

**福井大学大学院  
工学研究科  
研究報告**

**Vol.65 2017 MARCH**



福井大学大学院 工学研究科 研究報告 第65巻 2017年3月  
Mem. Grad. Sch. Eng., Univ. Fukui, Vol. 65 (March 2017)

目 次

【9月分】

<b>Project-Based Learning at a National University</b> <b>- A Collaboration between English and Engineering Departments -</b>	Wayne MALCOLM, Christopher HENNESSY, Yukio AKASHI, Masayuki KAWAI, Yasuyuki SAKAI and Keigo SUZUKI	1
<b>グリコール酸エステル結合を有したポリテトラメチレングリコールの合成と それを用いた分解性ポリウレタン材料の合成と性質</b>	小笹太寛 橋本保 漆崎美智遠 阪口壽一	11

【3月分】

<b>空き家の管理条例及び解体事業の全国的動向</b>	尾野加朱実 内田洋紀 菊地吉信	23
<b>離散空間上における位相点作用素のシンプレクティック共変性</b>	渡辺大輔 柴田喬之 橋本貴明	29
<b>携帯端末を使用した出席管理システム</b>	増田進也 小高知宏 黒岩丈介 白井治彦	37
<b>バックグラウンド実行を前提としたコマンド入力系列を用いた ユーザ認証手法の検討</b>	松井将吾 小高知宏 黒岩丈介 白井治彦	45
<b>無線イーサフォンによる音声通信システムの構成</b>	村瀬穂貴 小高知宏 黒岩丈介 白井治彦	53
<b>ゲームエージェントを使った不完全情報ゲームの盤面予測</b>	遠田英嗣 小高知宏 黒岩丈介 白井治彦	61

**Memoir of Graduate School of Engineering, University of Fukui**  
**Vol. 65, March 2017**

**CONTENTS**

**【September】**

**Project-Based Learning at a National University**

**– A Collaboration between English and Engineering Departments –**

.....	Wayne MALCOLM, Christopher HENNESSY, Yukio AKASHI, Masayuki KAWAI, Yasuyuki SAKAI and Keigo SUZUKI	1
-------	---	---

**Synthesis of Glycolate-Containing Poly(tetramethylene glycol)s and**

**Properties of Degradable Polyurethanes Prepared Therefrom**

.....	Takahiro OZASA, Tamotsu HASHIMOTO, Michio URUSHISAKI and Toshikazu SAKAGUCHI	11
-------	---	----

**【March】**

**Domestic Movements of Management Ordinance and**

**Demolition Programs for Vacant Houses**

.....	Kasumi ONO, Hironori UCHIDA and Yoshinobu KIKUCHI	23
-------	---	----

**Symplectic Covariance of Phase Point Operator on Discrete Space**

.....	Daisuke WATANABE, Takayuki SHIBATA and Takaaki HASHIMOTO	29
-------	--	----

**Attendance Management System Using Mobile Phone**

.....	Shinya MASUDA, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA and Haruhiko SHIRAI	37
-------	--	----

**Consideration of Intrusion Detection Method Based on**

**the Feature of Command Sequence**

.....	Shogo MATSUI, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA and Haruhiko SHIRAI	45
-------	---	----

**Voice Communication System Using the Wireless Etherphone**

.....	Hotaka MURASE, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA and Haruhiko SHIRAI	53
-------	--	----

**Predict State of the Incomplete Information Game with Game Agent**

.....	Hidetsugu TODA, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA and Haruhiko SHIRAI	61
-------	---	----

## Project-Based Learning at a National University – A Collaboration between English and Engineering Departments –

**Wayne MALCOLM\* Christopher HENNESSY\*\* Yukio AKASHI\*\*\*  
Masayuki KAWAI\*\*\*\* Yasuyuki SAKAI\*\*\*\* and Keigo SUZUKI\*\*\***

In this paper, the authors outline the theoretical background for the creation of an engineering project-based learning English course, describe the actual content creation and implementation of this course from April 2014 to August 2014, and identify positive and negative themes analyzed through grounded theoretical coding from students' feedback, which lead to significant alterations of future iterations of the course. The major positive themes resulting from this analysis include *presentation, knowledge acquisition in other fields, design, and research*. Negative themes expressed by the students in the first iteration of the course include *more TOEIC, time-consuming, more English, and burdensome*. The authors conclude the paper by commenting about ongoing research concerning the longitudinal effects on engineering students who participated in an English language project-based learning class, and ambitions for creating a robust and informed engineering project-based learning model for English students that can be easily transferred to and utilized in other university English programs.

**Key Words :** Project-Based Learning, ESL, Second Language Acquisition, Engineering, Collaborative Learning

### 1. Introduction

The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) emphasizes project-based learning as a vital element in reforming Japan's education system by 2030. The objective is to make Japan a place able to thrive in the 21<sup>st</sup> century (Suzuki, 2015). In this reform effort, MEXT highlights critical thinking skills as a requirement for success in a 21<sup>st</sup> century globalized world. With the timeline of 2030, MEXT implies a long-term view in reforming education and in preparing Japanese society for the future. This longitudinal view of reform is the core of the current research endeavor that will be described in this paper. Within that core is the objective of enhancing student critical thinking skills.

The authors designed a longitudinal research study that looks at the effects a project-based learning class taught using English has on multiple groups of engineering and architecture students at a national university in Japan. Through this lens, they have set up a research structure that follows the students who have participated in the project-based learning course at the university where they teach. By the end of the research project, three separate iterations of the project-based learning course will have been taught with a total of 72 student participants. Moreover, the authors will have collected a wealth of qualitative data from various sources including open-ended questionnaires, professional journals, and student and faculty interviews. For the purposes of this paper, the authors are focusing on giving a brief outline of the initial iteration of this course in 2014, student reactions to that course, and analysis of those reactions to create informed revisions to course structure and content. Data used in this paper was

---

\* Language Center

\*\*School of Global and Community Studies

\*\*\*Architecture and Civil Engineering Course,  
Graduate School of Engineering

\*\*\*\*Mechanical Engineering Course, Graduate  
School of Engineering

drawn primarily from questionnaires completed by the student participants.

First, the theoretical framework will be given to describe the big picture vision of the project, and to show what literature the authors drew from in order to support and fill their knowledge base. After that, the methodology will be laid out describing the data gathered from a questionnaire completed by the students after the conclusion of the first iteration of the course in the spring of 2014. This data will be analyzed using theoretical coding research methods to precisely interpret student feedback. This feedback will lead to a final discussion on revisions that were implemented for following iterations based on the analysis results.

## **2. Theoretical Framework**

Critical thinking as Mergendoller (n.d.) defines is “ordinary thinking done well, that is reflectively, with attention to criteria, and with the goal of making a defensible, reasoned judgment” (para. 4). Researchers from the University of Louisville (2016) say, “The ability to think critically calls for a higher-order of thinking than simply the ability to recall information” (para. 1). Chan and Lau (2016) define critical thinking as “the ability to think clearly and rationally about what to do or what to believe” (para. 1). In another form, Paulo Freire’s (1996/1970) concept of *conscientizacao* takes ideas of critical thinking to a more activist realm. One has to be engaged in his or her environment in a critical manner by being literate enough to know what messages are being communicated on their behalf. This engagement will allow for greater social, political and economic empowerment thus placing power in the hands of the

individual. Once people know how to engage through being literate they can think critically and conscientiously (Freire, 1996/1970). These understandings of critical thinking support and frame the project-based learning approach employed by the university instructors in their objective to foster a learning environment where critical thinking was a major organic compound for the students to develop their linguistic as well as scientific abilities.

As described, critical thinking was central to the formation of the class being presented in this paper. The class itself is a STEM-based project-based learning course, so the identification of critical thinking as a key building block of the class is natural. Capraro, Capraro, and Morgan (2013), who write specifically about STEM-based project-based learning, asserted that central to project-based learning was critical thinking. Mergendoller and Larmer (2015) identified eight essential elements of project-based learning that include:

1. Challenging problem or question
2. Sustained inquiry
3. Authenticity
4. Student voice and choice
5. Reflection
6. Critique and revision
7. Public product
8. Key knowledge, understanding, and success skills

When cross-referenced with the theoretical definitions and concepts presented earlier, unity between critical thinking and project-based learning is complimentary. The following excerpt from Capraro, Capraro, and Morgan (2013) highlight the stated complimentary aspects of project-based learning and critical thinking,

Project-Based Learning is...composed of several problems students will need to solve. It is our belief that PBL provides the contextualized, authentic experiences necessary for students to scaffold learning and build meaningfully powerful science, technology, engineering, and mathematics concepts supported by language arts, social studies, and art. STEM PBL is both challenging and motivating. It requires students to think critically and analytically and enhances higher-order thinking skills. STEM PBL requires collaboration, peer communication, problem-solving, and self-directed learning while incorporating rigor for all students. STEM PBL builds on engineering design as the cornerstone and as the foundation on which students bring their compartmentalized knowledge of science, technology, and mathematics to bear on solving meaningful real-world problems (p. 2).

The connection between project-based learning and critical thinking is clear. Project-based learning could not be what it is without critical thinking.

### **3. The Course**

#### **3.1 Inspiration**

The current state of Japan seems to be defined by a search for identity, or a reaffirmation of a perceived dominance painted by astronomic success throughout the 1980s. Whatever the perception, the actions on the ground by governing bodies and socio-economic and socio-politico organizations

informs observers that Japan is trying to invigorate the populous as a way to deal with the very real implications of being a major economy in a world defined by globalization. This macro-understanding of the world has real implications for institutions of higher education responsible for educating and training the human resources of the future: the designers, builders, and leaders of tomorrow.

Therein lies the simple inspiration for creating an English language class utilizing a project-based learning pedagogical approach. The driving force was to create communicatively competent professionals who will be able to contribute to Japan as a nation, and a member of the world of nations (Ravestejin, et al, 2006). Also, this class was created based on prevailing actions by government ministries like MEXT to create funding programs specifically designed to allow institutions of higher education to create and implement programs that will advance the critical thinking skills of the student body, while preparing them with practical English language skills to do the work of a professional in the 21<sup>st</sup> century. Society is not built upon one static force. Be it pure economics, or health and welfare, or art, or education, etc. Multiple forces push and pull society creating the dynamism needed for a successful standard of living. University students are being called upon by business and society to engage more with the world in order to bring the benefits of globalization to Japan. Without the ability and skill to think critically, Japan could be on the negative end of what globalization has to offer. Our goal was to make sure the students experience a course that prepares them to be able to harness the forces within globalization and focus the best of those forces into Japan.

### 3.2 Planning

The development of this project-based learning course can be summed-up with two words, *collaboration* and *meetings*. From October 2013, the authors and the director of the department where they teach met with a group of four engineering teachers with the goal of designing projects suitable for second year first semester mechanical engineering and architecture students. Even before these meetings in October of 2013, the director met with various administrators to ensure adequate class time and financial resources could be allocated for a course of this nature. Also, department heads in the engineering faculty met with the authors and their director to determine which engineering teachers wished to be a part of this class, which was unique for the university.

By October 2013, the course facilitators of the class were known. What was needed was a tangible curriculum, and students. All the details were worked out over weekly meetings between the director and the English and engineering faculty and syllabus was developed by April 2014. Also, 24 students were chosen to be in the class. Twelve mechanical engineering majors and twelve architecture majors were selected based on the highest TOEIC scores within each major. A lot of discussion was had regarding how to choose the students, and because all engineering students were taking the TOEIC regularly, this gave the planning group some relatively objective way of choosing the most English-proficient students in terms of ability to read and understand technical English. This was not a perfect solution, but one the planning group thought was the most practical given time and

resource constraints. When the students were selected, a meeting with the selected students was scheduled. During this meeting the students were informed about the parameters of the class in Japanese so they could more easily comprehend what was being asked of them. The choice to participate in this class was 100% voluntary. If a student did not want to participate in this course, they had the ability to opt not to and instead be placed in regular non-PBL English class. There was no penalty of any kind for not choosing not to participate. In the end, all the students who participated in this class volunteered to do so. (This has remained the student selection policy for all following iterations of this class.)

### 3.3 Course Objectives

In designing the objectives that would guide the course, looking back to the theoretical framework was important. Based on the literature the following objectives were derived:

1. To improve engineering English skills;
2. To improve professional presentation skills;
3. To improve collaboration skills; and
4. To improve critical thinking skills

As one can see, a main objective was dedicated to critical thinking. The rationale being that students may not have ever heard of project-based learning, or know the epistemological and ontological roots of the approach. This emphasis was also important to make faculty and administration aware of this critical component of the class. The authors did not

know the level of understanding various populations at the university brought to the development of this class. However, critical thinking, as it has been such a catch phrase for quite some time, is a more recognizable term, in English and Japanese. Finally, making critical thinking skills a distinct objective allowed the teachers to focus on it immediately and without ambiguity.

### **3.4 The Projects**

The following sections will lay out the details of each project as designed by the engineering faculty, who were a vital part of this class, and the English language instructors. These are brief descriptions containing the core elements of each project. Throughout all projects, engineering faculty who work in professional circumstances provided technical support to the groups by means of lectures and class-to-class feedback concerning the process of building the projects. At any given time there were at least three faculty members in any one class – two English language instructors and one engineering instructor. All projects were all completed by the first iteration class within one semester – April 2014 to August 2014.

#### **3.4.1 Make a Bridge (Engineering Proctor – Keigo Suzuki)**

In teams of four, each team was given materials to make a bridge that could carry the weight of ten kilograms. All teams were issued the same materials – plywood planks and beams sufficient to make a miniature bridge. Grading criteria included weight – the less the finished structure weighed the higher the points to be awarded; aesthetics – a judging and ranking system was employed to

determine the best looking bridge by where the students chose the top three most aesthetically-pleasing bridges; and displacement of the bridge when holding up to ten kilograms – the engineering professor collaborating for this project used a laser displacement mechanism to determine the structural integrity of the bridges by where the bridge that held the steadiest and bent the least received the most points.

#### **3.4.2 Make a Luminaire (Engineering Proctor – Yukio Akashi)**

Again, in teams of four, students were tasked with designing and building a lighting fixture – a luminaire. With this project each of the teams had to buy original materials they had planned to use in constructing their luminaires. All student expenses were reimbursed through department budget allocated for the class. As for grading, students were graded on the aesthetics of the luminaires. To decide the most aesthetically pleasing lighting fixture, a judging and ranking system was again employed.

#### **3.4.3 Design Eyewear (Engineering Proctors – Masayuki Kawai and Yasuyuki Sakai)**

The third project was a little different than the bridge and luminaire projects. Students were presented with a challenge to design eyewear for particular country markets – Italy, Germany, Dubai (United Arab Emirates), India, Denmark, and the United States. The president of a local prominent eyewear production company presented this challenge with the goal to only design the glasses. For this project there would be no physical product made. Students designed the glasses based on market research, then proposed the idea to the

president of the company in a public presentation. The president of the company selected the best three designs. As this was the final project, it was planned to culminate in a community-wide public presentation, which was open to and attended by the university and surrounding community, and covered by local and national press.

Throughout all three projects student teams had goals they had to reach, but how they traversed the path to achievement of those goals depended a lot on team dynamics, instructor support, and ability to understand the materials provided to them. Each project resulted in student teams giving a presentation to their classmates and instructors. The final presentation was larger and more consequential than the final grade. Following the success of the graded public presentation, the student groups had the opportunity to bring their presentation from university grounds to an actual local community eyewear event where they were able to present their designs to real people working in the eyewear field.

#### **4. Methodology**

##### **4.1 Research Methods**

The researchers utilized several methods for obtaining and analyzing data. This allowed for a better understanding of student needs. They could also adjust course content to better align with the course objectives listed above. In this section, these research methods will be outlined.

###### **4.1.1 Triangulation of Data**

The researchers utilized the triangulation method of data collection in order to obtain and synthesize multiple types of data obtained

from the course participants (Wolcott, 1994). The data collected included: (1) journals and (2) questionnaires. While there were only two types of data collection tools, they allowed students substantive ways to organize and express their thoughts.

All course participants kept journals, what the authors called *Professional Journals*. The content of the *Professional Journal* was a freewriting and a project diary worksheet (Beckett & Slater, 2005). For freewriting, students were required to answer certain questions that varied week by week and write their thoughts on anything involved with the class over the previous week. The project diary worksheet has more prescribed sections for the participant to write comments about language used and skills learned over the previous week. Each participant was required to fill this out every week and turn into the instructors for grading and comments. For the purpose of this research paper, the authors will focus on a 2014 questionnaire which provided course participants the opportunity to free write, in general, their reactions and feelings to the course. The researchers were able to obtain 24 responses.

#### **5. 2014 Student Questionnaire Analysis**

##### **5.1 Theoretical Coding**

The researchers have been utilizing a grounded theory method of theoretical coding on the data obtained to not only analyze the data, but also allow them to “choose or construct new data collection methods and revise earlier ones” as necessary (Boyatzis, 1998; Prince et al., 2006; Thornberg et al., 2014). For this paper, the researchers conducted a line-by-line version of initial

coding on data gathered from the questionnaire. From this, initial coding themes emerged that allowed for insight into course improvement for the second iteration of the PBL course, as described in the next section.

### **5.1.1 PBL First Iteration – December 2014 Questionnaire Results**

A total of 24 participants filled out the questionnaire in December 2014. In these questionnaires, certain themes emerged through the initial coding process. The researchers have divided themes into positive – the participant appears to believe this was a positive aspect of the course – or negative – the participant appears to believe this was a negative aspect of the course. Interpretations of whether an item was positive or negative were determined by the context of the answer. These free-response answers were written in full sentences and all were quite clear in context during the transition of data to themes during the initial coding stage. The specifics are indicated in the table below:

Table 1: Theoretical coding themes mentioned by three or more participants for December 2014 Questionnaire (out of 24 respondents)

Initial Coding Theme	Number of participants	Positive (P) / Negative (N)
presentation	14	P
knowledge acquisition in other fields	7	P
more TOEIC	6	N
design	5	P
time-consuming	5	N
research	5	P
more English	5	N
burdensome	4	N
new	3	P
anxious	3	N

### **5.1.2 Discussion of the Results**

Using the results outlined above, it is clear the infusion of presentation and specialized knowledge elements – specifically engineering – into an English class was viewed positively by students of the class, with more than half the students (14 of 24) recognizing the *presentation* elements and over one-fourth (7 of 24) recognizing the *knowledge acquisition* elements. Furthermore, a substantial number of students seemed positive on the *design* and *research* skills gained from participating in these projects, with five of 24 – or more than 20% – referring to each of these themes.

However, a number of negative themes emerged along with positive themes. In particular, four negative themes stood out due to the number of appearances they made in the data – (1) *more TOEIC*, (2) *time-consuming*, (3) *more English*, and (4) *burdensome*. In response to this, the researchers made amendments to course content, for subsequent iterations, in order to achieve more of the positive aspects and reduce the negative aspects as outlined by course participants.

### **5.1.3 Changes to Course Based on Results**

A number of revisions were made to the course content of subsequent course iterations based on the theoretical coding results from the December 2014 questionnaire. These changes took effect for the second iteration of the course, which was conducted from October 2015 to February 2016. These revisions were implemented in order to encourage more of the positive themes referred to by participants and minimize the negative themes.

As far as the *presentation* theme, course content was amended to include a two-minute

presentation (referred to as ‘mini-presentation’ in-class) in nearly every project-related class in order to build students ability to speak English comfortably and professionally in front of an audience. The *knowledge acquisition in other fields, design, and research* themes were promoted through the use of more group-oriented critical thinking exercises in English. An example would be an activity called “Craggy Rock,” in which students work in groups to determine which types of bridges must be used in certain, predefined scenarios. This more effectively ensured their use of technical vocabulary in English to solve problems.

A number of revisions were also made to address negative themes. The most major change was reduction of the number of projects designed by students from three to two, retaining the bridge project and the luminaire project. This revision addressed all negative themes – *more TOEIC, time-consuming, more English, and burdensome* – first by freeing up 10 classes to be specifically targeted for TOEIC study. By adding this TOEIC element, it can be argued that the *more English* theme was also addressed. It also freed up students’ time and lowered the burden on students since often project work had to be conducted outside of class hours in order to properly build a project. This also addressed the *time-consuming* and *burdensome* themes.

One other major revision was the streamlining of the project work for each the bridge and luminaire projects. In the case of the bridge project, students used styrene building materials in lieu of wood, drastically reducing the building time for students. In the case of the luminaire, students designed and built thin plastic or paper slips for cube-shaped,

prefabricated lamps as opposed to building lamps using wood or metals, and designed from scratch. Both of these streamlining processes were incorporated to address the *time-consuming* and *burdensome* themes expressed by the first iteration participants.

## 6. Summary

In this paper, the authors outlined the theoretical background for the creation of an engineering project-based learning English course, described the actual content creation and implementation of this course from April 2014 to August 2014, and identified positive and negative themes analyzed through grounded theoretical coding from students’ feedback, which lead to significant alterations of future iterations of the course. The major positive themes resulting from this analysis included *presentation, knowledge acquisition in other fields, design, and research*. These themes were encouraged in the second iteration of the course through the inclusion of mini-presentations in nearly every project-related class, and through the inclusion of critical thinking activities. Negative themes expressed by the students in the first iteration of the course included *more TOEIC, time-consuming, more English, and burdensome*. These negative themes were addressed through two major changes in course content: (1) the reduction of three projects to two projects for the semester, and (2) the streamlining of the bridge and luminaire projects.

In future papers, the authors will analyze similar qualitative data from following iterations of the course – starting with the second iteration conducted from October 2015 to February 2016 – to understand the effects

the revisions made to the course. The authors will also continue to work on the base research project of tracking student participants longitudinally in order to understand the effects of an English project-based learning class on engineering students. They will continue the collection of data and analysis of the first and second iteration participants, and begin the data collection process with third iteration participants beginning in October 2016. Included with the data collection methods used to this point, the authors wish to begin interviewing students – in focus groups, individually, or both – to begin probing deeply into the theoretical coding themes that have emerged through this research analysis. Finally, a driving vision is to create a robust and informed engineering project-based learning model for English students that can be easily transferred to and utilized in other university English programs.

## 7. Acknowledgements

The efforts of Director Albert Lehner need to be acknowledged. Without his support, guidance and trust this class would never have existed, and the positive results and opportunities generated from building a real university community would never have materialized. Thank you Dr. Lehner!

## 8. References

- [1] Beckett G. & Slater T. The project framework: a tool for language, content, and skills integration. *ELT Journal*, 59-2, 108-116 (2005).
- [2] Boyatzis R. *Transforming qualitative information*. Thousand Oaks: SAGE Publications (1998).
- [3] Capraro, R. M., Capraro, M. M., & Morgan, J. R. *STEM project-based learning : An integrated science, technology, engineering, and mathematics approach (2<sup>nd</sup> Ed.)*. Rotterdam, The Netherlands : Sense Publishers (2013).
- [4] Eslami Z. & Garver R. English language learners and project-based learning. In Capraro et al. (Eds.), *STEM project-based learning: an integrated science, technology, engineering, and mathematics approach*. (pp. 119-127). Rotterdam: Sense Publishers (2013).
- [5] Freire, P. *Pedagogy of the Oppressed* (M. B. Ramos, Trans.). London, EN: Penguin Books (1996).. (Originally published by The Continuum Publishing Company in 1970)
- [6] Lau, J. & Chan, J. [C01] What is critical thinking? (2016). Retrieved from <<http://philosophy.hku.hk/think/critical/ct.php>>
- [7] Mergendoller, J. (n.d.) Teaching critical thinking skill through project based learning. Retrieved from <<http://www.p21.org/news-events/p21blog/1097-teaching-critical-thinking-skills-through-project-based-learning>>
- [8] Mergendoller, J. R. & Larmer, J. Why we changed our model of the “8 essential elements of PBL” (2015). Retrieved from <[http://bie.org/blog/why\\_we\\_changed\\_our\\_model\\_of\\_the\\_8\\_essential\\_elements\\_of\\_pbl](http://bie.org/blog/why_we_changed_our_model_of_the_8_essential_elements_of_pbl)>
- [9] Morgan J. Moon A. & Barroso L. Engineering better projects. In Capraro et al. (Eds.), *STEM project-based learning: an*

- integrated science, technology, engineering, and mathematics approach.* (pp. 29-40). Rotterdam: Sense Publishers (2013).
- [10] Prince M.J. and Felder R.M. Inductive teaching and learning methods: Definitions, comparisons, and research bases. *Journal of Engineering Education*, 95-2, 123-138, (2006).
- [11] Ravesteijn W., De Graff E., & Kroesen O. Engineering the future: The social necessity of communicative engineers. *European Journal of Engineering Education*, 31-1, 63-71 (2006).
- [12] Suzuki, K. H. (2015). OECD/Japan seminar – Japan's educational reform for 2030 (2015) Retrieved from <[http://www.mext.go.jp/component/a\\_menu/other/detail/\\_icsFiles/afieldfile/2016/01/05/1365660\\_3.pdf](http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/afieldfile/2016/01/05/1365660_3.pdf)>
- [13] Thornberg R., & Charmaz K. Grounded theory and theoretical coding. In U. Flick (Ed.), *The SAGE handbook of qualitative data analysis*. (pp. 153-170). London: SAGE Publications (2014).
- [14] University of Louisville. What is critical thinking? (2016). Retrieved from <<http://louisville.edu/ideastoaction/about/criticalthinking/what>>
- [16] Wolcott H. *Transforming qualitative data, description, analysis, and interpretation*. Thousand Oaks, CA: Sage. (1994).

# グリコール酸エステル結合を有したポリテトラメチレングリコールの合成とそれを用いた分解性ポリウレタン材料の合成と性質

小笛 太寛\* 橋本 保\* 漆崎 美智遠\* 阪口 壽一\*

## Synthesis of Glycolate-Containing Poly(tetramethylene glycol)s and Properties of Degradable Polyurethanes Prepared Therefrom

Takahiro OZASA\*, Tamotsu HASHIMOTO\*,  
Michio URUSHISAKI\* and Toshikazu SAKAGUCHI\*

(Received September 30, 2016)

Glycolate-containing poly(tetramethylene glycol)s (PTHF-GA-OH) were prepared by the reaction of bifunctional living poly(tetrahydrofuran) with lithium bromide followed by the substitution reaction of the produced bromide end groups with potassium glycolate. The obtained polyols were reacted with 4,4'-diphenylmethane diisocyanate and then with 1,4-butanediol to give a polyurethane with degradable ester moieties. The treatment of the obtained polyurethane (PTHF-GA-BD-PU) with potassium hydroxide in tetrahydrofuran/ethanol (9/1 v/v) solvent in the presence of a small amount of water caused hydrolysis reaction of the glycolate ester linkages to give the mixture of PTMG and the urethane oligomers. The extraction of PTMG with methylene chloride from the mixture resulted in the recovery of PTMG in over 70% yield based on the poly(tetrahydrofuran) segments of PTHF-GA-BD-PU. Enzymatic degradation of PTHF-GA-BD-PU was carried out with lipase as a catalyst. The heterogeneous reaction with film specimens in water using phosphate buffer solution (pH 7.4) at 37 °C caused the decrease in the molecular weight of PTHF-GA-BD-PU. This is probably due to the lipase-catalyzed hydrolysis of the glycolate ester groups of PTHF-GA-BD-PU.

**Key Words :** Ester Bond, Glycolic Acid, Polyol, Polyurethane, Degradable Polymer, Chemical Recycling

### 1. 緒 言

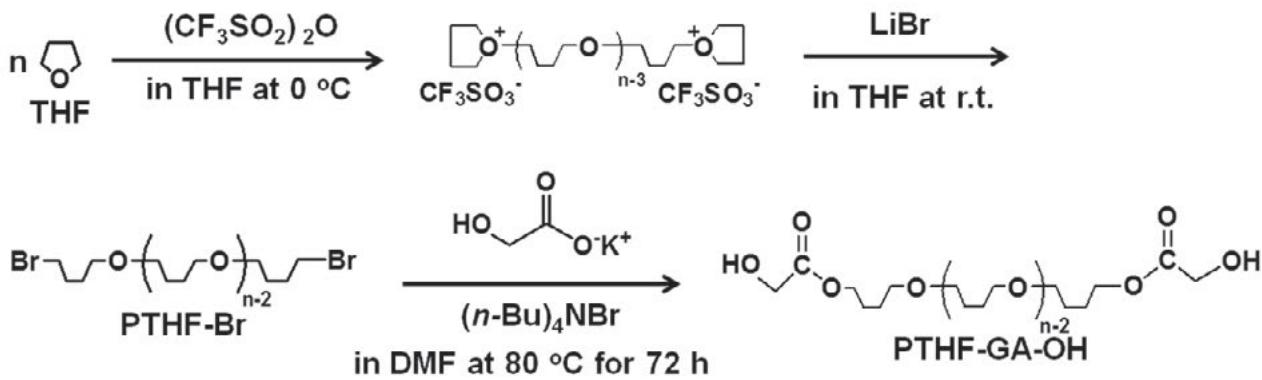
廃棄材料を化学反応により分解して原料や中間体を再生し、それらを再び材料合成に利用するのがケミカルリサイクルである。高分子のケミカルリサイクルの克服すべき問題は、これまで製造してきた一般の汎用高分子材料はもともと分解するようには設計されていないため、化学分解するには高温、高压といった過酷な分解反応条件が必要なことが多く、効率やコスト面で現実的でないことである。例えば、フォーム材、ゴム・エラストマー、弾性繊維、樹脂、塗料として幅

広く利用されているポリウレタン材料をケミカルリサイクルするため、ウレタン結合を加水分解、アルコール分解、アミン分解し、原料であるポリオールを再生する試みは以前から活発に研究されている<sup>[1]</sup>。しかし、化学的にも熱的にも安定なウレタン結合を分解するには過酷な反応条件が必要で、原料ポリオールと同じポリオールを高収率で再生させることはできない。そのため、ポリウレタンのケミカルリサイクルはほとんど普及していない。

我々は、資源循環型社会に真に対応したリサイクルを実現するには、分解して原料分子を再生できる結合部位を分子構造内に組み込んだ高分子を、材料設計の段階から意識して開発することが重要と考えた<sup>[2]</sup>。このような高分子材料として、これまでに、酸の作用により分解するアセタール結合を分子構造内に導入したポリウレタンエラストマーとポリウレタンフォームの

\* 大学院工学研究科材料開発工学専攻

\* Materials Science and Engineering Course, Graduate School of Engineering



**Scheme 1.** Synthesis of glycolate-containing poly(tetramethylene glycol) (PTHF-GA-OH) and polyol precursor (PTHF-Br).

開発を行った<sup>[2]~[5]</sup>。その性能は従来のポリウレタン材料とほぼ同じレベルであり、適当な酸強度の酸性水溶液を作用させると、室温、常圧でアセタール結合が加水分解し、対応する原料ポリオールがもともと使われた重量に対して約80%の収率で再生されることを明らかにした<sup>[2]~[5]</sup>。しかし、この分解可能なポリウレタン材料は、分解生成物として原料ポリオールとともにアセトアルデヒドを発生した。アセトアルデヒドは揮発性有機物質にあたり、例えば自動車の内装や建物の中で使用されるウレタン材料<sup>[6], [7]</sup>にとって危険因子であると懸念され、現在のところ実用化が見送られている。

その点を踏まえ本研究では、分解しても有害物質を発生しないエステル結合を分解性結合として、サトウキビなどの天然物から得られることも知られているグリコール酸エステル単位を有する汎用タイプのポリウレタン材料を開発することを目的とした。まず、汎用ポリウレタンエラストマーの最も一般的な原料である、テトラヒドロフランの開環カチオン重合により得られるポリテトラメチレンジコールに、分解性のグリコール酸エステルを導入した新規のポリテトラメチレンジコール(PTHF-GA-OH)を合成した。そして、このポリオールを原料としてポリウレタン(PTHF-GA-BD-

PU)を合成し、その物性を検討した。また、ポリテトラメチレンジコール鎖長が熱的性質や力学的性質に及ぼす影響についても検討した。さらに、アルカリ加水分解とエステル加水分解酵素であるリパーゼによる分解を検討した。

## 2. 実験

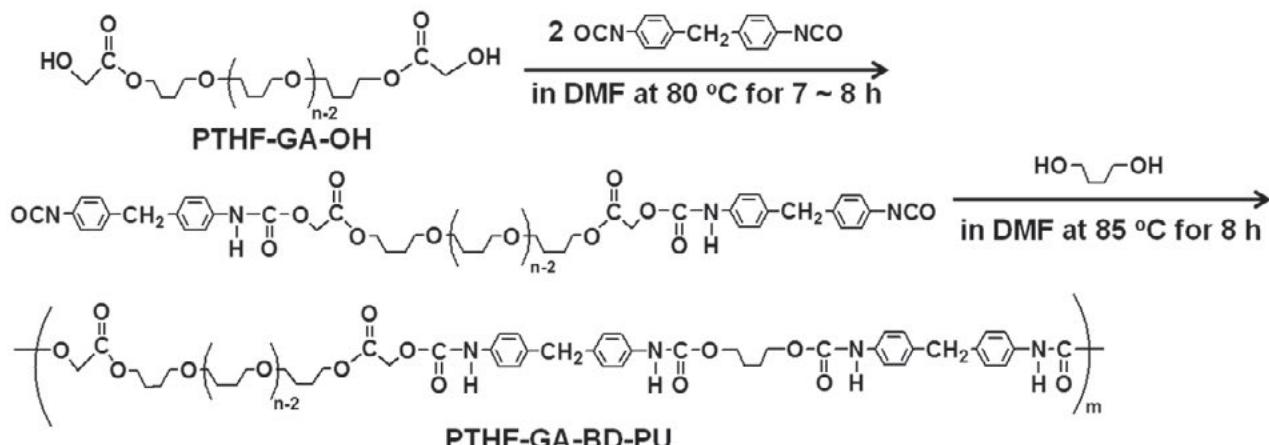
### 2.1 試薬

テトラヒドロフラン(THF；キシダ化学、一級)は、モレキュラーシーブス3A 1/16を加えて一晩予備乾燥し、水素化リチウムアルミニウム上で3時間還流後、蒸留を行った(bp 66 °C)。以上の操作を2回行い、重合日に同様の操作により3回目の蒸留を行い、使用した。N,N'-ジメチルホルムアミド(DMF；キシダ化学、特級)は、モレキュラーシーブス3A 1/16を加えて一晩予備乾燥して水素化カルシウム上で1回減圧蒸留(70 °C/40 mmHg)し、褐色アンプルに入れ、使用直前まで冷蔵庫で保存した。トリフルオロメタンスルホン酸無水物は、以下のように合成した。アンプルに入ったトリフルオロメタンスルホン酸25 mLをドライアイスマタノールで凍らない程度に冷やしておき、これを100 mLナス型フラスコに入れた。かくはんしながらそこに五酸化二

**Table 1.** Synthesis of Glycolate-containing Poly(tetramethylene glycol)s (PTHF-GA-OH) with Polyol Precursor (PTHF-Br) of Different Molecular Weights

Time, min	$M_n$ (NMR) <sup>a)</sup>	Feed, g (Feed, mmol)			Yield, g	Yield, %
		PTHF-Br	GA-K	$(n\text{-Bu})_4NBr$		
10	2380	20.0 (8.40)	2.88 (25.2)	8.13 (25.2)	20	89
15	3100	25.0 (8.07)	2.76 (24.2)	7.80 (24.2)	25	97
30	5780	27.0 (4.67)	1.60 (14.0)	4.52 (14.0)	27	90

a) Number-average molecular weight of PTHF-Br measured by <sup>1</sup>H NMR spectroscopy.



