

*Research Reports of
National Institute of Technology, Tokyo College
No.46(2), Mar. 2015*

東京工業高等専門学校
研 究 報 告 書



第 46 (2) 号

2015. 3

目次

長期休暇用課題への取り組み方と学力との関係	安富 義泰	1
長期休暇明け試験における学力の推移	安富 義泰	8
	市川 裕子	
	小中澤 聖二	
	中里 肇	
	波止元 仁	
	石田 唯之	
	笠谷 昌弘	
	藤川 卓也	
炭素繊維を用いたカート用シートの軽量化	木村 南	13
	山岸 勇介	
波動逆解析による材料内部の欠陥可視化システム	福田 勝己	18
	西村 良弘	
	鈴木 隆之	
	福田 昌了	
マイクロ領域における摩擦特性（第 4 報：摩擦係数の周波数特性）	福田 勝己	24
	小林 光男	
	鈴木 健司	
	三原 純一	
	吉岡 亨	
創造性を養う設計製図の授業方法に関する研究	林 丈晴	31
	多羅 尾進	
	志村 穰	
	中村 源一郎	
電気工学科 4 年次の PBL 教育の検証	綾野 秀樹	37
	伊藤 浩	
	松井 義弘	
	羽鳥 広範	
	松岡 敏	
素子損失のアンバランスを考慮したインバータノイズ低減法の評価	綾野 秀樹	43
	佐藤 優太	
	松井 義弘	
フォトリソグラフィを用いた MOEMS 技術の教材開発	伊藤 浩	50
	新國 広幸	
自律移動ロボットのための位相限定相関法を用いた路面画像による移動量計測	鈴木 与海	56
	多田 昂介	
	青木 宏之	
C 言語学習支援ツールの開発	小坂 敏文	62
	水村 亮介	
	松林 勝志	
	吉本 定伸	
八王子市小学校科学教育センター「インターネット講座」の実施	田中 晶	66
	土屋 賢一	
	林 丈晴	
	中野 雅之	
	小池 和摩	
	酒井 元太	
	菅原 健太	
	仲林 龍馬	
	牧野 康平	

Research Reports of National Institute of Technology, Tokyo College No.46 (2)

CONTENTS

Relation between the Efforts to the Assignments for Long Vacations and the Scholastic Ability Yoshiyasu YASUTOMI	1
Transition of the Scholastic Ability in Tests after Long Vacations Yoshiyasu YASUTOMI, Yuko ICHIKAWA, Seiji KONAKAZAWA, Hajime NAKAZATO, Jin HATOMOTO, Tadayuki ISHIDA, Masahiro KASATANI, Takuya FUJIKAWA	8
Lightening of Seat for Go-cart that Uses Carbon Fiber Reinforced Plastic Minami Kimura, Yuske Yamagishi	13
Construction of a System Making Internal Defect Images by an Inverse-problem-solving method Katsumi FUKUDA, Yoshihiro NISHIMURA, Takayuki SUZUKI, Masatoshi FUKUTA	18
Friction Characteristics of Micro Area (4th Report: Frequency Characteristics of Friction Coefficient) Katsumi FUKUDA, Mitsuo KOBAYASHI, Kenji SUZUKI, Junichi MIHARA, Tohru YOSHIOKA	24
Study on the Design and Drafting Lesson Method to Encourage Creativity Takeharu HAYASHI, Susumu TARAO, Jyo SHIMURA, Gen-ichiro NAKAMURA	31
Verification of the PBL Education which the 4th Grade Students in Department of Electrical Engineering Have Learned Hideki AYANO, Hiroshi ITO, Yoshihiro MATSUI, Hironori HATORI, Satoshi MATSUOKA	37
Evaluation of the Noise Reduction Technique in Consideration of the Unbalance of Power Losses Generated in Power Devices Hideki AYANO, Yuta SATO, Yoshihiro MATSUI	43
Development of Teaching Materials for MOEMS Technology by Using Photolithography —4th Report, Evaluation of Basic Characteristics of Diaphragm Fabrication Process— Hiroshi ITO, Hiroyuki NIKKUNI	50
Measurement of the Amount of Travel by Road Surface Images Using Phase Only Correlation for Autonomous Mobile Robots Azumi SUZUKI, Kousuke TADA, Hiroyuki AOKI	56
Development of C language Learning Support Tool Toshifumi KOSAKA, Ryosuke MIZUMURA, Katsushi MATSUBAYASHI, Sadanobu YOSHIMOTO	62
Internet Course for Hachioji Elementary-school Science Education Center Akira TANAKA, Kenichi TSUCHIYA, Masayuki NAKANO, Kazuma KOIKE, Genta SAKAI, Kenta SUGAWARA, Ryoma NAKABAYASHI, Kouhei MAKINO	66

長期休暇用課題への取り組み方と学力との関係

安富 義泰*

Relation between the Efforts to the Assignments for Long Vacations and the Scholastic Ability

Yoshiyasu YASUTOMI

The Department of Mathematics has given the first and second-year students assignments during long vacations and tests to see their achievement after long vacations since 2012. In this paper, we investigated how students worked on these assignments, and found that it caused the difference in the Scholastic Ability of students.

Keywords : Difference of the Scholastic Ability, How Students Work, Fixation of the Scholastic Ability

1. はじめに

東京高専では、自主的に学習する習慣が身に付いていない学生に継続的に学習する機会を提供する為、また、特に 1 年生・2 年生の原級留置者・退学者を減らす為の対策として、春休み・夏休み・冬休みなどの長期休暇に課題を出し、授業期間中と同じ様に定期的に数学に接する事が出来る様にしている。そして、その学習効果を測る為に、全 1 年生・2 年生を対象とした長期休暇課題の類似問題から作成した春休み明け試験・夏休み明け試験・冬休み明け試験およびゴールデンウィーク明け試験を 2012 年度から実施している [1]。

2013 年度 1 年生（現 2 年生）と 2014 年度 1 年生（現 1 年生）の、1 年生春休み明け試験・1 年生前期定期試験・1 年生夏休み明け試験の平均点の比較を行ったところ、1 年生春休み明け試験と 1 年生前期定期試験の平均点については 2 学年間にほとんど差異が見られなかったが、1 年生夏休み明け試験については実施した 2 科目両方において 2 学年間で得点率に 5% 程度の差異が生じている事がわかった[2]。

これまでの、長期休暇前に課した課題を長期休暇後に回収・評価するのみで、実際に長期休暇中に学生がどの様に長期休暇用課題に取り組んできたかに対しては調査や指導はしていなかったが、2 学年間の 1 年生夏休み明け試験の結果を受け、本年度は、夏休み明けに全 1 年生・2 年生を対象としたアンケートを実施し、夏休み期間中に長期休暇用課題にどの様に取り組んできたかを調査した。

この報告書では、2013 年度 1 年生と 2014 年度 1 年生の夏休み期間中の長期休暇用課題への取り組み方の比較を行うとともに、現 1 年生と現 2 年生の夏休み期間中の長期休暇用課題への取り組み方と夏休みを挟んだ学力の変化との関係についてクラス毎・学科毎に比較を行う。

2. 2013 年度 1 年生と 2014 年度 1 年生の長期休暇用課題への取り組み方の比較

全 1 年生・2 年生を対象に実施した（別紙）の様なアンケートの結果は表 1 および図 1 の通りである：

表 1 夏休み課題への取り組み期間別人数（人）

	お盆までが中心	まんべんなく	後期直前が中心
2013 年度 1 年生	34	85	61
2014 年度 1 年生	29	100	63

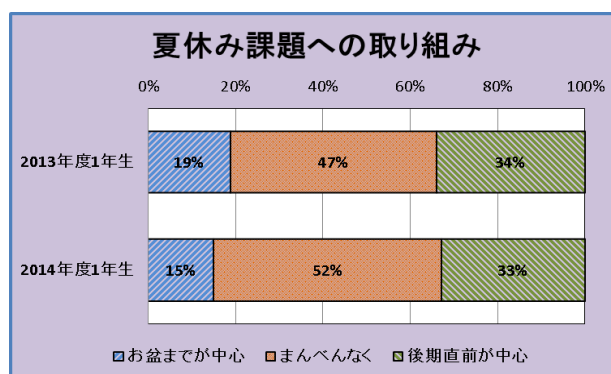


図 1 夏休み課題への取り組み期間別人数の割合 (%)

2013 年度 1 年生（現 2 年生）・2014 年度 1 年生（現 1 年生）いずれの学年においても、夏休み期間中まんべんなく課題に取り組んだ学生の数が多い。しかしながら、その割合については、夏休みが始まってすぐお盆までにほとんど課題を終わらせた学生の割合が 2013 年度 1 年生は 19%であったのに対して 2014 年度 1 年生は 15%であり、夏休み期間中まんべんなく課題に取り組んだ学生の割合は

2013 年度 1 年生が 47%であったのに対して 2014 年度 1 年生は 52%であり、後期授業が始まる直前に急いで課題に取り組んだ学生の割合は 2013 年度 1 年生が 34%であったのに対して 2014 年度 1 年生は 33%であった。夏休み期間中に課題に取り組んだ期間別の人数については、2013 年度 1 年生は 2014 年度 1 年生よりも夏休みが始まってすぐお盆までに課題を終わらせた学生が多く、2014 年度 1 年生は 2013 年度 1 年生よりも夏休み期間中まんべんなく課題に取り組んだ学生が多かった事がわかった (表 1・図 1)。

次に、実際に取り組んだ日数・時間・1 日あたりの平均時間の結果は表 2・3・4 及び図 2・3・4 の通りである：

表 2 夏休み課題への期間別取り組み日数 (日)

	最初の一週間	夏休み中期	最後の一週間	日数合計
2013年度1年生	2.6	3.6	2.6	8.8
2014年度1年生	2.5	3.9	2.5	8.9

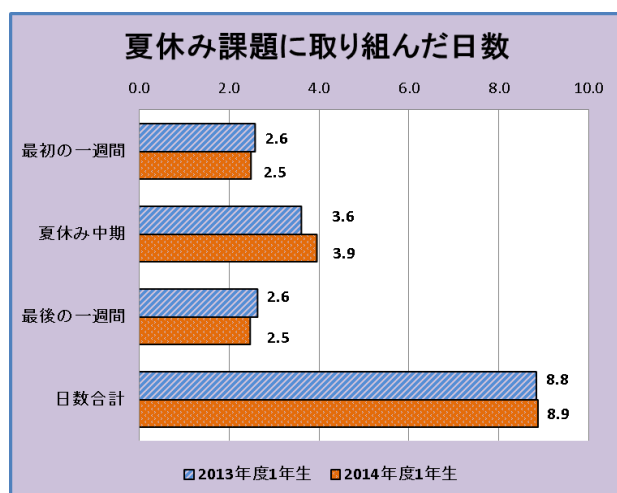


図 2 夏休み課題への期間別取り組み日数 (日)

夏休み期間中に課題に取り組んだ日数の合計の平均は、2013 年度 1 年生が 8.8 日であったのに対して 2014 年度 1 年生が 8.9 日であり、2 学年間にはほとんど差異は見られない。しかし、取り組んだ期間別に比較すると、夏休みが始まって最初の一週間に課題に取り組んだ日数の平均は 2013 年度 1 年生が 2.6 日であったのに対して 2014 年度 1 年生が 2.5 日であり、8 月中旬から 9 月中旬までの約 1 ヶ月の間に課題に取り組んだ日数の平均は 2013 年度

1 年生が 3.6 日であったのに対して 2014 年度 1 年生が 3.9 日であり、後期授業が始まる直前の最後の 1 週間に課題に取り組んだ日数の平均は 2013 年度 1 年生が 2.6 日であったのに対して 2014 年度 1 年生が 2.5 日であった。以上の事から、夏休み期間中に課題に取り組んだ日数についても、2014 年度 1 年生は 2013 年度 1 年生よりも夏休み期間中まんべんなく課題に取り組んでいた事がわかった (表 2・図 2)。

表 3 夏休み課題への期間別取り組み時間数 (時間)

	最初の一週間	夏休み中期	最後の一週間	時間合計
2013年度1年生	7.3	5.1	6.7	19.1
2014年度1年生	4.3	6.8	8.0	19.1

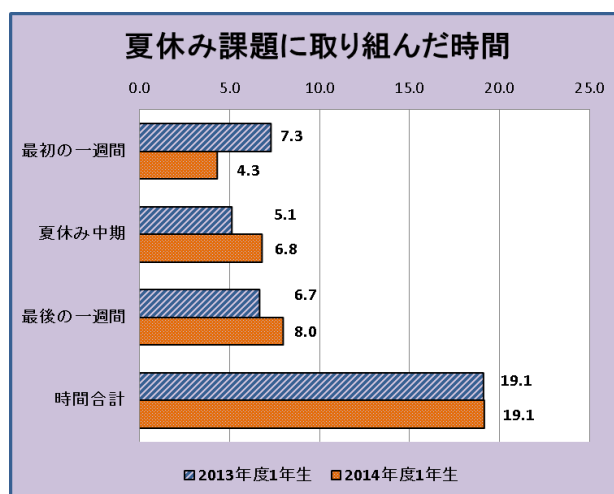


図 3 夏休み課題への期間別取り組み時間数 (時間)

夏休み期間中に課題に取り組んだ時間の合計の平均は、2013 年度 1 年生が 19.1 時間であったのに対して 2014 年度 1 年生が 19.1 時間であり、2 学年間にはほとんど差異は見られない。しかし、取り組んだ期間別に比較すると、夏休みが始まって最初の一週間に課題に取り組んだ時間の平均は 2013 年度 1 年生が 7.3 時間であったのに対して 2014 年度 1 年生が 4.3 時間であり、8 月中旬から 9 月中旬までの約 1 ヶ月の間に課題に取り組んだ時間の平均は 2013 年度 1 年生が 5.1 時間であったのに対して 2014 年度 1 年生が 6.8 時間であり、後期授業が始まる直前の最後の 1 週間に課題に取り組んだ時間の平均は 2013 年度 1 年生が 6.7 時間であったの対

して 2014 年度 1 年生が 8.0 時間であった。以上の事から、夏休み期間中に課題に取り組んだ時間については、2013 年度 1 年生は 2014 年度 1 年生よりも夏休みが始まってすぐお盆までに課題に取り組んだ時間が長く、2014 年度 1 年生は 2013 年度 1 年生よりも夏休み中盤から終盤にかけて課題に取り組んだ時間が長かった事がわかった（表 3・図 3）。

表 4 夏休み課題への期間別平均取り組み時間（時間/日）

	最初の一週間	夏休み中期	最後の1週間	平均1日あたりの
2013年度1年生	2.8	1.4	2.5	2.2
2014年度1年生	1.7	1.7	3.2	2.2

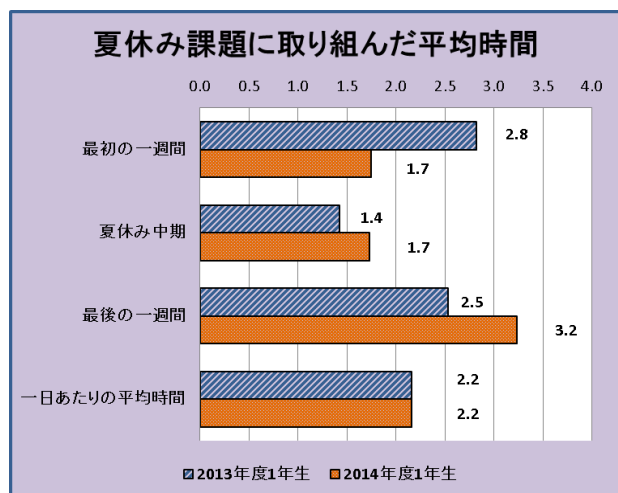


図 4 夏休み課題への期間別平均取り組み時間（時間/日）

夏休み期間中に課題に取り組んだ日における 1 日あたりの平均時間は、2013 年度 1 年生が 2.2 時間であったのに対して 2014 年度 1 年生が 2.2 時間であり、2 学年間にはほとんど差異は見られない。しかし、取り組んだ期間別に比較すると、夏休みが始まって最初の 1 週間に課題に取り組んだ日における 1 日あたりの平均時間は 2013 年度 1 年生が 2.8 時間であったのに対して 2014 年度 1 年生が 1.7 時間であり、8 月中旬から 9 月中旬までの約 1 ヶ月の間に課題に取り組んだ日における 1 日あたりの平均時間は 2013 年度 1 年生が 1.4 時間であったのに対して 2014 年度 1 年生が 1.7 時間であり、後期授業が始まる直前の最後の 1 週間に課題に取り組んだ日における 1 日あたりの平均時間は 2013 年度 1 年生が 2.5 時間であったのに対して 2014 年度 1 年生が 3.2

時間であった。以上の事から、夏休み期間中に課題に取り組んだ日における 1 日あたりの平均時間については、2013 年度 1 年生は 2014 年度 1 年生よりも夏休みが始まってすぐお盆までは集中的に課題に取り組んだものの夏休み中盤にはあまり課題に取り組んでおらず、2014 年度 1 年生は 2013 年度 1 年生よりも夏休み始まってすぐから夏休み中盤にかけて継続的に課題に取り組み続けた後、夏休み最後に更に集中的に課題に取り組んでいた事がわかった（表 4・図 4）。

3. 長期休暇用課題への取り組み期間別の学力定着

前期定期試験の平均の得点率に対する夏休み明け試験の得点率の割合を学力定着率と定義する。現 2 年生・現 1 年生の夏休み期間中の長期休暇用課題への取り組み方別の学力定着率は表 5・6 及び図 5・6 の通りである：

表 5 学科毎の夏休み課題への取り組み期間別定着率(%)

	お盆までが中心	まんべんなく	後期直前が中心	クラス平均
2年A学科	102%	92.3%	88%	91.8%
2年B学科	84%	87.1%	86.5%	86.6%
2年F学科	96%	96%	93%	95%
2年G学科	76%	94%	85%	87%
2年H学科	61%	57%	51%	57%
学年平均	84%	85%	81%	83%

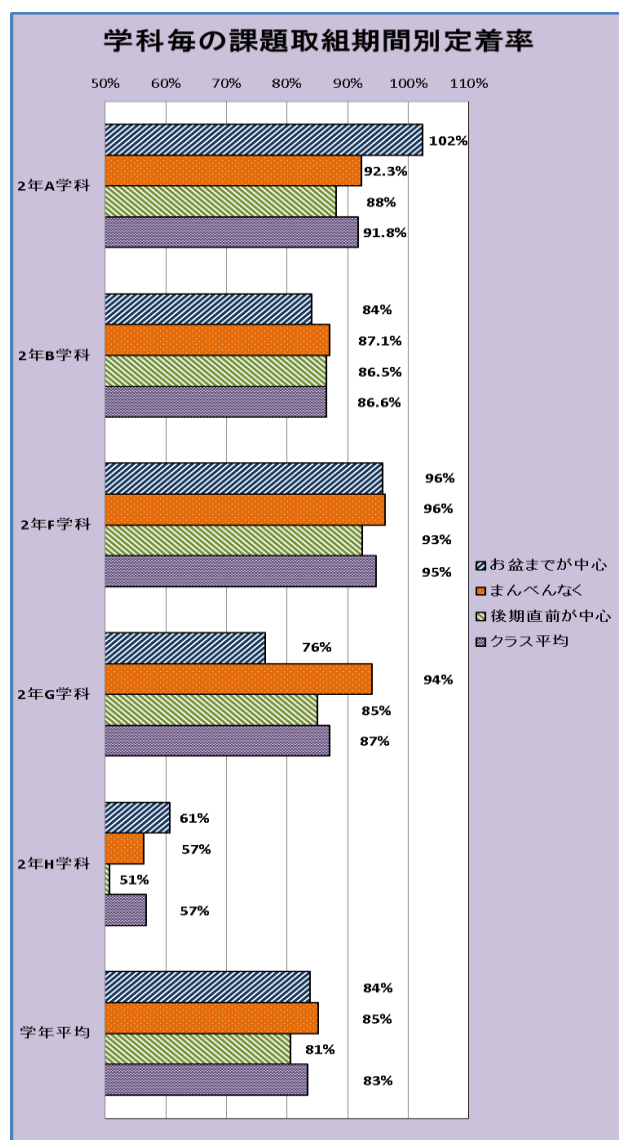


図5 学科毎の夏休み課題への取り組み期間別定着率(%)

現2年生の夏休みを挟んだ学力定着率には、学科間に大きな差異が見られた（定着率が最も高い学科と低い学科との差は38%、学年全体の定着率は83%）が、いずれの学科においても、夏休み期間中まんべんなく課題に取り組んだ学生の方が後期授業が始まる直前に急いで課題に取り組んだ学生よりも定着率が高かった（表5・図5）。

表6 クラス毎の夏休み課題への取り組み期間別定着率(%)

	お盆までが中心	まんべんなく	後期直前が中心	クラス平均
1年P組	83%	85%	67%	77%
1年Q組	79%	86%	82%	84%
1年R組	90%	83%	64%	80%
1年S組	86%	82%	67%	80%
1年T組	79%	76%	66%	74%
学年平均	83%	82%	70%	79%

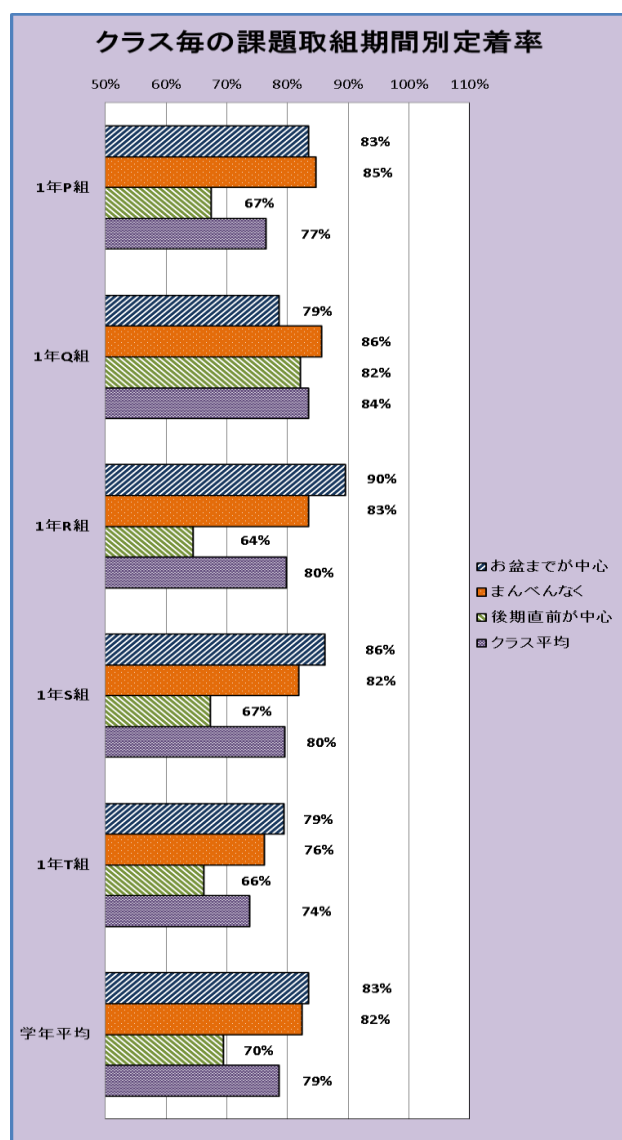


図6 クラス毎の夏休み課題への取り組み期間別定着率(%)

現1年生の夏休みを挟んだ学力定着率には、クラス間に現2年生ほどの差異は見られない（定着率が最も高い学科と低い学科との差は10%、学年全体の定着率は79%）。また、現1年生のいずれのクラスにおいても、現2年生と同様に夏休み期間中まんべ

もなく課題に取り組んだ学生の方が後期授業が始まる直前に急いで課題に取り組んだ学生よりも定着率が高かった（表 6・図 6）。

4. 同一クラス内の長期休暇用課題への取り組み期間別・科目別の学力定着

2014 年度 1 年生のある 1 クラスにおいて、ある科目 A のみについて、夏休み前に希望者を募り、次の様な実験を行った。

- ・科目 A の長期休暇用課題を、分量がほぼ均等になる様に 6 つに分ける
- ・夏休み期間中、毎週決まった曜日に、分けられた長期休暇用課題を 1 つずつ提出する

最初に参加するかしないかを決めるのは学生の任意であったが、一度参加すると決めた学生には強制的に毎週定期的に決められた分量の課題を提出して貰った。この定期的課題提出法への参加学生の割合はクラスの 4 割ほどであった。

定期的課題提出法への参加学生・不参加学生別の前期定期試験の平均の得点率を表 7 及び図 7 に、夏休み明け試験の科目毎の定着率を表 8 及び図 8 に示す：

表 7 定期的課題提出法への参加学生・不参加学生別
前期定期試験の平均得点率(%)

	前期試験平均
参加学生平均	79%
不参加学生平均	76%

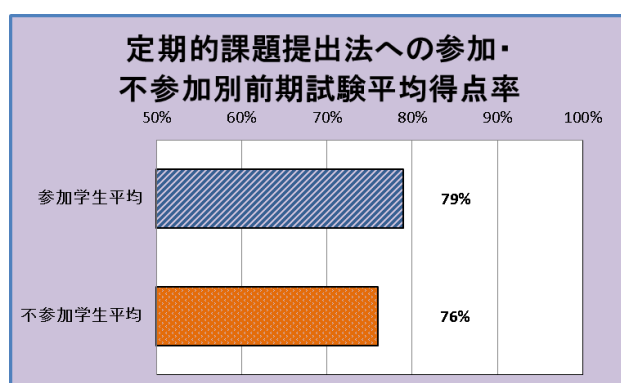


図 7 定期的課題提出法への参加学生・不参加学生別
前期定期試験の平均得点率(%)

表 8 定期的課題提出法への参加学生・不参加学生別
科目毎の定着率(%)

	科目 A	科目 B
参加学生平均	84%	66%
不参加学生平均	74%	72%

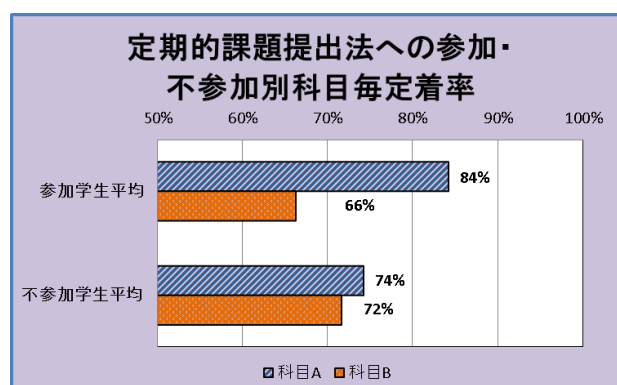


図 8 定期的課題提出法への参加学生・不参加学生別
科目毎の定着率(%)

科目 A の前期定期試験の平均の得点率には、定期的課題提出法への参加学生と不参加学生との間にほとんど差異は見られない（表 7・図 7）が、科目 A の夏休み明け試験の得点率では、定期的課題提出法への参加学生の得点率が不参加学生の得点率を大きく上回っている（表 8・図 8）。

一方、長期休暇用課題への取り組み方を特に指定していない科目 B の夏休み明け試験の得点率では、逆に科目 A の定期的課題提出法への参加学生の得点率は不参加学生の得点率を下回っている（表 8・図 8）。

4. まとめ

1 年生春休み明け試験・1 年生前期定期試験の平均点の比較では、2013 年度 1 年生と 2014 年度 1 年生の 2 学年間にほとんど差異は見られなかったが、1 年生夏休み明け試験の平均点の比較では実施した 2 科目両方で 2014 年度 1 年生の方が 2013 年度 1 年生よりも得点が高かった。その間の夏休み期間中の長期休暇用課題への取り組み方を調査したところ、2013 年度 1 年生は 2014 年度 1 年生よりも夏休みが始まってすぐお盆までに長期休暇用課題を終わらせた学生が多く、2014 年度 1 年生は 2013 年度 1 年生よりも夏休み期間中まんべんなく長期休暇用課題に取り組んだ学生が多かった。また、夏休み期間中に長期休暇用課題に取り組んだ日数の合計の平均や取り組んだ時間の合計の平均については 2 学年間にはほとんど差異は見られなかったが、実際に課題に取り組んだ日における 1 日あたりの平均時間を見ると、

2013 年度 1 年生は 2014 年度 1 年生よりも夏休みが始まってすぐお盆までは集中的に長期休暇用課題に取り組んだものの夏休み中盤にあまり長期休暇用課題に取り組んでいない期間が存在する。これに対して、2014 年度 1 年生は 2013 年度 1 年生よりも夏休みが始まってから夏休み中盤にかけて継続的に同程度の密度で長期休暇課題に取り組み続け、夏休み終盤に更に集中的に課題に取り組んでいた。

また、2014 年度 1 年生のある 1 クラスのある科目について、参加者を募って毎週定期的に決められた分量の長期休暇用課題を提出して貰ったところ、この定期的課題提出法に参加した学生の 1 年生夏休み明け試験の得点率は不参加学生の得点率を大きく上回った。

これらの事から、長期休暇中の課題への取り組み方について、長期休暇が始まってすぐや次の授業期間が始まる直前の一部の期間のみに集中して課題に取り組むのではなく、

**長期休暇課題に全く触れない期間を作らず
少量ずつでも継続的に課題に取り組み続ける事が重要**

である事がわかった。

この定期的課題提出法は、参加学生には（自ら進んで参加しているのでもちろんだが）好評で、

- ・毎週提出するシステムは良い
- ・課題提出を定期的に（強制的に）するのが良い
- ・日頃から予習・復習になる

などの意見が寄せられた。

また、定期的課題提出法を実施していないクラスからも

- ・予定を立てて計画的にやりたい
- ・課題を複数回に分けて欲しい
- ・インターネットで課題を提出したい

などの意見が寄せられ、定期的課題提出法への学生のニーズがある事がわかった。

ただ、全ての教員が担当する全てのクラス・担当する全ての科目で定期的課題提出法を実施するのは非常に難しいと思われる。多くの校務をこなしつつ、毎週送られてくる課題の全てに目を通し添削するのは 1 人の教員あたり 2 クラスが限度ではないかと思われる。

参考文献

- [1] 安富義泰, 市川裕子, 小中澤聖二, 中里肇, “長期休暇における数学の学力維持と学力不振学生の学力向上への取り組み”, 東京工業高等専門学校研究報告書, Vol.45, No.2 (2014), pp.9-14.
- [2] 安富義泰, 市川裕子, 小中澤聖二, 中里肇, 波止元仁, 石田唯之, 笠谷昌弘, 藤川卓也, “長期休暇明け試験における学力の推移”, 東京工業高等専門学校研究報告書, Vol.46, No.2 (2015), pp.8-12.

授業改善アンケート

年

組・工学科

番

1. 夏休みの課題について教えてください.

1. 1. 夏休みの課題の分量についてあなたの評価を教えてください.

5 (多すぎる) 4 (ちょっと多い) 3 (ちょうど良い) 2 (ちょっと少ない) 1 (もっと欲しい)

1. 2. 夏休みの課題の難易度についてあなたの評価を教えてください.

5 (難しすぎる) 4 (ちょっと難しい) 3 (ちょうど良い) 2 (ちょっと易しい) 1 (易しすぎる)

1. 3. 夏休みの課題を解いた期間を教えてください.

・試験返却後, お盆くらいまで・・・(日間くらい, 合計 時間くらい)

・お盆後から9月中旬くらいまで・・・(日間くらい, 合計 時間くらい)

・後期が始まる1週間前くらいから・・・(日間くらい, 合計 時間くらい)

1. 4. 今後より良くするには, どう改善したらいいと思いますか?

2. 夏休み明け試験について教えて下さい.

2. 1. 夏休み明け試験の実施についてあなたの評価を教えてください.

5 (とても良い) 4 (まあまあ良い) 3 (どちらでもない) 2 (ちょっとヤダ) 1 (絶対やめて欲しい)

2. 2. 夏休み明け試験の実施時期についてあなたの評価を教えてください.

5 (今のままで良い) 3 (後期始まって2回目の授業くらい) 1 (後期始まって3回目くらい)

2. 3. 夏休み明け試験の試験時間についてあなたの評価を教えてください.

5 (短すぎる) 4 (ちょっと短い) 3 (ちょうど良い) 2 (ちょっと長い) 1 (長すぎる)

2. 4. 夏休み明け試験の難易度についてあなたの評価を教えてください.

5 (難しすぎる) 4 (ちょっと難しい) 3 (ちょうど良い) 2 (ちょっと易しい) 1 (易しすぎる)

2. 5. 今後より良くするには, どう改善したらいいと思いますか?

ご協力ありがとうございました.

