

ISSN 0919-5440

静岡理工科大学紀要

第15卷

The Bulletin of the Shizuoka
Institute of Science and Technology

Vol.15

2007

目 次

巻頭「紀要の発刊に寄せて」

学長 荒木信幸

論 文

マイコンによるブラシレスモータの正弦波PWM駆動制御 小杉忠博、尾山敬祐、坂下享史、松井龍一、恩田 一	1
ウェーブレット解析の高速バースト同期引き込みへの応用 袴田吉朗、戸倉信之	7
10進ディジタルLSI回路(2)実測結果 波多野 裕、村松一矢、里中勝己、山本 毅	13
ゲート速度性能解析用実験回路の実測 波多野 裕	19
触覚系微細テクスチャー弁別の感覚情報処理機構 宮岡 徹、中村敏男	25
自由単位半群の biunitary submonoid の syntactic monoid について II 田中源次郎	33
プログラミング教育と3Dコンピュータゲーム開発 玉真昭男、小松 隆、青木 悠	39
遅延選択と確率的遡及因果—確率はどの段階で崩壊するのか— 榛葉 豊	47
車のコンディションはどうか?運転のスキルはどの程度? —より良い講義の為の振り返りチェックリスト— Gregg MCNABB	57

研究ノート

サブミクロン回路試作によるCMOSインバータの速度解析 波多野 裕、芝田通明	69
宇宙用2重ラッチ回路のSEU効果 波多野 裕	73
多世界論と「わたくし」の謎 榛葉 豊	77

レビュー

乳児における意図性の理解 小杉大輔	87
ファンデルワールス3量体Ar ₂ /NH ₃ の構造に関する量子化学的研究 関山秀雄	97
シクロプロパノール系の開裂反応 桐原正之、野口拓也、幡野明彦	105

教育関連報告

創造体験教育「創造・発見」の平成18年度実施報告—プログラムの改善と環境の整備— 丹羽昌平、榊田 勝、越水重臣、土肥 稔、服部知美、中川 淳、 中村 塁、小林久理真、関山秀雄、河村都美明、坂野俊則	117
平成18年度インターンシップ実施報告—キャリア教育のメイン・プログラムを目指して— 富田寿人、桑原宏成、野村龍男、渡辺俊幸、桐原正之、 河村都美明、大石和典、星 利光、竹下知宏	127

Contents

P r e f a c e

President Nobuyuki ARAKI

Original Papers

- Sine wave PWM-drive system of brushless-motor using a microcomputer
..... Tadahiro KOSUGI, Keisuke OYAMA, Takashi SAKASHITA,
Ryuiti MATUI and Hajime ONDA 1
- Fast Burst Synchronization using a Wavelet Analysis
..... Yoshiro HAKAMATA and Nobuyuki TOKURA 7
- Decimal Digital LSI Circuits (2) Experimental results
..... Hiroshi HATANO, Kazuya MURAMATSU, Katsumi SATONAKA
and Tsuyoshi YAMAMOTO 13
- Test circuit experimental results for logic gate speed-performance analyses
..... Hiroshi HATANO 19
- Tactile-information-processing mechanisms of fine-surface-texture discrimination
..... Tetsu MIYAOKA and Toshio NAKAMURA 25
- On syntactic monoids of biunitary submonoids of free monoids II Genjiro TANAKA 33
- Programming Education and Development of 3D-Computer Games
..... Teruo TAMAMA, Takashi KOMATSU and Yu AOKI 39
- Delayed Choice and Probabilistic Backward Causation
-At Which Stage Does the Collapse of Probability Occur?- Yutaka SHINBA 47
- How's your car? How's your driving?
-A reflective checklist for better classroom teaching- Gregg MCNABB 57

Research notes

- A CMOS inverter speed-performance analysis utilizing fabricated sub- μ m circuits
..... Hiroshi HATANO and Michiaki SHIBATA 69
- SEU Effects on Spaceborne Dual Latch Circuits Hiroshi HATANO 73
- Many Worlds Theories and the Enigma of "Self" Yutaka SHINBA 77

Review

- Intentional understanding in infancy Daisuke KOSUGI 87
- Quantum Chemical Study on the Structure of Ar_2/NH_3 Van der Waals Trimer
..... Hideo SEKIYAMA 97
- Fragmentation of Cyclopropanol Systems
..... Masayuki KIRIHARA, Takuya NOGUCHI and Akihiko HATANO 105

Education -related Reports

The Preparation and the Practice of the Educational Program

"Exercises for Creation and Invention" in 2006

..... Shohei NIWA, Masaru SAKAKIDA, Shigeomi KOSHIMIZU, Minoru DOHI,
Satomi HATTORI, Jun NAKAGAWA, Rui NAKAMURA, Kurima KOBAYASHI,
Hideo SEKIYAMA, Tomiaki KAWAMURA and Toshinori SAKANO 117

A Report on the Internship Program in 2006, For the Main Program on Career Education

..... Hisato TOMITA, Kousei KUWABARA, Tatsuo NOMURA, Toshiyuki WATANABE,
Masayuki KIRIHARA, Tomiaki KAWAMURA, Kazunori OISHI,
Toshimitsu HOSHI and Tomohiro TAKESHITA 127

Graduate Student Thesis Abstracts 141

Research Activities

Abstracts of published papers 199

Presentations 216

Books 229

紀要の発刊に寄せて

学長 荒木 信幸

静岡理工科大学は、大学としての基本的な役割である「教育」・「研究」・「地域貢献」の一般的な理念を具現化するための活動を日常的に行っています。また、本学の歴史や置かれている立場に基づいた特徴ある活動も行っています。このような活動の成果あるいは経過を一定期間毎に大学としてまとめて公表し、社会から評価を受けることは、大学として重要な業務となっています。このことは、近年、社会の中の公共的な組織として義務であるとの位置づけが強まっていると思われます。この場合、大学が公表する方法や手段、さらには評価の受け方には目的に応じて色々な種類があり、効果的に対応する必要があります。

静岡理工科大学紀要は、教員の研究成果の発表の場として、本学が開学した年度の1992年3月に創刊準備号として発刊されました。続いて、次の年の創刊号から毎年発行され、今回の2007年度版で、15巻目となりました。当初は、主として、人文・社会・外国語・保健体育部門の論文を掲載し、理系教員の研究成果は、それぞれの学会誌に発表することを期待していたようです。その後、内容に検討が加えられ、理系・文系の区別なく研究成果を掲載するようにし、論文のみでなく、研究ノート、技術報告・資料、レビューなどの貴重な資料などをまとめて公表する場としました。さらに、大学院を修了した学生の修士論文要旨を全員分掲載し、第8巻からは、教育関連報告と言うジャンルを設け、教育を重視する大学の姿勢を表すものとなりました。また、本紀要には、本学教員全員の研究活動記録として、本年度一年間に学会誌に採択された論文の抄録、学会発表の記録、発刊した著書等のリストを掲げて研究成果を総括できるようにしてあります。

豊かな人間性を基に、やらまいか精神と創造性で地域社会に貢献する技術者を育成することが、本学の理念であり、研究成果を地域に還元していくことが本学の使命の一つになっています。そのような使命を遂行するために、本紀要が、本学の教職員はもとより、地域の方々にとって、大いに役に立つ存在であることを願っております。

マイコンによるブラシレスモータの正弦波 PWM 駆動制御

Sine wave PWM-drive system of brushless-motor using a microcomputer

小杉 忠博*, 尾山 敬祐**, 坂下 享史**, 松井 龍一**, 恩田 一***

Tadahiro KOSUGI, Keisuke OYAMA, Takashi SAKASHITA, Ryuiti MATUI and Hajime ONDA

Abstract: Brushless-motors are used in various field and still desired for farther technical development. Authors are making researches for realizing more efficient performance of brushless-motor. Here, we constructed sine wave PWM-drive system and feedback-control system of brushless-motor using the microcomputer. In sine wave PWM-drive system, 3phase inverter is applied to produce variable frequency and variable voltage 3 phase wave. Microcomputer is used efficiently to produce sine wave PWM timing and to realize control algorithm.

1. はじめに

著者らはブラシレスモータの高効率駆動やセンサレス駆動, ベクトル制御を指向している. ブラシレスモータは, 同期電動機を磁極位置検出し閉ループ駆動することで, DC モータの優れた制御特性を生かしたまま, 唯一の欠点である機械的な摺動接触構造の整流機構をインバータに置き換え非接触式の整流方式に変えたものである.

近年のマイコン(マイクロコンピュータ)の発達により, センサレス駆動やベクトル制御が可能となり, DC モータと同等以上の制御が可能となりつつある. これらの駆動, 制御の実現には振動抑制, 高性能・高効率駆動のためにインバータの出力電流を正弦波状にすることが必須である.

本研究では, ベクトル制御やセンサレス駆動実現に必須であるマイコンを用いて正弦波 PWM(パルス幅変調)駆動し, 速度制御システムの構築により各種制御解析を行った.

2. システムの構成

2.1 全体構成

本システムの全体構成を図 1, 装置全体写真を図 2 に示す. 対象となる同期電動機に取り付けられたロータリーエンコーダ, フォトインタラプタ(ここではフォトマイクロセンサ:商品名)によってロータの位置を検出し, マイコンで演算して3相正弦波 PWM 信号を生成する. また, ロータリーエンコーダによって回転速度検出し, 可変抵抗から入力した速度指令と比較してそれに適した速度制御用 PWM を生成する. それら二つを掛け合わせ各相 180° 通電区間インバータのパワー MOS FET へ出力される. 一点鎖線に囲まれた部分はマイコンのソフトウェア処理により実現した. マイコンはルネサス社の H8 シリーズで ROM がフラッシュメモリの型式(H8/3687F)を利用した.

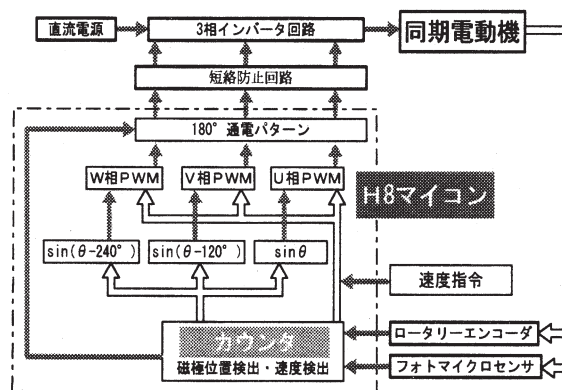


図 1 全体構成

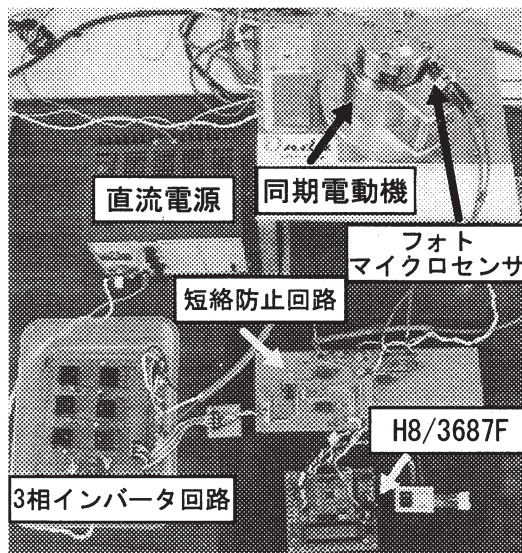


図 2 装置全体写真

2007 年 2 月 28 日受理

* 理工学研究科 システム工学専攻

** 理工学部 電気電子情報工学科 学生

*** 理工学部 電気電子情報工学科

2.2 同期電動機

同期電動機の構造は、直流電動機とは逆に電機子が固定子となり、界磁が回転子となっているものが多い。同期電動機を回転させるには、電機子巻線に交流電源を接続し、界磁 N 極、S 極の向きに同調させて電機子導体の電流方向を変える必要がある。この任意の交流電源を作り出し、回転制御するためにインバータを用いる。

本研究で使用した同期電動機は、界磁が 6 対の N 極 S 極で構成された 12 極機である。また磁極位置検出のため回転軸に黒色テープが貼られている。

2.3 インバータ

インバータと同期電動機の結線図を図 3 に示す。ここでは、インバータを 180° 通電方式で駆動する。180° 通電方式とは、各トランジスタの ON 時間（通電期間）を電気角で 180° とした方式である。この方式では通電区間中を正弦波状に PWM(パルス幅変調)することが重要となる。

本研究では、通電時間切り替えトランジスタにパワー MOS FET 6 個を使用した。また、この方式では、DC モータと同等の制御ができることから、インバータが整流子に対応し、ブラシレスモータと呼ばれる。

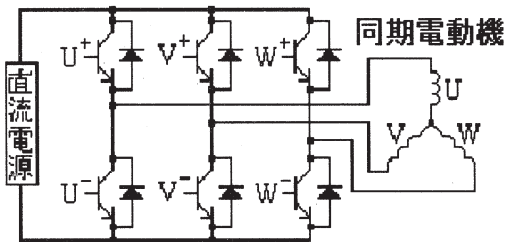


図 3 インバータと同期電動機

2.4 マイコン (マイクロコンピュータ)

マイコンとはマイクロコンピュータ (Microcomputer) の略称である。1970 年代頃あった大型汎用コンピュータや制御用コンピュータに対して LSI 化されて、小さいこと、マイクロサーキットで構成されているためマイクロコンピュータと呼ばれている。CPU の他にメモリや I/O コントローラ、入出力装置を内蔵している。小型、低消費電力、高信頼性、量産性、低価格、プログラム変更により使用が可能等のような特徴を備えている。本研究で使用したマイコンは (株) ルネサステクノロジ社製の H8/3687F である。図 4 にマイコン基盤の写真を示す。これは同社の H8/300Tiny シリーズ中に含まれ、外部バスがないためコンパクトさが特徴で、フラッシュ ROM への書き込み作動電圧が 5V で可能である。タイマ、カウンタ、PWM モード等の機能を備えておりモータ制御に適している。

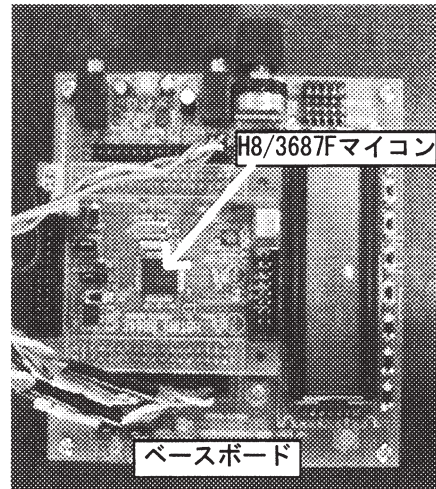
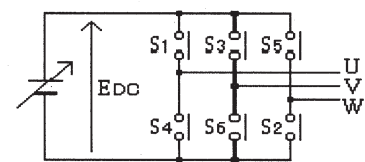


図 4 H8/3687F マイコン

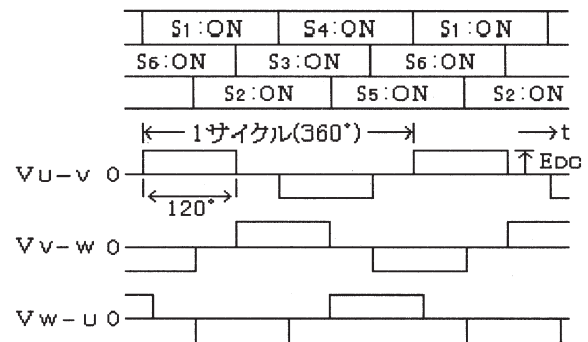
3. 3 相 180° 通電正弦波 PWM の構築

3.1 3 相インバータ

インバータを簡単に説明すると直流電力を交流電力に変換する電力変換回路というのが適当である。直流を交流に変換するにはスイッチング可能な素子が必要である。3 相インバータの原理は図 5 のように示され、6 個のスイッチによって 3 相ブリッジに形成される。1 相分のスイッチは上下同時に ON しないように交互に ON させ、他の相とは電気角で 120° 位相を持っている。このようにすると、矩形波であるが 3 相交流が得られ、その周波数はスイッチの ON - OFF の周波数、線間電圧の波高値は直流回路電圧値になる。機械開閉機構のスイッチでは周波数や寿命に制約があるため、実際には半導体電力素子を使用され、本研究ではパワー MOS FET を使用した。このパワー MOS FET をドライブさせるためのゲート信号をフォトマイクロセンサによる磁極位置信号とマイコンにより生成した。



(a) 原理回路



(b) 出力波形

図 5 3 相インバータの原理

3.2 3相 180° 通電方式

3相 180° 通電方式とは電機子の電気角 180° で各相を切り替える方法である。この方式は通電区間中を正弦波状にすることが重要なテーマとなる。180° 通電の原理図を図6に示す。図に示すようにU相誘起電圧を基準として、U, V, W各相が出力信号が生成され、それぞれ電気角で120°位相がずれている。各相の通電期間は電気角で180°で、3相インバータの上側回路、下側回路それぞれ、U相→V相→W相と転流動作を行い、モータを駆動する。180° 通電方式は 60° ごとの磁極位置検出によって生成することができ出力の状態によってモード①から⑥が定義される。この180° 通電区間を正弦波 PWM し、モータ電流を正弦波状にする。

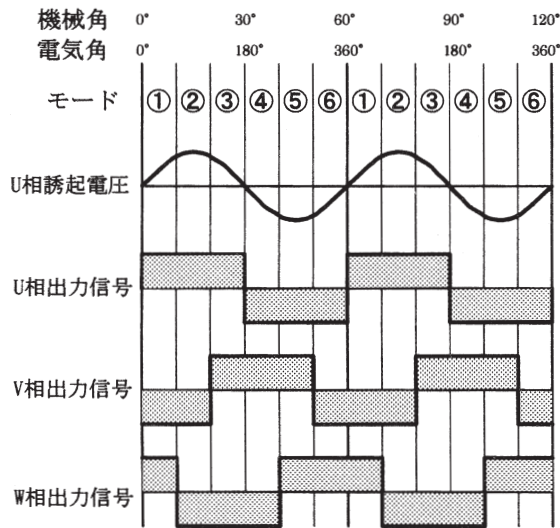


図6 3相 180° 通電の原理

3.3 磁極位置検出

本研究では、磁極位置検出器にはプログラムの簡略化を目的にロータリーエンコーダとフォトマイクロセンサの二つを用いた。ロータリーエンコーダは、高分解能なため180° 通電区間の検出、正弦波 PWM 出力のための磁極位置情報検出に使用した。本研究では測定開始点からの回転角度に対応して発生するパルスを積算する計数測定方式のインクリメンタル式で分解能は1000(P/R)のものを使用した。フォトマイクロセンサにおいては、原点(基準信号)とU相基準磁極位置情報の検出に使用した。通常は、磁極ロータの位置を磁氣的センサ(例:ホールセンサ)で検出するが、本研究では外部設置が可能な方法として、このセンサを用いた。フォトマイクロセンサは図7のようにセンサ設置台上に設置し、検出物体の代わりに黒テープを同期電動機に貼って位置を検出した。この黒テープは同期電動機の磁極位置に対応している。黒テープがフォトマイクロセンサの手前を通過すると、発光面から出た光は黒テープに吸収されて受光面に到達しなくなるため、フォトマイクロセンサの出力はLowとなる。黒テープを過ぎると、発光面から出た光は金属部分で反射して受光面に到達する

ので、フォトマイクロセンサの出力はHighとなる。本研究では6対12極のブラシレスモータを使用しているので、1回転でHigh, Lowの信号は6回ずつ繰り返されることになる。

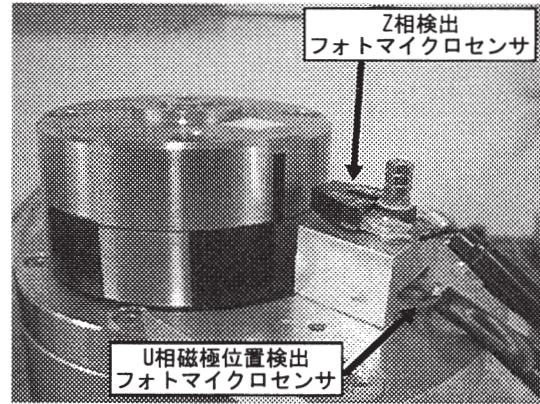


図7 フォトマイクロセンサの設置位置

3.4 3相 180° 通電パターンの生成

180° 通電パターンを生成するためには、モータの磁極位置を検出し、現在のモードであるか判断し切り換える必要がある。モードの切り換えは電気角 60° ごとに行われる。ロータリーエンコーダ A 相パルスは Z 相パルスを基準とし一回転に 1000 パルスが出力される。この関係からロータリーエンコーダ A 相パルスと電気角の関係は、1パルス=2.16°となる。つまり、電気角 60° =約 28 パルスを検出するごとにモードを①~⑥の間で切り換えることにより 180° 通電パターンを生成している。動作モードと出力信号の関係を表1に示す。生成した3相 180° 通電パターンの+側信号を図8に-側信号を図9に示す。

表1 動作モードと出力信号の関係

モード	U相誘起電圧を基準とした電気角	U+	U-	V+	V-	W+	W-
①	0° ~60°	on	off	off	on	on	off
②	60° ~120°	on	off	off	on	off	on
③	120° ~180°	on	off	on	off	off	on
④	180° ~240°	off	on	on	off	off	on
⑤	240° ~300°	off	on	on	off	on	off
⑥	300° ~360°	off	on	off	on	on	off

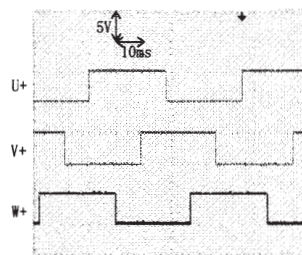


図8 3相 180° 通電パターン (+側)

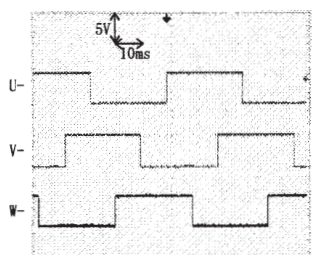


図9 3相 180° 通電パターン (-側)

3.5 3相正弦波 PWM 波形の生成

磁極位置検出に使用したフォトマイクロセンサは、U相の磁極位置を検出し、ロータリーエンコーダは1000(P/R)の分解能を持つ。フォトマイクロセンサでU相通電区間の立ち上がりを検出しロータリーエンコーダの発生パルスカウントが開始されU相磁極位置が検出される。パルスカウントに120°、240°位相分のパルス数の遅れを持たせV相、W相磁極位置を検出する。検出された3相磁極位置は、プログラム中の正弦波関数データテーブルに格納されている正弦波 PWM のデューティ比を決定するレジスタ値と対応させ、各相磁極に合った正弦波 PWM のデューティ比を決定する。これらの演算をマイコンで実現した。出力される正弦波 PWM は速度制御 PWM と掛け合わせ、先に述べた180°通電区間のみインバータのゲートへと出力される。発生させた+側正弦波 PWM 波形を図10に、-側正弦波 PWM 波形を図11に示す。

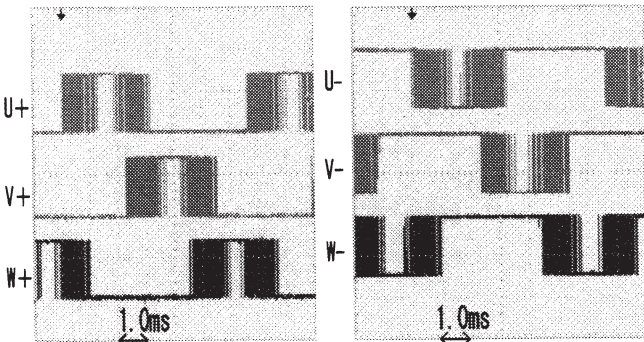


図10 +側正弦波 PWM 波形 図11 -側正弦波 PWM 波形

4. 速度制御システムの構築

4.1 マイコンによる閉ループ速度制御

閉ループによる速度制御システムの仕様を表2、ブロック線図を図12に示す。指令値の可変抵抗の電圧値は、マイコンの入力端子に入力される。マイコンでこの電圧値をA/D変換し、デジタルデータに変換した後、レジスタに記憶する。このレジスタの値により速度制御 PWM デューティ比が変化する。同期電動機の回転速度はロータリーエンコーダのパルス数を10[ms]間カウントすることで得る。ここで得た回転速度と指令値を比較し、この偏差にPIDの各要素を組み込むことでそれぞれ対応したデューティ比を出力する。

表2 速度制御システムの仕様

電源電圧	15 [V]
最大回転数	1490 [rpm]
回転速度検出用 RE	1000 [P/R]
回転速度検出用 サンプル周波数	100 [Hz]

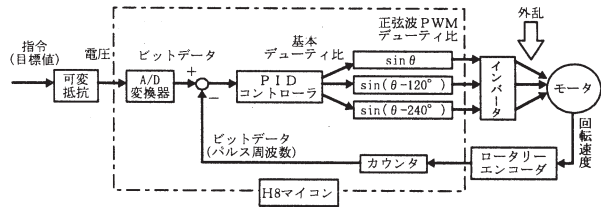


図12 閉ループ速度制御システムのブロック線図

4.2 入出力特性

図13に閉ループP(比例)制御の入出力特性を示す。指令値電圧に比例して回転数が増加していることが確認できる。またP(比例)ゲインが大きくなるにつれて指令値電圧に対する回転数が増している。Pゲインが小さく指令値が小さい場合に回転していないのは、モータの軸受け摩擦等による機械損の影響である。各グラフが線形性であることから非常に制御特性が良い結果となっている。

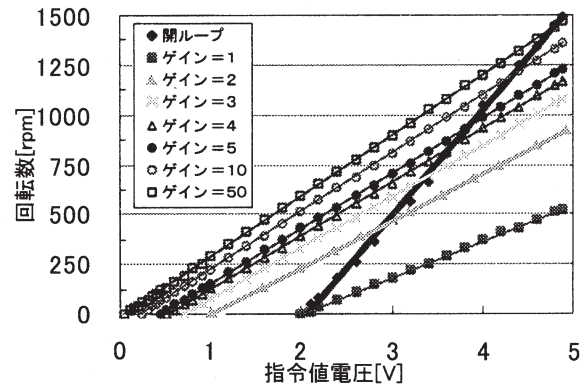


図13 入出力特性(閉ループP制御)

4.3 負荷特性

図14に負荷特性を示す。各Pゲインにより無負荷近傍の回転速度の違いは、定常偏差によるものである。閉ループ制御に比べ、閉ループP制御の場合は負荷(電流)の増加に伴う回転数の減少が抑えられていることが判る。特に、ゲインが大きいときほど負荷(電流)の増大に伴う回転数の減少が小さくなっており、より正確な速度制御ができていくこと判る。ただし、デューティ比は100%に達するとそれ以上の値にはならないため、回転数自体を上げることはできても、負荷による回転数の減衰はある程度までしか防ぐことはできない。これにより、速度制御が確立されて外乱に対する抑制効果ができていると確認できる。

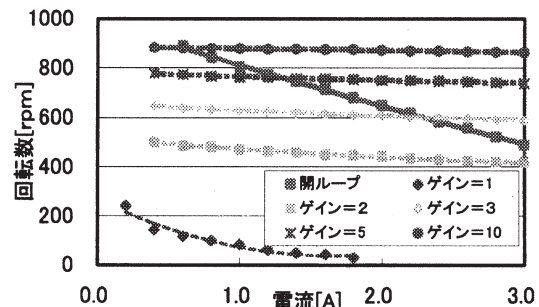


図14 負荷特性

4.4 ステップ応答

0 から 700[rpm]に達するまでのステップ応答を測定し、速応性、安定性の評価項目としてオーバーシュート(Os), 定常偏差を示した表を表 3 に示す。開ループに比べ P 制御(P ゲイン=4)の場合は速応性を示す遅れ時間, 整定時間に改善がみられる。P 制御と PI 制御では, 定常偏差に改善がみられている。しかし, I ゲインが大きい(I ゲイン=1/10)場合には, ハンチングが起きてしまう。これを適当な I ゲイン(本研究では I ゲイン=1/45)にすることにより立ち上がり, 定常偏差, 安定性ともに改善できる。これより各制御コントローラが正しく動作していることが確認できる。表 3 に各測定項目をまとめたものを, 図 15 に開ループ, 図 16 に P 制御(P ゲイン=4), 図 17 に PI 制御(P ゲイン=4, I ゲイン=1/10), 図 18 に PI 制御(P ゲイン=4, I ゲイン=1/45)のステップ応答を示す。PI 制御(P ゲイン=4, I ゲイン=1/45)では立ち上がりも良好で, 定常偏差が改善されきれいなステップ応答波形であることが確認できる。

表 3 各制御のステップ応答の比較

	回転数 [rpm]	定常偏差 [rpm]	遅れ時間 [ms]	整定時間 [ms]	Os [%]
開ループ	700	—	116	1050	—
閉ループ (P ゲイン 4)	466	234	30.0	524	6.21
閉ループ (P ゲイン 4) (I ゲイン 1/10)	706	0	48.0	∞	56.9
閉ループ (P ゲイン 4) (I ゲイン 1/45)	702	0	48.0	168	0

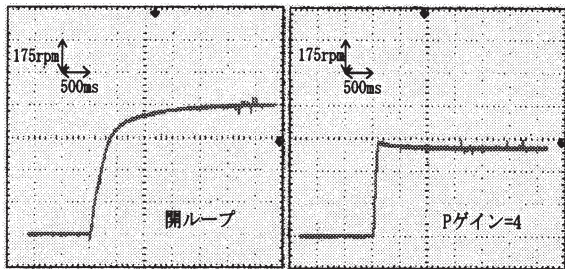


図 15 開ループのステップ応答

図 16 閉ループ P 制御のステップ応答

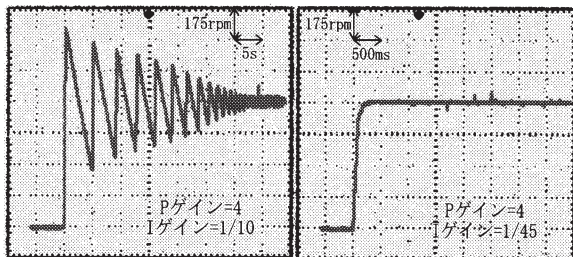


図 17 閉ループ PI 制御のステップ応答

図 18 閉ループ PI 制御のステップ応答

5. 特性解析

5.1 ブラシレスモータの伝達関数

ブラシレスモータは, モータの端子電圧から回転数までの伝達関数は 2 次系で, それぞれ電気的時定数と機械的時定数からなる 1 次遅れの積である。しかし電気的時定数が小さければ式(1)のように機械的時定数の 1 次遅れで近似できる。

$$\frac{\Omega}{V_t} = \frac{1}{K_e} \frac{1}{(1 + sT_m)} \quad (1)$$

Ω : 角回転数, K_e : 誘起電圧係数, T_m : 機械的時定数

ここで, 測定した本研究でのシステムの機械的時定数, 誘起電圧係数から本システムにおけるブラシレスモータの伝達関数を求めると式(2)になる。

$$K_e : 9.96 \times 10^{-2} \text{ [V/rad/s]}, T_m : 0.20 \text{ [s]}$$

$$G(s) = \frac{\Omega}{V_t} = \frac{1}{K_e} \frac{1}{(1 + sT_m)}$$

$$G(s) = \frac{50}{s + 5} \quad (2)$$

5.2 開ループ速度制御システムの解析

図 19 に本研究における開ループ速度制御のブロック線図を示す。可変抵抗から入力された速度指令値電圧は, マイコン内部で様々な変換器を通して制御対象のブラシレスモータへと入力される。この開ループ速度制御システムの伝達関数は式(3)になる。これに目標値 700[rpm]となる指令値電圧 2.3[V]を入力し解析を行った。解析した結果と実測値との比較を表 4 に, グラフ化したものを図 20 に示す。実測値と解析値では, 誤差がでているが, これらの誤差はブラシレスモータの伝達関数, ステップ応答の計算上の誤差や機械的時定数の読み取り誤差と考える。

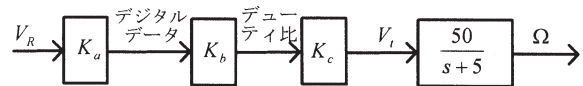


図 19 開ループ速度制御のブロック線図

K_a	A/D 変換器	205	[data/V]
K_b	デューティ変換器	0.001	[%/data]
K_c	端子電圧変換器	15	[V/%]
V_R	指令値電圧	2.3	[V]

$$G(s) = \frac{K_a K_b K_c \cdot 50}{s + 5} = \frac{354}{s + 5} \quad (3)$$

表 4 開ループ速度制御の解析

	実測値	解析値
回転数[rpm]	700	659
時定数[ms]	199	200

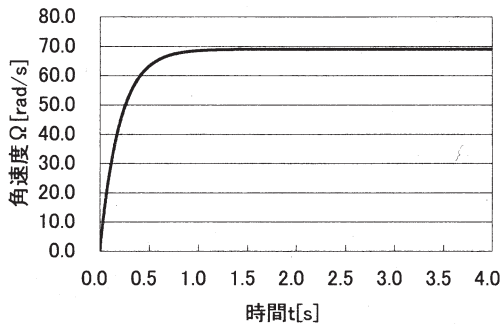


図 20 解析値からのステップ応答(開ループ)

5.3 閉ループ速度制御システムの解析

図 21 に本研究における閉ループ速度制御のブロック線図を示す。可変抵抗から入力された速度指令値電圧は、開ループ制御と同様にマイコン内部で様々な変換器を通して制御対象のブラシレスモータへと入力される。速度センサの性能を示すフィードバック要素と、速度コントローラが加えられる。この閉ループ速度制御システムの伝達関数は式(4)になる。これに開ループ同様目標値 700[rpm]となる指令値電圧 2.3[V]を入力し解析を行った。解析した結果と実測値との比較を表 5 に、グラフ化したものを図 22 に示す。実測値と解析値では、誤差がでていますが、逆回転やブレーキ制御の 4 象限動作が確立されていないこと、ブラシレスモータの伝達関数、ステップ応答の計算上の誤差や機械的時定数の読み取り誤差が原因と考える。

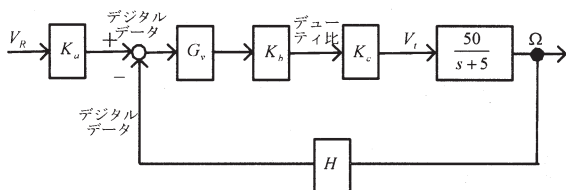


図 21 ブロック線図

- V_R 指令値電圧 2.3 [v]
- H フィードバック要素 6.36 [data/rad/s]
- G_v 速度コントローラ

$$G_0 = \frac{K_a G}{1 + GH} = \frac{154 G_v}{s + 5 + 4.77 G_v} \quad (4)$$

表 5 閉ループ速度制御の解析 (P ゲイン=4)

	実測値	解析値
回転数[rpm]	466	530
時定数[ms]	53.4	41.7
定常偏差[rpm]	234	170

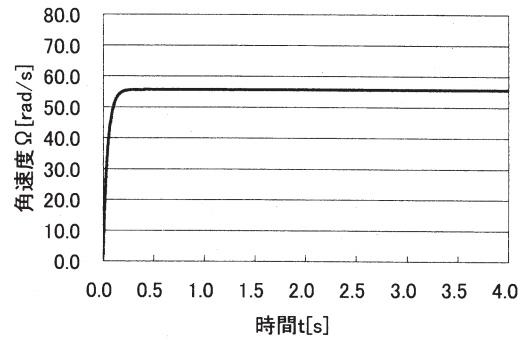


図 22 解析値からのステップ応答(開ループ)

6. おわりに

6.1 まとめ

ブラシレスモータの高効率駆動やセンサレス駆動、ベクトル制御の実現に向け、マイコンによるブラシレスモータの正弦波 PWM 駆動を構築し下記の点が実現できた。

- (1) マイコンによる 3 相 180° 正弦波 PWM 駆動が実現でき安定で高効率な回転が実現できた。
- (2) 速度制御システムの構築により、外乱抑制効果が確認でき制御コントローラを実現できた。
- (3) 正弦波駆動が実現したことから、今後のセンサレス駆動、ベクトル制御への発展が可能となった。

6.2 今後の課題

今回、正弦波駆動の実現ができたことで、ベクトル制御等への高効率駆動が可能となった。今後は、これらの実現の可能性を判断しながら、以下に示す課題を解決する必要がある。

(1) 4 象限動作の実現

現在のシステムでは、1 象限のみ動作のため、制御系として動作に不安定が生じてしまう場合がある。ブレーキ制御、左回転駆動を実現する 4 象限での運転が望まれる。

(2) 電流制御の実現

現在はモータに印加する電圧を制御する電圧制御を行っている。ブラシレスモータの制御性の良さは、発生トルクが電機子電流に比例することであり、電流制御の実現により高性能な制御やベクトル制御への発展が可能となる。

(3) ベクトル制御の実現

ベクトル制御とは電機子電流を磁束をつくる励磁電流分と、トルクをつくるトルク電流分にベクトル的に分解して制御する方法である。より高度な制御が可能となる。

参考文献

- 1) 荻野弘司；“ブラシレス DC モータの使い方”，オーム社 (2003 年)
- 2) 小山正人 他；“AC サーボシステムの理論と設計の実際”，総合電子出版社(1990 年)
- 3) 樋口龍男；“自動制御理論”，総合電子出版社(1990 年)

ウェーブレット解析の高速バースト同期引き込みへの応用

Fast Burst Synchronization using a Wavelet Analysis

梶田 吉朗*

戸倉 信之**

Yoshiro HAKAMATA

Nobuyuki TOKURA

Abstract: The paper summarizes the filter banks theory and the wavelet analysis that many researchers were investigated earlier. This is because those theories are needed to construct trans multiplexers. Trans multiplexers mean a system where an inverse wavelet transform is used as a transmitter, while a normal wavelet transform is used as a receiver. The construction is contrary to one that is used in a usual multilevel resolution analysis.

In order to construct trans multiplexers, the filter banks theory and the wavelet analysis show the importance of a transmission delay control that is inserted between a transmitter and a receiver. This time we made programs including analyzing filter banks, synthesizing filter banks, normal and inverse wavelet transform functions, etc., and we simulated trans multiplexers in C programs. As well as the theories, the simulated results also showed the importance of controlling the transmission delay to establish block synchronization of the transmitted data. However, we don't acquire concrete resolution method to establish block synchronization. These issues will be investigated near future.

1. はじめに

短いデータを用いてバースト伝送を行うには、伝送効率劣化を低減するためにバースト信号の先頭を高速に見いだす高速バースト同期確立が重要である。しかしながら、本研究で想定している高能率符号変調を用い、かつ短いデータを用いてバースト伝送を行うシステムの検討は進んでいない。

従来は、プリアンプル（バースト信号同期確立用信号、衛星通信ではユニークワード）を使用するシステムが知られている。一方、最近の代表的な高能率符号変調である OFDM では、同期確立のために伝送信号の一部分を付加する冗長化処理を施している。長いデータを用いたバースト伝送では付加した部分による効率低下の影響は少ないが、短いデータを用いたバースト伝送では効率低下が無視できない。ギガビットイーサネット（IEEE802.3z/ab）では複数フレームをまとめて送信する方法（フレームバースト：長バースト化）で対処しており、同様のことを無線 LAN(IEEE802.11g)で行っている例（メルコ AirStation G54, バッファロー WZR-G54 など）がある。

本論文は、時間軸データを周波数軸データに変換（およびその逆変換）する操作における基底として時間および周波数の両領域において局在するウェーブレットを用い、マルチレート信号処理を行うことによりウェーブレットの特性を利用してバースト伝送の実現を図るシステムをシミュレーションにより検討したものである。

通常行われているマルチレート信号処理の構成ではアナライザ（ウェーブレット変換器）からシンセサイザ（ウェーブレット逆変換器）に向けて信号が伝送される。またアナライザ、シンセサイザを含む全ての信号処理は同一装置内

において行われるので、同一クロック信号の下に動作し、信号の同期に関しては特別な注意を払う必要がないと言う特徴がある。

一方アナライザとシンセサイザを逆に接続した構成であるトランスマルチプレクサでは、分割バンク、合成バンクは各々物理的に離れた場所に設置されるので信号を正しく復号するためにはブロック同期の問題を解決することが不可欠である。

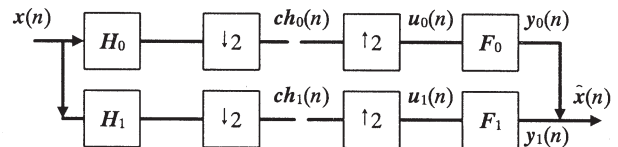
筆者らは、トランスマルチプレクサをフィルタバンクあるいはウェーブレット解析を適用して構成し、バースト伝送を行う場合の問題点を明らかにするために、シミュレーションによる検討を行ってきたのでその結果について報告する。

2. フィルタバンクおよびウェーブレット解析の概要

2.1 2チャンネルフィルタバンクの構成法

トランスマルチプレクサを構成するために必要となるフィルタバンクの構成法を文献[1][2][3]を参考にして整理する。

2チャンネルフィルタバンクの構成を図1に示す。



分割フィルタ ダウンサンプラ アップサンプラ 合成フィルタ
図1 2チャンネルフィルタバンク

入力信号を $x(n)$ とすると低域通過分割フィルタ H_0 の z 領域におけるデシメータ出力は式(1)で表される。

$$CH_0(z) = \frac{1}{2} [H_0(z^{1/2})X(z^{1/2}) + H_0(-z^{1/2})X(-z^{1/2})] \quad (1)$$

これがインタポレータを通過すると式(2)となる。

$$U_0(z) = \frac{1}{2} [H_0(z)X(z) + H_0(-z)X(-z)] \quad (2)$$

したがって合成側の低域通過フィルタ出力 $Y_0(z)$ は次式となる。

2007年3月12日受理

*理工学部 電気電子情報工学科

*矢崎総業(株) 技術研究所

$$Y_0(z) = \frac{1}{2} F_0(z) [H_0(z)X(z) + H_0(-z)X(-z)] \quad (3)$$

同様に高域通過フィルタ出力 $Y_1(z)$ は式(4)となる。

$$Y_1(z) = \frac{1}{2} F_1(z) [H_1(z)X(z) + H_1(-z)X(-z)] \quad (4)$$

合成フィルタ出力の z 変換は式(3)と(4)の和で与えられるが、これを $X(z)$ および $X(-z)$ について整理すると式(5)を得る。

$$\hat{X}(z) = \frac{1}{2} [F_0(z)H_0(z) + F_1(z)H_1(z)]X(z) + \frac{1}{2} [F_0(z)H_0(-z) + F_1(z)H_1(-z)]X(-z) \quad (5)$$

第一項は信号項、第二項はエイリアス項である。これより式(6)に示すように出力信号が単に入力信号の m サンプル遅延した値となるためには、式(7)(8)の条件が満たされなければならない。

$$\hat{X}(z) = z^{-m} X(z) \quad (6)$$

式(7)は無歪み条件、式(8)はエイリアス除去条件である。

$$F_0(z)H_0(z) + F_1(z)H_1(z) = 2z^{-m} \quad (7)$$

$$F_0(z)H_0(-z) + F_1(z)H_1(-z) = 0 \quad (8)$$

式(9)が成り立つとき式(8)は自動的に満足される。

$$F_0(z) = H_1(-z), \quad F_1(z) = -H_0(-z) \quad (9)$$

このための一方法として、図2に示すように $H_1(z)$ を $H_0(z)$ の交番反転である $H_1(z) = -z^{-N} H_0(-z^{-1})$ となるように選択する方法が知られている。 N はフィルタ次数(タップ数-1)である。

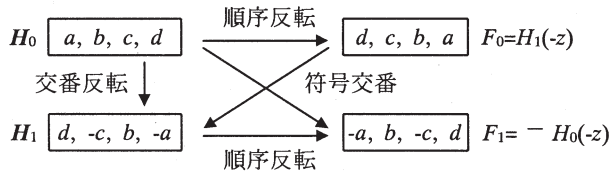


図2 エイリアス除去条件を満たすフィルタ係数の関係
これを適用すると無歪み条件(7)は式(10)のように変形される。

$$F_0(z)H_0(z) + F_1(z)H_1(z) = F_0(z)H_0(z) - H_0(-z)F_0(-z) = P_0(z) - P_0(-z) = 2z^{-m} \quad (10)$$

ここに $P_0(z) = F_0(z)H_0(z)$ である。式(10)において積フィルタ $P_0(z)$ の偶数べきは自動的に打ち消される。したがって m は奇数でなければならず、 m 以外の奇数べきは全て0となる必要がある。積フィルタ $P_0(z)$ の一例を図3に示す。

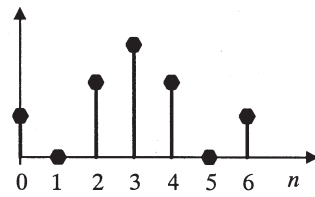


図3 積フィルタ $P_0(z)$ の例

これより低域通過フィルタ $H_0(z)$ の係数を $h(n)$ とすると、 $h(n)$ は式(11)に示す“2重シフト直交性”を満たすべきことが導かれる。

$$\sum_n h(n)h(n-2k) = \delta(k) \quad (11)$$

$$\sum_n |h(n)|^2 = 1$$

$\delta(k)$ は Kronecker のデルタで記号である。

2.2 フィルタバンクのポリフェーズ構成

(1) 分割フィルタバンク

入力を x 、フィルタを C とするとき、その出力 Cx をダウンサンプリングすることは $C(z)X(z)$ の奇数べきを捨て、偶数べきを取り出すことに相当する。

$$\text{偶数べき} \begin{cases} C(z) \text{の偶数べきと} X(z) \text{の偶数べきの積} \\ C(z) \text{の奇数べきと} X(z) \text{の奇数べきの積} \end{cases}$$

であるから、入力信号およびフィルタを複数のフェーズに分解してから積和演算を行えば、データ長が短くなるため計算量が削減され、また無駄な計算を行わなくて済むため高速に処理できるようになる(処理クロックを低減できる)。

一例としてフィルタ C の特性を $C(z) = a + bz^{-1} + cz^{-2} + dz^{-3}$ とすると $C(z)$ は図4のようにポリフェーズ分解できる。

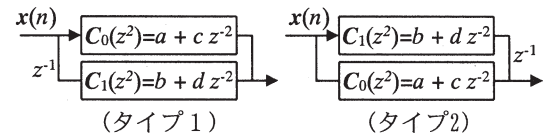


図4 フィルタのポリフェーズ分解

ここに $C_0(z) = a + cz^{-1}$ 、 $C_1(z) = b + dz^{-1}$ である。

図1の2チャネルフィルタバンクにおいて分割フィルタ H_0 、 H_1 にタイプ1のポリフェーズ分解を、合成フィルタ F_0 、 F_1 にタイプ2のポリフェーズ分解を適用し、デシメータ、インタポレータとポリフェーズフィルタの位置を入れ替えると図5が得られる。ここに $H_p(z)$ は式(12)で表される。

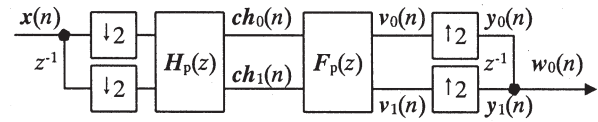


図5 ポリフェーズ構成2チャネルフィルタバンク

$$H_p(z) = \begin{bmatrix} H_{00}(z) & H_{01}(z) \\ H_{10}(z) & H_{11}(z) \end{bmatrix} \quad (12)$$

なお $H_{i,j}(z)$ において i はチャネルを、 j はフェーズを表す。

分割フィルタの出力 $ch_0(n)$ 、 $ch_1(n)$ の z 変換は式(13)で表される。

$$\begin{bmatrix} CH_0(z) \\ CH_1(z) \end{bmatrix} = H_p(z) \begin{bmatrix} X_0(z) \\ z^{-1}X_1(z) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$X_0(z)$ 、 $X_1(z)$ は入力信号の偶数フェーズ $x_0(n)$ 、奇数フェーズ $x_1(n)$ の z 変換である。

(2) 合成フィルタバンク

図5においてアップサンプリングにより奇数フェーズに0が挿入されるので、信号 $y_0(n)$ 、 $y_1(n)$ は偶数べき項だけから成り、奇数べき項は全てゼロとなる。したがってべき関数の性質から出力 $w_0(n)$ の偶数べき、奇数べきは合成フィルタ F_0 、 F_1 の偶数べき、奇数べきにのみ依存する。このためフィルタを偶数フェーズ、奇数フェーズに分けて積和演算を計算することができ、結果的に高速処理を実現できる。

タイプ2のポリフェーズ分解を適用した合成フィルタの z 伝達関数は式(14)で与えられる。

$$F_p(z) = \begin{bmatrix} F_{00}(z) & F_{10}(z) \\ F_{01}(z) & F_{11}(z) \end{bmatrix} \quad (14)$$

なお $F_{i,j}(z)$ において i はチャンネルを, j はフェーズを表す.

また式(12)と違って $F_{01}(z)$ が2行1列に配置される.

(3) 完全再構成条件

(1)(2)から図5の出力 $w_0(n)$ の z 変換は式(16)で与えられる.

$$\begin{bmatrix} V_0(z) \\ V_1(z) \end{bmatrix} = F_p(z) \begin{bmatrix} CH_0(z) \\ CH_1(z) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$W_0(z) = \begin{bmatrix} z^{-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0(z^2) \\ V_1(z^2) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$= \begin{bmatrix} z^{-1} & 1 \end{bmatrix} F_p(z^2) H_p(z^2) \begin{bmatrix} X_0(z^2) \\ z^{-2} X_1(z^2) \end{bmatrix}$$

これより式(7)に対応した完全再構成条件として式(17)を得る. ここで m は分割フィルタ, 合成フィルタ間の遅延である.

$$F_p(z)H_p(z) = z^{-m} I \quad (17)$$

なお, 合成フィルタとアップサンブラとの接続方法(直線接続, 交叉接続)を考慮すると, 一般的な M 分割フィルタバンクの完全再構成条件は式(18)のようになる. ここに $0 \leq r \leq M-1$ であり, I_r は $r \times r$ の単位行列である.

$$F_p(z)H_p(z) = z^{-m} \begin{bmatrix} 0 & I_{M-r} \\ z^{-1}I_r & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式(18)が成立するとき入出力の伝達関数は式(19)となる.

$$T_{FLL}(z) = z^{-(Mm+r+M-1)} \quad (19)$$

なお, 式(11)が成り立つとき分割フィルタ $H_0(z)$ は

$$H_0^T(z^{-1})H_0(z) = I \quad (\forall z) \quad (20)$$

を満足する. すなわちパラユニタリ特性を有する. このとき $H_0(z)$ は直交行列となり, その逆行列は $H_0^{-1}(z) = H_0^T(z)$ となる. これより合成フィルタは分割フィルタの転置行列となる.

2.3 離散ウェーブレット解析

ある解像度(レベル j)における関数 $f_{j+1}(t)$ をスケーリング

関数 $\phi_{j+1,k}(t)$ の線形結合として式(21)のように表すものとする.

$$f_{j+1}(t) = \sum_k a_{j+1}(k) \phi_{j+1,k}(t) \quad (21)$$

ここに $\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi_{j,k}(2^j t - k)$ であり, これはレベル0のスケーリング関数 $\phi(t)$ をレベル j に伸張し, また k だけ時間シフトして得られる.

関数 $f_{j+1}(t)$ を一つだけレベルの低い関数 $f_j(t)$ を用いて近似すると, 解像度が粗くなる結果として細部の情報が欠落する. この欠落した情報を関数 $g_j(t)$ とするとウェーブレット

$w_{j,k}(t)$ の線形結合を用いて式(22)のように表せる.

$$g_j(t) = \sum_k b_j(k) w_{j,k}(t) \quad (22)$$

ここに $w_{j,k}(t) = 2^{j/2} w(2^j t - k)$ であり, これは(レベル0の)マザーウェーブレット $w(t)$ をレベル j に伸張し, k だけ時間シフトした関数である.

以上より次式が成り立つ.

$$f_{j+1}(t) = f_j(t) + g_j(t) \quad (23)$$

$$\sum_k a_{j+1}(k) \phi_{jk}(t) = \sum_k a_j(k) \phi_{jk}(t) + \sum_k b_j(k) w_{jk}(t) \quad (24)$$

スケーリング関数 $\phi(t)$ およびウェーブレット $w(t)$ は式(25)(26)に示す2スケール方程式(伸張方程式, ウェーブレット方程式)を満足する. N はフィルタ次数である.

$$\phi(t) = \sum_{n=0}^N \sqrt{2} c(n) \phi(2t - n) \quad (25)$$

$$w(t) = \sum_{n=0}^N \sqrt{2} d(n) \phi(2t - n) \quad (26)$$

ここで $\phi(t)$ は低域通過フィルタに, $w(t)$ は高域通過フィルタに相当している. $c(n), d(n)$ は直交フィルタバンクの係数であり, 2重シフト直交性が成り立つ. さらに

- ・スケーリング関数 $\phi(t - n)$ は互いに直交する
- ・スケーリング関数 $\phi(t - n)$ はウェーブレットに直交する
- ・ウェーブレット $w_{jk}(t) = 2^{j/2} w(2^j t - k)$ は全てのスケール

(周波数)で直交する

ことを考慮すると式(24)~(26)から次式を導くことができる.

(ウェーブレット変換)

$$a_j(k) = \sum_{l=2k}^{2k+N} c(l-2k) a_{j+1}(l) = \sum_{n=0}^N c(n) a_{j+1}(2k+n) \quad (27)$$

$$b_j(k) = \sum_{l=2k}^{2k+N} d(l-2k) a_{j+1}(l) = \sum_{n=0}^N d(n) a_{j+1}(2k+n) \quad (28)$$

(ウェーブレット逆変換)

$$a_{j+1}(l) = \sum_{k=\lfloor l/2 \rfloor - (N-1)/2}^{\lfloor l/2 \rfloor} c(l-2k) a_j(k) + \sum_{k=\lfloor l/2 \rfloor - (N-1)/2}^{\lfloor l/2 \rfloor} d(l-2k) b_j(k) \quad (29)$$

式(29)において $\lfloor \cdot \rfloor$ はガウス記号であり, 括弧内の値を超えない最大整数を表す.

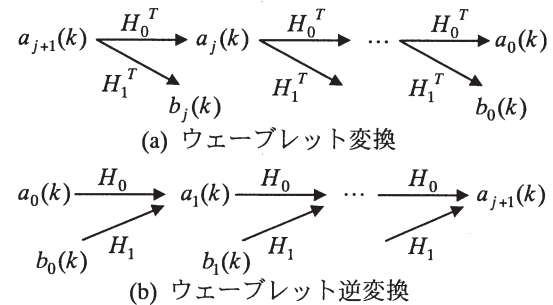


図6 スケーリング係数, ウェーブレット係数の再構成

式(27)(28)は分割フィルタバンクに相当するが、フィルタバンクとは係数の順序が時間反転している。式(29)は合成フィルタバンクと同じたみ込みの計算である。分割フィルタを H_0 とすると時間反転した行列は H_0^T で表されるので、式(27)~(29)の関係は図6のように図式化できる。

3. トランスマルチプレクサの動作と完全再構成条件

図7にトランスマルチプレクサの構成図を示す。この構成は、図1および図5で示した構成とはシンセサイザ、アナライザの順序が逆になっている。このトランスマルチプレクサの特性を文献[3]を参考にして整理する。

MチャンネルのアップサンブラとMチャンネルのダウンサンブラを対向させるときには、両サンブラの間に挿入される伝送路遅延がMサンプル時間のときのみダウンサンブラから信号が出力される。この特性を考慮すると、図7において例えば信号 x_0 はM-1サンプルだけ遅延して伝送路に送出されるので、さらに1サンプルだけ遅延した y_1 に出力されることになる(伝送路遅延 m を0と仮定した場合)。

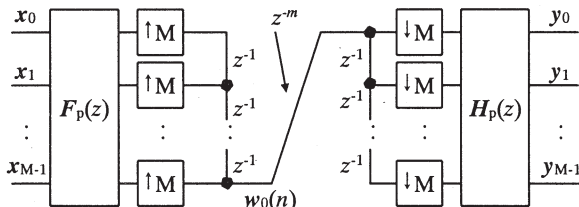


図7 トランスマルチプレクサの構成

以上より図7は図8の等価回路で表すことができる。すなわち図8において信号 $x_0 \sim x_{M-2}$ は1サンプル遅延後に $y_1 \sim y_{M-1}$ に出力され、信号 x_{M-1} は遅延なしで y_0 に出力される。

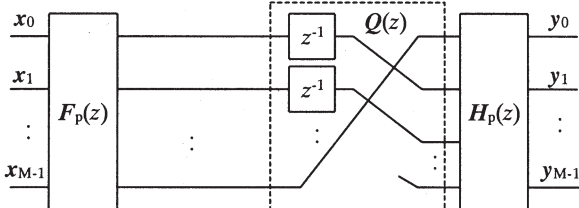


図8 トランスマルチプレクサの等価回路

したがって図9に示すように合成フィルタとアップサンブラを交叉して接続し、かつ信号 x_0 に1サンプル時間の遅延を挿入してやれば、全入力信号が1サンプルだけ遅延して対応するポートに出力されることになり完全再構成を実現できる。

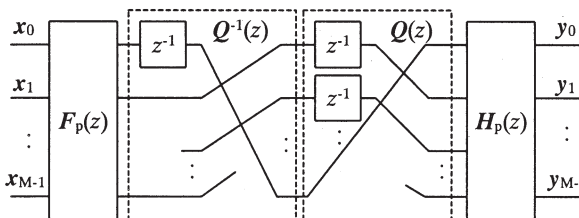


図9 トランスマルチプレクサ(完全再構成, r=1)

実際的な方法としては図7において伝送路遅延を

$$z^{-m} = z^{-(KM+1)} \tag{30}$$

となるように調整すれば良い。Kは任意の整数である。これは信号 x_0 が y_0 に出力されるようにするために伝送路に1サンプル時間の遅延を与え、残りの伝送路遅延を分割数Mの整数倍の遅延となるように調整するものである。これにより信号 $x_0 \sim x_{M-1}$ はKMサンプル遅延後に $y_0 \sim y_{M-1}$ に出力される。このとき分割フィルタにおける低域通過フィルタ H_0 の係数が式(11)に示す2重シフト直交性を満足しており、かつ式(9)の条件が満足されるように他のフィルタの係数を選んでおけば、 H_0 はパラユニタリ特性を持つ。すなわち H_0 は直交行列となり $H_p(z)F_p(z) = I$ が成り立つ。なお、この構成では伝送路には $\sim x_{M-2}, x_{M-2}, \dots, x_0$ と逆順に信号が送出される。

4. トランスマルチプレクサによる高速バースト同期引き込み

(1) 想定しているシステム構成

図10(a)に送信部の構成を示す。送信データをブロック長毎に分割し、さらに直列/並列変換器において並列データに変換する。その後変調器(信号分割器)において送信帯域上に一定間隔で配置されたM個のキャリアに、伝送するデータの順番に対応してマッピングする。この周波数軸上のデータをウェーブレット逆変換し、送信信号ブロックに変換する。この送信信号ブロックをD/A変換器でアナログ信号に変換し、帯域通過フィルタで不要な周波数成分を抑圧した後、増幅器で無線周波数帯域に周波数変換/増幅し、アンテナから送信バースト信号(マルチキャリア信号)として送出する。

図10(b)に受信部の構成を示す。受信した無線バースト信号を増幅器でベースバンド信号帯域に周波数変換し、帯域通過フィルタで不要な周波数成分を除去した後、A/D変換器でデジタル信号に変換する。さらにこの信号をウェーブレット変換し、送信部と同一キャリア上のM個のデータに変換する。このデータを復号器において復号し、並列/直列変換器で直列信号に変換して送信されたデータを再生する。

なお送信部は移動を前提とするサテライト局、受信部はアクセスポイントなどの固定局を想定している。このため送信部のクロック信号の周波数は、下り回線(アクセスポイントからサテライト局へ連続伝送される回線)によって既に受信部のクロック周波数との周波数同期が確立されているとする。しかしクロック信号の位相は伝送距離に依存して変わるため、送信部と受信部のクロック信号の位相同期は取れていないものとする。

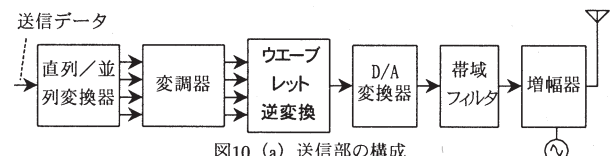


図10 (a) 送信部の構成

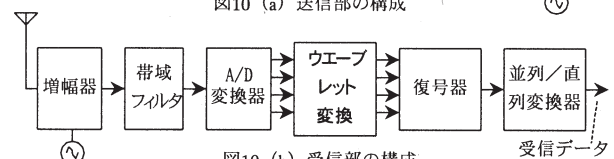


図10 (b) 受信部の構成

図10 システム構成

(2) 2チャンネルフィルタバンクのシミュレーション

試作したポリフェーズ構成ダウンサンプラ、アップサンプラの関数をデバグするために、図5に示したポリフェーズ構成の2チャンネルフィルタバンクを構成し、インパルス応答を求めた。フィルタ係数にはドベシー (Daubechies) の $N=3$ の係数を用いた。図11に示すように、入力信号 $x(n)$ よりも3サンプル時間だけ遅延した出力信号 $\hat{x}(n)$ が得られており、正しい動作が確認できた。左側が分割側、右側が合成側である。なお $y_0(n)$ には関数の中で1サンプル時間の遅延を与えている。

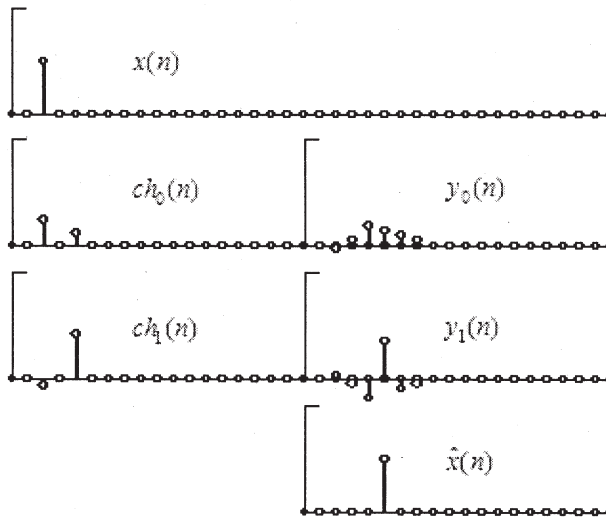


図11 2チャンネルフィルタバンクのインパルス応答

(3) 4チャンネルトランスマルチプレクサ(フィルタバンク使用)

図11で用いた2チャンネルフィルタバンクを2段縦続接続し4チャンネル ($M=4$) のトランスマルチプレクサを構成した。このトランスマルチプレクサに2ビット→4レベル変換器を介して5段PN信号を入力し、その出力をシミュレーションにより求めた。なお、分割バンクの直前には、前章で説明したように1サンプル時間の遅延を挿入するようにした。図12-1は伝送路の遅延が0の場合であり、正しい出力が得られている。 $M=4$ であり、伝送路遅延が1, 2, 3サンプル時間の場合には解析バンクから信号が出力されないことを確認した。

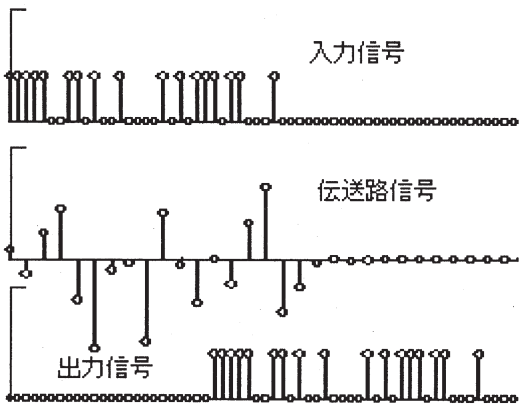
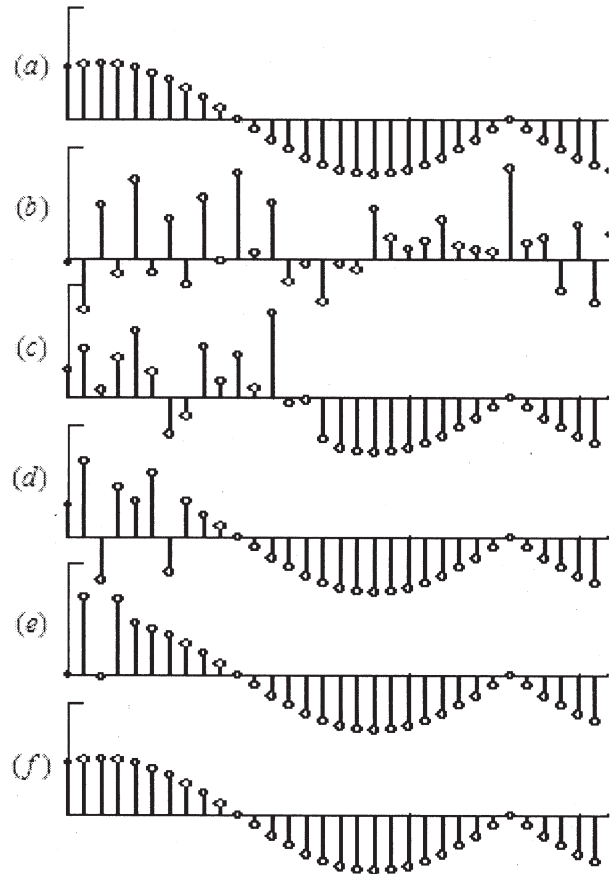


図12-1 トランスマルチプレクサのシミュレーション (4チャンネルフィルタバンク使用時)

(4) ウェーブレット解析のトランスマルチプレクサへの適用

ドベシー (Daubechies) の $N=3$ の係数を用いて一例として32チャンネルのトランスマルチプレクサを構成し、位相反転のある周期32の正弦波を入力したときの波形をシミュレーションした。初期位相を6とした。図12(a)に入力波形を示す。図12(b)は式(29)によりウェーブレット逆変換して求めた送信器(合成器)出力 $a_4(k)$ ($k=0\sim31$)である。



(a): 入力信号, (b): 伝送路波形, (c): レベル3波形, (d): レベル2波形, (e): レベル1波形, (f): レベル0波形

図12 トランスマルチプレクサ(ウェーブレット解析)

(3)のシミュレーション結果からも分かるように、フィルタバンクを用いたトランスマルチプレクサでは送信器-受信器間に挿入される伝送遅延の制御が重要である。これはウェーブレット解析を適用した場合でも同様である。しかしながらウェーブレット解析では一定ビット数のブロックを入力し、かつそのブロックの周期性を仮定して一括処理を行うので、伝送遅延の制御はブロック同期(ワード同期)を確立することに帰着する。ここでは、まずブロック同期(ワード同期)が取れているものと仮定して、図12(b)の伝送路波形(レベル4)を受信器に入力し、ウェーブレット変換してレベル3のスケール係数 $a_3(k)$ ($k=0\sim15$) およびウェーブレット係数 $b_3(k)$ ($k=0\sim15$)を求めた。結果を図12(c)に示す。左半分が $a_3(k)$ 、右半分が $b_3(k)$ である。右半分を見ると1回のウェーブレット変換により図12(a)の信号が再構成されている。これは図6(a)の再構成アルゴリズムに対応している。図12(c)の左半分

の $a_3(k)$ を更にウェーブレット変換し $a_2(k)$ ($k = 0 \sim 7$), $b_2(k)$ ($k = 0 \sim 7$) を求め図 12(d)に示す. 以下順次スケーリング係数に対してウェーブレット変換を施すことにより最終的に図 12(f)のレベル 0 の信号が得られる. この波形は図 12(a)の入力信号波形を再構成していることが分かる.

なお信号長を長くした場合, 他の信号波形 (インパルス, PN 信号) の場合にも同様に再構成できることを確認している.

図 13 は, 図 12(b)の伝送路波形を 1 サンプル時間だけ遅延させてからウェーブレット変換した結果 (レベル 0) である. ブロック同期がはずれているため信号が再構成されないことが分かる.

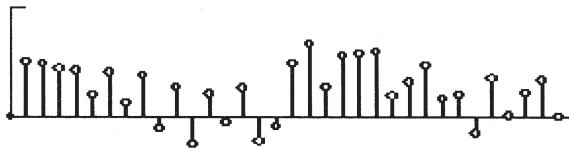


図 13 トランスマルチプレクサ (ブロック同期はずれ時)

(5) 2チャンネルフィルタバンクを適用したブロック同期の確立
(3)(4)の結果から, トランスマルチプレクサを実現するためには, フィルタバンクあるいはウェーブレット解析のいずれを使用しても伝送路遅延によって生ずるブロック同期 (はずれ) の問題を解決することが不可欠である.

同期確立ブロック	データ
----------	-----

図 14 送信データの構成

一例として, 図 14 に示すようにウェーブレット逆変換したデータに 2チャンネルフィルタバンクの合成フィルタを通した同期確立ブロックを前置して伝送路に送出し, ブロック同期を確立する方法を検討した. 図 15 が同期確立用受信器の回路構成である. 1 サンプル時間の遅延を挿入した 2チャンネル解析器#0 と, 遅延を挿入しない 2チャンネル解析器#1 を並列接続して構成する.

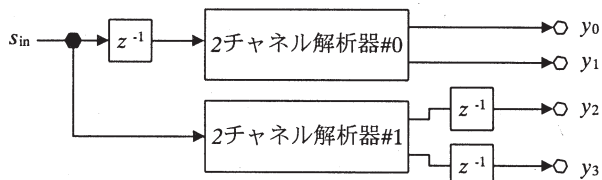


図 15 2チャンネルフィルタバンクを適用した同期引き込み回路

図16にシミュレーション結果を示す. 図15の $y_0 \sim y_3$ が2回連続して全て1となったときにブロック同期の確立を判断するものである. 便宜上受信器のクロックはグラフの最左端からカウントしているものと仮定する. Sinにおける左側の波形の先頭ビットは偶数番目 (4番目) から始まっている. この結果解析器#0の出力から同期パターンが検出される. 一方右側の波形の先頭ビットは奇数番目 (19番目) である. このため解析器#1の出力から同期パターンが検出されている.

以上のように, この方法を用いれば原理的にはブロック同期を確立することができる. しかしながら実際に回路を実現

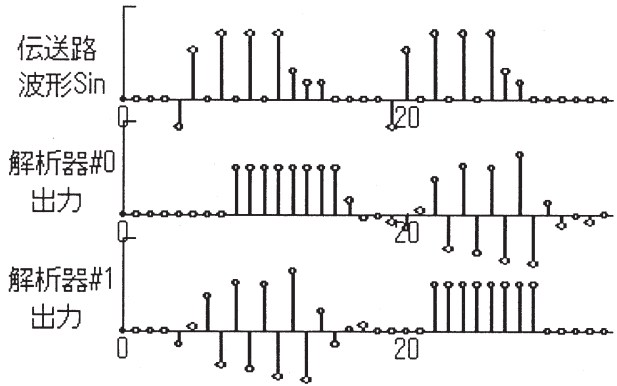


図16 2チャンネルフィルタバンクによるブロック同期の確立

するためには, ①チャンネル数 (分割数) と引き込み時間の関係, ②データのミスサンプリングを避ける手法, などの更なる課題を解決する必要がある.

5. まとめ

本論文は, フィルタバンクおよびウェーブレット解析を適用してトランスマルチプレクサを構成し, パースト伝送を行う場合の課題を明らかにするためにに行った検討をまとめたものであり, 以下のような結果について述べた.

- (1) トランスマルチプレクサを構成するために必要となる, フィルタバンクの構成方法, 離散ウェーブレット解析の手法について整理した.
- (2) トランスマルチプレクサの動作とその完全再構成条件について整理した.
- (3) フィルタバンク, あるいはウェーブレット解析を適用したトランスマルチプレクサを構成し, シミュレーションを行った.
- (4) 伝送路遅延を制御してブロック同期を確立する一手段として, ウェーブレット逆変換されたデータに 2チャンネルフィルタバンクで逆変換した同期パターンを前置して伝送路に送出する方法を考え, 課題を明らかにした.

以上の検討結果から, トランスマルチプレクサを実現するためには, 伝送路遅延を良好に制御することによりブロック同期を確立することが不可欠であることが明らかになった. 今後さらに同期確立の方法の検討を進め, 具体的なシステムとしての実現を図っていきたい.

[参考文献]

- [1] Gストラング, T. グエン, 著, 高橋進一, 池原雅章, 訳, “ウェーブレット解析とフィルタバンク I (入門編)”, 培風館, 2001 年
- [2] 高橋進一, 池原雅章, “デジタルフィルタ”, 培風館, 1999 年
- [3] 貴家仁志, “マルチレート信号処理”, 昭晃堂, 1999 年
- [4] 昌達 K'z, “画像処理を極めるアルゴリズムラボ, ウェーブレット変換による圧縮処理①ウェーブレット変換の基礎”,

10進デジタルLSI回路 (2)実測結果

Decimal Digital LSI Circuits (2) Experimental results

波多野 裕*、村松 一矢**、里中 勝己***、山本 毅****

Hiroshi HATANO, Kazuya MURAMATSU, Katsumi SATONAKA and Tsuyoshi YAMAMOTO

Abstract : Three different decimal LSI circuits, a decimal adder, a BCD to decimal decoder and a seven-segment decoder have been successfully fabricated utilizing a double polysilicon and double metal 1.2 μm CMOS process. The newly designed decimal adder and BCD to decimal decoder both using an original gate array technology, have been confirmed to function correctly by fabricated chip measurements. The experimental results have also shown that the seven-segment decoder circuit for a seven-segment LED display operates correctly.

1. 緒言

分かり難い2進数表示であるデジタル回路を、分かり易い10進数表示に近づける工夫の一環として、10進加算回路、BCD-10進デコーダ回路および10進数を表示する7セグメントデコーダ回路に着目して設計試作を行っている。既報の“10進デジタルLSI回路(1)回路設計”¹⁾においては、各回路の回路構成とレイアウト設計について報告した。

今回、10進加算回路、BCD-10進デコーダ回路および10進数を表示する7セグメントデコーダ回路を2層ポリシリコン2層アルミ1.2 μm CMOSプロセス²⁾³⁾⁴⁾を用いて試作して、試作チップの実測を行った。本論文ではシミュレーション結果の詳細と試作回路の実測結果を報告する。

2. 10進加算回路

2.1 回路シミュレーション⁵⁾

2層ポリシリコン2層アルミ1.2 μm CMOSプロセスを用いてゲートアレイ方式で10進加算回路を設計した。

NMOSトランジスタのゲート長は1.5 μm 、PMOSトランジスタのゲート長は1.5 μm で、実効チャンネル長はNMOSトランジスタが0.9 μm でPMOSトランジスタが0.8 μm である。ゲート酸化膜厚は25nmである。

ゲートアレイを構成するベーシックセルのNMOSトランジスタのチャンネル幅は40 μm 、PMOSトランジスタのチャンネル幅は40 μm で設計した。

10進加算回路はこのベーシックセルを63使用して設計した。配線領域を含めた占有面積は189052 μm^2 である。

図1に10進加算回路のSPICEによるシミュレーション結果を示す。シミュレーションに用いたワークステーションはSUN Ultra5(AS7000/U5)、CPUはUltraSPARC-III(270MHz)、メインメモリは64MB、補助記憶装置は4.3GB、オペレーティングシステムはSolaris 2.6である。

入力A0、A1、A2、A3、B0、B1、B2、B3、C-1に対する出力D0、D1、D2、D3、Cdのシミュレーション波形を示す。既報の“10進デジタルLSI回路(1)回路設計”の表1の真理値表と比較して正しく動作していることを確認する事ができた。入力信号を繰り返しパルスで作成したため、800nsの前後で同一の出力が2サイクル繰り返されている。

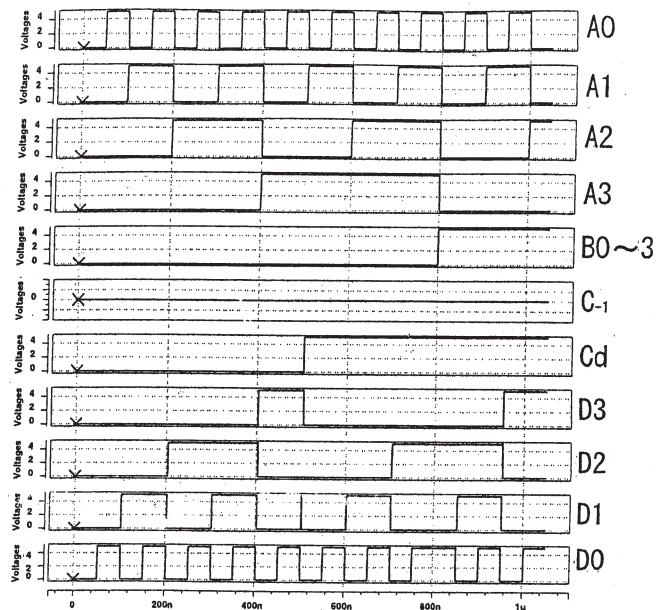


図1 10進加算回路のシミュレーション結果
横軸：時間[s] 縦軸：電圧[V]

2007年2月15日受理

* 理工学部 電気電子情報工学科

** 理工学部 電子工学科卒業生 (現在 山下工業 (株))

*** 理工学部 電子工学科卒業生 (現在 JA)

**** 理工学部 電子工学科卒業生 (現在 浜松ホトニクス (株))

2.2 実測結果

2層ポリシリコン2層アルミ1.2 μm CMOSプロセスを

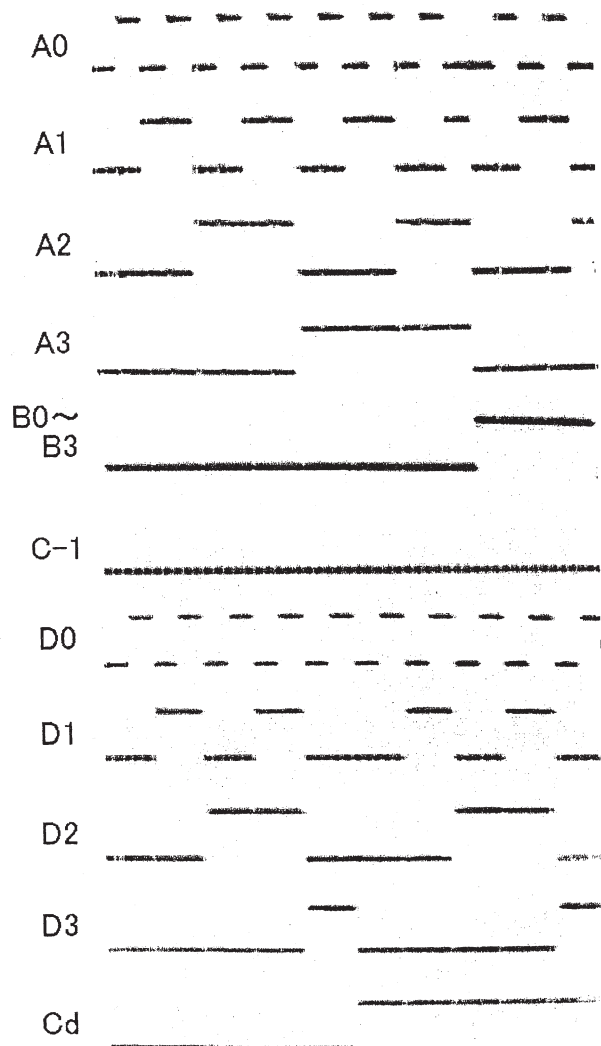


図2 10進加算回路の実測結果

横軸：時間[10 $\mu\text{s}/\text{div.}$]縦軸：電圧[5V/div.]

