

MEMOIRS
OF
HOKKAIDO POLYTECHNIC COLLEGE

No. 40
February, 2025

CONTENTS

Original Articles

- 1. Parameter Tuning of Whale Optimization Algorithm Using Taguchi Orthogonal Array Michio INNAMI 1
- 2. Survey of Kesen Carpenter Kikuzo Hanawa and the Construction Work of the Main Hall of the Hokkaji Temple
—About Building Work Design Documents and Building Work Specifications—
..... Yoshihiro MOROSAWA, Yuki YOSHIMURA, Yousuke MIKAMI,
Kazushi OKAMOTO, Yuki ZAIKE, Koutarou NISHIMURA and Nozomu MIURA 11

Study Notes

- 1. Development of trial class materials
—Construction of a method to apply to practical training tasks at the Polytechnic University (Part 1)—
..... Fumiki ISO 17
- 2. Development of Training Bridging Theory and Practice in Power Electronics
..... Kazutoshi SATO 21
- 3. Problems with Shear Beam Finite Element Models derived from Variational Method based on the Energy Principle
..... Toshinaga WADA, Keiichi INOUE, Michio INNAMI and Yoshihiro MOROSAWA 25

Published by
HOKKAIDO POLYTECHNIC COLLEGE
Zenibako 3-190, Otaru, 047-0292 Japan

北海道職業能力開発大学校
紀 要

第 40 号
令和 7 年 2 月

目 次

研究論文

- 1. Parameter Tuning of Whale Optimization Algorithm Using Taguchi Orthogonal Array 印南 信男 1
- 2. 気仙大工・花輪喜久蔵と北海寺本堂建築工事の調査
—建築工事設計書・建築工事仕様書について—
..... 諸澤 良浩・吉村 雄気・三上 耀介・岡本 和士・在家 優輝・
西村 光太郎・三浦 望 11

研究ノート

- 1. 体験授業教材の開発
—学卒者訓練で実施する実習課題への適用方法の構築（その1）—
..... 磯 史樹 17
- 2. パワーエレクトロニクス科目における理論と実習の橋渡し訓練の開発
..... 佐藤 和利 21
- 3. エネルギー原理に基づく変分法から導かれたせん断はり有限要素モデルの問題点
..... 和田 俊良・井上 圭一・印南 信男・諸澤 良浩 25

北海道職業能力開発大学校紀要

第四〇号

二〇二五年二月

北海道職業能力開発大学校

Parameter Tuning of Whale Optimization Algorithm Using Taguchi Orthogonal Array

Michio INNAMI*¹

(Received **** **, 2024)

Metaheuristics are methods that give quasi-solutions to optimization problems not limited to particular classes. Swarm intelligence is a sort of metaheuristic. A swarm is consisted of numerous individuals which behave according to simple rules and share information among them. The search processes are conducted efficiently as a swarm. Many methods have been proposed so far, e.g. Particle Swarm Optimization and Artificial Bee Colony. Whale Optimization Algorithm (WOA), inspired by the foraging behavior of humpback whales, also belongs to swarm intelligence. It is reported that its search performance is excellent especially for functions with a large number of dimension. It has only a few parameters to determine, which affect the performance. Consequently it is important to set them properly. This study treats parameter tuning of WOA. In addition to above parameters, several coefficients as constants used in WOA are also taken into consideration for optimizing. If there are many variables required to be determined, it complicates the numerical experiments of all combinations of the parameters. Thus the Taguchi orthogonal array is employed that allows reducing the number of experiments substantially. Four benchmark functions, existing all combination of either unimodal or multimodal and either separable or non-separable, are selected for parameter tuning. The results showed that the combination of the population size and the number of iterations affects largely the search performance. WOA yielded the best capability when the population size is 5 and the number of iterations is 500 among the specified levels. The other parameters and constants made no clear significant differences.

1. Introduction

Mathematical programming¹⁾ is a method for solving optimization problems, providing exact solutions. However, it is only applicable to limited problem classes, and is not practical for problems where the

amount of computation increases exponentially as the scale increases.

Another approach to optimizing solutions is metaheuristics²⁾. They are inspired by various natural phenomena. The search processes are carried

*1 Department of Production Electronic and Information System Technology

out through a kind of trial and error iterations. Although it is almost impossible to find exact solutions with metaheuristics, the problems are not limited to specific classes. Moreover, practical approximate solutions can be yielded with much less computational burden.

In the category of metaheuristics, there exist simple algorithms, e.g. Mountain Climbing Method, Annealing Method³⁾ and Tabu Search (TS)⁴⁾. Another type is called evolutionary computation. The latter is further classified into evolutionary algorithms and swarm intelligence algorithms. One of the most well-known evolutionary algorithms is Genetic Algorithm (GA)⁵⁾, which imitates the evolution of genes. Swarm intelligence is a technique for exploring optimal solutions as a swarm, in which each individual behaves according to simple rules and shares information among the others. Particle Swarm Optimization (PSO)⁶⁾ is a typical swarm intelligence algorithm inspired by the behavior of a swarm of birds or fish. Artificial Bee Colony (ABC)⁷⁾ mimics the foraging behavior of bees. Besides, there exist Artificial Immune System (AIS)⁸⁾, Ant Colony Optimization (ACO)⁹⁾, Cuckoo Search (CS), and many more.

Whale Optimization Algorithm (WOA)¹⁰⁾ also belongs to swarm intelligence, proposed by Mirjalili and Lewis in 2016. It was inspired by the foraging behavior of humpback whales. It is reported that WOA is especially excellent in searching for a global extreme value of a function with a large number of dimension¹¹⁾. This algorithm has only a few parameters required to be configured, whereas there are also several coefficients as constants. If the parameters are not properly determined, the algorithm cannot perform sufficient capability.

This study attempts to achieve parameter tuning of WOA to optimize its search performance for several benchmark functions. The constants are also applied to be tuned. An orthogonal array based on the Taguchi method¹²⁾ is employed to efficiently run numerical experiments.

The rest of this paper is structured as follows. The

next section overviews WOA. Section 3 describes problem settings, while Section 4 presents optimization results and discussion. Finally Section 5 concludes the paper.

2. Whale optimization algorithm

Humpback whales have a unique method of foraging prey, called bubble-net feeding¹³⁾. They work in groups, searching for schools of krill or fish near the surface of the ocean. They first dive to a depth of 12 meters approximately, then they release bubble in a spiral shape and swim up to catch up with their prey.

WOA mimics their behavior. An objective function is to be prepared, for evaluating the excellence of the solution. Solving an optimization problem is to find a set of design variables that makes the value of the objective function, called fitness value, maximum or minimum. The position vector $\vec{X}(t)$ of each individual that simulates an whale in a swarm represents a candidate solution for design variables. The argument t means the number of iterations at the point. The position vectors of all the individuals are randomly placed in the search space as initial values.

In each iteration, the individuals are updated as follows :

1. The coefficient vectors Eqs. (1) and (2) are determined by an uniform random vector \vec{r} in the range of $[0, 1]$.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (1)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r} \quad (2)$$

where \vec{a} has an initial value of 2, decreasing linearly to zero at the final iteration. \vec{a} tends to decrease the value of $|\vec{A}|$ as the iteration proceeds. The operator “ \cdot ” denotes an element-by-element multiplication.

2. Each individual is updated its position vector to $\vec{X}(t+1)$ described as below, depending on the values of p and \vec{A} , where p is a uniform random number in the range $[0, 1]$.

Table 1 Benchmark functions

Function	Property	Definition	Domain ($i = 1, \dots, n$)	Optimal value
Sphere	U S	$f_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$ x_i \leq 5.12$	$f_1(0, \dots, 0) = 0$
Brown	U N	$f_2(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n-1} (x_i^2)^{(x_{i+1}^2+1)} + (x_{i+1}^2)^{(x_i^2+1)}$	$-1 \leq x_i \leq 4$	$f_2(0, \dots, 0) = 0$
Alpine 1	M S	$f_3(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n x_i \sin x_i + 0.1x_i $	$ x_i \leq 10$	$f_3(0, \dots, 0) = 0$
Salomon	M N	$f_4(\mathbf{x}) = 1 - \cos\left(2\pi\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) + 0.1\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$	$ x_i \leq 100$	$f_4(0, \dots, 0) = 0$

U: Unimodal M: Multimodal S: Separable N: Non-separable

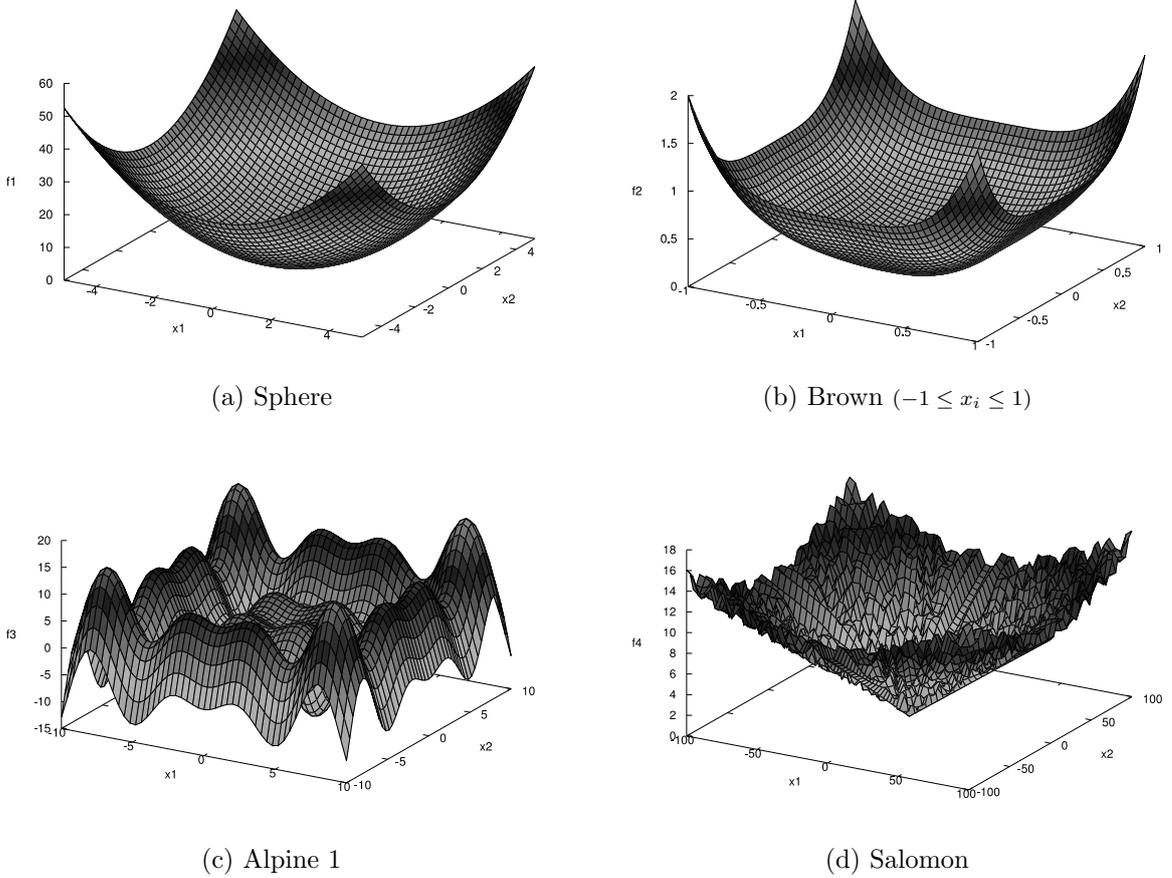


Fig. 1 Shapes of benchmark functions ($n = 2$)

- If $p < 0.5$ and $|\vec{A}| < 1$

This phase imitates encircling prey. Each individual searches in the vicinity of an individual with most outstanding fitness value.

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (3)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4)$$

$\vec{X}^*(t)$ is the position vector of an individual which has the best fitness value in the t -th iteration.

- If $p < 0.5$ and $|\vec{A}| \geq 1$

This is an *exploration* phase where each individ-

ual searches in the vast search space.

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_{\text{rand}} - \vec{X}(t) \right| \quad (5)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{\text{rand}} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (6)$$

\vec{X}_{rand} is the position vector of an individual randomly chosen in the swarm.

