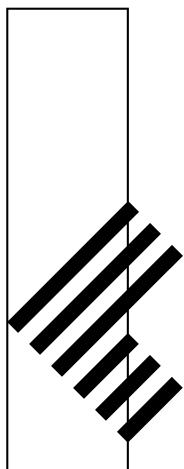


工学院大学  
総合研究所年報  
第21号 2013年度



平成26年7月発行

工学院大学総合研究所

RESEARCH INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
KOGAKUIN UNIVERSITY

# 工学院大学における大学院教育と研究

学長 水野 明哲

工学院大学では学部を卒業した優秀な学生が大学院修士課程に入学することを歓迎している。ひとつにはよりレベルの高い人材を社会に送り出せるからであり、さらには工学院大学の研究に貢献をしてもらえるからである。

学生は学部を卒業するときに、就職するか大学院に進学するか迷う。研究への情熱から大学院を選ぶ者もいるが、いい就職があるなら学部卒で就職してしまおう、と考える者も少なくない。2013年度卒業生のうち大学院に進学したのはおよそ20%であり、それ以外のほとんどが就職した。我々は、これを少なくとも30%、できれば50%まで高めていきたいと考えている。

大学院では、指導教員の下で指導を受けながら研究を展開することになる。教員は教育や外部の学会等の仕事もあり、研究に十分な時間を割くことができないため、大学院生は貴重な研究上の戦力である。大学院生が研究成果を国際学会で発表することを奨励するため、旅費の補助を行っている。この制度を活用して海外発表に出かける大学院生は、年間80名程度に上る。モチベーションの高い大学院生を社会に送り出すことを後押しする制度だと思っている。

大学院では、講義を受けることと、研究をすることが行われる。指導教員は大学院生が研究面で大きな成果を上げてくれることを期待し、時として研究者への発展を期待しがちである。しかし、現実には研究職につける者は極めてまれで、大多数が企業に就職してさまざまな職種に就く。そうだとすると、専門の研究を深めることも大切であるが、一方で高い見識と広い視野を持った学生を育て、社会に送り出すことが大学院の使命であることを意識しなければならない。

だとすれば大学院教育は、広い分野の講義をバランスよく履修することと、専門の研究を深めることの両方をバランスよく習得することが望ましいということになる。たぶん、企業も、狭い専門の知識を持つだけでなく、幅広い視野を持つ人材を求めていると考えるのが適切であろう。将来マネジメント業務を行う際には、リーダーシップやマネジメント力、バランス感覚などが重要で、そういう能力を育てることを考えているであろう。今後の大学院カリキュラムを考える上で重要なキーになりそうである。

同じことは、博士課程修了者についてもいえることである。博士課程まで進んで研究を深めたとしても、就職してその専門をそのまま生かせる場は少ない。むしろ、幅広い能力を生かして企業でマネジメント力を発揮するケースが多いようである。博士課程の院生の指導においても、このような視点を大切にしていきたい。

## 学内競争的研究費と成果主義、そして学生教育力

総合研究所 所長 小野幸子

本年報は 2013 年度に終了あるいは継続の学内競争的研究費であるプロジェクト研究と、2013 年度実施の科研費採択奨励研究費の支援を受けた研究の成果を掲載し報告するものです。科研費採択奨励研究費は今年で実施 3 年目となります。学振/文科省の科研費審査の評価点に基づき配分するもので、プロジェクト研究が学内での審査を経るのに対して外部評価によるとの違いはありますが、いずれも競争的資金としての形を明確に示しています。これは、成果主義に基づいて配分される研究費と言え、本学において、画期的な考え方による競争的資金となっています。これらは、意欲の高い研究者の研究支援として、さらなる研究の活性化と外部資金の導入につながることが期待されております。

教員の研究活動支援のため、研究活動の企画・マネジメント、研究成果の活用促進等を行う専門職であるリサーチアドミニストレーター（URA）を戦略的に置く大学が国公私立を問わず増えています。規模の大きな大学では、分野ごとに URA を置き、JST などの大型資金への導入のノウハウを駆使し、応募の促進と研究者への支援が行われています。その結果、もし億単位の資金導入に繋がれば、URA 雇用費用も十分補って余りあるものになります。文科省においても、URA などの専門職の大学への導入を補助金の対象として奨励しています。特に私学で教育と研究の両立のため日夜骨身を削っている教員にとっては、URA の存在は大きな助けとなり、忙しさの為に諦めている大型資金への応募も増加することが考えられます。本学においてもいざれはそのような方向に進むことが期待されます。

先日の日経新聞に、全上場企業の人事担当者が評価する大学の順位が掲載され、本学が全国の大学の中で、総合ランキングで第 14 位(早稲田、慶應、関西学院に次ぐ私大第 4 位)という素晴らしい結果が報告されていました。側面別ランキングでは、独創性：第 5 位、対人力：第 8 位、専門性・仕事力：第 9 位という結果です。日々学生の研究室の中での圧倒的な成長を見ている教員としては、まさに“我が意を得たり”の結果ではないでしょうか。高い研究への姿勢、妥協を許さない、日々ベストを求める研究への対峙が上記の評価を得る学生を育てることに繋がっているでしょう。対人力の内容は“科学活動に積極的に取り組んでいる、コミュニケーション能力が高い、ストレス耐性がある”と説明されています。まさに本学が、工学教育を通じて鍛え育てている学生の姿と重なります。研究の推進が結果として素晴らしい学生教育に繋がることを改めて確認した、嬉しいニュースでした。

# 目 次

学長 水野 明哲  
総合研究所所長 小野 幸子

## 1. 総合研究所プロジェクト研究報告（2013年度研究終了）

- A Study on New Application Level Link Aggregation by Overlaying Network Concept Implementation on Android Terminals

責任者 浅谷 耕一…………… 11

- 細胞の増殖、分化、機能維持を制御する蛇毒因子の単離とその機能に関する研究

責任者 辛 英哲…………… 19

## 2. 総合研究所プロジェクト研究報告（2014年度継続研究）

- 遠隔操作する災害対応ロボットに資する動的電波マップ生成に関する研究

責任者 羽田 靖史…………… 29

- 放射性物質の回収とリン酸塩ガラス異常現象を利用した長期安定的固定化

責任者 大倉 利典…………… 35

- 高品質 In 系窒化物半導体の結晶成長とデバイス製作プロセスの構築

—高品質 GaInN 膜の構造評価とデバイス応用—

責任者 山口 智広…………… 41

- 新高精度超音波距離計測法による介護環境等での動き検知システムの研究

責任者 斎田 光孝…………… 48

- 表面ナノ構造を基礎とした機能性薄膜の形成

責任者 阿相 英孝…………… 58

- バーチャル力学に基づく多脚ロボットの全身位置・姿勢・力・モーメントの知的歩行制御

—バーチャル力学モデルに基づく 6 足歩行ロボットの姿勢と振動のロバスト制御—

責任者 黄 慶九…………… 63

- 大学間連携による広域共助システムの構築

責任者 久田 嘉章…………… 71

- 分子プレカーサー法による次世代薄膜リチウムイオン電池の作製

責任者 佐藤 光史…………… 84

- 八王子市犬目町地域の理科教育に果たした斎藤家の役割に関する基礎的研究

責任者 数馬 広二…………… 93

## 3. 総合研究所科学研究費採択奨励研究報告（2013年度）

- カルシウムイメージングデータからの細胞位置およびスパイク時系列自動推定

竹川 高志…………… 105

- バリオジエネシスに動機づけられた統一理論の構築と探求

進藤 哲央…………… 106

・ エンベデッド・シミュレーションによる電気鉄道饋電システムの数値的最適設計および制御	
	高木 亮……………
107	
・ 多剤耐性克服薬の開発を志向したセコスリキシドの全合成研究	
	南雲 紳史……………
	108
・ 放射性物質の回収とリン酸塩ガラス異常現象を利用した長期安定的固定化	
	大倉 利典……………
	109
・ 体性感覚を通じたフィードバック情報量の最適化に関する基礎研究	
	福岡 豊……………
	110
・ ドライ電極によるBCIシステムと健常者による評価	
	田中 久弥……………
	111
・ 特許権侵害に対する救済のあり方がイノベーションと特許出願行動に与える影響の分析	
	矢崎 敬人……………
	112
・ 適応制御型ヘテロジニアスネットワークー通信性能の向上と低消費電力化の両立ー	
	大塚 裕幸……………
	113
・ セラミックスを含む異材接合体の高強度化と耐久性評価	
	立野 昌義……………
	114

## 2014年度総合研究所運営委員

総合研究所所長	小野 幸子（応用化学科教授）
所長代理	長嶋 祐二（情報デザイン学科教授）
大学院運営委員会委員長	今村 保忠（応用化学科教授）
機械系学科互選	伊藤慎一郎（機械工学科教授）
化学系学科互選	中尾 真一（環境エネルギー教授）
電気系学科互選	坂本 哲夫（電気システム工学科教授）
建築学部互選	小野里憲一（建築学科教授）
情報学部互選	長嶋 祐二（情報デザイン学科教授）
グローバル エンジニアリング学部互選	疋田 光孝（機械創造工学科教授）
基礎・教養教育部門	林 真理（基礎・教養教育部門教授）
U D M センター長	久田 嘉章（まちづくり学科教授）
E C E C センター長	鷹野 一朗（電気システム工学科教授）
F M S センター長	鈴木 健司（機械システム工学科教授）

# 2013年度総合研究所研究一覧（学内研究費）

## (プロジェクト研究)

研究課題	研究責任者	所属学科・職名は2013年度
<b>・2013年度研究終了</b>		
A Study on New Application Level Link Aggregation by Overlaying Network Concept Implementation on Android Terminals	淺谷 耕一	情報通信工学科 教授
細胞の増殖、分化、機能維持を制御する蛇毒因子の単離とその機能に関する研究	辛 英哲	応用化学科 准教授
<b>・2014年度継続研究</b>		
遠隔操作する災害対応ロボットに資する動的電波マップ生成に関する研究	羽田 靖史	機械システム工学科 准教授
放射性物質の回収とリン酸塩ガラス異常現象を利用した長期安定化の固定化	大倉 利典	環境エネルギー化学科 教授
高品質 In 系窒化物半導体の結晶成長とデバイス製作プロセスの構築 一高品質 GaInN 膜の構造評価とデバイス応用一	山口 智広	情報通信工学科 准教授
新高精度超音波距離計測法による介護環境等での動き検知システムの研究	疋田 光孝	機械創造工学科 教授
表面ナノ構造を基礎とした機能性薄膜の形成	阿相 英孝	応用化学科 准教授
バーチャル力学に基づく多脚ロボットの全身位置・姿勢・力・モーメントの知的歩行制御 一バーチャル力学モデルに基づく6足歩行ロボットの姿勢と振動のロバスト制御一	黄 慶九	電気システム工学科 准教授
大学間連携による広域共助システムの構築	久田 嘉章	まちづくり学科 教授
分子プレカーサー法による次世代薄膜リチウムイオン電池の作製	佐藤 光史	基礎・教養教育部門 教授
八王子市犬目町地域の理科教育に果たした斎藤家の役割に関する基礎的研究	数馬 広二	基礎・教養教育部門 教授

(科学研究費採択奨励研究)

研 究 課 題	研究者	所属学科・職名は 2013 年度
カルシウムイメージングデータからの細胞位置 およびスパイク時系列自動推定	竹川 高志	情報デザイン学科 助教
バリオジエネシスに動機づけられた統一理論の構築 と探求	進藤 哲央	基礎・教養教育部門 准教授
エンベデッド・シミュレーションによる電気鉄道饋電 システムの数値的最適設計および制御	高木 亮	電気システム工学科 准教授
多剤耐性克服薬の開発を志向したセコスリキシドの 全合成研究	南雲 紳史	応用化学科 教授
放射性物質の回収とリン酸塩ガラス異常現象を利用 した長期安定的固定化	大倉 利典	環境エネルギー化学科 教授
体性感覚を通じたフィードバック情報量の最適化に 関する基礎研究	福岡 豊	電気システム工学科 教授
ドライ電極による BCI システムと健常者による評価	田中 久弥	情報デザイン学科 准教授
特許権侵害に対する救済のあり方がイノベーション と特許出願行動に与える影響の分析	矢崎 敬人	機械創造工学科 准教授
適応制御型ヘテロジニアスネットワーク －通信性能の向上と低消費電力化の両立－	大塚 裕幸	情報通信工学科 教授
セラミックスを含む異材接合体の高強度化と耐久性 評価	立野 昌義	機械工学科 教授

# 1. 総合研究所プロジェクト研究報告 (2013年度研究終了)

# A Study on New Application Level Link Aggregation by Overlaying Network Concept Implementation on Android Terminals

-A New Application Level Link Aggregation with Roaming on Android Terminals-

Koichi ASATANI \*1 and Hidenori Nakazaro\*2

\*1 Department of Computer Science and Communications, Kogakuin University  
1-24-2 Nishishinjuku, Shinjuku, Tokyo, 163-8677 Japan

\*2 Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, Waseda University  
1-3-10 Nishi-Waseda, Shinjuku-ku, Tokyo 169-0051, Japan

**ABSTRACT:** Link aggregation bundles multiple physical links on a single virtual link, enabling very high-speed and large-capacity data communications. It also enables redundant communications. Several link aggregation methods have been proposed. These methods utilize transport layer link aggregation.

Link aggregation enables very high-speed and large-capacity data communications by aggregating multiple physical links on a single virtual link. It also enables redundant communications. Several link aggregation methods have been proposed. These methods utilize transport layer link aggregation.

In this report, a new application level link aggregation is proposed and implemented on Android OS, which is one of the popular OSs for mobile devices such as smartphones and tablet PCs. The proposed application level link aggregation method is verified with use of an implemented terminal. Roaming scheme for the link aggregation is also proposed for terminal movement from an access network to another access network. It also verifies the scalability of the proposed link aggregation scheme by using multiple terminals.

## 1. INTRODUCTION

Link aggregation has been studied to realize high-speed and large-capacity data communications [1], [2]. Link aggregation provides a single logical link by bundling multiple physical links. It enlarges the bandwidth of a logical link being not limited to a physical link bandwidth. The upper limit of bandwidth of a logical link is approximately given by the total sum of those of physical links. Link aggregation provides communication redundancy. More specifically, if packets are lost on a physical link, they are retransmitted on another physical link, and therefore transmission of packets can be guaranteed.

Link aggregation has been proposed for various communication systems. For Ethernet, IEEE802.3ad is specified [1]. A multi-link radio system with link aggregated MIMO (Multi-Input Multi-output) transmission has been proposed [2]. The cognitive layer link aggregation [3],

and M/TCP (Multi Path / Transmission Control Protocol) in transport layer are proposed [4]. In these methods, link aggregation is achieved in transport or lower layers. Therefore, they require modifications of the existing transport or lower layer functions and are not easy to be implemented. These existing methods are limited to wired link aggregation or wireless link aggregation [5].

In this report, we propose a new link aggregation method on application layer, which enables link aggregation for wireless and/or wired links by adopting the overlay network concept. The proposed link aggregation is done in application layer and requires no modifications in the existing transport or lower layers. We propose a roaming scheme for terminal movement from an access network to another access network. As a preliminary experiment, link aggregation by using multiple Android terminals are verified by controlling a number of available links.

## 2 PROPOSED ROAMING OF APPLICATION -LEVEL LINK AGGREGATION

## 2.1 Architecture

The configuration of the proposed roaming scheme is shown in Figure 1. When a client starts link aggregation communication, a client can access Base Station A, and Access Point B. The client is assumed to be located in the overlapping area of a base station and access point coverages to be able to use multiple access systems. The protocol stack of the proposed link aggregation scheme using two physical links is shown in Figure 2. The server sends data, and the client performs data restoration. Two TCP connections are independently established by the application.

The proposed link aggregation scheme includes four functions; (1) dynamic link control function which switches from/to link aggregation mode communication to/from a single link communication mode, (2) dynamic data distribution balancing function which determines appropriate data distribution ratio between two links by observing throughputs, (3) dynamic distribution ratio control function which controls distribution ratio to adapt temporal link throughput variation during data transfer, and (4) roaming function to adapt client movement from an access network to another access network.

## 2.2 Dynamic link control function

The following description is for aggregation of two physical links. The client sends test data to measure link throughputs along with available links when it tries to establish new connection on each link. It determines whether link aggregation mode or a single link mode is adopted based on the measured throughputs.

## 2.3 Dynamic link control function

The following description is for aggregation of two physical links. The client sends test data to measure link throughputs along with available links when it tries to establish a new connection on each link. It determines whether link aggregation mode or a single link mode is adopted based on the measured throughputs.

## 2.4 Dynamic distribution balancing ratio control function

In case that link aggregation is adopted, data distribution ratio

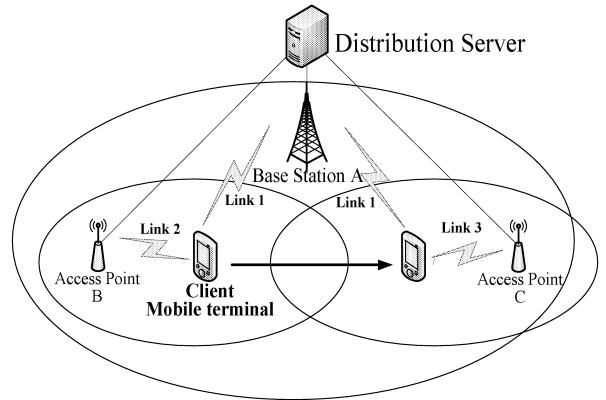


Figure 1 Configuration of the proposed roaming scheme

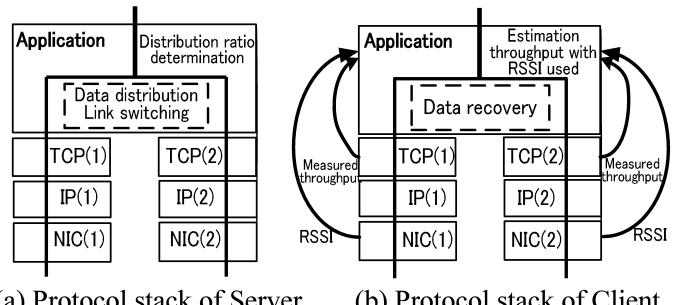


Figure 2 Protocol stack of the proposed link aggregation

between links is determined. The client notifies the ratio to the distribution server. The distribution ratio is determined to maximize the overall throughput using link aggregation. When the throughput change is detected, the distribution ratio is dynamically updated to adapt the throughput variation. Thus, the overall throughput is maintained to be maximal. If the overall throughput of link aggregation mode becomes inefficient as compared with the throughput of a single link mode, this function switches to a single link mode from link aggregation mode.

During the data transfer, the throughput of each link is measured by observing the data receiving rate through each link at the client. By using the measured throughputs, the function continues to update the distribution ratio for link aggregation mode, and also judges if the link aggregation mode is maintained or is switched to single link mode. In case of switching to single link mode, the dynamic link control function observes link performance and tries to switch back to link aggregation mode based on the measured performance. The

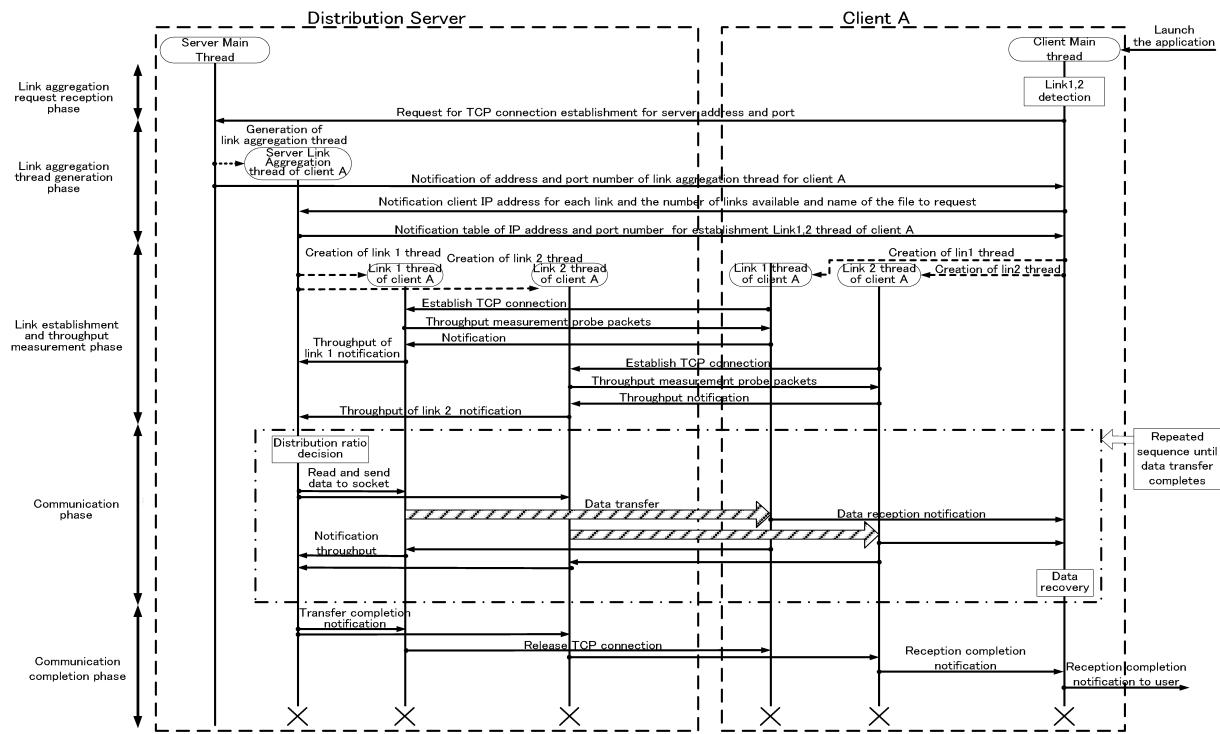


Figure 5 Sequence diagram of the proposed link aggregation scheme

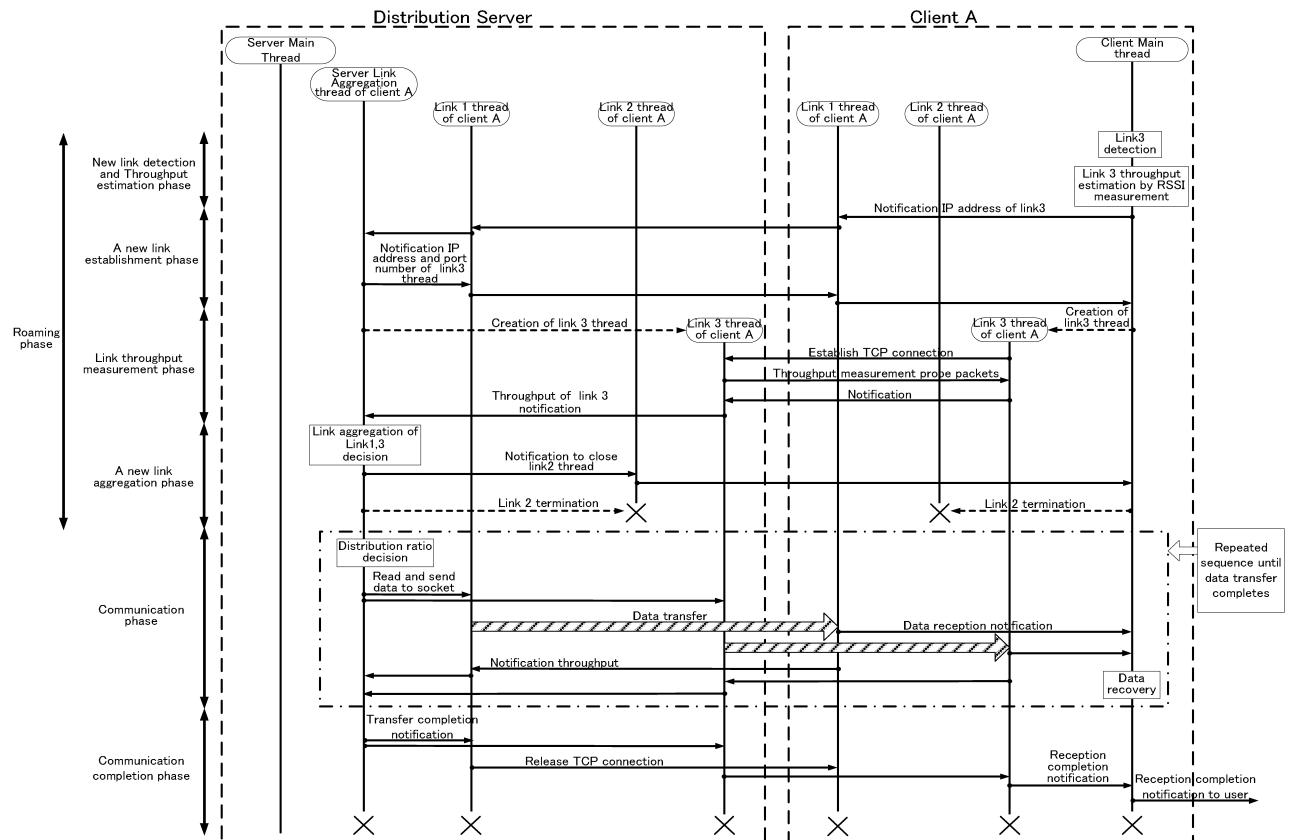


Figure 6 Sequence diagram of the proposed roaming Scheme

performance observation is done by sending test data along with the associated links. If the throughput of each link varies continuously during link aggregation mode, this function updates the distribution ratio repeatedly from the measured throughput of each link and notifies updated ratio to the delivery server.

The distribution ratio is determined based on measured throughput of each link. The distribution ratio is given by the following. Distribution ratio for link  $i$  is applied throughput of link  $i$  divided by a sum of throughputs of aggregated links.

The distribution ratio between two links is given by the following, assuming the throughputs of link A, and B are  $\alpha$ , and  $\beta$ , respectively. Data ratio applied to link A is given by  $\alpha/(\alpha + \beta)$  and data ratio applied to link B is given by  $\beta/(\alpha + \beta)$ .

## 2.5 Dynamic distribution ratio control function

The determined distribution ratio is send to the distribution server to notify the ratio via each data link. This is for redundant distribution ratio notification. After the distribution server is notified of the distribution ratio, the server distributes data to each link following the notified distribution ratio. If the throughput varies during the data transfer, the distribution ratio is dynamically updated to adapt the throughput variation. There is a time difference in the client between timings of data reception completion of associated links. Therefore, the distribution ratio is updated when the varied throughput is measured to be greater than or equal to the specified threshold.*Roaming function*

If link 3 is detected by the client, link 3 throughput is estimated based on the detected RSSI of AP. If the estimated throughput is higher than the prescribed threshold for link aggregation, link 3 is established and the throughput is measured. An example of the relationship between RSSI and throughput for IEEE802.11b is shown in Figure 3 [6]. The link aggregation decision is made by two steps. The first decision is based on the estimated throughput through the relationship between RSSI and the throughput as in Figure 3. If the estimated throughput is higher than the prescribed threshold, then the second step follows. The second step is the throughput

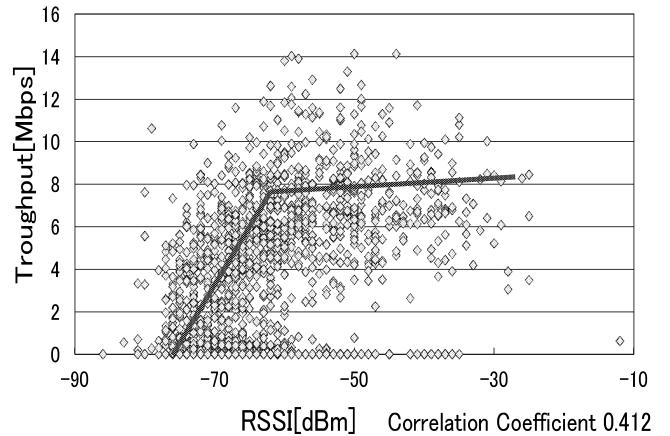


Figure 3 IEEE802.11b of relationship of RSSI and throughput

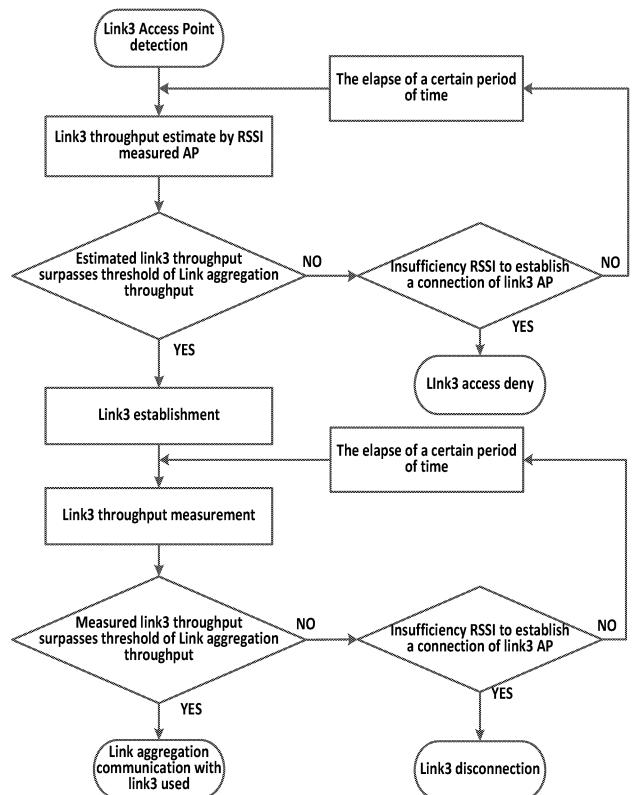


Figure 4 Flow chart of the proposed roaming scheme

measurement by using the test data. If the measured throughput is again higher than the prescribed threshold, then the link aggregation is achieved. Flow chart of the proposed roaming scheme is shown in Figure 4.

### 3 SEQUENCE OF APPLICATION-LEVEL LINK AGGREGATION

#### 3.1 Link aggregation communication sequence

The proposed link aggregation sequence is shown in Figure 5, where link 1 and link 2 are aggregated, as an example.

##### (1) Link aggregation request reception phase

Main thread of a distribution server (Server Main thread; SM thread) awaits a link aggregation request from a client. Client A launches the application and generates a main thread in client A (Client Main thread; CM thread), and sends a link aggregation request to a distribution server.

##### (2) Link aggregation thread generation phase

The distribution server generates a link aggregation thread (Server Link Aggregation thread; SLA thread) for client A when it receives a link aggregation request from client A. SLA thread has dynamic link control, dynamic distribution balancing ratio control, and dynamic distribution ratio control functions.

SM thread notifies address and port number of SLA thread for client A to client A. Client A notifies IP addresses of each link, the number of available links, and requested file ID to SLA thread for client A when it receives the notification from the distribution server.

SLA thread and CM thread generate link threads based on the notification about the number of available NICs and IP addresses of each link for client A, and IP addresses and port numbers for client A in the distribution server. As many link threads are generated as the number of available links for the link aggregation. The data is transferred through those link threads.

##### (3) Link establishment and throughput measurement phase

The link thread of each link for client A establishes TCP connection. The link threads in the distribution server send the throughput measurement packets. Client A notifies the distribution server of the throughput of each link which is obtained with measurement packets.

##### (4) Communication phase

SLA thread determines the distribution ratio between two links based on the notification of throughput of each link from client A.

Table 1 Experimental equipment

Clients	Distribution server
Model No.	Vostro 3300
CPU	Intel i5 M480
Virtualization Soft ware	Virtualbox 4.1.6
Host OS	Windows7 Home Premium
Guest OS	Android2.3 x86
Wireless Interface (IEEE802.11g)	GW-USMicro-G
Wireless Interface (IEEE802.11n)	GW-USValue-EZ
Access points	
AP1, 3	WZR-HP-G301NH
AP2, 4	CG-WLBARAGM

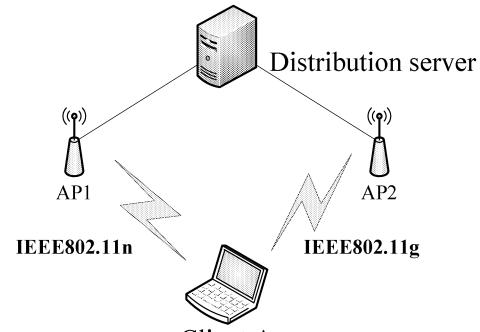


Figure 7 Link aggregation configuration for single terminal

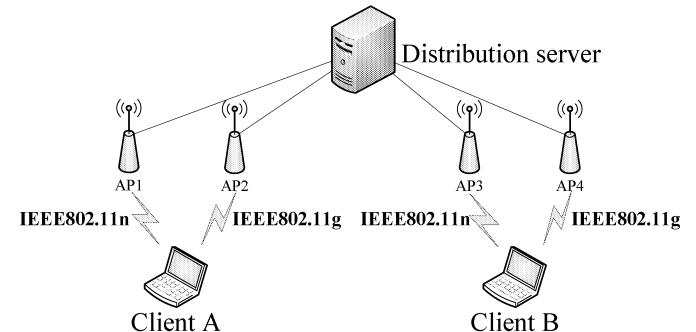


Figure 8 Link aggregation configuration for multiple terminals

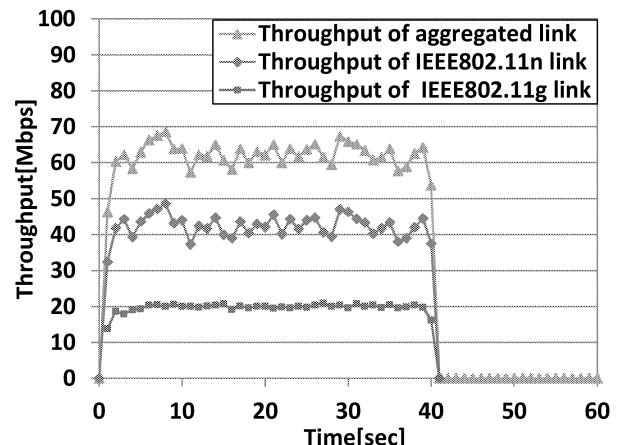


Figure 9 Throughput of link aggregation with individual terminal used.

The variation of throughput during communication is measured by the effective throughput of received data through each link in client A. Distribution ratio of between two links is dynamically updated by being notified of throughput of each link from client A.

SLA thread distributes the data to each link threads according to the distribution ratio. Each link thread send distributed data packets to each link.

If the client A receives the prescribed data size from the distribution server, received data packets are aligned by using sequence numbers, and the original data is recovered.

The link aggregation communication phase is repeated until the data transfer completes.

#### (5) Communication completion phase

When the data transfer completes, SLA thread sends transfer completion notification to each link thread in the distribution server. Each link thread in the distribution server releases TCP connection when it receives the notification of transfer completion from the distribution server. Each link thread for client A sends reception completion notification to CM thread after verifying TCP connections release, and CM thread sends reception completion notification to the user of client A when it receives the notification of the reception completion. The communication is completes.

### 3.2 A new link detection sequence

The proposed roaming scheme sequence is shown in Figure 6, where two links are aggregated and roaming is requested from AP2 to AP3.

#### (1) New link detection and throughput estimation phase

CM thread detects AP of a new link 3 and estimates throughput of link 3 based on the measured RSSI.

#### (2) A new link establishment phase

If the estimated link 3 throughput surpasses the link aggregation threshold, CM thread sends IP address and port number of NIC of link3 to establish link 3 connection.

#### (3) Link throughput measurement phase

SLA thread and CM thread create each Link3 thread. Link 3 connection between these link 3 threads is established and the

effective throughput is measured by client A. The measured throughput is notified to SM thread in the distribution server.

#### (4) A new link aggregation phase

If the measured throughput surpasses the link aggregation threshold, SLA thread notify termination of link 2 thread to CM thread. Link aggregation using link 3 starts after link 2 thread is terminated.

## 4 MULTIPLE TERMINAL LINK AGGREGATION EXPERIMENTS

### 4.1 Experimental configuration

To verify the proposed link aggregation as a preliminary experiment, link aggregation experiments were conducted by building experimental networks with the implemented system. Two kinds of networks are setup; one is for link aggregation of single terminal, and the other is link aggregation of multiple terminals for scalability feasibility. Download test data size is 300MB. Two wireless links used IEEE802.11g and IEEE802.11n. The channels were chosen to avoid the interference between both links. The equipment used in the experiments is summarized in Table 1. The configurations of the link aggregation of individual terminal and link aggregation of multiple terminals experiments are shown in Figure 7 and 8, respectively.

When the disconnected link recovers, link aggregation mode adapts the link recovery. This experiment was conducted by single and multiple terminal link aggregation experiment. IEEE802.11n link was disconnected for single terminal link aggregation. IEEE802.11n link for client A, IEEE802.11g link for client B were disconnected for multiple terminals link aggregation. Disconnection happened in fifteen seconds after link aggregation mode started and the link was reconnected after ten seconds.

### 4.2 Experimental results

The experimental results on the throughput of single terminal link aggregation are shown in Figure 9. The throughput of a new connection and disconnection link management for single terminal link aggregation are shown in Figure 10.

These experiments verified that the data transfer on each link ended at almost same instant. This means that data distribution ratio control was achieved properly. Switching to link aggregation mode from single link mode was successfully verified when the disconnected link recovered and became available after fifteen seconds. In the experimental results of multiple terminal link aggregation as shown in Figure 11, throughput of each client verified that the data transfer on each link ended at almost same instance.

## 5 CONCLUSION

In this report, we reviewed our proposed roaming scheme for application level link aggregation. Preliminary experiments verified the scalability of the proposed link aggregation by using multiple terminals. Implementation and evaluation of proposed roaming scheme are for future study.

## REFERENCES

- [1] Draft standard P802.3ad, Supplement to Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection(CSMA/CD)Access Method and Physical Layer Specification: Link Aggregation, draft 3.0, Nov. 1999.
- [2] Yohei HASEGAWA, Tsutomu MURASE, "A Multi-path TCP Gateway with Dynamic Path-load-balancing", Technical report of IEICE, NS2003-328, pp.175-178, Mar.2004.
- [3] Daisuke SAKAMOTO, Katsuhiro KONDO, Hiroaki MURATA, Kouichi MUTSUURA, "ML-ARQ scheme for Multilink Wireless LAN", Technical report of IEICE, IN2004-273, pp.149-152, Feb.2005.
- [4] Kentaro ISHIZU, Masahiro KURODA, Hiroshi HARADA, "Adaptive Hetero-link Aggregation in Cognitive Wireless Cloud", Technical report of IEICE, SR2006-73, pp.43-50, Mar.2007.
- [5] Takafumi Takiguchi, Hiromu Masui, Akira Hidaka, Yoshio Sugizaki, Osamu Mizuno, Koichi Asatani, "A New Application Level Link Aggregation and Its Implementation on Android Terminals", IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Aug.2012.
- [6] Junya Kawashima, "Stable Route Discovery based on Signal Stability Fluctuation for mobile Ad-hoc Networks", Master thesis, Kogakuin University, Mar.2007 (in Japanese)

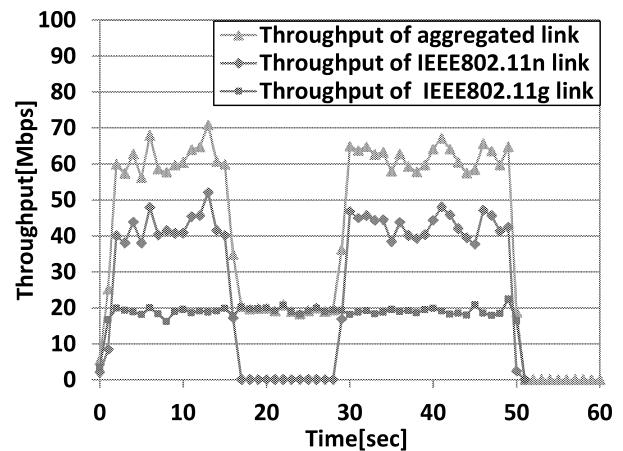
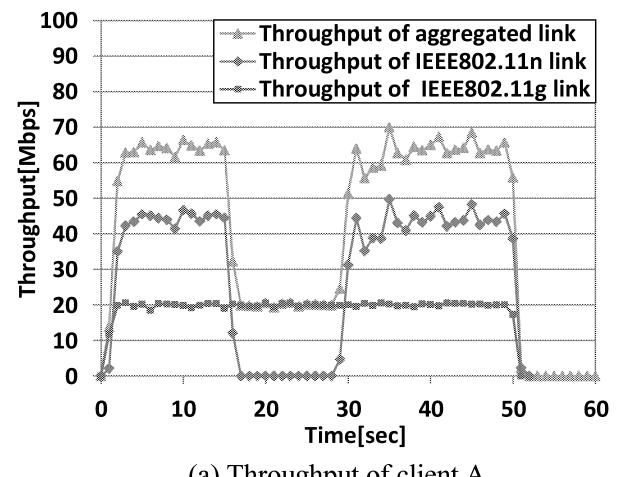
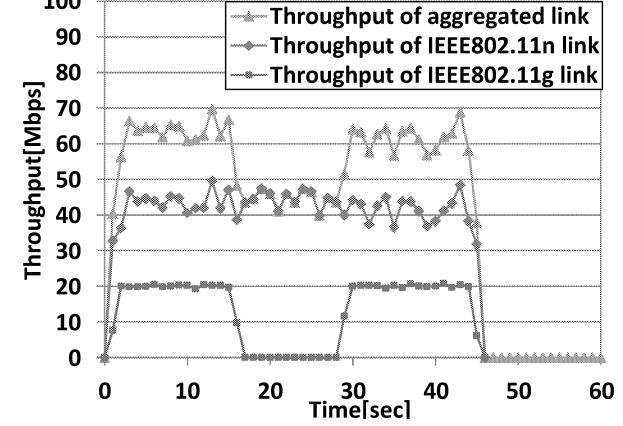


Figure 10 Tracking characteristics of disconnection and re-connection of link aggregation according to the throughput variation with single terminals used



(a) Throughput of client A



(b) Throughput of client B

Figure 11 Tracking characteristics of disconnection and re-connection of link aggregation according to the throughput variation with multiple terminals used

## ① 発表論文

[1] T. Takiguchi, H. Masui, A. Hidaka, Y. Sugizaki, O. Mizuno, and K. Asatani, A New Application Level Link Aggregation and Its Implementation on Android Terminals, Wireless Communications and Mobile Computing, Special Issue: Advances in Wireless and Mobile Computing Issues, Volume 12, Issue 18, pp. 1664–1671, Wiley, 2012. 12.

## ② 学会発表

[1] A. Hidaka, K. Asatani, K. Fujimura and O. Mizuno A New Application Level Link Aggregation and Roaming Scheme for Android Terminals, 28th International Conference on Information Networking (ICOIN2014), Phuket, Thailand, 2014. 2. 11

[2] A. Hidaka, T. Takiguchi, T. Ozawa, Y. Sugizaki, O. Mizuno, and K. Asatani, A New Application Layer Link Aggregation and Its Scalability Evaluation on Multiple Android Terminals, The 11th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-special), C4-2, Tokyo, Japan, 2012. 10. 30.

[3] T. Takiguchi, H. Masui, A. Hidaka, Y. Sugizaki, O. Mizuno, and K. Asatani, A New Application Level Link Aggregation and Its Implementation on Android Terminals (Invited), IEEE IWCNC 2012, Limassol, Cyprus, 2012. 8. 28.

[4] 藤村 和久, 日高 瑛, 淺谷 耕一, 水野 修, アプリケーションレベルリンクアグリゲーションにおける UDP 通信のローミング手法の提案, 電子情報通信学会 2014 年総合大会, 2014. 3.

[5] A. Hidaka, K. Asatani, and O. Mizuno, A New Application Level Link Aggregation with Roaming Capabilities on Android Terminals Supporting Streaming Applications, 電子情報通信学会 2014 年総合大会, 2014. 3.

[6] A. Hidaka, T. Takiguchi, Y. Sugizaki, O. Mizuno, and K. Asatani, A New Application Level Link Aggregation on Android Terminals and Its Scalability Evaluation, 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2012. 9. 12.

[7] 増井大 杉崎義雄 水野修 淺谷耕一, 無線・有線ネットワーク上のオーバレイ・ネットワークによるリンクアグリゲーション方式, 電子情報通信学会

CQ 研究会, 2011. 3. 8.

[8] 増井大, 杉崎義雄, 水野修, 淺谷耕一, 無線・有線ネットワーク上のオーバレイ・ネットワークによるリンクアグリゲーションの実験的評価, 電子情報通信学会 2011 年総合大会, 2011. 3.

[9] 増井大・杉崎義雄・水野修・淺谷耕一, アプリケーションレベルリンクアグリゲーションにおけるスループットを指標とした動的パケット分配手法, 2010 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-7-38, 2010. 9. 16.

## ③ 特許出願

無し

## 細胞の増殖、分化、機能維持を制御する蛇毒因子の単離と その機能に関する研究

工学院大学 応用化学科 辛 英哲

工学院大学 応用化学科 今村保忠

明治薬科大学 薬学教育センター 阿刀田 英子

山梨大学 医学部 井上 克枝

Isolation and Characterization of the Snake Venom Protein that Affects the Growth, Differentiation and Function of mammalian Cells.

Yongchol Shin and Yasutada Imamura, Department of Applied Chemistry, Kogakuin University:

Hideko Atoda, Department of biology, Meiji Pharmaceutical University:

Katsue Inoue, Department of Clinical and Laboratory Medicine, Yamanashi University

**ABSTRACT :** The snake venom proteins that inhibit binding of human fibrosarcoma cell(HT-1080) to collagens and fibronectin were purified from the crude venoms of *Naja atra* (Taiwan cobra) and *Ovophis okinavensis* (Hime habu) by column chromatography. Determined N-terminal amino acid sequence of one of purified proteins from the venom of *Naja atra* is identical with Cardiotoxin-4. The molecular weight of the venom protein measured by mass spectrometry well coincides with that of Cardiotoxin-4. Therefore, the purified venom protein is identified as Cardiotoxin-4, that has hemolysis activity. The Cardiotoxin-4 inhibits binding of HT-1080 as well as other tumor cells to type IV collagen more effectively than type I collagen or fibronectin. 100 kDa protein from the venom of *Ovophis okinavensis* inhibits binding of HT-1080 to fibronectin specifically, not to Type I collagen.