(平成 27 年 3 月 4 日受理)

長期休暇明け試験における学力の推移

安富 義泰*, 市川 裕子*, 小中澤 聖二*, 中里 肇*, 波止元 仁*
石田 唯之**, 笠谷 昌弘**, 藤川 卓也**

Transition of the Scholastic Ability in Tests after Long Vacations

Yoshiyasu YASUTOMI, Yuko ICHIKAWA, Seiji KONAKAZAWA, Hajime NAKAZATO,
Jin HATOMOTO, Tadayuki ISHIDA, Masahiro KASATANI, Takuya FUJIKAWA

The Department of Mathematics has given the first and second-year students assignments during long vacations and tests to see their achievement after long vacations since 2012. The tests are partially used for evaluating their final grades. In this paper, we see the transition of the scholastic ability in tests after long vacations and effects of matriculation with no distinction for departments

Keywords : Transition of the Scholastic Ability, Matriculation with No Distinction

1. はじめに

東京高専では、自主的に学習する習慣が身に付いていない学生の継続的な学習を支援する為、また、特に低学年学生の原因留置者・退学者を減らす為の対策として、春休み・夏休み・冬休みなどの長期休暇に課題を課し、授業期間中と同程度の密度で数学に接する事が出来る様に工夫している。そして、その学習成果を見る為に、長期休暇課題の類似問題から作成した春休み明け試験・夏休み明け試験・冬休み明け試験およびゴールデンウィーク明け試験を2012年度から全1・2年生に向けて実施している。これらの試験の結果は、単位取得の為の評価の一部になっている他、定期試験等における成績不振者に学習法指導や問題解説などを行う数学相談室へ行く様に促す判断材料の1つとして使用している [1]。

定期試験の他にもこの様な試験を多数課す事について、「成績に入れて欲しくない」「休み明け直後の授業時間ではなく（解説をして貰って）1～2回後の授業時間内で試験を実施して欲しい」などの意見はあるものの、

- ・自分の実力・弱点・理解度が分かる
- ・休み中も勉強する習慣が付く

など、学生の評価は1年生・2年生ともに良好である [1]。

この報告書では、2013年度1年生（現2年生）と2014年度1年生（現1年生）の春休み明け試験から夏休み明け試験までの、2学年間の試験の平均点の比較を行うとともに、現2年生の1年生春休み明け試験から2年生夏休み明け試験までの学科毎の試験の平均点の推移の比較を行う。

2. 2013年度1年生と2014年度1年生の比較

1年生春休み明け試験では、基本的な数の計算と文字式の計算について出題している。1年生前期には代数Ⅰ（2単位）と幾何Ⅰ（2単位）が開設されており、代数Ⅰでは、数と式、2次の関数・方程式・不等式を学習し、幾何Ⅰでは三角関数を学習する。1年生夏休み明け試験では、それぞれの科目の前期全体を試験範囲として出題している。

2013年度1年生と2014年度1年生の春休み明け試験から夏休み明け試験までのクラス毎の平均点は表1及び図1・2・3の通りである。ただし、春休み明け試験は10点満点、定期試験は75点満点、夏休み明け試験は100点満点である：

表1 クラス毎の春休み明け試験から夏休み明け試験までの平均点（点）

	春 休 み 明 け (10点中)	代 数 Ⅰ 平 均 (75点中)	幾 何 Ⅰ 平 均 (75点中)	代 数 夏 休 み 明 け (100点中)	幾 何 夏 休 み 明 け (100点中)
2013 1年A組	8.4	56.6	58.1	54.2	64.7
2013 1年B組	8.2	50.7	53.2	45.3	53.5
2013 1年C組	8.1	53.0	50.3	48.1	56.2
2013 1年D組	7.9	58.0	56.8	55.6	60.6
2013 1年E組	7.8	53.1	61.3	45.6	63.2
2014 1年F組	8.4	56.2	54.5	58.9	61.2
2014 1年G組	8.3	50.7	57.4	48.5	60.7
2014 1年H組	8.2	55.7	56.1	55.1	71.9
2014 1年J組	8.0	53.6	56.1	57.5	62.0
2014 1年K組	7.9	58.1	54.7	54.3	64.4

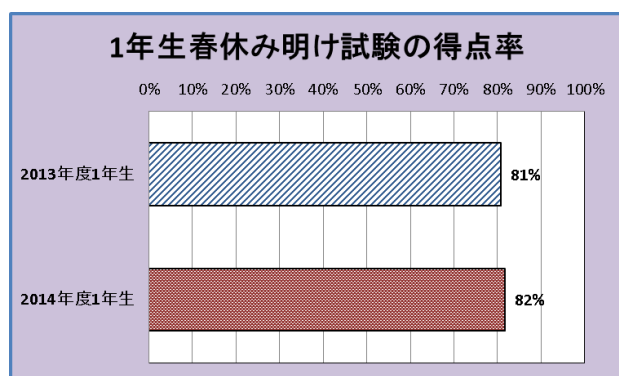


図1 1年生春休み明け試験の得点率 (%)

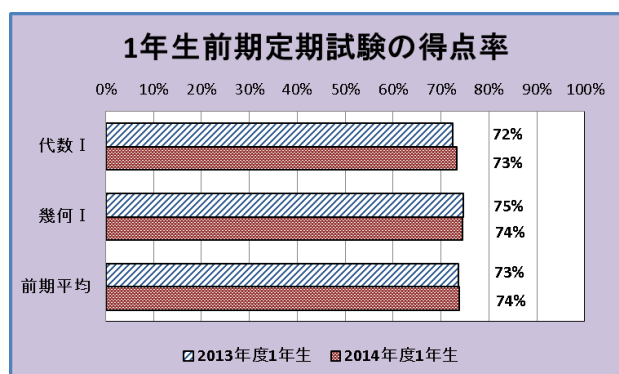


図2 1年生前期定期試験の得点率 (%)

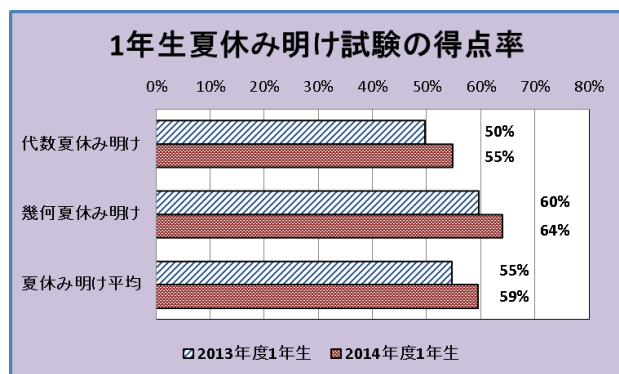


図3 1年生夏休み明け試験の得点率 (%)

1 年生春休み明け試験の平均点は、2013 年度が 8.1 点であるのに対して 2014 年度が 8.2 点であり、2 学年間にはほとんど差がない (表 1・図 1)。また、代数 I と幾何 I の前期定期試験 (中間試験と期末試験) の平均点も、2013 年度がそれぞれ 54.3 点と 55.9 点であるのに対して 2014 年度が 54.9 点と 55.8 点であり、2 学年間にはほとんど差がない (表 1・図 2)。しかし、代数夏休み明け試験と幾何夏休み明け試験の平均点は、2013 年度が 49.8 点と 59.6 点であるのに対して 2014 年度は 54.9 点と 64.0 点であり、2013 年度に比べて 5 点近く高くなってい

る (表 1・図 3)

夏休み明け試験における、2 学年間の平均点の差は、夏休み期間中の長期休暇用課題への取り組み方に原因がある様に思われる。詳しくは [2] を参照されたし。

また、2014 年度において、1 クラスだけ特に平均点の高いクラスがある (表 1) が、これはアクティブラーニングを行っているクラスであり、これについては、市川准教授の論文 (発表予定) を参考にされたし。

3. 2013 年度 1 年生の 1 年生春休み明け試験から 2 年生夏休み明け試験までの平均点の推移

東京高専では、1 年生は学科の区別のない状態で入学する (くくり入試)。そして、2 年進学時に成績上位者から優先的に学科を選べるというシステムを採用しており、結果的に、入学者の約 4 割が入学時の希望学科に行けないという状況にある (2011 年度入学者・2012 年度入学者)。

表 2 は、2013 年度 1 年生 (現 2 年生) の成績を、2 年進学時に配属された学科毎に集計し直し、1 年生春休み明け試験から 2 年生夏休み明け試験までの平均点を表したものである。ただし、1 年生春休み明け試験は 10 点満点、定期試験は 75 点満点、1 年生夏休み明け試験と 2 年生春休み明け試験は 100 点満点である。また、2 年生夏休み明け試験は、1 年の内容 (代数・幾何) と 2 年前期の内容 (微積) の両方を含む：

表 2 2013 年度 1 年生の 2 年次配属学科毎の 1 年生春休み明け試験から 2 年生夏休み明け試験までの平均点

(点)	1 年春休み明け	代数 I 中間	幾何 I 中間	代数 I 平均	幾何 I 平均	代数夏休み明け	幾何夏休み明け	代数 II 平均	幾何 II 平均	2 年春休み明け	微積 I	(代数・幾何・微積)
	(/10)	(/75)	(/75)	(/75)	(/75)	(/100)	(/100)	(/75)	(/75)	(/75)	(/75)	(/100)
2014.2年P学科	8.2	57.9	57.7	58.2	60.3	57.7	66.8	61.3	53.9	55.7	52.9	65.1
2014.2年Q学科	8.2	47.7	51.8	50.1	51.2	39.1	48.8	49.6	44.1	37.4	52.0	43.1
2014.2年R学科	8.1	57.1	56.9	59.1	59.1	57.9	67.8	59.9	54.8	57.2	52.2	64.0
2014.2年S学科	8.1	54.2	56.9	55.9	57.5	52.0	59.2	56.9	50.3	50.2	52.9	61.6
2014.2年T学科	7.8	50.9	54.3	52.2	55.8	43.8	58.0	54.0	46.0	49.7	48.6	56.7

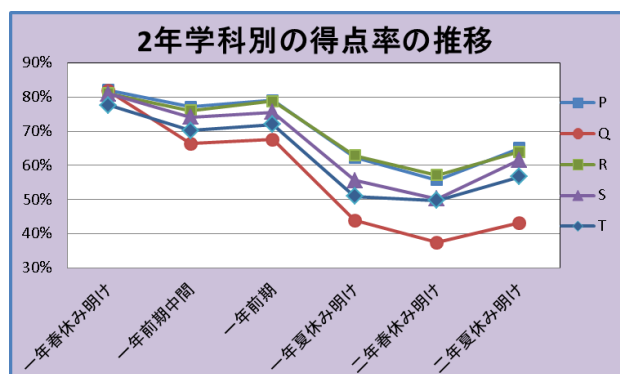


図 4 2 年生学科別の得点率の推移 (%)

1 年生春休み明け試験の平均点には，学科間に大きな差は見られない（平均点が最も高い学科と低い学科との差は 0.4 点，学年全体の平均点は 8.1 点）が，1 年生前期中間試験の平均点では差が 8.1 点（学年全体の平均点は 54.6 点），1 年生夏休み明け試験の平均点では差が 19.0 点（学年全体の平均点は 55.2 点），2 年生春休み明け試験の平均点では差が 19.8 点（学年全体の平均点は 50.0 点），2 年生夏休み明け試験の平均点では差が 22.0 点（学年全体の平均点は 58.0 点）という様に，平均点は低下傾向にあるのに対し，学科間の平均点の差は拡大傾向にある（表 2・図 4）。

また，各試験における学科毎の平均点についての順位については，1 年生春休み明け試験から 1 年生前期中間試験の間で変動が見られるが，1 年生前期中間試験から 2 年生夏休み明け試験の間に大きな変動は見られない（図 4）。

次に，各試験間の相関関係を表しているのが図 5 から図 11 である：

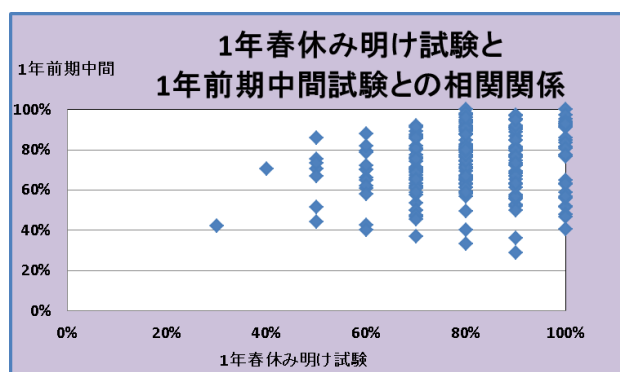


図 5 1 年生春休み明け試験と 1 年生前期中間試験との相関関係

1 年生春休み明け試験の得点率と 1 年生前期中間試験の得点率との相関係数は $R=0.17$ であり，ほとんど相関はない（図 5）。

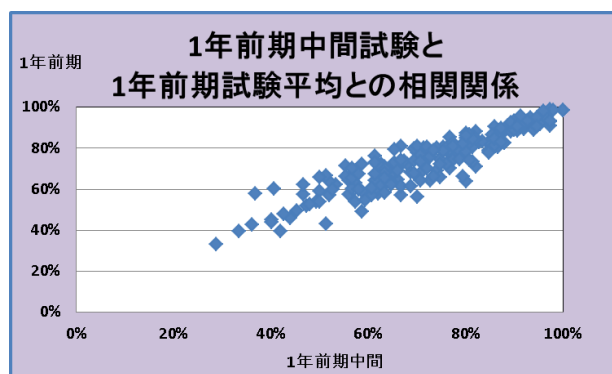


図 6 1 年生前期中間試験と 1 年前期試験平均との相関関係

1 年生前期中間試験の得点率と 1 年生前期試験の平均の得点率との相関係数は $R=0.92$ であり，極めて強い相関があると言える（図 6）。

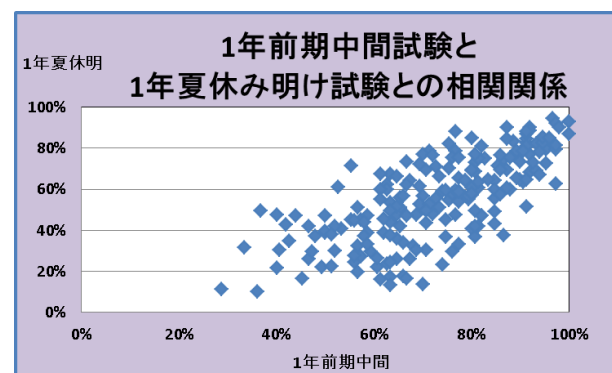


図 7 1 年生前期中間試験と 1 年生夏休み明け試験との相関関係

1 年生前期中間試験の得点率と 1 年生夏休み明け試験の得点率との相関係数は $R=0.72$ であり，強い相関があると言える（図 7）。

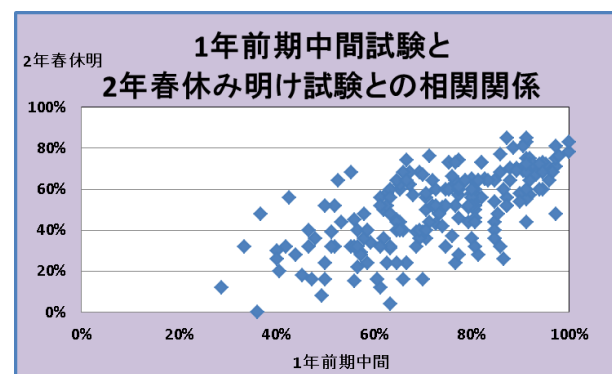


図 8 1 年生前期中間試験と 2 年生春休み明け試験との相関関係

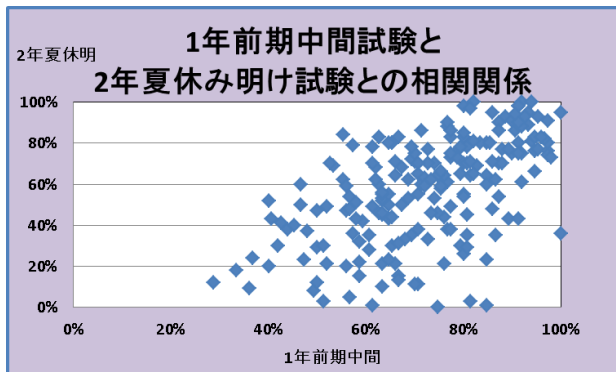


図 9 1 年前期中間試験と 2 年夏休み明け試験との相関関係

1 年生前期中間試験の得点率と 2 年生春休み明け試験の得点率との相関係数, 2 年生夏休み明け試験の得点率との相関係数は, それぞれ, $R=0.66$, $R=0.57$ であり, 比較的強い相関があると言える (図 8・図 9)。

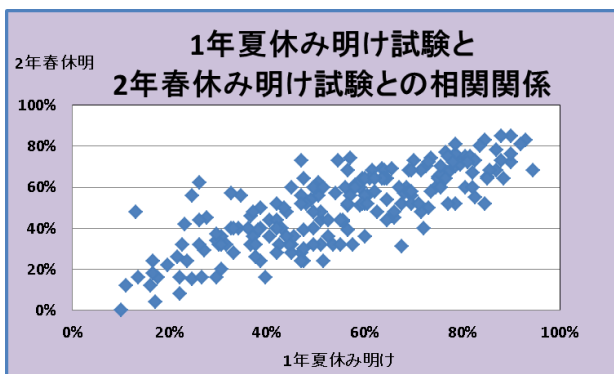


図 10 1 年夏休み明け試験と 2 年春休み明け試験との相関関係

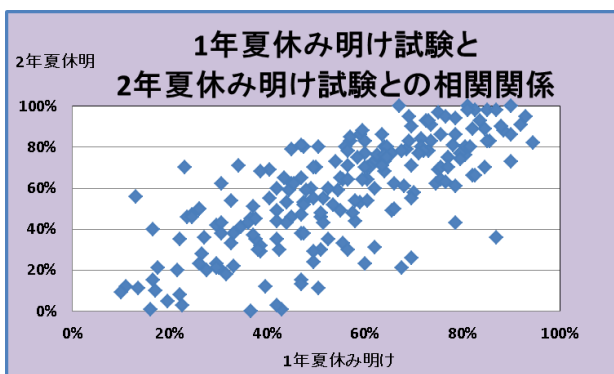


図 11 1 年夏休み明け試験と 2 年夏休み明け試験との相関関係

1 年生夏休み明け試験の得点率と 2 年生春休み明け試験の得点率との相関係数, 2 年生夏休み明け試験の得点率との相関係数は, それぞれ, $R=0.80$, $R=0.73$ であり, 強い相関があると言える (図 10・

図 11)。

4. まとめ

2013 年度 1 年生と 2014 年度 1 年生の, 1 年生春休み明け試験・1 年生前期中間試験・1 年生夏休み明け試験の平均点の比較から, 1 年生春休み明け試験と 1 年生前期中間試験ではほとんど差異が見られない 2 学年間でも, 1 年生夏休み課題への取り組み方によって, 夏休み明け試験の結果に差異が生じる事がわかった。

また, 2013 年度 1 年生の, 1 年生春休み明け試験から 2 年生夏休み明け試験までの学科毎の平均点の比較から, 1 年生春休み明け試験での成績 (入学時の学力) と 1 年生前期中間試験での成績 (入学 2 ヶ月後の学力) にはほとんど相関はないが, 1 年生前期中間試験での成績が 2 年生夏休み明け試験での成績まで影響を及ぼしている事がわかった。また, 1 年生夏休み明け試験での成績は, 2 年生夏休み明け試験での成績まで強い相関を表している事がわかった。

これらの事から, 低学年学生に対する数学教育において,

入学後, 1 年生前期中間試験までの時期と,
1 年生夏休みの過ごし方が特に重要

である事がわかった。

また, 1 年生前期中間試験から 2 年生夏休み明け試験の間に, 各試験における学科毎の平均点についての順位に大きな変動は見られない事から, もし現状の様な, 学科の区別のない状態で入学を許可し, 後に成績上位者から優先的に学科を選べるというシステムを採用し続けるのであれば, 『早期体験重視の教育を通して』即戦力となる技術者を輩出する, という高専の存在意義を考えれば, 数学の学力という面から言えば,

学科配属は 1 年生後期からで十分

である事もわかった。

更に言えば, 希望学科に配属されず, 2 年生になって勉強に対する意欲を失い, そのまま留年・退学していく学生の事を考えれば, 混合学級は残しつつ, 入学許可は学科毎に出すものの, 進級時の転科をしやすくする事で,

- ・学生の意志で進路を選ぶ (変える) 事が出来,
- ・学科とのミスマッチを減らす事が出来,

- ・学生の勉学へのモチベーションを高める事が
出来、
その結果、
- ・留年や退学を減らす事が出来る
と考えられる。

参考文献

- [1] 安富義泰，市川裕子，小中澤聖二，中里肇，“長期休暇における数学の学力維持と学力不振学生の学力向上への取り組み”，東京工業高等専門学校研究報告書，Vol.45，No.2 (2014)，pp.9-14.
- [2] 安富義泰，“長期休暇用課題への取り組み方と学力との関係”，東京工業高等専門学校研究報告書，Vol.46，No.2 (2015)，pp.1-7

(平成 27 年 3 月 4 日受理)

炭素繊維を用いたカート用シートの軽量化

木村 南* 山岸勇介**

Lightening of seat for go-cart that uses carbon fiber reinforced plastic

Minami Kimura and Yuske Yamagishi

It has equal bend strength to the GFRP seat in this research, and it aims at making the seat for the lightened CFRP sandwich wagon for trial purposes. The laminated structure improves $250\text{kPa} \pm 50\text{kPa}$ by using 3k life crossing in the pressurizing medium with the rubber tube and has improved molding the surface of doing by $0/90^\circ$, 45° , $\pm 0/90^\circ$, the form, $0/90^\circ$, and 45° and $\pm 0/90^\circ$. The seat that had been made for trial purposes obtained bend strength equal with $\text{vf}40\%$ and the GFRP seat, and lightened 33%.

key words; CFRP, seat, go-cart

1. 緒言

カート用シートはガラス繊維強化プラスチック（以下 GFRP と略す）が主流であるがまた炭素繊維強化プラスチック（以下 CFRP と略す）を用いたシートは車体の軽量化，ドライバーへの安全配慮として，強度向上による開発が進められている．そこで本研究では CFRP シートよりもより軽量化したサンドイッチ構造を用いてカート用の CFRP シートの試作を目標として開発を行った．強度を従来品と同等にしてサンドイッチ構造発泡材を芯材として表皮材を GFRP よりも密度の小さい CFRP に変更し軽量化によるカートの燃費向上，シャーシ上重量の軽減による操縦性の向上を目的とした．

2. 実験材料

Fig.1 に CFRP 製サンドイッチ構造シート用素材として東邦テナックス製炭素繊維クロスを示した．Fig.2 にエポキシ樹脂(GH クラフト製 Z-2)および硬化剤(H-07)を示した．硬化条件は $22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ で 24 時間の硬化時間とした．さらに Fig.3 にサンドイッチ構造のコア(芯材)としたポリエチレン製シートを示した．



Fig.1 Carbon fiber 3K cloth

Fig.4 には従来から用いられていた市販の YAMAHA の GFRP 製シート(質量 1,510g)を示した．



Fig.2 Epoxy resin GH-Craft Z-2 and Curing agent H-07



Fig.3 Formed polyethylene seat



Fig.4 GFRP go-cart seat(weight 1510g)

3. 曲げ試験

3-1 試験概要

サンドイッチ構造において繊維方向，構造の状態を調べるため Fig.5 に示す引張試験機を用いて 3 点曲げ試験を行う．試料の準備の都合により GFRP の曲げ強さは文献値より 160MPa ²⁾でありサンドイッチ構造シートの強度目標値とした．

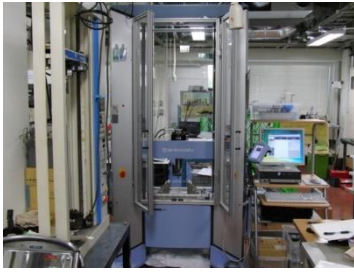


Fig.5 Tensile test apparatus (100kN)

3点曲げ試験は JIS K7074 に基づいて行い、支点間距離 160.0mm、試験速度 9.5mm/min で行った。試験片は短冊型とし長さ $l=200.0\text{mm}$ 、幅 $b=30.0\text{mm}$ 、厚さ $h=4.50\text{mm}$ で作製した。試験片の種類、試験結果である平均曲げ強さを Tab.1 に示す。Fig.6 に試験片の側面を巻いてあるものと巻いていないものの違いを示す。試験片作製時には Fig.7 に示すシリコンゴム型を用いて短冊状のサンドイッチ構造の曲げ試験片を作製した。

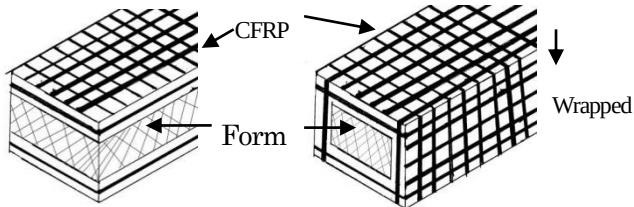


Fig.6 Bending test piece laminated and wrapped



Fig.7 Silicone rubber mold for CFRP test piece

Table 1 CFRP sandwich bending test specimen laminated conditions

Type	A	B	C	D	E	F	GFRP
Side wrapped	-	○	○	○	○	○	-
Skin 0	-	-	-	-	-	0/90	-
Skin 1	0/90	0/90	0/90	0/90	± 45	± 45	-
Skin 2	0/90	0/90	± 45	± 45	0/90	0/90	-
Skin 3	0/90	0/90	0/90	0/90	± 45	± 45	-
Core	Form	Form	Form	Form	Form	Form	-
Skin 4	0/90	0/90	0/90	± 45	± 45	0/90	-
Skin 5	0/90	0/90	± 45	0/90	0/90	± 45	-
Skin 6	0/90	0/90	0/90	± 45	± 45	0/90	-
Skin 7	-	-	-	-	-	± 45	-

3-2 試験結果

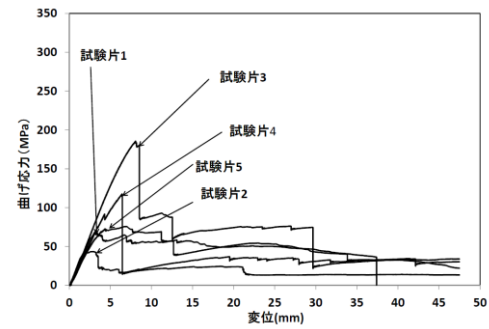


Fig.8 Relationship between bending stress and stroke of type A

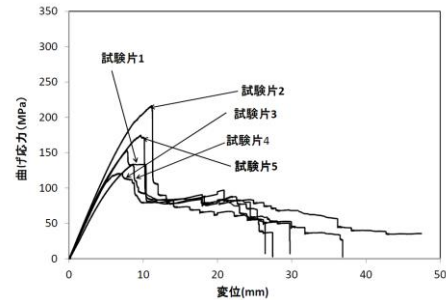


Fig.9 Relationship between bending stress and stroke of type B

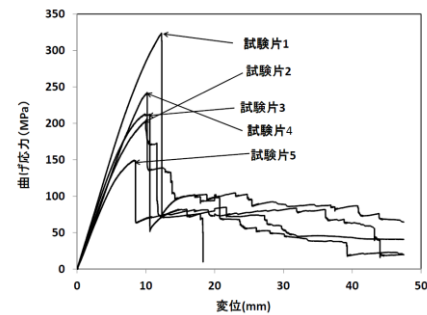


Fig.10 Relationship between bending stress and stroke of type C

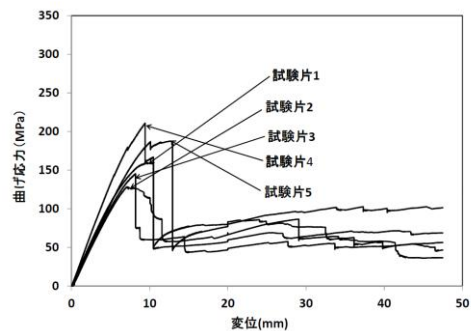


Fig.11 Relationship between bending stress and stroke of type D

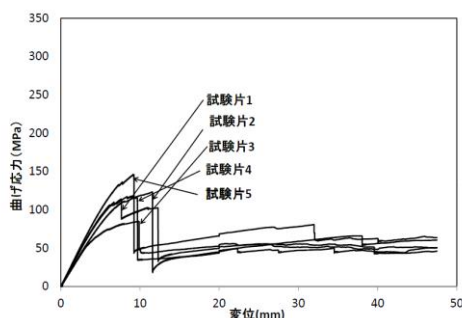


Fig.12 Relationship between bending stress and stroke of type E

試験片 A, B より側面に炭素繊維を巻いた方が強度が高かった。3層積層した条件の中では C が曲げ強さが最大となった。また E の4層積層することにより曲げ強さが3層積層のものより向上することが分かった。試験片 C~F より 0/90° 方向を外側に配置することで曲げ強さが向上することが分かった。

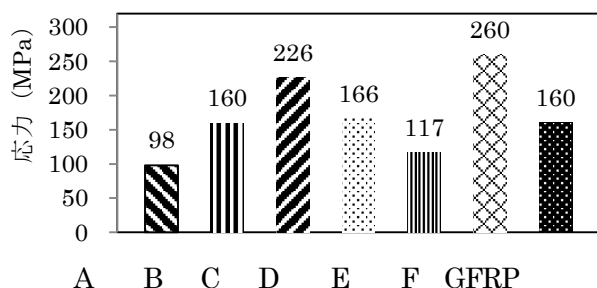


Fig.13 Experimental bending stress of various laminated type

3-2 3点曲げ試験の考察

CFRP, 発泡ポリエチレン, CFRP サンドイッチシートの曲げ弾性率（理論値と実測値）を求める。

CFRP 単体の曲げ弾性率は³⁾

$$E = E_{CF} \times vf + E_{EP}(1 - vf)$$

各値は炭素繊維弾性率 $E_{CF}=137\text{GPa}$, 炭素繊維含有率 $vf=35\%$, エポキシ樹脂弾性率 $E_{EP}=2.5\text{GPa}$

$$137 \times 0.35 + 2.5(1 - 0.35) = 50\text{GPa}$$

曲げ試験③条件より疑似等方性なので次式⁴⁾を用いる。

$$E = \frac{E_L + E_T - 2E_L v_{TL} + 4G_{LT}(1 - v_{TL}v_{LT})}{3(E_L + E_T) + 2E_L v_{TL} + 4G_{LT}(1 - v_{TL}v_{LT})} \times \frac{E_L + E_T + 2}{1 - v_{TL}v_{LT}}$$

各値は CFRP 繊維方向弾性率 $E_L=50\text{GPa}$,

CFRP 直角方向弾性率 $E_T = 2.5\text{GPa}$, ポアソン

比（繊維方向） $v_{TL} = 0.1$,

ポアソン比（垂直方向） $v_{LT} = 0.3$, せん断弾性率は

$G = E/2(1 + \nu)$ より, $50/2(1+0.1)=23\text{GPa}$.

$$E = \frac{50 + 2.5 - 2 \times 50 \times 0.1 + 4 \times 23(1 - 0.1 \times 0.3)}{3(50 + 2.5) + 2 \times 50 \times 0.1 + 4 \times 23(1 - 0.1 \times 0.3)} \times \frac{50 + 2.5 + 2 \times 50}{1 - 0.1 \times 0.3}$$

発泡ポリエチレンの弾性率は引張試験の実測値により縦弾 $0.46 \times 10^{-3}\text{GPa}$ であった。

CFRP サンドイッチシートは次式より

$$E = E_{f1} V_{f1} + E_{f2} V_{f2}$$

ここで CFRP 弾性率 $E_{f1}=33\text{GPa}$, CFRP 体積分率 $V_{f1}=62\%$, 発泡材弾性率 $E_{f2}=0.46 \times 10^{-3}\text{GPa}$, 発泡材含有率 $V_{f2}=38\%$.

$$33 \times 0.62 + 0.46 \times 10^{-3} \times 0.38 = 20\text{GPa}$$

実測値に関しては CFRP, CFRP サンドイッチシートは3点曲げ試験, 発泡材は電子天秤を用いて3点曲げ試験を行い求めた。Table 2 に各材料の曲げ弾性率の理論値と実測値を示す。

Table 2 Bending modulus theoretical and experimental result (GPa)

	CFRP	Expanded Poly-Ethylene	CFRP Sandwich
Theoretical	33	0.46×10^{-3}	20
Obtained	32	1.0×10^{-3}	20

CFRP 単体, CFRP サンドイッチシートの実測値は理論値と近い値となり, 曲げ試験結果は信頼できるデータである。

4. 軽量化目標値の設定

試作シートは GFRP シートを原型として作製するので曲げ試験片の密度と GFRP シートの比より, 軽量化の目標値を出す。CFRP 曲げ試験片の密度は次式より

$$\frac{\text{試験片体積 } 27.0\text{cm}^3 - \text{発泡材体積 } 10.2\text{cm}^3}{\text{試験片重量 } 16.7\text{g}}$$

$$= 1.01\text{g/cm}^3$$

GFRP シートの密度は

$$\frac{\text{重量 } 1510\text{g}}{\text{実測体積 } 1000\text{cm}^3} = 1.51\text{g/cm}^3$$

と求められた。密度の比は

$$\frac{1.01}{1.51} = 0.67$$

$$(1 - 0.67) \times 100 = 33\%$$

以上より CFRP シートの軽量化の目標値は30%と仮定する。

5. 試作シートの作製

5-1 試作経緯

試作1号シートは19%軽量化に成功したが, シートの成形性が良くなかった。試作2号シートは, 成形性は向上したが軽量化の改善が見られなかった。試作3号はさらなる軽量化, 成形性向上を主眼に作り作製した。

原型とした YAMAHA 製 GFRP シートの曲げ強さを 160MPa ⁹⁾と仮定した. 試作 1 号は曲げ強さが 160MPa になるような曲げ試験片 No.②の積層構造を採用し, 発泡スチロール型による単純な形状で作製した. その強度は後述の GFRP シートを下回った. そこで試作 2 号シートでは GFRP シートを原型として転写成形し, 炭素繊維の積層構造に曲げ試験片 No.④(曲げ強度 260MPa)の構造を採用したところ, GFRP シートを上回る強度が得られたが, 19%の軽量化にとどまった. Fig.14 に試作 1 号シート (左), 2 号シート (右) を示す.

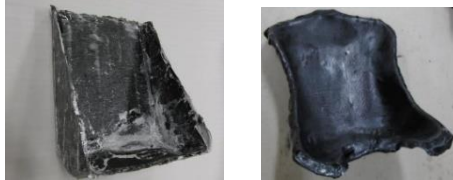


Fig.14 CFRP sandwich sheet trial No.1 and No.2

5-2 試作 3 号シートの作製方法

GFRP シート裏面を原型として用いるためにエポキシ樹脂を GFRP シート裏側に塗布し, 紙やすりで磨き, 表面を滑らかにした. 繊維積層構造を No.③の条件としてまず第一層の炭素繊維クロス $0/90^\circ$ を GFRP シートの裏面に貼り Fig.5 に示すマウンテンバイク用ゴムチューブ(直径 40mm)を加圧媒体として($250\text{kPa} \pm 50\text{kPa}$)で加圧硬化した. ゴムチューブはシートの背面に当たるように配置し, 反対側は試作 2 号シートの中に砂袋を詰めたものを万力にて固定した. 硬化させた CFRP は GFRP シートからはがし, 裏面から積層する. 残りの CFRP の積層は無加圧で作製した.

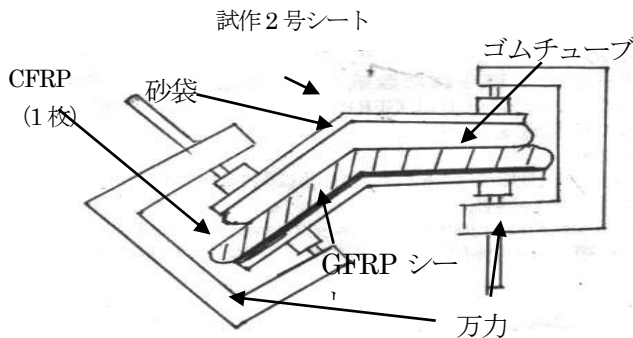


Fig.15 CFRP sandwich sheet forming method



Fig.16 CFRP sandwich sheet forming (sand bag weight)



Fig.17 Rubber tube setting



Fig.18 GFRP sheet as forming punch

5-3 試作結果

試作 3 号シート (Fig.23) は加圧により表面の成形性が向上した. 試作 3 号シートの重量は 1050g となり, GFRP シートの 1510g に比べ, 33%の軽量化となり, 目標値に達した.



Fig.19 CFRP sandwich sheet

6. シートの変位測定試験

6-1 試験方法

強度の比較方法はシートをカートに固定し, 1 個 100N の錘をシート中央部に積載し変位量を測定した. 最大 600N (GFRP シートは 400N からは破壊の恐れがあり, 300N まで) 積載した. 測定位置を Fig.6 に示す. 測定にダイヤルゲージを使用し左右の平均 $(R1+L1)/2=A1$ とした

6-2 試験結果

Fig.20 に荷重と変位を示した GFRP シートに比べて試作 1 号はたわみが大きく CFRP を擬似等方に 4 層積層した. 試作 2 号ではたわみが小さく硬くなっていた. そこで CFRP を 3 層積層した試作 3 号シートと GFRP シートの傾きに差は無くなっていた. 試作 3 号シートは 600N まで積載しても傾きの変化

はなく、その剛性はGFRPシートと同等であった。

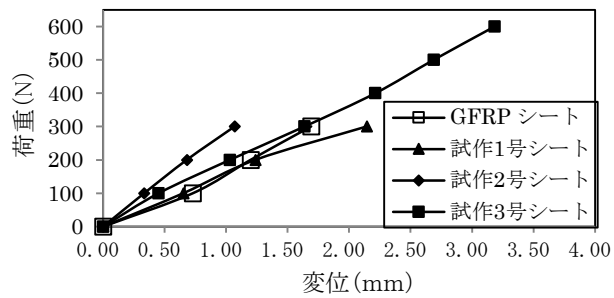


Fig.20 Relationship between load and stroke

7. 結言

曲げ試験より得られた数値を元にサンドイッチ構造を用いたCFRPシートはGFRPシートに比べ、剛性は同等で32%の軽量化を実現した。加圧により表面の成形性は向上した。端面処理、シート全体の加圧が課題である。

参考文献

- 1)木村南・山岸勇介:62 回塑加連(2011),557-558,
- 2) GFRP の物性値
<http://www.nikkenjusi-kakou.co.jp/busseitihikaku.htm>
(Accessed 2011-10-09)
- 3)平川賢爾・大谷泰夫・遠藤正浩・坂本東男:機械材料学,(1999),217-220
- 4)福田博・邊吾一:複合材料の力学序説 ,(2003),97-99

(平成 27 年 3 月 19 日受理)

波動逆解析による材料内部の欠陥可視化システム

福田勝己* 西村良弘** 鈴木隆之** 福田昌了***

Construction of a System Making Internal Defect Images by an Inverse-problem-solving method

Katsumi FUKUDA, Yoshihiro NISHIMURA, Takayuki SUZUKI, Masatoshi FUKUTA

Ceramic materials are unreliable for manufacturing large structural components because they are likely to have fatal internal defects and their fracture responses are much faster and more drastic than those of metal materials. Ultrasonic Testing, particularly imaging of internal defects, is necessary for reliable use. 3D scanning systems and programs were developed to derive images of internal defects. Truncated Singular Value Decomposition, an Inverse-problem-solving method, was conducted to reconstruct internal defect images. This study investigated what factors (e.g., frequency and number of piezoelectric elements) affect the reconstructed defect images.

(Keywords: Array Probe, Inversion Analysis, Truncated Singular Value Decomposition)

1. 緒言

全ての工業製品やサービス等といったことに
関して、必ず「安心・安全」というキーワードが
欠かせない時代となっている。こういった時代
背景から、各種材料や工業製品といった物に対
して、安心かつ安全を保つための技術として、
対象を壊さずに内部を調べ、きずを検出する非
破壊検査の必要性が高まっている。

超音波探傷試験はその非破壊検査の一つであ
る。試験片に対して超音波を発信すると、その
超音波は試験片内部の欠陥で反射する。超音波
探傷試験は、この反射波を計測することで欠陥
の位置や大きさの程度を知る検査である。金属
材料、非金属材料どちらに対しても使用可能で
あり、表面の欠陥も検知できるが、従来、超音波
探傷試験で材料内部の欠陥から得られる波形デ
ータの解読には専門的な知識が必要であった
1)~3)。

そこで、本研究では材料内部の欠陥可視化シ
ステムの構築を目的に、開口合成法と TSVD 法
の二つの画像再構成プログラムを作成し、欠陥
がどのように再現されるのかについて明らかに
した。

2. 超音波探傷試験

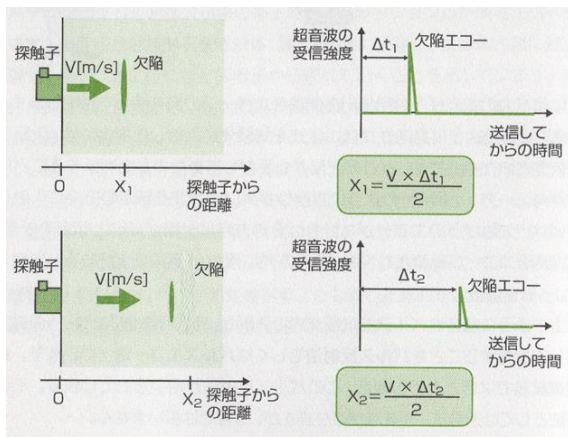
2.1 超音波探傷試験とは

超音波探傷試験とは、超音波を用いた非破壊
検査である。試験片に対して超音波を発信する
と、その一部は試験片内部の欠陥で反射する。
内部欠陥からの反射波は探触子で受信され、こ
の反射波を観察することで、欠陥の位置や大き
さの程度を知ることができる。金属材料、非金
属材料どちらに対しても使用可能であり、表面
の欠陥も検知できる。

2.2 パルス反射法

超音波探傷試験にはいくつか方法がある。こ
こでは、本研究で用いるパルス反射法について
説明する。

パルス反射法は、探触子から送信された超音
波パルスの一部が、対象物内部の欠陥に反射す
ることを利用する。図 1 にパルス反射法の例を
示す。

Fig.1 Pulse echo method⁴⁾

探触子から試験片に、超音波パルスを送信する。超音波パルスは伝播経路にある欠陥で反射し、欠陥エコーとして探触子で受信される。探触子から欠陥までの距離 X は、受信波をもとに式(1)から求めることができる。超音波パルスは探触子と欠陥の間を往復するため、距離は音速 V と時間 Δt との積の半になる。また、超音波の受信強度から欠陥の大きさも予測できる。

$$X = \frac{V \times \Delta t}{2} \quad (1)$$

超音波探傷試験では、このように欠陥からの反射波からその位置や大きさを推定することができる。

3. 超音波

3.1 超音波とは

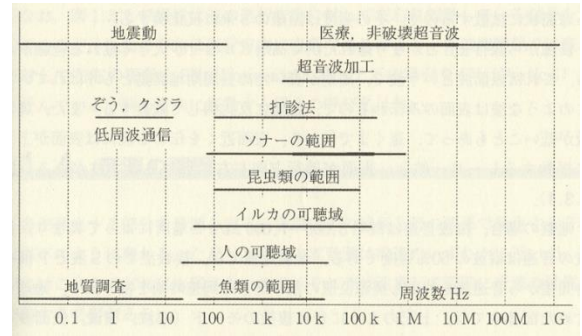
超音波の定義にはさまざまな見解があるため明確には定まっておらず、日本工業規格 (JIS) では以下のように定義している。

「超音波音 (ultrasound) : 可聴音の上限周波数 (およそ 16kHz) を超える音響振動」 (音響用語) ⁵⁾

「超音波 (ultrasonic wave) : 人の耳の可聴範囲以上の周波数の音波。注記 一般的には 20kHz 以上とされる」 (非破壊試験用語) ⁶⁾

二つの JIS では記述が異なるが、どちらも周波数を基準にして、ある値よりも周波数が高く人の耳には聞こえない音波を超音波としている。

現在応用されている周波数の例を図 2 に示す。工業的に多く使用されている音は、主に数 Hz ～ 数十 MHz である。

Fig.2 Frequency and application⁷⁾

3.2 音速

気体、液体、固体の中を変位または圧力が伝わる現象を音と呼び、音が伝わる気体、液体、固体を媒質と呼ぶ。音速は、この媒質の中を伝わる音の速さのことである。物質自体が振動することで伝わるため、媒質の種類により決まる物性値の一種である。本研究で使用する試験片は窒化ケイ素で、その音速は約 10870[m/s] である。

3.3 音響インピーダンス

媒質の密度と音速との積を、その媒質の音響インピーダンスと呼ぶ。音響インピーダンスは、媒質の境界での反射と透過を考える際に用いられる。

音響インピーダンスの異なる二つの媒質間では、音波の反射と透過が生じる。二つの媒質間の音響インピーダンスが同程度であれば音波はよく透過し、反射波は非常に小さくなる。逆に、この差が大きいと透過波は小さくなり、反射波は非常に大きくなる。欠陥からの反射は、この音響インピーダンスの差から生じる。

4. アレイプローブ

4.1 アレイプローブとは

本研究では、探触子にアレイプローブを用いた。アレイプローブは、多数の振動子をリニアに並べた超音波探傷装置である。各振動子で超音波パルスの発信タイミングを制御する (フェーズドアレイ技術) ことで、試料内部の任意の点で焦点を結ぶことが可能である。図 3 にフェーズドアレイの原理を示す。

また, X 方向はイメージエリアがアレイプローブの計測領域内であれば, 計測に機械的走査が必要ないため, シングルプローブに比べ短時間で 2 次元画像が得られる. 図 4 にアレイプローブとシングルプローブとの走査の違いを示す.