**Scheme 2.** Synthesis of glycolate-containing polyurethanes (PTHF-GA-BD-PU).

りん4 gを加え、さらに20分後に25 g加えて90分放置した。その後、ミクロの蒸留装置を組み、オイルバス温度130 °Cで生物物の蒸留を行った。その後、同様な装置を組み、100 mLナス型フラスコに生成物と少量の五酸化二リンを加え2回目の蒸留を行った。全ての蒸留物を回収して褐色アンプルに入れ、使用直前まで冷蔵庫で保存した。ベンゼン(和光、一級)は2つ口丸底フラスコに入れ、水素化カルシウムを少量加え、3時間還流後、蒸留(bp 78 °C)して使用した。その他の試薬は市販品をそのまま使用した。

## 2.2 臭素末端ポリ(THF)(PTHF-Br)の合成

Scheme 1にPTHF-Brの合成方法を示す。開始剤にトリフルオロメタンスルホン酸無水物を用いてTHFを開環カチオン重合すると、二官能性のTHFのリビングカチオンポリマーを生成する。これに停止剤として、臭化リチウムを反応させ、臭素末端ポリテトラヒドロフラン(PTHF-Br)の合成を行った。

三方コックを備え付けた500 mLナス型フラスコに乾燥窒素を吹き込みながらヒートガンによりフラスコを外部より熱し(~450 °C)、フラスコ内部を乾燥した。THF 180 mL(2.22 mol, 反応溶液中 12.17 mol/L)をシリ

ンジで入れ、ドライアイスマタノールバス中に1時間入れて0 °Cにした。その後、トリフルオロメタンスルホン酸無水物をシリングで2.4 mL( $1.46 \times 10^{-2}$  mol, 反応溶液中 0.080 mol/L)加えてメタノールバス中で所定の時間かくはんした。その後反応溶液を、臭化リチウム63.5 g(0.36 mol;  $(CF_3SO_2)_2O$ に対して25倍過剰)をTHF(400 mL)に溶かした溶液に注ぎ、重合反応を停止させた。その後、反応溶液からエバポレーターを用いてTHFを除去し、溶液を濃縮した。その後、その濃縮したポリマー溶液をイオン交換水(~0 °C)に注いでポリマーを沈殿させた。

## 2.3 グリコール酸エステル単位を有するヒドロキシ末端ポリ(THF)(PTHF-GA-OH)の合成

Scheme 1にPTHF-GA-OHの合成方法を示す。グリコール酸カリウムを合成するため、ナス型フラスコにグリコール酸9.78 g(0.129 mol)と、エタノール200 mLに水酸化カリウム6.02 g(0.107 mol)を溶かした溶液を加え、かくはんしながら室温で1時間反応させた。反応後、ガラスフィルターを用いたろ過によりグリコール酸カリウムを回収し、メタノールで洗浄し、未反応のグリコール酸を除去した後、室温で真空乾燥を行った。

**Table 2.** Synthesis of Glycolate-containing Polyurethanes (PTHF-GA-BD-PU) with Glycolate-containing Poly(tetramethylene glycol)s (PTHF-GA-OH) of Different Molecular Weight

$M_n$ (Titr.) <sup>a)</sup>	Feed, g (mmol)			Yield, g	Yield, %
	PTHF-GA-OH	MDI	BD <sup>b)</sup>		
2800	12.0 (4.29)	2.15 (8.57)	0.913 (3.91)	10.9	79
3140	13.2 (4.20)	2.10 (8.41)	0.328 (3.64)	12.5	84
7510	21.0 (2.80)	1.40 (5.60)	0.173 (1.92)	13.6	63

a) Molecular weight of PTHF-GA-OH measured by acetylation method.

b) The feeds were determined by amine addition method.

還流冷却管および三方コックを備え付けた 300 mL の 3 つ口丸底フラスコに、合成した PTHF-Br を入れ、DMF 200 mL に溶解させた。次いで、合成したグリコール酸カリウムと相間移動触媒として臭化テトラ *n*-ブチルアンモニウムを加え、反応温度 80 °C で 72 時間反応させた。それぞれの PTHF-GA-OH の合成に用いた PTHF-Br の分子量および試薬の仕込み量を Table 1 にまとめて示す。その後、反応溶液をろ過し未反応のグリコール酸カリウムを除去し、ろ液からエバポレーターにより DMF を除去し、生成ポリマーを室温で真空乾燥した。さらに、ポリマーを THF 100 mL に溶解させ、イオン交換水(～0 °C)に注いで再沈殿して精製した。その後、回収したポリマーを室温で真空乾燥した。

#### 2.4 グリコール酸エステル単位を有するポリウレタン (PTHF-GA-BD-PU) の合成

Scheme 2 に PTHF-GA-BD-PU の合成方法を示す。還流冷却管、三方コック、滴下漏斗を備え付けた 4 つ口セパラブルフラスコに 4,4'-ジフェニルメタンジイソシアート(MDI)を入れて乾燥窒素雰囲気下にした。そこへ、滴下漏斗を用いて PTHF-GA-OH をゆっくり滴下し、80 °C で 7~8 時間反応させイソシアート末端プレポリマーを合成した。次に、反応系中に存在するイソシアート基をアミン当量法により定量し、加える鎖延長剤である 1,4-ブタンジオール(BD)の量を正確に決定した。それぞれの PTHF-GA-BD-PU の合成に用いた PTHF-GA-OH の分子量と試薬の仕込み量を Table 2 にまとめて示す。原則的な仕込みモル比は、ポリオール : MDI : BD = 1:2:1 である。また、イソシアート基の定量では、イソシアート基の量が半分以下になっていないとき、ポリオールと MDI の反応を続け、再度、イソシアート基の定量を行った。その後、残存するイソシアート基と当量のヒドロキシ基量に対応する BD を 0.5 時間ごとに全量を 3 回に分けて加えた。この時、反応が進行するに伴い、粘度が上昇するため、DMF により希釈しながらかくはんした。BD をすべて加え終わってから 9 時間反応させた。反応終了後、大量のメタノールに生成物を沈殿させ、メタノールで洗浄した後、真空乾燥させた。生成したポリマーをさらに精製するため、その THF 溶液をメタノールに投入して再沈殿を行い、室温で真空乾燥した。

#### 2.5 グリコール酸エステル単位を有するポリウレタン (PTHF-GA-BD-PU) のアルカリ加水分解

Scheme 3 に PTHF-GA-BD-PU のアルカリ加水分解反応式を示す。ナス型フラスコにポリウレタンを約 0.4 g を入れ THF 9.0 mL を加え溶解させた。次いで、0.5 mol/L エタノール性水酸化カリウム溶液 1.0 mL ( $5.0 \times 10^{-4}$

mol) を加えた後、イオン交換水 0.1 mL ( $5.6 \times 10^{-3}$  mol) を加え、室温にて 24 時間にかくはんしながら反応させた。その後、エバポレーターを用いて溶媒を除去し、生成物を室温で真空乾燥した。そして、その回収した分解生成物混合物から、塩化メチレンを溶媒として原料ポリオールに相当するポリテトラメチレングリコール(PTMG)を抽出して回収した。

#### 2.6 グリコール酸エステル単位を有するポリウレタン (PTHF-GA-BD-PU) の酵素による加水分解

酵素による加水分解反応は、緩衝溶液(りん酸緩衝溶液 pH 7.4)中の水系不均一反応により行った。試験管にポリウレタンを約 40 mg 入れ、緩衝溶液 5 mL と Phycomyces nitens 由来 Lipase(活性 : 100 ~ 200 unit/mg; 和光、生化学用)30 mg を加えた。このとき、酵素は溶解しているが、ポリウレタンはフィルム状で浮遊していた。この不均一溶液を 37 °C でかくはんした。所定時間経過後、ポリマーフィルムを反応溶液から取り出し、イオン交換水で十分に洗浄した後、室温で真空乾燥した。フィルムを取り出した後の反応溶液は、エバポレーターを用いて水を除去した後、室温で真空乾燥を行った。その後 THF に溶解させ、ろ過により不溶な塩を除去した。そのろ液からエバポレーターを用いて THF を除去した後、室温で真空乾燥を行い、反応水溶液中に存在していたかもしれない分解生成物を回収した。回収したフィルムと反応溶液からの抽出物を一つにまとめて分析に供した。

#### 2.7 測 定

ポリマーの分子量分布は、ゲルパーミエーションクロマトグラフィー(GPC)を用いて測定し、標準ポリスチレン(分子量: 8420000, 775000, 186000, 50000, 16700, 2800)により作成した検量線を基に数平均分子量( $M_n$ )と重量平均分子量( $M_w$ )と多分散度( $M_w/M_n$ )をポリスチレン換算で求めた。GPC 本体に島津製作所製 LC-10AD, 示差屈折計(RI)に島津製作所製 RID-6A, プレカラムに昭和電工製 Shodex A-800P, カラムに昭和電工製 Shodex A-80M を 2 本, Shodex KF-802.5 を 1 本、直列に接続して使用した。カラム温度は室温、溶媒に THF を用い、流速 1.0 mL/min で測定した。核磁気共鳴スペクトルは、核磁気共鳴測定装置に日本電子製 LA-300 FT-NMR スペクトロメーターおよび JNM-ECX500 FT-NMR スペクトロメーターを使用し、溶媒にメタノール-*d*<sub>4</sub>, クロロホルム-*d*, 重水、内部標準にテトラメチルシランを用いて、室温で測定した。ヒドロキシ末端ポリマーのヒドロキシ基含量は、アセチル化法<sup>[8]</sup>によって求めた。ヒドロキシ末端ポリマー 0.3 g を 100 mL のナス型フラスコに取り、そこにアセチル化試薬(無水酢酸 1.5 mL

**Table 3.** Characterization of Glycolate-containing Poly(tetramethylene glycol) (PTHF-GA-OH) and Polyol Precursor (PTHF-Br)

	$M_n$ (GPC) <sup>a)</sup>	$M_w/M_n$ (GPC) <sup>a)</sup>	$M_n$ (Calc.) <sup>b)</sup>	$M_n$ (NMR) <sup>c)</sup>	$M_n$ (Titr.) <sup>d)</sup>
<b>PTHF-Br(2410)</b>	<b>2410</b>	<b>1.51</b>	<b>2430</b>	<b>2380</b>	-
<b>PTHF-Br(2930)</b>	<b>2930</b>	<b>1.44</b>	<b>2780</b>	<b>3100</b>	-
<b>PTHF-Br(7810)</b>	<b>7810</b>	<b>1.31</b>	<b>5670</b>	<b>5790</b>	-
<b>PTHF-GA-OH(2800)</b>	<b>2580</b>	<b>1.45</b>	<b>2420</b>	<b>2580</b>	<b>2800</b>
<b>PTHF-GA-OH(3140)</b>	<b>3480</b>	<b>1.39</b>	<b>2770</b>	<b>3190</b>	<b>3140</b>
<b>PTHF-GA-OH(7510)</b>	<b>6410</b>	<b>1.53</b>	<b>5660</b>	<b>7500</b>	<b>7510</b>

a) Measured by GPC with polystyrene calibration.

b) PTHF-Br of  $M_n$ (Calc.) =  $72.12 \times DP_n$ (Calc.) - 16.00 + 79.00 × 2

$DP_n$ (Calc.) =  $[THF]_0 / \{[(CF_3SO_2)_2O]_0 \times 0.72$  (Initiator Efficiency) } × Conversion (%) / 100 ;

PTHF-GA-OH of  $M_n$ (Calc.) = PTHF-Br of  $M_n$ (Calc.) - 79.90 × 2 + 75.04 × 2

c) Measured by  $^1H$  NMR spectroscopy.

d) Measured by acetylation method.

をピリジン 48.5 mL に溶解させた溶液)を 5.0 mL、ホールピペットを用いて正確に加えて、還流管を備え付け、オイルバスで約 100 °C、1 時間反応させ、室温に冷ましてからイオン交換水を還流冷却管の上から 15 mL 加えて未反応の無水酢酸を完全に酢酸にした。この反応溶液に指示薬 0.1 wt% エタノール性フェノールフタレイン溶液を数滴加え、マグネットスターラーでかくはんしながらビュレットを用いて 0.05 mol/L エタノール性水酸化カリウム溶液により滴定した。同様にブランク試験も行い、両者の滴定値の差よりそのポリマーのヒドロキシ基含量を求めた。

アミン当量法によるイソシアナート基の定量は、以下のように行った。まず、塩酸エタノール溶液(塩酸 2 mL エタノール 200 mL をメスシリンダーで調製)を、ビュレットを用いて 0.05 mol/L 水酸化カリウムエタノール溶液で滴定を行い、その濃度を求めた。また、ジブチルアミンベンゼン溶液は 200 mL のメスフラスコにジブチルアミン 2.6 g を加えて、ベンゼンを用いて調製した。イソシアナート末端プレポリマーを約 0.2 g

をナス型フラスコに取り出し、ジブチルアミンベンゼン溶液をホールピペットで 10 mL を加え、その溶液を 60 °C で 30 分間温め、室温まで冷却した後、指示薬 BPB を一滴加えて、ビュレットを用いて塩酸エタノール溶液で滴定した。また、ブランク試験も行い、両者の滴定値の差を基にイソシアナート基を定量した。ポリマーのガラス転移温度は示差走査熱量測定(DSC)によって求めた。本体にはリガク製 Thermo Plus DSC 8230L を使用し、標準サンプルにはアルミナを入れたアルミパンを用い、測定温度変化を昇温速度温度 5 °C/min に設定し、窒素雰囲気で測定した。ポリマーの熱分解温度は、熱重量分析(TG-DTA)によって求めた。本体にはリガク製 TG-DTA8078G1 を使用し、標準サンプルにはプラチナパンに入ったアルミナを用い、窒素雰囲気下で測定した。室温から 650 °Cまでの温度範囲で昇温速度 10 °C/min の条件で測定した。熱分解温度( $T_d$ )は、サンプルの 5%重量減少時の温度とした。引張試験は、テンション UMT-III-100S 型引張試験機を用い、試験片は幅 5 mm、長さ 20 mm、厚さ 0.7~0.8 mm のものを使用し、引張速度 10 mm/min、室温(25 °C)で、100%伸張時の弾性率( $M_{100}$ )、引張強度( $T_B$ )、破断時の伸び( $E_B$ )を測定した。動的粘弹性試験(DMA)は、本体に UBM Rheogel-4000 を用い、試験片は幅 5 mm、長さ 10 mm、厚さ 0.8~1.0 mm のものを使用し、周波数 1.0 Hz、昇温速度 2 °C/mm、温度範囲 -120~150 °C で、貯蔵弾性率( $E'$ )と損失正接( $\tan \delta$ )の温度依存性を測定した。

**Table 4.** Characterization of Glycolate-containing Polyurethanes (PTHF-GA-BD-PU)

	$M_n$ <sup>a)</sup>	$M_w/M_n$ <sup>a)</sup>	$M_n$ of Soft Segment <sup>b)</sup>
<b>PTHF(2800)-GA-BD-PU</b>	<b>20400</b>	<b>2.29</b>	<b>2800</b>
<b>PTHF(3140)-GA-BD-PU</b>	<b>30100</b>	<b>2.19</b>	<b>3140</b>
<b>PTHF(7510)-GA-BD-PU</b>	<b>25700</b>	<b>1.86</b>	<b>7510</b>

a) Measured by GPC with polystyrene calibration.

b) Measured by acetylation method.

### 3. 結果と考察

**Table 5.** Properties of Glycolate-containing Polyurethane (PTHF-GA-BD-PU)

	Hexane	Toluene	$\text{CHCl}_3$	$\text{AcOEt}$	$\text{CH}_2\text{Cl}_2$	THF	Acetone	DMF	DMSO	$\text{Et}_2\text{OH}$
PTHF-GA-BD-PU	×	×	○	○	○	○	×	○	×	×

a) Polymer concentration, 1 wt/vol%; ○: soluble, ×: insoluble.

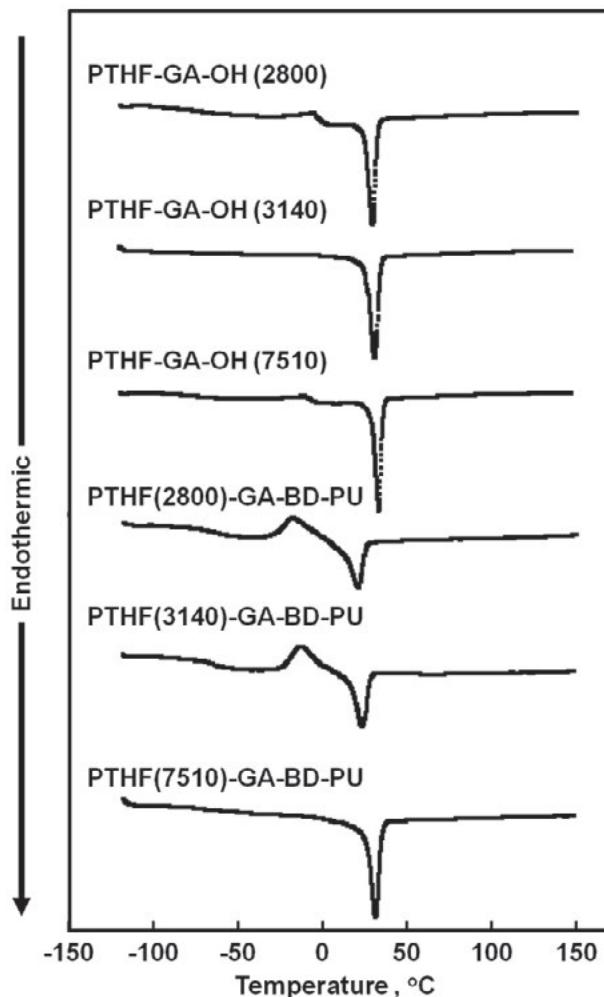
### 3.1 ポリオール (PTHF-GA-OH) 及びポリウレタン (PTHF-GA-BD-PU) の合成

Table 3 に得られた PTHF-Br と PTHF-GA-OH のキャラクタリゼーションの結果を示す。PTHF-Br において  $^1\text{H}$  NMR のプロトンピーク強度比より求めた分子量は、本重合系の開始剤効率<sup>[9]</sup>を考慮した計算値とほぼ一致した。また、PTHF-GA-OH において  $^1\text{H}$  NMR スペクトルにおけるエステル結合に由来するプロトンピークを基に求めた分子量と、アセチル化法による滴定より求めた末端 OH 基含量分析に基づく分子量を比較した。その値はおよそ一致した。また、これらの末端基分析により求められた分子量と本重合系の開始剤効率を考

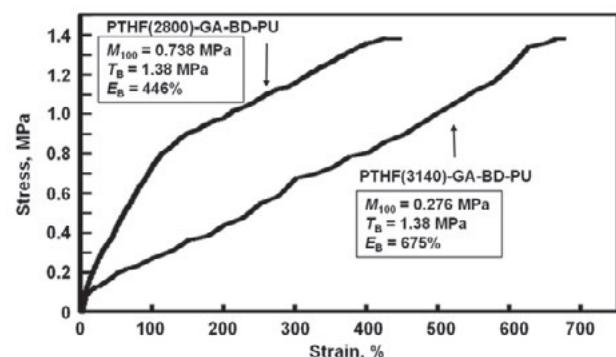
慮して求められた重合度より計算された理論分子量が、末端基分析の精度が低下する高分子量体サンプル [PTHF-GA-OH(7510)]を除いてほぼ一致した。これらのポリオールを過剰の 4,4'-ジフェニルメタンジイソシアートと反応させプレポリマーを合成し、次いで、1,4-ブタンジオールにより鎖延長することでポリウレタンを合成した。得られたポリウレタンの数平均分子量を Table 4 に示す。その値は、約 2 万～3 万であった。

### 3.2 ポリウレタン (PTHF-GA-BD-PU) の溶解性

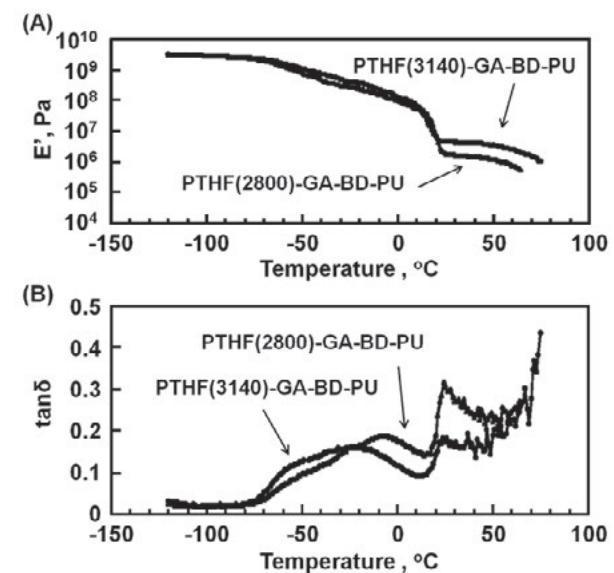
合成したポリウレタンの溶媒への溶解性を Table 5 に示す。代表サンプルとして PTHF(3140)-GA-



**Figure 1.** DSC thermograms of the polyols (PTHF-GA-OH) and the polyurethanes (PTHF-GA-BD-PU) on second heating scan.



**Figure 2.** Tensile stress-strain curves of PTHF(2800)-GA-BD-PU and PTHF(3140)-GA-BD-PU.



**Figure 3.** Temperature dependent of (A)  $E'$  and (B)  $\tan \delta$  for PTHF(2800)-GA-BD-PU and PTHF(3140)-GA-BD-PU.

**Table 6.** Properties of Glycolate-containing Polyurethanes (PTHF-GA-BD-PU)

$M_n$ <sup>a)</sup>	Tensil Test			Viscoelastic Test		DSC		TG-DTA	
	$M_{100}$ <sup>b)</sup> , MPa	$T_g$ <sup>c)</sup> , MPa	$E_g$ <sup>d)</sup> , %	Rubbery Plateau Area, °C	tanδ Peak Temp., °C	$T_g$ <sup>e)</sup> of Soft Segment, °C	$T_m$ <sup>f)</sup> of Soft Segment, °C	$T_d$ <sup>g)</sup> , °C	
PTHF(2800)-GA-BD-PU	20400	0.738	1.38	446	24 ~ 64	-	-63	21	327
PTHF(3140)-GA-BD-PU	30100	0.276	1.38	675	22 ~ 76	-	-66	23	332
PTHF(7510)-GA-BD-PU	25700	-	-	-	-	-	-71	31	346

a) Measured by GPC ; polystyrene calibration. b) Tensile modulus 100% elongation. c) Tensile strength. d) Elongation at break.

e) Glass transition temperature; on second heating scan. f) Melting temperature; on second heating scan.

g) Thermal decomposition temperature; 5% weight loss.

BD-PU を用い、1 wt/vol% の濃度で、室温にて溶解試験を行った。PTHF(3140)-GA-BD-PU はクロロホルム、酢酸エチル、塩化メチレン、THF、DMF に可溶であった。

### 3.3 ポリウレタン (PTHF-GA-BD-PU) の熱的性質

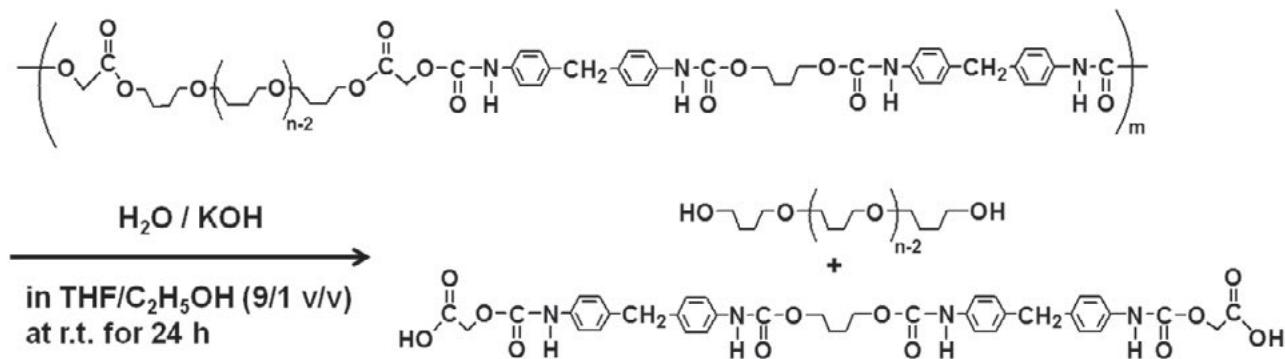
Figure 1 に分子量 2800 ~ 7510 の分子量を持った PTHF-GA-OH とそれぞれの PTHF-GA-OH をソフトセグメントとして有する各ポリウレタンの DSC による第 2 昇温過程のサーモグラムを示す。 PTHF-GA-OH の基本構造である PTMG は結晶性なので、分子量 2800 ~ 7510 のいずれのポリマーでも結晶の融解に由来する吸熱のピークが観測された。一方、これらのポリオールを用いて合成されたポリウレタンでは、 PTHF(2800)-GA-BD-PU は -63 °C, PTHF(3140)-GA-BD-PU は -66 °C, PTHF(7510) -GA-BD-PU は -71 °C で  $T_g$  が観測され、 ソフトセグメントの分子量が増加すると、  $T_g$  が低くなる傾向を示した。これは、ソフトセグメント鎖長が長い方がウレタン結合単位の凝集により形成されるハードセグメントドメインの束縛を受けにくくなり、ガラス転位温度が低くなったと考えられる。また、ソフトセグメントの分子量が 2800 と 3140 を有するポリウレタンでは、再配列による結晶化とその融解に由来する発熱と吸熱のピークが観測された。また、ソフトセグメントの分子量が 7510 のポリウレタンにおいても、ソフトセグメント鎖の結晶の融解のピークが観測された。

また、Table 6 にそれぞれのポリウレタンの 5%重量損失温度( $T_d$ )を示す。それぞれの  $T_d$ は PTHF(2800)-GA-

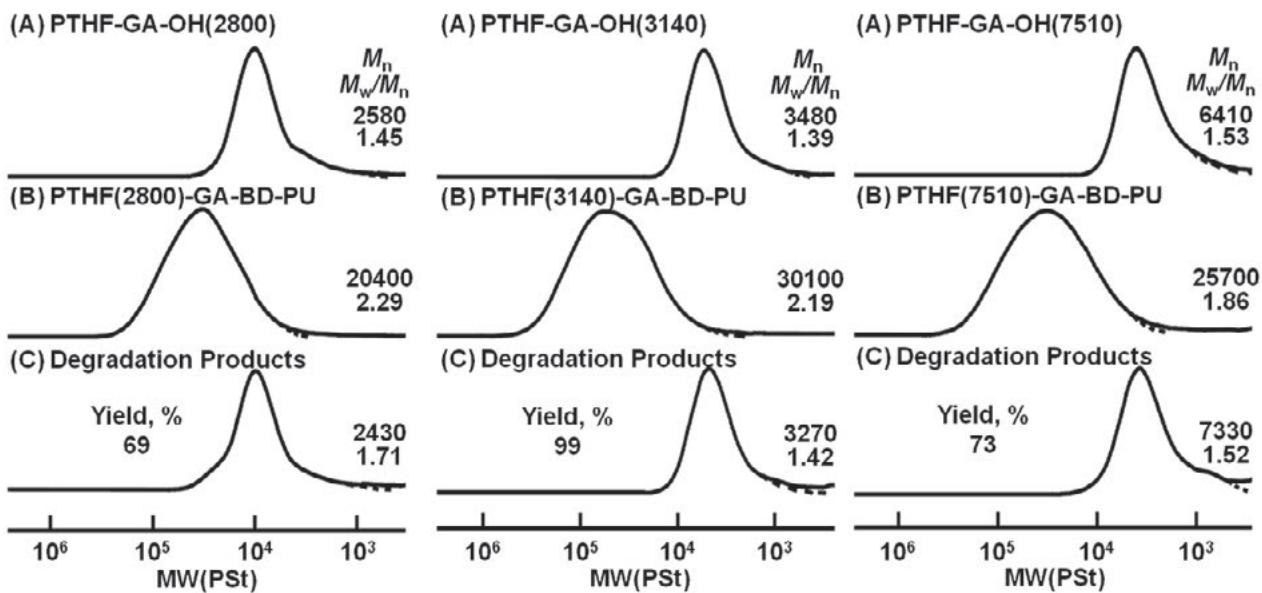
BD-PU は 327 °C, PTHF(3140)-GA-BD-PU は 332 °C, PTHF(7510)-GA-BD-PU は 346 °C であった。このように、合成されたポリウレタンの  $T_d$  はいずれも 330 °C 前後であり、熱的に安定であることがわかった。

### 3.4 ポリウレタン (PTHF-GA-BD-PU) の力学的性質

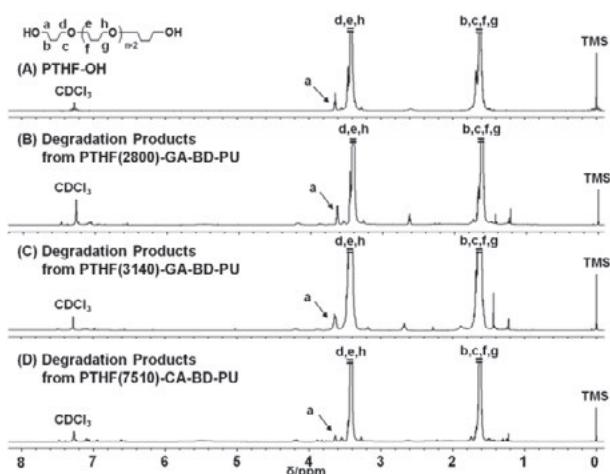
Figure 2 に PTHF-GA-BD-PU の引張試験の結果を示す。PTHF(2800)-GA-BD-PU は 100%伸張時の弾性率 ( $M_{100}$ ) は 0.738 MPa, 破断時の強度 ( $T_B$ ) は 1.38 MPa, 破断時の伸び ( $E_B$ ) は 446 % であった。PTHF(3140)-GA-BD-PU は 100%伸張時の弾性率 ( $M_{100}$ ) は 0.276 MPa, 破断時の強度 ( $T_B$ ) は 1.38 MPa, 破断時の伸び ( $E_B$ ) は 675 % であった。PTHF(7510)-GA-BD-PU はアニーリング操作後において膜の形状を維持できないほど軟化してしまったため測定はできなかった。この図から PTHF-GA-BD-PU はソフトセグメント鎖長が長くなるに従い、弾性率が減少する傾向を示した。次に、Figure 3 に PTHF-GA-BD-PU の動的粘弾性試験による貯蔵弾性率 ( $E'$ ) と損失正接 ( $\tan\delta$ ) の温度依存性を示す。PTHF(2800)-GA-BD-PU では 18 °C 付近でポリ(THF)ソフトセグメントの結晶の融解による急激な貯蔵弾性率の減少が見られ、24 °C ~ 64 °C 付近までゴム平坦領域を示した。PTHF(3140)-GA-BD-PU は 16 °C 付近でポリ(THF)ソフトセグメントの結晶の融解による急激な貯蔵弾性率の減少が見られ、22 °C ~ 76 °C 付近までゴム平坦領域を示した。また、それぞれの PTHF-GA-BD-PU におけるポリ(THF)ソフトセグメントの結晶の融解に



**Scheme 3.** Alkaline hydrolysis reaction of polyurethanes (PTHF-GA-BD-PU).



**Figure 4.** GPC curves of (A) Glycolate-containing poly(tetramethylene glycols) (PTHF-GA-OH), (B) glycolate-containing polyurethanes (PTHF-GA-BD-PU), and (C) CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>-soluble part of the degradation products.: the degradation reaction was carried out by hydrolysis with 0.05 mol/L-KOH in ethanol/THF (1/9 v/v) solvent at room temperature for 24h.



