ISSN 0540-4924

宮崎大学 工学部
紀 要

MEMOIRS

OF FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF MIYAZAKI

No. 52 November, 2023

FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF MIYAZAKI, JAPAN

宮崎大学 工学部

Editorial Committee
Chairman : Hiroki TAMURA

Kensuke NISHIOKA
Asuka INADA
Mitsuteru IRIE
Hirosumi YOKOYAMA
Osamu OONISHI
Susumu KATAYAMA
Hirofumi IZUHARA

Original articles are can be seen at the University of Miyazaki Academic Repository.
(https://miyazaki-u.repo.nii.ac.jp/)

These memoirs are issued annually.
All communications are to be addressed to the chairman of the committee, Faculty of Engineering, University of Miyazaki, Gakuen Kibanadai Nishi 1-1 889-2192, Japan.
(Tel. 0985-58-2871)

MEMOIRS OF FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF MIYAZAKI
No. 52, November 2023
CONTENTS

Original Articles

Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO
Influence of Specific Surface Area of Cement Solidified Fly Ash on Leaching Amount of Easily Soluble Substances 1

Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO
Influence of Non-rainfall Period and Surrounding Particle Size on Leaching Amount of Easily Soluble Substances from Cement solidified Fly Ash 11

Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO
Effect of External Concentration on Leaching Amount of Easily Soluble Substances in Cement Solidified Fly Ashh 17

Yutaka DOTE, Hideki HARADA, Tomoo SEKITOO
Environmental Safety of Solar Panel Componets Used as Fine Aggregate for Concrete 23

Yuki TOYOTA, Naohiro KAMIBEPPU, Chihiro MORITA
Investigation of Recovery Status of Damaged Bridges on the Kuma River and Examination of Practicality of Mobile Bridgesr 31

Shogo TAWARA, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATU, Masatoshi KIMURA
Development of Heat Storage Particles Lifting Device for Solar Thermal Receiver 41

Tianmu ZHAO, B. SHIN
Numerical Method for Unsteady Gas-Liquid Two-Phase Flow using Preconditioning 47

Bayu K. WARDHANA, B. SHIN
Numerical Investigation of the Aerodynamic Performance of Winglet Configurations for Wind Turbine Blade 53

Kensei FUJITA, B. SHIN
Numerical Study of Laminar Separated Flow in a Symmetric Sudden Expansion Channel 59

Akito YOSHIMATSU, Yasuhiro BONKOBARA, Nobo UEOKA, Takayuki HAMAHATA, Kentaro SAKAI, Atsushi NAKANO, Shinichi TERAZONO
Development of Borehole Seismometer Using Conical Pendulum to Three-Component Velocity Measurement 65

Kota KATSUKI, Yasuhiro BONKOBARA, Shunsuke NAKANO, Takayuki HAMAHATA
Countermeasure against Frictional Vibration in Electric Sander by Dynamic Absorber 71

Riku KAMIYA, Yasuhiro BONKOBARA, Rio MATSUO, Takayuki NARAHARA,Takayuki HAMAHATA
Suppression Effect of Two Flexible Joints for Underwater Sound Propagation 77

Takeaki MIYASHITA, Tetsuro KATAYAMA
Proposal of a Framework for Continuous Support of the Implementation Step in TDD ····· 81

Noriko KAWASAKI
Story of Personal Experiences of Two Graduates in the Master' s Double Degree Programr ····· 87

Masatoshi BEPPU, Makoto SAKAMOTO
Implementation and Effectiveness of Viewpoint Switching in VR Using Smartphones ····· 95

Masatomo IDE, Makoto SAKAMOTO
Basic Study on Customization of Video Production ····· 101

Kouki MORIMOTO, Makoto SAKAMOTO
A Study on Extensions to Prevent User Selection Malfunctions in Blender ····· 109

Kakeru TAKEMURA, Shogo SONODA, Makoto SAKAMOTO, Atsushi IIBOSHI
Description of the Character by the Inbetweening Algorithm for Animation Ⅲ ····· 115

Kakeru TAKEMURA, Sho KODAMA, Makoto SAKAMOTO
Basic Study on Speed Suppression Using Visual Illusion by Projection Mapping ····· 121

Ota HAMASUNA, Makoto SAKAMOTO
Prototype of Markerless WebAR by UsingRight Handas Object of Recognition ····· 125

List of Master's Thesis ····· 132
Others ····· 136

目　次

研究報告論文

土　手　　裕
関　戸　知　雄
：セメント固化飛灰の比表面積が易溶解性物質の溶出量に及ぼす影響 …… 1

土　手　　裕
関　戸　知　雄
：非降雨期間および周辺粒子粒径の固化飛灰からの易溶解性物質溶出量への影響 …… 11

土　手　　裕
関　戸　知　雄
：外部濃度がセメント固化の易溶解性物質溶出量に及ぼす影響 …… 17

土　手　　裕
原　田　秀　樹
関　戸　知　雄
：太陽光パネル部材のコンクリート用細骨材としての環境安全性 …… 23

豊　田　祐　樹
上別府　尚　弘
森　田　千　尋
：球磨川における被災橋梁の復旧状況調査とモバイルブリッジの実用性の検討 …… 31

俵　　彰　吾
長　瀬　慶　紀
友　松　重　樹
木　村　正　寿
：粒子流動型レシーバのための蓄熱粒子持ち上げ装置の開発 …… 41

Tianmu ZHAO
B. SHIN
：Numerical Method for Unsteady Gas-Liquid Two-Phase Flow using Preconditioning … 47

Bayu K. ARDHANA,
B. SHIN
：Numerical Investigation of the Aerodynamic Performance of Winglet Configurations for Wind Turbine Blade …… 53

藤　田　健　誠
B．　シ　ン
：二次元対称急拡大チャンネル内層流はく離流れの数値解析 …… 59

吉　松　爽　杜
盆子原　康　博
上　岡　野　歩
濵　畑　貴　之
境　健　太　郎
中　野　　敦
寺　薗　信　一
：円錐振り子を利用した３成分速度型ボアホール地震計の開発 …… 65

勝　木　広　太
盆子原　康　博
中　野　駿　輔
濵　畑　貴　之
：動吸振器による電動サンダーの摩擦振動抑制効果 …… 71

神　谷　　陸：フレキシブル継手の２段設置による管内水中音伝播の抑制効果 …… 77
盆子原　康博
松　尾　理　央
楢　原　貴　之
濵　畑　貴　之

宮　下　丈　明：テスト駆動開発における実装工程の継続的な支援を目的としたフレームワークの提案 … 81
片　山　徹　郎

川　崎　典　子：ダブル・ディグリー・プログラムの体験者２名による語りに基づく一考察 …… 87

別　府　雅　敏：スマートフォンを利用した VR の視点切り替えの実装と効果について …… 95
坂　本　眞　人

井　手　理　智：映像制作のカスタマイズに関する基礎研究 …… 101
坂　本　眞　人

森　本　光　喜：Blender におけるユーザの選択時誤作動を防ぐ拡張機能の検討 …… 109
本　　眞　人

武　　村　　架：アニメーションの中割りアルゴリズムによるキャラクターの描写Ⅲ …… 115
田　　彰　　悟
坂　本　眞　人
飯　干　淳　志

武　　村　　架：プロジェクションマッピングによる視覚的錯覚を用いた速度抑制についての基礎研究 … 121
児　　玉　　尚
坂　本　眞　人

濵　砂　桜　太：右手を認識対象としたマーカーレス型 WebAR の試作 …… 125
本　　眞　　人

修士論文題目一覧 …… 132
その他　　…… 136

セメント固化飛灰の比表面積が易溶解性物質の溶出量に及ぼす影響

土手　裕 a)・関戸　知雄 b)

Influence of Specific Surface Area of Cement Solidified Fly Ash on Leaching Amount of Easily Soluble Substances

Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO

Abstract

The purpose of this study was to develop salt leaching control technology by solidifying fly ash with cement. Cylindrical specimens with different porosity were prepared to determine the parameters of the leaching model. Three cubic specimens with different size were prepared to clarify the relation between the specific surface area of the specimen and the leaching amount per specimen weight. Tank leaching tests were performed on these cylindrical and cubic specimens. As the porosity of specimen increased, the rate constants of surface dissolution were decreased, and the ratio of volume of specimen contributing to surface dissolution were increased. As the specific surface area was decreased, dimensionless cumulative leached amounts of Na, K and Cl were decreased, which means that leaching of salts from cement solidified fly ash could be controlled. In the non-depleted region, the actual leaching from cubic specimen was expressed by the proposed leaching model very well in both cases where the ratio of the maximum leaching amount per surface area was considered constant and where the depth contributing to surface dissolution was considered constant.

Keywords: Cement solidified fly ash, Easily soluble substance, Specific surface area

1.　はじめに

一般廃棄物の直接焼却率は平成 29 年度に 80%程度であり [1]、ごみ焼却率の向上に伴い埋立物のうち焼却残渣（焼却灰と飛灰）の割合が増加する傾向にある [2]。焼却残渣のうち、特に焼却飛灰には易溶解性物質が多く含まれており [3]、浸出水中の塩類の高濃度化が進行する。塩類の高濃度化は埋立層内の物理化学的・生物学的作用、浸出水処理施設機能、放流先の水環境に悪影響をもたらすため [4]、浸出水中の脱塩処理が行われている。脱塩処理によって生成される副生塩は工業塩として再利用する方法が検討されているが、天然塩と比較してコストが高すぎる。そのため、処分場で保管または産業廃棄物として処分されている [5]。

一方で、飛灰には重金属類が多く含まれているため、飛灰を埋立処分する場合に中間処理を行わなければならない。飛灰の中間処理のうち、セメント固化処理は易溶解性物質の一つである塩類の不溶化は出来ないが、セメント固化体は屈曲などの物理的要因により拡散が遅延される [6]。セメント固化体からの易溶解性物質の主要な溶出機構は固化体表面に付着する易溶解性物質の溶出と固化体試料内部からの表面への拡散である [7]。そのため、セメント固化体からの易溶解性物質の重量当たり溶出量は固化体を大きくすることで抑制できると予想されるが、固化体の大きさと重量あたり溶出量の関係は報告されていない。

溶出モデルは表面溶出モデルと内部拡散モデルの組み合わせによって表現される [8]。内部拡散モデルで用いられる拡散係数 D は空隙率 θ と関係があり、空隙率が増加すると拡散係数は増加する [9]。また、竹本は表面溶出が暴露面近傍で生じるため、固化体の全体の体積のうち、表面溶出に関与する体積の割合を γ を用いて表現し、溶出モデルとした [10]。

そこで、本研究ではセメント固化体の大きさによる塩類溶出抑制効果の検討を目的として、異なった大きさのセメント固化体を用いてタンクリーチング試験を行い、固化体の大きさと固化体重量当たり溶出量の関係を明らかにした。さらに、溶出量予測モデルの適応性を検討した。

2.　実験方法

2.1 供試体の作成

2.1.1 固化方法

A 市の一般廃棄物焼却施設（活性炭と消石灰を吹き込む排ガス処理を行っている）の焼却飛灰を実験に用いた。固

a) 土木環境工学プログラム教授
b)土木環境工学プログラム准教授

表1　供試体作成条件.

供試体ID	C/A (%)	W/S (%)	A:飛灰 (g)	C:ｾﾒﾝﾄ (g)	W:水 (g)
A-20-20	20	20	54	11	13
A-30-20	30	20	58	17	15
A-40-20	40	20	54	21	15
A-50-20	50	20	50	25	15
A-20-30	20	30	50	10	18
A-30-30	30	30	58	17	23
A-40-30	40	30	68	27	29
A-50-30	50	30	63	32	29
A-20-40	20	40	75	15	36
A-30-40	30	40	77	23	40
A-40-40	40	40	78	31	44
A-50-40	50	40	73	37	44

表2　供試体作成条件（円柱供試体）.

供試体ID	目標空隙率(%)	C/A (%)	W/S (%)	A:飛灰 (g)	C:ｾﾒﾝﾄ (g)	W:水 (mL)
B-30	30	50	30	720	360	324
B-35	35	40	40	684	274	383
B-40	40	20	40	792	158	380

表3　供試体作成条件（立方体供試体）.

供試体ID	一辺の長さ (cm)	C/A (%)	W/S (%)	A:飛灰 (g)	C:ｾﾒﾝﾄ (g)	W:水 (mL)
C-4	4	40	40	284	93	131
C-6	6	40	40	252	101	141
C-8	8	40	40	600	240	336

化体の作成条件を決定するために、内径6cm、高さ2cmの塩化ビニール管を1辺が7cmの正方形の板で底を閉じたモールドを用いて実験を行った。表1に示す、供試体作成条件に従って、飛灰に対する普通ポルトランドセメントの添加率（C/A）を重量比で20%-50%の範囲で添加した。 また、セメントと飛灰の合計である固形分（S）に対する水の添加率（W/S）を重量比で20%-40%の範囲で添加した。混練り用の容器にセメントと飛灰を所定量取り、自動混練り機（ウィップミックス社製、VPM2）を用いて2分間の混合を2回行った。その後、所定量の水を添加して3分間の混合を2回行い、モルタルを作成した。充填方法はモールドの高さの1/2程度までモルタルを詰めて締め固め、モールド上端までモルタルを追加し締め固めた後、モルタルを少しずつ追加しながら上部が平らになるように整えた。モルタルを充填したモールドにラップをかけ室温 25℃で1週間養生した後、脱型した。

タンクリーチング試験用の供試体は直径5cm、高さ10cmの円柱モールドと一辺が4、6、8cmの3種類の立方体モールドを用いた。表2、表3に示す条件に従って、円柱供試体および立方体供試体を1条件につきそれぞれ3個（タンクリーチング試験用に2個、分析用に1個）作成した。円柱供試体は空隙率が30、35、40%となるように、立方体供試体は空隙率が35%になるように条件を設定した。混練りは上記と同様の方法で行った。C-8以外の供試体はそれぞれ3供試体分を一度に混練りしてモールドに充填し、C-8供試体は1つずつ混練りしてモールドに充填した。充填方法はモールドに高さの1/3程度モルタルを詰めて、金属の突き棒で締め固める操作を3度行い、上端までモルタルを充填した後、上端を平らになるように整え、上記と同様にして養生を行った。

2.1.2 防水方法

養生終了後に円柱供試体を脱型・重量測定後、表面に大きな空隙がない供試体を2つ選び、タンクリーチング試験用の供試体とした。タンクリーチング試験に使用する円柱供試体は、上面のみを暴露面として使用するため、暴露面以外の底面と側面はシリコーンシーラント（セメダイン株式会社、SM-451）で覆った。また、タンクリーチング試験の際に供試体をつるすためのアクリル糸（ビッグマン工作所、No.10、直径0.52mm）を供試体の重心よりも高い位置に結び付け、その上からシリコーンシーラントを塗り、アクリル糸を固定した。その後、ポリビンの口にひっかけて静置できるように竹串にアクリル糸を結び、セメダインスーパーX（セメダイン株式会社）を用いて固定した。

2.2 試験方法

2.2.1 固化体試料の前処理

脱型した分析用セメント固化体は、C-8以外の供試体は全量をC-8は全量の半分を乳鉢で粗粉砕し、105℃で恒量になるまで乾燥して含水率を測定した。乾燥後の試料の一部を空隙率測定用試料として保存した。残りの試料は乳鉢を用いて2mm以下になるように粉砕し環境庁告示13号溶出試験（以後、13号溶出試験と呼ぶ）、シリアルバッチ試験、全含有量試験に用いた。

2.2.2 全含有量試験

粉砕した試料約0.2g、蒸留水50mL、濃硝酸5mL、30%過酸化水素水0.5mL（塩素分析は0.1ml）をこの順番でコニカルビーカーに加え、時計皿で蓋をして 240℃に設定したホットプレートで完全に乾燥させないように最低30分煮沸した後、室温まで冷却した。ガラス繊維濾紙（Whatman、GF/B ）を用いて全量を吸引濾過し、蒸留水で100mLにメスアップした。

2.2.3 溶出試験

13号法溶出試験については、1Lのポリ瓶に粉砕した試

料を約 40g 取り、L/S=10 となるように蒸留水を加え、200rpm で 6 時間振とうを行った後、上澄みを 0.45μm のメンブランフィルターを用いて濾過した後、残った溶液の EC および pH を測定した。

シリアルバッチ試験については、500ml の遠心分離管に粉砕した試料を約 10g 取り、蒸留水 400ml を加え、200rpm で 6 時間振とう後、5000G で 10 分間遠心分離を行った。遠心管の上澄み水を 500ml のメスシリンダーに移し容量を測定した後、溶液を 0.45μm のメンブランフィルターを用いて濾過した後、メスシリンダーに残った溶液の EC および pH を測定した。翌日、蒸留水 300ml を遠心管に加え、上記と同様の操作を行った。これを繰り返して、合計で 4 回の溶出操作を行った。

タンクリーチング試験については、円柱供試体を 2L のポリビンに蒸留水を 1.5L 加えて供試体を静置した（L/S=4.1～4.5）。 静置後、所定の時間が経過したら、供試体をつり上げて、新しい蒸留水を入れたポリビンに供試体を移した。蒸留水の交換時間は肴倉の方法[11]と同様に、試験開始から 0.125、0.25、0.5、1、2、4、8、16、32 および 64 日目とした。供試体を取り出した後の溶液の一部を 0.45μm メンブランフィルターで濾過した後、残っている溶液の pH と EC を測定した。供試体 C はハイパック（ENTEC、S-61）に L/S=5 となるように蒸留水を加えて C-4 供試体を静置した。C-6、C-8 供試体の場合は C-4 供試体の溶液量/表面積（L/A（mL/cm^2））と同じになるように蒸留水をハイパック（ENTEC、S-62（C-6 供試体）、S-65（C-8 供試体）に加えて静置した。加える蒸留水の量は C-4 供試体は 0.6L、C-6 供試体は 1.2L、C-8 供試体は 2.3L とした。実際の L/S および L/A を表 4 に示す。静置後、円柱供試体と同様の時間が経過したら、ハイパックの蓋を開け、使い捨てのゴム手袋を着用し、供試体をつかみ表面の水滴を落とした後、新しい蒸留水を入れたハイパックに供試体を移し、ハイパックの蓋をして静置した。その後の操作は円柱供試体と同様に行った。供試体を静置する際、プラスチック製シャーレで作成した台をハイパックの底に置き、その上に供試体を置いた。C-4 供試体は高さが 0.8cm のシャーレを、C-6 および C-8 供試体は高さが 1.3cm のシャーレを用いた。なお、表面についている気泡を除くため、静置期間の 16-64 日の間は週に 2 回、供試体を空気中に出して気泡を除いた後、再度静置する操作を行った。

2.3 分析方法

全ての濾液には濃硝酸を 0.5%加えて保存した。Na、K、Ca、Mg 濃度はフレーム原子吸光光度法（HITACHI Z-2000）を用いて分析を行った。また、Cl 濃度はチオシアン酸水銀法により分析した。空隙率は粗粉砕した試料のうち約 1cm 程度の物を再度十分に乾燥させて水銀ポロシメータ（島津製作所、オートポアⅣ9500 ）で測定した。

3. 解析方法

表 4 実際の L/A 比および L/S 比.

試料 ID	C-4		C-6		C-8	
繰り返し番号	1	2	1	2	1	2
L/A 比	6.3	6.3	5.6	5.6	6.0	6.0
L/S 比	5.1	5.0	3.0	3.0	2.4	2.3

3.1 既往の溶出モデル

表面溶出モデルについては式(1)に示す様に、含有量 Q(mg/kg)の減少速度が含有量に比例する[8]。重量当たり累積溶出量 M(mg/kg)と Q の間には式(2)の関係があることから、t=0 で $Q=Q_0$ の初期条件で式(1)を解くことで M は式(3)で表現できる。

$$\frac{dQ}{dt} = -kQ \tag{1}$$

$$\mathrm{M} + \mathrm{Q} = Q_0 \tag{2}$$

$$\mathrm{M} = Q_0(1 - e^{-kt}) \tag{3}$$

ここで、Q_0 は初期含有量(mg/kg)、k は表面溶出速度定数(1/s)、t は経過時間(s)を表す。筆者らは、表面溶出は暴露面近傍で生じるので、式(1)の Q は固化体全体の含有量ではなく、暴露面近傍部分の重量当たりの含有量であると考え、固化体全体の体積のうち、表面溶出に関与する体積の割合をγとして、最大表面溶出量 Qa を式(4)で定義し、式(3)を式(5)に書き変えた[10]。

$$Q_a = \gamma Q_0 \tag{4}$$

$$\mathrm{M} = Q_a(1 - e^{-kt}) \tag{5}$$

拡散溶出モデルについては肴倉[11]の方法に従った。固化体内部で溶解した物質が、固化体外へ溶出するとき、溶解物質の単位時間単位断面積当たりの移動量すなわちフラックス J(mg/(m^{2}s))は濃度勾配に比例し、フィックの第一法則から式(6)で表される。

$$\mathrm{J} = -D_e \frac{dC}{dx} \tag{6}$$

ここで、De は有効拡散係数(m^2/s)、C は濃度(mg/m^3)、x は暴露面からの距離(m)をそれぞれ表す。C は x と時間 t との関数であり、フィックの第二法則から式(7)で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial C^2} \tag{7}$$

内部濃度 C_0 および外部濃度 C_1 がそれぞれ一定とすると、初期及び境界条件は以下の通りである。

$t=0$、$x \leqq 0$；$C=C_0$

$t>0$、$x=0$；$C=C_1$

$t>0$、$x=-\infty$；$C=C_0$

これを解くと

$$-\frac{C-C_1}{C_0-C_1} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\zeta} \exp(-\zeta^2)\, d\zeta \tag{8}$$

ここで、

$$\zeta = \frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \tag{9}$$

$$C_0 - C_1 \fallingdotseq C_0 \tag{10}$$

表5　用いた飛灰の元素含有量(%).

試料	Na	K	Ca	Mg	Cl
飛灰	3.1	3.1	16	1.2	17
報告値*	3.2 (1.9-4.5)	2.4 (0.4-3.3)	18 (13-26)	1.3	13 (8.4-20)

*：文献12、13、14の平均。括弧内は最小値と最大値

である。以上からx=0すなわち試料表面からの溶出フラックスJは、開始から時刻tまでの重量当たり累積溶出量は式(8)をx=0の条件で時刻tまで積分した形で表現される。

$$M = 2SC_0\sqrt{\frac{D_e t}{\pi}} \tag{11}$$

ただし、Sは比表面積(m^2/kg)を表す。実際の溶出は表面溶出式(5)と拡散溶出式(11)の合計であるので式(12)で表される。

$$M = Q_a(1 - e^{-kt}) + 2SC_0\sqrt{\frac{D_e t}{\pi}} \tag{12}$$

3.2 提案するモデル

溶出モデルを立方体供試体に適用するために表面溶出項に2種類の修正を行った。ケース1として、立方体の大きさによらず最大表面溶出量の割合が一定の場合を考えた。ただし、立方体の場合は暴露面が1面ではなく6面あるので面の数を式(4)に乗じた。

$$Q_{a1} = 6\,\gamma\,Q_0 \tag{13}$$

ケース2として、立方体の大きさによらず、表面溶出する深さ(あるいは体積)が円柱供試体と同じ場合を考えた。すなわち円柱供試体の表面溶出する深さは$\gamma * L_0$となるので、これに立方体の面積($6*L_C^2$)を乗じたものを立方体の体積L_C^3で除すことでQa_2を求めることができる。

$$Q_{a2} = 6\frac{\gamma L_0 L_c^2}{L_c^3}Q_0$$

$$= 6\frac{\gamma L_0}{Lc}Q_0 \tag{14}$$

ここで、L_0は円柱供試体の高さ、L_cは供試体Cの一辺の長さを表す。

3.3 モデルパラメータの決定方法

パラメータDe、k、γは円柱供試体Bのタンクリーチング試験のMの実測値と計算値の残差二乗和が最小となるようにエクセルのソルバーを用いて求めた。

4.　結果と考察

4.1 用いた飛灰性状

本研究で使用した飛灰の含有量分析結果を表5に示す。また、既往の研究[12)~14)]で報告されている値も表中に示す。本研究で用いた飛灰の含有量は既往の研究で報告されている値と同程度であった。

表6　飛灰の溶出率(%).

Na	K	Ca	Mg	Cl
87	81	30	0.003	110

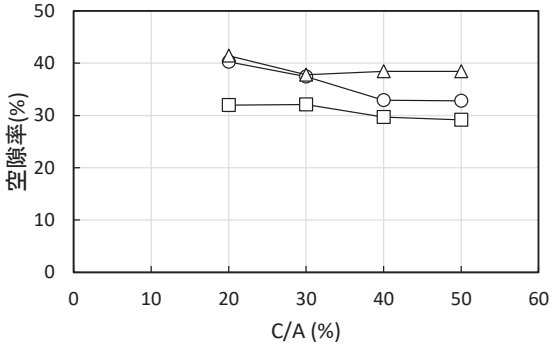


図1　固化体作成条件と空隙率の関係（○：W/S=20%, □：W/S=30%, △：W/S=40%.

用いた飛灰の溶出率を表6に示す。なお、溶出液のpHは12.3であった。Na、Kの溶出率は80%以上、Clの溶出率は110%であり、多くが可溶性のものであった。なお、Clの溶出率が100%をわずかに超えているのは、試料のばらつきのためだと考えられた。Caの溶出率は30%と低かった。これは、本研究で用いた飛灰は排ガス処理のために飛灰中に$Ca(OH)_2$が吹き込まれているが、そのうちClと反応して$CaCl_2$となった易溶解性のCaと未反応の難溶性の$Ca(OH)_2$が含まれており、難溶性の$Ca(OH)_2$が多く含まれていたためCaの溶出率は低くなったと考えられた。Mgはほとんど溶出しなかったが、これは、pHが高いため溶出しなかったと考えられた。

4.2 セメント固化条件と物理特性

固化体作成条件と空隙率の関係を図1に示す。C/Aが大きくなるにつれて空隙率は減少したが、C/A=40%と50%での空隙率の差は小さかった。既往の研究[15)]ではW/S=40%-65%の範囲でC/Aが増加するにつれ空隙率は減少する傾向が報告されており、本研究も同様の結果となった。また、何れのC/A条件でもW/S=30%の空隙率が最も低かった。C/A=20%と30%の条件ではW/S=20%と40%での空隙率の差はほとんどなかったが、C/A=40%以上ではW/S=40%の空隙率の方がW/S=20%での空隙率よりも高くなった。既往の研究[15)]ではW/S=40%-65%の範囲でW/S比の増加に伴い、空隙率は増加することが報告されている。しかし、本実験ではW/Sが最も低いW/S=20%の空隙率は最小にはならなかった。その原因として、本実験では充填時の流動性が低く、十分に充填できず空隙が増えたためであると考えられた。本実験条件の範囲では、セメント固化体の空隙率は30-40%で

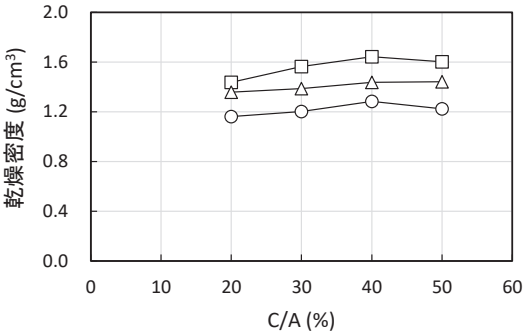


図 2　固化体作成条件と乾燥密度の関係（○:W/S=20%, □: W/S=30%, △: W/S=40%）.

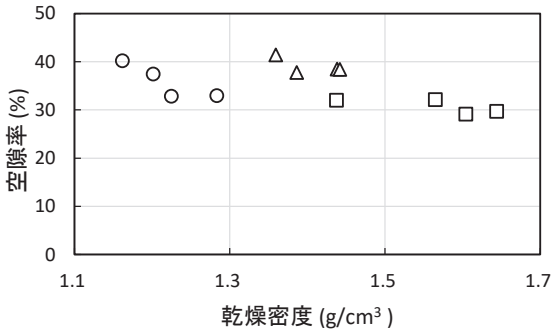


図 3　乾燥密度と空隙率の関係（○: W/S=20%, □:W/S=30%, △: W/S=40%）.

あった。

図 2 に固化体作成条件と乾燥密度の関係を示す。C/A が大きくなるにつれて乾燥密度は増加したが、C/A=40%と50%ではほとんど差がなかった。既往の研究 [16] では C/A=35%-80%の間で、C/A が増加するにつれて乾燥密度が 1.1 から 1.2g/cm³ に増加することが報告されており、本研究も同様の傾向であった。C/A の乾燥密度は何れの C/A 条件でも W/S=30%が最も大きかった。W/S が小さくなると乾燥密度が大きくなると考えられるが、本実験では W/S が最小である W/S=20%で乾燥密度が最も小さかった。W/S=20%で乾燥密度が低かった原因は、前述した空隙率と同様、充填時の流動性が低く、十分に充填できず空隙が増えたためであると考えられた。

図 3 に乾燥密度と空隙率の関係を示す。竹本の研究 [10] では、乾燥密度が大きくなると空隙率は減少しており、本研究も同様の結果であった。空隙率が 30%を下回ることは無かった。

4.3 供試体の物理・化学特性

タンクリーチング試験に用いた供試体の物理特性を表 7 に示す。設定した空隙率(30、35、40%)に比べて B-35、B-40 の空隙率は大きくなった。原因として、試料のばらつきや充填する高さが 2cm から 10cm になったことで締め固めが上手くいかず、十分に充填出来なかった。そのため空隙率が増加したと考えられた。また、空隙率や乾燥密度は前述したように C/A が増加すると空隙率は減少し、乾燥密度は増加した。供試体 C の中での物理特性のばらつきはわずかであった。空隙率の平均は 38%であり、同じ作成条件であった B-35 と比較すると 3 ポイント小さいだけであった。供試体 C の乾燥密度も B-35 と同じであったことから、供試体 C と B-35 は同等の物理的特性を持っていると見なせた。

供試体の元素含有量を表 8 に示す。供試体 B は C/A が大きくなると Na、K、Cl の含有量は減少し、Ca の含有量は増加した。これはセメントの Na、K、Cl 含有量が得られた飛灰よりも低く、Ca は高いためであると考えられた。また、供試体 C の元素含有量の変動係数は最大で 6%であり、供試体 C の元素含有量は供試体によらず一定であった。また、供試体 C の元素含有量は B-35 とほぼ同じであった。

13 号溶出試験での溶出率を表 9 に示す。供試体 B では C/A による溶出率の変化はほとんどなかった。飛灰の溶出率と比較すると、Na、K では、セメント添加による溶出率の変化はなかった。Ca、Cl はセメントの添加によって減

表 7　供試体の物理特性.

供試体 ID	含水率(%)	空隙率(%)	乾燥密度 (g/cm^3)
B-30	16	29.8	1.6
B-35	22	40.9	1.4
B-40	23	48.2	1.3
C-4	23	37.9	1.4
C-6	23	38.8	1.4
C-8	23	36.1	1.5

表 8　供試体の元素含有量(%).

供試体 ID	C/A	Na	K	Ca	Mg	Cl
B-30	50	2.0	2.0	18	1.1	10
B-35	40	2.4	2.3	16	1.0	12
B-40	20	2.8	2.6	15	1.0	13
C-4	40	2.2	2.2	18	1.0	10
C-6	40	2.4	2.4	18	1.0	11
C-8	40	2.3	2.2	18	1.0	12

表 9　13 号溶出試験での溶出率(%).

供試体 ID	C/A	Na	K	Ca	Cl
B-30	50	83	83	17	74
B-35	40	73	79	17	69
B-40	20	75	83	20	77
C-4	40	83	87	18	89
C-6	40	83	81	17	73
C-8	40	88	92	18	87

表 10　シリアルバッチ試験での溶出率(%).

供試体 ID	C/A	Na	K	Ca	Cl
B-30	50	81	93	29	92
B-35	40	73	85	31	94
B-40	20	72	88	31	90
C-4	40	83	92	31	98
C-6	40	81	90	30	99
C-8	40	89	97	32	87

表 12　累積溶出量の実測値と計算値との間の決定係数.

供試体 ID	Na	K	Cl
B-30-1	0.9994	0.9977	0.9995
B-30-2	0.9984	0.9988	0.9989
B-35-1	0.9990	0.9979	0.9995
B-35-2	0.9993	0.9986	0.9996
B-40-1	0.9994	0.9991	0.9995
B-40-2	0.9989	0.9985	0.9994

少した。Ca は不溶性の C-S-H 構造を形成した[17] ため溶出率が低下し、Cl はフリーデル氏塩として水和物中に取り込まれたり空隙壁面に吸着する[18]ため、溶出率が低下したと考えられた。供試体 C の溶出率の変動係数は最大で 11%であった。供試体 C の溶出率は B-35 と比較すると、Ca を除く全ての元素で 10 ポイント程度大きくなった。

シリアルバッチ試験での溶出率を表 10 に示す。13 号溶出試験の結果と比較すると、K、Cl は溶出率が 90%程度に増加した。Na の溶出率はほとんど変化せず 80%程度であり、K、Cl と比較すると不溶性の割合が高かった。 以上から、13 号溶出試験では可溶性の K、Cl を全量溶かすことは出来ないことが確認された。また、シリアルバッチ試験での溶出率が 100%に達しないことから、セメント固化体には不溶性のものも含まれていることがわかった。よって、タンクリーチング試験結果の解析では Q_0 として、シリアルバッチ試験の溶出量を用いることとした。

4.4 モデルパラメータの決定

既往の研究[11]によると累積溶出量と経過時間の両対数グラフでの傾きが 0.35 以上では拡散領域にある。表 11 に供試体毎、元素毎の拡散領域期間を示す。B-30-2 を除く供試体は拡散領域が 32 日を超えていた。また、傾きが 0.35 未満では試料は枯渇状態にあり[11]、式(12)は成り立たない。そのため、枯渇状態になるまでの期間でパラメータ探索を行った。表 12 に枯渇していない期間での累積溶出量の実測値と得られたパラメータによる計算値の間の決定係数(R^2)を示す。R^2 は最低でも 0.9977 と高い相関があった。なお、図 4 に最も決定係数が小さかった条件(B-30-1、K)での実測値と計算値の比較を示すが、実測値と計算値は

表 11　供試体毎、元素毎の拡散領域期間(day).

	Na	K	Cl
B-30-1	0-64	0-64	0-64
B-30-2	0-4	0-4	0-4
B-35-1	0-64	0-64	0-32
B-35-2	0-64	0-64	0-64
B-40-1	0-32	0-32	0-32
B-40-2	0-32	0-32	0-64

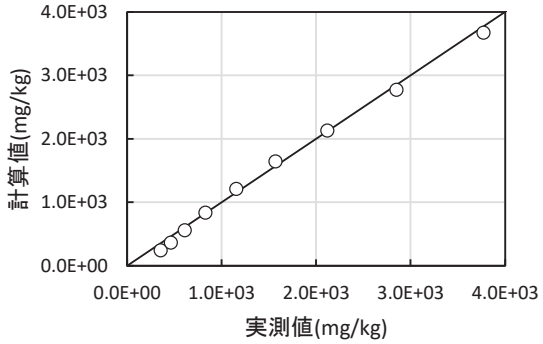


図 4　供試体 B-30-1 の K 累積溶出量の実測値と計算値の関係(直線は実測値=計算値を表す).

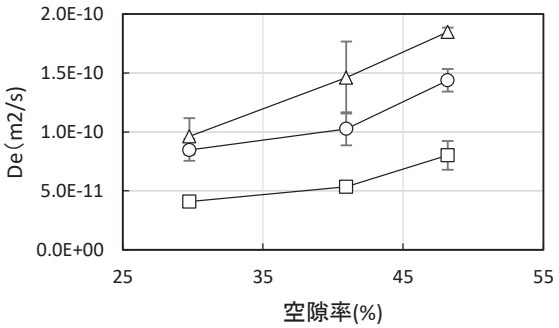


図 5　De と空隙率の関係（○：Na, △：K, □：Cl）.

よく一致していた。以上から、用いたモデル及び得られたパラメータは円柱供試体の溶出現象をよく表現していると言えた。

4.5 空隙率とモデルパラメータの関係

得られた有効拡散係数 De の平均値と空隙率の関係を図 5 に示す。全ての元素で空隙率の増加に伴い De は増加した。これは空隙率の増加に伴い屈曲係数が減少したため[9]と考えられた。空隙率 41%の De のばらつきが大きかったが、全ての元素について空隙率 41%と 48%の間での De は有意差が認められた（有意水準 5%)。水中の分子拡散係数 D_0 に対する有効拡散係数の比と空隙率の関係を図 6 に示す。なお、用いた D_0 を表 13 に示す。Na、K の De/D_0 は同程度だが、Cl はこれらよりも小さかった。その原因は、Na、K

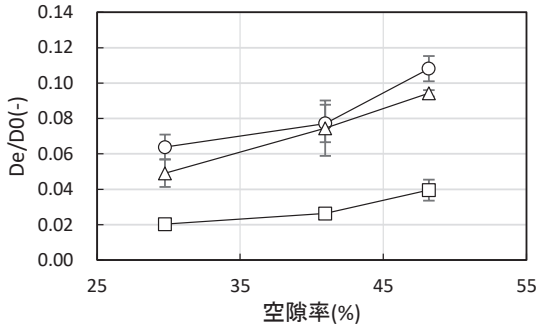


図 6　De/D_0 と空隙率の関係（○：Na，△：K，□：Cl）．

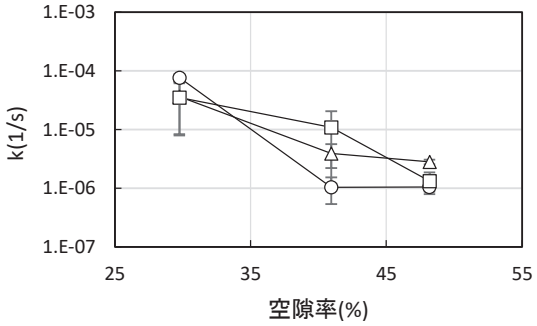


図 7　k と空隙率の関係（○：Na，△：K，□：Cl）．

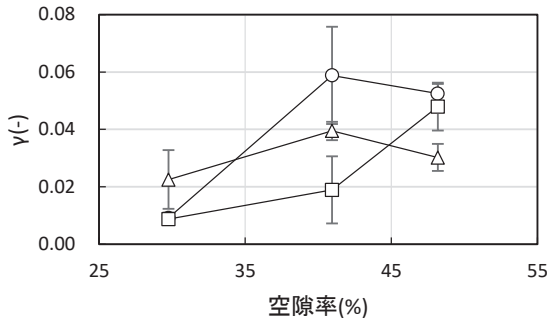


図 8　γ と空隙率の関係（○：Na，△：K，□：Cl）．

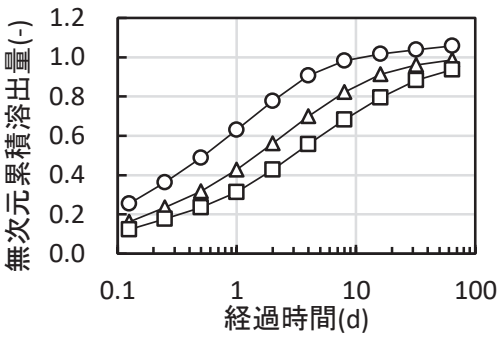
は物理的遅延効果のみを受ける[6]のに対し、Cl は水和物中への固定化や空隙壁面への吸着[18]のような化学的遅延効果も受けるためだと考えられた。

得られた表面溶出速度定数 k の平均値と空隙率の関係を図 7 に示す。全ての元素で空隙率が増加すると k は減少する傾向にあった。また、空隙率 41%ではばらつきが大きかったが、空隙率 41%での k は全ての元素間での有意差が認められた（有意水準 5%）。

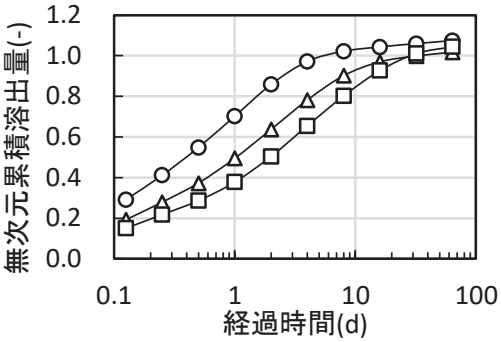
得られた表面溶出に関与する割合 γ の平均値と空隙率の関係を図 8 に示す。すべての元素で、空隙率が増加すると γ は増加する傾向にあった。空隙率が増加することで表面溶出に関与する空間が増えたためであると考えられた。また、K は空隙率 48%で減少したが、原因は不明であった。

表 13　水中の分子拡散係数 $D_0 \times 10^9$ (m^2/s)[19].

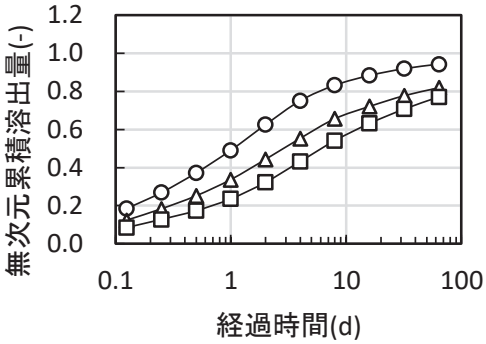
Na	K	Cl
1.33	1.96	2.03



a) Na



b) K



c) Cl

図 9　立方体供試体の無次元累積溶出量の経時変化（○：C-4，△：C-6，□：C-8）．

4.6 セメント固化体の比表面積が溶出量に与える影響

無次元溶出量（溶出量を含有量で割った値）の経時変化

表 14　立方体供試体を用いたタンクリーチング試験で枯渇しない時間範囲(day).

試料 ID	Na	K	Cl
C-4-1	0-1	0-1	0-1
C-4-2	0-1	0-1	0-2
C-6-1、 2	0-2	0-2	0-2

表 15　立方体供試体を用いたタンクリーチング試験における溶出量の実測値と計算値の間の決定係数（上段がケース 1、下段がケース 2）.

試料 ID	Na	K	Cl
C-4-1	0.9924 0.9902	0.9900 0.9870	0.9910 0.9901
C-4-2	0.9878 0.9851	0.9861 0.9826	0.9940 0.9951
C-6-1	0.9918 0.9899	0.9897 0.9879	0.9984 0.9987
C-6-2	0.9905 0.9884	0.9854 0.9833	0.9898 0.9905
C-8-1	0.9933 0.9924	0.9953 0.9951	0.9982 0.9973
C-8-2	0.9867 0.9853	0.9887 0.9883	0.9980 0.9980

を図 9 に示す。なお、繰り返し 1、2 の 64 日目の無次元溶出量の変動係数は最大で 5%であり、供試体によるばらつきは小さかったため、結果は 2 つの供試体の平均値を用いた。 時間の経過とともに累積溶出量は増加した。Na については供試体 C-4、K については全ての供試体で無次元累積溶出量が 1 以上であり、これらの条件では、実験終了時には固化体内の元素が枯渇状態であると考えられた。枯渇状態では式(8)を得るための境界条件が成り立たないことから、式(12)が成り立たない。供試体 C を用いたタンクリーチング試験で供試体が枯渇状態にならない範囲を表 14 に示す。供試体が大きくなると枯渇しない範囲は大きくなった。C-4 の塩素を除いて、繰り返し 1、2 による枯渇範囲の違いはなかった。供試体 C を用いたタンクリーチング試験では枯渇しない条件を満たす時間は比較的短時間であることが分かった。

全ての条件で 1 日までは枯渇状態ではないので、1 日目の無次元累積溶出量と比表面積の関係を図 10 に示す。全ての元素で比表面積が小さくなると無次元累積溶出量は減少した。比表面積を小さくすることで、塩類の溶出が抑制できることが分かった。

4.7 立方体供試体への溶出量予測モデルの適合性

ケース 1 とケース 2 の枯渇しない範囲での累積溶出量の実測値と計算値の間の決定係数(R^2)を表 15 に示す。Cl の一部（C-4-2、C-6-1、C-6-2）を除き、ケース 1 の方が溶出現象をよく表現できていた。Cl の一部（C-4-2、C-6-1、C-6-2）でケース 2 の方が R^2 が大きかった理由は不明であった。ケース 1 とケース 2 の差が最も大きかった C-4-2 の K についての無次元累積溶出量の経時変化を図 11 に示すがケース 1、ケース 2 ともに枯渇していない領域では実際の溶出現象をよく表現できていると言えた。

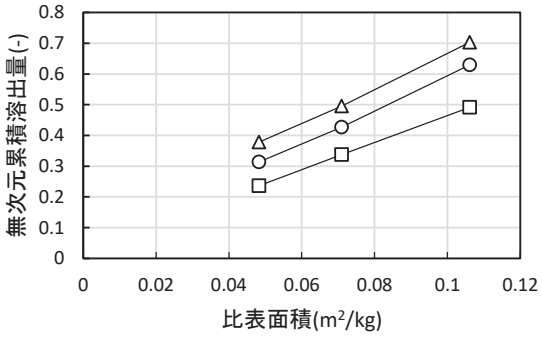


図 10　1 日目の無次元累積溶出量と比表面積の関係（○：Na, △：K, □：Cl）

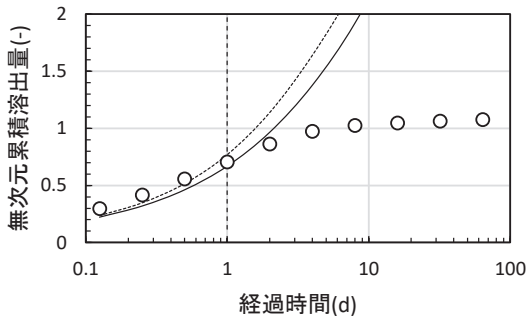


図 11　供試体 C-4-2 の K の無次元累積溶出量実測値と計算値の関係(枯渇しない範囲：1 日目まで，実線：ケース 1，点線：ケース２)

表 16　立方体供試体の表面溶出量の比 Q_{a2}/Q_{a1}.

試料 ID	Na	K	Cl
C-4	2.5	2.5	2.5
C-6	1.7	1.7	1.7
C-8	1.3	1.3	1.3

ケース 1 とケース 2 での計算値の差が小さかった理由を考察する。Q_{a2}/Q_{a1} を表 16 に示すが、最大で 2.5 倍程度しか違わなかった。また、1 日目の拡散による累積溶出量に対する表面溶出による累積溶出量の比を表 17 に示すが、表面溶出量は拡散による溶出量の 50%以下と小さかった. よって、ケース 1 とケース 2 での累積溶出量差が小さかった理由として、累積溶出量に対する表面溶出量の寄与が小さく、Q_{a1} と Q_{a2} の違いも小さいことが原因であると考えられた。

また、ケース 1 では供試体が大きくなるにつれて表面溶出の割合が高くなり、ケース 2 では供試体によらず一定で

あった。 1日目の拡散による溶出量に対する表面溶出量の計算式を以下に示すが、ケース1（式(15)）ではLcを含んでいるので供試体の大きさの影響を受けたが、ケース2（式(16)）ではLcを含んでいないことから供試体の大きさの影響を受けないことが分かった。

$$\frac{\gamma L_c(1-e^{-kt})}{2\sqrt{\frac{D_e t}{\pi}}} \tag{15}$$

$$\frac{\gamma L_0(1-e^{-kt})}{2\sqrt{\frac{D_e t}{\pi}}} \tag{16}$$

5. おわりに

本研究では、セメント固化体の大きさと固化体重量当たり溶出量の関係を明らかにし、溶出予測モデルの適応性を検討することを目的とし、大きさの異なる立方体供試体を用いてタンクリーチング試験を行った。得られた主な知見を以下に示す。

(1)全ての元素で空隙率が増加するとkは減少し、γは増加する傾向にあった。

(2)全ての元素で比表面積が小さくなると無次元累積溶出量は減少しており、比表面積を小さくすることで塩類の溶出を抑制できた。

(3)最大表面溶出量の割合が一定の場合のケース1と、表面溶出する深さが一定の場合のケース2のどちらのモデルも枯渇していない領域では実際の溶出現象を表現できた。

(4)ケース1では供試体が大きくなるにつれて表面溶出の割合が高くなり、ケース2では供試体によらず一定であった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、社会環境システム工学科学生の山﨑直人君の協力を得た。

参考文献

1) 環境省：平成29年度，一般廃棄物の排出及び処理状況について，平成31年.