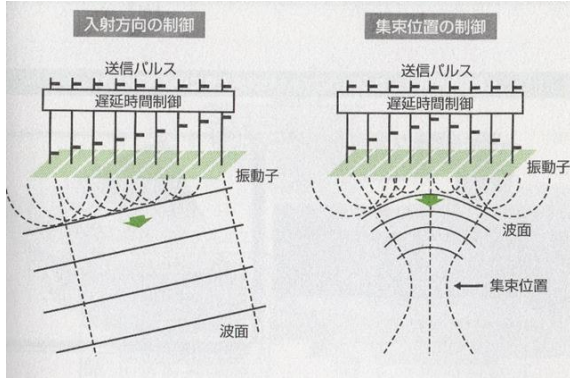


Fig.3 Phased array method⁴⁾

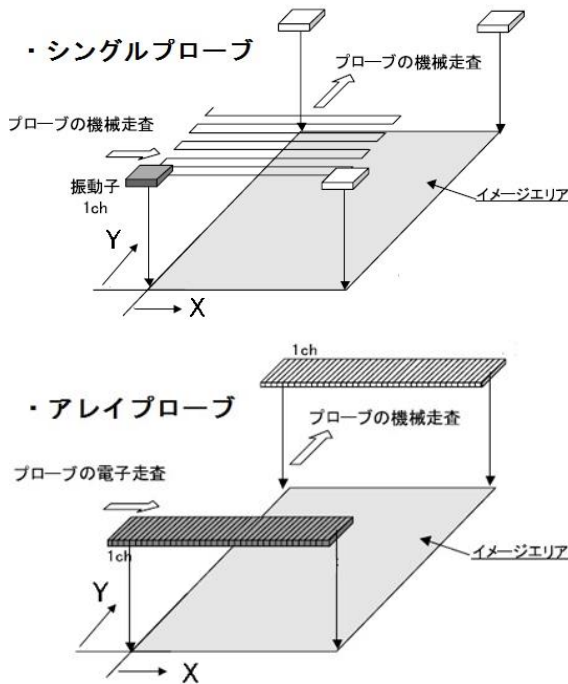


Fig.4 Scanning method

4.2 ボリュームフォーカス

本研究では, 超音波の送受信方法にボリュームフォーカス法を採用した. ボリュームフォーカスとは, 走査範囲を一回の超音波の送受信で検査するというものである.

試験片に対し, 全振動子から超音波を一齐に発信することで平面波を送信する. その後, 全振動子で反射波の受信を行う. 欠陥からの反射波は, PC 上で重ね合わせることで走査範囲全域

に仮想的に焦点を結ぶことが可能となる.

そのため, 一回の送受信で走査範囲全域を検査可能であり, 走査も高速に行うことができる.

5. 画像再構成手法

5.1 開口合成法

開口合成法とは, 各振動子で得た受信波を足し合わせることで計測領域内の各位置に焦点を形成し, 高分解能の画像再構成を行う手法である. ある点からの反射波を複数の振動子で受信した場合, その点から振動子までの距離が異なるため到達時間に差が生じる. このとき, 各振動子の間隔がわかっているならば, 到達時間の差から点の位置を特定することができる.

図 5 に開口合成法の原理を示す. いま, 計測領域内の任意の点 $A(x, z)$ からの反射波について考える. 原点はアレイプローブと試験片との接触面に置き, その接触面方向を X 軸, 深さ方向を Z 軸とする. アレイプローブからの送信波は平面波であるため, 超音波パルスが発信されてから点 A に到達するまでの時間 t_a は式(2)から求められる. 次に, 超音波は点 A で反射し, 振動子 $P_i(x_i, 0)$ で受信される. このとき, 反射から受信までに要する時間 t_b は式(3)から求められる. 以上より, 送信から受信までにかかる時間 t_i は式(4)から求めることができる.

$$t_a = \frac{z}{c} \quad (2)$$

$$t_b = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2+z^2}}{c} \quad (3)$$

$$t_i = t_a + t_b = \frac{z}{c} + \frac{\sqrt{(x-x_i)^2+z^2}}{c} \quad (4)$$

ここで, c は試験片の音速, x_i は原点から振動子 P_i までの距離, z はアレイプローブと試験片との接触面から点 A までの深さ, x は原点から点 A までの X 軸方向距離を示す.

実際の超音波探傷試験では, 超音波の送信から反射波の受信までにかかる時間が得られるため, 式(4)を用いて振動子 P_i から欠陥までの距離を示す曲線を描くことができる. 開口合成法では, この曲線を全振動子の受信波から描くことで, 重複部分に欠陥の位置を特定することができる.

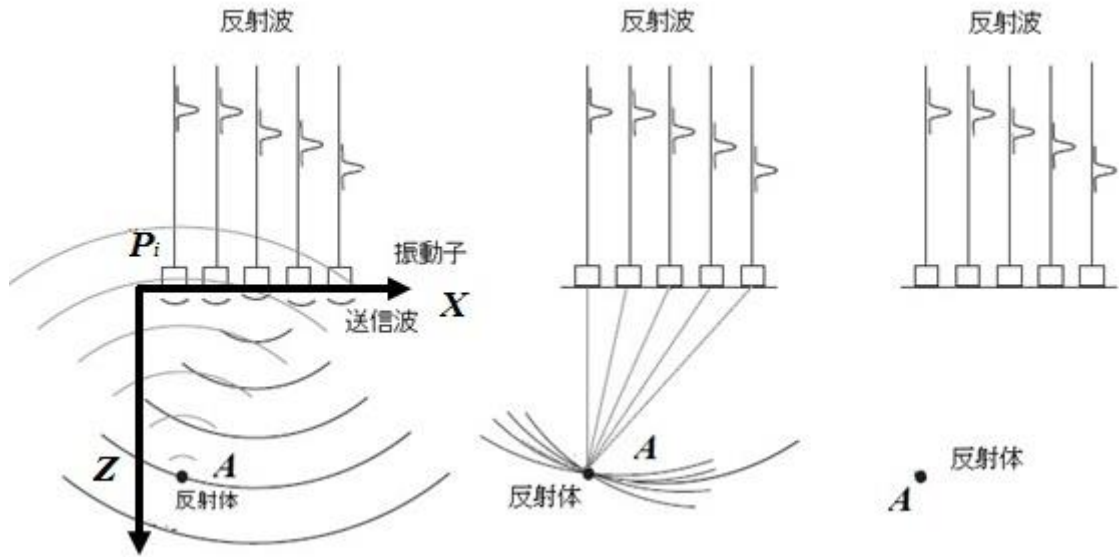


Fig.5 Synthesis analysis

5.2 TSVD 法

TSVD 法は、打ち切り特異値分解を用いて最少二乗解を求める手法である。計算を途中で打ち切ることによって、解の発散を抑制している。

開口合成法では式(4)を用いて曲線を描き、その交点に欠陥を推定している。これに対し、TSVD 法では各振動子での受信波から最少二乗解を求めることで、より正確に欠陥の位置を特定することができる。また、曲線を重ね合わせるわけではないため、開口合成法特有のノイズを解消することができる。

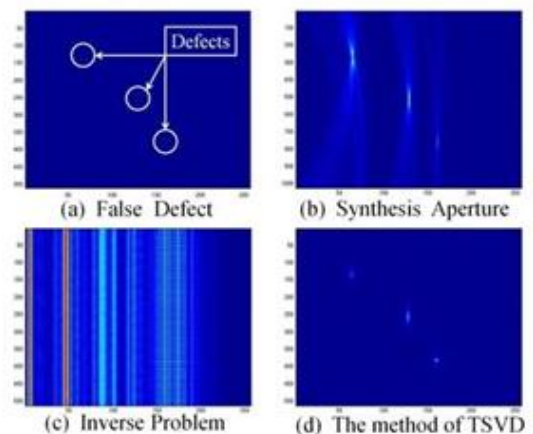


Fig.6 Comparison of each analysis model

6. 仮想欠陥を用いた実験

6.1 実験条件

画像再構成の計算手法を比較するにあたり、初めに仮想欠陥に対して実験を行った。送信波には正弦波を用いることとした。周波数は実際の実験条件と同じ 5[MHz]とし、試験片の音速も実験に用いる窒化ケイ素に合わせ 10870[m/s]とした。

6.2 実験結果及び考察

図 6(a) に示す仮想欠陥を用いて、三種類の手法で画像再構成を行った。(b)は開口合成法で、(c)は逆問題で、(d)は TSVD 法で画像再構成した結果である。

それぞれの手法を(a)の欠陥と比較すると、(b)の開口合成法では再構成画像が実際の欠陥より大きく検出されてしまっている。開口合成法は音波の伝播方向に垂直な方向にノイズが出てしまうという特徴があるため、このような傾向が現れたと考える。(c)の逆問題では、画像の中にノイズのようなものが多いが見られる。逆問題は直交行列を用いてデータを対角化することで、特異値である欠陥を求めるという手法である。逆問題解法で扱う応答関数行列は、計算機の精度と比較すると殆んど正則でないために、そのままでは解くことが出来ない。(d)の TSVD 法では、計算を打ち切ることで解の発散を抑制しているため、欠陥イメージが鮮明に確認できる。

7. 擬似欠陥を持った試験片を用いた実験

7.1 実験装置

仮想欠陥を対象とした各手法の比較を確認できたため、実際のデータへの応用を行う。本実験で用いた装置の外観を図 7 に、アレイプローブの外観を図 8 に、装置の仕様を表 1 に示す。一般的な超音波探傷装置では、サンプリング周波数が数 10[MHz]～数 100[MHz]の A/D コンバータを用いるのに対し、本装置で用いる A/D コンバータは最大 2[GHz]までの調節が可能となっている。また、 $2[\mu\text{m}]$ の高精度で移動の制御が可能で、 $10[\text{ns}]$ の分解能で遅延時間も設定することが可能である。

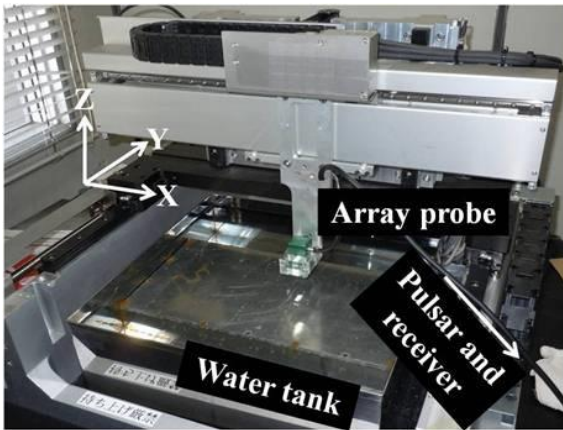


Fig.7 Measuring device

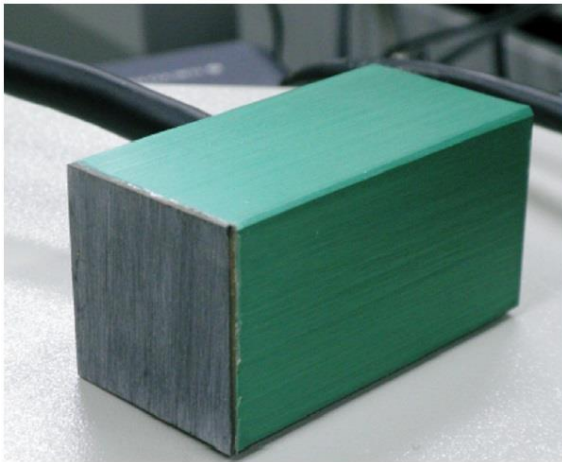


Fig.8 Array probe

Table1 Specification sheet

Material	: PZT	Configuration	: Rectangle
Channels	: 32ch	Frequency	: 5[MHz]
Dimension of probe		: $25 \times 25 \times 50[\text{mm}]$	
Dimension of transducer		: $0.4 \times 13[\text{mm}]$	
Curvature radius of dimension		: 50[mm]	
Clearance of transducer		: $0.1 \times 13[\text{mm}]$	

7.2 実験条件

図 9 に欠陥形状およびサンプルとアレイプローブとの位置関係を示す。本研究では、サンプルの材料を窒化ケイ素とし、その内部に欠陥として底面から高さ 5[mm]、幅 1[mm] のスリットと、高さ 5[mm]、直径 1[mm] の穴欠陥を想定した。また、センサの周波数（5[MHz]）とサンプル材料の音速（約 10870[m/s]）との関係から、1 波長は約 2.2[mm] となる。つまり、この 1 波長分がセンサの分解能に相当する。サンプリング周波数は 400[MHz]とし、サンプリング数は 10000 とした。

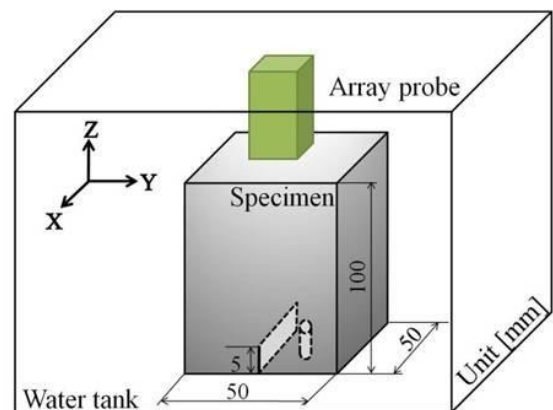


Fig.9 Measurement model

7.3 実験結果及び考察

図 10(a)に窒化ケイ素の欠陥モデル図を、(b)に開口合成法による再構成画像を、(c)に TSVD 法による再構成画像を示す。

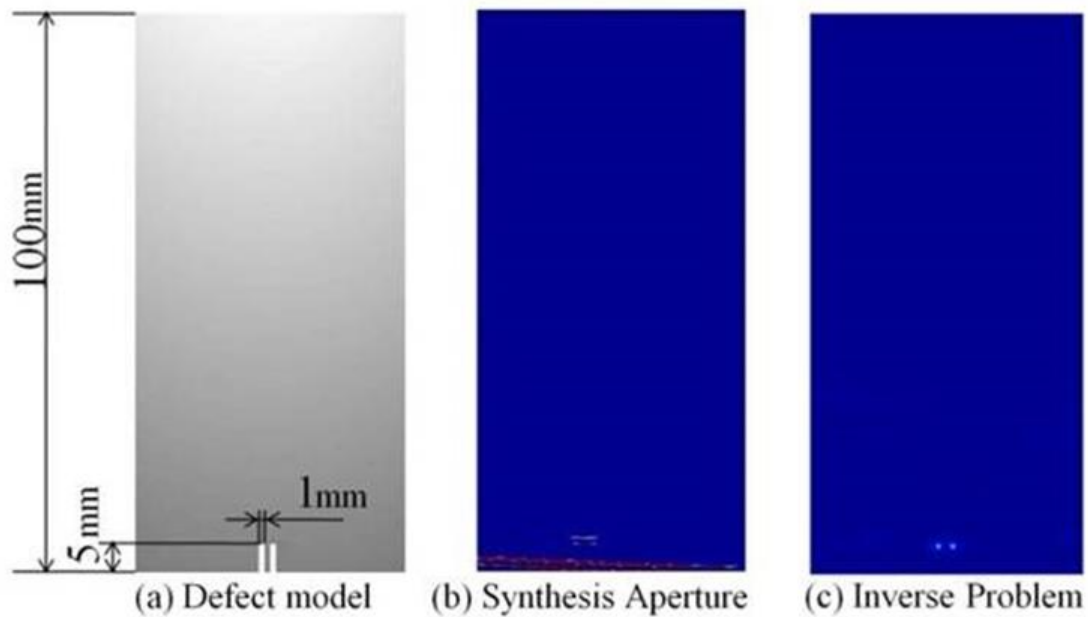


Fig.10 Experiment results

図 10 より, 開口合成法では深さ方向は再現できていることが分かる. しかし, 欠陥が実際のものより大きく検出されてしまい, 二つの欠陥が繋がってしまっている. TSVD 法では深さ方向は開口合成法と同様に再現できていることに加え, 二つの欠陥が別々に検出できていることが分かる. このことから, 開口合成法に比べて TSVD 法の方がより詳細な欠陥画像を得ることができることが確認できた.

8. 結言

本研究では, 専門的な知識を必要としない, 材料内部の欠陥可視化システムを考案し, 画像再構成手法の比較を行った.

初めに, 実験のシミュレーションプログラムを作成し, 仮想欠陥に対して実験を行った. そこで得られた波形データに対して画像再構成を行うことで, 各種法による可視化システムの有効性を確認した.

次に, 擬似欠陥を持った窒化ケイ素試験片を用いて実験を行い, その計測データに対して画像再構成を行うことで, 実際の試験における TSVD 法の, 開口合成法に対する有効性を確認した.

参考文献

- 1) 福田勝己, 西村良弘, 斎藤直也, “波動逆解析による内部欠陥の可視化システムの開発”, 第 55 回日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, pp220-221(2011)
- 2) 村上丈子, ドミニクブラコニエ, 三浦俊治, 村井純一, 西谷豊, “アレイ探触子による高速超音波探傷新技術”, 日本非破壊検査協会, 平成 18 年度超音波シンポジウム, pp.35-38(2006)
- 3) Y.NISHIMURA, T.SUZUKI, K.FUKUDA, M.ISHII, N.SAITO, Image Reconstruction of Defects 100 mm deep within SN Sample using Inverse Problem Solving, IEEE International Ultrasonic Symposium (2012)
- 4) 水谷義弘, 図解入門よくわかる 最新非破壊検査の基本と仕組み, 秀和システム, p186-218, 2010.
- 5) 日本工業規格, JIS Z 8106, 2000.
- 6) 日本工業規格, JIS Z 2300, 2009.
- 7) 宇田川義夫, 超音波技術入門 発信から受信まで, 日刊工業新聞社, p9, 2010.

(平成 27 年 2 月 25 日受理)

マイクロ領域における摩擦特性 (第 4 報 : 摩擦係数の周波数特性)

福田 勝己*, 小林 光男**, 鈴木 健司**, 三原 純一***, 吉岡 亨*

Friction Characteristics of Micro Area (4th Report: Frequency Characteristics of Friction Coefficient)

Katsumi FUKUDA, Mitsuo KOBAYASHI, Kenji SUZUKI, Junichi MIHARA and Tohru YOSHIOKA

Recently, many kinds of micro machine technologies have been improved day by day. However, many tribological properties in micro scale order have not emerged. The purpose of this work was to reproduce a friction phenomena in micro scale order using diamond tip of curvature radius 0.5[μm] and synthetic silica wafer. In case of same normal load, it was found that frequency characteristics of the friction coefficient regarding distance have similar tendency.

Keywords: Micro Tribology, Friction, Frequency Characteristics

1. 緒言

摩擦とは、接触する二つの物体が相対運動する際に運動を妨げる向きに力が発生することをいう。この現象によって物体を容易に静止させることが可能であり、人の歩行からねじ締結まで生活における様々な場面で役立っている。しかし、摩擦は、運動を妨げることから機械構造物におけるエネルギーロスや動作の不安定さの原因になる上、摩擦に付随して起こる摩耗により機械の寿命を縮めることにも繋がっている¹⁾。

近年では、従来の機械構造物より遥かに小さい MEMS やマイクロマシンが研究開発されている。そして、MEMS やマイクロマシンにおいては、機械構造物同士のみかけの接触面積も非常に小さなものとなるため、マイクロ領域における摩擦特性を把握することが重要となる。マイクロ領域では、マクロ領域とは異なる摩擦特性を示すことが知られているが²⁾、その全容は未だ明らかになっていないため、研究を進めることが急務である。

既報^{3,4)}において、石英ガラスウエハとダイヤモンド触針との微小摩擦試験により、約 40[mN]以下の低垂直荷重域における摩擦速度と摩擦係数との関係や、垂直荷重の変化がマイクロ領域の摩擦における摩擦係数および摩擦形態に及ぼす影響について明らかとなった。しかし、より高荷重域まで含めた摩擦速度と摩擦係数との関係は明らかになっていない。さらに、摩擦係数はしゅう動中に変動しているが、既報において、この変動に関する

特性については検討されていない。

そこで、本報では、これらの未解明な点を実験的に明かんとすることを目的とし、石英ガラスウエハと先端曲率半径 0.5[μm]のダイヤモンド触針との微小摩擦試験を、垂直荷重と摩擦速度の双方を変化させながら実施した。そして、200[mN]以上の高垂直荷重域まで試験しても、摩擦係数の大きさについて摩擦速度による変化は起こらないことが確認された。また、摩擦速度としゅう動時間から摩擦距離を求め、これを周波数として摩擦係数の周波数解析を行ったところ、摩擦速度には依存せず、垂直荷重によって周波数特性が変化することが分かった。さらに、試験後の石英ガラスウエハ上の摩擦痕を光学顕微鏡で観察した結果、こちらも周波数特性と同様に摩擦速度による変化はほぼ見られず、垂直荷重の変化のみによって摩擦形態が変化することが明らかとなった。

2. トライボロジー

2.1 アモントン・クーロンの摩擦法則¹⁾

アモントン・クーロンの摩擦法則は、レオナルド・ダ・ヴィンチ、アモントンおよびクーロンらによって発見された摩擦法則である。この法則では、摩擦に関して発見された以下の 4 つの法則について述べられている。

- (1) 摩擦力は垂直荷重に比例する。ここで、垂直荷重とは二つの固体を接触面に対して垂直に押付ける力であり、摩擦力とは、二つの固体を相

対移動させる際、接触面と平行で進行方向と逆向きに作用する力のことである。また、摩擦力を垂直荷重で除した値を摩擦係数とすれば、以下の式(1)の関係が得られる。

$$\mu = \frac{F}{N} = \text{const} \quad (1)$$

ここで、 μ ：摩擦係数

F ：摩擦力[N]

N ：垂直荷重[N]

である。

- (2) 摩擦力は見かけの接触面積によらず一定である。
- (3) 最大静止摩擦力は動摩擦力より大きい。
- (4) 動摩擦力は摩擦速度によらず一定である。

アモン・クーロンの摩擦法則は、特にマクロの摩擦領域では多くの場合で成立するが、ミクロの領域を扱ったマイクロトライボロジーにおいては必ずしもこの法則に従うとは限らないため、実験的に法則を調べる必要がある。

2.2 摩擦の起因

摩擦が発生する起因には諸説あり、多くの議論がなされている。本項ではとりわけ重要である凹凸説、凝着説および掘り起こし摩擦について述べる。実際の摩擦現象では、これらの起因が複雑に影響を及ぼし合っていると考えられるため、どの起因がより支配的なのかという観点から考察する。

2.2.1 凹凸説^{1),2)}

あらゆる固体の表面には表面粗さと呼ばれる微細な凹凸が存在している。二つの固体が接触する場合には、表面の凹凸部先端によるかみ合いが発生しており、この状態で二つの固体をしゅう動させた場合には、一方の突起が他方の突起を乗り越える必要がある。凹凸説とは、突起を乗り越えるために必要な力を摩擦力とする説である。しかし、突起が斜面を登るためには力が必要であるが、逆に突起を降る場合には斜面から力を受けるため、平均すると突起を超えるために必要な仕事は 0 になってしまう。このために凹凸説は、現在では正しくないとされている。

2.2.2 凝着説^{1),2)}

接触する固体の真実接触部では、表面の分子や原子が互いに力を及ぼし合い、密着しようとする

力が働く。この現象を凝着と呼び、この凝着部分をせん断方向に引き離すために必要な力を摩擦力とするのが凝着説である。この凝着力の起因としては、物体同士の化学的な結合力や静電気力、ファン・デル・ワールス力、真実接触部に凝縮した水分子の表面張力等が考えられ、摩擦材料や雰囲気依存する。現在、凝着説は摩擦現象を説明する最も有力な説とされている。

2.2.3 掘り起こし摩擦¹⁾

実際の摩擦では、凝着による摩擦の他にも様々な要因が摩擦力となって現れるが、掘り起こし摩擦はその代表的なものである。硬い材料と比較的軟らかい材料とを摩擦させる場合、硬い材料は軟らかい材料に食い込み、進行方向上の軟らかい材料を排除あるいは破壊しながらしゅう動することになり、このときに要する力が掘り起こしによる摩擦力である。

3. 試験

3.1 試験装置

Fig.1 に試験装置の概観を示す。試験装置はクリーンブース内の除振台上に設置されており、XYZ ステージおよびこれを一定速度で移動させる電動アクチュエータからなるステージ部と、平行平板ばねおよび静電容量型変位計により垂直

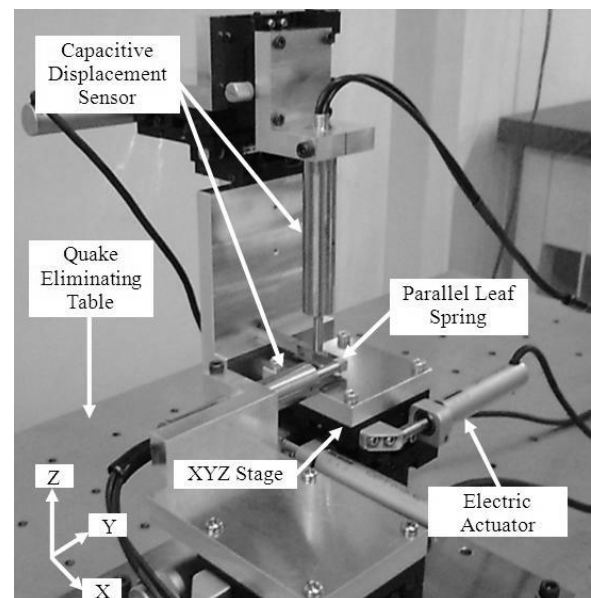


Fig. 1 Experimental Setup

荷重と摩擦力を測定する測定部から構成されている。

3.2 平行平板ばね

Fig.2 に平行平板ばねの外観を示す. 本試験で
使用した平行平板ばねは, ジュラルミンのブロ
ックより一体製作したもので, 垂直荷重と摩擦力
を同時に測定するため, それぞれの力の方向に対
応した二つの平行ばね部を持つ. 垂直荷重および
摩擦力の測定時には, 静電容量型変位計を用いて
平行ばね部の変位量を計測し, フックの法則から
算出する.

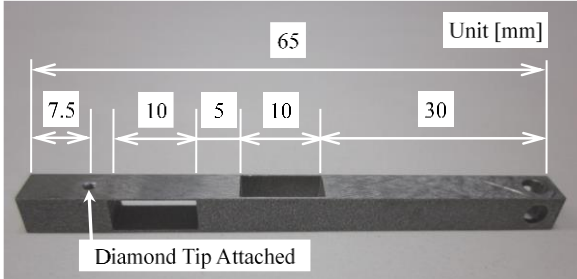


Fig.2 Parallel Leaf Spring

3.3 試験方法

本試験時には, 石英ガラスウエハを XYZ ステ
ージ上に固定し, ダイヤモンド触針を平行平板ば
ねに取り付けた. そして, 電動アクチュエータ
を用いて XYZ ステージごと石英ガラスウエハを
Z 方向に移動させることでダイヤモンド触針に押
付け, Y 方向に移動させることによってしゅう動
させた.

3.4 試料および試験条件

Table 1 に試料の詳細を示す. 本試験で使用する
試料は, 結晶面, 結晶方向などを考慮する必要の
ない石英ガラスウエハ⁵⁾と, 石英ガラスウエハよ
り十分に硬く, 摩耗や変形を無視することができる
ダイヤモンド触針である. なお, 微小領域での

Table 1 Details of Sample

Synthetic Silica Wafer	Composition	SiO ₂
	Diameter	50[mm]
	Vickers Hardness	650[HV]
	Ra	0.005[μm]
Diamond Tip	Curvature Radius of Tip	0.5[μm]
	Angle of Tip	57[deg]

摩擦を実現するため, ダイヤモンド触針の先端曲
率半径は 0.5[μm]とした.

次に, Table 2 に試験条件を示す. 本試験の雰

気は大気中とし, 垂直荷重と摩擦速度の双方を変
化させて試験を行った. また, 測定時間は 30[s]と
し, 測定開始時は石英ガラスウエハをダイヤモン
ド触針に押付けた状態で静止させ, その後 21[s]以
上の間しゅう動させた.

Table 2 Experimental Condition

Temperature	25±1[°C]
Relative Humidity	50±10[%]
Friction Velocity	90, 115, 139, 192[μm/s]
Experimental Time	30[s]
Sampling Period	2.5[ms]

4. 試験結果および考察

Fig.3 に, 本試験により得られた試験結果の一例
を示す. この一例の試験条件は, 垂直荷重 161[mN],
摩擦速度 139[μm/s]であり, 縦軸は摩擦係数, 横軸
は測定時間である. 本試験結果において, 測定開
始から約 3[s]はダイヤモンド触針と石英ガラスウ
エハとを接触させた状態で静止させており, その
後, しゅう動を始めている. 本試験結果から, し
ゅう動中の摩擦係数は時間的に変動していること
が確認でき, これを算術平均した値および変動の
双方について考察することが重要となる.

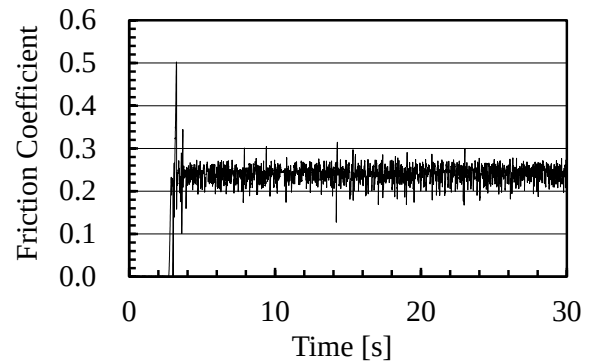


Fig.3 Relationship between Friction Coefficient and
Experimental Time (161[mN], 139[μm/s])

4.1 摩擦係数の垂直荷重および摩擦速度との関 係

Fig.4 に, 垂直荷重と摩擦係数との関係を示す.

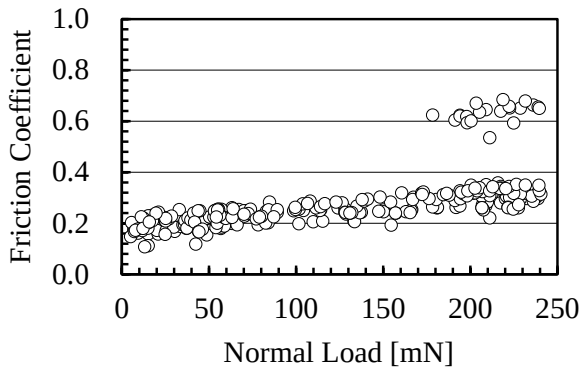


Fig.4 Relationship between Friction Coefficient and Normal Load

ここで、縦軸の摩擦係数はダイヤモンド触針と石英ガラスウエハとのしゅう動中の算術平均値である。Fig.4 より、垂直荷重の増加に伴い摩擦係数も徐々に上昇することや、垂直荷重 180[mN]以上において、大小二つの摩擦係数が出現することが確認された。

次に、Fig.5 に、垂直荷重 79[mN], 129[mN], 161[mN]および 225[mN]における摩擦速度と摩擦係数との関係を示す。但し、垂直荷重 225[mN]については、特に摩擦速度が大きい場合、大小二つの摩擦係数のうち大きい方において非常に短い時間しか測定できなかったため、小さい摩擦係数のみプロットしている。Fig.5 を見ると、垂直荷重 79[mN]から 225[mN]までのいずれの場合も、摩擦速度を変化させても摩擦係数の平均値はほとんど変化しないことが分かる。

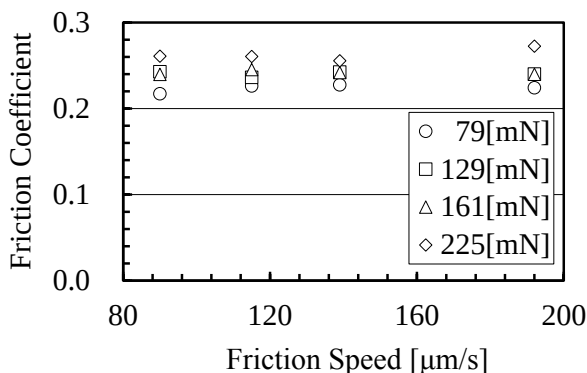


Fig.5 Relationship between Friction Coefficient and Friction Speed

以上より、本試験条件において、「2.1 アモントン・クーロンの摩擦法則」のうち、垂直荷重と摩擦が、動摩擦力が摩擦速度によらないとされる(4)の摩擦力が比例するとされる(1)の法則は成立しない

法則は成立することが明らかとなった (Fig.5 において縦軸は摩擦係数だが、式(1)より、垂直荷重と摩擦係数が等しければ動摩擦力も等しい)。

4.2 摩擦係数の周波数特性

摩擦係数を時間的平均値として見た場合の特性は上述の通りであるが、Fig.3 から分かる通り、摩擦係数はしゅう動中に変動している。この変動は、実際のマイクロマシン等の機械要素における振動と密接な関係を持ち、しゅう動中における動作の不安定さの原因にもなると考えられるため、その特性を把握することが重要である。

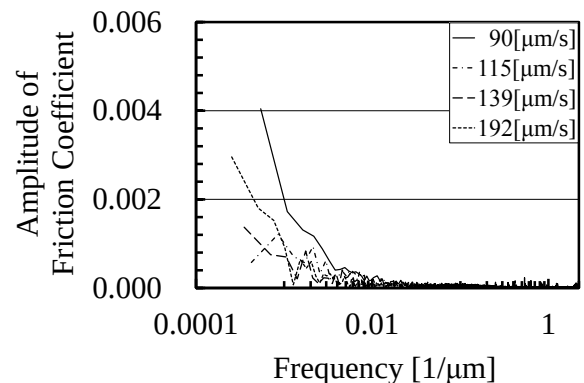


Fig.6 FFT Analysis of Friction Coefficient (79[mN])

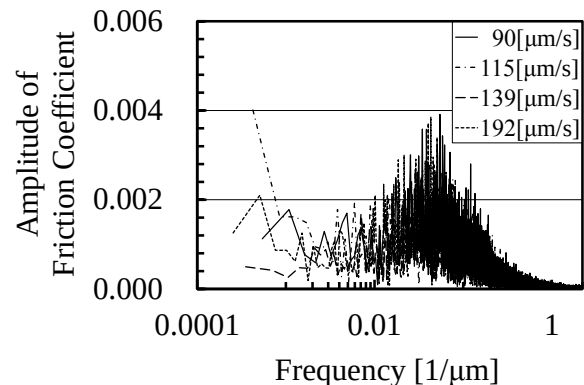


Fig.7 FFT Analysis of Friction Coefficient (129[mN])

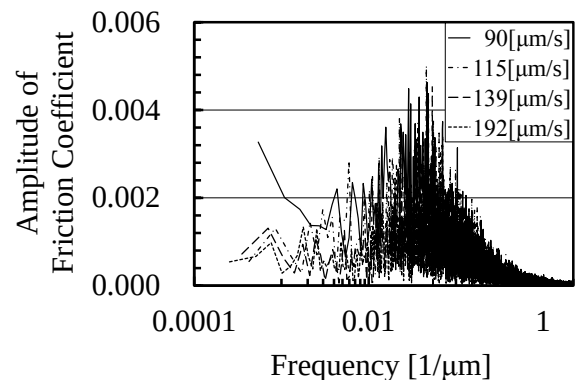


Fig.8 FFT Analysis of Friction Coefficient (161[mN])

そこで、しゅう動中の摩擦係数の時間的変動に

ついて, フーリエ解析した結果を Fig.6 から Fig.8 に示す. Fig.6 から Fig.8 において, 縦軸は摩擦係数の周波数成分の大きさであり, 横軸は, 時間と摩擦速度から摩擦距離を求め, それを周波数として示したものである. なお, 摩擦係数が大小二つ出現する垂直荷重領域については, どちらの摩擦係数の測定時間も連続して十分にとれなかったため割愛する.