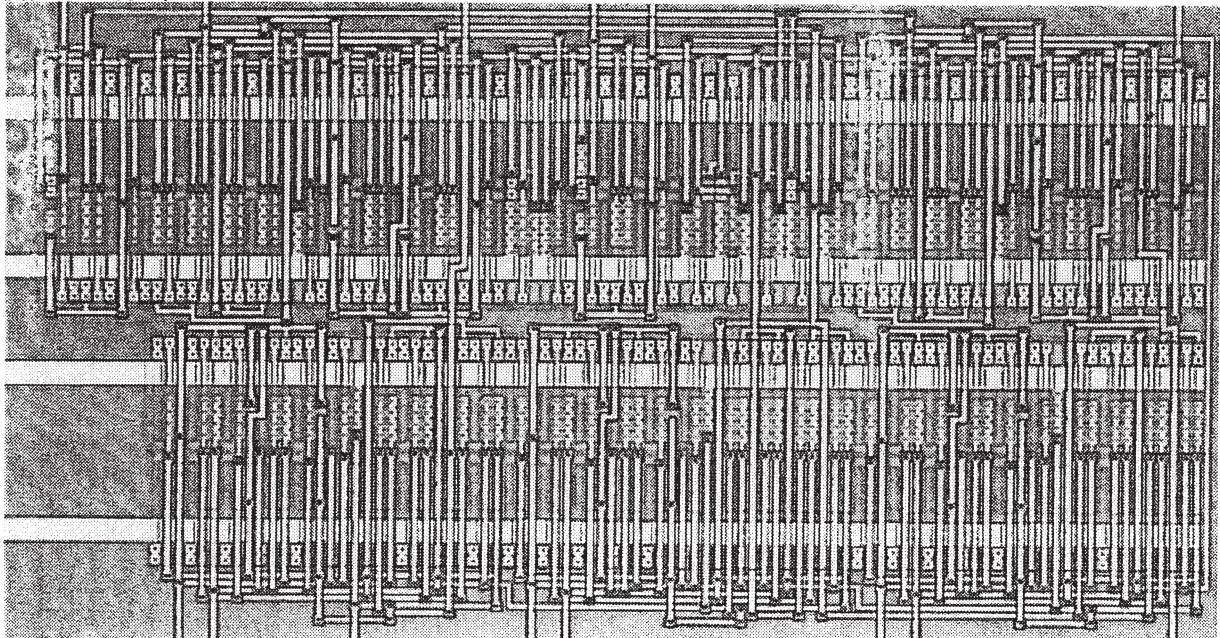


図3 10進加算回路の顕微鏡写真（倍率：200倍）

用いて試作した10進加算回路の実測波形を図2に示す。入力A0の周波数は100kHzである。既報の“10進デジタルLSI回路(1)回路設計”の表1の真理値表と比較して正しく動作していることを確認する事ができた。また、図1のシミュレーション波形において500ns付近で出力D1に出ているグリッチは図2では観測されなかった。

図3に試作した10進加算回路の顕微鏡写真を示す。倍率は200倍である。

3. BCD-10進デコーダ回路⁶⁾

3.1 シミュレーション結果

2層ポリシリコン2層アルミ1.2 μm CMOSプロセスを用いてゲートアレイ方式でBCD-10進デコーダ回路を設計した。

NMOSトランジスタのゲート長は1.5 μm 、PMOSトランジスタのゲート長は1.5 μm で、実効チャネル長はNMOSトランジスタが0.9 μm でPMOSトランジスタが0.8 μm である。ゲート酸化膜厚は25nmである。

ゲートアレイ方式で設計したBCD-10進デコーダ回路は34のベーシックセルを使用している。

図4にBCD-10進デコーダ回路のSPICEによるシミュレーション結果を示す。既報の“10進デジタルLSI回路(1)回路設計”の表2の真理値表と比較して正しく動作していることを確認する事ができた。

3.2 実測結果

2層ポリシリコン2層アルミ1.2 μm CMOSプロセスを用いて試作したBCD-10進デコーダ回路の実測波形を図5に示す。入力A0の周波数は100kHzである。図4のシミュレーション波形と比較して正しく動作していることを確認する事ができた。

図6に試作したBCD-10進デコーダ回路の顕微鏡写真を示す。倍率は200倍である。

4. 7セグメントデコーダ回路

4.1 シミュレーション結果⁷⁾

2層ポリシリコン2層アルミ1.2 μm CMOSプロセスを用いて2ビット全加算器を含む7セグメントデコーダ回路を設計した。

NMOSトランジスタのゲート長は1.5 μm 、PMOSトランジスタのゲート長は1.5 μm で、実効チャネル長はNMOSトランジスタが0.9 μm でPMOSトランジスタが0.8 μm である。ゲート酸化膜厚は25nmである。

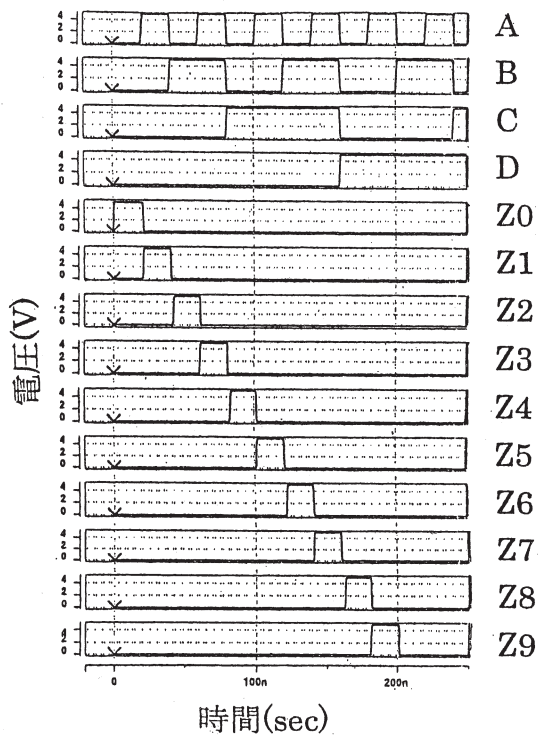


図4 BCD-10進デコーダ回路のシミュレーション結果

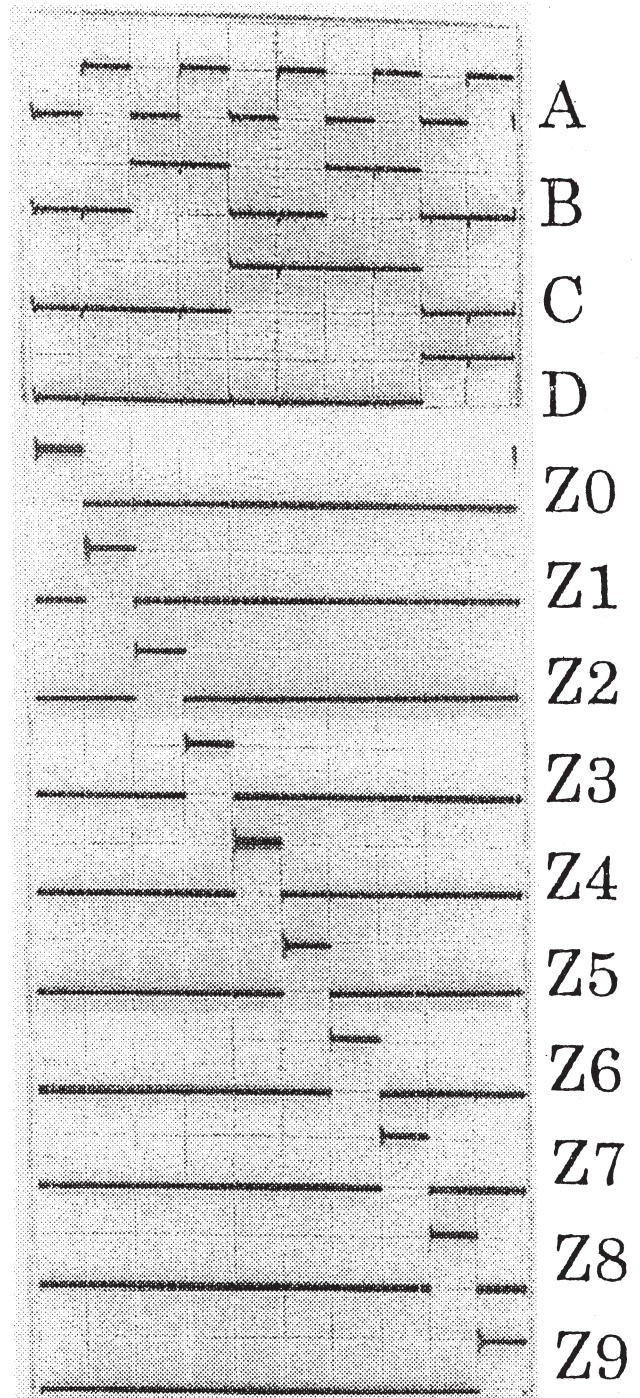


図5 BCD-10進デコーダ回路の実測結果
横軸：時間[10 $\mu\text{s/div.}$] 縦軸：電圧[5V/div.]

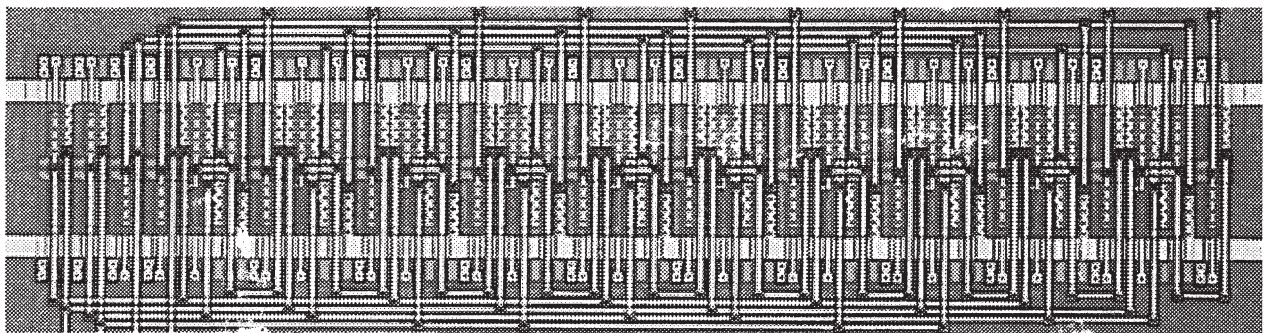


図6 BCD-10進デコーダ回路の顕微鏡写真(倍率：200倍)

図7に2ビット全加算器の入力A0、A1、B0、B1、Cin、および7セグメントデコーダの出力a、b、c、d、e、f、g

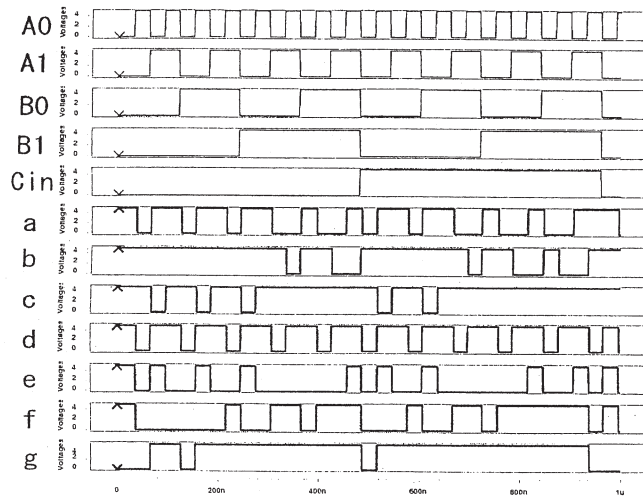


図7 7セグメントデコーダ回路のシミュレーション結果
横軸：時間[s] 縦軸：電圧[V]

のSPICEによるシミュレーション結果を示す。既報の“10進デジタルLSI回路(1)回路設計”の図9のタイミングチャートと比較して正しく動作していることを確認する事ができた。

4.2 実測結果

2層ポリシリコン2層アルミ1.2 μ mCMOSプロセスを用いて試作した7セグメントデコーダ回路の実測波形を図8に示す。入力A0の周波数は100kHzである。図7のシミュレーション波形と比較して正しく動作していることを確認する事ができた。

図9に試作した7セグメントデコーダ回路の顕微鏡写真を示す。倍率は200倍である。

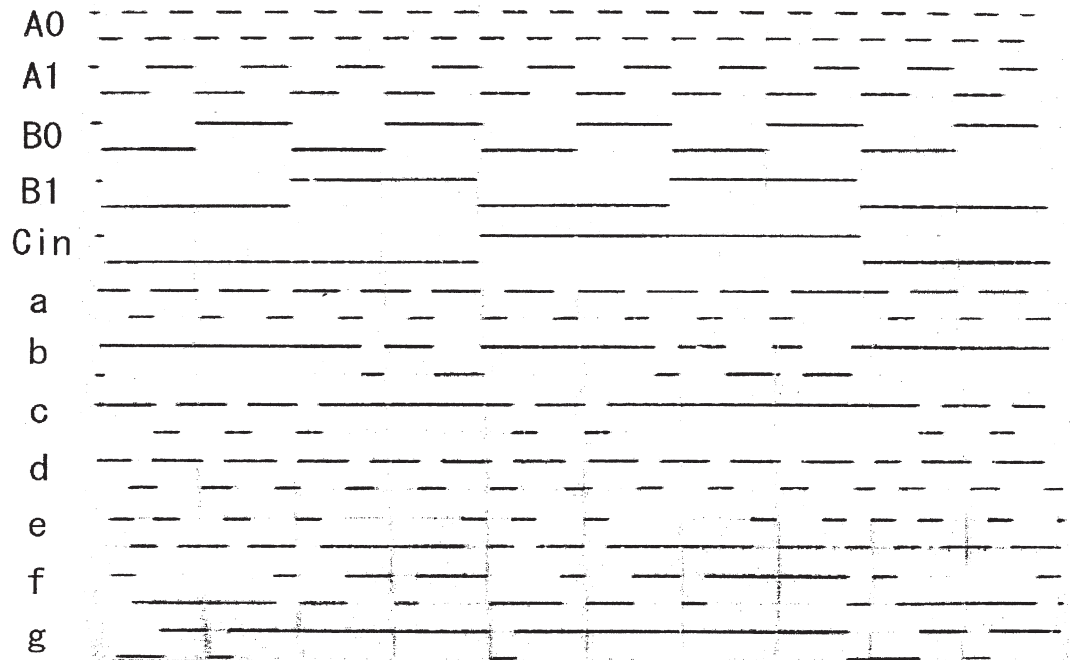


図8 7セグメントデコーダ回路の実測結果
横軸：時間[20 μ s/div.] 縦軸：電圧[5V/div.]

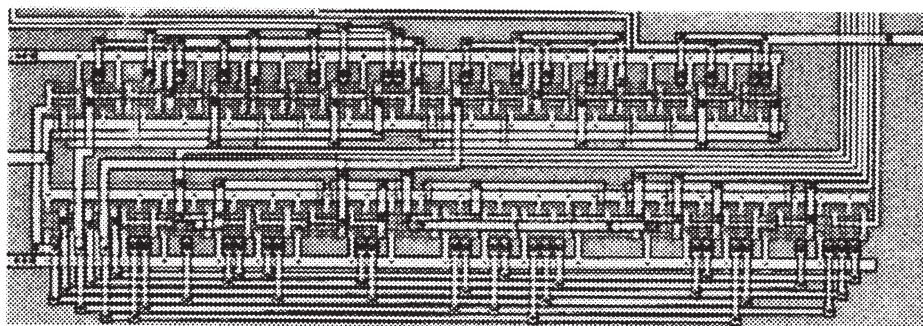


図9 7セグメントデコーダ回路の顕微鏡写真
(倍率：200倍)

5. 結言

10進数を扱うことのできるデジタル回路としてBCDコード10進加算回路、BCD-10進デコーダ回路および10進数を表示する7セグメントデコーダ回路を2層ポリシリコン2層メタル1.2 μ m CMOSプロセスを用いて試作した。

試作した10進加算回路、BCD-10進デコーダ回路、および7セグメントデコーダ回路を実測してシミュレーション通りの機能動作の確認に成功した。

各回路の動作限界を試作チップの実測により検討することが今後の課題である。VDEC等の測定装置を使用することも必要である。

10進デジタル回路の検討の一環として、今回報告した3種類の回路に加えて、10進計数回路の設計試作⁸⁾も進めている。

謝辞

10進加算回路の試作に関しては2005年度卒研生の鈴木博也君（現在、浜松ホトニクス）、測定に関しては2006年度卒研生の加治寛己君（現在、三栄ハイテックス）の協力があつた。BCD-10進デコーダ回路の測定に関しては2005年度卒研生の田力正徳君（現在、デンソーテクノ）の協力があつた。また、試作チップの顕微鏡写真の撮影は2006年度卒研生の鈴木剛弘君（現在、浜松ホトニクス）らが担当した。記して謝意を表す。

本研究に関するチップ試作は東京大学大規模集積システム設計教育研究センター（VDEC）を通しオンセミコンダクター（株）、日本モトローラ（株）、HOYA（株）、京セラ（株）の協力で行われたものである。

参考文献

- 1) 波多野 裕, 村松一矢, 里中勝己, 山本毅, “10進デジタルLSI回路(1)回路設計”, 静岡理科大学紀要, 第14巻, pp.37-41, 2006.
- 2) T.Ochiai and H.Hatano, “DC characteristic simulation for floating gate neuron MOS circuits”, IEE Electronics Letters, vol.35, no. 18, pp.1505-1507, 1999.

- 3) T.Ochiai and H.Hatano, “A proposition on floating gate neuron MOS macromodeling for device fabrications”, IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E82-A, no. 11, pp. 2485-2491, 1999.
- 4) T.Ochiai and H.Hatano, “A low temperature DC analysis utilizing a floating gate neuron MOS macromodel”, IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, pp. 1114 -1116, 2003.
- 5) 村松一矢, “10進加算回路の設計”, 静岡理科大学2004年度卒業論文.
- 6) 里中勝己, “フルカスタム及びゲートアレイ方式による復号器の設計試作”, 静岡理科大学2004年度卒業論文.
- 7) 山本毅, “7セグメントCMOS回路と高性能化検討用テスト回路”, 静岡理科大学2004年度卒業論文.
- 8) 天野知弥, 内田昂志, “10進計数回路の設計”, 静岡理科大学2006年度卒業論文.

ゲート速度性能解析用実験回路の実測

Test circuit experimental results for logic gate speed-performance analyses

波多野 裕*

Hiroshi HATANO

Abstract : In order to investigate very-high-speed logic circuits, eight-input NAND and eight-input NOR logic experimental circuits have been successfully designed and fabricated utilizing double polysilicon and double metal 1.2 μ m CMOS process. 2.7 ns propagation delay time difference has been found in eight-input NAND circuits for different input conditions. 2.8 ns propagation delay time difference has also been found in eight-input NOR circuits. These results obtained here should be carefully taken into account in very-high-speed LSI designs.

1. 緒言

スケーリング則¹⁾を指導原理とするLSIの高速化、高集積化が困難になりつつある現状を打ち破るため、ゲートレベルでの高性能化の検討が必要である。

このゲートレベルでの高性能化を検討するため、3入力NAND回路と3入力NOR回路を用いて入力印加条件依存性を明らかにして既にその結果を報告した。即ち、3入力NAND回路、3入力NOR回路において1段当たり約1 nsの入力条件依存性が存在することが明らかになった²⁾。

本論文では、超LSIの一層の複雑化を念頭に置いて多入力NAND回路と多入力NOR回路の速度性能を、8入力NAND回路と8入力NOR回路の設計試作により検討したので、サブミクロンCMOSプロセス³⁾⁴⁾⁵⁾による試作チップの実測結果を中心に報告する。

2. 8入力NAND/NOR回路⁶⁾

論理的には等価な回路構成における、トランジスタ・レベルまで考慮に入れた入力条件の違いが信号伝達速度に及ぼす影響を詳細に明らかにするためのNAND回路解析用の9種類の実験回路を図1に示す。NANDゲートにおける立上がり遅延時間と立下り遅延時間を分離するため、1段毎にインバータを具え、回路試作後、オシロスコープで実測可能な遅延時間となるように8入力NANDとインバータの組を50段接続した、8入力NAND+インバータの50段チェーンを設計した。図の一番上は8入力NAND回路の入力全てに同じ信号を印加する回路で、8入力同時変化NAND回路(8NAND)である。図の上から2番目以下の回路は8入力のうち7入力がV_{DD}に接続されていて残りの1つが入力となっている8入力1

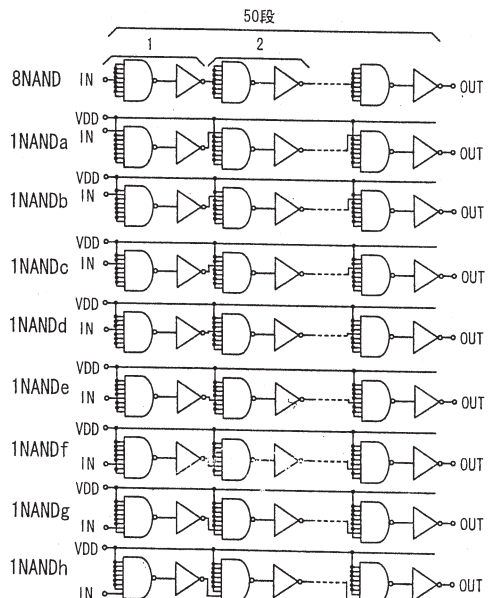


図1 8入力NAND+インバータの50段チェーン

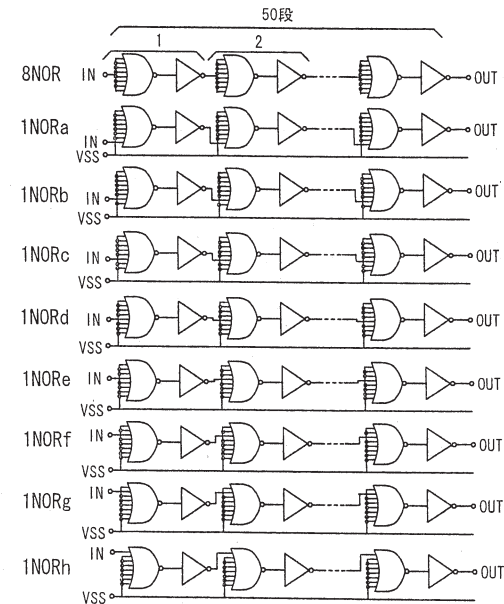


図2 8入力NOR+インバータの50段チェーン

2007年3月2日受理

* 理工学部 電気電子情報工学科

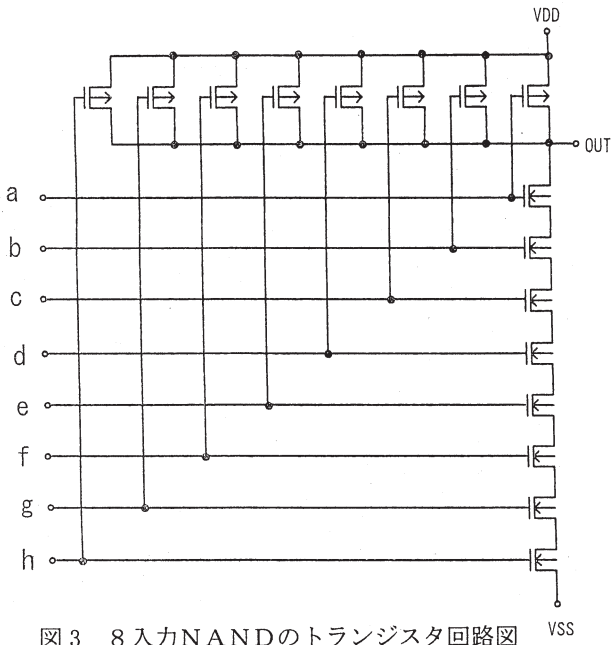


図3 8入力NANDのトランジスタ回路図

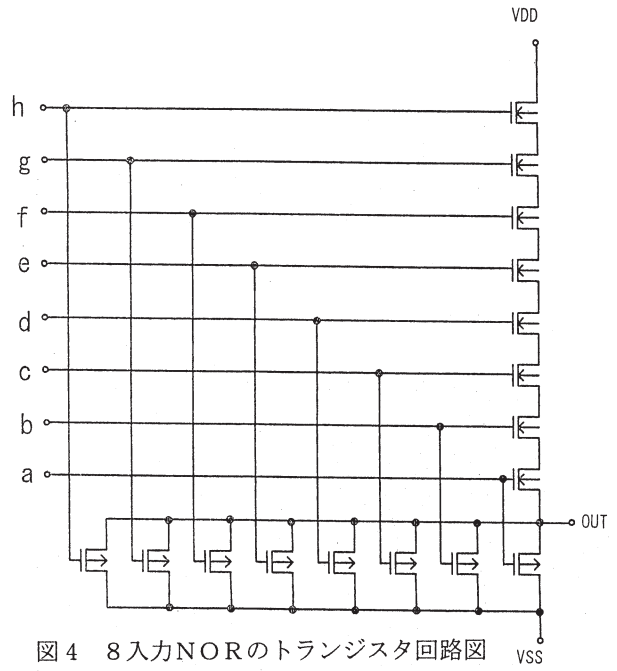


図4 8入力NORのトランジスタ回路図

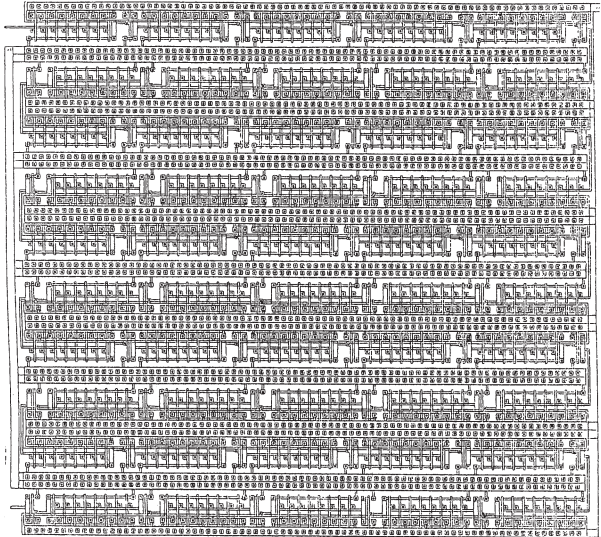


図5 8入力同時変化NAND+インバータの50段チェーン(8NAND)のレイアウト図

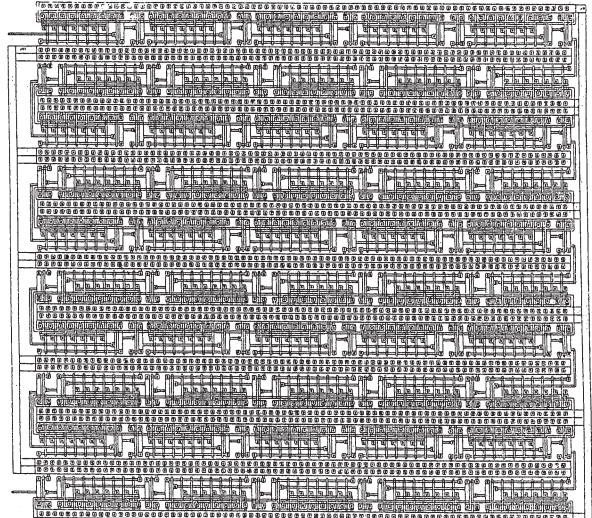


図6 8入力1入力変化NAND+インバータの50段チェーン(1NANDa)のレイアウト図

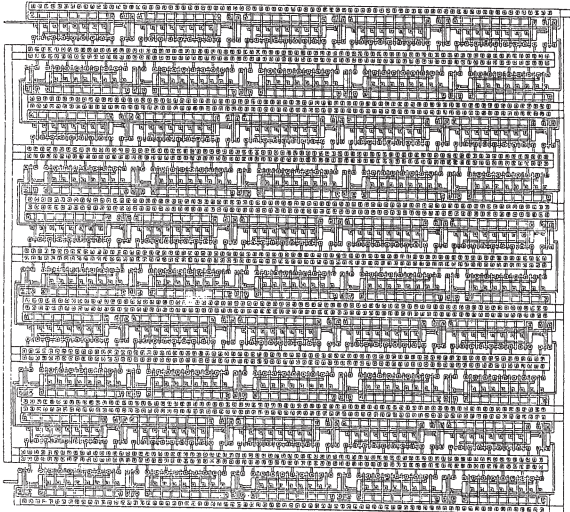


図7 8入力同時変化NOR+インバータの50段チェーン(8NOR)のレイアウト図

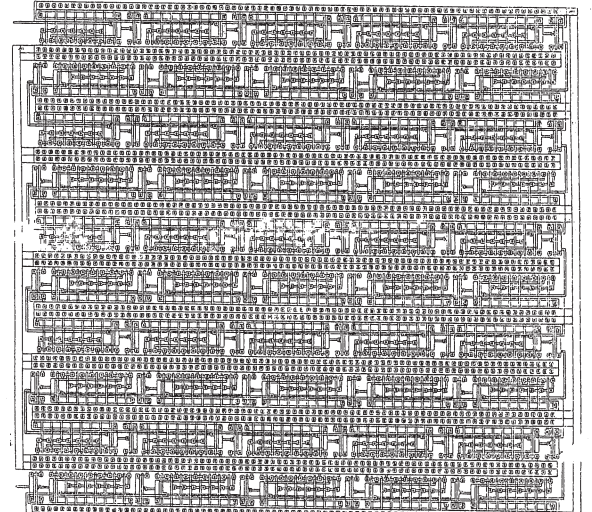


図8 8入力1入力変化NOR+インバータの50段チェーン(1NORa)のレイアウト図

入力変化NAND回路 (1NAND) である。1NANDの8種類の回路は入力信号を印加する端子が異なっていて、入力端子が出力側に近い方から1NANDa、1NANDb、1NANDc、1NANDd、1NANDe、1NANDf、1NANDg、1NANDhとした。

同じくNOR回路解析用の9種類の実験回路を図2に示す。図の一番上は8入力NOR回路の入力全てに同じ信号を印加する回路で、8入力同時変化NOR回路 (8NOR) である。図の上から2番目以下の回路は8入力のうち7入力がV_{ss}に接続されていて残りの1つが入力となっていて8入力1入力変化NOR回路 (1NOR) である。1NORの8種類の回路は入力信号を印加する端子が異なっていて、入力端子が出力側に近い方から1NORa、1NORb、1NORc、1NORd、1NORE、1NORf、1NORg、1NORhとした。

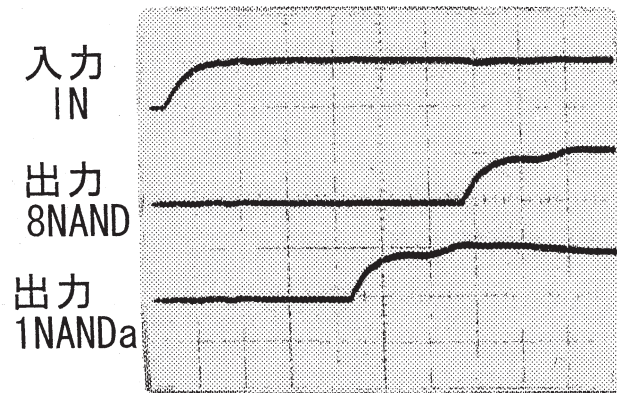


図9 8入力NAND+インバータの50段チェーン
実測結果 横軸：50ns/div. 縦軸：5V/div.

図3に8入力NAND回路のトランジスタ回路図を示す。NMOSが直列に8個、PMOSが並列に8個接続されて構成されている。

図4に8入力NOR回路のトランジスタ回路図を示す。PMOSが直列に8個、NMOSが並列に8個接続されて構成されている。

図5から図8に試作した実験回路のレイアウト図を示す。図5は50段8入力同時変化NAND+インバータ・チェーン (8NAND) のレイアウト図を示す。入力は左上から入り、左下に出力する回路である。図6は50段8入力1入力変化NAND+インバータ・チェーン (1NANDa) のレイアウト図である。図7は50段8入力同時変化NOR+インバータ・チェーン (8NOR) のレイアウト図を示す。図8は50段8入力1入力変化NOR+インバータ・チェーン (1NORa) のレイアウト図である。

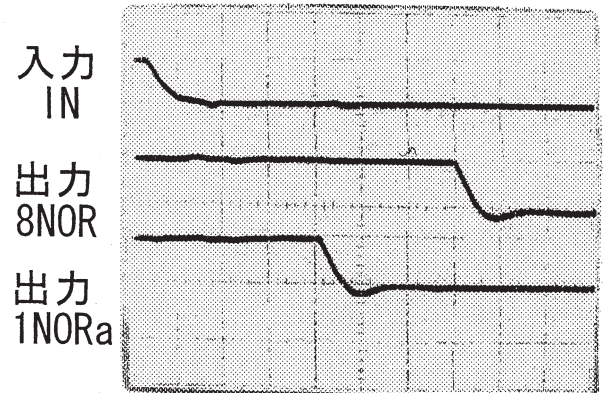
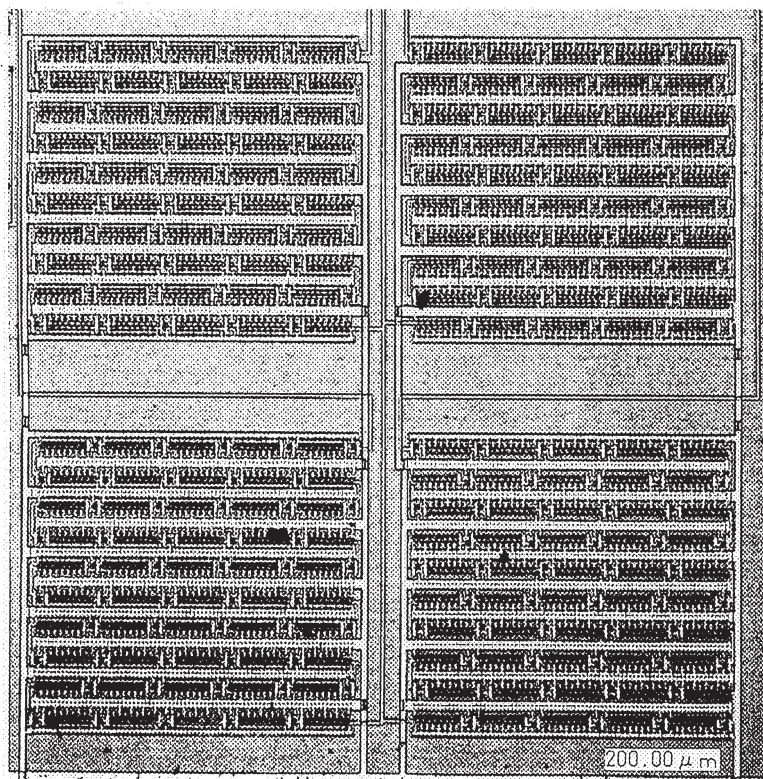


図10 8入力NOR+インバータの50段チェーン
実測結果 横軸：50ns/div. 縦軸：5V/div.

図11 4種類の50段チェーンの
顕微鏡写真 (倍率：100倍)
8NAND : 右下
1NANDa : 右上
8NOR : 左下
1NORa : 左上



8入力1入力変化回路は文献(2)と同じように8 NANDaと8 NORaを試作した。

3. 実測結果

既報の「NAND及びNORゲート速度性能解析用実験回路の設計」²⁾で詳細に述べた測定原理に従って図5と図6の50段NAND+インバータ・チェーンの実測から、8入力NANDゲート1段当たりの8入力同時変化と1入力変化の遅延時間の差を求めた。

図9に電源電圧5Vにおける8 NANDと1 NANDaの出力波形を示す。50段通過後の遅延時間の差は約135 nsである。

図10に電源電圧5Vにおける8 NORと1 NORaの出力波形を示す。50段通過後の遅延時間の差は約140 nsである。

図11に試作回路の顕微鏡写真を示す。左上の回路が1 NORa、右上が1 NANDa、左下が8 NOR、右下が8 NANDである。

図12に8入力NAND回路における8入力同時変化と1入力変化の1段当たりの遅延時間差の電源電圧依存性を示す。黒丸が実測結果である。3チップの平均値を示す。また、白丸はシミュレーション結果である。

図13に8入力NOR回路における8入力同時変化と1入力変化の1段当たりの遅延時間差の電源電圧依存性を示す。黒丸が実測結果である。3チップの平均値を示す。また、白丸はシミュレーション結果である。

以上の実験結果から、8入力NAND回路では電源電圧5Vの時、入力条件の違いにより1段当たり約2.7 nsの遅延時間差が発生することが判明した。また、8入力NOR回路では電源電圧5Vの時、入力条件の違いにより1

段当たり約2.8 nsの遅延時間差が発生することが判明した。文献(2)で述べたように1.2μmCMOSプロセスで試作した回路の1段当たりの平均遅延時間は1 ns程度以下であるため、これらの結果は無視することができない値である。なお、8入力同時変化と1入力変化の遅延時間差の原因は文献(2)で既に述べたとおりである。

4. 結言

超LSI回路におけるゲートレベルの速度性能改善の検討を行うため、8入力NAND回路と8入力NOR回路の回路速度の入力印加条件依存性を、1.2μmCMOSプロセスを用いて試作したチップの実測により実験的に明らかにした。

NAND回路では8入力同時変化回路の遅延時間が1入力変化回路より2.7 ns遅いという結果が得られた。NOR回路では8入力同時変化回路の遅延時間が1入力変化回路より2.8 ns遅いという結果が得られた。

本研究において得られた8入力回路の実測結果は複雑な超LSI回路の高速化の観点から回路設計上、十分考慮されなければならないと考えられる。一方、シミュレーションのみに基づく場合、多入力論理回路の回路速度劣化の入力印加条件依存性をオーバー・エスティメイトすることになることも判明した。

謝辞

本研究に関するチップ試作は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通しオンセミコンダクター(株)、日本モトローラ(株)、HOYA(株)、京セラ(株)の協力で行われたものである。

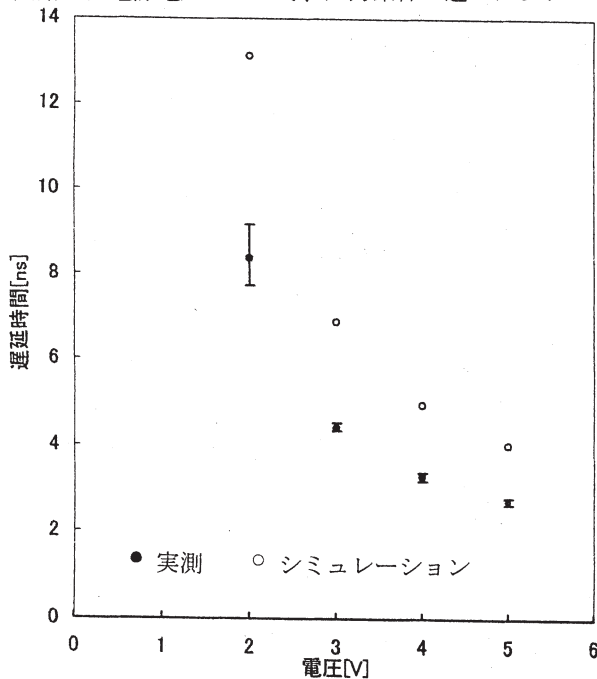


図12 8入力NANDにおける8入力同時変化と1入力変化の1段当たりの遅延時間差の電源電圧依存性

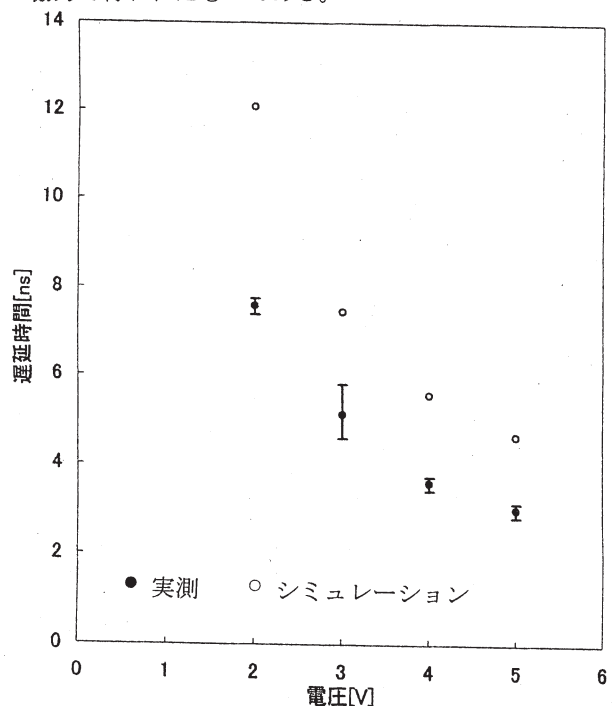


図13 8入力NORにおける8入力同時変化と1入力変化の1段当たりの遅延時間差の電源電圧依存性

参考文献

- 1) R. H. Dennard et al., "Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions", IEEE J. of Solid-State Circuits, SC-9, pp. 256-268, 1974.
- 2) 波多野 裕、山本毅、渋谷耕児、"NAND及びNORゲート速度性能解析用実験回路の設計", 静岡理工科大学紀要, vol. 13, pp. 27-32, 2005.
- 3) T.Ochiai and H.Hatano," DC characteristic simulation for floating gate neuron MOS circuits", IEE Electronics Letters, vol.35, no. 18, pp.1505-1507, 1999.
- 4) T.Ochiai and H.Hatano," A proposition on floating gate neuron MOS macromodeling for device fabrications", IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E82-A, no. 11, pp. 2485-2491, 1999.
- 5) T.Ochiai and H.Hatano," A low temperature DC analysis utilizing a floating gate neuron MOS macromodel", IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, pp. 1114 -1116, 2003.
- 6) 森章紀, "演算回路設計と基本論理回路速度解析", 静岡理工科大学 2005 年度卒業論文.

触覚系微細テクスチャー弁別の感覚情報処理機構

Tactile-information-processing mechanisms of fine-surface-texture discrimination

宮岡 徹*, 中村敏男**

Tetsu MIYAOKA and Toshio NAKANURA

Abstract: The purpose of the study was to investigate the low-pass filter characteristics and to evaluate the validity of “amplitude-information hypothesis” proposed by Miyaoka et al. for the mechanisms of fine-surface-texture discrimination in human tactile perception. Two experiments were performed. In Experiment 1, six diffraction gratings were used as stimuli. Their wavelengths were 6.7, 13.3, 25.0, 33.3, 50.0, and 75.2 μm . Six subjects participated in the experiment. The stimuli were moved on the index finger in three moving velocities and the subject judged roughness of the stimuli with two-alternative, forced-choice technique. Psychometric functions, calculated from the experimental data, clearly showed the existence of the low-pass filter. In Experiment 2, five abrasive papers with particle sizes between 1 μm and 30 μm were used as stimuli. Six subjects, the same ones as in Experiment 1, participated in Experiment 2. Patterns of psychometric functions obtained in the experiment were similar to each other in spite of the changes of stimulus moving velocities. The results supported the amplitude-information hypothesis.

1. はじめに

ヒトは手で対象に触れることにより、その表面についての情報を取得することができる。この機能を触テクスチャー知覚と呼ぶ。触テクスチャー知覚は、基本的に2種類に分けられる¹⁻⁴⁾。第1は粗いテクスチャーの知覚である。粗いテクスチャーの知覚は、眼で見てもわかるような表面の凹凸パターンを触ることにより知る働きである。第2は微細テクスチャーの知覚である。微細テクスチャーの知覚は、視覚ではわからないような細かな粗さ・滑らかさの違いを、触ることによって知る働きである。粗いテクスチャーの知覚は、1~数mm程度の構成要素が作り出すパターンの弁別に関連している。これに対し、微細テクスチャーの知覚は1~100 μm 程度の構成要素の作り出す、粗さ・滑らかさという言葉であらわされる特性の弁別に関連している。両者は弁別する要素の大きさが非常に違う。両者とも刺激表面上で指を動かすことによりテクスチャーをよく知覚できるが、粗いテクスチャーの知覚では、指を静止させてもぼんやりと粗さがわかるのに対し、微細なテクスチャーの知覚では、指を静止させると粗さ・滑らかさの弁別がまったくできなくなる。これらのことからわかるように、粗いテクスチャー知覚と微細テクスチャー知覚にはそれぞれ異なった情報処理メカニズムが関与していると考えられる。

粗いテクスチャーの知覚に関しては、数多くの研究が実施され、その知覚に関与する機械受容単位が遅順応I型単

位(SA I)であることが明らかにされた⁵⁻¹¹⁾。微細なテクスチャー知覚については、宮岡らが精密研磨紙を刺激として用いる実験を行い、粒子サイズが1~40 μm の場合、弁別閾は2.4~3.3 μm となることを発見した¹²⁾。触覚系はローパスフィルタ特性を持ち、微細なテクスチャー情報をそのまま取り込むことはできない。そこで宮岡らは、触覚系がフィルタを通過した情報のうち、刺激表面凹凸の振幅情報のみを用いてテクスチャーの粗さ弁別を行っているとする「振幅情報仮説」を提案した¹²⁾。この仮説によれば、刺激表面情報が触覚系のフィルタを通過できなければ、刺激表面のテクスチャーは知覚できないことになる。そこで宮岡は、回折格子を刺激として用い、触覚系のフィルタ特性を調べる実験を行った¹³⁾。その結果、触覚系に確かにフィルタが存在すること、そしてその通過上限周波数は約600Hz付近にあることを明らかにした。ただしこの実験は、刺激に触れる指を被験者が能動的に一定速度で動かす方法で実施された。訓練したとはいえ、被験者の指移動速度にはかなりのばらつきが見られ、それが実験結果にノイズを混入させていると推定された。

本研究では、被験者の指を固定し、ステッピングモータを用いて皮膚上で刺激を動かすという受動触条件下で微細テクスチャー知覚の絶対閾を求めることにより、触覚系のフィルタ通過の上限周波数を定めることを実験目的とした。あわせて、触覚系がローパスフィルタ特性を持つとき、微細テクスチャー知覚に刺激の振幅情報が用いられるとする振幅情報仮説の妥当性について、実験に基づいて検討することも本研究の目的であった。

2007年3月6日受理

* : 理工学部情報システム学科

** : 大学院理工学研究科

2. 触覚系ローパスフィルタのモデルと振幅情報仮説が妥当と考えられる理由

まず、ローパスフィルタの上限周波数付近の刺激を含むような刺激群を提示した場合、心理測定関数はどのようなパターンを示すかについて説明する。

今、それぞれ1つの波長成分のみを持つ2つの刺激の粗さ・滑らかさを比較する事態を考える。被験者が2肢強制選択法により応答するとし、心理測定関数 y を

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-x + s)} \quad (1)$$

とおく。ただし、 s は標準刺激波長、 x は比較刺激波長をあらわす ($s > 0$, $x > 0$)。さてある一定速度で刺激に触れた場合、波長 x_0 以下の刺激が引き起こす皮膚振動の周波数は触覚系のローパスフィルタ通過上限値を上回るため刺激情報はフィルタを通過することができず、表面テクスチャーは知覚されない。また刺激波長が x_0 より長ければ、刺激情報はローパスフィルタを通過することができ、表面テクスチャーが知覚される。このように仮定した場合、以下の結果を導くことができる。

$s \leq x_0$ で且つ $x \leq x_0$ の場合、

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-x_0 + x_0)} = \frac{1}{2} \quad (2)$$

$s \leq x_0$ で且つ $x > x_0$ の場合、

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-x + x_0)} \quad (3)$$

$s > x_0$ で且つ $x \leq x_0$ の場合、

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-x_0 + s)} \quad (4)$$

$s > x_0$ で且つ $x > x_0$ の場合、

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-x + s)} \quad (5)$$

式(2)~(5)の結果をグラフにあらわすと、Fig. 1 のようになる。Fig. 1 の縦軸は標準刺激より比較刺激の方が粗いと判断した比率、横軸は比較刺激波長の相対値である。

標準刺激の波長が絶対閾 x_0 以下の場合、比較刺激波長も x_0 以下であれば、式(2)から比較刺激の方を粗いと判断する確率は0.5となる。また、比較刺激波長が x_0 を越えた場合、比較刺激を粗いと判断する比率が増加し、式(3)から心理測定関数は上に凸の増加関数となる。なお、標準刺激波長が絶対閾 x_0 以下ならすべての心理測定関数は互いに重なり合う。

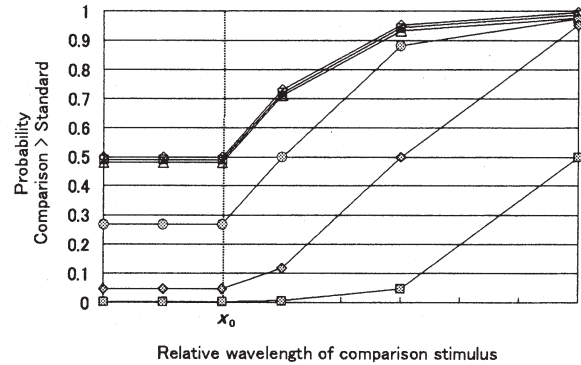


Fig. 1. Simulation results based on the equations (1)-(5). The vertical axis shows the probability that comparison stimuli are judged rougher than standard stimuli. The horizontal axis shows relative wavelength of the comparison stimulus. Each symbol in the figure represents the results of each standard stimulus, respectively. The x_0 in the figure shows an absolute threshold.

標準刺激が絶対閾 x_0 を越えると (Fig. 1 の灰丸印)、波長が x_0 以下の比較刺激の方を粗いと答える比率は0.5を下回る (式(4))。比較刺激波長が x_0 より長くなると、比較刺激の方を粗いと答える比率が増加し始める (式(5))。標準刺激の波長がさらに長くなると (灰菱印, 灰四角印)、比較刺激波長 x_0 以下で比較刺激の方を粗いと判断する比率はますます減少するが (式(4))、比較刺激波長が x_0 を越えると心理測定関数が増加に転じるというパターンは変わらない (式(5))。

さて、このようなローパスフィルタが存在する場合、触覚系はどのような情報を用いて微細テクスチャーの弁別を行っているのだろうか。これに関して、宮岡は上記の「振幅情報仮説」を提案した¹²⁾。ここで振幅情報仮説について考える前に、よく提案される微細テクスチャー弁別に関する他の仮説がなぜ有り得ないのかについてまず述べ、その後に振幅情報仮説について説明する。

微細テクスチャー弁別を可能にする機構としてまず思いつくのは、摩擦の大小を手がかりとして弁別作業を行っているとする仮説である。刺激表面の粗さが違うと摩擦の大きさも異なる。この摩擦係数の大きさの違いを滑らかさの違いとして知覚しているという可能性が考えられる。しかし、精密研磨紙にシリコンオイルを塗布し、摩擦係数を小さくしても実験結果には影響しないので¹²⁾、この仮説があやまりであることがわかる。

皮膚機械受容単位の神経発射密度であらわされる時系列情報が微細テクスチャーの情報を脳に送るという仮説もある。しかし、この仮説も成り立たない。われわれが刺激表面の粗さ・滑らかさを知ろうとするときには、刺激上で指をある程度の速さで移動させながら刺激表面を探索する。例として、30 mm/s の速度で指を動かしながら粒子サイズ 3 μm と 30 μm の刺激の弁別を行う場合を考えてみ

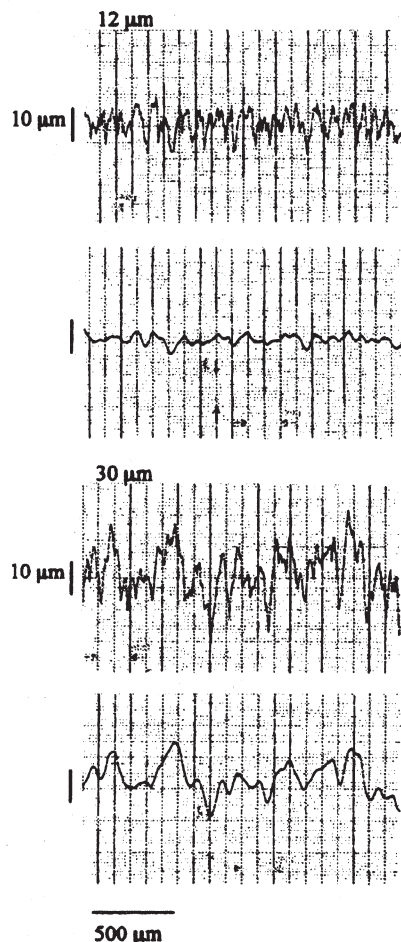


Fig. 2. Cross-section profiles of abrasive papers observed with the contact profile meter (Kosaka, SE-30D) with and without a filter. The top two profiles are the cross sections of 12- μm particle abrasive paper. These two profiles show the same part of the same abrasive paper. The upper of the two shows the profile without a filter. The lower shows the profile passed through a filter. The filter passed waves with wavelengths which were greater than 250- μm . The bottom two profiles are the cross sections of 30- μm abrasive paper. The upper shows the profile without a filter. The lower shows the profile passed through the same filter used in the 12- μm abrasive paper¹²⁾.

よう。3 μm と 30 μm の刺激を、それぞれ波長 3 μm と 30 μm の正弦波で近似すると、3 μm の刺激には 10 kHz、30 μm の刺激には 1 kHz の神経発射が対応する。ところが、皮膚機械受容単位の神経発射上限値は 1 kHz 未満なので、理論的には 3 μm と 30 μm の刺激は区別できないことになる。しかし、実際には 3 μm と 30 μm の刺激の弁別は非常に容易である。従って、触面の微細テクスチャー知覚には神経発射の時系列情報は用いられていないことになる。

皮膚における機械受容単位の分布に基づく空間的情報によって微細テクスチャー弁別が行われているとする仮説もある。しかし、皮膚機械受容単位の密度は最も高密度の手指末節でも 250/cm² 程度であり^{14,15)}、このとき各受容

単位の間は約 600 μm 離れていることになる。これでは 3 μm と 30 μm の刺激を弁別することはできない。機械受容単位の種類によっては、1 本の神経線維に数個以上の機械受容器が接続していることもあり、この場合各機械受容器間の間隔は多少小さくなるが、弁別にはまったく不十分である。もし、機械受容器が非常に規則正しく並んでいれば、神経発射の位相差情報を利用することも可能であるが、実際には機械受容器はそうに配列されていないので位相差情報を利用することはできない。

以上のような仮説が成り立たない状態で、皮膚機械受容単位の能力の範囲内で粗さ・滑らかさ弁別が可能な情報処理機構として、宮岡らは振幅情報仮説を提案した。それは、触覚系が対象表面の凹凸情報のみを用いて微細テクスチャーの弁別を行っているとする仮説である。精密研磨紙の表面凹凸を表面粗さ計で観察した結果は Fig. 2 のようになった。Fig. 2 の上段の 2 つは粒子サイズ 12 μm 、下段の 2 つは粒子サイズ 30 μm の精密研磨紙表面の観察結果である。いずれの粒子サイズについても上側は計測された表面凹凸をそのまま表示し、下側は波長 250 μm のローパスフィルタを通した結果を表示している。双方の上側の波形を見ると、いずれも直径 12 μm あるいは直径 30 μm の粒子が敷き詰められた形にはなっていないことがわかる。精密研磨紙表面は、さまざまな波長成分を含んだ複雑な波としてあらわされている。通常、ヒトの皮膚や神経系は高い周波数成分をカットし、低周波数成分しか利用することができない。しかし、12 μm と 30 μm のそれぞれの粒子サイズについてローパスフィルタを通過した下側の波形をみると、いずれもフィルタを通過した長波長成分に表面凹凸の振幅情報は保存されている。すなわち、精密研磨紙の粒子サイズが小さければ表面凹凸の振幅も小さくなり、粒子サイズが大きくなれば表面凹凸振幅も大きくなる。そこでこの振幅情報を用いれば、触面の微細テクスチャーを弁別することは今まで明らかにされた皮膚機械受容単位能力の範囲内で十分可能である。

本研究では、基本波長より長い波長を含まない表面(回折格子)とさまざまな波長成分を含む表面(精密研磨紙)を刺激として用い、微細テクスチャーの粗さ弁別実験を行い、触覚系がどのようなローパスフィルタ特性を持つか調べることを実験目的とした。また、実験結果に基づき、振幅情報仮説が成り立つかどうか検討することも本実験の目的であった。

なお、本研究では 2 つの実験(実験 1、実験 2)を実施したが、実験中の学習効果による影響をキャンセルするため、実験 1 と実験 2 を同時並行的に実行した。

3. 実験 1

実験 1 の目的は、触覚系のローパスフィルタの特性を調べることであった。そのために、刺激として回折格子を用いた。3 種類の互いに異なった速度で刺激を動かして手指

末節に提示し、微細テクスチャー弁別の心理測定関数を求めた。回折格子は、基本波長成分より長波長の成分を含まないので、基本波長成分がローパスフィルタを通過したとき、はじめて粗さの弁別が可能となる。そこで、実験条件を適切に設定すれば、刺激移動速度が変化するとき、ローパスフィルタ通過限界波長も変わり、それに伴う心理測定関数のパターン変化が観察できるはずであった。

3.1 方法

(1) 被験者： いずれも20歳代の男子大学生5名および大学院生1名が被験者として実験に参加した。被験者はすべて心理物理実験の経験者であった。

(2) 刺激： 刺激には6種類の回折格子を用いた。回折格子はいずれも1辺30mmの正方形で、厚さは10mmであった。回折格子表面には断面が三角波状の溝が刻まれており、公表値から計算した溝の波長は、それぞれ6.7, 13.3, 25.0, 33.3, 50.0, 75.2 μm であった。回折格子をレーザー顕微鏡で観察した結果、これらの計算値が満たされていることを確認した。実験時には、6種類の刺激から2つを選び、刺激装置に被験者から見て上下（遠近）方向に、また刺激移動方向が溝方向と直交するようにセットし、粗さ判断を求めた。

(3) 実験装置： 刺激提示の実験装置として、ステッピングモータ（Oriental Motor : PX534MH-B）とそのコントローラ（Melec : 870V1）を使用した。コントローラはパーソナルコンピュータに接続されており、コンピュータからステッピングモータへ駆動信号を送ることにより刺激の動く速さを制御した。

ステッピングモータには刺激をセットするための刺激固定装置を取り付けた。そしてこれらを、被刺激部位である手掌部を載せるためのアルミニウム製の支持台内に設置した。支持台の中央部には10mm \times 18mmの穴が2つ、互いに穴の中央位置間距離が50mm離れるようにあけてあった。上記のように、2つの穴は、被験者から見て上下（遠近）方向に配列されていた。被験者は穴に指をあてて、穴の直下を通過する刺激に触れ、判断を行った。

(4) 実験手続き： 6種類の刺激から2つを選んで組み合わせる場合、同一刺激を含む重複組み合わせは21種類となる。刺激の提示位置効果をキャンセルするために組み合わせ数を2倍とした結果、すべての組み合わせの数は42種類となった。

粗さ判断に際し、視覚的・聴覚的手がかりをなくすために、被験者はアイマスクを着用し、また、実験室内にはスピーカにより白色雑音を提示した。被験者は、利き手を実験装置の手掌支持台に載せ、支持台中央部の2つの穴に交互に示指を置き、穴の直下を一定速度で移動する刺激に触れて、2つの刺激のうちどちらを粗く感じるかを2肢強制選択法により答えた。また、刺激に触る際に、試行ごとに摩擦の大きさが変化するのを防ぐために、刺激表面にシリ

コンオイル（信越シリコーン、KF-96-10CS）を塗布した。1組の刺激提示時間は最長で約24秒、試行間隔は20秒とした。各組の刺激提示は、被験者の応答が得られ次第打ち切った。また、刺激移動速度は、5mm/s、10mm/s、20mm/sの3種類とした。それゆえ、刺激移動速度が5mm/sの場合、刺激は1判断時間中に最大2往復、10mm/sの場合は最大4往復、20mm/sの場合は最大8往復するように設定した。判断に際して、被験者が2つの刺激のどちらに何回触れるかといったことは制限しなかった。

各被験者は、3種類の刺激移動速度条件とすべての刺激の組み合わせについてそれぞれ8回の実験試行を実施したので、各被験者の全実験試行回数は、 $3 \times 42 \times 8 = 1008$ 回となった。なお、実験中は皮膚感度を落とさないために実験室温度を25~27°Cに保った。

3.2 結果

各被験者の応答を集計し、各標準刺激、各移動速度について心理測定関数を計算した。それらの結果を刺激移動速度条件ごとにグラフ化したものをFig. 3に示す。Fig. 3-(a)は刺激移動速度が5mm/s、Fig. 3-(b)は刺激移動速度が10mm/s、Fig. 3-(c)は刺激移動速度が20mm/sの結果である。いずれの図においても、図中の菱印、四角印などは標準刺激の波長をあらわす。例えば、Fig. 3-(a)の、白菱、白四角、灰三角、灰丸、灰菱、灰四角の各印は標準刺激波長がそれぞれ6.7, 13.3, 25.0, 33.3, 50.0, 75.2 μm の場合の心理測定関数をあらわしている。また、各図の横軸は比較刺激の波長、縦軸は標準刺激より比較刺激の方を粗いと答えた比率である。

Fig. 3-(a), 3-(b), 3-(c)の3つの図を見るとわかるように、刺激の移動速度が5mm/sから20mm/sと速くなるにつれて心理測定関数のパターンが変化していくことがわかる。各図の心理測定関数の左端の、特に白菱印、白四角印を結ぶパターン部分をみると、Fig. 3-(a) (5mm/s)では平坦に近いパターンがわずかに観察されるだけだが、Fig. 3-(b) (10mm/s)では比較刺激波長（横軸）6.7~13.3 μm の部分に平坦部分がはっきりあらわれている。Fig. 3-(c) (20mm/s)では、平坦部分がさらに25 μm にまで延びている。すなわち、刺激速度が速くなると平坦部分が長波長方向に延長するという結果が観察された。

また、刺激移動速度5mm/sでは、標準刺激が6.7 μm （白菱印）の心理測定関数と13.3 μm （白四角）の心理測定関数は互いに重なり合い、他方、標準刺激25~75.2 μm の心理測定関数群とは離れている。しかし、刺激速度が10mm/sになると、標準刺激25 μm の心理測定関数が6.7, 13.3 μm の心理測定関数に接近してくる。さらに、刺激速度20mm/sでは、標準刺激6.7, 13.3, 25 μm の心理測定関数が互いに重なり合い、これに標準刺激33.3 μm の心理測定関数が接近するというパターンが見られた。

3.3 考察

実験1の結果をあらわすFig. 3-(a), 3-(b), 3-(c)からわか

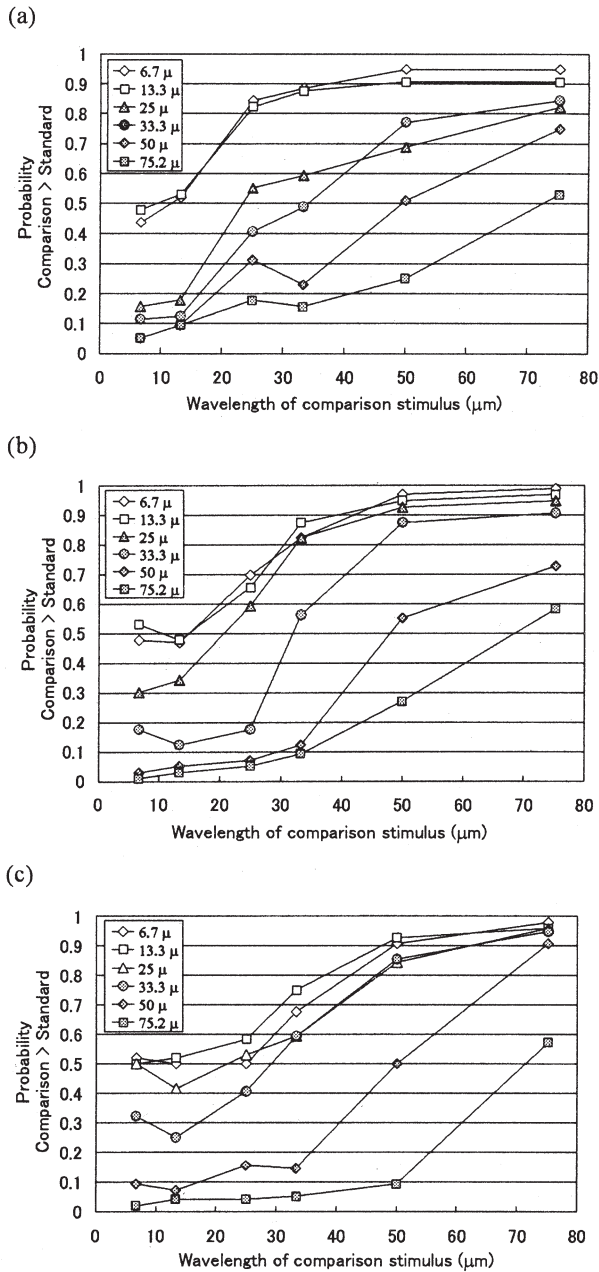


Fig. 3. Psychometric functions based on the data of the diffraction grating discrimination experiment. Moving velocities of stimuli are 5 mm/s, 10 mm/s, and 20 mm/s from top to bottom. The vertical axis in each figure shows the probability that the comparison stimuli were judged rougher than the standard stimuli. The horizontal axis shows the wavelength of comparison stimuli. Each symbol in the figure represents the results of each standard stimulus, respectively. The unit of the values in the legend is micrometers.

るように、刺激の移動速度が変化すると心理測定関数のパターンも変化する。これは何を意味するのであろうか。Fig. 1 の説明部分で述べたように、2 肢強制選択法により判断する場合、標準刺激、比較刺激ともにそのテクスチャーの粗さが絶対閾以下であると、両刺激を区別できないので、心理測定曲線は平坦で比較刺激の方を粗いとする判断

の比率は 0.5 となる。標準刺激値が絶対閾以下で、比較刺激が絶対閾より大きくなると、心理測定関数は上に凸の増加関数となる。この場合、すべての心理測定関数は互いに重なり合う。

さて、Fig. 1 に示したように、標準刺激が粗さ検出の絶対閾を越え、比較刺激が絶対閾以下の場合には、心理測定関数は平坦とはなるが、比較刺激の方を粗いとする比率は、0.5 を下回り、標準刺激表面が粗くなるほど 0 に接近していく。また比較刺激の粗さが絶対閾を越えると、心理測定関数は上に凸の増加関数となる。標準刺激が絶対閾を越えている場合、各心理測定関数パターンは標準刺激の粗さに依存し、それらが異なれば互いに重なることはない。

さて、Fig. 3 を見ると、実験結果が式(2)~(5)を基本的に満たしていることがわかる。刺激移動速度 5 mm/s の場合は、標準刺激 6.7 μm と 13.3 μm の心理測定関数が重なり合い、標準刺激 25 μm の心理測定関数はこれらからかなり離れているので、微細テクスチャー検出の絶対閾は 13.3 μm 付近にあることがわかる (Fig. 3-(a))。刺激移動速度 5 mm/s で刺激波長 13.3 μm の場合、皮膚表面に提示される振動周波数は 376 Hz となり、触覚系ローパスフィルタ通過の上限値は 400 Hz 付近と推測される。

刺激移動速度 10 mm/s の場合、やはり標準刺激 6.6 μm と 13.3 μm の心理測定関数は重なり、標準刺激 25 μm の心理測定関数がこれらに接近している。ここから、微細テクスチャー検出の絶対閾は 13.3 μm と 25 μm の間でかなり 25 μm に近いところにあると推測できる。刺激速度 10 mm/s の場合、刺激波長 13.3 μm と 25 μm で皮膚表面に提示される振動周波数は、それぞれ 752 Hz, 400 Hz となるから、結局ローパスフィルタの通過上限周波数は 400 Hz 以上で、400 Hz にかかなり近い所にあることになる。

刺激移動速度 20 mm/s の場合は、標準刺激波長 6.7, 13.3, 25 μm の心理測定関数が重なり合い、標準刺激 33.3 μm の心理測定関数がそれらに接近している。ここから、微細テクスチャー検出絶対閾は 25 μm と 33.3 μm の間で、33.3 μm にやや近い所にあることになる。刺激移動速度 20 mm/s の場合、刺激波長 25 μm と 33.3 μm で皮膚表面に提示される振動周波数は、それぞれ 800 Hz と 601 Hz であるから、ローパスフィルタ通過の上限周波数は 600 Hz よりやや高周波数の部分に存在することになる。

上記の結果から、触覚系には確かに通過周波数の上限値を決めるローパスフィルタが存在することがわかり、その上限値もおおよそ 400~600 Hz の間にあることが明らかとなった。

4. 実験 2

実験 1 では、触覚系にローパスフィルタが存在することが明らかとなった。実験 2 では振幅情報仮説が成り立つか否かを検討する。実験 2 では、精密研磨紙を刺激として使用し、固定された手指末節表面上で、刺激を 3 種類の互い

に異なった速度で動かして、微細テクスチャー弁別の心理測定関数を測定した。精密研磨紙はその粒子サイズに関わらずさまざまな波長成分を含むため、刺激情報が触覚系のローパスフィルタを通過した後も、粒子サイズに対応した振幅成分を含む。そこで、それらの振幅情報を用いれば非常に小さい粒子サイズでもテクスチャー弁別が可能となるはずである。また、刺激移動速度を変えて、ローパスフィルタを通過できる刺激波長を変化させても、刺激振幅情報を弁別に用いている限り、得られる心理測定関数には変化がないはずと予測された。

4.1 方法

(1) 被験者： 実験1と同一の被験者が実験2にも参加した。

(2) 刺激： 刺激には粒子サイズ1, 3, 9, 12, 30 μm の5種類の精密研磨紙(住友3-M製)を用いた。これらの精密研磨紙を1辺30 mmの正方形にカットし、1辺30 mm, 厚さ10 mmの正方形木材片に貼って実験に用いた。実験時には、5種類の刺激から2つを選んで、刺激装置に被験者から見て上下(遠近)方向にセットし、粗さ判断を求めた。

(3) 実験装置： 実験1と同一の装置を用いて、実験2を実施した。

(4) 実験手続き： 5種類の刺激から2つを選んで組み合わせる場合、同一刺激を含む重複組み合わせは15種類となる。刺激の提示位置効果をキャンセルするために組み合わせ数を2倍とした結果、すべての組み合わせの数は30種類となった。

粗さ判断に際し、視覚的・聴覚的手がかりをなくすためのアイマスク着用、スピーカによる白色雑音提示は、実験1と同様とした。また、被験者が利き手を実験装置の手掌支持台に載せ、示指で刺激に触れて判断する方法や1組の刺激提示時間、試行間隔も実験1と同様とした。実験2においても、刺激移動速度は5 mm/s, 10 mm/s, 20 mm/sの3種類とした。

各被験者は、3種類の刺激移動速度条件とすべての刺激の組み合わせについてそれぞれ5回の実験試行を実施したので、各被験者の全実験試行回数は、 $3 \times 30 \times 5 = 450$ 回となった。なお、実験中は皮膚感度を落とさないために、実験1と同様に実験室温度を25~27°Cに保った。

4.2 結果

実験1と同様の方法で各被験者の応答を集計した。それらを刺激移動速度条件ごとにグラフ化した結果をFig. 4に示す。Fig. 4(a)は刺激移動速度が5 mm/s, Fig. 4(b)は刺激移動速度が10 mm/s, Fig. 4(c)は刺激移動速度が20 mm/sの結果である。いずれの図においても、図中の灰菱、灰四角、灰三角、灰丸、濃灰菱の各印は、標準刺激粒子サイズがそれぞれ1, 3, 9, 12, 30 μm の心理測定関数をあらわす。また、各図の横軸は比較刺激の粒子サイズ、縦軸は標準刺激より比較刺激の方を粗いと答えた比率である。

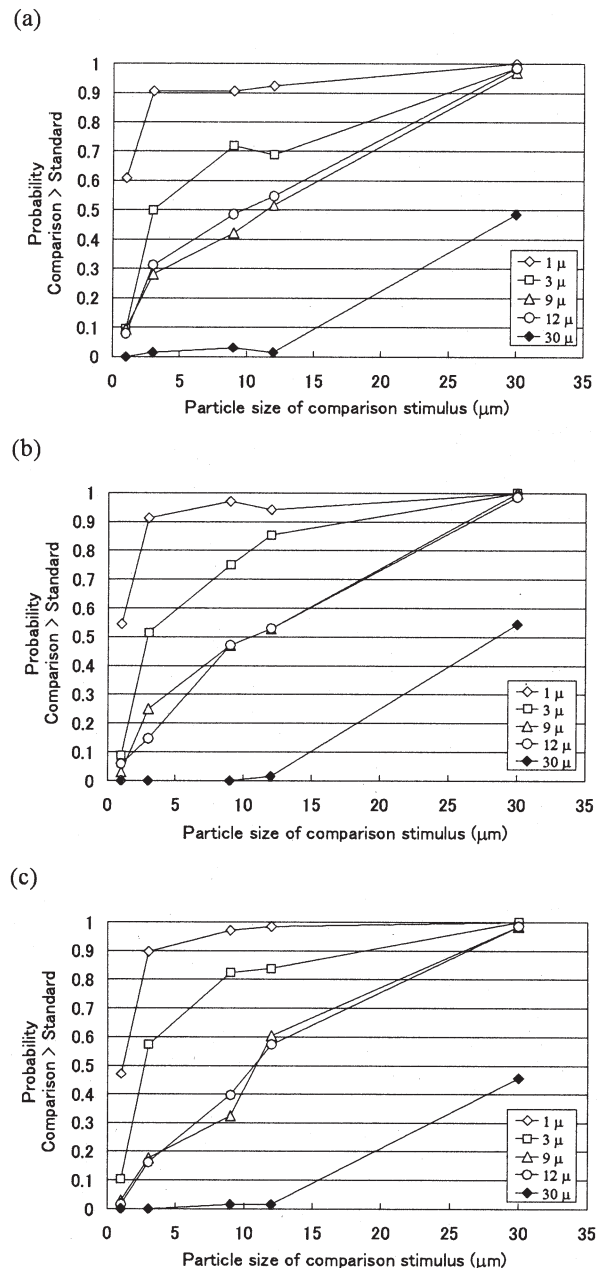


Fig. 4. Psychometric functions based on the data of the fine-surface texture discrimination experiment. Moving velocities of stimuli are 5 mm/s, 10 mm/s, and 20 mm/s from top to bottom. The vertical axis in each figure shows the probability that the comparison stimuli were judged rougher than the standard stimuli. The horizontal axis shows the particle sizes of comparison stimuli. Each symbol in the figure represents the results of each standard stimulus, respectively. The unit of the values in the legend is micrometers.

3つの図を比較してみるとわかるように、刺激の移動速度が変化しているにもかかわらず、同一の標準刺激(例えば粒子サイズ1 μm)で得られた心理測定関数パターンはほとんど変わらなかった。また、刺激速度の変化につれ心理測定関数のパターンが一定方向に変わっていくという実験1で観察された現象も、実験2では観察されなかった。

4.3 考察

精密研磨紙を刺激として用いた場合の微細テクスチャー弁別の心理測定関数は、被験者の指に触れる刺激の移動速度が 5 mm/s から 20 mm/s に変化してもほぼ同一パターンを示した。これは、言い換えれば精密研磨紙の粗さ弁別力が刺激の動く速さに影響されないことを示していた。こうした結果はわれわれが日常的に体験する印象と一致している。われわれが何らかの対象に触って、その表面の粗さ・滑らかさを知ろうとする場合、触る速度をかなり変えても対象の粗さ・滑らかさの印象が大幅に変わってしまうことはない。

ヒトが微細テクスチャーを知覚する場合には、指と刺激表面の間に動きが必要である。また、ヒトの触覚系はローパスフィルタ特性を持っているので、必然的に触覚系に入力される周波数情報には上限値が存在することになる。この制限にも関わらず、Fig. 4 から明らかのように、触覚系は粒子サイズ 1 μm の精密研磨紙表面と粒子サイズ 3 μm の精密研磨紙表面の粗さの違いを弁別できる。指と刺激の間の相対的速度が 30 mm/s なら、3 μm の正弦波は 10 kHz ということになるから、これでは触覚系のローパスフィルタを通過することはできない。結局、実験 1 の結果から、被験者が微細テクスチャー弁別に利用している情報は、周波数がおおよそ 600 Hz 以下でしかも刺激の移動速度に依存しない情報ということになる。この情報を用いて粗さ弁別を行う場合に最も可能性が高いと考えられるのは、刺激の凹凸情報を用いることである。Fig. 2 の説明部分で述べたように、1~40 μm の粒子については、250 μm 以下の波長をカットするフィルタを通過した後でも、粒子サイズが大きくなるほど表面凹凸振幅が大きくなるという単調関係が維持されていた¹²⁾。被験者がローパスフィルタを通過した刺激の凹凸情報を利用して微細テクスチャー弁別を行っているなら、今まで明らかにされてきた触覚系の能力の範囲内で、実験 2 の刺激の粗さの相互弁別は十分可能である。しかも、刺激表面の凹凸情報を用いているなら、その弁別力は、精密研磨紙の場合、刺激移動速度が極端に速かったり遅かったりしない限り、速度に依存せず同じレベルとなるはずである。実験 2 の結果はこの推測を裏付けるものであった。

5. 総合的考察

実験 1 の結果から、ヒトの触覚系はローパスフィルタ特性を示すこと、そしてその通過上限周波数がおおよそ 400~600Hz の間にあることが明らかとなった。また、実験 2 から、刺激の移動速度の遅速にかかわらず精密研磨紙の表面テクスチャー弁別能力には変化が見られないことがわかった。

刺激が回折格子の場合、刺激移動速度が 20 mm/s となると波長 25 μm の刺激の振動はローパスフィルタを通過することができず微細テクスチャーは知覚されなかった。こ

れに対し、刺激が精密研磨紙の場合は、刺激サイズが 1 μm と 3 μm であってもそのテクスチャー弁別は十分可能であった。波長 25 mm の回折格子の全振幅は 10 μm であるから、その凹凸は触覚系が十分検出できる範囲にある。しかし、20 mm/s で指と刺激が相互移動すると、振動周波数がローパスフィルタ通過の上限値を越えてしまうために振幅情報は入力されず、従って知覚されなかった。これに対し、例えば 3 μm の精密研磨紙表面は、Fig. 2 に示したようにさまざまな波長成分を含むために、その情報の一部はローパスフィルタを通過することができた。その結果、フィルタを通過した情報を利用することにより、粒子サイズ 3 μm の刺激のフィルタ通過後の凹凸の全振幅が 3 μm 未満であるにも関わらず、微細テクスチャーを知覚することが可能となった。

本研究の結果から、ヒトが微細テクスチャーを知覚するためには、まず触覚系に入力される情報が触覚系のローパスフィルタを通過できなければならないことが明らかとなった。刺激凹凸振幅が十分皮膚機械受容器の知覚できる大きさであったとしても、振動周波数レベルでフィルタを通過できなければ、その情報は利用されない。また、触覚系のローパスフィルタを通過しさえすれば、刺激振幅がかなり小さくても微細テクスチャーが知覚できる。宮岡の最近の測定では、微細テクスチャー知覚の絶対閾は粒子サイズ 0.8 μm 付近にあることが示されている(未発表データ)。

本研究の結果から、微細テクスチャー知覚を可能にする触覚情報処理メカニズムとして、刺激の振幅情報を利用するなら、現在明らかにされている触覚系の能力の範囲内で微細テクスチャー知覚が可能であることが明らかとなった。回折格子のような特殊な目的のために精密に作られた人工物を除くと、われわれの周囲にある対象の表面は多様な波長成分を含んでいる。しかも、それらに触れるときの指の運動速度も、手指表面の発汗状態も絶えず変化している。このように不安定要素の多い入力条件において、触覚系の微細テクスチャー知覚能力を一定に保つために安定性のある刺激振幅情報を用いるという仮説は、蓋然性がかなり高いと考えられる。

6. 結論

本研究は、触覚系の微細テクスチャー知覚におけるローパスフィルタの特性を調べること、および微細テクスチャー知覚を可能にする機構としての振幅情報仮説の妥当性を検討する目的で実施された。回折格子を刺激として用いた実験の結果、ローパスフィルタが確かに存在すること、実験で得られた心理測定関数のパターンはモデルとして提案されたシミュレーションパターンと基本的に一致すること、またローパスフィルタを通過できる上限周波数が 400~600 Hz の間にあることが明らかとなった。また、精密研磨紙を用いた実験から、微細テクスチャー知覚を可能にする触覚系の情報処理機構として提案された振幅情報

仮説を支持する証拠が得られた。

今後は、本研究を踏まえて、刺激波長範囲を適切に設定し触覚系のローパスフィルタについてさらに正確なデータを得ることが重要と考える。また、本研究で提案したモデルを洗練させ、全範囲で微分可能な関数を得た上で、実験データに基づいてパラメータ値を決定し、ローパスフィルタ通過上限周波数を計算で求めることが望ましい。

振幅情報仮説については、触覚系の情報処理能力からみて可能な他の仮説も考慮しつつ、その成立範囲等についてさらに検討を加えていく必要がある。

謝辞

本研究の実施に当たっては、静岡理科大学学生、樋口貴士君、森下祐一君、木村嘉宏君、小林慎一君、長尾希君の協力を得た。

引用文献

- 1) M. Hollins, "Touch and haptics", In S. Yantis (Ed); *Stevens' handbook of experimental psychology (third edition), Vol. 1: Sensation and perception* (John Wiley & Sons, New York, 2002), pp.585-618.
- 2) M. Hollins, S. Bensmaïa, and R. Risner, "The duplex theory of tactile texture perception", *Proceedings of the Fourteenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*, 1998, 115-120.
- 3) M. Hollins, S. J. Bensmaïa, and S. Washburn, "Vibrotactile adaptation impairs discrimination of fine, but not coarse, textures", *Somatosensory & Motor Research*, **18**(2001), 253-262.
- 4) 宮岡徹, "触覚のモジュール機構", 静岡理科大学紀要, **3**(1994), 85-98.
- 5) D. T. Blake, S. S. Hsiao, and K. O. Johnson, "Neural coding mechanisms in tactile pattern recognition: the relative contributions of slowly and rapidly adapting mechanoreceptors to perceived roughness", *J. Neurosci.*, **17**(1997), 7480-7489.
- 6) C. E. Connor, S. S. Hsiao, J. R. Phillips, and K. O. Johnson, "Tactile roughness: neural codes that account for psychophysical magnitude estimates", *J. Neurosci.*, **10**(1990), 3823-3836.
- 7) C. E. Connor and K. O. Johnson, "Neural coding of tactile texture: comparison of spatial and temporal mechanisms for roughness perception", *J. Neurosci.*, **12**(1992), 3414-3426.
- 8) K. Johnson, "Neural basis of haptic perception", In S. Yantis (Ed); *Stevens' handbook of experimental psychology (third edition), Vol. 1: Sensation and perception* (John Wiley & Sons, New York, 2002), pp.537-583.
- 9) K. O. Johnson and S. S. Hsiao, "Neural mechanisms of tactual form and texture perception", *Annu. Rev. Neurosci.*, **15**(1992), 227-250.
- 10) K. O. Johnson and G. D. Lamb, "Neural mechanisms of spatial tactile discrimination: neural patterns evoked by Braille-like dot patterns in the monkey", *J. Physiol. (London)*, **310**(1981), 117-144.
- 11) K. O. Johnson and J. R. Phillips, "Tactile spatial resolution. I. Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition", *J. Neurophysiol.*, **46**(1981), 1177-1191.
- 12) T. Miyaoaka, T. Mano, and M. Ohka, "Mechanisms of fine-surface-texture discrimination in human tactile sensation", *J. Acoust. Soc. Am.*, **105**(1999), 2485-2492.
- 13) 宮岡徹, "触覚系微細テクスチャー知覚におけるフィルタ特性の検討", 静岡理科大学紀要, **11**(2003), 95-105.
- 14) R. S. Johansson and Å. B. Vallbo, "Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin", *J. Physiol.*, **286**(1979), 283-300.
- 15) Å. B. Vallbo and R. S. Johansson, "Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation", *Human Neurobiol.*, **3**(1984), 3-14.

自由単位半群の biunitary submonoid の syntactic monoid について II

On syntactic monoids of biunitary submonoids of free monoids II

田中 源次郎*

Genjiro TANAKA*

Abstract: This paper is a continuation of the study of Tanaka[10]. We deal with the maximal biprefix code construction which is a natural generalization of group code construction.

記号と諸定義

本論文は文献 [10] の続編である。従って本節を除き、各節の番号は文献 [10] からの続き番号を与える。文献 [10] では群コードの構成に関する拡張を行い、自由単位半群 A^* から完全単純半群 M の 1-添加 M^1 上への morphism があるとき、 M^1 の適当な部分集合 S については $\varphi^{-1}(S)$ が A^* の free submonoid をなし、その基底は極大な biprefix code をなすことを示した。それらの code は完全単純半群の表現に付随するものであるから、completely simple semigroup code と呼ぶことが出来る性質のものである。本論文では、文献 [10] での方法で得ることが出来る code の syntactic monoid を取扱う。使用する用語と記号については、重複を避け論文 [10] を参照することとし、必要最小限の説明に留める。以下に述べる記号 A, G, H , については本論文全体を通して記号の意味を固定して使用する。

A はアルファベット, A^+ は A 上の自由半群, A^* は A 上の自由単位半群とする。 G は群, H は G の部分群とする。以上の記号と意味については論文全体を通して固定して用いる。もし $x, y \in G$ かつ $xy^{-1} \in H$ ならば, $x \equiv y \pmod H$. と書く。

K を $KCHCG$ なる G の部分群とする。 G における H の左剰余類の集合上の右正則表現の核 $\cap_{g \in G} g^{-1}Hg$ と K との共通部分を $K(H)$ で表す。つまり $K(H) = (\cap_{g \in G} g^{-1}Hg) \cap K$.