2) 松藤敏彦：データから見た高塩類問題の原因と将来，廃棄物学会誌，Vol.8，No.7，pp.493-497，1997.

3) 貴田晶子，野馬幸生：焼却残渣中の易溶解性元素の溶出特性，廃棄物学会誌，Vol.8，No.7，pp.500-509，1997.

4) 堀井安雄，田中信寿：焼却残渣埋立率の高いごみ埋立地の浸出水処理における最近の技術課題，廃棄物学会誌，Vol.8，No.1，pp.64-75，1997.

5) 鄭修貞，山田正人：浸出水処理への逆浸透法の適用，環境技術，Vol.35，No.3，pp.182-188，2002.

6) 水谷聡，植村政也，山田攻男，貫上佳則：炭酸化処理した都市ごみ焼却飛灰セメント固化体の拡散溶出試験による評価，環境工学研究論文集，Vol.44，pp.435-441,2007.

7) R. Malviya, and R. Chaudhary: Leaching behavior and immobilization of heavy metals insolidified/stabilized products, Journal of Hazardous Materials, B137, pp.207-217, 2006.

8) K. Suzuki, and Y. Ono: Leaching characteristics of stabilized/solidified fly ash generated from ash-melting plant, Chemosphere, Vol.71, pp.922-932, 2008.

9) M. A. Cinquepalmi, T. Mangialardi, L. panei, A. E. Paolini, and L. Piga: Reuse of cement-solidified municipal incinerator fly ash in cement mortars：Physico-mechanical and leaching characteristics, Journal of Hazardous Materials, Vol.151, pp.585-593, 2008.

10) 土手裕，竹本昌弘，関戸知雄：セメント固化体からの易溶解性物質溶出モデルパラメータへの固化体作成条件の影響，宮崎大學工學部紀要，50，pp.23-31，2021.

11)肴倉宏史，水谷聡，田崎智宏，貴田晶子，大迫政造，酒井伸一：利用形状に応じた溶出試験による廃棄物溶融スラグの長期的溶出評価，廃棄物学会論文誌，Vol.14，No.4，pp.200-209，2003.

12)中山勝也，山本政英，田中誠基，小澤祥二，松田仁樹，高田満：飛灰に含有される重金属のハロゲン化反応による乾式分離特性，廃棄物学会誌，Vol.13，No.5，pp.271-278，2002.

12)岩川寿樹，関戸知雄，土手裕：都市ごみ焼却飛灰中の重金属の降雨による含有量変化に関する研究，第24回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，D7-12，2013.

13)江藤次郎，津留真哉，崎田省吾，張瑞娜，島岡隆行：一般廃棄物焼却残渣埋立地における不溶性塩素の挙動と生成メカニズム，廃棄物学会誌，Vol.19，No.2，pp.131-140，2008.

14)C. Lampris, J. A. Stegmann, and C. R. Cheeseman: solidification/stabilization of air pollution control residues using Portland cement: physical properties and chloride leaching, Waste Management, Vol.29, pp.1067-1075, 2009.

15)Y. Yakubu, J. Zhou, Z. Shu, Y. Zhang, W. Wang, and Y. Mbululo: Potential application of pre-treated municipal solid waste incineration fly ash as cement supplement, Environmental Science and Pollution Research, Vol.25, pp.16167-16176, 2018.

表17 1日目の拡散による溶出量に対する表面溶出量の比(%)（上段がケース1、下段がケース2）.

試料ID	Na	K	Cl
C-4	6 15	11 28	19 48
C-6	9 15	17 28	29 48
C-8	12 15	23 28	38 48

16)伊藤裕恭：廃棄物からの重金属溶出抑制，Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, Vol.12, No.319, pp.497-503, 2005.
17)石田哲也，宮原茂禎，丸屋剛：ポルトランドセメントおよび混和剤を使用したモルタルの塩素固定化特性，土木学会論文集E, Vol.63, No.1, pp.14-26, 2007.
18)日本化学会：化学便覧改訂4版，丸善，1993.

非降雨期間および周辺粒子粒径の固化飛灰からの易溶解性物質溶出量への影響

土手　裕 a)・関戸　知雄 b)

Influence of Non-rainfall Period and Surrounding Particle Size on Leaching Amount of Easily Soluble Substances from Cement solidified Fly Ash

Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO

Abstract

The purpose of this study was to clarify the effect of non-rainfall period and surrounding particle size on the leaching amount of easily soluble substances from cement solidified fly ash using a column experimental device. In the column tests, the dimensionless cumulative leachng amount of each element decreased with increase in non-rainfall period. As the particle size of the glass beads increased, the dimensionless cumulative leaching of any element decreased. The dimensionless cumulative leaching amount at a particle size of 2 mm diameter was almost the same as the leaching amount in the tank leaching test. It indicated that the same leaching amount as that from cement solidified fly ash immersed in water was leached even in the non-rain period.

Keywords: Cement solidified fly ash, Easily soluble substance, Non-rainfall period, Column tests

1.　はじめに

一般廃棄物の直接焼却率は平成29年度に80%程度であり[1)]、ゴミ焼却率の向上に伴い、埋め立て物の75%を焼却残渣が占めており、そのうち飛灰の割合は約 30%と推計されているため[2)]、全体の飛灰の割合は約 23%程度である。飛灰には易溶解性物質が多く含まれており[3)]、浸出水中の塩類の高濃度化が進行している[4)]。塩類の高濃度化は、放流先の淡水の生態系や農作物に悪影響をもたらす可能性があるため[5)]、浸出水の脱塩処理が行われている[4)]。脱塩処理によって生成される副生塩は、再利用すると天然塩よりもコストが高いため、保管または最終処分場に埋め立てられているが[6)]、これは最終処分場の延命化に逆行する。よって、脱塩処理の代わりに、浸出水中の塩濃度を下げることが必要である。

セメント固化処理は易溶解性塩類の不溶化はできないが、セメント固化体は緻密な構造による内部空隙の屈曲などの物理的要因により拡散が遅延される[7)]。セメント固化体からの易溶解性塩類の主要な溶出機構は固化体表面に付着する易溶解性物質の溶出と個化体試料内部からの表面への拡散である[8)]。溶出挙動を検討する実験方法の１つであるオランダのカラム試験(NEN7343)では連続流に対する溶出を検討しているが[9)]、間欠散水は扱っていない。焼却主灰を対象とした間欠散水カラム実験の例があるが、散水間隔が１日と50日の２通りであり[10)]。実際の降雨間隔は10日の間で指数関数的に減少しているので[11)]、実際の溶出条件とは異なっていた。以上のように、実際の降雨間隔を想定した溶出挙動に関する報告がないことから、間欠降雨での溶出挙動を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では非降雨期間がセメント固化体からの塩類溶出量に与える影響を明らかにすることを目的として、カラム実験を行った。また、セメント固化体周辺物の粒径の影響も検討した。

2.　実験方法

2.1 ガラスビーズ保水量等測定実験方法

実際に用いたビーズは AS ONE 社の材質はソーダガラス製で、BZ-2(1.5-2.5㎜。呼称粒径２㎜)、BZ-3(2.5-3.5㎜。呼称粒径 3㎜)、BZ-4(3.962-4.699㎜。呼称粒径 4.4㎜)の3種類を用いた。

メスシリンダーにガラスビーズ 250mL 以内になるように充填した。充填時にはメスシリンダーの側面をたたくなどの締め固めはしなかった。見かけの充填密度(g/mL)は、充填体積と充填重量から求めた。この作業を３回繰り返した。

測定に用いた実験装置を図１に示す。カラムはアクリル

a) 土木環境工学プログラム教授
b)土木環境工学プログラム准教授

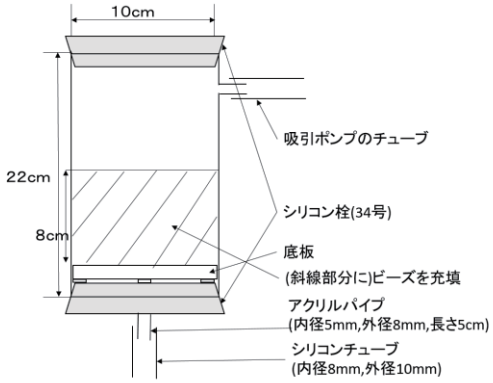


図１　保水量測定用カラム概要図.

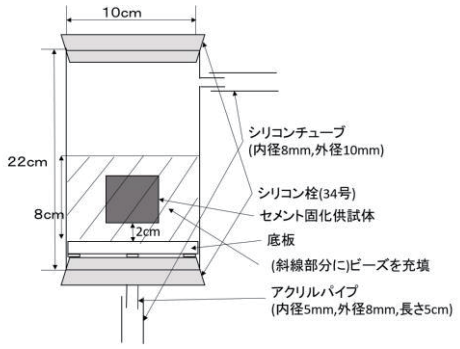


図２　カラム試験概要図.

製で内径 10cm、外径 11cm のものを用い、カラムの上部と下部はシリコン栓を取り付け、下部のシリコン栓にはアクリルパイプを通してシリコンチューブを取り付けた。下部のシリコン栓の上に厚さ 0.5cm、直径 1cm の穴を約 0.5cm ごとに開け、上部に水切りシートを接着した底板を置いた。また、底板の下部に厚さ 0.3mm、約 0.5mm 四方のアクリル板を 4 カ所接着し、シリコン栓と底板の間に空間を設け、排水が一様に行われるようにした。カラムにガラスビーズを底部から約 8cm まで充填し、薬匙をつかって表面を平らにした。蒸留水をビーズ表面の２cm 程度上まで静かに加え、カラムにシリコン栓をして、吸引ポンプの吸引圧を徐々に上げて、0.05MPa で約 30 分間脱気した。次に、カラム底部から蒸留水を抜き、10 分放置した。この作業をガラスビーズにつき 3 回繰り返した。カラム内に保水された量はカラムに加えた蒸留水とカラムから流出した蒸留水の差から求めた。この量を充填したガラスビーズの重量で除することで充填重量当たり保水量(mL/g)を求めた。また、ガラスビーズの見掛け密度から充填体積当たりの保水量(mL/mL)を求めた。測定はビーズ粒径毎に 3 回繰り返した。

ガス洗浄ビン(AS　ONE、PC 製、2000ml)にビーズを約 750mL 程度加え、蒸留水をガラスビーズの約 1/2 程度加えて、減圧を 5 分程度行った。大気圧に解放後、更に蒸留水をビーズの上端が水没するまで加え、減圧を 5 分程度行った。加えた蒸留水の体積とガラスビーズ重量および見掛けの充填密度から充填体積当たり最大保水量(mL/mL)を求めた。

2.2 供試体の作成

カラム試験および、タンクリーチング試験用の供試体は一辺が 4cm の立方体モールドを用いた。立方体供試体を 1 つの実験につきそれぞれ 5 個（カラム試験用に 3 個、タンクリーチング試験用に 1 個、分析用に 1 個）作成した。供試体の配合条件は、飛灰に対する普通ポルトランドセメントの添加率(C/A)　とセメントと飛灰の合計である固形分に対する水の添加 率(W/S)をそれぞれ、重量比で 40wt％とした。混練り用 の容器にセメントと飛灰を所定量取り、ホバートミキサー(マルイ、MIC-362-1)を用いて 2 分間混合した。その後、所定量の水を添加して 3 分間の混合を 2 回行い、モルタルを作成した。供試体はそれぞれ 5 供試体分を一度に混練りしてモールドに充填した。充填方法はモールドに高さの 1/3 程度モルタルを詰めて、金属の突き棒で締め固める操作を 3 度行い、上端までモルタルを充填した後、上端を平らになるように整え、モルタルを充填したモールドにラップをかけ室温 25℃で 1 週間養生した後、脱型した。脱型後の分析用供試体は乾燥試料を乳鉢を用いて粉砕した後、1 日ごとの変化率が 1%以下になるまで乾燥試料の重量を毎日測定し、変化量をもとに含水率を求めた。その後は目開き 2mm の篩で篩い、試料の全量を 2mm 以下に粉砕した。また、脱型の翌日にカラム試験とタンクリーチング試験を開始した。

2.3 カラム実験、タンクリーチング実験方法

2.3.1 カラム実験

カラム実験では散水後一定期間放置し（この期間を非降雨期間と呼ぶ）、散水を行う事で非降雨期間中にセメント固化体から溶出した塩類を回収した。測定に用いたカラムを図 2 に示す。ガラスビーズを 2cm の厚さになるように敷き、供試体を設置し、ガラスビーズを供試体の上面 2cm までビーズを充填させた。散水方法としては、カラム上部横のチューブのピンチコックを取り除き、 250mL（空隙量相当）の蒸留水を固化体の真上から固化体から外れないように円を描いてゆっくりと加えた。カラムからの排水はカラム下部に設置した容器で受けた。排水がなくなると（概ね散水後 10 分程度）、シリコン栓をしてからカラム上部横から下部の順番でシリコンチューブをピンチコックでとめて、排水を回収した。所定の間隔（非降雨期間）をあけて散水を行った。2 回目以降の散水は、カラム下部に排水受けを設置してからカラム上部横、下部の順番でピンチコックを外し、カラム下部のチューブに溜まっている水溶液を設置した排水受けに取り、250mL の蒸留水を同様に散水し、流失した排水を同じ排水で受けたあと、1 回目と同様にカラムを密閉した。最後の散水は、散水をして排水を回収す

表２　ガラスビーズの性状.

	見掛け充填密度(g/mL)			充填体積当たり保水量(mL/mL)			充填体積当たり最大保水量(mL/mL)		
	BZ-2	BZ-3	BZ-4	BZ-2	BZ-3	BZ-4	BZ-2	BZ-3	BZ-4
平均	1.52	1.53	1.55	0.090	0.076	0.060	0.251	0.258	0.246
変動係数(%)	0.5	0.1	0.1	2	3	4	1	0.8	2

るまでとした。排水受けの排水は0.45μmのメンブランフィルターを用いて濾過し分析試料を得た。残った溶液のECおよびpHを測定した。

2.3.2 タンクリーチング実験

ハイパック（ENTEC、S-61）にL/S=5となるように蒸留水を加えて供試体全体を浸漬し静置した。加える蒸留水の量は0.6Lとした。静置後、カラム実験と同様の時間が経過したら、供試体を新しい蒸留水を入れたハイパックに供試体を移し、ハイパックの蓋をして静置した。ただし、1回目の静置時間はカラム実験での排水回収と同様の10分後に供試体を移した。供試体を取り出した後の溶液の一部を0.45μmメンブランフィルターで濾過した後、残っている溶液のpHとECを測定した。供試体を静置する際、プラスチック製シャーレで作成した台をハイパックの底に置き、その上に供試体を置いた。

2.4 含有量試験、溶出試験、分析方法

含有量試験については、粉砕した試料約0.2g、蒸留水50mL、濃硝酸5mL、30%過酸化水素水0.1mlをこの順番でコニカルビーカーに加え、時計皿で蓋をして240℃に設定したホットプレートで完全に乾燥させないように最低30分煮沸した後、室温まで冷却した。ガラス繊維濾紙（Whatman、GF/B）を用いて全量を吸引濾過し、蒸留水で100mLにメスアップした。

環境庁告示13号溶出試験については、1Lのポリ瓶に粉砕した試料を約20g取り、L/S=10となるように蒸留水を加え、200rpmで6時間振とうを行った後、上澄みを0.45μmのメンブランフィルターを用いて濾過し分析用試料を得た。残った溶液のECおよびpHを測定した。

シリアルバッチ試験については、500mlの遠心分離管に粉砕した試料を約10g取り、蒸留水400mlを加え、200rpmで6時間振とう後、5000Gで10分間遠心分離を行った。遠心管の上澄み水を500mlのメスシリンダーに移し容量を測定した後、溶液を0.45μmのメンブランフィルターを用いて濾過し分析試料を得た。メスシリンダーに残った溶液のECおよびpHを測定した。翌日、蒸留水300mlを遠心管に加え、上記と同様の操作を行った。これを繰り返して、合計で4回の溶出操作を行った。

含有量分解液以外の全ての濾液には濃硝酸を0.5%加えて保存した。Na、K、Ca、Mg濃度はフレーム原子吸光光度法（HITACHI Z-2000）を用いて分析を行った。また、Cl濃度はチオシアン酸水銀法により分析した。

表１　用いた飛灰の性状.

	Na	K	Ca	Mg	Cl
含有量(mg/kg)	41,100	41,900	192,000	16,400	201,000
溶出率(%)	75	82	23	0.001	63

表３　供試体養生後密度(g-wet/cm^3).

非降雨期間	1日	2日	4日	8日
平均(g-wet/cm^3)	1.90	1.83	1.85	1.83
変動係数(%)	1.0	0.8	0.9	0.9

3. 結果と考察

3.1 用いた飛灰性状

本研究で使用した飛灰の含有量および溶出率を表1に示す。溶出液のpHは12.4であった。Na、Kの溶出率は75%以上、Clの溶出率は63%であり、多くが可溶性のものであった。Caの溶出率は23%と低かった。これは、本研究で用いた飛灰は排ガス処理のために飛灰中に$Ca(OH)_2$が吹き込まれているが、そのうちClと反応して$CaCl_2$となった易溶解性のCaと未反応の難溶性の$Ca(OH)_2$が含まれており、難溶性の$Ca(OH)_2$が多く含まれていたためCaの溶出率は低くなったと考えられた。Mgはほとんど溶出しなかったが、これは、pHが高いため溶出しなかったと考えられた。

3.2 ガラスビーズ保水量等の測定結果

表2にガラスビーズの性状を示す。何れの項目も変動係数が4%以下であり、実験の再現性は良かった。ビーズ粒径が大きくなると見掛けの充填密度は増加したが、範囲は1.52~1.55g/mLと小さかった。充填体積当たり保水量はビーズ粒径が大きくなるにつれて、小さくなった。充填体積当たり最大保水量は粒径による差は小さかった。

3.3 供試体性状について

表3に非降雨期間条件毎の供試体密度を示す。変動係数は最大で1%であり、各非降雨期間条件内での密度は同一

表5　供試体化学特性.

非降雨期間	含有量(mg/kg-dry)			溶出試験　溶出率(%)			シリアルバッチ試験　溶出(%)		
	Na	K	Cl	Na	K	Cl	Na	K	Cl
1日	27,100	28,000	108,000	77	83	83	81	87	91
2日	38,400	40,500	93,000	55	53	71	65	75	91
4日	39,900	43,100	90,200	55	49	90	63	73	96
8日	35,300	37,200	97,500	60	58	77	62	65	90
平均	35,200	37,200	97,200	61	61	80	68	75	92
変動係数(%)	14	15	7	15	22	9	11	11	2

表4　供試体の含水率(%).

非降雨期間	1日	2日	4日	8日	平均	変動係数(%)
含水率(%)	23.6	23.7	21.2	23.3	23.0	4.3

であると見なせた。また、非降雨期間条件の間の密度の平均値の差の検定を行ったところ、有意水準5%で有意差は見られず、非降雨期間条件の間でも供試体密度は同等であると言えた。

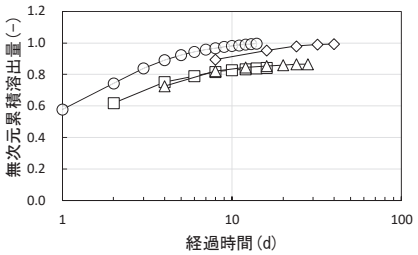
表4に含水率を示すが、変動係数は4.3%であり、非降雨期間条件の間でも供試体含水率は同等であると言えた。

表5に供試体の化学特性を示す。含有量、溶出率共にNa、Kの変動が大きかったが、これは非降雨期間1日の供試体の値がその他の非降雨期間の値よりも高いことに起因した。しかし、シリアルバッチ試験溶出率の変動係数は小さかった。Cl も特にシリアルバッチ試験溶出率の変動は小さかった。

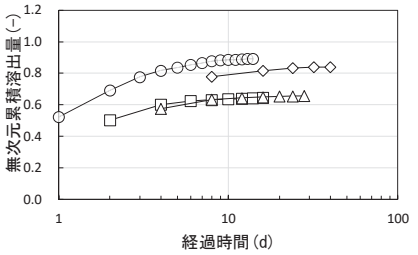
図3にタンクリーチング試験の結果を示す。無次元累積溶出量は、累積溶出量をアベイラビリティー試験溶出量で除して求めた。ただし、1日目の溶出量は若干変動が大きかったので累積溶出量の計算には用いなかった。無次元累積溶出量はNaとKについては、全ての非降雨期間でのデータがある10日付近で非散水期間の影響を見ると、無次元累積溶出量は非降雨期間1日、8日の順で大きく、2日と4日の値はほぼ同じで8日よりも低かった。非降雨期間が大きくなると溶出濃度が大きくなり、セメント固化体内部濃度との差が小さくなるためにセメント固化体の溶出が抑制されると考えられたら、この過程では非降雨期間の影響を説明できなかった。Cl については、非散水期間の違いは見られず、その理由は不明であった。

3.4 カラム実験結果

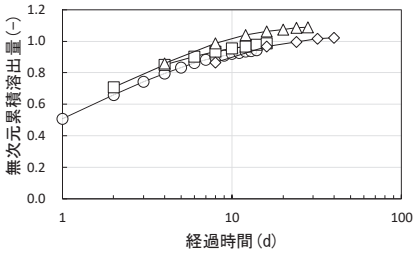
ビーズ粒径 2mm を用いたカラム実験から得られた無次元累積溶出量の経時変化を図4に示す。タンクリーチング試験と同様 1 日目の溶出量は若干変動が大きかったので累積溶出量の計算には用いなかった。タンクリーチング試験と比較してカラム実験の無次元累積溶出量はどの元素



a)Na



b)K

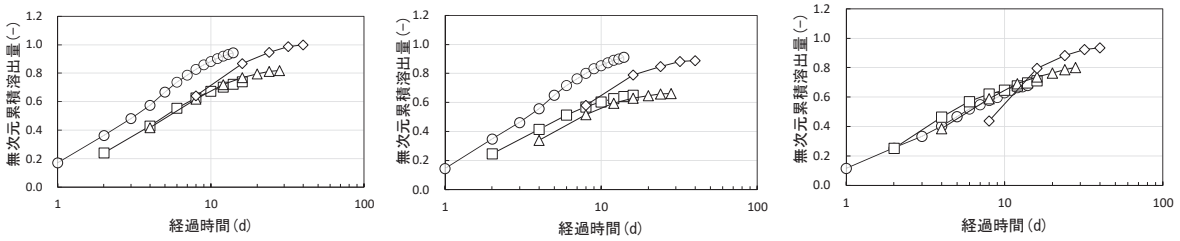


c)Cl

図3　タンクリーチング試験における無次元累積溶出量（非降雨期間：○；1日，□；2日，△；4日，

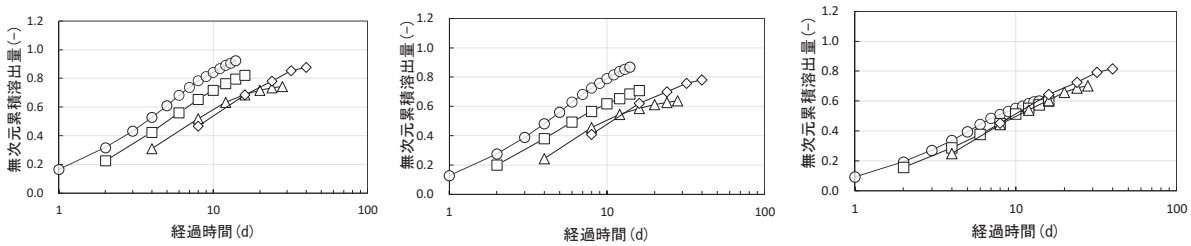
でも同程度であり、非降雨期間中でもセメント固化体からの溶出が継続し、浸漬状態と同量が溶出したと言えた。NaとKについての非降雨期間の影響はタンクリーチング試験と同様であるが10日までは非降雨期間2、4、8日の差は小さかった。Cl についてもタンクリーチング試験の結果と同様に非降雨期間の影響は見られなかった。

ビーズ粒径 3mm を用いたカラム実験から得られた無次元累積溶出量の経時変化を図5に示す。タンクリーチング試験やビーズ粒径 2mm の結果と異なり、NaとKの無次元



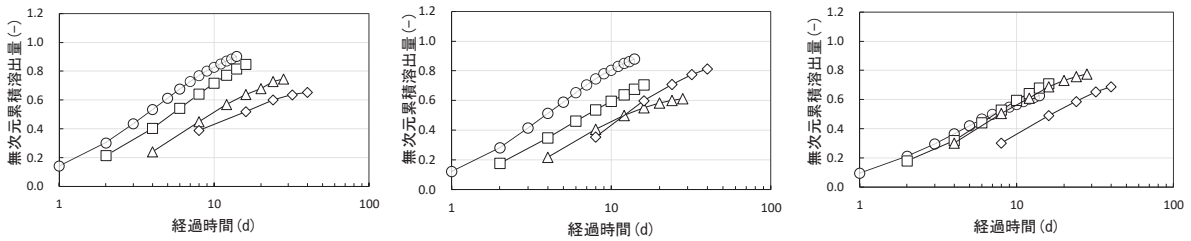
a)Na　　b)K　　c)Cl

図 4　BZ-2 における累積溶出量-1 日目なし（非降雨期間：○；1 日，□；2 日，△；4 日，◇；8 日）.



a)Na　　b)K　　c)Cl

図 5　BZ-3 における累積溶出量-1 日目なし（非降雨期間：○；1 日，□；2 日，△；4 日，◇；8 日）.



a)Na　　b)K　　c)Cl

図 6　BZ-4 における累積溶出量-1 日目なし（非降雨期間：○；1 日，□；2 日，△；4 日，◇；8 日）.

累積溶出量は非降雨期間 1 日で最も高く、非降雨期間 2 日で低くなり非降雨期間 4 日と 8 日でさらに低くなったが、4 日と 8 日の差は小さかった。Cl については非降雨期間の影響は見られなかった

ビーズ粒径 4.4mm を用いたカラム実験から得られた無次元累積溶出量の経時変化を図 6 に示す。Na については非降雨期間 1 日と 2 日の無次元累積溶出量の違いは、ビーズ粒径 3mm のときと同程度であったが非降雨期間 4 日よりも 8 日の無次元溶出量小さくなった。K についてはビーズ粒径 2mm の結果と同じ結果となった。Cl については非降雨期間 8 日の無次元溶出量 が他の非降雨期間よりも小さくなった。

以上から、何れの元素も非降雨期間が大きくなるにつれて無次元累積溶出量が小さくなった。その原因として、非降雨期間の増加に伴いビーズ保水量内の濃度が増加し、セメント固化体内部濃度との差が小さくなったため、セメント固化体からの溶出が抑制されたと考えられた。

無次元累積溶出量に与えるビーズ粒径の影響およびタンクリーチング試験との違いを考察するために、最も経過時間の長い非降雨期間日 8 日の 40 日の無次元累積溶出量を図 7 に示す。どの元素でもビーズ粒径が増加すると無次元累積溶出量は低下した。ビーズ粒径が増加すると充填体積当たり保水量が減少することから、保水量が少ないほど保水中の濃度が大きくなるので、セメント固化体の外部濃度が高くなるため、セメント固化体内部濃度と外部濃度の差が小さくなるため、溶出量が減少した可能性が考えられた。

また、ビーズ粒径 2mm の場合の無次元累積溶出量はタンクリーチング試験の溶出量と同程度であった。これは、ビーズ粒径 2mm の場合、セメント固化体が水中に浸漬した状態での溶出量と同程度の溶出量が非降雨期間でも溶出したことを示していた。

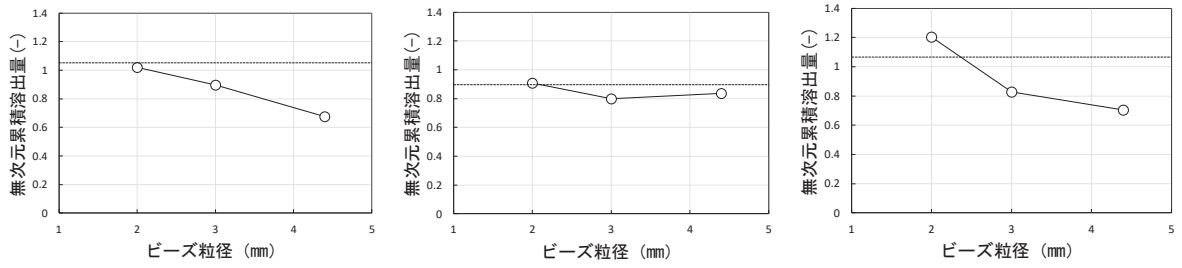


図７　無次元累積溶出量に与えるビーズ粒径の影響およびタンクリーチング試験との違い（○：カラム試験における無次元累積溶出量，…：タンクリーチング試験における無次元累積溶出量）.

4.　おわりに

本研究では、非降雨期間における周辺粒子粒径のセメント固化体からの易溶解性物質溶出量への影響を明らかにすることを目的として、タンクリーチング試験とカラム試験を行った。得られた主な知見を以下に示す。

(1) タンクリーチング試験において、非降雨期間（浸漬している期間）の影響はNaとKについては、無次元累積溶出量は非降雨期間１日、８日の順で大きく、２日と４日の値はほぼ同じで８日よりも低かった。Clについては、非散水期間の違いは見られなかった。

(2) カラム試験において、非降雨期間の影響は何れの元素も非降雨期間が大きくなるにつれて無次元累積溶出量が小さくなった。その原因として、非降雨期間の増加に伴いビーズ保水量内の濃度が増加し、セメント固化体内部濃度との差が小さくなったため、セメント固化体からの溶出が抑制されたと考えられた。

(3) ガラスビーズの粒径が大きくなると、どの元素でも無次元累積溶出量は小さくなった。その原因としてビーズ粒径の増加による保水量低下が保水内での高濃度化を引き起こし、セメント固化体の外部濃度が高くなるため、セメント固化体内部濃度と外部濃度の差が小さくなるため、溶出量が減少した可能性が考えられた。

(4) ビーズ粒径2mmの場合の無次元累積溶出量はタンクリーチング試験の溶出量と同程度でセメント固化体が水中に浸漬した状態での溶出量と同程度の溶出量が非降雨期間でも溶出したことを示していた。

今後の課題として、非降雨期間やビーズ粒径によって影響が見られないことがあったため、ビーズ粒径や非降雨期間の条件を変えて検討する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、社会環境システム工学科学生の中島篤志君の協力を得た。

参考文献

1) 環境省：平成29年度，一般廃棄物の排出及び処理状況について，平成31年.
2) 矢島達哉：一般廃棄物の焼却残さの発生量評価，第27回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.177-178，2016.
3) 貴田晶子，野馬幸生：焼却残渣中の易溶解性元素の溶出特性，廃棄物学会誌，Vol.8，No.7，pp.500-509，1997.
4) 堀井安雄，田中信寿：焼却残渣埋立率の高いごみ埋立地の浸出水処理における最近の技術課題，廃棄物学会誌，Vol.8，No.1，pp.64-75，1997.
5) 鄭修貞，山田正人：浸出水処理への逆浸透法の適用，環境技術，Vol.35，No.3，pp.182-188，2002.
6) 大野彰久，伊藤智祥，樋口壯太郎：最終処分場から発生する副生塩の有効利用について，第26回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp.468-469，2015.
7) 水谷聡，植村政也，山田攻男，貫上佳則：炭酸化処理した都市ごみ焼却飛灰セメント固化体の拡散溶出試験による評価，環境工学研究論文集，Vol.44，pp.435-441，2007.
8) R. Malviya, and R. Chaudhary: Leaching behavior and immobilization of heavy metals insolidified/stabilized products, Journal of Hazardous Materials, B137, pp.207-217, 2006.
9) 貴田晶子：廃棄物の有害性評価と廃棄物由来資源の安全性評価，Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, Vol.11, pp.232-243, 2004.
10) 久保田洋，繁泉恒河，山田裕己，野口俊太郎，佐藤研一：散水・通気処理が焼却主灰の溶出性に与える影響，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.28，pp.199-212，2017.
11) 中北英一，長澤光弥，池淵周一：降雨―蒸発過程における長期観測情報の面代表性に関する一考察，京都大学防災研究所年報，第43回，B-2，pp.137-152，2000

外部濃度がセメント固化の易溶解性物質溶出量に及ぼす影響

土手　裕 [a)]・関戸　知雄 [b)]

Effect of External Concentration on Leaching Amount of Easily Soluble Substances in Cement Solidified Fly Ash

Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO

Abstract

In this study, tank leaching tests were carried out for the purpose of clarifying the effect of external concentration on the leaching amount of easily soluble substances in cement solidified fly ash. Four solvents used were distilled water, solvent-1, solvent-5, and solvent-10. In the case of distilled water as solvent, the dimensionless leaching amount reached the maximum value at 0.125 day in all substances of Na, K, and Cl. Thereafter, the leaching amount increased from 0.25 day to 2 day, and decreased from 4 day. There was little leaching amount after 8 days. In addition, the leaching amounts from the cement solidified fly ash for all substances were suppressed when the external concentration was higher than solvent-5. The reason was considered that the difference between the external concentration and the concentration inside the cement solidified fly ash decreased with increase in external concentration, and it led the decrease in leaching rate of easily soluble substances from cement solidified fly ash.

Keywords: Cement solidified fly ash, Easily soluble substance, Tank leaching test

1.　はじめに

廃棄物を焼却処理した際に発生する焼却残渣の埋立割合は年々増加している。環境省の調査によると、2017 年時点の廃棄物最終処分量のうち、77%を焼却残渣が占めている [1)]。焼却残渣は主灰と飛灰に分類され、約 3 割を飛灰が占めている [2)]。飛灰中に高濃度に濃縮された易溶解性塩類は、浸出水中の濃度を増加させる [3)]。これら浸出水の高塩濃度化は、浸出水処理施設内でのスケール障害や浸出水放流先での塩害等の悪影響を及ぼす [4)]。そのため、必要に応じて浸出水の脱塩処理が行われている。脱塩残渣として発生する副生塩の大半は、乾燥後フレコン保管がなされている。最終処分場の残余容量は減少傾向にあり、延命化する必要があるが、フレコン保管はこれに反する [5)]。また、一部では工業塩として再利用されているが [6)]、副生塩を工業塩として再利用するには莫大なコストがかかる [7)]。このように脱塩処理には問題があるので、浸出水の高塩濃度化に対する脱塩処理以外の対策を考える必要がある。

脱塩処理以外の対策として、飛灰をセメント固化することにより塩類溶出を遅らせる方法が考えられる。本来、セメント固化処理は飛灰からの重金属類の溶出を抑制することを目的として、飛灰にセメントを添加し、固化する処理方法である。セメント固化は塩類の不溶化には効果がないが、セメント固化体の緻密な構造により、塩類の溶出を遅らせることができる [8)]。セメント固化体からの易溶解性物質の主要な溶出挙動は、固化体表面からの溶出と内部から表面への拡散であることが報告されている [9)]。また、セメント固化体の外囲水がわずかにでも流動しているとき、境界層外濃度は無視できる程度に低いとみなしてよいことも報告されている [10)]。しかし、最終処分場に埋め立てられたセメント固化体は、上部のセメント固化体から溶け出した高濃度の易溶解性塩類を含む浸出水と接触する。浸出水の塩素濃度は 70、000mg/L が報告されており [11)]、この濃度を無視できるかは検討されていない。また、セメント固化体の外部濃度がセメント固化体からの易溶解性塩類の溶出濃度に与える影響を考慮している研究事例は見受けられない。

そこで本研究では、実際の処分場を想定した場合に、セメント固化体の外部濃度がセメント固化体からの易溶解性塩類の溶出濃度にどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的とした。そのため、濃度の異なる溶媒を用いてタンクリーチング試験を行い、固化体の溶出量と外部濃度との関係を明らかにした。

2.　実験方法

2.1 供試体の作成

a) 土木環境工学プログラム教授
b)土木環境工学プログラム准教授

Ａ市の一般廃棄物焼却施設(活性炭と消石灰を吹き込む排ガス処理を行っている)の焼却飛灰を実験に用いた。タンクリーチング試験用の供試体は一辺が 4cm のアクリル製の立方体モールドを用いて、5 個(タンクリーチング試験用に 4 個、分析用に 1 個)作成した。供試体の配合条件は、飛灰に対する普通ポルトランドセメントの添加率(C/A)とセメントと飛灰の合計である固形分に対する水の添加率(W/S)をそれぞれ、重量比で 40wt%とした。混練り用の容器にセメントと飛灰を所定量取り、ホバートミキサー(マルイ、MIC-362-1)を用いて 2 分間混合した。その後、所定量の水を添加して 2 分間の混合を 3 回行い、モルタルを作成した。充填方法はモールドの高さの 1/3 程度モルタルを詰めて、金属の突き棒で締め固める操作を 3 度行い、上端までモルタルを充填した後、上端が平らになるように金属のヘラで整えた。モルタル充填後のモールドにラップをかけ、室温 25℃で 1 週間養生した後、脱型した。

2.2 溶媒作成および密度測定方法

溶媒の想定濃度を Na 700mg/L、K 900mg/L、Ca 600mg/L、CL 3000mg/L とし、この濃度の溶媒を溶媒-1 と呼ぶこととする。溶媒-1 は水 1L あたり NaCL 1.8g、KCL 1.7g、$CaCL_2$ 1.7g を溶解して作成した。溶媒-1 の濃度の 5 倍、10 倍の溶媒を作成し、それぞれ溶媒-5、溶媒-10 とした。タンクリーチング試験に用いた溶媒は、溶媒-1、5、10 に加えて蒸留水(以後、溶媒-0 と呼ぶ)を用いた。

500mL のメスシリンダーに溶媒 500mL を加え、溶媒の体積と加えた溶媒の重量から溶媒の密度を求めた。同一溶媒につき、以上の作業を 3 回行った。密度測定結果を表 1 に示す。変動係数が 0.2%以下と小さく、実験の再現性は良かった。溶媒-1 で密度が 1 よりも小さくなった理由は、メスシリンダーの目盛の有効数字に関係していると考えられた。

2.3 溶出・含有量試験方法

2.3.1 固化体試料の前処理

脱型後、表面に大きな空隙がない供試体を 4 つ選び、重量を測定後、タンクリーチング試験用の供試体とした。残った 1 つの供試体は分析用とした。分析用供試体は乳鉢で粗粉砕し、前日との減少率が 0.5%以下になるまで 105℃で乾燥して含水率を測定した。含水率測定後の試料は乳鉢を用いて 2mm 以下になるように粉砕し、全含有量試験、環境庁告示 13 号溶出試験(以後、13 号法溶出試験と呼ぶ)、シリアルバッチ試験に用いた。

2.3.2 タンクリーチング試験

プラスチック製シャーレで作成した台を置いたハイパック(ENTEC、S-61)に L/S=5 となるように溶媒を加えて台上に供試体を置き、蓋をして静置した。加える溶媒の量は 600mL とし、溶媒密度に基づいて溶媒-0、1、5 は 600g、溶媒-10 は 620g とした。供試体は完全に浸漬した。静置後、

表 1　溶媒密度測定結果.

	溶媒-1	溶媒-5	溶媒-10
平均密度(g/mL)	0.994	1.01	1.03
変動係数(%)	0.10	0.20	0.13

所定の時間が経過したらハイパックの蓋を開け、ゴム手袋を着用し供試体をつかみ、表面の水滴を落とした後、新しい溶媒を入れたハイパックに供試体を移し、蓋をして静置した。溶媒の交換時間は肴倉の方法[12]と同様に、試験開始から 0.125、0.25、0.5、1、2、4、8、16、32 及び 64 日目とした。所定の交換時間までは蒸留水を溶媒として使用し、以降は溶媒-0、1、5、10 を用いた。蒸留水から溶媒に変える時間は実験シリーズごとに異なり、0.25 日目から溶媒を使用した実験を E-0.25、0.5 日目から溶媒を使用した実験を E-0.5、1 日目から溶媒を使用した実験を E-1 と呼ぶこととする。タンクリーチング試験の最初に蒸留水を使用している状態は固化体が埋め立てられた直後の実際の処分場内で直接雨水と接触している状態を模擬し、溶媒-1、5、10 を使用している状態は埋め立てられたセメント固化体の上に次のセメント固化体が埋め立てられ、上部の固化体由来の濃い浸出水に下部のセメント固化体が触れている状態を模擬している。また、溶媒-0 を用いた実験は溶媒-1、5、10 との比較のために行った。供試体を取り出した後の溶液の一部を 0.45μm のメンブレンフィルターを用いてろ過し、分析試料を得た。その後、残った溶液の pH と EC を測定した。

なお、E-0.25 の溶媒-5 用の供試体(タンクリーチング試験(溶媒-0、5)用、分析用の合計 3 供試体)は別途作成し、供試体の分析とタンクリーチング試験も別途行った。

2.3.3 溶出試験

13 号法溶出試験とシリアルバッチ試験をそれぞれ行った。13 号法溶出試験は、1L のポリ瓶に試料 40g を取り、蒸留水 400mL を加え、200rpm で 6 時間振とう後、約 5 分静置し、上澄みを 0、45μm のメンブランフィルターを用いてろ過し、分析試料を得た。最後に、残った上澄みの pH と EC を測定した。

シリアルバッチ試験は、500mL の遠心分離管に粉砕した試料 10g を取り、蒸留水 300mL を加え、200rpm で 6 時間振とう後、5000G で 10 分間遠心分離を行った。遠心管の上澄みをメスシリンダーに移し容量を測定後、0.45μm のメンブレンフィルターを用いてろ過し、分析試料を得た。その後、メスシリンダーに残った溶液の EC 及び pH を測定した。翌日、蒸留水 300mL を遠心管に加え、上記と同様の操作を行った。これを繰り返して、合計で 4 回の溶出操作を行った。

2.3.4 全含有量試験

試料 0.2g をコニカルビーカーに取り、蒸留水 50mL と

濃硝酸 5mL を加え、約 1 分間静置後、30%の過酸化水素水 0.1mL を加えた。コニカルビーカーに時計皿を被せ、240℃に設定したホットプレートを用いて完全に乾燥させないように最低 30 分間煮沸した後、室温まで冷却した。その後、ガラス繊維ろ紙(Whatman、GF/B)を用いて全量を吸引ろ過した。得られたろ液を蒸留水を用いて 100mL にメスアップし、分析試料を得た。全含有量試験は繰り返し 2 回で行った。

2.4 分析方法

タンクリーチング試験、溶出試験で得たろ液には濃硝酸を 0.5%加えて保存した。Na、K、Ca はフレーム原子吸光光度法(HITACHI、Z-2000 型)を用いて分析を行った。また、Cl はチオシアン酸水銀法により分析した。

3. 結果と考察

3.1 用いた飛灰性状

本研究で使用した飛灰の性状の平均値を表 2 に示す。なお、溶出液の pH は 12.15、EC は 3.23 S/m であった。含有量は Cl、Ca が最も多く、Na と K が同程度であり、Mg が最も少ない値を示した。Na と K の溶出率が約 60%であり、Cl の溶出率は約 80%であった。このことから Na、K、Cl の大部分が溶存態であると言えた。Ca の溶出率は 27.7%と低かった。これは、本研究で用いた飛灰は排ガス処理のために飛灰中に $Ca(OH)_2$ が吹き込まれているが、そのうち Cl と反応して $CaCl_2$ となった易溶解性の Ca と未反応の難溶性の $Ca(OH)_2$ が含まれており、難溶性の $Ca(OH)_2$ が多く含まれていたためであると考えられた。また Mg はほとんど溶出しなかったが、これは pH が高かったため難溶性の $Mg(OH)_2$ を生成し、溶出しなかったと考えられた。

3.2 供試体の物理化学特性

3.2.1 養生後密度、含水率

各実験で作成した供試体の養生後密度の平均、標準偏差、変動係数を表 3 に示す。変動係数は最大で 1.9%であり、同一実験毎に作成した供試体間の密度の変動は小さいと言えた。また、各実験間での養生後密度の平均値の差の検定結果を表 4 に示す。全ての実験の組合せで有意水準 5%で有意差がなかった。以上のことより、供試体の作成時期に関わらず全ての供試体の養生後密度は同一と見なして良いことが分かった。

3.2.2 化学特性

供試体の元素含有量の平均値を表 5 に示す。変動係数は最大でも 5%と小さい値を示しており、再現性は高かったといえた。含有量については、Cl が最も多く、Na と K が同程度であり、Mg が最も少なかった。供試体に対し行った溶出試験の結果を表 6 に示す。13 号法溶出試験での溶出率を飛灰の溶出率と比較すると、Cl がセメントの添加によって減少した。 Cl はフリーデル氏塩として水和物中に取り込まれたり空隙壁面に吸着する[13]ため、溶出率が低下したと考えられた。シリアルバッチ試験での溶出率と 13 号法溶出率を比較すると、Na、K、Cl はいずれもシリアルバッチ試験溶出率の方が高くなった。このことから可溶性塩類含有量としてはシリアルバッチ試験溶出量の方が適切であると言えた。そのため、以降の溶出量の無次元化にはシリアルバッチ試験溶出量を用いることとした。Na の溶出率を、K、Cl と比較すると、Na のシリアルバッチ試験溶出率の増加が小さく、Na は K、Cl と比べて溶出しにくいと言えた。溶出率の変動係数は溶出率が極めて小さい Mg を除くと最大で 13%であったことから、供試体からの可溶性塩の溶出率は供試体によらず概ね同一であると言えた。

表 2 飛灰の性状まとめ.

	Na	K	Ca	Mg	Cl
溶出濃度 (kg/L)	2.25	2.16	4.72	1.0×10^{-5}	14.3
溶出量 (kg/kg)	22.4	21.5	47.0	1.0×10^{-4}	143
含有量(kg/kg)	36.5	36.3	170	11.9	184
溶出率(%)	62	59	28	0.001	78

表 3 養生後密度.

実験 ID	E-0.25	E-0.5	E-1
平均(g-wet/cm^3)	1.89	1.84	1.81
標準偏差(g-wet/cm^3)	0.036	0.024	0.012
変動係数(%)	2	1	1

表 4 各実験間の養生後密度の検定結果.

	E-0.25	E-0.5	E-1	E-0.25(0.5)
E-0.25		×	×	×
E-0.5			×	×
E-1				×

×：有意水準 5%で有意差なし

表 5 供試体の元素含有量(kg/kg-dry).

	Na	K	Ca	Mg	Cl
平均	26.4	23.9	177	7.40	114
変動係数(%)	5	4	7	2	5

3.3 溶媒濃度の変動

本研究で作成した溶媒の濃度の平均値と変動係数を表 7 に示す。溶媒濃度は想定値に近い値を示した。また、本研究で比較対象とする Na、K、Cl については変動係数は最大で 10%であり、同一条件内での溶媒濃度の変動は小さいことから、作成時期が異なっても、用いた溶媒の濃度は同一と見なして良いと言えた。

3.4 蒸留水条件での溶出挙動

表6　溶出試験結果.

	13号法溶出試験 溶出量(kg/kg)					シリアルバッチ試験 溶出量(kg/kg)				13号法溶出試験 溶出率(%)					シリアルバッチ試験　溶出率(%)			
	Na	K	Ca	Mg	Cl	Na	K	Ca	Cl	Na	K	Ca	Mg	Cl	Na	K	Ca	Cl
平均	19.4	18.1	27.1	0	84.3	20.5	21.1	53.1	99.9	74	76	15	0	75	78	89	30	88
変動係数(%)	4	2	14	31	10	5	2	10	3	9	7	7	32	13	10	5	4	7

表7　溶媒濃度の変動解析結果.