**Figure 5.** <sup>1</sup>H NMR spectrum of (A) PTHF-OH, (B) the dichloromethane-soluble part of the degradation products of PTHF(2800)-GA-BD-PU, (C) the dichloromethane-soluble part of the degradation products of PTHF(3140)-GA-BD-PU, (D) the dichloromethane-soluble part of the degradation products of PTHF(7510)-GA-BD-PU in CDCl<sub>3</sub>

より急激な貯蔵弾性率の減少の温度領域は、Table 6 に示す DSC により測定された融点とおおよそ一致した。

### 3.5 ポリウレタン (PTHF-GA-BD-PU) のアルカリ加水分解性

PTHF-GA-BD-PU を室温にて THF/エタノール混合溶液中 (9/1 v/v), 水の存在下で水酸化カリウムを 24 時間

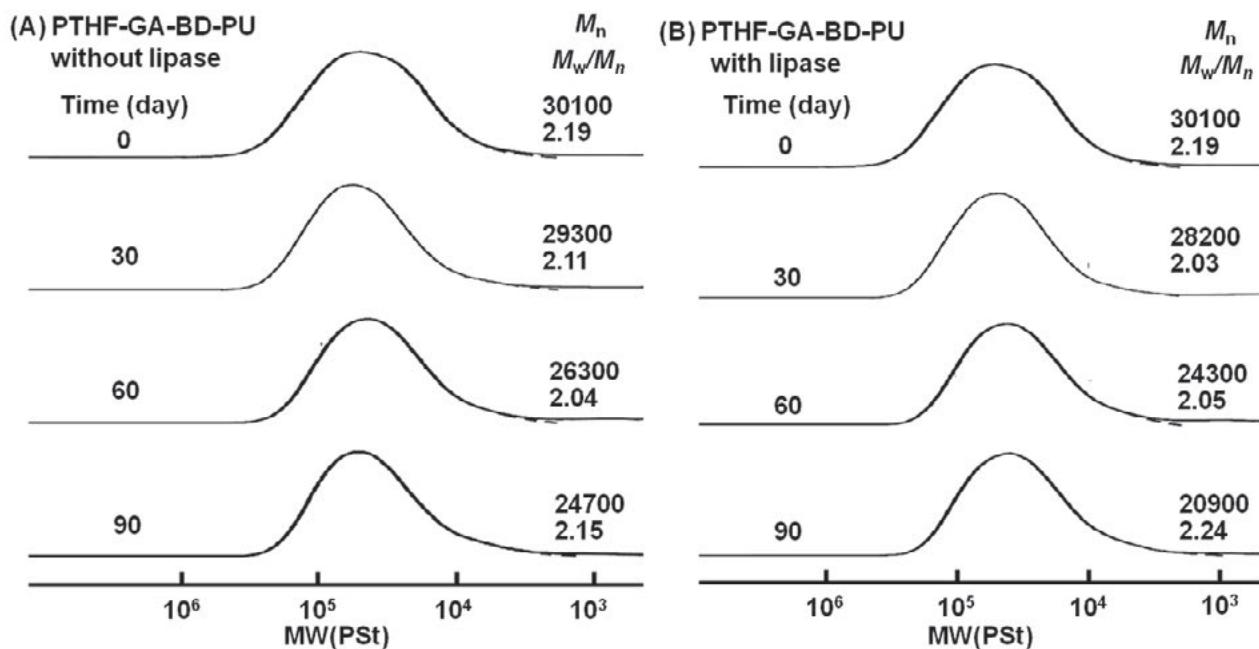
作用させた。Figure 4 にそれぞれの PTHF-GA-OH (A), PTHF-GA-BD-PU (B), そして PTHF-GA-BD-PU 分解の分解生成物の塩化メチレン可溶部 (C) の GPC により測定した分子量分布曲線を示す。Figure 4 の GPC カーブに示すように、塩化メチレン可溶部にはポリ(THF)のみが 70%以上という高収率で回収された。Figure 5 にそれぞれの塩化メチレン可溶部の <sup>1</sup>H NMR スペクトルを示す。いずれの分子量の抽出物においてもポリテトラメチレングリコールの特徴的な 3.64 ppm のピーク a が観測された。また、その他の構造由来のピークが観測されたことから、グリコール酸エステル結合を有するポリウレタンのエステル結合部位が加水分解し、ポリウレタンの原料ポリオールとなるポリテトラメチレングリコールが分離、回収できたと考えられる。

### 3.6 ポリウレタン (PTHF-GA-BD-PU) の酵素による加水分解性

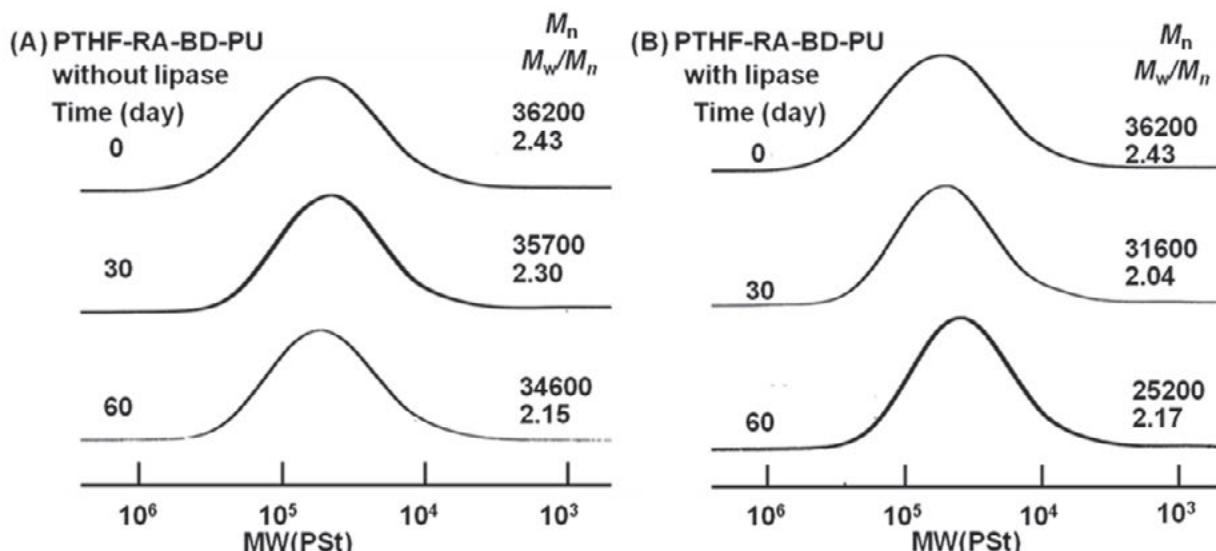
ポリウレタン PTHF-GA-BD-PU の酵素分解挙動の検討を行った。Figure 6 (A)に緩衝溶液中で処理した生成物の GPC により測定した分子量分布曲線を示す。代表試料として PTHF(3140)-GA-BD-PU を用いた。この図より、PTHF-GA-BD-PU は反応時間が経過するにつれて分子量の減少が見られ、わずかに加水分解反応が進行していることがわかった。また、Figure 6(B) に緩衝溶液中において酵素を作用させた生成物の GPC により測定した分子量分布曲線を示す。この図より、PTHF-GA-BD-PU は反応時間が増加するに従い、高分子量部の流出位置が低分子量領域にシフトしており、

分子量が減少していることがわかる。このことより、PTHF-GA-BD-PU は酵素によるエステル結合部位の加水分解反応が進行することがわかった。比較のため、Figure 7 に同条件下におけるリシノレイン酸エステル結合を有するポリウレタン(PTHF-RA-BD-PU<sup>[10]</sup>)の酵素分解挙動を、Figure 8 にエステル結合を有していないポリウレタン(PTHF-BD-PU)の酵素分解挙動を示す。PTHF-RA-BD-PU は PTHF-GA-BD-PU と同様に反応時間が増加するに従い、分子量が減少していることがわかる。一方、PTHF-BD-PU においては酵素の有無にか

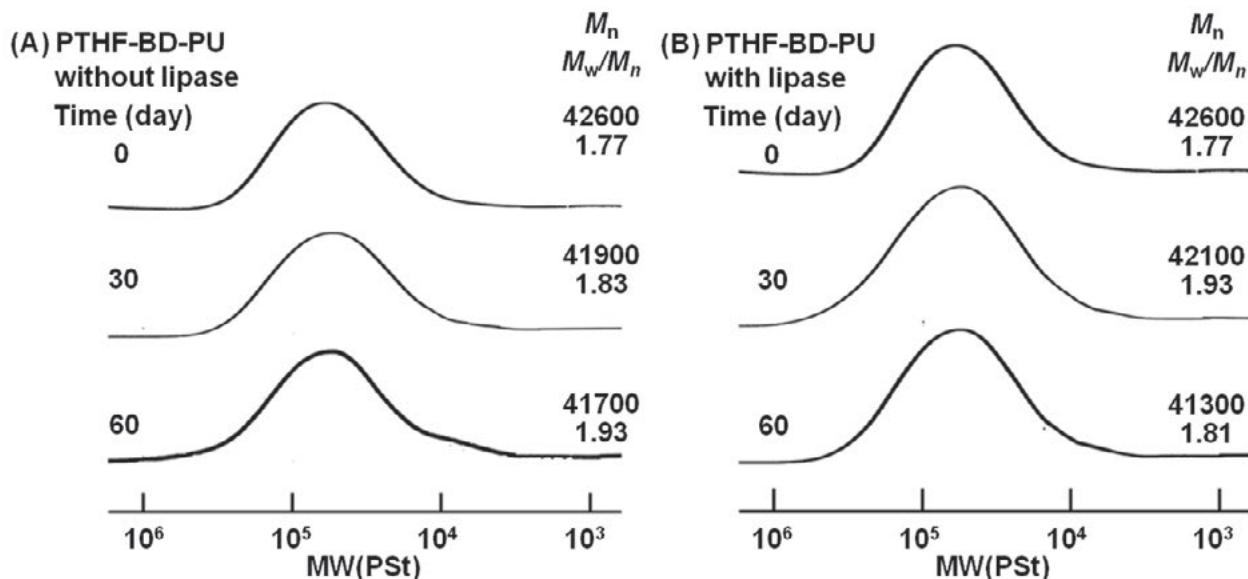
かわらず分子量分布の大きな変化は見られなかった。Table 7 にこれらの酵素分解の結果をまとめて示す。また、各条件における分解反応において、分子量の減少率( $M_{n,d}$ )を求めた。この減少率は、反応前のポリウレタンの数平均分子量に対する、分解反応による数平均分子量の減少量の割合より計算された値である。PTHF-GA-BD-PU における  $M_{n,d}$  は、90 日で 30.6% であった。一方で、PTHF-RA-BD-PU における  $M_{n,d}$  は、60 日で 30.4% であった。このことより、グリコール酸エステル結合を有するポリウレタンは、リシノレイン酸



**Figure 6.** Change in molecular weight distribution curves of the PTHF-GA-BD-PU measured by GPC; the degradation reactions were carried out in heterogeneous system using film specimens (10 mm x 10 mm; 1 mm thickness) with lipase (source : Phycomyces nitens) in phosphate buffer aqueous solution (pH 7.4) at 37 °C.



**Figure 7.** Change in molecular weight distribution curves of the PTHF-RA-BD-PU measured by GPC; the degradation reactions were carried out in heterogeneous system using film specimens (10 mm x 10 mm; 1 mm thickness) with lipase (source : Phycomyces nitens) in phosphate buffer aqueous solution (pH 7.4) at 37 °C.



**Figure 8.** Change in molecular weight distribution curves of the PTHF-BD-PU measured by GPC; the degradation reactions were carried out in heterogeneous system using film specimens (10 mm x 10 mm; 1 mm thickness) with lipase (source : Phycomyces nitens) in phosphate buffer aqueous solution (pH 7.4) at 37 °C.

エステル結合を有するものよりも酵素による加水分解反応が遅く進行することがわかった。

#### 4. 結 論

汎用ポリウレタンゴム・弾性繊維の原料ポリオールとして広く利用されているポリテトラメチレングリコールの分子中にグリコール酸エステルを導入した新規ポリオールを合成し、得られたポリオールを用いて、

分子中に周期的に分解性のエステル結合を有するポリウレタンを合成した。分解性エステル結合を有する新規ポリウレタンは高い熱的安定性を有することがわかった。

アルカリの作用による加水分解反応条件においてポリウレタン分子中のエステル結合が分解し、分解生成物から原料であるポリテトラメチレングリコールを高収率で回収することができた。したがって、PTHF-GA-BD-PU はケミカルリサイクルが可能なポリ

**Table 7.** Degradation of PTHF-GA-BD-PU, PTHF-RA-BD-PU, and PTHF-BD-PU: Change in Number-Average Molecular Weight ( $M_n$ ), Polydispersity ( $M_w/M_n$ ) and Decreasing ratio of  $M_n$  ( $M_{n,d}$ )

	Reaction Time (day)	Hydrolysis in Buffer Solution <sup>a)</sup>			Enzymatic Hydrolysis in Buffer Solution <sup>b)</sup>		
		$M_n$ <sup>c)</sup>	$M_w/M_n$ <sup>c)</sup>	$M_{n,d}$ <sup>d)</sup>	$M_n$ <sup>c)</sup>	$M_w/M_n$ <sup>c)</sup>	$M_{n,d}$ <sup>d)</sup>
 PTHF-GA-BD-PU	0	30100	2.19	0	30100	2.19	0
	30	29300	2.11	2.7	28200	2.03	6.3
	60	26300	2.04	12.6	24300	2.05	19.3
	90	24700	2.15	17.9	20900	2.24	30.6
 PTHF-RA-BD-PU	0	36200	2.43	0	36200	2.43	0
	30	35700	2.30	1.4	31600	2.04	12.7
	60	34600	2.15	4.4	25200	2.17	30.4
	90	-	-	-	-	-	-
 PTHF-BD-PU	0	42600	1.77	0	42600	1.77	0
	30	41900	1.83	1.6	42100	1.93	1.2
	60	41700	1.93	2.1	41300	1.83	3.1
	90	-	-	-	42500	1.82	0.2

a) The degradation reaction was carried out in heterogeneous system using film specimens (10 mm x 10 mm; 1 mm thickness) without lipase in phosphate buffer aqueous solution (pH 7.4) at 37 °C.

b) The degradation reaction was carried out in heterogeneous system using film specimens (10 mm x 10 mm; 1 mm thickness) with lipase (source : Phycomyces nitens) in phosphate buffer aqueous solution (pH 7.4) at 37 °C.

c) Measured by GPC with polystyrene calibration.

d)  $M_{n,d} = (M_{n0} - M_{nx})/M_{n0} \times 100 [\%]$ ,  $M_{n0}$  : Sample's  $M_n$  before degradation,  $M_{nx}$  : Sample's  $M_n$  after degradation.

ウレタン材料として期待される。また、水中でリバーゼ酵素を作用させると、分解反応が進行することがわかった。この分解反応の進行はエステル結合を持たない従来のポリウレタンでは見られない挙動であることから、酵素の作用によりエステル結合部位のみが分解していると考えられる。また、PTHF-GA-BD-PU は、PTHF-RA-BD-PU と比較すると酵素による加水分解反応が遅く進行することがわかった。

### 参考文献

- [1] J. Scheirs: *Polymer Recycling*, John Wiley & Sons, Chapter 10, 339 (1998).
- [2] 橋本 保: 高分子, 57, 350 (2008).
- [3] T. Hashimoto, H. Mori and M. Urushisaki, *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, 46, 1893 (2008).
- [4] T. Hashimoto, A. Umehara, M. Urushisaki and T. Kodaira, *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, 42, 2766 (2004).
- [5] 橋本 保 三澤蔵充 漆崎美智遠: 高分子論文集 65, 178 (2008).
- [6] D. Randall and S. Lee: *The polyurethanes book*, Wiley, Chapter 1, 1 (1987).
- [7] 松永勝治 編, 最新ポリウレタン材料と応用技術—ポリウレタン創製への道—, シーエムシー出版, 第2編 第2章, 145 (2005).
- [8] 有機微量分析研究懇談会編, 有機微量定量分析, 南江堂, 452 (1969).
- [9] T. Hashimoto, K. Takeda and T. Kodaira: *J. Macromol. Sci., Pure and Appl. Chem.*, A37, 293 (2000).
- [10] 萩輪岳郎, 漆崎美智遠, 阪口壽一, 橋本 保: 福井大工報, 59, 61 (2011).



## 空き家の管理条例及び解体事業の全国的動向

尾野 加朱実\* 内田 洋紀\*\* 菊地 吉信\*

### Domestic Movements of Management Ordinance and Demolition Programs for Vacant Houses

Kasumi ONO\*, Hironori UCHIDA\*\* and Yoshinobu KIKUCHI\*

(Received February 3, 2017)

Many vacant houses could bring danger to surrounding and neighboring residents. For that reason, "Act on Special Measures to forward municipalities' moves for the Promotion of Vacant Houses" was enforced in 2015. This paper aims to clarify the actual conditions of the management regulation and the demolition program by the municipalities. The number of the management regulation and the demolition program has been increasing, and the demolition programs were grouped into seven types, although the present state is transitional period of response to the Act.

**Key Words :** Vacant houses, Proper management, Regulation, Demolition, Program

#### 1. はじめに

国土交通省の調査によると、今後使う予定の無い空き家(その他の空き家)は空き家全体のおよそ4割を占め、そのうちの約7割は腐朽破損があり、周辺環境や近隣住民に危険を及ぼす可能性のある空き家(以下「老朽危険空き家」)であるとの推計も出されている<sup>[1]</sup>。2015年5月26日には「空家等対策の推進に関する特別措置法」(以下「空家特措法」)が完全施行され、税情報を空き家所有者等の特定に活用できるようになるなど、老朽危険空き家対策の進展が期待されている。また、法律や条例の整備と並行して、全国の自治体で空き家の管理や解体を促す事業が行われており、今後もそういった取り組みが増えていく事が予想される。

そこで本研究は、近年の自治体による空き家対策の動向を把握するため、空き家の管理条例及び解体事業に焦点を当てる。空家特措法の施行に伴う条例

の動向と、空き家解体事業の実施状況を明らかにし、自治体による空き家対策のあり方について考察する。

空き家の管理条例や解体事業に関する先行研究は近年多くなっており、篠部らや小川、占部らによる空き家の管理条例や解体事業の現状と課題を研究したもの<sup>[2]~[6]</sup>や、清水らや中込ら、三信ら、篠部による空き家解体事業を行った後の跡地利用について調査したもの<sup>[7]~[10]</sup>、富永らによる空き家管理条例と空き家関連施策との連携を調査したもの<sup>[11]</sup>、北村による空家特措法成立後の自治体の対応について考察したもの<sup>[12]</sup>等さまざまな観点から研究されている。本研究はこれら先行研究を参考にしつつ、空家特措法の施行前後の自治体の全国的な動向について明らかにする。

#### 2. 研究の方法

本研究はまずインターネット及び文献調査により情報を収集した上で、解体事業について自治体向けアンケート調査を行う。2段階の調査により、空き家の管理条例及び解体事業の現状を明らかにする。

##### 2.1 管理条例についての調査

まず、2014年8月1日~10月31日(第一回調査)

\*大学院工学研究科建築建設工学専攻

\*\*株式会社サンワコン

\*Architecture and Civil Engineering Course, Graduate School of Engineering

\*\*Sanwacon Co.,Ltd

と 2015 年 7 月 7 日～2016 年 1 月 4 日(第二回調査)の期間にインターネット検索エンジン「Google」での「空き家等 適正管理」というキーワード検索及び国土交通省による都道府県への調査結果<sup>[13]</sup>から文献調査を行い、全国の空き家管理条例を抽出し 2 時点間の変化を見た。さらにその後の動向を把握するため、2016 年 5 月 12 日～9 月 6 日(第三回調査)に同様の調査を行った。

## 2.2 解体事業についての調査

インターネット検索エンジン「Google」での「空き家 解体」「空き家 撤去」「空き家 除去」「空家解体」「空家 撤去」「空家 除去」というキーワード検索により、2015 年 11 月までに老朽危険空き家解体事業を行っている又は過去に行っていたとみられる全国の自治体の情報を収集し、241 自治体を得た。次に、2015 年 12 月に 241 自治体を対象にアンケート調査を実施した。調査の内容は①空き家の実態把握について②空き家解体事業について③今後の空き家解体事業及び空き家対策についてで、147 自治体(156 事業)から回答があり回収率は約 61% であった。

## 3. 空き家管理条例の全国的動向

### 3-1. 設置自治体

今回の調査によれば、第三回調査時(2016.9)には 461 自治体で空き家管理条例が設置されている。第二回調査時(2016.1)と、第一回調査時(2014.10)では、それぞれ 439 自治体、380 自治体であったため、条例設置自治体数が徐々に増加していることが分かった<sup>[1]</sup>。全国の総自治体数 1,718 に対し約 1/4 の自治体が条例を設置することになる。

図 1 に設置年別の件数を示す。これを見ると平成 24 年以降急速に条例の数が増加しているが、平成 27 年から増加率は低くなっている。これは空家特措法の施行により、条例を設置する自治体が減少したためと考えられ、今後も減少すると予想できる。

図 2 は都道府県ごとの総自治体数に対する条例設

置自治体数の割合を示したものである。日本海側で、特に国交省により全域豪雪地帯に指定されている県ほど割合が高い傾向にある。また、空家特措法施行前の第一回調査時(2014.10)と施行後の第二回調査時(2016.1)を比較すると、多くの都道府県で割合が増加している一方、変化なしの都道府県も 13 あった。さらに、第二回調査時(2016.1)と第三回調査時(2016.9)を比較すると、減少した県が 4、変化なしの県が 21 と、空家特措法施行後における各自治体の対応にばらつきがある。

### 3-2. 空家特措法への対応

空家特措法の施行により既設の管理条例の内容を改正する自治体が出てきている。第一回調査時(2014.10)に把握した 380 自治体のうち条例内容を変更した自治体は、第二回調査時(2016.1)で 35 件、さらに第三回調査時(2016.9)で 67 件あり、全 380 自治体の 2 割弱が変更している。また、空家特措法の施行から時間が経過するにつれ条例内容を変更する自治体が増加していることがわかる。

条例の変更程度と自治体数の推移を図 3 に示す。条例内容の一部改正を行った自治体が第三回調査時(2016.9)で 40 件と多く、既存の空き家管理条例を活用しつつ空家特措法へ整合させようという傾向にあることが窺われる。

さらに表 1 では、条例変更を行った自治体の例を主な変更点と併せて示している。これをみると、一

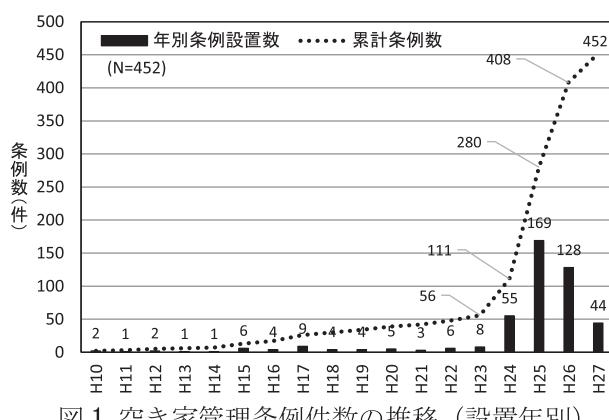


図 1. 空き家管理条例件数の推移（設置年別）

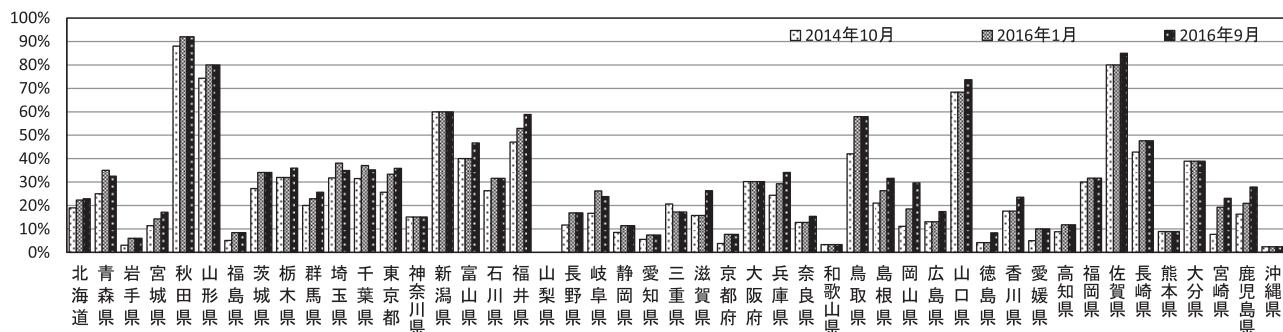


図 2. 都道府県別空き家管理条例設置市区町

部改正を行った武雄市(佐賀県), 鳥取市(鳥取県)では, 改正の前後でいずれも「助成」「寄附」の項目が盛り込まれている。これら2つの項目は, 空家特措法では規定されていない自治体独自の内容である。その理由として, 鳥取市のホームページには「法律には助成, 寄附の受け入れ等, 行政支援についての規定がないことから, 法律のみで対応することは早期解決につながらないと思われる」との記述があり, 法律では対応できない部分を条例で補完することが意図されている。武雄市の対応についても同様と考えられる。一方で, 市川市(千葉県)のように条例は継続して設置するものの内容は全改正を行い空家特措法への対応を図る自治体や, 三次市(広島県)のように既存の条例を廃止した上で新たに空家特措法の内容を盛り込んだ条例を設置する自治体もある<sup>2)</sup>。豊後高田市(大分県)は条例を廃止し, 以降は法律に基づき対応することとしている。

こうした対応の違いが生じている原因は, 現時点では法律が施行されて間もないことや, 自治体により空き家対策の整備状況にばらつきがあるため, 対策が進んでいるところは運用実態に合わせ, 遅れているところは法律に合わせるように変更していることだと推察される。また, 条例の変更を行わず, 法律と併存させている自治体は, 住民に混乱を与える可能性もあると指摘されており, 対策が求められる。いずれにせよ, 今後も条例の見直しにより空家特措法へ対応する自治体は増加すると考えられる。

#### 4. 老朽危険空き家解体事業の全国的動向

##### 4-1. 全国的な事業実績

アンケート調査に有効回答のあった147自治体155事業<sup>3)</sup>について, 図4に開始年別の事業数を示す。これを見ると, 平成23年より急速に事業開始数が増加しており, 老朽危険空き家解体事業が増加傾向にあることが分かる。これは, 平成22年に全国初の空き家管理条例の制定(所沢市)に伴い, 空き家への関心が高まってきたためであろう。ただし, 平成27年度の事業開始数はそれ以前に比べ, 数が減少している。これは, 平成27年5月に空家特措法が完全施行され, 空き家対策の基盤となる部分(実態調査や, 空き家管理条例・判断基準の見直し等)への対応が優先されたためと推察される。

また, 図5は, 2011年度から2015年度にかけての事業に関する住民からの相談件数と事業実施済み棟数を示した図である。相談件数と実績の増加率には大きな差があり, 2012年以降, 実績は相談件数のおよそ半数しか満たしていない。さらに, 相談件数

について記録を採っていない自治体もあり, 実際はさらに多くの相談があると考えられる。つまり, 老朽危険空き家解体事業を全体的に見ると, 住民による相談は増加しているが, 解体事業ではそれすべてに対応できていない。ただし相談の増加は一方で, 空き家に対する住民の意識が高まっていることの証左ともみることもできる。

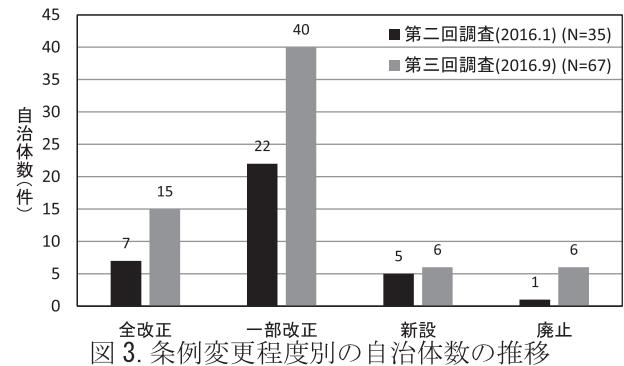


表1. 主な変更点(例)

変更した自治体例	武雄市(佐賀県)		鳥取市(鳥取県)		市川市(千葉県)		豊後高田市(大分県)		三次市(広島県)		
	項目	前	後	項目	前	後	項目	前	後	項目	
助言・指導	●	-	●	-	●	-	●	-	●	●	
勧告	●	-	●	-	●	-	●	-	●	●	
命令	●	-	●	-	●	-	●	-	●	●	
公表	●	●	●	●	●	-	●	-	●	●	
代執行	●	-	-	-	●	-	-	-	-	●	
罰則	-	-	●	-	-	-	-	-	-	●	
審議会	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
支援	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	
助成	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-	
補助	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
寄付	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-	
変更程度	一部改正	一部改正	全改正	廃止	廃止新設	凡例 ●:項目あり -:項目なし					

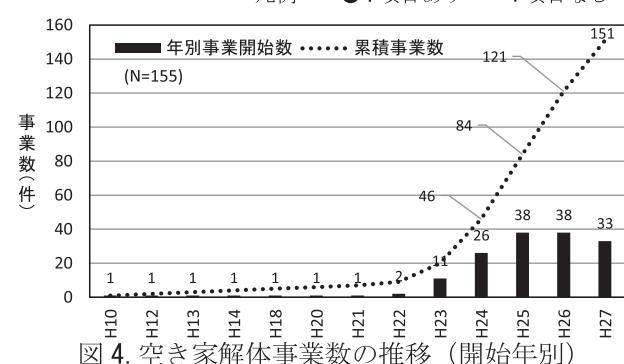


図4. 空き家解体事業数の推移(開始年別)

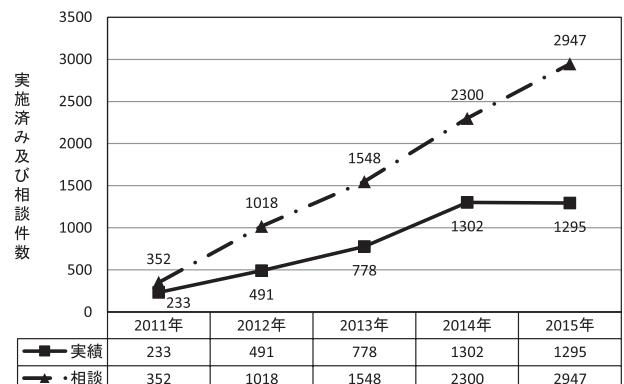


図5. 事業相談件数と事業実施済み件数の推移

#### 4-2. 空き家解体事業の分類

アンケート調査に有効回答のあった 147 自治体について、事業タイプを 7 つに分類する。各タイプの説明と該当する自治体数を表 2 に示す。これをみると、老朽危険空き家解体事業の大部分を単純補助型事業が占めていることがわかる。

