

目 次

巻頭「紀要の発刊に寄せて」

学長 荒木信幸

論 文

マイコンによる電気自動車用モータ駆動システム	恩田 一	1
ビタビ復号アルゴリズムを用いた位置検出法	郡 武治	7
CMOSメモリ・レジスタ回路のSEU効果	波多野 裕、鈴木剛弘	13
カスケード電圧スイッチ論理回路のSEU効果	波多野 裕	19
二足歩行ロボットを制御する組み込みソフトウェア教材の開発	玉真昭男、今釜光輔	27
平凡の原理と主観確立－参照集団はどう決まるか－	榛葉 豊	37
ニューカム問題－遡及因果と辻褃合わせ－	榛葉 豊	47
古典的誤差評価法に基づく4次以下の実系数代数方程式向け任意精度ソルバの開発	幸谷智紀	55
理工系大学生における学習動機・授業中のつまずき・学習意欲の関連	小杉大輔	63
DRAMA ACTIVITIES IN THE CLASSROOM AS A WAY TO IMPROVE STUDENTS' ENGLISH COMMUNICATIVE SKILLS	Bogdan PAVLIY	73

研究ノート

強誘電性結晶が示す誘電分散	出口 潔	79
顕微メスバウア分光装置の開発と応用	吉田 豊、早川一生、行平憲一、鈴木都文、坂田和正	83

技術報告及び資料

静岡県の精密・超精密技術のアンケート結果－9年間で全国レベルに追いついた－	大塚二郎	87
PIC16F648Aを用いたストップウォッチの設計と試作	袴田吉朗	97

レビュー

東海地震に備えた小型レスキューロボットの検討	見崎大悟	103
------------------------	------	-----

教育関連報告

中計に基づく学生実験用測定評価デバイスの設計試作	波多野 裕、林 良平、袴田尚吾、石川貴幸	111
平成19年度インターンシップ実施報告－参加学生の増加を目指して－	富田寿人、丹羽昌平	
恩田 一、森 隆比古、出口 潔、河村都美明、星 利光、山下博通、青島偉夫		117
Webデザイン特別プログラム教育のための小規模サーチエンジンの試作	幸谷智紀、竹口友大	131
ネットワークを利用した講義小テストシステムの構築	常吉俊宏、常吉高弘	139
創造体験教育「創造・発見」の平成19年度実施報告－現状の問題点と将来への提言－	関山秀雄、丹羽昌平、榊田 勝、越水重臣、土肥 稔、服部知美	
中村 壘、小栗勝也、小林久理眞、河村都美明、竹下知宏		145
サイエンス・パートナーシップ・プロジェクトを通じた理科教育連携活動	幡野明彦	153

Contents

P r e f a c e

President Nobuyuki ARAKI

Original Papers

Microcomputer controlled motor drive system for an electric vehicle	··· Hajime ONDA	1
A Location Estimation Method Based on Viterbi Algorithm	·········· Takeharu KOHRI	7
SEU Effects on CMOS Memory Register Circuits		
··········	Hiroshi HATANO and Takehiro SUZUKI	13
SEU Effects on Cascade Voltage Switch Logic Circuits	·········· Hiroshi HATANO	19
Development of Teaching Materials for Embedded Software Controlling a Two-Legged Robot	·········· Teruo TAMAMA and Kousuke IMAKAMA	27
Copernican Principle and Subjective Probability –How Do We Decide the Reference Ensemble–		
··········	Yutaka SHINBA	37
Newcomb' s Problem –Backward Causation and Posterior Consistency–		
··········	Yutaka SHINBA	47
Development of Arbitrary Precision Solver based on Classical Error Estimation for Real Algebraic Equations of Degree less than or equal to 4	··· Tomonori KOUYA	55
The relationship among the motives for learning, recognition for lack of understanding in classes, and learning motivation:in the case of college students belonging to Department of Science and Technology	·········· Daisuke KOSUGI	63
DRAMA ACTIVITIES IN THE CLASSROOM AS A WAY TO IMPROVE STUDENTS' ENGLISH COMMUNICATIVE SKILLS	·········· Bogdan PAVLIY	73

Research notes

Note on the Dielectric Dispersion of Ferroelectric Crystals	·········· Kiyoshi DEGUCHI	79
Development of Mössbauer spectroscopic microscope and its Applications		
··········	Yutaka YOSHIDA, Kazuo HAYAKAWA, Kenichi YUKIHIRA, Kunifumi SUZUKI and Kazumasa SAKATA	83

Technical Report and Materials

Questionnaire Result on Precision and Ultraprecision Technology in Shizuoka Prefecture –Catch Up with the National Level in Nine Year–		
··········	Jiro OTSUKA	87
Design and Trial Manufacture of a Stop Watch with a PIC 16F648A Micro Computer		
··········	Yoshiro HAKAMATA	97

Review

A Survey on Trends of Rescue Robots for Tokai Earthquake	·········· Daigo MISAKI	103
--	-------------------------	-----

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2008年版で、16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。

マイコンによる電気自動車用モータ駆動システム

Microcomputer controlled motor drive system for an electric vehicle

恩田 一*
Hajime ONDA

Abstract: A motor drive system for an electric vehicle is described. The drive system is controlled by a microcomputer with PWM mode. An Insulated Gate Bipolar Transistor. (IGBT) chopper is used to drive a DC motor with a battery. A very fast switching of the IGBT is necessary to improve the switching performance in accordance with least switching power losses. Several methods are proposed and experimented to achieve this improvement. A soft switching technique seems to be most useful for this purpose but which is not achieved.

1. はじめに

環境問題がクローズアップされる中, 早晚自動車は電気自動車への移行が必然と見られている. 本学電気電子情報工学科では環境にやさしく電気・電子技術満載の電気自動車を学科のシンボルとし, 対外的 PR 用に高校生の興味を引きそうなスポーツタイプの電気自動車を購入した. その名称を本学のシンボル「お理工ちゃん」からとって「お理工カー」とした. このモデル車に, 各教員の専門分野からテーマ選定した研究項目技術を付加してさらにインテリジェント化し, その名のとおり「お理工 (インテリジェント) カー」を完成させるプロジェクトを立ち上げ, 活動中である. 本報告は, そのプロジェクト活動の一環である.

電気自動車の中核はなんと言っても主動力源のモータとエネルギー源のバッテリーである. 本報告は電気自動車の動力源であるモータの駆動制御システムに関するもので, モデル車搭載のモータ駆動システムを, より高性能化することを目的としている.

2. システムの構成

2.1 モデル車の動力部構成

図1に購入したモデル車の写真を示す. 法的には「小形特殊車」に属する車で, 車両ナンバーも取得し, 市中のデモ走行も行っている. オープンキャンパス等の学内イベントには必ず出現するようにしている. 常時は事務棟ロビーに説明用の立て看板と共に展示している. 写真中の矢印は関連する技術の研究テーマで, 学科のプロジェクト員が自身の研究や卒研テーマとして推進中のものである. これらは7テーマあり, その内2テーマはほぼ完了である. 本報告のテーマも, これらの内の1テーマであるが, まだ研究途中のテーマで, 本報告は中間報告である.

モデル車の駆動部構成を図2に示す. モータは旧式になるがブラシ付きの直流直巻モータで, パワーMOSFET トラ

ンジスタで構成されるチョッパによって, 車載された 72 V バッテリーから駆動される. 図3に, モータとドライバーの写真を示す. ドライバーは密閉構造で, 外箱が風冷用の放熱板を兼ねている. モータ, ドライバー共に空冷で, 制御ボックスに設置されてブローで冷却されている.



図1 モデル電気自動車

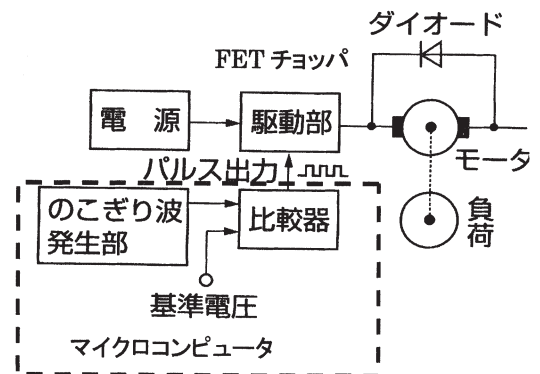


図2 モータ駆動部の構成

2008年3月4日受理

* 理工学部 電気電子情報工学科

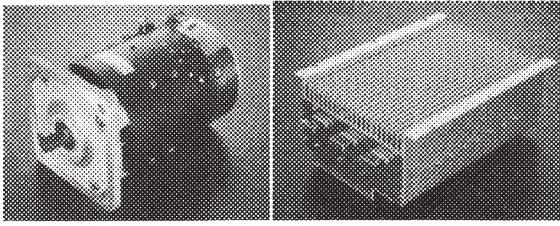


図3 モータとドライバー

2.2 システムの全体構成

本研究実験システムの全体構成を図4, 装置全体写真を図5に示す. 主な構成はマイコン部とチョップ部である.

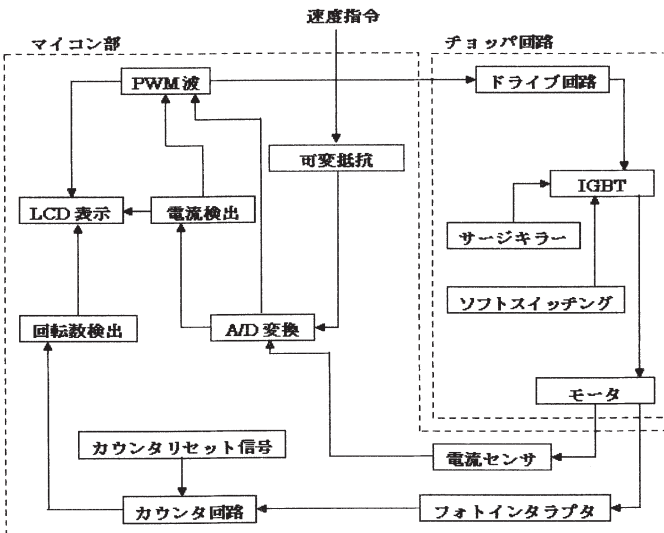


図4 システム全体構成

マイコン部の動作は下記である. その大まかなフローチャートを図6に示す.

- ①可変抵抗器から供給されるアナログ電圧をデジタル化し, これに応じてチョップの出力電圧を制御するためにパルス幅変調 (PWM) された信号を作り出す.
- ②モータ電流を非接触電流センサで検出し, A/D変換する. この電流値を監視し, 過大な電流が流れた時, チョップを停止して, 安全確保とチョップ回路保護を行う.
- ③モータの回転数を回転軸に取り付けたパルス発生器のパルス数から検出して, 液晶表示器に表示する.

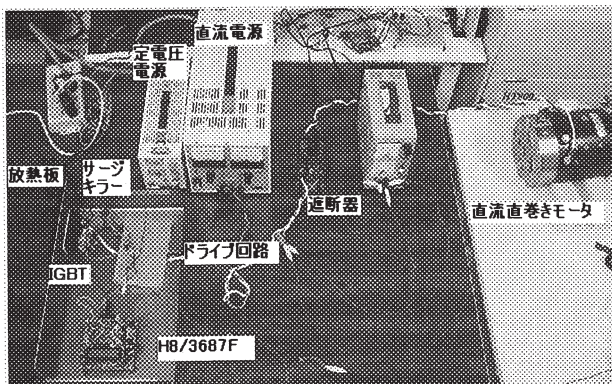


図5 装置全体写真

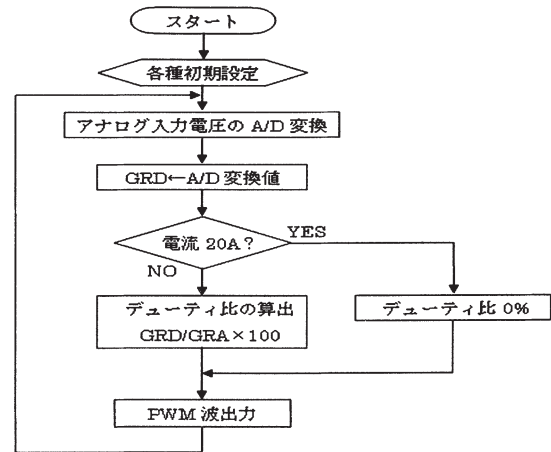


図6 マイコン制御フローチャート

一方, チョップ部の動作は下記である.

- ①マイコン部からPWM信号を入力され, この信号に応じたデューティでスイッチング素子のIGBTをON/OFFする.
 - ②スイッチング素子での損失を減らすために, ベース駆動回路, サージキラーを十分機能させる.
- チョップ部動作については別途詳しく述べる.

3. マイコンによるPWM信号の発生

PWM制御は, パワーエレクトロニクスにおける基本的な技術で, 電力制御用半導体素子の電力損失を減少させるための方法である. 半導体素子をスイッチとして扱い, そのON/OFFの比(デューティ)を変えることにより出力電圧を制御するものである. 多くの制御用マイコンはPWM信号を効率的に発生する機能を有している. 基本的にはタイマとカウンタの応用で, 図7に示すような動作を行う. 即ち, 内部クロック信号をカウンタでカウントし, レジスタGRAに設定された値になるとリセットされ, 図示の鋸歯状波を発生する. これがスイッチング周波数を決定する. パルス幅を決定する他のレジスタ, たとえばGRBに所定の値を設定すると, 図7上部FTIOBのようなパルス波形が得られる. また, レジスタの設定値をGRCのようにすると, 図7下部FTIOCのようなパルス波形が得られる. このようにして, レジスタに設定された値によって, パルス幅をゼロから最大まで変化させることができる.

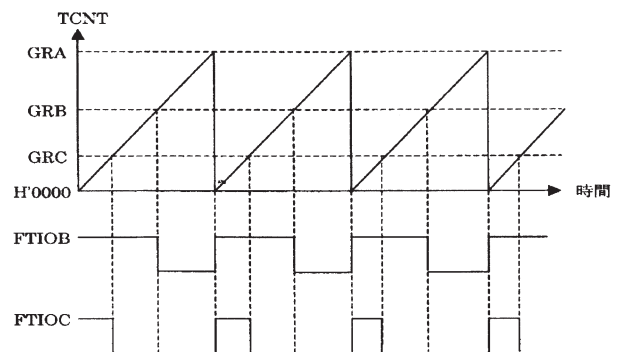


図7 マイコンでのPWM信号発生原理

4. IGBT チョッパ

4.1 IGBT 素子

電気自動車用のような大電力を制御する半導体素子としては表1に示すようなものがある. これらの中で本研究に適した素子として IGBT を選定した. その主な理由は下記である.

- ①使用電圧 (100V前後), 電流 (数十A程度) 条件
- ②スイッチング周波数 (20 kHz 前後) 条件
- ③ゲートドライブは電圧駆動で, 少ない電流で済む.
- ④モジュール化されて使い易い.

表1 各種電力用素子の性能

素子種類	最大電圧 (V)	最大電流 (A)	最大周波数 (kHz)	ゲートドライブの難易
サイリスタ	6000	2500	1	△
バイポーラ Tr	1200	800	10	×
パワーMOSFET	1000	30	100	◎
IGBT	1200	300	50	○

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) はパワーMOSFET とバイポーラトランジスタの長所を取り入れた電力用半導体素子である. 入力(ゲート駆動)はパワーMOSFETの絶縁ゲート形で電圧駆動タイプのため入力電流が少なく済む. 一方, 出力段はバイポーラトランジスタで, オン時の飽和電圧が小さいため, 電力損失が少ない. 使用した IGBT 素子の回路図と外観写真を図8に示す. 大電力用素子は回路図に示すように並列接続の帰還ダイオードと共に内部接続されてモジュール化されており, 配線や冷却器への取り付けが大変し易い形で供給されている. ここでは2素子入りのモジュールを使用し, 1つの IGBT トランジスタともう一つの素子のダイオードのみを帰還ダイオードとして利用している.

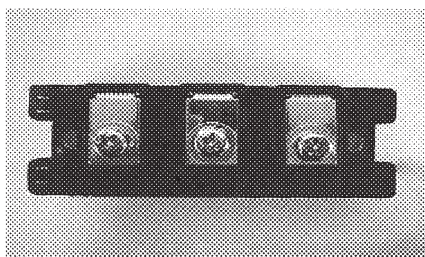
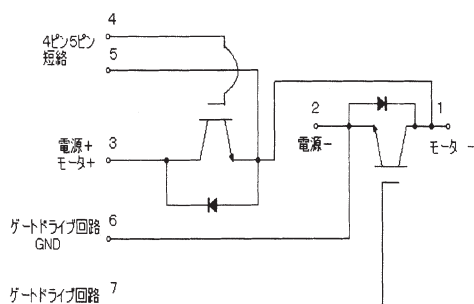


図8 IGBT モジュール

4.2 IGBT チョッパの構成とスイッチング動作

IGBT チョッパの主回路部分を図9に示す. 前述したように, IGBT 1素子と, 直列接続されたもう1素子のダイオード部分のみをモータに並列接続して, フライホイールダイオード D_{F2} としている. スwitchingのオフ時に IGBT のコレクタ・エミッタ間電圧 V_{ce} が過大になって破壊するのを防ぐため, コレクタ・エミッタ間にサージキラーを接続してある. モータに直列に接続してるリアクトル L はソフトスイッチング用の素子である.

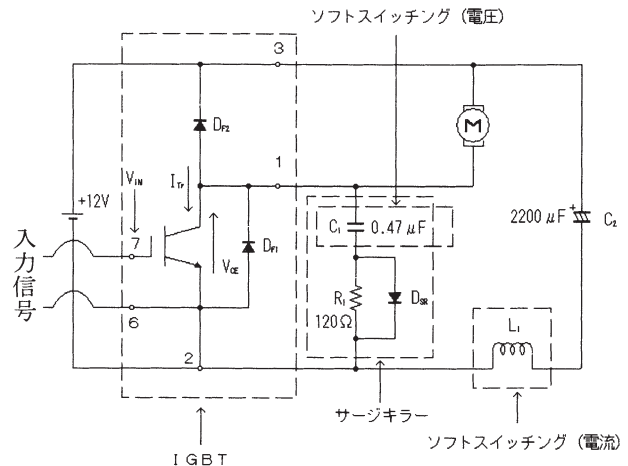


図9 IGBT チョッパ主回路

IGBT チョッパの動作を図10により説明する. ゲート電圧のオン/オフにより IGBT のスイッチングが行われる. オフ時 (T_{off}) にはトランジスタの電流 I_{tr} はゼロになり, コレクタ・エミッタ間電圧 V_{ce} は電源電圧 E まで上がる. オン時 (T_{on}) には電流 I_{tr} は急激に立ち上がり, コレクタ・エミッタ間電圧 V_{ce} は急激に下がる. しかし, オン時にも V_{ce} は完全にはゼロにならず, いくらかの電圧が残る. この時, V_{ce} と I_{tr} の積が IGBT 素子内の損失になる. これをオン時損失と言う. オフ時には, それまで IGBT に流れていた電流はフライホイールダイオード側に転流して, モータとの間で循環する.

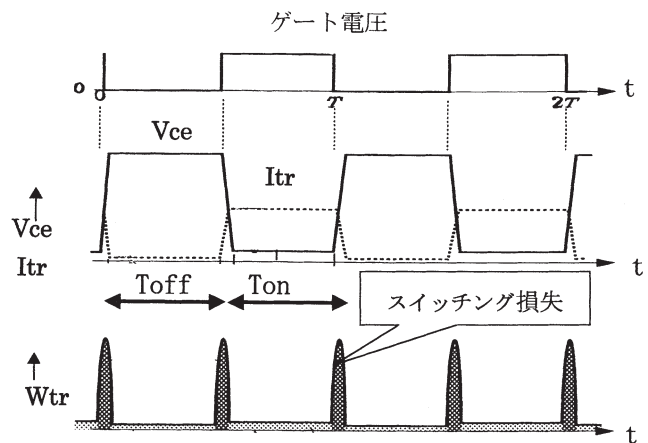


図10 IGBT の動作波形

オフ時にも素子の損失は存在するが、これは非常に小さい。オン時、オフ時の損失を合わせて定常損失と呼ぶ。

スイッチングのオン/オフ時にはスイッチング素子の電流・電圧は瞬時に切り替わるわけではなく、図10の V_{ce} と I_{tr} のようにお互いが重なり合って変化する。この時、 V_{ce} と I_{tr} の積はIGBT素子内の損失になる。これをスイッチング損失とよぶ。IGBTの素子内損失を W_{tr} とした時、 W_{tr} は定常損失とスイッチング損失の和で図10の最下部に示すような波形になる。スイッチング損失は短時間ながら、そのピーク値はかなり大きくなる。もともと、電力用半導体素子をスイッチング方式で使用するのには、素子内での損失を無くすための方法であるが、スイッチング周波数が高くなるとスイッチング損失の割合が大きくなり、無視できなくなる。

本研究では、これらIGBT素子内で発生する損失を最低限に抑えて、小形で効率の良いIGBTチョップを構築するのが大きな課題である。

4.3 素子内損失の低減方法

素子内損失を低減する方法としては下記が考えられる。

- ①スイッチングを完全に行わせるために、IGBTのゲートドライブを十分(高速、完全)に行う。
- ②スイッチング時の V_{ce} 、 I_{tr} の立ち上がりを制御する。

①は電力用素子を使用する場合の基本的な項目である。素子を完全にオンさせるためには十分な電圧・電流を高速にゲートに供給する。これにより、高速なスイッチングと、IGBTを完全に飽和領域にすることにより、オン時の V_{ce} を最低限にすることができ、損失を低減できる。特に、IGBTはゲートが絶縁型であるため容量(コンデンサ)分が大きく(2500pF)、この容量を高速に充電するために高速な電流供給が必要である。本研究ではトランジスタ2段によるゲート駆動を行った。ゲート駆動回路を図11に示す。

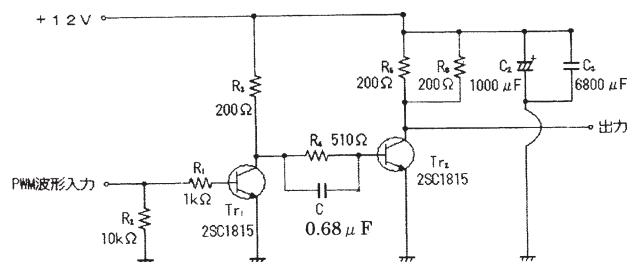


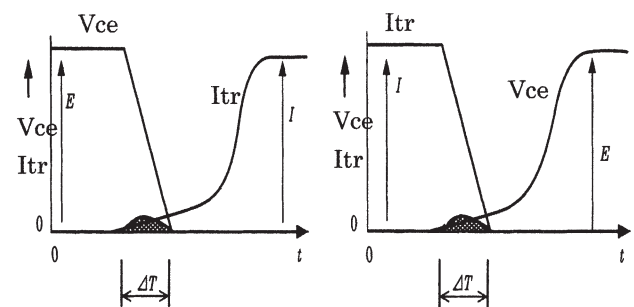
図11 ゲートドライブ回路

②は、まずスイッチング時間をできる限り短くすることが第1である。図10において、スイッチング周期 T ($T_{off} + T_{on}$)に比べてスイッチング時間が十分短ければスイッチング損失の発生頻度が低く、スイッチング損失は少ない。

しかし、最近ではスイッチングにともなう騒音を人間の可聴周波数範囲以上に選ぶことが多い。本研究でもスイッチング周波数は、マイコンのクロック周波数との関係で17.7kHzに設定している。この場合、スイッチング周期 T は56.4 μ sである。スイッチング時間は①のゲートドライブの性能とも関係するが、速くても数 μ sあるので、オンとオフの両方でスイッチング時間の割合が周期の10%程度になり、全損失の中で支配的になる。従って、この損失は積極的に低減する必要がある。スイッチング損失を低減する方法として「ソフトスイッチング」法がある。

4.4 ソフトスイッチング

スイッチング損失を低減するには、図10でスイッチング時の V_{ce} と I_{tr} の重なりを無くせばよいことになる。すなわち、IGBTのオン時には電流 I_{tr} の立ち上がりを抑え、オフ時には電圧 V_{ce} の立ち上がりを抑えることにより、重なりを減少させることができる。前者をゼロ電流スイッチング、後者をゼロ電圧スイッチングと呼び、両者をまとめてソフトスイッチングと呼ぶ。これに対して図10のような方法をハードスイッチングと呼ぶ。ソフトスイッチング時の電流・電圧波形を図12に示す。



(a)ゼロ電流スイッチング (b)ゼロ電圧スイッチング

図12 ソフトスイッチング

①ゼロ電流スイッチング

IGBTのオン時には、図12(a)で示すように、電圧 V_{ce} が急激に減少し、電流 I_{tr} が増大する。この時、図8のLで示すリアクトルをIGBTと負荷に直列に挿入しておくと電流 I_{tr} の立ち上がりを抑制できる。それにより、電圧と電流の重なり期間 ΔT を小さくでき、結果としてスイッチング損失 W_{tr} を減少させることができる。

②ゼロ電圧スイッチング

IGBTのオフ時には、図12(b)で示すように、IGBT電流が急激に減少し、電圧が増大する。この時、図9のサージキラー破線内で示すように、IGBTと並列にコンデンサを接続しておくことで電圧の急激な上昇を抑えることができる。このコンデンサの役割は、元々は電圧の急激な上昇による素子の破壊防止のためであるが、ソフトスイッチングとしての機能を持たせることができる。IGBTのオン時とオフ時の特性から、図9に示すような直列抵抗と並列ダイオードとの複合回路が良く用いられる。

5. 実験結果

5.1 IGBT チョップ動作

IGBT チョップの動作波形を図 13, 14, 16, 17 に示す. パラメータとして表 2 の条件 1 ~ 4 に示すように変更した. 条件 3, 4 はソフトスイッチングに対応するものである.

表 2 実験条件のパラメータ

条件	各低減策	抵抗(Ω)	コンデンサ(μF)	コイル(μH)
1	サージキラー(ダイオード無し)	120	0.94	-
2	サージキラー(ダイオード付き)	120	0.94	-
3	ゼロ電流スイッチング	120	1.41	1.9
4	ゼロ電圧スイッチング	120	3.76	-

オシロスコープの波形はそれぞれ上から, ①IGBT ゲート入力, ②IGBT のコレクタ・エミッタ間電圧 V_{ce} , ③IGBT 電流波形 I_{tr} とフライホイールダイオード波形 I_d およびモータ電流 $I_m (= I_{tr} + I_d)$, ④IGBT の素子損失 $W_{tr} (= V_{ce} \times I_{tr})$ である.

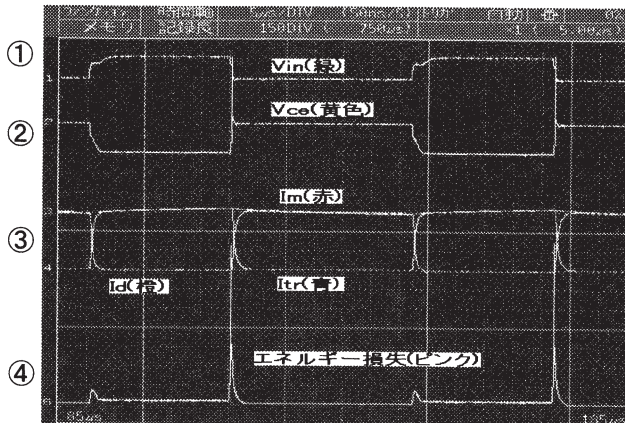


図 13 チョップ動作波形 (条件 1)

図 13 の条件 1 は, 表 2 で示すように, 通常のサージキラー付き回路で, ゲートドライブを完全に実現できているために, IGBT のオン/オフが完全に行われていることが確認できる. すなわち, ゲート信号が H レベルの時はオン時で, V_{ce} がゼロに近く (0.6V) I_{tr} は高速に最大値まで到達している. ゲート信号が L レベルの時はオフ時で, V_{ce} がゼロから急激に立ち上がってヒゲ状のサージが発生するが, 素早く電源電圧まで上昇して完全にオフ状態となり, 電流 I_{tr} はゼロになる.

性能の評価項目としては①オフ時の V_{ce} の電圧上昇最大値, ②素子損失 W_{tr} の最大値 (W), ③素子損失エネルギー (Wtr の時間積分値; W·s) である. 図 13 の場合①は 52.2 (V), ②は 840 (W), ③は 0.289 (W·s) であった.

図 14 は条件 2 の場合で, サージキラーの抵抗に並列に高速ダイオードを接続したものである. IGBT のオフ時に V_{ce} に乗るヒゲ状のサージをダイオードとコンデンサを通して高速に吸収すると言うメカニズムである. オシロスコープの図形 2 段目の V_{ce} 立ち上がりを図 13 の場合と比べてみると大分減少しているのが見て取れる. オシロスコープ上で読み取ると 30V で, 図 13 の場合の 6 割程度に減少しており, これにともなって, IGBT 素子損失 W_{tr} も 0.46 (W) に減少している.

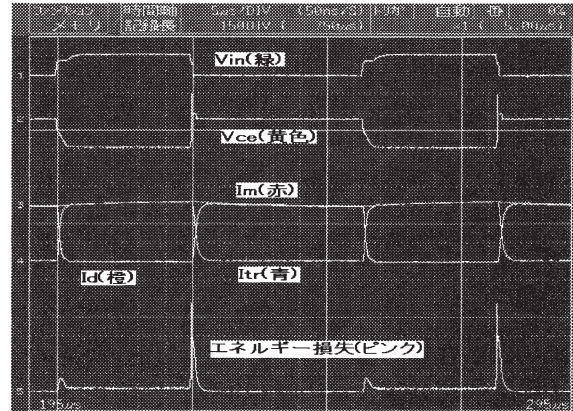


図 14 チョップ動作波形 (条件 2)

図 15 に, 各条件における評価結果をまとめてある. 条件 2 では素子損失エネルギーも条件 1 の場合の半分近くになっており, サージキラーのダイオードは大変有効であることが解かる.

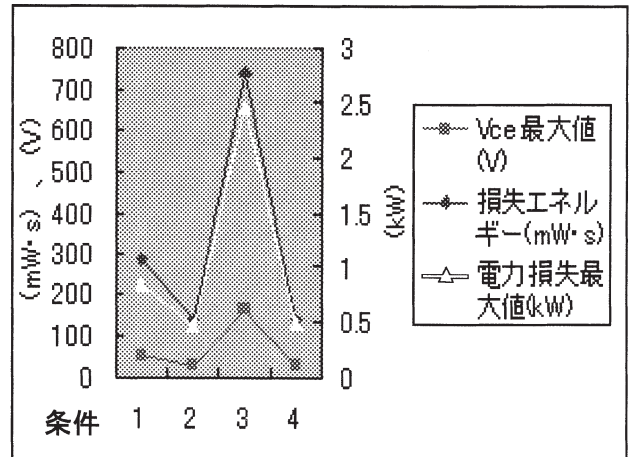


図 15 各条件下での評価結果

図 16, 17 は表 2 の条件 3, 4 に対応するソフトスイッチングに関する実験結果である. 図 16 はゼロ電流スイッチングを実験したもので, 図 9 で示したようにリアクトル L (1.9 μH) を入れたものである. オン時の電流立ち上がりは抑制でき, オン時の素子損失がゼロ近くまで抑制できたが, オフ時の V_{ce} が回路の共振により大きく振動しており, ここでの素子損失が非常に大きくなってしまった.

回路内の浮遊容量や浮遊インダクタンスを含めて詳細な検討をした上で、リアクトルの大きさLを決定する必要がある。

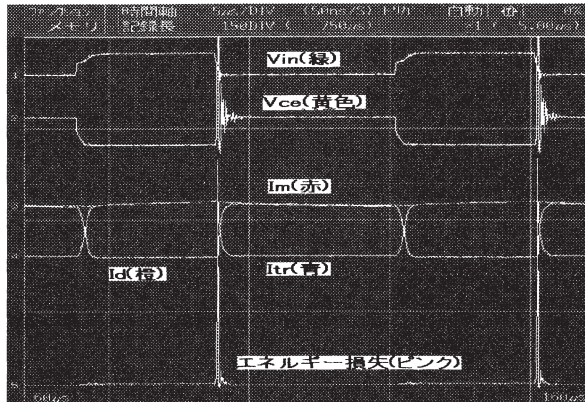


図 16 チョップ動作波形 (条件3)

図 17 はゼロ電圧スイッチングの場合である。IGBT のオフ時に V_{ce} の立ち上がりを送らせてスイッチング損失減少を狙ったものであるが、効果はほとんど見受けられない。表 2 で示した並列コンデンサ容量がまだ少なく、 V_{ce} の立ち上がりが抑制されていない。10 μ F 程度が必要かと思われる。

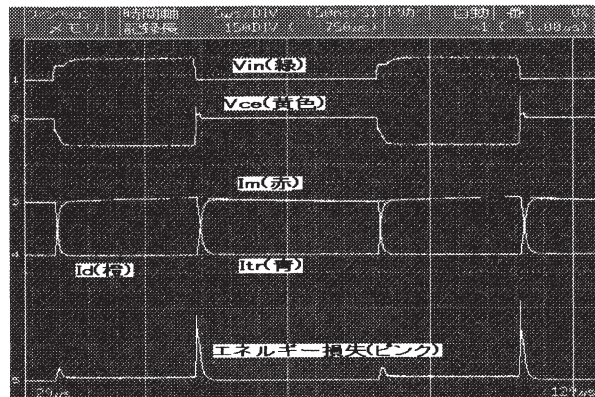


図 17 チョップ動作波形 (条件4)

5.2 モータ制御特性

マイコンからの入力により IGBT チョップを用いてモータを駆動し、オープンループで回転数制御した。また、モータの回転数を測定しマイコン付属の液晶表示に表示した。モータ印加電圧と回転数の関係を図 18 に示す。回転数はモータ軸につけたセンサからパルスで検出した測定値と、市販のデジタル回転計で測定したものを両方に表示した。

モータはマイコンに制御されてスムーズに回転し、所定の 1800 (rpm) まで直線的に制御できていることが確認された。回転し始める電圧がゼロボルトではなく、3 V 程度であるのは始動トルクが大きく、かなりの始動電流を必要とするからである。また、マイコン内で測定した回転数も誤差無く正確に回転数を検出できていることがわかる。

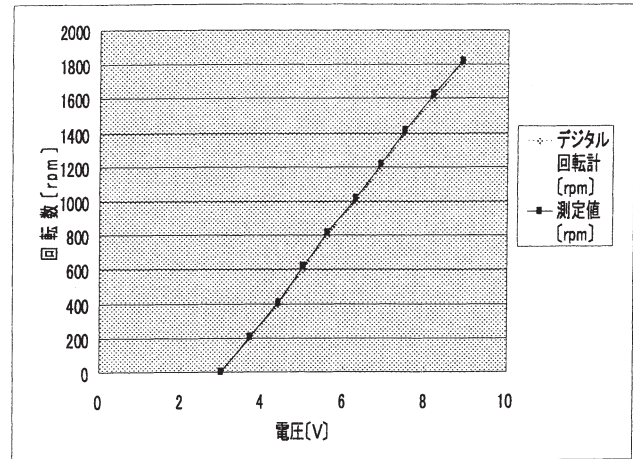


図 18 モータの電圧—回転数特性

6. まとめ

6.1 結果のまとめ

制御用マイコンを用いて大容量 IGBT チョップによる DC モータ駆動の基本的な技術を確立することができた。スイッチング損失を低減するため種々の方法を検討し、概略の傾向を把握することができた。

6.2 今後の課題

さらなる高性能化のために、下記を検討する必要がある。

(1) スwitching損失の低減

ベースドライブをさらに高速化してスイッチング時間を短縮化し、今回は不十分だったソフトスイッチングを完成させること。そのためには、多数のコイルやコンデンサを用意して実験的に確認するのは非効率であるので、シミュレーションによる検討を導入する。

(2) 電流制御系の構築

電流制御系の導入により、より高速なトルク制御が可能になり、過電流対策もより容易になる。

(3) 耐ノイズ対策

回転数検出カウンタの誤動作等が発生しており、ノイズを出す側と受ける側両方からの対策が必要。

本研究は 2007 年度卒業研究として実施したものである。担当した卒研生の佐野祐康君、寺田敬仁君、山下圭介君、山下洋輝君の努力に感謝致します。

参考文献

- 堀 桂太郎；“H8 マイコン入門”，東京電機大学出版局 (2003 年)
- 岡昭雄；“パワーエレクトロニクス入門”，森北出版 (1997 年)
- トランジスタ技術 Special No.85 改訂*実践パワーエレクトロニクス入門，CQ 出版 (2004 年)
- 島田義人；H8/Tiny マイコン完璧マニュアル，CQ 出版 (2005 年)

ビタビ復号アルゴリズムを用いた位置検出法

A Location Estimation Method Based on Viterbi Algorithm

郡 武治
Takeharu Kohri

Abstract:

A novel location estimation method based on the Viterbi algorithm has been developed. With this method, maximum likelihood location estimation is achieved at several 100 nsec. In addition, the location estimation terminal can be composed of a single LSI.

Since the Viterbi algorithm has two functions, noisy signal detection and a maximum likelihood sequence path, this method can be applied to location estimation. The scale of the execution circuit is reduced with the survivor-correction because redundant data is erased.

With the proposed method, the location estimation error is decreased by 60% or less compared with the conventional estimation method with which a base station detects the location of a signal.

In this paper, the principle of the proposed method is discussed, and estimation error improvement is verified by computer simulation in a 16×16 array model. Finally, the circuit scale is estimated.

1. はじめに

人や物を認識するユビキタスコンピューティングはしだいに広がりつつある。なかでも、位置検出は中核の技術として、これまで、さまざまな位置検出法が提案されている。

位置を検出するためのセンシング手法としては、RSSI (Received Signal Strength Indicator)、TDA (Time of Arrival)、TDOA (Time Difference of Arrival)、AOA (Angle of Arrival) などがあり、検出された距離又は角度情報を用いて、位置が算出される。

位置を推定する方法としては、三角法による方法が多く用いられているが、注目されている方法として、多数の固定ノードにおいて、移動端末からの信号を同時検出し、確率関数である尤度関数に換算し、最尤推定により、移動端末の位置を推定する最尤位置推定方法がある¹⁾⁶⁾。

この方法は、多数の固定ノードから送信された信号を移動端末が受信し、移動端末位置を最尤推定する方法を用いても、同様に実現することができる。

しかしながら、これまで提案された位置推定方法では、クラメール・ラオの下界を使った方法など、非常に最適位置を見つけるまでの手順が多く、膨大な演算処理をする必要があった。また、フィルタリングして、存在しないものを削除し、残りの観測点データを推定値する方法も考えられているが、致命的な誤りに陥る可能性があった。

筆者は、ビタビ復号アルゴリズムにおける最尤推定法とその回路構成に着目し、位置検出に適合させることを考え

た。

ビタビ復号は、受信した信号系列から最適な符号系列を最尤検出する方法であり、適合するルート選択と尤度判定を併せ持つアルゴリズムである。

提案方法は、ビタビ復号で扱う情報を位置情報に置き換え、同一アルゴリズムによるハードウェアで最尤位置推定を行うものである。このことにより、これまでのビタビ復号回路と同様に、1つのLSIで高速に位置の推定ができ、数10MHzに一回最尤位置推定することも可能である見通しを得た。

本文では、基本動作について述べ、次に計算機シミュレーションにより、実現性を確かめ、その特性をもとめる。最後に実現のための回路規模の推定を行い、FPGAの現状と比較し、実現可能であることを示す。

2. 提案方法の動作原理

図1は提案する位置検出モデルを示したものである。

本モデルは、移動端末と設置位置が固定した固定ノードから構成される。

各固定ノードは、受信する移動端末からの信号の電力が伝送距離に比例することから、移動端末までの距離を推定することができる。移動端末の位置推定は、この全固定ノードにおいて検出した距離情報を基に、ビタビ復号アルゴリズムを用いて行われる。

図2は具体的な動作原理を示したもので、(a)は配置した固定ノードと移動端末までの距離の関係を示し、(b)は

各固定ノードにおいて行われる、最適パス選択の動作を示している。

次のように動作する。

- ① 移動端末から送信された信号は、全固定ノードで受信され、受信レベルから移動端末からの距離 d_0, d_1, \dots, d_n が測定される。
- ② 送信された信号は、 t_d 間隔で受信され続ける。
- ③ 移動端末は最大移動距離が設定され、次の送信までの間に動ける最大範囲は、固定ノード 1 区間の距離を超えないものとする。本例では、固定ノード n_0 近傍にいる移動端末は次の送信タイミングでは $n_0, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ の近傍にいるはずである。
- ④ 集計局では検出距離情報 d_0, d_1, \dots, d_n と過去の位置履歴から、ビタビアルゴリズムにより、移動端末位置を最尤位置検出する⁷⁾。

提案方法では、過去の位置履歴から、移動端末位置を最尤位置検出する方法として、ビタビアルゴリズムを用いている。

一般的なビタビ復号アルゴリズムでは、送信側において、原データを符号化レジスタに逐次蓄積し、論理演算式により、符号化信号を生成送信される。受信側では、受信信号から論理式に合った符号化信号列を最尤推定し、元の原データが再生される⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

このアルゴリズムは位置検出においても、同様に考えられる。前述の符号化レジスタの状態を固定ノード位置に置き換え、移動端末が固定ノード位置を遷移していくように考えればよい。

一般的なビタビ符号化回路では、状態数は拘束長内にある符号化レジスタ数である。これに対し、提案する位置検出方法では、状態数は全固定ノード数になる。

また、状態遷移は一般的なビタビ符号化回路において逐次入力される原データにより生じるのに対し、提案する位置検出方法では、移動端末移動により生じる。

状態遷移の一回の遷移に取り得るパス数は、原データの元数であるのに対し、提案方法では、固定ノードの 1 回検出タイミングあたりに移動端末が動きうる範囲内にある固定ノード数になる。

一般的なビタビ復号と提案方法を比較すると、表 1 のようになる。

表 1 ビタビ復号と提案方法の比較

	一般的なビタビ復号	提案する位置検出方法
状態遷移	符号化レジスタの状態	固定ノードの位置
一回の遷移に取り得るパス数	原データの元数	移動端末が動き得る範囲内にある固定ノード数

図 2(b) は、移動端末の移動位置である全ての固定ノードに状態を置き、全ての状態遷移パターンをトレリス線図で示したものである。受信側では、移動端末がこのトレリ

ス線図にそった動きをするはずであるので、各固定ノード毎に可能性のある移動位置系列の尤度 $W=w_0w_1w_2 \dots w_{n-1}$ を比較し、最尤な移動位置系列を選択する。判定基準である尤度は、各固定ノードにおいて測定した距離情報 $Y=y_0y_1y_2 \dots y_{n-1}$ を用いて、演算される。

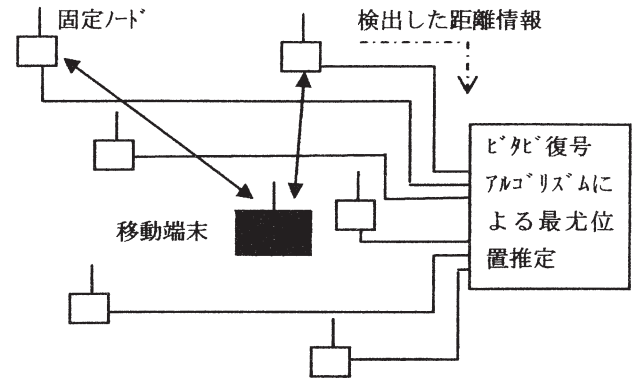
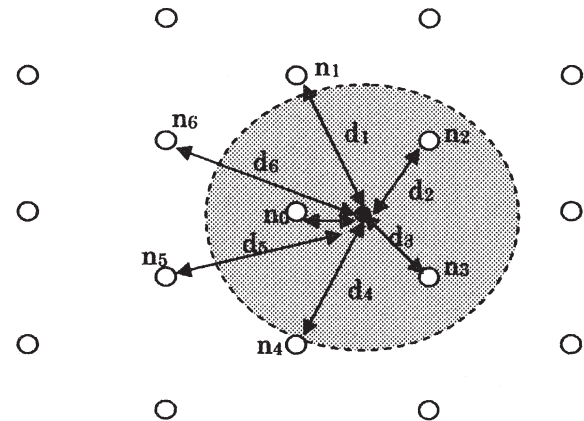
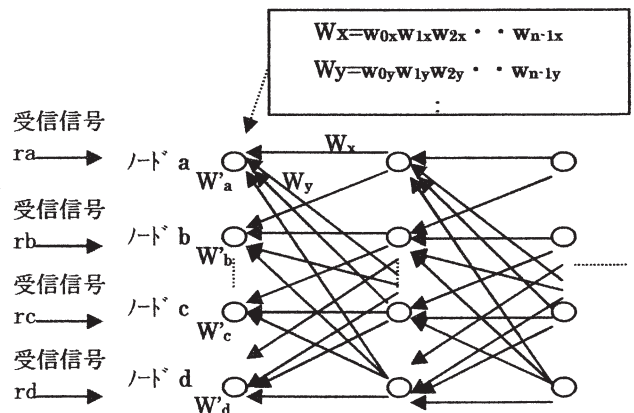


図 1 提案する位置検出モデル

- : 移動端末
- : 固定ノード
- (dashed circle) : 1 回の検出タイミング内に移動端末が移動する範囲



(a) 正六角形ゾーン構成に配置した固定ノードと位置端末
移動端末が移動可能な 7 者から比較選択



(b) トレリス線図
図 2 動作原理図

移動端末と固定ノードとの距離 y_1, y_2, \dots, y_{n-1} は、受信信号 $r_0, r_1, r_2, \dots, r_{n-1}$ のレベルが距離に比例して低下することから、受信信号のレベルを用いて推定することができる。

尤度関数はその状態の最もらしさを示す確率関数である。一般的なビタビ復号では、受信した信号があいまい度を示す直接的な情報であり、軟判定データとして尤度情報として直接用いて最尤判定を行っている。これに対し、提案する位置検出法では、尤度関数を各固定ノードにおいて検出された受信信号のレベルから換算された距離情報を用いて、位置の最尤判定を行っている。

尤度関数は確率関数であり、直接検出した受信信号だけではなく、従って、最もらしさを表現するものであれば、なんでもよいことになる。

式(1)に、提案する位置検出に用いる尤度関数を示す。

各固定ノードにおける尤度関数は受信信号のレベル r_i から換算された距離情報である尤度 y_i を用いて、移動端末の移動経路パスの尤度 w_i が求められる。尤度関数は条件付確率 $P(Y|W)$ として、表すことができる。

$$P(Y|W) = \prod_{i=0}^{n-1} p(y_i|w_i) \quad (1)$$

各パスの尤度関数は、ユークリッド距離により求められ、このような量をメトリック (metric) と呼ぶ。

ビタビアルゴリズムの特徴は、各パスが交差する所において、それ以降両パスの記録を残しておく必要はなくなることから、生き残りパスを選択し、尤度関数の値が小さい方のパスを捨ててしまうことにある。このようにすることにより、演算量を大幅に少なくしている。

図3は回路構成を示したもので、状態毎に、メトリック演算をする ACS 回路と過去のパスを残しておくパスメモリから構成され、各状態において、生き残りパスを選択するたびに、その系列の過去の系列データを選択記録するようにしている⁸⁻⁹⁾。

ビタビ復号アルゴリズムの長所は、各パスが交差する所において、それ以降両パスの記録を残しておく必要はなくなることから、生き残りパスを選択し、尤度関数の値が小さい方のパスを捨ててしまうことにある。このようにすることにより、演算量、回路を大幅に少なくしている。

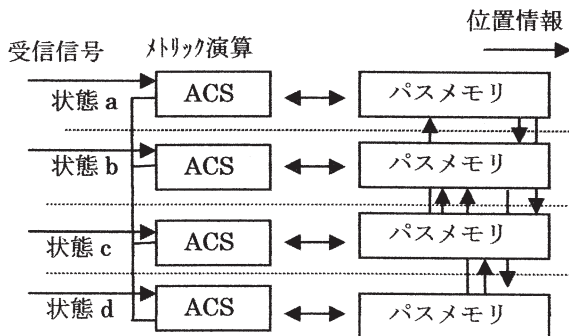


図3 位置検出回路構成

3. 特性の評価

(1) 評価モデル

信号の減衰を距離測定に用いた方法は、次のように求めることができる。

自由空間において、無線信号の信号レベルの減衰は、式(2)のように距離に比例し、電力では距離の二乗に比例することになる。

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (2)$$

L: 自由空間減衰 (信号レベル)

d: 距離

λ : 信号波長

実環境では、マルチパス伝搬の影響があり、式(3)に示すように、減衰係数を用いて表すことができ、自由空間では、 $\alpha = 2$ になる。

$$P_r = Kd^{-\alpha} \quad (3)$$

P_t : 送信電力

P_r : 受信電力

α : 減衰係数

K: 定数

距離 d は、式(3)を用いれば、式(4)のように求めることができる。

$$d = (P_r/K)^{-1/\alpha} \quad (4)$$

ここで、実際の機器で検出される受信レベルは、受信増幅器の雑音加わり、式(5)のようになる。

$$P_r = P_t + n$$

$$d_r = ((P_t + n)/K)^{-1/\alpha} \quad (5)$$

P_r : 実測受信信号電力

P_t : 送信信号電力

d_r : 実測受信信号電力から算出した距離

このように考えると、受信電力による距離推定の誤差は、マルチパス伝搬によるレベル変動に受信端末の雑音加わったものとなる。図4にモデルを示す。

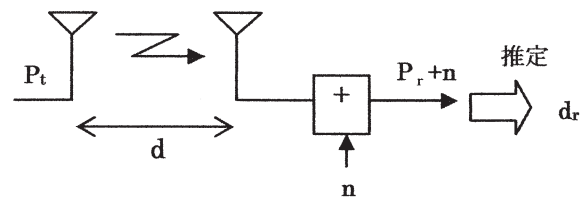


図4 距離推定演算モデル

(2) 計算機シミュレーションによる評価

(a) 自由空間における特性

マルチパス伝搬の生じない、自由空間に、固定ノードを等距離配置した理想的なモデルを仮定する。

固定ノードを正六角形配置し、移動端末が、固定ノード内を自由に動き、移動端末が送信する信号は全固定ノード

が受信できるモデルとする。

全固定ノード間の距離は等距離であり、距離はすべて1とする。

局は図1に示すように64台(16x16)としてシミュレーションする。

条件として、

- ・ 移動端末が検出タイミングの間に移動できる最大移動距離は1とする。
- ・ 全固定ノードの受信機は同じ性能を有する(同一電力の無線信号を受信すると、同じS/Nの検出信号が得られる)。
- ・ 移動端末と固定ノードの距離は、移動端末から送信された信号を各固定ノードが受信し、受信電力から距離に換算するものとする。

ここで、距離は式(5)において減衰係数を2とすることにより推定できる。

特性は、受信機の性能により異なり、これをパラメータとする。

性能を決める雑音 n は、受信増幅器のNFから求められる。本シミュレーションでは、移動端末と固定ノードの距離が1の所における固定ノードの受信機の検出信号 S/N から算出される雑音 n を用いる。

式(5)において、 $P=1$ 、 $K=1$ と簡略化し、シミュレーションを実施した。

簡略化したモデルでは、距離と受信機のS/N関係は図5のようになり、距離1以下も定義できる。

図6はS/Nをパラメータとして、距離検出誤差を示したものである。

本提案方式と比較するため、従来方式と比較した。

従来方式とは、全固定ノードの内、最も大きい受信電力を示す固定ノードの位置を移動端末の位置とする最も一般的なモデルである。

図からわかるように、以下のことがわかる。

- ① S/N=-15dB以下になると、平均位置検出誤差は、提案方法、従来方法どちらも差がなくなる。
- ② S/N=0dBになると、両者に差が表れ、平均距離誤差が5から2に60%程度改善されていることがわかる。
- ③ S/N=10dB以上になると、再び両者に差がなくなる。

①については、移動端末近傍の固定ノードを含むすべてのノードにおいて、検出信号が雑音に埋まり、全く信号が検出できなくなるため、どちらの方法も検出不可能になっている。

②については、提案方法による最尤判定の効果が表れ、改善されている。従来方法では、雑音の影響により、移動端末から遠い固定ノードの受信電力が近傍固定ノードの受信電力以上になり、距離を誤って検出されることにより、大きな距離誤差を生んでいると考えられる。

③については、回線品質が高いため、どちらの方法も誤判定する確率が少なくなり、差がなくなっている。

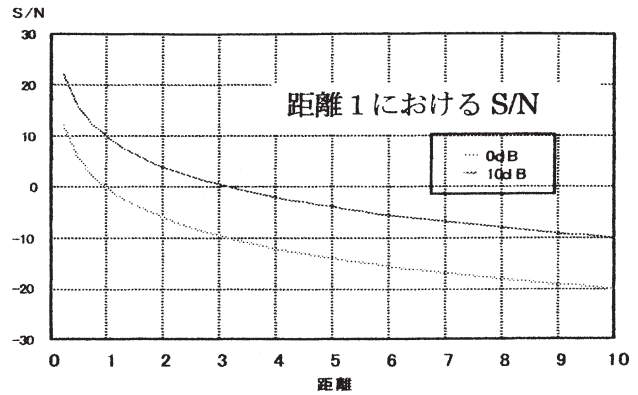


図5 移動端末-固定ノード間の距離と固定ノード受信機のS/N関係

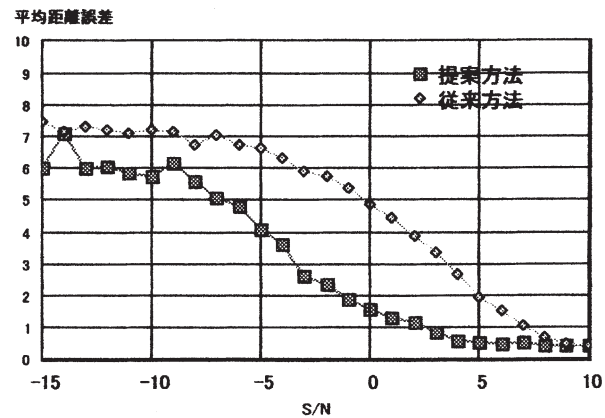


図6 S/Nをパラメータとした距離検出誤差(減衰係数2)

(b)実環境における特性

実測による経験値として式(3)における、減衰係数が2~3になると報告されている^[4]。

そこで、減衰係数 α を2.5として、シミュレーションした結果を図7に示す。

距離が離れると急激に受信電力が下がり、誤検出が少なくなるため、従来方法、提案方法ともに、平均距離誤差が少なくなっていることがわかる。

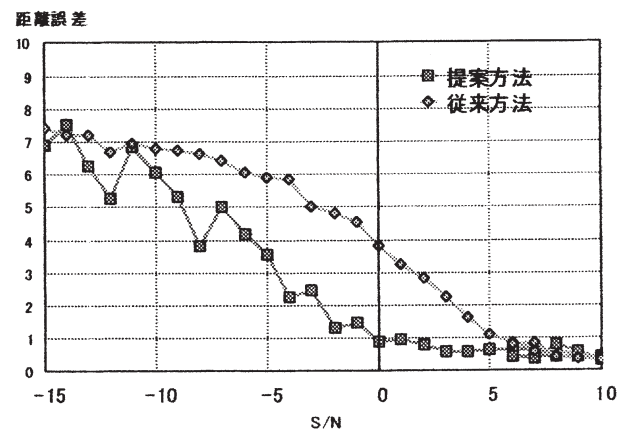


図7 S/Nをパラメータとした距離検出誤差(減衰係数2.5)

(c) 打ち切りパスメモリ数

完全な最尤復号するためには、過去の状態を記憶しているパスメモリを切ることはできない。しかし、ハードは有限であり、実質的な所で切る必要がある。通常用いられている誤り訂正回路では、拘束長の5から6倍であれば十分であるといわれている。

本提案に用いた場合におけるパスメモリ長を決めるため、どのあたりで収束するか調べてみた。

生き残りパスが選択されることにより、深くなると次第に間違った値を持つパスメモリが少なくなり、全て同じ値になる。

図7は、各状態毎にあるパスメモリにおいて、パスメモリの位置において、同じ値を持つパスメモリ数を調べたものである。すべてが一致すると状態数が256であるので256になる。

図より、20程度で、全てのパスメモリの値が一致することがわかる。従って、正六角形構成では、20程度のパスメモリを用意すればよいことがわかる。

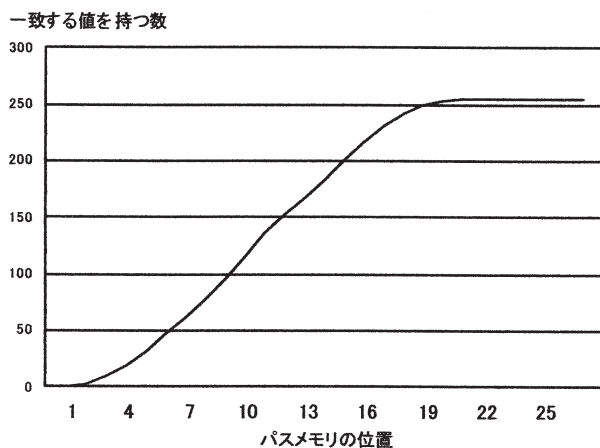


図7 同じ値を持つパスメモリ数

4. 回路規模の推定

回路規模を推定する。

状態数が、全固定ノード数あることから、状態数分 ACS 回路とパスメモリを作る必要がある。

この状態数は、一般的な通信において用いられている状態数と大差ない。例えば、伝送能率1/2、拘束長7のビタビ復号回路では、64状態である。固定ノード64の場合と同じである。

しかしながら、本提案の回路規模を大きくする要因として、一般的な通信において、パスメモリでは“0”“0”を表す1ビットの系列であるのに対し、常にどの状態からの遷移であるかを記憶しておく必要があるため、固定ノード64では、6ビットいるため、1系列あたりのパスメモリ量は6倍になる。また、ACS回路においても、伝送能率1/2では、2つのパスの比較でよいのに対し、本例のような7パスの比較を比較する必要があり、回路規模が大きくなる。

このように、回路規模が大きくなっても、現在市販されている中規模 FPGA 素子 (Field Programmable Gate Array) で十分対応することが可能である。

表2は本モデルを実現した場合における回路規模を見積もったものである。また、表3に市販のFPGAの回路規模を例として示す。

固定ノード数をパラメータとし、以下の条件で算出した。算定条件:

- ACSにおける1状態における演算回路: 比較、加算回路を合わせて40エレメント
- 1記録当たりのパスメモリ bit 数 8bit (セルの番号を8ビットとして表現)

例えば、本例で示した固定ノード256のモデルでは、エレメント数10k、メモリ68kbitが必要となり、これは中規模FPGAで十分実現可能であることを示している。

表2 回路規模の推定

設計値			回路規模		
固定ノード数	状態数	パスメモリ打ち切り段数	ACS		パスメモリ
			エレメント数	メモリ数 (bit)	メモリ数 (bit)
16 (4x4)	16	10	640	128	1,280
64 (8x8)	64	16	2,560	512	8,192
256 (16x16)	256	32	10,240	2,048	65,536
1024 (32x32)	1,024	64	40,960	8,192	524,288

表3 現在市販されているFPGA

回路規模	ロジックエレメント数	メモリー数 (bit)	デバイス名
小規模	5,136	414,000	CyclonIII EP3C5
中規模	39,600	1,134,000	CyclonIII EP3C40
大規模	119,088	3,888,000	CyclonIII EP3C120

5. あとがき

ビタビアルゴリズムによる新たな最尤位置推定法を提案し、計算機シミュレーションにより、検証を行った。

検証の結果、1チップLSIで実現できることを確認した。このことにより、1秒間に数メガ回最尤位置推定することが可能になり、工場など製造現場にも、適用可能であることがわかった。

提案方法では、改善効果として、移動端末から送信される信号を受信し、最も受信電力の高いノードをその移動端末の位置とする従来の方法に比べ、位置検出

誤差が最大 60%改善されることがわかった。

今回の検討では、自由空間における特性評価であったが、マルチパス伝搬があり、見通し外のエリアも存在する実フィールドにおける特性を評価する予定である。また、提案方法は、さらに詳細な位置推定も可能と考えられ、今後検討する予定である。

参考文献

- 1) 朝生、斎川、服部、“セルラーシステムにおける電界強度と移動速度情報を用いた最尤位置検出法”, 情報処理学会論文誌 Vol. 45, No5, ppl409-1416, March 2004
- 2) 川端、朝生、犀皮、服部、“セルラーシステムにおける最尤推定法に基づく TDOA システムの位置検出性能評価”, 信学論(B)Vol. J87-B No. 2, Feb. 2002
- 3) 朝生、斎川、服部、“移動通信における TDOA を用いた INS-PX 位置検出法の提案”, シミュレーション学会論文誌 Vol. 22 No4, pp79-85 2003
- 4) 高島、趙、柳原、福井、福永、原、北山、“センサネットワークにおける受信電力と最ゆう法を用いた位置推定”, 信学会論(B)Vol. J89-B No. 5 2006
- 5) Neal Patwari, A. O. Hero III, M. Perkins, Neiyer S. Correal, R. J. O' Dea, " Relative Location Estimation in Wireless Sensor Networks", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 51, No. 8, Aug. 2003
- 6) A. J. Weiss, " On thr Accuracy of Cellular Location System Based on RSS Measurements", IEEE trans. on Vehicular Technology, Vol52, No6, 2003
- 7) 今井秀樹, “符号理論”, 電子情報通信学会, 2000
- 8) 郡, “移動通信におけるマルチパスフェーディングを補償する多重受信最ゆう復号法” 電気学会論文誌 C, 111 巻 11 号, 1991
- 9) 久保田、郡、加藤, “SST(Scarce State Transition) 型ビタビ復号回路”, 信学会論文誌 B, Vol169B no11, 1986

附録 1

一般的なビタビ復号法の動作

伝送能率 1/2、拘束長 3 の畳み込み符号化した信号 (X^2+X+1, X^2+1) を復号する場合について説明する。

ビタビ復号の動作は、以下のようになる。

- (i) 伝送される符号化信号は符号回路の状態遷移により生成される。この状態遷移は伝送すべきデータにより生じる。従って、符号化信号を復号する復号回路では起こりえるすべての状態を用意し、各状態についてその状態に至る過去の状態からの遷移(パス)を比較する。すなわち、各パスのもつ尤度に受信シボルの尤度を加算し、新たな尤度を算出する。
- (ii) 次に、同一状態に遷移する複数パスのうち、尤度の大きい最適なパスを選択する。

- (iii) 選択されたパスのうち最も大きい値をもつパスの過去のデータが復号信号として選択される。

具体的には、図 A に示すように、状態” 00” では状態” 00” と状態” 01” からのパスのうち、尤度の大きいパスを選択する。従って、各パスのもつ尤度 M_{00} と M_{01} にそれぞれ受信信号 r のもつ尤度 r_1, r_2 を加算し、式 (A1) に示すように尤度 $P_{00 \rightarrow 00}$ と $P_{01 \rightarrow 00}$ を生成し、 $P_{00 \rightarrow 00}$ と $P_{01 \rightarrow 00}$ の内大きい方のパスを選択し、新たな尤度 M'_{00} としている。

$$\begin{aligned} \text{" 00" から " 00" へのパス } P_{00 \rightarrow 00} &= M_{00} + r_1 \\ \text{" 01" から " 00" へのパス } P_{01 \rightarrow 00} &= M_{01} + r_2 \end{aligned} \tag{A1}$$

r_{11} : 受信信号の軟判定データと符号化信号” 0, 0” との信号間距離
 r_{12} : 受信信号の軟判定データと符号化信号” 1, 1” との信号間距離

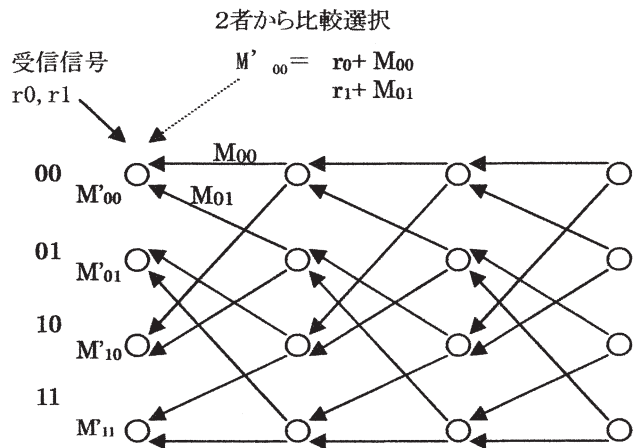


図 A 一般的なビタビ復号におけるトレリス線図

CMOSメモリ・レジスタ回路のSEU効果

SEU Effects on CMOS Memory Register Circuits

波多野 裕*、鈴木 剛弘**

Hiroshi HATANO and Takehiro SUZUKI

Abstract : In order to design radiation-hardened LSIs for space applications, single-event-upset (SEU) effects on CMOS memory register circuits have been investigated using SPICE. A 4-bit memory register has been successfully fabricated utilizing a double polysilicon double metal 1.2 μm CMOS technology. The register has been confirmed to function correctly by the fabricated chip measurements. SEU simulation results have indicated that the memory register has almost the same order SEU immunity as the conventional circuits that were reported previously, showing usefulness for this proposed SEU simulation method.

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⁾。

2008年1月現在、太陽が新たな活動期に入ったと見られていて、太陽が活動期に入ると、太陽から放出される電子や陽子などの太陽風によって地上の電子製品の回路なども影響を受ける可能性が指摘されている。太陽の活動が最も激しくなるのは2011~2012年ごろとみられている。

われわれの研究室(電気電子工学科の光応用・電子デバイス分野)では、トランジスタ・レベルから回路設計を行い実際にチップを試作して、CMOS集積回路に対するSEU効果に関する一連の検討を行い、その結果の一部を既に報告してきた²⁾⁻⁵⁾。

本論文では、CPUで使用されているCMOSメモリ・レジスタ回路に対するSEU効果を検討した。レジスタは計算結果の保持、RAM、ROMへのアクセスのためのアドレス保持などを行う回路である。

4ビットCMOSメモリ・レジスタ回路を設計試作した。トランジスタ・レベルから回路設計を行い実際に1.2μm CMOSプロセス(実効チャネル長NMOS0.9μm、PMOS0.8μm)⁶⁾⁻¹⁰⁾を用いてチップを試作して、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。更に、この実測により機能動作を確認できたレジスタ回路に対するSEU耐性をシミュレーションにより検討したので、それぞれの結果を報告する。

2. 4ビットCMOSメモリ・レジスタ

メモリ・レジスタは1ビットが1つのフリップフロップによって構成されていてビット数だけフリップフロップを並べ、書き込み制御信号と読み出し制御信号を全てのフリップフロップに共通に加えるよう構成される。そのため全ビット並列書き込み、並列読み出しの回路である。図1に設計した4ビットCMOSメモリ・レジスタの論理回路図を示す。フリップフロップは最もシンプルなSRフリップフロップを使用した。 \bar{W} は書き込み制御信号、 \bar{R} は読み出し制御信号である。

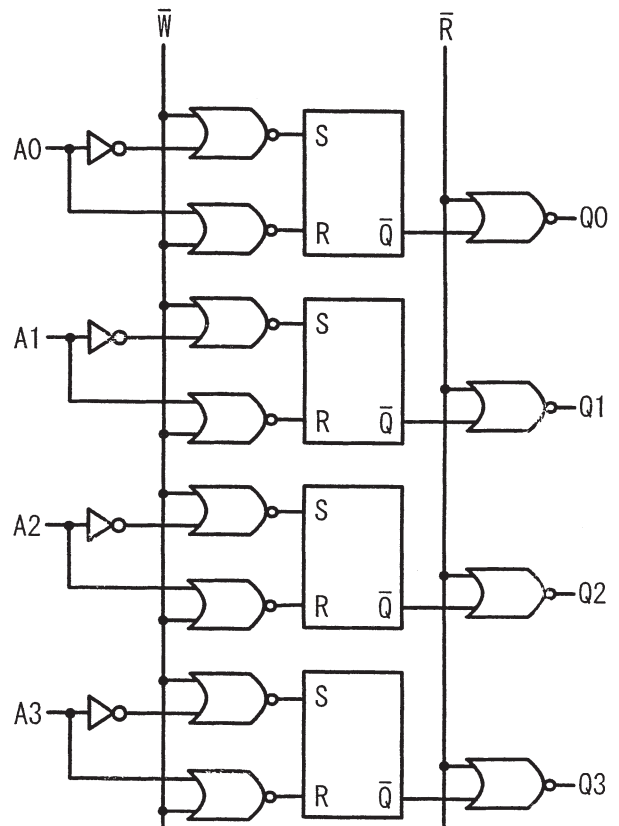


図1 4ビット・メモリ・レジスタの論理回路図

2008年2月1日受理

* 理工学部 電気電子情報工学科

**理工学部 電気電子情報工学科卒業生

(現在 浜松ホトニクス(株))

図2に4ビットCMOSメモリ・レジスタのトランジスタ回路図を示す。入力がA0、A1、A2、A3、出力がQ0、Q1、Q2、Q3である。SRフリップフロップはNORゲートを使用し、8トランジスタで構成した。総トランジスタ数は88である。

図3に4ビットCMOSメモリ・レジスタのレイアウト図を示す。1.2 μm 2層アルミニウムCMOSデザインルールにより設計した。占有面積は140 μm ×145 μm である。

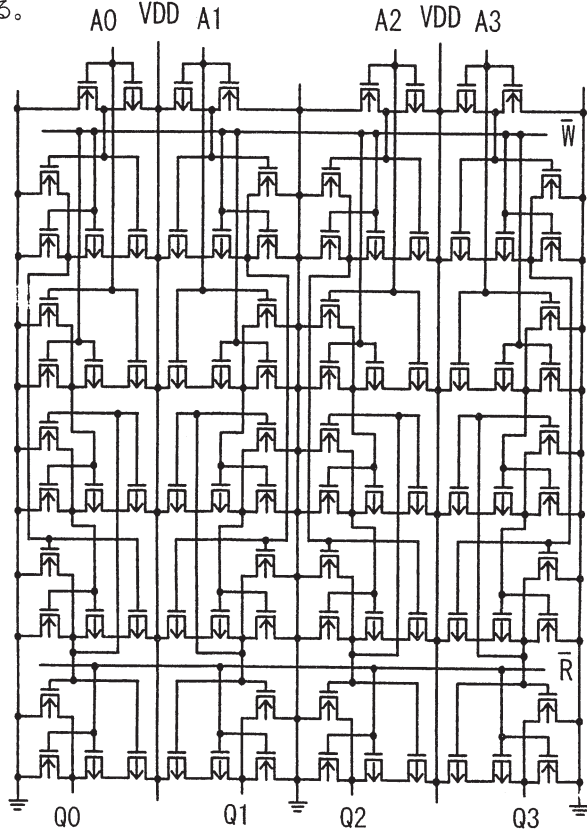


図2 メモリ・レジスタのトランジスタ回路図

図4に4ビットCMOSメモリ・レジスタの機能動作を確認するために行った回路シミュレーションの結果を示す。図の前半部分では1.1 μs 付近まで読み出し制御信号R-barがハイのため、出力Q0、Q1、Q2、Q3が入力にかかわらず全て0となっている。次に、1.1 μs 付近で書き込み制御信号W-barと読み出し制御信号R-barが同時に変化する時に着目する。W-barがローからハイに変化する直前は入力A0、A1、A2、A3が全て1である。従って、各フリップフロップにはデータ1が書き込まれる。同時にR-barはハイからローに変化するため、データ1が読み出され、出力Q0、Q1、Q2、Q3が、次にW-barがハイからローに変化

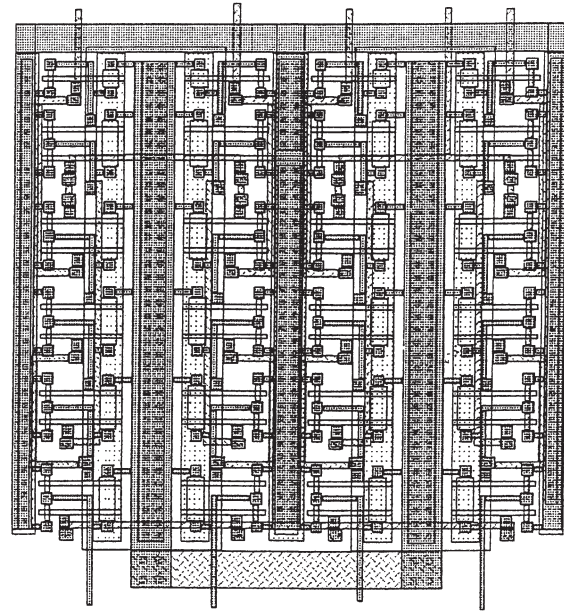


図3 メモリ・レジスタのレイアウト図

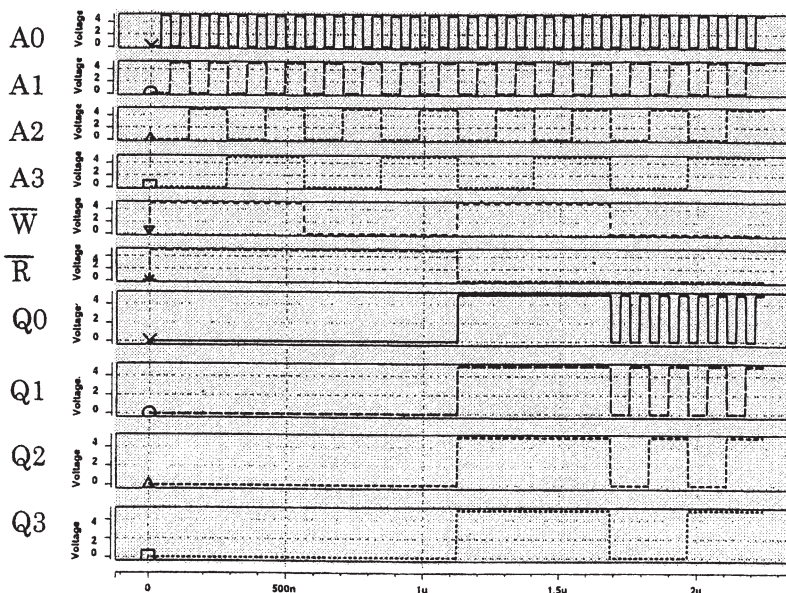


図4 メモリ・レジスタの動作シミュレーション

横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

する $1.7\mu s$ 付近まで、1を保持する。 $1.7\mu s$ 以降はWもRもローであるため、入力A0, A1, A2, A3の変化がそれぞれ、Q0, Q1, Q2, Q3にそのまま出力されている。以上の結果から、設計した4ビットCMOSメモリ・レジスタが正しく動作することが確認できた。

図5に $1.2\mu m$ 2層アルミニウムウェルCMOSプロセスで試作した4ビットCMOSメモリ・レジスタの顕微鏡写真

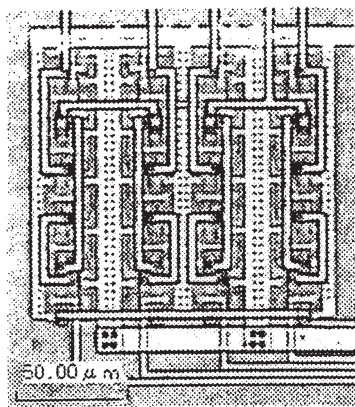


図5 メモリ・レジスタの顕微鏡写真

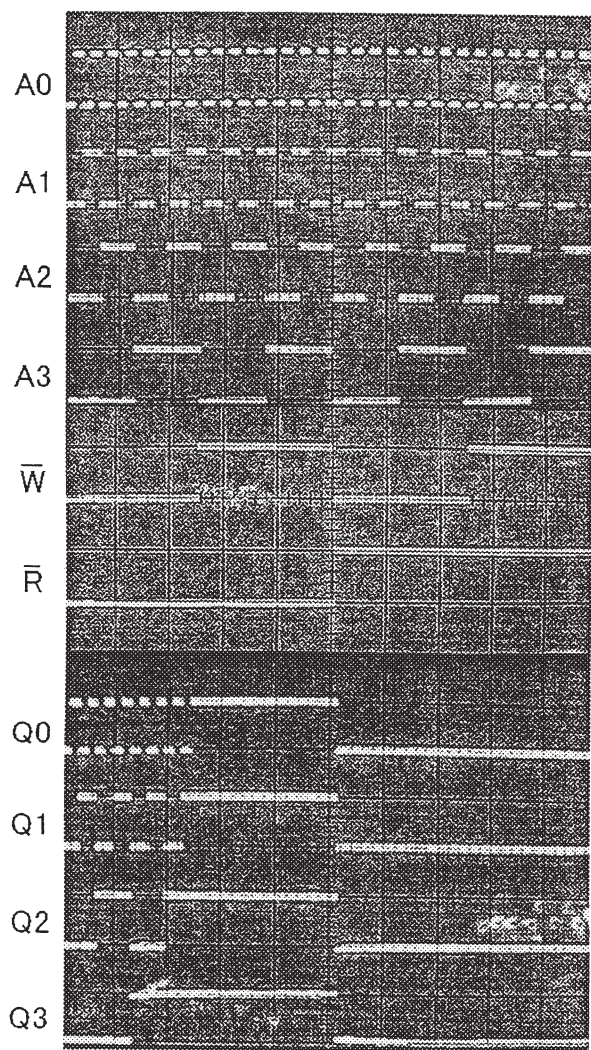


図6 メモリ・レジスタの実測波形
横軸： $25\mu s/div$. 縦軸： $5V/div$.

を示す。NMOSトランジスタとPMOSトランジスタのゲート長は $1.5\mu m$ で、実効チャンネル長がNMOSは $0.9\mu m$ 、PMOSが $0.8\mu m$ である。ゲート酸化膜厚は $25nm$ である。

図6に試作した4ビットCMOSメモリ・レジスタの実測波形を示す。はじめの $60\mu s$ 付近までは書き込み制御信号Wと読み出し制御信号R-barがローであるため、入力A0,

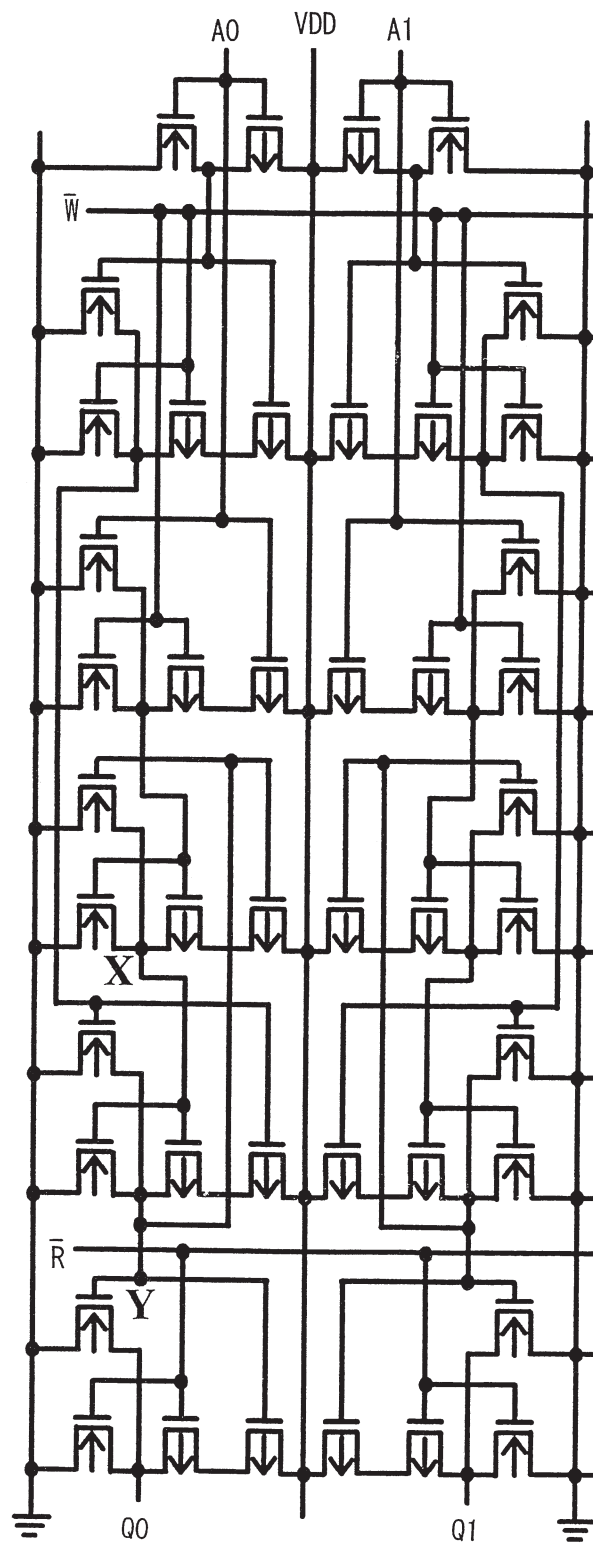


図7 メモリ・レジスタのノードX、ノードY

A1、A2、A3がそのままQ0、Q1、Q2、Q3に出力されている。次に、 \overline{W} がローからハイになる時、入力A0、A1、A2、A3が1になっているため、 \overline{W} がハイである125 μ s付近までの期間では、各フリップフロップに1が保持されQ0、Q1、Q2、Q3には1が出力されている。125 μ s以降は \overline{R} がハイであるため出力は全て0である。以上の結果から試作した4ビットCMOSメモリ・レジスタが正しく動作することが確認できた。

3. SEUシミュレーション

CMOS回路において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400fCである¹¹⁾。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7に示す、入力がA0、出力がQ0の部分のフリップフロップにおいて回路のノードX (FFのQ)がハイ・レベルの状態で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。

1.5 μ sの時刻において、ノードXに500fCの荷電粒子誘起電荷が発生した場合のシミュレーション結果を図8に示す。出力Q0の論理レベルの一時的低下が見られるが、電荷が消えた後は元の1レベルに戻り、正しいデータ1を

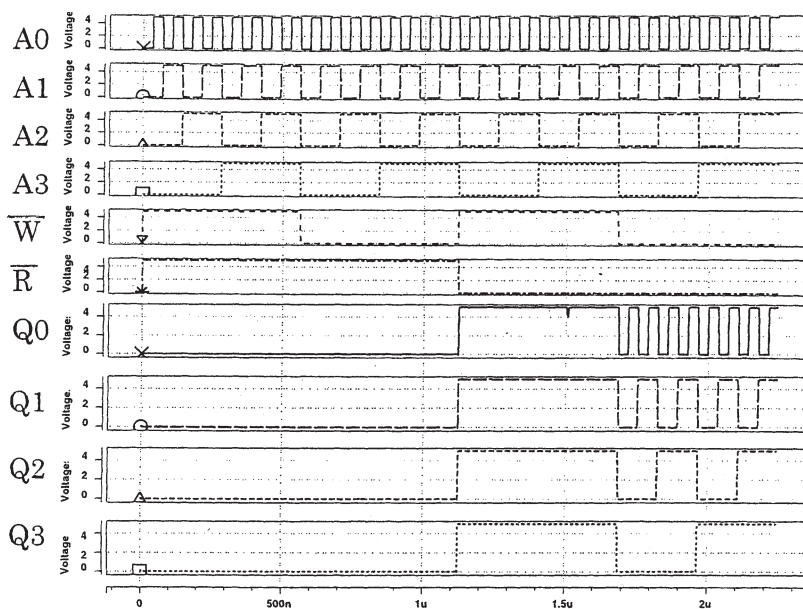


図8 メモリ・レジスタのノードXに500 fCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果

横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

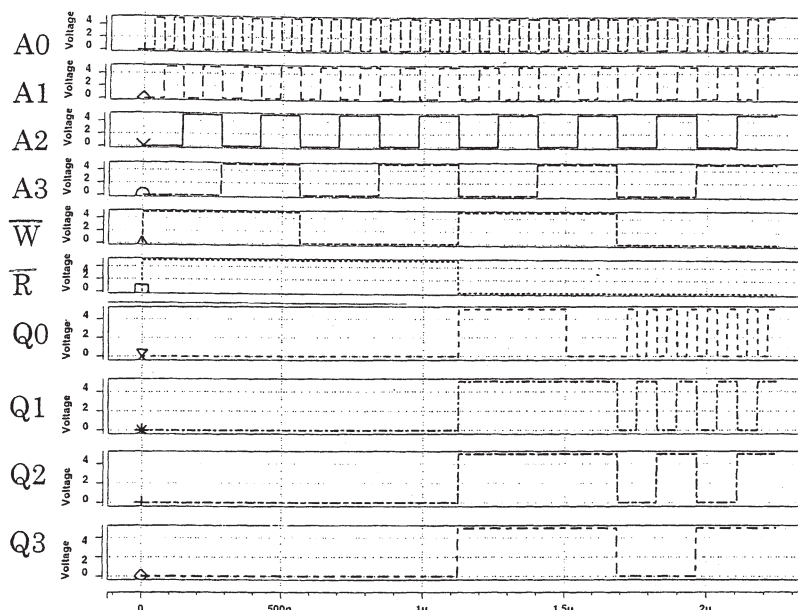


図9 メモリ・レジスタのノードXに550 fCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果

横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

保持していることが分かる。

図9に、 $1.5\mu s$ の時刻において、ノードXに550 fCの荷電粒子誘起電荷が発生した場合のシミュレーション結果を示す。この場合は $1.5\mu s$ 以降の \overline{W} がハイの期間、Q0が0と誤動作して、SEUが発生していることが分かった。

更に、ノードY (FFの \overline{Q}) がハイ・レベルの状態でN MOS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。この場合、各フリップフロップは0を保持している。 $1.5\mu s$ の時刻において、ノードYに650 fCの荷電粒子誘起電荷が発生した場合のシミュレーション結果を図10に示す。出力Q0の論理レベル0の一時的上昇が見られるが、電荷が消え

た後は元の0レベルに戻り、正しいデータ0を保持していることが分かる。

図11に、 $1.5\mu s$ の時刻において、ノードYに700 fCの荷電粒子誘起電荷が発生した場合のシミュレーション結果を示す。この場合は $1.5\mu s$ 以降の \overline{W} がハイの期間、Q0が1と誤動作して、SEUが発生していることが分かった。

図9と図11の結果を比較すると、ノードYに荷電粒子が入射した場合の方が、ノードXに入射した場合よりSEU耐性が大きいことが分かる。これはノードYにはトランジスタのゲート容量が4つ分、拡散容量が3つ分接続されているのに対して、ノードXにはゲート容量が2つ分、拡散容量が3つ分接続されていて、ノードYの寄生容量が大

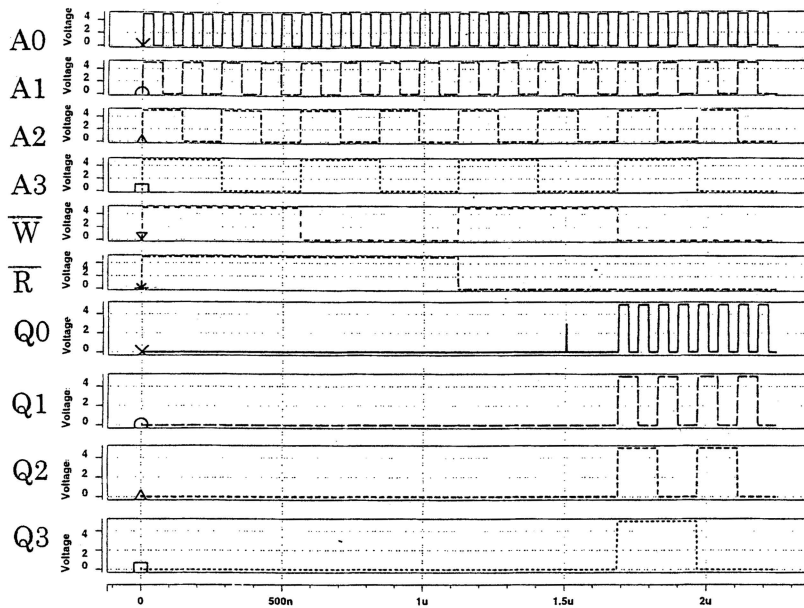


図10 メモリ・レジスタのノードYに650 fCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果
横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

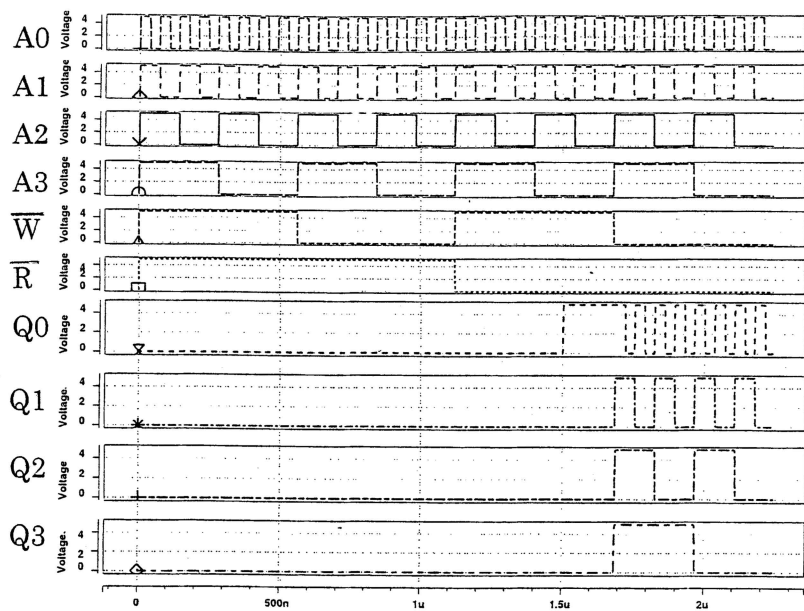


図11 メモリ・レジスタのノードYに700 fCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果
横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

きいためであると考えられる。

以上のSEUシミュレーションから得られた従来回路の500 fCあるいは650 fCというSEU耐性は文献値400 fCから判断して妥当な結果であると考えられる。

4. 結言

シンプルな構成のSRフリップフロップを用いて4ビットCMOSメモリ・レジスタを設計試作した。トランジスタ・レベルから回路設計を行い実際に1.2 μ m CMOSプロセスによりチップを試作して、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。

更に、この実測により機能動作を確認できたCMOSメモリ・レジスタ回路に対するSEU耐性をシミュレーションにより検討した。その結果、今回試作したメモリ・レジスタは当研究室が既に報告した従来形ラッチ回路のSEU耐性と比較して同程度の耐性であることが判明した。また、文献値と比較しても同程度の耐性であることが判明した。これにより本論分で用いたSEUシミュレーションの有効性と妥当性がメモリ・レジスタでも確認できた。

本論文で述べたSPICEによりSEU耐性をシミュレーションで予測可能であるという結果を踏まえて、今後は、当研究室で設計試作して既にその機能動作を実測により確認しているセット優先形SRフリップフロップ、マスター・スレーブ形JKフリップフロップ、Dラッチ、およびDフリップフロップの4種類の異なる記憶回路を用いた4種類のメモリ・レジスタ群に対するSEU耐性の比較検討を行う予定である。更に、2重ラッチ回路のような多重系を取り入れ、SEU耐性を強化したメモリ・レジスタの設計などが今後の課題である。

謝辞

メモリ・レジスタに対するSEUシミュレーションに関しては2007年度卒研生の横井和輝君（現在、三栄ハイテックス）の協力があつた。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) H. Hatano et al., "Radiation-hard CMOS VLSI logics for space applications", The Bulletin of Shizuoka Inst. of Sci. & Tech., vol.4, p.1-7, 1995.