	溶媒-1				溶媒-5				溶媒-10			
	Na	K	Ca	CL	Na	K	Ca	CL	Na	K	Ca	CL
平均(kg/L)	0.748	0.933	0.496	2.81	3.58	4.07	2.41	13.2	6.80	9.14	4.52	27.6
変動係数(%)	9	9	11	6	2	4	8	1	2	10	5	6

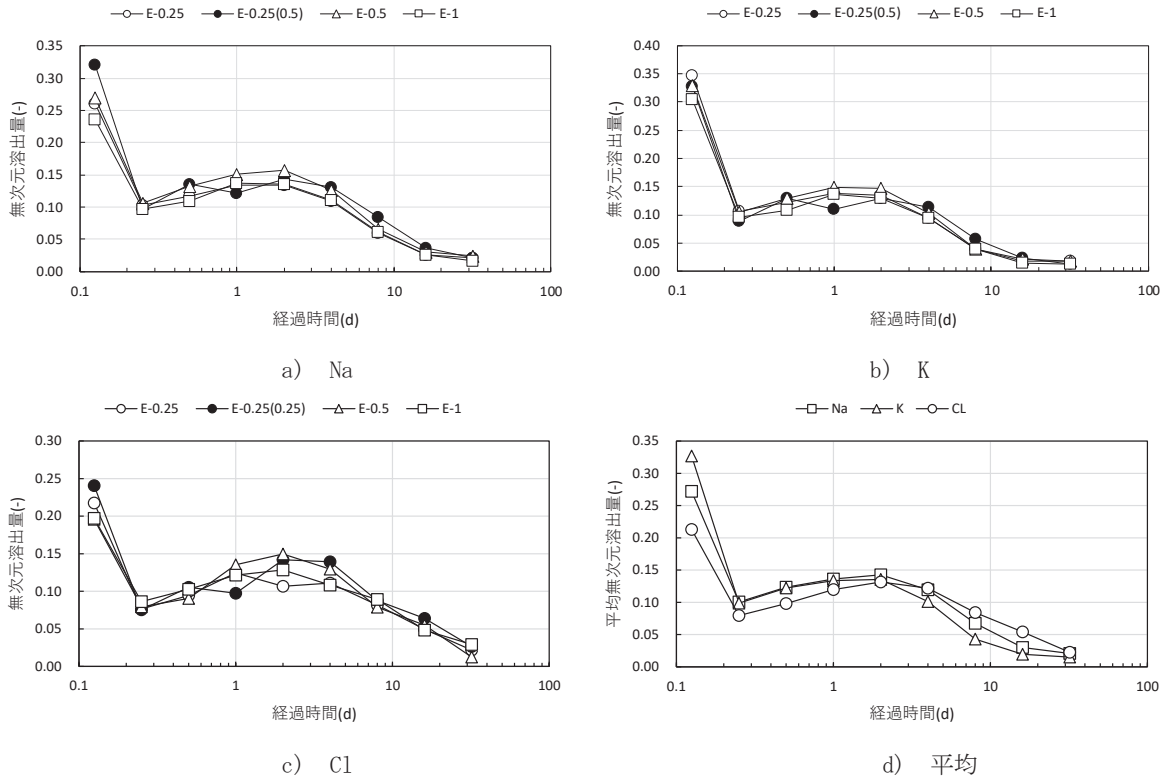


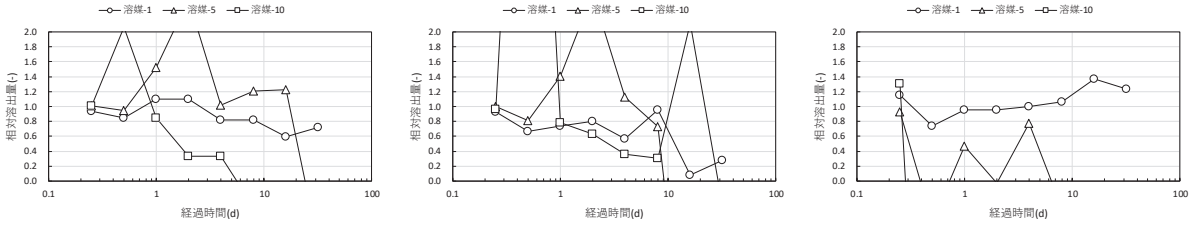
図1　蒸留水を溶媒として用いた条件での無次元溶出量の経時変化.

図1のa)、b)、c)に溶媒として蒸留水を用いた場合の無次元溶出量の経時変化を示す。無次元溶出量は単位重量当たり溶出量をシリアルバッチ試験溶出量で除することで求めた。全ての元素において、1回目(0.125d)の採水時に無次元溶出量は最大であり、2回目(0.25d)の採水時から5回目(2d)の採水時まで増加し、6回目(4d)の採水時以降減少した。全ての元素において供試体間の無次元溶出量の変動は1回目の採水時を除いて、0.05未満に収まっており、変動は小さいと言えた。

無次元溶出量の平均値を図1のd)に示す。1回目(0.125d)の採水時の無次元溶出量は元素により大きく異なった。経過時間2日目以降の無次元溶出量の低下はKが比較的早かった。16日目以降で無次元溶出量は0.05以下となった。

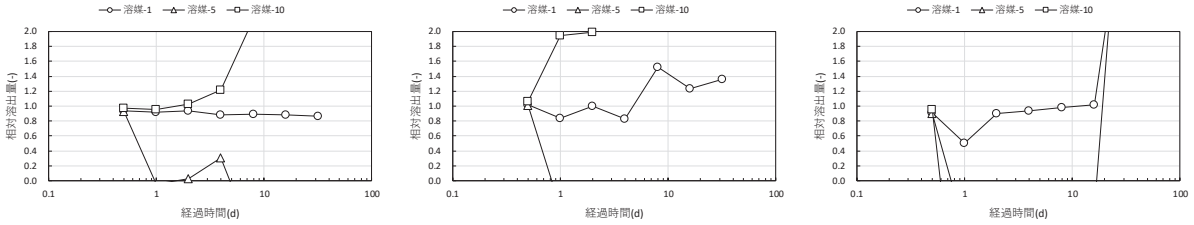
3.5 外部濃度の溶出量への影響の評価

溶媒-1、5、10を用いた実験では、溶出量には加えた溶媒中の元素重量も含まれるため、溶出量から溶媒中元素重量を差し引いたものを正味の溶出量とし、この正味の溶出量を最大可能溶出量で除したものを無次元正味溶出量と呼ぶ。さらに、蒸留水条件での無次元溶出量に対する無次元正味溶出量の比を相対溶出量と呼ぶことにする。相対溶



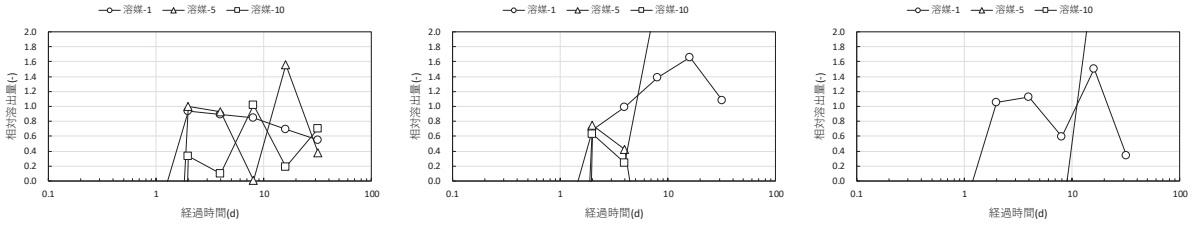
a）Na　　b）K　　c）Cl

図 2　E-0.25 における相対溶出量の経時変化.



a）Na　　b）K　　c）Cl

図 3　E-0.5 における相対溶出量の経時変化.



a）Na　　b）K　　c）C l

図 4　E-1 における相対溶出量の経時変化.

出量が 1 より小さくなると、溶出量が蒸留水条件での溶出量よりも低下したことを表す。なお、相対溶出量が 2 以上及びマイナスになった時の値はプロットしていない。図 2 に実験 E-0.25 での相対溶出量の経時変化を示す。プロットは溶媒を蒸留水から切り替えた以降から示している。Na について見ると、溶媒-1 では 8 日目までは 0.8～1.1 の値を示しており蒸留水と同程度の溶出量であった。溶媒-5 の場合は 8 日目まで 0.9～1.2 と蒸留水と同程度の溶出量であった。1 日目、2 日目において相対溶出量が 1 を超えているのは正味溶出量の計算に用いた溶出液濃度と溶媒濃度の分析精度が原因と考えられた。溶媒-10 では 1 日目までは 0.8～1.0 と蒸留水と同程度の溶出量であったが 2 日目以降、相対溶出量は 0.3 まで低下し、溶出量は抑制された。K も Na と同様の変化を示した。Cl について見ると、溶媒-1 では 8 日目まで 0.7～1.2 と蒸留水と同程度の溶出量であった。溶媒-5 では、0.25 日目までは蒸留水と同程度の溶出量であったが、0.5 日目からは溶出量が抑制された。溶媒-10 の場合は 0.25 日目までは 0.9～1.2 と蒸留水と同程度の溶出量であったが、それ以降相対溶出量が 0.5 まで低下し、溶出量は抑制された。

図 3 に実験 E-0.5 での相対溶出量の経時変化を示す。Na と K は同様の変化を示した。溶媒-1 では全経過時間において 0.9～1.1 と蒸留水と同程度の溶出量であった。溶媒-5 の場合、0.5 日目までは 0.9～1.1 と蒸留水と同程度の溶出量であったが、1 日目以降は相対溶出量は 0.3 まで溶出量が抑制された。溶媒-10 は溶媒-1 と同様の変化を示した。Cl について見ると、溶媒-1 の場合 8 日目まで 0.9～1.0 と蒸留水と同程度の溶出量であった。溶媒-5 では、Na、K と同様の変化を示した。溶媒-10 の場合、0.5 日目までは 0.9～1.0 と蒸留水と同程度の溶出量であったが、1 日目から相対溶出量がマイナスとなった。

図 4 に実験 E-1 での相対溶出量の経時変化を示す。Na について見てみると、溶媒-1、10 では 8 日目まで 0.8～1.1 と蒸留水と同程度の溶出量であった。溶媒-5 では 4 日目まで 0.9～1.1 まで蒸留水と同程度の溶出量であったが、8 日目で相対溶出量が 0.1 まで下がり、溶出量が抑制された。 K について見ると、溶媒-1 では全経過時間において 0.7～1.1 と蒸留水と同程度の溶出量であった。溶媒-5 の場合、0.25 日目までは 1.0～1.1 と蒸留水と同程度の溶出量であったが、0.5 日目から相対溶出量が 0.4 まで減少し、

溶出量は抑制された。溶媒-10 では溶媒-5 と同様の変化を示した。Cl について見ると、溶媒-1 では 8 日目まで 0.6～1.1 と蒸留水と同程度の溶出量であった。溶媒-5 の場合、0.25 日目まで 2.0～1.0 と蒸留水と同程度の溶出量であったが、0.5 日目以降相対溶出量がマイナスとなった。溶媒-10 では、0.25 日目までは 0.9～1.0 と蒸留水と同程度の溶出量であったが、0.5 日目から相対溶出量はマイナスになった。

以上のことより、全元素において、セメント固化体からの溶出量は、溶媒-5 以上外部濃度が大きくなると抑制された。これは外部濃度が大きくなることで固化体内部の濃度との差が小さくなるからであると考えられる。溶出量が小さいほど正味溶出量の計算精度は悪くなっていた。

5. おわりに

本研究では、セメント固化体の外部濃度がセメント固化体からの易溶解性塩類の溶出量にどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的として、濃度の異なる溶媒を用いてタンクリーチング試験を行った。得られた主な知見を以下に示す。

(1) 供試体間の物理化学特性の変動は小さく、実験の再現性は高かったといえる。

(2) 蒸留水条件の場合全元素において、0.125 日目の採水時に無次元溶出量は最大の値を示した。その後、0.25 日目から 2 日目まで溶出量は増加傾向を示し、4 日目以降から減少傾向を示した。

(3) 蒸留水条件の場合全元素において、8 日目以降はほぼ溶出しなかった。

(4) 全元素において、セメント固化体からの溶出量は、溶媒-5 以上外部濃度が大きくなると抑制された。これは外部濃度が大きくなることで固化体内部の濃度との差が小さくなるからであると考えられた。

本研究ではセメント固化体の外部濃度が固化体からの易溶解性塩類の溶出濃度に影響を与えることを明らかにした。今後は、埋立地中でのセメント固化体からの易溶解性塩類の溶出濃度を予測するときに外部濃度の影響も考慮して予測する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、社会環境システム工学科学生の大津湧暉君の協力を得た。

参考文献

1) 環境省：日本の廃棄物処理　平成 29 年度版。平成 31 年.
2) 矢島達哉：一般廃棄物の焼却残さの発生量評価，廃棄物資源循環学会研究発表会講演集，Vol.27， pp.177-178， 2016.
3) 今岡務，山岡通宏，西嶋渉，岡田光正，井上雄三：キレート溶液洗浄法による飛灰中の重金属と無機塩類の同時処理， 廃棄物学会論文誌， Vol.14，No.5，pp.288-296，2003.
4) 堀井安雄，田中信寿：焼却残渣埋立率の高いごみ埋立地の浸出水処理における最近の技術課題，廃棄物学会誌，Vol.8，No.1，pp.64-75，1997.
5) 飯野成憲，荒井泰裕，岡田万由子，稲員とよの，小泉明：都市ごみ焼却灰の脱塩処理コストを考慮したセメント資源化モデル，土木学会論文集，Vol.73，No.6，pp.179-188，2017.
6) 韓佳恵，干斯夫，樋口壮太郎：浸出水脱塩処理に伴う副生塩のリサイクルに関する研究(その 2)，廃棄物資源循環学会研究発表会講演集，Vol.28，pp.403-404，2017.
7) 鄭修貞，山田正人：浸出水処理への逆浸透法の適用，環境技術，Vol.35，No.3，pp.182-188，2002.
8) 水谷聡，植村政也，山田攻男，貫上佳則：炭酸化処理した都市ごみ焼却飛灰セメント固化体の拡散溶出試験による評価，環境工学研究論文集，Vol.44，pp.435-441，2007.
9) R. Malviya, and R. Chaudhary: Leaching behavior and immobilization of heavy metals insolidified/stabilized products, Journal of Hazardous Materials, B137, pp.207-217, 2006.
10) 寺島泰：固化体中放射性核種の浸出過程とその解析方法とについて，土木学会論文報告書，Vol.209，pp.54，1973.
11) 松藤康司，島岡隆行：浸出水流出特性と埋立地建設への課題，廃棄物学会誌，Vol.8，No.7，pp.510-522，1997.
12) 肴倉宏史，水谷聡，田崎智宏，貴田昌子，大迫政造，酒井伸一：利用形状に応じた溶出試験による廃棄物溶融スラグの長期的溶出評価，廃棄物学会論文誌，Vol.14，No.4，pp.200-209，2003.
13) 伊藤祐恭：廃棄物からの重金属溶出抑制，Journal of the society of Inorganic Materials, Japan, Vol.12, No.319, pp.497-503, 2005.

太陽光パネル部材のコンクリート用細骨材としての環境安全性

土手　裕[a)]・原田秀樹[b)]・関戸　知雄[c)]

Environmental Safety of Solar Panel Componets Used as Fine Aggregate for Concrete

Yutaka DOTE, Hideki HARADA, Tomoo SEKITO

Abstract

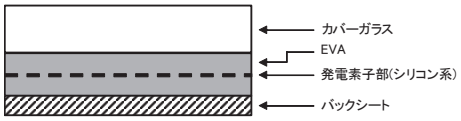
In order to evaluate the environmental safety of solar panel components as fine aggregate for concrete, the leaching tests and content tests of hazardous heavy metals were conducted about etched and un-etched samples. In the un-etched samples, the leaching concentrations and contents of F and Pb didn't satisfy the Environmental Quality Standards for Soil Pollution. In particular, the leaching concentration of Pb from battery cell was 4500 times higher than the Standards. Although an etching treatment was effective in reducing the leaching concentrations and contents, the concentrations and contents of Pb after etching could not satisfy the Standards. The leaching concentrations of Pb and Se from some of etched samples which satisfied the Leaching Standards before etching could not satisfy the Standards. It was considered that mixing etched solar panel components with cement might satisfy the Standards owing to the insolubilization and dilution effect of mixing with cement when the components were used as fine aggregate.

Keywords: Solar panels, Hazardous heavy materials, Fine aggregates, Environmental safety

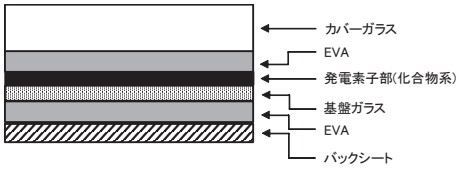
1.　はじめに

太陽光発電が一般家庭に本格的に導入されるようになったのは 1990 年代頃からで、地球温暖化対策として再生可能エネルギーへの期待が高まったことや、2012 年に制定された固定価格買取制度(FIT 法)が開始されたことから、導入量が増加し[1)]、2018 年には全国で約 55.5GW、2019 年には約 61.8GW の太陽光パネルが設置されている[2)]。太陽光パネルの耐用年数は約 20～30 年とされており[3)]、今後寿命を迎えた使用済みの太陽光パネルが大量に廃棄され、2040 年度には廃棄量が年間約 80 万トンにもなると推測されているが[4)]、この廃棄量は 2018 年の日本全体の産業廃棄物最終処分量の約 8.6%に相当する。また、不法投棄の懸念[5)]や自然災害による廃棄物の増加も問題となっている[6)]. そのため、適正かつ環境安全性を考慮したリサイクル方法の確立が重要な課題である。

太陽光パネルには発電素子部の素材によって、主にシリコン系と化合物系の 2 種類がある[6)]。図 1 に太陽光パネルの構造を示す。シリコン系太陽光パネルは主にカバーガラス、封止材(エチレン酢酸ビニル共重合樹脂(Ethylene Vinyl Acetate Copolymer)、EVA と表記する)、発電素子部、バックシートから構成され、発電素子部の素材がシリコンである。化合物系太陽光パネルは主にカバーガラス、EVA、発電素子部、基板ガラス、バックシートから構成され、化合物系の発電素子部では主に CIS(銅、インジウム、セレン)が用いられている。シリコン系、化合物系の両方の部材となっているカバーガラスは太陽光パネルの 6～7 割を占めており、シリコン系のカバーガラスには As や Sb といった有害物質が含まれる[7)]。EVA は加熱・加圧するこ



a)シリコン系太陽光パネル



b)化合物系太陽光パネル

図 1　太陽光パネルの構造.

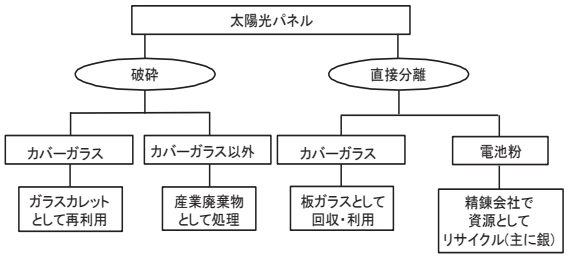
a) 土木環境工学プログラム教授
b) ソーラーフロンティア株式会社
c) 土木環境工学プログラム准教授

とで発電素子部、ガラス、バックシートと接着させているため、発電素子部とEVAを分離することは極めて困難である。バックシートは耐候性、電気絶縁性、耐薬品性、EVAとの接着性などが要求され、PETなどの有機フィルムを多積層させたものとなっている[8]。含有量については、素子部の電極に10,000mg/kg以上の含有量としてCu、Zn、Agの有価物が、有害物質としてハンダに由来するPbが含まれ、1,000-10,000mg/kgの含有量として、シリコン系・化合物系ともガラス・EVA・結晶・バックシート混合物にPb、Sb、シリコン系のカバーガラスにSbが含まれ、化合物系のガラス・EVA・結晶・バックシート混合物に100-1,000mg/kgのSe、Cdが含まれるとの報告がある[7]。溶出試験により、シリコン系の素子部の電極からPbが埋立基準(0.3mg/L)を大きく超える500mg/Lの溶出濃度や、化合物系の素子部からSeが埋立基準(0.3mg/L)を超えないが、0.06mg/Lの溶出濃度が報告されている[7]。以上のように、太陽光パネルには有害な重金属が含まれ、リサイクルに際して環境汚染を引き起こす可能性がある。

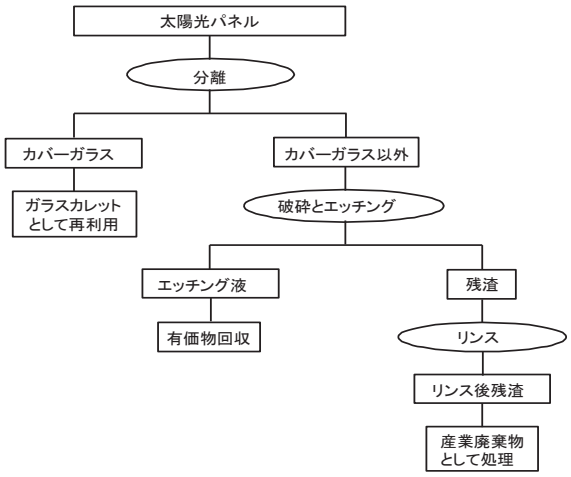
太陽光パネルをリサイクルする上で、部材別に分離することが必要である。図2に太陽光パネルの分離フローを示す。シリコン系太陽光パネルの場合は、部材別に分離する方法として破砕と直接分離の2種類がある。破砕処理の場合、太陽光パネルを破砕・湿式比重選別し、分離されたカバーガラスはガラスカレットとして再利用され、カバーガラス以外は産業廃棄物として処分される。分離処理の場合は、金属ブラシを用いてバックシート・EVA・素子部の順に削りとり、カバーガラスは板ガラスとして回収・利用され、カバーガラス以外は精錬会社で資源としてリサイクルされる[6]。化合物系太陽光パネルの場合は、加熱等によって、カバーガラスを太陽光パネルから分離し、分離されたカバーガラスはガラスカレットとして再利用される。カバーガラス以外は破砕とエッチングを行い、エッチング液から有価物を回収し、残渣はリンスを行い、産業廃棄物として処理される[9]。

このように、太陽光パネルの様々なリサイクル技術の開発を進められているが、まだ実用化には至っておらず、実証中である。その理由として、有価物としての回収対象にはならないカバーガラス以外(EVA・素子部・基盤ガラス)について有害物質の溶出が懸念されるからである。そのため、環境に配慮したリサイクル技術を開発する必要がある。

回収物のリサイクル方法の1つとしてコンクリート細骨材代替が考えられる。太陽光パネルリサイクル残渣のコンクリート細骨材代替利用における環境安全性についての研究は報告されていない。一方、汚染土壌をセメントを用いて不溶化する研究が行われており、その不溶化メカニズムとして、Cd、Pb、Cr(VI)、Se、Asはそれぞれ、$CdCO_3$[10]、$Pb(OH)_2$や$PbCO_3$[11]、$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCrO_4 \cdot 12H_2O$[12]、



a)シリコン系太陽光パネル



b)化合物系太陽光パネル

図2　太陽光パネルの分離フロー.

$CaSe_3 \cdot H_2O$、や$Ca_6[Al(OH)_6]_2(SeO_4)_2 \cdot 26H_2O$[13]、$Ca_4(OH)_2(AsO_4)_2 \cdot 4H_2O$[14]といった不溶化物を生じることで不溶化することが報告されている。また、Fはエトリンガイト($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$)生成段階で$OH^-$基や$SO_4^-$基と置換し、エトリンガイト内部に$F^-$がイオン交換して取り込まれて不溶化する報告がある[15]。BとSbの不溶化メカニズムの報告は見られなかった。

本研究の目的は、化合物系の太陽光パネル(SF系)とシリコン系太陽光パネル(Si系)のエッチング後の太陽光パネル部材をコンクリート用細骨材として利用した場合の細骨材としての環境安全性を評価することを目的とした。そのために、エッチング後部材を対象に土壌環境基準に関する溶出試験、含有量試験を行った。また、エッチング前の太陽光パネル部材も同様に試験を行い、エッチング効果についても検討した。

2.　実験方法

2.1 用いた試料について

表 1　用いた試料.

太陽光パネルの種類	エッチングの有無	部材	試料 ID	提供日
SF 系	無し	カバーガラス	SF-CG	2020/9/14
		EVA	SF-EVA	2020/10/19
		基板ガラス	SF-SG	2020/9/14
		バックシート	SF-BS	2020/10/19
	有り	カバーガラス	SF-CG-E	2020/11/26
		EVA	SF-EVA-E	2020/11/30
		基板ガラス	SF-SG-E	2020/11/26
		バックシート	SF-BS-E	2020/12/22
Si 系	無し	カバーガラス	Si-CG	2020/11/30
		電池セル	Si-CEL	2020/12/7
	有り	カバーグラス	Si-CG-E	2020/12/25
		電池セル	Si-CEL-E	2020/12/25

実験に用いた試料はソーラーフロンティア株式会社国富工場から破砕された状態で提供された。実験に用いた試料は表 1 に示すように、化合物系の太陽光パネル(SF 系)とシリコン系太陽光パネル(Si 系)である。ソーラーフロンティア株式会社は化合物系太陽光パネルを生産していることから SF 系の部材には不純物は含まれていないが、Si 系パネルは他社の太陽光パネルから各部材を回収したため、Si 系の部材には EVA やバックシートが含まれていた。そのため、実験に用いる前に Si 系の試料は目開き 1.1mm の篩を通過した試料を用いた。また、バックシートについては目視で 1cm 以上のものを取り除いた。エッチング処理もソーラーフロンティア株式会社で行われ、部材を 60%硝酸に浸漬後に吸引ろ過で固液分離を行い、水洗浄後に自然乾燥させたものがエッチング処理物として提供された。エッチング後の試料は水分を含んでいたが、各種試験には乾燥せずに用いた。なお、エッチング処理物の含水率を表 2 に示す。ガラス系の試料は 10%未満であったが、プラスチック系の試料(EVA、バックシート、電池セル)は 20%台であった。

2.2 試験方法

2.2.1 溶出試験

土壌汚染対策法に基づく環境省告示 18 号試験に準拠し、試料の溶出量試験を行った。材質が PP のポリ瓶 1L に試料 50g を取り蒸留水 500mL を添加し、200rpm で 6 時間振とうを行った後 10 分ほど静置し、上澄み 400mL 程度をビーカーに取った。EVA とバックシートは上澄みを取るのが困難なため、プラスチック製のざる(目開き横 3mm×縦 1mm)を用いて予備ろ過を行い、400mL 程度をビーカーに取った。これらを 0.45μm のメンブレンフィルターを用いてろ過した。ICP 分析用試料はろ液を 50mL 取り、有害重金属用濃硝酸を 0.25mL 加えた。As、Se、Sb 分析用試料はろ液を 100mL 取り、有害重金属測定用濃塩酸を 0.5mL 加えた。F、Cr 分析用試料は 50mL 取り、何も加えなかった。ろ液は冷蔵庫に保存した。最後に、ビーカーに残った上澄み液を用いて、pH と EC を測定した。

表 2　エッチング後試料の含水率.

試料 ID	含水率(%)	乾燥温度(℃)	乾燥日数
SF-CG-E	6	100	1 日
SF-EVA-E	27	60	3 日
SF-SG-E	3	100	1 日
SF-BS-E	24	60	3 日
Si-CG-E	4	100	1 日
Si-CEL-E	22	60	3 日

2.2.2 含有量試験

土壌汚染対策法に基づく環境省告示 19 号試験に準拠し、試料の含有量試験を行った。材質が PP のポリ瓶 500mL に試料 6g を取り 1mol/L の塩酸 200mL を添加し、200rpm で 2 時間振とうを行った後 10 分ほど静置し、上澄み 150mL 程度をビーカーに取った。Cr 用サンプルに関しては、炭酸ナトリウム 0.53g 及び炭酸水素ナトリウム 0.84g を量り採り、蒸留水 1L で完全に溶解させた六価クロム用溶出溶媒を用いた。EVA とバックシートは上澄みを取るのが困難なため、溶出試験で用いたものと同じざるを用いて予備ろ過を行い、150mL 程度をビーカーに取った。これらに対して 0.45μm のメンブレンフィルターを用いてろ過した。ICP 分析用試料はろ液を 50mL 取り、有害重金属用濃硝酸を 0.25mL 加えた。AS、Se、Sb 分析用試料、F 分析用試料は 50mL、Cr 分析用試料は 100mL ろ液を取り、何も加えなかった。ろ液は冷蔵庫に保存した。

2.2.2 分析方法

Na、K、Ca、Mg は原子吸光光度法(HITACHI、Z-2000)により分析をした。分析試料 10mL に対して、ランタン溶液を 0.5mL 添加した。B、Al、Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Si は ICP(SHIMADZU、ICPS-8100)により分析した。ただし、溶出試験の Cd、Pb、T-Cr はフレームレス分析法により分析した。As、Se、Sb は予備還元した試料を水素化物発生装置(HVG-1)を用いて、5mol/L 塩酸と 0.4%(w/v)水素化ホウ素ナトリウム水溶液で水素化し、ICP(SHIMADZU、ICPS-8100)により分析した。予備還元の方法として、As

表3　エッチング前試料の有害重金属の溶出濃度(mg/L).

試料 ID	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
SF-CG	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	<0.005	<0.007	0.42
SF-EVA	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	<0.005	<0.007	0.012
SF-SG	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.013	<0.005	<0.007	<0.007
SF-BS	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	<0.005	<0.007	0.011
Si-CG	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	0.006	<0.007	0.16
Si-CEL	2.0	<0.001	45	0.05	<0.001	<0.005	<0.007	0.009
土壌環境基準	0.8	0.003	0.01	1	0.05	0.01	0.01	0.02*

注：灰色の欄は基準値を超過している.
＊：Sb は要監視項目

表4　エッチング前試料の有害重金属以外の溶出濃度(mg/L).

試料 ID	pH	EC(mS/m)	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Co	Ni	Cu	Zn	Si
SF-CG	10.42	13.6	19	0.1	9.0	1.5	0.02	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	26
SF-EVA	9.75	3.73	1.8	0.1	5.8	0.16	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	2.0
SF-SG	10.36	11.2	14	0.9	6.6	1.3	0.05	0.14	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	17
SF-BS	9.33	2.40	0.6	<0.1	4.3	0.07	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.57
Si-CG	10.39	9.75	11	<0.1	5.7	1.6	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	28
Si-CEL	7.89	4.18	1.1	<0.1	3.6	0.11	0.01	2.4	<0.01	<0.01	0.06	0.02	0.87

は比色管に試料を加え、蒸留水で 15mL 程度に調製し、5%w/v ヨウ化カリウム+5%w/v L-アスコルビン酸混合溶液 2.5mL、濃塩酸 2.5mL を加えた。その後、70℃のウォーターバスで約 4 分間加温し、室温で放冷した後に、蒸留水で 25mL にメスアップした。Se は比色管に試料を加え、蒸留水で 20mL 程度に調製し、濃塩酸 2.5mL を加えた。その後、比色管立てごと金属の容器に入れて、100℃の湯浴で約 10 分間加温し、室温で放冷した後に、蒸留水で 25mL にメスアップした。Sb は比色管に試料を加え、蒸留水で 15mL 程度に調製し、濃塩酸 5mL、チオ尿素溶液(0.1mol/L)を 3mL を加えた。その後、蒸留水で 25mL にメスアップした。F はイオンクロマトグラフ(日本ダイオネクス(株)製 ICS-1100、カラム AS4A-S、溶離液 Na_2CO_3 1.8mol/L/$NaHCO_3$ 1.7mol/L)により分析した。F の含有量試験試料に関しては、比色管に試料を 1mL 取り、蒸留水を 9mL、200g/L 硝酸銀を 1mL 加え、よく攪拌した後に 10 分ほど放置した後に 0.45μm のメンブレンフィルターでろ過したろ液を分析に用いた。

3.　結果と考察

3.1 エッチング前試料の溶出試験結果

表 3 にエッチング前試料の有害重金属の溶出濃度を示す。なお、T-Cr は基準値を超えなかったので Cr(VI)は測定していない。基準値を超過した欄を灰色で示すが、SF 系および Si 系のカバーガラスの Sb が環境基準を超過し、それぞれ環境基準の約 20 倍、約 8 倍であった。ガラスの透明度を上げるために用いられる消泡剤に Sb が含まれるため[7]、本研究で用いたカバーガラスの消泡剤から Sb が溶出したと考えられた。電池セルの F と Pb が基準値を超過し、それぞれ基準値の約 2.5 倍、約 4500 倍であった。電池セルにはハンダが用いられているため、ハンダが Pb の溶出源と考えられた[7]。

表 4 にエッチング前試料の有害重金属以外の溶出濃度を示す。pH は約 8～10 のアルカリ性であり、特にカバーガラスや基板ガラスのガラス系の pH が高かった。全体的に溶出濃度は低いが、カバーガラスや基板ガラスのガラス系の Si 溶出濃度は比較的高かった。

3.2 エッチング前試料の含有量試験結果

表 5 にエッチング前試料の有害重金属の含有量を示す。電池セルの Pb のみが基準値を超過し、基準値の約 20 倍であった。溶出試験と同様に電池セルの中に鉛がハンダとして含まれていることが原因である[7]。溶出試験で基準値を超えていた F と Sb は含有量試験では基準値以下であった。表 6 にエッチング前試料の有害重金属以外の含有量を示す、全体的に含有量は少ないが、Fe は全試料で多く、電池セルに Al が非常に多く含まれていた。

3.3 溶出濃度に対するエッチングの効果

表 7 にエッチング後試料の有害重金属の溶出濃度を示す。なお、T-Cr は基準値を超えなかったので Cr(VI)は測定していない。SF 系および Si 系のカバーガラスとバックシートの Sb が環境基準を超過し、

表 5　エッチング前試料の有害重金属の含有量(mg/kg).

試料 ID	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
SF-CG	<20	<0.4	0.6	2.1	<0.4	<4	<4	<4
SF-EVA	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<4	<4	<4
SF-SG	<20	<0.4	0.5	1.7	<0.4	<4	<4	<4
SF-BS	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<4	<4	<4
Si-CG	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<4	<4	<4
Si-CEL	<20	<0.4	2,800	3.3	<0.4	4	<4	<4
土壌環境基準	4000	45	150	4000	250	150	150	-

注：灰色の欄は基準値を超過している.

表 6　エッチング前試料の有害重金属以外の含有量(mg/kg).

試料 ID	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Co	Ni	Cu	Zn	Si
SF-CG-E	150	3.4	96	19	520	4.9	<0.4	6.9	0.5	1.7	18
SF-EVA-E	14	2.7	49	2.8	150	2.5	<0.4	1.3	<0.4	12	3.8
SF-SG-E	120	11	73	20	430	6.7	<0.4	6.6	0.6	1.5	15
SF-BS-E	1.7	1.3	23	0.76	48	1.5	<0.4	<0.4	<0.4	1.7	3.3
Si-CG-E	57	4.1	19	7.4	130	10	<0.4	3.9	<0.4	2.3	8.2
Si-CEL-E	26	15	56	1.9	360	21,000	<0.4	3.9	35	44	130

表 7　エッチング後試料の有害重金属の溶出濃度(mg/L).

試料 ID	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
SF-CG-E	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	<0.005	<0.007	0.16
SF-EVA-E	0.6	<0.001	<0.001	<0.01	0.003	0.007	<0.007	<0.007
SF-SG-E	<0.5	<0.001	0.002	<0.01	<0.001	<0.005	<0.007	<0.007
SF-BS-E	<0.5	<0.001	0.34	<0.01	<0.001	0.018	<0.007	0.075
Si-CG-E	<0.5	<0.001	<0.001	<0.01	0.002	0.020	<0.007	0.042
Si-CEL-E	<0.5	<0.001	42	0.02	0.021	0.019	<0.007	<0.007
土壌環境基準	0.8	0.003	0.01	1	0.05	0.01	0.01	0.02*

注：灰色の欄は基準値を超過している.
＊：Sb は要監視項目

それぞれ環境基準の約 8 倍、約 2 倍、約 4 倍であった。バックシートの Sb の由来は分からなかった。バックシートと電池セルの Pb が環境基準を超過し、それぞれ環境基準の約 30 倍、約 4000 倍であった。バックシートの Pb の由来は分からなかった。バックシートと Si 系のカバーガラス、電池セルの Se が環境基準を約 2 倍超過した。これらの部材の Se の由来は分からなかった。エッチング前試料の溶出試験で基準を超えたものについての除去率を表 8 に示すが、Sb は除去率が 60～70%程度であったが、エッチング後も環境基準を満足しなかった。F は除去率が 80%で、エッチングにより溶出基準を満足した。Pb は除去率が 7%で、エッチングによる除去効果は低かった。また、SF 系のバックシートの Pb と Sb についてはエッチングすることで基準値を超過した。よって、エッチング処理は Pb 以外の物質について溶出濃度を低減することに効果があると言えるが、基準値を満足できない試料もあることが分かった。また、エッチングにより溶出濃度が基準を超過する場合もあった。

表 8　エッチング前試料で基準を超えたものについての除去率(%).

	試料 ID	F	Pb	Sb
溶出濃度	SF-CG	-	-	62
	Si-CG	-	-	74
	Si-CEL	80	7	-
含有量	Si-CEL	-	71	-

表 9 にエッチング後試料の有害重金属以外の溶出

表9 エッチング後試料の有害重金属以外の溶出濃度(mg/L).

試料 ID	pH	EC(mS/m)	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Co	Ni	Cu	Zn	Si
SF-CG-E	9.65	6.1	7.3	0.3	3.5	0.66	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	35
SF-EVA-E	1.73	0.64	1.2	0.2	2.0	0.26	1.1	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	0.9
SF-SG-E	9.27	2.4	5.1	0.3	2.7	0.53	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	8.8
SF-BS-E	2.31	200	0.6	0.2	0.5	0.18	0.41	0.15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.76
Si-CG-E	8.83	4.3	6.2	<0.1	1.7	0.47	0.13	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	3.0
Si-CEL-E	4.87	94	1.3	0.5	2.3	0.36	0.77	530	<0.01	0.02	2.2	0.14	4.9

表10 エッチング後試料の有害重金属の含有量(mg/kg).

試料 ID	F	Cd	Pb	B	T-Cr	Se	As	Sb
SF-CG-E	<20	<0.4	0.5	0.4	<0.4	<4	<4	4
SF-EVA-E	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	4	<4	<4
SF-SG-E	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<4	<4	<4
SF-BS-E	<20	<0.4	0.4	<0.4	<0.4	13	<4	<4
Si-CG-E	<20	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	12	<4	<4
Si-CEL-E	<20	<0.4	800	0.5	<0.4	14	<4	<4
土壌環境基準	4000	45	150	4000	250	150	150	-

注：灰色の欄は基準値を超過している.

表11 エッチング後試料の有害重金属以外の含有量(mg/kg).

試料 ID	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Co	Ni	Cu	Zn	Si
SF-CG-E	81	3.7	75	15	160	2.2	<0.4	2.3	0.5	3.2	27
SF-EVA-E	9.5	2.1	4.5	2.0	12	0.41	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	9.0
SF-SG-E	25	4.1	9.7	4.6	60	2.0	<0.4	1.3	<0.4	<0.4	9.9
SF-BS-E	3.7	1.8	<0.4	1.4	4.7	1.6	<0.4	<0.4	<0.4	0.5	6.3
Si-CG-E	65	4.7	33	9.6	35	2.6	<0.4	1.5	<0.4	<0.4	8.4
Si-CEL-E	19	6.5	32	5.8	39	12,000	<0.4	0.9	89	3.4	110

濃度を示す。pH はカバーガラスや基板ガラスと言ったガラス系が pH8.8～9.7 と高く、プラスチック系は pH1.7～4.9 と低かった。全体的にエッチング前試料よりも溶出濃度は低いが、電池セルの Al 溶出濃度はエッチング処理により非常に高くなった。

3.4 含有量に対するエッチングの効果

表 10 にエッチング後試料の有害重金属の含有量を示す。電池セルの Pb のみが基準値の約 5 倍を超過した。除去率 Pb の除去率も表 8 に示すが、71%であり、エッチング前試料の含有量より低くなったが環境基準を満足しなかった。表 11 にエッチング後の有害重金属以外の含有量を示すが、溶出濃度同様にエッチング前試料の含有量よりも含有量は少なく、エッチング前試料で含有量が比較的多かった Fe は大きく減少し、電池セル中の Al もエッチング前試料の 1/2 に減少した。

3.5 考察

エッチングによって F 溶出濃度は基準以下になったが、Sb や Pb、Se の溶出濃度および Pb の含有量が基準値を超過することから、エッチング後の部材をコンクリート用細骨材として用いる場合には Sb と Pb、Se について注意が必要である。セメントと混合することにより、Pb と Se についてはそれぞれ $PbCO_3$ および $Pb(OH)_2$[11]、$CaSeO_3 \cdot H_2O$ および $Ca_6[Al(OH)_6]_2(SeO_4)_3 \cdot 26H_2O$[13] として不溶化することが知られており、エッチング後の試料を細骨材として用いた場合のコンクリートが溶出・含有量基準を超過しない可能性がある。Sb については、セメント処理による不溶化は期待できないが、最大で溶出基準の約 8 倍の超過であることから、細骨材としての使用率を下げることによる希釈効果で溶出基準を満足する可能性がある。

4. おわりに

本研究では、SF 系と Si 系のエッチング後の太陽光パネル部材のコンクリート用細骨材としての環境安全性を評

価することを目的として、溶出試験、含有量試験を行った。得られた主な知見を以下に示す。

(1)エッチング前試料の溶出濃度は、SF系およびSi系のカバーガラスのSbと電池セルのFとPbで環境基準を超過した。特にPbについては環境基準の4500倍であった。

(2)エッチング前試料の含有量は、電池セルのPbが環境基準を約20倍超過した。

(3)エッチング処理はSbやFの溶出濃度やPbの含有量を減少させる効果はあったが、エッチング処理後の試料ではこれらの物質のうちF以外は溶出基準、含有量基準を満足せず、エッチング処理による有害物質除去は不十分であった。また、Pb、Se、Sbについては、エッチング前には環境基準以下の溶出濃度であった試料をエッチングすることにより、溶出基準以上の溶出が見られた試料もあった。

(4)エッチング後の試料を細骨材として用いた場合のコンクリートからの有害物質の溶出については、セメントと混合することによる不溶化や希釈効果により環境基準を満足する可能性があると言えた。

謝辞

本研究の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務により得られたものである。また、社会環境システム工学科学生の石田泰隆君には実験の協力を得た。

参考文献

1) 佐川龍郎：太陽電池モジュールのリユース・リサイクルと環境省のガイドライン，廃棄物資源循環学会誌，Vol.30，No.6，pp.365-370，2019.
2) IRENA：Renewable Energy Statistics 2020.
3) 砂田達輝，乗超晃，狩野公俊：廃太陽光パネルのリサイクルシステムの構築,第29回廃棄物資源環学会研究発表会講演集，pp.287-288，2018.
4) 環境省：使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書(2015)
5) 村上進亮，豊田晟史：使用済み太陽光パネルの発生量と処理フロー,廃棄物資源循環学会誌,Vol.30,No.6,pp.371-378，2019.
6) 瀬川昇：使用済み太陽光システムのリユースおよびリサイクル事業,廃棄物資源循環学会誌,Vol.30,No.6,pp.393-402，2019.
7) 環境省：太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書 www.env.go.jp/press/files/jp/27519s.pdf（閲覧日2023年2月1日）
8) （株）東レリサーチセンター：バックシート https://www.toray-research.co.jp/businesses/analysis-evaluation/ana_011.html （閲覧日2023年2月1日）
9) 日経XTECH：使用済みCISパネルのリサイクルに道，低コスト・高収率で材料を分離・回収 https://xtech.nikkei.com/dm/atcl/feature/15/327680/030500007/?P=3（閲覧日2023年2月1日）
10) G. Voglar, and D. Lestan: Equilibrium leaching of toxic elements from cement stabilized soil, Journal of Hazardous Materials,Vol.246-247,pp.18-25,2013.
11) V. R. Ouhadi, R. N. Yong, and M. Deiranlou: Enhancement of cement-based solidification/stabilization of a lead-contaminated smectite clay, Journal of Hazardous Materials, Vol.403, 2021.
12) 橋本敦美，伊藤靖，佐藤道生，羽原俊祐：合成したセメント水和生成物による微量元素(六価クロム、ヒ素、セレン、ホウ素、フッ素およびアルミニウム)の固定化について，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，No.1，pp.71-78，2012.
13) D. H. Moon, D. G. Grubb, and T. L. Reilly: Stabilization/solidification of selenium-impacted soils using Portland cement and cement kiln dust, Journal of Hazardous Materials,Vol.168,pp.944-951, 2009.
14) J. V. Bothe Jr., and P. W. Brown: Arsenic immobilization by calcium arsenate formatio, Environ. Sci. Technol., Vol.33, No.21, 1999.
15) 亀井健史，蓬莱秀人：高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発，地盤工学ジャーナル，Vol.4，No.1，pp.91-98，2009.

球磨川における被災橋梁の復旧状況調査とモバイルブリッジの実用性の検討

豊田　祐樹 a)・上別府　尚弘 b)・森田　千尋 c)

Investigation of Recovery Status of Damaged Bridges on the Kuma River and Examination of Practicality of Mobile Bridges

Yuki TOYOTA, Naohiro KAMIBEPPU, Chihiro MORITA

Abstract

In recent years, due to many natural disasters, it has become difficult to evacuate due to damage to lifelines such as bridges, and countermeasures have been discussed. Therefore, we conducted an intermittent survey of the damage to bridges over the Kuma River, which was damaged by heavy rain in July 2020, and investigated the damage, the recovery period and period of use of the temporary bridge. As a result of the survey, it was found that the installation of the emergency assembly bridge takes two months at the earliest, and the fastest time for complete restoration is about two and a half years.

In addition, a mobile bridge, which was one of the emergency bridges, would be analyzed for the purpose of quick rescue operations in case of disaster. As a result of the analysis, it was found that the use of reinforcement materials suppresses the deflection of the mobile bridge. In addition, it is possible to run emergency vehicles even with the load setting of the 3rd class forest road bridge. Since it can be transported by truck by adjusting the weight of the member, it can be said that the practicality of the mobile bridge is high.

Keywords: Emergency bridge, Disasters, Scissors structure, Mobile bridge, Reinforcing material

1.　はじめに

近年、国内外で自然災害が多数発生しており、人的・物的被害ともに大きな問題となっている。一例として、平成 30 年豪雨では西日本を中心に全国各地で豪雨災害が発生し、岡山県倉敷市真備町では高梁川支流の小田川水系が氾濫し、真備町全域が水没する大災害 [1] となった（図 1）。近年の自然災害は、被害状況も多様化し、求められる内容も多岐にわたっている。今後も自然災害の発生自体を抑制することは困難を極めることが予想されるため、災害復旧に向けた対応の必要性が重要視されている。被害の中でも、ライフラインの要である橋梁の破損等によって被災者の避難や復旧・支援活動が制限されるといった問題が存在する。橋梁等のライフラインの被害把握は被災者の避難や復旧、支援活動を進めるうえで必要不可欠である。しかし、橋梁の一次的な被害把握 [2] は行われているが、断続的な被害把握は行われておらず、復旧時期や仮設橋の使用期間の目途を把握する研究は行われていない。

また、この問題を解決すべく、各地方整備局では、交通上重要な道路の迂回路や被災橋梁の代替路として利用する応急組立橋を保有している。直近の使用事例では令和 4 年 7 月に宮城県で応急組立橋が使用されている [3]。しかし、応急組立橋は設置までに 2 週間以上を費やすため、人命救助の観点から、より迅速な架橋が可能な橋が求められている。そこで、土木学会では、人命救助を目的として 72 時間以内に架橋できる橋梁を緊急仮設橋と定義し [4]、近畿地方整備局の緊急仮設橋 [5]、有尾らが研究開発を行っているモバイルブリッジ [6]など、国内外の様々な機関で独自の開発・研究が行われている。緊急仮設橋は応急組立橋と用途が異なり、迅速かつ一時的な利用が考えられているため、現行の道路橋示方書等の設計基準より緩和された設計荷重の採用が推し進められている。しかしながら、緊急仮設橋は未だ開発段階にあるものばかりであることに加え、設計荷重の緩和を国交省が認めてい

図1.　平成30年豪雨（岡山県倉敷市真備町）.

a)工学専攻環境系コース大学院生
b)宮崎市上下水道局下水道整備課維持係
c)土木環境工学プログラム教授

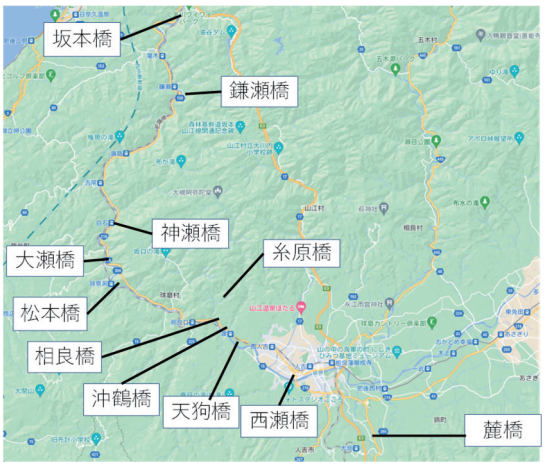


図2.　調査橋梁の位置関係.