G 上の構造行列 Σ を持つ $I \times J$ Rees matrix semigroup を $M(G; I, J; \Sigma)$ であらわす。もし $m = \text{Card}(I)$ と $n = \text{Card}(J)$ がともに有限の場合は $M(G; I, J; \Sigma)$ を $M(G; n, m; \Sigma)$ と明示する。

$\varphi : A^* \rightarrow M(G, I, J, \Sigma)^1$ を準同形写像とする。 G の空でない部分集合 S に対し

$$\tilde{S}_{ij} = \{(h; i, j) | h \in S\}, \quad \tilde{S} = \bigcup_{i \in I, j \in J} \tilde{S}_{ij}$$

そして

$$L_\varphi(S) = \varphi^{-1}(\tilde{S}) \cup \{1\}.$$

と定義する。

A^+ から G への写像 $\delta : A^+ \rightarrow G$ を,

$$\varphi(w) = (g; i, j) \text{ のとき, } \delta(w) = g,$$

と定義する。このとき $\varphi(u) = (x; i, j)$ かつ $\varphi(v) = (y; k, l)$ ならば, $\delta(uv) = x\sigma_{jk}y = \delta(u)\sigma_{jk}\delta(v)$ となる。

4. $L_\varphi(H)$ の syntactic monoid

$\varphi : A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$ を上への morphism とする。文献 [10] により, Σ は H 上の行列ならば $L_\varphi(H)$ は A^* の submonoid である。本節では, Σ は H 上の行列の場合, submonoid $L_\varphi(H)$ は A^* の syntactic monoid が完全単純半群となることを示すことが主目的である。

L を A^* の部分集合とする。各 $w \in A^*$ に対し $A^* \times A^*$ の部分集合を次のように定義する；

$$\text{Cont}_L(w) = \{(u, v) | u, v \in A^*, uvw \in L\}.$$

L の syntactic congruence \equiv_L とは次で定義される合同関係である；

$$w \equiv_L w' \iff \text{Cont}_L(w) = \text{Cont}_L(w').$$

商半群 A^* / \equiv_L は L の syntactic monoid と呼ばれる。

$\varphi : A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$ を上への morphism とする。以下 $L = L_\varphi(H)$ の場合について議論する。 $w \in A^*$ の \equiv_L -類は $[w]$ で表す。

群 G 上の行列 Σ の j 行と i 列をそれぞれ \sum_j^R と \sum_i^C で表す。 K を G の部分群とする。もしすべての $i \in I$ に対し, $\sigma_{ji}\sigma_{ii}^{-1} \in K$ ならば, $\sum_j^R \equiv \sum_i^R \pmod K$ と書く。もしすべての $j \in J$ に対し, $\sigma_{ji}\sigma_{jk}^{-1} \in K$ ならば, $\sum_i^C \equiv \sum_k^C \pmod K$ と書く。

群 G 上の行列 Σ のすべての成分で生成される G の部分群を G_Σ で表す。つまり

$$G_\Sigma = \langle \sigma_{ji} | j \in J, i \in I \rangle.$$

群 G 上の $J \times I$ 行列 $\Sigma = (\sigma_{ji})$ は以下を満たすとき H -正規化されていると呼ばれる：

- (1) Σ は H 上の行列である。
- (2) 各 $(i, k) \in I \times I$ に対し, $\sigma_{ti} \equiv \sigma_{tk} \pmod{G_\Sigma(H)}$ を満たすある $t \in J$ が存在する。
- (3) 各 $(j, l) \in J \times J$ に対し, $\sigma_{js} \equiv \sigma_{ls} \pmod{G_\Sigma(H)}$ を満たすある $s \in I$ が存在する。

「 H -正規化された行列」なる概念は著者がはじめて定義導入 ([7]) したものであり一般に馴染みの無いものであるから例を示す。

- 例 4.1. $G_1 = \langle x, y | x^3 = y^2 = (xy)^2 = 1 \rangle$ (3 次対称群),
 $Z_1 = \langle z | z^4 = 1 \rangle$ (位数 4 の巡回群),
 $G = G_1 \times Z_1$ (群としての直積),
 $H = \langle y \rangle \times Z_1$ (G の位数 8 の部分群)

とする. 次の3つの $J \times I$ 行列はすべて H 上の行列であり,

$$G_{\Sigma_i} = \langle y, z^2 \rangle = \langle y \rangle \times \langle z^2 \rangle, \text{ かつ}$$

$$G_{\Sigma_i}(H) = \{1\} \times \langle z^2 \rangle \quad i = 1, 2, 3, \text{ である.}$$

$$(1) \Sigma_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & y \\ 1 & z^2 \end{pmatrix}, \quad (2) \Sigma_2 = \begin{pmatrix} 1 & z^2 & y \\ 1 & y & yz^2 \\ y & yz^2 & y \end{pmatrix},$$

$$(3) \Sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & y & yz^2 \\ 1 & z^2 & yz^2 \\ 1 & yz^2 & y \end{pmatrix}$$

(1) $\sigma_{p1} \equiv \sigma_{q1} \pmod{G_{\Sigma_1}(H)}$, $p, q \in \{1, 2, 3\}$. かつ $\sigma_{11} \equiv \sigma_{12} \pmod{G_{\Sigma_1}(H)}$. 従って Σ_1 は H -正規化された行列である.

(1) のような第1行と第1列がすべて単位元1であるような行列は一般に「正規化されている」と呼ばれる. 正規化された行列 Σ は, G_{Σ} を含む任意の部分群 H について H -正規化された行列である.

(2) $\sigma_{11} \equiv \sigma_{12}, \sigma_{31} \equiv \sigma_{33}, \sigma_{32} \equiv \sigma_{33} \pmod{G_{\Sigma_2}(H)}$,
かつ $\sigma_{13} \equiv \sigma_{33}, \sigma_{22} \equiv \sigma_{32} \pmod{G_{\Sigma_2}(H)}$. 従って Σ_2 は H -正規化された行列である.

(3) 任意の j に対し, $\sigma_{j1}\sigma_{j3}^{-1} \notin G_{\Sigma_3}(H)$, 従って Σ_3 は H -正規化された行列ではない.

命題 4.1. Σ を H -正規化された $J \times I$ 行列とする. $\varphi : A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$ を上への morphism, $w, w' \in A^+$ を $\varphi(w) = (\delta(w); i, j)$ として $\varphi(w') = (\delta(w'); k, l)$ であるような語とする. $w \equiv_{L_{\varphi}(H)} w'$ であるための必要十分条件は次の3条件がなりたつことである;

- (1) $\delta(w) \equiv \delta(w') \pmod{H(H)}$,
- (2) $\sum_i^C \equiv \sum_k^C \pmod{G_{\Sigma}(H)}$,
- (3) $\sum_j^R \equiv \sum_l^R \pmod{G_{\Sigma}(H)}$.

証明. (⇒). Σ は H -正規化されているから, $\sigma_{ti}\sigma_{tk}^{-1} \in G_{\Sigma}(H)$ および $\sigma_{js}\sigma_{ls}^{-1} \in G_{\Sigma}(H)$ となるようなある $t \in J$ と $s \in I$ が存在する.

(1) g を G 中の任意の元とする. φ は全射であるから, ある $u, v \in A^+$ とある $t' \in I, s' \in J$ が存在し $\varphi(u) = (g\sigma_{ti}^{-1}; t', t)$ および $\varphi(v) = (\sigma_{js}^{-1}\delta(w)^{-1}g^{-1}; s, s')$ となる. このとき $\varphi(uwv) = (1; t', s') \in \tilde{H}$ であるから $uwv \in L_{\varphi}(H)$. よって $uw'v \in L_{\varphi}(H)$. 従ってある $\tau_1, \tau_2 \in G_{\Sigma}(H)$ に対し $\delta(uw'v) = g\sigma_{ti}^{-1}\tau_1\sigma_{tk}\delta(w')\sigma_{ls}\sigma_{js}^{-1}\delta(w)^{-1}g^{-1}$
 $= g\sigma_{tk}^{-1}\tau_1\sigma_{tk}\delta(w')\sigma_{ls}\sigma_{ls}^{-1}\tau_2\delta(w)^{-1}g^{-1} \in H$.
 τ_1, τ_2 は G の正規部分群 $H(H)$ の元だから $g\delta(w')\delta(w)^{-1}g^{-1} \in H$. よって $\delta(w')\delta(w)^{-1} \in g^{-1}Hg$. $g \in G$ は任意の元であったから $\delta(w')\delta(w)^{-1} \in H(H)$.

(2) q を J 中の任意の元とし, $\varphi(z) = (1; q', q)$, $z \in A^+$ とする. $zw \equiv_{L_{\varphi}(H)} zw'$ であることと (1) により $\delta(zw)\delta(zw')^{-1} \in H(H)$. よって $\sigma_{qi}\delta(w)\delta(w')^{-1}\sigma_{qk}^{-1} \in H(H)$. $\delta(w)\delta(w')^{-1} \in H(H)$ であり $H(H)$ が G の正規部分群であることより,

$$H(H)\sigma_{qk} = H(H)\sigma_{qi}\delta(w)\delta(w')^{-1} = H(H)\sigma_{qi},$$

つまり $\sigma_{qi}\sigma_{qk}^{-1} \in H(H)$. 従って $\sigma_{qi}\sigma_{qk}^{-1} \in H(H) \cap G_{\Sigma} = G_{\Sigma}(H)$ がすべての $q \in J$ について成り立つ. つまり,

$$\sum_i^C \equiv \sum_k^C \pmod{G_{\Sigma}(H)} \text{ を得る.}$$

(3) p を I 中の任意の元, として $\varphi(z) = (1; p, p')$, $z \in A^+$ とする. $wz \equiv_{L_{\varphi}(H)} w'z$ であることと (1) により

$$\delta(wz)\delta(w'z)^{-1} \in H(H). \text{ つまり } \delta(w)\sigma_{jp}\sigma_{lp}^{-1}\delta(w')^{-1} \in H(H)$$

である. $\delta(w)\delta(w')^{-1} \in H(H)$ より, $\sigma_{jp}\sigma_{lp}^{-1} \in H(H)$ を得る.

(⇐). 逆に (1), (2), (3) が成立すると仮定する.

$\varphi(x) = (\delta(x); p, q)$, $\varphi(y) = (\delta(y); r, s)$, $x, y \in A^+$ とする. 定義により $G_{\Sigma}(H) \subseteq H(H) \subseteq G$ であり $H(H)$ が G の正規部分群であることに注意すると次の導出が成り立つ;

$$\begin{aligned} xwy \in L_{\varphi}(H) &\Rightarrow \delta(x)\sigma_{qi}\delta(w)\sigma_{jr}\delta(y) \in H \\ &\Rightarrow \delta(x)\sigma_{qk}\tau_1 h \delta(w')\sigma_{lr}\tau_2 \delta(y) \in H, \exists \tau_1, \tau_2 \in G_{\Sigma}(H), h \in H(H) \\ &\Rightarrow \delta(x)\sigma_{qk}\delta(w')\sigma_{lr}\delta(y) \in H \Rightarrow \delta(xw'y) \in H \Rightarrow xw'y \in L_{\varphi}(H). \end{aligned}$$

逆の導出も同様に示すことが出来る. 従って $w \equiv_{L_{\varphi}(H)} w'$. 証明終.

monoid M 上の3つの同値関係 $\mathcal{R}, \mathcal{L}, \mathcal{H}$ (Green's relations) を以下のように定義する;

$$\begin{aligned} m\mathcal{R}m' \text{ iff } mM = m'M, \quad m\mathcal{L}m' \text{ iff } Mm = Mm', \\ \mathcal{H} = \mathcal{R} \cap \mathcal{L}. \end{aligned}$$

系 4.2. 命題 4.1 で用いた記号と仮定のもとで次が成立する.

- (1) $[w]\mathcal{R}[w'] \iff \sum_i^C \equiv \sum_k^C \pmod{G_{\Sigma}(H)}$,
- (2) $[w]\mathcal{L}[w'] \iff \sum_j^R \equiv \sum_l^R \pmod{G_{\Sigma}(H)}$,
- (3) $[w]\mathcal{H}[w'] \iff \sum_i^C \equiv \sum_k^C \pmod{G_{\Sigma}(H)}$ かつ $\sum_j^R \equiv \sum_l^R \pmod{G_{\Sigma}(H)}$.

証明. (1) (⇒). もし $[w]\mathcal{R}[w']$ ならば, ある $u \in A^*$ に対し $[w'] = [w][u]$ である. つまり, $w' \equiv_{L_{\varphi}(H)} wu$ となっている. $\varphi(w) = (\delta(w); i, j)$ かつ $\varphi(w') = (\delta(w'); k, l)$ より, ある $s \in J$ について $\varphi(wu) = (\delta(wu); i, s)$ となる. 従って, 命題 4.1 の (2) により, $\sum_i^C \equiv \sum_k^C \pmod{G_{\Sigma}(H)}$ が成立する.

(⇐). $\sum_i^C \equiv \sum_k^C \pmod{G_{\Sigma}(H)}$ と仮定する. φ が全射であることから, $\varphi(u) = (\sigma_{ji}^{-1}\delta(w)^{-1}\delta(w'); t, l)$ であるようなある $u \in A^+$ が存在する. $\varphi(wu) = (\delta(w'); i, l)$ であるから $\delta(wu) = \delta(w')$. 従って wu と w' は命題 4.1 の条件 (1)-(3) を満たす. よって $wu \equiv_{L_{\varphi}(H)} w'$ を得る. 同様に, $\varphi(v) = (\sigma_{lt}^{-1}\delta(w')^{-1}\delta(w); t, j)$ であるようなある $v \in A^*$ に対し, $w \equiv_{L_{\varphi}(H)} w'v$ であることが示せる. よって $[w]\mathcal{R}[w']$. (2), (3) の証明は (1) の右-左双対なので省略する. 証明終.

命題 4.3. Σ を群 G の部分群 H 上の行列とする. $\varphi : A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$ が上への morphism ならば, $L_{\varphi}(H)$ の syntactic monoid の自明でない \mathcal{H} -class は剰余群 $G/H(H)$ と同形である.

証明. [10] の命題 3.6 により, Σ は H -正規化されていると仮定してよい. $U = \{g_{\lambda} | \lambda \in \Lambda\}$ を G における H の右剰余類の代表系とする. 各 $g_{\lambda} \in U$ に対し, $\varphi(w_{\lambda}) = (g_{\lambda}; 1, 1)$ であるような $w_{\lambda} \in A^*$ が存在する. $G_{11} = \{[w_{\lambda}] | \lambda \in \Lambda\}$ とおく. すると, 系 4.2 により, 集合 G_{11} はある \mathcal{H} -class \mathcal{H}_{11} に含まれる.

$G_{11} = \mathcal{H}_{11}$ であることを示す. $[w] \in \mathcal{H}_{11}$ かつ $\varphi(w) = (g; i, j)$ とすると, $[w]\mathcal{H}[w_{\lambda}]$. 従って, 系 4.2 により,

$$\sum_i^C \equiv \sum_1^C \pmod{G_{\Sigma}(H)} \text{ かつ } \sum_j^R \equiv \sum_1^R \pmod{G_{\Sigma}(H)}.$$

よって, $g \in H(H)g_{\mu}$ であるような, ある w_{μ} に対し, $w \equiv_{L_{\varphi}(H)} w_{\mu}$. よって $[w] = [w_{\mu}] \in G_{11}$, よって $\mathcal{H}_{11} \subseteq G_{11}$. 従って $\mathcal{H}_{11} = G_{11}$ をうる.

対応 $\theta : G_{11} \rightarrow G/H(H)$ を次で定義する.

$$\theta([w]) = \sigma_{11}\delta(w)H(H).$$

もし $w \in [w_\lambda]$ ならば, $\delta(w)H(H)=\delta(w_\lambda)H(H)$, よって $\sigma_{11}\delta(w)H(H)=\sigma_{11}\delta(w_\lambda)H(H)$. 従って θ の定義は確定している (well-defined である). 命題 4.1 により, θ は全単射である. $u \in [w_\lambda]$, $v \in [w_\mu]$, $\varphi(u)=(\delta(u); i, j)$, $\varphi(v)=(\delta(v); k, l)$ とする. 命題 4.1 のより, ある $x, y \in G_\Sigma(H)$ に対し, $\sigma_{jk}=x\sigma_{j1}$, $\sigma_{j1}=y\sigma_{11}$ である. xy が正規部分群 $H(H)$ の元であることに注意すれば,

$$\begin{aligned}\sigma_{11}\delta(w)H(H) &= \sigma_{11}g_\lambda\sigma_{jk}g_\mu H(H) \\ &= \sigma_{11}g_\lambda xy\sigma_{11}g_\mu H(H) = \sigma_{11}g_\lambda\sigma_{11}g_\mu H(H).\end{aligned}$$

よって $\theta([w_\lambda][w_\mu])=\theta([w_\lambda])\theta([w_\mu])$ となり, G_{11} は $G/H(H)$ に同形である. 証明終.

命題 4.4. H を群 G の部分群, Σ を H -正規化された行列とする. $\varphi: A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$ を上への morphism とすると, 次の 3 条件は同値である.

- (1) $L_\varphi(H)$ の基底は group code である.
- (2) $1 \in A^*$ の $\equiv_{L_\varphi(H)}$ -class $[1]$ は一元集合ではない.
- (3) すべての $i, k \in I$ に対し, $\sum_i^C \equiv \sum_k^C \pmod{G_\Sigma(H)}$ が成り立つ. そして, すべての $j, l \in J$ に対し, $\sum_j^R \equiv \sum_l^R \pmod{G_\Sigma(H)}$ が成り立つ.

証明. (1) \Rightarrow (2). $L_\varphi(H)$ の syntactic monoid は群である. $w \in A^+$, $\varphi(w)=(\sigma_{ji}^{-1}; i, j)$ とする. $\varphi(w^2)=\varphi(w)$ であるから, 命題 4.1 により $[w^2]=[w]$. 群は唯一つの中等元を持つから, $[1]=[w]$.

(2) \Rightarrow (3). $w \in [1]$, $\varphi(w)=(\delta(w); i, j)$ とする. 任意の $(g; k, l)$ に対し, $\varphi(u)=(g; k, l)$ であるような, ある $u \in A^*$ が存在する. $[uw]=[wu]=[u]$ かつ

$$\varphi(uw)=(g\sigma_{ji}\delta(w); k, j), \quad \varphi(wu)=(\delta(w)\sigma_{jk}g; i, l),$$

であるから, 命題 4.1 により,

$$\sum_i^C \equiv \sum_k^C \pmod{G_\Sigma(H)}, \quad \sum_j^R \equiv \sum_l^R \pmod{G_\Sigma(H)}$$

を得る.

(3) \Rightarrow (1). 系 4.2 により, 任意の $w, w' \in A^+$ について $[w]\mathcal{H}[w']$. よって, すべての $[w], w \in A^+$, は同じ \mathcal{H} -class に属している. G_{11} を命題 4.3 の証明中の G_{11} と同じ集合とする. $1 \in A^*$ について, $[1] \in G_{11}$ であることを示す. $w \in A^*$ を $\varphi(w)=(\sigma_{11}^{-1}; 1, 1)$ であるような元とする. $(u, v) \in \text{Cont}_{L_\varphi(H)}(1)$ とすると, 次の場合が考えられる.

(i) $u=v=1$, (ii) $u=1, v \in A^+$, (iii) $u \in A^+, v=1$, (iv) $u, v \in A^+$.

(i) の場合, $w \in L_\varphi(H)$ だから,

$$(1, 1) \in (\text{Cont}_{L_\varphi(H)}(1) \cap \text{Cont}_{L_\varphi(H)}(w))$$

となる.

(ii) の場合, $L_\varphi(H)$ は biunitary submonoid である ([10]. 命題 3.3) から,

$$1 \cdot v \in L_\varphi(H) \iff 1 \cdot w \cdot v \in L_\varphi(H).$$

(iv) の場合. $\varphi(u)=(\delta(u); i, j)$, $\varphi(v)=(\delta(v); k, l)$ とする. 条件 (3) より, ある $x, y, z \in G_\Sigma(H)$ について

$$\sigma_{11}=x\sigma_{j1}, \quad \sigma_{11}=y\sigma_{1k}, \quad \sigma_{jk}=z\sigma_{11}.$$

x, y and z が正規部分群 $H(H)$ の元であることに注意すれば,

$$(u, v) \in \text{Cont}_{L_\varphi(H)}(1)$$

$$\iff \delta(u)\sigma_{jk}\delta(v) \in H \iff \delta(u)z\sigma_{11}\delta(v) \in H$$

$$\iff \delta(u)\sigma_{11}\delta(v) \in H \iff \delta(u)\sigma_{11}\sigma_{11}^{-1}\sigma_{11}\delta(v) \in H$$

$$\iff \delta(u)x\sigma_{j1}\sigma_{11}^{-1}y\sigma_{1k}\delta(v) \in H \iff \delta(u)\sigma_{j1}\sigma_{11}^{-1}\sigma_{1k}\delta(v) \in H$$

$$\iff \delta(uwv) \in H \iff (u, v) \in \text{Cont}_{L_\varphi(H)}(w).$$

従って, $\text{Cont}_{L_\varphi(H)}(1) = \text{Cont}_{L_\varphi(H)}(w)$, よって $[1] \in G_{11}$. \square

まり $L_\varphi(H)$ の syntactic monoid は G_{11} である. 上への morphism $\theta: A^* \rightarrow G/H(H)$ を $\theta(w)=H(H)\sigma_{11}\delta(w)$ で定義すると, $L_\varphi(H)=\theta^{-1}(H/H(H))$ となり, (1) が成り立つ. 証明終.

系 4.5. H を群 G の部分群, Σ を H 上の $J \times I$ 行列, そして

$$\varphi: A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$$

を上への morphism とする. もし $\text{Card}(I)=1$ または $\text{Card}(J)=1$ ならば, $L_\varphi(H)$ の基底は group code である.

証明. $\text{Card}(I)=1$ と仮定する. 命題 3.6 により, $\Sigma=(\sigma_{j1}), j \in J$, は H -正規化されていると仮定してよい. すべての $j, l \in J$ について $\sigma_{j1}\sigma_{l1}^{-1} \in G_\Sigma(H)$ であるから, 命題 4.4 により $L_\varphi(H)$ の基底は group code である. 証明終.

命題 4.6. H を群 G の部分群, Σ を H -正規化された行列, $\varphi: A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$ を上への morphism とする. もし G_Σ または H が G の正規部分群ならば, $L_\varphi(H)$ の基底は group code である.

証明. もし G_Σ が G の正規部分群ならば, 任意の $g \in G$ に対し, $G_\Sigma = g^{-1}G_\Sigma g \subseteq g^{-1}Hg$ が成り立つので, 任意の $g \in G$ に対し $G_\Sigma \subseteq g^{-1}Hg$. よって $G_\Sigma \subseteq H(H)$, よって $G_\Sigma(H) = H(H) \cap G_\Sigma = G_\Sigma$.

もし H が G の正規部分群ならば, $H(H) = H$. 従って, $G_\Sigma(H) = H(H) \cap G_\Sigma = G_\Sigma = H \cap G_\Sigma = G_\Sigma$. いずれにしても, $G_\Sigma(H) = G_\Sigma$. 従って, 任意の $\sigma_{ji}, \sigma_{lk} \in G_\Sigma$ について, $\sigma_{ji}\sigma_{lk}^{-1} \in G_\Sigma(H)$. よって命題 4.4 の条件 (3) が成り立つ. 従って $L_\varphi(H)$ の基底は group code である. 証明終

命題 4.7. Σ を H 上の $J \times I$ 行列とし,

$$\varphi: A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$$

を上への morphism とする. もし $G/H(H)$ が可換群ならば, $L_\varphi(H)$ の基底は group code である.

証明. [10, 命題 3.6] により, Σ は H -正規化された行列と仮定してよい. もし $G/H(H)$ が可換ならば, $H/H(H)$ は $G/H(H)$ の正規部分群である. よって H は G の正規部分群である. 命題 4.6 により, $L_\varphi(H)$ は group code である. 証明終.

系 4.8. Σ を H 上の $J \times I$ 行列, $\varphi: A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$ を上への morphism とする. もし G が可換群ならば, $L_\varphi(H)$ の基底は group code である.

証明. 略.

ここで, group code についての注意を述べておく. G を群, $1_G \in G$ をその単位元とする.

$$\varphi: A^* \rightarrow G, \quad \varphi(1) = 1_G$$

を上への準同型写像とする (morphism). G の部分群 H に対し $L_H = \varphi^{-1}(H)$ と置く. L_H は A^* の free submonoid をなす. その基底 (極小生成系)

$$C = (L_H - \{1\}) - (L_H - \{1\})^2$$

は A 上の code をなす. このような群と上への morphism を用いて得ることが出来る code を group code と呼んだ. G の 1 添加 G^1 を考える. G^1 はもはや群ではない. 単なる monoid である. $\varphi(1) = 1$, $\eta|_A = \varphi|_A$ で定義する.

$$L_\eta(H) = \eta^{-1}(H) \cup \{1\}$$

と置くと, $A/\equiv_{L_H} \cong A/\equiv_{L_\eta(H)}$. 群として同型. となる. $L_\eta(H) - \{1\} = L_H - \{1\}$ であるから, $L_\eta(H)$ と L_H の基底は一致する. 従って, group code は群を用いなくとも得ることが出来る.

さらに, 次の例は A^* から, 群の 1 添加ではない完全単純半群の 1 添加の上への morphism によって group code が出現する例である.

例 4.2. $A = \{a, b\}$, $G = \langle x, y \mid x^3 = y^2 = (xy)^2 = 1 \rangle$, 3 次対称群とする. $H = \langle y \rangle$, 位数 2 の部分群, とする.

$$\Sigma = \begin{pmatrix} y & y \\ y & y \end{pmatrix}.$$

$\varphi: A^* \rightarrow M(G; 2, 2; \Sigma)^1$ を次で定義する.

$$\varphi(a) = (x : 1, 1), \varphi(b) = (x^2 : 2, 2).$$

すると, $\varphi(a^{2m}) = (y : 1, 1)$, $m \geq 1$, $\varphi(a^{2n+1}) = (x : 1, 1)$, $n \geq 0$,
そして,

$\varphi(b^{2m}) = (y : 2, 2)$, $m \geq 1$, $\varphi(b^{2n+1}) = (x^2 : 2, 2)$, $m \geq 0$,
である.

$$\varphi(ab) = (x^2y : 1, 2), \varphi(a^2b) = (x^2 : 1, 2),$$

$$\varphi(aba) = (1_G : 1, 1), \varphi(a^2ba) = (x^2y : 1, 1),$$

$$\varphi((a^2ba)^2) = (xy : 1, 1), \varphi(a^2ba \cdot aba) = (x^2 : 1, 1),$$

従って, $\varphi(a)$ と $\varphi(b)$ で生成される部分半群 $\langle \varphi(a), \varphi(b) \rangle$ は集合 $(G; 1, 1)$ を含む. 従って, $(G; 1, 1)(x^2; 2, 2) = (Gyx^2; 1, 2) = (G; 1, 2)$ を含む. 同様にして, $\langle \varphi(a), \varphi(b) \rangle$ は $(G; 2, 1)$, $(G; 2, 2)$ を含み, φ は上への写像である. $G_\Sigma(H) = \{1_G\}$ である. 命題 4.4 の (3) により, $L_\varphi(H)$ の基底は group code である. このことを具体的に見てみる.

$$\varphi(ab^{2n+1}a) = (y : 1, 1), \varphi(ab^{2n}a) = (1_G : 1, 1), n \geq 0.$$

$$\varphi(ba^{2n+1}b) = (1_G : 2, 2), \varphi(ba^{2n}b) = (y; 2, 2), n \geq 0.$$

従って, $L_\varphi(H)$ の基底は $C = ab^*a + ba^*b$ である.

次の表で与えられる遷移関数を持つオートマトン

$$A = (\{1, 2, 3\}, \{a, b\}, \delta, 1, \{1\})$$

を考える. (表は $\delta(1, a) = 2$, のように読む)

δ	1	2	3
a	2	1	3
b	3	2	1

このオートマトンは $L_\varphi(H) = C^*$ を受理する. その syntactic monoid は明らかに 3 次対称群である.

半群 S ($|S| > 1$ とする) が S 以外にイデアルをもたないとき, S は単純であるという. S が単純であって極小右イデアル, 極小左イデアルをもつとき, S を完全単純半群という. Rees matrix semigroup は完全単純半群であり, 逆に完全単

純半群は Rees matrix semigroup で表現されることはよく知られた事実である.

集合 I 上の同値関係 \approx_C を $i, k \in I$ に対し

$$i \approx_C k \iff \sum_i^C \equiv \sum_k^C \pmod{G_\Sigma(H)}$$

で定義する. I' を I 上の同値関係の \approx_C の代表系とする. $[i]_C$ で $i \in I'$ の \approx_C -類を表す. 同様に, J 上の同値関係 \approx_C を $j, l \in J$ に対し

$$j \approx_R l \iff \sum_j^R \equiv \sum_l^R \pmod{G_\Sigma(H)}$$

で定義する. J' を J 上の同値関係 \approx_R の代表系とする. $[j]_R$ で $j \in J'$ の \approx_R -類を表す.

もし $[u], [v] \in A^*/\equiv_{L_\varphi(H)}$, $u, v \in A^+$, であつ
 $\varphi(u) = (x; i, j)$, $\varphi(v) = (y; k, l)$
ならば, 命題 4.1 により,

$$[u] = [v] \iff xy^{-1} \in H(H), i \approx_C k, j \approx_R l.$$

次の命題は $A^*/\equiv_{L_\varphi(H)}$ は, group code でなければ, 完全単純半群の 1 添加になっていることを示す. G が有限群無限群であることを問わず, また添え字集合 I や J が有限無限を問わず命題は成立することに注意すべきである. なぜならば, G.Lallement and C. Reis[7] により, G, I, J の全てが有限の場合の全ての "elementary codes" の構成法が与えられている. しかし, 例えば G が無限群の場合はいかようにして "elementary codes" を構成するかはこれまでほとんど知られていなかった. 僅かに中畑 [6] の構成例があるくらいである. 本研究により code C が稠密でなければ, C はすべて上への morphism $\varphi: A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$

命題 4.9. Σ は H -正規化された行列で,

$$\varphi: A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$$

は上への morphism とする. このとき $A^*/\equiv_{L_\varphi(H)}$ は群であるか, または完全単純半群に 1 添加したものである.

証明. $S' = A^*/\equiv_{L_\varphi(H)}$ とおく. S' が群でないとする. すると, $[1] \in S'$, $1 \in A^*$ は一元集合である. したがって, 任意の $w_1, w_2 \in A^+$ について, $[w_1][w_2] \in S' - \{[1]\}$. 従って $S = S' - \{[1]\}$ は S' の部分半群をなす. S が完全単純半群であることを示す.

$M \subseteq S$ を S の任意のイデアルとする. はじめに $M = S$ を示す. $[w] \in M$, $\varphi(w) = (x; i, j)$, を任意の元とする. $[u] \in S$, $\varphi(u) = (y; p, s)$, も任意の元とする. φ は全射だから, $\varphi(v_1) = (\sigma_{qi}^{-1}; p, q)$, $\varphi(v_2) = (\sigma_{jr}^{-1}x^{-1}y; r, s)$ となる $v_1, v_2 \in A^+$ が存在する.

$\varphi(v_1 w v_2) = (\sigma_{qi}^{-1}; p, q)(x; i, j)(\sigma_{jr}^{-1}x^{-1}y; r, s)$
 $= (y; p, s) = \varphi(u)$. よって $[v_1][w][v_2] \in [v_1]M[v_2] \subseteq M$. よって $S \subseteq M$, つまり, $M = S$. よって S は単純である. つぎに,

$$M_i = \{[w] \in S \mid \varphi(w) = (\delta(w); k, l), p \approx_C i\}$$

とおく. M_i が S の極小右イデアルが存在することを示す.

$[u_1], [u_2] \in M_i$, $\varphi(u_1) = (\delta(u_1); k, l)$, $\varphi(u_2) = (\delta(u_2); p, q)$ ならば, $k \approx_C i$, $p \approx_C i$ である. $\varphi(u_1 u_2) = (\delta(u_1 u_2); k, q)$, $k \approx_C i$ より, $[u_1][u_2] \in M_i$. つまり M_i は部分半群をなす.

任意の $[u] \in M_i$, $\varphi(u) = (\delta(u); k, l)$ と任意の $[v] \in S$,

$\varphi(v) = \delta(v; s, t)$ に対し, $\varphi(uv) = (\delta(u_1v); k, t)$. $k \approx_C i$, より $[uv] \in M_i$, つまり $M_i[v] \subseteq M_i$. したがって, M_i は右イデアルである. つぎに M_i が極小右イデアルであることを示す. $M \subseteq S$ を $M \subseteq M_i$ なる S の右イデアルとする. 任意の $[v] \in M$, $\varphi(v) = (\delta(v); s, t)$ に対し, $\varphi(w) = (\sigma_{ip}^{-1}\delta(v)^{-1}\delta(u); p, l)$ なる $u \in A^+$ が存在する. よって, $\varphi(vw) = (\delta(u); s, l)$. $[v] \in M \subseteq M_i$ より, $s \approx_C i \approx_C k$. よって $[vw] = [u]$. よって, $[u] \in M[w] \subseteq M$. 従って, $M_i \subseteq M$, つまり $M = M_i$. よって M_i は極小右イデアルである. 同様に, $N_j = \{[w] \in S \mid \varphi(w) = (\delta(w); k, l), l \approx_C j\}$ は S の極小左イデアルであることが示せる. 証明終

$\Sigma' = (H(H)\sigma_{ji})$ を $G/H(H)$ 上の $J' \times I'$ 行列とする. もし $A^* / \equiv_{L_\varphi(H)}$ が群でなければ, 上への morphism $\theta : A^* / \equiv_{L_\varphi(H)} \rightarrow M(G/H(H); I', J'; \Sigma')^1$ を次で定義する. $\theta([1])=1, w \in A^+$ に対しては, $\varphi(w)=(x; i, j), i \in [i']_C, j \in [j']_R$ のとき $\theta([w]) = (H(H)x; i', j')$.

もし $v \in [w], \varphi(u)=(y; k, l)$ ならば, $xy^{-1} \in H(H), k \in [i']_C = [i']_C, l \in [j']_R = [j']_R$ である. このとき, $\theta([v]) = (H(H)y; i', j') = (H(H)x; i', j') = \theta([w])$ となり, θ の定義は確定している. $[w'] \in A^* / \equiv_{L_\varphi(H)}, \varphi(w')=(z; p, q)$ について $\theta([w']) = \theta([w])$ とすると, $xz^{-1} \in H(H), p \in [i']_C = [i']_C, q \in [j']_R = [j']_R$ である. 従って, $[w'] = [w]$ であるから θ は単射である. 任意の $(H(H)x; i', j') \in M(G/H(H); I', J'; \Sigma')$ に対し, $\varphi(w)=(x; i', j')$ となる $w \in A^+$ を考えれば, $\theta([w]) = (H(H)x; i', j')$ であるから, θ は全射である. $\varphi(u_1) = (z_1; p, q), p \in [p']_R, q \in [q']_C, \varphi(u_2) = (z_2; r, s), r \in [r']_R, s \in [s']_C$ とする. $\theta([u_1])\theta([u_2]) = (H(H)z_1; p', q')(H(H)z_2; r', s') = (H(H)g; p', s')$, ここで $g = z_1\sigma_{q'r'}z_2$. 一方, $\varphi(u_1u_2) = (z_1\sigma_{qr}z_2; p, s)$. $r \approx_C r'$ より, $\sigma_{q'r'}\sigma_{q'r}^{-1} \in G_\Sigma(H)$. $q' \approx_R q$ より, $\sigma_{q'r}\sigma_{q'r}^{-1} \in G_\Sigma(H)$. 従って, $(\sigma_{q'r'}\sigma_{q'r}^{-1})(\sigma_{q'r}\sigma_{q'r}^{-1}) = \sigma_{q'r'}\sigma_{q'r}^{-1} \in G_\Sigma(H)$. よって, $\sigma_{q'r'} = h\sigma_{qr}, h \in H(H)$. 従って, $H(H)g = H(H)z_1\sigma_{qr}z_2$. 従って, $\theta([u_1])\theta([u_2]) = \theta([u_1][u_2])$ となり, θ は半群としての同形写像である. 以上により, 次の命題が証明された..

命題 4.10. Σ は H -正規化された行列で,

$$\varphi : A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$$

は上への morphism とする. もし $A^* / \equiv_{L_\varphi(H)}$ が群でないならば, $A^* / \equiv_{L_\varphi(H)}$ は $M(G/H(H); I', J'; \Sigma')^1$ に同形である.

$M(G/H(H); I', J'; \Sigma')$ は $M(G; I, J; \Sigma)$ と H で決定される. つまり, $M(G/H(H); I', J'; \Sigma')^1$ の構成は φ によらない. 従って, 命題 4.10 により, もし φ と ψ が A^* から $M(G; I, J; \Sigma)^1$ の上への morphism ならば, $A^* / \equiv_{L_\varphi(H)}$ と $A^* / \equiv_{L_\psi(H)}$ は同形である.

以下に述べる命題 4.11 の証明には次の結果 ([1,p.264]) が必要である; もし X が thin maximal biprefix code であり $A=(Q, A, \pi, 1, \{1\})$ が X^* を認識する可移オートマトンならば

- (1) すべての $w \in A^*$ に対し, $1 \in \pi(Q, w)$,
- (2) すべての $w \in A^*$ に対し, 誘導式 $[\pi(s, w) = \pi(1, w) \implies s = 1]$ が成り立つ.

命題 4.11 X を thin maximal biprefix code, A を X^* を認識する可移オートマトンとする. もし transition semigroup $T(A^+)$ が完全単純半群ならば, $X^* = L_\varphi(H)$ を満たすような,

ある完全単純半群 $M(G; I, J; \Sigma)$, と群 G のある部分群 H とある上への morphism $\varphi : A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$ が存在する.

証明. $A=(Q, A, \pi, 1, \{1\})$ を X^* を認識する可移オートマトンとする. $\{R_i \mid i \in I\}$ と $\{L_j \mid j \in J\}$ をそれぞれ $T(A^+)$ の \mathcal{R} -類と \mathcal{L} -類の集合とする. さらに, r_i を $R_i \cap L_1, i \in I$ のべき等元, q_j を $R_1 \cap L_j, j \in J$ のべき等元とする, ここで $q_1=r_1=e \in R_1 \cap L_1$ とする. $J \times I$ 行列 Σ を $\Sigma = (q_j r_i)$ と定義する. Σ は群 $G=L_1 \cap R_1$ 上の行列である. H を G における 1 の固定部分群とする. つまり $H=\{h \in G \mid (1)h=1\}$ とする. 任意のべき等元 $q \in T(A^+)$, について, $(1')q=1, 1' \in Q$, とすると; $(1)q = (1')q^2 = (1')q = 1$ であるから, $q_j r_i$ は 1 を固定する, つまり $q_j r_i \in H$. 従って, Σ は H 上の行列である. 対応 $\theta : M(G; I, J; \Sigma) \rightarrow T(A^+)$ を $\theta(g; i, j) = r_i g q_j$ で定義する. θ は $M(G; I, J; \Sigma)$ から $T(A^+)$ の上への同形写像である (文献 [2,p.92]).

対応 $\varphi : A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$ を, もし $a \in A$ かつ $\pi_A(a) \in R_k \cap L_l$ ならば,

$$\varphi(a) = (e\pi_A(a)e; k, l)$$

で定義する. 任意の $u \in A^+, \pi_A(u) \in R_i \cap L_j$ に対し $\varphi(u) = (e\pi_A(u)e; k, l)$ であることを, u の長さについての帰納法で示す. $\pi_A(w) \in R_i \cap L_j$ に対し $\varphi(w)=(e\pi_A(w)e; i, j)$ が成り立つと仮定する. もし $a \in A, \pi_A(a) \in R_k \cap L_l$ ならば $\varphi(wa)=(e\pi_A(w)eq_j r_k e\pi_A(a)e; i, l)$. $eq_j=q_j$ and $r_k e = r_k$ であるから,

$$e\pi_A(w)eq_j r_k e\pi_A(a)e = e\pi_A(w)q_j r_k \pi_A(a)e.$$

$\pi_A(w) \in R_i \cap L_j$ と $\pi_A(a) \in R_k \cap L_l$ より, $\pi_A(w)q_j = \pi_A(w)$ かつ $r_k \pi_A(a) = \pi_A(a)$. よって,

$\varphi(wa)=(e\pi_A(wa)e; i, l)$ かつ $\pi_A(w)\pi_A(a) \in (R_i \cap L_j)(R_k \cap L_l) = R_i \cap L_l$. よって, もし $u \in A^+, \pi_A(u) \in R_i \cap L_j$ ならば $\varphi(u)=(e\pi_A(u)e; i, j)$ であることが示された.

つぎに φ が上への写像であることを示す. S を $\{\varphi(a) \mid a \in A\}$ で生成される $M(G; I, J; \Sigma)$ の部分半群とする. もし $e = \pi_A(u) \in R_1 \cap L_1, u = b_1 b_2 \cdots b_m, b_t \in A, 1 \leq t \leq m$ ならば, ある $j' \in J$ and $k' \in I$ に対し, $\pi_A(b_1) \in R_1 \cap L_{j'}, \pi_A(b_m) \in R_{k'} \cap L_1$ であり,

$$\varphi(u) = (e\pi_A(u)e; 1, 1) = (e; 1, 1) \in S.$$

各 $\pi_A(w) \in T(A^+)$ について, $\varphi(uwu) = (e\pi_A(w)e; 1, 1) \in S$ がなりたつから, $(G : 1, 1) = (eT(A^+)e; 1, 1) \subseteq S$. $\pi_A : A^* \rightarrow T(A)$ が上への写像であるから, 各 $i \in I$ と各 $j \in J$ に対し $x, y \in A, \pi_A(x) \in R_i, \pi_A(y) \in L_j$ であるような $x, y \in A$ が存在する. このとき, ある $t \in J$ とある $s \in I$ について, $\varphi(x) = (e\pi_A(x)e; i, t), \varphi(y) = (e\pi_A(y)e; s, j)$. このことと $eT(A^+)e$ が群であるという事実より, $e\pi_A(x)e \cdot eT(A^+)e \cdot e\pi_A(y)e = eT(A^+)e$ つまり $\varphi(x)(G; 1, 1)\varphi(y) = (G; i, j) \subseteq S$. をうる. これは φ が上への写像であることを意味する.

$w \in X^+$ とすると $(1)\pi_A(w)=1. 1 \in (Q)e$ であり e は $(Q)e$ 上では単位置換であるから, $(1)e\pi_A(w)e = 1$. よって $\varphi(w) \in \tilde{H}$, つまり $w \in L_\varphi(H)$.

逆に, $w \in L_\varphi(H)$ とすると, ある $i \in I, j \in J$ について, $\varphi(w) = (e\pi_A(w)e; i, j) \in \tilde{H}$. よって, $(1)e\pi_A(w)e=1$ より, $((1)\pi_A(w))e = 1$, かつ $(1)e=1$. 従って命題 4.11 に先立つ注意により, $(1)\pi_A(w)=1$. よって, $w \in X^*$. 以上より $X^* = L_\varphi(H)$. 証明終.

上記の証明は比較的複雑である. 半群論のよく知られた定

理は断ることなく使用している. やや難解と思われるので、具体例をあげて詳細する.

例 4.3. $A = \{a, b\}$ の部分集合

$$X = \{a^3, a^2ba, a^2b^2, ab, ba^2, baba, bab^2, b^3\}$$

は有限極大 bifix code である. は次の遷移関数を持つものオートマトン

$$A = (\{1, 2, 3, 4, 5\}, \{a, b\}, \delta, 1, \{1\})$$

は X^* を受理する可移オートマトンである.

δ	1	2	3	4	5
a	2	3	1	3	1
b	4	1	5	5	1

A^+ の transition semigroup T は恒等置換と二つの変換

$$x = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 1 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad \alpha = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 4 & 1 & 5 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

で生成される完全単純半群である. T は位数 24 の半群で 4 つの \mathcal{H} -類を持つ. \mathcal{H} -類の一つは 6 元からなる

$$G = \{x, x^2, e = x^3, y = \alpha x, xy, x^2y\}$$

である. この \mathcal{H} -類が 3 次対称群と同型であることは容易に確かめるが出来る. e が G における単位元である. T 中のべき等元は $e, (x^3\alpha^3)^2, (\alpha^3x^3)^2, \alpha^3$ の 4 つである.

$$e = r_1 = q_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

$$q_2 = (x^3\alpha^3)^2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 4 & 5 & 4 & 5 \end{pmatrix}$$

$$r_2 = (\alpha^3x^3)^2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 3 & 2 \end{pmatrix}$$

とおく. 2 次の行列を $\Sigma = (q_j r_i), 1 \leq j, i \leq 2$ で定義する;

$$\Sigma = \begin{pmatrix} e & e \\ e & xy \end{pmatrix}$$

Σ は G 上の行列となる (一般論として成り立つ事実である, たとえば文献 [2] を参照されたい). 各べき等元は 1 を固定する. したがって Σ は G 中の 1 の固定部分群 $H = \{e, xy\}$ 上の行列になっている.

$$exe = x, eae = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 1 & 3 & 1 & 3 \end{pmatrix} = y$$

Rees matrix semigroup を $M(G; 2, 2; \Sigma)$ で定義する. そして $\varphi: A^* \rightarrow M(G; I, J; \Sigma)^1$ を, $\varphi(1) = 1$, かつ

$$\varphi(a) = (x; 1, 1), \varphi(b) = (y; 2, 2)$$

で定義する. すると φ は上への morphism である. このとき $X^* = L_\varphi(H)$ となるというのが、命題の主張である.

本論文では, 完全単純半群の 1-添加をその syntactic monoid として持つ free submonoid の構成について述べた. その基底が有限な場合は G.Lallement and C. Reis[7] の研究がある. しかし, 無限 code を扱うときはこの大きな研究成果をそのまま利用することは出来ない. 証明には有限性が使われている部分があるからである. 従って, 本論文では上記 [7] の手段によらない方法で対象を無限の場合に広げた. morphism φ による code の構成は時として膨大な計算が要求される. そこで, 適当なオートマトンの構成が望まれる. これに対する解答を筆者は見出しているが紙面の都合でここで述べる余裕はなく次の機会に解説する.

References

[1] J.Berstel and D.Perrin, *Theory of Codes*, Academic Press, New York, 1985.
 [2] A.H.Clifford and G.B.Preston, *The Algebraic Theory of Semigroups*, Vol.1, American Mathematical Society, Mathematical Surveys 7, 1961.
 [3] G.Lallement, *Semigroup and Combinatorial Applications*. Wiley, New York, 1979.
 [4] M.Katsura and G.Tanaka, Groups of finite elementary codes, *Words, Languages and Combinatorics*, pp.251-261, World Scientific Publishing, Singapore, 1992.
 [5] M.Katsura and G.Tanaka, Groups of finite elementary codes, *Theoretical Computer Science* 108 (1993), pp.119-149.
 [6] G.Lallement and D.Perrin, A graph covering construction of all the finite complete biprefix codes, *Discrete Math.*36 (1981) 261-271.
 [7] G.Lallement and C. Reis, Team tournaments and finite elementary codes, *Inform. and Control* 48 (1981) 11-29.
 [8] 中畑登, biprefix code の 1 つの族について, 京都大学数理解析研究所講究録 697,1989, pp.70-89.
 [9] D.Perrin, Codes Bipr fixes et groupes de permutations, Thèse Doctorat d' tat, Universit  de Paris VII, 1975.
 [10] 田中源次郎, 自由単位半群の biunitary submonoid の syntactic monoid について I, 静岡理工科大学紀要 2004, pp.151-164.
 [11] G.Tanaka, On syntactic monoids of biunitary submonoids determined by homomorphisms from free semigroups onto completely simple semigroups, *Theoretical Computer Science* 352 (2006), pp.57-70.

プログラミング教育と3Dコンピュータゲーム開発

Programming Education and Development of 3D-Computer Games

玉真 昭男*, 小松 隆\$, 青木 悠#

Teruo TAMAMA, Takashi KOMATSU and Yu AOKI

Abstract: In the programming education, what is important are not only mastering the programming language grammar and solving many exercises, but also development experience of a program over 3000 lines. 3D-games are good targets for that purpose. This year, two students developed a shooting game and an F1-racing game. Each of them developed an over-10,000 line program and found how difficult a 3D-game development was. They also knew the necessity of knowledge in mathematics and physics, which proved that game development is very good target for the programming education as well as basic subjects education.

1. はじめに

情報処理学会は、情報処理の優れた題材であるゲームを対象とした研究を世界の中心となって押し進めることが日本の情報処理技術の発展に貢献するとの考えから、ゲームに関連した研究領域を新たに「ゲーム情報学」と名付け、1999年に「ゲーム情報学研究会」を発足させた。その設立目的の中でも述べられているように、ゲームはルールが明確で評価し易い、それ自体が興味深い、制作目標が達せられる度に、更に拡張しようという次の目標を自然に思いつく、などの特徴を有しているため、情報処理やプログラミングの例題として非常に適している。外国では、特にチェスを人工知能分野での探索、データベース、機械学習、専用アーキテクチャなどの研究材料として、またパズル全般をアルゴリズムの研究開発題材として、大いに活用してきた。

しかし、「日本では、ゲームやパズルを扱った研究は少なく、情報処理において世界に遅れをとる一要因ともなっていた。」という。

「ゲーム情報学研究会」発足以来、将棋、囲碁、チェス、あるいは Amazons など、主にボードゲームのアルゴ

リズムに関する研究が中心であるが、日本でもゲームの研究が盛んになってきた。一方、レースゲームやシューティングゲームなどのアクションゲームに関しては、研究材料として取り上げた例は少ない。機能的にも、ビジュアル的にも、優れた市販ゲームが多く出回っているため、研究として取り上げ難いというのが理由であろうが、シューティングゲーム分野で敵機の動作に知性を持たせることで、新たなゲーム性を追求している研究¹⁾などもある。

しかし、今の子供達にとって、最も身近で誰もが一度は試したことのある遊びは、将棋・囲碁ではなく、圧倒的に「コンピュータゲーム」であろう。大学の情報処理系学科に入学してくる学生にも、このような体験からコンピュータゲームを作りたいと希望する学生は多い。ゲーム作りは、出来栄を自分で評価できる、何か1つ作るとアイデアが次々に湧いてもっと作りたくなる、更に高度な機能を作りこみたくなる、といった自己拡張性があり、完成したときの達成感も大きいので、アルゴリズム考案やプログラミングといった「知的もの造り」教育の題材として非常に優れている。

将来、プログラマーやSE（システムエンジニア）を目指す学生には、プログラミング言語の文法を理解し、多くの演習問題を解くだけでは不十分で、卒業研究などで、例えば3000行以上の大規模プログラミング開発の体

2007年3月6日受理

* 理工学部 情報システム学科

\$ 現 デンソーテクノ株式会社

現 SSBソリューション株式会社

験が必要である。その課題として、出来栄を自分で評価でき、アイデアが次々に湧いてもっと作りたくなる「ゲーム」は格好の題材である。

では、大学でどんなゲーム作りを目指すかであるが、ゲーム情報学研究会はまたその「目的」の中で、次のように示唆している。

「ゲームの強いプログラムを目指すだけでなく、コンピュータを用いてゲーム自体の歴史的あるいは社会的な研究を行なうのも興味深いことです。たとえば、『どういうゲームが世間に受けるのか』をコンピュータを用いて分析することは応用の側面からも重要と考えられます。」

主な研究分野として14分野を挙げているが、そこで我々はその中の次の3つを目指すことにした。

- ・ゲームプレイングプログラム
- ・インターネット上のゲーム
- ・コンピュータを用いた新しいゲーム開発

大学でゲームを開発するもう一つの意義は、大学祭、オープンキャンパスなどのイベントで、展示の目玉として宣伝に使えることである。子供、小中高校生、大学生から社会人まで、長く居座ってゲームを楽しむ姿が見受けられ、最も人気のある会場の一つとなる。特に高校生は、大学進学後自分でもこのようなものを作りたいと思うからであろうが、全てのゲームを試した上で、どうやって作るのか、作成にはどれ位時間が掛かるのかなど、熱心に質問する人が多い。

このような背景から、Windows用のC/C++コンパイラであるVisual C++.NETTMと3Dグラフィック・ライブラリDirectXTMを駆使して、3Dゲーム作りを行ってきた。我々は、アルゴリズムよりはゲームシステムそのものの実現と三次元の映像表現技術に重点を置き、シューティングゲーム、レースゲーム、ロールプレイングゲームなど、これまでに約10種類の3Dゲームを開発してきた。

今回、シューティングゲームとレースゲームの2つのジャンルで、新規性も含めて一定の成果を上げることが出来たので報告する。特にF1レースゲームに於いては、物理効果の導入、フォースフィードバックの掛かる操縦席とのドッキングにより、F1カーの加速性能を体験できるレーシングシミュレータを開発することが出来た²⁾。

2. 使用したソフトウェア

開発環境としてWindows用のC/C++コンパイラVisual C++.NETTM 2003、3Dゲーム開発用ライブラリとしてDirectXTM 9.0c、モデリングソフトとしてMetasequoiaTM Ver2.4.0を使用した。DirectXは、Windows用のゲームを開発するために必要な、高速グラフィックス描画処理、3D演算、サウンド・ミュージックの再生、ネットワーク通信機能などをまとめたコンポーネントである³⁾。

3. シューティングゲーム

3.1 ゲームのジャンル

シューティングゲームにもいろいろな種類があり、自機や画面がどのように動くかで「固定画面シューティング」、「縦スクロールシューティング」、「横スクロールシューティング」などと分類されている。これらのゲームはいずれも実質的には2Dで表現されている。完全3D表現によって作られているゲームには「フライトシミュレータ」や「フライト・シューティング」というものがあるが、いずれも奥行きや空間が把握しにくく、誰もが簡単に遊べるレベルのゲームではない。

画像は3Dでありながら、2Dのような操作感覚で簡単に遊ぶことのできるゲーム性を持ったものに「奥スクロールシューティング」と言う分類が存在する。これは機体を画面中央に半固定し、決まったルートを走行しつつ、その先々で出てくる敵機を破壊して行くというゲームである。プレーヤーは奥行きなどを気にすることなく敵を撃つことができ、さらに3Dグラフィックスによる奥行き表現で全体の見栄えを確保することができる。

今回、シューティングゲームとレースゲームをもとにそれらを結合させることで新しいゲーム創りに挑戦した。そのジャンルの名称をここでは「レース・フライト・シューティングゲーム」と呼ぶことにする。これはレースゲームの「走る」要素とフライト・シューティングの「撃つ」要素を取り入れたものである。ゲーム内容は、決められたコースの中を自由飛行し、規定時間内にどれだけ多くの敵を攻撃・破壊できたか、コースをどれだけ周回できたかを競うものである。シューティングゲームの「敵を撃って倒すこと」とレースゲームの「コースを高速で

正確に走ること」のいずれの要素も取り入れることに成功した。「奥スクロールシューティング」が決まったコース上を走るのに比べ、コース内を自由に飛行できる点が違っている。コース周辺の壁に激突しないように自機を高速に操縦しつつ敵を攻撃する、という二重の難しさとスリルのあるゲームである。

3. 2 モデリング

前述したモデリングソフト Metasequoia™ Ver2.4.0 を用いて自機のモデリングを行い、これにテクスチャを UV マッピングし、自機として Fig. 3.1 を完成させた。UV マッピングとはテクスチャをポリゴン毎に座標を指定して貼ることのできる技術で、これを使用することでより精密なモデリングを行うことができる。モデリングソフトを用いて好きなキャラクタを作る楽しさも体験できる。完成したモデルは、Metasequoia のエクスポート機能を使い、X ファイル形式(.x)で出力する。DirectX は D3DXLoadMeshFromX 関数を使って、その X ファイルを 3D 画面内に描画する。

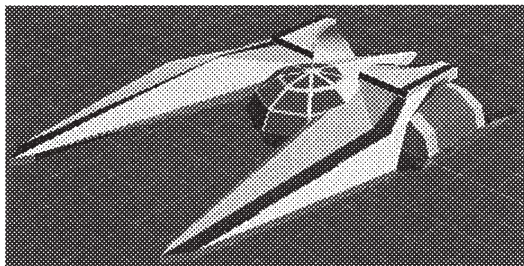


Fig. 3.1 完成した自機のモデル

3. 3 当たり判定

シューティングゲームのプログラミングで最もやっかいなのが「当たり判定」である。これには弾丸と敵機、または自機との当たり判定、自機とコース周辺との衝突判定が含まれる。弾丸、敵機、自機などのキャラクタをポリゴンの組合せで作っている場合は、一方のポリゴンの各頂点と他方のポリゴン面の重なり判定を数学的に行えば良い。しかし、複雑な形状になるとポリゴン数が増加するため、関係する全てのポリゴン同士の重なり判定計算にしてしまえば処理が重くなるなどの問題があった。

一方、3Dゲーム開発用のライブラリである DirectX は X ファイルを用いたキャラクタ同士の衝突判定に便利な処理方法やそのための関数を用意している。バウンディングスフィア (Bounding Sphere) やバウンディングボックス (Bounding Box)⁴⁾ と呼ばれるものがそれである。前者は球体どうしの当たり判定であり、後者は直方体の箱 (Box) で当たり判定を処理する。ボックスの生成方法は D3DXComputeBoundingBox 関数を使いオブジェクトの左下隅と右上隅の頂点データを取得する。これを対角線として直方体を生成する。バウンディングスフィアに比べ直方体の当たり判定なので球体のようなモデル形状との著しいアンマッチは減らすことができる。バウンディングボックスの当たり判定には幾つかの方法があるが、ここでは OBB (Oriented Bounding Box) 法を用いた。

OBB 法は自由に回転可能なバウンディングボックスのことで、オブジェクトの角度が変化してもバウンディングボックスは変化せず、モデルを追いかけるように角度を変えて、バウンディングボックスが移動する。処理としては重くなるが、オブジェクトとのフィット率が高いため、不自然な当たり判定を避けることが出来る。

3. 4 完成したシューティングゲーム

ゲームの特徴は以下のとおりである。

- ・ シューティングゲームとレースゲームの融合
- ・ コースの自由飛行
- ・ 複数の敵の登場と複雑な動き
- ・ 時間制限性

敵の挙動に工夫を凝らし滑らかで変化のある動きをさせている。スプライン曲線に沿った飛行をさせることで半自動的に滑らかな動きを作り出すことに成功した。

本ゲーム制作で苦労した点は、立体的にコース内を自由飛行させることで、コースをはみ出さずにかかにして飛行させるかという点に最も時間が掛かった。コース壁面への衝突を判定・表示するために「レイ」という直線とポリゴンの交差を利用する処理をすることで解決することができた。本ゲーム遊戯中の一画面を Fig. 3.2 に示す。

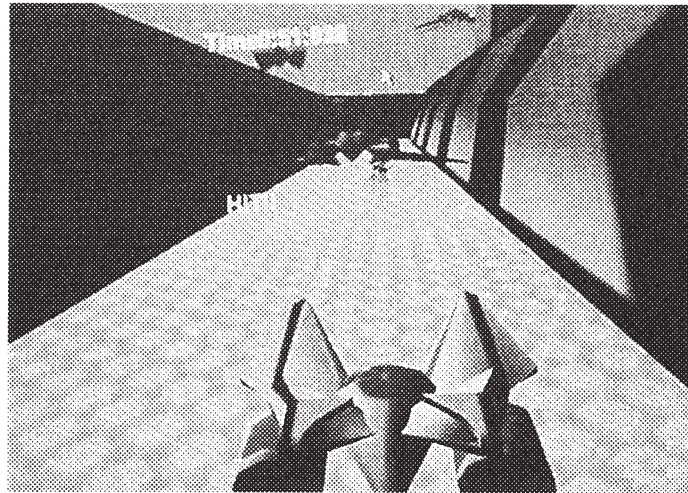


Fig. 3.2 ゲーム遊戯中の一画面

4. F1レースゲーム

モーターカーレースF1の迫力を体感できる3Dレーシングシミュレータの実現を目指して研究を進めて来た。物理モデル⁵⁾を取り入れることによって、ゲームに登場する3Dオブジェクトに物理法則に従った運動や挙動をさせることが可能となる。また、ゲームと連動させて椅子の角度を変化させることができる専用操縦席を利用し、操縦席の傾きによってプレイヤーにF1の加速度を擬似体感させることを目標とした²⁾。

4.1 ゲームプログラミング

ゲームプログラムの全体を示すために、ゲームプログラムに含まれる主要クラスのいくつかをUMLクラス図で

表す。この線図では3つの規約を使う。1番目は、四角の中の名前でクラスを表す。2番目は、ダイヤの付いた線で複合クラス関係を表す。3番目は、複合線の終わりに星をつけて、「所有者」クラスがもう一方のクラスのインスタンスを2つ以上持てることを示す。本ゲームプログラムに含まれる主要クラスをこのクラス図で表すとFig. 4.1のようになる。中心となるクラスはCStageMain、CStageOP、CStageEDの各ステージクラスである。ステージクラスがCObj3dやCSprite、CSoundなどのインスタンスを持ちそれぞれを動作させることによって各ステージの振る舞いが決まる。そして各ステージのインスタンスはMainが持ち、ゲームの進行にあわせてMainプログラムの中でステージを切り替える。

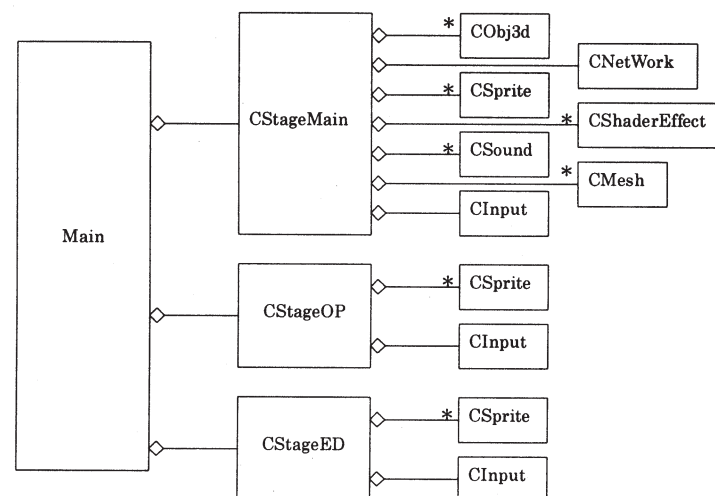


Fig. 4.1 作成したプログラムのクラス図

4. 1. 1 CObj3d クラス

3Dゲームでは車や建物、動物といった3Dのオブジェクトが複数登場する。また、それらをフィールド上で動かすことも必要になってくる。3Dの物体は基本的に位置、角度、大きさの3つの変化があるが、プログラムを書く上で3Dの物体にこれらの振る舞いをさせるクラスが必要になりCObj3dクラスを作成した。位置、角度、大きさをセットしたり、それらの状態を取得したりするメソッドとアクセッサ関数で構成している。自分自身の描画もCObj3dクラスで行う。

また、このCObj3dクラスはゲーム中に出てくるいろいろな3Dのオブジェクトに対してそれぞれのクラスを派生させる目的で作成した。CObj3dCarクラスはCObj3dクラスを継承し、車両を加速させたりストップさせたりするアクセル関数やブレーキ関数などを付け加えた。

4. 1. 2 CStage クラス

CStageクラスはゲームプログラムの中で中心となるクラスであり、ゲームのオープニングやエンディング、メインのゲームステージを作成するための基底クラスである。CStageクラスからCStageOP、CStageMain、CStageEDなどのクラスを派生させている。

CStageOPクラスやCStageMainクラス、CStageEDクラスはCStageクラスを継承しているため、それぞれDraw、Move関数を持ちそれぞれのクラスによって違うバージョンの関数を持つことになるが、ここでポリモーフィズムのテクニックが使える。

4. 2 状態遷移

ゲームプログラミングをしていると、オープニングやエンディング、選択画面、メインゲームステージなどいろいろなゲームステージの段階が存在する。ゲームをしていて常にオープニングから始まり、選択画面へ移りメインゲームステージ、エンディングという流れでゲームが進行すれば問題ないが、途中でオープニング画面に戻ったり、選択画面に飛んだりすることが多々ある。そういった時にいちいちif文で場合分けをしていると分かり難くなり、新しいステージを間に挿入したくなった時に修正がきかなくなってしまうという問題がある。そこで状態遷移プログラ

ムを取り入れた。状態遷移関数は以下のような型で表現する。

```
typedef int(*STFuncPtr)(void *);
```

状態遷移関数の戻り値は整数になっているが、これが状態遷移図の相関を表すパラメータである。

4. 3 物理モデル

ゲームに登場するキャラクタや背景を3Dグラフィックスでリアルに表現できたとすると、次はその動きのリアルさが問題になる。ゲームに出てくる「物」が物理法則にしたがっていないければ、ボール1つ投げるのにも不自然な表現になってしまう。物理を理解していなくても、ボールの動きを観察して何となく真似ることはできるかもしれないが、インタラクティブ性が要求されるゲームの世界ではプレイヤーの操作に合わせて動きを変えなければならぬため、形ばかりの真似では追いつくことができない。今日のようにコンピュータの性能や3Dライブラリなどの条件が整ってくると「現実感」を表現するためにいかに物理効果を表現できるかが重要になってくる。

4. 3. 1 物理エンジン⁵⁾

物理エンジンといえばゲーム業界では”Havok”が有名だが、最近ではAGEIA社の”PhysX”がクローズアップされてきている。それは”PhysX”の物理エンジンに対する考え方がかなり次世代であることから来ている。また、PhysX APIは非商用であれば無料で使用することができるためPhysXを利用して研究を進めることにした。

4. 3. 2 PhysXについて

ここで言う「物理」は「ニュートン物理」をベースとした運動「物理」を指す。ゲームにおける「物理」エンジンといった場合も、一般的には3Dオブジェクトの運動/挙動を司るものということになっている。HavokもAGEIAもこの運動物理のエンジンメーカーである。

現在、AGEIAでは、同社のWebサイトにて、フリー版のSDKやデモソフトなどをアップロードしている。一般ユーザーでも入手可能で、SDKを利用して開発を行うことができる。

PhysXでサポートされる物理演算は剛体物理、有限要素解

析、軟体物理、流体物理、毛髪シミュレーション、布シミュレーションなど、多岐に渡る。

4. 3. 3 PhysX の使用方法

PhysX では、物理モデルを適用するオブジェクトのことをアクター (Actor) と呼ぶ。アクターには様々なステータスを割り当てることができ、様々な物体、場면을表現することができる。他にも、アクター同士をつなげるジョイント (Joint) がある。ジョイントにも様々なステータスを割り当てられ、壊れるジョイントなどさまざまな場面に対応できる。

PhysX のもうひとつ重要な概念がシーン (Scene) である。シーンとは、世界にどのような決まり (重力など) を与えるかを定めるものである。例えば重力が無い宇宙と、重力がある地球上は別のシーンであるといえる。PhysX では、必ず1つシーンを作成しなければならない。

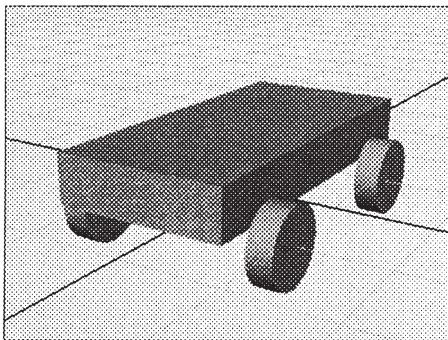


Fig. 4.2 車両型アクター

4. 4 専用操縦席

専用操縦席の土台はフライトシミュレータ用モーションベース (日本BTA, FSチェア⁶⁾) で、ロール方向とピッチ方向の2軸で角度を変えられることができる椅子である。本学と共同研究を行っている静岡文化芸術大学の宮田圭介教授はこのFSチェアをベースに機能的な車の操縦席を開発中である⁷⁾。今回その操縦席を借用してドッキングし、椅子のロール角、ピッチ角を変化させることによりプレイヤーがF1の加速度を体感できるのではないかと考えた。傾斜時の運転者に加わる重力加速度を用いて並進加速度を模擬するように設計した。

4. 3. 4 自動車型のアクター作成

F1カーの動作を再現するにはF1カー型のアクターを作成する必要がある。しかしそのようなアクターを作るのは非常に複雑で困難であるため、車両全般で使用できるFig. 4.2のような車両型アクターを作成した。ボディの大きさやタイヤの直径は3Dモデルの大きさに合わせる必要がある。タイヤとボディはジョイントでつながっており、タイヤにたいしてトルクを加えることによって車両型のアクターを動かすことができる。これによりFig. 4.3のように、壁との衝突時に車体の衝突応答を表現したり、タイヤの地面に設置している部分の静止摩擦係数や動摩擦係数を変化させることによって車の横滑りなどの表現が可能になる。

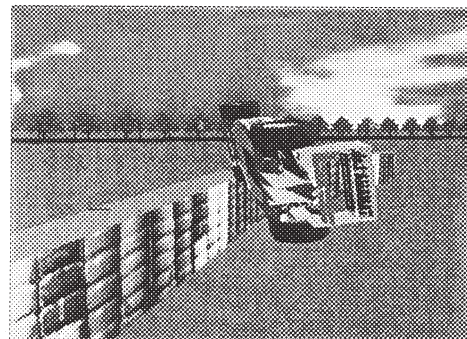


Fig. 4.3 ゲーム中で壁との衝突時の画像

4. 4. 1 フォースフィードバック機能

F1カーの加速度を本操縦席で体感できるようにするためにまず、レーシングゲーム中のF1カーが実際のF1カーと同じような加速をするようにプログラムすることから始めた。あるF1チームWEBサイト⁸⁾に、F1カーに関するデータが掲載されているが、それによると実在するF1カーの加速は、静止時から100km/hまで加速するのに3.7秒かかり、100km/hから200km/hまで加速するのに1.5秒かかるということが分かった。このデータを基にFig. 4.4のような加速度曲線 (折れ線近似) を作成し、ゲーム中のF1カーが作成した加速度曲線と同じように加速していくようプログラム側で調整をした。

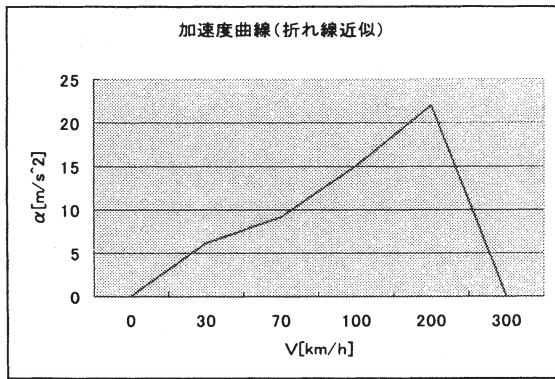


Fig. 4.4 加速度曲線 (折れ線近似)

そして、Table 4.1 に示すように、それぞれの加速時、ブレーキ時の操縦席のピッチ角を設定した。また F1 マシンにかかる横方向の G と操縦席のロール角を対応させてプレイヤーが F1 の横方向の G を体感できるようにした。そのために、F1 マシンを操縦している人間に働く遠心力を計算する必要があるが、実際の F1 マシンのコーナリング時に操縦者に働く遠心力は次の式で表される。

$$F = m \times \frac{V^2}{R} \quad (8.1)$$

m : 運転者の質量, V : 車速, R : 旋回半径

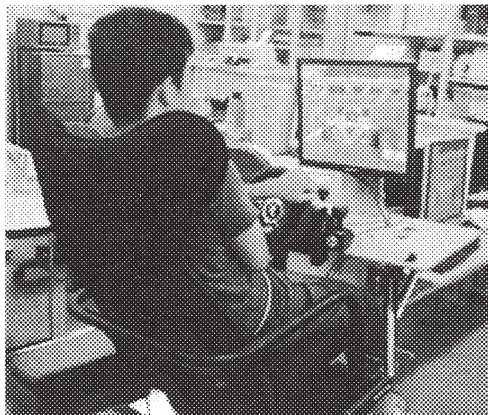


Fig. 4.5 ゲーム操縦風景

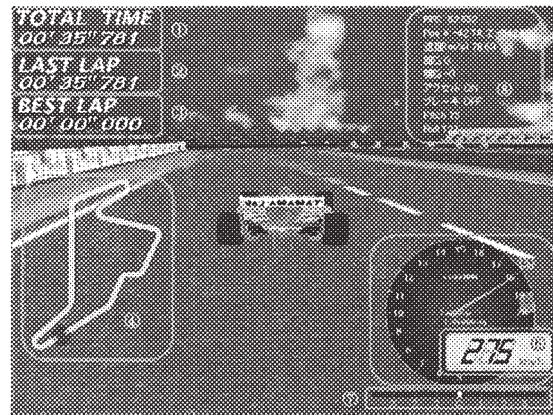


Fig. 4.6 ゲーム画面

簡単のため、コーナー部では等速円運動になると近似した。この式を使ってコーナリング時に F1 マシンを操縦している人間にかかる横方向の G をプログラム側で計算するようにした。そして F1 マシンの操縦者に働く横方向の G に合わせて操縦席のロール角を設定した。Table 4.2 に横 G と操縦席の傾斜角との対応を示す。

Table 4.1 ピッチ傾斜角と F1 カー速度との対応

速度領域 [km/h]	<100	100~200	200~300
加速時(後)	5°	10°	5°
ブレーキ時(前)	5°	7°	10°

Table 4.2 F1 カー加速度とロール傾斜角と対応

加速度	<1G	1G~2G	2G~3G	≤3G
角度	3°	7°	10°	12°

4. 4. 2 評価

Fig. 4.5 にゲーム操縦風景、Fig. 4.6 ゲーム画面を示す。椅子の前後の動きに関しては、擬似的ではあるがうまく再現することができた。

5. 考察

3D空間でのレースゲームとシューティングゲームを結合した新しいジャンルのゲームを作成することが出来た。また、物理モデルとフォースフィードバック付操縦席導入によって迫力のある F1 レーシングシミュレータを開発することができた。それぞれのプログラム規模、すなわちモデリングで作られた X ファイルの個数・サイズ、プログラム (ソースコード) 行数を Table 5.1 に示す。い

れも 1 万行以上の巨大プログラムである。

前者はまだ出来て間もないが、後者はすでにオープンキャンパス、大学祭、産学官連携フォーラム等のイベントでデモに供され、安定動作が確認されている。いずれも、開発者達は所期の目標をほぼ達成したとして、満足感を持って研究を終えている。1 万行以上の動作するプログラムを開発したことで、プログラミング教育の最終段階での目的を十分に達成したと言えるであろう。

Table 5.1 開発したプログラム規模

プログラム名	Xファイル		ソースコード行数
	個数	総ファイルサイズ(MB)	
シューティングゲーム	42	1.67	10,127
F1レーシングシミュレータ	20	6.17	12,938

6. まとめ

本学に於けるプログラミング教育の最終段階として、卒研究生1人と院生1人に、Visual C++ .NET 2003とDirectX 9.0cを使って、3Dシューティングゲームとレースゲームを開発させた。それぞれに以下の点で新規性を発揮することも出来た。

- (1) 新しいジャンルでのゲーム創り
- (2) 物理モデルとフォースフィードバック付操縦席導入により、0~300km/hまでの加速性能の模擬体験が出来るF1シミュレータの開発

開発者達は、本研究を通してゲーム開発がどれだけ大変なのかを理解することが出来た。プログラミング技術だけでなく、3Dモデリング技術や数学・物理の知識など、多方面にわたる技術や知識が必要であることを体験し、自らの力で会得する努力も出来た。ゲームという「もの」造りを行わせることによって、本学が目指す「ものから入り、のちに基礎知識の必要性を自覚させる」教育の成果を十分に達成したと言うことが出来よう。

参考文献

- 1) 川野洋：シューティングゲームの敵機動作および攻撃弾発射アルゴリズムに関する考察，第16回ゲーム情報学研究会，9，2006/06/30.
- 2) 小松隆，玉真昭男，宮田圭介(静岡文芸大)：DirectXを活用した3Dレーシングシミュレータの作成，情報処理北海道シンポジウム2006，ポスターセッションE-8，2006. 10. 13.
- 3) 登大遊：DirectX9.0 3Dアクションゲーム・プログラミング，2003，工学社
- 4) 斉藤 和邦：“DirectX 逆引き大全 500の極意”，秀和システム.
- 5) PhysX by Ageia ホームページ，<http://www.ageia.com/>，2006.
- 6) FS チェアアームホームページ：<http://www.device21.com/FSChair.htm>，2006.
- 7) 宮田圭介(静岡文芸大)，小松隆，玉真昭男：運転操作系デザイン検討用モーションベースの開発，人間工学会東海支部研究大会，3B2，pp. 68-69，2006. 10. 28.

※Visual C++[®]，DirectX[®]はMicrosoft 社、PhysX[®]はAGEIA 社、Havok[®]はHavok 社、それぞれの登録商標です。

遅延選択と確率的遡及因果

— 確率はどの段階で崩壊するのか —

Delayed Choice and Probabilistic Backward Causation
— At Which Stage Does the Collapse of Probability Occur? —

榛葉 豊*

Yutaka SHINBA

Abstract : When we use Bayes - Laplace theorem for the retrospective situation, by its nature, determining the probability of hypothesis by the observed data, with the propensity interpretation of probability, we encounter some difficulty called Humphreys' Paradox that shows the incommensurateness between collapsed value 1 for the past event and Bayesian value of probability. There is another Paradox called Newcomb's problem, which concerns backward causation and enigma for probability 1. We discuss retrospective causality and usage of the subjunctive mood with the past perfect tense of propensity considering these problems. Wheeler's delayed choice experiment by gravitation lens in the universe will show us some suggestion. We must self-examine the tense of subjective probability, and the meaning of causality. Then we could progress into the hard problem of integration between objective and subjective nature of probability as well as into another hard problem of relation between classical and quantum probability.