- 3) 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", 静岡理工科大学紀要, vol. 12, p. 109-118, 2004.
- 4) 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.
- 5) 波多野 裕, "宇宙用2重ラッチ回路のSEU効果", 静岡理工科大学紀要, vol. 15, pp. 73-76, 2007.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) H.Hatano and T.Ochiai, "77K DC characteristics for floating gate neuron MOS circuits", Proceedings of 4th European Workshop on Low Temperature Electronics, pp.271-275, 2000.
- 10) H.Hatano and T.Ochiai, "Neuron MOS circuit performance improvements by low temperature operation", Proceedings of 4th European Workshop on Low Temperature Electronics, pp.49-53, 2000.
- 11) 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.

カスケード電圧スイッチ論理回路のSEU効果

SEU Effects on Cascade Voltage Switch Logic Circuits

波多野 裕*
Hiroshi HATANO

Abstract : In order to design radiation-hardened LSIs for space applications, single-event-upset (SEU) effects on cascade voltage switch logic (CVSL) circuits have been investigated using SPICE. Static and dynamic CVSL circuits have been successfully fabricated utilizing a double polysilicon double metal 1.2 μm CMOS technology. The both CVSL circuits have been confirmed to function correctly by the fabricated chip measurements. SEU simulation results have confirmed that the CVSL circuits have high SEU immunity. SEU immunity for the CVSL circuits is compared to that for the conventional CMOS circuits, showing that the CVSL is a candidate for a SEU immune spaceborne 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⁾。

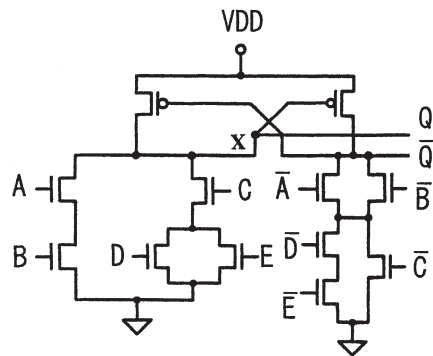
われわれの研究室 (電気電子工学科の光応用・電子デバイス分野) では、トランジスタ・レベルから回路設計を行い実際にチップを試作して、CMOS集積回路に対するSEU効果に関する一連の検討を行い、その結果の一部を既に報告してきた²⁾⁻⁵⁾。

本論文では、2系列の相補的なNMOSスイッチ構造と1対の交差接続されたP形プルアップ・トランジスタから構成するカスケード電圧スイッチ論理 (CVSL) 回路に着目した。CVSL回路は真およびその相補値の両方の信号を用いる2重系回路である。(なお、cascade から電子回路用語 cascade²⁾という造語が作られた。)

スタティック形及びダイナミック形CVSL回路を設計試作した。トランジスタ・レベルから回路設計を行い実際に1.2μmCMOSプロセス (実効チャネル長NMOS 0.9μm、PMOS 0.8μm)⁶⁾⁻¹⁰⁾を用いてチップを試作して、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。更に、この実測により機能動作を確認できた2種類のCVSL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ので、それぞれの結果を報告する。

2. カスケード電圧スイッチ論理 (CVSL) 回路¹¹⁾

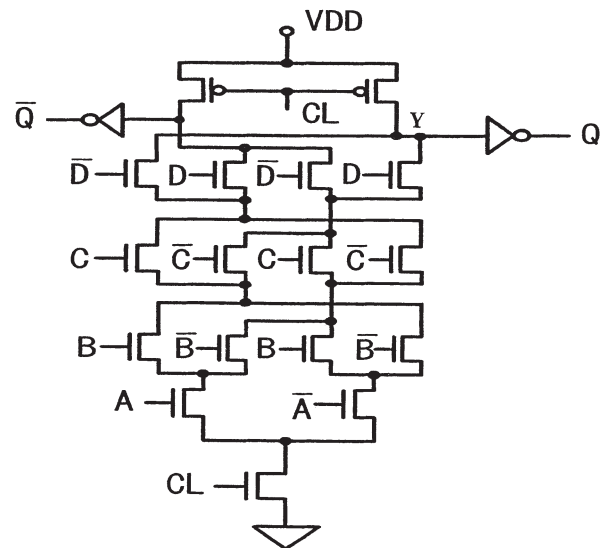
図1に今回設計したスタティック形CVSL回路のトランジスタ回路図を示す。論理演算 $A \cdot B + C \cdot (D + E)$



$$Q = (A \cdot B) + [C \cdot (D + E)]$$

$$\bar{Q} = (\bar{A} + \bar{B}) \cdot [\bar{C} + (\bar{D} \cdot \bar{E})]$$

図1 スタティック形CVSL回路



$$Q = A \oplus B \oplus C \oplus D$$

$$\bar{Q} = \overline{A \oplus B \oplus C \oplus D}$$

図2 ダイナミック形CVSL回路

2008年2月29日受理

*理工学部 電気電子情報工学科

を実行する回路である。2つのPMOSと、真の信号を入力とする5つのNMOSおよび反転信号を入力とする5つのNMOSからなる2重系の構成である。

図2に今回設計したダイナミック形CVSL回路のトランジスタ回路図を示す。クロック形の4入力XOR回路であり、2系列のドミノ・ゲートと同じである。

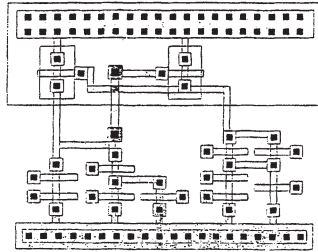


図3 スタティック形CVSL回路のレイアウト図

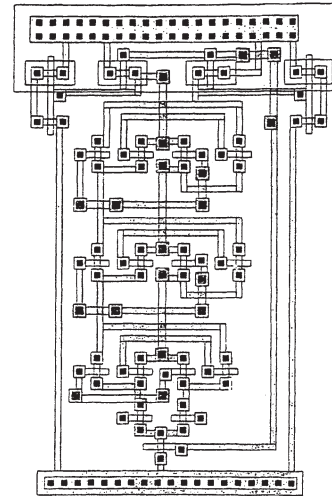


図4 ダイナミック形CVSL回路のレイアウト図

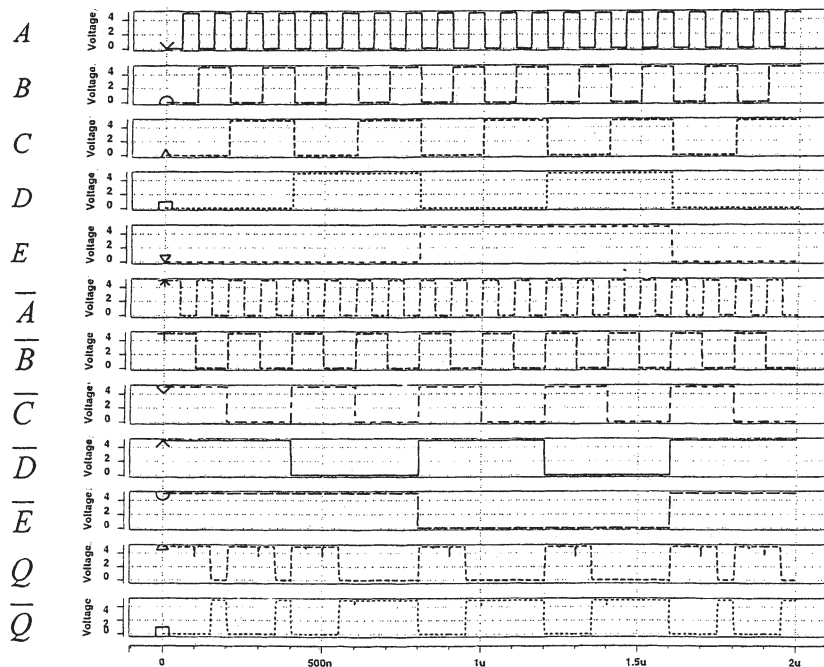


図5 スタティック形CVSL回路の動作シミュレーション 横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

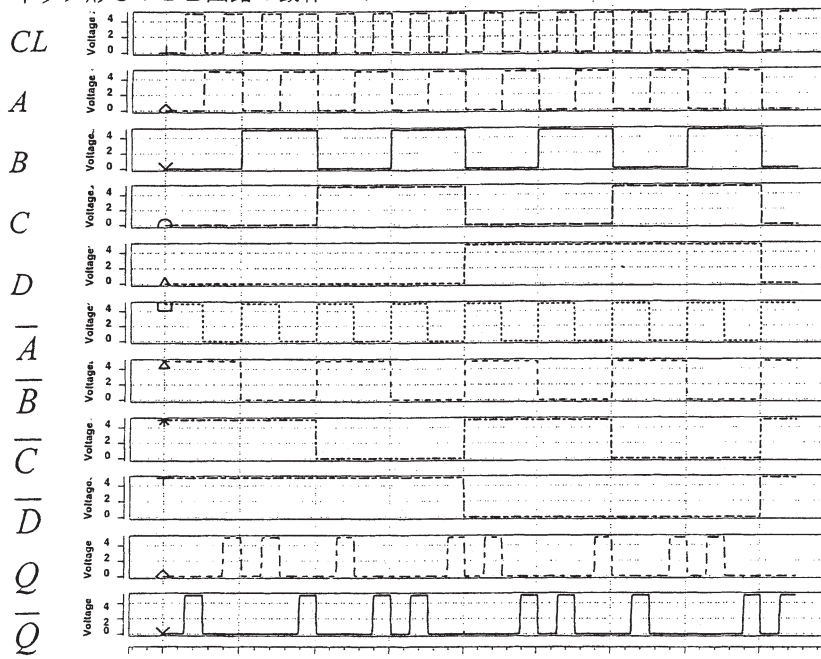


図6 ダイナミック形CVSL回路の動作シミュレーション 横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

を実行する回路である。2つのPMOSと、真の信号を入力とする5つのNMOSおよび反転信号を入力とする5つのNMOSからなる2重系の構成である。

図2に今回設計したダイナミック形CVSL回路のトランジスタ回路図を示す。クロック形の4入力XOR回路であり、2系列のドミノ・ゲートと同じである。

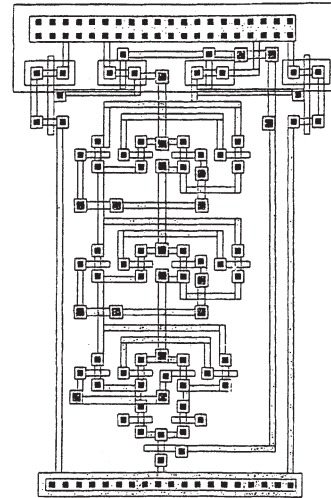
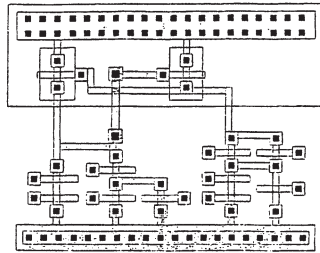


図3 スタティック形CVSL回路のレイアウト図

図4 ダイナミック形CVSL回路のレイアウト図

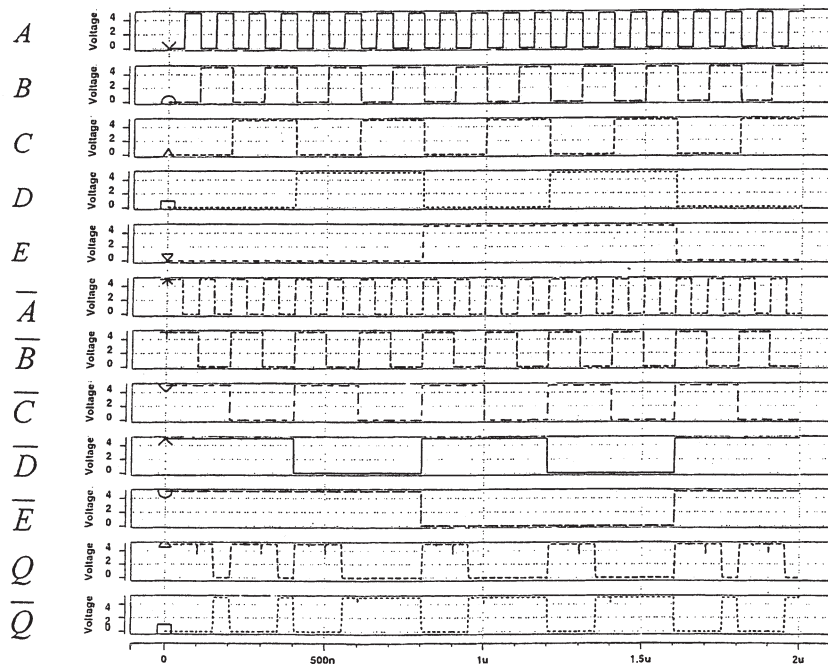


図5 スタティック形CVSL回路の動作シミュレーション

横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

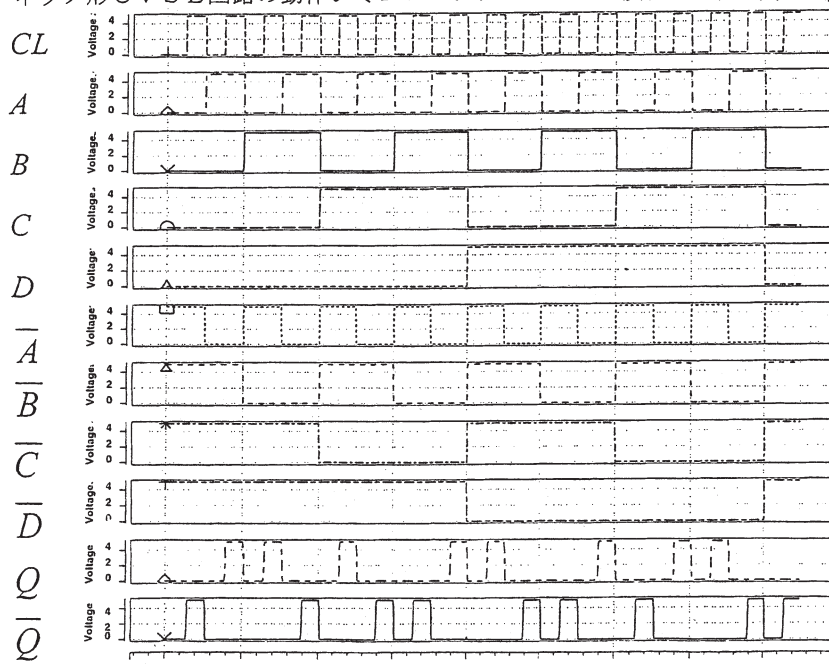


図6 ダイナミック形CVSL回路の動作シミュレーション

横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

図3にスタティック形CVSL回路のレイアウト図を示す。1.2 μm 2層アルミニウムエレクトロニクスデザインルールにより設計した。占有面積は73 μm ×56 μm である。図4にダイナミック形CVSL回路のレイアウト図を示す。占有面積は81 μm ×120 μm である。

図5に、設計したスタティック形CVSL回路の機能動作を確認するために行った回路シミュレーションの結果を示す。Q出力およびその反転の出力の \bar{Q} ともに期待値通りの結果が得られ正常動作が確認できた。図6に設計したダイナミック形CVSL回路の機能動作を確認するために行った回路シミュレーションの結果を示す。クロックCLがハイで回路が活性化されている場合、4入力のうち奇数個の入力が1のとき出力Qが1で、偶数個の入力が1のとき出力Qが0、という正常なXOR（排他的論理和）動作を確認することができた。反転の出力 \bar{Q} はCLがハイのときQに対して反転していることも確認できた。

図7に1.2 μm 2層アルミニウムエレクトロニクスプロセスで試作したスタティック形CVSL回路の顕微鏡写真を示す。NMOSトランジスタとPMOSトランジスタのゲート長は1.5 μm で、実効チャンネル長がNMOSは0.9 μm 、PMOSが0.8 μm である。ゲート酸化膜厚は25nmである。写真中央部分に反転入力発生回路を設けた。図8に試作したダイナミック形CVSL回路の顕微鏡写真を示す。回路部分の左右両側に反転入力発生回路を設けた。

図9に試作したスタティック形CVSL回路の実測波形を示す。図5のシミュレーション結果と比較して試作した回路が設計通り正常に動作していることを確認できた。図10に試作したダイナミック形CVSL回路の実測波形

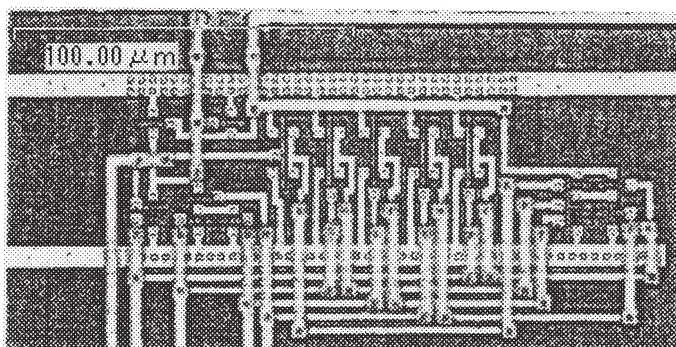


図7 スタティック形CVSL回路の顕微鏡写真

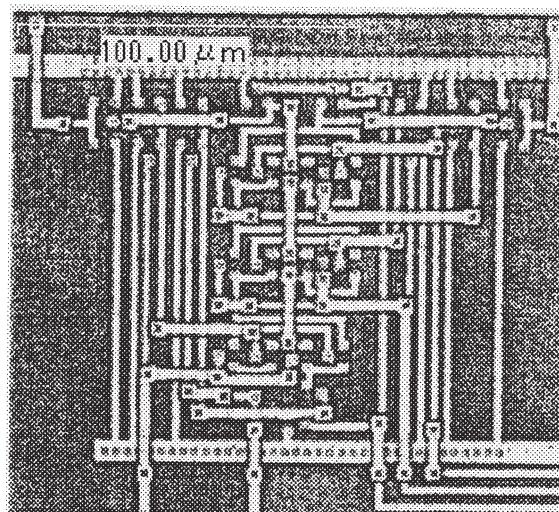


図8 ダイナミック形CVSL回路の顕微鏡写真

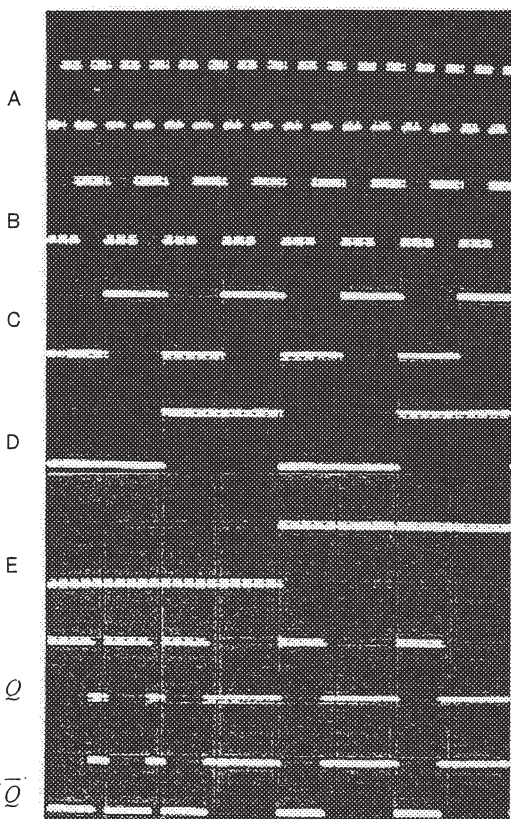


図9 スタティック形CVSL回路の実測波形
横軸：20 $\mu\text{s}/\text{div}$. 縦軸：5V/div.

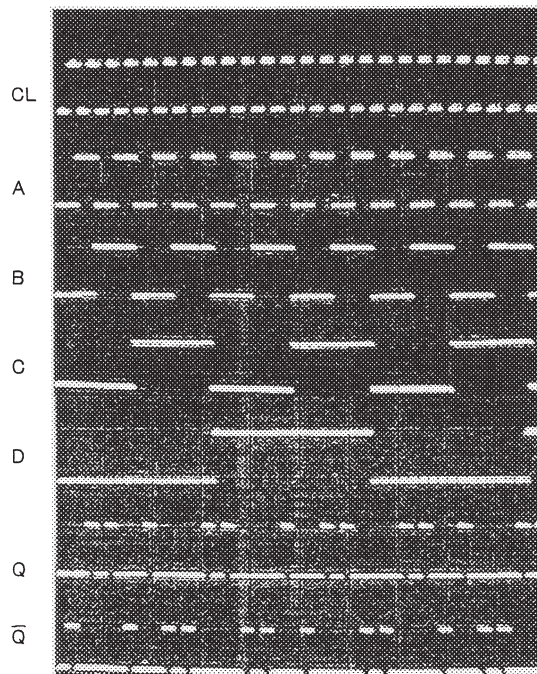


図10 ダイナミック形CVSL回路の実測波形
横軸：50 $\mu\text{s}/\text{div}$. 縦軸：5V/div.

を示す。図6のシミュレーション結果と比較して試作した回路が設計通り正常に動作していることを確認できた。

3. SEUシミュレーション

CMOS回路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における荷電粒子の誘起電荷は約400 fCである^{12,13)}。同一バイアス条件で、この電荷量を変化させ、回路動作への影響を観測して、回路のSEU耐性を検討した。

図1に示すスタティック形CVSL回路のノードXがハイ・レベルの状態で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。

ノードXに回路シミュレータSPICEの独立電流源を接続した。1ナノ秒の間、0.4 mAの電流を流すことにより、400 fCの電荷をノードXに発生させた。

50 nsの時刻において、ノードXに400 fCの荷電粒子誘起電荷が発生した場合のシミュレーション結果を図11に示す。出力Qの論理レベルの一時的低下が見られるが、

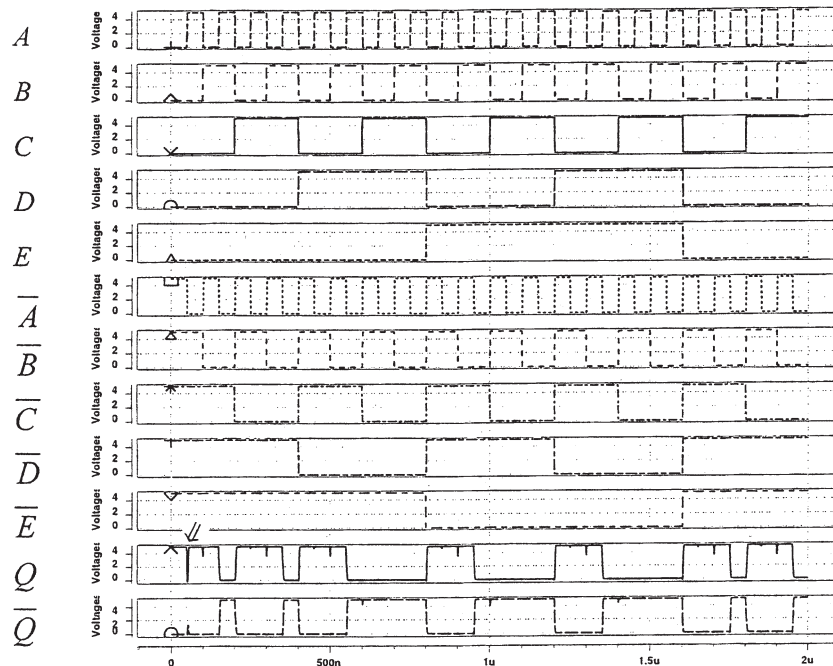


図11 スタティック形CVSL回路のノードXに400 fCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果

横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

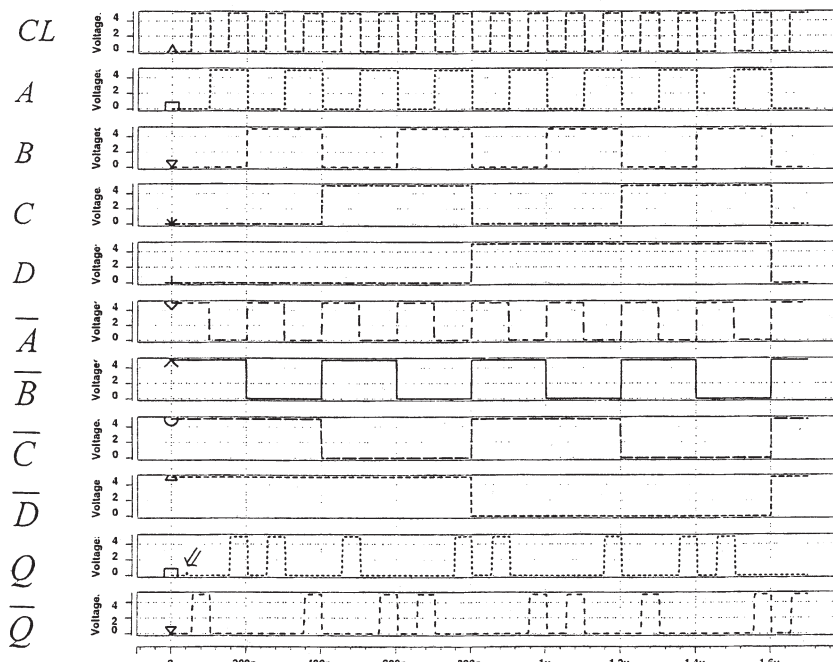


図12 ダイナミック形CVSL回路のノードYに400 fCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果

横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

電荷が消えた後は元の1レベルに戻り、正しいデータ1を示していることが分かる(矢印部分)。

次に、図2に示すダイナミック形CVSL回路のノードYがハイ・レベルの状態で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。

40 nsの時刻において、ノードYに400 fCの荷電粒子誘起電荷が発生した場合のシミュレーション結果を図12に示す。出力Qの論理レベル0が一時的に0.6 V程度上昇するが、電荷が消えた後は元の0レベルに戻り、正し

いデータ0を示していることが分かる(矢印部分)。

図13に、スタティック形CVSL回路のノードXに図11の25倍の10 pCの荷電粒子誘起電荷が発生した場合のシミュレーション結果を示す。出力Qの論理レベルの一時的低下が見られるが、電荷が消えた後は元の1レベルに戻り、正しいデータ1を示している(矢印部分)。更に100 pCでも正常動作であった。

図14に、ダイナミック形CVSL回路のノードYに図12の25倍の10 pCの荷電粒子誘起電荷が発生した場合のシミュレーション結果を示す。出力Qの論理0が一時的に

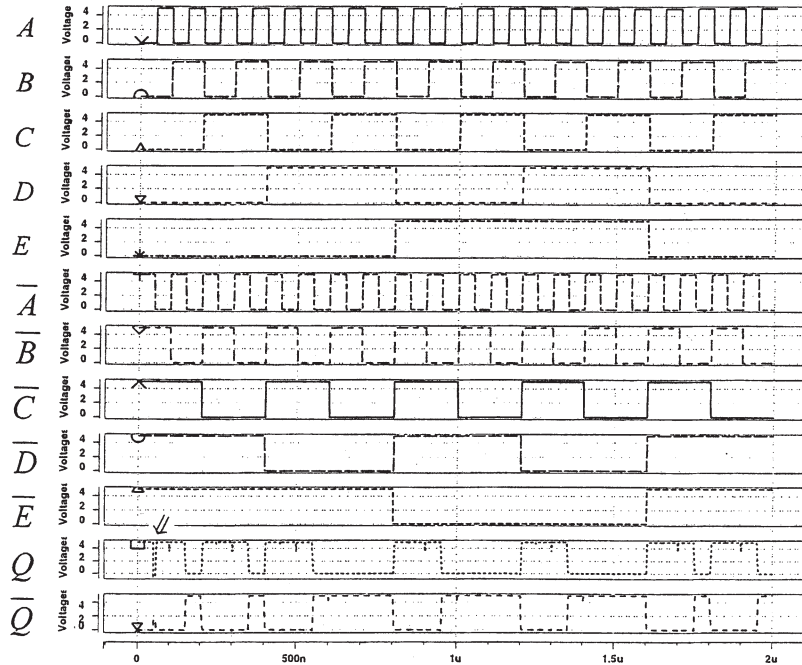


図13 スタティック形CVSL回路のノードXに10 pCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果

横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

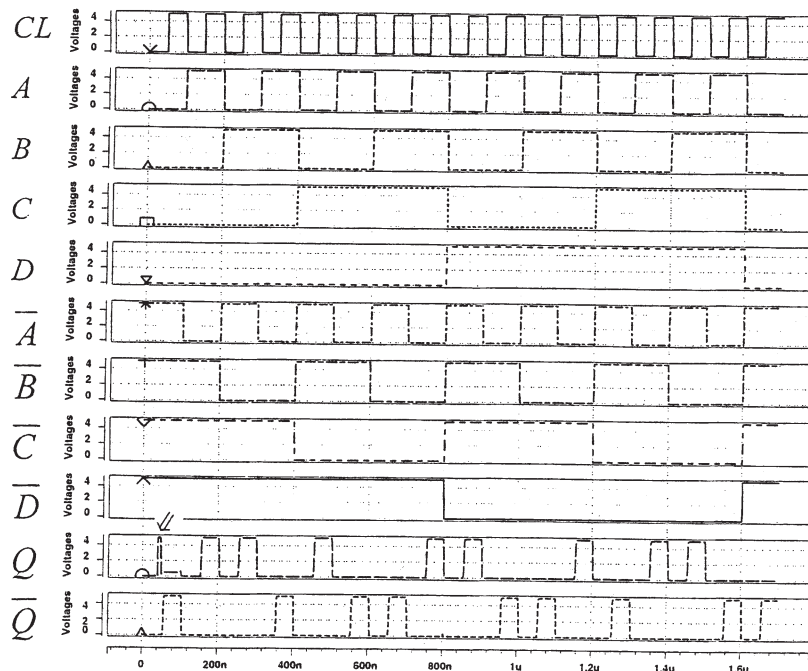


図14 ダイナミック形CVSL回路のノードYに10 pCの電荷が誘起された時のシミュレーション結果

横軸：単位 (s) 縦軸：単位 (V)

上昇したが、電荷が消えた後は元の0レベルに戻り、正しいデータ0を示した(矢印部分)。更に100 pCの場合には出力Qの0が1と誤動作してSEUの発生を確認した。

以上のシミュレーション結果から、今回試作したCVSL回路は両者とも従来のCMOS回路の25倍以上のSEU耐性を持つことが判明した。

4. 結言

宇宙用論理回路の候補の一つとして、スタティック形及びダイナミック形CVSL回路を設計試作した。トランジスタ・レベルから回路設計を行い実際に1.2 μ m CMOSプロセスを用いてチップを試作して、試作チップの実測によりスタティック形及びダイナミック形CVSL回路の機能動作を確認することに成功した。

更に、この実測により機能動作を確認できた2種類のCVSL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。その結果、試作したCVSL回路は通常のCMOS回路と比較して25倍以上のSEU耐性を備えていることが明らかになった。

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。

参考文献

- 1)波多野 裕, *耐環境CMOS超LSI*, (1996).
- 2)H. Hatano et al., "Radiation-hard CMOS VLSI logics for space applications", *The Bulletin of Shizuoka Inst. of Sci. & Tech.*, vol.4, p.1-7, 1995.
- 3)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.
- 4)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", *静岡理科大学紀要*, vol. 14, pp. 31-35, 2006.
- 5)波多野 裕, "宇宙用2重ラッチ回路のSEU効果", *静岡理科大学紀要*, vol. 15, pp. 73-76, 2007.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.49-53,2000.
- 11)成島晃久, "カスケード電圧スイッチ論理回路", *静岡理科大学 2006 年度卒業論文*.
- 12) 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.
- 13) F. L. Kastensmidt, "SEE mitigation strategies for digital circuit design applicable to ASIC and FPGAs", *2007 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference*.

二足歩行ロボットを制御する組み込みソフトウェア教材の開発

Development of Teaching Materials for Embedded Software Controlling a Two-Legged Robot

玉真 昭男*, 今釜 光輔\$

Teruo TAMAMA and Kousuke IMAKAMA

Abstract: Shortage of embedded software engineers is becoming serious in Japan. Complying with a request from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, a laboratory course is prepared for teaching embedded software programming in the newly established Faculty of Comprehensive Informatics. For middle- to high- level students, two teaching materials have been developed using PIC and H8 microcomputers: (1) an infrared transmitter and receiver, (2) two-legged robot controllers.

1. はじめに

現在、組み込みソフトウェア技術者が不足することが声高に叫ばれている。組み込みソフトウェアとは、パソコン上で動くソフトではなく、自動車、家電、携帯電話、産業ロボットなどに組み込まれたマイクロコンピュータ(マイコン)を動かすプログラムのことである。マイコンには多くの種類があり、それぞれにプログラムが異なるので、マイコンのプログラム開発は簡単ではなく、ハードウェアに関する知識も要求される。

マイコンはもともと日本で電卓用に開発された電子部品であり、家電、自動車、玩具などに組み込んで高度な制御をするようにしたのも日本が最初なので、組み込みソフトウェアの開発は日本が得意な分野であった。しかし、いつの間にか組み込みソフトの技術者が不足するようになり、日本の競争力の低下が心配されている。2004年、経済産業省と情報処理推進機構(IPA)は「組み込みソフトウェアスキル標準」を策定し、産業界と大学に開発技術者の育成を図るよう呼びかけた。

デジタル家電や携帯電話などの高機能化に伴って、組み込みソフトは開発量が年々増加している。一方、携帯電話など、どんどん新しい製品が出て来る。開発期間がますます短くなるので、ソフト開発は困難を極める。組み込みソフトの場合、不具合が起きたら製品を回収しないと直せな

いので、莫大なコストが掛かり、企業に大損害をもたらす。信用も失うことになる。品質と信頼性の高い、高度なプログラムを短期間で開発できる技術者が、今まさに求められている。

組み込みシステムの開発を行っている企業でも、教えられる人材がいない、一線の技術者に時間が無い等の理由で、重要であるのに企業教育は十分に行われていないというのが実態である。そこで、経済産業省は、産官学が協力して大学等の教育機関に組み込みソフトウェア分野の教育カリキュラムを設け、実施していく必要性を訴えている。その要請に応え、本学総合情報学部・コンピュータシステム学科では集中実習科目「組み込みソフトウェア」を新設して、優れた人材の育成を目指す。

この集中実習科目を充実したものにするためには、初級から上級に至るいろいろな教材を用意する必要がある。今、世の中では、何らかのマイコンとその周辺にLEDや液晶ディスプレイを搭載したプリント基板が数多く開発されている。これと小規模なプログラム開発環境がセットになって、安価な電子教材として市販されている。入門から初級用にはこれで十分である。

中級用は各種センサやサーボモータがセットになっていて、これらの制御プログラムの開発を学ぶものが多い。教材としての中～上級用の代表は、それらを組み合わせて車を制御するライントレースロボットであろう。これだと競技を行うことで、作成したプログラムの機能確認だけで

2008年3月10日受理

* 理工学部 情報システム学科

\$ 現 アスモ株式会社

なく、アルゴリズムの優秀性や性能を争うことが出来、より高度なプログラムを開発する能力が鍛えられる。

我々は学生にもっと人気のある二足歩行ロボットをターゲットとした、中～上級用の電子教材開発を目指し、次の2つを開発した。

(1) 赤外線送受信器

二足歩行ロボットは市販の”ROBONOVA-I” (Hitec Multiplex Japan 社) を用いた (Fig. 1)。これは ATMEL 社の ATmega128 という 8 ビットマイコンを使った専用制御コントローラを搭載しており、PC 上で開発したモーションファイルを内蔵の RAM に保存する方式をとっている。事前に用意した幾つかのモーションの選択は、専用の赤外線リモコンで行う。この赤外線リモコンの出力波形をオシロスコープで解析し、同じ波形を出力する赤外線送信器を PIC (Peripheral Interface Controller) マイコン (Microchip 社) を使って製作した。これに USB インターフェイス回路をつけることにより、PC からの制御が可能になった。同様に、赤外線受信器も開発した。これで”ROBONOVA-I” の制御が可能になったばかりでなく、テレビなどのマルチメディア機器を制御するリモコンや、携帯電話と通信できる赤外線送受信器などのマイコン教材を開発する道が開けた。

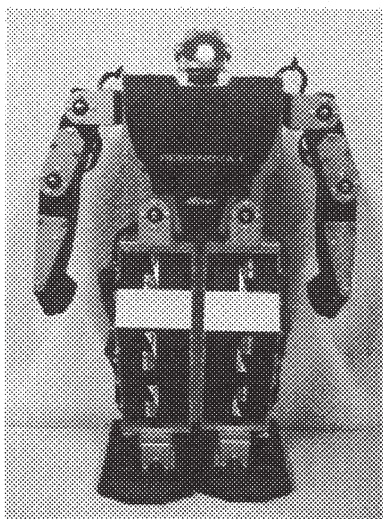


Fig. 1 ROBONOVA-I の写真

(2) 二足歩行ロボット制御コントローラ

次に、”ROBONOVA-I” の専用制御コントローラと同様のものを 8 ビットの PIC マイコン、16 ビットの H8 マイコン

(ルネサステクノロジー社) を用いて開発することにした。2 種類のマイコンを用いる理由は、第一ステップでの取り組みやすさと、将来の発展性の両方を目指したためである。PIC は低価格でピン数も少なく、また解説本も数多く出版されているため、初心者には半田付け作業もプログラミングも極めて取り組みやすい。しかし、大学の教材としてはこれだけでは不十分なので、産業界でもよく使われている H8 マイコンを使った教材も開発することにした。新学部の集中実習科目「組み込みソフトウェア」では、当面 H8 マイコンを共通マイコンとして用いる予定である。

2. 赤外線送信器の製作

ROBONOVA の赤外線リモコンと同じ波形を発生する赤外線送信器を開発するため、オシロスコープを用いて赤外線リモコンの波形を測定した。

2.1 赤外線リモコンの構成

赤外線通信はシリアル通信となっており、一本の信号ラインで NEC フォーマットという信号パターンを使用し情報のやり取りをおこなう。NEC フォーマットを Fig. 2 に示す。

2.2 ROBONOVA の赤外線リモコンの波形

ROBONOVA の赤外線波形は Fig. 3 に示すように NEC フォーマットと同じくリーダー部、カスタムコード、データコードの 3 部から構成される。しかしリーダー部は NEC フォーマットの場合の HIGH が 9ms、LOW が 4.5ms に対して、ROBONOVA の場合は HIGH が 5ms、LOW が 1ms となっている。カスタムコードはデータコードと同じビット '0' と '1' の並びとなっており具体的には '0101' となっている。データコードは 8 ビット構成になっており、ストップビットは存在しない。

ROBONOVA のカスタムコードとデータコードの '0' と '1' の仕様を Fig. 4 に示す。ビット 1 の場合 HIGH の期間が 0.6ms、LOW の期間が 0.44ms である。ビット 0 の場合 HIGH の期間が 0.6ms、LOW の期間が 0.92ms である。

2.3 USB インターフェイス付赤外線送信器製作

今回 PIC マイコンを用いて USB インターフェイス付赤外

線送信器を製作した¹⁾。使用した PIC は PIC12F629A である。USB インターフェースの部分は市販の USB I/F ボード” USB-I0V8” (テクノキット社) を用いた²⁾。

赤外線送信器の回路図を Fig. 5 に示す³⁾。赤外線 LED を 2 個配置し、USB からの信号を 4 チャンネル配線した。4 チャンネル配線したことにより $2^4 - 1 = 15$ 種類の信号 (命令) を送信することができる。また電源 (VCC と GROUND) は USB バスから供給されるようにした。製作した USB I/F 付赤外線送信器の写真を Fig. 6 に示す。

PIC マイコンはアセンブリ言語か C 言語でプログラミングできるが、今回 μs 単位の動作が要求されるため、アセ

ンブリ言語を用いた。C 言語の場合、コンパイラを使用して C 言語のソースコードをコンピュータが直接実行可能な機械語のプログラムに変換する。しかし、コンパイラが出力したオブジェクトファイルが必ずしもプログラマの望んだ待機時間を発生するとは限らないため、今回はアセンブリ言語を使用した。PIC のアセンブリ言語は 35 命令からなっている。

赤外線リモコンの波形と USB I/F 付赤外線送信器の波形を Fig. 7 に示す。二つの波形はほぼ同じ形をしていることが確認できる。ROBONAVA を正常に動作させることも出来た。

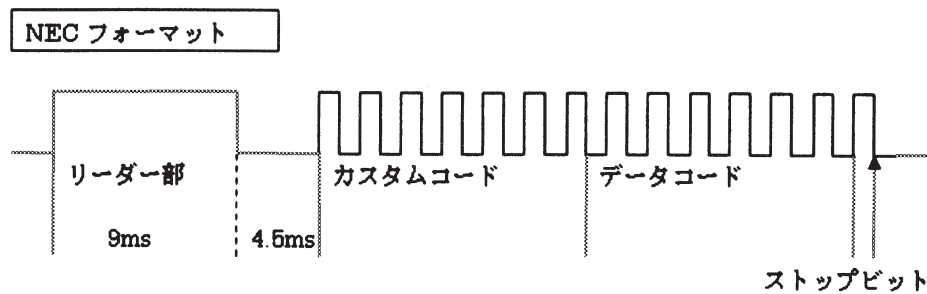


Fig. 2 NEC フォーマット

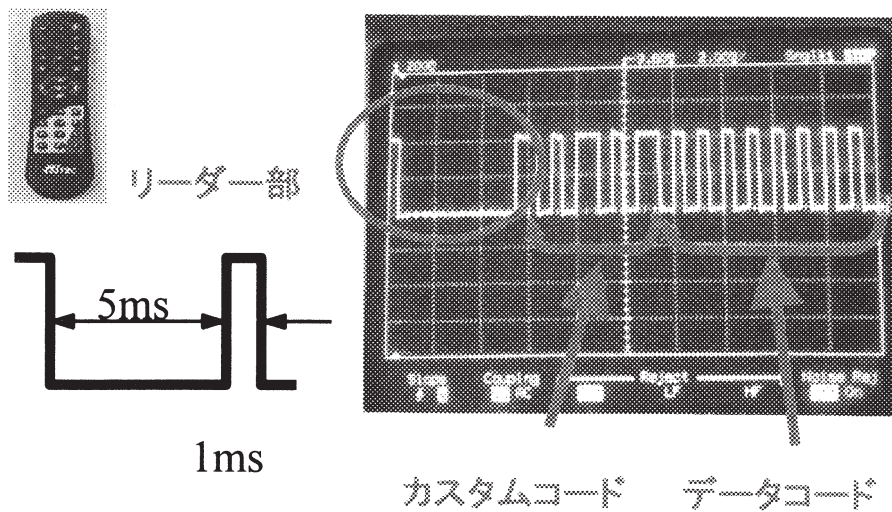


Fig. 3 ROBONOVA の赤外線リモコンの波形

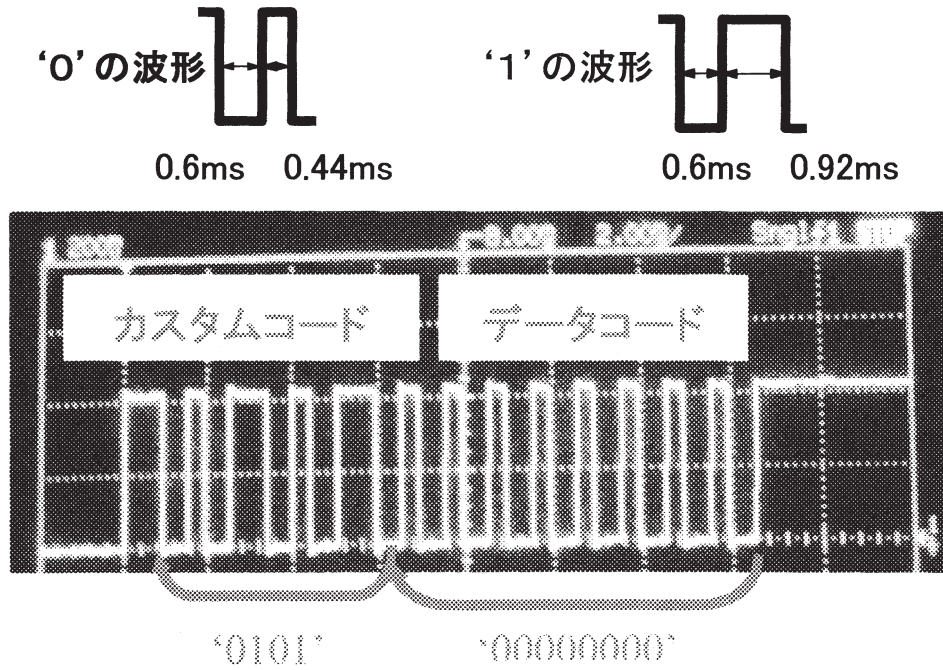


Fig. 4 ROBONOVA の '1' と '0' の仕様

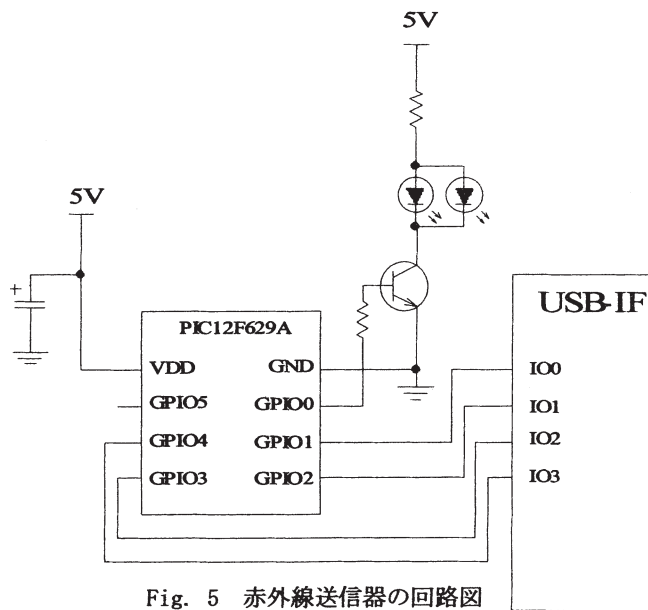


Fig. 5 赤外線送信器の回路図

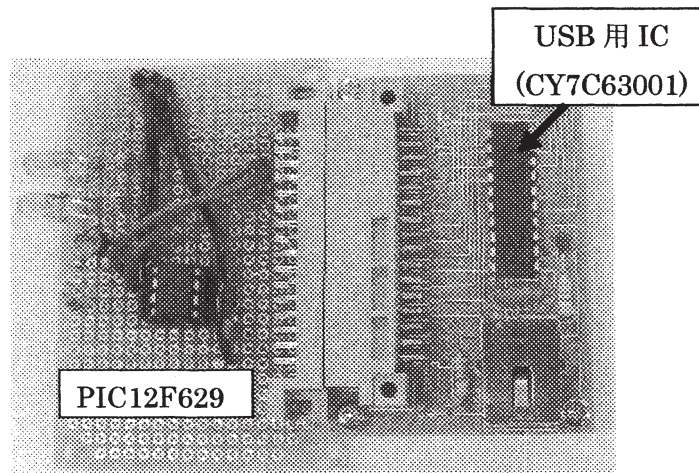


Fig. 6 USB I/F 付赤外線送信器

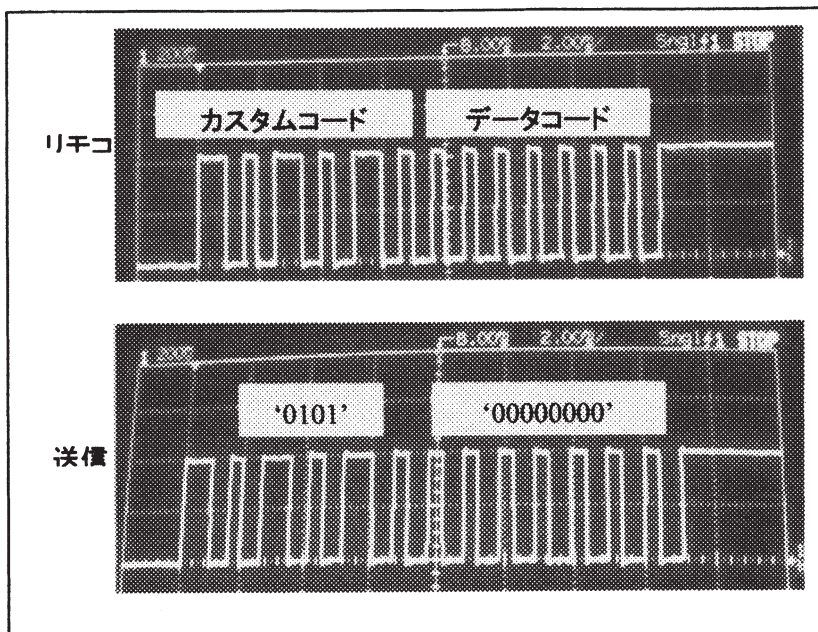


Fig. 7 USB I/F 付赤外線送信器の波形

3. 赤外線受信器と PWM 回路を搭載したロボット制御コントローラの試作

ROBONOVA の専用制御コントローラは ATMEL ATmega128 というマイコンを用いた MR-C3024 である。これを解析した結果、二足歩行にフィードバック制御は行われていないことが分かった。通常、ロボットの二足歩行では重心が足裏から外れた時の制御が問題になる。その重心コントロールため、ROBONOVA でも加速度センサによるフィードバック制御が必要と考えていたが、行われていなかった。その代わりにロボットの足裏の部分を広くすることでバランスを取り、簡単化していることが分かった。それなら、本体の制御は関節部に配置された 16 個のサーボモータの制御だけで良いので、制御ボードとプログラムが簡単になる。PIC マイコンでも十分いけると判断して、まずは PIC を用いてロボット制御コントローラを製作することにした。

3. 1 赤外線受信器の製作⁴⁾

赤外線受信器は USB I/F 付赤外線送信器の赤外線波形を受信し、その波形に従って命令を、PWM 波形を出力する PIC16F877A に送信する。今回 PIC16F877A は 12ms 周期で常に PWM 波形を出力しているため、赤外線受信器は PIC16F84A 内に組み込んだ。PIC16F84A の PORTA の 0 ピン目を赤外線受信に使用し、PORTB の 0~2 ピンで PIC16F877A

に 4 ビットの信号を送出する。

赤外線を受信する際は Fig. 8 に示すように、リーダー部の信号を受信後の 5ms の前後 $500\mu s$ の内に信号が LOW になったらカスタムコードを読み込む処理に進み、それ以外は初期状態に戻る。カスタムコードとデータコードのビット '0' と '1' は $1000\mu s$ と $500\mu s$ の前後 $50\mu s$ 余裕を持って信号の判定をしている。

3. 2 PWM (パルス幅変調)回路の開発

PWM とはパルス波のデューティ比を変化させることである。サーボモータの制御などに使用する波形で、変更したい角度によって出力する '1' のパルス幅を変更する。周期は一定である。Fig. 9 に ROBONOVA で使用しているサーボモータ用 PWM 波形をオシロスコープで撮った写真を示す。測定結果をもとに角度とパルス幅の関係式を算出した (Table 1)。ROBONOVA のサーボモータ用 PWM は 12.04ms の周期である。'1' のパルス幅は 0.600~2.400ms の間となっている。角度 (r) を 1° 変化させるごとに '1' のパルス幅が $10\mu s$ ずつ増減する。

今回、PWM 回路を PIC16F877A と H8/3052F の両方で作成した。使用したプログラム言語はどちらもアセンブリ言語である。アルゴリズムはほぼ同一で、フローチャートを Fig. 10 に示す。

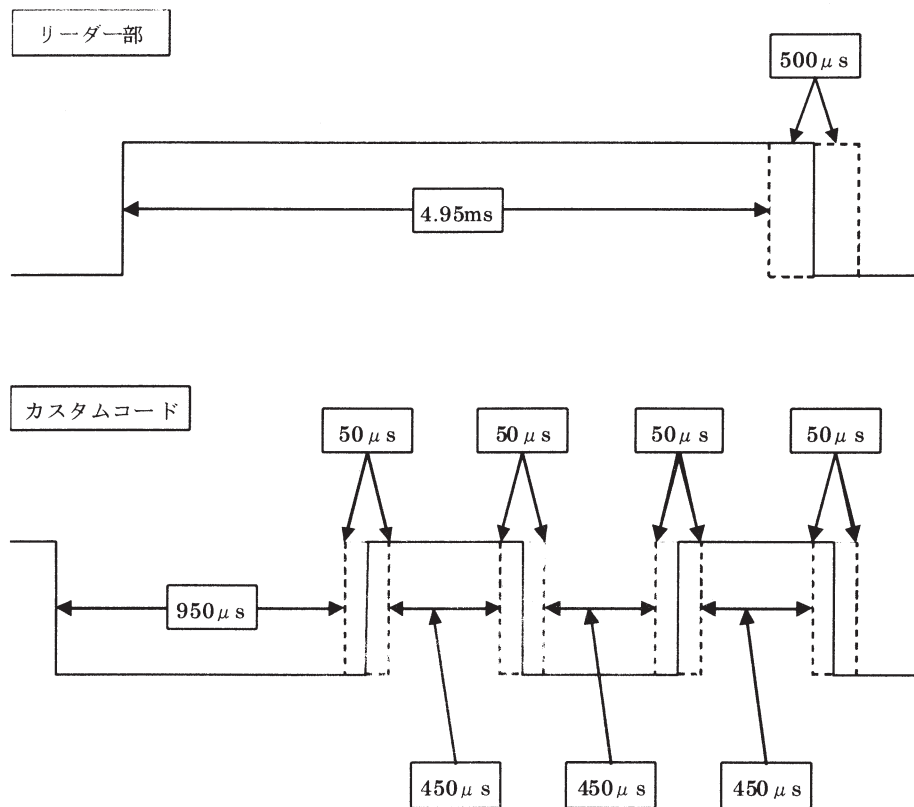


Fig. 8 信号入力の仕事み

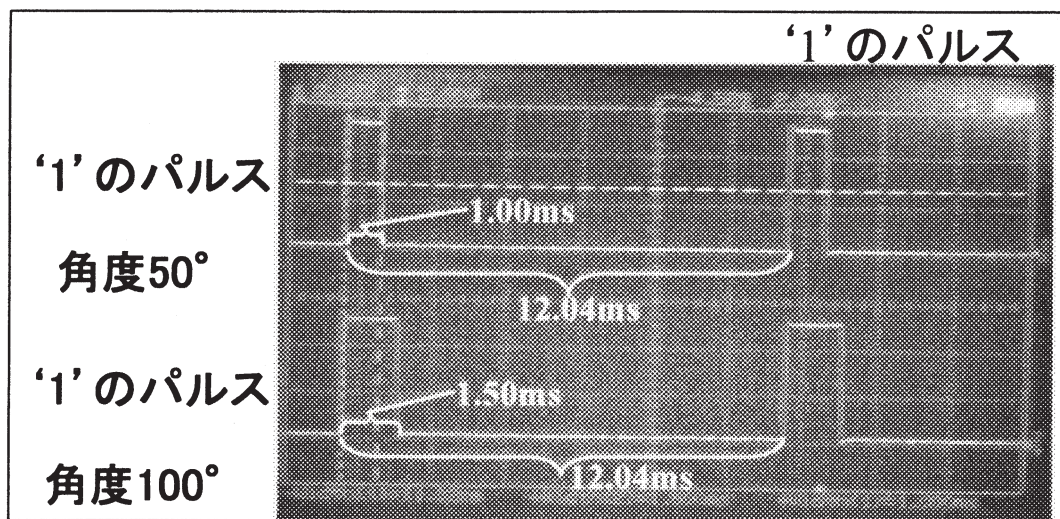


Fig. 9 PWM 波形

Table 1 二足歩行ロボットのパルス幅関係式 (r : モータの角度)

	右側のモータの関係式	左側のモータの関係式
'1'のパルス幅 t1[ms]	$t1 = 2.500 - 0.010 \times r$	$t1 = 0.500 + 0.010 \times r$
'0'のパルス幅 t2[ms]	$t2 = 9.540 + 0.010 \times r$	$t2 = 11.540 - 0.010 \times r$
周期 T[ms]	$T = t1 + t2 = 12.040$	$T = t1 + t2 = 12.040$

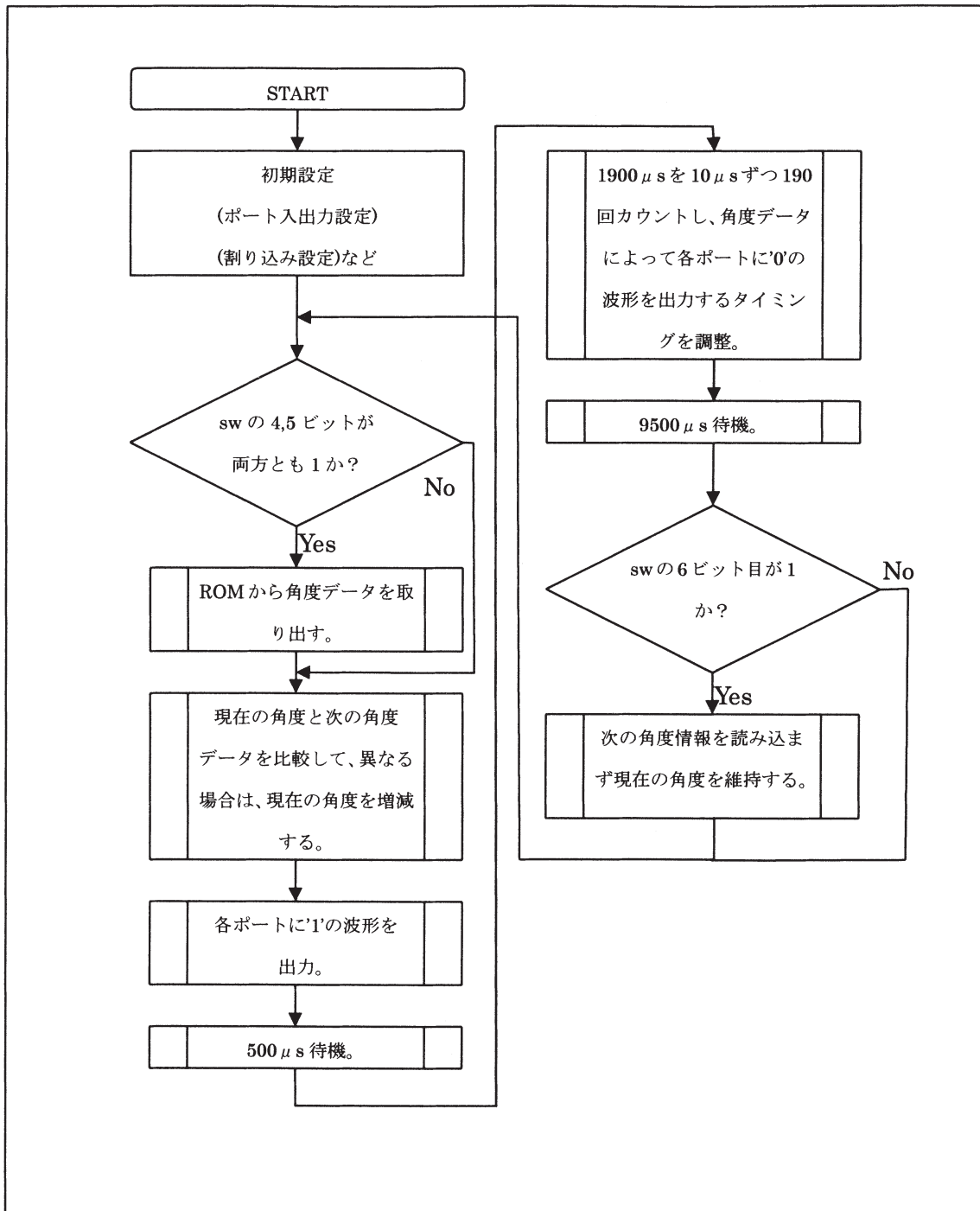


Fig. 10 PWM回路のフローチャート

3. 3 作成したプログラム規模

Table 2 にまとめる。

製作した回路に使った PIC の種類とプログラム行数を

Table 2 マイコンの種類と行数

	赤外線送信器	赤外線受信器	PWM回路
PICの種類	PIC12F629	PIC16F84A	PIC16F877A
行数	296行	178行	761行

3. 4 ROBONOVA 制御コントローラ用専用プリント基板の試作

プリント基板の設計にはアルティウム・ジャパン社の Protel 99 SE を使用した。同ソフトウェアを用いて入力したロボット制御コントローラの全回路図を Fig. 11 に示す。

3. 5 試作したロボット制御コントローラ

このプリント基板に、PWM出力をする PIC16F877A、モーションファイル（16 個のサーボモータの時系列角度情報）を記録した EPROM M27C256B-10F1、赤外線波形を受信する PIC16F84A を搭載した。完成したロボット制御コントローラを Fig. 12 に示す。PWM 波形を出す PIC16F877A は赤外線受光器と接続された PIC16F84A と接続されている。製作した回路の動作の流れを Fig. 13 に示す。赤外線送信器から信号が送信されたら、プリント基板の赤外線受光器が波形を受信し、PIC16F84A に送信される。PIC16F84A

は受信した波形から命令を抽出し、命令を PWM 回路である PIC16F877A に送信する。命令を受け取った PIC16F877A は EPROM に保存されたモーションデータを取り出し、モーションを実行する。すべてのモーションが済んだら、最後のモーションの状態で待機する。

今回用いた EPROM は、紫外線用いて消去を行う UVEPROM で、ROBONOVA のモーションプログラムを記録するために使用した。PIC マイコン内の EEPROM や ROM では容量が足りないなので、補助するために使用した。

PIC16F877A は 40 ピンの IC であるが、EPROM と接続したため、サーボモータ制御用のピン数が不足し、10 本だけとなってしまった。そこでこのコントローラでは腰から下の 10 個のサーボモータだけを制御することにした。これでも、最も重要なポイントである、うまく二足歩行動作を行わせることが出来るかどうかの判定は出来るためである。16 個のサーボモータ全ての制御は、次に作る H8 マイコンボードで行うこととした。

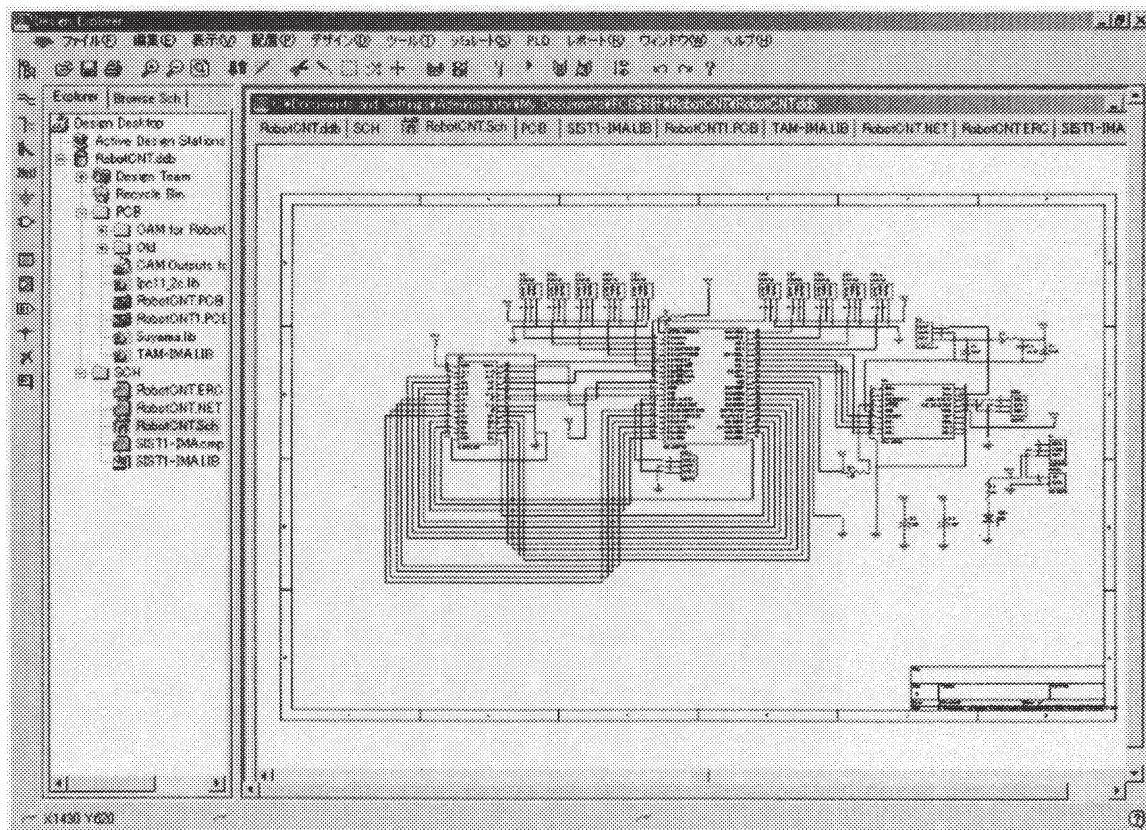


Fig. 11 Protel99SE を用いたロボットコントローラ全配線図の設計

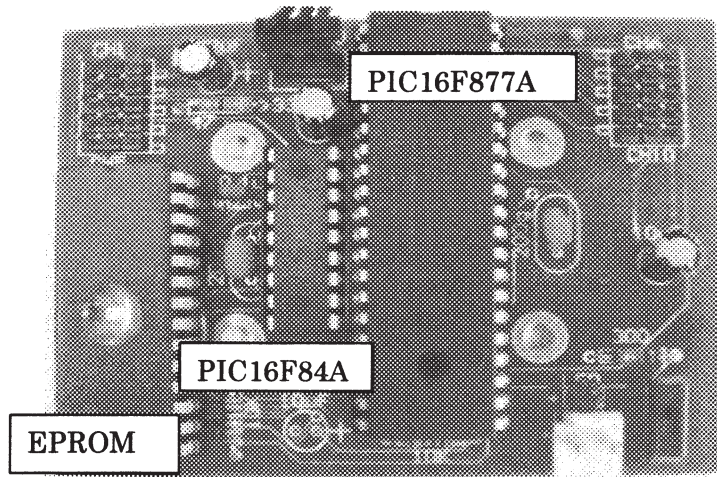


Fig. 12 赤外線受信器とPWM回路を搭載したプリント基板

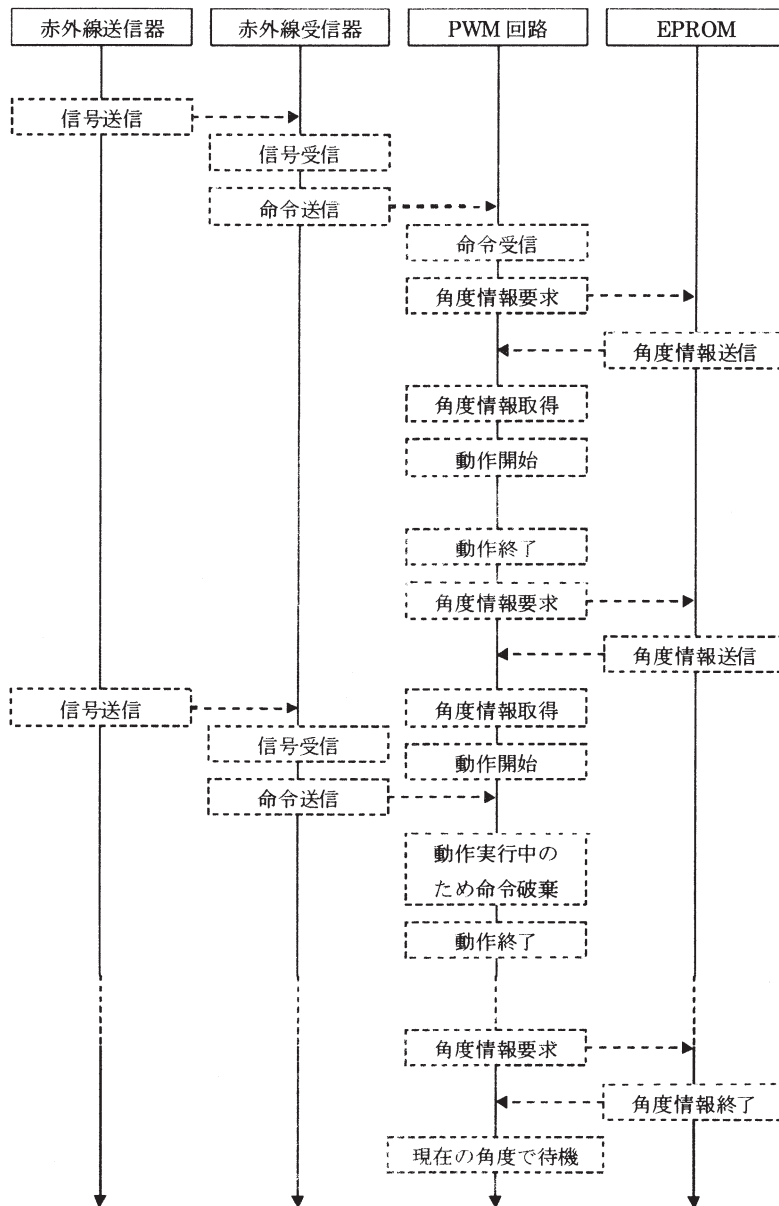


Fig. 13 回路処理のフローチャート

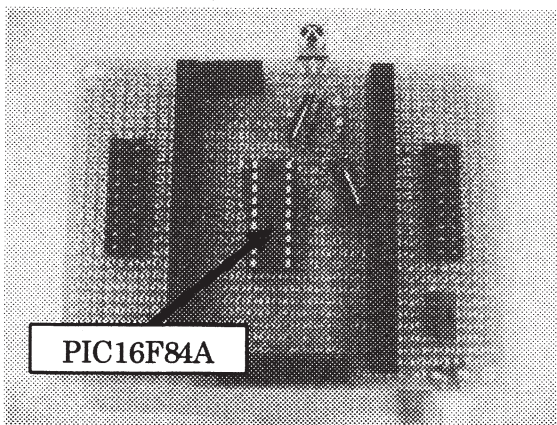
3. 6 動作確認

PC からの信号で登録したモーションを順に呼び出し、前進、後退、おじぎなど、腰から下の10個のサーボモータの制御で出来る動作を正常に行わせることが出来た。

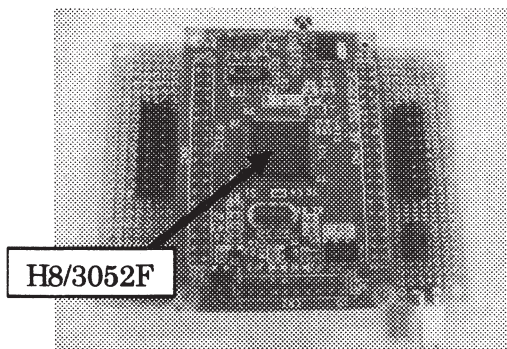
4. H8 マイコンの使用

H8 マイコンは、ルネサステクノロジーが開発したマイクロプロセッサである。より高度な制御を行うために、PIC を H8 マイコンに置き換えることにした。

16ビットの H8/3052F を使用することとし^{5), 6)}、マイコン搭載部分は市販の「AKI-H8/3052F マイコンボード (秋月電子通商製)」を用いた⁹⁾。これを載せるマザーボードは、専用プリント基板を起すほどでは無いので手作りとした。試作したロボット制御コントローラを Fig. 14 に示す。このボードでも、PIC を用いたロボット制御コントローラと同じく二足歩行はもちろん、16 個のサーボモータの全てを使った全身動作を正常に行わせることが出来た。



(a) マザーボード部分



(b) (a)の上に AKI-H8/3052F マイコンボードを搭載

Fig. 14 H8 マイコンを用いたロボット制御コントローラ

Fig. 15 はその中の一つ、「水平バランス」というモーシ

ョンを ROBO NOVA に行わせた写真である。

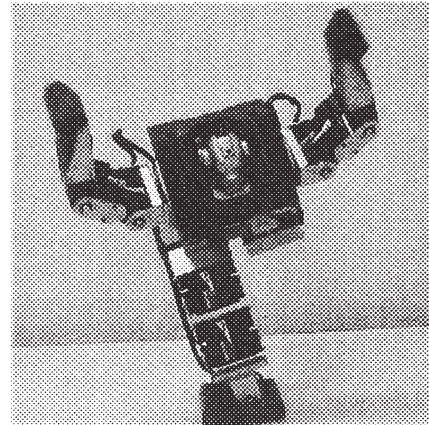


Fig. 15 「水平バランス」のポーズ

5. まとめ

中～上級用の組み込みソフトウェア演習用電子教材製作を目的として、市販の二足歩行ロボットを制御する、赤外線送受信器と二足歩行ロボット制御コントローラの2つを開発した。前者により、テレビなどのマルチメディア機器を制御するリモコンや、携帯電話と通信できる赤外線送受信器などのマイコン教材を開発する道が開けた。また、後者を各種センサやトルクの大きいサーボモータなどと組み合わせて発展させることにより、オリジナルなロボットを開発することも可能となった。今後、上級用電子教材開発につなげて行く予定である。

参考文献

- 1) 高橋孝雄:「やさしいPIC マイコンプログラミング&電子工作」, 2005, 株式会社秀和システム.
- 2) 永島智二:「手作り USB 機器—USB - IO で作る電子レットから Web カメラまで」, 2005, RBB PRESS.
- 3) 赤外線送信器 HP: <http://www5b.biglobe.ne.jp/~YASUSI/gallery/electronics/041219/041219.htm>
- 4) 田中光一:「PIC マイコンで作るインドア・プレーナラジコン飛行機を作って飛ばそう」, 2005, CQ 出版.
- 5) 堀桂太郎:「H8 マイコン入門」, 2003, 東京電機大学出版局.
- 6) 今野金顕:「マイコン技術教科書 H8 編—AKI - H8 で学ぶ組み込みコンピュータのハード&ソフト (IT text)」, 2002, CQ 出版.

平凡の原理と主観確率

— 参照集団はどう決まるか —

Copernican Principle and Subjective Probability
— How Do We Decide the Reference Ensemble —

榛葉 豊*

Yutaka SHINBA

Abstract : It is asserted by many astrophysicists and philosophers that the Copernican Principle applied to the future of our civilization seems to give some prediction on remaining time. And, the anthropic principle seems to explain the fine tuning of our universe. However, the use of the anthropic principle and the Copernican (mediocrity) principle, will conclude drastically different subjective probability for slightly different situation. That is, of course, related to the difficulty of the principle of no difference, namely the problem of reference ensemble. We will integrate the many world problems of anthropic principle, enigma of interpretation of probability, the harder problem of consciousness, transmigration view, many-universe in cosmology and many worlds in quantum mechanics. Then, we discuss the prior identification and the posteriorly acquired status, and also discuss the relation between subjective and objective probability. Additionally, we treat the quantum monad theory.