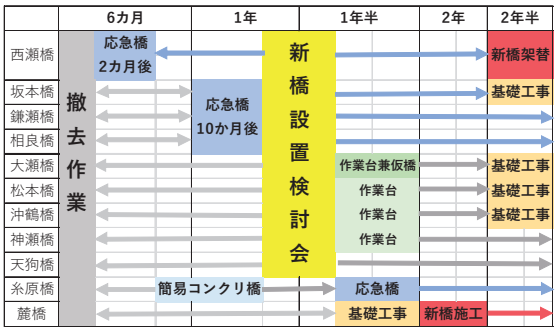


図3.　復旧状況の分類.

図4.　災害直後の西瀬橋(R2.7.23).

図5.　西瀬橋に設置された応急組立橋(R2.12.24).

図6.　新橋架替工事中の西瀬橋(R4.12.14).

ないため、使用段階には至っていない。

このような背景から、被害・復旧状況の把握として令和 2 年 7 月豪雨で被害にあった球磨川に架かる橋梁について調査を行い、復旧時期や仮設橋の設置期間の目安についてまとめる。また、緊急仮設橋の研究としてはモバイルブリッジについての解析を行う。モバイルブリッジで用いられるシザーズ構造は、中沢らが平衡方程式を用いた解析 [7]を行っているが、多格間で補強材を用いた場合の解析データは少ない。そこで、4 格間から 8 格間での補強材を用いた解析を行い、一般荷重より荷重制限が低い設計荷重を用いて実橋梁を想定した解析を行うことで、モバイルブリッジの実用性について検討する。

2.　令和 2 年 7 月豪雨での被災橋梁の復旧状況

2.1 被災調査

令和 2 年 7 月豪雨は、九州南部、九州北部地方、東海地方の多くで記録的な大雨が発生 [8]し、令和 2 年 7 月 3～4 日の豪雨により熊本県を流れる球磨川水系では、同川に架かる 33 橋梁に流出などの被害が発生した。

球磨川水系の橋梁被害調査は、過去に令和 2 年 7 月、12 月、令和 3 年 7 月、12 月、令和 4 年 7 月の 5 度行っており、球磨川本流に架かる橋梁を中心に 16 橋を調査している。本論では、令和 4 年 12 月 14 日に行った 6 度目の調査も含め、16 橋のうち図 2 に示す 11 橋について、過去の復旧状況と比較しながらまとめた。

図 3 に災害発生から現在までの復旧状況を示す。西瀬橋が最速の 2 ヶ月後、坂本橋・鎌瀬橋・相良橋が 10 ヶ月後に応急組立橋が設置された。また、旧橋撤去作業には 2 年、新橋施工工事の着工には 2 年半を有していることが分かる。以下に 6 度目の調査時点で復旧工事が行われている西瀬橋、坂本橋、麓橋の復旧状況についてそれぞれ述べる。

(a)　西瀬橋

図 4、5、6 に西瀬橋の変化の様子を示す。西瀬橋は小学校の通学路であった点が考慮され、流出した 1 径間約 40 m に災害発生から 2 ヶ月後、応急組立橋が設置された。6 度目の調査時には新橋架替部のトラス橋の組立工事が橋下の岸部で行われていた。架替工事は歩道部が令和 5 年 1 月上旬、車道部が同年 2 月下旬の完了を予定しており、災害発生から新橋架替まで 2 年半の期間を要することがうかがえる。

(b)　坂本橋

坂本橋は橋長 121m、2 径間の鋼トラス橋でトラス部分が全て流出した。災害発生から 10 ヶ月後に応急組立橋が

設置された。災害発生から 2 年半後に新橋橋脚部分の基礎工事が開始されたことから、復旧には 3 年以上の期間を有することが分かる。坂本橋の応急組立橋は設置から 1 年半以上経っているが、目立った外傷はなく、常設橋と遜色のない働きをしている。

(c)　麓橋

麓橋は 1 径間の鋼桁橋でそのすべてが流出した。その後、仮設橋の設置などの対策は取られないまま、災害から 1 年半後に新橋施工工事が行われた。6 度目の調査時点では令和 5 年 3 月 24 日までの工事が予定されており、災害から 2 年 8 ヶ月後に新橋が架け替えられることとなる。麓橋は橋長約 15 m の短い橋であったため、復旧期間が調査橋梁の中でも短く済んだと考えられる。

2.2 仮設橋の設置について

令和 2 年 7 月豪雨による橋梁被害調査を参考に仮設橋の設置期間について検討していく。

災害発生から新橋架替までは橋長が短い橋で約 2 年、橋長が 100 m 以上になると 3 年以上の年月を費やす。橋梁の復旧期間に応急組立橋を代替橋とすることは現段階での最善策であり、 3 年以上の設置期間が必要とされる。

しかし、応急組立橋の設置には最短で 2 ヶ月の期間がかかっており、災害発生から 2 ヶ月は陸路の移動が大幅に制限されていたと言える。緊急仮設橋にはこの 2 ヶ月間の対岸移動を可能とする耐久性能とより迅速な架橋性能が求められる。

3.　緊急仮設橋について

3.1 緊急仮設橋の現状

災害時などに用いられる仮設橋には、図 7 に示す仮設橋・応急組立橋・緊急仮設橋といった種類がある。土木学会では、人命救助を目的として緊急時に早期かつ簡易架設が可能な橋を特に緊急仮設橋と定義しており、災害発生から 72 時間以内に架橋できるものを指している。

緊急仮設橋の例として国内では、近畿地方整備橋の主桁を組み合わせて設置する緊急仮設橋 [5]（図 8）や、有尾らによって研究開発されたマジックハンドの要領で片岸からの設置が可能なシザーズ構造のモバイルブリッジ [6]（図 9）、海外では George らによって開発された吹き戻しの要領で展開するタイドアーチブリッジ [9]（図 10）などがある。

3.2 緊急仮設橋の課題

緊急仮設橋はまだ開発・研究段階であるものが多い。また、応急組立橋設置までに対岸移動を可能とする一時的な目的での利用が考えられているため、林道橋や桟橋、過去に使用された設計基準といった現行の道路橋示方書等の設計基準より緩和された設計荷重の採用が推し進められている。しかし、設計荷重を満足していないことから国交省が使用を認めていないため、現段階での使用は難しい状況にある。

そこで、緊急仮設橋独自の設計荷重を設ける必要があることが検討されている。

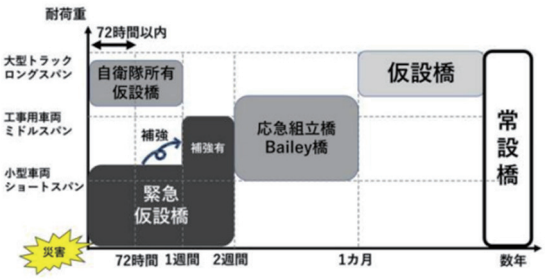


図7.　土木学会が示す仮設橋のタイプ.

図8.　近畿地方整備局の緊急仮設橋.

図9.　モバイルブリッジ.

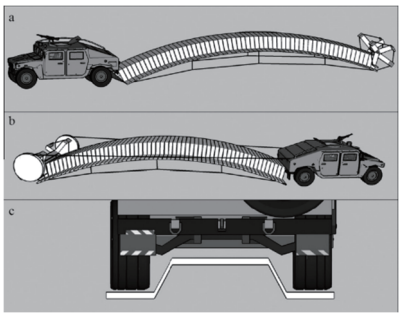


図10.　タイドアーチブリッジ.

4.　モバイルブリッジについて

ここでは、緊急仮設橋の 1 つであるモバイルブリッジについて、ストラット補強によるたわみの抑制効果について検証する。

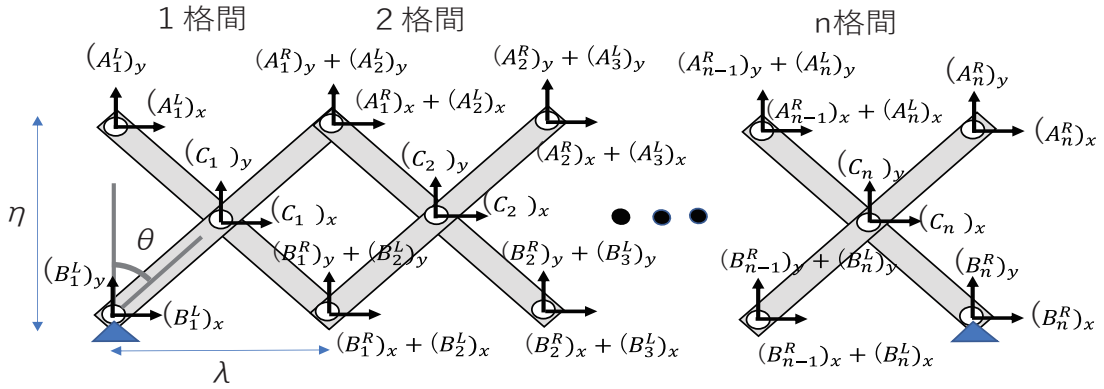


図11.　n格間シザーズのモデル.

4.1 モバイルブリッジの概要

図 9 に示すモバイルブリッジとは、はさみ状の骨組みを組み合わせるシザーズ構造を用いた展開型緊急仮設橋である。支間長は約 20 m あり、4～6 人の作業人員で 1 時間程度での組み立てが可能である。モバイルブリッジの利点としては、機械式伸縮装置を用いることで大型クレーンを使用せずに架橋ができることや、橋自体を折り畳むことができるため、輸送がしやすいといった点が挙げられる。

4.2 シザーズ構造の基礎力学

モバイルブリッジに使用されているシザーズ構造の平衡方程式について、n格間シザーズのモデルを図 11 に示す。なお、A_1^L, B_1^L, C_1 等は、各節点に作用する力である。図 11 に示す各格間毎に力のつり合い式を立て、それらを連立方程式で解くことによって反力や曲げモーメントなどを算出する。以下にその一例として、8 格間シザーズの式を示す。

シザーズの結合部の平衡式を次式のように定義する。ここで、kは任意の整数である。

$$\begin{Bmatrix} B_k^R \\ A_k^R \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} B_{k+1}^L \\ A_{k+1}^L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_{k,\ k+1} \\ A_{k,\ k+1} \end{Bmatrix} \tag{1}$$

単純両端支持条件のn格間での反力は、

$$\begin{aligned} &\{B_1^L,\ B_n^R\}^T \\ &= -T_{wn}^{-1}\Bigg[\{Z(C_n,\ A_n^R)\}^T \\ &+ \sum_{i=0}^{n-2}(T_L T_R^{-1})^i T_L \{B_{n-i-1,\ n-i} A_{n-i-1,\ n-i}\}^T \\ &+ \sum_{i=1}^{n-2}(T_L T_R^{-1})^i \{C_{n-i},\ 0\}^T + (T_L T_R^{-1})^{n-1}\{Z(C_1,\ A_1^L)\}^T\Bigg] \end{aligned} \tag{2}$$

である。ここで、各成分は次のようになる。

$$T_{wn} = (T_{Yn} + (T_L T_R^{-1})^{n-1} T_{Y1})$$

$$Z\{C_n,\ A_n^R\}^T = \{C_n + (A_n^R),\ a(A_n^R)\}^T$$

$$Z\{C_n,\ A_n^L\}^T = \{C_n + (A_n^L),\ a(A_n^L)\}^T$$

$$T_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \eta & -\lambda \\ -\eta & -\lambda & 0 & 0 \end{bmatrix},\ T_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\eta & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta & \lambda \end{bmatrix}$$

$n = 8$では、以下のように表せる。

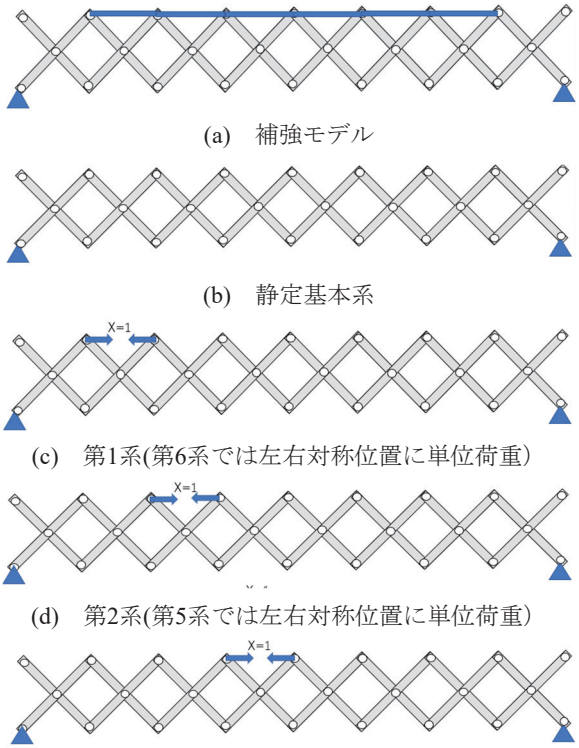
$$\begin{aligned} &\{B_1^L,\ B_8^R\}^T \\ &= -T_{w8}^{-1}\Bigg[\{Z(C_8,\ A_8^R)\}^T \\ &+ \sum_{i=0}^{6}(T_L,\ T_R^{-1})^i T_L \{B_{8-i-1,\ 8-i},\ A_{8-i-1,\ 8-i}\}^T \\ &+ \sum_{i=1}^{6}(T_L T_R^{-1})^i \{C_{8-i},\ 0\}^T + (T_L T_R^{-1})^7 \{Z(C_1,\ A_1^L)\}^T\Bigg] \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)を用いて反力を求め、軸力Nや曲げモーメントMなどの部材力を求めることができる。

4.3 補強材の導入について

本研究では、4～8 格間シザーズについて補強材を導入した解析を行う。各格間それぞれ 2 格間目から$n-1$格間目に補強材を導入し、$n-2$次不静定問題を検討する。1 例として 8 格間シザーズ構造の補強材を用いたモデルを図 12(a)に示す。

単純両端支持 8 格間シザーズに何も力が作用していない状態を静定基本系として図 12(b)に示す。また、2 格間目に$X = 1$の単位荷重を与えたものを第 1 系とし、同じように 3～7 格間目に$X = 1$の単位荷重を与えたものを第 2～6 系とし、それぞれ図 12(c)～(e)に示す。ここで、基本系、第 1～6 系のそれぞれの曲げモーメントをM_0～M_6とし、同様に、軸力をそれぞれN_0～N_6とする。



(a)　補強モデル

(b)　静定基本系

(c)　第1系(第6系では左右対称位置に単位荷重)

(d)　第2系(第5系では左右対称位置に単位荷重)

(e)　第3系(第4系では左右対称位置に単位荷重)

図12.　8格間シザーズのモデル.

第1系の場合での仮想変位は、

$$\delta_{01} = \sum\int \frac{M_0 M_1}{EI}dx + \sum \frac{N_0 N_1}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{4}$$

$$\delta_{11} = \sum\int \frac{{M_1}^2}{EI}dx + \sum \frac{{N_1}^2}{EA} + \frac{{N_1}^2}{EB}L_0 \sin\theta \tag{5}$$

$$\delta_{21} = \sum\int \frac{M_2 M_1}{EI}\mathrm{dx} + \sum \frac{N_2 N_1}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{6}$$

$$\delta_{31} = \sum\int \frac{M_3 M_1}{EI}\mathrm{dx} + \sum \frac{N_3 N_1}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{7}$$

$$\delta_{41} = \sum\int \frac{M_4 M_1}{EI}\mathrm{dx} + \sum \frac{N_4 N_1}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{8}$$

$$\delta_{51} = \sum\int \frac{M_5 M_1}{EI}\mathrm{dx} + \sum \frac{N_5 N_1}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{9}$$

$$\delta_{61} = \sum\int \frac{M_6 M_1}{EI}\mathrm{dx} + \sum \frac{N_6 N_1}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{10}$$

となる。同様にして第2系では、

$$\delta_{02} = \sum\int \frac{M_0 M_2}{EI}dx + \sum \frac{N_0 N_2}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{11}$$

$$\delta_{12} = \sum\int \frac{M_1 M_2}{EI}dx + \sum \frac{N_1 N_2}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{12}$$

$$\delta_{22} = \sum\int \frac{{M_2}^2}{EI}dx + \sum \frac{{N_2}^2}{EA} + \frac{{N_2}^2}{EB}L_0 \sin\theta \tag{13}$$

$$\delta_{32} = \sum\int \frac{M_3 M_2}{EI}dx + \sum \frac{N_3 N_2}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{14}$$

$$\delta_{42} = \sum\int \frac{M_4 M_2}{EI}dx + \sum \frac{N_4 N_2}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{15}$$

$$\delta_{52} = \sum\int \frac{M_5 M_2}{EI}dx + \sum \frac{N_5 N_2}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{16}$$

$$\delta_{62} = \sum\int \frac{M_6 M_2}{EI}dx + \sum \frac{N_6 N_2}{EA}\frac{L_0}{2} \tag{17}$$

となり、第3～6系も同様である。ここで、E:ヤング係数、A:シザーズ部材の断面積、I:断面二次モーメント、B:補強材の断面積である。これらは重ね合わせの原理により、次式のようにまとめられる。

$$\begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{21} & \delta_{31} & \delta_{41} & \delta_{51} & \delta_{61} \\ \delta_{12} & \delta_{22} & \delta_{32} & \delta_{42} & \delta_{52} & \delta_{62} \\ \delta_{13} & \delta_{23} & \delta_{33} & \delta_{43} & \delta_{53} & \delta_{63} \\ \delta_{14} & \delta_{24} & \delta_{34} & \delta_{44} & \delta_{54} & \delta_{64} \\ \delta_{15} & \delta_{25} & \delta_{35} & \delta_{45} & \delta_{55} & \delta_{65} \\ \delta_{16} & \delta_{26} & \delta_{36} & \delta_{46} & \delta_{56} & \delta_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} \delta_{01} \\ \delta_{02} \\ \delta_{03} \\ \delta_{04} \\ \delta_{05} \\ \delta_{06} \end{Bmatrix} \tag{18}$$

この式に求めた仮想変位を代入し、不静定力X_1～X_6が求まる。求めた不静定力を用いて、補強後のシザーズの断面力を次式で求める。

$$M = M_0 + M_1X_1 + M_2X_2 + M_3X_3 + M_4X_4 + M_5X_5 + M_6X_6 \tag{19}$$

$$N = N_0 + N_1X_1 + N_2X_2 + N_3X_3 + N_4X_4 + N_5X_5 + N_6X_6 \tag{20}$$

以上のように求めた断面力を用いて、単位荷重法によりシザーズ部材に生じるたわみyを次式より求める。

$$y = \int_0^{L_0} \frac{N\bar{N}}{EA}dx + \int_0^{L_0} \frac{M\bar{M}}{EI} \tag{21}$$

以上の過程により、シザーズ構造における各部材力やたわみを求めることができる。

5.　補強材を用いた解析

今回は4格間～8格間シザーズそれぞれについて、橋長の範囲が5～12 mでの解析を行う。解析を行うにあたり、設計荷重は道路橋示方書に記載されている、表1に示す主桁を設計する場合の荷重を採用した[10)]。

5.1 断面剛性比によるたわみの変化

補強材の断面積を変化させ、補強材の大きさの違いによる補強効果を比較していく。シザーズ部材と補強部材の断面剛性比であるαは、以下のように示される。

$$\alpha = \frac{B}{A} \tag{22}$$

また、断面剛性比αを0～1まで0.1間隔で変化させたときのそれぞれのたわみをδ_{an}とし、補強なしの場合のたわみδ_{a0}で割った値をたわみ比βとして以下に示す。

$$\beta = \frac{\delta_{an}}{\delta_{a0}} \tag{23}$$

図13に橋長8mの6格間シザーズのαとβの関係を示す。

表 1.　一般荷重の詳細.

荷重	主載荷荷重（幅5.5m）						従載荷荷重
	等分布荷重p_1			等分布荷重p_2			
	載荷長 D（m）	荷重(kN/m²)		荷重(kN/m²)			
		曲げモーメントを算出する場合	せん断力を算出する場合	L≦80	80<L≦130	130<L	
A活荷重	6	10	12	3.5	4.3-0.01L	3	主載荷荷重の50%
B活荷重	10						

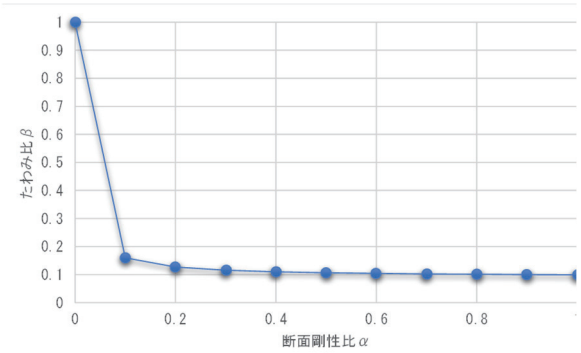


図 13.　断面剛性比 α とたわみ比 β の関係.

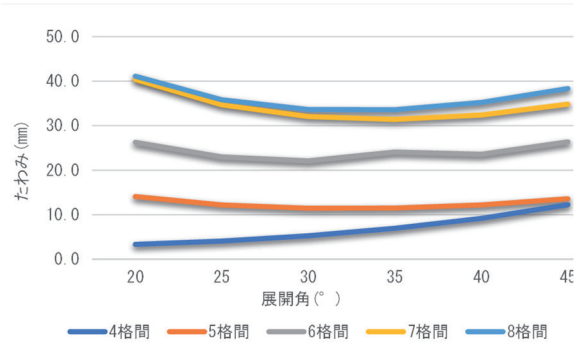


図14.　橋長6mでの展開角とたわみの関係.

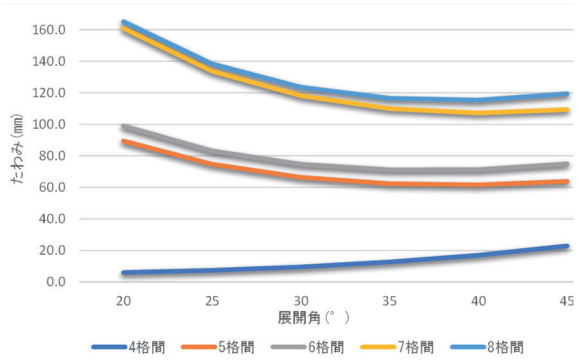


図15.　橋長9mでの展開角とたわみの関係.

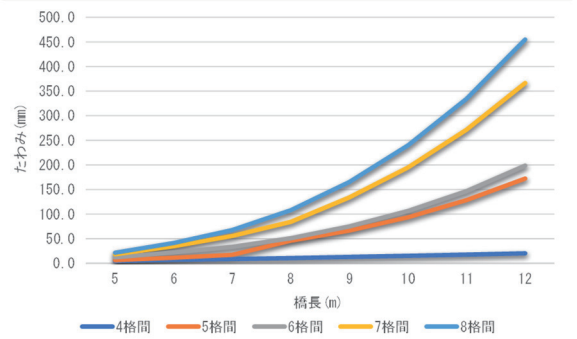


図16.　橋長によるたわみの変化.

$\alpha = 0.1$でβの値が大きく減少しており、αが0.1より大きな値をとっても、βはあまり変化しない結果となった。他格間シザーズで橋長を変化させても同様の結果が得られた。このことから、$\alpha = 0.1$で十分な補強効果があることと、αの増加に伴うたわみの減少効果はあまり期待できないことが分かる。この結果を踏まえ、これ以降の解析では断面剛性比$\alpha = 0.1$を採用する。

5.2 展開角によるたわみの変化

モバイルブリッジの展開角の違いによるたわみの変化量について比較した。4～8格間シザーズそれぞれについて、橋長6m、9mでのたわみの様子を図14、15にそれぞれ示す。4格間のみ展開角とたわみが比例関係に近く、他格間については35°～45°付近でたわみの最小値をとることが分かる。また、橋長が長くなるにつれ、3格間と4格間、6格間と7格間でのたわみの差が大きくなり、橋長が10～12mでも同様の傾向が見られた。このことから、橋長の長化に伴う使用格間の変更が生じる際、3格間から4格間、6格間から7格間への変更は、部材の減量や展開角などを考慮し、たわみの増加を抑制する必要があることが考えられる。

5.3 橋長によるたわみの変化

モバイルブリッジの橋長の違いによるたわみの変化量について比較した。図16に4格間～8格間シザーズそれぞれの橋長が5～12 mでのたわみの変化を示す。なお、モバイルブリッジ展開時の橋高が1,500 mm～4,500 mmの範囲内で解析を行ったため、展開角を4格間は35°、5・6格間は30°、7格間は25°、8格間は20°とする。

解析の結果、橋長が長くなるにつれ、4格間のみ比例的

表 2.　3 等林道橋荷重の詳細.

荷重	主載荷荷重（幅5.5m）						従載荷荷重
	等分布荷重p_1			等分布荷重p_2			
	載荷長 D（m）	荷重(kN/m²)		荷重(kN/m²)			
		曲げモーメントを算出する場合	せん断力を算出する場合	L≦80	80<L≦130	130<L	
1等林道橋	6	10	12	3.5	4.3-0.01L	3	主載荷荷重の50%

橋の等級	荷重	線荷重 P（kN/m）	等分布荷重p（kN/m²）		
			L≦80	80<L≦130	130<L
2等林道橋	T-14	34.3	1等林道橋の70%		
3等林道橋	T-9	24.5	1等林道橋の50%		

な変化が見られ、他格間では2次関数的な変化が見られた。

6.　実橋梁を想定した解析

6.1 解析概要

実橋梁を想定して、シザーズ部材の耐力や補強部材の座屈についても考慮した解析を行った。荷重設定については、緊急仮設橋は現行の道路橋示方書に記載されている基準まで満たす必要はないと考えられているため、従来の設計荷重より緩和されたものを使用する。よって、設計荷重を道路橋示方書に記載されている主桁を設計する際に用いられる一般荷重[10]と、表2に示す北海道が定める3等林道橋の荷重[11]の2つを採用し、両者の比較を行う。

解析モデルのモバイルブリッジに使用する部材については、全部材共通でアルミニウム合金A6063を用いる。部材のヤング係数は$E = 7.0 \times 10^4\ \mathrm{N/mm^2}$、 0.2%耐力は245 MPaとする。また、断面剛性比は、$\alpha = 0.1$として補強材の座屈荷重を満足させる場合には補強材の厚みをかなり薄くする必要があるため、補強材に現実的な厚みを持たせるために、$\alpha = 0.3$として解析を行う。

橋長については2章の調査橋梁の１つである麓橋を参考に、支間長を15 m、全橋長は17 mに設定する。また、モバイルブリッジの輸送手段についても考慮が必要である。ここでは中型トラックに分類される6 tトラックでの輸送を想定し、荷台の積載量[12]を考慮して、モバイルブリッジの一部材長を5 m以下、幅員を2.3 m、展開時の橋高を3.0～3.8 mの範囲とする。

6.2 解析モデルの決定

表3に展開時の橋高3 m、3.4 m、3.8 mにおける各格間の展開角や部材長などの参考値を示す。シザーズ部材の断面は、縦：240 mm、横：60 mmと設定している。なお、縮小高さとはモバイルブリッジ運搬時の折り畳まれた状態での高さ、縮小長さは同状態での長さを表す。

表 3.　各格間での実橋梁解析の結果.

	高さ(m)	展開角(°)	部材長(m)	縮小高さ(mm)	縮小長さ(mm)
4格間	3	54.8	5.26	1712	5253
	3.4	51.3	5.44	1769	5435
	3.8	48.2	5.7	1850	5693
5格間	高さ(m)	展開角(°)	部材長(m)	縮小高さ(mm)	縮小長さ(mm)
	3	48.6	4.53	1958	4528
	3.4	45.0	4.81	2073	4802
	3.8	41.8	5.1	2195	5092
6格間	高さ(m)	展開角(°)	部材長(m)	縮小高さ(mm)	縮小長さ(mm)
	3	43.4	4.13	2220	4121
	3.4	39.8	4.43	2376	4420
	3.8	36.7	4.74	2541	4734
7格間	高さ(m)	展開角(°)	部材長(m)	縮小高さ(mm)	縮小長さ(mm)
	3	39.0	3.86	2484	3855
	3.4	35.5	4.18	2684	4173
	3.8	32.6	4.51	2892	4504
8格間	高さ(m)	展開角(°)	部材長(m)	縮小高さ(mm)	縮小長さ(mm)
	3	35.3	3.68	2754	3671
	3.4	32.0	4.01	2998	4004
	3.8	29.2	4.35	3250	4348

表3に示す通り、4格間は部材長が想定範囲よりも長い。6～8格間は展開角が小さく、これに伴うたわみの増加が懸念される。よって、今回は展開角が45°となり、橋高を3.4 mとする5格間シザーズを扱って解析を行った。

図17、18に上記の条件を考慮し作成した解析モデルの詳細を示す。

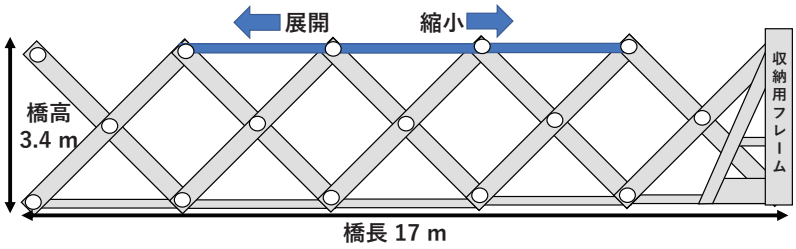
6.3 解析結果

(a)　応力計算

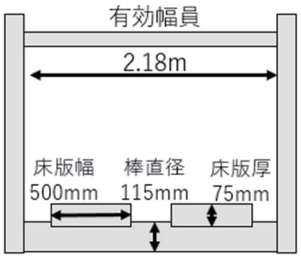
シザーズ部材にかかる最大応力をシザーズ部材に発生する曲げモーメントと軸力を考慮して次式を用いて算出する。

$$\sigma = \frac{M}{I}x + \frac{N}{A} \tag{24}$$

ここで用いたxは中立軸からの距離を表しており、今回

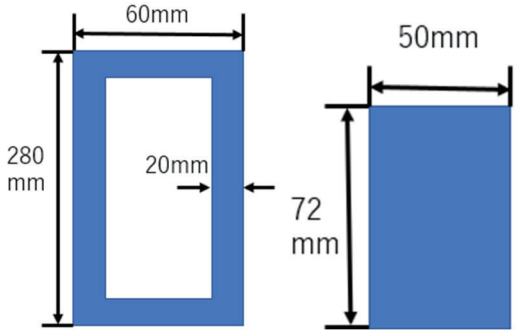


(a) 展開時のモデル



(b)正面から見た際の様子

図 17. 5格間シザーズの解析モデル.



(a)シザーズの断面積 (b)補強材を断面積

図 18. 部材の断面積.

用いたシザーズの断面は長方形を想定している。

補強なしの最大応力をσ_0、補強あり最大応力をσ_1とし、許容応力σ_aとの安全率を、一般荷重と3等林道橋荷重に分け、それぞれ比較した。

一般荷重の場合、

$$\sigma_a/\sigma_0 = 245\ \mathrm{MPa}/438.2\ \mathrm{MPa} = 0.58 \tag{25}$$

$$\sigma_a/\sigma_1 = 245\ \mathrm{MPa}/92.5\ \mathrm{MPa} = 2.75 \tag{26}$$

となる。安全率は、補強なしでは安全率が1を下回っている。補強ありの場合、安全率の目安である3に近い値が算出された。

3等林道橋荷重の場合、

$$\sigma_a/\sigma_0 = 245\ \mathrm{MPa}/233.6\ \mathrm{MPa} = 1.08 \tag{27}$$

$$\sigma_a/\sigma_1 = 245\ \mathrm{MPa}/49.8\ \mathrm{MPa} = 5.10 \tag{28}$$

となる。安全率は、一般荷重と比べて2倍近く上回っており、補強材を用いた場合の安全率5.10は、3を大きく上回っている。

(b) たわみの計算

たわみの許容値を道路橋示方書[11]より、支間長の1/500とし、$\delta_a = 30.0$ mmとする。補強なしのたわみの値をδ_0、補強ありのたわみの値をδ_1として比較した。

一般荷重の場合、

$$\delta_0 = 590.2\ \mathrm{mm} > \delta_a = 30.0\ \mathrm{mm} \tag{29}$$

$$\delta_1 = 52.0\ \mathrm{mm} > \delta_a = 30.0\ \mathrm{mm} \tag{30}$$

となる。たわみの値は補強することにより、補強なしの値の約12分の1の値となったが、たわみの許容値を下回るまでには至らなかった。

3等林道橋荷重の場合、

$$\delta_0 = 316.2\ \mathrm{mm} > \delta_a = 30.0\ \mathrm{mm} \tag{31}$$

$$\delta_1 = 28.2\mathrm{mm} < \delta_a = 30.0\ \mathrm{mm} \tag{32}$$

となる。補強材を用いた場合、たわみの値は補強材なしの値の約11分の1の値となり、許容値を下回る結果となった。

(c) 座屈荷重と耐荷重の計算

3等林道橋荷重を設計荷重にした際の補強部材の座屈、床版の耐荷重、床版を支える棒の耐荷重についても検討した。

まず、補強部材にかかる不静定力をそれぞれX_1～X_3として、座屈荷重をP_{cr}とすると、

$$X_1 = X_3 = 78.0\ \mathrm{kN} < P_{cr} = \frac{\pi^2}{l^2}EI = 92.9\ \mathrm{kN} \tag{33}$$

$$X_2 = 81.1\ \mathrm{kN} < P_{cr} = \frac{\pi^2}{l^2}EI = 92.9\ \mathrm{kN} \tag{34}$$

となる。したがって、補強部材はどちらも座屈しないことが分かる。

次に、床版にかかる荷重をP_1、床版を支える棒にかかる荷重をP_2として、耐荷重をそれぞれP_a、P_bとすると、

$$P_1 = 30.1\ \mathrm{kN} < P_a = \frac{4\sigma Z}{2l} = 33.8\ \mathrm{kN} \tag{35}$$

$$P_2 = 60.2\ \mathrm{kN} < P_b = \frac{4\sigma Z}{l} = 63.6\ \mathrm{kN} \tag{36}$$

となる。したがって、床版と棒のどちらも耐荷重の値を満足することが分かる。

また、本解析で用いたモバイルブリッジにかかる最大荷重は3等林道橋荷重の場合、6,323 kgとなる。救急車の荷重が3,200 kg程度であるため、緊急車や普通自動車などの走行は問題なく行えることが分かる。

(d) 運搬における積載量の計算

モバイルブリッジを運搬用に折り畳んだ状態について検討する。モバイルブリッジの運搬イメージを図19に示す。今回は図11のθを折り畳みの際は3°とした。図19のモデルのように折り畳んだ場合、縮小高さは2,292.8 mm、縮小長さは4,801.7 mm、シザーズ部材と床版の合計重量は4,323.3kgとなった。縮小高さと縮小長さは積載可能範囲である荷台高さ2,800 mm未満、全長12,000 mm以内に収

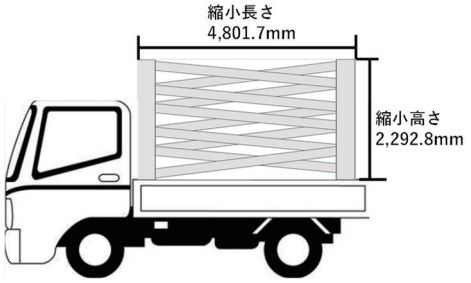


図 19.　運搬時のモデル.

まっている。積載荷重についてはモバイルブリッジの収納用フレームの重量を1,700 kg以内にすることで運搬可能となる。

しかし、収納用フレームはその自重がカウンターウエイトの役割を担っており、フレーム重量が1,700 kgで架橋作業をした場合、モバイルブリッジ展開中に落橋する可能性が考えられる。よって、架橋作業時は収納用フレームの自重に加えて、運搬で使用したトラックとフレームを紐で繋ぐなどして、カウンターウエイトの効果を高めて、モバイルブリッジの落橋を防ぐ措置が必要である。

7.　まとめ

本研究では、令和2年7月豪雨により被害を受けた球磨川水系の橋梁調査とモバイルブリッジの補強材による補強効果の検証を行った。

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

1) 令和 2 年 7 月豪雨で被害を受けた球磨川水系の橋梁は現在、調査した橋梁のうち 5 橋に仮設橋が設置されていた。設置時期については西瀬橋が最速の 2 ヶ月後、坂本橋・鎌瀬橋・相良橋が 10 ヶ月後であった。旧橋の撤去作業もほぼすべての橋で完了していた。糸原橋では工事による迂回路を設けるために仮設橋が設置されており、仮設橋の旧橋の代替橋以外の目的での使用も見受けられた。
2) 新橋設置計画はほぼすべての橋で災害発生から 1 年半後に計画されており、橋橋脚部分の基礎工事に着工している橋も見受けられた。西瀬橋では調査時に新橋架替部のトラス橋の組立工事が橋下の岸部で行われており、災害から 2 年半後の令和 5 年 2 月に完全復旧される見込みである。
3) 令和 2 年 7 月豪雨の被害復旧調査を参考にすれば、応急組立橋や仮設橋については 2～3 年の期間での設置が必要である。また、応急組立橋の設置期間が被害発生から 2 ヶ月後であったため、この 2 ヶ月間の人命救助路を確保する目的での緊急仮設橋の導入は必要不可欠と言える。
4) モバイルブリッジに補強材を用いた場合の補強効果については、シザーズ部材の 10 分の 1 程度の断面積の補強材を使用することで十分な効果が得られた。
5) モバイルブリッジの橋長が長くなるにつれ、4 格間シザーズと 5 格間シザーズ、6 格間シザーズと 7 格間シザーズのたわみの変化量に大きな差が見えたため、4 格間シザーズから 5 格間シザーズ、6 格間シザーズから 7 格間シザーズへ変更をする際は部材の減量や展開角を変更させ、たわみの増加を抑える必要がある。
6) 解析の結果、モバイルブリッジは 3 等林道橋の設計荷重で十分機能することが示された。よって、人命救助を目的とする短期間での運用であれば問題無く行える可能性は高いといえる。
7) モバイルブリッジの運搬については中型トラックを用いて、道路交通法の範囲内での運搬が計算上は可能である。

参考文献

1) 防災リテラシー研究所：平成 30 年豪雨災害 真備町の水害 1：bosailiteracy.org/literacy/typhoon/mabi1/ (閲覧日 R4.12.19) .
2) 地盤工学委員会性能に基づく橋梁の耐震設計法に関する研究小委員会：「東日本大震災における橋梁の全体被害状況とその一時分析」土木学会，第 32 回地震工学研究発表会講演論文集，2012.
3) 国土交通省東北地方整備局～宮城県大崎市で被災した丸山橋の復旧に向けて～：https://www.thr.mlit.go.jp/news_izen.asp?news=202209 (閲覧日 R4.12.19).
4) 土木学会工学委員会：災害時の緊急架設を目的とした緊急仮設橋に関する調査報告，2020.
5) 田中和嗣：応急組立橋を用いた災害復旧支援，近畿地方整備局研究発表会防災・保険部門，vol2，2014.
6) I.Ario, M.Nakazawa, Y.Tanaka, I.Tanikura, S. Ono : Development of a prototype deployable bridge based on origami skill, Automation in Construction, Vol32, pp.104-111, 2013.
7) 近広雄希，有尾一郎，中沢正利，田中義和：シザーズ型展開橋の静力学特性とその検証，構造工学論文集，Vol.62A，2016.
8) 気象庁：令和 2 年 7 月豪雨 令和 2 年(2020 年)7 月 3 日～7 月 31 日（速報）：https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2020/20200811/20200811.html （閲覧日 R5.1.10）.
9) George Lederman, Zhong You ,Branko Glišic : A novel deployable tied arch bridge, Engi-neering Structures 70,2014.
10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編，pp.92-102，2017.
11) 北海道ホームページ：北海道林道事業設計指針，3 章第 8 項，pp.14-16，2015.
12) 全日本トラック協会：車両総重量と積載量：https://jta.or.jp/ippan/hayawakari/8-sekisai.html（閲覧日 R5.1.18）.

粒子流動型レシーバのための蓄熱粒子持ち上げ装置の開発

俵　彰吾 a)・長瀬　慶紀 b)・友松　重樹 c)・木村　正寿 d)

Development of Heat Storage Particles Lifting Device for Solar Thermal Receiver

Shogo TAWARA, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATU, Masatoshi KIMURA

Abstract

In recent years, renewable energy sources that do not emit carbon dioxide, such as solar thermal power systems, have been attracting worldwide attention. Therefore, we are conducting research on solar thermal power systems using a beam down solar concentrator at the University of Miyazaki. The objective of the research is to develop a lifting device that continuously supplies thermal storage particles for use in solar thermal power systems. In this paper, air conveying device was produced and tested. As a result, not all particles could be lifted on condition that using the screw feeder. When lifting particles to height of more than 1.5m, the lifting method should be re-examined.