Fig.6 は垂直荷重 79[mN]における摩擦試験のフーリエ解析結果である. Fig.6 から, 比較的小さい垂直荷重 79[mN]において, いずれの摩擦速度においても, 低周波数領域を除いて周波数成分が現れていないことが分かる. なお, ここで現れた低周波数成分は試験時の石英ガラスウエハの僅かな傾きや, 石英ガラスウエハ表面のうねりが影響しているものと考えられる.

次に, Fig.7 は垂直荷重 129[mN]における摩擦試験のフーリエ解析結果である. Fig.7 を見ると, 0.01 ~ 1[μm]の間に摩擦係数の周波数成分が強く現れていることが分かる. また, いずれの摩擦速度の場合も周波数成分はほぼ同じ分布をしている.

Fig.8 は垂直荷重 161[mN]における摩擦試験のフーリエ解析結果である. 摩擦係数の周波数成分は Fig.7 と同じく 0.01 ~ 1[μm]の間に強く現れており, いずれの摩擦速度の場合もほぼ同様の分布をしている. また, 周波数成分の大きさは Fig.7 と比較してやや大きくなっていることが確認できる.

以上より, 摩擦係数の時間的変動は, 垂直荷重の変化に伴い周波数成分の分布または大きさが変化するが, 摩擦距離を周波数として示すと, 摩擦速度を変化させても周波数成分の大きさや分布はほとんど変化しないことが明らかとなった.

4.3 光学顕微鏡による摩擦痕の観察

続いて, 垂直荷重や摩擦速度を変化させた場合に, 摩擦形態がどのように変化し, 摩擦係数の大きさや周波数特性に影響を及ぼすか明らかにするために, 微小摩擦試験後の石英ガラスウエハ上の摩擦痕を光学顕微鏡により観察した. 摩擦痕の観察結果を Fig.9 から Fig.11 に示す. これらの図において, 中央に縦向きに伸びている痕が摩擦痕であり, 下から上に向けて摩擦している. また, 摩擦痕の左右に黒く見えているものは摩耗粉である.

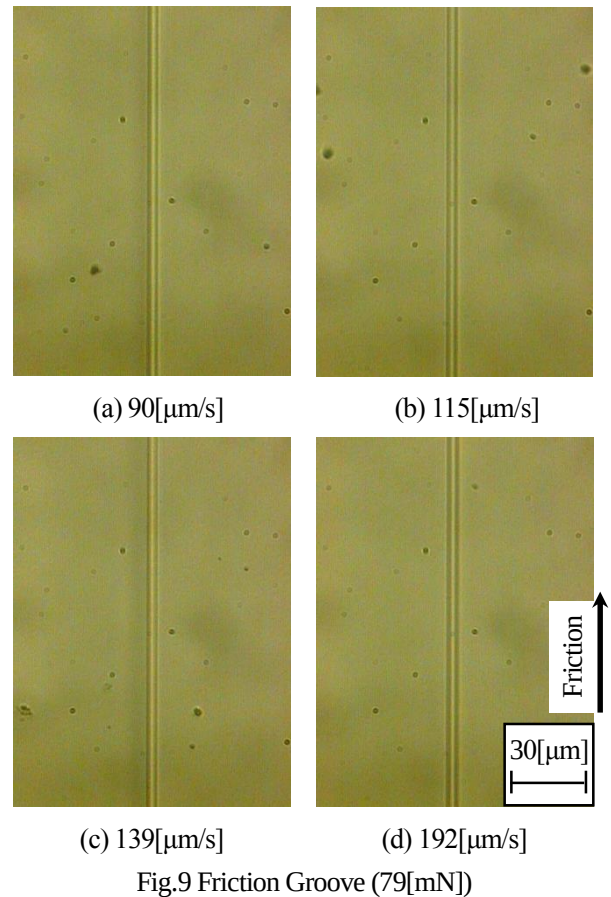


Fig.9 Friction Groove (79[mN])

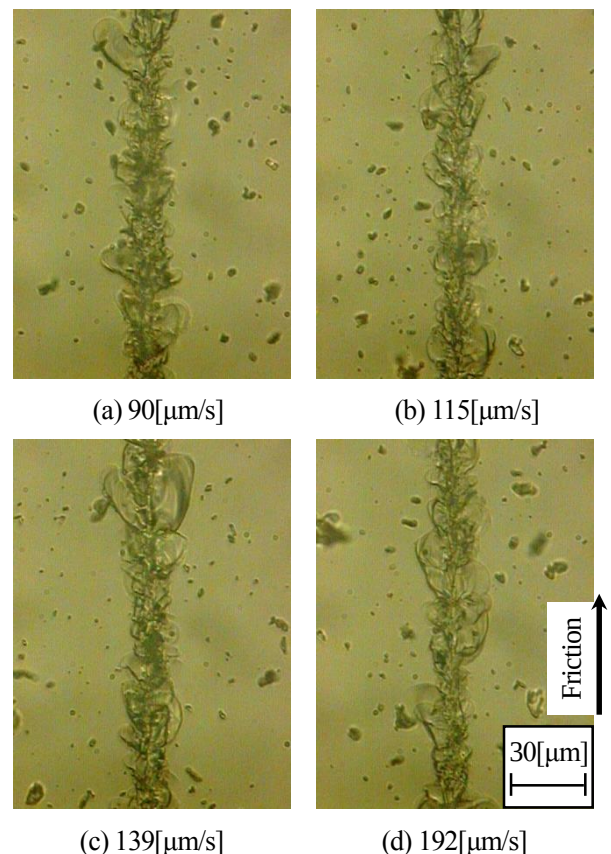


Fig.10 Friction Groove (129[mN])

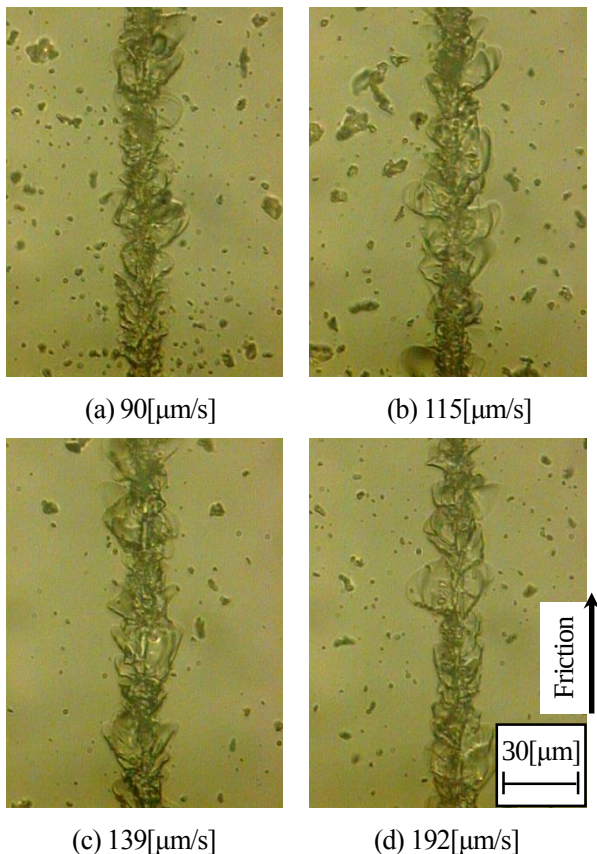


Fig.11 Friction Groove (161[mN])

まず, Fig.9 から Fig.11 における摩耗粉量を比べてみると, 垂直荷重 79[mN]より 129[mN]および 161[mN]のときの方が多く, 垂直荷重が一定の場合, 摩擦速度による摩耗粉量の変化はほとんど見られないことから, 摩擦係数の時間的平均値が垂直荷重の増加に応じて大きくなることに対応している。

次に, Fig.9 に示す垂直荷重 79[mN]における摩擦痕形状を見ると, クラックは発生しておらず, 一直線状の摩擦痕であることから凝着による摩擦が支配的であると考えられる。また, 摩擦速度に関わらず摩擦痕の幅や状態に相違は見られない。

さらに, Fig.10 に示す垂直荷重 129[mN]の場合, 摩擦痕にクラックが確認できる。このことから, 掘り起こしによる摩擦が支配的であることが予想でき, この掘り起こしによって摩擦係数が変動するものと考えられる。また, 摩擦速度を変化させても摩擦痕のクラック等の形状にとりわけ相違は見られないことから, 前項で摩擦係数の摩擦距離に対する周波数特性がほぼ一致したことにも対応する。

Fig.11 に示す垂直荷重 161[mN]の場合も同様にクラックが確認でき, 摩擦速度を変化させても摩擦痕に変化は見られない。

5. 結言

マイクロ領域における垂直荷重および摩擦速度による摩擦係数の大きさや周波数特性の解明を目的として, 先端曲率半径のダイヤモンド触針と石英ガラスウエハとの微小摩擦試験を実施し, 石英ガラスウエハ上の摩擦痕を光学顕微鏡で観察することで考察を加えた。その結果, 以下のことが明らかとなった。

- (1) しゅう動中の摩擦係数の平均的な大きさは, 200[mN]以上の高垂直荷重域まで含めても, 摩擦速度には依存せず, 垂直荷重の増加に対応して上昇する。
- (2) 凝着摩擦が支配的と考えられる低垂直荷重域における摩擦係数の周波数特性は, 周波数成分が低周波数領域を除きほとんど現れない。
- (3) 掘り起こし摩擦が支配的になると考えられる高垂直荷重域における摩擦係数の周波数特性は, 周波数成分が $0.01 \sim 1[1/\mu\text{m}]$ のあたりに現れる。また, 摩擦距離に対する周波数成分の分布は, 摩擦速度に関わらずほぼ一致する。
- (4) 石英ガラスウエハ上の摩擦痕の観察から, 摩擦痕の形状も摩擦速度に依存せず, 垂直荷重の増加に伴い変化することが確認された。

謝辞

本研究の一部は, (公財) 精密技術測定技術振興財団からの助成によるものであります。この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田中久一郎：摩擦のおはなし, 日本規格協会, (1985).
- 2) 安藤泰久：マイクロトライボロジー入門, 産業図書, (2009).
- 3) 福田勝己, 小林光男, 鈴木健司, 堤 博貴, 飯田貴大, 小澤直樹：マイクロ領域における摩擦特性(第 1 報), 東京工業高等専門学校研究報告書 第 40(1)号, (2008), pp.29-34.
- 4) 福田勝己, 小林光男, 鈴木健司, 藺牟田桂, 繁

山 航: マイクロ領域における摩擦特性(第 3 報),
東京工業高等専門学校研究報告書 第 44(2)号 ,
(2013), pp.59-64.

5) 土橋正二: ガラスの化学, 講談社, (1972).

(平成 27 年 2 月 25 日受理)

創造性を養う設計製図の授業方法に関する研究

林丈晴*, 多羅尾進*, 志村穰*, 中村源一郎**

Study on the Design and Drafting Lesson Method to Encourage Creativity

Takeharu HAYASHI, Susumu TARAO, Jyo SHIMURA, Gen-ichiro NAKAMURA

It is important to develop a curriculum where the qualities for students to encourage creativity are brought up in National College of Technology. As such a curriculum, “the lesson method where the students experience a series of processes including motivation of the creation, design, plan, production and evaluation without fail, then get a rational suitable solution” is practiced. We arranged teaching contents, materials, and so on for re-constitutive or improvement of the lesson. In this paper, we reported these contents.

Key Words : Gear Box, Design, Innovation, Creativity

1. 緒 言

イノベーションを起こす素養のうち最も重要なもののうちの一つに創造性がある。これを養うには、社会的要求などを総合的に配慮したものづくりについて、創造の動機から始まり設計・計画・製作・成果の評価を欠落することなくたどらせ、評価と修正を繰り返しながら合理的で最適な解を導くプロセスを体験させることが有用である¹⁾。我々は、設計・計画・製作・成果の評価の流れの授業を構築することを目的として工業高等専門学校機械工学科3年の機械設計製図において本プロセスによる授業を実施した。さらに、授業の再構築および改善のための基礎資料として、授業内容、使用した材料などをまとめたので報告する。

2. 授 業

2・1 授業の概要

平成25年度前期に、本校機械工学科3年生の機械設計製図Aにおいて、学生40名に対して本プロセスによる授業(90分×2コマ×15週)を実施した。具体的には、学生に、図1に示す「バリアフリー」や「省エネ」の観点から、買い物や建物内の移動などで活用するための超小型電気自動車を製作することを想定させ、これに使用する減速歯車装置の仕様策定・設計・製図・製作・評価を行なわせた。表1に

授業の概要を示す。なお、使用可能な部品などとして、表2および表3を提示する。

第2回では、仕様を策定させ、第3回～第11回では、設計書および図面を作成させた。なお、第2回～第11回は個人作業である。

電池を電源とした高齢者が室内を移動するための安価な電動式移動体に取り付けるための減速歯車装置を設計し製図してさらに製作しなさい。

設計条件

- ・電源に6本の単3充電式ニッケル水素電池(1.2V, 1900mAh)を用いる。
- ・使用するモータはmaxon DC motor 273752(トルク定数 19.4mNm/A, 回転数定数 491 [rpm/V](回転数/トルク)勾配 8.43 [rpm/mNm])とする。
- ・連続運転時間が約60分を超えること。
- ・使用する材料などは、指定されたものの中から選ぶこと。

図1 設計例題

また、表1に記されている第3回～第11回については目安であり、実際にはその進度に個人差が生じた。第12回では、約6名からなるグループに分けて、学生にグループとして製作する設計内容を1つ

*機械工学科, **教育研究技術支援センター

選ばせた。この活動では、各々の図面および設計内容の問題点を改めて見直すとともに、相手の考えを聞き取り、自分の考えを主張する体験をすることも狙いと

表 1 授業の概要

第 1 回	減速比と歯数比
第 2 回	課題の提示/仕様の策定/課題に取り組むために必要なモータの知識の習得/走行抵抗の算出
第 3 回	減速比の算出/段数と歯数の決定/モジュールの仮定 (歯の強度計算)
第 4 回	軸の強度計算
第 5 回	設計製図 (歯車)
第 6 回	設計製図 (歯車)
第 7 回	設計製図 (軸受・軸)
第 8 回	設計製図 (セットカラー/組立図)
第 9 回	設計製図 (組立図)
第 10 回	設計製図 (組立図)
第 11 回	設計製図 (歯車箱フレーム)
第 12 回	討論/加工
第 13 回	加工
第 14 回	加工/組立
第 15 回	加工/成果物の評価/振返レポート

表 2 使用可能な部品等 (歯車以外)

提供される部品	注文品名
40 mm×80 mm アルミ 角 厚さ2mm 長さ2m	アルミブラケットフレーム HFHQ4080-2-2000 (ミシミ)
50 mm×40 mm アルミ 角 厚さ2mm 長さ2m	アルミブラケットフレーム HFHQ5050-2-2000 (ミシミ)
φ6mm シャフト用ベアリング	ベアリング B670 FL696ZZ (ミシミ)
φ6mm シャフト用セットカラー	セットカラー SCS SCS6-8 (ミシミ)
S45C 丸棒	ハコウシャフト PSFG PSFG6-600 (ミシミ)
6mm と 6mm の軸の連結 用スリット型カップリング	CPSSC20-6-6 (ミシミ)
駆動輪に取り付けられたディスクブレーキ用 ハブ	BITEX DH12M (32H)

表 3 使用可能な歯車

	m	z	b	穴径
S75S14K+0805	0.75	14	8	5
S75S20B+0806	0.75	20	8	6
S75S24B+0806	0.75	24	8	6
S75S25B+0806	0.75	25	8	6
S75S28B+0806	0.75	28	8	6
S75S30B+0806	0.75	30	8	6
S75S48B+0606	0.75	48	6	6
S75S50B+0606	0.75	50	6	6
S75S56B+0606	0.75	56	6	6
S75S60B+0606	0.75	60	6	6
S75S64B+0606	0.75	64	6	6
S75S70B+0606	0.75	70	6	6
S75S72B+0606	0.75	72	6	6
S1S12K*1206	1	12	12	6
S1S13K*1206	1	13	12	6
S1S14K*0806	1	14	8	6
S1S14K*1206	1	14	12	6
S1S15K*0806	1	15	8	6
S1S15K*1206	1	15	12	6
S1S20B*0806	1	20	8	6
S1S25B*0806	1	25	8	6
S1S84A-0610F	1	84	6	10
S1S90A-0610F	1	90	6	10
S1S96A-0610F	1	96	6	10
S1S100A-0610F	1	100	6	10

※ 全て S45C/JIS4 級相当

※ m: モジュール(mm) z: 歯数 b: 歯幅(mm)

する。ここで、選ばれた設計をしたもの、選ばれなかった設計をしたものの両方にその理由を書かせた。選ばれた理由として、「図面がきれいで見やすい」「加工の手間が少なそう」などがあつた。また、選ばれなかった主な理由としては、「加工に必要な情報が記載されていない」「現実的に組立が不可能である」「設計が間違っている」「自分の設計コンセプトを班員にうまく伝えることができなかった」などがあつた。

第 12 回～第 15 回では、グループ毎に選ばれた設計内容の図面を基に加工および組立を行わせた。このプロセスで設計製図と製作のつながりを大きく意識したものとする。さらに、実際に自転車に取り付け動くか否かを検証させ成果物の評価も行わせた。

2・2 設計例

①仕様策定→②必要トルクの算出→③定常走行時の電流決定→④減速比の算出→⑤装置のイメージ図決定→⑥歯車の強度計算および使用歯車の決定→⑦軸の設計→⑧フレームの順で行う。ここでは設計例として①～⑥について示す。

①仕様策定

ベース車両には市販のものを使用し、車両は前1輪、後2輪自転車とする。この自転車は15kgで、体重60kgの人間が乗るものとする。従って総質量は75kgである。なお、駆動部は後輪片側とする。速度は人間の歩く速度よりやや遅い2km/hとする。

②必要トルクの算出

タイヤの転がり係数は0.014と仮定すれば走行抵抗10.5N ($=750\text{N} \times 0.014$) である。タイヤ半径0.25mとすれば必要なトルク約2.62Nm ($=10.5\text{N} \times 0.25\text{m}$) である。

③定常走行時の電流決定

ここで、電池6本を直列で(7.2V, 1.9Ah)使用すると仮定して設計する。今回使用する容量約1.9Ahのバッテリーで60分程度運転するには、単純計算で平均1.9A程度の電流を流すことができる。ところが、1.9Aは電池の能力を超えているので、実際は60分も電流を流すことができない。そこで、今回は定常走行時に1.5Aの電流を流すことを想定した。

④減速比の算出

この場合モータから得られるトルクは29.1mNm ($=\text{トルク定数} \times \text{消費電流} = 19.4\text{mNm/A} \times 1.5\text{A}$) である。従って、動力伝達効率を90%と仮定すれば、減速比が約100 ($\div 2620\text{mNm} \div (29.1\text{mNm} \times 0.9)$) の減速装置が必要となる。

ところで、当モータの無負荷状態での回転数は、約3540rpm ($\div \text{回転数定数} \times \text{電圧} = 491\text{rpm/V} \times 7.2\text{V}$) であるから、29.1mNmのトルク負荷時のモータの回転数は約3300rpm ($\div \text{無負荷状態での回転数} - [\text{回転速度/トルク}] \times \text{トルク} = 3535\text{rpm} - 8.43\text{rpm/mNm} \times 29.1\text{mNm}$) である。従って、車輪の回転速度は約33rpm ($=\text{モータの回転速度} \times \text{減速率} = 3300\text{rpm} \times 1/100$) である。これにより、最大速度3.1km/h ($=\text{タイヤの直径} \times \pi \times \text{回転速度} = 0.5\text{m} \times \pi \times 33\text{rpm} \times 3/50(\text{km/h}) / (\text{m/min})$) が得られる。この計算は実際より少なく見積もる。さらに今回は電線で生じる電

圧降下を考慮していない。しかし、これらを考慮しても2km/h以上では走行することができる。

⑤装置のイメージ図決定

これらを満たす減速装置として図2に示すものを仮定する。

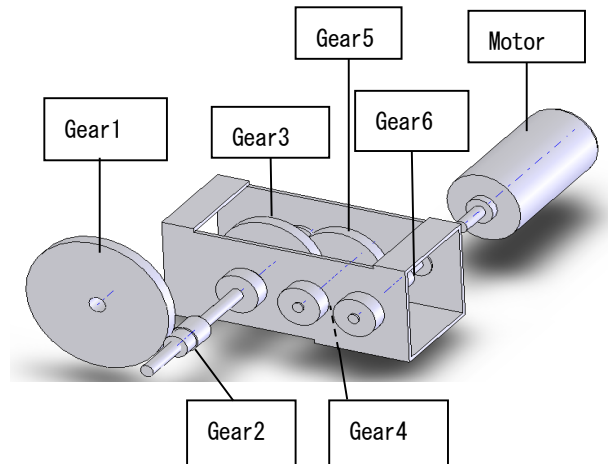


図2 イメージ図

⑥歯車の強度計算および使用歯車の決定

減速比100とするために表4に示す歯車を使用すると仮定し、強度計算を行う。強度計算で使用する定数(許容曲げ応力、許容接触応力および歯形係数など)は、機械設計法²⁾に示してあるものを用いる。強度計算では曲げ許容応力の観点と最大接触応力の観点の両者からそれぞれ許容円周力を求め、実際に生じている円周力と比較する。なお、曲げ許容応力の観点からの判定において、歯幅が同一のかみ合う1対の歯車では、小歯車の評価を行えば十分である。歯幅が異なる場合は、基本的にはそれぞれの許容円周力を求めなければならないが、小歯車の評価において、歯幅としてかみ合い幅を用いることにより、本手法での評価が可能である。ただし、この方法では通常の評価方法で求めた場合より低い許容円周力が算出される可能性があるが、ここではこの方法を用いた。

円周力を求める準備として、まずはそれぞれの軸のトルクTと回転速度nを下式のように求めておく必要がある。ここでは簡単のため、軸間における動力伝達効率を100%とし、軸のすべりはしないものとする。

$$T_5 = T_6 \frac{mz_5}{mz_6} = 29.1 \times \frac{64}{14} = 133 \text{ mNm} \quad (1)$$

$$n_5 = n_6 \frac{mz_6}{mz_5} = 3300 \times \frac{14}{64} = 722 \text{ rpm} \quad (2)$$

ただし、 m はモジュール、 z は歯数である。また、 T や n の添え数字は、その番号の歯車に締結されている軸のトルクや回転数などを意味し、それ以外の記号の添え数字はその記号が当該歯車のものであることを意味する。この計算方法で他の軸のトルクと回転速度を求めると表 4 のようになる。

表 4 歯数および軸の状態

	歯幅 [mm]	モジュール [mm]	歯数	トルク [mNm]	回転速度 [rpm]
Gear1	6	1	84	2980	32.2
Gear2	12	1	15	532	180
Gear3	6	0.75	56		
Gear4	8	0.75	14	133	722
Gear5	6	0.75	64		
Gear6	8	0.75	14	29.1	3300

歯車 1 と歯車 2 のかみ合い部に生じる円周力 F_1 、および周速度 v_1 はそれぞれ次のようになる。

$$F_1 = \frac{T_1}{d_1/2} = \frac{2980}{84 \times 1 \div 2} = 71 \text{ N} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{n_1}{60} \times d_1 \times \pi \times 0.001 \\ &= \frac{32.2}{60} \times 84 \times \pi \times 0.001 = 0.14 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 d はピッチ円直径、 n は回転速度である。

次に許容円周力を求める。このために必要な定数は、円周力領域係数 Z_H 、材料定数係数 Z_E 、許容曲げ応力 $\sigma_{\lim F}$ 、許容接触応力 $\sigma_{\lim H}$ 、使用係数 K_A 、動荷重係数 K_D および 歯形係数 Y である。領域係数 Z_H は歯車の圧力角に依存しここでは 2.49 である。材料定数係数 Z_E はかみ合う 2 つの歯車のヤング率に依存し、ここでは 190 である。使用する歯車の

許容曲げ応力 $\sigma_{\lim F}$ は 211MPa、許容接触応力 $\sigma_{\lim H}$ は 540MPa である。また、モータにより駆動し負荷は変動しないため使用係数 K_A は 1.0 で、使用する歯車 JIS4 級相当で使用時の歯車の周速度が 0.14m/s であるから動荷重係数 K_D は 1.0 である。本かみ合わせにおいては小歯車の歯数が 15 であるから歯形係数 Y は 3.1 である。

以上より、曲げ許容応力から算出される許容円周力は、

$$F = \frac{\sigma_{\lim F} b m}{Y K_A K_D} = \frac{211 \times 6 \times 1}{3.1} = 408 \text{ N} \quad (5)$$

である。また、最大接触応力から算出される許容円周力は、

$$\begin{aligned} F &= \left(\frac{\sigma_{\lim H}}{Z_H Z_E} \right)^2 \left(\frac{u}{u+1} \right) \left(\frac{b m z}{K_A K_D} \right) \\ &= \left(\frac{540}{2.49 \times 190} \right)^2 \times \left(\frac{84}{\frac{84}{15} + 1} \right) \times \left(\frac{6 \times 1 \times 15}{1.0} \right) \\ &= 1.141^2 \times \left(\frac{84}{84 + 15} \right) \times 90 \\ &= 1.3 \times 0.85 \times 90 = 99 \text{ N} \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ただし、 u は歯数比で 1 より大きく、 b はかみ合い幅、 z は小歯車の歯数、 Y は小歯車の歯形係数である。総じて述べると、歯車 1 と歯車 2 のかみ合いにおいては円周力が 99N の負荷なら安全で、実際には 71N しかかかっていない。

歯車 3 と歯車 4 のかみ合い部に生じる円周力 F_3 、および周速度 v_3 はそれぞれ次のようになる。

$$F_3 = \frac{532}{56 \times 0.75 \div 2} = 25 \text{ N} \quad (7)$$

$$v_3 = \frac{180}{60} \times 56 \times 0.75 \times \pi \times 0.001 = 0.39 \text{ m/s} \quad (8)$$

また、モータにより駆動し負荷は変動しないため使用係数 K_A は 1.0 で、使用する歯車 JIS4 級相当で使用時の歯車の周速度が 0.39m/s であるから、動荷重係数 K_D は 1.0 である。本かみ合わせにおいては小歯車の歯数が 14 であるから歯形係数 Y は 3.2 である。

以上より、曲げ許容応力から算出される許容円周力は、

$$F = \frac{\sigma_{\lim F} b m}{Y K_A K_D} = \frac{211 \times 6 \times 0.75}{3.2} = 297 N \quad (9)$$

である。また、最大接触応力から算出される許容円周力は、

$$\begin{aligned} F &= \left(\frac{\sigma_{\lim H}}{Z_H Z_E} \right)^2 \left(\frac{u}{u+1} \right) \left(\frac{b m z}{K_A K_D} \right) \\ &= 1.141^2 \times \left(\frac{64}{64+14} \right) \times \left(\frac{6 \times 0.75 \times 14}{1.0} \right) \quad (10) \\ &= 1.3 \times 0.81 \times 63 = 66 N \end{aligned}$$

となる。総じて述べると、歯車3と歯車4のかみ合いにおいては円周力が66Nの負荷なら安全で、実際には25Nしかかかっていない。

歯車5と歯車6のかみ合い部に生じる円周力 F_5 は、および周速度 v_5 はそれぞれ次のようになる。

$$F_5 = \frac{133}{64 \times 0.75 \div 2} = 5.5 N \quad (11)$$

$$v_5 = \frac{722}{60} \times 64 \times 0.75 \times \pi \times 0.001 = 1.8 m/s \quad (12)$$

また、モータにより駆動し負荷は変動しないため使用係数 K_A は1.0で、使用する歯車JIS4級相当で使用時の歯車の周速度が1.8m/sであるから動荷重係数 K_D は1.3である。本かみ合わせにおいては小歯車の歯数が14であるから歯形係数 Y は3.2である。

以上より、曲げ許容応力から算出される許容円周力は、

$$F = \frac{\sigma_{\lim F} b m}{Y K_A K_D} = \frac{211 \times 6 \times 0.75}{3.2 \times 1.3} = 228 N \quad (13)$$

である。また、最大接触応力から算出される許容円周力は、

$$\begin{aligned} F &= \left(\frac{\sigma_{\lim H}}{Z_H Z_E} \right)^2 \left(\frac{u}{u+1} \right) \left(\frac{b m z}{K_A K_D} \right) \\ &= 1.141^2 \times \left(\frac{56}{56+14} \right) \times \left(\frac{6 \times 0.75 \times 14}{1.3} \right) \quad (14) \\ &= 1.3 \times 0.80 \times 48 = 50 N \end{aligned}$$

となる。総じて述べると、歯車5と歯車6のかみ合いにおいては円周力が50Nの負荷なら安全で、実際には5.5Nしかかかっていない。

以上より、これらの歯車では、強度上問題ないことが示された。

2・3 設計結果と製図および製作

これについて組立図と部品図を製図した。なお、部品図としては歯車、軸、ギアボックスフレームおよび軸受である。また学生が実施した加工を表5、出来上がった作品を図3に示す。

本カリキュラムにおいて学生が使用した歯車を表6、その累計を表7にそれぞれ示す。

表5 学生が実施した主な加工

加工名	加工方法
アルミ角の切断	バンドソー
軸のDカット	ヤスリ
ギアボックスフレームの軸受用穴あけ	ボール盤 NCフライス（少数）
ギアボックスフレームの窓あけ	フライス盤 NCフライス
軸の切断	弓鋸



図3 学生の製作した作品

表 6 学生が使用した歯車の種類

規格		m	z	b	規格		m	z	b
1 班	S75S70B+0606	0.75	70	6	5 班	S1S100A-0610F	1	100	6
	S75S14K+0805	0.75	14	8		S1S20B*0806	1	20	8
	S75S70B+0606	0.75	70	6		S75S56B+0606	0.75	56	6
	S75S14K+0805	0.75	14	8		S75S14K+0805	0.75	14	8
	S75S60B+0606	0.75	60	6		S75S56B+0606	0.75	56	6
	S75S20B+0806	0.75	20	8		S75S14K+0805	0.75	14	5
2 班	S75S70B+0606	1	84	6	6 班	S1S100A-0610F	1	100	6
	S75S14K+0805	1	12	8		S1S20B*0806	1	20	8
	S75S70B+0606	0.75	56	6		S75S70B+0606	0.75	70	6
	S75S14K+0805	0.75	14	8		S75S20B+0806	0.75	20	8
	S75S60B+0606	0.75	56	6		S75S56B+0606	0.75	56	6
	S75S20B+0806	0.75	14	8		S75S14K+0805	0.75	14	8
3 班	S1S96A-0610F	1	96	6	7 班	S1S84A-0610F	1	84	6
	S1S15K*0806	1	15	8		S1S12K*1206	1	12	12
	S75S72B+0606	0.75	72	6		S75S70B+0606	0.75	70	6
	S75S20B+0806	0.75	20	8		S75S14K+0805	0.75	14	8
	S75S60B+0606	0.75	60	6		S75S56B+0606	0.75	56	6
	S75S20B+0806	0.75	20	8		S75S25B+0806	0.75	25	8
4 班	S1S100A-0610F	1	100	6	8 班	S1S100A-0610F	1	100	6
	S1S15K*0806	1	15	8		S1S12K*1206	1	12	12
	S75S72B+0606	0.75	72	6		S75S72B+0606	0.75	72	6
	S75S20B+0806	0.75	20	8		S75S30B+0806	0.75	30	8
	S75S72B+0606	0.75	72	6		S75S72B+0606	0.75	72	6
	S75S20B+0806	0.75	20	8		S75S28B+0806	0.75	28	8

表 7 本授業で使用した歯車の数

規格	数
S75S14K+0805	8
S75S20B+0806	6
S75S25B+0806	1
S75S28B+0806	1
S75S30B+0806	1
S75S56B+0606	6
S75S60B+0606	2
S75S70B+0606	4
S75S72B+0606	5
S1S12K*1206	3
S1S15K*0806	2
S1S20B*0806	2
S1S84A-0610F	2
S1S96A-0610F	1
S1S100A-0610F	4

3. 結 言

設計・計画・製作・成果の評価の流れの授業を構築することを目的として東京工業高等専門学校機械工学科 3 年の機械設計製図において本プロセスによる授業を実施した。さらに、授業の再構築および改善のための基礎資料として、授業内容、使用した材料などをまとめた。

参考文献

- 1) 21 世紀の技術教育(改訂), 日本産業技術教育学会 (2012)
- 2) 塚田忠夫ら, 機械設計法第 2 班, 森北出版株式会社 (1999)

謝辞

本研究は、文部科学省大学間連携共同教育推進事業「KOSEN 発 “イノベティブ・ジャパン” プロジェクト」の支援を受けたものである。

(平成 27 年 3 月 3 日受理)

電気工学科 4 年次の PBL 教育の検証

綾野 秀樹* 伊藤 浩* 松井 義弘* 羽鳥 広範** 松岡 敏**

Verification of the PBL education which the 4th grade students in department of electrical engineering have learned

Hideki AYANO* Hiroshi ITO* Yoshihiro MATSUI* Hironori HATORI** Satoshi MATSUOKA**

This paper shows the verification results of the PBL education currently carried out in the department of electrical engineering, National Institute of Technology, Tokyo College. It has been conducted in the ELECTRICAL ENGINEERING LABORATORY III, which is a course for the 4th grade students, since 2008. The subject of the course is to develop a baseball game with an FPGA. To solve the subject, students form groups, cooperate mutually and tackle the task enthusiastically. Furthermore, they consider logically and achieve good results.