### 1. はじめに

コラーゲンなどの細胞外基質は細胞の足場としてだけでなく、細胞の増殖や分化、機能維持に積極的に関与していることが明らかになっている。細胞外基質と細胞の結合は、インテグリンとよばれる細胞膜タンパク質を筆頭に多くのタンパク質、糖鎖、脂質などが関与していると考えられている。インテグリンは細胞表面に発現している膜貫通型タンパク質であり、 $\alpha$ 鎖と $\beta$ 鎖の異なる2つのサブユニットが非共有結合により会合した構造をし

ており、細胞の接着、脱着において中心的な役割を果たす。哺乳類では18種類の $\alpha$ 鎖と8種類の $\beta$ 鎖が存在し、その組み合わせが異なる24種類のインテグリンが知られている。インテグリンの接着能は細胞が受ける種々の刺激に応じて細胞の内側からもコントロールされている。また、インテグリンを介して細胞がリガンドに接着すると、その情報は細胞内に伝えられ最終的には細胞の次の活動（生存、増殖、遺伝子発現など）を引き起こすことが分かっている。これらの結合について詳細に解析することは、細胞外基質によって細胞の増殖、分化や機能維

持がいかに制御されているかを調べる上で重要である。ヘビ毒の中にはインテグリンと競合的に結合することで細胞と細胞外基質の接着を阻害し、細胞の機能の抑制や細胞にダメージを与えるタンパク質がある。このようなタンパク質は循環器疾患の診断薬の設計、骨粗しょう症の治療薬、および血管新生により引き起こされる腫ようの増殖と転移における治療薬の設計に利用されている(1)。

Cardiotoxin (CTX) ファミリータンパク質はコブラ科のヘビ毒に多く含まれている塩基性タンパク質で、3つのループからなる構造をしており立体構造の特徴から three finger toxin ファミリータンパク質に属する(図3)。コブラ科のヘビ毒は、アセチルコリンやアセチルコリン受容体、あるいはイオンチャンネルに作用する神経毒が主に含まれていることが分かっており、神経に関する報告が圧倒的に多い。その含量は通常のコブラ粗毒中に30~50%非常に高い。タイワンコブラ粗毒由来のCTX1はマウスの骨格筋細胞の壊死を惹き起すことがわかつており、CTX2, CTX3, CTX4は溶血作用を持つことが知られている(2)。また、CTX3は腫瘍細胞の壊死を引き起こす(3)、プロテインキナーゼCの阻害することが知られている。CTX5は、インテグリン $\alpha_5\beta_3$ と結合することが知られている(4)。このようにCTXファミリーは幅広い活性を有する事が知られている。

昨年度までの研究から、CTX4が細胞接着阻害活性を有することを明らかにした。これまでCTX4に細胞接着阻害活性がある事は知られておらず、接着阻害作用機構について詳細に解析することにより、インテグリンなどの細胞膜レセプターを介した細胞外基質による細胞の増殖、分化や機能維持の制御機構の一端を明らかにする、また、腫瘍細胞などの特定の細胞の増殖や転移を制御する道具としての可能性を検討することができると考えている。本研究では、CTX4, CTX3の効率良い精製法を確立することを目指した。

一方、マムシ科のヒメハブ粗毒から、細胞外基質であるファイプロネクチンと肉腫細胞の結合を阻害する因子が存在する事を明らかにした。本研究ではこの因子を特定し、接着阻害機構を明らかにする事を目指した。

## 2. 実験方法

### 2.1 カラムクロマトグラフィーによる接着阻害因子の単離と同定

18種類の蛇毒から、細胞外基質と細胞の結合に影響を及ぼす因子を含む蛇毒を選定した。本研究では細胞外基質としてコラーゲン、ファイプロネクチンを用いた。コラーゲンは、従来ペプシン等の酵素を用いて組織から抽出するが、工学院大学の今村保忠教授により酵素を使わずコラーゲンを抽出する方法が確立されており、より生

体内の状態に近いコラーゲンを用いた。つぎに、蛇毒から種々のカラムクロマトグラフィーを用いて、目的タンパク質を精製する。本実験では、ゲルろ過クロマトグラフィー、陽イオン交換クロマトグラフィーおよび陰イオノン交換クロマトグラフィーを単独、あるいは組み合わせて、タイワンコブラ粗毒からCTXファミリータンパク質を単離し、ヒメハブ粗毒から接着阻害因子を単離した。タンパク質のN末端側のアミノ酸配列をプロテインシーカーエンサーで解析し、分子量を飛行時間型質量分析計によって測定した。

### 2.2 蛇毒タンパク質を用いた接着阻害実験

クロマトグラフィーにより分画した蛇毒タンパク質画分や単離したCTXを用いて、ヒト線維肉腫細胞(HT-1080)と各細胞外基質(I型、IV型コラーゲンおよびフィブロネクチン)との接着への影響を調べた。さらに、数種類の細胞を用いて細胞接着阻害実験を行い細胞による接着阻害活性の特異性を確認した。

また、各種プロテアーゼ阻害剤を用い、蛇毒タンパク質の性質について調べた。

### 2.3 蛇毒タンパク質の標的因子の特定

各種培養細胞を細胞溶解液に加え、3時間インキュベートした。その後、細胞溶解液を回収し、試料とした。

CTX4あるいはBSAをビオチン化した。されたCTX4あるいはBSA回収した。

#### 2.19 ビオチン化したCTX4とBSAを用いた、細胞に含まれるCTX4と結合するタンパク質の検出

この試料を電気泳動した後、PVDF膜にゲル中のタンパク質を転写した。PVDF膜上に Biotin Labeling Kit-NH<sub>2</sub>を用いてビオチン化したCTX4あるいはBSAを添加した。PVDF膜上に転写したタンパク質と結合したビオチン化CTX4あるいはBSAを、酵素標識したアビジンと反応させ、発光基質による検出を試みた。

### 2.4 蛇毒タンパク質を用いた細胞外マトリックス切断実験

I型、IV型コラーゲンおよびフィブロネクチンとクロマトグラフィーにより分画した蛇毒タンパク質画分を混合し、一定時間インキュベートした。その後、SDS-PAGEにて切断活性の有無を検討した。

## 3. 結果

### 3.1 タイワンコブラ粗毒からの接着阻害因子の単離と同定

コラーゲンとの結合阻害活性が最も強かったタイワンコブラ粗毒から、ゲルろ過クロマトグラフィーと陽イオノン交換クロマトグラフィーによって接着阻害因子であるタンパク質を効率よく精製する事に成功した(図1)。

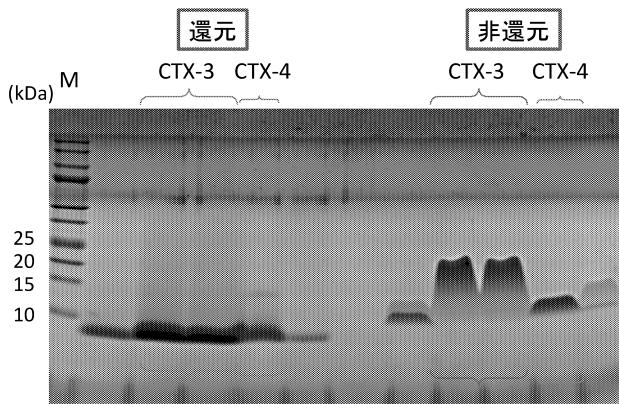


図1 単離したCTXファミリータンパク質のSDS-PAGE法による解析

単離したCTX-3およびCTX-4を、15% Tricine SDS-ポリアクリルアミドゲルを用いた電気泳動法により分析した。CTX-3, CTX-4共に還元条件下では、10kDa以下となった。一方、非還元条件下では、CTX-3は20kDa, CTX-4は10kDaであった。

単離したタンパク質の分子量を質量分析計によって測定した結果、分子量は6781.080でありCTX4（分子量6780.3846）とほぼ一致した。他のCTXファミリータンパク質も同様に単離した。単離したタンパク質の分子量を上記と同様にして測定した結果、6734.308であり、Cardiotoxin-3 (CTX3)（分子量6734.4292）とほぼ一致した。それぞれのタンパク質の収率はCTX-4が2.7%, CTX-3が7.8%であった。この2つのタンパク質のN末端側のアミノ酸配列(20残基)を解析したところ、それぞれのタンパク質の決定されたアミノ酸配列はCTX4とCTX3に完全に一致したため(システイン残基は、還元アルキル化等を行っておらず、予想された配列の位置では検出されなかった)、2つのタンパク質をCTX4とCTX3であると同定した。またゲルろ過クロマトグラフィーの結果から、CTX3はCTX4より高分子量側に溶出される事がわかり、多量体を形成していることが示唆された。

### 3. 2 単離した接着阻害因子(CTX)による各種細胞と細胞外マトリックスとの接着阻害

CTX4を用いたときの結果(図2)を見るとIV型コラーゲンとHT-1080の接着をより強く阻害していた。さらに、細胞による特異性を確認するために数種類の細胞を用いて接着阻害実験を行ったところ、ヒト胎児由来肝臓細胞(HEK293), ラット副腎髓質褐色細胞(PC-12)とIV型コラーゲンの接着を強く阻害していたが、ヒト臍帯静脈内皮細胞(HUVEC), ヒト胎児由来線維芽細胞(TIG-1)の接着をほとんど阻害しなかった(図2)。接着阻害活性がみられた細胞は全て腫瘍化した細胞であり、CTX4は腫瘍細胞によるIV型コラーゲンへの接着を強く阻害すると考えられる。一方で、CTX3を用いて接着阻害実験を行っ

た結果、細胞接着阻害はいずれの条件でも認められなかった。

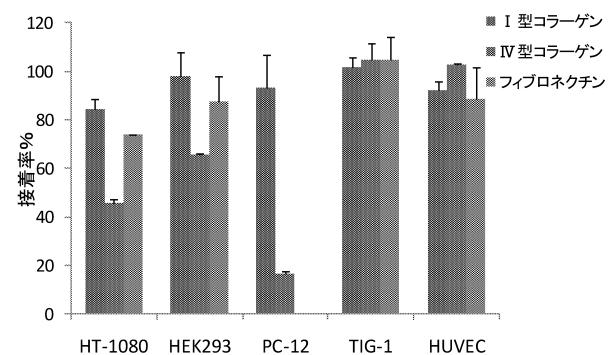


図2 各種細胞とCTX4を用いた細胞接着阻害実験

HT-1080, HEK293, PC-12, TIG-1, HUVECを用いて細胞接着阻害実験を行った。CTX4非添加時の各種細胞と細胞外マトリックスとの接着数を100%とした。添加したCTX4の終濃度は全て2.2μMである。PC-12はCTX4を添加無しでもフィブロネクチンと接着しなかった。

多くのthree finger toxinファミリータンパク質の神経毒性発現残基が2ループ目の先端に存在することや、CTX3とCTX4のアミノ酸配列の違いから(図3, 4), CTX4が有する接着阻害活性は28~31残基のアミノ酸に起因するものではないかと考えている。



図3 CTX4とCTX3のアミノ酸配列の相同性

CTX4とCTX3のアミノ酸配列を比較し、CTX3と異なるCTX4のアミノ酸配列を赤色で示した。数字はアミノ末端からのアミノ酸残基数を示している。

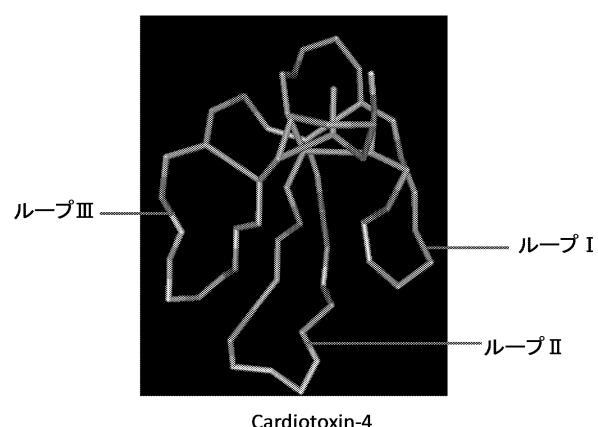


図4 CTX4の立体構造図

中性アミノ酸を灰色、塩基性アミノ酸を青色、酸性アミノ酸を赤色、CTX3と異なるアミノ酸を黄色、ジスルフィド結合をオレンジ色で表す。

### 3.3 蛇毒タンパク質の標的因子の特定

ビオチン化CTX4と結合する細胞膜上のタンパク質の検出を行った。その結果、CTX4を反応させたメンブレンにのみ、PC-12、TIG-1、HUVECの各種細胞溶解液では、25kDa～35kDa付近にCTX4と結合するタンパク質が確認できた。したがって、PC-12、TIG-1、HUVECの細胞膜上に、CTX4と結合する分子量が25～35kDaのタンパク質を含んでいる可能性が高い(図5)。

また、検出されたバンドがスマアなことから、糖タンパク質であると考えた。細胞表面に分布しているタンパク質が糖鎖修飾を受けていることが多いことから、今回検出されたタンパク質は細胞表面に分布している可能性がある。しかし、HT-1080にはこのようなタンパク質が検出されなかつたため、今回検出されたタンパク質が接着阻害活性に関与していることは示せなかった。もしくはHT-1080は別の機構により接着を阻害させている、SDS-PAGEによりタンパク質が変性してCTX4と結合できなかつた等の理由が考えられる。

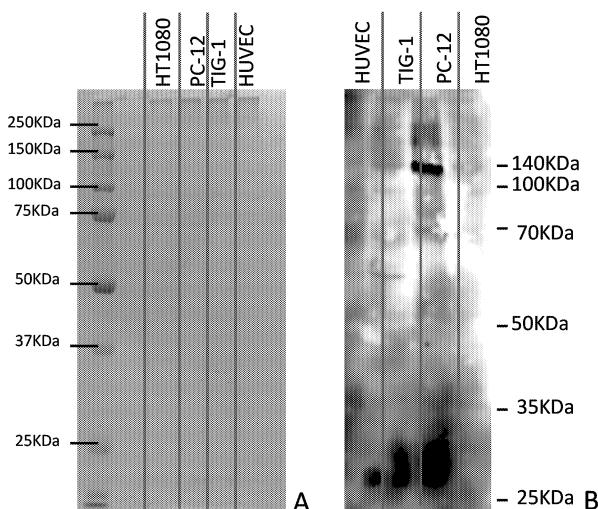


図5 各種培養細胞膜上のビオチン化CTX4と結合するタンパク質の検出

A: 各細胞の溶解液を電気泳動した後、CBB染色を行った。B: PVDF膜に各細胞の溶解液を転写し、ビオチン化CTX4 (1.3 μM) を反応させてアビシンにて検出した。

### 3.4 ヒメハブ粗毒からの接着阻害因子の単離と同定

また、ゲルろ過クロマトグラフィーを用いて、ヒメハブ粗毒を分子量により分画し、それぞれの画分を用いて、細胞と細胞外基質との結合阻害活性を調べた。その結果、

分子量30kDa～100kDaのタンパク質が含まれる画分①、②に、肉腫細胞とファイプロネクチンとの結合を特異的に阻害する活性があることが分かった(図5)。

画分②が示す細胞接着阻害活性は、2価陽イオンのキレーターであるEDTA処理あるいは熱処理によってほぼ完全に阻害された。一方セリンプロテアーゼ阻害剤、システインプロテアーゼ阻害剤による活性阻害は部分的であった。これらの結果から活性の本体は、カチオン依存性タンパク質分解酵素であると推測された(図6)。

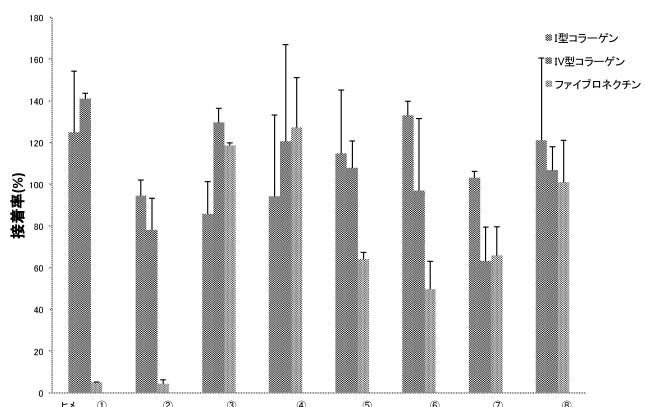


図5 ゲルろ過クロマトグラフィーにより分画したヒメハブ粗毒由来の各画分による、肉腫細胞と各種細胞外マトリックスとの結合への影響

HT-1080を用いて細胞接着阻害実験を行った。ヒメハブ粗毒非添加時の肉腫細胞と細胞外マトリックス(I型コラーゲン、IV型コラーゲン、ファイプロネクチン)との接着数を100%とした。ファイプロネクチンとHT-1080との結合を強く阻害した①、②の画分には30～100kDaのタンパク質が含まれている。

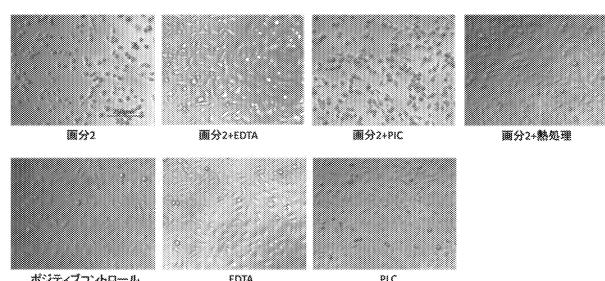


図6 細胞接着阻害活性を示すヒメハブ粗毒由来の画分への各種前処理の影響

HT-1080のファイプロネクチンへの接着を阻害する画分②に、EDTA添加あるいは熱処理を行うと、細胞阻害活性はほぼ完全に阻害された。一方、セリンプロテアーゼ、システインプロテアーゼを含むprotease inhibitor cocktail (PIC)では活性阻害は部分的であった。

接着阻害因子を単離するため、画分②から接着阻害活性を指標にイオン交換カラムを用いた。その結果、HT-1080とファイプロネクチンとの結合を阻害するタンパク質を単離することに成功した(図7、8)。

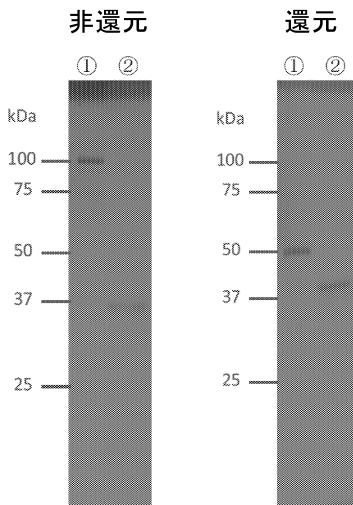


図7 単離した接着阻害タンパク質の SDS-PAGE 法による解析

陽イオン交換クロマトグラフィーにて得た画分を、 SDS-ポリアクリルアミドゲルを用いた電気泳動法により分析した。画分①、画分②は非還元条件下ではそれぞれ、 100kDa、 37kDa、 還元条件下では、 50kDa、 40kDa となつた。

100kDaタンパク質（画分①）を用いて、細胞接着阻害実験を行ったところ、ファイプロネクチンとの接着を阻害した。一方、I型、IV型コラーゲンとの接着は阻害しなかった（図8）。

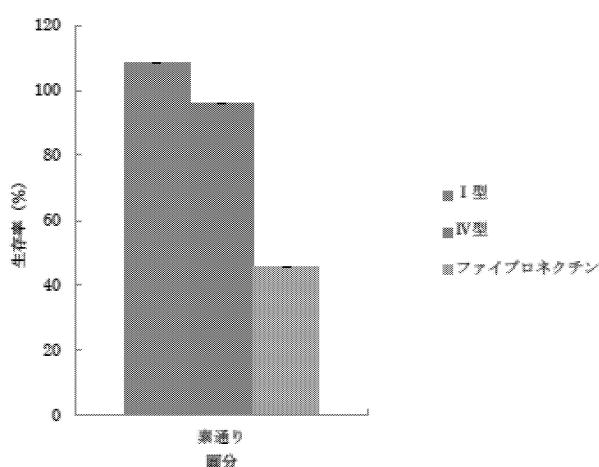


図8 100kDa タンパク質による細胞接着阻害実験での細胞生存率

細胞生存率は蛇毒タンパク質を加えず、細胞のみを播種した際の値を 100%とした。

画分①の100kDa、画分②の37kDaタンパク質のN末端側のアミノ酸配列をプロテインシーケンサーにて解析した。その結果、37kDaタンパク質はokinaxiobinIと一致した。OkinaxiobinIは蛇毒セリンプロテアーゼであり、トロンビン様酵素としてフィブリノーゲン切断活性を持つことが知られている。一方、100kDaタンパク質ではアミノ酸配列を解読

することが出来なかった。アミノ末端がブロックされていると思われた。

#### 4. 考 察

タイワンコブラ粗毒から細胞該マトリックスヒト線維肉腫細胞 (HT-1080) との接着を阻害する因子を単離した。分子量及びN末端のアミノ酸配列からCTX4であることが明らかとなった。CTX4は腫瘍化した細胞とIV型コラーゲンとの接着を特異的に阻害した。特にラット副腎髓質褐色細胞 (PC-12) とIV型コラーゲンとの接着を強く阻害した。接着阻害活性を示さなかったCTX3とアミノ酸配列を比較した結果、28～31残基のアミノ酸 (Ser-Asn-Leu-Thr) が接着阻害活性に関係していると考えられた。CTX4には溶血作用があることが知られているが、細胞とIV型コラーゲンとの結合を阻害する活性があることは知られておらず、その作用機序は大変興味深い。ビオチン化したCTX4と結合する細胞膜タンパク質の分子量は、PC12由来細胞膜では25～35kDa、TIG-1由来細胞膜では25～30kDaであった。CTX4による接着阻害が確認できなかったHUVEC由来細胞膜では25kDaの分子量のタンパク質と結合することが確認できた。一方、CTX4による接着阻害を示すHT1080由来細胞膜では、CTX4と結合を示すタンパク質を確認することが出来なかった。これらタンパク質との結合がCTX4の示す、細胞接着阻害活性と関係しているか、現在検討中である。

タイワンコブラ粗毒由來のCTX5は、インテグリン $\alpha_v\beta_3$ との結合を阻害する事が報告されている。インテグリン $\alpha_v\beta_3$ はファイプロネクチンあるいはフィブリノーゲンの受容体であることが知られており、IV型コラーゲンの受容体ではないと考えられている。よってCTX4とCTX5の細胞接着阻害は異なる機構で起きていると考えられる。腫瘍細胞の壊死を引き起こすCTX3は細胞膜表面上のリン脂質と相互作用することが報告されている(5)。CTX3とスフィンゴリン脂質複合体とのX線結晶構造解析も行われており、結合機構の詳細についての解析が進んでいる(5)。CTX3はスフィンゴリン脂質複合体と相互作用しつつ、細胞に穿孔を形成する事で細胞死をもたらすと考えられている。CTX4には細胞死を誘導する活性があることは知られておらず、スフィンゴリン脂質複合体との相互作用の有無についても知られていない。

コブラ科の蛇毒に主に含まれているthree-finger toxinファミリータンパク質は神経細胞の神経伝達物質受容体に結合し、神経伝達を阻害することが知られている。タイドクハキコブラ由來のthree-finger toxinファミリータンパク質 $\alpha$ -cobra toxin (Cbtx)とアセチルコリンレセプター構造類似体 acetylcholine-binding proteinとの複合体のX線結晶構造解析から、Cbtxの2つ目のループに標的タンパク質の認識部位が存在する(6)。本研究からも、CTX4の第2ループのアミノ酸残基

が接着阻害活性に関与していることが示唆されており、three-finger toxin ファミリータンパク質の第2ループの機能的特徴であると考えられる。

ファイブロネクチンと細胞との結合を阻害する蛇毒タンパク質として、よく知られているのがディスインテグリンである。アルギニン (R) -グリシン (G) -アスパラギン酸 (D) からなる配列が接着阻害活性に関与することが明らかにされている(7)。ディスインテグリンの分子量は 10~20 kDa であり、本研究でヒメハブ粗毒に含まれる、ファイブロネクチンと細胞の結合を阻害するタンパク質として同定されたタンパク質のサイズは 100kDa であることから、ディスインテグリンではない、新規なタンパク質であると考えられる。

今回 100kDa タンパク質のカチオン依存性あるいはタンパク質分解酵素活性について検討するに至らなかった。アミノ末端のアミノ酸配列も解析することができず、同定するに至らなかった。一方、P-III クラス蛇毒メタロプロテアーゼはアミノ末端がブロックされていることが多いことから、今回得られた 100kDa タンパク質はメタロプロテアーゼであると推測された(8)。ダイマー構造を示す P-III クラス蛇毒メタロプロテアーゼとして、VAP1 と HV1 が知られており、両者は細胞のアポトーシスを誘発することが知られている(9)。現在までのところ、上記 2 つのタンパク質が、ファイブロネクチンと細胞の結合を阻害するという報告はない。よって、今回単離した 100kDa タンパク質は、未知の機構にてファイブロネクチンあるいはその受容体に作用するダイマータンパク質であると考えられる。

CTX4 やヒメハブ中の新規細胞接着阻害因子による細胞接着阻害機構を研究することで、細胞外基質による細胞の増殖、分化や機能維持の制御機構の一端を明らかにし、腫瘍細胞などの特定の細胞の増殖や転移を制御するツールの開発を目指す。

## 参考文献

- (1) Lewis, R. J., Garcia, M. L. : Therapeutic potential of venom peptides, *Nature Rev. Drug Discov.*, Vol. 2, (2003) pp. 1790-802.
- (2) Chen, Y. H. et al. : Membrane disintegration and hemolysis of human erythrocytes by snake venom cardiotoxin (a membrane-disruptive polypeptide), *Biochem. Int.*, Vol. 8 (1984). pp. 329-338
- (3) Iwaguchi, T. et al. : Cytolytic activity of cytotoxin isolated from Indian cobra venom against experimental tumor cells, *Biochem. Int.*, Vol. 10 (1985). pp. 343-349
- (4) Wu, P. L., et al. : Non-cytotoxic cobra cardiotoxin A5 binds to alpha(v)beta3 integrin

and inhibits bone resorption. Identification of cardiotoxins as non-RGD integrin-binding proteins of the Ly-6 family, *J. Biol. Chem.*, Vol. 281 (2006). pp. 7937-7945

- (5) Wang, C. H. et al. : Glycosphingolipid -facilitated membrane insertion and internalization of cobra cardiotoxin. The sulfatide cardiotoxin complex structure in a membrane-like environment suggests a lipid-dependent cell-penetrating mechanism for membrane binding polypeptides., *J. Biol. Chem.*, Vol. 281 (2006). pp. 656-667
- (6) Bourne, Y. et al. : Crystal structure of a Cbtx-AChBP complex reveals essential interactions between snake a-neurotoxins and nicotinic receptors, *EMBO J.*, Vol. 24 (2005). pp. 1512-1522
- (7) Huang, T-F. et al. : A low molecular weight peptide inhibiting fibrinogen interaction with platelet receptors expressed on glycoprotein IIb/IIIa complex. *J. Biol. Chem.*, Vol. 262 (1987) . pp. 16157-16163
- (8) Cominetti, M. R. et al. : BaG, a new dimeric metalloproteinase/disintegrin from the *Bothrops alternatus* snake venom that interacts with a5b1 integrin. *Arch. Biochem. Biophys.*, Vol. 416 (2003) . pp. 171-179
- (9) Takeda, S. et al. : Snake venom metalloproteinase; Structure, function and relevance to the mammalian ADAM/ADAMTS family proteins. *Biochim. Biophys. Acta.*, Vol. 1824 (2012) . pp. 164-176

## 研究成果

### 発表論文

1. Wannemacher, K. M. , Jiang, H., Hess, P. R. , Shin, Y., Suzuki-Inoue, K. and Brass, L. F. "An expanded role for semaphoring 4D in platelets includes contact-dependent amplification of Clec-2 signaling." *J. Thromb. Haemost.* **11**, 2190-2193, 2013
2. Shin, Y., Akiyama, M, Kokame, K., Soejima, K. and Miyata, T. "Binding of von Willebrand factor cleaving protease ADAMTS13 to Lys-plasminogen." *J. Biochemistry* **152**, 251-258, 2012

### 学会発表

1. Takayuki Mineo, Yongchol Shin, Kaori Kitada, Suzuka Hara, Toshiki Uchida, Yasutada Imamura. "Type I collagen produced by cells in ascorbate depletion shows a lower denaturation temperature." 9th Pan Pacific Connective Tissue Societies Symposium. Nov 24-27, 2013. Hong Kong

- Academy of Medicine, Hong Kong, China.
2. Yasutada Imamura, Takahisa Shinbo, Arisa Amano, Masahige Kodama, Yohsuke Iseki, Hiroaki Miyazaki, Yongchol Shin. “Sea cucumber collagen fibrils as cell culture substrates.” 9th Pan Pacific Connective Tissue Societies Symposium. Nov 24–27, 2013. Hong Kong Academy of Medicine, Hong Kong, China.
  3. Yongchol Shin, Yu Matsushita, Yui Sakakibara, Takahisa Shinbo, Kazuaki Yanagawa, and Yasutada Imamura. “Development of blood vessel substitutes for chemical library screening.” The 11th International Symposium on Advanced Technology. Oct 30, 2012. Kogakuin University, Hachioji, Japan.
  4. Ryuichi Hiratsuka, Yongchol Shin, Kana Endo, Yasutada Imamura. “Novel potential cause of thrombotic thrombocytopenic purpura.” The 11th International Symposium on Advanced Technology. Oct 30, 2012. Kogakuin University, Hachioji, Japan.
  5. Shinbo Takahisa, Yongchol Shin, Yasutada Imamura. “Sea cucumber-derived collagen fibers. The expression of von Willebrand factor were observed in the structures as a differentiation marker of the endothelial cells.” The 11th International Symposium on Advanced Technology. Oct 30, 2012. Kogakuin University, Hachioji, Japan.
  6. 高橋 俊宏, 辛 英哲, 遠山 武志, 小峯 裕, 今村 保忠. “細胞外基質への細胞接着を特異的に阻害するヒメハブ粗毒由来タンパク質の探索.” 第36回日本分子生物学会年会, 2013年12月3~6日, 神戸国際展示場, 神戸
  7. 辛 英哲, 平塚 竜一, 遠藤 佳菜, 今村保忠. “ヒト血漿へのストレプトキナーゼ添加によって活性化したplasminは, ヒト血漿中ADAMTS13を切断する.” 第35回日本血栓止血学会学術集会, 2013年5月30~6月1日, 山形国際ホテル, 山形
  8. 平塚 竜一, 辛 英哲, 遠藤 佳菜, 今村保忠. “溶血性連鎖球菌由來ストレプトキナーゼによって活性化したplasminはヒト血漿中ADAMTS13を切断する.” 第85回日本生化学大会, 2012年12月14~16日, 福岡国際会議場, 福岡
  9. 新保 貴久, 辛 英哲, 今村 保忠. “ナマコ由來コラーゲン線維を用いた血管内皮細胞の管腔形成” 第44回日本結合組織学会学術大会 第59回マトリックス研究会大会合同学術集会, 2012年6月7~8日, 日本青年館, 東京
  10. 松下 裕, 辛 英哲, 榊原由衣, 今村保忠. “IV型コラーゲンを取り入れた生体内環境を模した人工血管の可能性 -IV型コラーゲン会合体上で長期培養し

た血管内皮細胞の形態, 機能の検討-” 日本化学会第92春季年会, 2012年3月26~29日, 慶應義塾大学, 横浜

11. 遠山武志, 辛 英哲, 濑戸良子, 関口泰之, 今村保忠. “ヒト線維肉腫細胞(HT-1080)とIV型コラーゲンの接着を阻害するタイワンコブラ由来タンパク質の単離” 日本化学会第92春季年会, 2012年3月26~29日, 慶應義塾大学, 横浜

## 2. 総合研究所プロジェクト研究報告 (2014年度継続研究)

# 遠隔操作する災害対応ロボットに資する動的電波マップ生成に関する研究

工学院大学 工学部 機械システム工学科 羽田靖史

芝浦工業大学 工学部 通信工学科 行田弘一

Dynamic Generation of Electromagnetic Wave Strength Map for Tele-Operated Rescue Robot

Yasushi Hada, Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University

Koichi Gyoda, Department of Communications Engineering, Shibaura Institute of Technology

**ABSTRACT :** When the tele-operated mobile robot went over its communication range accidentally, the operation would be suspended. We named this kind of trouble “the distress of mobile robot”. In order to prevent the distress of mobile robot, it is necessary to estimate communications conditions around the robot by means of radio wave propagation simulation. The simulation consists of a combination of environmental shape measurement and radio propagation simulation using the shape. In this paper, we describe the trial simulation using ray-tracing method for outdoor environment.

**Key Words:** tele-operated mobile robot, wireless communication, network

## 1. はじめに

東日本大震災以降、災害対応ロボットの実用化が改めてクローズアップされている。[1] 実用上の大きな技術課題の一つに、無線通信状況の推定、及び可視化がある。遠隔操作ロボットの制御は、ロボットに搭載されたカメラ等のセンサ情報を元に操作者が行動指示を送る、通信を介した広義のフィードバック系を構成する。そのため、通信が切れればロボットは停止し、それ以降の運用が不可能となる。ここではこれを「ロボットの遭難」と呼ぶ。特に危険な被災地において人間の代替として運用される災害対応ロボットでは、遭難したロボットを回収することは本末転倒であるため、そのまま放置されることとなる。実際に、東京電力福島第一原子力発電所で用いられていた「クインス改」[2]「Survey Runner」[3]などはケーブル切断による通信途絶により遭難し、現在も発電所棟内で停止中である。[4,5] これらのロボットでは無線通信の不確実性を嫌い有線方式での通信を行っていたが、無線通信の信頼性がより向上すれば、重い通信ケーブルを用いる有線方式よりも利点が多いことは自明である。また、信頼性がない無線通信を用いた運用では、操作者は

遭難を恐れて、本来運用可能であるはずの範囲までロボットを進めず、自らロボットの運用範囲を狭めてしまう。この原因は通信可能範囲を操作者がわからないからであり、状態の可視化が必要不可欠である。

本研究では、ロボットの遭難を防止するために、未知環境における将来の通信状況をシミュレーションにより推定し操縦者に提示するシステムの開発を目的とする。これには未知環境の形状データ生成と電波伝搬のシミュレーションが必要であるが、本稿では地形データを利用した電波伝搬シミュレーションについて述べる。なお、これまで屋内環境を想定していたが、本年度以降の研究ではこれを応用しより一般的な屋外広範囲を対象とする。

## 2. ロボットによる火山探査

活動中の火山に対し、火口付近の立入禁止区域内の調査は、土石流や融雪型火山泥流の予測に関する重要な情報となる。そこで、我々の研究グループでは、産官学をメンバーとする火山災害対応ロボティクス研究会を中心に、火山噴火時に立入禁止区域内の調査を実施することが可能な無

人調査ロボットシステムの実現を目指している。具体的には、飛行ロボットならびに地上移動ロボットの研究開発を行い、浅間山において、このロボットシステムを用いた模擬無人調査を実施している。これにより、火山噴火が起きた際、火口付近の立入禁止区域内に投入可能な無人調査ロボットシステムの実現を目指す。

本研究では飛行ロボット及び地上移動ロボットは安全圏に設置した操作卓から無線電波にて監視及び操作される。用いる無線電波は地形や使用する電波の周波数、電力等の条件により伝搬経路が異なるため、これをシミュレーションにより明らかとすることによって、ロボットの行動可能範囲を明らかとすることが出来る。

### 3. 想定する無線通信

飛行ロボット及び地上移動ロボットは遠隔地に置いた操作卓(地上局)から、監視・操作のための通信を行なうと考える。通信は以下の3種類の通信が想定出来る。(図1)

- ① 地上局←→地上移動ロボット間
- ② 地上局←→飛行ロボット間
- ③ 飛行ロボット←→地上移動ロボット間

まず①は操作卓から直接地上移動ロボットを操作するための通信である。この通信可能範囲を知ることにより、移動ロボットが不作為に通信範囲を逸脱し操作不可能になる状態(ロボットの遭難)を回避することができる。次に②は操作卓と飛行ロボットとの直接通信である。地上移動ロボット同様に、飛行ロボットを操作する場合の遭難を防ぐことができる。また、この通信は次に述べる中継通信を実現するために必要である。最後の③の通信は、地上移動ロボットが遭難した場合、または①の直接通信可能範囲外を調査したい場合において、操作卓から飛行ロボットを中継することによって地上移動ロボットを操作・監視するための通信である。

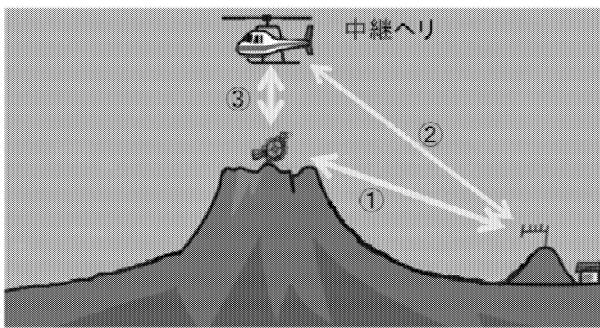


Fig. 1 想定する3種類の無線通信

シミュレーションの計算方法にはいくつかの方法があり、表1に示したようにそれぞれ利点・欠点がある。本研究は、浅間山火口から数km離れた位置から電波を発信した際の広範囲な電波伝搬を調べるために、時間領域差分法(FDTD法)や、FEM解析は本研究には向かず、レイトレース法で電波伝搬シミュレーションを行うこととした。レイトレース法とは、幾何光学理論に基づき送信点から受信点へ到達する電波を追跡することにより、伝搬損失、遅延時間、到来方向を推定できる

手法で、電波伝搬解析で広く使われている。シミュレーション時間が短く一般に広い範囲の計算に使用される。

Table 1 電波通信シミュレーション方式の得失

	メリット	デメリット	精度は悪いが 計算量少ない
レイ トレース法	シミュレーション時間が短い 一般的に広い場所での シミュレーションを行う	地図のポリゴン化に依存し シミュレーション時間が長くなる 精度を出すのが難しい	
時間領域 差分法 (FDTD法)	精度の高いシミュレーションを行なうことができる	周波数の高さと環境の広さに依 存しシミュレーション時間が長く なる	
FEM解析	精度の高いシミュレーションを行なうことができる	周波数の高さと環境の広さに依 存しシミュレーション時間が長く なる 一般的に狭い範囲での シミュレーションを行う	精度は良いが 計算量が膨大

電界が位相情報なしで加算されている場合、時間で平均化された受信電力は以下で与えられる。

$$P_R = \sum_{i=1}^{N_p} P_i$$

$N_p$ はパスの数であり、 $P_i$ は*i*thパスの電力を時間で平均化し、以下によって与えられる。

$$P_i = \lambda / 2 \pi \eta_0 \left| E g(\theta\varphi) + E g(\theta\varphi) \right|^2$$

$\lambda$ は波長であり、 $\eta_0$ は自由空間( $377 \Omega$ )のインピーダンスであり、 $E_{\theta,i}$ と $E_{\phi,i}$ は*i*thパスの受信点での電界の $\theta$ と $\varphi$ の成分であり、 $\theta_i$ と $\varphi_i$ の到来方向は

$$g_\theta(\theta, \varphi) = |G_\theta(\theta, \varphi)|^{1/2} e^{j\phi\theta}$$

で与えられる。 $G_\theta$ は受信アンテナ利得の $\theta$ 成分であり、 $\varphi_\theta$ は遠い区域の電界と $g_\phi$ のための類似の定義の2成分の相対位相であり、量 $\beta$ は本質的量の尺度であり、これにより、送信された波形 $S_T(f)$ の周波数スペクトルは受信機 $S_R(f)$ の周波数感度のスペクトルと重複する。

$$\beta = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_R(f) S_R(f) df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_R(f) df}$$

$f_{\min}$ と $f_{\max}$ は最小周波数と最大周波数であり $S_T(f) > 0$ の範囲である。

レシーバ波形 $S_R(f)$ は最大値が1となるように常に正規化を行う。正弦波形の場合はフラットな分布が想定される。また、 $f_0 - \frac{\beta}{2} < f < f_0 + \frac{\beta}{2}$ および $f_0$ は搬送波周波数であり、 $\beta$ は有効帯域でありそうでない場合は0となる。すべてのフィールドが(位相と)コヒーレントに結合されている場合総受信電力は以下で求まる。

$$P_R = \frac{\lambda \beta}{8\pi\eta_0} \left| \sum_{i=1}^{N_p} \left[ E_{\theta,i} g_\theta(\theta_i, \varphi_i) + E_{\phi,i} g_\phi(\theta_i, \varphi_i) \right] \right|^2$$

経路を結合するための相関オプションを使用する場合時間による相関パスの各グループを電力で平均化し、以下を使用して求まる。

$$Q_j = \frac{\lambda^2 \beta}{8\pi\eta_0} \left| \sum_{i=1}^{M_j} [E_{\theta,i} g_\theta(\theta_i, \varphi_i) + E_{\theta,i} g_\phi(\theta_i, \varphi_i)] \right|^2$$

$Q_j$  は  $j^{\text{th}}$  グループの経路に起因する電力であり、 $M_j$  はグループ内の経路の数である。総電力は各グループのパワーを合計することによって見出せる。

$$P_R = \sum_{i=1}^{N_C} Q_i$$

$N_C$  は相関するグループの数である。受信電力が検出されると dBm の値を以下の式で決定される。

$$P_R(\text{dBm}) = 10 \log 10 [P_R(\text{W})] + 30 \text{dB} - L_S(\text{dB})$$

#### 4. 電波伝搬シミュレーション

##### 4. 1 シミュレーションコンピュータの環境

シミュレーションコンピュータの環境は表 2 の通りである。

Table 2 シミュレーションコンピュータの環境

CPU	Core i7 4770S (3.1GHz)
Memory	DDR3-SDRAM 16GB (PC3-12800)
OS	Windows7 Enterprise 64bit
シミュレーションソフトウェア	Wireless Insite (remcom)

##### 4. 2 シミュレーションモデル

地形モデルとして、浅間山、小浅間山、六里が丘休憩所を含む図 2 で表す範囲について国土交通省より公開されている 50m メッシュの地形データ(図3)を利用した。操作卓は浅間山六里が丘休憩所に設置し、パラボラアンテナ(利得 27.5dBi, 半值角約 7deg)を小浅間山頂に向ける(打ち上げ角 7.95deg)。また飛行ロボットは半波長ダイポールアンテナを持ち、周辺地帯を地表高一定で飛行するものとし、地表高は 10m, 30m, 50m, 100m の4種類を試みた。地上移動ロボットは地表高 0.4m に同じく半波長ダイポールアンテナを設置した。また、電波は無線 LAN 規格と同じ 2.4GHz, 200mW とし、操作卓側アンテナを、飛行ロボット及び地上移動ロボット側のアンテナは半波長ダイポールアンテナを用いた。以上の条件は 5 章に示す実際に行なったロボット実験に則している。

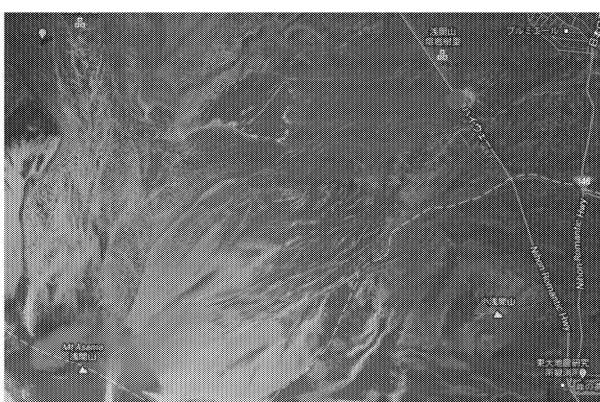


Fig. 2 シミュレーション範囲（赤丸が操作卓、三角が小浅間山山頂）

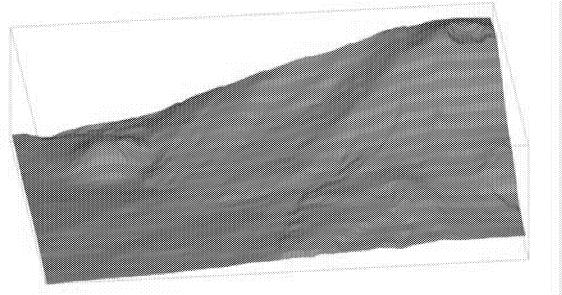


Fig. 3 シミュレーションに用いた三次元地形図

#### 4. 2 シミュレーション結果

##### 4. 2. 1 操作卓←→地上移動ロボット間の電波伝搬シミュレーション結果

①地上局←→地上移動ロボット間の通信可能範囲をシミュレーションした。操作卓から送信した電波が地上移動ロボットにおいて -100dB 以上で受信可能な範囲を図 4 に示す。浅間山及び小浅間山の複雑な地形のため、直接操作卓から通信可能な範囲は大きく制限されていることがわかる。直接操作で地上移動ロボットを動かす場合はこの範囲を逸脱してはならない。

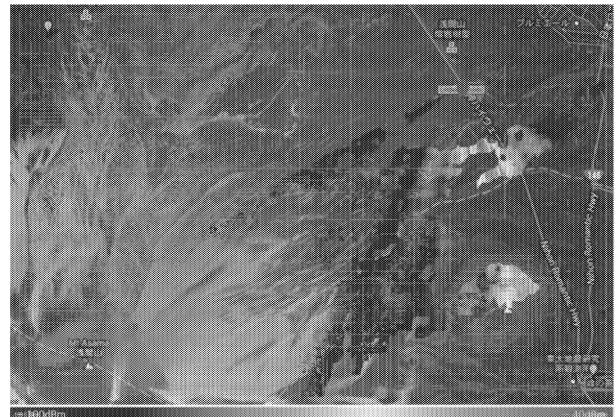


Fig. 4 操作卓から小浅間山山頂の探査ロボットに向けて電波を発信した際のシミュレーション結果（地表 0.4m）

##### 4. 2. 2 操作卓←→飛行ロボット間の電波伝搬シミュレーション結果

操作卓から送信した電波が空中ロボットにおいて -100dB 以上で受信可能な範囲を図 5～8 に示す。空中ロボットの地表高はそれぞれ図 5 が 10m、図 6 が 30m、図 7 が 50m、図 8 が 100m である。地上移動ロボット同様、直接操作卓から通信可能な範囲は制限されているが、空中ロボットの高度を上げることによって通信範囲が大きくなり、50m または 100m まで高度を上げればほぼ制限がなくなることがわかる。ただし操作卓からみ

て小浅間山の裏側に関してはこの限りではなく、飛行ロボットの高度にかかわらず通信することはできない。

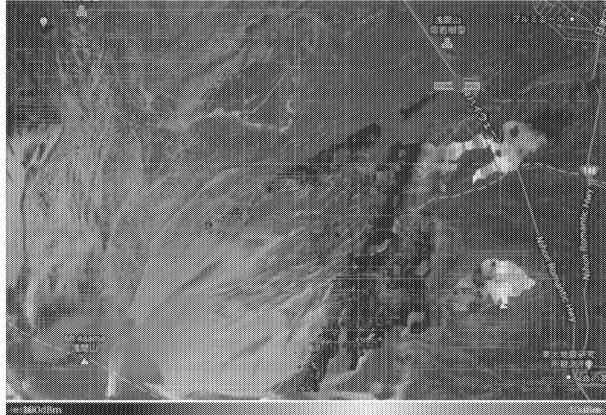


Fig. 5 操作卓から小浅間山頂の飛行ロボットに向けて発信した際の電波伝搬シミュレーション結果（地表 10m）



Fig. 6 操作卓から小浅間山頂の飛行ロボットに向けて発信した際の電波伝搬シミュレーション結果（地表 30m）

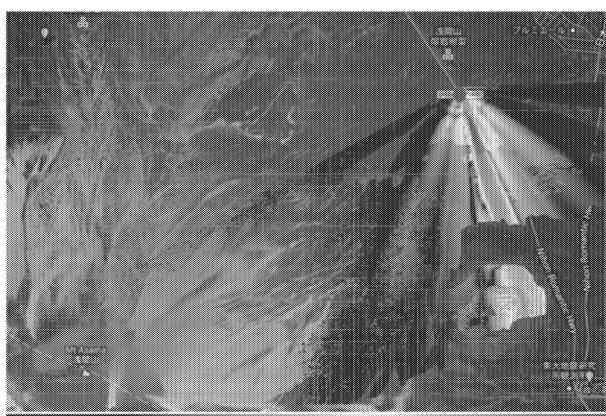


Fig. 7 操作卓から小浅間山頂の飛行ロボットに向けて発信した際の電波伝搬シミュレーション結果（地表 50m）

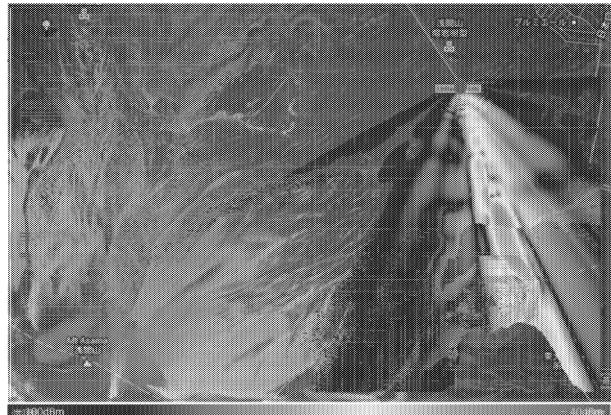


Fig. 8 操作卓から小浅間山頂の飛行ロボットに向けて発信した際の電波伝搬シミュレーション結果（地表 100m）

#### 4. 2. 3 飛行ロボット←→地上移動ロボット間の電波伝搬シミュレーション結果

飛行ロボットを小浅間山山頂にホバリングさせた際の飛行ロボットから地上移動ロボットへの通信可能範囲を図 9～図 13 に示す。前節と同様に、飛行ロボットの地標高は 10m(図 10), 30m(図 11), 50m(図 12), 100m(図 13)とし、また比較のために飛行ロボットが離陸していない際の結果も図 9 に表した。

結果をみると、飛行ロボットが飛び立っていない場合(図?)は通信可能範囲が著しくせまくなっているが、一旦飛び立つと、通信可能エリアは大きく広がる。しかし、高度 10,30,50m の段階では特に山頂に近いエリアに関しては通信不可能となっており、地表高 100m までを上げることによりやっと殆どの範囲が通信可能となる。これは特に山頂の地形によって見通し範囲が狭くなることが原因であり、例えば地上移動ロボットが山頂から下りていく場合に通信を維持するためには、飛行ロボットは 100m の対地高度を保つ必要があることがわかる。また、①の操作卓からの直接通信では通信不可能であった範囲について、本節の中継通信であれば通信可能となることから、飛行ロボットによる中継通信の有効性が示されている。



Fig. 9 飛行ロボットから発信した際の電波伝搬シミュレーション結果（地表 0.4m）



Fig. 10 飛行ロボットから発信した際の電波伝搬シミュレーション結果（地表 10m）



Fig. 11 飛行ロボットから発信した際の電波伝搬シミュレーション結果（地表 30m）



Fig. 12 飛行ロボットから発信した際の電波伝搬シミュレーション結果（地表 50m）



Fig. 13 飛行ロボットから発信した際の電波伝搬シミュレーション結果（地表 100m）

## 5. 実証実験

2013年9月と10月の2回に分けて火山災害対応ロボティクス研究会による共同実験が行なわれた。本研究では、上述のシミュレーションとほぼ同様の条件で無線通信を行わせた。地上操作卓の写真を図14に、飛行ロボット、地上移動ロボットの写真を図15,16に表す。結果については未発表内容を含んでいるため来年度の報告に併せて記載するが、これまでの検討において、シミュレーションに用いた50mメッシュ地図では精度が荒く、正しくロボットの行動範囲を表せていないことが明らかとなっており、精度の高いメッシュデータを用いて再計算することでより正確にロボットの行動可能範囲を検討することが可能となる。



Fig.14 操作卓のパラボラアンテナ。左遠方は小浅間山、右側の斜面は浅間山のもの。

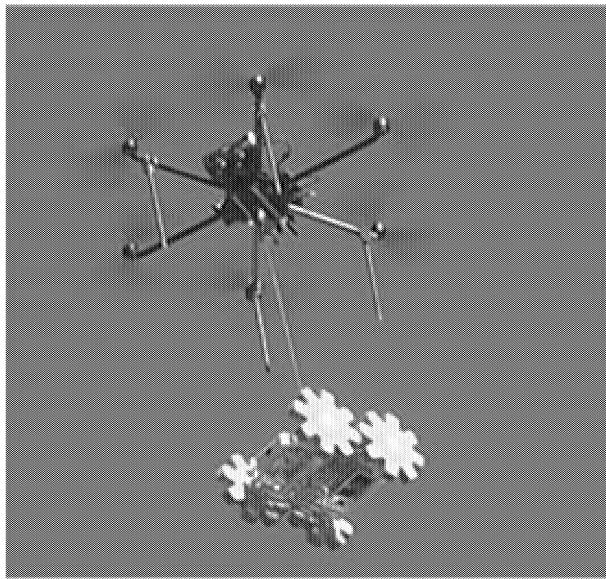


Fig. 15 飛行ロボットが地上移動ロボットを運搬し降下させている様子



Fig. 16 地上移動ロボット。遠くに見えるのは操作卓のある六里が丘休憩所

## 6. まとめ

本研究では飛行ロボットと地上移動ロボットが火山調査を行なうために、無線通信可能範囲を電波伝搬シミュレーションにより求め、ロボットの行動に資する情報提供を行なうことを目的としている。操作卓とロボットを含めた三者間の通信を電波伝搬レベルでシミュレーションすることによりロボットの行動範囲の可視化を行なった。また飛行ロボットを中心とした行動可能範囲の拡大について議論を進め、シミュレーション結果によりその有効性を明らかとした。また実証実験においてシミュレーションの妥当性の検証なども行なったが詳細については次回の報告で述べる。今後は高精細地図データを用いることによるシミュレーションの精度向上、実証実験との詳細比較や、ロボットの行動に資する情報の抽出などに注力する予定である。

## 参考文献

- (1) 深間,"原発事故対応のための遠隔操作機器の開発と運用",ロボット(206),pp.33-38, 2012.
- (2) Keiji Nagatani, et. Al., "Redesign of rescue mobile robot Quince -Toward emergency response to the nuclear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011-", Proc. of the 2011 IEEE SSRR, pp. 13-18, 2011.
- (3) “福島第一原発の復旧支援を行う探査ロボットを東京電力に貸与,” トピー工業株式会社ニュースリリース,  
<http://www.topy.co.jp/release/archives/2012/03/06/entry502.html>
- (4) “東電、原子炉建屋内で停止したクインスの扱いは未だに検討中”, 日刊工業新聞社 Robonable,  
<http://www.robonable.jp/news/2011/10/quince-1028.html>
- (5) “トピー工業のロボットは回収困難、無線通信で救助できず、原発事故調査”, 日刊工業新聞社 Robonable,  
<http://www.robonable.jp/news/2012/07/topy-0713.html>
- (6) 小暮他, “電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界”, CQ 出版社, ISBN978-4-7898-3022-5, 2010.
- (7) 宇野, “FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析”, コロナ社, ISBN978-4-339-00689-6, 1998.
- (8) J.S. Gutmann, et. Al., "Fast, Accurate, and Robust Self-Localization in Polygonal Environments," Proc. of IROS'99, pp.1412-1419, 1999.

# 放射性物質の回収とリン酸塩ガラス異常現象を利用した長期安定的固定化

工学院大学 工学部 環境エネルギー化学科 大倉利典

工学院大学 工学部 環境エネルギー化学科 吉田直哉

東京大学 先端科学技術研究センター 渡部俊也

Recovery of radioactive substances and long-term stable immobilization using phosphate glass anomaly

Toshinori Okura, Department of Environmental and Energy Chemistry,  
Faculty of Engineering, Kogakuin University

Naoya Yoshida, Department of Environmental and Energy Chemistry,  
Faculty of Engineering, Kogakuin University

Toshiya Watanabe, Research Center for Advanced Science and Technology,  
The University of Tokyo

**ABSTRACT :** Radioactive substances leaked by an accident of the nuclear power plant which occurred in March in 2011. Techniques for recovering the radioactive substances have been required. We studied adsorption methods as a technique of collection, and vitrification methods of iodine for safekeeping. In this study, Iodine-adsorption on magnesium compounds was evaluated, and fixation of iodine into glass was tried. The resultant Iodine-adsorbed magnesium compounds could be vitrified into phosphate glass.