事業の目的は、全体的には自然災害や居住環境の向上を目的とする事業が多い一方で、土地の利用や適正な課税といったことを目的とする事業もあり、様々な面からのアプローチがなされている。

表 2. 事業タイプ

事業タイプ	説明	自治体数
I 単純補助型	自治体が所有者に解体費用の一部を補助する	123
II 地域連携補助型	自治体が所有者に解体費用の一部を補助し、跡地は自治体が借り受ける	2
III 土地建物寄贈型	自治体が土地建物の寄付を受け、自治体が建物を解体する	6
IV 固定資産税減免型	所有者が空き家を解体した際に、当該敷地に係る固定資産税を減免する	3
V 自治会主導型	自治会が空き家を解体する際に、自治体が解体費用の一部を補助する	3
VI 複合型	I ~ V のタイプの事業を複数行っている	9
VII その他	上記以外のもの	1

\* I, V 型のみ評価未回答がそれぞれ 6, 1 自治体あるため計 140 自治体

#### 4-3. 事業評価

図 6 は、アンケート回答者すなわち各自治体の事業担当職員による事業評価の平均値を示した図である。6 項目各 5 段階評価で「不十分」が 1、「十分」が 5 である。図 6 より「職員の人手」の項目が最も低い評価であり、空き家解体を進める上で、自治体職員の負担が大きいことが推察される。続いて「職員の専門的知識」、「事業の財源」の評価が低く、現状では事業を進めるための資源が十分でないといえる。

次に、事業評価 6 項目による主成分分析を行った

結果を図 7 に示す。第一主成分を「総合的評価の高低」、第二主成分を「事業効果の外部 - 内部」とした。さらにクラスター分析を行い、自治体を「C1. 総合的評価 高」「C2. 外部効果 高」「C3. 標準」「C4. 総合的評価 低」の 4 つのクラスターに分類した。

事業タイプと各クラスターを比較した結果、I. 単純補助型は全体に広く分散し、その評価も様々である。II. 地域連携補助型の 2 自治体はそれぞれ C2, C4 に分類され、周囲への影響を評価しているかどうかにより担当者の評価に差異が生じたと考えられる。一方、IV. 固定資産税減免型は 3 自治体が C1, C3, C4 にそれぞれ分類された。C1 と C4 に分類された A 町と B 市では、実績の件数は 3 件と 2 件で差は無いが、事業の評価では 6 項目すべてで 2 段階以上の差異が見られた。また、全体としては、II ~ VII の型の 23 自治体が C1:3, C2:3, C3:5, C4:12 と分散して分類されていることから、事業タイプと評価には明確な関連が無い。これは自治体が地域に合った事業タイプを選択する必要があることを示していると考え

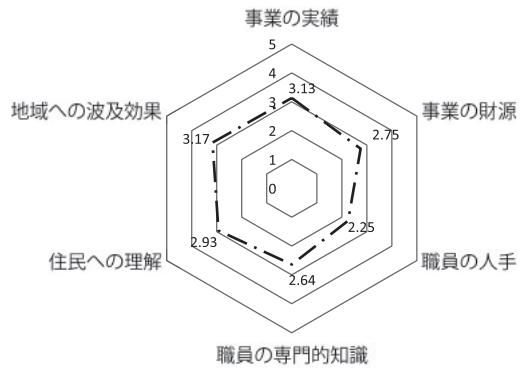


図 6. 全体評価の平均

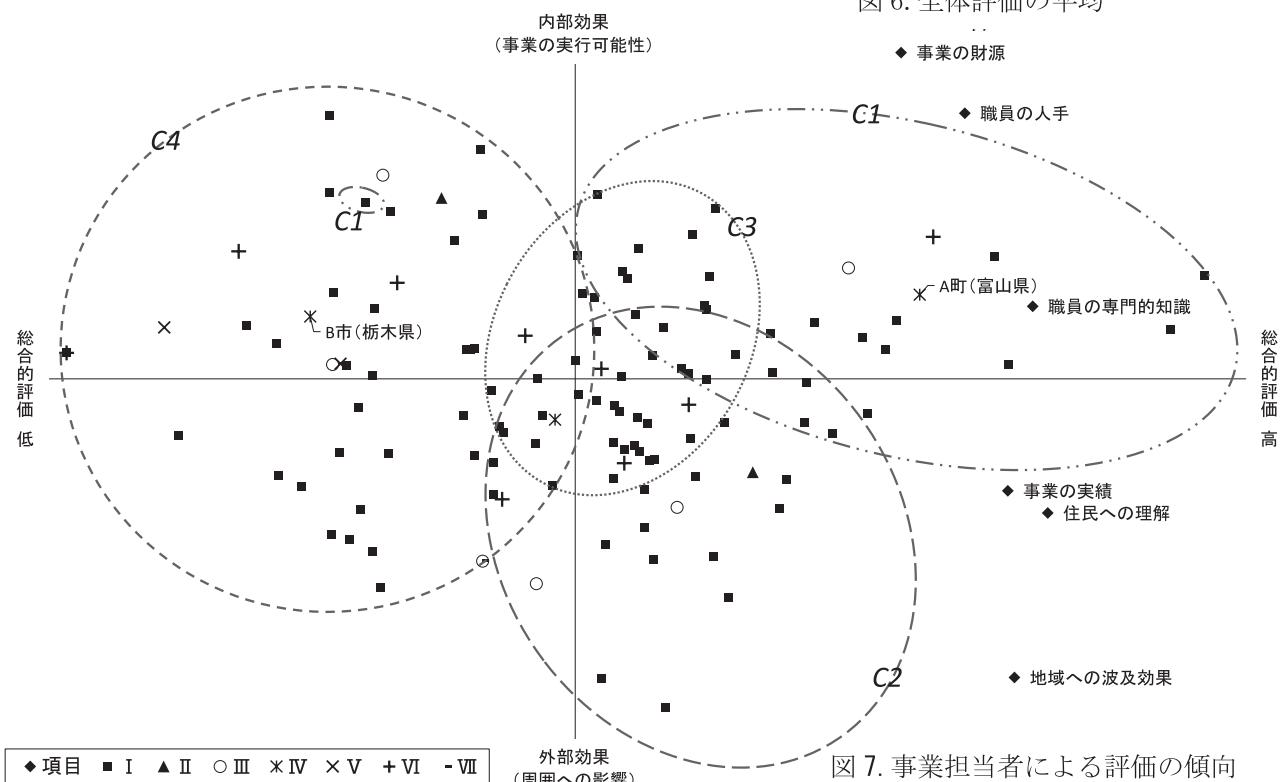


図 7. 事業担当者による評価の傾向

られるが、総合的評価の低いC4に半数以上の12自治体が分類されていることから、現状では課題も多いと考えられる。

アンケートでは今後の課題として、多くの自治体が所有者特定や資力のない所有者へどう対応していくのかという点、自治体内部の組織作り、人員の確保や、民間との連携など体制作りという点が挙げられた。しかし、その一方で、本来は個人が責任を負うべき空き家に公的な補助を行うことに対して、疑問を投げかける声もあった。

## 5.まとめ

本研究により得られた主な知見を以下にまとめる。  
①空き家管理条例の動向

各自治体は現在、空き家管理条例と空家特措法を対応させている期間とみられ、条例の変更の有無や程度など差異が見られた。今後、先行的に対応した自治体に倣い対応を進める自治体が増えていくことや、それに伴う対応のパターン化が予想される。また、空き家管理条例の変更を行わない自治体は、空家特措法と空き家管理条例を併存させることになる。このような法律と条例両方の規制がされた状態では住民に混乱を与える可能性があり、住民にとってわかり易い制度とする必要がある。

### ②空き家解体事業の特徴と評価

空き家解体事業を7タイプに分類できた。事業の全体評価は職員の人手不足を感じている行政担当者が多い。さらに事業タイプによらず自治体により事業の評価にばらつきがあることから、地域の実情に合った事業の選択や住民への周知が重要である。

## 6.今後の課題

今後の課題としては、空家特措法施行以降の空き家の管理条例や解体事業の動向を引き続き注視すると同時に、民間企業で行われている空き家管理ビジネスや、全国で続々と商品化されてきている空き家解体ローンについても動向を把握し、総合的な空き家の管理・解体施策の構築につなげる必要がある。

### 〈注釈〉

- 1)2014年4月1日国土交通省の調査では355と報告されている。
- 2)空き家条例を廃止新設したものの中には、既存の条例内容の中の空き家に関する部分のみを廃止し、新たに条例を設置している自治体も含む。

3)事業の開始年について未回答の事業が1件あったため、有効回答数は147自治体155事業となった。

### 〈参考文献〉

- [1]国土交通省社会資本整備審議会住宅宅地分科会 第42回、配布資料(2015)  
(<http://www.mlit.go.jp/common/001107436.pdf>)  
(2015.10.28 アクセス)
- [2]篠部裕、占部智大：人口減少時代の空き家の整備に関する研究—その3 空き家の適正管理条例の現状と課題、日本建築学会中国支部研究報告集36, 767~770(2013)
- [3]篠部裕、占部智大：空き家の適正管理条例の現状と課題—東日本の地方自治体を事例として、日本建築学会技術報告集20-45, 723~726(2014)
- [4]小川宏樹：空き家管理条例における不良空き家の判定基準および情報収集手段に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集計画系54, 605~608(2014)
- [5]篠部裕、宮地敬士：空き家の解体除去施策の現状と課題—西日本の地方自治体を事例として、日本建築学会技術報告集18-39, 709~714(2012)
- [6]占部智大、篠部裕：人口減少時代の空き家の整備に関する研究—その4 空き家解体除去事業の実態と課題、日本建築学会中国支部研究報告集36, 771~774(2013)
- [7]清水陽子、中山徹、前根美穂：長崎市における空き家対応事業について、日本建築学会近畿支部研究発表会, 413~416(2011)
- [8]中込幸人、高見沢実、野原卓：人口減少時代の空き家対策—解体目的の対応策とその跡地利用に着目して—、横浜国立大学学位論文(修士)(2013)
- [9]三信篤志、篠部裕：空き家の解体除去整備に関する研究—呉市危険建物除去促進事業を事例として—、都市計画論文集49-3, 357~362(2014)
- [10]篠部裕：空き家の解体除去に伴う跡地活用の現状と課題、日本建築学会学術講演梗概集(関東), 129~132(2015)
- [11]富永麻倫、姥浦道生：自治体空き家管理条例による空き家の管理対策に関する研究—横手市空き家等の適正管理に関する条例を中心として—、都市計画論文集48-3, 723~728(2013)
- [12]北村喜宣：空き家対策特措法の成立を受けた自治体対応、自治実務セミナー(2015)
- [13]国土交通省による都道府県への聞き取り調査結果(H25.1, H25.10, H26.4, H27.4)



# 離散空間上における位相点作用素のシンプレクティック共変性

渡辺大輔\* 柴田喬之\* 橋本貴明\*

Symplectic Covariance of Phase Point Operator on Discrete Space  
Daisuke WATANABE\*, Takayuki SHIBATA\* and Takaaki HASHIMOTO\*

(Received February 3, 2017)

The phase point operator  $\Delta(q, p)$  is a quantum counterpart of classical phase point  $(q, p)$ . Its discrete version was formulated for an odd number of lattice points by Cohendet et al. and even case by Leonhardt. They both have symplectic covariance which is of fundamental importance in quantum mechanics. But its explicit form of the projective representation of the symplectic group which appears in the covariance relation is not yet known. We show in this paper the existence and uniqueness of the representation and a method to construct it using the Euclidean algorithm.

**Key Words :** Discrete space, Phase point operator, Symplectic group, Covariance, Group representation

## 1. 緒 言

1932年にWignerによってWigner関数が発見され、熱力学の量子補正の研究に導入された<sup>[1]</sup>。近年では量子光学や量子カオス、量子計算などの分野でWigner関数が応用され、特に量子-古典対応が重要な研究において再び注目を集めている。一方、離散空間上のWigner関数の歴史は比較的新しく、1987年のWoottersによって素数の格子点からなる離散空間上に対して<sup>[2]</sup>、また同年Cohendet et al.により整数スピンに対応する奇数個の格子点からなる離散空間上(奇数次元の離散空間上)の場合に定式化された<sup>[3]</sup>。偶数個の格子点からなる離散空間上でのWigner関数の振る舞いは奇数の場合とは大きく異なり、その後1995年にLeonhardtは半整数スピンに対応する偶数次元の離散空間上にWigner関数を構成したが、仮想的な自由度(ghost variable)を取り入れる必要があった<sup>[4]</sup>。

Wigner関数は運動量方向に積分すると位置方向の分布関数に、位置方向に積分すると位置のFourier変換で与えられる運動量方向の分布関数となり(周辺則)，分布関数としての振る舞いを示す。しかし、その値は負

にもなる為、擬分布関数と呼ばれている。また、この周辺則を満たす関数は複数あるが、連続空間の場合、回転対称性を考えるとWigner関数が一意に決まることが知られている。

シンプレクティック変換は正準交換関係を不变にするため、量子力学において重要な対称性となっている。連続空間上や奇数次元の離散空間上では、Fourier作用素で挟むと90度回転する(シンプレクティック変換の一部である)という線形の正準変換の中で一番簡単なFourier共変性が既に知られている。本論文では、奇数、偶数次元の離散空間上でCohendet et al. や LeonhardtによるWigner関数から導かれる位相点作用素が、シンプレクティック共変性を満たすこと、またそのようなシンプレクティック変換の群の射影表現が存在し、かつ唯一であることを示す。

以下1~5章では、離散空間上での位相点作用素の基礎的事項について述べる。6章では、シンプレクティック共変性について説明する。7章では、シンプレクティック共変性に必要なシンプレクティック変換の群を離散空間上で定義し、それが2つの元( $h_+$ ,  $h_-$ )から生成されることを示す。8章では、シンプレクティック群のユニタリ射影表現  $U(S)$  が存在し、更に一意的であることを証明する。9章では、7章で示した2つの元から低い奇数次元の離散空間上において  $U(h_+)$ ,  $U(h_-)$  を必要条件から求め、一般の奇数次元での形を予想する。

\*大学院工学研究科物理工学専攻

\*Applied Physics Course, Graduate School of Engineering

そしてその予想した形が、位相点作用素をシンプレクティック共変性を満足することを確認する(十分性の確認)。10章では、9章と同様に偶数次元の離散空間上において  $U(h_+), U(h_-)$  を必要条件から求めるが、7章で定義したシンプレクティック変換の群では射影表現を満足していないことが分かった。そこで改めて仮想的な自由度(ghost variable)を考慮し、格子点の数を2倍としたシンプレクティック変換の群を再定義し、一般の偶数次元でシンプレクティック共変性を満足する  $U(h_+), U(h_-)$  を決定した。

## 2. 連続空間上の Wigner 関数

### 2.1 Wigner 関数

Wigner 関数はもともと古典的な位相空間上の関数であり、一般的には次のように定義される。

$$\mathcal{W}(q, p) = \frac{1}{2\pi\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} dr e^{ipr/\hbar} \psi^*(q + \frac{r}{2}) \psi(q - \frac{r}{2}) \quad (1)$$

これを運動量方向と位置方向にそれぞれ積分すると、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{W}(q, p) dp = |\psi(q)|^2 \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{W}(q, p) dq = |\tilde{\psi}(p)|^2 \quad (3)$$

となる。すなわち、Wigner 関数を運動量方向に積分すると位置方向の分布関数、位置方向に積分すると位置の Fourier 変換で与えられる運動量方向の分布関数になり、いわゆる周辺則を満たしている。このことから Wigner 関数は、量子力学的な分布関数に相当するものであることが分かる。しかし、その値は負にもなることから擬分布関数と呼ばれている。

### 2.2 位相点作用素

Wigner 関数から導かれる、状態によらない構造的な部分を位相点作用素  $\Delta(q, p)$  と定義する。

$$\mathcal{W}(q, p) = \frac{1}{2\pi\hbar} \text{Tr}[\rho \Delta(q, p)] , \quad \rho = |\psi\rangle\langle\psi| \quad (4)$$

具体的に座標表示では

$$\Delta(q, p) = \int_{-\infty}^{\infty} dr e^{ipr/\hbar} |q + \frac{r}{2}\rangle\langle q - \frac{r}{2}| \quad (5)$$

となり、運動量表示では

$$\Delta(q, p) = \int_{-\infty}^{\infty} ds e^{-iqs/\hbar} |p + \frac{s}{2}\rangle\langle p - \frac{s}{2}| \quad (6)$$

となる。

これらの作用素を用いて、次のように古典的なハミルトニアンを Weyl 順序で正準量子化したハミルトニアンに変換することができる。

$$\hat{\mathcal{H}}(\hat{q}, \hat{p}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dq dp \mathcal{H}(q, p) \Delta(q, p) \quad (7)$$

このため位相点作用素  $\Delta(q, p)$  は古典的位相点  $(q, p)$  に対応する量子的な作用素と考えられる。

また、位相点作用素は Wigner 関数の周辺則に対応して

$$\int_{-\infty}^{\infty} dp \Delta(q, p) = |q\rangle\langle q| \quad (8)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} dq \Delta(q, p) = |p\rangle\langle p| \quad (9)$$

を満たす。位相点作用素を考える利点として、量子化的対象を拡大できることが挙げられる。

## 3. Cohendet et al. による Wigner 関数と位相点作用素・Weyl 作用素

ここからは離散空間上の Wigner 関数について述べる。

本章では、Cohendet et al. が奇数個の格子点からなる離散空間上(奇数次元の離散空間上)に構成した Wigner 関数と、そこで用いられる位相点作用素と Weyl 作用素について述べる<sup>[3]</sup>。

### 3.1 Weyl 作用素の定義

Cohendet et al. は奇数次元の離散空間上に Wigner 関数を構成するにあたり、まず Weyl 作用素を定義している。そのオリジナルの定義式が次式である。

$$(W^{C'}_{m,n} \varphi)(k) = \exp\left(-\frac{4\pi imn}{N} + \frac{4\pi ink}{N}\right) \times \varphi(k - 2m) \quad (10)$$

ここで、 $m, n, k \in I = \{-\frac{N-1}{2}, -\frac{N-3}{2}, \dots, \frac{N-3}{2}, \frac{N-1}{2}\}$  であり  $N$  を法として考える。

### 3.2 演算子の定義

位相演算子、シフト演算子、反転演算子を以下、計算の便宜の為次のように定める。

位相演算子  $Q$  は次式のように定義される行列である。

$$Q = \sum_k |k\rangle\omega^k\langle k| \quad (11)$$

ここで、1の原子  $N$  乗根を  $\omega$  としている。

$$\omega = \exp\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \quad (12)$$

次にシフト演算子  $P$  は次式のように定義される行列である。

$$P = \sum_k |k-1\rangle\langle k| \quad (13)$$

これら  $Q, P$  には交換関係として次式のような関係が導かれる。

$$PQ = \omega QP \quad (14)$$

また, 反転演算子  $T$  は次式のように定義される行列である.

$$T = \sum_k | -k \rangle \langle k | \quad (15)$$

先ほどの Weyl 作用素を  $I$  のインデキシングにおいて位相演算子とシフト演算子を用いて表すと,

$$W^{C'}_{m,n} = \omega^{-2mn} Q^{2n} P^{-2m} \quad (16)$$

となる.

### 3.3 位相点作用素の定義

Cohendet et al. は次に, 式(16)の Weyl 作用素の  $T$  変換として位相点作用素を定義している.

$$\Delta^C_{m,n} = W^{C'}_{m,n} T = \omega^{-2mn} Q^{2n} P^{-2m} T \quad (17)$$

この位相点作用素は以下のような性質をもつ.

$$\Delta^{C\dagger}_{m,n} = \Delta^C_{m,n} \quad (18)$$

$$(\Delta^C_{m,n})^2 = \mathbf{1}_N \quad (19)$$

$$\text{Tr}(\Delta^{C\dagger}_{m,n} \Delta^C_{m',n'}) = N \delta_{m,m'} \delta_{n,n'} \quad (20)$$

$$W^{C'\dagger}_{m',n'} \Delta^C_{m,n} W^{C'}_{m',n'} = \Delta^C_{m-2m',n-2n'} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \Delta^C_{m,n} \Delta^C_{m',n'} \\ &= \exp \left[ \frac{8\pi i}{N} (mn' - nm') \right] \Delta^C_{-m',-n'} \Delta^C_{-m,-n} \end{aligned} \quad (22)$$

### 3.4 Wigner 関数の定義

そして最後に式(17)の位相点作用素を用いて, 連続の場合と同様に奇数次元の離散空間上の Wigner 関数は次のように定義される.

$$\begin{aligned} \mathcal{W}_{m,n} &= \frac{1}{N} \text{Tr} [\rho \Delta^C_{m,n}] , \quad (\rho = |\psi\rangle\langle\psi|) \\ &= \frac{1}{N} \langle\psi|\Delta^C_{m,n}|\psi\rangle \end{aligned} \quad (23)$$

この Wigner 関数は連続空間の場合と同様に, 周辺則を満たすことを求めることができる.

## 4. Leonhardt の Wigner 関数

次に, Leonhardt が構成した偶数個の格子点からなる離散空間上(偶数次元の離散空間上)での Wigner 関数について述べる<sup>[4]</sup>.

### 4.1 Leonhardt の記述した Wigner 関数

Leonhardt が構成した Wigner 関数は, 奇数, 偶数次元の離散空間上において成り立つが, 偶数次元の場合整数点の間に仮想的な自由度(ghost variable)を導入することによって Wigner 関数の構成を可能にしている.

まず, 特性関数と呼ばれる次の関数を定義する.

$$\tilde{W}_{m,n}^L \equiv \sum_k^{N-1} \exp \left[ -\frac{4\pi i}{N} m(k+n) \right] \langle k | \rho | k+2n \rangle \quad (24)$$

ここで, Leonhardt は特性関数を  $4\pi$  で二重逆 Fourier 変換したものと離散的な Wigner 関数と定義している.

$$\mathcal{W}_{\mu,\nu} \equiv \frac{1}{D^2} \sum_{m,n} \exp \left[ \frac{4\pi i}{N} (m\nu + n\nu) \right] \tilde{W}_{m,n}^L \quad (25)$$

また, 式(25)に式(24)を代入したものは次のように書ける.

$$\mathcal{W}_{\mu,\nu} = \frac{1}{D} \sum_m \exp \left( \frac{4\pi i}{N} m\nu \right) \langle \mu - m | \rho | \mu + m \rangle \quad (26)$$

式(25)は奇数, 偶数両次元の離散空間上で周辺則を満たす Wigner 関数である. ただし, 奇数次元の場合  $(\mu, \nu)$  が整数の位相空間,  $D = N$  で構成され,  $I = \{-\frac{N-1}{2}, -\frac{N-3}{2}, \dots, \frac{N-3}{2}, \frac{N-1}{2}\}$  の範囲で和をとる. 偶数次元の場合には,  $(\mu, \nu)$  が整数とその間に半整数を入れた位相空間,  $D = 2N$  で構成され,  $I' = \{0, \frac{1}{2}, 1, \dots, \frac{2N-1}{2}\}$  の範囲で和をとると, 式(25)の Wigner 関数は実数で 1 に規格化されている.

### 4.2 特性関数から Weyl 作用素の導出

特性関数を変形すると,

$$\begin{aligned} \tilde{W}_{m,n}^L &= \sum_k^{N-1} \omega^{-2m(k+n)} \langle \psi | k+2n \rangle \langle k | \psi \rangle \\ &= \langle \psi | \omega^{2mn} Q^{-2m} P^{-2n} | \psi \rangle \end{aligned} \quad (27)$$

となり, ここから  $\tilde{W}_{m,n}^L = \text{Tr}[\rho W^L_{m,n}]$  とし, Weyl 作用素を

$$W^L_{m,n} = \omega^{2mn} Q^{-2m} P^{-2n} \quad (28)$$

と定義する.

### 4.3 Leonhardt の位相点作用素の導出

Leonhardt の位相点作用素は  $W^L$  を  $4\pi$  で二重逆 Fourier 変換することで定義される.

$$\begin{aligned} \Delta^L_{m,n} &= \frac{1}{N} \sum_{m',n' \in I'} \\ &\times \exp \left[ \frac{4\pi i}{N} (mm' + nn') \right] W^L_{m',n'} \end{aligned} \quad (29)$$

ここで式(11), (13)及び式(15)で定義した位相演算子, シフト演算子, 反転演算子のインデキシングを  $I'' = \{0, 1, \dots, N - 1\}$  とすると, 式(29)は

$$\Delta_m^L = \omega^{-2mn} Q^{2n} P^{-2m} T, \quad (m, n \in I') \quad (30)$$

と表せる。

## 5. 並進共変性

本研究の目的で使用するシンプレクティック共変性について述べる前に, まず並進共変性について述べる.

### 5.1 連続空間上や奇数次元の離散空間上での並進共変性

連続空間上で定義した位相点作用素や Cohendet et al. が定義した位相点作用素は, 位相空間上で原点の位相点作用素を並進を表す群の射影表現である Weyl 作用素で挟むと, その点での位相点作用素が定まるという性質がある.

連続空間上では Weyl 作用素を

$$W(q, p) = \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} (\hat{q}p - \hat{p}q) \right\} \quad (31)$$

とおくことで, 位相点作用素は,

$$\Delta(q, p) = W(q, p)\Delta(0, 0)W^\dagger(q, p) \quad (32)$$

と表せる. また, 奇数次元の離散空間上では Weyl 作用素を

$$W_{m,n} = \omega^{-mn/2} Q^n P^{-m} \quad (33)$$

とおくことで, 位相点作用素は,

$$\Delta_{m,n} = W_{m,n}\Delta_{0,0}W_{m,n}^\dagger \quad (34)$$

となる. 式(33)は式(31)の自然な離散化となっている.

しかし, 偶数次元の離散空間上では, 仮想的自由度 (ghost variable) を含むために並進を表す群の射影表現が知られていない.

## 6. シンプレクティック共変性

線形の正準変換であるシンプレクティック変換は, 古典力学系を不变にするものとして量子力学において重要な対称性となっている.

また, シンプレクティック変換  $S$  からなるユニタリ表現を  $U(S)$  として次式を定義する.

$$U(S)\Delta_{m,n}U^\dagger(S) = \Delta_{S(m,n)} \quad (35)$$

全てのシンプレクティック変換  $S$  に対して, 先の並進共変性と同様に式(35)が成り立つとき, 位相点作用素  $\Delta_{m,n}$  はシンプレクティック共変性を持つという.

先行研究では,

- 連続空間上において, 位相点作用素をシンプレクティック共変にするようなシンプレクティック変換の一部である回転  $R_\theta$  に対応する特定の  $U(R_\theta)$
- 奇数次元の離散空間上において, シフト演算子と位相演算子を,  $a_p, a_q$  を位相因子として  $P \Rightarrow UPU^\dagger = a_p P^\kappa Q^\lambda$ ,  $Q \Rightarrow UQU^\dagger = a_q P^\mu Q^\nu$  と変換する条件  $\kappa\nu - \mu\lambda = 1$

を導入すると, 位相点作用素が唯一に決まる<sup>[5]</sup>. しかし,  $U(S)$  の具体的な形は明示されていない.

## 7. シンプレクティック変換の群

### 7.1 離散空間上のシンプレクティック変換 $S$ の定義

連続との類推から  $\mathbb{Z}_N \times \mathbb{Z}_N$  の離散空間上においてシンプレクティック変換  $S$  の群  $Sp_N$  を定義する.

$$Sp_N = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \mid a, b, c, d \in \mathbb{Z}_N, |S| = 1_N \right\} \quad (36)$$

### 7.2 Euclid アルゴリズム

シンプレクティック変換の群  $Sp_N$  は, 2 つの元  $(h_+, h_-)$  から成り立っている群  $Sp'_N$  に等しい ( $Sp_N = Sp'_N$ ) ことを示す.

$h_+, h_-$  を次のように定義する.

$$h_+ \equiv \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \in Sp_N, \quad h_- \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \in Sp_N \quad (37)$$

$h_+$  と  $h_-$  それぞれ  $n$  乗したものを  $S$  にかける.

$$h_+^n \cdot S = \begin{pmatrix} a + nc & b + nd \\ c & d \end{pmatrix} \quad (38)$$

$$S \cdot h_+^n = \begin{pmatrix} a & na + b \\ c & nc + d \end{pmatrix} \quad (39)$$

$$h_-^n \cdot S = \begin{pmatrix} a & b \\ na + c & nb + d \end{pmatrix} \quad (40)$$

$$S \cdot h_-^n = \begin{pmatrix} a + nb & b \\ c + nd & d \end{pmatrix} \quad (41)$$

となる. ここでは行 (列) を何倍かしたものもう一方の行 (列) に加える操作を行っている. 式(38)~(41)を Euclid アルゴリズム 1 とする.

次に,  $h_t$  を以下のように定義する.

$$h_t \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ N-1 & 0 \end{pmatrix} \in Sp_N \quad (42)$$

$h_t$  は  $h_-^{N-1}$  を  $h_+$  で挟んだ形で表せる.

$$h_+ h_-^{N-1} h_+ = h_t \quad (43)$$

したがって,  $h_t \in Sp'_N$  である.

$S$  に  $h_t$  をかけて,

$$h_t \cdot S = \begin{pmatrix} c & d \\ N-a & N-b \end{pmatrix} \quad (44)$$

$$S \cdot h_t = \begin{pmatrix} N-b & a \\ N-d & c \end{pmatrix} \quad (45)$$

となる. ここでは行(列)を入れ替えるような操作を行っている. 式(44), (45)を Euclid アルゴリズム 2 とする.

Euclid アルゴリズム 1, 2 を任意シンプレクティック変換  $S \in Sp_N$  の成分に対して応用すると,  $S$  は  $h_+, h_-$  のみで表すことができ,

$$Sp_N = Sp'_N \quad (46)$$

となる.

## 8. $U(S)$ の射影表現とその一意性

ここからはシンプレクティック変換  $S$  から得られるユニタリ表現  $U(S)$  が射影表現を持ち, さらに一意性を持つことを説明する.

### 8.1 射影表現

式(35)を新たな  $U(S')$  で挟むと

$$U(S')U(S)\Delta_{m,n}U^\dagger(S)U^\dagger(S') = \Delta_{S'S(m,n)} \quad (47)$$

と変形できる. ここで, シンプレクティック群の性質から,  $S'S = S''$  とすると,

$$U(S'')\Delta_{m,n}U^\dagger(S'') = \Delta_{S''(m,n)} \quad (48)$$

に変形できる. 全ての位相点作用素に対して可換なものは単位行列の位相因子倍であることを利用して,

$$U(S \cdot S') = e^{i\theta}U(S)U(S') \quad (49)$$

となり,  $U(S)$  が射影表現であることを示している. ただし,  $U(S)$  はユニタリ性 ( $UU^\dagger = 1$ ) を満たしている.

### 8.2 射影表現の一意性

任意のシンプレクティック変換  $S$  は Euclid アルゴリズムによって  $h_+, h_-$  のみで表せ, 式(49)と一緒に考えると, 任意の  $U(S)$  は  $U(h_+)$  と  $U(h_-)$  のみで表すことができるるので,  $U(S)$  の定義を

$$U(S) = \prod_{s=\{+,-\}} U(h_s) \quad (50)$$

とする.

ここで, シンプレクティック変換  $S$  について注意が必要である. それは,  $S$  ができる  $h_+$  と  $h_-$  の組み合せが 1つではないとき, すなわち

$$S = \prod_{s \in I_1} h_s = \prod_{s \in I_2} h_s \quad (51)$$

となるときである.  $I_1, I_2$  は + と - の組み合せでできるもので, それぞれ + と - の順番が異なっているものである.  $U_1(S), U_2(S)$  は定義より

$$U_1(S) = \prod_{s \in I_1} U(h_s), \quad U_2(S) = \prod_{s \in I_2} U(h_s) \quad (52)$$

である. ここで, 式(35)に両辺左から  $U^\dagger(S)$ , 右から  $U(S)$  をかけると,

$$U^\dagger(S)\Delta_{m,n}U(S) = \Delta_{S^{-1}(m,n)} \quad (53)$$

となるはずである. このことから  $\Delta_{m,n}$  に左から  $U_2^\dagger(S)U_1(S)$ , 右から  $U_1^\dagger(S)U_2(S)$  をかけたものを考えると,

$$(U_2^\dagger(S)U_1(S))\Delta_{m,n}(U_1^\dagger(S)U_2(S)) = \Delta_{m,n} \quad (54)$$

となる. 更に, 上と同様に位相点作用素の可換性も利用して,

$$U_1(S) \doteq U_2(S) \quad (55)$$

となる. つまり,  $h_+$  や  $h_-$  の組み合せが異なっていても,  $S$  が等しければ  $U(S)$  は一意性を持つことになる.