Keywords: Solar Thermal Receiver, Particle lifting device, Solar heat, Solar concentrator

1. はじめに

現在、日本国内におけるエネルギ消費量は 1973 年に比べ、2011 年では約 2.4 倍になっており、発電比率はほとんどが原子力発電と火力発電が占めている。東日本大震災後は原子力発電の長期運転休止により、火力発電の発電比率を約 9 割まで上昇させている。火力発電は二酸化炭素を大量に排出し、地球温暖化の原因の一つである温室効果ガスを増加させ、低炭素社会の実現とは程遠いものである。また、エネルギ資源である化石燃料の石油も海外の輸入に頼っており、国内で安定した供給できるエネルギが求められている。そこで近年、温室効果ガスを削減するために、二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギが世界的に注目を浴びている。再生可能エネルギにはバイオマス火力発電や水力発電、地熱発電などが挙げられ、太陽光の熱を用いて発電する太陽熱発電もその一つである [1)]。

太陽熱発電の特徴としては、太陽光を熱に変換するため、太陽光発電と比較した際に、雲による発電量の変動が小さくなることが分かっており、安定した発電量が得られる点が挙げられる。また、蓄熱システムを導入すると、太陽光が得られない夜間などでも、電力を供給することが可能となる [2)]。

太陽熱発電では、ビームダウン式太陽集光装置で集光した太陽光を加熱部であるレシーバに照射し、レシーバ内にあらかじめ投入された蓄熱粒子を加熱する。加熱された蓄熱粒子は、スクリューフィーダで一定量取り出され、気密性を保つためのバルブを介して、熱交換器に投入される。熱交換器に投入された蓄熱粒子は圧縮空気と熱交換を行い、熱交換を行った圧縮空気は熱機関を駆動させることで発電を行う。太陽熱発電の概略図を図 1 に示す。熱交換した後の蓄熱粒子は、レシーバより下の位置で排出される。太陽熱発電は連続的に発電を行えることが重要であり、熱交換後にレシーバ下方へ排出された粒子を再びレシーバまで持ち上げて、再度加熱することが必要である。しかし、粒子をレシーバまで持ち上げる装置はこれまで開発が行われていなかった。そこで蓄熱粒子持ち上げ装置の開発を本研究の目的とする。

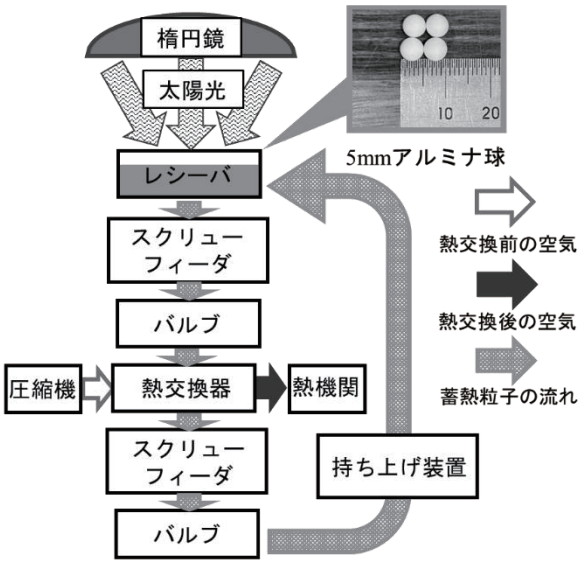


図 1　連続的な太陽熱発電の流れ

a)工学専攻機械・情報系コース大学院生
b)工学科機械知能工学プログラム教授
c)工学科機械知能工学プログラム助教
d)教育研究支援技術センター技術専門職員

2. 実験装置

2.1 粒子持ち上げ装置

蓄熱粒子を地面から高さ1.5 mにあるレシーバまで搬送する装置として、複数の案を検討した。レシーバまで確実に粒子を持ち上げることのできる搬送能力があることや、装置の構造が単純であることなどを項目として◎○△×の4段階で評価した。表1にそれぞれの案と評価を示す。

表1　持ち上げ装置の案とその評価

	スクリューコンベア	ベルトコンベア	チェーンバケット	電磁弁による搬送	磁力による搬送	穴あき金属板での搬送	空気搬送
搬送能力	△	○	○	○	×	△	○
構造	△	△	△	×	△	△	◎
耐熱性	○	○	○	×	×	×	○
制御	△	○	○	○	○	○	○
メンテナンス性	△	○	△	△	△	△	△
スペース	△	○	○	○	○	△	○
コスト	○	○	○	△	△	△	○
消費電力	○	○	○	○	○	○	△

表1より、ベルトコンベア、チェーンバケット、電磁弁による搬送、空気搬送の4つが搬送能力において評価が高かったが、その中でも構造が簡単である空気搬送を採用し、粒子持ち上げ装置を製作した。図2に製作した粒子持ち上げ装置の概略図を示す。

粒子持ち上げ装置は、空気で粒子を持ち上げる管路に塩ビ管を用い、地面から高さ1.5 mに持ち上げられた粒子の排出口を設けた。塩ビ管内に送る空気は、スライダックにより、風速を調節できるようにしたブロワを用いた。ブロワからの風速を調べるため、塩ビ管内に熱線流速計を設置した。図3に示す台形ねじスクリューフィーダを用いて、持ち上げる粒子を塩ビ管内に投入した。台形ねじスクリューフィーダとは、モータの回転運動で台形ねじを回転させ、ケース内の粒子を押し出すようにして、一定量を排出する装置である。スクリューフィーダケースには粒子の投入口と排出口が1つずつあり、粒子持ち上げ装置では、スクリューフィーダの排出口から塩ビ管内に投入される。

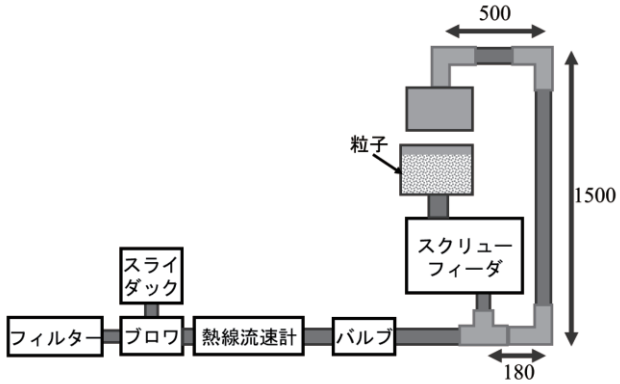


図2　粒子持ち上げ装置の概略図

2.2 粒子持ち上げ装置の動作原理

粒子の持ち上げ装置の動作原理は、まずブロワから風を送り、熱線流速計で管内の流速が安定したことを確認したら、バルブを閉じ、一度管内に風が送られないようにする。管内に風が送られない状態で、スクリューフィーダの台形ねじを1回転させ、塩ビ管内に粒子を投入する。その後、バルブを開くことでブロワからの風が一気に管内に送られ、粒子に働く空気抵抗により粒子を持ち上げる仕組みになっている。本論文では、宮崎大学に設置されているビームダウン式太陽集光装置で使用することを想定し、地面から垂直上向きに高さ約1.5 mに塩ビ管の粒子排出口を設けている。

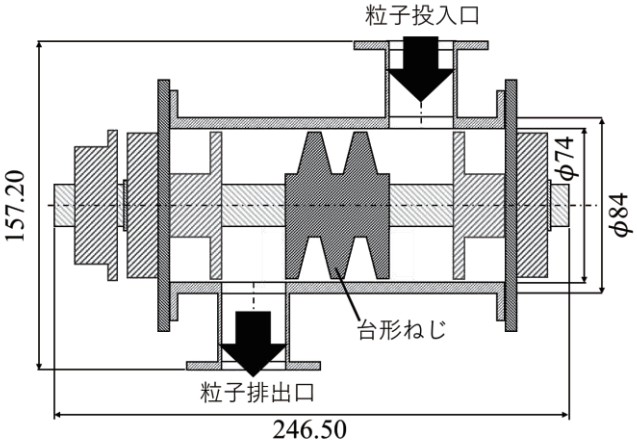


図3　台形ねじスクリューフィーダの概略図

2.3 蓄熱粒子

現在の太陽熱発電に用いられている主な蓄熱媒体を以下に示す。

2.3.1 溶融塩

太陽熱発電で使用される溶融塩は主に硝酸塩系である。硝酸塩系の溶融塩は安全性や低コストであることから幅広く使われており、最高温度は550 ℃程度まで上げられるが、融点が230 ℃と高い。そのため、常に融点の40～50 ℃以上高い状態を保つための加温を行う必要があり、エネルギ消費量が大きくなる[2)]。

2.3.2 コンクリート

コンクリートやセラミックを用いた蓄熱システムは、コンクリート・セラミックの躯体中に配管によって熱媒を通して熱交換を行う。安価なコンクリートなどを用いることなどでコストを抑えることができるが、 固体媒体と熱媒間との熱交換効率を上昇させることが課題とされている[2)]。

2.3.3 固体粒子

蓄熱媒体として固体粒子の砂がある。砂は砂漠地帯に豊富にあり、非常に安価というメリットがある。実際に砂を蓄熱媒体にした固体粒子充填レシーバの開発が行われている[3)]。

本研究室では固体粒子の中でも直径 5 [mm]のアルミナ

球を蓄熱媒体に使用し、ビームダウン式太陽集光装置を用いた太陽熱発電を行うことを考えている。そこで、今回製作した空気搬送による粒子持ち上げ装置には、粒子直径と材質の変化によって搬送にかかる時間と 1 分間に搬送できる量を見るため、アルミナ球については直径 3、5 mm、ステンレス球で直径 5 mm の 3 種類を非加熱の状態で使用した。以下の表 2 にそれぞれの粒子の密度を示す。

表 2　各粒子の密度

	密度[kg/m^3]	重さ[mg/個]
アルミナ球 3 mm	3602	58
アルミナ球 5 mm	3584	242
ステンレス球 5 mm	7915	517

3. 粒子搬送実験

3.1 搬送可能な粒子量の計測

3.1.1 搬送可能な粒子量の計測目的

製作した粒子持ち上げ装置で、搬送可能な粒子量を計測する目的は、1 分間に搬送できる最大の粒子量を明らかにするためである。そこで、スクリューフィーダを 1 回転させ、粒子の排出にかかる時間、またその時排出された粒子の質量を明らかにする必要がある。そこで、1 回の搬送にかかる時間とインターバルを計算により求めた。ここでのインターバルは粒子の搬送が終わった瞬間から次の搬送が開始できるようになるまでの時間と定義する。

3.1.2 インターバルの計算

粒子搬送が終わった時から、次に搬送が行えるようになるまでの 1 インターバルは、以下の図 4 に示すスクリューフィーダの排出口から管路の底面までを想定し、計算により求めた。以下に計算式を示す。

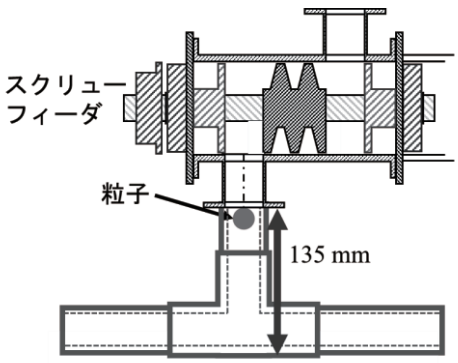


図 4　インターバルの計算の概略図

$$y = V_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \tag{1}$$

式 (1)に粒子の初速度 V_0 = 0 m/s 、スクリューフィーダから塩ビ管内底面までの高さ $y = 0.135$ m を代入し、スクリューフィーダから粒子が自由落下するまでの時間t [s]を求めた。スクリューフィーダの回転時間にはモータの回転数を回転速度[rps]で割ることで求めた。粒子が自由落下する時間とスクリューフィーダの回転時間の和をインターバルとして求めた。

3.1.3 搬送のみにかかる時間の計算

粒子を投入する時間を含めない、搬送のみにかかる時間を計算により求めた。

$$F = \frac{1}{2} \rho_f \, v_f^2 \, S \, C_d \tag{2}$$

F: 抗力 [N]

ρ_f: 空気の密度　1.293 kg/m^3

v_f: 計測した流速 [m/s]

S: 粒子の断面積 [m^2]

C_d: 抗力係数 0.47 [4)]

$$a_x = \frac{F}{m} \tag{3}$$

a_x :水平方向の粒子の平均加速度 [m/s^2]

m : 粒子の質量 [kg]

$$V_1 = \sqrt{2 a_x \Delta x} \tag{4}$$

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 + 2 a_x \Delta x} \tag{5}$$

V_1 : 粒子の初速度 [m/s]

V_2 : V_1よりΔx進んだ粒子の速度 [m/s]

$\Delta x = 0.01\, m$

$$t_x = \frac{\Delta x}{\frac{V_2 - V_1}{2}} \tag{6}$$

t_x: 水平方向の搬送にかかる時間 [s]

式 (2) には空気の密度ρ_f : [kg/m^3]、熱線流速計で計測した流速v_f [m/s]、粒子の断面積S [m^2]、粒子の形状である球体に働く抗力係数$C_d = 0.47$ を代入して粒子に働く抗力F [N]を求めた。式 (3) では抗力F [N]を粒子の質量m [kg]で割ることで粒子の水平方向の平均加速度a_x [m/s^2]を求めた。式 (4) より、粒子の初速度V_1を求め、速度V_1で 0.01 m 先に進んだ時の粒子の速度をV_2とし、式 (5) より求めた。式 (6) ではΔx = 0.01 m を速度差の平均で割ることでΔx間を水平方向に搬送される粒子の時間を求めた。この求めた時間を予備実験装置の搬送距離だけ積算し、搬送にかかる時間とした。位置 0.01 m 以降では先ほど求めたV_1とV_2を用いて流体と粒子の相対速度を考慮した抗力を求めた。また、垂直方向の搬送では、粒子の平均加速

度を求める式 (3) から重力加速度を引くことで求めた。垂直方向の抗力は、式 (2) のv_fに計測した流速からV_1とV_2の平均速度を引いた値を代入して求めた。

以上の計算過程を得て、粒子の搬送のみにかかる時間を求めた。インターバルと搬送のみにかかる時間を合わせた搬送にかかる時間の計算結果は、計測結果とともに図 4 に示す。

3.1.4 搬送にかかる時間の計測

計算で求めた搬送にかかる時間と実際の搬送にかかる時間との差を調べるため、粒子持ち上げ装置を用いた搬送にかかる時間の計測を行った。計測条件を以下の表 2 に示す。計測条件の管内の流速はブロワの出力をスライダックによって調節し、ブロワを開いた状態での熱線流速計で計測した最大流速である。

表 2　搬送にかかる時間の計測条件

パイプの内径 [mm]	25.6
高さ方向のパイプ長さ [m]	1.5
管内の空気の流速 [m/s]	40
モータの回転速度 [rps]	1.2
実験回数 [回]	30
粒子の種類 (直径 [mm])	アルミナ球 (3, 5) ステンレス球 (5)

3.1.5 搬送にかかる時間と粒子量の計測結果と考察

スクリューフィーダを取り付けた垂直管路の搬送にかかる時間の計測結果と計算結果を図 5 に示す。また、各粒子 1 回分の搬送にかかる時間とその時搬送された粒子の重さから、1 分間に搬送できる最大排出流量を求めた。図 6 に最大排出流量を示す。

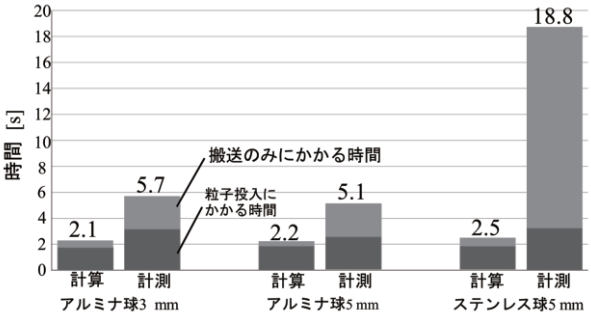


図 5　垂直管路の搬送にかかる時間

図 5 より、アルミナ球 3 mm と 5 mm において、計測した搬送にかかる時間に大きな差はなかった。このことから、アルミナ球の直径が 3 ～ 5 mm の間では搬送にかかる時間に粒子の直径が大きく影響しないことが分かる。ステンレス球についてはアルミナ球と比較して密度が大きく、搬送されずに管内に残るものもあり、搬送にかかる時間もアルミナ球と比べて長かった。また、粒子の材質や直径に関わらず、搬送にかかる時間は、計算で求めた値より計測結果の方が遅くなった。原因として、エルボ内壁に粒子が衝突し、計算よりも粒子の速度が低下したことが考えられる。ステンレス球が持ち上げられなかった理由として、図 7 に示すように、管内に投入された粒子が管路の長さ方向に分布し、位置によって粒子の加速距離が異なることが考えられる。粒子が持ち上がるエルボ部分から遠い位置にある粒子は加速する距離が長いため持ち上がりやすく、エルボに近い粒子ほど加速する距離が短いため、持ち上がりにくくなると考えられる。この加速距離の差はアルミナ球を投入した時も生じていると考えられるが、アルミナ球の密度はステンレス球の半分以下であるため、今回の計測条件の流速 40 m/s では十分に持ち上げられているものと考えられる。

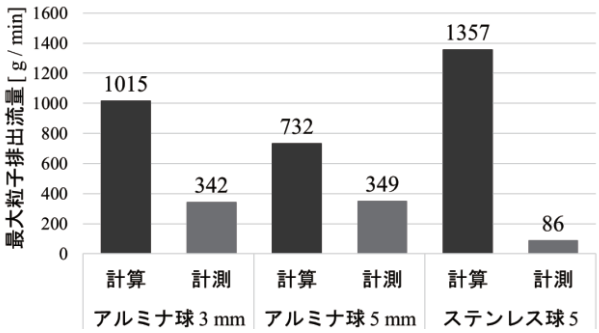


図 6　垂直管路の最大粒子排出流量

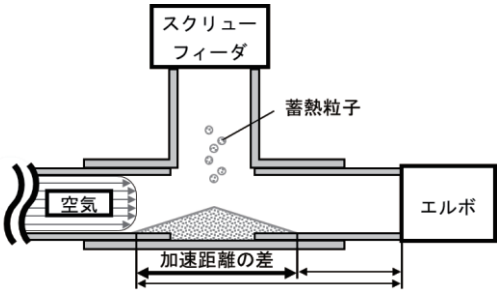


図 7　加速距離の差のイメージ

図 6 より、1 回に搬送される粒子量の計測から求めた、1 分間当たりの最大粒子排出流量が、計算で求めた値より少なくなっている。これは、搬送にかかる時間が、計算で求めた時間より遅くなっているためである。計算より遅くなった理由は、スクリューフィーダからの空気の漏れによって、 熱線流速計に表示されている流速より下がっていることが考えられる。よって、1 分間に搬送できる回数が計算で求めた値より少なくなることで、排出できる粒子の量が減っている。特にステンレス球は、投入された粒子の半分も搬送できなかったため計算で求めた値より極端に小さくなっている。

よって、垂直管路ではアルミナ球は搬送可能であるが、ステンレス球の連続的な搬送は困難であり、1 分間に搬送できる最大の粒子量はアルミナ球 5 mm で約 350 g になると考えられる。

3.2 持ち上げ装置の管路の改良

垂直管路の粒子持ち上げ装置では、管内に投入されたステンレス球の半分も持ち上げることができなかった。その原因として、粒子が投入された位置から、地面と垂直上向きに持ち上げられる位置までの距離が 180 mm であり、粒子の加速する区間が短いのではないかと考えた。そこで、管内に投入された粒子が、ブロワの風を受けて水平方向に加速する区間を増やすために、粒子が持ち上げられるエルボまでの管路を 2420 mm まで延長した。また、粒子を持ち上げる管路は、90° エルボから 45° エルボに変更し、地面に対して垂直だったものを 45° にすることで、エルボ内壁で衝突する粒子を少なくし、より排出されやすいように改良を加えた。管路改良後の粒子持ち上げ装置を図 8 に示す。

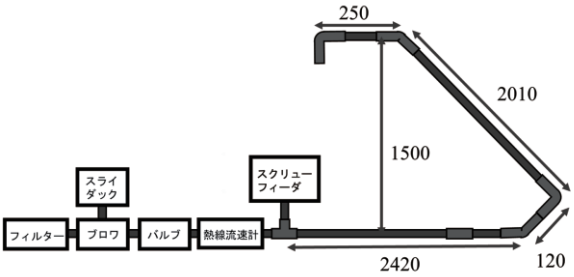


図 8　管路改良後の持ち上げ装置の概略図

3.2.1 管路改良後の粒子搬送実験目的

管路を延長することで、ブロワの風によって粒子が加速する距離を延長し、角度の緩いエルボを用いた持ち上げ装置では、ステンレス球の搬送にかかる時間と粒子排出流量が改善されているかを確認することを目的とした。

3.2.2 管路改良後の粒子搬送実験条件

以下の表 3 に、管路改良後の粒子搬送実験条件を示す。管内の流速は、管路を延長したことによる管路摩擦等による損失で、垂直管路の時より流速が低下したと考えられる。

表 3　管路改良後の粒子搬送実験条件

パイプの内径 [mm]	25.6
装置全体の高さ [m]	1.5
管内の空気の流速 (エルボ前での実測値) [m/s]	30.7
実験回数	10
粒子の種類 (直径 [mm])	ステンレス球 (5)
モータの回転速度 [rps]	1.2

3.2.3 管路改良後の粒子搬送実験結果と考察

粒子持ち上げ装置の管路改良前後で、粒子搬送にかかる時間の結果を図 9 に示す。図 9 より、搬送にかかる時間は改良前の装置で計算で求めた値の約 12 倍、改良後の装置では約 14 倍の時間をかけて粒子が排出された。1 回の搬送にかかる時間は改良前の装置に比べ 5 秒以上早く排出された。 また、改良前後の粒子排出量については、図 10 に示す。図 10 より、1 回当たりの粒子排出量は垂直管路より約 2 倍以上多く排出されていることがわかった。

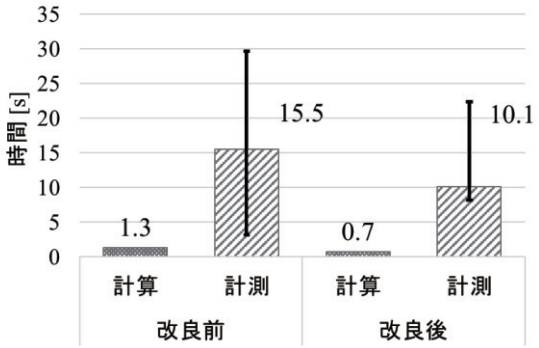


図 9　管路改良前後の搬送にかかる時間

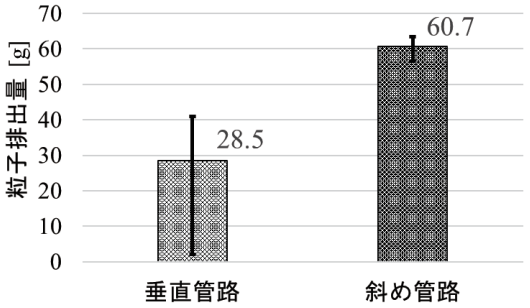


図 10　管路改良前後の 1 回あたりの粒子排出量

よって、加速距離の延長と管路を 45° 傾けることは搬送にかかる時間を減らし、粒子排出量を増加させることに有効であることがわかった。

3.3 粒子持ち上げ装置の気密性の改良

垂直管路を、90° から 45° に傾けることで、搬送にかかる時間を短くし、搬送する粒子量を増加させることができた。しかし、粒子の投入を行うスクリューフィーダケースと管路の隙間から、ブロワから送られてくる空気が漏れており、管内の流速が低下していた。そこで、粒子の投入を行うスクリューフィーダを 2 つの塩ビボールバルブへ変更した。以下の図 11 に気密性の改良を行った粒子持ち上げ装置の概略図を示す。

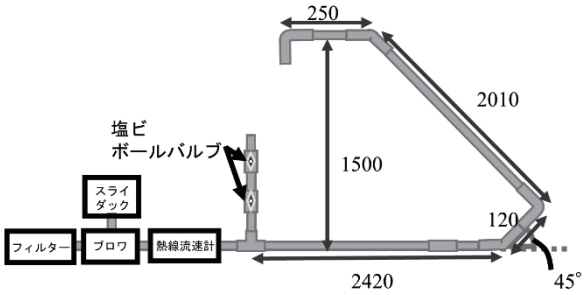


図 11　気密性改良後の持ち上げ装置の概略図

2つのバルブは交互に開閉を行うことで、ブロワから送られてくる空気を漏らすことなく管内へ粒子を投入することができる。

3.3.1 気密性改良後の粒子搬送実験目的

斜めに傾けた粒子持ち上げ装置のスクリューフィーダを外し、2つの塩ビボールバルブを取り付けて、気密性を改良した。気密性を改良した斜め管路の持ち上げ装置を用いて、アルミナ球3 mm、アルミナ球5 mm、ステンレス球5 mmの3種類の粒子が空気の漏れによる搬送にかかる時間と搬送量についての影響を確認するため実験を行った。

3.3.2 気密性改良後の粒子搬送実験条件

以下の表 4 にバルブを取り付けた斜め管路の粒子搬送実験条件を示す。管内の流速は45°エルボ手前で計測を行った値を用いて実験条件に設定した。使用する粒子の量はスクリューフィーダが一回転するときの平均排出量をボールバルブへ投入した。

表4　気密性改良後の粒子搬送実験条件

パイプの内径[mm]	25.6	
装置の高さ [m]	1.5	
管内の流速[m/s]	36.3	
実験回数 [回]	10	
使用する粒子 (直径 [mm]と 粒子量[g/回]	アルミナ球 (3)	39.0
	アルミナ球 (5)	31.0
	ステンレス球 (5)	71.5

3.3.3 気密性改良後の粒子搬送実験結果と考察

スクリューフィーダを取り付けた改良後の持ち上げ装置とバルブを取り付けた持ち上げ装置で搬送にかかる時間を図12に示す。

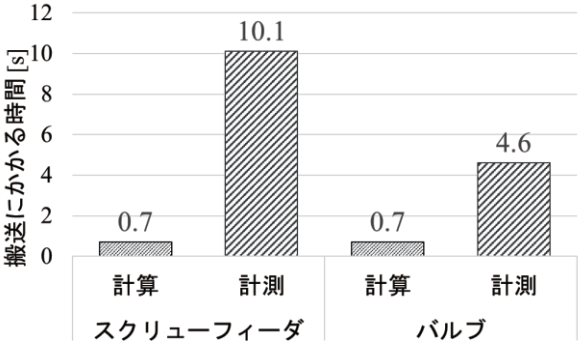


図12　斜めにした管路の粒子搬送実験結果

図12より、搬送にかかる時間はスクリューフィーダでステンレス球を投入する場合は、空気の漏れが生じていたため、計算で求めた値の約14倍の時間がかかって搬送されていた。しかし、バルブで気密性を保った管路で粒子の搬送を行うと、計算で求めた時間の約7倍で搬送された。このことより、空気の漏れによる流速の低下は搬送にかかる時間に大きく影響していることが分かり、空気搬送装置において気密性を保つ必要がある。また、ビームダウン式太陽集光装置で、空気搬送による粒子持ち上げ装置を使用する際には、スペースの関係からボールバルブを取り付けることは難しい。そのため、スクリューフィーダ、またはスクリューフィーダと管路の間に気密性を保持できるような工夫・改良が必要である。

4. 結論

熱交換後の蓄熱粒子をレシーバまで持ち上げる装置として、複数の持ち上げ方法を検討し、空気搬送による蓄熱粒子持ち上げ実験装置を設計・製作した。製作した装置に密度、粒径の異なる3種類の粒子を用いて搬送実験を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 粒子を持ち上げる管路を垂直に立てた空気搬送装置では、投入されたアルミナ球3 mmと5 mmを持ち上げることができたが、5 mmステンレス球は投入された粒子の半分も持ち上げられず、連続的に搬送ができないことがわかった。

(2) バルブで気密性を保った管路を45 °傾け、加速距離の延長を行い、持ち上げ装置の改良を行った。改良後の装置では、5 mmステンレス球の搬送にかかる時間を短くし、粒子排出量増加させることができた。

(3) スクリューフィーダを取り付けた斜め管路では空気の漏れが生じ、管内に投入されたステンレス球をすべて持ち上げることができず、気密性を保持するようなスクリューフィーダの開発が必要であることが明らかになった。また、1.5 m以上の位置へ粒子を搬送するためには、 他の粒子の持ち上げ方法を検討する必要がある。

謝辞

実験を進めるにあたり、技術職員の三宅琢磨氏、濱畑貴之氏、長友敏氏の協力を得た。記して謝意を表す。また、本研究はJSPS科研費 JP22K05007の助成を受けたものである。

参考文献

1) 独立行政法人　新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO 再生可能エネルギ技術白書　第2版　－第1章　再生可能エネルギの役割－, （2014）, p.4.~p.10
2) 独立行政法人　新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO 再生可能エネルギ技術白書　第2版　－第5章　太陽熱発電・太陽熱利用, （2014）, p.4.~p.10, p.39.~p.40
3) Evan Johnson , Derek Baker , Ilker Tari “Proposal of a Novel Gravity-Fed, Particle-Filled Solar Receiver” SolarPACES 2016 AIP Conf. Proc. 1850, p.030028-1~030028-7
4) 演習流体力学　日本機械学会　丸善出版　2012.5 JSMEテキストシリーズ　日本機械学会, p.113

Numerical Method for Unsteady Gas-Liquid Two-Phase Flow using Preconditioning

Tianmu ZHAO[a)], B. SHIN[b)]

Abstract

Gas-liquid two-phase flow such as cavitation is a formidable computational challenge due to its flow characteristics with compressible and incompressible flow nature. In this study, a time consistent high resolution numerical method for gas-liquid two-phase flows is proposed and applied to a shock tube problem. A finite-difference 4th-order Runge-Kutta method and a Roe-type flux splitting method with the 3rd-order MUSCL TVD scheme are employed to solve the 1-D Euler equations. The artificial viscous terms in the flux splitting are modified by using the preconditioning matrix to enhance the numerical stability and time consistency in computation for compressible and incompressible unsteady flow with arbitrary Mach numbers. A homogeneous equilibrium gas-liquid two-phase flow model is used. So that, the present method permits simple treatment of the whole gas-liquid two-phase flow field including wave propagation, large density changes, and incompressible flow characteristics at low Mach numbers. As numerical examples, 1-D shock tube problems of gas-liquid two-phase flow with an arbitrary void fraction were solved to validate the present numerical method and the results showed a good agreement with exact solutions in pressure, density, velocity and temperature distributions as well as simulations of unsteady phenomena of the shock waves. The stability and convergence of the present method for arbitrary Mach number flow problems were confirmed. Observations of the shock and expansion wave behaviors were made and discussed.

Keywords: Gas-liquid two-phase flow, Preconditioning matrix, Modified Roe scheme, Artificial viscosity, FDM, Shock tube problem

1. INTRODUCTION

The hydraulic flow with hydraulic transients and hydro-acoustics such as cavitating flow has both compressible and incompressible flow characteristics. For this kind of flow, a compressible flow model which can handle the incompressible flow is advantageous. For this purpose, artificial compressible method and time-derivative preconditioning method[1-2)] have been developed and used in the steady state computation. In general, these methods are not consistent in time because the time derivative is multiplied by the preconditioning matrix. For unsteady flow computation, therefore, the preconditioning method for steady problems should be improved to that of consistent in time.

In this paper, according to the basic concept of high-order upwind scheme, a modification of artificial viscous terms in Roe's flux difference splitting[3)] was examined to obtain time consistent unsteady solutions by using the preconditioning method. That is the artificial viscous terms in the flux splitting are modified by the preconditioning matrix to enhance the numerical stability at the treatment of gas-liquid interfaces in the two-phase media. A homogeneous equilibrium gas-liquid two-phase model[4)] taken account of the compressibility of mixed media is used.

a) Graduate Student, Interdisciplinary Graduate School of Agriculture and Engineering, Dept. of Materials and Informatics
b) Professor, Mechanical Engineering Program

As numerical examples, gas-liquid two-phase shock tube problems with arbitrary void fractions and Mach numbers were computed to investigate the applicability and stability on the unsteady problem. Also, the unsteady phenomena of compression and expansion waves in the shock tube were observed and discussed.

2. NUMERICAL METHOD

In this study, the fundamental equations are one-dimensional (1-D) Euler equations for the mixture mass, momentum, energy and the gas-phase mass conservation can be written as follows[5)],

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial x} = 0$$

$$\text{with } \boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \\ \rho Y \end{bmatrix} \text{ and } \boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (e+p)u \\ \rho u Y \end{bmatrix} \tag{1}$$

where, u, p and e in the unknown variable vectors $\boldsymbol{Q}$ and flux vectors $\boldsymbol{E}$ are velocity, pressure and total energy, respectively. Based on the concept of homogeneous equilibrium model, gas-liquid two-phase medium is treated as pseudo single-phase medium, and the mixture density ρ of the two-phase medium can be described as a linear combination of the gas phase and the liquid phase densities with the

local void fraction α (gas volume fraction) and the quality Y.

To obtain the preconditioning matrix of the non-conservative system directly controllable the physical variables, the conserved variables $\boldsymbol{Q}$ in Eq.(1) are transformed to primitive variables $\boldsymbol{W}$ as follows:

$$\Gamma^{-1}\frac{\partial \boldsymbol{W}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial x}=0 \quad \text{with} \quad \boldsymbol{W}=[p,u,T,Y]^T \quad \text{and} \quad \Gamma^{-1}=\frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{W}} \tag{2}$$

To improve the stability for the unsteady multiphase problems with incompressible and compressible flow natures, a modified artificial viscous term in Roe's flux-difference splitting was proposed. The derivative of the flux vector $\boldsymbol{E}$ can be written with the numerical flux as $(\partial \boldsymbol{E}/\partial x)_i=(\boldsymbol{E}_{i+1/2}-\boldsymbol{E}_{i-1/2})/\Delta x$, and the flux $\boldsymbol{E}_{i+1/2}$ modified by using the Γ^{-1} and preconditioning matrix Γ_p as[6]:

$$\boldsymbol{E}_{i+1/2}=\frac{1}{2}\{\boldsymbol{E}(\boldsymbol{Q}^L_{i+1/2})+\boldsymbol{E}(\boldsymbol{Q}^R_{i+1/2}) -\Gamma^{-1}_{pi+1/2}(\boldsymbol{L_p}|\Lambda|\boldsymbol{L_p}^{-1})_{i+1/2}(\boldsymbol{W}^R_{i+1/2}-\boldsymbol{W}^L_{i+1/2})\} \tag{3}$$

where, Λ, $\boldsymbol{L_p}$ and $\boldsymbol{L_p}^{-1}$ are matrices of eigenvalues and the left eigenvectors of $\Gamma_p(\partial \boldsymbol{E}/\,\partial \boldsymbol{Q})\Gamma^{-1}$. The stability terms of the third term in Eq.(3) can also consist of $\Gamma^{-1}_{i+1/2}$ instead of $\Gamma^{-1}_{pi+1/2}$. Γ_p^{-1} is preconditioner of the non-conservative system which is formed by the addition of the vector $\theta[1,u,H,Y]^T$ to the first column of the Γ^{-1}. H is the enthalpy defined by total energy. Parameter θ is chosen by Choi and Merkle[2] and Weiss & Smith[7]. $\boldsymbol{W}^{L,R}_{i+1/2}$ is obtained by applying the third-order MUSCL TVD scheme as followings:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{W}^L_{i+1/2}&=\boldsymbol{W}_i+\frac{1}{4}\{(1-\kappa)D^+\boldsymbol{W}_{i-1/2} +(1+\kappa)D^-\boldsymbol{W}_{i+1/2}\}\\ \boldsymbol{W}^R_{i+1/2}&=\boldsymbol{W}_{i+1}-\frac{1}{4}\{(1-\kappa)D^-\boldsymbol{W}_{i+3/2} +(1+\kappa)D^+\boldsymbol{W}_{i+1/2}\}\end{aligned} \tag{4}$$

Here, the flux-limited values of $D\boldsymbol{W}$ and the minmod function are determined by:

$$\begin{aligned}D^+\boldsymbol{W}_{i-1/2}&=\mathrm{minmod}(\delta\boldsymbol{W}_{i-1/2},b\delta\boldsymbol{W}_{i+1/2}),\\ D^-\boldsymbol{W}_{i+1/2}&=\mathrm{minmod}(\delta\boldsymbol{W}_{i+1/2},b\delta\boldsymbol{W}_{i-1/2}),\\ \delta\boldsymbol{W}_{i+1/2}&=\boldsymbol{W}_{i+1}-\boldsymbol{W}_i\\ \mathrm{minmod}(x,y)&=\mathrm{sign}(x)\max[0,\min\{|x|,y\mathrm{sign}(x)\}]\end{aligned}$$

The linear combination parameter κ is determined by the range of $-1\le\kappa\le 1$ and has an effect on the accuracy. On the other hand, the slope of the flux in the minmod function is controlled by the limiter b. The range of b, $1\le b\le(3-\kappa)/(1-\kappa)$, is determined by the condition of TVD stability. In this computation, b of 4 and κ of 1/3 are used to obtain 3rd-order accuracy.

For time accurate solutions, the following 4th-order Runge-Kutta explicit method in finite difference discretization is used in Eq.(2) with $\boldsymbol{L}(\boldsymbol{Q})=\partial\boldsymbol{E}/\partial x$ because it is capable of capturing linear as well as non-linear waves and can resolve contact discontinuities.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{W}^1&=\boldsymbol{W}^n-\Delta t/4\Gamma\boldsymbol{L}(\boldsymbol{Q}^n)\\ \boldsymbol{W}^2&=\boldsymbol{W}^n-\Delta t/3\Gamma\boldsymbol{L}(\boldsymbol{Q}^1)\\ \boldsymbol{W}^3&=\boldsymbol{W}^n-\Delta t/2\Gamma\boldsymbol{L}(\boldsymbol{Q}^2)\\ \boldsymbol{W}^{n+1}&=\boldsymbol{W}^n-\Delta t\Gamma\boldsymbol{L}(\boldsymbol{Q}^3)\end{aligned} \tag{5}$$

The time integration of Eq.(5) give a time-consistent solution for the unsteady gas-liquid two-phase flow problem.

3. NUMERICAL RESULTS

3.1 Riemann problem

The present numerical method has been validated in Riemann problem with a series of initial condition and arbitrary void fraction α_i. All tests were computed in a 1-D shock tube domain of x [-10m, 10m] with a discontinuous interface at $x=0$m, under a same initial temperature $T=300$K. The initial values of four tests with primitive variables between left ($\boldsymbol{W}_L$)- and right ($\boldsymbol{W}_R$)-hand side are summarized in the Table 1 as below. Test 1 has a small pressure difference, while Test 2 has different velocities on the two sides of the tube. Test 3 is a Sod[8] suggested initial condition with 10 times difference in pressure, and a severe condition of 100 times pressure difference set in Test 4.

Table 1. Initial values for Riemann problem.

Test	u (m/s)		ρ (kg/m^3)		p (kPa)	
	$\boldsymbol{W}_L$	$\boldsymbol{W}_R$	$\boldsymbol{W}_L$	$\boldsymbol{W}_R$	$\boldsymbol{W}_L$	$\boldsymbol{W}_R$
1	0	0	1.161	1.103	100	95
2	10.2	6.8	1.161	1.161	100	100
3	0	0	1.161	0.1161	100	10
4	0	0	1.161	0.01161	100	1

3.2 Distributions

Figure 1 shows the results of Test 1 for the shock tube problem of single phase ideal gas flow with $\alpha_i=$

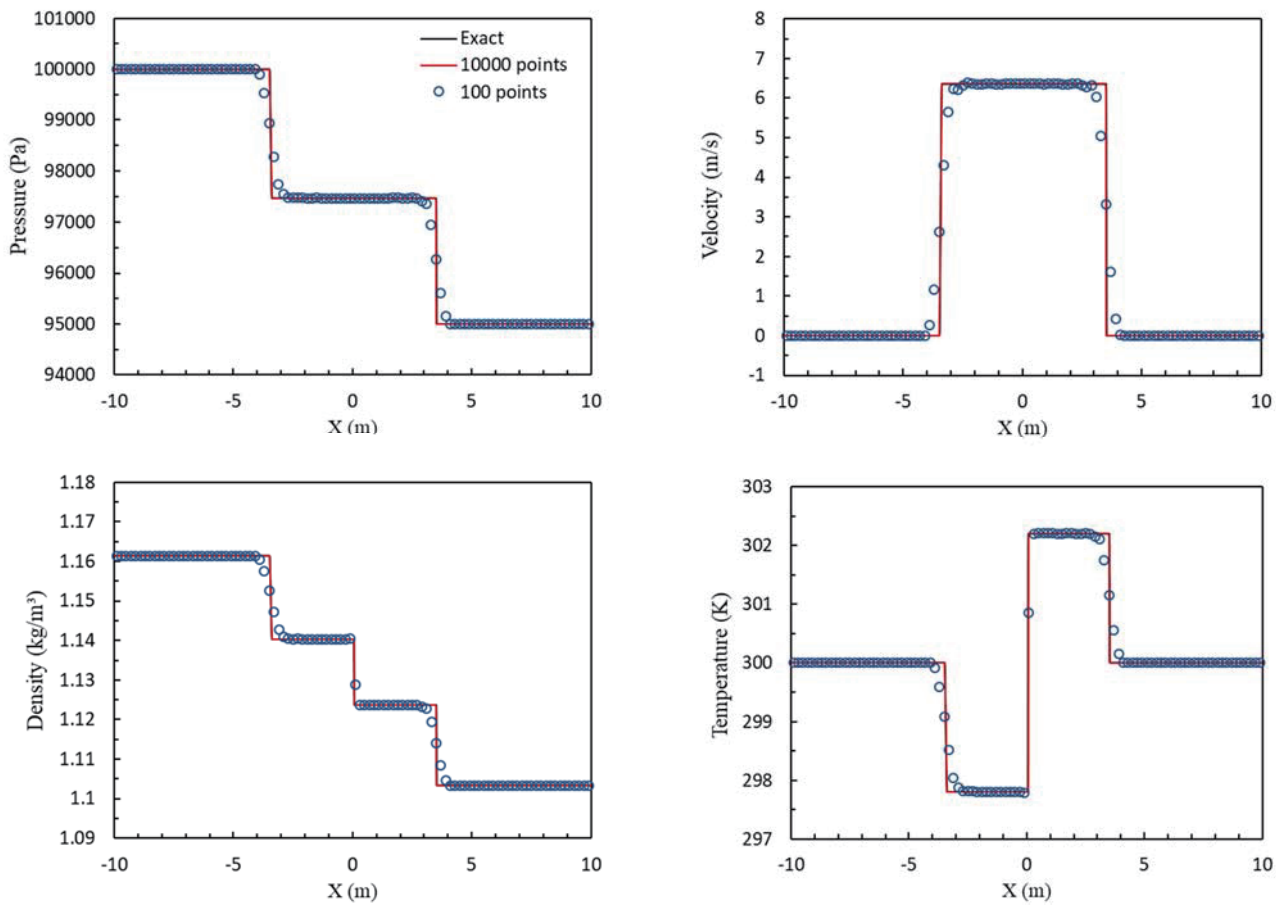


Fig. 1. Computational results of pressure, velocity, density and temperature distributions for Test 1 with $\alpha_i = 100\%$.

100% at $t = 0.01$s. As see in the pressure, velocity, density and temperature distributions, the results obtained by present method with 10,000 grid points (red line) are totally overlaps with exact solutions (black line). And, even using a coarse grid of 100 (blue symbols) points, the predictions are also in good agreement of the fine mesh solution, except a small dissipation at the discontinuity surface.

Test 1 is similar to the incompressible flow case with very low density change, so that, due to the incompressible flow nature, the expansion wave is propagating like a compression wave. Very small changes of density and velocity are observed as investigated in the previous work[5]. As shown in Fig. 1, the pressure difference on the two sides of the tube drives an expansion wave to the left-hand side while a compression wave goes to the right with a same velocity.

In the region swept by two waves, the pressure is the average of initial pressures on both sides. The area swept by the expansion wave has a higher density and a lower temperature, while the compression wave shows opposite behavior. According to the equation of state of ideal gas, it is quite rational that the density and temperature have opposite distributions under a certain pressure. The velocity showed an oscillation appeared near the discontinuity surface, although its variation is very small.

3.3 Stability and convergence rate

Figure 2 shows a comparison of iteration histories of maximum residuals of pressure $|p^{n+1} - p^n|_{max}$, density $|\rho^{n+1} - \rho^n|_{max}$ and velocity $|u^{n+1} - u^n|_{max}$ for Test 1 of ideal gas flow with $\alpha_i = 100\%$. Although the shock tube problems can be solved by Roe's[3] scheme without preconditioning, as seen in those iteration histories, the present scheme with preconditioned artificial viscous terms is more stable and has a higher convergence rate compared with Roe's scheme without preconditioning.

Furthermore, to verify the stability and convergence rate of present scheme in solving unsteady shock wave problem with arbitrary Mach number and void friction α_i, four test cases including incompressible (Test 1, 2) and compressible flow (Test 3, 4) were considered. All tests were computed from a single phase of ideal gas flow ($\alpha_i = 100\%$) to a two-phase flow ($\alpha_i = 50\%$) and a liquid phase flow ($\alpha_i = 0\%$). All iteration histories of pressure $|\Delta p|$ are shown in Figs. 3 to 5.

The iteration histories for a single phase of ideal

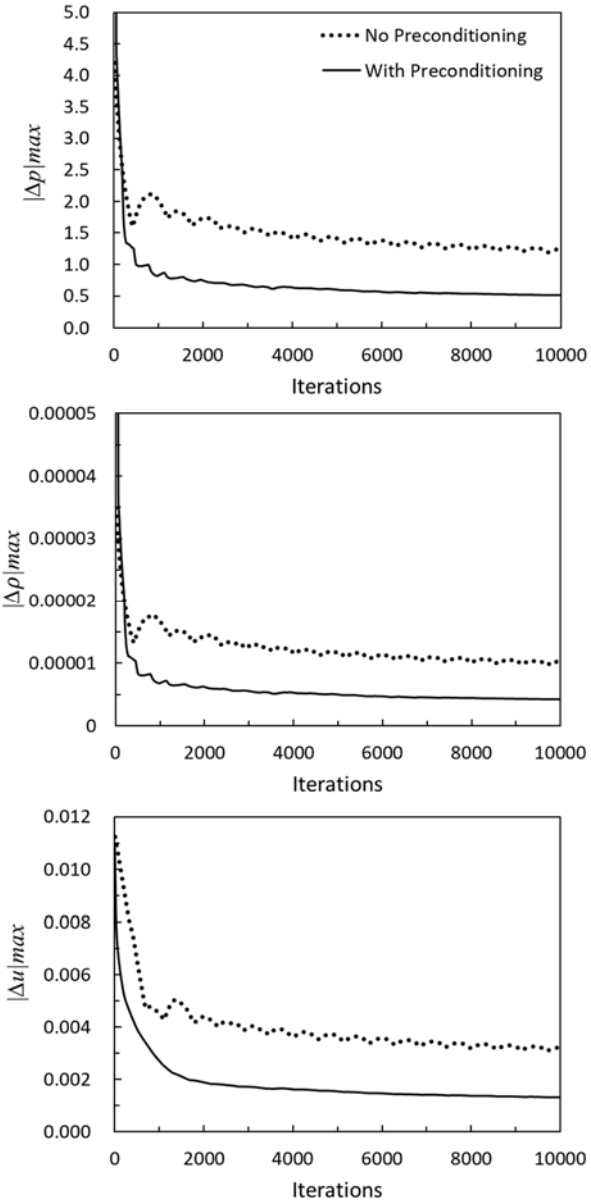


Fig. 2. Iteration histories of ideal gas flow for Test 1 with $\alpha_i = 100\%$.

gas flow are shown in Fig. 3. As seen in the curves of Test 1 and 2, present method with preconditioning (solid line) has obviously higher convergence rate than the without preconditioning one (dotted line). In Test 3 and 4, two residuals showed similar curves even preconditioned one decreases rapidly at the beginning steps of iteration. As a whole, the present scheme with preconditioning converges faster than that without preconditioning. In the two-phase flow case as shown in Fig. 4, the residual curves of present scheme in Test 1, 2 and 3 are slightly improved compare to Roe's scheme. However, in Test 4 with a huge difference, the Roe's scheme without preconditioning showed an extremely unstable history while the present method still very stable. In the single phase of liquid flow cases as shown in Fig. 5, present method shows excellent convergence rate and stability in all the test cases.

4. CONCLUSIONS

A time consistent high resolution numerical method for gas-liquid two-phase flow was proposed and applied to the two-phase shock tube problem. In the proposed method, the artificial viscous terms in the flux splitting for upwinding were derived to improve numerical stability and keep consistency in time. A MUSCL TVD scheme and stable 4-stage Runge-Kutta method were used. A homogeneous equilibrium model of gas-liquid two-phase flows was applied. The present method was examined in shock tube problems with several test cases, and the results showed a good agreement with exact solutions in pressure, velocity, density and temperature distributions. The present method quite well simulated unsteady phenomena of the shock wave including the propagation of both compression and expansion waves. The iteration histories show that the present scheme is stable and has a high convergence rate. Also, the improvement of numerical stability and applicability of the present method to unsteady flow problems with arbitrary void fraction and Mach numbers were confirmed.

REFERENCES

1) E. Turkel: Preconditioned methods for solving the incompressible and low speed compressible equations, J. Comput. Phys., Vol.72, pp.277-298, 1987.
2) Y.H. Choi, C.L. Merkle: The application of preconditioning in viscous flows, J. Comput. Phys., Vol.105, pp.207-223, 1993.
3) P.L. Roe: Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference scheme, J. Comput. Phys., Vol.43, pp.357-372, 1981.
4) B.R. Shin: Numerical analysis of unsteady cavitating flow by a homogeneous equilibrium model, 31st AIAA Fluid Dyn. Conf., AIAA Paper 2001-2909, pp.1-10, 2001.
5) B.R. Shin: A high resolution numerical scheme for a high speed gas-liquid two-phase flow, J. Mech. Sci. Tech., Vol.25, pp.1373-1379, 2011.
6) S. Yamaguchi, B.R. Shin: A time constant preconditioning method for unsteady gas-liquid two-phase flows, AIP conf. proc. Vol.2993, pp.03003.1-03003.4, 2020.
7) J.M. Weiss, W.A. Smith: Preconditioning applied to variable and constant density flows, AIAA J., Vol.3, pp.2050-2057, 1995.
8) G.A. Sod: A survey of several finite difference methods for systems of nonlinear hyperbolic conservation laws, J. Comput. Phys., Vol.27, pp.1-31, 1978.

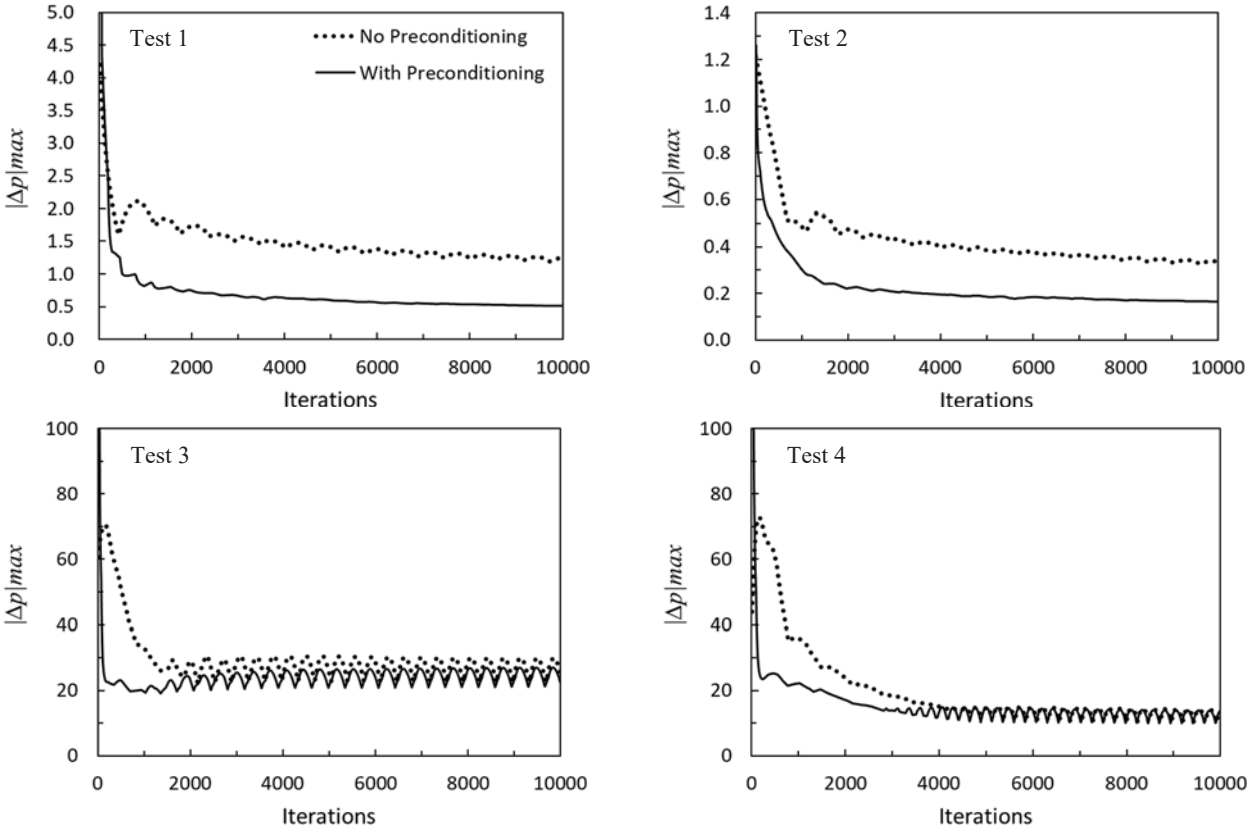


Fig. 3. Iteration histories of $|\Delta p|$ for ideal gas flow with $\alpha_i = 100\%$.