## 1. はじめに

2011年3月の東日本大震災により発生した原発事故により、これまで核燃料サイクルの中では比較的半減期が短いため重要視されてこなかったヨウ素、セシウム、ストロンチウムなどの核種の放射性同位体が大気、海、土壤に飛散した。これにより新たな問題として、これらの核種の処理に関する技術の不足が明らかとなった。問題点は大きく分けて二つの段階からなる。初めの段階は、飛散して希薄な放射性物質を効率よく回収することであり、次の段階はそれを安全に長期間保管することである。この問題のうち保管（固化処理）に関しては、当研究グループでこれまで行われてきた放射性廃棄物のガラス固化技術を応用して核種の安定的な長期保管が可能であると考えられる。そのガラス固化技術につながる形で効率的な回収方法を確立することが必要とされている。

本研究では、ヨウ素、セシウム、ストロンチウムの3種の放射性物質をターゲットとし、ヨウ素吸着性能を有することが知られている酸化マグネシウムに注目

した<sup>1)</sup>。さらに、マグネシウムはリン酸塩ガラスに添加元素として一定の割合で加えると「リン酸異常現象」と呼ばれる密度低下を伴う構造の変化が起き、構造内に様々な元素を取り込めるなどを、本研究グループでは明らかにしている<sup>2)</sup>。この現象を利用し、ヨウ素やセシウム、ストロンチウムをマグネシウム化合物で吸着、回収しリン酸塩ガラスを用いた長期安定的なガラス固化体の作製ができるのではないかと考えた。よって、本研究では、ヨウ素、セシウム、ストロンチウムのマグネシウム化合物による効率的な回収について安定同位体を用い検討し、その後安定な固化ガラスとして最終処理を行う一連のプロセスの開発を目的とした。

## 2. 実験

### 2. 1 ヨウ素をターゲットとしたマグネシウム化合物による回収及びガラス固化処理

本研究では、マグネシウム化合物によるヨウ素の吸着性能評価として、JIS 活性炭試験法の吸着性能（液相）を利用し、マグネシウム化合物のヨウ素吸着性能評価を行った。ヨウ化カリウム水溶液にヨウ素を溶かし

て  $0.05\text{ mol/L}$  ヨウ素溶液とし、そこへ一定量のマグネシウム化合物を投入・攪拌し、吸着させた。予備実験から求めた吸着平衡時間に達した後、溶液を遠沈管に移し、遠心分離により液相と沈殿物(ヨウ素-マグネシウム化合物)に分離した。分離した液相を  $0.10\text{ mol/L}$  チオ硫酸ナトリウム溶液を用い滴定した。滴定量からヨウ素残留濃度、試料単位質量当たりのヨウ素吸着量を求め、吸着等温線を作成した。また、遠心分離後のヨウ素-マグネシウム化合物のX線回折(XRD)測定を行い、結晶相の同定を行った。

ガラス固化に用いる母ガラスの作製、およびガラス固化処理を行った。リン酸、酸化マグネシウムを出発原料とし、 $\text{MgO:P}_2\text{O}_5=40:60$  (モル比) となるようにビーカー内で各出発原料を混合、縮合させ、マントルヒーターを用いて加熱しながら混合・脱水を行った。十分に混合・脱水させた後アルミナるつぼに移し、電気炉(マッフル炉)中で1時間仮焼、 $1250^\circ\text{C}$ で1時間溶融させ、ステンレス板を用いて急冷し、母ガラスを作製した。母ガラスに含有率 5~20mass%の間でヨウ素-マグネシウム化合物を加え、乳鉢で混合、 $1250^\circ\text{C}$ 、45分の条件で溶融させ、ステンレス板を用いてプレス急冷し、固化ガラス(以下、ヨウ素固化ガラスと表記)を作製した。また、吸光度測定を行ったサンプルに関しては、プレス急冷法により板ガラスの作製を行った。ヨウ素固化ガラスについて、XRD測定、エネルギー分散型X線分析(EDX)、および拡散反射スペクトル測定を行った。

## 2.2 セシウム、ストロンチウムをターゲットとしたマグネシウム化合物による回収およびガラス固化処理

セシウム、ストロンチウムの回収および最終処理として、酸化マグネシウムを用いた液相におけるセシウム、ストロンチウムの回収実験、ガラス固化処理を行った。セシウム、ストロンチウムの  $10\text{ mM}$  溶液  $100\text{ ml}$  を作製し、リン酸により  $\text{pH} 2.0$  に調整後、酸化マグネシウム(比表面積:  $20.5\text{ m}^2/\text{g}$ )を  $1.0\text{ g}$  投入、シェイカーにより常温で攪拌した。任意の経時ごとに  $1\text{ ml}$  採取し、ろ過、10倍希釈の後イオン交換クロマトグラフィー(IC)測定により各残留濃度を測定した。また、アルカリ条件下での検討、pH調整の有無、吸着をカルシウム化合物に変えた場合についても検討を行った。

セシウム、ストロンチウムのガラス固化範囲および耐水性を確認するため、 $\text{MgO-Cs}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$  系および  $\text{MgO-SrO-P}_2\text{O}_5$  系ガラスを  $\text{MgO+Cs}_2\text{O}$  or  $\text{SrO:P}_2\text{O}_5$  のモル組成比  $40:60 \sim 60:40$  で作製した。ガラス作製には溶融急冷法を用い、原料を混合、 $300^\circ\text{C}$ で仮焼の後、 $1250^\circ\text{C}$ で1時間の条件で溶融、グラファイトボードに流し出

しガラス試料を得た。XRDおよびEDX分析、また、耐水性評価のため、MCC法およびJIS R 3502に基づいた耐水試験を行った。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 マグネシウム化合物のヨウ素吸着性能とガラス固化の結果

ヨウ素吸着性能評価において使用したサンプルの型番、比表面積及びJIS活性炭試験法に準じ求めた各試料の吸着性能をTable 1に示す。

Table 1 マグネシウム化合物のヨウ素吸着性能

サンプル	比表面積( $\text{m}^2/\text{g}$ )	ヨウ素吸着性能( $\text{mg/g}$ )
酸化マグネシウム	UC 95M	8.5
	UC 95HK	6
	UC 95ST	20.5
	UCM 150	180
マグネシウムクリンカー	UBE 98粉	-
	UBE 99S粉	-
高純度超微粉マグネシア	2000A	7.6
	500A	33.3
水酸化マグネシウム	UD 650	29.30
	UD 653	21.90

酸化マグネシウムの小粒径試料で最大  $2.23\text{ g/g}$  のヨウ素吸着性能を示すことがわかった。また比表面積が大きいものほど吸着性能が高い傾向にあることがわかった。表中ブランクとなっているマグネシウムクリンカー試料は粒が粗いため、平衡時間に達する前に攪拌が止まってしまい、ヨウ素吸着性能を評価することができなかった。また、水酸化マグネシウム試料については吸着量が少ないため、JIS規格に準ずる範囲の吸着等温線を得ることができなかった。これは、吸着性能が表面積に依存することや、酸化マグネシウムが水に対して溶解度が高いのに対し、水酸化マグネシウムは難溶性なため、化学吸着と物理吸着の割合が異なるためだと考えられる。

Fig. 1にヨウ素を吸着した酸化マグネシウムと酸化マグネシウム試料、水酸化マグネシウム試料の各XRDパターンを示す。

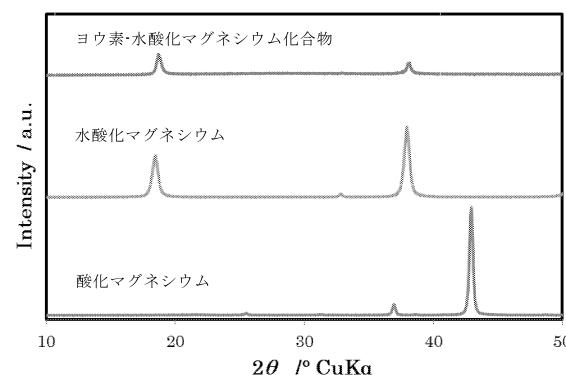


Fig. 1 ヨウ素-マグネシウム化合物及び酸化マグネシウム、水酸化マグネシウムのXRDパターン

酸化マグネシウム試料を用いてヨウ素溶液中のヨウ素を吸着しても、吸着後のヨウ素-マグネシウム化合物は水酸化マグネシウムの形に変わっていることがわかった。これは溶液中で、溶解度の高い酸化マグネシウム試料が水酸化マグネシウムへと変化し、その過程でヨウ素を吸着しているためだと考えられる。また、水酸化マグネシウム試料と比べ、吸着量が明らかに多いのは、溶液中で電離して、ヨウ素と反応する割合が多く、化学吸着の割合が高いためだと考えられる。

作製した固化ガラスは、いずれもヨウ素-マグネシウム化合物の添加量が 15mass%まで透明であり、X 線的に非晶質となった。添加量 20mass%では部分的に失透し不均質となった。また、EDX パターンからはヨウ素元素に相当するピークは見られなかったため、大部分は溶融の過程で蒸発していると考えられる。Fig. 2 に母ガラス ( $MgO : P_2O_5 = 40 : 60$ ) およびヨウ素固化ガラスの拡散反射スペクトル測定(吸光度換算)結果を示す。ヨウ素 - マグネシウム化合物の添加量の増加とともに紫外域での吸収強度が高くなった。ガラス中でのヨウ化物イオン、および臭化物イオンは通常二つに分離した吸収帯を持つが、相当するピークの分離は見られなかつた。そのため、単体の形ではなく、化合物としてガラス中に保持されている可能性が示唆された。

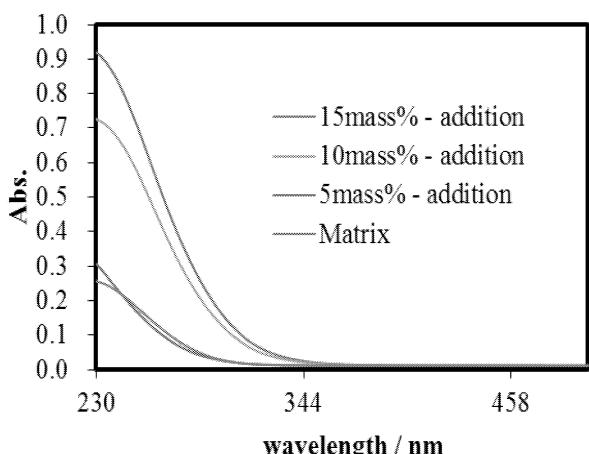


Fig. 2 母ガラス及びヨウ素固化ガラスの拡散反射スペクトル (吸光度換算)

### 3. 2 マグネシウム化合物によるセシウム、ストロンチウムの回収とガラス固化結果

Fig. 3 にイオン交換クロマトグラフィーを用いて測定した、振とう時間とセシウムまたはストロンチウムの残留濃度の関係(a)およびその時の pH 変化(b)を示す。振とう開始後 20 分程度で、セシウム、ストロンチウムの残留濃度は共に大幅に減少した。また、各ターゲットの濃度減少に応じて pH 変化にも相関性が見られたため、マグネシウムと共に、セシウムまたは、ストロンチウムおよびリン酸が共沈することにより、溶

液中の各ターゲットの残留濃度が著しく減少したと考えられる。また、pH 調整無、アルカリ条件下、塩酸を用い pH 調整を行った系、酸化カルシウムを用いた場合ではいずれもこのような急激な濃度減少は見られなかつた。沈殿物の XRD パターンからセシウム溶液を用いた系では  $CsMgPO_4 \cdot 6H_2O$ 、酸化マグネシウム、水酸化マグネシウムが混在した形で沈殿していることがわかつた。

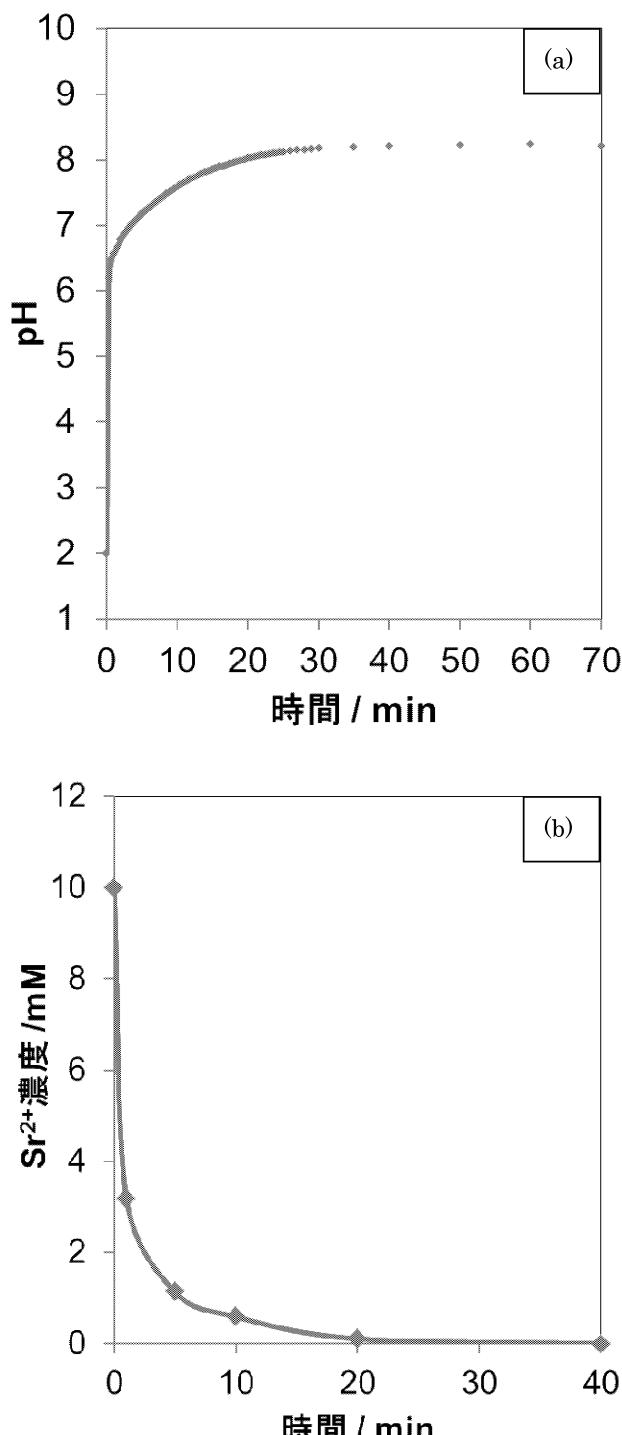


Fig. 3 ストロンチウム浸漬液の振とう時間と残留濃度及び pH の関係

(a) 振とう時間と Sr 濃度変化 (b) 振とう時間と pH 変化

作製した固化ガラスは、いずれの組成でも無色透明なガラスとなった。Fig. 4 に各固化ガラスの X 線回折パターンを示す。いずれの組成でもハローパターンとなり、結晶化することなくガラス化したと考えられる。また、セシウム、固化ガラスにおいて、金属元素の添加とともに密度が増加し、リン酸異常現象と思われる密度低下は見られなかった。しかし、ストロンチウム固化ガラスでは、モル組成比  $MgO + SrO : P_2O_5 = 47 : 53$  の試料で密度の低下が見られた。これは、イオンの価数およびイオン半径に依存し、同族の Mg および Sr を含む 3 成分系のみ密度の低下が見られたと考えられる。各固化ガラスについて、組成比 25:25:50 の試料を用いて EDX 測定を行った結果、添加量と同等の割合で各元素が検出された。よって、ヨウ素のガラス固化処理とは異なり、仕込み量通りの含有率となることが示唆された。

セシウム固化ガラスおよびストロンチウム固化ガラス(モル組成比 25:25:50)の水に対する浸出量および浸出率を Fig. 5 に示す。セシウム固化ガラスは、イオン交換水に浸漬後、3 日後までに急激な浸出が観察され、その後浸出の平衡に達しているように見える。また、ストロンチウム固化ガラスでは、イオン交換水への浸漬日数に比例し、リニアな浸出量の増加が見られた。そのため浸出率もほぼ一定となった。 $MgO + Cs_2O$  or  $SrO : P_2O_5$  の組成比を変化させた場合、セシウム固化ガラスでは組成比に関係なく、浸出量、浸出率共にほぼ一定となったが、ストロンチウム固化ガラスについては、マグネシウム、ストロンチウムの添加量が増加するにつれて、浸出量が著しく低下した。ガラスの溶解反応は、金属元素架橋構造の水和反応による溶解が支配的であることと、金属元素の含有量が増えることにより金属元素架橋構造が増えることから、マグネシウム、セシウム、ストロンチウム等の金属元素含有量が増えることによってガラスの溶解が促進されると考えられる。しかし結果としてストロンチウム固化ガラスの耐水性が金属元素の含有量と共に増したのは、ストロンチウム添加量の増加により、P-O-P 結合よりも水に強い P-O-Sr 結合が増加したため、水和反応が進行しなかったと考えられる。これらの結果から、固化ガラスの耐水性を向上させるためには、P-O-M 結合 ( $M$ : 金属元素) を生成するカチオン種を添加する必要があると考えられる。また、マグネシウム、セシウムのみを含むセシウム固化ガラスにストロンチウムを添加することにより、耐水性の向上が見込める。

#### 4. 結言

ヨウ素、セシウム、ストロンチウムの 3 種の元素について、マグネシウム化合物を用いた回収法、および

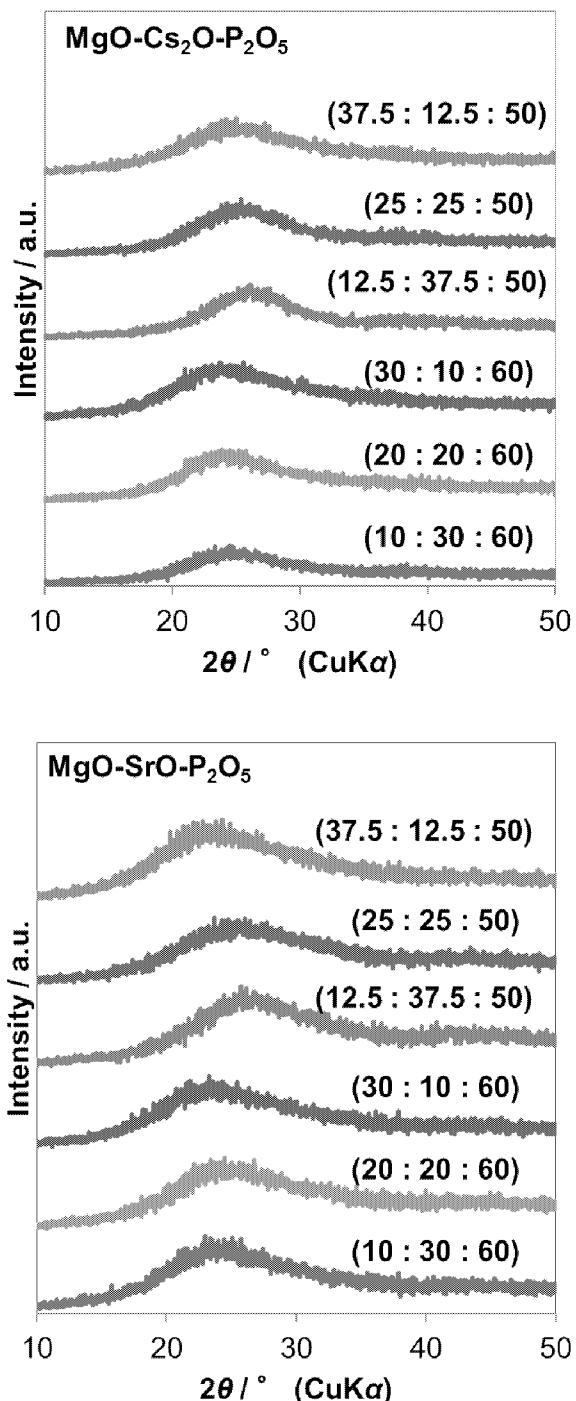
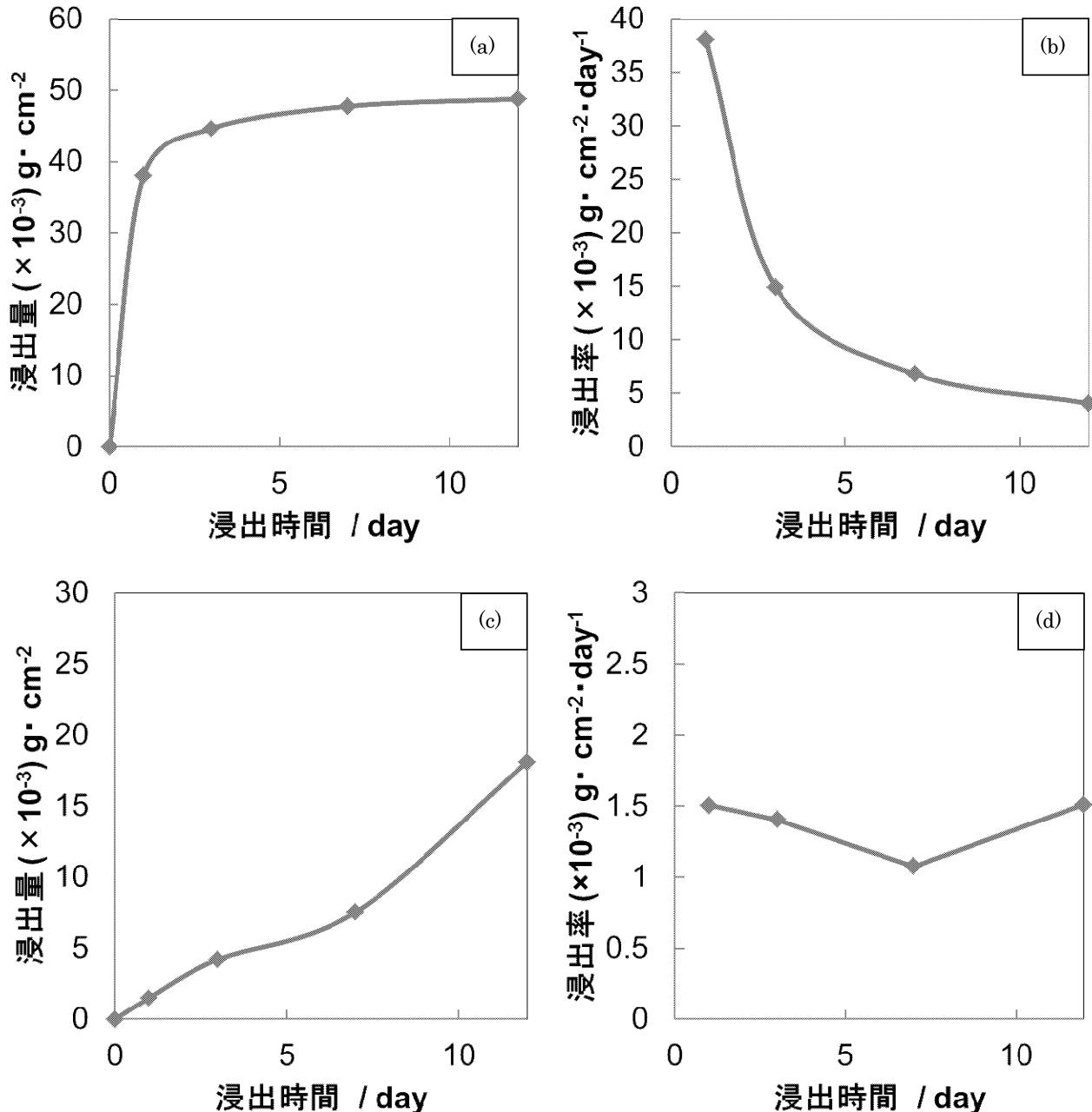


Fig. 4 セシウム、ストロンチウム固化ガラスの XRD パターン

その後のガラス固化処理の検討を行った。ヨウ素の回収については、酸化マグネシウムの小粒径試料で最大 2.23 g/g のヨウ素吸着性能を示すことがわかった。また、水酸化マグネシウムを用いた場合と比較し、化学吸着の割合が高いことから吸着性能が高いと考えられる。その後のガラス固化に関しては、紫外可視拡散反射スペクトルからは、ヨウ化物イオンに相当するピークは見られなかったため、化合物の形でガラス中に保持されていると考えられる。



セシウム、ストロンチウムの回収について、酸化マグネシウムを用い、リン酸により各浸漬液のpHを2.0に調整した条件で、セシウム、ストロンチウムとともに溶液中の残留濃度の著しい低下が見られた。この濃度減少は、リン酸とマグネシウムおよびターゲットであるセシウム、ストロンチウムの共沈反応によるものであると考えられる。その後のガラス固化処理の検討に関しては、セシウム、ストロンチウムの硝酸塩、酸化マグネシウム、リン酸を原料とし、組成範囲を変化させ、固化ガラスを作製した。その結果、作製したすべての組成で無色透明な非晶質のガラス試料が得られた。これらのガラスについて密度測定を行った結果、セシウム固化ガラスでは、リン酸異常現象とみられる密度低下は見られず金属元素の添加量に応じて密度が上昇した。ストロンチウム固化ガラスについては組成比

MgO+ SrO : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 47 : 53 (モル比) のサンプルで、密度の低下が見られた。またEDXスペクトルから、仕込み量と同等の割合の組成が維持されていることがわかった。これらの固化ガラスについて耐水性試験を行った結果、セシウム固化ガラスでは、セシウムおよびマグネシウムの添加量によらず、一定の浸出量、浸出率となり、ストロンチウム固化ガラスでは、ストロンチウムの添加に伴い耐水性が上昇した。

以上の結果から、ヨウ素に関しては酸化マグネシウムにより、セシウム、ストロンチウムに関しては酸化マグネシウムと合わせて、リン酸によるpH調整を行うことで、十分な回収性能を示すことが示唆された。また、回収後の固化ガラスに関し、セシウム、ストロンチウム固化ガラスでは、仕込み量に応じた割合で、ガラス中に保持されていることから長期安定に効率良く

最終処理が行えることが示唆された。耐水性に関しては、P-O-P 結合よりも水に強い P-O-M 結合を生成するカチオン種を添加することで、向上が見込まれると考えられる。

### 参考文献

- 1) N. N. Treushchenko, B. A. Dmitrievskii, A. A. Kazakov, S. K. Tsvetkov, A. Yu. Popov, B. Ya. Galkin, and V. A. Treushchenko, Recovery and Long-Term Storage of Radioactive Iodine Using Magnesium Containing Composites. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, Vol. 44, No. 4, pp. 587–591, 2010.
- 2) 大倉利典「ガラスによる高レベル放射性廃棄物の固化処理」*Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan.*, 13, pp. 448-445, 2006.

# 高品質 In 系窒化物半導体の結晶成長とデバイス製作プロセスの構築 —高品質 GaInN 膜の構造評価とデバイス応用—

工学院大学 工学部 情報通信工学科 山口智広

工学院大学 工学部 情報通信工学科 本田徹

情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 東脇正高

立命館大学 理工学部 電気電子工学科 荒木努

Growth of High-quality In-based Nitride Semiconductors and Development of Device Fabrication Processes

— Structural Evaluation of GaInN Films and Development to Devise Fabrication —

Tomohiro Yamaguchi, Department of Information & Communication Engineering, Kogakuin University

Tohru Honda Department of Information & Communication Engineering, Kogakuin University

Masataka Higashiwaki, National Institute of Information and Communications Technology

Tsutomu Araki, Department of Electrical & Electronic Engineering, Ritsumeikan University

**ABSTRACT:** The reproducible growth of thick GaInN films with a flat surface has been realized using the developed droplet elimination by radical-beam irradiation (DERI) method, which we proposed for the growth of high-quality InN films, by radio-frequency plasma-assisted molecular beam epitaxy (RF-MBE). The thick GaInN films grown by DERI method had no structural and In-compositional changes (or fluctuations) both in the growth direction and in the growth plane. A pn-GaN diode using GaInN film was also fabricated. When the carriers were injected into the pn-InGaN diode with In-composition of 18 % by applying forward bias, a clear blue-green emission with a wavelength of 500 nm was observed. In addition, a slight output power was obtained when the light was irradiated using a solar simulator.

## 1. はじめに

AlN、GaN、InN およびそれらの混晶からなる窒化物半導体材料は、緑～青色発光ダイオード (LED: Light Emitting Diode)、白色光源、青紫色レーザダイオード (LD: Laser Diode) などの発光デバイスを次々と実現させ、社会発展に大きく貢献してきた。また、AlGaN 系材料の高品質化の実現に伴い、実用デバイス適応領域を更に短波長側に広げ、現在では深紫外用 LED を実現させる材料として揺るぎない地位を得ようとしている。

2002 年、InN のバンドギャップが従来の報告値である 1.9 eV よりはるかに小さい約 0.65 eV であることが報告<sup>1-3)</sup> されて以来、InN および高 In 組成の GaInN をはじめ

とする混晶を含む In 系窒化物半導体は、赤外域発光デバイスや超高効率タンデム太陽電池用の材料として注目されるようになった。しかしながら In 系窒化物半導体は、低い InN の乖離温度、高い窒素の平衡蒸気圧などの本質的な問題<sup>4)</sup> により、Ga 系窒化物半導体や Al 系窒化物半導体と比べ、高品質結晶を得ることが困難な材料であることが知られている。現時点での In 系窒化物半導体の実用デバイス適応領域は、せいぜい緑色域までであり、それ以上の長波長域においては未だ結晶成長基盤技術の構築段階にあるといえる。

我々は、この In 系窒化物半導体の高品質結晶実現のための結晶成長技術の開拓、および、この材料を用いたデバイス製作プロセスの構築を図るべく、2012 年 4 月より

3 年間の総合研究所プロジェクト研究をスタートさせた。初年度は、高品質 In 系厚膜成長技術の開拓に焦点を当て研究を行った。本年度は、製作した GaInN 膜の構造解析を行うとともに、本 GaInN 膜を用いたデバイスの試作を行ったので報告する。

## 2. GaInN 厚膜の製作手法

GaInN 厚膜は、分子線エピタキシー (MBE: Molecular Beam Epitaxy) 法を用い、13 族の Ga と In、および、15 族の窒素を励起状態にして供給することにより製作する。成長には最適な成長条件、特に 15 族と 13 族の原料供給比である V/III 比の制御が非常に重要である。この制御を簡便かつ再現性良く行うために、高品質 InN を成長するための新しい手法として我々が提案している DERI (Droplet Elimination by Radical-beam Irradiation) 法<sup>5)</sup> を GaInN 成長に応用させた。DERI 法の 1 つの特徴は、反射高速電子線回折 (RHEED: Reflection High-energy Electron Diffraction)<sup>5)</sup> や光反射率測定<sup>6)</sup> などのその場観察を用いてモニタリングすることを通して、成長時の厳密な V/III 比制御を取り除くことができる。DERI 法は、①メタルリッチ成長プロセス (MRGP: Metal-Rich Growth Process)、および、②ドロップレット除去プロセス (DEP: Droplet Elimination Process) の 2 つのプロセスよりなる。図 1 に GaInN 混晶成長のための DERI 法のプロセス模式図<sup>7)</sup> を示す。MRGP では、GaInN を V/III<1 ( $N^*/(Ga+In)<1$ ) の条件下で成長を行う。ただし、GaInN 成長を行うためには、 $N^*/Ga>1$  の条件を追加する必要がある。メタルリッチ条件下にて GaInN 成長を行うと、Ga が優先的に結晶中に取り込まれ、In が結晶表面に吐き出される現象が起こる<sup>8)</sup>。次に、DEP では、Ga と  $N^*$  照射のみを行う。この時の Ga の供給量は、MRGP 時の  $N^*/Ga$  供給比と一定になるように制御する必要がある。このようにすることにより、 $N^*$  はすべての Ga と反応し、過剰となった  $N^*$  が結晶表面に滞在する In との反応をおこす。製作される GaInN の In 組成は供給された Ga と  $N^*$  の比のみにより決定される。結果として、MRGP と DEP 間で In 組成揺らぎのない GaInN 結晶が製作されることが期待される。また、Ga と  $N^*$  の供給比の制御は依然必要とされるものの、Ga、In、 $N^*$  間での厳密な V/III 比制御は解消されることとなる。

この MRGP と DEP を繰り返すことにより、図 2 に示すように、X 線回折 (XRD: X-ray diffraction) 測定で観察する限り相分離のない厚さ 1  $\mu\text{m}$  以上の単結晶厚膜 GaInN を成長することができる。

## 3. DERI 法製作 GaInN 膜の構造解析

MRGP と DEP を繰り返すことにより厚膜 GaInN を製作する。断面透過電子顕微鏡測定 (TEM: Transmission Electron Microscopy) 結果、および、オージェ電子分光測

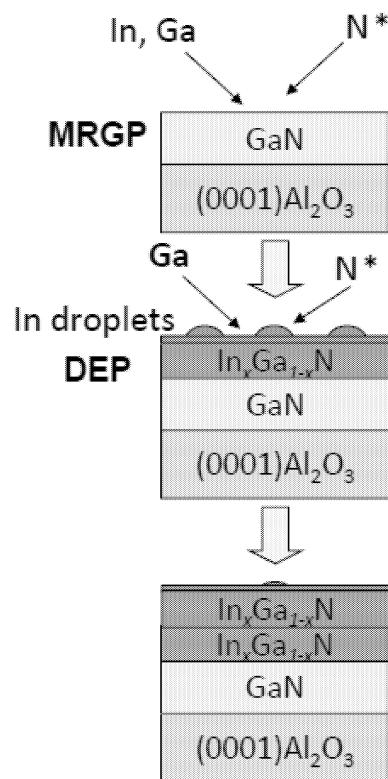


Fig. 1 Schematic diagram of growth model of thick GaInN film using advanced DERI.<sup>7)</sup>

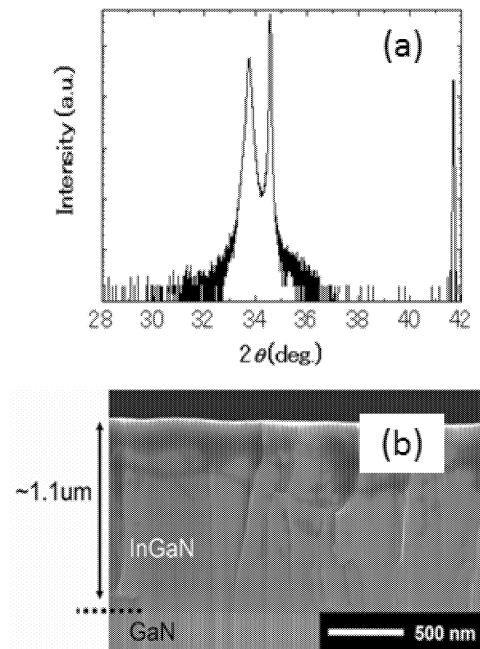
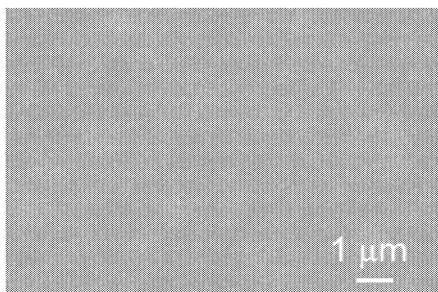


Fig. 2 Results of thick Ga<sub>0.8</sub>In<sub>0.2</sub>N film with a thickness of approximately 1.1  $\mu\text{m}$ . (a) XRD 2 $\theta$ -profile and (b) cross sectional SEM image.

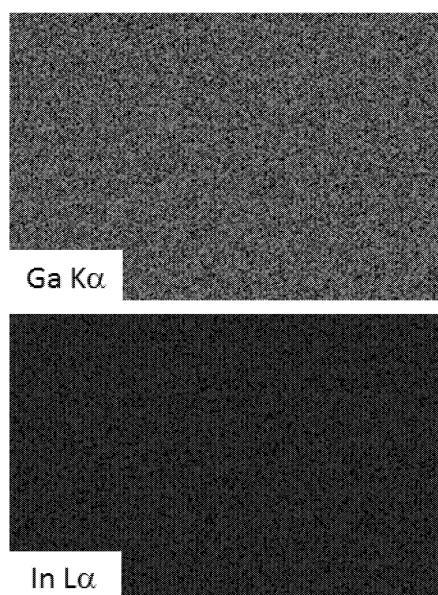
定 (AES: Auger Electron Microscopy) 結果より、繰り返しに起因する界面層の形成や界面部からの新たな転位の発生等は確認されなかった。本結果は、昨年度の報告書内に記載されている<sup>7)</sup>ので参考頂きたい。

図3に、同サンプル（厚さ 500 nm で In 組成 20% の GaInN 膜）の走査電子顕微鏡測定(SEM: Scanning Electron Microscopy) 結果を示す。表面 SEM 像から、非常に平坦な表面モフォロジーをもつ GaInN 膜が得られていることが確認できる。図4には、図3の測定範囲におけるエネルギー分散型 X 線分析測定 (EDX: Energy Dispersive X-ray Spectrometry) 結果を示す。Ga や In が GaInN 膜の面内分布において、相分離や偏析等が発生している様子は確認されなかった。

このように、DERI 法を用いて製作された厚膜 GaInNにおいて、成長軸方向についても成長面内についても、構造的な変化や In 組成の変化や揺らぎは確認されなかった。



**Fig. 3** Surface morphology of  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{N}$  film with a thickness of approximately 500 nm measured by SEM.



**Fig. 4** Results of EDX measurements in  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{N}$  film with a thickness of approximately 500 nm.

一方で、DERI 法を用いた GaInN 成長時に生じるメタリック条件での Ga の取り込み優先性を考慮に入れると、GaInN 表面に転位等に起因する表面ポテンシャルの違う領域がある場合、極微構領域において表面ポテンシャルの違いに起因して Ga の取り込み優先性が生じ、In と Ga の組成揺らぎが引き起こされることが予想される。今回の EDS 測定では、装置の分解能限界もあり、極微構域での組成揺らぎは確認されなかつたが、DERI 法により製作した GaInN 厚膜の極微構評価は、結晶成長学的な新たな知見を得るためにも、また、後述のデバイス特性への影響を理解するためにも、今後も継続した調査を行っていく必要があると考える。

#### 4. pn-GaInN 太陽電池特性のシミュレーション

これまで報告されている窒化物半導体材料を用いた太陽電池の構造は、有機金属気相成長 (MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法を用いて製作され、n-GaN 上に In 組成の低い GaInN 薄膜や量子構造を成長させ、p-GaN で挟んだものがほとんどであった。最近、4 % 程度の変換効率の GaInN 太陽電池の報告<sup>9)</sup>がされるようになったが、その基本構造は変わらない。これは、MOCVD 法では厚膜の GaInN を製作することが困難なためである。我々の成長技術を活かした厚膜成長 GaInN により製作可能となった pn-GaInN 構造により、どの程度の出力効率が期待できるのか検討を行った。

シミュレータには STR 社の SCSim を用い、様々な In 組成に対する pn-GaInN ホモ接合構造の太陽電池特性のシミュレーションを行った。具体的なシミュレーション条件は表1に示すとおりである。

図5に、様々な In 組成に対する pn-GaInN 太陽電池特性のシミュレーション結果を示す。In 組成を高くするにつれ、解放電圧 (Voc) は小さくなつた。これは、In 組成を高くするにつれ、バンドギャップが小さくなることに起因する。対して、In 組成を高くするにつれ、短絡電流 (Isc) は大きくなつた。これにより、変換効率は In 組成 50 % 程度で一番大きくなり、7 % 程度を実現できることが分かった。

**Table 1** Simulated condition.

GaInN の In 組成	10~70 [%]
n-GaInN の厚さ	70 [nm]
p-GaInN の厚さ	70 [nm]
電子濃度	$1 \times 10^{18} [\text{cm}^3]$
電子移動度	$100 [\text{cm}^2/\text{Vs}]$
正孔濃度	$1 \times 10^{18} [\text{cm}^3]$
正孔移動度	$5 [\text{cm}^2/\text{Vs}]$
電子の寿命	1 [ns]
正孔の寿命	1 [ns]
転位密度	$10^9 [\text{cm}^2]$

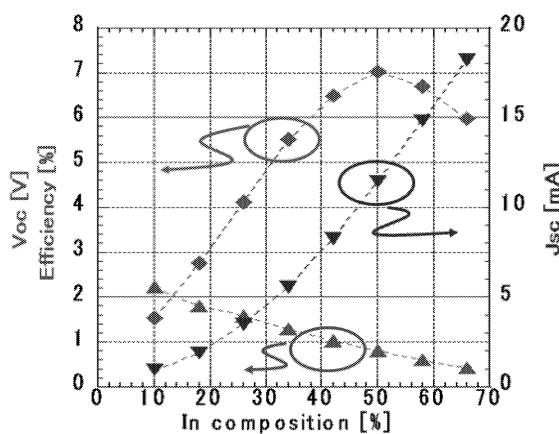


Fig. 5 Simulated results ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  and efficiency) of pn-GaInN solar cell as function of In composition .

## 5. pn-GaInN ダイオードのデバイス製作

図 6 に、pn-GaInN ダイオードの製作プロセスを示す。購入した GaN/Sapphire テンプレート上に、まず n-GaInN 層を前述の手法を用いて製作する。その上に p-GaInN 層を連続して成長させる。p-GaInN 層は、GaN 成長時に適切な Mg 量を供給することにより実現することができる。このように結晶成長により製作した pn 接合 GaInN 膜に対して、誘導結合方式 (ICP: Inductively Coupled Plasma) ドライエッティング装置を用いて p 型 InGaN 層を部分的に除去した後、n 型電極、p 型電極として、スパッタ装置を用いて Ti/Al/Ti/Au を、電子銃型 (EB: electron beam) 蒸着装置を用いて Au/Ni をそれぞれ堆積させる。

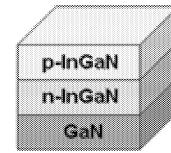
膜のエッティングについては、私学助成により今年度購入いただいた ICP エッティング装置の立ち上げを現在行つており、本プロジェクト終了となる来年度は、本学でのエッティングプロセス実施結果が報告できるものと期待している。n 層および p 層上への電極形成については、本プロジェクトの共同研究者である本田教授所有の装置を用いて、すでにプロセス実施が可能な状態にある。

本年度は、JST ナノテクノロジープラットフォーム「研究設備の試行的利用」に採択頂いたこともあり、物質・材料研究機構にて、エッティングおよび電極形成を行うことができた。次章では、物質・材料研究機構にて製作したデバイスの特性評価結果について報告する。

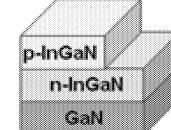
## 6. pn-GaInN ダイオードのデバイス特性結果

図 7 に、今回製作した pn-GaInN 膜の XRD 逆格子測定結果を示す。この結果より、GaInN 膜は相分離等のない単一組成の単結晶であり、GaInN 膜の In 組成は約 18 %、GaN 下地層に対する GaInN の緩和率は約 17 % であることが見積もられた。

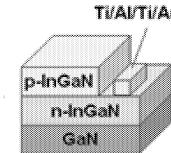
①成長させた GaInN 膜



②ICPによるエッティング



③スパッタによるn電極形成



④EBによるp電極形成

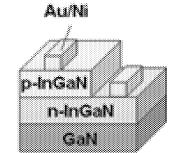


Fig. 6 Fabrication process of pn-GaInN diode.

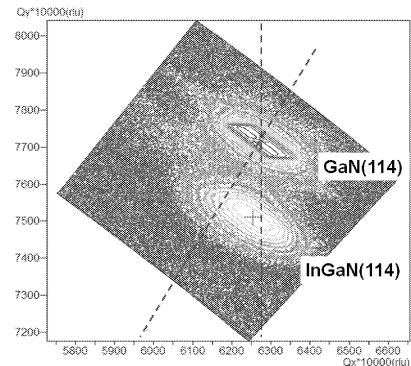
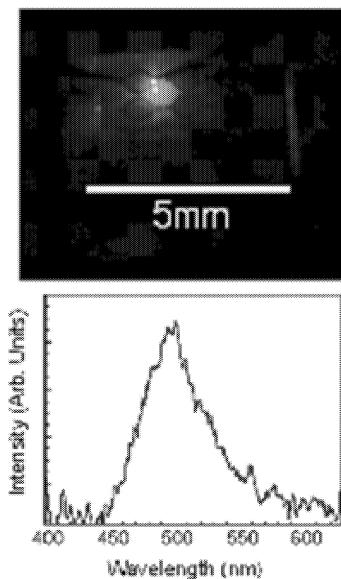
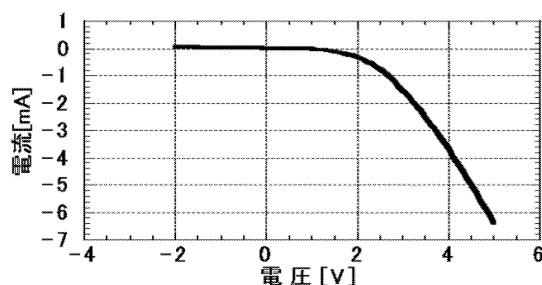


Fig. 7 Reciprocal space map of pn-GaInN film grown on GaN/sapphire template obtained by XRD measurement.

図 8 には、このサンプルに順方向バイアスを加えキャリアを注入した時に得られた発光写真と発光スペクトルを示す。発光波長 500 nm 程度の明瞭な青緑発光を確認した。図 9 には、このサンプルに対するソーラーシミュレータを用いた光照射 (放射照度: 1000 W/m<sup>2</sup>) 時の I-V 特性結果を、また、表 2 には、図 9 から見積もられた短絡電流、開放電圧、曲線因子を示す。このように、今回作った pn-GaInN 太陽電池は入射された光に反応して、



**Fig. 8** Emission photo and spectrum obtained from pn-GaInN diode with In composition of 18 %, where forward bias was applied.



**Fig. 9** I-V characteristics obtained in pn-GaInN diode with In composition of 18 %.

**Table 2** Characteristics of pn-GaInN solar cell.

短絡電流 Isc	1.46 [ $\mu$ A]
開放電圧 Voc	0.3 [V]
曲線因子 FF	0.28

わずかにではあるが発電出力が得られていることが分かった。しかしながら、シミュレーション結果から期待された値からはほど遠いものがあった。

## 7. 最後に

私学助成により今年度購入いただいたICPエッチング装置の立ち上げを現在行っており、本プロジェクト終了となる来年度は、本学でのエッチングプロセス実施結果が報告できるものと期待でき、高品質In系窒化物半導体の結晶成長とともにデバイスプロセスの構築に向け、順

調な研究を展開できている。

また、今年度、JST ナノテクノロジープラットフォーム「研究設備の試行的利用」に採択頂いたこともあり、物質・材料研究機構にて、エッチングおよび電極形成を行うことができたため、本年度、結晶成長により製作したpn-GaInN膜のデバイス構造プロセスおよびその評価までを行うことができた。

本デバイス製作を通して、pn-GaInN層を基盤とした実用可能なデバイス製作のためには、さらなる結晶成長技術の高度化を図るとともに、デバイス構造の最適化（例えば、n層・p層のキャリア濃度制御、厚さ制御等）やデバイス製作プロセスの最適化（例えば、電極材料、半導体-金属のコンタクト抵抗等）が必要であるという知見を得ることができた。

## 謝 辞

本研究は、工学院大学プロジェクト研究の援助を受けて行われた。また、本研究の一部は、科研費 若手研究(A) # 25706020、東電記念財団 研究助成（基礎研究）、および、文部科学省 ナノテクノロジープラットフォーム「研究設備の試行的利用」の援助も受けている

なお、GaInN太陽電池構造製作の一部（選択エッチング・電極形成）は、ナノテクノロジープラットフォーム「研究設備の試行的利用」の援助の下、選択エッチング、電極形成に必要となる各種装置の使用にあたり、物質・材料研究機構の池田直樹氏、大里啓考氏のご助言、ご協力をいただいた。

また、立命館大学の名西憲之教授には、本研究成果として得られた一部のサンプル製作にあたり、結晶成長装置を使用させていただいた。

物質・材料研究機構の角谷正友博士、Liwen Sang博士には、pn-GaInN太陽電池特性のシミュレーションを行うために、シミュレータを使用させていただいた。また、デバイス構造製作プロセスに関して、ご議論いただいた。

pn-GaInNの結晶成長およびデバイス製作には、研究室学部4年生の鳴谷建人君に協力してもらった。

ここに、あわせて感謝申し上げる。

## 参 考 文 献

- 1) V. Y. Davydov, A. A. Klochikhin, R. P. Seisyan, V. V. Emtsev, S. V. Ivanov, F. Bechstedt, J. Furthmüller, H. Harima, A. V. Mudryi, J. Aderhold, O. Semchinova and J. Graul, Phys. Status Solidi B 229, R1 (2002).
- 2) J. Wu, W. Walukiewicz, K. M. Yu, J. W. Ager III, E. E. Haller, H. Lu, W. J. Schaff, Y. Saito and Y. Nanishi, Appl. Phys. Lett. 80, 3967 (2002).
- 3) T. Matsuoka, H. Okamoto, M. Nakao, H. Harima and E. Kurimoto, Appl. Phys. Lett. 81, 1246 (2002).
- 4) J. B. MacChesney, P. M. Bridenbaugh and P. B. O'Conner, Mater. Res. Bull. 5, 783 (1970).

- 5) T. Yamaguchi and Y. Nanishi, *Appl. Phys. Express* **2**, 051001 (2009).
- 6) K. Wang, T. Yamaguchi, T. Araki, E. Yoon and Y. Nanishi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 01AE02 (2011).
- 7) 山口智広、本田徹、荒木努、東脇正高、工学院大学総合研究所プロジェクト研究報告書 (2012).
- 8) T. Yamaguchi and Y. Nanishi, *Phys. Status Solidi A* **207**, 18 (2010).
- 9) M. Mori, S. Kondo, S. Yamamoto, T. Nakao, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki, and H. Amano, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 08JH02 (2013).

## 研究成績

### ① 発表論文

1. M. Imura, S. Tsuda, T. Nagata, H. Takeda, M. Liao, A. Yang, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, Y. Koide, K. Kobayashi, T. Yamaguchi, M. Kaneko, N. Uematsu, K. Wang, T. Araki and Y. Nanishi, "Impact of Mg Concentration on Energy-Band-Depth Profile of Mg-doped InN Epilayers Analyzed by Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.* **103**, 162110/1-4 (2013).
2. T. Yamaguchi, D. Tajimi, M. Hayashi, T. Igaki, Y. Sugiura and T. Honda, "Effect of (GaN/AlN) alternating-source-feeding buffer layer in GaN growth on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and silicon by RF-MBE", *phys. stat. sol. (c)* **11**, 1549-1552 (2013).
3. J. Ibáñez, R. Oliva, F. J. Manjón, A. Segura, T. Yamaguchi, Y. Nanishi, R. Cuscó and L. Artús, "High-pressure Lattice Dynamics in Wurtzite and Rocksalt Indium Nitride Investigated by Means of Raman Spectroscopy", *Phys. Rev. B* **88**, 115202/1-13 (2013).
4. M. Imura, S. Tsuda, T. Nagata, H. Takeda, M. Liao, A. Yang, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, Y. Koide, K. Kobayashi, T. Yamaguchi, M. Kaneko, N. Uematsu, T. Araki and Y. Nanishi, "Systematic Investigation of Surface and Bulk Electronic Structure of Undoped In-polar InN Epilayers by Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy", *J. Appl. Phys.* **114**, 033505/1-6 (2003).
5. R. Jimenez-Riobóo, C. Prieto, R. Cuscó, L. Artús, C. Boney, A. Bensaoula, T. Yamaguchi and Y. Nanishi, "Temperature Dependence of the Surface Acoustic Waves Propagation Velocity in InGaN Films by High Resolution Brillouin Spectroscopy : Determination of the Temperature Coefficient of Frequency", *Appl. Phys. Express* **6**, 056601/1-4 (2013).
6. S. Nargelas, K. Jarašiūnas, M. Vengris, E. Sakalauskas, T. Yamaguchi and Y. Nanishi, "Injection-Activated Defect-Governed Recombination Rate in InN", *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 08JD02/1-4 (2013).
7. A. Yang, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, T. Yamaguchi, M. Imura, M. Kaneko, S. Ueda, O. Sakata, Y. Nanishi and K. Kobayashi, "Investigation of the Effect of Oxygen on the Near-Surface Electron Accumulation in Nonpolar M-Plane (10-10) InN Film by Hard X-Ray Photoelectron Spectroscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 08JD01/1-3 (2013).
8. T. Yamaguchi, N. Uematsu, T. Araki, T. Honda, E. Yoon and Y. Nanishi, "Growth of thick InGaN films with entire alloy composition using droplet elimination by radical-beam irradiation", *J. Cryst. Growth* **377**, 123~126 (2013).
- ② 国際学会発表
1. Y. Nanishi, T. Yamaguchi, T. Araki and E. Yoon, "DERI Method; Possible Approach to Green, Red and IR Light Emitters Based on Nitride Semiconductors", SPIE Photonic West (Feb. 2014, USA) (*Invited talk*).
2. T. Hatakeyama, T. Yamaguchi, D. Tajimi, Y. Sugiura, R. Amiya, T. Onuma and T. Honda, "Mist CVD growth of  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on sapphire substrates and RF-MBE growth of GaN on  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/sapphire templates", The 12th International Symposium on Advanced Technology (Nov. 2013, Taiwan).
3. T. Yamaguchi, K. Wang, T. Honda, E. Yoon, T. Araki and Y. Nanishi, "Growth of InN and Related Alloys using DERI Method toward Fabrication of Optoelectronics Devices", The 2nd International Conference on Advanced Electromaterials (Nov. 2013, Korea) (*Invited talk*).
4. R. Amiya, Y. Sugiura, D. Tajimi, T. Yamaguchi and T. Honda, "Impact of Native Surface Oxide on GaN Layers for their Surface Band Bending", The 2nd International Conference on Advanced Electromaterials (Nov. 2013, Korea).
5. S. Ohsawa, D. Tajimi, T. Yamaguchi and T. Honda, "RF-MBE Growth of GaN/Al Heterostructures on 4H-SiC", The 2nd International Conference on Advanced Electromaterials (Nov. 2013, Korea).
6. T. Hatakeyama, T. Yamaguchi, D. Tajimi, Y. Sugiura and T. Honda, "Use of  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> template in GaN film growth", 2013 JSPS-MRS Joint Symposia (Sep. 2013, Japan).
7. T. Araki, T. Yamaguchi, E. Yoon and Y. Nanishi, "MBE Growth of Thick InN and InGaN Films using DERI Method", 2013 JSPS-MRS Joint Symposia (Sep. 2013, Japan).
8. T. Hatakeyama, T. Yamaguchi, D. Tajimi, Y. Sugiura and T. Honda, "RF-MBE Growth and Characterization of GaN Films on  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Sapphire Template", 10th International Conference on Nitride Semiconductors (Aug. 2013, U.S.A.).
9. T. Yamaguchi, K. Wang, T. Honda, E. Yoon, T. Araki and Y. Nanishi, "RF-MBE Growth of InGaN Ternary Alloys: Advantage of DERI method", The 16th Canadian Semiconductor Science and Technology Conference (Aug. 2013, Canada) (*Invited talk*).
10. T. Yamaguchi, T. Hatakeyama, D. Tajimi, Y. Sugiura, T. Onuma and T. Honda, "RF-MBE growth of GaN films on nitridated  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> buffer layer", 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (Aug. 2013, Poland).
11. Y. Nanishi, T. Yamaguchi, T. Araki and E. Yoon, "Message for Future Research and Development of Opto-Electronic Devices Based on Nitride Semiconductors", The 8th LED Semiconductor Lightings Conference (Aug. 2013, Korea) (*Plenary*

- talk).*
12. Y. Nanishi, T. Yamaguchi, T. Araki and E. Yoon, "Recent Progress and Issues of InN and InGaN Growth for Future Optoelectronic Devices", The WCU Korea-China Workshop on Nitride Semiconductors 2013 (Jul. 2013, Korea) (*Invited talk*).
  13. T. Honda, T. Yamaguchi, D. Tajimi, S. Osawa and M. Hayashi, "Compressively strained GaN growth on (0001) 4H-SiC with Al buffer by MBE", E-MRS 2013 Spring Meeting (May 2013, France).
  14. S. Osawa, D. Tajimi, T. Yamaguchi and T. Honda, "Aluminum layers grown on (0001) 4H-SiC for the GaN growth by molecular beam epitaxy", The 40th International Symposium on Compound Semiconductors (May 2013, Japan).
  15. T. Yamaguchi, D. Tajimi, M. Hayashi, T. Igaki, Y. Sugiura and T. Honda, "Effect of (GaN/AlN) ASF buffer layer in GaN growth on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and silicon by RF-MBE", The 40th International Symposium on Compound Semiconductors (May 2013, Japan).
  16. D. Tajimi, Y. Sugiura, T. Hatakeyama, T. Onuma, T. Yamaguchi and T. Honda, "Growth of ultra-thin InN layers in GaN matrix for super weak waveguides", The 6th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductor (May 2013, Taiwan).
  17. Y. Nanishi, T. Yamaguchi, K. Wang, T. Araki and E. Yoon, "Recent Progress on InN and InGaN Growth for Future Optoelectronic Devices", Conference on LED and Its Industrial Application (Apr. 2013, Japan) (*Invited talk*).
  18. T. Hatakeyama, T. Yamaguchi, D. Tajimi, Y. Sugiura and T. Honda, "Growth of GaN on  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Sapphire Template by RF-MBE", Conference on LED and Its Industrial Application (Apr. 2013, Japan).
  19. S. Osawa, D. Tajimi, T. Yamaguchi and T. Honda, "Formation of Aluminum Templates Grown on (0001)4H-SiC for the GaN Growth by RF-MBE", Conference on LED and Its Industrial Application (Apr. 2013, Japan).
- ③ 国内学会発表
1. 鳴谷建人, 山口智広, Ke Wang, 荒木努, 名西憲之, Liwen Sang, 角谷正友, 藤岡秀平, 尾沼猛儀, 本田徹、"GaInN の RF-MBE 成長と pn ホモ接合型青緑色 LED の製作", 2014 年 (平成 26 年) 春季 第 61 回応用物理学関係連合講演会 (2014 年 3 月 神奈川).
  2. 山口智広、畠山匠、多次見大樹、尾沼猛儀、本田徹、"Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 上 GaN 成長と GaN 上 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 成長", 第 43 回結晶成長国内会議 (2013 年 11 月 長野).
  3. 網谷良介、多次見大樹、杉浦洋平、山口智広、本田徹、"表面酸化物の GaN 表面フェルミ準位と表面バンド曲がりに及ぼす影響", 2013 年 (平成 25 年) 秋季 第 74 回応用物理学学会学術講演会 (2013 年 9 月 京都).
  4. 大澤真弥、多次見大樹、山口智広、本田徹、"4H-SiC 上の疑似 Al 基板製作と疑似基板上への GaN RF-MBE 成長", 2013 年 (平成 25 年) 秋季 第 74 回応用物理学学会学術講演会 (2013 年 9 月 京都).
  5. 井村将隆、小出康夫、名西憲之、荒木努、山口智広、山下良之、吉川英樹、小林啓介、津田俊輔、長田貴弘、武田寛之、A.L.Yang、金子昌充、上松尚、"硬 X 線光電子分光法を用いた Mg-InN のエネルギーバンド分布評価", 2013 年 (平成 25 年) 秋季 第 74 回応用物理学学会学術講演会 (2013 年 9 月 京都).
  6. 坂本正洋、王 科、荒木努、名西憲之、Euijoon Yoon, 山口智広、"RF-MBE を用いた InGaN 成長の膜厚依存性", 2013 年 (平成 25 年) 秋季 第 74 回応用物理学学会学術講演会 (2013 年 9 月 京都).
  7. D. Tajimi, Y. Sugiura, T. Hatakeyama, T. Onuma, T. Yamaguchi, T. Honda", Impact of ultra-thin InN layers in GaN matrix for light-emitting diodes with super weak waveguides", 32nd Electronic Materials Symposium (2013 年 7 月 静岡).
  8. R. Amiya, Y. Sugiura, D. Tajimi, T. Yamaguchi, T. Honda, "Influence of native surface oxide on GaN surface band bending", 32nd Electronic Materials Symposium (2013 年 7 月 静岡).
  9. T. Hatakeyama, T. Yamaguchi, D. Tajimi, Y. Sugiura, T. Honda, "RF-MBE growth of GaN films on  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/sapphire template", 32nd Electronic Materials Symposium (2013 年 7 月 静岡).
  10. S. Osawa, T. Hatakeyama, D. Tajimi, T. Yamaguchi, T. Honda, "The GaN growth on psude Aluminum templates by molecular beam epitaxy", 32nd Electronic Materials Symposium (2013 年 7 月 静岡).
  11. 網谷良介、多次見大樹、杉浦洋平、山口智広、本田徹、"表面酸化物による GaN 表面フェルミ準位に及ぼす影響", 日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 第 5 回 窒化物半導体結晶成長講演会 (2013 年 6 月 大阪).
  12. 荒木努、山口智広、名西憲之、"DERI 法を応用した RF-MBE による InGaN 成長と評価", 日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 第 5 回 窒化物半導体結晶成長講演会 (2013 年 6 月 大阪) (招待講演).
  13. 名西憲之、山口智広、荒木努、"InN および In-rich InGaN をベースとした窒化物半導体による長波長発光デバイス開発への挑戦", LED 総合フォーラム 2013in 徳島 (2013 年 4 月 徳島) (招待講演).