- If $p \geq 0.5$

This is an *exploitation* phase that mimics the whales spiraling to chase prey.

$$\vec{D}' = \left| \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (7)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (8)$$

b is a coefficient specifying the shape of the logarithmic spiral and l is a uniform random number in the range $[-1, 1]$.

3. Above processes (1 and 2) are repeated until the final iteration is reached.

3. Problem settings

3.1 Selection of benchmark functions

Functions can be classified according to their characteristics. There exist unimodal and multimodal functions. The former have only one extreme value, whereas the latter have more than one. In general, the latter are more difficult to search for the best solutions because they tend to fall into local optima. There are also two types of functions whether their variables are separable or not. The latter are harder to solve in most cases.

Table 2 Factors and their levels

Factor	Level				
	1	2	3	4	5
A Population size	5	10	20	50	100
Number of iterations	500	250	125	50	25
B a_0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
C P	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
D b	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
E l_{max}	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4

Four benchmark functions¹⁴⁾ are selected as objective functions for parameter tuning of WOA as shown in Table 1, all having a global minimum in their domains. All combinations of unimodal or multimodal, and separable or non-separable, are prepared. Sphere and Brown functions are unimodal, while Alpine 1 and Salomon functions are multimodal. In terms of variable separation, Sphere and Alpine 1 are separable, Brown and Salomon are non-separable. The shape of each function with two-dimensions is depicted in Fig. 1. Brown function is shown in domain limited to $-1 \leq x_i \leq 1$ ($i = 1, 2$) in the figure, because the function value increases rapidly when x_i exceeds 1, making it difficult to grasp the shape around the global optimum.

Table 3 Orthogonal array $L_{25}(5^5)$

Exp. No.	Level				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	3	4	5
3	1	3	5	2	4
4	1	4	2	5	3
5	1	5	4	3	2
6	2	1	5	4	3
7	2	2	2	2	2
8	2	3	4	5	1
9	2	4	1	3	5
10	2	5	3	1	4
11	3	1	4	2	5
12	3	2	1	5	4
13	3	3	3	3	3
14	3	4	5	1	2
15	3	5	2	4	1
16	4	1	3	5	2
17	4	2	5	3	1
18	4	3	2	1	5
19	4	4	4	4	4
20	4	5	1	2	3
21	5	1	2	3	4
22	5	2	4	1	3
23	5	3	1	4	2
24	5	4	3	2	1
25	5	5	5	5	5

Table 4 Experimental results with the orthogonal array

Exp. No.	Level					Median fitness value			
	A	B	C	D	E	Sphere	Brown	Alpine 1	Salomon
1	1	1	1	1	1	2.514E-24	8.395E-24	9.322E-27	9.987E-02
2	1	2	3	4	5	9.281E-49	5.350E-57	5.210E-35	1.386E-24
3	1	3	5	2	4	1.804E-38	1.338E-41	3.197E-27	3.733E-16
4	1	4	2	5	3	2.765E-52	8.771E-56	3.859E-38	1.456E-26
5	1	5	4	3	2	2.190E-47	2.666E-50	4.507E-30	1.140E-22
6	2	1	5	4	3	1.449E-24	1.047E-24	3.613E-17	1.405E-10
7	2	2	2	2	2	8.622E-31	3.070E-33	9.620E-23	2.236E-13
8	2	3	4	5	1	2.706E-24	2.915E-28	1.732E-18	5.249E-13
9	2	4	1	3	5	9.626E-32	6.074E-33	7.320E-25	1.017E-13
10	2	5	3	1	4	4.426E-27	1.614E-25	2.768E-18	5.439E-12
11	3	1	4	2	5	8.343E-16	3.336E-15	1.155E-09	1.294E-05
12	3	2	1	5	4	1.013E-21	2.456E-21	7.372E-16	9.987E-02
13	3	3	3	3	3	2.174E-18	7.939E-21	1.699E-11	9.987E-02
14	3	4	5	1	2	7.152E-15	7.260E-16	4.295E-09	9.987E-02
15	3	5	2	4	1	2.232E-20	1.071E-21	7.820E-14	9.987E-02
16	4	1	3	5	2	4.259E-09	3.975E-10	6.878E-06	9.987E-02
17	4	2	5	3	1	3.476E-07	1.832E-08	1.628E-04	9.987E-02
18	4	3	2	1	5	1.087E-07	1.625E-08	6.888E-05	1.999E-01
19	4	4	4	4	4	2.414E-08	5.705E-09	8.095E-05	9.987E-02
20	4	5	1	2	3	5.954E-08	2.037E-08	8.898E-05	2.999E-01
21	5	1	2	3	4	3.314E-04	1.010E-04	1.349E-02	3.999E-01
22	5	2	4	1	3	8.996E-04	8.942E-05	3.863E-02	4.999E-01
23	5	3	1	4	2	2.683E-04	7.712E-05	2.344E-02	3.999E-01
24	5	4	3	2	1	5.785E-04	9.082E-05	3.218E-02	3.999E-01
25	5	5	5	5	5	1.884E-04	7.194E-06	6.289E-03	2.999E-01

3.2 Parameter settings

Most optimization algorithms have several parameters required to be determined properly. Setting these values is significant because they affect the search performance. However, there are no distinct criteria of determining the values. In practice, they are thought to be in most cases determined by trial and error.

WOA algorithm has only a few parameters to be determined : population size, the number of iterations and b in Eq. (8).

This study attempts to determine the proper parameter values for the optimal performance of WOA. It is noted that in WOA, a in Eq. (1) is set to 2 as initial value, l in Eq. (8) is an uniform random number

in the range $[-1, 1]$, and the condition for selecting Eqs. (7) and (8) is $p \geq 0.5$. Here, let the initial value of a to a_0 , l to in the range of $[-l_{\max}, l_{\max}]$ and $p \geq P$ instead of $p \geq 0.5$. Above coefficients, i.e. a_0 , l_{\max} and P , are also tried to be tuned. Each factor, namely parameter is assigned five levels as shown in Table 2. The levels are determined as follows : As for factor A, the sets of population size and the number of iteration are selected such that their products are 2500, of which the computational costs are considered to be the same among all the levels. Since a_0 and P are originally set to 2.0 and 0.5, respectively, smaller and larger values are added as their levels. For b and l_{\max} , the intermediate values of the levels are both set to 1.0.

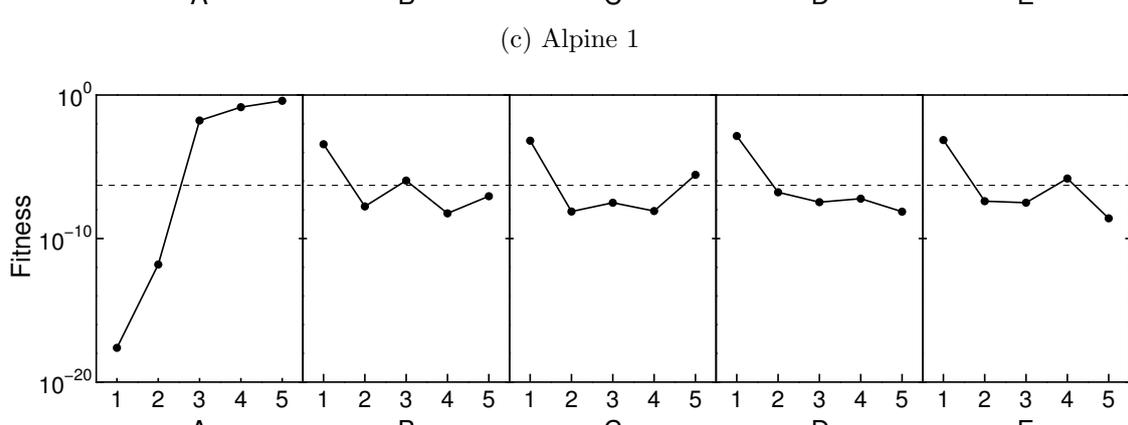
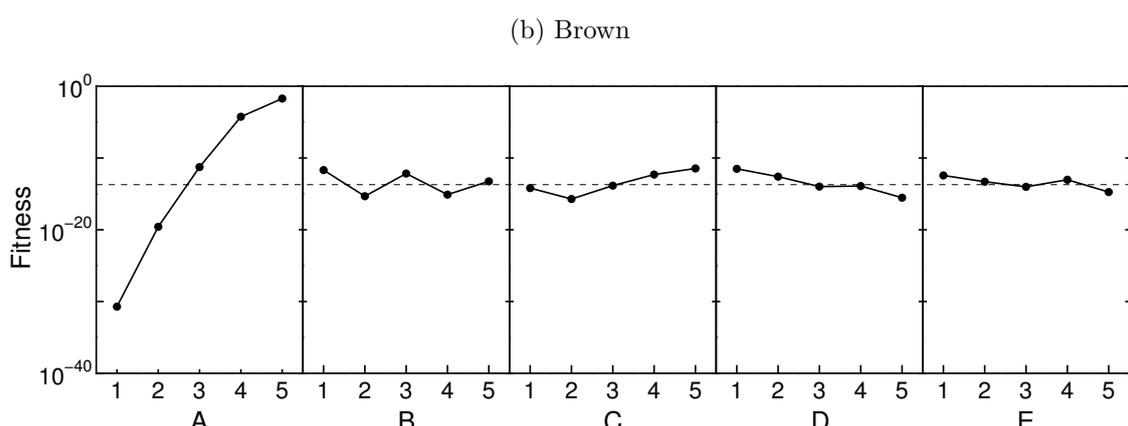
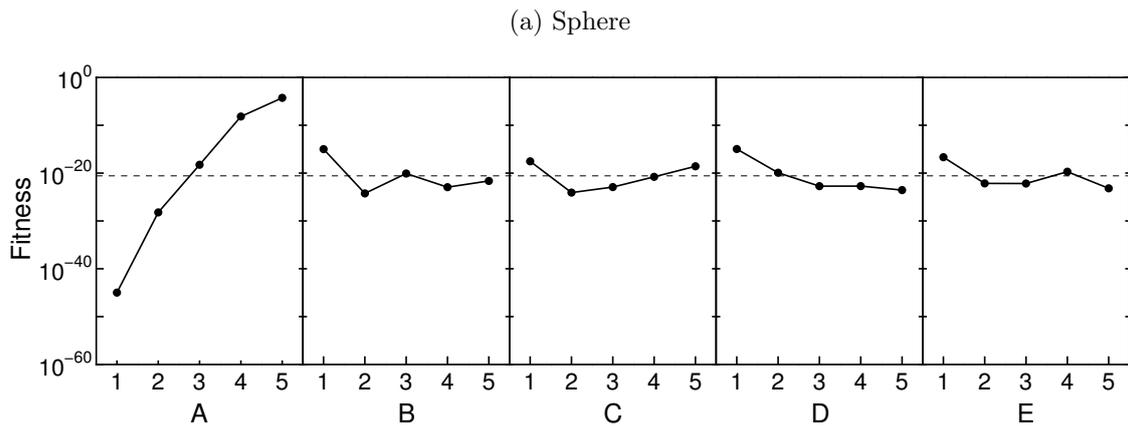
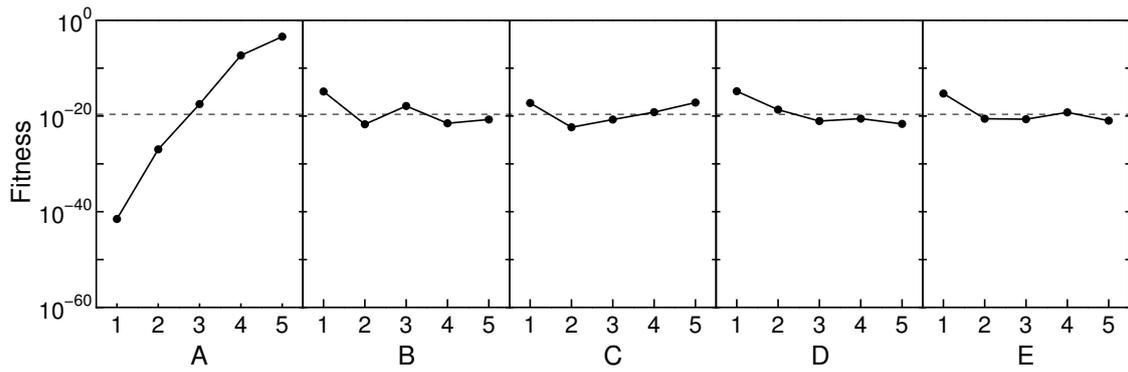


Fig. 2 Main effect plots of the factors

The number of the combinations of all levels is $5^5 = 3125$, which is not practical to conduct all the experiments. The orthogonal array based on the Taguchi method leads to reducing experimental operations. If each factor is considered independent of the others, the interactions can be ignored. In this situation, an orthogonal array allows the application of minimal combinations. For each level of any column, i.e. factor, all levels of the other columns appear the same number of times. This is an orthogonal relationship. Thus for a certain factor, the effects of the other ones cancel out because they are averaged. By analysis of variance, the results obtained from the orthogonal array lead to the optimal levels.