1. 序論

確率の謎に関係すると思われる多世界論あるいは可能世界論が、一見縁遠いと思われる色々な分野にある。一つは、量子力学の観測問題、解釈問題の一つの解決である、Everetteの多世界解釈^{13, 14, 33-38)}である。第二には意識の超難問または「わたくし」の問題^{1-6, 18, 39-52)}と呼ばれる唯我論、自我などに関する問題の説明に使われるもの。これは一人称の死生学、転生世界観、ゾンビ問題とも関係が深い。この線では中込の量子モナド理論^{54, 55)}もその視界に入ってくる。そして第三には、宇宙のファイン・チューニングに対する一つの理解法である人間原理^{7-12, 14, 19)}、更にその発展形としての地球文明に対する終末論法等に現れる平凡の原理である。第四には宇宙論において、宇宙の多重発生や脈動宇宙論である。そして最後は確率の解釈そのものに関するものである。古典確率であっても、確率概念や非決定論の受容には、可能世界論、アンサンブル解釈が、統計力学のような物理科学はもとより、経済学や倫

理学など社会科学、人文学あるいは日々の生活での非決定論の納得のためによく使われるであろう。また不充足理由律（無差別の原理）運用の困難にも関連する。

どの多世界も、一応それなりに事態を説明する理論装置として機能するように思われる。例えそれらが最善のものではないと考えられるかも知れないとしても、そしてOckhamの剃刀ですぐにもそり落とされそうなものかも知れないとしても、である。これらの色々な学問で別々に、その分野の困難を説明するために導入されてきた多世界は実は同じ出自ではないかと、筆者は考える。本稿では、Copernicusの平凡の原理に焦点を当てつつ、主観確率の謎、不充足理由律の困難、諸多世界概念の統合について考察する。

まず、それぞれの多世界のおさらいをしておこう。量子力学の多世界解釈は、観測問題における「波束の収縮」を説明するために導入された。状態のユニタリー発展と射影仮説の2元論を、ユニタリー発展だけの1元論にして、観

2008年3月6日受理

* 理工学部 情報システム学科

測量の固有状態への「波束の収縮」は存在しないとするためのものであった。

次に「わたくし」の問題である。「わたくし」の問題とは、なぜ世界は、かけがえのない「わたくし」の体と精神を通してのみ開けているのか、どうして「わたくし」は他者ではないのか。他者は存在するのかと言う問題である。一人称の「わたくし」の死とはどういう事なのかと言うことでもある。これは疑似問題であるとする論者や問題自体理解できないという論者も居るが、発達心理学では採り上げられている問題である。ここでいう「わたくし」から展開する世界をモノドと見れば、観測理論をその一練習問題と化すという量子モノド理論も一種の多世界論と言えりと筆者は思う。

人間原理は、宇宙のファイン・チューニング問題から出てきたものである。Edington や Weyl の巨大数仮説や Dirac の物理定数経時変化などという説¹⁴⁾ が昔有った。宇宙や電子などに関する値の間に 10^{40} 等という比があちこちに見られると言うような話である。その後の研究で、我々の世界の物理定数の値がごくごく僅か異なっている、原子が安定に存在できないとか、惑星形成がされない、高等生命は生存できない・・・などのことに気がつかれた。それなのに我々は存在する。この奇跡的事態（宇宙のファイン・チューニングと呼ばれる）をどう説明するかである。

第一は「偶然」である。第二は人類を愛する「神の恩寵」である。そして神の導入を嫌う第三の理論装置が人間原理である。それは B. Carter が創始し²⁷⁾、互いに大きく異なる種々のバージョンがあるのではあるが、多くの宇宙論者に支持されてきた。

我々人間が存在するということから、逆に宇宙のファイン・チューニング^{7,8,14,19)} を説明するのである。すなわち多宇宙の存在を仮定すれば、膨大な数のそれらの中には、ひとつくらいファイン・チューニングされた状態の宇宙が有るであろう。そこに生命が、高等生命が、そして意識が、ついには宇宙論に思いをはせる意識つまり私たちが生まれるであろう。であるから、我々の宇宙がファイン・チューニングされているのは必然なのである。ファイン・チューニングされていない宇宙では、我々のような問を発する生命体は存在せず、ファイン・チューニングされていない宇宙を観測すると言う事態はあり得ないのである。このようなことを観測選択効果と言います。それは、電話によるアンケート調査は電話を持っている富裕階層の意見に偏るとか、光学望遠鏡による天体観測は地球から見て明るく見える星に偏ったデータしか得られない等のことである。

我々の宇宙ではファイン・チューニングが見られる。

⇒ファイン・チューニングはほとんど奇跡的な事態である。

⇒この驚くべき事態は説明されなければならない。

⇒多宇宙仮説が真であればファイン・チューニングの不

思議さを大幅に軽減する

⇒従って我々は多宇宙仮説を受け入れる合理的理由を持つ。

と議論が進められる。このような論法を「遡行的推論 (retroduction)」, 「仮説形成的推論(abduction)」と言う。不思議なことを前にして、もし何々だったらこのことは不思議ではない。だから何々だったのだと言う強引な推論法である。

Leslie^{24, 25)} は湖の魚という譬えを持ち出す。『あなたは水面の濁ったこの湖の底の方に 23.2576 インチの魚が住んでいた事を知っている。と言うのも、あなたはたった今その魚を釣り上げたからである。あなたは湖に関するこの事実をさらに納得させるような強力な説明を必要としているだろうか。勿論そんなことはない、とあなたは考えるだろう。どんな魚でも何らかの長さを持っていないからである。しかし、次の瞬間にあなたの釣り道具が将にこの長さのプラス・マイナス 100 万分の 1 インチの魚だけを釣るようなタイプであった事に気付いたとしよう。そうするとどう考えるであろうか。多分、二つの選択肢が考えられるであろう。湖には非常に多くの異なった魚が泳いでいて、あなたの道具はそのどれかを釣るのに適していたのである。或いは、恵み深い神があなたを哀れんで、将にその道具で釣れる魚を湖に泳がしたのである。』

釣り道具に適合しない魚は釣れない、と言う釣りによる選択効果である。奇跡の原因は恵み深い神か、そうでなければ背後に居るあなたの釣り道具にサイズの合わない沢山の魚たちの存在である。しかしその様なサイズの合わない魚は論理的に存在が要求されるものでなく、魚のサイズは色々ばらばらついていると言う背景知識が前提されている。

特に宇宙論者 Dicke が主張した物理法則は一定にした一つの宇宙の中から、その部分領域などとして我々の世界を選び出すのを「弱い人間原理と呼ぶ」。一方、物理法則さえも異なる多世界を議論するのを「強い人間原理」という。強い人間原理では宇宙は必然的に知的観測者を生み出すようなものでなければならない。

また弱い人間原理では、現に在る観測者の地位がその観測者の存在を不可能にはしないと言うのであるが、そこを不可解、すなわち確率が低くはないとすると、それは次の章で論ずる平凡の原理となる。観測者は参照集団の中で何か特殊な特性を持っているのではなく、平均的な地位を占めている確率が高いということから議論を出発させる論法である。終末論法もこの一例である。

宇宙論や確率論一般の背景としての多世界についてはここでは割愛する。

2006年から2007年にかけて、三浦は現代思想に人間原理、転生世界観など多岐にわたるテーマについての12編の連

作論文¹²⁾を発表したが、以下それを念頭に置いて話を進めていく。事前の価値、事後の結果的認定という問題。不充足理由律と参照集団の決まり方の問題に重点を置いて考察する。

2006年のアメリカ映画“The Prestige”（日本では2007年6月公開）は怖いほどに「わたくし」の問題の核心を表現している。これまでの転送装置事故問題や分割脳問題と結局全く同じ事なのであるが、本質をえぐり出したような映画である。三浦の論文では、「わたくし」の問題を疑似問題であるとして退けるが、転生世界観に関連させての議論がほとんどで、事後の「わたくし」認定という注意に終始する。ここでは“The Prestige”をどう見るかを論じたい。

簡単に、“The Prestige”の紹介しておく。それは2人のライバルマジシャンの瞬間移動マジックをめぐるの凌ぎあいの物語である。驚くようなトリックを双方繰り出すのだが、映画の最終トリックの1つ前の大物トリックが「わたくし」の問題になっている。物理学者 Tesla が、転送機を開発し、しかしその試作機には欠陥があったのだが、マジシャンはそれを承知で譲り受ける。欠陥とは転送元に物体が残ってしまう、すなわちコピーが出来てしまう事である。マジシャンは舞台の上で自分が転送機に入る。観客席の後方に自分を転送する。同時にそこに残ってしまった「自分」は床が割れて床下にある水槽に落下するようになっていて、その場で溺死しなくてはならない。舞台をやるたびに転送機に入って自分は喝采を浴びているのか、水中で苦しみもがきながら1分後の死を待っているのか、どちらの側になるのだろうかと恐れつつ舞台を続けるという話である。舞台とは別の場面で、転送して2人になった主人公が「自分」を射殺する場面もある。

この映画は、別にこれまで哲学者達によって沢山されてきた転送機事故問題分析と本質の違いは何もない。転送機は、元々オリジナルをスキャンし、同時にオリジナルを破壊する事が仮定されていて、それがうまくいかずコピー、いやオリジナルか、が残った場合の地位の問題が問われていた。またうまく作動しても、オリジナルの破壊が少し遅れるときに、単にオリジナルは転送機に入って殺されるだけであり、向こうに生じるであろう、肉体も記憶も自分と同じコピーに「わたくし」を託して死ぬるかと言う問題であった。分割脳の問題も全く同じである。

2. 平凡の原理

2.1 終末論法と平凡の原理

終末論法は、我々の宇宙の歴史の中での位置から、地球文明の寿命を論理的蓋然性だけで推論しようとするものである。それは、何人もの宇宙論者によって、それぞれに少しずつ、あるいは大幅に異なった形で提出されてきた。終末論法の特徴は、なんの現実世界に関する情報も用いず

に(勿論問題設定に関する情報やある種の事前確率は分かっている)、蓋然性だけで結論を得ると言うことである。従って、目的は全く異なるが、確率の謎を考える上で非常に有用であると思われる。

情報がない場合に、人はどういう選択をしたらよいであろうかと言う意志決定の文脈でいえば、有利なことが起こる事前確率の高い選択をせよと言うことになる。もし何か異論があるのであれば、根拠となる事実すなわち情報があると言うことであるから、その情報に従ってベイズの定理によって事後確率としてベイズ改訂していけばよい。

誘拐されて地下室に幽閉された。同時に記憶喪失になった。その前にどこにいたのか、自分はどういう人物かという記憶もなくなって、さてこの地下室はどこにあると思うか、正解しないと殺すと誘拐犯に言われたら、人口などの事前情報から、本州と答えるのが妥当だろう。四国とは普通言わないであろう。

さて、終末論法が一番単純な形を見ておこう。終末論法は平凡の原理にもとづいている。平凡の原理は天文学では Copernicus の原理と言われることが多い。我々は宇宙の中心ではないし、特殊な特別な環境に居るのではない。平凡なあるいは平均的な、または典型的な位置を占めている確率が高いと言う、蓋然性においての原理である。言い換えれば我々の存在は低確率な不可解なものではないという原理である。一番有りそうな位置にいる確率が高いということである。この、ここにもあるのだから他にもあるだろうという原理により天文学者は地球外文明の可能性を論じ、地球外文明に関する物理学者 Fermi の論証や天文学者 Drake の見積もり式などが提出され、1960年にはオズマ計画が実行された。この式には文明の寿命という因子がある。これを推定するのが終末論法の原初の形である。

終末論法の議論は次のようになる。我々の文明を考えよう。

私は人類の中のランダムなサンプルである。

⇒ ランダムに選ばれた個人は、全人類（全人類史を通しての）の中で、特殊な位置だと期待するのは合理的ではない。仮説検定の形式で言えば、有意水準5%で、人類の先頭（アダムとイヴ）の2.5%であるとか、人類滅亡直前の2.5%に入るとは期待しない方がいいだろう。

一方、地球人類は急増している。

⇒ そうすると、典型的順番の人間は時間で言うと、滅亡寸前の時期に生きている。

⇒ 人類はまもなく滅亡する。

この様な形式である。終末論法は、前提も色々で有り得るから、結論も様々である。人口が飽和しているなら、人類はずっと続くという結論になる。宇宙植民をしてそれ以降は、地球を飛び立った人類文明は銀河で繁栄すると言うシナリオを前提にすれば、また違って来る。

ここで重要なことは、私は、というときの私は、「わた

くし」の問題で言う「わたくし」と密接な関係がある。同じというのではなく、逆に正反対の意味合いを持つのである。これこれしかじかの肉体と歴史を持ち、どういう経緯で生まれ、どういう記憶と性格とクオリアをもつかけがえない「わたくし」ではないのである。たまたま、地球文明の将来について思いをはせている私なのであって、それは、その様な知性と興味を持つものなら誰でもよいのである。このことについては、2.3, 2.4で述べる。

しかし、その様な観測者(思考者)私が、どのようなものであり得るのであるのか、と言うことはこれまた重大な問題である。人類であっても、地球文明滅亡などと言うことを思いつかないような段階の個人は除外されるのか。地球を飛び出した植民星の人類は、もう滅亡の危機など考えていないのではないか、もしかしたら人類が作成した Si 型生命体であってもよい、等と言うことである。それによって議論の結果は全く変わってくる。この参照集団の問題は 2.4 で論ずる。

2.2 逆ギャンブラーの誤謬

人間原理、平凡の原理を論ずるとき、最初に注意される例題がある。哲学者 I. Hacking⁵⁹⁾ の、「逆ギャンブラーの誤謬」である。これを見ておこう。

まず、ギャンブラーの誤謬とは次のことを言う。

このルーレットは、しばらく観察していたが赤が出る方が、黒が出る方より多い。このルーレットは偏っていないはずだから、長い目で見れば赤と黒の出る回数は半々である。だからもうそろそろ黒にかけた方がよい。

この町内にはいま爆弾が立て続けに 2 個落ちた。だからこの町内に逃げ込めば安全だ。(全く逆に、この町内は呪われている、と、ベイズ学習するという人もあるかも知れないが)

この様に、大数の法則と独立性と言うことに対する誤解である。今までのデータから、未来の予測をする際の順方向の誤謬がギャンブラーの誤謬である。

これに対し、逆ギャンブラーの誤謬とは次のような考えである。現在のデータから、過去の事象や仮説、原因の可能性を推古遡及する際の誤謬である。

ある日、私は賭場に入っていた。するとロイヤルストレートフラッシュが出たと言って大騒ぎだった。ロイヤルストレートフラッシュが出るとは奇跡に近い。ものすごく沢山の試行をしなければ出るものではない。と言うことはこの賭場では、ずっと長い間ポーカーが続けられていたのであろう。

強い人間原理で、多宇宙、すなわち多数回の試行、を導入するのは、この過ちではないかという議論もある。

一つの宇宙 → 一回のゲーム
多宇宙 → それまでの多数回のゲーム

と言う対応である。

三浦のいう例は次のようなものである。

サイコロを 3 つ振る賭を賭場でやっている。私が賭場から呼ばれて行ってみると (6, 6, 6) が出ていた。これは事前に多数回の投げがあったからであろうか。この状況は多投説を確証しはしない。今回初めてだろうと、過去に何回試行されていたと、今の確率を変えはしない。

しかしもし、こうだったらどうであろう (Bostrom 版)。

(6, 6, 6) が出たときのみ、あなたを起こして賭場に呼んでくる事になっていた。これは事前に (6, 6, 6) に特別な価値を与えていることに当たる。これだとあなたは必ず (6, 6, 6) を見る事になる。観測選択効果である。これなら多投説を確証する。サイコロの目は (6, 6, 6) しか観測されない。観測されるまで、何度も試行されて、実際実現したというわけである。

しかしもし更に次のような強い条件が付いていたらどうであろうか。378 回目の投げで (6, 6, 6) が出たらあなたが呼ばれる。379 回目だったら、あなたとは別の誰か特定の人が呼ばれる、等となっていた。

するとサイコロは 1 回しか投げられていなくて、偶然 (6, 6, 6) が出てあなたは呼ばれたのと区別は付かなくなる。オリジナルの逆ギャンブラーの誤謬同様に多投説は確証されない。

2.3 事前の指定と事後の認定

ポーカーでロイヤルストレートフラッシュが出たときの驚きはなんであろうか。(C3,S8,S9,DA,D3) も確率的には同じ筈である。それは、ロイヤルストレートフラッシュと言う組み合わせには、事前の価値付けがなされているからである。(C3,S8,S9,DA,D3) は、その他のどんな価値付けもされていない手と一緒にされ分類される。しかし、サイコロの (3, 1, 5) にしても、もしそれがあなたの母の誕生日だったら、あなたにとっては、事前の価値があったのである。統計力学の原理も、同じ巨視的配置になる微視的な組み合わせの数を数えるという、その様な類のものであった。同じ分類になる手の数を数え上げるのである。

ここで、三浦の挙げる例を見てみよう。2000 年の TV 朝日系の TV シリーズ「トリック」では冒頭で、マジシャン山田奈緒子が、相棒になる物理学者上田次郎に予言マジックをしてみせる。それは次のようなトリックである。

上田の研究室を初めて訪れた山田は「封筒有りますか」と聞き、上田はそこらを探し回り封筒を発見して山田に渡す。上田に百円玉に印をつけさせる。それを貰った封筒に封入する山田。呪文を唱える山田。すると山田の手には上田の印をつけた百円が。

トリックは次の通り。封筒には底にスリットがありそこから印の付いた百円を取り出した。このスリット付きの封筒は、元々は山田持参で、隙を見て上田の極めて乱雑な机に忍ばせておいたのだ。

こんなに綱渡りのような都合の良いことの連続でしか成り立たないマジックは、現実には成立しないと思われる。しかし大丈夫なのである。

その理由は、もし都合よく行かなかったら「その時には別のマジックをやりました」という事であった。封筒マジックでなくても何かが成功すればいいのである。後出しジャンケンのようなもので、相手の出した手に応じて、その後で対応する手を使って必ず成功させるのである。

1から5までの数字を選ばせて、あなたが5を選んだら、靴底から「あなたの選ぶ数字は5です」と言うカードを取り出すというマジックも同様である。もし4を選んだとしたら、尻のポケットから「あなたの選ぶ数字は4です」と言うカードを取り出せばよい。

これが事後の結果的認定ということである。それぞれの場合によって、やる手品が違ったりしているとか、カードを取り出す場所が違って居るではないかという難詰が出てこよう。しかしよいのである。マジックの成功という観点からすればどれもよい。結果的に使われたマジックが、物語に残るマジックになるのである。それは事後に発生した価値であり、事後に結果的に発生した世界に中心なのである。

どの手品で、どのポケットからのカードでマジックが成功しても良いのである。成功すると言う役割を果たしている。この場合、マジックが成功すると言うことは、事前に価値を持っている。しかし、どういうマジックかは事前の価値を持っては居ない。マジックの成功は観測選択効果により（ほぼ）必然である。事後的に、事前に指定された価値が生じた物を出してくるだけで、それが事後的に特定の地位を占めるのである。

この意味を宇宙で言えば、我々のいま居る「地球」は、太陽系の第3惑星で、かくかくしかじかな星であるが、三浦のよく言う言い方で言えば、その名は固有名詞ではなくて普通名詞であると言うことになる。宇宙論や文明の寿命を議論するような（どんな形であれ）知的生命体を、その歴史の中で生じさせたような惑星を普通名詞「地球」と、事後的に呼ぶのである。（第3者から見ればこれから生じさせそうな惑星も地球の候補ではある。）

宇宙論、文明の寿命等に思いをはせている観察者が居る星が「地球」なのであるから、観察者はアンドロメダ星雲の機械文明の一員でもよくて、その星では「地球」と言っていないのであるが、我々の議論ではそれを地球と呼んで差し支えないのである。ここでの問題は確率の議論でその分母となる宇宙、分子となる有る性質を満たす宇宙の数だけが問題なのである。「地球」や観測者はその分子の数に入っているだけで、他の星が、固有名詞の地球かも知れないわけであるが、それは問題ではない。私という観測者はどの星の住人でもよかったのである。事後的に私になっている。

ここまでは、ほとんどの人が納得するであろう。それでは、一人称の「わたくし」の問題ではどうなるであろうか。地球上に同時期に60億人という肉体が存在する（ここでは「今此处問題」と呼ばれる「わたくし」の問題の類似問題、すなわち「なぜ世界は21世紀の日本から展開しているのかという問題」には触れないでおく）。すると、そのなかでなぜ「わたくし」の世界は「わたくし」の肉体と精神を通して開けているのか、他の肉体の経験は出来ない、と言う問題は、疑似問題であることが分かるであろうと三浦は主張する。

ここでかけがえのない「わたくし」、死んでしまったらもしかしたら世界の存在はなくなるかも知れないという議論さえ出来る「わたくし」は、固有名詞ではなく普通名詞となる。

多宇宙 ↔ 60億人の人類
地球を含む宇宙 ↔ 「わたくし」の肉体

と対応している。

哲学的問を發している一人称の「わたくし」に、事後的にこの個人名で呼ばれている私の肉体と精神になる、あるいはそう呼ばれる事になるのである。「わたくし」がある、と言うのが事前の価値である。

こうして何も問題はない。「わたくし」には他人の経験、知覚は出来ない。また逆に言って他人の経験、知覚をするなら、それはもうその別の肉体的個人の「わたくし」である。それぞれの人にそれぞれの「わたくし」である。この様に「わたくし」の問題は疑似問題であると切って捨てられるだろうか。

条件を満たす他の肉体も「わたくし」である。これから転生世界観と一致した見方が出てくる。

「わたくし」であることは、論理的、物質的連続性で決まるのか、それとも事後の認定なのか。事後の認定とすると、「わたくし」感をどう説明するのだろうか。重大なことは、「わたくし」感を説明できないと、みなはゾンビであるかも知れず、唯我論を克服することが出来なくなるのではないだろうかということである。私だけが特別と言うことはない、という平凡の原理を持ち出しても、世界の展開元を議論するとき、確率的原理である平凡の原理は用いることができないと思う。

また三浦¹²⁾では分割脳や「プレステージ」の状況の考察がつけられていないように思われる。筆者は、疑似問題と切って捨てる前に検討がまだまだ必要と思える。

ここで用語の説明をしておく。SIAとは、Self Indication Assumptionの略である。「わたくし」は事前に特定の価値を持つ何かである。世界に自意識は沢山あっても、場合によっては、「わたくし」は実体化しないかも知れない。「わたくし」となるためには、特定の歴史が必要とされている、

等の考え。意識達の中からではなくすべての存在の中からのランダムなサンプルなのである。

一方、SSA とは、Self Sampling Assumption の略で、「わたくし」は事後的に同定される存在で、もし世界に自意識が存在すれば、それらの中からのランダムなサンプルとして「わたくし」は必ず実現すると言う考え。終末論法は SSA に基づいた議論である。

2.4 参照集団はどう決まるのか

もし SSA を採用すれば、「わたくし」は多宇宙の他の宇宙にも居るだろうと言うだけでなく、この宇宙の他の肉体と精神であってもよかったと言うことになる。宇宙について考えている知的生命であればどれも選ぶところはない。宇宙の思いを馳せる知的生命が結果的に「わたくし」の地位を襲うのである。

どの肉体でもあり得たのであるから、それを同じと思うことにすると、転生世界観と同じようなことになる。しかし当然のことであるが、他の転生体とこの「わたくし」にはなんの因果的繋がりもない。すなわち記憶のごく僅かな連続なども全くないのである。それで転生と言えるかという問題は残るが、人間が生きる上での価値観の問題と言うことになる。

ここで注意しなければならないのは、平凡の原理を用いるときに、参照集団の取り方は必ずしも自明ではないと言うことである。終末論法の所で見たように、単に人類の一員なら数に入るというのではなく、そこでは、地球文明の将来について不安を持っていて、高い知能も持ち合わせている人という条件が付いている。それをなぞるなら、転生するのは、その様な条件を満たす人の間に限られると言うことになる。つまり同じレベルの人にしか転生しない。

単純に、唯我論では世界の対称性が悪いので（「わたくし」の肉体、精神だけが特別にクオリアを持っていることになるので）、全ての肉体は同じ地位を持っているとする転生論とは、当然ではあるが転生する範囲が異なるのである。

この転生しうる（言葉の問題で転生という言葉が嫌なら単に準拠集団とか参照集団と言えばよいであろう）範囲、終末を考えているかどうかなどと言う条件や覚醒度が高い人かどうかという条件・・・などで参照枠が変わってくる。それによって見積もりが違って来るのである。「どう見るか」で確率が変わるのである。しかしそれこそ、「主観確率」とか「信念の度合い」と呼ばれる由縁である。

ここに、不充足理由律あるいは無差別の原理との結びつきが伺える。

不充足理由律はどう運用すればいいのか。何を持って原子的な命題でお互いに差別がないと判断できるのであるか自明ではない。実際不充足理由律のパラドックスは沢山知られている。例えばワインと水のパラドックス、Bertrand

の幾何学的パラドックスなど¹⁵⁾である。

Bertrand のパラドックスは、円を切るランダムな直線を考えたときに、弦が内接正3角形の一辺より長くなる確率を問うものである。どういう変数について一様分布なのかで確率は全く異なる。直線の角度とか、直線の円の中心からの距離とか、面積に様に減の midpoint が分布するなどによって確率値が違って来る。しかしある変数が自然な物理的状況は考えられるので、判断の方法はあると言える。

ワインと水のパラドックスでは、ワインと水を混合する際の濃度の範囲を問うのである。この際、ワイン中の水の割合を変数にするか、水の中のワインの量（すなわち前者の逆数）を変数にするのかで結果は異なる。この場合でも人間が液体の混合あるいは希釈を行う際の操作はどう動かすかと言うことを分析してみれば（液体 A と B と言うのではなく希釈用の液体と薄められる側の価値を持つ液体という区別がある場合なら）なにかの手がかりは得られるのではないだろうか。

しかし量子統計に見るように、Bose 統計、Fermi 統計のように、見方で変わるというわけには行かないものもある。実際実験で区別が付く。

終末論法では、我々であるとか、「わたくし」の歴史上の位置を問題にするが、その我々は全人類の中での位置なのか、それともある条件を満たす部分集団の中で考えるのかが問題になる。比喩的に言えば、上に出てきた転生論で、転生できる範囲はどこまでと考えれば良いか、と言う問題である。それによって結果の見積もりが変わってくる。

しかし、文明の終末に興味を持つような、のような曖昧な条件で参照集団が定義されるのは余りに頼りなく、結果に対する信頼度も低いと言わざるを得ない。

この様に平凡の原理は、参照集団の問題が出てくるので、不充足理由律あるいは無差別の原理と強い結びつきが生じるのである。

不充足理由律の具体的運用について極端な例を作ることが出来る。参照集団をどこまでとするかで、ある事象の確率をほぼ 1 にも 0 にも出来るという例である。合理的推論をするのだが、参照集団の見方で全く変わってしまう。だからこそ「主観」確率、あるいは信念の度合いと呼ばれているのではあるが、次の節で「眠り姫問題」を見てみよう。

3. 眠り姫問題

漠然とであるとか直感的にと言うのではなく、何か根拠を求めつつ主観確率を見積もると言うことがある。そのときには、原子的な命題、原子的存在を見いだして、それらの間にとくにどれかが起こりやすいと言うことはないと言う不充足理由律より、無差別であるとして、それらに等確率を付与する。

上にも見てきたように、この作業は、見方によりどうでもなって根拠が見いだせなくなることがしばしばある。

2000年にElgaによって提出された「眠り姫問題」^{10,56)} (the sleeping Beauty Problem) を見てみよう。なおこの問題は意志決定理論分野では、数年早く知られていたという。

あなたは日曜日に睡眠薬で眠らされる。その後フェアなコインが投げられる。(下の表のように月曜には必ず起こされるので、コインは月曜に起こしてから振っても良いとされているが議論の余地はある)

表 → 月曜
裏 → 月曜 火曜

その結果、裏表に従って、上に示したように表なら月曜に起こされて、質問をされてまたすぐ眠らされる。もし裏の場合は、月曜に起こされるのは表の場合と同様であるが、また眠らされた後、火曜にまた起こされ、月曜同様に質問されまた眠らされる。このとき月曜に起こされたという記憶は完全に消去される。火曜に起こされたときには、前の記はなく、今日が何曜かわからない。あなたは実験の設定は完全に分かっているが、とにかく目覚めたときに何曜かわからないし、コインが表だったのか裏だったのかかわからない。水曜日に起こされて実験終了となる。

さて、あなたは起こされたとき「コインは表だったと思いますか」と表だった確率を聞かれる。

この問題には2つの解答があり得る。それは $p=1/2$ と $p=1/3$ である。ここにはベイズの定理的状況がなかなか理解できない、と言う次元の問題よりもっと深い困難があるのである。

まず $p=1/2$ 説。実験開始前に表の確率を問われたら、フェアなコインだということであるから $p=1/2$ である。そして月曜に起こされることは裏でも表でもそうなのであるから、自分が起こされたというデータは、新しい情報にはならず、確率は変わらない。起こされると言う事態は確率1で起こるのである。Lewis⁵⁶⁾はこの説である。

次に $p=1/3$ 説。実験者から見ればあなたが起こされるという状況は3つある。表が出て月曜に起こされたとき。裏が出て月曜に起こされたとき。そして裏が出て火曜に起こされたときである。この3つが無差別であると考えれば、仮に表と答えたら正解率は $1/3$ である。Elgaはこの説である。

次に、別の質問。起こされたあなたは「今は月曜日です。さてコインが表だった確率は」と質問される。表の確率はどれだけか。

今度は月曜であるという新たな情報が得られている。この問に対する答えは、前問の $p=1/2$ と $p=1/3$ の2説に対応して2通りになるだろう。

$p=1/2$ 派。→ 火曜ではないことが分かったのである

から、裏が出て火曜という可能性はなくなった。表が出て月曜か、裏が出て月曜かである。実験前の状況では裏が出て火曜の確率は、裏の $1/2$ かける 月か火のどちらかという $1/2$ で $1/4$ である。これがなくなり 裏で月曜の確率 $1/4$ と 表で月曜の $1/2=2/4$ が残る。これを比較すると $p=2/3$ である(ベイズの定理で改訂したのである)。

$p=1/3$ 派 → 火曜の可能性は $1/3$ であると主張しているのであるから、残るのは 表で月曜の $1/3$ と、裏で月曜の $1/3$ である。これより $p=1/2$ となる。

両説とも月曜と分かったときに表の確率が高くなるが、高くなること自体には納得がいく。しかし $p=1/2$ 派だと、次のような不具合がある。コインを投げる時期は月曜に起こした後でも問題は変わらない。その設定では、月曜と分かったあなたは、これからコインが投げられるのだと分かる。これから投げるフェアなコインは表が $1/2$ が出る。しかるに上記推論では、月曜と分かったとき、表の確率は $2/3$ であると言うパラドックスになる。

さて、両説のどちらが正しいのであろうか。今のところ、それぞれ別の状況で正しいとされている。この実験が1回限りのものであるのなら、 $p=1/2$ が正しい。肉体としての私が1つだけであり、他のものであり得ないときには正しいと言ってもいい。

しかしこの実験が何回も繰り返し行われるとか、この実験は大勢に対してやられている、従って今の目覚めを経験している私は誰でもあり得た、と考えられるならば、表で月曜の起こしと裏で月曜の起こしと裏で火曜の起こしの数は同じ値に収束する。これから直ちに $p=1/3$ である。この場合、主体は自分の肉体ではなく、起こしというものにフォーカスされていて、起こしの数が多い方が、確率が高いのである。起こすと言うことが参照集団なのである。これは起こしの回数と言うだけではなく、起こしの時点にフォーカスしていると言ってもいい。今火曜だとすると、裏なら起こしはあるが、表なら起こしはあり得ない。表だったら、起こされないで終わってしまうわけである。しかるに私は起こされた。従って裏の可能性の方が高い。

勿論、状況設定からすぐ分かるように、起こされるとはビッグバンに対応している。また眠らされるとはビッグクランチである。そして因果関係のない宇宙が何度も生成消滅しているというのは、前回の記憶が無くなるということに入っている。若しくは因果関係や情報伝達のない多宇宙の事を言っているとしてもいい。

その上で私は多宇宙にいるのだろうか(私の宇宙以外の宇宙はあるのだろうか)、それとも宇宙は一つだろうかということを問題にしていると読める。

終末論法で言えば、表は文明がすぐ滅びること、裏は文明が続くこと。月曜に起こされるとは、私が文明の歴史の初期にいるということを表している。

ここで設定を極端にして、裏だったら10000日間起こす

と言うことが続けられるとしてみれば、問題が鮮明になるであろう。

コインが表なら、あなたは月曜に起こされ後はずっと眠らされたまま。裏なら月曜からずっと百万日の間毎日起こされる。そのたびにまた眠らされ記憶は消される。こあなたが起こされたとき、表の確率は。また起こされて、今日は初日だと言われたときの表の確率はどれだけか。

$p=1/2$ 派だと、起こされたときには、 $1/2$ 。初日と聞いたときには $1000000/1000001 \cong 1$ である。この場合初日と聞いたなら、裏だったら百万分の一の奇跡になってしまうのであるから、ほぼ確実に表である。

$p=1/3$ 派だと、起こされたときには $1/1000001 \cong 0$ ，初日と聞いたときには $1/2$ に修正される。

4. 平凡の原理と確率

平凡の原理は宇宙論や意識の問題の新しい型の方法論であるのではあるが、参照集団（準拠集団）をどう取るかと言うことを、あらわに議論しないと推論が進まない。従って、不充足理由律の実際の運用上の困難を明示的にあぶり出すと言える。

しかし上で見てきたように、観測主体あるいは議論する主体の位置とか地位に関しての問題が、結論を大幅に変更してしまう。そこには必然的に自意識の問題、「わたくし」の問題が内包されてしまう。

人間原理の多宇宙、「わたくし」の問題をめぐるの多自意識、量子力学の Everette の多世界、これらは実はみな同じ概念装置なのではないであろうか。そしてなにより確率の謎に関係する、卑近な言い方をすれば、非決定論を担保するアンサンブルのような概念であるが、それも多分同じものであろう。同種の問題であるというのとどまらず、同一のものであろうと推測している。この探求はまだまだ始まったばかりのように思われる。

多世界の考究による、唯我論の克服も、副産物的な大きな目標でもある。

人間原理、平凡の原理を用いた議論では、三浦にしても「自分は、人類は全ての・・・の中で典型的である確率が高い」と言うような言い回しを使っている。此处で既にして「確率」と言う言葉を使っている。この「確率」を担保するのも、人間原理とは別の多世界なのであろうか。それとも人間原理で導入される多世界が同時に確率概念や非決定論を担保する多世界にもなっているのではあろうか。上に述べたように自動的にビルトインされているのではあろうと考える。このことこそ最終的に解決されなければならない根本問題である。

一宇宙説でのファイン・チューニングの確率と言ったとき、その確率のためにアンサンブル（多宇宙）を想定

するであろう。一方において人間原理で多宇宙が導入される。それもその方が不可解さを減少させるなどと言ってである。これは一宇宙も多宇宙も同じ事になってしまっているのではないだろうか。

以上に加えて、宇宙論の多重発生宇宙、ウィーラーの振動宇宙論、「わたくし」の対称性回復の多世界（いわゆる転生世界観）、そして確率の本性に関する多宇宙は1つに統合されるべきものであろうと思う。その暁には主観解釈と客観解釈も一つの概念の2つの現れになるのであろう。

「わたくし」の問題について言えば、沢山の肉体から1つが SSA によって「わたくし」として事後的に実現する。それはそれでよい。しかし分割脳や映画「プレステージ」に見られるような、恐怖絶望と言ったクオリアの分析はほとんどされていないと思う。「プレステージ」では、人類を構成する沢山の異なる肉体の中のどれが「わたくし」の展開元となっているかという設定ではなく、2つの全く同じ肉体と記憶なのだが、一方は死に瀕し一方は喝采を浴びていると言う違いの、どちらなのかである。

かけがえのない「わたくし」と言った段階で SIA に基づいているのであろうが、2者択一となった段階では SSA によって、どちらも「わたくし」である。しかし一方は他方の死を願っている。他方がもがいてもこっちの「わたくし」は何も苦しくないのである。こうして話は振り出しに戻ってしまうように思われる。やはり一方の勢力（たとえば永井⁴²⁻⁴⁶、渡辺^{47, 50-52}）と同様、筆者もこの問題を超難問とする者である。

参照集団の決まり方についても困難な点があると思う。肉体を単位とするか、覚醒の時点単位とするかで眠り姫問題には2つの説があり得た。これが不充足理由律によって無差別の原理を発動させる指針であった。しかしこの2説の根拠をどう説明すればいいのであろうか。実験で区別は出来ないのである（片方は単一事象についてであるので、確率の経験値は得られない）。しかし値は厳然と違う。このままで納得できるであろうか。

三浦は更に次のような議論もしている。はっきりと気持ちの良い目覚めは明晰な思考で問題に参加しているから、自意識も明確で SIA である。しかし受け答えは出来るがぼやっとしている場合は、それなりの参照集団に数えられる資格しかなく、その様なぼやっとした目覚めという参照集団の一員であり、SSA を適用すべきだと。もっと踏み込むと、明晰な思考の人、知能の高い人は参照集団の中の一単位より参加度が高いと見なしうるので、この知能が高くないと出来ない議論を現にしている「わたくし」は、知能の高い人に「転生する」（知能の高い人が問題の参照集団で、確率の値がそれによって決まる）等となると、納得出来なくなってくるであろう。

確率が、そんな曖昧な概念や自分の思い、見方で、大

幅に変わって良いものであろうか。たとえそれが、同じような状況でも、個人個人で異なる、主観確率（信念の度合い）であるにしてもである。

中込一保江の量子モノイド理論^{54, 55)}は、世界は Leibniz のいうモノイドの集合体であるとする。モノイドは全世界を内包し窓はなく、しかしモノイドの間には「予定調和」があつて、他のモノイドの「私」の決定がこのモノイドのなかの物に反映していると言うものである。もちろん、このモノイドでの「私」の決定も他のモノイドに伝達されている。

人間原理	モノイド理論
「私」のいる宇宙	→ 「私」のモノイド
知的生命体の宇宙	→ 知性を内包するモノイド

この様な世界設定の下で観測理論に解決を与えるというのであるが、人間原理の多宇宙と非常に似通っている。また、量子コンピュータの創始者、Deutsch⁵³⁾は古くより Everett の多世界解釈の支持者で、量子コンピュータが作動すれば、それが Everett の多世界の实在性の証明になっていると言っているが、これらの主張の分析も行わなくてはならない。

次稿では、今回考察した諸問題の各論を検討していく予定である。

謝辞 35年の長きにわたり、科学基礎論の議論につき合ってくださいている、筑波大学の緑川信之教授に感謝します。

参考文献

- 1) Derek Parfit, 『理由と人格 — 非人格性の倫理へ』, 勁草書房 (1988年) 原書 *Reasons and Persons*, Oxford U.P. (1984)
- 2) 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)
- 3) D. J. Chalmers, 『意識する心 — 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)
- 4) H. Moravec, 『電脳生物たち — 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)
- 5) 三浦俊彦, 「『意識の超難問』の論理分析」, 『科学哲学』35-2 (2002年) 69
- 6) 三浦俊彦, 「人間原理と独我論 — 「私」の位置の再解釈」, 『和洋女子大学紀要』第40号 (2000年) 17
- 7) 三浦俊彦, 「観測選択効果と多宇宙説 — 伊東邦武『偶然の宇宙』について」, 『科学哲学』36-1 (2003年) 121
- 8) 三浦俊彦, 『論理学入門』, NHK 出版 (2000年)
- 9) 三浦俊彦, 『可能世界の哲学』, NHK 出版 (1997年)
- 10) 三浦俊彦, 『論理パラドクス』二見書房 (2002年) 『論理サバイバル』二見書房 (2003年)
- 11) 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
- 12) 三浦俊彦, 「人間原理のパラドクス 1~12」, 『現代思想』2006年11月~2007年10月 (青土社) 『多宇宙と輪廻転生 — 人間原理のパラドクス』, 青土社 (2007年) に収録
- 13) 榛葉豊, 「定理としての確率解釈」, 静岡理工科大学紀要9巻 (2001年) 365
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 榛葉豊, 「遅延選択と確率的遡及因果 — 確率はどの段階で崩壊するか —」, 静岡理工科大学紀要15巻 (2007年) 47
- 18) 榛葉豊, 「多世界論と「私」の謎」, 静岡理工科大学紀要15巻 (2007年) 77
- 19) 伊東邦武, 『偶然の宇宙』, 岩波書店 (2002年) 『宇宙を哲学する』, 岩波書店 (2007年)
- 20) 伊東邦武, 『ケインズの哲学』, 岩波書店 (1999年)
- 21) 伊東邦武, 『人間的な合理性の哲学』, 勁草書房 (1997年)
- 22) 小島寛之, 『確率的発想法』, NHK (2000年)
- 23) 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)
- 24) J. Leslie, *Universe*, Routledge (1989)
- 25) J. Leslie: *Infinite Minds - A Philosophical Cosmology*, Oxford (2001)
- 26) J. Leslie, 『世界の終焉』, 青土社 (1998年) 原書 *End of the World: The Science and Ethics of Human Extinction*, Routledge (1996)
- 27) B. Carter: "Large Number Coincidences and the Anthropic principle in Cosmology" in "*Confrontation of Cosmological Theories with Observation*", M.S. Loinger ed., Reidel (1974) p231
- 28) J.R. Gott III, "Implications of the Copernican Principle for our Future Prospects", *Nature* 363 (1993) 『時間旅行者のための基礎知識』, 草思社 (2003年), 原書は *Time Travel in Einstein's Universe*, Houston Muffin (2001)

- 29) A. Vilenkin, 『多世界宇宙の冒険』日経 BP (2007 年),
原書 *Many Worlds in One*, Hill & Wang, (2006)
- 30) F. Tipler, *Physics of Immortality: Modern Cosmology, God and the Resurrection of the Dead*, Anchor Books (1994)
- 31) D. Gillice, 『確率の哲学理論』, 日本経済評論社 (2004 年)
原書 *Philosophical Theories of Probability* (2000)
- 32) 市川伸一, 『確率の理解を探る』, 共立出版 (1998 年)
- 33) H. Everett III: ““Relative State” Formulation of Quantum Mechanics”, *Rev. Mod. Phys.*, **29**, 454 (1957)
- 34) B. DeWitt and N. Graham ed., *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton U.P. (1973)
- 35) M. Gell-Mann and J. Hartle, “Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology”, *Proc. 3rd Int’l Symp. on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Thechnology*, ed. S. Kobayashi and H. Ezawa (Phys.Soc.J, 1991)
- 36) R. Omnes, *Quantum Philosophy*, Princeton UP, (1999)
- 37) R.B. Griffiths, *Consistent Quantum Theory*, Cambridge (2002)
- 38) 和田純夫, 「量子力学の多世界解釈」, 『現代物理学最前線 6』 共立出版 (2002 年)
- 39) 石川幹人他編, 『入門 マインドサイエンスの思想 -心の科学をめぐる現代哲学の論争』, 新曜社 (2004 年)
- 40) Collin McGinn, 『意識の＜神秘＞は解明できるか』, 青土社 (2001 年)
原著 *The Mysterious Flame :Conscious Mind in a Material World*, Basic Books (1999)
- 41) 安達自朗他編, 『心とは何か -心理学と諸科学の対話』, 北大路書房 (2001 年)
- 42) 永井均, 『転校生とブラックジャック -独在性をめぐるセミナー』, 岩波書店 (2001 年)
- 43) 永井均, 『＜私＞の存在の比類なさ』, 勁草書房, (1998 年)
- 44) 永井均, 『＜私＞のメタフィジクス』, 勁草書房 (1986 年)
- 45) 永井均, 『私・今・そして神 -開闢の哲学』, 講談社, (2004 年)
- 46) 永井均, 『なぜ意識は実在しないのか』, 岩波書店 (2007 年)
- 47) 渡辺恒夫, 「自我の発見とは何か -自我体験の調査と考察」, 『東邦大学紀要』第 24 巻 (1992 年) 25
- 48) 村田純一, 『「わたし」を探検する』, 岩波書店 (2007 年)
- 49) 中島義道, 『「私」の秘密』, 講談社 (2002 年)
- 50) 渡辺恒夫他編, 『＜私＞という謎 -自我体験の心理学』, 新曜社 (2004 年)
- 51) 渡辺恒夫, 『＜私の死＞の謎 -世界観の心理学で独我を超える』, ナカニシヤ出版 (2002 年)
- 52) 渡辺恒夫, 小松栄一, 「自我体験 -自己意識発達研究の新たな地平」, 『発達心理学研究』第 10 巻 (1999 年) 11
- 53) D. Deutsch, 『世界の究極理論は存在するか -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)
- 54) 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)
- 55) 中込照明, 『唯心論物理学の誕生』, 海鳴社, (1998 年)
- 56) A. Elga, “Self-locating Belief and the Sleeping Beauty Problem”, *Analysis* **60**(2000)143
D. Lewis, “Sleeping Beauty: reply to Elga”, *Analysis* **61**(2001)171
- 57) N. Bostrom, *Anthropic Bias: Observation Selection Effects in Science and Philosophy*, Routledge (2002)
- 58) I. Hacking, 『偶然を飼い慣らす』, 木鐸社 (1999 年)
原書 *The Taming of Chance*, Cambridge U.P. (1990)
- 59) I. Hacking, “The Inverse Gambler’s Fallacy; the Argument from Design. The Anthropic Principle Applied to Wheeler Universes”, *Mind* **96**

ニューカム問題

— 遡及因果と辻褃合わせ —

Newcomb's Problem

— Backward Causation and Posterior Consistency —

榛葉豊*

Yutaka SHINBA

Abstract : The Paradox called Newcomb's problem, which concerns retrospective influence and conflict between the maximum expected utility principle and the dominant strategy principle. We discuss usage of the subjunctive mood with the past perfect tense of propensity. And we discuss the backward causation in connection with the conception, that is, making of past at present time reasoning in the context of decision making. Explanation of Newcomb's Problem by Prisoner's Dilemma also discussed.

1. はじめに

自由意志, 原因, 因果, 責任と言った考察は, そうでなかったかも知れない世界を考察の範囲に含む確率言明の世界像で議論がされる¹⁻⁶⁾. この大きな分野の中で, 特に意志決定理論, 遡及因果の問題, 自由意志の問題, 過去制作論などの基本的問題を内包したパラドックスが Newcomb 問題である. それは 1960 年に物理学者 W.N. Newcomb が考案したと言われ, 1969 年に哲学者 R. Norzick⁷⁾ が論じたことから有名になった, 今なお一致した見解が出ない問題である.

具体的な問題は次の節に述べるが, 一言で言えば完全に近い予言能力を持った知性に対する信頼の問題であり, 現在の態度で過去, そしてそれに繋がる未来は変えられるかという遡及因果の問題であり, 期待効用原理と優越戦略原理の間の相克の問題である.

Newcomb 問題は, ゲームの理論の代表的類型であるところの, 囚人のジレンマの状況と似て⁷⁻¹⁰⁾ いるとして, 意志決定理論における優越戦略選択原理と期待効用最大原理の間の矛盾の例題と考えられると論じられてきた. しかし筆者は必ずしもその通りではないと考える.

またこの問題は, 多くの論点の内に自由意志の問題も内包するが, それはある極限移行の際問題になるのである. この点に限って言えば, この問題だけに特有の論点ではないのではと思うので, 本稿では論じない.

そして何よりこの問題は, 遡及因果の典型例であると考えられる. 遡及因果の問題としては, 主観確率の性質も持つ客観確率の一つである Popper の傾向性解釈の破綻であると主張される, Humphreys のパラドックス^{5, 6)} も有名である. しかしそちらは, 傾向性解釈がその本来の意味を喪失するという例で, むしろ傾向再解釈を改変して新しい傾向性解釈を構成していこうとする動機ともなるものである.

我々は, Newcomb 問題を, 完全な推論能力や完全情報の下での矛盾と, 過去は過去自体ではなく現在間主観的に制作される過去物語であるという過去制作論を踏まえて考察する.

2. Newcomb 問題

Newcomb 問題とは次のようなパラドックスである.

2008年3月10日受理

* 理工学部 情報システム学科

1993年のNorzick版⁸⁾によれば、

「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。しかしここに困った問題がある。箱2に1億円入れるか入れないかは、予言に関して超能力を持つものが決める。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あなたの選択よりずっと前に行う。もし彼が、あなたは両方の箱をとるとの予言に達した場合、箱2には1億円は入れない。すなわち箱2の中身は0である。もし、かれが、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の結論に達した場合には、1億円を箱2に入れる。以上の事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も超能力者は知っている。さてあなたの最適戦略は1箱のみ受け取るか、2箱とも取るか、どちらであろう」

である。

つまり簡単に言うと戦略(1)を採用して2箱取ったばあい、それは予言されていて、箱2の内容は多分0であり、あなたが得るのは10万円の可能性が高い。しかし低い確率ではあるが予言が外れていて1億円入っているかも知れなくてその時は1億10万円手に入る。一方戦略(2)を採用し、箱2だけの1箱にするとその行為も予言されていて箱2には多分1億円入っていて1億円手に入るが、低い確率ではあるが予言が外れていると箱2の中身が0と言うことがあり、その時には1円も得られない。

超能力者の予言が当たる確率を $p < 1$ としよう。 p は1に非常に近い。この問題について、人がどんな反応をするかの統計的研究、それも詳細に、民族、宗教、年齢、性別、出身階層、家族構成、年収、等別に詳しく調べる。これだけでも $p = 1/2$ 以上の予言は出来る。

またあなたの行動を観察して、あなたの性癖を調べ、選択の傾向を探る。また今日のあなたの体調、このところのあなたの経済状況などの要因などを調べるなどである。それにずっと将来、脳と気分や決定との関係が解き明かされたとして、スーパーコンピュータで、シミュレーションを試みるなど。また神を導入する手もあるが、そうすると問題自身の意味が異なってくる恐れも出てくるであろう。

もし、 $p = 1$ だとするとどうなるであろうか。超能力者の予言通りになってあなたの自由選択はあり得ない。過去の時点で超能力者が1箱と言って箱2に1億円を入れる ⇒ 現在になって、あなたに自由はなく予言通り箱2の

み受け取り、1億円を得る。超能力者が2箱取ると言ったときには箱2に1億円はない。⇒ 現在になってあなたは2箱取るが、併せて10万円である。1箱のみ受け取るのが最善の戦略と言いつつそうではない。あなたに決定を変える余地はないのである。どちらのシナリオになるかはすでに世界の最初より決まっている。あなたに自由意志がないだけでなく、超能力者にもないのであって、単に幾何学的な静的世界があるだけである。この状況は我々が問題にしたいとは別の状況であろう。もしそれでも自意識が選択しているような感じを受けるといのであれば、1箱を受け取るということではなければならない。

さて、元に戻って $p < 1$ の分析をしよう。まず期待効用を計算してみよう。ここでは効用は金額そのものであるとする。ここに p はその戦略が超能力者の予言と一致する確率である。

あなたが、箱2だけ受け取るという戦略(2)を選択した場合。あたったと言うことは、超能力者は1箱と予言し箱2に1億円入れていた。また外れた場合というのは、超能力者は2箱と予言していて、箱2は空ということである。期待金額は

$$U_1 = p \times 10000 + (1-p) \times 0$$

但し単位1万円とする。

もし2箱取るという戦略(1)を選択した場合。あたったと言うことは、超能力者は2箱取ると予言していて、箱2には金を入れなかった。また外れた場合というのは、超能力者は箱2だけ取るだろうと予言して、箱2に1億円を入れてあった。このときに2箱取れば1億10万円である。期待金額は

$$U_2 = p \times 10 + (1-p) \times 10010$$

となる。

予言は90%当たる、すなわち $p = 0.9$ としてみれば、 $U_1 = 9000$ 、 $U_2 = 9 + 1001 = 1010$ となる。すなわち、期待効用最大原理から言えば、1箱のみ受け取るというのが、 $p = 0.9$ の時の最適戦略である。 $p = 0.99$ とすれば、 $U_1 = 9900$ 、 $U_2 = 9.9 + 100.1 = 110$ となり更に、1箱受け取る戦略の方が有利である。

p の値で最適戦略は変わるから、 $U_1 = U_2$ になる p を求めてみる。予言が当たらないなら箱2に1億円が入っているかいないか今の選択によらず分からないのだから、2箱取った方が当然得であろうからである。その値は $p = 0.5005$ である。

予言が全然当たらないとは、 $p = 0.5$ であることを言うのであろう。それでは $p = 0.1$ としたらどうなるか。 $U_1 = 1000$ 、 $U_2 = 9010$ である。しかしこの場合には予言能力はあると言うべきではあるが。予言者が予言と反対のことをしてしまうとでも言えば良いであろうか。

上のことを踏まえて考えてみよう。境界値が0.5005で

あるから、完全に外れる場合を除いてほとんどの場合、期待効用最大原理から言えば、1箱取るのが最善である。しかし、ここで期待効用最大原理は、多数回の試行ができる事が前提されている。単一事象の場合を考えるとどうなるであろうか。

1箱説の論拠。 p の値を厳密には特定せずに、非常に高い精度で当たる、と言うことにしておこう。すると2箱取るという戦略を取ると、多分超能力者に読まれていて箱2は空だろう。従って多分10万円である。しかるに箱2だけを受け取るという戦略では、そのことを高い精度で超能力者は予言して居るであろうから、箱2には1億円が入っている。従って箱2のみ受け取れば、1億円が手に入る。しかしもし超能力者の予言が外れたら、低確率ではあるがゼロの恐れは有り得る。

この立場は、現在のあなたの選択が、上の文に示されているように、過去の予言に何らかの意味で「影響」してそれが過去の行動を律して、その時点で固定された結果が現在まで更に未来へまでも発展していくと言う考えであると思われる。一種の確率的遡及因果である。

2箱説の論拠。これは、遡及因果はあり得ないという信念に基づいている。超能力者が何をしようとして現在箱1には10万円があり、箱2には0円か1億円である。これは決定済で、確率は超能力者が予言して金を箱に入れたか入れなかったか過去の既に崩壊している。今さら決して変わらない。自由意志の問題は発生しない。なぜなら確率1で予言しているわけではなく、僅少な ϵ だけの逃げる余地がある。ただ単に低い確率で予言が外れることがあるだけである。

こうして、箱2だけとれば、何も得られないか1億円である。両方の箱をとれば、10万円か1億10万円のどちらかであり、10万円は保障されていて、ゼロと言うことはない。当然2箱受け取るべきである。2箱取ることを予言していれば、1億円のチャンスは全くなくなるのであるが、 ϵ だけは予言が外れるのであるから、その分だけはチャンスは少ないが1億円（それ+10万円）が期待できる。

3. 過去の制作

大森²⁷⁾による、過去自体というものはないという主張がある。「過去は現在制作される」、「過去とは過去物語である」等と言いつつ習わされる。大森は 5. で説明する、Dummet の「曾長の踊り」を題材にとっている (Dummet の論旨は遡及因果の問題と思われるので、その主旨とはずれていると思われるのではあるが)。大森の主旨は、次のようなものである。

過去が過去自体として実在すると言うことは誤りである。過去は実在ではなく、人間による物語としての制作物

である。

過去は、触れるわけでもなく感じる事が出来るわけでもなく、ただ想起する事が出来るだけである。

「曾長の踊り」は、もう既に確率は崩壊して固定されているのであるが、まだどうなったか主体には分からない事柄に対して祈るという話である。いわゆる「後の祭り」になってしまっている筈の事に対して祈るというのである。

それは、遡及因果を引き起こして、過去を改変したいと言うのではない。そうではなくて過去を（いまから）「引き起こす」のだと言うのである。

過去は、自分の想起と他人達の想起の社会的同意が矛盾無く整合的に成り立つように、社会の中で制作されて公認の歴史となり、そこで初めて過去が作られるのである。その際直接過去自体を参照するわけにはいかないのである。そのまだ制作されていない過去に対して祈るというのは、固定されている過去が変わってくれと祈るのではなく、現在において、過去が自分にとって有利なものとして制作されて欲しいと言う祈りである。

つまり確率の崩壊は現在起こるのであるから、崩壊前の主観確率の対して祈るのである。曾長の踊りでは、見届け人に対しては、過去において確率は崩壊している。

この過去の制作という考えに立ってみて、Newcomb 問題はどうかであろうか。物理的に過去に影響できないのは大前提である。過去物語の制作とは、その時点までは確率は崩壊しておらず、その時点で社会的整合性を損なわない物語が制作される。そしてその物語がそれ以降の未来に向かっての、物理的に言えば時間発展であるが、物語前編になると言うことである。

Newcomb 問題では、あなたの1箱か2箱かの選択の時点が現在である。もし過去自体があるとすればそれは超能力者の予言と箱封入である。現在の時点で超能力者の行動に関する2つの場合と、自分の選択の2通りでシナリオは4つあるわけである。あなたの選択も全てが終わってから4つのシナリオを高めから比較検討するというのではなく、超能力者の2通りからの選択による2通りのシナリオが、今あなたが1箱か2箱かの選択を目前にして、良い方のシナリオが起こっていたことになって欲しいと、まだ制作されていない過去の出来を祈りつつ、と言うことであろう。

大森の曾長の踊りの分析でも曾長にとっての確率の崩壊以前の2日間の踊りを問題にしている。

そうであれば、過去を変えるのではないのであるから、遡及因果は起こりえない。箱2に1億円が入っているか入っていないかのいずれかの物語が箱の中を見た後で制作されるので、もうひとつの箱1の中の10万円を取ろうと取るまいと、有ったとしてその1億円は、消えて無くなりはない。この観点で矛盾は起こらない。 ϵ の分だけは、予言が外れたという物語が、あなたの選択と箱を開くとい

う行為の後で最終的に制作されるだけである。過去制作論の観点は2箱説を支持するように思われる。

4. 期待効用仮説か優越戦略か

2. で、期待効用最大原理と、1箱説、2箱説の考えを見た。この節では、Newcomb問題を囚人のジレンマと見た分析を検討してみよう。

Nozickは遡及因果の観点よりも、むしろ期待効用原理と優越戦略原理の相克を問題にしていたようである。

ゲームの理論では、対戦相手がどのような戦略を選択してきても、無条件でいつも自分の他の手よりも効用が大になる戦略を、優越戦略とか支配戦略という。

囚人のジレンマは正規形2人非協力非零和ゲームである。共犯を疑われている2人の囚人が居る。両方とも自白すると両者懲役5年、両者とも否認すると両者とも懲役1年。もし片方が裏切って自白して司法取引に応じ、片方は否認を続けると、そのときには裏切った方は釈放、裏切られた方は懲役5年である。と言うような設定の両プレーヤーにとって対称なゲームである。

このゲームは両者自白という戦略対がNash均衡点、すなわちお互いにその点から、自分から選択を変えたら不利になる点、である。残りの3点はPareto最適点であり、ここからは両者一致で改善される点はない。ここで両者否認が共栄の解である。また両者自白は共倒れである。信頼を確立しないと共倒れという類型である。

Newcomb問題はこれには該当しないとおもう。第1に、囚人のジレンマは、両者同時に手を出すゲームであり、展開型のゲームではない。Newcomb問題はむしろ交互に手を指す展開型で表現した方が分かりやすい。

第2には、囚人のジレンマは一応対称型が前提されている非零和ゲームである。ところがNewcomb問題では、超能力者の得る効用は問題にされていない。ゲームの理論はそれぞれ自分の効用を大きくしようとしている主体間の設定である。例えば結果的に或いは設定上で、協力や自己犠牲も扱おうとしても、基本的には両プレーヤーの効用が問題となる。

第3に、これがもっとも本質的であるが、Newcomb問題はゲーム理論で扱う状況ではない。予言というのは超能力者の意志でその結果を選べるものではない。それはどんなメカニズムかは知らないが、超能力者の勝手には出来ないもので、世界のありようと、とりわけあなたの(未来の)行動に依っている。そして更にNewcomb問題が決定論としてではなく成立するためには、 ϵ の確率で外れるという事が本質的である。であるから本質的に、超能力者にもどうしようもない確率の要因が入ってくる。

あなたから見れば、超能力者はあなたの手を読んでと言うより、別の要因で戦略を決めるのである。これはゲームの理論の枠組みにない、ゲームの外部の物理的世界からの

影響である。(もちろん設定を、純粋なゲームの理論の枠組直して、別の議論することも出来るではあろうが。)その上、ここが複雑なのであるが、確率 ϵ で外れると言う事態は、超能力者の予言が、予言ではなくて確率的にはあるが、あなたの未来の行動を縛ってしまう様にもとれる。それは逆に見てもそうであり、あなたの選択が、その原因である「予言」(本来は「原因」ではない)に確率的に遡及因果している。

利得の表を作ってみると下の表のようになるろう

	予言 2箱取る	予言 1箱取る
あなた 2箱取る	0円+10万円	1億10万円
あなた 1箱取る	0円	1億円

右上のマスと左下のマスは縦に見ても横に見ても確率 ϵ で起こる。

表から分かるように、あなたにとっての優越戦略は2箱取ることである。Norzikは、確率的相関はあるが因果的ではないとして、2.で見た様に、期待効用最大原理からは1箱取るべきである、となるのと比較して、2箱取るという優越戦略を採るべきだと結論した。

しかし、この問題は確率的遡及因果であると筆者は考える。

囚人のジレンマは、心理的な分析としては、繰り返しのスキームにおいて協力の発生を議論するものである。しかしこの問題で、裏切りとか、信頼という要素があるであろうか。効用は、あなたの効用しか指定されておらず、超能力者の効用は指定されていない。であるから超能力者はあなたのことを信頼するもしないもないのである。別にあなたが超能力者の予言を裏切ろうと裏切るまいと構わないのである。しかも裏切りという言葉さえ当てはまらないであろう。あなたは、超能力者の予言の内容を、超能力者のあなたの手の読みで変わりうるものとして知りもしないのである。箱2を開けてみて、そこに1億円あるかないか分かって初めて、過去の超能力者の「戦略」(それは超能力者が選べるのではないから「戦略」には当たらないのではあるが)が分かるのである。事前に何か推測する術はない。(もっともあなたが自分を反省して、1箱派か2箱派かであるかを考え、超能力者はこれを分析し尽くすであろうと想定することは出来るが)

そして今一度強調するが、超能力者の選択は過去に既に決定されていて、あなたの戦略選択時と同時ではない。この遡及因果が有るか無いかが決定的岐れ道となるので

ある。

5. 遡及している様に見えるほかの例

以下のパラドックスも、Newcomb 問題と言われることがある。

・Dummett の「酋長の踊り」¹²⁾

「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ようと思われている。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う後の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。」

酋長の踊りは大森によって²⁷⁾「後の祭り」を祈る」で取り上げられた。過去制作論によれば、過去は若者の帰還後に、村人達の共有の物語として制作されて初めて生成される。祈りは、未来に良い過去物語が制作されるようにとの祈りである。従ってパラドックスなど無く、我々の過去自体の実在という幻想が問われていると論じられた。

この問題において、Dummett としては遡及因果を論じたかったのであろうが、しかし確率的遡及因果はしていないと思われる。なぜならこの問題ではそもそも、過去の事象が原因となって先ず順方向の因果で現在の事象と確率的に結びつくと言えない。若者が勇敢だったら、酋長の踊りが激しくなる確率が高く、若者が卑怯だったら酋長の踊りの勢いは弱々しくなる確率が高い、などの話は無いのである。

この例は、単に確率の崩壊の起こる段階についての議論と受け取られる。

次の例の方が（これも Dummett¹³⁾による）わかりやすいであろう。

Retrospective Prayer

「私がラジオで「12時間前に太平洋で船が沈没し、生存者は少数である」と聞いたとする。私の息子はその船に乗っていた。私は、息子が生存者の中に入っていたように、溺れ死ななかつたようにと祈る。」これは、もし私の息子が溺れたのなら、神に向かって、そうした過去変えて彼が溺れなかつたようにして下さいと要求することである。

これをまさに大森は幻想と退けたのであった。

・Ayer による「Calvinist の祈り」¹¹⁾

「カルヴァン派は運命予定説を信じている。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。彼らは今現在勤勉であることが、もうすでに彼らの将来には影響しないことをわかまえている。彼らの将来は既に誕生以前に決まっているのであるから。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。」

カルヴァン派の勤行は Ayer によって遡及因果を考えるために提出されたものであった。

この問題は確率的遡及因果ではなく、もっと強い、確率的ではない遡及因果を問題にしている。（尤も、決定論では自由意志はなく、勤勉にしようとする努力するという選択肢を選び取る言うことは出来ないのではあろうが。）文意より、勤勉な行いを現在しているものは、必ず神が死後に救済すると誕生前に決定していた者である。であるからこのままだと遡及因果をしてしまうので、問題の意味は次のように取るべきであろう。話を確率的なものにするか、それとも「これまで、この話を知らない状態で」勤勉かどうかを問題にすると言う変更である。

6. 確率的遡及因果と事後的辻褃合わせ

確率的遡及因果は、現在の条件付きの過去の事象の確率が、条件によって変わるかどうかということに関係する。それがあつたら、ベイズの定理により形式的には原因の確率が出てくる。もちろんその解釈が傾向性だとすると矛盾が生じるなどの議論はある。現在の状態（データ）過去の原因（仮説）の確率が決まってくる。しかしそれが因果かどうかは全く別の話である。

因果関係を考察する前に現在の事象を固定して、それから遡及するなら原因の確率が出てくる。しかし原因の方を先に特定しておいて、それになるように現在の行動を変えるのは、何もしないで居てそうなったのではないから間違いである。Neyman-Pearson 形式の仮説検定において、検定結果を見てから、有意水準や、データの異なる個体を持ってきて水準に入っているなどとやったり、水準自身を変えてみたりする過ちと同じである。

さて、Newcomb 問題は遡及因果しているか

Newcomb 問題は、優越戦略原理と期待効用原理の相剋を問題にするために提出されたパラドックスである。遡及因果は1つの考え方として表れてきているが、次の対応が一応のたたき台であろう。遡及因果があると思うか思わないかによって、

遡及因果あり	→	1箱	期待効用最大原理
なし	→	2箱	優越戦略原理

が最適戦略となる。

遡及因果がないと思う場合には、2箱説が直ちに最適である。あなたの選択が過去に遡って箱に1億入れるか入れないかには影響しない。それは過去の時点でそれ以前の情報から完了しているのである。単に目の前に2つ箱がある。片方は10万円、片方は1億円かも知れないしゼロかも知れない。と言う時敢えて10万円必ず入っている箱を要らないというのは合理的ではない。その間、1億円のあるなしは固定していて変わらないのである。必ず多い方を取るべきである。

一方、遡及因果有りとして、1箱だけとるという戦略を採用するという事については、そんなに自明ではない。条件付き確率をみれば、現在の事象と過去の事象が関連しているのは明らかである。しかしそれを遡及因果とみるかどうかである。この議論は多くの論者により錯綜していて非常に難しい。1億円入っているかも知れないは個を先ず指定する。その中はゼロかも知れないし1億円かも知れない。この段階で10万円もらわないという事が出来る人はあまりいないと思われる。M. GardnerのScientific America誌上のアンケート調査でも2箱派が多数派であった。しかしそれでも1箱派は存在する。その心理を考えてみよう。

そこで10万円を取らなかつたら、1億円が保障されるであろうかという事についての感覚である。10万取らないと超能力者がみるかどうかと言うことについて、超能力者は、予言の時点までの情報を元にあなたを分析して、とみるなら、確率はそこで崩壊と言うべきで1億円のあるなしは固定している。従って2箱とって良い。しかし何か本当に未来を「見て」予言を決めていると考えたら、(その精度が多少低かったとしても)あなたは遡及因果出来ると思っ居るわけであり、過去の超能力者に見破られないために1箱にすべきである。

いずれにしろ予言は確率1ではない精度という設定である。従って2箱取るという行為をあなたが現在しても、 ϵ だけの割合で外れて1億10万円になるかも知れない。そういう柔軟性は残っているのではある。しかし ϵ の値が50%近くランダムに近い状況で予言など無いに近いと言う場合でも、期待効用最大原理は1箱を勧める。ここが期待効用原理の最大の確率感覚との乖離についての難点であると思う。意志決定理論で有名なAllaiの反例^{28, 29)}と同じぐらいの重要性を持つ期待効用最大原理の難点であると思う。

今のあなたの選択が一度過去に遡及してからブーメラン的に⁴⁾現在に戻り更に将来を決定していくのであるが、箱選択をしている現在から未来に向かって良い出発をするためには、過去の不安は清算しておかなくてはならない。従って敢えて必ず他の条件によらずにもらえる10万円と

らないという、辻褃合わせの心理が働くのだと思う。10万円取らないと言うことは「高い精度」で1億円が入っているとということになっているはずであり、もし10万円取れば「高い精度」で箱は空である。1億円が入っているとすることが「当然」のものであるとするなら、そのためには10万円は取らないのでなくては辻褃が合わない。

過去の制作論もここで見る遡及因果も、いかに納得するかという方策であると思う。つまりそれをしなかった時の「後悔」の大きさを問題にしているのである。もし10万円を取って、それが遡及因果してブーメランで戻ってきたのか、それともそれ以外の事に依るのかは知らないが、とにかく1億円失った(この様に、未だどうなるか分かってないことではあるのだが、最善のことを前提にどれだけ悔しいかを計量するのである)ときに、その(負の)効用と10万円の効用を比較するのである。確率計算を入れても良いではあろう。

効用の観点で言うと、多少気になる設定の問題は残っている。ここでは金額が10万円と1億円である。10万円を500万円としたらどうであろうか。個人効用の違いという観点から見ると、本稿で論じてきた議論が又変わってくるものと思われる。それは又他の場所で論じたい。

最後に、全く別の観点で遡及因果を合理的にする世界観があるように思われる。SSA (Self Sampling Assumption) という、人間原理での一つの世界観²¹⁾である。

それに依れば、あなたは事前に特定されたかけがえのないあなたではなく、事後の特定である。結果的にNewcomb問題を考えるようになった知的生命体であり、他の星雲の機械文明の一員がNewcomb問題を考えていたのであったとしても良かったと言うのである。これによるとそうでない時とは確率の見積もりが、全く違ってしまうこともある。

どちらがあなたかという場合、片方がもう一方に自分の人生や幸福や財産を託して死ぬるという場合、遡及因果はあるとして行動するのが合理的と言うことなのである。これは極論に聞こえるかもしれないが、「転送事故問題」の分析などで、在る極限では当然のものとして納得できる状況になるのである。この問題については別に詳論したい。

謝辞

文献の出典について教示していただき、また科学哲学の議論に35年間つき合っていたいただいている、筑波大学の緑川信之教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) P. S. Laplace, 『確率の哲学的試論』, 岩波書店(1997年, 原著は1814年)

- 2) 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
- 3) 一ノ瀬正樹, 『原因と結果の迷宮』, 勁草書房 (2001年)
- 4) 一ノ瀬正樹, 『原因と理由の迷宮』, 勁草書房 (2006年)
- 5) P. Humphreys, “Why Propensities Cannot Be Probabilities”, *The Philosophical Review* **94**, (1985)557-570
- 6) W.C. Salmon, “Propensities: a Discussion Review of D.H. Mellor *The Matter of Chance*”, *Erkenntnis* **14** (1979)183-216
- 7) R. Nozick, “Newcomb’s Problem and Two Principles of Choices”, *Essays in Honor of Carl Hempel*, Reidel(1969)
- 8) R. Nozick, “Newcomb’s Problem and Two Principles of Choices”, *Paradoxes of Rationality and Cooperation*, University of British Columbia Press.(1985)107-133
- 9) R. Nozick, *The Nature of Rationality*, Princeton University Press(1993)
- 10) D. Lewis, “Prisoner’s Dilemma is a Newcomb Problem”, *Philosophical papers I*, Oxford(1983)
- 11) A.J. Ayer, 『知識の哲学』, みすず書房 (1981年), 原著 *The Problem of Knowledge* (1956)
- 12) 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
- 13) M. Dummett, “Bringing About the Past”, *ibid*
- 14) 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
- 15) 榛葉豊, 「信念の度合いと不充足理由律 — 3 人問題の Bayes 解をめぐって —」, 静岡理工科大学紀要 13巻 (2005年) 53
- 16) 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) 155
- 17) 榛葉豊, 「遅延選択と確率的遡及因果 — 確率ほどの段階で崩壊するのか —」, 静岡理工科大学紀要 15巻 (2007年) 47
- 18) 伊藤邦武, 『ケインズの哲学』, 岩波書店 (1999年)
- 19) 伊藤邦武, 『人間的な合理性の哲学』, 勁草書房 (1997年)
- 20) 三浦俊彦, 『論理パラドクス』, 二見書房 (2002年)
- 21) 三浦俊彦, 「人間原理のパラドクス」, 『現代思想』 (2006~2007年) 青土社
- 22) 小島寛之, 『確率的発想法』, 日本放送協会出版 (2004年)
- 23) R.M. Sainsbury, 『パラドクスの哲学』 勁草書房 (1993年) 原書 *Paradoxes*, Cambridge U.P.(1988)
- 24) W. Poundstone, 『パラドクス大全』, 青土社 (2004年) 原書 *Labyrinth of Reason*, Anchor Books(1988)
- 25) 大森荘蔵, 『時間と自我』, 青土社 (1992年)
- 26) 大森荘蔵, 『時間と存在』, 青土社 (1994年)
- 27) 大森荘蔵, 「「後の祭り」を祈る」, 『時は流れず』, 青土社 (1996年)
- 28) 榛葉豊, 『意志決定理論・社会的選択理論』 SIST (2006年)
- 29) 松原望, 『計量社会科学』, 東京大学出版会 (1997年)

古典的誤差評価法に基づく4次以下の実係数代数方程式向け任意精度ソルバの開発

Development of Arbitrary Precision Solver based on Classical Error Estimation for Real Algebraic Equations of Degree less than or equal to 4

幸谷智紀*

Tomonori KOUYA*

Abstract: Most numerical algorithms are based on the discretization of original continuous problems, and these algorithms are executed by using finite precision floating-point arithmetic operations. Therefore, the numerical results obtained through such floating-point operations have two types of errors; theoretical errors derived from the discretization, and round-off errors derived from the finite precision floating-point arithmetic operations. A well-known a posteriori and empirical error estimation method is used to estimate errors separately by comparing several numerical results obtained under different conditions. We call this method "Classical Error Estimation (CEE)." We have proved experimentally that CEE-based algorithms employed for eigenvalue problems for symmetric matrices, nonlinear equations, and initial value problems for ordinary differential equations, provide efficient results. However, a large number of problems remain unsolved; we target the solving of such problems by the application of the CEE method. Real algebraic equations are one of the problems and they often appear in various fields. Equations of degree less than or equal to 4 can be solved through finite algebraic manipulations; a CEE-based arbitrary precision solver requires only the estimation of round-off errors. Therefore, they are suitable for verifying the CEE-based estimation of round-off errors. In this paper, we demonstrate that the CEE method can be applied to various real algebraic equations of degree less than or equal to 4, and this method is highly efficient in obtaining user-required precision numerical results.

1. 初めに

数値計算アルゴリズムの多くは、連続問題を離散化し、有限桁の浮動小数点数を用いることを前提としたものである。従って、得られた数値解には離散化に伴って発生した理論誤差と有限桁の浮動小数点演算に伴って発生した丸め誤差が含まれている。

古くから、多くの問題やアルゴリズムにおいては、条件を変えて複数の数値解を比較することにより、この二つを区別してそれぞれ事後的に評価することができるということが経験的に知られている³⁾。我々はこのような経験的な誤差評価法を「古典的誤差評価法」と呼び、実対称行列の固有値問題⁷⁾、非線型方程式⁷⁾、常微分方程式の初期値問題に対してこれを適用し、多くの問題に対して的確な誤差評価が可能であることを示してきた。

しかしまだ対象とする問題は数多く残っている。特に実係数の代数方程式は応用範囲が広い。4次以下のものは有限回の代数演算で解が得られるため、丸め誤差のみ評価することで任意精度計算が可能になり、丸め誤差評価が適切に働いているかを確認するためには相応しい問題となる。そして、これを土台とすることにより、高次の代数方程式の任意精度計算も可能になる。

本稿において、我々はこの4次以下の実係数代数方程式に対して古典的誤差評価法を適用し、多くの問題に対して有効に働くことを示す。また、実装したアルゴリズムの数値的安定性の比較実験にも有用なものとなることも併せて示す。

2. 4次以下の代数方程式の解法

ここでは実装した実係数代数方程式の解法について、その概要のみを簡潔に述べる。3次、4次代数方程式の解公式は既存のもの¹⁰⁾に基づいて実装した。後述する数値実験は全てこのアルゴリズムに基づいて実装したプログラムによって得られたものである。なお、本稿を通じて、虚数単位は $i = \sqrt{-1}$ で表わすことにする。

2.1 1次, 2次方程式

1次方程式

$$a_1x + a_0 = 0 \quad (a_1 \neq 0) \quad (1)$$

は

$$x = -a_0/a_1$$

とすればよい。2次方程式

$$a_2x^2 + a_1x + a_0 = 0$$

は多くの数値計算の教科書で述べられている通り、解公式

$$x = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2a_0}}{2a_2}$$

を柘落ちを避けるようにして計算する⁵⁾。

2.2 Cardano 法 — 3次代数方程式の解公式

3次方程式

$$a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 = 0 \quad (a_3 \neq 0) \quad (2)$$

に対する代表的な解公式が Cardano 法である。この解公式を導く手順を大雑把に示す。

まず

$$x = y - \frac{a_2}{3a_3}$$

とし、式(2)に代入して

$$y^3 + 3py + q = 0 \tag{3}$$

と式変形する。この時

$$p = -\frac{a_2^2}{9a_3^2} + \frac{a_1}{3a_3}$$

$$q = \frac{2a_2^3}{27a_3^3} - \frac{a_1a_2}{3a_3^2} + \frac{a_0}{a_3}$$

である。更に $y = u + v$ とし、かつ u と v は $uv = -p$ を満足するものとする、式(3)の y に代入して

$$u^3 + v^3 = -q$$

を得る。また $u^3v^3 = -p^3$ なので、 u^3, v^3 は 2 次方程式

$$z^2 + qz - p^3 = 0$$

の解である。従って

$$u^3 = \frac{-q + \sqrt{q^2 + 4p^3}}{2}$$

$$v^3 = \frac{-q - \sqrt{q^2 + 4p^3}}{2}$$

である。これを満足するもののうち一つを \hat{u}, \hat{v} とし、1 の複素数 3 乗根のうちどちらか一つを ω とすれば、 $uv = -p$ を満足するものは

$$\beta_1 = \hat{u} + \hat{v}$$

$$\beta_2 = \omega\hat{u} + \omega^2\hat{v}$$

$$\beta_3 = \omega^2\hat{u} + \omega\hat{v}$$

である。従って式(3)の解 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ を具体的に書くと

$$\beta_1 = \hat{u} + \hat{v}$$

$$\beta_2 = -\frac{1}{2}(\hat{u} + \hat{v}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(\hat{u} - \hat{v})i \tag{4}$$

$$\beta_3 = -\frac{1}{2}(\hat{u} + \hat{v}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(\hat{u} - \hat{v})i$$

となる。よって、これらを用いて元の 3 次代数方程式(2)の解 α_i ($i = 1, 2, 3$) は

$$\alpha_i = \beta_i - \frac{a_2}{3a_3} \quad (i = 1, 2, 3)$$

となる。

なお、3 次方程式の解のうち絶対値最小の解を精度良く求めるため、元の方程式の解の逆数を解として持つ代数方程式を再度解き直す実装も存在する¹⁰⁾が、後述するように今回は精度不足の際のリトライを自動的に行うようにしているので、この方法は採用しなかった。それによる不具合も今の所発見されていない。

2.3 Ferrari 法 — 4 次代数方程式の解公式

4 次方程式

$$a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 = 0 \quad (a_4 \neq 0) \tag{5}$$

に対して歴史的に最初に提唱されたものとされているが Ferrari 法である。これも Cardano 法と同様に

$$x = y - \frac{a_3}{4a_4}$$

とおいて式(5)に代入することにより

$$y^4 + py^2 + qy + r = 0 \tag{6}$$

となる。ここで

$$p = -\frac{3a_3^2}{8a_4^2} + \frac{a_2}{a_4}$$

$$q = \frac{a_3^3}{8a_4^3} - \frac{a_2a_3}{2a_4^2} + \frac{a_1}{a_4}$$

$$r = -\frac{3a_3^4}{256a_4^4} + \frac{a_2a_3^2}{16a_4^3} - \frac{a_1a_3}{4a_4^2} + \frac{a_0}{a_4}$$

である。

$q = 0$ の時は直ちに因数分解でき

$$\left(y^2 - \frac{-p - \sqrt{p^2 - 4r}}{2}\right)\left(y^2 - \frac{-p + \sqrt{p^2 - 4r}}{2}\right) = 0$$

を y について解けばよい。

$q \neq 0$ の時は、式(6)を

$$y^4 = -py^2 - qy - r$$

とし、この両辺に $y^2z + z^2/4$ を加えて

$$\left(y^2 + \frac{z}{2}\right)^2 = (z-p)\left(y - \frac{q}{2(z-p)}\right)^2 + \frac{1}{4(z-p)}(z^3 - pz^2 - 4rz + 4pr - q^2) \tag{7}$$

と式変形する。さすれば右辺の 3 次式が $z^3 - pz^2 - 4rz + 4pr - q^2 = 0$ となる z を一つ見つければ、 $q = 0$ の時と同様、直ちに因数分解でき

$$\left(y^2 + \frac{z}{2} - \sqrt{z-p}\left(y - \frac{q}{2(z-p)}\right)\right) \times \left(y^2 + \frac{z}{2} + \sqrt{z-p}\left(y - \frac{q}{2(z-p)}\right)\right) = 0 \tag{8}$$

を y について解けばよいことになる。

Ferrari 法の概要は以上であるが、実際にこれをそのまま実装すると、特に近接解の時には数値的不安定さを惹起することがある。それを回避する工夫が必要になると思われるが、今回は十分な解析が行えていないので、まだそこまでの改良は行っていない。また、後述する我々の任意精度計算アルゴリズムは、必要な精度に達するまでリトライを繰り返すため、多少の不安定性があってもそれをカバーすることが可能であり、最終結果への精度面での影響は今の所見つかっていない。

3. 古典的誤差評価法について

伊理³⁾は、第 4 章「たった一回だけの計算なんて」(pp.20-25)において、「系統的に計算方法を変えて 2 回以上計算すると非常に有用な情報が得られる」と述べ、理論誤差と丸め誤差の大きさを評価する方法を具体例をもとに述べている。ことに後者は有限桁の浮動小数点演算を用いる限り逃れ得ないものであるが、厳密な丸め誤差限界を得ようとすると過大評価になりがちになる。しかし、実用的には同じアルゴリズムを計

算桁数を変えて実行して得た近似値の差を取ることで、短い計算桁数で計算した近似値に含まれる丸め誤差を評価することができる。

本稿ではこの考え方にに基づき、10進 S 桁の近似値 $x^S \in \mathbb{R}$ に含まれる理論(打ち切り)誤差 $T(x^S)$ と丸め誤差 $R(x^S)$ を下記のように評価する方法を「古典的誤差評価法」と呼ぶことにする。

理論誤差の評価 理論誤差が丸め誤差より優越している地点の誤差を理論誤差の評価値 $T(x^S)$ として使用

丸め誤差の評価 同じアルゴリズムを実行し、長い桁数 $L (> S)$ で計算した結果 x^L を真値として用い、それより短い桁数 S による結果 x^S に含まれる丸め誤差の評価値 $R(x^S)$ を

$$R(x^S) = |x^L - x^S| \quad (9)$$

とする

本稿ではこれに基づき、 x^S に含まれる絶対誤差の評価値 $E(x^S)$ を

$$E(x^S) = \max(T(x^S), R(x^S)) \quad (10)$$

とする。実際に適用する時には、 $T(x^S) \approx R(x^S)$ となるような、必要最小限の桁数で計算することを仮定している。

上記の評価法のうち、丸め誤差の評価は問題やアルゴリズムによらず共通である。同じアルゴリズムを桁数を変えて実行するだけであるから、 x^L の計算はあまり計算時間が変わらない程度に計算桁を増やし、 x の計算と並列実行することが可能である。

これに対して理論誤差の評価法は、アルゴリズムが依拠する近似理論に応じたものが必要となるが、今回は有限回の代数演算のみで終了する処理のみなので、詳細については参考文献⁷⁾に譲り、解説は割愛する。

4. 要求精度を持つ近似値を得るための自動計算アルゴリズム

以上の古典的誤差評価法を用いて、ユーザが指定した精度桁数を持つ近似値を得るためには、計算桁数も当然それ以上必要となる。しかし計算桁数が多すぎると計算時間が長くなるため、必要最小限の計算桁数で実行することが望ましい。そこで、今回我々は、古典的誤差評価法によって得られる誤差の評価値に基づいて、下記のように文字通りの Trial & Errorを行うことで計算桁数を必要なだけ自動的に確保するようにした。この際の計算桁数の増減方法は、

1. 収束するが要求精度より近似値の精度が低い場合→計算桁数の増量分を単調増加
2. 収束しない場合→計算桁数の増量分を2倍に増加

とする。計算桁数さえ十分確保できれば収束する見通しがあれば、(2)の場合は計算桁数を早く増加させることで、失敗試行を減らすことができる。Zivの戦略⁹⁾と似ているが、これより計算桁数の増量は抑えた方が、多くの問題において少ない桁数で要求精度を満足することが実験的に確認できているため、このように設定した。

以下、我々のアルゴリズムの詳細を述べる。

ユーザが指定した精度桁数(10進)を $U \in \mathbb{N}$ とする。あらかじめ指定しておいた精度桁数の増分の最小値を $D \in \mathbb{N}$ を用い、桁数の増分量 C を

$$C = \max(D, U/10) \quad (11)$$

とする。つまり10%増量する。これを元に、実際に計算する桁数 S を

$$S = U + C \quad (12)$$

とし、丸め誤差を評価するために必要な精度桁数 L を

$$L = S + C \quad (13)$$

として、 S より C 桁だけ余分に桁数を取るようにする。このようにして決めた精度桁数に基づいて $R(x^S)$ を求める。

更に、収束判定に必要な相対許容度 ε_r と絶対許容度 ε_a を

$$\varepsilon_r = 10^{-U}, \quad \varepsilon_a = 10^{-2U} \quad (14)$$

とし、基本的には

$$|x_k^S - x_{k-1}^S| \leq \varepsilon_r |x_k^S| + \varepsilon_a$$

を満足した時点で収束したものとする。この時の反復回数を k_s とすれば、この時点における理論誤差の評価値 $T(x_{k_s}^S)$ を得るために、更にもう一度だけ反復を行い、 $x_{k_s}^S$ の理論誤差の評価値 $T(x_{k_s}^S)$ を確定する。同時に丸め誤差の評価値 $R(x_{k_s}^S)$ も確定するので、(10)式に基づいて絶対誤差の評価値 $E(x_{k_s}^S)$ が決定される。

もしこの時点で $E(x_{k_s}^S) < \varepsilon_r |x_{k_s}^S|$ を満足していれば、これをユーザ指定の精度を持つ近似値として受け入れ、 U 桁に丸めてユーザに返す。そうでなければさらに C 桁追加してもう一度計算を行う。

これとは別に、もし指定された最大反復回数に達しても収束しない場合は、 C を2倍して再計算を行うようにするが、前述したように今回この処理は行う必要はない。

今回実装した代数方程式ソルバは、以上の計算桁数増加アルゴリズムに基づき、ユーザ指定精度を満足するために必要な桁数で自動的に計算が行えるようになっており、極端に過大すぎる桁数での計算を行わない。この実現のためには、次の3つの機能を持った多倍長浮動小数点ライブラリが不可欠である。

- 変数ごとに精度を可変に設定できる
- 異なる精度を持つ変数どうしの演算(混合精度演算)が可能
- プログラム実行中に動的に精度を変更する機能

我々のBNCpack⁴⁾が土台としているGMP¹⁾やMPFR^{11,8)}はこれらの機能を持っており、提案した自動計算アルゴリズムの実行が可能となるものである。