# 新高精度超音波距離計測法による介護環境等での動き検知システムの研究

工学院大学 グローバルエンジニアリング学部 斎田 光孝  
室蘭工業大学工学部情報電子工学系学科 長谷川 弘治

## Study on Movement Detection in Care Environment Using Precise Ultrasonic Distance Measurement Method

Mitsutaka HIKITA Faculty of Global Engineering, Kogakuin University  
Koji HASEGAWA Faculty of Information & Electronic Engineering, Muroran University

**ABSTRACT:** Sensor network which connects many sensors via small-scale private wireless network such as ZigBee has been researched all over the world. In the future, it will provide home/office-circumstance monitoring such as taking care of old people, preventing crime and maintaining security. In this paper, we will propose a new care-environment monitoring system using the previously developed novel ultrasonic distance measurement method installed in ZigBee-based sensor network. Simulation results and fundamental experimental results will also be presented. A new concept called “Sensor Network” has been proposed by combining sensor technologies together with radio communications system such as cellular-phone. Sensed signals from many sensor nodes distributed in home, office and public places are collected to a center node by small local radio network. It will have a big impact on our lives and grow to be a giant industry in the future. Millimeter-wave radar systems using 76GHz have been introduced in high-end vehicles. By advancing similar technique used in radar systems, we have proposed a new accurate ultrasonic positioning method which can be installed in sensor network. The wavelength of 40kHz ultrasonic wave is 8.5mm almost the same as that of millimeter wave, which make it possible to adopt similar technique to our proposal. Ultrasonic continuous waves (CWs) at discrete frequencies which correspond to those of the Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) procedure are transmitted. Based on the relative amplitudes and phases between the received and transmitted CWs, the impulse response can be calculated in the center node, which can provide accurate distance information between nodes via many reflecting objects. If we subtract the impulse response at present time from that at the preceding time, we can obtain the change of distances to objects at two different times. By this procedure, we can exclude effects of inactive objects and detect only moving objects. Sensor network such as ZigBee and Z-Wave including these devices will be applied not only to care environment but also home/office monitoring, prevention of crime and watch in hospitals. In this report, both simulation results based on millimeter-wave technique and basic experimental results will be presented.

### 1. はじめに

携帯電話は飛躍的な進歩を遂げた。しかし、その後提案された多くの無線システムに関しては、無線 LAN と Bluetooth は普及しているが、その他のシステムには関連産業を牽引するような進展は見られない。移動通信の進歩

に伴って、最近提案されたセンサネットワークと言われる新概念がある<sup>(1)</sup>。非常に多数のセンサ(センサノード)を配置し、各センサからの出力信号を主に移動通信と同様の手段により構築したネットワークを介して集約し、それ等のデータに基づき、家庭やオフィスの住環境の制御<sup>(2)(3)</sup>、ビ

ルや市街単位での環境モニター、大規模な地域単位での自然環境状態の観察や保護などを行うものである。センサネットワークは、21世紀における携帯電話に匹敵するインパクトの大きい新概念であり、産業的にも大きく成長するといわれている。

我々は、センサネットワークをベースに病院や要介護者住宅のモニターを超音波を用いて行う研究を進めている。病室における患者のモニターや独居老人の住状況のモニター等は今後益々重要になる。現在は主に、①起床時前後の家電器具の電源のON/OFFをモニターするなど極めて間接的な検知方法、②CCDカメラ等により病人や住人の動きを監視する極めて直接的な手法が採用されている。前者は精度的な面で課題が多く、後者はプライバシーの面で用途は限定される。本研究は、これ等の課題に解決を与えるもので、ON/OFFモニターに比べ精度は極めて高く、CCDカメラに比べるとヒト等の動きは検知するが人物像は示さない。

手段は新しい高精度な超音波距離計測法を応用するものである<sup>(4)(5)(6)</sup>。センサノードの一部として超音波送受信機能を搭載し、一対のノード間でIFFT(Inverse Fast Fourier Transform)周波数に対応したCW超音波を送受信する。送信に対する受信超音波の相対振幅/相対位相を求めZigBee、Z-Wave等でセンターノード(別電源で動作)へ送る。そこで一括IFFT処理を行うことにより、反射物体を介した送受信トランシスデューサ(ノード)間のインレス応答を導出する。時間が若干異なる上記の2つのインパルス応答間の差を求ることで静止物体の影響を消去し、ヒト等の動きのみを抽出し、フォローするものである<sup>(7)(8)(9)</sup>。

従来のパルスエコー法を用いた超音波距離計測の高精度化には、CDMA通信と同様に符合拡散方式<sup>(10)</sup>、レーダーなどに採用されているチャーブ信号方式<sup>(11)</sup>がある。しかし、どちらも送受信側で重い信号処理が必要であり、電池1ヶで年単位の動作が要求されるセンサノードには採

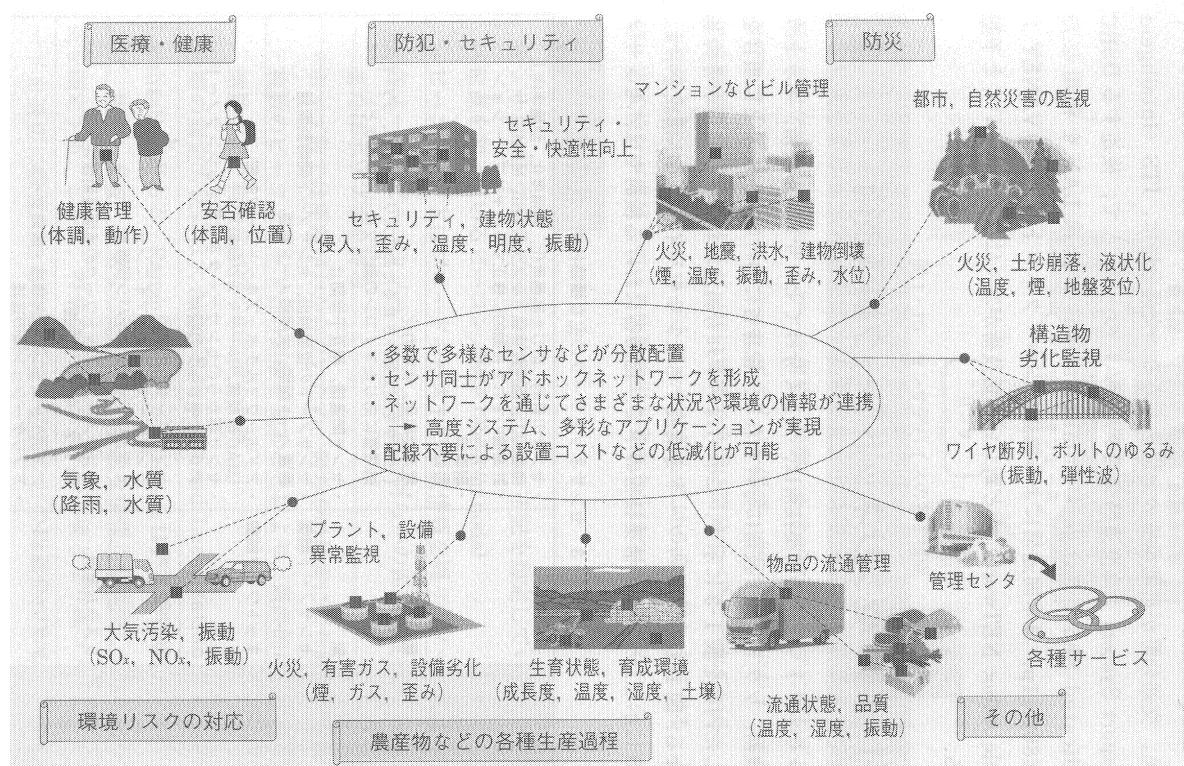


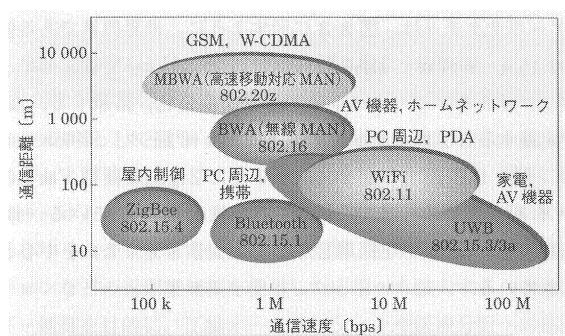
図1 総務省の考えているセンサネットワークの将来展望

用出来ない。また、上記のようにヒト等の動きの検知には適用出来ない。

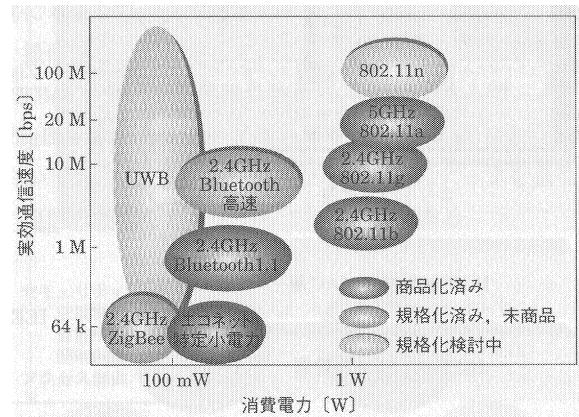
20kHz 以上の音波は可聴域の外にあり超音波と言われるが、その波長は 17mm 以下である。良く用いられる 40kHz では、波長は 8.5mm と電波ではミリ波の領域に対応する。超音波の反射、散乱、回折等およびそれらによる減衰に関しては、電波と同様種々の検討が必要と思われる<sup>(12)</sup>。しかし、現状筆者等は過去の研究例も含めて詳細は把握していない。本論文では、ミリ波の車載レーダーの受信電力の概念を適用し、我々の提案の可能性をシミュレーションした。また、基礎的なレベルの実験ではあるが、提案の基本部分の実験も行い実現性を確認した。本報告では、これ等の結果をまとめた。

表 1 各種無線規格(PHY)と応用分野

System	Features	Application
WLAN (Wireless LAN)	IEEE802.11a/b/g/i, 2.4GHz/5.2~5.6GHz	LAN (Wi-Fi) 等、データ伝送等
Bluetooth / Bluetooth Low Energy	IEEE802.15.1, 2.4GHz	マウス-PC通信等、時計-携帯通信等
ZigBee	IEEE802.15.4, 2.4GHz, 65535ノード	センサネットワーク等
Z-Wave	800~900MHz(米、欧州等), 232ユニット	センサデータ伝送、ホームオートメーション
UWB (Ultra-Wide Band)	IEEE802.15.3a, 3~10GHz	未定
BAN (Body Area Network), HBC (Human Body Com.)	IEEE802.15.6, 5~50MHz	ボディ通信、非接触スイッチング等
Transfer Jet	4.5GHz, 560Mbps (誘導電界結合型)	高速インターフェース (USB等)
WiGig (Wireless Gigabit)	10GHz, 7Gbps (~10m程度)	PC-HDTV、プロジェクターデータバス等



(a) 各種無線の通信速度と伝送距離の関係



(b) 各種無線の消費電力と実行通信速度の関係

図2各種無線の特徴比較(ZigBee はセンサネットワークのような低消費電力で通信速度の遅いシステムへの応用を想定している)

## 2. 携帯以外の無線システムとセンサネットワーク

総務省は、センサネットワークの将来展望を非常に大きな社会的インパクトのあるシステムと考え、図1に示すような概念を提案し、ロードマップ等も示している。我々は将来これ等のネットワークが安価に構築出来ることを前提に、さらなるネットワークの高度利用として、より快適な住環境、特に介護環境等のモニターを実現する研究を進めている。

表1に、提案されているあるいは既に規格化された携帯電話以外の無線システムの特徴と応用分野を示す。携帯電話は非常に大きな産業に成長したが、携帯電話以外では WLAN、Bluetooth は使用されているが、関連産業を牽引するようなインパクトは小さい。

ZigBee、Z-Wave は上記のセンサネットワーク用として期待は大きいが、センサネットワーク自体のサービス内容が現状では決して魅力あるものではない。むしろセンサネットワークおよびそれを支える無線システムの発展は、サービス内容の充実に依存する点が大きいと考えられる。その点本研究は、センサネットワークに付加価値を与えるも

のであり、今後このような提案が多くなされることがセンサネットワークの大きな飛躍には必須の条件である。

ZigBee の周波数帯域は国により種々アサインされているが、日本では 2.4GHz 帯が候補の一つである<sup>(13)</sup>。Z-Wave は、800-900MHz 帯を用いた ZigBee より簡易なシステムであるがより長距離通信が可能である<sup>(14)</sup>。米、欧州で規格化されているが、日本では対応する周波数帯域には空きがない。図 2(a)に示すように ZigBee は、低レート伝送のため最大 250kbps と低いが、最大の特徴は 1 ケのノードは 65,535 ケのノードと接続が可能である。また、センサノードは図 2(b)に示すように極めて低消費電力動作が可能であり、単一バッテリーで 1~数年の動作を保証している。これによりセンサノード同士を結びつけたセンサネットワークの構築が可能となる。また、ノード間でデータを橋渡しすることが出来、Star-link、Tree-link、Mesh-link 等のネットワークトポロジーが可能である。本研究では、ZigBee を基本無線ネットワークとしたセンサネットワークを想定した。新提案の超音波距離計測技術を基に、センサノードで得られたデータを ZigBee でセンターノードへ送り、そこでデータ処理することで、介護環境等における要介護者の動きを検知するものである。

本提案である超音波の送受信機能をセンサノードへ付加する場合は、各ノードが内蔵する数~10 数 MHz の TCXO (Temperature -Compensated X'tal Oscillator: 温度補償型基準発振器)の信号を分周、倍増することで数 10kHz の超音波の送信信号を生成する。また、受信波に対しては送信波と混合することで、I(X 軸)、Q(Y 軸)成分を抽出する。これ等の信号データは、ZigBee でセンターノードへ送り、センターノードで後に説明する IFFT 等<sup>(15)</sup>の一括処理を行う。

### 3. 新高精度超音波距離計測法

#### 3.1 IFFT 处理に基づく距離計測

図 3 に示すように、反射物体を介してトランスマッテューサ間で超音波を送受する場合を想定する(実際には、各トランスマッテューサは別々のセンサノードに搭載される)。簡単のため、図 4 に示すようにトランスマッテューサは周波数特性を有する(詳細は、後半で実験データを元に説明する)。送信トランスマッテューサから IFFT に対応する離散的な周波数の CW 超音波を送信すると((a)図)、受信波は伝搬と反射のため振幅は減少し、位相は回転する((b)図)。送信波に対する受信波の相対振幅と相対位相は、送受信トランスマッテューサ間のディスクリート伝達関数  $G(\omega_i)$ 、 $i=1 \sim n+1$  となる。従って、IFFT 处理すると送受信トランスマッテューサ間のインパルス応答が得られる。ここで、IFFT の周波数間隔を  $\Delta f$  とすると、時間軸では  $T=1/\Delta f$  を周期に繰り返される。折り返しの影響が無視出来る  $T$  すなわち  $\Delta f$  を定める必要がある。

センサノードでは各周波数に対する  $G(\omega_i)$  すなわち相対振幅/位相を求め、ZigBee を介してデータをセンターノードへ送る。センターノードでは別電源で IFFT 处理等を行うため、センサノードの消費電力は極めて小さく出来る。インパルス応答のピーク点から送受信トランスマッテューサ間の遅延時間が求まる。遅延時間に超音波の速度 ( $331.45 + 0.607 \times T_0 (\text{°C})$  m/s) を掛けると、反射物体を介した送受トランスマッテューサ間の距離を正確に求めることが出来る<sup>(4)(5)(6)</sup>。

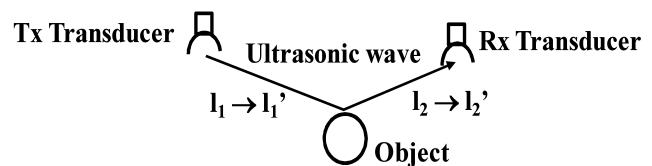


図 3 反射物体を介した超音波の送受信

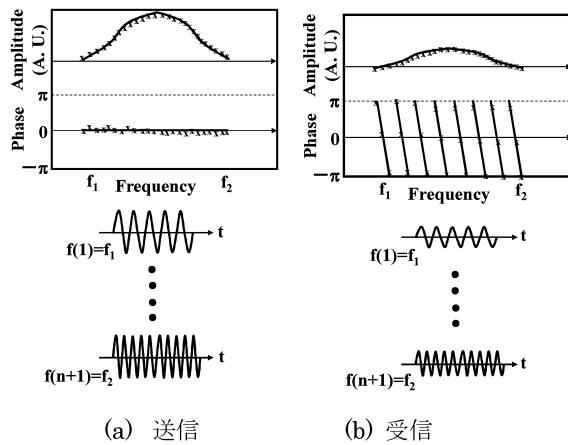


図 4 IFFT 周波数に対応した CW 超音波の送受信

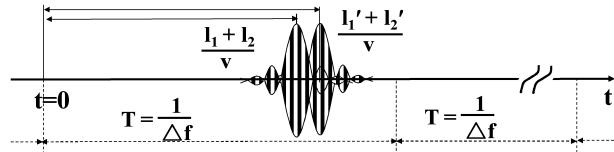


図5 図3の系のインパルス応答(IFFT処理結果)

### 3.2. 新計測法による動き検知

上記の測定法は、符合拡散法のようにレプリカとの相関(10)やチャーブ信号法のようにパルス圧縮(11)などの処理を必要しない。図3で  $t=t$  時の各トランスデューサと反射物体間を  $l_1$ 、 $l_2$  とし、 $t=t'$  時には物体が移動し  $l_1 \rightarrow l_1'$ 、 $l_2 \rightarrow l_2'$  となるとする。 $t=t$  と  $t=t'$  における各インパルス応答の差を求めると、図5のような結果が予想される。 $t=t$  から  $t=t'$  の間で物体に動きがある場合は動いた先々でのインパルス応答が表れるが、両者の差を取ると動きがない場合は互いに打ち消しあい出力はない。すなわち、静止物体は消去し動物体のみを表示することが出来るため、介護環境モニターなどで必要な動き検知手段として利用出来る(7)(8)(9)。

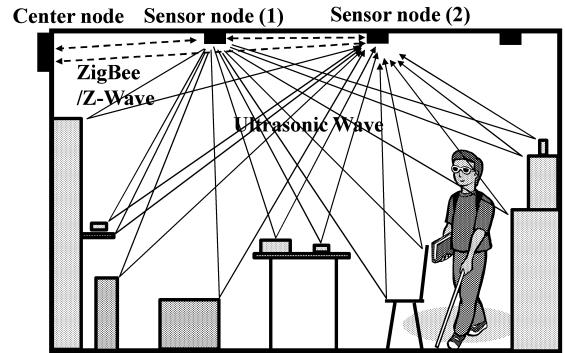


図6 シミュレーションモデル

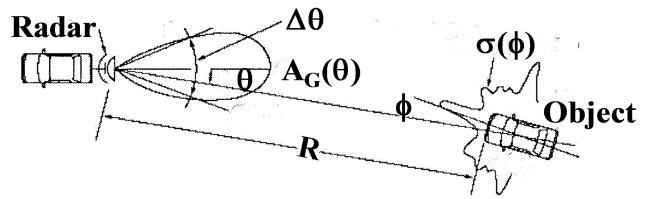


図7 ミリ波車載レーダーの送受信と反射

#### 4. レーダーと類似の散乱を仮定したシミュレーション

#### 4.1. シミュレーションモデル

シミュレーションに用いたモデルを図6に示す。センサノード(1)から超音波を送信、(2)で受信する。送信波に対する受信波の相対振幅/位相をZigBee等を介してセンタノードへ送る。センタノードでIFFT処理等を一括行うこととで、(1)、(2)間のインパル応答を求める。時間の異なるインパル応答の差より動物体のみを抽出するものである。

良く用いられる 40kHz の超音波を仮定すると、波長は 8.6mm となる。超音波の伝搬には、電波同様空間減衰、反射、回折等<sup>(12)(16)</sup>を考慮した扱いが必要であるが、筆者はこの点に関しては詳細を把握していない。電波ではミリ波帯に匹敵する波長のため、今回は図 7 に示すミリ波の車載レーダーで良く知られた関係式を準用する。また、反射は 1 回のみで多重反射は無視する。受信電力  $P_r$  は、以下で与えられる。

$$Pr = \frac{Pt A_G(\theta)^2 \lambda^2 \sigma(\phi)}{(4\pi)^3 R^4}$$

(1)

ここで、超音波トランスデューサには指向性があり、アンテナ利得  $A_G(\theta)$  同様  $\theta$  特性を規定すべきであるが、今回は簡単のため、全  $\theta$  に対して 1 とする。送信電力  $P_t$ 、波長  $\lambda$  等も簡単のため規格化し、 $P_t \lambda^2 / (4\pi)^3$  を 1 と置く。(1) より、受信電力  $P_r$  は距離  $R$  の 4 乗分の 1 で減衰し、振幅は 2 乗分の 1 で減衰することが分かる(図 8)。有効反射断面積  $\sigma(\phi)=\sigma$  は、振幅で考える場合は  $\sigma^{1/2}$  として扱う。シミュレーションでは、種々の距離に存在する反射物体の反射係数として規定する必要がある。図 8 のモデルでは、反射物体を介したセンサノード(1)、(2)間の距離は最少 3m、最大 8m を仮定する。反射係数は物体の形状、角度  $\phi$  に依存するため、今回は以下を仮定した。すなわち、3~8m 間に 10cm 間隔で 50 ケの反射物体が存在する。反射係数  $\sigma^{1/2}$  は、0~1 の間の乱数を 50 ケ用い規定した。図 9(a)に各距離に仮定した物体の反射係数を示す。図 9(b)に、図 8 の距離による減衰特性を考慮した換算反射係数  $\sigma^{1/2} / R^2$  を示す。

上記の外に、单一周波数信号を送信する場合と異なり、IFFT 周波数に対応した複数周波数の超音波を送受信するため、送受信トランスデューサのディスクリート周波数特性  $G_T(\omega_i)$ 、 $G_R(\omega_i)$  を規定する必要がある。 $G_T(\omega_i)$ 、 $G_R(\omega_i)$  を単独で評価するのは極めて難しい。ここでは、両者の積の絶対値  $|G_T(\omega_i)| \cdot |G_R(\omega_i)|$  として Gauss 関数を仮定する。図 10 に仮定した特性を示す。比較のため後に示す実験で用いたトランスデューサの実測値も示すが、両者は良く一致していることが分かる。

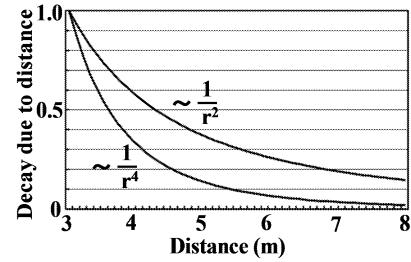


図 8 受信電力、振幅の距離による減衰

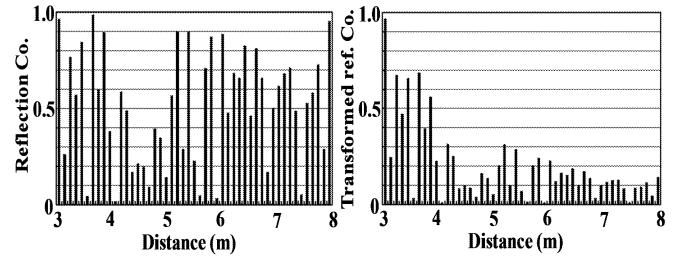
(a) 反射係数  $\sigma^{1/2}$  (b) 換算反射係数  $\sigma^{1/2}/R^2$ 

図 9 3~8m に存在する反射物体(50 ケ)の反射係数

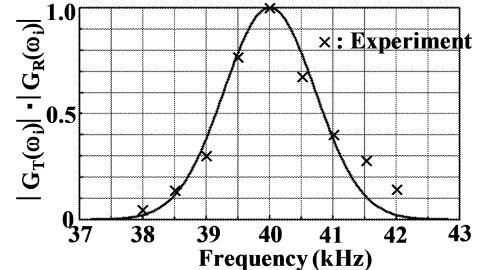
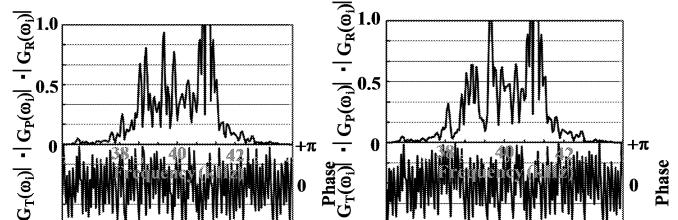


図 10 トランスデューサの周波数特性



(a) 3.052m の伝達特性 (b) 3.252m の伝達特性

図 11 ヒトの移動とディスクリート伝達特性

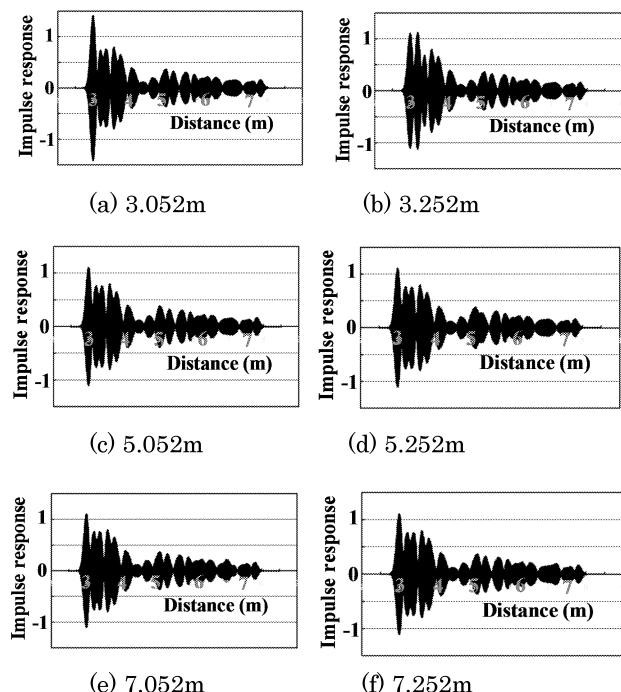


図 12 各移動点での IFFT 处理によるインパルス応答

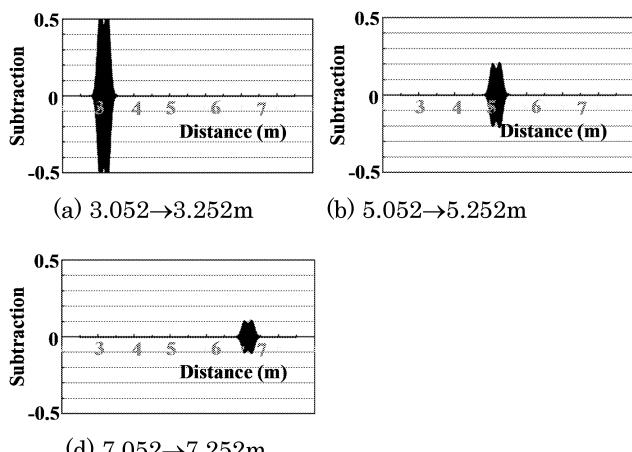


図 13 インパルス応答の差によるヒトの動き

#### 4.2. 動き検知のシミュレーション結果

シミュレーションでは、図 6 のモデルでヒトのみが最小距離の 3m から最大距離の 8m まで移動すると仮定する。3m でのヒトの反射係数は 0.5(最大値の半分)と仮定し、距離と共に他の反射物体と同様に  $R^{-2}$  で減衰するとする。 $\Delta f=0.03125\text{kHz}$  を仮定すると、折り返し距離は約 11m である。

前述のように送受信トランシスデューサのディスクリート周波数特性(伝達関数)を  $G_T(\omega_i)$ 、 $G_R(\omega_i)$  で表わす。超音波の伝搬と前述の反射物体による効果を含めたディスクリート伝達特性を  $G_p(\omega_i)$  で表わす。図 11(a)、(b)にヒトが 3.052m と 20cm 移動し 3.252m となった時のセンサノード(1)、(2)間の伝達特性  $G_T(\omega_i) \cdot G_p(\omega_i) \cdot G_R(\omega_i)$  を示す。図 12(a)、(b)に図 11(a)、(b)のデータを IFFT 处理し求めたインパルス応答を示す。同様に、5.052m から 5.252m へ移動した場合のインパルス応答を図 12(c)、(d)に、7.052m から 7.252m へ移動した場合を図 12(e)、(f)に示す。ヒトの移動によりインパルス応答自体は若干変化するが、これ等の変化から動きを検知することは難しい。

図 13(a)に図 12(a)、(b)のインパルス応答の差を示す。静止物体の影響は全て消去され、ヒトのみが 3.052m から 3.252m へ移動した様子が分かる。同様に、図 12(c)、(d)のインパルス応答の差、図 12(e)、(f)のインパルス応答の差を図 13(b)、(c)に示す。それぞれ 5.052m から 5.252m へ、7.052m から 7.252m への移動の様子が分かる。以上より、本手法により原理的に静止物体の影響を消去し、ヒトなどの動物体の影響のみを表示出来ることを示した。

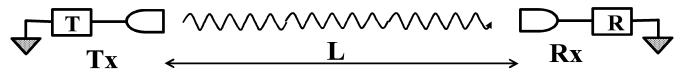
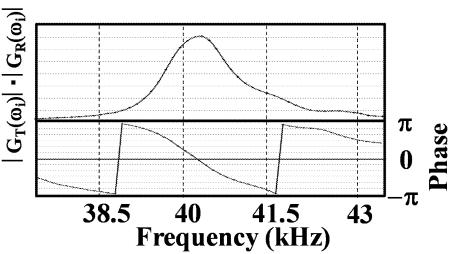


図 14 簡略化した実験系



(a) L=0 のディスクリート伝達関数

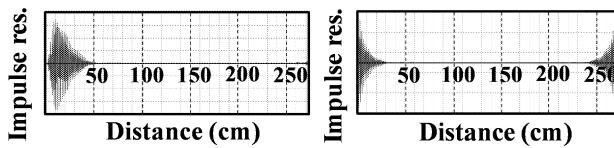
(b)  $G_T(\omega_i) \cdot G_R(\omega_i)$  の IFFT (c) 補正  $G_T(\omega_i) \cdot G_R(\omega_i)$  の IFFT

図 15 L=0 のディスクリート伝達関数による位相補正

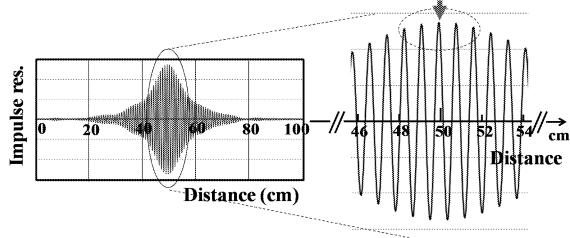


図 16 L=50cm のインパルス応答(1mm 程度の精度で距離測定可能)

## 5. 基礎実験結果

### 5.1. 高精度距離測定

初めに図 14 に示す送受信トランシスデューサのみで反射物体は存在しない系で実験を行った。図 15(a)に、図 14 で L=0 の場合すなわち送受信トランシスデューサを直接接続した時のディスクリート伝達関数  $G_T(\omega_i) \cdot G_R(\omega_i)$  を示す。電波のアンテナと異なり、超音波トランシスデューサは振動子で形成されるため、振動の慣性に起因し大きな位相傾斜が生ずる。図 15(b)に  $G_T(\omega_i) \cdot G_R(\omega_i)$  を IFFT 处理し求めたインパルス応答を示す。約 10cm 程度の遅延と波形の非対称性が明確に表れている。動き検知のベースである高精度な距離計測にはこの点の補正が必須と考えられる。すなわち、

$$G_T(\omega_i) \cdot G_R(\omega_i) = |G_T(\omega_i)| \cdot |G_R(\omega_i)| \exp\{j(\theta_T(\omega_i) + \theta_R(\omega_i))\} \quad (2)$$

と表わし、後半の位相部分をディスクリート伝達関数から補正(削除)する必要がある。図 15(c)に、 $G_T(\omega_i) \cdot G_R(\omega_i)$  に補正を加え((2)の位相の逆数を掛け)、更に IFFT 处理で求めたインパルス応答を示す。中心は距離ゼロにあり、完全に対称な応答波形が得られた。

図 16 に図 14 で L=50cm とした系でのインパルス応答波形を示す。この場合送受信トランシスデューサ間の伝達関数は、空間伝搬部の伝達関数を  $G_p(\omega_i)$  と表すと  $G_T(\omega_i) \cdot G_p(\omega_i) \cdot G_R(\omega_i)$  となる。従って補正結果は、

$$G_T(\omega_i) \cdot G_p(\omega_i) \cdot G_R(\omega_i) \cdot \exp\{-j(\theta_T(\omega_i) + \theta_R(\omega_i))\} \quad (3)$$

で与えられる。図 16 よりインパルス応答のピークは L=50cm にあり、その誤差は 1mm 程度である。本距離計測法が極めて高精度であることが分かる。

### 5.2. 動き検知

上記の高精度距離計測法を介護環境等でのヒトの動き検知に適用する。図 6 に対応する実験設備はまだ完備されておらず、今回は極めて基礎的なモデルで実験を行った。図 17 にモデルを示す。送受信トランシスデューサは 1.5m 離れて垂直な壁面に設置した。反射物体は直径 7cm で長さが 40cm の円柱を用いた。円柱は天井に平行にスライド出来、これにより反射物体を介した送受信トランシスデューサ間の距離を可変する。

図 18(a)、(b)、(c)、(d)に反射物体を介した送受信トランシスデューサ間の距離を変化させた場合の IFFT 处理で求めたインパルス応答を示す。反射物体の影響が鮮明に表れており、更にその振幅は距離の二乗に反比例して小さくなっていることが分かる。これは図 13 のシミュレーションでは、換算反射係数として図 9(b)の  $\sigma^{1/2}/R^2$  を仮定したが、この仮定がほぼ正しいことも示している。

図 19(a)に図 18(a)と(b)の差、すなわち時間と共に反射物体が 2.1m から 2.4m へ移動した場合を示す。同様に図

19(b)に図 18(c)と(d)の差、すなわち 2.7m から 3.1m へ移動した場合を示す。両図より、反射物体の動きが明確に現れていることが分かる。

従来のパルスエコー法では、時間的にキャリア周波数で振動している波形を受けるため、検波した包絡線情報しか得ることは出来ない。受信パルスは複数の反射物体からの反射波の重畳で構成されるため、検波により個々の反射物体からの情報は失われる。従って包絡線波形の差からは特定の物体の動きは検知出来ない。一方、本手法は差の波形が明確に表れ、動きのない反射物体からの反射波は互いに打消し合うため、ヒトなどの動きのある物体のみを検知出来るものと考えられる。

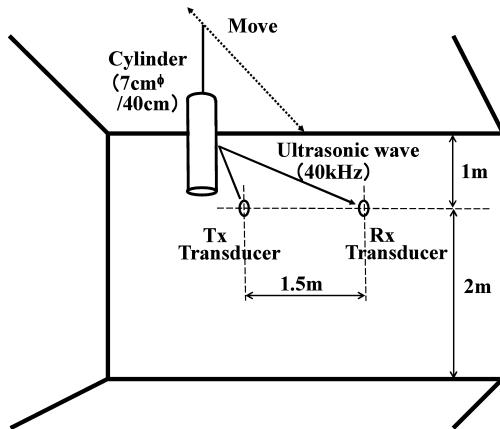


図 17 基礎実験用モデル

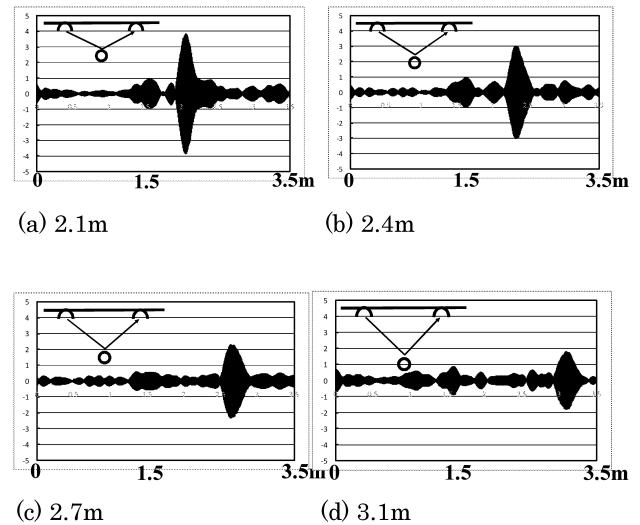


図 18 2~3m の実験データに IFFT を適用して求めたインパルス応答

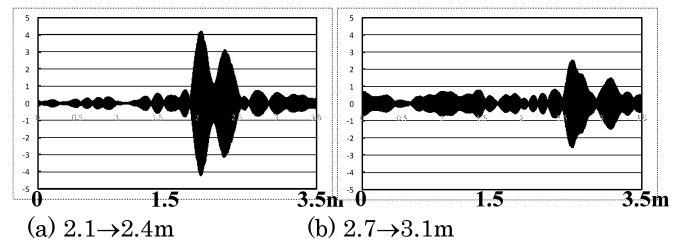


図 19 実験データに基づく動き検知(時間の異なるインパルス間の差)

## 6. むすび

将来のセンサネットワークの一部としての導入を目指し、超音波による介護環境等のモニターの研究を進めている。複数のセンサノード間で IFFT 周波数に対応した CW 超音波を送受信し、そのデータを元にセンサノード間のインパルス応答を求める高精度距離計測法を提案した。更に、時間が若干異なるインパルス応答の差よりヒト等の動きを特定する検知法を発案した。シミュレーションと基礎実験により実現の可能性を示した。今後介護環境等を想定した実験系を構築し、更に具体的な評価を行う予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、文部科学省研究費補助（基盤研究（C））および工学院大学プロジェクト研究費の下に行われている。ここに記して、謝意を表する。

## 文献

- [1] 小川，“センサネットワークトー総論一，”電子情報通信学会誌，Vol.89，No.5，pp.362-366，2006年。
- [2] 森，野口，佐藤，“センサネットワークと生活行動，”電子情報通信学会誌，Vol.89，No.5，pp.430-435，2006年。
- [3] 平澤，齋藤，“複数センサを用いた居住者の活動把握，”電気学会 MSS 研究会資料，MSS-09-5，pp.25-30，2009。
- [4] 斎田，“超音波距離計測システム，”特許番号 5442215 (平成 20 年 5 月 13 日出願)。
- [5] M.Hikita, T.Watanabe, et al, “Investigation of novel ultrasonic positioning method installed in sensor network,” PIERS Proc. pp.1676-1681, Mar. 2009.
- [6] T.Watanabe, M.Hikita, et al, “Study of accuracy improvement for ultrasonic positioning method installed in sensor network,” Proc. USE, Vol.30, pp.225-226, 2009.
- [7] 斎田，“超音波計測システム，”特願 2010-269436, 平成 22 年 12 月 2 日出願。
- [8] N.Tobita, M.Hikita, “Basic study of distance measurement and movement detection in sensor network using ultrasonic technique,” Proc. USE, Vol.32, pp.89-90, 2011.
- [9] M.Hikita, N.Tobita, et al, “Study on new ultrasonic positioning and movement detection installed in sensor network,” PIERS Proc. pp.27-30, Mar. 2012.
- [10] Dixon, R.C.: Spread Spectrum Systems, John Wiley & Sons, 1979.
- [11] De Witte, E. and H. D. Griffiths, “Improved ultra-low range side lobe pulse compression waveform design.” Electronics Letters, Vol.40, No.22, pp.1448-1450, 2004.
- [12] 市坪，“移動通信における多重波伝搬の周波数特性，”信学論(B), Vol.J93-B, pp.1140-1149, 2010.
- [13] IEEE Standard 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2003.
- [14] 辻井他, デジタル信号処理の応用, 電子情報通信学会, pp.16-26, 昭和 56 年。
- [15] 奥村他, “陸上移動無線における伝搬特性の実験的研究,”通研実報, Vol.16, No.9, pp.1705-1764, 1967.

## 表面ナノ構造を基礎とした機能性薄膜の形成

工学院大学 応用化学科 阿相英孝

工学院大学 環境エネルギー化学科 吉田直哉

工学院大学 環境エネルギー化学科 大倉利典

工学院大学 電気システム工学科 鷹野一朗

芝浦工業大学 材料工学科 湯本敦史

地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター 中村 勲

### Fabrication of functional thin films based on nanostructured surface

Hidetaka Asoh, Department of Applied Chemistry, Kogakuin Univ.

Naoya Yoshida, Department of Environmental and Energy Chemistry, Kogakuin Univ.

Toshinori Okura, Department of Environmental and Energy Chemistry, Kogakuin Univ.

Ichiro Takano, Department of Electrical Engineering, Kogakuin Univ.

Atsushi Yumoto, Department of Materials Science and Engineering, Shibaura Institute of Technology

Isao Nakamura, Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute

**ABSTRACT :** Functional thin films with nanostructured surface are expected to be used in various fields such as electrochemical, optoelectrical, magnetical and biological sciences as functional devices. In this study, the fabrication of functional thin films was investigated by two types of approach, that is, wet process (metal-assisted chemical etching, anodic etching, anodizing) and dry process (supersonic free-jet PVD, ion beam assisted deposition). The proposed thin films have potential technological applications in fields that need textured surfaces of controlled morphology on the submicron to nanometer order.