Keywords: PBL, FPGA, CAD, 創造電気実験

1. 諸言

近年、エンジニアリングデザイン教育や PBL 教育などのアクティブラーニング方式に対する関心が高まっている。PBL(Project-Based Learning)は、「課題解決型学習」とも呼ばれ、従来型の「講義」と「実験・演習」の積み上げではなく、具体的な課題を設定して課題解決という目標に向かって学生を意欲的に取り組ませ、その過程で自分の方法論を獲得する手法である⁽¹⁾⁽²⁾。この PBL の特徴は、

- 学生は 1 グループ 5 人程度のチームを構成
- 各チームのプロジェクトテーマとしては、解決方法が知られていないオープンなものを設定
- プロジェクト実行のためのフレームワークの設定、実施計画立案、プロジェクト実行を学生が自ら実施

という点である。この過程で、学生はほかの講義・実験科目の重要性を認識し、課題解決という目標に向かって意欲的に取り組むことにより、学習動機を強くすると同時に、通常の講義・実験科目では得られない実践的な力（課題解決能力、プレゼンテーション能力、論理的思考力、モデリング能力、デザイン力など）を身に付けることができる。

東京高専電気工学科では、平成 20 年より、4 年次前期の実験科目「創造電気実験Ⅲ」において PBL

教育を実施している。この実験は、3 年次の座学科目「デジタル回路」の実験演習の位置付けで週 1 回 4 時限で実施している。

実験の課題は、「野球ゲーム」を FPGA と CAD 設計ツールにより論理回路のみで回路設計することである。FPGA を用いた設計では、一般的には Verilog や VHDL などのハードウェア記述言語を使用するが、本実験ではハードウェア記述言語による設計は認めていない。これは、プログラミング演習ではなくデジタル回路の実験演習の観点によるものである。ディスクリートの論理素子を組み合わせて実施させた場合に発生するノイズ誤動作や配線の半田付け不良など、論理演算以外の実験的な不安定要素を排除するために FPGA を使用している。また、あえて論理素子を用いた回路で設計させることにより、デジタル処理系で必要となる同期や遅延の概念を理解させることも目的の一つである。

本実験は、これまでも検証と修正を繰り返しながら、少しずつ改良を加えている。本報告では、平成 26 年度の実験状況から、現状取り組んでいる PBL 教育について、実施内容を検証する。

2. 実験内容

2.1 実験事項

表 1 に実験のスケジュールを示す。1 回目の授

表 1 実験のスケジュール

項目	実験事項	終了予定
1	ガイダンス CADの動作理解と使用法の習得	1回目
2	電子ロックの設計・製作	～5回目
3	野球ゲームの設計・製作	～14回目
4	プレゼンテーション	15回目

業において、ガイダンス、CAD ツールの動作理解、使用法の習得を実施する。CAD ツールの使用法は、テキストに従って簡単な論理回路を設計することで学ぶ。次に、デジタル回路設計と学習として、4桁の暗証番号による電子ロック回路を設計・製作させる。電子ロック設計は、野球ゲーム設計の導入学習の位置付けであり、仕様、ブロック図、ブロックの機能説明を予め提示し、ブロックの機能を満たすような機能ブロックを製作させる。この演習では、製作すべき機能ブロックが予め判ることから、比較的容易に設計できる。この製作を5回目の実験までに終了させ、完成次第、野球ゲームの設計・製作に取り掛かる。野球ゲームは14回目の実験までに終了させ、15回目の授業においてプレゼンテーションを実施させる。早期に完成するグループでも12回前後の授業時間を費やしている。完成したグループは、新たな追加機能等を検討させる。

実験は、3名(端数が生じる場合のみ4名)のグループで実施させ、役割調整、進捗の管理、自己評価は各グループに委ねる。各グループにはCADツールがインストールされたパソコンを与えており、インターネットにも接続できる環境にある。ゲームの製作過程では、教員は基本的には何も教えず、学生が教科書あるいはインターネット等で調べる。学生が完全に迷走している場合は、解答ではなく、解答にたどり着く方針のヒントを与える場合がある。ヒントは可能な限り複数種類を与え、学生が必要に応じて選択できることを心掛けている。当然、学生もヒントとして与えた方針を選択せず、全く別のやり方を見つける場合もある。

全ての学生は、翌週の授業までに、実験の目的、調査した内容、実施内容、評価結果、隘路事項、疑問点、まとめ・感想を纏めたレポートを毎回作成する。教員はレポートの体裁も含めて内容を確認・評価し、提出した授業の最中に返却する。必要に応じて再提出させる。毎回のレポートは、ファイルに綴じさせ、過去の失敗事例やその解決法を活かせるようにしている。(同様の不具合解決の助けになるように、隘路事項として失敗事例と解決法を纏めるように指導している。)また、レポートとは別に、各グループには仕様書、設計書、プレゼンテーション資料を作成させる。仕様書は、本来は設計を始める前に入念に作成し、設計を開始した後は修正できない性質のものである。学生にはその旨を説明した上で、本実験では、仕様書の書き方の練習を踏まえて、製作が終了した段階で、製作した機能が不足なく網羅されているかという観点で作成させる。さらにプレゼンテーションでは、十分程度の時間で、役割、苦労した点、他のグループにはない工夫した点について、グループ内のメンバー全員が発言するようにさせている。

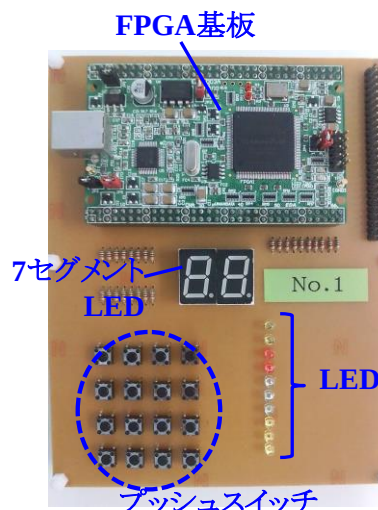


写真1 実験基板の写真

認・評価し、提出した授業の最中に返却する。必要に応じて再提出させる。毎回のレポートは、ファイルに綴じさせ、過去の失敗事例やその解決法を活かせるようにしている。(同様の不具合解決の助けになるように、隘路事項として失敗事例と解決法を纏めるように指導している。)また、レポートとは別に、各グループには仕様書、設計書、プレゼンテーション資料を作成させる。仕様書は、本来は設計を始める前に入念に作成し、設計を開始した後は修正できない性質のものである。学生にはその旨を説明した上で、本実験では、仕様書の書き方の練習を踏まえて、製作が終了した段階で、製作した機能が不足なく網羅されているかという観点で作成させる。さらにプレゼンテーションでは、十分程度の時間で、役割、苦労した点、他のグループにはない工夫した点について、グループ内のメンバー全員が発言するようにさせている。

2.2 CAD ツールの概要と FPGA 基板の構成

CAD ツールにはFPGAベンダーのアルテラ社製のフリーソフト Quartus II ver. 9.1 を使用する。このソフトは、Verilog や VHDL などのハードウェア記述言語による設計に加え、論理回路ベースでの設計も可能である。さらに、Quartus II はコンパイル後に論理シミュレーションによる検証が可能である。このため、特に、回路規模が小さい段階(各機能ブロックの製作段階)では論理シミュレーションを実施し、デバッグ終了後に FPGA 基板にダ

ダウンロードを実施して評価する。

写真1に実験基板の写真を示す。実験基板は、電気工学科で製作した基板にアルテラ社製 FPGA Cyclon II (EP2C5T144C8;144 ピン素子)が搭載された EDA003(ヒューマンデータ社製;オンボードクロック 30MHz)基板を搭載した形態としている。基板上には、16 個のプッシュスイッチ、10 個の LED(黄2 赤2 緑3 黄2 の順で搭載)、2 個の7セグメント LED を搭載している。それぞれの素子の端子は Cyclon II の端子に接続している。

3. 野球ゲームの設計・製作

3.1 課題の共通仕様

表2, 表3に、野球ゲームの動作仕様、ハードウェア仕様をそれぞれ示す。表に示した仕様は、ゲームにおいて大まかな仕様・制約であり、記載していない細かい点に関しては、各グループで決定し、仕様書に明記させている。例えば、

- ダブルプレーにおける累上走者の扱い
- 打撃ルーレットの回転時の表示方法
- 終了時の得点の表示(例えば、5対0の状態でも満塁ホームランが発生した場合に9点と表示させるか6点と表示させるか、得点の点減方法等)

については、各グループで決定する。

表2 野球ゲームの動作仕様

1	電源投入後、スタートスイッチを押すことでゲームが始まる。
2	最初の状態は、ノーアウトランナーなしからのチーム0の攻撃とする。
3	打撃スイッチを1回押すと打撃ルーレットが回り、もう一度押すと打撃ルーレットが止まる。このときの出目に従い、アウト1、アウト2、ヒット、2塁打、3塁打、ホームランのいずれかが決まる。各出目の確率は、それぞれ、16/32, 6/32, 4/32, 3/32, 2/32, 1/32とする。
4	出目がアウト1の場合はアウトカウントが1つ増える。また、出目がアウト2の場合は、ランナーがいずれかの塁にいる場合はアウトカウントが2つ増え(ダブルプレー)、ランナーなしの場合はアウトカウントが1つ増えるものとする。
5	進塁は打撃ルーレットの出目に従い、ランナーは塁打どおりに進塁するものとする。例えば、ヒットが出た場合はランナーは1塁となり、次に2塁打が出た場合はランナーは2塁と3塁になる。
6	アウトカウントが3になると、チーム0の攻撃は終了し、チーム1の攻撃になる。
7	先に6点以上得点したチームを勝ちとし、勝負が決定した時に勝利チームの得点を点減させる。

表3 ハードウェアの仕様

1	得点の表示用として、2つの7セグLEDをそれぞれのチーム用として用いる。
2	アウトカウント表示用に2個、ランナー出塁状況表示用に3個、打撃結果表示用に3個のFPGA基板上のLEDを使用する。
3	スイッチ基板上の2つのスイッチをスタートスイッチ、打撃スイッチとして使用する。

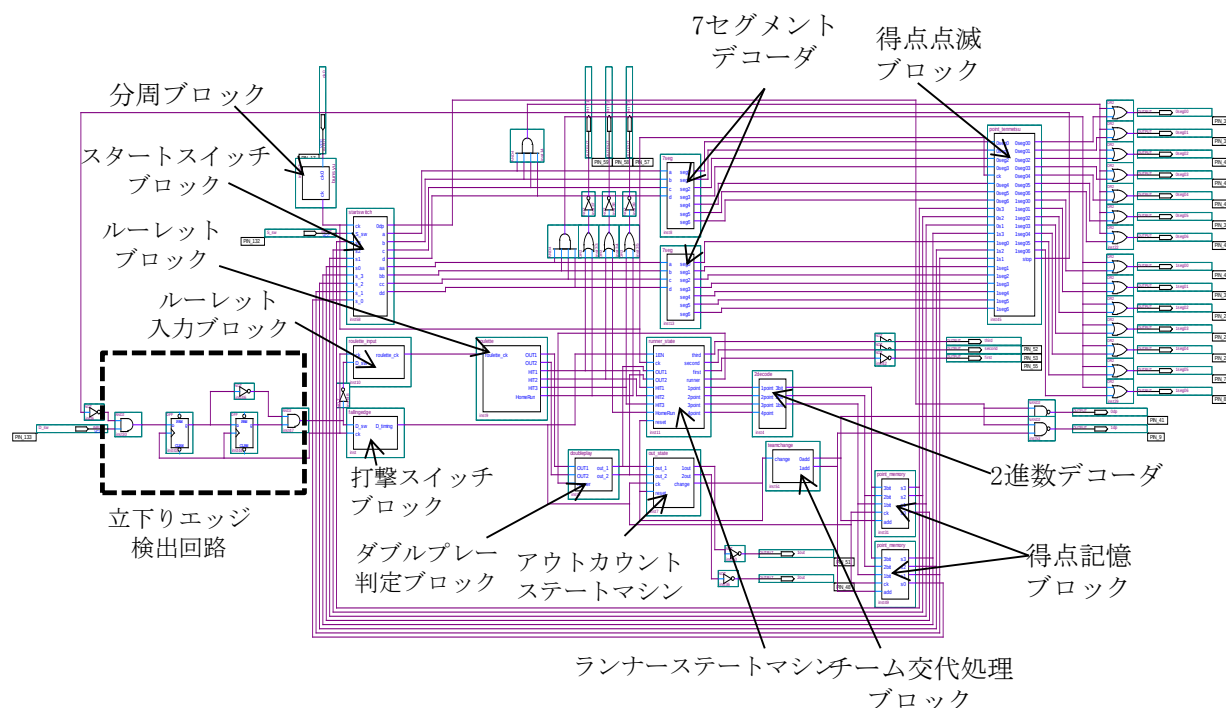


図1 野球ゲームのブロック図の例

図 1 に野球ゲームのブロック図の例を示す。ゲームを構築するために、まず、どのような機能ブ

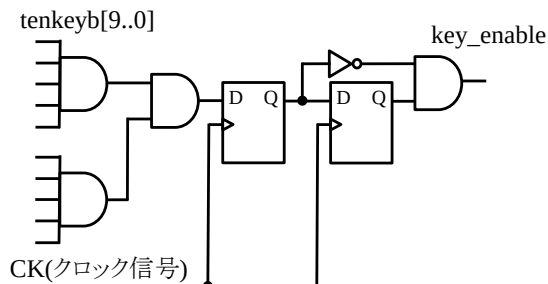


図 2 テンキーの立下りエッジ検出回路の例

ロックが必要であるかを考える。次に、それぞれの機能ブロックを、論理素子を組み合わせで作製する。図 2 に、論理回路の回路例としてテンキーの立下りエッジ検出回路のブロック図の例を示す。AND 回路, NOT 回路, フリップフロップの論理素子を使用して構築している。その他のブロックも同様に論理素子により機能を実現している。それぞれのグループで状態遷移表, 真理値表を作成し, 回路を構築するため, 各機能ブロックの正解は単一ではなく複数存在する。また, 前後の機能ブロックのインターフェースの違いにより, 同じ機能ブロックであっても正常に動作しない事象も発生する。(別の班の成功例を参考に機能ブロックを作成する学生もいるが, 多くの場合は, そのままでは使用できないため, 各グループ毎の工夫が必要になる。)

写真 2 に, ゲーム動作時の写真を示す。表 3 に示すハードウェア仕様を満足するように LED および 7 セグメント LED が配置されていることが判る。また, ルーレットの回転を 7 セグメント LED で回転表示するなど, 各グループ毎によりゲームらしくなるように様々な工夫が施されている。

3.2 学生の取り組みと工夫の例

本実験では, 教員は学生に対して解決手法ほとんど教えない。このため, それに慣れない学生は当初は戸惑うが, ゲーム製作という性質もあり, 意欲的に取り組んでいるようである。「ゲームとして成立すること」という極めてシンプルかつ明確なゴールであることと実験が必修教科である点が意欲的に取り組まざるを得ない状況にしているとも考えられる。また, 「野球」という身近で, 皆ル

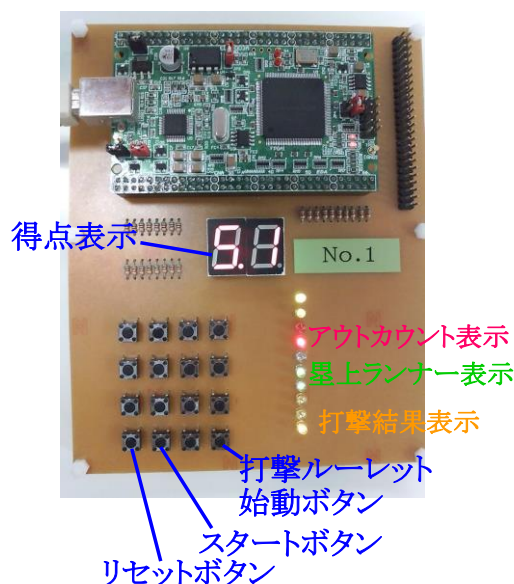


写真 2 ゲーム動作時の写真

ールを把握している対象を題材としている点も能動的に演習をするための一要因になっていると考える。

一方で, 実験の進捗を学生に管理させていることから, いくつかのグループは実験回次の終盤には実験時間を超えて放課後等を利用して課題の製作をすることになる。(過去には, 前期中の課題でありながら, 学年末頃まで放課後に残ったグループもあった。)平成 26 年度は, 13 グループ中 11 グループが期限内にゲームを完成しており, 残る 2 グループも概ね完成している状況であった。(残る 2 グループは後期の放課後等に完成させる。)

本実験は, グループ実習であり, 教員が教えないという点で, グループ内ではもとより, グループを超えて協力し学びあう光景が見られた。特に, 欠陥(バグ)への発見対応に関しては, グループ内でディスカッションした中から新たな対策へ結びつけるなど, グループ学習による相乗効果も見られた。また, 野球(baseball)についてほとんど把握していない留学生が含まれるグループでは, 他のグループ員がそのルールについて懸命に教えている場面があった。この場合は, 学生の負担は大きくなるが, 当たり前だと判ることを丁寧に教える(説明する)というコミュニケーション面での別の効果があると考えられる。

一方で, 終始, グループ内の他のメンバーに頼る学生が散見された。そのうちの多くは仕様書・

設計書の作成で自分の仕事を見つけている状況であった。(特定の学生に負担が偏らないように、レポートに自分が実施した内容を明記させているが、「仕様書・設計書の作成」という形で記載している。)ただし、毎週のレポート作成の中で、グループ内での実施内容・経過は共有せざるを得ず、その連絡過程の中で学びあっているようである。また、上記の観点から、現行の 1 グループ 3 名という人数は最適であると考ええる。

各グループのゲーム製作過程において、最も多くの時間を費やすのがデバッグの作業である。個別の機能ブロックでのシミュレーションは正常に動作している場合でもブロック全体を結合した場合にバグが発生する場合がある。主なバグの種類を下記に挙げる。

- ・ 配線のつなぎ間違い(回路規模が大きいため、煩雑な配線をするとな多くの場合つなぎ間違える。)
- ・ 機能ブロック間の動作の遅延(例えば、出目に対してランナーの表示動作が遅れる。)
- ・ 非同期動作の使用(クロック同期を外し、別の信号を与えるなどの間違い。)
- ・ 出目に対する進塁動作、加點動作の不備
- ・ 論理素子の使用不備(フリップフロップの誤認識 enable, preset のなどの誤認識。)
- ・ CAD ツールの使用不備(非認証文字の使用。)
- ・ 機能ブロックそのものの不備(シミュレーションでの見逃し。)

ほとんどの場合において、バグは 1 つではなく、複数かつ複合的に発生する。本ゲームの製作は、ハードウェア記述言語ではなくデジタル回路の論理素子で構成させているため、回路規模が比較的大きく、つぎはぎの対応ではデバッグは困難である。特に、デジタル回路ではハードウェア記述言語のように部分対応で解決することは学生には困難であり、もぐらたたき状に新たなバグを誘発する可能性がある。多くの学生は、上記の点で苦労するが、次第に想像に頼ったデバッグの方法では収束しないことに気が付き始める。この点に気が付いた学生は、バグの再現性などから要因を論理的に考え始めるようになる。指導する教員は、この点が最も重要で、この実験の本質であり意義であると考えている。

デバッグの手法に関しても各グループで工夫が見られた。一例を下記に示す。

- ・ 全体回路をいくつかに分け、どこの範囲に欠陥があるかを絞っていく。
- ・ ルーレットの回転に関わるクロックを十分に遅くし、必要な出目を出しやすくする。
- ・ 使用していない押しボタンを有効利用し、ルーレットに頼らない処理を進める。(アウトボタン、ヒットボタン等を作成し、再現性を検証する。)

実験後の学生の感想の中に「途中からデバッグが楽しくなった」との記載があった。その学生から詳しく話を聞くと「バグの要因を推理していくことが楽しい」とのことであった。この学生は、論理的に原因を追及していく方法を学習したと考えられる。今後、別の研究開発、設計においても役立つものと期待したい。

4. 今後に向けて

本報告では、東京高専電気工学科で取り組んでいる PBL 教育について、実施内容を取り上げて検証し、以下の結論を得た。

- ・ 本実験は、デジタル回路の実験演習として、野球ゲーム製作の課題を解決するために、意欲的に取り組む内容になっている。
- ・ 論理的に思考し、課題解決に向かう内容である。
- ・ ゲーム機能としての新しい発想のみならず、デバッグ手法などで工夫点が立案できる内容である。
- ・ グループ活動として、学びあうこと・協力しあうことができる内容になっている。

一方で、他のグループ員に頼る学生も散見された。この点については、グループ学習の難しさであり、今後、何らかの改善方法を検討する必要がある。

PBL 教育の課題として、

- (1) 年度を重ねるたびに、過去に実施した事例を真似る案件が増加する。
- (2) 評価が難しい。

という声がある。本実験の場合、全てのグループが同じゴールであり、かつ、「ゲームとして成立すること」という極めてシンプルな命題のため、他のグループから情報を求める学生が発生する。しかし、各グループで全体の回路が異なるため、正

解が無限に存在し、他のグループからの情報のみでは動作しない場合が多い特徴があり、真似は難しいと考える。さらに、ゴールが明確かつシンプルであること、各グループにおいて苦労点・工夫点が異なることで、各グループに対する評価は比較的容易である。一方で、グループ活動の中で個人に対する評価は極めて困難である。また、個々の役割分担の観点からは、現行の1グループ3名という人数は最適であると考ええる。

今後の方針としては、課題の難易度に対する学生の制作力・考察力の推移を考え、学生のアンケート結果などを参考にして更新していきたいと考える。さらに、課題解決に向けて論理的に考えさせる工程は維持しながら、新たなゴールの設定を考えていきたい。また、本実験は授業目的の観点から考慮していないが、本来のFPGAの設計として必要な回路のゲート数、速度を考慮した設定も検討していきたいと考える。

謝辞

本資料の作成にあたり、平成26年度の電気工学科4年生の学生諸君から参考資料として製作物の写真や資料を提供していただきました。厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 伊藤明：「「創造工学」を通じたエンジニアリングデザイン教育の実施」，平成25年度全国高等専門学校・長岡科学技術大学電気系教職員交流集会(2013)
- [2] 「PBL (Project-Based Learning 課題解決型学習) 教育とは」，九州工業大学ホームページ，<http://www.mns.kyutech.ac.jp/~nakao-m/pbl/about.html>

(平成 27年 2月 25日受理)

素子損失のアンバランスを考慮したインバータノイズ低減法の評価

綾野 秀樹* 佐藤 優太** 松井 義弘*

Evaluation of the Noise Reduction Technique in Consideration of the Unbalance of Power Losses Generated in Power Devices

Hideki AYANO* Yuta SATO** Yoshihiro MATSUI*

This paper proposes a technique for reducing a leakage current which flows into a power source as a conductive noise. The proposed technique can also suppress an unbalance of conductive periods of the power devices in the inverter circuit. The feature of this technique is to change the polarity of the additional zero-sequence voltage. The simulation results and experimental results show that the proposed technique can reduce the leakage current by about 30% than the conventional technique.

Keywords: leakage current, zero-sequence voltage, common-mode, EMI, motor

1. 諸言

近年, インバータの普及により, 家電製品や産業機器において省エネルギー化が実現されている。インバータは, 商用交流電力を整流した直流電力に対して, 半導体素子のスイッチング動作によって任意の周波数, 任意の振幅の交流電力に変換するシステムである。インバータにより, 例えばモータ負荷の場合には, 低損失で滑らかな可変速駆動が実現できる。このため, 鉄道や電気自動車などの交通システム, 鉄鋼圧延機産業やエレベータなどの産業システム, エアコンや冷蔵庫などの家電製品など幅広い分野で適用されている。

一方, インバータのスイッチング動作時には各相の出力電圧が急峻に変化する。この場合に発生する電磁ノイズの抑制が課題となっている^{(1)~(6)}。例えば, 高周波数の漏えい電流として電源などに漏えいし, 漏電ブレーカや自機器・周辺機器の誤動作を誘発する恐れがある。

筆者らは先に, 最もノイズが大きくなる零速度領域の場合(昇降機の駆動開始や停止, 電車駆動時の後退起動抑制および電気自動車の坂道発進など, 極低速での高トルク出力に相当する条件)を対象として, 漏えい電流を低減する手法を提案した^{(7)~(10)}。また, モータ駆動条件まで適用範囲を広げた直流零相電圧重畳方式を提案し, 漏えい電流を低減できることを示した⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。電力変換器が発生する電圧成分は, 磁束電圧成分, トルク電圧成分, 零相電圧成分に分解することができ, それぞれは直交する⁽¹³⁾。先に提案した手法は, 零相電圧を有

効に利用する点が特徴であり, モータの駆動特性に影響を与えない。さらに, ノイズ抑制部品などハードウェアを追加することなく, ソフトウェア処理のみで漏えい電流の低減が可能になる。一方で, 直流零相電圧重畳方式は, インバータを構成するスイッチ素子の ON 時間にアンバランスが発生するため, 発生する素子損失にばらつきが発生する恐れがあった。

本報告では, スwitch素子の導通時間のアンバランスを抑制し, かつ, 漏えい電流を低減できる制御方式を提案する。さらに, シミュレーションによる有効性の確認, および, 実機による検証を実施した結果を示す。

2. 実験システムの構成

Fig. 1 に実験システムのシステム構成を示す。Fig. 1 では, 電源とダイオード整流器の間にコモンモードチョーク L_c を接続する。さらに, コモンモードチョーク L_c とダイオード整流器の間の各相に, 対地コンデンサとして C_{ga} を星型接続し, その中性点とグラウンドの間を C_{gb} を介して接続する。インバータの出力には配線インダクタンス L_l を介してモータを接続する。さらに, インバータのスイッチング周波数は 10 kHz として駆動させる。負荷として使用する誘導モータは, 定格電圧が線間電圧で 200V, 定格速度は 1500rpm, 極数は 4 極である。このため, 定格運転時のインバータの出力周波数は 50Hz となる。本論文では誘導モータを V/f 一定制御で制御する。

*電気工学科 **2013 年度電気工学科卒業生(現 東芝三菱電機産業システム株式会社)

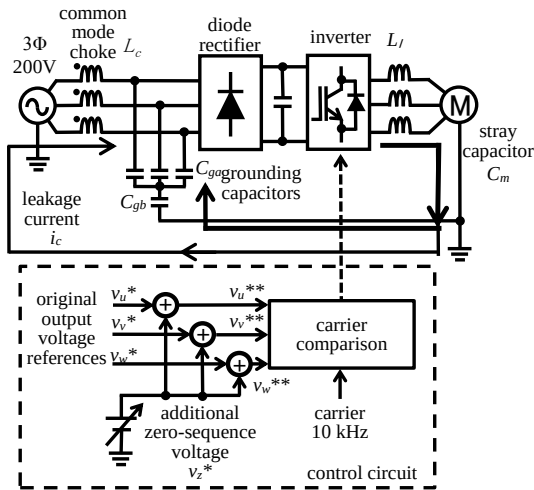


Fig.1 System configuration.

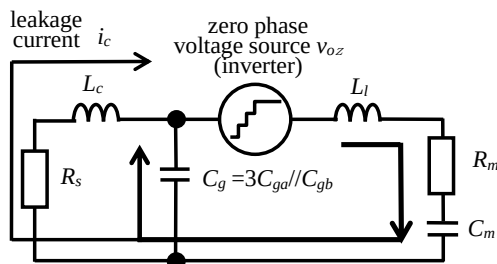


Fig.2 Zero-sequence equivalent circuit.

インバータのスイッチングに起因して発生する漏えい電流は、モータの巻線-フレーム間に存在する浮遊容量 C_m を介してグラウンドに漏えいする⁽¹⁾⁽¹⁴⁾。この漏えい電流は、周辺機器を経由して電源を流れる経路と対地コンデンサを流れる経路がある。漏えい電流はスイッチング周波数以上の高周波数となるため、コモンモードチョークを経由する電源側の経路よりも対地コンデンサを通る経路の方がインピーダンスは低くなる。このため、Fig. 1 では、漏えい電流は主に対地コンデンサ側に流れ、周辺機器への悪影響を低減できる。本研究では、電源側に流れる漏えい電流 i_c の更なる低減を目的としており、出力電圧指令値に零相成分の指令値を重畳する点が特徴である。Fig. 1 では、モータの回転指令に基づき、出力電圧指令値と零相成分を決定する。この零相成分は各出力相電圧に対して同時に同量を与える電圧であり、線間電圧を考えた場合には相殺されるため、モータ駆動に対して影響を与えない。

Fig. 2 に Fig. 1 のシステムの等価回路を示す。ここで、 R_m はモータ等の負荷側の抵抗成分であり、 R_s は電源側の抵抗成分である。インバータは零相電圧の電圧源として表され、零相電流は L_l 、

Table 1 Parameters in equivalent circuit.

cable inductance	L_l	$8.2[\mu\text{H}]$
load resistance (zero-sequence)	R_m	$25[\Omega]$
stray capacitor	C_m	$2.9[\text{nF}]$
common mode choke's inductance	L_c	$0.79[\text{mH}]$
power source resistance	R_s	$3[\Omega]$
grounding capacitor	C_{ga}	$0.68[\mu\text{F}]$
	C_{gb}	$0.47[\mu\text{F}]$

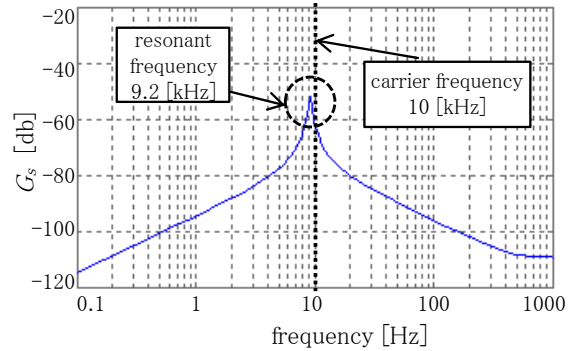


Fig.3 Admittance gain of the leakage current.

R_m 、 C_m を介してグラウンドに流れる。この零相電流は、 C_{ga} と C_{gb} の直列接続で表される対地コンデンサ C_g を流れる経路と電源側の L_c 、 R_s を流れる経路からインバータへ循環する。Table 1 に等価回路の定数を示す。ここで、 L_c 、 C_g 、 L_l 、 C_m は、実機評価システムにおいて個別に実測した値であり、 R_s および R_m は、数 kW クラスのモータを想定して設定した値である。

Fig. 3 に、Fig. 2 の漏えい電流 i_c とインバータ出力零相電圧 v_{oz} の比(以下漏えい電流ゲイン G_s と呼称する。)の特性を示す。Fig. 3 は共振点を持つ特性となり、共振周波数 f_c は、コモンモードチョーク L_c と対地コンデンサ C_g に依存する値になる。Table 1 の条件では共振周波数は 9.2 kHz となる。この共振周波数は、キャリア周波数 (10 kHz) よりも低くなるようにコモンモードチョーク L_c と対地コンデンサ C_g の値を設定している。これにより、キャリア周波数の高調波次数が高くなるほど漏えい電流ゲイン G_s は小さくなる。

3. 直流零相電圧重畳方式とその課題

Fig. 3 より、漏えい電流を低減するためには、出力零相電圧 v_{oz} の周波数成分のうち、特に漏えい電流ゲイン G_s の大きい共振点付近の周波数成分を低下させることが有効である。つまり、 v_{oz} の

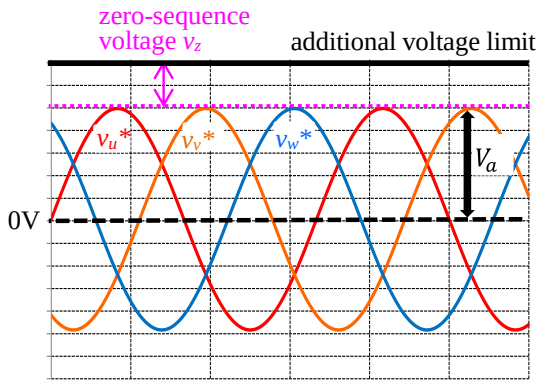
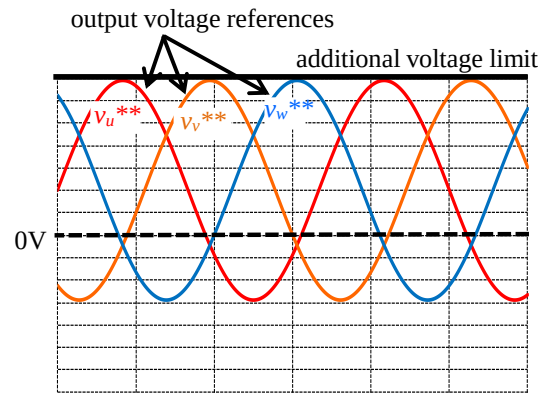


Fig.4 Relation between the original voltage reference and v_z with additional DC zero-sequence voltage technique.

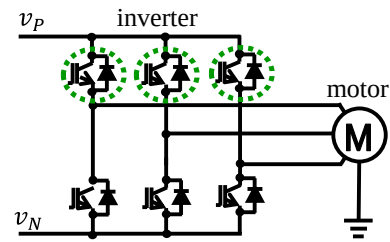
周波数成分には、キャリア周波数 10 kHz の高調波成分が含有されるため、その基本波周波数である 10 kHz の成分を低下させればよい。筆者らは先に、モータの駆動指令電圧に対して直流成分の零相成分を重畳することにより、漏えい電流を低減する方法を提案した^{(7)~(10)}。(以後、この手法を直流零相電圧重畳方式と呼ぶ。)この手法を用いて、実測評価をした結果、直流零相電圧重畳方式はモータの駆動に影響を与えることなく、漏えい電流を 160mA から 110mA にできること示した。

Fig. 4 に、直流零相電圧重畳方式の電圧指令値 v_u^* , v_v^* , v_w^* と零相電圧指令値 v_z^* の関係を示す。ここでの電圧指令値は、回転指令から演算した元々の値である。この方式では、零相電圧を正方向のみの直流電圧として指令限界値 $100\sqrt{2}$ V と出力電圧指令の振幅最大値の差分を各相の出力電圧指令に重畳する。

Fig. 5 に、出力指令波形とインバータ主回路のスイッチ素子の導通時間の関係を示す。Fig. 5(a) の零相電圧重畳後の出力相電圧指令値は、オフセットを有し最大値が重畳限界値と一致する波形となる。この場合には、正極側の電圧の出力期間が大きくなり、Fig. 5(b) のインバータを構成する上側スイッチ素子の方が下側スイッチ素子よりも導通割合が大きくなる。このため、上下スイッチ素子に印加される電圧にアンバランスが発生し、一方のスイッチ素子に電力損失が集中する。この結果、一方のスイッチ素子の寿命低下をもたらす恐れがある。



(a) output voltage references



(b) inverter circuit

Fig.5 Output voltage references and inverter circuit model.

4. アンバランス抑制方式の提案

3 章での直流零相電圧重畳方式の課題を踏まえ、上下スイッチ素子の導通時間のアンバランスを抑制し、かつ、漏えい電流を低減する制御方式を提案する。提案方式では、出力相電圧指令値の中間電圧 v_m の符号に着目して零相電圧指令値 v_z^* を演算する。特に、安定したモータの駆動を実現できる範囲で零相電圧の重畳量が大きくなるように、以下のように演算する。

$v_m \geq 0$ の場合、

$$v_z^* = (100\sqrt{2} - V_r^{\wedge}) \times 0.9 \quad (1)$$

$v_m < 0$ の場合、

$$v_z^* = -(100\sqrt{2} - V_r^{\wedge}) \times 0.9 \quad (2)$$

ただし、

$$V_r^{\wedge} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_r \quad (3)$$

$$V_r = 3.27 \cdot f \quad (4)$$

である。提案するアンバランス抑制方式では、直流零相電圧重畳方式よりも零相電圧の重畳量を増加できる点が特徴である。つまり、直流零相電圧重畳方式では、零相電圧重畳量は指令限界値 $100\sqrt{2}$ V と出力電圧指令の振幅最大値 V_r の差分であるに対し、アンバランス抑制方式では、

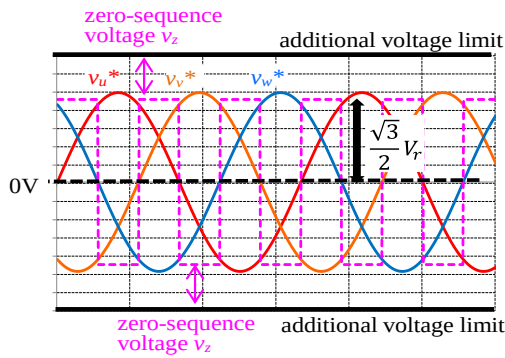


Fig.6 Relation between the original voltage reference and v_z with proposed technique.

(1)~(3)式に示すように指令限界値と $\sqrt{3}/2V_r$ の差分量まで重畳できる。ただし、本評価では、(1)(2)式のように、安全率 0.9 を乗算し、零相電圧指令値 v_z^* を導出している。また、(4)式の 3.27 は使用した誘導モータの V/f 定数を表す。この方式により、零相電圧の重畳割合が等しくなり、上下スイッチ素子の ON 時間のアンバランスを抑制できる。

Fig. 6 に、アンバランス抑制方式における、相電圧指令値と零相電圧指令値の関係を示す。アンバランス抑制方式では、正方向と負方向に零相電圧を切り替えて重畳する。このため、Fig. 6 のように、出力電圧指令に重畳する零相電圧は矩形波状の波形となる。

5. シミュレーション結果

提案方式の有効性を確認するために、回路シミュレータ PSIM を使用し、漏えい電流波形のシミュレーション評価を実施した。Fig. 7 に、漏えい電流のシミュレーション結果を示す。さらに Fig. 8, Fig. 9 に、Fig. 7 の結果において代表的な周波数指令(0Hz, 27Hz, 43.3Hz)での拡大波形を示す。Fig. 7 (a)は、インバータの回転周波数指令の特性である。0.3 秒からモータを起動し、5.3 秒でモータ最大回転になるように指令を与える。つまり、5 秒間で最大周波数が最大で 43.3Hz に達するように設定した。

Fig. 7 (b)に、零相電圧を重畳しない従来方式の漏えい電流波形を示す。従来方式の場合、漏えい電流はモータ零速度時に最大となり、振幅最大値は 156mA となる。また、漏えい電流は、インバ

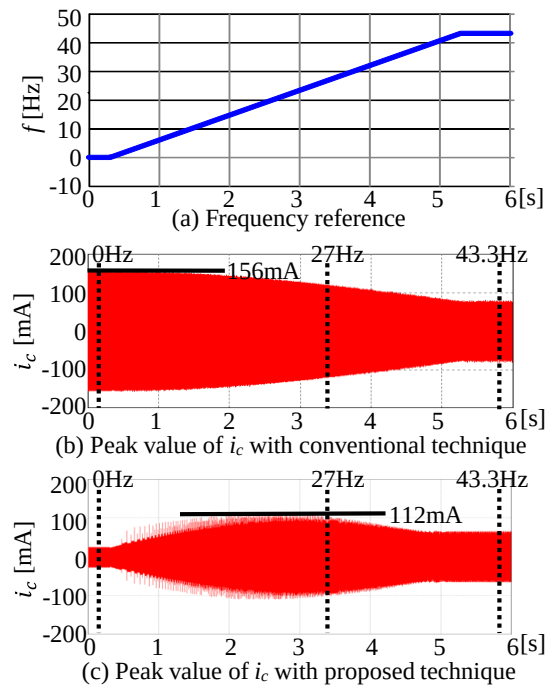
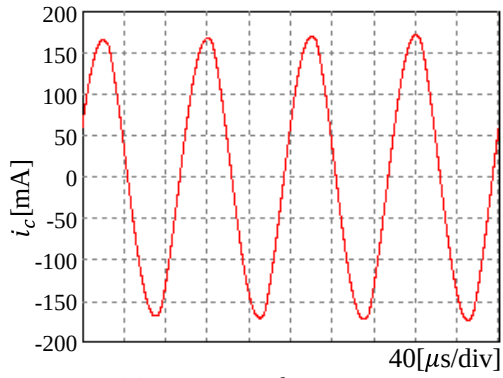


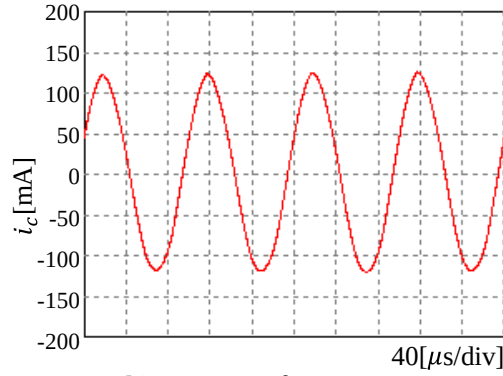
Fig.7 Simulation results.