1. 確率の収縮と遡及因果

初期 Keynes の論理解釈や de Finetti と Ramsey の主観解釈などの、確率を信念の度合いとする確率の主観的解釈では、確率の値 1 と 0 は特別な意味を持っている。論理解釈では通常の論理での命題間の関係を表す。それ以外の値の場合がまさに不確実な状況での、信念の度合いあるいは確証度を表すということになる。主観解釈でもこのことについては同様である。値 1 と 0 は、一般に不確定という世界観の下でも、当然含まれなければならないであろう、世界記述の特殊な場合であると、単純には取れよう。しかし、決定論の世界と非決定論の世界が、そこで峻別されているとも思える。この別の世界観間のトポロジーを考察したい。

もうひとつ、確率がいつ、何によって 1 に変化するのかと言う問題を、主観説、客観説（これらの全く違った 2 つの概念は、ヤヌスの双面であるからなどと言って逃げてはならず、これらは将来的には統合されるべきものであると筆者は考える）の両方にわたって考察してみたい。

これらの問題を考察するには、因果の問題が係わってくる。因果と相関について、この世にあるのは相関だけであり、因果

とは錯覚か、それとも人間の脳の癖が習慣に過ぎないという、Hume 以来の注意が立ち現れる。この根本的な問題には、今回は触れないことにする。しかし、確率を収縮させる（崩壊させる）もの（こと）は何かと言うことについては避けると言うわけにはいかないであろう。

Popper の傾向性解釈¹⁵⁾ は、量子力学を扱うためという目的が大きな動機となって提出された客観解釈である。量子力学の確率は、普通の物理学者にとっては、von Mises の頻度解釈を素朴にしたような客観解釈（物理的解釈）である。傾向性解釈は、客観解釈でありながら、たとえば今年中に極東で限定核戦争が起こる確率というような単一事象の確率を論ずることが出来るというのが特徴である。従って、なかば、主観解釈であるとも言える。そこにいう傾向性（Propensity）とは、関係する世界の配置であるとか状況であるとか、量子力学に引きつけて言えば、測定対象系と実験装置と（さらには観測者の）もつ、ある場所で電子が観測されるというような特定の結果を生じる「傾向」を数値で表したものである。従って、状態ベクトル（対象だけでなく観測装置も含んだ）のようなものであると言える。

この傾向性概念に対する難点として、良く取り上げられるの

2007年3月2日受理

* 理工学部 情報システム学科

が, Humphreys^{13,14)} のパラドックスと Newcomb¹⁵⁻¹⁷⁾ 問題である。傾向性は確率とは言えないのではないかと露わにする問題で、多くの分析がある。

前者は明示的に時間の経過を含んだ問題で、遡及確率を Bayes-Laplace の定理により、まさに確率の逆算法として「原因」の確率を認識するときに、傾向性概念は意味を失うのではないかと「パラドックス」である。この問題には、いつ確率が観測結果を表す事象である事を表す値 **1** に確定するかということを含んでいる。確率の崩壊（収縮）である。これは端的に言って、観測問題の波束（確率振幅）の収縮に当たる。ここでこれまでの論者に筆者もひとまず合意することは、量子力学が特別なのではなく、普通の確率でも、「同じ」、「崩壊」というよく分からない事が起こっているということである。

Popper は「砂漠でルーレットの出目で行軍する兵士」という例え⁴⁾ を出して、量子力学の観測理論での議論の持つ、古典的確率に対する特権性を否定した。ルーレットの針の向く方向に一定時間ずつ行軍する兵士のアンサンブルを重ね焼きしたものは、もやとした雲が拡がっていく（正規分布の点の集まりをあらわす確率密度分布関数の）ようなものである。ある時間が経ったあとで、当の兵士が次のどちらに行こうかとしている瞬間にその兵士を「観察したら、古い雲は消え去り、私たちがその兵士を観察したその地点から新しい雲がはじまってしまう。・・・これは「波束の収縮」と同じである・・・」。情報が得られたことにより確率は **1** に変化する。という例え話である。

しかしやはり観測理論と兵士では、厳然とした違いはあるのである。どうして卿の生前に、このことについて物理学者との議論がもっとなされなかったのかと惜しまれてならない。筆者の感ずる限りでは、Popper の憎んだ唯物論者の、そもそも問題が存在しないというお決まりの態度と結果的には同じ事になってしまうのではないか。

違いは、古典確率には存在しない干渉についてと、まさにそれに対する非干渉化（デコヘア）がどうして起こり、観測者は非干渉化をどう認識するのかである。非干渉化は量子的実在である潜在性から古典的実在性への変容である。現象や実体が観測により生成されるという言い回しも使われている。潜在から存在への変容は確率で言えば、確率 **1** で無かったものが確率 **1** になると言うことである。

Everett の多世界解釈に関連した考察も必要になってこよう。

一方、後者、Newcomb 問題の方は、筆者には確率のトポロジー、決定論と非決定論の距離感を考えさせてくれるように思われる。このパラドックスでは、「**1** に非常に近い確率で」という条件が含まれ、そしてそれがパラドックスたるために本質的である。この問題は、確率 **1** だとパラドックスにならないのである。この大違いの原因をこの問題は考えやすく提示してくれる。

またこの問題は、因果と相関、原因と責任と言った問題に近づく分かりやすい一つの捌め手であると思う。

量子力学の観測理論、特に物理的観測理論という、観測装置の巨視性を理論の数学モデルに本質的に取り入れて、「波束の収縮」を導出する（なかには量子力学の改変も含む理論もある）

理論達が沢山これまでに提出されてきた。種々の観点からいろいろの工夫を凝らしているのであるが、数学的に自明な波束の収縮の不可能性を避けるために執った手段として、これらに共通するのは、根拠が明らかでない観測量代数の制限と言う手法でなければ、(多くの場合) 時間 $\rightarrow \infty$ や 粒子数 $\rightarrow \infty$ の極限をとると言うことである。これは物理学というものの本性であり責められるべきではないかも知れない。だが、極限をとる理論での現実には実現されない極限を、マイクロマクロ変換という大義明分の下で飛び越え、説明とすることには反省があつて当然である。これが確率空間（可換、非可換の両方共）でのトポロジーをどう考えるかということである。

この極限移行概念の最近の観測理論の手柄は、「波束の収縮」、「非干渉化過程」を時間の関数として連続に記述するという、「瞬間の間の変化」を描き出すことが出来るようになってきたことである。

さて、両問題に共通する遡及という事態に対しては、「Wheeler の遅延選択実験」の思考実験が、別の視点からの靈感を与えてくれるのではないかと思う（哲学者の議論では遅延選択実験についての議論を見たことがない。また Schrödinger の猫に関しても「Wigner の友人」のパラドックスが観測理論ではさんざん考え尽くされていると思うが、これに触れたのを見たことがない。しかしこちらについては似た議論がされている）。この思考実験を古典確率との統合という文脈からなぞってみたい。

2. 確率の動力学に関する要請

さて、上記の問題を分析するために、2 つのパラドックスを述べなければならないが、この議論でよく使われる概念を先に述べておかなければならない。確率の動力学については、次のような原理が要請されることが多い。ここで言う確率は、主観解釈で扱われるのがわかりやすいような問題を、我々は考察するのであるから、信念の度合いが先ず候補になるが、傾向性を扱う文脈では、その意味こそ追求されるべきである「傾向性」と言うことになる。

たとえばノ瀬は次のような要請¹²⁾を示している。

・過去確率原理

「ある出来事が特定の仕方であつた今生じてしまったものとして確認されるやいなや、少なくとも単独の出来事の確率に関する限り、その出来事の生起確率は **1** でなければならない」

過去と未来は非対称であり、起きてしまったことの確率は **1** であつて、変更できず固定されている。知った以上、過去についての確率的議論は出来ない。すなわち現在から見て確率 **1** であるという立場であり、逆に時間の流れに乗ってみれば起こる以前は、一般には確率が幾ら近くても **1** ではないのだが、起こった「瞬間」に **1** になる事を含意している。

この原理は観測問題での一切の議論・考察を飛び越して、導き出すべき結論を公理にしている様なものである。強いて言うなら、今日の観測問題では真つ先に否定される、観測者の無

限退行の後の abstract Ich が「認識」した「とき」に波束の収縮（固有状態への射影）が起こるという Wigner - von Neumann 理論と同じである。

そして、当然のことではあるが、頻度解釈では単一事象は扱えないのであるから、この原理は確率的な認識や考察を行う人間に伴われている信念の度合いか、傾向性についての言明である。傾向性の場合、認識者が確認や意識をしないでも事実があれば収縮すると言うことである。

ここで大切な注意しておきたい。ほとんどの論者は、哲学者も物理学者も経済学者、認知心理学者もではあるが、量子論においてもあっても次のことが成り立っているように見えると言うことを主張する。すなわち、論者間の細かい異同については論じないことにして、「観測以前は確率的分布で表され、測定すると突然の不連続な変化で固有状態になる」ということである。

これは大きな間違いである。波束の収縮を、状態ベクトルあるいは波動関数で表現するために誤解が生じるのである。波動関数は複素数で表される潜在であって、確率の雲のようなものとは本質的な差がある等と彼らも言ってみたりはするものの、やはり確率分布関数との見かけの類似性に引っ張られるのである。「波束の収縮」のとき量子力学で起こっていることは、分離することは出来なくて絡み合っているのはあるが、実は概念的には別の次の2つのことなのである。

それは、デコヘア（非干渉化）と「確率の崩壊」の2つである。確率振幅の分布関数（すなわち波動関数）が何らかの出来事によって確率分布関数（で表される対象）になる、ということと、その確率分布関数が、ある1つの可能な固有値に対応する状態に崩壊するということである。この2つは、時間的に引き続いて起こるのではなく一般には分離できずに同時進行するように見える。

この後者の方が、ここでいう過去確率原理に対応するものである。筆者はこちらの方が真に理解困難な過程であると思う。デコヘアの方がまだしも理解しやすいのではないだろうか。

ところで状態を状態ベクトルではなく、密度行列で記述すればこの様な誤解や混乱は生じない。密度行列は確率振幅とその確率的混合を1つの概念で表せる数学的道具である。よく、本質的還元不能な確率と無知による確率の両方を同時に表すなどと言われる。状態ベクトルが根元的なものと考えると、密度行列は2次的なものであるのではないのかと疑問になるかも知れない。だが、量子力学をごく基本的な自然の観察から再構成してみると、むしろ密度行列が状態を表す根元的で自然な概念であることが分かる^{30,31)}。世界に関する命題が作る束を考察するとそれは直相補モデューラ束という Boole 束から分配律を外したものであることが分かる。この命題束の表現を Hilbert 空間の線形部分空間の包含関係で作る束で作ることが出来ることが Gleason の定理で示せる。そして世界の状態が、すべての観測量に対し確定的な値を与える事は出来ないと考えると、それを記述するのはその Hilbert 空間の自己共役作用素であり、また同時に観測量の方も自己共役作用素で表現されることが分かるのである。逆に、密度行列において、対角線上のある一カ所だけが

1である時、対応する基底ベクトルが波動関数であるような「特殊な」状態であるベクトル状態なのである。

勿論物理に数学を合わせるならば、世界は Hilbert 空間では記述できず超関数の空間が必要になるのではあるが、ここではそのことは関係しないであろう。

最終的には分けて考えてはいけないのだが、2段階で表現してみよう。先ず密度行列が対角行列にデコヘアされる。これは量子力学的干渉性が無くなるということ、頻度解釈での客観確率の崩壊と言えよう。さて密度行列が対角化されたとき、その対角線上の数値の分布が古典的確率分布である。これがどれか一つに崩壊すると行列はある行列要素のみ1となって測定は完了する。この最後の選出の過程こそが、ここで言う過去確率原理で崩壊する、主観確率または傾向性確率である。

しかし密度行列の上記の変化は、それぞれが分離して継続して起こるのではなく同時進行するのである。であるから、量子力学が古典論とは全く概念的に違うのではなく、古典的収縮を含むのである。そして多分その古典的崩壊とデコヘアは絡み合っているであろう。

（上で注意した2つの概念を併せたもの他にもう一つの概念が観測理論では登場する。それは von Neumann のいう観測の第1段階と第2段階である。第1段階は今日ではスペクトル分解過程と呼ばれる。対象の取り得る測定される量の固有値と観測装置上で読み取る量に対応させる過程で、von Neumann はその様な相互作用を起こす自己共役作用素の存在を証明した。つまり対象系と観測装置をエンタングルするのである。しかしそれは確率とは関係のない概念である。我々が議論している2つの概念は第2段階に相当する。）

一ノ瀬は補助仮説として

・単調性

「ひとたび一つの命題が証拠的確率1を持ったなら、それは以後それを保持する」

も採用する。それ以後の時間発展を正確に計算できないであるとか、記憶が薄れていくなどの理由をつければ、時間の経過と共に確率はだんだん1から減じていく。しかし少なくとも発覚直後から「少し」の間は確率1に非常に近いと想定できる。これは観測理論では第1種の観測と呼ばれてきた。（第2種は、固有値は得られるが、まさにその観測過程に依って、状態は分からなくなってしまうと言う例外的なタイプである）

さて一ノ瀬は過去確率仮説を次のように言い換えて議論を行っている。

・確率崩壊仮説

「私たちがいる出来事が過去へと過ぎ去って行くのを観察するやいなや、そうした私たちの観察こそが、その出来事確率が値1へと崩壊することの原因となる」

しかしこの言い方は、確率を統合しようという筆者にすれば、

物理学者が精力的に検討して葬り去った量子力学の「Wignerの友人」のパラドックスをも特別規せず、確率一般に成り立つ議論をしようと一ノ瀬も将来的にはするはずなのに、再燃と言うより論点先取に近いものであって、驚愕の感がある。この仮説の文面は、半分明示的に主観確率しか扱わないと宣言していると取れる。まさにHumphreysのパラドックスが問題にしている筈の傾向性確率を除外すると言っているようなものである(過去確率原理で、頻度解釈の方は除外して議論することにはなっていた)。

「Wignerの友人」とは次のようなものであった。それは「Schrödingerの猫」に付随して語られるようになったパラドックスであった。部屋の中に友人を閉じこめ、「猫はいつ死んだか」と部屋を開けてから質問するのである。猫の問題は、マクロな猫の状態が(メソスコピックな状態の重ね合わせは、20世紀末より既に観測されつつある事を注意しておく)生と死の重ね合わせであるという容認できない状況を問題にしたのであった。少し言い換えると、どの時点あるいは段階で猫は死ぬのかと言う問題でもある。友人は認識力と記憶と内省能力を持っていて、私に報告が出来る。私にとっては質問をするまで友人の状態は重ね合わせであり、従って彼が観察している猫も重ね合わせである。質問の答えを聞いた時点で私にとって波束は収縮する。しかしマクロ物体であり、生命体であり、意識を持ち、abstract Ichである友人にとっては、彼が、猫が死ぬのを観察した時点において、猫は重ね合わせではなくなり、波束は収縮するのである。これは、Wigner-von Neumannの理論の奇妙さでもある。この奇妙さゆえ、解釈から意識や認識というものを排除しようと言うことになり、いわゆる物理的観測理論や多世界解釈が生まれたのである。そして客観解釈しか言っていないかのような風潮になったのである。これは一ノ瀬の書く「ビデオを箱の中に設置しておいて、ずっと廻していつ猫が死ぬかを記録しておくとうなるだろう」と似ているようであるが本質は全く違っている。ビデオは単なるマクロ物体で、デコヘアの議論の対象にはなりうるが、意識やAbstract Ich等は持っていない。そして意識や認識と言うことがまさに主観確率の担い手なのであるからである。しかし、主観的存在の認識を意識のない過去のマクロ物体に仮託するという観点を提起しているとも考えられる。Wignerはもしかすると最初から確率の謎の深さに気付いていたのかも知れない。

この確率崩壊仮説を吟味することによって、観測理論での確率はどの確率であるのかということが、我々にとって浮き彫りになって来るのであろう。

3. Humphreysのパラドックス

Salmonは、Humphreysが考案したパラドックスだとして、次のような問題を1979年に示した¹⁴⁾。遡及因果に関する命題では、Bayesの定理を用いた遡及因果的確率計算が奇妙な事態を招く。逆確率が意味を持たないように見える傾向性確率は、確率と言えないのではないかという例である。その問題にHumphreysという名前がエポニムされたのはFetzerによつての

ことで1981年のことであった。Humphreys自身の議論はそれより後年の著作¹⁵⁾に見いだされる。次の表現はEarsan and Salon(1992)³⁹⁾によるものである。

「フリスビーを生産する機械AとBがある。機械Aは1日あたり1%の不良品を出し生産量は800個である。一方機械Bは古くて、1日あたり2%の不良品を出し、200個しか生産できない。1日の終わりに2つの機械で作られたフリスビーは1000個である。これらは検査されて不良品はある箱に入れられているとする。1日の終わりにその中からフリスビーをランダムに1つ取り出す。このときそれが機械Aで作られた「確率」はどれだけだろうか」

設定は観測理論での2重スリット実験から非干渉化の論点を除いたものと同じである。

さて、不良品であるという事象をDとする。またAでそれが機械Aで生産されたものである事を表し、Bで機械Bによって生産されたものである事を表す事にする。すなわち、それぞれの機械の不良品率は $p(D|A)=0.01$ 、 $p(D|B)=0.02$ である。またそれぞれの機械による生産量の割合から事前確率は、 $p(A)=0.8$ 、 $p(B)=0.2$ である。これらの尤度と事前確率を用いると、Bayesの定理により仮説の事後確率は、

$$\begin{aligned} p(A|D) &= \frac{p(D|A)p(A)}{p(D|A)p(A) + p(D|B)p(B)} \\ &= \frac{0.01 \times 0.8}{0.01 \times 0.8 + 0.02 \times 0.2} \\ &= \frac{2}{3} \end{aligned}$$

と計算される。左辺の条件付き確率の意味は、観察された証拠Dと言う条件の下で、その証拠を招来するような仮説(理論)の確率、いわゆる逆確率、である。

これを何日にもわたる平均であるとか、フリスビーを取り出すという行為を何回もやると言ったときの統計をとるといった状況に当てはめて頻度解釈的にとれば、全く問題は発生しないと思われる。しかし単一事象についての議論であるとするとうなるであろうか。ある特定の日に、夕方、不良品箱から1個のフリスビーを取り出すと言った状況である。その時の信念の度合いかあるいは傾向性はちゃんと意味を持ちうるのかという心配が発生するのである。

条件付き確率 $p(A|D)$ は、単純に読めば「不良品箱の中からランダムにフリスビーをとりだしたとき、それがその日(その時点以前に既に)機械Aで生産されていた「確率」である。このBayesの定理で計算された逆確率が傾向性だとすると、「今手に握っているフリスビーが、機械Aで生産された傾向は2/3である」と言わねばならない。機械Aが不良品を出す傾向性なら有意だが、「機械Aが今手に持っているフリスビーを

事前に生産したように「する」、夕方の世界のもつ傾向性」は意味不明であろうと言うのである。この文は遡及因果を語っているのである。

Bayes の定理は、確率算としては常に成り立つ。主観確率という扱いでは、理論の検証過程のモデルとしてずっと使われてきたし、実用問題としても Bayes 統計学や Bayes 推論として使われている。現実の統計的状況での実用上の解釈には困難を来さない。例えそれがリスク解析、エキスパートシステム、ベイジアンネットワーク、ベイジアンフィルターなどでの、時間的にみれば遡及推論になる場合であってもである。

ただ、3 囚人問題の解釈^{22, 32)}のように、繰り返しやアンサンブルをどうやっても想定できないであろう本質的に単一事象である場合には、その時の自然な解釈である主観解釈を、どう頻度解釈に対応させてよいのか分からないと言った状況が出現する。

さて、この問題でどこが受容しにくいのかを浮き彫りにするため Gillies は¹⁰⁾ 次のような問題の修正を試みた。すなわち

「機械 A はオレンジ色のフリスビーを生産し、機械 B はブルーのフリスビーを生産する」

を追加してみた。現に手に持っているフリスビーは既に機械 A か B によって既に生産されたものであり、そのフリスビーの色は生産されたとき以来、夕方までずっと決定（固定）していた、すなわち確率 1 であった。生産されたときは色は決定していてこれは過去確率原理で言う「確認されるやいなや」に該当すると思われる。勿論なにが確認か、意識の関与はなくて良いのか、等の観測理論でおなじみの疑問は当然だが、ここでは私に知らせないようにしつつ、第 3 者が確認してもしなくても色は変わらないと言うことで了解することにしよう。(但しここが量子力学との本質的な違いで、量子力学では第 3 者が途中で確認すると「色」が変わるのである事には注意しなければならない。非干渉化がいかに重大かの証左である。)

箱に手を突っ込んで 1 つのフリスビーを抜き取り、その結果もし手に持ったフリスビーの色がオレンジであった場合、それがオレンジ色であった確率はずっと 1 であったはずなのに、手に持ったオレンジ色のフリスビーが機械 A で生産された傾向性は 1 以下である 2/3 としなければならないというのである。傾向性と言うときの言葉の使い方からして、それは「今手に持っているオレンジ色のフリスビーという証拠とそれも含めた夕方の世界の状況が、時間的に遡って、事前に機械 A で生産されて色がオレンジであったように「する」傾向性」という奇妙な文になり、partial backward causation があるとしなければ理解不能であると議論した。

しかしそうであろうか。目をつぶって 1 つのフリスビーをとったとして、見る前の時点ではどうであろうか。私にとってフリスビーは A で作られたものかも知れず、B で作られたものであるかも知れず確率 1 ではない。夕方現在どちらの色かと問えば、数値的計算は Bayes の定理によって今の色の確率を言うの

は妥当である。色は昼間からずっと変化しないのであるから、そのままの確率の値を昼の生産時の色の確率として良く、さらに 1 対 1 対応で機械 A か B かの別の確率として良いと考える。従って色を確認するという行為が、遡及して過去の事象の確率を収縮させているとして問題ないのではないだろうか。すなわち一ノ瀬の言う遡行確率仮説

「私たちが過去の出来事を虚構的に現前化させることが、確率が過去へと遡行して 1 へと崩壊することの原因なのでありそこから過去についての決定論が現れる」

は、もし私たちの認識の上での遡及因果を認めるとすれば妥当のように見える。

そしてこのことは、傾向性確率でなく、ここの確率が信念の度合いだとしたら、なおさら問題はないと思われる。しかし、確率が abstract Ich によって崩壊するというはなしは、観測理論で真っ先に否定されたものである。精神世界の物質世界への介入のようなことはタブーだった。だが、ここで言う確率は、頻度解釈の確率ではなく、信念の度合い、そうでなければ傾向性である。信念が認識結果で突然変化するのとは当然である。問題はそのことをどう頻度解釈の確率と折り合いをつけるかである。

この問題に対する哲学者の反応は、このパラドックス故に傾向性解釈はうまくいかないものであることが分かったとするもの、さらに Gillies のように傾向性解釈を考察分類¹⁰⁾して、長期傾向説を採用するというものがある。この長期傾向説とは、単一事象の確率を扱うのをあきらめたものである。極大決定された世界の状況下で、繰り返し試行を行って、長期的に見てその確率値が得られるという頻度解釈に近いものである。量子力学の確率はこれに近いのかも知れない。だが長期傾向説はすでに頻度解釈(加うるに波動関数のように世界とか装置の状況に確率の責任を帰するという解釈)に戻ってしまったようなものである。

また、Bayes の定理の方を問題にして、適用範囲を定めるべき(数学的にではなく解釈の上で)だとするものもある。たとえば朝作業開始以前に $p(A|D)$ を評価するのは有意味である。

日中の A で表されるオレンジ色のフリスビーが生産されるという事象も、D という、夕方不良品をとりだしているという事象も、確率評価時点より以後で未だどうなるか分からない事である。しかし同じ条件付き確率を、夕方評価した場合には意味がない。なぜなら条件 D が実現したときには、フリスビーの色も判明し、そして A か B かも既に決定されていてしかも判明しているからである、と言う主張である。

こうして分かってくるのは、信念の度合いや傾向性に遡及因果を許さなければならないように見えたり、確率を評価する時点と、条件となる事象、問題にする事象の時間的前後関係が問題になってくる可能性があると言うことである。このことは原初的には我々の意識の内の出来事である。

生理学的な議論であるが Goodman は仮現運動²⁰⁾という現象

について議論している。それは暗闇で光点が継続して接近した場所で光ると、その方向に光点が移動したように見えるという現象である。移動方向が決定する第2の発光以前に相当する中間の点にも遡って光点は連続して見える。Penroseも^{33,34)}意識の離散性の可能性を論じている。遡及因果はそれ自体が我々の世界の分節化の在り方に関係している。その整理は大きな仕事であろう。しかし我々は、過去の事象について、つまり歴史について条件付き確率的な表現を用いる。更には架空の物語についても可能性の議論などをする。これらの表現の仕方が上記の実際に起こる出来事の遡及確率についての整理と同様なのであるかも知れなければならぬ。

4. Newcomb 問題

Nozick は、物理学者 Newcomb が考案した問題であるとして次のような問題を論じた¹⁵⁾。この問題はHumphreysのパラドックスとも似た、遡及因果にからんだ意志決定の問題である、前者よりもっと困難な、確率のトポロジーと心理の問題を内包していると言えよう。いろいろなバージョンが知られているが、少し分かりにくい確率のトポロジーの問題に気付かせてくれるNozickの1993年版¹⁶⁾から見ていこう。

「ここに箱1と箱2がある。箱1には必ず10万円入っている。箱2には1億万円入っているか何も入っていないかのどちらかである。あなたの取れる戦略は(1)両方の箱の中のものを受け取る、(2)箱2に入っているものだけを受け取る、のどちらかである。しかしこの問題がある。箱2に1億円入れるか入れないかはある超越者が決める。彼はあなたの戦略決定を、事前に非常に正確に予言できる。またあなたも彼の予言能力を信じている。彼はあなたの選択を予言し、その予言に依存して以下のことを行う。もし彼が、あなたは両方の箱をとると予言した場合箱2には1億円は入れない。あなたが箱1の10万円は放棄して箱2の中に入っているものだけを受け取ると予言した場合には、1億円を箱2に入れる。このことをあなたは良く理解しているし、またあなたが理解していることを超越者は知っている。さてあなたの最適戦略はどちらであろう」

超越者とか神が出てきて、哲学的分析は出来ない様にも見えるが、「非常に正確に」などとなっていて、確率は1ではなくていくら1に近くても $p < 1$ が想定されているのである。もし1なら決定論となるがそうではないのである。従って技術の進歩や未知の作用によって、将来その様な予知に近いことが可能になる事も有り得る、と想定して分析することは不合理ではない。

仮に確率1で予知できると言うことにすると、パラドックスではなくなり最適戦略は容易に決定できるかに見える。箱2だけを受け取るとすると、それは予知されていて、その結果として超越者は箱2に1億円を入れている。もし両方の箱をとるならそれを予知していた超越者は箱2に何も入れず、箱1の10万円しか受け取れない。従って箱2のみ受け取ると言うのが最

善のように見える。

Newcomb問題において、予知が当たる確率 p を、Humphreysのパラドックスに現れている、Bayesの定理で算出された機械Aで生産された確率、であるとし、過去に遡って箱2に超越者が1億円を入れることと、やはり遡って機械Aで生産されるということに対応させてやれば、両者はほぼ同型問題である。

違いは一つには、Newcomb問題には、意志決定論の文脈として、過去の出来事が確率1に固定されると、効用の値が決まるという追加された部分がある。だがそれは本質的ではなく、本質的なのは、 p が1に非常に近いとされ、またその値自身も解答者に委ねられていると言うことである。超自然的な話しに見えるのも本質ではない。 p が1に近い現実の話ではない様に感じられるだけである。ということは、観測理論の「2重スリット実験」(あるいは「Stem-Gerlach型実験」)も含めて3者は観測理論の非干渉化の問題派別にすれば、ほぼ同型問題であることが分かる。

所で、確率1という決定論にはさらなる困難が待ち受けているかもしれない。私の選択は予知の時点で決められており、そもそも選択の自由はないのではないのか。それとも、選択の時点では自由意志があり、それを予知時点という過去から再び未来である現在をみて、私が自由に決めている結果を過去からのぞき見しているだけで、私の選択が遡及因果で超越者を動かし、超越者は受動的役割しか持たないのだろうか。この因果の輪のパラドックスは良く問題にされることではあろう。だがここでは論じないことにしよう。

さて、問題文通り $p < 1$ であることにする。それでも箱2のみ受け取るという選択は、直前の議論により最善である。予言が外れる場合もあるわけだが、 p を必要なだけ1に近くとってみれば期待金額について同じ結論になる。この場合確率的遡及因果が働いていると言える。

両方の箱を受け取るのが最善であるという考えもあり得る。これは、確率的遡及因果はあり得ないとする立場である。遡及因果がないとすると、超越者が予知をして箱2に1億円を入れるか入れないかした時点で箱の中は決定され、それ以後ずっと確率1でそのままの状態である。観測理論なら予知した時点で波束は収縮している。だから、いま私が1つの箱だけとろうと両方ともとろうと、箱の中の金額は変わらない。それなら両方取った方が得である、と言う論法である。

予知の確率は1ではないから外れることもあるわけである。したがって超越者が、私は箱2だけとると予知して箱2に1億円入れたのに、それが外れて私が両方の箱をとっても論理的矛盾にはならないのである。もし確率1であったら、論理的に成立しない循環因果になってしまったところであった。

このように、Newcomb問題は、確率のトポロジーとして $p = 1$ と $p < 1$ が質的に全く異なる(それは決定論かそうでないかであるから当然と言えるが)ことを、改めて浮き彫りにしてくれるのである。

以下に示す版もNewcomb問題と呼ばれる。確率のトポロジ

一の困難が表立ってはいないが、隠れているだけである。

・Ayerによる「Calvinistの勤行」¹⁸⁾

「カルヴァン派は運命予定説を信仰している。それによると、彼らの神は彼らの誕生以前に既に彼らを救済または断罪してしまっている。しかし自分が救済されるかは死後になって分かるのである。にもかかわらず彼らは勤勉を心がける。彼らは今勤勉であることが、もうすでに彼らの将来に影響しないことをわかまえている。しかし一方彼らは、神の選んだ人のみが誕生後勤勉になりうると信じている。すると彼らの信念に依れば選民の一人である事が現在勤勉であることの必要条件である。ということは勤勉であることが選民であることの十分条件である。彼らは過去のために勤勉であろうとする。自分は生まれる前に神に救済されていた、とするために現在勤勉であろうとする。」

・Dummettの「酋長の踊り」¹⁹⁾

「ある部族では成人の条件としてライオン狩りに行って勇敢に振る舞わねばならない。若者は2日旅し、2日間ライオン狩りをし、2日間かけて帰ってくる。見届け人が若者に同行し、帰ると酋長に若者が勇敢だったかどうかを報告する。その部族では、酋長の行う儀式はいろいろなことに影響しうると信じられている。酋長は若者が勇敢にライオン狩りをするように、と念じて6日間踊りを踊る。と言うことは、若者が勇敢であったかどうかが決まってしまった後の2日間も、酋長は若者のために踊り続けるのである。これは過去の事件に影響しようとしていると考えられる。」

・三浦の表現²⁸⁾

「ゲジゲジが大好きな人は癌になると言うことが判明した。これはゲジゲジに発癌物質があるのではなく、ゲジゲジが大好きになる遺伝子を持つ人は、その遺伝子がまさに発癌遺伝子であると言うことであった。だからゲジゲジを沢山食べたからと言って、その遺伝子がなければ癌にはならない。逆にその遺伝子を持つ人に、ゲジゲジを食べないように監視していても癌になる。さて、あなたはゲジゲジを目の前にしている。統計に依ればこの状況でゲジゲジを食べた人は非常に高い確率で癌になっている。食べなかった人が癌になったという例はほとんど無い。発癌遺伝子がないのにゲジゲジを自発的に食べる人はほとんど0である。あなたは今日の前のゲジゲジが食べたい。しかし食べればほぼ確実に発癌遺伝子の持ち主だった、ことになってしまっただろう。どうしたらよいだろうか」

これらはすべて確率的遡及因果である。ただ、Nozick版のように、各戦略の結果の効用を示して意志決定論の問という形にしているだけである。

もう既に事態が決定してしまった後でも、未だ自分はその決定された内容を知らない場合には自分にとって確率は1ではない。従って、何かその決定に影響すると信じていることを行いたくなるのである。文面を見ると、因果関係ではなく相関関係

であると直ちに読める事例達である。それを、遡及因果という手を使って、因果関係に持ち込もうとするあがきである。

Calvinistの勤行ではどうだろうか。神が選民を最初に決定する。選民⇒死後救済される。また非常に高い確率で選民以外⇒勤勉でない、と言うことから、現在の時点からみると「勤勉」と「救済」は因果関係ではなく相関である。それを勤勉⇒選民だった、といったん過去へ遡及因果をおこし(backward causation)、そこから現在を通り越して死後という未来の救済に順方向の因果(forward causation)を果たすという仕組みである。この話も確率1では成り立たない。今から勤勉にしても、過去の神の決定は覆らないのに、と言う筋だが、もし確率1だとしたら、救済されない人はそもそもなりたくても勤勉にはなれないからである。

三浦の例でも構造は全く同じである。発癌遺伝子⇒癌。一方、発癌遺伝子⇒ゲジゲジ好き。「ゲジゲジ好き」と「将来発癌」には因果関係はない。今、目の前の「ゲジゲジ食べたい」、なのだが、それを否定することにより、遡及因果で発癌遺伝子がないと言うことであつたと言うことにして、そこから順方向因果で「将来癌にならない」にしたいのである。(食べたいのが饅頭ではなくゲジゲジにしてあるのは、饅頭だと発癌遺伝子がない人でもある程度は食べたいと思われるからである。ゲジゲジなら、普通の人が食べたいとはほとんど絶対思わないであろうからである)

酋長の踊りでは少々違って次のようになる。ここで主人公である酋長が現在とる行為は、もうすでに無駄な踊りである。今までの例とは違って、この行為は若者の過去の勇敢な狩りの結果では無い。だからそれを遡及してと言うことにはならない。そうではなくて、同時的でないと効力のない踊りを、過去に向かって発しているのである。しかし共通するのは、確率1で既に決定されてしまった、若者の勇敢さが、見届け人の明日の報告までは、酋長にとって $p < 1$ であると言うことである。不確定であるからこそ、また踊りの効力があると思えるのであって、酋長は2日間踊り踊り続けるのである。

この例は、最も単純な例で遡及因果はしないが、むしろ、それぞれの人にとって、いつ確率が崩壊するかと言う問題に特化している例と言える。観測問題で言う「観測者」あるいは「巨視的観測装置」は、この場合言うまでもなく見届け人である。そして見届け人は「Wignerの友人」でもある。見届け人が若者の振る舞いを観察した時点で若者の勇敢さが確率1に崩壊するのか、それとも狩りの旅から帰ってきて、酋長に報告して酋長が若者の振る舞いを知った時点なのか、である。確率を信念の度合いとするなら、問題はほとんど無いであろう。酋長の信念の度合いなら明日の報告の時に、見届け人の信念の度合いなら、既に若者が狩りをしているときに崩壊している。

この問題では他の表現と違って、若者の勇敢さから酋長の踊りへの順方向の因果というものがみられない。他の例では順方向に確率的因果があつて、その逆が真であるように感じられる心理により遡及因果をしている。しかしこの例では、酋長は確率崩壊以前なら直接に過去向き因果が出来ると感じている。

曾長の行為は、我々も良くやることである。検査の結果を聞く前は、癌の確率は私にとって崩壊していない。そこで、わざと検査結果を聞くのを延ばして、その間に癌になりにくいと言われることをしたり（曾長の例と同じ）、もし癌だったらそういう振る舞いをしないで言うことをやってみたり（Calvinistは勤行をし、三浦はグジグジを食べたいのを我慢する）のである。

このように我々はいったん過去に自分の身を置き、その過去の視座から確率的順方向因果で、現在を改善しようとするのである。小島が²⁹⁾「仮定法過去完了」と呼んでいるのはこのことであろう。Bayesの定理に現れる条件付き確率を考えると、我々はついVenn図の上に平面的に並んでいる点集合で「空間的に」併置されていると感じて、時制を忘れがちなのである。であるからHumphreysのパラドックスがなぜ困難なのか説明されないと理解できない人も多いであろう。

われわれが条件付き確率について時制を忘れて話を進めがちなのは、西洋の命題論理学自身が、時制を頭には組み込んではいない³⁵⁾からなのであるか。

5. Wheelerの遅延選択実験

Bohrは³⁶⁾、非可換な量のどちらを測定するかは自由があるような状況で、そのどちらを測定するかは最後の瞬間まで遅らせるという思考実験を論じている。「遅延選択実験」である。

たとえば、光源から出た光子を2つのスリットに通す。集光レンズでフィルムに像を造るようにする。そうするとフィルムには沢山の光子の集積として干渉パターンが記録される。これは光子が2つのスリットを通ったとすることで光子の波動性が見えている。しかしフィルムを取り除くと、2つのスリットから光子が来る交叉する2つの方向の延長上に光電管を置けば、光子は2つのスリットに対応するどちらかの光電管で記録される。これは光子がどちらか1つのスリットだけを通ったとすることで、光子の粒子性をみている。いわゆる相補性である。

フィルムを置くか取り除いて光電管で観測するかを、光子がスリットを通りすぎた後と後に決めると言うのが遅延選択実験である。光子がスリットを通るときには未だ粒子性を測られるのか波動性を測られるのか決まっていない。それなのに未来の実験が何なのかを知っていて1つか、そうではなくて2つのスリットを同時に通るかを決めているように見えるということになる。逆に言うと、最後の測定が、時間的に遡及因果して、過去の光子の振る舞いを決定しているように見えるのではないかとすることである。ただそんな高速に実験装置を切り替えることはできないと思われていた。

量子力学者、重力理論家、宇宙論者のJ. Wheelerはこの思考実験が別のやり方で可能であると考え、1979年、Einstein百年祭のプリンストンのシンポジウムで、実験を提案した。また、1980年6月、フィラデルフィアでのアメリカ哲学会にて講演をして、哲学者に量子力学の深刻さを印象づけた。

1982年には、Bellの不等式³⁷⁾を用いた、量子力学と局所実在

論にもとづく確率力学理論との決定実験を目論んだAspectの実験が行われたが、このとき、実験装置の各部分が「共謀」といけない(どんな機構でか分からないが念のため)と言って、遅延選択も実験に組み込まれた³⁸⁾。その結果、局所実在論は維持できないことが分かったことはよく知られている。1986年にはWheelerの提案の実験が成功し、量子力学の予言通りになることが分かった。

しかしもっと印象深いのは、重力レンズを使った遅延選択実験であろう。

銀河はその全質量による重力場で光を曲げレンズの働きをすることがある。クェーサーという天体があるが、それが非常に接近して見える2重クェーサーという現象がある。これは銀河による重力レンズによって1つのクェーサーが2つに見えていたのである。この状況は上記の遅延選択実験をものすごく拡大したものである。2つの経路の間隔は5万光年であった。また、クェーサーから地球までの距離は数十億光年と見積もられた。2つの経路の光行差を埋めるため(そうしないと干渉しない)のテクニックなども伴えば、次の実験が地球上で出来る。つまり両方の経路からの光を交叉させるようにして、そこにスクリーンを置くか、その位置からずれた位置にスクリーンを置くかの選択である。ずれた位置のスクリーンは、前出の実験での2つの光電管に相当する。

この実験では、重力レンズの左右を通ったときから、地球での観測(どちらの実験をするかという選択)まで十億年オーダーの遅延があるわけである。

Wheelerは、頭と尻尾は姿が実体として見えているが洞体は煙であるGreat Smoky Dragonというドラゴンの絵(観測と観測の間は、あるいは「記録」された事象と「記録」された事象の間は「現象」ではないと言う寓意)とか、尻尾のある眼球(眼球は現在の私たちの世界、尻尾は我々の宇宙の過去)が自分の尻尾を見ている絵などを示して、現在の我々の観測が過去を決定し、ひいては現在の我々を生成しているという事を述べる。これは前節で述べたいったん過去の視座に遡及因果して身を置きそこから順方向因果すると言う図式と同じである。だが、多分大きな違いは、前節の例は信念の度合いととるべきなのに、ここでは本来の意味での傾向性にとらねばならないという事である。

遅延選択は確かに遡及因果を起こしているように見える。しかもそれは信念の度合いという主観確率の世界ではなく客観的な傾向性についてである、しかし筆者には、量子不可分性は空間だけでなく時間についても不可分、因果と言うより、実験全部、開始から終了までが部分に分解できない1つの現象なのであると思える。

6. パラドックス間の関係と共通する問題。仮定法過去完了的視座

前節までで見てきたように、

i) 傾向性解釈を過去に遡った事象を変数とする条件付き確率に適用したときの困難を表すHumphreysのパラドックス。

ii) 意志決定論の文脈で提出された、そして確率1の謎のすぐ脇にあり、いったん過去に遡及しその視座から起こらなかった未来に順方向に因果する、仮定法過去完了の構造の Newcomb 問題。

iii) 量子力学基礎論、宇宙論の文脈で提出された、どの時点で波束の収縮が起こるのかを直接遡及因果の形で提出し、更に宇宙は循環因果で生成されているのかその謎を問い、宇宙全体の量子不可分性 (Quantum Non-separability) を時間方向にも適用すべきであると主張しているかのような Wheeler の遅延選択実験。

これら3つの問題は、構造の上ではほとんど同型問題に近い。他のいろいろな難問をそれぞれに抱えつつ、共通しているのは遡及因果と仮定法過去完了で語られるべき過去に視座を置いた順方向因果の組み合わせになっているということである。これを、一ノ瀬はブーメラン因果¹²⁾と呼んでいるが、これは何も珍しい事ではない。初等統計学で戒められる、因果と相関を間違えてはいけないと言う注意で、過去の事象を通しての因果という事例である。だから難しいのはやはり遡及因果するところである。ただし、われわれが、ああたったかも知れない世界についての悔悟をするときの事を意志決定論の文脈で分析するとき²⁹⁾、このブーメランという言い方は簡潔で良く感じを表していると思う。

そしてもう一つ共通しているのは、確率のトポロジー、すなわち $p=1$ と、1に幾らでも近いが $p \neq 1$ という場合の間の違いが問題の様相を変えてしまう言うことである。このことは、i), ii) のどちらにおいても、本来パラドックスが成立するかどうかの違いとなっている。根本的な相違であるが単純にパラドックスが成立しないとされる方の $p=1$ の場合は、都合が悪いからと言って捨てて良いようなものではない。この両者の間の接続性こそ探求されるべき事柄である。

iii) は確率1と言う事柄が頭には現れない。遡及因果が表に出ている。しかし確率が数十億年も遡及して1になると言うことを述べている。それが提出されて実験が遂行されたのが、デコヘアの議論や実験が行われるようになる以前であるから無理もないが、最終段階の地球上での測定による崩壊は瞬間に(と言うより無時間的に起きると言う扱いである。しかし、20世紀末あたりからの物理学の状況は $p=1$ という状態への確率の崩壊(波束の収縮)を時間につて連続的に扱うことが出来るようになってきている。現実にはその中間状態も観察されている。我々はむしろこの点に注目すべきであろう。

われわれがなすべきは、観測問題のような客観確率だけでなく主観確率に対しても確率1の世界と崩壊する前の世界を連続的につなぐ考察であり、さらには主観解釈と客観解釈の統合である。

さて一方でパラドックスの間に重大な相違はある。第1には、取り扱われる確率が i) と ii) は主観確率 (i) の傾向性確率は客観確率であると言われるが主観確率の面も持っている) であるのに対し、iii) は客観確率をアつかっている。Popper は、物理学者が自分では認識せずに、あるいは多少は気付いていて

も主張がぶれてしまつて同じ頁の中で主観解釈になったり客観解釈になったりする、と揶揄しているが、物理学が信念の度合いを扱っているとは、現在ほとんどの人は思わないであろう。

従って主観確率の面を考察したいという欲望には物理学は対外的には禁欲的である。初期の観測理論では主観確率と客観確率の概念の違いがあまり認識されていなかった。「Wignerの友人」のパラドックスは直ちに唯我論に行き着いてしまう。その様な事柄を恐れ、それ以後は返って主観確率や認識、意識と言う概念を持ち込むことは厳しく戒められてきたのである。

第2に当然のことではあるが、iii)は確率振幅で記述される非可換確率である。後の相違はいろいろあるが、付随的にしか過ぎないであろう。「非可換確率の崩壊は古典確率の崩壊と同じ事である」という Popper や一ノ瀬の主張で満足するのではなく、「非可換確率と古典確率は、前者が後者を含み、崩壊のメカニズムも同じものである。それがどうして違うように見える場合があるのかということこそが、探求されなければならない。デコヘア(非干渉化)での極限移行、すなわち客観確率の崩壊と確率1の謎で象徴される主観確率の崩壊の関係も統合整理されなければならない」としたい。

もし仮に一ノ瀬の主張のように逆行確率仮説が証明されたとすると、意識が確率を崩壊させるのであるが、これは確率を信念の度合いととれば、知った瞬間に変化するのとは当然である。傾向性にとると多少問題を発生するかも知れないが、とにかく観測理論で何十年も前から忌避されている様な現象とは対象が違う。観測理論では、状態ベクトルを確率振幅 (Popper が批判するように、物理学者達は確率振幅に対して、主観解釈と客観解釈の間でぶれている様に見えるという難点はあるが、しかし Popper は密度行列を知らなかったようで、彼の物理学者に対する批判のうち何割かは密度行列が同時に持つ確率の2つの側面のあらわれを物理学者は述べていたと言うように説明できると思う) であると言いつながら、深層心理では何か実体的なイメージを持っているからである。

しかし、確率の非干渉化、すなわちデコヘアの途中の解析や実証も物理学ではされている現在、それが信念の度合いではないことは承知で言うが、瞬間ではなく有限の時間をかけて量子力学なら波束の収縮、信念の度合いなら確率の崩壊が起こると言う統一した理解が望まれる。急いで付け加えるが、当然このことは、確率の異なる側面である客観解釈と主観解釈の統合という難問も抱き合わせになっている。事は一気に臨まねばならないのではないだろうか。

Newcomb 問題に現れる「予知」などからんだ尤度を厳密に1であるとすると、もとのパラドックスに、循環因果というさらなるパラドックスが付け加えられることになる。すると自由意志が否定されるという問題もからんできて、全く違った様相になってしまう。循環因果は、電気回路の自励発振と良く似ている。循環因果の種(原因)は何かという疑問も生じてくる。この様にいろいろな疑問が出てくると言うことは、確率のトポロジーの重大性を認識させてくれる。

遡及因果についての議論は何となくやりにくい印象を受ける。

我々には未だ原因と言うことの意味がはっきり了解されていないという困難のためであるのは勿論だが、さらには、対偶や逆などという論理を用いるときには、意識的に時制の問題を外から付け加えなければならない為であると思われる。時制を内蔵し、かつ非可換確率論を基本とした確率論の構築をしなければならぬのであろう。

最後に、非常に古くからの問題ではあるが、因果という基本問題は、遡及因果だから特に奇妙と言うだけのことではない。因果と相関との違いは自明ではない。原因や責任とは何を意味するのかと言った問題は、われわれの倫理の基本問題でもあり、今年論じられなかったが、これから精力的に研究を遂行知る所存である。

謝辞：筑波大学図書館情報学群の緑川信之教授にはいつもながら議論をしていただきまして感謝いたします。私も言語分析の方をちゃんとやらなければと感じる今日この頃です。

参考文献

- 1) K. Popper, 『科学的発見の論理』上・下 大内他訳 恒星社厚生閣 (1971年) .
- 2) K. Popper, 『实在論と科学の目的 -ポストスクリプト I』, 上・下, 小河原他訳 岩波書店 (2002年)
- 3) K. Popper, 『開かれた宇宙 -ポストスクリプトII』, 小河原他訳 岩波書店 (1999年)
- 4) K. Popper, 『量子論と物理学の分裂 -ポストスクリプトIII』, 小河原他訳 岩波書店 (2003年)
- 5) K. Popper, *A World of Propensities*, Thomas Press, (1995)
- 6) ポパー哲学研究会編, 『批判的合理主義 第2巻 応用的諸問題』, 未来社 (2002年)
- 7) 小河原誠編, 『批判と挑戦』, 未来社 (2000年)
- 8) 蔭山泰之, 『批判的合理主義の思想』, 未来社 (2000年)
- 9) P. S. Laplace, 『確率の哲学的試論』, 岩波書店 (1997年, 原著は1814年)
- 10) D. Gillice, 『確率の哲学理論』, 日本経済評論社 (2004年) 原書 *Philosophical Theories of Probability* は2000年
- 11) 一ノ瀬正樹, 『原因と結果の迷宮』, 勁草書房 (2001年)
- 12) 一ノ瀬正樹, 『原因と理由の迷宮』, 勁草書房 (2006年)
- 13) P. Humphreys, "Why Propensities Cannot Be Probabilities", *The Philosophical Review* **94**, (1985)557-570
- 14) W.C. Salmon, "Propensities: a Discussion Review of D.H. Mellor *The Matter of Chance*", *Erkenntnis* **14** (1979)183-216
- 15) R. Nozick, "Newcomb's Problem and Two Principles of Choices", *Paradoxes of Rationality and Cooperation*, University of British Columbia Press.(1985)107-133
- 16) R. Nozick, *The Nature of Rationality*, Princeton University Press(1993)
- 17) D. Lewis, "Prisoner's Dilemma is a Newcomb Problem", *Philosophical papers I*, Oxford(1983)
- 18) A.J. Ayer, 『知識の哲学』, みすず書房 (1981年), 原著 *The Problem of Knowledge* は (1956)
- 19) M. Dummett, 「結果は原因より先行できるか」, 『真理という謎』, 勁草書房(1986年)原書 *Truth and Other Enigmas* は1978年
- 20) N. Goodman, 『世界制作の方法』, みすず書房 (1987年) 原書 *Way of World Making* も1987年
- 21) 榛葉豊, 「人間中心原理と確率の本性 -確率過程量子化の解釈のために-」, 静岡理工科大学紀要 12 巻 (2004年) 177
- 22) 榛葉豊, 「信念の度合いと不充足理由律 -3 囚人問題の Bayes 解をめぐる-」, 静岡理工科大学紀要 13 巻 (2005年) 53
- 23) 榛葉豊, 「統計的確率に対する信念の度合い -確率的言明の反証可能性-」, 静岡理工科大学紀要 14 巻 (2006年) 73
- 24) 伊藤邦武, 『ケインズの哲学』, 岩波書店 (1999年)
- 25) 伊藤邦武, 『人間的な合理性の哲学』, 勁草書房 (1997年)
- 26) 三浦俊彦, 『可能世界の哲学』, 日本放送協会出版局 (1997年)
- 27) 三浦俊彦, 『論理学入門』, 日本放送協会出版 (2000年)
- 28) 三浦俊彦, 『論理パラドクス』, 二見書房 (2002年)
- 29) 小島寛之, 『確率的発想法』, 日本放送協会出版 (2004年)
- 30) J. M. Jauch, *Foundation of Quantum mechanics*, Addison-Wesley(1972)
- 31) 渡辺慧, 『知識と推測 -科学的認識論』, 東京図書 (1975年) 原書 *Knowing and Guessing* は1969年
- 32) 市川伸一, 『確率の理解を探る』, 共立出版 (1998年)
- 33) R. Penrose, 『心は量子で語れるか』, 講談社 (1998年) 原書 *The large, the Small and the Human Mind* は1997
- 34) R. Penrose, 『皇帝の新しい心』みすず書房 (1994年) 原書 *The Emperor's New Mind* は1989
- 35) 石飛道子, 『ブッダ論理学 -五つの難問』, 講談社 (2005年)
- 36) N. Bohr, 「原子物理学における認識上の諸問題をめぐる Einstein との討論」『ニールスボーア論文集 I, 因果性と相補性』岩波書店 (1998年) 原論文は"Discussion with Einstein on Epistemological Problem in Atomic Physics", *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Ed. Schipp, Evancton Illinois(1949)
- 37) J.S. Bell, *Physics* **1**(1965)195
- 38) A. Aspect and G Roger, in *Proc. Int'l Symp. on Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo 1983*, Phys. Soc. Japan(1984)
- 39) J. Earman and W.C. Salmon, "The Confirmation of Scientific Hypothesis", *Introduction to Philosophy of Science*, Princeton Hall(1992)
- 40) R.M. Sainsbury, 『パラドクスの哲学』 勁草書房 (1993年) 原書 *Paradoxes*, Cambridge U.P.(1988)

車のコンディションはどうか？運転のスキルはどの程度？

～ より良い講義の為の振り返りチェックリスト ～

How's your car? How's your driving?— A reflective checklist for better classroom teaching—

Gregg MCNABB*

Abstract: Falling enrolment combined with a large surplus of schools and universities means that there is an urgent need for educators and administrators to become innovative. Faculty development will be an important aspect of any innovation initiatives. This paper discusses some fundamentals of faculty development.

Key words: faculty development (FD), education, branding, cars, driving

はじめに

少子化による入学者数の減少は今や厳然たる事実である。いくつかの大学ではすでに、近い将来の生存競争に備えて Faculty Development Program (教員を始めとする学校関係者や大学全体の組織力向上プログラム。以下FDという) の開発に取り組み始めている。大学教員になるための特別な免許は存在しないので、残念ながらごく少数の大学関係者しか教授法、管理法等の正規トレーニングを受けていない。指導する・教えるということは、間違いなく最も重要な「ピープルビジネス」であり、現在 FD の重要性について全国的に関心が高まっていることは、日本の教育において大変心強い変化であるといえよう。

この論文では、教育現場で日常的に扱う基本的な、しかし重要な観点—自動車で喩えればネジやボルトといったモノがFDで言えば何なのかということに注目していきたい。

また、楽しみながらこのテーマを理解してもらうために、誤解を与えがちな直接的な表現は避け、主に「車と運転」の比喩を用いた。

クリストファー・ショーン氏の著作『*More Recipes for Tired Teachers*』(1991年)の「Teacher's Roadworthy Test」(先生の為の路上適正テスト)を参考とし、さらにいくつかの視点を加えた。ショーン氏は教えることの喩えに「車」のみを用いているが、私は少し考え方を広げ、「運転」という概念も取り入れた。「車」

はショーン氏のオリジナルと同様、主に教師や生徒及び教室での経験を表し、「運転」は一般にいう教育課程を表している。

しかしながら、最も重要なのはメッセージを伝えることであるから、これらの比喩には完璧でない部分もあることをご容赦いただきたい。

【車のモデル/教育機関について】

1. あなたはどんな車が好きだろうか？どんな車を運転しているのだろうか？新車？軽自動車？セダン？輸入高級車？アンティーク？年代物のスポーツカー？ポンコツ車？あるいはレンタカー？

車の種類によって人のリアクションは変化するものだ。

新車は誰もが楽しめる。ピカピカの新車には欠陥や傷が一切なく、特有の香りもある。皆気をつけて取り扱うし、それがスポーツカーであればなおさらだ。

新人教員も同様である。希望に溢れ、同僚は親切に接してくれる。前向きで良く働き、どんな問題にも縛られていない。もしくはまだ小さな問題であれば容易に解決できる。言い方を変えれば小さな失敗は周囲から許され忘れ去られる。彼らはヒネガティブな先入観を持たず、後で軌道修正が必要になるような考えも持たない。従って、新人教員がそうであるように、私達自身も物事をできるだけ新しい観点から捉えるように努めるべきである。古い車でも問題なく走行し、ドライバーもその車の運

Received March 2, 2007

*Department of Computer Science, Shizuoka Institute of Science and Technology

転に慣れているかもしれないが、定期的に新車に乗り換えることは新鮮な気分にしてくれるという点で良案である。アンティークでない限り、古いモデルの車をまた違う古いモデルに置き換えたところでメリットはないのである。

軽自動車は純粋に機能的だ。基本的な機能のみを持ち合わせている。制約はいろいろあるが、一番の長所は値段が安いことである。個々のモデルの違いを区別するのは難しいが、軽自動車に求められているのは基本的な機能であるから、デザイン性はあまり気にされず、セカンドカーとして選ばれることが多い。

しかし、残念なことに、教育現場ではそうもいかない。装備・機能に適した運転をしているうちは問題ないが、乱暴に運転したり、高価なセダンのような乗り心地を求めてしまうと途端に故障してしまい、新しい車を購入せざるを得なくなる。もっとも軽自動車は処分するのが容易で簡単に乗り換えることができると考えられているため、故障しても特に問題はないかもしれないが・・・故障を避けるには適切な運転が重要だ。上手く扱えば、セダン並みに長持ちするだろう。

一般的に選ばれることが多いのは典型的なセダンだろう。基本的な機能は全て揃っているし、時には限定オプションが付いてくる。各モデル毎のバリエーションはそう多くはないが、スタイリッシュな赤いアルティマなどを目にすることもある。最新機能の付いたハイブリッドカーでない限り、値段も似たり寄ったりである。ある程度激しく運転しても相当の期間は故障しないだろう。しかしながら、もし手入れを怠れば路上のスペースをとり、他のドライバーの妨げとなるようなポンコツ車に成り果ててしまうだろう。

日本では高級輸入車もかなり人気だが、将来的には安めの輸入車の魅力が増して、高級車の人気は今後減少する傾向にあるかもしれない。高性能でスタイリッシュなモデルが多いのが特徴である。日本車と少々異なる部分があるため、運転に慣れるのに時間を要するかもしれないが、ほとんど全てのニーズに応えてくれる。優れたハンドリング動作でスムーズな運転を可能にする。道路をよく知っているかのようである。メンテナンスのための値段は高めだが、クオリティー重視の人はそれなりの価値を見出せるだろう。多くはバイリンガルである(マニュアルやカーナビは二ヶ国語で書かれていることが多い)。オプションの選択肢も多岐に渡り、最新機能を搭載し、時には日本車にはないような先進的な機能を備えているモデルもある。

これらの高級輸入車の市場は、価値を認識し高額でも支払う余裕のある人の多い中近東のUAEやカタールが盛況であ

る。これとは逆に高級日本車はアメリカ等に輸出され、現地では高級輸入車として扱われている。

本物の自動車の市場とは対照的に、日本の教育現場には残念ながらかなりの数のいわゆるポンコツ車が存在する。大がかりな修理が必要か、あるいはもはや走行に適さないような車である。中には見るに耐えないものもある。

自動車市場でもアンティーク車やビンテージ物のスポーツカーは極めて稀だ。それらの美的価値は時が経つにつれ上昇し、クラシックな音、乗客を運ぶにはもったいないようなスタイルなどにより、人々を楽しませてくれる。継続的で入念な手入れの賜物である。ひとつひとつが芸術作品といっても過言ではない。たとえ軽自動車やセダンであっても手のかけようによってはこのようなクラシックカーになり得る。カルメンギアやビートルも昔は大衆車だったが今やれっきとしたクラシックカーである。どの車を選んだとしても大切な事は、周囲が自分をどう見るかを考え、自らのブランディングを行うことである。

日本ではレンタカーが良く利用される。種類も豊富に揃っている。古いスタンダードなモデルがほとんどだが、中には高級車が手頃な値段で借りられることもある。ビンテージや新種のスポーツカーは、やはり高額だ。最近では軽自動車やセダンもレンタルされている。残念ながらレンタカーは乱暴に扱われがちなので故障するのが早いですが、供給数が上回っているため、補充は容易にできる。

とは言うものの、これは警戒すべき傾向である。企業や団体が多種多様なレンタカーのコレクションを活用しながらブランドイメージを確立するのは難しいだろう。ヤナセに行けば高級車が展示されたショールームがあり、顧客はその中から好きな車を選択できる。だからこそ真っ先にショールームを訪ねるのだ。昨今の消費者は品質に厳しくなっている。その中であって、十分なマーケティング戦略なしに多種多様な車を用いてヤナセのようなブランドを構築することは不可能なのではないだろうか。結果、この場合のFDは、品質問題と顧客へのブランドイメージの浸透の2点を同時に図っていかねばならない。ヒュンダイは値段の手頃さと品質のバランスを上手く達成した良い例といえるだろう。ヒュンダイはまた、慎重かつ厳しい品質管理により、安価な車でもブランディングできるということも証明している。

2. 最近洗車、内装の清掃、ワックスがけをしたのはいつ？

ワックスの綺麗にかかった黒や赤のスポーツカーは誰の目

にも美しい。多くの人が振り返って見るだろうし、声に出して賞賛するだろう。きちんと清掃された清潔な車に乗るのは気持ちの良いものである。ほとんどの人はそれなりに気を使って洗車をしているだろうが、中には手入れの行き届いていない車も見かける。そんな車に乗ったり、近づいたりするのは気分の良いものではない。何日も食べ物を車内に放置し、湿気ったフレンチフライやハンバーガーの臭いの充満した、タバコの吸殻の溢れたような車には誰も寄り付きたくないものだ。

私達も日頃、自分自身の身だしなみ(髪型、服装、適度な運動、歯や肌の手入れ等)には気をつけるべきだ。なぜ卒業式や結婚式等にはピカピカに手入れされた車が多いのか？なぜ大学入試センター試験に立ち会う教授陣は、自分の学校に入学すると決まってもいない受験生のためにきちんとした服装をしてくるのか？しかし一方で毎日学校で顔を合わせる、私達の「顧客」である生徒達に対しては、エアフレッシュナーもほとんど使わず、掃除機もかけず、外観が汚れてきても塗装のやり直しや洗車は重要ではないと考えているような教員がいることも事実なのである。

最近では、生徒はまさに私達の「顧客」であり、教育というビープルビジネスに携わる以上、顧客のニーズに即したブランド力が鍵になる。トヨタ、ホンダ、マツダ、ヒュンダイ、メルセデスや日産が顧客のニーズを知り尽くしその期待に応えようと努力しているのに対して、GMやフォードなどは遅れをとっている感が否めない。ブランドの方向性が特徴のない曖昧なものであれば、世間に間違ったイメージを与えかねない。これは教員個人にも教育機関にも当てはまる問題である。

これを実証するべく私は毎年生徒に対して 15 分程度の英語での面接を実施している。面接を終えた後で、次の試験に向けた準備は万端かと質問してみる。同時にどの教科のテストが一番簡単、あるいは難しいかと訊ねてみると、驚いた事に多くの生徒が毎年同じ教科名を挙げるのだが、なんと担当教授の名前を覚えていないのである。13 回を超える講義をしているにもかかわらず、その担当教授の名前は知られていないままなのだ。インパクトがなく、ブランド力がないということである。

幸いにもセダンや軽自動車は、新品のガラス(新しい眼鏡)美しく縁取られたタイヤ(靴)やより良い塗装(ファッショナブルな服装やアクセサリー)を施すことで、簡単に経済的かつ効果的に変身できる。FDはこの基本的だが忘れられがちな顧客サービスの観点を考慮すべきである。また、軽自動車やセダンをカスタマイズすれば高級車と同じくらい格好よく見せることが可能であることを理解すべきだ。結局のところ、それはオー

ナーのプライド次第ではあるのだが・・・。自分はリース契約した軽自動車で行くのだと決めたなら、車が魅力的になるように最大限の努力を払うことが大切である。もしあなたの戦略が、リースした軽自動車を乗りつぶすということであれば、そのブランディングは危険だといわざるを得ない。FD が組織の全体戦略に含まれていないならば、組織自体の失敗は決定的なのである。

3. 定期的な点検をしているか？エンジンは快調か？エンジントラブルを隠そうと余分な物を足し過ぎていないか？

車には定期的な点検が欠かせない。これは誰もが知っている常識だ。私達にも適度な運動や趣味、休暇、バランスの取れた生活習慣が必要である。オイル交換はエンジンの原動力であるから、私達も旬の食材を摂取し健康維持に努めることが大切である。

エンジンに少しでも不調が見つければもちろん修理が必要だ。修理をせずに長時間運転すれば車は故障する。私達は1日中運転し続けるということはない。ドライブの途中で適当に何回か休憩をはさむ人がほとんどだろう。車を酷使すれば故障時期を早めてしまい、疲れている時は集中力が散漫になり事故を起こす危険性が増す。となれば自分だけでなく周りにも危険が及ぶ可能性があるため、休憩をはさむことが自分にとっても車にとっても良いことになる。Engine additives(カフェインや砂糖)の定期的な摂取は一時的にはエンジンの動きを良くするが、車を長持ちさせる最良の方法は注意して運転することである。

FDはより効率的であるためのトレーニングを含んでいるべきだ。教育における効率性の実現は、喫緊に取り組むべき大きな課題である。

4. すぐに修理を施すか？

自分の車に問題が見つかってもしそれが小さなものであれば大抵の人は放っておくだろうが、ひとたび問題が大きくなれば原因が何かを突き止めすぐに修理に出すだろう。あなたがもし自分の教え方に問題があると思ったらすぐにしかるべきエキスパートに相談に行くだろうか？なるべく早く解決しようとするだろうか？

5. 計画性をもってメンテナンスをすれば、トラブル知らずのドライブが続けられる

車は必要であればその都度修理に出すが、それ以外にも定期的に車検に出さなければならない。教員の世界でもほとんどの教員免許保有者は何らかの資格更新の義務を果たさなければならないが、皮肉なことに大学教授は教員を育成する立場にあるにもかかわらず、正式な免許も必要ない上に指導能力の見直しの義務さえもない。この問題は真っ先に改善されるべきである。全ての教育過程において、FDに教員の能力点検の義務化を組み込むことが望ましいのではないだろうか。この有効性は生徒からの評価結果を集計すれば一目瞭然に確認できるだろう。これはすなわち、快適なドライブに繋がることになるだろう。

【車と教室】

● 室内温度はどうか？

快適なドライブのためには暑過ぎたり寒過ぎたりしないよう注意することが大切である。

● シートは正しく調節されているか？

教室によっては座席の位置を変えられる。定期的に配置換えをすることは気分転換にもなる。目的を持って配置換えをするのは悪くない。

● 電気はきちんと点くだろうか？

照明も大切である。日本の建物に多い蛍光灯は目が疲れる原因にもなるので、できるだけ日光を取り入れよう。

● サンバイザーや反射ガラスはあるか？

暑い日や寒い日、雨の日などにはブラインドやカーテンを有効に使って教室の環境をより良く保とう。

● チェーンやパンプ、トランスミッション液等、スペアパーツは準備しているか？

生徒はよく忘れ物をするので、テキストや鉛筆、消しゴム、配布プリント、ティッシュ等はスペアを持っておくようにしよう。

● カーオーディオは使用するか？

授業の開始時に音楽を流す事は、ムードを演出するのにも役立つし、生徒に対して自分自身を特徴付ける事ができる。何も「サービス」しない他の教師陣とは良い意味で区別されてアピールになるだろう。何気なく曲を流したとしてもある生徒にとっては初めて聴くジャズかもしれず、新しい楽しさの発見に繋がるかもしれない。

● ライターはきちんと使える状態か？

講義の始まる前に教室の設備がきちんと動くか確認しているか？意外と確認しない人が多いのではないだろうか。

● 運転する前にドアをロックし、全員のシートベルト着用を確認しているか？

授業の前に全員が揃い、準備万端かどうか確認しているか？中には授業開始後も生徒がトイレに立ったり遅刻する事を容認している教師もいる。

以上の例は単純でわかりやすいものばかりだが、多くの教員が実行していないのは憂慮すべきことである。

【運転—教える事と教育過程】

路上の規則

1. 走る速度は速過ぎたり遅過ぎたりしていないか？

スピードという点では教員も罰金を払うべきかもしれない！さまざまな理由から、目的地への到着を急ぐ人もいるが、ドライブでは道中を楽しむ事こそ最高の喜びである。地図(シラバス)を見ながら注意深く準備(レッスンプラン)をすれば、スピードを出す必要もない。スピードを出し過ぎると周りの景色はどんどん過ぎて行き、普段だったら気づくさまざまな事も見逃してしまうかもしれない。逆に、スピードを緩め過ぎると後続の車が詰まって迷惑をかけることになる。

これらペース配分の問題は中学校・高校で慢性的に見られる。数人の生徒にペースを合わせようとすれば、他の生徒はもっと多くのことを学ぶはずの機会を逃してしまう。規定の速度に則って走らなければならない。

FDにおいて重要な点は、教科内容をいかに効率的に教えるかという事であり、それさえしっかり押さえていけばペース配分に悩む事はない。日本で極めて弱い教科である英語に関しても、英語教育に関するセミナー(無料もしくは低料金)が全国至る所で毎週末に開催されているにもかかわらず、参加している教員はほんのわずかであることは驚きだ。こういったスキルアップの機会を利用しない手はないではないか。

2. 「徐行」や「合流」サインに注意を払っているか？

高速道路の合流地点で、他の車が車列を譲ってくれない状況はストレスが溜まるし、事故に繋がる危険性もある。同様に、時には生徒の要望に合わせて授業を進めることも必要である。常に合わせる必要はないが、講義を進めていく上で彼らの意見を取り入れることも参考になる。例えば、分厚い教科書を使っていて到底期間内には終わらない場合。そのような場合は、生徒に勉強したい単元を自由に選択させることもできるし、特

定の単元を個々のペースで履修させることも可能だ。

主要な自動車会社は顧客の声を常に収集・分析し製品開発に役立てている。最も重要なピープルビジネスに身を置く私達も、教育の過程において生徒が良きパートナーであることを再認識するべきである。

3. 信号が変わったらすぐに発進しているか？(講義は時間通りに始めているか?)「生まれ」の標識は守っているか?(時間通りに終わっているか?)

大学においては、講義終了の30秒前に宿題を出す教員と、終了時間を2~5分超過してしまう教員という2種類のドライバーがいる。どちらの場合も、生徒は次の講義に間に合う心配になりそわそわしてしまう。(彼らは交通ルールを守って遅刻しないようにしているのだから。)その結果、しっかり話を聞いていなかったりする。さらには、教員の私達が遅れても許されるのであれば、生徒が遅刻することを注意できなくなる。教員はできるだけ交通規則に則って行動するべきである。

4. 事故を未然に防ぐ為の運転を実践しているか?シグナルは余裕を持って事前に出しているか?

路上では常に周りを意識し、様々な状況を予測して運転しなければならない。これによって未然に事故を防ぐ事ができる。

授業においても生徒がつまづきそうな内容を予め予測し、備えておく必要がある。目の前に危険なカーブが迫っていれば徐行するのと同じように、講義の方向性を変える時や難しいテーマを与える時は、事前にある程度説明を加えておく。そうすれば生徒はついてくる事ができる。急に方向転換したら、ついてこれない生徒も出るだろうし、道に迷う者もでてくるかもしれない。

プロらしく運転しよう

1. 窓を開けて空気の入替えをしているか?

長時間のドライブでは室内の空気がよどんでくる。時々窓を開けて新鮮な空気を入れるのは気持ちの良いものだ。講義中にリフレッシュできるような工夫をしてみよう。

2. 新しい道を選んだ事はあるか?

講義をより良く進める為に、時には違った道(方法)を選ぶこともできる。通り慣れた同じ道ばかり通っているとマンネリ化し

て機械的に授業をすすめることにもなりかねない。講義内容に自信があれば、乗客(生徒)に違う景色を案内する余裕が生まれる。目的地に着くまでにひとつではなくいろいろな道を会得できたら、もっと良いドライバーになれるだろう。FDはこのような自己改善の機会を与えるべきである。

3. ラジオは正しくチューニングされているか?

前述のショーン氏は、私達教員は十分に生徒の意見を聞いているか、と疑問を投げかける。時としてラジオはただのバックグラウンドミュージックになりがちである。生徒が関心を持つ局にチューニングを合わせてあるだろうか。また、自分のお気に入りのCDやmp3ばかりを好んで聴くだけでなく、最近流行りの音楽に興味を持つ事も大切である。

一部の教員はクラスで教え方や自分のパフォーマンスについてアンケート調査を行っているようだが、もっとそういうことに時間をかけて良い。(今はせいぜい1学期に2回程度だろう。)自分の教え方に自信があったとしても、生徒から意見をフィードバックしてもらい、参考にしていくことは大変重要である。意見を聞かせてほしいという熱意を見せれば、生徒も臆することなく意見をくれることだろう。

4. ギアチェンジはスムーズか?

教室での間の取り方はどうだろうか?ギアの進行は必要に応じてスムーズに行っているか?「偉大な」教員と「良い」教員の違いのひとつは、間(流れ)の取り方を理解しているか否かである。偉大な教員は間の取り方が申し分なく、微妙な進行をスムーズにこなす。FDはこの「流れ」についての分析も踏まえておくべきだ。

5. ショーン氏は聞く。最後にブレーキをチェックしたのはいつ?

講義で自分ばかりが話し過ぎていないかを確認するためにも、時々自分にブレーキをかけて振り返ってみよう。これは外国語の教員だけが慎重になるべきことではない。コミュニケーションが一方通行になりがちな日本においては、できる限りすべての関係者とのパートナーシップについて学び努力する必要があるのだ。

6. 寝ている乗客はいないか?

日本人が車の中で良くうたた寝をすることは、外国人にとっては驚きである。景観や会話を楽しむ機会を失ってしまうというのにドライブの最中寝てしまうとは。

以前カナダのカルガリーからバンフへ向かう日本人のバスツアーに同行したことがある。80分足らずの道中の景色は雄大なロッキー山脈がせまってくる素晴らしいものだった。ところが、半数の人が到着するまでずっと寝ていたのである！

私達の仕事は教えること、そしてより良く教えることである。私達が行おうとしている講義は有益な内容がぎっしり詰まった重要なものであるはずだ。生徒にうたた寝させることは、その内容が重要ではない、もっと言えば私たちはプロではないと言っているようなものである。

【結論】

これまで述べてきた多くのポイントは、自動車教習所に行っ習うようなことばかりである。特別難しいことではないが常に遵守されなければならない。運転歴が長くなるほど自分の腕を過信してルールを無視しがちだ。これは高齢のドライバーに多く見受けられる事だが、誰もが運転を諦めなければならないほど年老いたとは言われたくないものだ。

FDの重要な点は、ピープルビジネスで成功を収める為に、できるだけ多くの人間関係の視点を組み入れることの重要性を強調することである。「第一印象で全てが決まる」というのは就職面接で良く言われることだが、幸いにも教職というのはその時々状況に合わせて自分のスタイルを再構築できるという利点がある。

誰でもより良いドライバーになることができるはずだ。しかし行く先には多くの障壁が待ちうけている。だからこそ、スキルが必要となるのである。

<参考文献>

More Recipes for Tired Teachers: Well Seasoned Activities for the ESOL Classroom by Christopher Sion (Addison-Wesley, 1991).

The writer would like to express his gratitude to a blind reader and Associate Professor Katsuko Tomotsugu for her careful corrections and comments.

Introduction

Now that falling enrolment is an ominous fact of life, some universities are already trying to gain a competitive advantage by revving up their faculty development programmes (FD) into high gear; others are just beginning now. Since there is no special university teacher's license, unfortunately, only a small proportion of academic staff have formal training in methodology, pedagogy or people management. Teaching is arguably the most intense and important type of "people business" so the current nationwide emphasis on FD is a very encouraging development for Japanese education.

In an effort to call attention to basic, but absolutely essential aspects of daily classroom teaching at all levels – in a word, to focus on the nuts and bolts of FD, – this short paper makes use of car and driving analogies primarily to facilitate recall, but also to be more enjoyable and avoid being misconstrued as overly direct or worse, pontifical. It adds to the 18-point "Teacher's Roadworthy Test" checklist that appeared in the Teacher Development section of Christopher Sion's classic activities book, *More Recipes for Tired Teachers* (1991). In his checklist, Sion only refers to the car as it relates to teaching, but I will expand on this and discuss the car and driving. The car is loosely taken to mean the teacher and/or students and the classroom experience similar to Sion's original version, while driving is the educational process in general. However, it should be noted that the value of the message takes precedence over trying to draw a perfect analogy.

Car models and educational institutions

1. What kind of car represents you? What are you driving? A brand new car? A K-car or similar? A typical sedan? A luxury foreign brand? An antique? A vintage sports car? A jalopy? A leased car?

People react very differently to different cars.

Almost everyone enjoys a new car. It is shiny and clean, it has no defects or damage, and it has that special new car smell and more. Everyone tries to take care of their new car, especially if it is a sports car. The same is true of new teachers or a new teaching position: there is a lot of hope and promise. Colleagues usually treat new teachers better. New teachers work well and initially are free from problems, or at least most minor ones are easily repaired free of charge. In other words, small mistakes are forgiven and forgotten. They usually don't arrive with negative preconceptions or other things that might require repairs later. Therefore, as much as possible, it is a good idea to condition ourselves to try to see situations from a new perspective just as a new teacher must. An old car might run all right and drivers are probably used to the way it drives, but trading it in for a new one periodically is a good idea. Unless it is an antique, most likely there is no advantage to replacing an older model with another older model.

A K-car is a purely functional car. It gets the most basic jobs done and that's all. Although it has numerous limitations, its main virtue is that it is cheap. It is difficult to distinguish one model from another and few people care about differentiation anyway since they are just basic units for simple work. They are often bought as secondary, *nonessential* vehicles, but, unfortunately, in education this is not the case. K-cars are fine for what they are designed for, but problems arise when some people try to drive them too hard, expecting them to perform like a better, more expensive sedan. If you drive a K-car too hard, it

will break down, quit running soon, and a new one will be needed. K-cars *are* viewed as being disposable, and replaceable, however, so few people become concerned when they do quit running. To avoid breakdown, proper driving is important. If treated well, K-cars can last almost as long as sedans.

A typical sedan is the most common choice. It provides basic transportation, sometimes with limited options. Usually there is not a lot of variation from model to model but occasionally we can see a value-added, stylish red Altima or similar. They all cost about the same except for the newer hybrids which have advanced, dual operating systems and computer technology. Most sedans are quite reliable. They can be driven rather hard for quite a long time before repairs are needed. If neglected, however, they can easily become jalopies that take up space on the road and impede other drivers.

Foreign luxury brands are quite common in Japan but will become scarcer in the future as cheaper imports seem more attractive. They tend to be very well made and have style. They drive a little differently and take a bit of getting used to at first, but can fulfill almost all driving needs. Most drive very smoothly and have excellent handling. They seem to know the road very well. They cost a little bit more to maintain, but are worth it for people who want quality. Many are bilingual or partly bilingual. They come with many options, sometimes equipped with cutting-edge hybrid technology and advanced, yet often unused, features that are unavailable on many Japanese models. Arabs, particularly in the United Arab Emirates and Qatar, who recognize their worth and are willing to pay full price, are purchasing the better foreign models. High-end Japanese models are being exported to America, where *they* have become the foreign luxury brands.

In contrast with the real automotive market in Japan, regrettably, in education there is a significant number of jalopies. There are unroadworthy vehicles that need

major repairs or should be retired from service. Some of them are real eyesores. Parallel to the actual automotive market, antique cars or vintage sports cars are rare. Their aesthetics improve with time, they are a joy to watch, have a classic sound and carry passengers with unmatched style. They are the result of years of constant, proactive care and attention. Each one is a work of art. However, if well cared for and customized, certain K-cars or specific sedans can also become modest classic cars. The Carmen Ghia and the Beetle, once basic cars, are now classic cars. No matter what car we choose, it's worth remembering that it is an important way we brand ourselves.

There is a leased car boom in Japan today. There are many varieties. Most are older, standard models, but there are older luxury models that can be rented quite cheaply. Vintage cars or new sports cars continue to retain their full value. Recently, in order to save every possible dollar, more and more new K-cars and economy sedans are being leased. Unfortunately, because they have been leased, these cars are driven far too hard and they break down, but there is such a large supply of them so it is still easy to get more. Nevertheless, this is an alarming trend. It may be difficult for an institution that needs to improve its brand image to try to do so by using a heterogeneous collection of leased vehicles. When we go to Yanase we all know that we can choose from among a showroom of quality vehicles. Of course this is the reason why we go to Yanase in the first place. Consumers are very quality-conscious these days, so it may be unrealistic to hope to achieve Yanase-like branding using a fleet of assorted vehicles unless there has been careful, prior analysis of the product line-up. As a result, FD needs to be a two-pronged campaign where actual quality issues are addressed in tandem with strategies to make sure that consumers will correctly perceive the intended branding image. Hyundai has been very successful in making consumers realize that affordability and quality are possible. Further, it is proof that with careful and

relentless quality control, cheaper vehicles can be well branded.

2. When was the last time you took your car to a car wash, vacuumed the interior, had a wax or got a new paint job?

A shiny, waxed, black or red sports car is a wonderful sight to most people. Most people turn to look at one and often admire it out loud. It is a pleasure to be in a newly vacuumed, air-freshened car. Although most people *do* take reasonable care of their cars, some are rarely washed and are basically unkempt. Some owners have day-old food lying around in them so when you enter or get close, it is unpleasant. It is self-evident that no one wants to be around a dirty car or one that smells like stale french fries, hamburgers or cigarette butts. Therefore, because of what we do, we *must* include certain necessities such as hairstyling, wardrobe updating, gym membership, dental care and cosmetics in our basic operating costs. Why is it that if you go to a graduation or wedding ceremony, you will see cars that have been carefully washed, waxed, polished and freshened? Why do most professors dress up for the 大学入試センター試験, even though none of the students in the room is their own? Yet for the students we all see on a daily basis, our regular customers who *pay our salaries*, some of us don't think a car wash is important, and rarely use air fresheners, vacuum or get a paint job when the exterior becomes very rough. These days, students are quite literally our customers and whether or not we acknowledge it, we *are* in the people *business*, which means that branding does matter, as does anticipating customers' needs. At Toyota, Honda, Mazda, Hyundai, Mercedes and Nissan they know very well what customers want and work hard to *surpass* customers' expectations, whereas at GM and especially Ford they may have learned too late. If our branding is nondescript or dull, then we run the risk of being perceived as such even when we are not. This is applicable both to individuals and institutions. To illustrate this point, every year I

conduct 15-minute student interviews (in English). Often after the formal interview is finished, I ask them if they are ready for their upcoming exams. I frequently ask them whose exam will be the easiest or the most difficult. Consistently, year after year, it has been astonishing to learn that a significant number of students name the same subjects and *cannot* tell me who teaches the courses. Even after 13 or more lectures some professors remain consistently anonymous!

Fortunately, any sedan or K-car can be easily, economically and effectively customized by adding such features as tinted glass (new glasses), nice tires with fancy rims (good shoes) and a better paint job (interesting and/or fashionable quality clothes and accessories). FD should address these basic but neglected aspects of customer service, recognizing that it is entirely possible to customize any K-car or sedan so that it looks almost as sharp as other more expensive cars. It all depends on the extent of one's pride of ownership. If a decision has been made to have a fleet of (leased) K-cars, then efforts should be made to make them as appealing as possible. If the strategy is to run a fleet of leased K-cars into the ground, irreversible damage may be done to brand image. Sincere FD must be a part of an institution's strategy in order to maintain a competitive edge.

3. Do you make sure that your car is tuned-up? Do you have regular pit stops? Are all cylinders firing? Are you adding too many engine additives in order to conceal engine trouble?

Cars need to be taken care of in order to operate optimally; this is obvious, common knowledge. We need to have tune-ups in the form of regular, vigorous physical exercise, hobbies, vacations, a balanced routine, and so forth. It is important to change the oil to keep the engine running smoothly. Thus in life, proper balance with seasonal variety is a must.

If all cylinders aren't firing correctly, then of course

maintenance is necessary. If we drive too long without tuning up the car, it will fail us. We don't normally drive a car all day; we have several "pit stops." We realize that if we push our car too hard, it may break down or hasten its breakdown. If we are tired, we need to stop because we risk endangering ourselves and other drivers when we aren't 100% alert on the road. Proper consideration must be shown to all people on the road. Therefore most drivers should make an effort to cover a reasonable distance in a day and then stop. Short pit stops to enjoy coffee and chat with passengers are necessary for the driver and car engine. If we are regularly, unwillingly driving all day and well into the night, we seriously need to evaluate what we can do to change so that we can avoid needing a major overhaul or causing an accident. Using engine additives (caffeine, sugar, etc.) periodically will boost engine performance and make it run more smoothly for a while, but the best way to preserve any car's life is to drive it carefully. FD should include training on how to work more efficiently. Efficiency in education is a major challenge that urgently needs to be dealt with.

4. Do you make repairs right away?

If there is some minor car trouble, many people will ignore it, but once it becomes a bit bigger, almost all drivers will find out what the trouble is and have it repaired. If there are problems in your teaching, do you ask for a consult from a qualified "technician?" Do you attempt to fix the trouble as soon as you can?

5. Scheduled maintenance helps to ensure longer, trouble-free driving.

Most of us repair our cars as necessary, but we must also submit to regular, comprehensive inspections. Ironically, almost all licensed teachers do undergo some form of mandated upgrading (a form of check-up or upkeep) but, at the same time, unlicensed university professors are not only exempt from this themselves, they are the very people teaching the

teachers. This needs to be improved upon. At all levels of education, FD initiatives, just like real inspections, could include mandated inspections accompanied by intervention as necessary. Effectiveness of such initiatives could be measured by the extent to which student evaluations indicate an increase in pleasant, smooth driving.

Cars and the classroom

•How's the temperature control?

We do need to be able to control the room temperature, but if we can't, we should expect that driving will be uncomfortable, so we'll need to be more careful.

•Are the seats properly adjusted?

In some classrooms seating can be arranged. Occasional rearrangement of desks and chairs make things seem new or better. Change for the sake of change is not wrong.

•Does the interior light work well?

Lighting is also important. Improper fluorescent lighting is something that almost everyone has to live with in Japan. It tends to make us feel tired, so as much as possible we should let in natural sunlight.

•Do you have a good sun visor or tinted glass?

On very hot days or very dismal, rainy days, we should use blinds or curtains to improve and manage the classroom environment.

•Do you have spare equipment such as chains, a pump, brake or transmission fluid, etc.?

Students do forget things all the time, so just as we carry spare equipment in our vehicles, as professional teachers we need to have various forms of spare equipment such as an extra textbook, pencils, erasers,

handouts, tissues, etc.

•Do you use the car stereo?

Playing music at the beginning of a lesson sets the mood, identifies you as being more approachable, allows you to reveal a different side of yourself and distinguishes you from most of your colleagues who don't offer any “サービス.” One simple song in a class may be a student's first exposure to jazz and the beginning of years of enjoyment.

• Does the cigarette lighter work?

Before you start a lesson, do you make sure to check all the equipment that you are going to use works properly or that you know how to use it correctly? It is surprising how many of us don't check our equipment.

• Before you start driving, do you lock the doors and make sure that everyone has fastened their seatbelts?

Do you make sure that everyone is ready before you start, and once you start that no one is going to need to leave? Some teachers let students (at all grades) unlock the door/take off their seatbelts by freely letting them go to the washroom, walk around the classroom or arrive late. The preceding examples are simple and obvious, which makes it all the more distressing that many teachers have a tendency to ignore them.

Driving – teaching and education process

Rules of the Road

1. Do you speed? Do you drive too slowly?

Perhaps we teachers ought to get fined for speeding, too! For some reasons, some people are overly concerned about getting to the destination, but in driving, the enjoying the journey is paramount. If we have a good roadmap (syllabus) and are well prepared (careful lesson plans), we shouldn't need to speed.

When we speed, many are left behind. When we speed, most likely we aren't paying close enough attention and may not see a number of things that we normally would. Conversely, when we drive too slowly, others behind us can become quite annoyed, and with justification. Both speeding and driving far too slowly are perennial problems in junior and senior high schools. In particular, teachers who want to be nice and "fair" to two or three students, may deprive other students of the chance to learn more. We have to drive the speed limit. A very important aspect of FD should be about how to teach content as effectively as possible so that pacing does not become an issue. Regarding English, where Japan is notoriously weak, it is astonishing that only a very few teachers take advantage of the numerous free or nearly free seminars that are offered throughout the country every weekend.