### 1. はじめに

表面処理の従来の役割は、主に装飾（着色）や防食（防錆）であったが、現在では様々な処理法が開発され、あらゆる産業分野で表面処理技術の重要性が増している。表面処理の目的は、①耐磨耗性や耐食性の付加など従来の基材の保護や機能性向上を図ること、②電気的特性や光学的特性の付加など従来の基材にはない新たな機能を付加すること、の大きく二つに分類される。但し、現状の製品や部品に対して要求される事項は必ずしも1つではなく、複数の要求を満足するためには、数種類以上の表面処理を複合的に組み合わせて対応するのが現状であ

る。例えば、コンピュータに搭載されるハードディスクの基材にはアルミニウムが用いられ、磁気記録媒体として磁性膜をコーティングする前には、磁性膜を支えるめつき処理が施されている。更に、磁性膜の上には製品の長寿命化や安定化を目的として保護膜や潤滑膜がコーティングされており、部品、基材、表面処理の目的に応じて様々な表面処理技術が適用されている。そのため、各種材料の表面をナノスケールで制御し、所望の表面特性を発現させるためには、基礎的な知見、実験技術を体系的に整理・活用することが重要な課題である。

そこで本プロジェクト研究では、ナノスケールで表面構造を制御した機能性薄膜の形成を主目的とし、濡れ性、接着性、耐摩耗性、磁性などの表面特性、各種機能をウ

エットプロセスならびにドライプロセス、それぞれ異なる二つのアプローチによって制御し、分子系、材料系、機械系の連携をベースとして、学内外の研究者間の協力体制のもとに社会ニーズにマッチした研究を開拓することを目的としている。本研究で実施する機能性薄膜の作製法は以下の二つに大別されるが、機能性薄膜というキーワードのもとに、基礎データ・技術を蓄積し、最終的には研究分野を越え、独自の表面処理技術の確立、新規物性の発現を目指している。

#### 【ウエットプロセス】

アノード酸化、めっき、電解重合、電解析出、ゾル・ゲル法、化学エッティングなど

#### 【ドライプロセス】

真空蒸着、イオンプレーティング、スパッタリング、CVD、溶射、イオン注入、エッティングなど

## 2. 本研究の目的

本研究では、ナノスケールで表面構造を制御した機能性薄膜の形成を主目的とし、濡れ性、接着性、耐摩耗性、磁性などの表面特性、各種機能をウエットプロセスならびにドライプロセス、それぞれ異なる二つのアプローチで展開し、適宜グループ間の情報提供、技術提供を通じて機能性薄膜作製技術の確立、得られた薄膜を活用した応用研究を模索する。

### 2-1：ウエットプロセスにより形成したナノポーラス膜の濡れ性評価

材料研究の分野において生体模倣（バイオミメティクス）に関する研究が近年盛んになり、蓮の葉の超撥水性、昆虫の足の接着性、蛾の眼の持つ無反射性、モルフォ蝶の鱗粉が放つ構造色など、固体表面に形成されるナノ・マイクロ構造に起因する特異な機能を模倣して、テフロンを使わない撥水材料や接着物質を使わない粘着テープ、金属薄膜を使わない無反射フィルム、色材を用いない発色繊維など、身近な生物に学び実用化された製品も数多い。研究分野は化学のみならず機械工学や流体力学の分野にも拡大し、MEMS技術などが機能性表面の創製に大きく貢献している。バイオミメティクスは生物学と材料科学の融合により世界的に発展してきたが、化学系と機械系の連携や他の技術体系を融合することで、さらなる発展と新規機能性材料の模索が可能と考えられる。

本研究課題の一つは、ウエットプロセスであるアノード酸化で形成したナノスケールのポーラス構造を持つ酸化アルミニウム（アルミナ）あるいは酸化チタン（チタニア）を基材として、ナノスケールでの幾何学構造、表面粗さ、表面状態などの材料自身の特性と撥水/撥油性、親水/親油性などの濡れ性の関係に着目し、バルク基板ではなく微細な孔を持つ固体基板表面の濡れ性を液滴の「静的」な状態ではなく、「動的」な挙動で評価することを目的とする。一般に固体表面は静的接触角で評価されることが多いが、自己浄化、防汚、刺激応答性表面の創製など実用を考える上では、動的濡れ性の理解が必要

である。またナノポーラス材料の濡れ性や接着性を研究することは、機能性酸化膜フィルターの形成等、応用展開も大いに期待できる。さらには処理条件を調整することで、硬質酸化膜も形成されることから、摩擦、磨耗、潤滑など基盤技術でありながら、学際的な位置づけが強い領域へもアプローチし、材料系と機械（トライボロジー）系の融合領域でも有益な情報の蓄積を検討する。ナノ構造の機械的特性の評価に関しては、後述する課題においても実施するが、本プロジェクトの研究組織であれば、グループ間の連携により実用レベルにおいて研究を格段に進展させることができると期待できる。

### 2-2：ドライプロセスにより形成した光磁気特性を持つ薄膜の評価

近年、光で制御できる磁性材料のように、光と磁気の関係が注目を集めている。この特性は磁性ナノ粒子による影響を強く受け、このナノ構造が光磁気特性を決定している。本研究では、ドライプロセスを代表するスパッタリング法や真空蒸着法などの基本成膜技術の他に、特徴ある成膜が行える超音速フリージェットPVD法やイオンビームミキシング法を用い磁性薄膜のナノ構造を制御する。スパッタリング法にはヘリコンスパッタリング装置を用いており、ターゲットプラズマと成膜基板が離れて位置するため、温度やガス流量コントロールにより金属薄膜や酸化物薄膜のナノ構造制御が精密に行える。また、超音速フリージェットPVDは、不活性ガス雰囲気中で皮膜となる原料を加熱蒸発させることにより生成させたナノサイズの粒子（ナノ粒子）を、マッハ4.2（約5km/s）の超音速ガス流により加速させ、基材に堆積させることにより皮膜を形成する新しい成膜法である。さらに、イオン照射と真空蒸着を併用したイオンビームミキシング法では、エネルギー粒子に加速イオンを用いるため、必然的に薄膜構造はナノ粒子化し条件設定により構造制御が可能となる。

これまで、それぞれの手法を用いて得意とする材料をもとに薄膜形成を行ってきたが、新たな材料形成を行うためには、多元的な視野から各成膜法の特徴を捉えたナノ構造の設計・制御が必要となる。ここでは、第一段階として高性能磁性薄膜の形成と光磁気薄膜の形成を目的とする。高性能磁性薄膜の形成には、超音速フリージェットPVDを用い「高飽和磁束密度」、「低保磁力」及び「高い初透磁率」を同時に満たすナノ結晶鉄基軟磁性膜を形成し、磁気シールドや磁気ヘッドなどの優れた軟磁性材料の実用化を目指す。同様に、イオンビームミキシング法では、磁性金属の蒸着と同時にイオン照射を行いミキシングすることで薄膜構造を微細化する。光磁気薄膜は、スパッタリング法により酸化チタンにコバルトやニッケルをドープすることで形成する。これらの薄膜については、薄膜構造、化学状態などを分析し磁気特性との関係を評価して、最適な形成条件を求める。また、ナノ構造は機械的特性にも影響を及ぼすことが知られていることから、実用的な薄膜とするためにも、硬さや摩

擦・摩耗などの機械的特性の調査も前述の課題と連携して進める。

### 2-3：ウエットとドライプロセスの融合によるナノ構造を制御した多機能薄膜の形成

本研究では最終的に、ウエットプロセスとドライプロセスとの融合を図り、光磁気特性、濡れ性、機械的特性などに優れた多機能薄膜の形成を実現させることを目的とする。すなわち、ウエットプロセスで微細加工された構造にドライプロセスで薄膜を形成し、濡れ性や磁気特性の制御、特性改善を図る。また、ドライプロセスで成膜した薄膜にアルミナやチタニアを形成し、ナノポーラス構造をつくることで、濡れ性に対する光磁気応答性を調査する。このように、両プロセスの融合により、新たな多機能薄膜の創製が期待でき、新材料・新プロセスの開発という観点からも、今日の社会的要請に応える魅力的な研究課題であると言える。

## 3. プロジェクト研究の進捗状況

共同研究者は、学内だけでなく学外の機関にも所属しているため、全メンバーへの情報提供は、基本的に電子メールで行っている。また、学内関係者との打ち合わせは、適宜当事者間で調整して実施している。

<2013年度に実施した主な打ち合わせ>

7月 予算配分、テーマ設定ほか

9月 共同研究者顔合わせ、進捗状況報告、ほか

12月 本研究課題の継続申請に関して、ほか

### 3-1：ウエットプロセスを中心としたナノ構造制御、表面改質、表面機能化

担当：阿相（本学応用化学科）、吉田、大倉（本学環境エネルギー化学科）

初年度は、基板表面のナノ構造と濡れ性の関係において、基礎的なデータを集積し、評価方法を確立するため、シリコン基板上に形成したナノ構造（ナノボア、ナノワイヤ構造）の静的・動的濡れ性に関して評価を進めた。

### 3-2：ドライプロセスを中心としたナノ構造制御、表面改質、表面機能化

担当：鷹野（本学電気システム工学科）、湯本（芝浦工大）、中村（都立産業技術研究センター）

初年度は、担当者が得意とするそれぞれの手法を用いて薄膜形成の基礎データを集積した。例えば、超音波フリージェット PVD を用いて、ナノ結晶軟磁性基膜あるいはナノ結晶半導体膜の開発を進めた。

ここまででは、当初の計画通りに研究が進んでおり、今後も、ウエットとドライプロセスの融合によるナノ構造を制御した多機能薄膜の形成の実現に向けて、定期的に打ち合わせを行い、研究を展開する計画である。本稿では、以下に 2013 年度の研究成果の一部を報告する。

## 4. 化学エッティングを施したシリコン表面の濡れ性に対する微細構造の効果

Si 表面上にポーラス Si のような微細構造を形成すると反射率や濡れ性などの表面特性が変化する。ここでは、種々のエッティングにより Si 表面に様々な微細構造を作製し、濡れ性と構造の関係に関する基礎データの収集を目的とした。

試料としてアセトン脱脂後、HF にて自然酸化皮膜除去をした Si 基板を用いた。試料に対して 5 wt% NaOH 中でアルカリエッティングを行い、その後 HF に浸漬することで水素終端化した Si 凹凸構造を作製した。また、フォトレジスト製ハニカムマスクを介して Au を用いた金属触媒エッティングを行い、ミクロン周期のホールアレイを作製した<sup>1)</sup>。さらに、ナノメートルオーダーのホール構造を作製するため、無電解析出による Ag を用いた金属触媒エッティングを行った<sup>2)</sup>。作製した試料は走査型電子顕微鏡 (FE-SEM:JSM-6701F) を用いて表面観察し、接触角測定には全自动接触角計 (DM-700) を用いた。

図 1 に銀を触媒として、過酸化水素を含む HF 中で金属触媒エッティングを施した Si 表面の SEM 像を示す。無電解析出でナノサイズの Ag 微粒子を Si 表面に不規則に析出させ化学エッティングをすることで、Si 基板表面にナノホール構造を形成することができる。しかしながら、基板表面において水平方向へもエッティングが進行するため、表面は図 1 に示すように粗雑化した。

図 2 に種々の表面処理を施した Si 基板の水接触角を示す。Si 表面を覆う官能基が親水基 (-OH) の時、接触角は 45°で親水性を示すが、HF により水素終端化 (-H) した場合には 75°と疎水性を示す。また、アルカリエッティングで作製したピラミッド型構造を HF で処理することで、接触角は 83°となった。これは、平滑面に比べて表面積が増加したことに起因する。サイズの異なるホール構造での接触角はマイクロホール構造で 123°、ナノホール構造では 138°であった。基板と水滴の接する面積を減らし、空気（空隙）の割合を高めることで、接触角が大きくなり、撥水性表面を形成したと言える。また、金属触媒エッティングで形成したナノホール構造の表面をヘキサメチルジシラザンで処理し疏水化することで、接触角は 152° となった。次年度も引き続き、静的接触角、動的接触角、転落角、転落加速度などから表面の微細構造と濡れ性の関係を総合的に評価・検証する予定である。

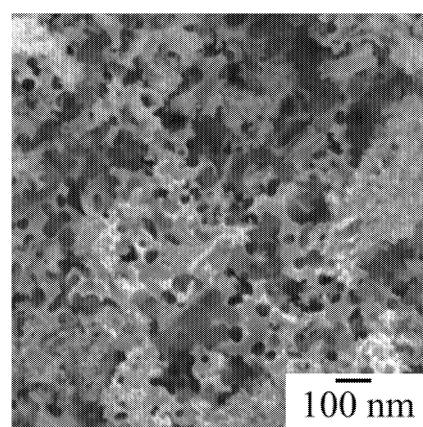


Fig. 1 SEM image of nanopores formed on Si (100) by metal-assisted chemical etching for 10 min using Ag catalyst.

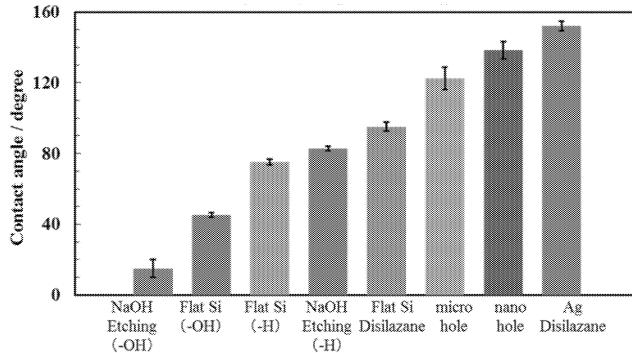


Fig. 2 Contact angle of Si substrate with different structures.

## 5. 超音速フリージェット PVD によるナノ結晶 Fe 基軟磁性膜の開発

近年、自動車や家電、医療機器などの高性能化に伴い、磁性分野が大きく発展し、磁性材料への要求性能が過酷化している。磁気ヘッドや磁気シールド、トランジスト等に用いられる軟磁性材料は、低保磁力、高透磁率、高飽和磁束密度であるほど高性能であるが、軟磁性材料の低保磁力化、高透磁率化を実現する手段として結晶粒を微細化する方法が近年注目されている。

軟磁性材料においては、結晶粒を微細化していくと、結晶粒子間に働く交換相互作用により結晶磁気異方性が平均化され磁気異方性が抑制・低下し、保磁力 ( $H_c$ ) が低下すると言われており、G. Herzer は結晶粒を 40 nm 以下に微細化することにより保磁力が結晶サイズの 6 乗に比例して減少すると報告している<sup>3)</sup>。

超音速フリージェット PVD は、生成直後の活性なナノ粒子を超音速ガス流(マッハ 4.2)により高速に加速させ、基材にナノ粒子を吹き付け・堆積させることにより皮膜を形成させる新規成膜法である。ナノ粒子の堆積により形成される本法による皮膜の膜組織は、数 nm から数十 nm 程度のナノ結晶粒を呈した皮膜が形成される。本研究は、超音速フリージェット PVD により Fe 基ナノ結晶膜の成膜を行い、成膜条件が及ぼす軟磁気特性への影響を評価検討することを目的とした。

SFJ-PVD 装置の概略図を図 3 に示す。本装置は、ナノ粒子生成室と膜形成室、及び真空排気系で構成されている。ナノ粒子生成室と膜形成室は搬送管により連結されており、搬送管の先端には超音速ノズルが取り付けられている。真空排気系により両チャンバを減圧し、ナノ粒子生成室側から不活性ガスを導入すると両チャンバ間の差圧により生成室側から膜形成室側へのガス流が発生する。不活性ガス雰囲気としたナノ粒子生成室で、膜材料を加熱蒸発させ蒸発した材料原子が不活性ガス原子との衝突により冷却・凝集しナノ粒子となる。生成させたナノ粒子は、ガス流により搬送管を通して膜形成室に搬送され、搬送管先端の超音速ガス流によりナノ粒子が高速に加速され基板に衝突・堆積し、膜を形成する。

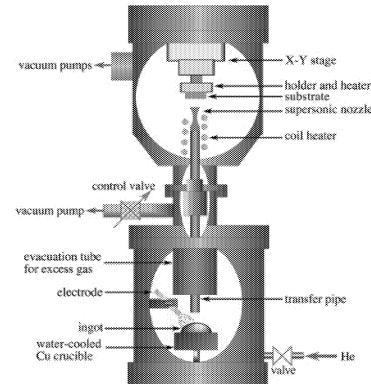


Fig. 3 Schematic diagram of SFJ-PVD apparatus.

基板には、φ5×1.0 (mm) の A1050 アルミニウム基板を用い、膜材料には純鉄 (4N) を使用した。成膜した皮膜は、SEM および TEM 組織観察、XRD により結晶構造、ビックース硬さ試験より硬さを、さらに VSM により磁気特性の評価を行った。

Fe 膜断面の SEM 写真を図 4 に示す。図 4 より、膜中及び基板界面にき裂などの欠陥は観察されず、緻密な皮膜が形成されていることが確認された。また、TEM 観察および図 5 に示す X 線回折結果から、Fe 膜の結晶粒径が ~16 nm の等軸  $\alpha$  相で構成されていること、配向性の無い多結晶膜であることが確認された。以上の結果は、本研究で検討した全条件において同じ結果であった。

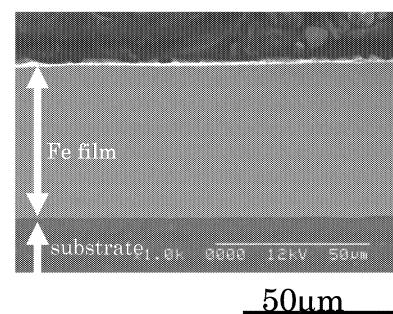


Fig. 4 SEM image of the cross sectional structure of Fe film on A1050 substrate.

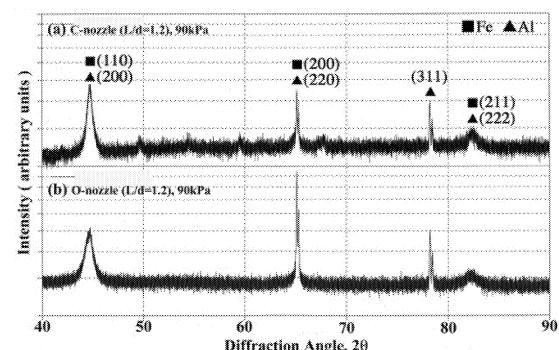


Fig. 5 XRD patterns of Fe film on A1050 substrate.

Fe 膜の磁気特性を VSM により分析した結果を図 6 に示す。図 6(a)は RF スパッタにより成膜した Fe 膜の結果であり、本法による Fe 膜の結果（図 6(b)）と比較した。図 6 の M-H ヒステリシスループから本法による Fe 膜の軟磁性特性が優れていることが確認された。

磁気特性は微細構造に敏感に変化し、優れた磁気特性を有する材料を開発するためには微細構造の制御を可能とする製造法の開発が必要とされている。次年度も引き続き、ナノ結晶 Fe 基軟磁性膜の組織と軟磁気特性の関係を総合的に評価・検証する予定である。

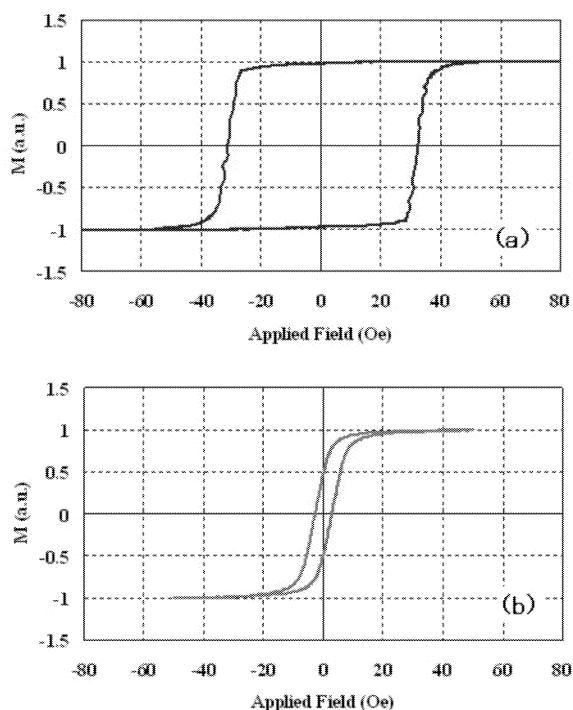


Fig. 6 M-H hysteresis loop of Fe films. (a) RF sputtering, (b) SFJ-PVD.

### 参考文献

- (1) H. Asoh, K. Fujihara and S. Ono, *Nanoscale Research Letters*, **7**, 406/1-406/8 (2012).
- (2) H. Asoh, K. Fujihara and S. Ono, *Nanoscale Research Letters*, **8**, 410/1-410/8 (2013).
- (3) G. Herzer, *Scripta Metallurgica et materialia*, **33**, 1741-1756 (1995).

# バーチャル力学に基づく多脚ロボットの全身位置・姿勢・力・モーメント の知的歩行制御

## —バーチャル力学モデルに基づく6足歩行ロボットの姿勢と振動のロバスト制御—

工学院大学 電気システム工学科 黄 慶九

華中科技大学 機械科学与工程学院 陳 學東

Position, Posture, Force and Moment Intelligent Walking Control Based on Virtual Dynamic Model  
for Multi-Legged Robot

— Posture and Vibration Control Based on Virtual Dynamic Model for Six-Legged Robot —

Qingjiu Huang, Department of Electrical Engineering, Kogakuin University  
Xuedong Chen, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science  
and Technology

**ABSTRACT :** In this paper, we proposed a robust control method based on the virtual suspension model for keeping the posture stability and decreasing the tiny vibration of the robot body when it is walking on irregular terrain. Firstly, we developed a six-legged walking robot for this study based on stable theory of wave gaits and CAD dynamic model. Secondly, in order to keep the posture stability of body when robot walks, we designed a virtual suspension model with one degree of freedom, which has virtual spring and damper, for the direction of the center of gravity, the pitch angle, and the roll angle of body respectively. And then, in order to decrease the tiny vibration of body when robot walks, we proposed an active suspension control by using sliding mode control based on a virtual suspension model. These proposed methods are discussed using the walking experimental results of the developed six-legged walking robot.

### 1. はじめに

多足歩行ロボットは近年多くの研究者の注目を集めている。これは歩行機械が凸凹の激しい地形においても移動できるという特徴を有するため、極限地での移動、作業に応用することが大いに期待できるからである。移動機構としては車輪機構が高速かつ広範囲の移動に適しているため主流となっているが、車輪、クローラは荒地をタイヤあるいは履帯で平滑化して移動するため連続的な轍を残すことになる。しかし機構的制約、拘束により連続的な轍を残せない場合が存在し、この時安定した移動が不可能になる。一方歩行機構では脚の接地点が離散的であるために階段の昇降、障害物の非接触な乗越え、および凸凹地形での安定した移動運動を実現できると考えられる。また、足裏の接地面積を自由に変更でき、足首

の能動あるいは受動自由度によって足裏を地形形状に従って支持もできる。以上の点から考えると極限地においては車輪機構よりも、脚機構ロボットの方が複雑な地形に適応させやすいと考えられる。

しかしこまでの多足歩行ロボットは胴体の振動を抑制する制御が行われていない。静止時に作業することや搭載機器への影響を考えると、振動を抑制する制御を行うことは必要である。一方、今まで振動体のサスペンションに関しての多くの研究は、実バネとダンパから構成された実サスペンションモデルベースでの研究が主流であった。しかしながらこの実モデルの振動系を多自由度体である振動体に装着することによって、制御機構が複雑になり、望ましい弾性や粘性を実現することが困難

であった。またサスペンション機構はアクティブなものとパッシブなものに分類できるが、パッシブサスペンションは歩行機械の特徴のひとつである停止作業時に頑健なプラットホームを構成する特性を阻害してしまうことや、遊脚時にストローク下限まで伸びてしまうなどの問題を有する。これまでのバーチャルサスペンションモデルを使った研究<sup>1,2)</sup>はバーチャルサスペンションの力学モデルを構築しているが、安定則によりモデルを構築していない事や、姿勢を一定に保ち姿勢に対する外乱を考慮した研究ではないという難点がある。さらに歩行ロボットの場合には凸凹な荒地との間に各種の周波数を持つことや、脚と地面の衝突や滑り、および負荷重量や重心の動的変化などの外乱の影響があるためロボットの胴体が振動してしまう。従って、ロボットの姿勢に対する外乱を抑制するために、システムの安定則に基づいたバーチャル力学モデルを構築する必要がある。また、バーチャルサスペンションモデルはシステムの安定則は保証するが、非線形系である外乱や定常誤差については保証しない。よってロボットの姿勢に対する外乱を抑制し、システムの安定則に基づいた振動制御を行うことが必要である。

そこで、本研究ではバーチャル力学モデルベースのロボットのサスペンションのロバスト制御を多足歩行ロボット胴体の姿勢と振動制御に適用することを提案し、機構の簡単化の上で、駆動力の弾性や粘性を有する柔軟なロボットの駆動制御を実現することを目指す。

脚式移動ロボットには2足、4足、6足、8足などがある。6足が静的安定性、かつ速さや制御の容易度に関して最適形状である。このような特長のため、現在国内外では6足歩行ロボットが惑星探査、火山の火口探査、森林作業、地雷探知、原子炉作業などに数多く応用されている<sup>(3)-(6)</sup>。このような背景で、本研究では昆虫の形に模擬する6足歩行ロボットを研究対象として多足歩行ロボットの運動に関する研究を行う。

研究の流れとしては、まず、ウェーブ歩容の安定余裕理論<sup>(1)</sup>及びCAD力学モデル<sup>(7)</sup>による6足歩行ロボットの開発を行う。つぎに、6足歩行ロボット胴体の姿勢を表すピッチ角方向、ロール角歩行、重心方向にそれぞれ仮想的なバネとダンパから構成する1自由度のサスペンション力学モデルを設計する。このバーチャルサスペンション力学モデルに基づき、座標移動法の提案による胴体の姿勢と各支持脚の力の釣合いを行う。さらに、このバーチャルサスペンション力学モデルに対してアクティブ制御入力と外乱を考慮し、有力な非線形ロバスト制御

としているスライディングモード制御<sup>8~11)</sup>をロボット胴体のサスペンション制御に適用する。これらによって、正確な姿勢を保つ姿勢制御と胴体の動搖を抑制する振動制御を実現できる。最後、CAD力学モデルベースのシミュレーション及び実機を用いる実験結果により本研究の手法の有効性を明らかにする。

## 2. 6脚ロボット

Fig.1は製作された実験機である。脚の駆動機構については、ゴムベルトを介してDCモーターとハーモニック減速器のハイブリッド駆動機構である。

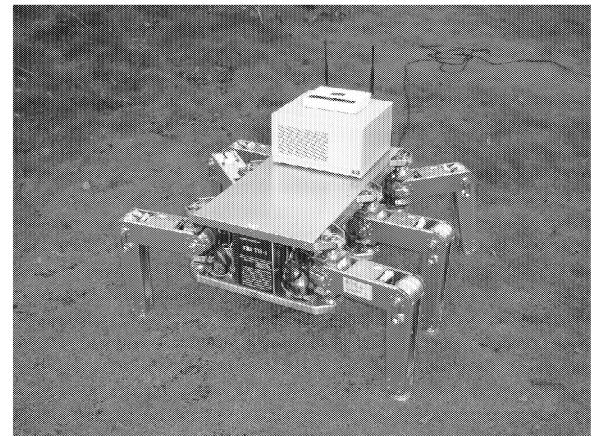


Fig.1 Developed 6-legged robot

ロボットの後ろに1本のAC電源ケーブルが胴体に付いているが、ほかのパソコン、センサ、モーター駆動ドライバーなどのものはすべてロボットの胴体に搭載された。モーターの定格トルクなどのパラメータをTable 1に示す。

Table 1 Parameters of robot

Body Weight	7.0 Kg
Weight of one leg unit	4.5 Kg
Total weight	34.0 Kg
Loadable weight	40.0 Kg
Reduction ratio of motors	100
Rated torque of DC motor 1	0.162 Nm
Rated torque of DC motor 2	0.750 Nm
Rated torque of DC motor 3	0.340 Nm

## 3. 支持脚系のバーチャルサスペンション力学モデル

脚式移動ロボットはダイナミックな力特性を持っているため、ロボットの安定な姿勢を保つための力学分析が不可欠である。ここで、本研究では多足歩行ロボットの胴体を回転体とし、各脚を胴体部における支持として考え、本研究で提案した座標移動法<sup>(13)</sup>を用いてロボットの胴体の姿勢と各支持脚の力との釣り合いを行うことにより、多足歩行ロボットの姿勢を保つための各支持脚の力

目標値を計算する。また、ロボット胴体の動搖を抑制するサスペンションモデルを構築すべきである。本研究では、図5に示されるように剛性地面を考え、ロボット胴体の垂直方向、ピッチ角方向、ロール角方向にそれぞれ仮想的なバネとダンパを持つ1自由度のサスペンション力学モデルを設計した。Fig.2には、垂直方向をz方向、ロボットの進行方向をy方向、ロボットの横方向をx方向とする。

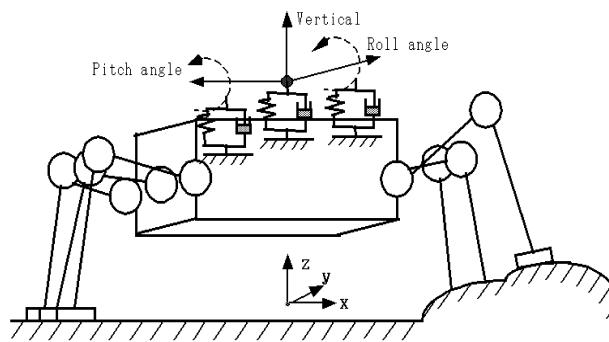


Fig.2 Virtual suspension dynamic model

ロボット胴体の垂直方向、ピッチ角方向、ロール角方向に平衡位置からの変位をそれぞれ $z$ ,  $\theta_p$ ,  $\theta_r$ と定義する。まず、ロボットが歩行しない場合、外乱を受けないため、バーチャルサスペンション力学モデルの運動方程式は以下のように時不変線形系になる。

$$\dot{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{z}} = -K_z z - C_z \dot{z} \quad (4)$$

$$I_x \ddot{\theta}_p = -K_p \theta_p - C_p \dot{\theta}_p \quad (5)$$

$$I_y \ddot{\theta}_r = -K_r \theta_r - C_r \dot{\theta}_r \quad (6)$$

ここで、 $M$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ はそれぞれロボット胴体の重さ、 $x$ 軸に回る慣性モーメント、 $y$ 軸に回る慣性モーメントである。 $K_z$ ,  $C_z$ ,  $K_p$ ,  $C_p$ ,  $K_r$ ,  $C_r$ はそれぞれロボット胴体の垂直方向、ピッチ角方向、ロール角方向に構築したバーチャル力学モデルのバネとダンパの係数である。そして、この3つのバーチャル力学モデルの特性方程式は以下のようになる。

$$\mathbf{M}\mathbf{s}^2 + \mathbf{C}\mathbf{s} + \mathbf{K} = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{s}^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{M} = [M, I_x, I_y], \quad \mathbf{C} = [C_z, C_p, C_r], \quad \mathbf{K} = [K_z, K_p, K_r]$$

このバーチャルの振動系の固有角周波数が $\omega_n$ 、減衰係数が $\xi$ である。ただし、

$$\omega_n = \sqrt{K/M}, \quad \xi = C/(2\omega_n M) \quad (9)$$

である。従って、この振動系の極は次式となる。

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (10)$$

このバーチャルサスペンションの振動モデルの安定条件は、特性方程式の極がすべて複素平面の左半面にあることである。このため、 $\xi$ をゼロより大きくしなければならない。なお、システム応答の過度性を良くすることと応答のオーバーシュートが小さくなることを考慮して、減衰係数 $\xi$ を0.7~1.0にとるとよい。

固有角周波数 $\omega_n$ については、以下のように設計を行う。今回の制御対象としたロボット胴体の垂直方向、ピッチ角方向、ロール角方向に対する動搖や脚と地面の衝突などの外乱が低周波数範囲であるので、共振を回避するため固有角周波数 $\omega_n$ をなるべく大きくする。さらに、固有角周波数 $\omega_n$ を大きくすることによって、バーチャル力学振動系に対して広い周波数帯域で良い安定性と過渡応答性を実現できる。これらによって、本研究ではピッチ角方向のモデルに対して、

$$\omega_{np} = 250 \quad \xi_p = 0.800$$

となる。ロール角方向のモデルに対して、

$$\omega_{nr} = 250 \quad \xi_r = 0.800$$

となる。胴体の垂直方向のモデルに対して、

$$\omega_{nz} = 60 \quad \xi_z = 0.800$$

となる。

本研究では、6足歩行ロボットの胴体の重さ、回転慣性モーメントは $I_x = 1.072[\text{kgm}^2]$ ,  $I_y = 0.906[\text{kgm}^2]$ ,  $I_z = 16.753[\text{kgm}^2]$ である。

式(7)を用いて、設計したバーチャル力学モデルのパラメータは以下の通りである。

$$K_p = 67000.0[\text{Nm/rad}] \quad C_p = 428.8[\text{Nms/rad}]$$

$$K_r = 56643.8[\text{Nm/rad}] \quad C_r = 428.8[\text{Nms/rad}]$$

$$K_z = 167530.0[\text{N/m}] \quad C_z = 2680.5[\text{Ns/m}]$$

以上のパラメータに基づいたバーチャル力学モデルの周波数応答のゲイン線図と位相線図はそれぞれFig.3とFig.4に示される。

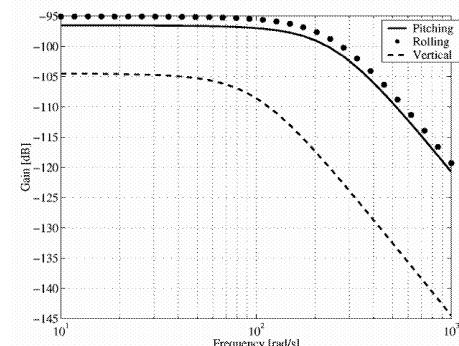


Fig.3 Gain diagram of a frequency response

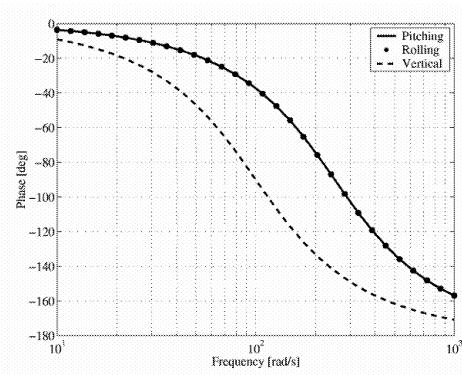


Fig.4 Phase diagram of a frequency response

#### 4. バーチャル力学モデルに基づくサスペンションのスライディングモード制御

ロボット姿勢に対するバーチャル力学モデルが Fig.2 のように構築される場合、ロボットのモデルは式(4), (5), (6)のように時不変線形運動モデルになるが、実際に、歩行ロボットのモデルは歩行時に外乱などやモデルパラメータの変動があるため時変非線形システムである。たとえば、凸凹など荒地に各種の周波数をもつことと、脚と地面との衝突や滑りがあるため外乱が存在している。さらに、歩行時に遊脚の運動のため支持脚で支持されたロボットの重量や重心は動的変化があるので、時変非線形の特性が存在している。さらに、バーチャル力学モデルを構築することのみを行う場合、ロボットの姿勢に対する定常位置誤差や定常速度誤差をなくすことができない。

本研究では、時変非線形系に対して有効な非線形ロバスト制御 – スライディングモード制御を用い、構築されたバーチャル力学モデルに基づき、ロボットの姿勢に対する定常位置誤差や定常速度誤差や外乱をなくすこと、時変非線形の項の影響を低減化こと、およびロボットの胴体の動揺を減少することを目的としている。具体的には、Fig.5 のように構築されたバーチャル振動力学モデルに対して、アクティブ制御入力  $u$  と外乱  $\ddot{z}$  を考慮し、スライディングモード制御を行う。

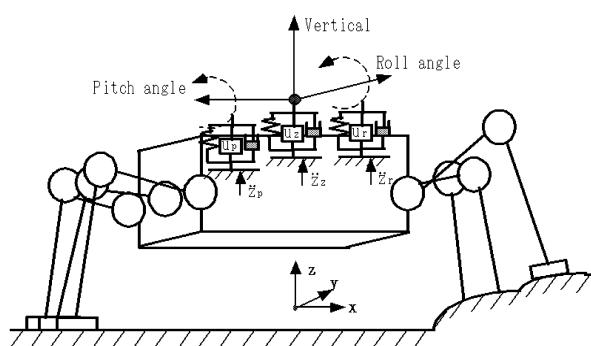


Fig.5 Virtual suspension model considering of active control input and disturbances

さらに、ロボット胴体の垂直方向、ピッチ角方向、ロール角方向に対してそれぞれの運動方程式を以下のように新たに定義する。

$$(M + \Delta M(t, \theta_{sw}))\ddot{z} = -K_z z - C_z \dot{z} + u_z + \ddot{z}_p \quad (11)$$

$$(I_x + \Delta I_x(t, \theta_{sw}))\ddot{\theta}_p = -K_p \theta_p - C_p \dot{\theta}_p + u_p + \ddot{\theta}_r \quad (12)$$

$$(I_y + \Delta I_y(t, \theta_{sw}))\ddot{\theta}_r = -K_r \theta_r - C_r \dot{\theta}_r + u_r + \ddot{z}_r \quad (13)$$

スライディングモード制御の設計については1型のサーボ系のスライディングモード制御と振動モード座標に基づくスライディングモード制御の2つの設計手法を行った。

##### 4.1 サーボ型のスライディングモード制御

ロボット胴体の垂直方向、ピッチ角方向、ロール角方向に同じ制御系を設計したので、ここでピッチ角方向に対する1型サーボのスライディングモード制御の設計を挙げる。これはピッチ角の目標値と実際のピッチ角の差の積分値を新たな状態変数とし、これと元のピッチ角方向の運動方程式式(10)から得られる拡大状態方程式と切換え関数を以下の式とする。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Qr + Fd \\ z_{en} &= \int(r - \theta_p)dt, \quad x = [z_{en}, \theta_p, \dot{\theta}_p]^T, d = \ddot{z}_p \\ \sigma &= Sx \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 $A$ ,  $B$ ,  $Q$  は

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -K_p/I_p & C_p/I_p \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/I_p \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$r$  はピッチ角の目標値であり、今回ゼロに設定する。 $d$  は外乱の項を示す。スライディングモードにおいては  $\sigma = \dot{\sigma} = 0$  から、等価制御入力  $u_{eq}$  は外乱を考慮しないとすれば、線形入力  $u_l$  は次式となる。

$$u_l = u_{eq} = -(\mathbf{S}\mathbf{B})^{-1}(\mathbf{S}\mathbf{A}x + \mathbf{S}\mathbf{Q}r) \quad (15)$$

切換え行列  $S$  をリカッチ方程式の解を用いて決定する。ここで、等価制御系の固有値の実部は -50 となり、安定余裕がある等価制御系を構築した。また、スライディングモードの非線形の入力  $u_{nl}$  は次式とする。

$$u_{nl} = -k(\mathbf{S}\mathbf{B})^{-1} \frac{\sigma}{|\sigma| + \eta} \quad (16)$$

非線形入力  $u_{nl}$  は不確かさをひとまとめにして補償し、かつシステムを切替面に拘束するための制御入力である。ここで、外乱を抑制する  $k=8600$  とし、チャタリングを防止するための  $\eta=0.1$  となる。従って、スライディングモード制御の入力  $u$  は線形制御入力  $u_l$  と非線形制御入力  $u_{nl}$  により構成される。

## 4.2 振動モード座標に基づくスライディングモード制御

本研究は姿勢制御かつ振動抑制であるので、振動抑制の観点からモード座標系によるスライディングモードを試みた。元の状態方程式では状態変数が不可制御だったのに対し、モード分離することにより、対角正準系になり、かつ状態変数が可制御になるためシステムの安定化がしやすくなるものと思われる。状態方程式の変化としては以下のようになり、入力も変化する。状態方程式は下記である。

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_e &= \mathbf{A}\mathbf{x}_e + \mathbf{B}u + \mathbf{F}d \\ \mathbf{x}_e &= [\theta_p, \dot{\theta}_p]^T\end{aligned}\quad (17)$$

振動モード座標変換

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{T}\mathbf{z}\quad (18)$$

によって、振動モード分離した状態方程式は

$$\dot{\mathbf{z}} = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{z} + \tilde{\mathbf{B}}u + \tilde{\mathbf{F}}d\quad (19)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{A}}$ 、 $\tilde{\mathbf{B}}$ は

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{A}} &= \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} -I_p/(\lambda_2 - \lambda_1) \\ I_p/(\lambda_2 - \lambda_1) \end{bmatrix} \\ \lambda_{1,2} &= \frac{-C_p/I_p \pm \sqrt{(C_p/I_p)^2 - 4K_p/I_p}}{2}\end{aligned}$$

スライディングモード制御の入力  $u$  はサーボ型のスライディングモード制御と同じく線形制御入力と非線形制御入力により構成される。

$$u = -(\mathbf{S}\tilde{\mathbf{B}})^{-1}(\mathbf{S}\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{z}) - \mathbf{S}(\mathbf{S}\tilde{\mathbf{B}})^{-1} \frac{\sigma}{|\sigma| + \eta}\quad (20)$$

## 5. 実験および考察

Fig.1 に示した実験機を用いて、Fig.2 のバーチャルサスペンションモデルに基づき、サーボ型のスライディングモード制御及び振動モード座標に基づくスライディングモード制御を 6 足歩行ロボットのサスペンション制御に適用した。この実験に関する準備、結果、及び考察を下記である。

### 5.1 実験の準備

実験を行うにあたり実世界における実験においてはシミュレーションの場合と異なり入出力の観測に大きな制限がある。そのため今回いくつかの作業を実験機に施した。尚、実験機からの出力で観測可能なものは各モーターのモニター電流、各関節のロータリーエンコーダーから

の角度のみである。

#### (1) 傾斜センサ

本研究の目的はロボットの歩行時における胴体のピッチ方向、ロール方向、 $z$  方向の振動を抑制することであるため、この 3 つを出力として観測する必要がある。 $Z$  方向についてはあらかじめ既知である脚寸法と実験機が出力する角度から各々の脚の接続部分の高さが求められるためその平均とした。ピッチ方向、ロール方向についてはリニア傾斜センサを用いて各方向の角度を計測する。

#### (2) トルクから脚先の力への変換

実験機には足先にはセンサは何もついていないため脚先の力の成分  $\mathbf{f} = [f_x \ f_y \ f_z]^T$  を脚の各リンクの寸法、各関節、およびヤコビ行列から求めた。各関節に駆動するモータートルク  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$  と足先の力

$\mathbf{f}$  との関係は

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}\quad (21)$$

となる。更にその逆を取り脚先の力を計算できる。それは以下の式で行う。

$$\mathbf{f} = (\mathbf{J}^T)^{-1} \boldsymbol{\tau}\quad (22)$$

$$f_{asis} = \tau_2 + \frac{l_t \sin \theta_2 + l_s \cos(\theta_2 + \theta_3) \tau_3}{l_s \cos(\theta_2 + \theta_3)}\quad (23)$$

$$f_z = \frac{1}{l_t \tan(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_2 + \cos \theta_2} f_{asis}\quad (24)$$

$$\begin{aligned}f_y &= \frac{1}{\tan \theta_1} \left( \frac{\tau_1}{l_t \cos \theta_2 + l_s \sin(\theta_2 + \theta_2)} \right) \\ &\quad + \frac{\tau_2}{l_s \cos(\theta_2 + \theta_3)} - \tan(\theta_2 + \theta_3) f\end{aligned}\quad (25)$$

$$f_x = -\frac{\tau_1}{\sin \theta_1} \left( \frac{1}{l_t \cos \theta_2 + l_s \sin(\theta_2 + \theta_2)} \right) + \frac{1}{\tan \theta_1} f_y\quad (26)$$

#### (3) 擬似トルクによるモータートルクの観測

モータートルクの観測は当初モニター電流にトルク係数をかけ求めていたが、ノイズによる振動が大きすぎたため、疑似トルクによるトルク入力を行った。疑似トルクは各サンプリングタイムの一つ前のトルクを出力適用することで連続的にトルクの処理を行う方法である。1 サンプリングタイム分の遅れが出ることになるがサンプリングタイムを十分小さくすることにより常に遅れ成分の影響を十分小さくできる。

## 5.2 実験結果

本研究では、遊脚 1 本、支持脚 5 本の歩容、遊脚 2 本、支持脚 4 本の歩容、遊脚 3 本、支持脚 3 本の歩容に対してそれぞれ実験を行った。ここで、遊脚 1 本、支持脚 5 本の歩容のみの結果を示す。

### (1) サーボ型スライディングモード制御の場合

まず、ピッチ角方向、ロール角方向、ロボット胴体の垂直方向に対してそれぞれの実験結果を Fig.6, Fig.7, Fig.8 に示す。これは凸凹の無い平地において 2 周期の歩容を与えた結果である。

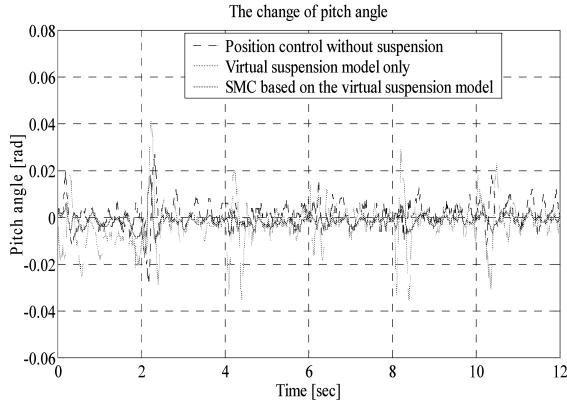


Fig.6 Changes in the direction of pitch angle

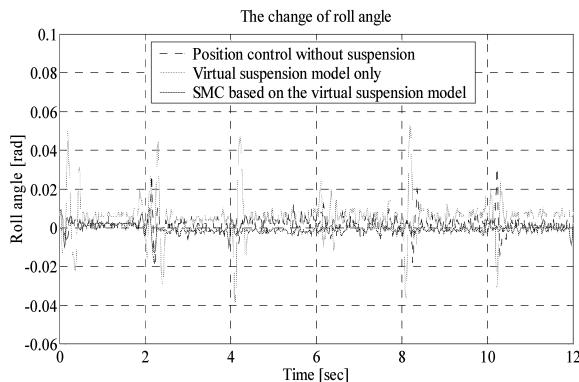


Fig.7 Changes in the direction of roll angle

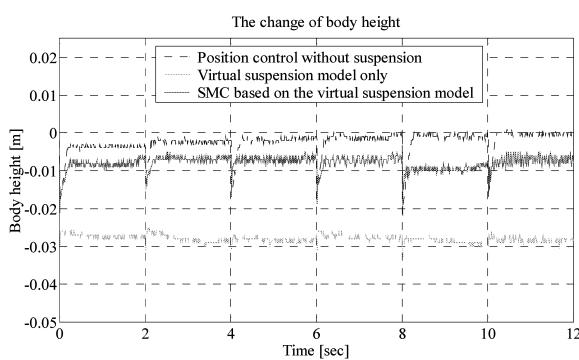


Fig.8 Changes in the vertical direction of body

点線はバーチャルモデルを用いずにロボットの各関節に位置軌道だけを入力した場合の応答、薄い実線はバーチャルサスペンションモデルのみを用いた場合の応答、

濃い実線はバーチャルサスペンションモデルに基づいてスライディングモード制御を行った場合の応答である。

以上の結果から 6 足歩行ロボットに対し姿勢のためのバーチャル力学モデルを構築し、スライディングモード制御を行うことは、そのロバスト安定性の観点からも有効であることが明らかである。

つぎに、ピッチ角の方法に対して制御入力、切替関数、及び位相面の結果を Fig.9-11 に示す。

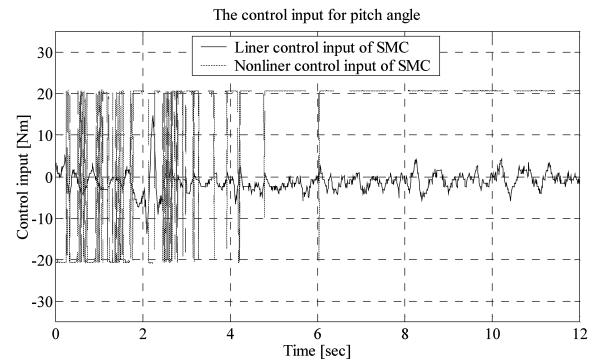


Fig.9 Control input of SMC of servo style

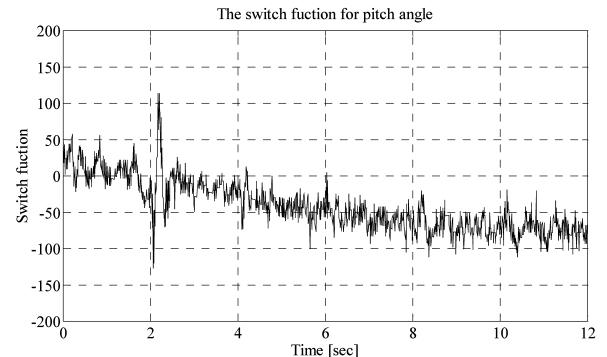


Fig.10 Switching function of SMC of servo style

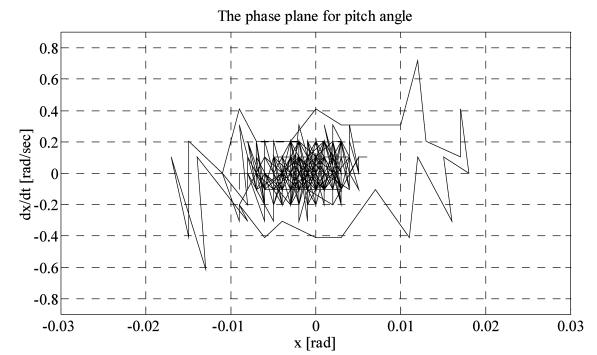


Fig.11 Phase plane of SMC of servo style

### (2) モード座標に基づくスライディングモード制御の場合

ロボット胴体の垂直方向、ピッチ角方向、ロール角方向に対してそれぞれの実験結果はサーボ型スライディングモード制御の場合とほぼおなじであるので、ここでピッチ角の方法に対して制御入力、切替関数、及び位相面

の結果のみを図 12-14 に示す。

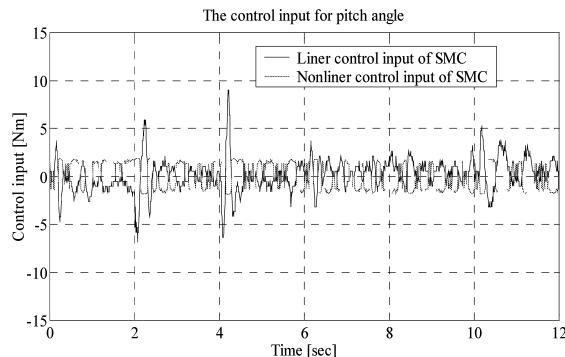


Fig.12 Control input of SMC based on mode coordinate

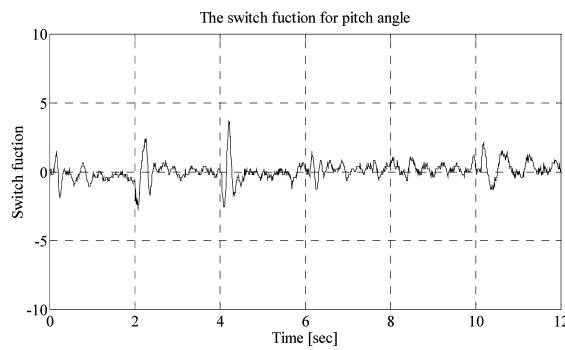


Fig.13 Switching function of SMC based on mode coordinate

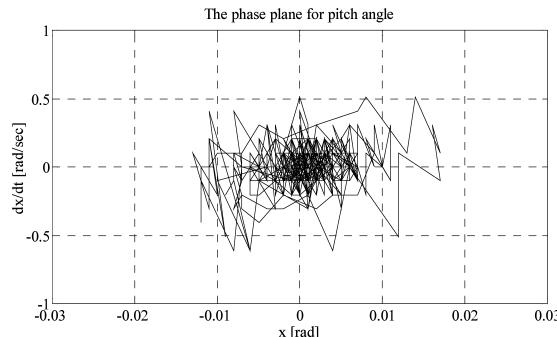


Fig.14 Phase plane of SMC based on mode coordinate

### 5.3 考察

(1) 図 9 と図 10 から明らかなようにバーチャルサスペンションを用いた場合は、用いない場合に比べ胴体のピッチ角、ロール角の変化が格段に改善できていることが分かる。さらにスライディングモード制御を行った場合、遊脚と支持脚の切換の際にわずかな姿勢の変動が見られるが、すぐに振動が止まり、姿勢角が目標値(今回はゼロに設定している)に追従しており、最も良好な結果が得られた。遊脚のスイング動作による負荷重量と重心の動的変化、脚と地面との衝突や滑りといった非線型外乱に対してスライディングモード制御が有効であることが

わかる。図 1 1 からはバーチャルモデルを用いない場合、バーチャルモデルのみを用いた場合では、胴体の重さに起因する定常偏差を解決できていないため、目標値に追従できていないのに対して、スライディングモード制御を行った場合では胴体の重量を外乱として扱い、アクティブ制御力を入力することで定常偏差を無くし目標値に追従させることに成功している。

(2) 今回の研究は姿勢制御且振動抑制であるので、振動抑制の観点からモード座標系によるスライディングモードを試みた。元の状態方程式では状態変数が不可制御だったのに対し、モード分離することにより、対角正準系になり、かつ状態変数が可制御になるためシステムの安定化がしやすくなるものと思われる。

図 1 2 と図 1 5 と比べると、モード座標に基づいた場合にはスライディングモードの非線形入力（薄い実線）が正負の切換を繰り返し行っていることがわかる。そのためこの結果はスライディングモードに到達した状態であるといえる。図 1 6 は図 1 3 より切換関数も 0を中心として安定していることからスライディングモード制御の特性がよく出ている状態だと言え、目標値付近で安定している。ピークの抑制、目標値への拘束、入力の切換、切換関数の安定、滑らかな位相以上が出ていてデータとして今回のなかでは最もよいデータであった。これらの結果によって、モード座標に基づいた場合には 6 足歩行ロボット胴体のサスペンション制御に対してスライディングモード制御の特徴として最もきれいに結果が出ていると思われる。

### 6. おわりに

本研究では、昆虫の形に模擬した 6 足歩行ロボットの研究を通じて、整地のみでなく凹凸の激しい荒地においても安定した歩行、作業が可能な汎用性の高い移動機体、アルゴリズムの作成を研究目的としている。現時点では歩行を中心に研究を進めているが、将来的には機体にマニピュレーターを装備させ、産業ロボットとして協調作業などの研究を行う。

本稿までは、ロボットの安定性と過渡応答性を図ることによって、胴体の垂直方向、ピッチ方向、ロール方向にそれぞれ仮想的なバネとダンパーから構築されたサスペンションの振動系を設計した。次に、構築したバーチャルサスペンション力学モデルに対して、アクティブ制御入力と外乱を考慮し、スライディングモード制御を歩行ロボットのサスペンション制御に適用したことを提案した。これらによって、正確な姿勢を保つ姿勢制御と胴体の動搖を抑制する振動制御を実現できた。さらに、スライディングモード制御の特徴を最大限引き出すため、サーボ型スライディングモード制御とモード座標に基づくスライディングモード制御の 2 種類の制御系設計を行った。最後、CAD の 3D シミュレーションおよび実機を用

いた実験の結果によりこのバーチャル力学モデルに基づいたスライディングモード制御の有効性を示した。これから、もっと多くの歩行パターンと歩行速度に対して本研究の提案手法を検討する。また脚先の位置と力のハイブリッド制御<sup>15)</sup>と結合して障害物の乗越えることを試み、不整地での安定歩行を目指す。

### 参考文献

- (1) Shin-Min Song, Kenneth J.Waldron: Machines that walk, The adaptive suspension vehicle, The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, (1989).
- (2) 米田完, 飯山浩幸, 広瀬茂男 : 4 足歩行機械のスカイフックサスペンション制御, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.7, pp.1066-1071, (1994).
- (3) David Wettergreen, Chuck Thorpe : Developing Planning and Active Control for a Hexapod Robot, Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automotion, pp.2718-2723, (1996).
- (4) T. Kubota, H. Katoh, I. Nakatani : Walking Rover with Multiple Legs for Planetary Exploration, Proc. of the Third Int. Conf. on Climbing and Walking Robots, pp.795-788, (2000).
- (5) David Wettergreen, Chuck Thorpe : Exploring Mount Erebus by Walking Robot, Robotics and Autonomous Systems, 11, pp.171-185, (1993).
- (6) Qing-Jiu Huang, Kenzo Nonami: Humanitarian Mine Detecting Six-Legged Walking Robot and Hybrid Neuro Walking Control with Position/Force Control, Special Issue on Computational Intelligence in Mechatronic Systems, Mechatronics, 13, pp.773-790, (2003).
- (7) Qing-Jiu Huang, Kenzo Nonami, etc.: CAD Model Based Autonomous Locomotion of Quadruped Robot by Using Correction of Trajectory Planning with RNN, Special Issue on Frontiers of Motion and Vibration Control, JSMS International Journal, Series C, Vol.43, No.3, pp.653-663, (2000).
- (8) 横山誠, J.K. Hedrick, 外山茂浩 : セミアクティブサスペンションのスライディングモード制御, 日本機械学会論文集, C 編, 67-657, 5, pp.1449-1454, (2001).
- (9) Nurkan YAGIZ, Ismail YUKSEK, Selim SIVRIOGLE: "Robust Control of Active Suspension for a full Vehicle Model Using Sliding Mode Control", The Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, vol.43, No.2, (2000).
- (10) 野波健蔵, 田宏奇 : スライディングモード制御, コロナ社, (1994).
- (11) 岩田義明 : スライディングモード制御による振動制御系設計法, 日本機械学会「No.910-42」講習会教材「'91-7.18,19,川崎, 体験・振動制御」, pp.33-43, (1991).
- (12) LMS DADS(Dynamics Analysis and Design System)は, LMS International の登録商標です.(日本における LMS DADS の販売代理店はサイバネットシステム株式会社である).
- (13) Qing-Jiu Huang, Masayoshi Yanai, Kyosuke Oon, Kenzo Nonami : Robust Control of Posture and Vibration Based on Virtual Suspension Model for Six-Legged Walking Robot, Proceedings of the 7th international conference of Motion and Vibration Control, Washington University in St. Louis, America, CD-ROM, No.41, (2004).
- (14) 小野京右 : “メカトロニクス時代の機械力学”, 培風館, (1999).
- (15) Qing-Jiu Huang, Kenzo Nonami : Neuro-Based Position and Force Hybrid Control of Six-Legged Walking Robot, Special Issue on Modern Trends on Mobile Robotics, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14, No.4, pp.534-543, (2002).