ータの周波数指令の増加に伴い減少する。これは周波数指令の増加に伴って、インバータの各相のスイッチ素子は同時にスイッチングすることがなくなるため、インバータが出力する零相電圧の変化率 dV/dt が小さくなることによる。Fig. 8 (c)より、モータ最大回転時の場合、漏えい電流の振幅最大値は 82mA となる。なお、Fig. 8 より、漏えい電流の波形形状はいずれもほぼ正弦波となる。

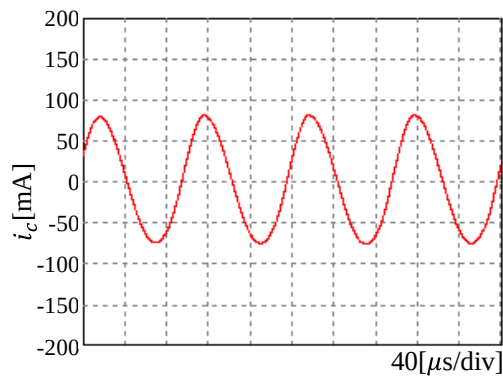
Fig. 7 (c)に、提案するアンバランス抑制方式を用いた場合の漏えい電流波形を示す。Fig. 9 (a)より、モータ低速回転時には零相電圧の重畳量が大きくなるため、振幅最大値は 22mA となり、従来方式と比較すると漏えい電流は大幅に減少できる。一方、周波数指令の増加に伴って、零相電圧の重畳量が小さくなるため、漏えい電流は一旦増加する。Fig. 9(b) より、漏えい電流は、周波数が 27Hz の場合に最大値 112mA となる。さらに周波数指令が増加した場合、インバータの各相はスイッチングが同時に発生しなくなるため、漏えい電流は低減する。Fig. 7 より、提案方式は従来方式に対して約 28%の低減効果を確認できる。また、直流零相電圧重畳方式の振幅最大値は 107mA であり、同程度の漏えい電流の低減が確認できた。



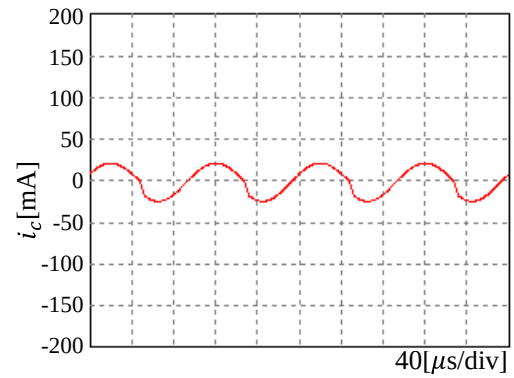
(a) inverter frequency: 0Hz



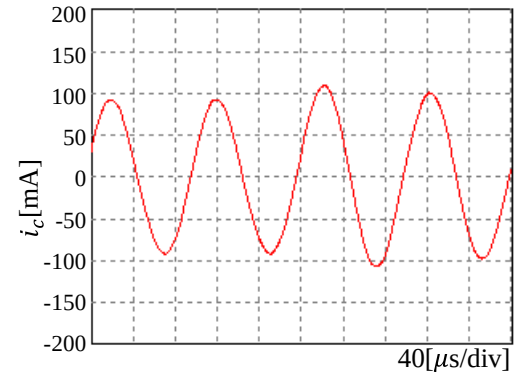
(b) inverter frequency: 27Hz



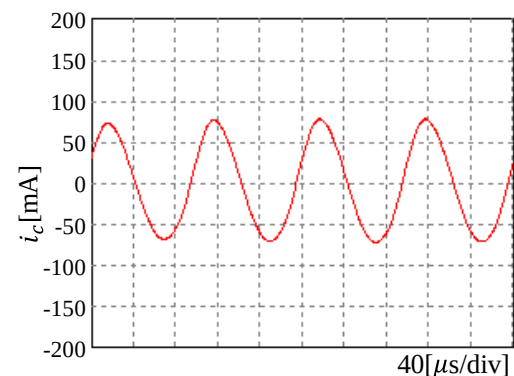
(c) inverter frequency: 43.3Hz

Fig. 8 Enlarged i_c waveforms in Fig. 7(b).


(a) inverter frequency: 0Hz



(b) inverter frequency: 27Hz



(c) inverter frequency: 43.3Hz

Fig. 9 Enlarged i_c waveforms in Fig. 7(c).

6. 実測結果

Fig. 10 に、零相電圧を重畳しない従来方式の漏えい電流の実測結果を示す。漏えい電流はモータ零速度時に最大値約 160mA となり、周波数指令の増加に伴い減少する。また漏えい電流波形は、いずれの周波数においても正弦波が出力されている。Fig. 10 の波形は、Fig. 8 のシミュレーション波形と、ほぼ一致していることが確認できる。

Fig. 11 に、提案するアンバランス抑制方式での漏えい電流の実測結果を示す。Fig. 11 (a)のモータ低速回転時には、零相電圧の重畳量が大きくなるため、漏えい電流は 41mA となり、従来方

式と比較すると漏えい電流は大幅に減少している。この場合の漏えい電流波形は、正負が非対称のひずみ波形となる。これは零相電圧を重畳したことにより、偶数次の高調波が発生するためである。Fig. 11 (b)より、周波数が 27Hz の場合に最大値 117mA となる。さらに周波数指令が増加した場合、インバータの各相はスイッチングが同時に発生しなくなるため、Fig. 11 (c)のように漏えい電流は低減する。Fig. 11 の波形はFig. 9 のシミュレーション波形とほぼ一致していることが確認できる。実測結果において、提案方式と従来方式を比較すると約 28%の低減効果を確認できる。

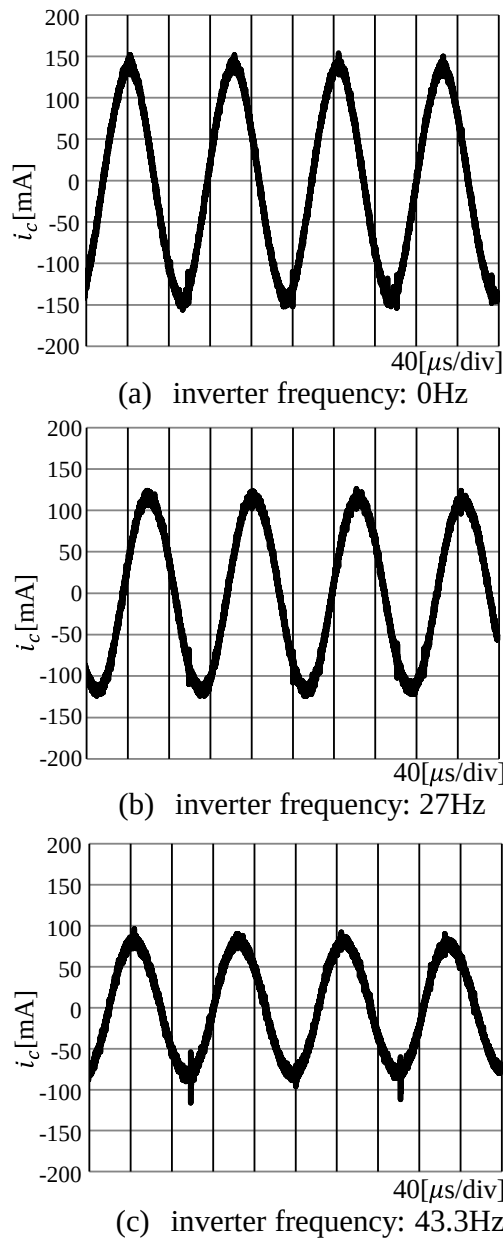


Fig. 10 Experimental results with conventional technique.

また、直流零相電圧重畳方式の振幅最大値は 110mA であり、同程度の漏えい電流の低減が確認できた。これにより、シミュレーションの妥当性を確認でき、かつ提案方式の有効性を確認できた。

Fig. 12 に、周波数指令が 10Hz の場合の漏えい電流の実測波形を示す。Fig. 12 より、周波数指令が 10Hz の場合は約 60Hz 毎に振幅の脈動が発生することが確認できる。この脈動は零相電圧の切り替わりに依存して発生する。この課題は、漏えい電流の振幅が最大となる周波数指令 27Hz の場合でも発生しており、シミュレーションでも

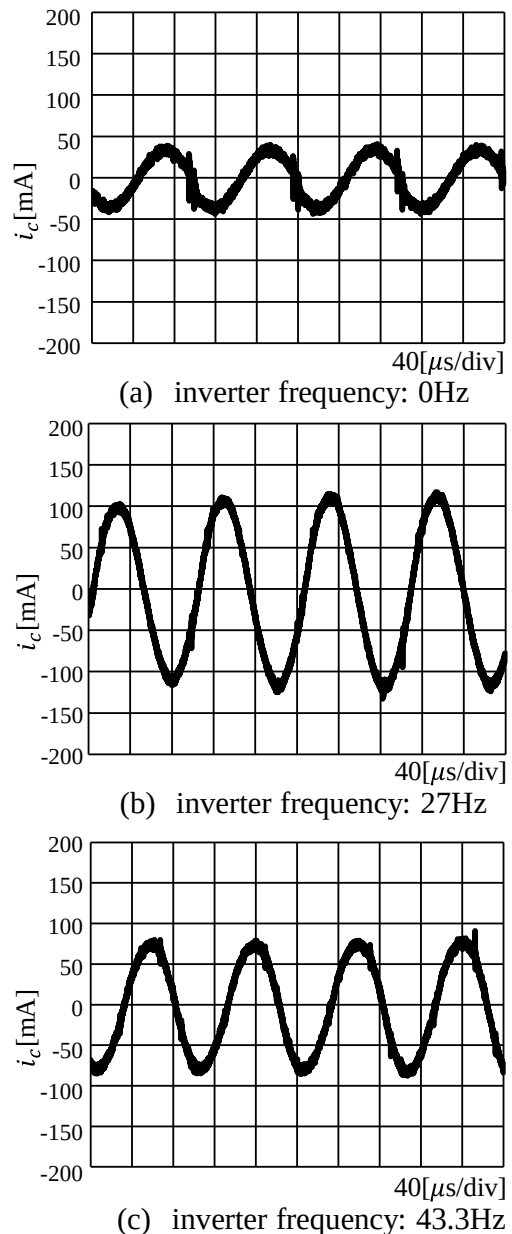


Fig. 11 Experimental results with proposed technique.

確認されている。Fig. 12 より、脈動時を除けば漏えい電流の振幅はより小さくなる。つまり、この切り替えによる脈動発生課題を解決することで、さらなる漏えい電流低減効果が見込まれる。

7. まとめ

本報告では、スイッチ素子の導通時間のアンバランスを抑制し、かつ、漏えい電流を低減できる制御方式を提案した。さらに、シミュレーションによる有効性の確認、実機による検証を実施した。以下に結論を示す。

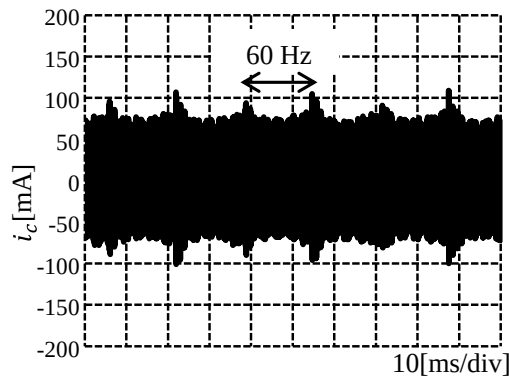


Fig.12 Ripple voltages with proposed technique.

- 三相出力電圧指令の中間電圧に着目し、その符号に基づいて零相電圧を切り替える制御方式を提案した。この方式により、インバータを構成する上下スイッチ素子の電力損失のばらつきを抑制できる。
- 提案するアンバランス抑制方式において実機検証を実施した結果、従来方式で約 160 mA 流れていた漏えい電流の振幅最大値を 117 mA まで低減できることを確認した。これは、直流零相電圧重畳方式の場合(110mA)と同程度の漏えい電流低減効果を確認である。これにより、シミュレーションの妥当性を確認でき、かつ提案方式の有効性を確認できた。
- 提案するアンバランス抑制方式では、相電圧の切り替わりに依存して漏えい電流波形に周期的な脈動が発生する。この課題を解決することにより、さらなる漏えい電流の低減が可能になると考える。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金基盤研究(C)「零相電圧を有効利用した電力変換器のノイズ低減技術の研究」(研究課題番号：25420275)の援助により行われた。

参考文献

- (1) 小笠原悟司・藤田英明・赤木泰文：「電圧形 PWM インバータが発生する高周波漏れ電流のモデリングと理論解析」，電学論 D，115，1，pp. 77-83 (1995-1)
- (2) 清水敏久：「EMI 抑制法の最新技術動向」，平 22 電学産業応用部大，Vol. 1，No. 1-02-3，p. 15-18 (2010)

- (3) P. S. Chen, "Effective EMI Filter Design Method for Three-Phase Inverter Based Upon Software Noise Separation," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 25, no. 11, pp. 2797-2806, 2010.
- (4) M. L. Heldwein and J. W. Kolar: "Impact of EMC Filters on the Power Density of Modern Three-Phase PWM Converters," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 24, No. 6, p. 1577-1588 (2009)
- (5) 武田順二・嶋根一夫・武田享悦・松岡寛晃・餅川宏・津田純一「エレベータにおける漏れ電流低減方法の提案」日本機械学会 技術講演会講演論文集，pp. 23-26 (2009)
- (6) 森本雅之：「統合接地システムにおける PWM インバータの漏洩電流の低減」，平 20 電学産業応用部大，Vol. 1，No. 1-67，pp. 315-320 (2008)
- (7) 綾野秀樹・松井義弘：「零相成分を利用した漏えい電流抑制法に関する検討」，平 23 電学産業応用部大，Vol. 1，No. 1-158，pp. 695-698 (2011)
- (8) 綾野秀樹・佐藤優貴・松井義弘：「零相電圧を利用した漏えい電流低減法の提案と検証」，電気学会論文誌 D，132 巻，12 号，pp. 1141-1148 (2012)
- (9) 綾野秀樹・佐藤優貴・松井義弘：「インバータが発生する伝導性ノイズの低減法とその評価システムの構築」東京工業高等専門学校研究報告書，44 号 (1)，pp. 107-112 (2012)
- (10) 綾野秀樹・佐藤優貴・松井義弘：「対地コンデンサの位置による漏えい電流の変化とその要因」，電気学会論文誌 D，133 巻，11 号，pp. 107-112，pp. 1048-1056 (2013)
- (11) 綾野秀樹，村上昂平，松井義弘：「モータの駆動領域におけるインバータノイズ低減法のシミュレーション評価」東京工業高等専門学校研究報告書，45 号 (2)，pp. 57-62 (2013)
- (12) H. Ayano, K. Murakami, Y. Matsui: "A Novel Technique for Reducing Leakage Current by Application of Zero-Sequence Voltage," The 2014 International Power Electronics Conference -ECCE ASIA-(IPEC 2014)，p. 2385-2391 (2014)
- (13) 杉本英彦：「AC サーボシステムの理論と設計の実際」，総合電子出版社，1990
- (14) A. V. Vouanne, P. Enjiti and W. Gray, "Application issues for PWM adjustable speed AC motor drives," IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 2, No. 5, p. 10-18 (1996)

(平成 27 年 2 月 25 日受理)

フォトリソグラフィを用いた MOEMS 技術の教材開発 —第 4 報, ダイアフラム作製プロセスの基礎特性の評価—

伊藤浩*, 新國広幸*

Development of Teaching Materials for MOEMS Technology by Using Photolithography —4th Report, Evaluation of Basic Characteristics of Diaphragm Fabrication Process—

Hiroshi ITO*, Hiroyuki NIKKUNI*

In this paper, etching technology for diaphragms as 3-D microstructures was examined experimentally to develop teaching materials for MOEMS. The fundamental experiments on the anisotropic etching using single-crystal silicon and the isotropic etching using amorphous silicon (a-Si) were carried out. In the anisotropic etching of single-crystal silicon, the temperature dependences in the etching rates of silicon and SiO₂ as mask were clarified, so it is possible to know the etching rate in arbitrary temperature. Also, the etching rate of the sputtered a-Si film using the KOH solution was obtained. It is indicated that the a-Si etching rate was similar to the value of the anisotropic etching for Si (110) plane. From these results, the MEMS process using the a-Si/SiO₂/c-Si substrate fabricated by the sputtering method was evaluated.

(Keywords: MOEMS, diaphragm, etching, KOH solution)

1. はじめに

MOEMS とは光・電気・機械マイクロシステムのことで、電子回路と光学的・機械的構造が一つの基板上で組み合わせり、高機能な機能性センサが可能となる融合複合技術である。この MOEMS 技術は広範囲な学際領域に跨る技術であることから、電気電子系、機械系、物質系の工学研究分野に関連する学科を横断した研究が進められている。また、プロセス技術ではマイクロ領域での加工を可能とするフォトリソグラフィ技術が用いられる。フォトリソグラフィ技術は Si 集積回路技術が牽引役として高度に発展してきているが、MOEMS 技術への応用に関しては多くの課題があり、現在も研究開発が進められている。

このようなことから、本研究では将来重要な技術となる MOEMS 技術の実験演習を行うための教材開発を目的に、基礎研究を継続して行っている。第 1 報では、フォトリソグラフィに関する基礎データの収集を主として行い⁽¹⁾、第 2 報では、光導波路、物性評価デバイスシステムの作製と評価を行い、基礎データを構築した⁽²⁾。第 3 報では、光導波路に機械的構造体であるダイアフラム構造を付与させた MOEMS 圧力センサ（光導波

型圧力センサ）の設計指針を示し、また、ネガ型フォトレジストを利用したフォトリソグラフィの基礎データを報告してきた⁽³⁾。

本研究報告では、MEMS 加工の中でのウェットエッチングによる三次元微細構造の作製技術に関する基礎データの収集を行う。単結晶 Si を用いた異方性エッチングと非晶質 Si (a-Si) を用いた等方性エッチングについて実験を行い、MEMS 圧力センサの教材開発における基礎的データとする。

2. 単結晶 Si の KOH による異方性エッチング

2. 1 概要

異方性エッチングは、エッチング速度が基板の結晶方位によって異なる。エッチング液、基板の結晶方位を組み合わせることで、複雑な微細構造体を作製できる。単結晶 Si の(100)面方位の基板を利用すると、図 2-1 のようなダイアフラム構造を形成できる。(100)面のエッチング速度に比べて(111)面のエッチング速度が極めて小さいため、ダイアフラム構造が作製される。

エッチングには、アルカリ性の水溶液が用いられ、水酸化カリウム(KOH)水溶液と水酸化テトラメチルアンモニウム(TMAH)水溶液がよく使われ

* 電気工学科

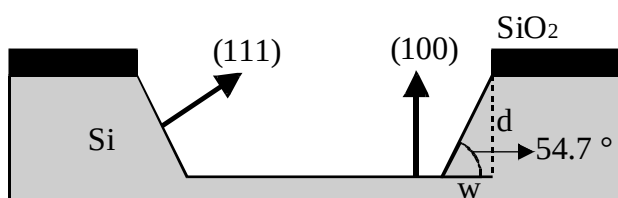
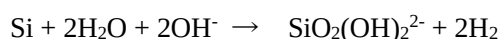


図 2-1 異方性エッチングにて作製された Si ダイアフラム

る。本取組みでは、加工の再現性、均一性に優れた KOH 水溶液を利用した Si 異方性エッチングの基礎データの収集を行う。KOH 水溶液と Si の反応式は次式で表される。



エッチング速度はエッチング液の温度に依存することが知られており、本取組みでは、エッチング速度の温度依存性を実験的に考察することにした。また、エッチング時のマスクとしては SiO₂ 膜を利用するが、SiO₂ 膜も少なからず KOH 水溶液によりエッチングされることが予想されるため、SiO₂ 膜におけるエッチング速度についても温度との関係を考察することにした。

2. 2 実験方法

ダイアフラムの作製プロセスは下記の 4 工程からなる。

- ①洗淨した単結晶 Si 上に、マスクとしての SiO₂ 膜をスパッタリング法により成膜する。SiO₂ 膜厚は 1.5 μm とした。
- ②SiO₂ 膜上に感光材としてのレジストを塗布し、フォトリソグラフィ法により、レジスト上にダイアフラムパターンを転写する。
- ③バッファードフッ酸により、ダイアフラム部の SiO₂ をエッチングする。
- ④KOH 水溶液により、Si の異方性エッチングを行う。

なお、エッチング温度は 60 °C、70 °C、80 °C の 3 条件の場合について、各々のエッチング速度を求めた。エッチング速度を求めるために、各温度でエッチング時間を変えた実験を行った。60 °C と 70 °C の場合は、60 分、120 分、180 分でエッチングを行い、80 °C では 30 分、60 分、90 分でエッチングした。また、KOH の濃度は、式田らによって明らかにされている表面粗さが少なくなる 34 wt.% とした⁽⁴⁾。

エッチング後、Si のエッチング深さ d (図 2-1 を参照) は、(111) 面の角度が基板平面から 54.7° で一定であることから、(111) 面の横幅 w を光学顕微鏡により測定し、下記の(1)式より求めた。

$$d = w \tan(54.7) \quad (1)$$

また、SiO₂ 膜のエッチング量は、エッチング後、基板をへき開してダイアフラム端面をつくり、SEM により SiO₂ 膜厚の変化を計測することで求めた。

2. 3 実験結果

図 2-2 に 70 °C で 60 分エッチングした Si 基板断面の SEM 画像を示す。(111) 面が 54.7° で形成されていることが確認でき、比較的フラットなエッチング面が観測された。

図 2-3 に KOH による Si エッチング量と時間の関係結果を示す。各々の温度において、時間に比例してエッチング量が大きくなっていることが分かる。また、直線の傾きがエッチング速度を表しており、最小 2 乗法より、エッチング速度は 60 °C で 0.36 μm/min、70 °C で 0.64 μm/min、80 °C で 1.2 μm/min と算出された。温度が 10 °C 上がるごとにエッチング速度はおおよそ 2 倍になることが分かった。

次に各々の温度でのエッチング速度を基に、アレニウスプロットを作成した。結果を図 2-4 に示す。これは式(2)のアレニウス式で近似できる。 k 、 T はそれぞれエッチング速度、絶対温度を表

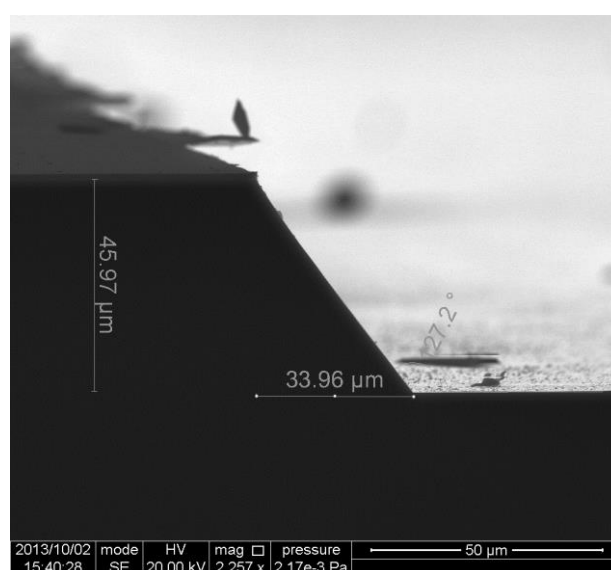


図 2-2 異方性エッチング Si 断面の SEM 画像

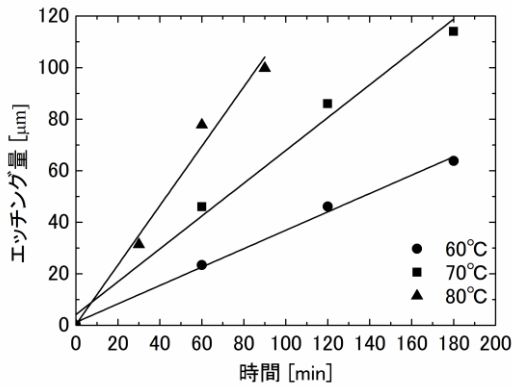


図 2-3 Si エッチング量と時間の関係

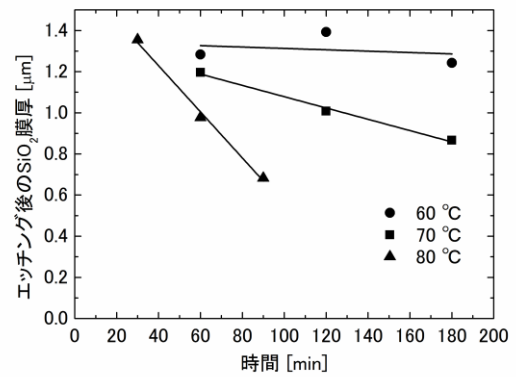
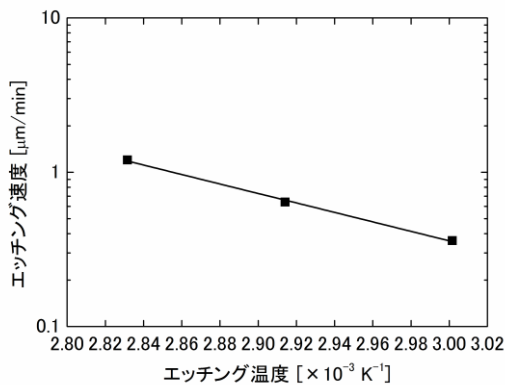
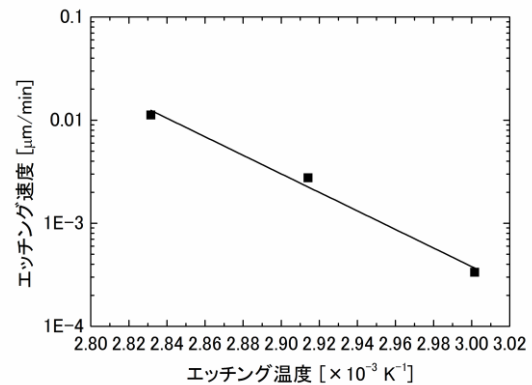
図 2-5 エッチング後の SiO₂ 膜厚と時間の関係

図 2-4 Si エッチング速度と水溶液温度の関係

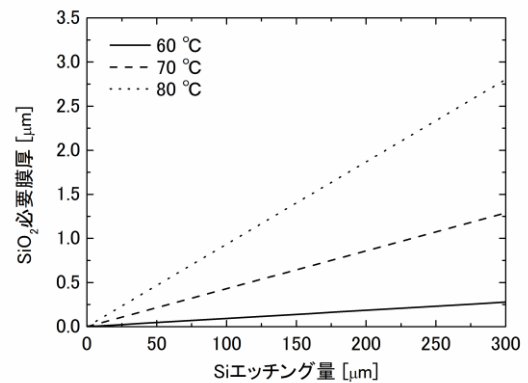
図 2-6 SiO₂ エッチング速度と水溶液温度の関係

している。この関係式から、任意の温度でのエッチング速度を導出することができる。また、この式より活性化エネルギーが 0.61 eV であることが分かった。

$$k = 6 \times 10^8 \exp\left(\frac{-7077}{T}\right) \quad (2)$$

図 2-5 にエッチング後の SiO₂ の残り膜厚を SEM で測定した結果を示す。エッチング時間が増えていくにつれて、SiO₂ 膜厚が減っていることが分かる。直線の傾きの絶対値がエッチング速度を表しており、最小 2 乗法によりエッチング速度は 60 °C で $0.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{min}$ 、70 °C で $2.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{min}$ 、80 °C で $11.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{min}$ と算出され、Si のエッチング速度の 1/100 以下だった。各々の温度でのエッチング速度を基に、アレニウスプロットを作成した(図 2-6)。この関係式から、任意の温度でのエッチング速度を導出することができる。また、活性化エネルギーが 1.78 eV であることが分かった。

実験より、SiO₂ 膜もエッチングされることが確認された。SiO₂ 膜が薄いとエッチング時になくなってしまい、マスクとしての機能を果たせな

図 2-7 Si エッチング量と SiO₂ 必要膜厚の関係

くなる。そこで、実験的に求めた Si と SiO₂ 膜のエッチング速度を基に、Si エッチング量とそれを実現するのに必要な SiO₂ 膜厚の関係を図 2-7 のように導きだした。例えば、80 °C で 200 μm の Si をエッチングする際には、SiO₂ が 1.9 μm 以上必要であることがわかる。ただし、SiO₂ の基板との密着性が悪いと、この条件を満たしていても薄膜が剥がれてしまうため、SiO₂ 膜の密着性を十分強くする必要がある。

3. KOH による a-Si の等方性エッチング

3. 1 概要

一般的に、MEMS を作製する基板として、Si ウエハ上に SiO_2 層と単結晶 Si 層が積層した SOI (Silicon-On-Insulator) 基板が使われる。Si 層が単結晶であることから結晶方向に依存した異方性エッチングが可能であり、微細構造を作製するのに有効である。しかし、SOI 基板は通常の Si ウエハと比べ約 10 倍程度高価な基板であり、MEMS センサのコスト面で問題である。また、作製が容易な非晶質 Si 層を用いた等方性エッチングによる微細加工プロセスを設計・構築できれば、安価に MEMS 素子が作製可能となり、将来の応用に向けて重要な技術となる。

そこで、本報告では非晶質 Si 層を用いた SOI 基板を成膜プロセスにより作製し、等方性エッチングによる微細加工特性を評価する。a-Si 層及び SiO_2 層は、スパッタリング法により作製する。このスパッタリング法は工業的に優れ、安価に良質な薄膜を作製することができる。また、これらの評価結果を基に、MEMS 作製における課題等を検討する。

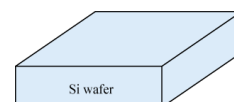
3. 2 実験方法

図 3-1 に現在考えている微細構造の作製手順を示す。①Si ウエハを洗浄する。②Si 基板上に SiO_2 および a-Si を成膜し、a-Si/ SiO_2 /c-Si 基板を作製する。③フォトリソグラフィにより SiO_2 (エッチング保護膜) のパターン形成をする。④KOH 水溶液による等方性エッチングで a-Si 層をパターン形状に加工する。⑤BHF (バッファードフッ酸) により上層 SiO_2 を削除し、同時にバッファ層 SiO_2 を溶解させ、中空構造を作製する。この MEMS 作製プロセスに向け、以下の基礎実験を行う。

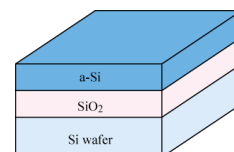
a. SOI (a-Si/ SiO_2 /c-Si) 基板の作製

SOI (a-Si/ SiO_2 /c-Si) 基板の作製には、2 種類のスパッタリング装置 (高周波スパッタ法: ULVAC SH350, DC スパッタ法: 芝浦メカトロニクス CFS-4ES) を用いた。 SiO_2 のスパッタ条件は $1\mu\text{m}$ の膜厚とするため 700W, 2 時間で行った。a-Si のスパッタ条件は膜質の変化、成膜速度を調べるため 300W 及び、400W の 2 つのスパッタ出力で行い、すべて 80 分で作製した。成膜中の基板温度はすべて室温である。

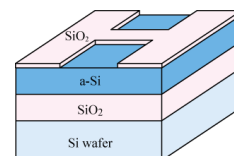
①Si ウエハの基板洗浄
超音波洗浄 (アセトン, セミクリーン)



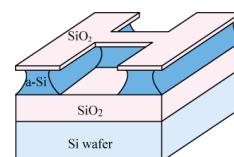
②a-Si/ SiO_2 /c-Si 基板作製
a-Si, SiO_2 膜のスパッタ成膜
設計膜厚: $1\mu\text{m}$



③フォトリソグラフィによるパターン形成
 SiO_2 保護膜: 膜厚 250nm
 SiO_2 エッチング: BHF, 5 分



④KOH による a-Si の等方性エッチング
条件: KOH34%, 室温, 5 分



⑤BHF による SiO_2 のエッチング
条件: BHF37%, 室温, 10 分

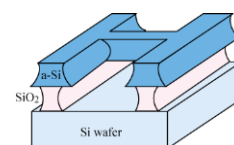


図 3-1 中空構造プロセスの作製手順

b. a-Si 膜上の SiO_2 膜のエッチング特性

バッファードフッ酸 BHF 水溶液の濃度は 37% とし、a-Si 膜上に SiO_2 層を成膜し、フォトリソグラフィによりパターンニングしたレジスト保護膜を形成した試料を作製した。BHF の温度は室温とし、浸漬時間を 2, 4, 7, 10, 15 分とした。

c. KOH による a-Si 膜のエッチング特性

水酸化カリウム KOH 水溶液は、濃度 34% とし、液体温度は室温で行った。a-Si のエッチング実験では、Si ウエハ上に Si 膜を成膜し、保護膜の SiO_2 で半面を覆った試料を作製した。KOH の浸漬時間は 1, 3, 5, 10 分とし、エッチング量は表面粗さ計を用いて測定した。

d. 中空構造プロセスの検証実験

本実験により作製した SOI 基板を用いて、橋形微細構造をパターンニングし、図 3-1 の手順により作製を試みた。KOH による a-Si 層の等方性エッチングは室温で 5 分、BHF による SiO_2 層のエッチングは室温、10 分で行った。

3. 3 実験結果と考察

a. SOI (a-Si/SiO₂/c-Si) 基板の作製

図 3-2 に作製した SOI (a-Si/SiO₂/c-Si) 基板の SEM 断面観察の結果を示す。a-Si 成膜の条件は 400W である。SiO₂ の膜厚は、約 0.99 μ m と得られた。これは SiO₂ の成膜速度が 8.8nm/min (700W) であることから、本実験の条件では約 1 μ m となり、一致していることを確かめた。また、a-Si 膜の膜厚は約 1.49 μ m となった。この結果から、a-Si の成膜速度は 18.6nm/min と見積もることができた。また、同様に 300W の試料も観察し、15.0nm/min の成膜速度を得ることができた。また、300W と 400W のいずれもスパッタ膜特有の柱状構造となっていることが確かめられた。

b. a-Si 膜上の SiO₂ 膜のエッチング特性

a-Si 膜上に成膜した SiO₂ 膜の BHF エッチング結果を図 3-3 に示す。本結果からエッチング速度は 140nm/min と見積もることができた。今までは、清浄な Si ウエハ上に成膜した SiO₂ 膜の BHF エッチング特性を評価してきたが、今回はスパッタ a-Si 膜上ということで、膜の緻密性及び密着性による SiO₂ 膜の剥離、膜表面の乱れなどによる影響があると考えていた。しかし、本実験では剥離等の問題なく SiO₂ のエッチングを行うことができていた。また、本実験と Si ウエハ上とでエッチング速度を比較すると、わずかに本実験の方が早いことが分かった。これは上記に挙げた原因が少なからず関係しているものと考えている。

c. a-Si 膜の等方性エッチング特性

図 3-4 に KOH による a-Si 膜の等方性エッチング特性を示す。この結果では、5 分以降にエッチングされず、一定の値となっている。これは Si 基板表面に洗浄で削除できず残った酸化膜の影響で、約 1 μ m の厚さでエッチングが止まったように見えているものと考えている。このため、5 分前の測定結果を考慮して、エッチング速度は 130nm/min と見積もることができた。この値は、異方性エッチングにおける(110)面方向のエッチング速度（室温に換算した場合）に近いことが分かった。この(110)面方向のエッチング速度は他の面方向に比べ早い速度であり、溶解し易い結晶面である。本実験では非晶質 Si 膜であることから、溶解し易い Si-Si 結合が一様に分布し、その結合によるエッチング速度に律速した速度になったも

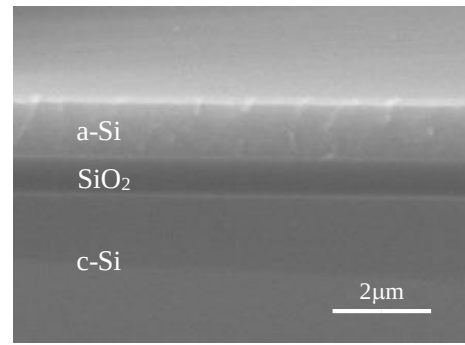


図 3-2 a-Si/SiO₂/c-Si 基板の SEM 断面観察

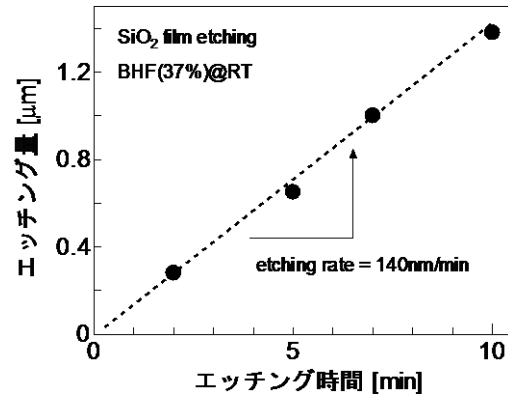


図 3-3 BHF による SiO₂ 膜のエッチング特性

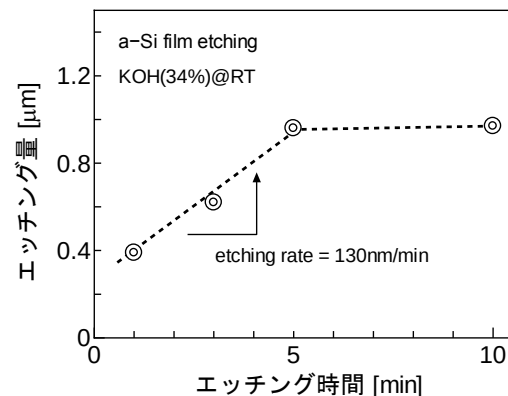


図 3-4 KOH による a-Si 膜のエッチング特性

のと推察している。

d. 中空構造プロセスの検証

図3-1の手順に従って、上記の実験結果を踏まえ中空構造の作製を試みた。この結果、工程⑤のSiO₂ エッチングにおいて、a-Si層が剥離してしまった。この原因として、a-SiとSiO₂膜との密着性が低いことと、a-Siの膜の緻密性が考えられる。スパッタ膜では一般的に柱状構造になり易く、膜の垂直方向に隙間ができる。この隙間にBHF溶液が浸透し、a-Si膜とSiO₂膜との界面でSiO₂が溶解し、結果的にa-Si膜が剥離してしまったと考えることができ

る。本実験ではスパッタ出力300W, 400Wともに柱状構造になっており、今後はa-Si膜の緻密化条件を検討する必要がある。

4. まとめ

本報告では、フォトリソグラフィを用いたMOEMS技術の教材開発を目指して、ウェットエッチングによる三次元微細構造の作製技術に関する基礎データの収集を行った。単結晶Siを用いた異方性エッチングとアモルファスSiを用いた等方性エッチングについて、各々基礎的な実験を行った。

単結晶Siの異方性エッチングでは、KOH水溶液によるSiのエッチング速度と水溶液温度の関係性について実験的に考察し、アレニウスの式を満たす関係性があることがわかり、任意の温度でのエッチングレートの導出が可能になった。また、KOH水溶液によるSiO₂のエッチング速度についても考察し、エッチング速度はSiのそれと比べて1/100以下であるが、少なからずエッチングされることがわかった。さらに、Siエッチング量とSiO₂必要膜厚の関係についても導出し、ダイヤフラム作製時の指針が得られた。ただし、必要なSiO₂膜厚に加え、スパッタリングにおけるSiO₂薄膜とSi基板の密着性についても考慮する必要がある。今後SiO₂膜の密着性向上にも取り組んでいく必要がある。

KOH水溶液による非晶質Siの等方性エッチングを評価した結果、単結晶Siの異方性エッチングのエッチング速度と同等の値であることがわかり、溶解し易いSi-Si結合方位に律速したエッチング速度であると考えた。また、スパッタa-Si膜上のSiO₂膜においても同等のエッチング速度でエッチングできることが確かめられた。さらに、a-Si/SiO₂/c-Si (SOI) 基板を作製し、中空構造作製を試みた結果、a-Si/SiO₂界面でa-Si膜の剥離が生じた。これは、a-Siの柱状構造が原因であると考えられる。

以上の成果より、MOEMSの三次元微細構造であるダイヤフラムの作製プロセスにおける一知見を得ることができた。今後は、引き続き作製プロセスの改善を図るとともに、本ダイヤフラムを利用したピエゾ型圧力センサや光導波型圧力センサを試作し、MOEMS技術教材開発へ向けた基礎研究に取り組んでいく予定である。

謝辞

東京大学大規模集積設計教育研究センター(VDEC) 所有のF5112+VD01 EB描画装置(株式会社アドバンテスト寄付)を使用してマスクの作製を行った。文部科学省ナノテクネットワークの支援を受けた。

参考文献

- (1) 伊藤 浩, 新國広幸, “フォトリソグラフィを用いたMOEMS技術の教材開発”, 東京工業高等専門学校研究報告書, 第43(2)号, 2012, pp.107-112.
- (2) 新國広幸, 伊藤 浩, “フォトリソグラフィを用いたMOEMS技術の教材開発-第2報, マイクロ光電子デバイスの実現に向けた基礎特性の評価”, 東京工業高等専門学校研究報告書, 第44(2)号, 2013, pp.85-90.
- (3) 新國広幸, 伊藤 浩, “フォトリソグラフィを用いたMOEMS技術の教材開発-第3報, マイクロ光電子デバイスの設計及び基礎特性の評価”, 東京工業高等専門学校研究報告書, 第45(2)号, 2014, pp.73-80.
- (4) M. Shikida, K. Sato, K. Tokoro, D. Uchikawa, “Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions”, Sens. Actuators, A 80, 2000, pp.179-188.