According to the orthogonal array $L_{25}(5^5)$ shown in Table 3, the combinations of levels addressed in this study are assigned and are reduced to 25 types of experiments. Here, each experiment is repeated 15 times. The interactions between the factors are not considered. The dimension of the benchmark functions is set to $n = 30$.

4. Results and Discussion

The experiments were conducted according to the orthogonal array for four benchmark functions. Table 4 shows the medians of the fitness values obtained in each experiment. Fig. 2 depicts the main effect plots which indicate the geometric mean of each level of each factor derived from Table 4, to show the effect of the each level of the factor, excluding the effects of the other factors. A, B, \dots , E and 1, 2, \dots , 5 denote the factors and the levels, respectively. The dashed lines indicate the geometric mean of each factor. The information on analysis of variance for each function on logarithm of the data is summarized in Table 5. Df, Sum sq, Mean sq, and Res stand for Degree of freedom, Sum of squares, Mean square, and Residuals, respectively. The degree of freedom for each factor is four, that means subtraction of one from the number of the levels. The F -value indicates the amount of difference between the levels, while the P -value corresponds to the F -value. If P -value is equal to or less than 0.05, the difference is significant at

5% level¹⁵⁾.

Above results represent that the combination of the population size and the number of iterations makes the differences significant in all the functions, and that the values of 5 and 500, respectively, show the best search performance among the specified levels.

In WOA, the update processes are more diverse than other swarm intelligence algorithms, e.g. PSO

Table 5 Information on analysis of variance

(a) Sphere					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	P
A	4	4757	1189.3	87.575	0.00038
B	4	172	42.9	3.159	0.14563
C	4	99	24.8	1.829	0.28652
D	4	153	38.2	2.812	0.17031
E	4	111	27.7	2.043	0.25302
Res	4	54	13.6		
(b) Brown					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	P
A	4	5398	1349.5	93.792	0.000332
B	4	256	64.1	4.453	0.088564
C	4	154	38.6	2.680	0.181418
D	4	249	62.2	4.324	0.092600
E	4	138	34.5	2.399	0.208701
Res	4	58	14.4		
(c) Alpine 1					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	P
A	4	2813.0	703.2	733.419	5.56E-06
B	4	55.1	13.8	14.373	0.0121
C	4	55.5	13.9	14.460	0.0120
D	4	46.6	11.7	12.160	0.0164
E	4	16.0	4.0	4.181	0.0974
Res	4	3.8	1.0		
(d) Salomon					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	P
A	4	1215.6	303.90	14.436	0.012
B	4	73.4	18.34	0.871	0.552
C	4	90.1	22.52	1.069	0.475
D	4	87.4	21.85	1.038	0.486
E	4	89.9	22.46	1.067	0.476
Res	4	84.2	21.05		

Table 6 Optimal level of each factor

Factor	Sphere	Brown	Alpine1	Salomon
A Pop. size	5	5	5	5
Iteration	500	500	500	500
B a_0	1.5	1.5	1.5	2.5
C P	0.4	0.4	0.4	0.4
D b	2.0	2.0	2.0	2.0
E l_{\max}	1.4	1.4	1.4	1.4

and ABC, thus the smaller number of population size seems to have been sufficient. Whereas, a small number of iterations is not enough to obtain good solutions. That indicates when computational resources are limited in a case like this, a larger number of iterations is more preferable than a larger population size. Except for Alpine 1 function, there were no other significant differences in other factors.

Table 6 shows the optimal values for each factor derived from the numerical experiments. The set of the values for each function in Table 6 supposes to make the search performance optimum within the specified levels if the interactions of the factors are ignored. The value of a_0 (factor B) for Salomon function is different from the other ones, however, that is insignificant because the P -value in Table 5 (d) is much larger than 0.05.

5. Conclusion

This study attempted to optimize the parameters of WOA, with five levels for each of five factors. Consequently, the population size and/or the number of iterations made the difference significant among their levels, for all the benchmark functions whether unimodal or multimodal, separable or non-separable. The results showed that a larger number of iterations is preferable to a larger population size. It revealed population size of 5 and the number of iterations of 500 lead to the best performance among the specified levels. The other factors made no clear significant differences. Moreover, the orthogonal array based on the Taguchi method enabled to perform efficiently the numerical experiments.

In future work the author would further examine the cases where the products of the population size and the number of iterations are larger.

References

- 1) Williams, H. P. : “Model Building in Mathematical Programming”, John Wiley & Sons, 2013.
- 2) Abdel-Basset, M., Abdel-Fatah, L. and Sangaiah, A. K. : “Metaheuristic Algorithms: A Comprehensive Review”, in Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications, Elsevier, pp. 185–231, 2018.
- 3) Kirkpatrick, S., Gelatt, JR, C. D. and Vecchi, M. P. : “Optimization by Simulated Annealing”, Science, Vol. 220, No. 4598, pp.671–680, 1983.
- 4) Glover, F. : “Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence”, Computers & Operations Research, Vol. 13, Issue 5, pp.533–549, 1986.
- 5) Holland, J. H. : “Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence”, Bradford Books, 1992.
- 6) Kennedy, J. and Eberhart, R. C. : “A New Optimizer Using Particle Swarm Theory”, Proceedings of the Sixth International Symposium on MHS '95, Nagoya, Japan, Piscataway, NJ, pp.39–43, 1995.
- 7) Karaboga, D. : “An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization”, Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- 8) Farmer, J. D., Packard N. and Perelson, A. : “The Immune System, Adaptation and Machine Learning”, Physica D, vol. 2, pp. 187–204, 1986.
- 9) Dorigo, M. : “Optimization, Learning and Natural Algorithms”, Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992.

- 10) Mirjalili, S. and Lewis, A. : “The Whale Optimization Algorithm”, *Advances in Engineering Software*, Vol. 95, pp. 51–67, 2016.
- 11) Li, H., Liu, X., Huang, Z., Zeng, C., Zou, P., Chu, Z. and Yi, J. : “Newly Emerging Nature-Inspired Optimization - Algorithm Review, Unified Framework, Evaluation, and Behavioural Parameter Optimization”, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 72620–72649, 2020.
- 12) Kacker, R. N., Lagergren, E. S. and Filliben, J. J. : “Taguchi’s Orthogonal Arrays Are Classical Designs of Experiments”, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 96, No. 5, pp. 577–591, 1991.
- 13) Watkins, W. A. and Schevill, W. E. : “Aerial Observation of Feeding Behavior in Four Baleen Whales : *Eubalaena Glacialis*, *Balaenoptera Borealis*, *Megaptera Novaeangliae*, and *Balaenoptera Physalus*”, *Journal of Mammalogy*, pp. 155–163, 1979.
- 14) Jamil, M. and Yang, X.-S. : “A Literature Survey of Benchmark Functions for Global Optimization Problems”, *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, Vol. 4, No. 2, pp. 150–194, 2013.
- 15) Yang, K. and El-Haik, B. : “Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development”, McGraw-Hill, New York, 2003.

気仙大工・花輪喜久蔵と北海寺本堂建築工事の調査

－建築工事設計書・建築工事仕様書について－

諸澤 良浩^{*1}・吉村 雄気^{*2}・三上 耀介^{*3}・岡本 和士^{*4}

在家 優輝^{*4}・西村 光太郎^{*4}・三浦 望^{*4}

(令和6年11月18日受理)

Survey of Kesen Carpenter Kikuzo Hanawa and the Construction Work of the Main Hall of the Hokkaiji Temple

－About Building Work Design Documents and Building Work Specifications－

Yoshiuhiro MOROSAWA^{*1}, Yuki YOSHIMURA^{*2}

Yousuke MIKAMI^{*3}, Kazushi OKAMOTO^{*4}

Yuki ZAIKE^{*4}, Koutarou NISHIMURA^{*4} and Nozomu MIURA^{*4}

(Received November 18,2024; Accepted for Publication February 1,2025)

Research reports of Kesen carpenter Hanawa Kikuzo had been conducted by Tsuneo Takahashi. However, no continued research has been conducted since then. This survey examines and organizes existing documents such as design documents and specifications for Hokkaiji Temple regarding the construction work of the main hall of Hokkaiji Temple, of which Kikuzo Hanawa was largely involved in the construction of shrines and temples in Hokkaido.

1. はじめに

これまで気仙大工・花輪喜久蔵（写真1）に関する研究報告は高橋恒夫¹⁾ 2) 3) によりなされてきた。しかしその後、継続して研究は行われていない。

本研究は北海道の社寺建築に大きく関係した花輪喜久蔵の仕事のうち、大正13年（1924年）札幌市中央区に建設した北海寺^{*1}の現本堂建築工事に関し、北海寺に現存する設計書等の文献（表1）を調査整理し、考察することを目的とする。

2. 気仙大工・花輪喜久蔵について

岩手県気仙郡地方（現在の岩手県気仙郡のほか、陸前高田市、大船渡市を含む旧気仙郡一帯を指す）の大工を気仙大工と称する。

花輪喜久蔵は明治元年（1868年）12月23日気仙郡綾里村^{*2}に生まれる。明治36年（1903年）北海道へ渡り、札幌に住所を定める。昭和17年（1942年）73歳で死去するまで道内で50件以上の社寺建築の建設に携わった。

* 1 建築科（Department of Architecture）

* 2 さくら構造株式会社（SAKURA KOZO Co., Ltd）

* 3 岩倉建設株式会社（Iwakura Construction Co.,Ltd）

* 4 建築施工システム技術科1年（Department of Advanced Architectural Technology）

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

図1 完成データ (資料番号1より)

4 設計書について

4.1 設計書の概要

北海寺には、花輪喜久蔵の名が記されている資料番号1「北海寺本堂建築工事設計書」と、南保新四郎の名が記されている資料番号4「北海寺本堂設計書」の、二つの建築工事設計書が保管されている。設計書の内容は部材名、材種、寸法、数量となる。現北海寺本堂の建築工事は花輪喜久蔵(設計・棟梁)により大正13年(1924年)に実施されているが、それより以前の大正9年(1920年)に、南保新四郎が建築工事設計書を作成していたことが分かった。花輪喜久蔵が設計書を作成した時期は大正9年(1920年)から大正13年(1924年)の間となる。以下に双方の設計書の項目を示す(表2)。

表2 設計書の項目

花輪喜久蔵	南保新四郎
①石工事・土工	①木工事(屋根工事、彫刻含む)
②木工事	②土工
③屋根工事	③石工事
④金物工事	④金物工事
⑤建具工事	⑤建具工事
⑥彫刻	⑥職方
⑦職方	

4.2 設計書の比較

両者の設計書には相違点が多くある。一部抜粋したデータを用い比較を行う(表3~6)。

表3 両設計書相違点その1 向拝虹梁

設計書名	本堂設計書(南保)	本堂建築工事設計書(花輪)
部材名	向拝虹梁	向拝虹梁
材種	桂	樺または栓
寸法	長さ	20尺
	成	1.8尺
	幅	1.1尺
数量	1	1

表4 両設計書相違点その2 連台虹梁・大虹梁

設計書名	本堂設計書(南保)	本堂建築工事設計書(花輪)
部材名	連台虹梁	大虹梁
材種	桂	樺
寸法	長さ	20尺
	成	1尺
	幅	1.4尺
数量	1	1

表5 両設計書相違点その3 向拝柱

設計書名	本堂設計書(南保)	本堂建築工事設計書(花輪)
部材名	向拝柱	向拝柱
材種	桂	タモ又は栓
寸法	長さ	15尺
	成	1.1尺
	幅	1.1尺
数量	2	2