以後,  $U(h_+), U(h_-)$  に関して詳しく述べる.

## 9. 奇数次元の離散空間上における $U(h_+), U(h_-)$

### 9.1 $U(h_+), U(h_-)$ の具体的な導出と一般の奇数次元での予想

式(35)に両辺右から  $U(S)$  をかけ,  $S = h_\pm$  とすると,

$$U(h_\pm)\Delta_{m,n}^C = \Delta_{h_\pm(m,n)}^C U(h_\pm) \quad (56)$$

となり, 前述で求めた位相点作用素を用いて式(56)を満足する  $U(h_+), U(h_-)$  を求める. 最後に, ユニタリ性を用いて  $U(h_+), U(h_-)$  を決定する. 実際に  $N =$

3, 5, 7 の次元で計算を行った。具体的に  $N = 3$  での  $U(h_+), U(h_-)$  を挙げる。

$$U(h_+) = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & \omega^2 & \omega^2 \\ \omega^2 & 1 & \omega^2 \\ \omega^2 & \omega^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (57)$$

$$U(h_-) = \begin{pmatrix} \omega^2 & & \\ & 1 & \\ & & \omega^2 \end{pmatrix} \quad (58)$$

のことから、一般の奇数次元の  $U(h_+)$  と  $U(h_-)$  を

$$U(h_+) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i,k \in I} |i\rangle \omega^{\frac{1}{2}(i-k)(i-k+N)} \langle k| \quad (59)$$

$$U(h_-) = \sum_{i \in I} |i\rangle \omega^{\frac{1}{2}i(i+N)} \langle i| \quad (60)$$

と予想する。

## 9.2 シンプレクティック共変性の確認

予想した  $U(h_+), U(h_-)$  が任意の Cohen et al. の位相点作用素  $\Delta^C_{m,n}$  に対してシンプレクティック共変性

$$U(h_\pm) \Delta^C_{m,n} U^\dagger(h_\pm) = \Delta^C_{h_\pm(m,n)}$$

を満足していることを確認する。ここでは計算が簡単な為、 $U(h_-)$  について述べる。

まず、式(17)の位相点作用素  $\Delta^C_{m,n}$  をブラケットで表すと、

$$\Delta^C_{m,n} = \sum_i \omega^{2n(-m+i)} |i\rangle \langle -i + 2m| \quad (61)$$

となる。したがって、

$$\begin{aligned} U(h_-) \Delta^C_{m,n} U^\dagger(h_-) \\ = \sum_i \omega^{2(m+n)(-m+i)} |i\rangle \langle -i + 2m| \\ = \Delta^C_{m,m+n} = \Delta^C_{h_-(m,n)} \end{aligned} \quad (62)$$

となり、シンプレクティック共変性を満たすことを確認した。よって、一般の奇数次元の  $U(h_-)$  の形は、

$$U(h_-) = \sum_{i \in I} |i\rangle \omega^{\frac{1}{2}i(i+N)} \langle i|$$

であるといえる。

同様に、 $U(h_+)$  に関しても予想した式(59)が Cohen et al. の位相点作用素に対してシンプレクティック共変性を満足することを確認した。

## 10. 偶数次元の離散空間上における $U(h_+), U(h_-)$

### 10.1 $U(h_+), U(h_-)$ の具体的な導出と問題点

先ほどの奇数次元の離散空間上の  $U(h_+), U(h_-)$  の導出を偶数次元の離散空間上でも同様に行う。

具体的に  $N = 2$  における Leonhardt の位相点作用素を用いて、シンプレクティック共変性を満足する  $U(h_+), U(h_-)$  は、

$$U(h_+) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \quad (63)$$

$$U(h_-) = \begin{pmatrix} 1 & \\ & i \end{pmatrix} \quad (64)$$

となった。しかし、式(63), (64) はシンプレクティック変換の群が式(36)の定義の下で射影表現を満足していない。この問題点は Leonhardt が偶数次元における離散空間上で Wigner 関数を構成するために、仮想的な自由度 (ghost variable) を導入して変数の数を 2 倍にしたことによる。その為、偶数次元の離散空間上に作用するシンプレクティック群についても考え方直す必要がある。

次で偶数次元でのシンプレクティック群を再定義する。

### 10.2 偶数次元のシンプレクティック変換の群

偶数次元の離散空間上では  $\mathbb{Z}_{2N} \times \mathbb{Z}_{2N}$  の空間であり、シンプレクティック変換  $S$  の群  $Sp_{2N}$  を次のように定義する。

$$Sp_{2N} = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \mid a, b, c, d \in \mathbb{Z}_{2N}, |S| = 1_{2N} \right\} \quad (65)$$

この定義の下で射影表現を考えてみる。

### 10.3 $U(h_+), U(h_-)$ の射影表現の確認と一般の偶数次元での予想

式(63)について、

$$\begin{aligned} \{U(h_+)\}^4 &= \frac{1}{4} \begin{pmatrix} -4 & 0 \\ 0 & -4 \end{pmatrix} \doteq \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= U(h_+^4) = U(e) \end{aligned} \quad (66)$$

となり、 $U(h_+)$  の射影表現が少なくとも 1 つ確認できた。

$N = 2$  での  $U(h_+), U(h_-)$  から一般の偶数次元の形を  $\tilde{\omega} = +\omega^{\frac{1}{2}} = +\exp(\frac{2\pi i}{2N})$  として、

$$U(h_+) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i,k \in I''} |i\rangle \tilde{\omega}^{(i-k)^2} \langle k| \quad (67)$$

$$U(h_-) = \sum_{i \in I''} |i\rangle \tilde{\omega}^{i^2} \langle i| \quad (68)$$

と予想する。ここで  $I'' = \{0, 1, \dots, N - 1\}$  である。

#### 10.4 シンプレクティック共変性の確認

次に奇数次元と同様に予想した  $U(h_+), U(h_-)$  が Leonhardt の定義した位相点作用素  $\Delta_{m,n}^L$  に対して、シンプレクティック共変性

$$U(h_\pm)\Delta_{m,n}^L U^\dagger(h_\pm) = \Delta_{h_\pm(m,n)}^L$$

を満足していることの確認を行う。まず式(30)で定義した Leonhardt の位相点作用素を  $\tilde{\omega}$  を用いて、

$$\begin{aligned} \Delta_{m,n}^L &= \tilde{\omega}^{-4mn} Q^{2n} P^{-2m} T \\ &= \sum_{i \in I''} \tilde{\omega}^{4n(i-m)} |i\rangle \langle -i + 2m| \end{aligned} \quad (69)$$

とする。ここでも計算が簡単な為、 $U(h_-)$  の共変性について述べる。

$$\begin{aligned} U(h_-)\Delta_{m,n}^L U^\dagger(h_-) &= \sum_i \tilde{\omega}^{4(m+n)(i-m)} |i\rangle \langle -i + 2m| \\ &= \Delta_{m,m+n}^L = \Delta_{h_-(m,n)}^L \end{aligned} \quad (70)$$

となり、シンプレクティック変換  $S$  の群が  $Sp_{2N}$  としたとき、シンプレクティック共変性を確認することができた。よって、一般の偶数次元の  $U(h_-)$  の形は、

$$U(h_-) = \sum_{i \in I''} |i\rangle \tilde{\omega}^{i^2} \langle i|$$

であるといえる。

同様に  $U(h_+)$  に関しても式(67)が Leonhardt の位相点作用素に対してシンプレクティック共変性を満足していることを確認した。

### 11. 結 言

離散空間の場合、正準量子化するとき次のような連続で用いる式を使っても量子化できない。

$$\hat{H} = H(\hat{x}, \hat{p}) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x)$$

しかし、ハミルトニアンに位相点作用素をかけて積分すると、次の式のように Weyl 順序で正準量子化したものにできる。

$$\hat{H}(\hat{q}, \hat{p}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dq dp H(q, p) \Delta(q, p)$$

つまり位相点作用素さえ分かれれば量子化ができることがあるが、これは連続と奇数個の格子点からなる離散

空間上の場合でしか証明されておらず、偶数個の格子点からなる離散空間上の場合で適用するには位相点作用素を一意的に決める必要がある。

今回我々の研究では、先行研究とは逆に、Cohendet et al. や Leonhardt が定義した位相点作用素を用いて、

$$U(S)\Delta_{m,n}^L U^\dagger(S) = \Delta_{S(m,n)}^L$$

というシンプレクティック共変性を満足するシンプレクティック変換  $S$  の群の射影表現が存在するかを調べた。

まず、シンプレクティック変換  $S$  は、Eclid アルゴリズムを用いて

$$h_+ \equiv \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad h_- \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

の2つで表せることが分かった。次に一般次元の  $U(S)$  の形は、 $U(h_+), U(h_-)$  で表せることが分かり、

$$\begin{aligned} U(h_+)_{\text{odd}} &= \sum_{i,k \in I} |i\rangle \omega^{\frac{1}{2}(i-k)(i-k+N)} \langle k| \\ U(h_-)_{\text{odd}} &= \sum_{i \in I} |i\rangle \omega^{\frac{1}{2}i(i+N)} \langle i| \\ U(h_+)_{\text{even}} &= \sum_{i,k \in I''} |i\rangle \tilde{\omega}^{\frac{1}{2}(i-k)^2} \langle k| \\ U(h_-)_{\text{even}} &= \sum_{i \in I''} |i\rangle \tilde{\omega}^{\frac{1}{2}i^2} \langle i| \end{aligned}$$

という形を予想し、それぞれの空間で定義された位相点作用素に対して、シンプレクティック共変性を満足するシンプレクティック変換の群が奇数次元では  $Sp_N$  で、偶数次元では  $Sp_{2N}$  となることが確認できた。

結果、シンプレクティック変換の群の射影表現が存在し、かつ唯一で Eculid アルゴリズムを用いて  $U(S)$  の具体的な形を導出することができる。

今後の課題として、連続空間上では奇数、偶数次元の離散空間上と同様にシンプレクティック共変性を満足する群の射影表現が唯一存在するか調べることが挙げられる。

### 参考文献

- [1] E.P.Wigner: Phys.Rev. 40, 749, (1932).
- [2] W.K.Wootters: Ann. Phys. (N.Y.) 176, 1 (1987).
- [3] O.Cohendet, Ph.Combe, M.Sirugue, and M.Sirugue-Collin: J.Phys. A21, 2875 (1988).
- [4] U.Leonhardt: Phys.Rev.Lett. 74, 4101, (1995).
- [5] M.Horibe, A.Takami, T.Hashimoto, and A.Hayashi: Phys.Rev. A65, 032105, (2002).



## 携帯端末を使用した出席管理システム

増田 進也\* 小高 知宏\* 黒岩 丈介\*\* 白井 治彦\*\*\*

### Attendance Management System Using Mobile Phone

Shinya MASUDA\*, Tomohiro ODAKA\*, Jousuke KUROIWA\*\* and Haruhiko SHIRAI\*\*\*

(Received February 3, 2017)

In this paper, we show the construction method for class support system using mobile phone. In this system, we use the Bluetooth function of the mobile phone owned by the students. The Bluetooth device has a unique address called Bluetooth Device address. Therefore, we can use that address as a student identifier.

In the educational support system, we create a system focused on attendance management. This system identifies students using Bluetooth and displays the student's information on Web page. Teacher compares Web page with the student, and confirms whether it is the principal or not. By using this class support system, it is possible to reduce misbehavior by the students.

**Key Words :** Bluetooth, Mobile Phone, Class Support, Attendance Management System

#### 1. はじめに

近年、情報通信技術（ICT）が急速に発達しており、特に日本国内において平成26年度末におけるインターネットの人口普及率は80%を超えており<sup>[1]</sup>。これは、パソコンの他に外出中でもインターネットに接続できる機器の普及が進んでいることが一因にもなっている。その普及に伴って、文部科学省は「教育の情報化ビジョン」を掲げて、特に初等中等教育段階においてICTの特徴を最大限に活かした教育を推進している<sup>[2]</sup>。

一方で大学では、大学生が所有しているスマートフォン等を活用したスマート教育の実用化に向けた教育支援システムの研究が行われている。そのシステムの中で、出席管理システムというものがある。そしてそのシステムには、GPS機能を用いて講義室にいるかを

監視するものや、学生がスマートフォン等を操作して出席確認をするもの等がある<sup>[3-5]</sup>。しかしそれだけでは、学生が代返を行う等の不正行為が発生する可能性があり、対応として不十分であると考えられる。またそれによって、教育支援システムが教育に与える効果が不明になってしまう可能性も考えられる。

そこで本研究では、携帯端末を使用した教育支援システムの構成方法について検証していく。具体的には、出席管理システムに焦点を絞り、携帯端末のBluetooth機能を用いて学生の特定を行い、学生情報を取得するシステムを開発する。このシステムを使用して、教員は学生情報を比較して本人確認を行い、本人であると決定した場合に出席とする。

本論文では、2章では既存の出席管理システムと問題点について述べ、3章では本研究における出席管理システムの構築について述べる。4章では実装について具体的に述べ、5章で開発したシステムについて考察し、総括する。

#### 2. 教育現場における出席管理システム

現在、研究や運用が行われている教育支援システムには、授業支援システム、学習支援システム、出席管理

\* 大学院工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻

\*\* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

\*\*\* 工学部技術部

\* Nuclear Power and Energy Safety Engineering Course,  
Graduate School of Engineering

\*\* Human and Artificial Intelligence Systems Course,  
Graduate School of Engineering

\*\*\* Technical Division

システムなどが存在している。その特徴として、学生が所有する携帯端末やパソコンなどを用いてシステムを運用することが前提とされている。

本章では、中でも携帯端末を用いた出席管理システムに焦点を絞って述べる。また、既存システムで不正行為の防止に利用される携帯端末の機能とそのシステムの問題点について述べ、本研究で行う手法について述べる。

## 2.1 出席管理システムの背景

現在の教育機関においては、主に点呼や出席簿等の出欠確認を行っている。しかし、このような従来の方法では、他者が欠席者の出席を装うために代わりに返事をしたり、出席簿に記入する不正行為が蔓延する可能性があった。実際に大学では、講義の単位認定において教員が一定の出席数を義務付けていたり重要視していることもあり、学生が代返行為等を行うことがあった。そのため、代返行為等が発覚した場合、当学期の総単位を剥奪するような学則を設けている大学も存在する。

また、代返行為を防止するために、講義毎に課題の提出を求める、学生の座席を指定する、学生の座席を回つて1人ずつ1枚の出席カードを配る等、教員が個人的に工夫をしていることもある。しかしそれでは出席確認に時間が掛かってしまい、講義に支障をきたすことがあり問題となっていた。そのような理由から、ICTの発展・普及に伴って、自動で出欠確認する出席管理システムの研究や運用が盛んに行われてきた。

## 2.2 既存システムと利用される携帯端末の機能

不正行為の防止に利用されている携帯端末の機能と既存の出席管理システムについて以下に示す。

### 2.2.1 GPS機能

携帯端末には、通常のGPS機能に加えて Assisted GPS(A-GPS)機能を内蔵している。通常のGPS機能ではGPS衛星からの信号を携帯端末で直接受信している形式をとっているが、屋内にいる場合は信号が弱くなるため位置特定に時間が掛かってしまうことがある。一方でA-GPS機能では衛星からの信号が弱い場合、携帯端末と通信している基地局を利用しておおよその位置を絞り込み、そこから測位可能な衛星の軌道データを端末に送ることで素早い位置の特定を可能にしている。

この携帯端末に備わっているGPS機能等を用いて、講義室に学生がいるかどうかを監視する出席管理シ

ステムがある<sup>[3]</sup>。このシステムの概要図について図1に示す。これは教員と学生が所持している携帯端末の位置情報をサーバに送り、それぞれの距離を計算することで学生が講義室にいるかどうかを確認して出欠確認が自動で出来るものである。これにより、教員が出席管理にかかる時間と手間を軽減させることができるとなる。

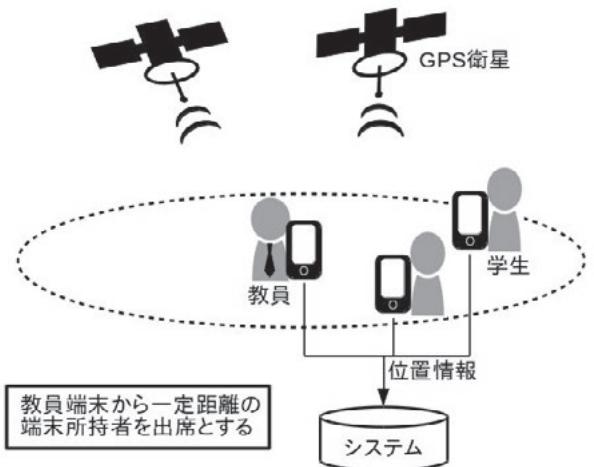


図1 GPS機能を用いた出席管理システムの概要図

### 2.2.2 Web ブラウザ閲覧機能

携帯端末の種類の中でもフィーチャーフォンは通話機能を主体としたものであり、Webブラウザ閲覧機能があるものの、セッション管理ができない点がある。そのためブラウザ閲覧中にメール機能などの他機能を使用するとセッションが切れてしまう。

そのセッション管理を利用して、学生が携帯端末のWebブラウザ閲覧機能を用いてシステムにアクセスし、出欠確認を行う出席管理システムがある<sup>[4]</sup>。このシステムの特徴として、携帯端末上のセッションを保持したまま学生は2つのパスワードを時間内に入力しなければ出席とされない点である。教員は出欠確認をする際に、出欠確認開始用のパスワードを用意し、学生に口頭で告げる。学生が携帯端末のブラウザで開始用パスワードを入力し終えると、教員は次に出欠確認終了用のパスワードを学生に口頭で告げる。そして学生が終了用のパスワードを入力すると出席とされる。これは上述した通り同一のセッションで行わなければいけない。そのため、学生が他者にメールなどでパスワードを伝えようとするとセッションが切れてしまうため自身の出席が認められることになり、不正行為が行われることを防ぐことができる。

### 2.2.3 iBeacon の Bluetooth 機能

携帯端末の多くには,Bluetooth Low Energy(BLE)と呼ばれる近距離無線通信規格の1つが内蔵されている。この通信機能の特徴は、指向性を持たないことに加えて、通常の Bluetooth よりも省電力でありながら広範囲で通信が行えるという点である。また、この通信方法を利用した iBeacon と呼ばれる通信プロトコルがある。これは電波を出すビーコン端末と電波を受信する携帯端末にインストールされた iBeacon 用アプリで構成される。携帯端末が Bluetooth の電波を受信すると、アプリがインターネットのサーバからビーコンを特定し、サーバに設定してある処理をアプリが実行するという形式を取っている。

この iBeacon の仕組みを利用した、講義室の入退室を検知可能にする出席管理システムがある<sup>[5]</sup>。このシステムの概要図について図2に示す。ビーコンから送られる信号を受信した携帯端末にインストールされたアプリは、どの講義室に入室したかを判断し所有者に知らせる。所有者は入室したかどうかを決定することで、アプリは入室時間をデータベースに加える。一方で、ビーコンから離れるとアプリがそれを検出して所有者に知らせる。所有者が退室を決定すると、アプリは退室時間をデータベースに加える。また講義室の広さに応じて、iBeacon の数や電力を調節することで、適切な通信距離を実現することが可能となる。

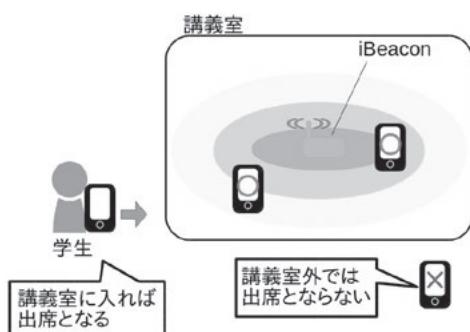


図2 iBeacon を用いたシステムの概要図

### 2.3 既存システムの問題点

ここまで携帯端末を使った出席管理システムについて紹介したが、それぞれには代返行為等の不正行為に十分に対処できていないことがある。その問題点の原因として、学生の出欠を取るのではなく、携帯端末単体で出欠を取ってしまっている点が挙げられる。

例えば、携帯端末を検出・監視するシステムでは、学生は携帯端末を他人に貸すだけで、講義に出ることな

く出席となってしまう。従来のシステムは、個人情報を含んだ携帯端末の貸し借りは行われないと考えられて構築されている。しかし、近年では携帯端末は安価で入手しやすいため、学生は日常で使用する携帯端末とシステムで使用する携帯端末を別に用意しておくことも可能である。

また、携帯端末で操作をして出欠を取るシステムでは、携帯端末の進歩によって不正行為防止が難しくなっている。2.2.2で述べたシステムでは、ブラウザから他の機能に移るとセッションが切れるフィーチャーフォンの特性を活かしたシステムとなっているが、近年普及しているスマートフォン等ではセッションが切れない。そのため、すぐにパスワードなどの情報を他人に伝達することが可能であり、不正行為が容易にできてしまう。

### 2.4 本研究の手法

2.3で述べたように、既存システムの問題点は携帯端末にある特定の操作をするだけですぐに出席にしてしまえる点である。その問題点を解消するためには、携帯端末単体で出欠を取るのではなく、他の要素を加えることが必要であると考えられる。

そこで本研究では、学生が所持している携帯端末と学生個人の情報を組み合わせて出欠決定をする出席管理システムについて検討していく。具体的には、携帯端末に備わっている Bluetooth 機能に着目し、Bluetooth Device address(BD アドレス)を学生の識別子として利用する。また、BD アドレスで学生を特定した後、学生の顔を直接見て本人かどうか確認することで不正行為の防止につなげる。そして、携帯端末を活用する教育支援システムの構成方法について検討していく。

## 3. 本研究における出席管理システムの構築

本章では、学生の出欠確認方法と出席管理システムの構築方法について述べる。

### 3.1 講義の出欠確認方法

本システムを利用した出欠確認の方法について検討する。出欠確認では、学生による不正行為をできる限り防止する必要がある。そのため、学生が特定の行動をすることによって出席を取る方法が理想的だと考える。また、出欠を取る際には学生本人であるか確認する機能が必要である。

以上から、学生の出欠決定をシステムが行うための動作として、出席を取ろうとしている学生の検出と誰であるかの識別、そして本人かどうかの確認が必要と

なる。

### 3.1.1 学生の検出と識別

学生の検出と識別の動作については、学生の所有物を使用する。従来のシステムで使用されている学生の所有物として学生証やICカード、携帯端末がある。しかしその中でも学生証やICカードは、他人に貸すことができるほど学生にとっての重要度が低く、そして専用の読み取り機を講義室ごとに設置する必要がありコストがかかってしまうという問題点がある。

そのため、学生が日常で使用する携帯端末に注目し、それを用いた学生の検出、学生の識別を行う。

### 3.1.2 本人確認の動作

本人確認には、本人しか持ち得ない特徴を利用して行う。具体的には、学生の画像と学生本人を教員が見比べるようにする。また学生の画像には、学生本人であることを保証されたものを使用する。そして学生の画像は、あらかじめ学生情報の一部として保存しておく。そのため、本研究では教員が本人確認を行う。

## 3.2 出席管理システムの構成

### 3.2.1 携帯端末と Bluetooth の受信機

出席を取ろうとしている学生の検出と識別には携帯端末の Bluetooth 機能を用いる。Bluetooth 機能が備わっている様々な端末には、探索可能状態にすることによって、他の端末上から端末情報を検出させることができる。そして、その端末情報の中には、端末を識別するための 48bit の固有な BD アドレスがある。この BD アドレスは原則として他の端末とアドレスが重複することがなく端末ごとに割り振られており、MAC アドレスと違って容易に変更することができないという特徴がある。

出席を取ろうとしている学生の検出と識別の処理の流れを図 3 に示す。今回は、受信機と携帯端末を用いて構成する。受信機とは、Bluetooth 機能を備わった周囲の携帯端末を検出する端末である。iBeacon では携帯端末にビーコンを検出させて動作を行わせているが、本研究では受信機自身が携帯端末を検出して動作する。受信機は、通信可能範囲内に存在する Bluetooth 機能を備えた端末との電波強度値を測定する。また、閾値を設けてその値より大きい電波強度値を持つ端末だけを検出する。以上から、出席を取る学生が受信機に携帯端末を近づけることによって、学生の検出が

可能となる。そして、検出された携帯端末の BD アドレスを用いることで学生の識別を行うことができる。

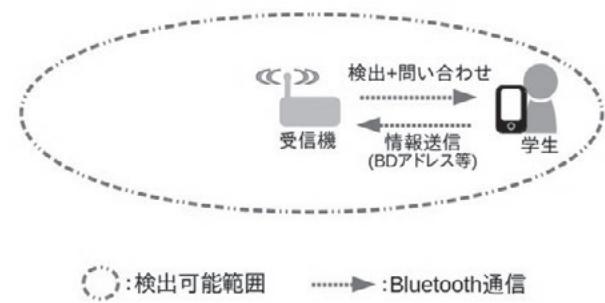


図 3 学生の検出と識別の処理

### 3.2.2 学生情報を登録したサーバ

出席を取ろうとしている学生の検出の後に、本人確認するために学生情報を取得しなければいけない。そのため学生情報をあらかじめ登録したサーバを用意する必要がある。

サーバとシステム全体の動作イメージについて図 4 に示す。サーバでは学生情報として、学生情報を事前にデータベース化して登録しておく必要がある。事前に登録するデータの要素として、BD アドレスや名前、学籍番号、顔写真、出席データなどで構成される。顔写真是出欠決定に使用されるため、詳細については後述する。

受信機は出席を取ろうとしている学生の携帯端末を検出し、携帯端末の BD アドレスをサーバに送信する。サーバ側では送られてきた BD アドレスとあらかじめ登録した学生情報の BD アドレスを比較を行う。そして BD アドレスが一致した場合、学生の特定ができたと判断され、BD アドレスに関連付けされた学生情報を取得を行う。

### 3.2.3 出欠決定

学生情報を取得した後に、出席を取ろうとした学生が本人であるかどうか確認する必要がある。そのため学生の顔と本人であることを保証された顔写真を用いて比較することにより、本人確認を行う。

学生が携帯端末を受信機に近づけた後、サーバでは学生情報の取得をして Web 上に内容を表示する。そして教員はその学生情報の顔写真と学生の顔を直接見比べて本人であるか確認する。教員が本人だと確認した場合、出欠決定を行う。教員は、サーバーのデータベースにある出席データに追加・更新を行う。

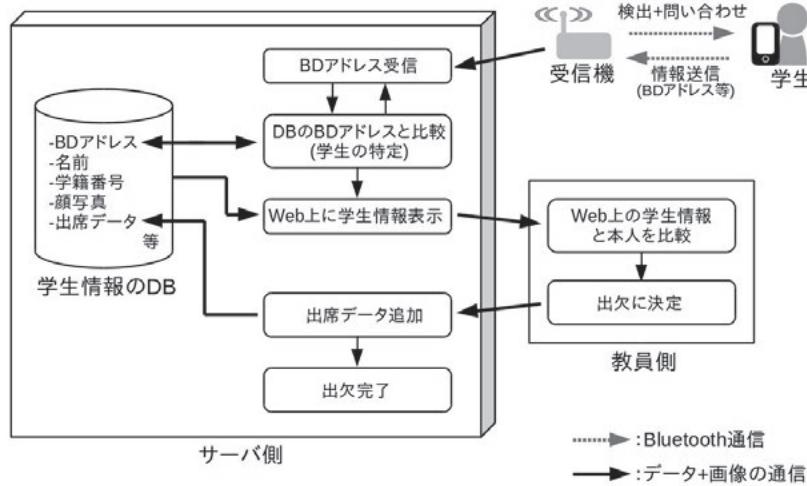


図4 サーバとシステム全体の動作イメージ

#### 4. 実装

本章では、実装したシステムについて述べる。

##### 4.1 受信機端末

受信機には、他機能でありながら小型かつ安価であることが必要とされる。そのため本研究では、RaspberryPi1 ModelB を使用した。仕様を表1に示す。本システムは、学生の携帯端末の検出に Bluetooth 機能を用い、サーバへ携帯端末の BD アドレスを送信するのに Wi-Fi 機能を使用する。そのため、それぞれのドングル (PLANEX BT-Micro4, PLANEX GW-USNANO2A) を RaspberryPi の USB ポートに取り付ける。これらは持ち運びと設置に手間がかからないという特徴がある。

Bluetooth の電波強度測定には、Bluez(ver.5.23-2) と呼ばれるオープンソースの Bluetooth プロトコルスタックを用いる。また、周辺端末ごとの電波強度値 (RSSI) を測定する。1m 付近で測定される電界強度値を A[dbm] とし、電波の減衰度合いを表す経路品質係数を N とする。また N の理論値は 2 である。さらに測定対象までの距離を R[m] とし、電波強度を以下の式で測定する。

$$RSSI[\text{dbm}] = A[\text{dbm}] - (10 \times N) \times \log_{10} R[\text{m}]$$

そして学生の検出を行う際には、携帯端末を受信機にかざすように近づけることによって BD アドレスを検出する必要がある。そのため測定した電波強度値が -60[dbm] 以下の時、その電波強度を計測した携帯端末の BD アドレスをサーバに送信するように Python(ver.2.7.9) でプログラムの作成を行った。また、データベースに MySQL を使用しているサーバに BD

アドレスを送るため、RaspberryPi から外部接続を行った。その外部接続の方法は MySQL のリモート接続を用いた。これまでの処理を RaspberryPi 上のシェルスクリプトで繰り返し実行するようにした。これによって、繰り返し学生の検出が可能となる。またこの実行が完了されるまで約 5-7 秒かかる。このことから、1 分間に 10 回ほど学生の検出ができることが分かる。

表1 RaspberryPi1 ModelB の仕様

CPU	700MHz, シングルコア
メモリ	512MB
USB2.0 ポート	2
OS	Raspbian(ver.8.0)
その他機能	音声入出力, 映像入出力, GPIO
サイズ	85.60 mm × 56.5 mm
価格	\$35

##### 4.2 サーバ

本研究で使用したサーバの環境について表2に示す。

表2 サーバの環境

CPU	4GHz, クアッドコア
メモリ	16GB
OS	Ubuntu(Ver.16.04.3)
データベース	MySQL(Ver.5.6.16)
Web サーバ	PHP(Ver.7.0.8)

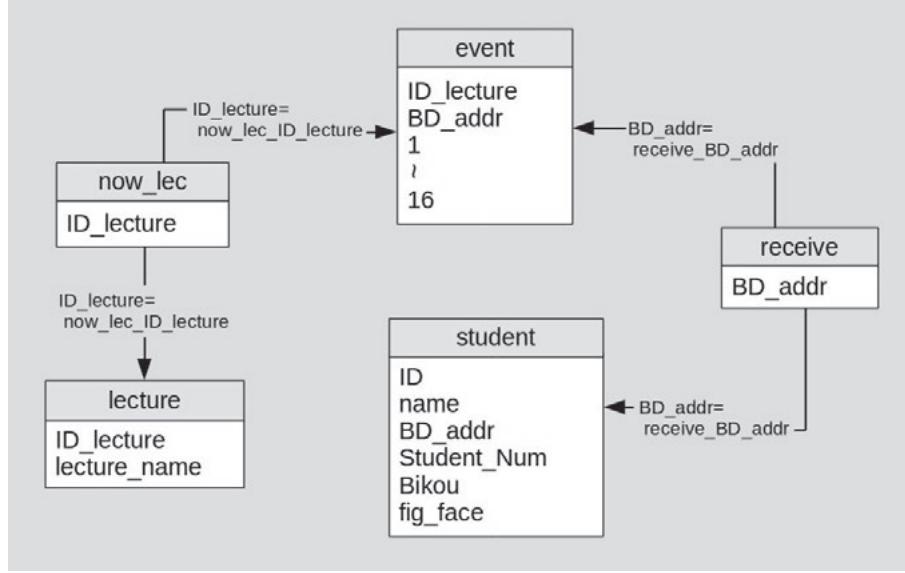


図 5 データベース構成と学生情報の特定までの流れ

#### 4.2.1 データベース

サーバでは、学生情報と受信機から送られてくる BD アドレスをデータベースに保存する必要がある。そのためデータベースには MySQL(Ver.5.6.16) を使用する。データベースのテーブルについて以下に示す。

- student: 学生の学籍番号、顔写真、BD アドレスなどの基本情報を含むテーブル。
- lecture: システムで使用する全講義のデータを格納するテーブル。
- now\_lec: 出席を取ろうとしている講義のデータを格納するテーブル。
- event: 全講義の出席情報を学生ごとに格納するテーブル。また 1 講義における講義数を 16 回までとしている。
- receive: 受信機から受信した BD アドレスを格納するテーブル。

#### 4.2.2 Web 表示機能

Web に表示する内容は、データベースから学生の情報や講義の情報を特定して表示する。データベース構成と情報の特定までの流れを図 5 に示す。まず始めに、受信機は定期的に BD アドレスを receive テーブルに書き換えて保存していく。そして receive テーブル内の BD アドレスと student テーブルに設定してある BD アドレスを比較して、学生情報を取得する。次に、教員が講義の出欠確認時に設定する講義情報である now\_lec テーブルと全講義情報を格納した lecture テーブルとを比較して、講義情報を取得する。また、取

得した講義情報と学生情報の取得に利用した BD アドレスを用いて、event テーブルから学生の出席データを取得する。

そして取得した学生情報、講義情報、出席データを Web ページに表示する。また Web 上に表示するために、PHP(Ver.7.0.8) を使用する。出席確認を行う際に、一度に複数の学生情報を Web 上に表示することができる。また、学生情報の表示は複数の学生を一度に表示することができ、これによってある程度の教員の負担を軽減させることができる。そして Web 上で表示された学生の顔写真を用いて、学生が本人であるか確認が行うことができる。本人確認後に、出欠ボタンを押すことによって出席データに今回の出席データを書き加えることができる。

#### 5. 動作例

本章では、学生と教員が行う動作例を図とともに以下に示す。

- まず始めに、学生は図 6 のように携帯端末を受信機にかざす。この時、携帯端末は Bluetooth 通信で他端末から検出可能状態にしておく必要がある。
- 次に教員は端末機器を使用して Web 上にアクセスして、Basic 認証と呼ばれる認証方法を行う。
- 認証の後、講義の設定を行い、図 7 のように学生情報を表示する。
- 教員は学生情報と学生本人の比較して本人確認を終えたら、出席か欠席かを Web 上のボタンで

決定する。



図 6 学生が行う動作

図 7 教員が閲覧する Web ページの表示例

## 6. 考察

本研究では、携帯端末と Bluetooth 電波を受信する受信機を用いた出席管理システムを構築した。出欠確認におけるシステムの基本的な動作である学生の検出と識別、学生情報の特定を行うため、学生が所有している携帯端末の Bluetooth 機能である電波強度と BD

アドレスを用いて実現した。このことから、学生が所持している携帯端末と学生の情報を用いた出席管理システムが運用可能であると考えられる。そして本システムを用いることで、従来の問題であった代返行為の防止に一定の効果があると考えられる。

また、本システムでは学生情報の他に出席データをデータベースとして用意し、Web 上に表示している。そのためデータベースに種類を追加することで、出席管理だけでなく課題提出型授業における課題提出や黒板やスクリーンの代わりに携帯端末を使う電子黒板にも活用することが可能であると考えられる。

開発したシステムは、携帯端末と Bluetooth 電波を受信する受信機を用いて構築されている。また、受信機は低コストで設置することができ、無線モジュールを使用することによって教員が移動する際には容易に持ち運ぶこともできる。そのため、ICT の発展につれて大学の講義室で使用できる無線 LAN のアクセスポイントが増えてきている近年において、本システムは有効な手段であると考えられる。

## 7. まとめと今後の課題

今回、携帯端末を用いた教育支援システムの構成方法について検討していく中で、出席管理システムに焦点を絞りシステム開発を行った。本システムでは、学生が携帯端末を受信機にかざすことで学生の検出と特定を行い、Web 上に表示された学生情報を教員が本人と見比べることで出欠決定を行うことが可能である。

また学生情報を複数人分 Web 上に表示することによって、ある程度の教員の負担を軽減させることができると考えられる。しかし、講義によっては非常に多くの学生が受講しており、学生の数に比例して出欠決定における教員の手間が増大する可能性がある。その問題を解決するため、教員が行わなければいけない動作をシステムで処理する必要がある。例えば、学生の顔と顔写真で類似度を算出して本人確認をするなどが考えられる。

また、近年においてネットワークにおける個人情報の流出が問題になっており、学生情報や出席データの流出対策が必要不可欠となる。本研究では、Basic 認証等の基本的な認証で行っていたが、他認証方法や通信の暗号化などを併用してセキュリティ性を高める必要がある。

## 参考文献

[1] 総務省: 平成 26 年通信利用動向調査, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/html/nc372110.html>, (2015)

[2] 文部科学省: 「教育の情報化ビジョン」の公表について, [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/23/04/1305484.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/23/04/1305484.htm), (2011).