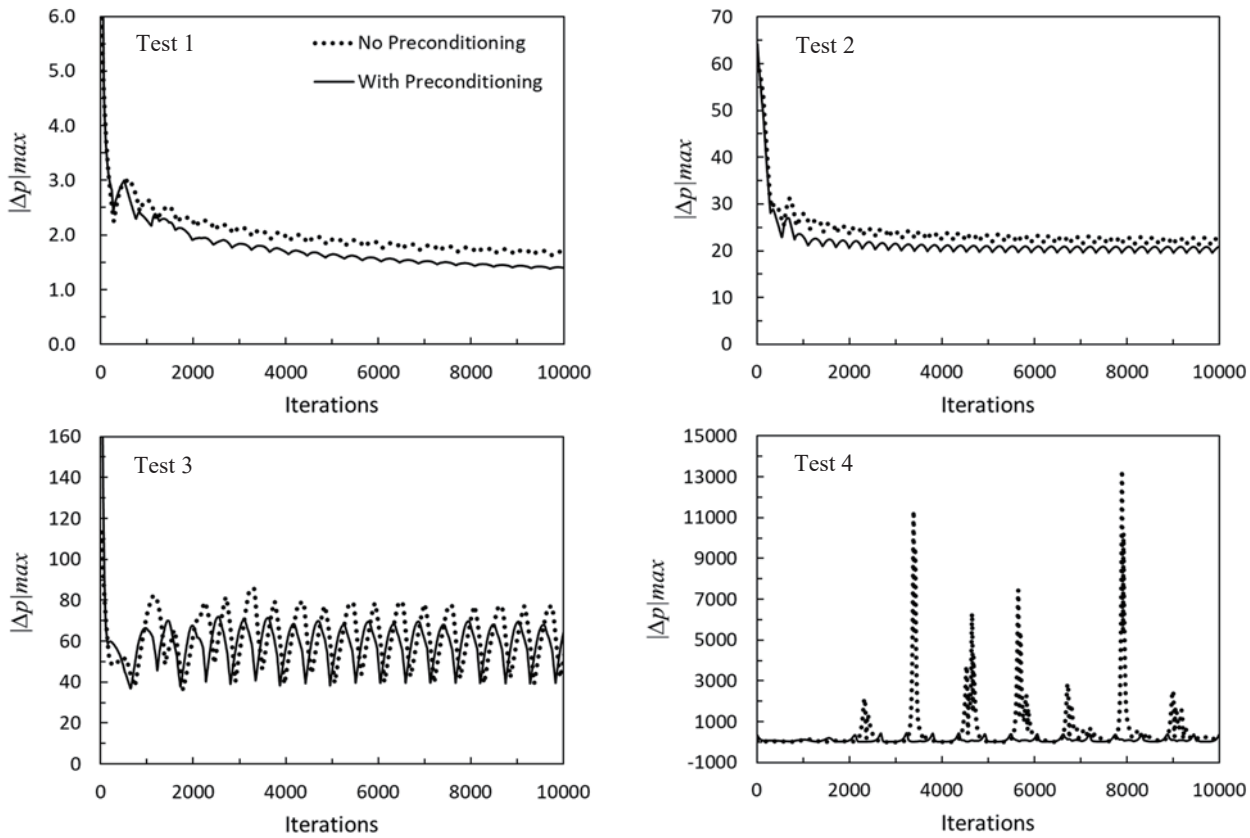


Fig. 4. Iteration histories of $|\Delta p|$ for two-phase flow with $\alpha_i = 50\%$.

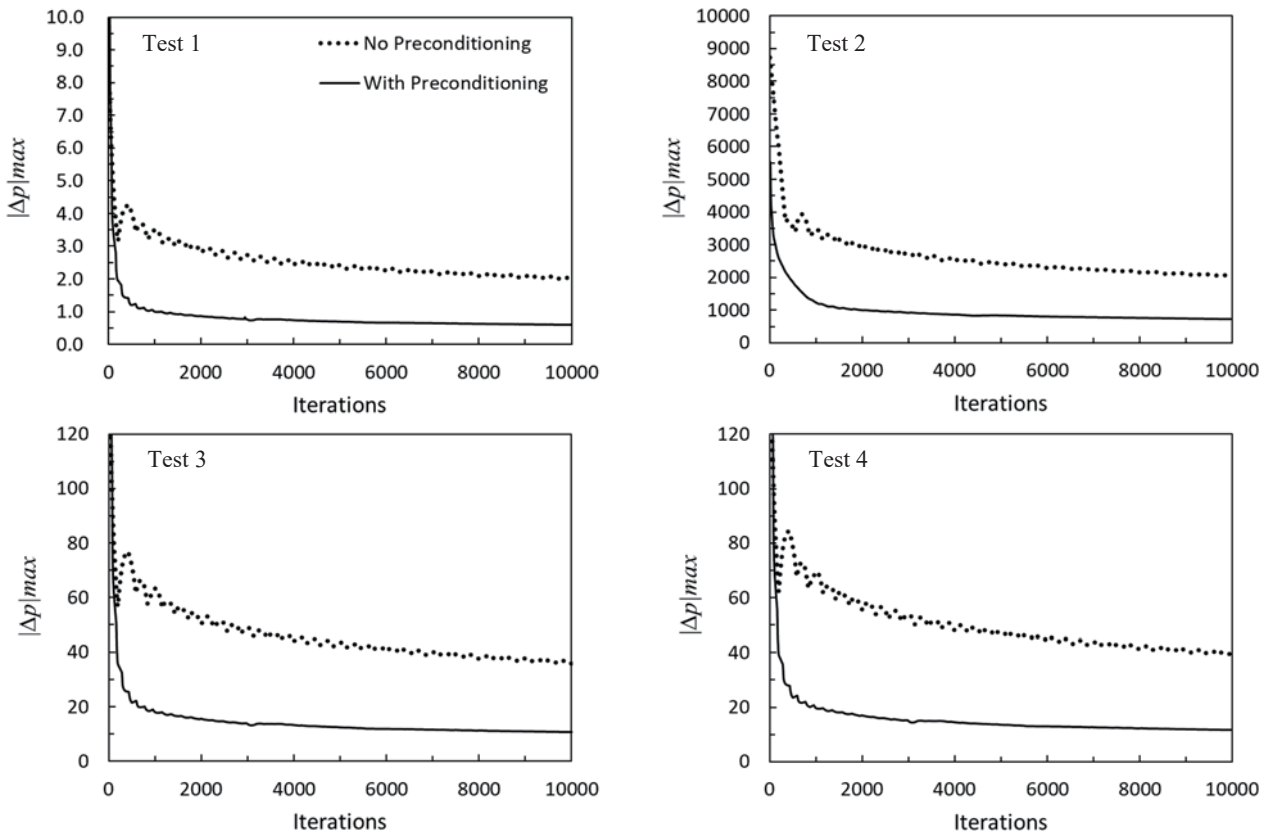


Fig. 5. Iteration histories of $|\Delta p|$ for liquid flow with $\alpha_i = 0\%$.

Numerical Investigation of the Aerodynamic Performance of Winglet Configurations for Wind Turbine Blade

Bayu K. WARDHANA[a)], B. SHIN[b)]

Abstract

In this research a numerical investigation of the effect of winglets on a blade performance for wind turbine is performed. Wind turbine blade from NREL Phase VI was chosen for the investigation. Winglet parameters of a cant angle, height, and winglet tip thickness are applied to investigate the effect on the blade aerodynamic performance. Numerical simulation with RANS equations in combination with SST *k-ω* turbulence model was performed. Moving reference frame was applied to simulate the blade rotating motion. The present numerical solutions were compared with the experimental data from NREL phase VI for validation. The comparison showed the solutions were in a good agreement with the experimental data for baseline blade configuration. Wind velocities in range of 8-10 m/s were chosen to investigate the winglet effect. Winglet height was varied to 1.5%, 3%, and 5% of rotor radius while combined with 90° cant angles (Upstream configuration) and -90° (Downstream configuration). Furthermore, winglet tip thickness was reduced from 100% to 85% and 70%. The numerical results showed that the winglet with height 3% of rotor radius and combined with a 90° cant angle has the best power coefficient improvement. Winglet with a -90° cant angle mostly reduces the blade performance. Reducing the winglet tip thickness reduces the strength of the tip vortices behind the blade tip.

Keywords: CFD, Horizontal axis wind turbine, Turbine blade, Winglet, Tip vortices, Blade performance

1. INTRODUCTION

In recent years, the availability of fossil energy sources had been decreased while the need of energy had been increased every year. The wind energy has become an option to fulfil the energy need as a renewable energy source. Therefore, the development of wind turbine technology is important. Maughmer[1)] investigated a winglet effect on a wing while introducing parameters such as a cant angle, height, toe angle and sweep angle. Since then, the winglet application on a wind turbine has been increased. The main advantage of a winglet is that the tip vortices from blade tip to winglet tip are removed, resulting in improved pressure distribution at the blade tip. Mourad et al.[2)] numerically investigated the effect of winglet height and the toe angle on the wind turbine performance in various tip speeds. They found that the blade performance is related to the location where the tip vortices occur. Meanwhile, Johansen and Sørensen[3)] studied a winglet effect by varying the parameters such as height, curvature radius, sweep angle and twist angle. They found that the winglet succeeds to increase the power production by shifting the tip vortices occurrence to the winglet tip. They also mentioned that the winglet also increases the thrust.

In this paper, the winglet with parameters of a cant angle, height, and winglet tip thickness is numerically investigated to find the optimum configuration to increase the blade performance. NREL Phase VI[4)] wind turbine blade is chosen as baseline blade in this study.

a) Graduate student, Interdisciplinary Graduate School of Agriculture and Engineering, Department of Materials and Informatics
b) Professor, Mechanical Engineering Program

2. NUMERICAL METHOD

2.1 Winglet configurations and computational domain

The winglet has a same sectional profile of S809 airfoil as the main blade. The parameter of a cant angle *c* was set as 90° (Upstream configuration) and -90° (Downstream configuration). The variations of winglet height *h* were equal to 1.5%, 3% and 5% of rotor radius *R* where the *R* is equal to 5 m. The winglet tip thickness t_t was varied from 100% to 85% and 70%. Overall, the winglet parameters used in this study are illustrated in Fig. 1.

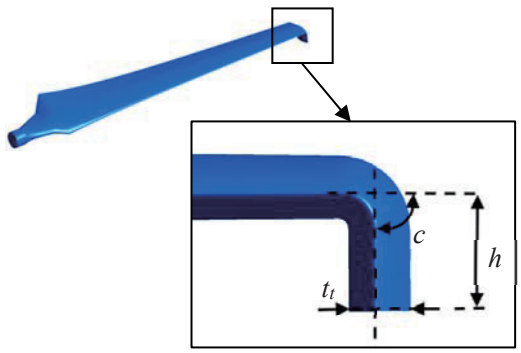


Fig. 1. Winglet parameters.

The computational domain used in this study is a rectangular as seen in Fig. 2. The domain consists of stationary and rotating region. The rotating region was

modelled as a moving reference frame to simulate the blade rotating motion at a constant rotational speed of 72 rpm. Unstructured mesh approximately 2.9 million elements were generated, where 95% of the elements were distributed within the rotating region. Structured prism elements up to 10 layers were generated near the blade surface for viscous sublayer. In this study, y+ value approximately 1 was kept to increase the accuracy of the solution.

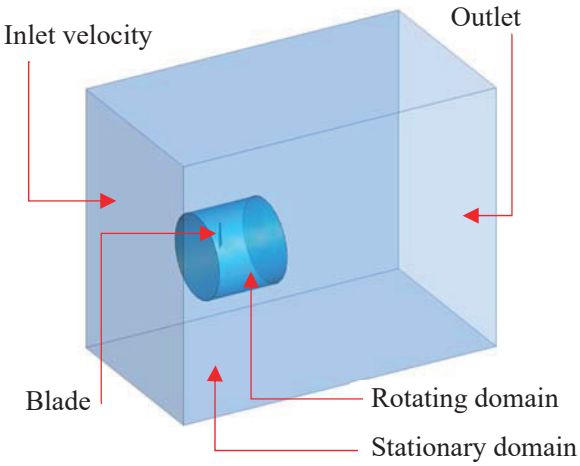


Fig. 2. Computational domain.

2.2 Governing equations

A three-dimensional incompressible Navier-Stokes equations are solved by using finite volume method. The equations are shown as follow.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 \boldsymbol{u} \tag{2}$$

where p is the pressure, ν is the kinematic viscosity, $\boldsymbol{u}$ is the velocity component and ρ is the density. SST k-ω turbulence model is selected to model the flow turbulent.

2.3 Numerical validation

In order to validate the numerical method, numerical solution of pressure distributions was compared to the experimental data at certain blade span location r from the rotor origin. The comparisons were taken at r/R equal to 0.63, 0.8 and 0.95 at wind speed 7 m/s. It can be observed in Fig. 3 that the present numerical solutions show a well agreement with the experimental data.

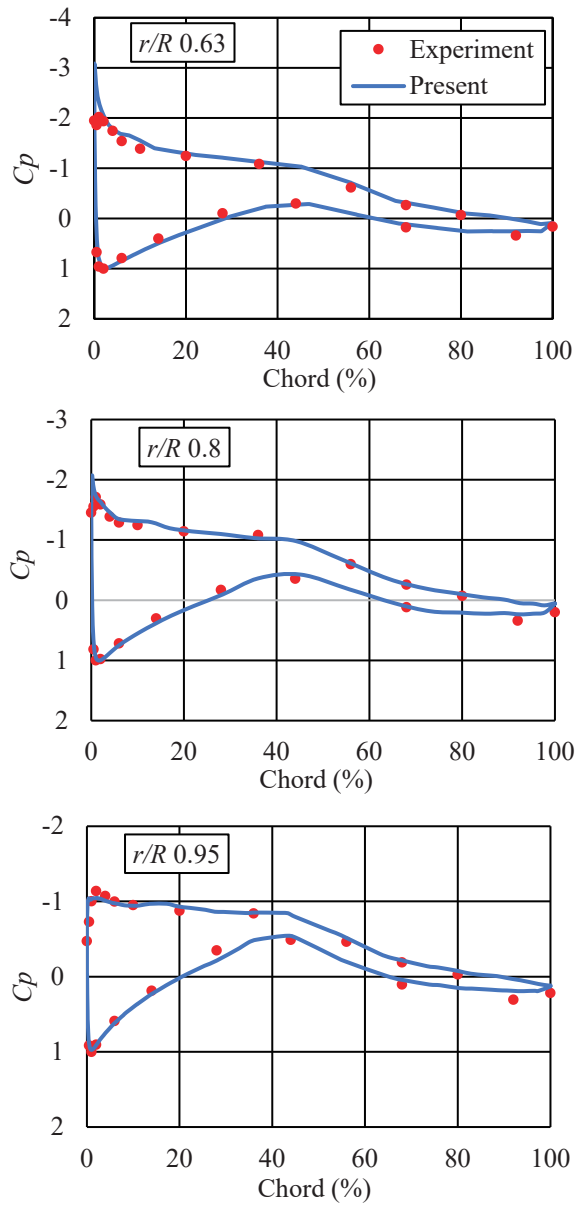


Fig. 3. Surface pressure distributions.

3. NUMERICAL RESULTS

3.1 Winglet height and cant angle effect on blade performance

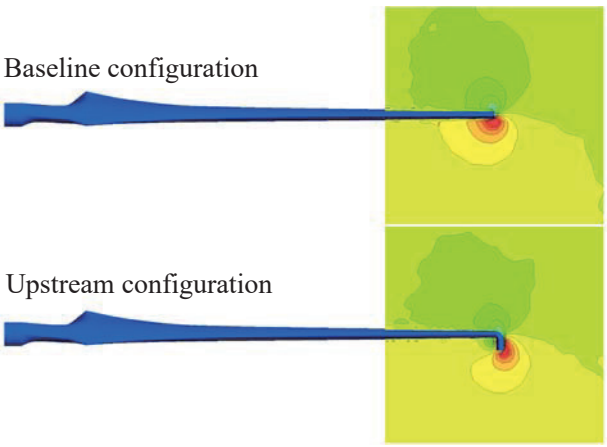
Table 1 shows the increment of power coefficient CP and thrust coefficient Ct compared to the baseline configuration. It can be seen that the upstream configurations mostly increase the blade performance. Meanwhile, downstream configurations mostly decrease the blade performance. Also, all configurations show a higher Ct value compared to the baseline configuration. Overall, Upstream configuration with h of 3%R has the best performance.

Table 1. Performance of blade with winglet configuration

V m/s	Cant angle 90° (Upstream conf.)					
	h = 1.5%*R*		*h* = 3%*R*		*h* = 5%*R*	
	CP	*Ct*	*CP*	*Ct*	*CP*	*Ct*
8	-0.55	0.56	1.34	2.91	0.05	2.91
9	1.09	0.48	1.14	0.96	0.80	1.74
10	1.12	0.98	2.21	2.02	2.88	2.41
V m/s	Cant angle -90° (Downstream conf.)					
	h = 1.5%*R*		*h* = 3%*R*		*h* = 5%*R*	
	CP	*Ct*	*CP*	*Ct*	*CP*	*Ct*
8	0.93	2.89	-5.14	0.85	-2.57	4.19
9	0.02	0.99	-2.76	0.71	-1.00	2.35
10	-0.96	1.32	-3.89	-0.17	0.31	3.45

Figure 4 shows the *z*-direction velocity or the spanwise flow component at the blade tip area at wind speed 8 m/s. Baseline configuration can't prevent the spanwise flow from mixing and creating a strong vortices at the tip, which increases the pressure on the blade suction surface and eventually reduces the blade power output while upstream and downstream configurations remove the vortices from blade tip. But in the downstream configuration, a strong spanwise flow component is observed on the blade pressure surface near the blade tip.

Figure 5 shows the pressure contour on the blade span location *r/R* of 0.95 at wind speed 8 m/s. Upstream configuration shows the lowest pressure on the blade suction surface overall. Meanwhile, winglet configurations don't improve the pressure distribution on the blade pressure surface significantly.



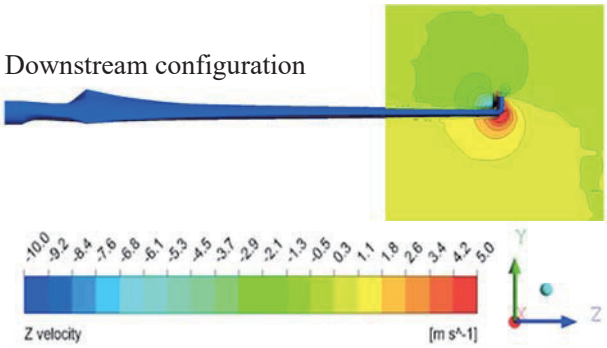


Fig. 4. Spanwise velocity contours.

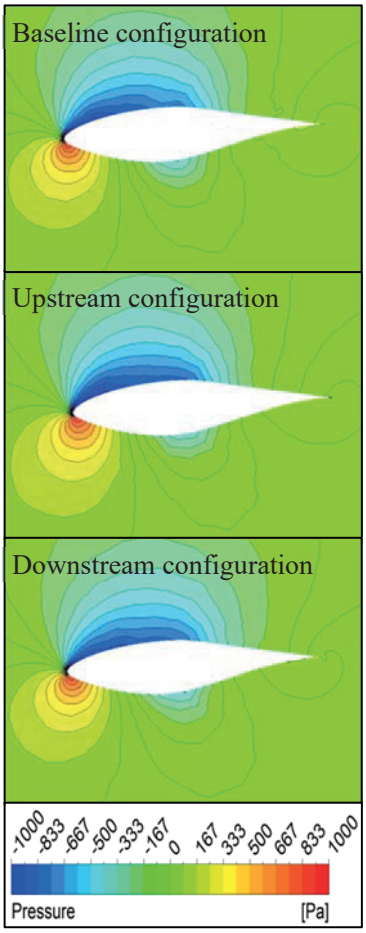


Fig. 5. Pressure contours at *r/R* of 0.95 blade section.

For further analysis, surface pressure distributions *Cp* of winglet with *h* of 3%*R* of upstream and downstream configurations are compared with baseline configuration at a wind speed of 8 m/s. Figure 6 shows that as a whole, upstream configuration decreases the pressure on the leading edge area while the downstream configuration decreases the pressure on the trailing edge area. It also shows that locations close to the blade tip experience stronger winglet influence. The difference in pressure distribution may cause a blade power reduction in the downstream configuration.

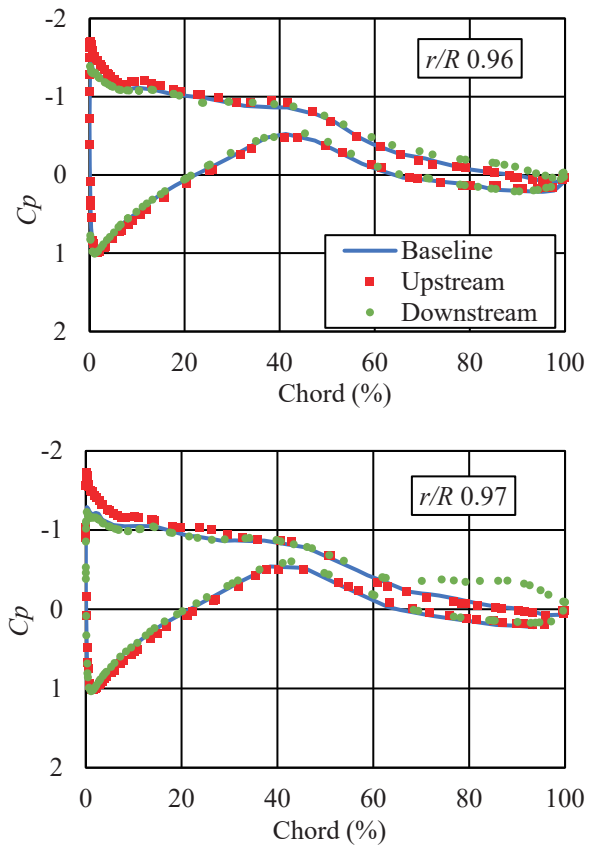


Fig. 6. Comparison of surface pressure distributions.

3.2 Winglet tip thickness effect on the tip vortices formation

Figure 7 shows the comparison of vortices magnitude of upstream configuration with tip thickness t_t of 100%, 85%, and 70% at location 0.16R behind the blade tip. The comparison was taken at wind speed 8 m/s for winglet with h of 3%R. The results show that reducing the tip thickness is effective to reduce the vortex strength. A significant improvement is achieved when the tip thickness is reduced from 100% to 85%. So that the magnitude of vortex at t_t=85% shows a lower strength at the center of the vortex than 100%. Meanwhile, reducing the tip thickness from 85% to 70% doesn't reduce the vortices strength significantly.

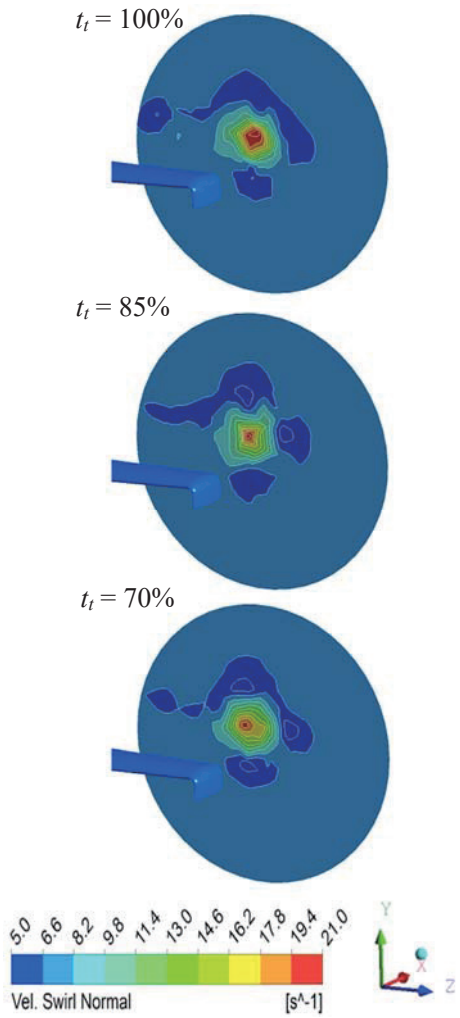


Fig. 7. Tip vortex magnitude behind the blade tip.

4 CONCLUSIONS

Numerical investigation based on a finite volume method is performed to investigate the effect of the winglet on a wind turbine blade performance. The numerical solutions show a good agreement with experimental data for the baseline pressure distribution, so that it was confirmed that the present numerical method is sufficiently reliable to predicts the aerodynamic characteristic. From the investigation, main conclusions were summarized as followings.

1) Upstream configuration winglets mostly succeed to increase the blade power coefficient compared to the baseline configuration. Winglet with height h of 3%R is the most effective configuration compared to the other.
2) Downstream configuration winglets mostly decrease the blade power coefficient compared to the baseline configuration.
3) All winglet configurations increase the blade thrust coefficient.
4) Reducing the winglet tip thickness from 100% to 85% is significantly improves the tip vortex

strength behind the blade tip. While, reducing the tip thickness from 85% to 70% doesn't result a significant effect.

REFERENCES

1) M. D. Maughmer: The Design of Winglets for High-Performances Sailplanes, J. Aircraft, Vol.40 No.6, pp.1099-1106, 1992.
2) M. G. Mourad, I. Shahin, S.S. Ayad, et al.: Effect of Winglet Geometry on Horizontal Axis Wind Turbine Performance, Engineering Reports, Vol.2 No.1, p.el.12101, 2020.
3) J. Johansen, N. N. Sørensen: Numerical Analysis of Winglets on Wind Turbine Blade Using CFD, Proc. European Wind Energy Conf. and Exhibit., pp.1-6, 2007.
4) M. M. Hand, D. A. Simms, L. J. Fingersh, et al.: Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configuration and Available Data Campaigns, NREL/TP-500-29955, 2001.

二次元対称急拡大チャンネル内層流はく離流れの数値解析

藤田　健誠[a)]・B．シン[b)]

Numerical Study of Laminar Separated Flow in a Symmetric Sudden Expansion Channel

Kensei FUJITA, B. SHIN

Abstract

Laminar separated flows in a two-dimensional symmetric sudden expansion channel with backward facing steps were investigated by using SMAC finite-different method. Computation was performed in a low Reynolds number range with $Re < 300$ and two difference channel expansion ratios of D/d=3 and 5. Numerical results such as velocity profiles and attachment points were in a good agreement with experiments and existing data. The formation of separation regions and their patterns were varied with both Reynolds number and the expansion ratio. The critical Reynolds number at which asymmetric flow begins decreased with increasing the expansion ratio. The distance of reattachment point increased with the expansion ratio. Computational results of velocity vectors, streamlines, pressure and vortices distributions were presented and discussed to identify the sudden expansion flow phenomena such as flow separation, recirculation, reattachment and the development of asymmetric flow patterns.

Keywords: Numerical Analysis, Laminar Flow, Separation, Reattachment Point, Symmetric Expansion Channel, Asymmetric Flow, Bifurcation

1.　はじめに

流れのはく離と再付着を伴う急拡大・急縮小流路は，単純な形状にもかかわらず基礎的な流れ現象を有する流体力学的に重要な流れ場であり，機械工学，化学プラントにおける管路システムや継ぎ手，医工学分野の人工臓器など工学的にも広く遭遇する流れ場であるため，古くから多くの研究が行われている[1)-5)]．特に，後ろ向き段付き形状の急拡大流路内の流れでは，ステップ後方ではく離流領域が形成されるため，逆圧力勾配，エネルギ損失，熱伝達，物質の拡散と混合，はく離せん断層の発達と不安定現象などに関連する様々な問題の研究対象になっている[6)-9)]．例えば，二次元対称急拡大流路の低レイノルズ数領域では，あるレイノルズ数を超えると対称流れが不安定となり，上下ステップ背後のはく離領域が異なる非対称定常流れへ移行するピッチフォーク分岐現象が起こり，さらにレイノルズ数を上げると第3のはく離渦が発生し，続いてホップ分岐に遷移することが知られている[4),10)]．しかし，流れパターンが変わる分岐レイノルズ数は，流路の拡大比や断面形状，速度分布，圧力勾配といった流れの条件等に依存するため，まだ統一的な見解には至らず，これらの非対称および非定常流れの発生メカニズムについて不明なことが多い．

本研究では，二次元対称急拡大チャンネル内を通るレイノルズ数300以下の層流はく離流れについてSMAC差分解法を用いた数値解析を行い，拡大比とレイノルズ数に対する急拡大部下流側の速度分布，はく離領域の伸縮，分岐レイノルズ数の変化等について調べ，対称急拡大チャンネル流れの基礎的知見を与えるとともに，この種の流れの予測に対する本数値解法の有効性について検討する．

2.　計算手法

2.1 基礎方程式及びSMAC法

数値計算のための基礎方程式は以下のような非圧縮性連続の式とナビエストークス方程式である．

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = \boldsymbol{0} \tag{1}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{u}\,\boldsymbol{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re}\nabla^2 \boldsymbol{u} \tag{2}$$

ここで$\boldsymbol{u}$は流速ベクトルで，pは圧力，Reはチャンネル入口の幅d，流入最大速度u_{max}を用い以下のように定義するレイノルズ数である．

a)機械設計システム工学専攻大学院生
b)機械知能工学プログラム教授

$$Re = \frac{u_{max} d}{\nu} \tag{3}$$

本研究で用いた数値解法は SMAC 法で，数値解析のための差分方程式は以下の通りである[12].

$$\frac{\boldsymbol{u}^* - \boldsymbol{u}^n}{\Delta t} = -\nabla p^n + \left(\frac{1}{Re}\nabla^2 \boldsymbol{u} - \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{u}\,\boldsymbol{u}\right)^n \tag{4}$$

$$\frac{\boldsymbol{u}^{n+1} - \boldsymbol{u}^*}{\Delta t} = -\nabla \phi \tag{5}$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{\nabla \cdot \boldsymbol{u}^*}{\Delta t} \tag{6}$$

$$p^{n+1} - p^n = \phi \tag{7}$$

ここで，ϕは圧力の修正量，上添字nは時間レベル，$*$はnと$n+1$の中間段階の値を表わしている．この計算では，未知変数$\boldsymbol{u}, p$を互いに違う点に定義する食い違い格子を用いるため境界条件を正確に扱うことができる．また，本研究では物体適合格子を用いるため， 式(4)~(7)の基礎方程式を曲線座標系に変換した基礎方程式を用い解析した.[12]

2.2 計算領域と計算条件

計算領域は図 1 に示すように，チャンネル入口幅dを基準とし，急拡大部から入口までを$l = 4d$，出口までを$L = 50d$とした．また拡大比$D/d = 3$ と 5の二種類のチャンネルに対して，格子点数はそれぞれ 135×61 点，165×101 点を用い計算した．図 2 に使用した計算格子の例を示す. 精度の良い解を求めるため格子は壁近傍とチャンネルの形状が変化するところに密集した． 一方， 境界条件は， 流入口に Poiseuille 流れを施し， 出口には対流流出条件，上下壁面には粘着の条件と SMAC 法の特徴である圧力に対する Dirichlet 条件を施した.

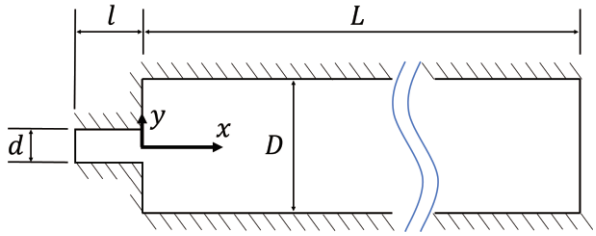


図 1.　二次元チャンネル流路の計算領域の概略図.

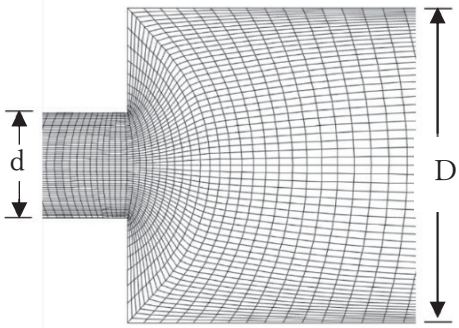


図 2.　$D/d = 3$の計算格子(135×61)の例.

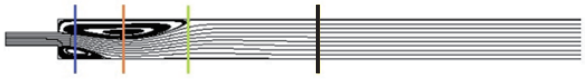
3.　解析結果

3.1 速度分布のおよび流れパターン

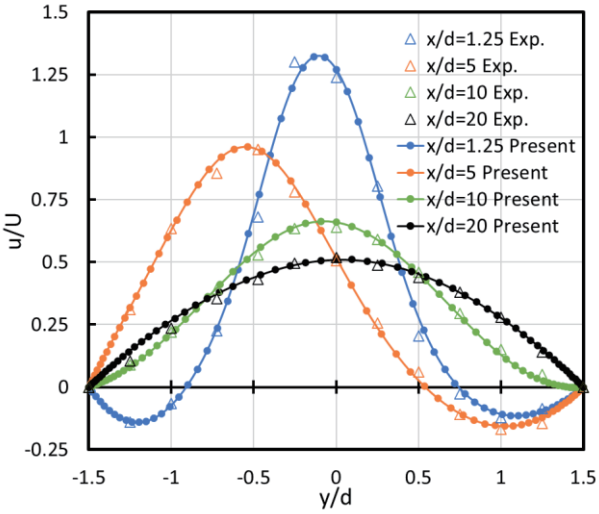
まず，本計算方法の信頼性を確認するために既存の結果との比較を行った．拡大比$D/d = 3$流路におけるRe=120 の時のチャンネル内の流線図と流れ方向の速度分布を図3に，Re=280の時の流線図と速度分布を図4にFearnら[4]の実験結果とともに示す．ここで図(a)の断面位置の色は図(b)の速度分布の色と対応している．Re 数の増加に伴うステップ背後の速度分布の変化や上壁に形成する主はく離渦の伸びと，この渦の膨らみにより下壁に生じる第 3 のはく離，はく離泡の規模など，各断面における速度分布が良くシミュレートされ，全体的に実験結果とほぼ同程度の結果が得られた.

図 5 に Re=280 のときの流れの様子を示す．逆圧力勾配域と流れのはく離，それらによる主流の蛇行，はく離せん断層，圧力の回復と渦度の強さ，再付着点あたりの流れの情報など，急拡大チャンネル流れの様子が良く理解できる.

図 6 (a), (b)に$D/d = 5$の場合の，それぞれ図 3，4 と同じステップ後方断面位置での流れ方向の速度分布を示す. 同じRe数に対して拡大比が大きくなると，図 3，4 に比べはく離循環領域は規模が大きくなり下流側まで広がり，第 3 はく離の出現も早くなることが分かった.

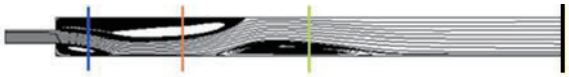


(a) 流線図と測定した 4 つのx/d断面位置.

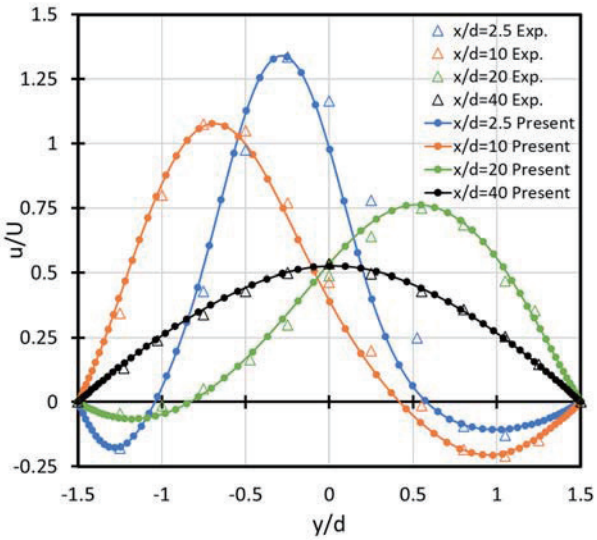


(b) 4 つの断面における速度分布の比較

図 3.　$D/d = 3$, Re=120 における流線図と速度分布図.

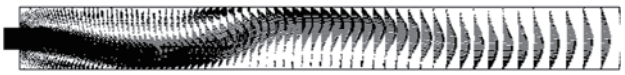


(a) 流線図と測定した 4 つのx/d断面位置



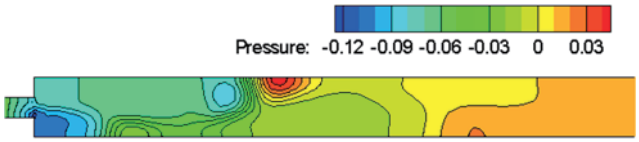
(b) 4 つの断面における速度分布の比較

図 4. $D/d = 3$, Re=280 における流線図と速度分布図.

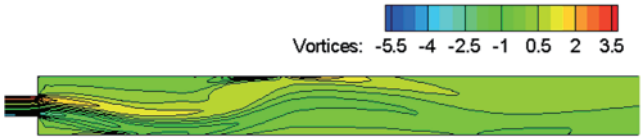


(a) 速度ベクトル図

(b) 流線図

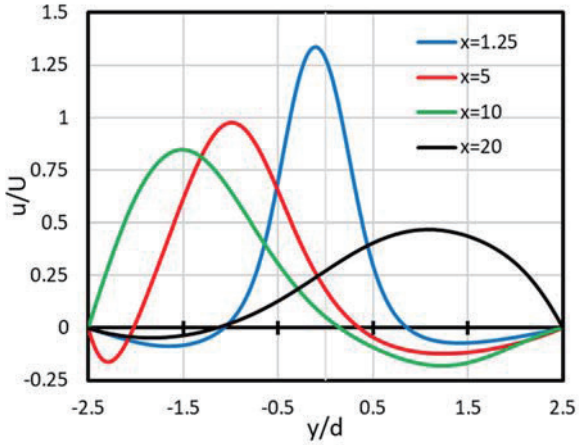


(c) 圧力分布図

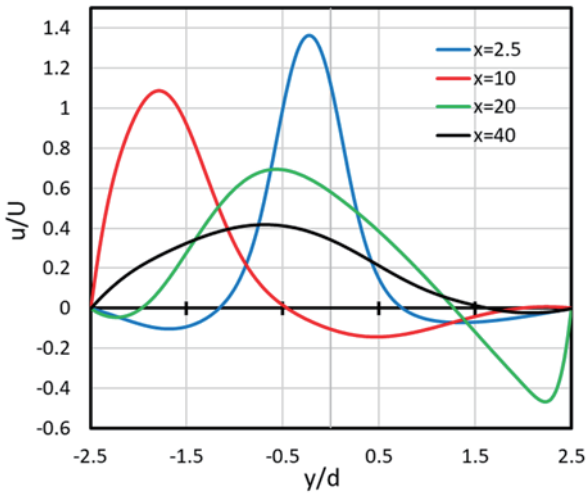


(d) 渦度分布図

図 5. $D/d = 3$, Re=280 における流れの様子.



(a) $Re = 120$



(b) $Re = 280$

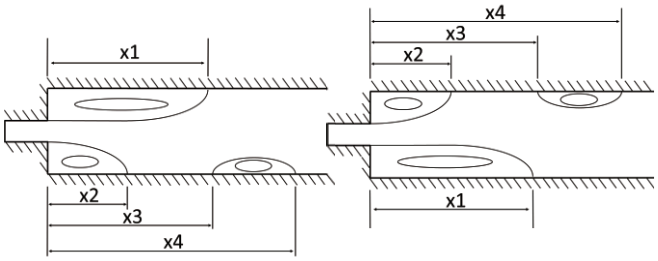
図 6. $D/d = 5$の場合の流れ方向速度分布図.

3.2 剥離・再付着点距離

次に拡大部後方の上下壁に現れる流れの剥離と再付着点までの距離を調べた. 図 7 に急拡大流路後方に発生する流れの剥離と再付着点までの距離の定義点を示す. また, Re数の変化に伴うはく離・再付着点距離x/dの変化を図 8 に示す. Re 数による再付着点の位置変化を調べるため, Re 数を 15 から 15 ずつ上げていきながら解析を行った. $D/d = 3$ではRe =75～90間で, $D/d = 5$では$Re = 30$~45 間で対称性が崩れていたため, その区間では Re 数を 1 ずつ細かく上げて解析を行った. この対称性が崩れ, 非対称流れと変わる臨界レイノルズ数Re_cは, $D/d = 3$ では Re_c =82~83, $D/d = 5$ ではRe_c =43~44 の間にあった. 流れのパターンが対称流れから非対称流れに突然変わるのではないので実際分岐現象が起きるRe_cを特定するのは難しく [13], 研究者によってばらつきが見られるが, 図 8 から分かるように Battaglia ら [14]が推定したそれぞれ 80.7, 42.6 に近い値となった. また, 第 3 のはく離は Battaglia らの 159, 75 に比べ 150, 74 とやや早いRe数で発生した, 拡大部背後で生じた対称渦はRe数に対してほぼ線形的に成長す

るが，Re数をさらに増やすと分岐現象が表れ，片方の渦はやや縮んだ状態で落ち着く反面，もう片方の渦はRe数とともに伸びていく．また，拡大比が大きくなると分岐現象は低いRe数で表れ，はく離領域も図 3, 4, 6 で調べたように広がっていく様子が見てとれる．一方，非対称流れパターンについて調べたところ，$D/d=3$では $Re=208$～209 間で，$D/d=5$ではいくつかのRe数で図 6(a)から(b)のように流れパターンの反転が観測された．これは実験の際良く観測されることだが，この研究では計算においても観測された．

図 9 には，図 8 の再付着距離x/dを中西ら[15]が紹介したようにRe_cのときの長さx_c/dで正規化したはく離泡長さのレイノルズ数変化を示す．この計算例に限り，ステップ背後に生じるはく離渦と分岐Re数との間には概ね相似性が見られる．片側単一段付き拡大流路で知られているように，比較的に安定した主はく離渦$x2$のRe数依存性については二つの結果が一致するが，流れの不安定性に大きく影響するその他のはく離渦については，Re数が大きいほどばらつきも増える傾向を示す．そのため，この相似性についてはまだ検討の余地があるが，図 5 で示すような二次元対称急拡大流路における非対称流れの形態は十分予測できる．



(a) パターン 1　　(b) パターン 2

図 7.　剥離と再付着点までの距離の概略図.

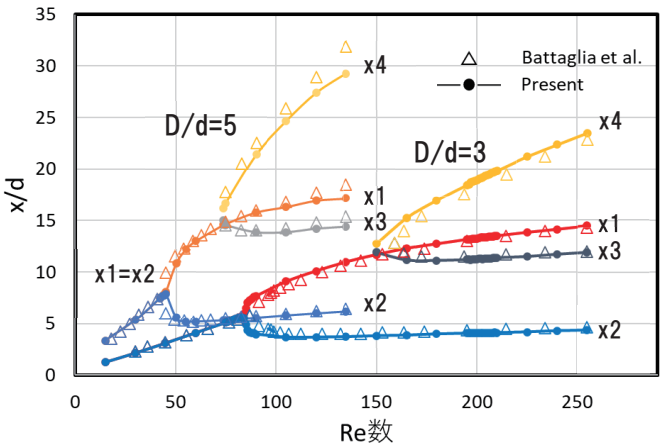


図 8.　Re 数による再付着点距離の変化.

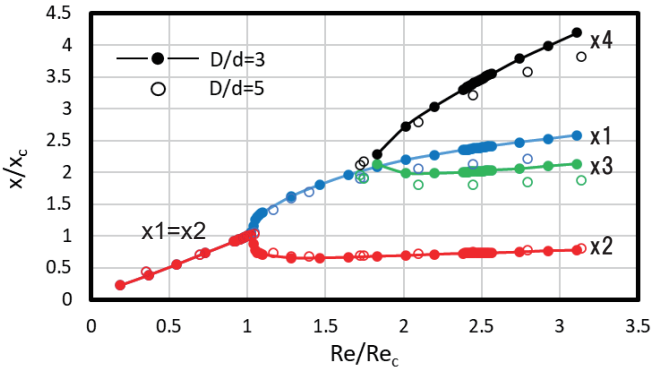


図 9.　Re_cで正規化したRe数と再付着点距離の変化.

3.3 対称流れから非対称流れへの遷移

図 10 に，$D/d=3$流路における$Re=208$のときの流れ方向の速度分布 u の経時変化を示す．計算初期に上下対称で出発した流れが時間と共に非対称流れに変わり，その後流れパターンを変えずそのまま定着した．ステップ背後のはく離の生成と成長，定常非対称流れパターンの形成過程がよく理解できる．この流路では，既述のとおり，$Re \geq 209$ではく離位置がこの図と正反対の上下反転した流れパターンが得られた．

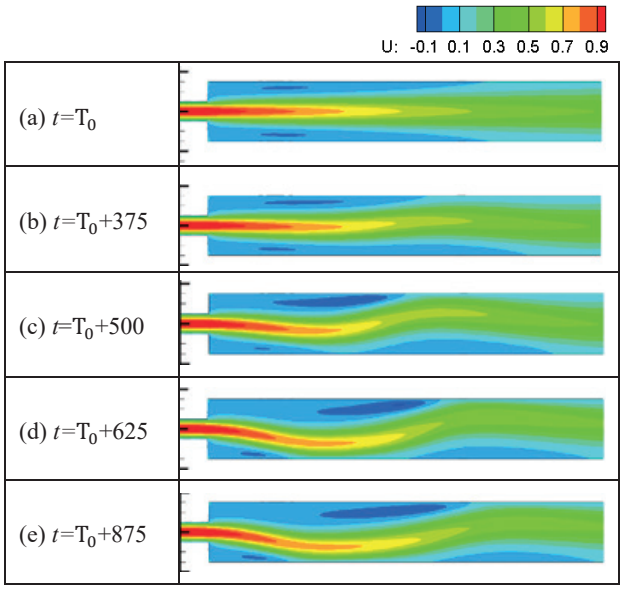


図 10.　$D/d=3, Re=208$のときの流れ方向速度uの分布の経時変化.

4. 結論

本研究では，拡大比が異なる二つの二次元対称急拡大チャンネル内を通る層流はく離流れについて SMAC 差分解法を用いて数値解析を行った．その結果，$Re < 300$の範囲で得られた速度分布および剥離点，再付着点の位置は既存の実験結果や計算結果とほぼ同等な結果が得られ，本計算方法の妥当性が確認できた．チャンネルの拡大比を大きくすると，はく離領域が広くなり流れが不安定化し易く，対称流れから非対称流れに遷移する分岐レイノルズ数は低くなることを確認した．適切な流れの可視化や時間変化を示すことで，レイノルズ数に対する速度及び圧力分布，主はく離の伸縮と第 3 はく離の生成，対称流れ場の非対称流れへの遷移など，複雑な対称急拡大チャンネル流れの振る舞いが理解し易い．

参考文献

1) A. H. Gibson, Hydraulics and its applications, Constable & Co., 1952.
2) F. Durst, A. Melling and J. H. Whitelaw: Low Reynolds number flow over a plane symmetrical sudden expansion, J. Fluid Mech., Vol. 64, pp.111-128, 1974.
3) B. F. Armaly, F. Durst, J. C. F. Pereira and B. Schonung: Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, J. Fluid Mech., Vol.127, pp.473-496, 1983.
4) R. M. Fearn, T. Mullin and K. A. Cliffe: Nonlinear flow phenomena in a symmetric sudden expansion, J. Fluid Mech., Vol.211, pp.595-608, 1990.
5) 日本機械学会: 管路・ダクトの流体抵抗，技術資料, 1979.
6) F. M. White: Fluid Mechanics, 9th Ed., McGraw-Hill, 2021.
7) R. J. Goldstein, V. L. Eriksen, R.M. Olson and E.R.G. Eckert: Laminar separation, reattachment and transition of the flow over a downstream-facing step, ASME J. Basic Engng., Vol.92, pp.732-741, 1970.
8) 中西助次，桜井元康，大坂英雄: 二次元対称急拡大流路内流れの数値的研究(力学量特性)，日本機械学会論文集(B 編), 61 巻 589 号, pp.84-91, 1995.
9) 太田照和，柳岡英樹，畑孝典： 二次元対称急拡大流路内流れと熱伝達の数値解析，日本機械学会論文集 B 編, Vol. 60, No. 579, pp. 3930-3936, 1994.
10) I. J. Sobey and P. G. Drazin: Bifurcations of two-dimensional channel flows, J. Fluid Mech., Vol. 171, pp. 263-287, 1986.
11) A. A. Amsden and F. H. Harlow: A simplified MAC technique for incompressible fluid flow calculations, J. Comp. Phys., Vol.6, 322-325, 1970.
12) 申炳録，井小萩利明，大宮司久明: 定常非圧縮性ナビエストークス方程式の曲線座標格子に適用できる効率的差分スキーム，日本機械学会論文集(B 編), Vol.56, pp.1357-1363, 1990.
13) F. Durst, J. C. F. Pereira and C. Tropea: The plane symmetric sudden-expansion flow at low Reynolds numbers, J. Fluid Mech., Vol.248, pp.567-581, 1993.
14) F. Battaglia, S. J. Tavener, A. K. Kulkarni and C. L. Merkle: Bifurcation of low Reynolds number flows in symmetric channels, AIAA, Vol.35, No.1, 1997.
15) 中西助次，桜井元康，大坂英雄: 二次元非対称急拡大流路内流れの数値的研究（はく離渦の検討），日本機械学会論文集(B 編), 63 巻 613 号, pp.13-20, 1997.