表6 両設計書相違点その4 内陣柱

設計書名	本堂設計書(南保)	本堂建築工事設計書(花輪)	
部材名	内陣柱	内陣柱	内陣柱
材種	桂	樺	樺
寸法	長さ	21尺	18尺
	径	1.1尺	1尺2寸
	幅	1.1尺	1尺
数量	10	6	4

相違点その1 向拝虹梁(表3)は、南保新四郎の設計では使用材料を桂とし、長さ20尺であるが、実施された花輪喜久蔵氏の設計では樺または栓とし、長さ18尺であり2尺短縮されている。

相違点その2 連台虹梁・大虹梁(表4)は、南保新四郎の設計は使用材料を桂とし長さ20尺であるが、花輪喜久蔵の設計では樺とし、長さ18尺であり2尺短縮されている。

相違点その3 向拝柱(表5)は、長さは同じであるが、樹種に違いがある。南保新四郎の設計では桂であるが、花輪喜久蔵の設計ではタモ又は栓としている。

相違点その4 内陣柱(表6)は、南保新四郎の設計は使用材料を桂とし、長さ21尺であるが、花輪喜久蔵の設計では樺とし、18尺であり3尺短縮されている。

以上の相違点を見ると、使用材料はいずれも当時の北海道内に生育しており、両者とも北海道産の材料で計画したと考えられるが、南保新四郎の設計よりも、花輪喜久蔵の設計では縮小された箇所が複数有り、規模が小さい。資料4 北海寺本堂設計書最終ページ(写真8)より、南保新四郎の見積りの合計額

は 68,470 円 48 銭である。資料 3 北海寺本堂建築見積書 1 ページ目 (写真 9) より、花輪喜久蔵の見積りでは 25,039 円 65 銭と記されており、金額が大きく違う。南保新四郎の出自は現在調査中であるが、代々富山の宮大工で、一方花輪喜久蔵は仕事を求めて明治 36 年に札幌へ移住してきた。南保新四郎の設計及び見積りが予算に合わず、設計者が花輪喜久蔵に変更されたとも考えられる。南保新四郎の設計後、再度設計及び積算を行い、建設工事完了まで 4 年経過したと考えられる。

実際に施工された北海寺本堂が花輪喜久蔵の図面通りの寸法であるかは、今後の調査で確認する。

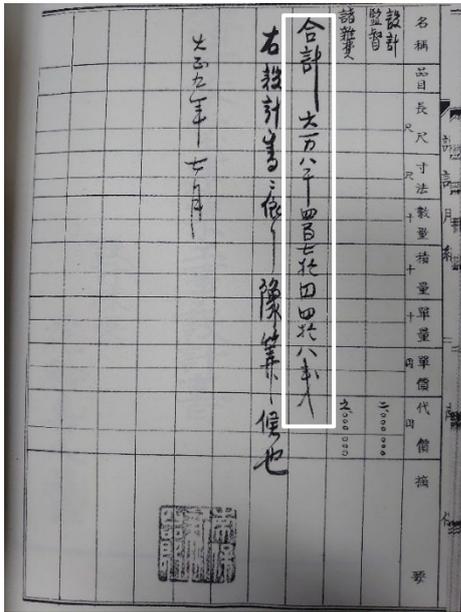


写真 8 北海寺本堂設計書 (資料番号 4-52P)

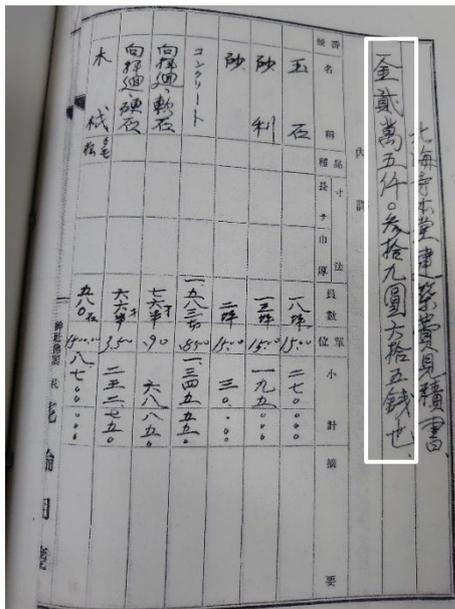


写真 9 北海寺本堂建築見積書 (資料番号 3-1P)

5. 建築工事仕様書について

5.1 建築工事仕様書の概要

資料番号 2「北海寺本堂建築工事仕様書」は花輪喜久蔵により資料番号 1「北海寺本堂建築工事設計書」と同時期に作成されたと考えられる。以下に項目を示す (表 7)。

表 7 北海寺本堂建築工事仕様書の項目

①各種寸法	⑬土台	⑳天井張り
②方位及び基礎	⑭柱	㉑小屋組
③側廻り根石	⑮虹梁	㉒破風板
④内廻り柱受け杢石	⑯組物及び台輪	㉓葦甲
⑤向拝四半及び土台受け石	⑰床下足堅め其他	㉔前包
⑥向拝双蓋石	⑱床板張り	㉕外側壁廻り
⑦添柱受け石	⑲敷居鴨居	㉖建具
⑧石据	㉚長押	㉗建築全物
⑨向拝柱	㉛内法費	㉘彫刻
⑩虹梁	㉜丸桁	㉙塗
⑪丸桁	㉝化粧軒	㉚屋根葺
⑫組物	㉞浜縁柱	㉛亜鉛鍍鉄葺

5.2 石材について

以下に項目①「各種寸法」の資料原本と完成データの一部 (写真 10・図 2)、及び項目③「側廻り根石」の資料原本 (写真 11) と内容を記載する。

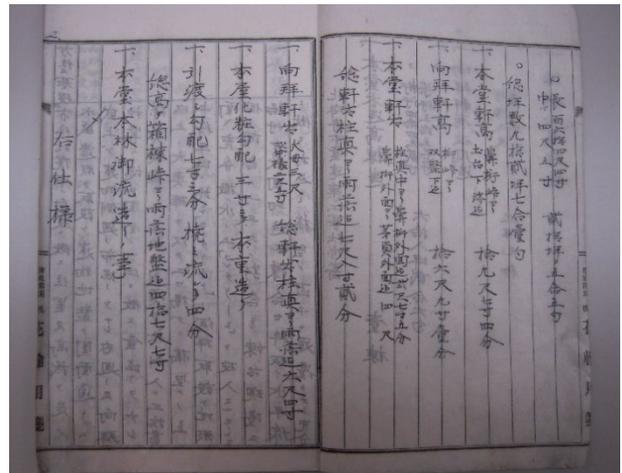


写真 10 資料原本 (資料番号 2-2P)

右仕様	○ 北海寺本堂建築工事仕様書	○ 長百六拾四尺四寸	貳拾坪〇五合五寸	図面番号 7
	○ 総坪数九拾貳坪七合壹寸	○ 巾八四尺五寸		
○ 本堂軒高	○ 鼻桁ヨリ	○ 鼻桁ヨリ	○ 拾九尺七寸四分	
○ 向拝軒高	○ 桁下迄	○ 桁下迄	○ 拾六尺九寸壹分	
○ 本堂軒	○ 柱真中ヨリ鼻桁外面迄	○ 柱真中ヨリ鼻桁外面迄	○ 七尺七寸五分	
○ 向拝軒	○ 大母三尺	○ 大母三尺	○ 二七〇	
○ 本堂化整勾配	○ 三寸ニテ本造り	○ 三寸ニテ本造り		
○ 引渡勾配	○ 七寸三分機ミ流レニテ四分	○ 七寸三分機ミ流レニテ四分		
○ 総高サ箱棟	○ 総高サ箱棟ヨリ雨込地盤四拾七尺七寸	○ 総高サ箱棟ヨリ雨込地盤四拾七尺七寸		
○ 本堂本林御流造りノ事				

図 2 完成データ (資料番号 2-2P)

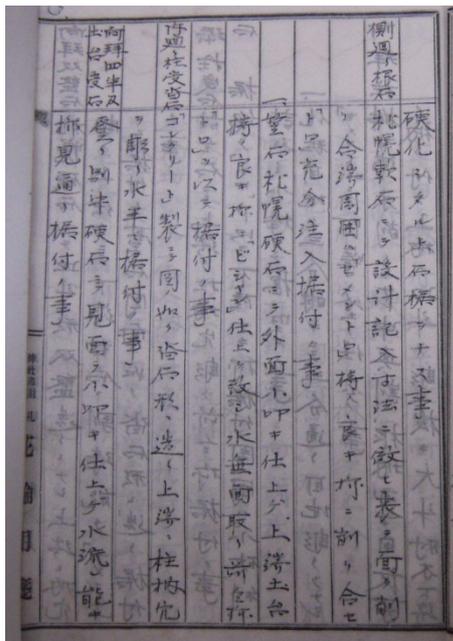


写真 11 資料原本（資料番号 2-3P）

側廻り根石

『札幌軟石ニテ設計記入寸法ニ倣ヒ表テ面ヲ削リ合端周囲ハ「セメントロ」棹ノ良キ様ニ削リ合セ「トロ」充分注入据付ノ事』

一、

『笠石札幌硬石にて外面小叩キ仕上げ上端土台棹ノ良キ様ニ「ビシャン」仕上ヲ致シ水無面取り前同様「トロ」ヲ以テ据付ノ事』

札幌軟石および札幌硬石は明治期より札幌市内の建築物に多く用いられた。現北海寺本堂建築工事が実施される以前の大正 7 年（1918 年）には、豊平と定山溪を結ぶ定山溪鉄道が開業しており、本工事にも利用されたことが考えられる。

6. 絵図について

6.1 絵図の概要

以下に南保新四郎が作成した資料番号 5「北海寺本堂絵図五枚」の各図面の名称を示す（表 8）。

表 8 北海寺本堂絵図五枚の名称

①本堂正面百分の一縮図（1枚）
②本堂百分の一平面図（1枚）
③本堂格天井百分の一図（1枚）
④本堂小屋組百分の一図（1枚）
⑤本堂側面百分の一縮図（1枚）

北海寺本堂絵図五枚は資料番号 4「北海寺本堂設計書」と一つの封筒（写真 12）に同封されていたことから、大正 9 年（1920 年）に同時に作成されたと考えられる。



写真 12 設計書と絵図 5 枚の入った封筒

6.2 絵図と現本堂の比較

絵図番号①本堂正面百分の一図（写真 13）と、実際に建設された現北海寺本堂の正面立面（写真 14）にも相違点があることが分かった。絵図番号①本堂正面百分の一図には正面入り口上部に唐破風は書かれていないが、現北海寺本堂の向拝上部には唐破風と懸魚、棟鬼飾りが存在する。正面と左右の三方に裳階が存在する。基壇を覆うように正面向拝は風除室形状、その両側の廻縁にガラス障子と腰壁が設けられ、廊下形状となっている。南保新四郎が書いた図面では、廻縁にガラス障子が入っておらず、札幌市の冬季の環境に適していないことも設計者変更の原因の一つとなったと考えられる。

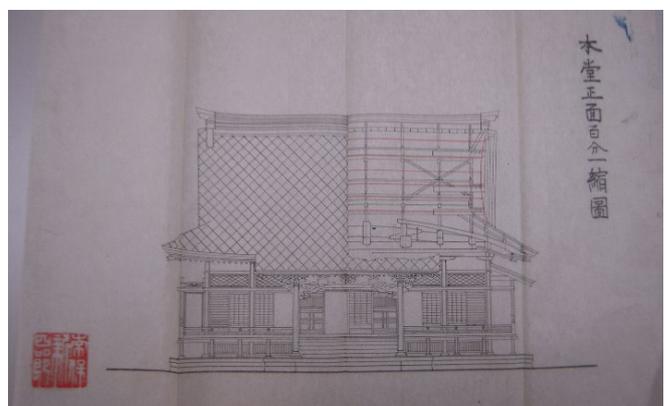


写真 13 本堂正面立面図（資料番号 5）



写真 14 現北海寺本堂正面

7. まとめ

今回の調査研究によって、気仙大工・花輪喜久蔵が設計・棟梁を務めた現北海寺本堂建築工事の計画段階における文献資料の一部を解説、資料化することができた。また花輪喜久蔵による工事実施以前に南保新四郎による計画が存在したことも分かった。しかし文献資料の調査はまだ途中であり、また現地実測調査は実施していない。残りの文献資料の調査および、実測調査を元にした各種図面の作図、設計者変更の理由調査、南保新四郎の経歴調査、花輪喜久蔵による建築工事設計書の部材寸法と実際に用いられている部材寸法が一致しているか等の確認は今後の課題とする。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの御助言を頂いた札幌市立大学名誉教授 羽深久夫様、民衆史研究家石川圭子様、貴重な資料を御提示くださった北海寺の皆様、深く謝意を表します。