5. IEEE754倍精度計算による前処理

我々の目指す、ユーザの要求精度を満足する近似値を自動的に得るためのアルゴリズムには、以上のような3条件を満たす混合精度演算が可能で多倍長計算環境が欠かせない。しかし、現状ではソフトウェアによって実装された多倍長計算は、CPU内でハードウェア処理が行われるIEEE754倍精度計算に比べ $10^3 \sim 10^6$ 倍遅くなることが確認されている*。また、多くの良条件な問題では倍精度計算でも十分な精度が得られることを考えると、処理の重い多倍長計算の前処理として、まずは高速な倍精度計算を行うことは無駄ではないと思われる。この前処理がうまく働くのであれば次の2点が期待できる。

*cf. <http://na-inet.jp/research/akita2006.pdf>

1. 理論誤差, 丸め誤差評価によって, 損失桁 P の見積もりが行えるので, 多倍長計算で必要な桁数に上乘せが可能となる。
2. ユーザの要求精度 ($U < 15$ の場合に限定) を満足することが明らかとなれば, この時点で計算を終了させることができる。

なお, 丸め誤差評価は IEEE754 倍精度計算のみで実行するため, 4つの丸めモード (RN, RZ, RP, RM) で計算した値を用いて, デフォルトの RN モード値との差の最大値を取って簡易評価を行う⁶⁾。こうすることで, 前処理の高速性を最大限維持することができる。

しかし, 悪条件な問題に対しては初期誤差による影響によって P の見積もりや要求精度の判定が騙されることもあり得る。実際, 後述する数値実験の結果では, 特に近接解を持つ場合にそのような現象が現れる問題も見つかっている。従って, 現状ではこの前処理を行うか否かはユーザの判断に任せるようにしている。もしこの前処理を行う時には, 計算桁数の増分量 (11) を

$$C = \max(D, U/10) + P$$

として考慮するようにした。しかし, 十分余裕のある精度桁数を取って計算する我々のアルゴリズムでは, P をどのように繰り入れようとあまり影響はなさそうである。

6. 数値実験

以上述べてきた代数方程式の解法, 及び計算精度桁数を増加させるアルゴリズムに基づき数値実験を行った結果をここで示す。数値実験に使用したハードウェア及びソフトウェアは下記の通りである。

H/W AMD Athlon64 X2 3800+ (2GHz), 4GB RAM

S/W Fedora Core 4 x86_64, gcc 4.1.1, CRLibm²⁾ 1.0beta1, MPFR 2.2.0, GMP 4.2.1

Cardano 法, Ferrari 法内部では \cos 関数を使用しているが, x86_64 の環境では gcc 標準の libm ライブラリに重大なバグ*が出現するため, 今回のように IEEE754 倍精度計算において丸めモードを変更した後の値の正確さが全く保証されない。それを回避するために CRLibm に実装されている $\cos_{\text{m,rz,ru,rd}}$ 関数を用いている。

6.1 例題

使用した例題は数値計算ハンドブック¹⁰⁾に掲載されている下記の 14 個の代数方程式である。本稿では式番号で方程式を区別することにする。

2 次方程式

$$\begin{aligned} \text{例 1} \quad & x^2 + 53.99999999x - 0.00000054 \\ & = (x - (-0.00000001))(x - 54) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{例 2} \quad & x^2 + x + 1 \\ & = \left(x - \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i\right)\right)\left(x - \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right)\right) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{例 3} \quad & x^2 - 2.40001x + 1.440012 \\ & = (x - 1.2)(x - 1.20001) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

3 次方程式

$$\text{例 1} \quad x^3 - 6x^2 + 11x - 6 = (x - 1)(x - 2)(x - 3) = 0 \quad (18)$$

$$\text{例 2} \quad x^3 - 3x^2 - 9x - 5 = (x - 1)^2(x - 5) = 0 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{例 3} \quad & x^3 + 2x^2 + 3x + 2 \\ & = (x + (-1))\left(x - \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{7}}{2}i\right)\right)\left(x - \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{7}}{2}i\right)\right) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{例 4} \quad & x^3 + 3x^2 + 3x + 1 \\ & = (x - (-1))^3 = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{例 5} \quad & x^3 + 3x^2 - 2 \\ & = (x - (-1))(x - (-1 + \sqrt{3}))(x - (-1 - \sqrt{3})) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

4 次方程式

$$\begin{aligned} \text{例 1} \quad & x^4 + 2x^3 + 6x^2 + 26x + 45 \\ & = (x - (-2 - i))(x - (-2 + i)) \\ & \times (x - (-1 + 2\sqrt{2}i))(x - (-1 - 2\sqrt{2}i)) = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{例 2} \quad & x^4 + 10004.01x^3 + 40107.04x^2 + 70400.07x + 700 \\ & = (x - (-10000))(x - (-0.01)) \\ & \times (x - (-2 - \sqrt{3}i))(x - (-2 + \sqrt{3}i)) = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{例 3} \quad & x^4 + 2x^3 + 2x^2 + 16x + 24 \\ & = (x - (-2))(x - (-2)) \\ & \times (x - (1 - \sqrt{5}i))(x - (1 + \sqrt{5}i)) = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{例 4} \quad & x^4 - 8x^3 + 24x^2 - 32x + 16 \\ & = (x - 2)^4 = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{例 5} \quad & x^4 + x^2 + 1 \\ & = \left(x - \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right)\right)\left(x - \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i\right)\right) \\ & \times \left(x - \left(\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i\right)\right)\left(x - \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right)\right) = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \text{例 6} \quad & x^4 - 4x^3 + 5.9999999995x^2 - 3.999999999x \\ & + 0.99999999950000000004 \\ & = (x - 0.99998)(x - 0.99999) \\ & \times (x - 1.00002)(x - 1.00001) = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

6.2 要求精度と真の精度との比較

まず, ユーザ要求精度 (10 進桁数) U を 20, 50, 100, 1000 桁とした場合の計算結果を Table 1 に示す。真の解を指定精度の 10 倍の桁数で計算し, これを真の値として実数部, 虚数部それぞれの相対誤差を導出したものである。数値が 0 になっているのは, 全ての桁が一致していることを示している。

この結果から, 全ての指定精度及び全ての例題に対して要求精度を満足する解が得られていることが分かる。要求精度より 1, 2 桁多めの桁数が出ているのは MPFR の多倍長浮動小数点数が 2 進であるため, 10 進変換の際の誤差を考慮して天井関数 (ceil) によって 2 進 bit 数が多めに与えられていることによるものと思われる。今回は全て 10^{-U} 以下の相対誤差に収まっているが, 数値によっては丸めた結果, 若干これを上回る相対誤差になることがある⁷⁾。

*cf. http://sourceware.org/bugzilla/show_bug.cgi?id=3976

Table 1: 数値計算ハンドブックの例題: 要求精度 U と相対誤差

2nd degree					
Eq.No.	Exact root	Relative Errors: Re, Im			
		$U = 20$	$U = 50$	$U = 100$	$U = 1000$
(15)	-54	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	0.00000001	7.1e-22, 0	2.5e-51, 0	1.4e-101, 0	1.3e-1001, 0
(16)	$-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$	0, 3.2e-21	0, 2.3e-52	0, 1.3e-101	0, 2.5e-1002
	$-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i$	0, 3.2e-21	0, 2.3e-52	0, 1.3e-101	0, 2.5e-1002
(17)	1.20001	1.5e-21, 0	2.7e-51, 0	3.4e-101, 0	4.3e-1001, 0
	1.2	2.3e-21, 0	1.8e-51, 0	1.9e-101, 0	6.3e-1001, 0
3rd degree					
Eq.No.	Exact root	Relative Errors: Re, Im			
		$U = 20$	$U = 50$	$U = 100$	$U = 1000$
(18)	3	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	2	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	1	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
(19)	5	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	-1	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
(20)	-1	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	$-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{7}}{2}i$	0, 3.9e-21	0, 2.6e-52	0, 1.0e-102	0, 3.8e-1001
	$-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{7}}{2}i$	0, 3.9e-21	0, 2.6e-52	0, 1.0e-102	0, 3.8e-1001
(21)	-1	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	-1	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	-1	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
(22)	$-1 - \sqrt{3}$	2.9e-21, 0	3.8e-51, 0	3.4e-101, 0	6.8e-1001, 0
	$-1 + \sqrt{3}$	1.6e-21, 0	5.4e-52, 0	3.0e-101, 0	5.9e-1002, 0
	-1	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
4th degree					
Eq.No.	Exact root	Relative Errors: Re, Im			
		$U = 20$	$U = 50$	$U = 100$	$U = 1000$
(23)	$1 + 2\sqrt{2}i$	0, 1.9e-21	0, 2.9e-51	0, 2.0e-101	0, 3.4e-1001
	$1 - 2\sqrt{2}i$	0, 1.9e-21	0, 2.9e-51	0, 2.0e-101	0, 3.4e-1001
	-2 + i	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	-2 - i	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
(24)	$-2 + \sqrt{3}i$	0, 3.2e-21	0, 2.3e-52	0, 1.3e-101	0, 2.5e-1002
	$-2 - \sqrt{3}i$	0, 3.2e-21	0, 2.3e-52	0, 1.3e-101	0, 2.5e-1002
	-10000	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	0.01	8.5e-22, 0	6.7e-52, 0	1.1e-101, 0	6.5e-1001, 0
(25)	$1 + \sqrt{5}i$	0, 2.3e-21	0, 8.7e-52	0, 4.5e-101	0, 4.3e-1001
	$1 - \sqrt{5}i$	0, 2.3e-21	0, 8.7e-52	0, 4.5e-101	0, 4.3e-1001
	-2	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	-2	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
(26)	2	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	2	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	2	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
	2	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
(27)	$\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$	0, 3.2e-21	0, 2.3e-52	0, 1.3e-101	0, 2.5e-1002
	$-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$	0, 3.2e-21	0, 2.3e-52	0, 1.3e-101	0, 2.5e-1002
	$\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i$	0, 3.2e-21	0, 2.3e-52	0, 1.3e-101	0, 2.5e-1002
	$-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i$	0, 3.2e-21	0, 2.3e-52	0, 1.3e-101	0, 2.5e-1002
(28)	1.00001	8.8e-22, 0	5.3e-51, 0	1.7e-101, 0	3.2e-1001, 0
	0.99999	8.8e-22, 0	5.0e-53, 0	1.7e-101, 0	6.3e-1001, 0
	0.99998	1.8e-21, 0	9.9e-53, 0	2.2e-101, 0	3.1e-1001, 0
	1.00002	1.8e-21, 0	9.9e-53, 0	3.5e-101, 0	6.4e-1001, 0

6.3 前処理における損失桁評価値

次に, IEEE754 倍精度計算による損失桁評価値 P の値を Table 2 に示す。

Table 2: IEEE754 倍精度計算における損失桁評価値 P

Ex.no	P	Ex.no	P
(15)	4	(22)	2
(16)	0	(23)	2
(17)	6	(24)	11
(18)	1	(25)	9
(19)	1	(26)	1
(20)	1	(27)	0
(21)	0	(28)	<u>1</u>

前述したように, この評価を行うと多くの場合に丸め誤差の上限を捕らえることができるが, 反面, 評価としては少し大きめに出ることが多くなる。例えば (15) では 4 桁の損失があると報告されているが, RN モードでの近似値は

$$\begin{aligned} & -5.4000000000000000e + 01 \\ & 1.0000000000000002e - 08 \end{aligned}$$

であり, また, (25) でも

$$\begin{aligned} & 1.0000000000000000 + 2.23606797749978981 i \\ & 1.0000000000000000 - 2.23606797749978981 i \\ & -2.0000000000000000 + 0.0000000000000000 i \\ & -2.0000000000000000 + 0.0000000000000000 i \end{aligned}$$

ほぼ 16 桁一致している。後者のケースは, 後述するように実装した Ferrari 法の不安定さに起因するものかもしれない。

逆にほぼ正確に捉えているのは (17) で, 実際,

$$\begin{aligned} & 1.20001000000020674 \\ & 1.1999999999979323 \end{aligned}$$

という近似値になる。また, (24) でも

$$\begin{aligned} & -2.00000008949473340 + 1.73205091026944813 i \\ & -2.00000008949473340 - 1.73205091026944813 i \\ & -1.0000000000000000e + 04 \\ & -9.99982101075147511e - 03 \end{aligned}$$

となり, 11 桁の損失桁という報告はほぼ適正と言える (小数部を 18 桁出力していることに注意)。

過小評価になっているのは (28) だが, これは定数項が倍精度では収まり切れず, 結果として別の方程式に化けてしまっていることが原因である。実際, 定数項が 0.9999999950000000003 の場合, 解は

$$\begin{aligned} & 0.99997925\dots, 0.99999165\dots \\ & 1.00000834\dots, 1.00002074\dots \end{aligned}$$

となり, 定数項が 0.9999999950000000005 の場合, 解は

$$\begin{aligned} & 0.99998097\dots, 0.99998824\dots \\ & 1.00001175\dots, 1.00001902\dots \end{aligned}$$

と激しく変化する。よって, 問題自体が変化している以上, 変化した問題に対してこの評価結果が正しいかどうかを考える必要が出てくる。最終的には初期誤差の範囲を特定した上で, 区間として係数を与え, 多くの精度保証数値計算において行われているように, それによって解がどのような変動を示すかを深く考える必要がある。なお前述したように, このような不正確な評価値が与えられても我々の任意精度計算アルゴリズムの最終結果には影響していない。

参考文献¹⁰⁾ではこの辺りの事情を深く吟味せずによしとしているが, このような初期誤差に対する不注意さが, 結果としてそこで著者が実装した Ferrari 法の数値的不安定性にも気が付かなかった要因と思われる。他山の石としたい事例である。

6.4 計算桁数の変化

最後に, 提案した計算桁数の変動アルゴリズムに則って自動的に変化していく計算桁数について考察する。Table 3 に 2 次方程式の例題を, Table 4 に 3 次方程式の例題を, Table 5 に 4 次方程式の例題の結果をそれぞれ示す。

Table 3: 要求精度 U と計算桁数の変化 (1/3)

2nd degree		
Eq.No.	U	Changes of $S(L)$
(15)	20	34(48)
	50	64(78)
	100	114(128)
	1000	1104(1208)
(16)	20	30(40)
	50	60(70)
	100	110(120)
	1000	1100(1200)
(17)	20	36(52)
	50	66(82)
	100	116(132)
	1000	1106(1212)

2, 3 次方程式の場合はリトライを一度も実行することなく要求精度の解が得られていることが分かる。それに対して, 4 次方程式の場合は条件の悪い問題 (25), あるいは初期誤差による影響の大きな問題 (28) において, 最大 4 回のリトライを行っていることが分かる。

特に (28) の場合では, 計算桁数が比較的小さい時には Ferrari 法内部の実数の平方根計算においてゼロに近いマイナス値になることがあり, それをリカバーするためにリトライを繰り返している。IEEE754 倍精度計算結果が参考文献¹⁰⁾のものとはほぼ同じ精度であること, 最終的には要求精度の近似値が得られていることから, 解法に潜む数値的不安定性による現象と思われるが, 現時点では深く解析できていない。

しかし, 不安定なアルゴリズムの実装であることがこのリトライ回数によって明確に現れることは, 我々の任意精度計算アルゴリズムの存在価値になり得る。今後, 更に安定性を増した実装を行った際の比較実験では有効に働くと思われる。

7. まとめと今後の課題

以上述べてきたように, 我々の 4 次以下の任意精度代数方程式ソルバは, 全ての例題に対してユーザの要求精度を満足する近似値が得られることが判明した。しかし, Ferrari 法の

Table 4: 要求精度 U と計算桁数の変化 (2/3)

3rd degree		
Eq.No.	U	Changes of $S(L)$
(18)	20	31(42)
	50	61(72)
	100	111(122)
	1000	1101(1202)
(19)	20	31(42)
	50	61(72)
	100	111(122)
	1000	1101(1202)
(20)	20	31(42)
	50	61(72)
	100	111(122)
	1000	1101(1202)
(21)	20	30(40)
	50	60(70)
	100	110(120)
	1000	1100(1200)
(22)	20	32(44)
	50	62(74)
	100	112(124)
	1000	1102(1204)

Table 5: 要求精度 U と計算桁数の変化 (3/3)

4th degree		
Eq.No.	U	Changes of $S(L)$
(23)	20	32(44)
	50	62(74)
	100	112(124)
	1000	1102(1204)
(24)	20	41(62)
	50	71(92)
	100	121(142)
	1000	1111(1222)
(25)	20	39(58) → 42(64)
	50	69(88) → 78(106) → 106(162)
	100	119(138)
	1000	1109(1218) → 1218(1436) → 1436(1872)
(26)	20	31(42)
	50	61(72)
	100	111(122)
	1000	1101(1202)
(27)	20	30(40)
	50	60(70)
	100	110(120)
	1000	1100(1200)
(28)	20	31(42) → 42(64) → 64(108)
	50	61(72) → 72(94)
	100	111(122) → 122(144)
	1000	1101(1202) → 1202(1404) → 1404(1808)

アルゴリズムに関してはまだ改良の余地が残っている。
今後の課題としては、次のことが挙げられる。

7.1 4次方程式向けの計算アルゴリズムの改良

現在実用に供されている数値計算ライブラリでも、GSL¹²⁾のように4次方程式向けのソルバが用意されていないものがある。これは前述したように安定したアルゴリズムの実装が難しいこと、反復法で十分高精度の解が得られることが要因として上げられよう。今後、現状のFerrari法より安定した計算アルゴリズムを実装していきたい。その際には、別の方法(Brown法など)との比較検討も行っていきたい。

7.1.1 高次代数方程式に対する任意精度ソルバの開発

我々は既に1024次の実係数代数方程式に対して実数解の任意精度計算が可能であることを示した⁷⁾。現在では、特に高次の代数方程式は、行列の固有値問題用のアルゴリズムを用いることで、近似値の損失桁を少なくすることができることが知られている。実際、近接度が増した高次の代数方程式に対しても、QR法を用いることで損失桁は殆ど発生しないことが我々の数値実験で確認できている。しかし、適切な初期値が設定でき、多倍長計算を用いることができる場合は、あくまで代数方程式のまま解くことで、計算時間と必要記憶領域が節約できることも同時に判明している。従って、前処理にはIEEE754倍精度計算を用いた固有値計算アルゴリズムを用いて近似値を得、これを多倍長計算による代数方程式向けの反復法の初期値として用いる方法が、今のところ多くの問題では有効に働くと考えている。

次の課題は複素数解を含む高次代数方程式の全ての解の任意精度計算を可能にするソルバを実装することだが、この場合でも、IEEE754倍精度計算による前処理と、多倍長計算による計算アルゴリズムとの組み合わせを行うことが良い効果を生むかどうかを確認する必要がある。その知見を考慮した上で、より有効な任意精度代数方程式ソルバを実装していきたい。

7.1.2 より多くの問題に対する検証

我々の提案する古典的誤差評価法は、あくまで経験的な知見を元にしてしているため、更に多くの例題に対して我々のソルバを適用してその有効性を確認することが欠かせない。そこで、本稿で実装した4次以下の実係数代数方程式ソルバを広く世界中のユーザに使ってもらうため、Fig.1のようなWebインターフェースを実装し、広く公開を行っている*。

セキュリティ維持のため、ユーザの要求精度は1000桁に抑えてあるが、問題によってはそれよりも大きな計算桁数を必要とするケースもあり、本当にセキュアなものになっているかどうかは定かではない。常に監視を行いつつ、多くの問題に対してこのWebインターフェースを適用してもらい、より多くの例題の収集と手法の有効性の確認を行っていきたい。

謝辞

Webインターフェースを公開後、Vincent Lérfeve, Paul Zemmernannの両氏から適切なアドバイスを頂いた。また、x86_64 Linux環境におけるglibcの初等関数のバグについては、NA Digestを通じて様々な方から資料や知見を寄せて頂いた。今回行った計算が可能になったのはこれらの方々の助力なくしては考えられない。ここで御礼申し上げたい。

最後に、古典的誤差評価法に基づく任意精度計算の実装は、長年に渡る元・日本大学 永坂秀子先生とのディスカッションによって培われたものである。博士前期課程以来十数年以

*<http://ex-cs.sist.ac.jp/~tkouya/try.cee.algebraic.eq.html>

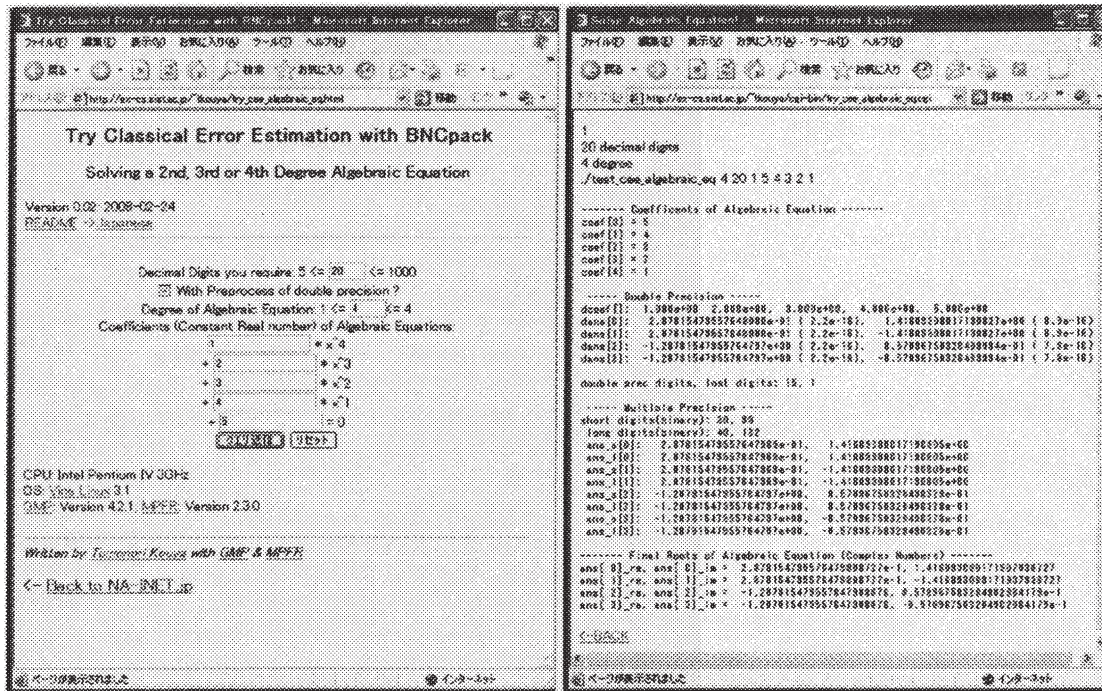


Fig. 1: デモ用 Web インターフェース (左) と計算結果表示例 (右)

上もの間、ご指導頂いていることに対して、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Swox AB. GNU MP. <http://swox.com/gmp/>.
- 2) CRlibm. Correctly rounded mathematical library. <http://lipforge.ens-lyon.fr/www/crlibm/>.
- 3) 伊理正夫, 藤野和建. 数値計算の常識. 共立出版, 1985.
- 4) Tomonori Kouya. BNCpack. <http://na-inet.jp/na/bnc/>.
- 5) 幸谷智紀. ソフトウェアとしての数値計算. <http://na-inet.jp/nasoft/>.
- 6) 幸谷智紀, 永坂秀子. IEEE754 規格を利用した丸め誤差の測定法について. 日本応用数学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 79 – 89, 1997.
- 7) 幸谷智紀. 実用的な古典的誤差評価法の提案と gauss 型積分公式の分点計算への応用について. 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. SIG18(ACS20), pp. 1 – 11, 2007.
- 8) L.Fousse, G.Hanrot, V.Lefèvre, P.Pélissier, and P.Zimmermann. MPFR: A multiple-precision binary floating-point library with correct rounding. *ACM Trans. Math. Softw.*, Vol. 33, No. 2, p. 13, 2007.
- 9) J.-M. Muller. *Elementary Functions. Algorithm and Implementation*. Birkhäuser, first edition, 1997.
- 10) 大野豊, 磯田和男監修. 新版 数値計算ハンドブック. オーム社, 1990.
- 11) MPFR Project. The MPFR library. <http://www.mpfr.org/>.
- 12) GSL Team. Gnu scientific library. <http://www.gnu.org/software/gsl/>.

理工系大学生における学習動機・授業中のつまずき・学習意欲の関連
The relationship among the motives for learning, recognition for lack of understanding in classes, and learning
motivation: in the case of college students belonging to Department of Science and Technology

小杉大輔*

Daisuke KOSUGI

Abstract: The purpose of the present study was to examine factors that underlie college students' learning and the relations among these factors. Four hundred and twenty-five college students answered a questionnaire. This questionnaire covered their motives for learning in a college, problem-solving strategies and causal attribution in the case of lack of understanding in classes, and learning motivation. Factors for each topic were extracted by factor analysis. Then, using the multiple linear regression analysis, we examined the relations among the factors of each topic. Results showed first that a kind of intellectual curiosity had a positive influence on learning motivations, constructive problem-solving and causal attribution in classes, while sense of obligation of academic learning had a negative effect on them.

はじめに

近年、高等教育の現場では、大学生の「学力低下」や「学習意欲の低下」の問題がますます深刻化しているようである。実際、全国の国公立大学を対象にした調査の結果、大学教員の6割が学生の学力低下を問題視していることが明らかになっている(朝日新聞社, 2005)¹⁾。ところが、その一方で、近年、大学生の授業出席率が高くなっていること、大学生活の中で占める勉学第一主義の傾向があることが指摘されている(溝上, 2004)²⁾。これは、一見すると不思議な現象である。

溝上(2004)は、これに関連して、現代の大学生の中には、「なぜ大学で学ぶのか、自分は何を学びたいのかをうまく理解できていないが、授業には出席している者」が少なからずいると指摘している。また、柳井(2002)は、学業が大学生活や人生にうまく関連づけられない学生(大学に適應できない学生)であっても、授業には相当の時間を費やしていると指摘している³⁾。つまり、学生には、学習の目的も意欲もなく、授業への志向性も低い、何となく授業には出席し、それで勉強していると考えられる風潮があると考えられるのである。

市川(2002)は、現在問題となっている学力低下は、単一の要因だけでは説明しにくいとし、以下の4つの要因が複合的に関わっているのだと論じている⁴⁾。4つの要因とは、①大学入学者比率の相対的増加という人口動態要因、②授業の工夫や魅力のなさや、評価の甘さという大学側の問題、③初等・中等教育の内容削減や勉強への方向づけの低下、④価値観の多様化や享乐的娯楽の増大による学習意欲の減退、である。たとえば、少子化の影響による受験競争の緩和は、入学者の学力の低下を招く結果となった。とくに私立大学においては、経営上学生の確保が必須であり、定員の充足を考慮し、合格基準を大幅に下げざるを得ないという現状がある(牧野, 2002)⁵⁾。そして、推薦入試やAO入試など、過去の学習履歴を問題にしにくい方法によって選抜された学生が増加している。したがって、一部の大学では、学力や学習意欲が大学での学びに耐えられないほどに低い学生を受け入れてしまう可能性がある。

このような問題を受けて、今日、多くの大学では、教員の授業改善やいわゆるFD(ファカルティ・ディベロップメント)への取り組みを重要視し、実践している⁶⁾。また、いわゆるリメディアル教育や、企業へのインターンシップ等の体験型の学習などを導入する大学も増えている。これらの取り組みは、学生側の視点を多く取り入れ、学びの環境を整えようとするものであり、その目標の中には、学生

2008年3月5日受理

*理工学部 情報システム学科

を大学に惹きつけるような魅力ある授業、学習環境づくり、そして学生の学習意欲の喚起が含まれる。しかし、初めから大学での学びに背を向けているような学生に対しては、これらの取り組みはほとんど意味をもたない。また、今後、いわゆる大学全入時代を迎え、このような学生はますます増加すると考えられる。

一方、大学が生き残るためには、教育方法・内容の充実のほか、学生支援にもますます力を入れ、学生の就職率を高い水準で維持するなど、ブランド力を身につけていかなければならない。その重要性は、各大学が学生の就職支援に力を入れていることから明らかである。これに関連して、小杉(2006)の調査によれば、高校生は、自分の興味のある学問領域を学ぶことのできる大学に進学し、その学問領域、あるいは将来の就職に役立つことを学習する、という大学生活の実現を希望している⁷⁾。また、安達(1999)は、理科系大学1年生の大学選択動機と入学後の適応に及ぼす影響について研究をおこない、大学生にとって、入学前に何のために入学するのかを吟味することが、その後の大学への適応に必要となると指摘している⁸⁾。安達の研究によれば、進学先を決定する段階で、情報設備機器や授業内容といった大学の機能に着目すること、ならびに入学後に専門的能力を習得することが、学業についての充実感を規定するという。これらのことから、大学で何を学ぶのかを認識すること、そして、その学びが将来の就職に結びつくことを認識することは、大学選択にも、大学での学習意欲の維持のためにも重要なのだといえる。

しかし、先述のように、とくに一部の私立大学では、定員の確保の必要性から、多様な資質をもつ学生を受け入れざるを得ない事態となっている。学生の中には、大学での学びについて十分に考えたことがないまま大学に入学し、‘とりあえず’授業には出席している者もいるだろう。そのような学生は、積極的な学習態度で授業に臨んでいるとは限らない。また、大学に出てさえいれば就職できるだろう、という認識があるかもしれない。これでは、大学での学びが将来の仕事に結びついている、あるいは職業への意識が学ぶ意欲に結びついているとはいえない。

今後、多くの大学において、このような学生を発見し、その学生の動機づけや学習意欲の状態に応じた教育をすることが求められると考えられる。そのためには、大学の

教職員が、個々の学生の学びの状態について知る必要がある。これに関連した研究として、先述の安達(1999)のほか、たとえば、溝上(2004)は、新入生を対象にした調査により、学業意欲と授業意欲の入学後の変化について調べている。また、松島・尾崎(2005)では、同じく新入生を対象に、大学進学動機と学習意欲、授業選択態度の関連について調べている⁹⁾。本研究では、これらの先行研究を踏まえ、大学生の学びに関する新たな尺度の構築をおこない、(本学の)学生の学びの特徴を明らかにすることを目的とした。本研究では、学習の動機づけと、授業態度に焦点を当てた。

大学での学習の動機づけに関する先行研究には、たとえば、大学への進学動機について調べた栗山ら(2001)の研究がある¹⁰⁾。栗山らの研究では、25項目からなる進学動機尺度を作成し、高校生を対象にした質問紙調査をおこなっている。そして、因子分析の結果、「社会的地位」、「得意分野」、「無目的・漠然」、「資格・専門」、「エンジョイ」の5因子が得られた。また、栗山らの進学動機尺度を用いて、大学の新入生を対象におこなった松島・尾崎(2005)の調査では、「専門・知的好奇心」、「社会的地位」、「無目的」の3因子が得られた。この中で、得意分野や専門・知的好奇心といった因子は、学習すること自体、あるいは学習内容による動機づけを意味する。また、社会的地位や資格・専門といった因子には、将来の職業への志向性を意味する項目が多く含まれる。これらのことから、動機づけに関する尺度を作成し、調査、分析をおこなうことにより、上で挙げた学力低下や学習意欲などの諸問題が、調査対象においてどのように関わるのかを知る手がかりとなると考えられる。

授業態度については、とくに、大学の授業において、理解できない事項があったときにどうするか(以下、授業中のつまずきへの対処方略)、大学の授業において、理解できない事項があったときに、それが何のせいだと考えるか(以下、授業中のつまずきの原因づけ)に注目し、これらに関する尺度を作成した。これは、先述の‘とりあえず’授業に出席する学生が多いという溝上(2004)の指摘に関連し、授業中に‘考えなくてはならない’状況になったときに、個々の学生がそれを積極的に解決するのか、消極的に解決するのかを知ることを目的としている。たとえば、

とりあえず授業に出席するというような消極的な姿勢の学生は、分からない問題についてそれ以上考えることを放棄してしまうのではないかと考えられる。学生の学力低下の問題や授業改善などとの関連からもこのような問題について考えることは重要であるといえる。

本研究では、まず自由記述による予備調査をもとに、学習の動機づけ尺度、授業中のつまずきへの対処方略尺度、授業中のつまずきの原因づけ尺度を作成し、静岡理科大学の学生を対象に調査を実施した。また、これに併せて、学習意欲に関する尺度として、下山(1995)の意欲低下領域尺度を用いて調査を実施した¹¹⁾。そして、得られたデータを因子分析、分散分析、重回帰分析を用いて分析した。

理工系の学生は、数学や理科など、現代の子どもたちがつまずきやすいといわれている科目を中心に履修することから、授業中のつまずきの経験を多く有するのではないかと考えられる。また、このような経験により、いわゆる学習性無力感を起こし、学習意欲を低下させる可能性もある。その一方で、通常の授業における学習内容は、将来の職業に結びつけやすいともいえ、このことは学習の動機づけに影響を与えると考えられる。

方 法

参加者 静岡理科大学の1年生205名、2年生98名、3年生100名と、学年不詳34名の計437名を対象に調査をおこなった。後述するすべての質問紙への回答を完遂した学生のみを有効回答者とした。その結果、有効回答者は425名であった（このうち女子は30名であった）。

質問項目

学習の動機づけ、授業中のつまずきへの対処方略、授業中のつまずきの原因づけについて質問項目を作成した。これらに加え、学習意欲の尺度として、下山(1995)の意欲低下領域尺度15項目を用いた。

学習の動機づけ 項目の作成にあたり、平成17年4月に2年生168名（うち女子13名）を対象に予備調査をおこなった。ここでは、なぜ大学で学んでいるのか、大学進学を志したきっかけは何かについて自由記述を求めた。この予備調査の結果に基づいて短文を作成し、さらに栗山ら(2001)の進学動機尺度の25項目を参考にして38項目を作成した。

参加者への教示として、「大学の授業や日常において、さまざまなことを学んだり、勉強したりすることについて質問します。あなたはそのような学習や勉強をどのような理由でおこなっていますか。以下のそれぞれの項目について、あてはまる(5)、ややあてはまる(4)、どちらともいえない(3)、あまりあてはまらない(2)、あてはまらない(1)のなかで最もあてはまる数字に○をつけてください。」という文章を、質問紙の冒頭に記した。

授業中のつまずきへの対処方略・授業中のつまずきの原因づけ 項目の作成にあたり、平成18年6月に、2年生104名（うち女子8名）を対象に、予備調査をおこなった。ここでは、「大学での（あるいは家庭での）学習において、そのときにしている学習内容がよく理解できず、うまく学習がすすまないときのことについて質問します。1. その状態に対し、どのように対処しますか。2. その状態になった原因は何だと考えますか。」という質問に対し、自由記述による回答を求めた。1と2の質問ごとに自由記述の結果をまとめ、それを基に短文を作成した。この短文について、調査の目的を知らない大学生（4年生）2名と、教育心理学を専門とする大学教員2名の意見を求め、質問項目を作成した。また、授業中のつまずきへの対処方略については、伊藤(1996)の学習方略尺度を参照した。このようにして、授業中のつまずきへの対処方略尺度18項目と、授業中のつまずきの原因づけ尺度19項目を作成した。

参加者への教示として、授業中のつまずきへの対処方略尺度では、「あなたが、大学の授業において、その内容が理解できなかったとき、あるいは、わからない問題や課題ができたとき、後でどのように対処するのかについて質問します。以下のそれぞれの項目について、あてはまる(5)、ややあてはまる(4)、どちらともいえない(3)、あまりあてはまらない(2)、あてはまらない(1)のなかで最もあてはまる数字に○をつけてください。」という文章を質問紙の冒頭に記した。また、授業中のつまずきの原因づけ尺度では、「あなたが、大学の授業において、その内容が理解できなかったとき、あるいは、わからない問題や課題ができたときのことについて質問します。このようなとき、その理由についてどのように考える傾向がありますか。以下のそれぞれの項目について、あてはまる(5)、ややあてはまる(4)、どちらともいえない(3)、あまりあてはまら

Table 1 学習の動機づけ尺度の因子分析表

項目内容	I	II	III
学ぶこと自体がおもしろいから	.80	-.05	-.12
難しい内容を学ぶのが楽しいから	.77	.04	-.20
考えたり、頭を使ったりするのが好きだから	.72	.06	-.16
内容を理解できるようになるのがうれしいから	.70	.17	-.27
教材や本などがおもしろいから	.70	.09	-.13
好奇心が満たされるから	.70	.05	.11
知識や能力が身につくのが楽しいから	.69	.03	.11
わからなかったことがわかるようになると自信がつくから	.59	.05	.15
興味のある分野を深く掘り下げたいから	.49	-.19	.23
得意とすることを追求したいから	.48	-.10	.24
人生の視野を広げたいから	.39	-.03	.17
きまりのようなものだから	-.10	.76	-.16
しないと罪悪感に責められるから	.10	.68	-.10
今の社会ではしなければならぬようになっているから	-.13	.66	.14
しておかないと不安だから	.05	.65	.19
まわりからやれと言われるから	-.16	.61	-.15
まわりの人についていけなくなるのが嫌だから	.02	.59	.26
課題などのやらなければならないものを与えられるから	.17	.57	-.10
まわりの人により印象をあたえたいから	.16	.50	.18
よい成績や評価を得たいから	.29	.50	.19
ほかにすることがないから	-.14	.49	-.23
後で困るのが嫌だから	.04	.48	.21
そうすること自体が大切なことだから	.26	.46	.15
就きたい職業に必要な知識をつけたいから	.04	-.06	.65
就職に有利だから	-.29	.31	.62
就職後、多くの収入・給与を得たいから	-.23	.17	.56
自分にあつた職業を探したいから	.00	.09	.53
専門的な知識や技術を身につけたいから	.27	-.19	.50
将来いろいろなことに役立つから	.24	-.14	.43
α係数	.89	.87	.73
因子間相関			
I	—	.06	.54
II		—	.14
III			—

ない (2)、あてはまらない (1) のなかで最もあてはまる数字に○をつけてください。」という文章を質問紙の冒頭に記した。

意欲低下領域尺度 下山 (1995) の意欲低下領域尺度 15 項目を用いた。この尺度は、学業意欲低下 5 項目、授業意欲低下 5 項目、大学意欲低下 5 項目の 3 つの下位尺度によって構成されている (巻末資料を参照)。

参加者への教示として、「今のあなたの心の状態を教えてください。以下のそれぞれの質問に対して、あてはまる (5)、ややあてはまる (4)、どちらともいえない (3)、あまりあてはまらない (2)、あてはまらない (1) のなかで最もあてはまる数字に○をつけてください。」という文章を質問紙の冒頭に記した。

調査の実施 1 年生と 2 年生の調査は平成 18 年 7 月に、3 年生の調査は平成 18 年 10 月におこなった。講義中に 7 枚

からなる質問紙 (表紙を含む) を配布した。表紙には、大学での学びに関する調査とタイトルを付し、回答の例を記した。調査の所要時間はおよそ 15 分であった。

結果と考察

因子分析の結果

学習の動機づけ尺度の因子分析 学習の動機づけ尺度 38 項目に対して、主因子法による因子分析をおこなった。因子分析の方法については、小塩 (2005) を参考にした¹²⁾。固有値の減衰状況 (7.234, 4.759, 2.040, 1.148, 0.990・・・) と因子の解釈可能性を考慮すると、3 因子構造が妥当であると考えられた。そこで、再度 3 因子を仮定して主因子法・Promax 回転による因子分析をおこなった。その結果、十分な因子負荷量を示さなかった 10 項目を分析から除外し、残りの 28 項目に対して、再度主因子法・Promax 回転

による因子分析をおこなった。Promax回転後の最終的な因子パターンと因子間相関をTable 1 に示す。なお、回転前の3因子で28項目の全分散を説明する割合は48.39%であった。

第1因子は11項目で構成されており、学ぶこと自体の楽しさや理解することの喜びを表す項目が高い負荷量を示していた。そこで、「知的好奇心」因子と命名した。

第2因子は12項目から構成されており、大学で学ぶことが社会的なきまりになっているという意識を表す項目が高い負荷量を示していた。そこで、「義務感」因子と命名した。

第3因子は6項目から構成されており、大学での学びを将来の職業に生かしたいという意識を表す項目が高い負荷量を示していた。そこで、「将来展望」因子と命名した。

授業中のつまずきへの対処方略尺度の因子分析 学習不振時の対処尺度18項目に対して、主因子法による因子分析をおこなった。固有値の変化(3.911, 2.153, 1.701, 1.181, ...)と因子の解釈可能性を考慮すると、3因子構造が妥当であると考えられた。そこで、再度3因子を仮定して主因子法・Promax 回転による因子分析をおこなった。その結果、十分な因子負荷量を示さなかった4項目を分析から除外し、残りの14項目に対して、再度主因子法・Promax 回転による因子分析をおこなった。Promax 回転後の最終的な因子パターンと因子間相関をTable 2 に示す。なお、回転前の3因子で項目の全分散を説明する割合は51.51%であった。

第1因子は8項目で構成されており、自分でできるところまでやろうという態度を表す項目が高い負荷量を示していた。そこで、「自力解決」因子と命名した。

第2因子は3項目で構成されており、あきらめて放置しようという態度を表す項目が高い負荷量を示していた。そこで、「あきらめ」因子と命名した。

第3因子は3項目で構成されており、友人を頼って解決しようという方略を表す項目が高い負荷量を示していた。そこで、「友人依存」因子と命名した。

授業中のつまずきの原因づけ尺度の因子分析 学習不振の原因づけ尺度19項目に対して、主因子法による因子分析をおこなった。固有値の変化(3.715, 1.791, 1.624, 1.046, ...)と因子の解釈可能性を考慮し、3因子構造

Table 2 授業中のつまずきへの対処方略尺度の因子分析表

項目内容	I	II	III
気分転換してから再度取り組む	.62	.04	.00
なぜ分からないのか考える	.62	.06	.03
何が分かっていないのか明らかにする	.57	-.10	-.05
とにかく考え続ける	.54	.03	-.09
辞書・参考書等で調べる	.48	-.07	-.00
授業ノートを見直す	.47	.01	.13
わかるところまでやる	.41	.03	.08
基礎からやり直す	.40	-.10	-.05
あきらめる	-.03	.82	.03
何もしないで放置する	.00	.78	.01
適当にやり過ごす	.01	.72	-.03
理解している人に教えてもらう	.00	-.04	.82
友人と一緒に問題を解いてみる	-.05	-.06	.75
友人のノートを借りる	.08	.11	.57
α係数	.74	.82	.74
因子間相関			
I	—	-.45	.08
II		—	-.02
III			—

Table 3 授業中のつまずきの原因づけ尺度の因子分析表

項目内容	I	II	III
先生の話をよく聞いていないから	.78	-.09	-.02
授業に集中しないから	.73	-.01	.03
理解しようとして授業を受けていないから	.65	.14	.00
ノートをとっていないから	.49	-.01	.03
授業内容が難しすぎるから	-.11	.73	.06
授業のペースが速すぎるから	-.21	.65	.02
先生の説明が分かりにくかったから	.14	.53	-.13
教材に工夫がないから	.14	.51	-.05
授業の雰囲気が悪いから	.11	.43	-.02
理解できないと決め付けてしまうから	.13	.42	.11
復習が不足しているから	.05	-.08	.86
予習が不足しているから	-.01	.09	.78
α係数	.76	.73	.81
因子間相関			
I	—	.38	.11
II		—	.05
III			—

が妥当であると判断した。そこで、再度3因子を仮定して主因子法・Promax 回転による因子分析をおこなった。その結果、十分な因子負荷量を示さなかった7項目を分析から除外し、残りの12項目に対して再度主因子法・Promax 回転による因子分析をおこなった。Promax 回転後の最終的な因子パターンと因子間相関をTable 3 に示す。なお、回転前の3因子で12項目の全分散を説明する割合は56.12%であった。

第1因子は4項目から構成されており、自らの授業中の態度の悪さを表す項目が高い負荷量を示していた。そこで、「授業態度の悪さ」因子と命名した。

第2因子は6項目から構成されており、授業方法や授業内容の悪さを指摘するような項目が高い負荷量を示していた。そこで、「授業の悪さ」因子と命名した。

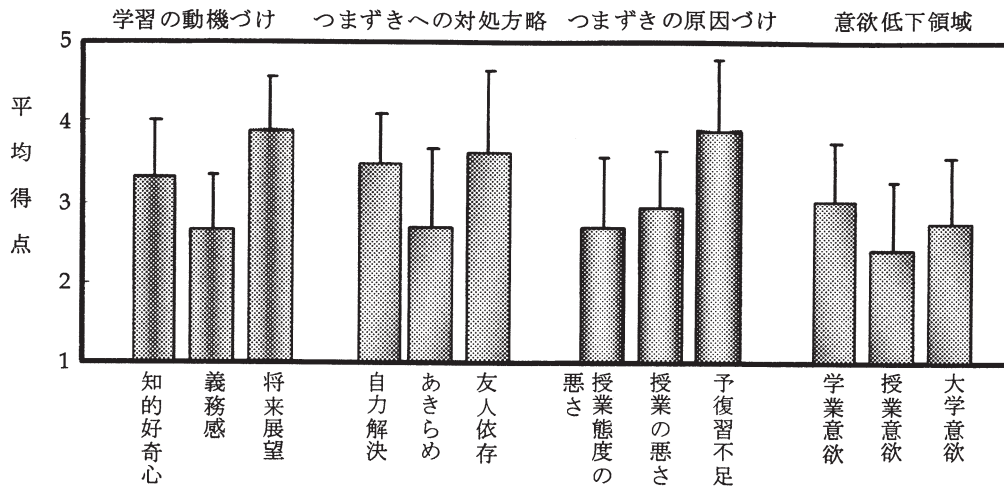


Figure 1 各尺度の下位尺度得点の平均値 (+ SD)

第3因子は3項目から構成されており、予習と復習の不足に関する項目が高い負荷量を示していた。そこで、「予復習不足」因子と命名した。

下位尺度得点の算出 上述の3つの因子分析において、各因子に高い負荷量を示した項目への得点の平均値を算出した(これを下位尺度得点と呼ぶ: Figure 1)。まず、学習の動機づけ尺度の下位尺度得点は、知的好奇心得点 ($M = 3.30, SD = .72$)、義務感得点 ($M = 2.64, SD = .69$)、将来展望得点 ($M = 3.90, SD = .66$) とした。次に、授業中のつまずきへの対処方略尺度の下位尺度得点は、自力解決得点 ($M = 3.46, SD = .64$)、あきらめ得点 ($M = 2.68, SD = .99$)、友人依存得点 ($M = 3.63, SD = 1.01$) とした。授業中のつまずきの原因づけ尺度の下位尺度得点は、授業態度の悪さ得点 ($M = 2.67, SD = .89$)、授業の悪さ得点 ($M = 2.92, SD = .72$)、予復習不足得点 ($M = 3.89, SD = .89$) とした。

また、意欲低下領域尺度の各下位尺度の平均値は、学業意欲低下得点 ($M = 3.01, SD = .72$)、授業意欲低下得点 ($M = 2.40, SD = .87$)、大学意欲低下得点 ($M = 2.73, SD = .81$) であった (Figure 1)。

以下の分析の記述では、上述の下位尺度得点について、すべて「得点」を省略する(つまり、知的好奇心得点のことを、知的好奇心と記述する)。

下位尺度得点の分散分析の結果と考察

上で算出した下位尺度得点について、尺度ごとに下位尺度得点どうしを比較する1要因の分散分析をおこなった。それぞれ、因子(3)を被験者内要因とした。意欲低下領

域尺度は、領域(3)を被験者内要因とした。

学習の動機づけ尺度 学習の動機づけ尺度の得点について分析をおこなったところ、因子の主効果が有意になった ($F(2, 424) = 510.6, p < .001$)。LSD法による多重比較をした結果、将来展望、知的好奇心の順に平均値が高く、それぞれの差が有意であった。今回の参加者は、大学での学びにおいて、将来の職業のための知識を身につけようと考えていると考えられる。また、義務感の得点の平均値は3点を下回っていた。このことから、全体として、大学で学ぶことをきまりごとのように考える傾向は強くないと考えられる。

授業中のつまずきへの対処方略尺度 授業中のつまずきへの対処方略尺度の得点について分析をおこなったところ、因子の主効果が有意になった ($F(2, 424) = 124.4, p < .001$)。LSD法による多重比較をした結果、友人依存、自力解決、あきらめの順に平均値が高く、それぞれの差が有意であった。平均値の比較から、今回の参加者は、授業中に理解できない問題などがあつた場合、友人を頼る、あるいは自分で解決しようとする傾向があると考えられる。あきらめ得点の平均値は3点を下回っていることから、全体として、このようなときにあきらめようとする傾向は強くないと考えられる。

授業中のつまずきの原因づけ尺度 授業中のつまずきの原因づけ尺度の得点について分析をおこなったところ、因子の主効果が有意になった ($F(2, 424) = 298.0, p < .001$)。LSD法による多重比較をした結果、予復習不足、授業法の

悪さ、授業態度の悪さの順に平均値が高く、それぞれの差が有意であった。今回の参加者は、授業中に理解できない問題などがあった場合、予習・復習が不足している、つまり自分の日常の努力が不足していると考えられる傾向があると考えられる。また、この結果からは、自らの授業態度よりも、授業法のせい、つまり教員のせいにする傾向があると考えられるが、これら2つの下位尺度得点の平均値は3を下回っており、この傾向は全体として強くなかった。

意欲低下領域尺度 意欲低下領域尺度の得点について分析をおこなったところ、領域の主効果が有意になった($F(2, 424) = 80.02, p < .001$)。LSD法による多重比較をした結果、学業意欲、大学意欲、授業意欲の順に平均値が高く、それぞれの差が有意であった。この尺度は、得点が高いほど意欲が低下していることを意味するので、進んで勉強しようという学業意欲が最も低いことが示唆される。しかし、学業意欲得点の平均値は3.01であり、この領域の意欲が全体として低いとは言えない。さらに、その他の2つの領域についても、得点の平均値は3を下回っていた。今回の参加者の意欲は全体として低くはなかったと考えられる。

重回帰分析の結果と考察

学習の動機づけ尺度と意欲低下領域尺度 学習の動機づけ尺度の3つの下位尺度得点が、意欲低下領域尺度の各下位尺度得点に与える影響を検討するために、重回帰分析をおこなった (Table 4)。

まず、知的好奇心と社会的要求から学業意欲低下に対する標準偏回帰係数が有意であったが、将来展望からの標準偏回帰係数は有意ではなかった。一方、知的好奇心、義務感、将来展望から授業意欲低下に対する標準偏回帰係数が有意であった。また、知的好奇心、義務感、将来展望から大学意欲低下に対する標準偏回帰係数が有意であった。

これらの結果から、知的好奇心が高いほど、つまり新た

Table 4 重回帰分析の結果

	学業意欲低下	授業意欲低下	大学意欲低下
	β	β	β
知的好奇心	-.66***	-.20***	-.17***
義務感	.15***	.18***	.22***
将来展望	.04	-.13*	-.27***
R ²	.40***	.08***	.14***

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$
 β : 標準偏回帰係数

な物事を学ぶことに楽しさを感じているほど、学業や大学生活に対する意欲が高いことが示された。これは、内発的動機づけを高めることが、学習の持続や上達につながるという市川(1995)の指摘に一致する¹³⁾。また、将来の展望、つまり、卒業後の職業を目標に学びたいという動機づけが高いほど、学習意欲が高いことが示された。大学生における学習意欲の維持には、現在学んでいることが将来の職業に生かされるのだという意識が重要であるといえる。一方、大学で学ぶことに対し、「きまりのようなものだから」や「まわりからやれと言われるから」という項目に代表されるような義務感をより強く感じているほど、学習意欲が低いことが示された。大学全入時代において、このような義務感を感じる学生は増加すると考えられる。今後、たとえば、授業や日常の学生指導において、現在の学びが将来の職業に結びつくことを自覚させる工夫をすることによって、義務感を低減させることが重要になるといえる。ただし、先の分散分析の結果から、今回の調査への参加者は、学習の動機づけ尺度において、将来展望尺度の平均得点をもっとも高かった。本学にとっては、この状態を維持することが重要である。そして、学びの目標をもたない学生を発見し、助言、指導をおこなうことも重要である。

授業中のつまずきへの対処方略尺度と意欲低下領域尺度 授業中のつまずきへの対処方略尺度の3つの下位尺度得点が、意欲低下領域尺度の各下位尺度得点に与える影響を検討するために重回帰分析をおこなった (Table 5)。

まず、自力解決とあきらめから学業意欲低下に対する標準偏回帰係数が有意であったが、友人依存からの標準偏回帰係数は有意ではなかった。一方、自力解決、あきらめ、友人依存から授業意欲低下に対する標準偏回帰係数が有意であった。また、あきらめと友人依存から大学意欲低下に対する標準偏回帰係数が有意であった。

これらの結果から、授業中のつまずきに対し、それを自

Table 5 重回帰分析の結果

	学業意欲低下	授業意欲低下	大学意欲低下
	β	β	β
自力解決	-.47***	-.13**	-.04
あきらめ	.26***	.34***	.34***
友人依存	.06	.11*	-.25***
R ²	.38***	.18***	.19***

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$
 β : 標準偏回帰係数

分の力で解決しようとする傾向が強いほど、つまり、なぜ分からないのかを考えたり、解法を調べたりという積極的な態度をする傾向が強いほど、学業意欲と授業意欲が高いことが明らかになった。一方、あきらめてしまう傾向が強いほど、学業意欲、授業意欲、大学意欲という3つの意欲の領域すべてが低いことが明らかになった。これらの結果は、直感的にも妥当である。また、友人を頼ろうとする傾向が強いほど、授業意欲は低い、大学意欲が高いことが示された。頼れる友人の存在が、大学での生活の価値を高めているのだと考えられるが、友人を頼るあまり、授業への意欲が低くなるという望ましくない傾向も見取れる。

先の分散分析の結果、今回の参加者では、授業中のつまずきへの対処方略において友人依存の得点が最も高く、あきらめの平均得点が最も低かった。全体としてあきらめてしまう傾向が強くないというのは望ましい結果であるが、友人への依存が過剰な学生については注意が必要である。

授業中のつまずきの原因づけ尺度と意欲低下領域尺度

授業中のつまずきの原因づけ尺度の3つの下位尺度得点が、意欲低下領域尺度の各下位尺度得点に与える影響を検討するために重回帰分析をおこなった (Table 6)。

まず、授業態度の悪さ、授業の悪さ、予復習不足から学業意欲低下に対する標準偏回帰係数が有意であった。また、授業態度の悪さから授業意欲低下への標準偏回帰係数は有意であったが、授業の悪さ、予復習不足からの標準偏回帰係数は有意ではなかった。そして、授業の悪さから大学意欲低下への標準偏回帰係数が有意であったが、授業態度の悪さと予復習不足からの標準偏回帰係数は有意ではなかった。

これらの結果から、授業中のつまずきの原因を授業に集中していないことや、授業を理解しようとしていないことなど、自らの授業態度の悪さに帰属させる傾向が強いほど、学業意欲と授業意欲が低いことが明らかになった。授業態度の悪さは、学ぶ意欲の低下の表れであることが確かめられたといえる。また、先生の授業法や授業内容の悪さにその原因を帰属させる傾向が強いほど、学業意欲、大学意欲が低いことが示唆された。一方、予習や復習が足りないこと、つまり努力不足にその原因を帰属させる傾向が強いほど、学業意欲が高いことが示唆された。この結果は、市川 (1995) で紹介されているワイナーの理論、つまり、学習

Table 6 重回帰分析の結果

	学業意欲低下	授業意欲低下	大学意欲低下
	β	β	β
授業態度の悪さ	.20**	.47***	.06
授業の悪さ	.14**	.07	.17**
予復習不足	-.12*	-.05	-.03
R ²	.08**	.25***	.04**

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

β : 標準偏回帰係数

Table 7 重回帰分析の結果

	自力解決	あきらめ	友人依存
	β	β	β
知的好奇心	.57***	-.31***	-.06
義務感	-.07	.31***	.00
将来展望	.10**	-.16**	.26***
R ²	.37***	.19***	.06***

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

β : 標準偏回帰係数

の結果の原因が努力の量にあると帰属された場合に学習意欲が高まるという理論にも当てはまる。一方、授業への参加度の低さや授業への批判的な態度は、つまずきを自ら解決しようという意欲や粘り強さの欠如を意味するともいえる。下位尺度得点の比較からは、今回の調査への参加者において、予復習の不足への原因づけが他の原因づけよりも優勢であることが示唆された。この傾向が、学生全体として維持されることが重要となる。

学習の動機づけ尺度と授業中のつまずきへの対処方略尺度 学習の動機づけ尺度の3つの下位尺度得点が、授業中のつまずきへの対処方略尺度得点に与える影響を検討するために重回帰分析をおこなった (Table 7)。

まず、知的好奇心、将来展望から自力解決への標準偏回帰係数が有意であったが、義務感からの標準偏回帰係数は有意ではなかった。次に、知的好奇心、義務感、将来展望からあきらめへの標準偏回帰係数が有意であった。一方、友人依存への標準偏回帰係数は、将来展望からのものだけが有意であった。

これらの結果から、学ぶことが楽しい、深く学びたいという傾向が強いほど、授業中のつまずきを自ら解決しようとする、あきらめようとしないことが示された。また、大学での学びをきまりのようなもの、しなければならないものだと考える傾向が強いほど、つまずきを自ら解決せずにあきらめてしまう傾向が強いことが示唆された。そして、将来の展望によって動機づけられているほど、つまずきを自ら解決しようとする、あきらめようとしないこと、

友人に依存することが示唆された。知的好奇心や将来への展望は、授業中のつまずきに対する対処にも影響していることが明らかになった。

学習の動機づけ尺度と授業中のつまずきの原因づけ方略尺度 学習の動機づけ尺度の3つの下位尺度得点が、授業中のつまずきへの対処方略尺度得点に与える影響を検討するために重回帰分析をおこなった (Table 8)。

まず、知的好奇心、義務感から授業態度の悪さへの標準偏回帰係数が有意であったが、将来展望からの標準偏回帰係数は有意ではなかった。次に、知的好奇心、義務感から授業の悪さへの標準偏回帰係数が有意であったが、将来展望からの標準偏回帰係数は有意ではなかった。また、知的好奇心と将来展望から予復習不足への標準偏回帰係数が有意であったが、義務感からの標準偏回帰係数は有意ではなかった。

これらの結果から、まず、知的好奇心の得点が高いほど、授業中のつまずきの原因が授業態度の悪さや授業法の悪さではなく、自らの予習・復習の不足にあると見なす傾向があることが示唆された。一方、大学で学ぶことを義務のようなものとみなす傾向が強いほど、授業中のつまずきの原因を、授業態度の悪さや授業法の悪さだと見なす傾向があることが示唆された。大学での学習を「やらされている」と感じている学生は、授業への参加度が低く、授業方法や授業内容に批判的である可能性が示唆されたといえる。また、将来の展望に学びを動機づけられている傾向が強いほど、予習や復習の不足に、授業中のつまずきの原因を帰属させることが示された。ここでも、大学での学びに将来の職業を結びつけ、それを目標にすることの重要性が確かめられたといえる。

授業中のつまずきの原因づけ尺度と授業中のつまずきへの対処方略尺度 授業中のつまずきの原因づけ尺度の3つの下位尺度得点が、授業中のつまずきへの対処方略尺度得点に与える影響を検討するために重回帰分析をおこなった (Table 9)。

まず、授業態度の悪さと予復習不足から自力解決に対する標準偏回帰係数が有意であったが、授業の悪さからの標準偏回帰係数は有意ではなかった。次に、授業態度の悪さと授業の悪さからあきらめへの標準偏回帰係数は有意であったが、予復習不足からの標準偏回帰係数は有意ではな

Table 8 重回帰分析の結果

	授業態度の悪さ	授業の悪さ	予復習不足
	β	β	β
知的好奇心	-.14 **	-.18 **	.13 *
義務感	.23 ***	.35 ***	.09
将来展望	-.04	-.02	.12 *
R ²	.06 ***	.13 ***	.07 ***

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$
 β : 標準偏回帰係数

Table 9 重回帰分析の結果

	自力解決	あきらめ	友人依存
	β	β	β
授業態度の悪さ	-.11 ***	.30 ***	.07
授業の悪さ	-.09	.17 ***	.31 ***
予復習不足	.21 ***	.03	.07
R ²	.06 ***	.16 ***	.12 ***

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$
 β : 標準偏回帰係数

かった。そして、授業の悪さから友人依存への標準偏回帰係数が有意であったが、授業態度の悪さと予復習不足からの標準偏回帰係数は有意ではなかった。

これらの結果から、授業中のつまずきの原因を自らの授業態度の悪さに帰属させる傾向が強いほど、そのような状況を自らの力で解決しようとせず、あきらめて当該の問題を放置したりすることが示唆された。授業への参加度がよくない学生は、分からない問題について自分で深く考えようとせず、その問題から逃避する傾向があるのだと考えられる。また、授業が分からないことの原因が、授業法や授業内容の悪さだと考える傾向が強いほど、あきらめたり、友人を頼ったりすることが示唆された。一方、予習や復習の不足、つまり自らの努力が原因だとみなす傾向が強いほど、つまずきを自ら解決しようとすることが示唆された。この結果は、先述のワイナーの学習意欲に関する理論に通じるといえる (市川, 1995)。

まとめ

本研究では、大学での学習の動機づけ、授業中のつまずきへの対処方略と原因づけを測定する尺度を作成した。これらの尺度と下山 (1995) の意欲低下領域尺度について、大学生を対象にした質問紙法による調査をおこなった。得られたデータを因子分析や重回帰分析を用いて分析した。

その結果、おもに次のようなことが確かめられた。

- (1) 学生が大学での学びを楽しいと思うことや将来の展望をもつことは、学ぶ意欲を高めるため、授業中のつまず

きを積極的に解決するために重要であり、そのつまずきが自分の努力不足のためであるという原因帰属につながる。

(2) 学生が大学での学びを義務だと思うこと、やらされていると感じることは、学ぶ意欲の低下につながる。大学での学びを義務だと思う傾向が強いほど、授業中のつまずきに対し、あきらめたり、放棄したりという消極的な対処をする。またこのような傾向が強いほど、授業態度が悪く、教員の授業法に批判的である。

これらの結果は、直感的にも妥当であるが、今後さらに発展させて、日常の講義や学生指導に活かせるようにしていく必要がある。

また、今回の調査結果は、1つの大学の学生(93%が男子学生)から得られた限られたものである。今後、複数の大学の学生を対象にした調査をおこない、専攻、男女、学年による違いなどを比較検討することにより、尺度の信頼性や妥当性を高める必要がある。とくに、学年差の検討については、学生指導の面からも有効であるといえ、今後の第一の課題としたい。

謝 辞

質問紙の作成にあたりご助言いただいた静岡理工科大学理工学部情報システム学科の手島裕詞先生と京都教育大学教育学部の矢野喜夫先生に深謝いたします。

引用文献

- 1) <http://www.asahi.com/> 2005年11月25日
- 2) 溝上慎一, “大学新入生の学業生活への参入過程—学業意欲と授業意欲—”, 京都大学高等教育研究第10号(2004) 67-87.
- 3) 高等教育学力調査研究会・柳井晴夫研究者代表, “大学生の学習に対する意欲等に関する調査研究”, 平成12、13年度文部科学省教育改革の推進のための総合的調査研究委託報告書(2002).
- 4) 市川伸一, 学力低下論争(筑摩書房, 2002).
- 5) 牧野幸志, “大学生の高校時代の学習態度に関する教育心理学的研究”, 高松大学紀要, 37(2002) 73-81.
- 6) 京都大学高等教育研究開発センター編, 大学教育学(培風館, 2003)
- 7) 小杉大輔, “高校生の学習観と大学観—大学教育との

関連について考える—”, 静岡理工科大学紀要, 14(2006) 119-126.

- 8) 安達智子, “理科系大学1年生の大学選択動機と入学後の適応について—就業動機志向による比較—”, 進路指導研究, 19(1999) 22-29.
- 9) 松島るみ・尾崎仁美, “大学進学動機と学習意欲・授業選択態度の関連—新入生を対象として—”, 京都ノートルダム女子大学研究紀要, 35(2005) 177-187.
- 10) 栗山直子・上市秀雄・齊藤貴浩・楠見 孝, “大学進学における進路決定方略を支える多重制約充足と類推”, 教育心理学研究, 49(2001) 409-416.
- 11) 下山晴彦, “男子大学生の無気力の研究”, 教育心理学研究, 43(1995) 145-155.
- 12) 小塩真司, 研究事例で学ぶSPSSとAmosによる心理・調査データ解析(東京図書, 2005).
- 13) 市川伸一, 学習と教育の心理学(岩波書店, 1995).

巻末資料

下山(1995)の意欲低下領域尺度(*は逆転項目)

学業意欲低下

2. 教師に言われなくても自分から進んで勉強する。*
8. 勉強に関する本を読んでもすぐに飽きてしまう。
11. 勉強で疑問に思ったことはすぐ調べる。*
14. 必要な単位以外でも、関心のある授業はとるようにしている。*
17. 大学で勉強をすることで自分の関心を深めている。*

授業意欲低下

1. 授業に出る気がしない。
4. 朝寝坊などで授業に遅れることが多い。
7. 何となく授業をさぼることがある。
10. 大学からの連絡事項を見落としてしまうことが多い。
13. 授業の課題の提出が遅れたり、出さなかったりすることがある。

大学意欲低下

6. 学生生活で打ち込むものがない。
9. 大学ではいろいろな人と交流がある。*
12. 大学にいるより、自分ひとりであるほうがいい。
15. 大学での時間は自分の中で有意義な時間である。*
18. 大学の中で自分の居場所がないと感じる。

DRAMA ACTIVITIES IN THE CLASSROOM AS A WAY TO IMPROVE STUDENTS' ENGLISH COMMUNICATIVE SKILLS

Bogdan PAVLIY*

ABSTRACT

English instructors in technical universities in Japan often have problems with students' indifference and apathy. Therefore we have to think over the ways to make our lectures more alive and to engage our students in learning process more intensely. The purpose of this essay is to discuss the possibility and the necessity to use drama activities for improving the technical university students' communicative skills. Drama is one of the ways to vitalize the audience and change the atmosphere in the classroom. It can become a catalyst for some students to start learning English with greater enthusiasm. I hope that this work can be helpful for those English instructors, who already use drama activities in their lectures, and shed new perspective for those who are still hesitating about the implementation of drama activities in the classroom.

INTRODUCTION

My first English students in Japan were high-school students, one of whom had just come back from a short home stay trip in the USA. And how surprised I was to hear that while being in America she realized for the first time in her life, that her English is a means to interact with other people, and even though she could not speak well, people did their best to understand her. She said, "English is so easy to learn, when you use it for communication." Generally, high-school and university students in Japan see English not as a communicative tool, but as a set of rules (with exceptions) that should be learned properly, in order to enter some good university or get a highly-paid job. The tendency to avoid the communicative aspect and teach English precisely the same way as mathematics, physics and other technical subjects (to have students learn and memorize some formulas) is quite strong among Japanese high-school teachers and university professors in Japan. Consequently, the students do not gain the confidence of using the language in and outside the class, even after years of studying English in school and university. Quite often their language abilities are limited to writing answers to the questions in their tests, putting the words in right order to make a sentence, choosing the correct word, phrase or answer to put into the blank on a test paper.

I am convinced that even in technical

universities one of the main purposes of the language teaching course must be to develop skills in communication. Unfortunately, they are often neglected and as the result, after graduation, only a few highly self-motivated individuals will be able to use English in real life. Others will avoid real communication (which involves emotions, ideas, appropriateness, adaptability and risk-taking) preferring to stay passive, just as they did during their English lectures. To help students put what they learned to use, we can try drama activities in our classes, as one of the powerful tools from our trove of teaching techniques. Of course, drama should be used in conjunction with other activities, and not dominate them. As F. Klippel points out (Klippel, 1985): "For learners who are studying English in a non-English-speaking setting it is very important to experience real communicative situations in which they learn to express their own views and attitudes, and in which they are taken seriously as people. Traditional textbook exercises – however necessary and useful they may be for pre-communicative grammar practice – do not as a rule forge a link between the learners and the foreign language in such a way that the learners identify with it."

VALUES IN THE USE OF DRAMA

Drama can enrich the classroom in three ways: first, as W. Rivers states (Rivers, 1983), it "...enables

learners to use what they are learning with pragmatic intent, something that is most difficult to learn through explanation"; second, through breaking the monotony of a conventional English class and transforming it into a world, where learners can use the language in operation, almost as competent users of English language; third, through the way it can motivate learners and fulfill their socio-affective requirements.

Drama is a unique tool, as it simulates reality and develops self-expression. It can meet the learners' need to use the target language in "real-life" situations, even when the "real-life" situations are artificially made in the classroom. "A situation is a totality, and by extracting the verbal content to study it in isolation we risk losing or deforming the meaning. Drama can help us to restore this totality by reversing the learning process, that is by beginning with meaning and moving to language from there." (Maley & Duff, 1978). However, before drama activities are implemented there are some practical considerations for the teacher.

THE ROLE OF THE TEACHER

"The atmosphere within a class or group can largely be determined by the teacher, who – quite often without being aware of it – sets the tone by choosing certain types of exercises and topics." (Klippel, 1985)

The teacher must be convinced that drama can be an effective tool in language learning. It may seem that drama is absolutely irrelevant to science and therefore it is meaningless to engage technical university students in drama activities. But as James Hoetker (1969) says, "development through drama is a gradual, cumulative process, and it is very uncertain what may be the developmental timetable, especially if drama is only an occasional activity." With practice, English lecturers may discover that the use of drama techniques in the classroom can be vital part of their teaching repertoire.

The teacher must be very clear and convinced in his purpose in introducing drama in the classroom (though, he may use it with intent to practice some grammar constructions or speech patterns, for example). He must believe in the value of acting and must explain to the students the value of the activity. Though the teacher is the one who creates the mood of the class, his main function should be that of initiator, controlling the situation but not domineering or

directing it alone. Hoetker warns that "the teacher who too often imposes his authority, or who conceives of drama as a kind of inductive method for arriving at preordained correct answers, will certainly vitiate the developmental values of drama and possibly its educational values as well." (Hoetker, 1969) . The teacher's rapport with students is essential. The students should feel at ease and relaxed in the classroom. "Learners need to feel a sense of belonging and security, and also to invest something of his own personality and so to enjoy a certain 'self-esteem.'" (Stevick 1976). If you try to make students act the roles they can not comprehend, or press on them too much, then the activity they have been engaged in may suddenly become dull and boring.

ANTICIPATED PROBLEMS: RESISTANCE OR INADEQUATE ATTITUDE OF THE STUDENTS, THEIR MOTIVATION

From junior high school, students are used to being passive English learners and expect their English lectures to be teacher-centered. Some students already have fixed ideas as to what a university instructor should be. They expect a rigid, fixed procedure in his teaching. Some students may also view the use of drama techniques as having no meaningful relation to language learning in a technical university. While waiting for their turn to take part in the activity students may feel neglected or ignored (which is likely to happen if you have more than 30 students in a class). Higher level students may even consider the whole activity trivial or childish.

Each student has his own motivation to learn. "One student may be motivated to get through each language class with the least personal hassle, while acquiring the barest minimum of the language, compatible with not flunking out; another may be motivated to get high grades by supplying what the teacher or some testing agency seems to be seeking on tests; yet another may be motivated to learn a subset of skills or a distinctive vocabulary to achieve personal goals...."(Rivers, 1997).

The teacher has to be sensitive to shy and reticent students, not using force to get them to participate. He should avoid giving them overly difficult tasks, which they are unable to handle. He should make positive comments wherever possible not demanding too much. This would gradually build up the confidence of the students. But even if students

can do nothing but read their part of the dialog in front of their spectator classmates, it may give them a thrill, and, consequently, become a catalyst for them to learn English with greater enthusiasm.

Concerning the students' motivation in drama activities, Maley and Duff (1978) say: "In a sense, motivation is not needed when working through drama, because the enjoyment comes from imaginative personal involvement, not from the sense of having successfully carried out someone else's instructions."

"Motivation, strong or weak is always there. It is the task of a teacher to discover the springs of motivation in individual students and channel it in the direction of further language acquisition through course content, activities in and out of the classroom, and learner-generated or at least learner-maintained projects.... Frequently the intrinsic attraction of the subject matter and the interest aroused by classroom interaction will spark motivation to persist with language learning, and this will continue until a degree of language control satisfying to the learner has been attained." (Rivers, 1997)

WORK WITH THE TEXT

Students can use the conventions of drama as a means of exploring and discovering what lies beneath the surface of the text they engage in within the English classroom. The teacher sometimes may ask them to create "missing" scenes, which are suggested but not fleshed out in the original text. They can also improvise alternative scenes or endings and demonstrate to each other that there can be a variety of possibilities when it comes to the interpretation and representation of meanings (usually, different groups respond to the same task in different ways). Cecily O'Neill (1985) writes, "The dramatic world of educational drama is most valuable both educationally and aesthetically when its construction is shared and its meanings negotiated."

While reading the dialogs aloud, students can improve their reading skills and their pronunciation at the same time. It is a good opportunity for them to have their pronunciation individually checked and corrected by the teacher.

DRAMA ACTIVITIES

Drama activities include role-play, script reading, simulation, improvisation, language games

and acting. I would recommend using role-play and script reading as main drama activities for large classes (20 students and over). Improvisation, simulation and language games are less guided and allow more room for spontaneous response, but they usually can not be conducted in big classes because of lack of time and differences in students' knowledge of English (you have to try to engage everyone!), so they are recommended for more advanced students and for smaller groups.

Let's then consider how we can engage students in drama activities in our real situation. For example, we have about 30 students in class, their English proficiency is at more or less of the same level and as a group they are quite passive or even unwilling to learn. For such a class to create a role-play or conversational drama activities it is better to use the material, which is of relevance to the lives, interests and future careers of the students. I usually use simple and short dialogs from the English conversation textbook for beginners or intermediate students.

PROCEDURE

- First of all we have to prepare the text (some short conversation or dialog), that is related to our current topic, with grammar structures that covered in previous or current lectures. The text may be from the materials students use in their English course. Students should have their own copy of the dialog.

- The teacher has students listen to the dialog 2-3 times and asks them questions, to ensure they can understand it properly. Sometimes, when the students unable to get the meaning of some phrases or grammar constructions, there might be a need to give them some examples with simpler words or words they have already become used to, and then to check again if they understood the meaning. As a rule, I explain the meaning in Japanese, although in some cases it might be better to use English for the explanation (for example with advanced students).

- After finishing the explanation stage, we read aloud the conversation/dialog. It takes time, but the teacher must ensure that at least most of the students are actually reading the dialog and not only look at their textbooks or printouts. Such preparation work generally takes about 10-15 minutes and after

that the teacher has the students reading in groups.

- When students read in groups, the teacher has to be very attentive and careful, because at this stage he is going to make a quick evaluation and decide who will act “on the stage” (near the blackboard) before others. Sometimes you can get all students to act, but usually, because time is limited, you can only engage some students in performance (4-5 groups= 1/3 ~ half of a class). If, while reading his lines for the first time the student makes a mistake in pronunciation, the teacher should not neglect it, but stop the reading to make the student say the word or the expression correctly. But if the correct pronunciation seems to be too difficult, it would be wise not to press on the student until he gets it right, but to proceed with the next sentence. Where everybody makes the same mistake(s) in pronunciation, it can be useful to write the correct pronunciation in *katakana* on the class board (although in general I am strictly against using *katakana* for transcription).

- When all the students have finished their reading in groups, the teacher can start the performance. The first group starts to perform in front of others (it’s better to choose the group that appeared to be the best at the reading stage, if you don’t want the performance to stall right from the start). The teacher has to act as a stage director, showing students their possible movements, helping them to use gestures and exclamations in their performance and creating at least 2 or 3 possible versions of what happens in the dialog they are going to act out.

For example, one of the students plays the role of a doctor and another one plays a patient waiting for his turn to have a check-up. How will the doctor call his patient? He may open the door and say: “Come in, please” or he may ask a nurse to do it for him (in that case, the teacher needs someone to play the nurse, or he may do it himself), or the nurse calls the patient, he comes in, but the doctor seems to be so busy with his papers (or is he asleep!?) so that he ignores the patient’s “Good morning,” and the patient has to say something like “... Doctor..., excuse me..., doctor, have you called me?”

Students must be given choices about how to act, but it is much better if you can entice the students to improvise for themselves. In that case they may

really enjoy their acting.

Preparation for acting “on stage” should not be too long; otherwise the teacher is at risk to lose control over other students or over the classroom situation in general. The teacher has to be very sensitive to the atmosphere in the classroom and to start the performance at just the right time, when the actors are already prepared (at least to a certain extent), while most of the students still think it interesting and are eager to become involved in it.

IMPLEMENTATION

At all stages of the role-play activity the teacher should not forget that along with the fulfillment of the socio-affective requirements of the students, the main aim of the activity is the implementation, the putting into practice the material (grammatical, lexical, etc.) they have to learn in lectures.

Roy Batstone, one of the authors of modern theories on language learning, advocates proceduralisation as one of the three stages in learning of a language. Proceduralisation is making language available to be used, that is ready to be activated from its store in the mental lexicon on demand (Batstone 1994), and to be able to do this a student needs practice in a “real-life” situation in a context where the language is likely to be used. By using drama, we are expanding the students’ fields of language use, providing more opportunity to look at the real features of conversation, doing the conversation in situation close to real and therefore facilitating proceduralisation. During a lecture, which is about ninety minutes long, to engage all 30-40 students of a class in real-life simulation is, in most cases, physically impossible, but at least we can prevent many of the students from being idle, disinterested and inattentive. Every student expects, until the last minute of the lesson, that he might be called on to act before his classmates.

CONCLUSION

Observing the students engaged in role-play and other drama activities, I came to the following conclusions:

- The level of difficulty is a key factor for the activity. If the students can not understand the material they are supposed to learn and act, any activity and any work with the material will be boring for them. So it is better to begin with easier conversations and then

gradually give them more and more difficult texts and dialogs.

- The success of the activity is often determined by the relevance of the task to the students. It is very important for them to know that the situation they act out in the lesson can *really* happen and they may use the phrases and keywords they learned in real life. I would recommend explaining to the students when and how they may get into such situation, before you start the activity. For example, teacher may say: "This conversation was in the hotel lobby, after two colleagues had attended the same presentation. Now, guys, imagine you are somewhere overseas. The presentation had just finished. You came back to your hotel, and there you unexpectedly met your colleague. So, you have to say something..."

- It might be better to begin the lecture as usual (e.g. reading and translated the selected text(s), giving grammar explanations, checking students' homework, etc.) and then smoothly change it to drama activities, rather than to push students into acting right from the beginning of the lecture. It is good to have warm-up activities, too.

- Some students (though it happens very rarely) might feel too excited with the drama activities. They enjoy showing off, being a "hero", acting "on stage" before others. Sometimes they behave like clowns to entertain their fellow students. To prevent the performances of that kind, teacher should be very attentive and sensitive during drama activities and be able to change it into the activities of another type, if necessary. We want our students to be active, but we definitely do not want them to make a one-person show out of our lectures.

- Some students can not act, speak or perform before others even in Japanese. We have to be prepared for them and try to engage them in alternate activities. For example, they may become the members of a jury, whose task is to decide who of their fellow students made better performance. As a rule we should not press too much on students. Avoid confrontation!

- Talking in front of others might be a frightening prospect for some people, and it is truly a talent. But if we want to improve our students' English so that they feel more confident, we should get them acting and reading out loud in lectures by any possible means. The more the better.

To my surprise, I found out that sometimes Japanese students are even afraid of being understood, when they speak English. I've heard one of my students say: "I will never speak English to foreigners....What shall I do if they answer me, or ask me something in response?" So usually they think it's safe to give up, choose the easier way and say: "Sorry, I can't speak English." They avoid talking and do not even try to start the conversation. We have to change this. Even though it's scary and their fellow students might laugh at them occasionally, the more they talk out loud the better they will get.

By the means of drama we give our students the opportunity to practice in a much freer and effective way the expressions they learned in lectures. And, I hope, it can help them to get rid of that "very Japanese" fear to speak English and still be themselves before other people.

Acknowledgement:

For his suggestions and corrections, I would like to express my appreciation to Gregg McNabb, an associate professor at Shizuoka Institute of Science and Technology.

BIBLIOGRAPHY

- 1) A. Maley, and A. Duff, *Drama Techniques in language learning* (Cambridge University Press, 1978), pp.12-13.
- 2) R. Batstone, *Making Sense of New Language: A Discourse Perspective*, Online Journal Language Awareness Vol.11, No1, 2002, p.14-27.
- 3) R. Batstone, *Grammar* (Oxford University Press, 1994).
- 4) F. Klippel, *Keep Talking: Communicative Fluency Activities for Language Teaching (Cambridge Handbooks for Language Teachers)* Cambridge University Press, 1985, pp.5-6.
- 5) E. W. Stevick, *Memory, Meaning and Method*, (Newbury House, Rowley, Mass,1976).
- 6) E. W. Stevick, *Teaching and Learning Languages*, (Cambridge University Press, 1982).
- 7) W. M. Rivers, *Communicating Naturally in a Second Language: Theory and Practice in Language Teaching (Cambridge Language Teaching Library)*, Cambridge University Press, 1983.
- 8) W. M. Rivers, *Principles of Interactive Language*

Teaching,1997.

<http://www.language.tut.ac.za/calt/docs/10>

Principles_1.html

- 9) S. L. Dodson *The Educational Potential of Drama for ESL* <http://www.european-mediaculture.org>
- 10) J. Hoetker, *Dramatics and the Teaching of Literature*, Champaign, Illinois: National Council of Teachers of English/ ERIC Clearinghouse on the Teaching of English, 1969, pp.28-29.
- 11) C. O'Neill, "Imagined worlds in theatre and drama," *Theory Into Practice*, 24 (3), Summer 1985, p. 160.

強誘電性結晶が示す誘電分散

Note on the Dielectric Dispersion of Ferroelectric Crystals

出口 潔*

Kiyoshi DEGUCHI

The complex dielectric constants of $C_5NH_6 \cdot ClO_4$ (PyClO₄) and $C_5NH_6 \cdot BF_4$ (PyBF₄) were measured at frequencies in the microwave region. It is found that the high-frequency dielectric constant ϵ_∞ in the Cole-Cole arc law shows small but distinct anomalies at the ferroelectric phase transition temperatures.

