Journal of Intelligence Science in Local Research (JIS-LR)

Vol.01 No.2

下関市立大学 研究機構

目 次

1	A Quasi-Experimental Study of Parallel Python-R Learning in Data Science Education: Implementation and Assessment in a BYOD Environment	白濵 成希 (下関市立大学)	1-20
2	「記述統計」の基礎事項の理解度とつまずき箇所の一考察 ―「データの分析」に関するテスト問題の誤答分析を通して― A Study of Comprehension and Stumbling in the Basics of “Descriptive Statistics”―Through Analysis of Test Errors on “Data Analysis”―	佐々木 淳 (下関市立大学)	21-40
3	A Study of the Positive Impact of Attraction of a Hotel on the Local Economy	野津 隆臣 (下関市立大学)	41-48
4	Exploring Bereaved Mothers' Perceptions of Grief Support Groups After Child Loss	藤田 紋佳 濵田 裕子 (下関市立大学) 森口 晴美 相星 香 (NPO 法人福岡こどもホスピスプロジェクト)	49-61
5	プログラミング言語のコンパイラの構文解析 Parsing theory of compilers of programming languages	山根 智 (下関市立大学)	62-83
6	ラフ集合・ルールリダクションへのバイオ計算技術の導入 Introduction of Bio Computing Technology To Rule Reduction for Rough Set Method	和多田 淳三 酒井 浩 松本 義之 (下関市立大学)	84-103
7	日本の海上物流の現状と港湾政策に関する考察 ―日本と韓国の海上物流に着目して―	竹内裕二 (下関市立大学) 李 應珍 禹 賢娥 郭 芝連 坂田 理莉 (大邱大学校)	104-122

[Original Article]

A Quasi-Experimental Study of Parallel Python-R Learning in Data Science Education: Implementation and Assessment in a BYOD Environment

Naruki Shirahama[1]

[1]Shimonoseki City University

要旨

本研究では、データサイエンス教育において、Python と R 言語を並行して学ぶ教育手法の有効性を検証し、Windows Subsystem for Linux (WSL) と Jupyter Notebook を活用した BYOD 環境での実践的学習環境の構築を目指す。さらに、ビジネスとヘルスケアの専門科目に対する本手法の教育効果についても測定・分析する。研究方法として、1 年次の「DS プログラミング入門」において両言語を並行して学ぶカリキュラムを実施し、言語理解度テスト、課題解決能力テスト、学生の言語選好アンケートなどを用いて効果を測定する。また、WSL と Jupyter Notebook を用いた BYOD 環境の有効性を評価し、専門分野別のプログラミング教育手法の最適化を図る。本研究の成果は、データサイエンス教育の新たなベストプラクティスとして、高度なスキルを持つデータサイエンティスト人材の育成に貢献することが期待される。

キーワード： データサイエンス教育、並行学習、Python、R 言語、BYOD、WSL、Jupyter Notebook、ビジネス、ヘルスケア、プログラミング教育

Abstract

This study aims to verify the effectiveness of a parallel learning approach for Python and R programming languages in data science education and to develop a practical learning environment using the Windows Subsystem for Linux (WSL) and Jupyter Notebook in a Bring Your Own Device (BYOD) setting. Additionally, it measures and analyzes the educational impact of this method on specialized courses in business and healthcare. The research methodology includes implementing a curriculum for simultaneous learning of both languages in the first-year "DS Programming Introduction" course, with effectiveness measured through language comprehension tests, problem-solving ability tests, and student language preference surveys. Furthermore, the study evaluates the efficacy of the BYOD environment using the WSL and Jupyter Notebook and optimizes programming education methods for specific fields. The findings of this study are expected to contribute to the development of highly skilled data science professionals by establishing new best practices in data science education.

Keywords: Data Science Education, Parallel Learning, Python, R Language, BYOD, WSL, Jupyter Notebook, Business, Healthcare, Programming Education

1. Introduction.

With the advent of Society 5.0, the demand for human resources possessing the capability to effectively analyze large and complex data sets and make precise decisions is rapidly increasing. In response to this societal demand, universities across Japan are establishing new data science faculties and departments. Shimonoseki City University also established the Faculty of Data Science in 2024. Python, which demonstrates particular advantages in data analysis, machine learning, and

R language, which specializes in statistical analysis, has been adopted as the primary teaching language at these educational institutions.

However, substantial challenges remain for contemporary data science education. Numerous students tend to rely exclusively on the initial programming language they acquire and experience difficulty adapting to alternative languages and utilizing multiple languages effectively. This phenomenon has impeded the development of a versatile and adaptable workforce in the rapidly evolving field of data science.

Furthermore, in actual work environments, the ability to use multiple languages and tools according to a situation is often required. Therefore, there is an urgent need in the educational field to develop human resources that not only have a deep understanding of a single language, but are also able to flexibly use multiple languages and take advantage of their respective strengths. The purpose of this study was to propose a new approach to this issue and to examine its effectiveness.

1.1 Background of the Study

Data science is an interdisciplinary field that derives meaningful insights from large and complex datasets. The field requires a wide variety of tasks, including data collection, pre-processing, analysis, and visualization, to interpret the results. It is known that different programming languages and tools are best suited to the different characteristics of each task. For example, Python is widely adopted for data processing and machine-learning tasks because of its rich set of libraries (NumPy, Pandas, Scikit-learn, etc.). R, on the other hand, has advantages in statistical analysis and advanced data visualization and is particularly useful in academic research and biostatistics [1].

In recent years, the role of data scientists in the industry has evolved, and the required skill set has changed significantly. According to Kumar and Aithal (2020)[2], modern data scientists need flexibility and broad technical knowledge that is not dependent on a specific programming language [2]. This trend is a prerequisite for adapting to rapidly evolving technology and business environments.

Against this backdrop, there is an urgent need to develop effective methods for learning multiple programming languages in data science education. In particular, Python and R languages are highly suitable for parallel learning because their strengths are complementary and can cover the entire data science workflow. Donoho (2017) provided a comprehensive analysis of the scope and evolution of data science, arguing that data science encompasses much more than just statistics and machine learning, including data preparation, representation, computation, visualization, and the scientific study of data analysis itself [3].

Furthermore, Bialystok et al. (2009) suggested that the concurrent learning of multiple languages contributes to improved problem-solving skills [4]. This approach has the potential to foster student adaptability and creative thinking in data science education.

While existing research has extensively examined programming language education, several critical gaps remain.

- Limited empirical studies on simultaneous acquisition of multiple programming languages
- Insufficient research on BYOD implementation in data science education
- Lack of domain-specific studies in business and healthcare contexts

This study addressed these gaps through a systematic investigation of parallel language learning in a controlled educational environment.

1.2 Purpose of the Study

The main objective of this study was to empirically verify the effectiveness of a parallel learning approach for Python and R languages in data science education. Furthermore, we aim to evaluate the impact of a Bring Your Own Device (BYOD) environment integrating the Windows Subsystem for Linux (WSL) and the Jupyter Notebook on practical data science learning. To achieve this objective, the following three research questions will be set

Primary Research Question

How does the parallel learning of Python and R affect students' programming competency and problem-solving abilities in data science education?

Secondary Research Questions

1. What impact does a BYOD environment with WSL and Jupyter Notebook have on learning outcomes?
2. How do domain-specific applications (business or healthcare) influence the effectiveness of parallel language learning?
3. What factors contribute to the successful implementation of the parallel learning approach?

This investigation aims to examine the optimization of the concurrent acquisition of Python and R programming languages in the context of data science applications across various disciplines. The objective was to formulate an educational framework that addresses the specific requirements and demands of each field of study.

Through these research topics, this study aims to provide a new perspective on conventional data science education methods and contribute to the establishment of more effective and practical educational approaches. Furthermore, the results of this research are expected to serve as the basis for an educational model to foster highly adaptable human resources in the rapidly evolving field of data science.

1.3 Significance of the Study

This study aims to contribute to the development of educational methodology in this field by presenting a new paradigm for data science education and empirically verifying its effectiveness. The significance of this study can be viewed from the following perspectives from multiple perspectives.

This apprenticeship model of learning aligns with the established practices in other scientific fields. This approach contributes to improving students' adaptability and creative problem-solving skills and can be positioned as an attempt to apply the cognitive advantages identified in the context of programming education [4]. This study is expected to contribute to the development of highly adaptive personnel in the rapidly evolving field of data science.

Second, the construction and evaluation of a BYOD environment integrating WSL and the Jupyter Notebook aims to design an educational environment based on practical learning theory [5] and demonstrate its effectiveness. This effort bridges theory and practice and provides students with learning opportunities that closely resemble the actual work environment. This is expected to effectively implement Kolb's (2014) experiential learning cycle [6] and facilitate the acquisition of deep understanding and practical skills.

Third, the development of educational methods specific to the different disciplines of business and healthcare is based on situated learning theory [7], which aims to develop context-dependent applied competencies in data science. This approach bridges the gap between industry needs and academic education, and contributes to the development of a more effective human resource development model.

Furthermore, through the qualitative improvement of data science education, this research will contribute to the realization of an advanced data-utilizing society, which is the goal of Society 5.0. The development of human resources to drive digital transformation will strengthen industrial competitiveness and promote social innovation, and its social significance is extremely significant. The results of this research can be applied not only to data science education but also to education in other fields requiring complex skill sets, and are expected to contribute widely to the development of practical and effective educational models in higher education.

2. Pilot studies

2.1 Current Status and Issues in Data Science Education

Data science education has developed rapidly in response to the demands of the digital age and has come to occupy a core position in the curricula of higher education institutions. A comprehensive survey by Shimbaru (2023) documented that the Mathematics, Data Science, and AI Education Program Accreditation System (MDASH) had certified 78 educational institutions by August 2021, including 66 universities, 2 junior colleges, and 10 technical colleges [8]. However, the survey revealed marked differences in the curriculum structure and completion requirements of each institution, making the standardization and quality assurance of educational content an urgent

issue.

Sasajima et al. (2023) conducted a five-year study implementing problem-based learning (PBL) exercises using real data in undergraduate data science education and reported positive outcomes in practical skill development [1]. Their longitudinal study showed that the systematic introduction of PBL exercises from lower grades had a statistically significant positive impact on students' acquisition of practical skills ($p < 0.01$). However, the study also pointed out that individual differences in students' basic programming skills may affect the learning effectiveness of PBL, suggesting the need for further research in this regard.

A survey conducted by Nakada and Gherghel (2024) found that only 33% of humanities students in the Faculty of Foreign Studies showed interest in data science, whereas other faculties showed higher levels of interest (e.g., 52% in the Faculty of Business) [9].

Specifically, 54.3% of liberal arts students indicated that they were "not very interested" or "not interested at all" in data science, a statistically significant difference from science students (23.7%) ($\chi^2(1) = 45.62$, $p < 0.001$). This result suggests that current data science education may be biased toward science fields, and highlights the need for an integrated arts and sciences approach.

While these previous studies demonstrate the importance and prevalence of data science education, they raise three main issues: standardization of the curriculum, effective ways to develop practical skills, and the need for a comprehensive approach that is not limited to the humanities and sciences. This study aimed to develop and validate a new educational model to address these issues.

2.2 Methodology of Programming Language Education

With regard to programming language teaching methodologies, there are two main paradigms: the traditional approach, which emphasizes a deep understanding of a single language, and the emerging approach, which encourages the parallel learning of multiple languages. Each approach is based on a different theoretical foundation and pedagogical goal.

Yusupova et al. (2022) empirically examined the impact of adaptive e-learning environments using machine learning algorithms on programming education [10]. Their study showed that e-learning environments that provide personalized learning pathways significantly improve student learning outcomes compared to traditional uniform teaching methods ($t(198) = 3.74$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.53$). In particular, they concluded that flexibility in meeting students' individual needs is a key factor in this effect.

Kumar & Aithal (2020), on the other hand, through a qualitative analysis of the demand for human resources in the data science field, revealed the diversity of skill sets required of data scientists [2]. They emphasized that industry demands require data scientists to be proficient in multiple programming languages and tools, highlighting the importance of versatile technical skills in the field. This finding suggests the effectiveness of a concurrent learning approach for multiple languages, and has important implications for the design of educational curricula.

In addition, Bialystok et al. (2009) demonstrated that bilingualism is associated with enhanced executive control functions, particularly in tasks requiring inhibition of distracting information and switching between tasks, although bilingual speakers also show some disadvantages in lexical access and vocabulary size compared with monolinguals [4].

While research on programming education is expanding, Robins (2019) notes that teaching and learning programming continue to face well-documented challenges [11]. In particular, longitudinal studies on the effects of parallel learning and comparative studies that consider different learner characteristics are lacking.

While these previous studies suggest the potential effectiveness of the multiple-language parallel learning approach in programming language education, they also highlight the need to rigorously examine its effectiveness. This study aims to address this research gap and empirically examine the effectiveness of multiple language parallel learning in data science education.

2.3 Educational Use of WSL and Jupyter Notebook

Research on the educational use of the Windows Subsystem for Linux (WSL) and Jupyter Notebook is an emerging area of computer science education. The WSL provides the ability to run Linux directly in a Windows environment, greatly simplifying the construction of a cross-platform development environment. Jupyter Notebook, on the other hand, is an open-source web application that allows users to interactively execute code and instantly visualize results.

Perez and Granger (2015), in describing Project Jupyter, emphasized the importance of integrating code and explanatory text into a single interactive document for scientific computing and data analysis [12]. According to their qualitative analysis, a key advantage of the Jupyter Notebook is its ability to integrate code and explanatory text into a single interactive document. This characteristic is highly valued in both reproducible research and teaching, suggesting that it is particularly effective in developing computational thinking skills. Rule et al. (2019) provide guidelines for using Jupyter Notebooks to enhance reproducibility and transparency in computational research through proper documentation and sharing practices [13].

Ochkov et al. (2022) demonstrated how Jupyter Notebook and JupyterLab can be effectively integrated into STEM education, supporting various learning activities including problem formulation, scientific calculations, computational experiments, and interactive teaching materials [14]. On the other hand, empirical research on the combined educational use of WSL and the Jupyter Notebook remains limited; Ochkov et al. (2022) provide a comprehensive analysis of the impact of these environments on STEM education. Their study showed that the Jupyter Notebook and JupyterLab support a wide range of learning activities, from problem-setting formulation to scientific computation, computational experimentation, and even the creation of interactive teaching materials. In particular, the ability to integrate multiple programming languages (e.g., Python and R) and markup languages (e.g., Markdown and LaTeX) in a single environment has been pointed out as having the potential to deepen learners' understanding and promote practical skill acquisition. This finding provides theoretical support for the effectiveness of the parallel learning approach for Python and R languages proposed in this study and suggests that an integrated learning environment may contribute to the acquisition of multiple languages and practical data science skills. A survey of freshmen university students conducted by Kambe et al. (2024) (n = 102) reported significant individual differences in students' ICT utilization skills in a 14-item self-assessment of basic computer skills [15].

While these previous studies show that WSL and the Jupyter Notebook have great potential for data science education, they also highlight the lack of empirical studies on their effective implementation and long-term learning effects. This study aims to address this research gap and systematically examine the impact of a learning environment that integrates WSL and Jupyter Notebook on concurrent learning of multiple programming languages.

3. Research methodology

In this study, we adopted a quasi-experimental approach (quasi-experimental approach) using naturally formed learning patterns to examine the effectiveness of parallel learning of Python and R languages in data science education. This approach is suitable for implementation in an educational setting because it exploits naturally occurring differences in conditions without experimental manipulation, and is also appropriate from the perspective of ethical considerations [16].

3.1 Research Subjects

The research subjects will be first-year students enrolled in the 2025 academic year at the Faculty of Data Science at Shimonoseki City University. The same curriculum will be offered to all students, and learning patterns that naturally form during the one-year learning process will be observed.

3.2 Learning Environment

The following integrated learning environments are provided for all students:

1. Ubuntu 22.04 LTS environment using WSL2 (Windows Subsystem for Linux 2) on Windows 11
   This allows students to use a Linux-based development environment integrated directly into Windows, providing a modern development platform that bridges the Windows and Linux environments (Leeks, 2020) [17].
2. Jupyter Notebook and RStudio Server
   - Jupyter Notebook: A web-based interactive computing environment that enables the creation and sharing of documents containing live code, equations, visualizations, and narrative text, supporting multiple programming languages including Python and R (Kluyver et al., 2016) [18]. These 'computational notebooks' allow students to combine code

execution with rich documentation and immediate visualization of results.

- RStudio Server: An integrated development environment that provides a comprehensive platform for R-based data analysis and supports reproducible research workflows through integrated tools for code development, data analysis, visualization, and document preparation (Gandrud, 2020) [19]. This environment allows the seamless integration of coding, analysis, and presentation of results in a single interface.

3. Visual Studio Code（VS Code）

A lightweight cross-platform code editor that supports multiple programming languages, including Python and R, provides seamless integration with the WSL. Its extensible architecture allows it to function effectively across different development scenarios, including web, desktop, and cloud development (Del Sole, 2022) [20].

Students have autonomy in selecting and utilizing these environments, based on their individual preferences. This flexible environment setting will allow students to choose languages according to their personal learning styles and preferences, and to observe natural learning patterns. These environments provide students exposure to professional computational tools and practices (Nolan & Lang, 2015), while facilitating practical data science skills [21]."

3.3 Curriculum

The curriculum for this study will be designed to allow students to learn the basics of Python and R languages in parallel, and will be built on the constructivist alignment theory proposed by Biggs et al. (2023) [22]. This theory emphasizes the coherence among learning objectives, instructional activities, and assessment methods to promote deep learning. The curriculum consists of six main topics, with appropriate study periods for each topic.

1. Fundamental data types and variables
   - Python: int, float, str, list, dict
   - R: numeric, character, vector, list, data.frame
   - Learning Objectives: Understand the basic data structures of both languages and to use them appropriately.
2. Control structure (conditional branching, loops)
   - Python: if-else, for, while
   - R: if-else, for, while, apply functions
   - Learning Goal: To Implementing basic algorithms using conditional branches and loops.
3. Functions and Modules
   - Python: def, lambda, import
   - R: function(), source(), library()
   - Learning Objectives: Implement reusable code as functions and make appropriate use of external libraries.
4. Manipulation of data frames
   - Python: pandas (DataFrame, Series)
   - R: dplyr, tidyr
   - Learning Objectives: To acquire efficient manipulation and pre-processing techniques for structured data.
5. Data visualization:
   - Python: matplotlib, seaborn
   - R: ggplot2
   - Learning Goal: Select and implement appropriate visualization techniques according to data characteristics.
6. Basics of statistical analysis
   - Python: scipy.stats, statsmodels
   - R: basic statistics, lm(), glm()
   - Learning Objectives: Understand basic statistical methods and perform analyses using appropriate libraries.

Each topic will be structured around interactive exercises using Jupyter Notebook and RStudio

Server, adopting a Problem-Based Learning (PBL) approach (Hmelo-Silver, 2004) [23]. This allows students to learn by comparing the characteristics of both languages through practical problem-solving. The PBL approach was chosen because it promotes flexible knowledge acquisition, effective problem-solving skills, self-directed learning, collaboration, and intrinsic motivation, all of which are essential in data science education.

The effectiveness of educational approaches that utilize real-world datasets has been demonstrated in multiple studies. Vandergon et al. (2018) examined the impact of computer-supported collaborative science (CSCS), a teaching method that engages students in the collection, analysis, and interpretation of real-world data [24]. Their research showed that working with real-world data significantly increases students' motivation and engagement in learning. Based on these findings, the use of real-world datasets is recommended for assignments conducted at the end of the semester to promote the acquisition of practical data science skills.

The evaluation consisted of an assignment at the end of each topic (50%), and a final comprehensive exercise (50%). These projects allow students to freely choose their language and observe their natural language preferences and learning patterns. This curriculum design allows students to choose a language according to their own interests and aptitudes while learning the basics of both languages systematically and in depth.

3.4 Data Collection

This study employs a Mixed Methods Research method to collect quantitative and qualitative data (Guest & Fleming, 2014), as this approach allows for more comprehensive evidence and can address research questions that a single-method approach cannot adequately answer [25].

1. Submission of assignment file
    - Method: Assignment management system using Google Classroom
    - Content: Languages, code quality, and solution approaches used for each topic assignment
    - Frequency: At the end of each topic
    - Objective: Assessment of language selection tendencies and problem-solving skills
2. Self-assessment questionnaire
    - Methods: A questionnaire using the Visual Analog Scale (VAS) [26] was used, which has been validated as an effective method for capturing subtle gradations in respondent assessments (Shirahama et al., 2016). This approach allows for more precise measurements than traditional discrete scales while maintaining reliability in digital implementation.
    - Content: Self-assessment of language proficiency, motivation to learn, self-efficacy, etc. (0-100 scale)
    - Frequency: At the end of each topic and at the end of the semester
    - Objective: To analyze learners' subjective evaluation and psychological factors
3. Semi-structured interviews
    - Method: 30-minute interview in person or online
    - Content: Reasons for the selection of learning approaches, difficulties, comparative perspectives on languages, etc.
    - Frequency: Ten randomly selected from each group after the end of the semester.
    - Objective: Deep understanding of the learner's experiences and perceptions

The collected data will also be classified a posteriori into the following groups.

1. Dual language learning group: Students who used Python and R to the same degree and demonstrated a certain level of proficiency in both languages.
2. Single language acquisition group: students who primarily use one of the languages and show high proficiency in that language

3.5 Data Analysis

This study employs a mixed analysis approach that combines quantitative and qualitative analyses.

1. Descriptive statistics

- Calculate basic statistics (mean, standard deviation, median, etc.) to characterize each group
- Visualize distribution of language use ratios, test scores, and VAS scores (histograms, box plots, etc.)

2. Statistical hypothesis testing
   - Independent samples t-test: Test for differences in language proficiency, problem-solving ability, etc. between the two groups
   - Repeated two-way analysis of variance (ANOVA): analyzes changes in learning outcomes for both groups over time
   - Mann-Whitney U test: non-parametric test for comparing groups when normality cannot be assumed

3. Multivariate analysis
   - Multiple regression analysis: analyzes the relationship between language acquisition patterns (independent variable) and learning outcomes (dependent variable)
   - Principal Component Analysis (PCA): Extracts major learning behavior patterns from learning log data

4. Qualitative analysis
   - Thematic analysis [27]: a rigorous qualitative method involving familiarization with data, systematic coding, theme development, and refinement to extract meaningful patterns from interview data
   - Content analysis: Systematic categorization of reasons for selection of learning approaches and impressions from free-text responses

5. Mixed Analysis Methods
   - Integration of quantitative and qualitative results: following Fetters et al.'s (2013) [28] framework, results are integrated through [specific approach: narrative/data transformation/joint display] to achieve comprehensive interpretation

All statistical analyses were performed using R, with a significance level set at $\alpha = 0.05$. Effect sizes were reported using Cohen's d or Hedges' g.

3.6 Ethical considerations

This research will be conducted in accordance with the ethical principles of the Declaration of Helsinki [29] and the research ethics guidelines of Shimonoseki City University. Specifically, the following measures will be taken

1. Informed consent: The purpose of the research, methods, anticipated risks and benefits, and the use and protection of data were explained, and written consent was obtained.
2. Data anonymization: Personal identifiers are removed, and randomly generated ID numbers are assigned. The correspondence sheets were strictly controlled and destroyed after the study was completed.
3. Data Security: Collected data are encrypted and stored on a password-protected server. Access privileges were restricted to key members of the research team.
4. Freedom of participation and right to withdrawal: Ensure that participation in the research is completely voluntary and can be withdrawn at any time and without cause. Clearly, no disadvantages resulted from refusal or withdrawal.
5. Educational Equity: Ensure that all students have the same quality of educational opportunities regardless of their participation in the study.
6. Ethics Committee Approval: Approval was obtained from the Ethics Committee of Shimonoseki City University before the study began.

These ethical considerations will protect the rights and welfare of participants while simultaneously ensuring the conduct of scientifically valuable research.

4. Expected effects, etc.

The parallel learning approach for Python and R languages proposed in this study is expected to have multifaceted effects on data science education. Below, we discuss the anticipated benefits in terms of key aspects.

4.1 Effects of language acquisition

The parallel learning group (PLG) is expected to show more balanced proficiency in both languages compared to the single language focus group (SLFG). Specifically, the following effects are expected

1. Concept transfer between languages: We explore potential parallels with Cummins' (1979) [30] developmental interdependence hypothesis from bilingual education, suggesting that just as second language competence can build upon first language development, PLGs may develop transfer abilities based on strong foundational understanding in one programming language before intensive exposure to the second, although the cognitive mechanisms may differ significantly.
2. Improved metalinguistic cognition: Drawing parallels with Bialystok's (2001) [31] research on bilingual cognitive development, we hypothesized that PLGs may develop enhanced metalinguistic awareness in the context of programming languages, although the relationship between natural and programming language learning requires further investigation. (While Bialystok's work [31] focuses on natural language bilingualism, the cognitive advantages she identifies - particularly in selective attention and abstract structure understanding - may have relevant applications to programming language learning, though this theoretical extension requires empirical validation.)
3. Flexible language selection capability: Drawing inspiration from research on natural bilingualism (Grosjean, 2010) [32], we hypothesized that PLGs may develop similar capabilities in choosing appropriate programming languages for specific tasks, although this parallel requires empirical validation.

4.2 Improve problem-solving skills

The concurrent learning approach is expected to contribute to improved problem-solving skills in the following ways

1. Promoting multidimensional thinking: Drawing from Guilford's (1967) [33] broader theory of human intelligence and cognitive abilities, we hypothesized that exposure to multiple programming languages may enhance students' capacity for diverse problem-solving approaches.
2. Enhanced algorithmic thinking: Drawing from Papert's (1980) constructionist theory [34], which emphasizes learning through the meaningful construction of mental models, we propose that experience with multiple programming languages may help students build their own understanding of abstract algorithmic concepts through concrete implementations in different contexts.
3. Improved debugging skills: Drawing from Vessey's (1985) [35] research on debugging expertise, which demonstrates how experts develop superior program chunking abilities and systematic debugging strategies, we hypothesized that experience with multiple programming languages may enhance students' ability to develop more sophisticated debugging approaches. However, this potential relationship between multilanguage experience and debugging expertise requires empirical validation.

4.3 Effectiveness of the learning environment

The proposed integrated learning environment (WSL, Jupyter Notebook, RStudio Server, VS Code) is expected to be effective in

1. Acquisition of practical skills: Drawing from Lave and Wenger's (1991) [36] theory of situated learning and legitimate peripheral participation, we propose that using industry-standard tools within a collaborative learning community allows students to gradually develop practical skills through authentic participation in data science practices, moving from peripheral to more central

participation in the field.
2. Seamless language switching: Integrated environments allow students to easily move between languages and facilitate comparative learning. While acknowledging the fundamental differences between natural and programming languages, we consider how Krashen's (1982) concept of 'comprehensible input' might inform our understanding of how learners process multiple programming syntax systems.
3. Facilitating self-regulated learning: Flexible environmental settings allow students to customize the environment to their own learning style, which is expected to lead to effective learning based on Zimmerman's (2002) [38] theory of self-regulated learning.

4.4 Learning Effectiveness by Specialty

This study focuses on two specialties, business data science and healthcare data science, and is expected to have the following effects

1. Improved domain-specific skills: Using datasets and tasks specific to each discipline, students are expected to simultaneously acquire practical domain knowledge and data science skills. This aligns with research showing that learning is fundamentally influenced by the context in which it takes place (Bransford et al., 2000) [39].
2. Acquiring a cross-disciplinary perspective: By learning both languages, students can compare approaches and methods from different disciplines and acquire a cross-disciplinary perspective.
3. Understanding discipline-specific language preferences: It is expected that more suitable languages and methods will be identified for each discipline, which may provide useful insights into language selection in future research and practice.

These anticipated effects form the hypotheses of this study and provide a basis for future empirical testing. As the study progresses, a comparison of these predicted and actual results will help to clarify the effectiveness and challenges of the concurrent learning approach in data science education.

While these expected effects provide a theoretical framework for our research, it is essential to validate them through an empirical investigation. To this end, we conducted a preliminary experiment in 2024 to test our hypotheses and refine our methodology before its full implementation in 2025. This preliminary study focused on examining students' responses to parallel language learning and testing the effectiveness of our BYOD environment.

5. Preliminary Experiment

In this study, a preliminary experiment was conducted in the required course "Introduction to Data Science Programming" (15 weeks) in 2024 to verify the educational effectiveness and feasibility of Python-R parallel learning, which will be implemented in 2025. The purpose of this preliminary experiment was to confirm the effectiveness of the proposed parallel learning approach and identify practical issues.

5.1 Survey Subjects and Timeframe

The survey was conducted with 88 students enrolled in the "Introduction to Data Science Programming" (a required course) offered in the second semester (15 weeks) of the 2024 academic year. The survey was conducted after the 11th lecture and evaluations based on what they had learned up to that point were obtained. There were 62 valid responses were received (response rate: 70.5%).

5.2 Curriculum Structure

Students were provided with WSL2 (Windows Subsystem for Linux 2), Ubuntu 22.04, and JupyterLab environments on Windows 11 and were given hands-on training in a Bring Your Own Device (BYOD) format using their own laptop computers. The curriculum was designed to cover basic data science elements, such as functions, collections, data frames, and statistical methods, and to allow students to learn R and Python in parallel.

5.3 Survey Methodology

5.3.1 Quantitative evaluation by Visual Analog Scale (VAS)

A Visual Analog Scale (VAS) was employed for the evaluation, which is a measurement method that enables continuous subjective evaluation, and respondents responded by placing a mark at an arbitrary position on a horizontal line.

In this study, we used VAS to quantitatively analyze learners' subjective evaluations of parallel learning in R and Python from four perspectives: understanding, confidence, motivation, and potential. It has the advantage of being able to detect minute differences that are difficult to capture by using a conventional Likert scale. A scale of to 0-100 was used for each evaluation index to measure the learner's perception more precisely. In this analysis, the left and right ends of the line were set as 0 and 100, respectively, and the results were quantified as integer values. Figure 1 shows the questionnaire form used.

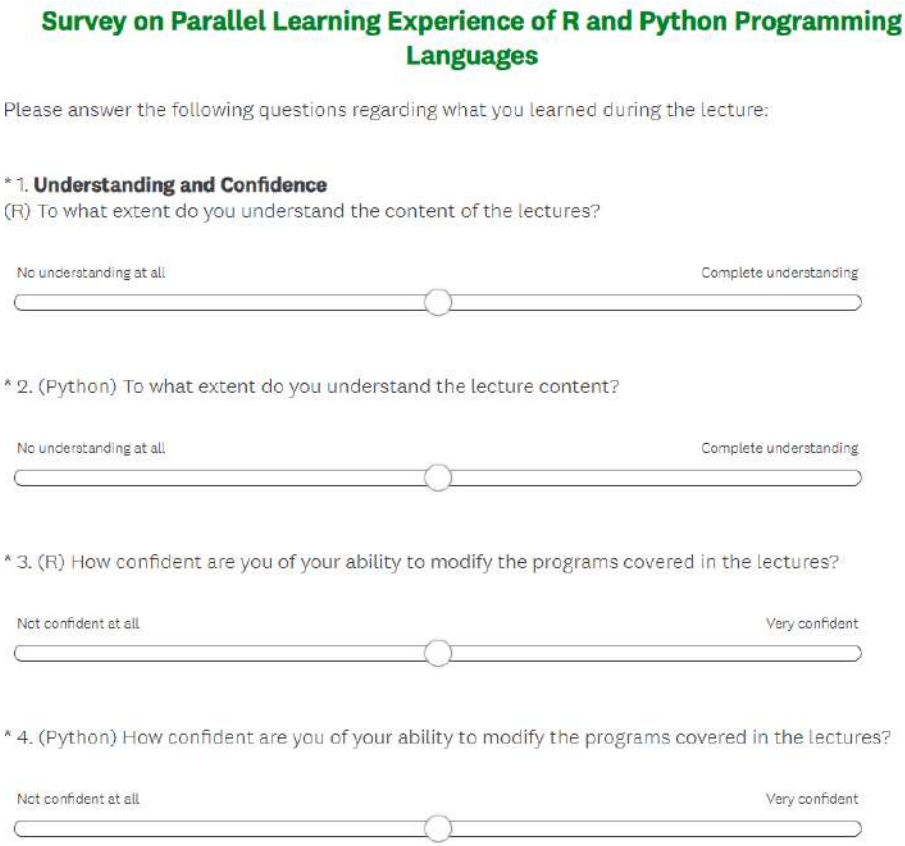


Figure 1 Online survey form (in part, VAS)

The following four items were evaluated for the R language and Python:

1. "Understanding" (Q1: R, Q2: Python)
- "To what extent do you understand the content of the programs covered in the lecture?"
- 0: " No understanding at all" - 100: " Complete understanding "

2. "Confidence" (Q3: R, Q4: Python)
- How confident are you in your ability to modify the programs covered in the lecture?"
- 0: " Not confident at all " to 100: "Very confident "

3. "Motivation" (Q5: R, Q6: Python)
- How much do you enjoy learning?"
- 0: "Not enjoyable at all" to 100: "Extremely enjoyable "

4. "Potential" (Q7: R, Q8: Python)
- How useful do you think it will be for your future career?"
- 0: "Not useful at all" to 100: "Very useful"

The following questions were asked to measure language preference (Q9).

- "When comparing the R language and Python, which do you prefer more?"
- 0: "Strongly prefer R" to 100: "Strongly prefer Python"

Questions were also asked about programming experience (Q10) and the desired major course of study (Q11) as background information. ("Extensive programming experience" was selected by 0 respondents)

Programming experience (Q10)

- No prior programming experience
- Limited experience
- Extensive programming experience

Preferred Course of Study (Q11)

- Business
- Health care

In the free description field, there were entries for mathematics, AI, teaching, and sensibility that were undecided.

Free-text Qualitative Evaluation

The questions were in the form of free-answer questions.

Q12: "Please describe your preferences for Python and R, including the specific aspects that you like or find challenging in each language."

Additional reasons for adopting the VAS include the following.

1. Continuous evaluation is possible and can capture minute differences
2. Quantifies respondents' subjective evaluations and facilitates statistical analysis.
3. Visually intuitive answers are possible
4. Suitable for comparative evaluation of both languages



Figure 2 Distribution of Four Metric VAS Score

Table 1 Descriptive Statistics for VAS Scores

Metric	Language	*n*	Mean	SD	Median	Min	Max
Understanding	R	62	61.16	13.45	63.0	23	89
	Python	62	62.39	14.00	63.0	25	91
Confidence	R	62	49.47	18.17	47.5	11	91
	Python	62	49.65	16.63	45.0	15	88
Motivation	R	62	69.73	16.82	68.5	29	100
	Python	62	72.39	15.84	72.5	28	100
Potential	R	62	76.00	15.85	75.5	39	100
	Python	62	78.27	15.83	76.5	36	100

Wilcoxon's signed-rank test was used to compare the R and Python languages in this study. The test results are listed in Table 2.

Table 2 Results of Wilcoxon Signed-Rank Test between R and Python VAS Scores

Basic Test Statistics

Metric	W-stat	p	p (adj)	Effect size r	Effect Int.
Understanding	512.0	0.012	0.049	0.318	Medium
Confidence	701.5	0.904	1.000	0.015	Negligible
Motivation to learn	369.5	0.004	0.014	0.370	Medium
Potential	382.0	0.008	0.033	0.335	Medium

Detailed Effect Analysis

Metric	Confidence Interval (Lower)	(Upper)	H-L est.	Significance
Understanding	-3.000	-0.500	-1.500071	TRUE
Confidence	-1.500	1.000	-0.000058	FALSE
Motivation to learn	-5.000	-1.000	-2.999991	TRUE
Potential	-3.500	-0.500	-2.000036	TRUE

Using this data, quantitative (descriptive and inferential statistics) and qualitative (text mining) analyses were conducted to examine the educational effects of learning R and Python in parallel from multiple perspectives.

First, the VAS score analysis was explained. Figure 2 shows a graph that visualizes the distribution of the four metrics (Understanding, Confidence, Motivation, and Potential) by superimposing a box-and-whisker plot on a violin plot and bee swarm plot. The outliers are indicated in red. Table 1 summarizes the descriptive statistics of the VAS scores.

To simultaneously analyze the four metrics ("Understanding," "Confidence," "Motivation," and "Potential"), this study employed adjusted values using the Bonferroni method. This ensures the appropriate control of the first type of error and statistical reliability of the conclusions. Note that the adjusted value is calculated as four times the original value, and if it exceeds one, it is rounded to one. The results of the analysis of these four metrics are described below.

1. Comparative analysis of "Understanding"

The results of the Wilcoxon signed-rank test for "Understanding" confirmed a statistically significant difference between R and Python ($W = 512.00$, $p = 0.012$, $r = 0.318$). The effect size was medium, with a Hodges-Lehmann estimator of -1.50 (95% CI: [-3.00, -0.50]). Descriptive statistics showed that Python (mean = 62.39, SD = 14.00, median = 63.00) had slightly higher understanding than R (mean = 61.16, SD = 13.45, median = 63.00). From the distribution plots in Figure 2, a higher concentration of scores was observed in Python, although the variation in understanding was similar in both the languages.

2. Comparative analysis of "Confidence"

No statistically significant difference was detected for "Confidence" ($W = 701.50$, $p = 0.904$, $r = 0.015$). Effect sizes were negligible, with a Hodges-Lehmann estimator of 0.00 (95% CI: [-1.50, 1.00]). For descriptive statistics, R (mean = 49.47, SD = 18.17, median = 47.50) and Python (mean = 49.65, SD = 16.63, median = 45.00) were nearly equivalent. From the distribution chart in Figure 2, we can observe that the distribution pattern of confidence in both languages is similar and tends to be concentrated around the median value.

3. Comparative analysis of "Motivation"

A significant difference was detected for "Motivation" ($W = 369.50$, $p = 0.004$, $r = 0.370$). The effect size was medium, with a Hodges-Lehmann estimate of -3.00 (95% CI: [-5.00, -1.00]), with Python (mean = 72.39, SD = 15.84, median = 72.50) showing significantly higher learning motivation than R (mean = 69.73, SD = 16.82, median = 68.50), indicating a significantly higher motivation than R (mean = 69.73, SD = 16.82, median = 68.50). The distribution plots in Figure 2 confirm the bias toward the higher-score range in Python.

4. Comparative analysis of "Potential"

Significant differences were also identified in perceptions of "Potential" ($W = 382.00$, $p = 0.008$, $r = 0.335$). The effect size was medium, with a Hodges-Lehmann estimate of -2.00 (95% CI: [-3.50, -0.50]), with Python (mean = 78.27, SD = 15.83, median = 76.50) receiving slightly higher ratings of future potential than R (mean = 76.00, SD = 15.85, median = 75.50). The distribution in Figure 2 shows that both languages have a slightly higher evaluation of future potential than the other languages. The distribution in Figure 2 shows a bias toward higher scores in both languages but is more pronounced in Python.

The results of these analyses showed significantly more positive evaluations of Python, particularly in terms of motivation and perceived future potential. However, the differences in understanding were small and no differences were observed in confidence, suggesting that parallel learning does not cause a significant bias in basic language acquisition.

5.3.2 Sentiment analysis of free-text comments

For the sentiment analysis of free-text comments, we employed a method combining morphological analysis and a sentiment word dictionary. First, morphological analysis was performed using RMeCab (Version 1.0) to extract nouns, verbs, and adjectives. To extract vocabulary containing

sentimental expressions, vocabulary was classified according to the following criteria.

- Positive vocabulary: "fun," "interesting," "good," "like," "easy to understand," "simple," "convenient," "useful," "efficient," "attractive," "friendly," "easy to use," etc.
- Negative vocabulary: "difficult," "complicated," "hard to understand," "difficult," "confusing," "poor at," "troublesome," "demanding," "anxious," "dislike," "hard to use," etc.

Sentiment scores were calculated using the following formula:

$$S = \frac{p - n}{p + n + 1}$$

p: total number of positive expressions, n: total number of negative expressions

where p is the total number of positive expressions and n is the total number of negative expressions. Adding 1 to the denominator prevents zero division and normalizes the score to the range [-1, 1]. This sentiment score indicates that the closer the value is to -1, the more negative the sentiment expressions are, and the closer it is to 1, the more positive the sentiment expressions are.

Table 3 shows the descriptive statistics of the sentiment scores by language-preference group. The Python weak preference group had a neutral mean sentiment score of 0.000 and lowest standard deviation of 0.243. In contrast, the R weak preference group had a mean sentiment score of 0.271 and the Python strong preference group had a mean sentiment score of 0.389, indicating relatively positive sentimental expressions.

Table 3 Sentiment Scores by Language Preference Group

Language Preference Group	n	Mean	SD	Median	Positive Ratio
Strong R Preference	20	0.000	0.243	0.000	11.1 %
Weak R Preference	12	0.271	0.295	0.250	50.0 %
Weak Python Preference	18	0.000	0.243	0.000	61.5 %
Strong Python Preference	12	0.389	0.347	0.500	66.7 %

As shown in Figure 3, the distribution of sentiment scores was visualized using a combination of violin, box-and-whisker, and bee swarm plots. The analysis showed that the R strong preference group and Python weak preference group tended to concentrate their emotion scores on approximately 0. In contrast, the R weak preference group and Python strong preference group showed a relatively wide distribution of emotion scores and a tendency to use more positive emotional expressions. In particular, the Python strong-preference group showed the highest distribution of emotion scores compared with the other groups.

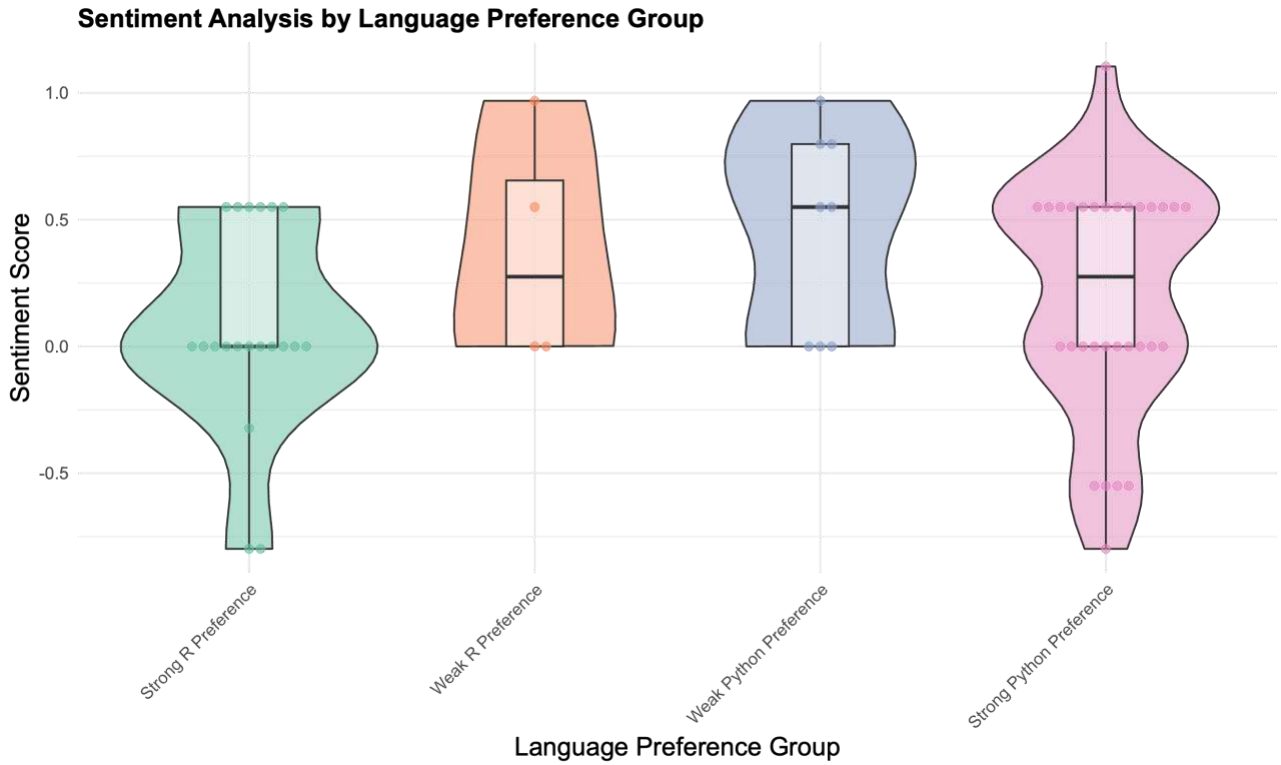


Figure 3. Distribution of sentimental expression by language preference group

To analyze the differences in emotional expressions between the language preference groups in more detail, we focused our analysis on the ratio of positive emotional expressions. As shown in Figure 4, the positive ratio for each group was visualized as a bar graph.

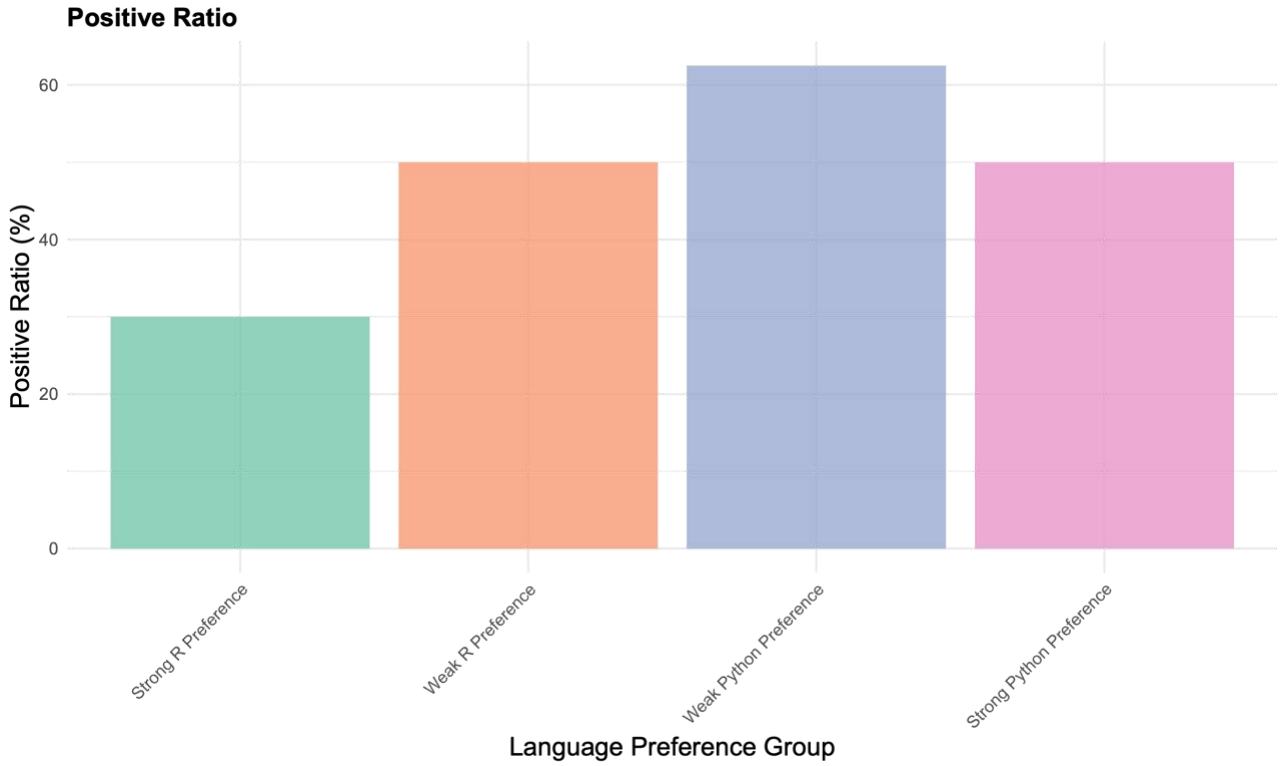


Figure 4: Positive Ratios by Language Preference Group

The analysis showed that The Python strong-preference group had the highest positive ratio (66.7 %), followed by the Python weak-preference group (61.5 %). In contrast, the R weak preference group showed a neutral value of 50.0%, whereas the R strong preference group had the lowest positive ratio (11.1 %). These results suggest that

Python-preferring learners tended to use more positive expressions.