<注>

- ※1 法華宗の寺院。札幌市中央区南3条東4丁目1番地に明治23年(1890年)初代寺院建立。明治33年(1900年)5月大火により焼失する。大正13年(1924年)現在の本堂が再建された。
- ※2 現在の岩手県大船渡市三陸町綾里である。
- ※3 慶応元年(1865年)富山県南砺市出身。経歴等は調査中。

<参考文献>

- 1) 高橋恒夫：気仙大工・花輪喜久蔵とその作品について、日本建築学会東北支部研究布告集、No47, pp. 21-24, 1986. 3
- 2) 高橋恒夫：北海道および樺太における気仙大工・花輪喜久蔵の関係した建築について、日本建築学会大会学術講演梗概集1986年大会(北海道), pp. 703-704, 1986. 8
- 3) 高橋恒夫：江戸期および明治期の在郷大工集団に関する基礎的研究 気仙大工を中心に、東京大学博士(工学) 乙第10494号 1992.1
- 4) 花輪喜久蔵事績録刊行委員会：気仙・匠・年輪—巨匠花輪喜久蔵の史跡と伝統技能伝承をめざして—, p. 78, 1993, 11

体験授業教材の開発

－学卒者訓練で実施する実習課題への適用方法の構築（その1）－

磯 史樹*¹

(令和6年11月18日受理)

Development of Trial Class Materials

- Construction of a Method to Apply to Practical Training Tasks at the Polytechnic University (Part 1) -

Fumiki ISO*¹

体験授業は、北海道職業能力開発大学校（以下、当校と記す）の理解と魅力発信のためにテーマと内容が重要である。そこで、当校の特徴の一つである課題実習の要素を体験授業に適用することを考え、製品開発工程が体験できる教材を開発した。また、開発教材を各科目の実習課題や演習に適用することで、課題実習の製作物の質向上に有用と考え、開発教材を実習課題に適用する方法の構築を考えた。本稿は、体験授業教材の開発から適用状況及び開発教材を実習課題に適用する方法の構築について報告する。

1. はじめに

北海道職業能力開発大学校で開催するオープンキャンパスは、当校の概要、入試制度や科・系の説明をはじめ、校内見学や個別相談、学生による座談会などを行っている。これに加え、夏季に開催するオープンキャンパスでは、体験授業を行っている。体験授業のテーマは、系のカリキュラム、保有する機材、技術動向などを勘案し設定している。また体験授業は、講義、実験、実習など様々な授業形式で実施される。参加者が当校の特徴を理解し、専門的な学習内容に興味を惹くように、教材や実施方法について十分な検討を行い、参加者が当校の応募者となるように実施している。筆者が所属する電気系で実施した過去5年間（2020年～2024年）の体験授業のテーマおよび参加人数を表1に示す。

当校では、2020年に応用課程生産システム系にロ

表1 電気系体験授業テーマと参加人数

年	体験授業のテーマ	参加人数
2024	電気のコツを科学する	4
	電気自動車の作り方	2
	LEDライトを作ろう（2回）	7
2023	アームロボットに仕事を覚えさせよう！（4回）	5
2022	アームロボットさんに仕事を覚えさせてみよう（2回）	9
	モータの中身	3
	電気と熱	2
2021	いろいろなセンサを活用した照明の自動制御	3
	ロボットをコントロールして仕事をさせよう！（3回）	11
2020	アーム型ロボットのティーチング体験（3回）	9

・年4回実施（2020年のみ3回実施）

*1 生産電気システム技術科（Department of Advanced Electric Technology for Production System）

ボットコースが設立され、各種産業用ロボットが導入された。そこで、ロボット技術に興味を有する受験対象者の参加を見込み、垂直多関節ロボットを活用した体験授業を実施してきた。2022年までの3年間は、新規性・話題性から一定数の参加人数があったが、2023年の参加人数は大幅に減少したため、2024年は、当校の理解や魅力を体験できるテーマの一つとして、課題実習を体験できるものを検討した。

学卒者訓練の実習科目は、教科内容を習得するために必要な課題や演習を実施している。標準カリキュラムやシラバスには、課題や演習について具体的な記載が少ない。このため、授業担当者は、前教科担当者から引き継いだ演習や課題を実施している場合が多い。また、習得すべき内容を満たすための演習や課題は、実際の製品製作で検討する物理的制約や電磁的影響など、考慮すべき内容を省略することがある。この場合、実際の製品製作のイメージを持たせるために、各種事例を挙げるなどして、理解度向上に努めている。

一方、製品製作の工程を学習する機会として課題実習が設定されている。課題実習は、各科目で習得した専門知識、技能、技術を組み合わせ、仕様を満たす製品を製作するため、製品開発の各工程を学習し、グループで協働し完成を目指す。しかし、設計や製作工程に問題が生じ、製作物の品質低下や納期に問題が生じることがある。要因の一つとして製品開発を意識した学習が不足していると考えた。そこで、各専門科目で、製品製作を意識した課題や演習に取り組むことは、課題実習の製作工程改善や製作物の品質向上に有用であると考えた。

以上より、当校の特徴である課題実習を体験できる体験授業教材の開発と、開発した教材を学卒者訓練の実習課題へ適用することは有用と考え、開発教材から実習課題に適用する方法の構築を検討した。

2. 体験授業テーマ設定

オープンキャンパスで実施される体験授業は、多くの参加者が見込める魅力的なテーマ設定と参加者が満足する内容が求められる。当校で実施している講義、実験、実習を踏まえた内容の授業を限られた時間で遂行し、参加者に「当校へ入校したい」という気持ちにさせるため、内容や実施方法について十

分に吟味する必要がある。そのためには、専門用語は少なく、生活に身近なテーマや当該分野のトレンドに合致するテーマを選択し、参加者自身や過去の経験と関連づけるように促し、一方的な授業ではなく、参加者が授業へ参加するための内容であることが重要である¹⁾。そこで、「電気」と聞いてイメージしやすく生活に密着しているものとして照明をテーマに据え、夜間や非常時に活用するハンディ型のLEDライト（以下、LEDライト）の製作体験をテーマとして設定した。なお、LEDライトを題材にした体験授業は、他大学校でも実施しており、本教材は、中国能開大で使用した教材を参考にした。

3. カリキュラム

授業を計画、実施する際には、カリキュラム、シラバス、指導案、教材などを作成し、教科の目標を達成するための指導ができるように整備する必要がある。また、体験授業についても、通常の授業と同様にカリキュラムや指導案などを作成する必要性が

表3 体験授業カリキュラム

体験名	LEDライトをつくろう！	
目標	実装工程、組立工程の体験を通じ、LEDライトを製作する。	
目的	LEDライトの製作体験を通じ、製品づくりへの興味醸成および電気系の専門性理解を目的とする。	
項目	内容	時間
準備	1. 留意事項・準備 (1) 諸説明 (2) 安全作業	5分
概要	2. LED概要 (1) 蛍光灯廃止とLED照明 (2) LEDの原理と特徴	5分
実装	3. 実装工程 (1) 使用材料確認 (2) 半田付け作業方法と練習 (3) 実装演習 (4) 点検	25分
組立	4. 組立工程 (1) ケースの構成 (2) 組み立て作業 (3) 点検	15分
まとめ	5. まとめ (1) 回路構成 (2) アンケート記入	10分
使用機器	工具一式、安全用具、プロジェクト、書画カメラ、工具一式	計60分

ある。これらは、担当者に抛らず授業を実施する上で重要であり、授業品質の担保にもなる。本稿で適用した体験授業のカリキュラムを表2に示す。

4. 教材概要

教材は、テキスト、LED ライト製作に必要な各種材料で構成される。参加者が体験する内容は、時間的制約により、あらかじめ一部作成した回路基板に部品を半田付けする実装工程、及び実装した回路基板をケースに固定する組立工程とした。

テキストは、筆者が通常授業で実施するものと同様にパワーポイントで作成し、LED の活用事例、原理、歴史などの概要、製作するための作業手順、作業のポイントなどで構成した。

市場に流通している LED ライトは、様々なニーズに対応するため、シーンに応じた機能を有するものが販売されている。教材とする LED ライトは、低コストで材料や部品が容易に入手可能な構成とするため、LED の点灯・消灯のみ可能なシンプルな機能とした。

筐体は、操作性、組み立て易さ、メンテナンス性を考慮した。LED、回路基板、電池、スイッチなどの部品レイアウトは、筐体のデザインに合わせて設計する必要があることから、市販のものを流用せず、柔軟性を考慮し 3D プリンタで製作した。

以上より、開発教材は、製品として製作する一部工程を体験できるものとなった。図1に開発教材の LED ライト、図2に LED 点灯回路を示す。



図1 LED ライト

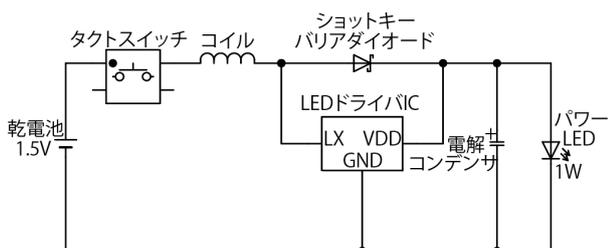


図2 LED 点灯回路

5. 体験授業への適用と結果

2024年6月に開催した第2回オープンキャンパスで、当教材を用いた体験授業を実施した。参加者数は、午前5名、午後2名の計7名だった。当該体験授業の指導体制は、説明教員1名、実技指導教員2名、学生4名で実施した。実技指導教員および学生の丁寧な指導により、概ね時間内に完成した。しかし、組立工程は工数が多く、予定よりも時間が経過していたため改善が必要である。校で統一的に実施しているオープンキャンパスのアンケート結果から、当該体験授業は概ね満足との回答が得られた。

6. 実習課題適用に向けた検討

開発教材の実習課題への適用は、生産電気システム技術科の実習科目とした。このうち、製品として物理的制約の検討が必要な、電子回路基板の設計製作方法を習得する CAD/CAM 応用実習、3DCAD の操作や筐体作成方法を習得する機械工作・組み立て実習の2科目に適用することが有用と考えた。

6.1 CAD/CAM 応用実習への適用

CAD/CAM 応用実習は、電子回路基板の設計製作工程を習得する目的で、電子回路 CAD の活用、パターン設計、基板作成、部品実装、評価（実験）を実施している。導入段階では、CAD ソフトの操作に慣れる必要性から、部品点数の少ない回路の製作を行い、少しずつ部品点数を増やした回路を実習課題として段階的に実施している。設計製作する回路は、主に専門課程で学習した電子回路や当該授業と並行して実施されている電子回路設計製作実習、パワーエレクトロニクス回路を題材として実習課題を実施してきた。製作する回路基板は、回路機能を満たすもので、レイアウトは入出力の配置を考慮する程度である。時間的制約などもあり、筐体のデザイン細部を想定した基板製作は行っていない。一方、開発教材の電子回路基板は、実際に筐体に組み込むために基板の大きさや各種部品レイアウトなど、筐体の構造を考慮した設計が必要である。また、開発教材の回路は、これまで実施した課題と比較しても、部品点数、回路機能、評価方法を考慮しても実習課題として活用できる。よって、開発教材は、製品開発をイメージした新たな課題として活用できる。表3に当科目で実施している主な実習課題を示す。