2. Do you pay attention to "Yield" or "Merge" signs?

When other cars will not let us on the freeway and pretend like we are not there, it is frustrating and sometimes dangerous. In the same way, sometimes we need to yield to our students and allow their preferences to merge with our own. It may not be necessary to practice a cooperative style all the time, but from time to time it is valuable to include their input as to how to conduct the classes. For example, very simply, when we are using a large course book that we know we will not be able to finish, we could give students the opportunity to choose all of the units they want to study. Or we could let them decide how to approach a particular unit. Major (automobile) companies continuously solicit, measure and respond to customers' comments as a fundamental part of improving their products and services. Since we are in the most intense people business that there is, we should also make sure that students are full partners in the education process.

3. Do you wait too long after the light has changed before you get going? Do your lessons start on time?

Do you stop at the "Stop" sign? Do lessons finish on time?

At the university level, these two types of drivers are quite common. We should not be hastily assigning homework in the final 30 seconds of a class or continuing the class an additional 2-5 minutes. In both situations, students will be more concerned about getting to their next class on time (most of them do try to follow the rules of the road), so what is being said may not be heard correctly. Additionally, if we can be late, then it should be acceptable for students to be late as well. As much as possible, we need to adhere to the rules of the road.

4. Do you practice defensive driving? Do you signal well in advance?

We have to watch out for others on the road and try to predict what they will do. In this way, we will reduce the possibility of having an accident. We need to anticipate where students might have trouble and be ready for that. If there is a dangerous curve in the road, we will slow down. Similarly, when we are about to change direction in our lesson or about to introduce a difficult concept, we need to let students know what to expect so that they will be able to follow us. If we turn suddenly, some people won't be able to follow us and will get lost.

Driving professionally

1. Do you roll down the windows to change the air?

If we drive for a long time, inside the car can get stale, so breath of fresh air every so often is healthy for everyone. We should always be looking for ways to add something fresh to our lessons.

2. Do you ever take a new road?

Not only should we be on the lookout for ways to enhance our lessons, sometimes we can take a different route. If we are so familiar with our usual

route, we may drive somewhat robotically. Once we feel confident in what we are teaching, we can enjoy pointing out to our passengers some other sights. The more ways we have to get to our destinations, the better drivers we will be. FD should offer opportunities for this kind of self-improvement.

3. Is the radio tuned properly?

Related to merging above, Sion asks whether we truly listen to our students. Often when the radio is on we aren't really paying much attention, it's just in the background. Are we tuned in to students' concerns? In addition, more and more, we tend to listen to our own cds and mp3s; perhaps we need to allow for more real-time streamed content. Some teachers administer their own surveys in class. A few take time in their classes (perhaps twice a semester) to ask students about their teaching performance. Even when we have a pretty good idea of how we are doing, it is still important to give students the opportunity to give us feedback. It is very valuable to them to know that you want to hear their opinions and that they can state them without fear.

4. Do you grind the gears or shift smoothly?

How is your timing in the classroom? Are you able to shift up or down smoothly as needed? One of the differences between a great teacher and a good teacher is an understanding of flow. Great teachers have impeccable timing, shifting is so subtle and smooth that it becomes almost imperceptible. FD should include analysis of flow.

5. Sion asks, "When did you last check your brakes?"

This is asked in order to have us reflect on whether we are talking too much in class. Not only foreign language teachers need to be wary of this tendency. As much as we can, we need to make learning a partnership between all stakeholders even in Japan where communication still tends to be one way.

6. Do you have sleeping passengers?

It has always been surprising to me that in a car, Japanese passengers will sleep and miss out on all the scenery and opportunity for conversation. Once I accompanied a busload of Japanese tourists from Calgary to Banff. During the 80-minute drive, there is spectacular scenery. Nevertheless, about half of them slept until we had arrived. Our job is to teach, and teach well. Presumably the lessons we prepare have content that has value. When we allow students to sleep, in point of fact, we are telling them that the content is unimportant and/or that we aren't professionals.

Conclusion

Many of these points are just like the ones we learned when we went to driving school. They are not especially difficult but they *do* need to be followed all the time. Over time, some drivers believe that because they learned how to drive and have been driving for a long time, they can disregard some rules or think they are better drivers than they actually are. Just as is the case when we drive normally, sometimes we may let our guard down or become overconfident. It is particularly true that some old drivers do not want to admit that it is time to stop driving and certainly they do not want to be told that it is.

An important part of FD should be to emphasize the necessity of trying to master as many aspects of interpersonal relationships as possible in order to capitalize on opportunities for success in the people business. "You don't get a second chance to make a good first impression" is a common expression mostly used in reference to the job interview process. Fortunately this doesn't apply to teaching where, through FD, we can and should reinvent ourselves often, according to circumstances. Many of us are capable of becoming better drivers. But the road ahead is filled with many potholes so we will need to use our skills.

サブミクロン回路試作によるCMOSインバータの速度解析

A CMOS inverter speed-performance analysis utilizing fabricated sub- μ m circuits

波多野 裕*、芝田 通明**

Hiroshi HATANO and Michiaki SHIBATA

Abstract : In order to investigate high-speed logic circuits, two different CMOS inverter experimental circuits have been successfully designed and fabricated utilizing sub- μ m CMOS process. The designed circuits are twenty-seven stage inverter chains. Each inverter consists of four series NMOS transistors and four series PMOS transistors. 0.9 ns propagation delay time difference has been found for different inverter input conditions. Based on the results, a cascaded-gates CMOS inverter design methodology for high-speed LSIs is discussed.

1. 緒言

従来のLSI技術発展の指導原理はトランジスタの比例縮小(スケールリング)則¹⁾に従った高速化、高集積化であった。しかし、半導体プロセスの微細化の進展とともに微細化のみによるLSIの回路性能改善が困難になりつつある。

この微細化による高性能化の限界を克服するゲートレベルでの高性能化を検討するため、本研究では基本論理ゲートとしてMOSトランジスタを縦積みしたインバータ回路に着目した。

従来の研究では、縦積み回路構成における性能劣化の原因はトランジスタの基板バイアス効果によるしきい値電圧の上昇であると考えられていた²⁾。

本研究では、CMOSインバータの速度性能を詳細に解析するための2種類の実験回路を設計し、サブミクロンCMOSプロセスにより試作し、実測により、縦積みインバータの速度性能を決める支配的要因を明らかにして、微細化による高速化の限界を打ち破る一助とするための検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 縦積みCMOSインバータ回路³⁾

トランジスタを縦積みにした2種類のCMOSインバータをサブミクロンCMOSデザイン・ルール⁴⁾⁻⁶⁾により設計した。

図1(a)に4つのNMOSトランジスタと4つのPMOSトランジスタを直列に接続して、下端のNMOSのソースを接地端子に、上端のPMOSのソースを電源端子に接続し、中央のNMOSとPMOSのドレインを共通出力としたインバータを示す。入力信号は接地端子、電源端子から最も遠い中央のNMOSとPMOSのゲートに印加する。他のNMOSのゲートは電源端子に、他のPMOS

のゲートは接地端子に接続する。このインバータを「入力が電源から遠いインバータ」、と呼ぶ。

図1(b)に示すインバータでは入力信号は、接地端子、電源端子にソースが接続されたNMOS、PMOSのゲートに印加する。他のNMOSのゲートは電源端子に、他のPMOSのゲートは接地端子に接続する。このインバータを「入力が電源に近いインバータ」、と呼ぶ。

これらの2種類のインバータをそれぞれ27段接続した図1(c)のようなインバータ・チェーンを2種類設計した。

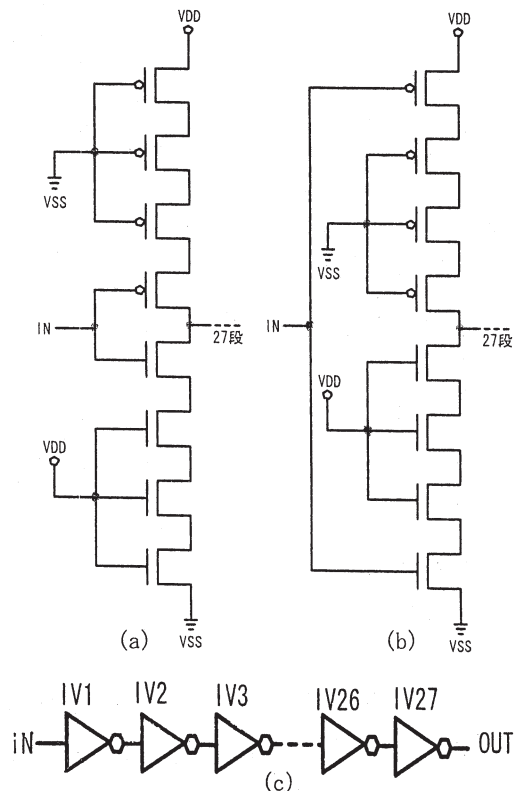


図1 試作した実験回路

接地 (V_{SS}) 側がNMOS、電源 (V_{DD}) 側がPMOS

(a)入力が電源から遠いインバータのトランジスタ回路図

(b)入力が電源に近いインバータのトランジスタ回路図

(c)27段インバータ・チェーンの論理回路図

2007年2月15日受理

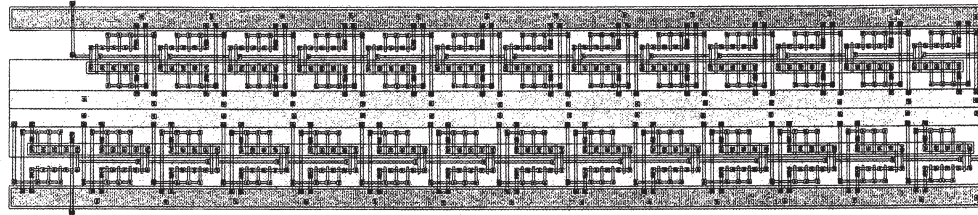
* 理工学部 電気電子情報工学科

** 理工学部 電子工学科卒業生

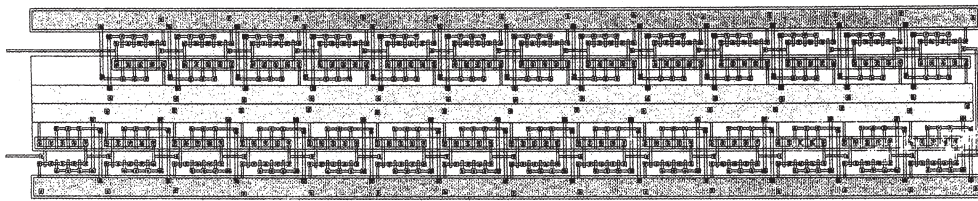
図2 (a)に「入力が電源から遠いインバータ」の27段チェーンのサブミクロンCMOSデザイン・ルールによるレイアウト図を示す。図2 (b)に「入力が電源に近いインバータ」の27段チェーンのレイアウト図を示す。

3. 試作回路の実測結果³⁾

サブミクロンCMOSプロセスで試作した実験回路の実測波形を図3に示す。「入力が電源から遠いインバータ」の27段チェーンの入出力波形を写真の下側に、「入



(a)入力が電源から遠いインバータ



(b)入力が電源に近いインバータ

図2 27段インバータ・チェーンのレイアウト図

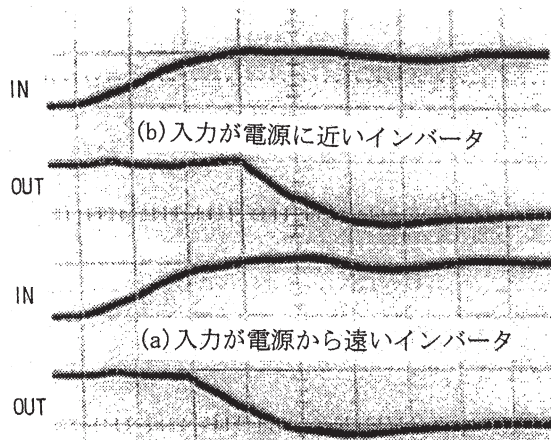


図3 27段インバータ・チェーンの遅延時間の実測結果
横軸：20 ns/div 縦軸：5 V/div

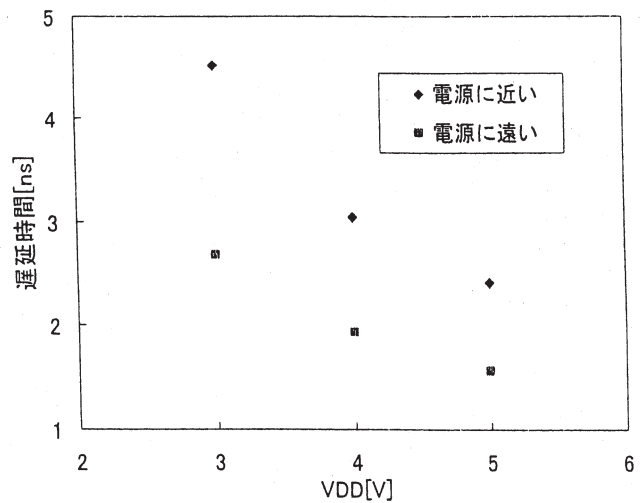


図4 インバータ1段当たりの遅延時間の実測結果

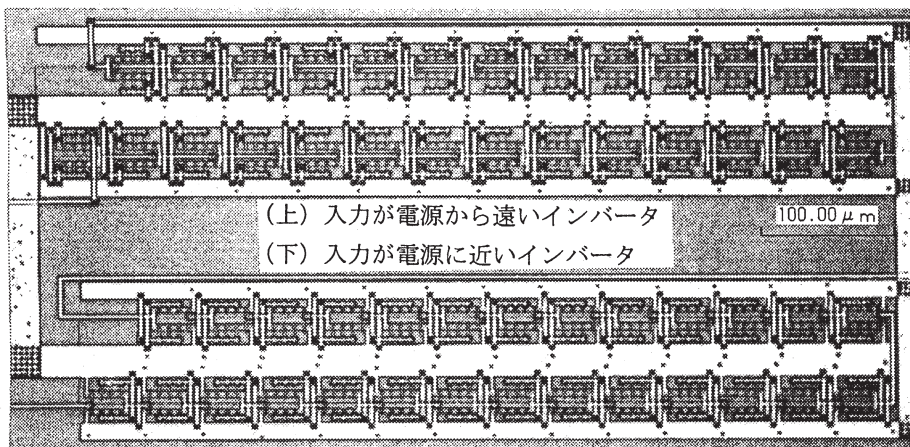


図5 27段インバータ・チェーンの顕微鏡写真

力が電源に近いインバータ」の27段チェーンの入出力波形を上側に示す。前者の応答が後者より約23ns速いことが判明した。1段当たりの遅延時間差は0.86nsである。

図4に実測から求めた、2種類の27段インバータ・チェーンの1段当たりの遅延時間の電源電圧依存性を示す。「入力が電源から遠いインバータ」の方が「入力が電源に近いインバータ」より高速で、更に、電源電圧が低くなる程、速度性能の差は大きくなることが明らかになった。スケールリング則に従う場合、電源電圧は低減されるので、今回明らかになった速度性能差は今後の回路設計において一層考慮しなければならない、と考えられる。また、図4の各データ・ポイントにおけるシミュレーションとの誤差は最大で6%程度であった。

今回、試作回路の実測から得られた、「入力が電源から遠いインバータ」の方が「入力が電源に近いインバータ」より高速である、という結果は、従来の、縦積み回路構成における性能劣化の原因はトランジスタの基板バイアス効果によるしきい値電圧の上昇に起因する²⁾、という説明とは逆の結果である。

即ち、今回の実験結果は、縦積み回路の速度性能を決める支配的要因が、トランジスタの基板バイアス効果によるしきい値電圧の上昇ではなく、トランジスタが駆動すべき負荷容量の大きさの違いであるということを示している。図1で説明すると、(a)の負荷容量は入力が印加されるトランジスタのドレイン容量、配線容量、次段のトランジスタのゲート容量である。一方、(b)の負荷容量は(a)に加えて、出力側にあるオン状態の3つのNMOSと3つのPMOSの合計である。この負荷容量の違いが縦積み回路の速度性能差の支配的要因と考えられる。

図5に試作回路の顕微鏡写真を示す。

4. 結言

縦積みインバータの速度性能を正確に解析するため、サブミクロンCMOSプロセスを用いて2種類の27段インバータ・チェーンを設計試作した。

試作回路の精密な実測の結果、縦積み回路の速度性能を決める支配的要因が、トランジスタの基板バイアス効果によるしきい値電圧の上昇ではなく、トランジスタが駆動すべき負荷容量の大きさの違いであるということが明らかになった。シミュレーションも6%程度の誤差で実測結果を支持している。本実験結果は、微細化による高速化の限界を打ち破るためのゲートレベルでの高性能化検討の一助となると考えられる。

謝辞

本研究に関するチップ試作は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通してオンセミコンダクター(株)、日本モトローラ(株)、HOYA(株)、及び京セラ(株)の協力で行われたものである。

参考文献

- 1) R. H. Dennard et al., "Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions", IEEE J. of Solid-State Circuits, SC-9, pp. 256-268, 1974.
- 2) 馬場俊祐, "沖電気のSOI技術の現状", 第4回半導体の放射線照射効果研究会予稿集, pp. 1-4, 2004.
- 3) 芝田通明, "メモリーレジスタの設計試作", 静岡理工科大学2005年度卒業論文.
- 4) T. Ochiai and H. Hatano, "DC characteristic simulation for floating gate neuron MOS circuits", IEE Electronics Letters, vol. 35, no. 18, pp. 1505-1507, 1999.
- 5) T. Ochiai and H. Hatano, "A proposition on floating gate neuron MOS macromodeling for device fabrications", IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E82-A, no. 11, pp. 2485-2491, 1999.
- 6) T. Ochiai and H. Hatano, "A low temperature DC analysis utilizing a floating gate neuron MOS macromodel", IEICE Trans. Electron., vol. E86-C, pp. 1114-1116, 2003.

宇宙用 2 重ラッチ回路の S E U 効果

SEU Effects on Spaceborne Dual Latch Circuits

波多野 裕*

Hiroshi HATANO

Abstract : Single-event-upset (SEU) effects on a novel latch circuit with dual feedback loops have been investigated using SPICE. SEU simulation results have confirmed that the newly designed dual latch circuit has high SEU immunity. Single-event-upset immunity for the dual latch circuit is compared to that for the conventional latch circuit, showing that the dual latch circuit is a candidate for a SEU immune spaceborne sequential logic circuit.

1. 緒言

宇宙環境で使用される CMOS 集積回路は放射線の電離作用の影響が積算されて半永久的特性劣化を生じさせるトータル・ドーズ効果や単一の高エネルギー荷電粒子によるラッチアップ現象や回路の一時的誤動作であるシングル・イベント・アップセット (SEU) に対する耐性強化が必要である¹⁾。

本報告では、SEU 耐性を強化した順序論理回路として、トランジスタ・レベルから回路設計を行い実際に 1.2 μm CMOS プロセス (実効チャネル長 NMOS 0.9 μm, PMOS 0.8 μm)²⁾⁻⁶⁾ を用いて試作して、試作チップの実測によりその機能動作を確認することに成功した 2 重ラッチ回路⁷⁾ に対する SEU 耐性をシミュレーションにより検討した結果を報告する。

2. 2 重ラッチ回路

図 1 に SEU 対策を施した 2 重ラッチ回路のトランジスタ回路図を示す。従来のラッチ回路と比較すると、D 入力を受ける NMOS と PMOS を除いて 1 段目のクロック形 CMOS インバータ、次の CMOS インバータ及び 2 段目のクロック形 CMOS インバータの全ての回路部分が 2 重になっている。

3. SEU シミュレーション⁸⁾

CMOS 回路の内部の逆バイアス状態の PN 接合に荷電粒子が照射されると空乏層に電荷が発生して PN 接合をショートさせる。サブミクロン CMOS プロセスで試作された LSI における荷電粒子誘起電荷は約 400 fC である⁹⁾。同一バイアス条件で、この電荷量を変化させ、SEU の発生を観測して、回路の SEU 耐性を検討した。

図 2 に示す従来のラッチ回路のノード X がハイ・レベルの状態 NMOS の PN 接合が逆バイアスの時に荷電粒

子が入射するという想定でシミュレーションを行った。

図 3 に示す 2 重ラッチ回路のノード X がハイ・レベルの状態 NMOS の PN 接合が逆バイアスの時に荷電粒子が入射するという想定でシミュレーションを行った。更に、ノード Y がハイ・レベルの状態 NMOS の PN 接合が逆バイアスの時に荷電粒子が入射するという想定でシミュレーションを行った。

従来のラッチ回路に対するシミュレーション結果例を図 4 と図 5 に示す。200 ns において 500 fC の荷電粒子誘起電荷が発生した場合の回路動作を図 4 に示す。電荷が消えた後は出力 Q が正常なロー・レベルに戻っているため回路誤動作は発生していない。一方、図 5 は 200 ns で 560 fC の荷電粒子誘起電流が発生した場合の回路動作を示すが、出力 Q が 200 ns からハイ・レベルになり回路誤動作が発生していることがわかる。

2 重ラッチ回路に対するシミュレーション結果を図 6 から図 9 に示す。ノード X において 5 μs において 560 fC

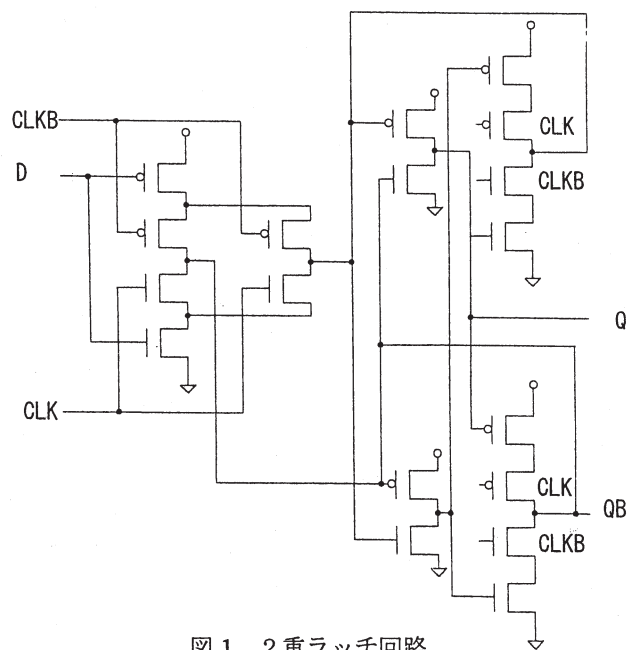


図 1 2 重ラッチ回路

2007 年 3 月 5 日受理

*理工学部 電気電子情報工学科

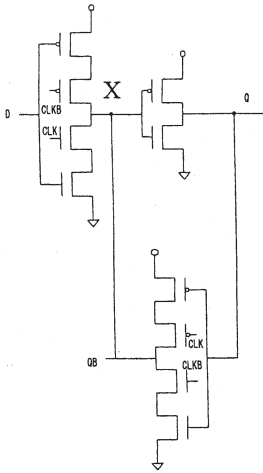


図2 従来のラッチ回路のノードX

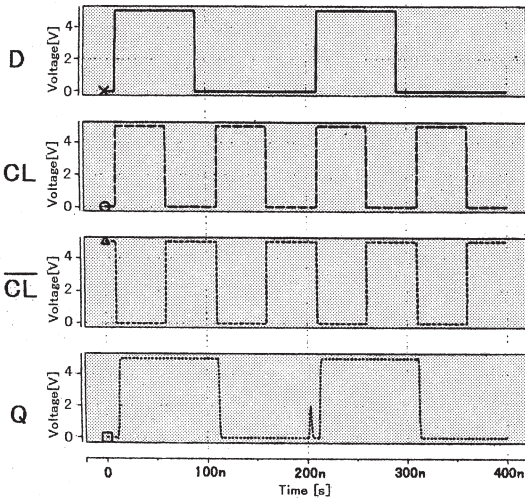


図4 従来のラッチ回路のノードXに500 fCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果

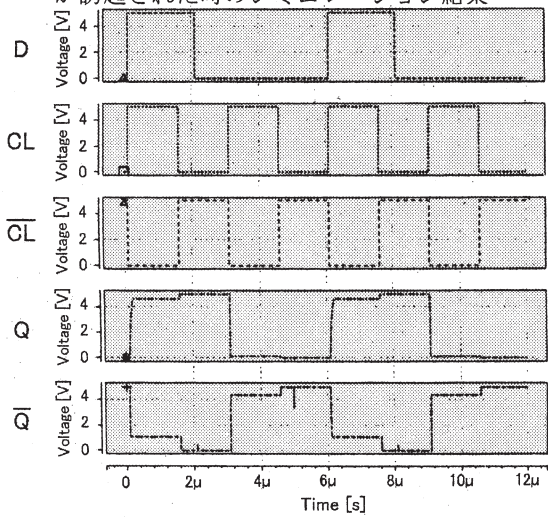


図6 2重ラッチ回路のノードXに560 fCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果

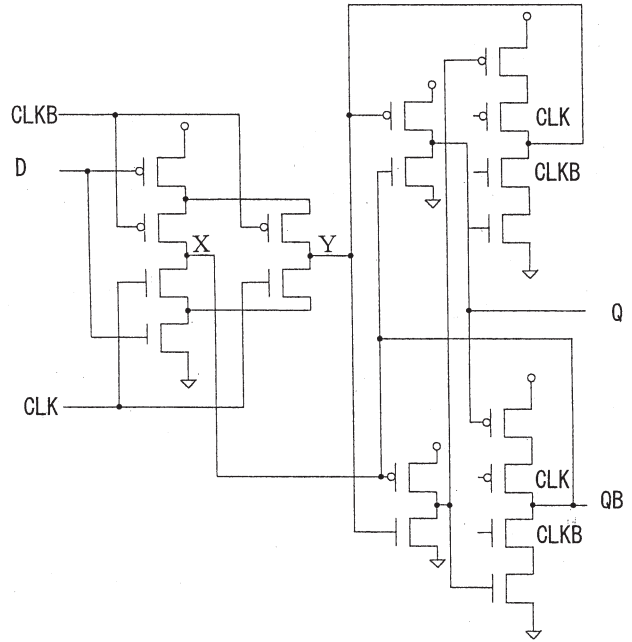


図3 2重ラッチ回路のノードX及びノードY

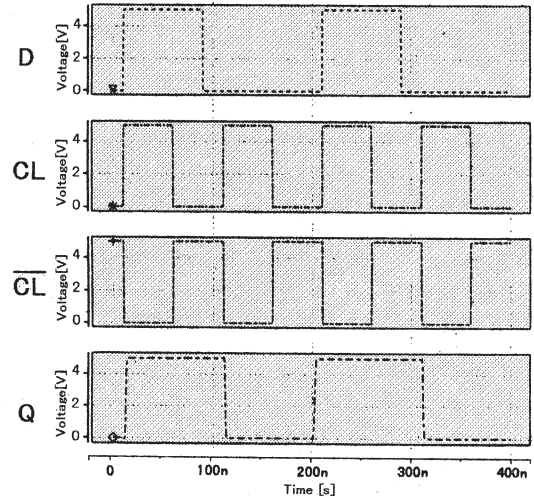


図5 従来のラッチ回路のノードXに560 fCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果

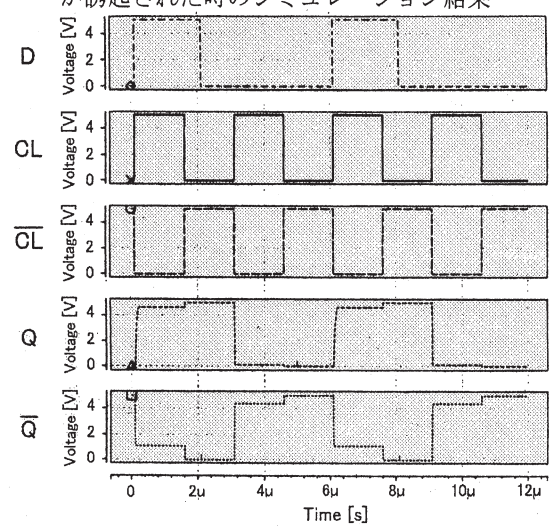


図7 2重ラッチ回路のノードXに560 fCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果

の荷電粒子誘起電荷が発生した場合の回路動作を図 6 に示す。ノードYにおいて $5\mu s$ において $560 fC$ の荷電粒子誘起電荷が発生した場合の回路動作を図 7 に示す。電荷が消えた後、どちらも電圧レベルが元に戻っているため回路誤動作は発生していない。文献値 $400 fC$ の 1000 倍の電荷がノードXに発生した場合を図 8 に、ノードYに発生した場合を図 9 に示す。どちらの場合も回路誤動作は発生せず、2重ラッチ回路のSEU耐性をシミュレーションにより確認することに成功した。

4. 結言

SEU耐性を強化した順序論理回路として、トランジスタ・レベルから回路設計を行い実際に $1.2\mu m$ CMOS プロセスを用いて試作して、試作チップの実測によりその機能動作を確認することに成功した2重ラッチ回路に対するSEU耐性をシミュレーションにより検討した。

従来のラッチ回路が回路誤動作する荷電粒子誘起電荷のレベルより3桁高い誘起電荷レベルまで、2重ラッチ回路は正常な回路動作を行うことをシミュレーションにより確認することに成功した。2重ラッチ回路は宇宙用順序論理回路として有用な回路である。

2重ラッチ回路に対するビーム照射実験が今後の課題である。

なお、SEUシミュレーションの動作周波数効果を含む詳細と2重ラッチ回路のトータル・ドーズ耐放射線性やラッチアップ耐性に関する耐放射線性¹⁰⁾⁻¹⁹⁾の報告は別の機会に譲る。

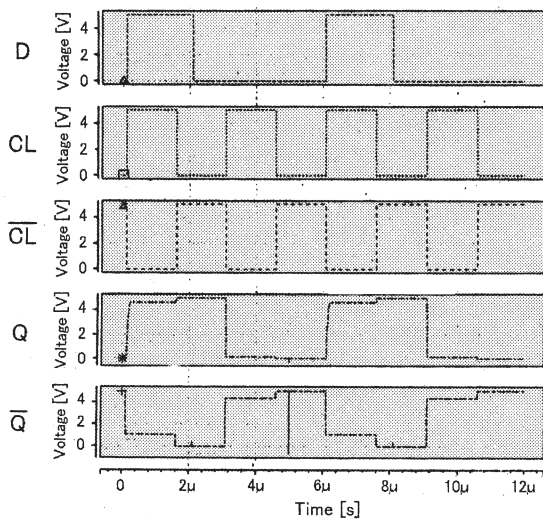


図 8 2重ラッチ回路のノードXに $400 pC$ の電荷が誘起された時のシミュレーション結果

謝辞

本研究に関するチップ試作は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通しオンセミコンダクター(株)、日本モトローラ(株)、HOYA(株)、京セラ(株)の協力で行われたものである。

参考文献

- 1) 波多野 裕, 耐環境CMOS超LSI, (1996).
- 2) T.Ochiai and H.Hatano, "DC characteristic simulation for floating gate neuron MOS circuits", IEE Electronics Letters, vol.35, no. 18, pp.1505-1507, 1999.
- 3) T.Ochiai and H.Hatano, "A proposition on floating gate neuron MOS macromodeling for device fabrications", IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E82-A, no. 11, pp. 2485-2491, 1999.
- 4) T.Ochiai and H.Hatano, "A low temperature DC analysis utilizing a floating gate neuron MOS macromodel", IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, pp. 1114 -1116, 2003.
- 5) H.Hatano and T.Ochiai, "77K DC characteristics for floating gate neuron MOS circuits", Proceedings of 4 th European Workshop on Low Temperature Electronics, pp.271-275, 2000.
- 6) H.Hatano and T.Ochiai, "Neuron MOS circuit performance improvements by low temperature operation", Proceedings of 4 th European Workshop on Low Temperature Electronics, pp.271-275, 2000.
- 7) 波多野 裕, 水口隆太郎, "宇宙用高信頼順序論理回路の設計試作", 静岡理工科大学紀要, vol. 14, pp. 31-35, 2006.

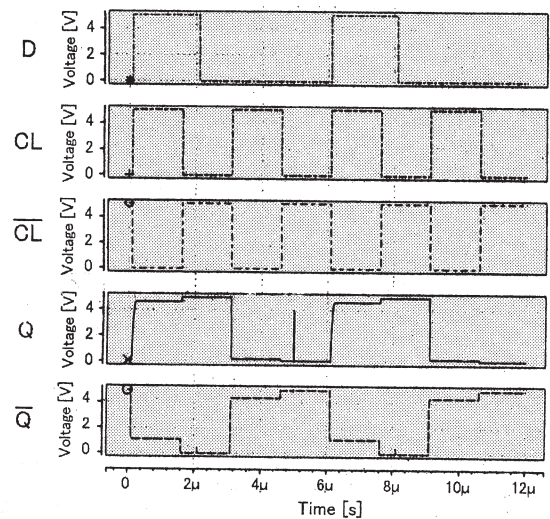


図 9 2重ラッチ回路のノードYに $400 pC$ の電荷が誘起された時のシミュレーション結果

- 8) 加治寛己, “順序論理回路の耐環境性評価”, 静岡理科大学 2006 年度卒業論文.
- 9) M. C. Casey et al., ”HDB using cascode-voltage switch logic gates for SET tolerant digital designs”, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol.52, no.6, pp.2510-2515, 2005.
- 10) H. Hatano et al., ”CMOS logic circuit optimum design for radiation tolerance”, IEE Electronics Letters, vol.19,no23., pp.977-979,1983.
- 11) H. Hatano et al., ”Total dose radiation effects on CMOS ring oscillators operating during irradiation”, IEEE Electron Device Letters, vol.EDL-4, no.12, pp.435-437, 1983.
- 12) H. Hatano et al., ”CMOS shift register circuits for radiation-tolerant VLSIs”, IEEE Trans. Nuclear Science, vol.NS-31, no.5, pp.1034-1038, 1984.
- 13) H. Hatano et al., ”Radiation-tolerant high-performance CMOS VLSI circuit designs“, IEEE Trans. Nuclear Science, vol.NS-32.no.6,pp.4031-4035,1985.
- 14) H. Hatano et al., ”Radiation-tolerant 50MHz bulk CMOS VLSI circuits utilizing radiation-hard NMOS transistors”, IEEE Trans. Nuclear Science, vol. NS-33, no.5,pp.1126-1130, 1986.
- 15) H. Hatano et al., ”Total dose radiation-hardened latch-up free CMOS structures for radiation-tolerant VLSI designs”, IEEE Trans. Nuclear Science, vol.NS-33, no.6,pp.1505-1509, 1986.
- 16) H. Hatano et al., ”A radiation-hardened 10K-gate CMOS gate array”,IEEE Trans. Nuclear Science, vol.NS-36, no.6, pp.2435-2438,1989.
- 17) H. Hatano, ” Radiation hardened high performance CMOS VLSI circuits”, IEE PROCEEDINGS-G,vol.139, no.3, p.287-294, 1992.
- 18) H. Hatano et al., ”Radiation-hard CMOS VLSI logics for space applications”, The Bulletin of SIST, vol.4, p.1-7, 1995.
- 19) 波多野, 渋谷, 望月, ” ナノ秒 6 トランジスタ CMOS スタティック RAM の設計試作(1)メモリ・セルと光ビーム照射実験”, 静岡理科大学紀要, vol. 12, p. 109-118, 2004.

多世界論と「わたくし」の謎

Many Worlds Theories and the Enigma of “Self”

榛葉 豊*

Yutaka SHINBA

Abstract : Walking into the third millennium, evidences for the harder problem of consciousness are fairly produced. The problem of “Self” is the harder problem of philosophy of consciousness more than the relation of brain-body problem. That problem concerns the question that why the world is unfold from “my” body (eyes) and quoria of “Self”. Some case of divided brain patients, and extrapolation from the quantum teleportation will afford us the way to tackle the harder problem of continuity of “Self”. We also consider about the world view based on reincarnation, the anthropic principle with the assumption of mediocrity and many universe interpretation for quantum mechanics or the foundations of probability.

1. 「わたくし」の問題

Descartes 以来の古くからの難問として、心と体の関係、意識と物質世界の関係を論じる「心身問題」（最近では「心脳問題」と言われることが多い）がある。哲学者 Chalmers は Tucson の意識の科学に関する国際会議で¹⁾、脳の機構と精神活動などを扱う易しい問題 easy problem に対して、心身問題、特にクオリアの問題を「意識の難問」the hard problem と呼んだ^{1, 2)}。これに対し更に困難な「意識の超難問」the harder problem of consciousness²⁷⁾があるとして Roberts は、Nagel⁵⁾ や Perfit³⁾の取り上げてきたような、次の問題をあげた。

その問題というのは、日本語では「「わたくし」の問題」と呼ばれている。「わたくし」と言う感覚、特別なクオリアはどこからどうして生じるのだろうか、「わたくし」とはどこから来た何者なのだろうかと言う疑問である。この問題は英米圏の分析哲学では文献が比較的少ない。これに対して日本では何人もの論客が論争を続けている^{9-13, 15-26, 37, 38)}。(実存主義はこの種の問題に対して敏感でありうるという永井の指摘もある¹²⁾)

この違いは、一つには日本語と英語の違いであると思われる。日本語でもこの問題を表現し意味を伝達するには困難が伴うが、英語でこの問題を普通に述べるのは絶望的であるらしい。物理的世界の特定のある人が（発話者である私にしろ、君にしろ、Thomas にしろ、あるいは事物に

しろ）主語にならなければならないからである。そしてもうひとつは英米哲学では Wittgenstein 等によって、唯我論を論ずることが戒められた影響が残っている為であると思われる。

さて、強調しなくてはならないことは、ここに言う「わたくし」とは、100 人の人間がいれば 100 の自我がある、という次元での 100 個の私ではない。世界に 1 つしかない、他ならないかけがえのないこの「わたくし」なのである。100 個の人体（脳）というハードウェアがあったとして、なぜ、他ならぬこの私の肉体に、「わたくし」は宿っているのだろうか。向こうからこちらを眺めている人の肉体が、「わたくし」の肉体であっても良かったのではないだろうか。「わたくし」は私の肉体でも、記憶でもない。まさにそこから世界が展開されている原点のことである。

以下「わたくし」は世界が開ける原点を意味し、「私」で一人称の代名詞を表すことにする。発話中は、「私」は命題を述べている主体を表す。あるいはある時点で、「私」として発話をした肉体、をも表す場合がある。

実証主義哲学者、物理学者の Mach に、「Mach の自画像」と呼ばれるようになったスケッチ⁷⁾がある。（酷似したスケッチが後代の知覚心理学者 Gibson⁸⁾にもある）それは Mach の左眼球から見える風景の絵である。丸い視界の中右には Mach 自身の鼻とその下に髭が見えている。Mach の安楽椅子に投げ出した足が中央に見え、右手でまさにこ

2007 年 3 月 6 日受理

* 理工学部 情報システム学科

のスケッチを描いているところも見える。このスケッチは後世いろいろな観点から考察されるが、ここでは私が Mach だったとして、なぜ Mach の眼球という光学装置に映った映像が (Mach の)「わたくし」に知覚されるのだろうかと言うことを考えたいのである。

「わたくし」の世界が、「私」の肉体装置を通して「展開」しているという感じがする。なぜ、他の肉体(そして精神)を通して世界は展開しないのだろうか。

並行的な問題として「いまここ」問題という視点もある。なぜ、「いま」は 21 世紀初頭なのだろうか。なぜ「わたくし」には 21 世紀初頭の世界が開けているのだろうか。なぜ、「わたくし」には Napoleon と会見する可能性がないのであろうか。

もう一度言おう。なぜ東京にいる「わたくし」には東京の風景が見えていて、たとえば (Edinburgh に住むどれか 1 つの肉体の眼球を通して) Edinburgh の街の景色が見えてはいないのだろうか。Edinburgh に住む人に「なったら」、東京の「私」の事など知りもしないのであるから、元の疑問も何も消滅 (Edinburgh の人には元々存在しない) するだけで、何の問題も存在しないようにも思える。しかしそう即断しないで、ゆっくり検討をしてみたい。

波動力学建設者の Schrödinger は、その問題に係わる以前は、古代インドのヴェーダ哲学を研究していた。ヴェーダ哲学の先駆けをなすウパニシャッド思想では、梵我一如と言うことを言う。アートマン (真我) は宇宙精神ブラフマン (梵) と同一である。死後アートマンとブラフマンが合一するように、あるいは生きながら梵我一如を悟るべく修行する。アートマンの複数性はマーヤー (幻) であるというのである。「わたくし」の問題がヴェーダでも「超難問」であることを象徴していると思うが、アートマンとは、「これこれ無きもの」としてしか記述できない、としている。3000 年近く前の哲人にとっても (少なくとも) 筆者にとっても、「わたくし」とは何か、と問い始めるとき、いったい何を説明したら分かった気になるのであろうかと途方に暮れる感覚が同じなんだと少しは安心できる。

さて、波動力学連作論文発表の直前の 1925 年、38 歳の時に Schrödinger はこの様な問題を取り上げ、彼独自の「わたくし」感を書き残している⁴⁾。

「なぜ私は私の兄でなく、私の兄は私でなく、私は遠縁の従兄弟のうちの一ではないのか」「おそらく百年前にも誰かがこの場所に座り、私と同様に敬虔なそしてもの悲しい気持ちを心に秘めて、暮れなずむ万年雪の山頂を眺めていたことだろう。私と同様に彼もまた父から生まれ、母から生まれた・・・果たして彼は、私とは違う誰か他の者であったのだろうか。彼は私自身、すなわち私の自我であったのではないか」「自我の多様性は見かけだけのもので、本当は 1 つの精神があるだけである」

急いで付け加えなければならない。他の肉体を通して世界が開けるといふ自体の意味は誤解されやすい。Edinburgh に住んでいる人の肉体を通してと言ったときには、記憶も、知識も、性格もそのスコットランド人の本来のそれらが伴われているという意味である。けっして日本人でこれこれしかじかの記憶と、そして何より他ならぬ「わたくし」のクオリアを持っているのではないのである。自分の記憶や欲望を保ったまま、いわゆる変身願望にでてくる状況のように (あるいはかすかな記憶、潜在意識を保って) 他の肉体、社会的地位・・・になると言うのとは全く異なるのである。ここで言うのは、今の自分を完全に忘れてしまった (と言うよりむしろはじめから知らない) 事になるから「変身」には当たらないであろう。

したがって、それなら何ら困難は発生しない、と批判派は言うだろう。仮に「わたくし」が別の人間 (の肉体と記憶と・・・を持っている人) になった、(と言うよりもっと適切には「であった」としても) と言う事態が起こっても、その新しい肉体は「わたくし」が移ってくる前の記憶しか持っていないのだから、その肉体に備わっている別の「わたくし」と「私」の組み合わせを中心として記述されるだけではないのか。実際学会でも、このような研究に批判的な人は、このことを論じる研究者は、端的に彼が離人症であると言うことを告白しているようなものである、などと揶揄したりする。この様な反論に対してこの研究自体の哲学的と言うだけでなく、心理学的な意義を主張出来るようなアンケート調査と聞き取り調査を、臨床心理学者高石恭子や理論心理学者渡辺恒夫は^{16) 17)}、発達心理学の自我体験の調査という文脈で行っている。それでも、精神障害者や発達過程のある現象発現のパーセンテージを調べただけだと批判者からは言われるかもしれないが。

上の批判に関連して、以下のような自我体験に関する調査報告を紹介する。

渡辺の質問紙調査¹⁷⁾。対象は男女大学生 227 名であった。自己の起源に関する 4 つの文章を体験の見本例として提示して、類似体験を自由記述させたものであった。その結果、19.8%に当たる 45 例を自我体験例とした。そしてなぜ自分は自分なのか、なぜ自分は他人ではないのか、なぜ自分は今ここにいるのか、等に分類報告した。

天谷に依れば²⁰⁾ 男女大学生 160 名に対する質問紙調査の内の、自我体験と見なせる 50 名中 22 名に面接調査を行い、17 名に自我体験を認めている。

また、渡辺と小松による調査では²¹⁾ 男女大学生 345 名中 27.5%に自我体験を認めた。初発体験のピークは小学校低学年であった。

これらの調査結果は、自我体験や「わたくし」への気づきは、特殊な人に見られる病理学的症例とは見なせないことが分かるであろう。またこれらの報告に引用されている、

文学者や科学者達の告白例もその感を深めさせる。

さて、もし「わたくし」が、かけがえの無い唯一のものであるとするなら、他の人はどうなるだろうか。他の人は、外から見るとちゃんと知能も持ち、意識も持ち、自意識も持っているように見える。これはもしかすると Chalmers などのいう「ゾンビ」なのではないだろうか。「わたくし」は疑う。 (人間と外見も行動、反応も同じに見え、さらには、物理的肉体は全く人間と変わらないのに内的なクオリアを持たないものを哲学的ゾンビという)。また、Searle の言う「中国語の部屋」も思い出される。(この思考実験はまた別の問題も含んでしまうが、次のような問題で、知能に関する Turing テストに対する批判として提出されたものである：部屋に人が入っていると。その部屋には中国語のこういう記号列にはこう言う操作をせよとかの指示書がある。さてこの部屋の外から中国人が何か中国語で質問すると、部屋の中の人忙しく働いて、中国語の漢字列で返事を返す。中国人は、部屋の中の人中国語を理解していて、対話がなりたっていると思うだろうが、中の人、中国語は全く分からない。)

このような疑いは唯我論(独我論)に傾きやすいかも知れない。しかし誰でも良いがある特定の人(唯我)を中心として世界が展開すると記述するのは、対称性が悪いと思わないであろうか。唯我論は非対称の極みである。この様な対称性の悪さ、そして孤独を回避したい言う思いが輪廻転生世界観(遍在転生論¹⁸⁾)につながっていく。それはすべてのひとは、一つの「わたくし」が輪廻転生したものであるというもので、そこに言う転生とは今という同時断面にも転生し、この世界のすべての人は同じく「わたくし」なのだという対称性を満たすモデルである。

われわれは、近い将来実際に出来るようになりそうな思考実験を通して、「わたくし」の連続と死について考察することにする。

2. 分割脳

1960年代、てんかんの患者に対して次のような療法が行われたことがある⁹⁾。てんかんは脳全体に神経発火の異常な波動が共鳴のように拡がることだとされ、それを避けるため、右脳と左脳を、そこだけでつないでいる脳梁を切断するという手術をすれば全身の痙攣などの症状は起こらないのではないかと考えられた。そしてその様な手術は実際に行われ、対症療法ではあるが痙攣発作の軽減などの成功を収めた。この様な脳梁切断術を受けた、分割脳の持ち主となった患者は、外から見て別段に運動、行動、性格など日常生活におかしな所は見られなかった。

この分割脳の人に対して、心理学者がいろいろな実験を行った。沢山行われた実験を要約して言えば次のようになる。左脳、右脳のうち片方に文字を見せて、その指示で作業をしてもらう。つまり作業台を鼻の前に置いた衝立で2

分しておいて文字を提示するのである。(実は左目は視野の左半分は左脳につながり、右目も同様に左の視野は左脳に、右の視野は右脳につながっている。そこで脳梁切断と一緒に、左目の右視野が右脳につながっている部分と右目の左半分の視野が左脳につながっている視神経交叉部も切断すれば、左目の左半分が左脳のみ、右目の右半分が右脳のみにつながっていると言う状況がつけれる。勿論この実験の方は人間に対して行われたのではない。作業訓練を十分に猫や猿の視神経交叉を切断して行われた)

こうして作業台の左は左脳だけに、右半分は右脳だけにつながった状況が作り出された。右に置いた「コップ」という文字は右脳にしか認識されない。このとき、目を閉じて左手で(左手は右脳支配である)今見た文字のものを手にとって下さいと言うと、彼は左手を使って手探りでコップを取ることが出来る。

では「今とったものは何ですか。言葉で説明してください」というと彼は答えられない。「私は文字を見なかったし何も取っていない」と言う答えもあるそうである。なぜなら返事をしている言語機能は左脳にあるのだが、左脳には右脳が見て認識した「コップ」という情報は伝わらないからである。

次に、作業台の左で(左脳だけに)、鉛筆という文字を見せて、右脳が支配する左手で取ってくださいという。右脳はどういう文字が見えたか知らないから鉛筆を取ることが出来ない。「何を取ればいかわかりますか」と聞くと、鉛筆であると答えられる。これは鉛筆と言う文字を見た左脳が、その左脳の言語機能を使って答えているのである。

ここで問題になるのは、左脳と右脳は別の「人格」なのだろうか。もっと言えば別の「わたくし」なのだろうか。両者に記憶などは共通しているだろうし、他人から見れば破綻は見られない。分割脳の持ち主本人でなければ(右脳、左脳どちらが本人か)分からないことであるが、右脳は共通部分は残っているとしても間接的にしか連絡の取れない左脳をどう感じているのだろうか。それとも、別の存在とは感じていなくて、自分の精神的な機能になにか障害があると言う風を感じているのであろうか。

この問題は、多重人格者において、それぞれの人格の間では、お互いをどう感じるかという疑問と似ている。分割脳でも一緒だが、同じ体を(分割脳では、脳は別々であるが)共有しているのである。また多重人格の方でしかあり得ないだろうが、治療により同じ肉体と脳を共有している人格達が統合されて行くというのは、その人格達にとってはどの様な感じがするのであろうか。統合の際には中心になる人格があるらしい。他の人格はだんだん消滅(すなわち死である)していくのだが、残る方の人格は精神的な何かを吸収するという感じなのだろうが、消える人格のほうは自分が消えることを受け入れるのだろうか。

さてここでもし医療技術が進んで片方の脳が損壊して

も生きさせられるようになったでしょう。もう一步進めて代替の肉体を用意できるようになったでしょう。すると次の状況が起こる。

東京である人の脳を手術で脳分割をして、片方は代替肉体に入れて N.Y.にはこぶ。手術前には窓の外に東京タワーが見えていた。では、麻酔が覚めて回復したときに、見えるのは東京の景色だろうか。N.Y.の景色だろうか。右脳と左脳それぞれにとって違う風景が見えるのだろう。東京の「わたくし」にとって、N.Y.の片割れが拷問にあっても東京の「わたくし」は痛くも痒くもないだろう。N.Y.の方には「わたくし」はあるのだろうか。この議論は逆にしても対称的である。ただ、N.Y.の方は手術中に移動したんだなと思うであろうが。そしてどちらの半脳も、もう片方の半身(半脳が失われてしまって、障害者になってしまった)と思うであろう。そして、当然「わたくし」として連続しているのは(手術中の記憶はないが)自分の方であると思うはずである。東京の半脳は、失われた半脳に他者の自我を感じるののだろうか、それとも単に肉片と思うだろうか。脳の病変で脳のある部分を摘出するといった場合、患者はその摘出する部分に人格は感じないのではないか。しかしこの場合、摘出されて、廃棄されたかも知れない部分の方も、N.Y.で存続するのであるから、そちらから見れば、東京の方を肉片と思うであろう。最大の疑問は「ではなぜあの手術による分割に際して、この「わたくし」はあちらの方の「わたくし」ではなかったのか」である。もし自分が拷問されていてその後永久に地下牢にとじこめられる、しかしもう一方は安楽に暮らしているのだったら、何を恨んだらよいのであろうか。

この場合元の肉体と代替肉体で途中までは一つの「わたくし」だったと言うことである。元々違う肉体で、「わたくし」も記憶も違うと言うことだと、原型の「わたくし」の問題となる。

この分割脳を分離して移動する状況は、全く同じ脳に違う「わたくし」がという事ではない(「わたくし」が各人にあるという立場では)。右脳と左脳は元々異なるハードウェアであったし、片方は代替肉体に入っている。もっと完全にハードウェアが同じという状況は、テレポーテーションに依るものである。

3. テレポーテーション

20世紀末の20年間に超微細加工技術、超高感度測定技術の進展により、量子力学の基礎に係わる思考実験やその応用が現実に行われるようになってきた。特に最後の10年には、量子計算機、量子暗号のブレイクスルーがあった。21世紀に入って、量子テレポーテーションが、1光子レベルで実現しているのは、報道でよく知られているところである。この様な時期に、古くからあるテレポーテーションに関する(倫理的や法学的)思考実験を、「わたくし」の問題がらみで思い出してみたい。

1966年に始まった Star Trek という TV シリーズがあった。日本では宇宙大作戦という名前で放映された。そして現在まで、続シリーズやスピンオフシリーズが放映されている。その中で、宇宙船から惑星への移動などには「転送」という方法が使われている。どうもこれは、物体をスキャンしてその情報を送って向こうで再構成しているように見える(と言っても何か物質的な物やエネルギーを送っているかのような時もあったりする。energize とか beam up というかけ声が使われているが、前者だとエネルギーを送っているようにも思えるし、消去してエネルギーとして放散させているようにも取れる)。この TV シリーズではよく、転送に関する事故にまつわるテーマが取り上げられている。そしてこれに題材を取った論考も沢山ある⁶⁾。

ところで、量子テレポーテーションとは次のような技術である。それは物質を瞬時に離れた場所を送るというのではない。情報を(物質や波動という担体にのせて送るのではなく)量子力学的不可分性を利用して送り(じつは補助的な古典的情報通信も併用しなくてはならないが)、向こうの物質を用いて、こちらのテレポーテーションさせる物質を再現するのである。送られるのは情報だけである。ここに量子非複製定理 quantum no cloning theorem²⁸⁾と言うのがあって、こちらのテレポーテーションする粒子の状態は必ず破壊されるのである。従ってこの技術でコピーをすることは出来ない。必ず破壊的転送になるのである。古典的な転送の場合にはこの様な制限はなく、理想極限ではコピーを作れる。しかし物理的に考えると幾らでもよい精度でスキャンすると言うことや、情報転送においても通信量の上限などを考えると制限が生じ、将来技術が進展したら「非常によい精度でコピーを作れる」となろう。と言っても筆者はマクロ物体の量子テレポーテーションや、記憶まで再現する古典テレポーテーションなどは、人類が存続する間にはできないであろうと思っている。しかし記憶まで再現できる古典テレポーテーションを想定して、思考実験をしたい。そしてその古典転送技術は「スキャンの際に人を傷つけることはない」と仮定する(技術が未熟だと量子転送と同じく破壊転送になってしまうだろうが、それは将来解決されるとするのである)。これが基本的な前提である。

さて、人間をテレポーテーションできたとする。量子テレポーテーションの場合は必ず破壊的なので、以下に述べる困難は発生しない。その困難とは、非破壊的転送の場合におこる(破壊的でも同様の困難があるとも考えられるかも知れないが)社会的そして法学的な要請によるものである。すなわち、我々の社会に、肉体も記憶も精神も全く同じ人間が2人いることは、権利などを議論する時に困難を引き起こすという事である。そのために転送元の物あるいは人間の方は「消去」という、取り決めするということになる。

これが量子テレポーテーションだったら、自動的に転送元の物は、消去ではないが状態が破壊されるので、選択の余地はない。しかし古典転送の場合には、放っておけばコピーが生じてしまう。そこで、SF等での設定は、転送元は、明示はされないが消去する設定になっている。

ここでの倫理的問題は（それは「わたくし」の問題ではない。「わたくし」の問題は、ドラマにしたら面白いであろうと思うのだが、取り上げられたことを筆者は知らない。やはり英語圏ではやりにくい概念なのであろうか）次のような場合に発生する。事故で、転送元の物、あるいは人が取り決め通り消去されなかったらどうなるか。BBCで数年前放映されたTVドラマでは、転送元に残ってしまった主人公が、転送機から脱出して市中に逃げる。それを政府のエージェントが消去しに（殺しに）来るのである。あるコロニーを、コロニー社会構成員全員で、ある惑星に転送するというのもあった。辻褄を合わせるために転送機故障で元の惑星に残ってしまった社会を惑星ごと破壊するわけである。このとき問題になるのは、どちらの人、あるいは社会が正当な、転送前の人あるいは社会の（連続的）後継者なのかである。Star Trekでも転送の事故で副長Raikerが2人になり、その後の体験の違いで、性格がそれぞれお互いに変ってしまった後に2人が出会うというエピソードがあった。

端的に言って、転送元の人あるいは社会は、単にスキャンされただけである。それなのになぜ殺されなければならないのだろうか。

ここで、上の状況を「わたくし」の問題として考えてみる。転送されることを殺されることだと言えば誰も転送されようとする人はいないだろう。であるから、瞬時に分解されて（物質やエネルギーを送るのではないからその必要はないのだが）分解される時のことなど知覚されません、等という説明がされるだろう。

転送された方の分身から見れば、転送以前の記憶は完全にあるわけである。従って、東京の転送機に入って、気がついたら、Parisの転送機から出てきた、と言うことになる。後に残した東京の肉体は瞬時に消されたと思うだけで、気にもしないかも知れない。残してきた分身が消去される際の地獄の苦しみの可能性に、もし思い至ったとしても彼には痛くも痒くもない。

一方東京の分身の方は、事故がなければ瞬時に消されるのであるから、思い悩む暇もない。だがもし消去に少し時間的遅れがある、あるいは事故で消去されなかったとしたらどうだろうか。あるいは転送機に入る前に、不安感からいろいろ考えているとしてもよいだろう。彼にとって事態は次のようであろう。

もし事故で消去されなかったら、転送の後に見えるのは東京だろうかParisだろうか（これは分割脳の例と同じ事である）。「わたくし」はどちらの分身として世界を見

ているのだろうか。世界はどこから展開するのだろうか。

もし、逆の事故で、すなわち転送機がうまく働かず、Parisで分身が再構成されなかったとした場合はどうなるのであろうか。この場合は極限移行すれば、転送を取りやめた場合につながる。すなわち、「わたくし」は、あくまで東京のこの私の肉体に宿っている「わたくし」である。

転送というのは、はっきり言って、「Parisに、あなたと全く同じ記憶や感情や肉体を持っている人が生成されます。彼の意識は東京にいた（あなたであった）ときから連続して、そのままParisの転送機から出てきます。あなたの家族との関係、あなたのやりかけの仕事、将来達成するであろう偉業も彼がやってくれます。ですから移動時間の節約のために、安心して死んでください」と言われたのと同然である。

これでは転送されようと思う人はいないだろう。それ以後の人生を、他人に託して死ぬのに近い。最後の節でこのことは論じよう。

転送と、一卵性双生児の問題と違うのは、転送の方は途中まで全く同一の人間であることである。一卵性双生児は、ほとんど同じハードウェアではあるが、微妙に異なった経験から異なった人格が形成される。クローン人間の場合もクローンで作られる方は成長後全く別に新たに人格が作られるのであるからこれも別の話であり、あまり問題はない。

4. 諸分野での多世界

・量子力学の多宇宙

量子力学の解釈の一つに、1957年にEverette IIIが提出し³¹⁾、Wheelerによって宣伝された（彼は1980年の日立中研の会議では、すでに多世界解釈は放棄したと言っていたが）多世界解釈がある^{29, 30)}。その解釈では、波束の収縮と言うことは現れず、観測のたびに可能な固有値に対応する世界に分裂していくという解釈である。

Copenhagen 解釈、Wigner - von Neumann 解釈、非局所隠れた変数の諸理論、確率過程量子化法の諸理論、町田一並木の大量子力学、沢山ある物理的観測の理論、・・・と種々の解釈がある中で、Copenhagen 解釈は正統解釈と言われてきた。その正統解釈が完全支配する時代は1980年頃まで続いた。筆者が観測理論を勉強し始めた1970年代には、多世界解釈のことはほとんど知られていなかったが、研究会で口に出すと大御所から、SFのようだね、とかグロテスクで美学に合わないとか、性懲りもない等とおこられたものである。

しかし、1980年代に入って、宇宙論の方面からの要請や、メソスコピック物理の興隆による思考実験の現実化、それに量子情報理論からの影響などにより、多世界解釈は異端ではなくなってきた（日本ではそうでもない。旧弊な勢力は残っている）。特に、量子Turingマシン概念を提出することによって量子計算機分野を拓いたD. Deutsch

は³²⁾、多世界解釈の正しさを証明するために量子計算機の研究を始めたと言っている。量子計算機が実現すれば多世界解釈が「正しい」証拠になるというわけである。(なぜ量子計算の成功が多世界解釈を確証するのか、Deutschの説明ではよく分からないので、この問題は別に考えてみたい)

さて、多世界解釈では、観測量の各固有値が得られる事に対応した世界に分岐するのであるが、そのどの世界に「わたくし」がいるのかという問題には答ええない。どの世界にも観測者はいて、それぞれにその世界での固有値を観測している。

多世界解釈では、多世界に分かれる世界の更にそのアンサンブル(これはリアルな話で、実際に同じように準備された実験装置が沢山あるとしてもよいし、何回も実験を繰り返すと思ってもよい)を考えることによって、他の解釈では公理であるところの波動関数に対する Born の確率解釈を、定理として導出できるのである。その方法は、アンサンブルの内、その固有値が得られている世界の相対頻度を計算するのである。ただし、確率概念の微妙なところには触れないのではあるが。

独断で言えば、量子(統計)力学の2種類の確率の内(還元不能な量子力学的確率で客観解釈されるべき確率と、無知による確率で主観解釈を用いて語られうる確率)のうち、物理的な客観解釈されるべき確率を説明していると言えるだろう。

この様に多世界解釈で、なぜ「わたくし」はこの特定の固有値が得られている世界にいるのか。なぜ他の固有値の世界で観測しては居ないのと言う謎が残る。これは、なぜ「わたくし」はこの肉体を通して世界を見ていて、あちらにいる人の肉体を通してではないのかという、「わたくし」の問題とほとんど同じ構造である。違いは、後者は、同じ世界の中の、人間として異なる人(肉体、頭脳、記憶)の間で特に他ならぬこの「私」の体であるというのに対し、前者では、全く同じ人間だが別の世界にいる肉体の間での(そしてその世界はけっしてお互いに認識されないのだからテレポーテーションでのコピーとは違う)関係になっている。

・確率概念と意志決定論のための多世界(可能世界)

量子力学ではなく、普通の確率でもその概念構成の背後には世界のアンサンブルが暗黙の内に想定されていると考えられる。これは主観解釈でも客観解釈においてもである。客観解釈ならそれは何らかの物理的なものであり、相対頻度解釈が基本であるから、アンサンブル中の相対頻度を想定すると言うことは理解しやすい。主観解釈では確率は信念の度合いであるが、ある事象が起こらなかった可能世界の集合を想定して、その中でのある事象の、どれだけ特別であるかの程度の非数値的な「勢力」のようなもの(を基数化した)を信念の度合いととればよいだろう。

・人間原理の多宇宙

我々の宇宙において、いくつもある物理定数が、我々の宇宙での値とほんの僅かでも異なっていると、知的生命体は発生できない、生命は発生できない、物質は安定でない、そもそも宇宙が存在できない等の事態となることはよく知られている。この「奇跡」と言える事態は、ファイン・チューニングと呼ばれている^{29, 35, 36)}。

この奇跡を説明する一つめの方法は、人間に恩寵を与えようと思っている神が、ファイン・チューニングを行ったと言うものである。「神」を理由にすることを避ける方法が「人間原理」である。アブダクションを用いたその論法は次のようなものである。

宇宙は沢山ある。しかもそれらは物理定数が違っている(ここが量子力学の多世界解釈とは違うところで、多世界解釈では物理定数はどの世界でも同じである。測定結果が違うだけである)。沢山の異なった物理定数の世界があれば、人間が発生できるファイン・チューニングされた宇宙もその沢山の中にはあるはずである。宇宙や物理定数についてこの様な議論をしている人間は、発生できなければそもそもファイン・チューニングの質問もしなかったわけで、人間の存在がファイン・チューニングされた宇宙を必然としていると言う議論である。強い人間原理、弱い人間原理など区別があるが、ここでは踏み込まない。この様な必然を「観測選択効果」という。

この多宇宙でも、「わたくし」は他の(知的生命体が発生しうる)宇宙にいないのか、と言う疑問が発生する。但しこの場合、他の宇宙にいる「人間」ではないかも知れず、「わたくし」は、別の形態の生命体として、宇宙の不思議に思いを致していると言うことになる。

この種の議論には次のような論法も出てくる。それは「平凡の原理」²⁵⁾とか「メディオクリティの仮定」と言われる。仮定するのは「議論している自分は「典型的」である」または「平凡である」確率が高い、ということである。他に何も情報がなければ、自分は典型的であり、あるいは多数派である、と仮定した方が、諸事当たる確率が高いだろうと言う考えである。自分は例外であると、先に仮定するのは、間違いを犯し易いであろう。

たとえば、i)人類文明はこの先何千年も続く、ii)事実として人口は急増している iii)すると我々の先祖より子孫の方が圧倒的に多いから、我々は人類史の例外的初期にいることになる、iv)これはメディオクリティの仮定に反する v)依って i)は誤りである。であるとか、i)地球外高等文明は沢山ありお互いに交流がある ii)しかし地球外文明は発見されていない iii)地球は取り残された例外的存在である iv)メディオクリティの仮定より私たちは例外ではない、故に v)仮定 i)は誤りである。このような論法である。

この論法に出てくるわれわれは知的生命体で問題意識と自我を持った複数存在する「私」たちのことである。「わ

たくし」の問題が問うているのは、(もしそうであったとして)「なぜ「わたくし」は例外なのだろうか」、と言う疑問である。

気がつくと思うが、人間原理の議論は「わたくし」の問題と同型である。

「わたくし」 → 「知的な人類」
「私」の肉体と脳 → 「ファイン・チューニングの宇宙」

のように対応させれば、「わたくし」が「私」の中にあることを発見すると言うことの観測選択効果である。それは(なぜかたまたま或る特定の 肉体 / 物理定数の値 として実現してしまっているのではあるが)必然であるということになる。しかし筆者にはこの構図は受け入れがたく、何か見落としがあると思えてならない。

・宇宙論での物理的多宇宙と形而上学的多宇宙

現在の宇宙論では、宇宙発生のとき、宇宙が多重発生したとか、子宇宙が出来たとかの議論がされる。この話は形而上学的議論ではなく、実際の物理的多宇宙である。ところで我々は、上記のようにいろいろな分野での多宇宙を見てきた。これらは別々の、カテゴリーさえ異なる概念と思われてきた。それらの概念を「短絡的に」同じ起源であると同定するのは、「世界に圧倒的な不思議が2つある。多分それらは関係している、あるいは同じものの異なった現れである。一緒に考えればすべて解ける」という軽薄であると忌避され軽蔑される考えであった(Penrose はこれに類した議論^{33, 34)}をしたことがある。意識と時間と量子力学と重力に関しての議論の中でのことである。

しかしそうではないのではないかと筆者は思う。真摯にこれらの多宇宙概念の起源と本質、そして同一性の可能性を素直に研究すべき時が来たと思う。Universe と言う語はその言葉からして uni- すなわち唯一のもので、その他のものはないと言う意味である。ところが最近あちこちで Multiverse と言う語が使われるようになってきたことを付記する。これは多世界を論ずることが異端では無くなってきたことの表れであると思う。

5. 一人称の死生学と遍在転生世界観

死生学では、一人称の死と二人称の死、三人称の死があるという³⁹⁾。三人称の死は、社会の中において統計で記述されるような現象。二人称の死は、死に際してのホスピスのようなこと。そして一人称の死こそ「わたくし」の死である。もしかすると「わたくし」が死ぬと世界は消滅するのかもしれない。一人称の死こそ、我々が知りたいことである。

前節までで見てきたように、もし「わたくし」の問題が真の問題なら、「わたくし」は、実際の「私」の肉体の片割れであったかも知れず、転送された「私」のコピーであ

るかも知れず、またある「私」とは別人の「某」であったかも知れず、さらには別の宇宙の非炭素型生命体であったかも知れないということになった。

一つの「私」が2つに分かれる場合、消去される方にとっては単に死ぬだけと同じと思われた。これは、長い宇宙旅行を冷凍で行って、到着するとき解凍すると言う場合や、病人を冷凍して、治療法が見つかったら解凍すると言う話とも似ている。前者は、解凍され生き返るのを信じて、後者は、放置すれば必ず(すぐ)死ぬ所を、もしかしたら解凍後数十年生きられるかも知れないと期待して死ぬのである。

もっと卑近には、夜寝るのも同じではないか。明日目覚めると、寝る前と連続した「わたくし」の自意識であることを信じて、短い死を死ぬのである。3.でふれたことのように言えば、明日の「私」(それはコピーかも知れない)に将来を託して死ぬのである。もっと言えば、Penrose が示唆するように意識は元来不連続であるかも知れないから、そうだとすると我々は常に瞬間瞬間に死んでいるのかも知れない。

そして、「わたくし」がかけがえのない特別な何かであるとする、それは非常に対称性の悪い世界観になる。「わたくし」が特別な例外であるとする、メディオクリティの仮定にもそぐわない。そこで提案されるのが、遍在転生世界観¹⁹⁾である。電子が時空の中をスパイラル状に運動して(時間に逆行するときは陽電子であった)、この世界の電子は1個であるというDiracの冗談と同様に、1つの「わたくし」が時空内で、その様につながり、この同時世界のすべての「私」は「わたくし」であるというのがその言うところである。または、タイム・シェアリング・システムのように、「わたくし」がすべての「私」を行き来していると言っても良い。勿論、「わたくし」が「彼」であるときには、「私」である記憶や感覚は全くないのである。これなら対称性は回復されている。

しかしこれは、言葉の言い換えにしか過ぎないのではないだろうか。三浦は²²⁾記号論理学を駆使して、「わたくし」の問題は文法上の誤りに発する疑似問題に過ぎないと主張している。しかし筆者にはその様なことではなく、ヴェーダントが言っているように、我々の言語では否定形しか語れない用に思われる「わたくし」はやはり超難問であり、西洋論理学の限界を、時制の問題などとともに示しているのではないかと思われる。更にこの問題を追及していきたい。

もうひとつにはモナド論的多世界のことがある。10年ほど前に、保江の推薦文付きで、中込は^{40, 41)}量子力学の観測理論をも演習問題として解消してしまうと言う触れ込みの「量子モナド理論」を発表した。これは測定の際の各固有値に対応するモナド達から世界は成り、一つの(「わたくし」の)モナドは物理的全宇宙をその一つの内に内包する、とするものであると思われる。それぞれのモナドは

どの「私」から世界が展開されていてその「私」が「わたくし」になっているかが異なるのであろう。本稿で述べたことから容易に示唆されることは、中込のモノド論の発想で、量子モノド理論よりはるかに普及している EverettIII の多世界解釈を再構築してみるということである。来年度はこの仕事に取り組みたい。

謝辞

この問題に関して 35 年前よりずっと議論に乗ってくれている筑波大学の緑川信之教授に感謝します。

参考文献

- 1) D. Chalmers, "Facing up to the problem of consciousness", Hameroff ed. *Toward a Science of Consciousness: The first Tucson Discussions and Debates*, MIT Press (1994)
- 2) D. J. Chalmers, 『意識する心 ー脳と精神の根本原理を求めて』, 白揚社 (2001 年) 原著は *The Conscious Mind*, Oxford U.P.(1996)
- 3) Derek Parfit, 『理由と人格 ー非人格性の倫理へ』, 勁草書房(1988) 原書 *Reasons and Persons*, Oxford U.P. (1984)
- 4) E. Schrödinger, 『我が世界観』, 共立出版 (1987) 原書, *Mein Leben, Meine Weltansicht*, Paul Zsolnay Verlag (1985) 初出は 1925
- 5) T. Nagel, 『コウモリであるとはどのようなことか』, 勁草書房, (1989 年), 原著は *Mortal Question*, Cambridge U.P.(1979)
- 6) H. Moravec, 『電脳生物たち ー超 A.I.による文明乗っ取り』, 岩波書店 (1991 年) 原著は *Mind Children*, Harvard U. P. (1988)
- 7) E. Mach, 『感覚の分析』, 法政大学出版局 (1971 年) *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*, Verlag von Gustav Fischer, (1918)
- 8) J.J. Gibson, 『生態学的視覚論』, サイエンス社, (1979 年) 原書 *Ecological Optics*, Harvard U. P., (1976)
- 9) 永井均, 『転校生とブラックジャック ー独在性をめぐるセミナー』, 岩波書店 (2001 年)
- 10) 永井均, 『<私>の存在の比類なさ』, 勁草書房, (1998 年)
- 11) 永井均, 『<私>のメタフィジクス』, 勁草書房 (1986 年)
- 12) 永井均, 『私・今・そして神 ー開闢の哲学』, 講談社, (2004 年)
- 13) 石川幹人, 『心と認知の情報学』, 勁草書房 (2006 年)
- 14) Collin McGinn, 『意識の<神秘>は解明できるか』, 青土社 (2001 年) 原著は *The Mysterious Flame :Conscious Mind in a Material World*, Basic Books(1999)
- 15) 石川幹人他編, 『入門 マインドサイエンスの思想 ー心の科学をめぐる現代哲学の論争』, 新曜社 (2004 年)
- 16) 安達自朗他編, 『心とは何か ー心理学と諸科学の対話』, 北大路書房 (2001 年)
- 17) 渡辺恒夫, 「自我の発見とは何か ー自我体験の調査と考察」, 『東邦大学紀要』第 24 卷 (1992 年) 25
- 18) 渡辺恒夫他編, 『<私>という謎 ー自我体験の心理学』, 新曜社 (2004 年)
- 19) 渡辺恒夫, 『<私の死>の謎 ー世界観の心理学で独我を超える』, ナカニシヤ出版 (2002 年)
- 20) 天谷裕子, 『『自分』というものへの気づき』, 『名古屋大学大学院教育学研究科教育心理学論集』第 26 卷 (1997 年) 26
- 21) 渡辺恒夫, 小松栄一, 「自我体験 ー自己意識発達研究の新たな地平」, 『発達心理学研究』第 10 卷 (1999 年) 11
- 22) 三浦俊彦, 『『意識の超難問』の論理分析』, 『科学哲学』35-2 (2002 年) 69
- 23) 三浦俊彦, 「観測選択効果と多宇宙説 ー伊東邦武『偶然の宇宙』について」, 『科学哲学』36-1 (2003 年) 121
- 24) 三浦俊彦, 「人間原理的推論における『この宇宙』」, 『科学基礎論研究』103 (2005 年) 「ゼロからの論証」, 青土社 (2006 年) に収録
- 25) 三浦俊彦, 『論理学入門』, NHK 出版局 (2000 年)
- 26) 三浦俊彦, 「人間原理と独我論」, 『和洋女子大学紀要』第 40 号 (2000 年) 17
- 27) T.S. Roberts, The Harder Problem of Consciousness, http://www.infocom.cqu.edu.au/Staff/Tim_Roberts/Home_Page/harder.htm
- 28) W.K. Wothers and W.H. Zurek, "A single quanta cannot be cloned", *Nature*, 299,(1982)802
- 29) 榛葉豊, 「人間中心原理と確率の本性 ー確率過程量子化の解釈のためにー」, 静岡理工科大学紀要 12 卷 (2004 年) 177
- 30) 榛葉豊, 「定理としての確率解釈」, 静岡理工科大学紀要 9 (2001 年)
- 31) H. Everett III: "“Relative State” Formulation of Quantum Mechanics", *Rev. Mod. Phys.* , **29**, 454(1957)
- 32) D. Deutsch, 『世界の究極理論は存在するか ー多宇宙理論から見た生命, 進化, 時間』, 朝日新聞社 (1999 年), 原書 *The Fabric of Reality: The*

Science of Parallel Universes and Its Implications,
Allen Lane (1997)

- 3 3) R. Penrose, 『心は量子で語れるか』, 講談社 (1998年) 原書 *The large, the Small and the Human Mind* は 1997
- 3 4) R. Penrose, 『皇帝の新しい心』, みすず書房 (1994年) 原書 *The Emperor's New Mind* は 1989
- 3 5) 伊東邦武, 『偶然の宇宙』 岩波書店 (2002年)
- 3 6) 松田卓也, 『人間原理の宇宙論 - 人間は宇宙の中心か』, 培風館 (1990年)
- 3 7) 村田純一編, 『「わたし」とは誰か』, 「新・哲学講義. 第4巻」 岩波書店 (1998年)
- 3 8) 中島義道, 『「私」の秘密』, 講談社 (2002年)
- 3 9) 渡辺恒夫, 人文死生学研究会, 心の科学の基礎論研究会合同研究会 (2006年) での講演
- 4 0) 中込照明, 「モナド論的あるいは情報機械的世界モデルと量子力学 (数理的考察)」, 素粒子論研究 94-1, (1996年)
- 4 1) 中込照明, 『唯心論物理学の誕生』, 海鳴社, (1998年)

乳児における意図性の理解

Intentional understanding in infancy

小杉大輔*

Daisuke KOSUGI

Abstract: The question of how the ability to analyze the intentional structure of actions develops is one of the main themes of cognitive science and developmental psychology. The system of knowledge which explains observed behavior with reference to internal states such as beliefs, perceptions, emotions, and intentions takes years to fully emerge in human ontogeny. Even so it is thought that elements of intentional action knowledge are in place during infancy. In this article, I review recent findings from studies that seek the origins of intentional understanding; especially I focused on the works by A. L. Woodward and her colleagues. I begin by outlining what infants seem to know about intentional action during the first year of life, and then I consider the question of how this knowledge originates.