The results of this analysis indicate that students' affective responses to parallel learning reflect complex evaluations based on their understanding of language characteristics and learning experiences rather than simple likes and dislikes. In particular, the tendency of students who express a strong preference to make more objective evaluations suggests that parallel learning may promote a deeper understanding of language characteristics.

Finally, we analyzed the characteristic patterns of sentimental expressions from the learners' free descriptions. In positive contexts, expressions such as "like," "easy," and "easy to understand" were commonly used, especially positive evaluations regarding the "ease of understanding" of the language. On the other hand, in negative contexts, expressions such as "difficult," "complicated," and "confusing" confusing were observed, with particular reference to the difficulties in dealing with errors.

Furthermore, distinctive expression patterns were identified for each language preference group: the R language preference group often referred to the intuitive understandability of statistical processing, while the Python preference group was characterized by references to the abundance of libraries and practicality. In the neutral group, many objective expressions that compared and evaluated the features of both the languages were observed. These expression patterns may reflect differences in perceptions of each group's language preferences.

It should be noted that the results described above are only preliminary experiments, and that the findings were obtained under limited conditions of educational practice for first-term students. It is expected that more effective educational methods will be established in the future through further practice and accumulation of research.

These preliminary results largely support our theoretical expectations outlined in Section 4, particularly regarding the development of metalinguistic competence and effectiveness of the BYOD environment. However, they also highlight several areas requiring attention in full implementation, such as the need for more structured support for students who show strong language preferences. These insights will be invaluable in refining our approach to the 2025 implementation.

6. Discussion

This study was designed to test the effectiveness of a parallel learning approach for Python and R languages in data science education. Below, we discuss key aspects of this study and provide future perspectives.

6.1 Effectiveness of the concurrent learning approach

In developing our theoretical framework, we carefully considered parallels from natural language acquisition research, while acknowledging the fundamental differences between natural and programming languages. Programming languages, which are formal systems with precise syntax and semantics, are likely to engage different cognitive processes than natural languages. However, insights from multilingual education research provide useful metaphors and hypotheses for investigating how learners might effectively acquire multiple programming languages. The following analysis explores these potential parallels, while maintaining appropriate theoretical caution.

The concurrent learning approach proposed in this study has the potential to provide a new perspective on data science education. While acknowledging the fundamental differences between natural and programming languages, we draw inspiration from theories of multilingual acquisition in natural language learning (cf. Hufeisen and Marx, 2007) [40] to explore potential parallels in how learners might develop competencies across multiple programming languages. The following benefits are expected.

1. Improved meta-linguistic competence: Learning multiple languages in a comparative manner may deepen the understanding of the abstract structure of languages and improve adaptability to new languages and frameworks.
2. Diversification of problem-solving approaches: Understanding the characteristics of different languages enables multifaceted approaches to problems and fosters creative problem-solving skills.
3. Readiness for practical work: It is expected that mastery of both languages, which are widely used in industry, will facilitate adaptation to the work environment after graduation.

However, the possibility of increased cognitive load and decreased learning efficiency owing to parallel learning must also be considered, and these points must be carefully examined.

6.2 Advantages and Challenges of a BYOD Environment

The BYOD (Bring Your Own Device) environment employed in this study is expected to have the following advantages and challenges

Advantages:

1. Continuity of learning: Personal devices allow for a seamless learning environment on- and off-campus.
2. Customizability: This enables the environment to be configured to meet the needs of individual students.
3. Cost efficiency: May reduce capital investment in part of the university.

Issue:

1. Environmental diversity: Differences in device performance and settings among students may affect their learning experience.
2. Security Risk: Security management of personal devices is challenging.
3. Technical Support: The burden of technical support for a wide variety of devices may increase.

To address these issues, it is necessary to develop appropriate guidelines and establish a technical support system, particularly to address the diverse learning spaces and technical challenges identified by Sølvberg and Rismark (2012) [41] in their study of mobile learning environments.

6.3 Optimize educational methods specific to your field of expertise

This study focuses on two specialized areas: business data science and healthcare data science. The following points are important for the optimization of educational methods specific to these disciplines.

1. Integration of Domain Knowledge: Curriculum that effectively integrates programming education with domain knowledge should be developed.
2. Use of real data: Efforts should be made to bridge the gap between theory and practice through exercises using actual datasets from each field.
3. Industry-academia collaboration: Collaboration between companies and medical institutions is important for designing curricula that reflect industry needs.

Through these optimizations, more effective professional education based on Kolb's (1984) [42] experiential learning cycle, which emphasizes concrete experience, reflective observation, abstract conceptualization, and active experimentation, is expected to be realized.

6.4 Limitations of the study and future challenges

The following limitations and issues exist in this study and require further investigation in future studies.

1. Sample size and generalizability: Since the study was conducted at a single university, the generalizability of the results should be done with caution. Further validation in multiple institutions is warranted.
2. Verification of long-term effects: Long-term effects that cannot be captured in a one-year observation period require follow-up studies.
3. Consideration of individual differences: A more detailed analysis of the impact of individual differences in learning styles and cognitive abilities on results is needed.
4. Validity of evaluation indicators: Further verification and improvement of evaluation indicators for programming and problem-solving skills are needed.
5. Role of educators: Further research on the skills and role of educators in effectively implementing a concurrent learning approach is needed.

It is hoped that addressing these issues will more clearly demonstrate the effectiveness of the concurrent learning approach in data science education, and lead to the establishment of a practical educational model. In the future, the findings of this study can be used as the basis for planning

larger-scale, longer-term research projects.

Finally, this study proposes a new approach to data science education, and the results may have important implications for educational practices and policymaking. However, we must not forget that the essence of education lies in the growth of individual learners. We conclude this paper by emphasizing the importance of flexible educational approaches that respond to the needs and potential of each individual learner as well as technological and methodological advances.

References

[1] Munehiko Sasajima, Ken Ishibashi, Takehiro Yamamoto, Takayuki Yumoto, Hiroaki Ohshima, Tetsuya Fujie, Naoki Kato (2024), "On the Education of Lower Grades in the Faculty of Data Science through Problem-Solving Exercises Using Real Data Reflections on PBL Exercises through FY2023", Proceedings of the Annual Conference of JSAI. (in Japanese) DOI: 10.11517/pjsai.JSAI2024.0_3P1GS304

[2] Kumar, S., Aithal, S. (2020), "How Lucrative & Challenging the Boundaryless Opportunities for Data Scientists?", International Journal of Management, Technology, and Social Sciences, 5(2), pp.110-129. DOI: 10.5281/ZENODO.3966222

[3] Donoho, D. (2017), "50 years of data science", Journal of Computational and Graphical Statistics, 26(4), pp.745-766. DOI: 10.1080/10618600.2017.1384734

[4] Bialystok, E., Craik, F. I., Green, D. W., & Gollan, T. H. (2009), "Bilingual minds". Psychological science in the public interest, 10(3), pp.89-129. DOI: 10.1177/1529100610387084

[5] Dewey, J. (1938), "Experience and education", New York: Macmillan.

[6] Kolb, D. A. (1984), "Experiential Learning: Experience As The Source Of Learning And Development", Journal of Business Ethics.

[7] Lave, J., & Wenger, E. (1991), "Situated learning: Legitimate peripheral participation", Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511815355

[8] Toshiki Shimbaru (2023), "Facts about Mathematical, Data Science, and AI Education Programs (数理・データサイエンス・AI 教育プログラムの実状)", Japan Journal of Educational Technology., 47(2), pp.333-342. (in Japanese) DOI: 10.15077/jjet.46095

[9] Tomohiro Nakada, Claudia Gherghel (2024), "Report on Questionnaire Survey in Introduction to Data Science", Research Report of JSET Conferences, 2024(2), pp.2436-3286. (in Japanese) DOI: 10.15077/jsetstudy.2024.2_91

[10] Yusupova, S. B. et al. (2022), "The Advantage of Using e-Learning in Teaching Students Programming Languages", IEEE Region International Conference. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017040

[11] Robins, A. (2019), "Novice programmers and introductory programming", In The Cambridge Handbook of Computing Education Research (S. Fincher & A. Robins, Eds.). Cambridge University Press, 327-376. DOI: 10.1017/9781108654555.013

[12] Perez, F., & Granger, B. E. (2015), "Project Jupyter: Computational narratives as the engine of collaborative data science", Retrieved September, 11(207), 108. https://blog.jupyter.org/project-jupyter-computational-narratives-as-the-engine-of-collaborative-data-science-2b5fb94c3c58

[13] Rule, A., Birmingham, A., Zuniga, C., Altintas, I., Huang, S. C., Knight, R. & Rose, P. W (2019), "Ten simple rules for writing and sharing computational analyses in Jupyter Notebooks", PLoS Computational Biology, 15(7), e1007007. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1007007

[14] V. F. Ochkov, A. Stevens and A. I. Tikhonov (2022), "Jupyter Notebook, JupyterLab – Integrated Environment for STEM Education", 2022 VI International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), pp. 1-5, DOI: 10.1109/Inforino53888.2022.9782924

[15] Junko Kambe, Asuka Yamaguchi, Kazue Tamada, Toshiki Matsuda (2024), "A Preliminary Survey on Improving ICT Usage by New Students Using BYOD", Research Report of JSET Conferences, 2024(2), pp. 1-4. (in Japanese) DOI: 10.15077/jsetstudy.2024.2_1

[16] Shadish, W. R., Cook, T. D., & Campbell, D. T. (2002), "Experimental and quasi-experimental designs for generalized causal inference", Houghton Mifflin. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:938218

[17] Leeks, S. (2020), "Windows Subsystem for Linux 2 (WSL 2): Tips, Tricks, and Techniques", Packt Publishing. https://packt.link/free-ebook/9781800562448

[18] Kluyver, T., Ragan-Kelley, B., Pérez, F., Granger, B. E., Bussonnier, M., Frederic, J. & Jupyter development team (2016), "Jupyter Notebooks - a publishing format for reproducible computational workflows", International Conference on Electronic Publishing. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:36928206

[19] Gandrud, C. (2020), "Reproducible research with R and RStudio", Chapman and Hall/CRC. https://christophergandrud.github.io/RepResR-RStudio/

[20] Alessandro Del Sole (2022), "Visual Studio Code Distilled: Evolved Code Editing for Windows, macOS, and Linux. 3rd ed.", Apress. DOI: 10.1007/978-1-4842-9484-0

[21] Nolan, D., & Lang, D. T. (2015), "Data Science in R: A Case Studies Approach to Computational Reasoning and Problem Solving", Chapman and Hall/CRC. DOI: 10.1201/b18325

[22] Biggs, J., Tang, C., & Kennedy G. (2023), "Teaching for quality learning at university 5th Edition", McGraw-hill education (UK). https://www.mheducation.co.uk/teaching-for-quality-learning-at-university-5e-9780335250820-emea-group

[23] Hmelo-Silver, C. E. (2004), "Problem-based learning: What and how do students learn?", Educational psychology

review, 16(3), pp.235-266. DOI: 10.1023/B:EDPR.0000034022.16470.f3
[24] Vandergon, V. O., Reveles, J., Herr, N., Nguyen-Graf, D., Rivas, M., d'Alessio, M., & Foley, B. (2018), "Engaging Students in Conducting Data Analysis: The Whole-Class Data Advantage", In I. Management Association (Ed.), K-12 STEM Education: Breakthroughs in Research and Practice, pp. 970-996, IGI Global. DOI: 10.4018/978-1-5225-3832-5.ch045
[25] Guest, G., Fleming, P (2014), "Mixed Methods Research", In Public Health Research Methods (pp. 581-614), SAGE Publications, Inc. DOI: 10.4135/9781483398839.n19
[26] Shirahama, N., Watanabe, S., Ikegami, F., & Mori, Y. (2016), "Development of VAS App to Improve the Youth Mental Health Research Environment", ICIC Express Letters Part B: Applications, 7(9), pp.1939-1944. DOI: 10.24507/icicelb.07.09.193
[27] Braun, V., & Clarke, V. (2006), "Using thematic analysis in psychology", Qualitative research in psychology, 3(2), pp.77-101. DOI: 10.1191/1478088706qp063oa
[28] Fetters, M. D., Curry, L. A., & Creswell, J. W. (2013), "Achieving integration in mixed methods designs—principles and practices", Health services research, 48(6pt2), pp.2134-2156. DOI: 10.1111/1475-6773.12117
[29] World Medical Association (2013), "World Medical Association Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects", JAMA, 310(20), pp.2191–2194. DOI: 10.1001/jama.2013.281053
[30] Cummins, J. (1979), "Linguistic interdependence and the educational development of bilingual children", Review of Educational Research, 49(2), pp.222-251. DOI: 10.2307/1169960
[31] Bialystok, E. (2001), "Bilingualism in development: Language, literacy, and cognition", Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511605963
[32] Grosjean, F. (2010), "Bilingual: Life and reality", Harvard University Press. DOI: 10.4159/9780674056459
[33] Guilford, J. P. (1967), "The nature of human intelligence", McGraw-Hill. DOI: 10.3102/00028312005002249
[34] Papert, S. (1980), "Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas". Basic Books, Inc. DOI: 10.5555/1095592
[35] Vessey, I. (1985), "Expertise in debugging computer programs: A process analysis", International Journal of Man-Machine Studies, 23(5), pp.459-494. DOI: 10.1016/S0020-7373(85)80054-7
[36] Lave, J., & Wenger, E. (1991), "Situated learning: Legitimate peripheral participation", Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511815355
[37] Krashen, S. D. (1982), "Principles and practice in second language acquisition", Pergamon Press.
[38] Zimmerman, B. J. (2002), "Becoming a self-regulated learner: An overview", Theory Into Practice, 41(2), pp.64-70. DOI: 10.1207/s15430421tip4102_2
[39] Bransford, J. D., Brown, A. L., & Cocking, R. R. (2000), How people learn: Brain, mind, experience, and school: Expanded edition. National Academy Press.
[40] Hufeisen, B., & Marx, N. (2007), "How can DaFnE and EuroComGerm contribute to the concept of receptive multilingualism? Theoretical and practical considerations", In J. D. ten Thije & L. Zeevaert (Eds.), Receptive Multilingualism: Linguistic analyses, language policies and didactic concepts (pp. 307-321). John Benjamins Publishing Company. DOI: 10.1075/hsm.6.20huf
[41] Sølvberg, A. M., & Rismark, M. (2012), „Learning spaces in mobile learning environments", Active Learning in Higher Education, 13(1), pp.23-33. DOI: 10.1177/146978741142918
[42] Kolb, D. A. (1984), "Experiential learning: Experience as the source of learning and development" Prentice-Hall.

【原著論文】

「記述統計」の基礎事項の理解度とつまずき箇所の一考察

—「データの分析」に関するテスト問題の誤答分析を通して—

A Study of Comprehension and Stumbling in the Basics of "Descriptive Statistics"

—Through Analysis of Test Errors on "Data Analysis"—

佐々木　淳[1]

Jun Sasaki[1]

[1]下関市立大学

Shimonoseki City University

要旨

本研究では、大学・高専生及び社会人に対して数理・データサイエンス・AI 教育を効果的に行うことを目的として、それらの教育の必要となる「記述統計」の基礎事項の理解度とつまずき箇所の考察を、文系大学生に行った基礎力テストを用いて分析を行った。
分析の結果、問題で具体的な数値を与えた場合、平均・中央値・最頻値を求める方法については良好な正答率であった。しかし、具体的に数値を与えなかった場合は平均についても求めることができない学生が散見され、具体的な数値を与えた場合と比較して有意な差が認められた。分散については、具体的な数値を与えた場合も正答率は低く、具体的な数値を与えなかった場合は正答率が更に下がった。そのため、分散の教育は具体的な計算から指導する必要があると考える。四分位数については定義が曖昧な学生が散見されたため、教育を実施する際は定義の説明のみならず意味や実用性を含める必要がある。

キーワード：代表値、記述統計、散布度、四分位数

Abstract

In this study, with the aim of effectively providing education in mathematics, data science, and AI to university and technical college students and working adults, we analyzed the understanding of the basic concepts of "descriptive statistics" necessary for such education and the points where students have difficulties, using a basic skills test administered to liberal arts university students.

The results of the analysis showed that the students had a good level of understanding of questions that required them to find the mean, median and mode. However, the correct response rate for questions about variance and quartiles was low, and there were some students whose definitions were unclear.
Therefore, I think that education on descriptive statistics should include guidance on the meaning of variance and quartiles.

Keywords: Descriptive Statistics, Measures of Central Tendency, Statistical Dispersion, Quartile Points

1. はじめに

AI やデータサイエンスの発展は急速に進んでおり、その影響は社会のあらゆる分野に及んでいる。閣議決定された内閣府（2022）による「AI 戦略 2022」において様々な具体目標が定められ、大学・高専生に対しては「文理を問わず、全ての大学・高専生（約 50 万人卒／年）が課程にて初級レベルの数理・データサイエンス・AI を習得」することを目指し、社会人に対しては「多くの社会人（約 100 万人／年）が、基本的情報知識と、データサイエンス・AI 等の実践的活用スキルを習得できる機会をあらゆる手段を用いて提供」することとしている。この目標から数理・データサイエンス・AI の技術を活用するための基盤として、数理的な能力の重要性が強調されていることがわかる。

しかしながら、大学・高専生及び社会人に対して数理・データサイエンス・AI 教育を行う場合は、中等教育のそれとは違い、教育に充てられる時間が限られているため、効果的に教育を行うことが不可欠となる。具体的には学生や社会人が何を理解していて、理解不足の内容がどこにあるのかを教育を行う者が踏まえた上で教育を実施しないと、学生や社会人が知っていることを丁寧に教育することになることや十分に理解できていないことに気づかず教育することになり、所要の結果が得られない可能性が考えられる。

そこで本研究では、文系大学生を対象に実施した記述式の数学基礎力テストの中から、数理・データサイエンス・AI 教育の基礎となる高等学校数学 I の「データの分析」に関する問題に焦点を当てる。そして理解度およびつまずき箇所を把握し、高等学校、大学の教育及び社会人に対するリカレント教育のいずれにも効果的となる示唆を得ることを目的とする。

この目的とした理由は、誤答例から教育内容に強弱をつけ効果的なものするためである。数学・統計の単元や問題は、易しいものから難しいものまで幅広くあるが、難易度を考慮した研究は多くない。そのため、例えば高等学校等における数学の授業であれば、教員による経験もしくは教科書の配列順などを頼りにすることになる。教員に経験がない場合に問題解説を行う際、もしかすると授業を受けている生徒がよく分かっている問題に対して時間をかけて丁寧に解説を行っている可能性や、逆に生徒があまり理解できていない問題に対して理解ができている問題と同じ時間で解説を行い、生徒が理解不足になっている可能性も考えられる。本研究がその対策となり、効果的な教育の一助となることを目的としている。

なお、本研究における文系大学生とは、文学部、経済学部、法学部などの文系学部に所属する大学生とする。また、数学の基礎力は、高等学校の教科書に掲載されている例題の意味を理解し、計算間違いをせずに解答できる能力と定義する。本研究は、佐々木(2023)及び佐々木(2024)をもとに更に分析を行い、大幅に加筆・修正したものである。

2. 研究の方法等

2-1. 分析する問題

誤答の分析は、文系大学生の数学基礎学力を測るために 2023 年度及び 2024 年度に実施した数学基礎力テストを用いて行った。数学基礎力テストは、数理・データサイエンス・AI を学ぶ上で必要となる統計の基礎的な能力を確認する内容で、記述統計に関連する内容であるデータの分析から 7 題、推測統計に関する内容である、集合から 1 題、場合の数から 4 題、確率から 5 題、数列の Σ 計算から 2 題、積分の計算から 2 題で構成されている。

本研究は数学基礎力テストにおけるデータの分析の問題 7 題から表 1 にある 4 題の分析を行う。この 4 題を選出した理由は、データの分析における基本的な概念であるとともに、数理・データサイエンス・AI の理解に不可欠となるためである。本数学基礎力テストの問題は、学校基本法 30 条 2 項にある「生涯にわたり学習する基盤が培われるよう、基礎的な知識及び技能を習得させる」ことを踏まえ、基礎的な知識及び技能を確認できるものとし、具体的には高等学校の教科書や東京理科大学数学教育研究所(2022)を参照して出題した。

表 1　基礎力テスト 1 における「データの分析」に関する内容を抽出

問題	内容（下線は 2024 年のみ出題、下線なしは 2023 年・2024 年の両年出題）
1	次のデータに対して問いの値を求めよ「１、２、３、４、５、６、６、７」[注1)] (1)　中央値、(2)　最頻値、(3)　範囲、(4)　第 1 四分位数、(5)　第 2 四分位数、(6)　第 3 四分位数
2	次のデータに対して問いの値を求めよ「９、４、７、８、５、１、１０、８、２」 (1)　平均、(2)　分散、(3)　中央値、(4)　最頻値、(5)　範囲、(6)　第 1 四分位数、(7)　第 2 四分位数
3	平均点が 60、分散が 225 のテストにおいて、全員の点数を 10 点加えたとき及び 10 倍したときの平均点
4	平均点が 60、分散が 225 のテストにおいて、全員の点数を 10 点加えたとき及び 10 倍したときの分散

2-2. 分析方法

数学基礎力テストを採点し、正答・誤答、無答の人数及び割合を算出した。平均・分散に

注１）2023 年度は「１、２、３、４、５、５、６、７」として出題した。

ついては、問題 2 のように具体的な数値で出題したものと、問題 3 及び問題 4 のように、具体的な数値を与えなかったものがあり、これらの正答率に有意な差があるか否かについてはマクネマー検定を用いて分析した。また、中央値及び第 2 四分位数の正答率についても、有意差を調べるためマクネマー検定を用いた。分析には SPSS for windows Ver.28.0 を用いた。なお、SPSS におけるマクネマー検定の p 値は、二項検定のよる p 値が算出されるため、検定統計量から算出した p 値はそれとは別に示した。

前述の分析後、誤答の集計を行い、どのような誤解や理解不足があるのかを分析した。

2-3. 研究対象者

対象は公立 S 大学経済学部の学生で、主となる対象学年は 1 年生である。回答は記述式で行い、プリントやノートの持ち込みは不可とした。実施日、試験時間及び受検者数等の内訳は表 2 の通りである。なお本研究において、研究対象を大学生とした理由は、高等学校における教育課程を経た学生が、どの程度基礎知識および学力レベルを身に付けているのかを検証すると同時に、短期的な記憶に依存した学習効果を最小限に抑えるためである。具体的には、定期試験の直前に行われる一夜漬け学習などによって得られる短期的な記憶効果に左右されない状況とすることで、研究の信頼性を高めることを目的とした。

2-4. 倫理的配慮

対象の学生には文書と口頭により研究の趣旨を説明した。研究の参加は自由意志によること、途中で拒否できること、個人情報の保護及び匿名性の確保等を伝え、研究同意書を用いて同意を確認した。本研究に不同意の学生はいなかったが、日本とカリキュラムが異なる留学生及び過去に同数学基礎力テストを受検した再履修の学生は分析対象に含めなかった。分析の対象に含めなかった学生は、2023 年度の留学生 9 人、2024 年の留学生 9 人及び 2023 年度に基礎力テストを受検し、2024 年に再履修した学生の 3 人である。本研究の調査実施に当たっては、下関市立大学の倫理委員会（受付番号 2301-0417）の承認を得て行った。

表 2　基礎力テスト 1 の実施年度、実施日、試験時間及び受検者数

実施年度	実施日	試験時間	有効回答数（受検者数）単位：人				
			1 年	2 年	3 年	4 年	計
2023	5 月 15 日	60 分	287 (292)	14 (16)	6 (6)	7 (9)	314 (323)
2024	4 月 22 日	75 分	281 (290)	12 (14)	1 (1)	2 (3)	296 (308)

3. 先行研究

「データの分析」に関する誤答分析は、高等学校の単元として「データの分析」が導入される前と後でそれぞれ存在する。

「データの分析」導入前の先行研究としては、日本数学会(2013)が、平成 23 年度入学の大学新入生を主な対象として 46 の大学で大規模な調査を行っている。代数・幾何・解析の 3 分野から偏りなく出題しており、この中に「データの分析」に関する内容が含まれている。

「データの分析」に関する内容は、分布や平均に関する基本的な正誤問題であった。日本数学会(2013)は、正答率を 90%と想定していたが、結果は大幅に下回っていた。分析の結果及び、東京理科大学数学教育研究所(2006)が行った 2005 年基礎学力調査報告の結果から「定義に従って平均を計算することはできるが、平均の性質や意味がわからない層がかなりいると思われる」と指摘している。

「データの分析」の導入後の先行研究としては、中村(2019)が、公立短期大学校で数学的な知識や技能を必要とする工業系の学科（建築科、情報技術科）に所属している学生 45 人に対して実施している。中村(2019)は、「データの分析」の学習内容の理解の様相について 3 つの結果を残している。1 つ目は、調査した工業系の学生 45 人の中に「データの分析」を苦手としている学生が約 4 割存在すること。2 つ目は「最頻値、四分位数、箱ひげ図については苦手意識がないが、実際にはそれらの意味を十分に理解していない」こと。3 つ目は「分散、標準偏差、相関係数は、苦手意識をもっており、実際にそれらの意味や関係を理解できていない。また、それらの値を求めることもあまりできていない」ことである。中村(2019)はこれらの結果を踏まえ、「分散、標準偏差、相関係数は、それぞれの意味と関係の理解が重要」「四分位数と四分偏差の意味を理解し、箱ひげ図との関係で捉えることができるように指導することが必要」で、そのためには「5 数要約量の視覚化を指導に取り入れることが有効」であり、「データの分析」の指導においては「苦手意識を取り、学習内容が好きで、楽しくなるような教材、題材や指導などの工夫が必要」と述べている。

中村(2019)の結果は有用であるものの、対象者数が少ないためサンプルサイズを考慮すると、調査結果は集団依存の可能性も考えられる。また、対象者が数学的な知識や技能を必要とする理系の学生であるため、そうではない学生、特に文系の学生の様相については調査・分析の蓄積が必要と考えられる。

学習の定着度の観点では、高松・村上・関・中田（2017）が、「データの分析」が高等学校の学習課程に導入され、その内容を学んだ高校生が初めて大学に入学した 2015 年度に、神戸常盤大学保健科学部（看護学科および医療検査学科）の新入生を対象に「データの分析」から選んだ 17 項目で基礎学力テストを実施し、その結果を分析している。

分析の結果は「数学的な概念の学習定着度が低かった」と結論付けており、「大学における統計学教育においても再度、学習定着度を向上させる教育が必要である」と指摘している。ただし、この論文では調査した問題を非公開にしている点と、表 3 と論文中の分析の通り正答率に有意な差が見られるものの、その理由が明らかにはされておらず、改善策の具体的な言及がなされていない。そのため、大学において統計教育の再教育が必要であること、特に正答率が低い分散や四分位数の教育を強調する必要があることは示唆されるものの、その原因が計算力不足によるものなのか、転記間違いなどのケアレスミスによるものなのか、定義の記憶が曖昧によるものなのか、詳細な情報を得ることができない。

表 3　正答率 高松・村上・関・中田(2017)から、特徴的なデータを抽出（表中の百分率は正答率）

年度	学科	対象人数	分散 2	第 2 四分位数	第 3 四分位数	散布図 2
2015	看護	74	16%	39%	47%	66%
2015	医療検査	85	41%	55%	65%	79%
2016	医療検査	95	58%	60%	73%	67%

出典：高松邦彦・村上勝彦・関雅幸・中田康夫（2017）「神戸常盤大学保健科学部新入生に対する統計学教育に関する一考察　―高等学校数学Ⅰ（新課程）の「データの分析」の学習定着度をもとに―」

全国学力・学習状況調査では、小学生及び中学生に様々な代表値やグラフの定着度を確認する調査をしている。中学の数学では、令和 5 年度は累積度数（正答率：46.3%)、四分位範囲（正答率：65.7%）及び箱ひげ図の解釈（正答率：33.9%)、令和 4 年度はヒストグラムの解釈（正答率：44.2%)、箱ひげ図の解釈（正答率：44.4%)、令和 3 年度はヒストグラムの度数の読み取り（正答率：83.2%)、令和 2 年度は範囲（正答率不明)、平成 31 年は最頻値（正答率：58.6%)、中央値（正答率：54.1%）ヒストグラムに関する内容（正答率：13.8%）などである。小学校の算数では、令和 5 年度は棒グラフの読み取り（正答率；56.4%）及び分割表の読み取り（正答率：64.8%)、令和 3 年度は棒グラフの読み取りが 2 つ（正答率：90.8%と 78.8%)、平成 31 年度も棒グラフの読み取りが 2 つ（正答率：95.2%と 78.8%）であった。

これらはデータの分析に関する誤答分析の先行研究の一部であるが、データの分析に関する誤答分析は少なく、文系の学生を対象とした誤答分析については更に少ない。冒頭で引用した内閣府(2022)の AI 戦略 2022 が掲げているのは「文理を問わず」であるため、文系の学生がどこまでを理解していて、どの内容に理解不足があるのかについては研究の蓄積が必要であると考える。

本研究は、先行研究の調査対象では少なかった文系の学生に焦点を当て、答案の誤答分析から学生が理解不足の原因となっている箇所の把握を行い、効率的な教育への示唆につなげることを目的とする。なお、本研究が対象とする学生と先行研究が対象とする学生とでは、受けてきたカリキュラムが異なる点について注意した上で分析を行っている。

4. 誤答の分析

4-1 平均・分散の誤答分析

4-1-1 具体的な数値を与えた場合の平均・分散の誤答分析

表 1 の問題について正答率及び誤答の分析を行う。平均及び分散の計算については表 1 の問題 2 で出題した。問題は「９、４、７、８、５、１、１０、８、２」の平均と分散で、答えは、それぞれ6と80/9であり、結果は表 4 の通りであった。平均の結果については良好であったが、分散については正答者が 2 割程度であった。

平均の誤答は、データの大きさを 9 ではなく 10 としたことによる計算間違いなどのケアレスミスによるものがほとんどであり、定義を把握していないと考えられる回答はほとんどな

かった。ただし、平均を間違えた場合は分散も間違えることになるため、サンプルの大きさの数え直しや計算の確認などの見直しの重要性を伝える必要があると考える。分散の誤答の概要については表 5 の通りで、計算間違いと定義を把握していないものに大別された。

表 4　問題 2(1)平均・(2)分散の正答・誤答・無答の内訳

（単位：人、括弧内の単位：受検者数に対する百分率、以後の単位も同様とする）

問題	年度	正答	誤答	無答	受検者数
問題 2 (1) 平均	2023	299 (95.2)	15 (4.8)	0 (0.0)	314
	2024	280 (94.6)	16 (5.4)	0 (0.0)	296
	合計	579 (94.9)	31 (5.1)	0 (0.0)	610
問題 2 (2) 分散	2023	78 (24.8)	94(29.9)	142 (45.2)	314
	2024	55 (18.6)	145 (49.0)	96 (32.4)	296
	合計	133 (21.8)	239 (39.2)	238 (39.0)	610

表 5　問題 2(2)分散の誤答の概要

分散の誤答の概要		回答の数値	年度		合計	
			2023	2024		
分子（偏差平方和）の計算間違い		$81/9 = 9$	9	33	42	62
		89/9	6	0	6	
		上記以外	10	4	14	
偏差平方和を回答	計算正解	80	8	26	34	39
	計算間違い	上記以外	1	4	5	
偏差平方和の平方根を回答		$\sqrt{80} = 4\sqrt{5}$	8	9	17	
偏差の和、偏差の和の平均を回答		0	5	8	13	
最大値を回答		10	5	2	7	
標準偏差（計算間違い含む）を回答		$4\sqrt{5}/3$	6	0	6	
平均の平方根を回答		$\sqrt{6}$	2	4	6	
平均偏差を回答	計算正解	$24/9 = 8/3$	0	3	3	6
	計算間違い	20/9	0	1	1	
	分子のみ	24	0	2	2	
計算間違い後、平方根を回答		$\sqrt{9} = 3$	3	2	5	
2 乗平均、計算は正答		404/9	3	2	5	
最頻値		8	3	2	5	
割るサンプルの大きさの間違い		80/6、80/36 等	0	3	3	
その他			25	40	65	
合計			94	145	239	

定義を把握していないことに起因する誤答を分析すると、偏差平方和を回答したものやそ

の平方根、偏差を 2 乗しなかったもの、最大値、平均偏差を回答したものなどであった。これらの誤答は、偏差を 2 乗する意味や偏差平方和をサンプルの大きさで割る理由を理解していないことが原因で分散の定義が正確に記憶されず、誤答になった可能性が示唆される。

そのため、分散を指導する際には、偏差を 2 乗する意味を強調すること、特に偏差の和が 0 になるという結果を口頭で説明するにとどめず、実際に計算して 0 になることを提示するなど、面倒な計算を省略せずに見せて、実感させる必要があると考える。その上で、偏差平方和をデータの大きさで割る（偏差平方の平均とする）説明を行い、公式の意味を理解させることで曖昧な公式暗記による誤答が減少すると考えられる。特に、サンプルの大きさで割ることは、後に学習する自由度や不偏分散の理解にもつながるため、定義式や公式を提示して演習するのみならず、具体的に演習した問題を活用しながら、公式の意味を言葉にして説明するなどの工夫が必要になると考える。そして、これらの配慮は中央教育審議会(2014)が指摘する「知識の暗記・再生に偏りがち」を防ぐことにもつながると考える。また、分散は、統計的な推測などで必須の統計量であるため、知識のみの習得にとどめてしまうと、分散の知識が必要となる統計的な推測の理解不足につながる可能性があると考えられる。

なお、この誤答結果が示すように、意味を理解することが大事であることはもとより、計算力も大事であることも強調する必要があると考える。

4-1-2 具体的な数値を与えない場合の平均・分散の誤答分析

表 4 の結果は、具体的な数値を与えた場合の平均・分散の誤答である。そうではない場合が問題 3 及び問題 4 であり、結果は表 6 の通りである。問題 3、問題 4 の正答・無答の判断は、10 を加えた場合、10 倍した場合の両方ともに正答・無答の場合とし、それ以外を誤答に分類した。表 4 では正答率が約 95%であった平均の正答率は、問題 3 の表 6 で 64.5%と 30%以上も下がっており、表 4 では正答率が約 20%であった分散の正答率は、問題 4 の表 6 で 4.7%と、15%以上も下がった。平均、分散ともに問題 2 と比較すると、正答率が大きく下がったため、この正答率の有意差を調べるためにマクネマー検定を行った。

表 6　問題 3 の平均、問題 4 の分散の正答・誤答・無答の内訳

問題		年度	正答	誤答	無答	受検者数
3	平均	2024	191 (64.5)	60 (20.3)	45 (15.2)	296
4	分散	2024	14 (4.7)	199 (67.2)	83 (28.0)	296

2024 年度の問題 2(1)の平均と問題 3 の平均の正誤についてマクネマー検定を行った結果、検定統計量が 71.36、p 値が $2.98 \cdot 10^{-17}$、二項検定による p 値が $2\sum_{i=0}^{11}\binom{111}{i}\left(\frac{1}{2}\right)^{111} = 4.09 \cdot 10^{-19}$ であり、具体的な数値で与えた場合の平均と具体的な数値を与えなかった場合の平均の正答率に有意な差が見られた。検定統計量及び p 値算出に使用した分割表は、表 7 である。

表 7　問題 2(1)の平均、問題 3 の平均に関する分割表

		問題 3 の平均		合計
		正答	誤答・無答	
問題 2 (1) の平均	正答	180	100	280
	誤答・無答	11	5	16
合計		191	105	296

同様に 2024 年度の問題 2(2)の分散と問題 4 の分散のデータに対してマクネマー検定を行った結果、検定統計量が 29.49、p 値が$5.62 \cdot 10^{-8}$、二項検定による p 値が$2.72 \cdot 10^{-8}$であり、具体的な数値で与えた場合の分散と具体的な数値を与えなかった場合の分散の正答率に有意な差が見られた。検定統計量及び p 値算出に使用した分割表は、表 8 である。

表 8　問題 2(2)の分散、問題 4 の分散に関する分割表

		問題 4 の分散		合計
		正答	誤答・無答	
問題 2 (2) の分散	正答	6	49	55
	誤答・無答	8	233	241
合計		14	282	296

問題 3 の平均及び問題 4 の分散の誤答の概要は表 9 の通りである。

表 9　左の表が「平均」の誤答、右の表が「分散」の誤答（灰色の背景は無答もしくは誤答）

問題 3 平均の誤答		誤答の人数
+10 の場合	×10 の場合	
70	無答	14
70	60	11
60	600	6
70	70	3
60	60	3
70	120	2
60	無答	2
無答	600	2
1 人だけの回答が 17		17
合計		60

問題 4 分散の誤答		誤答の人数
+10 の場合	×10 の場合	
225	225	65
225	2250	57
235	2250	22
無答	2250	5
225	無答	5
325	2250	3
325	22500	2
225	22.5	2
1 人だけの回答が 38		38
合計		199

問題 3 の平均の誤答については「10 を加えたときに 70、10 倍したときに白紙」と回答したものと「10 を加えたときに 70、10 倍したときに変化せず 60」と回答したものを合わせると 25 人であり、誤答の 41.7%を占めた。問題 4 の分散の誤答については「10 を加えたとき

も 10 倍したときも共に 225」と回答したものと「10 を加えたときに 225、10 倍したとき 2250」と回答したものを合わせると 122 人であり、誤答の 61.3%を占めた。

具体的な数値ではない問題 3 の平均及び問題 4 の分散の正答率は、具体的な数値である問題 2(1)の平均及び問題 2(2)の分散の正答率と比べ大幅に下がり有意な差が見られた。この結果は、藤村(2012)の分析した「概念的理解に基づき思考プロセスを多用に表現することに関しては国際平均レベルであり、考えを何も表現しないものの割合は国際平均を上回っていることを示している」ことを顕著に表していると考える。

なお、この問題においても思考プロセスが多用であるため、仮に概念的理解ができていなくても正答することはできる。具体的には「知識の暗記・再生」、「手続き的知識の正確な適用」、「具体的な数値による検証」などで解答ができることから、それらの方法についても定着していない可能性が示唆される。例えば「知識の暗記・再生」であれば、下記の(2)式を、(1)式に用いることで、問題 3 は(3)式、問題 4 は(4)式のように求めることができる。もちろんこの公式は、受検者が学習した現在の教育課程の 1 つ前の課程では、数学 B の確率分布と統計的な推測で学ぶ内容で、多くの学生がこの単元を履修していない可能性が高いため、この公式を学んでいない。この状況は、現在の教育課程では多くの学生が履修することとなった統計的な推測を学ぶことで解消されるが、本結果より数学 I のデータの分析における平均及び分散の定義と(1)式が関連されていないことがわかる。そのため、現在の教育課程における統計的な推測で(1)式を学習しても、「知識の暗記・再生」に留まる可能性が示唆される。数学 B の統計的な推測の学習において(1)式の「知識の暗記・再生」とならないためには、数学 I のデータの分析で、平均及び分散の定義を学習し、問題演習をさせた上で(1)式を紹介し、具体的な問題を通して、(1)式の意味付けをするなどの配慮が必要になると考える。

$$E(X+Y)=E(X)+E(Y)、\ E(aX)=aE(X)、\ V(aX+b)=a^2V(X) \tag{1}$$

$$E(X)=60、\ V(X)=225 \tag{2}$$

$$E(X+10)=E(X)+E(10)=60+10=70、\ V(X+10)=V(X)=225 \tag{3}$$

$$E(X\cdot 10)=10E(X)=10\cdot 60=600、\ V(X\cdot 10)=10^2V(X)=100\cdot 225=22500 \tag{4}$$

次に、この問題の誤答を通して「手続き的知識の正確な適用」について考察したい。この問題の誤答結果から、藤村(2012)が述べる「日本の子どもは、解法が 1 つに定まった問題に対しては手続き的知識を正確に適用して解決すること（定型的問題解決）には秀でている」のは、具体的な数値に限られる可能性があると考えられる。

なぜなら本問は次の解答例にあるように、記憶した公式に文字を代入する「手続き的知識の正確な適用」によっても解決ができるためである。つまり、公式を正確に記憶し、文字式に不慣れでなければ、概念的な理解ができていなくても解決できるのである。

解答例）受検者をn人（nは自然数）とし、n人の点数を$x_i(1 \leqq i \leqq n)$、その平均を$\overline{x}$、その分散をs_x^2とする。x_iのそれぞれに 10 点を加えた点数を$y_i(1 \leqq i \leqq n)$、その平均を$\overline{y}$、分散をs_y^2とし、x_iのそれぞれを 10 倍した点数を$z_i(1 \leqq i \leqq n)$、その平均を$\overline{z}$、分散をs_z^2とする。

問題文の条件は(5)式のように表現できる。

$$\overline{x} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{n} = 60 \text{ 、 } s_x^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n} = 225 \tag{5}$$

まず問題 3 の平均を求める。$y_i = x_i + 10$及び$z_i = x_i \cdot 10$とし、(5)式を用いることで、次の(6)式、(7)式と求まる。

$$\overline{y} = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i + 10}{n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{n} + \frac{10}{n} \sum_{i=1}^{n} 1 = 60 + \frac{10}{n} \cdot n = 60 + 10 = 70 \tag{6}$$

$$\overline{z} = \sum_{i=1}^{n} \frac{z_i}{n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i \cdot 10}{n} = 10 \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{n} = 10 \cdot 60 = 600 \tag{7}$$

次に問題 4 の分散を求める。$y_i = x_i + 10$及び$z_i = x_i \cdot 10$とし、(5)式を用いることで、次の(8)式、(9)式と求まる。

$$s_y^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\{(x_i + 10) - (\overline{x} + 10)\}^2}{n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n} = 225 \tag{8}$$

$$s_z^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(z_i - \bar{z})^2}{n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i \cdot 10 - \overline{x} \cdot 10)^2}{n} = 10^2 \sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n} = 100 \cdot 225 = 22500 \tag{9}$$

最後に「具体的な数値による検証」であるが、受検者の誤答から具体例を用いて実験する能力も不足している可能性が示唆される。例えば分散が 225 であれば、標準偏差が$\sqrt{225} = 15$となることを考慮すれば、60 点から 15 点高い 75 点と 60 点から 15 点低い 45 点という 2 つのデータを用意することできる。推奨できる方法ではないが、この 2 つのデータから容易に問題文の条件を具体的な数値で表すことができ、計算によって解答だけは導くことができる。全員の点数を 10 点加えた場合の平均は(10)式、10 倍した場合の平均は(11)式である。同様に、全員の点数を 10 点加えた場合の分散は(12)式、10 倍した場合の分散は(13)式である。

$$\overline{y} = \frac{(45 + 10) + (75 + 10)}{2} = \frac{140}{2} = 70 \tag{10}$$

$$\overline{z} = \frac{(45 \times 10) + (75 \times 10)}{2} = \frac{1200}{2} = 600 \tag{11}$$

$$s_y^2 = \frac{\{(45 + 10) - 70\}^2 + \{(75 + 10) - 70\}^2}{2} = \frac{15^2 + 15^2}{2} = 15^2 = 225 \tag{12}$$

$$s_z^2 = \frac{\{(45 \times 10) - 600\}^2 + \{(75 \times 10) - 600\}^2}{2} = \frac{150^2 + 150^2}{2} = 150^2 = 22500 \tag{13}$$

本結果から、問題 3、問題 4 のような具体的な数値で構成されていない問題については、

まず具体的な問題、例えば問題 1 や問題 2 などを用いて、10 加えた場合、10 倍した場合はどのように変化するのかを演習も兼ねた計算をさせて、実感させた上で意味付けをする等の工夫が必要であると考える。もちろん、前述に示した通り、yやzの文字を用いることで、手続き的知識の正確な適用で解答を導くこともできるが、本結果の通り具体的な数値による問題の演習によって手続き的知識の正確な適用ができても、文字には不慣れな場合はyやzなどを用いた問題に対して手続き的知識の正確な適用ができるとは限らないと考える。そのため、藤村(2012)が紹介する「手続き的知識・スキルを獲得するための方法としてスモールステップで問題を構成」する必要があると考える。

4-2 中央値・最頻値の分析

問題 1 と 2 の中央値と最頻値の分析を行っていく。問題 1 と問題 2 の違いは、データが昇順に並べられ、データの大きさが偶数であるのが問題 1、データが規則なく並べられ、データの大きさが奇数であるのが問題 2 である。

まず表 1 の問題 1 の中央値、最頻値の問題について分析を行う。出題したのは 2024 年度のみで、正答・誤答・無答の内訳は表 10 の通りであった。

表 10　問題 1(1)中央値、(2)最頻値の正答・誤答・無答の内訳

問題 1	年度	正答	誤答	無答	受検者数
(1) 中央値	2024	280 (94.6)	16 (5.4)	0 (0.0)	296
(2) 最頻値	2024	294 (99.3)	2 (0.7)	0 (0.0)	296

問題 1 の中央値、最頻値は共にほとんどの学生ができていた。中央値の誤答は、中央にある 2 数の中で小さい値の 4 と回答した学生が 9 人、中央にある 2 数の中で大きい値の 5 と回答した学生が 3 人で、この 2 つが誤答の 75%を占めた。この誤答から、中央値が真ん中のある値であることは認識していると考えられる。本問を間違えた学生にはデータの大きさが 2 以上の偶数の場合は、中央の 2 数の平均が中央値になることを強調して説明する必要があると考える。なお、最頻値の誤答の 2 人は、最大値を求めていた。

次に表 1 の問題 2 における中央値、最頻値であるが、出題は 2023 年・2024 年の両年で表 11 の通り多くの学生ができていた。最頻値については、すべて 95%を超える正答率であり良好であった。