## 大学間連携による広域共助システムの構築

工学院大学 まちづくり学科 久田嘉章、村上正浩

独立行政法人 防災科学技術研究所（2013年度末まで工学院大学）久保智弘

東北福祉大学 福富哲也、尾形正志、鶴橋徹、渡辺信也、樋口智美

神戸学院大学 浅野壽夫、前林清和、若菜穂、濱田真由美、吉井諒子

Study on Effective Cooperative Partnership among Distant Universities

Yoshiaki Hisada, Masahiro Murakami, Department of Urban Planning, Kogakuin University  
Tomohiro Kubo, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Tetsuya Fukutomi, Masashi Ogata, Toru Uzurahashi,  
Shinya Watanabe, Tomomi Higuchi, Tohoku Fukushi University  
Toshio Asano, Kiyokazu Maebayashi, Minoru Wakana,  
Mayumi Hamada, Ryoko Yoshii, Kobe Gakuin University

**ABSTRACT:** We developed and tested an effective cooperative partnership using ITC, which shared the information on the damage and safety during large earthquakes among the three distant universities (Kogakuin, Tohoku Fukushi, and Kobe Gakuin Universities). First, we held workshops for discussing own experiences and effective cooperation methodology, and then developed the information system. Finally, we tested the system during the earthquake drill of Kogakuin University, and discussed how to develop a more effective partnership.

### 1. はじめに

1995年阪神淡路大震災や2011年東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえ、現在では首都直下地震や南海トラフ巨大地震に対する懸念が高まっている。大規模震災が発生した場合、被災地の事業者や大学はライフラインの停止などにより機能不全に陥り、被害状況の把握や関係者の安否確認は非常に困難な状況になる。そこで迅速かつ効果的な対応を行うためには、被災地外の機関との広域連携体制を構築することが必要となると考えられる。

東北福祉大学・神戸学院大学・工学院大学（以下、TKK3大学）は、遠隔授業システムによる遠隔授業や夏季集中講義・演習などのための協定を締結しており、教育を中

心とする共助体制を構築している<sup>(1)</sup>。2011年東日本大震災の際は、仙台市内にある東北福祉大学では、停電やライフライン被害により、周辺の被害情報の把握、原発被害の情報など災害対応に必要な情報が十分に収集できず、速やかな対応を行うことが困難な状況になった。さらに春休みであったため、多くの教職員・学生は国内外に旅行や部活動、就職活動などに出ており、被災した大学での安否確認は困難を極めた。同様に都心にある工学院大学でも長周期地震動等により室内やエレベータが損傷し、また都内の混乱等により速やかな対応は困難になった<sup>(2)</sup>。一方、神戸市内の神戸学院大学は平常であり、TKK3大学

連携により関西旅行に来ている東北福祉大学の学生の安否確認と一時受け入れ実施することができた。さらに震災直後に神戸学院大学・工学院大学の教職員が東北福祉大学を訪問し、備蓄品などの提供や関東・関西方面での学生就職活動、被災地でのボランティアの支援の申し出を行った。特に学生ボランティア活動では、TKK3 大学連携により多くの活動を実施した。また、工学院大学で毎年実施している防災訓練では、東北福祉大学・神戸学院大学の教職員・学生による講演会・実習、訓練の見学、さらに遠隔授業システムを用いた学長等による情報交換なども実施している。安否確認や被災地での状況は、被災地外の大学を拠点とすれば速やかな対応の可能性があり、その後の業務継続やボランティア活動でも被災地外から支援を得る体制とシステムを整え、被災時には速やかに活用することの重要性を認識した。さらに、このような体制・システムを体系化することは学術的にも価値があり、さらに事業者など他の機関でも活用可能な実践的なシステムを構築できる可能性がある。

以上のことから、本研究の目的は、これまで被災の経験を持つ神戸学院大学と東北福祉大学と連携し、災害時の対応や業務継続、社会貢献活動のための経験・ノウハウ<sup>(3), (4)</sup>と、工学院大学の都市減災研究センター（以下、UDM<sup>(5)</sup>）等で蓄積した減災のための研究成果<sup>(6), (7)</sup>を融合し、大学間連携による広域共助システムを構築することにある。本報告では、広域共助体制の構築と災害時の周辺被害や安否確認などの情報共有を行うためのシステム構築、およびそれを活用した防災訓練について報告する。

## 2. 大学間連携による広域共助システムの構築

### 2. 1 研究計画の概要

Fig.1 に示すように、本研究は TKK3 大学で実施してい

る大学間連携授業やボランティア活動等で蓄積した連携体制を基礎とし、震災の被災経験を持つ神戸学院大学と東北福祉大学における災害時の対応や業務継続のための経験・ノウハウと、工学院大学の UDM 等で蓄積した減災のための研究成果を融合し、大学間連携による広域共助システムを構築することを目的とする。具体的には、以下の 3 つの内容で構成される。

1. 大学連携による教職員ワークショップ（以下、WS）による 3 大学の減災のための経験・ノウハウの共有
2. 大学連携による学生・教職員の安否確認、大学業務継続（職員派遣や入試会場貸出などを含む）、学生ボランティア活動等を効果的に実施するための広域共助システムの構築
3. 3 大学協働による防災訓練等による広域共助システムの検証

1 では、大学連携による教職員 WS・研究交流会を実施し、1995 年阪神・淡路大震災で被災した神戸学院大学、2011 年東日本大震災で被災した東北福祉大学における災害時の対応や業務継続のための経験、及び、工学院大学の UDM で実施している減災のための研究成果（GIS による広域情報共有システム、リアルタイム被災度判定システム、業務継続計画の策定や実践的な防災訓練など）などに関する情報共有を行い、実践的な共助の体制を構築する計画である。

2 では、GIS による広域情報共有システムと遠隔授業システムを活用して、3 大学連携による学生・教職員の安否確認、業務継続のための広域連携、ボランティア活動支援を可能とする広域共助システムを構築する。

最後に、3 では構築した広域共助システムを活用し、3 大学がこれまで別々に実施している防災訓練を連携体制で実施して、システムの検証を行い、成果を広く公表する計画である。

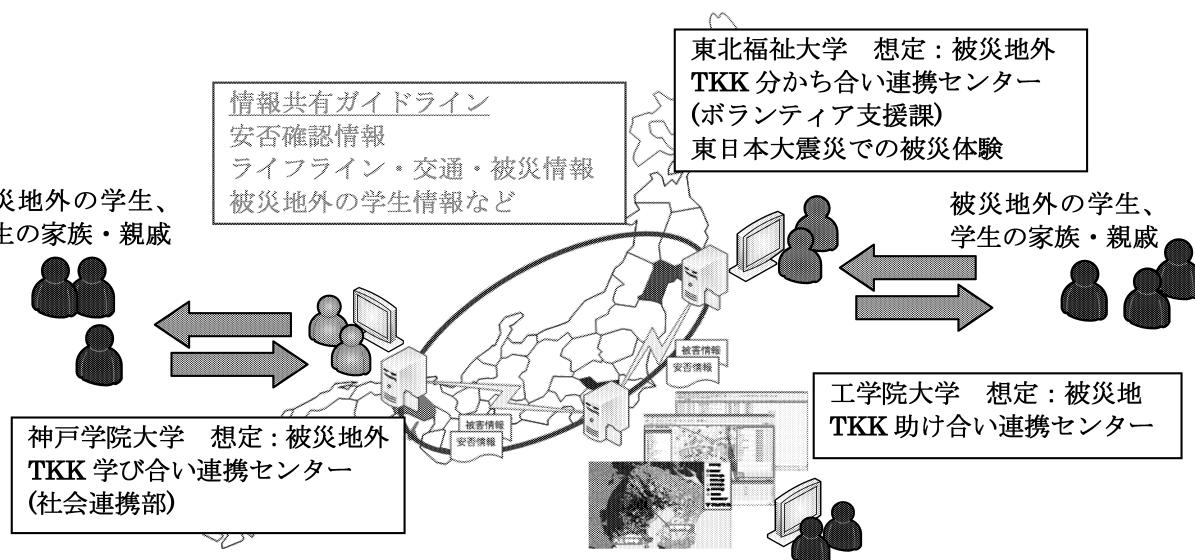


Fig.1 Schematic explanation for effective cooperative partnership among the three distant universities

## 2. 2 大学間連携について

本研究では、文部科学省による平成21年度「大学教育充実のための戦略的大学連携支援プログラム」に採択された東北福祉大学、工学院大学、神戸学院大学による大学間連携<sup>(1)</sup>をもとに、より効果的な広域共助体制の構築について検討する。

上記プログラムは、平成21年度から24年度まで文部科学省から助成を受けて、防災・減災、ボランティアを中心とした社会貢献教育の展開を目的に各大学にコーディネートを行うためのセンターを設置し、共同イベントや共通カリキュラムの構築、ボランティアネットワークの構築などを行った。このうち、共通カリキュラムについては、文部科学省からの助成が終了した後も継続的に実施している。

本研究では、このフレームワークを利用した広域共助体制の構築を検討している。初めに各大学のセンター関係者だけでなく、各大学の職員も含めた顔の見える関係を作るためにWSを実施した<sup>(8)</sup>。次に災害時の連携について実践的な防災訓練を通じて検証を行い、訓練での課題の改善策や次回の連携について、検討会を行った。こういった活動をPDCAサイクルで継続して実施していく計画である。

## 2. 3 3大学連携WSについて

広域共助体制を構築するにあたり、各大学の関係者同士が、顔の見える関係を築き、効果的な共助体制に関する議論を積み重ねることが必要である。そこで、本研究では、2013年6月14日の3大学関係者によるWSを工学院大学で実施した。

WSに備えて、各大学での経験や教訓を把握・整理するために事前アンケートを2013年5月22日から6月3日まで3大学の教職員を対象に実施した。アンケート結果を整理した結果を下記に示す。

### 神戸学院大学(阪神淡路大震災)

#### 課題

- ・安否確認：電話のみ
- ・ライフライン：水の問題⇒トイレ、空調
- ・火災対応、情報伝達

#### 対応で必要だった事・苦労された事

- ・入試対応、
- ・留学生への対応、
- ・被災した教職員、学生の家族への対応

### 東北福祉大学(東日本大震災)

#### 課題

- ・安否確認：電話、人的ネットワーク
- ・ライフライン：ガソリンの問題、停電によりシステムが利用できなくなった
- ・情報伝達、帰宅困難になった学生への対応、キャンパス間の連絡方法

#### 対応で必要だった事・苦労された事

- ・入試対応
- ・学生との連絡手段
- ・研究室の確認
- ・災害対応の職員の家族に対するケア

### 工学院大学(東日本大震災)

#### 課題

- ・ライフライン：エレベータ、
- ・災対本部の立ち上げ
- ・帰宅困難者対応
- ・情報提供方法

#### 対応で必要だった事・苦労された事

- ・システム担当者の不在による対応の遅延、
- ・計画停電の影響（交通の混乱など）

3大学で共通の課題と対応で必要だったことと苦労したことを探査すると、下記の項目が挙げられる。

- ・安否確認、情報収集、情報伝達、
- ・ライフラインの確保・対応
- ・被災した学生、留学生、教職員への対応
- ・災害時業務における対応（家族、交通手段など）

2013年6月14日に実施したWSでは、初めに各大学で阪神淡路大震災と東日本大震災での被災体験について報告した。次に各大学の関係者同士がそれぞれの知見や課題を話し合すため、1つのグループに3大学の参加者が同席する3つのグループを形成し、それぞれ違った災害時の状況を想定し、初動対応について議論した。WSで挙がった課題・対策について、2013年11月28日に実施予定の工学院大学学地防災訓練で実施するための準備を進めた。

WSの参加者をTable.1に、当日の流れを以下に示す。

1. 挨拶・プロジェクト研究の概要について  
(工学院大学・久田教授(プロジェクト代表))
2. 自己紹介(各自1分程度、Table.1参照)
3. ワークショッピング
  - 3-1. これまでの災害対応について  
各大学から5分程度計15分  
事前アンケートの共有(10分程度)
  - 3-2. 大学間で協力・支援ができる活動についての検討(WS形式で実施)
  - 3-3. 検討内容の発表(20分程度)
  - 3-4. 11月28日の防災訓練で実施する内容の確認(10分程度)
4. まとめ・閉会会のあいさつ  
(工学院大学・後藤教授(常務理事))

このWSでは、3大学で大規模災害の経験や教訓を共有することと大学間連携により共助体制を構築するために、

はじめに各大学からこれまでの災害対応について、報告を行った。次に、3-2で大学間連携による共助体制を構築するために必要な協力・支援をする活動の検討を行うため、3つのグループを作り、3大学の教職員がそれぞれのグループで意見交換と協力支援活動について検討を行った。

Table 1 The member of the first workshop

大学名	所属	氏名(敬称略)	班分け
東北福祉大学	総合マネジメント学部 産業福祉マネジメント学科 TKK分かち合いセンター長	福富 哲也	A
	ボランティア支援課	鶴橋 徹	B
	ボランティア支援課	渡辺 雪也	C
	ボランティア支援課	強口 智美	A
	人文学部人文学科	前林 清和	C
神戸学院大学	TKK学び合いセンター 副センター長	若菜 稔	A
	社会連携部	濱田 真由美	B
	社会連携部	吉井 誠子	C
	建築学部 まちづくり学科 TKK助け合い連携センター長	久田 嘉章	B
工学院大学	建築学部 建築学科 大学業務担当	後藤 治	A
	総務課	高橋 章	A
	総務課	岡本 信彦	C
	広報アドバイザー	菊池泰功	B
	八王子総務課	遠藤 智香	B
	建築学部事務室	増田 千谷子	A
	TKK助け合い連携センター	久保 智弘	ファシリテーター



Fig.2 The 1st workshop among the three universities

報告された各大学での災害対応を以下にまとめる。

#### 神戸学院大学

前林教授より 1995 年阪神淡路大震災の神戸学院大学での対応について説明があった。当時は携帯電話などが多く、学生の安否確認には固定電話や学生宅を歩いて訪問するなどで行い、非常に時間がかかったこと。火災が発生したが幸い消防が対応したことによって被害が大きくならなかつたことなど説明があった。

#### 東北福祉大学（鶴橋氏）

ボランティア支援課鶴橋係長より、東日本大震災での東北福祉大学の対応について説明があった。停電となつたため、安否確認や情報連絡など支障をきたしたことや大学を避難所として開設し、学生や地域住民を受け入れて、炊き出しを行つたことなど説明があった。また、翌日からボランティア活動を実施したと報告があった。

#### 工学院大学

総務課高橋課長より、東日本大震災での工学院大学の対応について説明があった。発災直後、関東地方の電気・ガス・水道などライフラインは正常に利用できたが、交通機関がマヒしたため、新宿キャンパスでは帰宅困難者の受け入れを実施したことや安否確認について、学科・学部を中心に実施したことなど報告があった。

次に、3 大学で震災時に行う大学間での協力・支援活動に関する検討を行つた。その際、3 つの班（A～C）を作り、それぞれの班で設定した議論の内容について、班ごとに異なる設定条件の下、被災地となった大学に対して、被災地外にある大学がどういった対応や協力・支援が行えるかについて、班内で検討した。さらに検討結果を班の代表者が検討結果を発表した。

#### 議論の内容

- ・どんな情報を共有するか？
- ・どうやって共有するか？
- ・どうやって情報を集めるか？
- ・何が必要か？準備できているか？
- ・誰にどうやって伝えるか？
- ・家族との連絡は？

#### 条件

A 班・B 班：電気利用可 + 輪轍状況 + 建物利用可

C 班：電気利用不可（発電機あり） + 建物利用可

（輪轍：電話難しい、インターネットへのアクセスはできるがかなり遅くなる。）

発電機：携帯、PC の充電は可能、携帯中継局は、2 日間利用できると仮定）

各班で検討した内容を下記に記述する。

#### A 班：

- ・工学院大学が被災した事を想定
- ・学生・教職員の情報について、事前にそれぞれが共有する形を準備しておく必要があるのではないか
- ・各大学での意思決定の情報なども共有して、どこかにアクセスして確認できるといった仕組みを作るのがよいのではないか
- ・通信方法は有線ではなく、無線などの代替案を準備すべきではないか
- ・システム的な確認方法について、代替案を作る事が課題ではないか

#### B 班：

- ・工学院大学が被災を受けたら、学内の情報をどう集めるか？
- ・マニュアルがあったが、利用できなかったという教訓・経験

・東日本大震災の東北福祉大学では、リーダーシップをとれる方が自主的に行動した事をふまえ、大まかな役割りを決めて、部や学科などで単純な役割を決めておき、各部・学科で考えて活動する訓練を実施してみるのがよいのではないか。

・学生の安否確認は非常に苦労する。また出かけている学生への連絡対応について、各大学で窓口を設けておくのがよいのではないか

・掲示板のようなものをお互いの大学で立ち上げて、連絡先を周知し、その連絡先を拠点にして、情報を共有する

・被災している大学で何が行っているか自分たちでは分からぬ。そのため、どういったことが起きているのかという情報（地域の避難所などの情報）を被災していない大学で収集して、被災した大学に連絡する仕組みを構築する。

・遠隔システムが通常回線なので、災害時利用なども考慮に入れるため、専用線や衛星通信といった代替案を検討してはどうか

#### C班：

・工学院大学で地震が起きたと想定した場合、非常に大変である

・情報共有するために工学院大学から2大学に連絡する

・LINEを利用して情報共有や安否確認する事はできないか。3大学だけのLINEのようなシステムを構築して、早い段階から情報共有・安否確認ができるのではないか。学生さんはLINEを頻繁に利用しているので、活用することで安否確認がとりやすいのではないか

・電気がないため、自家発を利用できる時間の確認。携帯電話だけを充電する機器が必要ではないか

・東日本大震災でも、神戸学院大学では、学生の安否確認をすべて行う事ができなかった。日本で大きな災害が発生したらどこの大学であっても安否確認をする必要があるのではないか

・工学院大学では、10日間分の食料の備蓄が必要ではないか。しかしどうやって確保するか検討するが必要

・震災後に東京に支援に入る事は可能であるか？東日本大震災では、神戸学院大学では、兵庫県とともに活動をしていたため、仙台に行く事ができた。その経験から支援に行くためには、行政との連携が必要ではないか

・避難について、本震や余震が起きた・起っている中は、ゆれによる不安のため地上階におりたいと考えることから、とどまつておくのは心理的に難しいのではないか。

・災害対応マニュアルについても3大学で照らし合わせてみるのもよいのではないか。お互いで知っておく事も必要ではないか（大学間でのマニュアルの共有）

## 2. 4 事後アンケートについて

WSの終了後、各大学での教訓やWSの内容、実施方法、次回のWSでの内容について確認するため、事後アンケートを実施した。下記にアンケート内容と回答結果を示す。全回答者数は10であり、以下の()内の数字は回答数を示す。

### 1. 各大学の震災対応について

#### 1-1. 各大学の震災対応を聞いての感想

- |                   |                                  |
|-------------------|----------------------------------|
| ③ とても参考になった(5)    | ② 参考になった(5)                      |
| ③ どちらともいえない(0)    | ④ 大学の環境や状況が異なるため、あまり参考にならなかった(0) |
| ⑤あまり参考にならなかった。(0) |                                  |

#### 1-2. 自身の大学の震災対応計画に役立ちそうな話題となつたか？ 回答：

- |                  |                                  |
|------------------|----------------------------------|
| ① とても参考になった(3)   | ② 参考になった(7)                      |
| ③ どちらともいえない(0)   | ④ 大学の環境や状況が異なるため、あまり参考にならなかった(0) |
| ⑤あまり参考にならなかった(0) |                                  |

#### 1-3. 他大学の震災対応について、WSでの報告以外に伺つてみたい事などあれば、お聞かせください。

・時間が、もう少しあれば、震災も含めてですが、個人的にお聞きしたいこともあります。（たとえば大学の普段の様子他）

・震災対応とは違いますが、総合防災訓練ではどういったことを具体的に行っているのか伺つてみたいと思いました。

・①備蓄の基準 ②震災対応の啓蒙活動内容 ③②の学内における支援体制

・TKK3大学という広域連携の大学であるからこそ、初動対応時の次の行動について伺つてみたい。

- ・失敗したと思われること（反省内容を含めて）。
- ・行動を起こしたがために混乱させてしまったこと。
- ・トイレの対応について
- ・女子学生への対応
- ・各大学の安否確認システムについて
- ・各大学にあるキャンパス毎の災害対策など（各部署の役割や備蓄や女子学生への対応などについて）
- ・例えば、それぞれの大学に引率者や学生がスクーリングなどで行っていた場合などで、互いにできる支援などは何か。
- ・安否確認システム

#### 1-4. 他大学の震災対応を聞いて、気づいた事や学んだ事などあれば、お聞かせください。

・東北福祉大学の中には、ボランティア課という所属があることに驚きました。福祉大学ならではですね。とても職員も方々が熱心に取り組んでおられる様子が良くわかりました。工学院の職員も、名簿にあった方々が殆

ど来られてなかつたのは、残念だと思います。なかなか、3大学集まってお話を伺うのは、出来ないことです。参加されれば、とても勉強になったと思います。

・安否確認システムのサーバーがダウンするなど、想定していないことが起こる為、安否確認システム以外の安否確認の方法も考えたほうがよいと感じました。

・本学園では、3.11東日本大震災においてインフラに支障はなく、1日（1泊）限りの対応であったが、東北福祉大学では数日間に渡った対応であった。話をうかがい最悪の事態を想定した備えをしていく必要を強く感じた。実際の対応は多岐にわたるが、全てに対応できるわけではない。優先度をどう付けて対応し、自治体（新宿区など）と協力体制を築いていくが課題であると感じた。

・事前にいただいていた資料では、「安否確認」とは書かれていましたが、実際にどのように安否確認をしたのか、直接、具体的な話を聞くことができました。電話やメール、そして連絡のついた学生には、友達にも大学へ連絡するようにと伝言をたのみ、情報がひろがっていったそうです。今の学生は、ツイッター、ラインなど、日頃からやりとりをしているので、学生から学生への伝達は、予想以上に早いのかもしれません。でも、それをあてにすることなく、大学として、安否確認の手段や方法は、想定できる状況を考え、いくつか確率しておく必要があると思いました。

・阪神・淡路大震災では学生が学内に滞在していない時間帯に発生したので、学生の誘導や避難場所の検討、帰宅困難者の受け入れ等の対応について勉強をさせていただいた。

・安否確認システムの実用が期待できること、危機管理マニュアルが職員に浸透していないこと

・トイレの備蓄については、3日分と言わず、10日分は用意した方がよいと他大学の方からアドバイスをいただきました。また、汚物の保管場所については、明確な場所が決まっていないので、早急に検討しなければならないと思いました。さらに、本学の仕様に最も相応しいトイレのタイプなどを調べて整備したく思います。

・工学院大学で毎年開催する、自治体と連携した防災訓練について

・工学院大学さんの防災訓練や備蓄についてと東日本大震災での実際の対応

・阪神淡路大震災当時の神戸学院大学お状況や個人の体験談

#### 1-5. その他、他大学の震災対応を聞いて、ご意見・ご感想などあれば、お聞かせください。

・本学園において防災関連の業務を所管する部署は、総務課である。しかしながら、総務課で全ての対応をおこなうのは不可能である。東北福祉大学、神戸学院大学では日常的に学生、他部署との協力関係が構築できているように思われた。本学園ではどうできるか。現実的な観点から模索していきたい。

・日頃からの防災訓練等がしっかりとできていることを実感した。

・地震が起きた際に教員や職員に求められるのは臨機応変に柔軟に対応できるか、そしてリーダーシップが取れるかどうかが重要だと思った。特に福祉大さんの事例はとてもその重要さを知ることができた。

・地域によって震災対応は違うものだと改めて認識させられた。また、大学の建物の被災状況についても確認することができ、良かった。

・これまで県外での支援活動が主であり、長期的な活動が多くたが、地元が被災地となり被害が広範囲となると、宿泊を伴う長期の活動が難しいことを知った。

・被災地（者）のためだけでなく、学生が支援活動を通して社会貢献の実践力を身につけるためには、長期の活動が必要であり、そのためにはもっと他大学等との連携した活動を展開する必要があると感じた。

・各大学がある場所で震災があった場合の、互いの支援の仕方について話をすることがWS内であったが、互いの支援のデメリット部分において今後震災後のボランティア活動や支援で必要と思われる自治体などとの連携の話ができたこと

・各大学の学生ボランティアのありかたというか、3大学での連携の仕方やボランティアの仕方で移動や宿泊についてのそれぞれの備えや現在の大学の状況などの話が聞けたこと

## 2. WSについて

### 2-1. WSの時間について

- |          |            |              |            |           |
|----------|------------|--------------|------------|-----------|
| ①長かった(0) | ②やや長かった(0) | ③ちょうど良かった(3) | ④やや短かった(7) | ⑤ 短かった(0) |
|----------|------------|--------------|------------|-----------|

### 2-2. WSの内容について

- |                 |                |                |                     |                  |
|-----------------|----------------|----------------|---------------------|------------------|
| ① 十分適切な内容だった(0) | ② 適切な内容だった(10) | ③ どちらともいえない(0) | ④ あまり適切ではない内容だった(0) | ⑤ 適切ではない内容だった(0) |
|-----------------|----------------|----------------|---------------------|------------------|

### 2-3. WSの準備について

- |               |                |                |         |
|---------------|----------------|----------------|---------|
| ① ちょうど良かった(5) | ② どちらともいえない(4) | ③ 準備が不十分だった(0) | 回答なし(1) |
|---------------|----------------|----------------|---------|

### 2-4. WSでは、自身の意見を出せたか？

- |             |           |                |                  |              |
|-------------|-----------|----------------|------------------|--------------|
| ① よく発言した(0) | ② 発言した(6) | ③ どちらともいえない(1) | ④ あまり発言できなかった(2) | ⑤ 発言しなかった(0) |
|-------------|-----------|----------------|------------------|--------------|

### 2-5. 上記2-4で④、⑤と回答した方にお伺いいたします。発言できなかった理由を可能な範囲でお聞かせください。

・少し、遅れて参加したことと、代表の方の話して時間終了でした。

・防災についての知識が不十分かつ阪神大震災の記憶

もありまいであったため。

2-6. WS を行う際に、必要なものやあった方がよかつたものなどあれば、お聞かせください。

- ・3大学さんが、あつまつての事が、あんまり伝達されていなかったように思います。普段の、集まりの方が人数が集まるのはなぜでしょうか？学科からは、私一人だったような気がします。そのときに頂いた、書類を今回来れなかった防災担当者へも配布頂ければ、他大学の対応も良く把握できる良い資料だったと思います。

- ・色々と準備をしていただいているので、特別なものは必要なかった。

- ・WS を行ううえで必要なものは揃っていたように思います。ものではありませんが、WS の意図を理解しているファシリテーターが必要かと思いました。私の班では運営側が設定したお題についての話し合いの時間は少なく、みんな思い思に話をしただけに終わったように感じました。

- ・初対面の方々も多かったので、名札があつたらよいと思いました。

- ・各発表者の発言をホワイトボードに記入、または、PCで記録をとり、スクリーンに映し出せば、もっと多くの意見が交わされたかと思います。

- ・記録係になりましたが、手書きだったので全部書き取れず、書き取るのにいっぱいいっぱいになってしまい、まとめきれなかつたので、パソコンがあつたらもう少し綺麗に見やすくまとめられたかな？と思いました

2-7. 他大学の教職員の方とは話した感想について

- ・時間がなく、殆ど会話はできませんでした。

- ・他大学の立地条件によって、同じ問題点や違う問題点があるため（たとえばトイレの問題など）大学ごとの対応も必要であると思いました。

- ・皆さんの防災への意識が高く、もっと勉強しなくてはと感じました。

- ・グループに分かれて話しをしたときには、おそらく、フォーマルな文書や発表では出てこないとても具体的な話がうかがえてよかったです。（テーマからそれた部分も多かったです、最終的には報告する方がうまくまとめてくれました）大学によって、組織体制も学生活動とのかかわりも異なるので、いい機会をいただけたと思います。八王子キャンパスの防災を考える部署の一員として、もっと積極的に情報収集や知識をつける重要性を感じました。

- ・工学院大学の方と話をしましたが、都市直下型地震が起きることを想定して色々と検討されていることと、起きた場合の対応に苦慮されている様子が伺えた。

- ・各大学の事例を現場の生の声として聞くことができたのでとても参考になりました。

- ・工学院大学は、都心の真ん中にあり、震災が起きた際は、道路規制等で物資も届けられない過酷な環境にな

るのでとのご意見をいただき、危機感を感じました。非常に話しやすい雰囲気で、様々な質問をさせていただくことができました。

- ・被災地と被災地以外での取り組み方の違い、考え方や方法の進め方等について参考になった。

- ・阪神淡路大震災や東日本大震災の時の個人の体験や経験などの話が聞けて、過去の震災について知ることができ、勉強になった

- ・各大学の方針はあるが個人の意見など今後の課題について様々な意見が聞けてよかったです

- ・各大学の所在地や出身も違うため、対応や考え方も違い、多くの意見が交わされたことが良かった。避難方法や安否確認の方法、被災者の受け入れについての考えも、各大学によって違うため大変参考になり、今後の課題も共有することができた。

2-8. 災害時にどんな情報が必要になると感じたか？

- ・311 災害を経験して、食べもの・ラジオ・懐中電灯他の備蓄は必ず必要に思いました。何処で、災害に遭うかわかりません。あれから、2年たちますがまだ、昨日の事のようですね。お互に声を掛け合うことの大切さが、大事だと思います。

- ・今どこで何が起こっているのかが、被災地ほどわかっていないため、そういう情報を定期的に送ってもらうことが大切であると感じた。

- ・①被災状況 ②交通・道路状況

- ・震災のときには、被災された当事者の方々は、災害の状況、被害の状況についての情報がすぐには伝わらなかつたと伺いました。WS の際に話題になっていましたが、被災地でないところから被災地へ、状況を伝える手段が必要と思いました。

- ・周辺で何が起こっているのか。・学生および教職員の安否情報。・どれくらい大学で避難生活を送らなければいけないか。・動いても大丈夫か、安全な場所は何処か。・ライフライン等はどうなっているのか。避難者への対応を含めた有益な情報が必要となる。

- ・全体の被害状況、交通状況、ライフラインといった情報が必要だと思った。鶴橋さんがおっしゃっていたが、大学の外の被害状況が全くわからなかつたそうです。津波が起きていることも知らなかつた。全体の被害状況を被災していない大学から提供することは必要だと思った。

- ・近隣周辺の被害情報。情報の内容もそうですが、情報を伝達するルート・情報伝達方法をみんなが知っているように周知の方法を検討しなければならないと思いました。

- ・直後 = 被害情報、発生後しばらく = 支援情報、発生後数年後 = 防災・減災教育情報

- ・備蓄に関して、数量の問題があると感じた。学生数で対応している大学が多かつたが、地域や旅行者等の避難者を合わせるとどうしても足りなくなってしまう。その際に、何をどれだけ分配したなどの数量を把握しながら

ら、物資を分配しなければならないと感じた。また、学内避難所を運営する学生ボランティアの確保など学生への情報伝達手段を確立しなければならないと感じた。

- ・大学や大学周辺の被害状況、備蓄の状況での支援物資の必要品目、安否確認の共有（3大学の学生・保護者・教職員などが見れるシステム？）、外部からの情報提供を集約し3大学で共有できる通信手段（データベース？）

2-9. 災害時に備えてどんな準備が必要になると感じたか？

- ・普段から、地震・火事等があったときの家族・職場への伝達方法をいつも考えています。大きな災害が起きた時には、携帯もつながらない状況にあるかもしれません。家には、部屋に防災袋を置いてありますが、外出時の災害には、役に立ちません・なかなか、普段の生活をしていると、いざと言うときの事を忘れがちです。こういうお話を機会があると、また、気が締まります。

- ・消費期限の問題や収納場所の問題から難しいが、10日間分の食糧の確保が必要であると感じた。

- ・①連絡方法の確認（学内、学外） ②3大学が相互に協力しあっての安否確認 ③3大学が相互に協力しあっての情報提供

- ・学生および教職員による防災訓練等を充分に行い、いざという時に各自が何をすればよいかということが自然と身につき、素早く行動を起こせるような状態が必要と感じた。また、本部機能に対しても十分なシミュレーションの必要性を感じた。

- ・まずは教職員の意識の改善、災害時の対応マニュアルを熟知すること、それを基に実践する場を設けること。

- ・いつ起きてても、その場の状況に応じて判断し、救護・消火などの役割を振ることができるリーダーの育成と、指示を受け、即時に動くことのできる隊員の育成。

- ・防災・減災教育、救援・支援ネットワーク、救援・支援マニュアルおよび訓練

- ・安否確認や備蓄に関しての準備もだが、ソーラーなどの自然エネルギーも活用したライフラインの確保や各教職員の担当についても決定しなければならない。

- ・災害後の教職員や部署の役割・担当を決めておき、周知することが必要だと思いました（学内だけでなく学外で災害が起こった場合の対応についてや、役割での防災訓練を行うなど）

- ・安否確認に伴う学生へのシステム登録と、安否確認システムを利用した情報ツールみたいなものの作成

- ・他大学が被災地になった場合の、本学の対応についてすぐに動けるよう普段からの準備が必要だと、WSで話しながら思いました（→1-5で話した自治体などとの連携についてと同じような内容です）

- ・備蓄の管理、自家発電、人数に応じた避難場所の確保など、季節に応じた備え、学内避難学生に対する対応、女子学生への対応、今回の震災をもとに再度検討したい

3. WSに参加して、その他感じた事や気づいた事、ご意見、次回WSで話し合いたい話題などあれば、お聞かせください。

- ・今回はWSをはじめ交流の機会を設けていただきありがとうございました。引き続き、交流をしていなければと存じます。正直、本学園のことだけでも手に余っている状況ですが、今後は3大学がどんな形で協力していくのかも考えていきたいと思います。

- ・当日は勉強をさせていただき有り難うございました。3大学の教職員が交流できたのも良かったと思います。但し、WSの参加人数がもう少し多ければ、色々な意見交換が出来て良かったのではないかと思う。

- ・WSに参加して、防災訓練の重要さといかに教職員を巻き込んでいくのが大変かわかりました。本学では一度地震を経験している大学とは思えないほど、防災訓練や災害が起きた際の対応について関心が薄い教職員がとても多いです。今回のWSで、福祉大さんの初動対応の話を聞いて、今の本学の現状に危機感を持ちました。このプロジェクト研究で話し合った内容などを学内にフィードバックする方法を考え、今の状況を開拓するように働きかけていきたいと思いました。

- ・参加して、被災された大学における生の声が聴けて、非常に参考になりました。貴重な時間でしたが、本学の職員の出席が少なかったことを残念に感じるとともに、防災に対してどのように啓蒙活動を推進していくべきのか、どうしたら自分の問題として捉えてもらえるかを、考えさせられました。

- ・災害時要援護者への取り組みについて

- ・今回はWSのテーマが学内向けだったので、学外に向かって内容でWSを行ってみたらまたいろいろな話ができるかもしれないと思いました。例えば、グループ毎に被災大学一箇所や被災していない大学一箇所を想定し、制限のある中どのような支援ができるのかなど話し合い、時間ががあればアイスブレイクやワールドカフェのように数名だけ途中でグループ内のメンバーを半分くらい入れ替えて、他大学が合流してからを想定したWSをするとか・・・。教授の先生方に動きのあるWSをお願いして動いてもらえるか分かりませんが、大学間の職員の交流がしやすいかな？と思いました

事後アンケートでは、①今回実施した各大学での災害対応・教訓の共有、②WSの内容、③その他意見・感想、次回WSでの検討内容などの3つについてアンケートを実施した。その結果について、以下に記述する。

①今回実施した各大学での災害対応・教訓の共有

- 3大学でこれまで経験した災害対応や教訓を聞くことによって、3大学ともに自身の災害対応計画などに参考となったことが分かった。また、各大学での報告のみならず、WSの際に直接各大学の関係者から聞くことができ、より詳しい内容についても知ることができ、大学間で教訓や経験を共有することができた。

## ②WS の内容

WS でのグループ内の議論の時間が短いという回答が多く、実際に確保できた時間も 1 時間もなかったことから、次回以降グループ内での議論の時間を十分に確保し、3 大学の関係者が十分に議論できるようにしたいと思う。併せて、議論の内容の記録や意見のとりまとめなどのために各グループにホワイトボードやノート PC などを用意したいと思う。

また、各大学で取り巻く環境が異なるため、各大学で災害対応の内容が異なるが、それぞれの大学での対応や考え方、経験を聞くことによって、グループ内での議論を深めることができたと考えられる。

最後に災害時に必要となる情報や備えについては、時間のフェーズによって異なるが、安否・被害情報や支援情報といったものが挙げられ、こういった情報を通信機器や ICT を活用して備える必要があることが分かった。また、事前の備えとして備蓄やライフラインの確保、3 大学で共助体制の構築が必要であることが分かった。さらに防災・減災教育として、震災の経験や教訓を、学生のみならず教職員間でも伝承していくことも大切であること意見があった。

③その他意見・感想、次回 WS での検討内容などについて

WS での感想・意見として、今回 3 大学の教職員がグループ内の議論することができ、参考となる情報を得られたことや参加人数をもう少し増やすなどの意見をいただいた。また、次回 WS については、学外に向けた内容の WS や災害時要援護者への対応、もう少し実践的で動きのある WS を実施などの意見をいただいた。

災害発生直後に被災した大学で必要となる支援意見交換と協力支援活動について、WS を通じて、3 大学の教職員がこれまでの災害で得た教訓や経験を共有し、災害は発生した場合の状況を想定して、対応方法について検討を行った。

今回の WS では、初回ということもあり、まずそれぞれの大学がこれまでどのような経験をして、どういった教訓を得たかについて、お互いが発表することで、それぞれの大学で経験と教訓を共有するとともに、災害時の共助体制を構築するために重要となる顔のつながりを作る機会とすることを主要な目的とした。WS では災害発生直後大きな問題となる情報収集について、安否情報や周辺の被災状況を中心に議論し、大学間連携により遠隔地からも支援できる内容について考え、検討を行った。

3 大学での震災体験の共有については、各大学から報告と事前アンケートによって、当時どういった活動をしたか、どういった対応に苦労したか・問題になったかといった経験と教訓を共有する事ができた。

3 大学 WS については、ファシリテーター側で用意した課題について、各グループで議論する事によって、共助体制を構築するために必要な顔の見える関係を築く事ができた。また、災害発生時に必要となる情報共有の必要

性や安否確認の方法の検討が必要である事が分かった。このため、災害発生時に大学間で情報共有や安否確認が行えるような仕組み・システムの構築を行う必要がある。また、共助体制を構築するために各大学での災害対応マニュアルを照らし合わせてみる必要があるため、今後各大学の災害対応マニュアルを共有する事を検討する。

一方、事後アンケートからこの WS での課題として、議論する時間が短かった事や参加者として工学院大学の参加者が少なかった事があげられたため、次回の WS では大学間で議論する時間をもう少し確保することや意見を記録・取りまとめるために必要となるホワイトボードや PC といった道具の準備を行い、さらに工学院大学の参加者を増やす必要がある。

今回の WS やアンケートの結果を受けて、2013 年 11 月 28 日工学院大学での防災訓練では、安否や被害情報を共有することを目的に訓練を実施する。そのため、訓練前までに情報共有サーバーを構築して、訓練で利活用を検討する。さらに、3 大学での災害対応マニュアルを照らし合わせ、共有化を行うとした。

## 2. 5 広域情報共助システムの構築について

災害時に情報共有を行うために 3 大学で共通に利用できる広域共助システムの試作を行った<sup>(9)</sup>。災害時に利用するシステムを構築するにあたり、災害時の利用では、有事に使い方を忘れるなどの問題があり、平時からの利用方法も含めて検討する必要がある。そこで、本研究では、平時利用として、3 大学連携で通常業務として行っている共同カリキュラム<sup>(10)</sup>での使用を検討した。このカリキュラムでは、他大学の科目もリアルタイムで受講できるように実施しているもので、通常授業のように資料配布がある。また各大学の学年歴の違いや通信が切断した時に備え、授業映像を録画し、大学間で共有している。そのため、この配布資料や授業映像の共有での平時利用を含めたシステム構築を行った。このシステムは、他大学の職員が容易に利用できる用に一般的な CMS サービスで多く利用されている Word Press を用いた。また、Linux + Word Press によって構築したため、導入費用は通信とサーバー代となり、安価に構築することができた。また、この Word Press は、PHP で稼働することができ、安否確認のための情報入力を PHP で作成することにより、同一サーバーで安否確認としても利用できるように構築した。

広域情報共有システムを構築するにあたり、WS で挙がった災害時に情報共有するシステムと安否確認にも利用できるシステムを兼ね備えたものを構築する必要がある。

さらに WS では、災害時の情報共有システムとして、必要な機能・性能について以下の 3 点が挙げられた。

1. 揭示板のように PC の専門知識がなくとも情報共有ができるシステム
2. 代替機能を持つことができる(災害時にも利用でき

る)システム

### 3. 3 大学だけの LINE のようなシステム

本研究では、LINE のようなシステムを構築することは難しいため、上記 2 点を満たすために、1. 専門知識がなくとも情報入力やファイル共有、メンテナンスができるシステム。2. 災害時にも利用できるシステムとして、ホスティングサービス会社に利用することで、サーバーを 3 大学とは関連しない場所で使用することを想定して、現在広く使われている CMS(コンテンツマネジメントシステム)として、利用されている WordPress を用いて、サーバーを構築した。なお、現在は研究として試験的に利用するため 実際のサーバーは工学院大学に設置している。

この WordPress の利点について以下に挙げる。

- ・学会や企業などのホームページとして広く利用されている。
- ・フリーの OS である Linux 上で稼働する。
- ・FW(ファイアーウォール)が設置されていても WEB のポートを利用するため、外部からもファイルのアップロードなどが可能である。
- ・記事やコメントの入力もブログや掲示板といった一般のユーザーの知識で利用することができる。
- ・スマホでも WEB を見ることができる。
- ・記事にパスワードをかけ、限られたメンバー内で共有ができる。
- ・データベース管理に MySQL(フリー)を使い、ページの管理に PHP(フリー)を利用している。

本研究では、広域情報共有システムが災害時の利用では、使い方を理解していないため利用できないといった可能性もあるため、平時からの利用を考え、平時には 3 大学で行っている 3 大学連携授業のデータや映像を



Fig.3 ITC system for effective sharing information among distant universities  
(Left: General window, Right: Administer window)

共有するためにも利用できるようにした。本研究で構築した広域情報共有システムのページを Fig.3 に示す。次に、安否確認については、このシステムを利用する上で安否確認ができた学生の情報について、デジタルデータにパスワードをかけて、サーバーにアップし、コメントをサーバーに残すことで、共有することができる。ここでパスワードは事前に 3 大学で共有しておく。

さらに、災害時には、学外にいる学生の安否を確認する必要もある。そこで、学外にいる学生が安否を伝えることができるよう、画面を作成した。作成するにあたり、以下に挙げる点について考慮して、構築を行った。

- ・スマホや携帯などの端末からも入力が可能
- ・安否確認のデータを一覧できる
- ・3 大学の学生を対象とすることができます。

そこで、これら条件を満たす画面を作成するため、上記 WordPress で利用されている PHP という言語を使って、構築することで、現状の使用のまま利用することができ、スマホや携帯などからも入力が可能であり、WEB で集計結果の一覧を把握することができる。また、セキュリティーの確保も必要であるが、学生の親族や関係者も安否を知りたいという状況も想定する必要がある。これは、東日本大震災で安否確認情報を被災地外の親せきや関係者が知り得たいといったニーズがあり、Google などで避難所の情報を広く共有し、そこで得られた情報を人々の間で共有し合うといったことがあった。このため、災害時の安否確認については、セキュリティーをかけることなく伝えることで、情報を必要としている人にも伝えることができると考え、ここでは特に設定しないこととした。

ここで作成した画面を Fig.4 に示す。安否情報入力のページには、氏名と学籍番号を入力することで、部外者が無作為に入力しても一致しないため、関係者の情報で

ないことを把握することができる様にした。また、不幸にして安否が伝えられない人は、アクセスできない状況と考え、入力項目を「無事」、「怪我有、無事」、「助けが必要」とした。また、助けが必要な場合の情報入力として、コメントを入力できる様にした。

安否情報の確認のページには、入力した情報に加え、入力した時間が分かる様に時間の項目を追加した。これによりいつ入力したか把握できる。また、データは画面を選択してコピーし、エクセルなどに貼り付けることで、集計することができる。

The screenshot shows two windows of the ITC system. The top window is titled 'アラウザから安否情報を入力' (Enter safety information from your smartphone) and contains fields for university selection (東北福祉大, 工学院大, 神戸学院大), a reference number, and a comment section. The bottom window is titled '入力情報表示' (Display input information) and shows a table of submitted data from various universities, including names, comments, and timestamps.

大学	学籍番号	名前	安否情報	連絡事項	入力時間
神戸学院大	0151152	深澤真由美	無事	ポートアイランドキャンパスにいます。	2013/07/06 PM 4:02
工学院大	0312820	久保智弘	無事	怪我有くありませんか?	2013/07/09 PM 4:57
神戸学院大	0013290	吉井 隆	無事		2013/11/27 PM 1:57
工学院大	0013290	久保智弘	無事	怪我有くあつと	2013/11/27 PM 1:57
神戸学院大	0411278	高井 浩	無事		2013/11/28 PM 2:18
工学院大	0411017	押川未来	無事		2013/11/28 PM 2:19
工学院大	0411181	田中真風	無事	怪我有くありませんが出勤が遅くなりました	2013/11/28 PM 2:21
工学院大	Dm1208	新谷二	無事		2013/11/28 PM 2:28
工学院大	0013290	久保智弘	怪我有くあります	ひざが、すいてます	2013/11/28 PM 2:30
東北福祉大	1015006	菅原大也	無事		2013/11/28 PM 2:34
工学院大	D110002	大野 雄貴	無事		2013/11/28 PM 2:33
工学院大	D110002	大野 雄貴	無事		2013/11/28 PM 2:33
東北福祉大	121159	道邊裕子	無事		2013/11/28 PM 2:30
第七福社大	1243006	孫 滉音	無事		2013/11/28 PM 2:33
東北福祉大	127630	針生みれい	無事		2013/11/28 PM 2:33
工学院大	0411190	木本彩乃	無事		2013/11/28 PM 2:35
工学院大	B110265	今林花鳥	無事		2013/11/28 PM 2:40
東北福祉大	121159	鈴木智奈	無事		2013/11/28 PM 2:40
工学院大	J110264	木村雅之	無事	14時51分にメールが来ました、唐突にメールが届いて、びよ。ようす	2013/11/28 PM 2:40
東北福祉大	0411347	カミンデウガ支援課	無事	道辺 優也	2013/11/28 PM 2:42
	Dm8205	小川秀美	無事		2013/11/28 PM 2:43
工学院大	Dm1205	荒川洋輔	無事		2013/11/28 PM 2:43
工学院大	H110028	石川理人	無事		2013/11/28 PM 2:41
神戸学院大	04111347	深澤真由美	おひき	2013/11/28 PM 3:03	
神戸学院大	04111347	田中祐士	無事	怪我有	2013/11/28 PM 3:04
	B412124	川口拓	無事		2013/11/28 PM 3:04
神戸学院大	B112205	門野優子	無事		2013/11/28 PM 3:04
東北福祉大	0411347	鶴嶋 重	無事		2013/11/28 PM 3:43
東北福祉大	0411347	鶴嶋 葵	無事	先ほど一度迷惑しましたが、迷惑不貲でしたので、再迷惑します。	2013/11/28 PM 3:45

Fig.4 ITC system for effective sharing information among distant universities (Top: Input window for safety information, Bottom: Sum table window)

以上のように、PC の専門的な知識がなくとも情報共有ができる事を想定し、簡易に情報が共有できるシステムを構築した。また、WordPress を使った情報共有を行うため、平時の利用なども考慮した簡易なマニュアルも作成した。その結果、3 大学連携授業の資料共有や授業映像の共有など平時に利用可能である。

## 2. 6 工学院大学地震防災訓練での検証

本研究で構築した広域情報共有システムについて、2013 年 11 月 28 日に行った工学院大学地震防災訓練の検証を行った。下記に、今回の訓練の想定、訓練内容につ

いて記載する。

### 訓練の想定について

工学院大学の防災訓練では、首都圏で震度 6 弱の地震が発生したことを想定して実施される。この地震発生に伴い、工学院大学新宿キャンパスと八王子キャンパスで、自衛消防組織による初動対応や災害対策本部の設置、運営の訓練を実施する。本研究では、東北福祉大学と神戸学院大学の職員及び学生が本学に来校した際に震災にあったことを想定した。当日の防災訓練の流れを以下に示す。

14:10 : 首都圏で震度 6 弱の地震が発生

14:15 : 自衛消防隊による自衛消防活動を開始

14:25~15:30まで 災害対策本部訓練

14:30~16:10 : 体験型訓練(防災イベント)

### ・情報共有訓練について

これまで、TKK3 大学連携として、工学院大学の地震防災訓練の機会を利用して、遠隔会議システムによる情報共有を実施してきた。遠隔会議を使った情報共有訓練では、被災地にある工学院大学で、収集した被害状況や協力の支援を被災地外にある東北福祉大学と神戸学院大学に報告・依頼を行い、情報共有を行うものである。

本研究では、遠隔会議システムを使った情報共有訓練に加え、広域共助体制による情報共有を行うことから、WordPress を用いたサーバーを使った情報共有訓練を実施した。

### ・想定シナリオについて

発災直後、被災地内の大学では被害状況の把握と災害対応が中心となり、周辺の情報把握が難しい状況である。またライフラインにも被害や通信の輻輳が想定されるところから、十分に周辺情報を収集することが難しいと考えられる。そこで、周辺情報について、被災地外から情報共有サーバーにより、被災地内の大学へ共有するシナリオを想定した。シナリオの内容は、発災直後に、震度情報や交通情報を被災地外の 2 大学で WEB や TV から入手し、サーバーに入力する。次に交通情報や周辺の被害情報について、WEB を通じて、入力する。最後に、安否確認について、被災地内いる職員や学生の情報を同サーバーから入手するとともに、安否確認の協力について、申し出るようなシナリオにした。Table 2 に訓練で使用したシナリオを示す。

### ・訓練での情報共有について

上述の想定に基づいて、訓練で実際に情報共有を行った。各大学での情報共有の様子を Fig. 5, 6 に示す。防災訓練では、Fig. 6 に示すように被災地外の 2 大学で収集した情報を入力し、Fig. 5 に示すように被災地内の工学院大学で災害対応に活用した。今回訓練で利用したサー

バーは、ブログ用にも使われているものであるため、専門的な知識がなくとも情報入力することができるため、容易に情報共有することができた。また、本研究で構築したサーバーを災害時の利用とした場合、利用方法

を忘れるや動かないといったようにいざといったときに利用できないことがあるため、平時の3大学連携授業で授業資料や連絡情報に活用することで平時から利用でき、上述の非常時のみの利用の問題について、対応すること

Table.2 The time schedule for earthquake drill in Kogakuin university (November 28, 2013)

時間	神戸学院大学さん	東北福祉大学さん	工学院大学
14:20	震度情報 新宿 震度6弱、関東の広い範囲で震度5強から震度7となっていきます。	交通情報 地震の影響により関東地方の公共交通機関は停止しています。	
	津波の情報 気象庁によると、津波の心配はないようです	ライフライン情報 地震の影響により、関東地方の広範囲で水道、電気、ガスが停止している地域があります。	
			安否情報 こちらに来ている2大学の学生さんの安否を連絡
14:50	交通情報 テレビの情報によると、関東地方のJRや私鉄各線では、北陸の影響により停止しており、終日運休となるということです。 また、公共交通機関が停止したことにより主要駅では、帰宅困難者であふれているそうです。	ライフライン情報 テレビの情報によると東京の主要地域では少しずつ電気が復旧しているそうです。しかし、通信では、軽微により、通信規制が続いているそうです。	現状の報告 現在集まっている情報を掲示
	被害の情報 関東地方の主要都市では、けが人が多数発生し、医療機関が混雑しているそうです。	被害の情報 建物倒壊などが多く発生し、東京の横七周辺では、建物火災も発生しているそうです。	
			安否確認の依頼 二学院から2大学へお願いを掲示
15:20	安否情報の協力 二学院大学さんの安否情報について、協力します。西日本にいる二学院の方や二学院大学に連絡のつかない方は下記の連絡先まで安否の連絡をしてください。 078-xxx-xxx	安否情報の協力 二学院大学さんの安否情報について、協力します。北日本にいる二学院の方や二学院大学に連絡のつかない方は下記の連絡先まで安否の連絡をしてください。 022-xxx-xxx	



Fig.5 The emergency operating center of Kogakuin university during the earthquake drill

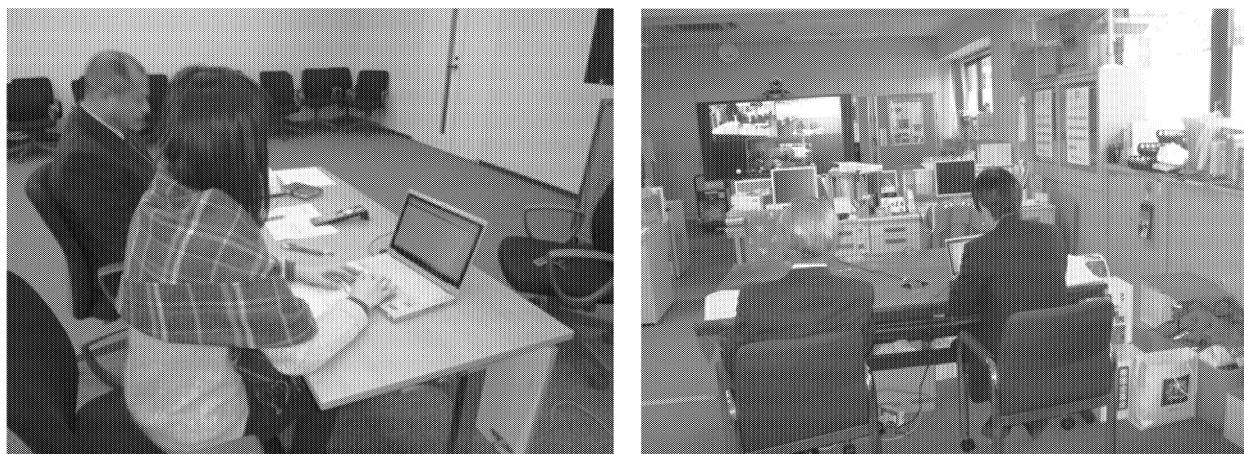


Fig.6 Sharing damage and safety information in Kobe Gakuin university (left), and Tohoku Fukushi university (right) during the earthquake drill

ができる。さらに、このサーバーでは、容易にファイルの共有や記事を作成することができ、広くホームページにも利用されている仕組みであるため、平時の利用に向いているといえる。したがって、本研究で構築した仕組みにより、災害時に情報共有することができ、平時からの利用によってメンテナンスもかねて、運用することができる。また、3章で述べたようにこのサーバーはフリーのOSやサービスによって構成されているため安価であり、広く一般に利用されていることからマニュアル本も多くあるため、そういうものを利用することで、利用熟練度を上げていくことができる。

安否確認についても、WordPressで利用されている言語を基に作成されたものであることから、WordPressをインストールすることで利用することができ、コード自体も簡潔で短いものとなっているため、メンテナンスが容易である。

最後に、訓練参加者による検証ワークショップを2014年2月18日に工学院大学で行い、2013年度の訓練について感想と改善点等の意見交換を行い、2014年度の方針について議論を行った（Fig. 7）。



Fig.7 Review WS on the 2013 project (2014/2/18)

### 3. おわりに

今回、本研究で構築した広域共助体制とそれに伴うシステムについて、工学院大学での地震防災訓練で検証を行った。その結果、本研究で構築したシステムを利用することで、災害時の情報共有に利用できることを確認した。また、安否確認についても、容易に入力することができ、被災地外でも確認することができた。さらに、今回の訓練では東北福祉大学と神戸学院大学の学生と職員に参加していただくことで、本学がこれまで培ってきた防災訓練のノウハウを共有する機会とすることができます、さらに客観的に本学の訓練について、見学していただくことができた。こういった機会を設けることにより、各大学が持つ経験やノウハウを共有することができ、広域共助体制の一助とすることもできた。

今後は各大学での防災訓練について、見学に行くなど

の交流を図るとともに、構築したシステムを平時から利用し、活発な情報共有を行うことで、災害時の情報共有を円滑に行えるようにしていくよう、継続的に実施していくことが必要である。また、システムの運用について、災害時の影響を受けないようホスティングサービス会社に利用することで、3大学のある地域とは離れた地域にサーバー機能を移すことで、災害時の停電などの影響を受けにくくする必要がある。

### 謝辞

本研究で開催したワークショップや防災訓練の実施において、TKK3大学（東北福祉大学・神戸学院大学・工学院大学）の多くの教職員・学生に協力を頂きました。記して感謝いたします。

### 参考文献

- (1) TKK3大学連携プロジェクト  
<http://www.kobegakuin.ac.jp/~tkk/>
- (2) 久保智弘、久田嘉章、相澤幸治、大宮憲司、小泉秀斗、東日本大震災における首都圏超高層建築における被害調査と震度アンケート調査、日本地震工学会、日本地震工学会論文集、第12巻、第5号、pp1-20, 2012
- (3) 高橋英彦、東日本大震災 被災地からの報告「災害文化の伝承に必要なこと」、社会貢献学会大会、2012
- (4) 小抜 隆、高橋英彦、東北福祉大学「減災・予防福祉演習」における実践を中心として、社会貢献学会大会、2012
- (5) 都市減災研究センター（UDM）  
<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwgt024/>
- (6) 久田嘉章、村上正浩、座間信作、遠藤 真、柴山明寛、市居嗣之、関澤 愛、末松孝司、山田武志、野田五十樹、松井宏樹、久保智弘、大貝 彰、地域住民と自治体の協働による発災対応力の向上と効率的な被害情報収集・共有のための防災訓練、日本地震工学会論文集 第9巻2号、pp. 130-147, 2009
- (7) 村上 正浩、柴山 明寛、久田 嘉章、市居 嗣之、座間 信作、遠藤 真、大貝 彰、関澤 愛、末松 孝司、野田 五十樹、住民・自治体協働による防災活動を支援する情報収集・共有システムの開発、日本地震工学会論文集 第9巻2号、pp. 200-220, 2009
- (8) 渡辺信也、久田 嘉章、大学間連携による災害時支援体制の構築について 3大学連携によるワークショップの実施、社会貢献学会・第4回大会、2013、
- (9) 広域情報共有システム、  
<http://tasukeaimap.cc.kogakuin.ac.jp/wordpress/>

# The new generation thin film Li-ion battery fabricated by molecular precursor method

Mitsunobu Sato, Kogakuin University

Tohru Honda, Kogakuin University

Ichiro Takano, Kogakuin University

Li Lu, National University of Singapore

## 分子プレカーサー法による次世代薄膜リチウムイオン電池の作製

工学院大学 基礎・教養教育部門 佐藤 光史

工学院大学 情報通信工学科 本田 徹

工学院大学 電気システム工学科 鷹野 一朗

国立シンガポール大学 機械工学科 呂 力

**ABSTRACT :** Lithium ion batteries (LIB) were increasing attention, because they are the dominant power sources for most of portable electronics. We reported the transparent thin film LIB with using the ceramic electrodes,  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (LTO) and  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  (LFP) thin films fabricated on fluorinated tin oxide glass electrode, by the molecular precursor method (MPM). In order to develop the micro and transparent LIB, it is necessary to improve the electrochemical performance of the materials for each electrode. This work mainly focuses on the fabrication of and the copper-doped LTO and LFP thin films (Cu-LTO, Cu-LFP) on a SUS substrate by using the MPM. The electrochemical measurements in terms of rate capability and charge-discharge profile are employed to evaluate the battery performance of LTO, LFP, Cu-LTO, and Cu-LFP thin films, and their powders. In the case of LTO thin films, the plateau was confirmed at around 1.55 V with 70 mAh/g of capacity. The electric conductivity improved by the Cu dopant. For the LFP thin film which has ca. 30 mAh/g of capacity, the plateau was appeared at around 4.85 V. In addition, the multi-layer thin films were fabricated on the FTO glass substrate. The quantity of discharge electricity for 4-layer thin films was 54 mC.