現在、当研究室では有極性のピリジニウムイオン C_5NH_6 を含む強誘電性結晶の誘電分散を調べている。その過程で少々うれしい発見をした。以下では、そのささやかな喜びの背景を書かせていただく。

誘電体に電場を印加すると電気分極が生じる。その電気分極は、成因の違いによって①電子分極、②イオン分極、③配向分極に大別される。電子分極は電場印加に伴う原子核と電子雲の間の相対的位置の変化(変位)、イオン分極は正イオンと負イオンの相対的位置の変化(変位)によってそれぞれ生じる。これらは、電荷を持つ粒子(電子あるいはイオン)の位置のずれ(変位)によって生じることから、共に変位分極と呼ばれる。

これに対して配向分極は、物質を構成している分子に有極性部分が含まれている場合に生じる分極である。ある種の物質では、熱運動によって、物質中の多数の有極性分子の方向が乱れている無秩序状態にある場合がある。その安定方位が二方位の単純な場合には、個々の有極性分子は上向きの方角と下向きの方角の間を時々刻々飛び跳ねている。そこに電場が印加されると、電場方向に向く有極性分子の数がわずかに増え、その結果、統計平均として結晶に電場方向に電気分極が生じる。

変位分極は力学的分極であり配向分極は統計的分極とも言える。この違いの結果として、交流の電場を印加して発生する電気分極を調べる(実際には複素誘電率を測定す

る)と、その周波数依存性に大きな違いがみられる。つまり、変位分極に起因する複素誘電率はバネの振動と類似の共鳴型分散と呼ばれる周波数変化を示すのに対し、一方の配向分極の複素誘電率は緩和型(デバイ型)分散を示す。このようにして、複素誘電率の周波数依存性(誘電分散)を調べることで、物質中の分子やイオンの運動状態を知ることができる。

通常、物質の中には配向分極を担う数種の有極性分子や変位分極を担う数種の正負イオンが共に含まれている。周波数を増加させながらこのような物質の複素誘電率を測定すると、直感的には分極を担う担体の質量順に、低周波側から分子、イオン、電子の順でそれぞれが関係する分散がつつぎつつぎに観測される。この状況を模式的に示すと図1のようになる。ここまでのことは、多くの固体物性論の大学教科書にも詳説されている。

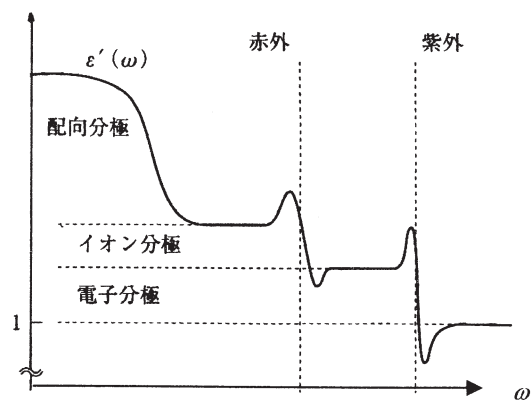


Fig. 1 複素誘電率の実数部 ϵ' の周波数依存性の模式図

2008年3月15日受理

*理工学部物質生命科学科

次に強誘電性物質を考える。強誘電性を示す物質（強誘電体）は、コンデンサー材料、圧電材料、焦電材料として材料科学における重要な研究対象である。強誘電性とは、外から電場を印加しなくても電気分極を自然発生させる性質を言う（この分極は自発分極と呼ばれる）。多くの強誘電体は、高温では通常の誘電体と同じ状態（常誘電相）にあり、温度を下げるとある温度（相転移温度）以下で強誘電性示す状態（強誘電相）に移る。この相変化は強誘電的相転移と呼ばれる。強誘電的相転移は、その自発分極の成因から、①変位型相転移と②秩序－無秩序型相転移とに大別される。前者の自発分極はイオン分極から生じており、後者の自発分極は配向分極から生じている。このため、変位型相転移では共鳴型誘電分散（ソフト・モード）が、秩序－無秩序型相転移では緩和型誘電分散（誘電臨界緩和）が観測されることが期待される。

ここからは、秩序－無秩序型強誘電体の誘電分散に話を限定する。緩和型（デバイ型）誘電分散は、

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 - i\omega\tau} \quad (1)$$

と記述される。ここで、 $\varepsilon(\omega)$ は角振動数 ω で測定される複素誘電率、 ε_s は角振動数 ω がゼロで測定される静的誘電率、 ε_{∞} は十分に高い周波数で測定される高周波誘電率、 τ は緩和時間を表す。複素誘電率を $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega)$ と書き、上式に代入して少々計算を行うと、

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_{\infty}}{2} \right)^2 + \varepsilon''^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{2} \right)^2 \quad (2)$$

と変形される。この式は Cole-Cole の円弧則と呼ばれ、横軸に実数部 ε' 、縦軸に虚数部 ε'' を取って $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega)$ の実験値をプロットすると実軸上に中心を持つ円弧上に乗ることになる。

図2は、 $C_5NH_6 \cdot ClO_4$ （略称 PyClO₄）の実験値を Cole-Cole プロットした結果である。常誘電相（相転移温度より高温側）ではこのように実験値が円弧上によく乗ることから、この誘電分散は緩和型であることが分かる。結晶構造解析などの結果と合わせて考えると、この緩和型分散は有極性分子であるピリジニウムイオンの配向運動に起因するものと考えられる。もう少し解析を進めて緩和時間を求めると、結晶中でのピリジニウムイオンの配向運動の速度がわかる。

従来の多くの実験的研究は、ほぼこの段階で終了するのが普通である。しかし我々は高周波領域での実験精度に自信があったので、試みに 10 GHz で測定された実数部を温度に対してプロットしてみた。PyClO₄ および $C_5NH_6 \cdot BF_4$ （略称 PyBF₄）の結果を図3に示す。図中には最少自乗法により求められた(1)式中の ε_{∞} も示している。少々議論が必要なのであるが、結果として、10 GHz で測定された実数部 ε' は ε_{∞} とほぼ一致する。図3に見られるように、PyClO₄ や PyBF₄ の ε_{∞} は相転移温度で異常を示している。これが今回の小さな発見である。この結果は、 ε_s だけでなく ε_{∞} にも相転移に関係している部分が含まれていることを示している。

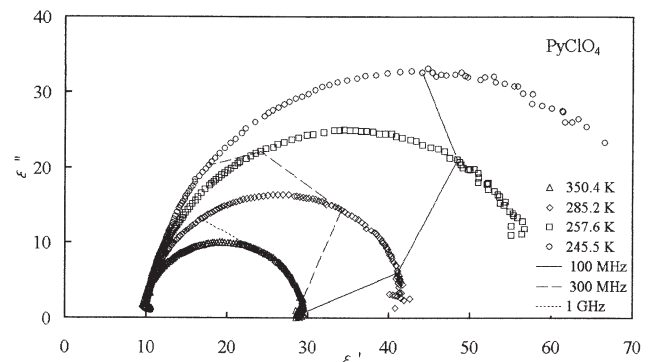


Fig. 2 PyClO₄ の Cole-Cole プロット

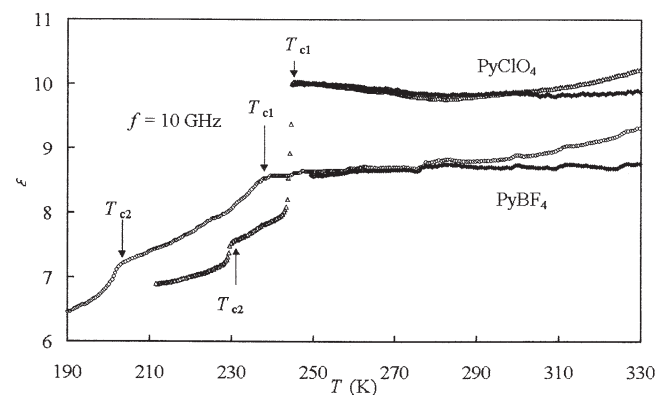


Fig. 3 10 GHz で測定された ε' の温度依存性。図中の小点は、最小二乗法により求められた ε_{∞} 値を示す。

PyBF₄ や PyClO₄ の結晶構造解析の結果からは、ピリジニウムイオンの他に、BF₄ や ClO₄ アニオン四面体も電気双極子を担っている可能性が示唆されていた。従って、これらアニオンの運動状態が相転移に伴って変化し、それ

が ϵ_∞ に異常をもたらしたものと考えられる。

このようにして、誘電分散を通して結晶中の 2 種類の分極の運動を分離して観測できた。理論的には、着目している誘電分散（以下では分散 A と呼ぶことにしよう）から求められた ϵ_∞ が、より高周波側で分散（分散 B）する分極成分からの応答を含んでいることは当然であり、その場合、分散 A の ϵ_∞ は分散 B の ϵ_s に対応することになる。従って、もし分散 A も分散 B も共に相転移に関係しているならば、分散 A の ϵ_s と同様に、分散 B の ϵ_s （つまり分散 A の ϵ_∞ ）も相転移温度で異常を示すことが予想される。実際、変位型強誘電体ではそのような例がいくつか発見されている。

しかしながら、これまでに数多くの秩序－無秩序型強誘電体で緩和型分散が詳細に調べられてきたものの、そのほとんどで ϵ_∞ は温度に対して一定値を示すとされてきた。あるいは、その温度依存性を議論できるまでの実験精度が得られていなかったのかもしれない。このため、相転移とは無関係の部分という意味を込めて、時として ϵ_∞ は “normal part” とも呼ばれた。多分、相転移温度付近で ϵ_∞ の異常が観測された例は今回のピリジニウム系強誘電体が最初であろう。では、何故多くの秩序－無秩序型強誘電体では ϵ_∞ が温度に対して一定値を示しているのに、ピリジニウム系強誘電体では異常が観測されたのだろうか。その議論は少々専門的になりすぎるので詳細は別の機会に譲ることにする。[1]

誘電分散を学び始めた当初は、秩序－無秩序型強誘電体の ϵ_∞ が異常を示さないという実験結果を不思議に思っていた。ところが、誘電分散との付き合いが深まっていく間に、何時しか、自分が疑問に思っている事すらも忘れ去っていた。今回、 ϵ_∞ が異常を示す例を発見して初心に戻った思いがし、実験屋のささやかな喜びを味わっている。

[1] K. Deguchi : J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 024715-1 – 024715-4.

顕微メスバウア分光装置の開発と応用

Development of Mössbauer spectroscopic microscope and its Applications

吉田 豊*, 早川一生**, 行平憲一***, 鈴木都文****, 坂田 和正****
 Yutaka Yoshida*, Kazuo Hayakawa**, Kenichi Yukihiro**,
 Kunifumi Suzuki**** and Kazumasa Sakata****

A newly developed Mössbauer spectroscopic microscope enables us to observe mapping images of ^{57}Fe distribution in solid. The microscope uses a focusing element of γ -rays, i.e., a multicapillary X-ray lens (MCX) developed for X-ray microbeam analysis. After recoil-free-absorption of the focused γ -rays (Mössbauer effect), conversion electrons will be emitted from ^{57}Fe in the matrix, and the electrons will be counted using three-stages micro-channel-plates (MCP) as a function of the position of the γ -ray spot on the sample surface. The space resolution and the detection limit of Fe concentration reaches down to 50 μm and 10^{15} atoms/ cm^2 , respectively. Clearly shown is in multicrystalline silicon, as an example of semiconductor, that substitutional and interstitial ^{57}Fe atoms, which can separately be observed by changing the resonance condition, distribute differently in different crystal grains. As an example of metallic system, a stainless steel foil is investigated, and the mapping images show a microstructure consisting of both Martensite and Austenite phases produced after a tensile test.

1. はじめに

メスバウア分光法はプローブ原子核とその周りの電子との超微細相互作用を利用してプローブ原子の化学状態やその近傍の結晶・磁気構造、格子欠陥など、バルク材料に関する原子スケール情報を獲得できる評価法である¹⁾。ここで紹介する“顕微メスバウア分光装置”はメスバウア分光法が有する評価手段としてのポテンシャルに加え、この分光法が持つ欠点、すなわち「微細組織に関する情報が直接得られない」ことを克服しようとするものである。メスバウア分光はプローブ核による γ 線の無反跳共鳴励起放出・吸収(メスバウア効果)を利用して、原子核のエネルギー準位の変化を観察する。メスバウア効果が観測される核種(^{57}Fe , ^{119}Sn など)では γ 線のエネルギーはkeVから数10keVで、X線のエネルギーと同程度である。しかも材料への入射フォトン数は $10^5\sim 10^9/\text{s}$ 程度、観測するのは γ 線から固体格子へのエネルギー付与がない無反跳共鳴放出・吸収過程のみであるので材料内で格子系や電子系の複雑な励起プロセスが観測結果に重なることはない。また、“顕微メスバウア分光装置”は放射光施設などの大掛かりな装置は必要なく、放射線密封線源が扱える実験室があれば卓上に設置可能な装置となっている。将来「線源組込み機器」としての利用が可能になれば、本顕微装置は走査電子顕微鏡のオプションとしての応用が期待できる。

2. 顕微メスバウア分光装置

開発した“顕微メスバウア分光装置”²⁾では、X線用集光素子を用いて、 ^{57}Fe メスバウア核から放射される14.4keV- γ 線をXYゴニオに固定された材料上に集光する。材料中に含まれる ^{57}Fe 原子核でメスバウア共鳴吸収後に放出される内部転換電子を材料表面のXY座標の関数としてマッピング計測する。図1に顕微メスバウア分光装置の断面図を示す。図1の左下部の ^{57}Co 線源から放出

される14.4keV γ 線は大気中に固定されているMCXを透過し、真空チャンバー内XYゴニオ上に固定されている試料表面に集光される。チャンバーはターボ分子ポンプおよびイオンポンプで排気され、内部の真空度は 10^{-5}Pa である。1.85~3.7GBq ^{57}Co 線源の有効直径は2mm、EC壊変後 ^{57}Fe の14.4keV励起状態から100nsの寿命で γ 線が放射される。この γ 線のうちMCX光軸に平行な成分が透過率35%でMCX先端から出射し、図1のように58mmの焦点距離で試料表面上に直径約200 μm で集光される。 ^{57}Co 線源はメスバウアドライブの先端に固定され、以下の測定例で述べるように共鳴条件を変化させると個々のスペクトル成分のみのマッピング像も観測できる。

MCPおよび試料を固定しているXYゴニオは位置微調整可能で、 γ 線の光軸調整やMCP位置の最適化などが可能である。XYゴニオはMCPによる電子の計測に同期させて、100nm~100 μm のステップ幅で移動する。1点あたりの計数時間は10秒から100秒程度、20 \times 20または40 \times 40の

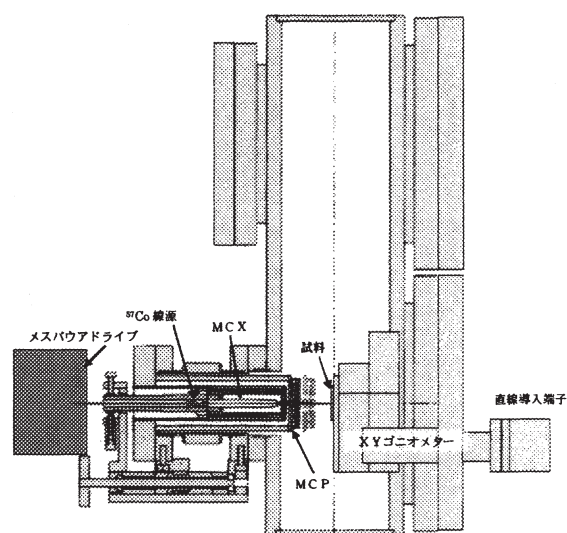


Fig.1 A cross section of Mössbauer spectroscopic microscope. ^{57}Co source is connected to a conventional velocity drive.

2008年3月14日受理

* 理工学部 物質生命科学科

** 機器センター, *** 工作センター

**** 大学院理工学研究科・材料科学専攻

ステップ数を数時間から1日程度でスキャンし、画像データを収集する。

本装置の空間分解能はX線用集光素子であるMCXのスポットサイズ 200 μ および収束ビームの強度分布に依存しており、次に示す微細組織観察から約 50 μ m の空間分解能が達成されていると考えられる。本顕微装置が通常の蛍光X線マッピングと異なるのは：

- 1) Fe 原子のみをメスバウア効果を利用して選択的に測定可能である。
- 2) ppm 程度の極微量鉄原子の画像測定が可能。
- 3) スペクトル成分を与える異なる化学状態や格子位置の鉄原子を区別して、マッピング測定が可能。
- 4) 従って、材料の極微細組織と Fe 原子の分布・化学状態などの関係を詳細に評価することが可能である。

3. 多結晶シリコン中の鉄不純物分布

半導体シリコン結晶中の鉄原子の研究は 1950 年代に開始されてからすでに半世紀以上の歳月が過ぎているが、固溶度や格子位置、荷電状態など鉄原子の挙動には未だ不明な点が多い。シリコンは太陽光発電用多結晶材料も含むあらゆる電子デバイスの基盤材料で、鉄不純物はすべてのシリコン材料で問題となっている³⁾。現在、一般的に受け入れられている描像は、「鉄はシリコン結晶中では格子間原子としてのみ存在し、固溶度を超える鉄は鉄シリサイドとして表面や酸素析出物近傍または結晶粒界などに析出する」とするものである。格子間 Fe 原子は、室温近傍は p-type Si で Fe^+ 、n-type Si では Fe^0 として存在し、p-type Si 中では、ドーパント B 原子と電気的相互作用のために Fe^+B^- ペアを形成し、室温付近でも光照射などで解離することが報告されている。

我々はメスバウア分光のさまざまな計測技術を開発し、シリコン結晶中の鉄の問題に取り組んできた⁴⁻¹⁷⁾。例えば、鉄で故意汚染した Si 試料を高温 1273K から室温までの広い温度範囲で直接メスバウア・スペクトルを測定し、「熱平衡状態では大部分の Fe 原子が置換格子位置に存在する」という実験結果を報告している^{4, 7-9, 12-17)}。また、格子欠陥濃度が高い多結晶 Si では観測されるスペクトル

は単結晶と比べて大きく異なることも判明している¹²⁾。さらに、理化学研究所の核破砕生成物分離装置により、メスバウア核 ^{57}Fe の親核 ^{57}Mn ($\tau_{1/2}=1.45m$) を生成・分離し、Si 結晶に高エネルギー・イオン注入しながら孤立 ^{57}Fe の格子位置、荷電状態、そして拡散挙動を 10K から 1200K の温度範囲で詳細に調べた^{10, 11)}。スペクトルは格子間 Fe 成分と置換格子 Fe 成分の両方の成分が観測され、試料温度の上昇と共に格子間 Fe 成分がイオン注入時に生成される原子空孔と結合して置換格子 Fe 成分が形成される過程のその場観察に成功している。最近ではシリコン中の鉄の状態はシリコン結晶内部の鉄分布、応力場、電場さらに光照射の有無など外場の影響により大きく変化することも明らかになりつつある¹⁶⁻¹⁷⁾。さらに、太陽光発電用多結晶シリコンでは欠陥構造が複雑で、Fe は固溶状態に加えて欠陥に捕捉状態、またドーパントとのクラスターとしても存在している¹²⁾。従って、シリコン中の鉄不純物の問題の全容を解明するためには、メスバウア分光からの原子スケールの情報に加え、シリコン材料内部の鉄不純物分布および欠陥構造などの極微細組織に関する情報も同時に精査する必要がある。そこで、今回開発した“顕微メスバウア分光装置”により、まず、鉄で故意汚染した多結晶シリコンのマッピング測定を行った。

1.5mm 厚の ^{57}Fe を p 型多結晶 Si に蒸着し、1000 $^{\circ}C$ で熱処理後にまず通常メスバウアスペクトルを測定した¹²⁾。次に、この試料を 4 \times 2mm の範囲でスキャンし得られたマッピング像を図 2 に示す。(a) は光学写真、(b) はすべての鉄成分を含むように最大ドップラー速度 $\pm 3mm/s$ で振動させながら測定したマッピング像、(c) はメスバウアドライブを停止させてドップラー速度ゼロで測定したマッピング像、即ち主に多結晶 Si 中の置換格子 ^{57}Fe 原子成分の分布を示している。(d) は (b) から (c) を差し引いて得られた像で、主に格子間 ^{57}Fe 原子と ^{57}Fe -B ペア成分の分布を表している。これらの分布は多結晶シリコンの結晶粒 ((a) に対応しており、異なる結晶粒では異なる種類の鉄原子成分の分布、即ち置換格子鉄と格子間鉄の分布が観察される。

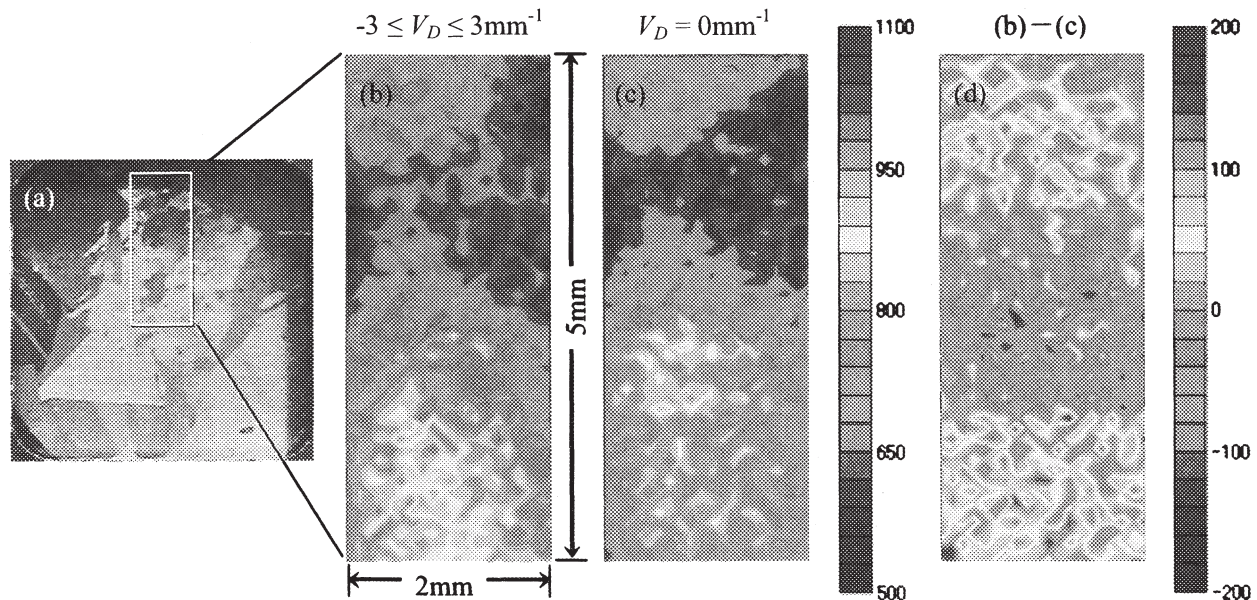


Fig.2 Typical images of a ^{57}Fe -deposited mc-Si wafer observed by Mössbauer microscope: (a) picture of the sample, and the region observed by the microscope, (b) the image corresponding to all ^{57}Fe Mössbauer spectral components, which was obtained by vibrating Mössbauer transducer, (c) the image mainly corresponding to substitutional ^{57}Fe component, which was obtained at zero Doppler velocity, and (d) the difference between (b) and (c), i.e., interstitial ^{57}Fe components.

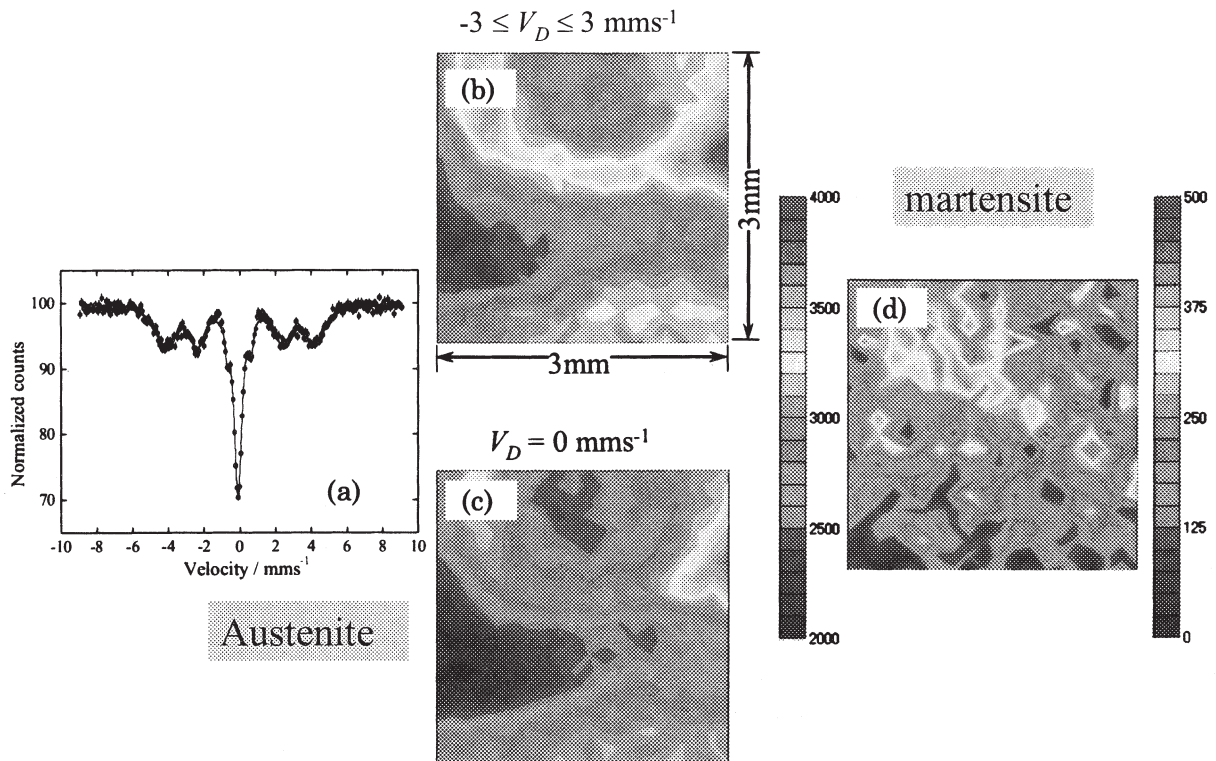


Fig. 3 Mössbauer spectrum and mapping images of a stainless steel: (a) Mössbauer spectrum of stainless steel after a tensile stress-strain test, (b) with vibrating Mössbauer drive in the Doppler velocity range between -10 and 10 mm/s, (c) without vibration, corresponding mainly to Austenite, and (d) a difference between (b) and (c), corresponding roughly to Martensite.

これらのマッピング像で観察される鉄原子分布は表面蒸着後の 1000℃の拡散処理で得られたもので、表面からの鉄不純物拡散が多結晶シリコン内部の結晶粒構造や内部歪、原子空孔、転位などの分布に大きく影響され、鉄原子の格子位置も大きく異なることを直接示している。尚、同一視野で撮影した走査電子顕微鏡像では (b) ~ (d) のこのような極微量鉄原子分布に対応する像は観察されない。鉄原子分布に対する、空間分解能はこれらのマッピング像から 20 ~ 50μm、また、極微量鉄不純物に対する検出限界は他の測定から約 10^{15} Fe/cm³ と見積っている。今後、“顕微メスバウア分光装置”が太陽電池材料の発電効率向上のための評価手段として大きな役割を果たすものと期待される。

4. 応力誘起マルテンサイト相および残留オーステナイト相の分布

鉄原子を含む最も一般的な材料は鉄鋼材料で、オーステナイトとマルテンサイトを含む極微細組織を非破壊で直接観察できる評価手段はあまりない。そこで、“顕微メスバウア分光装置”の性能試験のために、引っ張り試験後の応力誘起マルテンサイトを含む SUS304 試料を観察した。この材料のメスバウア・スペクトルを図 3 (a) に、得られたマッピング像を (b) ~ (d) に示す。図 3 (a) のスペクトルでオーステナイト相はスペクトル中央付近の常磁性のシングレット、マルテンサイト相は 6 本に分裂した線幅の広がった強磁性の成分である。(b) のマッピング像は材料に含まれる鉄原子から無反跳共鳴吸収後に放出される内部転換電子によるものである。即ち、 γ 線が原因となる光電効果による電子放出確率よりメスバウア効果の反応断面積が 200 倍程度大きいので、ここで計測される電子はほぼ全てメスバウア効果に起因する内部転換電子といえる。つまり、(b) のコントラストは鉄の濃度分布を反映している。

ところで、SUS304 は異なる結晶構造からなる微細組織であるので、測定 (b) でこのようなコントラストが観測されるのは、一見理解できない。しかしながら、本装置の測定ではメスバウア効果を利用しているため、結晶相ごとに無反跳共鳴吸収・放出する確率(デバイワラ因子)異なり、これが今回観測されたコントラストを与えていると考えられる。今後さらに、材料中に存在する各相の深さ分布も考慮した定量的なコントラスト計算法を開発する必要がある。

ドップラー速度ゼロの位置(図の中央)は γ 線エネルギー・シフトゼロに対応しており、この共鳴条件でメスバウア吸収および内部転換電子放出が生じるのは、オーステナイト相中の鉄原子のみである。実際に (b) と (c) の像は類似していることから、マッピング像を計測する際に、メスバウアドライブを静止させた状態がこの共鳴条件に対応するので、図 3 (c) はオーステナイト相の分布と考えられる。一方、ドライブを全ての鉄成分が観測できるように振動させて測定を行ったマッピング像 (b) と静止してオーステナイト中の鉄のみに敏感な条件でマッピングした像 (c) の差が (d) である。つまり、(d) のコントラストはマルテンサイト相中の鉄原子に起因していることになる。現在、走査電子顕微鏡観察を行っており、結果は改めて報告する。

5. まとめ

顕微メスバウア分光装置により鉄を含む幅広い材料や物質の微細構造評価・分析が可能になり、今後、物質科学、化学、物理学、材料学、鉱物学、医学、さらに環境学など様々な分野で利用できると期待できる。半導体、鉄鋼材料、触媒材料、磁石材料、鉱物、バイオマテリアルなど鉄が重要な役割を果たす物質は無数に存在する。現在、本装置の有用性を実証するため、様々な物質でマッピング像の測定を継続している。

謝辞

本研究開発は平成 16 年度 RSP (研究成果育成型) 育成試験, 平成 17 年度科学研究費補助金, 平成 18 年度シーズ発掘試験研究, 平成 19 年度静岡理工科大学特定研究費の補助を受けて実施された. 株式会社 島津総合科学研究所・技監・常勤顧問・副島啓義氏には M C X の制作・利用に際し、貴重なご支援とアドバイスをいただきました. 財団法人・浜松地域テクノポリス推進機構・浜松地域知的クラスター本部科学技術コーディネータ・大隅安次氏と財団法人浜松科学技術研究振興会静岡 T L O やらまいか・技術移転部の小野義光氏のご支援に感謝いたします. M C P 制作では浜松ホトニクス株式会社の渥美卓治氏, 鈴木章夫氏にお世話になりました.

参考文献

- 1) メスバウア分光入門—その原理と応用, 藤田英一編著, アグネ技術センター, 1999; <http://www.sist.ac.jp/~yoshida/>, <http://www.mossbauer.org/>, <http://orgs.unca.edu/medc/>
- 2) 吉田 豊, 特許出願 2007-129585 「メスバウア分光測定装置」
- 3) A. A. Istratov, H. Hieslmair, E. R. Weber, *Appl. Phys.*, **A69**, (1999) 13.
- 4) Y. Yoshida and F. Shimura, *Proc. of 8th Int. Symposium on Silicon Materials Science and Technology*, Ed. H. R. Huff, U. Gösele and H. Tsuya, **98-1** (1998) 984.
- 5) Y. Yoshida, Y. Kobayashi, K. Hayakawa, K. Yukihiro, F. Shimura, A. Yoshida, X. Diao, H. Ogawa, Y. Yano, and F. Ambe, *Defect and Diffusion Forum*, **194-199** (2001) 611.
- 6) Y. Yoshida, Y. Kobayashi, A. Yoshida, X. Diao, S. Ogawa, K. Hayakawa, K. Yukihiro, F. Shimura and F. Ambe, *Hyperfine Interactions*, **141-142**, (2002) 157-162.
- 7) Y. Yoshida, in *PV2003-03 of ECS, ALTECH 2003 Analytical and Diagnostic Techniques for Semiconductor Materials and Processes*, (2003) 479.
- 8) S. Ogawa and Y. Yoshida, in *Proc. of the Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2001*, 330-331.
- 9) Y. Yoshida, S. Ogawa, and K. Arikawa, *Physica B*, **340-342** (2003) 605.
- 10) Y. Yoshida, Y. Kobayashi, K. Hayakawa, K. Yukihiro, A. Yoshida, H. Ueno, F. Shimura and F. Ambe, *Physica B*, **376-377** (2006) 69.
- 11) Y. Yoshida, Y. Kobayashi, K. Yukihiro, K. Hayakawa, K. Suzuki, et. al, *Physica B*, 401-402 (2007) 101-104.
- 12) Y. Yoshida, S. Horie, K. Niira, K. Fukui and K. Shirasawa, *Physica B* **376-377** (2006) 227.
- 13) Y. Yoshida, S. Aoki, K. Sakata, Y. Suzuki, M. Adachi, and K. Suzuki, *Physica B*, 401-402 (2007) 119-122.
- 14) Y. Yoshida, Y. Suzuki, A. Matsushita, K. Suzuki, and K. Sakata, *Physica B*, 401-402 (2007) 167-170.
- 15) Y. Yoshida, in *Proc. of The Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2007, Niigata*, 154-169.
- 16) K. Suzuki, Y. Morikawa, Y. Yoshida and K. Asahi, in *Proc. of The Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2007, Niigata*, 195-198.
- 17) K. Sakata, K. Suzuki and Y. Yoshida, in *Proc. of The Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2007, Niigata*, 199-202.
- 18) 吉田 豊, materiあ, 47 (2008) 140-146.
- 19) Y. Yoshida, N. Murase, in *Proc. of JIMIC-3 Kyoto*, 923-926 (1999).
- 20) <http://www.sist.ac.jp/~yoshida/>

静岡県の精密・超精密技術のアンケート結果

—9年間で全国レベルに追いついた—

Questionnaire Result on Precision and Ultraprecision Technology in Shizuoka Prefecture
—Catch Up with the National Level in Nine Year—

大塚二郎*
Jiro OTSUKA

Abstract : A questionnaire on precision and ultraprecision technology was held for the companies in Shizuoka prefecture by Regional Science Promotor of Hamamatsu three times (in 1997,2001,2006). In 1997 it was made clear by this questionnaire that recognition level on the positioning or machining accuracy in Shizuoka was in one order magnitude lower than that of the national wide and this phenomena showed that Shizuoka level was about 10 years behind. But it has caught up with the national level in nine years.

1. はじめに

著者が、1997年から1998年にわたり地域研究開発促進拠点支援事業（RSP事業）「超精密の加工と位置決めに関する研究」に係わり、(財)浜松地域テクノポリス推進機構にお世話になった。その折、同財団の協力で静岡県の企業者、公設試と学の研究員を対象として“精密・超精密技術に関するアンケート”を行った。その結果、精度に関する認識値（問5）が全国レベルのアンケート調査（精密工学会超精密位置決め専門委員会による²⁾）の認識値に比べて一桁劣っていることがわかった。これは全国レベルに比べて静岡県のレベルが約10年遅れていることを意味していた。

そこで、その遅れを取り戻すために1998年7月に精密技術研究会（後に先端精密技術研究会と改名、略称APT研）が、事務局を(財)浜松地域テクノポリス推進機構として、企業数42社、個人会員数6名のもとに発足した。その後平成19年度には参加企業数77社と個人会員数19名に増加した。

2001年6月に第2回アンケート調査、2006年12月に第3回アンケート調査を行い、この度1999年から2006年迄の9年間にわたる静岡県の精密・超精密技術の推移を調査してきたので、ここに報告する。なお、第1回から第3回までの回答者数は次のとおりである（1企業1名）。

回答者について

- (1) 第1回 1997年12月 117名
このとき、先端精密技術研究会（APT研）は存在しなかったため、会員、非会員の区別はない（APT研は1998年発足した）。
- (2) 第2回 2001年6月
- ・ 先端精密技術研究会 会員 30名（回答率 $30/75=40.0\%$ ）
 - ・ 先端精密技術研究会 非会員 118名（回答率 $118/4253=2.8\%$ ）
- (3) 第3回 2006年12月
- ・ 先端精密技術研究会 会員 53名（回答率 $53/97=54.6\%$ ）
 - ・ 先端精密技術研究会 非会員 85名（回答率 $85/4608=1.84\%$ ）
- 非会員の回答率が悪いが、回答者の内容を見るとそれなりに精密技術に関心を持っている者が回答してきている。

2008年3月17日受理

*理工学部 機械工学科

Table 1. Details of questionnaire

【問1】 あなたの業種は次のどれに属しますか (○印をつけてください)。

1. 鉄鋼・非鉄金属	2. 一般機械	3. 精密機械	4. 電気・電子機器	5. 輸送用機器
6. 石油化学	7. ゴム・合成樹脂	8. 化学工業	9. 医薬品	10. 繊維
11. 紙・パルプ	12. 窯業	13. 食品	14. エネルギー	15. 運輸・倉庫
16. 建設	17. メンテナンス	18. 大学・試験・研究所	19. その他 ()	

【問2】 あなたの職種は次のどれに属しますか (○印をつけてください)。

1. 経営・管理	2. 総務・資材・企画	3. 営業・販売	4. 生産・技術	5. 研究・開発
6. 設計	7. その他 ()			

【問3】 問1の業種について、もう少し詳しくその内容を教えてください。

.....

【問4】 次のような精密技術と思われる中に、貴社の関心がある物に○印をつけてください (複数回答可)。

1. 位置決め	2. 加工	3. 計測	4. 制御	5. 振動
6. 機械要素	7. トライボロジー	8. 半導体	9. CAD・CAM	10. メカトロニクス
11. 環境	12. 画像処理	13. その他 ()		

【問5】 精密技術・超精密技術といった場合、どの程度の寸法精度 (認識値) をイメージされますか。下記の表中に○印をつけてください。(現在ははっきりとした定義はありませんので、お考えになっている値でお答えください。)

	精密技術	超精密技術
① 100 μm以下		
② 10 μm以下		
③ 1 μm以下		
④ 100 nm以下		
⑤ 10 nm以下		
⑥ 1 nm以下		
⑦ 0.1 nm以下		
⑧ 0.01 nm以下		

【問6】 貴社の事業の中に精密技術あるいは超精密技術に属すると思われるものがありますか (○印をつけてください)。

・精密技術	ある	ない
・超精密技術	ある	ない

【問7】 問6で[ある]とお答の方に質問します。それは何ですか。差しつかえなければ、なるべく具体的にお答えください。

.....

【問8】 問6で[ない]とお答の方に質問します。今後精密か超精密技術にかかわる予定がありますか。

・ある (具体的に:)
・ない

【問9】 現在、精密技術・超精密技術についてお困りの点がございましたら、差しつかえない範囲でできるだけ具体的にご記入ください。

.....

.....

2. 各問に対する回答結果

以下、問1～問9の回答結果を述べる。

以下、「会員」とあるのは先端精密技術研究会の会員を示し、「非会員」とあるのはそうでないことを示す。

【問1】 あなたの業種は次のどれに属しますか

[回答のまとめ]

図1(a)と同図(b)を比べると、当然のことながら前者の方に精密機械の割合が大きいことがわかる。

各業種の回答者数を円グラフに現わしたのが図1(a)会員、同図(b)非会員、同図(c)は会員、非会員を統合したものである。

なお、グラフ中の<その他>の内容は次のとおりである。

- 《会員》 ・ダイヤモンド工具 ・製造業 ・精密工具 ・大学生 ・学生
- 《非会員》 ・金融 ・情報通信業 ・教育 ・金型製作、プラスチック射出成形 ・金属製品 ・ウレタンフォーム ・超硬ドリル製造 ・広告代理店業 ・工業材料商社 ・野球ベルト製造及び卸し ・めっき ・電気機械器具製造業 ・搬送システム設計、製造販売 ・印刷業 ・金型、板金製品 ・金属熱処理 ・商工会議所 ・製造業

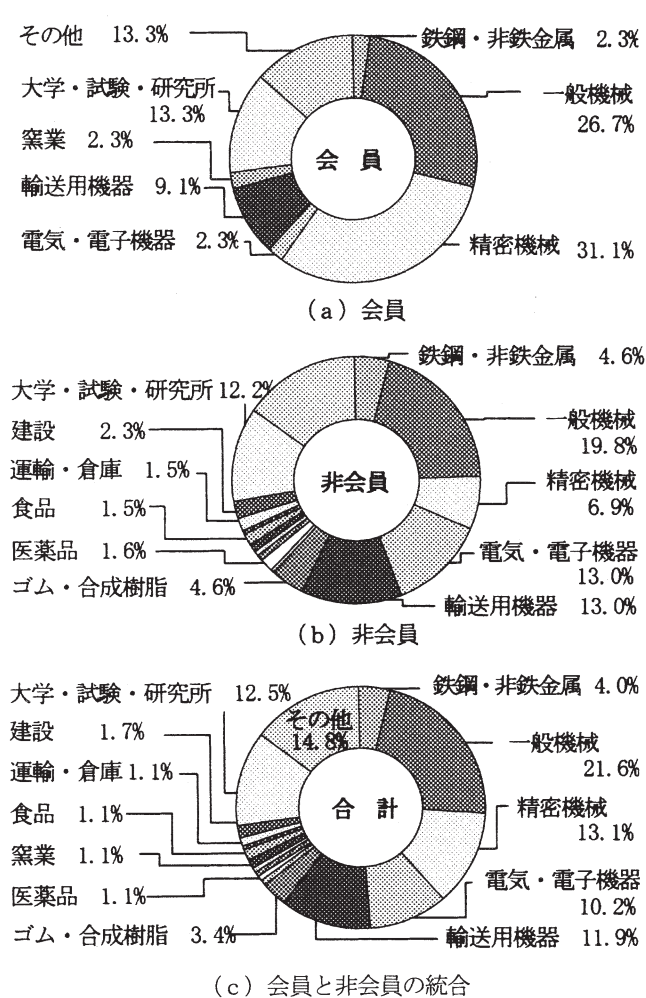


Fig. 1 Percentage of business category

【問2】 あなたの職種は次のどれに属しますか

図2に第3回(2006年)の回答のみを示す。第1回、第2回を比べて大きな差はない。

<その他の内容>

《会員》 ・退職 ・大学

《非会員》 ・企画 ・研究 2件 ・教育 2名、社会貢献 ・技術営業、コーディネーション他 ・教員 ・繊維団体 ・経済団体業務 ・経営支援等 ・産学連携推進関係者

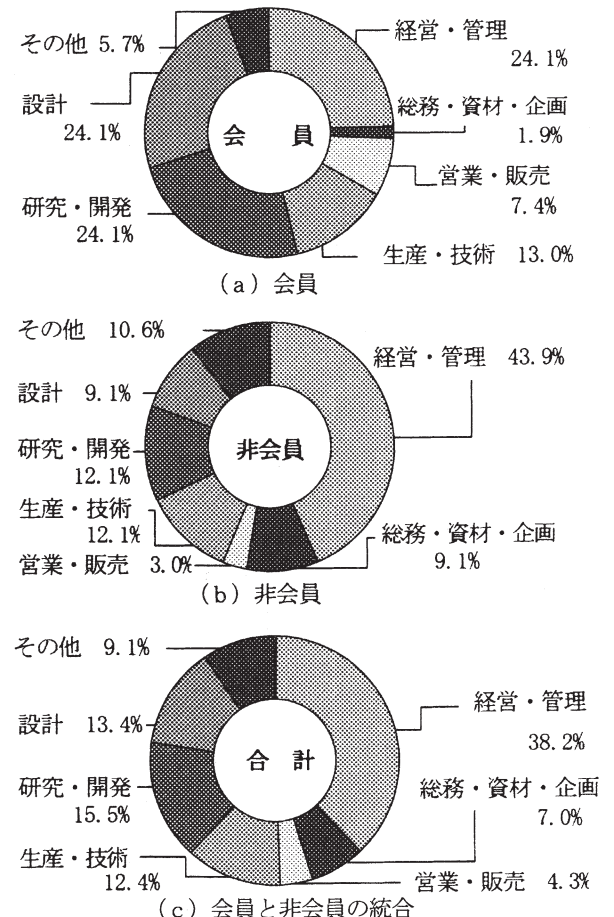


Fig. 2 Percentage of occupational category

【問3】 問1の業種についてもう少し詳しい内容を教えてください。

詳細は省略するが、次のような事項がわかった。
 (1) 第1回アンケートでは、静岡県でも「電気・電子機器」「精密機械」において半導体関連の業種が少数あったが、第3回アンケートでは、半導体、液体、FDP、ナノテク等の企業が増加しつつあることがわかった。
 (2) 工作機械メーカーが、業種「一般機械」に入っていたり業種「精密機械」に入っていたりする。また、自動車関連の部品製造業にたずさわる者が、業種「一般機械」と業種「精密機械」に分かれて入っている。

【問4】精密技術と思われる中に、貴社の関心があるものに○印をつけてください。(複数回答可)

[回答のまとめ]

第1回から第3回を通して常にベスト4は、「加工」、
「計測」、「位置決め」、「制御」であり、中でも「加工」

は常にトップである。静岡県は物造り、加工が非常に盛んであることを物語っている。これらの中で「制御」は「制御工学」を指すのではなく、しいて言えば、「メカトロニクス」を指すことが多いことを付け加えておく。

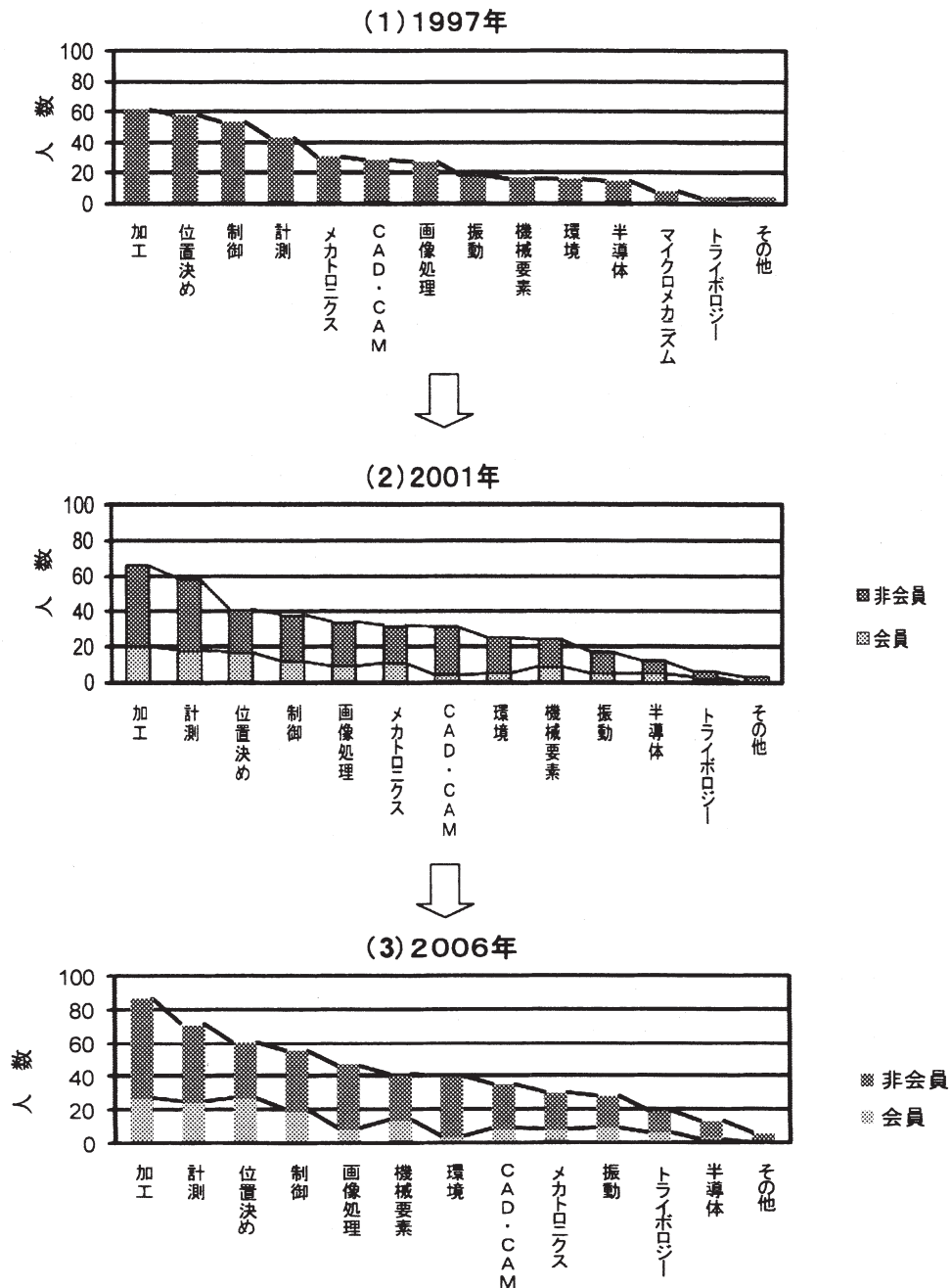


Fig 3. Concern with precision technology by the repliers

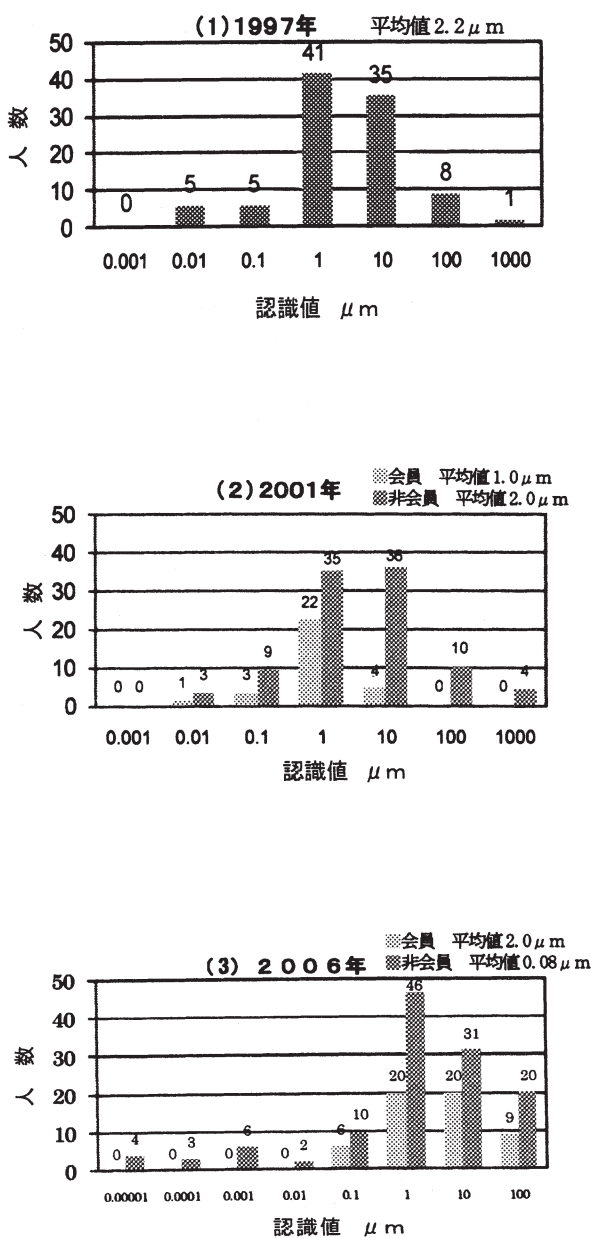
【問5】精密技術・超精密とは、寸法精度認識値からい
うとどの程度とお考えですか。

図4において左側(a)は第1回から第3回までの精
密に関する認識値を示し、右側(b)は同じく第1回か
ら第3回までの認識値を示している。

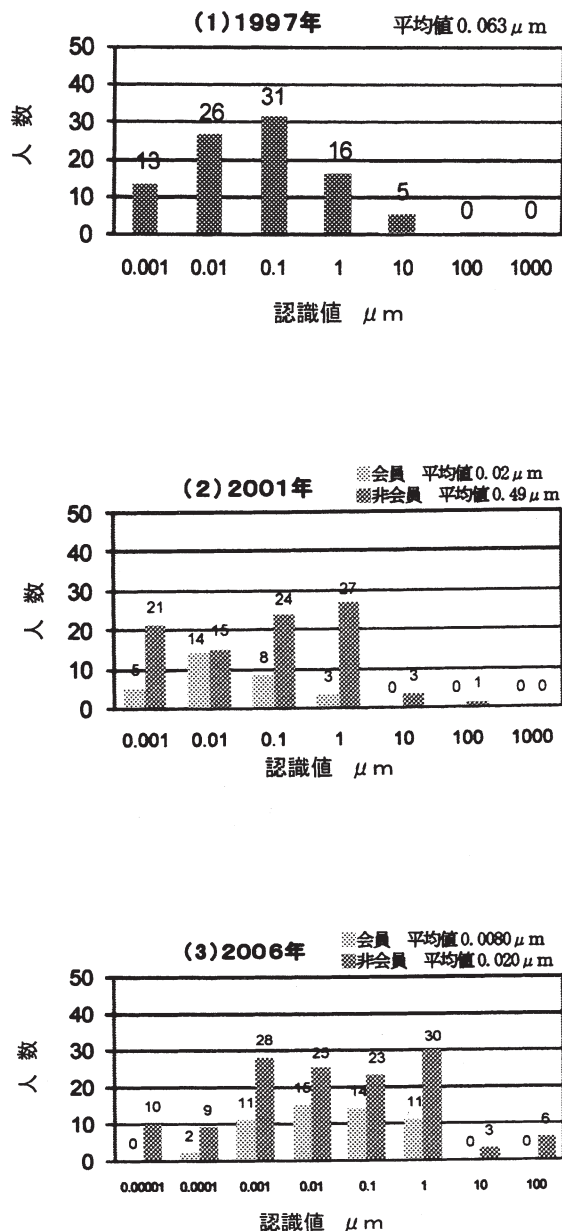
[回答のまとめ]

1997年(第1回アンケート)の認識値は、図4を
みてわかるとおり精密では殆ど0.1~10 μ mの範囲

にわたるが、それらの平均値は2.2 μ mである。一方
超精密では0.001~10 μ mと広い範囲にわたるが、
それらの平均値は0.063 μ mである。これらの平均
値は精密、超精密共に年の経過と共に小さくなり、
確実に静岡県の精密技術への関心が高まり、精密・
超精密技術が向上していくことがわかる。なお、非
会員の場合、超精密の意味が理解できないで、異常
な値(例えば100 μ m)を示した人(企業)があつた
が、その値をそのままの値を用いた。



(a) Precision technology



(b) ULtraprecision technology

Fig. 4 Recognition level of precision and ultraprecision

【問6】貴社の事業のなかに精密技術あるいは超精密技術に属すると思われるものがありますか。

図5 (a) に精密技術の有無, 同図 (b) に超精密技術の有無の数を示す。

[回答のまとめ]

・精密技術については, 図5 (a) を見てわかるとおり第1回アンケート(1997年)で回答した117名中66名(56.4%)が持っていたが, 第3回アンケート(2006年)では, 回答した会員53名中37名(69.8%)と増加したが, 非会員

では, 81名中35名(43.2%)持つに至り, 減少を示した。

・超精密技術については, 図5 (b) を見てわかるとおり, 超精密技術を持つ回答者が確実に増加したことがわかる。つまり, 第1回(1997年)アンケートでは15名(14.4%)だったものが第3回では, 会員では回答した53名中14名(26.4%)非会員では回答した77名中11名(14.2%)である。このことより会員の中で超精密技術を持つに至った者が増加したことがわかる。

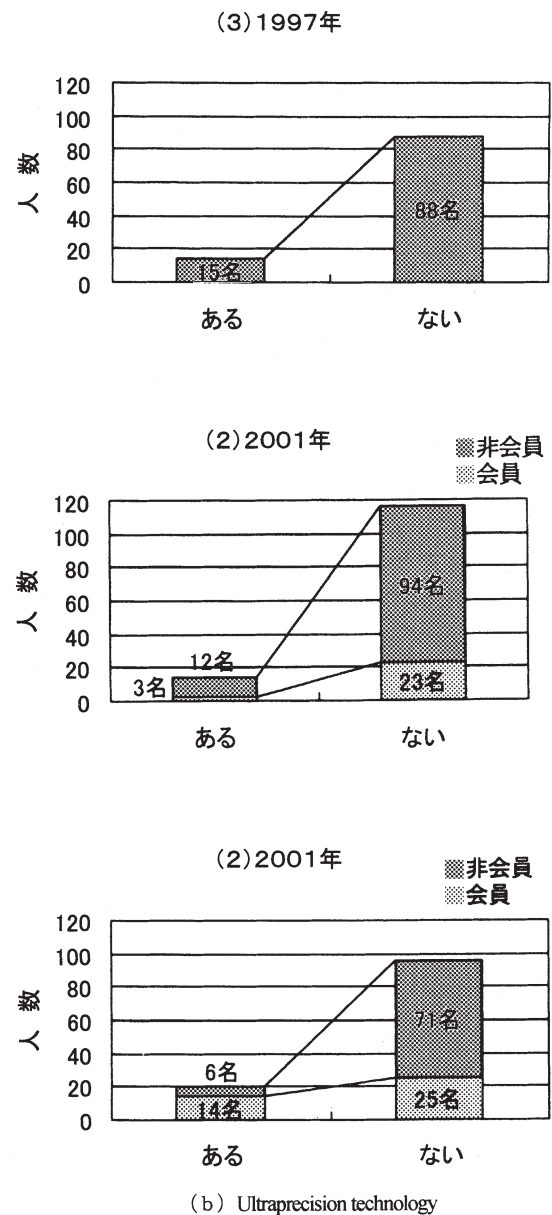
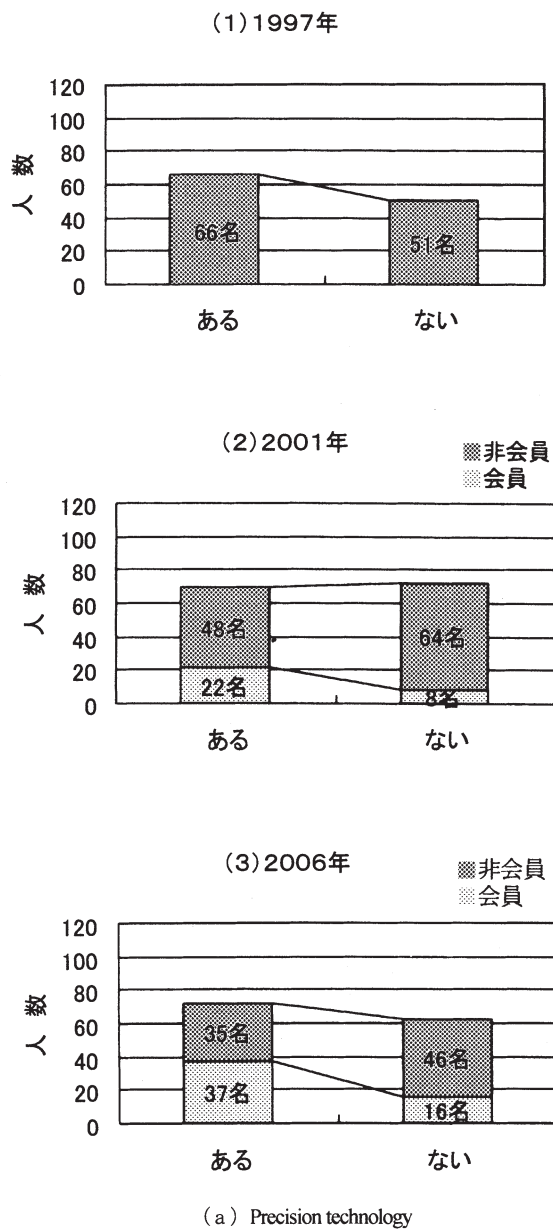


Fig. 5 Possession or non-possession of precision and ultraprecision technology

【問7】質問6で精密技術，又は超精密技術が「ある」とお答えの方に質問します。それは何ですか。具体的にお答えください。

第3回アンケート（2006年）のみの回答を表2～表3に示す。

[回答のまとめ]

- ・精密技術に関しては，第1回（1997年）～第3回（2006年）を通して加工，位置決め，計測等

全般にわたっている。

- ・超精密技術と第1回（1997年）の頃は，半導体がらみが多かったが，以後，第3回では，ナノテクノロジー全般，MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)，NEMS (Nano-Electro-Mechanical Systems)等に変化していることがわかる。

Table 2. Details of precision and ultraprecision technology in the case of members

精密	加工	<ul style="list-style-type: none"> ・加工，組立技術 ・微小表面形状の形成 ・精密技術では「歯車の研究加工」，超精密技術では「ナノサイズの結晶粒サイズの計測及び硬度，残留圧縮応力等の分析・計測 ・エンジン部品の試作加工 ・精密固定軸継手（リジッドカップリング） ・精密部品加工，精密ブラスト加工，精密レーザ加工 ・精密組立技術 ・ダイヤモンドバイト ・金型の加工に関する事 ・案内面はすべり案内 ・円筒研削 ・金型のガイドピン 加工公差 5N 	加工	<ul style="list-style-type: none"> ・加工，組立技術 ・精密技術で「歯車の研究加工」，超精密技術では「ナノサイズの結晶粒サイズの計測及び硬度，残留圧縮応力等の分析・計測 ・精密固定軸継手（リジッドカップリング） ・工作機械
	計測	<ul style="list-style-type: none"> ・自動車部品計測 ・計測技術（表面粗さ測定，真円度測定，レーザ即長，静電容量センサ等による微小変位測定等） ・工作機械の静的精度 ・精密 一般的に10～100μmの位置決めに必要なX, Y, Z Table 付計測器 ・超精密 Z軸方向の振動をnm単位で押さえた光単装置（光干渉を利用した） ・3次元測定機検証用ゲージ ・刃物に要求される精度として外周精度，側面精度，形状に対する精度。又切削面粗さへの要求 ・ギヤチェッカー，精密金型 ・レーザ測定による0.01μmオーダの測定と，0.1μmオーダの立体（3次元）制御 	超精密計測	<ul style="list-style-type: none"> ・計測技術（表面粗さ測定，真円度測定，レーザ即長，静電容量センサ等による微小変位測定等） ・精密 一般的に10～100μmの位置決めに必要なX, Y, Z Table 付計測器 ・ロータリエンコーダの超高精度な校正，校正精度0.01”→0.002”へ ・セラミックス加工の面粗さ・形状誤差
	位置決め	<ul style="list-style-type: none"> ・モジュール検査においてPCB基板の位置決め ・±50nmのステージ位置決め制御技術 ・ナノハンドステージ，手動でナノレベルの位置決め ・精密位置決め技術 ・ステージの位置決め ・直接的な製造ではないが，機械にスケール等使用 ・1nm, 5nm, 100nm 分解能の位置決め ・位置決め装置 	位置決め	<ul style="list-style-type: none"> ・ナノハンドステージ，手動でナノレベルの位置決めを行います ・精密位置決め技術 ・1nm, 5nm, 100nm 分解能の位置決めステージがあります ・位置決め装置
	制御	<ul style="list-style-type: none"> ・サーフェイス型 X-Yスケージ 	制御	<ul style="list-style-type: none"> ・超精密 Z軸方向の振動をnm単位で押さえた光単装置（光干渉を利用した） ・±50nmのステージ位置決め制御技術
	その他	<ul style="list-style-type: none"> ・研究開発 ・位置決め要素技術の研究開発 ・技術的に見て，自動車生産技術は精密技術の範囲であるが，その精密さをしっかりと保証する上で超精密計測の技術も持ちあわせている必要がある。 	その他	<ul style="list-style-type: none"> ・研究開発

Table 3. Details of precision and ultraprecision technology in the case of nonmembers

精密 非会員	加工	<ul style="list-style-type: none"> ・加工技術（静圧軸受） ・研削，薄膜 ・製品の打抜機（パンチャー）の左右バランスなど ・チップ接合装置 ・超精密ダイヤモンドバイト ・転動体精度（真円度，円筒度，面積度） ・射出成形用金型 ・切削加工，計測 ・ロールの真円度，表面精度，回転の振れ ・部品製造に伴う 金型，検品の技工 ・金型の加工技術 ・マシニングにて ドッククラッチ爪切削加工（10 μ以下） ・平面硝消盤 ・部品加工精度 ・プレス部品の形状精度 ・研磨，治具ボーリング加工，マシニングセンター ・圧造工具 ・3D CAD/CAMによる精密切削加工，φ0.02～0.5の切削工具を使用するMC加工，難削材（医療用タン合金，SUS全般）の精密微細加工，自由局面加工，医療画像DICOMデータから種々のデバイスの実現（例；人口関節インプラント各種の製作）IGES～あらゆるファイル形式のCADデータをサポート ・微細加工→転写，光学系 ・プレスクリアランス ・合成樹脂製のシートのカット，寸法精度が重要な点 ・製版刷版技術 ・デジタルカメラのシャッター部分の部品成形用金型部品，ズームレンズ用スライド部成形用の金型部品 ・印刷技術でのドットを版に焼く技術など（印刷機） ・ナノインプリントの製造装置 	加工	<ul style="list-style-type: none"> ・加工技術（静圧軸受） ・冷間鍛造による，歯車の歯面精度及び同軸精度 ・微細加工→転写，光学系 ・ナノインプリントの製造装置 ・研削，薄膜
	計測	<ul style="list-style-type: none"> ・当社設計製作の測定装置（プレーキディスク測定） ・計測（nmオーダー） ・検査装置の画像処理 ・光ディスクの信号読取解析時の密度等 ・光の調芯 ・精密測定（レーザ測長器，三次元測定機等） ・3D計測機 ・部品の加工精度管理 	計測	<ul style="list-style-type: none"> ・ロータリエンコーダの超高精度な校正 校正精度 0.01"から 0.002"へ
	位置決め	<ul style="list-style-type: none"> ・ミクロン単位の位置決め ・精密技術位置決め精度 10nm ・位置決ステージ ・XYステージ ・検査装置のステージ位置決め制度 ・ステージを中心とした位置決め ・半導体製造装置，画像処理装置，各種組立装置，光通信機器アライメント装置等 ・設備，治具における製品の位置決め調整機構 ・位置決め補正装置 	位置決め	<ul style="list-style-type: none"> ・位置決ステージ ・XYステージ ・検査装置のセテージ位置決め制度
	制御	<ul style="list-style-type: none"> ・膜厚制御 ・搬送システムに関する制御関連 ・画像処理技術など 	制御	<ul style="list-style-type: none"> ・検査装置の画像処理 ・膜厚制御
	その他	<ul style="list-style-type: none"> ・機械要素 ・AFMを用いた微細化国技術 ・加工，計測，位置決めなど（機械領域に限らず） ・電子部品の実用化技術（狭ピッチ，小型電子部品） ・環境（特に熱の管理，鉄の膨張率 3/1000） 	その他	<ul style="list-style-type: none"> ・AFMを用いた微細化国技術 ・加工，計測，位置決めなど 又，機械領域に限らず市広く存在する
		超精密		超精密

【問8】今後精密・超精密に係わる予定がありますか。

第3回のみを回答を表4～表6に示す。

[回答のまとめ]

第1回(1997年)では、精密技術について「あり」答えたのが10名、「なし」と答えたのが5名、第2回(2001年)では、(a)会員で「あり」答えたのが1名、「なし」と答えたのが1名、(b)非会員で「あり」答えたのが13名、「なし」と答えたのが6名となったが、精密技術について、第3回(2006年)では、会員で「あり」答えたのが10名、「なし」と答えたのが5名(表4)、超精密技術について、第3回(2006年)では、非会員で「あり」答えたのが10名、「なし」と答えたのが58名となり(表5)、第3回になって挑戦しようという気概の企業が増加した。

具体的内容は以下に示す。

Table 4. Precision or ultraprecision technologies in which the repliers want to be concerned in the case of members

あ る	10 名	<ul style="list-style-type: none"> 顧客の要求がだんだん厳しくなっている ナノ素材による(傾斜材料部品の形成技術)、SPS 応用技術等について勉強中 表面仕上加工にトライボロジー技術の高い要求から レーザ加工関連 ダイヤモンド総形バイト 自社商品の位置決め精密化への希望 問7の精度をチャンピオンデータでなく、安定して得られるようにしたい 0.01mm(10μm) オーダの輪郭制御 10μm以下の仕事が多いが、やがて1μm以下の要求にも応えなければならない
な い	5	

第3回アンケート 2006年

Table 5. Precision or ultraprecision technologies in which the repliers want to be concerned in the case of nonmembers

あ る	10 名	<ul style="list-style-type: none"> 治具に寸法目盛り打ち、精度0.1mm可 今後更に金型技術でのUP 0.3φ~0.05φ位のボス加工をしたい 今後宇宙関連事業にチャレンジする場合 光学系部品製造 各種めっき 画像処理関連 精密部品加工用の金型製作 世の中高精密化へ向かっているの、弊社も超精密技術が必要となる
な い	58 名	<ul style="list-style-type: none"> 予測不能 現在はないと思います できない

第3回アンケート 2006年

【問9】現在、精密技術、超精密技術についてお困りの点を具体的にお答えください。

表6に示す。

[回答のまとめ]

下記のとおり、加工技術、センサ、アクチュエータ、計測に関するもの、それに伴う環境等が問題となっていることがわかる。

Table 6. Details of technological problems

会 員	14 名	<ul style="list-style-type: none"> 専門技術者の育成 加工機、加工方法 地域企業を活性化させるための研究開発テーマとして最適な課題が見出せない ドライ切削加工、セミドライ加工についてノウハウを吸収したいと考えている 精度の高いZ位置決めnm単位の振動対策 測定機、測定方法について検討していると共に、加工機械のより高精度機が要望されますが、金額が・・・ 位置決め用超精密機構加工技術 センサ、アクチュエータが無い センサは組み込むには大きすぎる 外乱で安定しない 温度によるリニアスケールの伸縮問題 精度の低下 製造ライン内での自動計測 高分解と高速(応答)とのトレードオフなど
非 会 員	29 名	<ul style="list-style-type: none"> 温度による材料の伸縮 大型サイズの基板の温度による伸縮 振動 駆動機構、センサ共に特注品となり入手しにくい 摩擦 技術者の育成 振動：整定時間の短縮 大型ステージの工軸同軸制御 現在アルミ、鉄ケースに穴あけする時に予定では0.2mm以下のところ0.5mm位ずれてしまう。それなりの治具等を作ってもこの程度。0.1mmで充分 位置検出センサ及位置決め制御 測定装置が高額の為 自社で所有できない 恒温室設備がない為、検証できない機械があり受注不可となる 恒温室がないため、精度管理が出来ない 2次元測定の時と計測面積 社内設備、測定器関連が乏しく、必要性に応じた情報入手を求む 超精密な装置を完成させたとしても、その精度などの検証方法が簡単ではない 安価な測定装置 簡便、安価な測定技術

第3回アンケート 2006年

3. 結言

3回にわたるアンケートの結果、おおよそ次のようなことが言える。

- (1) 第1回(1997年)～第3回(2006年)の回答者の寸法精度についての認識値の平均値は、図4に示すとおり、大きな幅を持つが、その図に示されている平均値を示したのが図5の右半分の非会員、APTの部分である。全国²⁾の精密・超精密の認識値が1994年から停滞する中、2006年には静岡県の超精密技術の平均認識値が全国レベルに追いつき、追い越そうとしている(なお、アンケート回答者の業種構成は全国と静岡県に特に大きな差はない)。
- (2) 静岡県の企業で、精密技術の中で関心のある技術のベスト4は、3回のアンケートとも第1位は「加工」であり、以下「位置決め」、「計測」「制御(メカトロニクス)」が常にベスト4を占めている。
- (3) 当初は超精密加工というと半導体関連が多かったが、現在は液晶はじめ多岐にわたり、ナノメートルは勿論ピコメートルに挑戦する企業も出てきた。
- (4) 静岡県は三河地方と併せて日本のもの造りの中心になっているといっている。依然自動車はその中心であるが、産業の分野が広がりつつある。

参考文献

- 1) 大塚二郎, “静岡県の精密技術についてのアンケート調査結果”, 静岡理工科大学紀要, Vol. 7(1995), 221-237 頁
- 2) 大岩孝彰, 勝木雅英, “超精密位置決めにおけるアンケート調査”, 精密工学会誌, Vol. 69(2003)No. 3, 1077-1082 頁

謝辞

本レポートをまとめるに当り、種々御協力くださったAPT研究会の皆様、(財)浜松地域テクノポリス推進機構の方々、静岡理工科大学、静岡大学の方々に感謝申し上げます。

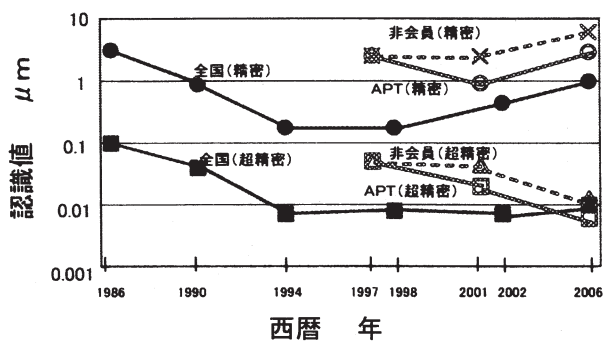


Fig 6. Comparison of recognition level on the positioning or machining accuracy in Shizuoka prefecture with that of national wide

PIC 16F648A を用いたストップウォッチの設計と試作

Design and Trial Manufacture of a Stop Watch with a PIC 16F648A Micro Computer

袴田 吉朗*

Yoshiro HAKAMATA

Abstract: The material summarizes the design of a stop watch that uses a PIC 16F648A micro computer as a controller. In 2007, I made an incentive lecture on a manufacture of a stop watch to the Shizuoka Kita High School students. And I also undertook the task of teaching a manufacture of the stop watch. The activities were made in the chain of the Super Science High-school (SSH) program.

1. はじめに

平成 19 年度に静岡北高校スーパーサイエンスハイスクール (SSH)におけるインセンティブ・レクチャー実施の依頼を受け、ストップウォッチに関する講義および製作実習を行った。本資料はストップウォッチの設計内容を取りまとめたものである。

2. ストップウォッチの回路

図 1 に試作した回路を示す。3 桁で 9 分 59 秒までのカウント動作、1 秒以内の精度を目標にした。図 2 に外観を示す。制御回路の 8 ビット CMOS マイコン PIC 16F648A、アノードコモン形の 7 セグメント LED (3 個)、トランジスタおよびその他の部品からなる。電池はリチウム電池であり、電圧は 3V である。

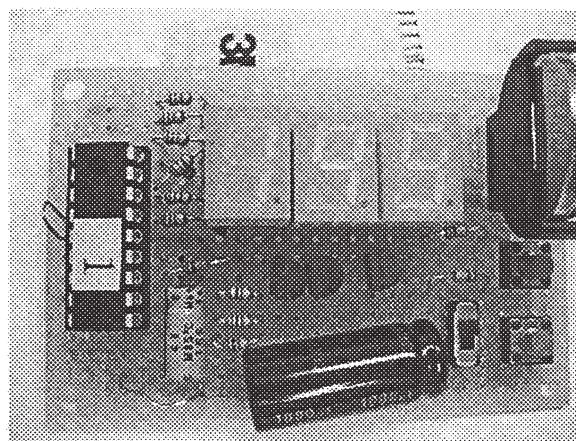


図 2 完成したストップウォッチ (1 分 45 秒を表示)

(1) リセット回路

10kΩの抵抗, 22μFのコンデンサおよびスイッチで構成している。リセットボタンを押すと 22μFのコンデンサにおける電荷が 0 となり、MCLR 端子が L となってリセットがかかる。

その後 10kΩの抵抗を通して 22μFのコンデンサが電源電圧にまで徐々に充電されるので、PIC が再び動作するようになる。ハードウェアリセット時にはプログラムの処理は図 3 のフローチャートにおける先頭に移るので、LED の表示は 0 クリアされる。

(2) start / stop SW

RA0 端子 (PORTA) にタクトスイッチを接続し、100kΩの抵抗で電源にプルアップしている。

(3) 7セグメント LED

アノードコモン形の LED を 3 個使用し、これらをダイナミック点灯させている。

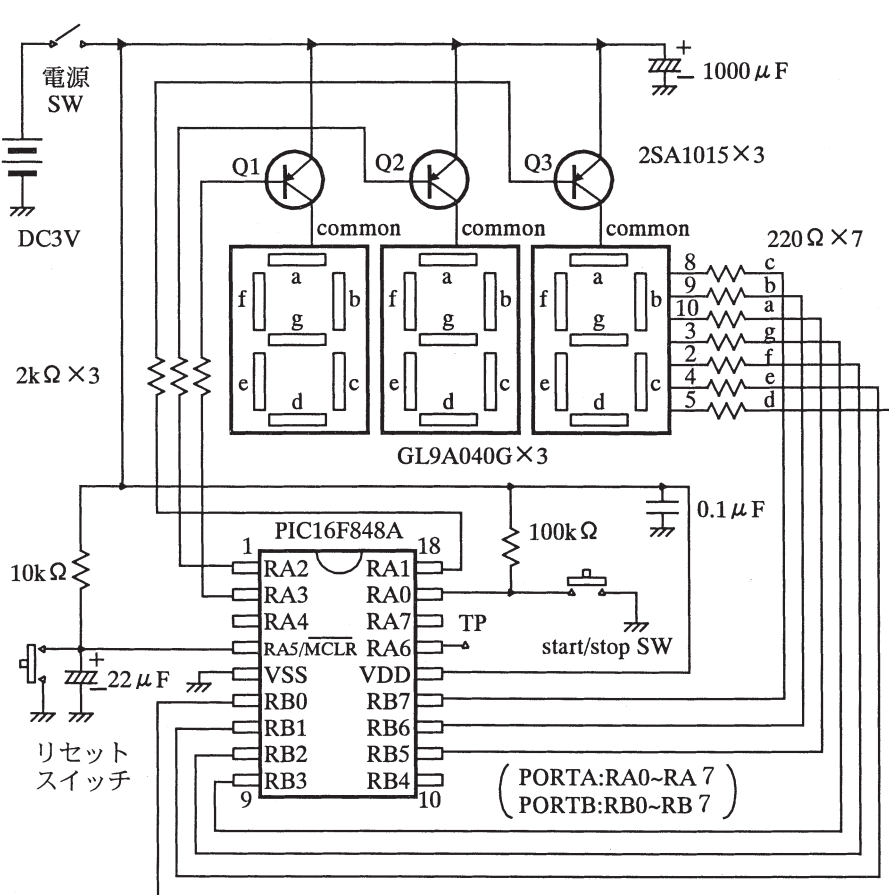


図1 ストップウォッチの回路図

2008 年 3 月 3 日受理

*理工学部 電気電子情報工学科

(4) 電流制限抵抗

7セグメント LED に流す電流を制限するために 220Ω の電流制限抵抗を用いている。LED の端子電圧は約 1.9V であるから LED に流れる電流は約 7mA となり、幾分少なめである。

3. ストップウォッチのプログラム構成

(1) 回路全体のフローチャート

ストップウォッチの動作を図3の概略フローチャートに示す。プログラムはメインプログラムと割り込みサービスルーチンからなる。

① メインプログラム

- ・ クロック周波数, 入出力ピンおよびタイマー0 割り込みの設定後, start / stop SW が押されるのを待つ。
- ・ start / stop SW が押されたら, 5ms 毎のタイマー0 割り込みを待つ無限ループを実行する (網掛けで示したループ)。
- ・ 再び start / stop SW が押されると, カウントを停止してその時のカウント値を表示する。
- ・ 再度 start / stop SW が押されると, 続きからカウントする。
- ・ 図 3 のフローチャートにはないが表示をクリアするためには, リセットスイッチを押す。

② 割り込みサービスルーチン (ISR)

- ・ タイマー0 割り込みが発生するとこのISRが5ms ごとにコールされる。割り込み終了時にプログラムを再開できるように必要なレジスタを待避した後, タイマー0 の割り込みフラグ TOIF を 0 クリアする。またカウンタ TMR0 に初期値を再設定して次の割り込みに備える。
- ・ カウント値を LED に表示する。
- ・ この割り込みが 200 回発生したか否かで1秒の経過を計測し, このときカウント値である1バイト変数 SEC_CNT (下位バイト) (あるいは SEC_CNTH (上位バイト)) をカウントアップする。
- ・ カウント値を BCD に変換後表示する。
- ・ 保存したレジスタを復帰してメインプログラムに戻る。

(2) 各種レジスタの設定

① CMCON レジスタ

CMCON レジスタにおいて CM2:CM0=111 とすることにより, コンパレータをオフとし, PORTA を I/O ピンとして使用できるようにする。設定を以下に示す。

```
MOVLW 0x07
MOVWF CMCON
```

② PORTA, PORTB レジスタ

PIC における入出力ピンは, 「PORT レジス

タ」と呼ばれる 8 ビットのレジスタである。このレジスタの 1 ビット毎が入出力ピンに対応しており, さらに「TRIS レジスタ」を用いて各ピン毎に入力/出力を指定する (バンク 1)。設定を以下に示す。

```
MOVLW B'00000000' ; PORTB
MOVWF TRISB ; RB0~RB7 全出力
MOVLW B'00010001' ; PORTA
MOVWF TRISA ; RA0, RA4 入力
```

③ PCON レジスタ

以下の命令で内蔵クロックを 4MHz に設定する (バンク 1)。

```
BSF PCON, 3 ; 4MHz
```

④ OPTION_REG

プリスケアラの設定を以下に示す (バンク 1)。

```
MOVLW B'11000100' ; PS=32
MOVWF OPTION_REG
```

⑤ TMR0

タイマーカウンターの初期値の設定を以下に示す (バンク 0)。

```
T0_SETDATA EQU .100
MOVLW T0_SETDATA
MOVWF TMR0
```

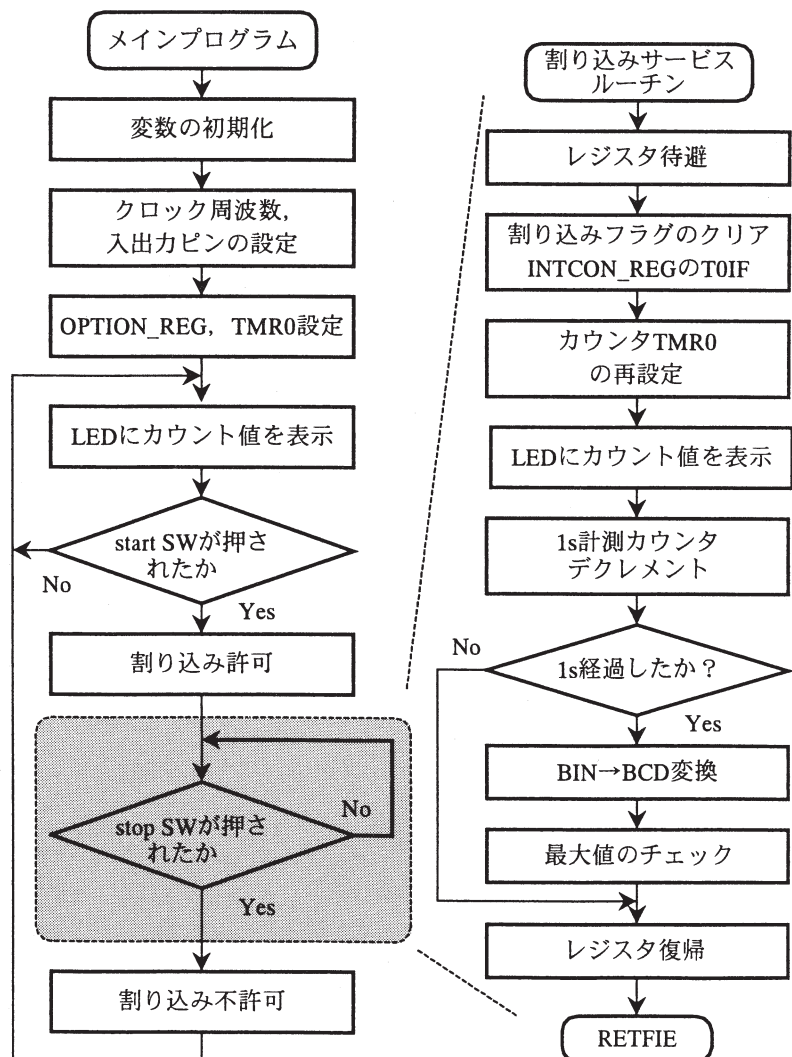


図3 ストップウォッチ・プログラムの概略フローチャート

(3) 内蔵クロックの設定

図4にPIC16F648Aのクロック回路を示す。図4におけるCPUCLK (F_{osc}) は、PICの1命令が4命令サイクルからできているため、更にカウンタによって1/4分周されて使用される。

部品点数を減らすためにPICに内蔵されている内部発振器を使用した。このため切り替えスイッチ1を用いてINTOSCに設定した。これは、プログラムのコンフィギュレーションにおいてINTOSCと記述することにより行っている。このときRA6/OSC2ピンからは $F_{osc}/4=1\text{MHz}$ のクロックが出力される。またRA7/OSC1ピンは通常のIOピンとして使用できる。

なおINTOSC_RCに設定すると、RA6/OSC2、RA7/OSC1ピンとも通常のIOピンとして使用できる。

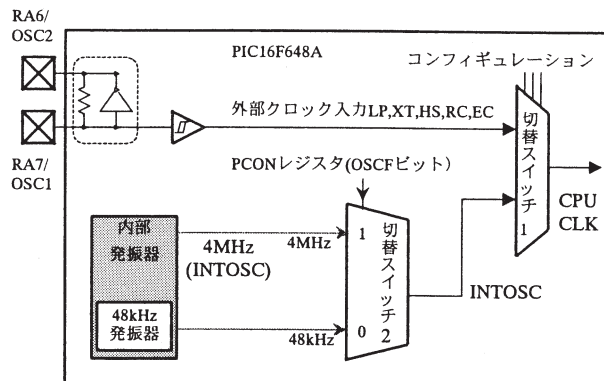


図4 PIC16F848Aにおけるクロック系統図

内部発振器の周波数は切り替えスイッチ2を用いて設定する。発振周波数は、プログラムにおいて図5に示すPCONレジスタのOSCFビットに書き込む値によって以下の値になる。

- OSCF=1 4MHz (typical)
- =0 48kHz (typical)

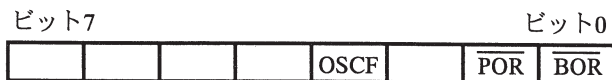


図5 PCONレジスタ (アドレス8Eh)