表 11　問題 2(3)中央値、(4)最頻値の正答・誤答・無答の内訳

問題 2	年度	正答	誤答	無答	受検者数
(3) 中央値	2023	293 (93.3)	20 (6.4)	1 (0.3)	314
	2024	278 (93.9)	16 (5.4)	2 (0.7)	296
	合計	571 (93.6)	36 (5.9)	3(0.5)	610
(4) 最頻値	2023	302 (96.2)	12 (3.8)	0 (0.0)	314
	2024	291 (98.3)	5 (1.7)	0 (0.0)	296
	合計	593 (97.2)	17 (2.8)	0 (0.0)	610

4-3 範囲の分析

表 1 の問題 1 及び 2 の範囲について分析を行う。問題 1 の範囲は 2023 年度のみ、問題 2 の範囲については 2023 年度・2024 年度の両年で実施した。正答・誤答・無答の内訳は表 12 の通りであった。

表 12　問題 1 (3)及び問題 2(5)範囲の正答・誤答・無答の内訳

範囲	年度	正答	誤答	無答	受検者数
問題 1 (3) 範囲	2024	236 (79.7)	52 (17.6)	8 (2.7)	296
問題 2 (5) 範囲	2024	237 (80.1)	49 (16.6)	10 (3.4)	296
問題 2 (5) 範囲	2023	231 (73.6)	52 (16.6)	31 (9.9)	314

問題 1(3)、問題 2(5)、の範囲に関する誤答の概要は表 13 の通りであった。いずれにおいても範囲の定義を覚えていないことによる誤答で、誤答で多かったものは最大値を回答したものと「最小値～最大値」を回答したもので、この 2 つの誤答で誤答全体の 75%を占めた。

表 13　問題 1(3)及び 2(5)の範囲に関する誤答の概要

問題 1(3) 範囲の誤答		誤答の
内容	数値	人数
最大値	7	27
最小値～最大値	1～7	14
最小値＋最大値	8	8
(最小値＋最大値)/2	4	2
データの総和/4	8.5	1
合計		52

問題 2(5) 範囲の誤答		誤答の人数		
内容	数値	2023	2024	合計
最大値	10	24	20	44
最小値～最大値	1～10	18	12	30
最頻値	8	3	7	10
最小値＋最大値	11	0	5	5
(最小値＋最大値)/2	5.5	1	2	3
その他		6	3	9
合計		52	49	101

4-3 第 2 四分位数の分析

4-3-1 第 2 四分位数の分析（問題 1）

表 1 の第 2 四分位数の分析については問題 1 と問題 2 に分けて行う。問題 1 の中央値は前述の通り良好であったが、第 2 四分位数の正答率は表 14 の通り大きく下がった。

表 14　問題 1「1、2、3、4、5、6、6、7」(1)中央値、(5)第 2 四分位数の正答率等

問題 1	年度	正答	誤答	無答	受検者数
(1) 中央値	2024	280 (94.6)	16 (5.4)	0 (0.0)	296
(5) 第 2 四分位数	2024	237 (79.3)	47 (16.4)	12 (4.3)	296

(5) 第 2 四分位数	2023	185 (58.9)	98 (31.2)	31 (9.9)	314
(5) 第 2 四分位数	合計	422 (69.2)	145 (23.8)	43 (7.0)	610

問題 1 における、2024 年度の中央値と第 2 四分位数の正誤のデータに対してマクネマー検定を行ったところ、検定統計量が 37.7、p 値が$8.11 \cdot 10^{-10}$、二項検定による p 値が$6.98 \cdot 10^{-11}$であり、中央値と第 2 四分位数の正答率に有意な差が見られた。検定統計量及び p 値算出に使用した分割表は表 15 である。

表 15　問題 1(1)の中央値、問題 1(5)の第 2 四分位数の正答と誤答・無答に関する分割表

		問題 1(5)の第 2 四分位数		合計
		正答	誤答・無答	
問題 1(1)の中央値	正答	234	46	280
	誤答・無答	3	13	16
合計		237	59	296

問題 1(5)の第 2 四分位数の誤答の概要は表 16 の通りである。

表 16　問題 1「1、2、3、4、5、6、6、7」(5)第 2 四分位数に関する、誤答の内訳(N=145)

誤答の内容			年度		合計	
誤答の概要		数値	2023	2024		
第 1 四分位数(Q_1)		2.5	58	6	64	82
第 1 四分位数(Q_1)と誤解し、更にミス		2	13	5	18	
中央にある 2 数「4、5」の中で	小さい値	4	2	9	11	19
	大きい値	5	3	5	8	
「1、2」、「3、4」、「5、6」、「6、7」 と 4 分割した後、2 番目に当たる「3、4」の平均値		3.5	9	6	15	
第 3 四分位数(Q_3)		5.5／6	1	8	9	
「1、2」、「3、4」、「5、6」、「6、7」 と 4 分割した後、2 番目に当たる「3 と 4」		3 と 4	5	1	6	
前半 4 項の中央の 2 数「2、3」のうち大きい値		3	5	0	5	
その他		－	2	7	9	
合計			98	47	145	

これらの誤答から、第 2 四分位数の定義については曖昧である学生が散見されることが分かる。第 2 四分位数及び後に議論する第 1 四分位数が曖昧であると、箱ひげ図を正確に書くことも、箱ひげ図を分析することもできない。本研究の結果から、第 2 四分位数は中央値と同じ値であるという用語の説明のみに留まると「知識の暗記・再生」となってしまい、時間の経過とともに記憶が曖昧となり、定着されない可能性が示唆される。中村(2019)が述べる通り、「四分位数と四分偏差の意味を理解し、箱ひげ図との関係で捉えることができるように

指導することが必要」であると考える。

4-3-2 第 2 四分位数の分析（問題 2）

同様に問題 2 の中央値と第 2 四分位数の分析を行う。中央値は問題 1 と同様に良好であったが、第 2 四分位数の正答率も同様に表 17 の通り大きく下がった。問題 2 においても 2024 年度の中央値と第 2 四分位数のデータに対してマクネマー検定を行ったところ、検定統計量が 46.6、p 値が$8.61 \cdot 10^{-12}$、二項検定による p 値が$2.26 \cdot 10^{-13}$であり、中央値と第 2 四分位数の正答率に有意な差が見られた。検定統計量及び p 値算出に使用した分割表は表 18 である。

表 17　問題 2「９、４、７、８、５、１、１０、８、２」(3)中央値、(7)第 2 四分位数の正答率等

問題 2		年度	正答	誤答	無答	受検者数
(3) 中央値		2024	278 (93.9)	16 (5.4)	2 (0.7)	296
(7) 第 2 四分位数		2024	226 (76.3)	55 (18.6)	15 (5.1)	296
(3) 中央値		2023	293 (93.3)	20 (6.4)	1 (0.3)	314

表 18　問題 2(3)の中央値、問題 2(7)の第 2 四分位数の正答と誤答・無答に関する分割表

		問題 2(7)の第 2 四分位数		合計
		正答	誤答・無答	
問題 2(3)の中央値	正答	223	55	278
	誤答・無答	3	15	18
合計		226	70	296

問題 2 の第 2 四分位数の誤答の概要は表 19 の通りである。問題 1 の第 2 四分位数の正答率と同様に、定義について曖昧である学生が散見されていた。

問題 1 および問題 2 において、第 2 四分位数の正答率が中央値の正答率と大きく離れており、マクネマー検定によって正答率に有意な差が見られたため、中央値と第 2 四分位数を同じものと認識しているのかを分析した。分析した結果は表 20 で、中央値と第 2 四分位数を異なる値で回答した学生の割合は、問題 1 と 2 のいずれの場合も 20%程度であった。この結果からも、第 2 四分位数の定義を正確に記憶していない学生が散見されることがわかる。

そして本結果から、第 2 四分位数については中央値と同じ値であるという言葉の定義のみでは定着度が低くなることが示唆される。定義に関しては、村田(2020)が「何かをするために定義するのではなく、定義すること自体が目的となっている」と述べている通り、定義が目的になると意味理解が希薄になり、本結果のようになることが示唆される。そうならないためにも、中村(2019)が述べるように「四分位数と四分偏差の意味を理解し、箱ひげ図との関係で捉えることができるように指導することが必要である。そのためには、5 数要約量の視覚化を指導に取り入れることが有効と考えられる」。

表 19　問題 2「９、４、７、８、５、１、１０、８、２」(7)第 2 四分位数の誤答の概要(N=55)

誤答の内容		誤答の人数	
誤答の概要	数値		
第 3 四分位数（Tukey(1977)の定義によるもの）	8	7	13
第 3 四分位数	8.5	6	
昇順もしくは降順に並び変えずに真ん中の値	5	12	
第 1 四分位数	3	4	8
第 1 四分位数（Tukey(1977)の定義によるもの）	4	2	
第 1 四分位数を決める 2 数「2、4」で小さい値	2	2	
平均値	6	7	
最大値	10	3	
前半の 4 項「1、2、4、5」を「1、2」と「4、5」と分割し、2 番目の「4、5」の平均	4.5	3	
前半の 4 項「1、2、4、5」の最後の項の 5 と後半の 4 項「8、8、9、10」の最初の項の 8 の平均	6.5	2	
その他：回答が 1 人のもの		7	
合計		55	

表 20　問題 1・2 において中央値と第 2 四分位数を同じものと認識しているか否か

問題	中央値と第 2 四分位数を同じものと認識			中央値と第 2 四分位数を異なるものと認識
	正答	不正答	計	
1	234 (79.1)	3 (1.0)	237 (80.1)	59 (19.9)
2	223 (75.3)	5 (1.7)	228 (77.0)	68 (23.0)

4-4 第 1 四分位数の分析

4-4-1 第 1 四分位数の分析（問題 1）

表 1 における問題 1 の第 1 四分位数の正答・誤答・無答の結果は表 21 の通りであるが、本問には正答・誤答の判断ができない回答があった。本来、第 1 四分位数の正答には第 2 四分位数の正答が必要である。しかし、第 2 四分位数が誤答で第 1 四分位数を正答であった回答が 10 あった。この 10 の回答については、偶然正答となった可能性もあるが、第 2 四分位数を記載ミスなどのケアレスミスによって間違えた可能性も考えられる。したがって、正答・誤答の判断ができないため、判断不能とした。ただし、いずれの場合でも指導は必要で、第 1 四分位数が偶然正答となった学生には正確な定義を、第 2 四分位数を転記ミスなどのケアレスミスで間違った学生には見直しの重要性を説明する必要がある。

なお第 2 四分位数が正答かつ第 1 四分位数が正答の回答の中に、中央値が誤答であったものが 1 つだけあったが、この場合は正答に含めた。

誤答は表 22 の通りで、第 1 四分位数の定義を記憶していないことによるものであった。

表 21　問題 1(4)第 1 四分位数の正答・誤答・判断不能・無答の内訳

問題 1	年度	正答	誤答	判断不能	無答	受検者数
(3) 第 1 四分位数	2024	210 (70.9)	68 (23.0)	10 (3.4)	8(2.7)	296

表 22　問題 1(4)の第 1 四分位数の誤答の概要

問題 1(4) 「1、2、3、4、5、6、6、7」の第 1 四分位数に関する誤答			誤答の人数	
誤答の内容		数値		
前半の 4 数「1、2、3、4」のうち中央にある 2 数「2、3」の中で	小さい値	1	34	41
	大きい値	3	7	
最小値		1	12	
「1、2」、「3、4」、「5、6」、「6、7」 と 4 分割、「1、2」の平均値		1.5	9	
その他：4 と回答 3 人、最大値の 7、1～7 及び 7/4 と回答 1 人			6	
誤答の合計			68	
判断不能	中央値が正答で、第 2 四分位数を間違い	2.5	10	

4-4-2 第 1 四分位数の分析（問題 2）

問題 2(6)の第 1 四分位数の回答については、現行までの高等学校の教科書で定義されているものと、Tukey(1977)の定義によるものが混在していた。現行までの高等学校の教科書において、第 1 四分位数を Tukey(1977)による定義で記載されたものは 1 つもなく、教科書によっては第 1 四分位数の定義が他にもあると明記されているものがあるだけであった。もちろん、受検者が独自に学習した可能性も考えられるが、問題 1 のようにデータのサイズが偶数の場合の中央値や第 1 四分位数の誤答例から、中央の 2 数の 4 と 5 で大きい方と間違った解釈で解答して偶然正答になった可能性も考えられる。そこで本問の分類については、現行までの高等学校の教科書による第 1 四分位数で記述され、かつ第 2 四分位数が正答のものを暫定的に正答と表示し、Tukey(1977)の定義による第 1 四分位数で記述され、かつ第 2 四分位数が正答のものについては判断不能とした。結果は表 23 である。

表 23　問題 2(6)の第 1 四分位数の誤答の概要

判定	誤答の内容		数値	人数	
正答	中央値、第 2 四分位数共に正答		3	173	174
	中央値は不正答、第 2 四分位数は正答			1	
不正答	中央値は正答、第 2 四分位数は不正答			17	20
	中央値、第 2 四分位数ともに不正答			3	
判断不能	Tukey の定義	中央値、第 2 四分位数共に正解	4	34	35
		中央値が不正答、第 2 四分位数が正答		1	
不正答	Tukey	中央値、第 2 四分位数共に不正解		6	11

	の定義	第 2 四分位数が不正解		5
	中央値を除いた前半「1、2、4、5」の中の中央の 2 数「2、4」で小さいほうの値		2	16
	並べ間違い「1、2、4、7」かつ前半の 4 項の平均		3.5	8
	最小値		1	8
	その他：回答者が 1 人、2 人の誤答がそれぞれ 4 つ		－	12
無答	－		－	12

4-5 第 3 四分位数の分析（問題 1）

表 1 における問題 1(6)の第 3 四分位数の正答・誤答・無答の結果は表 24 の通りである。第 3 四分位数の正答の条件として、第 1 四分位数が正答を含めたため、本問の正答率は四分位数（第 1 四分位数、第 2 四分位数、第 3 四分位数）全部の正答率と同義である。なお、第 2 四分位数が不正答で第 1、3 四分位数が正答だった学生は 5 人存在するが、その場合は判断不能とし、中央値を間違えて、四分位数がすべて正答の学生が 1 人だけ存在したが、その場合は正答として扱った。

表 24　問題 1(6)第 3 四分位数の誤答の概要

問題 1	年度	正答	誤答	判断不能	無答	受検者数
(3) 第 3 四分位数	2024	207 (69.9)	75 (25.3)	5 (1.7)	9(3.0)	296

誤答の概要は表 25 の通りである。表 25 の通り、第 3 四分位数が不正答の学生のほとんどは、第 1 四分位数も不正答であり、四分位数の定義を正確に記憶していないことによるものであった。

なお、問題 2 の第 3 四分位数については、四分位数の定義が高等学校の教科書によるものと Tukey(1977)の定義によるものが混在し判断できないものが多々あったため、誤答の分析については今後の課題としたい。

表 25　問題 1(6)第 3 四分位数の誤答の概要（灰色の背景は誤答）

第 1 四分位数	第 3 四分位数	人数
2	6	28
1	6	6
3	6	6
2.5	6.5	6
1 と 2	5 と 6	4
1.5	5.5	3
4	6	2
1.5	6	2

1	3	2
組合せが 1 つの回答		16
誤答の合計		75
判断不能：第 2 四分位数が不正答で第 1、3 四分位数が正答		5

5 まとめと今後の展望及び課題

本研究の目的は、数理・データサイエンス・AI 教育の基礎となる「データの分析」に関する問題に焦点を当て、理解度およびつまずき箇所を把握し、高等学校、大学の教育及び社会人に対するリカレント教育のいずれにも効果的となる示唆を得ることであった。

数学基礎力テストの誤答の分析から、平均値、中央値、最頻値の求める方法については良好であった。間違えた学生はケアレスミスによるものなので、見直しの重要性を強調する必要があると考える。

四分位数の第 1 四分位数、第 2 四分位数については、定義を覚えていない学生が多く見受けられ、中央値と第 2 四分位数を同じ値であると認識していない学生が 20%を超えていた。そのため、定義を覚えることのみならず、中村(2019)が述べるように「四分位数と四分偏差の意味を理解し、箱ひげ図との関係で捉えることができるように指導することが必要」になると考える。「箱ひげ図」などの利用目的を明確に伝えて、具体的に実践し、図を描きながら実感することで、「知識の暗記・再生」ではなく、実践で使える知識につながると考える。ただし、四分位偏差は現行の教科書から削除されているものもあるため、中村(2019)の論文における四分位偏差を四分位範囲と読み替える必要がある。

分散については意味の理解が十分ではない学生が顕著に見受けられ、定義を覚えていないことによる誤答、計算ミスによる誤答及びそれらの複合の誤答が散見された。また「知識の暗記・再生」、「手続き的知識の正確な適用」、「具体的な数値による検証」についても課題のある学生が多かった。そのため数学 I の「データの分析」、数学 B の「統計的な推測」で扱われる分散については、各々が「手続き的知識の正確な適用」、「知識の暗記・再生」で留まることが無いように、数学 I の「データの分析」において具体的に計算をすることで求めた分散について、データすべてに 10 を加えた例、データのすべて 10 倍した例を計算力の養成を意識しつつ演習し、数学 B で学習する公式につなげる配慮などを行うことが有効になると考える。その上で、数学 B の「統計的な推測」では、公式の円滑な活用をしつつも、具体例に落とし込んで、実感させるなどの配慮を行うことが有効になると考える。

今後は本研究の結果を踏まえた講義を行い、本研究の結果が、学生や社会人の理解度に寄与するかを検証していきたい。

引用・参考文献

国立教育政策研究所（2019、2021、2023）「全国学力・学習状況調査 4 説明資料(4)小学校算数」、https://www.nier.go.jp/kaihatsu/zenkokugakuryoku.html（検索日：2025 年 2 月 21 日）

国立教育政策研究所（2019、2021、2022、2023）「全国学力・学習状況調査 4 説明資料(5)中学校数学」、https://www.nier.go.jp/kaihatsu/zenkokugakuryoku.html（検索日：2025 年 2 月 21 日）

佐々木淳（2023）「文系学生の「データの分析」の能力分析及び誤答の考察－古典的テスト理論及び項目反応理論による結果を踏まえてー」、日本数学教育学会、第 56 回秋期研究大会発表集録、pp.365-372

佐々木淳（2024）「「データの分析」の問題に対する誤答の分析及び理解度の考察」数学教育学会」、2024 年度数学教育学会秋季年会予稿集、pp.64-66

数理・データサイエンス・AI・教育プログラム認定制度検討会議（2020）「「数理・データサイエンス・AI 教育プログラム認定制度(リテラシーレベル)」の創設について」、https://www8.cao.go.jp/cstp/ai/suuri/ninteisousetu.pdf（検索日：2024 年 9 月 30 日）

高松邦彦・村上勝彦・関雅幸・中田康夫（2017）「神戸常盤大学保健科学部新入生に対する統計学教育に関する一考察　―高等学校数学 I（新課程）の「データの分析」の学習定着度をもとに―」、神戸常盤大学紀要、第 10 号、神戸常盤大学、pp.61-69.

中央教育審議会（2014）「新しい時代にふさわしい高大接続の実現に向けた高等学校教育、大学教育、大学入学者選抜の一体的改革について～すべての若者が夢や目標を芽吹かせ、未来に花開かせるために（答申）～」https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/__icsFiles/afieldfile/2015/01/14/1354191.pdf　（検索日：2024 年 9 月 30 日）

東京理科大学数学教育研究所(2006)「高校生の数学力 NOW－2005 年基礎学力調査－」、科学新興新社／フォーラム・A

東京理科大学数学教育研究所(2022)「高校生の数学力 NOW XVII－2021 年基礎学力調査－」、科学新興新社／フォーラム・A、p.146

内閣府（2022）「統合イノベーション戦略推進会議 AI 戦略 2022」、https://www8.cao.go.jp/cstp/ai/aistrategy2022_honbun.pdf（検索日：2024 年 9 月 30 日）

内閣府（2024）「統合イノベーション戦略推進会議 AI 戦略 2024」、https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/togo2024_zentai.pdf（検索日：2024 年 9 月 30 日）

中村好則（2019）「高校における数学学習のつまずきと支援に関する研究」、岩手大学大学院教育学研究科研究年報、第 3 号、岩手大学大学院教育学研究科、pp.185-206.

日本数学会（2013）「第一回 大学生数学基本調査報告書」、https://www.mathsoc.jp/publication/tushin/1801/chousa-houkoku.pdf（検索日：2024 年 9 月 30 日）

藤村宣之（2012）「数学的・科学的リテラシーの心理学」、有斐閣

村田翔吾（2020）「数学的探究における定義活動を促進するための教材の要件」、日本科学教育学会、第 44 回年会論文集、pp.569-572.

John W. Tukey(1977), “Exploratory Data Analysis 1st Edition”, *Addison-Wesley*

【原著論文】

A Study of the Positive Impact of Attraction of a Hotel on the Local Economy

Takaomi Notsu*

*Shimonoseki City University

Abstract

In a tourist destination, the government which expects the increase of tourists might need to develop abilities to accommodate them. Considering local economy where upper-midscale hotels whose capacities are small relative to a market compete in prices for acquiring customers in an oligopolistic market, we investigate tourism policy such that the government would attract a new hotel. The government would like to make a "feasible" policy in the sense that the attraction never leave the customers or the industry worse off. Focusing on the market where hotels including an entrant are symmetric, we show that there exists a legitimate range of hotels' capacities within which the attraction is feasible. We also explicitly find the range of hotels' capacities. Our result suggests that the government does not necessarily attract a high-class hotel such as a five star hotel (an upscale or luxury hotel) for a positive impact of the attraction. Instead, the government might still enjoy the positive impact by introducing an entrant which is similar to incumbents in terms of capacity size and brand equity without incurring vast amount costs of the attraction of a larger hotel or a high-class hotel.

Keywords: Tourism policy, Attraction of hotel, Hotel's capacity, Welfare

1. Introduction

* Department of Economics, Shimonoseki City University (email: notsu-ta@shimonoseki-cu.ac.jp). We are grateful to anonymous two referees for helpful comments.
* Department of Economics, Shimonoseki City University (email: notsu-ta@shimonoseki-cu.ac.jp). We are grateful to anonymous two referees for helpful comments.

In a tourist destination, the government which expects the increase of tourists might need to develop abilities to accommodate them.[1] We investigate tourism policy such that the government would attract a new hotel. A question arises if one wants to explore the possibility of implementation of such a policy; Does the attraction have a positive impact on social welfare? This is our main interest.[2] We interpret the number of guest rooms which a hotel holds as a capacity and then we study a relation between the hotels' capacities and a positive impact of the attraction.

The policy (the attraction of a new hotel) alters the structure of the market and thus our model is dynamic. But we suppose local economy where there exist upper-midscale hotels whose capacities are small relative to a market and the hotels before and after the introduction of the policy compete in prices for acquiring customers in an oligopolistic market. It is noteworthy that there are strategic interactions between the hotels in such a market. Then, we describe the market by a Bertrand competition, which is a model of game theory.[3]

In the Bertrand competition, each hotel charges a room price. Customers prioritize room prices and they would like to reserve at the lowest price possible.[4] However, each hotel cannot accommodate customers beyond the own capacity. Who reserves at what price is in accordance with an efficient rationing rule; Under an efficient rationing rule, customers' priority of being rationed to a hotel with a lowest price is according to their willingness to pay. Namely, the customers who are more willing to pay are more likely to be rationed to a hotel with a lowest price until the total capacities of the hotels charging the lowest price are exhausted. After that, among remaining customers, those who are more willing to pay are more likely to be rationed to a hotel with a second lowest price until the total capacities of the hotels charging the second lowest price are exhausted, and the same hereinafter.[5]

In our model, initially, there exist $n(\geq 2)$ symmetric incumbent hotels which are upper-midscale and that they play Bertrand competition described above.[6] Next, the government attracts a new hotel. The government has the power to decide the entrant's

---

[1] For instance, Ministry of Tourism gives subsidies for setting up new hotels in some states in India.

[2] Yamaguchi City has been selected for the list of "52 Places to Go in 2024" in The New York Times (https://www.nytimes.com/interactive/2024/travel/places-to-travel-destinations-2024.html). Many tourists might come to the area around Yamaguchi City from abroad in the near future. An objective of the paper is to contribute to the governments of the area around Yamaguchi City including Shimonoseki City by proposing a tourism policy implication for attracting a new hotel.

[3] Game theory is a useful tool to analyze behavior of strategic economic agents. In game theory, "(Nash) Equilibrium" is a standard solution concept. As usual in game theoretic analyses, we base analyzing an equilibrium of a Bertrand competition on the paper. For details of game theory and the concepts of equilibria, see for example, Gibbons (1992).

[4] We assume that customers who have booked show up without fail and they stay at the booking price.

[5] For details of an efficient rationing rule, see for example, Levitan and Shubik (1972), which consider price competition models with capacity constraints.

[6] Symmetric means that hotels' capacities and the costs of providing services are the same among hotels.

capacity and quality, whereas the ability to attract a new hotel is limited and it cannot attract a larger hotel or a high-class hotel such as a a five star hotel (an upscale or a luxury hotel). The entrant which the government can attract is similar to incumbents in terms of capacity size, brand equity and brand recognition. After the entrant enters the market, $(n+1)$ hotels play the Bertrand competition.[7]

Under our assumptions of capacities, there exists a symmetric pure equilibrium in which all hotels charge a same price with probability 1 in the Bertrand competition.[8] The government pays attentions to both consumer surplus and producer surplus at the equilibria in the markets.[9] It intends to choose attraction which has positive impact on both consumer surplus and producer surplus. We define that the attraction is "feasible" if consumer surplus and producer surplus will never be worse off than before the entrant enters the market.[10]

We show that there exists a legitimate range of hotels' capacities within which the attraction is feasible. We also explicitly find the range of hotels' capacities; The attraction can be feasible when capacities of each hotel are small relative to the markets. This is our main result.

An intuition of the result is that the attraction makes hotels lower their prices through competition and as a result, consumer surplus gets better. If capacities of each hotel are too large, then they provoke fierce competition and as a result, producer surplus gets worse. On the contrary, the capacities which are not too large keep the competition mild and the profit of the entrant compensates loss of producer surplus which stems from the competition. Then, moderate capacities make the attraction feasible.

Our result suggests that the government does not necessarily attract a larger hotel or a high-class hotel such as a five star hotel for a positive impact of the attraction.[11] Instead, the government might still enjoy the positive impact by introducing an entrant which is similar to incumbents in terms of capacity size and brand equity without incurring vast amount costs of the attraction of a larger hotel or a high-class hotel.

In the paper, we assume that the government controls the entrant's capacity and quality, whereas models in which the entrant chooses its own capacity or quality is also meaningful. In such models, hotels might be asymmetric. Although analyses of the

---

[7] If the entrant and the incumbents are different types of hotels in terms of brand equity and brand recognition, it is not suitable to describe the market by the Bertrand competition.

[8] Such an equilibrium is characterized by the total capacities of the hotels. We have this result by applying Brock and Scheinkman (1985) and Notsu (2023).

[9] Surplus is a measure of welfare. For details, see for example, Mas-Colell et al. (1995).

[10] If the attraction makes at least one agent surplus worse off, then it is not feasible. This means that such a policy does not support from an agent whose surplus gets worse because of the attraction.

[11] This is the case if the government has the power to decide the entrant's capacity and quality. To the contrary, if the government allows the entrant to choose its capacity or quality, then we should study a model with a decision stage of the entrant. For example, it would be like something which follows Shaked and Sutton (1982).

market of asymmetric hotels might resembles ours, it is slightly complicated. Further, models with fixed costs of hotels and actual negotiations or contracts which is relevant to the attraction are important. These are future researches.

We end this introduction with other literatures. Yield management (or revenue management) is well known as a way of management in hotel industry. It focuses on hotel's practices such as room pricing and it studies how expected profits of the hotels can be maximized.[12] However, it does not pay attentions to strategic interactions between hotels (customers) except a few researches. In this sense, yield management and our approach are different. Some literatures (Yoshimura and Watada (2014), Watada et al. (2017) and Zhao et al. (2020)) consider the strategic interactions by using game models.[13] On the other hand, the new entry of a hotel is not considered in their researches and it is studied in this paper.

The rest of the paper proceeds as follows. In Section 2, we describe our model. Section 3 is analyses and we study feasible attraction. Section 4 concludes the paper.

2. Model

We describe our model. We consider the local economy where all existing hotels are upper-midscale hotels. Guest rooms which the hotels hold are assumed to be homogeneous. Each customer prioritizes prices of guest rooms when they reserve. The hotels compete in room prices for attracting customers.

Hotels are represented by natural numbers. I is denoted by a set of hotels which exist in a market. As explained later, a policy alters number of the hotels existing in the market. But for simplicity, we use the same notation I before and after the introduction of the policy. For $i \in I$, p_i is hotel i's price. k_i is firm i's capacity, which means number of guests rooms which hotel i holds. Costs of providing hotel services are zero for any hotel.

Given a price $p \in [0,1]$, number of customers who are willing to reserve at the price is $D(p) = 1 - p$. The customers who have booked show up without fail and they stay at the booking price. Each hotel cannot accommodate customers beyond the own capacity. Who reserves at what price is in accordance with an efficient rationing rule.

The timing of game is as follows. Assuming $n \geq 2$,

・**State 1**($s1$): $I = \{1,2,\dots,n\}$ and $k_1 = k_2 = \cdots = k_n = k \in (0,1)$. n hotels play Bertrand competition under an efficient rationing rule.

---

[12] For recent researches of yield management, see for example, Klein et al. (2020).

[13] Yoshimura and Watada (2014) and Watada et al. (2017) combine game models with yield management. Zhao et al. (2020) assume an oligopolistic market and analyze price adjustment in hotel industry.

・**Attraction of hotel**: The government attracts an entrant denoted by $n+1$. The entrant which the government can attract is similar to incumbents in the sense that it is an upper-midscale hotel and $k_{n+1} = k$.

・**State 2**($s2$): $I = \{1,2,\dots,n,n+1\}$ and $k_1 = k_2 = \cdots = k_n = k_{n+1} = k$. $(n+1)$ hotels play Bertrand competition under an efficient rationing rule.

In each state, given $(p_i)_{i\in I}$, firm i's profit π_i is

$$\pi_i = \begin{cases} p_i \cdot \min\left\{\frac{1-p_i}{|I(p_i)|}, k\right\}, & \text{if } p_i = \underline{p} \\ p_i \cdot \max\left\{\min\left\{\frac{1-p_i-\sum_{j:p_j<p_i} k_j}{|I(p_i)|}, k\right\}, 0\right\}, & \text{if } p_i > \underline{p} \end{cases}$$

where $I(p_i) = \{j \in I : p_j = p_i\}$ and $\underline{p} = \min_{j\in I} p_j$.

We assume the economy where capacities of each hotel are small relative to the market.

Assumption. $k < 1/(n+2)$.

For simplicity, we use a term "Bertrand equilibrium" when we refer to an equilibrium of Bertrand competition in each state. For each state $s \in \{s1, s2\}$, $CS(s)$ and $PS(s)$ are denoted by consumer surplus and producer surplus at a Bertrand equilibrium, respectively.

3. Analyses

In the sense that the government would like to make a policy which has a positive impact on both hotel customers and hotel industry, we define "feasible" attraction as follows.

Definition 1. *The attraction is feasible if* $CS(s2) \geq CS(s1)$ *and* $PS(s2) \geq PS(s1)$ *holds.*

We study "feasible" attraction. We start with the following Lemma. Define $p^* = 1 - |I| \cdot k$ in each state.

Lemma. *In each state, a Bertrand equilibrium is such that* $p_i = p^*$ *for any* $i \in I$ *if the following holds.*

$$k \leq \frac{1}{|I|+1}. \tag{1}$$

Proof. Suppose that $p_i = p^*$ for any $i \in I$. Then, the size of customers whom hotel i attracts is k. First, we verify that any hotel does not have an incentive to

undercut the price p^*. Even if hotel i charges $p^* - \epsilon$ for small enough $\epsilon > 0$, then the size of customers whom hotel i attracts remains k for any $i \in I$. Therefore, any hotel cannot improve the profit by undercutting p^*.

Second, we verify that any hotel does not have an incentive to charge any price beyond p^*. Consider $\arg\max_{p'} p' \cdot \big(1 - p' - (|I|-1)k\big) = \frac{1-(|I|-1)k}{2}$ and define $\hat{p} = \frac{1-(|I|-1)k}{2}$. Now suppose $k \leq \frac{1}{|I|+1}$. Then $\hat{p} \leq p^*$ and $1 - \hat{p} - (|I|-1)k \geq k$. Since $p' \cdot \big(1 - p' - (|I|-1)k\big)$ is a concave quadratic function of p', we have

$$
\begin{aligned}
&p' \cdot \min\Big\{1 - p' - (|I|-1)k, k\Big\} = p'k < p^*k \quad \text{for any } p' \in (0, p^*),\\
&p' \cdot \min\Big\{1 - p' - (|I|-1)k, k\Big\} = p^* \cdot \big(1 - p^* - (|I|-1)k\big) = p^*k \quad \text{for } p' = p^*,\\
&p' \cdot \max\Big\{ \min\Big\{1 - p' - (|I|-1)k, k\Big\}, 0\Big\} = p' \max\Big\{1 - p' - (|I|-1)k, 0\Big\}\\
&\qquad\qquad < p^*k \quad \text{for any } p' > p^*.
\end{aligned}
$$

Third equation means that any price which is strictly greater than p^* never improve hotel i's profit in the case where any hotel $j \neq i$ charges p^*. We have established the claim. □

We obtain the following benchmark result.

Benchmark. *In State 1, $p^* = 1 - nk$ and $(p_1, p_2, \ldots, p_n) = (p^*, p^*, \ldots, p^*)$ is a Bertrand equilibrium. We also have*

$$CS(s1) = \frac{1}{2} \cdot nk \cdot nk = \frac{n^2k^2}{2},$$

$$PS(s1) = (1 - nk) \cdot nk.$$

Proof. In State 1, the inequality (1) is $k \leq 1/(n+1)$. Clearly, this holds under Assumption such that $k < 1/(n+2)$. Therefore, $(p_1, p_2, \ldots, p_n) = (p^*, p^*, \ldots, p^*)$ is a Bertrand equilibrium in State 1 by Lemma. For the remaining arguments, the calculation of $CS(s_1)$ and $PS(s_1)$ is clear. □

Then, we have the following proposition for a legitimate range of hotels' capacities within which the attraction is feasible.

Proposition. *The attraction is feasible if $k \leq 1/(1+2n)$.*

Proof. Suppose that $k \leq 1/(1+2n)$. In State 2, the inequality (1) is $k \leq 1/(n+2)$. This holds since $n \geq 2$ and $1/(1+2n) < 1/(n+2)$. Therefore, $p^* = 1 - (n+1)k$ and $(p_1, p_2, \ldots, p_n, p_{n+1}) = (p^*, p^*, \ldots, p^*)$ is a Bertrand equilibrium in State 2 by Lemma.

We also have

$$CS(s2) = \frac{1}{2} \cdot (n+1)k \cdot (n+1)k = \frac{(n+1)^2 k^2}{2},$$

$$PS(s2) = \big(1 - (n+1)k\big)(n+1)k.$$

From these calculations and Benchmark,

$$CS(s2) - CS(s1) = \frac{(1+2n)k^2}{2} > 0.$$

Furthermore,

$$PS(s2) - PS(s1) = k\big\{1 - (1+2n)k\big\} \geq 0$$

if $k \leq 1/(1+2n)$. We have established the claim. □

From the proposition, we have a policy implication for the government whose ability to attract a new hotel is limited. That is, the government might still enjoy the positive impact by attracting an entrant which is similar to incumbents in terms of capacity size and brand equity even if it cannot incur vast amount costs of the attraction of a larger hotel or a high-class hotel such as a five star hotel.

4. Conclusion

We investigate tourism policy such that the government would attract a new hotel assuming local economy where upper-midscale hotels whose capacities are relatively small compete in prices for acquiring customers in an oligopolistic market. In our model, $n(\geq 2)$ symmetric incumbent hotels initially exist in the market and they play Bertrand competition. Next, the government attracts a new hotel which is similar to incumbents in terms of capacity size and brand equity. After the entrant enters the market, $(n+1)$ hotels play Bertrand competition. Does the attraction have a positive impact on social welfare?

We define feasible attraction as it never leave the hotel customers or the hotel industry worse off. Then, we show that there exists a legitimate range of hotels' capacities within which the attraction is feasible. We also explicitly find the range of hotels' capacities; The attraction can be feasible when capacities of each hotel are small to some degree.

Our result suggests that the government does not necessarily attract a larger hotel or a high-class hotel such as a five star hotel (an upscale or a luxury hotel) for a positive impact of the attraction. Instead, the government might still enjoy the positive impact by introducing an entrant which is similar to incumbents in terms of capacity size and brand equity without incurring vast amount costs of the attraction of a larger hotel or a high-class hotel.

We should study the cases where the entrant chooses its own capacity or quality and sometimes asymmetric hotels play oligopoly. Also, fixed costs of hotels and negotiations or contracts between the government and the entrant are issues to be analyzed. These are future researches.

Conflict of Interest: The author has no conflict of interest.

References

Brock, W.A., Scheinkman, J.A.,1985. “Price setting supergames with capacity constraints”, Rev. Econ. Stud. 52, pp.371-382.

Gibbons, R., 1992. “Game Theory for Applied Economists”: Princeton University Press.

Klein, R., Koch, S., Steinhardt, C., Strauss, A. K.,2020. “A review of revenue management: Recent generalizations and advances in industry applications”, Eur. J. Oper. Res. 284, pp.397-412.

Levitan, R., Shubik, M.,1972. “Price duopoly and capacity constraints”, Int. Econ. Rev. 13, pp.111-122.

Mas-Colell, A., M.D. Whinston, J. R. Green., 1995. “Microeconomic Theory”: Oxford University Press.

Notsu, T., 2023. “Collusion with capacity constraints under a sales maximization rationing rule”, Int. J. Game Theory 52, pp.485-516.

Shaked, A., Sutton, J., 1982. “Relaxing Price Competition Through Product Differentiation”, Rev. Econ. Stud. 49, pp.3-13.

Watada, J., Yoshimura, K., Vasant, P., 2017. “A Bertrand Game-Based Approach to Hotel Yield Management Strategies”, Handbook of Research on Holistic Optimization Techniques in the Hospitality, Tourism, and Travel Industry, pp.27-66

Yoshimura, K., Watada, J., 2014. “Game-based strategy development for hotel yield management”, Innovative Management in Information and Production, pp.377-386.

Zhao, Z., Chen, M.H., Su, C.H., Tian, Li., 2020. “Asymmetric price responses to hotel competition caused by heterogeneous customers' willingness to pay”, Int. J. Hospitality Management 90, Article 102409.

Exploring Bereaved Mothers' Perceptions of Grief Support Groups After Child Loss：Perspectives for Enhanced Support

Ayaka Fujita[1, 2, 3, 4], Yuko Hamada[1, 4], Harumi Moriguchi[4], Kaori Aihoshi[4, 5]

1, Shimonoseki City University, Japan

2, Japan Society for the Promotion of Science, Japan

3, Cicely Saunders Institute of Palliative Care, Policy & Rehabilitation, Florence Nightingale Faculty of Nursing, Midwifery & Palliative Care, King's College London, UK

4, Non-profit organization Fukuoka Children's hospice Project, Japan

5, Department of Health Sciences, Faculty of Medical Sciences, Kyushu University, Japan

Abstract

Aim: This study explores mothers' perceptions of grief support groups following child loss and provide implications for future support. Methods: Mothers attending grief support meetings since 2017 completed online surveys after each meeting from 2020. Survey completion indicated consent. Content analysis identified from the 6th to 13th meetings to identify codes and categories from open-ended comments. Results: Thirty-seven (64.9%) out of 58 participants responded. Eight categories emerged from 106 codes: "space to talk about the deceased child," "listening and being listened to," "empathy and shared experiences," "expressing suppressed emotions," "realizing they are not alone," "emotional relief," "a place to remember the deceased child," and "facing grief." Conclusions: Mothers reported benefits from support groups, while persistent nature of grief emphasizes the need for ongoing, individualized support.

Keywords: bereavement, child, grief support, mother

Introduction

The death of a child is considered as a profound and devastating experience (Davies, 2004; Price, 2015). It is associated with grief-related distress, which reportedly persists longer than that of other types of loss, occasionally enduring throughout the parent's lifetime (Pohlkamp et al., 2019) Several studies have demonstrated that the death of a child has a more significant adverse impact on bereaved families' mortality and psychosocial outcomes compared with other types of loss (Li et al., 2005; Li et al., 2003; Pudrovska, 2009) (Rosenberg et al., 2012). Furthermore, it has a profound effect on parents' mental health, interpersonal relationships, and fundamental beliefs about the meaning of life (Cacciatore et al., 2014).

The presence of an appropriate support system is crucial when faced with such a severe loss. After the loss of a child, the interaction between individual grief and changes in family members' daily lives can significantly affect family relationships (Dias et al., 2017) (Gilmer et al., 2012). Consequently, all family members find themselves in a situation where they must grieve the loss of the child individually and collectively. Therefore, support from family, friends, and professionals becomes an essential element in navigating the grieving process (Klass, 2006).

In particular, grief support groups provide a valuable space for individuals with similar experiences to come together and share their experiences, feelings, and coping strategies (Umphrey & Cacciatore, 2011). They play an important role in supporting the grieving process by reducing participants' sense of isolation and creating opportunities for information sharing and mutual support (Aho et al., 2012). Previous studies have emphasized the importance of social support for bereaved parents who have lost a child (Kreicbergs et al., 2007) (Laakso & Paunonen-Ilmonen, 2002).

However, our understanding of the experiences of mothers who have lost children in grief support groups remains insufficient. Moreover, there is limited research on the quality and effectiveness of support provided by these groups, as well as their alignment with participants' needs (Lichtenthal et al., 2015). It is important to gain a deeper understanding of how mothers following child loss perceive and experience of grief support groups from multiple perspectives as it allows for the identification of strengths and weaknesses in existing support groups, revealing opportunities for improvement (Dyregrov et al., 2013). In addition, uncovering the specific needs and challenges of mothers who have experienced child loss may lead to the development of more effective and individualized interventions (Cacciatore & Flint, 2012).

Moreover, healthcare professionals and mental health specialists can use the insights

gained from the experiences of grief support groups to provide more appropriate support to the bereaved (Keesee et al., 2008). This will enable them to gain a deeper understanding of group dynamics and the needs of individual participants, thereby facilitating a more effective provision of support.

Our research team has been conducting group meetings for families who have lost a child as part of grief support. This study aims to analyze the open-ended responses from a survey administered to participants of these grief support meetings to elucidate their perceptions after participation. Through this research, we expect to gain deeper insights into the effectiveness and areas for improvement of grief support groups and the specific needs of participants. The findings are anticipated to provide valuable information for designing and implementing future grief support programs, ultimately contributing to the realization of more effective support for parents who have lost a child.

Aim

This study aims to explore mothers' perceptions and reflections on the significance of attending grief support group meetings following the loss of a child and provide implications for future support strategies.

Grief Support Group: “A Ladder to the Sky” (Overview)

“A Ladder to the Sky” is a grief support group for bereaved parents who have lost children that has been operating since 2017. It provides a safe space for members to share their experiences and feelings. Meetings are held three to four times a year, either online or in person. Aside from the adult group, a separate group for bereaved siblings, primarily children, was established in 2023.

In adult group meetings, participants begin with brief self-introductions, followed by a review of the group’s guidelines, including maintaining confidentiality regarding shared experiences, allowing for the flexible entry and exit from the meeting, respecting individual comfort levels in sharing, and refraining from criticizing or judging others’ contributions. Once the guidelines are established, participants are given the opportunity to share their stories openly.

During the meetings, staff members serve as facilitators, ensuring that participants feel heard and respected. They take a non-interruptive approach while actively listening to the narratives that are being shared. They also encourage dialogue and interaction by prompting questions and fostering a supportive environment for participants to connect with one another.

At the end of each session, the participants are invited to provide feedback through an

optional questionnaire. This feedback, which encompasses opinions on the group's operations and overall experience, is valuable in guiding future improvements and ensuring that the group continues to meet the needs of its members.

Methods

Participants: The participants were attendees of grief support meetings for families who have lost a child.

Study Period: April to May 2024

Data Collection: Data were collected through online surveys conducted after each meeting since 2020. After each session, the participants were invited to complete a voluntary questionnaire, and survey submission was considered as consent to participate in the study.

Questionnaire Content: Aside from five-point Likert scale evaluations of the overall experience and operational aspects of the grief support group, the questionnaire includes open-ended sections for feedback and suggestions regarding the group and personal reflections on participation. The present analysis focuses on the qualitative data collected from these open-ended sections.

Analysis: Free-text responses from questionnaires administered from the 6th to the 13th meetings were analyzed using content analysis, focusing on participants' perceptions and reflections on the significance of attending the meetings. Textual data were coded according to contextual units. Subsequently, these codes were classified and organized into categories based on similarities in their descriptive content. To ensure analytical rigor, the primary researcher maintained consistency in the coding and categorization processes and conducted member checking with co-researchers. Collaborative dialogue on uncertain classifications helped minimize subjective biases, enhancing the reliability of the analysis.

Ethical Considerations: This study was approved by the research ethics committee at the researchers' affiliated institution (Approval Number: 2408-1023) and that it conforms to the provisions of the Declaration of Helsinki.

Results

Out of 58 participants, all of whom were mothers, 37 (64.9%) provided responses. Eight categories emerged from 106 codes (Table 1).