表3 主な実習課題

課題名	部品点数
マイク	26
交流電圧検出回路	19
ブートストラップ回路	18
三角波生成回路	8
マルチバイブレータ	11
バターワース型 LPF 回路	12
パワーアンプ	12
発振回路	11
LED ライト (開発教材)	10

※部品点数は、実装する全ての部品数である。

6.2 機械工作・組み立て実習への適用

機械工作・組み立て実習は、2017年度の標準カリキュラムより、筐体設計に必要な3DCADの操作、3Dモデルの設計を習得する内容を含む科目となった。習得度を確認する課題は、他科目の実習で使用する部品や機構をモデル化する課題を実施してきた。2019年度よりFDM式の3Dプリンタの導入を機に、設計したものが造形できるようになった。これにより、学生は構造やデザインに関する興味を持ったことが、授業アンケートや授業態度から確認された。しかし、造形にかかる時間制約もあり、実習課題は、単純な機構や部品を組み合わせたものである。

開発教材の筐体は、3DCADで作図し、3Dプリンタで造形したものである。筐体は、回路基板の固定方法やメンテナンスを考慮した構造など、検討すべき項目が多岐にわたる。電気製品には筐体が不可欠であり、電気技術者としてこの視点を持つことは重要である。よって、開発教材は実践的な課題として活用できる。

7. 実習課題への適用方法の構築

体験教材を実習課題に適用するための検討結果を踏まえ、体験授業教材から実習課題へ適用する方法を整理した。表4に実習課題への適用手順を示す。なお、手順4～手順7は、2025年度に適用する予定である。

8. まとめ

本稿では、当校の特徴である課題実習を体験できる教材を開発し、開発した教材をオープンキャンパスの体験授業に適用したことを述べた。また、開発

表4 実習課題への適用手順

手順	内容
1	体験授業テーマ設定 ・生活に身近、該当分野のトレンド、参加者自身や過去の経験と関連付けているかなど、テーマとしての妥当性検討 ・カリキュラム(技術要素)との関連確認 ・機材、材料、予算の確認 ・時間数、難易度の検討
2	体験教材作成 ・時間数に応じた教材構成の検討・作成 ・カリキュラム、指導案の作成
3	技術要素に応じた科目の選定 ・適用科目の洗い出し、現状の実習課題や内容の確認
4	実習課題への落とし込み ・習得内容と課題の関連性、位置づけ確認 ・時間数、難易度の検討
5	実習課題教材の作成
6	実習課題の適用
7	実習課題の評価

教材を学卒者訓練の専門科目で実施する実習課題への適用に向けた手順を示した。

教育訓練は、受講者が興味を持って授業や課題に取り組み、習得度や満足度を向上させるために様々な手法で展開されている。そのためには、適切な教材や指導方法が必要である。体験授業は、当該分野の技術動向を踏まえた適切なテーマ設定と教材開発を継続することが重要である。一方、実習課題は、学生が科目の内容をどの程度習得しているのか確認するものである。製品製作を意識した課題であっても、内容の逸脱や消化不良になることは避けなければならない。本稿により、教材の在り方を再認識し、より魅力的な体験授業の実施と最適な実習課題及び指導方法の構築の一助となれば幸いである。

<参考文献>

- 1) 浅原知恵：オープンキャンパスの目的をふまえた体験授業のあり方について、城西大学教職課程センター紀要，第7号，P60，2023. 3
- 2) 佐藤光宣：オープンキャンパスにおける体験授業に関する覚書，帝京大学短期大学紀要，第42号，2022. 3

パワーエレクトロニクス科目における理論と実習の橋渡し訓練の開発

佐藤 和利^{*1}

(令和6年11月18日受理)

Development of Training Bridging Theory and Practice in Power Electronics

Kazutoshi SATO

(Received November 18, 2024; Accepted for Publication February 1, 2025)

本研究の目的は、経験学習モデルを参考に、標準課題実習や開発課題実習のような総合的な実習に必要な知識や技術の習得のために、パワーエレクトロニクス科目の理論と実習を結びつけ、知識の定着とともに学生の学びの自主性を高める訓練を開発することである。また、本研究の問いは、開発した訓練の取り組みによりパワーエレクトロニクス知識の定着と学生の自主性向上につながったかを検証することである。

1. はじめに

北海道職業能力開発大学校の電気系学生は、電子回路に対して苦手意識を持つ学生が多い。応用課程生産電気システム技術科1年生は、前期にパワーエレクトロニクス科目を学習し、後期から始まる標準課題実習に臨む。電子回路技術の基礎を習得していないとパワーエレクトロニクス知識の習得は難しい。苦手意識を克服させるには、学生自らが学ぶ意欲を持ち、積極的かつ自主的に学習できる環境が必要だと考える。学習者が自主的に興味を持って学習し、学習結果を振り返って次の学習につなげて知識を習得する学びに経験学習モデルがある。

本研究では、経験学習モデル¹⁾を参考に、総合的な実習に必要な知識や技術の習得のために、パワーエレクトロニクスの理論と実習を結びつけ、知識の定着とともに学生の学びの自主性を高める訓練を開発することを目的とする。また、本研究の問いは、開発した訓練の取り組みによりパワーエレクトロニクス知識の定着と学生の自主性向上につながったか

を検証することである。

2. 経験学習モデル

Kolb 他 (2018) は、経験学習とは、意図的に何らかの経験をし、その経験から内省的に振り返りを行う。その振り返りから自分の考えや選択を決定し、自ら行動する一連の学びのプロセス（経験、検討、思考、行動）を通して自らをコントロールしながら学習していくものであると説明している。これは図1に示す4つのステップからなり、「経験する」、「検討する」、「考える」、「行動する」で構成される学習プロセスであるとしている。¹⁾

3. 研究方法

本研究では、パワーエレクトロニクス学科および実習の中で以下の表1に示す取り組みを実践し、理解度確認テストや振り返りシート、学びの自主性アンケートの結果などから知識の定着および自主性の向上を検証する。

* 1 生産電気システム技術科 (Department of Advanced Electric Technology for Production System)

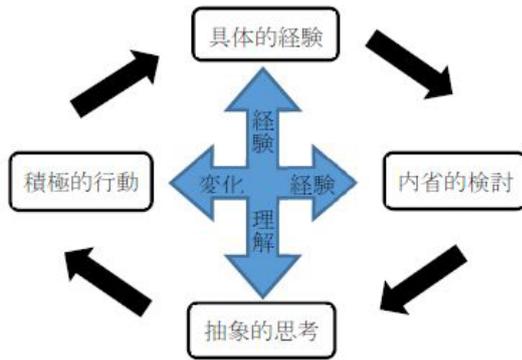


図1 学習サイクル

表1 本研究で実施した取組みおよび経験学習サイクル

取組み内容	経験学習サイクル
理解度確認テスト	経験・検討・思考・行動
シミュレーション演習	経験・行動
実習前後の振り返りシート	検討・思考
プレゼンテーション報告	経験・検討・思考・行動
学びの自主性アンケート	—

4. 研究結果および考察

4.1 学科の取組み結果

理解度確認テスト（期末テスト含む）は、3分野の中で①関連知識の正答率が一番高く、理解度確認テストの平均正答率が87.75%、期末テストが90.36%であり、知識が定着できたといえる。また、期末テストは、表2に示すように②回路原理と強い相関が見られた。回路原理はパワーエレクトロニクス知識を習得する上で重要な要素であり、期末テスト出題数の7割を占める。回路原理を正答できている者ほど期末テストの得点が高く、パワーエレクトロニクスの知識全般を理解できているといえる。さらに表3に示す自主性アンケート1回目の相関を見ると、a1とa6の相関が最も強く、理解度確認テストの実施がこの授業の満足度に大きく関わっていることがわかる。

4.2 実習の取組み結果

学生は実験前後に振り返りシートを記入することで、行動の成果・改善に気付き、次に活かすことができたことと自主性アンケート2回目の結果からもわかった。

表2 期末テストの分野別相関結果

	期末①関連	期末②原理	期末③構成	期末
①関連	--			
②原理	0.39	--		
③構成	0.45	0.72**	--	
期末	0.54*	0.98**	0.82**	--

* p < 0.05, ** p < 0.01 N=14

表3 学びの自主性アンケート1回目の相関結果

	a1	a2	a3	a4	a5	a6
a1 理解度確認テストにより、講義内容の理解が深まった	--					
a2 シミュレーション課題で、講義内容の理解が深まった	0.46	--				
a3 理解度確認テストの他者コメントで得意な点に気付いた	-0.17	-0.16	--			
a4 理解度確認テストの他者コメントで苦手な点に気付いた	-0.23	-0.01	0.79**	--		
a5 理解度確認テストの他者コメントで勉強の進め方がわかった	-0.27	0.12	0.74**	0.91**	--	
a6 全体を通して、この講義形式に満足している	0.78**	0.12	-0.53	-0.64*	-0.69**	--

* p < 0.05, ** p < 0.01 N=14

振り返りシートは、経験学習サイクルの内省的検討および抽象的思考の要素が強く、その振り返りを活かして積極的行動に移行し、具体的経験をし、その経験を再び内省的検討していくことで自主性を高めていくことに役立っているといえる。また、14名中12名は、プレゼンテーション方式による報告を「経験して良かった」と回答している。プレゼンテーションを実施したことで、実習で学んだ知識・技術を整理し理解できたと回答している学生が11名いる結果となった。

4.3 橋渡し訓練の効果

標準課題実習1テーマ終了後の学生の取組みについて、自主性アンケート3回目の結果を表4に示す。c1において、c5およびc6に有意な相関が見られた。標準課題実習において、多岐にわたる作業および作業工程の中で、学生自身が自分の役割を理解し行動できたと回答した者は、グループで問題解決に努め、標準課題実習全体を通して自主的に取り組むことができたと考えてよい。他にc1とc3、c3とc5およびc3とc6にも強い相関が見られた。標準課題実習はワーキンググループ方式であるため、パワーエレクトロニクス実習での経験が標準課

表4 学びの自主性アンケート3回目の相関結果

	c1	c2	c3	c4	c5	c6
c1 自分の役割を理解し、責任持って作業できた	--					
c2 進捗を把握し、問題点を検討しながら作業できた	0.62*	--				
c3 意見を提示し、他者の意見を聞き入れながら取り組んだ。	0.85**	0.74**	--			
c4 失敗や手戻り時に、原因を追究し繰り返さないように努めた	0.71**	0.37	0.71**	--		
c5 トラブルをグループで解決するように努めた	0.94**	0.65*	0.86**	0.74**	--	
c6 自ら考えながら主体的に取り組むことができた	0.92**	0.53	0.86**	0.69**	0.85**	--

* p < 0.05, ** p < 0.01 N=14

題実習において自主性を発揮できたと考えることができる。

5. 結論

学科目について、パワーエレクトロニクス①関連知識においては学生に定着させることができたといえる。②回路原理においては期末テストとの強い相関があった。しかし、②回路原理の期末テスト平均正答率は65.0%でばらつきが大きくなり定着したとはいえない結果となった。③回路構成についても同様の結果となった。

実習については、振り返りシート、プレゼンテーション報告の経験が学生の自主性向上に効果があったことを示すことができた。また、学科および実習の取り組み経験から、パワーエレクトロニクスの知識・技術を実践的に使える知識・技術に学生自身が昇華させ、標準課題実習でも自主的に取り組むことにつながったと考えられる。つまり、開発した訓練により、パワーエレクトロニクス知識の定着と学生の学びの自主性向上に効果があったと考える。

今後の課題としては、理解度確認テストの他者からのコメントを、学生がもっと具体的なコメントを出せるよう、事前の指導を行う。理解度確認テストの②回路原理の知識が定着できるように作問する。後に実施する実験に即した内容および段階的に学べるよう工夫する。振り返りシートは、記入例を用いて効率化を図り、作業工程や役割分担を記入する項目を増やして協調意識を高めることができるものに修正する。さらにプレゼンテーション報告については、報告結果の点数化など数値化して評価を行うこ

ととする。

<参考文献>

- 1) David A, Kolb and Kay, Perterson (中野真由美) : 「最強の経験学習」辰巳出版(2018)

エネルギー原理に基づく変分法から導かれた せん断はり有限要素モデルの問題点

和田 俊良^{*1} 井上 圭一^{*2} 印南 信男^{*3} 諸澤 良浩^{*1}

(令和6年〇月〇日受理)

Problems with Shear Beam Finite Element Models derived from Variational Method based on the Energy Principle

Toshinaga WADA^{*1}, Keiichi INOUE^{*2}, Michio INNAMI^{*3} and Yoshihiro MOROSAWA^{*1}

(Received 〇〇, 2024; Accepted for Publication 〇〇, 2025)

In the previous paper, S-model was developed by the authors. This model takes into account slip between the steel bar and concrete in Kawai model. This Kawai model was incorporated shear displacements into a conventional simple beam model. Analysis of cantilevered beam using the S-model showed that displacements were able to calculate under the bending mode, but the solution diverged under the tensile mode. This divergence is predicted to be due to the coupling term of the finite elements derived from the variational formula. This coupling term refers to the coupling between axial displacement and shear displacement. As far as the authors have been able to find, there does not appear to be any paper discussing the above coupled terms in Kawai-model. In this paper, the problem of the coupled effect between axial and shear displacements in Kawai-model is presented and the verification method is explained. One of the verification methods is the analyses of the effective digits of the finite element stiffness matrix. And then, another methods are to study the influence of the number of divisions and element aspect ratio in the finite element model on the solution.