1. はじめに

世界に存在する対象の中で、人間は特殊である。人間は、自己推進的に複雑に動き、他の対象に注意を向け、それにはたらきかけ、ときには相互作用する。そして、ヒトという種の‘機能的な’一員になるためには、これらの人間の動きをたんなる物理的なものとしてではなく、心理的世界の現れとして表象できなければならない (Woodward, 2005¹⁾)。自閉症のように、この能力に深刻な障害があると、社会的な生活は困難になってしまう (Baron-Cohen, 1995²⁾)。

近年の研究により、生後2年目までに、子どもは他者の行為の意図的構造を分析できるようになることが示されてきた。たとえば、子どもは生後18ヶ月までに、ヒトや環境についての新たな情報を収集するために、他者の行為の目標、計画、注意の状態に注目し、推論できるようになる。また、このような能力の起源は、個体発生のより早期にみられることも明らかになってきた (Woodward, 2005)。

行為の意図的構造を分析する能力は、他者を介した学習、つまり社会的学習には不可欠であり、それゆえ、認知発達の基盤であるといえる。したがって、その発達の起源を知ることが大変重要である。本論文では、まず、乳児が生後1年目に、意図的行為について何を知っているのかについて、とくに Woodward とその共同研究者による研究に注目しながらレビューしていく。それに続いて、この知識がいかにして生まれるのかという問題について考察する。

2. 乳児における目標指向性への敏感性

ヒトのおとなは、‘行為 action’をたんなる、ある区間内の物理的動きや移動としてではなく、特定の対象や結果に向けられていると解釈する。この対象指向性 (object-directedness) は、多くの意図的行為のもつ知覚される特性のひとつである。たとえば、Woodward (1998)³⁾で用いられた事象は、実験者の女性が、目の前に並べられたクマのぬいぐるみとボールのうちの一つに手を伸ばしてつかむというものであった (後にも詳述する)。このような単純で具体的な行為は、人の動きの物理特性 (彼女は腕を上げて、左へ動かした) としてよりも、むしろ行為主体 (agent) と目標 (goal) の関係で記述される (彼女はクマをつかんだ)。もちろん、物理の側面も知覚しているが、おとなの目には、物理特性は中心的ではない。

それでは、このような認識は、いつごろから現れるのだろうか。乳児は、行為を主体の目標の構造に基づいて表象するのだろうか、また、するのであれば、それはどのような条件においてであろうか。このような問題へのアプローチとして、近年の研究者たちは、視覚的馴化-脱馴化法と呼ばれる方法を用いた実験的検証をおこなってきた。この実験法では、注視反応を指標とし、乳児が提示された刺激事象を心的にどのように処理しているのかを検証する。馴化-脱馴化法では一般的に、乳児をある事象に馴化させて (この事象を馴化事象と呼ぶ)、その後、ひとつあるいは複数の事象を提示し、馴化状態からの反応の回復を測定する (この事象をテスト事象と呼ぶ)。乳児が、馴化事象と

2007年3月2日受理

* 理工学部 情報システム学科

テスト事象の間に何らかの差異を知覚したとき、注視時間の回復が見られるといえる。一方、両者の間に差異が検出されない、つまり、テスト事象がすでに見慣れたものであると認識されたときには、注視時間の回復は見られないと考えられる。この実験方法は、乳児の認知能力について調べる研究で広く使用されている。

Woodward (1998)では、馴化の段階で、上述のように、実験者の女性が、目の前に並べられたクマのぬいぐるみとボールのうちのひとつに手を伸ばしてつかむ事象を続けて提示した(ここではクマのぬいぐるみをつかむ事象を提示したものとす)。続くテスト段階では、クマとボールの左右の位置が入れ替えられ、同様の2種類の事象が提示された。1つ目の事象は、新位置事象であり、ここでは、実験者の手を伸ばす位置(馴化段階から)変化したが、つかむ対象は変化しなかった。もう1つの事象は、新対象事象であり、実験者は同じ位置に手を伸ばし、馴化段階とは異なる対象(ここではボール)をつかんだ。新位置事象では、行為主体-対象の関係(agent-object relation)は保たれているが、表面上の特性が異なる、一方、新対象事象では、行為主体-対象の関係が変わるが、表面上の特性は変わらない。上述のように、乳児は馴化後、馴化事象に比べて新奇性を知覚した刺激を長く注視すると予想される。そして、乳児が新対象事象を長く注視したならば、それは、彼らが馴化事象を行為主体-対象の関係にもとづいて表象していた証拠であると解釈されるのである。Woodwardらの一連の研究により、6、7、9、12ヶ月児において、新対象事象への新奇反応(新位置事象に対する注視反応よりも有意に長い注視反応)が見られた。この結果は、乳児は生後6ヶ月までに、つかむ(grasping)という行為の目標指向的構造に敏感であることを示唆する(Woodward, 2005)。

ところで、Woodward (1998)では、さらに、竿とおもちゃの手を用いて、先の人手の動きと同じ動きを再現したものを刺激事象とし、同様の実験をおこなっている(例: 竿についておもちゃの手がクマのぬいぐるみをつかむ)。そして、その結果、新位置事象に対する新対象事象への選好はみられなかった。この結果は、先の実験における乳児の反応は対象に向けての手の動きや、手と対象の接触によって引き起こされるのではなかったことを示唆するといえる。なぜなら、‘竿条件’でもこれらの動きそのものは存在したからである。乳児は、人がある対象をつかむ、というときのみ、つかむという行為が含まれる事象を行為者-目標(agent-goal)の関係で符号化(encode)したのである。

‘つかむ’というような道具的行為は、行為者が表出する、目標の具体的なしるしである。日常生活において、これらの行為は目に見える効果をもつ。たとえば、このような行為によって、行為者が望む対象が行為者に近づく。そして、このような効果は、乳児がその行為の目標構造を認識するのを助ける。一方、ある人とその人が注意を向けている対象との関係というのは、目に見えるものではない。

つまり、心理的なものであり、行動上の手がかりから推論するしかない。研究者たちは、乳児がいつごろから、どのように、他者とその人が注意を向ける対象との‘見えない接続’を理解するようになるのかに興味をもってきた。

3. 乳児における他者の注意と意図の関係の理解

このような問題を扱った研究に、乳児とおとなとの共同注意(joint attention)を評価する研究がある。共同注意とは、他者の凝視方向を追従し、同じ位置に注意を向ける(注意をシフトさせる)ことである。乳児が、このように他者の視線を追うことができるのは、他者が‘何かを見ていること’を乳児が理解できているからだとされてきた(相手が対象を見ようとしていることの意味と、その対象への選択的注意)。しかし、同じ場所に注意をシフトするからといって、乳児が行為の目標指向性を理解していることにはならない。視線の追従は、‘ある対象を見ること’の概念的表象を含まない過程の結果であるという指摘もある(Moore & Corkum, 1994⁴⁾)。

しかし、視線追従の意義については十分に検討されていない。この問題に関連して、Woodward (2003)⁵⁾は、先述のつかむことに関する実験のロジックを用いて、乳児が、他者とその人が注意をむけた対象との‘見えない接続’を表象できるかどうかを調べた。この実験において、乳児には、ある人が、目の前に並べられた2つのおもちゃのうちの1つのほうを向いて、①そのおもちゃを凝視する事象、②そのおもちゃを凝視して指さす事象、そして、③乳児には、ある人の腕だけが見えていて、その手が1つのおもちゃを指さす事象が提示された。これらの事象を馴化段階で提示された後、テスト段階では、2つのおもちゃの位置が入れ替わり、新対象事象と新位置事象が提示され、乳児の選好反応が評価された。この実験の結果、12ヶ月児は、新対象事象を選好した。つまり、凝視と指さしの行為者-対象関係の変化に反応した。一方、7ヶ月児と9ヶ月児では、同様の選好は見られなかった。

ところで、この実験において、12ヶ月児ではポジティブな結果が得られ、7ヶ月児と9ヶ月児においてはネガティブな結果となったことは、社会的応答性の発達の観点からは妥当なことのようなのである。たとえば、乳児は、生後9-12ヶ月の間に、社会的パートナーに調律を合わせるようになり、共同注意をよくするようになるほか、指さしのようなコミュニケーション的な身振りを産出するようになるといわれてきた(Tomasello, 1995⁶⁾)。Woodward (2003)の実験の結果は、このような社会的応答性の変化に、社会的認知の変化、とくに注意行動の関係性の構造に敏感になるという変化が伴うことを新たに指摘しているといえる。

これに関連して、Woodwardはさらに、社会的応答性と社会的認知の特別な関係も明らかにしている。Woodward & Guajardo (2002)⁷⁾では、8-11ヶ月児を対象に、上述のWoodward (2003)と同様の指さしについての馴化実験を

おこなった。さらに、親へのインタビューと実験室での観察を通じ、被験児が対象への明白な指さしを産出できるかを評価した。この評価の結果、48人の被験児のうち、18人は明白な指さしを産出しはじめていたが、30人はまだであることが示された。この2群の間に、月齢や全体的な注意の能力や馴化段階での反応に差はなかった。しかし、馴化実験のテスト段階での反応において、有意な群間の差がみられた。明白な指さしを産出した群の乳児は、テスト段階において、新位置事象よりも新対象事象に対して有意に長い注視反応を見せた。一方、指さしを産出しなかった群の乳児では、2つのテスト事象への反応に差がなかった。

これらの結果は、最初期にみられる視線追従が、他者の注意と対象との関係（見えない接続）への気づきをともなうものではないことを示唆する。しかし、指さしのような直示的な社会的反応がみられる生後12ヶ月ごろには、この関係に気づき始めているようである。さらに、生後12-18ヶ月には、他者の‘見ることと知ること’の関係（見た対象のことは知っている、見ていない対象のことは知らない）の理解が見られることが報告されている（e.g., Tomasello & Haberl, 2003⁸⁾）。

4. 乳児における行為の意図と文脈の関係の推論

ここまでで紹介してきたように、先行研究では、乳児がつかむ、見る、指さすという特定の行為を対象指向的であると解釈することが報告されている。実際、これらの行為は、おとなにとっても、目標や意図を示す潜在的な記号（sign）である。しかし、いうまでもなく、私たちおとなは、このような、特定のわかりやすい行為だけを意図を表出するものとして解釈するわけではない。むしろ、あいまいな、新奇な行為の背後にある目標や意図について、文脈を手がかりに推論することが多いといえる。それでは、乳児にはこのような推論は可能なのだろうか？

いくつかの研究によって、乳児は生後9-12か月までに、ある行為をその文脈に基づいて解釈することが示唆されている。たとえば、Gergely et al. (1995)⁹⁾は、12ヶ月児が、コンピュータスクリーン上のディスクの動きを、その動きの道筋が目標到達への合理的な（rational）手段なのかどうかという物理的な文脈にもとづいて認識することを示している。Gergely et al. (1995)では、乳児は、まず馴化事象として、画面中央のバリアの両サイドにディスクが1つずつあり、片方のディスク（ここではディスクAとする）がバリアを飛び越えてもう片方のディスク（ディスクBとする）に向かって行き、両者が接触するという事象を提示された。続いて、バリアの除かれたテスト事象が呈示され、乳児が馴化事象をいかに解釈していたかが検証された。テスト事象は2種類あり、ひとつはディスクAが馴化事象と同様に（バリアがあるかのように）飛び跳ねてディスクBに向かっていく事象、もうひとつは、ディスクAがディスクBに向かって直進していく事象であった。もし

乳児が馴化事象においてディスクAに対して目標指向性を付与したならば（あるいは馴化事象を目的論的に解釈したならば）、バリアが無くなったテスト事象においては、ディスクAが合理的・最適な道筋を進むであろうと期待すると考えられる。したがって、1つ目のテスト事象は、ディスクの動きは見慣れているが、この期待に反する事象となり、2つ目のテスト事象はディスクの動きは新奇であるが期待に即した事象ということになる。そして、この実験の結果、12ヶ月児は、1つ目のテスト事象を2つ目のテスト事象よりも選好した。さらに、Csibra et al. (1999)¹⁰⁾は、同様の結果が9ヶ月児でも見られることを示した。

また、Behne et al. (2005)¹¹⁾では、実験者が乳児に小さなおもちゃを手渡すゲームのような課題を用いて、乳児の社会的反応を分析している。この実験では、実験者は、乳児におもちゃを手渡すやりとりで何度か成功した後、その行為に失敗する。この失敗には2通りあり、1つは実験者が乳児におもちゃを手渡す意思がない（unwilling）という文脈であり、もう1つは、意思があってもそうできない（unable to do）という文脈であった。ただし、いずれの場合も、実験者が見せる動きは同一であった。前者の文脈では、実験者は、乳児をからかうようにおもちゃを遠ざけ、後者の文脈では、おもちゃを思いがけず落としてしまった。このような場面において、9ヶ月児は、前者のときに、より不満そうに反応することが示唆された。乳児は、因果的制約（手が届くか、など）や、からかいの意図を含んだおとなの顔や声の情報を処理しているようである。Gergelyらの研究と方法は異なるが、この研究も、乳児が文脈の情報に基づいて、対象指向性を表象することを示唆している。

5. 行為の目標の構造

ここで、行為の目標構造の認識について触れておきたい。私たちおとなは、‘つかむ’とか‘凝視する’といった単一の行為の目標だけを見ているわけではない。一連の行為を、全体的な目標によって体制化されていると見なすことがある（Woodward, 2005）。たとえば、誰かが食器棚に歩いていき、ノブを握り、ドアを引いてあけ、中のクッキーの箱をつかむ、という一連の行為を見ると、単一の行為の目標（食器棚に到達する、ドアを開く）だけでなく、それぞれの行為を起こさせる全体の目標も理解する（何か食べ物をとる）。Zacks and Tversky (2001)¹²⁾は、行為の構造のこのような側面を部分-全体の階層（partonomic hierarchies）と表現している。つまり、下位目標によって体制化された行為は、より高次の目標によって体制化された連続的行為の部分となす。行為の連続をこのように分析する能力は、事象表象の発達には不可欠である。

それでは、乳児は、ある行為が、異なる階層水準の目標に向けられていると解釈できるのだろうか。Woodward and Sommerville (2000)¹³⁾は、この問題にアプローチしている。彼女たちは、ある人がある対象に、それとは違うもう1

つの対象を手に入れるためにはたらきかける, という事象を乳児に提示した。つまり, 1つ目の対象への行為は, その対象に向けられているとも(近接目標 proximal goal), 行為の連続の最後に得られるもう1つの対象(最終目標 ultimate goal)に向けられているとも解釈できるのである。以下でこの実験について詳述する。

Woodward and Sommerville (2000)において, 12ヶ月児は, 演者が2つの透明な箱のうちの1つのフタに手を伸ばしてつかむのを見た。2つの箱にはともにおもちゃが入っていた。演者は, さらにフタを開け, 中のおもちゃをつかんだ。注目すべき問題は, 乳児が, フタをつかむというはじめの行為が, 箱そのものに向けられていると解釈するか, 中のおもちゃに向けられていると解釈するかということであった。乳児は, 1つの箱を開けておもちゃをつかむという事象に馴化され, 馴化後に, おもちゃの位置が逆になった事象を提示された。新対象事象では, 開ける箱は馴化段階と同じだが, おもちゃは異なっていた。新位置事象では, 開ける箱は逆だが, おもちゃは馴化段階と同じだった。テスト事象では, 演者は, 箱のフタをつかんだだけで, 行為を完遂しなかった。これは, 乳児が, 馴化事象における最初の行為(つまり, 箱のフタをつかむ)をいかに解釈していたかをテストするためであった。もし, 乳児が, その行為が箱そのものに向けられていると解釈したならば, 新位置事象を新対象事象よりも選好するだろう。一方, 最初の行為が, 箱の中のおもちゃに向けられていると解釈するならば, 逆に, 新対象事象を新位置事象よりも選好するだろう。実験の結果, 12ヶ月児は後者の選好パターンを見せた。彼らは, 行為の連続を, その最終目標にもとづいて認識していたのである。したがって, 行為は完遂していなかったにも関わらず, 乳児は近接目標よりも, 最終目標により敏感に反応したのである。

それでは, 乳児は, どのような情報に基づいて, このような解釈をするのだろうか。1つの可能性として, 乳児は行為の連続を, その生起順のみにもとづいて, 最終目標に関連づけているかもしれない。つまり, 乳児は, 「行為はそれに続いて起こる結果に向けられている」と仮定しているというものであり, 一連の行為の最後にある目標が, 最終目標ということになる。しかしながら, おとなは行為の生起順番だけにもとづいて, 行為の高次の目標を分析するわけではない。たとえば, おとなは行為の因果的制約の情報に注意する。ある行為が, 物理的にある目標の達成を可能にするとき, おとなはその行為がその目標に向けられていると解釈する。そして, 先述の Gergely et al. (1995)の研究は, 乳児が, 行為の因果関係を手がかりに, 行為の下位目標を, 高次の目標に関連づけることができるという可能性を示唆するのかもしれない。

この問題に関連して, Woodward and Sommerville (2000)では, 先述の箱を開ける事象を提示する実験の追加実験をおこなっている。この実験では, 12ヶ月児が行為とその

目標を関係づける際に, その行為の連続の順序だけにもとづくのか, それとも, それらの因果関係に注意するのか(箱を開けることは, 行為者がおもちゃをつかむことを可能にする)をテストした。刺激は, 先の実験とほぼ同様であったが, 今回はおもちゃが箱の外に置かれていた。したがって, 行為の時間順序は先の実験と同じであったが, 因果関係は異なっていた(箱を開けることと, おもちゃをつかむことは因果的に無関係であった)。これらの条件による実験の結果, 乳児に, 新位置事象を長く見る傾向がみられた。つまり, 乳児は, 箱のフタをつかむことがおもちゃに向けられているとは解釈しなかったのである。

さらに, Sommerville and Woodward (2005)¹⁴⁾は, 12ヶ月児を対象にした実験で, おもちゃを手にするために布をひっぱるといふ, いわゆる手段-目的課題(means-end problem)を刺激事象として用い, Woodward and Sommerville (2002)と同様の結果を得ている。そして, さらに, 10ヶ月児を対象にこの実験をおこなった結果, 全体としては, 反応は一貫していなかったが, 新たな指標を加えて, 被験児を群分けして分析したところ, 興味深い結果が得られた。被験児は, 馴化実験に加え, 「布にのせられた, 手の届かないところにあるおもちゃを, 布をひっぱることによって手にすることができるかどうか」を評価する課題に参加した。そして, この課題における計画的な反応(おもちゃを手にするために布をひっぱっている間, おもちゃから目を離さず, おもちゃが近づいたらすぐにおもちゃをつかむか)と, 馴化課題における, 新布事象(新位置事象)よりも新対象事象を選好する反応との間に連関がみられた。対象操作課題においてよい反応をみせた乳児(上位25%)は, 新対象事象を有意に選好した(つまり, 実験者の布をつかむという行為が, それにのせられているおもちゃに向けられていると解釈した)。一方, 操作課題の反応がよくなかった乳児(下位25%)は, 新布事象を選好した。これらの結果は, 乳児が, 布をつかむという行為が布に向けられていると解釈したことを示唆するといえる。

このように, 生後10から12ヶ月までに, 乳児は行為-対象の局所的な関係だけでなく, 行為の連続とその最終的な結果の関係にも注意を向けているのである。1年目の終わりまでに, 乳児は, 行為の部分-全体階層の構造について推論しはじめるのである。

6. 乳児の知っていること

このように, 乳児は生後1年目から, 行為をその意図の構造に基づいて分析しはじめる。この分析は, 動きや接触の表層の水準を超えており, 人間の行動の意味的要素を映し出している。そして, この分析は, 生後5-6ヶ月ですでにみられる。生後9-12ヶ月の間には, 行為者と行為者が注意している目標を関連づけ, 文脈に基づいて, 一連の行為と目標を関連づける。

これらの発見は, 乳児が意図というものをどのように理

解しているのかという疑問をおこさせる。乳児は、ある行為とそれが向けられた対象との関係の本質をどのように理解しているのだろうか。おとなは、行為と関連づけられた行動の規則性 (regularities) と、それらの規則性の基礎となる心的状態の両方を表象する。1つの可能性は、乳児は前者は表象するが、後者は表象しないというものである。たとえば、乳児は行為者と対象の関係を、よく続いて起こる行為にもとづいて理解するかもしれない (たとえば、人はそのとき見ていたものによく働きかける)。

乳児が、行動の規則性の分析から始めるのだとしても、そこから成熟した意図概念を構成することは可能だろう。行為者-対象関係を行動にもとづいて分析することにより、乳児は行為者と目標の 관계に気づくようになる。また、行為者と対象に注目していれば、意図についてのより豊かな知識を構成するのに有効な事象の側面が強調されることになる。行動分析は行為の心理的相関物についての洞察の基礎を提供しうるのである (Whiten, 1994¹⁵)。

乳児が、行動の規則性だけを表象しているという可能性についてのもうひとつの例がある。Gergely と Csibra は、乳児の行為の分析は、目標指向的に合理的に体制化されたものであるが(目的論的表象)、それは精神が行為の原因となるという知識の構成に先立ち、さらにその基礎をなすと仮定している (Gergely & Csibra, 1998¹⁶ ; 2003¹⁷) ; 乳児の初期の目的論的表象は、行為者と目標の関係に、観察可能な心情が伴うとき、その関係を特定化する。これらの表象は、目標とは、心的に表象された情態 (信念 beliefs) との関連で追求される心的存在物 (願望 desires) であるという概念的洞察の基礎をなすと仮定される (Woodward, 2005)。

それでは、乳児は、行為を引き起こす内的状態について何か理解しているのだろうか。子どもは、心的生活の側面を理解するのに十分な、宣言的で精巧な知識のシステムをもつようになるが、それと同じシステムを乳児がもつとは到底考えられない。また、乳児から得ることのできるデータの種では、この問題へのアプローチは難しい。より年長の子どもの心について話すことができ、それは彼らの心の理解についての貴重な情報源となる。そして、このような情報を乳児から得ることはできない。乳児は、心的状態を名づける語を理解していないし、使わない。したがって、行動的な反応が、このような研究の指標になってしまう。そして、常にとは言わないがしばしば、それらの反応によって、乳児は心的状態を表象しないと解釈されやすい。

しかしながら、乳児が、観察される行為の内的な相関物について何かを理解しているという結論に矛盾しない証拠もある。成熟した素朴理論では、心的状態を、直接の物理的作用あるいは物理的接続とは独立して存在するもの、個々の行為主体の中に存するもの、そして、自己と他者の中で同じ形をなしているものとして表象している。乳児は行為の情報を探知しながら、これらの心的経験の側面について、生後1年目の終わりまでに理解していくようである。

まず、すでに論じたように、乳児は他者と彼・彼女が注意している対象の間の非物理的な関係を表象するし、さらに、目標を特定の行為とは独立しているものとして表象する。これらの能力は、乳児が、行為者-対象間に、即時の物理的接続よりも抽象的な何かを表象することを示す。

また、乳児は目標を行為者個人の特性として表象する。たとえば、Buresh and Woodward (2006)¹⁸ は、9ヶ月児と13ヶ月児が行為主体のアイデンティティを行為の目標と一体をなすものとして表象することを示した。上述のWoodwardらによる一連の実験と同様の手続きによる実験をおこなった結果、馴化段階とテスト段階で行為の提示者が交代すると、新対象事象への選好はみられなかった。Kounlemer, Wynn, and Bloom (2003)¹⁹では、違う観点から同様の問題にアプローチしている。この実験で、乳児は図形が相互作用している事象のアニメフィルムを提示された。1つの対象がもう1つの対象を執拗に追いかけてまわすような事象である。この事象を見た12ヶ月児は、追われる図形が追う図形から逃れることを期待するという。乳児は、ある(消極的)資質のある対象に帰属させ、その資質をもとに、その対象の新たな文脈における行為を推論した。

さらに、乳児の自分自身の行為主体としての経験と他者の目標指向的行為の理解の間には強い関係がある。まず、乳児は、ある行為をマスターすると同時に、その行為の目標指向性を理解するようになるという証拠がある (Woodward, Sommerville, & Guajardo, 2001²⁰)。加えて、Meltzoff and Moore (1977)²¹が明らかにした新生児模倣にみられるように、乳児は、非常に早くから、自身の目標指向的行為を他者のそれに合致させるように形成する。乳児は、自分自身の目標と他者の目標を同様の形式で表象しているようである(この問題については、6でより詳しく述べる)。そして、乳児が自分自身の内的な意図状態に気づいているときには、他者もそれと同様の状態をもつとみなすことが示唆されている。

これらの発見は、すべて乳児が心的状態を理解していると結論づけられるような証拠にはならない。しかし、心的状態の知識の中心的な側面は、乳児期に現れはじめることを示唆している。

7. 行為の知識の起源

ここまで見てきたような研究の成果により、私たちは、行為についての知識の発現の枠組みを推測することができる。そして、それゆえ、このような知識がどのようにして生まれるのかを知りたくなる。概念構造の基礎的側面は、生得的な抽象的知識システムによるのか、それともボトムアップ的学習と概念的構成の所産なのかという問題は、認知科学や発達心理学の分野において、永続的に議論されている。そして、この議論は、社会的認知の領域でも活発である。それは、とくに乳児期の意図的行為の知識についての証拠によって、この知識のシステムへの何らかの生得的

寄与がある可能性が提起されていることに起因する。

たとえば、Premack(1990)²²⁾による理論はよく知られている。これは、乳児は、観察した事象を意図的だと解釈するための抽象的システムをもって生まれるというものである。この生得的な意図性検出のシステムは、実世界の行為主体の経験とは独立していて、ある特定の動きのパタンによって引き金がひかれ、駆動すると考えられている。そして、乳児が意図性を付与する対象として、広い範囲の存在物 (entities) を仮定している (それには、人の見慣れない行為や、人のみかけをもたない見知らぬ対象が含まれる)。

Premack は、引き金になる手がかりは、自己推進的動き (self-propelled motion) であるとしている。そして、自分で動く対象はどれも行為主体であるとみなされ、その行動は、意図、選好、学習の能力、その他の心理現象を表すものとして解釈されるという。この場合、ある単一の行動手がかりが、生得的な信念のシステムの引き金を引くことになる。同様の説明は、Johnson (2000²³⁾; Shimizu & Johnson, 2004²⁴⁾にもみられる。Johnson は、ある存在物が随伴的な社会的相互作用をするとき、乳児は、その存在物は、離れた存在物に注意を向け、目標指向的なしかたで行為することのできる行為主体であると推論すると仮定している。

一方、生得的な概念は、ある特定の行動パタンのみを説明するという説がある (したがって、行動手がかりそのものが、生得的な概念が何であるかを具現化していることになる) (Leslie, 1994²⁵⁾; Gergely & Csibra, 2003; Kiraly et al., 2003²⁶⁾。このシステムは、これらのパタンを表している事象に発火すると考えられている。たとえば、Gergely と Csibra は、ある存在物が目標に向けて明らかに合理的な動きで移動しているのを見ることによって、生得的な合理的行為の概念の引き金がひかれ、乳児は、その存在物が新たな状況でも合理的に振舞うだろうと期待するようになる と仮定している。Kiraly たちは、このような効果をもつ他の手がかりを2つ提案している。①顕著な成果の原因となる動きと、②同じ目標に向けられた、繰り返しの、多様な (しかし、潜在する力は等しい) 動きである。

これらの仮説はすべて、乳児が意図的行為の比較的抽象的な概念をもっていて、乳児はそれをクリティカルなしかたで動く対象すべてに—その対象が実世界の対象に似ているかどうかに関わらず—付与すると予想している。そして、生後9-12ヶ月の乳児において、この予想を支持するような実験結果が得られている。上述のように、この月齢の乳児は、コンピュータスクリーン上の抽象図形の動きを目標指向的だと解釈することが示唆されている (Gergely et al., 1995; Kounmeier et al, 2003)。また、Johnson たちは、乳児は、ある存在物が社会的に随伴した行動に従事するのを見ると、その存在物を行為主体としてみなすようになることを明らかにしている (Shimizu & Johnson, 2004)。

Shimizu and Johnson (2004)では、12ヶ月児に、ボサボサの緑色の毛をまとったブロックを見せた。1つの群では、

乳児はまず、そのブロックが、実験者の社会的勧誘に対して (ビーブ音と動きによって) 随伴的に反応する場面を提示された。もう1つの群の乳児は、同様にブロックを提示され、ビーブ音も聞いたが、実験者とブロックが相互作用する場面は提示されなかった。その後、両群の乳児は、馴化段階で、ブロックが (明らかに自己推進的に)、2つのターゲット対象物の1つに接近し、接触するのを見た。そして、テスト段階では、Woodward (1998)と同様、新対象事象と新位置事象が提示された。その結果、テスト段階における注視反応に群間で違いが見られた。2つのテスト事象を区別したのは、先に実験者とブロックの社会的相互作用を目撃した群のみであり、この群の乳児は、新対象事象を選好した。この反応は、乳児がブロックの動きを目標指向的だと解釈したことを示唆する。つまり、先に提示された社会的相互作用が手がかりとなって、乳児が、ブロックを行為主体だと解釈したのだと考えられるのである。

これらの発見は、生後9-12ヶ月までに、乳児は比較的抽象的な目標指向的行為の概念を保持すること、そして、その概念は、ある状況においては、非日常的な行為主体にまで拡張されうることを示唆する (が、すべての対象に拡張されるのではない。たとえば、Meltzoff, 1995²⁷⁾)。しかし、その生得性については確かめられていない。ポジティブな研究成果は、生後12ヶ月以降の乳児から得られたものが大半であり、たとえば、Woodward (2005)は、そこで見られる乳児の反応は、生得的に授かったシステムではなく、'発達する'システムの所産であると述べている。

8. 行為の知識の発達と学習

Woodwardのような研究者は、乳児の行為の知識は生得的ではなく、乳児が、実世界の行為主体とその行為の経験から抽出し、発達とともにより抽象的でフレキシブルになっていくのではないかと考えている。Woodward (2005)は、乳児は、特定の行為とそれらの行為どうしの関係についての知識を得ると、それらの行為にまたがる規則性を抽出するのではないかと、そして、その規則性を、新奇あるいはあいまいな事象を解釈するのに使うのではないかと提案している。

もし、乳児がはじめにもっている目標指向的行為の概念が抽象的なものならば、乳児ははじめから、あらゆる存在物に目標を帰属させるだろう。しかし、そうではないことを示した証拠がある。たとえば、5-6ヶ月児は、'つかむ'という日常的に慣れている行為は目標指向的だと解釈したが、無生物の動きや人間の見慣れない動きは同様に解釈しなかった (Woodward, 1998; 1999)。また、上述の Gergely et al. (1995)と同様の実験をおこなった Csibra et al. (1999)では、6ヶ月児は、ディスクに目標指向性を付与するような反応を見せなかった。目標指向性の付与に関する月齢差は、Kiraly et al. (2003)でも報告されている。

これらの報告は、生後1年目において、乳児は、まず、

目標指向的行為の局所的理解を見せ、その理解がより一般的になっていくという結論を支持するようである。つまり、乳児は、はじめに‘人間’の‘つかむ’というような特定の行為についての目標指向性理解を見せ、生後 9-12 ヶ月になると、より抽象的な対象やその行為にも目標指向性を付与するようになると考えられる。しかし、このような結論をするためには、より入念な検証が求められる。先に述べたように、生得的な知識の発現の引き金を引く、潜在的な行動の手がかりがあるという仮説がいくつかあり、まだこれらを完全に否定することはできない。たとえば、これまでの実験的研究では、乳児にそのような手がかりを提示できていない可能性もある。これに当てはまりそうな事例として、Luo and Baillargeon (2004)²⁸⁾が興味深い研究をおこなっている。この研究では、5 ヶ月児が、自己推進的に動く箱を目標指向的な行為主体であると解釈することを明らかにしている。しかし、この報告は、Shimizu and Johnson (2004)において、12 ヶ月児が、実験者と相互作用しなかったブロックには、目標指向性を付与しなかったことには矛盾している。より低月齢の乳児については、更なる検証が必要である。

ここで、概念構造はボトムアップ学習と概念的抽象化の所産であるという、生得主義に反する説について紹介したい。意図的行為の知識が認知学習によって得られるという説は、乳児の社会的認知における社会的経験の影響に焦点を当てる研究者が発展させてきた (e.g., Tomasello, 1995; Carpenter, Nagell, & Tomasello, 1998²⁹⁾)。これらの説では、一般に、9-12 ヶ月児が注目されている。この時期は、乳児がおとなとともに、より構造化された相互作用-共同注意やコミュニケーションな身振り、ゲーム遊び、模倣などをしはじめる。これらの新しい相互作用の開始は印象的であり、‘社会的認知の革命 (social-cognitive revolution)’ のシグナル、とりわけ、意図的行為の理解のシグナルだととらえられてきた (Tomasello, 1995)。

この時期に出現する相互作用のパターンは、新たな社会的認知能力のしるしとしてだけでなく、これらの能力を立ち上げる手段としてもとらえることができる。とくに、3 項関係 (triadic interactions) への従事は、乳児が他者の意図を発見するための条件を設定すると仮定されている (Carpenter, Nagell, & Tomasello, 1998)。3 項的な相互作用においては、おとなと子どもは環境の同じ側面に注目する (時には、それにはたらきかける)。そしてこのことが、乳児が、自分自身の行為と意図の状態を (観察された) 他者の行為と並べて位置づける機会を提供する。乳児が、他者とその他者が注意を向けている対象の間の意図的な関係を推論するのに不可欠な構造要素を学習するのは、このような機会であると考えられてきた。また、乳児はまず、自身の (注意と対象の間の) 意図的な関係の表象と他者についてのそれとの溶け合った表象を形成し、そこから、独立した行為主体としての自分自身と他者という分化した

概念を構築すると提案する研究者もいる (Barresi & Moore, 1996³⁰⁾)。また、自己から他者への類推的な拡張の過程のようなもの、つまり、乳児は、‘他者は自分自身と類似した内的経験をもつ’ と推論すると考えている研究者もいる (Carpenter, Nagell, & Tomasello, 1998; Meltzoff, 2002³¹⁾)。

これらの理論は、もっともらしいし、乳児期の認知発達をうまく説明できる可能性があるが、実証的な研究は進んでいない。このひとつの理由として、これらの理論のもととなる証拠が、意図的理解のインデックスとして社会的応答性に依存していることが挙げられる。子どもの社会的応答を、他者の意図の理解の証拠として扱ってよいのかどうかについては長い間議論されてきた。たとえば、Tomasello (1995)は、9-12 ヶ月児の視線追従と共同注意行動は、他者の意図の理解を反映すると示唆している。しかし、Barresi and Moore (1996)が指摘するように、これらの行動は、強化の過程によって形成されるかもしれないし、注意についての理解を必要としない低い水準の過程によって支えられるかもしれない。一般的に、社会的行動は、いくつかの水準の処理の影響を受けるため、ある行動とある特定の心的表象の直接の関係は明白ではない。加えて、体制化された 3 項的行動を社会的認知のもっともよい証拠として扱うことは、より低月齢の乳児の認知能力を過小評価することになる可能性がある。生後 9-12 ヶ月に満たない乳児は、体制化された 3 項関係には参加しないが、先述のように、馴化パラダイムを用いた実験的研究によれば、彼らは意図的行動の重要な側面を理解している。

また、ある行為についての知識に伴う社会的応答は、その知識の原因にも結果 (証拠) にもなりうるため、社会的に構成される過程を評価しにくいという問題がある。たとえば、3 項関係において、乳児がおとなとある対象への注意を共有していることは、乳児がおとなの注意についての知識を獲得する機会 (手段) を与えるし、一方では、乳児がそのような知識を保持しているという証拠を構成することにもなる。社会的経験が、行為の知識を構成する要因であることは間違いないが、その経路を明確にすることが求められる。そして、そのための独立した指標が必要である。この問題について、Brune and Woodward (2004, cited in Woodward, 2005) は、乳児の行為理解の馴化の指標と、社会的応答性の指標を組み合わせた実験をおこなっている。

Brune and Woodward (2004) の目的は、乳児の行為理解が、社会的応答性と相関関係にあるかを確かめることであった。両者に重要な変化が起こるとされる、生後 9-12 ヶ月の時期に注目した。両者に相関があれば、経験が乳児の社会的認知の発達に寄与することの証拠になる。

Brune and Woodward (2004) は、10 ヶ月児を対象にした実験をおこなった。先行研究により、10 ヶ月児は凝視や指さして表出される注意の関係を理解しはじめることが示されている。各被験児は、まず、馴化法による実験 2 つに参加した (それぞれの実験は別の日におこなわれた)。

1つの実験は、彼らの凝視の理解を評価するもの、もう1つの実験は、指さしの理解を評価するものであった。Brune and Woodward (2004) では、この2つの実験における被験児の反応が、彼らの社会的応答性と相関するかどうか注目した。そのため、乳児の社会的行為—視線追従、親との共同注意への参加、対象の指さしの能力—についても実験的に調べた。そして、分析の結果、被験児の馴化実験の反応と社会的行為との間に有意な相関があることが示唆された。しかし、この相関関係は、直感的な予測とは異なるものであった。つまり、乳児の社会的行為と社会的認知の間には、比較的一般的な相関関係があると考えられていたが、発見された相関関係は、比較的行為固有であった。たとえば、指さしの理解は、乳児自身の指さしの能力と有意な相関があった（これは、Woodward & Guajardo, 2002 と同じ）。しかし、指さしの理解は、その他の社会的行為の指標とは相関がなかった。一方、凝視の理解は養育者との共同注意への従事程度と相関があったが、指さしの産出や他の社会的行為との相関はなかった。いずれの理解も、視線の追従の傾向とは無相関であった。

このように、社会的経験は、社会的認知の発達に寄与するようであるが、不明な点が多い。たとえば、ある社会的経験がある社会的認知を生み出すのか、あるいは、ある社会的認知がある社会的経験を導くのか、という因果関係の方向は明らかではない。また、Brune and Woodward (2004) では、社会的認知のある特定の側面と、ある特定の社会的行為の産出の間に有意な相関が見られたが、このような相関がより一般的になるのは、いつ、どのようにしてなのかという問題もある。さらに、子どもの社会的経験の体制化には、子ども自身の社会的認知のほかに、親の行動特性のような要因も大きく影響すると考えられる。今後、これらの問題について、横断的研究と縦断的研究の両方からアプローチする必要があるだろう。

9. 行為の表象と脳科学からの示唆

乳児のもつ認識の起源に関する研究は、近年、脳科学の成果により、新たな展開をみせている。「心の座」としての脳神経系の仕組みについて明らかにする研究には、生化学的方法、微小電極法など、さまざまな手法がある。それらの中で、近年の心理学ともっともつながりが深いのは、非侵略計測法によるイメージング法であろう。その中でも、機能的磁気共鳴画像法（functional magnetic resonance imaging: fMRI）を用いた研究は、心理学の研究とのコラボレーションにより、多くの成果を挙げている。そして、より近年になって登場した光トポグラフィ法は、乳児の脳の測定を可能にするものであり、これを用いた研究の進展が期待されている。

さて、ここで、脳研究と意図性の認識の研究のつながりについて紹介したい。意図的行為主体としての経験が、意図の概念の発達に寄与するという仮説については、長い間

議論されてきた。これに対し、近年、行為主体としての経験が、他の行為主体の理解のための情報を与えるという可能性に関心が寄せられている。これは、行為の産出と行為の知覚に共通する神経—認知的表象の存在—ミラーニューロンの研究としてよく知られている—が示唆されていることによる。たとえば、サル単一細胞の記録から、被験体がある目標指向的行為を産出しようとしているとき、その被験体が、人が同じ行為をするのを観察したときの両方で発火する運動前野のニューロンの存在が明らかになった（Rizzolatti, Fogassi, & Gallese, 2001³²⁾）。また、機能的イメージング研究によって、ヒトの大人の脳で、ミラーニューロンと同様の機能をもつ領域が発見されている（e.g., Iacobini et al., 1999³³⁾）。ミラーシステムは、他者の行為を自分がその行為をおこなうときにはたらく神経回路の活動によって理解する神経過程に対応すると考えられている（田中, 2006³⁴⁾）。

ヒトの乳児においては、サルのミラーニューロンと比較できるような直接の証拠はないが、ミラーシステムが乳児にも存在するのではないかと考えられる理由がある。たとえば、乳児は、生まれた直後から他者の行為を模倣する（Meltzoff & Moore, 1977）。いうまでもなく、新生児は、自分自身の容姿や行動を見たことがない。それにも関わらず、観察した他者の行為を再現することができるという現象はたいへん不思議である。そして、これは、自分自身の行為と他者の行為を自動的に共鳴させる機構が、乳児の脳に備わっていることを示唆する証拠だと考えられるようになってきたのである（Meltzoff, 2002）。これに関連して、ミラーシステムは、遂行された行為（模倣すべき行為）の感覚コピーを生成し、それを模倣すべき行為と比較すると考えられている（Rizzolatti, Fogassi, & Gallese, 2001; 川合, 2007³⁵⁾）。もしも、このような神経的機構の存在が明らかになれば、模倣の発達の研究だけでなく、意図性や心の理解の発達についての研究も飛躍的に発展するだろう。

ところで、Sommerville, Woodward, and Needham (2005)³⁶⁾ は、乳児自身の目標指向的行為の経験が、他者の行為の表象に生かされるかどうかを確かめる実験をおこなっている。この問題は、ミラーシステムによる行為理解と関連しており、大変興味深い。この研究で、Sommerville たちは、3ヶ月児に新たな目標指向的行為を学習させた。その行為とは、マジックテープ付きの手袋を用いて、目の前に置かれたおもちゃを自分に近づけるというものである。この月齢の乳児は、まだ手伸ばし（reaching）の能力に限りがあり、自分でおもちゃに手を伸ばしてそれを自分に近づけることは難しい。そして、Woodward の先行研究によれば、この月齢の乳児は、まだ、他者が対象に手を伸ばしてつかむという行為を目標指向的に解釈しない（Woodward, 2005）。Sommerville らの研究の目的は、手袋を用いた対象指向的行為の経験が、Woodward (1998) と同様の馴化パラダイムによる実験の反応、つまり他者行為の理解に影響

を及ぼすかを検証することであった。そして、実験の結果、手袋による対象操作を経験した群の3ヶ月児は、Woodward (1998)と同様の実験のテスト段階において新位置事象よりも新対象事象を選好した。一方、手袋による対象操作を経験しなかった統制群では、馴化実験において、いずれかのテスト事象への選好は見られなかった。さらに、実験群の馴化実験における新対象事象への選好の度合いと、手袋で対象に接触した時間(累積時間)の間に有意な相関がみられた。これらの結果は、乳児の目標指向的行為の経験が、他者の目標指向的行為の認知に影響を与えることを示唆する。このような効果がみられる月齢や、行為の種類、あるいはその発達変化など、今後調べられるべき問題は多いが、非常に興味深い報告である。

10. まとめ

本論文では、Amanda L. Woodwardとその共同研究者による一連の研究に焦点を当て、0歳児における意図性の認識と、それに関連する諸問題についてレビューした。乳児は、生後3-5ヶ月において、他者の行為の目標指向性を認知しはじめ、社会的応答性がより豊かになる生後9-12ヶ月において、その知識をより精緻に、かつ柔軟にしていこうである。Woodwardは、意図的行為の知識は、局所的なものから、より一般的な、そして抽象的なものへと変化するという発達の過程を描いている(Woodward, 2005)。発達の道筋については、他の立場をとる研究者の説明も魅力的であり、今後、盛んな議論がおこなわれると考えられる。しかし、巧みに構成された多くの実験により、これまで十分に検討されていなかった0歳児の行為知識についてのデータを提供したWoodwardの功績は非常に大きい。この領域の研究の発展がますます期待される。

ところで、Woodwardたちの研究では、馴化パラダイムを用いた実験が中心であったが、意図性の認識の研究では、模倣反応を指標にした実験にもとづく報告も多い。たとえば、Meltzoff (1995)は、18ヶ月児に対し、他者がある対象操作を完遂できない様子を見せ、同じ対象を渡したときの被験児の反応を観察した。ここで提示された対象操作は、たとえば、ビーズを通した長いひもをカップに入れるというものである(完遂できないというのは、この場合、ビーズのひもをカップにうまく入れられないことをさす)。この実験の結果、行為が完遂できない様子を目撃した被験児が、行為が完遂されたのを目撃した被験児と同様の水準で、対象操作を完遂させたことが示された。つまり、18ヶ月児は、目撃していないはずの目標行為を推論し、それを再生したのである。これは、18ヶ月児における他者の目標の理解の強い証拠であると考えられている。また、他の研究者による追試の結果、同様の反応は、12ヶ月児では見られない(目標行為の推論にもとづく再生は見られない)ことが示されている(Bellagamba & Tomasello, 1999³⁷⁾)。しかしながら、Carpenterらは、より単純な目標指向的

行為を提示したときの模倣反応をもとに、12ヶ月児であっても、他者の行為の目標を理解していることを示している。また、Gergely, Bekkering, & Kiraly (2002)³⁸⁾は、14ヶ月児が、他者の行為の手段と目標の関係を、合理性に基づいて理解し、状況によって、その目標を再現する手段を変えることを示している(手段と結果の再現と、より合理的な手段による結果のみの再現)。

模倣反応は、意図性理解の強い証拠となるが、運動技能の制約を受けるので、1歳以上の子どもに適用された実験手法を、そのまま0歳児に用いることができない。つまり、模倣反応を指標にすると、その行為に含まれる運動技能がまだレパートリーに入っていない乳児(のもつ知識)を過小評価してしまう可能性がある。したがって、たとえば、模倣反応と馴化反応の関係を明らかにするような研究が必要である。

最後に、他者行為の理解に寄与する生得的な機構については、今後ますます研究が進み、新たな議論が展開していくと考えられる。本論文では、おもに抽象的な概念の生得性についての議論、意図性認識への経験の寄与についての議論、そして、ミラーシステムについての議論を紹介した。近年の実験手法の進歩や、脳科学とのコラボレーションによって、より低月齢の乳児のもつ認識や、その神経的基盤について扱うことができるようになってきた。この領域の研究の進展は早く、最新の動向に常に注目していく必要がある。

参考文献

- 1) Woodward, A. L. (2005). The infant origins of intentional understanding. R. Kail (ed.), *Advances in Child Development and Behavior*, pp. 229-262.
- 2) Baron-Cohen, S. (1995). *Mindblindness: An essay on autism and theory of mind*. Cambridge, MA: MIT Press.
- 3) Woodward, A. L. (1998). Infants selectively encode the goal object of an actor's reach. *Cognition*, 69, 1-34.
- 4) Moore, C. & Corkum, V. (1994). Social understanding at the end of the first year of life. *Developmental Review*, 14, 349-372.
- 5) Woodward, A. L. (2003). Infants' developing understanding of the link between looker and object. *Developmental Science*, 6, 297-311.
- 6) Tomasello, M. (1995). Joint attention as social cognition. In C. Moore & P. J. Dunham (Eds.), *Joint attention: Its origins and role in development* (pp. 103-130). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- 7) Woodward, A. L., & Guajardo, J. J. (2002). Infants' understanding of the point gesture as an object-directed action. *Cognitive Development*, 17, 1061-1084.
- 8) Tomasello, M., & Haberl, K. (2003). Understanding attention: 12- and 18-month-olds know what's new for other persons. *Developmental Psychology*, 39, 906-912.

- 9) Gergely, G., Nadasdy, Z., Csibra, G., & Biro, S. (1995). Taking the intentional stance at 12 month of age. *Cognition*, 56, 165-193.
- 10) Csibra, G., Gergely, G., Biro, S., Koos, O., & Brockbank, M. (1999). Goal attribution without agency cues: The perception of "pure reason" in infancy. *Cognition*, 72, 237-267.
- 11) Behne, T., Carpenter, M., Call, J., & Tomasello, M. (2005). Unwilling versus unable? Infants' understanding of intentional action. *Developmental Psychology*, 41, 328-337.
- 12) Zacks, J., & Tversky, B. (2001). Event structure in perception and conception. *Psychological Bulletin*, 127, 3-21.
- 13) Woodward, A. L., & Sommerville, J. A. (2000). Twelve-month-old infants interpret action in context. *Psychological Science*, 11, 73-77.
- 14) Sommerville, J. A., & Woodward, A. L. (2005). Pulling out the intentional structure of action: The relation between action production and action processing in infancy. *Cognition*, 95, 1-30.
- 15) Whiten, A. (1994). Grades of mind reading. In C. Lewis & P. Mitchell (Eds.), *Children's early understanding of mind* (pp. 47-70). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- 16) Gergely, G., & Csibra, G. (1998). The teleological origins of mentalistic action explanations: A developmental hypothesis. *Developmental Science*, 1, 255-259.
- 17) Gergely, G., & Csibra, G. (2003). Teleological reasoning in infancy: The naïve theory of rational action. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 287-292.
- 18) Burech, J. S., & Woodward, A. L. (2006). Infants track action goals within and across agents. *Cognition*, doi: 10.1016/j.cognition_2006.07.001.
- 19) Kounlmeier, V., Wynn, K., & Bloom, P. (2003). Attribution of dispositional states by 12-month-olds. *Psychological Science*, 14, 402-408.
- 20) Woodward, A. L., Sommerville, J. A., & Guajardo, J. J. (2001). How infants make sense of intentional action. In B. Malle, L. Moses, & D. Baldwin (Eds.), *Intention and intentionality: Foundations of social cognition* (pp. 149-169). Cambridge, MA: MIT Press.
- 21) Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, 198, 75-78.
- 22) Premack, D. (1990). The infant's theory of self-propelled objects. *Cognition*, 36, 1-16.
- 23) Johnson, S. C. (2000). The recognition of mentalistic agents in infancy. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 22-28.
- 24) Shimizu and Johnson, 2004
- 25) Leslie, A. M. (1994). ToMM, ToBY and agency: Core architecture and domain specificity. In L. A. Hirschfeld & S. A. Gelman (Eds.), *Mapping the mind: Domain specificity in cognition and culture* (pp. 119-148). Cambridge: Cambridge University Press.
- 26) Kiraly, I., Jovanovic, B., Prinz, W., Aschersleben, G., & Gergely, G. (2003). The early origins of goal attribution in infancy. *Consciousness and Cognition*, 12, 752-769.
- 27) Meltzoff, A. N. (1995). Understanding the intentions of others: Re-enactment of intended acts by 18-month-old children. *Developmental Psychology*, 31, 838-850.
- 28) Luo, Y., & Baillargeon, R. (2005). Can a self-propelled box have a goal? *Psychological Science*, 16, 601-608.
- 29) Carpenter, M., Nagell, K., & Tomasello, M. (1998). Social cognition, joint attention and communicative competence from 9 to 15 months of age. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 63 (4).
- 30) Barresi, J., & Moore, C. (1996). Intentional relations and social understanding. *Behavioral and Brain Sciences*, 19, 107-154.
- 31) Meltzoff, A. N. (2002). Imitation as a mechanism of social cognition: Origins of empathy, theory of mind, and the representation of action. In U. Goswami (Ed.), *Blackwell handbook of childhood cognitive development* (pp. 6-25). Malden, MA: Blackwell Publishers.
- 32) Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation and action. *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 661-670.
- 33) Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, 286, 2526-2528.
- 34) 田中啓治 (2006) 随意運動の制御. 田中啓治・岡本仁 (編) 脳科学の進歩 分子から心まで (pp. 108-122). 放送大学教育振興会.
- 35) 川合伸幸 (2007). 模倣と行為の理解に関する最近の研究の紹介: ミラーシステム, サル, 乳児の模倣. *認知科学*, 14, 155-160.
- 36) Sommerville, J. A., Woodward, A. L., & Needham, A. (2005). Action experience alters 3-month-old infants' perception of others' actions. *Cognition*, 96, B1-B11.
- 37) Bellagamba, F., & Tomasello, M. (1999). Re-enacting intended acts: Comparing 12- and 18-month-olds. *Infant Behavior and Development*, 22, 277-282.
- 38) Gergely, G., Bekkering, H., & Kiraly, I. (2002). Rational imitation in preverbal infants. *Nature*, 415, 755.

ファンデルワールス 3 量体 Ar_2/NH_3 の構造に関する量子化学的研究Quantum Chemical Study on the Structure of Ar_2/NH_3 Van der Waals Trimer

関山 秀雄 *

Hideo SEKIYAMA *

Abstract: The study of intermolecular interactions is a useful step toward gaining a basic understanding of the dynamic behaviour of molecules in various environments. Especially, interactions of the ammonia (NH_3) molecule with other molecules provide valuable information on protein-protein interactions or protein-solvent interactions in biological systems. From this point of view, high-level *ab initio* calculations [MP2] using correlation consistent basis sets of Dunning [aug-cc-pVTZ] were carried out to study the structure and stability of Ar_2/NH_3 Van der Waals trimer and to clarify the nature of three-body interactions. The details of the potential energy surface and the effect of the basis set superposition error (BSSE) are discussed.

1 はじめに

分子がファンデルワールス力で結合したいわゆる分子クラスターは、分子間相互作用、化学反応機構、反応動力学の基礎的研究の観点から極めて重要で興味深い。現在では、超音速ジェット法による極低温(1-10K)の分子ビームにより、3分子以上のクラスターを容易に得ることができ、赤外吸収分光法、分子線電場共鳴法、マイクロ波分光法、分子線レーザー誘起蛍光法等の種々の分光学的手段により、クラスターの平衡構造や分子間ポテンシャルに関する研究¹⁾が急速に進んだ。しかし、分子クラスターは一般に分子間力が弱く、分子間ポテンシャルの異方性もさまざまであり、しばしば実験的方法による構造決定が困難であることが多い。そこで、理論計算、とりわけ非経験的量子化学計算²⁾が、これらの実験的手法に加えて不可欠な手段となっている。2003年の本紀要第11巻では、分子クラスターのような弱い結合をもつ系を対象とした量子化学計算の抱える問題点、特に計算のレベル、基底関数系の問題、基底関数重ね合わせ誤差について、いくつかの2量体(Ar_2 , Ar/CO , Ar/NH_3)を例に詳細に報告した³⁾。本研究では、それに引き続き更に希ガスとアンモニアの3量体 Ar_2/NH_3 について、分子間ポテンシャルや最安定構造の探索を行った。ファンデルワールス3量体に関する量子化学計算は、2量体に比べるとまだ極めて数が少ないため、問題点等の実態が必ずしも定かではない。また、アンモニア分子のつくるクラスターについては、生体内のタンパク質のアミノ基と周囲の溶媒分子との相互作用の観点からも極めて興味深い系といえる。

2 計算方法

非経験的分子軌道法(*ab-initio* MO法)を用いて、分子間ポテンシャルエネルギー曲面の計算を行った。非経験的分子軌道法²⁴⁾は、量子力学のSchrödinger方程式をある近似のもとで解き、分子の波動関数を求めるが、分子クラスターの場合、主として次

の3つが計算の信頼性を決めていることを以前、報告した。

- ① 計算方法
- ② 基底関数系の選択
- ③ 基底関数重ね合わせ誤差(Basis Set Superposition Error : BSSE)の程度

①はHartree-Fock法で十分であるのか、あるいは電子相関をどれだけ取り込む必要があるかということであるが、Hartree-Fock近似では分子間相互作用で重要な分散力があらわせないため、分子クラスターの計算にはPost Hartree-Fock法による電子相関の取り込みは必須である。②は分子軌道を表す原子軌道関数に用いる基底関数の問題である。これについては、以前の研究でTriple- ζ typeのもので高次の分極関数やdiffuse関数が必須であることを報告した。また、③は分子クラスターの計算について、常につきまとう問題である。今、3個の分子、分子A、分子B、分子Cが相互作用して3量体を作っているものとする。この3量体の全エネルギーを計算するとき、実際の分子計算では“完全な”基底関数を使うことができないため、分子A、分子Bおよび分子Cはそれぞれ、自分自身の基底関数だけでなく自分以外の2つの分子に属する基底関数がまざることによって安定化する。このため、クラスターの全エネルギーは必要以上に低く計算されてしまう。そこでこのBSSEに対する補正が必要となる。この補正方法として一般的によく用いられている方法としてBoysとBernardiらのcounterpoise法^{5,9)}がある。今、分子A、分子B、分子Cが相互作用して3量体を作るとき、その相互作用エネルギー(ΔE)は通常、以下のように計算される。

$$\Delta E = E_{ABC}(ABC) - E_A(A) - E_B(B) - E_C(C) \quad (1)$$

ここで、 E_{ABC} は3量体ABCの全エネルギー、 E_A 、 E_B 、 E_C はそれぞれ単量体である分子A、分子B、分子Cの全エネルギー

2007年2月27日受理

* 理工学部 物質生命科学科

ギーである。なお、 $E_{ABC}(ABC)$ の括弧内の記号は計算に用いた基底関数を示している。たとえば、 $E_A(A)$ は分子Aの基底関数を用いて計算した分子Aの全エネルギー、 $E_{ABC}(ABC)$ は分子A、分子B、分子Cすべての基底関数を用いて計算したクラスターABCの全エネルギーを表す。前述したように、(1)式の ΔE はBSSEを含んでいる。Counterpoise法による補正(CP補正)を行った相互作用エネルギー(ΔE^{CP})は、次式であらわされる。

$$\Delta E^{CP} = E_{ABC}(ABC) - E_A(ABC) - E_B(ABC) - E_C(ABC) \quad (2)$$

すなわち、分子A、B、C、および3量体のすべてを同じ基底関数で計算することによって、BSSEを補正するものである。たとえば、(2)式の $E_A(ABC)$ は分子Aのエネルギーを、A分子の位置においた基底関数、B分子の位置に置いた基底関数、さらにC分子の位置においた基底関数これらすべてを使って計算することを意味している。分子クラスターの計算にあたっては、このBSSEができるだけ最小限に抑えられる計算方法や基底関数を選択することが望ましい。

以上、上述の①、②、③を考慮し、計算にあたっては、以前行った二量体 Ar_2 、 Ar/NH_3 の平衡構造を比較的良好に再現する方法を選んだ。計算方法としては、電子相関を摂動として取り込む Møller-Plesset 法^{7,8)}のうち2次のMP2法、基底関数としてはDunningらのTriple- ζ typeのaug-cc-pVTZ^{9,10,11)}を用いた。このMP2/aug-cc-pVTZでの計算方法では、ファンデルワールス錯体の代表例である Ar_2 について、計算値として平衡原子間距離は3.8 Å (実測値3.8 Å)¹²⁾、相互作用エネルギーは -3.8×10^{-4} au (実測値 -4.4×10^{-4} au)¹²⁾の値が得られており、実測値を比較的良好に再現する。

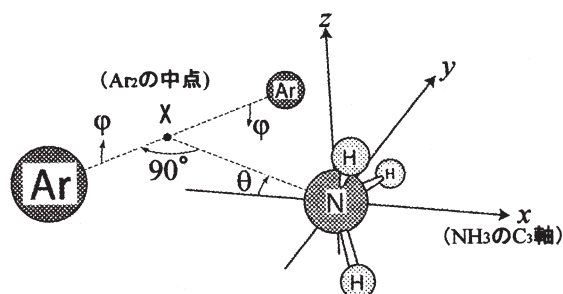


図1. 3量体 Ar_2/NH_3 の座標系。
(モデル1, モデル2の場合)

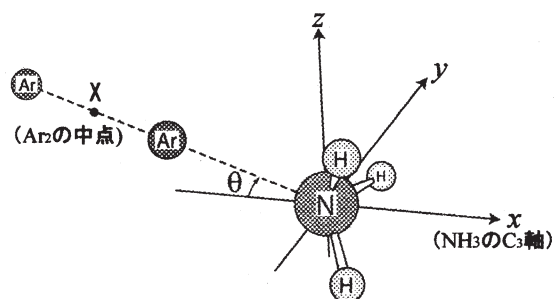


図2. 3量体 Ar_2/NH_3 の座標系。
(モデル3の場合)

3量体 Ar_2/NH_3 の計算にあたっては、後述する3種類のモデル(モデル1, モデル2, モデル3)に応じて、図1と図2の座標系を用いた。

図1では、 NH_3 のN原子を原点、 C_3 軸をx軸に一致させ、水素原子の1つをxy平面上(第1象限)に置いた。ここで Ar_2 の中点Xは常にxy平面上にあるものとし、N-XとAr-Ar軸は常に直交しているものとする。また、N-Xをx軸の負の方向から測った角度を θ 、N-X軸のまわりのAr-Ar軸の回転角を φ で表した。 $\varphi=0^\circ$ では、2つのAr原子はともにxy平面上にあり、 $\varphi=90^\circ$ では、Ar-Ar軸はxy平面に垂直となる。

図2では、 NH_3 分子は図1と全く同じ様に置かれているが、2つのAr原子は常にxy平面上にあり、なおかつN-Ar-Arは常に直線になっているものとする。角度 θ で Ar_2 分子の向きを表す。計算にあたっては、3種類のモデル(モデル1, モデル2, モデル3)を考えた。モデル1, モデル2, モデル3の構造をそれぞれ、図3, 図4, 図5に示す。モデル1, モデル2はどちらも図1の座標系で考えたものである。モデル1とモデル2は図1でそれぞれ、 $\varphi=90^\circ$ と $\varphi=0^\circ$ の場合である。モデル3は図2のものに対応する。3つのモデルで角度 θ が変化するとき、 Ar_2 が NH_3 に対してどのように移動するか、図3~図5から把握できる。

それぞれのモデルに対して、まず、第一段階として、角度 θ を変化させてクラスターの全エネルギーおよび相互作用エネルギーを計算した。このとき、 NH_3 分子と Ar_2 分子との距離 $R(N-X)$ および Ar_2 分子の原子間距離 $R(Ar-Ar)$ はクラスターの全エネルギーが最も小さくなるようにその都度最適化した。相互作用エネルギー ΔE は、下記により算出した。

$$\Delta E = E(Ar_2/NH_3) - E(Ar) - E(Ar) - E(NH_3) \quad (3)$$

(3)式で、 $E(Ar_2/NH_3)$ のクラスターの全エネルギー、 $E(Ar)$ 、 $E(NH_3)$ はそれぞれAr、 NH_3 の全エネルギーである。求めた ΔE に対して、前述のCP補正を行った。

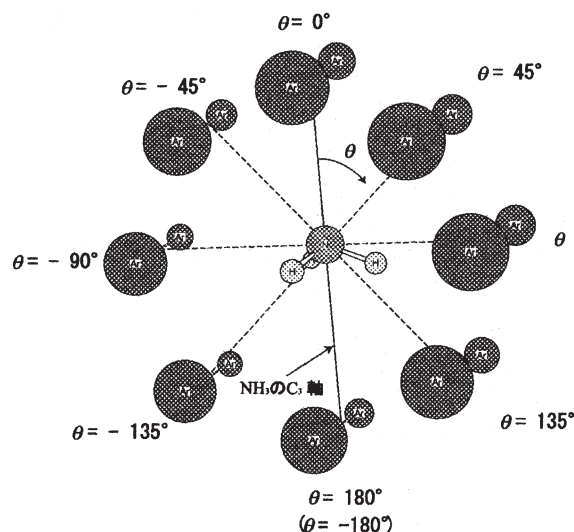


図3. モデル1.

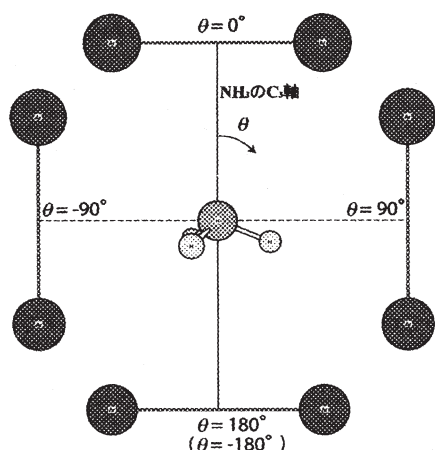


図4. モデル2.

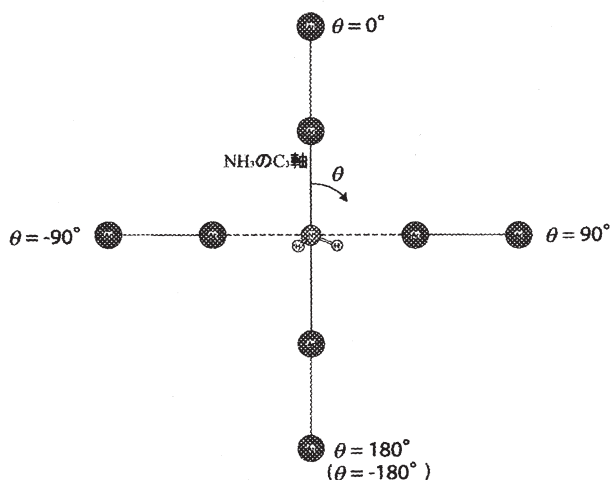


図5. モデル3.

計算の第2段階として、求めた相互作用エネルギーの結果から、最も安定である構造を取り出し、それをもとにさらに精密な構造最適化を行った。その結果得られた構造が、このクラスターの分子間ポテンシャル曲面の minimum の位置にあることを確認するために、非経験的計算により分子振動の解析を行い、振動数成分を調べた。

3 結果および考察

図6～図8にそれぞれ、モデル1～モデル3の相互作用エネルギーを示す。それぞれのグラフにはCP補正がある場合とない場合をのせてある。CP補正を施すと一般に相互作用エネルギーは、大きくなる(絶対値は小さくなる)。モデル1～モデル3の相互作用エネルギーの計算値に含まれているBSSEの値は、どのモデルの場合でも最大で約30%程度である、以前、報告した例で、同じ計算方法(MP2/aug-cc-pVTZ)で行った二量体Ar/NH₃の場合⁴⁾では、BSSEの値は最大で約50%程度であり、それにくらべると3量体の方が少なくなっている。また、補正前の曲線の形状は補正後とあまり変わってはおらず、このこと

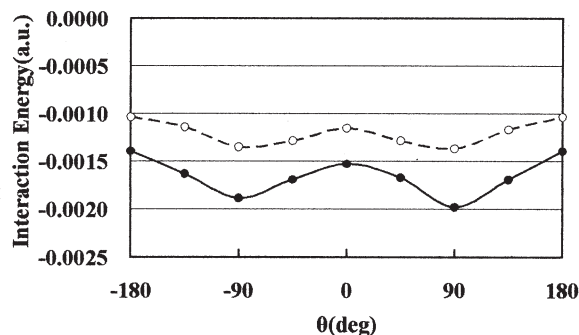


図6. モデル1の相互作用エネルギー。
(黒丸: CP補正なし, 白丸: CP補正あり)。

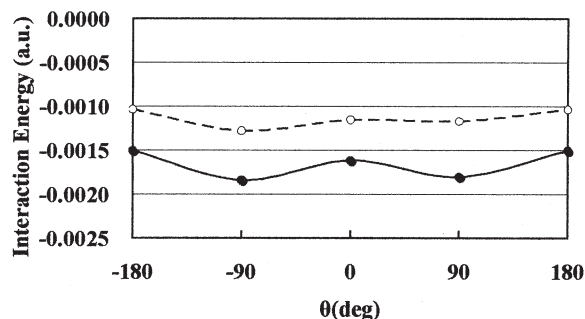


図7. モデル2の相互作用エネルギー。
(黒丸: CP補正なし, 白丸: CP補正あり)。

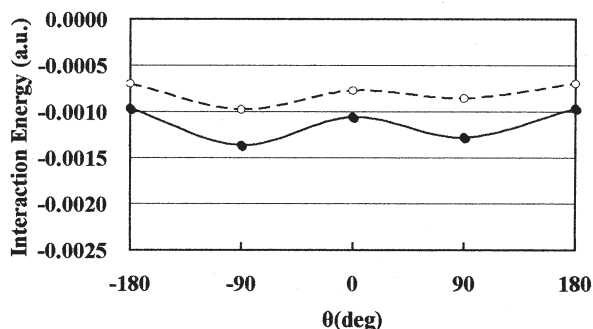


図8. モデル3の相互作用エネルギー。
(黒丸: CP補正なし, 白丸: CP補正あり)。

は、二量体Ar/NH₃の場合と同様である。

図6～図8のモデル1～モデル3の相互作用エネルギーのグラフでは、どの場合も $\theta=90^\circ$ と -90° のところでは極小値をとり $\theta=180^\circ$ (-180° と同じ)のところでは極大値をとっている。すなわち、2つのAr原子がともにNH₃分子のC₃軸付近、すなわちNH₃分子に対してNの非共有電子対が伸びている方向やまた、それと逆方向にあるときは不安定になる傾向にあることがわかる。このことは、実験的に最安定構造が明らかになっている2量体Ar/NH₃の場合も同じ傾向になっている⁴⁾。

モデル1～モデル3のCP補正した相互作用エネルギーの曲線から、もっとも最安定と考えられるところとして、モデル1の $\theta=90^\circ$ (相互作用エネルギーは -0.001367 a.u.)と -90° (相互作用エネルギーは -0.001350 a.u.)のところを取り出すことに

する。 $\theta=90^\circ$ の構造 (以後モデル A とする) を図 9 と図 10 に、 $\theta=-90^\circ$ の構造 (以後モデル B とする) を図 11 と図 12 に示す。

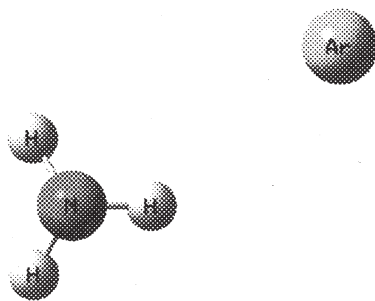


図 9. モデル A の構造 (1).



図 10. モデル A の構造 (2).

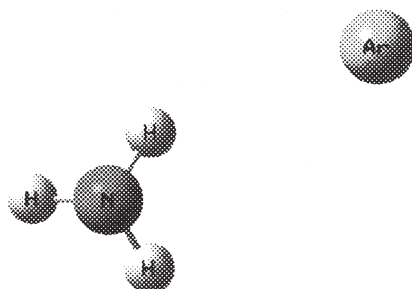


図 11. モデル B の構造 (1).

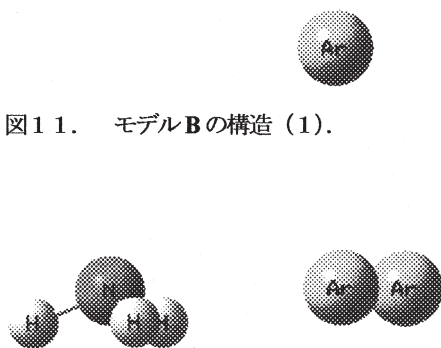


図 12. モデル B の構造 (2).

ここで、図 9 と図 11 は NH_3 分子の C_3 軸方向から見たもの、図 10 と図 12 は NH_3 の N 原子をとおり NH_3 分子の C_3 軸に直交する方向から見たものである。どちらのモデルの構造も 2 つの Ar 原子が NH_3 分子の C_3 軸からは離れ、 NH_3 分子の 3 つの H 原子が作る平面上付近に位置していることがわかる。また、モデル A、モデル B、どちらのモデルでも原子間距離は $R(\text{Ar}-\text{Ar})=$

3.8\AA 、2 つある $R(\text{N}-\text{Ar})$ は全く同じ 6.7\AA である。

これらのモデル A およびモデル B の構造が分子間ポテンシャル曲面の *minimum* の位置にあるかどうか判定するために、全エネルギーの核座標に対する 2 次微分を計算し、基準振動の振動数を求める計算を行った。その結果、モデル A については、全部で 12 個の振動モードのうち 2 個が虚数の振動数 ($52.624 i \text{ cm}^{-1}$, $21.5637 i \text{ cm}^{-1}$) (ここで、 i は虚数単位)、モデル B については、1 個が虚数の振動数 ($56.0326 i \text{ cm}^{-1}$) であった。これらに対応する基準振動の振動モードを図 13~図 15 に示す。

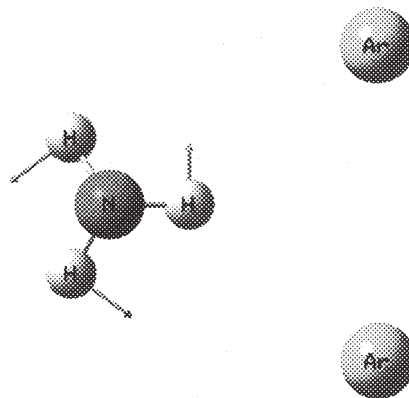


図 13. モデル A の $52.624 i \text{ cm}^{-1}$ の振動モード

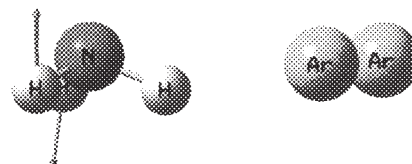


図 14. モデル A の $21.5637 i \text{ cm}^{-1}$ の振動モード

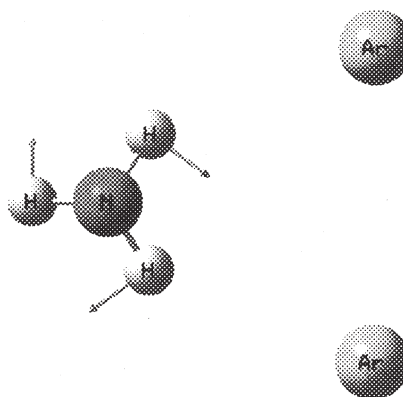


図 15. モデル B の $56.0326 i \text{ cm}^{-1}$ の振動モード

モデル A、モデル B ともに分子間振動の振動モードに虚数の振動数が出現することから、分子間ポテンシャルの *minimum* の位置にないことが判明した。そこで、モデル A、モデル B の構造をそれぞれ出発点とし、基準振動数計算を併用しながら、

エネルギー勾配法による構造最適化計算を行った。最適化の結果得られた構造は、モデルAとモデルBのどちらからも全く同じものが得られた。相互作用エネルギーは、 -0.001484au (CP補正済み)まで低下した。また、最適化された構造では、基準振動の振動数には、虚数のものは存在せず、ポテンシャル曲面の *minimum* の位置に到達したことが確かめられた。最適化された構造を図16と図17に示す。図16は、 NH_3 分子の C_3 軸方向から見たもの、図17は、 NH_3 のN原子をとおり NH_3 分子の C_3 軸に直交する方向から見たものである。また、各原子の座標を表1に示した。2つのAr原子はともに NH_3 分子の3つのH原子が作る平面上付近にほぼ位置しており、1つのAr原子は NH_3 分子のN-H結合軸の方向にあるが、もう一つのAr原子は、 NH_3 分子の2つのN-H結合軸の方向に対して、中間の方向に存在する。また、Ar-Ar軸は NH_3 分子の C_3 軸に対して約 75° 傾いている。原子間距離で $R(\text{Ar-Ar})=3.8\text{\AA}$ 、 $R(\text{N-Ar})$ はそれぞれ 3.5\AA および 3.8\AA であり、 $R(\text{Ar-Ar})$ については、同じ計算方法での2量体の Ar_2 の原子間距離 $R(\text{Ar-Ar})=3.8\text{\AA}$ (実験値: 3.8\AA)¹²⁾と比べるとまったく等しくなっている。このことは、3量体でもAr原子間の相互作用が2量体の Ar_2 のとときと変わらないことを示している。また、 $R(\text{N-Ar})=3.5\text{\AA}$ の距離にあるAr原子の NH_3 に対する位置(図16で2つのAr原子のうち左側のもの、図17では、2つのAr原子のうち右側のもの)は、二量体 ArNH_3 の場合のAr原子の位置とほとんど同じである⁹⁾。現在、 Ar_2/NH_3 については、実験結果が存在しないため、実験との直接の比較ができないが、関連する3量体である Ne_2/NH_3 については、マイクロ波分光による実験結果が存在する¹³⁾。そこで、比較のために今回得られた Ar_2/NH_3 の構造でAr原子をそれぞれHe、Neに置き換えた He_2/NH_3 、 Ne_2/NH_3 で全く同じ計算方法(MP2/aug-cc-pVTZ)でエネルギー勾配法による構造最適化を試みた。その結果の構造を図18~図21に示す。また、各原子の座標を表2、表3に示した。 Ne_2/NH_3 の最安定構造は、 Ar_2/NH_3 のものと同様、 Ne-Ne 軸は NH_3 分子の C_3 軸に対して約 70° 傾いている。構造パラメータでは $R(\text{Ne-Ne})=3.2\text{\AA}$ 、 $R(\text{N-Ne})$ はそれぞれ 3.3\AA 、 3.6\AA となっており、このうち Ne-Ne 間距離については、同じ計算方法での2量体 Ne_2 の原子間距離 3.2\AA (実験値: 3.3\AA)¹⁴⁾とほぼ同じになっており、 Ar_2/NH_3 の時と同様、 Ne-Ne 間の相互作用がかなり大きいことを示している。また、 Ne_2/NH_3 についてのマイクロ波分光の実験¹³⁾では、最安定構造については、 Ne-Ne 軸は NH_3 分子の C_3 軸に対して直角またはそれに近い構造としており、 $R(\text{Ne-Ne})=3.3\text{\AA}$ 、またN原子から Ne-Ne の midpoint までの距離を 3.6\AA 程度と見積もっており、本計算結果と大方の点で一致している。一方、 He_2/NH_3 の計算結果では、 $R(\text{He-He})=5.8\text{\AA}$ 、 $R(\text{N-He})=3.3\text{\AA}$ であり、同じ計算方法での2量体 He_2 の原子間距離 $R(\text{He-He})=3.3\text{\AA}$ と比べると He-He 間はかなり長くなっており、 He-He 間の相互作用はあまりないことがわかる。また、2つのHeはともに NH_3 分子の2つのN-H結合軸の中間の方向に存在し、 He-He 軸は NH_3 分子の C_3 軸と完全に直交している。

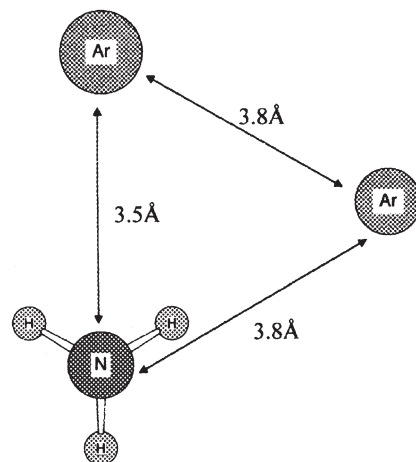


図16. 構造最適化計算によって得られた Ar_2/NH_3 の構造(1)。

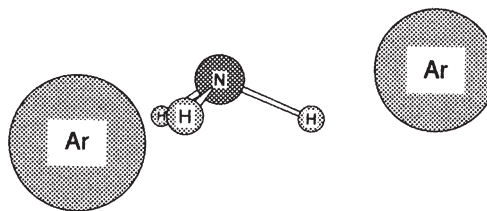


図17. 構造最適化計算によって得られた Ar_2/NH_3 の構造(2)。

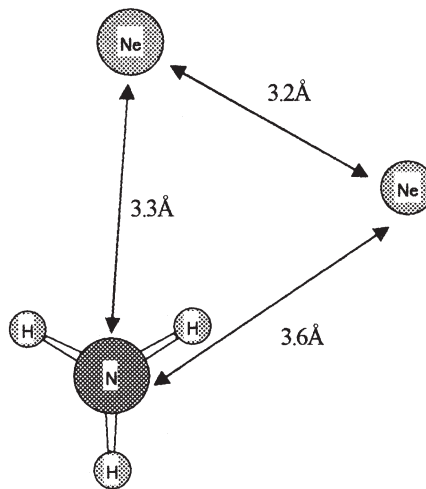


図18. 構造最適化計算によって得られた Ne_2/NH_3 の構造(1)。

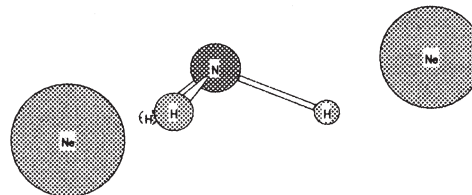


図19. 構造最適化計算によって得られた Ne_2/NH_3 の構造(2)。

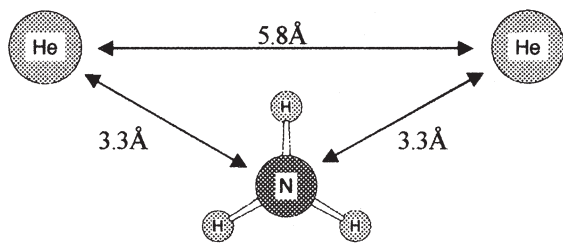


図20. 構造最適化計算によって得られた He_2/NH_3 の構造 (1).

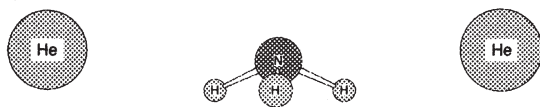


図21. 構造最適化計算によって得られた He_2/NH_3 の構造 (2).

表1. Ar_2/NH_3 の原子座標 (座標の単位: Å)

原子	x 座標	y 座標	z 座標
N	-0.5283	2.4234	-0.1123
H	-0.1310	3.3028	0.1936
H	0.1390	1.7010	0.1273
H	-1.3503	2.2604	0.4556
Ar	-1.7294	-0.9048	-0.0028
Ar	2.0095	-0.4411	0.0033

表2. Ne_2/NH_3 の原子座標 (座標の単位は: Å)

原子	x 座標	y 座標	z 座標
N	1.9598	-0.5461	-0.1134
H	2.5340	-1.3097	0.2207
H	1.0015	-0.7795	0.1123
H	2.2009	0.2655	0.4412
Ne	-0.4149	1.7612	-0.0051
Ne	-1.5306	-1.1965	0.0071

表3. He_2/NH_3 の原子座標 (座標の単位は: Å)

原子	x 座標	y 座標	z 座標
N	0.0000	-0.4600	-0.1026
H	0.8132	-0.9740	0.2048
H	0.0001	0.4222	0.3890
H	-0.8133	-0.9739	0.2048
He	2.8544	1.1864	-0.0201
He	-2.8544	1.1864	-0.0201

4 まとめ

ファンデルワールス3量体 Ar_2/NH_3 の最安定構造を求め

るため、分子間ポテンシャルの量子化学計算を行った。2量体 Ar/NH_3 で有効であった $\text{MP2}/\text{aug-cc-pVTZ}$ の計算方法では、3量体 Ar_2/NH_3 の相互作用エネルギーは、BSSE が最大でも約30%程度であり、2量体 Ar/NH_3 の計算に比べて特に増加する傾向等はなくむしろ小さかった。また、CP補正によって相互作用エネルギーのプロファイルが全く変わる等の問題も起きず、CP補正における問題は特に見出せなかった。

また、分子振動の計算と併用することにより、安定構造を詳細に見出すことができたが、実験との比較のため関連する3量体 (Ne_2/NH_3 , He_2/NH_3) の安定構造を求めた。その結果、3量体の構造は希ガス原子同士の相互作用によって依存することが判明した。 Ar_2/NH_3 , Ne_2/NH_3 では、希ガス原子同志の相互作用は、2量体 Ar_2 , Ne_2 の場合と全く同様であったのに対し、 He_2/NH_3 では、He原子間同志の相互作用は、 He_2 に比べるとかなり小さいことが判明した。また、 Ne_2/NH_3 に関しては、マイクロ波分光法から示唆されている安定構造を大方、再現していた。したがって、これらの3量体に関しては、 $\text{MP2}/\text{aug-cc-pVTZ}$ の計算がほぼ有効に働いているものと考えられる。

今後の課題としては、4量体、5量体のような多量体においてBSSEの効果がどのようになるか、系統的な研究が必要である。また、このBSSEをできるだけ少なくする方法の一つとして、分子間の中間に基底関数をおく、いわゆる *midbond function* の使用があげられる。しかし究極には、BSSE free となる基底関数の開発が必要である。また、MP法は電子相関を取り込む方法として、一般によく使われているが、摂動の次数が上がると計算の規模が桁はずれに増大し、大きい系によってはあまり実用的でなくなる。これに対して、密度汎関数法 (DFT法) は現在、非経験的計算においては、電子相関を取り込む簡便な方法として化学反応機構や吸着の問題等比較的大きい系にも適用されているが、分子間相互作用の中の分散力が現在、まだ必ずしも正確に記述できない欠点がある。使われる汎関数の改良が望まれ、この点がクリアできれば、かなり大きい系についての分子間ポテンシャルの計算が可能となる。

5 参考文献

- 1) 梶本興亜 編, “クラスターの化学”, 培風館.
- 2) A. Szabo and N. S. Ostlund, *Modern Quantum Chemistry: Introduction to Advanced Electronic Structure Theory* (Macmillan Publishing Co., Inc. 1982).
- 3) W. J. Hehre, Leo Radom, P. v. R. Schleyer and J. A. Pople, *Ab Initio Molecular Orbital Theory* (John Wiley & Sons, New York, 1994).
- 4) 関山秀雄, 平山弘和, 原川勇, 松本奈穂, “分子間ポテンシャル曲面に及ぼす基底関数重ね合わせ誤差の影響について”, 静岡理工科大学紀要, 第11巻 (2003) pp.243-255.
- 5) H. B. Jansen and P. Ross, *Chem. Phys. Lett.*, **3** (1969) 140.
- 6) S. B. Boys and F. Bernardi, *Mol. Phys.*, **19** (1970) 553.
- 7) C. Møller and M. S. Plesset, *Phys. Rev.*, **46** (1932) 618.

- 8) J. S. Brinkley, J. A. Pople, *Int. J. Quant. Chem.*, **9** (1975) 229.
- 9) T. H. Dunning, Jr., *J. Chem. Phys.*, **90** (1989) 1007.
- 10) R. A. Kendall, T. H. Dunning, Jr. and R. J. Harisson, *J. Chem. Phys.*, **96** (1992) 6796.
- 11) D. E. Woon and T. H. Dunning, Jr., *J. Chem. Phys.*, **98** (1993) 1358.
- 12) P. R. Herman, P. E. Larocque, B. P. Stoicheff, *J. Chem. Phys.*, **79** (1983) 2559.
- 13) J. van Wijngaarden, Wolfgang Jäger, *Chem. Phys.*, **283** (2002) 29.
- 14) R. A. Aziz, *J. Chem. Phys.*, **99** (1993) 4518.

シクロプロパノール系の開裂反応

Fragmentation of Cyclopropanol Systems

桐原 正之*、野口 拓也**、幡野明彦*

Masayuki KIRIHARA, Takuya NOGUCHI and Akihiko HATANO

Abstract: This review summarizes the synthetic reactions using the fragmentation of cyclopropanol systems developed by author's group.

1. はじめに

シクロプロパノールやその誘導体 (1) は、シクロプロパン環の開裂を伴う様々な合成化学反応の原料として、広く用いられている。シクロプロパノールの合成法は様々なものが開発されてきているが、メタルエノレートをシクロプロパン化する方法や、エステルとアルケンで低原子価チタンを用いて反応させる方法が一般的である (Fig. 1)。¹⁾

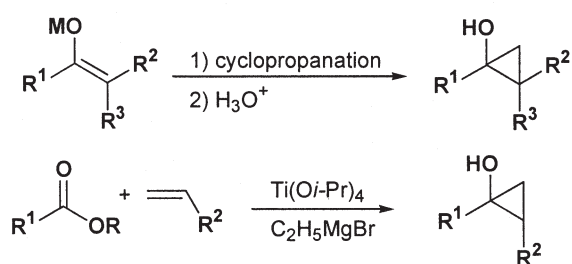


Fig. 1. シクロプロパノールの合成法

シクロプロパノール誘導体 (1) の中でも、シクロプロパン環が別の環と縮環している化合物は、有機合成化学上利用価値が高く、その反応性が詳しく研究されている。これまでにこれの C₁-C₃ 結合 (結合 a)、C₁-C₂ 結合 (結合 b)、C₂-C₃ 結合 (結合 c)、をそれぞれ選択的に切断する反応が開発されている (Fig. 2)。¹⁾

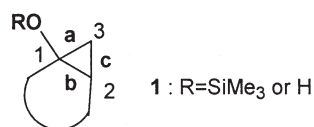


Fig. 2. シクロプロパン環が別の環と縮環している化合物

我々の研究グループでも 1 の開裂反応の研究を行っており、既に新たな反応をいくつか見出すことに成功している。本総説ではこれらの我々が見出した反応について紹介していく。なお、他の研究グループによって見出された反応に関しては、既に詳細な総説が報告されているので、¹⁾ それを参照していただきたい。

2. 超原子価ヨウ素試薬によるシクロプロピルシリルエーテルの開裂反応²⁾2-1. Phenyliodine(III) Diacetate によるシクロプロピルシリルエーテルの開裂反応^{3,4)}

Rubottom らは、1 に対して酢酸中で四酢酸鉛を反応させると、結合 a と結合 b が両方とも切断されて、アルケン部位を持つカルボン酸 (2) が生成するという反応を報告していた (Fig. 3)。⁵⁾

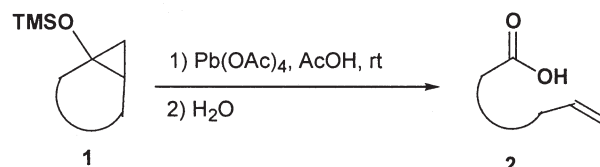


Fig. 3. 四酢酸鉛によるシクロプロパノール系の開裂反応

本反応は有機合成化学上有用な反応であると考えられるが、毒性の強い四酢酸鉛を化学量論以上用いなければならぬという問題点があった。また我々がこの反応を用いて、窒素官能基を持つ 1 の誘導体やエポキシドを持つ 1 の誘導体の開裂を試みたところ、低収率でしか目的の 2 が得られなかった。

我々は、四酢酸鉛と類似の化学反応性を示し、毒性が低いという特徴を持つ超原子価ヨウ素試薬⁶⁾に着目して、1 との反応を検討することにした。

我々は 1 に対して、酢酸のようなプロトン性溶媒中で超原子価ヨウ素試薬を反応させれば、結合 a と結合 b を一挙に開裂できるのではないかと考え検討を開始した。

超原子価ヨウ素試薬としては phenyliodine(III) diacetate (PIDA) を用いて、酢酸溶媒中室温で 1 と 8 時間反応させた。また比較のため、四酢酸鉛を用いて同条件下で反応も行ってみた。その結果、いずれの場合も結合 a と結合 b が切断されて、収率良く目的化合物 (2) を得ることができた (Table 1)。

全ての場合において PIDA を用いた方が、四酢酸鉛を用いた場合よりも 2 の収率が良かった。また、PIDA を用いた場合はほとんど副生成物が生成しなかったのに対して、四酢酸鉛を用いた場合は複数の副生成物が生成した。

2007年3月1日受理

* 理工学部 物質生命科学科

** 総合技術研究所 特別主幹研究員

Table 1 酢酸溶媒中でのPIDAまたはPb(OAc)₄を用いたシクロプロパノール系の開裂反応

Entry	Starting Material	Product	Yield (%)	
			PhI(OAc) ₂	Pb(OAc) ₄
1			(n=1) 92 (n=2) 96 (n=3) 84	83 92 70
2			(n=1) 64 (n=2) 73 (n=3) 65	. ^a . ^a . ^a
3			84	36
4			63	44
5			91 ^b	67 ^b
6			85	51
7			80 ^b	38 ^b
8			82	65
9			74	73

a) Not examined.

b) The yields of the corresponding methyl esters that were obtained from diazomethane treatment of **3**.