Table 1: Categories of Mothers' Perceptions of Grief Support Groups

Category	Sub-category	Code Count
Space to Talk About the Deceased Child	Speaking comfortably among those with shared experiences	8
	Talking with people in similar situations	5
Listening and Being Listened To	Listening to diverse perspectives	7
	Having one's story heard	2
	Experiencing unique sharing confined to grief support groups	3
Empathy and Shared Experiences	Receiving empathy for one's feelings	3
	Empathizing with others' experiences and situations	7
	Sharing feelings and experiences	6
Expressing Suppressed Emotions	Venting emotions freely	8
	Expressing grief through tears	9
Realizing They Are Not Alone	Realizing one is not alone	4
	Recognizing previous isolation before joining	1
Emotional Relief	Experiencing emotional relief	5
	Feeling unburdened through talking	6
A Place to Remember the Deceased Child	Maintaining unchanging feelings towards the deceased child	4
	Preserving memories and emotions of the deceased child	3
Facing Grief	Gaining new insights	5
	Recognizing the individuality of grief	3
	Suppressing emotions in daily life	13
	Experiencing occasional tearful moments	2
	Encountering periods of distress	2

Categorical Descriptions

1. Space to Talk About the Deceased Child

This category highlights the role of the grief support group as a safe space for mothers to discuss their deceased children. This category comprised two subcategories: Speaking comfortably among those with shared experiences and Talking with people in similar situations. The first subcategory revealed that mothers found comfort in sharing their experiences with others who understood their loss, as exemplified by the code: “I felt comfortable talking to people in the same situation,” The second subcategory emphasized the value of connecting with others in similar circumstances, illustrated by the code: “Although the circumstances of our children's deaths were different, we shared the common experience of losing a child.” These findings demonstrate that the group provided a space where bereaved mothers could openly discuss their deceased children with others who truly understood their experience

2. Listening and Being Listened To

This category highlights the significance of participants listening to others and having their own experiences heard. The category comprised three subcategories: Listening to diverse perspectives, Having one's story heard, and Experiencing unique sharing confined to grief support groups. The first subcategory demonstrated how mothers valued hearing various experiences, as shown by the code: “I was able to listen to stories from people in different situations.” The second subcategory highlighted the importance of having their own experiences acknowledged, exemplified by the code: “They listened to my story.” The third subcategory revealed the unique nature of discussions possible only in these groups, as illustrated by the code: “There are things that can only be said and heard in this space.” These findings indicate that the group provided mothers with a space where they could both have their experiences heard and listen to others' experiences, fostering mutual support through this reciprocal relationship.

3. Empathy and Shared Experiences

This category emphasizes the importance of emotional connections through shared experiences and mutual understanding. The category comprised three subcategories: Receiving empathy for one's feelings, Empathizing with others' experiences and situations, and Sharing feelings and experiences. The first subcategory highlighted how mothers felt understood by others, as illustrated by the code: “There were people who empathized with my feelings.” The second subcategory demonstrated how mothers could

relate to others' situations, exemplified by the code: “There were many aspects of others' stories that I could identify with, as if they were expressing my own feelings.” The third subcategory revealed the depth of emotional sharing, as shown by the code: “We could share our feelings because we had the same experience.”

4. Expressing Suppressed Emotions

This category reveals how emotions that are usually difficult to express were freely shared within the group. The category comprised two subcategories: Venting emotions freely and Expressing grief through tears. The first subcategory demonstrated how mothers could release their suppressed emotions, as shown by the code: “I was able to release my accumulated emotions.” The second subcategory revealed how mothers found comfort in expressing their emotions through tears, exemplified by the code: “I was glad I could cry here.” These findings indicate that the meetings provided mothers with a space where they could express deep emotions through both words and tears that might be difficult to show in their daily lives

5. Realizing They Are Not Alone

This category illustrates how mothers found comfort in discovering they were not alone in their grief experiences. The category comprised two subcategories: Realizing one is not alone and Recognizing previous isolation before joining. The first subcategory demonstrated how mothers found solace in meeting others with similar experiences, as shown by the code: “I felt reassured that I wasn't alone.” The second subcategory revealed their previous sense of isolation, exemplified by the code: “Before participating, I had been carrying the burden alone.” These findings indicate that the group helped mothers transition from feelings of isolation to a sense of connection with others who shared similar experiences.

6. Emotional Relief

This category illustrates how participants found emotional relief through sharing their experiences. The category comprised two subcategories: Experiencing emotional relief and Feeling unburdened through talking. The first subcategory demonstrated how mothers felt emotional clarity after participation, as shown by the code: “I was able to sort out some of the emotions I had been keeping inside.” The second subcategory revealed the therapeutic effect of verbalization, exemplified by the code: “My heart felt lighter through talking.” These findings indicate that expressing grief within the group

helped mothers process their emotions and achieve a sense of emotional release.

7. A Place to Remember the Deceased Child

This category illustrates how the grief support group provided a space for mothers to honor and remember their deceased children. The category comprised two subcategories: Maintaining unchanging feelings towards the deceased child and Preserving memories and emotions of the deceased child. The first subcategory demonstrated the enduring nature of maternal feelings, as shown by the code: “No matter how much time passes since losing my child, my thoughts and feelings remain the same.” The second subcategory revealed mothers' concerns about preserving memories, exemplified by the code: “I'm afraid of forgetting the memories of my child.” These findings indicate that the group served as a valuable space where mothers could acknowledge their unchanging bonds with their children and actively maintain their memories.

8. Facing Grief

This category illustrates how mothers encountered and processed their grief experiences within the group. The category comprised five subcategories: Gaining new insights, Recognizing the individuality of grief, Suppressing emotions in daily life, Experiencing occasional tearful moments, and Encountering periods of distress. The first subcategory revealed mothers' development of new perspectives, as shown by the code: “Listening to mothers who have been through this longer, I realized it's okay not to force myself to move on.” The second subcategory demonstrated the understanding of grief's unique nature, exemplified by the code: “Everyone's experience is different.” The third subcategory highlighted the challenges of daily life, illustrated by the code: “In daily life, I usually keep my feelings about my child locked away.” The fourth and fifth subcategories revealed the ongoing nature of grief, as shown by codes: “Sometimes my heart reacts with tears before I can even process my thoughts” and “In some situations, it becomes particularly difficult.” These findings indicate that the group enabled mothers to face their grief while recognizing both the universality and individuality of their experiences.

Discussion

This study explored perceptions of mothers following child loss regarding their participation in a grief support group and identified eight primary categories. These

findings offer valuable insights into the effectiveness of grief support groups and the specific needs of mothers who have lost children.

Categories such as “expressing suppressed emotions” and “realizing they are not alone” emerged from this study, corroborating the established role of grief support groups in providing emotional support for the bereaved. According to Umphrey and Cacciatore (Umphrey & Cacciatore, 2011), grief support groups provide a crucial space for empathy and support during the grieving process, a finding mirrored in the present study.

Notably, the finding that shared empathy reduces feelings of isolation is consistent with Aho et al.’s (Aho et al., 2012) study, which posited that sharing experiences within a group fosters a sense of connection among participants. Moreover, the emergence of categories such as “space to talk about the deceased child,” “empathy and shared experiences,” and “listening and being listened to” in this study further reinforces that dialogue and emotional sharing are crucial elements in alleviating feelings of isolation.

However, the quality and effectiveness of support in grief support groups may not be universally applicable. Klass (Klass, 2006) emphasized that grief processes are individualistic, and bereaved individuals may have diverse emotional needs. The findings of the present study, particularly the diverse needs emerging from participants’ open-ended responses, support this assertion. Consequently, future group operations should prioritize providing individualized support. Similarly, Cacciatore and Flint (Cacciatore & Flint, 2012) emphasized that grief support groups should provide flexible support tailored to individual circumstances, considering each participant's unique grieving process.

The emergence of the category “expressing suppressed emotions” as a significant result in the present study further suggests that mothers may have different preferences and needs in emotional expression during grief, requiring varied approaches in emotional support strategies. In the study of Laakso and Paunonen-Ilmonen (LAAKSO & PAUNONEN-ILMONEN, 2002), which described the diversity of emotions and reactions to grief among bereaved parents, they highlight the possibility that necessary support and approaches may differ on a case-by-case basis. Therefore, it is important to develop tailored approaches (e.g., adopting diverse support techniques and providing support based on individual needs) in the future.

Cultural background often influences coping with loss experiences. Previous studies have discussed how cultural differences may shape the grieving process. In their study on the positive effect of robust social support on bereaved individuals’ outcomes, Kreicbergs et al. (Kreicbergs et al., 2007) underscored the importance of considering

cultural context. For example, in certain cultures, internalizing grief rather than expressing it outwardly may be considered virtuous (Goss, 1999), potentially leading to resistance to group dialogue. Thus, culturally sensitive support is essential for mothers from such backgrounds.

The present study suggests the need for ongoing support as evidenced by the emergence of categories such as “a place to remember the deceased child” and “facing grief” from mothers’ open-ended responses. This implies that the grieving process is not transient, highlighting the importance of long-term support. Malkinson and Bar-Tur (Malkinson & Bar-Tur, 2005) noted that grief, particularly the profound grief associated with losing a child, can persist for extended periods. While long-term support is emphasized globally (Malkinson & Bar-Tur, 2005) (Gilmer et al., 2012), efforts in Japan, such as those noted by Shimazono (Shimazono, 2022), similarly highlight the need for sustained and culturally sensitive support. However, as Okaku (Okaku, 2024) warns, evaluation frameworks for such initiatives remain underdeveloped. Therefore, while providing continuous support for the entire family, it is essential to develop higher-quality support based on participant feedback.

Gilmer et al. (Gilmer et al., 2012) emphasized the pervasive impact of bereavement on daily life and advocated for the provision of continuous support for the entire family. Beyond individual support, Kim et al. (Kim et al., 2023) highlighted the importance of addressing family system dynamics, as grief affects and transforms family relationships as a whole.

Limitations of the Study

This study has several limitations. First, the sample size was small (responses from 37 out of 58 individuals [64.9%]). Therefore, the results should be interpreted with caution. Moreover, the survey method might have resulted in varying depths and details of responses among participants, and self-selection bias might exist, potentially reflecting more opinions from mothers actively seeking support. Furthermore, relying on open-ended responses meant that the level of detail in answers may vary depending on the expressive abilities of participants. This may result in important information not being fully elicited. Thus, future studies should perform deeper data collection by combining interviews with surveys.

This study has several limitations. First, the sample size was relatively small, with responses collected from 37 out of 58 individuals (64.9%), which limits the generalizability of the findings and warrants cautious interpretation. Second, the survey

method may have led to variations in the depth and detail of responses among participants. Additionally, self-selection bias may have influenced the results, as mothers who were more actively seeking support might have been more likely to participate. Third, the reliance on open-ended responses introduced variability in the level of detail provided, potentially reflecting differences in participants' expressive abilities. This could have resulted in some important information not being fully captured. Furthermore, as the survey was conducted anonymously across sessions 6-13, it was not possible to distinguish unique participants from repeat attendees. Consequently, some perspectives may be overrepresented, which should be taken into account when interpreting the findings. To address these limitations, future studies should employ a more robust data collection strategy, such as combining anonymous surveys with in-depth interviews, to gain richer and more comprehensive insights.

Clinical Applications

The results of this study provide important implications for healthcare professionals and mental health specialists. In particular, categories such as “space to talk about the deceased child” and “expressing suppressed emotions” indicate aspects that professionals should pay special attention to when engaging in dialogue with the bereaved. Moreover, the importance of “empathy and shared experiences” emphasizes the value of peer support and providing opportunities for peer support alongside professional-led support. We can expect to realize more effective and comprehensive support for bereaved parents by integrating these insights into clinical practice.

Conclusions

Mothers who have lost children largely perceive grief support groups positively, reporting benefits such as increased awareness and improved management of their grief. However, the findings also highlight the ongoing challenges that these mothers face in their daily lives, underscoring the persistent and fluctuating nature of grief. The study's identification of diverse needs and the potential influence of cultural backgrounds further emphasizes the importance of providing individualized and culturally sensitive support. Therefore, grief support programs should not be limited to one-time interventions, but should offer sustained and regular support that caters to the unique and evolving needs of mothers following child loss. Incorporating flexible program structures, long-term support plans, and opportunities for peer interaction

alongside professional guidance can contribute to more effective and comprehensive support for parents navigating the complex and enduring journey of child loss grief.

Acknowledgments

We express our deepest gratitude to the bereaved individuals who cooperated with this study. We sincerely appreciate the invaluable insights you provided, which have proven essential for improving the quality of grief support in the future. Your contributions are hereby acknowledged with profound thanks.

References

Aho, A. L., Paavilainen, E., & Kaunonen, M. (2012). Mothers' experiences of peer support via an Internet discussion forum after the death of a child. *Scandinavian Journal of Caring Sciences*, *26*(3), 417-426. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1471-6712.2011.00929.x

Cacciatore, J., & Flint, M. (2012). ATTEND: toward a mindfulness-based bereavement care model. *Death Stud*, *36*(1), 61-82. https://doi.org/10.1080/07481187.2011.591275

Cacciatore, J., Lacasse, J. R., Lietz, C. A., & McPherson, J. (2014). A Parent's Tears: Primary Results from the Traumatic Experiences and Resiliency Study. *OMEGA - Journal of Death and Dying*, *68*(3), 183-205. https://doi.org/10.2190/OM.68.3.a

Dias, N., Docherty, S., & Brandon, D. (2017). Parental bereavement: Looking beyond grief. *Death Studies*, *41*(5), 318-327. https://doi.org/10.1080/07481187.2017.1279239

Dyregrov, K., Dyregrov, A., & Johnsen, I. (2013). Participants' recommendations for the ideal grief group: a qualitative study. *Omega (Westport)*, *67*(4), 363-377. https://doi.org/10.2190/OM.67.4.b

Gilmer, M. J., Foster, T. L., Vannatta, K., Barrera, M., Davies, B., Dietrich, M. S., Fairclough, D. L., Grollman, J., & Gerhardt, C. A. (2012). Changes in Parents After the Death of a Child From Cancer. *Journal of Pain and Symptom Management*, *44*(4), 572-582. https://doi.org/10.1016/j.jpainsymman.2011.10.017

Goss, D. K. R. (1999). SPIRITUAL BONDS TO THE DEAD IN CROSS-CULTURAL AND HISTORICAL PERSPECTIVE: COMPARATIVE RELIGION AND MODERN GRIEF. *Death Studies*, *23*(6), 547-567. https://doi.org/10.1080/074811899200885

Keesee, N. J., Currier, J. M., & Neimeyer, R. A. (2008). Predictors of grief following the death of one's child: the contribution of finding meaning. *Journal of Clinical Psychology*, *64*(10), 1145-1163. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jclp.20502

Kim, M. A., Sang, J., Yi, J., Sung, J., & Howey, W. (2023). Changes in Relationships in Bereaved Families: Perspectives of Mothers Who Lost a Child to Cancer. *OMEGA - Journal of Death and Dying*, *88*(2), 525-549. https://doi.org/10.1177/00302228211047105

Klass, D. (2006). Continuing conversation about continuing bonds. *Death Stud*, *30*(9), 843-858.

https://doi.org/10.1080/07481180600886959

Kreicbergs, U. C., Lannen, P., Onelov, E., & Wolfe, J. (2007). Parental Grief After Losing a Child to Cancer: Impact of Professional and Social Support on Long-Term Outcomes. *Journal of Clinical Oncology*, *25*(22), 3307-3312. https://doi.org/10.1200/jco.2006.10.0743

Laakso, H., & Paunonen-Ilmonen, M. (2002). Mothers' experience of social support following the death of a child. *Journal of Clinical Nursing*, *11*(2), 176-185. https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2702.2002.00611.x

Li, J., Laursen, T. M., Precht, D. H., Olsen, J., & Mortensen, P. B. (2005). Hospitalization for Mental Illness among Parents after the Death of a Child. *New England Journal of Medicine*, *352*(12), 1190-1196. https://doi.org/doi:10.1056/NEJMoa033160

Li, J., Precht, D. H., Mortensen, P. B., & Olsen, J. (2003). Mortality in parents after death of a child in Denmark: a nationwide follow-up study. *Lancet*, *361*(9355), 363-367. https://doi.org/10.1016/s0140-6736(03)12387-2

Lichtenthal, W. G., Sweeney, C. R., Roberts, K. E., Corner, G. W., Donovan, L. A., Prigerson, H. G., & Wiener, L. (2015). Bereavement Follow-Up After the Death of a Child as a Standard of Care in Pediatric Oncology. *Pediatric Blood & Cancer*, *62*(S5), S834-S869. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pbc.25700

Malkinson, R., & Bar-Tur, L. (2005). Long Term Bereavement Processes of Older Parents: The Three Phases of Grief. *OMEGA - Journal of Death and Dying*, *50*(2), 103-129. https://doi.org/10.2190/w346-up8t-rer6-bbd1

Okaku, T. (2024). Learning From Bereavement Research and Practice in the UK. *Japanese Journal of Grief and Bereavement Research*, *5*, 29-35.

Pohlkamp, L., Kreicbergs, U., & Sveen, J. (2019). Bereaved mothers' and fathers' prolonged grief and psychological health 1 to 5 years after loss—A nationwide study. *Psycho-Oncology*, *28*(7), 1530-1536. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pon.5112

Pudrovska, T. (2009). Parenthood, stress, and mental health in late midlife and early old age. *Int J Aging Hum Dev*, *68*(2), 127-147. https://doi.org/10.2190/AG.68.2.b

Rosenberg, A. R., Baker, K. S., Syrjala, K., & Wolfe, J. (2012). Systematic review of psychosocial morbidities among bereaved parents of children with cancer. *Pediatric Blood & Cancer*, *58*(4), 503-512. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pbc.23386

Shimazono, S. (2022). Rethinking Grief Care through the Cultural Aspect. *Japanese Journal of Grief and Bereavement Research*, *3*, 3-10.

Umphrey, L. R., & Cacciatore, J. (2011). Coping with the Ultimate Deprivation: Narrative Themes in a Parental Bereavement Support Group. *OMEGA - Journal of Death and Dying*, *63*(2), 141-160. https://doi.org/10.2190/OM.63.2.c

【総説解説論文】

プログラミング言語のコンパイラの構文解析

Parsing theory of compilers of programming languages

山根　智
Satoshi Yamane[1]

[1]下関市立大学
Shimonoseki City University

要旨

私たちの世界を動かすプログラムは事実上すべて，人間が Python や Java，C などの高級プログラミング言語で記述し，それをコンパイルして低レベルのコードにまとめて実行する．現代のプログラミング言語のためのコンパイルを行う技術，すなわち，コンパイラの多くは，Alfred V. Aho と Jeffrey D. Ullman の貢献が大きく，それにより 2020 年度に，コンピュータ科学の最高峰のチューリング賞を受賞した [1]．コンパイラでは字句解析，構文解析，コード生成などのための技術やアルゴリズムが重要である． 本解説記事では，コンパイラの構造及び，コンパイラで最重要で最難関な構文解析，特に LR 構文解析 ［7］ について，類書にない構文解析手法の関係を明確化して，有効な事例を新規に追加して，解説を行う．これにより，現在と未来の社会を支えるコンピュータ・ソフトウェアの理解を深めることができる．さらに重要なことは，構文解析の理論，技術，実装は他の多くのソフトウェアの原理となっており，今後のソフトウェアの作成に大いに有益である．なお，本解説記事はドラゴンブック ［2］ や優れた教科書 ［3,4,5,6］ などを参考にしている．

キーワード：　プログラミング言語，コンパイラ，構文解析，LR 構文解析

Abstract

All programs that run our world are written by humans in high-level programming languages such as Python, Java, and C, which are then compiled into low-level code and executed. Much of the technology for compiling for modern programming languages, i.e., compilers, is due to the contributions of Alfred V. Aho and Jeffrey D. Ullman, which earned them the Turing Prize, the pinnacle of computer science, in FY2020 [1]. Techniques and algorithms for lexical analysis, parsing, and code generation are

important for compilers. This article describes the structure of compilers and the most important and most difficult part of compilers, parsing, especially LR parsing [7] , by clarifying the relationship between parsing methods and adding new effective examples not found in other books. This will deepen your understanding of computer software that supports present and future society. More importantly, the theory, techniques, and implementation of parsing are the principles of many other software, and will be of great benefit in the development of future software. This article is based on Dragon Book [2] and excellent textbooks [3,4,5,6].

Keywords: programming language, compiler, parser, LR parser

１.はじめに

コンピュータ・ソフトウェアは,私たちが関わるほとんどすべての技術に力を与える.携帯電話や自動車で動作するものから，大手ウェブ企業内の巨大サーバーファームで動作するものまで,私たちの世界を動かすプログラムは事実上すべて，人間が Python や Java，C などの高級プログラミング言語で記述し，それをコンパイルして低レベルのコードにまとめて実行する．現代のプログラミング言語のためのコンパイルを行う技術，すなわち，コンパイラの多くは，Alfred V. Aho と Ullman D. Jeffrey の貢献が大きく，それにより 2020 年度に，コンピュータ科学の最高峰のチューリング賞を受賞した［1].

また，Alfred V. Aho と Jeffrey D. Ullman らの共著『Compilers principles, techniques & tools』はコンパイラ技術に関する決定的な本であり，形式言語理論と構文指向翻訳技術をコンパイラ設計プロセスに統合したものである［2]．カバーデザインからしばしば「ドラゴンブック」と呼ばれており，高レベルのプログラミング言語をマシンコードに変換する段階を明晰に示し，コンパイラ構築の全プロセスをモジュール化している．この書籍には，字句解析，構文解析，コード生成のための効率的な技術に対して，彼らが行ったアルゴリズム的な貢献も含まれている.ドラゴンブックの最新版は 2007 年に出版され，コンパイラ設計に関する標準的な教科書として世界で広く読まれており，日本語の翻訳もあり，大学や大学院の講義や研究において有効活用されている.

本解説記事では，コンパイラの構造及び，コンパイラで最重要で最難関な構文解析について，類書にない構文解析手法の間の関連および新たな事例を盛り込んで解説を行う．これにより，現在と未来の社会を支えるコンピュータ・ソフトウェアのコンパイラの構文解析手法の理解を深めることができる．さらに重要なことは，構文解析の理論，技術，実装は他の多くのソフトウェアの原理となっており，今後のソフトウェアの作成に大いに有益である．なお，ドラゴンブックを手本に，日本語の優れた教科書も多数あり、その代表的な書籍［3,4,5,6］を参考文献にあげており，本解説記事の作成にも参考にしている.

２.コンパイラの位置づけと構造

最初に，原始プログラムを読み込んで，機械コードを出力するまでの典型的な流れを図１

に示す．以下では，ドラゴンブック［2］に従って簡単に概要を説明する．

まず，コンパイラは高級プログラミング言語で書かれた原始プログラムを読み込んで，必要に応じて前処理を行い，コンパイル可能な原始プログラムを出力する．なお，前処理では，別のファイルに格納している原始プログラムやライブラリなどを取り込んで原始プログラムに展開して，コンパイル可能な原始プログラムを作る．次に，その原始プログラムをコンパイラが読み込んで，ターゲットマシンに対応したアセンブリプログラムに変換する．次に，アセンブリプログラムをアセンブラに入力して，再配置可能な機械コードを出力する．最後に，リンカまたはローダに再配置可能な機械コードを入力して，リンカまたはローダはライブラリファイルや再配置可能目的ファイルを取り込んで，最終的に実行可能な機械コードを出力する．

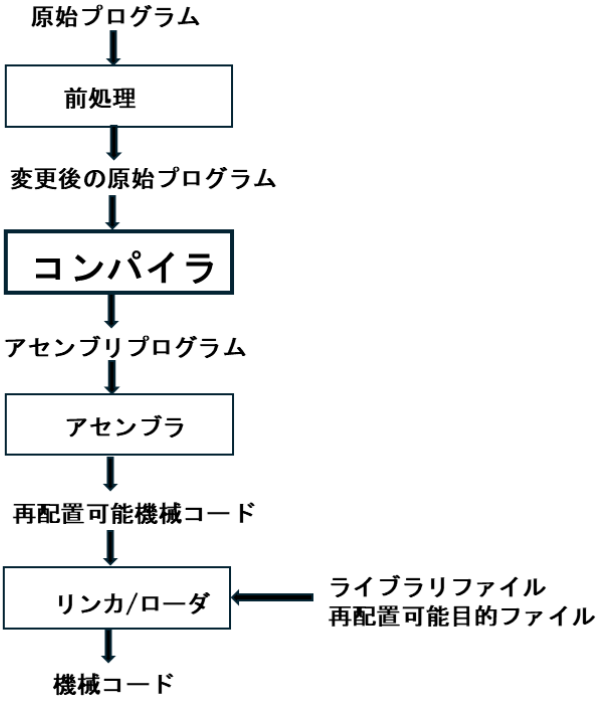


図１　コンパイラの位置づけ

次に，コンパイラの典型的な内部の構造を図２に示す．以下では，ドラゴンブック［2］に従って簡単に概要を説明する．コンパイラの内部の構造は，大まかには，解析と合成の２つの部分に分かれている．

(1)解析部は原始プログラムを構成要素に分解し，それらに文法的な構造を与える．この構造を利用して原始プログラムの中間コードを作り出す．また，原始プログラムのデータなどの情報を収集し，記号表に格納する．なお，解析部は字句解析，構文解析，意味解析，中間コード生成からなる．

① 字句解析は原始プログラムの文字ストリーム(文字列)から，名前やキーワードなどのプログラムとして意味のある最小単位のトークンストリーム(トークンの列)を作り出す．

② 構文解析はプログラミング言語の文法に従って，トークンストリームから構文木を作る．

③ 意味解析は型の整合性などをチェックする.

④ 中間コード生成は構文木からアセンブリの命令に近い中間コードを生成する.コンパイラによっては,中間コードを経ずに,直接にアセンブリプログラムを生成して,その後,最適化するものもある.

(2)合成部は中間コードと記号表の情報からアセンブリプログラムを作り出す.なお,合成部は中間コードの最適化とコード生成からなる.

① 中間コードの最適化は中間コードの合成において無駄な中間コードを削除する.並列処理などのハードウェアの進化により,多数の研究がなされている.

② コード生成は中間コードからアセンブリプログラムを生成する.

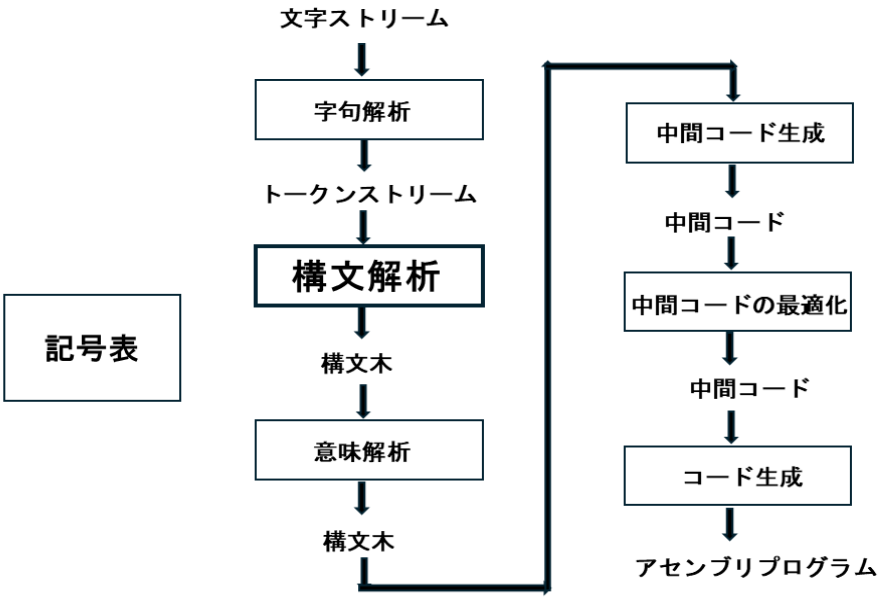


図２　コンパイラの構造

３.プログラミング言語の文法

構文解析の説明の前に,ドラゴンブック［2］や和文教科書［5］に従い,プログラミング言語の文法について説明する.

まず,構文解析するためには,プログラミング言語の文法を数学的に定義する必要がある.プログラミング言語は文法的には文脈自由文法であり,以下の４つ組$\langle V_N, V_T, P, S\rangle$で定義する.

（定義）文脈自由文法は４つ組$\langle V_N, V_T, P, S\rangle$である.

ここで,各記号は以下である：

非終端記号(Non-terminal Variable)の集合　V_N

終端記号(Terminal Variable)の集合 V_T

生成規則(Production Rule)の集合　P

開始記号(Start Symbole) $S \in V_N$

ただし，$V_N \cap V_T = \{\}$

また，生成規則は”$A \rightarrow \alpha$”$\in P$ であり，左辺は一つの終端記号 $A \in V_N$，右辺は $\alpha \in (V_N \cup V_T)^*$である．ただし，生成規則の集合 P は S を左辺とする生成規則を必ず含む．

なお，左辺が同じで右辺が異なる２つ以上の生成規則を以下のように書く．

$A \rightarrow \alpha_1, \cdots, A \rightarrow \alpha_n$ は $A \rightarrow \alpha_1 | \cdots | \alpha_n$ とまとめて書く．

非終端記号 V_N は変数のようなものであり，終端記号 V_T はプログラムに出現する記号である．重要なことは，生成規則の集合により文法を定義するものであり，生成規則は左辺の非終端記号から右辺の非終端記号または終端記号の連結された文字列に書き換える規則である．

次に，プログラミング言語に現れる典型的な文法の一部(多くの教科書で出現する文法)を文脈自由文法で記述してみる．

$G=\langle V_N, V_T, P, E\rangle$の各組は以下である．

$V_N=\{E\}$

$V_T=\{+, *, (,), i\}$

$P=\{E \rightarrow E+E$

$E \rightarrow E*E$

$E \rightarrow (E)$

$E \rightarrow i\}$

開始記号 $E \in V_N$

次に,文法 G から i+i*i に対する構文木を作るが,図３のように２つの構文木が存在する．ここで，⇒は生成規則を１回適用して左辺から右辺が得られることを意味する．

① E ⇒ E + E ⇒ E + E * E ⇒ E + E * i ⇒ E + i * i ⇒ i + i * i

② E ⇒ E * E ⇒ E * i ⇒ E + E * i ⇒ E + i * i ⇒ i + i * i

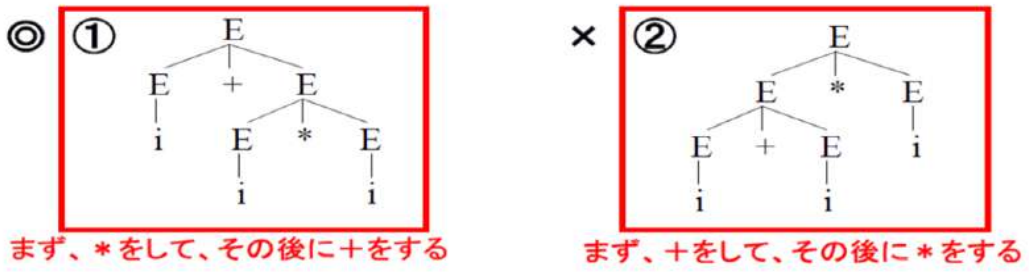


図３　i+i*i に対する２つの構文木

この文法は２つの構文木が生成でき，曖昧性を持つ文法である．掛け算が足し算よりも優先度が高いという演算子の優先順位を考慮すると，①が正しい構文木である．文法の曖昧性を除去するために，演算子の優先順位と結合性を生成規則に埋め込む必要がある．その結果，以下の文法が作れ，この文法がプログラム言語の文法として採用されており，以降の章でもこの文法 G’を用いる．

$G'=\langle V_N, V_T, P, E\rangle$の各組は以下である．

V_N={E, T, F}

V_T={+, ＊ (,), i}

P={E→E+T

E→T

T→T*F

T→F

F→(E)

F→i}

開始記号 E∈V_N

４.構文解析の概要

構文解析はプログラミング言語の文法に従って，原始プログラムのトークンの列から構文木を作るものである.構文解析の手法として,代表的なものが２つあり,図４に示すように,根からトップダウンに構文木を作る手法（再帰的下向き構文解析手法）と葉からボトムアップに構文木を作る手法（LR 構文解析手法）がある [2].

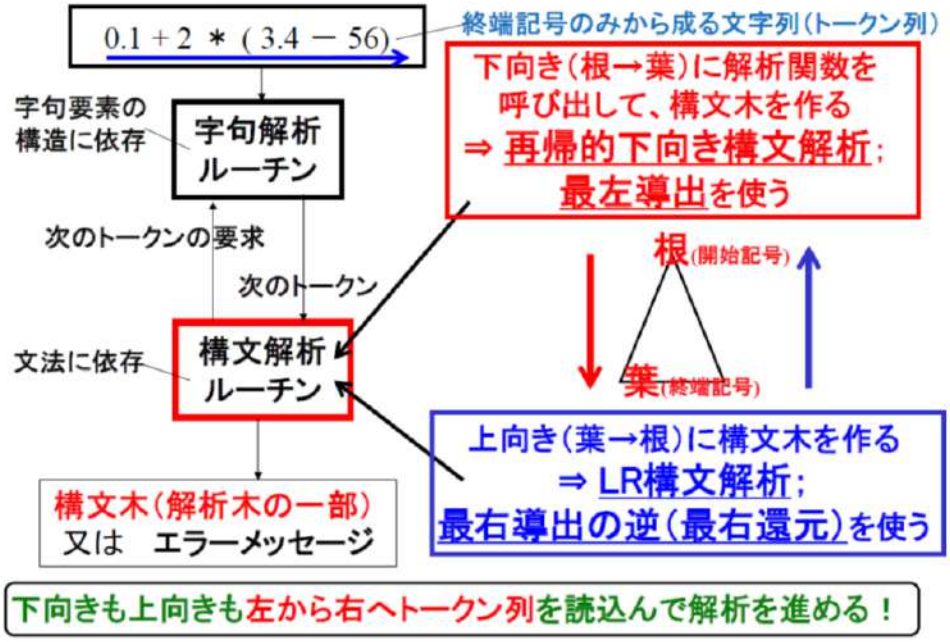


図４　代表的な２つの構文解析手法

再帰的下向き構文解析手法は最左導出を繰り返して，根から葉に向かって構文木を作る．一方，LR 構文解析手法は最右導出の逆，つまり最右還元を繰り返して，葉から根に向かって構文木を作る．２つの構文解析手法ともにトークンの列を左から右へバックトラックなしに一度読み込んで解析して構文木を作る．また，再帰的下向き構文解析器を作るには，生成規則毎に解析関数を手作り，再帰的に解析関数を呼び出して構文木を作る必要がある．一方，LR 構文解析器は文法から自動的に構文解析プログラム生成器できて，構文解析可能な文法クラ

スも広く，実用上から多用されている．

５．再帰的下向き構文解析手法

５．１　基本的考え方

この章では，３章で導入した以下の文法を対象とする．

G’=<V_N, V_T, P, E>の各組は以下である．

V_N={E, T, F}

V_T={+, ＊ (,), i}

P={E→E+T, E→T, T→T*F, T→F, F→(E), F→i}

開始記号 E∈V_N

まず，再帰的下向き構文解析の考え方に従い，図５に示すように，トークン列 i*(i+i)から，最左導出により，木の根から葉に向けゴールまでの構文木を生成する．ここで，図６に示すように，無限ループとバックトラッキングが発生する．G’は左再帰性のある文法（例えば，E→E+T）なので，E の解析関数は E から E+T の構文木を作るが，トークンへのポインタが前進しないで無限に呼び出され，無限ループを発生させる．一方，バックトラッキングが発生すると，構文木の作成時間が大きくなったり，プログラムが複雑になるので，実用上から大きな問題となる．

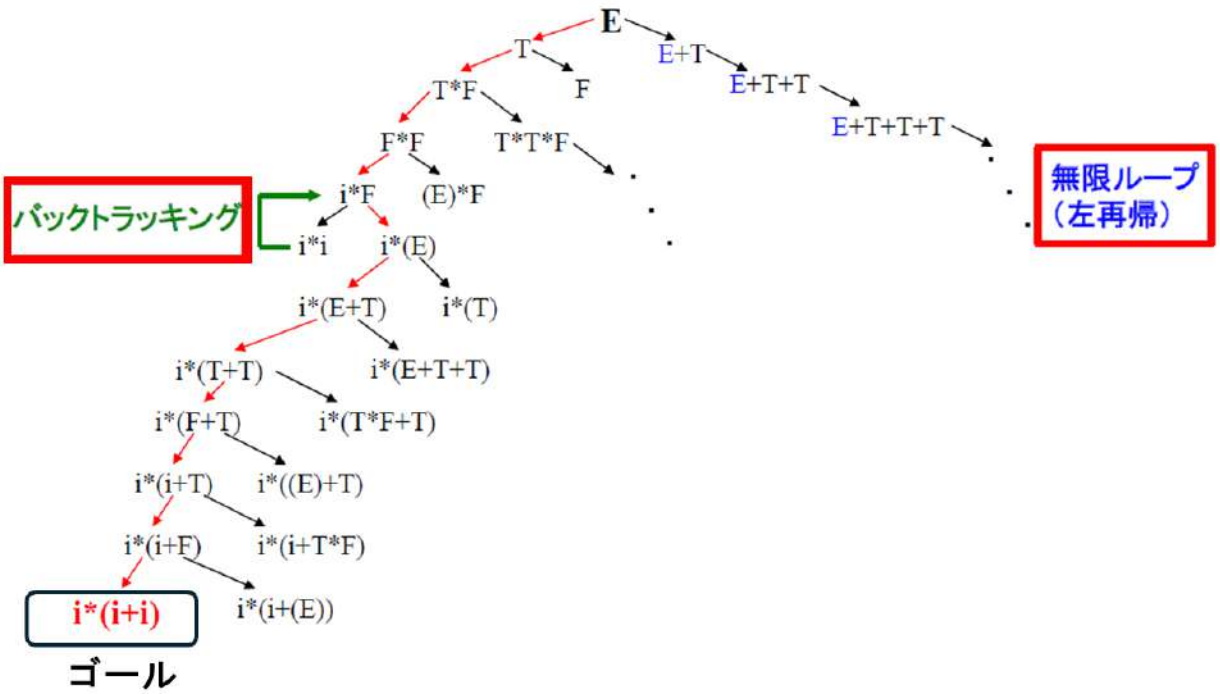


図５　再帰的下向き構文解析手法の流れ

再帰的下向き構文解析では，無限ループを回避するために，左再帰性のある文法を右再帰性の文法に変換して構文解析を行い，左再帰性の文法の構文木を生成する．一方，バックトラッキングを回避するために，トークンを先読みすると，呼び出すべき解析関数がユニーク

に決まるような文法を構文解析の対象とする．再帰的下向き構文解析の流れを図６に示す．

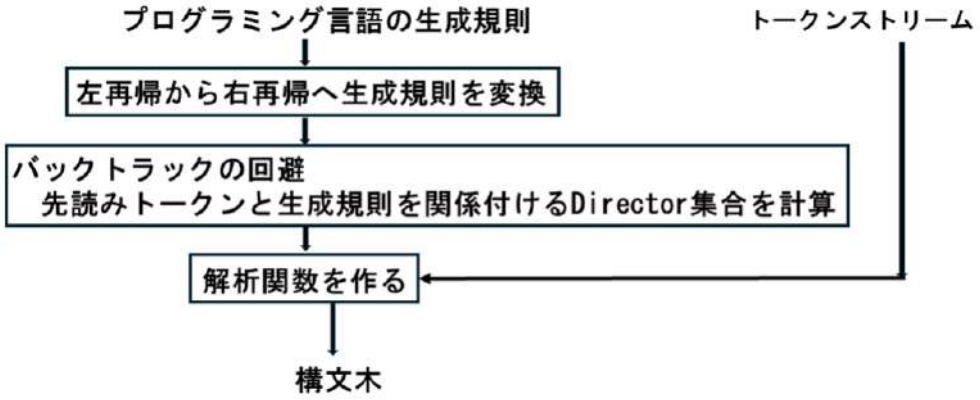


図６　再帰的下向き構文解析手法の流れ

５．２　左再帰性から右再帰性への変換

G’は左再帰性のある文法（例えば，E→E+T）なので，E の解析関数はトークンへのポインタが前進しないで無限に呼び出され,無限ループを発生させる.再帰的下向き構文解析では，無限ループを回避するために，左再帰性のある文法を右再帰性の文法に変換する．

例えば，左再帰性を持つ次の単純な生成規則を考える．

A→Aa|b

なお，A は非終端記号，a と b は終端記号であり，b は A 以外の記号とする．A から最左導出により，$ba^n(n\geqq 0)$が導出できる．ここで，新しい非終端記号 A’を導入して，右再帰性を持つ次の生成規則を作る．

A→bA’

A’→Aa’｜ε

最右導出を用いると，A→Aa|b と同じ終端記号列 $ba^n(n\geqq 0)$が導出できる．以上より，左再帰性を有する文法の構文解析は右再帰性の文法に変換して構文解析すればよいことがわかる．

左再帰性のある文法 G’=<V_N, V_T, P, E>から左再帰性を除去して，

V_N={E, T, F}

V_T={+, * (,), i}

P={E→E+T, E→T, T→T*F, T→F, F→(E), F→i}

開始記号 E∈V_N

以下の文法 G’’ =<V_N’, V_T, P’, E>が得られる．

V_N’={E, E’, T, T’, F}

V_T={+, * (,), i}

P’={E→TE’, E’→+TE’｜ε, T→FT’, T’→*FT｜ε, F→(E), F→i}

開始記号 E∈V_N

５．３　Director 集合によるバックトラックの回避

再帰的下向き構文解析では，開始記号から最左導出により，生成規則毎に解析関数を実装

して，それらを再帰的に呼び出して，構文木を完成させる．このときに，ある非終端記号の生成規則が複数存在するときに，k 個のトークンを先読みし，どの生成規則，つまり，どの解析関数を呼び出せばよいかを決定する方法を用いることである．これが LL(k)構文解析法である．ここで，LL とは，Left to right scanning（左から右へトークンストリームをスキャンする）と Leftmost derivation（最左導出）である．以下では，最も簡単で実用上重要な LL(1)を説明する．以降では，ドラゴンブック ［2］ や和文教科書 ［4,5］ などに従い，Director 集合の計算方法を定義する．

Director 集合を計算するためには，まずは First 集合と Follow 集合を計算する必要がある．以降では，一般のプログラミング言語の文法 $G=\langle V_N, V_T, P, S\rangle$とその記号列 $\alpha \in (V_N \cup V_T)^*$に対して，αから生成される記号列の先頭に現れる終端記号の全体をαの First 集合と呼び，First(α)と表記する．非終端記号 A に対して，文法 G の文形式において A の直後に現れる可能性のある$を含む終端記号の全体を A の Follow 集合と呼び，Follow(A)と表記する．以下の図７に形式的定義と概念図を示す．ここで，⇒*は生成規則を０回以上適用して，左辺から右辺が得られることを表す．なお，$はトークン列の最後尾の記号であり，開始記号 S の Follow 集合には$が必ず含まれる．

$First(\alpha)=\{a \mid a\in V_T,\ \alpha \overset{*}{\Rightarrow} a\cdots\}$　　$Follow(A)=\{a \mid a\in V_T,\ S\$ \overset{*}{\Rightarrow} \cdots Aa\cdots\}$



図７　First 集合と Follow 集合

以上の First 集合と Follow 集合を用いて，図８で Director 集合を定義する．生成規則 A→αに対して，終端記号の集合 Director(A,α)を以下のように定義し，A→αの Director 集合は生成規則 A→α を使った場合に，入力トークン列の先頭に現れる可能性のある終端記号の集合である．ここで，αからεが生成される場合には，Follow(A)を使う必要がある．なお，First 集合や Follow 集合,Director 集合の計算方法は書籍 ［2,3,4,5］ に詳しく書いており，紙面の都合上から本解説では省略する．

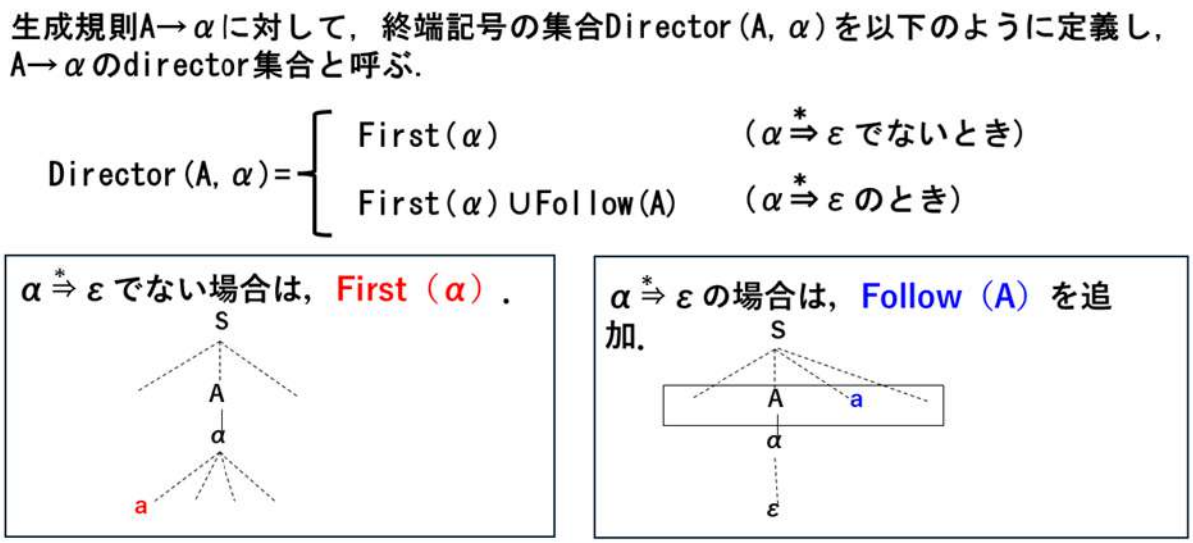


図８　Director 集合

５．４　再帰的下向き構文解析器の実現

Director 集合を計算するには，事前に計算した Null 関数値や First 集合，Follow 集合が必要である．なお，Null 関数値は生成規則の右辺に出現する記号列 $\alpha \in (V_N \cup V_T)^*$ から ε が最左導出されるかを表す関数である．図９に示すように，５．２で左再帰性文法から右再帰性文法へ変換した生成規則の集合 P に対して，事前に計算した Null 関数値や First 集合，Follow 集合を用いて，Director 集合を計算した結果を示す．

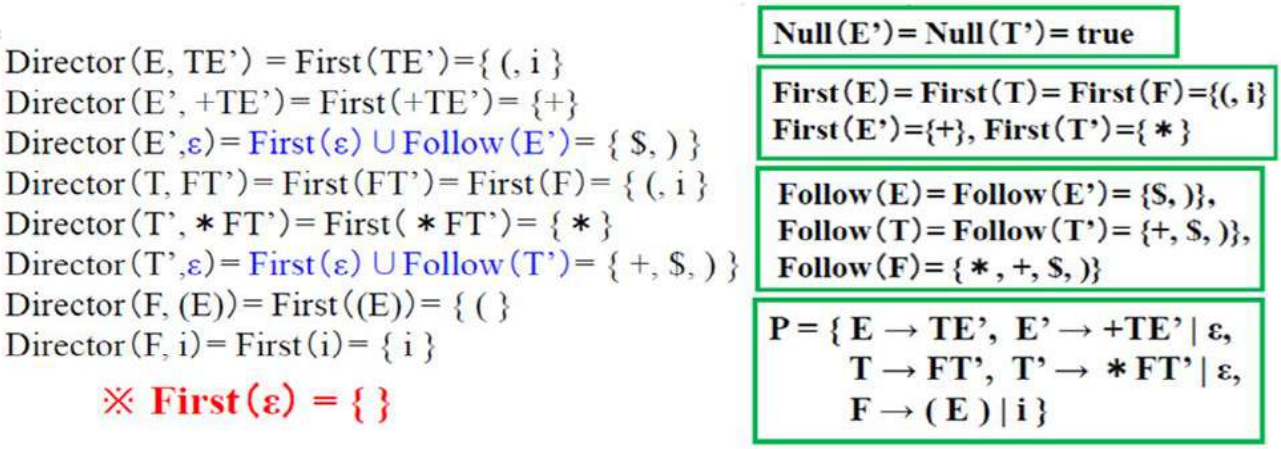


図９　Director 集合の計算

この Director 集合を用いて，この文法が LL(1)かどうかを判定する．左辺が同じで右辺のみが異なる，生成規則の部分集合{E'→+TE',E'→ε}，{T'→*FT'，T'→ε}，{F→(E)，F→i}に対して，

Director(E',+TE')∩Director(E'，ε)={}

Director(T',*FT')∩Director(T'，ε)={}

Director(F,(E))∩Director(F,i)={}

なので，この文法は LL(1)である．つまり，１つのトークンを先読みすれば，最左導出の対

象となる非終端記号の生成規則を決定できる.