(4) タイマー0割り込みによる1sパルスの作成

図3に示したように1s毎にパルスを発生させる必要がありPIC16F648Aにおけるタイマー0割り込みを使用している。

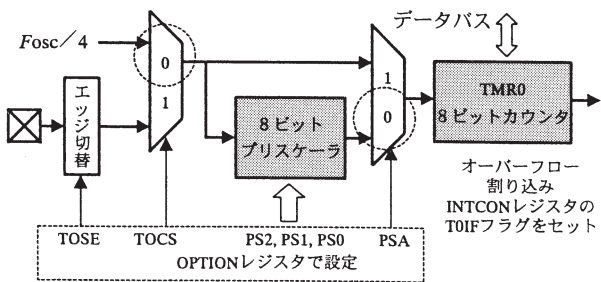


図6 タイマー0の内部構成

図6にタイマー0の内部構成を示す。8ビットのプリスケアラおよび8ビットのTMR0カウンタ本体からなる合計16ビットのカウンタによって構成されている。したがって最大で65536分周が可能である。

F_{osc} は図4に示したCPUCLKであり、 F_{osc} を1/4分周したクロックがタイマー0に入力されている。これは1命令が4個の命令サイクルからなるためである。図7はプログラムにおいてプリスケアラを設定するためのタイマー0制御用レジスタ(OPTION_REG)の内容である。

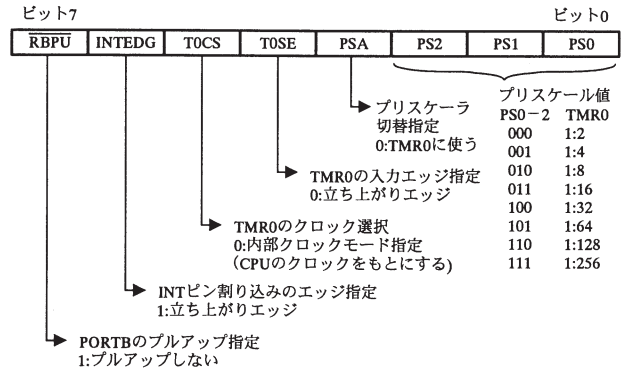


図7 OPTION_REGレジスタの内容

本プログラムでは $F_{osc}=4\text{MHz}$ を使用したもので、この場合におけるタイマー0の動作を図8によって説明する。図8(a)はタイマー0への入力クロックである。パルスの周期は周波数の逆数であるから $\frac{4}{F_{osc}} = 1\mu\text{s}$ となる。プリスケアラ値は図7に示した8通りのみの設定が可能である。いまプリスケアラ値を $PS=32$ に設定すれば、図8(b)に示すようにプリスケアラにおける出力パルスの周期は

$$\frac{4}{F_{osc}} \times PS = 1\mu\text{s} \times 32 = 32\mu\text{s} \quad (1)$$

となる。このパルスがTMR0本体に入力されてさらに分周される。TMR0本体は8ビットのカウンタであり、最大でも得られる周期は

$$32\mu\text{s} \times 256 = 8192\mu\text{s} = 8.192\text{ms} \quad (2)$$

に過ぎない。したがってタイマー0では5ms周期のパルスを得るようにして、これをプログラムにおいて200回カウントして1sの時刻を得るものとする。

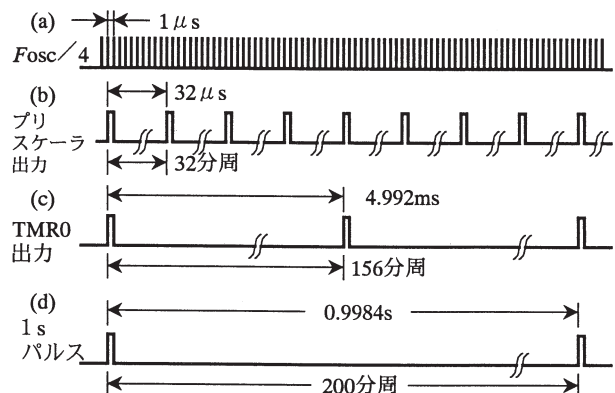


図8 タイマー0による分周動作 ($F_{osc}=4\text{MHz}$ の例)

$$\frac{5\text{ms}}{32\mu\text{s}} = 156.25 \quad (3)$$

であるから、式(3)の値を整数化してTMR0本体が156カウント

した時にタイマー0 から 1 個パルスが出力される (割り込みがかかる) ようにすれば良い。TMR0 本体は 0 から 255 まで順次カウント数が增大していくアップカウンタである。したがって最初に $256 - 156 = 100$ (=64H ; H は 16 進数の意味) を設定しておけば、残り 156 をカウントした時にタイマー0 からパルスが出力され目的を達成できる。

TMR0 本体の設定値としてこの値を用い、さらにプログラムにおいて 200 回カウントするものとすれば

$$32\mu s \times 156 \times 200 = 998400\mu s = 0.9984s \quad (4)$$

となり正確には 1 秒とならない。9 分 59 秒間では

$$0.9984s \times (60 \times 9 + 59) = 598.042s \quad (5)$$

となる。正確には 9 分 59 秒=599 秒であるから計算上の誤差は 1 秒以下 (遅れ) である。

(5) LED のダイナミック点灯制御

PICによって7セグメントLEDを制御して複数桁を表示しようとする場合には、以下のような課題を解決する必要がある。

- a) 7セグメントLEDで3桁表示するためには、最低でも21本のPIC入出力ピンが必要である。しかしPIC16F648Aの入出力ピンは最大16本でありこのままでは対応できない。
- b) すべてのLEDを常時点灯させるようにすると消費電力が大きくなり、特に電池駆動の場合には電池が早く消耗するという問題がある。

上記の課題を一挙に解決する方法が「LEDのダイナミック点灯制御」と呼ばれる方法である。図1に示した回路は、図9に示す7セグメントLED(アノードコモン形)を用いて3桁の数字を表示する回路例である。

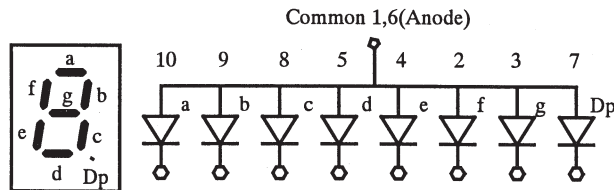


図9 7セグメントLED(アノードコモン)の接続

3個の7セグメントLEDにおける同じ記号のカソード電極は共通に接続(バス接続)し、電流制限抵抗を介してPICの出力ピン(PORTB)に接続している。一方、素子内部で共通接続されているアノード端子は、PNPトランジスタ2SA1015を介してPICにおけるPORTAから出力されるstrobe出力(桁ドライブ)に接続する。PNPトランジスタはエミッタ(E)に対してベース(B)の電圧を低くすると電流が流れるので、strobe出力がLになるとLEDが点灯する。このときstrobe出力が同時にLとならないようにプログラムで制御する必要がある。

図10にストップウォッチで使用するダイナミック点灯制御(3桁の場合)のタイミングチャートを示す。1秒の桁におけるデータを出力した後1秒の桁ドライブ信号(strobe信号)を5ms間Lにして1秒のLEDを点灯させ、その後10秒桁、1分桁についても同様に行う。その後は同じ動作を繰り返す。

このようにすると、ある瞬間では一つの桁だけが点灯してい

るが、人間の目には「残像現象」があり、一度光を見ると光が消えた後も約100ms程度はその光を連続して見ているように錯覚し各桁が連続して点灯しているように見えることになる。

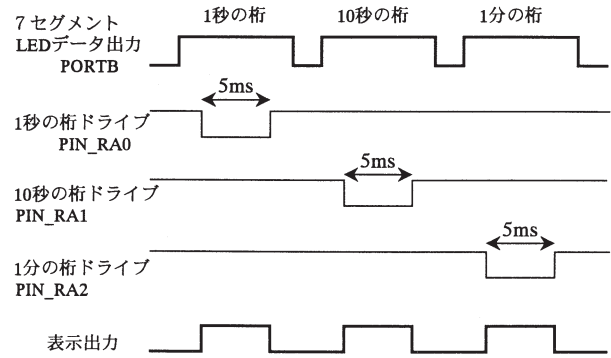


図10 ダイナミック点灯制御のタイミングチャート

図11にダイナミック点灯制御のフローチャートを示す。5ms毎に割り込みがかかるので、この度に変数COLUMNの値を1→2→4→1→・・・と巡回させ点灯を制御する。関数の冒頭で全LEDを消灯させ、その後COLUMNの値にしたがって1桁ずつ点灯させている。最初はこの部分をメインプログラムにおける網掛けを施した部分に挿入していたが、期待通りの動作にならなかったためISRに移行させた。

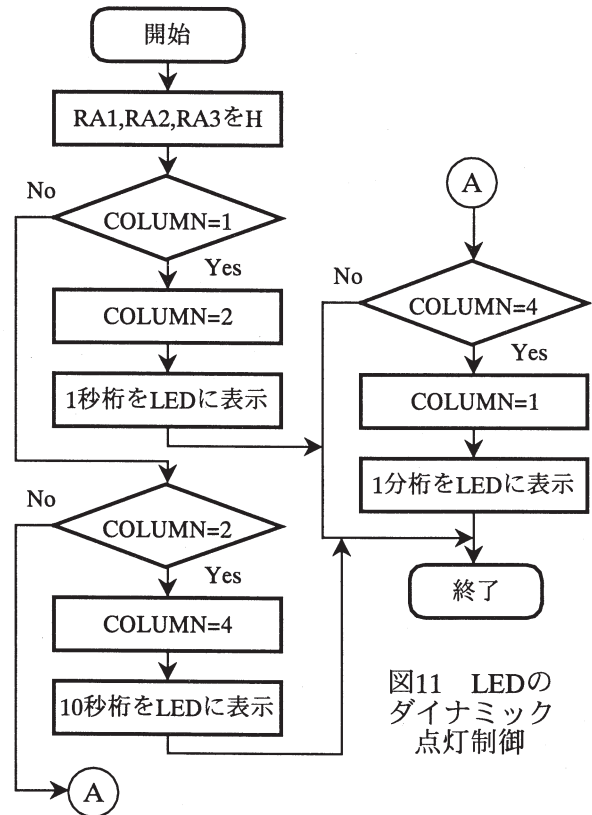


図11 LEDのダイナミック点灯制御

(6) バイナリ→BCD変換

0~9分59秒の時刻データを秒単位で表すと0~599秒になる。この時刻データを、ISRにおいて2個の1バイト変数SEC_CNT(下位バイト)およびSEC_CNTH(上位バイト)にバイナリデータとして格納している。したがってLEDに表示する前に、バイナリデータをBCDデータ(MINT, SEC_HIGH, SEC_LOW)

に変換して、各LEDに対応させておく必要がある。

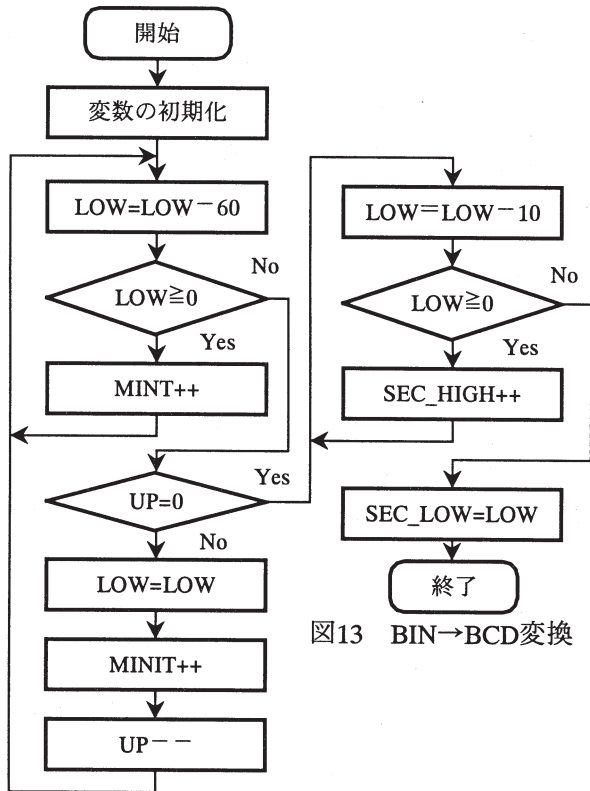


図13 BIN→BCD変換

図13がBIN→BCD変換プログラムのフローチャートであり、文献 [2] を参考にして作成した。LOWはSEC_CNTを格納する一時変数、UPはSEC_CNTHを格納する一時変数である。処理は以下ようになる。

- ① まず、最初のブロックではLOW=SEC_CNTから差が負になるまで60を引いていき、引くことができた回数をMINITに格納する。
- ② 次のブロックでは、もし上位桁UP=SEC_CNTHが0ならばこれ以上引けないので、10秒桁を求めるために④に移る。
- ③ 0でなければ、上位桁から借りてくることにより60が引けることになる。ここでLOWの値として1番目のブロックで計算した負になっているLOWの値を用いるが、この理由については(7)において説明する。
- ④ 3番目のブロックでは、すでにUP=0となっている。この条件下でLOWから10を引いていき、負になるまで引き続けていって10秒桁を求め、

ビット		
7	6543210	
1	00000000	+256
0	11111111	+255
0	11111110	+254
	:	② :
0	10000001	+129
0	10000000	+128
0	01111111	+127
0	01111110	+126
	:	:
0	00000100	+4
0	00000011	+3
0	00000010	+2
0	00000001	+1
0	00000000	+0
1	11111111	-1
1	11111110	-2
	:	① :
1	10000001	-127
1	10000000	-128

図14 2の補数による符号付き2進整数

これをSEC_HIGHに格納する。

⑤ LOWの残りをSEC_LOWとする。

(7) 上位桁からのボローの計算

(4)の③において、UPが0でない場合にLOWの値として1番目のブロックで計算した結果として負になっている値を用いるが、これは以下の理由による。

図14は、2の補数による符号付き2進整数を表したものである。ビット7が1となるブロック①は8ビットにおける-128~-1の負数を表すが、これらのブロックにおけるビットの並びは+128~+255を表すブロック②における並びと全く同じである。ブロック①②はUPの値によって識別できる。このためUP=1が確認できれば、(6)③のような計算を行っても差し支えないことが分かる。

(8) 時刻データにおける最大値のチェックと初期化

時刻データが最大値599になったとき、各種の変数を初期化する必要がある。これを図15に示すフローチャートに従って行っている。

	cba	gfed
0	0001	1000
1	0011	1111
2	1001	0100
3	0001	0110
4	0011	0011
5	0101	0010
6	0101	0000
7	0001	1111
8	0001	0000
9	0001	0011

図16 LEDのデータ

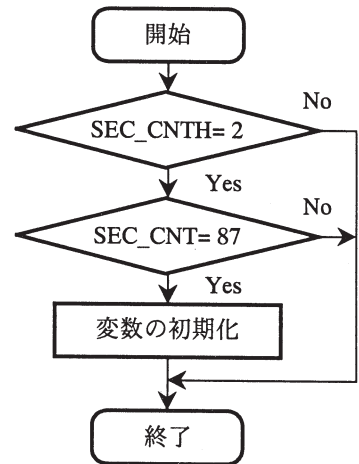


図15 時刻データの最大値の検出

(9) BCD→7セグメント変換

アノード共通形の7セグメントLED (GL9A040G) を使用している。ピン配置を考慮してポートBの出力データを図16のように設定した。カソード共通形におけるデータのビットを反転して呼び出すことを基本としているが、配線の都合上から上位4ビットと下位4ビットを交換している。

(10) ボタン押下の検出

start/stop SW が押されたか否かをプログラムで検出するときに、接点がついたり離れたりする「チャタリング」が生ずる。

本プログラムでは、このためいったん入力の変化を検出してから、チャタリングが終了するのにかかる時間であると予想される5msの間タイマーを入れて待つようにした(図17)。その後再度データを入力し、最初に検出したデータ(0)と同じデータ(0)であることが確認できた場合に次の処理に進むようにした。もし再度確認した時にデータが1であれば、上記の条件が満足されるまで待つようにしている。

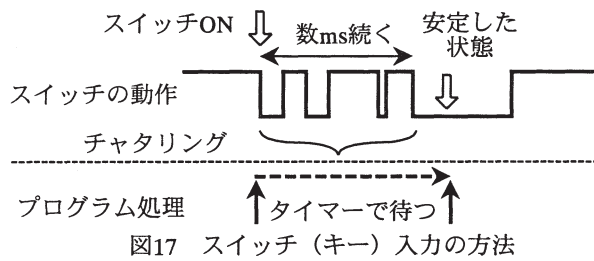


図17 スイッチ（キー）入力の方法

なお実際のタクトスイッチを押した場合の動作を測定したところ、チャタリングは予想よりは少なかったものの、Lとなる時間が最低でも約100msと長いことが分かった。このためスイッチを押して離してもすぐ応答せず、反応が鈍いという症状が出て使い勝手が良くなかった。そこで再読込後 PORTA の RA0 を強制的に H となるように制御している。

4. 試作結果および高精度化の検討

(1) 全部で 10 台試作した。市販のストップウォッチと比較しながら 9 分 59 秒間のカウント試験を行ったが、最悪 10 秒程度の誤差の出るものがあった。そこで以下の検討を行った。

(2) プログラムにおける流れの見直し

大きな誤差の出る原因は、図3のフローチャートにおいて「1s計測カウンタのデクレメント」～「最大値チェック」の部分をISRに入れており、時刻のカウント値によってISRの処理時間の異なることが一要因と考えられる。特に1秒経過後の処理時間が大きい。このため、「1s計測カウンタのデクレメント」以外の部分をメインプログラムの網掛けを施した部分に再度移行してみた。

なおタイミングを制御するためにISRに変数 start_flag を導入し、ISRがコールされたときにこの変数を H とし、メインへ移行した部分を抜ける時に L となるように変更を加えた。この手法は、LD-CELP コーデックで取った手法³⁾と同じである。

この結果、処理の流れによってISRの処理時間が大きく変化することはなくなった。またLEDのダイナミック点灯制御も問題なく実行できた。

(3) 内蔵クロック周波数の測定

(2)の変更を織り込んだプログラムを2号機に書き込み、カウント試験を実施してみた。しかしながらシミュレーションではISRのコールされる周期が5msになっており、しかも処理によってほぼ一定であることを確認できたが、9分59秒の試験では6秒程度進んでいた。動作時の電源電圧は2.48Vであった。旧プログラムを使用した1号機の電源電圧は1.9Vにまで低下していたが、同じ試験を行ったところ1秒以内の誤差であった。

そこで2号機のクロック周波数をテストポイント(15番ピン)において測定してみたところ、電源電圧2.7V～2.3Vにおいて1.0093MHz～1.0089MHzであり、1%ほど進んでいた。消費電流は70mA～20mAであった。

(4) 外付け32.768kHzクロックへの変更

試作した結果では電池の消耗がかなり激しく、また内蔵クロ

ック周波数の精度が良くないことが分かった。このため外付けの32.768kHz水晶振動子を用い、周波数の低下による低消費電力化と、TMR0カウンタの再設定を不要とさせる高精度化を図ることにした。プログラムの変更点は以下の4点である。

- ・コンフィギュレーションでLP_OSCに設定
- ・PCONレジスタをコメントアウト
- ・OPTION_REGにおいてPSA=1に設定
- ・TMR0カウンタの初期値をTO_SETDATA=0に設定

以上の設定により、タイマー0割り込みの周期は256クロック(31.25ms)となり、カウンタの再設定は不要となる。

このプログラムを4号機に実装して9分59秒のカウント試験を行ったところ、約1秒の進みであり精度が向上した。このときの電源電圧は2.48V、電流は12mAである。精度は向上したものの、ダイナミック点灯の周期が31msと長くなったため、チラツキが非常に気になるようになってしまった。

そこで、ダイナミック点灯制御の流れを図18のように変更した。上部の数字はクロック数である。ポイントを以下に示す。

- ① 図11において、冒頭における全LED消灯から各桁LEDの点灯までの時間をNOPにより調整し、同一となるようにした。
- ② strobe出力がLとなる期間を5msに調整するために、3.54ms(29クロック)のタイマーを後続させた。
- ③ 1桁を表示後、全LEDを消灯させ、各桁の点灯時間を等しくなるようにして、各桁が同じ明るさで点灯するようにした。
- ④ その後 start_flag を 0 とし、割り込み待ちに入り、ISR と タイミングをとっている。この時間は1秒経過後のバイナリ→BCD変換に要する時間を稼ぐために必須である。

まだ4MHzクロックの場合に比べると幾分気にはなるものの、実用上問題のないチラツキに抑えることができた。

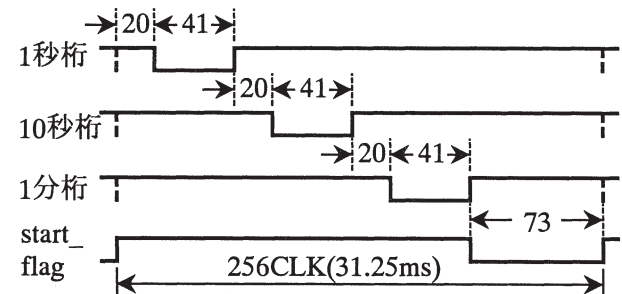


図18 ダイナミック点灯制御のタイムチャート

5. むすび

PIC16F648Aを使用したストップウォッチの設計と試作結果について述べた。

[参考文献]

- 1) PIC16F627A/628A/648A Data Sheet Flash-Based, 8-Bit CMOS Micro controllers with nano Watt Technology
- 2) 後閑哲也, “改訂版 電子工作のためのPIC16F活用ガイドブック”, 技術評論社, 平成19年
- 3) 袴田吉朗, 溝口真規, 緒方渉, 菅野純一, “LD-CELPアルゴリズムを適用した音声CODERの開発”, 静岡理科大学紀要, 第11巻, pp.35-59 (2003)

東海地震に備えた小型レスキューロボットの検討

A Survey on Trends of Rescue Robots for Tokai Earthquake.

見崎 大悟*

Daigo Misaki

Abstract: Japan is an earthquake-prone country. Tokai Earthquake of magnitude 8 is predicted in wide Pacific Ocean side in Japan. Our University is located in center of this area. The rescue robots of different types are proposed, to searching for survivors quickly in the collapsed buildings. However, we can come to conclusions, that many of the proposed rescue robots are not so easy to manufacture, they are not movable or mobile enough to server in broad area such as disaster area of Tokai earthquake, and also they are too large and expensive. Considering all problems, we develop the micro rescue robots which matched the features of earthquake disaster. These micro rescue robots which have a simple locomotion mechanism and IR sensor module or CCD camera have been developed to identify survivor position under collapsed buildings. The basic experiments of automatic navigation and remote control navigation to the human are carried out with simple on-off motor switching. The simple design layout results is not only light weight robots but also allowing employment of a large number of robots

1. 諸論

近年、阪神・淡路大震災での兵庫県南部地震や新潟県中越地震、スマトラ島沖地震などの大型地震が相次ぎ、地震災害に対する懸念が強まっている。大型地震によって発生する大規模災害では被害者の迅速な救助が常に求められており、迅速な救助は2次災害発生時の被害を最小限に抑えることができる。しかし、災害地での救助作業は、多くの危険が伴い救助している側が2次災害に遭遇する危険が高い。また、東海地震に代表される大規模・大災害では被災者数が膨大でありまた被災規模が広域にわたるため人的救助には限界があり、大型救助機械等も被災者の近辺にたどり着くまでに時間がかかるため迅速な救助は非常に困難であるという問題点がある。

地震発生時に生じる被害の大半は、建物の倒壊による生き埋めである。静岡県の分析によると、東海地震発生時には、県内で約3万人の生き埋めの被災者が発生すると報告されている。このような生き埋め状態では「72時間」がひとつの壁と目されており、72時間以内に救助できるか否かで被災者の生存率が大きく変わってくる。新潟県中越地震での土砂崩れで生き埋めになった家族の救助には92時間を要しているおり、レスキュー隊への救助要請があった時点で既に72時間が経過していた。発見、救助要請がもっと早ければ家族全員が助かった可能性もあるという。

地震による間接的被害として津波被害も考えられる。前述のスマトラ島沖地震の被災者の9割が津波によるものである。津波による被災者は、押し寄せた波の衝撃により

気絶し、気絶したまま流されて海上で溺死してしまう場合が多い。このような場合、早期に発見すれば助かるケースも多い。しかし、海上での津波被災者の救助活動は救助船からの目視による被災者の探索が通常だが、津波被害の直後は津波による漂流物により小型船舶の海岸付近への接近、侵入が困難であり、また多数の浮遊物が発生するため目視による探索では被災者の発見、判別が非常に困難であるため救助活動が難航する。近年日本で発生した地震による津波で被害を伴ったものは2003年の十勝沖地震（被災者2人）であり、他にも複数地震によって津波が発生している。東海地震でも、高い確率で津波が発生することが予測されており、津波による被災者が発生すると予測されている。

これらの大規模災害においては、迅速な被災者探索活動が最も重要であると考えられ、近年は大規模災害時における迅速な被害者救助方法が各地で考案され、実用化されている。そのひとつとして現在おこなわれているのが救助犬をもちいた被災者探索活動である。救助犬は特別な訓練を通過し、災害時、被災者の位置をすばやく探知することができる。しかしながら救助犬は特別な訓練を課するため地域配備の頭数が少ない、訓練・育成に時間がかかる、疲労・集中力などから長時間の探索に向かないなど様々な問題がある。平成13年10月末現在、静岡県で登録されている救助犬は24頭であり、県内全域をカバーするにはあまりにも頭数が少ない。そして例え人間でないとはいえ2次災害に遭遇する確率が高く、非常に危険である。そこで救助

2008年3月31日受理

* 理工学部 機械工学科

犬にかわり、ロボットによる被災者救助、探索支援が考案され、各地の大学、企業など多くの研究機関でレスキューロボットの研究、開発が進められている。実際、2001年ニューヨークで起きた「同時多発テロ」での貿易センタービル倒壊現場において、開発中であったレスキューロボットを投入し、被災者を発見した事例も存在する。⁽¹⁾

レスキューロボットはその所持機能により、主に「探索」と「救助」の2つに区分、特化される。救助用レスキューロボットは東京消防庁の「ロボキュー」や株式会社テムザックの「T-52 援竜」など、災害現場において倒壊家屋や瓦礫を撤去し、被災者救助のための空間を作成することを目的とするロボットである。しかしながらこれらは瓦礫撤去のための大きな力が必要となり、必然的に機体が大型化し、開発コストが膨大化する。また機体が大きいため、運搬が非常に困難であり、大規模広範囲災害、東海地震のような災害現場では、被災地にたどり着くのも困難であると考えられる。索用レスキューロボットは東京工業大学広瀬・米田研究室の開発した「蒼龍」やロボット探索救助支援センター(CRASAR)の開発した探査ロボットなど、災害現場などの不整地の走行を可能とし、搭載された様々なセンサーやカメラを用いて被災者を探索することを目的としたロボットである。先に述べたとおり、ロボット探索救助支援センター(CRASAR)の開発した探査ロボットは実際に貿易センタービル倒壊現場において搭載されたカメラで被災者を発見した実績を持つ。しかしながらこれらの機体は開発が進むほど機体構造が複雑化し、開発コストが膨大化するため、大量生産が困難であり、必然的に1機の探索範囲が広がってしまい広範囲をカバーすることが不可能になってしまう。

以上のようにさまざまなレスキューロボットのプロトタイプが研究・開発されているが、多くの研究成果が大都市・大規模・大災害を想定しており、東海地震のように広域に被災地が分散するようなケースが発生した場合に、実際にそれらのロボットが出勤、活躍するといったシナリオの実現は困難であることが考えられる。また上記のロボットはすべて陸上での救助・探査活動を目的としており、津波被災者を救助・探査するようなロボットを研究している機関は少ない。そこで本研究では、我が静岡県で発生が予想されている、東海地震の特色を分析した上で、その特色にあわせたロボットレスキュー活動の提案・開発をおこなうことを研究目的としている。

2. 東海地震に備えたレスキューロボット

2.1 東海地震の特徴⁽²⁾⁻⁽⁵⁾

日本列島付近では4つのプレートが相互に接し、それらの境界で日本海溝、相模トラフ、南海トラフが形成されている。太平洋プレートは毎年西に約10cm、フィリピン海プレートは毎年北西に3~5cm程度の速さでそれぞれ動き、日本列島の下に潜り込んでおり、これにユーラシアプレ-

トなどの大陸側のプレートの端が引きずりこまれ、歪みのエネルギーが徐々に蓄積されている。この歪みが限界に達し、元に戻ろうとするときに破壊が起こり、巨大なエネルギーが放出され巨大地震が発生する。こうした海溝型の巨大地震は歴史的にもかなり規則正しく一定の間隔で発生しており、その前兆から発生メカニズムまでも研究されている。

駿河湾から九州にかけての太平洋沿岸地域では100年から150年周期で南海トラフでの海溝型地震がほぼ同じ場所、同じ規模で発生している。駿河湾から御前崎付近、いわゆる遠州地域は過去1854年に発生した安政東海地震(マグニチュード8.4)以来大型地震が発生しておらず、地震活動の空白域と呼ばれプレート境界での歪みが臨界状態まで蓄積している可能性が高く、いつ巨大地震が発生してもおかしくない想定されている。これが東海地震である。

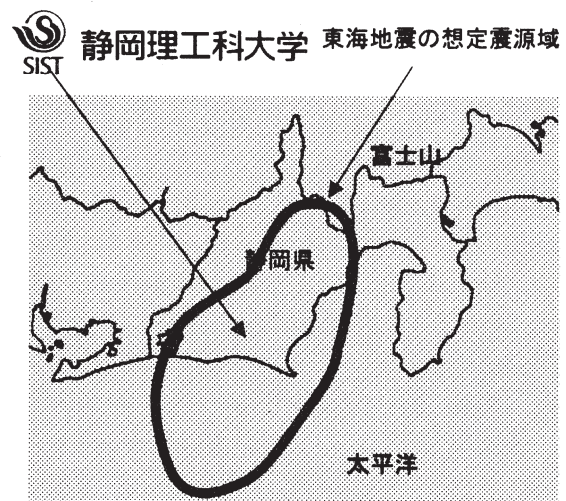


図1 東海地震の想定震源域

東海地震が発生した場合、震度5以上の揺れが愛知県～神奈川県周辺まで発生し、震源部静岡県では全県で震度6弱以上、最大震度7強の揺れが発生すると予測されている。図1に示すように想定震源域である駿河湾および駿河湾トラフの大半は海であり、地震が起こった場合、大規模な津波被害も予測されている。最大津波高さは10数m程度、遠州灘で3~7m程度、伊豆半島南部で5m程度、伊豆半島東部で3.4m程度と予測され、発生した津波は紀伊半島～房総半島にまで達し、津波での浸水被害は最大で38km²以上と予測されている。しかしながら静岡県域海岸線では防波堤や水門など既に9割以上の区域で津波対策が実施されている。このため津波による被害者はスマトラ島沖地震等に比べると少なくなると思われる。ただ震源周辺域では地震発生から津波到達までの時間間隔がほとんど無いため手動水門の閉鎖をする時間が無いことや、地盤の液状化によって防波堤としての機能を失う地域などが一部存在

するなど、早急な対策が必要となる部分も残されている。また夏場の海水浴シーズンなど、海岸域に人が集まりやすい期間に津波が発生した場合、想定被害者数は数倍に増えると予測されている。

東海地方は歴史的に地盤が弱い箇所が各所に多数存在しており、マグニチュード8以上の地震が発生した場合、静岡県内で最大 1000k m²の範囲が液状化、建物倒壊数は13万棟以上、要救助者数は2万8千人以上と予測され、これに対する推計被害総額は26兆円と予測されている。また静岡県内には富士川河口断層帯という断層が存在する。この断層帯は富士川河口から富士山南西山麓にかけてほぼ南北に延びる約20kmの断層帯であり、南方の駿河湾中のプレート境界断層に続いていると考えられている。東海地震はこのプレート境界により発生するため、地震が発生した場合、この富士川河口断層帯も同時に地殻変動を起こす可能性が極めて高いとされ、この時の断層変位量は最低7m以上と予測されている。この規模の地殻変動が発生した場合、東西の流通陸路が寸断され、物流が停止し大規模な経済的混乱の発生が懸念されている。これらの復旧には、緊急輸送用に限った場合でも1週間以上の期間が必要とされ、完全に復旧するまでには最短でも半年以上の期間が必要とされている。交通のみならず、電力、水道といったライフラインの復旧についても最低1ヶ月以上の期間を要すると予測されており、これら被害による避難民の数は最大119万人、1ヶ月後でも56万人が避難所での生活を余儀なくされると予測されている。

2.2 袋井市で予想される被災状況

静岡県全体で見た、本学の位置する袋井市の被害規模を比較する。地震による被害は、発生する地震の大きさだけでなく、その地域の地盤の特性に大きく影響を受ける。震源地の地盤は主に第1種地盤、第2種地盤、第3種地盤の3つに分けられる。表1のように袋井市は第2種及び第3種地盤が静岡県全体から比べ多いことがわかる。特に地震に弱い第3種地盤が県全体では2%であるのに対し、新袋井市に当たる2市町の平均では26.6%と1/4以上が軟弱地盤である。これらのデータは想定震度に反映されている。推定震度を表2に示す。県全体では震度6弱以内と想定されている地域が8割程度に対し、袋井市では6強以上と想定されている地域が8割程度であり、深刻な事態が予想される。図2に示す袋井市による推定震度分布図によると袋井駅北西部の地域で特に大きな被害が予想されている。昭和19年12月7日に起きた東南海地震では、県内では袋井市の被害が死者122人と一番大きく、その理由は、地盤にあったと考えられる。粘土質の地盤であるため、揺れが大きく、そのため家屋の倒壊などによる被害が大きかった。

表1 静岡県内の地盤状況

	面積	第1種地盤	第2種地盤	第3種地盤	
静岡県	7713.9km ²	63.1	34.9	2.0	
旧袋井市	80.12km ²	2.9	70.4	26.7	
旧浅羽町	28.46km ²	0	73.5	26.5	
総面積	108.58km ²	旧2市町平均	1.45	71.95	26.6

3種区分地盤種(面積率:%)
 第1種地盤:良好な洪積地盤及び岩盤
 第2種地盤:第1種・第3種に属さない洪積・沖積地盤
 第3種地盤:沖積地盤のうち軟弱地盤

表2 静岡県内で想定される地震被害規模

震度	5強	6弱	6強	7
静岡県	5.0	74.4	18.9	1.7
旧袋井市	0	20.7	55.8	23.5
旧浅羽町	0	24.1	43.9	32.0
旧2市町平均	0	22.4	49.95	27.75

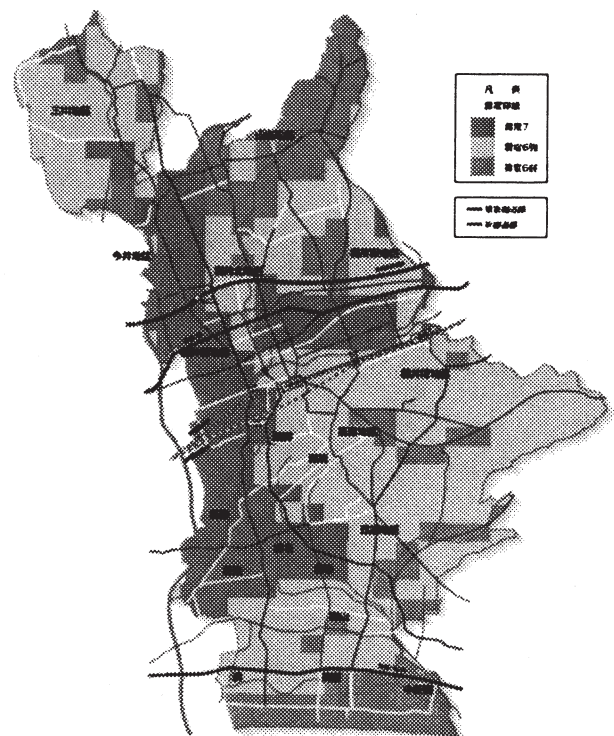


図2 袋井市の予想される地震分布⁽⁵⁾

また、地盤の問題点としては、液状化現象があり、記憶に新しい、阪神・淡路大震災、鳥取県西部地震、芸予地震でも液状化が大きく報道されている。液状化現象がクローズアップされたのは、昭和39年(1964年)に発生した新潟地震である。それまで建物を支える地盤として信頼されていた厚い砂層が、一瞬にして軟化したために、新潟では多くの建物や橋が沈下または倒壊してしまった。

液状化現象とは、地盤の中には土の粒子が重なり合っており、この土粒子はかみあっていて、地下水位以下の地盤ではそのすきまの中に地下水がある状態となっている。ところが、地震によって左右に揺られると、土粒子のかみ合わせがじょじょにはずれてゆき、ついには土粒子がばら

ばらになり、地下水の中に浮いたような状態になることをいう。

液状化による被害は、主に次の2つに分類される。

- (1) 地盤の支持力が低下することにより発生する建物等の沈下や傾斜
- (2) 噴砂（水と砂が地中から噴き上げてくる現象）などによる被害

最も液状化する可能性のある地盤は、砂地盤であり、しかもゆるい砂地盤で、さらに地下水が地表面付近の浅い深さに存在しているような地盤である。逆に砂地盤であっても、地下水に浸されていない砂地盤では液状化が起こりにくいとされている。袋井市では7割程度が危険度小から大であり、袋井駅周辺や河川沿いが特に液状化の危険度が高いことが報告されている。袋井市に関する災害予想のデータは、県内の他の地域と比べて極めて大きく、地震発生時には大きな被害が予想される。

2.3 レスキューロボットの研究とその問題点

緒論でも述べたように、現在各地で研究、開発の行われているレスキューロボットは、その所持機能や目的によって2つに大別することができる。

1つはマニピュレータなどで被災地の瓦礫や倒壊物を取り除いて救助空間を作り出し、実際に被災者を救助、運搬する救助型レスキューロボット、そしてもう1つはセンサーやカメラなどで被災地での被災者探索作業を主目的とする探索型レスキューロボットである。前者はその目的から倒壊物を取り除くための力と2次災害の発生を防ぐ器用さが求められる。特に大きな力を発生させるためにロボット自体が大きくなる傾向があり、その分開発コストが膨大となる。また世界貿易センタービル倒壊現場のように、被災者の近辺まで容易に運搬、接近できる状況以外にはロボットの使用が困難であると思われる。またその運搬には別途専用の機材、運搬車を用意するケースが多く、その分余計に開発費用・期間がかかってしまう。このように救助型レスキューロボットは運用現場が限定される傾向、かつ開発、運用コストの問題から研究、開発している機関は極限られる。他方、探索型レスキューロボットに求められるのは優秀な探索能力と長時間の連続稼働である。被災地で人間や救助犬が侵入できない空間にも侵入する必要があり、また長時間の連続稼働を可能とするために必然的にロボット自体が小さくなる傾向にある。そして探索型レスキューロボットは災害救助以外にも様々な応用、活動の場が存在するため現在多くの機関で研究、開発が進められている。図3にレスキューロボットの研究マップを示す。レスキューロボットの多くは、探索という目的からセンサーやカメラなどを数種類、複数装備している物が多く、またその制御

回路など合わせて非常に複雑な構造をしている物が多い。そのため単機、もしくは数機しか製作しておらず、大量に生産しようとした場合、大変なコストと時間が必要となる。どんなに高性能な探索ロボットであっても、単機で実際に探索できる範囲は数㎡程度であり大規模広域災害の場合、被害範囲が広域でしかも被害者が膨大な数の現場では活躍しづらいと考えられる。また高機能であればあるほどロボットが高価になってしまい、ロボットが2次災害に遭ったときの費用も無視できなくなってしまう。これらの事項を踏まえ東海地震のような大規模広範囲災害において、有効に活用できるロボットの条件を考える。

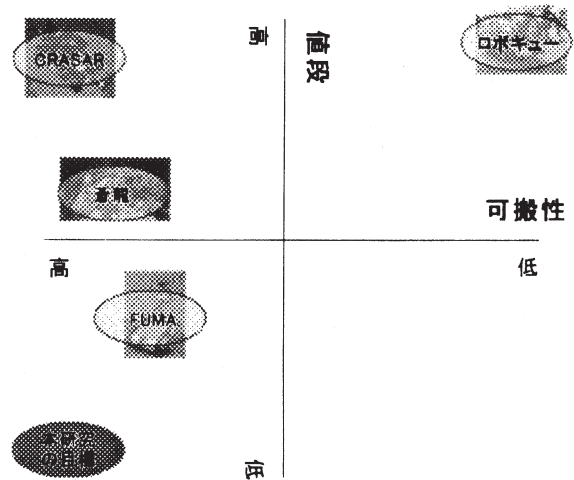


図3 レスキューロボットの研究マップ

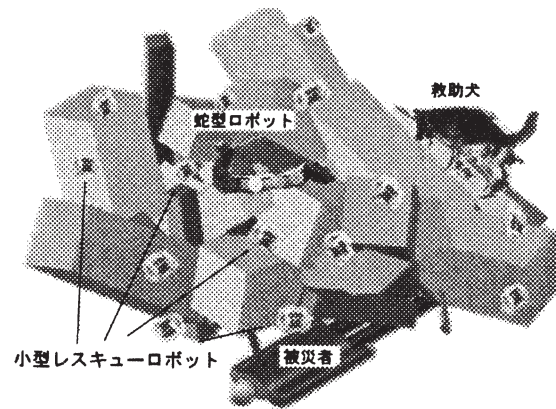


図4 本研究で想定する被災者探索活動

2.3 提案する東海地震に備えた小型レスキューロボットを用いた救助活動

本研究で提案する救助活動は広範囲、多人数の被災者を「高性能な数体のレスキューロボット達」ではなく、図4に示すように「単純、単機能の大量のレスキューロボット群」で探索し、その位置情報を伝達し、救助隊をその場所へ送るといったものである。東海地震においてその被害規模は静岡県のみならず、隣県の愛知県から神奈川県にまで及び、迅速な救助を要する被災者は2万8千人以上と予測さ

れている。また同時に起こる可能性が高いと思われる断層隆起の影響で交通網は寸断され、運送車の被災地への侵入も困難な状況になるであろうと推測される。このような状況下でどうやって大量のレスキューロボット群を被災地に投入するか。現在検討しているのは「輸送飛行機（ヘリコプターなど）からの空中投下」を考案している。開発中のレスキューロボットは空中から投下しても、破壊、故障せずに探索活動を開始することが可能な構造を開発する。

3. レスキューロボットの設計仕様の検討

3.1 設計仕様の検討

緒論で述べたとおりロボットの運搬、保守、保管やメンテナンスが容易であること、人や救助犬が侵入できない狭く危険な場所に投入、進入可能であること、単機で広範囲を探索するのではなく、狭い範囲を数で補うという想定から安価で大量生産しやすいシンプルな構造であること、災害現場という過酷な状況下に置いて簡単に破壊、故障してしまわない頑丈な構造であることというコンセプトを元に、以下のような条件が必要であると考えられる。

(1) 小型

特殊な機構を用いず標準状態で瓦礫などの下を移動するために、可能な限り小型化する。

(2) 安価

現在提案されているレスキューロボットの多くは、一台辺りのコストが数十万から数百万単位である。大量生産する為にはこの数十から数百分の一程度、可能な限り低コストであることが望ましい。

(3) 自給式

災害現場に投下するため、外部から有線でのエネルギー供給や電源補給は困難である。その為、内蔵電源の有効的利用や普遍的エネルギー（太陽エネルギー）を用いた電源補給の方法などを用いる。

(4) 自律被災者探索

多数のロボットを投下するためそのすべてを人間が制御することは困難である。その為、ロボット自身が自律して被災者を探索する機構を備える必要がある。またそれを補うために遠隔地からロボットを制御するソフトや回路もあわせて開発する。

(5) 破壊、衝撃に強い構造

上空から投下する、被災地という過酷な状況、2次災害の発生の可能性などを考慮し、それに耐えうる構造が必要となる。

(6) 単純、大量生産可能な構造

広大な被災範囲が予測されるため、ロボットは短期間で大量に数を揃える必要がある。

これらの条件を満たすために、生産、組み立て簡単でかつ高性能な機体を開発する必要がある。本研究では上記の条件を満たす陸上及び海上探索用小型レスキューロボットの設計を行う。

3.2 小型レスキューロボットの検討例

3.3.1 振動モータをもちいた跳躍式移動機構型ロボット

本研究で設計した小型レスキューロボットの移動メカニズムは「振動推進」⁽⁶⁾⁽⁷⁾である。振動推進とは移動機構自身に振動発生源を搭載し、その振動を利用することで物体を移動させる方法である。ロボットに用いるアクチュエータは携帯電話等に使用される扁平型マイクロ振動モータを使用することにより低消費電力、低コスト、小サイズでの振動推進機構を実現している。扁平型（コイン型）振動モータは内部に半円形の回転子を用いて、回転子の重心を偏らせた状態で回転させることで遠心力が発生し、振動を得ることができる。この時発生する遠心力は回転子の回転軸に対して垂直方向に均一に作用する。この遠心力を利用し、常に特定の方向に力を作用させるために振動モータを移動面に対して一定の角度を持たせて移動体に配置することにより、移動体の進行方向と逆方向で摩擦差を生じさせることにより、移動体は特定方向に移動する。このロボットの振動推進モデルを図5に示す。前進時は遠心力が移動体の垂直成分上向きに作用することで移動体の垂直効力が減少する。つまり移動体が移動面から受ける摩擦力が軽減され、移動速度が上昇する。逆に後退時は、遠心力が垂直成分下向きに作用するため、移動体の垂直効力が増加する。その結果摩擦力が増加し移動体の移動性能が低下する。振動モータが1回転する毎に前進後退の動作をする。と仮定すると、移動体に作用する摩擦力は前進時<後退時であることから、移動体の変位量は前進時>後退時となる。この時の変位差が移動体のスタートからの走行距離に相当する。また振動モータを横方向に並列に配置し、それぞれのモータを逆回転で駆動させることにより進行方向に対して垂直横方向に働く力を打ち消しあっている。そして左右片方のモータを停止させることにより旋回運動が可能としている。右旋回の場合は進行方向右側のモータを停止、左側のモータを駆動させ続けることで右方向に旋回することができる。逆の場合も同様である。また振動モータの振幅を板ばねにより増幅させることにより、移動体の移動速度を向上させている。外郭は立方体フレーム構造になっており、左右を除いた4面どの体勢で設置しても常に駆動可能な設計となっている。図6に実際に作成したロボットの外観を示す。また、図7はロボットを構成する基本的な部品を示し、十数個の部品から構成される単純な構造であることがわかる。

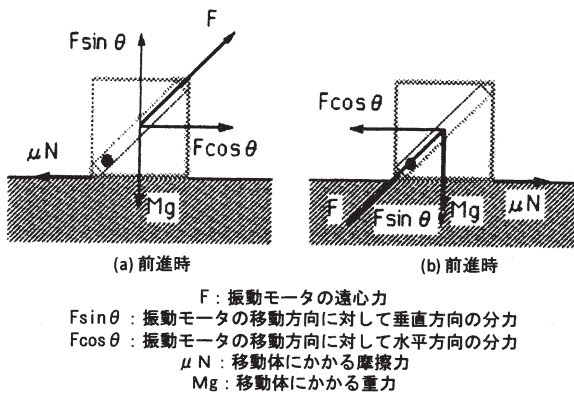


図5 振動推進モデル

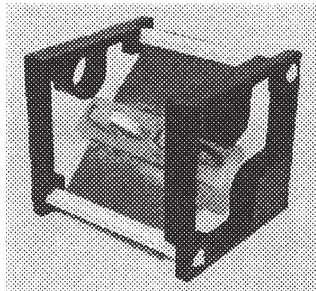


図6 作成したロボットの外観

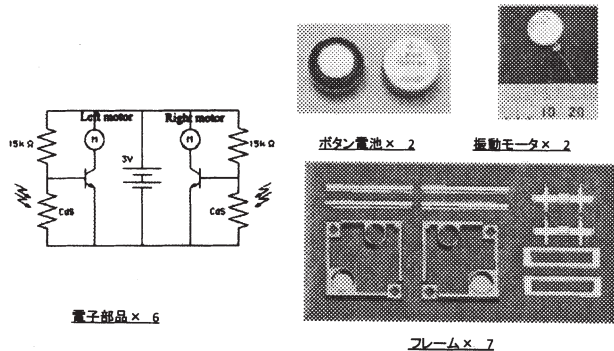


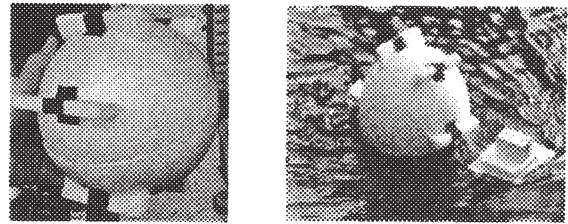
図7 ロボットを構成する基本部品

3.3.2 無方向性の特徴を持つ水上レスキューロボット

小型レスキューロボットのコンセプトに加え、水上探索を行う場合、前述の通り海上には漂流物が多数存在する。このため一般的なスクルーやポンプなどによる推進機構では、漂流物を巻き込んでしまう可能性があり、動作に支障を来す恐れが高い。そこで外部に露出しない駆動機構を備える必要がある。本研究で設計した水上小型レスキューロボットの移動メカニズムは「偏心推進」である。偏心推進とは移動機構の重心を一定の位置に偏心させ、重力によって元の位置に戻ろうとする力を利用することで物体を移動させる方法である。

本研究では、球体フレーム内部の重りを一定の方向にアクチュエータによって移動させることにより、重心を移動

させ、外郭の球体フレームを回転させている。駆動前の状態では、錘(重心)は接地面に対して垂直方向に存在する。これを進行方向に対して平行な位置に移動させると、錘に働く重力によって重りは再び元の位置に戻る。この時、外側の球体フレームが回転し、球体フレームと水面の抵抗によってロボットは移動する。この方式は消費電力を抑え、長時間駆動が可能となり、また移動機構の作用不能状態に陥りにくいという特徴がある。また錘を進行方向に対して左右方向にずらすことにより、左右方向への旋廻を可能としている。外郭は球体フレームを採用することにより、常に一定の状態を着水し、移動の無方向性を実現している。



(a) 水上レスキューロボットの外観 (b) カメラを搭載した水上レスキューロボット

図8 水上レスキューロボット

3.3.3 小型ロボットをもちいた探索例⁽⁸⁾

本研究で提案する小型レスキューロボットは、図4で示した被災者探索のシナリオに基づき、大量の小型ロボットが瓦礫の下に生き埋めになった被災者を探索する事が要求される。本研究では、基礎実験として、離れた位置にいる人を、自動でロボットが探索をおこなう機構を開発・検証する。

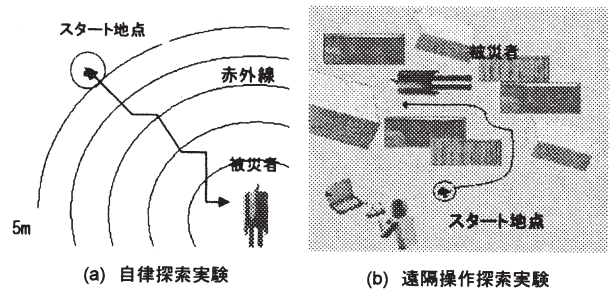


図9 小型ロボットを用いた被災者探索方法

(1) 自律探索による検索方法の検討

ロボットに搭載する自律駆動用の回路を設計する。開発するレスキューロボットは被災者探索が主目的であり、そのために人間を検知するセンサ系を搭載する回路を設計するのが最終目的である。本研究では人体感知センサとして焦電型MPモーションセンサ NaPi0n(松下電工)を使用する。このセンサは周囲と検知対象との温度差によって生じる赤外線の変化を検知する。特に人間の体温に合わせて検出範囲が設計されているため、人体を検知するのに適し

ている。センサの最大有効距離は 5[m]である。図 1 0 に示すようにロボットの回路には MP モーションセンサを左右それぞれに 1 つずつ用いており、センサが周囲との温度差を感知した場合、トランジスタに流れる Base-Emitta 間電流が遮断され、そちら側の振動モータが停止し、旋回動作を行い人体に向かっていくように回路設計されている。図 1 1 にロボット制御のモデル図を示す。この回路は両センサが赤外線の変化を感知した場合には、双方の振動モータに電流が流れないためロボットは停止状態のままである。

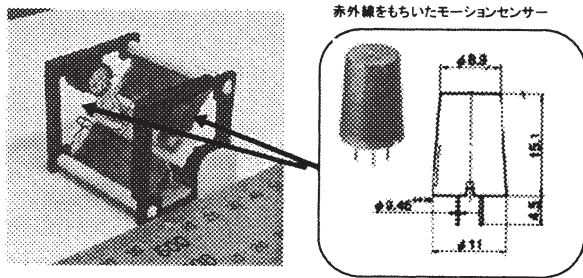


図 1 0 小型ロボットの自律誘導の手順

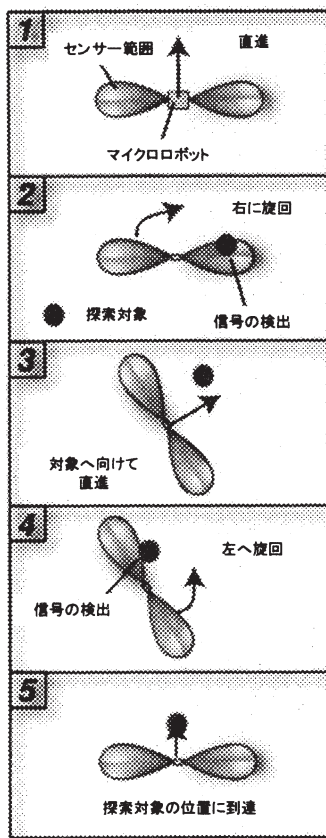
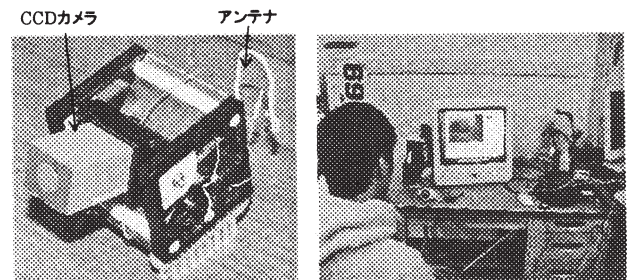


図 1 1 小型ロボットの自律誘導の手順

(2) 遠隔操作方法に関する検討

自律型ロボットの動作を補うため、遠隔操作型ロボットの設計・開発を合わせておこなった。遠隔操作システムは図 1 2 に示すように、ロボットの前方にワイヤレス式の小型 CCD カメラを搭載し、遠隔地から被災地の様子を確認

しながらロボットを目標の位置まで誘導させることができる。実験では、ロボットと床面間での摩擦力を低下させ移動性能を向上させるために、ブラシを底面に装着している。



(a) 遠隔操作レスキューロボット (b) 遠隔操作探索実験

図 1 2 小型ロボットの遠隔操作

(3) 探索実験の結果

探索実験ではロボットを被災者から縦横の直線距離で 1[m], 3[m], 5[m]の位置に配置し 8 回ずつ探索実験を行なった。またセンサの最大有効距離よりも離れた位置からの探索として、6[m], 7[m]の位置から、始めから被災者の方へ進ませたものと、被災者と水平方向へ進ませたものを、2 回ずつ行なった。センサの範囲内である 1[m], 3[m]では 100%探索に成功した。しかし、最大有効距離の 5[m]では約 90%に下がってしまった。被災者探索の軌跡をセンサの有効範囲を超える 6[m], 7[m]では、進行方向側に被災者を向けたロボットは、途中からセンサの有効範囲内に入り辿り着くことが出来た。センサ側を被災者に向けたロボットは、センサが被災者に反応せずそのまま離れていった。基本的にロボットは発進直後に右往左往しながら正面に進んで行き、センサに被災者を捕らえるとその方向へ旋回し被災者のほうへ進んだ。図 1 3 に、5[m]の位置でおこなった探索実験の概要と、ロボットの誘導軌跡を示す。

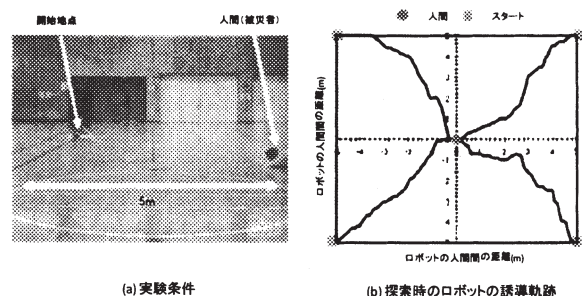


図 1 3 探索実験の結果 (自律誘導)

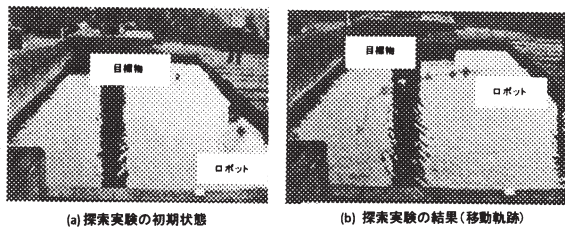


図 1 4 探索実験の結果 (遠隔操作)

次に、遠隔地操作に関して瓦礫の内部探索と、水上での目標物探索の実験をおこなった。図 1 4 に水上での探索実験の結果を示す。ワイヤレスカメラの映像の受信に関しては、陸上では映像送受信にまったく問題の無い距離でも、水上では映像がコマ落ちしたり、途切れる状況が頻繁に発生したりした。特に、カメラが水中に浸ってしまうと、映像はその瞬間数秒から数分間受信が停止してしまうこともあった。しかし、映像が受信できていれば、その映像をモニタリングして操作を行うことは可能であった。ただ、操作は可能ではあるものの、水上に浮かぶ目標をカメラに捕らえるのは至難の業であった。水上の場合、目標が一定位置に固定していることが無いと、またロボットが動くたびに波が発生し、その影響で目標が移動してしまうためである。今回の実験では、水上に浮く軽い物を目標にしたためこのような事態になったが、もっと重い物、人のような大きく流されにくい物であればカメラによる操作も有効であると考えられる。

3. 結論と今後の課題

大学の位置する袋井市の地震発生時の被害状況について調査をおこなったところ、東海地震の発生が予想される静岡県内の中でも特に大きな被害が予想されている地域であることがわかった。我々の研究課題としては、広域型の地震災害に対応したレスキューロボットのコンセプトを提案し基礎実験をおこない、有効性と問題点を確認した。今後は、より実用的なレスキューロボットの開発に向けて、走行性能の改良や、複数のレスキューロボットや防災システムの連携など、さまざまな課題が考へる。そのために、県内の関係箇所と連携して研究をすすめていく予定である。

謝辞

この研究は、静岡理科大学特定研究費、財団法人静岡総合研究機構学術教育研究推進事業費補助金および笹川科学研究助成金の支援を受けて実施された。お礼を述べる。重ねて、研究に参加してくれた齊藤顕君⁽⁹⁾をはじめとした研究室の学生の協力にも感謝する。また、研究に関して適切にアドバイスをいただいた益田正先生および電気通信大学青山尚之先生にも感謝する。

- 1) 牧田忍, "ニューヨーク世界貿易センター(WTC)でのレスキューロボット(<特集>災害対応のためのロボティクス)" 日本機械学会誌, Vol.106, No.1019, pp. 794-802, (2003)
- 2) 中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」、「東海地震に関する専門調査会報告」(2001)
- 3) “海上保安庁の最近の津波対策等について”, (<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/tsunami/index.htm>)
- 4) “袋井市耐震改修促進計画”, 2006年 袋井市
- 5) “袋井市市役所ホームページ 地震・防災情報”, (<http://www.city.fukuroi.shizuoka.jp/ctg/07100010/07100010.html>)
- 6) Hisayuki Aoyama, Atushi Himoto, Ryutaro Misumi, Ohmi Fuchiwaki, Daigo Misaki, Theodore Sumrall, Micro Hopping Robot with IR Sensor for Disaster Survivor Detection, Pro. of the 2005 IEEE International Workshop on Safety, Security and Robotics, ooKobe, pp.189-194, (2005)
- 7) Atsuhisa Himoto, Hisayuki Aoyama, Ohmi Fuchiwaki, Daigo Misaki and Theodore Sumrall, Development of micro rescue robot - human detection, 2005 IEEE International Conference on Mechatronics, pp. 526-631, Taipei, (2005)
- 8) Daigo Misaki, Akira Saito, Atushi Himoto and Hisayuki Aoyama, Micro rescue robot with CCD camera and IR sensor for earthquake rescue, Extend Abst. of IASME/JSME Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2006)
- 9) 齊藤顕, “東海地震に備えた小型レスキューロボットに関する研究”, 平成 17 年度静岡理科大学修士論文

中計に基づく学生実験用測定評価デバイスの設計試作

Middle-term Plan Based Electronic Devices Design and Fabrication for Undergraduate Students Experiment Education

波多野 裕*, 林 良平**, 袴田尚吾***, 石川貴幸****

Hiroshi HATANO, Ryohei HAYASHI, Shogo HAKAMATA and Takayuki ISHKAWA

Abstract : In order to improve electron devices design and experiment education in the Department of Electrical and Electronics Engineering, six different devices have been designed and fabricated utilizing 1.2 μm double polysilicon double metal N-well CMOS technology. The proposed two experiments are possible candidates for device experiments of “Experiments in Electronic Engineering” in the SIST curricula 2008.

1. 緒言

2007年3月4日、本学電気電子工学科クリーンルームにおいて1991年開学時設置設備老朽化に起因する漏水事故⁽¹⁾が発生し筆頭著者の居室及び実験研究室も冠水した。本報告では、老朽化した諸設備更新の困難な現状を鑑み、更に日本国内における大学レベルの集積回路教育の「ものづくり教育」の観点からの大きな進展も考慮に入れて、1996年に設置された大学共同利用センタ東大VDEC⁽²⁾を活用した学生実験用測定評価デバイスの設計試作を検討した結果を報告する。

1993年の本学紀要において「学部学生のための集積回路CAD教育の試み」⁽³⁾と題して、本学第1期生3年次の「電子デバイス実験」開始に合わせて、学生実験の「設計思想」とその内容の一部を報告した。その「設計思想」の延長上に今回の報告も位置するものである。

本報告は、現カリキュラムの3年前期「電子工学実験」からクリーンルーム関連テーマが2008年度からの新カリキュラム3年後期「光応用・電子デバイス実験」へ移行することによる「電子工学実験」の集積回路関連テーマ減少を補うための検討の一環である。本報告で述べる実験内容はCAD関連1テーマ、測定評価関連1テーマに相当し、合計2テーマ、学生実験の2回分に関する提案である。

NOT回路、NOR回路、NAND回路、EXOR回路、NMOSトランジスタ、リングオシレータの6種類のデバイスを1.2 μm 2層アルミニウムNウェルCMOSプロセスで設計試作した。NMOSの実効チャネル長は0.9 μm、PMOSの実効チャネル長は0.8 μmである。ゲート酸化膜厚は25 nmである⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

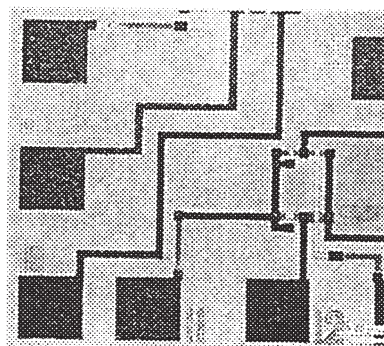


図1 既存の学生実験用チップの顕微鏡写真

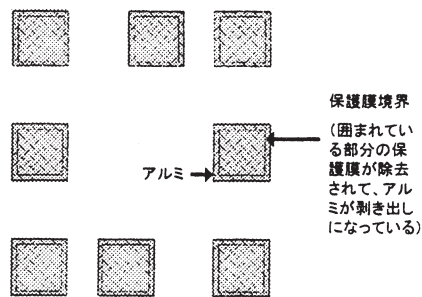


図2 設計した入出力パッドのレイアウト図

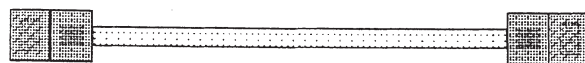


図3 入力保護抵抗のレイアウト図

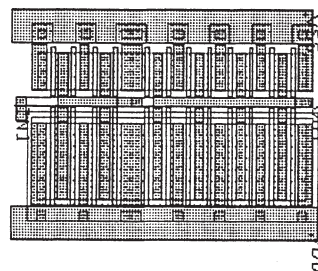
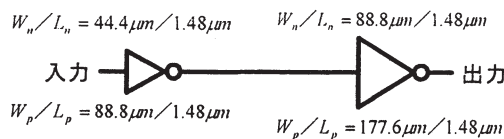


図4 出力バッファの回路図とレイアウト図

2008年2月29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 エルナー(株))
 *** 理工学部 電気電子情報工学科卒業生(現在 スズキ(株))
 **** 理工学部 電気電子情報工学科卒業生(現在 (株)オサダ)

2. 入出力パッドの設計

設備更新の困難な現状を鑑み、現行の学生実験で用いている測定機器に合わせて入出力パッドの設計を行った。学生実験で用いられているチップの入出力パッドの顕微鏡写真を図1に示す。図1の写真にある入出力パッドの大きさ及びパッド間隔をもとにCADツールを用いて入出力パッドを設計した。設計した入出力パッドのレイアウト図を図2に示す。パッドの外枠はアルミ、内枠は保護膜境界

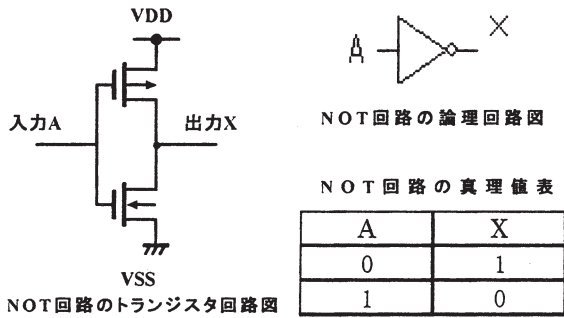


図5 NOT回路

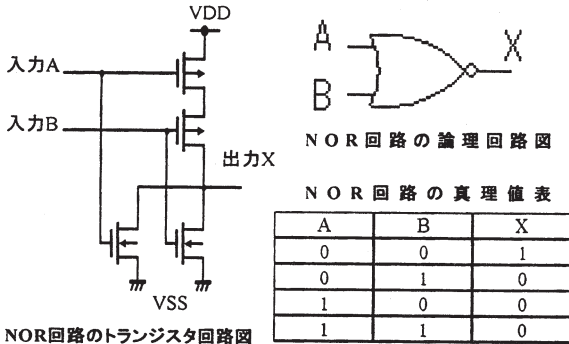


図6 NOR回路

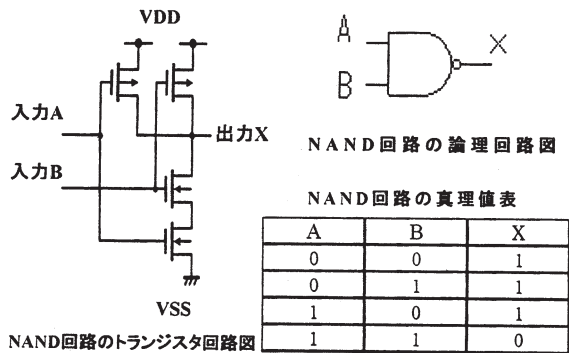


図7 NAND回路

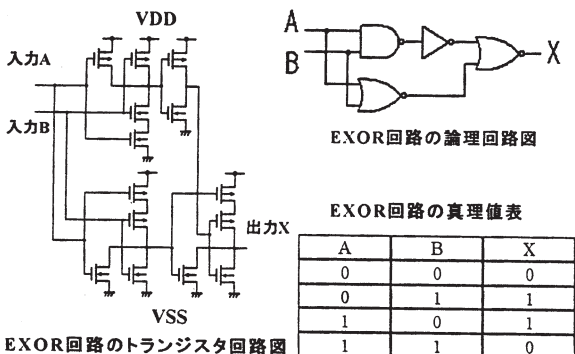


図8 EXOR回路

を表している。

3. デバイス設計とシミュレーション

過大電圧入力によるゲート破壊防止のため、入力パッドと配線間にn+拡散層で構成した入力保護抵抗を接続した。図3に入力保護抵抗のレイアウト図を示す。n+拡散層のシート抵抗は50~70Ω/□、入力保護抵抗の寸法は幅1.48μm、長さ29.6μmである。従って、入力保護抵抗

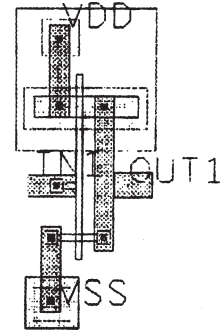


図9 NOT回路のレイアウト図

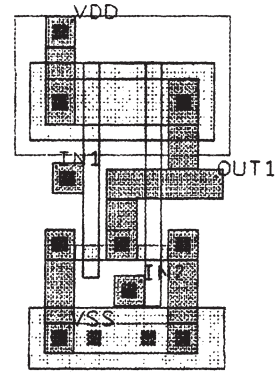


図10 NOR回路のレイアウト図

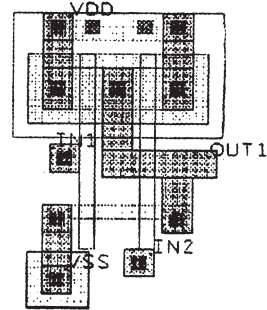


図11 NAND回路のレイアウト図

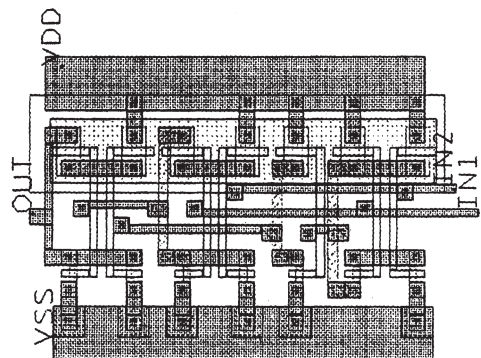


図12 EXOR回路のレイアウト図

の抵抗値は 1.0~1.4 kΩである。

各回路の出力には出力バッファを接続した。図4に出力バッファの論理回路図、トランジスタ寸法、及びレイ

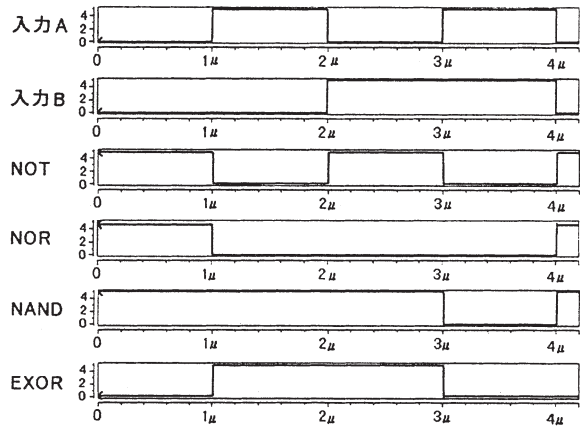


図13 NOT回路、NOR回路、NAND回路、EXOR回路のシミュレーション結果 横軸：時間(s) 縦軸：電圧(V)

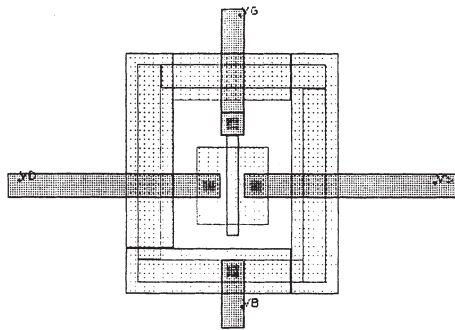


図14 NMOSトランジスタのレイアウト図

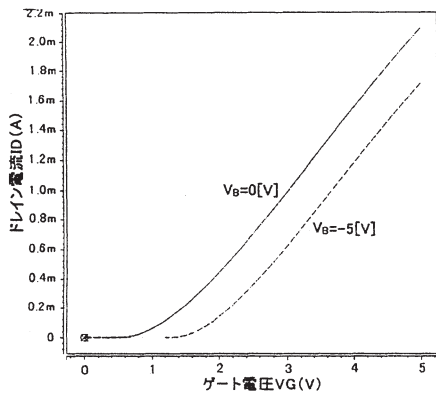


図15 NMOSのVG-ID特性のシミュレーション結果

$$V_{I(V_B)} = V_{I(0)} + \gamma \sqrt{V_B} \dots \textcircled{1}$$

$$\gamma = \left(\frac{I_{ox}}{\epsilon_{ox}} \right) \sqrt{2q\epsilon_{si}N} \dots \textcircled{2}$$

$$\textcircled{1}, \textcircled{2} \text{より}$$

$$N = \frac{\left(\frac{V_{I(V_B)} - V_{I(0)}}{\sqrt{V_B}} \times \frac{\epsilon_{ox}}{I_{ox}} \right)^2}{2q\epsilon_{si}}$$

- ①・基板バイアス $V_B = -5[V]$
- ・酸化膜厚 $t_{ox} = 250[\text{\AA}] = 250 \times 10^{-10}[m]$
- ②・酸化膜の誘電率 $\epsilon_{ox} = 35.4 \times 10^{-14}[F/m^2]$
- ・電子の電荷量 $q = 1.6 \times 10^{-19}[C]$
- ・シリコンの誘電率 $\epsilon_{si} = 11.9 \times 10^{-14}[F/m^2]$
- 計算の結果、不純物濃度Nは $N = 2.63 \times 10^{22}[\text{個}/m^3]$

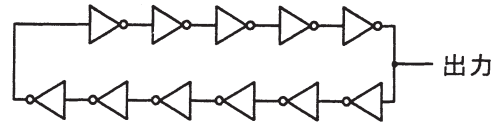
図16 基板不純物濃度の算出方法

アウト図を示す。Lはゲート長、Wはゲート幅である。

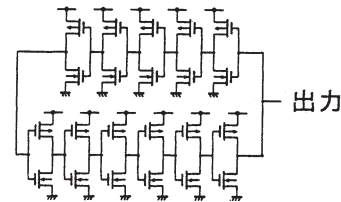
3.1 基本ゲート

図5から図8にNOT(インバータ)回路、NOR回路、NAND回路、EXOR(排他的論理和)回路の論理回路図、トランジスタ回路図および真理値表をそれぞれ示す。また、図9から図12にNOT回路、NOR回路、NAND回路、EXOR回路のレイアウト図を示す。PMOSのWはNMOSの3倍である。

図13に設計したNOT回路、NOR回路、NAND回路、EXOR回路の回路シミュレーション結果を示す。設



設計したリングオシレータの論理回路図



設計したリングオシレータのトランジスタ回路図

図17 11段リングオシレータ

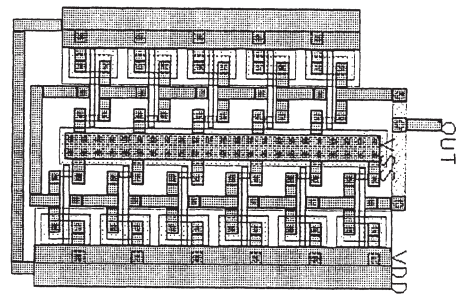


図18 リングオシレータのレイアウト図

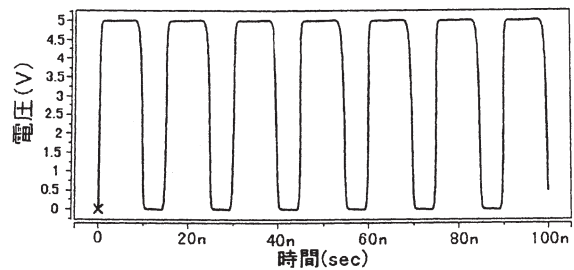


図19 リングオシレータのシミュレーション結果

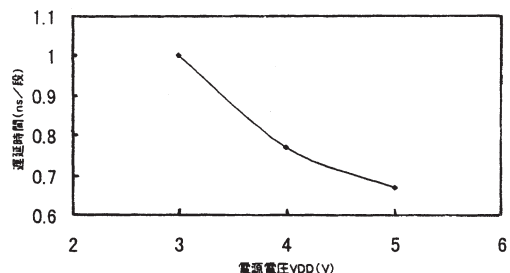


図20 遅延時間の電源電圧依存性(シミュレーション)

計した基本ゲートが正常に動作することを確認した。また、オシロスコープのプロブなどの測定系寄生容量 100 pF を想定したシミュレーションを行い 4.4 MHz まで動作することが判明した。

従って、測定評価の実験テーマでは、この 4 種類の基本ゲート回路を用いて、キロヘルツからメガヘルツまでの各種周波数特性を実測により学習することが可能である。

3.2 NMOSとリングオシレータ

設計した基板端子付き NMOS トランジスタのレイアウト図を図 14 に示す。基板バイアスを与えるためトランジスタの周りを p+ 拡散層で囲み基板端子を設けた。

この NMOS トランジスタを用いることにより、トランジスタのしきい値電圧の基板バイアス依存性のデータを求め、基板不純物濃度を算出する実験が可能になる。図 15 に、基板バイアス $V_B = 0V$ における $V_G - I_D$ 特性と基板バイアス $V_B = -5V$ における $V_G - I_D$ 特性のシミュレーション結果を示す。このグラフから、ドレイン電流が流れ始めるゲート電圧、即ち、しきい値電圧を求めた。しきい値電圧は、 $V_G - I_D$ 曲線に X 軸付近で最小二乗法により接線を引き、その接線と X 軸の交点のゲート電圧とした。基板バイアス $V_B = 0V$ におけるしきい値電圧は 0.95 V であった。基板バイアス $V_B = -5V$ におけるしきい値電圧は 1.45 V であった。

この 2 つの値を用いて図 16 に示す方法で基板不純物濃度を算出した。式①は基板バイアスがある時と無い時のしきい値電圧の関係を表す教科書レベルの式である。

測定評価の実験テーマでは、試作チップの直流特性の実測により異なる基板バイアスを与えてしきい値電圧を測り、実測により基板不純物濃度を算出する実験を行う。

図 17 に設計した 11 段リングオシレータの論理回路図とトランジスタ回路図を、図 18 にリングオシレータのレイアウト図を示す。また、図 19 にシミュレーションにより求めた電源電圧 5V の場合の発振波形を示す。この発振波形から発振周期 T を求め、n 段リングオシレータのインバータ 1 段当たりの遅延時間 t_{pd} を、

$$t_{pd} = T / (n \times 2)$$

から算出した。図 20 にシミュレーションにより求めた遅

延時間の電源電圧依存性のグラフを示す。

測定評価の実験テーマでは、異なる電源電圧に対してオシロスコープの発振波形から T を実測して実測により図 20 のグラフを作成する。この実験から電源電圧が回路速度へ及ぼす影響を体得することができる。

4. 試作結果

NOT 回路、NOR 回路、NAND 回路、EXOR 回路、NMOS トランジスタ、リングオシレータの 6 種類のデバイスを $1.2 \mu m$ 2 層アルミニウムウエル CMOS プロセスで試作した。NMOS の実効チャネル長は $0.9 \mu m$ 、PMOS の実効チャネル長は $0.8 \mu m$ である。ゲート酸化膜厚は 25 nm である。図 21 に 4 種類の出力バッファ付き基本ゲートの顕微鏡写真を示す。図 22 に NMOS トランジスタ (右上) と 11 段リングオシレータ (左下) の顕微鏡写真を示す。

5. 結言

電気電子工学科 3 年前期「電子工学実験」における学生実験のテーマを検討するため、CAD 関連テーマの 1 つとして、6 種類のデバイスをサブミクロン 2 層アルミニウムウエル CMOS プロセスで設計した。更に、測定評価関連テーマの 1 つとして、実測を前提として、6 種類のデバイスをサブミクロン 2 層アルミニウムウエル CMOS プロセスで試作した。各回路に入力保護抵抗と出力バッファを接続することにより、微細デバイスの取り扱いに慣れていない学生でもデバイスを破壊することなく、安定した高周波動作までの測定評価を行うことが可能である。

なお、チップ試作費用は 1 ペレットが約千円である。従って、定員 80 人として各学生に 1 ペレット与えても総額は約 8 万円である。一方、クリーンルーム維持費は年間 150 万円超掛かっている。

本報告は、CAD 実験と測定評価実験の 2 つのテーマが連動することを必ずしも前提としている訳ではない。即ち、測定評価用チップをあらかじめ作り貯めておくことを想定している。従って、CAD 関連テーマ単独の増設、あるいは、測定評価実験テーマ単独の増設にも対応できる。

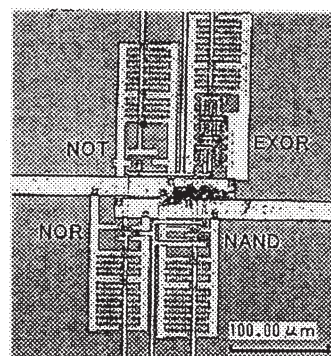


図 21 基本ゲートの顕微鏡写真

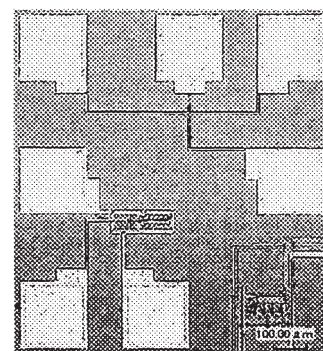


図 22 NMOS とリングオシレータの顕微鏡写真

最後に、VDECの存続性に関しては、所謂、地方単科小規模私立大学の存続性に比較すれば、前者の存続性の方が後者より遥かに高いと考えるのが妥当である。万が一のケースでは、例えば10年分800ペレットをあらかじめ作製しておくことにより次のカリキュラム変更まで対応することもできる。

VDEC設置に先立って、1980年代に半導体メーカーと私立大学教員の協力によりマイクロエレクトロニクス研究開発機構⁽³⁾が発足し、これが国によるVDEC設立に繋がった。VDECは産業界と大学の連携した、21世紀の工学部における「ものづくり教育」の全国レベルのモデル・ケースである。半導体分野以外の工学部門、例えば、ロボット、航空、情報通信、制御エネルギー、バイオ食品分野などでも、第二のVDECが望まれて久しい。VDECをモデルとして、日本の理工系教育全体を活性化することが産業立国を再び可能にする。

なお、本報告で述べた基板不純物濃度算出実験は、ウェーハ規格不明の場合に、デバイス測定から推定する方法である。得られる不純物濃度はトランジスタのゲート直下の、しきい値電圧調整用にイオン注入された不純物を含む値である。得られた値は、推定イオン注入量から見積もって妥当な結果であると考えられる。

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) 静岡理工科大学安全委員会事故報告書(2007. 3. 5)
- 2) <http://www.vdec.u-tokyo.ac.jp>
- 3) 波多野裕, “学部学生のための集積回路CAD教育の試み,” 静岡理工科大学紀要, vol. 2, pp. 27 - 42, 1993.
- 4) 林 良平, “学生実験用測定評価デバイス及びカウンタ回路の設計”, 静岡理工科大学 2007 年度卒業論文.
- 5) 袴田尚吾, “ハザード・フリーLSI回路”, 静岡理工科大学 2007 年度卒業論文 (第2章 学生実験用測定評価デバイスの設計試作)
- 6) 石川貴幸, “学生実験用測定評価デバイスの設計試作”, 静岡理工科大学 2007 年度卒業論文.

平成19年度インターンシップ実施報告 —参加学生の増加を目指して—

A Report on the Internship Program in 2007,
Regarding the Increase of Interns.