1. はじめに

前報¹⁾で著者らは、単純なはり理論にせん断変位を組み込んだ川井・藤谷モデル^{2)~5)}(以後、川井モデルもしくは full cupled model, Fc-model と記述する)にすべり変位 S を導入した鉄筋コンクリートせん断はりの有限要素モデル (S-model) を提示した。

本 S-model では、曲げモード下の解は得られるが、引張モードにおいて解が発散した。この特異な挙動

は、川井モデル^{2)~5)}そのものの特性に惹起される可能性があるように考えられた。川井モデルでは、エネルギー原理に基づく変分式から有限要素が導出されているが、通常とは異なり、軸方向変位とせん断変位が連成することから、著者らは、この特殊な連成が単純なはりモデルの挙動からの乖離を呼ぶ一つの要因であると推察している。

川井・藤谷・藤井⁶⁾は、Fc-model の軸方向変位と

*1 建築科 (Department of Architecture)

*2 福井大学大学院工学研究科 建築建設工学専攻 (University of Fukui Architecture and Civil Engineering)

*3 生産電子情報システム技術科 (Department of Production Electric and Information System Technology)

せん断変位の連成を無視した別のモデル (un-coupled model, Uc-model と記述する)^{6,7)} を実際に採用しているが、この連成項の無視の可否については触れていないようである。

なお、ここに示したように川井モデルと呼称する場合、下記の2つのモデルがあることになる。

I) Fc-model : full coupled model

II) Uc-model : un-coupled model

本稿では、川井モデルの問題点について論述し、さらには変位やひずみ・応力の評価手法に触れることを目的としている。なお、ここでは本研究での数値解析例については呈示しないため、論文ではなくノートの形で記述していることをお断りしておく。

2. 川井モデルの定式化の特性

上述の川井モデルに触れる前に、まずこれまでのはりモデルの変遷を概略的に示すこととする。

2.1 曲げ理論によるモデル

簡素なはりモデルの出発点は、*Bernoulli-Euler* による断面変形に平面保持が仮定された「曲げはりモデル (1654年)」である。これに従って19世紀以降、はり理論に基づく近似解としてのたわみと回転角を有する有限要素が定式化され、年代の特定は難しいが、さらに軸方向変位も組み込まれている。

1951年に *Timoshenko* がせん断変形に相当する回転角を付加するせん断はりモデル⁸⁾ を提唱した。勿論、この *Timoshenko* モデルに軸方向変位の組み込みは可能であり、さらに鉄筋とコンクリート間のすべり S を入れたモデル⁹⁾ も現出している。留意すべきは、例え *Timoshenko* のせん断はりモデルであっても、せん断変形による断面内の丈方向の軸方向変位分布は直線を描くことしかできず、せん断変位場のゆがみを正確に記述しているとは言い難い。

また *Timoshenko* モデルでは、解析の前に予め「せん断断面剛性係数」を定める必要がある。*Timoshenko* 型の鉄筋コンクリートせん断はりモデルに鉄筋のすべりを考慮する場合など、事前にせん断断面係数を設定することは煩雑であろう。

2.2 曲げはりにせん断変位が組み込まれたモデル

1974年に川井ら²⁾ は、平面保持が仮定された曲げはりにせん断変位を組み込み、断面のせん断応力を表示する独自のせん断はりモデルを定式化した。こ

のモデルでは、*Timoshenko* モデルのような事前の断面のせん断断面剛性係数の設定は不要である。

川井の手法によれば、はりの変位場を1) 軸方向変位 w 、2) たわみ v 、3) 回転角 ϕ そして4) せん断変位 \bar{w} で規定し、軸方向の全体変位 W は、 w と v から定まる軸方向変位とせん断変位 \bar{w} の和としている。このような変位の設定より、1階と2階の偏微分から、はりの垂直とせん断ひずみが容易に定義される。

鷺津¹⁰⁾ が著述しているように、エネルギー原理に基づく変分法と外力の仮想仕事に従って、変位の変分ごとの境界条件を満たす微分方程式が得られ、これを解くことによって変位が求められることとなる。実際に、この微分方程式群をそのまま解くことは不可能であると思われ、近似解としての有限要素を求めてこれを活用することが一般的である。何も変分法での有限要素の定式化が常道ではなく、仮想仕事の原理から有限要素が導かれることも多い。

変分法の特徴は、導入した変位の全てが、ひずみエネルギーの二次式の展開から互いに連成するところにあり、そのエネルギー汎関数の停留条件より解が保証されることにある。すなわち川井モデルでは、異なる6つの連成項が生成され、そのうち独自の連成項は軸方向変位とせん断変位 ($w-\bar{w}$) とたわみとせん断変位 ($v-\bar{w}$) であることを知る。著者らはこれを自らの定式化に沿って、それぞれ第4項と第5項と呼んでいる。

一方で、仮想仕事の原理より有限要素を導く場合には、ひずみ場を任意に設定することを端緒とするため、必ずしも変分法のように、連成関係の全てを満たすとは限らず、恣意的な選択が可能である。

3. 川井モデル (Fc-model) の問題点と検証手法

著者らは、鷺津のエネルギー原理の系統に従って川井モデル (Fc-model) の第一変分を求め、それより低次の有限要素を導いた。この有限要素より、川井・藤谷や加島¹¹⁾ と同一の鋼製の片持ちばり (断面 $10 \times 80\text{mm}$, スパン 80mm) を解析対象とし、その曲げモード解析より一致した解を得た。さらに、はり自由端に引張力を作用させたが、軸方向の変位 w が発散した。

川井・藤谷は、鉄道車両構体⁴⁾ を対象とした有限要素解析を行っている。この解析例では、車両のス

パン中央で鉛直荷重を担い、同時に車両端部の支持端に捩じりモーメントを作用させているが、先の変分式からの軸方向変位とせん断変位の第4連成項を無視した有限要素方程式を構成させ、後の藤井⁶⁾も同一モデルを使用している。著者らは、この第4項を無視したモデル(Uc-model)を引張モード解析したが、解は妥当なものが得られている。

藤谷と藤井は、軸方向変位 w とせん断変位 \bar{w} を連成させる第4項を無視した理由には触れていない。しかしながら、変分式に存在する項を無暗に無視することはできず、著者らはこの第4項に関連する問題点についてここに解説したい。

なお、たわみ v とせん断変位 \bar{w} を連成させる第5項については後に触れる。

3.1 川井モデル(Fc-model, Uc-model)の検証手法

著者らの鉄筋コンクリートせん断はりモデル(前報⁷⁾のS-modelである)は、前述したとおり、川井モデル(Fc-model)に新たに鉄筋とコンクリート間のすべり変位 S を直接組み込んだものである。このすべり変位 S は、軸方向に沿った要素間距離ゼロとするズレであり、まさしくせん断変位の一つであって、同時に軸方向変位であると解釈される。もとより、川井モデル(Fc-model)の第4項の連成に問題があれば、本S-modelにおける鉄筋の軸方向変位 w_s 、すべり S 、せん断変位 \bar{w}_s 間の連成にも解の発散要因が顕在することとなり、川井モデル(Fc-model)における第4項の取り扱いは重要である。

本稿では、当然のことながら、エネルギー原理やこれに基づく変分法の正否を論じるつもりは毛頭ない。変分法は、あくまでも著者ら自身が設けた変位によるひずみから得られた数学展開に過ぎず、それは数学として適当である。問題は、川井モデル(Fc-model)の有限要素としての妥当性であり、その数値解の振る舞いは検証せざるを得ない。

単純なはりモデル、一般的な平面モデル、さらには三次元の有限要素の解析において、変分法から導かれ、境界条件を満足する要素が外力によって発散することはないようである。例え、第4項を無視したUc-modelで満足される解が得られたとしても、その演算精度保証はいかなるものなのか明らかにされたことはないようである。つまり、せん断はりのひずみエネルギーの変分より得られた連成項をフル

に使用せず、特定項を無視した有限要素の構成方程式を数値解析上の検証を経ずに使用することに幾許かの問題が内在することは否定できないように思われてならない。繰り返しの強調になるが、少なくともUc-modelへの数値解析上の精度保証が必要なことは必至であると言える。

3.1.1 検証比較モデルの設定

通常のはりモデルや平面モデルを用いた有限要素解は、実績を持って信頼されており、その適応分野は広範である。川井モデルは、曲げはりモデルの可撓性と平面応力モデルの曲げ・せん断変形性能の両者を有するため、はりモデルと平面モデルの中間的要素と理解しても良いように思われる。言い換えれば、平面応力モデルの鉛直変位をはりモデルのたわみが替わって担っているとも言えるだろう。このことから、川井モデルの変形挙動や解の精度を曲げはりモデルや平面応力モデルと比較することは、解析手法上、意味あることのように判断される。

ここに本研究では1)川井モデル(Fc-model, Uc-model)の数値解と2)一般的なはりモデルの解並びに3)平面応力モデルの解とを比較・検討し、川井モデル(Uc-model)の解析精度と変形特性の傾向を検証したいと考えている。

3.1.2 行列式と階数(ランク)の算定

川井モデルの変分式から導かれた有限要素では、要素の剛性マトリックスと外力の関係、さらには剛性マトリックスと質量整合マトリックス関係が構築される。エネルギー原理に基づく変分式は数学としての単純な展開として定まっており、先ずはそこに不適な有限要素の変分項は存在しないと見做されるため、前述の引張モード下での解の発散は、数値演算精度上の問題と考えられる。要約すれば、変分式に数学的な不適項は導出されはしていないが、数値演算上の誤差や特異性に起因された発散現象が観察されていると言うことである。

さらにもう一つの異なる視点は、変分式から有限要素の構成モデルが作成された段階で、力学的齟齬が生じている可能性が否めないことである。これを判断するには、本研究による検証結果を相互に比較して、総合的に判断することになる。

著者らは、有限要素解析の変位算定のためにa) Gauss-Johrdan法を有限要素構成式のband matrixに

適用し、その前進消去・後退代入によってシンプルに解法しているが、引張モード下で解は発散した。本解析対象モデルは極めて簡素な片持ちばりであり、形状・諸元に特異なものはない。また、連立多元方程式の解法 (solver) も既往の問題では有用であることは折り紙つきである。しかし、ここで solver の機能不足を疑い、b) 多元方程式の Lu 分解法を新たに採用し、剛性マトリックスにピボット選択と行の絶対最大値によるスケールリングを施したが、解の発散は止められなかった。さらには、c) 前処理つき共役勾配法を取り入れ、誤差外力による繰り返し演算を適用して精度の向上を試みたが、やはり結果は同じで解は発散した。そもそも通常の有限要素法の弾性解析において、特異解が得られることはまずないと言える。従って、川井モデルの (Fc-model) 特異性は、数値演算上の問題だけではなく、先に触れたように、変分式からの有限要素の構成に問題がある可能性も否定できないように思われる。