次に，再帰的下向き構文解析により，LL(1)文法の入力トークン列 w=i*i+i$からの構文木の作成の例を図１０に示す.

(1)開始記号 E から下向きに構文木を作成する.

(2)左辺を E とする生成規則は E→TE’のみであり，トークンの先頭は i である.

(3)Director(E,TE’)={(,i)}であり，i∈Director(E,TE’)={(,i)}なので，①の構文木を作成する.

(4)最左導出の対象は T であり，T を左辺とする生成規則は T→FT’のみである．解析対象のトークンは依然，i である．理由は，まだ先頭のトークンの i が構文木になっていないからである.

(5)i∈Director(T,FT’)={(,i}なので，T の子供に②の木を追加する.

(6)最左導出の対象は F であり，F を左辺とする生成規則は F→(E)と F→i の２つある．解析対象のトークンは依然 i であり，i∈Director(F,i)，Director(F,(E))は i を含まない．よって，F→i を用いて構文木を作り，③ができる.

(7)最左導出の対象は T’であり，解析対象のトークンは*である．T’を左辺とする生成規則は T’→*FT’のみであり，*∈Director(T’,*FT’)なので，④の構文木を作る.

以上を続けて，①，②，…，⑪の順番に構文木を作り，最終的に，図１１の構文木ができ，構文解析が終了する.

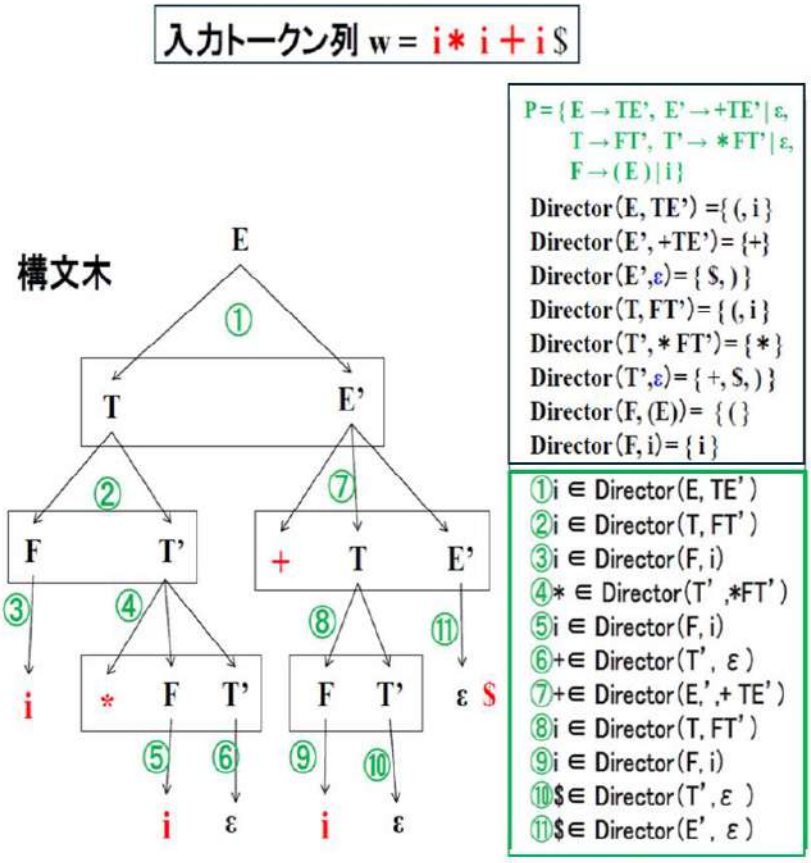


図１０　再帰的下向き構文解析による LL(1)文法の構文木の作成例

６.LR 構文解析手法

６．１　基本的考え方

LR 構文解析手法は最右導出の逆，つまり最右還元を繰り返して，葉から根に向かって構文木を作る．再帰的下向き構文解析手法と同様に，LR 構文解析手法もトークンの列を左から右へバックトラックなしに一度読み込んで解析して構文木を作る．これらの様子はすでに図５に示している．LR 構文解析手法の最大の特徴は文法から自動的に構文解析プログラムが生成できて，構文解析可能な文法クラスも広く，実用上から多用されている．さらに，重要なことは，最右導出の逆，つまり最右還元を用いるために，左再帰性のある文法でも問題なく解析でき，文法をそのまま構文解析できる．なお，LR 構文解析の名前は，Left-to-right-scanning（トークンの列を左から右へバックトラックなしに一度読み込んで構文解析を行うことを意味している)，Right-most-derivation in reverse（最右導出の逆の順序，つまり最右還元で構文解析を行うことを意味している）の頭文字をとったものである．以降では，ドラゴンブック［2］や和文教科書［3,4,5,6］に従い，解説する．

６．２　最も基本的な LR(0)構文解析手法

まず，構文解析の途中の状態を考える．たとえば

A→xyz

という生成規則で作られたトークン列を構文解析して構文木を作っている途中で，x を読み終わった状態で，y を読もうとしている状態であるとする．その状態を

A→x・yz

と書く．ここで，y が終端記号であれば y を読もうとしている状態であり，y が非終端記号 B であり，

$B \rightarrow x_1 y_1 z_1$

という生成規則があれば，x_1 を読もうとしている状態

$B \rightarrow \cdot x_1 y_1 z_1$

でもある．以上より，LR(0)項とその集合の閉包を導入する．以降においては，５章で導入した文法 G’=<V_N, V_T, P, E>を用いる．

ここで，V_N={E, T, F}

V_T={+, ＊ (,), i}

P={E→E+T, E→T, T→T*F, T→F, F→(E), F→i}

開始記号 E∈V_N

(定義)文法 G’の LR(0)項とは，P の任意の生成規則に対して，その右辺の左端，右端および記号の間のどれか一箇所に”・”をつけたものである．

例えば，生成規則 E→E+T に対して，以下の４つの LR(0)項が存在する．

E→・E+T　　E→E・+T　　E→E+・T　　E→E+T・

E→・E+T のように，右辺の先頭にドットがある LR(0)項を導入項と呼ぶ．また，E→E+T・の

ように，ドットが末尾にあるLR(0)項を完全項と呼ぶ．

また，先ほどの例で示したように，A→x・yzにおいて，yが非終端記号Bであり，B→$x_1y_1z_1$という生成規則があれば，x_1を読もうとしている状態B→・$x_1y_1z_1$でもあるので，LR(0)項の集合として{A→x・Bz， B→・$x_1y_1z_1$}を考える必要がある．ゆえに，LR(0)項の集合Ｉに対して，Closure(I)を考える．

（定義）文法G’のLR(0)項の集合Ｉの閉包Closure(I)とは次のように得られる．

1. Closure(I):=I
2. A→α・Bβ∈Closure(I)に対して，B→γという生成規則があればB→・γをClosure(I)に加える。
3. 上記2.を新たに加わるものがなくなるまで繰り返す．

例えば，I={E→E+・T}のClosure(I)は{ E→E+・T， T→・T*F， T→・F， F→・(E)， F→・i}となる．

また，一般に，LR(0)項の集合Ｉから記号Ｘによって遷移する先をGOTO(I,X)と書いて，以下に定義する．

（定義）ＩをLR(0)項の集合，X∈(V_N∪V_T)=Vとしたとき

GOTO(I,X)=Closure({A→αX・β｜ A→α・Xβ∈I})

例えば，I={T→T・*F}のとき，GOTO(I,*)は以下になる．

GOTO({T→T・*F},*)

=Closure({T→T*・F})

={ T→T*・F， F→・(E)， F→・i}

文法G’=<V_N， V_T， P， E>において，このようなLR(0)項の集合を求めるには，まず，構文解析の終了判定を容易にするために，新たな非終端記号E’を追加しE’→Eなる生成規則を文法G’の生成規則の集合Pに追加して，以下のアルゴリズムを実行する．

（アルゴリズム）

初期設定　C:={Closure({E’→・E })}

以下を新たな集合がCに付け加えられなくなるまで繰り返す：

任意のI∈CとX∈Vに対し，GOTO(I,X)が空集合でなく，Cに入っていなかったらCに加える

文法G’に適用すると，ドラゴンブック［2］や和文教科書［3][5］のオートマトンと同様な図１１のオートマトン得られる．このオートマトンを正準オートマトンと呼ぶ．特に，ここではLR(0)を用いているのでLR(0)オートマトンとも呼ぶ．なお，状態の中の完全項は青色，構文解析の終了を意味するE’→E・は赤字で示す．この正準オートマトンを用いて，与えられた入力トークン列の構文解析を進める．

一般に，入力トークン列ｘが与えられると，最初に・x$から出発し，正準オートマトンを用いて，構文木を作りながら，構文解析中ではu・v$の形になり，時点と呼ぶ．なお，u∈($V_N$∪$V_T$)*，v∈$V_T$*である．ここで，uは読み込み済みのトークン列から構成した部分的な構文木であり，vはまだ読み込んでいないトークン列である．最終的に，開始記号Ｓの時点Ｓ・$になれば，入力トークン列ｘの構文木ができて，構文解析は正常に終わる．構文解析中では，正準オートマトンの状態遷移に従い，以下のいずれかを行う．

(1)還元(reduce)：正準オートマトンのある状態の中の LR(0)項 A→ α・を使って，時点 uα・v$の α を A に還元して，時点 uA・v$に移行する．

(2)シフト(shift)：正準オートマトンの a による状態遷移を使って，入力トークン a を読み込んで，時点 u・av$から時点 ua・v$に移行する．

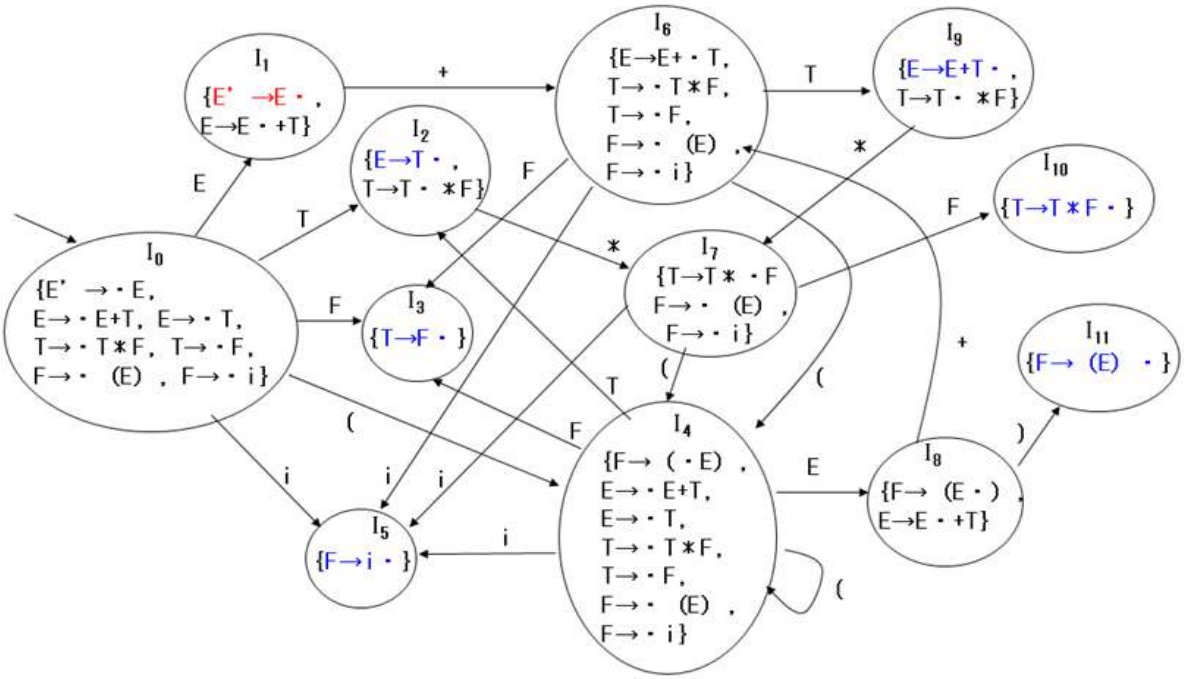


図１１　正準オートマトン（LR(0)オートマトン）

LR 構文解析の動作を説明するために，配置を導入する．まず，前述の時点 u・v$，u∈$(V_N \cup V_T)^*$，v∈$V_T^*$は，

$a_1a_2\cdots\cdots a_n \cdot x_kx_{k+1}\cdots\cdots x_n\$$

と書ける．ここで，$a_i \in V_N \cup V_T$ (i=1,…,n)，$x_j \in V_T$ (j=k,…,m)である．次に，時点 u・v$は正準オートマトンの状態 I_i(i=1,…,n)を用いて，配置

$(I_0a_1I_1a_2I_2\cdots\cdots a_nI_n \cdot x_kx_{k+1}\cdots\cdots x_n\$)$

が定義できる．ここで，I_0 は正準オートマトンの初期状態であり，I_i=GOTO(I_{i-1},a_i)(i=1,..,n)である．

次に，i+i*i$の構文解析を行い，図１２のように配置で示す．

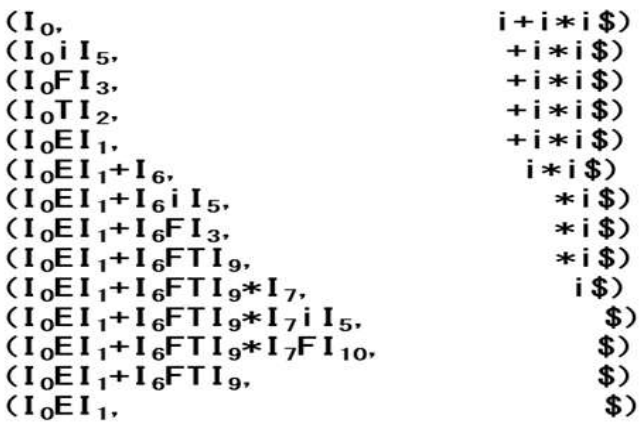


図１２　配置による i+i*i$の LR 構文解析の例

ここで，配置($I_0EI_1+I_6TI_9$,*i$)において，$I_9$={E→E+T・,T→T・*F}であり，E→E+T・による還元と T→T・*F によるシフトの２つの可能性があり，不都合な状態と呼ぶ。図１２では，シフトを優先させて，シフトを行った．この不都合な状態を回避する解決方法として，一文字先読みする SLR(1)や LR(1)，LALR(1)がよく知られている．

６．３　SLR(1)構文解析手法

LR 構文解析において，次の入力トークンを一つだけ先読みし，Follow 集合を使って不都合な状態を回避するのが SLR(1)構文解析手法である．以下に，次の入力トークンを一つだけ先読みし，Follow 集合を使って不都合な状態を回避する方法を定義する．

（定義）時点 u・v$=u・$v_1$v’$において，u に対し A→α・を使って還元するときは以下である．ただし，v_1は終端記号である．

(1)u=u’α

(2)S・$ $\Rightarrow^*_{rm}$ u’A・v_1v’$ $\Rightarrow^*_{rm}$ u’α・v_1v’$かつ $v_1\in$Follow(A)の場合にのみ還元する

ここで，$\Rightarrow^*_{rm}$は 0 回以上の最右導出を行うことを表す．

もし $v_1\notin$Follow(A)ならば，LR(0)項 B→α_1・aα_2に対して，v_1=a であれば」シフトする．

もし $v_1\notin$Follow(A)かつ $v_1\neq$a ならば，構文エラーである．

ただし，Follow(A)={a$\in V_T$|S $\Rightarrow^*_{rm}$ $u’Aa…}

SLR(1)構文解析手法では，動作表と行先表を使用する．６．２の LR(0)構文解析の正準オートマトンから作成した動作表，行先表，生成規則の番号，Follow 集合を表１に示す．

(1)動作表は状態 I において，次の入力が a$\in V_T$で会った場合の動作を，I の行の a の列に記述したものである．

① 動作表中の sj は，次の入力を読み込んで状態 I_jにシフトすることを表す．

② 動作表中の rj は，j 番目の生成規則で還元することを表す．

(2)行先表は還元動作 rj において，還元後に，状態 I と非終端記号 a に対して行き先の状態を記述したものである．

表１　動作表，行先表，生成規則の番号，Follow 集合

動作表

	i	+	*	(	)	$
I_0	s5			s4		
I_1		s6				受理
I_2		r2	s7		r2	r2
I_3		r4	r4		r4	r4
I_4	s5			s4		
I_5		r6	r6		r6	r6
I_6	s5			s4		
I_7	s5			s4		
I_8		s6			s11	
I_9		r1	s7		r1	r1
I_{10}		r3	r3		r3	r3
I_{11}		r5	r5		r5	r5

行先表

	E	T	F
I_0	I_1	I_2	I_3
I_4	I_8	I_2	I_3
I_6		I_9	I_3
I_7			I_{10}

生成規則の番号

1. E→E+T
2. E→T
3. T→T*F
4. T→F
5. F→(E)
6. F→i

Follow集合

Follow (E') ={ $ }
Follow (E) ={ $, +,) }
Follow (T) ={ $, +,), * }
Follow (F) ={ $, +,), * }

次に，トークンの列 i*i+i$の SLR(1)構文解析を行う．図１３に構文解析の配置を示す．まず，配置の図の１行目では，(F→・i)∈I_0と動作表の１行目１列目の(I_0,i)より s5 となり，２行目が得られる．次に，２行目では，(F→i・)∈I_5と動作表の６行目３列の(I_5,*)より r6 となり，生成規則の番号６の F→i で還元して，行先表の(I_0,F)でI_3になる．同様の還元とシフトを続けて，配置の図の最後の行は，動作表の(I_1,$)より受理となり，構文木が生成できた．

（読込み済み，未読）／動作

(I_0, i*i+i$)　／action[$I_0$][i] = s5 より，i をシフトし，$I_5$をpush
(I_0iI_5, *i+i$)　／action[$I_5$][*] = r6 より，i$I_5$をpopし，F とgoTo[$I_0$][F]をpush
(I_0FI_3, *i+i$)　／action[$I_3$][*] = r4 より，F$I_3$をpopし，T とgoTo[$I_0$][T]をpush
(I_0TI_2, *i+i$)　／action[$I_2$][*] = s7 より，* をシフトし，$I_7$をpush
(I_0TI_2*I_7, i+i$)　／action[$I_7$][i] = s5 より，i をシフトし，$I_5$をpush
(I_0TI_2*I_7iI_5, +i$)　／action[$I_5$][+] = r6 より，i$I_5$をpopし，F とgoTo[$I_7$][F]をpush
(I_0TI_2*I_7FI_{10}, +i$)　／action[$I_{10}$][+] = r3 より，T$I_2$*$I_7FI_{10}$をpopし，T とgoTo[$I_0$][T]をpush
(I_0TI_2, +i$)　／action[$I_2$][+] = r2 より，T$I_2$ をpopし，E とgoTo[I_0][E]をpush
(I_0EI_1, +i$)　／action[$I_1$][+] = s6 より，+ をシフトし，$I_6$をpush
(I_0EI_1+I_6, i$)　／action[$I_6$][i] = s5 より，i をシフトし，$I_5$をpush
(I_0EI_1+I_6iI_5, $)　／action[$I_5$][$] = r6 より，iI_5 をpopし，F とgoTo[I_6][F]をpush
(I_0EI_1+I_6FI_3, $)　／action[$I_3$][$] = r4 より，FI_3 をpopし，T とgoTo[I_6][T]をpush
(I_0EI_1+I_6TI_9, $)　／action[$I_9$][$] = r1 より，EI_1+I_6TI_9をpopし，E とgoTo[I_0][E]をpush
(I_0EI_1, $)　／action[$I_1$][$] = 受理 より，構文解析終了（エラーなし）．

図１３　i*i+i$の SLR(1)構文解析の配置

６．４　LR(1) 構文解析手法

SLR(1)構文解析では，不都合な状態を解決するために Follow 集合だけを用いた．すなわち，ある状態 I_1 の中の A→α・とそれ以外があったとき，次の入力記号 a が a∈Follow(A)であるとき A→α による還元をすることにした．Follow(A)={a|a∈V_T, S$⇒*…βAa…}とすると，Follow は A の右側の a を考慮しているが，A の左側にあるβは考慮していない．ここで，A の左側と右側の両方を考慮し，Follow 集合を細分化したものが LR(1)文法である．A の左側βが違えば次にくる a も違う可能性がある．そこで，入力記号も一緒にして，[A→α・,a]とう LR(1)項を使用する．さらに，この LR(1)項を一般化して，[A→x・y,a]を考える．左側の A→x・y は LR(0)項であり，LR(1)項の核と呼ばれる．a は先読み記号と呼ばれる終端記号である．LR(1)項は構文解析が進んで，もし完全項を核とする LR(1)項[A→xy・,a]になれば，次の入力が x のときに，生成規則 A→xy による還元ができることを意味する．なお，LR(1)項の集合については，核が同じである LR(1)項[A→x・y,a_1],…，[A→x・y,a_n]をまとめて，[A→x・y,a_1/…/a_n]と書く．

LR(1)項の集合 I に対して，その閉包 Closure(I)は次のアルゴリズムで得られる．

（アルゴリズム）

1. Closure(I):=I
2. [A→α・Bβ,a]∈Closure(I)に対して，B→γという生成規則があれば，b∈First(βa)なるすべての b について，[B→・γ,b]を Closure(I)に加える．
3. 上記 2. を新たに加えるものがなくなるまで繰り返す．

この閉包が LR(1)構文解析における正準オートマトンの状態である．正準オートマトンの状態遷移は次の GOTO(I,X)によって決められる．

（定義）I を LR(1)項の集合，X∈(V_N∪V_T)=V としたとき

GOTO(I,X)=Closure({[A→αX・β,a]|[A→α・Xβ,a]∈I})

文法 G’=<V_N, V_T, P, E>において，このような LR(1)項の集合を求めるには，まず，構文解析の終了判定を容易にするために，新たな非終端記号 E’を追加し E’→E なる生成規則を文法 G’の生成規則の集合 P に追加して，以下のアルゴリズムを実行する．

（アルゴリズム）

初期設定　C:={Closure({E’→・E })}

以下を新たな集合が C に付け加えられなくなるまで繰り返す：

任意の I∈C と X∈V に対し，GOTO(I,X)が空集合でなく，C に入っていなかったら C に加える

LR(1)構文解析の動作表は SLR(1)の動作表と同様に作られるが，次の点のみが異なる．

SLR(1)の場合は

A→α・∈I_1 ならば a∈Follow(A)に対して A[I_1,a]は A→α で還元する

であったが，LR(1)の場合は

[A→α・,a]∈I_1 ならば A[I_1,a]は A→α で還元する

となる．LR(1)の正準オートマトンの一部を図１４に示す。

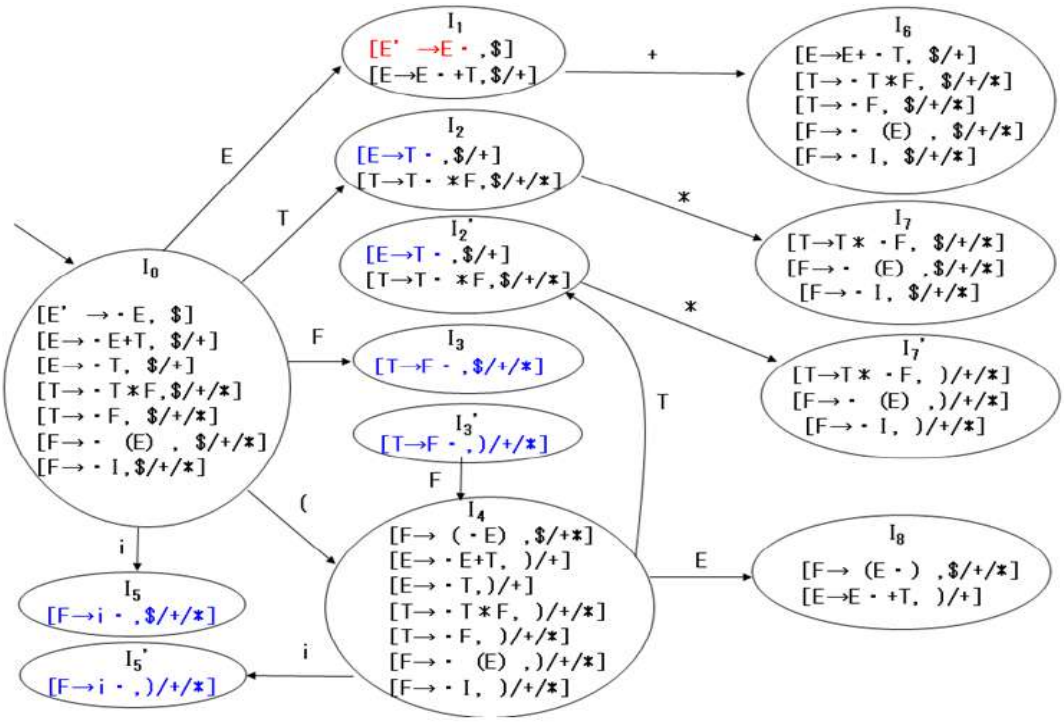


図１４　LR(1)の正準オートマトンの一部

６．５　LALR(1) 構文解析手法

LR(1)構文解析法は SLR(1)よりも詳細な構文解析が可能であるが，正準オートマトンの状態数が多すぎ，現実のプログラミング言語では実用的ではない．そこで，核が同じである LR(1)項を同一視することによって，状態数を減らすのが LALR(1)構文解析法である．これによって，LALR(1)の構文解析の正確さは LR(1)より劣るが，Follow 集合を使う SLR(1)よりも正確な構文解析が実現でき，しかも状態数は SLR(1)と全く同じになり，実用的な構文解析が可能となる．なお，LALR は Lookahead（先読み）LR の略である．LALR(1)の正準オートマトンを図１５に示す．C 言語は LALR(1)構文解析で実現できることが知られている．

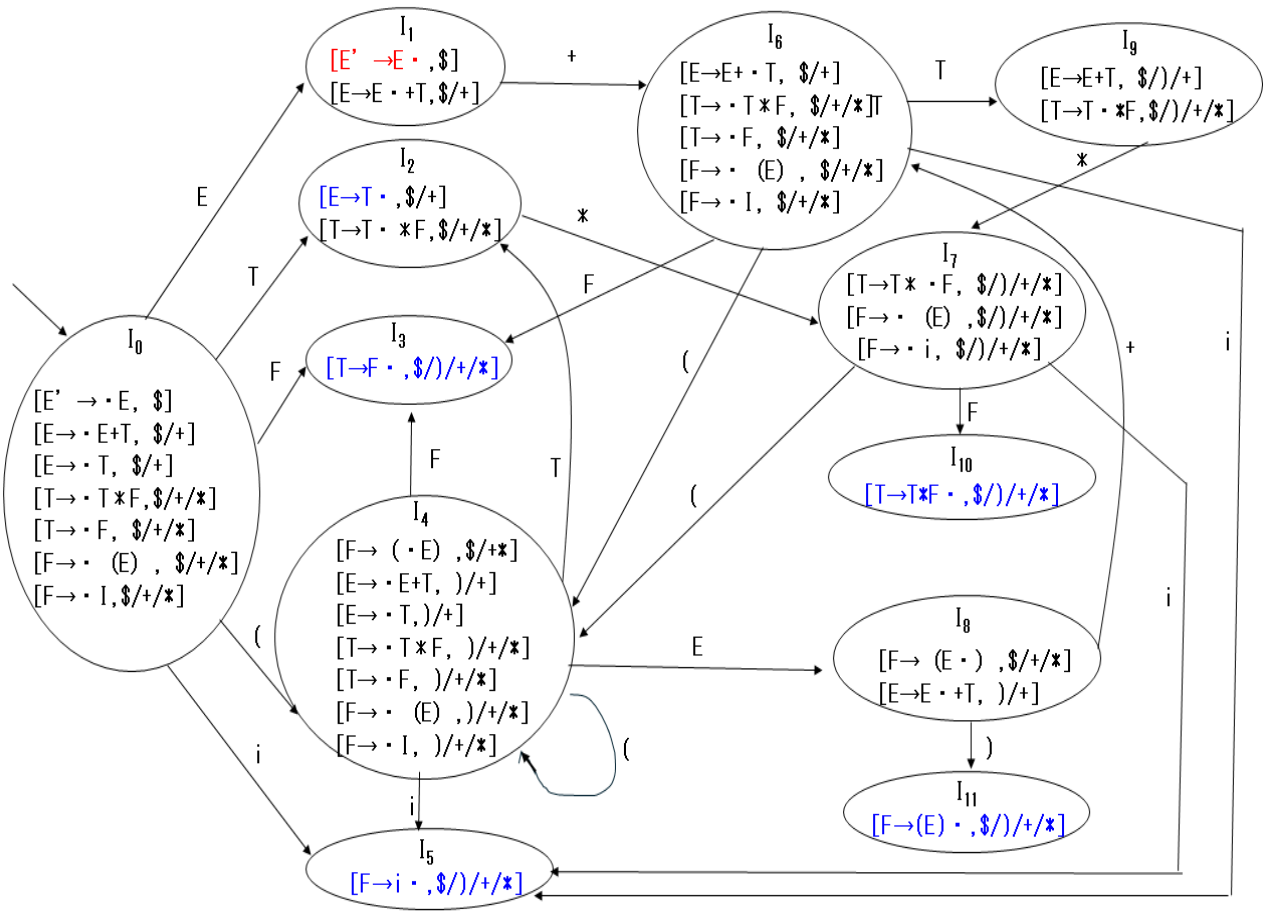


図１５　LALR(1)の正準オートマトン

６．６　LR 構文解析の理論的背景

ここでは，和文教科書［6］と LR 構文解析の論文［7］に従い，LR 構文解析の理論的背景を説明する．

まず，プログラミング言語の文法を表す文脈自由文法を G0=(N, Σ, P, S)とする．ここで，N は非終端記号の集合，Σは終端記号の集合，P は生成規則の集合，S は開始記号である．なお，不要な非終端記号は含まれないで，ε生成規則もないとする．次に，LR(0)の場合と同様な考え方により，以下のような新たな開始記号 S’を追加した文法 G0’を考える．なお，$はトークン列の最後尾を表す記号である．

$G0' = (N \cup \{S'\}, \Sigma \cup \{\$\}, P \cup \{S' \rightarrow S\$\}, S')$

次に，G0’によって定まる文字列の集合 C_G を以下のように定義する．

$C_G = \{\alpha\ \beta \mid S' \Rightarrow^*_{rm} \alpha Aw \Rightarrow_{rm} \alpha\ \beta w\}$

ここで，記号列αβはハンドルβが生成規則 A→βで還元できる記号列であり，C_G は還元できる記号列の集合である．なお，ハンドルとは，記号列の中で生成規則の本体と合致する部分列のことで，その生成規則による還元が最右導出を逆順に辿ったときの１ステップに対応するものを呼ぶ．もっとも重要なことは C_G が正規言語であることである．ゆえに，C_G を生成する文法は正規文法であるので，有限オートントンで受理できる［7］．以上より，C_G を受理する還元動作をする非決定性有限オートマトンが構成できることがわかる．

次に，和文書籍［6］に従い，C_G を受理する還元動作をする非決定性有限オートマトンを

構成する.

G0’=(N∪{S’},Σ∪{$},P∪{S’→S$},S’)とし,C_G={α β|S’$\Rightarrow^*_{rm}$α Aw$\Rightarrow_{rm}$α β w}を受理する非決定性有限オートマトン NG を次のように構成する.

NG=(Q, Σ, δ, S0, F)

ここで,

Q={[A→α・β]|A→α β∈P}　　(LR(0)項)

Σ=N∪Σ　　(語彙=非終端記号の集合∪終端記号の集合)

S0=[S→・S$]　　(開始記号の導入項)

F={[A→α・]|A→α∈P}　　(完全項（CG の受理状態（還元）))

δは以下の関数である：

δ([A→α・vβ],v) = [A→αv・β],ここで v∈N∪Σ

δ([A→α・Bβ], ε)= [B→・γ],ここで B→γ∈P

ここで，集合の包含関係より，L(NG)= {α β|S’$\Rightarrow^*_{rm}$α Aw$\Rightarrow_{rm}$α β w}= C_Gが示せる．非決定性有限オートマトン NG は部分集合構成法 [8] により，決定性オートントンである正準オートマトンが構成できる.

以上により,最右導出の最後の１ステップは有限オートマトンを使い実現できる.つまり，有限オートマト，すなわち正準オートマトンを繰り返し使うことにより，ある範囲の文脈自由文法の解析ができることがわかる．さらに，配置を用いて構文解析を進めてきたが，これは正準オートマトンの状態遷移をスタックに記憶しており，構文解析の効率化を実現している [6].

６．７　LR 構文解析のまとめ

LR 構文解析のクラスを図１６にまとめる．以下のことが知られている.

1. まず，LR 構文解析は再帰的下向き構文解析よりも広いクラスの文法が解析できる.
2. 次に，LR(K)は k が大きくなるほど，広いクラスの文法が解析できる.
3. 次に，LR(1)を細かく分けると，LR(0)<SLR(1)<LALR(1)<LR(1)の順番で，より広いクラスの文法が解析できる.
4. 次に，LALR(1)によりほとんどのプログラミング言語が構文解析できる.
5. 最後に，LR 構文解析器は構文解析器生成系 Yacc(Yet Another CompilerCompiler) [2] により，自動生成できる．これは文法から正準オートマトンが自動生成できることにより理解できるであろう.

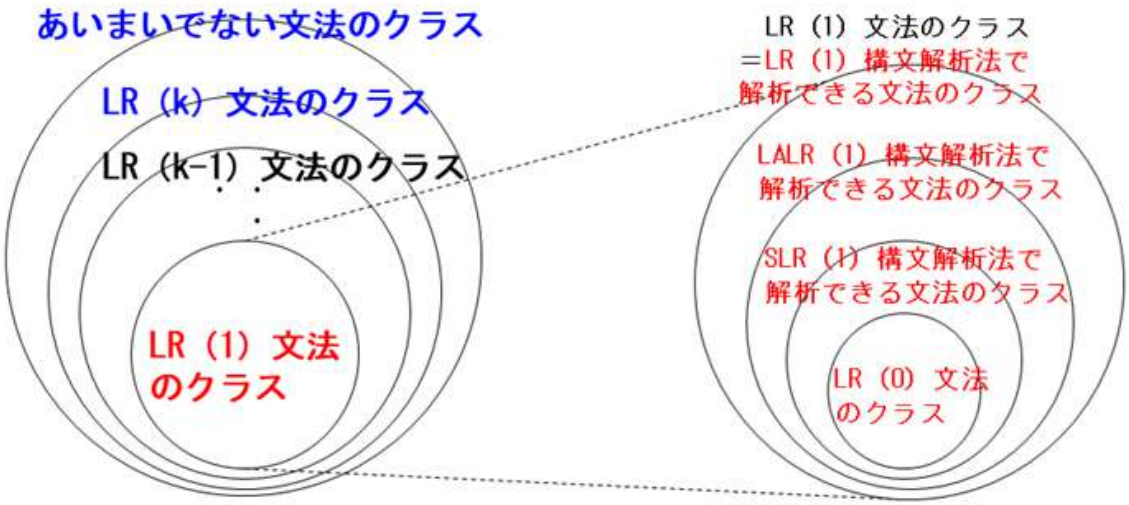


図１６　LR 構文解析の文法のクラス

７.まとめ

私たちの世界を動かすプログラムは，人間が Python や Java，C などの高級プログラミング言語で記述し，それをコンパイルして低レベルのコードにまとめて実行する．現代のプログラミング言語のコンパイラの多くは，Alfred V. Aho と Jeffrey D. Ullman の貢献が大きい[1]．コンパイラでは字句解析，構文解析，コード生成，最適化などのための効率的な技術やアルゴリズムが重要である． 本解説記事では，コンパイラの構造及び，コンパイラで最重要で最難関な構文解析，特に LR 構文解析［7］について理論や技術などの解説を行った．特に，類書にない構文解析手法の間の関連および新たな事例を盛り込んで解説を行ったので理解を深める助けとなる．もっとも重要なことは，LR 構文解析［7］の本質は，文脈自由言語のプログラミング言語の構文解析に対して，驚くべきことに有限オートマトンを繰り返し実行していることである．これの解説記事により，現在と未来の社会を支えるコンピュータ・ソフトウェアの理解を深めることができる．さらに重要なことは，コンパイラの理論，技術，実装は他の多くのソフトウェアの理論や設計，実装などの原理となっており，今後の新しいソフトウェアの設計や実装に有益である．

今後，人工知能や分散処理， 組込みシステムなどの多数の新しいアプリケーションの開発が必要であり，それらを合理的に記述して設計・実装できる新しいプログラミング言語が生まれるので，コンパイラの理論と技術，実装などの理解は必修であり，本解説はそれらに有益であろう．また， 今後， 組込みシステムや人工知能などにおいて， 新しいハードウェアが作られるので， コンパイラの最適化技術などの進展が期待される． なお，ドラゴンブック[2] を手本に，日本語の優れた教科書も多数あり， その代表的な書籍［3,4,5,6］などを参考文献にあげており，本解説記事の作成にも参考にしている．

引用・参考文献

[1] ACM(2020)”ACM Turing Award Honors Innovators Who Shaped the Foundations of Programming Language Compilers and Algorithms”,ACM(https://awards.acm.org/about/2020-turing (accessed on 31 December 2024)).

[2] Alfred V. Aho, Monica S. Lam, Jeffrey D. Ullman(2007)”Compilers principles, techniques & tools”, pearson Education, pp.1-1038.
（訳本：A.V.エイホ （著), 原田 賢一 （翻訳)(2009)『コンパイラ 第2版: 原理・技法・ツール』,サイエンス社,pp.1-1090.）

[3] 中田育男(2009)『コンパイラの構成と最適化 第2版』,朝倉書店,pp.1-601.

[4] 佐々 政孝(1989)『プログラミング言語処理系』,岩波書店,pp.1-602.

[5] 湯淺 太一(2014) 『コンパイラ』,オーム社,pp.1-248.

[6] 大堀 淳(2021)『コンパイラ: 原理と構造』,共立出版,pp.1-185.

[7] Donald E. Knuth(1965)”On the Translation of Languages from Left to Right”, Information and Control, 8(6), pp.607-639.

[8] Jeffrey D. Ullman, John Hopcroft, Rajeev Motwani(2006)” Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation”, Addison Wesley,pp.1-750.

謝辞

本解説記事は金沢大学理工学域電子情報学類の３年生向けコンパイラの講義資料をまとめたものです。コンパイラ技術全般において，中田先生，佐々先生，湯浅先生，大堀先生のセミナーや書籍などは大変有益であり，ここに感謝します。また，TA として講義資料作成にご協力いただいた金沢大学大学院生の小寺広志さんに深く感謝します。最後に，丁寧に本解説記事を査読いただいた査読者各位に感謝します。

【解説論文】

ラフ集合・ルールリダクションへの バイオ計算技術の導入

Introduction of Bio Computing Technology To Rule Reduction for Rough Set Method

和多田　淳三[1]　　酒井　浩[1]　　松本　義之[1]
Junzo Watada　Hiroshi Sakai　Yoshiyuki Matsumoto

[1]下関市立大学
Shimonoseki City University

要旨

ラフ集合の方法は、決定規則の縮約によく利用されている。ラフ集合を用いた具体的な技術は、決定規則の抽出方法として用いられる。しかし、多くの決定規則を扱う際には、計算負荷が問題になる。すべての最小長の決定規則を計算する問題は、組み合わせ爆発が生じ、NP 困難な問題である。この計算の課題を扱うために、本解説では、バイオ・コンピューティング技術を導入する方法を解説する。この手法は、決定規則の縮約に、DNA 分子技術を応用したもので、問題の計算処理の複雑さを効果的に軽減できる。1998 年に L.M. Adleman が、生物学的計算パラダイムの概念を開拓して以来、この技術は、既存のアルゴリズムに活用及び実装することで、新しい問題解決アルゴリズムを開発する能力を提供してきた。しかし、経営工学の意思決定問題に対する学際的な DNA 分子技術を用いたアルゴリズムは、いまだ DNA の利用が限られた分野に限定されており、計算技術としてはそれほど広く用いられているとは言えない。本解説では、DNA 分子構造や特性を操作する分子工学のメカニズムとその技術を解説し、一般的な分子アルゴリズムの利用を紹介している。特に、我々が開発したラフ集合の最小ルール探索のための決定ルールを最小化するアルゴリズムを説明している。

キーワード：　DNA 計算、決定ルール削減、NP 困難問題、有向グラフ、DNA ラフ集合計算、エンコーディングプロセス、デオキシリボ核酸、含窒素塩基、水素結合

Abstract

Rough set methods are often used to reduce decision rules. Specific techniques using rough sets are used as a method for extracting decision rules. However, when dealing

with many decision rules, the computational load becomes an issue. The problem of calculating all minimum-length decision rules is a NP-hard problem with combinatorial explosion. To address this computational challenge, this article describes a method to introduce biocomputing technology. This method applies DNA molecular technology to the reduction of decision rules, and can effectively reduce the computational complexity of the problem. Since L.M. Adleman pioneered the concept of the biological computing paradigm in 1998, this technology has provided the ability to develop new problem-solving algorithms by utilizing and implementing them in existing algorithms. However, algorithms using interdisciplinary DNA molecular technology for industrial engineering decision-making problems are still limited to areas where DNA is used in a limited way, and it cannot be said that they are widely used as a computational technology. This article describes the mechanisms and techniques of molecular engineering that manipulate DNA molecular structures and properties, and introduces the use of general molecular algorithms. In particular, we describe an algorithm we developed to minimize decision rules for minimum rule searches of rough sets.