特に窒素官能基、酸素官能基、シクロプロパン環、オキシラン環を持つ化合物の場合、これらの傾向が顕著であった (entries 3-7)。またこの反応では、酸素官能基を持たないシクロプロパン環やオキシラン環は反応しないことが明らかとなった (entries 6-7)。

さらにシクロプロパン環上に置換基を1つ持つ化合物の場合、*endo*体からは(*Z*)-アルケンが (entry 8)、*exo*体からは(*E*)-アルケンが (entry 9) が立体特異的に生成

することが認められた。

次に我々は、酢酸以外の溶媒を用いて、**1** と PIDA の反応を検討してみた (Fig. 4)。

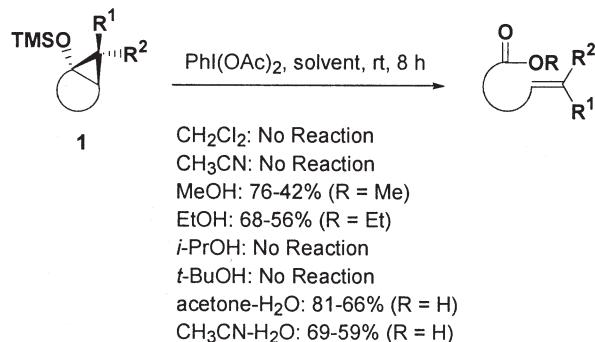


Fig. 4. 各種溶媒中でのPIDAを用いたシクロプロパノール系の開裂反応

その結果、ジクロロメタンやアセトニトリルのような非プロトン性溶媒中では反応は進行しないが、メタノールやエタノールのようなアルコール中では反応が進行し、対応するエステル基とアルケニル基を持つ化合物が得られた。収率は酢酸中での反応に比べて低かった。またアルコールでも、2-プロパノールや *t*-ブタノール中では全く反応が進行しなかった。

さらに水を溶媒として用いる事も検討した。水単独では **1** が溶解しないので、全く反応はおこらなかったが、含水アセトンや含水アセトニトリル中では反応し、酢酸中での場合と同様に **2** が得られた。この場合も収率は、酢酸を溶媒として用いた場合に比べて、若干低かった。

2-2. 反応機構^{3,4)}

Table 1 の entry 8 および 9 において、いずれも立体特異的に反応が進行したことから、本反応の反応機構は **Fig. 5** に示したようなものではないかと推定した。

まず PIDA が結合(a) (C₁-C₇結合) もしくは結合(b) (C₁-C₆結合) と反応して、シクロプロパン環が開裂してオキソニウムイオン中間体 (**A**, **B**) となる。非プロトン性溶媒や酸性度の弱いプロトン性溶媒である 2-プロパノールや *t*-ブタノール中では反応が進行しなかったため、この段階で溶媒からのプロトネーションによる PIDA の活性化が必要であると考えられる。

次に、オキソニウムイオン中間体 (**A**, **B**) に対して、プロトン性溶媒が付加してアセタール中間体 (**C**, **D**) となる。続いてヨードベンゼンが脱離するとともに、**C** の場合は C₁-C₆結合が、**D** の場合は C₁-C₇結合が切断され、酸無水物 (R = Ac)、エステル (R = Me, Et)、またはカルボン酸 (R = H) になる (なお、酸無水物は反応の後処理の際に水を加えたためにカルボン酸になったと考えられる)。

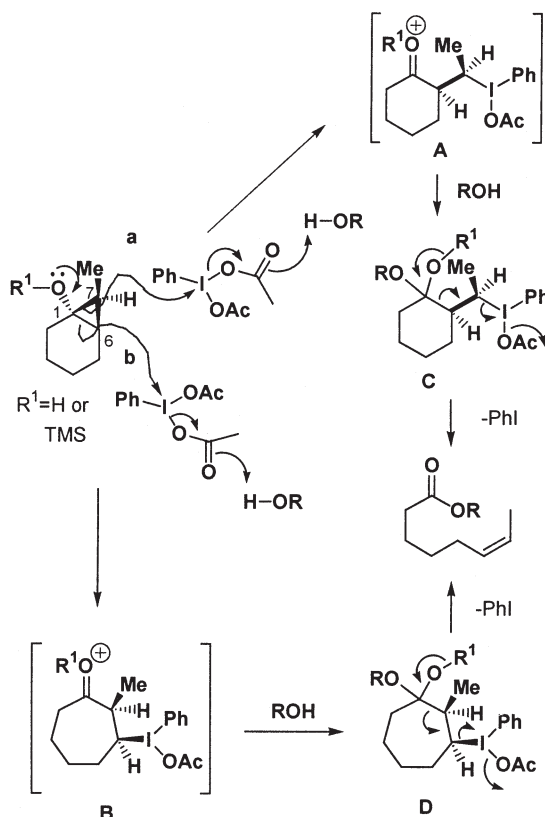


Fig. 5 推定される反応機構

2 本目の結合が切断される際に C の場合は C₁-C₆ 結合と C₇-I 結合がアンチペリプラナー型になって反応するため、立体特異的に反応が進行し、単一のアルケンの幾何異性体を与える。また D の場合も C₁-C₇ 結合と C₆-I 結合がアンチペリプラナー型になって反応するため、立体特異的に反応が進行する。

Moriarty らは 1 に PhIO と tetrabutylammonium fluoride を作用させると、結合 a で切断がおこった化合物と結合 b で切断がおこった化合物の混合物が得られてくることを報告している (Fig. 7)。⁷⁾

この結果から PIDA による開裂反応も A を通るルートと、B を通るルートの両方で進行していると考えられる。

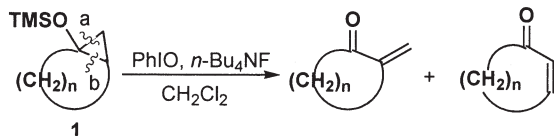


Fig. 6. PhIO と n-Bu₄NF による 1 の開裂

2-3. 酸触媒による PIDA のシクロプロパノール系開裂反応の活性化^{4,8)}

推定した反応機構により、PIDA による 1 の開裂反応ではプロトン性溶媒による PIDA の活性化が必要であると考えられる。そこで反応系内に酸触媒を加えれば反応が進行しやすくなるのではないかと考え、検討を行った。その結果、トリフルオロメタンスルホン酸 (TfOH) を

触媒として加えると反応が著しく促進されることが判明した (Fig. 7)。

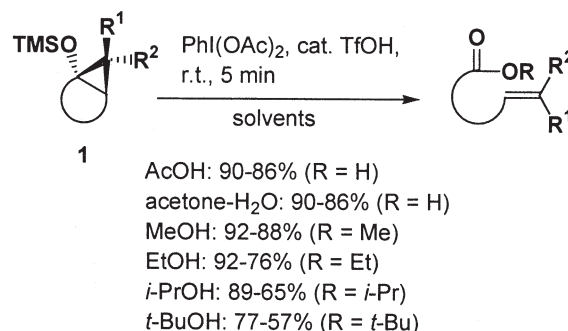


Fig. 7. TfOH 触媒存在下におけるシクロプロパノール系の PIDA との反応

プロトン性溶媒を用いた場合は、いずれも短時間 (5 分) で収率良く反応が進行した。含水アセトン、メタノール、エタノールなどを溶媒とした場合は、TfOH 触媒が存在すると、無触媒の場合に比べて収率が大幅に向上した。さらに、無触媒の時は全く反応がおこらなかった、2-プロパノールや *t*-ブタノール中でも反応が進行し、対応するエステルを与えた。

2-4. PIDA 以外の超原子価ヨウ素試薬とシクロプロパノール系の反応⁴⁾

PIDA 以外の超原子価ヨウ素試薬として、phenyl-iodine(III) bistrifluoroacetate (PIFA)、PhIO ならびに iodylbenzene (PhIO₂) を用いて、1 の開裂反応を検討した (Table 2)。

Table 2 各種超原子価ヨウ素試薬との反応

	AcOH (R = H)	MeOH (R = Me)	<i>i</i> -PrOH (R = <i>i</i> -Pr)	<i>t</i> -BuOH (R = <i>t</i> -Bu)
PhI(OCOCF ₃) ₂	92% (5 min)	64% ^{a)} (5 min)	81% (5 min)	67% (5 min)
PhIO	96% (8 h)	N. R.	N. R.	N. R.
PhIO + cat. TfOH	97% (5 min)	90% (5 min)	67% (5 min)	33% (5 min)
PhIO ₂ ^{b)}	90% (8 h)	N. R.	N. R.	N. R.
PhIO ₂ ^{b)} + cat. TfOH	95% (5 min)	90% (5 min)	77% (5 min)	46% (5 min)

a) With a catalytic amount of TfOH, the ester was obtained in 79% yield.
 b) 55 mol% of reagent was used.

酢酸を溶媒にした場合は、全ての場合で反応は円滑に進行し、高収率で目的化合物を与えた。アルコール系溶

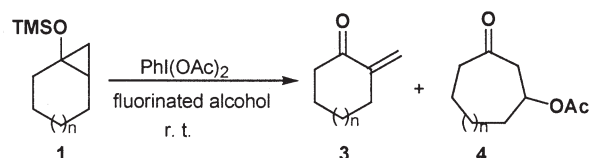
媒中では、PhIO や PhIO₂ を用いた場合は反応は進行しなかった。しかしながら TfOH 触媒を加えると反応が進行した。PhIO₂ は 5 価のヨウ素化合物なので、**1** に対して 55 mmol の試薬を加えるだけで反応は完結した。

2-5. 含フッ素アルコール中での PIDA または PIFA とシクロプロパノール系との反応⁹⁾

反応機構の項でも述べたように、本反応が進行するためには、まず第一段階でプロトンによる PIDA の活性化が必要であると考えられる。これは TfOH 触媒を用いると、酸性度の弱いイソプロパノールや *t*-ブタノールを溶媒として用いても反応が進行することからも支持される。

ここで、酸性度は高いが求核性が低い含フッ素アルコール中で反応を行うと、一段階目の反応は進行するが、二段階目のアシルカチオンへの求核攻撃がおこりにくくなるため、他のプロトン性溶媒を使用した場合は異なる化合物が生成するのではないかと考えた。そこで、2,2,2-torifluoroethanol 中や 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol 中での **1** と PIDA や PIFA の反応を検討した (Table 3)。

Table 3 含フッ素アルコール中での**1**とPIDAの反応



1	reaction condition	yield of 3	yield of 4
n=1	CF ₃ CH ₂ OH, 8 h	8%	55%
n=2	CF ₃ CH ₂ OH, 8 h	9%	64%
n=3	CF ₃ CH ₂ OH, 8 h	60%	33%
n=3	CF ₃ CH ₂ OH, cat. TfOH, 5 min	57%	21%
n=3	(CF ₃) ₂ CHOH, 8 h	21%	63%
n=3	(CF ₃) ₂ CHOH, cat. TfOH, 5 min	29%	45%

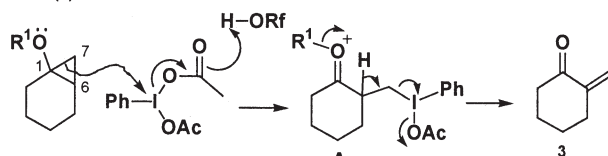
その結果、含フッ素アルコール中での **1** と PIDA との反応ではシクロプロパン環の結合切断が一箇所ではおこらず、エキソエノン体 (**3**) と β -アセトキシケトン体 (**4**) が得られることがわかった。また興味深いことに、TfOH 触媒を加えると、反応時間は大幅に短縮されたが (5 分以内)、無触媒の時と同じ化合物 (**3**, **4**) が得られ、シクロプロパン環の結合切断が二箇所でも切断された化合物 (アルケニルエステル体) は全く生成しなかった。

本反応の機構は次のように考えている (Fig. 9)。

まずエキソエノン体 (**3**) が得られる場合は、PIDA が C₇ を攻撃して C₁-C₇ 結合 (結合 a) を切断し、オキソニウム

中間体 (**A**) が生成する。ここで含フッ素アルコールは求核性に乏しいため **A** を求核攻撃することができない。そのためヨードベンゼンが **A** から脱離して **3** が得られる。

Path (a)



Path (b)

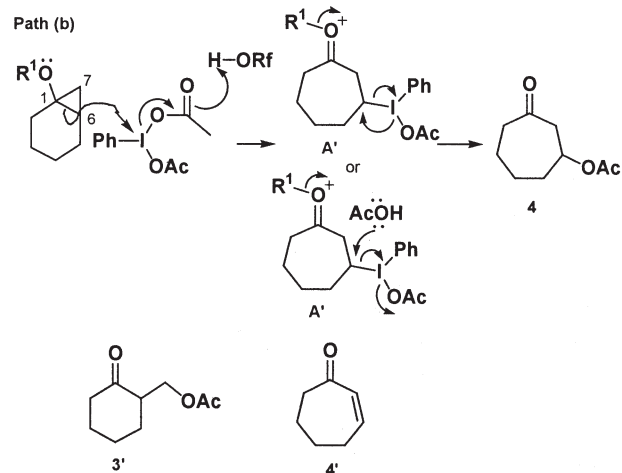
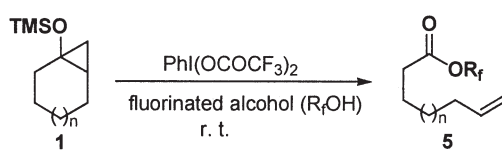


Fig. 8. 含フッ素アルコール中での**1**とPIDAの反応の機構

一方 β -アセトキシケトン体 (**4**) が得られる場合は PIDA が C₆ を攻撃して C₁-C₆ 結合 (結合 b) を切断し、オキソニウム中間体 (**A'**) が生成する。この場合も含フッ素アルコールは **A'** を攻撃しないためヨードベンゼンの脱離とともにアセトキシ基が置換して **4** が生成する。 β -アセトキシケトン体 (**3'**) やエンドエノン体 (**4'**) がなぜ得られてこないのかは今のところ良く解っていない。

次に含フッ素アルコール中、室温で **1** と PIFA との反応を検討した。

Table 4 含フッ素アルコール中での**1**とPIFAの反応



1	reaction condition	yield of 5
n=1	CF ₃ CH ₂ OH, 5 min	27% (R _f =CH ₂ CF ₃)
n=2	CF ₃ CH ₂ OH, 5 min	69% (R _f =CH ₂ CF ₃)
n=3	CF ₃ CH ₂ OH, 5 min	68% (R _f =CH ₂ CF ₃)
n=3	(CF ₃) ₂ CHOH, 5 min	37% [R _f =CH(CF ₃) ₂]

この場合は通常のプロトン性溶媒中での場合と同様の反応が進行し、シクロプロパン環の結合が二箇所も切断されて、エステル体 (**5**) が単一の化合物として得られてきた (単離収率があまり良くないが、これは生成物の揮発性、

不安定性によるものである) (Table 4)。

PIFAと1との反応の機構は次のように考えられる (Fig. 9)。まずPIFAと1が反応して、C₁-C₇結合(結合a)またはC₁-C₆結合(結合b)が切断されてオキソニウムイオン中間体(A, A')が生成する。

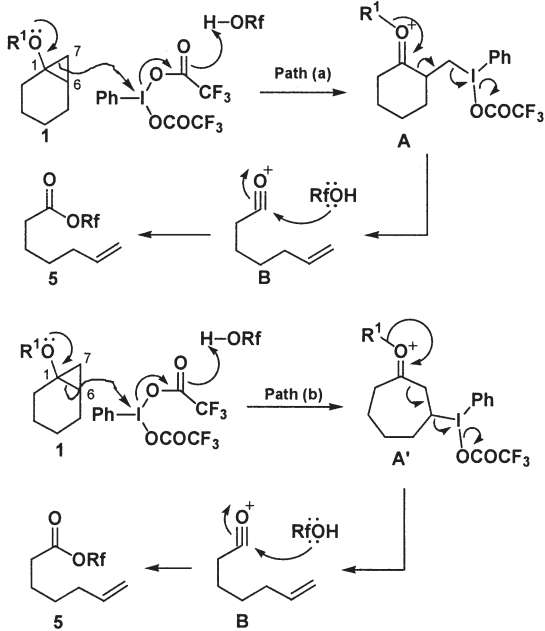


Fig. 9. 含フッ素アルコール中での1とPIFAの反応の機構

次にヨードベンゼンとトリフロロアセトキシアニオンの脱離とともに、C₁-C₆結合またはC₁-C₇結合が切断されてアシリニウムイオン中間体(B)になる。これに対して含フッ素アルコールが攻撃することによりエステル体(5)が生じると考えられる。

2-6. 天然物合成への応用^{10,11)}

超原子価ヨウ素試薬によるシクロプロパノール系の開裂反応を応用して、ピペリジンアルカロイドであるピニジン^{12,13)}の両対掌体の不斉合成を行なうことに成功した (Fig. 10)。

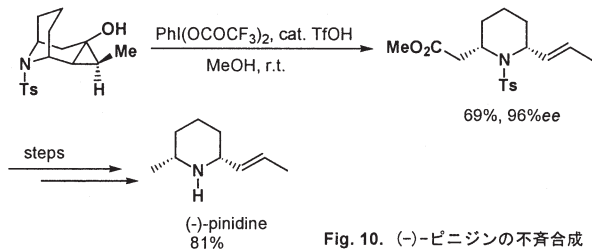


Fig. 10. (-)-ピニジンの不斉合成

さらに我々は(+)-インドリチジン 223AB(37)¹⁴⁾の形式不斉合成にも成功した。

3. フッ化硫黄試薬とシクロプロピルシリルエーテルの反応

3-1. Diethylaminosulfur trifluorideによるシクロプロピルシリルエーテルのフッ素化反応¹⁵⁾

我々が1を用いる有機合成化学反応の研究を開始した時点(1994年)の時点では、1のC₁-C₃結合(結合a)やC₁-C₂結合(結合b)を選択的に開裂する反応は幾つか報告されており、有機合成化学への応用もなされていたが、1のC₂-C₃結合(結合c)を開裂する反応は、シクロプロパン環の開裂反応の機構研究に関するものが若干検討されていただけで、有機合成化学反応への適用を目指した研究は全く行われていなかった。¹⁾

我々は、1に対してフッ化硫黄試薬であるdiethylaminosulfur trifluoride (DAST)¹⁶⁾を作用させると、1のC₂-C₃

Table 5 DASTによるシクロプロパノール系の環開裂フッ素化反応

entry	starting material	products
1		96% (R=TMS) 71% (R=H)
2		45%
3		80%
4		95%
5		73%
6		85% (1:6)
7		57% (1:1)
8		82% (1:2)
9		85% (7:2)
10		63% trace

結合（結合 c）が選択的に開裂してフッ素原子の導入され、アリルフロライド類(6, 6')が収率良く得られることを見いだした (Table 5)。一級フッ化物 (6) と二級フッ化物 (6') が生成する場合は、二級フッ化物(6') の方が優先した(entry 6, 8, 9)。本反応はアリルフロライド類の良い合成法になると考えられる。またアリルフロライド類は、さらに変換可能なアルケン部位を持つため、含フッ素合成素子としての活用も期待できる。

興味深いことに、ほとんど全ての場合は環開裂フッ素化反応が進行したが、シクロプロパン環上の置換基が α -ナフチル基である場合は、環開裂フッ素化がほとんど進行せず、シリロキシ基がそのままフッ素で置換された、フロロシクロプロパン体が得られてきた (Entry 10)。

本反応の反応機構は次のように考えている (Fig. 11)。まず trimethylsilyl fluoride の脱離とともに DAST の付加がおこる。次に diethylaminosulfino fluoride の脱離とシクロプロパン環の開裂がおこりアリルカチオンが生成し、このアリルカチオンに対してフッ化物イオンが攻撃してアリル位フッ素化体が生成する。しかしながら例えば1位に α -ナフチル基のような強力な電子供与基が存在するような場合は、シクロプロピルカチオンが安定化されるため環開裂はおこらず、これに対してフッ化物イオンが攻撃してフロロシクロプロパン体が生成する。

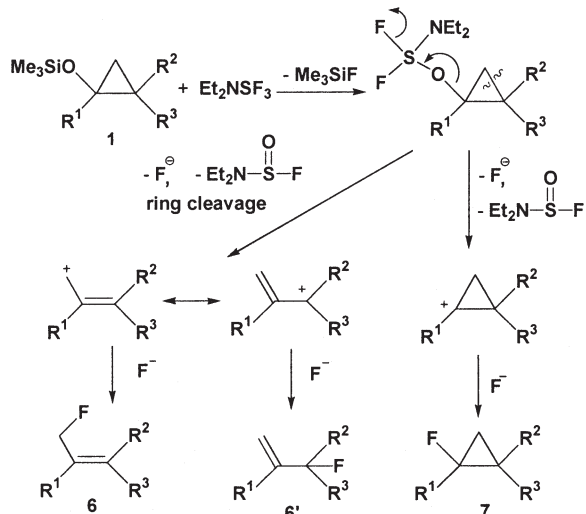


Fig. 11. DASTによるシクロプロパノール系の環開裂フッ素化反応の機構

一級フッ化物 (6) と二級フッ化物 (6') では、二級フッ化物 (6') の方が優先した事は、本反応がカルボカチオン経路で進行している事を良く支持している。

一般に DAST によるアルコールのフッ素化反応は、 S_N2 もしくは S_Ni で進行するとされているので、¹⁶⁾ カルボカチオンを経由 (S_N1) する本反応は大変ユニークである。

3-2. Diethylaminosulfur trifluoride によるシクロプロピルシリルエーテルのフッ素化反応における置換基の電子的効果¹⁷⁾

前節でも述べたように、DAST と 1 との反応においてアリルフロライド (6, 6') が生成するかフロロシクロプロパン (7) が生成するかは、1 のシクロプロパン環上置換基の電子的性質に大きく左右されると考えられる。そこで、これらについてさらに詳細に検討することにした。

まず1位に置換基を有する 1 に関して、DAST との反応を検討した (Table 6)。その結果当初の予想どおり、置換基の電子供与性が小さいと環開裂フッ素化が進行しアリルフロライド (6) が生成するが、置換基の電子供与性が大きくなるに従い、環開裂が抑制されてフロロシクロプロパン (7) が生成するようになった。

Table 6. DASTと1との反応 (1位置換基の影響)

entry	starting material	products ^a
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

例えば1位置換基がフェニル基の場合には、環開裂が進行してアリルフロライドが生成するが (entry 2)、ベンゼン環の *o*-位にメトキシ基が存在すると、アリルフロライドとフロロシクロプロパンが両方生成してくる (entry 3)。さらに *p*-位にメトキシ基が存在したり、*o*-位と *p*-位

の両方にメトキシ基がある場合は、フロロシクロプロパン体のみが生成する (entry 4, 5)。また1位置換基が α -ナフチル基だとフロロシクロプロパン体のみが生成するが、電子供与性が若干弱い β -ナフチル基の場合は、アリルフロライドとフロロシクロプロパンの混合物になる。

次に2位置換基の影響を検討した。2位に電子求引基であるエトキシカルボニル基を持つ1に対してDASTを反応させると、いずれの場合もフロロシクロプロパン体のみが生成した (Table 7)。したがって、2位に電子求引基が存在すると、シクロプロパン環の開裂が抑制されることがわかった。

なお、単一の立体異性体を反応させても得られたフロロシクロプロパン体は立体異性体の混合物になった (entry 6)。このことは本反応がカルボカチオン経路で進行していることを良く支持している。

Table 7. DASTと1との反応 (2位電子求引性置換基の影響)

entry	starting material	products
1		
2		
3		
4		
5		
6		

次に、2位に電子供与性置換基 (Me, Ph) を持つ1とDASTとの反応を検討した (Table 8)。

この場合は、ほとんど全ての場所で、環開裂フッ素化が進行したので、2位に電子供与基が存在するとシクロプロパン環の開裂が促進されるということがわかった。例えば、1位置換基が

-メトキシフェニル

の場合、2位が無置換の場合はフロロシクロプロパン体を得られるが (Table 6 entry 4) 2位にメチル基 (Table 8 entry 2) やフェニル基 (Table 8 entry 3) が存在する場合は環開裂が進

行し、アリルフロライドが得られてきた。

また二級アリルフロライド (6) と一級アリルフロライド (6') では、二級のものが優先して生成した。

Table 8. DASTと1との反応 (2位電子供与性置換基の影響)

entry	starting material	products
1		
2		
3		
4		
5		
6		

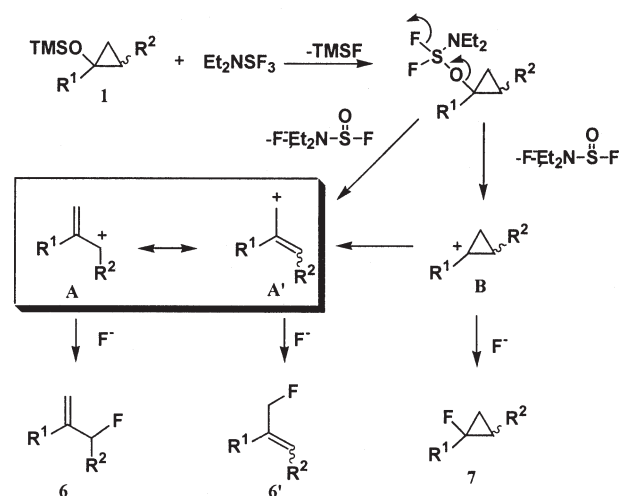


Fig. 12. 反応機構

1位ならびに2位置換基の影響に関しては、次のように考えている (Fig. 12)。まず1位の置換基であるが、ここに強力な電子供与基があるとシクロプロピルカチオン (B) が安定化されるため、環開裂は進行せずフロロシクロプロパン (7) が生成する。次に2位置換基であるが、ここに電子求引基が存在するとアリルカチオン (A, A') が不安定化されるために環開裂が抑制されてフロロシクロプロパン (7) が生成する。一方、2位に電子供与基が存在すると、アリルカチオン (A, A') が安定化されるために環開裂が促進されて、アリルフロライド (6, 6') が生成する。

3-3. Diethylaminosulfur trifluoride とシクロプロピルシリルエーテルの電子豊富芳香族化合物溶媒中での反応: Freidel-Crafts 型アリル化反応およびシクロプロピル化反応

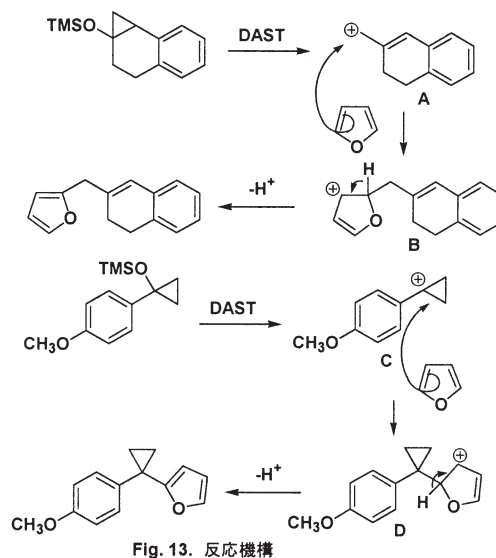
Table 9 芳香族化合物溶媒中での1とDASTとの反応

entry	1	ArH	products
1			
2	同上		
3	同上		
4	同上		
5	同上		
6	同上		
7			
8			
9			

これまで述べてきたように、1とDASTを反応させると、アリルカチオンもしくはシクロプロピルカチオンが生成する。通常はこれらのカチオンにフッ化物イオンが攻撃して、フッ素化体が得られるのであるが、もしここに他の求核種が存在すれば、それらをフッ素原子のかわりに導入できるのではないかと考え検討を行った。その結果、本反応を電子豊富な芳香族化合物溶媒中で行うと、Freidel-Crafts 型アリル化反応もしくはシクロプロピル化反応がおこることを見出した (Table 9)。

ベンゼンやトルエン中ではフッ素化体が得られただけであったが (entries 1,2)、アニソール、フラン、チオフェン、*N,N*-ジメチルアニリンなどの電子豊富な芳香族化合物を用いると、Freidel-Crafts 型の反応が進行した (entries 3-9)。

本反応の反応機構は次のように推定している (Fig. 13)。まず、1がDASTと反応してアリルカチオン (A) またはシクロプロピルカチオン (C) が生成する。これに芳香族化合物が攻撃して生成物を与える。



前述したように、DASTによるアルコールのフッ素化反応は、S_N2もしくはS_Niで進行するとされている。¹⁶⁾ 実際、コレステロールのような通常のアルコールとDASTとの反応をフラン中で行っても、Freidel-Crafts 型の反応は全く進行せず、フッ素置換体得られるだけである (Fig. 14)。

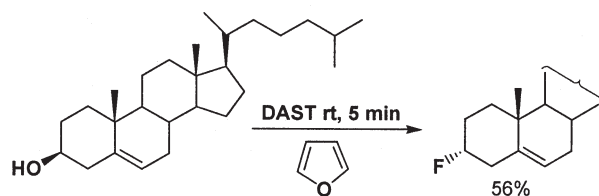


Fig. 14. フラン中でのコレステロールとDASTとの反応

今回我々が見出した反応は、DAST を用いるカルボカチオン経由の反応であり、大変ユニークなものである。

4. バナジウム錯体触媒と酸素を用いたシクロプロパノール系の開裂反応^{19,20)}

我々は、**1** に対して酸素雰囲気下で0.1当量のVO(acac)₂を反応させると、C₁-C₂結合(結合b)が選択的に切断されて、β-ヒドロキシケトン(**8**)とβ-ジケトン(**9**)が生成することを見出した(Table 10)。シクロプロパン環が存在していても、環上に酸素官能基をもたないものは反応しないことも明らかになった(entry 6)。

Table 10 VO(acac)₂触媒と酸素によるシクロプロパノール系開裂反応

entry	starting material	products
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

興味深いことに、5-(but-3-enyl)-1-trimethylsilyloxy-bicyclo[4.1.0]heptane を用いて、酸素雰囲気下で0.1当量のVO(acac)₂を反応させてもタンデム環化したような化合物は全く生成せず、β-ヒドロキシケトンとβ-ジケトンが得られた。この結果は、5-(but-3-enyl)-1-trimethylsilyloxy-bicyclo[4.1.0]heptane を不活性ガス下で塩化鉄(III)と反応させると、タンデム環化した化合物が得られるという報告とは対照的である (Fig. 15)。²¹⁾

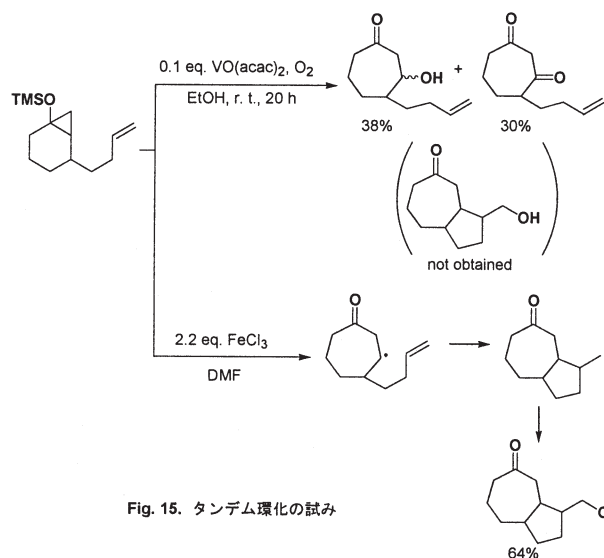


Fig. 15. タンデム環化の試み

本反応はラジカル反応で進行するが、シクロプロパン環の開裂によって生じたラジカルが、分子内のアルケンと反応する前に酸素と反応するのではないかと考えられる。実際、Fe(III)やMn(II)触媒を用いる反応でも、酸素雰囲気下で反応させると、タンデム環化したような化合物は全く生成せず、β-ヒドロキシケトンとβ-ジケトンが生成した (Fig. 16)。

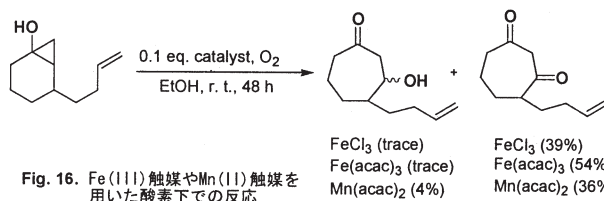


Fig. 16. Fe(III)触媒やMn(II)触媒を用いた酸素下での反応

β-ヒドロキシケトンを酸素雰囲気下でVO(acac)₂と反応させてもβ-ジケトンは全く生成しなかったため、β-ヒドロキシケトンはシクロプロパノールから直接生成しているということがわかった (Fig. 17)。

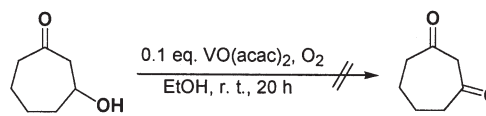


Fig. 17. β-ヒドロキシケトンとバナジウム触媒-酸素の反応

近年、Blanco らは 3-alkylbicyclo[*n*.1.0]alkanol に対して、酸素雰囲気下で $\text{Fe}(\text{acac})_3$ とシリカゲル存在下に照射を行うと、過酸化物が得られることを報告している (Fig. 18)。²²⁾

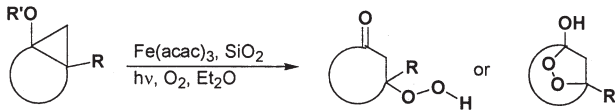


Fig. 18. $\text{Fe}(\text{acac})_3$, シリカゲル、酸素存在下での照射

我々も、3-alky-1-trimethylsilyloxybicyclo[*n*.1.0]alkane に対して、0.1 当量の $\text{VO}(\text{acac})_2$ を酸素雰囲気下で反応させると、 β -ヒドロキシケトンとともに過酸化物が生成することを見出した (Table 11)。

Table 11 過酸化物生成反応

entry	starting material	solvent	products
1		EtOH	
2		$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{OH}$	
3		$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{OH}$	
4		$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{OH}$	

特に、反応溶媒として 2,2,2-トリフロロエタノールを用いると過酸化物の収率が向上した (entry 2-4)。

過酸化物に対して 0.1 当量の $\text{VO}(\text{acac})_2$ を酸素雰囲気下で反応させると、 β -ヒドロキシケトンへと変化することから、 β -ヒドロキシケトンや β -ジケトンは過酸化物を經由して生成していると考えられる (Fig. 19)。

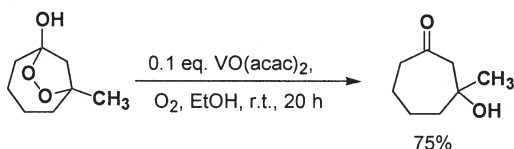


Fig. 19. 過酸化物から β -ヒドロキシケトンへの反応

本反応の反応機構は次のように考えている。まずバナジウム触媒とエタノールにより脱シリル化がおり、シクロプロパノール体になる。これがさらにバナジウム触媒により酸化されて、環開裂をおこしラジカルが生成する。このラジカルと酸素が反応して、 β -ペルヒドロキシケトンになる。これが分子内ヘミアセタール形成をおこない、過酸化物体となる。また β -ペルヒドロキシケトンはエタノールと反応し、 β -ヒドロキシケトンとなり、またバナジウム触媒と酸素によって脱水し、 β -ジケトンになる。高原子価バナジウム化合物が、シクロプロパノールを酸化開裂することによって生ずる低原子価バナジウム化合物は酸素によって元の高酸化状態に酸化される (Fig. 20)。

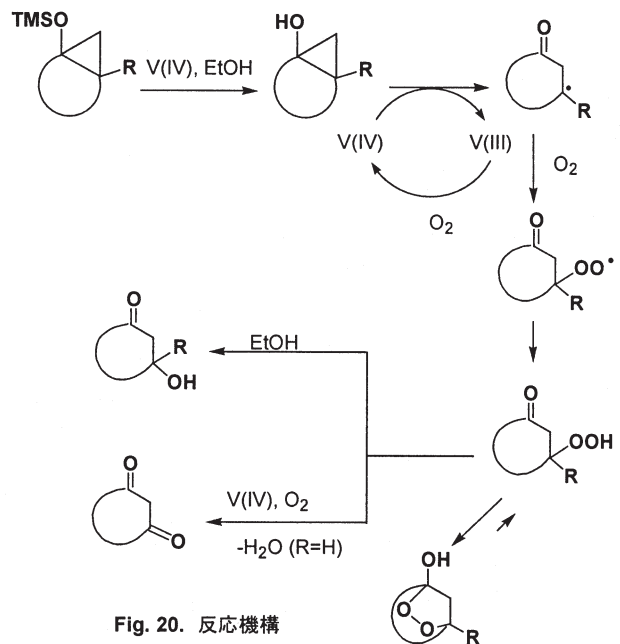


Fig. 20. 反応機構

次に、シクロプロパン環上にエトキシカルボニル基を持つ **1** を用いて、エタノール中酸素雰囲気下で検討を行った (Table 12)。

Table 12. シクロプロパン環上にエトキシカルボニル基を持つシクロプロパノール系の反応

entry	starting material	products
1		
2		

Table 12. シクロプロパン環上にエトキシカルボニル基を持つシクロプロパノール系の反応

entry	starting material	products
3		
4		
5		
6		

この場合は C₁-C₃ 結合 (結合 a) が選択的に切断され、酸素原子は導入されなかった。本反応では VO(acac)₂ は単なるルイス酸として働き、酸素は反応には関与していないと考えられる。実際、無酸素条件下で反応を行っても同様の反応が進行した (Fig. 21)。

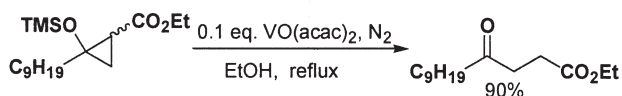


Fig. 21. シクロプロパン環上にエトキシカルボニル基を持つシクロプロパノール系の無酸素状態の反応

参考文献

- O. G. Kulinkovich, *Chem. Rev.* **2003**, *103*, 2597.
- 総合論文: 桐原正之, 角田広子, *有機合成化学協会誌* **2004**, *62*, 919.
- M. Kirihara, S. Yokoyama, H. Kakuda, T. Momose, *Tetrahedron Lett.* **1995**, *36*, 6907.
- M. Kirihara, S. Yokoyama, H. Kakuda, T. Momose, *Tetrahedron* **1998**, *54*, 13943.
- G. M. Rubottom, R. Marrero, D. S. Krueger, J. L. Schreiner, *Tetrahedron Lett.*, **1977**, 4013; G. M. Rubottom, E. C. Beedle, C.-W. Kim, R. C. Mott, *J. Am. Chem. Soc.* **1985**, *107*, 4230.
- V. V. Zhdankin, P. J. Stang, *Chem. Rev.* **2002**, *102*, 2523; *Hypervalent Iodine Chemistry (Top. Curr. Chem.* **224**); T. Wirth, ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, **2003**.
- R. M. Moriarty, R. K. Vaid, T. E. Hopkins, B. K. Vaid, O. Prakash, *Tetrahedron Lett.* **1990**, *31*, 197.
- M. Kirihara, S. Yokoyama, T. Momose, *Synth. Commun.* **1998**, *28*, 1947.
- M. Kirihara, M. Shimizu, S. Yokoyama, H. Kakuda, *ITE Lett.* **2003**, *4*, 215.
- T. Momose, T. Nishio, M. Kirihara, *Tetrahedron Lett.* **1996**, *37*, 4987.
- M. Kirihara, T. Nishio, S. Yokoyama, H. Kakuda, T. Momose, *Tetrahedron* **1999**, *55*, 2911.
- W. H. Tallent, V. L. Stormberg, E. C. Horning, *J. Am. Chem. Soc.* **1955**, *77*, 6361; W. H. Tallent, E. C. Horning, *J. Am. Chem. Soc.* **1956**, *78*, 4467; R. K. Hill, T. H. Chan, J. A. Joule, *Tetrahedron* **1965**, *21*, 147.
- ピニジンの最初の不斉合成: N. Yamazaki, C. Kibayashi, *J. Am. Chem. Soc.* **1989**, *111*, 1396.
- T. Momose, N. Toyooka, S. Seki, Y. Hirai, *Chem. Pharm. Bull.* **1990**, *38*, 2072; T. Momose, N. Toyooka, Y. Hirai, *Chem. Lett.* **1990**, 1319; T. Momose, M. Toshima, N. Toyooka, Y. Hirai, C. H. Eugster, *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1* **1997**, 1307; T. Momose, M. Toshima, S. Seki, Y. Koike, N. Toyooka, Y. Hirai, *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1* **1997**, 1315.
- M. Kirihara, T. Kambayashi, T. Momose, *Chem. Commun.* **1996**, 1103.
- Middleton, W. J. *J. Org. Chem.* **1975**, *40*, 574-578; Hudlicky, M. *Org. React. (N. Y.)* **1988**, *35*, 513-637; Rock, M. H. in *Methods of Organic Chemistry, Workbench Edition, Vol. E 10a, Organo-Fluorine Compounds*, ed. Baasner, B.; Hagemann, H.; Tatlow, J. C., Thieme, Stuttgart, **2000**, p. 406-431.
- M. Kirihara, H. Kakuda, M. Tsunooka, A. Shimajiri, T. Takuwa, A. Hatano, *Tetrahedron Lett.* **2003**, *44*, 8513.
- M. Kirihara, T. Noguchi, H. Kakuda, T. Akimoto, A. Shimajiri, M. Morishita, A. Hatano, Y. Hirai, *Tetrahedron Lett.* **2006**, *47*, 3777.
- M. Kirihara, M. Ichinose, S. Takizawa, T. Momose, *Chem. Commun.* **1998**, 1691.
- M. Kirihara, H. Kakuda, M. Ichinose, Y. Ochiai, S. Takizawa, A. Mokuya, K. Okubo, A. Hatano, M. Shiro, *Tetrahedron* **2005**, *61*, 4831.
- L. Blanco, A. Mansouri, *Tetrahedron Lett.* **1988**, *29*, 3239; K. I. Booker-Milburn, *Synlett*, **1992**, 809.
- V. Morisson, J.-P. Barnier, *Tetrahedron Lett.* **1999**, *40*, 4045.

創造体験教育「創造・発見」の平成18年度実施報告 —プログラムの改善と環境の整備—

The Preparation and the Practice of the Educational Program
“Exercises for Creation and Invention” in 2006

丹羽昌平*1, 榊田 勝*1, 越水重臣*1, 土肥 稔*2, 服部知美*2,
中川 淳*3, 中村 壘*3, 小林久理真*4, 関山秀雄*4, 河村都美明*5, 坂野俊則*5

Shohei NIWA, Masaru SAKAKIDA, Shigeomi KOSHIMIZU,
Minoru DOHI, Satomi HATTORI, Jun NAKAGAWA, Rui NAKAMURA,
Kurima KOBAYASHI, Hideo SEKIYAMA, Tomiaki KAWAMURA and Toshinori SAKANO

Abstract: A new educational program which encourages creative ability and inventive genius of the students has been introduced into the curricula of Shizuoka Institute of Science and Technology since 2003. This program is referred to as “Exercises for Creation and Invention.” This paper presents a discussion about the preparation, organization, detailed policies and results of the program which was conducted in 2006 as the third practice after a preliminary trial in 2003. This program includes such creative work as the production of novel electrical and mechanical devices, the production of competitive machines for contests involving various kinds of robots or electric vehicles, research on specific subjects, and student work as volunteers in schools and homes for the aged or the handicapped.

1. はじめに

静岡理科大学では平成10年(1998)に学生の創作活動の支援を目的として創作ショップが創設された。その後、平成11年度から開始された新カリキュラムにおいて一連の創成教育が導入された。また、全学科を対象とするインターンシップも平成11年度から導入され、主に静岡県西部地区のもの作り関連企業において毎年多数の学生が就業体験を行っている。

平成11年から平成15年までの5年間にこれらの創造体験関連科目群の履修者および関連した課外活動参加者の累計は2,000名を超えるに至った。これらの科目群の統合や補完を目的として、新科目「創造・発見1・2」が平成15年度開始の新カリキュラムにおいて導入された。平成15年度に行われた参加学生約80名による試行的な実施の結果を踏まえて新科目「創造・発見」の5分野40テーマからなる実施案が作成され、平成16年度には参加学生延べ457名(履修登録者数208名)により本格的な実施がスタートした。

本報告は、平成18年度の「創造・発見」の計画および実施の各段階における経過および結果について述べるとともに、本事業によって得られた成果や問題点を取りまとめ、次年度以降の実施における制度の改善に資することを目的としている。

2. 創造・体験教育「やらまいかプログラム」の経過

2.1 「やらまいかプログラム」の趣旨

本学の立地する静岡県西部は、全国的にも希に見るほどのもの作り産業の集積地である。本学の卒業生の大部分が、地域のもの作り産業関連分野で技術者として活躍している。本学の教育目標は、地域で活躍できる優れた技術者の育成であって、「地域に開かれた、地域との連携による技術者教育」を目指している。

現在多くの大学においてももの作りや創作をテーマにしたいわゆる創成教育を技術系の教育の一環として取り入れられている。静岡県西部地域のもの作り企業をターゲットにした人材育成を目指している本学においても、創成教育によって学生のやる気や意欲を刺激して、自発性や積極性の向上、創造力の育成、勉学意欲の向上など学生の能力を一段と向上させる「やらまいかプログラム」と称する人材育成プログラムを実施している。具体的には平成11年度より、インターンシップ、創造工学入門、SISTプロジェクト、創造工学演習、ボランティア、などの形で次々と新科目の創設、または新しい活動を開始し、プログラムを徐々に完成させてきた。年度ごとにこれらの科目の履修者数をまとめた一覧表をTable.2に示す。

これらの科目群の統合や補完を目的として、新科目「創造・発見1・2」が平成15年度開始の新カリキュラムにおいて導入された。平成18年度までの「やらまいかプログラム」関連科目および新科目「創造・発見」の実施で得た成果をもとに、「やらまいかプログラム」が本学教育の中で重要な役割を果たすようになることが期待される。

Table.1 「やらまいかプログラム」関連科目の構成

学 年	新カリキュラム(平成15年度以降)における「やらまいかプログラム」	
大学院	プロジェクト型修士研究 インターンシップ	技術経営
4年生	プロジェクト型卒業研究 インターンシップ	
3年生	創造・発見2(全学科) インターンシップ(全学科)	
2年生	創造・発見1(全学科) インターンシップ(全学科)	
1年生	後期	SISTプロジェクト(機械・電子)
	前期	フレッシュマンセミナー(全学科) 創造工学入門(機械)

2007年4月2日受理

*1機械工学科, *2電気電子情報工学科, *3情報システム学科, *4物質生命工学科, *5学務課

Table. 2 「やらまいかプログラム」の実施経過と履修者数

「やらまいかプログラム」の実施経過と履修者数						
科目名	インターンシップ	創造工学入門	SISTプロジェクト	創造発見	ボランティア活動	年度別履修者合計
対象学科 対象学年	全学科 全学年	機械1年生	機械・電子1年生	全学科 2・3年生	全学科 全学年	
開始年度	平成11年	平成12年	平成13年	平成13年	平成11年	
単位付与開始 必修・選択の別	平成12年 選択	平成12年 必修	平成13年 必修	平成13年 選択	平成13年 選択	
実施年度・平成	11年	12年	13年	14年	15年	
	46				4	50
	53	88			19	160
	57	98	192	57	46	450
	62	109	179	80	53	483
	78	106	217	123	62	586
	84	103	188	139	43	557
	82	88	166	221	42	599
	42	87	147	121	37	434
科目別履修者合計	504	679	1089	741	306	3319

*履修者数は重複を含む延人数を表す。

*「創造・発見」欄の平成13～15年度分には「創造工学演習」履修者を含む。

2.2 「やらまいかプログラム」の内容

創作ショップ(平成10年創設)における活動 学生の創作活動を支援することを目的として、「すずよクリエイティブハウス」と名付けられた創作ショップが竣工した。この施設は創設以来現在に至るまでの8年間に、創造体験教育および課外活動の双方にフルに活用され、学外コンテストで好成績をあげるなどの大きな活動成果をあげている。

創造工学入門(平成12年開始) 平成12年度新カリキュラムにおいて機械工学科の学生を対象として創造教育が正規の学科目として初めて導入された。創造工学入門は1年生を対象としたもの作り教育や創造工学の導入を目的とした科目(1年前期開講)である。

SISTプロジェクト(平成13年開始) 創造工学入門に引き続き、もの作りのためのいくつかのプロジェクトに取り組む科目としてSISTプロジェクトを1年生後期に開講する。機械工学科と電気電子情報工学科の学生が学科の枠を超えて共同でプロジェクトに取り組みプロジェクトを進めるのが特色となっている。

創造工学演習(平成13年開始・平成15年終了) 創造工学演習は機械工学科2・3年生を対象として、創造工学入門に引き続いて学生が自らの発想を生かしたもの作りや創作活動を行うことを主眼とする科目である。平成15年度よりこの科目は新科目「創造・発見」に統合された。

インターンシップ(平成11年開始) 地域社会や地域の産業界との密接な関係を特長とする本学では、早期からインターンシップの導入を目指した。平成11年度よりインターンシップを教育の一環として実施しており、平成12年度

より単位を付与している。

ボランティア活動(平成11年開始) 福祉施設におけるボランティア活動のほか、袋井市内の小中学校においてパソコンを用いた教育の現場で本学の学生が指導補助を行うという学校教育アシスタントの活動などがあり、毎年多数の学生が参加している。

創造・発見(平成15年開始) 平成15年度新カリキュラムにおいて、従来、主に機械工学科を対象として行われていた創造教育を全学対象に拡大し、本学教育の主要な柱とするために新科目「創造・発見1・2」が導入された。平成15年度の試行的な実施に引き続いて、平成18年度には4回目の実施が行われた。

3. 「創造・発見」の具体的実施方針

3.1 「創造・発見」の計画と活動分野

「創造・発見」は平成11年度から次々といろいろな形で別々に進められてきた創造・体験教育関連の科目や活動を集大成して全学の学生を対象に拡大し、本学教育の主要な柱とするために、平成15年のカリキュラム改正の機会に創設した新科目である。「創造・発見」の内容としては、学生のモチベーションや意欲を高め能力向上にも役立つ活動をすべて包含することとした。それらのうち一部にはすでに特定の学科対象で実施していた科目もあり、学生の課外活動として実施していた部分もある。平成15～17年度においては「創造・発見」の活動分野を、「もの作りと創作活動」、「テーマ研究」、「コンテスト参加」、「ボランティア活動」の4分野としていたが、平成18年度では「コンテスト参加」分野のテーマの多くが「もの作り」に含まれることなどからこの分野を廃止し他の分野に統合した。それらの分野ごとの実施計画案について、内容を以下に説明する。

3.2 「創造・発見」の分野ごとの具体的実施方針

(1) 「もの作りと創作活動」分野について

「創造・発見」の主眼は、全く制約がない自由な発想によるもの作りと創作の活動である。「創造・発見」の主目的を達成するのがこの分野である。機械や装置、ロボット、電子回路、ソフトウェア、ゲーム、CG、ホームページ、アート作品などあらゆるジャンルのもの作りと創作に取り組む。創造・発見の中で最重点の分野である。活動時間の大半は、創作ショップ、各センターや実験室などにおけるもの作りおよび創作活動にあてる。成果を、作品、報告書、報告会などの形で発表する。従前に「コンテスト参加」分野に分類していたテーマの多くをこの分野に含めた。

(2) 「テーマ研究」分野について

自由な題材を選んで学生独自のテーマで研究を行い、その経験を卒業研究に生かすことを目的としてこの分野を設けた。一般的な学生が取り組みやすい分野であり、比較的少額の経費で多数の受講者に対応できる。特定のテーマについて研究を行いその成果をまとめて報告書および報告会でのプレゼンテーションの形で発表する。研究の題材は、自然科学、工学技術、社会科学、人文科学などあらゆる分野から選ぶものとする。グループに分かれ、学内の図書館や各センターにとどまらず学外の地域社会や企業における実地研究なども行う。途中経過をセミナーで発表し指導者の指導を受ける。7回程度のセミナーのあと最終的な報告書をまとめ、発表する。

(3) 「ボランティア活動」分野について

ボランティア活動で地域社会との「ふれあい」を体験する。これからの技術者にとって、バリアフリーやユニバーサルデザインといった福祉の観点や環境問題の観点は重要なものであり、これをボランティア活動で体験するこ

ともできる。小中学校、養護学校等における教育ボランティア、福祉施設、NPO等におけるボランティア、行事ボランティアなどを含めて考える。

3.3 「創造・発見」の履修と単位認定

(1) 履修登録時期及び評価時期

通年科目であるので、1年間（4月～翌年1月）までの期間で実施することが可能である。しかし、履修登録は後期とし、評価提出も後期の評価提出時期とする。

(2) 評価標語および単位数

優・良・可・不可での評価は困難であるので、合格・不合格とする。創造・発見1および2を各1単位とする。

(3) 単位認定者（総括者）及び分野と分野別担当者

- a. 単位認定者（総括者） 丹羽 昌平 教授
- b. 分野別担当者と分野別リーダー

分 野		分野別担当者 （※は分野内リーダー）
もの作りと創作活動		※中村壘講師（情報） ※土肥稔助教授（電子） 榊田勝教授（機械） 小林久理真教授（物質）
テーマ研究		※関山秀雄助教授（物質） 越水重臣助教授（機械） 服部知美助手（電子）
ボランティア 活動	教育ボランティア	中川淳教授（情報）
	他のボランティア	※丹羽昌平教授（機械）

学内指導者は、「創造・発見」担当教員9名、センター職員5名および特定のテーマのみを指導する教員数名の範囲内で担当する。

(4) 「創造・発見1」と「創造・発見2」の関係

「創造・発見2」は、原則として「創造・発見1」を履修済みの場合のみ履修できる。また、「創造・発見2」では、「創造・発見1」で履修したテーマと同一のテーマを継続して履修することも、新たに別のテーマを履修することもできる。

3.4 学外指導者の招聘

本プログラムを充実したものとするためには、多数の指導者が必要である。さらに本プログラムの内容をより豊富なものとするために、指導者は、本学教員に限らず、広く学外の有識者、経験者、地域社会や地域企業の在職者またはそれらのOBの中から適当な方、特に学生の指導に関してボランティア的な熱意のある方に協力を求めることとする。これは、地域社会と連携した教育によって技術者の育成を行うという本学の目標にも合致するものである。学外指導者の招聘は、学内の教員負担の増大を避けるという効果もある。実験・実習等で多数の補助的な指導者が必要な場合は、指導者の一部を本学の大学院生または4年生のTAでまかなう。以上のような方針のもとで近隣の企業関係者や団体に人選を依頼した結果、約10名の学外指導者を招聘することになった。

「創造・発見」の学外指導者については、学科目の創設以来平成18年度の実施に至るまで、職位として学内の規定中に存在しない「学外指導者」という仮の名称のままで実施してきた。平成18年度の後半に至って、それに関する学内規定が整備されることとなった。新しい学内規定によれば「学外指導者」に対して「非常勤講師」に準ずる「教育指導員」という新しい職位が与えられることになり、辞令も発せられることとなった。この新しい規定は平成19年度の実施から適用される。

4. 平成18年度の「創造・発見」の実施

4.1 「創造・発見」の課題・問題点とその解決

「創造・発見」の実施案を作成するにあたっては、「創造・発見」の従前の形態である「創造工学演習」の実施や、平成15～17年度の「創造・発見」の実施によって得られた課題や問題点およびそれらの解決策について次のような検討を行った。

○ テーマの選定について

「創造・発見」の前の形の「創造工学演習」においては、テーマは基本的に学生の独力で選定するシステムをとっていた。これは形の上では理想的には見えるが、現実には学生があまりにも経験不足のために、出てきたテーマは実現困難であったり、あまり意義の認められないものであったりして、結果的にある程度有意義なテーマに到達するまでにかなりの時間がかかってしまった。さらに十分な数の指導者がいなかった（学生数十名に指導者1人）ということもあり、学生の到達レベルは高くなかった。その反省から、「創造・発見」では学外指導者を含めて十分な数の指導者を確保し、かなり限定したテーマの中で活動する形を基本とした。

○ 指導者の選定について

「創造・発見」の実施案の作成に当たっては、学内でテーマとそれに対する指導者の募集を相当の期間行ったが、「創造・発見」担当教員以外の教員からの応募は極めてわずかであった。もちろんテーマを提案して学生の指導を行うことはその教員にとって追加の負担になる。1年生全員対象のフレッシュマンセミナーのように教員全員が担当するという規則にならない限り、ボランティア的に新たな負担を求めることは困難な面がある。そこで、学外指導者を依頼して試行を行ってみたいところ、学外指導者から学内では得られないような特色あるテーマがいくつか寄せられ、熱心な指導で学生にたいへん喜ばれるなど、よい結果が得られた。平成16年からの本格的な実施に当たっても、指導者の数では学内と学外がほぼ同数の体制とすることになった。ただし、学務課職員が学外指導者の対応に追われることとなり、負担になった。担当教員を含めて運営面での分担体制を整えることが必要である。

○ 活動場所

現在は、創作ショップは課外活動を中心としてかなり満員の状況であり、「創造・発見」のための活動スペースは非常に不足している。平成17年度までは、各学科の実験室の片隅を間借りするなど、かろうじて活動場所を見つけたという状況なので、今後は活動場所の確保が問題となる。平成18年度末には第2工作センターの新築を中心として、YES（やままいか教育サイト）と称する一群の施設からなる地域が完成したので活動場所の問題は解決された。

4.2 平成18年度実施案の作成

平成17年度までの実施によって得られた知見に基づいて平成18年度の「創造・発見」の実施のための詳細な方針が決定された。その内容の大部分は前年度までに実施を試みたものである。特に学外の技術者としての経験豊富な方約10名を指導者として依頼したところ、熱意あふれる指導で学生に大変好評であった。従って、平成18年度実施案においても学外指導者14名を依頼することとした。各指導者の指導方法や全体的な運営面でも前年度までの経験を生かして円滑な実施ができることが期待された。

4.3 平成18年度「創造・発見」実施内容の一覧

平成18年度の「創造・発見」について、各分野およびテーマごとの指導者および実施内容を列挙したものが次の表である。この表の右端には各テーマについて履修者数と単位取得者数を付記した。

Table.3 平成 18 年度「創造・発見」実施内容の一覧

分野	No.	テーマ	指導者	実施期間	実施場所	内容	履修	単位
もの作りと創作活動	1	バイクの構造研究	村井義彦*, 村越和生*, 土肥 稔	4 月から 14 回	創作ショップ 308 講義室	二輪車の分解組み付けおよび修理を体験するとともに過去の技術や最近の技術を学び、二輪車の構造・機能を理解する	13	13
	2	ワイヤ放電加工機・三次元加工機取扱資格	行平憲一	9 月上旬中旬	工作センター	この技術の習得は金型加工で重要な位置を占め、貴重な経験となる。資格取得者には、機械の優先的使用や取り扱い指導者の特典	8	5
	3	自分の香りを作ろう(アロマセラピー)	半田敦子*, 関山秀雄	4 月～1 月	301 実験室	植物の香りが心と体にどのように作用するかを学び、心身共に健やかで充実したライフスタイルを見つけていくヒントとする	15	14
	4	たたらを体験しよう	小林久理真	前後期通して全 7 回	屋外(砂鉄採取), 講義室	たたらは「もののけ姫」に出てくる古代の製鉄法。砂鉄採取 2 回(半日ずつ)炉の作成と、たたら操業(3 日間), 講義 2 回程度	12	5
	5	ラジコン飛行ロボットの製作	榎田 勝, 丹羽昌平	主に前期 7 回以上	201 実験室 創作ショップ	ラジコンで飛行するロボットを製作しコンピュータ制御による安定化や飛行の制御を実現する。	5	5
	6	ペルチエ素子による熱電発電機の製作・評価	十朱 寧	4 月から全 7 回	202 実験室	熱電現象を利用し、熱エネルギーを直接電気エネルギーに変える発電方式で、お湯と水の温度差による発電を試みる。	5	5
	7	ホバークラフトの製作	土肥 稔, 服部知美	前期	実験室	ホバークラフトについて調べ、製作する。最終的には有人で操縦可能なものを作る	6	6
	8	二足歩行ロボットの製作	丹羽昌平	主に前期 7 回以上	201 実験室 創作ショップ	二足歩行ロボットを製作しコンピュータ制御による安定化や歩行の制御を実現する。パフォーマンスなどを遂行させる。	3	3
	9	遠隔操縦ボートによる佐鳴湖水質調査プロジェクト	大嶋 三郎*, 丹羽昌平, 惣田 晃夫	4 月から 1 年間	創作ショップ 201 実験室	無人ボートを、携帯電話の無線機能を用い遠隔操縦しながら佐鳴湖の浄化のための水質調査を行うプロジェクト	2	0
	10	精密鑄造による能面と能ロボットの製作	落合修二*, 越水重臣	前期 20 回程度	創作ショップ 実験室	精密鑄造技術を学ぶ。能ロボットは能楽を奏で能の動作をする。また女面から夜又面に变化させたりする。	1	1
	11	ロボットコンテスト	益田 正, 見崎大悟	4 月から 1 年間	創作ショップ	NHK ロボコン大会などのロボコンへの出場を目標としてロボットを設計製作し、ロボットの機構やメカトロニクスを学ぶ。	7	7
	12	新聞記事データベースの作成	小栗勝也	4 月～8 月随時	439 実験室	新聞、テレビなどのメディアによる情報を研究するための基礎材料となる新聞記事データベースを独自に制作します。	3	3
	13	ドラマ・ドキュメンタリー映画の試行的制作	小栗勝也	9 月～12 月 30 時間程度	439 実験室	社会情報研究の一貫として、地元袋井市の各種情報を自ら取材し、短い映画(ビデオ)にまとめる作業を行います。	2	2
	14	燃料によるエンジン性能	清水義明*	9 月～12 月まで 7 回	310 講義室 他	小型 4 サイクルエンジンを使用して LPG, CNG, アルコール等の燃料を供給した場合のエンジン性能がどのように変化するかを学ぶ。	2	1
テーマ研究	15	日本の自動車産業を築いた名経営者から学ぶ	野沢隆二郎*, 土屋高志	前期 7 回程度	505 講義室	優れた製造会社の発展の歴史、創業した名経営者の人物像、哲学を調べ、学習して、もの作りへの意欲を喚起する。	6	6
	16	ビジネスプラン	山田 穎二*, 大野晴己*, 越水重臣	5 月～7 月 7 回程度	201 講義室	新ビジネスの創造を目指し、ビジネスプランの立案に挑戦する。自己表現力とコミュニケーションスキルを修得する。	4	4
	17	ワンチップマイコンによる制御入門(ライトレースロボット)	岡田靖志*, 見崎大悟	6 月～7 月全 7 回	305 講義室	ワンチップマイコンを用いマイコン制御プログラムをアセンブラで作成し、LED 点灯制御やステッピングモータ制御等を実験する。	3	3
	18	メディア情報研究	小栗勝也	9 月～12 月 30 時間程度	439 実験室	メディア情報を正しく読み取るために必要な基礎的学習と、新聞記事情報データベースを用いた比較研究の基礎を体験する	1	1
	19	絵本の魅力と読み聞かせ	萩田敏子*, 関山秀雄	5～7 月と 10～1 月計 7 回	図書館 セミナー室	最近静かなブームになっている絵本の「読み聞かせ」やお話を語る「ストーリーテリング」で心洗われる気持ちを体験。	8	7
	20	走査電子顕微鏡取扱資格	早川一生	9 月上旬・計 7 回	機器センター	資格取得者には、機器の優先的使用や取り扱い指導者の特典	10	4
	21	分子シミュレーション	関山秀雄	夏休み～後期全 7 回	313 研究実験室	「コンピュータ上での化学実験」によって分子の構造、化学反応の仕組み、物質のミクロの世界の現象の本質を学ぶ。	3	3

	22	ハイブリッド車の動力機構	鈴木 猛* 土屋高志	前期7回 程度	204LL 講義 室	エンジンとモーターの二種類の動力源を持つハイブリッド車の動力システムについて、動力特性、特徴と効果を検証する。	2	2
ボランティア活動	23	学校教育アシスタント	中川 淳	9月第2 週及び 第3週	袋井市内小 中学校	小中学校でパソコンを用いる情報教育のアシスタントとしてボランティア活動を行う。一般の教科も教育補助を行う。	18	18
	24	袋井市 IT アシスタント	中川 淳	8月～9 月数日 間	袋井市内の 公民館	袋井市民を対象としたIT講習会のアシスタントを行う。受講者は7歳から70歳までと年齢の幅が広い。	6	4
	25	初級・中級青少年指導者養成講座	山崎美穂子* 浅岡知恵子* 吉田 豊	全 15 回	講義室 袋井養護学 校	施設におけるボランティア活動について、講義および実習で学ぶ。コース修了者にはボランティア指導者の資格授与。	11	8
	26	地域社会におけるボランティア活動の実践	木村幸男* 丹羽昌平	全 15 回	101講義室	ボランティア活動や NPO 活動について詳しい講義および実習で学ぶ。	2	1

(注) *印は学外指導者

合計(履修者数と単位取得者数)	158	131
-----------------	-----	-----

4. 4 「創造・発見」履修学生の募集と活動状況

平成 18 年度は「創造・発見」の 4 回目の開講(平成 15 年度の試行を含む)となる。参加および履修学生の募集については、平成 17 年度までの実施の経験を踏まえて十分な準備を整えた。学期はじめのガイダンスの席上において「創造・発見」開講の説明および説明会開催の案内を行った上、4月 20 日(水)5 限に説明会を開催した。例年通り説明会には会場の教室がほぼ満員となるほどの多数の学生が詰めかけ、関心の高さを示した。

参加者募集の結果決定されたテーマごとの履修者数(単位取得を目標として履修登録を行った学生数)は、Table. 3 に示す通りである。それを分野ごとに集計した結果は次の Table. 4 に示す通りである。これらの表には最終的に単位を取得した者の数も示されている。

5 月中旬にはテーマごとに受講学生との打合せを行って開講および活動の予定を決定し、順次開講した。テーマごとの活動の時期および期間は Table. 3 に示す通りである。大部分のテーマについては予定通りに活動が行われた。一部のテーマについては、準備不足など種々の理由により活動が長引き、後期の 11 月に至るまで活動を継続したテーマもあった。

Table. 4 平成 18 年度・分野別の参加者数と履修者数

分野	履修者数	単位取得者数
もの作りと創作	84	70
テーマ研究	37	30
ボランティア活動	37	31
合計	158	131

5. 平成 18 年度「創造・発見」実施結果

5. 1 平成 18 年度「創造・発見」実施結果の概要

「創造・発見」の活動は、テーマごとに Table. 3 に示す期間および場所においてほぼ予定通りに実施され、大部分のテーマについて所期の成果を得ることができた。活動の終了時には、学生からは活動内容に関する報告書および活動状況に関するアンケート回答を、指導者からは活動経過の報告、学生の出席状況報告書、学生個別の評価報告書、アンケート回答などの提出を求めた。このうち、学生の報告書については、それをすべてまとめた報告集を作成する。

履修申告を行った学生については、出席状況、指導者による個別の評価、報告書の内容を総合して「合格・不合格」の判定を行い、合格者には 1 単位を付与した。各分野の単位取得者数は Table. 4 に示す通りである。平成 18 年度の「創造・発見」の単位取得者は 131 名となった。

5. 2 平成 18 年度「創造・発見」報告会の開催

平成 18 年度当初は、次の 3 回の報告会開催を計画していた。

- (1) 前期報告会(7月中旬): 前期で終了した活動の報告。
- (2) 大学祭における発表(10月下旬): 全テーマの中から有志が発表する。
- (3) 後期報告会(12月中旬): 後期に終了した活動の報告。しかし、前期終了のテーマ数が少ないことなどのため、前期報告会は取りやめとし、全テーマについて、(2)または(3)のどちらかの機会に必ず成果発表を行うこととした。

大学祭における発表は、大学祭の日程に合わせて 10月 28 日(土)、29日(日)の 2 日間、研究実験棟の 201 実験室において、展示、デモ、およびポスター発表を中心として行った。28 日(土)には父母懇談会があり多数の父母や学外者が訪れた。

後期報告会は 12 月 11 日(月)5 限に 206 製図室において、講演発表を中心とし、ポスター発表および実物展示を一部追加する形で開催した。学生と教員約 90 名が参加した。

5. 3 アンケート結果

参加学生および指導者の双方に対するアンケート調査の結果を以下に報告する。

学生向けのアンケート調査に対して、参加学生中 112 名の回答を得た。はじめに活動期間に対する質問に関しては、約 94% が適切であると回答した。Fig. 1 には、実施テーマ、実施環境(設備等)、指導者の指導、履修の成果、に分けて満足度を問う質問に対する回答の集計結果を示している。これによると、いずれの質問についても 90% 以上が「満足」または「やや満足」の回答を与えている。満足でない場合の理由としては、実施環境および設備についての不備などに関するもの、「履修の成果」では、もの作りが期間内に終了しなかったことによる不満が大部分であった。その他の希望としては、ロボット製作テーマの増加の希望が多く出されていた。

指導者向けのアンケート調査に対して 26 名の指導者の回答が得られた。履修学生の人数および活動期間に関してはかなりの数 10~30% が適切でないという回答している。人数については多すぎると少なすぎるとの両方の回答があり、期間については短すぎるとの回答が大部分である。活動テーマ、履修状況、活動状況については 90% 程度が「満足」または「ほぼ満足」の回答を与えている。満足でない場合の理由としては、学生の活動時間が不足、設備の不足などのために目標に到達しなかったこと、学生の心構えが不十分などが主たるものであった。その他の希望としては、活動場所や作品の置き場の確保、活動時期を早めてより早く完了する、運営体制(事務的な仕事の処理や他教員の協力)を確立して欲しいなどが主要な意見であった。

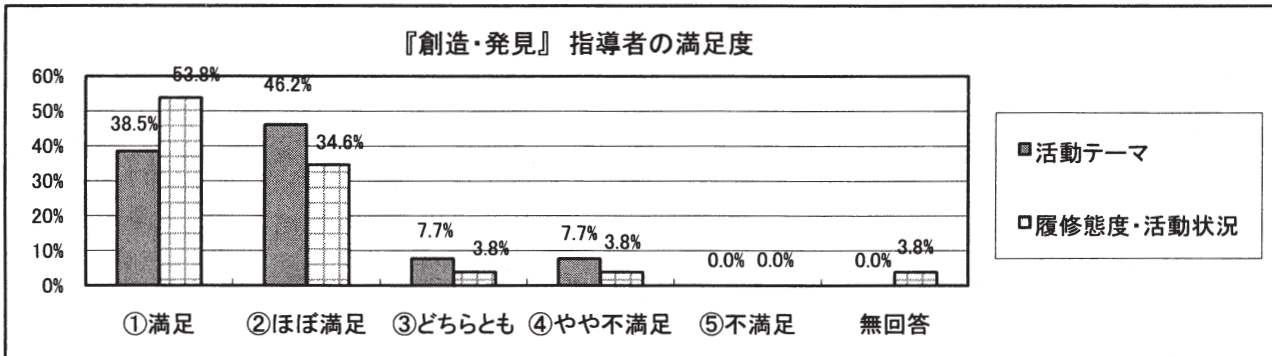
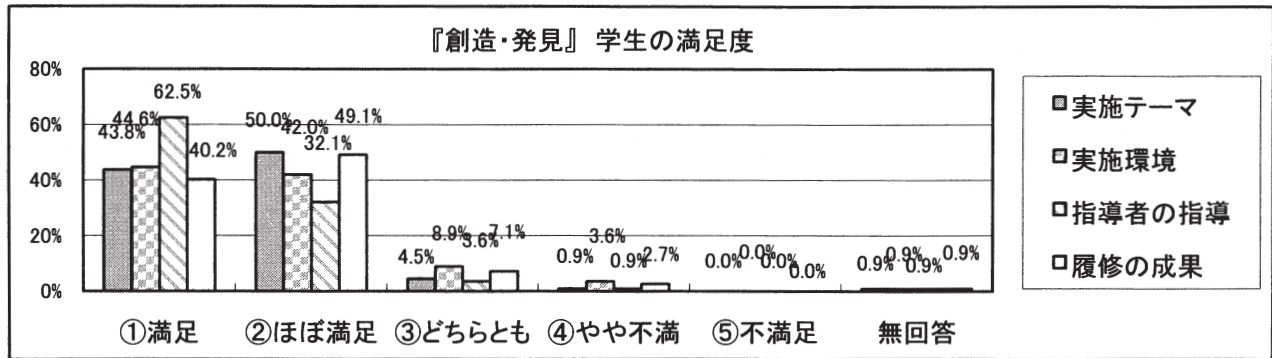


Fig. 1 満足度に関するアンケート結果 (受講学生および指導者)

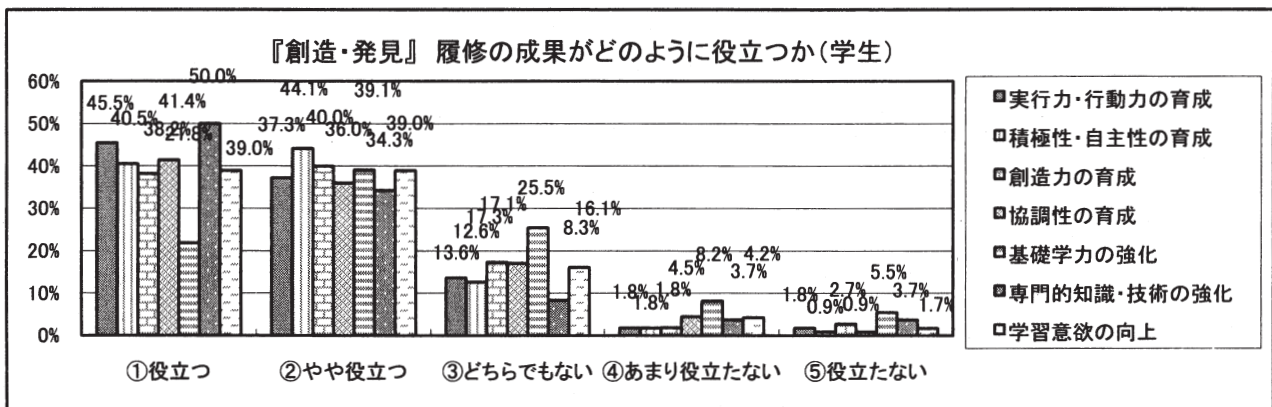


Fig. 2 履修の成果がどのように役立つか (学生)

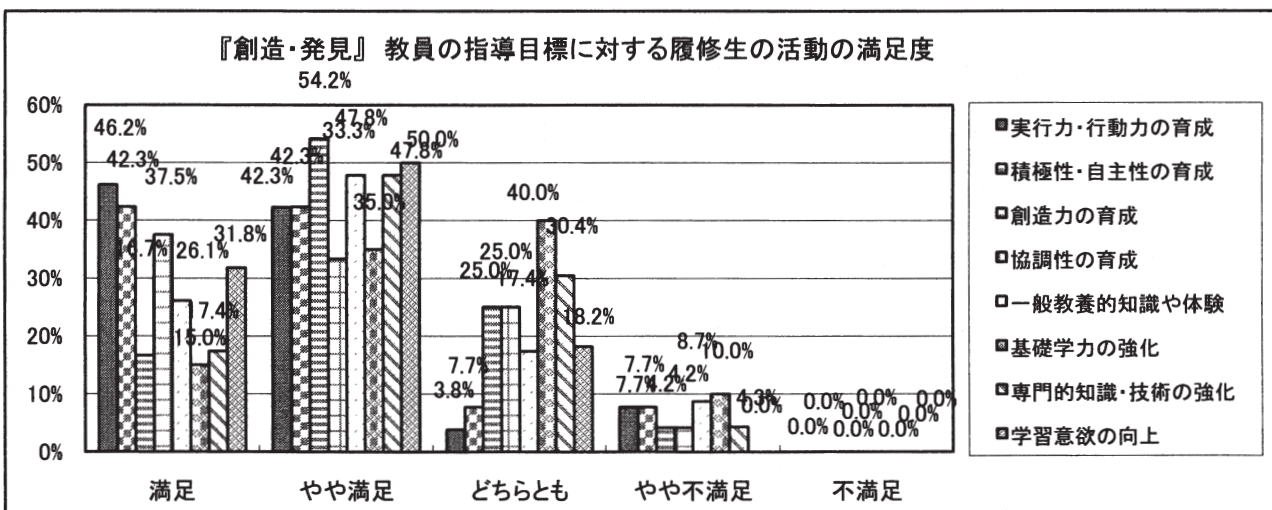


Fig. 3 指導目標に対比した履修生の活動成果 (指導者)

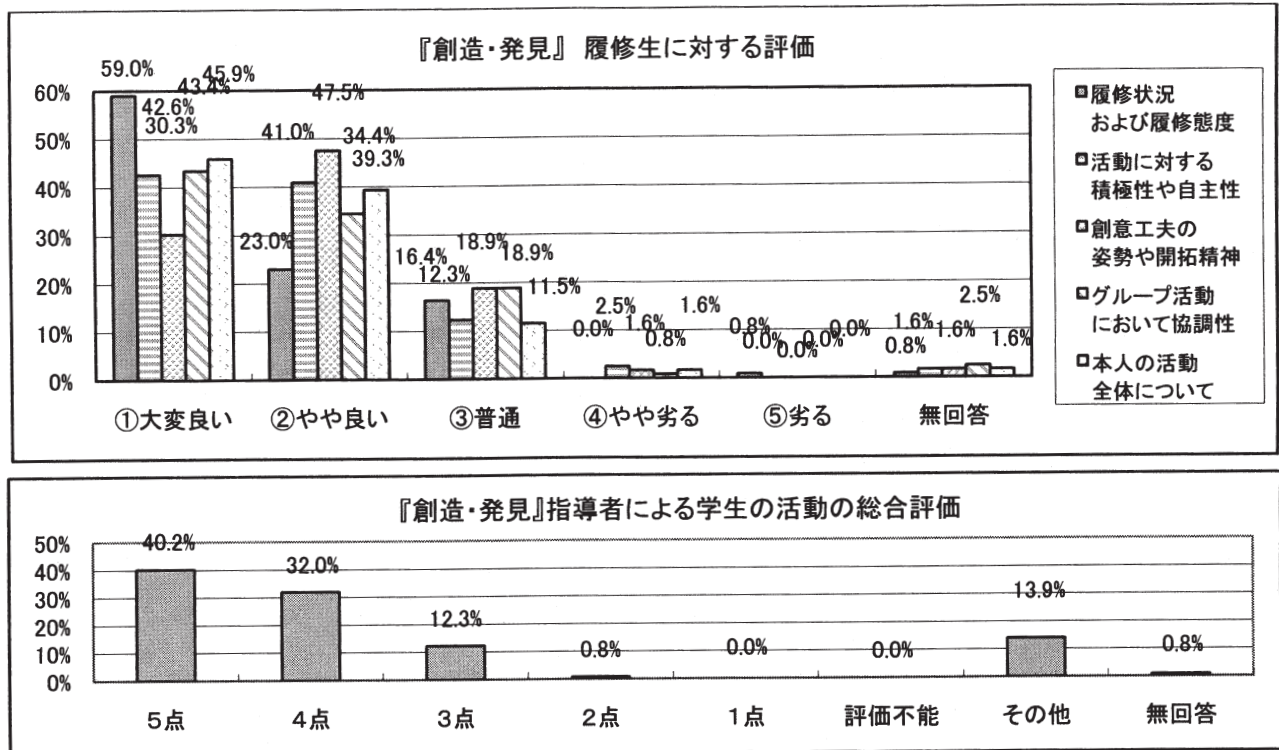


Fig. 4 指導目標項目別に見た履修学生の活動の評価（指導者）

Fig. 2 には「履修の成果がどのように役立つか」についての学生に対するアンケートの結果が示されている。実行力・行動力の育成、積極性・自主性の育成、創造力の育成、協調性の育成、専門的知識・技術の強化、学習意欲の向上、の各項目について 80%以上が「役立つ」または「やや役立つ」と回答し、基礎学力の強化については約 65%が「役立つ」または「やや役立つ」と回答している。

Fig. 3 には、指導者の指導目標に対する学生の活動の満足度に関する指導者に対するアンケート結果が示されている。実行力・行動力の育成、積極性・自主性の育成、の項目に関して 80%以上、創造力の育成、協調性の育成、一般教養的知識や体験、学習意欲の向上の項目に関して 70%以上が「満足」または「やや満足」と回答している。

Fig. 4 は、指導者による履修学生の活動の評価を指導目標項目別に集計している。履修状況および履修態度、活動に対する積極性や自主性、創意工夫の姿勢や開拓精神、グループ活動における協調性、の各項目および活動全般について 80%以上が「大変良い」または「やや良い」の評価を受けている。総合点の5段階評価に関しては、70%以上が5または4となっている。

5. 4 分野ごとの実施結果に関する検討

(1) もの作りと創作活動の分野

この分野では、自由な発想によるもの作りと創作活動を目的に、14のテーマが実施された。

「バイクの構造研究」は、昨年度まで「原付・バイクの修理」と称していた活動を、より研究的な内容を深めることを目指してテーマ名を変更したものである。昨年度までと同様に履修希望者が多く、希望者に提出させた「履修希望理由申告書」に基づいて履修者の選考を行った。活動の密度も濃く、自主活動にもかなり積極的に取り組んでいたようである。「たたらを体験しよう」では、砂鉄取り、釜戸作りを行い、少量ではあるが鉄を取り出すことができた。「ラジコン飛行ロボットの作製」は、機体、駆動系、制御の3つのグループで行った。制御系の部分のみが完成にまでは至らなかったが、機体および駆動系につ

いてはほぼ完成の状態でかなりの形は出来上がっている。後は飛行実験を待つばかりである。「ペルチェ素子による熱電発電機の製作・評価」では、実際に発電機を作製し、冷却・放熱実験、発電実験を行った。「二足歩行ロボットの製作」では、ロボットの組み立て、制御プログラムの作製を行い、各種の歩行動作をプログラムしてそれぞれの動作の違いを確認した。「遠隔操縦ポートによる佐鳴湖水質調査プロジェクト」では、水漏れや制御系の誤動作等の問題をクリアし、袋井南小学校のプールでの水上走行テストに引き続いて、竜洋海洋公園における遠隔操縦による航行テストの成功にまで至っている。その後、採水装置を取り付けて水質調査実験を行う直前になっているが、装置の一部にトラブルが発生して最終的な実験には至っていない。

すべてのテーマが当初の予定通りに進んだわけではないが、規定時間以上の作業を行い、様々な問題を解決し、一応の成果が得られている。単位を修得した学生に対して見れば、教員側の学生への評価と、逆に学生側からの授業に対する感想も、平均的に良好であり、その点では、本年度の授業は問題がなかったと考えられる。テーマの内容に関しては、ロボット製作関連が3件ともっとも多いが、ともかく、なんらかの装置やポート、ホバークラフト、などのような目に見える物体を作成するテーマがほとんどで、「たたら」のような、物質を調製するテーマは1件のみであった。テーマについては、今後は生物系、環境系も含めて、もう少し広がりがあったほうがバランス上よいかも知れない。

また、評価については、現在のところ、ある程度活動に参加し、レポートを提出すれば合格点を与えることになっていると思われる。いろいろなものを作成することが「もの作り」であるので、参加することが一番重要なことではあるが、将来的にはもう少し詳細な評価基準を考える必要があると思う。たとえば、作成したものに対して課題、条件を課して、それをクリアしているかどうかで評価することも考えられる。また、指導者どうしの横の連絡、情報交換の機会を増やして、評価基準をもっと相互に話し合える状況を作ることも必要かも知れない。

(2) テーマ研究の分野

テーマ研究は、例年と同様、自然科学や工学の分野のみならず社会科学や人文科学など幅広いジャンルから、学生が特定の1つのテーマについての研究を行い、未知の分野の体験、成果を得ることを意図した。今年度のテーマは計8件であり、学外からのテーマは、計4件、また、学内からは計4件であった。学外からのテーマのうち「ビジネスプラン」は今年から新たに加わったものである。

今年度の受講者数をみると、テーマによる偏りは昨年度ほど大きくはなかった。今回の実施では、成果報告会を10月の大学祭当日と12月の中旬の創造・発見の授業の時間帯に行った。「日本の自動車産業を築いた名経営者から学ぶ」では、本田宗一郎をはじめとする名経営者の人物や哲学を詳細に調べ、講演とポスター発表を行なった。今回から新たに登場した「ビジネスプラン」では、ビジネスプランの立案のプロセスについてわかりやすい講演発表が行われた。また、「ワンチップマイコンによる制御入門」では、マイコン制御によるLED点灯制御やステッピングモーター制御装置等に関する講演発表を行った。「新聞記事データベース」の作成では、さまざまな新聞の情報の違いやそれを読み取るときの問題点を講演発表により具体的な事例をあげて示してくれた。さらに化学の分野での「分子シミュレーション」では、いくつかのアミノ酸や蛋白質の立体構造を探索し、その結果をグラフィックスにしてポスター発表した。また、簡単な求核置換反応の機構を、量子化学計算を用いて原子の組み換えの詳細を示すことによって明らかにした。また、「走査電子顕微鏡取扱資格」では、電子顕微鏡の取り扱いに習熟し、さまざまな試料の興味深い写真を示しながら、電子顕微鏡の原理から詳しく説明してくれた。また、「絵本の魅力と読み聞かせ」では、例年通り、受講者全員が一人一人読み聞かせの実演を学内の教職員に公開する形で行った。あまり縁のない「読み聞かせ」とは、どのようなものか、少しでも多くの人に実感してもらうことに成功したといえる。

総じて今回のテーマ研究の発表では、昨年に比べると、口頭発表の数が増加しているのが特徴であった。また、昨年に続き、学生達の報告書では、新しいことを体験したことによる感動が随所にみられており、創造・発見の本来の目的を達成しているようであった。

以上が、今年度のテーマ研究の状況であるが、いくつかの問題点がある。ひとつは、口頭発表における質疑討論に必ずしもまだ慣れていないことである。これは、1年間に最低7コマ程度の履修では、内容の理解、口頭発表、質疑討論まで完璧にさせることは、むづかしいことによると考えられる。何人かの指導者たちは、7コマ以上のかんりの時間を使って丁寧に学生達を指導してくれていたケースもあったが、創造・発見という科目の目標をどこにおくかという根本的な問題とかかわってくるため、これは今後検討を要する課題といえる。もうひとつの問題は、これも昨年の報告で指摘したが、学内の教員の協力についてである。今回実施した8つのテーマは、学内4件、学外4件である。このうち学外指導者のテーマについては、日頃の大学の授業にはない新鮮な感動を学生達にもたらしてくれるという点で、創造・発見にまさに相応しい貴重なものといえる。これら学外指導者の数に比べると、学内指導者の数が少なく、いつもほとんど決まった一部の教員だけの協力を仰いでいるにすぎず、またテーマ自体も固定化してしまっている。創造・発見の授業は、日頃の講義、実習では得られないもの貴重なものを学生達にもたらしてくれる点などから、学生の人格や人間形成にも重要であると考え

られる。このような観点から、学内のすべての教員がローテーションを組んでも参加できる体制が望ましいと考える。さらに、このことによって、テーマ自体ももっとバリエーションに富ませることが出来、学生達の選択の幅も広がると考えられる。

(3) ボランティア活動の分野

ボランティア活動は、学校教育のアシスタントとして大学近隣の小中学校で活動するボランティア、養護学校の教育活動のアシスタントをするボランティア、袋井市内のIT講習会のアシスタントを行うボランティア活動、福祉施設やNPOと連携してボランティア活動を行う4つがある。平成18年度は、小中学校におけるボランティアに18名、養護学校のボランティアに11名、袋井市ITアシスタントに6名、施設のボランティアに2名の参加者があった。

小学校におけるボランティア活動は大学の授業に影響がないように9月の第2週(本年度は9月4日(月)～15日(金))に袋井市立袋井南小学校、袋井市立高南小学校、袋井市立山名小学校において実施し、養護学校におけるボランティアは、土曜日と日曜日に、静岡県立袋井養護学校において活動した。学生はボランティア活動に熱心に取り組んだ。活動後のアンケートによると、ボランティア活動に参加した学生のほとんどが活動に満足している。活動を通じて、学生同士が親密になり、積極的な学生生活を過ごすようにもなった。また、大学関係者以外との交流を通して、社会性も身につけている。本学のボランティア活動は地域の教育力を生かした教育システムと言える。また、ボランティア活動を通して、学生自らの学力不足を認識し、学習意欲が増したというアンケート結果があり、ボランティア活動の効果が大学の教育に波及していると考えられる。

静岡県立袋井養護学校の山崎美穂子校長と養護学校PTA・浅岡知恵子さんを中心とした父母の全面的な協力の下、講義と実践活動を通じてボランティアの心と障害のある児童生徒との対応を身につけることをねらいとした「初級青少年指導者」および「中級青少年指導者」資格取得講座を開講した。一定時間以上受講し、その内容を体験的に理解したものに対して静岡県教育委員会教育長名で「初級・中級青少年指導者」の認定証が授与される。平成14年度後期の「初級青少年指導者養成講座」からスタートして4年が経過したが、本学学生の活躍はすばらしく、養護学校からも大いに評価されている。ボランティア養成講座の受講者は1年間の障害児との交流活動を通し、自らの心のなかの「壁」を取り除き、社会の中の一員として大きく成長したようである。参加した学生のうち、2名が初級青少年指導者に、7名が中級青少年指導者に認定された。

小中学校におけるボランティアと養護学校におけるボランティアは活動内容が似ていることもあり、両方の活動に参加している学生がいる。学生が広く関心を多く持つことは歓迎できるが、ボランティア活動が広い範囲の学生に浸透していないということでもあり、今後、広い範囲の学生が参加するような策をたてねばならない。

6. 結論

静岡理工科大学において平成11年度から一連の創成教育およびインターンシップが導入された。本学ではこれらを「やらまいかプログラム」と名付け、学生の意欲と能力を高めるための重要な科目と位置づけている。平成11年から平成18年までの8年間にこれらの創造体験関連科目群は、重複を含む延べ人数では3000名を超える履修者を送り出した。

平成15年開始の新カリキュラムにおいて、創成教育科目群の統合や補完を目的として、新科目「創造・発見1・

2」が導入された。本報告は、平成18年度に行われた第4回目の「創造・発見」の実施の各段階における経過および結果について述べるとともに、これまでに得られた成果や問題点を取りまとめて報告した。

末筆ながら、「創造・発見」の実施に際して多数の大学の教職員並びに学外指導者の方々にご支援をいただいた。また、実施・運営上の事務全般については学務課の大山尋子さんに、アンケート結果の整理については教育開発センターの増田良子さんにそれぞれお世話になった。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 静岡理工科大学・2006年度・講義要項, 2006.
- 2) 丹羽昌平 他, “静岡理工科大学における創造体験教育「創造・発見」の計画と実施” 静岡理工科大学紀要, 第12巻(2004) 321-338.
- 3) 丹羽昌平 他, “平成16年度インターンシップ実施報告—インターンシップの教育効果の向上のために—” 静岡理工科大学紀要, 第13巻(2005) 95-104.
- 4) 丹羽昌平 他, “創造体験教育「創造・発見」の平成16年度実施報告”, 静岡理工科大学紀要, 第13巻(2005), 85-94.
- 5) 丹羽昌平 他, “地域社会との連携による実習体験教育”, 工学教育, 53-4(2005), 23-29.
- 6) 丹羽昌平 他, “創造体験教育「創造・発見」の計画と実施”, 工学教育, 53-5(2005), 37-43.
- 7) 丹羽昌平 他, “創造体験教育「創造・発見」の平成17年度実施報告—地域の知と技の継承と発展を目指して—”, 静岡理工科大学紀要, 第14巻(2006), 145-153.
- 8) 惣田昱夫 他, “平成17年度インターンシップ実施報告—事前教育の充実による教育効果の向上—” 静岡理工科大学紀要, 第14巻(2006) 163-174.