円錐振り子を利用した 3 成分速度型ボアホール地震計の開発

吉松　爽杜 a)・盆子原　康博 b)・上岡　野歩 c)・濵畑　貴之 d)・
境　健太郎 e)・中野　敦 e)・寺薗　信一 f)

Development of Borehole Seismometer Using Conical Pendulum to Three-Component Velocity Measurement

Akito YOSHIMATSU, Yasuhiro BONKOBARA, Nobo UEOKA, Takayuki HAMAHATA,
Kentaro SAKAI, Atsushi NAKANO, Shinichi TERAZONO

Abstract

The aim of this study is to develop a small, inexpensive borehole seismometer that can accurately measure the shot-period velocity signal of three directions. The prototype developed in prior research is composed of a biaxial horizontal electromagnetic sensor in conical pendulum form and a vertical electromagnetic sensor installed on the pendulum axis. The performance of the prototype has been verified experimentally, however, the accuracy of the measurement became degraded due to the elastic vibration and residual vibration of the pendulum axis. As a countermeasure for this problem, the prototype has been improved such as increasing the rigidity of the pendulum axis and adding a magnetic attenuation. In the paper, the performance of the improved prototype was evaluated based on the verification experiment results.

Keywords: Mechanism, Seismic system, Seismometer, Halbach magnet array, Nonlinear spring

1.　緒言

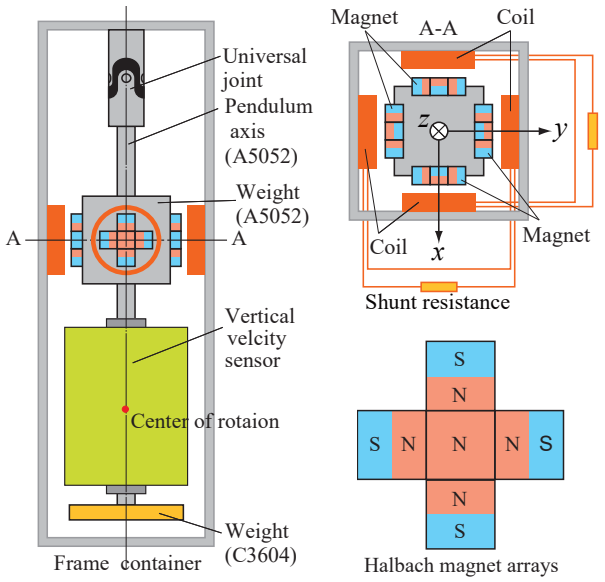
日本は、環太平洋火山帯に属す火山大国であり、火山活動の監視および観測が重要である。火山活動を観測する際、火山性微小震動を計測するために高感度地震計が用いられている。高感度地震計は、体感できないほどの微小震動を観測できる地震計であるため、地上から受ける人工的なノイズによる影響を抑制するために、ボアホール(観測井)の中に埋設して利用される。ボアホール型の地震計（ボアホール地震計）の機能としては、東西方向、南北方向、鉛直方向の微小震動を測定することが求められる。しかしながら、穴径が 150 mm から 200 mm 程度と非常に小さいため、装置の大きさに制限がある。現在は、縦長の管の中に各方向の単成分地震計を階層状に搭載したものが用いられることが多い [1]。ただし、管長が長くなると、ボアホールに挿入する際に困難を生じることがある。

このような背景を踏まえて、本研究では、ボアホール内に設置可能な 3 成分一体型の地震計を開発することを目指して、小型で安価な 3 成分速度センサの開発を行っている。開発中の地震計は、円錐振り子型の水平 2 成分センサに鉛直センサを搭載したものである。先行研究 [2]では、加振振動数が 20 Hz 程度までは正常に機能したものの、それ以降の振動数領域では、円錐振り子が共振して弾性モードが励起されることにより、水平方向の測定結果に誤差が生じることが確認された。本報では、この課題に対して試作機の改良を施し、再度検証実験を行ったので報告する。

a)工学専攻機械・情報系コース大学院生
b)機械知能工学プログラム准教授
c)工学専攻大学院卒
d)教育研究支援センター技術職員
e)産学・地域連携センター准教授
f)株式会社アコー代表取締役

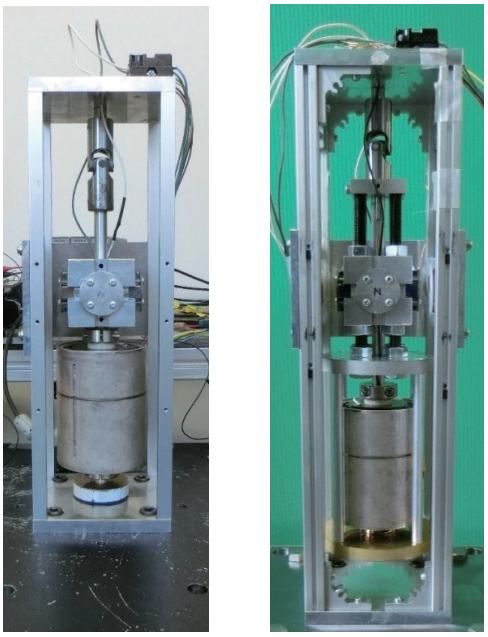
2.　試作機の構造

先行研究で開発した試作機(試作機 1)の構造を図 1 に示す。この試作機は、100 mm×100 mm×300 mm のフレーム内に、自在継手を介して円錐振り子が吊るされている。円錐振り子の上部には、2 方向水平センサとして水平方向の各 4 面に磁石を取り付けたブロックを設置している。フレームには、それぞれの磁石の正面にあたる位置にコイルが取り付けられている。フレームが振動した際には、電磁誘導の原理から磁石とコイルの相対速度に比例した起電力が発生する。円錐振り子は自在継手によって軸まわりに回転できないため、円錐振り子が任意の方向に振れてもコイルに対して磁石の向きが一定に保たれる。これにより、2 方向の速度を同時に計測することができる。



(a) 全体図　(b) 磁石-コイル部

図 1. 試作機 1 の構造.



(a) 試作機 1　(b) 試作機 2

図 2. 開発した試作機の外観.

水平センサの磁石には、1.0 cm^3 の立方体のネオジム磁石をハルバッハ配列に組み合わせた磁石を用いている。これにより、コイル側の磁束密度を高めることで、センサの感度を高めている。

一方、振り子の下部には、鉛直センサを設置している。鉛直センサは、現在広く普及している Sercel 社製の短周期速度型地震計（L-4C）の構造を模して設計を行った。しかしながら、その開発が間に合わなかったため、試作機 1 では実際の L-4C を用いている。鉛直センサは電磁式であり、円錐振り子の軸に永久磁石が設置されている。さらに、磁石の上下に設置された非線形ダイヤフラムばねを介してコイルが搭載された円筒状のおもりが支持されており、1 自由度ばねー質量系（サイズモ系）を構成している。なお、振り子が水平方向に振動する際、遠心力の影響により鉛直センサが誤作動することがある。このため、鉛直センサの重心の位置と円錐振り子の回転中心の位置を一致させる必要がある。

3. 試作機の改良

先行研究では、試作機 1 の性能を評価するために、スイープ加振実験と打撃実験を行った。具体的な実験結果は後に示すが、実験結果から振動によって振り子軸に弾性変形が生じ、これが原因となって 20 Hz 以上の振動数帯域で計測誤差が生じることが分かった。この問題を解決するために、振り子軸の剛性を高める改良を行った。図 2 に改良前の試作機(試作機 1)と改良後の試作機(試作機 2)を示す。

この改良にあたり、振り子軸自体を変更することが出来なかったため、以下のように振り子軸に補強材を追加することとした。まず、鉛直センサの上下に円板を取り付け、その間に 4 本の補強軸を取り付けた。下部の円板は、真鍮製とした。これは、回転中心を鉛直センサ付近に位置づけるためである。次に、水平センサの磁石ブロック部についても補強軸を設けた。ただし、磁石とコイル間の相対運動する領域を確保する必要があるため、4 本の補強軸を磁石ブロックに貫通させることとした。この補強軸は、鉛直センサの上面から自在継手の間までを結合している。以上の 2 箇所に補強軸を設置することで、振り子軸全体を補強することができる。

表 1. 試作機の諸元.

	試作機 1	試作機 2
質量 [kg]	2.35	3.57
固有振動数 [Hz]	1.08	1.04
高さ [mm]	320	400
振り子軸長 [mm]	255	300

鉛直センサの重心位置と振り子の回転中心を一致させるために、振り子長、各要素の質量や慣性モーメントについて最適設計を行った。最終的には、補強軸上の磁石ブロックの設置位置を変更することで、振り子の回転中心の位置を微調整することができる。それぞれの試作機の諸元を表 1 に示す。試作機 2 では、振り子長は 280 mm となり、試作機 1 よりも 45mm 長くなった。フレームのサイズについても、高さが 400 mm と試作機 1 よりも大きくなったが、外径についてはボアホールに挿入可能な制約の範囲に収まっている。また、振り子の固有振動数も 1.04 Hz であり、短周期地震計に求められる条件も満たしている。

4. スイープ加振実験

4.1 実験装置および方法

試作機 2 の性能評価を行うため、スイープ加振実験を行った。実験装置モデルを図 3 に示す。本実験では、松平式加振機にそれぞれの試作機を設置し、加振振動数を 0.8 Hz から 50 Hz の間で変更した。加振振動数の調整は、0.8 Hz から 10 Hz までは 1 Hz 刻みで、10 Hz 以降は 2 Hz 刻みで行った。加振台の振幅は片振幅 0.4 mm とし、N-S 方向、E-W 方向、鉛直方向にそれぞれ加振を行った。このときの振動台の速度を試作機 2 により測定した。また、比較のための参照値として、振動台に加速度ピックアップを設置して、加速度信号を積分することにより速度を測定した。なお、予備実験により試作機 2 の感度を同定した結果、各方向の感度の平均値は、N-S 方向が 3.47 V/(m/s)、E-W 方向が 3.44 V/(m/s)、鉛直方向が 26.9 V/(m/s)であった。

4.2 実験結果

実験結果を図 4、図 5 および図 6 に示す。図 4 は N-S 方向、図 5 は E-W 方向、図 6 は鉛直方向にそれぞれ加振したときの応答である。図中の縦軸は速度振幅、横軸は加振振動数を表している。また、改良前後の性能を比較するため、改良前の試作機 1 の測定値、改良後の試作機 2 の測定値、および参照値の 3 つの結果を示している。

まず、水平方向の結果を見ると、N-S 方向と E-W 方向のどちらの結果も、参照値に対して試作機 1 では 20 Hz 付近での測定値に誤差が生じていることが分かる。これに対して、改良を行った試作機 2 では、20 Hz 以降も概ね参照値と一致した結果が得られたことより、円錐振り子を補強した効果が表れていると考えられる。しかし、35 Hz 付近以降の加振振動数では、改良後も参照値との差が拡大する傾向が見られた。この原因について調査した結果、鉛直センサの振子のおもりが横方向に振動する共振が発生したためであることがわかった。この問題については次章で考察する。次に、鉛直方向の結果を見ると、試作機 2 では 45 Hz 付近まで概ね参照値と一致しており、試作機 1 よりも精度が向上していることがわかる。

5. 打撃加振実験

5.1 実験装置および方法

次に、打撃加振実験による性能評価を行った。実験装置を図 7 に示す。この実験では、ゴム脚で支持されたアルミ板上に試作機 2 を設置し、インパルスハンマで打撃したときの振動応答を測定した。打撃を行う際、主に N-S 方向と鉛直方向の 2 方向に対して同時に加振するように、斜め方向に打撃した。また、フレーム側面に加速度ピックアップを取り付けて、3 方向の参照値を測定した。感度は前章で示した値を用いた。

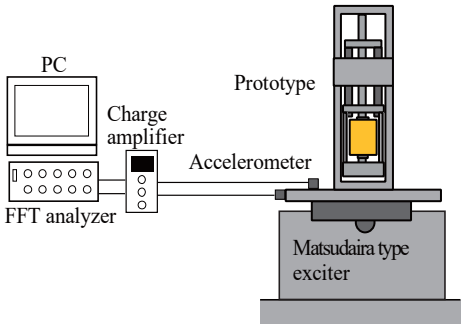


図 3. スイープ加振実験装置.

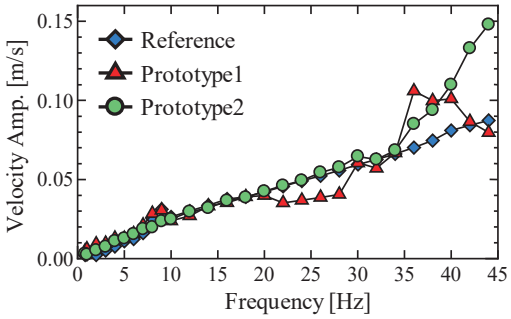


図 4. N-S 方向に対するスイープ加振実験結果.

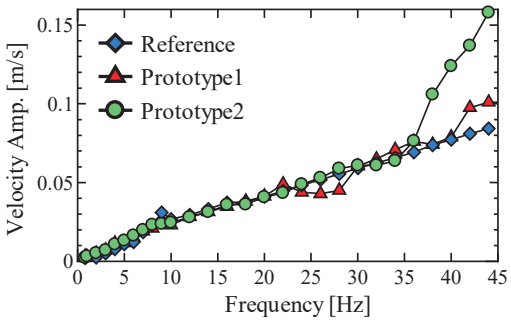


図 5. E-W 方向に対するスイープ加振実験結果.

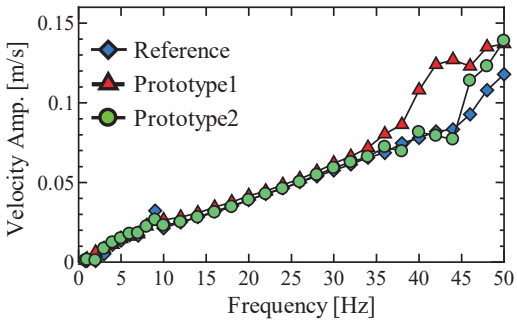


図 6. 鉛直方向に対するスイープ加振実験結果.

5.2 実験結果

実験結果の一例を図 8 に示す。これは、N-S・鉛直両方向に振動が発生するように打撃したときの結果である。図 8(a)が N-S 方向、図 8(b)が鉛直方向の時刻歴応答結果であ

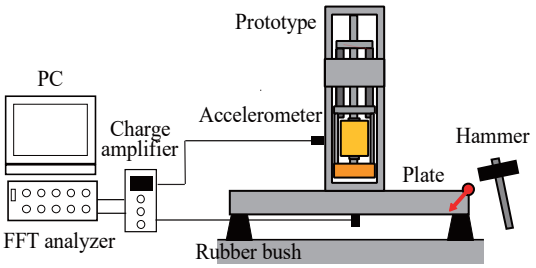
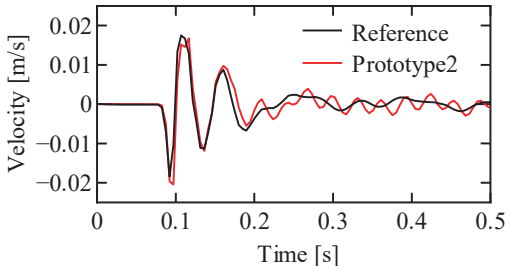
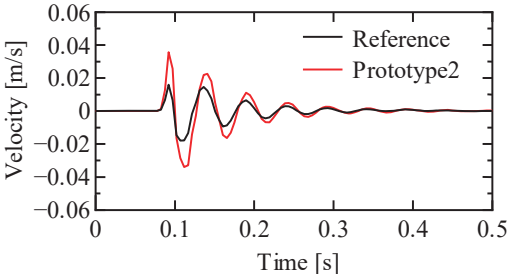


図 7. 打撃加振実験装置.



(a) N-S 方向



(b) 鉛直方向

図 8. 打撃加振実験結果.

り、それぞれ、試作機 2 の結果と参照値を示している。

まず、打撃直後の試作機 2 と参照値の結果を比較すると、水平方向、鉛直方向ともに周期は概ね一致していることがわかる。鉛直方向では、打撃直後で振幅に差違が見られるが、これは参照値の測定点と試作機の測定点の差が原因である考えられる。また、0.2 秒以降の応答を見ると、N-S 方向の結果では微小振動が生じていることがわかる。この原因については、次章で詳細を述べる。

6. 試作機の改良および検証実験

6.1 微小振動の原因調査

まず、水平方向の結果で見られる微小振動の原因調査を行った。発生振動数を調べた結果、図 9 に示すように試作機 2 の速度波形には 31 Hz と 33 Hz の成分が含まれていた。そこで、装置各部について打撃試験による原因調査を行ったところ、図 10 に示すように円錐振り子の打撃実験において打撃加振実験と同様に 30.6 Hz と 32.6 Hz の成分でピークが見られた。また、図 11 に示すように、円錐振り子の 5 箇所を打撃する実験を行い、円錐振り子の固有モードを求めた。その結果、30.6 Hz と 32.6 Hz の固有振動数に対

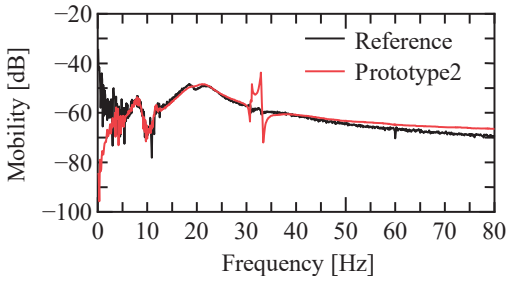


図 9. 打撃加振の周波数応答結果(N-S 方向).

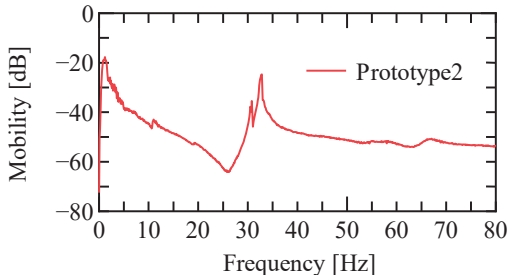
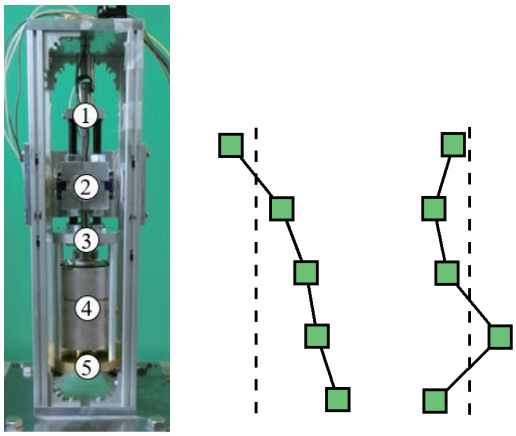


図 10. 円錐振り子に対する打撃試験結果.



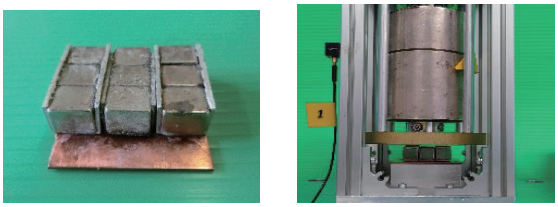
(a) 打撃点　(b) 30.6 Hz　(c) 32.6 Hz

図 11. 円錐振り子の弾性振動モードの測定結果.

応する固有モードが、それぞれ図 11(b)および(c)のように得られた。打撃点④の応答をみると、鉛直センサのおもりと振り子軸との位相差が生じていることがわかる。これは、鉛直センサのおもりを支える非線形ダイヤフラムバネがおもりの水平方向の運動を拘束しているが、その剛性が十分ではなく、30 Hz 付近の共振点において振り子軸に対しておもりの相対変位が生じた結果を示す。このことから、打撃加振実験では、鉛直センサのおもりが水平方向に運動する自由振動が励起されることで水平 2 成分センサの応答にも影響して、微小振動が計測されたものと推察される。また、スイープ加振実験結果でも 34 Hz 付近から誤差が大きくなった原因についても、鉛直センサのおもりの共振が原因であると考えられる。この問題を改善するために、円錐振り子軸に減衰を付加する検討を行った。

6.2 磁気減衰の付加

本来であれば、鉛直センサに直接減衰要素を付加して振動を抑制することが望ましいが、構造上困難であった。そこで、円錐振り子に磁気減衰を付加して振り子自体の振動を抑えることを試みた。磁気減衰は、磁石とアルミニウムや真鍮などの電気導体板が相対運動するときに発生するローレンツ力を利用した機構である[3]。この機構は構造が非常に単純であり限られた空間に設置することができる。試作機の円錐振り子下部にはおもりとしての真鍮製の円板があるため、その下に磁石を設置するだけで減衰を付加できる。

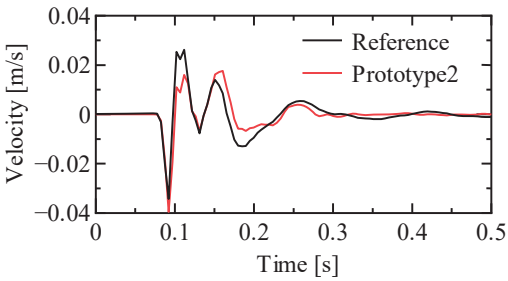


(a) 減衰磁石　(b) 設置位置

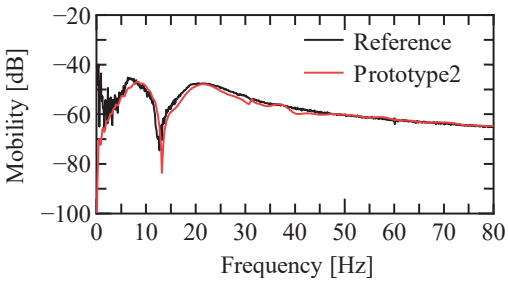
図 12. 磁気減衰の付加.

表 2. 減衰比の測定結果.

磁気減衰	無し	有り
減衰比	0.08	0.4



(a) 時刻歴波形



(b) 周波数応答

図 13. 磁気減衰導入後の打撃加振結果.

図 12(a)に製作した磁気減衰用の磁石を示す。この磁石は、ハルバッハ配列で並べた磁石をアルミ製の溝形鋼にはめ込み、エポキシ系接着剤(アラルダイト)で接着している。この磁石を図 12(b)に示すように、振り子におもりとして取り付けている真鍮円盤の下部にできるだけ近づけて設置した。自由振動実験によって減衰比を調べたところ、表 2 に示すように、減衰比が 5 倍に増加した。

この改良を加えた上で、前章と同様の打撃条件で打撃加振実験を行った。水平方向の結果を図 13 に示す。図 13(a)の時刻歴波形を見ると，図 8(a)で生じていた微小振動が発生していないことがわかる。また、図 13(b)の周波数応答結果においても、30 Hz 付近のピークが完全に表れていないことがわかる。以上より、鉛直センサのおもりの振動は磁気減衰の付加により低減可能であると考えられる。

7. 結言

本研究では、ボアホール内に設置可能な 3 成分一体型の地震計を開発することを目指して、先行研究で開発した 3 成分速度センサを搭載した試作機の改良を行った。得られた結果は以下の通りである。

(1) 円錐振り子の軸の弾性振動の発生を抑制するため、振り子軸の剛性を高める改良を行った。スイープ加振実験を行った結果、水平 2 成分センサでは 30 Hz 付近、鉛直センサでは 45 Hz 付近までは参照値と同等の精度で測定可能となった。

(2) 上記(1)の改良後に打撃加振実験を行った結果、水平方向の応答に約 30 Hz の微小振動が発生した。調査の結果、鉛直センサのおもりが水平方向に運動する自由振動が励起され、水平 2 成分センサの応答にも影響して、微小振動が発生することがわかった。

(3) 上記(2)の対策として、円錐振り子に磁気減衰を付加した結果、微小振動の発生を防ぐことができた。

参考文献

1) 気象庁地震火山部火山課，全国47火山への火山観測施設の整備，験震時報, Vol.77, No.4,, pp.241-262,　2014.
2) 上井雄輝，盆子原康博，上岡野歩，濵畑貴之，寺薗信一, “短周期ボアホール地震計に搭載する 3 成分速度センサの試作”, 宮崎大学工学部紀要, No.51, pp. 107-112, 2022.
3) 背戸一登，磁気減衰を利用した振動制御法，日本機械学会論文集(C 編)56 巻 525 号，pp.1079-1086，1990.

動吸振器による電動サンダーの摩擦振動抑制効果

勝木　広太 a)・盆子原　康博 b)・中野　駿輔 a)・濵畑　貴之 c)

Countermeasure against Frictional Vibration in Electric Sander by Dynamic Absorber

Kota KATSUKI, Yasuhiro BONKOBARA, Shunsuke NAKANO, Takayuki HAMAHATA

Abstract

The symptoms of Raynaud's disease, a hand-arm vibration syndrome, are caused by long-term use of hand-held electric tools or vibrating tools and by excessive exposure to hand-arm vibrations. The purpose of the present research is to develop a passive vibration suppression system using electric tools in order to address the problem of the hand-arm vibration syndrome. We focus on the development of a dynamic absorber for a electric sander used to grind the surface of wood or steel. After measuring and analyzing the vibration in the tools, it was proven that the fiction force acting between tools and work materials is one of the causes of an increase in the tool's vibration. Consequently, the suppression effect of the dynamic absorber on frictional vibration was verified experimentally. As a resuls, it was confirmed that when the dynamic absorber with the natural frequency of 10 Hz or less is installed on the sander, the daily vibration exposure values become lower than 1.0 m/s^2.

Keywords: Self-exited vibration, Vibration control, Dynamic absorber, Hand arm vibration

1.　緒言

ディスクグラインダや電動サンダーなど手持ち電動工具では、使用時に把持部に強い振動が発生し、作業者が手腕に振動ばく露を受ける。このような作業を長年経験すると、末梢循環障害や末梢神経障害などの手腕振動障害を発症する恐れがある [1)]。この障害の発症要因は、主に機械工具から手腕に伝播する振動であり、これをいかに低減するかが重要な課題である。

本研究では、手持ち電動工具に動吸振器などの制振装置を設置して、振動低減化を図ることを目的とする。既報 [2)] では、ディスクグラインダに生じる振動の発生要因を調べるとともに、動吸振器による振動抑制効果について検証した。その結果、砥石ディスクを被削材に接触させた際に、摩擦力の影響で 10Hz 以下の振動が増大することを示した。さらに、摩擦振動の発生振動数に近い固有振動数に設定した動吸振器をディスクグラインダに設置した結果、摩擦振動の発生を防止できることを確認した。さらに、得られた結果を踏まえて摩擦自励振動に対する動吸振器を内蔵した防振ハンドルの開発を行った [3)]。

本報では、先行研究に引き続いて、電動サンダー（以下、サンダーと呼ぶ）を対象として、動吸振器による振動抑制効果について検証する。まず、サンダー使用時に生じる手腕振動の要因が、ディスクグラインダと同じく摩擦振動であることを示す。さらに、サンダーに対して動吸振器を設置して、手腕振動測定実験を実施して動吸振器の有効性を検証するとともに、摩擦振動を抑制するための動吸振器の設計条件について考察する。

a)工学専攻機械・情報系コース大学院生
b)工学科機械知能工学プログラム准教授
c)教育研究支援センター技術職員

2.　手腕振動測定実験

2.1 電動サンダーおよび動吸振器

本実験で使用した電動サンダーは、図 1 に示すミニサンダーと呼ばれる機種である。このサンダーは、主に把持部となる本体部分と、偏心プーリーを介して本体内部のモータに取り付けられた板（パッド）からなる。パッドには紙やすりを取り付けることができ、モータを駆動するとパッドが旋回し、紙やすりの面を被削材に押し当てることで被削材を研磨することができる。

図 2 は、検証実験を行うために製作した動吸振器である。これは、土台に固定した板ばねにおもりを取り付けた単純な構造となっており、加振時にはおもりが横方向に振動する。この動吸振器は、実用的ではないものの、振子のおもりや板ばねを変更したり、おもりの取り付け位置を調整することで、振子の固有振動数を容易に設定することができる。また、土台と板ばねの間にゴムシートなどをはさむことで、減衰を付与することが可能である。具体的な実験条件や、サンダーに動吸振器を設置する方法については後述する。

図 1. 実験で使用した電動サンダー.

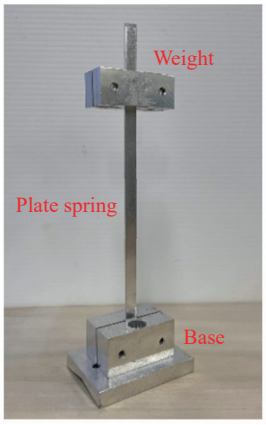


図 2. 製作した動吸振器.

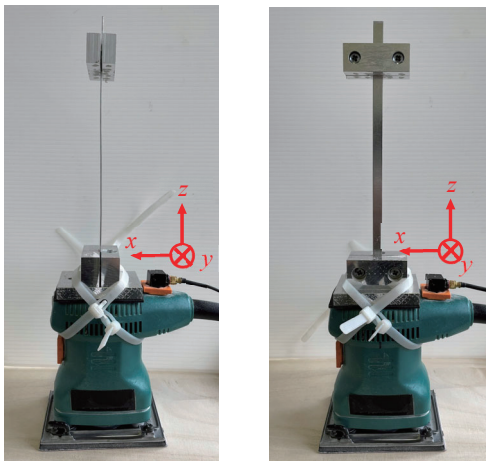
2.2 実験方法

本実験では、サンダーの把持部の振動加速度を測定する手腕振動の測定を行った。図 3 に実験時の様子を示す。実験にあたり、電動サンダーの上部に 3 軸加速度センサを設置した。紙やすりは、粗さが＃120（中目）のものを用いた。被削材には、縦 460 mm、横 550 mm、厚さ 13 mm の桐板を使用し、剛フレームに水平に固定した。体重計は、サンダーを被削材に押し付ける力（押し付け力）を測定するために使用した。

具体的な実験方法は以下の通りである。まず、被験者が体重計に乗り、サンダー本体の胴体部分を横から片手で把持する。サンダーを駆動した後、パッドを被削材に押し付ける。実際の研磨作業では、サンダーを前後左右に動かしながら行うが、本実験ではサンダーの位置を固定した状態で行う。また、押し付け力が 30 N の一定値となるように、被験者が体重計を確認しながら調節する。実際は±3 N 程度の変動が生じた。サンダーが定常状態になった後、3 軸方向の振動加速度信号を測定し、分析する。

サンダーに動吸振器を設置する際は、図 4 に示すように、結束バンドを用いて動吸振器の土台をサンダー本体の上部（把持部）に固定した。このとき、振子の運動方向を x 方向（電源ケーブルのある長手方向）と y 方向の 2 種類に設定した。振子の固有振動数は、3.5 Hz から 230 Hz までの範囲で変動させた。なお、振子に減衰を付与することは行っておらず、減衰比は最大でも 0.07 程度であった。

図 3. 手腕振動測定実験.



(a) x 振子 DA　　(b) y 振子 DA

図 4. 動吸振器の設置方法.

以上のことを考慮して、動吸振器の有無、動吸振器の振動方向、被削材との接触の有無など、実験条件の違いに応じてそれぞれ 3 回ずつ実験を行った。なお、以下の議論では、動吸振器を DA で表し、x 方向に振動する振子を x 振子 DA、y 方向に振動する振子を y 振子 DA と呼ぶ。また、被削材と接触していない状態を空転時、接触させて研磨している状態を接触時と呼び区別する。

2.3 日振動ばく露量 $A(8)$ の測定

手腕振動を定量的に評価するために、国際規格(ISO 5349-1)に基づいて日振動ばく露量 [4]を測定した。まず、把持部に取り付けたセンサにより手腕振動に対して周波数補正された 3 軸方向の振動加速度 a_{hwx}、a_{hwy}、a_{hwz} を測定する。さらに、1/3 オクターブバンド分析を行い、周波数補正振動加速度実効値の 3 軸合成値 a_{hv} を求める。これから、1 日の 8 時間等価振動加速度実効値として、次式により日振動ばく露量 $A(8)$ [m/s^2] を算出する。

$$A(8) = a_{hv} \times \sqrt{\frac{T}{8}} \text{、} \quad a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2} \tag{1}$$

ここで、T [hour] は 1 日当たりの振動ばく露時間であり、最大 2 時間までとなっている。また、日振動ばく露量には、改善対策を実施する目安として限界値 5.0 m/s^2 と対策値 2.5 m/s^2 の 2 種類の基準値が定められている。本報では、振動ばく露時間 $T = 2.0$ hour として手腕振動ばく露量 $A(8)$ を求め、限界値や対策値と比較して手腕振動の大きさを定量的に評価した。なお、使用したサンダーの 3 軸合成値のカタログ値は 4.9 m/s^2 である。

3. 実験結果および考察

3.1 振動の発生要因

サンダーに生じる振動の発生要因について調べるため、動吸振器を設置しない（DA 無し）場合で空転時と接触時とで実験を行った。図 5 は、測定した 3 方向の振動加速度信号に対するパワースペクトルから 3 軸合成値を求めた結果である。

まず、空転時の結果を見ると、モータ回転数である 254 Hz にピークがあり、その 3 軸合成値は 20.1 m/s^2 である。これは、パッドが旋回運動することに伴う、不釣り合い振動が発生したことを示している。また、ピークは小さいものの 120 Hz のピークがある。これは、モータの特性に起因した振動を表している。サンダーには交流整流子モータが使用されており、電源周波数に依存して回転子に作用する磁気吸引力が周期的に変動するために振動が発生し得る。先行研究で取り扱ったディスクグラインダでは、この振動成分が比較的大きかったものの、本実験で使用したサンダーではあまり影響がないようである。

次に、接触時の結果を見ると、モータ回転数であ 233 Hz にピークが表れている。モータの回転数が空転時よりも低くなるのは、押し付けによってパッドに摩擦力が働いたためである。このときの 3 軸合成値は 40.5 m/s^2 となり、空転時の 2 倍程度まで大きくなっている。確認のため、押し付け力を大きくすると、振動加速度はさらに増加した。これは、摩擦力が増大したことによると推察できる。このように、接触時ではパッドと被削材間に作用する摩擦力の影響により、モータ回転数成分の振動が大幅に増大することがわかる。ディスクグラインダの場合でも、接触時に摩擦力の影響で振動が増加することを確認している。ただし、増大した振動はモータ回転数成分ではなく、10 Hz 程度の低い振動数領域の振動であった。この点で、両者に発生する振動の特徴が異なっている。

3.2 動吸振器による振動抑制効果

前節の結果から、接触時に作用する摩擦力によって生じる振動が、手腕振動を増大する要因であることがわかった。そこで、この摩擦振動を抑制するために、サンダーに動吸振器を設置することを試みた。ここでは、動吸振器による振動抑制効果について実験的に検証した。

本実験では、動吸振器(DA）を設置しない場合（DA 無し時)、x 振子 DA を設置した場合、y 振子 DA を設置した場合の 3 種類で、さらに空転時と接触時を組み合わせた 6 種類の条件で、把持部の振動加速度の測定を行った。

まず、DA の有効性について検証するため、DA の固有振動数を変動しながら手腕部の振動加速度を測定した。DA の固有振動数は、おもりや板ばねの変更やおもりの設置位置を設定することにより、10 Hz から 230 Hz の範囲で調節した。初めに、DA の固有振動数を接触時に発生する振動の振動数に近い 230 Hz に設定して実験を行った結果、あまり振動は低減しなかった。さらに固有振動数を下げながら繰り返し実験を行った結果、固有振動数を 10 Hz に設定した場合では、有意な振動抑制効果が表れた。図 6 は、DA 無し時と固有振動数を 10 Hz に設定した y 振子 DA を設置した場合の振動加速度の測定結果である。図中には、図 5 と同様に測定した 3 方向の振動加速度信号に対するパワースペクトルから 3 軸合成値を求めた結果を示している。この結果を見ると、DA 無し時には 3 軸合成値が 40.5 m/s^2 程度の振動が発生したが、DA を設置した場合では 3 軸合成値が 27.7 m/s^2 まで減少した。これは空転時に近い状態である。なお、x 振子 DA を設置した場合も同様の傾向を確認している。この結果から、サンダーに対しても動吸振器による接触時に生じた振動を抑制できることがわかる。

なお、ここでの検討では、振動加速度の 3 軸合成値を用いたが、手腕振動に対しては日振動ばく露量により評価する必要がある。これについては次節で述べる。

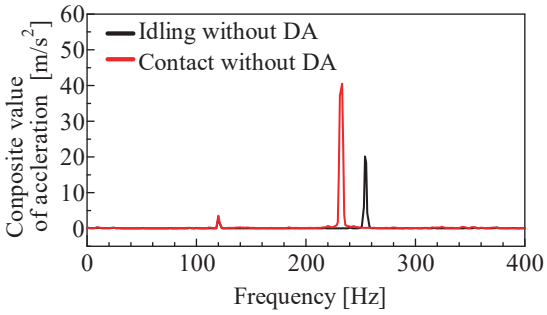


図 5. 振動加速度信号の周波数分析結果.

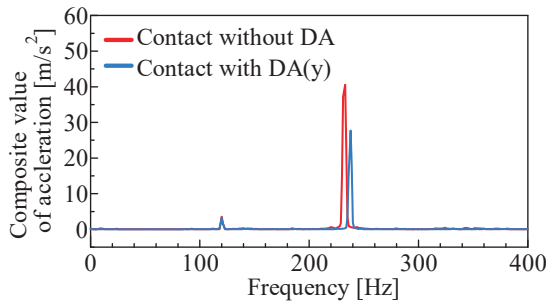


図 6. 振動加速度信号の周波数分析結果.

3.3 日振動ばく露量の測定結果

次に、前節と同様の実験条件で日振動ばく露量 $A(8)$ の測定を行った。ここでは、それぞれの実験条件で 3 回ずつ実験を行い、得られた結果の平均値を求めた。なお、式(1)の 1 日当たりの振動ばく露時間は 2 時間に設定した。

まず、DA を設置しない場合で日振動ばく露量を測定した結果、空転時では $A(8) = 1.09$ m/ s^2 、接触時では $A(8) = 1.74$ m/ s^2 であった。空転時よりも接触時の方が $A(8)$ が大きくなっており、摩擦力の影響が確認できる。この結果では、日振動ばく露量 $A(8)$ が対策値 2.50 m/s^2 以下となっているが、押し付け力を大きくすると $A(8)$ はさらに増加することから、本検討ではこの結果を評価基準として動吸振器の振動抑制効果について検証する。

図 7 および図 8 は、それぞれ x 振子 DA および y 振子 DA の固有振動数を 10 Hz から 230 Hz まで変動させて日振動ばく露量を測定した結果である。図中の横軸は DA の固有振動数であり、縦軸は日振動ばく露量 $A(8)$ をとっている。青色の線と記号は、空転時の結果を示し、赤色の線と記号は接触時の結果を表す。また、DA を設置しない場合の空転時と接触時の結果をそれぞれ、緑色の破線および実線で示している。

まず、図 7 の x 振子 DA を設置した場合の結果を見ると、空転時では DA の固有振動数によらず $A(8)$ が 1.0 m/s^2 以下となっており、DA 無しの結果（緑色破線）よりやや小さくなっている。このことから、サンダーに動吸振器を設置しても、空転時に振動が増加するような影響はないようである。一方、接触時では、DA の固有振動数に応じて $A(8)$ が変化しており、固有振動数が 50 Hz 付近のときでは 2.0 m/s^2 程度まで増えて、DA 無しの接触時の結果（緑色実線）よりも大きな値となっている。また、固有振動数が小さくなると、$A(8)$ が減少しており、固有振動数が 10 Hz にした場合では $A(8) = 0.92$ m/ s^2 であり、DA 無しの空転時と同程度まで $A(8)$ が低減していることがわかる。

次に、図 6 の y 振子 DA を設置した場合の結果を見ると、空転時では、図 5 と同様に、DA の固有振動数によらず DA 無し時の結果よりも小さくなっている。一方、接触時では、固有振動数が 200 Hz 付近のときでは $A(8)$ が 3.0 m/s^2 を超える程度まで増加している。また、固有振動数が小さくなると $A(8)$ が減少しており、固有振動数を 10 Hz にした場合では $A(8) = 1.10$ m/ s^2 であり、x 振子 DA を設置した場合も同様に、良好な振動抑制効果が得られている。

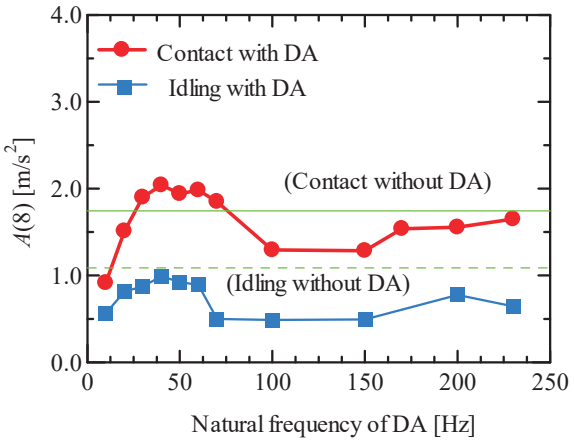


図 7.　x 振子 DA 設置時の日振動ばく露量.

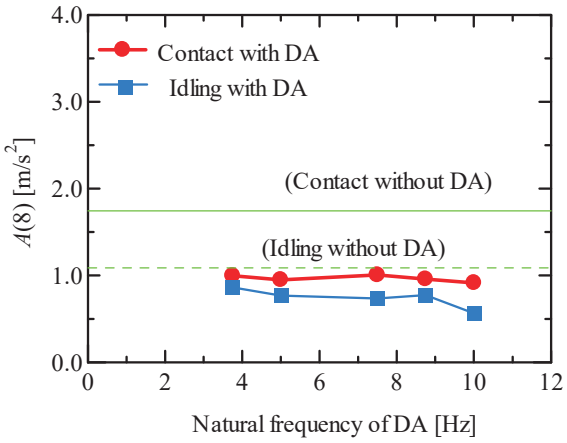


図 9.　x 振子 DA 設置時の日振動ばく露量.

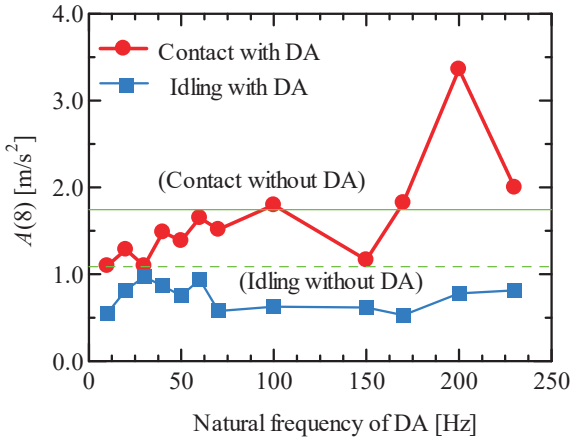


図 8.　y 振子 DA 設置時の日振動ばく露量.

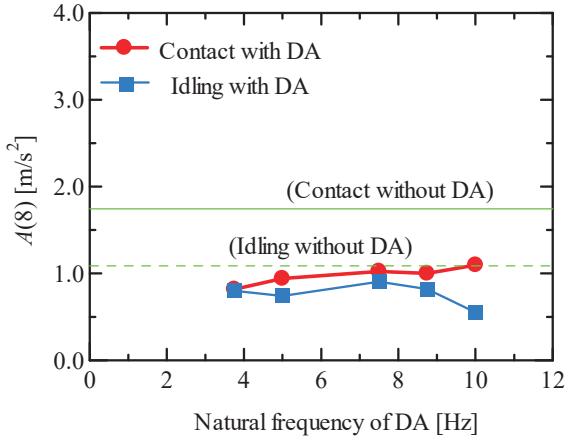


図 10.　y 振子 DA 設置時の日振動ばく露量.

次に、DA の固有振動数をさらに低く設定して、$A(8)$がどのように変化するのかについて調べた。図 9 および図 10 は、振子の固有振動数を 3.5 Hz から 10 Hz まで変動させて日振動ばく露量を測定した結果である。これらの結果を見ると、固有振動数が 10 Hz の場合と比べると、固有振動数をさらに低くしてもあまり変化はないようである。

以上の結果から、サンダーに動吸振器を設置する場合、振子の固有振動数を 10 Hz 以下に設定すれば、接触時に摩擦力に起因した振動の増加を完全に抑制できることが確認された。

4. 結言

本研究では、電動サンダーを対象として、動吸振器による摩擦振動の抑制効果について実験的に検証を行った。得られた結果は次の通りである。

(1) 接触時において、パッドと被削材間に作用する摩擦力の影響により、モータ回転数成分の振動が大幅に増大することを確認した。

(2) 接触時に発生する摩擦振動に対して動吸振器が有効であることを確認した。良好な振動抑制効果を得るには、動吸振器の固有振動数を 10 Hz 以下に設定すればよいことがわかった。

先行研究で取り扱ったディスクグラインダの場合でも、動吸振器の固有振動数を 10 Hz 以下とするとき、摩擦振動の抑制効果が高くなった。2 種類の異なる電動工具で、動吸振器の設計条件が共通であることは興味深い。ただし、摩擦力の影響で発生する振動の振動数帯域が、ディスクグラインダでは 10 Hz 付近であったが、サンダーの場合はモータ回転数であった。今後は、このような現象の差異が生じた原因を解明するとともに、摩擦振動に対する動吸振器の最適設計法を確立することを目指す。

参考文献

1) 柴田延幸, 永田智久, 塩田直樹: アルミ鋳造品製造行程における作業者の手腕振動ばく露の実態，労働安全衛生研究，Vol. 5, No. 2, pp. 79-86, 2012.
2) 松尾洋平, 盆子原康博, 山口剛範, 近藤孝広, 濵畑貴之: ディスクグラインダに生じる振動の発生要因とその低減対策”，Dynamics and Design Conference 2019.
3) 松尾洋平，盆子原康博，宮野俊亮，濵畑貴之，近藤 孝広: 摩擦振動を抑制するためのディスクグラインダ用防振ハンドルの開発，日本機械学会 2020 年年次大会講演論文集，＃S10120，2020.
4) 建設業労働災害防止協会編: 振動工具取扱作業の知識（作業者用テキスト），pp. 36-43, 2010.

フレキシブル継手の２段設置による管内水中音伝播の抑制効果

神谷　陸 a)・盆子原　康博 b)・松尾　理央 a)・楢原　貴之 c)，濵畑　貴之 d)

Suppression Effect of Two Flexible Joints for Underwater Sound Propagation

Riku KAMIYA, Yasuhiro BONKOBARA, Rio MATSUO,
Takayuki NARAHARA,Takayuki HAMAHATA

Abstract

Recently, noise problems often accur in a building that has been repurposed and reused, so-called conversion architecture. One of the causes of this probrem is structure-borne sound in pump piping system. Vibration reduction method that involves installing two flexible joints in series has been found to be useful for countermeasures against structure-borne sound in pump piping system. This technique is very useful compared to the general noise reduction method which installs many vibration isolators in the whole system. However, the effect of reducing sound wave propagation in piping has not been completely explained yet. In this study, the simple apparatus having the straight-line piping is treated, and the reduction of sound wave propagation in piping by installing flexible joints is verified analytically and experimentally. The numerical analysis and experimental results confirm that sound wave propagation in piping is reduced by the difference in sound velocity between the pipe and joint. Furthermore, the length of the joint and between joints is important reducing sound wave propagation in piping.

Keywords:　Noise control, Structure-borne sound, Pump piping system, Flexible joint

1.　緒言

近年、既存の建物を再利用して用途を変更するコンバージョン建築と呼ばれる手法を適用した物件が増えている。その中で、商業施設から居住施設などの静寂性が要求される用途に変更した場合、ポンプ配管系の固体伝搬音に起因する室内騒音問題がしばしば発生する [1]。この問題を抜本的に解決できる実用的な振動抑制技術として、２個の配管用フレキシブル継手を用いる振動抑制法が提案されている [2]。この方法では，ポンプ近傍の配管に２個の継手を直列に設置してポンプと継手間（上流側）の配管系の振動モードを適切に変化させることでポンプから配管系に伝搬する振動を抑制できる. 配管系に防振支持を設置するような一般的な方法と比べて施工範囲が狭く, 作業工程も非常に単純であることが特長である．一方，ポンプ配管系では配管振動と水中音波とが連成しながら伝搬する. このため, 配管振動のみを対象とした対策では固体伝搬音の抑制効果が十分発揮されていない可能性がある.