富田寿人*³, 丹羽昌平*¹, 恩田一*², 森隆比古*³, 出口潔*⁴
河村都美明*⁵, 星 利光*⁵, 山下博通*⁶, 青島偉夫*⁶

Hisato TOMITA, Shouhei NIWA, Hajime ONDA, Takahiko MORI, Kiyoshi DUGUCHI,
Tomiaki KAWAMURA, Toshimitsu HOSHI, Hiromichi YAMASHITA and Hideo AOSHIMA

Abstract: Practical education in cooperation with 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 2007. This is SIST's ninth full-scale program following the preliminary trial in 1999. In 2007, seventy-four companies in the western part of Shizuoka prefecture joined this plan by providing their own internship programs for over one hundred twenty students. Sixty-eight students participated in these programs and obtained varied experiences. The results of this program over nine 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。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整ってきている。このように、本学インターンシップは、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、本学のキャリア教育の中で重要な地位を占めつつある。

本報告は、平成19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、実習内容、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まとめ、本事業によって得られた成果や問題点を明らかにし、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、今年度から行った事前教育の改変により、学生の意識や企業の評価がどのように変わったか検討しようとしている。さらに平成11年から平成19年までの9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19年度インターンシップの計画

昨年度の反省点として①第1回の事前研修の参加学生が少ない、②事前研修の途中で受入企業の発表があると「やってみたい仕事がない」などの一方的な理由から、実習学生がこの段階で大幅に減少していく、③最終的な実習学生も今までになく少なかった、等が挙げられた。

平成19年度のインターンシップは、これらの問題点を改善するため、①第1回の事前研修を就職ガイダンスと同日にする、②第1回の事前研修時には受入企業名を学生

に発表し、学生に早い時期から実習企業を意識させるようにした。これらのことから、学生の意欲の喚起と積極性の一層の向上を目指し、学生の希望企業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、過去8年間の受入依頼の発送状況やこれまでの就職状況などを考慮して、協力依頼企業を選定した。3月8日には大学周辺の企業488社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19年度については昨年度からわずかに低下したものの74社の企業(80実習テーマ)から受入の申し込みがあつた。しかし、受入実習生の総数は127名にとどまり、22%の減少となつた。図1の「実習生受入企業一覧表」に74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15日に第1回の事前研修を行い、その後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。

学生の实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44社にのべ実習生70名を派遣することとなつた。昨年度が35社42名であつたことから、人数を増加させ、例年並みの参加者数に回復することができた。

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、

2007年11月27日受理

*¹機械工学科、*²電気電子情報工学科、*³情報システム工学科、*⁴物質生命科学科、*⁵学務課、*⁶就職課

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下回り30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72社、テーマ80、募集人数127名、実実習学生数68名)

No.	事業所名	実習テーマ	実習地	実習期間	日数	受入人数	実習人数
1	生活協同組合コープしずおか	作業や社会人と話すことを通じて「自分にとって働くことの意味・意義」を考える。	未定	8/31-9/11	12日間	1	
2	鈴与(株)	物流について流れの習得	静岡市	8/20-8/24	5日間	1	1
3	(株)ピップ	機械設計開発の補助	横浜市	8/20-8/31	10日間	1	
4		システム設計開発の補助				1	
5		電子・電気回路の設計開発の補助				1	
6	(株)島山製作所	CAD設計作業の習得	沼津市	8/20-8/31	10日間	1	
7	(株)システムフジ	社の雰囲気を感じながら業務についての知識を身に付けてもらう。	静岡市	8/13-8/24	10日間	1	2
8	松本印刷(株)	ISO9001、ISO14001、Pマークの手順で業務を行います。	吉田町	8/20-8/31	10日間	1	
9	東海アルミ箔(株) 蒲原工場	ACモーター制御システムによる実習	静岡市	8/20-8/31	12日間	1	
10		アルミニウム箔生産設備メンテナンス				8/20-8/31	12日間
11	(株)アステック	機械加工、機械組立、図面からのものづくりの一部始終を体験します。	静岡市	8/6-9/19	15日間	2	1
12		電気配線作業やシーケンスプログラムを使用しての装置調整。				8/6-9/19	15日間
13	矢崎化工(株)技術センター	無人搬送車の製造	静岡市	8/27-9/14	10日間	1	1
14	三明機工(株)	最先端の技術開発における設計、製造の技術や知識を体得	静岡市	9/10-9/15	5日間	3	2
15	(株)エキスパートパワーシズオカ	CATIA操作を活用した3次元と2次元データのモデリング手法習得	静岡市	8/20-8/31	10日間	3	
16	メガロ化工(株)	簡易製法(ラビットプロト)における製品製作の全工程を通して試作品を理解する。	焼津市	9/3-9/7	5日間	1	3
17	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	8/1-8/31	10日間	1	
18	オーエムプランニング(株)	部品設計と加工方法の習得	浜松市	9/3-9/14	10日間	1	
19	テイボー(株)	マーキングペン先の製造又は検査	浜松市	9/10-9/14	5日間	1	1
20	(株)遠州日石	SS(サービスステーション)において営業販売、接客の実習をはかる。	浜松市	8/20-8/24	5日間	2	1
21	富士ゼロックス静岡(株)浜松支店		浜松市	9/10-9/19	5日間	1	1
22	(株)ロジック	ソフトウェア開発及びシステム設計支援	浜松市	8/6-8/10	5日間	2	2
23	(株)小楠金属工業所	切削加工するための生産技術(設備、刃物、素材)と生産作業	浜松市	8/22-8/31	9日間	1	1
24	(株)ユニバンス	トランスミッションまたはトランスファーケース等のトルク伝達装置に関する技術計算	湖西市	8/27-9/14	10日間	1	1
25	(株)白木機械設計	2次元3次元CADを利用した機械設計業務および開発支援業務	浜松市	8/20-9/14	20日間	2	1
26		ステッピングモーターを用いた制御電子回路設計				2	1
27		マイコンボードを利用した制御系プログラム開発				2	
28	ショーダテクトロン(株)	機械組立又は性能試験	浜松市	8/6-8/24	10日間	1	
29	榎本工業(株)	工作機械の組立を通じてものづくりを学ぶ	浜松市	8/6-9/19	30日間	2	
30	(株)テクニカルサポート	ものづくりを学んでいただきます。	浜松市	8/6-8/24	10日間	2	
31	(株)エヌエステー	制御ユニットの組立、検査、調整など	浜松市	8/20-8/31	10日間	1	1
32	(株)ジャパン・ミヤキ	加工を通して部品の流れを学ぶ	浜松市	8/27-8/31	10日間	1	
33	(株)クレストック	マニュアル制作	浜松市	8/20-9/14	15日間	4	2
34	浜松ケーブルテレビ株式会社	ケーブルテレビ、ケーブルインターネット事業に関する業務全般の流れを理解する。	浜松市	9/3-9/14	10日間	1	1
35	不二工機製造(株)	一品生産により一個単位の図面にて制作する。	浜松市	9/13-9/19	5日間	1	
36	(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	8/27-9/27	10日間	2	

37	天方産業(株)	R8Cスターターキットによるソフト開発実習	浜松市	8/20-8/31	10日間	2	
38	東海精工(株)		浜松市	9/3-9/14	10日間	2	
39	やまと興業(株)	LED応用製品の開発と販売	浜松市	8/6-9/19	5日間	2	2
40	(株)アスキー	製造業の仕事	浜松市	8/20-9/14	10日間	2	
41	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	8/20-8/31	7日間	2	2
42	エルソルプロダクツ株式会社	化粧品製造の生産機械設備について	掛川市	8/6-8/10	5日間	2	2
43	創輝H・S(株)	サスペンション開発における実験評価業務	掛川市	8/20-9/14	10日間	1	
44		ハウジングアドバイザー				1	1
45	(株)トダックス	リフォーム営業、設計、積算、管理	掛川市	8/6-8/18	12日間	1	
46		機械設備工事、上下水道工事、空調設備工事の施工管理				1	
47	袋井市役所		袋井市	8/6-8/31	25日間	3	3
48	(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	8/20-8/31	10日間	2	
49	ニチアス(株)袋井工場	フッ素樹脂製品の製造と生産技術に関する業務の補助	袋井市	8/27-9/19	10日間	2	
50	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	8/20-8/28	7日間	1	1
51	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	8/6-9/19	10日間	2	3
52	大塚ベバレジ(株)袋井工場	省エネ法改正に伴う特定荷主の定期報告作成	袋井市	9/10-9/14	5日間	1	1
53	(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	9/10-9/19	10日間	2	2
54	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	8/6-9/19	2週間	2	1
55	(社福)明和会 あきは寮	心の触れ合い大切に、一緒に汗をかこう!	袋井市	8/6-8/31		4	
56	(株)エーピーアイコーポレーション袋井工場	精製実験&分析実技	袋井市	8/20-8/31	10日間	2	2
57	(社福)明和会 ワークスつばさ	授産所ってどんなところ? ~障害者と共に働く~	袋井市		相談	2	
58	袋井市月見の里 学遊館	情報発信事業の補助(IT関連)記録、映像(ビデオ、カメラ等)	袋井市	8/6-9/19	10日間	2	2
59	(株)アクティ森	体験型観光施設において、接客する中でサービス業の実際を学ぶ。	周智郡	8/9-8/22	14日間	2	
60	(株)ヤマハモーターエレクトロニクス	技術試作と評価に関する実習	周智郡	9/3-9/14	2週間	2	1
61	(株)相良プラスチック工業所		袋井市	8/27-9/14	10日間	3	1
62	ミネベア(株) 浜松工場	材料元素分析	袋井市	8/20-8/31	10日間	1	1
63	(株)榛葉鉄工所	オートバイマフラーの製造工程	掛川市	8/27-9/7	10日間	3	3
64	(株)木村铸造所	鋳物製品がどの様に加工され、利用されているか、物づくりの現場に注目。	御前崎市	8/20-9/1	11日間	1	
65	NSKワーナー(株)		袋井市	8/20-8/31	10日間	1	1
66	ポーラ化成工業(株)袋井工場	化粧品の品質管理	袋井市	9/3-9/14	10日間	1	1
67	(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	8/20-8/31	10日間	2	2
68	(株)磐田グランドホテル	サービス業における接客	磐田市	8/6-8/19	14日間	2	2
69	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	
70	磐田信用金庫	信用金庫業務研修	磐田市	8/6-8/24	3日間	3	3
71	第一工業(株)	自動車部品の構造解析	磐田市	9/10-9/19	8日間	1	
72	日星電気(株)	未定	磐田市	8/6-9/19	10日間	2	2
73	ナンヨー(株)	鋳鉄の材料試験業務	磐田市	9/10-9/21	10日間	2	1
74	(株)エフ・シー・シー 竜洋工場	クラッチディスク、クラッチプレート、クラッチガイドのプレス	磐田市	8/27-8/31	5日間	1	1
75	浜松鉄工(株)	NC旋盤、マシニングセンター等の実習作業	磐田市	8/20-8/31	11日間	2	1
76	(株)小出製作所	CAD/CAM 操作により設計から製品(テーマ別)完成までのサイクルを実習	磐田市	8/6-8/22	10日間	2	

77	菊川市消防本部	消防人としての基礎的知識と技術の習得	菊川市	8/6-8/17	10日間	1	
78	(株)ピコ・ナレッジ	IT業界全体の理解と簡単なプログラミング実習(JAVAまたはVB等でゲーム制作等)	名古屋市	8/20-8/31	10日間	1	1
79	静岡ビルサービス(株)	設備保守と清掃業務の実習	静岡市	8/20-8/31	10日間	2	2
80	矢崎総業(株)	機械の設計、製造、開発の実習	牧之原市	9/4-9/14	10日間	1	1

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		2	21		23
電子		1	10		11
情報		1	17	1	19
物質		1	16		17
大学院					
計		5	64	1	70

1名で2社に実習した学生がいる(実人数 68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	菊川市	1
静岡市	9	牧ノ原市	1
焼津市	1	磐田市	10
御前崎市	1	浜松市	21
掛川市	5	湖西市	1
袋井市	16	周智郡	2
榛原郡	1	名古屋市	1
横浜市	1		

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	42	27	25	23	22	22	161
電子	19	17	17	12	12	12	89
情報	41	23	23	17	16	16	136
物質	24	19	16	16	16	16	107
大学院	0	0	0	0	0	0	0
合計	126	86	81	68	66	66	493

表5 インターンシップ実習テーマの分野別分類

【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.

【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.

【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解との比較.

【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.

【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. 化粧品の品質管理. 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.

【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.

【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

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. 事前教育について

先にも述べたように、5月15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義」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である3名の4年生にお願いし、インターンシップでどのようなことが体験できたのか、また参加する上での考え方や心構え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注意を喚起した。

このように、事前研修を4回行うことにより、事前教育をより充実させる事ができ、明確な目的意識を持った学生を実習先へ送ることに効果的であったと考えている。参加者数を表4に示した。

本年度も、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回事前研修参加者126名の内70名が企業実習を行うこととなった。この実習参加率は55.6%で、昨年度の53.8%、一昨年度の49.1%を考えるとここ三年間では最も高い参加率であった。1回目の事前研修から受入企業を公表し、学生の参加意識を高めようとしたねらいが功を奏したのかも知れない。

6. 受入企業数と参加学生数の推移

まず、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し、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た。その上で、双方が署名捺印した。

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6日から9月21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9年間の受入企業数、実際に実習を実施した企業の数、募集実習生数、参加学生数、単位取得者数の変化を図1に示した。受入事業所数および募集実習生数は年々増加する傾向にある。しかし、昨年度参加学生数および実施事業所数が大きく減少したが、本年度は全ての項目においてほぼ一昨年度と同等の数字を残すことができた。参加学生の学科別内訳を図2に示した。参加学生の9年間の累計は570名以上となった。

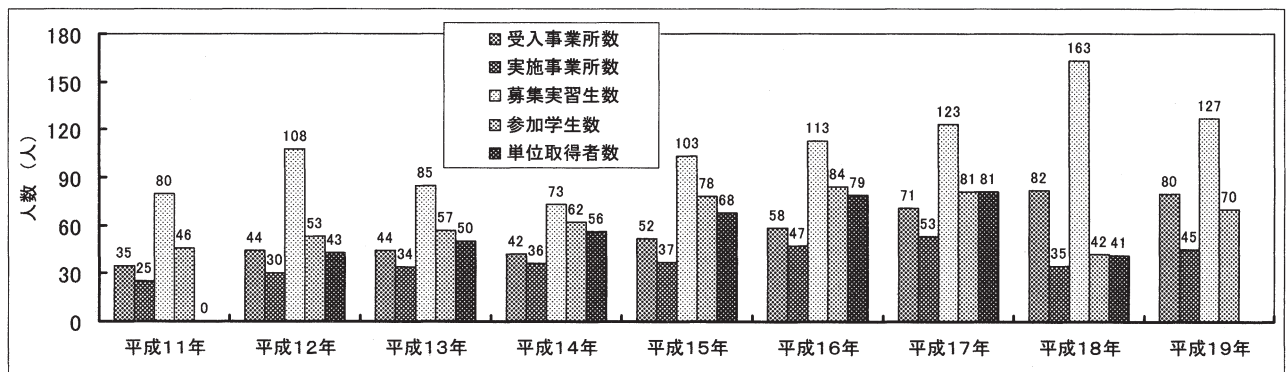


図1 受入企業等の数および参加学生数の9年間の変化

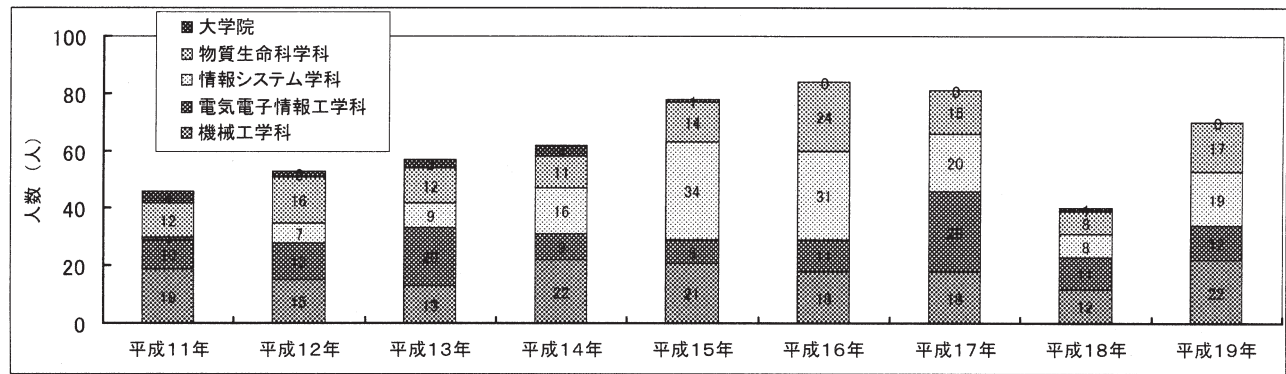


図2 参加学生数の学科別内訳(9年間の変化)

7. インターンシップで学生は何を得たか？

以下では、学生の実習報告書に基づいて、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まとめた結果を報告する。

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表1に示したとおりであるが、実習テーマのみでは実習の内容はわかりにくい。そこで、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、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、「製作、組立、加工実験、測定、試験、分析」の項目が35.2%と最も高く、次が「装置、機械、器具の使用法」が33.8%、「製作、組立、加工」が31.0%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「品質管理の方法や重要性」の学習ができたと答えた学生が9.9%と最多となった。次に「製品の検査・試験の重要性の認識」、「プログラミングやソフトウェア、ホームページ作成技術」、「実験・試験・測定技術」と答えた学生が8.5%であった。

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、「企業や職場の雰囲気がわかった」あるいは「企業の現場を見ることができた」と

答えた学生が19.7%と最も高く、「仕事に対する熱意、緊張感、厳しさ」をあげた学生が16.9%と多かった。その他、コミュニケーションやマナー、責任感など、学生が得た成果は非常に多岐にわた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59.2%と非常に高い割合となった。次いで「作業が大変、仕事は非常に苦労した」、「楽しみながら仕事できた」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、「職場の人たちからの指導がとてもよかった」という意見が最も高く、次いで「社員の人からとても親切にしてもらった」、「自分の視野を広げるよい機会となった」などの感想が多く、受入事業所の方々のご配慮によって、素晴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「基礎的、応用的な知識が足りなかった」が28.2%と最多の回答となっている。次に「もっと質問をするべきだった、もしくは足りなかった」であり、学生が研修を通して、自分をふり返り、どんな行動をすべきであったかに気づき、今後の勉強や行動に反映されればと願う。

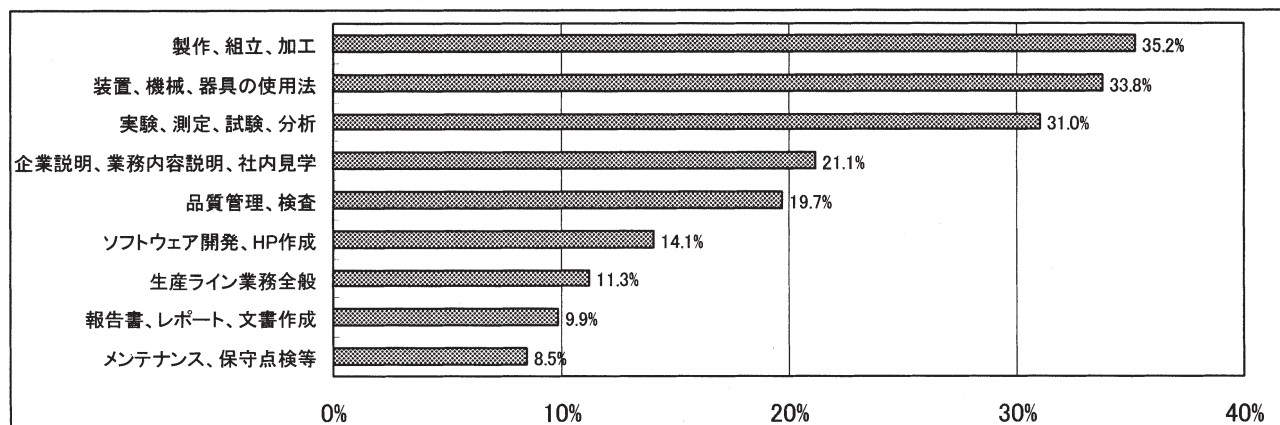


図3 実習内容の詳細

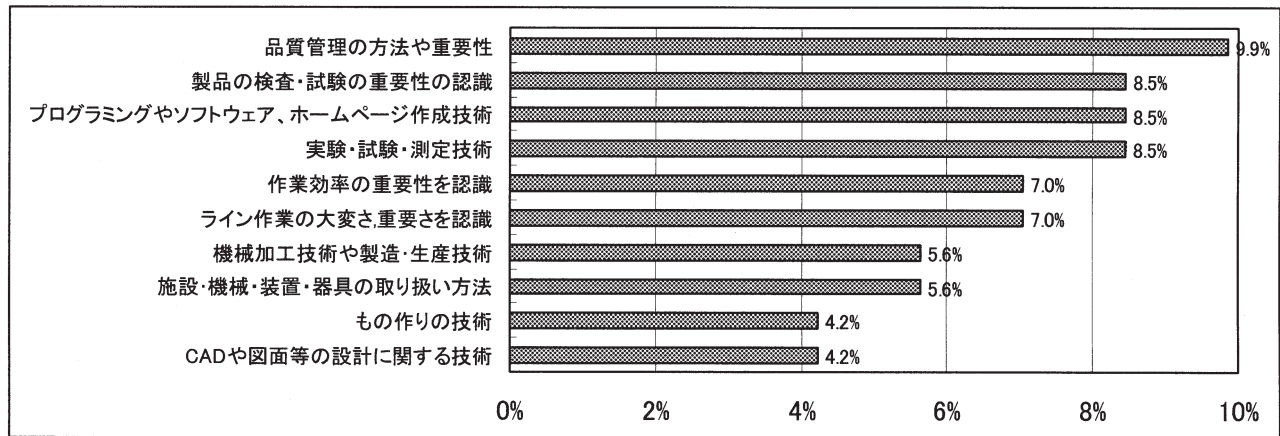


図4-1 実習によって得られた成果(技術的な学習・習得・経験など)

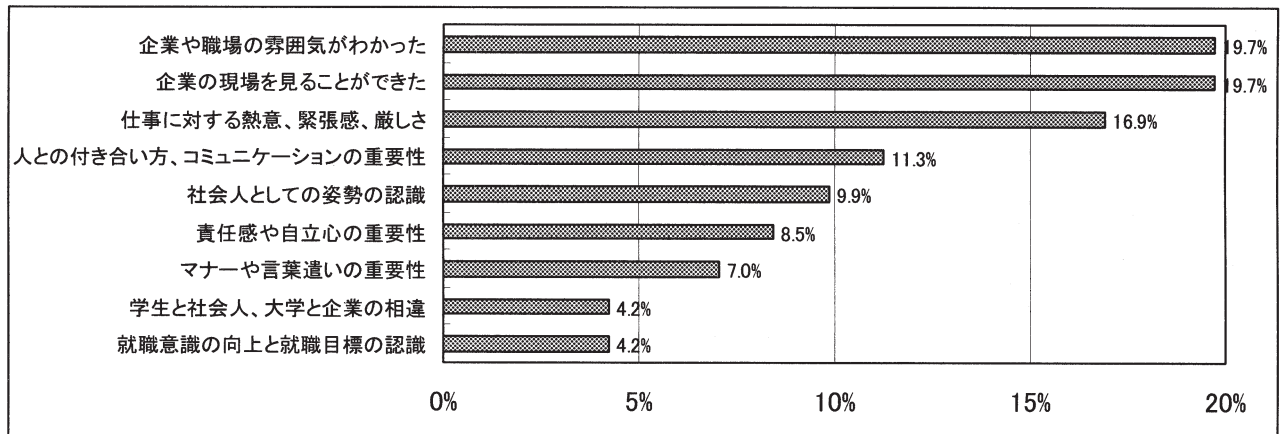


図4-2 実習によって得られた成果(企業、職場、仕事に関する認識など)

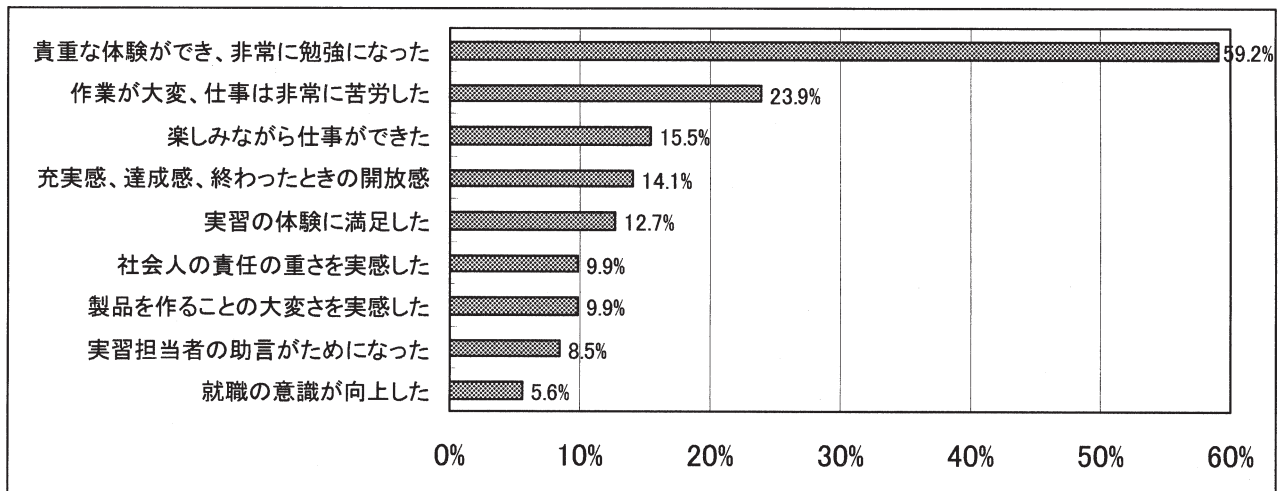


図5-1 実習に関する感想(実習内容について)

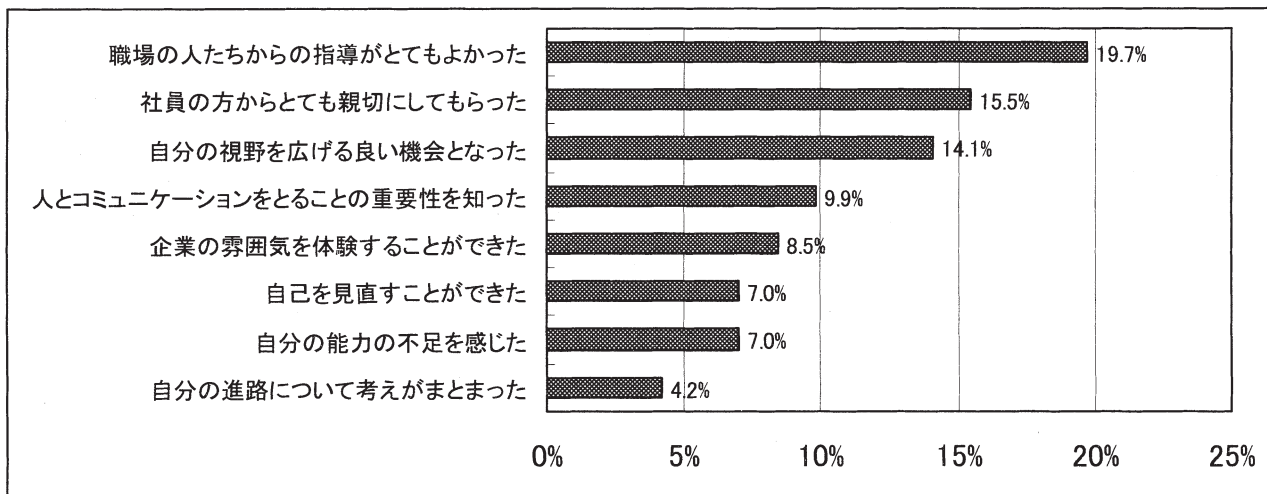


図5-2 実習に関する感想（企業・職場・仕事について）

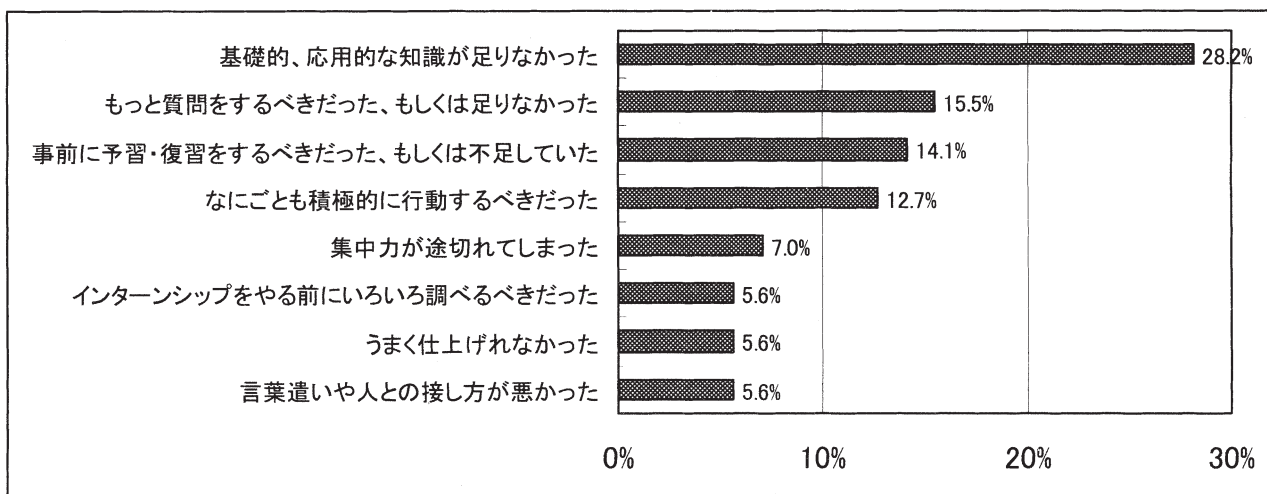


図6 実習に関する反省

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64)をまとめたものが表6である。昨年度と比較して、「勤務状況」の平均値は0.1ポイント上がる結果となったが、「責任感」や「全体評価」などその他の全ての項目で、0.1~0.3ポイント下がる結果となった。

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」が評価されたものの、一方で「積極性や元気がない」、「挨拶、返事ができない」などの指摘をされた学生もいた。事前研修でずいぶん指導してきたつもりであるが、その方法や手段にさらなる工夫が必要であると考えている。

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64社の回答を得た。これらの結果を図7に示した。「実習生の実習内容は満足すべきものであったか」、「実習生の態度や状況について」、「インターンシップ全般に関して」のいずれの評価も、約90%の回答が満足あるいはほぼ満足という結果となった。これらの結果から平成19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て大学として評価をする必要があるため、本年も各企業へ担当教員が訪問し、企業側の受け入れ担当者のほか実習生本人とも面談した。実習先企業を訪問した担当教員の報告書をもとに、

グラフにまとめたのが図 10 である。昨年同様、学生がまじめに一生懸命に、しかも、意欲的・積極的に実習に取り組んでいたという感想が目立つ。逆に、おとなしいや消極的であるといった評価もそれほど多くはないが見受けられた。

一方、訪問教員の事業所に対する評価は、熱心に良く指導していただいたことや、実習生のために企業側がテーマを決め、きめ細かな指導がおこなわれていることへの評価が高い(図 11)。しかし、今後の課題として、実習生の受け入れに不慣れなため戸惑っている企業へのサポートをどのようにしたらよいか、実習内容がインターンシップとしては疑問が残るという指摘が教員からあった企業への対応をどうしたらよいかなどの検討が必要である。

具体的評価の例

(真面目な仕事ぶりで好感をもたれた)

- ・まじめにしっかり仕事をしてくれた。
- ・データの整理と MAP 作成, HP 作成などの業務を担当しているが、高い処理能力で職場では大変助かった。

- ・人柄・応接態度が非常に明るく、まじめで好感が持た。
- ・若い感性から業務への新規アイデア提案を活発に出してもらい、会社として良い刺激を頂いた。
- ・一所懸命まじめに実習に取り組んでいた。
- ・非常にまじめで、がんばってもらっている。
- ・実習状況もきわめて良好で、さまざまなことに興味をもってやっており、休憩もせずに楽しく働いている。

(学生の積極性不足、受け入れ企業側へ感じた事項など)

- ・内気な性格らしく、積極的に笑顔で対応するような行動はみられなかった。
- ・挨拶・返事という、できて当然と思われることがなかなかできない。
- ・短期的なインターンシップであるため、仕事の内容がこまぎれなものになってしまう。
- ・大卒の学歴を必要としない職場のインターンシップにはやや疑問が残る。

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64)

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?	49 77%	4 6%	9 14%	2 3%	0 0%	4.6
2. 勤務態度(言葉遣い, 挨拶, 返事など)はいかがでしたか?	28 44%	16 25%	15 23%	3 5%	2 3%	4.0
3. 実習内容はよく理解しましたか?	17 27%	23 36%	22 34%	2 3%	0 0%	3.9
4. 仕事において, よく実行し, 行動し, 努力しましたか?	21 33%	28 44%	11 17%	2 3%	2 3%	4.0
5. 仕事は正確でよい結果が出ましたか?	17 27%	24 38%	21 33%	2 3%	0 0%	3.9
6. 創意工夫の姿勢は見られましたか?	15 23%	12 19%	27 42%	8 13%	2 3%	3.5
7. 仕事に対する積極性はいかがでしたか?	18 28%	23 36%	16 25%	6 9%	1 2%	3.8
8. 責任感をもっていましたか?	23 36%	16 25%	24 38%	1 2%	0 0%	4.0
9. 協調性はいかがでしたか?	16 25%	23 36%	22 34%	2 3%	1 2%	3.8
10. 全体評価	23 36%	21 33%	18 28%	2 3%	0 0%	4.0

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"> ・非常に真面目で、前向きな姿勢が良かった ・今回の学生は真面目で一生懸命実習に取り組む姿勢には好感が持てました ・今回の実習生の様に意欲が非常に高く、積極的な学生の受け入れは、受入部署も責任を持って対応するので、今後もそのような学生を期待したい ・研修で行って頂いた、機械トラブルの復旧作業及び省エネ法関連の報告資料作成に成果を残して頂きました。又、飲料製品の微生物汚染を短期確認する方法として DNA 操作法の調査を行って頂いて、その理解が深まる結果を残して頂きました ・当社の作業内容をよく理解され実習していただきました ・今回実習を行ってくれた生徒に関しまして常にまじめな態度で実習を行っていただきました
--

＜問題点の指摘があった＞

- ・積極性という面で、若干他の実習生より劣って見えた
- ・実習に対しては積極的に行っていた。もう少し元気があると良い。内容を理解している姿勢が見られた
- ・挨拶、返事は出来るように最低限の指導をお願いします
- ・単にインターンシップ経験は、単位習得のみの考えでアルバイト的な行動をするわけではない。学生ではなく、社会人として責任をもつためにはどのように接するか、まず人間関係の大切な部分を勉強してください

＜その他＞

- ・実習生が思い描く学遊館業務の研修が受け入れ期間中にできたか否かは評価が難しいが、生涯学習施設として不特定多数の市民が来館され、人と接することでコミュニケーション能力を高めたり、文化活動を企画する側で体験されたことは、今後の進路にとってプラスに働くものと期待します
- ・実習謝礼等、他社がどのように施しているか不安。当社なり、が比較したときに失礼とならないか
- ・実社会にでる為の経験に成ったと思います。会社にとっても仕事内容を知ってもらうためにもプラスと考えます

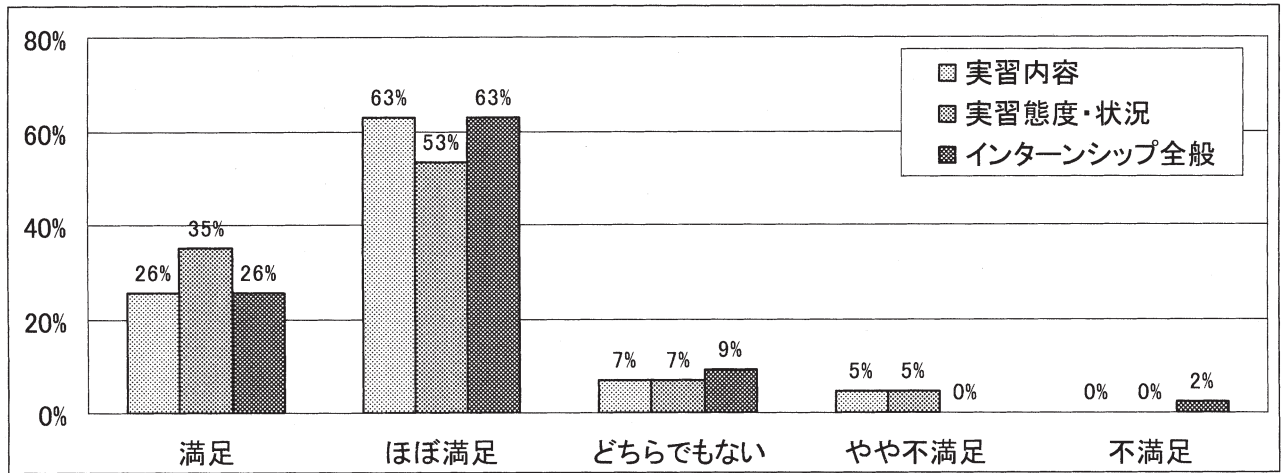


図7 インターンシップの結果に関するアンケート<受入企業担当者>

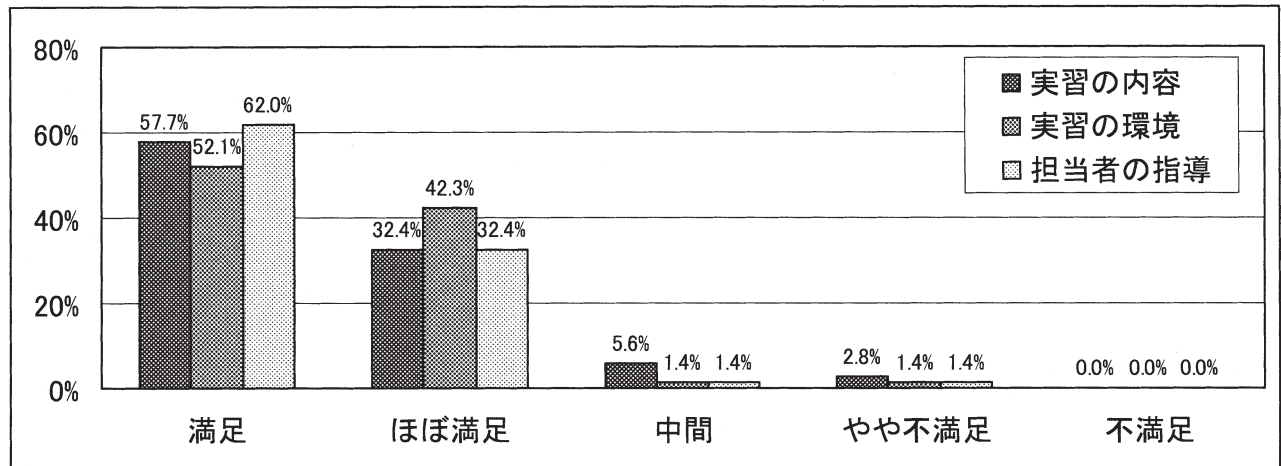


図8-1 参加学生による実習内容、環境、指導内容への満足度

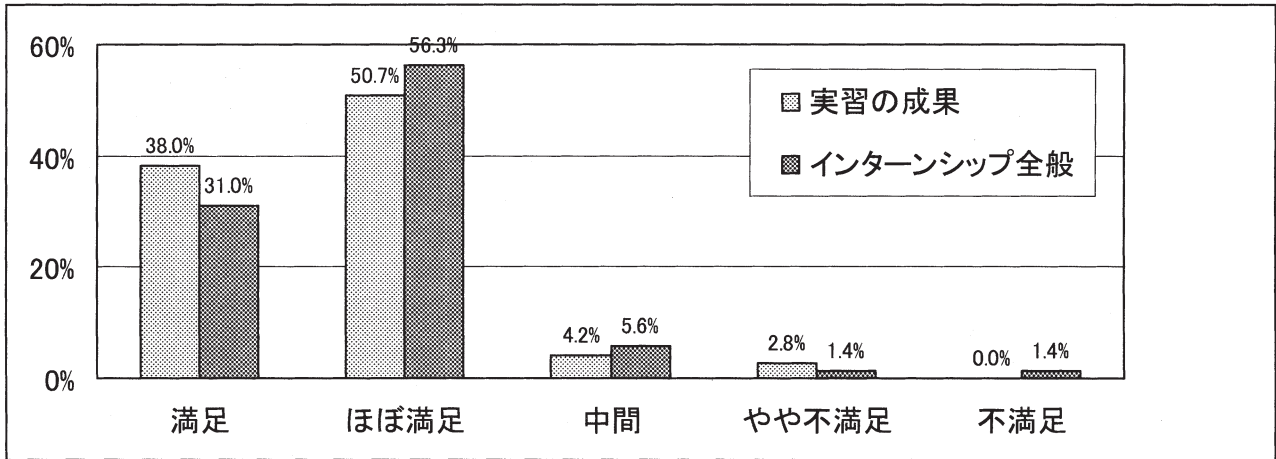


図8-2 参加学生による実習の成果、インターンシップ全般への満足度

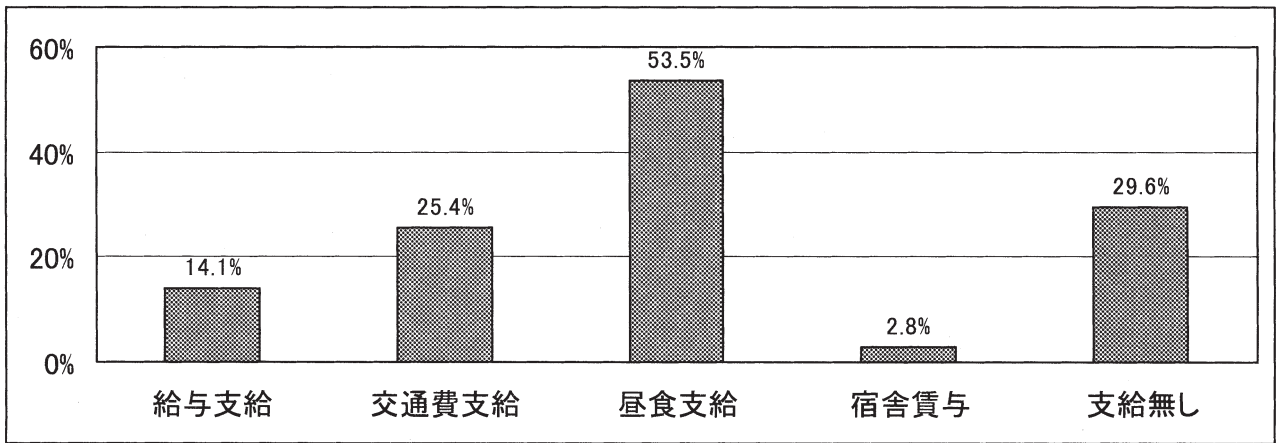


図9 実習生に対する支給の状況

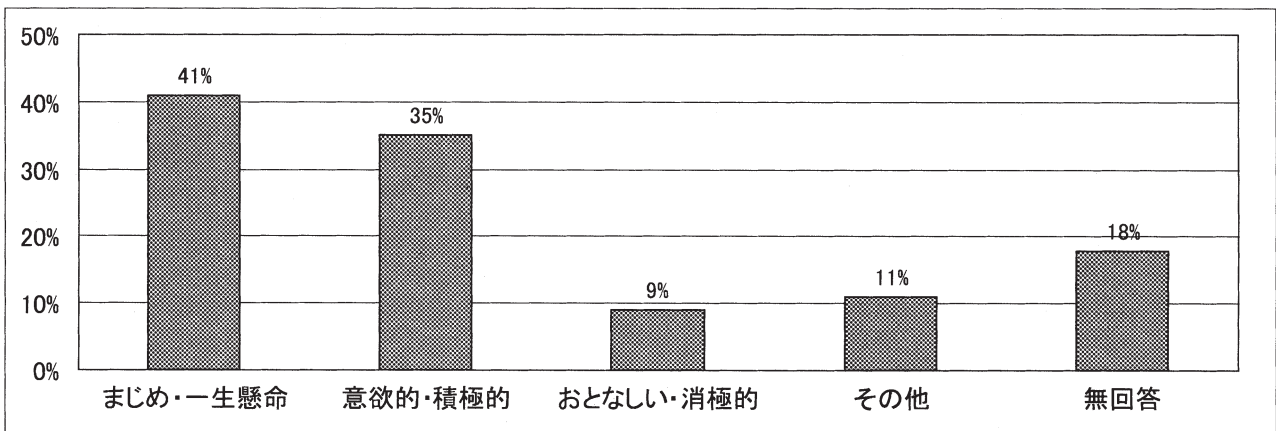


図10 実習生に対する訪問教員の評価

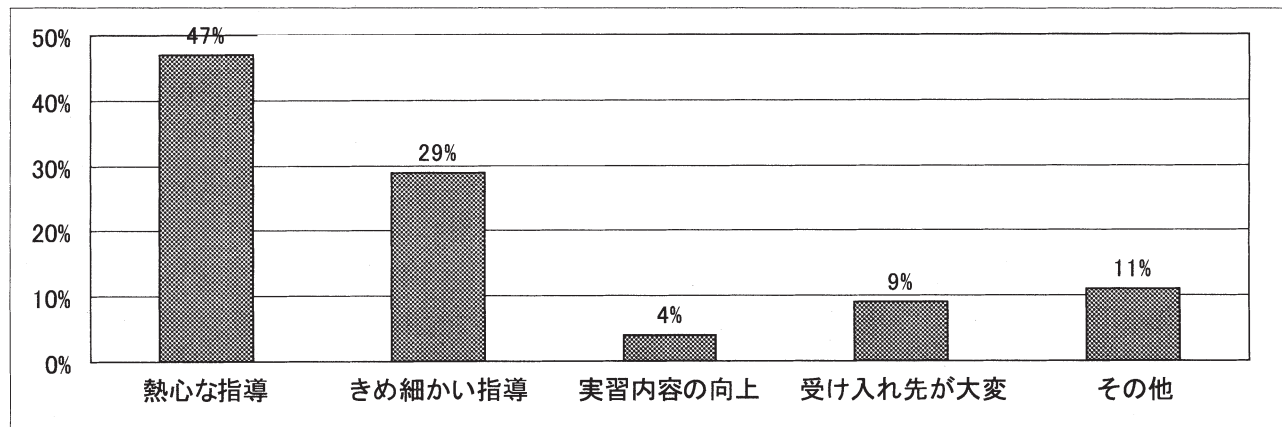


図 1 1 訪問教員の受入事業所への評価と要望

9. 平成19年度インターンシップのまとめ

9.1 事前研修の成果

昨年度は第1回の事前研修から参加学生が少なく、結果的に実習に参加した学生数はほぼ半減する結果となった。それをふまえ、本年度は参加学生数をいかに増やすかが大きな課題となった。

その対策として前述したように、まず第1回の事前研修を就職ガイダンスと同日にすることで、3年生の参加を促した。さらに、第1回の事前研修時には受入企業名を学生に発表し、学生に早い時期から実習企業を意識させるようにした。これらことから、学生の意欲の喚起と積極性の一層の向上を目指した。4回の事前研修中の学生減少を少しでも食い止めるため、昨年度から導入したDVDによる事前研修の補講も継続して行った。

その結果、第1回の事前研修には126名の学生が参加した。これは昨年度の162%に相当する数であった。また、実習学生数も68名と昨年度より66%増加した。さらに、第1回事前研修からの減少率は、ここ3年間で最も低い値となった。以上のことから、本年度の目標はおおむね達成できたと考えよう。

9.2 いくつかの反省点と改善点のまとめ

一方で、本年度のいくつかの反省点も指摘される。

- 1) 受入企業数が74社、受入実習生の総数は127名と、昨年度からわずかながら減少したこと。
- 2) 「積極性や元気がない」、「挨拶、返事ができない」などの指摘をされた学生もいた。
- 3) 受入企業から、大学との連絡調整がもっと必要との指摘があった。

受入企業数が減少したことについては、本年度から企業への参加協力依頼を3月8日にしていることから、年度替わりの時期ということもあり、企業としても回答をしにくかった事が原因しているものと考えられる。例年協力をいただいていた企業から、その時点で「来年度のことははっきりとお答えできない」という回答がいくつかあった。しかし、このシステムを続ける限りこのような事態は必ず起こってくるので、相互理解のための働きかけをしていかななくてはならない。

また、消極的な学生がいることについては、事前研修で何度も口頭で注意していることでもあり、挨拶や返事などの基本的な事項から方法を変えていく必要があると考える。例えば、接客業の教育担当者に挨拶やお辞儀の仕方を実習いただくとか講義だけでない対策、つまり声を出し、からだを動かすことが必要と思われる。しかし、これはイ

ンターンシップ参加者だけでなく、今や全学的にも必要な段階にあるのかも知れない。

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、キャリア教育の柱として全学的に取り組む
- 2) 実習内容の充実のため、企業や事業所にインターンシップへの理解をさらに深めてもらう
- 3) 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

これらの対策により、実習をより効果的なものとするのできるものと考えられる。

10. 9年間のインターンシップの総括と将来展望

10.1 インターンシップ実施9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

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、前述したように実習生を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

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。必修科目化の意見も

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。現段階として、“やらまいか教育”の中でいずれかを履修するという選択必修制の採用が望ましい方式であろう。

(5) 事前研修の効果

事前研修では、仕事をす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

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は少なくなり、将来の人材育成という意識も高まっている。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増えてきている。しかしながら、大学としては、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。

10.2 インターンシップの将来の展望

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必ずしも多いとは言えない。

したがって、次の手段として長期のインターンシップの導入が考えられる。しかし、これには企業側とのより高い信頼関係と連携が必要であり、大学としても意欲が極めて高く能力を備えた学生のみが参加できるところから始めることが必要と思われる。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ろう。

11. 謝辞

本年度のインターンシップ・プログラムを実施するにあたり、ご協力をいただいた企業およびその担当者の皆さん、そして報告会で発表をご担当いただいた皆さんに心から感謝致します。

そして、来年度もよろしくお願い致します。

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.

6) 富田寿人 他, 平成18年度インターンシップ実施報告—キャリア教育メイン・プログラムを目指して—, 静岡理工科大学紀要, 第15巻, 2007, 127-139.

Web デザイン特別プログラム教育のための小規模サーチエンジンの試作

Trial Development of Small-scale Search Engine to Educate Undergraduate Students in "Web Design" Special Program

幸谷智紀* 竹口友大**

Tomonori KOUYA* Tomohiro TAKEGUCHI**

Abstract: In April of 2009, we will start to educate "Web Design" as a important part of some "Special Programs" in newly started "Faculty of Comprehensive Informatics." In this program, we will reserve some amount of time to spend on learning scripts languages like PHP and Perl and SQL to manipulate databases by project-based learning method. Lack of educational materials for these purposes is currently making us develop such materials. In this paper, we describe brief summary of our small-scale search engine as one of educational materials for "Web design" special program.

1. 初めに

静岡理工科大学総合情報学部では 2009 年度から特別プログラムの一つとして「Web デザイン」を据えることを決定している⁴⁾。いわゆる Project-Based Learning(PBL) の手法を用いて実施されるもので、総合情報学部に属する意欲あふれる学部 2 年生 20 名程度を対象に、World Wide Web(以下 Web と略記)の技術全般を、実践を通じて習得することを目的とするものである。現在の計画では一年間に渡って 168 コマ(1 コマ=90 分)を確保し、5~6 名の教員が Web に関する技術の習得と制作物の評価を行うことを予定しており、我々はこの中で「データベースと Web」、即ち DBMS と Web を組み合わせて利用する 3 層 Web システムを構築する時間を担当することになっている。計画当初はこの時間内にサーチエンジン全体を構築する実習を行う予定であったが、その後の担当教員グループでの話し合いの結果、あくまでその基礎部分を教えるに留めたほうがよいということになった。従ってサーチエンジンの構築そのものは、意欲と能力のある学生向けのオプション教材、および卒業研究のための教材という位置づけである。

教育としてサーチエンジンを構築する試みはテネシー大学で既に行われコースウェアが出版されている³⁾が、これは線型計算と情報技術との橋渡しを目指したものであるのに対し、我々の目指すのは 3 層 Web プログラミング技術の応用としてのサーチエンジンシステムである。従って、基本的には既存のスクリプト言語の習得と、そこから SQL を用いて DBMS を操作するためのプログラミング実習が主となるが、それらを予備知識のない学生に習得させるための教材は現在適切なものが存在しない。そのため、我々は学内 LAN の環境でも設置可能な小規模サーチエンジンシステムを作り、それを段階を追って技術を習得しながら作り上げるための教材²⁾もあわせて執筆した。2007 年度の幸谷研究室における情報セミナー II ではこれを用いて 3 層 Web プログラミングの技術習得を行っている。最終的にはこのシステムを様々な用途に応用していくことを予定しており、従って、用途に合わせた実践的なサーチエンジンシステムとその技術を学ぶための教材開発は今後も継続していかねばならない。そのため、プロトタイプ版でも現状の商用サーチエンジンの基本機能を持つものを作り上げ、その性能評価を行ってシステムの限界を知っておく

必要がある。

本稿ではまずこのサーチエンジンシステムを構築するに至った経緯を説明する。次に現状の商用サーチエンジンシステムの例として Google の機能を解説する。そしてこれを土台にして構築した我々の小規模サーチエンジンシステムの解説を行い、その性能評価を行った結果を示す。最後に、まとめと今後の課題を提示して、次年度以降の開発計画への指針としたい。

2. Web デザイン特別プログラムと 3 層 Web プログラミング教育

Web デザイン特別プログラムは総合情報学部に属する 5 名の教員(菅沼・宮岡・金久保・手島・幸谷)に非常勤講師を加えた 6 名で担当し、主として人間情報デザイン学科の Web デザインコースに進む 2 年生が受講することを想定している。

このプログラムの目的は「Web デザイン」を総合的に学ぶことである。近年の Web は静的な HTML ファイルによる Web ページだけでは語れず、動画ファイルや Flash などを用いて視覚効果を高めたり、バックエンドにデータベースを用いる 3 層 Web システムを用いることが当たり前になっている。当然、TCP/IP Protocol Suite を土台とした Web サーバシステムの運用についてもそれなりの知識が必要となる。このような現代の Web を成立させるための IT 技術を総合的に学び、加えて狭義のデザイン能力とそこから受ける心理的効果についても学び、身に付けることが本プログラムの目的である。

このように様々な異分野の技術や知識を学ぶため、一年間に渡り、毎週 6 コマを使い、Project Based Learning の手法を用いて、理論と実践を交互に組み合わせながら Fig.1 に示すような順序で総合的な Web デザイン能力を磨いていく。

我々はこのうち「データベースと Web」36 コマ分を担当する。この部分のシラバス案の詳細を Fig.2 に示す。ご覧の通り、この中では 3 層 Web プログラミング技術を中心に学んでいくことになる。

ユーザが直接操作する Web ブラウザ、Web サーバ、バックエンドの DataBase Management System(DBMS)の 3 層から成る Web システムを構築するためのプログラミングを、本稿では「3 層 Web プログラミング」と呼ぶことにする。この歴史は古く、CGI は Web 草創期には利用されていたので、それと同じ時期には考案されていたのではないかと推察される。既に 1996 年にはまとまった邦書⁵⁾が出版されているが、10 年以上経った現在でも、フリーな DBMS が主流になってきたと

2008 年 3 月 4 日 受理

*理工学部情報システム学科

** (資) わいにじ

特別プログラム概要
HTML
JavaScript
PhotoShop & Flash
動画コンテンツの作成
Webページの心理評価(1)
Webデザインとユーザビリティ
Semantic Web/インターネットビジネス/情報倫理
Webページの心理評価(2)
前期報告レポート作成
2年生前期

9月	3DCGとWeb3D
10月	Web3Dの制作
11月	データベースとWeb
12月	Java
	Webデザイン
1月	Webページの心理評価(3)
	最終発表会と全体講評
	2年生後期

Fig. 1: Web デザイン特別プログラムのシラバス案

いう以外の技術の変化はない。それだけ「枯れた」技術と言えよう。この枯れた技術の現代的応用としてはサーチエンジンというものが面白いのではないかと我々は考えている。

しかし、現状では学生のプログラミング技術の習得状況は甚だ怪しく、プログラミング以外の関連事項も含め、一通りのことを PBL の中で教え込む必要があると思われる。以下、3 層 Web プログラミング教育に必要な重点事項を述べる。

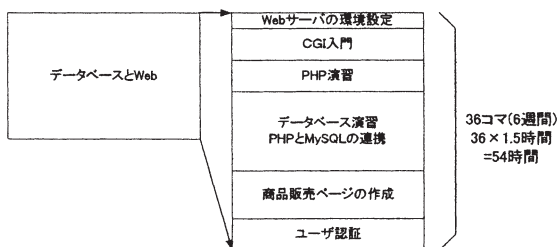


Fig. 2: 「データベースと Web」のシラバス案

2.1 Web サーバの運用技術

インターネットにさらされる環境で運用することを前提とした、Web サーバの運用技術の習得は必須と考えている。最近では ISP が用意するお仕着せの環境で CGI を動かすことが当たり前のことになっているが、じっくり時間をかけて学ぶことのできる機会に、システムの根本に触れておくことは無駄ではない。また、仮想マシン環境が一般化してきている昨今の現状を考えると、管理者 (root) としてサーバに触れる機会は逆に増えてくるとも考えられる。

そこで、昨年整備した VMware 環境⁶⁾ を利用し、OS(CentOS) のセットアップから Web サーバの環境設定まで全てを学生個人で行ってもらい、その環境の上で全ての実習を行うようにしようと考えている。Web サーバは OS に標準で搭載されている Apache を使用し、httpd daemon の起動と停止、httpd.conf の設定変更、アクセスログの読み方とログ解析ツールの利用法等を習得させる。UNIX の CUI に不慣れな学生が殆どだが、我々の経験上、GNOME のような GUI も併用すれば、実習に

支障をきたすことはないと思われる。

2.2 Perl/PHP の知識

3 層 Web プログラミングは、スクリプト言語だけではなく、Java や C/C++ といったコンパイラ言語でも可能である。最近ではむしろ後者、特に Java による実装が増えているように思われる。Multi-core CPU が増えつつある昨今では、Multi-thread 化の容易な言語で実装した方がパフォーマンスの点で有利になることが多いだろう。

しかし、Perl による CGI の実装は長い間標準として使用されてきており、現在でも Movable Type⁸⁾ のような主要な Web アプリケーションでも Perl を利用している例は少なくない。また、後述するように、我々の実装した Web ロボットは、長年の実績を積んできた Perl Module(libwww, Encode 等) を多数利用し、行数を抑えている。将来的には Java 等のコンパイラ言語への移行も考える必要があるが、現状、我々が持っているネットワーク資源を考えると、Perl で十分という面がある。

そこで我々は、Perl による CGI やデータベースプログラミングを教えると共に、並行して PHP についても触れる予定でいる。言語に関わらず、データベースの操作は SQL を発行してデータを操作するだけ、という基本を知る意味でも複数の言語に触れる機会があった方がよい。また、Perl に似ていながら可読性の良いスクリプトが書け、HTML に埋め込む形で容易に変更が可能な言語が存在することも知っておいた方がいい。

2.3 データベース (SQL) の基礎知識

コンピュータを専門とする大学学部において、データベースを講義しないところは皆無であろう。本学でも開講されているが、受講した学生の様子を見ると、ほとんど身につけていないというのが現状である。これは担当教員の責任というよりは、座学として RDB 理論を教えるという教育体制自体に無理があると思われる。実際、履修した学生に聞いてみると、RDB の操作は集合とその演算として考えられるという基本は理解しているようだが、それを SQL 文として書き下して活用することには繋がっていないようである。

従って、じっくり実習期間が確保できる PBLこそ、データベース技術の習得にふさわしい場と言える。前述したように、

データベースと Web の連携は枯れた技術であるが、現在のようフリーで使用できる DBMS が存在し、外部ストレージが Tera バイト単位で扱えるようになった昨今でこそ、その真価を個人で体験できるようになったと言える。

特に今回実装するサーチエンジンでは、扱うデータ量は膨大になる。また、昨日までアクセスできていた Web サイトが今日は存在しない、ということも日常茶飯事である。収集したデータの更新・削除を高速におこなうためには、信頼性の高いトランザクション処理が可能な DBMS が欠かせない。

従って、我々の教育では DBMS を扱うためのごく基本的な SQL 文の使い方だけを扱うようにし、データの更新・削除・検索を行う 1 行 SQL 文が書き下せる水準に達すればよしとする。

3. Google の検索機能

以上述べてきたように、我々の開発するサーチエンジンは 3 層 Web プログラミング技法を学ぶための教材として適切な規模のものである必要がある。また、ネットワークやコンピュータリソースの限られた環境で動作させるため、集められる URI 数は自ずと限られてくる。従って、サーチエンジンとしては行数も URI 数も必然的に小規模なものとなる。

とはいえ、小規模ながらも Web デザイン特別プログラム教育の一環として使用される以上、現代的なサーチエンジンの基本機能は備えていなければならない。そこで、世界的に最も成功している Google の機能の主要な機能を備えたものを目指すことにする。

Google の成功は、特に PageRank と呼ばれる被リンク数に基づく URI のランク付け機能によってもたらされたと言われている¹⁰⁾。しかし、最近では PageRank に加えて、検索キーワードや URI 間の関連性を柔軟に取り入れた機構も導入されているように見受けられる。ここでは PageRank による URI のランク付けの機構と、表面的に観察できるそれ以外の機構について述べる。

3.1 PageRank による重みづけ

PageRank に関しては既に Web 上¹⁰⁾や優れた書籍¹²⁾による解説が溢れているので、ごく簡単な解説に留める。基本的には Fig.3 に示すようにして、被リンク関係に基づいた確率遷移行列 H を導出することになる。

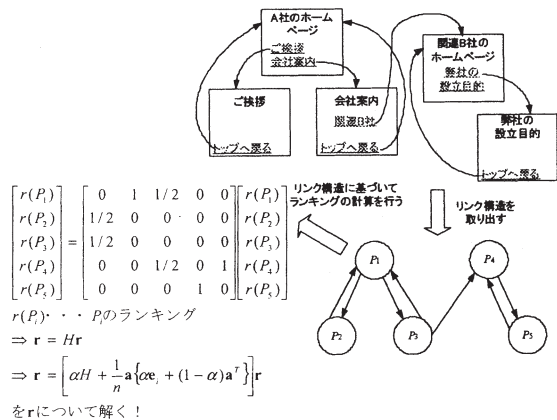


Fig. 3: PageRank 計算のための確率遷移行列の導出

この際、Tree 構造の末端、ループ構造もあり得るので、適度

なランダム移動成分を加味して次のような処理を行って Google 行列 G を導出する。

1. H の列成分が全てゼロの列を $1/n$ で置き換えた S を生成する。もし i 列目が全てゼロであれば:

$$S = H + \frac{1}{n} \mathbf{e} \mathbf{e}^T \quad (1)$$

となる。ここで \mathbf{e}_i は単位ベクトルであり、 $\mathbf{e} = \sum_{i=1}^n \mathbf{e}_i$ である。

2. $0 < \alpha < 1$ という定数 α を決めておき、Google 行列 G を

$$G = \alpha S + \frac{1-\alpha}{n} \mathbf{e} \mathbf{e}^T \quad (2)$$

$$= \alpha H + \frac{1}{n} \mathbf{e} (\alpha \mathbf{e}^T + (1-\alpha) \mathbf{e}^T) \quad (3)$$

とする。

Google 関係者による示唆によれば、 $\alpha = 0.85$ が Google 推奨値ということである¹²⁾。数学的にはこの G の最大固有値 $\lambda_1(G) = 1$ に対応する固有ベクトル \mathbf{r} が PageRank 値となる。これを求める数値計算アルゴリズムとしては、行列ベクトル積計算とノルムによる正規化計算のみから成るべき乗法¹³⁾を用いるのが適切である。最も計算量を必要とする行列ベクトル積では、 H がランダム疎行列であることを考慮すると劇的に計算性能が上がる。従って、(3) 式に基づいて行列ベクトル積の計算を行うことが望ましい。

3.2 URI 間の関連性と検索キーワードによる小規模な順序変更

基本的に、Google では PageRank に基づいて検索結果の表示順を決めていることになっているが、検索キーワードや URI によっては局所的にそれが破られることもある。

例えば検索キーワードとして「まんねん貧乏」と「得能史子」を与えた時の検索結果を Fig.4 に示す。

Amazon の URI と、「うだうだ Weblog」の URI の表示順が、検索キーワードによって入れ替えられていることが分かる。厳密に PageRank だけで表示順を決めているのであれば、局所的とはいえ、このような順序変更は起こらない筈である。また、インデントを付けることで関連が強いと判断された URI の引っ張り上げも行われており、これは意図的に PageRank を無視して実行されている。

しかし、このような観測を行っても表示順の詳細は不明なままである。我々のサーチエンジンにおいても、PageRank 以外の要素をどのように使用してユーザの望む順に表示するかはまだ詰め切れていない。従って、現時点ではこの機能は実装していない。

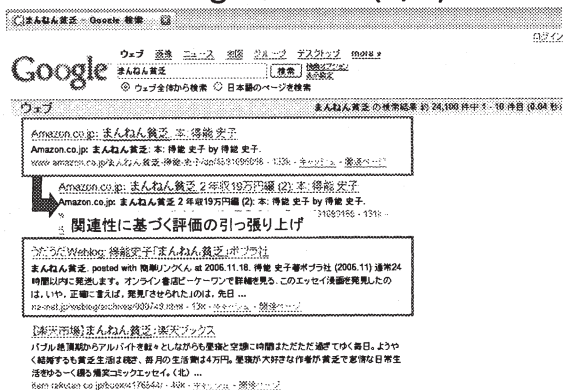
4. サーチエンジンシステムの概要

以上のような Google の機能に基づき、最終的に作成したサーチエンジンシステムは Fig.5 のような構成になった。

教育用のシステムであるため、最小限の 3 つのコンポーネント構成で実現できるようにしてある。各コンポーネントは次のような機能を持つスクリプトもしくはソフトウェアを使用している。

DBMS フリーで使用できる MySQL¹¹⁾を採用する。収集した全てのデータはここに格納される。

Google検索例(1/2)



Google検索例(2/2)

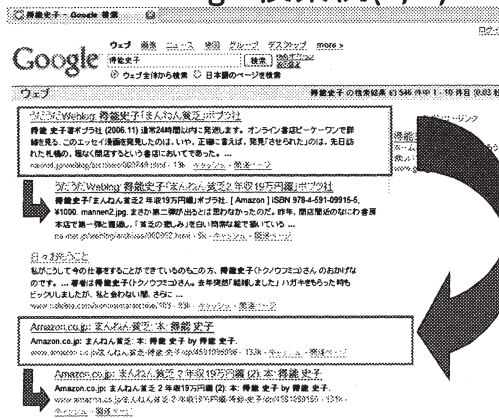


Fig. 4: Google 検索例— 検索キーワードによる順序変更 (左: 「まんねん貧乏」, 右: 「得能史子」)

検索用 IF 現状ではまだ仕様が固まっていないが、最終的には PHP スクリプト (+ JavaScript?) による実装を予定している。検索結果は後述するランキングの高い順に表示されるようになる。

Web ロボット Perl による Web データ収集プログラムで、現在のところ 400 行程度の規模である。robots.txt による収集制御に対応している。

図では DBMS, 検索用 IF, Web ロボットを別マシンで動作させているが、実習ではこれらを 1 台の仮想マシン上で動作させることになる。

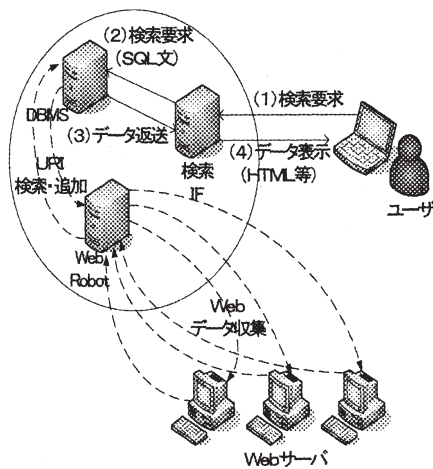


Fig. 5: サーチエンジンのシステム

これらのうち、特に重要な機能である Web ロボットと、ランキング計算部分について以下に述べる。

4.1 Web ロボット

Web ロボットの基本動作は

1. 既知の URI にアクセスし、テキストデータのみを取得

2. 取得したテキストデータ (HTML など) から新たな URI を取得 ⇒ 1 へ

というきわめて単純なものであるが、一歩間違えると悪質なアタックツールにもなりかねない危険な側面を持つ。そのため、次の機能を持つことが、安全な Web ロボットの運用には不可欠である。

- 同一 Web サーバにアクセスする際には、必ず十数秒以上の間隔をあける。
- robots.txt⁹⁾ によるアクセス制御に従う。

更に、新たな URI 取得のためには meta タグやアンカーを適切に読み取る機能が欠かせない。このためには HTML Parser が必要である。また、検索のためには Unicode に対応したエンコード機能を持ち、格納するテキストデータのエンコード方式を統一しなければならない。これから増えると思われるオープンドキュメント形式のオフィス文書ファイルも取り込むためには圧縮ファイルへの対応も求められるだろう。

現在のところ、これら全ての機能を満足する機能を備えた言語環境はそう多くない。そのため、パフォーマンスの向上に関しては難はあるものの、今のところは Perl とそのモジュール群を利用して Web ロボットを実装してある。この結果、スクリプトサイズも 500 行に満たない程度に抑えられている。

それでも学生は慣れない言語とモジュール群を活用しなければならないため、実際の PBL を行う際には配慮が必要となる。まず Perl 言語の解説を行い、次に DBI モジュールの使い方を通じて MySQL の操作手法に慣れ、その後に Encode, LWP, RobotUA, HTML Parser モジュールの機能を、短いスクリプトを作り動かすという経験を通じて理解させるようにする。慣れない言語と高度なネットワークアプリケーションの機能に親しむには、このように段階を追って少しずつ Web ロボット全体の機能が把握できるようにする配慮が必要であろう。

4.2 ランキング計算処理 — BNCsparse ライブラリの開発

前述したように、ランキングは Google 行列 G をべき乗法にかけることで得られる。我々のサーチエンジンではこのランキングを WebRank と呼ぶことにした。

この WebRank の計算を行うには、ランダム疎行列ライブラリを用いることが計算時間とメモリの節約のためには必須である。既にそのような疎行列ライブラリは様々なものが存在するので、既存のものを使うことも充分可能であるが、我々はスクラッチから作り上げた BNCsparse ライブラリを用いることにした。

新たに作った理由は次の通りである。

1. ベキ乗法で使用する計算は次のような行列ベクトル積である。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{k+1} &:= G\mathbf{r}_k \\ &= \alpha H\mathbf{r}_k + \frac{1}{n} \mathbf{e} (\alpha \mathbf{e}^T + (1 - \alpha) \mathbf{e}^T) \mathbf{r}_k \end{aligned}$$

これと基本ベクトル演算だけをサポートした最小限の機能のもので十分なため、最小のコード量 (500 行程度) で実装できる。

2. 後述するが、ベンチマークテストの結果、WebRank 計算よりもその前処理部分に時間がかかっており、あまり高速性は必要ないという現状がある。能力が足りないということが判明してから、より高速な既存のライブラリを用いても遅くない。
3. WebRank による順位付けが目的なので、各 URI には WebRank 値に基づいた整数値を与えておけば良い。こうすることで、浮動小数点数を用いるよりもデータベースのアクセスを高速化することができる。
4. チューニングの必要があまりないので、ANSI C の範囲で実装すればよい。こうすることで Linux と Windows の両方で動作するものができた。

BNCsparse ライブラリにおけるランダムスパース行列は、下記のような構造体で実装されている。これは CRS(Compressed Row Storage) 方式を基本とし、all ゼロの列構造も保持するものになっている。

```
typedef struct {
    // Elements of matrix
    double *element;
    // Dimensions of Row and Column
    long int row_dim, col_dim;
    // Indices of Non-zero elements
    long int **nzero_index;
    // Numbers of non-zero elements in i-th row
    long int *nzero_col_dim;
    // Numbers of non-zero elements in i-th column
    long int *nzero_row_dim;
    // Total number of non-zero elements
    long int nzero_total_num;
} drsmatrix;
```

例えば、次のようなランダム疎行列 H を格納するとする。

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

この時、構造体には以下のような形でデータが格納されることになる。

```
element = [1 1/2 1/2 1/2 1 1]
nzero_total_num = 7
row_dim = 5, col_dim = 5
nzero_index[0] = [1 2]
nzero_index[1] = [0]
nzero_index[2] = [0]
nzero_index[3] = [2 3]
nzero_index[4] = [3]
nzero_col_dim[0] = 2
nzero_col_dim[1] = 1
nzero_col_dim[2] = 1
nzero_col_dim[3] = 2
nzero_col_dim[4] = 1
nzero_row_dim[0] = 2
nzero_row_dim[1] = 1
nzero_row_dim[2] = 2
nzero_row_dim[3] = 1
nzero_row_dim[4] = 1
```

BNCsparse ライブラリを用いて WebRank を計算する手順は次のようになる。

1. テーブルからテキストファイルにリンク構造を書き出し
2. ベキ乗法に基づく WebRank 計算 (固有ベクトルが欲しい)
3. WebRank 値をテーブルに書き戻し

こうしてある頻度で収集された URI データベースに WebRank を書き込んでおくことで、検索結果はこの大きい方から先に表示できるようになる (Fig.6)。

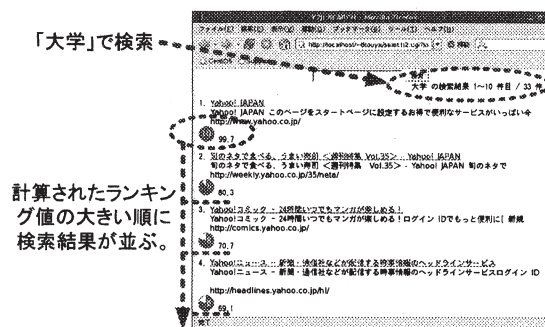


Fig. 6: 検索結果の表示 (「大学」で検索)

5. ベンチマーク結果

以上のような機能を備えたサーチエンジンシステムを動作させた結果をここでは示す。Fig.5 ではデータベース、検索 IF, WebRobot が別のマシン上で動作しているが、ここでの実験結果は特に断らない限り、一台の PC で行ったものである。

サーチエンジンのベンチマークは環境によって大きく異なる。まず外部回線容量がある程度大きくないとそこがボトルネックになってしまう。本学のように、堅固な Firewall で守られた組織内 LAN から実験を行う際には Firewall や内部 Proxy の性能も関係してくる。そして WebRobot 内の処理を並列化することで能力向上を目指そうとすると、今度は 2 以上の CPU 数あるいは Core 数が必要となる。更に全てのデータはデータベースに蓄えられるので、データ量が増えるに従い I/O 性能

はより高いものが求められる。どの要素もサーチエンジン性能に直結するものであるから、本来ならばそれらを全てチェックしなければならないが、現状では用意できる環境には制約があるので、その範囲内で出来ることを行って見たのが以下に述べる結果である。

5.1 本学内 LAN からの URI 収集と WebRank 計算結果

まず静岡理工科大学研究実験棟 LAN から URI 収集を行った結果 (Fig.7) と、それに対して WebRank 計算を行った結果を示す。

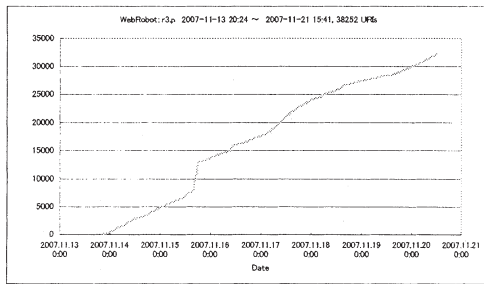


Fig. 7: 学内 LAN 内からの URI 収集数

条件は以下の通りである。

- 静岡理工科大学 LAN からアクセスしたので、Firewall と研究実習棟 Proxy の 2 段の Proxy を介して外部 7Mbps 回線を用いたことになる。
- 使用ハードウェア・ソフトウェア環境は次の通り
 - CPU Intel Pentium 4 (1.8GHz)
 - RAM 1GB
 - HDD 40GB
 - OS CentOS 5 x86_32 版
- WebRobot(r3.pl) は前述したように Perl スクリプトとして実装し、1 プロセスのみ起動。完全なシリアル動作である。
- Yahoo! Japan のトップページ (<http://www.yahoo.co.jp/>) からスタートした。後述するように、現状の WebRobot の収集アルゴリズムは深さ優先になっているため、殆どの URI は Yahoo! Japan サイト内のものとなっている。
- 1URI にアクセスするごとに 10 秒の wait を置くようにした。
- robots.txt の指示に従ってアクセス制限をしているので、意図的に WebRobot を拒否しているサイトの情報は収集できない。
- テーブルに記憶する URI は接続確認されたもののみである。アクセスできなかったものは記憶しない。

この結果、一週間で約 3 万 URI が収集できた (Fig.7)。更に収集を行い、最終的には約 8 万 URI 集めるに至った。これらのリンク構造 (行列 H) を Fig.8 に示す。黒点は非ゼロ要素があることを示している。

前述したように、3 万 URI でも 8 万 URI でも殆どが Yahoo! Japan サイト内の URI なので、行列の下三角部分には殆どリンクがない。これは発見した順に URI に固有 ID 番号を振っているためだと思われる。

これら 2 つのリンク構造に対して WebRank 計算した結果を次に示す。WebRank 計算のためのべき乗法の収束条件は次のように設定した。

$$\|r_k - r_{k-1}\|_1 \leq 10^{-5} \|r_{k-1}\|_1 + 10^{-50} \quad (4)$$

高速な CPU を持つマシン (Intel Core2Duo 2.16GHz, gcc 4.0.1 の場合) で WebRank を計算した結果は次の通りである。

1. テキストファイルからの読み込み
 - 38243URIs: 0.71 sec
 - 81305URIs: 1.78 sec
2. べき乗法の計算時間
 - 38243URIs: 0.09 sec (11 回反復, $\alpha = 0.85$)
 - 81305URIs: 0.30 sec (16 回反復, $\alpha = 0.85$)

現状では、データベースからリンク構造を引っ張り出してファイルに書き出し、それを読み取って J を構築している。従って、テキストファイルの読み込み時間とべき乗法部分の計算時間の和が WebRank 計算全体の時間を規定していることになる。この結果によって、テキストファイルからの読み込み時間はべき乗法の計算時間に比べて約 6 倍~7 倍かかっていることが分かる。よって、べき乗法部分をこれ以上高速化しても効果薄であり、それよりは I/O 性能を上げる方がよい。

5.2 URI 収集性能

更なる高速化を目指すため、URI 収集においてボトルネックになりそうな部分の改善を行って、実験を行った。改良したのは以下の 3 点である。

- ネットワークをより高速な外部回線 (ベストエフォート 100Mbps) を持つ所に変更
- WebRobot の処理をマルチプロセス化し、並列動作を行うようにした
- Cache メモリを搭載した RAID カードを用いて SATA HDD を RAID0 構成にし、ローカルストレージの性能向上を図った

このうち、マルチプロセス化による並列動作と、RAID 構成を用いた改善の概要について以下で解説を行う。

5.2.1 マルチプロセス化による並列動作

マルチプロセス化した WebRobot の動作概念図を Fig.9 に示す。

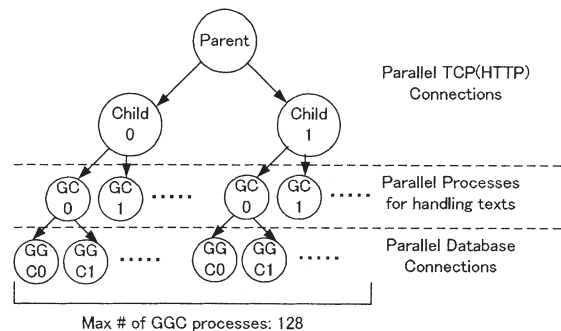


Fig. 9: Web Robot 処理の並列化

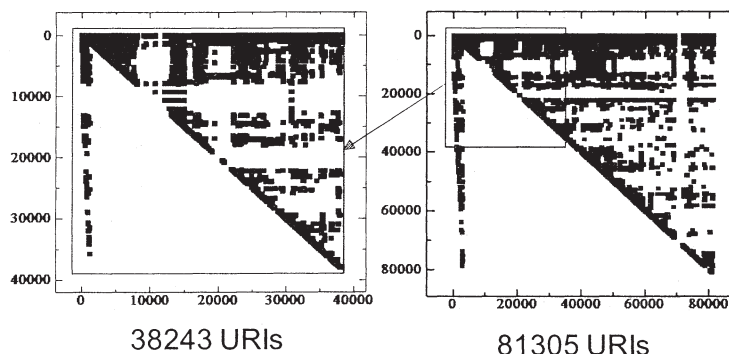


Fig. 8: H の構造

親 (Parent) プロセスは子 (Child) プロセスを fork を使って二つ起動した後はプログラム終了まで何もしない。子 (Child) プロセスは Web からのデータ収集を行うための TCP 接続 (HTTP) を担当し、接続が完了してから孫 (GC, Grandchild) プロセスを生成する。孫プロセスはひ孫 (GGC, Grand Grandchild) プロセスを生成し、テキスト処理を行った後、すぐに終了する。ひ孫プロセスはデータベースとの入出力を担当し、処理を終えた後はすぐに消えるようになっている。

全体としては親からひ孫プロセスを含めた合計数が上限値 (128) に達するまでは孫およびひ孫プロセスが生成され続ける。もし上限に達した場合は、子プロセスが 10 秒間 sleep した後、上限を下回っていることを確認できれば再度孫プロセスを fork する。

このような多段 fork によってプロセスを生成するようになったのは、子プロセス以下のプロセスをゾンビ化 (親プロセスへのリンクを失った状態) させないためである。末端のひ孫プロセスは init が預かるのでゾンビ化することはない。

一般に、近年はプロセスよりはスレッドが並列動作のために使用されることが多いが、ここではスレッドもプロセスも同じ実体として実装されている Linux を用いているので、枯れた技術である fork によるマルチプロセス構成を採用した。これによって、より大量の URI を収集することが可能になる効用が期待できる。

また、並列動作の性能向上を確実化するために、Quad-core CPU を搭載した次のようなマシン上で動作実験を行った。

- CPU Intel Core2Quad 6600
- RAM 4GB
- HDD 250GB
- OS CentOS 5 x86_64 版

5.2.2 RAID カードによるローカルストレージの高速化

これに加えて、I/O 性能の向上を図るため、大容量の Cache メモリを搭載した RAID ボードを上記のマシンに乗せ、RAID0 の機能を用いた。この結果、I/O 性能のボトルネックが解消され、より大量の URI が収集できる可能性が増える。

以上のような環境で URI 収集数の変化 (1 週間分) を Fig.10 に示す。比較のため、RAID ボードなし (No RAID0) の結果も載せてある。

RAID 機能を用いた場合は使用しない場合に比べ、最終的には 1.5 倍の URI 数の収集が可能になっていることが分かる。

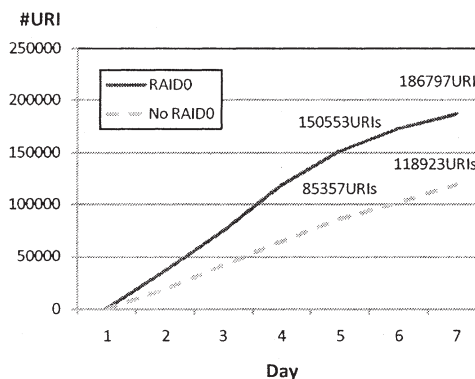


Fig. 10: 100Mbps 回線からの URI 収集数

なお、このグラフからはよく分からないが、RAID0 を使用した結果、ローカル側のルータがハングアップし、URI 数の伸びが若干削がれてしまっている。そのため、より高性能のルータを用いることにより、更なる性能向上が見込めることが予想できる。

6. まとめと今後の課題

以上、設置予定の Web デザイン特別プログラムの紹介、3 層 Web プログラミング教育の必要性とその応用としてのサーチエンジン構築の意義、そして教材として使用する予定のサーチエンジンシステムの性能評価を述べてきた。今後の課題はまず PBL の実践を行うことに尽きるわけだが、その際には以下のことをもう少し詰める必要があると我々は考えている。

教育課題 3 年生向け実験講座での教育実践の結果、PBL としても我々の目指すレベルは相当高く、学生にとっては厳しいものになると思われる。もちろん途中でドロップアウトさせないように精神的にも学習面でも注意深く指導する必要がある。そのためには、充実した内容の印刷物のテキスト²⁾ が不可欠である。これを次年度中に是非とも完成させたいと考えている。

研究課題 サーチエンジンシステム自体は、人間とインターネットとの接点となる不可欠のツールとなっており、学術研究課題としてもかなり面白いテーマであると考えている。現在のところ、次のことについて、このPBLで作成したサーチエンジンによる知見を元に研究テーマとして発展させられないか、と思案中である。

- ランキング計算の高速化・安定化と、ユーザ要求に応じたランキングの変動機能
- 日本語形態素解析を利用した検索要求部の改良

応用課題 我々が用意できるネットワークリソースを考えると、とても Google に対抗できるようなサーチエンジンシステムを作り上げることはできない。そこで、このPBLで構築したシステムを限られたネットワークエリア内の組織内ツールとして運用することを思案中である。その際には、グループウェアに取り入れられているような、組織にジャストフィットするようにランキングや Web ロボットをカスタマイズするための機構を入れる必要があるだろう。

また、外部回線さえ高速にできれば、更なる大量の URI が収集できることが判明した。多重にマシンを並べ、更なる高速化をローカルルータの限界まで行うことができれば、データマイニングのための大量のテキストデータ収集が行える。

謝辞

本研究は静岡理科大学特別研究費の支援を受けて行われた。関係者一同に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 竹口友大・幸谷智紀, ランク機能付きサーチエンジンの開発および I/O ボトルネック対策, 第 70 回情報処理学会全国大会講演集, 2008.
- 2) 幸谷智紀・竹口友大, “サーチエンジンを作ろう”, 未公開テキスト.
- 3) M.W.Berry, M.Browne, Understanding Search Engine, SIAM, 1999.
- 4) Web デザイン特別プログラムの紹介, <http://ex-cs.sist.ac.jp/~suganuma/dep/PBL/PBL.html>
- 5) 日経データプロ編, WWW-データベース連携システム構築法, 日経 BP 社, 1996.
- 6) 幸谷智紀, VMware を用いた PC cluster と PC 教室との共存実験, 平成 18 年度情報教育研究集会論文集, pp.507 - 501, 2006.
- 7) The Community ENTerprise Operating System, <http://www.centos.org/>
- 8) Movable Type, <http://www.movabletype.com/>
- 9) <http://www.robotstxt.org/>
- 10) Google の秘密 - PageRank 徹底解説, <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~baba/wais/pagerank.html>
- 11) MySQL, <http://www.mysql.com/>
- 12) A.N.Langville, C.D.Meyer, Google's PageRank and Beyond, Princeton University Press, 2006.
- 13) 幸谷智紀, ソフトウェアとしての数値計算, <http://na-inet.jp/nasoft/>

- 14) 山本達文, "PHP+MySQL と茶釜 (Chasen) を用いたサーチエンジンの作成", 2007 年度静岡理科大学情報システム学科卒業研究.
- 15) 伊藤裕晃, "サーチエンジンのための検索順序づけ (Rank 付け) に関する研究", 2007 年度静岡理科大学情報システム学科卒業研究.