[3] 青山 雄一郎, 西口 和也, 冬木 正彦, 植木 泰博: GPS 機能を利用した効率的モバイル出席管理モジュール, 第 4 回 Ja Sakai カンファレンス『Sakai を活用した学習支援環境の構築に向けて』, (2011).

[4] 植木 泰博, 米坂 元宏, 冬木 正彦, 荒川雅裕: 携帯電話を用いた出席確認システムの開発と評価(教育システム情報学会誌, Vol.22-No.3), 教育システム情報学会, pp.210-215(2005).

[5] 斯波 恭平, 謙訪 敬祐: iBeacon を用いた予備校向け出席管理システム(東京都市大学横浜キャンパス情報メディアジャーナル, 第 17 号), 東京都市大学環境情報学部情報メディアジャーナル編集委員会, pp.35-40(2016).

# バックグラウンド実行を前提としたコマンド入力系列を用いた ユーザ認証手法の検討

松井 将吾\* 小高 知宏\* 黒岩 丈介\*\* 白井 治彦\*\*\*

## Consideration of Intrusion Detection Method Based on the Feature of Command Sequence

Shogo MATSUI\*, Tomohiro ODAKA\*, Jousuke KUROIWA\*\* and Haruhiko SHIRAI\*\*\*

(Received February 24, 2017)

In this paper, we proposed a user authentication method for the period between the user logs in and logs out. It uses user's feature of command sequence. The proposed method is constructed by combining three methods. In the authentication experiment, we selected Schonlau's command sequence data. And we evaluated the proposed method and its accuracy and considered to use it from benchmark in background. Then from the experimental results, we confirmed that authentication accuracy is improved for the proposed method compared with the each single methods and the possibility that the proposed method can be used in the background while the user uses the system.

**Key Words :** Intrusion Detection System,Linux,Command,COS Similarity,TF-IDF,N-gram

### 1. 緒言

現代社会では多くのコンピュータが普及しており、その増加に伴ってコンピュータセキュリティ対策が重要な要素となっている。コンピュータを使用する際には、ユーザ認証<sup>[1][2]</sup>を行う必要があるが、端末の種類や利用環境によって取られる認証手法が異なっている。例えば、パスワードやICカードなどの所有物を使用する認証やユーザの虹彩や静脈の形のようなユーザ毎に異なる身体的特徴を使用する生体認証が挙げられる。システムまたは、その管理者は利用ユーザに認証システムを利用させることで、そのユーザが正当なユーザであるかを確認できる。

しかし、ユーザ認証は端末の使用開始時や、上位権限による実行が必要な場合にしか用いられないことがほとんどである。これはユーザ認証が繰り返し行われると、システムの可用性が損なわることが原因として挙げられる。そのため、不正ユーザに何らかの方法でユーザ認証を突破されてしまうと、ユーザや管理者が不正な侵入を把握するまでの期間は、コンピュータ端末や内に含むデータが危険にさらされてしまうことになる。例えば身近なパスワード認証を例に挙げると、パスワード解析のような高等な技術を不正ユーザに使われるまでもなく、入力時の盗み見やパスワードを書いたメモの紛失、盗難などの簡単な方法で認証を突破される可能性がある。

そこで本論文では、ログイン後のユーザのコンピュータ利用時の特徴に注目し、システム利用中のバックグラウンドで行うユーザ認証手法の提案を行う。本手法で用いるユーザの行動的特徴は、Linuxコンピュータでファイル操作や処理を行う際に入力されるコマンドの入力系列から取得する。この手法では、はじめにユーザの特徴を学習するためにコマンド入力系列の

\* 大学院工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻

\*\* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

\*\*\* 工学部技術部

\* Nuclear Power and Energy Safety Engineering Course,  
Graduate School of Engineering

\*\* Human and Artificial Intelligence Systems Course,  
Graduate School of Engineering

\*\*\* Technical Division

履歴からいくつかの手法によって正規ユーザモデルを得る。利用する履歴は、より正確なユーザ認証のために正規ユーザ以外による入力がないことが保証されたものである必要がある。それらの正規ユーザモデルと、利用者によって入力されたコマンド入力系列から同様の手法で得た利用ユーザモデルを比較し、利用者が正当なユーザであるかどうかの判定を行う。本研究では、3つのユーザモデル構築手法を使用し、それらから得たユーザ判定結果を1つのユーザ判定結果に統合することでユーザ認証を行う。本手法による認証はユーザの端末利用中に逐次行われることを前提とするために、モデル構築とユーザモデルの構築のベンチマークを計測してバックグラウンド実行が可能か確認を行う。

本論文の流れは以下のとおりである。2章では、本研究で用いた認証手法について述べる。3章では、コマンド入力系列データを使用した認証実験の流れについて述べ、その結果を示す。4,5章では、実験結果から認証手法の評価や考察と総括を行う。

## 2. コマンド入力系列を用いた認証

### 2.1 従来の手法と問題点

今までにコマンド入力系列を用いた様々な認証手法<sup>[3]</sup>が提案され研究が進められている。これらの提案された手法は単一でユーザ認証を行うのではなく、複数の手法の組み合わせによって認証精度の向上を図ることや、パスワード認証等の別の手法との組み合わせによって、より強固な認証システムを構築できることが指摘されている。

また、複数のコマンドを組み合わせる方法として、中田ら<sup>[4]</sup>はadaboostによる機械学習を用いた手法で認証精度を向上させる試みを行った。その結果、単一の手法のみを用いた場合よりも手法を組み合わせた場合の方が認証精度が大きく向上した。

しかし、機械学習を行うためには、正規ユーザのモデル構築用の学習データの他に大量の訓練データを用意する必要がある。また正規ユーザの特徴の経年変化を正規ユーザモデルに反映させるには、定期的な正規ユーザモデルの更新が必要である。ユーザモデル構築の時間的コストが大きくなれば、モデル更新の点で不利であると考えられる。

### 2.2 本研究の手法

コマンド入力系列を用いたユーザ認証の流れを図1に示す。

コマンド入力系列を用いたユーザ認証では、利用

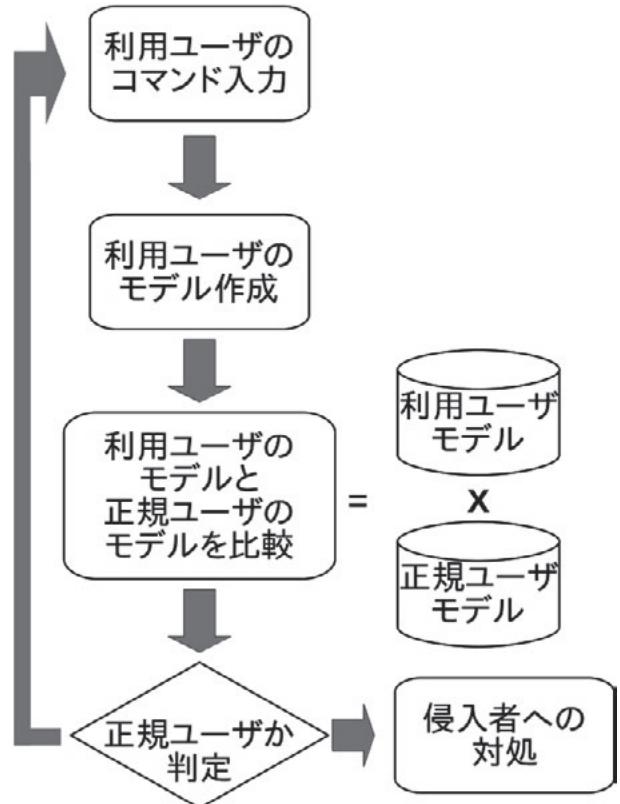


図1 コマンド入力系列を用いたユーザ認証の流れ

ユーザが入力したコマンドのデータを認証に利用するために、利用ユーザに対して認証機会を設ける必要がない。よってシステムの可用性を下げずにユーザ認証を行うことが可能である。また、一度だけの認証ではなくユーザが操作を行ってコマンドを入力し続ける限り認証を繰り返すことができる。よって正規ユーザがログインした後に侵入者によってシステムが操作される状況になったとしても、侵入者を検知できると期待できる。

本手法では、これまでの研究で指摘されているように複数の手法の組み合わせを行う。手法の組み合わせ方は様々な手法が考えられるが、本研究では単純に手法別に出力される3つのユーザ判定結果の多数決を取って、1つのユーザ判定結果とする。

以下、コマンド入力系列を用いた個人認証の流れを示す。はじめに、学習モデルの構築を行う。学習モデルの構築には、学習データとして正規ユーザのみが入力したコマンド入力系列の履歴を使用する。本研究では、その学習データから使用されたコマンドの利用率、コマンドの入力の前後関係について注目し、ユーザの特徴を算出したものを学習モデルとする。

次に検査モデルの構築を行う。検査モデルの構築は、学習モデルの構築と同様の手法を用いて行う。学習モ

日付	時刻	コマンド
2017/01/16	16:39:27	sudo initctl list
2017/01/16	16:46:58	sudo shutdown -h now
2017/01/16	17:27:02	ssh hoge
2017/01/16	18:16:03	ls
2017/01/16	18:19:31	pwd bash
2017/01/16	18:19:45	which bash
2017/01/16	18:23:59	ls

図 2 コマンド入力系列の例

モデルの構築では正規ユーザが入力した学習データを使用したが、検査モデルの構築では利用ユーザが入力したコマンド入力系列である検査データを用いる。また、検査データは利用ユーザの 1 セッション分のコマンド入力系列データであるのに対し、学習データはセッションの区別がない連続したコマンド入力系列である。ここでセッションとは、入力するための端末が立ち上がってから、閉じられるまでの期間や、一定数のコマンドが入力されるまでの期間のことを指す。

次に学習モデルと検査モデルの比較を行う。モデル構築手法によってモデルの内容が異なるために、モデル比較は同じ手法を用いて構築されたモデル同士で行う。学習モデルと検査モデルを比較し、モデル同士がどれだけ類似しているかを類似度として得る。

最後にユーザ判定を行う。学習モデルと検査モデルの類似度が予め設定しておいた閾値以上であると正当なユーザだと判断する。また手法毎にモデルの比較を行うために 1 つ検査データに対して、複数個のユーザ判定結果が出力される。本手法では、複数個のユーザ判定結果の多数決をとることによって、その結果を最終的なユーザ判定の結果とする。

### 2.3 コマンド入力系列

Linux コンピュータでは、ファイル操作やプログラム実行の手段として、(仮想) 端末にコマンドを入力することが出来る。本研究では、端末に入力されたコマンドを入力された順に並べたものをコマンド入力系列と呼ぶ。図 2 にコマンド入力系列の例を示す。

図 2 の例では、入力されたコマンドの他に日時やコマンドの引数が表示されている。後に述べる認証実験に用いたコマンド入力系列は、引数を含まない入力されたコマンドのみで構成されている。

### 2.4 特徴量の取得

本研究でコマンド入力系列のデータを、コマンドの 2-gram の出現頻度、TF-IDF、コマンドの 2-gram の用いた TF-IDF の 3 つの手法によって特徴付けてユーザモデルを構築する。以下では、それぞれの手法について述べる。

#### 2.4.1 コマンドの 2-gram の出現頻度

コマンドの 2-gram の出現頻度とは、モデル構築に使用するコマンド入力系列のデータ中に出現したそれぞれのコマンドの 2-gram の出現頻度を算出したものである。ここでコマンドの 2-gram とは、コマンドを入力された順に並べたときに、入力の前後関係を示すものである。 $i$  番目に入力されたコマンドを  $Command_i$  とし、 $i+1$  番目に入力されたコマンドを  $Command_{i+1}$  とすると、 $2gram(Command_i, Command_{i+1})$  が 2-gram となる。あるコマンドの 2-gram を  $2gram$  とすると、コマンド入力系列中に現れたコマンドの 2-gram の総数は、 $\sum_{j=0}^n N(2gram_j)$  で表される。ここで、コマンドの 2-gram がコマンド入力系列中に出現した確率を  $P(2gram)$  とすると、式 (1) に基づいて求めることが出来る。

$$P(2gram_k) = \frac{N(2gram_k)}{\sum_{j=0}^n N(2gram_j)} \quad (1)$$

コマンドの入力は通常、単一のコマンドだけで完了するものではなく、複数のコマンドの組み合わせによってコンピュータの操作を実現する。ファイルをコピーする場合を例に挙げて考えてみると、コピー元ファイルの場所を確認したり、その場所まで移動するコマンドを実行し、ファイルのコピーコマンドを実行し、最後にコピーできたかどうかの確認を行う。これは 3 つのコマンド入力で実現する操作であり、それぞれのコマンドの入力順序が異なっていると正しい操作が成り立たなくなる。このことから、コマンドの入力順序と組み合わせが重要であることが分かる。

#### 2.4.2 TF-IDF

TF-IDF は情報探査においてよく用いられている手法の 1 つである。文書中に出現した単語について、その文書を特徴づけている単語を高く評価して重みを付ける。TF-IDF は、単語の出現頻度  $tf$ (Term Frequency) と逆文書頻度  $idf$ (Inverse Document Frequency) の積によって求めることが出来る。 $tf$  はある文書  $d$  における単語  $X$  の出現数  $N(X)$  を、その文書の単語の総数で割ったものである。 $idf$  は文書の総数  $|D|$  を、単語  $X$  を

含む文書の個数  $|d : d \in X|$  で割ったものであり、単語  $X$  の希少性を示す。つまり、同じ単語を含む文書の個数の逆数を取っているので、他の文書中には現れないような単語はその文書を特徴づけるものを意味する。出現数の多い単語は tf 項では高い値を取っていても、他の文書中でも出現数の多い単語は idf 項の値が低くなるために、文書を特徴づける単語とは成り得ない。これらの積によって TF-IDF は式(2)に基づいて求められる。

$$tf_{i,d} \cdot idf_i = \frac{N(X, d)}{\sum_{j=0}^n N(X_j)} \times \ln \frac{|D|}{|d : d \in X_i|} \quad (2)$$

TF-IDF の特徴量取得モデルは図3に示す。

本研究では、コマンドの入力系列にも前後関係が存在し、文書の単語の並びと同様の性質があると考えたため、単語をコマンドに、文書をコマンドの入力系列と置き換えて TF-IDF を用いた。また、通常 idf は1単語の文書中での重みを示すものである。本手法では単語の2-gram も1つの単語と捉え、コマンドとコマンドの2-gram それぞれについての TF-IDF を求める。

## 2.5 COS類似度を用いた類似度の算出

前節では、ユーザモデルを作成するために用いたコマンド入力系列を特徴付ける手法を挙げた。本節では、構築したユーザモデル同士の比較方法について述べる。本手法では、ユーザモデルの比較に COS類似度を用いる。

COS類似度とは、文書中に現れた単語を用いて2文書間の類似度を求める手法である。本来であれば文書に用いる手法であるが、前項で述べたようにコマンドを単語、文書をコマンドの入力系列とすると応用が可能であると考える。また比較対象の文書、学習モデルと検査モデルは、同一ユーザが入力したコマンド入力系列であればどちらのモデルも似たような特徴が現

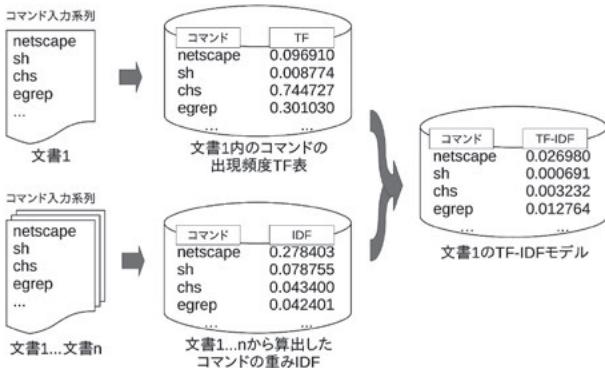


図3 ある文書のTF-IDFモデル

れると考えられる。コマンド入力系列から構築されたモデルには、コマンドとそのコマンドのベクトルを表す要素で構成されている。学習モデルに含まれるコマンドの要素と検査モデルに含まれるコマンド要素をそれぞれ  $\vec{x}, \vec{y}$  とし、各コマンドの出現数をそれぞれ  $x_i, y_i$  とすると、COS類似度は式(3)で表される。

$$COS(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{\vec{x} \cdot \vec{y}}{|\vec{x}| |\vec{y}|} = \frac{\sum_{i=0}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=0}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=0}^n y_i^2}} \quad (3)$$

COS類似度は0から1までの値を取り、モデル間の類似度が高いほど1に近い値を取る。

## 2.6 ユーザ判定

前節ではコマンドの2-gramの出現頻度、コマンドのTF-IDF、コマンドの2-gramのTF-IDFの3つの特徴量から、COS類似度を用いてモデル間の類似度を算出する方法を示した。ユーザ判定は予め閾値を設定しておき、算出された類似度が閾値以上の値であれば利用ユーザは正規ユーザであると判定し、閾値に満たない場合には利用ユーザは不正ユーザであると判定する。また、類似度の算出は同一のユーザモデル構築手法によって構築されたモデル同士で行うため、ユーザ判定結果は3つ存在する。そこで、3つのユーザ判定結果の多数決を取り、それを1つのユーザ判定結果にまとめる。

以上のモデル間のCOS類似度算出からユーザ判定までの流れを図4に示す。

## 3. 認証実験

### 3.1 実験方法

ユーザの学習データと検査データを用意し、これまでの章で述べたユーザ認証手法を用いてユーザ認証を行う実験を行った。また、認証実験に必要となる閾

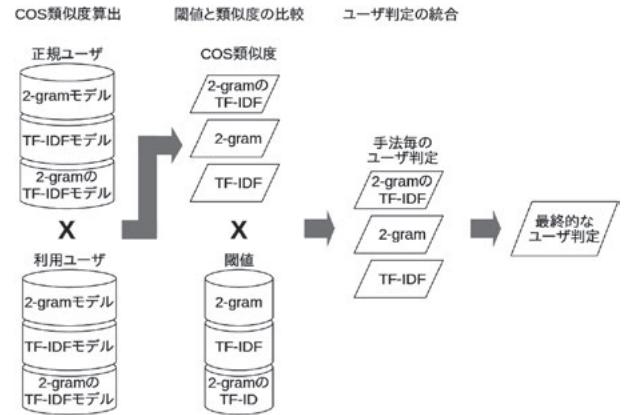


図4 ユーザ判定の流れ

値の設定も行い、モデル構築とモデル間の類似度算出に掛かるベンチマークの計測を行った。

### 3.2 実験データ

本研究では実験に際し,Schonlau 氏がインターネット上に公開しているコマンド入力系列のデータセット(以下,Schonlau データ)<sup>[5]</sup>を使用した。データの特徴は以下の通りである。

- ユーザ 50 人分のデータを含んでいる。
- ユーザ 1 人のデータは 5,000 コマンドで構成される学習データと 10,000 コマンドで構成される訓練データである。
- 訓練データは 100 コマンド毎に 1 セッションとして作成されているので、ユーザ 1 人当たりに対して、100 セッションの訓練データが存在することになる。
- 学習データは、正規のユーザが入力したコマンドのみで構成されている。
- 訓練データには、不正なユーザがコマンドを入力したなりすましセッションが存在する。
- なりすましセッションが何処に存在しているのかを示すファイルが公開されている。

### 3.3 実験環境

本実験の環境やプログラミング言語を表 1 に示す。

表 1 実験環境とプログラミング言語

Processor	Intel Core i7-4790
Clock frequency	3.6GHz
Memory	8G
OS	ubuntu 14.04LTS
言語	Ruby ver.1.9.3

### 3.4 閾値設定

ユーザの閾値は、各ユーザに対しユーザモデル構築手法別に 3 つの閾値を設定した。閾値の設定には、まず学習データから学習モデルを構築する。次に Schonlau データには 50 人分のユーザデータが用意されているので、総当りでそれぞれのユーザに対する学習モデルの COS 類似度を算出する。そして、各ユーザに対して求められた 49 個の COS 類似度の平均値を、そのユーザの閾値として採用した。この閾値は、モデル構築手法別に設定するので 1 人に対して 3 つ設定を行った。

### 3.5 ユーザ認証実験

閾値算出時に各ユーザの学習モデルを構築しているので、ユーザ認証では学習モデルと同様の手法で検査モデルを構築する。各ユーザには 100 セッションずつの検査データが与えられているので、各セッション別に構築を行うことで 100 個を検査モデルを構築する。次に各手法毎に検査モデルと学習データとの COS 類似度を求める。求めた COS 類似度と設定しておいた閾値を比較し、COS 類似度が閾値以上であれば正当なユーザであり、そうでなければなりすましユーザであると判定する。最後に、これまでに判定した 3 つの手法でのユーザ判定結果の多数決を取ることで最終的なユーザ判定を行った。

### 3.6 認証結果

手法別の全ユーザの認証精度の平均値を表 2 に示す。

表 2 ユーザ認証の結果

	平均 FAR[%]	平均 FRR[%]
コマンドの 2-gram の出現頻度	6.10	22.6
TF-IDF	10.0	20.8
コマンドの 2-gram の TF-IDF	5.10	21.3
組み合わせ	4.85	19.9

表 2 中の FAR(False Acceptance Rate) は他人受入率を意味し、検査データ中の侵入ユーザが入力したコマンド入力系列を誤って正規ユーザと判定してしまった割合を示す。FRR(False Rejection Rate) は本人拒否率を意味し、FAR とは逆に正規ユーザが入力したコマンド入力系列を侵入ユーザが入力したものだと誤って判定した割合を示す。

組み合わせ手法と単体の手法の平均の FAR,FRR を比較すると、組み合わせ手法の方が値が低くなっている。これは、手法を組み合わせることによって認証精度の向上ができていることを示していると考えられる。

ここで、閾値を徐々に変更させた時の全ユーザの認証精度の変化から得た ROC 曲線を図 5 に示し、図 5 中の method と手法名の対応を表 3 に示す。ROC 曲線を確認すると閾値がどのような値の時も概ね組み合わせ手法は、どの手法よりも認証精度が良いことが確認できる。

しかし、ユーザ認証の精度は一般的に FAR,FRR ともに 1% 以下でなければ実用に向かないと言われてい

表 3 method と手法名の対応

method	手法名
1	コマンドの 2-gram
2	TF-IDF
3	コマンドの 2-gram の TF-IDF
4	組み合わせ

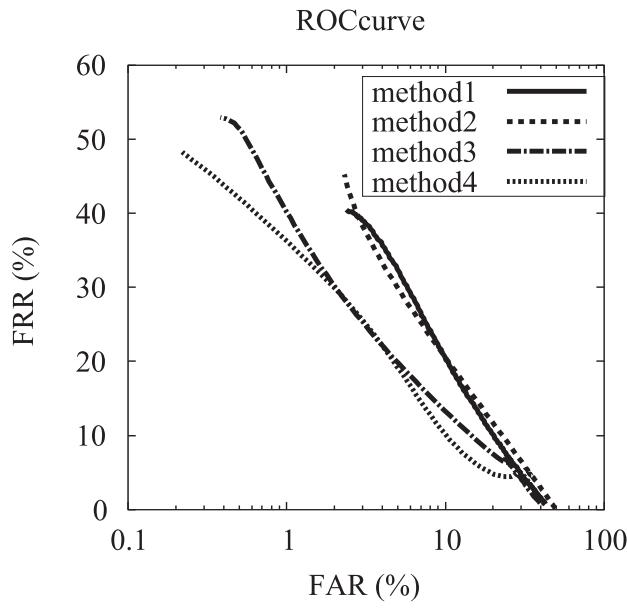


図 5 ROC 曲線

る。よって本手法は実際のユーザ認証に利用するには精度が足りていないと判断できる。

また、認証精度が良いユーザには、FAR, FRR ともに 0% のユーザ存在した。逆に精度が悪いユーザには、FAR=46.2%, FRR=12.6% や FAR=0%, FRR=96.7% というユーザも存在した。

次に学習モデル構築に掛かるベンチマークを表 4 に、学習モデル同士の COS 類似度算出に掛かるベンチマークを表 5 に示す。

表 4 ベンチマーク - 学習モデル構築

	2-gram	tf-idf	2-gram tf-idf
50 名分 [sec]	2.380	1.439	6.437
平均値 [sec]	0.04760	0.05774	1.456
最大値 [sec]	0.1010	0.06608	1.877
最小値 [sec]	0.01792	0.04916	1.391
最大-最小 [sec]	0.08308	0.01692	0.4860

全ユーザの学習モデル構築に掛かる時間は、手法別に見ると 2-gram の TF-IDF モデルの構築に最も時間が掛かり、その時間は 6.437 秒であった。また、学習モ

表 5 ベンチマーク - 学習モデル同士の COS 類似度算出

	2-gram	tf-idf	2-gram tf-idf
50 名分 [sec]	43.17	23.73	40.26
平均値 [sec]	0.8934	0.4746	0.8053
最大値 [sec]	1.268	0.8764	1.267
最小値 [sec]	0.5620	0.4282	0.5024
最大-最小 [sec]	0.7064	0.4482	0.7646

デル間の COS 類似度算出には 2-gram の出現頻度のモデル構築に最も時間が掛かり、その時間は 43.17 秒であった。閾値を出す COS 類似度の平均値の算出は 1 手法に関係なく 1 秒以下で出来るため、学習モデル構築から閾値算出までの処理は 1 分以下で行えるという結果になった。

次に検査モデルの構築に掛かるベンチマークを表 6 に、学習モデルと検査モデルの COS 類似度算出に掛かるベンチマークを表 7 に示す。

表 6 ベンチマーク - 検査モデル構築

	2-gram	tf-idf	2-gram tf-idf
50 名分 [sec]	128.7	132.5	207.6
平均値 [sec]	2.574	2.602	4.152
最大値 [sec]	5.366	5.072	6.201
最小値 [sec]	0.8996	0.8735	1.714
最大-最小 [sec]	4.467	4.199	4.487
1 セッションのモデル構築の平均	0.02574	0.02602	0.04152

表 7 ベンチマーク - 学習モデルと検査モデルの cos 類似度算出

	2-gram	tf-idf	2-gram tf-idf
50 名分 [sec]	64.29	44.34	56.44
平均値 [sec]	1.286	0.8868	1.129
最大値 [sec]	1.531	1.019	1.264
最小値 [sec]	0.9609	0.8387	0.9099
最大-最小 [sec]	0.5705	0.1803	0.3641

1 セッション分の検査モデル構築に掛かる時間は、手法別に見ると 2-gram の TF-IDF モデルの構築に最も

時間が掛かり、その時間は 0.04157 秒であった。また、学習モデルと検査モデルの COS 類似度算出には、平均値からユーザ 1 人当たりで見ると 2-gram の出現頻度のモデル構築に最も時間が掛かり、その時間は 1.286 秒であった。最大値で見てもその時間は 1.531 秒であり、大きな時間差は存在していない。COS 類似度と閾値比較によるユーザ判定と、各ユーザ判定結果の多数決による統合は全て 1 秒以下で出来るため、1 セッション当たりの検査モデル構築からユーザ判定までには 3 秒以下で行えるという結果になった。

## 4. 考察

### 4.1 ユーザ認証精度について

ユーザ認証精度の悪いユーザについて見てみると、FAR が小さく、FRR が大きいユーザと、FAR と FRR とともに大きいユーザに分けることができる。前者については、今回の実験では各ユーザに対する学習モデル同士の COS 類似度の平均値を閾値と設定したが、その平均値が大き過ぎたことが精度が悪くなった原因だと考えられる。実験前には、似た特徴を持つユーザが多いユーザでは、FAR が大きくなると予想し、その様なユーザの判定は厳しくする必要があると考えるために平均値を閾値として設定した。しかし、実際に閾値が必要以上に大きくなり過ぎたため、単純に平均値を取るのではなく、その他の要因を含めた閾値の設定を行う必要がある。

また、後者については今回の認証手法では、十分にユーザの特徴を捉えることが出来なかつたために、手法を組み合わせても認証精度が向上しなかったと考えられる。今回用いた手法そのものを改善し認証精度を上げるか、より多角的にユーザの特徴を捉えられるように別の手法を追加することによって認証精度の向上が可能であると考えられる。また、そのどちらの方法を行ってもユーザのコマンド入力系列の解析を行い、どのように特徴を捉えると手法が改善できるのか、またはどのような手法を追加すると効果が得られるのかを検討する必要がある。