Keywords: DNA computation, decision rule reduction, NP-hard problems, directed graphs, DNA rough set computation, encoding process, deoxyribonucleic acid, nitrogenous bases, hydrogen bonds

1. はじめに

本解説では、ラフ集合計算にバイオ・コンピューティング技術を導入する方法を解説する。この手法は、決定規則の縮約に、DNA 分子技術を応用したもので、問題の計算処理の複雑さを効果的に軽減できる。1998 年に L.M. Adleman [1]が、生物学的計算パラダイムの概念を開拓して以来、この技術は、既存のアルゴリズムに活用及び実装することで、新しい問題解決アルゴリズムを開発する能力を提供している。

機械学習、データマイニング、およびその他の情報処理タスクで遭遇する問題に対しそれらの課題や問題を解決するには、多様なテータベースと情報技術を必要としている[2], [3]。これらを考慮すると、ラフセットのとアルゴリズムフレームワークは、問題解決のための有効な代替手段となる。ラフセットは、オブジエクトとその値、および決定属性から構成される決定表を利用し、種々の分類タスクを解決する手段を提供している。この手段を用いると、与えられたオブジェクトとそれらの属性の情報から簡略化された規則を抽出することができる[4]。得られる規則は、if-then 型の論理式の集合であり、結論部が未知のデータの条件部が規則の条件部に合致すれば、未知データの結論部を規則の結論部で推定・補完する。これは得られた規則による意思決定支援の枠組みになる。ニューラルネットワーク系の結論付けでは結論付けの根拠の面に弱点があると考えられているが、規則を扱う体系では結論付けの根拠は用いた規則であり、説明機能を果たす。この性質から、現在、ラフセット理論は大規模データセットにおける理解可能で透明性のある意思決定のための基盤とも認識されている。

現在、ラフ集合とその応用に関する種々の研究が広く行われている。その中には、Slowinski

によって提案された一般化手法[5]が含まれる。データ解析の不確実性の管理に焦点を当てた一連の応用がある。Grzymala-Busse[6]は、エキスパートシステムにおけるデータの不確実性を管理する最小長の決定規則の計算手法を開発した。その後、Ziarko[7]は、新しいタイプの決定システム行列を提案して、決定規則の縮約方法を提供している。さらに、Skowron と Rauszer [8]は、判別行列に基づく決定システム行列を応用した増分識別アルゴリズムを提案した。別の増分アルゴリズムは、Shan と Ziarko [9]によって研究され、異なる方法で決定規則を形成した。多くの異なるタイプの決定規則は、いくつかの意味のある特性（オブジェクト、属性とその値、および決定属性の対応）を導いている。

それぞれの提案では、規則のすべてを求める場合と一部の規則を求める場合があるが、すべての規則を求める場合、２の属性数乗に依存する計算が必要であり、すべての最小長の決定規則を計算する問題は NP 困難な問題であることが示されている[10]。これは、ラフセット理論における唯一の不都合な側面である。このような背景において、第一著者は DNA 計算の手法を応用する全く斬新な手法を提案し、本手法により選択された各決定クラスの下近似部分集合を決定できることを初めて示した。これにより最小長の決定規則を導出できることを明らかにした。

著者らのうち酒井は、ラフセットの理論研究貢献している[30],[31],32].また、マレーシアの UTP 研究グループは、酒井の方法を用いて、地質データの分析にラフセットの分析で得られたルールを適用して成果を得ている[32x]。地質データの解析に UTP グループは通常のラフセットによるルール抽出に基づいた解析で成果を上げてきた[49],[49x]。さらに、松本らは、経済分析、FinTech,投資問題の知識獲得に、ラフセットによるルール抽出を適用して成果を上げてきた[50],[51],[52],[53],[55],[56]。特に、和多田は、2003 年ごろから、組み合わせ最適化の問題を解く方法として、DNA の化学反応が有効であることを種々して召してきた[42],[43],[46],[44],[47],[48]。

本解説では、ラフセットにおける計算の不都合性を解決するため DNA 分子技術を用い提案した計算手法をサーベイし、「DNA ラフセット計算」と名付けた枠組みを概説する。DNA ラフセット計算は伝統的なラフセットの数学概念と DNA 計算手法を融合した新たな枠組みであり、新たなデータ解析法を提供している。本解説ではその計算の効率性も評価する。尚、ページ数の制限により、一論文にまとめることが難しいため、本編においては DNA コンピューティングの基本技術を中心に述べる。続編を検討している。

本解説は、DNA コンピューティングの基本技術を解説し、以下のように構成されている：

- 節 1　研究の背景を示す。
- 節 2　提案手法の理解を深めるために DNA 分子の基本について説明する。
- 節 3　いくつかの関連する DNA 分子技術を説明する。
- 節 4　ラフセットの基本的な概念とモデル決定表について述べる。
- 節 5　我々の研究で提案してきた新しい DNA ラフセット計算方法を説明する。

2.方法　図など

2 デオキシリボ核酸

生物体の細胞に存在する生物ポリマー材料は、一般的にデオキシリボ核酸として知られ、DNA と略称されている[40]。DNA 分子は、生物の発達と生命維持に関連するさまざまな機能を果たしている。DNA 分子の機能を計算の観点から利用する主な利点は、これらの分子がナノメートルスケールで記憶を実現しながらデータを長期保存できる高容量のメモリとして機能する能力にある。本節では、DNA 分子、また窒素含有塩基とも呼ばれる DNA 分子の構成要素、および DNA 分子に存在する二つの重要な自然結合について簡単に説明する。

2.1 窒素含有塩基

基本的なレベルでは、一本の DNA 分子はリン酸、および 4 種類の異なる窒素含有塩基から構成されており、アデニン（A)、チミン（T)、グアニン G)、シトシン（C）と呼ぶ。これら四つの窒素含有塩基のそれぞれを図 1 に構造式とともに示している。図 1（a）と（c）は、それぞれ二重環構造をもつアデニン（A）とグアニン（G）を示しており、これらは、また、プリンと呼ばれる。図 1（b）と（d）は、それぞれ一重環構造をもつチミン（T）とシトシン（C）を示している。これらはピリミジンと呼ばれる[41]。DNA 計算の分子技術では、これら四つの窒素含有塩基 A,T,G,C を効果的に操作して意味のある処理を行う。

プリン鎖が常にピリミジン鎖に結びついているため、ベースの次元が DNA 分子の長さと同じになる。したがって、二つのプリンは任意に二つのピリミジンと結合できる。言い換えれば、一つの相補的ベニスペアリングは A と T から成り、もう一つの相補的ベースペアリングは G と C から成る。これら二つの相補的ベースペアリングから、糖リン酸の骨格グループは明確に設定された向きを持ち、最終的に DNA 分子のどのベースも同じ構造を想定することを可能にする。ベースペアの形成は対称的なプロセスであり、二本鎖（DNAasDNA)で右巻きヘリックスを形成する。したがって、DNA 分子の対称性は、単一ポリヌクレオチド鎖が正確に反対方向に走って asDNA ヘリックスを形成することに関連している[43],[1]。二つの異なるタイプの相補的ベースは、図 1(a)に示すように二つの水素結合で A と T を保持する。さらに、二つの異なるタイフの相補的ベースは、図 1（b）に示すように三つの水素結合で G と C を保持する。ホスホジエステル結合での強い結合を示す。

2.2 ホスホジエステル結合

四つの窒素含有塩基のそれぞれは、デオキシリボースと共にリン酸で結合できる。デオキシリボースがリン酸と結びついて核酸を形成する場合、ヌクレオチドである。ヌクレオチドがポリヌクレオチド鎖に結合するためには、リン酸が 5 炭素の最初の糖と結びついて、ヒドロキシル基が 3 炭素の第二糖に結びついている結合を取る必要がある。これらの化学的結合を通じて、リン酸エステル結合を形成する隣接するヌクレオチドの糖が結びついて構成している[41]。さらに、ホスホジエステル結合で化学化合物が非金属要素で構築される。

2.3 図 1 の説明

DNA の四つの有塩基の構造式：(2) アデニン（A）（二重環構造）;(D) チミン（T）（一重環構造）;(c) グアニン（G）（二重環構造）;(d) シトシン（C）（一重環構造） プリン鎖が常にピリミジン鎖に結びついているため、ベースの次元が DNA 分子の長さと同じになる。したがって、二つのプリンは任意に二つのピリミジンと結合できる。言い換えれば、一つの相補的ベニスペアリングはAとTから成り、もう一つの相補的ベースペアリングはGとCから成る。これら二つの相補的ベースペアリングから、糖リン酸の骨格グループは明確に設定された向きを持ち、最終的に DNA 分子のどのベースも同じ構造を想定することを可能にする。ベースペアの形成は対称的なプロセスであり、二本鎖 DNAasDNA）で右巻きヘリックスを形成する。したがって、DNA 分子の対称性は、単一ポリヌクレオチド鎖が正確に反対方向に走って asDNA ヘリックスを形成することに関連している[15]、[16]。二つの異なるタイプの相補的ベースは、図 1（a）に示すように二つの水素結合で A と T を保持する。さらに、二つの異なるタイフの相補的ベースは、図 1（b）に示すように三つの水素結合で G と C を保持する。ホスホジエステル結合での強い結合を示す。

2.4 水素結合

DNA 分子では、二つの異なるポリヌクレオチド鎖が溶液内で結びついて、二つの負の原子の水素を使用して形成される。ポリヌクレオチドの二本鎖の間の結合は、水素結合と呼ばれる結合グループによって構築される。特に、水素結合は DNA 分子の右巻きヘリックスの重要な形成など、DNA 分子の高次構造を構築する役割を果たしている。水素結合は特定の結合パターンを通じて起こり、それによって通常のベースペア（bp）が形成される。すなわち、塩基 A は常に塩基 T にのみ結合し、G は常に C にのみ結合できる。この現象はワトソン・クリック相補性として知られている[14]。1953 年にワトソンとクリックは最初に DNA 分子再構成モデルを構築した。

DNA 分子では、2 つの異なるポリヌクレオチド鎖が溶液内で結合され、2 つの負の原子の共有水素原子を使用して形成される。2 つの単一のポリヌクレオチド鎖間の接続は、水素結合と呼ばれる結合グループによって構築される。特に、水素結合は、右巻きのヘリックスなどの DNA 分子の高次構造の形成によって主要な役割を果たす。水素結合は、通常の塩基対(bp)を通じて発生する。つまり、塩基 A は常に塩基 T にのみ結合し、G は常に C にのみ結合する。この現象はワトソン・クリックの相補性と呼ばれている。

プリン鎖は常にピリミジン鎖にのみ結合するため、塩基の寸法は DNA 分子の長さと同じになる。したがって、2 つのプリンのいずれかは、2 つのピリミジンのいずれかと選択的に結合する。言い換えると、1 つの相補的な塩基対は A と T から構成され、もう 1 つの相補的な塩基対は G と C から構成される。これら 2 つの相補的な塩基対から、すべての糖リン酸のバックボーングループは明確な方向性を持ち、DNA 分子が DNA 配列の任意の塩基に対して同じ構造を想定することを可能にする。塩基対の形成は対称的なプロセスであり、二本鎖の DNA（dsDNA：double string DNA） の右巻きのヘリックスを形成することは重要である。したがって、DNA 分子の対称性は、2 つの単一のポリヌクレオチド鎖に関連し、それぞれが正確に反対方向に走り、dsDNA ヘリックスを形成する。

2 種類の異なる相補的な塩基は、図 3(a)でその構造式と共に示しているように、2 つの水素結合で A と T を結合させる。さらに、2 種類の異なる相補的な塩基は、図 3(b)でその構造式と共に示しているように、3 つの水素結合で G と C を結合させている。ホスホジエステル結合の強い結合と水素結合の弱い結合の組み合わせにより、特徴的な DNA 分子構造が形成される。

二重らせんの説明の節では、DNA ラフセットコンピューティングを開発するための DNA 分子の操作方法について、いくつかの重要な DNA 分子技術を説明する。特に、次節で、制限酵素技術とライゲーションについて述べる。

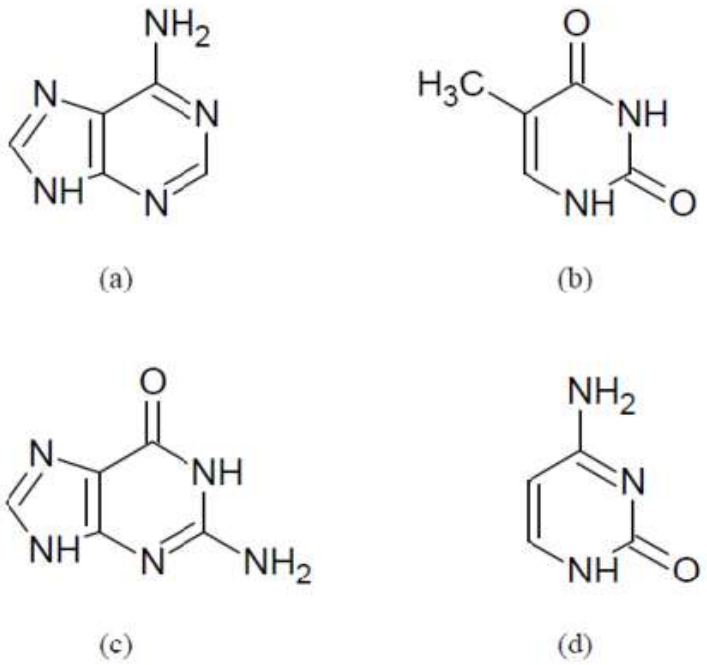
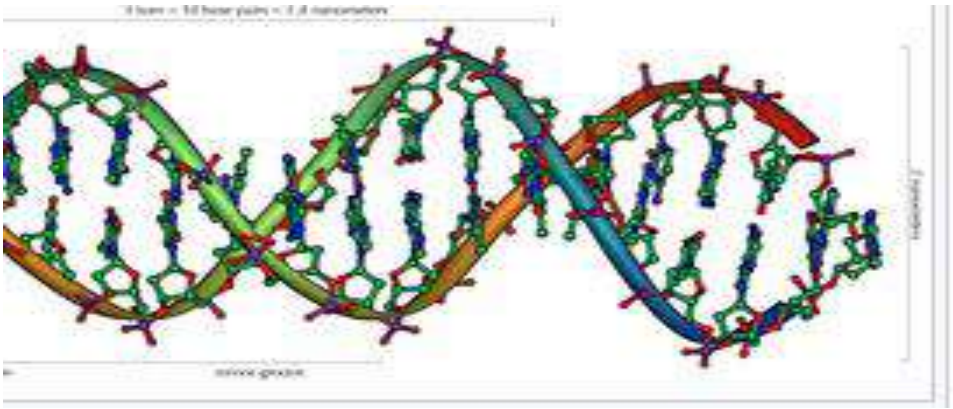
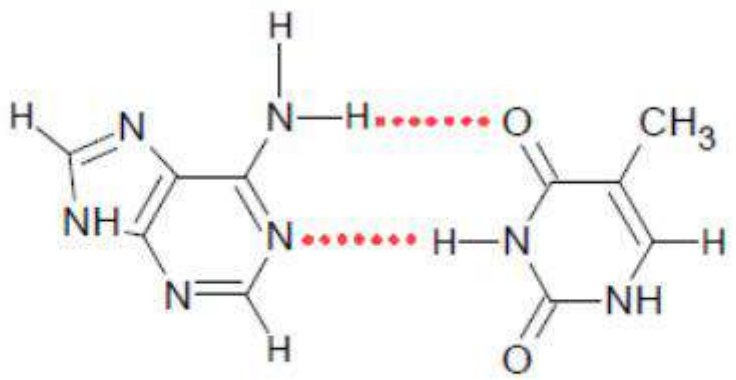


図 1： DNA における四つの窒素含有塩基の構造式：(a)アデニン（A)(二重環構造)；(b)チミン（T）（一重環構造)；(c)グアニン（G）（二重環構造)；(d)シトシン（C）(一重環構造)

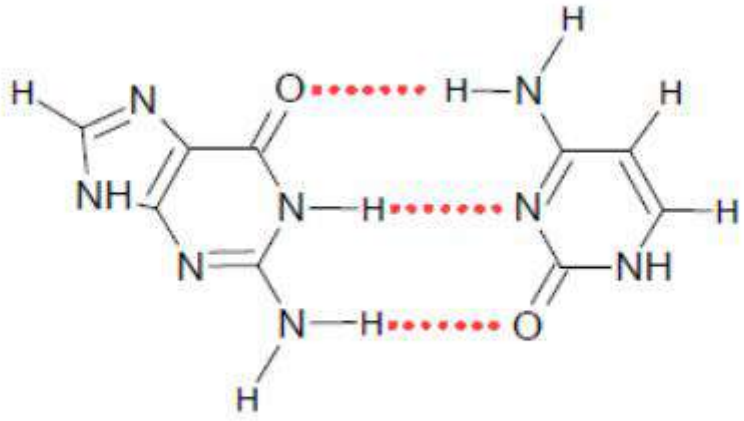


主構（major groove）と副構造（minor groove）が示されている。出典：wikipedia:

図 2 :DNA の二重らせん構造(二重らせん状)



(a)



(b)

図 3： ワトソン-クリック相補性における水素結合をその構造式で表したもの：(a)アデニン(A)とチミン(T)は 2 つの異なる相補的塩基で、2 つの水素結合に関与している；(b)グアニン(G)とシトシン c は 3 つの水素結合に関与する 2 つの異なる相補的塩基である技術、ポリメラーゼ連鎖反応(PCR)技術、親和性分離技術、およびゲル電気泳動技術の 5 種類の DNA 分子技術について詳述している。これらの分子技術はそれぞれ、DNA 分子を操作するための重要な機能を持っており、そのためには堅牢な DNA ラフセットコンピューティングを構築するために必要である。

3 DNA 分子技術

この節では、DNA 分子技術の手法を説明し、DNA ラフ集合計算を開発するための DNA 分子の操作を示している。具体的には、この節では制限酵素技術、リガーゼ技術、ポリメラーゼ連鎖反応（PCR）技術、親和性分離技術、およびゲル電気泳動技術の 5 種類の異なる DNA 分子技術について述べる。これらの分子技術は、それぞれ DNA 分子を操作する。DNA ラフ集合計算を構成するために必要不可欠である。

3.1 制限酵素技術

組換え DNA を生成するには、目的とする DNA 分子の特定の部位を切断し、特定の DNA フラグメントを分離する必要がある。これには、DNA の分子技術である制限酵素技術が使用される。この技術では、特定の DNA 配列を標的にすることで、DNA 分子を意図的に複数の断片に切り分ける。このような制限酵素の認識部位は、通常、4〜6 個のヌクレオチドで構成されており、それぞれが対応する塩基対を含んでいる[41]。異なる長さの DNA フラグメントは、異なる種類の DNA 塩基配列を増幅し、制限酵素技術を用いてそれらを別々の断片に切断することで生成される。つまり、制限酵素は特定の DNA 塩基配列を認識し、指定された位置でそれを切断する。

制限酵素はヌクレアーゼとして働き、DNA 内部の特定の位置（タイプ II 制限エンドヌクレアーゼ）で切断する。4 つの塩基（A, T, G, C）の可能性を考慮すると、任意の DNA 塩基配列で得られる予想頻度は 4 の n 乗になる。ここで n は認識される配列の長さであり、3 種類の異なる長さの部位が予測される。第一に、256 塩基対の各部位が四ヌクレオチド部位を示す。第二に、1024 塩基対の各部位が五ヌクレオチド部位を示す。最後に、4096 塩基対の各部位が六ヌクレオチド部位を示す。さらに、制限酵素技術における切断の機構は、粘着末端（sticky-ended）または平滑末端（blunt-ended）で行われる。図 4 は、制限酵素（EcoRI）の機構の例を示している。

3.2 リガーゼ技術

一本の DNA 鎖または二本の異なる逆方向の一本の DNA 鎖に含まれる不安定な dsDNA または dsDNA は、リガーゼ技術を用いて修復できる。リガーゼは、リコンビナント DNA プロセスにおいて重要なリン酸エステル結合の形成を触媒できる。生化学的手順で DNA プラスミドベクターはリガーゼプロセスで 1 つの DNA 分子に融合できる。

14 リガーゼ[44]は、リン酸エステル結合を触媒するために一本の DNA 鎖のギャップを封じるために使用される。リガーゼプロセスでは、T4 リガーゼは粘着末端型と鈍端型の両方に対応できる。プロセスに使用されるリガーゼバッファーには、一般的な室温下で不安定なアデノシン三リン酸（ATP）が含まれている[45]。凍結庫から取り出した後、すべての酵素の種類とバッファーは氷上に保管されている。

3.3 ポリメラーゼ連鎖反応（PCR）技術

PCR は、体外で行われる DNA 分子技術であり、特定の DNA 配列を同時にコンプリメントするプライマーの使用によって約 50 万個まで増幅できる。PCR 技術は DNA 分子の特性を分析するために開発された。PCR 技術は、DNA 分子の特定の領域を制限してその増幅を行う。その後、PCR 技術は耐熱性ポリメラーゼを含めることによって、DNA 塩基配列のテンプレート固有の合成反応を繰り返しできる。図 5 は一般的に使われている PCR 装置の例を示している。

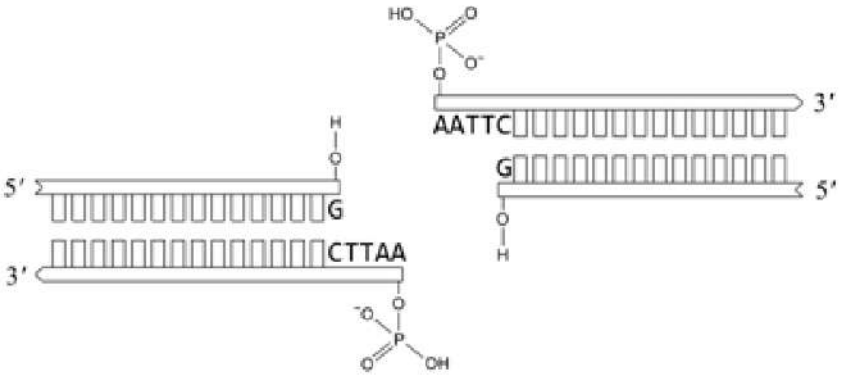


図 4：5-G|AATTC-3`と 5-G|AATTC-3`を表す DNA 塩基配列の切断を示す DNA 塩基対の制限酵素（EcoRI）の機能例



Thermal Cycler Dice Real Time System IV with PC.

図 5：一般的に使用される PCR 装置の例：タカ



図 6: アガロース電気泳動装置：（株）アドバンス製造の Mupid(R)-2plus 写真例

PCR 技術は、エネルギーとヌクレオシドを使用して DNA 分子を合成するバッファー、プライマー、ホリメラーゼ、およびテンプレートが必要である。特に、天然の酵素であるポリメラーゼは修復および DNA 分子の形成を触媒する中心的な部分である[46]。DNA 分子の合成の主要なステップが繰り返され、最新の合成された DNA 分子は明確に分離され、それらをプライマーの形成を可能にするために冷やし、その DNA 補完的配列を対象としている。

加熱と冷却の各サイクルにより、DNA 分子の数はプライマーの拡張により大幅に増加できる。主要な反応では DNA 分子が生成され、数サイクル後にプライマー拡張されたものが含まれている。加熱と冷却サイクル中、DNA 分子数は増加し続けるが、酵素が適切な数の DNA 分

子を合成しない可能性があるか、反応が突然弱まることがある。最適な増幅に必要なサイクル数は非常に変動が大きく､各増幅ステップまたは含まれている初期の材料の数に依存する。

PCR 技術の特徴は、強い反応が高温で繰り返される際に安定性を維持するために確立された。したがって、酵素 Thermus aquaticus Taq）ポリメラーゼ[47]を使用して安定性を維持する必要がある。

3.4 親和性分離技術

親和性分離は、特定の DNA 配列を他のものから分離し、1 つまたは複数の特定の DNA 配列を抽出するために使用する一種の DNA 分子技術である[48]。化学的目的抽出、細胞質、および発酵プロセスからの複雑な混合物を扱う親和性分離技術は、磁気ビーズを使用して水溶液で材料を収集および分散するために使用される。この抽出技術はまた、生化学的物質を抽出および分離するために使用される。別のタイプの親和性分離技術では、蛍光標識された DNA 断片を磁気ビーズに結合させることで DNA 分子を抽出することができる[49]。この特定のタイプの親和性分離では、蛍光標識された DNA 断片は磁気ビーズに結合されるリガーゼの特定のベース配列をもちいている。この分離技術は、磁気ビーズに付着させる機能と、DNA 断片の長さを示す固定化された磁気ビーズごとに識別する。この分離技術は同時に抽出およびテストされる多数の DNA 分子を扱うことができる。多くの親和性分離技術は自動化されることが期待できる。

3.5 ゲル電気泳動技術

この技術を用いて DNA 分子の長さを推定できる。ゲル竜気泳動技術には、アカロースゲル電気承動が一般的に使用される｡ゲル電気泳動は DNA 分子の長さを測定するだけでなく､DNAE 片をその構造から切り離すのにも非常に有効である[50]。図 6 は一般的に使用されるアガロースゲル電気泳動装置の例を示している。最近導入されたゲル電気泳動技術は、DNA 分子の長さを測定するだけでなく、核酸を分析して分子データを提供できる。この新しい装置は各単一の DNA 鎖と断片を自動的に測定し、その長さを示し、明確な線形帯を表示できる。

4 ラフ集合とモデル決定表

このセクションでは、ラフ集合理論の基本概念を簡単に再確認する。この内容は、DNA ラフ集合コンピューティングによる決定ルールの縮約を説明するのに役立つ。また、決定表の例を与え、この例の DNA ラフ集合コンピューティングによる解法を示す。

4.1 ラフ集合理論の概念

ラフ集合理論は Pawlak によって、集合論の概念に基づいて導入された[23]。Pawlak は、グラニュラー・コンピューティングの基礎や、新しい形式の計算機、知識発見の方法など、数多くの新しいアルゴリズムを初めて提案した[30]。

ラフ集合理論の枠組みを示す[31]。対象の集合を U とし、U 上の関係を R とする。R は直積集合 U×UÆ{(x,y)|x,y∈U}の部分集合と同一視され、この部分集合を R とかく。特に、下記の 3 要件を満たす関係 R は同値関係と呼ばれる。

(1)　(x,x)∈R（反射性）

(2)　(x,y)∈R ならば(y,x)∈R（対称性）

(3)　(x,y)∈R かつ(y,z)∈R ならば(x,z)∈R（推移性）

さらにこのとき、[s]={(s,t)|s,t∈U}と決めると異なる対象 s と t について[s]=[t]かつ[s]∩[t]={}の一方が成立する。この性質を利用し、対象集合 U を非交差集合（共通部分の無い集合）の和集合に直せる。これを関係 R による対象集合 U の分割または識別関係とよび、各集合[s]を対象 s を含む同値類とよぶ。対象集合 U、その同値関係 Ξ、および U の部分集合 X（ターゲット集合とよぶ）が与えられたとき、ターゲット集合 X に依存して下記の集合を決める。

(1)　下近似集合（クラス１） ΞA(X)={[s]|s∈U,[s]⊂X}

(2)　上近似集合（クラス３） ΞA(X)={[s]|s∈U,[s]∩X≠{}}=∅,

(3)　境界領域集合（クラス２） ΞB(X)=ΞA(X)−ΞA(X),

任意のターゲット集合 X⊆U に対するこれらの集合は、対象が確実に X 内に位置するもの(クラス 1)、確実には X に含まれないもの(クラス 2)、または X 内に存在する可能性があるもの(クラス 3)を表わす[32],[33]。下近似集合は集合 X によって自動的に決まる。著者らは DNA ラフ集合コンピューティング法を使用して、この下近似集合から得られる最小長の決定ルールを得る。

4.2 モデルとしての決定表

ラフ集合では、通常、決定システム DS に基づいて構築される決定表を扱っている。決定システム(DS)を DS = (U, Γ, ε, Ψ)と定義し、下記のように定める。

・$U=\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$とし、各要素 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ を対象とよぶ。

・$\Gamma=\{\zeta_1, \zeta_2, \cdots, \zeta_m\}$とし、各要素 $\zeta_1, \zeta_2, \cdots, \zeta_m$ を条件属性とよぶ。また特定の属性 ε を導入し、これを決定属性とよぶ。属性 ζ_i における属性値の和集合を I^{ζ_i} とかく。各条件属性の属性値の和集合を $I\nu$ とかき、決定属性 ε の属性値の集合を $D\nu$ とする。

・$\Psi: U\times(\Gamma\cup\{\varepsilon\})\rightarrow I\nu\cup D\nu$ により、各対象と属性から値への対応付けを行う。これにより、各対象 x_i に対する属性値が決まり、それらを $\Psi^{\zeta 1}(x_i), \Psi^{\zeta 2}(x_i), \cdots, \Psi^{\zeta m}(x_i), \Psi^{\varepsilon}(x_i)$ とかく。

最終的に、n 個の対象と m 個の条件属性値のそれぞれの組に対して１つの属性値が定まる。これは直感的には一枚の表を与えることに相当する。特に、決定属性値集合が $D\nu=\{\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n\}$のとき、決定属性値によって決まる U の部分集合を決定クラスとよび、$D\nu^{\tau 1}, D\nu^{\tau 2}, \cdots, D\nu^{\tau n}$ などで表わす。決定クラスは 4.1 節におけるターゲット集合に相当する。

この研究で実験に使うモデル決定表に触れておく。決定表は 8 つの対象、4 つの条件属性とその条件属性値、1 つの決定属性とその決定値から構成される。これらの決定ルールは、最小長を示すように縮約される必要がある。決定ルールを縮約することで、この決定表の特性が明らかになる。モデル決定表の枠組みを次のように表わす。

(1) U={X_1, X_2, ・・・, X_8}；

(2) Γ ={∗, #, ■, ●}；

(3) I_c^{*}={(∗, 1), (∗, 2), (∗, 3), (∗, 4)}；

(4) $I_c^{\#}$={(#, 1), (#, 2), (#, 3), (#, 4)}；

(5) $I_c^{■}$={(■, 1), (■, 2), (■, 3), (■, 4)}；

(6) $I_c^{●}$={(●, 1), (●, 2), (●, 3)}；

(7) D={DecisionClass-1を決める値∅, DecisionClass-2を決める値１}。

モデル決定表の詳細は以下の通りである。

(1) x_1={(∗, 4), (#, 3), (■, 1), (●, 1)}；

(2) x_2={(∗, 3), (#, 4), (■, 4), (●, 2)}；

(3) x_3={(∗, 1), (#, 1), (■, 1), (●, 3)}；

(4) x_4={(∗, 4), (#, 3), (■, 3), (●, 2)}；

(5) x_5={(∗, 2), (#, 2), (■, 1), (●, 1)}；

(6) x_6={(∗, 3), (#, 4), (■, 4), (●, 2)}；

(7) x_7={(∗, 4), (#, 1), (■, 2), (●, 3)}；

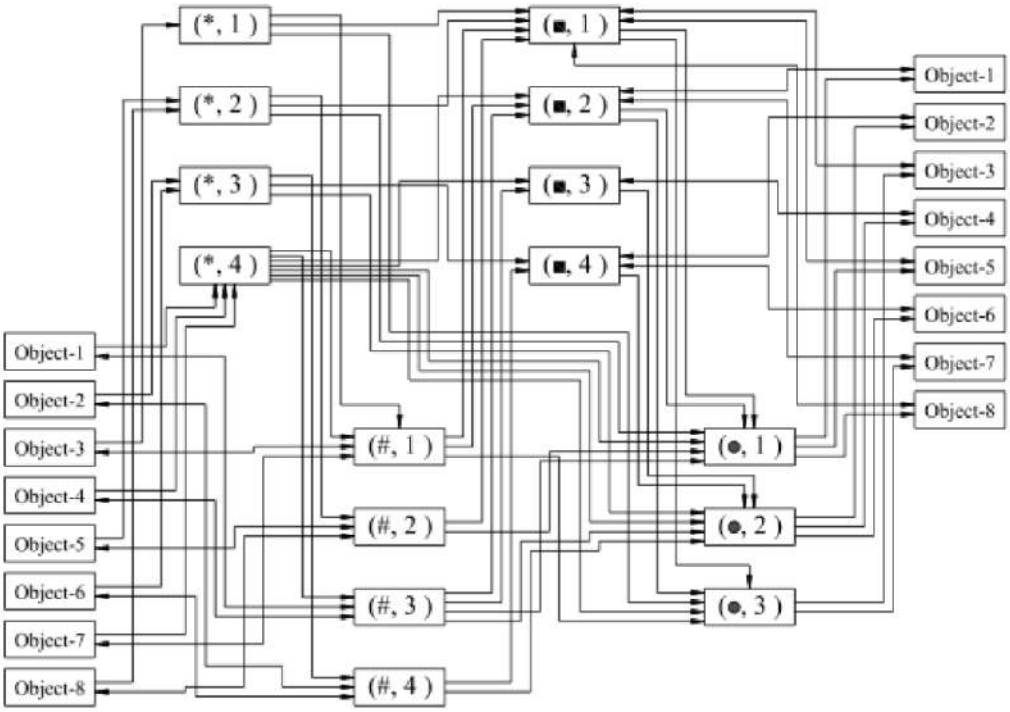
(8) x_8={(∗, 2), (#, 2), (■, 1), (●, 1)}；

(9) DecisionClass-1={x_3, x_4, x_6, x_8}；

(10) DecisionClass-2={x_1, x_2, x_5, x_7}.

1. $Object-1$ = ((∗. 4), (#, 3), (■, 2), (●, 1);
2. $Object-2$ = ((∗, 3), (#, 4), (■, 4), (●, 2);
3. $Object-3$ = ((∗, 1), (#, 1), (■, 1), (●, 3);
4. $Object-4$ = ((∗, 4), (#, 3), (■, 3), (●, 2);
5. $Object-5$ = ((∗, 2), (#, 2), (■, 1), (●, 1);
6. $Object-6$ = ((∗, 3), (#, 4), (■, 4), (●, 2);
7. $Object-7$ = ((∗, 4), (#, 1), (■, 2), (●, 3);
8. $Object-8$ = ((∗, 2), (#, 2), (■, 1), (●, 1));
9. $DecisionClass-1$ = ($Object-3$, $Object-4$, $Object-6$, $Object--8$);
10. $DecisionClass-2$ = ($Object-2$, $Object-5$, $Object-7$)

図 7: モデル DNA 有向グラフの表現



図では x1 から x8 は Object-1 から Object-8 と表示されている。

4.3 DNA 有向グラフによるルール生成の例

上記のモデル決定表に対して、図 7 に示すような DNA 有向グラフを作る。DNA 有向グラフの表現は、決定ルールを縮約するために使用される。モデル決定表から変換された DNA 有向グラフを図 7 に示す。ここで、5 つの対ノード (*,4)、 (#,1)、(#,3)、(■,1)、(■,2) は複数の方向に関連している。モデル DNA 有向グラフは、8 つの対象ノード $U=\{x_1, x_2, \cdots, x_8\}$ と 4 つの条件属性 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ から構成される。ここで、3 つの条件属性 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ は 4 つの条件属性値を取り、条件属性 ζ_4 は 3 つの条件属性値を取る。モデルペア行列は、与えられた対ノードの DNA 配列を一本鎖 DNA（ssDNA）としてエンコードする際に主に使用される。図 7 に言及する。

(1) (*,4) において、Object-1 は (#,3), (■,2), (●,1) へと方向づけられ、Object-4 は (#,3), (■,3), (●,2) へと方向づけられ、Object-7 は (#,1), (■,2), (●,3) へと方向付けられている。

(2) (#,1) において、Object-3 は (■,1) へ方向づけられ、Object-7 は (■,2) へ方向付けられている。

(3) (#,3) において、Object-1 は (■,2) および (●,1) へ方向づけられ、Object-4 は (■,3) および (●,2) へ方向付けられている。

(4) (■,1) において、Object-3 は (●,3) へ方向づけられ、Object-5 は (●,1) へ、Object-8 も (●,1) へと方向付けられている。

(5)（■,2）において、Object-1 は（●,1）へ、Object-7 は（●,3）へと方向付けられている。

上記の環境において、DNA の化学的な性質を用い条件部が最小長の 13 個のルールを得た。条件部が 1 個のルールは下記の 3 個。

(■,2)==>(ω,0)，　(＊,1)==>(ω,1)，　(■,3)==>(ω,1).

条件部が 2 個のルールは下記の 10 個。

(＊,4)&(#,1)==>(ω,0)，　(＊,4)&(■,1)==>(ω,0)，　(＊,4)&(●,1)==>(ω,0)，

(＊,4)&(●,3)==>(ω,0)，(＃,3)&(■,1)==>(ω,0)，　(＃,3)&(●,1)==>(ω,0)，

(＊,4)&(●,2)==>(ω,1)，(＃,3)&(●,2)==>(ω,1)，　(＃,1)&(■,1)==>(ω,1)，

(■,1)&(●,3)==>(ω,1).

5 DNA ラフ集合コンピューティング

4 節において、DNA ラフ集合コンピューティングとルール生成の簡単な例を示した。本節では前節 4.2 の内容を一般化した体系について述べる。決定表 DS = (U, Γ, ε, Ψ)の定義に従って、DNA 有向グラフを決める。

5.1 DNA における有向グラフ

3 つの異なる要素があり、それを対象要素、条件属性要素、条件属性値要素とする。決定表の有向グラフを作成するために、条件属性要素と条件属性値要素を一体化して「対要素」と呼ばれる単一の要素にする。したがって、1 つの対要素は条件属性要素と条件属性値要素を含んでいる。この 2 つの異なる要素（対象要素と対要素）を用いることで、これら 2 種類の要素から成る新しいタイプの有向グラフ、いわゆる DNA 有向グラフ図 8 を作成する。以下では、DNA 有向グラフに関する対象要素と対要素を対象ノードおよび対ノードと呼ぶ。

DNA 有向グラフにおいて、決定表と同様に n 個の対象ノード $x_1, x_2, \cdots, x_n$ からなる集合 $U=\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$、m 個の条件属性 $\Gamma=\{\zeta_1, \zeta_2, \cdots, \zeta_m\}$、$I_\nu$ と D_ν を考える。対ノード集合をペア行列として表現し Ps とする。DNA 有向グラフの構造は n 個の対象ノードと n 個の対ノードで構成されている。ここで、一部の条件属性は他の条件属性よりも少ない条件属性値をもつ対ノードが 1 つ以上存在する。この空のエントリを表すために、特定の記号「φ」を使用する。図 7 は一般の DNA 有向グラフ図 8 の特別な場合である。

図 8 について言及する。

(1) **a** は、n 個の対象ノード x_1, x_2, …, x_n から n 個の対ノード $(\zeta_1, \Psi_1^{\zeta 1})$, $(\zeta_1, \Psi_2^{\zeta 1})$, …, $(\zeta_1, \Psi_m^{\zeta 1})$ への方向を表す。

(2) **b** は、n 個の対象ノード x_1, x_2, …, x_n から n 個の対ノード $(\zeta_2, \Psi_1^{\zeta 2})$, $(\zeta_2, \Psi_2^{\zeta 2})$, …, $(\zeta_2, \Psi_m^{\zeta 2})$ への双方向の方向を表す。

(3) **c** は、n 個の対ノード $(\zeta_1, \Psi_1^{\zeta 1}), (\zeta_1, \Psi_2^{\zeta 1}), \cdots, (\zeta_1, \Psi_m^{\zeta 1})$, から n 個の対ノード $(\zeta_2, \Psi^{\zeta 21}), (\zeta_2, \Psi^{\zeta 22}), \cdots, (\zeta_2, \Psi^{\zeta 2m})$ への方向を表す。

(4) d は、n 個の対ノード $(\zeta_1, \Psi_1^{\zeta 1})$, $(\zeta_1, \Psi_2^{\zeta 1}), \cdots$, $(\zeta_1, \Psi_m^{\zeta 1})$ からその他の n 個の対ノード $(\zeta_n, \Psi_1^{\zeta n})$, $(\zeta_n, \Psi_2^{\zeta n}), \cdots$, $(\zeta_n, \Psi_m^{\zeta n})$ への方向を表す。

(5) **e** は、n 個の対ノード $(\zeta_1, \Psi_1^{\zeta 1})$, $(\zeta_1, \Psi_2^{\zeta 1}), \cdots$, $(\zeta_1, \Psi_m^{\zeta 1})$ から n 個の対ノード $(\zeta_n, \Psi_1^{\zeta n})$, $(\zeta_n, \Psi_2^{\zeta n}), \cdots$, $(\zeta_n, \Psi_m^{\zeta n})$ への方向を表す。

(6) **f** は、n 個の対ノード $(\zeta_2, \Psi_1^{\zeta 2})$, $(\zeta_2, \Psi_2^{\zeta 2})$,… $(\zeta_2, \Psi_m^{\zeta 2})$,からその他の n 個の対ノード $(\zeta_n, \Psi_1^{\zeta n})$, $(\zeta_n, \Psi_2^{\zeta n})$,… $(\zeta_n, \Psi_m^{\zeta n})$ への方向を表す。

(7) **g** は、n 個の対ノード $(\zeta_2, \Psi_1^{\zeta 2})$, $(\zeta_2, \Psi_2^{\zeta 2})$,… , $(\zeta_2, \Psi_m^{\zeta 2})$ から n 個の対ノード $(\zeta_n, \Psi_1^{\zeta n})$, $(\zeta_n, \Psi_2^{\zeta n})$,… , $(\zeta_n, \Psi_m^{\zeta n})$ への方向を表す。

(8) **h** は、その他の n 個の対ノード …,…,… から n 個の対ノード $(\zeta_n, \Psi_1^{\zeta n})$, $(\zeta_n, \Psi_2^{\zeta n})$,… , $(\zeta_n, \Psi_m^{\zeta n})$ への方向を表す。

(9) **i** は、その他の n 個の対ノード …,…,… から n 個の対象ノード x_1, x_2, … , x_n への双方向の方向を表す。

(10) **j** は、n 個の対ノード $(\zeta_n, \Psi_1^{\zeta n})$,$(\zeta_n, \Psi_2^{\zeta n})$,… ,$(\zeta_n, \Psi_m^{\zeta n})$$(\zeta_n, \Psi_1^{\zeta n})$, $(\zeta_n, \Psi_2^{\zeta n})$, … , $(\zeta_n, \Psi_m^{\zeta n})$ から n 個の対象ノード x_1, x_2, … , x_nへの方向を表している。

第 1 のケースでは、対象ノード x_i が対ノード$(\zeta_\alpha, \Psi^{\zeta\alpha}{}_\alpha)$に対して有向関係をもつ場合であり、$x_i e(\zeta_\alpha, \Psi_\alpha{}^{\zeta\alpha})$を表し、$x_i \bar{} e(\zeta_\alpha, \Psi_\alpha{}^{\zeta\alpha})$には有向関係がない。

第 2 のケースでは、対ノード$(\zeta_\beta, \Psi^{\zeta\beta}{}_\beta)$が対象ノード x_j に対して有向関係をもつ場合であり、$(\zeta_\beta, \Psi_\beta{}^{\zeta\beta}) e x_j$を表し、$(\zeta_\beta, \Psi_\beta{}^{\zeta\beta}) \bar{} e x j$には有向関係がない。

最終的なケースでは、対ノード$(\zeta_\alpha, \Psi_\alpha{}^{\zeta\alpha})$が対ノード$(\zeta_\beta, \Psi_\beta{}^{\zeta\beta})$に対して有向関係をもつ場合であり、$(\zeta_\alpha, \Psi_\alpha{}^{\zeta\alpha}) e (\zeta_\beta, \Psi_\beta{}^{\zeta\beta})$を表し、$(\zeta_\alpha, \Psi_\alpha{}^{\zeta\alpha}) \bar{} e (\zeta_\beta, \Psi_\beta{}^{\zeta\beta})$には有向

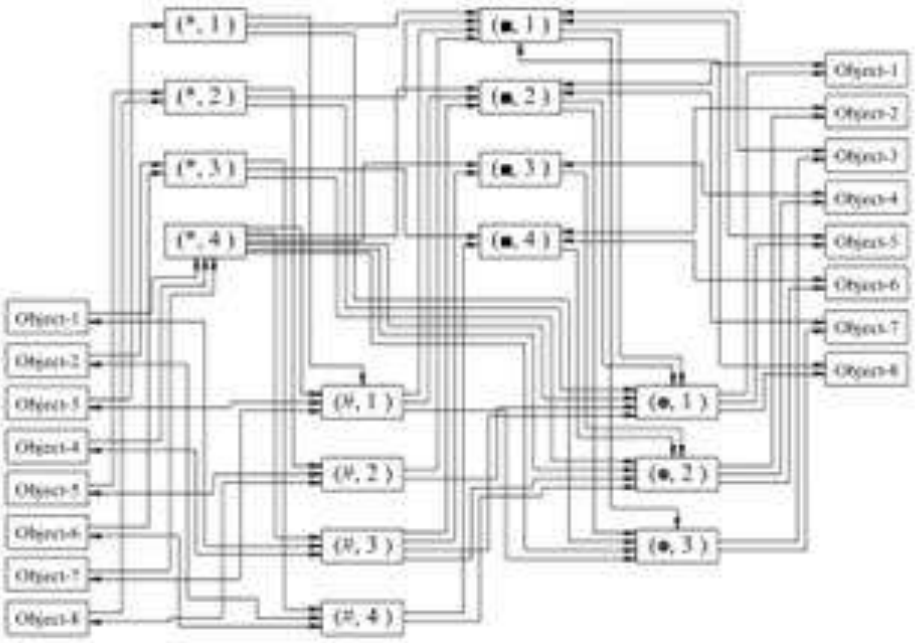


図８： DNA 有向グラフの表現

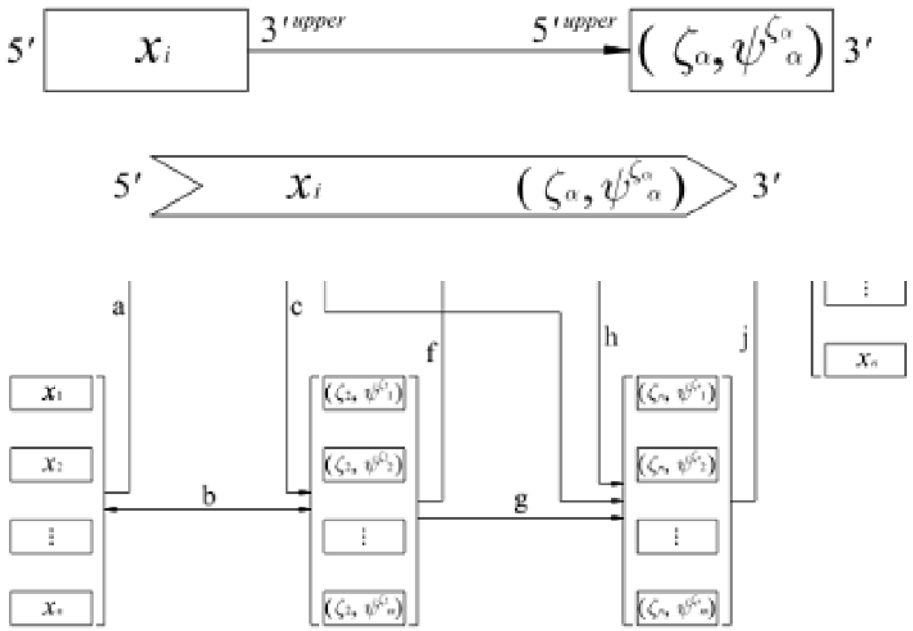


図９：タイプ１のダブルエンコードサブストリング表現

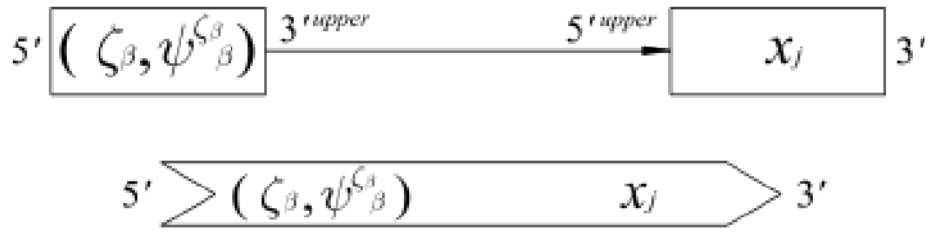


図１０：タイプ２のダブルエンコードサブストリング表現

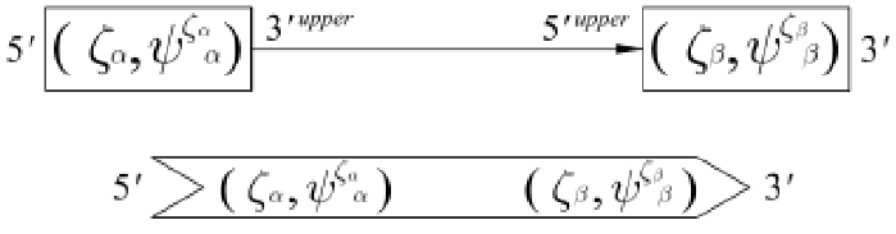


図１１：タイプ３のダブルエンコードサブストリング表現

- **タイプ１**はダブルエンコードサブストリングを表し、オブジェクトノード x_i とペアノード（ζ_α，$\psi_\alpha{}^{\zeta_\alpha}$）を含み、方向は x_i から（ζ_α，$\psi_\alpha{}^{\zeta_\alpha}$）へ向かう矢印で示される。

- **タイプ 2** もダブルエンコードサブストリングで、ペアノード（ζ_β, $\Psi_\beta{}^{\zeta_\beta}$)からオブジェクトノード x_j に向かう矢印が含まれている。
- **タイプ 3** は（ζ_α, $\Psi_\alpha{}^{\zeta_\alpha}$)から（$\zeta_\beta$, $\Psi_\beta{}^{\zeta_\beta}$）への方向矢印を含むダブルエンコードサブストリングである。