## 1. Introduction

Lithium rechargeable batteries using intercalation compounds as the cathode and lithium metal as the anode have been intensively studied during the past decade. However, it has been recognized that this type of battery will unlikely reach commercialization because of safety problems<sup>1)</sup>. To overcome this problem, a safer approach to rechargeable lithium batteries is to

replace lithium metal with a lithium intercalation compound, usually a carbon, leading to the so-called "lithium ion" batteries, first commercialized in 1990 by Sony Energetic Inc<sup>2)-4)</sup>. The energy density of lithium ion battery with high discharge voltage (3.6 V) is nearly twice as high as the Ni-Cd battery. Excellent cycle life and a higher level of intrinsic safety have been demonstrated<sup>1)</sup>. Compared to lithium metal batteries, the cathode materials suitable for lithium ion batteries are very highly oxidizing compounds, in

order to compensate the loss in cell potential at the anode.

Candidate cathode materials include layered compounds such as  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$ , and three dimensional  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  spinel phase. For practical application,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  spinel is a more desirable cathode candidate for Li ion batteries<sup>5)-15)</sup>, owing to the high cost of cobalt or nickel. Manganese-based materials offer the following advantages: low cost due to the natural abundance of manganese, lower toxicity and well-known recycling problems. Recent developments of lithium secondary batteries have shown that some 3-D compounds are the most promising cathode materials for secondary lithium ion batteries. Generally, compounds with a 3-D framework are more stable than the two-dimensional compounds. Lithium ion diffusion is clearly easier in 3-D frameworks than in two dimensional structures, because in the former structure the number of contact points of the diffusion paths for lithium ions is unambiguously larger than that in the latter. For instance, the 3-D  $\text{V}_2\text{O}_5$  and  $\text{LiM}_2\text{O}_4$  ( $M = \text{Ti}, \text{V}, \text{Mn}$ , spinel structure) exhibit very interesting lithium intercalation properties<sup>16)-23)</sup>. Among them, spinel phase compounds are of extreme interest as the cathode active materials for high energy density rechargeable lithium batteries. Recently, polyanion 3-D structures built of  $\text{PO}_4$  tetrahedra and  $\text{FeO}_6$  octahedra have engendered much interest for their potential use as cheap positive electrodes for lithium rechargeable batteries. Efforts towards this relatively novel class of intercalation hosts for lithium ion have focused on systems such as the olivine  $\text{Li}_{1-x}\text{FePO}_4$  and LISICON compositions  $\text{Li}_x\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  or  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  (LFP) into which reduction/oxidation of  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  occurs at potentials close to 3.43, 3.55, and 2.8 V vs.  $\text{Li}/\text{Li}^+$ , respectively<sup>24)-27)</sup>.

Spinel  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (LTO) is a promising anode material for lithium-ion batteries. This material exhibits characteristic properties, including very flat discharge and charge curves and a small structural change during charge-discharge processes. The material has a theoretical specific capacity of 175 mAh g<sup>-1</sup> and exhibits a practical specific capacity as high as 150–160 mAh g<sup>-1</sup> after 100 deep discharge cycles. During the process of  $\text{Li}^+$  intercalation and de-intercalation, the cubic symmetry of the parent spinel is unaffected by lithiation: the lattice parameter (0.836 nm) and unit-cell volume are virtually unaltered by the phase transition. The lack of significant change to the crystallographic parameter is remarkable and provides a structure that is extremely tolerant to electrochemical cycling. At the same time, the improved safety and reliability of the spinel compared with that of carbon electrodes make the lithium-ion batteries using LTO material as anode suitable to electric vehicle (EV) and power storage batteries<sup>28)-32)</sup>.

We reported the transparent thin film LIB with using the  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)$  for cathode and LTO for anode electrodes fabricated by the molecular precursor method (MPM)<sup>33)</sup>. The rechargeable properties of this Li ion battery assembled with the newly fabricated thin films were examined by a repeated charge and discharge test. It is remarkable that synchronously electrochromic reactions can be clearly observed during the charge and discharge operations of the transparent thin-film battery. The MPM is a wet process for the

formation of thin films of various metal oxides or phosphates, including titania and calcium phosphate compounds<sup>34)-45)</sup>. This method is based on the design of metal complexes in coating solutions, which have many practical advantages such as excellent stability, homogeneity, miscibility, coatability, and so on. This is because metal complex anions with high stability can be dissolved in suitable solvents such as ethanol by combining them with the appropriate alkylamines. Furthermore, the resultant solutions can form excellent precursor films through various coating procedures, including the spin-coating method. A uniform thin film can be easily obtained owing to the stoichiometric quantity of the metal complexes in the precursor solution. Even though multiple metal species are present in the coating solution, uniformity of the resultant oxides or phosphates can be obtained. This is the primary feature of the MPM in thin-film fabrication as compared with a conventional sol-gel method, in which metallocane polymers with different metal species having specific hydrolytic behaviors need to be prepared in coating solutions. Because the MPM is a solution-based method, it can also be used to fabricate thin films on large-area substrates. In this report, the multi-layering of each thin film was examined by the MPM, and the electrical property of the resulting batteries was measured. Furthermore, we attained to fabricate the LTO and LFP thin films with mosaic patterns controlled by removal of the precursor films using a wet stamp. The electrical properties of these films were also discussed.

## 2. Experimental

### 2.1 Materials

Ethylenediamine-*N,N,N',N'*-tetraacetic acid (EDTA = H<sub>4</sub>edta),  $\text{LiOH}$  H<sub>2</sub>O,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  9H<sub>2</sub>O, titanium tetraisopropoxide [Ti(O*i*Pr)<sub>4</sub>], and ethylenecarbonate were purchased from Kanto Chemical Co., Inc. Nitrilotriacetic acid (NTA = H<sub>3</sub>nta) was purchased from Tokyo Chemical Industry Co., Ltd. Butylamine, dibutylamine, dimethylcarbonate, LiPF<sub>6</sub>, and 4A molecular sieves were purchased from Wako Pure Chemical Industries, Ltd. Purified water was purchased from Kyoei Co. Ltd. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%) was purchased from Santoku Chemical Industries Co., Ltd., and 85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> was purchased from Taisei Chemical Industries Co., Ltd. LiPF<sub>6</sub> was dried in vacuum for 1 h before use. Ethanol was purchased from Ueno Chemical Industries, Ltd., and was dried on 4A molecular sieves before use. Other materials were used without further purification. Fluorinated tin oxide (FTO) pre-coated soda lime glass substrates were purchased from Asahi Glass Co., Ltd. The glass substrates with dimensions of 20 × 20 × 1.7 mm<sup>3</sup> were used. Double-coated adhesive polyester tape was purchased from Nitto Denko, Corp. SUS304 substrate (Φ 11 mm × 1 mm) was purchased from Rare metallic Co., Ltd.

### 2. 2 Preparation of $\text{Li}_2\text{O}$ precursor solution

A precursor solution containing a  $\text{Li}^+$  complex of NTA was obtained as follows: 5.83 g (45 mmol) of dibutylamine was added to 21 g of ethanol. A total of 3.35 g (17.5 mmol) of NTA and 6.63 g (15 mmol) of

$\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$  were dissolved in the solution with stirring at ambient temperature for 25–40 min. Each reagent was added in several portions. The 4A molecular sieves were then added into the precursor solution in order to remove  $\text{H}_2\text{O}$  molecules. The concentration of  $\text{Li}^+$  ions was 0.5 mmol g<sup>-1</sup>.

### 2. 3 Preparation of $\text{Fe}_2\text{O}_3$ precursor solution

The  $\text{Fe}^{3+}$  complex,  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})(\text{Hedta})]$  was first prepared as a precursor as follows: 42.18 g (0.14 mol) of EDTA and 61.10 g (0.15 mol) of  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  were added to 450 mL of water at 75°C. The solution was stirred for 1 h and then cooled to room temperature. The yellow powder precipitated from the solution (33.43 g) was collected on a paper filter under reduced pressure and air-dried.

The  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  precursor solution was prepared by the reaction of 29.0 g (80.2 mmol) of the isolated  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})(\text{Hedta})]$  complex with 18.6 g (144 mmol) of dibutylamine in 110 g of ethanol. The solution was refluxed for 6 h and then cooled to room temperature. The 4.53 g (40 mmol) of  $\text{H}_2\text{O}_2$  were then added, and refluxed for 0.5 h. The 4A molecular sieves were added to the precursor solution. The concentration of  $\text{Fe}^{3+}$  was adjusted to 0.5 mmol g<sup>-1</sup> by adding ethanol.

### 2. 4 Preparation of $(\text{Bu}_2\text{NH}_2)_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$

The dibutylammonium diphosphate hemihydrate,  $(\text{Bu}_2\text{NH}_2)_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  (BADP) was prepared in accordance with the method reported by our group for thin-film fabrication of apatite compounds<sup>46)</sup>. The 4A molecular sieves were added to the precursor solution.

### 2. 5 Preparation of $\text{TiO}_2$ precursor solution

The  $\text{TiO}_2$  precursor solution was prepared using a procedure that was slightly modified from that previously reported. The modified procedure was as follows: 52.8 g of ethanol, 5.85 g (80 mmol) of butylamine, and 7.65 g (40 mmol) of NTA were added together. The resulting solution was refluxed for 2 h with stirring and then cooled to room temperature. After adding 11.72 g (40 mmol) of  $\text{Ti}(\text{O}'\text{Pr})_4$ , the solution was refluxed for 2 h. After cooling the reacted solution to room temperature, 4.99 g (44 mmol) of 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  was carefully added. The solution was then refluxed for 1 h. The 4A molecular sieves were added to the precursor solution. The concentration of titanium was 0.5 mmol g<sup>-1</sup>.

### 2. 6 Preparation of $\text{CuO}$ precursor solution

A metal complex for preparing the precursor solution was isolated by the reaction of copper acetate monohydrate with EDTA in hot water<sup>47), 48)</sup>. The precursor solution was prepared as follows: 2.63 g (7.25 mmol) of the isolated  $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{edta})] \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  complex and 1.87 g (14.5 mmol) of dibutylamine were added to 10 g of ethanol. The solution was refluxed for 1 h and then cooled to room temperature. The concentration of copper was 0.5 mmol g<sup>-1</sup>.

### 2. 7 Preparation of LFP and LTO precursor solutions

The LFP precursor solution was prepared by mixing 0.10 g of the  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  precursor solution, 0.33 g of the BADP powder with 2.67 g of ethanol, and 0.15 g of the  $\text{Li}_2\text{O}$  precursor solution.

The LTO precursor solution was prepared by mixing 2.0 g of the  $\text{Li}_2\text{O}$  precursor solution and 2.5 g of the  $\text{TiO}_2$  precursor solution in 4.5 g of ethanol. The molecular sieves were added into these precursor solutions.

The Cu-doped LTO and LFP precursor solutions were prepared by adding the  $\text{CuO}$  precursor solution into the LFP and LTO precursor solutions.

### 2. 8 Coating and heat-treating procedures

Precursor films were formed by means of spin-coating at ambient temperature using a two-step process: the first step was carried out at 500 rpm for 5 s and the second at 2000 rpm for 30 s for all samples. Each precursor solution (50  $\mu\text{L}$ ) was dropped by a micropipette and spin-coated on a 20 × 20 mm area of the FTO glass substrate and Φ 11 mm of SUS304 substrate. The spin-coated precursor films were heat-treated at 550°C for 10 min (LFP) and 30 min (LTO) in air. In order to fabricate four and seven-layered films, respective coating solution was applied to form each layer and the procedures for coating and heat-treatment in air were repeated.

### 2. 9 Assembly of Li ion battery with thin-film electrodes

The LFP and LTO thin-film electrodes were assembled into a sealed sandwich-type battery, filled with an electrolyte, and sealed with a double-coated adhesive polyester tape. The electrolytic solution (1 mol L<sup>-1</sup>) was prepared by dissolving 0.15 g of  $\text{LiPF}_6$  in a mixture of 0.5 mL each of dimethylcarbonate and ethylene carbonate with stirring for ca. 12 h.

Thin film half-battery cells were assembled in an Ar-filled glove box using the thin films on SUS substrate as the working electrode, metal Li foil as the counter electrode and reference electrode, two pieces of separators (Celgard 2500) and 7–10 drops of electrolyte (1 M  $\text{LiPF}_6$  in EC:DEC = 1 : 1 organic solutions). Swageloks were used for half-battery assembling<sup>49)</sup>. The theoretical capacity was calculated from the ideal volume of thin films.

### 2. 10 Measurements

The crystal phase of the heat-treated thin films adhered to the FTO glass and SUS substrate was examined using an MXP-18AHF22 (Bruker AXS) X-ray diffractometer, with  $\text{Cu K}\alpha$  radiation generated at 45 kV and 100 mA. The use of parallel beam optics with an incident angle of 0.25° in the  $2\theta$  range of 10–45° was employed in each measurement. The thickness of each film was measured by a stylus profilometer, DEKTAK-3 (Sloan). The surface morphology of the resultant thin films adhered to the FTO glass was analyzed using FE-SEM (JSM-6701F, JEOL). The repeated charge and discharge test of the assembled battery was measured by a current and DC voltage source/monitor 6241A (ADC Co., Ltd.). The assembled battery was charged from the source with a constant current of 10, 100, 200, 300, 400, 500 and 1000  $\mu\text{A}$  for 20 sec at room temperature. The current of the LIB was measured after the 5 times repeated of charge-discharge. The integral value of the current was calculated from the current of the 1 to 300 sec. The equation is as follow;

$$Q = \int_1^{300} I(t)dt \quad (1)$$

The Q value is the quantity of discharge electricity.

The charge-discharge tests of thin film half-battery were carried out using Neware Battery Test Station. All the tests were conducted from 2.0 to 5.0 V for the LFP thin film, and from 1.0 to 3.0 V for the LTO one at room temperature, respectively, at a constant current density of  $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

### 3. Results

#### 3.1 XRD patterns of the resulting thin films

Stable precursor solutions for the spin-coating process were facilely prepared. The XRD pattern of the resultant thin film with a thickness of 80 nm on FTO glass substrate that was fabricated by heat treating the LFP precursor film in air is shown in Fig. 1. The peaks are assignable to the NASICON-type structure of  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ . The other peaks appeared in the pattern could be completely identified to FTO.

The XRD pattern of the resultant thin film with a thickness of 80 nm that was fabricated on the FTO glass substrate by heat treating the LTO precursor film in air is also shown in Fig. 1. The peaks are assignable to the spinel-type LTO. Also in this pattern, the peaks assignable to FTO were observed. In both patterns, no peak owing to impurity phase could be detected.

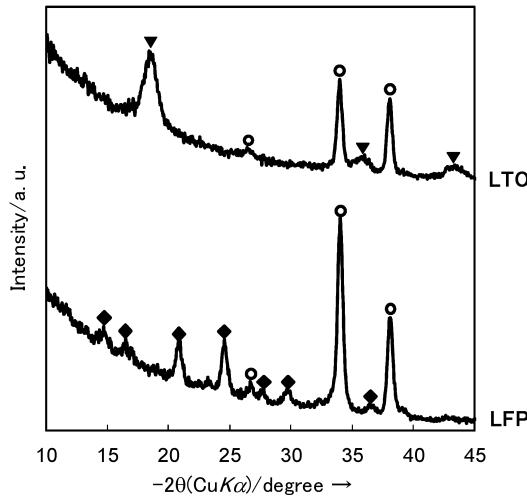


Fig. 1 The XRD pattern of the single layer of LFP and LTO thin film adhered to an FTO glass substrate. The peaks are denoted as follows: ▼: LTO ◆: LFP, and ○: FTO.

The XRD pattern of the resultant 7-layer thin film that was fabricated on the SUS substrate by heat treating the LFP precursor film in air is shown in Fig. 2. The peaks are assignable to the NASICON-type structure of LFP. The other peaks appeared in the pattern could be completely identified to SUS.

The XRD pattern of the resultant 7-layer thin film that was fabricated on SUS substrate by heat treating the LTO precursor film in air is shown in Fig. 2. The peaks are assignable to the spinel-type LTO. Also in this pattern, the peaks assignable to SUS were observed.

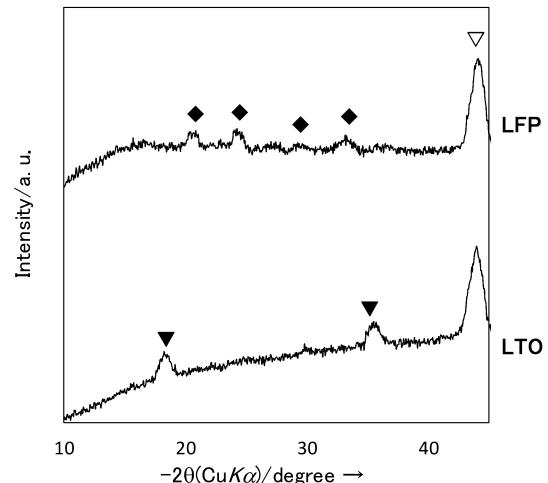


Fig. 2 The XRD pattern of the 7-layer of LFP and LTO thin film adhered to the SUS304 substrate. The peaks are denoted as follows: ▼LTO, ◆: LFP, and ▽: SUS substrate.

#### 3.2 FE-SEM images of the thin films

The cross-sectional FE-SEM images of the 4-layer LTO and LFP thin films with the mosaic pattern by removing the precursor film by removing with a stamp were shown in Fig. 3, respectively. The LTO and LFP thin films on the FTO glass substrate was fully covered with fine particles.

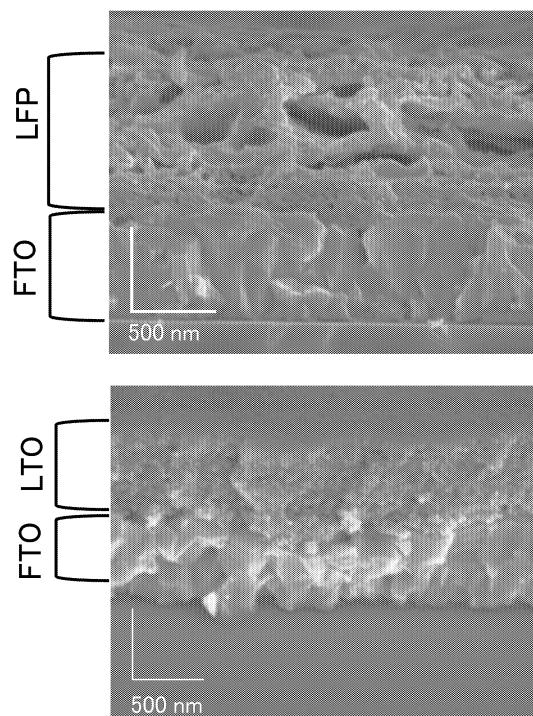


Fig. 3 The cross-sectional SEM images of the 4-layer LFP and LTO thin films adhered to the FTO glass substrate.

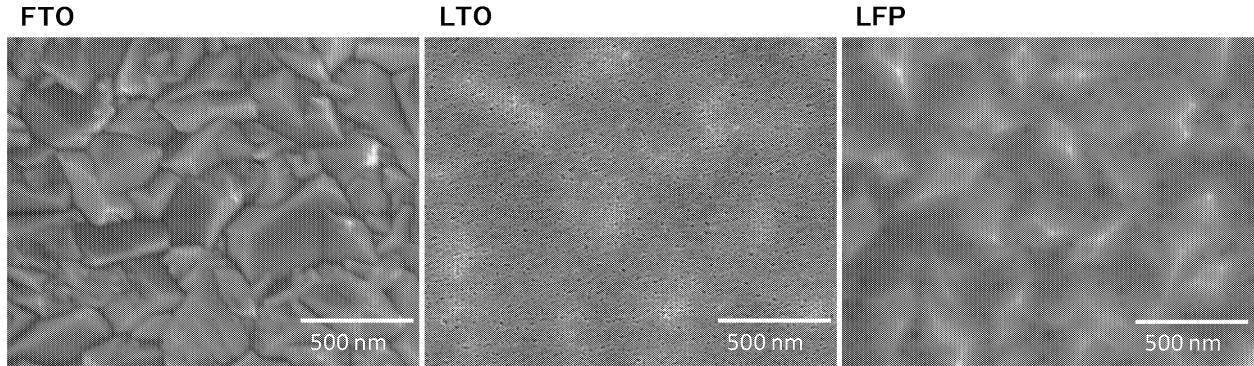


Fig. 4 The SEM images of the FTO glass substrate, LFP and LTO thin films adhered to the FTO glass substrate.

The FE-SEM images of the electrode surfaces of the resultant thin films adhered to the FTO glass are shown in Fig. 4. It can be observed that the surface of the FTO substrate is not fully covered by the LFP and LTO thin films, respectively.

### 3.3 Charge and discharge test of the assembled battery

The quantity of discharge electricity at discharge of the LIB dependence on the various current at charge was shown in Fig. 5. The quantity of discharge electricity for 4-layer thin films was 54 mC. The quantity of discharge electricity was depended on the layer numbers of active materials.

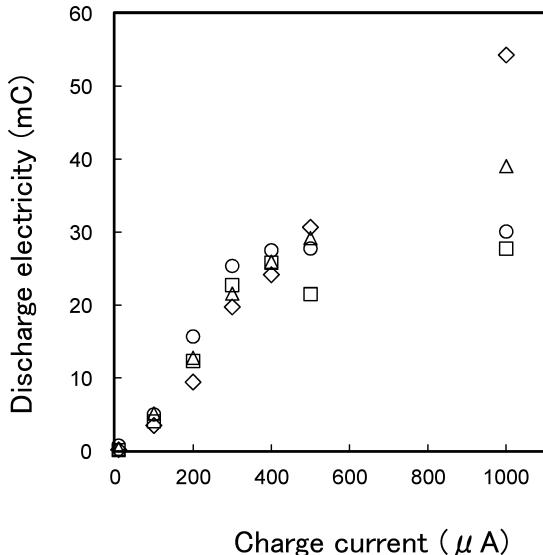


Fig. 5 The quantity of discharge electricity at discharge of the LIB dependence on the various current at charge. The denotation as follows: ○: 1-layer, □: 2-layer, △: 3-layer, and ◇: 4-layer.

### 3.4 Charge and discharge test of the half battery

Fig. 6 shows the charge-discharge curves of the second cycle of (a) LFP, Cu-doped LFP (2–4 V) and (b) LTO, Cu-doped LTO thin films(1–3 V), and (c) LFP thin films (3–5 V) that fabricated by molecular precursor method. An initial charge and discharge plateau at about 2.7 and 2.85 V in the LFP film of (a) are shown. It is notable that a charge plateau at the first charge curve of the film was not obtained.

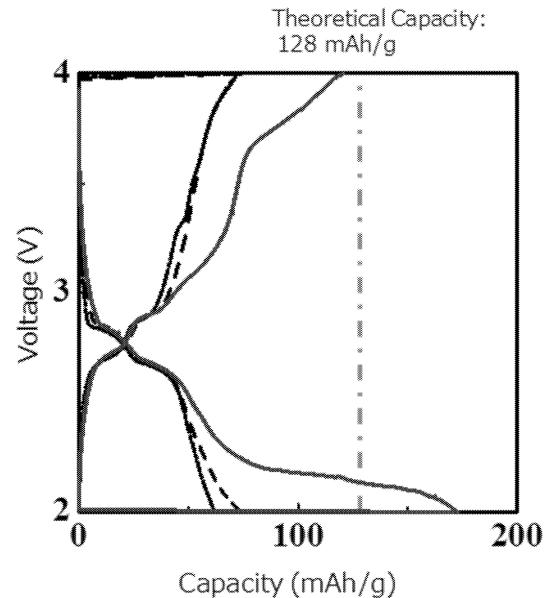


Fig. 6(a) Discharge and charge curves of  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  and Cu-doped  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  thin films prepared on the SUS substrates by molecular precursor method at 20  $\mu$ A in a mixed solvent of ethylene carbonate and diethyl carbonate containing 1.0 mol dm<sup>-3</sup> of LiPF<sub>6</sub>. The potential window of this measurement was from 2 to 4 V. The line indicates as follows: —  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ , - - -  $\text{Li}_{2.99}\text{Fe}_{1.99}\text{Cu}_{0.02}(\text{PO}_4)_3$ , ···  $\text{Li}_{2.95}\text{Fe}_{1.95}\text{Cu}_{0.10}(\text{PO}_4)_3$

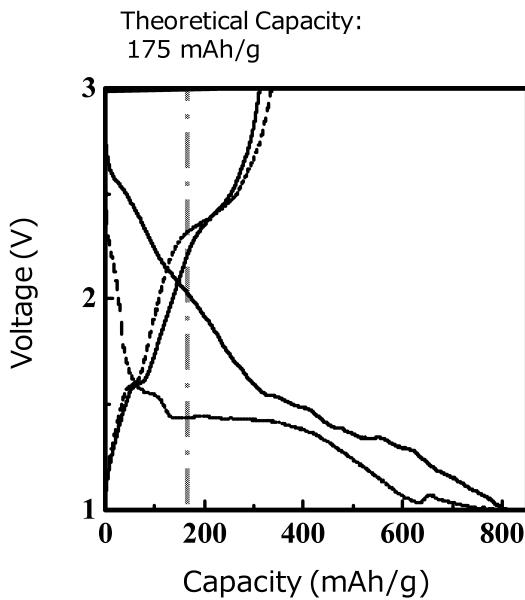


Fig. 6(b) Discharge and charge curves of  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  and Cu-doped  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  thin films prepared on the SUS substrates by molecular precursor method at  $2 \mu\text{A}$  in a mixed solvent of ethylene carbonate and diethyl carbonate containing  $1.0 \text{ mol dm}^{-3}$  of  $\text{LiPF}_6$ . The potential window of this measurement was from 1 to 3 V. The line indicates as follows: —  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ , ...  $\text{Li}_{3.98}\text{Cu}_{0.01}\text{Ti}_5\text{O}_{12}$

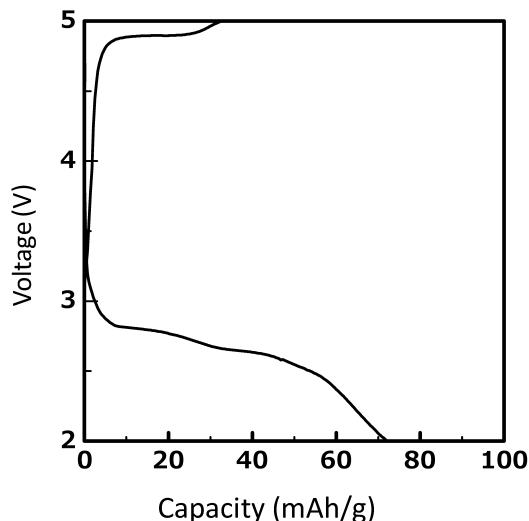


Fig. 6(c) Discharge and charge curves of  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  thin films prepared on the SUS substrates by molecular precursor method at  $20 \mu\text{A}$  in a mixed solvent of ethylene carbonate and diethyl carbonate containing  $1.0 \text{ mol dm}^{-3}$  of  $\text{LiPF}_6$ . The potential window of this measurement was from 3 to 5 V.

An initial charge and discharge plateau at about 1.55 V in the LTO film of (b) is shown. The long plateau at ca. 1.4 V is also shown. The charge-discharge curves of LFP from 3 to 5 V, the long plateau at 4.85 V are shown at the charge curve. However, the plateau at 4.85 V was not obtained at the discharge. The discharge plateau was also shown at about 2.7 and 2.85 V.

Fig. 7 shows the charge-discharge cycles of the SUS substrate, which was annealed at  $550^\circ\text{C}$  for 210 min. There was no plateau from 2 to 4 V.

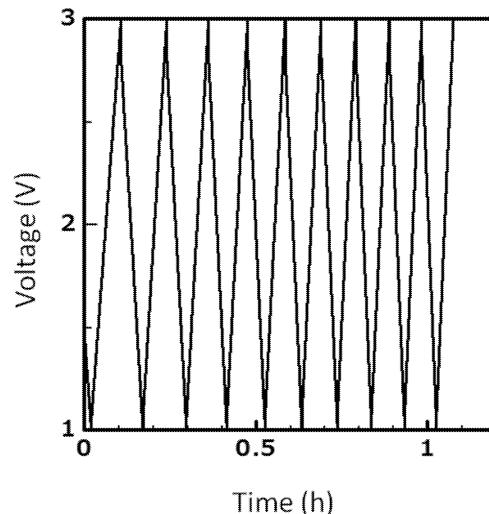


Fig. 7 Charge and discharge cycles of SUS substrates at  $20 \mu\text{A}$  in a mixed solvent of ethylene carbonate and diethyl carbonate containing  $1.0 \text{ mol dm}^{-3}$  of  $\text{LiPF}_6$ . The potential window of this measurement was from 1 to 3 V.

#### 4. Discussion

##### 4.1 Effect of layer structure

The electrochemical lithium insertion/extraction reactions involve both lithium ions diffusion in the lattice and charge transfer process on the particle surface. Thus, electrode's conductivity includes both lithium ion conductivity in active material and electrical conductivity of the electrode. Higher electrical conductivity is helpful to keep the inner resistance low and gives an excellent power density. The larger quantity of active materials is also preferable to use the LIB. In the case of our results, the roughness of the FTO is helpful for the electrical conductivity of the active materials. Furthermore, the charge rate is related to the discharge electricity. The discharge electricity of active materials increased layer by layer.

It is also notable that the quantity of discharge electricity for 4-layer thin films was observed as at least 54 mC after the five charge/discharge cycles with

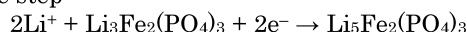
each charge of 20 mC, because the quantity of the four natural discharges for each 20 s is rather small after each charge operation.

#### 4.2 LFP thin film

Some of compounds which possess an  $\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ -type structure have three types of structural modifications: a monoclinic  $\alpha$ -phase at low temperatures, a monoclinic  $\beta$ -phase at middle temperatures which has almost the same structure as the  $\alpha$ -phase, but a larger unit cell than that of the  $\alpha$ -phase, and an orthorhombic  $\gamma$ -phase at high temperatures.

In 1998, Masquelier et al. reported<sup>26)</sup> reversible intercalation of lithium into  $\text{Li}_{3+x}\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  with up to two atoms per formula unit associated with electrochemical reduction of  $\text{Fe}^{3+}$  to  $\text{Fe}^{2+}$  for the first time. Therefore LFP may also be used as a cathode material in rechargeable lithium batteries. The charge/discharge reactions for LFP in Li-ion batteries are as follows:

Discharge step:



Charge step:



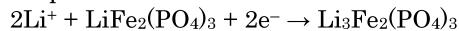
During charge/discharge processes, an intermediate phase  $\text{Li}_4\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  exist between  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  and  $\text{Li}_5\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  phases<sup>26)</sup>. It is obvious that use of nanostructured LFP can increase its discharge capacity and some other battery performance parameters.

However, in the case of our results for Li ion battery, the first charge for LFP did not occur. Thus, the potential window of the LFP was different from that reaction, in the voltage range from 2 to 4 V.

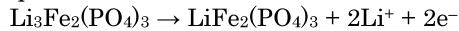
In the case of the 2–5 V, the plateau appeared at around 4.85 V which has ca. 30 mAh/g of capacity.

Christiansen et al., also reported such phenomena with using the LFP electrode<sup>50)</sup>. It is suggested that the  $\text{Li}^+$  extraction occurred with  $\text{Fe}^{4+}$  formation.  $\text{Li}^+$  extraction occurs at a plateau above 4.5 V but no discharge plateau above 3 V was observed. Thus, the reaction might occur as follows,

Discharge step:



Charge step:

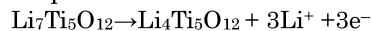


The detail mechanism of this reaction was also researched still going on this year with using the powders.

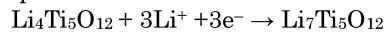
#### 4.3 LTO thin films

The charge-discharge cycling behavior is a typical kinetic reaction of LTO with a flat charge-discharge plateau at an average potential of 1.55 V (vs.  $\text{Li}/\text{Li}^+$ ), which is attributed to a two-phase phenomenon pertaining to  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  phase and  $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  one. This intercalation and de-intercalation process can be expressed as follows<sup>51)</sup>.

Discharge step:



Charge step:



In the spinel-type lithium titanate, the oxygen framework provides a 3-D network of channels for facile  $\text{Li}^+$  diffusion ( $10^{-8}$  to  $10^{-6}$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ) and exhibits little or no volume expansion during lithiation. Accordingly, it is acceptable that the good reversibility and the capability prevent from the structural change during lithium insertion/extraction. These properties make it an attractive anode for applications that require a long cycle life. There are no or few side reactions with electrolytes directly related to the irreversible capacity and power loss. This allows for the use of nanostructures to improve the rate capability, and the solid electrolyte interphase (SEI) was not formed. The good chemical compatibility, along with the relatively high potential versus  $\text{Li}^+/\text{Li}$ , makes the LTO anode much safer than the carbon-based anodes<sup>30), 31)</sup>.

In these present results, the plateau of the LTO thin films also shows 1.55 V with ca. 30 mAh/g of capacity. However, the voltage gradually decreased from the 1.55 V. The reason might be the poor electrical conductivity of the LTO thin films on SUS substrate.

#### 4.4 The effect of Cu-doping

The LTO thin film exhibits poor electrical and lithium ionic conductivities, and then limits its high rate-capability. The electrochemical performance of LTO materials can be improved by doping, but the interpretation of doping effects can be complicated by the interrelations between doping and microstructure, since the microstructure formed can be affected by the dopant additions. It has been reported that doping with cations and anions ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Ga}^{3+}$ ,  $\text{Zr}^{4+}$ ,  $\text{Mo}^{4+}$ ,  $\text{V}^{5+}$ ,  $\text{Ta}^{5+}$ ) in Li, Ti or O site and incorporation of second phase with high electrical conductivity are effective ways to improve the conductivities, and these can be attributed to the effects of the dopant on the LTO microstructure<sup>52)</sup>.

By the Cu-doping to LTO and LFP thin films, their charge-discharge curve was changed. It may be that the doping improved the electrical conductivity of the thin films. Additionally, the plateau at 1.4 V with ca. 300 mAh/g of capacity appeared with the doping. From Fig. 7, it is clear that the appearance is not due to the SUS substrate. This reaction will be also examined with using the powders<sup>53)</sup>.

#### Acknowledgement

We are grateful to Dr. Hiroki Nagai for his great contribution to this project.

#### Reference

- (1) M. Wakihara, O. Yamamoto: Lithium Ion Batteries Fundamentals and Performance, WILEY-VCH, (1998).
- (2) D.W. Murphy and J.N. Carides: Low Voltage Behavior of Lithium/Metal Dichalcogenide

- Topochemical Cells, J. Electrochem. Soc., 126, (1979) pp. 349-351.
- (3) M. Lazzari and B. Scrosati: A Cyclable Lithium Organic Electrolyte Cell Based on Two Intercalation Electrodes, J. Electrochem. Soc., 127, (1980) pp.773-774.
  - (4) T. Nagaura and K. Tazawa: Lithium ion rechargeable battery, Prog. Batt. Solar Cells, 9 (1990) 20-29.
  - (5) K. Ozawa: Lithium-ion rechargeable batteries with  $\text{LiCoO}_2$  and carbon electrodes: the  $\text{LiCoO}_2/\text{C}$  system, Solid State Ionics, 69 (1994) 212-223.
  - (6) J.R. Dahn, U. Sacken, M. R. Jukow and H. Al-Janaby: Rechargeable  $\text{LiNiO}_2 \cdot / \cdot$  Carbon Cells, J. Electrochem. Soc., 138 (1991) 2207-2211.
  - (7) W. Ebner, D. Fouchard, L. Xie: The  $\text{LiNiO}_2/\text{carbon}$  lithium-ion battery, Solid State Ionics, 69 (1994) 238-256.
  - (8) C. Delmas, I. Saadoune, and A. Rougier: The cycling properties of the  $\text{Li}_{x}\text{Ni}_{1-y}\text{CO}_y\text{O}_2$  electrode, J. Power. Sources, 43-44 (1993) 595-602.
  - (9) R. J. Gummow and M. M. Thackeray: Characterization of  $\text{Li}_x\text{Co}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_2$  Electrodes for Rechargeable Lithium Cells, J. Electrochem. Soc., 140 (1993) 3365-3368.
  - (10) J. M. Tarascon, E. Wang, F. K. Shokoohi, W. R McKinnon, and S. Colson: The Spinel Phase of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  as a Cathode in Secondary Lithium Cells, J. Electrochem. Soc, 138 (1991) 2859-2864.
  - (11) T. Ohzuku, M. Kitagawa and T. Hirai: Electrochemistry of Manganese Dioxide in Lithium Nonaqueous Cell III. X-Ray Diffractonal Study on the Reduction of Spinel- Related Manganese Dioxide J. Electrochem. Soc., 137 (1990) 769-775.
  - (12) J.M. Tarascon, D. Guyomard: The  $\text{Li}_{1+x}\text{Mn}_2\text{O}_4/\text{C}$  rocking-chair system: a review, Electrochim. Acta 38 (1993) 1221-1231.
  - (13) J.M. Tarascon, W.R. McKinnon, F. Coowar, T.N. Boowmer, G. Amatucci and D. Guyomard: Synthesis Conditions and Oxygen Stoichiometry Effects on Li Insertion into the Spinel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  J. Electrochem. Soc., 141, (1994) 1421-1431.
  - (14) D. Guyomard and J .M. Tarascon: The carbon/ $\text{Li}_{1+x}\text{Mn}_2\text{O}_4$  system, Solid State Ionics, 69 (1994) 222-237.
  - (15) R.J. Gummow, A. de Kock, M.M. Thackeray: Improved capacity retention in rechargeable 4 V lithium/lithium manganese oxide (spinel) cells, Solid State Ionics 69 (1994) 59-67.
  - (16) D. W. Murphy, P. A. Christian, F. J. Disalvo, and J. V. Waszczak: Lithium incorporation by vanadium pentoxide, Inorg. Chem., 18 (1979) 2800-2803.
  - (17) P. G. Dickens, S. J. French, A. T. Hight, M. F. Pye: Phase-relationships in the ambient-temperature  $\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$  system ( $0.1 < x < 1.0$ ), Mater. Res. Bull. 14 (1979) 1295-1299.
  - (18) C. Delmas, S. Brethes and M. Ménétrier:  $\omega\text{-Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$  - a new electrode material for rechargeable lithium batteries, J. Power Sources, 34, (1991) 113-118.
  - (19) K.M. Abraham: Status of Rechargeable Positive Electrodes for Ambient Temperature Li Batteries, J. Power Sources, 7, (1981/82) 1-43.
  - (20) Li Guohua, H. Ikuta, T. Uchida and M. Wakihara: The Spinel Phases  $\text{LiM}_y\text{Mn}_{2-y}\text{O}_4$  ( $M = \text{Co}, \text{Cr}, \text{Ni}$ ) as the Cathode for Rechargeable Lithium Batteries, J. Power Sources, 54 (1996) 178-182.
  - (21) M. Wakihara, H. Ikuta and T. Uchida: Nickel Chevrel-phase sulfides  $\text{Ni}_y\text{Mo}_6\text{S}_{8-z}$  and  $\text{Ni}_y\text{Mo}_6\text{S}_{8-z}\text{O}_n$  as the cathode of lithium secondary batteries, J. Power Sources, 43-44 (1993) 651-655.
  - (22) S. Yamaguchi, T. Uchida and M. Wakihara: A Rechargeable Lithium Battery Employing Cobalt ChevrelPhase Compound as the Cathode, J. Electrochem. Soc., 138 (1991) 687-689.
  - (23) W. Wakihara, T. Uchida, K. Suzuki and M. Taniguchi: A rechargeable lithium battery employing iron Chevrel phase compound ( $\text{Fe}_{1.25}\text{Mo}_6\text{S}_{7.8}$ ) as the cathode, Electrochim. Acta, 34 (1989) 867-869.
  - (24) S. Patoux, C. Wurm, M. Morcrette, G. Rousse, C. Masquelier: A comparative structural and electrochemical study of monoclinic  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  and  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ , J. Power Sources, 119-121 (2003) 278-284.
  - (25) S. C. Yin, h. Grondely, P. Strobel, H. Huang, L. F. Nazar: Charge ordering in lithium vanadium phosphates: electrode materials for lithium-ion batteries, J Am Chem Soc., 125 (2003) 326-327.
  - (26) C. Masquelier, A. K. Padhi, K. S. Nanjundaswamy, and J. B. Goodenough: New Cathode Materials for Rechargeable Lithium Batteries: The 3-D Framework Structures  $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{XO}_4)_3$ (X=P, As), J. Solid State Chem., 135 (1998) 228-234.
  - (27) D. Morgan, G. Ceder, M. Y. Saidi, J. Barker, J. Swoyer, H. Huang, and G. Adamson: Experimental and Computational Study of the Structure and Electrochemical Properties of  $\text{Li}_x\text{M}_2(\text{PO}_4)_3$  Compounds with the Monoclinic and Rhombohedral Structure, Chem. Mater. 14 (2002) 4684-4693.
  - (28) K.M. Colbow, J.R. Dahn, R.R. Haering: Structure and Electrochemistry of the Spinel Oxides  $\text{LiTi}_2\text{O}_4$  and  $\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$ , J. Power Sources, 26 (1989) 397-402.
  - (29) M. Nishizawa: Measurements of Chemical Diffusion Coefficient of Lithium Ion in Graphitized Mesocarbon Microbeads Using a Microelectrode, Electrochimi. Solid State Lett., 1 (1998) 10-12.
  - (30) T. Ohzuku, Y. Iwakoshi, K. Sawai: Formation of Lithium-Graphite Intercalation Compounds in Nonaqueous Electrolytes and Their Application as a Negative Electrode for a Lithium Ion (Shuttlecock) Cell, J. Electrochem. Soc., 140 (1993) 2490-2497.
  - (31) K. Zaghib, M. Armand, M. Gauthier: Electrochemistry of Anodes in Solid-State Li-Ion Polymer Batteries, J. Electrochem. Soc., 145 (1998) 3135-3140.
  - (32) E. Ferg: Spinel Anodes for Lithium-Ion Batteries, J. Electrochem. Soc., 141 (1994) 147-150.
  - (33) H. Nagai, H. Hara, M. Enomoto, C. Mochizuki, T. Honda, I. Takano, and M. Sato: Synchronous Electrochromism of Lithium Ion Battery with Chemically Fabricated Transparent Thin Films, Funct. Mater. Lett. 6 (2013) 1341001-1341008.
  - (34) M. Sato, H. Hara, T. Niside, Y. Sawada: A Water-resistant Precursor in a Wet Process for  $\text{TiO}_2$  Thin Film Formation. J. Mater. Chem., 6 (1996) 1767-1770.
  - (35) T. Nishide, M. Sato, H. Hara, Crystal Structure

- and Optical Property of  $TiO_2$  Gels and Films Prepared from Ti-edta Complexes as Titania Precursors, *J. Mater. Sci.*, 35 (2000) 465-469.
- (36) M. Sato, H. Hara, M. Kuritani, T. Nishide: Novel Route to  $Co_3O_4$  Thin Films on Glass Substrates via N-alkyl Substituted Amine Salt of Co(III)-EDTA Complex. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 45 (1997) 43-49.
- (37) M. Sato, T. Tanji, H. Hara, T. Nishide, Y. Sakashita:  $SrTiO_3$  Film Fabrication and Powder Synthesis from a Non-polymerized Precursor System of a Stable Ti(IV) Complex and Sr(II) Salt of edta, *J. Mater. Chem.*, 9 (1999) 1539-1542.
- (38) H. Nagai, C. Mochizuki, H. Hara, I. Takano, M. Sato: Enhanced UV-sensitivity of Vis-responsive Anatase Thin Films Fabricated by Using Precursor Solutions Involving Ti Complexes. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 92 (2008) 1136-1144.
- (39) H. Nagai, M. Hasegawa, H. Hara, C. Mochizuki, I. Takano, M. Sato: An Important Factor Controlling the Photoreactivity of Titania-O-deficiency of Anatase Thin Film, *J. Mater. Sci.*, 43 (2008) 6902-6911.
- (40) H. Nagai, S. Aoyama, H. Hara, C. Mochizuki, I. Takano, N. Baba, M. Sato: Rutile Thin Film Responsive to Visible Light and with High UV Light Sensitivity, *J. Mater. Sci.*, 44 (2009) 861-868.
- (41) H. Nagai, S. Aoyama, H. Hara, C. Mochizuki, I. Takano, T. Honda, M. Sato: Photoluminescence and Photoreactivity Affected by Oxygen Defects in Crystal-oriented Rutile Thin Film Fabricated by Molecular Precursor Method, *J. Mater. Sci.*, 45 (2010) 5704-5710.
- (42) D. S. Likius, H. Nagai, S. Aoyama, C. Mochizuki, H. Hara, N. Baba, M. Sato: Percolation Threshold for Electrical Resistivity of Ag-nanoparticle/Titania Composite Thin Films Fabricated Using Molecular Precursor Method, *J. Mater. Sci.*, 47 (2012) 3890-3899.
- (43) C. Mochizuki, Y. Sasaki, H. Hara, M. Sato, T. Hayakawa, F. Yang, X. Hu, H. Shen, S. Wang: Crystallinity Control of Apatite through Ca-EDTA Complexes and Porous Composites with PLGA., *J. Biomed. Mater. Res. Part B* 90 (2009) 290-301.
- (44) T. Honda, T. Oda, Y. Mashiyama, H. Hara, M. Sato: Fabrication of c-axis Oriented Ga-doped MgZnO-based UV Transparent Electrodes by Molecular Precursor Method, *Phys. Status. Solidi.*, 7 (2010) 2471-2473.
- (45) H. Nagai and M. Sato: Heat Treatment in Molecular Precursor Method for Fabricating Metal Oxide Thin Films"Heat Treatment - Conventional and Novel Applications, InTech, Chapter 13 (2012) 103-128.
- (46) K. Takahashi, T. Hayakawa, M. Yoshinari, H. Hara, C. Mochizuki, M. Sato, and K. Nemoto: Molecular precursor method for thin calcium phosphate coating on titanium, *Thin Solid Films*, 484 (2005) 1-9.
- (47) H. Nagai, T. Suzuki, H. Hara, C. Mochizuki, I. Takano, T. Honda, and M. Sato: Chemical fabrication of p-type  $Cu_2O$  transparent thin film using molecular precursor method, *Materials Chemistry and Physics*, 137 (2012) 252-257.
- (48) H. Nagai, T. Suzuki, H. Hara, C. Mochizuki, I. Takano, T. Honda, and M. Sato: Formation mechanism of p-type  $Cu_2O$  thin films via intermediate  $Cu^0$  species derived from Cu(II) complex of ethylenediamine-N,N,N'N'-tetraacetic acid, *Sci. Adv. Mater.* 6 (2014) 603-611.
- (49) B. Yan, J. Liu, B. Song, P. Xiao, L. Lu: Li-rich Thin Film Cathode Prepared by Pulsed Laser Deposition, *Sci. Rep.*, 3 (2013) 3332.
- (50) A. S. Christiansen, J. Rune, N. Poulsen, J. S. Høggaard, F. Cathrine, M. Steen, K. H. Kent, H. Peter: In Situ Study of High Voltage Performance of  $Li_3Fe_2(PO_4)_3$  Cathodes for Li Ion batteries, *Electrochemical Society. Meeting Abstracts*, (2013) 842-842.
- (51) X. Sun, M. Hegde, Y. Zhang, M. He, L. Gu, Y. Wang, J. Shu, P. V. Radovanovic, B. Cui: Structure and Electrochemical Properties of Spinel  $Li_4Ti_5O_{12}$  Nanocomposites as Anode for Lithium-Ion Battery, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 9 (2014) 1583-1596.
- (52) T. F. Yi, L. J. Jiang, J. Shu, C. B. Yue, R. S. Zhu, H. B. Qiao: Recent development and application of  $Li_4Ti_5O_{12}$  as anode material of lithium ion battery, *J. Phys. Chem. Solid.*, 71 (2010) 1236-1242.
- (53) J. Wang, H. Zhao, Q. Yang, T. Zhang, J. Wang: Electrochemical characteristics of  $Li_{4-x}Cu_xTi_5O_{12}$  used as anode material for lithium-ion batteries, *Ionics*, 19(2013) 415-419.