### 4.2 ユーザ認証に掛かるベンチマークについて

実験結果から、ユーザ認証で事前に用意しておくべき学習モデルと閾値が 1 分以内に得られることが分かった。今回の検査データの 1 セッションに含まれるコマンド数は 100 個であり、セッションの定義を変えて 1 分間に複数のセッションが生成されることは、考えにくいと判断した。よって、本手法によるモデル更新は 1 セッションの入力毎に行うことも可能では

ないかと考えられる。

検査データを用いたユーザ認証でもコマンド入力系列の入力が終了してから 3 秒以内にユーザ判定が完了する結果となった。よって、ユーザの利用中にバックグラウンドでユーザ認証を行うことが十分可能ではないか判断できる。

また、前節で別の手法を追加することで認証精度の向上を図る可能性について述べた。実験のベンチマークから考えると、正規ユーザモデルの更新やバックグラウンドでのユーザ認証に影響を及ぼさずに手法の追加が可能であると考えられる。

## 5. 結言

コンピュータの利用中にユーザ認証を行う手法として、コマンド入力系列を用いた認証手法の提案と認証の処理に掛かるベンチマークから実際にその手法が利用可能であるかの検討を行った。先行研究によって示されているように、複数個の認証手法を用いてそれを組み合わせることによって、認証精度を向上させることができる。しかし、正規ユーザモデルの構築や閾値の算出に時間が掛かり過ぎると、ユーザの利用中にバックグラウンドで認証を行うことや、ユーザの特徴の経年変化に合わせた正規ユーザモデルの更新が難しくなると考えた。そこで、コマンドの 2-gram の出現頻度、TF-IDF、コマンドの 2-gram の TF-IDF に注目してユーザモデルを構築し、単純に多数決によってユーザ判定結果を組みわせる認証手法による認証実験を行った。

認証実験では、侵入ユーザを正規ユーザと誤って判断してしまった割合である FAR と、正規ユーザを誤って侵入ユーザと判断してしまった割合である FRR を見ることで手法の精度を確認した。また、認証における各処理に掛かる時間をベンチマークとして求めた。

実験の結果、全ユーザの平均値では実際にユーザ認証として利用するための基準として一般的に扱われている FAR=1% 以下、FRR=1% 以下を達成することは出来なかった。しかし、ユーザによっては FAR=0%、FRR=0% の結果が得られているため、用いた手法を改善したり、より多角的にユーザの特徴を得られるように手法の追加を行うことで、全体の認証精度の向上が図れると考えられた。また、今回の閾値の設定方法についても、よい結果の得られたユーザとそうではないユーザが存在したため、ユーザ間の学習モデルの COS 類似度の平均値を単純に取るのではなく、他の要因を加えることによって、より適切な閾値を得る方法を検討することが課題として挙げられた。

ベンチマークの測定結果では、正規ユーザモデルを1セッション毎に再構築した場合でもユーザの利用に影響を及ぼしにくいと判断できるだけの時間の短さとなった。1セッション毎のユーザ認証についても、今回の手法ではコマンド入力系列の入力完了から3秒以内に認証を行ってユーザ判定を出力できる見込みが得られた。

本研究では、ログイン後のユーザのコマンド入力系列の特徴からユーザ認証を行う手法について検討したが、利用ユーザが侵入ユーザと判定された後の処理までは含まれていない。実際に、本手法のようなユーザ認証手法を用いたシステムを構築する際には、侵入ユーザが検知された場合の管理者への通知や利用ユーザの強制ログアウトや権限の制限等を行って、侵入ユーザによる被害発生を最小限に留める方法を検討する必要が課題として挙げられる。また、正規ユーザが誤検知された場合のシステムの再利用を行うためには、再度のユーザ認証を行う必要がある。しかし、ログイン時と同じ認証手法を用いると再び侵入ユーザにログインされてしまう可能性が高いため、さらに別の認証システムを組み合わせることの検討も必要であると考えられる。

## 参考文献

- [1] 高田 哲司: セキュリティとユーザビリティ特集 個人認証におけるセキュリティとユーザビリティ, ヒューマンインターフェース学会誌 Vol.9-No.1 (2007).
- [2] 吉田 隆: 高精度化する個人認証技術-身体的、行動的認証からシステム開発、事例、国際標準化まで, 美研プリンティング株式会社, pp.215-223 (2014).
- [3] 白井 治彦, 小高 知宏, 小倉 久和: コマンド入力連鎖による認証におけるファジィ測度的手法の検討, 知能と情報(日本知能情報ファジィ学会誌), Vol.17-No.6, pp705-718 (2005).
- [4] 中田 明秀, 小高 知宏, 黒岩 丈介, 白井 治彦: ユーザのコマンド履歴を用いた Adaboost 方による侵入者検知手法の提案, 福井大学大学院工学研究科原子力・エネルギー安全工学専攻修士論文 (2015).
- [5] Matthias Schonlau, Martin Theus: Detecting masquerades in intrusion detection based on unpopu-

lar commands, Information Processing Letters 76, pp.33-38 (2000).

## 無線イーサフォンによる音声通信システムの構成

村瀬 穂貴\* 小高 知宏\* 黒岩 丈介\*\* 白井 治彦\*\*\*

### Voice Communication System Using the Wireless Etherphone

Hotaka MURASE\*, Tomohiro ODAKA\*, Jousuke KUROIWA\*\* and Haruhiko SHIRAI\*\*\*

(Received February 24, 2017)

In this article, we propose a disaster communication system using ad-hoc mesh network. In this system, we use the Etherphone which is communication technology using only the data link layer and the physical layer of OSI reference model. In previous research it was shown that the wireless Etherphone can perform ad-hoc communication. However, it is not shown that voice communication can be performed with the wireless Etherphone. It shows that voice communication is possible with the wireless Etherphone.

**Key Words :** Etherphone, Disaster Communication, Ad-hoc network, Mesh Network

#### 1. はじめに

近年の日本においては、2011年の東日本大震災や、2016年の熊本地震など地震災害が多発している。これらの大規模な災害が発生した場合、安否確認や救助活動などのために情報伝達手段の確保が重要である。しかし、これは災害の規模が大きくなるほど困難になる。

普段、我々が利用している通信ネットワークは、大きく分けて2種類のネットワークによって成り立っている。1つ目は、ユーザーの端末と最寄りの電話局や基地局などの間を接続するアクセスネットワークである。これは、旧来の電話に用いられるメタル線や、近年のFTTHサービスに用いられている光ファイバーのような有線によるものと、携帯電話や無線LANなどの無線によるものがある。2つ目は、電話局や基地局などを相互に接続する基幹ネットワークあるいは、バックボーンである。これは、光ファイバーを用いた

有線によるものが用いられている。このような通信ネットワークは平常時において、我々に安定して高速な通信環境を提供している。しかし、地震等の災害発生時には状況が変わる。それはアクセスマッシュネットワークが通信可能であったとしても、基地局や基幹ネットワークに物理的な損壊が発生したり、停電により電力供給が無くなったりすることで、通信不能になる可能性があるからである。また、基地局や基幹ネットワークに物理的な損壊が無い場合でも、災害発生直後には、発生地域に内外から接続要求が集中することになる。そのため、輻輳状態になり通信を行えなくなってしまう。こうなってしまうと、遠方に済む家族の安否確認などはもちろん、生命に関わる重要な連絡さえもできなくなる可能性がある。

このような災害時における通信の問題を解決するために、様々な手法に関する研究が行われている。そのなかでも、アドホックネットワークを利用した災害時通信に関する研究が多数行われている。アドホックネットワークとは、移動端末によって一時的に形成され、固定的なインフラや集中管理機構がない無線ネットワークのことである<sup>[1]</sup>。本研究においても、アドホックメッシュネットワークを利用した災害時通信システムを対象に研究を行った。

一般に、アドホックネットワークの研究において

\* 大学院工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻

\*\* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

\*\*\* 工学部技術部

\* Nuclear Power and Energy Safety Engineering Course,  
Graduate School of Engineering

\*\* Human and Artificial Intelligence Systems Course,  
Graduate School of Engineering

\*\*\* Technical Division

は、AODV や DSDV といったプロトコルを拡張する研究が行われている<sup>[2][3]</sup>。一方、本研究では、福井大学が特許を有する通信技術であるイーサフォンを利用した災害時通信システムを検討する。イーサフォンは、OSI 参照モデルにおける第 2 層以下のイーサネットの機能のみを用いる通信技術である。先行研究において、無線イーサフォンを用いてアドホック通信を行うことが可能であると示されている<sup>[4]</sup>。しかし、これが音声通信に使用できることは示されておらず、また、実際の環境を想定した大規模ネットワークで使用できることも示されてはいない。そこで本研究では、この 2 点の内、無線イーサフォンによる音声通信を想定した実験を行った。

本論文では、2 章で災害時通信システムの概要と、イーサフォン通信技術を用いた構成について述べる。3 章では、イーサフォン無線通信端末の構成について述べる。4 章では、今回行った実験の方法と結果について述べる。5 章では、実験結果に対する考察を述べる。最後に、6 章でまとめを述べる。

## 2. イーサフォンによる災害時通信システムの構成

### 2.1 災害時通信システムの概要

本研究における災害時通信システムは、地震、津波、洪水、台風などの広域にわたる大規模な災害の影響によって、常用する通信インフラが使用できなくなった場合に、それを代替する応急的通信インフラのことである。災害時通信システムにおいて、使用不能になった通信ネットワークに対して、代替的に構築したネットワークのことを災害時通信ネットワークと呼ぶこととする。

伝達する情報の内容は、災害が発生した際の警察や消防による被災者の捜索・救助、緊急通報や避難誘導、被害情報の収集、連絡、復旧活動支援、被災者同士の安否確認などが挙げられる。この通信インフラは、被災地で破壊され利用できなくなった通信インフラを修復するわけではない。常用の通信インフラが完全復旧するまでの一時的な通信インフラである。したがって、常用のインフラとは求められる性質が異なる。ネットワーク構築にかかるコストが安価であることや、ネットワーク構築や通信に手間がかからないといった即応性、二次災害による被害を受けにくいという耐障害性、ネットワークを維持する電力が少なく済むことが求められる。

このような需要を満たすために、先行研究では、主にアドホックネットワークやメッシュネットワークと呼ばれるネットワーク形態が用いられる。これらの

ネットワーク形態では、広くコンピュータ間などの無線通信に用いられる IEEE802.11x や Bluetooth などの通信技術をベースに使用する。その上で、通信の際にアクセスポイントやルーターを用いず、目的ノードまでマルチポップ通信を行う。しかし、それらの無線マルチポップ通信では、最適化されたルーティングプロトコルを用いる必要があり、手間がかかる。また、情報の伝達内容や伝達頻度、利用目的や利用規模によってネットワークの構成方法は様々である。そこで本研究では、設定不要で、簡単に通信可能なイーサフォン通信技術を利用する無線通信端末を制作し、災害時における代替的なネットワークとしてモバイルアドホックネットワークを構築する。モバイルアドホックネットワークについて図 1 に示す。

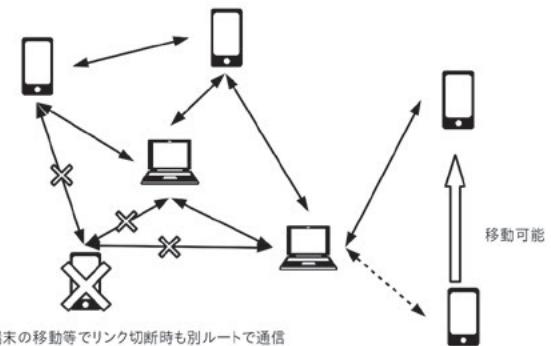


図 1 モバイルアドホックネットワーク

### 2.2 イーサフォン通信の概要

本研究で用いるイーサフォン通信技術について説明する。イーサフォンとは、福井大学が特許を有する通信技術（特許第 4110251 号）のことである<sup>[5]</sup>。イーサフォンは、TCP/IP などのプロトコルを用いず、OSI 参照モデルにおける第 1 層物理層と第 2 層データリンク層に相当する機能のみを用いる通信技術である。イーサフォンの様々な特徴の中で一番の利点は通信設定なしにネットワークを構成し、接続できることである<sup>[6]</sup>。一般に、コンピュータ間のデータ通信を行う場合には、TCP/IP などのプロトコルが用いられる。TCP/IP プロトコルは、エラー訂正やフロー制御などの高度な機能を有しており、強力なネットワーク管理が可能である。しかしその一方で、扱うパケットの構成が複雑になるという短所も持っている。イーサフォンは、利用範囲を近距離かつ閉鎖的に限定することで複雑な TCP/IP プロトコルを用いず、独自のプロトコルで通信する。このプロトコルをイーサフォンプロトコルと呼ぶ。さらにイーサフォンプロトコルをアド

ホック通信用に拡張したものをイーサフォンアドホックネットワークプロトコルと呼ぶ。イーサフォンは、イーサネットの機能を基盤とする技術である。そのため、イーサフォンプロトコルは Ethernet II フレームのフレーム構成を元にしている。イーサフォンアドホックネットワークにおけるフレームの構成を図2に示す。

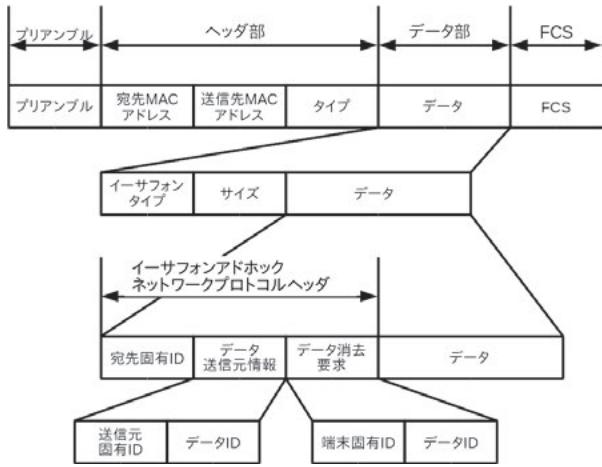


図2 イーサフォンアドホックネットワークプロトコルのフレームフォーマット

図中の上から、Ethernet II フレーム、イーサフォンプロトコル、イーサフォンアドホックネットワークプロトコルの各フレーム構成である。

イーサフォン通信の前提条件は以下のようにまとめられる。

- 各ノードの無線通信端末は固有の ID を持つ
- 全てのノードはお互いの MAC アドレスと固有 ID を把握している
- データ ID はデータに付与する固有の ID
- データ ID は全て利用可能状態にしてシステムをスタートする

通信の全体的な流れについて説明する。データを送信しないとき、各端末はデータを受信するためにネットワークを監視している。ある端末がデータを送信すると、通信可能範囲にある全ての端末がそれを受信する。受信したデータが、自分宛てのデータではなく、一度も転送したことがない場合、ブロードキャストによって周囲の全ての端末に対してデータを転送する。また、受信したデータが、自分宛てではなくても、転送したことがある場合はそれ以上転送せず、受信したデータを破棄する。そして、受信したデータ

が自分宛てであった場合は、受信したデータを受け取り、そこで通信を終了する。

### 2.3 音声通信の原理

音声は、アナログデータであり、これをそのままイーサフォンで伝送することはできない。音声をイーサフォンで伝送できるようにするためには、アナログデータである音声をデジタルデータに変換しなければならない。これを A/D 変換という。A/D 変換は、3つの段階から構成されている。順番に、標本化、量子化、符号化である。この節では、これらの段階を踏んで音声をデジタルデータに変換する原理を説明する。また、最後に、変換したデータのサイズがどのように求められるか説明する。

#### 2.3.1 音信号の標本化

標本化とは、時間的に連続な信号を一定時間ごとに区切り、その時間ごとの信号の振幅を標本として取り出す操作のことである。この操作のことは、サンプリングとも呼ばれる。標本化した際の時間間隔のことを、標本化周期または、サンプリング周期と呼ぶ。標本化周期は、 $T_s[\text{s}]$  で表される。また、単位時間あたりの標本数のことを標本化周波数または、サンプリング周波数と呼ぶ。標本化周波数は、 $F_s[\text{Hz}]$  で表される。これは式(1)となる。

$$F_s = \frac{1}{T_s} \quad (1)$$

標本化の際に、注意しなければならないこととして「標本化定理」が挙げられる。標本化定理とは、連続な信号を標本化する際、信号に含まれる最高周波数の 2 倍以上で標本化すれば、元になった信号が復元可能になるという法則のことである。つまり、信号を復元するには、最高周波数を  $F_{max}$  とすると、式(2)が成り立つ必要がある。

$$F_s \geq 2F_{max} \quad (2)$$

一般に、人間の耳の可聴領域は、50Hz から 20kHz であると言われている。これを再現するためには、20kHz の 2 倍で、40kHz 以上の標本化周波数が必要になる。

#### 2.3.2 音信号の量子化

量子化とは、標本化後の信号の振幅成分を、あらかじめ定められた有限個の値に近似する操作のことである。量子化の際に、信号を何段階に量子化するかを、量子化ビットまたは、量子化レベルなどと呼ぶ。

また、量子化の際に発生する誤差のことを、量子化誤差と呼ぶ。

量子化ビット数が大きくなるほど、量子化誤差は小さくなる。しかし、量子化ビット数が大きくなることは、データサイズが大きくなることにもつながる。

### 2.3.3 音信号の符号化

符号化とは、量子化で決定した信号の値を、時間経過に沿って2進数に変換する操作のことである。符号化によって音声をデジタルに変換することを、コーデックと呼ぶ。

PCM(Pulse Code Modulation)は、最も基本的で単純な符号化手法である。しかし、PCMのように量子化されたデータをそのまま符号化すると、データ量が大きくなるため圧縮される場合が多い。

### 2.3.4 音声通信のデータ量

音声通信のデータ量は、標本化周波数と量子化ビット、チャネル数を用いて求めることができる。チャネル数とは、音声出力の系統数のことであり、モノラルなら「1」、ステレオなら「2」として計算すれば良い。データ量は、単位時間あたりに出力されるデジタルデータのビット数のことである。よって、データ量は、チャネル数と標本化周波数と量子化ビット数の積で求めることができる。

今回の目標とする電話品質の音声は、ADPCMと呼ばれる符号化手法によって、32kbpsで表現される。

## 3. イーサフォン無線通信端末の構成

### 3.1 無線通信端末の構成

本研究で制作する無線イーサフォン通信端末は、主な処理を BeagleBone Black で行う。BeagleBone Blackについての詳細は次節で述べ、ここでは端末全体に関する構成を述べる。

BeagleBone Black は、イーサネット接続用に RJ-45 コネクタを備えている。しかし、無線 LAN 通信用のデバイスは実装されていない。ただし、USB ポートが用意されており、USB ホスト機能が実装されている。そのため、端末間の無線通信には、インターフェース変換ドングルである USB 無線 LAN アダプタを接続し、無線通信が行える状態にする。そして、音声入力用のマイクと出力用のスピーカーは、拡張 I/O ポートに接続する。イーサフォン無線通信端末のブロック図を図 3 に示す。

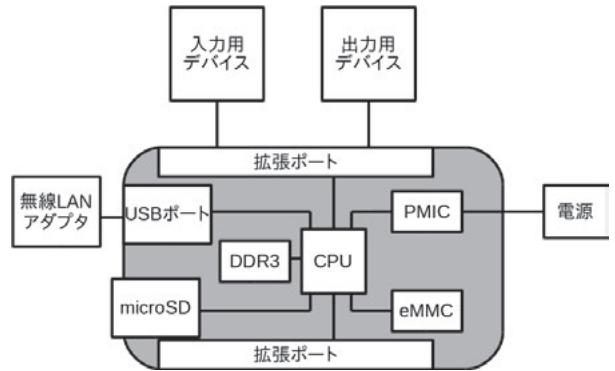


図 3 イーサフォン無線通信端末のブロック図

本研究では、送信・中継・受信の機能を持つイーサネット無線通信端末を実装した。

### 3.2 BeagleBone Black

BeagleBone Black は、小型のシングルボードコンピュータである。BeagleBone Black を図 4 に示す。

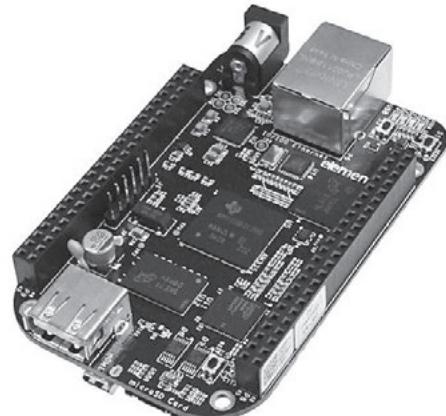


図 4 BeagleBone Black

<http://akizukidenshi.com/img/goods/C/M-09914.jpg>

また、主な仕様を表 1 に示す。

BeagleBone Black は、beagleboard.org によってオープンソースハードウェアとして開発されており、日本でも簡単に入手できる。SoC(System-on-a-chip) に ARM Cortex-A8 1GHz の TI AM335x を採用しており、主記憶として 512MB の DRAM を搭載している。

SoC とは、ある装置やシステムの動作に必要な機能の全てを、1つの半導体チップに実装する方式のことである。ターゲットとなる装置により構成は異なるが、マイクロプロセッサを核に、各種のコントローラ回路やメモリなどを統合したチップが多い。一般的には、半導体チップは機能ごとに提供されるため、

表1 BeagleBone Black の主な仕様

項目	内容
CPU	Sitara AM3358BZCZ100 1GHz,2000 MIPS
グラフィック	SGX530 3D,20M Polygons/S
主記憶	512MB DDR3L 800MHz
補助記憶	4GB,8bitEmbedded MMC
イーサネット	10M/100Mbps Ethernet, RJ45
USB	USB2.0 ホスト,mini USB クライアント
映像出力	micro HDMI
音声出力	HDMI(ステレオ)
I/O ピン	2 × 46
電源	5V 電源アダプタ,USB 給電
消費電力	約 210m～460mA/5V
サイズ	86 × 53mm



図5 無線 LAN アダプタ WLI-UC-GNM

<http://buffalo.jp/export/sites/buffalo.jp/product/wireless-lan/client/wli-uc-gnm/part/images/lineup/1.jpg>

プラスチック基板上に複数のチップを実装する必要がある。SoCでは、この複数のチップに分かれていた機能を統合し、一つのチップとして提供する。これにより、装置の小型化や製造コストの低減、配線の省略による高速化、部品点数の削減による消費電力の節減などのメリットが期待できる。

BeagleBone Blackは、手のひらに乗るような非常に小さなボードである。またOSには、標準のOSの他にUbuntuやDebianなどのLinuxOSも利用できる。そのため、比較的簡単に汎用的なシステム開発が可能である。近年、様々なシングルボードコンピュータが開発・発売されており、その中でもRaspberry Piが有名である。しかし、プロセッサの速度、拡張ポートの数などでBeagleBone Blackが勝っていることから、先行研究では、こちらが利用されている。本研究でも、この点と使用実績を考慮してBeagleBone Blackを用いることにする。

### 3.2.1 無線 LAN アダプタ

本研究では、無線 LAN アダプタとして、図5のWLI-UC-GNM(BUFFALO社製)を用いることとした。

WLI-UC-GNMの仕様を、表2に示す。

アクセス方式は、インフラストラクチャーモードとアドホックモードの両方に対応している。本研究では、アドホックモードを使用する。

表2 無線 LAN アダプタ WLI-UC-GNM の仕様

項目	内容
インターフェース	USB2.0/1.1
準拠規格	IEEE802.11n 技術 / IEEE802.11g / IEEE802.11b 準拠 ARIB STD-T66(2.4GHz 帯)
伝送方式	OFDM 方式,DS-SS 方式, 単信(半二重)
周波数範囲	2412-2472MHz(1-13ch)
データ転送速度(規格値)	IEEE802.11n : 最大 150Mbps IEEE802.11g : 最大 54Mbps IEEE802.11b : 最大 11Mbps
アクセス方法	インフラストラクチャーモード, アドホックモード
電源	5.0V(USB より給電)
消費電力	最大 2.5W
外形寸法	W16×H20×D9mm
動作環境	温度 0～40 度, 湿度 20～80 % (結露なきこと)

## 4. 音声通信の実験

### 4.1 前提条件

今回の実験では、イーサフォン無線通信端末を3台用意した。これらのイーサフォン無線通信端末は、それぞれ送信用、受信用、中継用として使用する。ここでは送信用の端末を端末A、受信用の端末を端末B、中継用の端末を端末Cとする。イーサフォン無線通信端末の無線通信の方式は「アドホックモード」に設定する。次に、アドホックモードに設定した端末同士で通信を行うために、ESSID(Extended Service Set Identifier)を一致させておく。ESSIDとは、IEEE802.11シリーズの無線LANにおいて、ネットワークを識別するために付けられる識別子の1つである。ESSIDには、最大32文字までの英数字を任意に設定できる。今回は、ESSIDを「etherphone-network」としてそれぞれの端末に設定した。

実験は、端末ABの2台のみの場合と端末ABCの3台の場合について行い、直接通信する端末は見通し10m離して実験を行った。3台で実験した際の配置を図6に示す。

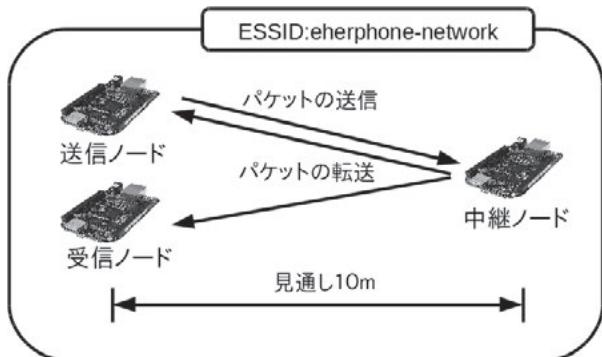


図6 端末3台での実験の配置図

### 4.2 実験

音声通信の可否を定量的に示すために、伝送速度を計測する実験を行った。まず、送信したデータと受信したデータを比較し、正しく伝送されるか実験した。その結果、端末2台間、3台間ともに100%損失なく伝送することができた。この結果を受けて、イーサフォン無線通信端末の伝送速度を計測する実験を行った。

伝送速度を計測する際には、送信するパケットが十分に大きくなれば、正しく計測することができない。あまり、データ量の大きくないパケットの場合、通信で伝えたいデータとフレームのヘッダ部の大きさ

の差が小さくなる。その状態で計測を行っても、実際にどれだけのデータを送信することができるのか正しく計測することができない。したがって、データ部には、できるだけ大きなデータを挿入する必要がある。Ethernet IIフレームの最大サイズは、1,518Byteであり、そのデータ部は、最大1,500Byteの値を取る。しかし、本研究においては、Ethernet IIフレームのデータ部にイーサフォンプロトコルや、イーサフォンアドホックネットワークプロトコルを挿入して通信を行っている。そのため、データ部を1,500Byte全て利用することはできない。イーサフォンアドホックネットワークプロトコルのデータ部は、最大1,474Byteのデータを挿入できる。今回の実験では、簡単のため、1,400Byteのテキストデータを用いることとした。これは、送信するフレーム全体のサイズと比較して十分に大きな値であると言える。1,400Byteのテキストデータを連続で100回送信し、通信が終了するまでにかかった時間を測定する試行を10回行った。

### 4.3 結果

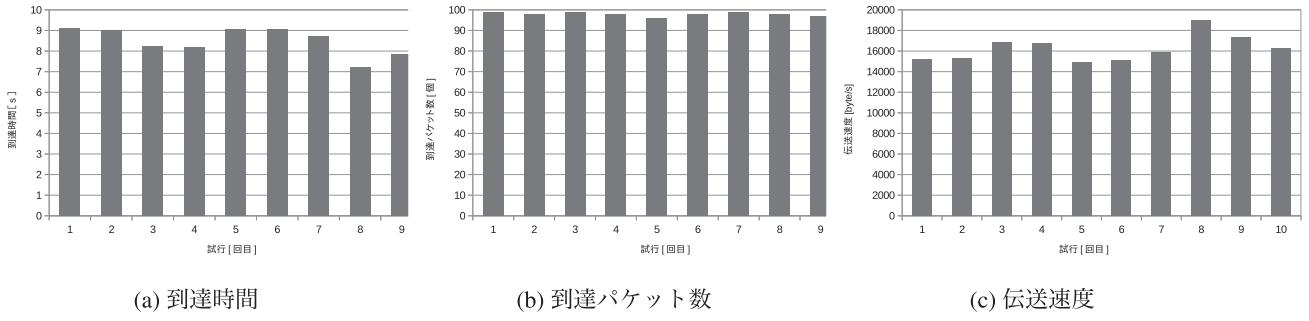
端末AB間の結果を図7に示し、端末ACB間の結果を図8に示す。それぞれのグラフにおいて、横軸は試行を表している。図7、図8の両者で、図(a)の縦軸は到達時間で、単位は[s]である。図(b)の縦軸は、到達パケット数で、単位は[個]である。図(c)の縦軸は、伝送速度で、単位は[Byte/s]である。また、各結果の平均値を表3に示す。

表3 各結果の平均値

項目	端末AB間	端末ACB間
到達時間 [s]	8''47	15''47
端末Cの到達パケット [個]	-	93.0
端末Bの到達パケット [個]	97.9	85.6
伝送速度 [kByte/s]	16.3	7.7

### 5. 考察

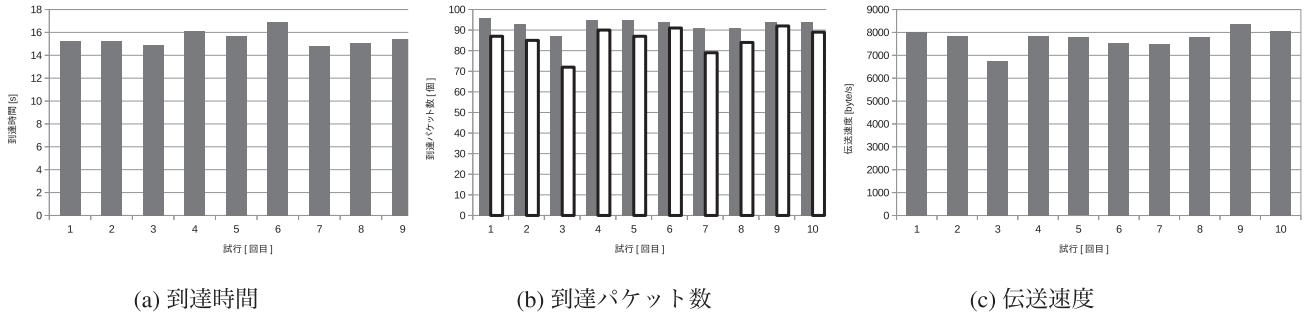
イーサフォン無線通信端末を用いた通信の伝送速度を測定する目的で、データを送信してかかった時間を計測する実験を行った。この実験では、イーサフォンアドホックネットワークプロトコルのデータ部に1,400Byteのデータを挿入し、それを連続で100回分送信する実験を行った。そして、送信用端末が送信を開始してから、受信用端末の受信が完了するまでの



(b) 到達パケット数

(c) 伝送速度

図 7 端末 AB 間の結果



(b) 到達パケット数

(c) 伝送速度

図 8 端末 ACB 間の結果

時間を計測した。また、その際、同時に記録した到達パケット数なども利用して、伝送速度を導出した。前述の通り、パケットを送信することで伝送速度を求める場合、できるだけデータ量の大きなパケットになるように設定しなければならない。それは、送信したパケットの伝送にかかる時間から、各プロトコルのヘッダフィールドの分のデータ量の影響を最小化するためである。イーサネットフレームのヘッダとイーサフォンプロトコルのヘッダ、イーサフォンアドホックネットワークプロトコルのヘッダフィールドの合計サイズは、40Byteである。これに対して、今回の実験環境でデータ部に挿入したデータは、1,400Byteであるため、十分に大きなデータを使用していると言える。そのため、この実験方法は妥当であったと考える。

2台での通信の際は、平均で97.9個のパケットが宛先まで到達し、伝送速度は16.3kByte/sであった。3台での通信の際は、平均で85.6個のパケットが宛先まで到達し、伝送速度は7.7kByte/sであった。伝送速度に関しては、現在一般的に用いられている固定電話の音質が32kbpsつまり、4kByte/sであることから、十分に音声通信に利用できると考えられる。しかし、2台で通信をした場合と比べて、3台で通信した場合はパケット到達数、伝送速度ともに結果が悪くなっていることが分かる。つまり、このままネットワークの規模を大きくした場合、思ったような通信ができないという問題が起きると考えられる。

3台の実験の際、結果が2台の場合と比べて極端に悪い理由について考察する。この実験の際には、中継用の端末Cに到達したパケットの数も計測した。この数値に注目する。端末Cへのパケットの到達は、送信元から1ホップ目の到達という意味で、端末2台での通信の実験結果と比較することができる。端末Cへの到達パケット数は、平均93.0個であり、約7%のパケットが損失していることが分かる。これは、2台での通信の平均97.9個のパケットが宛先に到達し、約2%のパケット損失率という結果と比べて明らかに悪化している。この2つの結果が出た端末の条件の違いは、パケットを中継したか、受け取って通信を終了したかの違いである。つまり、中継の際の処理がボトルネックとなって、伝送速度を低下させていると考えられる。よって、中継処理の軽減やバッファサイズの拡大を行い、状況の改善を図る必要があると考えられる。また、それによって、より大規模なネットワークにおいても期待通りに動作すると考えられる。

## 6. まとめと今後の課題

本研究では、先行研究で制作されたイーサフォン無線通信端末の性能評価を行った。先行研究では、イーサフォンアドホックネットワークプロトコルを実装した。実装されたイーサフォン無線通信端末は、送信・受信・中継の処理を取り込み、1台の端末で送信・受信・中継の一連の処理が行える様にした。その上で、

作成した通信端末を使用して、3台のイーサフォン無線通信端末を用いた通信実験を行った。その中で、イーサフォン無線通信端末が動作することと、イーサフォンアドホックネットワークプロトコルが利用できることに関して確認が行われた。しかし、その端末が音声通信に対応できるかという点や、実際の仕様を想定した多数のノードを用いた検証は行われなかつた。そのため、本研究では、作成したイーサフォン無線通信端末が音声通信に対応できるかということを主題に評価を行つた。

まず、端末2台間で16.3kByte/s、端末3台間で7.7kByte/sの伝送速度を得た。これは、固定電話の音質を十分確保できる速度であり、音声通信に用いることができる可能性を示せた。ただし、パケット損失率から中継処理がボトルネックとなって伝送速度を下げている可能性が高いことがわかつた。そのため短期課題としては、中継処理の負荷軽減が必要であると考えられる。

中長期課題としては、これまでイーサフォン無線通信端末3台での検証しか行われていないことが挙げられる。実際の災害時通信システムのとしての運用では、100台単位の端末を用いた大規模なネットワークが必要である。そのため、より現実に則した検証とするため、端末数を増やした状態で検証を行っていくことが必要であると考えられる。また、災害時通信システムにおいて本研究で検討を行っていない重要な問題として、消費電力の問題がある。災害時に使用することを考えると、外部からの電力供給ではなく、バッテリー等で長期間動作することが求められる。現状では、中継や受信処理のために、常にネットワークを監視している。ここで電力消費ができるだけ少なくすることが最終的に解決すべき課題であると考える。

## 参考文献

- [1] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一:アドホックネットワークと無線LAN メッシュネットワーク, 電子情報通信学会論文誌 B, J89-B-6, pp.811-823, (2006).
- [2] D.G.Reina , S.L.Toral , F.Barrero , N.Bessis , E.Asimakopoulou:Modelling and assessing ad hoc networks in disaster scenarios, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 4-5, pp.571-579, (2013).
- [3] Kwan-Wu Chin , John Judge , Aidan Williams , Roger Kermode:Implementation Experience with

MANET Routing Protocols, SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 32-5, pp.49-59, (2002).