しており、これにより dsDNA への明確な結合が可能になる。図 9 から図 15 までが、各サブストリングタイプの詳細な図解を示している。

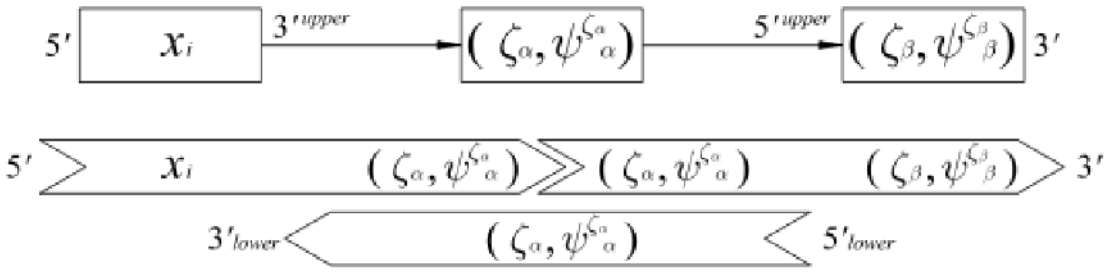


図１２：タイプ４のダブルエンコードサブストリング表現

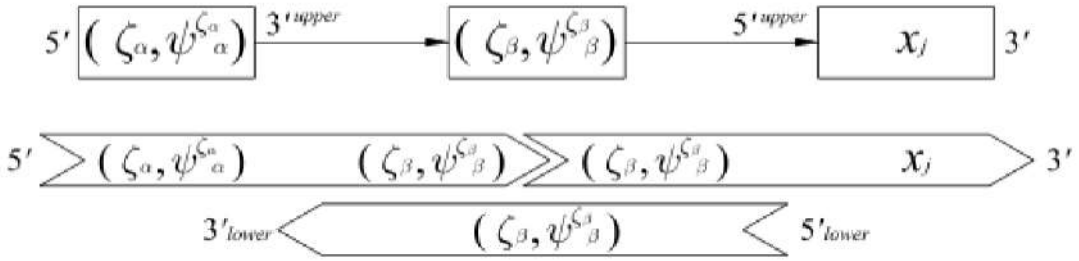


図１３：タイプ５のダブルエンコードサブストリング表現

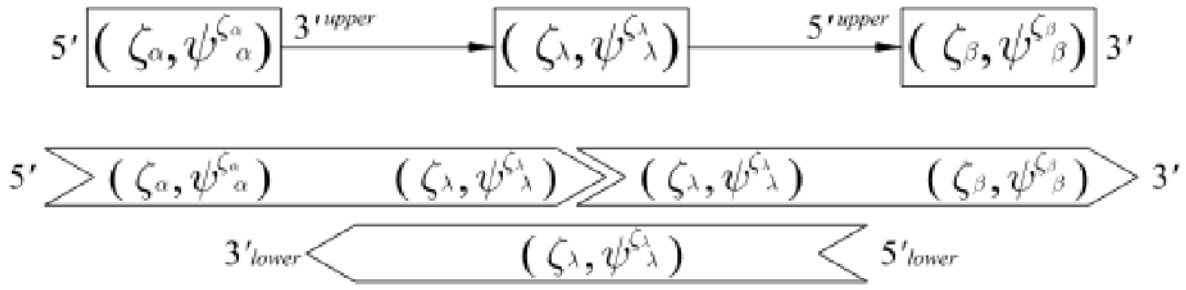


図１４：タイプ６のダブルエンコードサブストリング表現

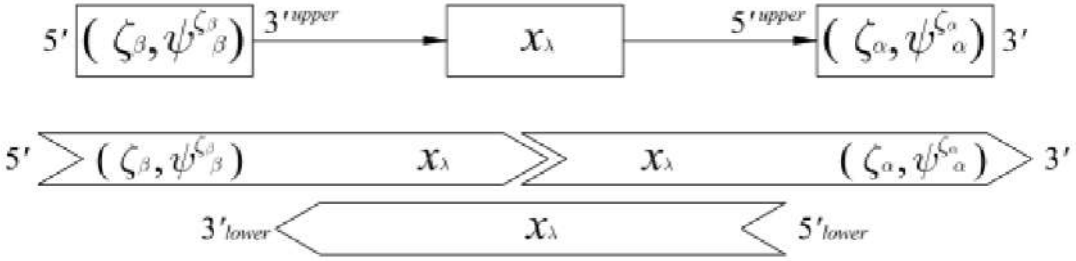


図１５：タイプ７のダブルエンコードサブストリング表現

6 結論

本解説では、DNA 分子計算を用いてラフ集合を計算する方法を提案した。DNA の有向グラフを用いて決定表のオブジェクトと属性値の関係を表現し、分子計算により下近似集合を識別し、決定ルールを縮約する手法を示した。簡単な例を示し、実際に得られるルールを示した。この方法により、計算効率が向上し、複雑な決定問題に対する解決策が提供した。将来的には、この手法をさらに発展させ、より広範な応用を目指すことが期待される。

謝辞

この研究は、2007 年から 2011 年までの北九州産業科学技術振興財団（FAIS）（アジアの大学間の科学技術協力のための FAIS R&D 基金）によって部分的に支援されました。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

[1] L.M. Adleman (1998)“computing with DNA: The manipulation of DNA tosolve mathematical problems is redefining what is meant by computation,”*Scientific American*, 279(2):34–-41. http://dx.doi.org/10.1038/scientificamerican0898-54

[2] Andrzej Skowron and Piotr Wasilewski,”Information systems in modeling interactive computations on granules,” *Theoretical Computer Science*, 412(42):5939-5959.{2011},issn:0304-3975, https://doi.org/10.1016/j.tcs.2011.05.045

[3] W. Pedrycz, S.-C. Chen, S.H. Rubin, and G. Lee (2011)“Risk evaluation through decision-support architectures in threat assessment and countering terrorism”. *Applied Soft Computing*, 11(1):621-–631. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.12.022

[4] Z. Pawlak (1982) “rough sets,”*International Journal of Computer and Information Sciences*, 11(5):341-–356. http://dx.doi.org/10.1007/BF01001956

[5] Roman Slowinski, editor (1992) “Intelligent Decision Support,” pages 363-–372. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. ISBN:3030963195, 9783030963194

[6] J.W. Grzymala Busse (2003)“a comparison of tree strategies to rule induction from data with numerical attributes,”Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 82(4):132-–140. https://doi.org/10.1016/S1571-0661(04)80712-6

[7] W. Ziarko (1993)“variable precision rough set model”. *Journal of Computer and System Sciences*, 46(1):39–59. https://doi.org/10.1016/0022-0000(93)90048-2

[8] A. Skowron and C. Rauszer (1992) “The discernibility matrices and functions in information systems.”In R.Slowinski(ed.),*Intelligent Decision Support: Handbook of Application and Advances of the Rough Sets Theory*, pages 331–362. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7975-9_21

[9] N. Shan and W. Ziarko (1995)“data-based acquisition and incremental modification of classification rules”. *Computational Intelligence*, 11(2):357–370. doi.org/10.1111/j.1467-8640.1995.tb00038.x

[10] L. Polkowski (2002) *Advances in soft computing Rough sets*. Physica-Verlag, Heidelberg.

https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1776-8
[11] James D. Watson, Tania A. Baker, Stephen P. Bell, Alexander Gann,Michael Levine, and Righard Losick (2008) *Molecular Biology of the Gene*(6th edition) Pearson Eduction, Inc. 日本語訳：ワトソン、遺伝子の分子生物学、第 6 版、監訳：中村桂子、役者：滋賀陽子、中塚公子、宮下悦子、*東京電機大学出版局*、2010 年、ISBN:978-4-501-62570-2 C3045. ISBN-13:978-0805395921
[12] Hiroshi Sakai, Michinori Nakata, Junzo Watada (2020) "NIS-Apriori-based rule generation with three-way decisions and its application system in SQL". Information Sciences, 507:755-771. https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.09.008
[13] 酒井浩，中田典規，和多田淳三 (2020) "ラフ集合非決定情報解析と NIS-アプリオリシステム —可能世界意味論に基づくルール生成システム—". 知能と情報 32(4):747-758. https://doi.org/10.3156/jsoft.32.4_747
[14] Hiroshi Sakai (2021) "Studies on Association Rule-based Table Data Analysis and Its Applications - New Mathematics for Data Sciences –". Journal of Combinatorics, Information & System Sciences 46(1-4):115-230. https://doi.org/10.32381/JCISS.2021.46.1-4.3
[15] Touhid Mohammad Hossain, Junzo Watada, Izzatdin A Aziz, and Maman Hermana.(2020) "Machine learning in electrofacies classification and sub-surface lithology interpretation: A rough set theory approach". Applied Sciences, 10(17):5940, 2020.https://doi.org/10.3390/app10175940.
[16] Hiroshi Sakai, Zhiwen Jian, Touhid Mohammad Hossain, and Junzo Watada.(2020) "Rule-based functionality for decision making with reasoning and its application: Case studies on three data sets.". Journal of Combinatorics, Information & System Sciences, 45(1–4):157–173, 2020. https://doi.org/10.32381/JCISS.2020.45.1-4.2.
[17] Touhid Mohammad Hossain, Junzo Watada, Izzatdin Abdul Aziz, Maman Hermana, Sheikh Tanzim Meraj, and Hiroshi Sakai.(2021) "Lithology prediction using well logs: A granular computing approach". Int. J. Innov. Comput. Inf. Control (IJICIC), 17(1):225–244, 2021.
[18] Yoshiyuki Matsumoto and Junzo Watada.(2009) "Knowledge acquisition from time series data through rough sets analysis". (IJICIC) International Journal of Innovative Computing Information and Control, 5(12):4885–4897, 2009. https://doi.org/10.14864/fss.24.0.144.0.
[19] Yoshiyuki Matsumoto and Junzo Watada.(2011) "Rough sets based prediction model of tick-wise price fluctuations". Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 15(4):449–453, 2011. https://doi.org/10.20965/jaciii.2011.p0449.
[20] Yoshiyuki Matsumoto and Junzo Watada.(2012) "Rough set-based market knowledge acquisition from tick-wise price movement data". International Journal of Intelligent Technologies and Applied Statistics, 5(3):267–280, 2012. https://doi.org/10.6148/IJITAS.2012.05.03.03.
[21] Yoshiyuki Matsumoto and Junzo Watada.(2015) "Rough set model based knowledge acquisition of market movements from economic data". In Information Granularity, Big Data, and Computational Intelligence, vol.8:375–388. Springer, Cham, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08254-7_18
[22] Yoshiyuki Matsumoto and Junzo Watada.(2018) "Knowledge acquisition from rough sets using merged decision rules". Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 22(3):404–410, 2018. https://doi.org/10.20965/jaciii.2018.p0404
[23] Jianxiong Yang and Junzo Watada. (2012) "Rough set based optimization for data mining: an improved fuzzy clustering approach". SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 5(4):210–217, 2012.
[24] Muhammad Faiz Mohamed Saaid, Zuwairie Ibrahim, Zulkifli Md Yusof, and Junzo Watada.(2010) "Automation of a DNA computing readout method based on real-time PCR implemented on a light cycler system". International Journal of Innovative Computing Information and Control (IJICIC), 6(10): 4263–4272, 2010.
[25] Don Jyh-Fu Jeng, Ikno Kim, and Junzo Watada.(2008) "Bio-soft computing with fixed-length DNA to a group control optimization problem". Soft computing, 12:223–228, 2008. https://doi.org/10.1007/s00500-007-0202-y,
[26] Rohani Binti Abu Bakar, Junzo Watada, and Witold Pedrycz.(2008) "A proximity approach to DNA based clustering analysis". International Journal of Innovative Computing Information and Control (IJICIC), 4(5):1203–1212, 2008.
[27] Rohani binti Abu Bakar and Junzo Watada.(2008) "DNA computing and its applications: survey". ICIC Express Letters ICIC International, 2(1):101–108, 2008.
[28] Rohani Binti Abu Bakar, Junzo Watada, and WitoldPedrycz.(2008) "DNA approach to solve clustering problem based on a mutual order". Biosystems, 91(1):1–13, 2008. https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2007.06.002,
[29] Rohani Binti Abu Bakar and Junzo Watada.(2011) "Empirical robustness evaluation of DNA-based clustering methods". International Journal of Intelligent Computing in Medical Sciences & Image Processing, 4(1):45303,2011.
[30] Rohani Abu Bakar, Chu Yu-Yi, and Junzo Watada.(2011) "Robustness of DNA-based clustering". In New Advances in Intelligent Signal Processing, pages75–92. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011。 https://doi.org/10.1007/978-3-642-11739-8_4

[31] Ikno Kim, Don Jyh-Fu Jeng, and Junzo Watada.(2006) "Redesigning subgroupsin a personnel network based on DNA computing". International Journal of Innovative Computing Information and Control (IJICIC), 2(4):885–896,2006.
[32] Ikno Kim, Junzo Watada, and Witold Pedrycz.(2008) "A DNA-based algorithm for arranging weighted cliques". Simulation Modelling Practice and Theory, 16(10):1561–1570, 2008. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2007.11.003},.
[33] Kim Ikno and Junzo Watada.(2009) "Decision making with an interpretive structural modeling method using a DNA-based algorithm". IEEE Trans. on Nanobioscience, 8(2):181–191, 2009. https://doi.org/10.1109/TNB.2009.2023788.
[34] Ikno Kim and Junzo Watada. (2009) "Decision making with an interpretive structural modeling method using a DNA-based algorithm". IEEE Trans on Nanobioscience, 8(2):181–191, 2009. https://doi.org/10.1109/TNB.2009.2023788},
[35] Ikno Kim and Junzo Watada.(2009) "a fuzzy density analysis of subgroups by means of DNA oligonucleotides". In Intelligent Systems and Technologies: Methods and Applications, pages 31–45. Springer, 2009.
[36] Ikno Kim, Yu-Yi Chu, Junzo Watada, Jui-Yu Wu, and Witold Pedrycz.(2011) "A DNA-based algorithm for minimizing decision rules: A rough sets approach". IEEE Trans on NanoBioscience, 10(3):139–151, 2011. https://doi.org/10.1109/TNB.2011.2168535,
[37] Ikno Kim, Junzo Watada, Witold Pedrycz, and Jui-Yu Wu.(2012) "Pattern clustering with statistical methods using a DNA-based algorithm". IEEE Trans on NanoBioscience, 11(2):100–110, 2012. https://doi.org/10.1109/TNB.2012.2190618.
[38] Ikno Kim, Junzo Watada, and Witold Pedrycz.(2013) "DNA rough-set computing in the development of decision rule reducts". In Rough Sets and Intelligent Systems-Professor Zdzislaw Pawlak in Memoriam: Volume 1, pages 409–438. Springer, 2013.
[39] Junzo Watada.(2008) "DNA computing and its application". In Computational Intelligence: A Compendium, pages 1065–1089. Springer, 2008.
[40] D.L. Hartl and E.W. Jones (2009) *Genetics: Analysis of Genes and Genomes* , pages 431–445. Jones and Bartlett Publishers Inc. 7th edn. ISBN-13:978-0763772154
[41] D.L. Hartl and E.W. Jones (2002) *Essential genetics* (3rd edn.), pages 90–412. Jones and Bartlett Publishers Inc.2002. ISBN-13:978-0763708382
[42] J.D. Watson and F.H.C. Crick (1953) “Molecular structure of nucleic acids, a structure for deoxyribose nucleic acid,”*Nature*, 171(4356):737–738, 1953. https://doi.org/10.1038/171737a0
[43] J.D.Watson, R.M. Myers, A.A. Caudy, and J.A.Witkowski (2007) *Recombinant DNA. W.H. Freeman and Company. Genes and genomes - a short course*, 3rd edn. ISBN:9780716728665, https://books.google.com/books/about/Recombinant_D.
[44] W.L. Jorgensen and J.D. Madura (1985)“temperature and size dependence for monte carlo simulation of tip4p water. molecular physics,”*An International Journal at the Interface between Chemistry and Physics*, 56(6):1381–1392. https://doi.org/10.1080/00268978500103111
[44] J.J. Greene and V.B. Rao.(1996) *Recombinant DNA principles and methodologies*.Marcel Dekker Inc. ISBN-13:978-0824799892
[45] L. Kari, G. Paun, G. Rozenberg, A. Salomaa, and S. Yu (1998)“ DNA computing, sticker systems, and universality,”Acta Informatica, 35(5):401–420. https://doi.org/:10.1007/s002360050125
[46] P. Rabinow (1996) *Making PCR: A story of biotechnology*. The University of Chicago Press, Chicago. https://doi.org/10.1525/ae.1999.26.3.783
[47] M.J. McPherson, P. Quirke, and G.R. Taylor (1991) *PCR 1*, pages 1–14. Oxford University Press Inc. https://doi.org/10.1093/oso/9780199631964.001.0001,
[48] P. Matejtschuk (1997) *Affinity separations*,pages 2–38. Oxford University Press Inc. ISBN-13:978-0199635504
[49] E.R. Goedken, M. Levitus, A. Johnson, C. Bustamante, M.OfDonnell, and J. Kuriyan (2004)“fluorescence measurements on the e. coli DNA polymerase clamp loader implications for conformational changes during atp and clamp binding,” *Journal of Molecular Biology*, 336(5):1047–1059. https://doi.org/10.1016/j.jmb.2003.12.074
[50] D.A. Micklos, G.A. Freyer, and D.A. Crotty (2003) *DNA science*. Cold Spring Harbor Laboratory Press. A first course, 2nd edn. ISBN(Hardback):0-87969-636-2
[51] Z. Pawlak (1984) “rough classification,”*International Journal of Man-Machine Studies,* 20(5):469–483. https://doi.org/10.1016/S0020-7373(84)80022-X
[52] J.F. Peters and A. Skowron (2007)“zdzis aw pawlak life and work (1926-2006),”. *Information Sciences*, 177:1–2. https://doi.org/10.1007/11847465_1
[53] L. Polkowski and A. Skowron (1998) Rough Sets in Knowledge Discovery 1.Methodology and Applications. Physica-Verlag, Heidelberg.ISBN:379081119X,9783790811193
[54] Z. Pawlak, S.K.M. Wong, and W. Ziarko (1988) “rough sets:, probabilistic versus deterministic approach”. International Journal of Man-Machine Studies, 29(1):81–95, https://doi.org/10.1016/S0020-7373(88)80032-4

【資料】

日本の海上物流の現状と港湾政策に関する考察
―日本と韓国の海上物流に着目して―

竹内裕二*・李應珍**・禹賢娥**・郭芝連**・坂田理莉**
Yuji Takeuchi*, Lee Eung-jin**, Woo Hyun-A, Kwak Ji-Yeon, Riri Sakata

*下関市立大学、**大邱大学校
Shimonoseki City University, Taegu University

要旨

韓国が世界のコンテナ貨物取扱量で世界第7位であるのに対し、日本は上位クラスに位置していない。本研究目的は、世界の海上コンテナ貨物の状況を把握したうえで日本と韓国における海上コンテナ港湾の関係性を把握し、日本の現況を示すことである。世界の物流評価軸は、海上コンテナ貨物量（TEU）であるが、日本の産業特性から海上コンテナ貨物による輸送ができない石炭・石油・鉄鉱石・穀物などの輸入、乗用車などの輸出が多いため必然的に世界競争力評価に寄与できない。また、船舶の大型化、海上コンテナ貨物の輸送技術の高度化などを視野に入れた港湾整備が世界で進んでいる。しかし、日本の港湾は、世界最大級の海上コンテナ貨物船が水深の関係から寄港できない。そのため、基幹航路船の誘致が難しい。さらには、日本経済が低迷していることからフィーダー輸送を充実させることを優先に考えなければならない現状がある。

キーワード：　コンテナ港湾、コンテナ貨物量、外貿基幹航路、国際力強化、競争力

Abstract

South Korea ranks seventh globally in container cargo handling, whereas Japan does not hold a comparable position among leading countries. This study aims to analyze the status of global maritime container cargo, examine the relationship between maritime container ports in Japan and South Korea, and provide insights into Japan's current situation. Although the global logistics metric is primarily based on container cargo volume (TEU), Japan’s unique industrial characteristics result in significant imports of coal, oil, iron ore, and grain—commodities unsuited to container transport—and exports of passenger vehicles. Consequently, Japan's contribution to global competitiveness in this area is limited. Meanwhile, global port development trends focus on accommodating larger vessels and enhancing container cargo transport technologies. However, Japanese ports face limitations, as the world’s largest container ships cannot dock due to depth constraints, making it difficult to attract primary-route vessels. Furthermore, Japan’s stagnant economy necessitates prioritizing feeder services.

Keywords: Container Port, Container Cargo Volume, Main Foreign Trade Route, International Strength, Competitiveness

1. はじめに

日本の財務省が、2023 年 4 月 20 日に貿易統計（速報）を発表した。その発表によれば、原油などのエネルギー価格の高騰や記録的な円安などが影響し、2022 年度の日本の輸入額が過去最大の 120 兆 9550 億円となった。一方の輸出額は、自動車や半導体などの電子部品関連の輸出が伸びたことなどにより、過去最大の 99 兆 2265 億円であった。結果的に貿易収支は、過去最大の 21 兆 7285 億円の赤字となった（読売新聞オンライン, 2023, 「昨年度の貿易赤字、21 兆円 7285 億円で過去最大...13 年度の 1.5 倍超」、読売新聞 2023 年 4 月 20 日)。この赤字額は、それ以前まで過去最大の赤字額（2013 年）だった 13 兆 7000 億円と比較しても、1.59 倍の赤字額である。これに関連した NHK ニュースによれば、貿易統計から 2021 年度の輸入額と比較して 32.2%の大幅増加になったものの、輸入量を指数で示す「数量指数」は前年度比 1.6%のマイナスだったという（NHK, 2023, 「昨年度の貿易収支 21 兆円 7285 億円の赤字 1979 年以降で最大」、NHK NEWS WEB 2023 年 4 月 20 日)。すなわち、日本の貿易は、「物流量が減り、輸入額が増えた」ということである。

四方を海で囲まれた日本は、島国ゆえ貿易活動なしに日本の経済活動と国民生活は成り立たないといっても過言ではない。そのような地理的状況ゆえに日本の貿易を担う主たる輸出入の手段は、必然的に海上輸送と航空輸送の 2 択になってしまう。その選択は、荷主が発送する荷物の内容によって物流のスピードと物量のトレードオフの関係から決定する[1)]。特に生産活動のグローバル化や人々の消費の多様化に伴い、国家間の経済交流が活発に展開されるようになってきた。この点は、1990 年頃から地理的に隣接している国家間で共同の経済利益を追求しようとする経済ブロック化の動きによるところが大きい。近年、注目すべきことに、新型コロナウイルス感染症拡大により国際旅客輸送が激減しても、国際貨物輸送が堅調に推移している。この現実からも、国際貿易の重要性が浮き彫りとなった。

本研究では、福山（2021）が主張する「釜山港湾公社は、現在、釜山港をその戦略的位置という観点から、北米航路・欧州航路等の海上航路とユーラシア大陸のシベリア・ランドブリッジ（SLB）やチャイナ・ランドブリッジ（中欧班列）のハブ港として位置付けている」点に着目した。なぜなら、釜山港から近距離にある九州地域の港湾における 2021 年度の海上コンテナ取扱貨物量合計（国土交通省, 2022）は、外貿コンテナ量に特化して見てみると 1,548,766TEU[2)]であった(全国合計 17,910,912TEU に対する 8.64%を占める)。このうち、博多港と関門港(北九州港と下関港)が占めている同年度の外貿コンテナ量合計は、1,291,939 TEU である（九州全体 83.42%を占めている)。この状況からも博多港・関門港（北九州港・下関港）が九州を代表するゲートウェイの役割を明らかに果たしているといえる。だからこそ、九州エリアにおいて今後、博多港・関門港（北九州港・下関港）による国際海上物流の

1）2022 年における日本の輸出入は、99.5%（8 億 5167 万トン）が海上輸送で、0.5%（399 万トン）が航空輸送だという（日本海事広報協会, 2022, p.12))。

2）TEU とは、Twenty-foot equivalent units の略で、20ft.コンテナ 1 個を 1TEU としている。ここでいう 20ft.とは、幅（W）2.0m×高さ（H）2.6m×長さ（D）6.1mサイズの換算コンテナ取扱個数の単位を意味している。

発展の可能性に期待が持てる。

本稿執筆するに当たり、物流に関する世界的社会情勢が変化に対応した日本への物流と、それを支える港湾の現状把握をすることから始める。この点に関する着目は、韓国が世界のコンテナ貨物取扱量で世界第 7 位（詳細は 2.1 で後述）に対し、日本が上位クラスに位置していない現実がある。本稿の研究目的は、世界の海上コンテナ貨物の状況を把握したうえで日本と韓国における海上コンテナ港湾の関係性を把握し、日本の現況を示すことである。

2. コンテナ港湾の競争力の変遷から見た現状

日本経済は、世界経済とのつながりを深める中で、グローバリゼーションの進展、自由貿易の恩恵を受けながら急速に成長を遂げた（経済産業省, 2021）。特に、1980 年代からの伸びは、日本の経済成長や 1985 年のプラザ合意以降の急速な円高などの要因から日本の輸出入による物流量が加速度的増していった。1993 年には、世界 GDP の約 18%を占めるようになった。この時代背景として、世界的な貿易・投資の拡大による進展で、世界規模で国際分業が行われるようになった点が大きい。2000 年以後の物流量は、輸送技術の向上によって、それ以前の物流量と比較しても著しい進展を果たしている（図 1 参照）。

2.1. 日本の物流に対する海上コンテナ貨物の位置づけ

1980 年以降、日系企業の海外進出が進み、生産拠点が中国や ASEAN 地域へ徐々にシフトしながら日本の産業構造は顕著に変化した。具体的には、国内の地方海上輸送貨物を徐々に集められなくなってきたことで、日本の主要港湾の海上コンテナ貨物量が相対的に少なくなってきた。また、産業構造そのものが高度化し、商品の高付加価値化や、サプライチェーンマネジメントが進み、リードタイムの圧縮ニーズが高まった。その背景として、日本国内における陸送運搬時間の短縮を理由に、それまで国際主要港湾までの陸上輸送をしていたもの

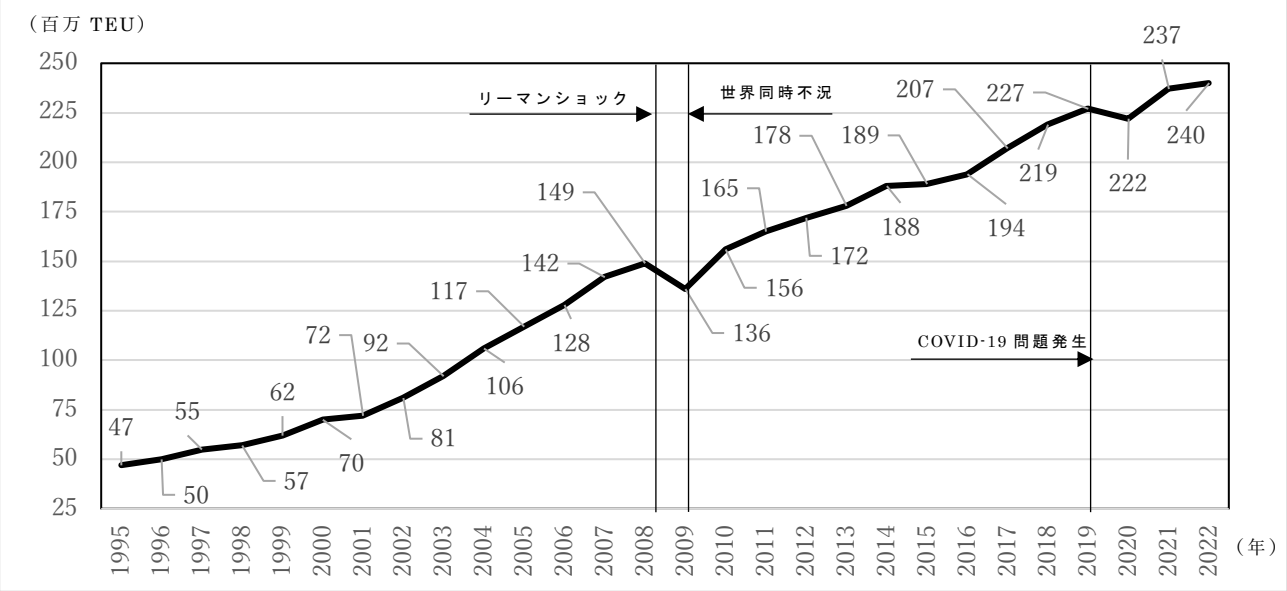


図 1：世界のコンテナ荷動き推移図
出典：日本郵船調査グループ（2022）, p.5

を地方港湾へ輸送するようになった。このことで地方港湾の国際化が急速に進展し、産業構造を大きく変化させていく要因にもなった。後述するが世界の物流は、リーマンショック後に大きく変化した。日本にとっては、この出来事を契機に隣国・釜山港がコンテナハブ港としての役割を担うようになった。その結果として、トランシップ貨物を小型コンテナ船によって日本－韓国間で受け渡しするようになった。

筆者は、海上輸送の位置づけを明確にするために貨物輸送全体を把握する必要があると考えた。海上輸送の特徴は、航空貨物と比べ運賃負担が安いものの輸送時間が長いことが挙げられる。それに比べ、航空輸送は、輸送時間が短い理由から荷主より鮮度が重要視される小ロット貨物が適していると支持されている。しかしながら、その実態について視覚的に把握できていない。そのため、筆者は 2001 年を 100 とした場合の日本の海上コンテナ貨物量と航空貨物量の経時変化を指数で図 2 に示した。この結果から 2002 年までの航空貨物輸送は、海上貨物輸送と比べて貨物取扱量が増加しているが、この年をピークに下降し始め 2005 年以降、海上コンテナ貨物輸送よりも航空機による貨物取扱指数が大きく落ち込んでいる[3)]。2009 年に航空貨物輸送と海上コンテナ貨物輸送の指数が翌年に均衡する。以後、その時々の世界情勢に左右されながら増減を繰り返し、海上コンテナ貨物輸送指数の方が、航空貨物輸送指数よりも高い状況が続く。他方の海上コンテナ貨物輸送については、航空貨物と異なり確実に取扱貨物指数を増やしているが、2021 年の時点で 2002 年時の指数と変わらない数字になっている。社会情勢による物流への影響という観点から両者を比較すれば、両者共に影響を受けている。その影響は、船舶輸送よりも空輸輸送の

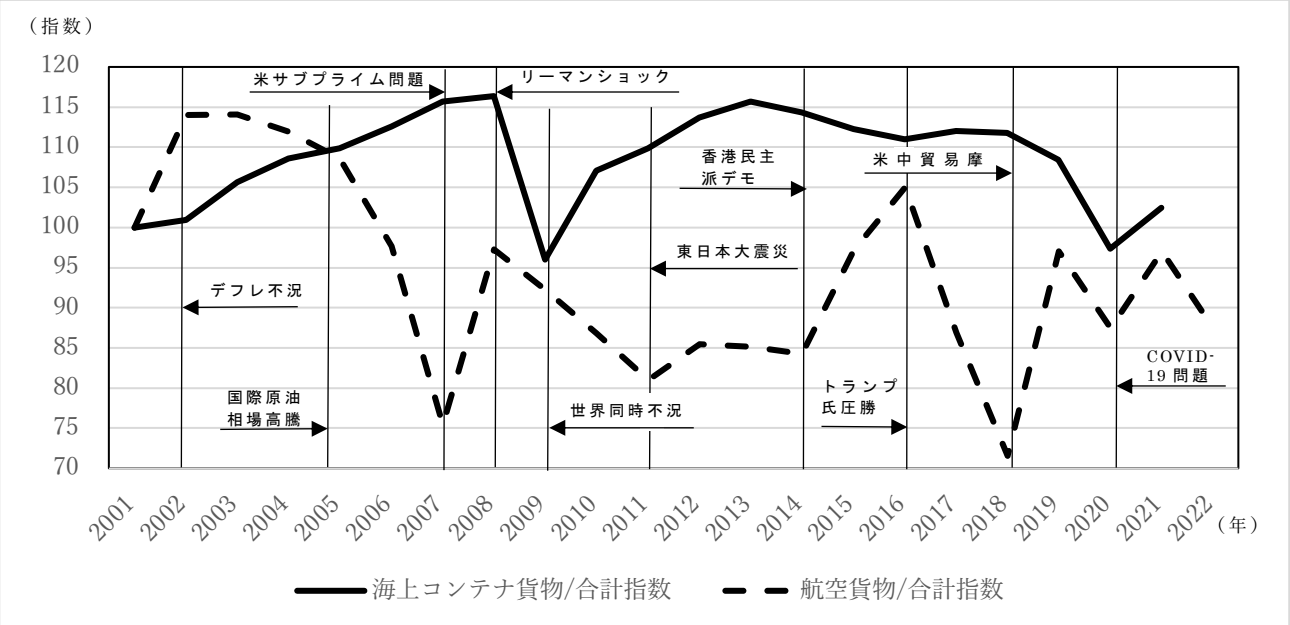


図 2：日本の船舶および航空貨物取扱量の変化図
備考：直送貨物を対象とし、継越貨物を除く。
出典：国土交通省「交通関係統計資料」および「日本出入航空貨物路線別取扱実績」を基に筆者作成

3）石倉・丹生（2003）によれば、航空貨物輸送は混載貨物が中心となる。そのため、航空貨物の流動は、混載貨物を取り扱うフォワダー*）の行動によって決まる。なぜなら、貨物輸送のコストを負担するのは荷主だが、搭載空港、利用キャリア、経由地等を全て決定しない（例えあっても稀）。一般的にフォワダーが運賃や輸送ルートなど複数パターンを提示し、荷主がその中から選択する形態が多い。このような状況から荷主が航空貨物を選択しなかったことによる結果が表れたものと考えられる。

*）フォワダーとは、日本語で「貨物利用運送事業者」といい、荷主から貨物を預かり、他の業者が取り扱う運送手段（船舶、航空、鉄道、貨物自動車など）を利用して運送を引き受ける役割を担う仕事である。

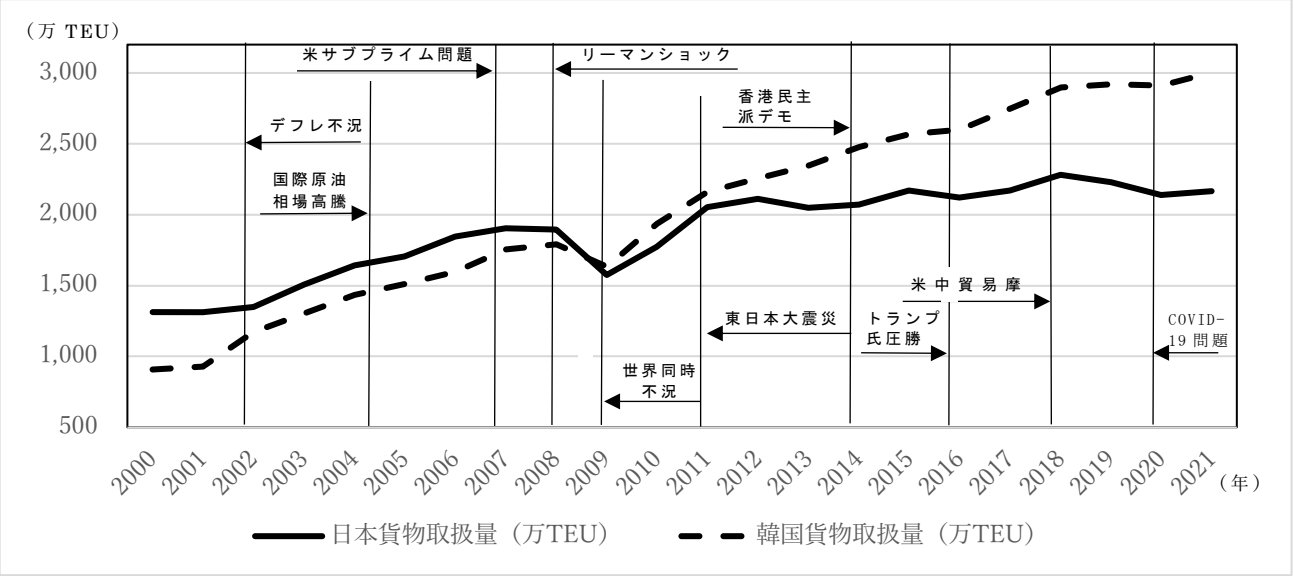


図 3：日本および韓国の貨物取扱量の変化図

出典：国土交通省「交通関係統計資料」および해양수산부 통계시스템（2023）「港湾統計システム資料 국적 외항선사 항로별 컨테이너 취급 현황 」を基に筆者作成

方が大きく受けている。この状況をより具体的に可視化するために、船舶輸送に特化した2000 年以降の日本と韓国の海上コンテナ貨物取扱量の推移を図 3 に示した。図 3 からわかるように韓国全体の海上コンテナ貨物取扱量は年々、着実かつ著しい増加傾向にある。特に2009 年以降の韓国において、大幅に海上コンテナ貨物取扱量が増加している（この点に関しては、次節 2.2.2 で解説）。一方の日本における海上コンテナ貨物取扱量は 2000 年以降、多少の増減が見られるものの着々と海上コンテナ貨物取扱量が増加している。海上コンテナ貨物の取扱量が増加した背景として、工業製品や中間財などの輸送量の増加、宅配事業の発達による個人向け貨物が増加した点が大きい。結果として、世界の貿易量や各国の海上コンテナ取扱量が急速に増量している。アジア諸国は、国際貿易がより一層発達することで、国際的な取引貨物量が増加するものと見越し、港湾を重要な社会インフラとして位置づけ、積極的に整備・運営体制の改革を行ってきたといえる。

この改革に関するアジア諸国の成果について、1980 年以降の海上コンテナ取扱量ランキング（表 1 参照）から世界の物流に対する競争力を 20 年ごとに比較して、その実態を浮き彫りにする。2020 年現在、上位 10 港のうち 7 港で中国の港がランクインしている。その多くの港が 1980 年当時、ランキングにも入っていない港である。さらに細見してみれば、2000 年の上位 10 港にランクインしている港は、香港港と上海港の 2 港のみで、その他の 5 港（寧波舟山、深圳、広州、青島、天津）は、直近 20 年で急成長した港である。その中でロッテルダム港と釜山港は、40 年経過しても世界の港湾貨物取扱量の上位 20 港にランクインしている。しかし、この 2 港ともが前述した中国の港に順位を追い抜かれた状況にある。具体的には、1980 年の時点で、ロッテルダム港が 2 位、釜山港が 16 位だった。20 年経過した 2000 年時点のロッテルダム港は 5 位へ順位を落とし、40 年後の 2020 年の順位は 10 位へとさらに順位を下げた。他方の釜山港は、2000 年に 3 位まで順位を上げたものの 2020 年時点で順位を 7 位に下げてしまった。この結果からも、日本の近隣諸国、特に中国が積極的に整備・運営体制面での改革を行い、確実に成果を上げていることがわかる。

表 1：世界のコンテナ取扱量統計一覧（1980 年から 2021 年）

順位	1980 年	2000 年	2021 年
1	ニューヨーク（アメリカ） 194 万 TEU	香港（中国） 1,810 万 TEU	上海（中国） 4,703 万 TEU
2	ロッテルダム（オランダ） 190 万 TEU	シンガポール 1,704TEU	シンガポール 3,747 万 TEU
3	香港（中国） 146 万 TEU	釜山（韓国） 754 万 TEU	寧波舟山（中国） 3,107 万 TEU
4	神戸（日本） 145 万 TEU	高雄（台湾） 742 万 TEU	深圳（中国） 2,876 万 TEU
5	高雄（台湾） 97 万 TEU	ロッテルダム（オランダ） 628 万 TEU	広州（中国） 2,418 万 TEU
6	シンガポール 91 万 TEU	上海（中国） 563 万 TEU	青島（中国） 2,371 万 TEU
7	サンファン（プエルトリコ） 85 万 TEU	ロサンゼルス（アメリカ） 487 万 TEU	釜山（韓国） 2,270 万 TEU
8	ロングビーチ（アメリカ） 82 万 TEU	ロングビーチ（アメリカ） 460 万 TEU	天津（中国） 2,026 万 TEU
9	ハンブルグ（ドイツ） 78 万 TEU	ハンブルグ（ドイツ） 424 万 TEU	香港（中国） 1,779 万 TEU
10	オークランド（アメリカ） 78 万 TEU	アントワープ（ベルギー） 408 万 TEU	ロッテルダム（オランダ） 1,530 万 TEU
-	13 位：横浜（日本） 72 万 TEU	21 位：：横浜（日本） 231 万 TEU	19 位：ニューヨーク （アメリカ）898 万 TEU
	16 位：釜山（韓国） 63 万 TEU	22 位：神戸（日本） 226 万 TEU	-：京浜（日本） 786 万 TEU
-	18 位：東京（日本） 63 万 TEU	28 位：名古屋（日本） 191 万 TEU	-：阪神（日本） 524 万 TEU
-	39 位：大阪（日本） 25 万 TEU	89 位：博多（日本） 51 万 TEU	41 位：東京（日本） 486 万 TEU
-	46 位：名古屋（日本） 20 万 TEU	112 位：北九州（日本） 12 万 TEU	72 位：横浜（日本） 286 万 TEU
-	92 位：北九州（日本） 8 万 TEU		73 位：神戸（日本） 282 万 TEU

出典：国土交通省ホームページ（世界の港湾別コンテナ取扱個数ランキング）より筆者作成

この 2 港以外の 1980 年当時の港湾を見た場合、世界 1 位の海上コンテナ取扱量を誇っていたニューヨーク港（アメリカ）は、表 1 に掲載されていないが 20 年後の 2000 年に 13 位（300 万 TEU)、40 年後の 2021 年に 19 位（758 万 TEU）と順位を下げている。同年当時の日本の港に焦点を当てて見てみれば、神戸港が 4 位（145 万 TEU）だった。ところが、20 年後の 2000 年に 22 位（226 万 TEU)、40 年後の 2021 年に 73 位（282TEU）と著しく順位を下げている。神戸港については、1995 年 1 月の阪神淡路大震災による影響から順位を下げても致し方ない。その他の日本国内の港は、2000 年以降上位 20 港以内にランクインすらできていない。

このような状況の日本国内の港も、国際的地位の低下から外貿基幹航路から外され、フィーダー[4)]化してしまった状況にある（詳細については、次節 2.2.1 で詳述)。この事については、日本に最も近い釜山港と日本の関係からも明確に表れている。この関係について福山（2021）は、釜山港のホームページのデータを基に次のような主張をしている。2020 年の釜山港における総コンテナ取扱量は、2,182 万 TEU あり、その内訳として輸出が 495 万 TEU、輸入が 485 万 TEU、トランシップ（T/S）が 1,202TEU だった。つまり、T/S 比率が全体の 55.1%を占めている。また、2018 年の釜山港の対日 T/S 比率は、56.35％だという。福山（2021）は記事の中で、「個別には、博多港・苫小牧港・門司港・新潟港等への T/S 比率が高いが、国

4）ここでいう「フィーダー」とは、基幹航路に接続された主要港から地方港へ輸送するといった支線の役割を果たすという意味である。

際コンテナ戦略港湾の東京・大阪・神戸の T/S 比率も高く、事実上、釜山港がハブ化している」と断言する。

2.2. 日本と韓国の港湾政策の違い

筆者らは、前節 2.1 で「日本の港湾は、国際的地位の低下から外貿基幹航路から抜港されてしまい、フィーダー化してしまっている」と述べた。かつての日本は、国際的地位があり他国から「貿易大国」、「海運王国」などと称されていたものの、その時の影さえも感じられない。日本が「貿易大国」と称された時は、1975 年（1980 年も）である。その当時の神戸港の海上コンテナ貨物取扱量は、世界第 3 位を誇っていた。その後の世界に対する日本の港湾の存在感は、表 1 に示す通りである。日本の港湾が国際的に存在感を薄くした理由について松田（2023）は、様々な背景があると断ったうえで「地理的条件（アジア・欧州航路の場合、日本が中国や韓国の先にある）」を挙げている。松田は、これを重要視する背景として、2021 年の日本と欧州間の海上コンテナ貨物輸送量が往復 131.1 万 TEU（アジア・欧州航路の 5.3%）に留まっている点を指摘する。つまり、アジア・欧州間の基幹航路を運営する海運会社（または船社）が、少量の貨物を日本まで運ぶことを嫌がった意思の表れととれる。運営会社にしてみれば、少しでもリードタイムを軽減し、必要経費など[5)]を削減したいと考えるのが当然の選択行為である。また、海上コンテナ貨物船の大きさが時代の変化に伴い技術も進歩しているから大型化し、寄港地を限定しなければならないといった物理的な要因に寄るところも大きい。

2.2.1. 日本の港湾政策

日本国政府は、港湾の国際的地位向上に向けての対策として「スーパー中枢港湾政策」を 2004 年度から開始している。この政策が実施された背景[6)]として、我が国の港湾競争力低下と東アジアのハブ港湾が台頭してきたことが挙げられる。国土交通省（2010）は、このような政策決定のプロセスを経て「スーパー中枢港湾政策」を実施したが、その政策目的として「コンテナターミナルのサービス水準の向上や港湾コストの低減を通じて基幹航路の寄港頻度を維持し、効率的な物流体系を構築することによって、産業の国際競争力の強化と国民生活の安定を図ること」だと示している。

これを受け、「スーパー中枢港湾選定委員会」が設置された後、1 年半の選定期間を経て全国の港湾の中から京浜港（東京港・横浜港）、阪神港（大阪港・神戸港）、伊勢湾（名古屋港・四日市港）を指定港湾とした。2005 年には、スーパー中枢に選定された港湾を「指定特定重要港湾」へと法的位置づけを与えるなどの港湾法改正を行った。この政策に対し、国費合計約 4,100 億円の措置が行われた。その後の総括を国際コンテナ戦略港湾検討委員会が、2010 年 2 月に報告書の中で「当初の目標について、平成 22 年度を目処に港湾コスト約 3 割低減、

5）例えば、アジア・欧州間の基幹航路を運営する海運会社が日本に寄港しないことで、①本船運行にかかる日数（リードタイム）を短縮する代わりに、本船往復の回数（頻度）の向上、②輸送時間の短縮、③航行距離の短縮による燃料費の削減などが挙げられる。

6）近藤（2010, p.45）は、「スーパー中枢港湾政策」が実施されるまでの経緯について、「2001 年 8 月に閣議決定された新物流施策大綱では、政府横断的な取組の下、日本経済のグローバル化を支えるサプライチェーンの構築を支援するため、安価で安定的、効率的な輸送拠点として国際コンテナ港湾の機能強化を推進する」とし、次いで「国土交通大臣の諮問機関である交通政策審議会が平成 14（2002）年 11 月にまとめた答申において、「国際コンテナ港湾のコスト、サービス構造を改革するため『スーパー中枢港湾の育成』を提唱された」と述べている。

リードタイム 1 日程度の短縮とする目標をほぼ達成した。基幹航路寄港回数については、横浜港で横ばい、それ以外の港では微減または減少とし、全国貨物の海外トランジット率の上昇率こそ減速したものの依然増加している」とまとめた。つまり、目標達成できたものの競争力回復までにつながらなかった。

この結果を踏まえ、2009 年当時の国土交通大臣（前原誠司氏）は、「国際競争力を高めるためには、さらに集中的に整備する港湾を絞り込む必要がある」という考えを示した。これを受け、2009 年 12 月に「国際コンテナ戦略港湾検討委員会」が設置された後、その選定作業に取り掛かった。4 ヶ月の選定期間を経て、2010 年 8 月に全国の港湾の中から京浜港（東京港・横浜港・川崎港）と阪神港（大阪港・神戸港）を国際コンテナ戦略港湾として指定した。その上で、これらの港湾を新しい港湾の種類として「国際戦略港湾」と位置付けるため、2011 年 3 月に港湾法の改正を行った。それに伴い、対象港湾に対する大水深岸壁の整備、効率的な港湾運営等、ハード・ソフト一体となった総合的な施策を実施してきた。さらにコンテナターミナルの一体的運営を実現するための港湾運営会社制度を創設した。