(平成 27年 3月 3日受理)

自律移動ロボットのための 位相限定相関法を用いた路面画像による移動量計測

鈴木 与海*, 多田 昂介*, 青木 宏之**

Measurement of the Amount of Travel by Road Surface Images
Using Phase Only Correlation for Autonomous Mobile Robots

Azumi SUZUKI, Kousuke TADA, Hiroyuki AOKI

Abstract:

Self-localization is necessary for autonomous mobile robots traveling to destination. This paper proposes a new method to measure travel amount of mobile robots by road surface images using phase only correlation (POC). POC is a technique that measures amount of parallel movement and rotation angle between images with high accuracy. As a result of experiments, straight-line distance is measured with generally exact accuracy, therefore effectiveness of the proposed method was confirmed. However, improvement is necessary because the precision of rotation angle measurement is low.

(Keywords: mobile robot, self-localization, phase only correlation, road surface image, amount of travel measurement)

1. はじめに

本研究室では、人々が生活する実環境の中で社会に役立つロボットとして画像処理を活用した自律移動ロボットの開発を行なっている。ロボットが実社会で活動するためには、ロボットの自己位置を精度よく推定する技術が必要となる。初期位置からの相対的な自己位置を推定する手法の一つとしてオドメトリが用いられる。オドメトリはタイヤの回転角をセンサによって読み取り、数値積分によってロボットの速度と角速度を計算することで移動量を計測する。しかし、オドメトリにはタイヤの滑りによる誤差、タイヤの径やロボットの大きさなどのパラメータ誤差、数値計算による計算誤差など様々な誤差が存在し、これらが時間経過とともに累積して正確な自己位置推定ができなくなってしまうといった問題がある。

本研究では、高精度な画像マッチング手法である位相限定相関法 (Phase-Only Correlation : POC) を用いた画像処理による自己位置推定の可能性に着目する。POC とは、画像を 2 次元離散フーリエ変換 (2-Dimensional Discrete Fourier Transform : 2-D DFT) によって振幅成分と位相成分から成る周波数領域に変換し、その位相成分のみを用いて相関演算を行なう手法である^[1]。これによって 2 枚の画像の類似度を判定すると同時に、

類似画像が平行移動しているものであればその移動量を計測することができる。更に、前処理として極座標変換を追加することで画像間の回転のズレも計測することが可能となる。また、POC は特定の模様が存在せず人が特徴を捉えにくい画像に対しても高い精度で移動量や回転角の計測を可能とする^[2]。

そこで本稿では、移動ロボットにウェブカメラを下向きに取り付け、撮影される路面の画像からロボットの正確な移動量を計測する手法を提案し、その有効性について検討する。

2. 位相限定相関 (POC)

図 1 に POC の計算手順を示す。画像サイズ $N_1 \times N_2$ の 2 枚の画像 $f(n_1, n_2)$, $g(n_1, n_2)$ に対し、これらの 2-D DFT をそれぞれ $F(k_1, k_2)$, $G(k_1, k_2)$ とする。

$$\begin{aligned} & F(k_1, k_2) \\ &= \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} f(n_1, n_2) e^{-i\frac{2\pi}{N_1}k_1n_1} e^{-i\frac{2\pi}{N_2}k_2n_2} \\ &= A_F(k_1, k_2) e^{i\theta_F(k_1, k_2)} \end{aligned} \quad (1)$$

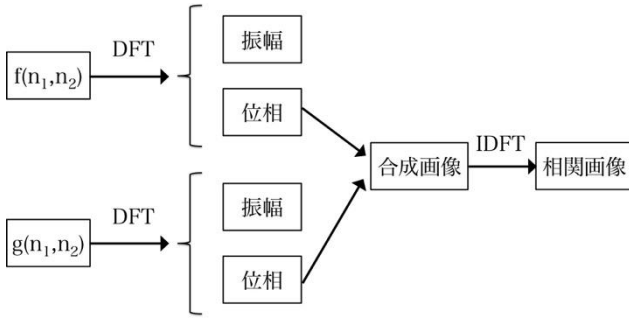


図1 POCの計算手順

$$G(k_1, k_2)$$

$$= \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} g(n_1, n_2) e^{-i\frac{2\pi}{N_1}k_1n_1} e^{-i\frac{2\pi}{N_2}k_2n_2}$$

$$= A_G(k_1, k_2) e^{i\theta_G(k_1, k_2)} \quad (2)$$

ここで、 $A_F(k_1, k_2)$ 、 $A_G(k_1, k_2)$ は各振幅成分、 $e^{i\theta_F(k_1, k_2)}$ 、 $e^{i\theta_G(k_1, k_2)}$ は各位相成分を表しており、位相成分のみの相互パワースペクトルは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} R(k_1, k_2) &= \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}|} \\ &= e^{i\{\theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)\}} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)において、 $\overline{G(k_1, k_2)}$ は $G(k_1, k_2)$ の共役複素数を表している。位相限定相関関数 $r(n_1, n_2)$ は式(3)を2次元逆離散フーリエ変換(2-Dimensional Inverse Discrete Fourier Transform : 2-D IDFT)することによって次式で与えられる。

$$\begin{aligned} r(n_1, n_2) &= \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_2=0}^{N_2-1} \sum_{k_1=0}^{N_1-1} R(k_1, k_2) e^{i\frac{2\pi}{N_1}k_1n_1} e^{i\frac{2\pi}{N_2}k_2n_2} \end{aligned} \quad (4)$$

図1に示すPOCの計算手順によって最終的に得られる相関画像は、式(4)の絶対値をとったものとして与えられる。

3. POCによる回転角と平行移動量の計測

基準となる画像を $f(n_1, n_2)$ 、 $f(n_1, n_2)$ を回転・平行移動して得られた画像を $g(n_1, n_2)$ とするとき、これら画像間の回転角と平行移動量を計測する処理の流れを図2に示す。POCは相関画像のピークが立つ位置から2枚の画像間の平行移動量 (δ_1, δ_2) を求めることができるが、画像が回転移動している場合は前処理としてまず回転角 $d\theta$ を求める必

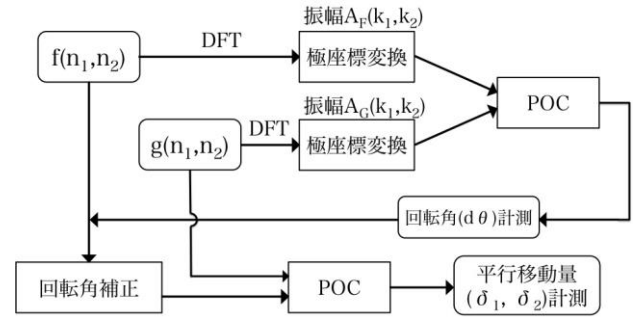


図2 回転角・平行移動量計測処理の流れ

要がある。回転角 $d\theta$ は、元画像を 2-D DFT することで得られる振幅成分に対して極座標変換を行い、回転角の変化 $d\theta$ を X 方向の変化に変換した後に、POC を行なうことで計測する。そして、この回転角 $d\theta$ の値を用いて基準となる画像 $f(n_1, n_2)$ に回転角の補正を施し、 $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ に回転角のズレが無い状態で再度 POC を行ない、平行移動量 (δ_1, δ_2) を計測する。

4. 移動ロボットの移動量計測手法

ある時刻 t において撮影された路面画像を $f(n_1, n_2)$ 、その 1 フレーム後の時刻 $t+1$ において撮影された路面画像を $g(n_1, n_2)$ とする。このとき、 $g(n_1, n_2)$ は $f(n_1, n_2)$ を回転・平行移動した画像に近いものと考えられるので、両画像間の回転角 $d\theta$ 、平行移動量 (δ_1, δ_2) は図2の流れに従って求めることができる。ただし、計測される平行移動量 (δ_1, δ_2) は時刻 t における位置と角度を基準としたものであり、 $t=0$ における初期位置を基準とした移動量は新たに計算し直す必要がある。

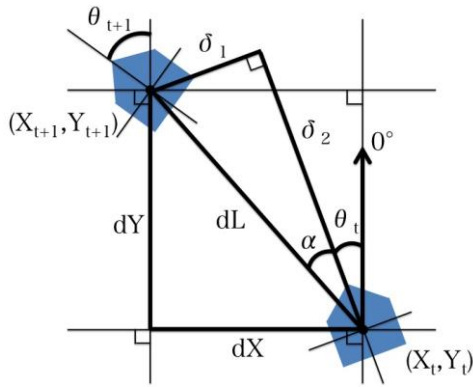
移動ロボットの時刻 t における座標を (X_t, Y_t) 、Y 軸とロボットが向いている方向との角度を回転角 θ_t とし、時刻 $t+1$ におけるそれらを (X_{t+1}, Y_{t+1}) 、 θ_{t+1} とする。これらは時間が経過するごとに以下の式で更新するものとする。

$$\theta_{t+1} = \theta_t + d\theta \quad (5)$$

$$(X_{t+1}, Y_{t+1}) = (X_t + dX, Y_t + dY) \quad (6)$$

ここで、式(6)の dX, dY は、座標 (X_t, Y_t) から座標 (X_{t+1}, Y_{t+1}) への平行移動量を表しており、その様子を図3に示す。図3において、 dL は座標 (X_t, Y_t) 、 (X_{t+1}, Y_{t+1}) 間の直線距離、 α は計測される δ_2 の直線と直線 dL との成す角度であり、

$$dL = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} = \sqrt{dX^2 + dY^2} \quad (7)$$

図 3 平行移動量(dX, dY)の計算法

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad (8)$$

である。これら dL, α より、 dX, dY はそれぞれ次式で計算される。

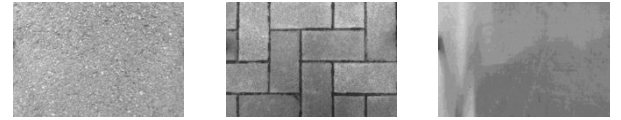
$$\begin{cases} dX = dL \sin(\theta_t + \alpha) \\ dY = dL \cos(\theta_t + \alpha) \end{cases} \quad (9)$$

5. 移動量計測の基礎実験

本稿で提案する手法では移動ロボットが走行する路面の画像を用いて移動量を計測するが、走行する場所によって路面の状態は様々である。そこで移動量計測の基礎実験として、走行する路面の違いによる計測精度について検証実験を行なう。

路面画像として図 4 に示す(a)アスファルト、(b)タイル、(c)廊下の 3 種類を用いる。画像は 256 階調のグレースケール、サイズは 2304×1536 であり、これらの画像より実験用の画像を生成する。実験用画像のサイズは 480×480 [pixel] とし、切り取る領域は図 5 に示すように元画像の中心を原点として回転角 $d\theta = -5 \sim +5$ [deg] (1 [deg] 刻み) で 11 通り、 X, Y 方向の平行移動量は $\delta_1 = -30 \sim +30$ [pixel] で 13 通り、 $\delta_2 = 0 \sim +30$ [pixel] (いずれも 5 [pixel] 刻み) で 7 通りとし、総計 $11 \times 13 \times 7 = 1001$ 枚の実験用画像を生成した。

このようにして生成した 1001 枚 $\times$ 3 種類の実験用画像に対して、基準とする中心画像との回転角と平行移動量を計測し、理論値との比較を行なった。その結果、アスファルトとタイルの路面画像では誤差は全く生じないことが確認されたが、廊下の路面画像については誤差が生じた。その様子を図 6 に示す。図 6 は各回転角に対して、 $\delta_1, \delta_2, d\theta$ の計測誤差の生じた回数を示している。



(a)アスファルト (b)タイル (c)廊下

図 4 実験に用いる路面画像

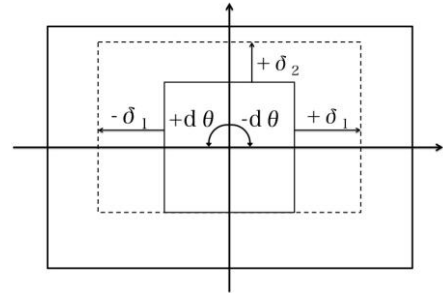


図 5 実験用画像の生成

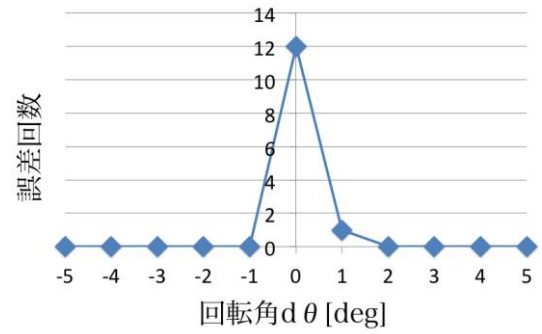
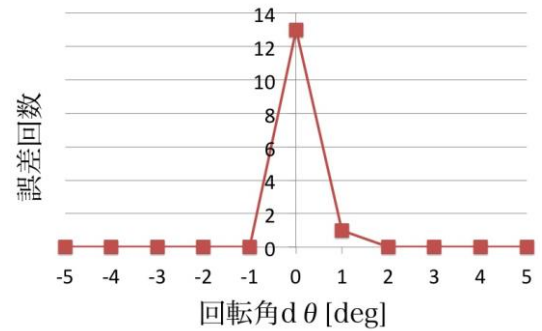
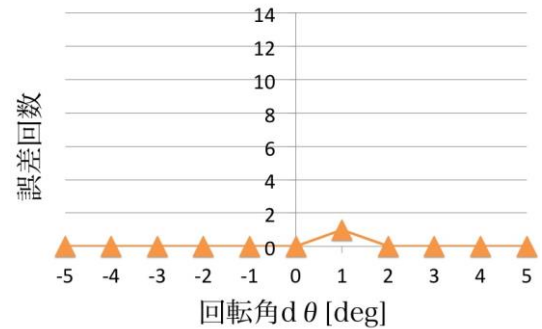
(a) δ_1 方向の誤差回数(b) δ_2 方向の誤差回数(c) $d\theta$ 方向の誤差回数

図 6 廊下画像における計測結果



図 7 高尾 1 号



図 8 スロープ

$d\theta = 0[\text{deg}]$ において δ_1 で 12 回, δ_2 で 13 回, $d\theta = 1[\text{deg}]$ においては $dx, dy, d\theta$ それぞれで 1 回の誤差が生じた。廊下の画像は他の 2 つの画像に比べて路面が滑らかであるため照明の光が反射しやすいということ、経年によって汚れや傷がついてはいるものの元が無地であり、輝度値の変化が少ない画像であるため誤差が生じていると考えられる。

6. ロボットの移動量計測実験

本実験では実際に移動ロボットにウェブカメラを取り付けて移動量計測を行ない、ロボットが直進した場合の実距離やカーブを含むコースを走行させた場合の回転角を正確に計測できるかどうかについて検証する。実験には本研究室で開発を行っている自律移動ロボット”高尾 1 号”(図 7)を用い、ロボット前方にウェブカメラを路面から約 40[cm]の高さに下向きで固定し、表 1 に示す 3 つのコースを手動で走行させながら路面画像を撮影する。このとき、コース 1 とコース 2 については基礎実験において設定した(a)アスファルト、(b)タイル、(c)廊下の 3 種類の路面で、ロボットの前進速度は 0.1[m/s]、回頭速度は 0.2[rad/s]とした。

表 1 走行コース概要

コース番号	概要
コース 1	10[m]直進
コース 2	5[m]直進した後、左に 90 度回頭してさらに 5[m]直進
コース 3	180 度の回頭が 2 回あるスロープ

表 2 始点座標を基準とした終点座標(コース 1)

	X[pixel]	Y[pixel]	θ [deg]	実距離[m]
(a)	151.56	15217	2	10.1895
(b)	-194.88	15317	-1	10.2565
(c)	-199.22	14413	0	9.6511

表 3 始点座標を基準とした終点座標(コース 2)

	X[pixel]	Y[pixel]	θ [deg]
(a)	-6438.7	3276.9	120
(b)	-7924.3	5112.9	106
(c)	-7326.7	10023	63

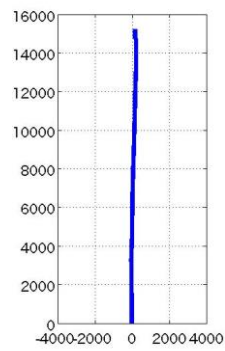
表 4 始点座標を基準とした終点座標(コース 3)

回頭速度[rad/s]	X[pixel]	Y[pixel]	θ [deg]
0.2	1137.3	4558.9	8
0.3	4825.5	5424.8	6

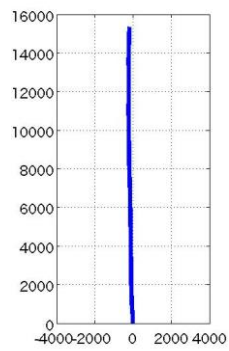
コース 3 については図 8 に示す通り、本校 3 棟 2 階のスロープにて回頭速度を 0.2[rad/s]ならびに 0.3[rad/s]として 2 回の計測を行なった。

図 9~11 に X 方向と Y 方向の移動量をプロットした各計測結果を示す。横軸 X、縦軸 Y とともに単位は[pixel]である。表 2~4 は各コースの始点から見た終点の座標と角度を示したもので、特にコース 1 については Y 軸方向の移動量を実距離に換算した結果も記載した。実距離への換算には、まず 10[cm]ごとに 4 点の印を付けた養生テープを床に張り付け、それらを撮影した画像から 4 点の座標を取得し、各点間のピクセル数を計算してその平均を取った値 $6.6961 \times 10^{-4}[\text{m/pixel}]$ を用いている。

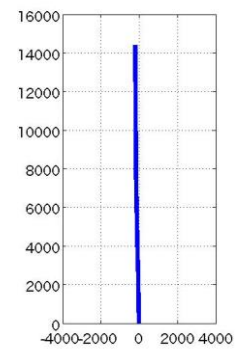
コース 1 の計測結果ではどの路面においても回転角に大きなズレは生じておらず、換算した実距離では(a)アスファルト、(b)タイルはほぼ正確に計測されているが、(c)廊下の路面は他の 2 つに比べて大きな誤差が生じている。その原因は前項の基礎実験で示した通り、廊下においては他の 2 つの



(a)アスファルト

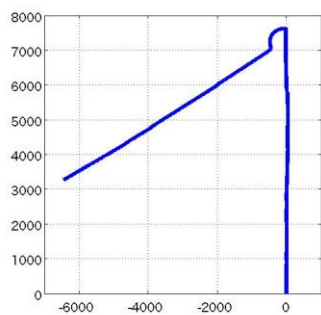


(b)タイル

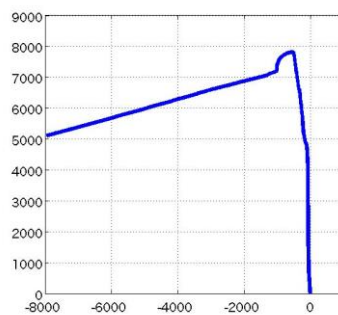


(c)廊下

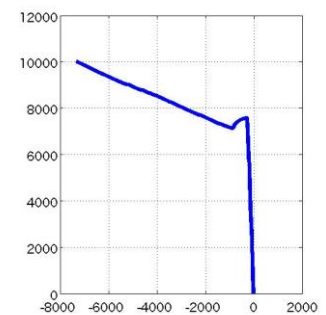
図 9 コース 1 の計測結果



(a)アスファルト

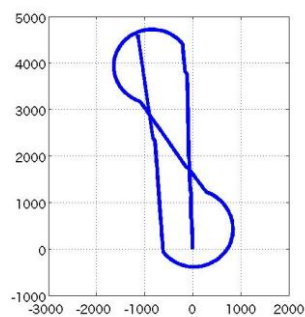


(b)タイル

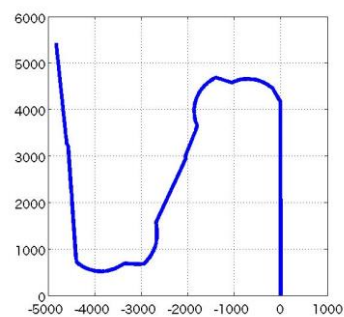


(c)廊下

図 10 コース 2 の計測結果



(a) 回頭速度 : 0.2[rad/s]

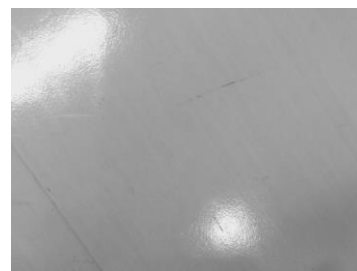


(b) 回頭速度 : 0.3[rad/s]

図 11 コース 3 の計測結果



(a)フレーム番号 : 918



(b)フレーム番号 : 931

図 12 コース 2 : 廊下の回頭中の画像

路面よりも POC による移動量の計測に誤差が生じやすいということに起因すると考えられる。

次に、コース 2 の計測結果ではどの路面においても回転角を正しく計測できていない。ロボットを手動で操縦しているため正確に 90 度回頭することができないという理由もあるが、回転角の正確な計測ができていないことが主因と考えられる。計測されたデータの詳細を見ると、回頭中の 1 フレームごとの回転角は 1 度刻みであり、まれに 0 度も含まれていた。特に(c)廊下の場合は回頭中においても 0 度が含まれている割合が多く、10 フレーム以上連続している箇所も存在した。図 12 は(c)廊下において計測された回転角が連続して 0 度となっていたフレーム間の画像で、どちらの画像にも照明の反射光が同一箇所に映り込んでしまっており、これが原因で正確な回転角の計測ができていないと考えられる。

コース 3 については、図 11 に示す通り 180 度回頭したときに回頭速度が $0.2[\text{rad/s}]$ の場合は計測結果が 180 度を超え、 $0.3[\text{rad/s}]$ の場合は 180 度を下回ってしまっており、回転角が正確に計測できていない。しかし、180 度の回頭を逆方向に 1 回ずつ行なった結果はどちらの場合も最終的な回転角が 0 度に近づいているため、回頭時に生じる誤差は小数点以下の値でほぼ一定程度であると考えられる。現状では 1 度刻みの精度で計測しているため誤差が生じてしまっているが、小数点以下の回転角を計測することによって正確な回頭方向が得られるものと考えられる。また、ロボットの構造にもよるが、回転の中心となるタイヤの中間位置にカメラを設置することができれば精度はより向上すると考えられる。

7. まとめ

本稿では移動ロボットの自己位置推定に向けた移動量計測手法として、ロボットにウェブカメラを下向きに取り付けて得られる路面の画像から、フレーム間のズレ量を POC によって連続的に計測することで移動量を計測する手法を提案し、その検討を行った。

まず初めに、移動ロボットが走行すると考えられるアスファルト、タイル、廊下の 3 種類の路面画像においてズレ量を正確に計測できるかを確かめる基礎実験を行なった結果、屋内の廊下など輝度変化の乏しい画像が撮影される路面においては

直進する際に多少精度が下がってしまうものの、路面画像による移動量の計測は可能であることが確認できた。更に、実際に移動ロボットにウェブカメラを取り付け、直線コースやカーブを含むコースについて移動量の計測実験を行なった。その結果、直線距離の計測では概ね良好な結果を得ることができたが、カーブを含むコースの場合は回転角をより精度よく計測する必要があるということが示唆された。また、屋内の廊下のような、照明による反射光が映り込んでしまう路面においては特に精度が下がってしまうことが明らかとなった。

以上のことから、路面画像のフレーム間毎のズレ量からロボットの移動量を計測する手法は、直線コースではほぼ良好な結果が得られており、またカーブを含むコースにおいても回転角を小数点以下の精度で計測し、照明による反射光の映り込みの対策を取ることで精度の向上が十分見込まれるため、有効な手法であることが確認された。

参考文献

- [1] 青木孝文, 伊藤康一, 柴原琢磨, 長嶋聖, "位相限定相関法に基づく高精度マシンビジョン", 電子情報通信学会 基礎・境界ソサエティ Fundamentals Review Vol.1 (2007) No.1 P 30-40
- [2] 三木明, "SRIPOC による画像識別", 東京工業高等専門学校平成 19 年度特専攻科別研究論文

(平成 27 年 3 月 4 日受理)

C 言語学習支援ツールの開発

小坂敏文*, 水村亮介** 松林勝志* 吉本定伸*

Development of C language Learning Support Tool

Toshifumi KOSAKA, Ryousuke MIZUMURA, Katsushi MATSUBAYASHI*, Sadanobu YOSHIMOTO

It is required for the beginners of C language to understand the behavior of the C program, at the beginning. By the way of contacting with many programs, it is necessary for them to get ability to interpret the function of each line of the program. When they use the static teaching materials like textbooks, understanding the behavior of the program may be difficult. Therefore we developed the dynamic commentary tool which comments on every line of the program, and canceled difficulty. Changing the part of the sample program is one of learning methods for learners to check their understanding of their own. Even in such a case the tool comments on a program accordingly every line. The tool is a good help and is friendly to the learners.

Keywords: C language, visual learning support tool, web site

1. はじめに

学生にプログラミングを教えるとは、課題を解決する手段を考え、それを言葉で表し、プログラミング言語で表現出来るようにすることである。そのためには、例題プログラムを追跡する能力である Reading 力を養うこと、そして新たなプログラムを作成する Writing 能力を養う必要がある。実際には新たなプログラム作成時には、自分で書いたプログラムの振舞を想像する能力も必要であり、これは Reading 能力にほかならない。なお、Writing 能力の獲得には多くの課題を体験させる必要があり、指導教員がそのような環境を学生に提供するツールについては別途開発が続けられている^[1]。学習者はそれまでの様々な分野での学習経験を基に新たなプログラミングを学んでいる。そのため、Reading 能力の獲得には学習経験の差により困難を感じない学生もいれば、困難を感じる学生もいる、そこで Reading 能力の獲得に困難を感じている学生を対象にした、学習支援ツールが必要となってくる。

困難の原因の 1 つは、教科書のような静的なサンプルプログラムの提示では、最初は多くの読み取り作業が必要となることである。サンプルプログラムを学生が読み解ければ問題ないが、その振る舞いを逐行解説されたり、一部を変更して逐行解説されたりするとさらに理解が深まる。そこで、自由に記述されたプログラムコードの各行を逐次丁寧に解説してくれる支援ツールが必要となる。

また、解説しすぎても意味がなく、プログラムのある行が実行された直後の変化を推測させ、その推測が正しいかどうか確かめさせながら、各自が正しい読み取りが出来ていることを確認できるような仕組みが必要である。プログラム開発統合環境のデバッガを用いることも考えられるが、これは用途が異なり、処理結果のみの提示になっている。

また、C 言語学習のはじめにおいては、プログラムとしては必要な記述であるが、プログラムを読み解く上では不必要な「おまじない」部分があり、これを無視してもよいような工夫も必要である。

なお開発する支援ツールは学習初心時期を対象として制御構造追跡に重点をおいているため、ファイル、構造体、ポインタに関してはサポート外とする。

本報告の支援ツールは学習支援のために数年にわたって開発を続けているものである^{[2][3]}。

2. プログラミング学習支援ツール

プログラム逐次解説型学習支援ツールに望まれることは次のようなことになる。

- (1) C 言語学習環境とシームレスに使えるツールであること。
- (2) プログラミング学習に直接関係ないプログラム上の記述は無視できること。
- (3) 自由に記述したプログラムに関してプログラムの行ごとに逐次解説ができること。

*情報工学科 **日立 INS ソフトウェア

- (4) 逐次解説は二段階で行われ, 行の説明と作業結果提示が出来, 学習者は自分の予想を確かめられること。
- (5) 逐次解説は, 手動で学習者が納得しながら, 次の行へ進めることができる他, 一定時間間隔で次の行に進むこともできるようになっていること。
- (6) 高速な逐次解説進行もできるが, このような場合のためにブレークポイントや変数値ブレークを設定できること。
- (7) このツールは, C 言語学習の初期に利用することを想定しているため, 対応する C 言語文法は, 初級レベルの学習内容とする。

3. プログラム逐次解説型学習支援の構成

プログラム逐次解説型学習支援ツールに望まれる機能に即して, 次のような設計を行なった。

- (1) アプリケーションは Web 上で動作するようにして, バージョンアップが Web サーバ側だけで対応できるようにする。Web サーバに負担をかけないために, Web ブラウザ側のみで動作するクライアントサイド動的アプリケーションとする。

- (2) ユーザが作成したプログラムを解説付きで実行できるように, エディタを備える。
- (3) アプリケーション上のボタンをマウスでクリックすることで, 行ごとの逐次ステップ実行が行えるようにする。
- (4) アプリケーション上のボタンをマウスでクリックすることで, 逐次自動実行が可能で, その速度を変更できるようにする。
- (5) 予めブレークポイントをセットしておけば, ブレークポイントまで, 高速に実行してストップできるようにし, そこから逐次実行再開もできるようにする。
- (6) 変数が指定した値になった時にブレークする機能をつける。
- (7) 逐次実行は二段階解説とし, 作業内容事前表示と作業結果表示ができる。
- (8) 変数は, その保持する値を常に表示し, プログラム 1 行の作業前の値と作業後の値を示せるようにする。また配列にも対応する。

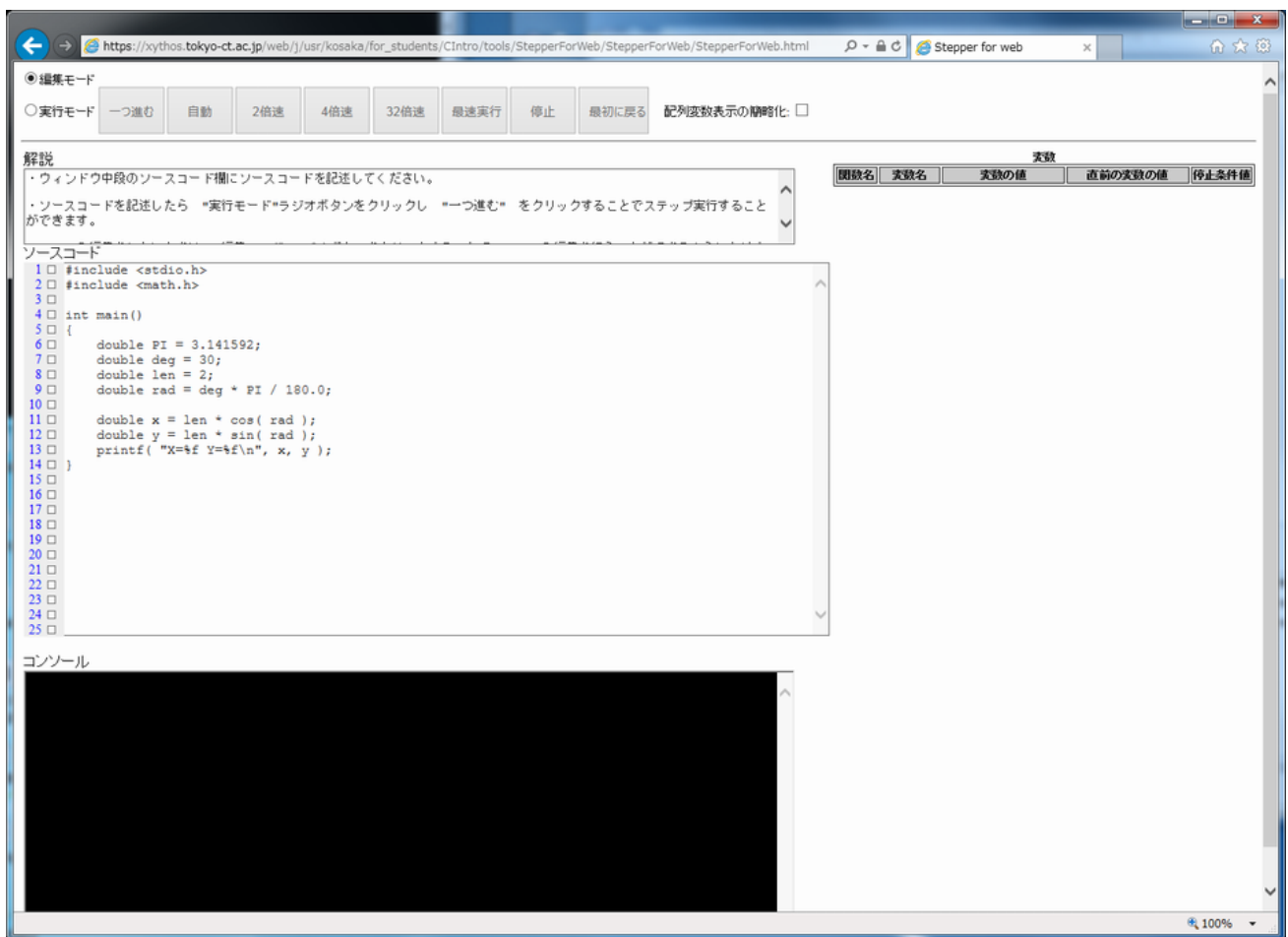


図 1 プログラム逐次解説型支援ツール 「Stepper For Web」

4. プログラム逐次解説型学習支援ツール

図 1 にブラウザ上に現れたプログラム逐次解説型学習支援ツールを示す。上部にはコントロール用のボタンが並び、その下に解説窓、プログラム窓、下部に黒字に白文字を表示するコンソール窓がある。また、右側に変数の状態を示す領域がある。

ユーザはまず、左上のボタンで編集モードにして、プログラムを編集する。次に、左上のボタンで実行モードにする。そして、「1 つ進む」ボタンを繰り返し押すことで、解説を読み、変数の動きを確認しながらプログラムを逐次実行できる。

5. 学習ツールとしての特徴

5.1 必要な部分だけの記述

プログラムの振る舞いを追いかける作業時には不要な部分を省略できる。図 2 に示すような簡易記述にしてもプログラムを実行できる。これは学習者にやさしい機能である。

```
ソースコード
1 double PI = 3.141592;
2 double deg = 30;
3 double len = 2;
4 double rad = deg * PI / 180.0;
5
6 double x = len * cos( rad );
7 double y = len * sin( rad );
8 printf( "X=%f Y=%f\n", x, y );
9
```

図 2 簡易記述

解説

変数に値や演算結果を代入します。

ソースコード

```
1 double rad, x, y;
2 double PI = 3.141592;
3 double deg = 30;
4 double len = 2;
5
6 rad = deg * PI / 180.0;
7 x = len * cos( rad );
8 y = len * sin( rad );
9 printf( "X=%f Y=%f\n", x, y );
10
```

図 3 二段階解説(1)

5.2 二段階解説

各行を逐次実行する時、図 3 のようにその行の意味を解説し、その直後の変数の変化や、条件判断を学習者に予測してもらい、次の段階で図 4 のように変数の変化や、条件判断を示す。この作業は学習者が自分で作ったプログラムの振る舞いを追跡するために必須の学習ポイントである。

解説

deg*PI/180.0を(演算の場合は演算結果を)radに代入しました。

ソースコード

```
1 double rad, x, y;
2 double PI = 3.141592;
3 double deg = 30;
4 double len = 2;
5
6 rad = deg * PI / 180.0;
7 x = len * cos( rad );
8 y = len * sin( rad );
9 printf( "X=%f Y=%f\n", x, y );
10
```

変数

関数名	変数名	変数の値	直前の変数の値
main	rad	0.5235986666666667	未初期化
main	x	未初期化	
main	y	未初期化	
main	PI	3.141592	

5.3 変数の変化状態の表示

変数の値が変化した時には、図 4 に示すように、変化する直前の値(状態)と変化した後の値を示し、プログラムのある行が実行された時の変化を際立たせている。

図 4 二段階解説(2)

解説

条件式:x<=10
結果 : true
条件式の結果がTrueなので{}内のプログラムを実行します

ソースコード

```
1 int x, y;
2 y=0;
3 for (x=1; x<=10; x++) {
4     y+=x;
5 }
6 printf( "%d", y );
7
```

図 5 詳細解説

5.4 for 文などの詳細解説

for 文では内部の詳細構造の理解が必要である。そのため、図 5 に示すようにかっこ内の文ごとの解説を行うようになっている。これにより、初期化部、判定部、後処理部の流れをわかるようにしている。

5.5 高速自動実行とブレーク

学習者の学習が進んでくると、ループ内部の実行などは、ワンステップずつではなく、高速に眺めたい時がある。そのような場合に対応して、自動実行があり、その速度は上部にあるボタンで選

ぶことができる。

自動実行で高速に動作させた時に必要になるのが、ある行に到達したところで一旦停止させるためのブレークポイントである。プログラムソース行の左にチェックボックスが有り、これを使って

ブレークポイントを設定できる。またある変数が指定した値になったら一旦停止する条件ブレーク機能も持っている。

5.6 その他

配列も扱えるようになっている。ただし、表示が冗長である場合は、簡易表示を行うこともできる。また、主な算術組み込み関数もサポートしている。自分で作成したユーザ関数の利用も可能であり、引数の受け渡し、関数の戻り値も解説できるようになっている。

6. 学習者の評価

C プログラミング学習中の情報工学科 2 年生に対し、本アプリケーションに関する評価アンケートを 2 回実施した。アンケート項目及び結果を表 1 および表 2 に示す。1 回目実施時期は学習開始後 2 ヶ月半の中間試験終了後 (6 月中旬) である。一般的に初心者には役立つという評価が読み取れる。2 回目のアンケート調査は、同じクラスで 12 月下旬に行なった。この時はすでに、C プログラミングの学習が進み、本アプリケーションがサポートしていない文法の学習に進んでいる時期である。このようなアプリケーションを使わなくても C プログラミングの学習ができる学生が一定数いることは確かだが、依然として、初心者には役立つであろうという評価は変化していない。またブレークポイントの採用などに対しても好意的な態度が読み取れた。

7. 授業担当教員の評価

学習者の評価の他に、他学科で C プログラミング授業担当の教員二名に、アンケートとコメントをお願いした。その結果、表 3 に示す質問事項にすべて肯定の回答を得た。また、ポイントや構造体の実装要求もあった。

8. まとめ

C プログラミング学習初心者に向けた、プログラムの振る舞いを行ごとに逐次見せるアプリケーションを開発した。主に基本構文構造、関数まで実装した。学習者に考える時間を与える二段階解説、for 文における詳細解説、ブレークポイントと高速逐次実行などを、アプリケーションは採用している。学習者からは、初心者が学習する上で役立つとの評価が多数で、またこのアプリケーションで学習し、自分のためにもなったとの評価もあった。

なお、本アプリケーション「StepperForWeb」は次の場所で公開中である。

https://xythos.tokyo-ct.ac.jp/web/j/usr/kosaka/for_students/CIntro/tools/StepperForWeb/index.htm

表 1 アプリケーションへの評価アンケート 1 回目

項目	はい	いいえ	他
アプリケーションは自分にとって効果があったと思うか	21	1	9
アプリケーションは初心者のプログラミング読解力向上に役に立つと思うか	29	0	2
ステップ実行動作は学習の役に立ったか	28	0	3
2 段階の解説文はわかりやすかったか	18	0	13

表 2 アプリケーションへの評価アンケート 2 回目

項目	はい	はい以外
自分はプログラミングが得意か	1	18
アプリケーションは自分に効果があったか	7	12
アプリケーションは初心者にも効果があると思うか	15	4
2 段階の解説文はわかりやすかったか	11	8
ステップ実行動作は学習の役に立ったか	14	5
自動送り・ブレークポイント機能は学習の役に立ったか	15	4
変数リストは学習の役に立ったか	14	5

表 3 教員に対するアンケートの項目

(1)アプリケーションは初心者にも効果があると思うか
(2)二段階の解説文はわかりやすかったか
(3)ステップ実行動作は学習の役に立ったか
(4)自動送り・ブレークポイント機能は学習の役に立ったか
(5)変数リストは学習の役に立ったか

謝辞

本アプリケーションの評価にあたり、本校電気工学科綾野秀樹先生、新國広幸先生にはご評価とご意見を頂きました。厚く感謝いたします。

参考文献

- [1] 小坂敏文, 吉本定伸, 松林勝志, プログラミング言語演習科目のための支援システムの構築, 論文集「高専教育」第 35 号, pp131-136 (2012)
- [2] 真鍋 大樹: C 言語プログラム実行状態が視覚的にわかるアプリケーションの開発, 国立東京工業高等専門学校情報科 平成 22 年度卒業研究論文 (2010)
- [3] 水村 亮介: C 言語学習支援 Web アプリケーションの開発, 国立東京工業高等専門学校情報科 平成 25 年度特別研究論文 (2013)

(平成 27 年 2 月 25 日受理)

八王子市小学校科学教育センター「インターネット講座」の実施

田中 晶*, 土屋賢一**, 林丈晴***, 中野雅之**, 小池和摩*,
酒井元太*, 菅原健太*, 仲林龍馬*, 牧野康平*

Internet course for Hachioji elementary-school science education center

Akira TANAKA, Kenichi TSUCHIYA, Masayuki NAKANO, Kazuma KOIKE,
Genta SAKAI, Kenta SUGAWARA, Ryoma NAKABAYASHI, Kouhei MAKINO

We have provided “Internet course” as an extension lecture of Hachioji elementary-school science education center every year since 2012. Hachioji science education center for elementary students started science courses 50 years ago. From June to February, about 130 elementary children from all over the city of Hachioji visit several schools/colleges, companies, etc and learn ten and several themes in science fields.