## 八王子市犬目町地域の理科教育に果たした斎藤家の 役割に関する基礎的研究

工学院大学 基礎・教養教育部門 数馬広二

工学院大学 基礎・教養教育部門 吉田司雄

工学院大学 基礎・教養教育部門 榎本淳一

工学院大学 工学部 環境エネルギー化学科 釜谷美則

工学院大学 総務・人事部付 酒井智晴

工学院大学 科学教育センター 若松昭秀

八王子市郷土資料館 土井義夫

小島資料館 小島政孝

Basic Research on roles of the Saito Family to contribute to the spread of science education for Inume-machi and its neighboring area of Hachioji city, Tokyo from the end of Edo era to Showa era.

Koji Kazuma, Division of Liberal Arts, Kogakuin University

Morio Yoshida, Division of Liberal Arts, Kogakuin University

Junichi Enomoto, Division of Liberal Arts, Kogakuin University

Minori Kamaya, Department of Environmental and Energy Chemistry,  
Kogakuin University

Tomoharu Sakai, Department of General Affairs, Kogakuin University  
Akihide Wakamatsu, Science Education Center, Kogakuin University

Yoshio Doi, Hachioji City Historical Museum

Masataka Kojima, KOJIMA MUSIUM

### ABSTRACT :

1. This study aims to investigate roles of the Saito Family to contribute to the spread of science education for Inume-machi of Hachioji city from the end of Edo era to Showa era.
2. At the end of Edo era, the Saito Family in Inume-machi was one of the *Hachioji Sennin-Doshin* and the village head of Inume. *Hachioji Sennin-Doshin* were employed by Tokugawa for the defense of the Edo Castle.
3. The collection of the Saito family contains old documents about their agricultural administration in Edo era, letters written in the same period, books since Meiji era, swards, instruments for chemical experiments, samples of stone relics as well as clothes, and so forth. Until 2013, we have made lists of 4,700 items of the collection.
4. The contents of the documents includes *Hatamoto*, *Sennin-doshin*, their land governance and situations of the Shimo-inume village of the time, and *Kenjutsu* (*Japanese fencing*) school.
5. The research group assumes there are several reasons why the Saito family could

take advantages of getting the leading edge scientific (technological) information from Edo, supposedly the most advanced information center at that time. The first reason is that the Saito Family was one of *Sennin-Doshin* throughout the Edo era. Secondly, they had learned *Ohira-Shinkyo-Ryu Kenjyutsu* (one of the Japanese fencing schools) and they occasionally visited a training center of the school in the Edo area. Then finally, being the village head of Inume might have allowed them to have easy access to the information from Edo.

6. With these backgrounds, the Saito family could contribute to the spread of science education for *Inume-machi*, which led Satoshi Saito, an offspring of the Saito family, to be assigned as a teacher of *Kawaguchi Seinen Gakko* (a school for youth after elementary education) during Showa era.

### 1. はじめに

本研究プロジェクトは、2013年～2015年の3年間で、工学院大学犬目キャンパスのある八王子市犬目町に江戸時代より住居する斎藤家が地域における理科教育の普及に果たした役割を、歴史的な分析を通じて明らかにするものである。工学院大学の立地的特色を生かした「八王子学」の構築をめざす基礎的研究と位置づけられる。

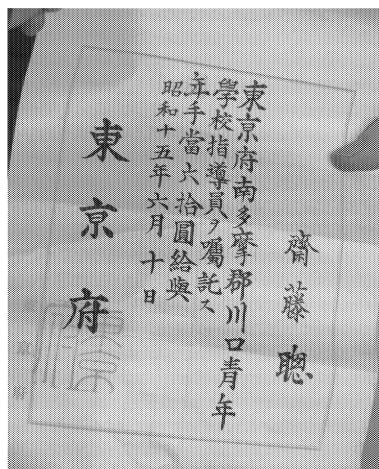
斎藤家は、江戸幕府の防衛拠点として甲州街道八王子宿に配備された軍事組織「八王子千人同心（組頭）」の家格であった。元禄12年（1699）以来、江戸時代の終わりまで、約170年間、千人同心としての家格と士分を保つとともに多摩郡下犬目村名主を務めた。



（写真1 犬目町・斎藤家の長屋門）

そのことが江戸幕末の社会情勢に敏感で、それがゆえに近代においても地域でのすぐれた指導者となり得たと考えられる。理科実験道具や古代遺跡から出土した石などの標本も数多く、斎藤聰氏が昭和15年、東京府より「川口青年学校指導員」を嘱託されている。（写真

1）青年学校は戦前に旧制小学校卒業生を対象に行われた地域の教育機関であり、斎藤家が犬目地域において指導的立場にあったと考えられる。



（写真2 斎藤家文書）

### 2. 斎藤家資料の発見および移管の経緯

2010（平成22）年4月1日、渡部正利本学名誉教授のご紹介で、八王子市犬目町の斎藤家への事前調査（吉田、榎本、数馬による）の結果、明治以降の書籍および貨幣、刀剣、化学実験器具、八王子地域における古代遺跡の標本、近世文書などが所蔵されていた。その後、斎藤家のご厚意により、2011（平成23）年3月に当該文書類を本学犬目キャンパス内（2-309）に移管させていただいている。

### 3. 斎藤家資料の整理について

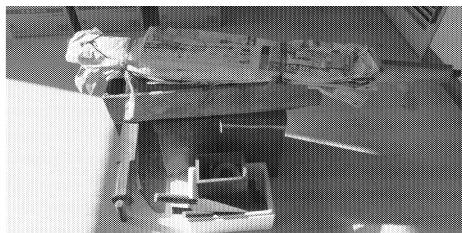
斎藤家資料は（写真3）のような箪笥や長持などの和家具に収められていた。本研究で

は、便宜上、和家具に単位A～Zの番号を割りあてた。



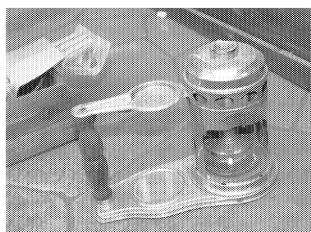
(写真3 資料が納めされていた和家具)

また、(写真4)のような民具や、火消しに使う水鉄砲、石や織物の標本などの資料も存在した。

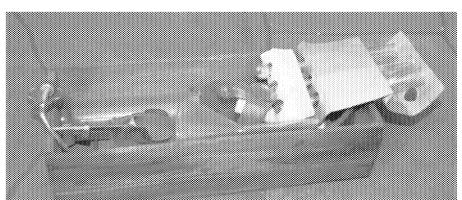


(写真4 火消し用具、民具など)

さらには、(写真5.6.7)のような実験器具もあった。



(写真5)



(写真6)



(写真7)

さて、2013年度は、斎藤家資料のうち、文書資料の文書目録作りを行った。

文書目録作りは、文書の埃や砂塵の除去、重なった文書の剥離、文書内容の解読、文書表題の決定、通し番号の作成、B4サイズのケント紙封筒に文書一枚ずつ封入、データ入力という作業工程で行われた。これらの作業は、古文書を破損せずに扱いつつ、古文書を読み解するという、特殊技能を要する作業であった。

目録入力済みの文書は(写真8)のように文書保存用段ボール箱に保管した。



(写真8 目録入力済み文書)

#### 4. 2013年度の成果

##### (1) 斎藤家文書の目録化

本プロジェクト以前に、2011年度より整理を開始し、2012年度末時点では近代書4,578冊と、近世文書1,900点の文書目録(仮)をまとめた。本プロジェクト1年目(2013年度)で近世文書3,153点を目録化し、目録合計5,053点となった。

斎藤家文書の各箱の概要は【表1】斎藤家文書の整理単位のとおりである。

単位A(4,100点)、B(630点)、C(83点)、D(41点)、E(91点)、F(25点)、I(43点)についてはつぎの通り。

- 1) 単位A (4,100点)
- ・一紙物が多く、内容は多岐に渡る…旗本用人／千人同心／知行村／上犬目村、に関わる物が比較的多い。
  - ・剣術関係は数点(A-11-2「御長柄剣炮棒御見分諸控」、A-11-5「(剣術組合せ書上げ)」他)ある。
- 2) 単位B : 約 630 点
- ・村明細帳、宗旨人別帳など下犬目村(及び上犬目村・近隣村)の基礎的なデータとなる史料、単位Aとも共通する村方文書
- 3) 単位C : 83 点
- ・手本、御用留、日記、千人同心公務・剣術・宗旨人別帳
- 4) 単位D : 41 点
- ・借用証文・質地証文・村政・千人同心組織
- 5) 単位E : 91 点
- ・借用証文・質地証文・小作・村政・千人同心
- 6) 単位F : 25 点
- ・旗本下知状・一紙物  
※板が添えられている史料。齊藤家が特に重要視した資料か。
- 7) 単位H : 整理中
- ・質地証文・金子借用証文→齊藤家を中心に下犬目村、上犬目村、近隣村よりの文書。
  - ・千人同心…扶持米・切米など俸禄を引当にした証文。文政年間の文書。
- 8) 単位I : 43 点
- ・反別帳

これら文書を、「通し番号・表題・差出人・宛先・年(干支)・西暦・月日・形態・点数・備考・キーワード」の各項目について記述し目録化した。そのサンプルを【表2】単位Aの仮目録の冒頭部分として末尾に示す。

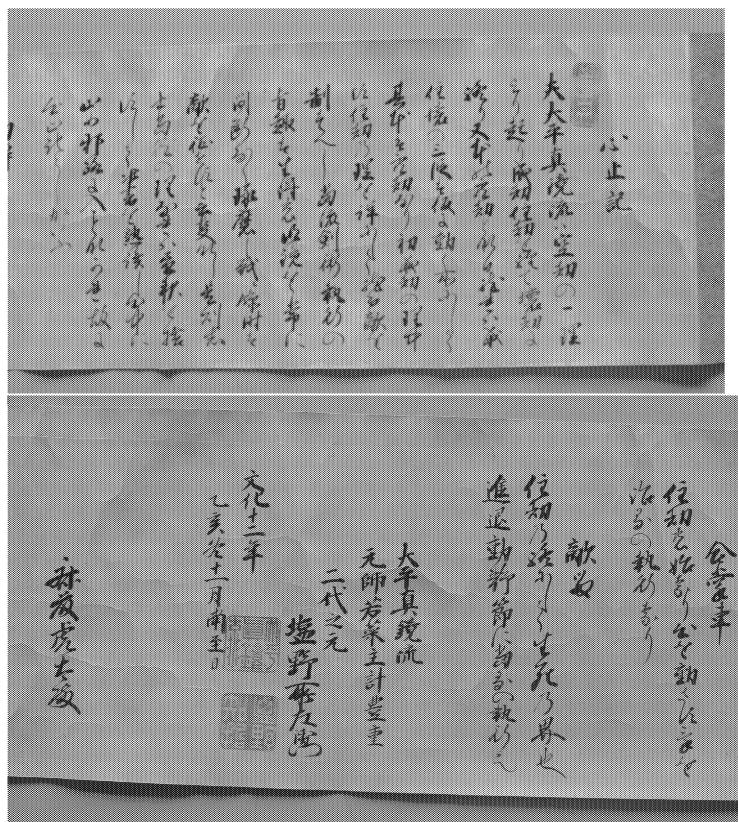
また【表3】斎藤家武術関係文書は、千人同心としての斎藤家が学んだ大平真鏡流剣術関係文書13点を抜粋した表である。

「おおひらしんきょうりゅう」は若菜主計豊重(真鏡齋)

(1727-1819)が創始。剣術、薙刀、柔術、居合術などを指導した。

豊重は江戸・青山に道場を開き、のち八王子に来住すること30余年、門弟3,000人といわれた。八王子千人同心原半左衛門組頭の塩野所左衛門(適斎 1775-1847)は「八王子総指役」として43年間八王子の大平真鏡流を指揮した。千人同心は武術見分のため江戸城に出かけ、その折、青山道場へも向かったと思われる。

以下に、文化12年(1815)11月南至日(現在の12月22日 冬至)、大平真鏡流八王子指南役の塩野所左衛門が犬目村斎藤家の一人、斎藤虎太(中村万吉組同心組頭)へ授けた初伝(入門後に初めて得る目録)の『心止記』を紹介する。



(写真9 大平真鏡流・心止記)

斎藤虎太は、大平真鏡流の塩野所左衛門へ文化8年(1812)に16歳で入門し20歳のときに見分をうけている。また天保12年(1841)には日光勤番を務めていることなどから、犬目村に

留まることなく情報の集積する江戸や日光への往来があった。このことは科学情報をも獲得しやすい立場であったと考えられる。

翻刻文は下記のとおり。

#### ○大平真鏡流剣術「心止記」

夫れ大平真鏡流ハ空劫の一理より起こり成劫住劫を経て壊劫に終わり、又本の空劫となる。然ば、成住壊の三段は仮に動く所にして、其本は空劫なり。初、成劫の理、中頃、住劫の理をつまびらかにして、然て、敵を制すべし。當流剣術執行の旨趣は生得の明鏡を常に間断なく琢磨し戦に臨む時は、敵を征せずといふ事なし。是則ち志士當然の理なれば昼夜を捨ずして此書を熟読し、心中に留め、邪路に入ことなかれ。故に心止記としかいふ。

初傳

○表之形

生真

成劫の始にして無我の執行なり。

合掌車

住劫の始めなり。心を動きせず、氣を治るの執行なり。

敵留

住劫の終にして生死のさかい也。進退動静節に当るの執行也。

大平真鏡流剣術 元帥 若菜主計豊重

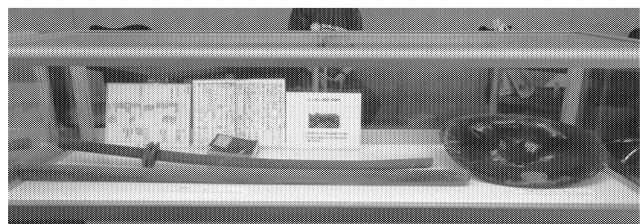
二代之元 塩野所左衛門 図 図

文化十二年乙亥冬 十一月南至日

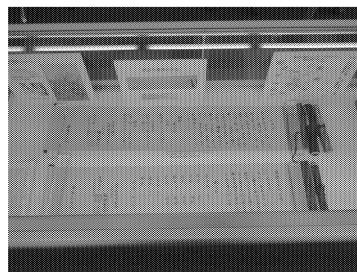
斎藤虎太殿

#### （2）工学院大学八王子科学教室での展示

本学科学教室が2013年8月24日、25日の2日間にわたり八王子キャンパスで行われ、「八王子学サロン」のブースで展示を行った。（写真10・11）八王子の歴史に関心を寄せる来場者とともに本資料所蔵者の犬目町斎藤氏ご夫妻（写真12）も展示を閲覧いただいた。



（写真10 展示 木刀および陣笠）



（写真11 展示 武芸伝書のみかた）



（写真12 2013年8月八王子科学教室にて 斎藤氏）

#### 5. 2014年度以降の研究について

今研究では、斎藤家が当時の最先端の科学情報を、情報が集積する中心地であった江戸から入手しやすかった理由の一つに剣術流派のネットワークがあると考えている。また千人同心であったこと、その地域の名主であったことなどの背景から、斎藤家は、犬目地域の理科教育の普及に貢献することが可能となり、のちに斎藤聰氏が昭和期の「川口青年学校」で指導員を嘱託されたことにつながったと考えている。

これを実証するために、以下を考えている。

- 1) 斎藤家文書近代資料群からの理科教育関係本の抽出と位置づけ。
- 2) 地域ネットワークについての考察
  - ① 江戸時代八王子千人同心としてのネットワーク（「番組合」における千人同心同士の関係）が近代以降地域のネットワークとして残存していた可能性。
  - ② 相給支配制度下における村同士のネ

- ツトワーク(戸吹村の松崎家との関係を含む)
- ③ 剣術流派のネットワーク
- 3) 江戸往来における科学情報の伝達
- 4) 江戸時代犬目村の村況と理科教育
  - ① 犬目村における千人同心の経済状況と理科教育（犬目村小野家、秋山家の比較）
  - ② 日記類における科学教育に関する記述の抽出

## 6. 本研究の八王子市への貢献

齊藤家文書は現在確認出来ているだけで10,000点を超える(書籍含む)と考えられ、未整理史料も含めるとかなり大きな史料群となる。相給知行は近世武藏国における特徴の一つと言えるが、相給知行地全てに史料が残っている例は少ない。八王子市においても相給村全体の様相はほぼ明らかにされていない。しかし、齊藤家文書の存在により、犬目村における相給の様相を明らかにすることが可能となる。齊藤家のある下犬目村は、現在編さん中の『八王子市史』にも記載されてない。

例えば今回の調査で宝永5年下犬目村明細帳(単位B箱)が発見されたが、市史の「村明細帳集成」では上犬目村のみの掲載となっており、齊藤家の文書があつてはじめて一村の状況が把握出来るようになる。今研究の成果は八王子市の近世史を明らかにするまでの貢献ができるものと考えられる。

※本研究のプロジェクトは、八王子市郷土資料館学芸員・土井義夫氏、および近世農村指導者の文化的活動について研究を続けている小島資料館館長・小島政孝氏の協力において遂行され、また史料整理、解読においては東京大学大学院河村真澄氏、一橋大学大学院宮島花陽乃氏の補助をいただいた。

## 参考文献

1. 奥村春夫編集『犬目ものがたり』八王子市陶鎔小学校発行, 1999
2. 塩野適斎『桑都日記』正・続、山本正夫、

- 栗山亀蔵訳、鈴木龍二編、1973、鈴木龍二記念刊行会
- 3. 八王子千人同心史編集委員会『八王子千人同心関係史料集』I (1988)・II (1989)・III (1990) IV (1991) 八王子市教育委員会、八王子市郷土資料館
- 4. 『多摩のあゆみー特集 多摩の剣術』vol. 86 たましん歴史・美術館、1997
- 5. 『八王子千人同心史』八王子市教育委員会、1992

【表1】斎藤家文書の整理単位

【表2】斎藤家単位A仮目録

【表3】斎藤家武術関係文書

表1 斎藤家文書(近世・近代文書A～Z)

単位	点数(仮)	内容・傾向	備考
A	4100	一紙物・千人同心・村方一般	
B	630	宗旨人別帳など冊物・村方基本情報及び村方一般	※未了
C	83	手本・御用留・日記・千人同心公務・剣術・宗旨人別帳	明治初年まで
D	41	借用証文・質地証文・村政・千人同心組織	明治10年代まで
E	91	借用証文・質地証文・小作・村政・千人同心	元禄の物あり 明治初年まで
F	25	旗本下知状・一紙物	重要視か※未了
G		土地帳簿・地券	近代
H		土地証文	※未了
I	43	反別帳	
J		近世書籍	※未了
K		近世書籍	※未了
L		近世書籍	※未了
M		書状・達状	※未了
N		書状	※未了
O		書状・領収証	※未了
P		近代書籍・書状	近代・※未了
Q		雑	近代・※未了
R		新聞	近代・※未了
S		近代書籍	近代・※未了
T		賞状など	近代・※未了
U		近代書籍	近代・※未了
V		近代書籍	近代・※未了
W		近代書籍	近代・※未了
X		雑	近代・※未了
Y			近代・※未了
Z			近代・※未了
計	5053		

表2 斎藤家武術関係文書

通し番号	表題	差出人	宛先	年(干支)	西暦	月日	形態
NO1	大平真鏡流剣術・心止記	大平真鏡流元帥若菜真 鏡齋豊重 二代之元 塩野所左衛門	斎藤虎太	文化12	1814	11月	巻
NO2	大平真鏡流柔術・初傳治内巻	大平真鏡流 二代之元 塩野所左衛門	斎藤虎太	文化14	1816		巻
NO3	御見分罷出候者姓名	塩野所左衛門 橋本類		文政3	1820	3月	堅
NO4	御見分日記	塩野所左衛門 橋本類		文政3	1820	3月	堅
NO5	大平真鏡流剣術・三才巻	大平真鏡流元帥若菜真 鏡齋豊重 二代之元 塩野所左衛門	斎藤虎太	文政9	1826	11月	巻
NO6	大平真鏡流柔術・初傳治内巻	大平真鏡流 二代之元 塩野所左衛門	斎藤富八	天保6	1835		巻
NO7	大平真鏡流剣術・忠仁之巻・免	大平真鏡流元帥若菜真 鏡齋豊重 二代之元 塩野所左衛門	斎藤虎太	天保11	1840	11月	巻
NO8	調練上覧			弘化3	1846		横
NO9	武術御見分姓名順			卯		4月	帳
NO10	先師塩野所左衛門葬儀の連絡	塩野改之進世話役中	斎藤富八				状
NO11	天然理心流襲名披露 (倅和多五郎へ剣術指 南方相讓候)	戸吹村 松崎正作	斎藤虎太				状
NO12	見分組み合わせ						横
NO13	大平真鏡流剣術口伝	若菜主計門人藤原誠盛					横

八王子犬目村斎藤家文書単位A仮目録  
凡例

				差出人	宛先	年(干支)	西暦	月.日	形態	点数	備考	キーワード
no1	A 1 1 0	[形態]表題「書出し」(内容摘要)	[包紙]宗旨人別五人組御改帳	名主斎藤 庄十郎	-	嘉永3	1850	3	包紙	1	人別	
no2	A 1 1 1	五人組改帳	宗旨人別五人組御改帳	名主斎藤 庄十郎	-	嘉永3	1850	3	横	1	人別	
no3	A 1 1 2	[刊本]武州入間郡山口親世音 利生記	別當金条	御地頭様 御役人中 か3名	-	-	-	-	堅	1	人別	
no4	A 1 2	[刊本]徳本人略行状記	文化14	1817	11.15	堅	1		宗教			
no5	A 1 3	王冬御切米内割帳	天保12	1841	10	堅	1		宗教			
no6	A 1 4	[包紙]上書 御紀二付奉申上候(農間質屋取 屋取調)	文政10	1827	9	包紙	1		千人同心・切 米			
no7	A 1 5 0	御紀二付奉申上候(農間質屋取 屋取調)	文政10	1827	9	堅	1		一部糊剥れ(別置)・丁間 史料あり(1丁目)			
no8	A 2 5 1	御紀二付奉申上候書付(農間質 屋取調)	文政12	1829	4	堅	1		農間渡世・取 縫出役			
no9	A 3 5 2	差上申一札之事(無宿徘徊取 縫等御利解)	文政10	1827	9	堅	1		1 A-2-5-1とほぼ同文に朱書 訂正			
no10	A 4 5 3	百姓代人 右衛門・組 頭富八・名 主次郎右 衛門	百姓代人 右衛門・組 頭富八・名 主次郎右 衛門	文政10	1827	9	堅	1	治安・取縫出 役			
no11	A 4 5 4	差上申一札之事(諸商人軒数 等取調)	百姓代人 右衛門・組 頭富八・名 主次郎右 衛門	文政10	1827	9	堅	2	同文2冊			
no12	A 4 5 5	寛(人數書上)「四月三日 一泊 り主人…」	-	-	-	-	(1)	1	農間渡世			不明
no13	A 4 5 6	質屋仲間名前書	-	-	-	-	(1)	1				
no14	A 4 5 7	(金子書上)「大正月…」	-	-	-	-	(1)	1				不明
no15	A 1 6	戊冬御切米勘定之帳	天保9	1838	10	堅	1		千人同心・切 米			
no16	A 1 7 0	〔括り紐〕	-	-	-	括り 紐	1					
no17	A 1 7 1	寛(金子受取覚下書)	庄十郎 (棒線)	戊	-	10	状	1	金銭賞借			

### 3. 総合研究所科学研究費採択奨励研究報告 (2013年度)

## カルシウムイメージングデータからの細胞位置 およびスパイク時系列自動推定

情報デザイン学科 助教  
竹川 高志

神経細胞は活動電位（スパイク）を発生した際に他の神経細胞に情報を伝達する。脳内の神経細胞集団がどのように情報処理を行っているかを理解するためには複数の神経細胞の活動電位を同時に記録する必要がある。活動電位を発生する際には細胞内のカルシウム濃度が上昇するため、カルシウム濃度に依存して光る蛍光タンパク質を導入した脳を二光子顕微鏡で動画として記録することにより、複数の細胞の活動電位が生じている様子を観察することができる。しかし、実際に神経細胞集団のデータとして扱うためには動画データから、各細胞の位置と活動の時系列を抽出する必要がある。実際には、データにはノイズが多く含まれるため、確定した情報ではなく情報を推定することになる。大容量の記録データから、高速・高精度に細胞位置と活動時系列を推定することが重要である。

本研究の目的は、現実的な計算時間で計算可能な、できるだけ高精度なスパイク時系列推定を開発し、その性能を定量的に評価することと、開発した手法を広く公開し利用可能にすることにより、カルシウムイメージングを用いた研究全体を推進することである。この目的の為に、活動電位と観測されるカルシウム濃度のモデルと空間的な細胞形状のモデルを取り入れたモデルに対して非負性とスパース性を導入し、高精度な解を得ることができる手法を実装した。

具体的には、 $n$  個の神経細胞それぞれに対して活動電位の発生タイミングを示す時系列  $u$  と空間状の位置および形状を表すイメージ  $a$  を想定し、 $n$  および  $u, a$  の具体的な値を推定する手法である。時系列  $u$  に従ってカルシウム濃度  $v$  が変化し、実際に観測されるのは各細胞の  $v$  と  $a$  の積で表される時空間パターンの重ね合わせにノイズが加わった動画である。実際には観測される値は相対値であり、信号のベースラインが不明であることを踏まえて拘束条件を考慮する必要がある。本研究では、 $u$  と  $a$  について適切な事前分布導入し MAP 推定を行うことで精度を向上させた。

改良したモデルの解を得る為には大規模な最適化問題を解く必要があるが、最適化分野の最新手法の導入や並列化プログラミングを用いた実装などの様々な工夫により現実的な計算時間で解を得ることができる見通しを得た。

## バリオジェネシスに動機づけられた統一理論の構築と探求

基礎・教養教育部門 准教授  
進藤 哲央

本研究では、電弱バリオン数生成を可能にするような素粒子標準模型を超える新物理模型の研究を行った。電弱バリオン数生成のためには、大きなノンデカップリング効果が必要であり、これを生じるためにはヒッグス場と、新たに導入されるボゾンとの結合定数が大きい必要があるが、ここで必要とされるような大きな結合定数は、低いスケールでランダウポールが現れることを示唆する。本研究では、そのようなランダウポーロの上のより基本的な物理理論の候補として SU(2)の超対称ゲージ理論に基づく模型を考えた。この模型では、低いエネルギー階級において、拡張ヒッグスセクターが予言される。ここでのヒッグス場たちは上のスケールの基本的な粒子の複合場として記述される。この SU(2) 模型に、基本場としての右巻きニュートリノを導入することで、低エネルギーの有効理論ではニュートリノ質量が輻射的に生成される模型を構築することに成功した。この模型のニュートリノ質量は、1 ループおよび 3 ループのダイアグラムを通して生成される。これらの研究成果を論文としてまとめ、S. Kanemura, N. Machida, T. Shindou, T. Yamada, Phys. Rev. D89, 013005 として出版した。また、ここで導入された右巻きのニュートリノ場がダークマターの候補となり得るかを現在研究中である。これらの研究と並行し、超対称標準模型における、レプトンフレイバーの破れに関する現象論的研究も行い、将来の実験において、タウセクターのレプトンフレイバーの破れが発見される可能性についての議論を行った。こちらの研究についても近いうちに論文としてまとめ、発表する

# エンベデッド・シミュレーションによる 電気鉄道饋電システムの数値的最適設計および制御

電気システム工学科 准教授  
高木 亮

近年、電気鉄道における消費エネルギー最小化をさまざまな数値的最適化手法を用いて実現する手法に関する研究が盛んであるが、特に饋電システムについては何らかのモデルの簡略化が行われることが多い。本研究では、より多くの計算機資源を投入し、詳細模擬が可能な「饋電特性シミュレーション・プログラム」を最適化プロセスに組込み利用する「エンベデッド・シミュレーション」により、これまで最適化の対象とされた例がない電気鉄道饋電システムの設計パラメータ（変電所の配置や出力、変換器の電圧・電流特性など）も含め、電気鉄道システムを構成するさまざまな対象を最適化する手法の確立をめざす研究を行った。その成果は以下のようにまとめることができる：

- (1) エンベデッド・シミュレーションの趣旨からすれば当然の結果ではあるが、この手法の適用のために必要とされる計算機資源は非常に大きいことがわかった。1件の最適化に必要な時間は数日にわたることが少なくなかった。また、詳細モデルを適用しているために、計算の収束が困難であること、評価関数の振る舞いが悪いため局所解への落ち込み等が頻繁に落ちること、シミュレーションを行うに当たり設定が必要な前提条件が多く、それらが最適化結果に及ぼす影響が少くないこと、などの問題があるため、最適化手法の適用は注意深く行う必要があることが明らかになった。
- (2) この手法を、近年導入実績が急速に増えつつある直流電気鉄道向け地上設置電力貯蔵システムの充放電特性の最適化に適用した。電力貯蔵装置の設置位置、出力、エネルギー蓄積容量、その他直流饋電システムのパラメータ等を設定すれば、充放電特性の最適化が可能であることが確認された。その際、最適化アルゴリズムとして多次元滑降シンプレックス法と遺伝的アルゴリズムを比較し、後者のほうがより良好な結果が得られることも確認した。
- (3) この手法を、(2)と同じ直流電気鉄道向け地上設置電力貯蔵装置の蓄積容量の最適化に適用した。蓄積容量の最適値が最適化により直ちに求まるような評価関数を見いだすことができなかつたが、異なる容量を定めて(2)と同じ手法による最適化を繰り返し、容量と最小化された消費エネルギーの関係から最適な容量を算定する方法を見いだした。

この手法は、(1)に述べた問題はあるものの、組み込むシミュレーションモデルの信頼性が高ければ、数値的最適化の結果がそのまま信頼しうるという点で優れた特徴を有する。今後多くの問題にこの手法を適用することを通じ、新たな知見を蓄積していくことが可能と考えられる。

## 多剤耐性克服薬の開発を志向したセコスリキシドの全合成研究

応用化学科 教授  
南雲 紳史

近年、新しい抗癌剤が次々に見出され癌の化学療法は目覚ましい進歩を遂げた一方で、化学療法が直面する困難な問題が顕在化してきた。その最たる例である多剤耐性は、臨床効果が得られた抗癌剤を連続して投与するうちに、腫瘍細胞があらゆる抗癌剤に対して効かなくなる現象である。近年、多剤耐性の分子機構解明が進むに伴い、耐性を獲得した癌細胞の細胞膜上にはP-糖タンパク質が過剰に発現していることがわかつてき。このタンパクは細胞内に入り込んだ抗癌剤を細胞外に排泄するポンプの役割を担っている。正常細胞においてもその細胞膜上に存在し、異物排泄の役割を果たしているが、その分布量ははるかに少ない。痛風治療に用いられ、抗腫瘍活性も有することが知られているコルヒチンはこの輸送タンパクの代表的なターゲットである。埼玉県の土壤から採取された *Saccharothrixide* sp. CF24 の大規模発酵液から単離されるセコスリキシドは、コルヒチン耐性 KB 細胞に対して、コルヒチンの共存下で殺細胞活性 ( $IC_{50}$  1.0 · g/mL) を示すことから、多剤耐性克服薬開発上の新たなリード化合物として興味深い。しかし、天然からは極微量しか得られないうえ、これまでに化学合成も確立されていなかった。

今回、報告者はエポキシスルフィドの立体特異的メチル化反応、2級水酸基に隣接したエポキシドの有機銅試薬による位置選択的メチル化反応、シリレンの位置選択的開環反応、トランス選択的大環状閉環メタセシス反応を利用して、全39工程でセコスリキシドの全合成に成功した。また、セコスリキシドの発見者によって提唱されていた立体構造が誤っていたことも突き止め、正しい絶対配置及び相対配置を明らかにした。

ところで、本合成の鍵反応として用いたもののうち、2級水酸基に隣接したエポキシドの有機銅試薬による位置選択的メチル化反応に関しては、基礎科学的にも興味深い知見を得ることができた。すなわち、水酸基をそのままの状態で反応を行うと、有機銅試薬は水酸基と離れた側のエポキシド炭素と反応し 1,2-ジオール体を与えるのに対し、水酸基をトリメチルシリル基で保護したものを基質として反応を行うと、シリルオキシ基と隣接した側のエポキシド炭素への求核が選択的に起こり、1,3-ジオールが主生成物となった。

残念ながら、今回の合成で得られたセコスリキシドはわずか 3 mg であったので、第二世代合成を確立することでより本化合物を大量に獲得することを現在目指している。それにより、誘導体合成への展開も可能になるものと考えている。

# 放射性物質の回収と リン酸塩ガラス異常現象を利用した長期安定的固定化

環境エネルギー化学科 教授  
大倉利典

$\text{MgO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$  (M-P) 系ガラスと同様にリン酸異常現象を示す anomalous タイプの  $\text{ZnO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$  系およびそれらの混合系である  $\text{MgO}\cdot\text{ZnO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$  系ガラスを母ガラスとした廃棄物固化体を作製し、イオン交換水、酸溶液 (0.1 mol/L HCl 水溶液)、アルカリ溶液 (0.1 mol/L NaOH 水溶液) に対する浸出挙動を明らかにした。図 2 に母ガラス (W0) と廃棄物 25, 45 mass% 固化体 (W25, W45) の浸出試験 20 日後の浸出率 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ) を示した。どの系でも母ガラスに廃棄物を含有することで浸出率が低くなっていることがわかる。しかし、母ガラスでは  $\text{ZnO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$  系ガラスの浸出率がどの系よりも低いのに対し、廃棄物固化体になると浸出率の低くなる系が母ガラスの時とは逆になるという結果になった。図 3, 4 には、それぞれ浸漬液を水としたときの、M-P 系ガラスの母ガラスと廃棄物 25 mass% 固化体の組成変化 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  含有量: P50=50 mol%, P53=53 mol%, P60=60 mol%) による浸出量の経時変化を示した。母ガラスの浸出量の変化では  $\text{P}_2\text{O}_5$  含有量の多い組成のガラスの方が、 $\text{P}_2\text{O}_5$  含有量の少ない組成よりも浸出速度が遅くなかった。一方、廃棄物 25 mass% 固化体の方では  $\text{P}_2\text{O}_5$  含有量の多い組成で浸出速度が早くなっていることがわかる。

リン酸塩ガラスの溶解には、おもにガラス中の金属元素架橋構造の水和反応と P-O-P 結合の加水分解反応による二つがある。リン酸塩ガラスは長い鎖状の重合リン酸アニオン同士が修飾金属元素によってイオン結合されている。このイオン結合が切れ重合リン酸アニオンが表面からほどけるように溶けるのが水和反応による溶解で、鎖状の重合リン酸アニオンの P-O-P 結合を開裂させて溶けるのが加水分解反応による溶解である。しかし、これら二つの反応の活性化エネルギーでは水和反応の方が加水分解反応よりも低くなるため、リン酸塩ガラスの溶解は水和反応が支配的に進むと考えられる。一方、廃棄物固化体の場合ガラス中の結合に廃棄物元素 M による金属元素架橋構造の P-O-M 結合が含まれる。廃棄物固化ガラスは P-O-M 結合によって母ガラスよりも高い耐水性を示すことから、母ガラスに含まれる金属元素架橋構造よりも強い結合となっていると考えられる。そのため、水を浸漬液とした浸出試験では、金属元素架橋構造の水和反応ではなく、P-O-P 結合の加水分解反応によってガラスの溶解が支配されると考えられる。よって全体の  $\text{P}_2\text{O}_5$  含有量の多い組成の方が高い浸出量になる。

以上、得られた成果を総括すると、高レベル放射性廃棄物の固化処理には anomalous タイプのマグネシウムリン酸塩ガラスが最も優れていることがわかった。

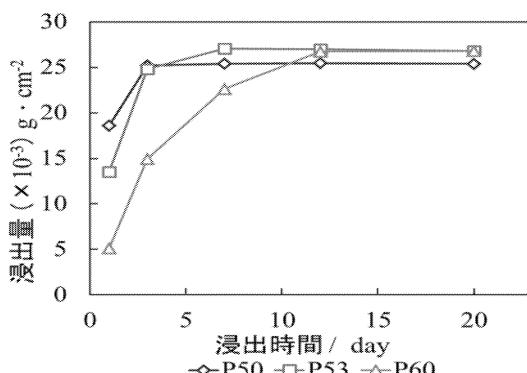


図 3 母ガラスの組成による浸出量の変化

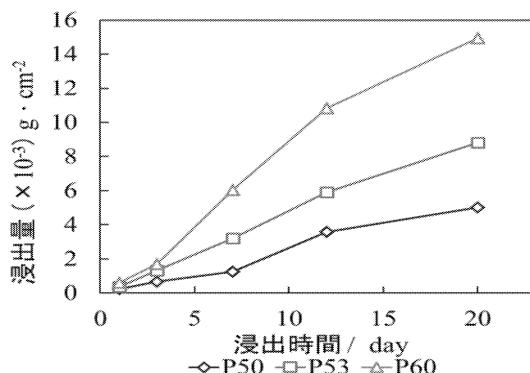


図 4 廃棄物固化体の組成による浸出量の変化

# 体性感覚を通じたフィードバック情報量の最適化に関する基礎研究

電気システム工学科 教授  
福岡 豊

ヒトは身体動搖に関する情報を視覚、前庭覚、体性感覚の3つの感覚を用いて検出し、直立姿勢を維持している。疾患によって直立姿勢の保持が困難な患者に対して、身体傾斜角や頭部の速度・加速度などの情報をフィードバックすることによって、直立姿勢の保持を支援する装置（balance prosthesis）が提案されている。日常生活での使用を考えると、視覚や聴覚を使って情報をフィードバックすることはできず、皮膚への電気刺激や振動刺激などの体性感覚を通じたフィードバックが利用されている。しかし、情報フィードバック法の検討が不十分なため、いずれの装置も実用化には至っていない。

本研究の目的は、体性感覚フィードバックの基礎的な特性を調査することである。平成25年度は、下記の2項目を研究した。本研究は工学院大学倫理委員会の承認のもとに実施された。また、全ての被験者から書面によるインフォームドコンセントを得た。

## 1. アナログ波形の弁別実験

手首に振動モータを固定して、振動刺激を加えた。将来のbalance prosthesisやヒューマンインターフェースへの応用を念頭におき、指先などを刺激部位とすることは避けた。モータの駆動信号として、正弦波、三角波、矩形波の三種類を用いた。何れの駆動信号もファンクションジェネレータで生成し、振幅5V、周期2Sとした。振動刺激を2回提示して、1回目と2回目の刺激が同じであったかを被験者に回答させた。これを1試行として、1被験者あたり27試行を行った。実験には5名の被験者が参加し、合計で135試行を行った。

実験の結果、三角波と矩形波の弁別は容易であるが、三角波と正弦波、正弦波と矩形波の組合せは弁別しにくいことが明らかとなった。また、同一の波形を2回提示した場合でも、1/3程度の試行で、同じであることが認識できなかった。

## 2. パルスパターンの弁別実験

アナログ波形の弁別は困難である組合せが多いとの結果を踏まえて、パルスのオン・オフを組合せたパターンを用いて同様の実験を行った。パターンは7通り準備した。この中には、オンの時間が一定のパターンに加えて、徐々に増えるもの、減るものがある。さまざまな組合せについて、弁別実験を行った。被験者は15名で、各被験者は28試行を行った。

実験の結果、(1) 刺激開始時のオンの時間が大きく異なっている組合せ、および、(2) デュエティ比が大きく異なっている組合せの弁別が容易であることが明らかとなった。

balance prosthesisの情報フィードバック手段として応用できるように、今後、さらに多くの被験者、刺激パターンで実験を行う予定である。

# ドライ電極によるBCIシステムと健常者による評価

情報デザイン学科 准教授  
田中 久弥

本報告ではドライ電極によるBCIシステムと、健常者による評価について報告する。ALS者のBCI利用姿勢を想定した座位姿勢でドライ電極を装着し、健常者による評価を行った。

入力正答率に関しては従来型電極とドライ型電極で正答率を比較すると両者に殆ど差はみられず、また刺激間隔(SOA)に対する正答率の特性も同様であるといえる。一方、BCIの評価としては、図1の文字入力では刺激間隔157msと210msにおいてドライ電極が80%を超えており、今回の健常者被験者群ではこの刺激時間が文字入力の効率が良い。図はないがピクトグラム入力では刺激間隔140msと175msにおいて80%弱の最良値となり、文字入力に比べて短いほうが、入力効率が良い。これは画面に表示される選択可能数に起因する特性と考えられる。文字画面では64文字の選択肢があるが、ピクトグラム画面では9の選択肢がある。画面上ではピクトグラムの方が、表示サイズが大きいので刺激間隔が短くても、すなわち点滅速度が速くても視認性が高いと考えられる。

通信速度(bit rate)については、入力正答率と同様に電極による特性の違いはみられなかった。BCIの評価としては、図2の結果から刺激時間が短いほうが、通信速度は早い。つまり、刺激時間を短くした方が入力は正確に早く成し遂げられたということである。

以上の結果から、BCIの意思伝達評価において、従来電極と同様の正答率と通信速度が確認された。さらに今回の実験の範囲内ではあるが、刺激時間を短くしたほうが入力は正確に早く成し遂げられた。これはBCIの利用者によって歓迎される成果である。今後はALS者に適用した場合の評価を行っていく。

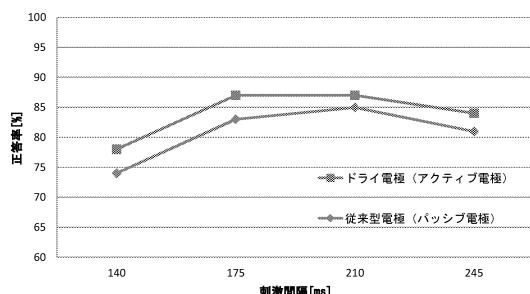


図1 文字入力におけるBCIの正答率

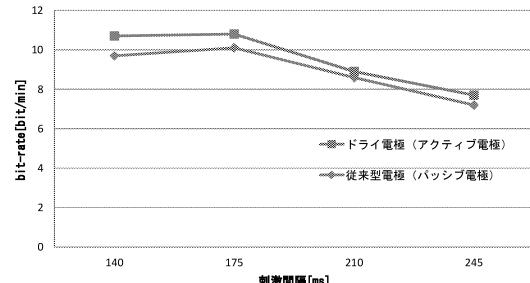


図2 文字入力におけるBCIのBit-rate

## 特許権侵害に対する救済のあり方が イノベーションと特許出願行動に与える影響の分析

機械創造工学科 准教授  
矢崎 敬人

特許権は、基準を満たす新技術を発明し公開した者に対して独占的な権利を一定期間付与することにより、研究開発のインセンティブを設けるとともに、研究開発の成果を社会的に活用できるようにするための制度である。この制度の実効性は、権利がどれほど強固に守られるかに依存する。特許権者の権利が非常に強く守られるならば、研究開発のインセンティブは大きい一方で、開発された技術の活用が進まなくなる可能性がある。本研究の中期的な目的は、特許権侵害行為があった場合に特許権者に対してなされる救済、そしてそれと表裏の関係にある、侵害者に対するサンクションのあり方について理論経済学的に分析し、研究開発インセンティブ創出と研究開発の成果の社会的活用を両立させる制度のあり方について検討することである。初年度である2013年度には、以下を行った。

第一に、理論経済学的な分析の前提となる、企業行動と制度の実態調査を行った。権利行使がイノベーションを阻害している可能性がある事例について、各国の判例を含む資料を収集・分析した。特に、技術標準に組み込まれる技術について、標準技術が関わる事例やパテントトロールの事例については詳細な調査を行った。また、特許は技術開発の成果の専有可能性確保の手段の一つに過ぎず、新技術の開発に成功した企業がそれを特許化しないことは広範に見られるところ、これらの事例について可能な限り資料を収集・分析した。さらに、各国特許制度下で、侵害が認められる条件と侵害に対する救済の制度について、各国の法令・判例や事例研究を含む書籍・資料を収集・分析した。

第二に、上記調査の結果を踏まえ、特許権侵害に対する救済としての差止請求権と損害賠償請求権を分析する理論的枠組みを構築し、予備的分析を行った。この枠組みの特徴としては、特許権は確率的特許（特許化されているが将来無効化される可能性がある特許）として捉えられていること、技術開発に成功した企業はその技術を特許化するか否かを選択すること、損害賠償金額の計算方法として用いられている複数の方法がもたらす結果の差異を検討していること、差止請求権が認められている場合（現行制度の特許）と認められない場合、また両者が並立している場合を比較していること、研究開発、特許化／秘匿、技術ライセンス・標準形成、侵害／代替技術利用、生産を一貫した枠組みで捉え、各段階におけるインセンティブを分析していることが挙げられる。予備的な分析からは、標準技術等、1製品に多くの特許技術が必要とされる分野においては差止請求権を制限することが社会厚生の向上につながる場合があり得ることが明らかになってきている。

初年度途中までの成果を踏まえて平成26年度科学研究費助成事業（基盤研究（C））に応募し、採択された。

# 適応制御型ヘテロジニアスネットワーク —通信性能の向上と低消費電力化の両立—

情報通信工学科 教授  
大塚 裕幸

本研究では、無線基地局数が増大した場合でも良好な通信性能を満足しつつシステム全体の消費電力を低減する適応制御型ヘテロジニアスネットワーク Heterogeneous network (HetNet)を確立することを目的とする。具体的にはマクロセル内にオーバーレイしたピコセルのセルサイズを端末の受信特性に応じて適応的に制御する方法を提案する。さらには、ネットワークを高密度化するスマートセルに本手法を適用した場合の消費電力と通信性能を評価・分析する。得られた成果については、関連する標準化機関に技術提案し、世界市場における日本の地位向上を目指す。

HetNet は移動体通信におけるセル構成手法の一つであり、システム容量を向上する、あるいは通信品質を改善する技術として期待されている。また、トライフィックが増加した場合、UE の接続先が Macro eNB から Pico eNB となる確率を高める Cell Range Expansion (CRE)という技術が注目されている。しかし、これまで検討されている CRE は Macro cell 内の全ての UE にとって常に最適であるとは限らない。本研究では、HetNet 環境において CRE の設計パラメータである受信電力のバイアス値 Cell Selection Offset (CSO)を各 UE の SINR に応じて、各々に対してより適切に選択することでスループット特性を改善するために、CSO を適応的に変化させる適応制御型 CRE を提案した。具体的には、適応制御型 CRE におけるバイアス値 CSO の設定方法および UE に対する制御アルゴリズムを示した。また、Homogeneous Network、従来型 CRE 及び提案方法に対してシステムレベルシミュレーションにより、平均ユーザスループットとセルエッヂスループット特性を明らかにし、比較検討を行った。その結果、適応制御型 CRE は、平均ユーザスループット特性を維持しながらセルエッヂスループット特性を改善することができることを示した。次に、Pico eNB の送信電力と CSO の両方を可変とする HetNet システムの提案を行い、そのシステム性能を評価した。5%ユーザスループットを評価指標とした場合、Pico eNB の送信電力が 30 dBm かつ CSO = 0 dB の場合と、Pico eNB の送信電力が 22 dBm かつ CSO = 4, 8 dB の場合のスループット特性はほぼ同じであることを示した。すなわち適当な CSO の設定により、Pico eNB の送信電力が 30dBm の場合と同じスループット特性を維持したまま Pico eNB の送信電力を低減できること、すなわちシステムの低消費電力化の可能性を示した。

研究成果として、特許「セルサイズ可変型ヘテロジニアスネットワーク」を申請した。また、IEEE の国際会議、国内の IEICE 総合大会、研究会等で研究成果の発表を行った。

# セラミックスを含む異材接合体の高強度化と耐久性評価

機械工学科 教授  
立野 昌義

## 1. はじめに

本研究では、セラミックスを含む異材接合体強度に及ぼす界面端形状の影響およびその耐久性を実験的に明らかにすることを目的とする。本研究目的を達成するため、下記評価及びシステムの構築を実施した。以下に主な成果を報告する。

## 2. 主な目標とその成果

### (1) セラミックスを含む異材接合強度に及ぼす界面端形状の影響

窒化珪素 - ニッケル接合体( $\text{Si}_3\text{N}_4$  - Ni)を対象として、異材接合体強度およびその破壊様式に及ぼす金属側界面端形状の影響を明らかにした。

汎用性を考慮しセラミックス側界面端幾何条件を一定としたまま金属側のそれを系統的に変えた試験片を用いることで、異材接合体の強度特性と破壊特性を明らかにした。この結果、金属側界面端形状を変更することによる異材接合体強度とそれに対応する破壊様式の影響度を明らかにでき、接合体強度の高度化を図る上で有効な界面端形状範囲を明確にできた。強度特性を支配する因子には接合界面結合力や界面端近傍の応力分布が関与する可能性があるなど今後の課題が明確になる。

### (2) 接合界面端残留応力低減効果

実験に用いた材料を想定した異材接合モデルを用い異材接合界面端近傍に生ずる残留応力に及ぼす金属側界面端形状の影響を明らかにした。

熱弾塑性解析結果と異材接合体試験片の強度と破壊様式との対応関係から、強度支配因子と応力分布との対応関係が明確になった。この結果に基づき界面端残留応力低減効果についての考察を行う。各界面形状の異材接合体モデルの応力分布は理論弾性論から導出される強度パラメータ（応力特異性指数、特異場強さ、熱応力に関する強さ）との導出を試み、今後はこれらとの対応を明らかにする。

### (3) 耐久性評価システムの構築

耐久性評価を行う上での疲労試験システムを設計および構築した。今後は構築したシステムの評価を行い、精度の向上や耐久性に関する結果を構築する。得られた結果に基づき異材接合体の強度支配因子と耐久性についての対応関係を明らかにする。

## 3. まとめ

窒化珪素 - ニッケル接合体を対象として、セラミックスを含む異材接合体強度および破壊様式に及ぼす金属側界面端形状の影響を明らかにし、その結果を数値解析に基づき強度上昇機構を明確にした。耐久性および本研究を進める上での課題や問題点が明確になった