- [4] 神谷将樹, 白井治彦, 黒岩丈介, 小高知宏, 小倉久和:イーサフォンを用いたアドホックネットワークによる災害時通信システムの構築, 日本知能情報ファジイ学会ファジイシステムシンポジウム講演論文集, 27, pp.969-972, (2011).
- [5] 福井大学:通信装置、及び、通信方法、特許出願 2004-217916. 特許公開 2006-041842, 特許番号(特許第4110251).
- [6] 木下昌昭, 白井治彦, 黒岩丈介, 小高知宏:アドホック・メッシュネットワークによる災害時通信システム, 福井大工報, 63, pp.63-74, (2015).

# ゲームエージェントを使った不完全情報ゲームの盤面予測

遠田 英嗣\* 小高 知宏\* 黒岩 丈介\*\* 白井 治彦\*\*\*

## Predict State of the Incomplete Information Game with Game Agent

Hidetsugu TODA\*, Tomohiro ODAKA\*, Jousuke KUROIWA\*\*and Haruhiko SHIRAI\*\*\*

(Received February 24, 2017)

In this paper, we can thaw an incomplete information game with artificial intelligence. The incomplete information game covers a part of the information to a player and is carried out. In this study, It is intended to let the game agent predict the invisible part of the incomplete information game game.

However, we do not know whether you can expect artificial intelligence. Therefore I prepare for a simple incompleteness information game to know whether you can expect artificial intelligence and can thaw it. The simple incomplete information game game searches towards a goal in a small field. The agent searches for the field of this game many times and learns the position of the goal. The agent imitates a successful example once. The agent begins a search with the start. When an agent arrives at the goal by few steps, We think the agent able to learn an incomplete information game. If an agent was able to predict the position of the goal, We may apply the artificial intelligence for the reality world.

**Key Words :** Artificial Intelligence, Game Agent, Machine Learning, Incomplete Information Games

### 1. はじめに

近年コンピュータを用いて課題を自律的に解かせる試みは多く, 20世紀中頃からコンピュータチェスをさせるといった研究が盛んである。

コンピュータが人間をチェスで破り, 現在ではマッチ戦において世界チャンピオンに対して無敗で勝利を収めるなどその成果は目覚ましい<sup>[1]</sup>.

2016年3月にGoogle DeepMindが作成したAlphaGoという囲碁プログラムが人間の中で最も囲碁が強い人物の李世ドルに対して全5戦で4勝1敗という成績を収めた。チェスプログラムがチェスのグラ

ンドマスターに勝利したのは1997年であるのに対し, 囲碁プログラムが2016年と遅れている。

囲碁はチェスのようなゲームと比較して, 局面の数が非常に膨大である。よって全探索のようなコンピュータの能力をフルに使った探索の仕方ができず長い間人間に勝つことが困難であると考えられていた。(少なくとも10年先だと言われていた。) しかしながらAlphaGoが勝利したことにより人工知能の発展の速度が尋常でないことがうかがえる<sup>[2]</sup>.

しかし, 近年研究されている自律的なゲームエージェントの多くは完全情報ゲームに対してのものが多く, 相手の手札, 状況などの情報が分からぬ不完全情報ゲームに対する研究は少ない。

不完全情報ゲームでは相手の状態や行動が不明瞭であり, 予測しなければならない部分が少なからず存在する。現実には当たり前のように予測しなければならない事がありふれているため, 完全情報ゲームより不完全情報ゲームのほうが現実に近いと言える。そのため現実世界への応用が期待されている<sup>[3]</sup>.

\* 大学院工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻

\*\* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

\*\*\* 工学部技術部

\* Nuclear Power and Energy Safety Engineering Course,  
Graduate School of Engineering

\*\* Human and Artificial Intelligence Systems Course,  
Graduate School of Engineering

\*\*\* Technical Division

本研究では、不確定要素が入る不完全情報ゲームを独自に設定し、不完全情報ゲームに対して機械学習によって人工知能が不明瞭である部分を予測することができるかどうかの確認を行う。

本論文では2章では題材とする不完全情報ゲームの設計を行い、3章では題材を解くエージェントの設計及びを行う、4章では実験を行い、5章で実験により出た結果を示す。6章で結果の考察を行い、7章でまとめを述べる。

## 2. ゲームの種類と題材設定

世界のゲームは完全情報ゲームと不完全情報ゲームの2つに分類される。完全情報ゲームとは全ての情報が開示されているゲームであり、近年研究されている将棋やチェスはその中でも二人零和有限確定完全情報ゲームという部類に分類される。

不完全情報ゲームは情報の一部しか開示されていないゲームであり、トランプゲームや麻雀などがそれにあたる。世界にあるゲームの中の大半が不完全情報ゲームとなる。

本章では、本研究で用いる不完全情報ゲームの設計を行う。

### 2.1 題材となる不完全情報ゲームの設計

本研究で用いる不完全情報ゲームとして $9 \times 9$ の限定されたフィールドを作る。そして、そのフィールドの中にランダムに開始位置と終了位置を配置する。

ゲームを行うプレイヤーからは終了位置は分からないようにになっており、開始位置から出たキャラクターをフィールドの中の終了位置を発見するために探索させる。終了位置を探した時点でゲームクリア、題材を解いたとする。

このゲームでの不確定要素としては、プレイヤーはキャラクターの位置は分かるが終了位置が分からないという点と、開始位置と終了位置がランダムであるから開始位置と終了位置までの距離が一定でないという事にある。

このゲームにおいて評価の基準となるのは移動した回数であり、少ない手順が高評価になる。

#### 2.1.1 フィールド設定

題材とするフィールドの横方向にX軸を、縦方向にY軸を設定する。X軸は左を基準とし、Y軸は上を基準とする。図1にフィールドのイメージを示す。フィールド内には移動を阻害する障害物のようなものは存

在しない。本論文内ではフィールド内での位置[X座標,Y座標]で表すこととする。



図1 フィールドイメージ図

#### 2.1.2 開始位置と終了位置

開始位置を[1~3,1~3]の中でランダムに生成し、終了位置を[6~9,6~9]の範囲でランダムに生成する。図1内の左上の9マスが開始位置の生成範囲となり、右下の9マスが終了位置の生成範囲となる。

開始位置が[1,1]で終了位置が[9,9]だった場合最も開始位置と終了位置が遠くなり、最短距離は16マスとなる。また、開始位置が[3,3]で終了位置が[6,6]だった場合が最も近くなり、最短距離は6マスとなる。そのため開始位置と終了位置の間の最短距離は6~16マスの間で変化する。

#### 2.1.3 キャラクターの設定

キャラクターは1回の手順で上下左右のいずれかに1マスだけ動くことができ、斜め方向には動けない。キャラクターの移動可能範囲は開始位置などと同様に図1に示す。図1内において、○がキャラクターを表し縦横1マスがキャラクターが1回の手順で移動できる範囲となる。

## 3. エージェントの設計

エージェントは人間の代わりに題材を解決する存在を指し、本研究では題材内のキャラクターを操作する存在である。エージェントは題材に対して機械学習を行い、題材への理解を深めていく。

エージェントのキャラクターを動かすための行動規範や学習手法を本章にて説明する。

### 3.1 行動規範

基本的に本研究でのエージェントはランダムにキャラクターを動かす。エージェントには題材に取り組む際に各移動方向に対してステータスとして移動値という値を持たせる。このステータスの初期値は各移動方向に対して全て一定で 25 である。

これは初期値ではエージェントは全ての方向への移動確率が同じである事を意味する。

### 3.2 学習手法

3.1 節で説明したようにエージェントは移動値を持つ。この移動値を変化させることでエージェントは学習を進めていく。移動値は終了位置にキャラクターが到達し、題材をするまで値は変化せず、ゲームクリアした時点で移動回数に基づいて移動値を変動させる。

これによりエージェントは前回終了位置に到達した、成功した事例を倣うように学習を進めていく。これを何度も繰り返すことによってエージェントは機械学習を進めていく。

学習方法のイメージ図を図 2 に示す。同じ値を持つエージェントを複数体用意する。これを第一世代とし、これらのエージェントはそれぞれ、題材に取り組む。全個体が題材を解いた後、全個体の中で最も評価値の高いエージェントを選出する。

最も評価値の高いエージェントのステータスを持つエージェントを、第一世代と同じ数だけ用意する。これを第二世代とする。これらに同様に題材を解かせる。

この動作を一定回数行った後、最終世代でのもとと最も評価値の高いエージェントのステータスを学習結果とする。

### 3.3 学習手法の式

$t$  回目のゲームの時の上方向への移動値を  $U_t$  とする。同様に  $t$  回目のゲームの時の下方向への移動値を  $D_t$ ,  $t$  回目のゲームの時の右方向への移動値を  $R_t$ ,  $t$  回目のゲームの時の左方向への移動値を  $L_t$  とする。移動値の初期値は  $U_0, D_0, R_0, L_0$  で表され、3.1 節で説明したようにそれぞれ 25 である。各方向への移動値の更新式は以下で表される。

$$U_{t+1} = U_t + CU_t$$

$$D_{t+1} = D_t + CD_t$$

$$R_{t+1} = R_t + CR_t$$

$$L_{t+1} = L_t + CL_t$$

$CU_t, CD_t, CR_t, CL_t$  は  $t$  回目のゲームでの各方向への移動回数を表しており、 $t$  回目での移動値に  $t$  回目

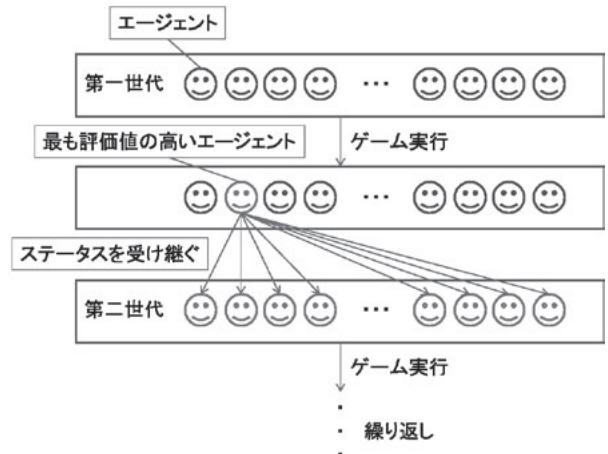


図 2 エージェントの学習方法イメージ

のゲームでの移動回数を足し合わせることで  $t+1$  回目の移動値を算出する。

それぞれの移動確率を  $PU_t, PD_t, PR_t, PL_t$  で表す。移動確率の更新式を以下に示す。

$$PU_{t+1} = \frac{U_t}{U_t+D_t}, \quad PD_{t+1} = \frac{D_t}{U_t+D_t}$$

$$PR_{t+1} = \frac{R_t}{R_t+L_t}, \quad PL_{t+1} = \frac{L_t}{R_t+L_t}$$

2 章で説明したように開始位置から見た時の終了位置の位置は右下方向にあるため PR と PD の確率が大きくなる事が予想される。

## 4. 実験

実際にエージェントに題材を解かせる実験を行った。

今回世代数×個体数が 1,000,000 回となるように学習を行う。これを学習前と学習後のデータで比較し、学習が行えているかどうかの確認を行う。また、フィールドの 1 マス毎の移動頻度を見ることによっても学習を行っているかの確認を行う。

### 4.1 学習前

学習を行う前にエージェントに問題を解かせる。

本研究ではエージェントはランダムな方向にキャラクターを操作するため、偶然終了位置をごく少ない移動回数で探索してしまう可能性がある。そこで 1 回のみの試行ではなく複数回試行させる。今回は 100 回題材を解かせ、各試行の終了位置の探索にかかった移動回数を見る。

以下にその時のそれぞれの試行回数時の図を示す.[図 3]

学習前のデータであるので移動確率は全て 25 % となっている。完全にランダムに動くため、当然全体的な移動回数は多くなる。

今回 100 回の試行中、偶然少ない移動回数で終了位置に入ったものでも 25 回の移動が必要だった。偶然に頼ったものであるので今回最大の移動回数の場合、1462 回もの移動を行った。

最大移動回数と最小移動回数とを比べると最小の 25 回はかなり少ないもののように見えるが、今回のフィールドは  $9 \times 9$  の全 81 マスであるので全体のマスの約 3 割を移動したことになる。多くはないが少ないとは言えないほどの移動回数と言える。

#### 4.1.1 学習前の移動頻度

学習前のデータを用いて、フィールド内をエージェントがキャラクターをどのように動かしているか、それぞれのマスへの移動頻度を見る。図 4 に 100 回の試行のうちから無作為に 1 つ選びだし、その時の移動頻度を示す。

図 4 では、色が濃いところほどエージェントがマスを訪れているという事になる。図を見てわかるように、開始位置の近くを多く探し、終了位置付近はあまり探索していないことが分かる。

これは開始位置から出たエージェントが徐々に行動範囲を広げて行っているように見える。そのためか終了位置は開始位置から近い位置の [7,7] に生成された時が比較的少ない移動回数で探索を終了していることが考えられる。

#### 4.2 個体数と世代数の比

個体数と世代数の積が 1,000,000 になるような学習を行わせるが、個体数と世代数の積が 1,000,000 となるような比は数多く存在する。そこで今回の学習に適した個体数と世代数の比を確認する。

比較を行うのは個体数 10 で世代数 100,000 の学習と、個体数 100 で世代数 10,000 の学習、個体数 1,000 で世代数 1,000 の学習、個体数 10,000 で世代数 100 の学習、個体数 100,000 で世代数 10 の学習の計 5 つの学習を行う。

得られた移動確率を学習データとする。この学習データを用いて 100 回題材を解かせ、各試行の終了地点にかかった移動回数のデータをテストデータとする。

学習データの各方向への移動確率とテストデータの最大移動回数、最小移動回数を比較することで最も

適した個体数と世代数の比を探す。

- 個体数 10 × 世代数 100,000

学習後の各方向への移動確率は上 22.50 % 下 27.53 % 右 27.50 % 左 22.47 % となった。

この学習データで 100 回題材を解かせた結果、最大移動回数は 436 回で、最小移動回数は 12 回であった。学習前のデータと比べると多少右下の方向へ行く傾向が強くなっている。

- 個体数 100 × 世代数 10,000

学習後の各方向への移動確率は上 20.31 %、下 29.67 %、右 29.68 %、左 20.35 % となった。

この学習データで 100 回題材を解かせた結果、最大移動回数は 444 回で、最小移動回数は 18 回であった。個体数 10 の時と比較すると、右下へ行く傾向が強くなっているが最大移動回数と最小移動回数は変化がなかった。

- 個体数 1,000 × 世代数 1,000

学習後の各方向への移動確率は上 18.18 %、下 31.92 %、右 31.78 %、左 18.10 % となった。

この学習データで 100 回題材を解かせた結果、最大移動回数は 201 回で、最小移動回数は 9 回であった。個体数 10 と 100 の時と比較すると、最大移動回数が非常に大きく減っている。最小移動回数も同様に減少しており学習が進んでいることが分かる。

- 個体数 10,000 × 世代数 100

学習後の各方向への移動確率は上 16.08 %、下 33.76 %、右 34.32 %、左 15.84 % となった。

この学習データで 100 回題材を解かせた結果、最大移動回数は 155 回で、最小移動回数は 11 回であった。個体数 1,000 と比較すると、移動確率の変化はあるものの最大移動回数と最小移動回数の回数はあまり変化がなかった。

- 個体数 100,000 × 世代数 10

学習後の各方向への移動確率は上 14.22 %、下 34.60 %、右 36.01 %、左 15.17 % となった。

この学習データで 100 回題材を解かせた結果、最大移動回数は 218 回で、最小移動回数は 9 回であった。個体数 10,000 と同様に 1,000 からの大きな変化は見られない。

学習データの各方向への移動確率と 100 回題材を解かせたテストデータの最大移動回数と最小移動回数の比較では比較要素が不足していたため、テストデータの偏差、平均を追加して比較する。

表 1 に各個体数でのテストデータの偏差、平均、最大移動回数、最小移動回数を記す。

表 1 個体数毎の学習結果比較

個体数	100k	10k	1k	100	10	学習前
偏差	38.19	27.50	35.25	62.75	81.85	263.9
平均	50.24	50.79	61.65	87.43	113.03	282.4
最大	218	155	201	441	436	1462
最小	9	11	9	10	12	25

偏差を見ると学習前から比較して個体数 10,000 までは減少している。しかし個体数 100,000 からは増加し、平均も同様に個体数 10,000 までは減少している。個体数 100,000 は個体数 10,000 とほぼ横並びとなつた。しかし個体数 10,000 の場合、最小移動回数が少し増加している。

今回のテストデータをとるために学習データで題材を 100 回試行したが、これでは個体数 1,000 と個体数 10,000、個体数 100,000 の明確な差が見えなかつた。

乱数による誤差である可能性があるため試行回数を多くすることで誤差の少ないテストデータを作成する。その後個体数 1,000、個体数 10,000、個体数 100,000 の比較を改めて行う。

その結果以下の表のようになつた。[表 2]

表 2 個体数 1,000 以降の学習結果比較

個体数	100k	10k	1k
偏差	36.74	33.16	36.06
平均	47.73	50.39	61.10
最大	585	408	449
最小	8	9	8

偏差に大きな差は見られず、平均、最大、最小においても差は見られなかつた。

この結果から個体数 1,000 で学習の進行が止まっていることが考えられる。このことから個体数 1,000 で学習を行うのが最適であると考えられる。

## 5. 結果

実験の結果個体数 1,000 で学習を行うのが最適であった。また、先に予想した通り全ての学習において右下方向への移動確率が大きくなり右下への重みづけがなされていることが分かる。

図 5 に学習後のデータを使って 100 回試行したときの図を示す。

学習前と学習後のデータとを比較すると全体的に見て大幅に移動回数が減っていることが図 3 と図 5 から見て取れる。

100 回試行したなかでの最大移動回数は 201 回で学習前から比べると最大移動回数は大幅に減少している。

しかし、今回のフィールドの全マス数は 81 マスであるので [1,1] から [9,9] まで順に全探索したとしても 81 回しか移動しないにもかかわらず 201 回もの移動を行つてはいるので、非常に移動回数が多い。このことからこの時は図 6 で示す範囲で終了位置を通り過ぎて停滯している事が考えられる。

### 5.1 学習後の移動頻度

学習後のデータを用いて、フィールド内をエージェントがどのように移動しているか、それぞれのマスへの移動頻度を見る。学習前と同様に図 7 に 100 回の試行のうちから無作為に 1 つ選びだし、その時の移動頻度を示す。

色が濃いところほどエージェントがマスを訪れているという事になる。全体的に見て学習前と異なり学習前は開始位置近くを探索していたが、学習後は終了位置付近を主に探索していることが分かる。

このことから学習が行えていると考えられる。また、[7,7] の位置の G に○がついているところが終了位置であるが、4.2 で予想した通り終了位置を通りすぎて [8,8] から [9,9] 付近を往復し、停滯していることが分かる。

今回の移動頻度を見ると学習の結果から開始位置から見て終了位置が右下にあると予想し右下方向へ向かう傾向が強い。そのため右端の [9,9] に終了位置が生成された時が比較的少ない移動回数で探索を終了していることが考えられる。

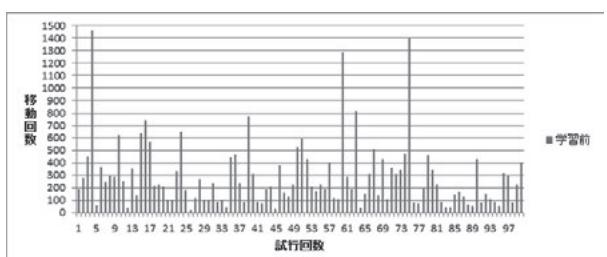


図 3 学習前の移動回数

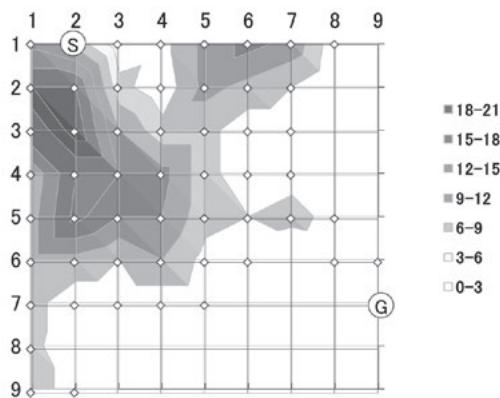


図4 学習前の各マスへの移動頻度

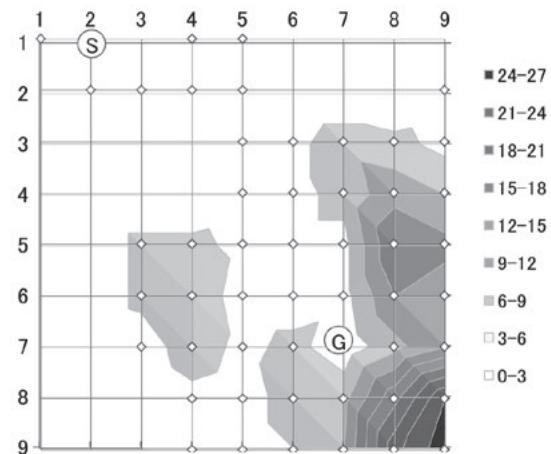


図7 学習後の各マスへの移動頻度

## 6. 考察

人工知能を用いて、プレイヤーに対して全ての情報が与えられていない不完全情報ゲームの問題の学習を行わせるに際して総学習回数 1,000,000 の中で個体数と世代数を変化させた。

その結果今回の学習に最も適しているのは個体数 1,000 世代数 1,000 であった。

個体数が 1,000 より少なければ移動回数が多いものに対してのマイナス報酬が適した値にならず、学習が遅れてしまうことが考えられる。1,000 より多い場合はマイナス報酬が 1,000 付近で一定となり学習の進みが一定になると考えられる。

学習の進みが一定であるため個体数 1,000 より多くなったテストデータにおいて個体数 1,000 と大差ない結果になったと考えられる。

個体数 1,000 で学習を行った結果、学習前に比べて移動回数は最大が 1462 から 201 へ減少し、最小が 25 から 9 に減少しており、移動回数の観点から見ると学習は成功していると考えられる。

また、各マスへの移動頻度を学習前と学習後で比較してみると学習前は開始位置付近を重点的に探索していることが分かる。学習後は終了位置の周りを重点的に探索していることが分かる。このことから移動頻度の観点から見ても学習は成功していると考えられる。

移動確率についても同様に、学習前は全て 25 % であったが、学習後には上 18.18 %、下 31.92 %、右 31.78 %、左 18.10 % と予想した通り右方向と下方向に対しての確率が上がっており重みづけされていることが分かる。このことからも学習は成功していると考えられる。

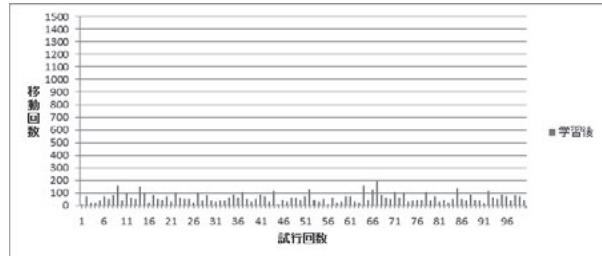


図5 学習後の移動回数

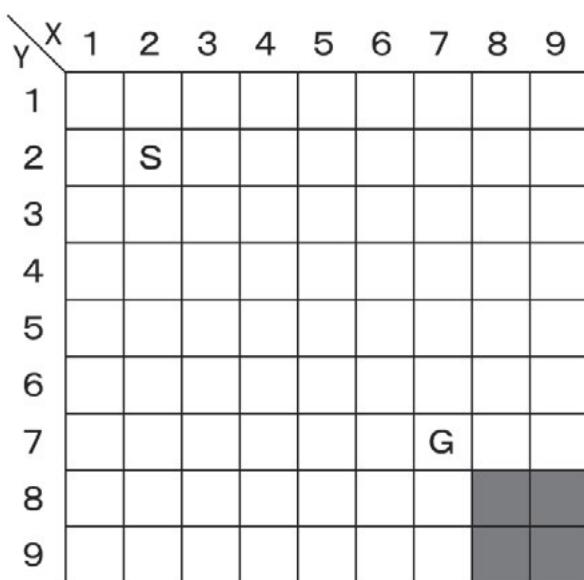


図6 停滞の原因

また、この学習前と学習後の移動確率の変化から今回の不完全情報ゲームを解くエージェントは開始位置から見て右下方向に終了位置があると予想しているといえる。

しかしながら終了位置を過ぎてしまった場合にはまだ右下の方に終了位置があると考えそのまま右下へ行こうとするため、右下の端を右往左往し停滞してしまう傾向がある。

これは今までの予想を破棄し別の予想をするというルールを獲得できていないからである。このルールが獲得できればその場の状況にあった判断が可能であると考えられる。

そのため今後の課題としては行き詰った場合の判断と、選択肢を複数用意し今までのルールを破棄、複数あるルールの中から1つを選択し行動するルールの変更という2つの事柄の学習が必要となる。

## 7. まとめ

近年行われている人工知能のチェスや将棋、囲碁のような完全情報ゲームへの適用が盛んである。

今回人工知能を完全情報ゲームではなく、不完全情報ゲームに対して適応させることができるとどうかを不確定要素の存在する独自の不完全情報ゲームを作成し、その確認を行った。

今回の学習においてもっとも上手くいった総学習回数1,000,000の中の個体数と世代数の組み合わせは個体数1,000で世代数1,000である学習方法が適しているという結果になった。

個体数1,000未満の時個体数が多くなればなるほど総学習回数が一定の場合エージェントは学習をよりよくおこなっていた。しかし、個体数1,000以上から移動確率の変化は見られたものの、テスト試行を行った時の平均の移動回数や偏差の値に大きな変化が見られなかつたため、個体数1,000が適切だと考えた。

また、個体数を大きくすればするほど学習にかかる時間は飛躍的に増加し、時間効率の点から言っても個体数1,000が適正であると考えられる。

学習の結果このエージェントがフィールド内を探索するための各方向へ移動する確率は上方向18.18%，下方向31.92%，右方向31.78%，左方向18.10%となつた。

学習前の予想では右下方向への移動確率が高くなることが予想されており、予想通りの結果となつた。

また、移動確率が変化したことでエージェントの移動傾向が変化し終了位置の付近を探査するようになつたことで全体的な移動回数の減少が見られた。しかし

ながら学習データでの試行を何度もしていると途中で全81マスであるのに対しこれを超える非常に移動回数が多い試行が見られた。

これは終了位置を過ぎて端まで到達してしまった場合でこの時エージェントは終了位置を過ぎたことに気付かずまだ右下方向に終了位置があると予想してしまっているためである。

これを改善するためにはルールの追加によって予想の変更を学習させる必要がある。

対策としては停滞に入った場合に、今までの予想を破棄し別の予想を立ててその予想に従って動くようになることや、自分の周囲のマスの確認することで終了位置を通りすぎないようにすることなどをルールとして獲得できるような学習を導入することが考えられる。

## 参考文献

- [1] 松原 仁:素朴な疑問:なぜチェス名人はコンピュータ chess に負けなければならなかったのか?, 情報処理, Vol.38 巻-8 号, pp.705-706(1997)
- [2] David Silver, Aja Huang, Chris J. Maddison, Arthur Guez, Laurent Sifre, George van den Driessche, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Veda Panneershelvam, Marc Lanctot, Sander Dieleman, Dominik Grewe, John Nham, Nal Kalchbrenner, Ilya Sutskever, Timothy Lillicrap, Madeleine Leach, Koray Kavukcuoglu, Thore Graepel & Demis Hassabis: "Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search". Nature, Vol.529-7587, pp.484-489(2016)
- [3] 大佐賀 猛, 野中 秀俊, 吉川 肇, 杉本 雅則: 不完全情報ゲームにおける適応的モンテカルロ木探索手法の提案, 情報処理学会論文誌数理モデル化と応用 (TOM), Vol.8-1, pp.38-44(2015)



## 福井大学工学部及び大学院工学研究科紀要編集委員会

前田 寧	紀要編集委員長		
吉田 達哉	機械工学専攻	小森 理	電気・電子工学専攻
石井 大輔	情報・メディア工学専攻	明石 行生	建築建設工学専攻
川崎 常臣	材料開発工学専攻	杉原 伸治	生物応用化学専攻
田嶋 直樹	物理工学専攻	片山 正純	知能システム工学専攻
島田 直樹	繊維先端工学専攻	川崎 大介	原子力・エネルギー安全工学専攻

### 工学研究科研究活動一覧

<http://www.eng.u-fukui.ac.jp/ResearchActivities/index.html>

福井大学附属図書館 学術機関リポジトリ（工学研究科関連）

<http://repo.flib.u-fukui.ac.jp/dspace/handle/10098/572>

このページ内の「日付」ボタンをクリックすると年代順のリストが表示されます。

国立情報学研究所 論文情報ナビゲータ（福井大学関連）のURL（書誌情報のみ）

[http://ci.nii.ac.jp/vol\\_issue/nels/AA12208150\\_jp.html](http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/AA12208150_jp.html)

## 福井大学工学研究科研究報告

2017年3月24日 印刷

2017年3月27日 発行

福井大学大学院工学研究科

〒910-8507 福井市文京3丁目9-1

電話（0776）27-8016（総合戦略部門研究推進課）

印刷所 能登印刷株式会社