Elementary students learn every course in three fields such as (1) Information Communication (ICT) for 2 hours, (2) chemistry for one hour and mechanical engineering for one hour in our National Institute of Technology, Tokyo College (NIT Tokyo College). Courses are scheduled to be held for two days, 60-70 children come to our college a day, and 30-35 children alternately attend (1) course and (2) course in each day. In this article, we especially focus on ICT field of “Internet course”. In this course, every elementary child is fixed up with a Windows PC, and attends three practical works: (A) Finding out IP address of his/her PC, children can enjoy multimedia chat using the IP address, (B) Making self-introduction home page with which the website audiences can operate synchronized 3D models through group work, (C) WLAN/LAN traffic observation. Elementary children can entree to some of manufacturing, being trained in rudimentary network programming and remote file management technique. Additionally, fifth grader teaching assistants (TAs) are proactively in planning, developing course materials, and teaching for “Internet course”.

These courses are extremely well received by not only the elementary children but also escorting primary teachers and Hachioji-City School Committee, so that the School Committee and NIT Tokyo College concluded bilateral agreement for science region-education. These courses surely contribute to increasing TAs' desire to study.

(Keywords: internet, region-education, extension lecture, web page design)

1. はじめに

本校はここ数年来、八王子市小学校科学教育センター^{1),2)}が主催する科学教育の一環である体験講座の中の 2~3 テーマを実施してきている。八王子市小学校科学教育センターは 50 年ほどの歴史があり、市内全域の小学校から選抜された理科やものづくりに興味を持つ約 130 名の小学生が、6 月~2 月にかけて順に市内何か所かの受け持ち校/企業等を回り十数テーマについて学習するものである。全般に理科あるいは科学に関わる内容が多くを占めており、小学校教員が指導する自由研究なども含まれている。

担当を希望する組織も幾か所がある中、本校では「ものづくり」の強みを活かして、目に見えて動くものや変化するもの、を小学生が自力で作成したり体験できる内容を提供してきており、毎年好評を得ている。

主著者研究室（田中研究室）では「インターネット」をテーマとして平成 24, 25, 26 年度と 3 年にわたって本校受け持ち講座を担当している^{3),4)}。この 3 カ年では表 1 のような実施形態で毎年 9 月上旬の土曜と日曜の二日間、田中研究室による情報系の「インターネット」講座の他、機械系、電子系、化学系

の講座も提供された。受講する約 130 人の小学生は三十数名ごとの分室と呼ばれる四つの班に分かれており、一日目に二つの分室、翌日に二つの分室が来校する。各分室は午前の二時間枠で、(A)「インターネット」、(B)「化学、或いは、機械と電子、或いは機械と化学(年度により異なる)」の(A)か(B)の一方を受講し、午後の二時間枠で午前中受講していない他方の講座を受講する。このように二日間で 130 名の小学生が(A)と(B)の両方を計 4 時間で受講することになる。八王子市小学校科学教育センター主催の講座であり、小学生の氏名や在校小学校名などは講座提供者側には知らされないが、出欠状況は極めて良好で毎年ほぼ 100%である。本講座の実績に基づき、平成 26 年 1 月 14 日には八王子市教育委員会と理科教育の充実のための「教育・研究に関する連携協定」が締結されており、出前授業も含めたさらなる地域教育への貢献も相互で検討されている状況である。

本稿では田中研究室が提供している「インターネット」講座について、企画、準備から実施内容、そして今後に向けた提言を述べ、地域教育貢献のみならず本校教育活動における本講座提供の意義についても触れる。2 章では教育センターのスケジュール、本校における実施スケジュールや体制などの概要を述べ、3 章で「インターネット」講座の概要、4 章では講座導入部分として実施している、インターネットを利用する際の基本概念である IP アドレスの理解に関わる実習を中心に述べ、5 章では講座内で「ものづくり」に相当する実習として位置付けている自己紹介ホームページ作りについて述べ、6 章では WLAN/LAN の違いやトラヒックの観察実習につい

て述べる。7 章では特に指導状況に関する全体的な考察を述べ、効果や評価等とともにこれまでの議論を受けて今後への提言を示し 8 章でまとめる。

2. 八王子市小学校科学教育センター

2.1 全体スケジュール

センター活動は半世紀の歴史を持ち、年度単位で 6 月頃から 2 月の週末土日を利用して市内小学生に向けた科学講座を実施している。各年度十数テーマの内の幾つかは市内の企業や高等教育機関が提供しており、本校は数年前から「ものづくり」中心の特色あるテーマを毎年提供してきた。4 月に主催者である教育センターと本校の担当でスケジュール確認等の打ち合わせを持ち、確認事項に基づいて検討した本校側のテーマや日程が教育センターにより取りまとめられて、5 月中旬頃に全体スケジュールとして確定する。5 月末頃には教育センターの講堂にて、教育長、センター長出席のもと全受講生を集め開講式が行われる。例年本校は校長他 1 名が来賓として招待されており、主著者(田中)も平成 25,26 年に出席している。開講式に続き児童に向けた年間スケジュールのガイダンスがある。本校担当分の講座は例年 9 月に設定されているため、6~8 月の間に講座の準備を行い、H26 年度は 9 月 13(土)、14(日)に実施した。3 月上旬には開講式と同様の出席者のもと閉講式が行われる。

2.2 本校の体制

本校内の担当者は小中学校科学教育支援委員として前年度から指名されており、主著者(田中)は平成 24 年度委員、25, 26 年度は委員長として担当してい

Table 1 Courses for Hachioji elementary-school science education center

日時：平成 26 年 9 月 13 日、14 日 9:30 - 15:30

場所：国立東京工業高等専門学校(東京高専) 5 棟 2 階 5201 教室、5 棟 1 階第一演習室、1 棟 3 階会議室、2105 実験室

集合：9:20 までに東京高専 4 棟の玄関を入った所で受付を済ませ、5 棟 2 階 5201 教室に集合。

持参していただくもの：筆箱(鉛筆、消しゴム)、軍手

月 日	分室	9:30-9:55	10:00 - 12:00		昼休み	13:00 - 15:00		15:00-15:30
		開講式	テーマ	教室		テーマ	教室	閉講式
9 月 13 日(土)	3	5201 教室	インターネットで初エンターリンク	5 棟演習室	2 棟教室 (1-1, 1-2)	小さい力で大きな力を生み出す装置の仕組みを知らう 化学の操作で水をきれいに	1 棟会議室 2105 室	5201 教室
	4		小さい力で大きな力を生み出す装置の仕組みを知らう 化学の操作で水をきれいに	1 棟会議室 2105 室		インターネットで初エンターリンク	5 棟演習室	
9 月 14 日(日)	1	5201 教室	インターネットで初エンターリンク	5 棟演習室	2 棟教室 (1-1, 1-2)	小さい力で大きな力を生み出す装置の仕組みを知らう 化学の操作で水をきれいに	1 棟会議室 2105 室	5201 教室
	2		小さい力で大きな力を生み出す装置の仕組みを知らう 化学の操作で水をきれいに	1 棟会議室 2105 室		インターネットで初エンターリンク	5 棟演習室	

*各教室へは教員及び学生が案内します

る。5月頃に校内スケジュール、担当内体制の確認、購入物や準備物等を決め、並行して校内の実施承認を受ける。以降は主著者が担当し本稿タイトルでもある「インターネット」講座に視点を置いて記す。「インターネット」講座は情報工学科田中研究室に所属する5年生を中心とするチュータ学生（TA）が企画立案から主体的に関与し、教員の指導のもと学生自らの提案に基づいて講座で用いるシステム設計も行う。数回のリハーサルを経て当日の指導もチュータ学生が主体となっていく。24、25、26年度それぞれ5名、2名、5名（小池、酒井、菅原、仲林、牧野）の田中研5年生（何れも男子）が担当した。ところで受講生の半数が女子児童のため、24、25年度については直前リハーサルと実施当日に情報工学科他研究室所属の女子学生各1名にもチュータとして協力してもらった。呼びかけるような口調で説明するなど児童がより馴染みやすくなったように思われる。Windows PCが50台設置された本校のコンピュータ演習室を使用し、校内LANやサーバ設備に接続して実施する。受講生は一人1台のPCを使用する。利用するIT設備は特に講座用の設定等が必要となるため、これらの設備の維持管理担当の技術職員の方にも協力頂いている。通常の、外部ネットワーク～校内LAN～演習室LAN、に加えて、帯域制限やトラフィックモニタができるスイッチを介してローカル環境（演習室LANと片方向通信可能、サーバ接続）を設置してもらった。

3. 「インターネット講座」の概要

3.1 プログラム

インターネットの仕組みを実際に体験しながら学んでもらうことが本講座の主目的であり、小学生に興味を持ってもらう中に技術的要素を織り込んで知らず知らずのうちにインターネットの仕組みが理解できるように考案した。特に、小学生自ら「ものづくり」できる構成を心掛け、次のようなプログラムとした。

I. インターネット上で守るべきマナーを、講座内の実習に関わる内容を中心に具体例を挙げて説明する。

インターネットにより親しんでもらえるよう努める以上、利用に際した注意をもより意識してもらいたいためである。

II. インターネットの構造について図を用いて説明する。

日常的に使用しているにも関わらず、普段殆ど意

識或いは理解することのない、インターネットの動作の仕組みについて、講座内の実習に関わる部分を中心に説明する。

III. 受講生自身が調べたIPアドレスを使い、実際に小学生同士でチャット（通信）を行う。

IPアドレスがネットワーク上で通信相手を指定するのに重要な役割を果たしていることを体験で理解してもらう。

IV. 無線LANと有線LANの二種類の接続方式によって何が異なるかを実験で確かめる。

LANの役割や種類、それぞれの通信方式の接続方法、データの特徴について理解してもらう。

V. グループでHTMLファイルを編集して自己紹介ホームページを作成する。作成したホームページを受講生が自分でサーバにアップロードして全員に公開し操作してもらう。

普段見ているウェブページがどのように作成されているか、どのような仕組みで多くの人が閲覧できるのか、そのためにサーバや中継装置（ルータ）はどんなことをしているのか、を受講生自ら実習を通して理解してもらう。同時に、部分的ながらプログラミングを体験し、自分でソフトウェアを作成すれば、画面表示、3D画像遠隔コントロール、グループ作業、通信、など様々な操作ができることを体感してもらう。

3.2 進行

2時間コースを計4回行ったが、第1回コースではやや時間内に収めることが難しい様子であったため、第2回コース以降は、a)インターネットマナー説明（3.1項I）ではプロジェクター表示を一部割愛して口頭説明中心として簡略化、b)メイン要素の自己紹介ページ作成（3.1項V）に2/3の時間を充て、無線LAN・有線LAN実験（3.1項IV）はその合間等に行うこととした。さらに第3回コース以降は、チャット（3.1項III）、自己紹介ページ作成、無線LAN・有線LAN実験といった体験型の内容を先に実施し、座学主体のマナー説明とインターネット構造の説明（3.1項II）を2時間枠最後の時間で実施する構成に変更した。

4. 導入：IPアドレスの理解

4.1 マナー講習

インターネットを利用、さらにはインターネットでプログラムを動かす等の際に気を付けるべきマナーやルールについて、特に講座と関連が強い項目の中から次の四つを説明した。a) 他人の画像を無断で

公開（アップロード）しない，b) 他人が作成した文書や画像を無断で複製し公開しない，c) 個人情報を公開しない，d) 他人が嫌に感じることはしない，の四つである．講座内の実習で該当する箇所が出てきたときには「先に話したマナーはこのようなことを言っていたんだよ」のように簡単に再確認し，実習内とリンクして以後も意識に残りやすいように心がけた．小学生対象のため，マナー講習に限らずプロジェクターでの説明にあたっては，図 1 のように極力文字を使わず殆ど絵だけとし，できるだけ一見して言いたいことが伝わるようにスライドを用意した．

4.2 インターネットの仕組みと IP アドレス

児童が見かけるであろう端末やケーブルの背後に繋がっているネットワーク機器(図 2)とその働きを，IP アドレスを軸にしてごく簡単に説明した．まず，IP アドレスで指定された送信端末から受信端末へ，

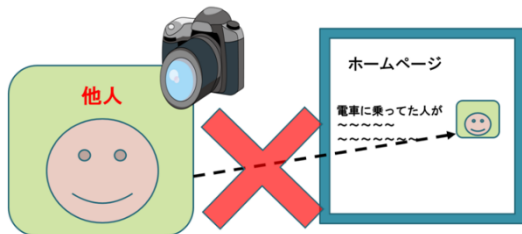


Fig. 1 Manners on internet

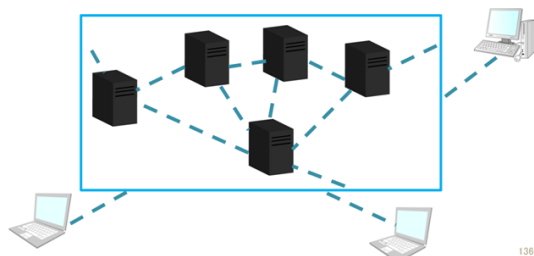


Fig. 2 Equipment for internet

写真や文字がパケットと呼ばれる単位に小分けされてルータやサーバ間で送受信されて送られる様子を図で示した．そして，端末ごとに IP アドレスが割り当てられていることを理解してもらうため，各自に自分の PC でコマンドプロンプトを開いて `ipconfig` で自 PC の IP アドレスを表示してもらい，それを画用紙にマジックで書いて周囲から見えるように PC の上に置いてもらった(図 3)．引き続きこの IP アドレスを使って受講生同士でチャットを行うので，受講生は IP アドレスがインターネットの世界では住所や電話番号のように使われていることを実習形態で理解できる．

各自の PC でチャットプログラム(図 3)を立ち上



Fig. 3 IP address as a residence address for chat work

げてもらい，通信したい相手の PC の上に置かれた IP アドレスをチャット画面の「通信相手のアドレス欄」に，自分のニックネームを「自分の名前欄」に，それぞれ入力してもらう．通信相手とお互いでチャット画面の接続ボタンを押すと，受講生がカラーで描く絵やテキストが双方の端末に表示される．チャットプログラムは，Microsoft Chat (H24 年)，本校学生自作(H25 年)，ホワイトボードチャット(H25,26 年)を使用した．市内全域の小学校から集まり普段はお互い話することがない相手とチャットで絵も使って会話できるため，IP アドレスの重要性が認識されるとともに，受講生同士の交流にも役立つ実習となった．

4.3 今後に向けて

IP アドレスや自分の ID の入力欄がどこにあるか等の質問が多く見られ，実際にプロジェクターで操作画面を見せながら実施した．日本語入力の切り替えや，IP アドレスの「.(ドット)」の入力方法には戸惑いが見られる場合もあるので，キーボードに大きくシールを張る等の方法も今後考えたい．プロジェクターで表示するだけでなく，TA や教員が教室を回って直接質問に答えたり補助する方法をとったので受講生に受け入れやすかったと思われる．

5. 自己紹介ホームページ作り実習

5.1 概要

簡単ながらソースコードからのプログラミングの実習のため、2時間の講座の6・7割程度を自己紹介ホームページ作成に充てた。分室（30・35人）単位の受講なので7・8人ずつの4つのグループに分かれてもらい、各グループ毎に自己紹介ホームページを作成してもらった。図4に示すように、各グループのページはグループ内の共通ページとタブによりスライドして個人個人のページが表示される個人ページで構成される。グループ共通のページにはグループのマスコットの3D画像が表示され、操作権限を持った閲覧者が操作すると全閲覧者の画面で同期して三次元動作をするようにした。

5.2 指導手順

予め用意した雛形ソースファイルを用意しておき一部を書き換えさせることで、プログラミングを意識せず容易に作成可能にしている。グループ内の各

自が作成した自己紹介ページは、受講生が自分でサーバに転送する。受講生が自分のページ以外を編集してしまった場合のエラーを自動で取り除く処理までは準備しなかったため、チュータ学生がサーバ操作してマージし、グループ毎のウェブページを作成させた。3D画像についてはWebGL⁵⁾を用い、予めいくつかの3Dモデルを用意しておき、その中からグループに1つ好きなモデルを選ばせ、自分たちの作ったウェブページにアクセスすると選んだモデルを動させる。このモデルの動きは同じページにアクセスしている全てのブラウザにも共有され、1人が動かしている様子を皆で見るができる。以下は当日に受講生が行った作業の流れである。

1. 練習として簡単なHTMLファイルを作成。
2. グループに分け、各自の編集する箇所を確認。
3. タブに自分のニックネームを表示させる。
4. プロジェクターで見せる実際の操作を参考に、各自で自分のPCで画像を表示させる。
5. 選んだ画像に合わせた、紹介文を書きこむ。
6. グループ内で相談して3Dモデルを一つ選び、グループページに表示させる手順を実施。

5.3 教材システムの開発

外部サーバ仮想OS（Cent OS 6）⁶⁾上にWebサーバを構築した。グループワークで作成されたホームページを全員で閲覧し、3D画像を操作できるようにするためのポイントは次の2点である。

<排他制御>同ページを開いているクライアント



Fig. 4 Self-introduction web page by elementary children in “internet course”

でただ一人のみがカメラ（3Dモデル）を操作可能にする。

<同期処理>3Dモデルの描画に使用されるカメラの位置や向きなどの情報をサーバに送り、同ページを閲覧している全てのブラウザのカメラの動きを同期させる。

処理概要を5と5.3.1～5.3.3項に示す。

5.3.1 排他処理

ホームページが完成してサーバにアップされると、30・35名の受講者が4グループのホームページを自由に閲覧することになる。複数の受講者が同時に一つのグループホームページの3Dモデルを操作しようとする、同時に複数のブラウザ（受講者PC）からカメラ情報が送られるが、サーバ側プログラムはどの情報を各ブラウザに送信すべきか判断できない。また、クライアント（受講者PC）側プログラムはブラウザ側の操作とサーバから受信したカメラ情報のどちらを適用すべきか判断できない。そこで以下の処理構造をとることとした。

- ・3Dモデルの操作権限は同時にはただ一つのブラウザ（クライアント）に帰属する。
- ・操作権限を持つブラウザはサーバからのカメラ情報を受け取らない。
- ・操作権限を持たないブラウザはサーバからカメラ

Table 2 Exclusive control for 3D web page

サーバ側プログラム	クライアント側プログラム
権限取得リクエストを受信する. 権限付与処理を実行する.	「待機する」ボタンが押されると, <code>queue.emit('join');</code> により権限取得リクエストが送信される.
サーバ側でキューに同一の ID が存在しないか確認する. なければ権限付与処理を終了.	
クライアント固有の ID がキューに挿入される.	
一定時間が経過すると, キューから ID を一つ取り出し, その ID を持つクライアントに <code>socket.emit('get_authority');</code> で操作権限付与処理をするよう命令.	サーバからの命令を <code>queue.on("get_authority", callback() {});</code> で受信し操作権限を示す <code>boolean</code> 変数を <code>true</code> にする. 3D モデルが操作できるようになる.
更に一定時間が経過すると, キューから次の ID を一つ取り出し, その ID に操作権限を付与.	一定時間が経過すると, 操作権限を示す <code>boolean</code> 変数を <code>false</code> にする.

情報を受け取り, 自ブラウザ動作に反映させる.

なお, データの送信には, `node.js` のパッケージライブラリの `Socket.io` を用いた. これらの前提で設計したサーバ側プログラムとクライアント側プログラムの排他処理の流れを表 2 に示す.

5.3.2 同期処理

カメラ情報 [位置と向きを示す] をリアルタイムに全てブラウザで同じ値にして, カメラの動きを同期させる. 処理概要を以下に示す.

1. 操作権限のあるブラウザから, `setInterval` 関数を用い毎秒 60 回 (以下) で操作命令入力を検出し, カメラ情報をサーバに送信する. 図 5 に主要部分を示す.
2. サーバはカメラ情報を受信すると操作権限を持たない全てのブラウザに対してカメラ情報を送信する. 図 6 に主要部分を示す.

```
socket.on('camera_position_from_client',
function(position,rotation){
    socket.volatile.broadcast.emit('camera_position_from_server',position,rotation);});
```

Fig. 6 Server program: send camera-information to all non-authority clients

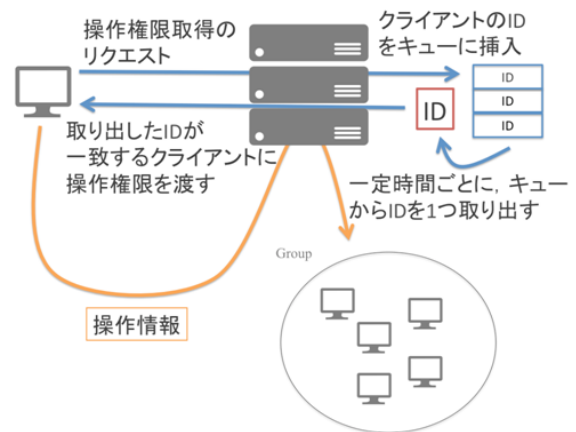


Fig. 5 Synchronization for 3Dmodel control

3. サーバからカメラ情報を受信したブラウザは図 7 により自ブラウザのカメラ情報と置き換える.

5.3.3 バージョン管理

5.1 節や図 4 に示すように受講生は各自分担するページを持っている. 各々に HTML ファイルの担当箇所を編集し, `Git`⁷⁾を用いて各々の HTML ファイルをマージし, 自己紹介ページ作成の編集時間を短縮した.

サーバ上の各ユーザーの記憶領域 `~/myPage` フォルダに元となる HTML ファイルを含むレポジトリをクローンした. その後, 受講生の各 PC 上でサーバに置いた HTML ファイルと同じ HTML ファイルを編集させ, サーバ上にアップロードしてもらった. そして (a) `~/myPage` 上で `git commit -a -m "ニックネーム"` コミットさせ, (b) `git branch グループ内の番号` でグループの人数分のブランチを作成させ, (c) `git push /var/www/html/webpageX/グループ番号 グループ内の番号` でクローン元のレポジトリにブランチをプッシュしてもらった. その後, (d) 各グループのレポジトリにてプッシュされた全てのブランチをマスターにマージした.

講座では受講生に `Tera Term`⁸⁾でサーバにアクセスしてもらい, 上記(d)以外を実施してもらった.

```
threejs.on('camera_position_from_server',
function(position,rotation){
    camera.position.set(position.x,position.y,position.z);
    camera.rotation.set(rotation.x,rotation.y,rotation.z);});
```

Fig. 7 Client (non authority) program: substitute camera-information

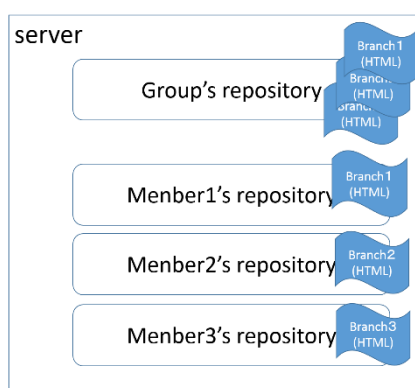


Fig. 8 Self-introduction web page on web server

使用するコマンドは受講生のPCのデスクトップに用意したテキストファイルからコピーアンドペーストさせて入力してもらい、キータイプミスを防止した。

受講生の作業が終了したときのサーバの状態を図8に示す。この状態になっていることを確認し、TAが各グループの領域に TeraTerm でアクセスし、プッシュされたブランチ（図8での各HTMLファイル）をすべてマージしグループの自己紹介ページが完成する。

5.3.4 今後に向けて

比較的限られた日数で教材を設計しているので、講座で実施した状況を検討した結果、今後次のような改良を行う予定である。

カメラの情報を送信するのに、`setInterval` を用いたが、代わりに `requestAnimationFrame` を用いればブラウザがノンアクティブ時には実行回数を減らしてメモリを節約でき、ブラウザ負荷に合わせて再描画の準備が整った際に実行できて負荷低減につながる。

サーバ内のタイマーに `setInterval` を用いた。受講生が「待機する」ボタンを押してから（即ち権限取得状態となった後の）待ち時間と、操作権限を維持して操作可能となる時間について別のタイマーを用いたので、不一致が発生してエラーになる可能性を残した。もともと `setInterval` 自体が正確に時間を測れないため、`process.hrtime` などのより正確な現在時刻を測れるタイマーが望ましい。

Git の操作や web ページの URL 入力、コピー＆ペーストの右クリック入力場所に戸惑う受講生もいたが、TA や教員が教室を回って補助も行い、受講生達は次々とページを完成させていった。ホームページが完成すると、自分達で作成した全員の自己紹介が各自のPCで見られ、各グループ毎に異なる3D画像が同期して操作できることに受講生たちは非常に興

味をもった様子で、歓声があがるよりむしろページ操作に夢中になって楽しんでもらった。

6. WLAN/LAN トラフィック実験

通常パソコンをネットワークに接続するためには、無線 LAN (WLAN) や有線 LAN (LAN) を用いるので、これらにどのような違いがあるのかを受講生に理解してもらう。Bit per second (bps) や Giga Byte (GB) などといったデータ単位について簡単に学んでもらった後にグループに分かれ、PC で 1GB の動画ファイルをサーバからダウンロードしてもらう。ダウンロードの際、WLAN と LAN の切り替えや通信状況を観察できるソフトウェア TCP Monitor Plus⁹⁾ を使用しそれぞれの違いを実際に見て確認してもらった。ローカル環境の6台のPCとWLAN/LAN使用可能アクセスポイント（ルータ）、WLAN子機等を使用し図9や図10を使い、トラフィックの測定方法や通信速度の意味を説明した。この他、スイッチを使った帯域制限やトラフィックの継続的な観察¹⁰⁾も紹介した。事前実験用の環境を用意して表3のようなトラフィックを予め確かめておき当日再現したが、受講生達は説明よりもむしろグラフのリアルタイムな変動に驚いていた。



Fig. 9 Traffic monitor

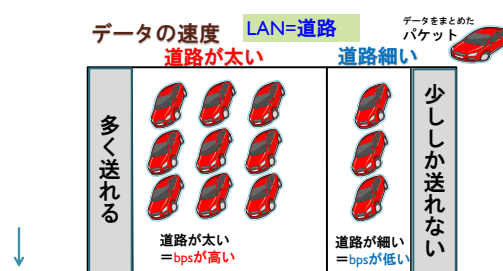


Fig. 10 Bit rate and bandwidth

Table 3 Traffic of LAN and WLAN

通信速度		最大速度 (Mbps)		平均速度 (Mbps)		
番号	PC名	無線1台	有線1台	無線3台	有線3台	有線2台
2	A	受信側と同じ		受信3(2)台の合計		送信側
3	B	17.808	92.257	6.62	88.523	受信側
4	C	16.735	92.011	3.387	0.75	18.141
5	D	17.345	92.246	7.03	2.984	74.082

7. 講座の指導の流れを俯瞰して

教員の指導の元とは言え、TA は毎年交代するため数回のリハーサルを経て講座に望んだ。講座初日はTA も緊張するなど修正点はある、時間配分も調整する必要があった。受講生のスキルのばらつきは当然なので、3D 画像操作可能なページ作成やバージョン管理等を体験してもらうには時間制約が強く、作業の意味を理解してもらうに至るにはやや駆け足となる。殆どパソコンを使ったことがない受講生にも理解できるように端的かつ丁寧に説明するつもりで臨むとよりスムーズに進行できるであろう。回を重ねるごとに説明を簡素化し、実習・体験の時間を多くとったことも好評につながったと思われる。

興味を持つことで本人の将来に向けた考えに影響を与えるケースも多く、当然とはいえ楽しく取り組んでもらうことは受講生にとって大切な要件である。このような事情もあり、TA が校内の道案内も行い小学生とともに昼食をとり雑談にも加わり、最近小学校で何が流行っているかや、スマートフォンのゲーム等の話題の応対をして、講座内容のみならず、受講生に高専の様子を体験してもらう機会ともなった。

教育センター側の理解を得た上で小学生と年齢が比較的近い TA による指導を中心としており、教員が小学生指導の中心となるよりも、受講生は馴染みやすく質問応対や補助も受け入れ易い。楽しんで受講してもらうためのみならず、内容理解にも大いに意味がある。企画や教材設計も教員指導のもと TA が主体的に行ったため、受講生視線から見た興味をもたらす内容となり、さらに、受講生が自分達でもおこなってみようとの意欲にもつながりやすく、非常に効果が高い。また、TA 学生にとっても人を指導することが本人自身の理解につながる得がたい機会になっている。

8. まとめ

小学校科学教育センター講座は年間をかけ十箇所程度（教育機関や企業、小学教員指導の自由研究）を巡回受講するため、科学（或いは理科やその延長に直

接含まれる領域）にこだわらず、本校の特徴であるものづくり要素を大いに取り入れると、受講生に新たな理解を育む機会となり教育センターの趣旨にも添うこととなる。引率教員コメント、受講生アンケート値や感想からも本校講座は望ましい方向で実施できているが、設備や装置に依存し過ぎると他の講座提供組織との差別化が難しくなるため、より発展を図る際も、殆どの受講生が今後日常的に取り扱える範囲を対象として、もう少し学習を重ねれば自分でもできるのでは、と思える方法をとるべきであろう。これらの意味でも本インターネット講座は望ましい実施状況である。

実施後のアンケート＜回答者 109 名＞では、本校を「知っていた」53%に対し、「研究室等を見学したい」は 74%であり、講座提供による本校に対する認知度向上の効果が見られる、「楽しかった」91%、「また参加したい」88%であり受講生の興味に添った内容であったと窺える。丁寧に教えてくれてインターネットについてすごく分かった；3D モデルを動かし面白かった；今までやったことのないことにとっても楽しんで取り組めた；いつもは見るだけで「つくる」ことはなかったのととても楽しかった、等と本講座は大変好評であった。過年度においても、毎年受講者から大変好評を得てきている。

受講生は自身で IP アドレスを見つけ出し手書きで画用紙に表示し、相互のチャットでその役割を体感しつつ理解した。講座に焦点を絞ったマナーも行い、使い方だけでなく安心してインターネットを利用できるよう心がけた。ほぼ経験がないと思われるソースプログラムのコーディングやファイル管理、サーバ操作も予め用意した雛形に沿ったものとは言え受講生自身に行ってもらい、ホームページが完成した際には「ものづくり」の達成感を十分得てもらっている。3D モデル操作も含めグループでホームページを完成させることで、インターネットで共同作業ができることも学んでもらえ、その中では受講生は意識することなく、ネットワークプログラミングや同期処理・排他制御の体験もできている。ルータの動作や WLAN/LAN の仕組み、トラフィック観測等も併せ、興味を持ちながらの自らの手を動かす実習を通して十分なインターネット構造理解となり、地域科学教育に貢献し得たと確信している。

謝辞

八王子市小学校科学教育センターの先生方，八王子市教育委員会様，並びに，講座の準備と実施にご協力下さいました本校技術室の溝口将吾様と伊藤祐様，本校企画室各位に深謝致します．

参考文献

- 1) <http://www.city.hachioji.tokyo.jp/kyoiku/kyoikujoho/009473.html>
http://www.city.hachioji.tokyo.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/009/473/katsudoutiran26.pdf. (2014.10.31 access)
- 2) 八王子市小学校科学教育センター，八王子市教育委員会，“平成 25 年度科学教育センター活動記録 第 43 回,” Feb. 2014.
- 3) 門脇雄治，小林正崇，安藤岬，野崎博樹，木村鉄哉，林美友梨，田中晶，三谷知世，“小学生に向けたインターネット講座の考案と実施,” 第 4 回大学コンソーシアム八王子学生発表会，pp.26-27, Dec. 2012.
- 4) 伊藤総一郎，岡野慎史，青柳智子，田中晶，大塚友彦，林丈晴，“小学生に向けた体験学習によるインターネット講座,” 第 5 回大学コンソーシアム八王子学生発表会，pp.44-45, Dec. 2013.
- 5) WebGL, <https://www.khronos.org/webgl/> (2014.10.31 access)
- 6) <http://www.centos.org/> (2014.10.31 access)
- 7) <http://git-scm.com/> (2014.10.31 access)
- 8) <http://www.microsoft.com/ja-jp/download/details.aspx?id=6501> (2014.10.31 access)
- 9) <http://hp.vector.co.jp/authors/VA032928/> (2014.10.31 access)
- 10) <http://www.zabbix.com/jp/> (2014.10.31 access)

(平成 27 年 3 月 5 日受理)

©東京工業高等専門学校

東京工業高等専門学校研究報告書

第 46(2)号

平成 26 年度

平成 27 年 3 月 31 日発行

編集者 東京工業高等専門学校図書委員会

発行者 東京工業高等専門学校

東京都八王子市櫛田町 1220-2

TEL (042) 668-5111

The name of this journal has been changed from “*Research Reports of Tokyo National College of Technology*” into “*Research Reports of National Institute of Technology, Tokyo College*” since the 2014 issue.