ところが、世界の物流事情は、この間にもコンテナ船の更なる大型化、船会社間の連携が進展したことで、基幹航路の寄港地の絞り込み（再編）など海運・港湾を取り巻く情勢が大きく変化しただけでなく、一層の厳しさを増した。具体的には、日本への基幹航路の寄港状況が、欧州航路に加え北米航路も製造業の輸出を支える東航[7)]が減少していった（片山, 2016, p.56）。片山は、この状況を放置した場合、直航基幹航路との価格競争も失われるから料金の高騰を招きかねないという。この状況を鑑みた国際コンテナ戦略港湾検討委員会は、2014 年 1 月に「集貨[8)]」、「創貨[9)]」、「競争力強化[10)]」の 3 本柱からなる「最終とりまとめ」を発表した（国土交通省, 2019a）。それを受け、阪神港（2014 年 12 月）と京浜港（2016 年 3 月）の港湾運営会社に対して国が出資することで、国・港湾管理者・民間の協働体制を構築した（片山, 2016, p.56）。

これらの動きにより、国際コンテナ戦略港湾政策が新たなステージに入ったといえるが、結果は表 1 に示す通りである。このような結果になった背景として、コンテナ船の更なる大型化と船社アライアンスの再編[11)]による航路寡占化に伴う、基幹航路の寄港地の絞り込みが大きく影響しているものと考えられる。これらが、複合的に作用したものだと考える方が自然である。2015 年時点のアジア・日本・北米間のコンテナ貨物の荷動きを見れば日本・東南アジア・南アジアルートおよび日本・北米ルートの荷動量は、北米・東南アジア・南米ルートと比較しても大差がある（表 2 参照）。また、片山（2016）の報告によれば、北米・東南アジア・南米ルートの荷動きのうち、直航貨物は約 328 万 TEU で、アジア諸港にトランシップされている貨物が約 113 万 TEU となっている。さらに、そのトランシップ先の内訳

7）東航とは、港湾用語の一つ。その意味について、北米航路を例に説明すれば、アジアから北米への動きを「東航」と言い、逆に北米からアジアへの動きを「西航」という。
8）戦略港湾への広域からの貨物集約などによる「集貨」を指す。
9）戦略港湾背後への産業集積による「創貨」を指す。
10）大水深コンテナターミナルの機能強化や港湾運営会社に対する国の出資制度の創設などによる「競争力強化」を指す。
11）その再編とは、次の通りである。2015 年 4 月の段階で、船社アライアンスは、4 船社（「2M ネットワーク（船腹シェア 28%）」、「G6 アライアンス（船腹シェア 17%）」、「CKYHE（船腹シェア 16%）」、「OCEAN THREE（船腹シェア 15%）」）あり、それぞれが競合していた。ところが、「2M ネットワーク」を除く 3 船社が統廃合することで、2016 年 4 月に「OCEAN ALLIANCE（船腹シェア 24%）」、同年 5 月に「ザ・アライアンス（船腹シェア 17%）」の 2 船社が結成され、3 大アライアンスに編成された（片山, 2016, p.60）。

は、台湾（365,608TEU）、香港（255, 187 TEU）、中国（252,225TEU）、韓国（91,986 TEU）の順に多い。日本は、わずか 16,200 TEU であった。

国土交通省（2019b, pp.8-10）は、その後の「基幹航路利用状況」及び「国際フィーダー航路の状況」について、次のように述べている。基幹航路利用状況については、船社による運送効率のためのコンテナ船の大型化、船社間のアライアンス再編が進んだという。この環境変化を前提に北米航路と欧州航路に関し、次のように報告をしている。北米航路は、「三大湾の港湾（京浜港、名古屋港、阪神港）への寄港に関しては、コンテナ船の平均載荷個数が 2013 年の 5,483TEU／隻から 2018 年の 7,432TEU／隻へ約 1.4 倍に増加した一方で、その寄港便数は各社の供給便数の調整などのため週 28 便から週 22 便へと減少した」という。追記として、「直航航路の寄港便数の減少に対して、直航率は緩やかに推移しているから、利用者は直航航路の利用を志向している」とコメントしている。欧州航路については、「三大湾の港湾への寄港に関しては、船舶の平均船型が 2013 年の 8,242TEU／隻から 2018 年の 8,927TEU／隻へ約 1.1 倍に増加した一方で、寄港便数は週 2 便から週 1 便へと減少した」という。追記として、「経路上に位置するシンガポール港など東南アジア諸港での接続サービスを利用する傾向が強まってきている。このため、我が国の欧州方面の貨物量が 2013 年より約 11%増加する中、その直航率は前回より 22.9 ポイント減の 38.8%となった」とコメントしている。

表 2：アジア・日本・北米間のコンテナ貨物の荷動

方面	ルート	荷動量
日本⇔東南アジア・南アジア航路	日本→東南アジア・南アジア	131 万 TEU
	東南アジア・南アジア→日本	141 万 TEU
日本⇔北米航路	日本→北米	63 万 TEU
	北米→日本	75 万 TEU
北米⇔東南アジア・南アジア航路	北米→東南アジア・南アジア	**148 万 TEU**
	東南アジア・南アジア→北米	**293 万 TEU**

出典：片山（2016, p.61）の図 8 を基に筆者作成

国際フィーダー航路については、「国内諸港（名古屋港、四日市港を除く）を発着する外貿コンテナ貨物のうち、欧州・北米・中南米・アフリカ・大洋州といった長距離方面貨物については、国際フィーダーを利用した貨物量が 2013 年の 6,855TEU から 9,732TEU へ増加するとともに、国際フィーダー航路の利用率についても 2013 年の 13.3%から 14.4%に拡大した」という。これらの状況から確実に基幹航路の寄港地として日本が外される傾向にあり、国際フィーダー航路が盛んになっている様が表れている。

2.2.2. 韓国の港湾政策

日本の港湾政策と対比する意味で、世界の港湾貨物取扱量の 7 位（2020 年）に位置している隣国韓国・釜山港の発展を見てみると日本の政策実行に対する成果と大きく異なる（表 1 参照）。1980 年当時の釜山港における貨物取扱量は、世界ランキング 16 位で、13 位の横浜港よりも取扱量が少なかった。ところが、20 年後の 2000 年時点で 3 位まで順位を上げている。この時の日本の港湾は、29 位の東京港を先頭に 36 位の横浜港と全体的に大きく順位を下げてしまった。この結果に対し 2020 年の釜山港は、2000 年時点よりも世界ランキングを 7 位まで下げたものの厳しい国際競争の中で確実に健闘している。

李（2012, p.88）は、韓国政府の港湾事業に対する取組について、「アジア諸国の港湾は、増加している海上コンテナ貨物を獲得するために港湾施設整備事業計画や港湾管理運営政策の見直しを積極的に推進している」と断ったうえで、「韓国政府は、中国、ロシア、北朝鮮

の経済変動に伴い、釜山港を東北アジアの物流中心拠点港を目指し、港湾施設整備政策、民営化政策、IT システム導入政策、港湾背後地を利用した港湾物流団地に関する計画を推進しつつも、港湾利用者のニーズに的確に対応するために競争力強化の戦略を展開している」と述べている。

韓国政府が港湾事業を推進させる背景として、国家戦略によって計画的に事業展開してきた経緯がある。1992 年に韓国の港湾開発に関する国家計画に「全国港湾基本計画」が初めて策定され、港湾開発における最上位計画に位置づけられた。この計画は、港湾法に基づき国土海洋部長官が 10 年ごとに国家港湾政策の新しい方向と基準を提示する目的としている。そのため、政府の港湾開発及び運営の根拠に、韓国港湾に関する中長期の方向と、韓国国内にある 57 の港湾別開発計画を含めて活用している（韓, 2011）。田（2021）は、1992 年から 2020 年までの 4 期にわたる基本計画の変遷についてまとめている。ここでは、田が取りまとめた韓国政府の港湾政策の内容を基に以下説明する。

（1）第 1 次全国港湾基本計画（1992 年-2001 年）は、港湾施設不足の解消と将来における海上貨物の急増を想定し、計画最終年度（2001 年）までに貨物取扱量を 9.2 億トン、海上コンテナ貨物量：821 万 TEU 対応可能に想定した。それに伴い、コンテナ埠頭や対北方、対黄海圏に向けての港湾施設拡充を計画した。行政（官）による運営体制を民営体制に転換し、競争による効率性増大を実現しようとした。この計画の成果として、1995 年に釜山新港整備に着手した。結果として 2001 年は、貨物取扱量：13.3 億トン、海上コンテナ貨物量：909 万 TEU だったことから当初計画を上回った。

（2）第 2 次全国港湾基本計画（2002 年-2011 年）は、貨物中心の港湾から付加価値を創出する国家的産業の育成を目標に計画している。そこには、朝鮮半島の地理的優位性を活かした需要創出型ハブ港を育成し、港湾運営の自律化、民営化、商業化の一層の推進を掲げている。この時初めて、ウォーターフロントの概念が導入された。この計画では、計画最終年度（2011 年）までに貨物取扱量：15.1 億トン、海上コンテナ貨物量：2,967 万 TEU 対応可能に想定した。その成果として、港湾公社の設立が 2003 年に定められ、2004 年に釜山公社、2005 年に仁川港湾公社が設立されている。2005 年時点の貨物取扱量（15.2 億トン）は、当初計画よりも早く目標達成した。

韓国政府は、港湾物流環境の急変により第 2 次全国港湾基本計画を修正（2006 年-2011 年）している。この修正理由として、北東アジアの港湾間における競争がますます熾烈化されるという予測に対する対応だとしている。そこには、配送施主などによる積み替え貨物の確実性が求められている背景に、港湾政策を量的成長から質的成長へ転換しなければならなかった。ここでいう質的成長の中には、港湾における物流のクラスター化や、それに伴う背後輸送網の拡充などによって、物流そのものの高付加価値化を図り質的成長を実現しようとしたものである。

（3）第 3 次全国港湾基本計画（2011 年-2020 年）は、計画最終年度（2020 年）までに貿易埠頭に 232 バース、旅客埠頭に 56 バース確保し、港湾の処理機能力を 50%以上向上させる。その結果として、貨物取扱量：18 億トン、海上コンテナ貨物量：3,633 万 TEU、港湾産業従事者 100 万人対応可能に想定した。この計画の結果として、2020 年の貨物取扱量は 51.8 億トン、海上コンテナ貨物量が 2,910 万 TEU であったことから当初計画の貨物量は上回っているものの、海上コンテナ貨物量が下回る結果となった。韓国政府は、港湾インフラ

拡充計画に対して、41 兆ウォン（日本円で約 4 兆 1000 億円）を投入し、物流、レジャー、文化が融合する高付加価値化した港湾の実現をビジョンとして描いている。この時の課題は、次の 5 項目であった。

①釜山港、光陽港、蔚山港の競争力を強化し、海外物流の高付加価値化とハブ港へ発展させたい。韓国政府は、釜山港をコンテナハブ港（積み替えハブ港）として集中的に育成、光陽港をインフラストラクチャー支援する総合物流ハブ港として育成、蔚山港を産業港・オイルハブ港として育成させるといった計画策定をした。中でも、釜山新港は、40 のコンテナバースを運営し、中国や日本の港湾との北東アジアハブ競争で優位性を確保させることにより、海上コンテナ積み替え規模を世界上位までに引き上げる狙いがある。

②2011 年における韓国の貿易依存度は 88%である。そのうち、港が輸出入の 99.8%を担っていた。この事実から競争力ある港湾の育成が重要課題として位置付けられた。そこで、国家経済発展の原動力とするため、港湾の背後圏域の産業立地や潜在能力などを考慮して地域圏域別に港湾の特化戦略を採用していく。そのうえで、港湾と周辺地域を経済活性化の拠点として開発を進めると同時に、地域別経済成長の拠点となるべき港湾の特性を推進するため、圏域別拠点育成を行う計画を策定した。具体的には、この圏域別拠点港を特化して育成していき、国家基幹産業ともいうべき製鉄（大山港および蔚山港：製鉄産業支援拠点）、石油化学（光陽港：石油化学産業支援拠点）、自動車（済州港・西帰浦港・仁川港：自動車産業支援拠点）、セメント（平沢港・唐津港・蔚山港・群山港：セメント産業支援拠点）、造船（東海墨湖港・玉階港・三択港：造船産業支援拠点）の発展を支援していく内容である。これらから輸出入の物流量を削減し、国内企業のグローバル競争における優位性を確保していく支援を行う狙いが伝わる。

本節での計画には、本稿に関係する貨物と関連しない項目がある。以下、紹介をしておくと次の 3 項目が挙げられる[12)]。③韓国の観光産業の発展と活性化のためにクルーズおよび構内の親水空間、マリーナ設備を拡充し、クルーズ及びマリナーインフラの開発を通じて港湾を海洋観光産業の拠点とする。その実現のため、クルーズ船専用バースの建設などを推進し、活用度が低い施設などの高付加価値化を図る。④港湾運営の効率性の向上とグローバルターミナル運営会社の育成のため、港湾管理者と運営体系の先進化を図り港湾運営会社の大型化、トリガールールの強化などを推進する。⑤発展途上国との国家間協力を通じて、港湾における国際交流の強化と港湾関係企業の海外進出を支援するといった国際港湾産業の国際化を推進していく計画である。

（4）第 3 次全国港湾基本計画修正（2016 年-2020 年）は、韓国を取り巻く国内外の環境変化に対応するための計画修正である。初めに、国際力強化[13)]のための体系的な港湾開発、管理運営の構築である。この修正に至った大きな要因は、韓国の国際競争力が 2011 年から 2013 年まで 22 位を維持していたものの、2014 年：26 位、2015 年：25 位と順位を下げ始

12）通し番号は、前述の番号の続き。

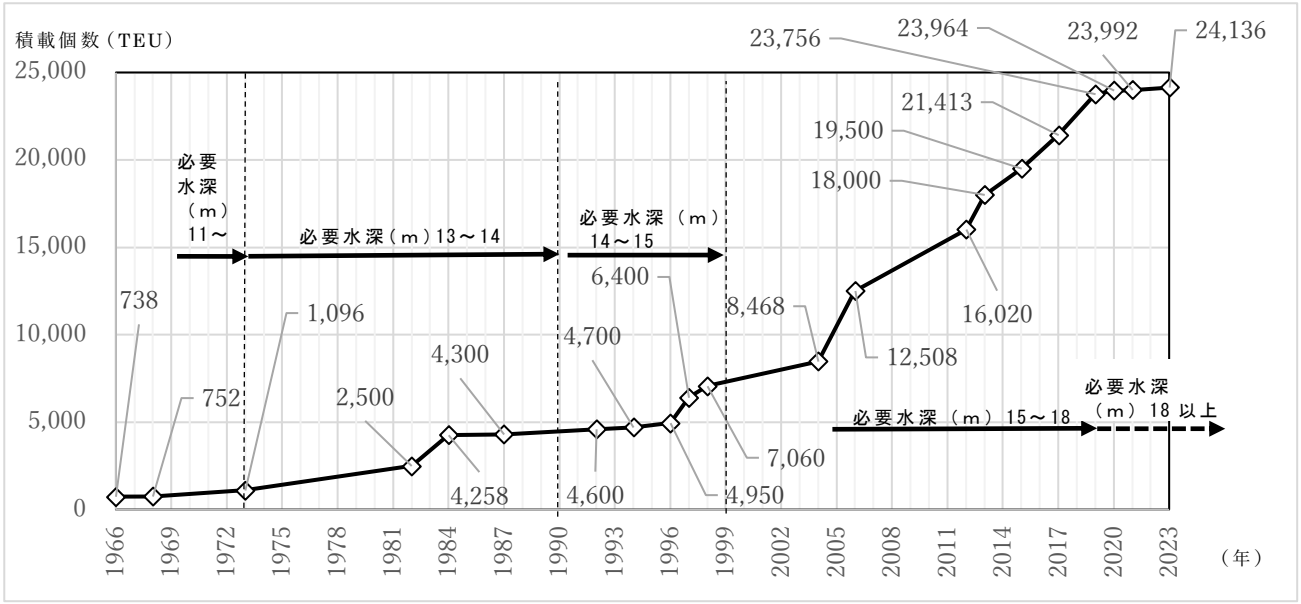
13）この政策の判断材料としているのが、世界の主要 60 か国と地域を対象に「企業にとってビジネスしやすい環境がどれほど整っているか」を基準に順位付けした IMD（国際経営開発研究所：International Institute for Management Development）が作成する「世界競争力年鑑（World Competitiveness Yearbook)」である。このランキングは、貿易に特化した調査ではない。しかし、競争力を判断する要素としての港湾の位置づけは大きい。本ランキングにおける日本の競争力は、1989 年から 1992 年まで 1 位であった。その後、2002 年に 27 位まで順位を落とした。以後、順位を上昇させた時もあったが、2022 年は 34 位である。

めた点に起因する。2016 年は、さらに順位を 4 つも下げ、29 位となった。一方の港湾貨物取扱量は、世界ランキングから見ても 2000 年：14 位、2005 年：9 位、2015 年：9 位、2020 年：8 位、2021 年：7 位と持続的に成長しているが、前述の国際力との間に乖離が見られる。それだけ、国内外の貿易に対する環境変化が激しいものと推察できる。

特にハブ港湾間の競争は激化の一途を辿っており、国際物流条件も大きく変化している。その変化に対応した国際競争力の確保が必修の課題となってきた。韓国の港湾では、輸出入貨物の 99.8%が処理しているという。港湾に関係する企業にとって、より一層の成果を上げるためにも物流費削減をはじめとする経費の効率化を図る必要があった。この実現には、港湾そのものの高度化と効率性向上が求められる。その一例として、韓国の主要 8 港湾（釜山港、仁川港、光陽港、平沢・唐津港、蔚山港、浦項港、木浦港、馬山港）に背後団地を造成するという。また、経済発展のために、年々増加傾向にある韓国から見たインバウンド観光客の取り込みも重視しており、国際クルーズなどの海洋観光の推進も課題としている。

この計画修正に対する具体的な施策として、韓国海洋水産部は、2020 年 11 月 18 日に「港湾政策の方向性と推進戦略」を発表した。日本海事新聞（2020）の記事によれば、この発表内容は 2030 年までの韓国港湾の中長期ビジョンと開発計画を盛り込んだものである。具体的には、2022 年に釜山第 2 新港「鎮海新港」を着工するという（釜山新港の西側）。そこには、第 3 次全国港湾基本計画で示したコンテナハブ港（積み替えハブ港）として集中的に育成するという観点からグローバルサプライチェーンの変化に対応できる安定した港湾物流ネットワークを構築していく狙いがある。さらには、北東アジアの物流の中心地としての地位を強固なものにするため、現在存在しない 3 万 TEU 規模の超大型船も受入可能な大型港湾として整備するという。その背景として、2017 年以降、2 万 TEU 積を超える船舶が建造・投入されている（ムーバーズドットコム, 2022 および図 5 参照）。この傾向は、今後の造船技術の向上に伴い、基幹航路を就航するコンテナ船がより一層大型化していくことを示唆している。また、同戦略は「グローバルな競争力を備えた高付加価値デジタル港湾の実現」というビジョンの下、3 つの戦略（①港湾物流のデジタル化、②継続的なインフラ投入を通じた港湾の国際競争力強化、③持続可能性の向上）を推進するという。韓国政府は、2030 年の数値目標として、貨物取扱量 19 億 6000 万トン、付加価値創造に 28 兆ウォン（約 2 兆 8000 億円）を投じるとしている。さらに、同年から韓国型スマート港湾運営を行うプラットフォームとしての自動テストベッド（実証実験を行うプラットフォーム）を構築する。

この運営を目指すため、2026 年までに光陽港に 5,950 億ウォン（約 595 億円）を投じて実証実験化に関する国産技術を開発し、実用実績を積む計画である。その結果を検証したうえで、釜山第 2 新港に国産の自動化技術を導入するという。釜山港以外の港湾開発計画としては、仁川エリアを対中国貿易のための物流拠点として育成し、中国との安定した物流網を構築する狙いがあるがゆえに、消費中心の首都圏専用ハブ港として仁川港を育成する計画である。そのため、コンテナ埠頭バースに 3 バースを追加するという。次いで、平澤・唐津港が自動車・雑貨など首都圏の産業支援港湾として、木浦港が西南圏地域産業拠点港湾として、済州港が旅客・クルーズ港として、蔚山港がエネルギー基地として、それぞれ育成していく計画だという。蔚山港については、石油、LNG（液化天然ガス）などのエネルギー埠頭 18 バースと背後団地を拡充していく計画にある。



１３）**図５：コンテナ船の大型化の推移と必要水深**　　**出典：筆者作成**

3.　世界の物流の動きと日韓の港湾に関する考察

前述してきた内容から日本のコンテナ港湾は、時代の変化に伴い、コンテナ港湾の「競争力」が衰えていく状況が露呈された。しかし、日本が努力を怠った結果ではない。アジアの周辺諸国を中心とした急速な港湾整備と基幹航路獲得の実態が浮き彫りになった。IMD（国際経営開発研究所）が行う「世界競争力年鑑」では、国家間の競争力を比べるうえの指標として、物流量を評価材料の一つにしている。この時、使用される物流量の単位は航空輸送の場合、重量（キログラム、トン）を使用する。一方の船舶輸送時の貨物量を計測する対象は、石炭、石油、鉄鉱石、穀物、乗用車などを除くと海上コンテナで輸送している。そのため重量でなく、港湾でのコンテナ取扱量（TEU）を世界競争力の評価軸にしている。

津守（2011, p.243）は、「コンテナ港湾の『競争力』を議論する際に最も挙げられる指標はコンテナ貨物の取扱量（取扱個数）である」と述べたうえで、「コンテナ貨物の取り扱い個数と言った場合、空のコンテナも含まれる」、「トランシップ貨物の場合は、ダブル・カウントされている。このように集めている貨物量という意味では、コンテナ貨物の取扱個数は正確な指標とは言えない」と、TEU による競争力評価基準への疑問[14)]を呈している。

3.1.　世界の競争力を評価する海上コンテナ貨物の TEU への疑問

前述した競争力評価を確認するため、TEU と重量で順位比較を行った（表 3 参照）。この比較結果から日本の場合、産業特性から海上コンテナ貨物による輸送ができない石炭・石油・鉄鉱石・穀物などの輸入、乗用車などの輸出が多いため必然的に世界競争力評価に寄与できないといった疑問が生じる。このような点からも、海上コンテナ貨物の取扱量（TEU）を世界の競争力の評価軸に据えることへの意義に疑問が生じる。しかし、IMD が海上コンテナ貨物取扱量を評価基準に挙げる理由は様々ある。その大きな要因として世界全体を対象に評価する場合、共通した項目がなければ順位が付けられない。それが、海上コンテナ貨物

14）この疑問は、コンテナ貨物取扱量に関連して、コンテナターミナルの稼働率、欧米基幹航路をはじめとする主要航路の便数も取り挙げられるケースもあるという（津守, 2011, p.243）。

表 3：世界の港湾別ランキング TEU と重量比較（上段が TEU 順位、下段が重量順位）

年	1 位	2 位	3 位	4 位	5 位	6 位	7 位	8 位	9 位	10 位
2000 年	香港	シンガポール	釜山	高雄	ロッテルダム	上海	ロサンゼルス	ロングビーチ	ハンブルク	アントワープ
	シンガポール	ロッテルダム	サウスルイジアナ	上海	香港	千葉	ヒューストン	名古屋	蔚山	光陽
2015 年	上海	シンガポール	深圳	寧波	香港	釜山	広州	青島	ドバイ	ロサンゼルス
	上海	シンガポール	青島	広州	ロッテルダム	ポートヘッドランド	寧波舟山	天津	釜山	大連
2020 年	上海	シンガポール	寧波舟山	深圳	広州	青島	釜山	天津	香港	ロッテルダム
	寧波舟山	上海	広州	青島	シンガポール	ポートヘッドランド	ロッテルダム	釜山	天津	大連

出典：国土交通省ホームページ（世界の港湾取扱貨物量ランキング 2000 年及び 2015 年、2005 年及び 2020 年、）より筆者作成

だったに過ぎない。次にビジネスの視点から物流を捉えれば、違った見え方ができる。つまり、一般の人々にとっての物流という観点から荷物（貨物）を見てみれば大きさと重量による輸送費換算が当たり前である。ところが、運輸業界の輸送費換算は、重量換算でなく、基本 20ft コンテナ 1 個当たりに対する輸送費換算をしている。そこには、港湾施設内での荷物の仕分け作業の効率化を優先的に考えた結果であり、業務上の請求作業のわかりやすさ、透明性の観点から当然の仕組みである。この現場視点で考えれば、今後も TEU 換算が基本になると考えるのが自然である。

このような性質を持つ海上コンテナ貨物であるが、新型コロナウイルス感染症（以下、コロナ）問題が発生した前後で状況が異なっている。この変化について、時系列的に状況を追ってみると次のようになる。世界の物流は、2018 年に始まった米中貿易摩擦の影響により荷動きが低下した。その影響は、回復する間もなく 2019 年 12 月にコロナが発症した。2020 年は、世界的パンデミックにより入港制限や船員不足から輸送能力が著しく低下したことで、物価が上昇した（日本経済新聞, 2020）。この影響は、翌 2021 年に世界的なコンテナ不足[15]による物流網の混乱という形で現れ（NHK, 2021, 「コンテナ不足　世界の物流混乱 国連“世界経済の回復に影響も”」、NHK NEWS WEB 2021 年 11 月 23 日）、2022 年以降も継続した。2023 年、コロナの終息により物流が活況になると思われていたが、それまでコンテナ不足だった状況が一転し、空きコンテナが中国各地の大型コンテナ港に山積される状況が出始めた。李・楊・包（2023）によれば、2022 年 10 月以降、荷詰めされたコンテナよりも海外から出戻ってくる空きコンテナの方が多くなり、中国の主要コンテナ港において、空きコンテナの置き場不足が生じている。この件に関し、大手フォワダーの担当者は、記者の取材に「なかには、余っているコンテナ船に空きコンテナを満載し、沖合に係留しているケースもある」と答えている。この点に関しても、津守が指摘している通りで、世界競争力の評価基準に疑問を感じる。

この空きコンテナが過剰になる背景として、コンテナの作りすぎに加え、ロシアのウクライナ侵攻によるインフレが影響し、中国から欧米に向うコンテナ輸送需要が落ち込んだものと分析している（李・楊・包, 2023）。この空きコンテナ問題は、今後も顕著になっていくものと考える。特に世界の港湾別ランキング 1 位の上海港が、コンテナ取扱能力の限界に近づくため、2022 年に新たな港湾整備事業[16]が開始された。その状況に対し、世界ランキング 2 位のシンガポール港も、同年に新たな港湾整備を進めている。このように世界の競争力

15）コンテナ不足の根本的原因は、コロナによる港湾作業員の不足によって、コンテナ貨物が港湾に滞留してしまったことによるものである。本来、貨物の入ったコンテナは、通常輸入地に到着後 14 日以内にコンテナ内を空にして、発送元に返却する仕組みになっている。

を誇示するためにどの国も計画的に事業展開を進めている。そのため、今後より一層の競争が激化していくものと考えられる。

その一方で、問題視しなければならないことは、港そのものが貨物を生み出す機能を持っているわけでないという点である。貨物は、多種多様な産業から生産され、それを相手に出荷していく流れの集合体として現れたものである。つまり、各港で取り扱う貨物が、どのような種類のもので、それがどの程度なのか、それら貨物の特性が、当該港が保有する物流機能において対応可能であるかどうかが問題点かつ重要となる。つまり、港の集荷力を検討する場合、単に港が持つ物流機能のみを対象とすればよいと言えない（津守, 2011, p.243）。逆に港が持つ物流機能以上に、港の後背地の産業集積の状況がその港の集荷力を大きく担っているかを明確に認識しておく必要がある。

深澤・川原・岡（2021, p.54）は、「1980 年以降の日本では、日系企業の海外進出が進み、生産拠点が中国や ASEAN 地域へ徐々にシフトしたことで、日本の港湾に貨物が自然に集まらなくなったことが大きい」という。かつての日本は「ものづくり日本」といわれた時期に「貿易大国」などと世界から称されていた。一方、今の中国が、「世界の工場」といわれると同時に世界の港湾取扱量ランキングの上位に自国の港湾名が連なっていることからもわかるように「ものづくり」と「貿易」には関連性が強い。だからこそ当然の結果であり、韓国の第 3 次全国港湾基本計画の中で港湾背後地開発だけでなく、韓国国内の主要港湾と地域産業を組み合わせ、個々の競争力を向上させながら、国家全体としての競争力を底上げするといった戦略的計画の表れでもある。

このような国際競争に対する日本政府の対応としては、スーパー中枢港湾プロジェクト、国際戦略港湾政策を通じて、「港湾経営の民営化」を政策の目玉とした港湾法改正の動きを行っている。具体的には、2009 年に国際コンテナ戦略港湾政策に基づいて、阪神港・京浜港を選定した。それに伴い、とん税優遇・物流団地整備といった施策のもとに港湾の競争力を図ってきた。深澤・川原・岡（2021, p.55）は、「基幹航路船の京浜港寄港数増加など、一時的な結果は表れているものの、定期寄港は、実現しておらず、現時点では施策の効果が十分に表れているとは言い難い」と指摘している。

3.2. 日本の港湾に基幹航路船が寄港しない理由

上述してきたように世界の産業構造が根本的に変化し、世界の港湾整備がより激化してくれば、今現在大幅な遅れをとる日本の港湾に対し、小手先だけの対応でこの状況が劇的に改善するなど考えられない。日本への基幹航路船の寄港数が減少している状況を鑑みれば、日本の港湾整備に対する課題だけでなく、船社側にも寄港しない理由があるはずである。これに対する理由として、日本の港湾の水深の浅さが大きな要因として挙げられる。具体的事象として、世界最大級のコンテナ船（24,000TEU クラス）が 2023 年 6 月に日本（広島県呉市）で建造された[17]。

ところが、日本国内で、当該船舶（全長 399.95m、積載能力 24,136TEU、必要喫水 18.15m）

16）世界第 2 位のシンガポール港は、2022 年 9 月 1 日に新コンテナ埠頭「トゥアス港」の 4 期計画のうち最初の 1 期目 3 バースが稼働した。世界第 1 位の上海港は、新埠頭建設をしなければ、シンガポール港に 1 位の地位を明け渡さなければならない。そこには、近いうちにコンテナ取扱能力の限界に到達するといった理由からである。これを見越して、上海港を運営する上海国際港務集団は、2022 年 6 月にコンテナ取扱が中心となる洋山深水港に 550 億元（約 1 兆 1059 億円）を投じて新たなコンテナ埠頭と関連施設を建設すると発表した（李・楊・包, 2023）。

を受け入れる港が水深の関係から存在しないため、主として中国の寧波・廈門、シンガポール、ロッテルダムやハンブルグ、アントワープを結ぶ航路でアジアとヨーロッパを往復して貨物輸送をするという（深水, 2023)。水深については、大坂（2020）が指摘するように世界最大級のコンテナ船を受け入れるために水深 18m以上が必要である。日本国内で水深 18mを保有する港は横浜港のみで[18)]、18m以上の水深を保有する港が日本にない。世界各国の主要港が大型船対応に向けた港湾整備に動く中、日本の港湾整備の対応が遅れていると言わざるを得ない。

港を利用する船社側の立場から考えれば、往復航路において運搬船の荷積みスペースを空状態で運航するよりも、収益面から貨物を満載して運航したいと考えるのが自然である。現状は、上述してきたように地方からの貨物を主要港湾に集約できない日本の港湾の実情から輸出される貨物量（製品)、輸入量が共に少なく、地方港湾が独自に韓国・釜山とのフィーダー運航をし始めた経緯がある。この状況で船社は、日本に寄港したいと思わない。それよりも、釜山港等の近隣コンテナハブ港に貨物をトランシップさせ、それを目的地へ輸送した方が経費的に得策だと船社が考えても不思議ではない。結果として、日本がアジアのトランシップ港の地位にない。さらには、図 5 で示しているように船体を大型化することで 1 回当たりの輸送量を増加させ、船舶輸送回数を減少させていく傾向も見て取れるため、船社が大型船を建造している。それに伴い、大型船が寄港可能な上海港、シンガポール港や釜山港等を中心とする東北アジア周辺の港湾におけるコンテナ取扱量の比率が上昇しているものといえる。一旦、貨物の流れが構築されてしまえば、容易に変更などできない。

3.3. 日本と韓国の港湾政策に対する取り組み姿勢の違い

日本の現状は、港湾政策の立て直しに向け、一点集中型の政策展開をしている一方で地方港湾に対する政策が見えてこない。そこには、中央政府から地方への権限移譲が続いているが、公共施設への投資が進んでいない状況もある。さらに、荷主の国内輸送時間重視の考え[19)]から、国際コンテナ戦略港湾などの拠点港に荷物の集約が難しくなってきている。国は、この点に関する背後地や道路網などの整備に関する付帯政策を打ってこなかったことなどが複合的に作用し、結果として現状を生み出しているものと考えられる。現実問題として、日本の港湾が他国からの基幹航路の寄港地になっていないため、近隣のコンテナハブ港から貨物をフィーダーしている率が高くなっている。これは、前述したことを考えれば当然のことであり、産業衰退の連鎖現象として捉えなければならない。つまり、貨物輸送のリードタイムが長期化してしまい、競争力が低下してしまうリスクが生じてしまう（深澤・川原・ 岡, 2021, p.55)。これは、日本の製造業などで顕著に表れる事象である。このような日本の状況に反して、韓国は飛躍的に貨物の取扱量を増やしている（表 1 および図 3 参照)。表 2 から釜山港の貨物取扱量が 2009 年より上昇し、日本の貨物取扱量よりも著しく増加している。つまり、コンテナハブ港として成長している釜山港に基幹航路船が寄港する数が確実に伸び

17）2023 年 6 月 2 日に広島県呉市にあるジャパンマリンユナイテッド（JMU）呉事業所で世界最大級のコンテナ船「ONE INNOVATION」が竣工した（深水、2023)。この時点で、世界一のコンテナ船である。船体の大きさは、24,000TEU クラスで、船長 399.95mである。

18）スーパー中枢港湾に指定された港の水深は、京築港：東京港 16m・川崎港 14m・横浜港 16-18m、阪神港：神戸港 16m・大阪港 16m、伊勢湾：名古屋港 16m・四日市港 12mである。

19）木俣・竹林 （2019, p.40）

ている結果であり、日本の世界ランキングを著しく下げる要因にもなっている(表 4 参照)。

この時の社会情勢として、2009 年にリーマンショックが発生し、その翌年に世界同時不況が起こっている。これらの出来事を契機に釜山港での貨物取扱量が上昇している。その背景として、荷主が輸送サービス（輸送費用・輸送時間・輸送品質）に求めていることから船社が寄港地を選別したものと推察できる(木俣・竹林, 2019, p.40, p.45)。

釜山港が、この時代の流れにタイミングよく乗れたのも 1990 年代から国策によりコンテナバースの拡充や整備、港湾の入港コスト優遇、港湾周辺地の開発による外国企業誘致を実施、コンテナ船の呼び込みを図ってきた成果が数字として表れたからに他ならない。このように韓国が、国際競争力を継続的に維持し、世界的地位を確立していったのも、計画実施期間の途中であっても、臨機応変に適宜計画変更（第 3 次全国港湾基本計画修正）をしてきたからである。また、韓国では、外貿だけに頼らず、国内生産力を高めるための努力として、物流費削減をはじめとする経費の効率化を図っている。具体的には、港湾そのものの高度化と効率性向上として、韓国の主要 8 港（釜山港、仁川港、光陽港、平沢・唐津港、蔚山港、浦項港、木浦港、馬山港）に背後団地を造成する計画を進めている。

このような政策は、日本が行う「拠点重視の政策」実施と内容的に大きく異なる。つまり、韓国は産業発展状況に伴い、港湾を中心にそれに付随する政策実施を行っている。日本には、日本ならではのよさがある。世界がグローバル化した社会になりつつある現状を鑑みれば、従来型のような対応の仕方では時代のニーズに対応しきれていない時期に差し掛かっているといえる。

4. まとめ

IMD（国際経営開発研究所）が行う「世界競争力年鑑」によれば、世界における日本の競争力が、年々衰退しているという。その評価軸に海上コンテナ貨物の取扱量（TEU）を評価軸に据えているため、議論の対象が海上コンテナ貨物の取扱量（TEU）になってしまう。そのような海上コンテナ貨物の取扱は、船舶の大型化、海上コンテナ貨物の輸送技術の高度化

表 4：世界の港湾別ランキング（釜山港＋日本のみ TEU 換算）

年	順位	国内 1 位	国内 2 位	国内 3 位	国内 4 位	国内 5 位	国内 6 位
1980 年	16 位：釜山港	4 位：神戸港	13 位：横浜港	18 位：東京港	39 位：大阪港	46 位：名古屋港	92 位：北九州港
2000 年	3 位：釜山港	8 位：名古屋港	15 位：横浜港	22 位：大阪港	24 位：北九州港	28 位：神戸港	29 位：東京港
2005 年	5 位：釜山港	11 位：名古屋港	17 位：千葉港	22 位：横浜港	29 位：北九州港	31 位：大阪港	34 位：東京港
2010 年	5 位：釜山港	25 位：東京港	36 位：横浜港	47 位：名古屋港	49 位：神戸港		
2015 年	6 位：釜山港	19 位：名古屋港	24 位：千葉港	34 位：横浜港	40 位：北九州港	42 位：神戸港	45 位：東京港
2020 年	7 位：釜山港	24 位：名古屋港	32 位：千葉港	47 位：横浜港	49 位：北九州港		
2021 年	7 位：釜山港	23 位：京浜港	41 位：東京港	72 位：横浜港	73 位：神戸港	77 位：名古屋港	82 位：大阪港

出典：国土交通省ホームページ（世界の港湾別コンテナ取扱個数ランキング）より筆者作成

などの理由から世界の港湾整備を大きく発展させている。かつて「貿易大国」などと称されていた日本は、今や世界の港湾別ランキングにおいて、上位クラスに入らない。このような状況に陥ったのは、日本の港湾政策が努力を怠っていたわけではない。港湾政策に対する日本政府の対応は、日本が国際競争に打ち勝つために一点集中型（スーパー中枢港湾プロジェクトや国際戦略港湾政策）の政策を行ったが、世界の動き、船舶の大型化などの諸条件とマッチングせず、結果として日本の港湾に世界最大級の海上コンテナ貨物船が寄港できない状況のままである。

近年の日本は、中央政府から地方に権限を委譲されているが、公共施設への投資が進んでいない状況がある。そこには、財政的に地方行政機関が単独で動くことが難しく、中途半端な立ち振る舞いしかできない状況が透けて見える。荷主側から、この状況を見てみれば、近年の国内輸送時間短縮の動きから主要港湾への輸送ができない現実がある。その回避方策が、地方港湾からコンテナハブ港の役割を担う釜山港へ直接フィーダーすることである。この現実を捉えるならば、世界の船舶貨物の現状（基幹航路の寄港地に日本が外されている)、釜山港などアジア周辺のコンテナハブ港との関係（フィーダー化してしまった現状)、コンテナ貨物を生み出せない状況（地方産業発展と連動した取組と港湾背後地の開発が進まない現状）といった難しい現実がある。

韓国の政策は、地方産業発展と国全体の動きに連動させた政策策定をしている。日本の政策は、集中開発型の拠点港活況政策をとってきたが、国内輸送時間短縮につながる政策を抱き合わせに行わなかったことから形・数字として成果が出てきていない。つまり、世界の動きを見据えて重要拠点港の拡充を行い、地方の特徴ある産業を活かす政策をとった韓国と、地方の産業、国内輸送時間短縮のことまで考慮せずに拠点重視の政策をとった日本の動き方の違いが結果として顕著に現れたに他ならない。今や日本の港は、水深が浅いため船舶の大型化していく状況にあるため基幹航路船の誘致が難しい。日本と他国との輸送状況を鑑みれば、フィーダー輸送を充実させる傾向にある。そこには、国内輸送時間短縮から国際航路の基幹港までの輸送を拒む荷主の存在もある。これらの状況から、地方の港を活況させていくことが当面の課題だと判断される。

本稿では、世界の物流状況から日本と韓国の関係、日本の現状について述べたが、地方港湾の状況にまで触れることができなかった。地方がフィーダー輸送を促進させている状況からわかるように地方行政だけでなく、地元産業界を含め誰もが必死に知恵を絞っている様が見て取れる。このような観点からも、地方港湾に関して今後さらなる検討が必要である。

引用・参考文献

Kabutan by MINKUBU（2018）「【特集】検証・開運株逆張り、“歴史的合理化”で見えてきた『10 年目の復活』＜株探トップ特集＞」、市場ニュース、Kabutan by MINKUBU、https:/ /kabutan.jp/news/marketnews/?b=n201805290583#:~:text=リーマン・ショックにより、それまで増加していたコンテナ貨物輸送量は 09 年に減少。%2010 年以降は輸送量が前年比増加に転じたものの成長率は鈍化した。その一方で、運航コスト削減を目指した船の大型化が進み船腹量が拡大。%20 需給のバランス悪化が続き、市況が悪化した。（最終アクセス日：2025 年 1 月 5 日）

해양수산부 통계시스템[海洋水産部統計システム]（2023)、「국적 외항선사 항로별 컨테이너 취급 현황［国籍 外航船 航路別 コンテナ取扱の現状］」、https://www.mof.go.kr/statPortal/cate/partStat.do（最終アクセス日：2023 年 7 月 1 日）

石倉智樹・丹生清輝（2003)、「我が国の国際航空貨物輸送における課題と空港政策戦略」、土木計画学研究・講演集、土木工学会、http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/200306_no27/pdf/52.pdf（最終アクセス日：2023 年 7 月 1 日）
大坂直樹（2020)、「日本の船と港がどうにもパッとしない構造要因　海運業界は集約進み造船業界も再編待ったなし」、東洋経済 ONLINE、2020 年 2 月 17 日、https://toyokeizai.net/articles/-/330669?page=2（最終アクセス日：2023 年 7 月 1 日）
片山敏宏（2016)、「国際コンテナ戦略港湾政策の取組状況と今後の展開」、『運輸政策研究』 Vol.19 No.2、一般財団法人 運輸総合研究所、pp.56-62
木俣順・竹林幹雄（2019）「日本荷主の海上輸送ニーズの変化に関する考察 －我が国発東南アジア向け輸出コンテナ貨物を対象とした 3 時点比較分析－」、『運輸政策研究』Vol.21、pp.39-47
経済産業省（2021)、「令和 2 年度版 通商白書：第 2 章 第 3 節 日本のグローバリゼーションの歴史」、経済産業省、p.278
国土交通省（2010)、「スーパー中枢港湾政策の総括と国際コンテナ戦略港湾の目指すべき姿、国土交通省ホームページ「報道・広報＞報道発表資料（添付資料-1） 平成 22 年 2 月 12 日」、https://www.mlit.go.jp/report/press/port02_hh_000020.html(最終アクセス日:2023 年 7 月 1 日）
国土交通省（2019a)、「国際コンテナ戦略港湾政策推進委員会　最終とりまとめフォローアップ　平成 31 年 3 月」、国土交通省 国際コンテナ戦略港湾政策推進委員会
国土交通省（2019b)、「我が国の国際海上コンテナ物流動向～全国輸出入コンテナ貨物物流調査結果からみた 5 つのポイント～」、国土交通省港湾局計画課
国土交通省（2022)、「2021 年の国内港湾のコンテナ取扱貨物量（速報値）：港湾別コンテナ取扱貨物量一覧、国土交通省ホームページ「報道・広報＞報道発表資料（添付資料） 令和 4 年 9 月 30 日」、https://www.mlit.go.jp/report/press/port03_hh_000095.html(最終アクセス日:2023 年 7 月 1 日）
近藤智哉（2010)、「港湾政策の経緯と今後の課題～国際コンテナ戦略港湾への展望～」、『立法と調査』No.310、pp.41-55
津守貴之(2011)、「日本のコンテナ港湾の競争力再考」、岡山大学経済学学会雑誌 42(4)、岡山大学、pp.244-264
田育誠（2021）「21 世紀国際貿易港湾発展の研究（十三）」、『神奈川大学国際経営論集 第 62 号』、神奈川大学経営学部、pp31-49
日本海事広報協会（2022)、「日本の海運 SIPPING NOW 2022-2023」、財団法人 日本海事広報協会
日本海事新聞（2020)、「韓国海洋水産部、釜山第 2 新港 22 年着工。30 年までの港湾政策発表」、日本海事新聞 2020 年 11 月 24 日
日本経済新聞（2020)、「物流、世界で停滞　海運・航空の輸送能力 3 割減も」、日本経済新聞 2020 年 5 月 11 日、https://www.nikkei.com/article/DGXMZO58949060R10C20A5EA2000/（最終アクセス日：2023 年 7 月 1 日）
日本郵船調査グループ（2022)、「世界のコンテナ輸送と就航状況 2022 年版」、一般社団法人 日本海運集会所
韓錘吉（2011)、「韓国の第 3 次全国港湾基本計画（2011-2020)」、日本海事新聞 2011 年 11 月 1 日
深澤瑛介・川原竜馬・岡昴一郎（2021)、「日本のコンテナ港湾について」、『ファイナンス』 令和 3 年 7 月号、財務省、pp.54-55
深水千翔（2023)、「なんというデカさ…日本で竣工『世界最大級のコンテナ船』デカすぎて日本に帰ってこれません！？」、乗りものニュース 2023 年 6 月 5 日 18:12、乗りものニュース、https://news.yahoo.co.jp/articles/26bc70b3d6d4af26ae30a18f71b0eab2d8097568?page=1(最終アクセス日：2023 年 7 月 1 日）
福山秀夫（2021)、「日本の欧州行き物流と韓国港湾」、日本海事新聞 2021 年 12 月 23 日
松田琢磨（2023)、「東京港で 46 位『日本の港湾』地位低下が激しい背景 コンテナ貨物取扱量は増加、でも世界順位は低迷」、東洋経済 ONLINE、4 月 17 日、https://toyokeizai.net/articles/-/665840?page=3（最終アクセス日：2023 年 7 月 1 日）
ムーバーズドットコム（2022）「2023 年コンテナ船最大船型トップ 10」、https://moverdb.com/ja/top-10-largest-container-ships-in-2022/（最終アクセス日：2023 年 7 月 1 日）
李貞和（2012）「第 6 章　釜山港の現状と展望」: 池上寛編『アジアにおける海上輸送と主要港湾の現状』調査研究報告書, アジア経済研究所, pp.87-100
李蓉茜・楊錦曦・包志明（2023）「中国の港に『空きコンテナの山』が積みあがる事情　コロナ禍での不足から一転、深刻な供給過剰に」、東洋経済 ONLINE 2023 年 2 月 27 日、東洋経済、https://toyokeizai.net/articles/-/653722（最終アクセス日：2023 年 7 月 1 日）