ネットワークを利用した講義用小テストシステムの構築

Development of a Quiz System for Lecture by Using Local Area Network

常吉 俊宏*, 常吉 高弘†

Toshihiro TSUNEYOSHI, Takahiro TSUNEYOSHI

Abstract: A series of computer programs have been developed for an on-line data-handling quiz system for lecture. Notebook PC based and cell phone email based cgi programs were shared in a local area network server and a local server inside a notebook PC which can interpret perl language. Each system can be used in a LAN connected PC environment for both teacher and students, or an environment of cell phones for students and a LAN connected PC only for teacher. Answer data transmitted from students by PC or cell phone is stored into an output file, checked with the right answer data file, and analyzed automatically to present the distribution of right and wrong answers by histogram and %. The program also shows all the questions and comments from students and a list of students' name who answered all the questions correctly in order of transmission time with the rank number. This system enables us an easy and prompt feedback from students for further education focusing on the difficult topics for them to understand. It promotes high achieving students to study the lecture further and also extract questions they hesitate to ask not by raising their hands.

1. はじめに

講義や実験の授業を行った後、あるいは、次の授業の前に、今回あるいは前回の授業を学生がどれだけ理解したかを確かめたい時が頻繁にある。テストとまではいなくても小さなテストを課して正解率を取り、直後の授業の前に何らかの手を打たねばならないかどうかを判断したい所である。しかしながら、紙の小テストの集計・把握には相当の時間と労力を取られ、億劫になりがちである。手を挙げさせて理解できたかどうかを尋ねても挙手する学生の数の少ないことが多く、正確さに欠ける場合が多い。また、復習をした学生がどの程度理解しているかを授業直前に、紙の小テストを課し、直後の授業に生かすように集計・把握するのは時間的に不可能であるし、授業の最後に小テストを課して、次の授業までに集計・把握しても、復習後の学生では状況が異なってしまう。これを ICT (情報通信技術) でサポートすることを計画した。

開学からこの方、新入生全員にノートパソコンをリースしながら、情報系の学科ならそうでもないと思うが、なかなかパソコン利用の授業がなく学生の間、「何のために新入生から高いノートパソコンを買わせたのか」という不満があることは知っていたので、このノートパソコンをまず利用することとした。これらを立ち上げる契機となったのは2001年度後期から情報システム学科3年次学生向けに開講した「生命と環境」である。これは「新カリキュラム」の中で情報システム学科との授業交流のひとつとして私が担当することになった科目であり、それ

まで物質科学科の60~80名程度の学生しか一度に教えてこなかった私には120名超の学生達の登録する授業を担当することに呆然とした記憶がある。そこで逆に授業から完全に紙をなくす計画を立てた。

講義には本やプリントによるテキストは設定せず、章ごとにパワーポイントファイル(PPT)を作成、スクリーンに投影するのと同じ詳細な図表、写真、文章を学生の手元でダウンロードし、カラーでも見ることができるようにした。また関連の理解を助ける動画ファイルやエクセルファイルなども学内サーバーに授業専用のフォルダを設け、学生が自由にダウンロードできるようにした。さらに毎回の講義の最初に小テストを実施、出席と小テストの点数を最終成績に40%組み入れることとした。また定期テストも小テストと同じようにノートパソコンを使用し、ただ選択肢だけでなく記述式の問題を数問含めて、選択肢番号と文章を送信させることとした。

さらに2004年度後期からは上記交流科目を物質生命科学科の学生に開講することになり、一時期ではあるが情報システム学科3年次と物質生命科学科2年次の合計140名超の登録学生に同時開講することとなった。この数の学生が同時に聴講できる教室は300、302と309であるが、いずれも学生の側に情報コンセントが設置されていない。そこでこの時は講義用テキストとして本を使用し、小テスト、定期テストには前述の目的で作成したノートパソコン用ソフトウェアを活用する形で、携帯電話のメール機能を利用して行った。

本報告では、最初にノートパソコン用に作成した小テスト・

2008年3月4日受理

* 静岡理工科大学 理工学部 物質生命科学科

† 首都大学東京 システムデザイン学部 情報通信システム工学コース

システム (PCT), 次に携帯電話メール用に作成した小テスト・システム (CPT), を紹介する。

2. ノートパソコン用小テスト・システム (PCT)

Web 上にはさまざまな、いわゆるアンケートプログラムがフリーウェアの形 (著作権は有) で公開されており、選択肢をいろいろな形で選んだり自由に記述ができるようになっている。そしてその結果を集計して、選択肢ごとの棒グラフ表示から%表示まで、多様な見やすい形で提示できるものも存在している。小テストシステムを最初からプログラム構築するには時間と手間が相当かかることと、バグつぶしに膨大な時間がかかることが想定されるため、今回の作成ではこれら既存のフリープログラムの活用を試みた。今回のシステム用には、選択肢入力が系統的でシンプルなもの、データ収集が系統的で、保存方法・形態がシンプルなもの、集計表示がわかりやすいもの、を目指し、多数のプログラムの中から perl 言語で記述された、主に2つの既存のプログラム^{1, 2)}の良い部分を結合し、本学の小テストに適した形に変形した。

2.1 学生用 PCT プログラム

覚え易い簡単な名前の perl 記述プログラム (inq.cgi) を学内サーバーの教員用フォルダ・授業用フォルダ内の「TEST」フォルダに配置し、細胞生物学小テスト(2005.5.19(木))

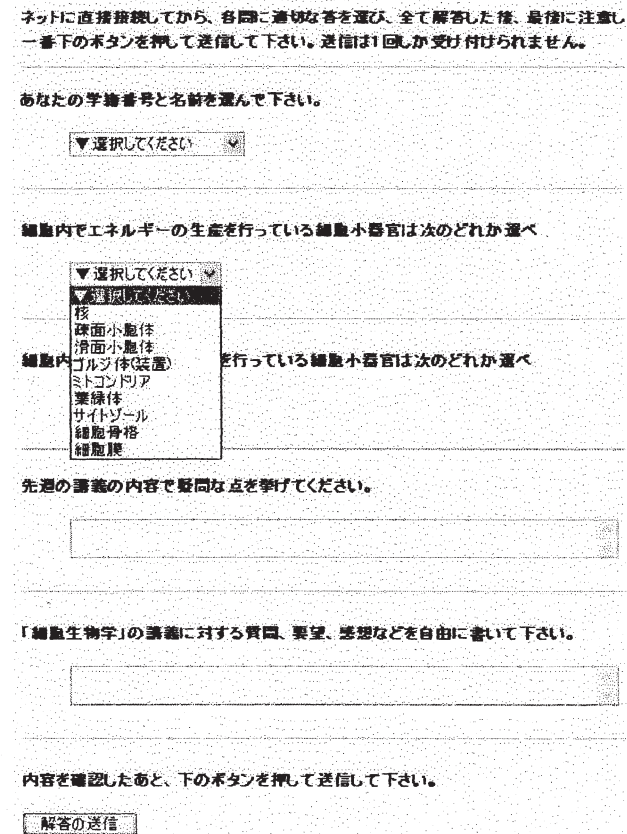


図1 学生用PCTプログラム入力画面

133.88.217.23	041406	5.05.19(木)10:55:4.1.1	少しずつわかって
133.88.217.12	041402	5.05.19(木)10:55:4.1.6	
133.88.217.21	041404	5.05.19(木)10:55:4.1.5	DNAの構造は複雑
133.88.217.19	041405	5.05.19(木)10:55:4.1.2	
133.88.217.52	041405	5.05.19(木)10:55:4.1.5	
133.88.217.19	041404	5.05.19(木)10:55:4.1.2	
133.88.217.28	041402	5.05.19(木)10:55:4.1.2	特にありません。
133.88.217.40	041401	5.05.19(木)10:55:4.1.2	
133.88.217.2	041400	5.05.19(木)10:55:4.1.2	
133.88.217.32	041401	5.05.19(木)10:55:4.1.2	
133.88.217.11	041403	5.05.19(木)10:55:4.1.6	
133.88.217.15	041403	5.05.19(木)10:55:4.1.2	
133.88.217.14	041405	5.05.19(木)10:55:4.1.2	
133.88.217.20	041405	5.05.19(木)10:55:4.1.3	
133.88.217.39	041403	5.05.19(木)10:55:4.1.2	
133.88.217.7	041400	5.05.19(木)10:54:4.1.2	
133.88.217.13	041406	5.05.19(木)10:54:4.1.1	もう少し小テスト
133.88.217.27	041405	5.05.19(木)10:54:4.1.6	アニメーションが
133.88.217.44	041402	5.05.19(木)10:54:4.1.6	全体的にまいち
133.88.217.16	031302	5.05.19(木)10:54:4.1.4	
133.88.217.34	041405	5.05.19(木)10:54:4.1.6	
133.88.217.36	041402	5.05.19(木)10:54:4.2.2	
133.88.217.49	041400	5.05.19(木)10:54:4.1.6	
133.88.217.31	041404	5.05.19(木)10:54:4.1.2	
133.88.217.6	031403	5.05.18(木)10:53:4.1.3	特になし、特になし
133.88.217.25	041403	5.05.19(木)10:53:4.1.2	
133.88.217.24	031403	5.05.19(木)10:53:4.3	
133.88.217.3	041403	5.05.19(木)10:53:4.2.4	エネルギーやタン

図2 学生用PCTプログラム・出力形式

フォルダにおいて、教員側で講義開始と同時に FTP プログラムからアップロードした、問題文と、セレクトボックス・ラジオボタン・チェックボックス・テキストボックスのパターン選択、各学生の学籍番号・氏名の選択枝も含めた選択枝文 (解答については 4~6 つから選択)、からなる入力ファイルを読み込み、問題・選択枝を提示する (図 1)。そして出力ファイルに、送信元の IP アドレス、選択した学籍番号・氏名、送信時刻、選択した選択枝の番号群、記述文 (質問・感想などプロジェクターに匿名で投影して OK と了解済みのもの、と、個人的な相談や質問など投影しては困るもの、の 2 種類を別々のテキストボックスに記述する) を 1 行にまとめて送信する (図 2)。送信が正常にできた時は「解答を受け取りました。おつかれさま」のメッセージを表示する。

送信の際、学生にはあらかじめイントラネットに PC を直接接続しておくよう指示するが、これを接続せずに送信しようとする、プロキシサーバーの IP アドレスが環境変数に記述されるため、プログラム中で判断して送信を拒絶し、改めて PC を直接接続した IP アドレスを送信させる (図 2 左端)。これをあとで情報センターから送られてくる dhcp ログリストを用い、接続した IP アドレスと各自の PC の ID (学籍番号) を照合し、本人 PC からの送信を確認、不正を抑止した。

以上の送信が正常にできたかどうかを学生自身がチェックできるプログラムを別に (perl.cgi) 用意し、出力ファイルを読み込んで学籍番号・氏名部分だけを学籍番号順に表の形で表示させる。なおこの小テストは現在のところ毎回 3 問ずつを課して解答締切りまで約 15 分程度、解説に約 5 分かかっている。解答作成の際は講義用 PPT ファイルなどの閲覧は許可するが、他者との相談は禁止している。

2.2 教員用 PCT プログラム

このプログラム名は学生には公開しない。万一ファイル名が見えた場合でも問題ないように長く判別しにくい名前にしておく。

- 問1:細胞内でエネルギーの生産を行っている細胞小器官は次のどれか選べ
 [0] 核
 [1] 液面小胞体
 [2] 滑面小胞体
 [3] ゴルジ体(装置)
 [4] ミトコンドリア
 [5] 葉緑体
 [6] サイトゾール
 [7] 細胞骨格
 [8] 細胞膜
- 問2:細胞内でタンパク質の合成を行っている細胞小器官は次のどれか選べ
 [0] 核
 [1] 液面小胞体
 [2] 滑面小胞体
 [3] ゴルジ体(装置)
 [4] ミトコンドリア
 [5] 葉緑体
 [6] サイトゾール
 [7] 細胞骨格
 [8] 細胞膜
- 問3:DNAの構造について記述した次の文章の中で誤っているのはどれか選べ
 [0] DNAはヌクレオチドの重合体つまりポリヌクレオチドである
 [1] ヌクレオチドはリン酸とリボース(5'炭素)、塩基からなる
 [2] DNAの骨格はリン酸とリボースからなる
 [3] DNAの遺伝情報は塩基が受け持つ
 [4] アデニン(A)とグアニン(G)はプリン塩基、シトシン(C)とチミン(T)はピリミジン塩基である
 [5] 生体内のDNA・RNA合成は5'から3'方向におこる
 [6] 2本鎖DNAは、5'→3'方向を同じ方向にそろえて、AとT、GとCの塩基がそれぞれ

細胞生物学小テスト(2005.5.19(木))解答送信者: 51名

041402	041404	041400	041402
041405	041402	041400	041402
041404	041406	041401	041400
041402	041404	041405	041405
041402	041401	041400	041401
041403	041405	041405	041403
041406	041405	041402	031302
041402	041400	041404	031403
031403	041403	031311	041403
031313	041401	041400	041403
041404			

図3 教員用PCTプログラム・送信確認画面

TESTフォルダもデフォルトのindex.htmlファイルをおいてディレクトリを読めなくしてある。ここでは先程のperl.cgiと同じルーチンを最初に使い、出力ファイルを全て読み込み、学生達の送信をチェック・表示(図3)しながら解答を締切。その後、既製のFTPプログラムから正答ファイルをアップロードしたあと、もう一度先程の教員用プログラムを更新し、出力ファイル中の学生達の解答と、正答ファイルのデータを各問ごとにプログラム内で照合、選択肢ごとに解答件数を集計、設問の文章と選択肢の文章に並べて正答率・誤答率をグラフおよび%表示する(図4)。

ミトコンドリア	人数	パーセント
核	0	0.0%
液面小胞体	0	0.0%
滑面小胞体	0	0.0%
細胞骨格	0	0.0%
細胞膜	0	0.0%

解答項目	人数	パーセント
核	0	0.0%
液面小胞体	43	84.3%
滑面小胞体	5	9.8%
ゴルジ体(装置)	2	3.9%
ミトコンドリア	1	2.0%
葉緑体	0	0.0%
サイトゾール	0	0.0%
細胞骨格	0	0.0%
細胞膜	0	0.0%

解答項目	人数	パーセント
DNAはヌクレオチドの重合体つまりポリヌクレオチドである	1	2.0%
ヌクレオチドはリン酸とリボース(5'炭素)、塩基からなる	4	7.8%
DNAの骨格はリン酸とリボースからなる	20	39.2%
DNAの遺伝情報は塩基が受け持つ	5	9.8%
アデニン(A)とグアニン(G)はプリン塩基、シトシン(C)とチミン(T)はピリミジン塩基である	3	5.9%
生体内のDNA・RNA合成は5'から3'方向におこる	3	5.9%
2本鎖DNAは、5'→3'方向を同じ方向にそろえて、AとT、GとCの塩基がそれぞれ2本、3本の水素結合をして結合する	15	29.4%

図4 教員用PCTプログラム・解答結果表示画面

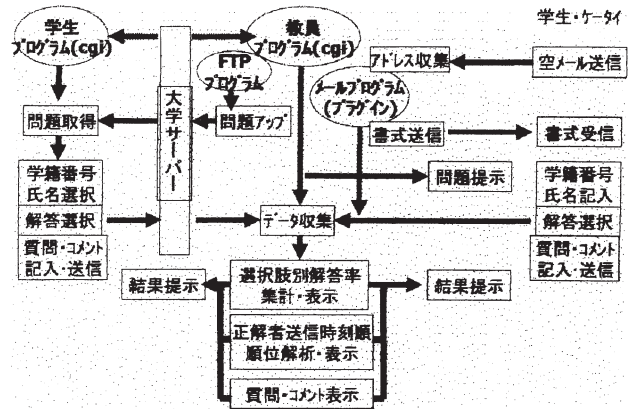


図5 教員用・学生用PCTおよびCPTシステムの概略

システムにおける各プログラム・ファイルの流れを図に示した(図5左半分)。集計・表示の段階で、理解不足あるいは誤解していそうな問題や選択肢を見出し、重点説明、注意を喚起する。続いて学生別の正解を集計して全問正解者を送信時刻の早い順にリストアップし、上位3位までを枠で囲んで表示・表彰する(賞金・賞品は、なし)(図6)。最後に投影了承済みの質問やコメントを匿名で表示し、これに回答、あるいはコメントする(図6)。

- [1位]:041404 君、全問正解おめでとう!(送信時刻=10:51)
- [2位]:041404 君、全問正解おめでとう!(送信時刻=10:52)
- [3位]:041401 君、全問正解おめでとう!(送信時刻=10:52)
- 041400 君、全問正解おめでとう!(送信時刻=10:54)
- 041405 君、全問正解おめでとう!(送信時刻=10:54)
- 以上、全問正解者12名
- コメント(1):「特になし。」
- コメント(2):「覚えることが多かった」
- コメント(3):「細胞器官の機能が理解しにくかった。」
- コメント(4):「特になし」
- コメント(5):「とりあえずムズイす。」
- コメント(6):「少しずつわかってきた」
- コメント(7):「DNAの構造は複雑で難しいと思った。」
- コメント(8):「特にありません。」
- コメント(9):「もう少し小テストの時間を長くしてほしい。」
- コメント(10):「アニメーションがあっただけよかった。」
- コメント(11):「全体的にいまいちよくわからない。話が進むのが少し早い。」
- コメント(12):「特になし」
- コメント(13):「エネルギーやタンパク質を作っている細胞はたくさんあるの実際にしているところをビデオ等で見たいです。」

図6 教員用PCTプログラム・全問正解者表彰・質問表示画面

3. 携帯電話メール用・小テスト・システム (CPT)

PC を使えない環境下では携帯電話を活用しようとしたが、携帯電話の Web 機能は作成当時も今も契約率・利用率・パケット料金に不安があったのと、やはり安価なために学生が安心して常時使用しているメール機能を用いるのが最も良いと考えられたため、メール活用のシステムを作成した。なお最近では全体の数%以下になったが、メール機能付き携帯電話を持っていない学生に対しては通常通りの紙による小テストを行った。

3.1 教員用 CPT プログラム

既に作成した教員用 PCT プログラム (2. 2) を活用するため、ウィンドウズ用 httpd ソフトウェア³⁾ でノート PC (XP) 内に Web サーバーを立ち上げた。並行して Perl インタープリター⁴⁾ を PC にインストールし、同 PCT プログラムを CPT 用に若干変更を加え動作させた。この 2 つのソフトウェアはシステム全体の perl プログラム開発のツールとしても活用した。

授業の流れとしては、学生に本など紙媒体の講義あるいは実験用テキストを持たせ、教壇のスクリーンにプロジェクターから PPT ファイルにより図表、要点を投影する。次の授業の最初に、携帯電話メール機能を利用して、前回の授業の復習を兼ねた小テストを行う。一番最初の小テストの前に教員の大学サーバー・メールアドレス宛てに学籍番号・氏名を記入したメールを送信させる。教員は自作のアドレス抽出用プラグインをつけたメーラーソフトウェア (AL-Mail⁵⁾) を動作させ、受信したメールの送信元アドレスを全て抽出し、送信先リストを作成する。次に小テストに対する解答書式 (図 7) を、その送

```

生命科学誘い5/18
合言葉:夏
$学番>07140
$氏名>
$答1>2
$答2>3
$答3>4
$自由>まさかDNAがあんな簡単に
取り出せるとは吃驚しました。

```

図7 CPT システムでの学生からのメール書式・解答送信例

信先リストに一斉送信する。続いて Web ブラウザーを立ち上げて自らの PC 内サーバーの教員用 CPT プログラムを動作させ、プロジェクターに投影する。CPT プログラムは設置されているサーバー・フォルダ内の入力ファイルを読み込み、最上部に小テストの問題とその番号、選択肢とその番号をなるべく大きく見や

すいフォントと大きさをリストアップして表示する。学生はそれを見て各問題について正解と考えた選択肢の番号を、送られてきた解答書式に引用返信の形で指示通りの様式で書き込み送信する。この時書式には「合言葉」の欄があり教員がその場で指定した言葉を書き込む。この合言葉が書かれていないと解答として抽出されない。これにより授業外から送信する不正を防止した。教員はメーラーソフトウェアのプラグインを合言葉と解答抽出用のものに付け替えて動作させ、各学生から受信したメールから、学籍番号、氏名、解答群、質問・感想、を抽出し、学生ごとに 1 行ずつ csv 形式で空の出力ファイル中に書き加えてゆく。メーラーソフトで受信、CPT プログラムを更新する度に、書き込まれたばかりの出力ファイルを読み込み、問題文、選択肢文に続いて、解答送信者名だけを送信時刻の最新のものから表の形で表示する。学生はそれを見て解答が正常に送信できたかを判断する。解答締切り後、プログラムを更新すると、教員用 PCT プログラムと同じルーチンで、出力ファイル中の学生達の解答と、フォルダ中にあらかじめ置いてあった正答ファイルのデータを読み込み、各問ごとにプログラム内で照合、選択肢ごとに解答件数を集計、設問の文章と選択肢の文章に並べて正答率・誤答率をグラフおよび%表示する (図 5 右半分)。集計・表示の段階で、理解不足あるいは誤解しているような問題や選択肢を見出し、重点説明、注意を喚起する。続いて学生別の正解を集計して全問正解者を送信時刻の早い順にリストアップし、上位 3 位までを枠で囲んで表示・表彰する。最後に投影し承済みの質問やコメントを匿名で表示し、これに回答、あるいはコメントする。以上で使用した入力ファイル、出力ファイル、正答ファイル、は全て PCT と同じ形式であり、転用が可能である。

3.2 携帯電話メールによる定期テスト実施と成績結果送信

定期テストについても、140 人だと採点処理が膨大になるため、同じく携帯電話メール機能を利用することとした。ただしメールを利用するとカンニングも容易になるため、不正が困難なテスト形式にした。すなわち問題文と選択肢文をそれぞれ独立に、別途作成したプログラムにより乱数配置し、各学生ごとに学籍番号・氏名つきで、A3 版 1 枚ずつに出力印刷した。問題と選択肢の乱数配置の各データは印刷用ファイル出力と同時に学籍番号・氏名との対応表を作成し別ファイルに出力した。乱数配置前の正答番号データに、この対応表を組み合わせ、各学生ごとの正答データを作成。これと定期テスト時間中に各学生の携帯電話から送られてきた解答データ (選択肢問題部分のみ照合。複数の記述式問題については別途エクセルの当該列でセルごとに評価して点数をつけた。) とをエクセル上で照合し、正答点数を評価した。

また、定期テスト後に自分の成績が A, B, C, D, あるいは再試対象かを早めに知りたい学生には、成績が出て学務課との成績確認が終了次第、希望のアドレスへメール送信することとした。あらかじめ小テストの際の非投影の自由記述欄に成績結果送信希望先メールアドレスを記入させておき、それを学籍番

号・氏名との対応で総合成績表にリストアップした。成績を確認後、sendmail コマンドを加えて作成した perl プログラムを用い、送信希望の各学生へ、授業科目名、メールアドレス、学籍番号・氏名、総合点、順位、成績判定結果、判定に基づいた一定の激励コメント、のデータを一齐送信した (図 8)。

Date: Sun, 13 Feb 2005 18:46:57 +0900 (JST)
 To: [REDACTED]
 From: [REDACTED]
 Subject: TEST-RESULTS
 Status: RO

《 生命と環境04・後期テスト結果 》

《 021314 様 》

《 あなたは、41.8点(平均60.1/100)で110位/125人 》

《 成績は再試でした。頑張ってください 》

/生命と環境・担当教員・常吉俊宏

【このメールは情報配信のみで返信はできません】

図8 CPT システムによる学生への成績結果一斉送信例

4. 教室内 ICT 化のメリットと課題

今回のシステム開発は、もともと講義対象学生数の突然の増加に対抗して、ICT 化により講義スタイルを一新しようとする契機から生まれてきたものである。しかしながら実際に ICT 化してみると小テストの毎回実施が全く苦でなくなり、学生の理解度を即座に詳細に把握でき、理解度の足りない、あるいは誤解している事項に対して重点説明・反復説明が間を置かずにでき、教育指導へのフィードバックメリットが大きい。また毎回、講義の最初に小テストを実施すると、同時に出席を取ることもなるので、学生に対し毎回の講義に最初からコツコツと出てくる習慣を促進することになっている。なお、他の講義でも使うカードリーダーは逆に講義の最後 10~15 分前に回し、最初と最後の出席をおさえることにより遅刻・早退を防止できている。

さらに出席を含めて小テストの成績を総合成績の 40% に計算することにより、毎回の講義の復習を促進する効果があるようである。また、全問正解者を特に順位付けで表示することにより成績優良者の学習意欲をさらに高める効果があると考えられる。また最後に質問も送信させることにより、普通では挙手をしてしなければならぬ質問を気軽にできる質問促進効果があるようである。現在では PCT システムを私の担当している全ての講義科目とテストに適用しており、CPT システムは PC 環境のないオムニバス授業の「物質生命科学概論」やオープンキャンパス、各種実験講座での高校生対象のアンケートやクイズなど、および非常勤講師として勤務している大学の講義科目や実験科目で活用している。

しかしながら課題も多数ありそうである。今回作成したシステムは、汎用を目的としたものにはなっておらず、マニュアル化も無論行っていない。使用にはプログラム言語とサーバーシステムの理解がある程度必要であるし、常時使用して慣れていないと使いにくく、開発者自身もしばらく使っていないと部分的に忘れてしまうという代物である。これを汎用化するとすれば相当のテーマとヒマが必要であろう。またこのシステムで現在対応可能な問題形式は選択肢方式とテキスト入力の記述式だけであり、数式やグラフなどには対応が不可能であり、特に大事な理系の分野において適用科目がかなり限定されることになる。また、現在のシステムでは、授業中に突然必要を感じて小テストを作ろうとしても時間がかかるという欠点があり、現在、「随時小テスト」対応のプログラムに変更を進めようとしている。

参考文献

- 1) 飾り職人ひで(Hideyuki Chikada), PerlInquire Ver. 3.01, <http://www.din.or.jp/~hideyuki/home/>
- 2) 結城浩, enq.cgi Ver. 1.15, <http://www.hyuki.com/>
- 3) 中田昭雄, AN HTTPD, <http://www.st.rim.or.jp/~nakata/>
- 4) ActiveState, ActivePerl, <http://aspn.activestate.com/>
- 5) (有)クレアル, AL-Mail32, <http://www.almail.com/>

創造体験教育「創造・発見」の平成19年度実施報告

—現状の問題点と将来への提言—

The Preparation and the Practice of the Educational Program “Exercises for the Creation and Invention” in 2007

関山 秀雄^{*1}, 丹羽 昌平^{*2}, 榊田 勝^{*2}, 越水 重臣^{*2}, 土肥 稔^{*3}, 服部 知美^{*3},
中村 塁^{*4}, 小栗 勝也^{*4}, 小林 久理真^{*1}, 河村 都美明^{*5}, 竹下 知宏^{*5}

**Hideo SEKIYAMA^{*}, Shohei NIWA, Masaru SAKAKIDA, Shigeomi KOSHIMIZU,
Minoru DOHI, Satomi HATTORI, Rui NAKAMURA, Katsuya OGUIRI,
Kurima KOBAYASHI, Tomiaki KAWAMURA and Tomohiro TAKESHITA**

Abstract: The educational program “Exercise for Creation and Invention “ has been introduced into the curricula of the Shizuoka Institute of Science and Technology since 2004. This program includes the production of electrical and mechanical devices, the making of movies and videos, the creation of works of art, research on specific subjects and student works as volunteers. The results of this program in 2007 are reported and the future problems are discussed.

1 はじめに

静岡理工科大学では、平成10年に学生の創作活動支援のため、創作ショップ（創作工房）が完成した。さらにその翌年、平成11年度から、主に機械工学科を対象にして、一連の創造教育（創造工学入門、創造工学演習、SISTプロジェクト、ボランティア等）がスタートした。本学の「やらまいかプログラム」の始まりである。また、全学科に対しては、静岡県内企業での就業体験教育として、インターシップが導入された¹⁾。上記の一部の科目を統合・補完する形で、新科目「創造・発見」が平成15年度から新たに導入された²⁾。初年度の平成15年度は、試行の形で学生に履修させることを試みたが、この試行結果を踏まえて平成16年度からは正式実施に踏み切り³⁾、今日に至っている。この間、創造・発見ワーキンググループ（現在の創造・発見科目担当教員）を中心に、テーマの発掘、学内および学外指導者の選定、運営方法、成績評価の方法、成果発表の方法等についてさまざまなディスカッションや改善等がおこなわれてきた。これらの詳細については、以前の文献⁴⁻⁶⁾を参照されたい。

本報告では、平成19年度における「創造・発見」の計画およびその実施結果、成果、現状の問題点、将来への提言を述べ、次年度以降の改善に資することを目的とした。

2 創造体験教育「創造・発見」について

2.1 「創造・発見」の目的

先に述べたように、創造体験教育「創造・発見」は、本学の「やらまいかプログラム」の一環として平成15年度にスタートした。この「やらまいかプログラム」の原点は、静岡県西部

のものづくり企業をターゲットとした人材育成を目指すところにあるが、さらに本学では、あえて「ものづくりに」に限定せず、日頃の大学の授業では味わえない広くさまざまなことを体験させることにより、学生の興味、意欲を起こさせ、勉学意欲の向上をはかるとともに、自発性、積極性、協調性、社会性の向上、創造力の育成を目指す人材育成のプログラムとした。このような考えをもとに、現在、「創造・発見」は「ものづくりと創作活動」、「テーマ研究」、「ボランティア活動」の3つの活動分野から成り立っている。また、学生にとっては、入学後のフレッシュマンセミナーと卒業研究を結ぶ橋渡しの役割を果たすものといえ、学生の履修時期は2～3年生としている。

2.2 「創造・発見」の活動分野

「創造・発見」には、現在3つの活動分野、「ものづくりと創作活動」、「テーマ研究」、「ボランティア活動」がある。以下に詳細を述べる。

2.2.1 「ものづくりと創作活動」

実際に手を動かして実物に触れながら行うものづくりや創作の活動である。作る対象となるものは、機械、装置、ロボット、電子回路、ソフトウェア、アート作品、CG作品、ビデオ作品等、幅広いジャンルである。本年度から「ものづくりと創作活動」のほとんどのテーマが、新たに開設された「やらまいかエデュケーションサイト」（略称 YES）の中の夢創造ハウスで行われるようになった。

2.2.2 「テーマ研究」

自然科学、工学技術、社会科学、人文科学、芸術等の幅広い分野からある一つのテーマを選択して、指導者の講義、指導をうけながら研究し、その成果をまとめるものである。「ものづく

2008年3月3日受理

^{*1} 物質生命科学科, ^{*2} 機械工学科, ^{*3} 電気電子情報工学科

^{*4} 情報システム学科, ^{*5} 学務課

りと創作活動」に比べると、かなり“座学”にちかひものであり、本学のフレッシュマンセミナーをさらに拡大したような形ともいえる。

2.2.3 「ボランティア活動」

外部の施設に出かけて行き、ボランティア活動を行うものである。対象となる施設は、地域の小学校、養護学校、福祉施設、NPO法人等がある。ボランティア活動を体験することにより、さまざまな人たちとの交流を通じて、学生には、世の中の諸問題やボランティアの果たす意義、重要性等を講義といくつかの体験を通じて学びとってもらふことを目的としており、学生の人間形成にとっても極めて重要なものである。

2.3 「創造・発見」の履修と単位認定

「創造・発見」は、創造・発見1（1単位）、創造・発見2（1単位）と2科目あり、ともに通年科目であり、履修期間はそれぞれ1年間となっている。実際には、4月に各指導者による各テーマ説明会を実施し、その後、学生がどのテーマを履修するか、希望調査を行う期間が必要なため、活動が開始されるのは、5月初旬～中旬となる。また、1月末の成績認定の前に成果報告会を行う必要がある関係上、成果報告会は12月におこなっている。したがって、正味の活動期間は5月～11月の約半年間である。指導者には、その間、最低でも7回程度の授業を行ってもらい、その他、学生の自主的な活動や大学祭での展示発表、成果報告会での指導等も行ってもらふことにしている。単位認定については、活動期間中の活動状況や報告書をもとに合格・不合格の評価を行う。

2.4 運営体制

「創造・発見」は、各学科より2～3名の教員が選出され、合計9名が科目担当教員として、科目の運営にあたっている。表1に各学科の科目担当教員を示す。

表1. 創造・発見1, 2の科目担当教員.

機械工学科	丹羽 昌平 教授 ^{*4} 榊田 勝 教授 越水 重臣 准教授 ^{*3}
電気電子情報工学科	土肥 稔 准教授 ^{*1} 服部 知美 講師
情報システム学科	小栗 勝也 准教授 中村 壘 講師 ^{*2}
物質生命科学科	小林 久理真 教授 関山 秀雄 准教授（総括責任者）

*1 「ものづくりと創作活動」のリーダー

*2 「ものづくりと創作活動」のサブリーダー

*3 「テーマ研究」のリーダー

*4 「ボランティア活動」のリーダー

また各テーマについては、学内指導者11名、学内技術職員3名、学外指導者13名が個々のテーマの指導にあたっている。

3 平成19年度の創造・発見の実施およびその結果

3.1 平成19年度の創造・発見のテーマ

表2～表4に今年度実施された創造・発見の3分野である「ものづくりと創作活動」、「テーマ研究」、「ボランティア活動」について、各テーマの概要を指導者、今年度の履修者数とともに示す。テーマ数では、ものづくりと創作活動が13テーマ、テーマ研究が5テーマ、ボランティア活動が4テーマである。昨年から継続テーマがほとんどであるが、「ボランティア活動」で、エコパ ビオトープの整備、管理を行う「エコパ ビオトープ事業参加」が新たに今年度から加わった。また、指導者のうち学外の指導者については、今年度から新たに「教育指導員」という職位が与えられることとなった。

3.2 平成19年度の履修学生の募集と活動状況

創造・発見の履修にあたって、学生には4月18日（水）5時限にガイダンス、各テーマの説明会を行い、履修学生の募集を行った。学生の希望が殺到し多人数となったテーマについては、学生がそのテーマを選択した理由を申告してもらい、それをもとに人数調整を行い、最終的に履修者を決定した。なお、学生が単位取得を希望しない場合でもひとつのテーマに参加して活動することも許可した。各テーマの活動は、5月初旬から開始し、早いものは前期で終了したが、大学祭での発表や報告会の準備等もあわせると12月初旬まで活動したことになる。今年度は、全受講者128名で、このうち単位取得希望者は124名であった。また、このうち合格者数は114名であった。

3.3 平成19年度の創造・発見の報告会、大学祭での展示発表の実施

今年度は、口頭発表またはポスター発表による報告会を2回分けておこなった。まず、前期で終了したテーマについては、10月1日（月）5時限に、後期に終了したテーマについては、12月17日（月）5時限に報告会を実施した。また、活動内容を広く一般に知ってもらうために、大学祭（10月27日（土）、28日（日））の期間を利用して、ポスター展示や作品展示による発表会を実施した。この発表会は、今年度から新たに創造・発見の活動の場となった「夢創造ハウス」で行った。また、一部のテーマは、すぐそばにある「エンジン実験棟」で行った。「夢創造ハウス」の場所が、大学祭の一般の参加者からはわかりにくい場所にあるため、呼び込みのためのいくつかのイベント（風船配り、ポップコーン配布、のみもの提供等）を学務課、学生と協力して行った。その結果、一般の人のかなりの参加者があった。

3.4 平成19年度の創造・発見の実施結果

創造・発見1, 2の成績は、報告会が終了後に各指導者から提出してもらい、最終的には、創造・発見科目担当者の総括責任者が合格・不合格を認定する。各指導者には、学生一人一人について活動状況（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、グループ活動に対する協調性、活動全般について）や報告書を5段階の点数で評価してもらい、それをもとに合格・不合格を評価してもらっている。

表2. ものつくりと創作活動.

分野	テーマ	指導者	概要	受講者数
もの 作り と 創作 活動	バイクの構造研究	●村井義彦 ●蜂須賀弘 土肥 稔	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新の技術を学び、二輪車の構造・機能を理解する。	11
	ワイヤ放電加工機取扱資格	行平憲一	ワイヤ放電加工機は金型加工で重要な位置を占め、この技術の習得は就職の上でも貴重な経験となる。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もある。	8
	自分の香りを創ろう(アロマセラピー)	●半田敦子 関山秀雄	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。入浴剤・シャンプー・クリームなどを製作し、自分にとって最適な香りをブレンドしていく。教材費として自己負担8,000円程度。	9
	たたらを体験しよう	小林久理真	たたらは「ものけ姫」に出てくる古代の製鉄法である。砂鉄採取2回(半日ずつ)、たたら操業(3日間)、講義2回程度。2年目の学生のみ2回程追加講義実施。	5
	フェザープレーンの製作 (旧ラジコン飛行ロボットの製作)	榊田勝 丹羽昌平	フェザープレーンと呼ばれる超小型・軽量飛行機模型の製作を通して飛行理論を学ぶ。	14
	ペルチエ素子による熱電発電機の製作・評価	十朱寧	熱電現象を利用して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。	3
	ホバークラフトの製作	土肥稔 服部知美	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ってもらいたい。	3
	ロボット作り (旧二足歩行ロボットの製作、 ロボットコンテストを含む)	丹羽昌平 見崎大悟	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逐行させる。	6
	遠隔操縦ボートによる佐鳴湖水質調査プロジェクト	丹羽昌平	携帯電話の無線機能を用いた遠隔操縦による無人ボートを製作する。また、これを用いて佐鳴湖の水質調査を実施する。	1
	精密鋳造による金属鏡、アクセサリ、指輪の製作	●落合修二 越水重臣	精密鋳造技術を学ぶ。金属鏡は表面が鏡で裏面は文様で作る。小物のアクセサリ、及び指輪の製作技術を学ぶ。	10
	マルチメディア作品の制作(大学 コママーシャルビデオの制作)	高林新治	担当部署との打ち合わせ、機材の使い方を習得、絵コンテの制作、撮影、編集、30秒および1分間のビデオ制作、試写会	2
	袋井市紹介のミニビデオ番組 を作ろう	小栗勝也 ●原野浩	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。地元で活動する映画関係者の全面協力を得て、映画製作の基本を学べるのは勿論、自ら出演して袋井市の「顔」になって頂くことも歓迎。見て喜ばれる楽しい作品を目指します。袋井市や新袋井フォーラムからも期待されている企画で、完成した作品は各所で上映される計画があります。優れた作品はコンクールへの出品も考えます。将来的には更に凄い企画に発展するかも知れません。若い力で、新しい情報発信のスタイルを袋井から創り出そう!	1
	燃料によるエンジン性能	●清水義明	小型4サイクルエンジンを使用して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。予定では、エンジンについての講義、供給燃料の特性を解説後、実験を行う。ガス燃料による実験は後期に実施する。	5

(指導者欄の●印は学外指導者)

表3. テーマ研究

分野	テーマ	指導者	概要	受講者数
テーマ研究	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	日本はものづくりで発展してきた国である。その中でも特に、自動車産業は世界に冠たる強い競争力をもっている。そこで遠州地方で起業し発展してきたトヨタ、ホンダ、スズキを取り上げ、名経営者といわれる人たちの生き様、哲学、熱き想いを学び、ものづくりに対するモチベーションを高める。日本人はものづくりに最も向いた民族であり、また遠州地方はものづくりを育む土壌があるので、そのアドバンテージを活かし、この地域のものづくりに貢献できる人材に育ってほしい。	2
	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制御)	●岡田靖志 見崎大悟	ワンチップマイコン「PIC 16F873A」を使用したマイコン制御プログラムをアセンブラで作成し、光センサでラインを検出して走行するライトレースロボットの制御実験を行なう。また、半田付けによる光センサーボードの製作実習も行なう。	2
	絵本の魅力と読み聞かせ	●萩田敏子 関山秀雄	絵本というのは、少ない言葉で大事なこと例えば、人生について、命について、生きることについて、喜びや感動について、伝えることができる表現手段であり、コミュニケーション手段であると評論家の柳田邦男は言っている。さまざまな絵本をとおして、絵本の世界の広がりを知り、読み聞かせによって日常忘れている言葉を聞く楽しさを味わい、声を出す開放感を体験する。	2
	走査電子顕微鏡取扱資格	早川一生	走査電子顕微鏡の簡単な原理説明と標準的な試料を使った取扱方法を学習する。資格取得者は、この機器の取扱資格を与える。	2
	ハイブリッド車の動力機構	●鈴木猛 土屋 高志	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、特徴と効果について検証する。	2

(指導者欄の●印は学外指導者)

表4. ボランティア活動

分野	テーマ	指導者	概要	受講者数
ボランティア活動	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	静岡県立袋井養護学校の全面的な協力の下、講義と実践活動から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」及び「中級青少年指導者」の資格取得講座を開講する。 講義及び演習と、土曜日に行われる「わくわく土曜サロン」及び「レインボーサロン」という名の交流活動が予定されている。	4
	地域社会におけるボランティア活動の実践	松本克秀 ●丹羽昌平	本学近隣にある関連団体および施設等の協力を得てボランティア活動を体験し、福祉問題や環境問題、さらには地域の様々な問題の理解を深め、地域社会におけるボランティア活動の果たす役割について学習すると共に、ボランティア活動の方法を修得することを目的として活動を行う。ボランティア活動は単に地域社会において奉仕活動によって役割を果たすとか地域社会との触れあいといった面ばかりでなく、学生本人にとってボランティア精神という言葉で代表される自己の自発性や積極性の涵養という観点で大きな効果が期待されている。	3
	エコパ ビオトープ事業参加	●原田創史	ビオトープは人工的につくられたものであり、人の手によって管理しなければなりません。エコパのビオトープはまだまだ発展途上にあつて、草刈り、植樹、外来種の駆除なお、手を加えなければならぬことが多くあります。一緒にビオトープを整備、守っていく方を募集します。	20
	学校教育アシスタント	関山秀雄	袋井市内の小学校で、学校教育全般についてのアシスタントを行う。「国語」「算数」「生活」「体育」「総合」などあらゆる教科のアシスタントを行います。また、給食、清掃、休み時間等も児童とともに活動します。運動会などの行事の練習や参加をすることもあります。子供の教育にあたることから、常に模範となる行動をとる必要があり、責任も重く、指導者としての自覚が要求されます。また、これまで、この活動に参加した学生皆さんの奮闘、努力により、教育関係者だけにとどまらず袋井市民からずいぶん高い評価を受けてきました。	13

(指導者欄の●印は学外指導者)

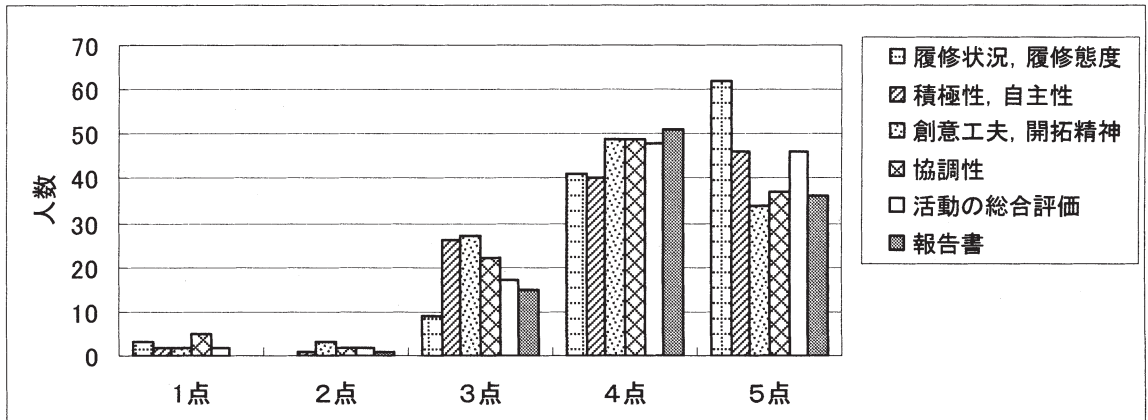


図1. 指導者からみた学生の評価

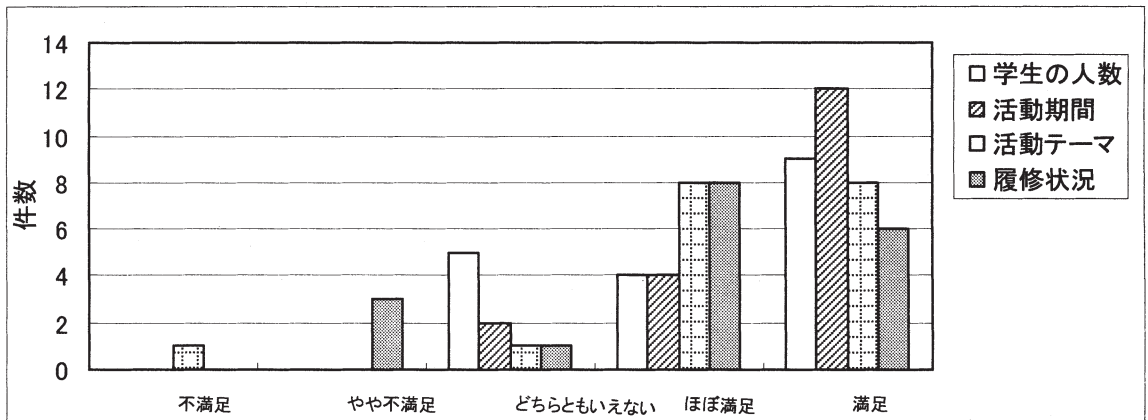


図2. 指導者からみた「創造・発見」の評価

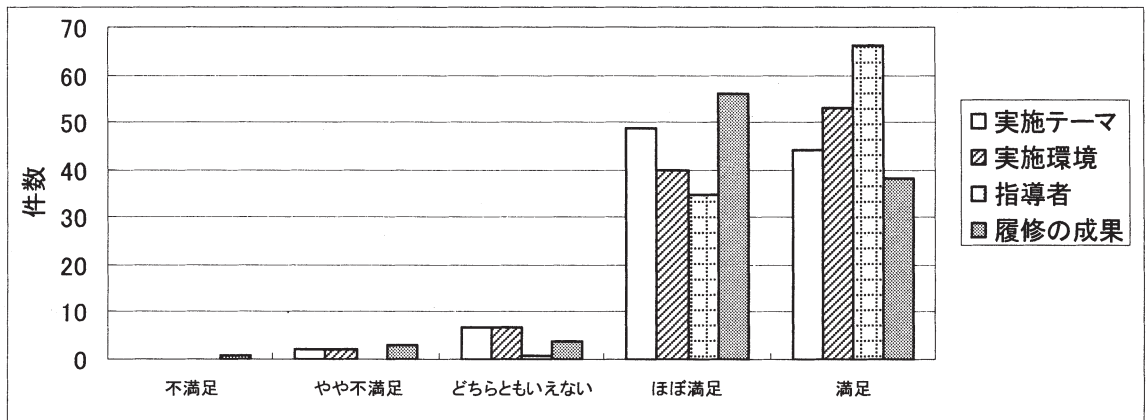


図3. 学生からみた「創造・発見」の評価

また、学生からみたときの創造・発見の科目に関する満足度等もアンケートとして毎年とっている。今年度の結果を図1～図3に示す。まず、図1には、創造・発見の履修学生に対する評価を示した。全体的には、4～5点に集中しており指導者たちは、概ね学生達を比較的高く評価しているようである。図2は、指導者からみた創造・発見の授業全般に関するアンケートである。これも目だって不満足点はなく、概ね満足されているようであった。また、図3は学生に対するアンケート結果である。学生達にとって創造・発見の満足度はかなり高いことが示されている。これらのアンケート結果は、昨年までのもの^{2,3,5,6)}とほぼ同じ傾向を示している。次に、指導者や学生達からでた個別の詳細な意見を以下に列挙する。

【指導者からの学生の評価についての個別意見】

- 活動に対しての興味が感じられ、積極的に参加していた。
- 学生が意欲的でとても授業が進めやすい。
- 忙しい毎日の中でよく20日以上もよく活動していた。
- はじめた時と比べて著しい成長が感じられる学生がいる。
- 学生は自分の意見をあまりいわない。
- 発表では学生自らのものがほとんどなされない。何事も受動的である。
- 活動中は大変熱心に取り組んでいったものの、レポートが全く提出されていない。
- リーダー的な存在の学生がいて頼もしかった。
- 指示されたことはよくやるが、工夫が不足している。
- 学生は、はじめは何もしらなかったが、熱心に勉強してテーマの内容をよく理解できるようになった。
- (ボランティアで) 常に誠意ある態度で活動していた。さまざまなことに積極的に取り組み、リーダーとして生き生きと活動していた。自分の役割についての確かな自覚が生まれた。
- (ボランティアで) 出かける前にもっと事前研修等が必要ではなかったかと思われる学生がいた。
- (ボランティアで) コミュニケーションが不得手であったが、体験活動を通じて徐々に成長する様子がみられた。
- (ボランティアで) 地域の人たちと交流したことが、その学生にとって大変素晴らしい経験だったことがわかる。
- (ボランティアで) 用事があるということで、活動にあまり参加できず不合格になった学生がいる。
- 文章力が劣っており、その指導を何回かせざるをえなかった。
- 電子系の学生のためか、機械系に対する興味が今ひとつであった。
- 報告会や発表会の準備に協力的な学生と非協力的な学生の差が大きい。

【指導者からの創造・発見の授業についての個別意見】

- 授業時間がもう少しあると大変助かる。現在のままでは、内容がかなり限定されてしまう。
- 創造・発見の直前の授業が時間延長され、創造・発見の授業時間帯に食い込み、30～40分、あるいはそれ以上遅れてくる学生がいる。これは、何とかして欲しい。
- 人数が多い場合は、前期、後期にわけて行うのもよいのではないか。
- 教室、設備が充実していて大変やりやすかった。
- (学内指導者で) 学生の授業時間割では授業のない時間帯があまりない。このため、創造・発見の授業時間帯以外の時間も使って指導しようとする大変苦勞する。
- パソコン等を購入する予算が欲しい。
- 学生が一人しかいない場合は、淋しいものがある。
- 工具棚の整備、実験室の完備、ごみ、廃品、掃除用具、資材、計器の管理室があればよい。
- ひとつのテーマに1～2人となると、学生が欠席したときは、休講とせざるを得ない。最低でも3人は必要か。それには、学生の履修希望をとるときは、第3希望くらいまでとって、1テーマあたりの学生数を平均化して1テーマあたりの学生数が少なくならないようにしたらどうか。
- 講座の内容から考えて一つのテーマに対して15コマ程度欲しい。
- 創造・発見では、理工系のテーマが多い。(自分が担当している) 人文系のテーマは場違いのような気がしないでもない。
- (ボランティアで) 大学生にとって、自分自身をみつめ自分がやりたいことは何なのか、自分が役に立っていることは何なのか、人との交流を通して学べるこの講座は、大学の日頃の授業の中では培えないものを持っている点で、この創造・発見は大変素晴らしい取り組みだと思う。
- (ボランティアで) 一テーマあたりの学生の人数が少ないと、日頃の活動での討論が十分できない。
- 報告会では、もっと討論の時間を増やした方がよい。
- 講義内容について大学側ともっと緊密な連携をしたい。
- 1テーマ20名は多すぎる。

【学生からの創造・発見全般についての個別意見】

- もっと活動時間を増やして欲しい。
- 説明会の掲示をもっとわかりやすくして欲しい。
- もっとテーマを増やして欲しい。
- それぞれの学科に特有のテーマがあまりない。
- プログラミングや情報系のテーマがない。
- 化学系のテーマを増やして欲しい。
- 機械や電子のテーマはあるが、情報系、物質科学系、

生物系のテーマがほとんどない。

- 環境美化に関連したボランティア活動を設けるべきではないか。
- 出版、音楽、映画に関連した「編集」のテーマを増設して欲しい。
- 学生にはあまり知られていない活動なので、説明会には1年生も参加させ、早くからこのような科目があることを教えておいたほうがよい。
- 天候に左右され、全部の行程を行えなかった。
- 夢創造ハウスの機材の使い方がよくわからない。
- 活動時間が不鮮明である。
- 授業が5時間限では遅すぎる。もっと早い時間帯から活動したい。
- 大学祭での発表場所が悪かった。あまり人がこないのでは？
- 活動したわりには、単位数が1単位と少ない。
- 1テーマあたりの履修者が少ない。
- 大変勉強になった。
- (ボランティア活動で) 10日間の活動時間は短い。
- (ボランティア活動で) とても楽しく活動できた。
- (ボランティア活動で) 思いやりの大切さに気がついた。

以上が、指導者や学生達から出た個別の意見である。指導者からみた学生についての意見をみると、大変意欲的な学生もいればほとんど受身でしか取り組まない学生もいる等、さまざまであったことが覗える。また、ボランティア活動で、学生によっては、もっと事前研修が必要であるとの指摘も見逃せない。しかし、活動を通じて学生達が徐々に成長していく姿が見えていくことは、いくぶんでも幸いといえる。また、指導者からの創造・発見の授業に関する意見では、授業回数に関するものがいくつかとりあげられていた。現在は、最低でも7コマの授業を行うことが基準となっているが、これでは教える内容に限られる等、時間不足であるとの意見が多かった。現在、指導者たちは、平均すると10～13コマ程度(報告会や発表会の準備等も含めて)おこなっているが、授業コマ数を増やして内容を充実させるよう検討する必要があると考えられる。また、受講学生が少なすぎる場合(1～2名)や多すぎる場合(20名等)もさまざまな点で好ましくないように指導者達は感じているようである。この点も、学生の履修希望調査を行うときに留意すべきことと考える。また、講義内容について大学の教員との緊密な連携を取りたいとの希望もいくつかあった。それぞれのテーマに対して学内で対応できる教員がいることが不可欠と考える。それにより、指導者達と大学の教員側とのさまざまな意見交換、連携ができ、学生達の教育もより一層充実するものと考えられる。また、学生からの創造・発見全般についての意見から、テーマにかたよりのあるとの指摘がいくつかあがっていた。現在では、機械系や電子系のテーマが多いのに比べて、情報系、物質系、生命系のテーマが極めて少ない。この点は、現

在の創造・発見のテーマが、学内教員や外部の指導者達のほとんどボランティア的ともいえる参加によって成り立っていることから考えると、ある程度やむをえないことでもある。しかし、さまざまな分野でバランスをとってテーマを学生達に提供することが必要なのはいうまでもないことであり、これは大学全体できちんと議論すべきことと考える。

3.5 各分野の実施結果に関する検討

3.5.1 ものつくりと創作活動

創造・発見の原点となる分野である。今年度は、表2に示した13テーマを実施した。現在、機械、電子系のテーマが9テーマ、物質系のものづくりが1テーマ、映像、映画製作が2テーマ、アロマセラピーが1テーマとなっている。履修した学生達は、粘り強くなりかなりの時間をかけてテーマにとりくんでくれたことが、学生達の発表や報告書からも覗えた。また、先に述べたように、本年度からは活動場所として、完成したばかりの「夢創造ハウス」が使えることになり、「ものつくりと創作活動」の分野にとってはやっと独自の活動場所を得たことになる。大学祭における発表では、この「夢創造ハウス」のPRもかねて、ここでいくつかのテーマが展示発表を行った。実際にホバークラフトに人を乗せて動かしたり、あるいは二足歩行ロボットを動かしたりする実演、さらに作成した商業ビデオの上映、等を見学者に対して行った。また、学生達の説明も一般の人たちにとってかなりわかりやすく好評であった。また、今年度は10月と12月に報告会を行ったが、特に10月は後期授業が開始された直後ということもあって、発表の準備が必ずしも十分にとれない状況になってしまった。このことは、反省点とはいえ、来年度からは報告会を12月にまとめて行うこととし、口頭発表の準備に十分な時間を割けるようにする予定である。

先に述べたように、現在のテーマでは、機械、電子系のテーマが多く、他の分野が少ない。これからは、物質系、生命系、情報系でのものつくりと創作活動の新たなテーマを増やし、全体のバランスを取ることが必要と考える。先に述べた学生のアンケートもそれを指摘している。あらためて各学科の協力を求めたいところである。

3.5.2 テーマ研究

今年度はテーマ研究として、表3の5つを実施した。これらは、創造・発見が開始された当初から続いているものである。機械、電子系3テーマ、人文系1テーマ、物質系1テーマである。このうち、機械、電子系のテーマの「ワンチップマイコンによる制御入門」は、実際にプログラムを作成しロボットの制御実験をおこなうものであり、「ものつくりと創作活動」の要素を持っているとも言える。いずれのテーマも学生達が新鮮な興味を覚えたことを、報告会や報告書で示してくれた。特に、「ワンチップマイコンによる制御入門」では、アセンブラ言語を体得し、どのようにしてロボットの制御を行うかを、筋道立てて学生がリアルに見せてくれ、学生の理解度の高さを示してくれたのは驚きだった。また、「絵本の魅力と読み聞かせ」では、最初に読み聞かせの意義を発表したのち、読み聞かせの実演をおこなった。静まり帰った会場での読み聞かせの実演は、大変感

動的であり、思わず会場から拍手が出たほどだった。テーマ研究は、もともとかなり“座学”に近いものであり、そのような意味では、学内の教員が担当するのも比較的容易であるといえる。それにもかかわらず、テーマ数が5つというのは、大変残念なことである。もう少し、さまざまな分野のテーマを期待したい。

3.5.3 ボランティア活動

ボランティア活動は表4に示した4つのテーマをおこなった。昨年までのものに加え、本年度から新たに「エコパ ピオトープ事業参加」が加わった。エコパ ピオトープの整備を実体験するものである。炎天下での作業等、肉体的にはかなり過酷な面もあったようであるが、学生達にとっては、さまざまな作業方法を会得し、興味深く新鮮であったようである。

また、これ以外に、袋井養護学校や袋井市内の小学校、さらにいくつかのNPO法人でのボランティア活動を昨年に引き続き行った。特に、袋井養護学校や袋井市内の小学校では、毎年、理工科大学の学生の活躍が大変、高く評価されており、学生達もボランティア終了後も学校とのつながりを大切にしているのは、大変すばらしいことと思う。学生達は、これらのボランティアを通じて、ボランティアの意義、重要性、心得、さまざまな人との接し方、社会性、リーダーシップ、等を身に付け、自分のさまざまな可能性を見出し、人間的にも成長するようである。ただ、さまざまな施設でボランティア活動をするには、あらかじめ事前研修等が重要で、学生によってはこれが不十分であると思われるケースがあり、今後、検討することとしたい。

4 結論および将来への提言

平成16年度から正式な実施が始まった「創造・発見」も今年度末で4回目を終了した。「創造・発見」は本学の特色である「やらまいか教育」、すなわち、積極的にチャレンジする精神と創造的なアイデアを生み出す力を育成する教育の重要な柱となっている。これまでの実施結果から、定量的に計ることは難しいが、学生の興味、意欲を起こさせ、勉学意欲の向上をはかるとともに、自発性、積極性、協調性、社会性の向上、創造力の育成に、多少なりとも貢献しているといえる。ここで、これまでの実施の経験から、今後、この教育プログラムをどのようにすればよいか、下記の提言をおこないたい。まず、「創造・発見」には、現在は3つの分野「ものづくりと創作活動」、「テーマ研究」、「ボランティア」があるが、これらはそれぞれ目的や活動形態がかなり異なるものである。また、成績評価の方法もそれぞれの分野で独自の評価項目がありうること、また、必要な活動時間もそれぞれの分野で異なること、このような点を考えると、3分野を現在のようにひとくくりの「創造・発見」の科目とするのではなく、それぞれ独立の科目として運営するほうが、望ましいと考える。次に、現在、「創造・発見」のテーマでは、指導者として学内教員が少ない。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、またテーマ自体も毎年、固定化してしまっている。このことは、学生からの指摘もあったとおりである。先にも述べたとおり、「創造・発見」

が本大学の重要科目と位置づけられていながら、このことは憂慮すべきことである。できることなら、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。また、これに加えて学外指導者は、授業内容について学内教員との協議や連携の必要性を感じている。それには、それぞれのテーマに対して学内で対応できる教員がいることが必要であり、教育のより一層の充実のためにもこのような体制を組むことが、今後不可欠と考える。

最後に本報告をまとめるにあたって、「創造・発見」の実施に多数の学外の方々、また本学教職員に多大なるご支援を賜ったことに感謝申し上げる次第である。また、科目運営の事務処理、報告書処理、成績処理等については、とりわけ学務課職員 大山尋子さん、松田三香子さんにお世話になった。ここで、あらためて御礼申し上げる次第である。

5 参考文献

- 1) 富田寿人 他, “平成 18 年度インターシップ実施報告”, 静岡理工科大学紀要, 第 15 卷 (2007) pp.127-139.
- 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 卷 (2004) pp.321-338.
- 3) 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」の平成 16 年度実施報告”, 静岡理工科大学紀要, 第 13 卷 (2005) pp.85-94.
- 4) 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, 第 53 卷, 第 5 号 (2005) pp.37-43.
- 5) 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」の平成 17 年度実施報告”, 静岡理工科大学紀要, 第 14 卷 (2006) pp.145-153.
- 6) 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」の平成 18 年度実施報告”, 静岡理工科大学紀要, 第 15 卷 (2007) pp.117-125.

サイエンス・パートナーシップ・プロジェクトを通じた 理科教育連携活動

Collaboration of Science Education with the High School by Science Partnership Project

幡野明彦

Akihiko HATANO

Abstract: We carried out science partnership project (SPP) for young people to take more interest in science and technology. SPP was followed by Japan Science and Technology Agency (JST), and we collaborated the high schools of community through science education. The students experienced the lecture and the experiments of science in our institute. I believe that they were more interested science and engineering by this program.

1. はじめに

科学技術立国日本と呼ばれて久しいが、10年後、20年後はどうであろうか？日本は二次産業（製造業）の発展と共に歩んできたため、科学技術立国と言われてきた。1970年のピーク時には、二次産業の占める割合はGDPの43.1%であったにも関わらず、2000年には27.9%にまで落ち込んだ。¹⁾ 静岡県は、全国工業出荷額が第三位であり（一位：愛知県，二位：神奈川県，2006年度），科学技術のなすべき重要性は高い地域であろう。²⁾ 次世代を担う子供達に理科の面白さを伝えることは、技術の継承という点からも非常に重要であり、かつ製造業離れを食い止め、地域社会の活性化にも長期的に結びついていくと考えられる。子供達の理科離れは、科学技術立国としての我が国において深刻な問題であろう。

このような危惧より、独立行政法人科学技術振興機構は、科学技術理解増進事業を進めている。子供達から一般の人に、科学をわかりやすく伝え、理科教育の裾野を広げる活動を始めている。今回報告するSPP（サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト）は、児童・生徒を対象とした学校等と大学・科学館等との連携による、観察、実験、実習等の体験的・問題解決的な学習活動を行う企画について支援する活動である。本活動は文部科学省が主催していた平成14年より行われ、物質生命科学科では、平成17年より支援を受け、地域の高校生を対象とした理科実験講座を行っている。高校の理科、農学等の教員と連携し、高校生に理科の面白さ、不思議さなど

を体験してもらい、科学への興味を喚起する活動を行っている。本論文では、当学科が行ってきた近隣の高校との理科教育を介した連携活動について、学科を代表して報告する。

2. 本学科の実験教室の歴史

物質生命科学科の理科教育活動は、花崎先生在任時の1998年当時までさかのぼることができる。体系化されたのが2001年で、楽しい物質科学実験教室という名称で袋井市周辺の小学生を対象にして活動を始めた。楽しい実験教室を実施するにあたり最も不安であったことは、子供達が来てくれるのだろうか？と言うことであった。しかし、取り越し苦労であり、子供達の楽しそうな笑顔が我々スタッフの活力でもあった。

楽しい物質科学実験教室の開催と同時に、高校生のための実験教室も開催することとなった。当時はゆとり教育が叫ばれ、高校のカリキュラムに総合学習という新しい授業が開設された時でもあった。子供達の感性を育てるような、体験型の学習を取り入れるという名目であったと記憶しているが、高校の先生も何をすべきなのか戸惑っている様であった。大学への実験講座の依頼も増え、実験教室への高校生の参加も積極的であった。それが現在のSPP活動へと繋がってきている。

嬉しいことに、高校生のための実験教室の経験者が本学に入学し、新しい科学実験の開発、学生が自由に実験を楽しむことができるような理科実験サークル・科学実験工房が誕生した。科学実験工房は、学生主体のサークルへと変化し、静岡科学の祭典への参加や袋井市月見の里のサイエンスショーなどにも活発に参加している。

2008年2月20日受理

*理工学部 物質生命科学科

表 1 SPP 連携高校と実施テーマ

年度	主催	連携高校	実施テーマ	担当者
2004	浜松城北工	浜松城北工	環境-夢・体験-事業	中西, 出口
2005	大学	掛川西・掛川東	環境に優しい新素材	山崎, 幡野
2006	大学	掛川東・袋井・磐田農	物質科学から環境問題へのアプローチ	吉田, 幡野
	常葉菊川	常葉菊川	環境調和型の有用物質の合成	桐原
2007	巨摩(山梨)	巨摩(山梨)	身近な素材から化学理論を学ぶ	幡野
	大学	掛川東・横須賀・磐田農	分子の働きによるセンシング技術	桐原, 幡野
	常葉菊川	常葉菊川	高温超電導体の作成と環境物質科学の探究	出口, 桐原
	巨摩(山梨)	巨摩(山梨)	身近な化学 ~環境にやさしい化学技術~	幡野

3. SPP への取り組み

SPP は地域の学校と大学等が行う、理科普及活動であり、全国的にも取り組みは年々増加している。大学や博物館、研究機関が主体となり行うタイプのほか、大学から講師の派遣を行うタイプ、また学校教員の研修を目的としたタイプの三種類がある。表 1 に、本学で実施してきた SPP 活動の年度の推移を示した。大学が主催するプログラムは一年に一件、高校が主体となり大学に講師派遣を依頼するタイプが二件となっている。当学が主催するプログラムでは、連携校を二校ないし三校にして、高校生との交流の場としての機会にもしている。実施するテーマにはキーワードがあり、2005 年と 2006 年は環境、2007 年は分子であった。一つのプログラムは二人の教員が担当し、共通する一つのキーワードのもと異なる側面から講義と実験を行い、教育効果を高めている。最後に、グループごとのパワーポイントを用いたプレゼンテーション、もしくはレポート提出を行った。感じたこと、考

えたことを自由に述べて頂き、学科教員とディスカッションすることで、理解の定着を図った。講師派遣を依頼してくる学校は、現在のところ常葉学園菊川中高等学校と山梨県立巨摩高等学校の二校である。静岡県の高校で SPP を積極的に導入しようと言う動きは、他県に比べるとやや少ない。その点、山梨県は非常に活発であり、高校二年生を中心に夏休み等を利用して SPP を取り入れ、理系の授業のフォロー、大学進学等への動機付けとして積極的に活用しているように見受けられた。以下、当学が主体となって実施した取り組みについて簡単に紹介する。

3-1 2005 年度

初申請の年となった。掛川西高校、掛川東高校の二つの高校と連携した。二つのテーマの実験を各二日間、計四日間行い、最終日にはパワーポイントを用いたプレゼンテーションを行った。実験テーマと担当者は、以下に示す通りである。

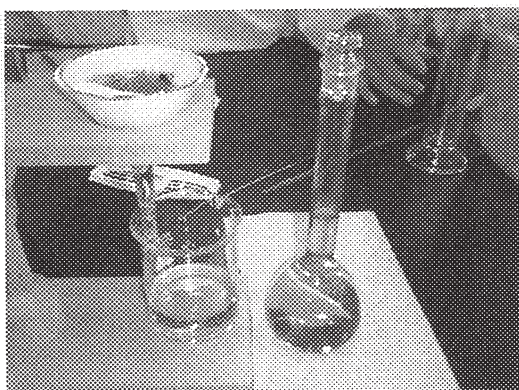


図 1 色素で染色した水に吸着剤を入れ、ろ過した水。きれいに脱色された。

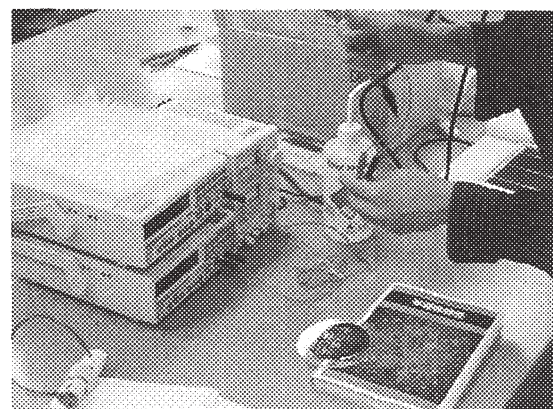


図 2 シリコン基板上にアルミ蒸着して作製した太陽電池の電気抵抗実験。

テーマ：環境に優しい新素材

- 1) 吸着現象を利用した環境汚染物質の除去：山崎誠志
- 2) 生物が分解するプラスチック：幡野明彦

本プロジェクトのキーワードは環境問題であり、新素材で環境問題に挑もうとする当学の教員の専門を生かすこととした。山崎先生のテーマでは、吸着現象という観点から、生物に害を及ぼす化学物質を吸着除去する新素材、ゼオライトや活性炭を用いた実験と講義を行った。幡野のテーマでは、土中の微生物や酵素によって分解され植物の肥料となる生分解性プラスチックに関する実験と講義を行った。³⁾

初めての取り組みであったが、高校生、引率教員の評価も高く、良い取り組みができたと感じた。

3-2 2006年度

テーマ：物質科学から環境問題へのアプローチ

- 1) 河川の環境ホルモンの測定：幡野明彦
- 2) クリーンエネルギーとしての太陽電池とその効率化：吉田豊

本年度も環境問題を共通キーワードとし、物理系テーマと化学生物系テーマの二つで実施した。実験三日、プレゼンテーション一日の計四日でプロジェクトを行った。図2は高校生が作製した太陽電池の電気抵抗の実験である。光を当てたときと、当てていないときで、電気抵抗の値が異なり、光電効果を体験できた瞬間であった。

3-3 2007年度

分子の働きによるセンシング技術

- 1) 制限酵素を用いた遺伝子鑑定法：幡野明彦
- 2) ソルバトクロミック色素の合成と溶液のセンシング：桐原正之

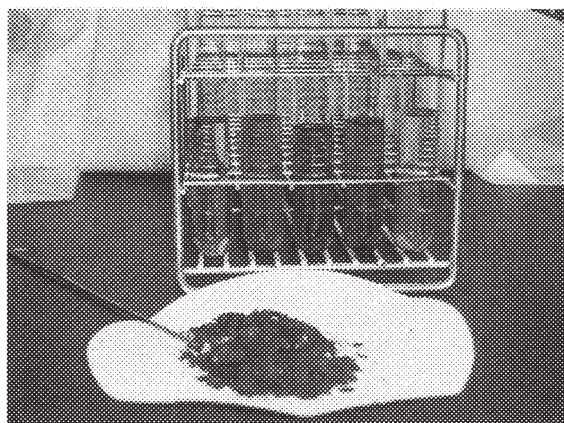


図3 ソルバトクロミック色素分子と各種溶媒に溶かしたときの色

2007年度のテーマは、これまでの環境から物質に視点を変えて行った。近年、積極的に機能を有した分子の合成が行われ、その分子を応用することで我々の生活が豊になっている。なかでもセンサーは、様々な物質の性質を判断するために重要な働きをしている。

まず、ソルバトクロミック色素の実験では、溶媒の極性を判定する色素分子を実際に合成し、様々な溶媒に溶かして色の変化を調べた。溶媒の種類により、黄色から青、赤まで、幅広い着色がみられ、溶媒センサーとして利用できることを体験した。

遺伝子鑑定法の実験では、制限酵素というDNAの塩基配列を見分け、切断する酵素を利用したセンシングを行った。制限酵素の働きによってDNAの切れ方が異なるため、DNAの長さを電気泳動で区別して遺伝子の違いを判断した。

4 アンケートからみる高校生の理科への意識

アンケートは、最終実験終了後、五段階で記入してもらった。残念ながら2006年度のアンケート結果は無いため、2005年度と2007年度を比較した。図に示したものは、重要だと思われる質問項目に対する結果を抽出した。なお、年度によって参加高校や参加者の就学コースに偏りが生じているため、絶対的な指標ではないことを付け加えておく。

4-1 理科の得意不得意について

得意な科目、不得意な科目を上げてもらった。好きな科目に関しては、2005年度は物理、化学・数学という順番で、2007年度は数学・生物、物理であった。どちらの年も、物理は好きである割合が高かった。嫌いな科目は、2005年度は圧倒的に生物であった。2007年度はばらついていた。

4-2 理系への進学・就職

2005年度は、ほぼ全ての生徒が理系への進学と就職を希望していた。高校側からの配慮で、理数系、理科系のクラブの生徒さんが多数参加してくれたためであると考えられた。2007年度では、中間意見が大きくなっている。今後、本活動を通して少しでも理系希望者が増えることを期待している。

4-3 今回の授業について

両年とも、授業は面白いと答えた生徒がほとんどであった。また、理解度も非常に高く、教えている側としても良い授業ができたと感じた。授業のレベルは、圧倒的に難しいと答えた。これは高校の理科の授業では習わな

いことを対象としたため、難しいと感じたのであろう。「難しいけど面白かった」という意見は、原理まで理解しようとする証であり、ポジティブにとらえていきたい。授業を通して理科への興味が湧いたか？という設問は、本プログラムにとって最重要課題である。当学のプロジェクトは大いに良い評価を得た。本活動を通して、高校生が科学技術に少しでも興味を持ち、今後の進路選択の幅を与えることができたのではないだろうか。

5 まとめ

サイエンス・パートナーシップ・プロジェクトを通して、地域の高校と理科教育を介した連携を行った。実験を行うまでは「なぜ大学まで来て実験を・・・」という雰囲気を漂わす年度もあった。しかし、実際に実験を進めると高校生の反応は非常に素直であった。実験で行うことの全てが新鮮であり、得られた結果に驚き喜び、真剣な眼差しと笑顔が見えた。楽しそうにフラスコを振る姿を見ることができるのは、教員冥利に尽きるのであろう。また、ティーチングアシスタントとしてサポートしてくれる当学の学生と高校生が打ち解け、コミュニケーションをとっている姿を見ると、感慨深いものが有る。しかしながら、講師、事務を担当する大学教員への負担は並大抵ではないが、高校生、引率高校教員のコメント

をみると、来年もやろうという気が湧いてくる。

謝辞

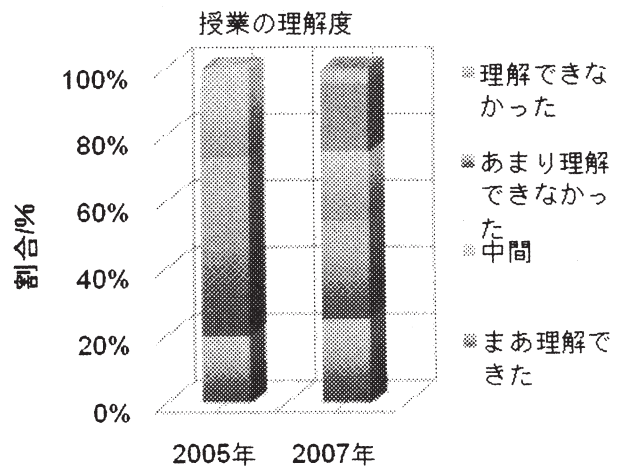
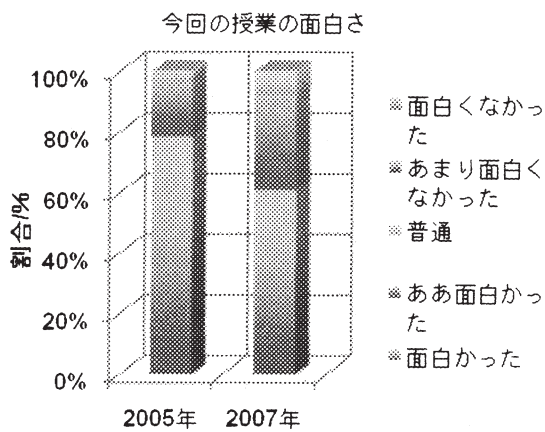
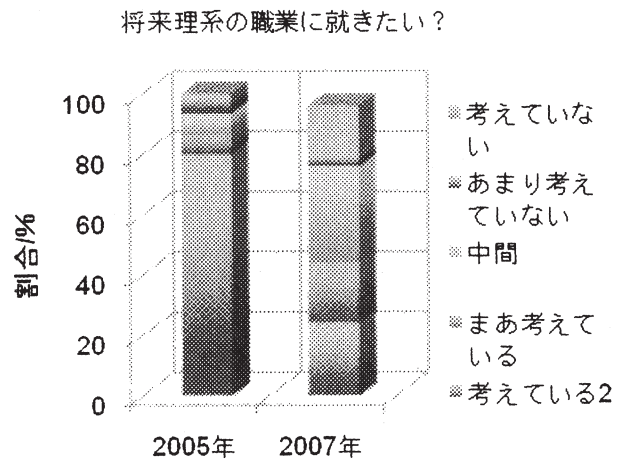
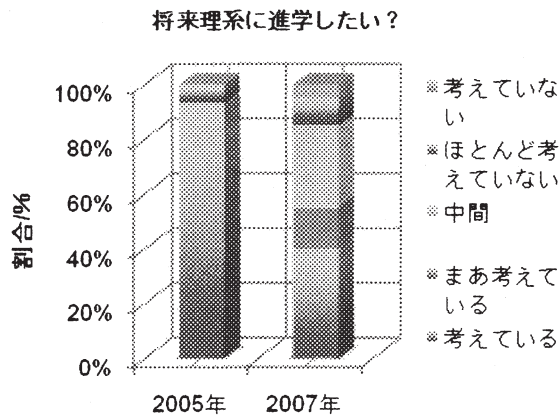
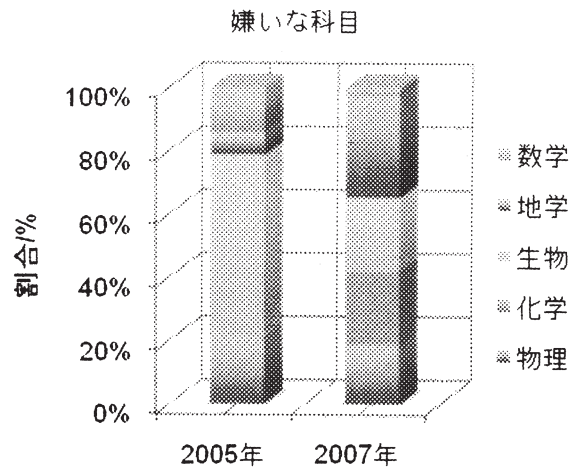
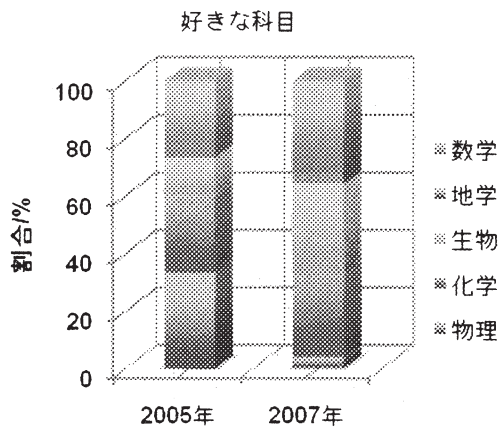
サイエンス・パートナーシップ・プログラムについては文部科学省（2005年）、サイエンス・パートナーシップ・プロジェクトについては独立行政法人科学技術振興機構（2006, 07年）から支援を頂いた。また、物質生命科学の全教員の協力により、本活動が遂行されたことを付け加える。

発表等

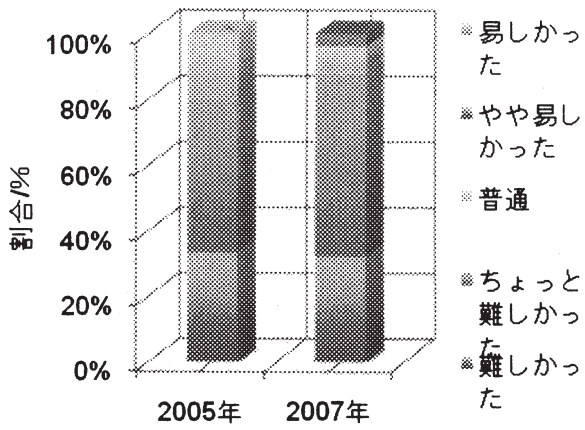
- 1) 2005年11月12日（土）文部科学省主催理科大好きシンポジウム2005, SPP報告会
- 2) 2007年8月31日（金）中日新聞朝刊

参考文献

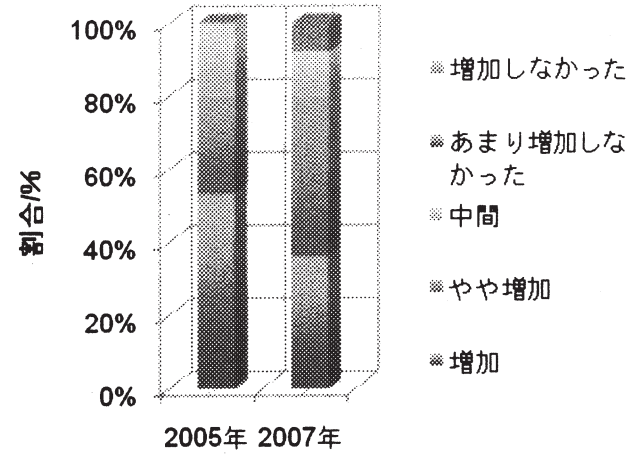
- 1) 総務省統計局統計データ「変化する産業・職業構造」.
- 2) 社会実情データ図録
<http://www2.ttcn.ne.jp/~honkawa/index.html>.
- 3) 物質生命科学実験テキスト, 静岡理工科大学学生実験テキスト.



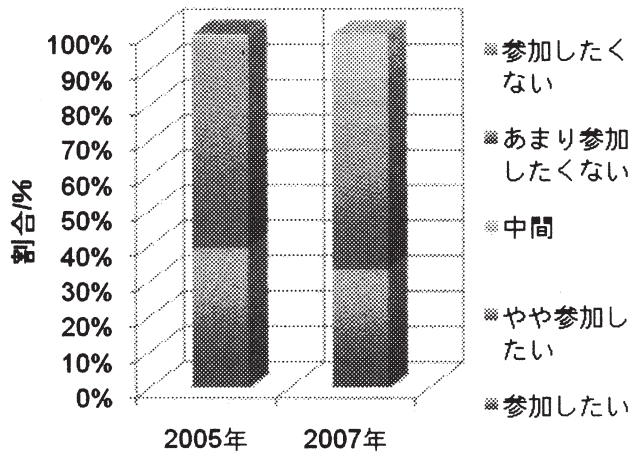
授業のレベル



理科への興味が湧いたか？



また参加したいか？



参加生徒の男女比