平成18年度インターンシップ実施報告 —キャリア教育のメイン・プログラムを目指して—

A Report on the Internship Program in 2006,
For the Main Program on Career Education.

富田寿人*³, 桑原宏成*¹, 野村龍男*², 渡辺俊幸*³, 桐原正之*⁴
河村都美明*⁵, 大石和典*⁵, 星 利光*⁵, 竹下知宏*⁶

Hisato TOMITA, Kousei KUWABARA, Tatsuo NOMURA, Toshiyuki WATANABE, Masayuki KIRIHARA,
Tomiaki KAWAMURA, Kazunori OISHI, Toshimitsu HOSHI and Tomohiro TAKESHITA

Abstract: A practical education in cooperation with the local industries, which is referred to as the internship, has been introduced into the curricula of Shizuoka Institute of Science and Technology since 1999. This paper presents the discussion about the preparation, the organization and the results of the internship program conducted in 2006. This is SIST's seventh full-scale program following the preliminary trial in 1999. In 2006, eighty-two companies in the western part of Shizuoka Prefecture joined this plan by providing their own internship programs for over one hundred sixty students. Forty-one students participated in these programs and obtained varied experiences. The results of this program in eight years are summarized and the future prospects of this program are also presented.

1. はじめに

静岡理科大学のインターンシップは、平成11年度の試行に始まり、平成12年度から授業の一貫として単位を付与して実施している。本報告は、平成18年度夏期に静岡理科大学において行われたインターンシップに関して、事業計画、受入企業に対する依頼、参加学生の募集、受入企業と実習希望学生のマッチング、夏期休業期間中の実習、参加学生の成績評価、実習結果の総括など各段階における経過および結果を概観し、本事業によって得られた成果や問題点を取りまとめ、来年度以降の実施における制度の改善に資することを目的としている。

この報告では、従来どおり学生の報告書を詳細に分析し、学生がインターンシップにおいてどのような内容の実習を行い、成果として何を得たか、また、どのような感想や意見を持ったかなどを明らかにするとともに、今年度からの事前教育の充実により学生の成長と企業の評価がどのように変わったか整理しようと試みている。さらに平成11年から平成18年までの8年間のインターンシップ実施結果の総括的なまとめおよび来年度以降のインターンシップに関する展望についても述べる。

2. 平成18年度インターンシップの計画

本学では、平成10年度よりインターンシップの教育への導入に関する調査と検討を始め、平成11年度夏期には試行的なインターンシップ事業を実施した。平成12年度からは単位を付与する形でインターンシップの本格実施を開始した。以後、履修する学生も少しずつ増加し、企業の受け入れ態勢も徐々に整ってきている。インターンシップは、本学周辺企業の中で人材育成の手段として理解が深まり定着しつつあると共に、本学のカリキュラムの中でも重要な地位を占めつつある。就職戦線が変化するなかで8年目の実施となる平成18年度のインターンシップは、昨年までの実施の成果を基に、インターンシップ先の企業の要望に応えるため、昨年度同様に事前教育を充実させ、

より学生にインターンシップになじめるよう教育を行い、静岡県西部地域の企業の協力を得ながら実施することが計画された。さらに過去の7年間の実施の状況や結果を踏まえて、学生の意欲と積極性の一層の向上を目指し、受入企業に対して実習内容の明確化と教育的効果に対するより多くの配慮を求め、学生の希望とのマッチングを図りながらより高い教育効果を得ることをインターンシップの実施目標とした。

3. 受入企業への協力依頼

地域社会との密接な連携を特色とする本学の教育の中にあつて、本学のインターンシップが目標としている地域産業との連携による地域に役立つ人材の育成、地域の企業や地域社会との交流の推進などの目的を達成するために、本学周辺地域の商工会議所等(袋井商工会議所、掛川商工会議所、磐田商工会議所、小笠地区商工会連絡協議会、磐周地区商工会連絡協議会)の協力を得て袋井市およびその周辺の企業に対してインターンシップ事業の協力依頼を実施した。その結果、平成18年度については昨年の約1.2倍の82社の企業(87実習テーマ)から約163名の実習生受入の意向が示された。図1の「実習生受入企業一覧表」に82事業所の一覧および実習生募集内容および実際に実習を行った学生の概略を示す。

4. 参加学生募集と派遣企業の決定

5月初旬、全学学生に対して、事前研修および企業研修を行い、その報告と事後研修への参加なしには単位の取得ができないことを告知し、インターンシップ希望者について、5月17日から4回の事前研修を実施した。参加学生募集と派遣企業の決定に当たっては、受入企業側からの教育上の効果を高める配慮を求めた「実習テーマ」に基づき、参加学生もこの実習内容をよく把握した上で、テーマと希望がよりマッチングするよう配慮した。

学生の実習希望者と企業の実習内容との間で調整を行ったのち、企業35社に実習生42名を派遣することとなった。実習生を派遣した企業ごとの実習期間、派遣実習生人数などの一覧を表1に示した。また、表2および表3には、実習生数の学年別および学科別の内訳および受入企業の

2007年3月5日受理

*¹機械工学科, *²電気電子情報工学科, *³情報システム学科, *⁴物質生命科学科, *⁵学務課, *⁶就職課

地域別内訳を示した。参加希望の学生数は受入可能人数を大きく下回り47社に上る企業に対しては企業から募集があるにもかかわらず実習希望学生が出ないという結果となった。一方では、希望者が実習定員を上回った企業数社

については、希望者の意欲や専門分野と実習内容の関連等を考慮して選考を行って派遣学生を決定した。

表1 実習生受入企業一覧表(企業82社、テーマ87、募集人数163名、実実習学生数41名)

No.	会社名	業務内容	実習地	実習開始	日数	募集人数	実習人数
1	(株) 島山製作所	3次元CADによる工作機械カバー製作	沼津市	8/24-9/8	10日間	1	1
2	(株) 増田鉄工所	CADデータの作成	富士市	8/21-9/1	10日間	1	
3	大宮製紙(株)	機械・電気設備の保守・保全・修理計画の立案等	富士宮市	9/11-22	12日間	3	
4	松本印刷(株)	ISO9001、ISO14001、Pマークの手順で業務をして頂きます	吉田町	8/21-9/1	10日間	1	1
5	山崎工業(株)	通信機器、エアコンなどのプリント配線板の組み立て作業	静岡市	8/21-31	9日間	1	
6	矢崎化工(株)	物流機器の組立	静岡市	9/11-22	10日間	2	1
7	三明機工(株)	開発型機械メーカーで最先端の技術を学ぶ	静岡市	9/11-22	10日間	3	1
8	鈴与(株)	物流業務と情報システムの現場実習	静岡市	8/21-25	5日間	1	1
9	(株) マルタカテクノ	健康機の各種性能の確認	藤枝市	8/4-31	10日間	2	1
10	大学産業(株)	現状では与えられた業務を楽しく行う	浜松市	8/4-31	10日間	1	1
11	テイボー(株)	マーキングペン先の製造又は検査	浜松市	9/11-15	5日間	2	1
12	(株) 遠州日石	接客を通じて販売力	浜松市		随時	10	
13	富士ゼロックス静岡(株) 浜松支店	DTPソフトを使って、様々なオンデマンドプリンターで出力	浜松市	9/11-22	9日間	2	1
14	(株) 遠鉄百貨店	お客様と接する機会を多くもち、笑顔で会話をしましょう	浜松市		随時	5	
15	(株) 小楠金属工業所	各種工作機械を使い精密部品を切削加工し測定する	浜松市	8/28-9/8	10日間	2	
16	ソフトブレン工業(株)	造づくり体験と製造原価の仕組みを知る 工程改善	浜松市	8/21-9/1	10日間	1	
17	ユニクラフトナグラ(株)	ものづくり体験	湖西市	9/11-22	10日間	1	
18	(株) ユニバンス	四輪駆動車の伝達装置に関する技術計算	湖西市	9/11-22	10日間	2	1
19	(株) 白木機械設計	モーターを用いた制御電子回路設計、シーケンス制御 2次元3次元CADを用いた部品図製図業務 組込みマイコンボードによる制御プログラム開発	浜松市	8/7-31	14日間	2	
20	(株) 浅沼技研	3次元測定機の操作法および図面読解	浜松市	8/21-31	9日間	1	1
21	ショーダテクトロン(株)	機械開発から出荷まで、作業を確認することで物作りを理解する	浜松市	9/11-22	10日間	1	
22	FDK(株) 湖西工場	設計業務について	浜松市	8/21-9/20	22日間	2	
23	榎本工業(株)	工作機械の組立を通して、実際の機械の設計と制御手法を学ぶ	浜松市	8/7-31	9日間	2	1
24	(株) ヒューモラボラトリー 浜松工場	電子部品、自動測定の体験	浜松市	9/4-15	10日間	1	1
25	(株) テクニカルサポート	営業に同行し、客先や社内の各部門を通じて、業務の全体像を把握	浜松市	8/7-9/21	14日間	2	
26	(株) エヌエスティー	制御ユニットの組立、配線、検査、調整	浜松市	8/21-9/1	10日間	1	1
27	浜二ペイント(株)	木工塗装の体験と塗料の性能評価	浜松市	9/11-9/22	10日間	1	
28	(株) ジャパン・ミヤキ	削り物に合わせた工作機械、刃物、回転数等の違いの把握	浜松市	8/21-9/1	10日間	2	
29	A. I. S(株)	相談の上対応	浜松市		随時		
30	浜松ケーブルテレビ株式会社	礼儀節度を重んじる	浜松市	9/4-15	10日間	1	1
31	不二工機製造(株)	金型、専用機、一品生産の為、生産システムを理解してもらいます	浜松市	8/24-30	5日間	1	
32	(株) アイゼン	エンジン部品(コンロッド)の加工設備と方法及び治具の機構について	浜松市	9/11-25	11日間	2	
33	天方産業(株)	半導体製品の提案プロセス	浜松市	9/11-22	10日間	2	
34	東海精工(株)	相談の上対応	浜松市	8/7-11	5日間	2	
35	やまと興業(株)	金属パイプ加工の基礎について学習及び現場での実習	浜松市	8/28-9/2	5日間	2	1
36	(株) コーリツ	製造会社の仕事の流れと製造工程を体験する	浜松市	8/23-9/25	10日間	1	
37	(株) ブローチ研削工業所	簡単な作業の補助	浜松市		未定	2	

38	(株)ZOA	小売業の流れについて	浜松市	8/4-17	10日間	3	
		小売業の流れ、仕入、売場作成、販売	浜松市	8/4-31	26日間	1	
		商業施設における物流及び商品管理システムについて	掛川市	8/4-17	14日間	1	
39	(株)榛葉鉄工所	オートバイマフラーの製造工程	掛川市	8/7-11	5日間	2	1
40	さわやか(株)	仕事を通じて、社会人としてのルール、マナーを身につける	掛川市	8/7-25	15日間	2	
41	(株)藤田鉄工所	改善グループにてMMチャートの実践、品証にてゲージ管理の実践	掛川市	8/22-9/16	5日間	3	
42	(株)電算インフォメーション 掛川事業所	ソフト評価の重要性を実際に評価業務を行いながら修得する	掛川市	8/21-9/22	20日間	2	
43	創輝H・S(株)	ショックアブソーバーの試作組立、ベンチテスト	掛川市	9/11-22	10日間	1	
44	袋井市役所	袋井市に住む人のサポート業務	袋井市	8/7-9/1	10日間		5
45	(株)赤堀技研	NC(数値制御)工作機械の操作による部品製造	袋井市	8/7-26	12日間	2	
46	(株)相良プラスチック工業所	プラスチック成形	袋井市	8/28-9/15	10日間	3	
47	中遠電子工業(株)	電子部品変圧器の製造工程における、検査業務	袋井市	8/21-29	7日間	1	1
48	大塚ベバレジ(株)袋井工場	省エネルギー検討	袋井市	9/11-15	5日間	1	1
49	(株)クリタス 袋井事業所	し尿処理施設フローの習得と運転管理の基本事項	袋井市	9/4-13	10日間	2	2
50	静岡県サッカー協会グループ エコパハウス	小笠山総合運動公園の多角的活用	袋井市	8/4-9/25	10日間	5	1
51	化工機プラント環境エンジニア(株)袋井事業所	汚水が浄化されるシステムを理解する	袋井市	8/4-25	15日間	2	1
52	(社福)明和会 袋井学園	知的障害者との交流を通して、福祉への理解を深める	袋井市	8/28-9/25	10日間	2	
53	(社福)明和会 知的障害者更正施設 あきは寮	心の触れ合い大切に、一緒に汗をかこう!	袋井市	9/11-29	14日間	4	
54	(社福)明和会 ワークス つばさ	明るく、元気な障害者の人達との出会い、ふれあいを知ろう。	袋井市	9/11-29	10日間	1	
55	袋井市月見の里 学遊館	IT関連の新しいワークショップで新しい企画をし、開催する。	袋井市	9/8-22	2週間話し合いによる	2	
56	(株)アクティ森	サービスから、人格形成や勤労観、職業意識や責任感の育成	森町	8/8-21	14日間	4	
57	(株)モリック	エンジン電装部品の試作、及び、評価	森町	9/11-22	11日間	3	2
58	ミネベア(株) 浜松工場	材料元素分析	袋井市	8/18-31	11日間	1	1
59	静岡製機(株)	機械製品の組立作業、又は、技術開発における測定作業等	袋井市	8/7-11	5日間	2	1
60	(株)アイテック	成形、加工工程から出荷までの一連の流れ	磐田市	9/11-22	10日間	2	
61	(株)杉山製作所	半自動機を全自動化する際の考察	御前崎市	8/17-25	8日間	2	1
62	(株)木村铸造所	鋳物製品の加工・利用から、物づくりの現場を知る	御前崎市	9/11-22	10日間	1	
63	NSKワーナー(株)	製品の試験・結果まとめ(仮)	袋井市	9/11-22	10日間	1	1
64	ポーラ化成工業(株)袋井工場	化粧品の品質管理	袋井市	9/11-15	5日間	1	1
65	(株)丸真電子	電子制御機器の試作品実験データ取り、検査	磐田市	9/21-31	9日間	1	1
66	磐田信用金庫	信用金庫業務研修	磐田市	8/7-9	3日間	3	1
67	日星電気(株)	技術補助、生産補助、電気・電子部品の製造業務	磐田市	8/4-9/25	10日間	2	
68	浜松光電(株)	電子部品の製造及び検査	磐田市	8/4-22	20日間	2	2
69	三恵(株)	物流について学ぶ	磐田市	7/20-8/10	22日間	2	
70	(株)エフ・シー・シー 竜洋工場	クラッチディスク摩擦材用ペーパーの抄造 補助業務	磐田市	8/21-25	5日間	2	1
71	ナンヨー(株)	鋳鉄の材料試験業務	磐田市	9/11-22	10日間	2	1
72	(株)小出製作所	MC、NC、フライス盤、ワイヤーカットなどのプログラム及び操作業務	磐田市	9/11-19	9日間	2	1
73	西島(株)	機械製造に関わるテーマ	豊橋市	8/4-9/25	10日間	2	
74	(株)ピコ・ナレッジ	システム開発のプロセスと実務	名古屋市	8/21-9/1	10日間	2	
75	羽立工業(株)	プラスチック製品の生産業務	湖西市	8/21-9/22	希望	2	
76	第一工業(株)	自動車部品の性能試験	磐田市	9/4-13	8日間	1	
77	大和鍛工(株)	鍛造品製造工程における品質保証と検査 測定の実習	掛川市	9/21-30	7日間	1	

78	新日本特機(株)	設計から試験機の完成迄	浜松市	8/21-9/1	14日間	1	
79	エズカ工業(株)	PC及びCADを使い産業機械の部品や詳細図を設計する。	磐田市	8/25-9/22	5日間	1	
80	(株)セイユー富士芝川工場	工場内ライン作業と品質管理業務	芝川町	未定		2	
81	矢崎総業(株)	電気電子機器製造販売	裾野市	8/4-9/25	10日間	1	
82	生活協同組合コープしずおか	体験・話し合いから「自分にとっての働くことの意義や意味」を考える	静岡市	未定		3	

表2 実習学生の学年・学科別人数

学科	一年	二年	三年	四年	計
機械		1	11		12
電子		1	10		11
情報			8	1	9
物質	1	2	6		9
大学院	1				1
計	2	4	35	1	42

1名で2社に実習した学生がいる(実人数41名)

表3 実習企業地域別内訳

市町名	人数	市町名	人数
沼津市	1	吉田町	1
静岡市	3	森町	1
藤枝市	1	磐田市	6
御前崎市	1	浜松市	9
掛川市	1	湖西市	1
袋井市	10		

表4 インターンシップ 事前研修会 出席者状況

学科	第1回	第2回	第3回	第4回	報告会	第5回	計
機械	14	12	12	10	12	9	69
電子	23	18	21	9	8	11	90
情報	14	13	11	9	8	8	63
物質	26	26	18	9	8	7	94
大学院	1	1	1	0	1	1	5
合計	78	70	63	37	37	36	321

表5 インターンシップ実習テーマの分野別分類

<p>[機械設計・開発などの分野] 機械設計. CAD による作図. 受注生産機の機構・開発設計. 試作機の性能確認. 自動車部品のモーター駆動化をにらんだ先行技術開発. 図面検証→試作→評価. 製品開発の補助作業. 鍛造. 金型の設計・製作現場を学ぶ. 開発・設計現場において開発業務を体験. 3次元 CAD を使ったパーツモデリング. エレベータ部品の設計. 開発品の試作. 製作. 評価. 健康関連機器の開発補助.</p> <p>[生産・機械加工・試作・もの作りなどの分野] 機械加工実習. クラッチディスク摩擦材の抄造作業. 自動車・オートバイ・農業機械の精密部品を切削加工. マシニングセンタによる製作. ワイヤ放電加工. オートバイマフラーの製造工程. 塑性加工(鍛造, 熱処理作業工程). 非鉄金属の各種加工. NC 加工汎用機の体験. 金型設計→加工→仕上→射出成形の体験. パイプ曲げ, ロウ付け, 溶接, 出荷等. NC 旋盤, マシニングセンタ, ホブ盤. 細穴放電加工. 洗濯機の部品製造から組立作業まで.</p> <p>[検査・測定・実験などの分野] 完成品検査. 画像処理装置. 加工条件設定のための測定分析. 試作機の性能確認. 2輪車用ショックアブソーバのテスト. エレベータ関連部品の品質調査. ショックアブソーバの試作組立, ベンチテスト. 自動車部品の性能試験. 品質管理及び試験活動のサポート. フッ素樹脂製チューブ・ウレタン製チューブの押し出し条件確立. 位置決め XY テーブルの評価実験. 自動車部品の振動特性測定. CAE による振動解析. 金属疲労分析. プレス製品の性能評価. 実験データの測定と理論値との比較.</p>
--

<p>[電気・電子関係の開発・実験などの分野] 工場内各種機器の電力集計及び分析. 工場内照明器具, 空調機器, 動力機器の使用電力集計及び分析. 電子制御機器の試作品実験データ収集. 超音波応用機器の開発設計. AutoCAD による電気回路の設計. 高速精密送り装置のモーター及びドライバーの特性解析. 微細認識用工学系における照明の解析. 電磁部品の評価検査. 各種回路の計測制御. レーザー干渉計を使用した変位測定. 太陽光発電システムの取付実習.</p> <p>[物質科学関係の開発・実験などの分野] 微生物応用による開発試験. 汚水浄化システムの理解. 水処理施設フローの習得と運転管理. 電子顕微鏡取扱業務. 環境計量における, 試料の前処理. 有機合成による香料分質の合成・精製. 化粧品品質管理. FeNi 合金の磁気特性調査. し尿の各処理工程のシステム管理と作業実習. 銅合金の透過電顕による組織観察. 緑茶カテキンの分析・整理. 水質分析.</p> <p>[情報関係などの分野] 図書館業務全般. エレベータ電気手配自動化ソフト作成. 物流業務と情報システムの現場実習. パソコンデータ入力. IT システム管理, ユーザーサポート等. PC 機器類の研究指導. インターネットを使った情報収集. ワード・エクセルなどの応用. 市内の観光スポットの写真撮影や資料収集・ホームページの作成. 3次元 CAD ソフトと遠隔ネットワークシステムの習得. データ収集プログラムの作成. データベースソフトの作成. Linux のリアルタイム制御. 発信用ソフトのデモ用サンプル制作.</p> <p>[企業経営・管理などの分野] 接客サービス. 本社として各支店との事務連絡業務. 接客</p>
--

販売・放送・番組制作における技術部門の仕事。現場見学、実習（配管、リフォーム、不動産）。PR・広報等。社会人になるための基礎教育の体験。ベンチャー企業の経営現場。作業工程管理。新製品のマーケティング。

【福祉活動・団体活動などの分野】

消火・救急訓練、消防機材点検等。お札や御守の授与、おみくじや護摩木のお授け補助、参拝者観光者に対するサービス。施設内外の整備（窓拭き、草刈り、押入れ掃除等）、重度障害児（者）の介助、散歩・制作活動等の介助。市民参加の地域福祉活動。

5. インターンシップの実施状況

先にも述べたように、5月17日から4回にわたり事前研修会を開催し、基礎的必要事項や心構えなどを説明した。第1回事前研修会ではインターンシップの概要とインターンシップに参加する上での考え方や心構え、履修等について説明を行った。第2回事前研修は「働くことの意味、大学で学ぶことの意味」について講義を行い、インターンシップそして社会人となるための心構えを学習してもらった。第3回目は昨年度の実習生受入企業である（株）エヌ・ビー中根屋の増田氏、静岡製機（株）の鈴木氏にお願いし、インターンシップに参加する上での考え方や心構えと大学としての企業研修の意義について話していただいた。また、本学就職課から、業界や企業についての基礎知識について説明を行った。第4回目は必要最小限の注意事項の説明に限定して行ったが、「意欲と積極性を高める」ことに関してできるだけの注意を喚起した。

一方で、本学と実習生受入企業等との間で双方の義務や責任を明らかにすると共に、万一の場合に備えるため実習生の受入に関して大学および企業等の双方が遵守すべき事項を列挙した覚え書きを作成し、双方が署名捺印の上、交換を行った。

また、参加学生と本学の教員との連絡を密にするため、参加申込書を提出する際、助言教員の承認をうけることとした。

インターンシップ実習は、8月4日から9月26日までの本学の夏期休業期間中に、各企業等において滞り無く終了することができた。各事業所における実習期間中には、インターンシップに対する協力の御礼と学生の実習状況の視察を目的として、インターンシップ実習生を受け入れていただいた企業等に担当教員が出向いて、実習の受入担当者と面談を行った。

最近の3年間に各受入企業等において実施したインターンシップの実習テーマについて分野別に分類したものを表5に示した。本学でインターンシップを実施した8年間の受入企業数、実際に実習を実施した企業の数、募集学生数、参加学生数、単位取得学生数の変化を図1に示した。実習を実施した企業数および参加学生数は過去6年間増加を続けていたが、本年度については参加学生数が昨年度の約半数と大幅に減少する結果となった。参加学生の学科別内訳を図2に示した。この減少の理由については、最後に言及したい。参加学生の8年間の累計は500名以上となった。

6. 事前教育の参加

昨年度から、従来課題となっていた事前教育をより充実させる目的から事前研修を4回にした（以前は2回）。これにより、学生の負担度は高いものになったが、明確な目的意識を持った学生が実習に参加することになり、その効果は明らかであった。本年度も事前研修を4回行い、その参加者数を表4に示した。

さらに本年度は、各事前研修をビデオに収録し、これを本学図書館のDVDライブラリーに登録した。これによって、事前研修当日に実験実習やその他の用事によって参加できなかった学生も、後日DVDを見て、内容に関するレポートを提出することによって、事前研修を受けたと認定されるようにした。

その結果、第1回的事前研修参加者78名の内42名が企業実習を行うこととなった。

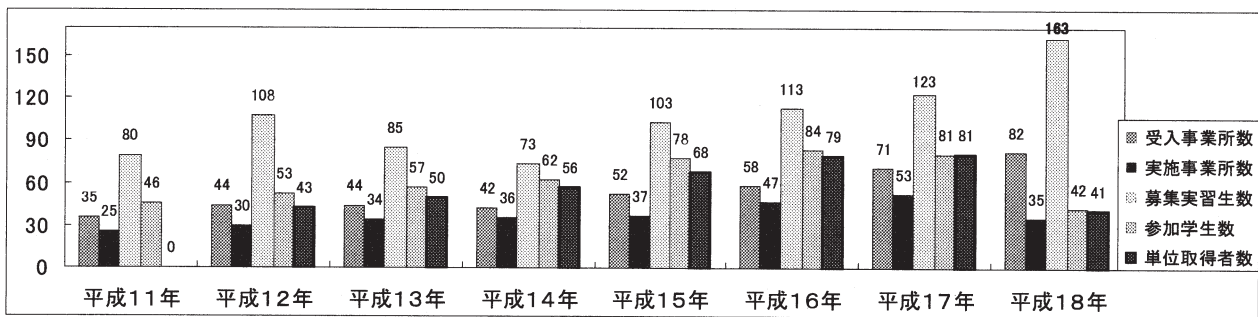


図1 受入企業等の数および参加学生数の8年間の変化

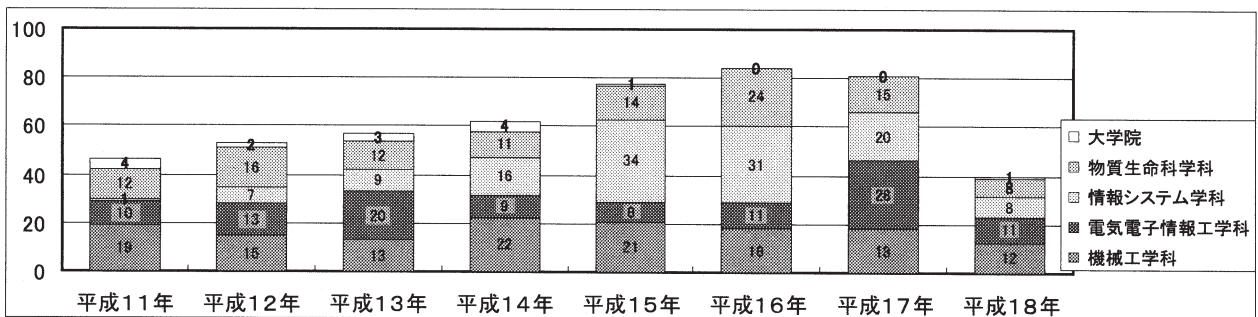


図2 参加学生数の学科別内訳(8年間の変化)

7. インターンシップで学生は何を得たか？

以下では、実習によって得られた成果、実習を行った感想、実習に関する反省、などについて学生の報告書からまとめた結果を述べる。

7.1 実習内容

学生が各受入企業等において行った実習テーマについては前記一覧表中に記載されたとおりであるが、実習テーマのみでは実習の内容はわかりにくいので、学生が実際に行った業務内容の詳細について事項別にまとめ、その内よく行われていた主要な業務内容を図3に示した。これによれば、「実験、測定、試験、分析」および「企業・業務説明、社内見学」の項目がそれぞれ14%と高く、次いで「製作、組立、加工」が11.4%と高い割合で行われていたことがわかる。

7.2 実習によって得られた成果

学生が実習終了後に提出した報告書中の「実習の成果」の項に述べられた内容を分類・集計し、まとめたものが図4-1、4-2である。図4-1は、特に実習の技術的な内容に関する成果の詳細について事項別にまとめた結果を示している。この中では「施設・機械・装置・器具の取り扱い方法」の学習ができたと答えた学生が18.5%と最多となった。次に「作業効率の重要性を認識」と答えた学生が13.6%となった。

実習によって得られた成果のうち、「企業・職場・仕事に関する認識」に関するものを図4-2に示した。つまり、成果のうち技術的内容に関するもの以外の事項を分類・集計したものである。これを見ると、「企業の現場を見ることができた」と答えた学生が15.9%、「企業や職場の雰囲気

がわかった」、「慎重かつ正確な作業の重要性」をあげた学生が9.3%と多かった。その他、学生が得た「企業・職場・仕事に関する認識」に属する成果は非常に多岐にわたり、このインターンシップで学生が得た成果が幅広いものであったことが明らかとなった。

7.3 実習に関する感想

学生の報告書で、「実習に関する感想」として記載された事項を整理し、項目ごとにまとめたものが図5-1、5-2である。図5-1は実習の内容に関する感想を、図5-2は実習を行った企業や職場、仕事などの感想について、主要な意見を示した。実習内容に関する感想としては「貴重な体験ができ、非常に勉強になった」が20%、次いで「楽しみながら仕事ができ」、「見聞きするもの全てが新しかった」などの回答が多かった。企業・職場・仕事に関する感想としては「社員の人からとても親切にもらった」、「良い環境で実習することができた」などの感想が多く、受入事業所の方々のご配慮によって、すばらしい研修が行われたことがうかがえる。

7.4 実習に関する反省

学生の報告書で、実習に関する反省として記載された事項を整理したものが図6である。その中では「何事も積極的に行動するべきだった」および「基礎的、応用的な知識が足りなかった」が最多の回答となっている。学生が研修を通して、自分を振り返り、どんな行動や勉強をすべきかを気づくことができたものとする。

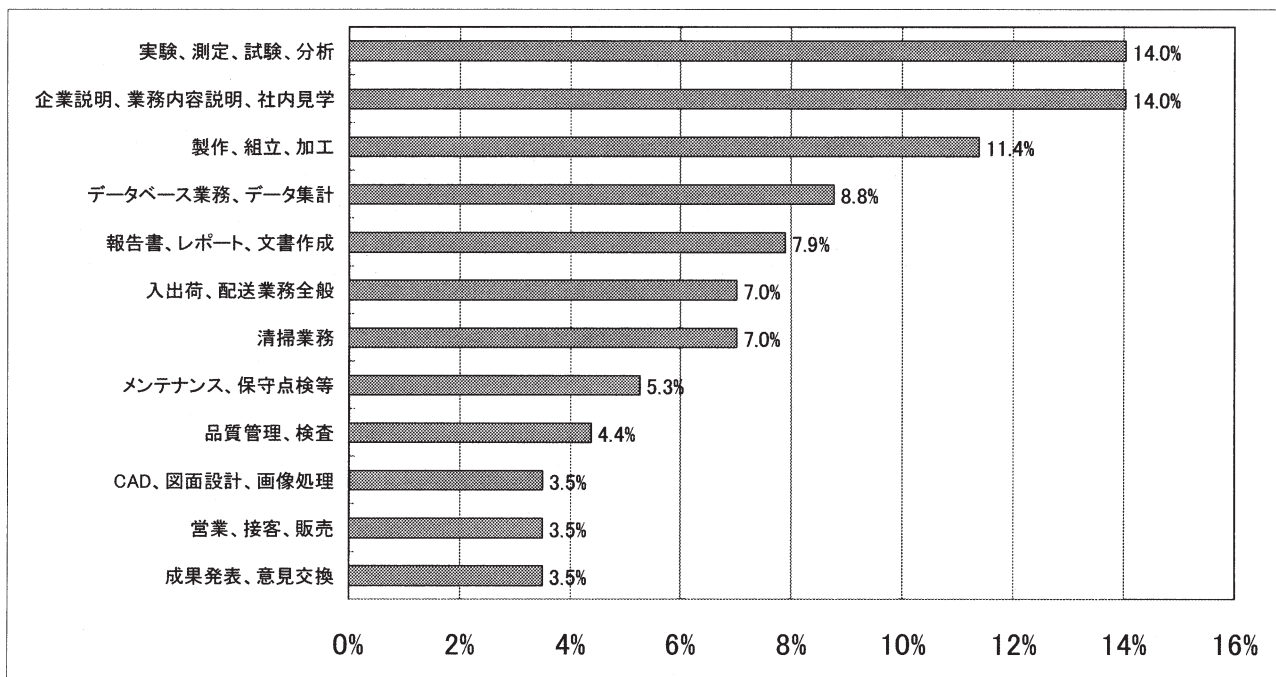


図3 実習内容の詳細

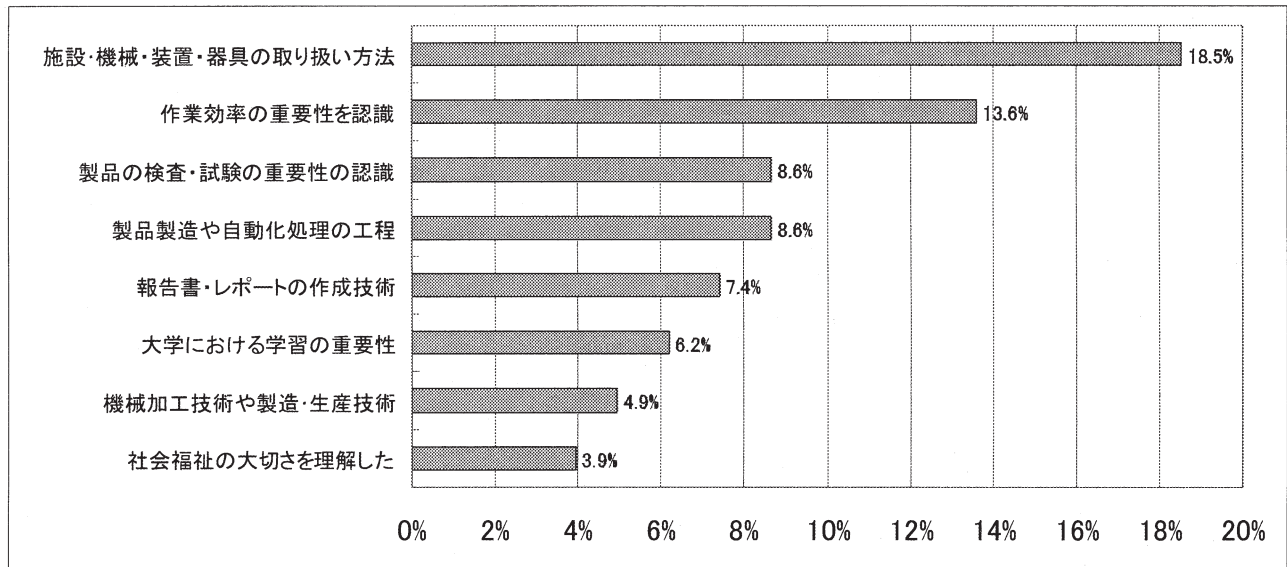


図4-1 実習によって得られた成果(技術的な学習・習得・経験など)

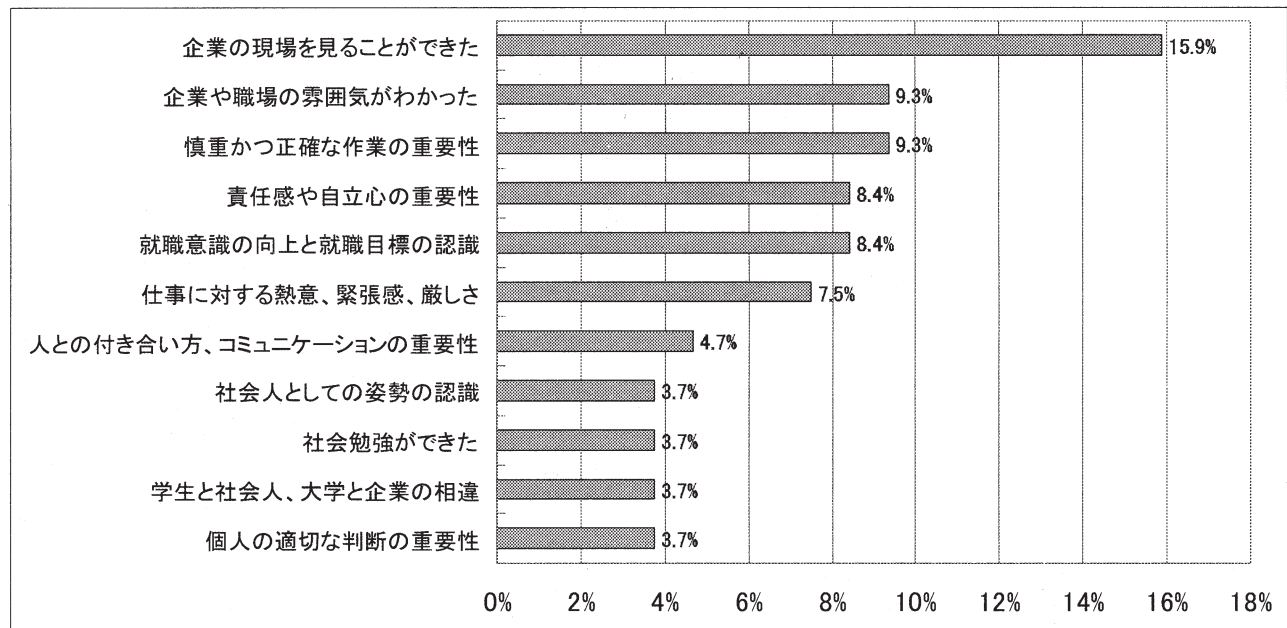


図4-2 実習によって得られた成果(企業、職場、仕事に関する認識など)

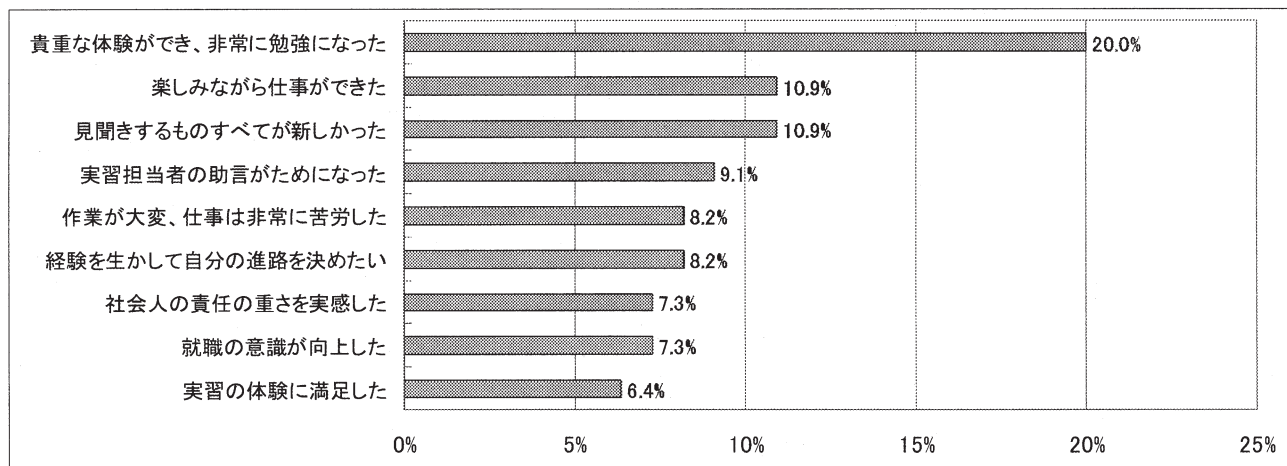


図5-1 実習に関する感想(実習内容について)

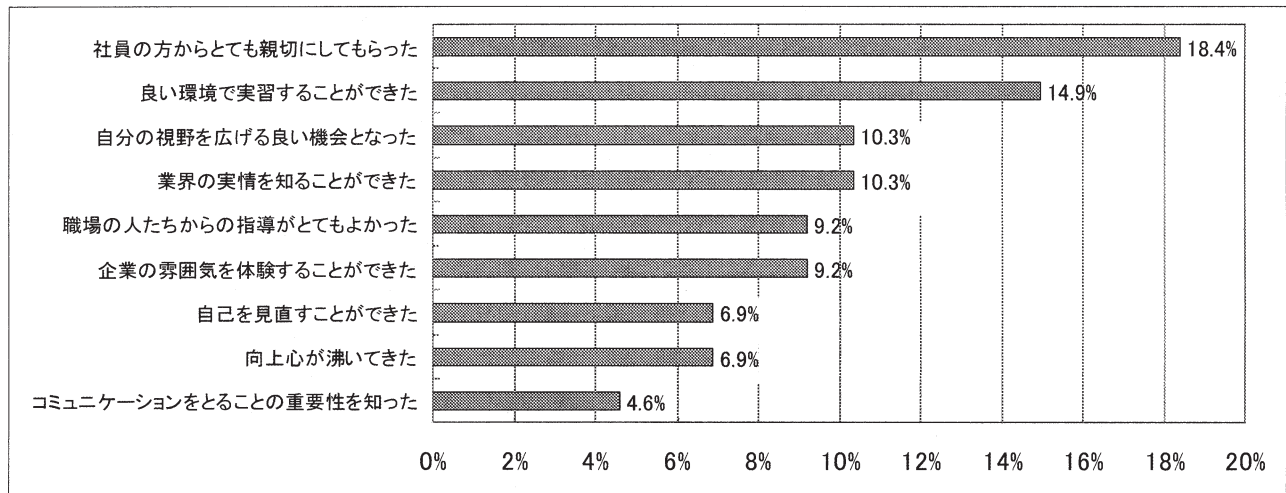


図5-2 実習に関する感想（企業・職場・仕事について）

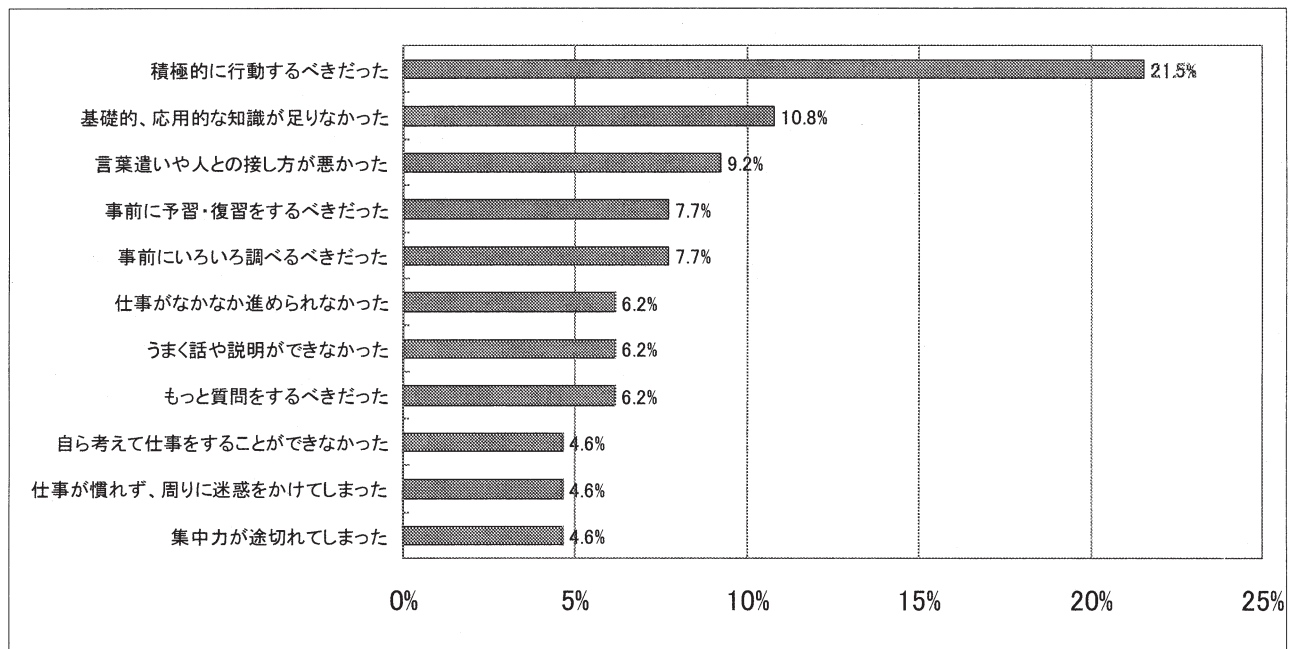


図6 実習に関する反省

8. インターンシップ実施の結果に関する検討

インターンシップの終了後に、実施状況をできるだけ詳しく調査して問題点を把握するために、受入企業等と参加学生の双方を対象としたアンケート調査を実施した。その結果について以下に述べる。

8.1 受入企業による実習生の評価

単位認定のため学生の実習状況の評価を行う必要がある。そのため企業等の実習担当者に依頼して個々の実習生の実習状況に関する評価を求めた。評価の内容は、10個の評価項目について5段階評価を求めたものである。その結果（回答数42）をまとめたものが表6である。「勤務状況」では平均値が4.5と昨年より0.3ポイント下がる結果となった。しかし、「責任感」や「全体評価」では昨年度を0.2ポイント上回る結果となった。その他の項目については昨年度とほぼ同じであった。

表7には個人別の所見として述べられた主要なものを

示している。おおむね「積極的な行動」が評価され、全般的には学生の实習状況は良好であったと思われる。しかし、一方でコミュニケーション不足や消極性なども指摘された学生もいた。

8.2 受入企業による満足度評価

受入企業等に対し、今回のインターンシップに関するアンケート調査の回答を求め、受入企業中35社の回答を得た。これらの結果を図7に示した。「実習生の実習状況は満足すべきものであったか」との問いに対しては約80%が満足またはほぼ満足との回答があった。「実習生の態度や状況について」適切あるいはほぼ適切との回答は90%以上であった。また、インターンシップ全般に関しての評価は、90%以上の回答が適切あるいはほぼ適切という結果となった。これらの結果から平成18年度のインターンシップに関しておおむね良好な評価が得られたと考える。

8.3 実習生による満足度評価

実習の結果に関する参加学生向けアンケート調査は、企業の受入態勢や実習内容の適否を問う内容を含んでいる。その結果をまとめたものが図8-1および8-2に示されている。実習内容、実習環境、成果などについて、ほとんどの学生が満足またはほぼ満足しているという回答が得られた。また、図9は実習生に対する給与や手当等の支給の状況をまとめたものである。

8.4 実習先訪問担当教員の報告

単位認定のために、学生の実習状況を調査し、大学として評価をする必要がある。本年も各企業へ担当教員が訪問し、企業側の受け入れ部門長または担当者と面談、さらに実習生本人とも面談する機会を得て、インターンシップの成果を評価した。訪問担当教員の実習生に対する感想をまとめたものが図10である。昨年同様、「真面目・一生懸命」に取り組んでいるといった感想が目立っている。次に「意欲的、積極的」といった感想が多かった。今年度の学生の特徴としては、「真面目に積極的な態度で取り組んでいた」と評価をすることができると考える。

教員からの事業所への評価は、「良く指導していただいた」との評価が高かった。特に実習生のために企業側がテーマを決め、受け入れに責任を持って取り組んでいることに満足している様子がうかがえる。これからも企業側の受

け入れを促進するためには、大学として信頼に沿う形で臨むべきと考える。

具体的評価の例

<真面目な仕事振りで好感をもたれた>

- ・毎日の作業報告がしっかり書けている
- ・会社で用意したプログラムで実習を行うようになっている
- ・外回りの仕事の実習であったが、最終日は会社の仕組みについての講義があった
- ・他大学の学生と一緒にあり緊張感があった（静岡文芸大、静岡産業大）
- ・マンツーマンでの指導が良かった
- ・人との接し方に進歩が見られた

<学生の積極性不足、受け入れ企業側へ感じた事項など>

- ・通勤に負担がかかり、身体が汚れる作業があり悩みの種であった
- ・実社会の仕事といった点では不十分な実習内容

表6 インターンシップ実習生に対する個人別評価（5段階評価、回答数 42）

評価項目	評 点					平均値
	大変良い	やや良い	普通	やや劣る	劣る	
	5	4	3	2	1	
1. 勤務状況(欠勤、遅刻、早退、などの状況)はいかがでしたか？	30	5	6	1	0	4.5
	72%	12%	14%	2%	0%	
2. 勤務態度(言葉遣い、挨拶、返事など)はいかがでしたか？	22	9	7	4	0	4.2
	52%	21%	17%	10%	0%	
3. 実習内容はよく理解しましたか？	12	20	10	0	0	4
	28%	48%	24%	0%	0%	
4. 仕事において、よく実行し、行動し、努力しましたか？	19	13	9	0	0	4.2
	46%	32%	22%	0%	0%	
5. 仕事は正確でよい結果が出ましたか？	15	15	11	0	0	4.1
	37%	37%	26%	0%	0%	
6. 創意工夫の姿勢は見られましたか？	13	8	20	0	0	3.8
	32%	19%	49%	0%	0%	
7. 仕事に対する積極性はいかがでしたか？	15	12	10	4	0	3.9
	37%	29%	24%	10%	0%	
8. 責任感をもっていましたか？	17	10	14	0	0	4.1
	42%	24%	34%	0%	0%	
9. 協調性はいかがでしたか？	15	9	15	3	0	3.9
	36%	21%	36%	7%	0%	
10. 全体評価	17	18	7	0	0	4.2
	40%	43%	17%	0%	0%	

表7 インターンシップ実習生に対する個人別評価の所見

<p><積極的な行動が評価された></p> <ul style="list-style-type: none"> ・10日間誠実に勤務してくれ、指導者からの評価も高かった。 ・大変まじめに、また積極的に仕事に取り組んで頂き良い結果を残せた。 ・朝早くから入社し、昼休み等にも貸与した参考資料を入念に読み、研修している姿が印象的。

- ・作業手順の理解から作業完了まで丁寧で迅速な仕事ができ、作業に工夫を加えること、発言ができる。
- ・明るく積極性があり、好青年という印象。向上心が強いと感じた。
- ・一つ一つの事柄を理解しようとする努力が見られた。製品に対する好奇心があることに大変関心した。
- ・積極性があり、疑問が生じたらすぐ質問もし、前向きな姿勢を感じた。
- ・勤務状況は大変良い。会社の仕組み、作業の意味を理解吸収しようと努力していた。責任感と協調性も高く、良い印象をもった。
- ・大変真面目に取り組んでくれて感謝。
- ・挨拶もしっかりしており、短期間だったが従業員とも打ち解けていた。
- ・清潔感があり好印象をもった。積極性があり、取り組む姿勢がよい。
- ・仕事の内容、役割は市の職員と同レベルで課したが、これによく応えてくれた。人当たりも良く市民サービスの実態を体感してくれたと思う。
- ・積極的に業務を遂行していた。不慣れな作業にも熱心に取り組んでいた。
- ・勤務態度は前向きで明るい。現場のきつい仕事にもよく対応した。
- ・実務担当者の指示、説明に耳を傾け、積極的に取り組んだ。現場のきつい仕事にもよく対応した。
- ・ソフト開発、パターン設計等本人が今までに経験したことのない分野に積極的に取り組んでくれた。

<一定の評価は受けたものの、問題点の指摘があった>

- ・真面目で言われた事は理解して仕事ができ、もう少し、周りの人と積極的に話ができれば一層良かった。
- ・言葉遣いは丁寧で、まじめに色々吸収しようとする姿勢が見受けられた。自分の意見を発言、表現する力を身につけるとよい。
- ・言葉は少ないが好青年でまじめに仕事をした。今後は人と接する機会をもっと会話を楽しんで欲しい。
- ・まじめで、挨拶もよくできた。最初は硬かったが終わり頃はうちとけてきた。もっと自分を出して自然にぶっつかっっていけば早く仲間に入れると思う。
- ・もう少しコミュニケーションがとれるとよかった。
- ・初対面の時より表情も明るくなった。この数日間が今後何かの役に立ってくれればと思う。
- ・素直で良い。指導したことはきちんと守った。おとなしい性格のため積極性に欠けると感じた。
- ・実習は真面目に取り組んでいた。他の研修生と比べ協調性や積極性が欠けている印象を受けた。
- ・真面目な性格だ。もう少し元気を出すこと。片付け等は指示をしなくても毎日しっかりできた。
- ・話を通して知識レベルは高い印象を受けた。仕事はそつなく実行。もう少し積極性が出るとうい。挨拶、返事はするが声が小さく元気がない印象を受けた。
- ・仕事に関し分からないところは素直に質問しながら実行した。もう少し積極性が出てくるとよい。挨拶、返事は声が小さく元気がない印象
- ・与えられた実習内容には責任感をもって臨んでいた。速さと正確さのバランスやデータまでには至らない自分で記したメモ等を大切にすることが若干望まれる。
- ・1日遅刻があったが、10日間の勤務態度は良く、仕事において良く実行し行動した。成績評価も短期間で全て良い評価になると思う。

<その他>

- ・1週間の実習だったが、取り組み姿勢、成果に不足はなかった。
- ・体力的に不安があり、空調のある部屋で作業を担当してもらった。今後の体力、耐久性の強化を勧める。
- ・溶接職場での実習であったため暑さに負けたようだ。塑性加工、溶接加工の工程中の変化に興味をもったようだ。

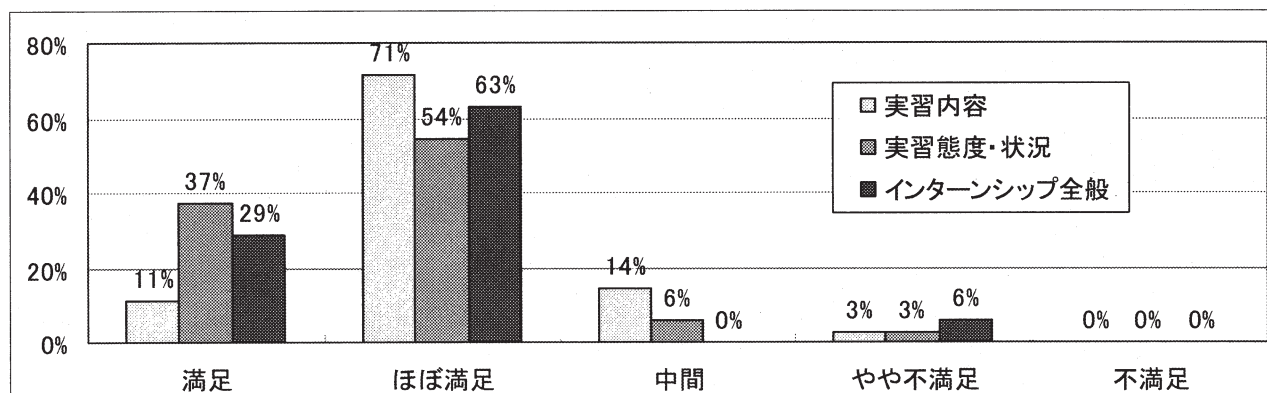


図7 インターンシップの結果に関するアンケート<受入企業担当者>

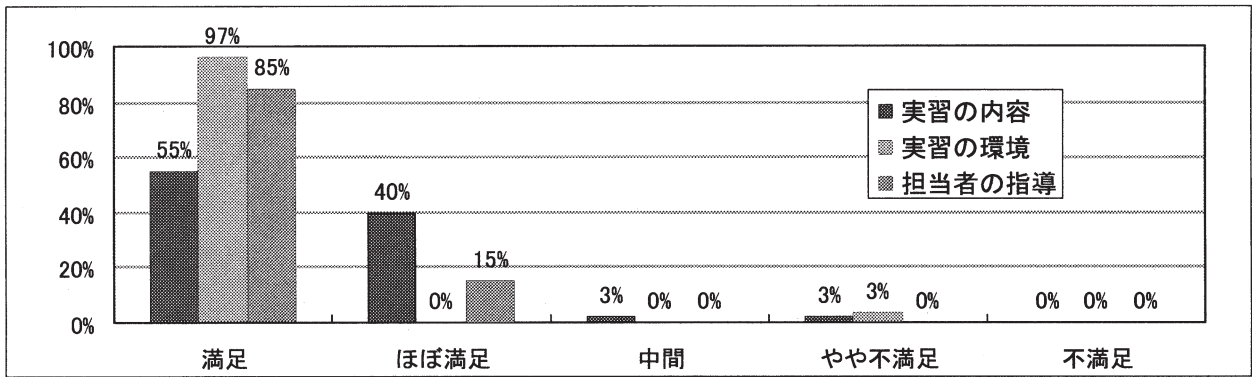


図 8 - 1 参加学生による実習内容、環境、指導内容への満足度

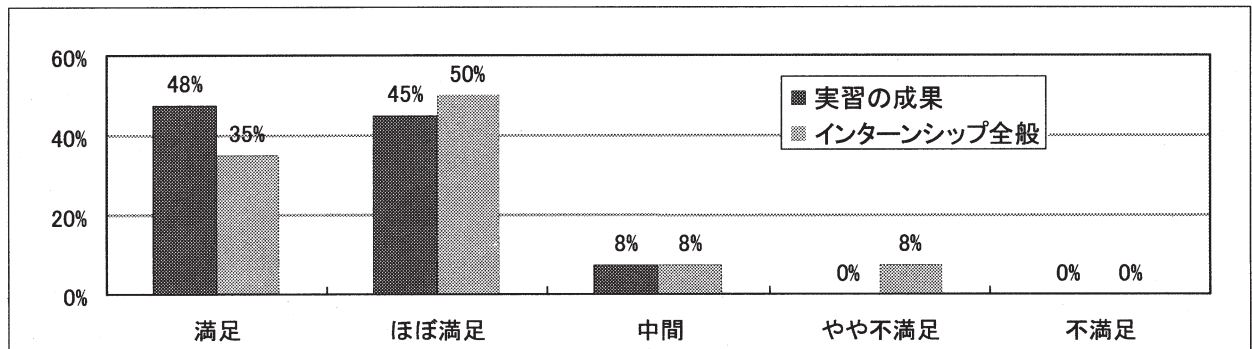


図 8 - 2 参加学生による実習の成果、インターンシップ全般への満足度

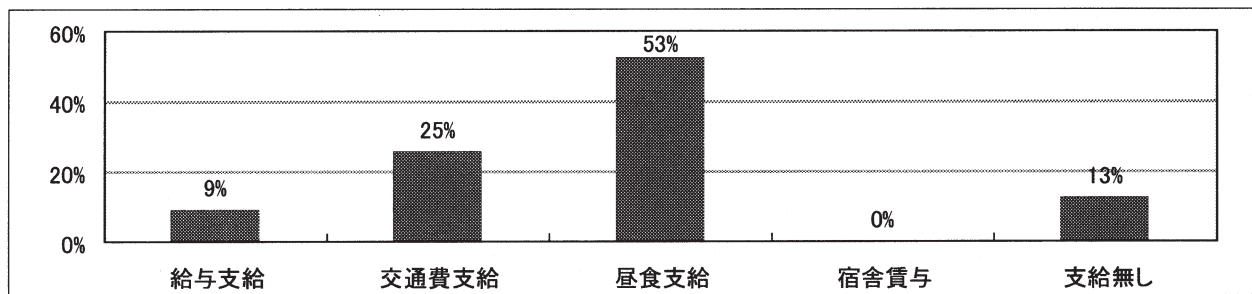


図 9 実習生に対する支給の状況

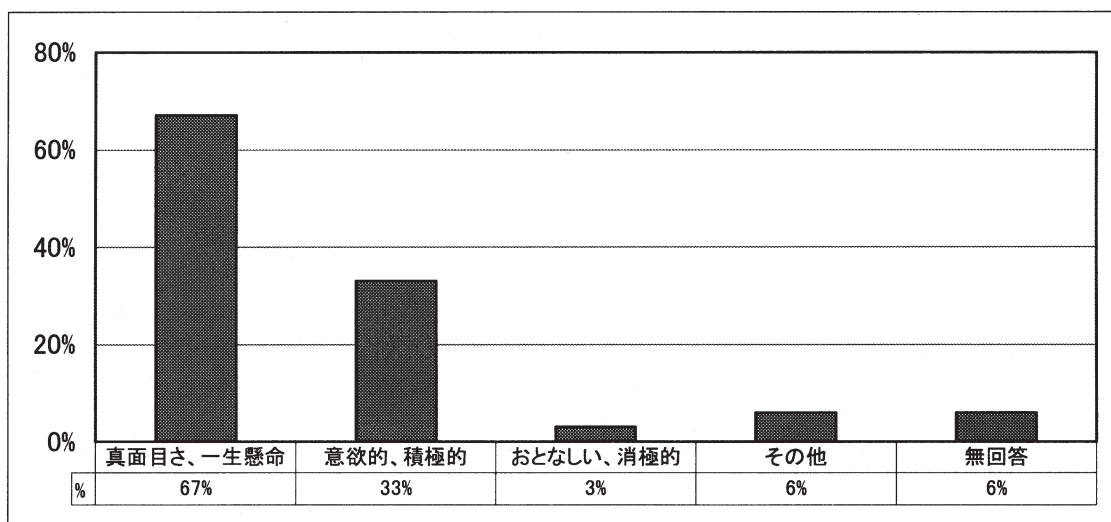


図 10 実習生に対する訪問教員の評価

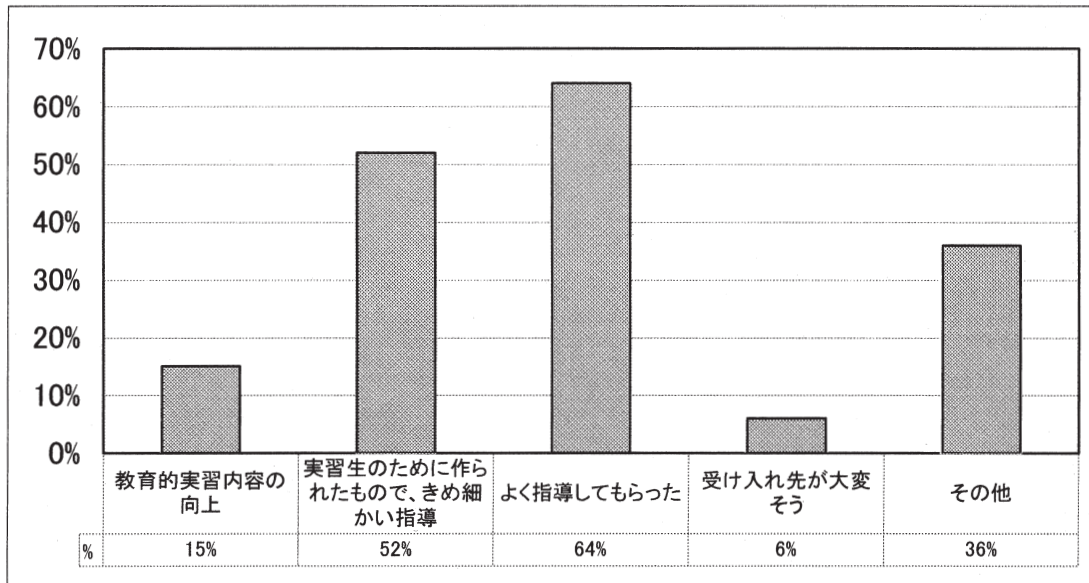


図 1 1 訪問教員の受入事業所への評価と要望

9. 平成18年度インターンシップのまとめ

9.1 事前研修の成果

今年度は、昨年度の成果を基に、インターンシップの効果を高めるために、昨年同様4回の事前研修を行った。82社の企業から163名の学生募集をいただいたにもかかわらず、第1回の事前研修には78名の学生しか参加しなかった。これは昨年度の47%に相当する数で、運営する側として当惑したのは事実である。少しでも学生数を増やし、78名からの減少を食い止めるために実施したのが、DVDによる事前研修の補講である。その結果、第1回事前研修からの減少率は、昨年度51%であったのに対し、今年度は47%とわずかながら改善することができた。

前述したように、結果的には実習を行った学生、企業のいずれもおおむね満足できるインターンシップであったことは明らかである。

9.2 いくつかの反省点と改善点のまとめ

今年度のいくつかの反省点も指摘される。

- 1) 初回の参加学生が78名と少なく、最終的な実習生は41名と昨年のほぼ半数であった。参加者数を増やす努力が必要であること。
- 2) 毎年のものであるが、募集や事前教育において相当な努力にも関わらず、「やってみたい仕事がない」などの一方的な理由から希望者があられないなど、全体として見た場合、学生の参加意欲が低い状況にあること。
- 3) 「真面目に実習をやり指示された業務はほぼ実行してはいるが、自分から質問することが少なく、自発性、積極性に欠ける」という指摘を受ける学生が少数ではあるが存在していること。

参加者数が激減した理由を考えると、まず、やらまいか教育科目群には、「創造発見」や「ボランティア」などの科目があり、これらとの競合で学生数が減ったことが考えられる。事実、これらの科目の履修者数も減少している。また、学内のクラブ活動として、ロボットコンテストやフォーミュラーカーや鳥人間コンテストなど多くのプロジェクトが動いており、積極的な学生の多くがこれらのプロジェクトに参加していることも、大きな原因のひとつであろう。インターンシップを含めた複数のプログラムに

参加している学生もいるのは事実であるが、非常に少数である。これは大きなプロジェクトに注ぐ労力が大きいため、「掛け持ち」ができなくなっているためであろう。さらに、昨年度から事前研修を2回から4回に増やしたことも、少なからず影響しているものと思われる。

いずれにせよ、学生にとってインターンシップは授業のひとつにすぎないのであり、キャリア教育の幹となるプログラムであるという認識は低いと言わざるを得ない。

今後の対策として、

- 1) 学内でインターンシップの意義や目的を再確認し、全学的に取り組む
- 2) 学生のインターンシップへの理解を高め、キャリア教育の柱とする
- 3) 受入企業等とインターンシップでの成果を共有できるよう、大学と受入企業等との間で実習内容に関する打ち合わせを可能な限り行う
- 4) 実習内容の充実のため企業等側のインターンシップへの理解を高めてもらう

これらの対策により、実習をより効果的なものとすることができるものと考えられる。

10. 8年間のインターンシップの総括と将来展望

10.1 8年間のインターンシップ実施状況の変化

本学では平成11年からインターンシップ実施を継続して8年目に至っている。本年度は事前教育を行うと共に、各年度同様に実施の際には、受入企業および参加学生の双方から詳細なアンケート調査を行ってインターンシップ実施上の問題点を調査すると共に、参加学生からは報告書を提出させ、企業の実習担当者からは学生の個別評価や所見の報告を受けて、各企業における実習内容および就業状況の把握に努めた。

10.2 インターンシップ実施8年間の総括

(1) 受入企業の募集

本学周辺の静岡県西部地区は、愛知県に連なって全国的にも有数の“もの作り”関連企業の集積地であり、実習の環境としては極めて恵まれている。本学のインターンシップの開始に当たっては本学周辺の多数の企業、商工会議所、自治体などからの積極的な支援が得られ、受入企業および

実習生の募集数は現在まで十分な数が確保されている。

(2) 参加学生の募集

昨年度まで参加する学生数は、毎年少しずつ増加していたが、今年度は大きく減少した。本学ではインターンシップは“やらまいか教育”科目群のひとつであるが、この科目群には、魅力あるプログラムが数多く用意されている。このような科目との競合の中で、学生を集めることは容易なことではない。しかし、4節に述べたように最終的に実習生が派遣できない企業もまだ相当数ある。このような企業には失望を与えるのみならず、大学との関係にも影響が生ずる可能性もあり、考慮すべき問題である。

(3) 就業体験によって学生が得た成果

7節で述べたように、学生が就業体験で得た成果は、技術的な面の習得や認識に関する事項、勤労観・職業観の育成に関する事項など非常に多岐にわたっており、インターンシップを経験した学生のうち大多数が人間的成長という点で大きな進展が見られる。このような“気づき”が今後の学生生活に生かされることは明白であり、この観点からインターンシップの目的を十分達成していると考えられる。

(4) カリキュラム上での取扱い

本学のカリキュラム上では「インターンシップ」は2年生以上に対する選択科目で単位数は1単位である。学内におけるインターンシップの重要性の認識は高まってきてはいるが、就職あるいはキャリア教育という観点からの位置づけをさらに高める必要がある。2回目の参加者（インターンシップ2）にも更に1単位を付与する案あるいは1単位を2単位にする案などもあり、今後検討されることになる。さらには、必修科目化の案もでているが、「意欲や資質の点で問題がある学生が参加した場合、受入企業に迷惑をかける」という懸念もある。現実的な方法として、他の科目と組み合わせた複数科目の中でいずれかを必ず履修するという選択必修制の採用も検討中である。

(5) 事前研修の効果

事前研修では、仕事をやる上での考え方や心構え、社会人としてのマナーなどの認識を高めることに努力した。とりわけ積極的に学ぶ姿勢を持たなければインターンシップに参加する意味はないことを強調している。その結果、企業担当者から積極性を評価される学生も多くおり、事前研修を充実させた効果が出たものと考えている。

(6) 受入企業の取り組み

8年前のインターンシップ開始当初に見られた受入企業の戸惑いの姿勢は少なくなり、将来の人材育成との高い意識もはじめている。さらに、しっかりしたインターンシップ用の教育プログラムを準備する企業も昨年より増えてきている。しかしながら、大学における教育活動の一環としてさらなる充実と努力をお願いしたい。

10.3 インターンシップの将来の展望

(1) 企業との連携の強化

インターンシップの課題の一つは、プログラムの内容をより高い教育効果を持つものとするところである。そのためには大学と企業との連携をより強化し、大学における事前教育の充実と企業における実習プログラムの充実の双方を目標とする改善を行うことが必要である。企業との連携教育をより強化して行くために、「産学連携教育協議会」を設立して協議を進めている。

(2) 学生の意欲の向上、学内での位置づけ

今後のインターンシップの発展のためにインターンシップに対する学生の意欲をより高めることが不可欠である。インターンシップ参加学生のための事前研修会を充実させたことは、学生の意欲を高め、十分な予備知識を与え

るなど、一定の成果を示したと考えられる。

今後は、就職のための実務教育、ビジネスマナー、資格取得などの一貫したキャリア教育の中に明確に位置づけられる必要があり、全学的なインターンシップに関する理解と協力が不可欠である。その中で就業意識の高揚をはかり、インターンシップに対する意欲や積極性の養成を行う必要がある。

(3) 長期インターンシップへの発展

全国的に見てもインターンシップの導入は一段落しつつある。しかし、多くの大学のインターンシップは本学におけると同様に2週間程度の短期のインターンシップを主とするものである。短期のインターンシップは学生にとって参加しやすいという利点はあるが、実質的な就業体験という意味では得るものが十分ではなく、また企業側にとってもメリットが多いとは言えない。従って、次の目標は長期のインターンシップの導入に移りつつある。本学において、現状または近い将来に採用し得る方法としては、(a) 夏期または春期の休暇期間のどちらかまたは両方を利用する方法、(b) 通常のカリキュラムの中での空き時間を利用して半期(半年間)継続する方法、(c) 卒業研究の代わりに長期インターンシップを選択する方法などが考えられる。本学においても長期インターンシップの導入に関する検討が今後されていくことになる。

11. あとがき

平成18年度は参加学生が激減した中で実施され、その成果と問題点を整理するとともに、インターンシップの実施経過および結果について本報告書にまとめた。また、平成11年から平成18年に至る8年間のインターンシップの実施結果を総括して成果反省点、改善点などをまとめ、それに基づいて今後のインターンシップの発展の方向と当面の課題を示した。さらに、将来の展望等の考察を行った。

参考文献

- 1) 文部省編, インターンシップ・ガイドブック, インターンシップの円滑な導入と運用のために, 1998.
- 2) 丹羽昌平 他, インターンシップで学生は何を得たか?—平成14年度インターンシップ実施報告—, 静岡理工科大学紀要, 第11巻, 2003, 281-303.
- 3) 丹羽昌平 他, インターンシップ実施5年間のまとめとこれからの展望—平成15年度インターンシップ実施報告—, 静岡理工科大学紀要, 第12巻, 2004, 299-320.
- 4) 丹羽昌平 他, 平成16年度インターンシップ実施報告—インターンシップの教育効果の向上のために—, 静岡理工科大学紀要, 第13巻, 2005, 95-104.
- 5) 丹羽昌平 他, 地域社会との連携による実習体験教育, 工学教育, 第53巻第4号, 2005, 23-29.
- 6) 惣田晃夫 他, 平成17年度インターンシップ実施報告—事前教育の充実による教育効果の向上—, 静岡理工科大学紀要, 第14巻, 2006, 163-174.