川井モデル (Fc-model) の有限要素の剛性マトリックスは、 $n \times n$ (ここに n は有限要素構成式の自由度であり、全変位数である) の正方マトリックスとされ、その解の存在は行列式の値が正である「正定値」となることである。このことは連立多元方程式の係数行列である剛性マトリックスの階数 (以下、ランクと記述する) が n (以後、フルランクと呼ぶ) となることと同値である。行列式を求めることよりもランクの探査は容易であり、本研究では簡素な Gauss の消去法からピボット判定による行の入れ替えを考慮してランクを算定することとする。なお、ランクについては線形代数学として下記のような同値関係が記され、その値によって大別される。

[I] rank $A = n$ が成り立つ場合 (フルランク)

- (1) 行列式 $|A| \neq 0$ (正定)
- (2) A は正則である
- (3) $Ax = 0$ は自明解のみを持つ

[II] rank $A \neq n$ (rank $A < n$) の場合

- (1) 行列式 $|A| = 0$
- (2) A は正則ではない
- (3) $Ax = 0$ は非自明解を持つ

さらにランクの計算より、その値が $n-m$ となれば、所与の連立多元方程式の正則は満足されず、安定した解を得るためには、すなわち剛性マトリックスの

正則を満たすために、 m 個の条件の欠如を明示する。これより、ランクは川井モデルの正定条件や演算精度の保証に有用であることを知る。

これに続けて、川井モデル (Fc-model) から先の第 4 連成項を欠落させた Uc-model のランク算定を行う必要もある。もし Uc-model がフルランクとなると、軸方向変位 w とせん断変位 \bar{w} との連成剛性が解を不安定とする要因であることが明らかにされ、Fc-model が所謂、質 (タチ) の悪い行列として構成されていることが物語られることになる。

次に、先のたわみ v とせん断変位 \bar{w} との連成を示す第 5 項について解説する。川井は、はりのせん断変形をたわみによって生じる単純な断面の回転によって記述することに限界があると考え、これを補正するためにせん断変位 \bar{w} をはり理論に導入した。これより第 5 項の連成が形成されており、この項の欠如は、川井モデルが川井モデルではなくなることを意味し、単純な曲げ問題においてさえせん断剛性項は変形に寄与しないこととなる。このことから、連成項としての第 5 項の無視は、もとより著者らの検証の外とされる。

3.2 せん断はり要素の精度解析

川井モデル (Fc-model) では、第 4 項の存在が有限要素方程式の正則を左右し、川井、藤谷、藤井らは第 4 項を無視することで解を得ている。しかしそうであっても、軸方向変位とせん断変位の連成を切った Uc-model の振る舞いについて未解明な部分を取り残されてように思われ、以下では解の演算精度保証の問題点について触れる。

3.2.1 剛性マトリックスの固有値解析

有限要素の剛性マトリックス A は実対称行列であることが多く、川井モデルもこれに他ならない。周知のごとく、この剛性マトリックス A の演算精度の評価に有効桁数^{12),13)} E_{fdig} を用いることが知られており、シンプルで明解な検証法であるため、本研究でもこれを採用することとする。

有効桁数 E_{fdig} を得るには、剛性マトリックス A の条件数 $\text{cond } |A|$ を事前に算定する必要がある。この $\text{cond } |A|$ は、剛性マトリックス A の実対称固有値解析^{14),15)} による最大固有値 λ^{\max} 並びに最小固有値 λ^{\min} の比 $\lambda^{\max}/\lambda^{\min}$ の常用対数値として定められる。ここで、計算環境最大桁数を E_{ndig} とすると有効桁数 E_{fdig} は

E_{ndig} から $\text{cond } |A|$ を差し引いた値である。

なお固有値解析では、剛性マトリックス A を *Householder* 変換により三重対角行列に変換し、その三重対角行列の固有値を二分法で求め、付け加えれば固有ベクトルは反逆法で計算している。著者らの資料渉猟は限られるが、一般的なはり要素や平面要素の解析精度についての記述に触れることはできなかった。既往の膨大な関連解析例の中で、両要素とも敢えて演算精度を明示せずとも、十分な実用精度を有していると暗黙裡に保証されているのが実情である。ただし、ここで述べている有効桁数 E_{fdig} は演算精度の検証に過ぎず、要素のひずみ・応力の実現象の表示能力の高さを示すものとは別ものであることは注記しておきたい。

一般のはり要素のひずみ場は、単純な垂直ひずみである。一方平面要素では、鉛直・水平二方向の垂直ひずみとせん断ひずみによる平面応力場が構成されるので、せん断はり解析では平面要素が有用なことは自明である。これらの通常使用の要素と川井モデルのせん断はり要素の有効桁数 E_{fdig} の相互比較から、川井モデルに解析上の位置付けを与えることは重要であり、これによってはじめて著者らの S-model の解析手法が有用となる。

3.2.2 解析有効桁数への要因検証

上述したとおり、解析有効桁数 E_{fdig} は剛性マトリックス A の条件数 $\text{cond } |A|$ の大きさから設定される。一般に、有限要素法の解析結果は解析パラメータの変動による有効桁数 E_{fdig} の減少、すなわち演算精度の低下が観察されると認識されており、以下にこれを記す。

[解析精度の低下傾向の要因]

- (1) 有限要素モデルの分割数を大きくすると、条件数 $\text{cond } |A|$ が大きくなり、有効桁数 E_{fdig} は小さくなる。ただし、分割数の増大は変位やひずみ・応力解析の要素精度を向上させることは周知の事実である。
- (2) 要素形状を細長い (アスペクト比が小さい) 要素を用いると、条件数 $\text{cond } |A|$ が大きくなる。
- (3) 剛性マトリックス A の係数配置において、大きな係数項が集中するような変位の取り方をすると、条件数 $\text{cond } |A|$ が大きくなる。

はり要素や平面要素では、要素分割による変位の収束性やひずみ・応力の分布状況の観察から、解の精度を論じることが殆どあり、これで解析精度は十分に評価される。しかし、川井モデルのように解の発散が認めらる不明確な要素では、この変位、ひずみ・応力の検証の前に、上記 (1) と (2) の変動による剛性マトリックス A の有効桁数 E_{fdig} へ及ぼす影響について検討することは、極めて重要であると言える。

なお、項目 (3) については要素の節点変位順に要素剛性マトリックスを構築することが、解の精度を安定させることは知られており、従来の変位表示はこれに沿うことが多く、川井モデルでもこれと同様とする。

3.2.3 変位・ひずみ・応力の検証

先に述べてきたとおり、本研究では、川井・藤谷が示した片持ちばり²⁾を解析対象に定め、はり要素、川井モデル (Uc-model) そして平面要素 (4 角形 4 節点アイソパラメトリック要素) を用いて、要素分割数や要素アスペクト比をパラメーターとしたケーススタディーを実施し、有効桁数 E_{fdig} そして変位と応力への影響を検証する。

3.3 境界条件による変位の縮約

上谷¹⁰⁾ は、*Timoshenko* はりの解析において境界条件である固定端、ピン、ローラにおける軸方向変位を単純に固定せず、曲げたわみ v の連成を考慮して拘束し、変位を縮約する手法を提示している。

藤井⁶⁾ は、先の軸方向変位 w とせん断変位 \bar{w} との第 4 連成項を無視した川井モデル (Uc-model) を用いて高層建物の固有値解析などに使用している。柱脚での固定端の軸方向変位 w とせん断変位 \bar{w} そしてたわみ v と回転角 ϕ を同時に完全固定していたが、後続論文⁷⁾で上谷の縮約手法を取り入れ、軸方向変位 W から変位を縮約して修正解を求めている。

藤井の解析では、第 4 項を無視した Uc-model を用いているために、Fc-model における引張モード下の解の発散を変位の縮約から解消されるかどうかの成否は検証されていない。注目すべきは、変位の縮約は剛性マトリックスの縮約と同意であり、剛性マトリックスの正則を促す可能性がある。著者らは、上谷の縮約法を Fc-model に適用して、剛性マトリックスの有効桁数や引張モード下の検証を行う。さ

らには、変位の縮約を施した Uc-model を使用して、要素分割数や要素アスペクト比が有効桁数や変位とひずみ・応力に与える影響も検証することとする。

本稿では、単純なはり曲げ理論に軸方向変位を導入したはりモデルにせん断変位を組み込んだ川井モデルの問題点とその検証手法について触れてきた。今後は、これ沿って数値解析し、その検証結果から著者らの提示している鉄筋コンクリートせん断はりモデル (S-model¹⁾) の基礎資料を得ることとする。

4. まとめ

川井・藤谷は、純曲げはりに軸方向変位を導入したはりモデルに、さらにせん断変位を組み込んだせん断はりモデル^{2)~5)}を定式化した。このモデルはエネルギー原理に基づく変分式から有限要素の形で構築されているが、1) 全関連項を使用する Fc-model と 2) 軸方向変位とせん断変位の連成を無視した Uc-model が設けられている。

著者らは、上記の川井モデル (Fc-model) に鉄筋とコンクリート間のすべりを組み込み、新たな鉄筋コンクリートせん断はりの有限要素 (S-model¹⁾) を構築した。しかしながら、この S-model と川井モデル (Fc-model) 自身をケーススタディーしたところ、軸方向変位とせん断変位の連成が、解の発散を惹起させることが示された。このことは、著者らモデルの精度検証の前に川井モデルの連成項の取扱いと解析精度の検証が回避せざることを示唆している。

これより、本稿では川井モデルの問題を明らかにしてその検証手法を解説し、その背景と論拠に触れた。検証手法としては、1) 剛性マトリックスの階数 (ランク) の算定、2) 剛性マトリックスの実対称固有値解析によるの演算精度としての有効桁数の解析、3) 要素分割数と要素アスペクト比が、変位とひずみ・応力に及ぼす影響、4) 変位の縮約による Fc-model の解の安定化の解析などである。

本稿のカテゴリーは「ノート」として区分され、本手法に従って得られた解析数値を掲げることはしていない。今後は、稿を改めて数値検証の結果とその考察について論述する予定でいる。

参考文献

1) 和田俊良, 高瀬裕也, 井上圭一 : 変分法を用

いたせん断変位と付着すべりを組み込んだ RC はりモデルの開発, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 93, 2020.6

- 2) 川井忠彦, 藤谷義信 : 梁理論の精密化に関する二, 三の試み (その 5) - 梁の剪断変形理論 (続) -, 生産研究, Vol26, No.9, 1974.6
- 4) 川井忠彦, 藤谷義信, 神津啓時 : 薄肉梁理論による鉄道車両構体の有限要素解析, 生産研究, Vol.35, No.8 (1983.8)
- 5) 藤谷義信 : 薄肉はり構造解析, 培風館, 1990.6
- 6) 藤井大地, 藤谷義信 : 薄肉はり理論による立体高層骨組の有限要素解析法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.453, Nov. 1993
- 7) 藤井大地, 藤谷義信 : 薄肉はり置換法の実務構造設計への適用に関する検討 - 薄肉はり置換法による高層ビルの構造解析に関する研究 (その 2) -, 日本建築学会構造系論文報告集, No.467, Jan. 1995
- 8) Timoshenko S.P., Goodier N. : Theory of Elasticity, McGraw-Hill Co., New York, 2nd ed, 1951
- 9) 越川武晃, 上田正生, 内山武司, 和田俊良 : 横せん断応力の影響を考慮したチモシェンコ梁部材の弾塑性解析, 日本建築学会構造系論文集第 570 号, pp.69-76, 2013.8
- 10) 鷺津久一郎 : エネルギー原理入門 初版第 2 版, 培風館, 1982.6
- 11) 加鳥裕昭 : 薄肉構造部材の離散化モデルによる高精密化解析, 名古屋大学博士論文, 1992
- 12) 鷺津久一郎, 宮本博他 : 有限要素解ハンドブック I 基礎編 第 7 版, 培風館, 1990
- 13) 菊地文雄 (訳) : 有限要素法の数値計算 2 刷発行, 培風館, 1982.2
- 14) 川井忠彦, 藤谷義信 : 振動および応答解析入門, 培風館, 1991.6
- 15) 渡部力他 : Fortran77 による数値計算ソフトウェア, 丸善, 1989.12
- 16) 上谷宏二 : ティモシェンコ梁の有限要素剛性方程式誘導のための縮約法, 構造工学論文集, 1993.3