本研究では、フレキシブル継手の２段設置法の更なる性能向上を図るために、配管振動と水中音波とを同時に抑制するためのフレキシブル継手の最適設置法の確立を目指している。そのための一検討として、直立した直線状配管の下部にゴム膜と取り付けた上で水を充填し、下端のゴム膜を慣性加振器で振動させて水中音を伝播させる実験装置を製作した。この装置を対象として、フレキシブル継手の２段設置による水中音伝播の抑制効果について実験と数値解析の両面から検討を行った。

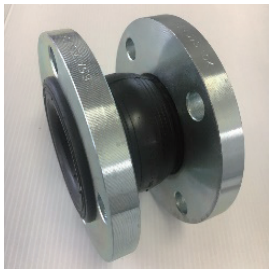
a)工学専攻機械・情報系コース大学院生
b)機械知能工学プログラム准教授
c)工学部機械設計システム工学科卒
d)教育研究支援センター技術職員

2.　実験による検討

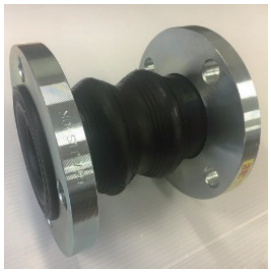
2.1 実験装置

図 1(a)に示した直線状配管を対象として水中音伝播に関する実験を行った。使用した配管は、呼び径 65A の炭素鋼鋼管であり、全長はおよそ 1.8 m である。フレキシブル継手には、図 1(b)に示すように、長さの異なる 2 種類の配管用防振ゴム継手（以下、継手と呼ぶ）を用いた．配管の下端は、フランジで厚さ 3 mm のゴム膜を張って密封しており、その管内に上端から 0.1 m のところまで水を投入する。図 2 に示すように、ゴム膜の下には小型加振器（Modal shop 社製、Model2002E）を設置しており、配管の下端付近（a 点）と上端付近（b 点）には、水中マイク（アコー社製、TYPE7800）を設置している。また、第 2

(a) 直線状配管



(b) フレキシブル接手 (Shot type)



(c) フレキシブル接手 (Long type)

図 1. 実験装置.

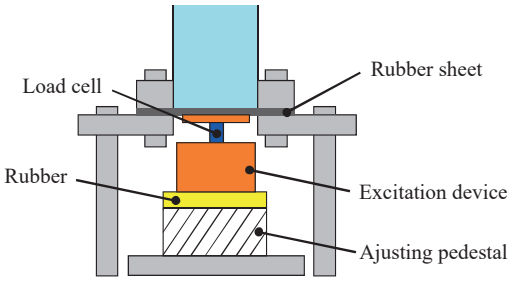


図 2. 加振機を利用した水中音発生機構.

継手よりも左側の配管を上流側配管、第 1 継手よりも右側の配管を下流側配管と呼ぶ。

2.2 実験方法

本検討では、継手の設置数や長さの違いが水中音伝播に及ぼす影響について調べることが目的である。このため、図 3 に示すように、継手を設置していない継手なしモデル（NJ）、継手を 1 個設置している 1 段設置（SJ）、長さが同じ継手を 2 個設置している 2 段設置モデル（DJ1）、長さが異なる継手を 2 個設置している 2 段設置モデル（DJ2）の 4 種類についてそれぞれ実験を行った。

実験方法は以下の通りである。まず、任意波形発生器（IWATSU 社製、SG-4321）により、加振器に正弦波信号を入力する。そして加振器で、ゴム膜を加振して管内に水中音を発生させる。このときの水中の音圧を上下端の水中マイクで計測する。このとき、下端の音圧振幅 A_a と上端

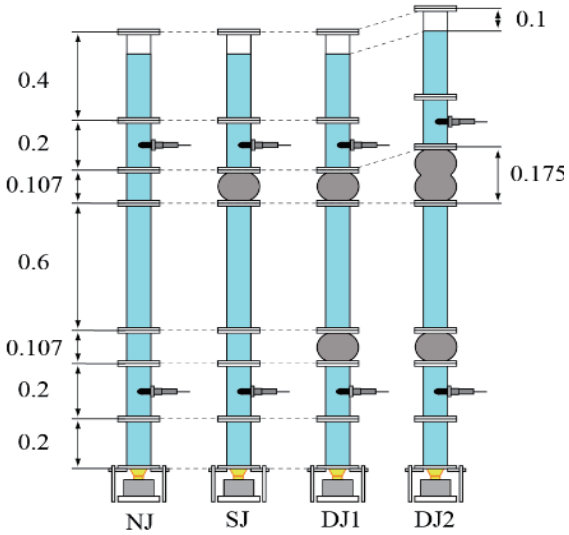


図 3. 実験モデル.

の音圧振幅 A_b から、音響透過損失 TL （以下、透過損失と呼ぶ）が次式により求められる。

$$TL = 20\log\left|\frac{A_a}{A_b}\right| \ [\mathrm{dB}] \qquad (1)$$

ここで、透過損失とは、透過範囲に入射する音のエネルギーと透過する音のエネルギーの比を表す。透過損失が大きいほど、水中音伝播を抑制していることを意味する。本実験では、加振力の振幅は一定の状態で、加振振動数を 100 Hz から 800 Hz までに変動させて、音圧を測定して透過損失を求めた。

3. 数値計算による検討

3.1 解析モデル

実験結果の妥当性について検証するために、直線状配管内水中音の音圧を解析的に求める。解析にあたり、管内を伝播する音波は管の軸方向だけに伝播する平面波とみなす。図 4 に解析モデルを示す。図 4(a)は継手を単段設置したときのモデル(SJ)であり、図 4(b)は 2 段設置したときのモデル(DJ1、DJ2)である。それぞれのモデルは左側から順に類別番号を付しており、要素 1、要素 3、要素 5 が配管に相当し、要素 2、要素 4 が継手に相当する。図 4 では，モデルを横向きに表記しているが、要素 1 のある左側が実験装置の下側に対応している。管内は水で満たされており、左端には音波の発生原があるのもとする。それぞれの右端の配管（SJ では要素 3、DJ1 および DJ2 では要素 5）は無限遠とする。その他、要素 r の長さを l_r とする．なお、簡単化のために、配管と継手の断面積は等しいものとして近似して取り扱う。

配管における波数を $k_p = 2\pi f / c_p$，継手における波数を $k_j = 2\pi f / c_j$ とする．ここに、f は音波の周波数であり、c_p および c_j は配管および継手における流体音速である。

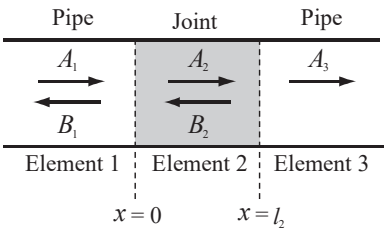


図 4.　単段設置時の解析モデル.

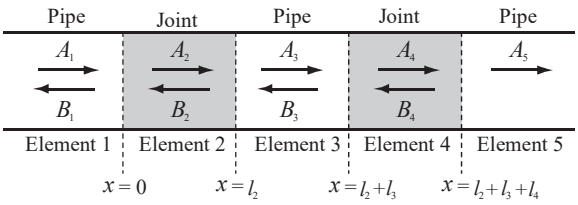


図 5.　2 段設置時の解析モデル.

3.2 管内流体の音速

管内が密度一定であるとすると、要素 r における管内流体音速 c_r は次式のように求められる。

$$c_r = c_0\sqrt{\frac{1}{1+(KD_r)/(E_r h_r)}} \tag{2}$$

ここに、c_0 は流体音速（1500 m/s）、K は体積膨張率（ρc_0^2）、E_r は縦弾性係数、h_r は肉厚、D_r は直径である。式(2)より管内の音速は、管の直径、肉厚、剛性によって変化することがわかる。とくに、配管と継手では管壁の剛性に大きな差異があるので、音速にも大きな差異が生じることになる。したがって、配管と継手のインピーダンス $Z_r = \rho c_r$ も異なる。このように、配管と継手で音響特性が異なることで、配管と継手の境界で反射波が生じ、エネルギーが損失されると考えられる。

3.3 音響透過損失の導出

図 4 および図 5 に示すように, 要素 2 の左端を原点とする座標 x をとる。このとき、要素 r 内の音圧 $p_r(x,t)$ と粒子速度 $u_r(x,t)$ に関する波動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial^2 p_r}{\partial t^2} = c_r^2 \frac{\partial^2 p_r}{\partial x^2} \tag{3}$$

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = c_r^2 \frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} \tag{4}$$

両式の解は次式のように求められる.

$$p_r(x,t) = i\rho\omega(A_r e^{i\omega t}e^{-ik_r x} + B_r e^{i\omega t}e^{ik_r x}) \tag{5}$$

$$u_r(x,t) = ik_r(A_r e^{i\omega t}e^{-ik_r x} - B_r e^{i\omega t}e^{ik_r x}) \tag{6}$$

ここに、A_r は前進波の振幅、B_r は後退波の振幅、k_r は波数（$k_1 = k_3 = k_5 = k_\mathrm{p}$, $k_2 = k_4 = k_\mathrm{j}$）、ω は音波の角周波数、ρ は流体の密度である。

各要素間の境界条件を式(5)および(6)に代入して、振幅 A_r, B_r について解くと、透過損失 TL が求められる。導出過程の詳細は省略するが、単段設置モデルの場合、要素 1 から要素 3 に伝播する音波の透過損失 TL は次式のように求めることができる。

$$\left.\begin{aligned} TL &= 20\log\left|\frac{A_1}{A_3}\right| = 10\log(T_{\mathrm{S1}}^2 + T_{\mathrm{S2}}^2) \\ T_{\mathrm{S1}} &= \cos k_\mathrm{j} l_2,\quad T_{\mathrm{S2}} = \frac{1}{2}\left(m+\frac{1}{m}\right)\sin k_\mathrm{j} l_2 \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

ここに、$m = c_\mathrm{p} / c_\mathrm{j}$ は音速比である。

同様にして、2 段設置モデルの場合、要素 1 から要素 5 に伝播する音波の透過損失 TL は次式のように求めることができる。

$$\left.\begin{aligned} TL &= 20\log\left|\frac{A_1}{A_5}\right| = 10\log(T_{\mathrm{D1}}^2 + T_{\mathrm{D2}}^2) \\ T_{\mathrm{D1}} &= \cos k_\mathrm{j} l_2 \cos k_\mathrm{p} l_3 \cos k_\mathrm{j} l_4 \\ &\quad - \sin k_\mathrm{j} l_2 \cos k_\mathrm{p} l_3 \sin k_\mathrm{j} l_4 \\ &\quad - \frac{1}{2}\left(m+\frac{1}{m}\right)\cos k_\mathrm{j} l_2 \sin k_\mathrm{p} l_3 \sin k_\mathrm{j} l_4 \\ &\quad - \frac{1}{2}\left(m+\frac{1}{m}\right)\sin k_\mathrm{j} l_2 \sin k_\mathrm{p} l_3 \cos k_\mathrm{j} l_4 \\ T_{\mathrm{D2}} &= \cos k_\mathrm{j} l_2 \sin k_\mathrm{p} l_3 \cos k_\mathrm{j} l_4 \\ &\quad - \frac{1}{2}\left(m^2+\frac{1}{m^2}\right)\sin k_\mathrm{j} l_2 \sin k_\mathrm{p} l_3 \sin k_\mathrm{j} l_4 \\ &\quad + \frac{1}{2}\left(m+\frac{1}{m}\right)\cos k_\mathrm{j} l_2 \cos k_\mathrm{p} l_3 \sin k_\mathrm{j} l_4 \\ &\quad - \frac{1}{2}\left(m+\frac{1}{m}\right)\sin k_\mathrm{j} l_2 \cos k_\mathrm{p} l_3 \cos k_\mathrm{j} l_4 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

4.　実験結果と計算結果の比較

図 3 に示した 4 種類のモデルに対して実験および数値計算を行い比較した。表 1 に実験と解析で用いたパラメータを示す。数値計算で用いる配管内の音速については実験による同定が困難であったため、1500 m/s とした。継手内の音速については、予備実験より 107 m/s とした。実験については 3 回ずつ行い平均をとった。

まず、図 6 に示した数値計算結果について考察する。図中の縦軸は透過損失であり、横軸は周波数である。図中の記号では、水色が NJ モデル、オレンジ色が SJ モデル、青色が DJ1 モデル、黄色が DJ2 モデルの結果を示す。この結果を見ると、NJ よりも SJ の方が透過損失は大きくなっており、継手の水中伝播音の抑制効果が確認できる。また、500 Hz 付近において、透過損失が急減し悪化してい

るが、これは継手が共鳴することに起因する。また、DJ1では、SJ よりもさらに透過損失が大きくなっており、継手の 2 段設置の水中音伝播の抑制効果が高いことがわかる。ただし、DJ1 でも継手の共鳴周波数帯域において透過損失が悪化している。これに対して、異なる長さの継手を設置した DJ2 では、継手の共鳴周波数帯域においても、透過損失の増加が確認できる。このように、異なる長さの継手を２段に設置することで、水中音伝播の抑制効果が大域的に得られることがわかる。

次に、図 7 の実験結果と図 6 の計算結果を比較する。図 7 の表記方法は、図 6 と同様である。両者の結果を比較すると、透過損失の大きさは、どちらも NJ、SJ、DJ1、DJ2 の順で大きな値をとっている。また、継手の共鳴周波数である 500 Hz 付近で透過損失が小さくなるなど、400Hz 以上の周波数帯域では計算結果と実験結果の特徴がある程度類似した傾向となっている。しかしながら、透過損失の値が、計算結果では最大 40 dB の低減効果があるのに対して、実験結果では、10 dB 程度しか得られていない。この原因としては、管内の水中に気泡が含まれるため、配管内の音速が 1500 m/s よりもかなり小さい値をとっている可能性があると考えられる。

5. 結言

本研究では、直線状配管モデルを対象として、フレキシブル継手の２段設置による水中音伝播の抑制効果について実験と数値解析の両面から検討を行った。得られた結果は、以下の通りである。

(1) 実験結果と数値計算結果は、定性的な特徴は概ね一致した。その上で、長さの異なる 2 個の継手を設置した場合、最も良好な水中音伝播の抑制効果が確認された。

(2) 実験結果では、計算結果よりも抑制効果が小さくなった。この原因は、水中内に気泡が存在することにより配管内と継手内の音速の差が小さくなったことによると考えられる。

参考文献

1) 日本騒音制御工学会編: 建設設備の騒音対策 2（配管系の騒音対策）, 1999, 技報堂.

2) 盆子原康博, 近藤孝広, 白木秀児, 坂本裕一郎: フレキシブル継手と剛体円板を用いたポンプ配管系の振動低減対策（直線状配管を対象とした検討）, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.769, pp.2232-2239, 2010.

表 1. 系パラメータ.

	Pipe	Joint
Outside diameter [m]	0.0763	0.1
Inside diameter [m]	0.0679	0.064
Thickness [m]	0.0042	0.018
Mass density [kg/m^3]	7800	5810
Young'smodulus [Pa]	210×10^9	10.6×10^6

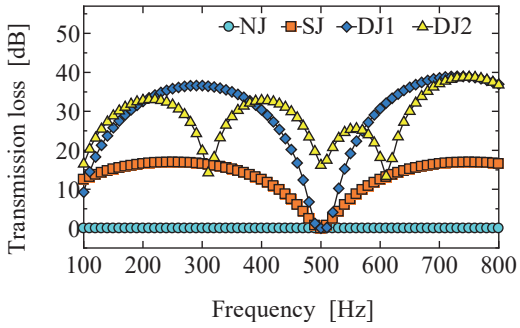


図 6. 音響透過損失の数値計算結果.

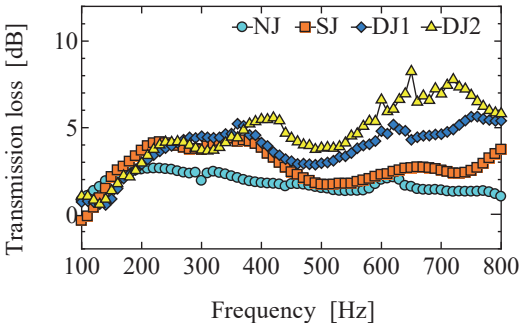


図 7. 音響透過損失の実験結果.

テスト駆動開発における実装工程の継続的な支援を目的としたフレームワークの提案

宮下　丈明 a)・片山　徹郎 b)

Proposal of a Framework for Continuous Support of the Implementation Step in TDD

Takeaki MIYASHITA, Tetsuro KATAYAMA

Abstract

TDD is a development methodology that brings us closer to better implementation and testing by repeating a series of steps: test design, implementation that satisfies the tests, and refactoring. In TDD, tests are executed too often, which is expected to improve software quality and find bugs early. On the other hand, one of the disadvantages of TDD is that too much time is wasted when test failures are repeated. This paper proposes a framework aimed at supporting the implementation steps in TDD. The proposed framework generates source code that passes tests while retaining refactoring by the developer. The prototyped framework reduced the time required for the implementation process by 94.22% and the generation time by 66.17% compared to manual work.

Keywords: TDD, Boundary Value Analysis, syntax analysis, automatic generation

1. はじめに

近年、ソフトウェアの活用範囲の拡大と複雑化に伴い、ソフトウェア品質と開発効率の重要性が注目されている[1)]。

ソフトウェア品質を高めるためのソフトウェア開発手法の 1 つに、テスト駆動開発（TDD）がある。TDD において開発者は、既存のソースコードではパスできないテストの設計、テストをパスする最低限のソースコードの実装、実装したソースコードのリファクタリング、の一連の工程を繰り返すことで、テストケースと実装をより良いものにしていく。TDD では、テストが頻繁に実行されるため、ソフトウェア品質の向上やバグの早期発見が見込める。一方、TDD のデメリットとして、テストの失敗が繰り返された場合に、時間を浪費しすぎることがある[2)]。

近年、ソフトウェアの開発効率の向上を目的として、UML や自然言語からソースコードを自動生成する研究が多く報告されている[3,4)]。これらの研究は、実装時間の短縮が期待できる。しかし、これらの研究の多くは一回限りの生成にのみ焦点を当てており、継続的な開発やリファクタリングを対象としていない。

本研究では、TDD における実装工程を継続的に支援することを目的としたフレームワークを提案する。提案するフレームワークは、テストコードによるテストにパスできない元のソースコードを、テストにパスするように修正することによって、新しいソースコードを自動的に生成する。また、生成したソースコードに対するリファクタリングを保持し、次の開発サイクルに反映することによって、継続的な開発に対応する。

a)工学専攻機械・情報系コース大学院生

b)工学教育研究部教授

2. 提案するフレームワーク

本章では、提案するフレームワークの構造と振舞いを紹介する。フレームワークの構造を図 1 に、フレームワークの振舞いを図 2 に、それぞれ示す。図 2 は、各サイクルにおけるフレームワークの振舞いを示しており、赤はテストコード、青は開発者によるリファクタリング、緑はフレームワークの振舞いを表す。

提案するフレームワークは、テストコードと、テストコードによるテストにパスできないソースコード S_{old} を入力とし、テストにパスできるソースコード S_{gen} を生成する。その後、1 つ前のサイクルにおけるリファクタリングを S_{gen} に統合することで、テストにパスし、かつ、1 つ前のサイクルにおけるリファクタリングを保持したソースコード S_{new} を出力する。その後、開発者は、S_{new} のレビューとリファクタリングを行い、次のサイクルに移る。

以降、図 1 に示す 5 つの処理部について、それぞれの振舞いを説明する。

2.1 テストコード解析部

テストコード解析部は、入力されたテストコードを解析し、各テストケースについて、テストケースデータを抽出する。テストケースデータは、テスト対象のクラス名とメンバ関数名、テスト対象のメンバ関数に与える引数、与えられた引数に対するテスト対象の関数の期待出力の 4 つの要素で構成する。テストコード解析部の振舞いを以下に示す。

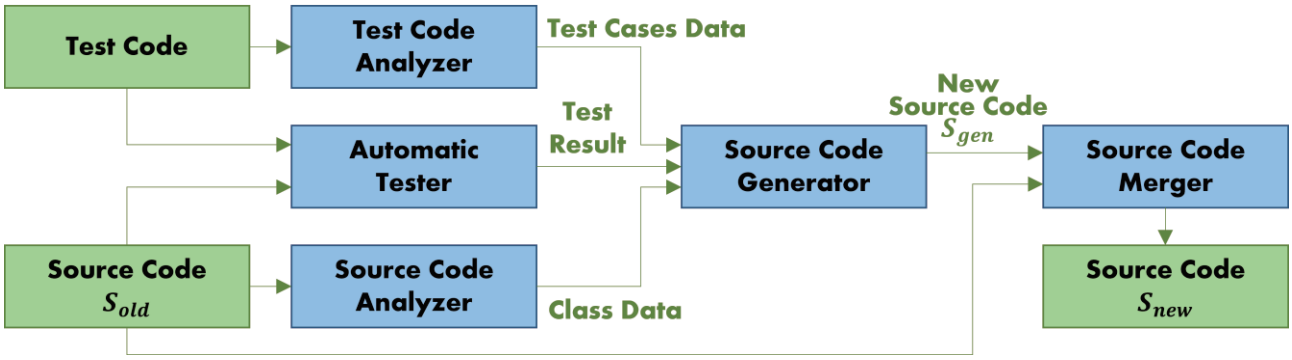


図 1. 提案するフレームワークの構造.

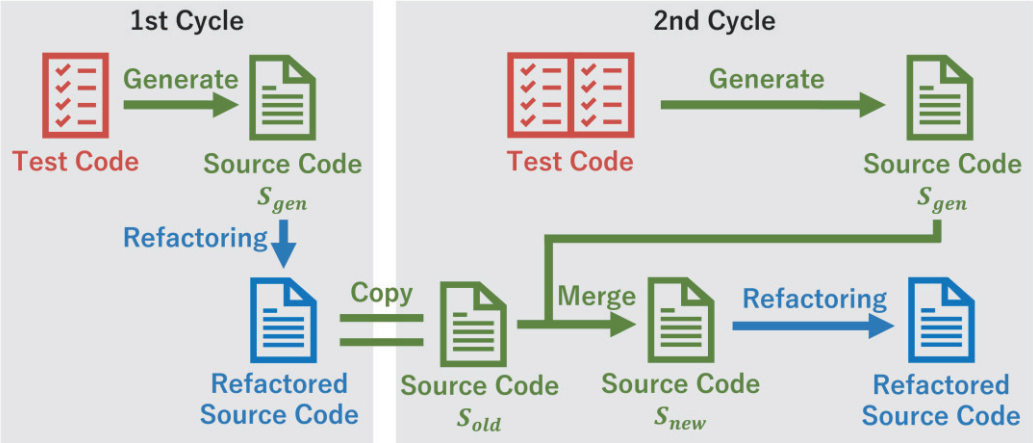


図 2. 提案するフレームワークの振舞い.

1. テストコード解析部は、テストコードを解析し、抽象構文木を生成する。
2. 生成した抽象構文木からアサーションを探索し、アサーションを含む関数を特定する。
3. 関数内の各変数から型と値を抽出し、変数テーブルを作成する。値は、リテラル値か、関数と関数に与えられた引数の値の組を意味する。変数に関数呼び出しの戻り値が代入されている場合は、関数と関数に与えられた引数の値の組を変数の値として変数テーブルに記録する。
4. アサーションで使用される値については、変数テーブルから型と値を取得する。値が関数と引数の組である場合、その関数をテストケースの対象として扱う。
5. 抽出したテストケースデータをソースコード生成部（2.4 節に後述）に渡す。

2.2 ソースコード解析部

ソースコード解析部は、既存のソースコード S_{old} を解析し、クラスデータを抽出する。具体的には、構文解析を行い、メンバ関数の引数の名前と型を抽出する。このクラスデータは、ソースコード生成部（2.4 節に後述）に渡す。ソースコード S_{old} が存在しない場合、ソースコード解析部はデータを渡さない。

2.3 自動テスト部

自動テスト部は、自動的にテストを実行し、テスト結果から失敗したテストケースのデータを抽出する。具体的には、テストケースの名前と、テストケースの対象となるメンバ関数の名前である。また、テスト実行時のエラーやテスト前のコンパイルエラーが発生した場合、エラーメッセージを記録する。抽出したテストケースデータと記録したエラーメッセージは、ソースコード生成部（2.4 節で後述）に渡す。既存のソースコードがすべてのテストをパスした場合は、空のテストケースデータをソースコード生成部に渡す。

2.4 ソースコード生成部

ソースコード生成部は、テストコード解析部、ソースコード解析部、自動テスト部から受け取ったデータをもとに、テストケースを満たすソースコード S_{gen} を生成する。ソースコード生成器は、既存のソースコード S_{old} がテストにパスできなかった場合にのみ動作する。ソースコード S_{old} がテストをパスし、自動テスト部からの失敗したテストケースデータが空だった場合は、処理を終了する。

2.4.1 入力データの統合

ソースコード生成部は、テストコード解析部から受け取ったテストケースデータのうち、自動テスト部から受け取った失敗したテストケースデータの関数名と一致するテストケースを抽出する。また、失敗したテストケースの関数を対象とするテストケースデータも同様に抽出する。ソースコード解析部から受信したクラスデータに、失敗したテストケースの対象となる関数を持つクラスのデータがある場合、このクラスデータを抽出する。

2.4.2 境界値分析に基づく期待出力の推定

ソースコード生成部は、テストケースが作成されていない入力に対する期待出力を、境界値分析をもとに推定する。境界値分析は、境界値を中心としたテストケースを使用するテスト設計手法である[5]。テストケースが境界値分析に基づいて設計されている場合、出力が異なる境界値前後の引数についてのテストケースが存在する。テストケースが作られていない引数やメンバ変数による期待出力は、引数やメンバ変数の値が近いテストケースの期待出力と同じ値である可能性が高いと考えられる。ソースコード生成部は、抽出したテストケースデータの引数やメンバ変数をもとにテストケースをソートする。テストケースがない入力に対する期待出力は、入力の値が近いテストケースの期待出力と同じ値を用いる。

2.4.3 テストケースを満たすソースコード生成

ソースコード生成部は、クラス、メンバ変数、メンバ関数、if ブロックの 4 種の中間データを生成する。そして、それらのデータを再帰的にソースコードに変換する。

クラスの中間データは、クラス名、メンバ変数の中間データ、メンバ関数の中間データを持つ。クラス名は、2.4.1 節で抽出したテストケースデータから参照する。メンバ変数の中間データは、2.4.1 節で抽出したクラスデータから取得した変数名と型を持つ。メンバ関数の中間データは、関数名、戻り値の型、複数の if ブロックの中間データを持つ。関数名と戻り値の型は、2.4.1 節で抽出したテストケースデータから参照する。if ブロックの中間データは、2.4.2 節で求めた境界値を条件式とする if 文と、期待出力を戻り値とする return 文を持つ。

ソースコード生成部は、クラスの中間データを再帰的にソースコードに変換することで、テストケースを満たすソースコード S_{gen} を生成する。生成したソースコード S_{gen} は、ソースコード統合部（2.5 節に後述）に渡す。

2.5 ソースコード統合部

ソースコード統合部は、前サイクルのリファクタリングデータとソースコード生成部で生成したソースコード S_{gen} を統合し、既存のソースコードを上書きする。

2.5.1 リファクタリングデータの統合

ソースコード統合部は、ソースコード生成部で生成したソースコード S_{gen} に既存のソースコード S_{old} を統合し、テストをパスできる、かつ、S_{old} が持つリファクタリングデータを含む新しいソースコード S_{new} を生成する。

ソースコード統合部は、まず S_{gen} と S_{old} を統合したソースコード S_{merge} を生成する。テストケースの追加によるソースコード S_{gen} の変更部分と、リファクタリングにより変更された S_{old} の変更部分とが重なっている場合、ソースコード統合部は、S_{old} を優先して統合したソースコード $S_{ahead\ old}$ と、S_{gen} を優先して統合したソースコード $S_{ahead\ gen}$ を生成する。そして、S_{merge}、$S_{ahead\ old}$、$S_{ahead\ gen}$ を順にテストし、テストにパスできたものを新しいソースコード S_{new} とする。すべてのソースコードがテストにパスできない場合は、正しくソースコードを生成できないことを開発者に通知し、処理を終了する。

2.5.2 レビューとリファクタリングの要求

ソースコード統合部は、開発者に S_{new} のレビューとリファクタリングを要求する。開発者から承認を受けた後、ソースコード統合部は既存のソースコードをリファクタリングされた S_{new} で上書きする。

3. 適用例

提案したフレームワークが正しく機能することを、フレームワークを試作し確認する。フレームワークは Python で試作し、対象とするソースコードは C++とした。構文解析には Antlr（ANother Tool for Language Recognition）[6]を、テストには Google C++ Testing Framework を使用した[7]。ソースコードは、ヘッダーファイルとソースコードファイルの 2 つのファイルを生成する。

3.1 境界値分析に基づくテストケースに対するソースコード生成

提案したフレームワークが正しくソースコードを生成できることを確認するために、試作したフレームワークにテストコードを入力し、ソースコードを生成した。試作したフレームワークに入力したテストコードを、リスト 1 に示す。 リスト 1 に示すテストコードから生成したソースコードのうち、ヘッダーファイルをリスト 2 に、ソースコードファイルをリスト 3 に示す。入力したテストコードは、FeeCalculator クラスのメンバ関数 getFee() に対する境界値テストである。関数 getFee()は、年齢を整数型の引数として受け取り、0～17 歳は 500、18～60 歳は 800、61～120 歳は 500、それ以外の値は-1 を返す。

リスト 1 に示すソースコードを入力として生成したソースコードは、すべてのテストケースをパスした。また、リスト 3 から、生成した条件分岐の範囲が妥当であることが確認できる。

リスト 1. テストコードの例

```
#include "gtest/gtest.h"
#include "FeeCalculator.h"
namespace foolish_coder{
	TEST(CalcFeeTest, CalcFeeTestCaseYoungestChild){
		FeeCalculator fee_calculator;
		EXPECT_EQ(fee_calculator.calcFee(0), 500);
	}
	TEST(CalcFeeTest, CalcFeeTestCaseOldestChild){
		FeeCalculator fee_calculator;
		EXPECT_EQ(fee_calculator.calcFee(17), 500);
	}
	TEST(CalcFeeTest, CalcFeeTestCaseYoungestAdult){
		FeeCalculator fee_calculator;
		EXPECT_EQ(fee_calculator.calcFee(18), 800);
	}
	TEST(CalcFeeTest, CalcFeeTestCaseOldestAdult){
		FeeCalculator fee_calculator;
		EXPECT_EQ(fee_calculator.calcFee(60), 800);
	}
	TEST(CalcFeeTest, CalcFeeTestCaseYoungestOld){
		FeeCalculator fee_calculator;
		EXPECT_EQ(fee_calculator.calcFee(61), 500);
	}
	TEST(CalcFeeTest, CalcFeeTestCaseOldestOld){
		FeeCalculator fee_calculator;
		EXPECT_EQ(fee_calculator.calcFee(120), 500);
	}
	TEST(CalcFeeTest, CalcFeeTestCaseTooYoung){
		FeeCalculator fee_calculator;
		EXPECT_EQ(fee_calculator.calcFee(-1), -1);
	}
	TEST(CalcFeeTest, CalcFeeTestCaseTooOld){
		FeeCalculator fee_calculator;
		EXPECT_EQ(fee_calculator.calcFee(121), -1);
	}
}
```

リスト 2. リスト 1 から生成したヘッダーファイル

```
#ifndef FEE_CALCULATOR_H
#define FEE_CALCULATOR_H
class FeeCalculator{
	public:
		int calcFee(int param1);
};
#endif
```

リスト 3. リスト 1 から生成したソースコード

```
#include "FeeCalculator.h"
int FeeCalculator::calcFee(int param1){
	if(param1 <= -1 || 121 <= param1){
		return -1;
	} else if((0 <= param1 && param1 <= 17) || (61 <= param1 && param1 <= 120)){
		return 500;
	} else if((18 <= param1 && param1 <= 60)){
		return 800;
	}
}
```

3.2 次サイクルにおけるリファクタリングの保持

提案したフレームワークが前サイクルにおけるリファクタリングを保持することを確認するために、3.1 節で生成したソースコードに対してリファクタリングを行い、次のサイクルにおけるソースコード生成の際にリファクタリングを保持できるかを確認した。リスト 3 に示したソースコードに対して、以下のリファクタリングを行った。

リスト 4. リファクタリングを保持したままリスト 3 を拡張したソースコード

```
#include "FeeCalculator.h"
int FeeCalculator::calcFee(int age){
	if((0 <= age && age <= 17)){
		return 0;
	} else if((18 <= age && age <= 60)){
		return 800;
	} else if((61 <= age && age <= 120)){
		return 500;
	}
	return -1;
}
```

- -1 を返す条件式を削除し、関数の末尾に「return -1;」を追加する。
- 引数名を param1 から age に変更する。

次に、0～17 歳は 0 を返すようにテストケースを拡張し、再度ソースコードを生成した。生成したソースコードをリスト 4 に示す。このソースコードは、拡張後のすべてのテストケースをパスした。また、リスト 4 の緑字で示すように、引数名の変更と-1 を返す処理の変更についてのリファクタリングを保持してソースコードを拡張できたことが確認できる。

4. 評価

提案するフレームワークの有用性を評価するために、TDD における実装工程に要する時間を、手作業と提案フレームワークを用いた場合とで比較した。

実験に参加した被験者は、大学院生 4 名と学部 4 年生 2 名の計 6 名である。彼らは TDD を使って 2 つのタスクを解決する。半数は 2 つのタスクのうち 1 つ目のタスクにのみフレームワークを使用し、もう半数は 2 つのタスクのうち 2 つ目のタスクにのみフレームワークを使用した。

各タスクの内容を、以下に示す。

1. FeeCalculator クラスのメンバ関数 calcFee()を実装する。関数 calcFee()は、ユーザの年齢を整数引数として受け取り、0~17 歳は 100、18~60 歳は 500、61~120 歳は 200、それ以外は-1 を返す。
2. DatePicker クラスのメンバ関数 getLastDayMonth()を実装する。関数 getLastDayMonth()は、引数として月を整数で受け取り、1 月、3 月、5 月、7 月、8 月、10 月、12 月は 31、4 月、6 月、9 月、11 月は 30、2 月は 28、それ以外は 0 を返す。

実験は、4 つのステップで行った。各ステップの内容を、以下に示す。

1. 既存のソースコードでは通過できないテストケースを 1 つ作る。
2. テストにパスできるソースコードを、手動またはフレームワークを使用して実装する。
3. 生成されたコードをレビューし、必要に応じてリファクタリングする。

表 1. テストケース 1 つあたりの作業時間

タスク	工程	手作業	提案する フレームワーク
T1	実装時間	3m25s	**14s**
	リファクタリング時間	50s	50s
	総時間	5m4s	**1m54s**
T2	実装時間	3m31s	**11s**
	リファクタリング時間	**7s**	40s
	総時間	4m26s	**1m19s**
平均	実装時間	3m28s	**12s**
	リファクタリング時間	**29s**	45s
	総時間	4m45s	**1m36s**

4. 課題が完了したと被験者が判断するまで、ステップ 1～3 を繰り返す。

1 つのテストケースあたりの平均時間について、ステップ 2 にかかる時間を実装時間、ステップ 3 にかかる時間をリファクタリング時間、ステップ 1～3 にかかる時間を総時間とし、それぞれ計測した。実験で作業時間を計測した結果を、表 1 に示す。

表 1 より、提案したフレームワークにより、TDD における 1 つのテストケースに対する実装時間を 3m16s（94.22%）短縮したことがわかる。一方で、リファクタリング時間は 16s 長くなった。原因は、フレームワークが自動生成したソースコードのレビューにかかる時間である。しかし、総時間として、3m9s(66.17%)を短縮できた。したがって、提案フレームワークは、TDD における実装工程の効率化に有用である。

また、提案したフレームワークは、被験者による引数名に対するリファクタリングを保持したソースコードを生成した。

以上のことから、本論文で提案したフレームワークは、TDD における実装工程の継続的な支援に有用であるといえる。

5. おわりに

本研究では、TDD における実装工程の継続的な支援を目的としてフレームワークを提案した。提案したフレームワークについて、試作を行い、提案したアルゴリズムでテストコードを入力としたソースコードの生成、および、前サイクルにおけるリファクタリングを保持したソースコードの生成が行えることを確認した。また、評価実験において、試作したフレームワークは、TDD における 1 つのテストケースについて、実装工程に要する時間を 94.22%、開発時間を 66.17%削減した。更に、開発者によるリファクタリングを保持したソースコードを生成した。

以上のことから、提案したフレームワークは TDD における実装工程の継続的な支援に有用であるといえる。

今後の課題を以下に示す。

- ソースコード生成部の拡張による適用範囲の拡大
  本論文で提案したフレームワークのソースコード生成部は、境界値分析を基に設計されたテストケースが入力されることを想定しており、if 文と return 文による実装にしか対応していない。これにより、単純な実装にしか適用できず、有用性が低い。機械学習を用いて、汎用的なソースコード生成を実現することで、有用性を向上できると考える。

- ソースコード統合部の拡張によるリファクタリング保持率の向上
  本論文で試作したフレームワークでは、前サイクルにおけるリファクタリングを統合する際、ソースコードの差分だけに注目しており、その意味については解析していない。そのため、テストをパスすることを最優先したとき、リファクタリングが保持されない可能性がある。この問題に対し、ソースコード統合部によるソースコードの統合時に、ソースコード生成部による変更やリファクタリングによる変更について、それぞれコード中の位置や前後の文との文脈を解析することで、よりリファクタリングを保持できると考える。

- ソースコード解析部によるリファクタリング保持率の向上
  本論文で提案したソースコード解析部は、既存のソースコードから関数の引数名のみを抽出する。既存のソースコードから、頻度の高い構文や特徴的な記述を抽出し、保持できるようソースコード解析部を拡張することで、リファクタリングの保持率をより高くできると考える。

- 自動生成によるソースコードの変更内容の理解支援
  評価実験の結果から、フレームワークによって自動生成したソースコードのレビューに時間がかかることが分かった。自動生成によって生じたソースコードの変更を、開発者にわかりやすく提供し、ソースコードの理解を助けることで、レビューやリファクタリングにかかる時間を短縮し、保守性が高まると考えられる。変更内容の具体的な提供方法として、自動生成するコードにコメントを付加する、ソースコードに適用した変更を要約したメッセージを表示する、変更があった部分をマークし区別しやすくすることがあると考える。

参考文献

1) BBC: What went wrong inside Boeing's cockpit? . https://www.bbc.co.uk/news/extra/IFtb42kkNv/boeing-two-deadly-crashes#group-System-failure-zAFs52mVNd. Accessed: 2023/4/24.
2) F.Anwer, S.Aftab, U.Waheed, Muhammad,S.S., “Agile Software Development Models TDD, FDD, DSDM, and Crystal Methods: A Survey”, International Journal of Multidisciplinary Sciences and Enginnering, Vol. 8, No. 2, pp. 1-10, 2017.
3) Mukhtar,M.I., Galadanci ,B.S., “AUTOMATIC CODE GENERATION FROM UML DIAGRAMS: THE STATE-OF-THE-ART”, Science World Journal, Vol. 13, No. 4, pp. 47-60, 2018.
4) P.Yin, G.Neubig, “A Syntactic Neural Model for General-Purpose Code Generation”, Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Vol. 1, pp. 440-450, 2017.
5) GIHOZ 境界値分析. https://www.veriserve.co.jp/gihoz/boundary.html. Accessed:2023/04/25.
6) Antlr. https://www.antlr.org/. Accessed:2023/04/23.
7) GitHub google/googletest. https://github.com/google/googletest. Accessed:2023/04/23.

ダブル・ディグリー・プログラムの体験者 2 名による語りに基づく一考察

川崎　典子 [a)]

Story of Personal Experiences of Two Graduates in the Master's Double Degree Program

Noriko KAWASAKI

Abstract

The Faculty of Engineering of the University of Miyazaki started the Master's Double Degree Program, which is a special study-abroad program under the official academic agreement between universities, in 2009. Up to FY2019, although the Faculty inevitably decided to suspend the program in FY2020, 2021, and 2022, seven Japanese students studied abroad in the program. It is easy to imagine they learned a lot of new things and different perspectives during studying abroad. However, their stories have not been shared in the Faculty and little known as a result. This paper describes them through semi-structures interview with two graduates, who studied in Myanmar or Indonesia in the program.

Keywords: Double Degree Program, Study-abroad, Personal experience, Semi-strcutured interview

1.　はじめに

宮崎大学工学部の学生の大半が目指す日本の企業で働くエンジニアに、世界で通用する国際性が求められるようになって久しい。グルーバル化に対応する日本社会の要請に応えるように、多くの工学系大学では半年以上の中長期の留学プログラムを導入している。工学系の留学プログラムの中で特色的なものの一つに、修士課程在籍中に所属する国内大学と派遣された海外大学の学位を取得できる「ダブル・ディグリー・プログラム（以下、DDP）」が挙げられる。DDP では、大学間（または研究科間）協定を持つ日本の大学と海外の大学が独自の入学試験を実施し、両者の学生を互いの適当な時期に約 1 年間派遣し合う仕組みが取られている。文部科学省によれば、DDP によって、「学生にとっては、より短い期間、少ない経済的負担で複数の大学からの学位を取得できるとともに、安心して学業に専念し、国際的な経験を積むことが可能となるなど、流動化の促進につながる効果」と「大学にとっては、他大学との国際教育連携を通じて教育内容を充実するとともに、優秀な学生の計画的な受入れ・派遣を通じて国際的な視野をもつ人材を育成するなど、質の保証を伴った大学間交流の促進と国際競争力の向上につながる効果」が得られる [1)]。DDP のメリットには、日本の大学の基準に合格すれば海外の大学での通常の入試を免除されて、日本の大学に在籍したまま海外の大学に正規生として学位留学できること、さらには、特別な留学プログラムであるため、通常の留学より短い期間で学位を取得できることが挙げられる [2)]。

宮崎大学工学研究科（以下、工学研究科）は、2009 年に初めてインドネシアのブラウィジャヤ大学と DDP を締結し、2010 年に同大学から 4 人の学生を受け入れた。その後、インドネシアの 2 つの大学、さらにはミャンマーの 8 つの大学と DDP を締結し、合計 11 の海外協定大学にまで拡充された。工学研究科の DDP による受入れ・派遣の学生数は表 1 の通りである。ただし、新型コロナ感染症拡大の影響により、2020～2022 年の DDP による受入れおよび派遣は中止された。

表 1　工学研究科の DDP による受入れ・派遣実績

実施年	工学研究科で受け入れた学生数	工学研究科から派遣した学生数
2010 年	4 人	0 人
2011 年	2 人	0 人
2012 年	2 人	0 人
2013 年	5 人	3 人
2014 年	2 人	0 人
2015 年	4 人	3 人
2016 年	7 人	0 人
2017 年	13 人	0 人
2018 年	8 人	1 人
2019 年	7 人	0 人
合計	54 人	7 人

a) 工学部工学基礎教育センター准教授

表1で分かるように、工学研究科で受け入れた学生数はこれまでに50人を超えているが、工学研究科から派遣した学生数は合計7人で、派遣した学生がいない年が多くある。DDP 派遣の希望者は毎年のように存在するものの、協定大学での研究活動に関わる心配や日本での就職活動に対する不安が長期留学に踏み出せない要因となる。また、開発途上国の生活を知らぬまま危険性にのみ注意を向けがちな世情も彼らの DDP の応募を躊躇させてしまう。

これまでに累積した DDP 派遣の体験者が少ない中、約1年間ミャンマーに留学した日本人男性 A さんと、約1年間インドネシアに留学した日本人男性 B さんの2名から協力を得て、個別にインタビューを実施した。そこで、彼らのような体験者の語りを通して、DDP で派遣される日本人学生について考察していく。本稿では、インタビューで明らかになった留学中の生活の様子を中心に、留学中の苦労や意識の変化に加え、留学までの過程や帰国後の歩みと近い将来の展望についても記録しながら、彼らの体験から浮かび上がる DDP 派遣の実態を明らかにしていく。

2.　DDP 体験者のインタビュー結果

インタビューは図1に示す質問項目で構成される。まず、DDP体験者の方々にインタビュー前に質問項目を見て準備してもらい、1～2週間後に筆者と体験者の方が対面またはオンラインで面談しながら話を聞く半構造化インタビューを実施した。そして後日、体験者の方に発言内容の記録を提示して、適宜修正や加筆をしてもらいながら何度かメールで質疑応答を繰り返し、記録を完成していった。インタビューは2名それぞれに1回実施し、いずれも3時間以上を要した。事前に質問項目に回答する時間やインタビュー後に発言内容の記録の細部を確認する時間を加味すれば、さらに多くの時間を割いていただくこととなった。なお、インタビューについては、Aさんとは2022年3月9日に対面で実施し、Bさんとは2022年9月18日にオンライン（Zoom使用）で実施した。

インタビューの質問項目
①高校までの英語の取組と海外渡航経験
②宮崎大学工学部への入学理由
③大学入学以降の英語の取組と海外渡航経験
④DDPの応募までの経緯
⑤DDPにおける学生生活の様子
⑥海外滞在中の苦労
⑦海外滞在中に強く印象に残っていること
⑧帰国後の進路選択の経緯
⑨DDPの経験について深く語る機会
⑩大学生の後輩たちに伝えたいこと

図1　インタビューの質問一覧

以下の記述は、体験者の方の発言内容を基に、筆者が趣旨を変えずに表現の修整や編集を加えたものである。

2.1　日本人男性Aさん

Aさんは宮崎県出身で、高校卒業までは日向市内で家族と暮らし、2011年4月の宮崎大学工学部への入学を機に宮崎市内に単身で暮らすようになった。2015年4月に工学研究科に入学し、DDPを使って2015年12月から2016年12月までミャンマーに留学した。現在は、宮崎県内の工学系企業で情報システムエンジニアとして働いている。

①高校までの英語の取組と海外渡航経験

小学校の時には、（英語の授業では、）外国人講師が楽しく話してくれ、漠然と面白いなあと思っていた。中学校の頃から英語を苦手な科目と感じるようになり、理系科目のほうが得意になった。しかし、外国人講師の授業や彼らとの雑談は楽しめていた。また、英語とは直接関係しないが、社会の授業で世界情勢を知る機会があったことを覚えている。高校で英語を学ぶようになっても得意な科目とは言えず、大学入試の英語では、事前の見込み点数よりやや低い結果となった。高校卒業までに海外渡航の経験はない。

②宮崎大学工学部への入学理由

高校の物理の授業が好きで、サイエンス部に所属していたこともあり、電気系か情報系の大学に進みたいと考えた。大学進学までに単身赴任の父親を訪ねて複数回県外を訪問した経験から、自分には宮崎県の生活環境が最も合っていると感じ、宮崎で暮らし続けたいと思い、宮崎大学工学部を第一希望とした。

③大学入学以降の英語の取組と海外渡航経験

学部1年次のEラーニングでの授業は無味乾燥に感じていた。一方で、学部1～2年次の対面授業では、興味のある工学系の内容が盛り込まれていたこともあり、良い印象を持っている。

学部3年次には、専門科目の工学英語が始まり、学生グループ単位での読解やプレゼン発表など、学生の学び合いによる授業が主で、大いに楽しめた。他の工学系科目にかける学習時間に比べると短いが、英語学習に前向きに取り組み、英語への苦手意識がなくなっていた。さらには、学部4年次の研究活動で日常的に英語論文を読むようになり、英語が真に必要になってきたと感じた。

そして、学部卒業論文の発表終了後に指導教官の先生から大学院での海外研修に誘われた。実際に修士学生となった2015年8月に、日本学生支援機構の海外渡航支援を受け

て3週間の海外研修に出た。人生初の海外旅行で、ミャンマーを訪問することになった。同行者にゼミ仲間がいたこともあって当初は楽しみにしていたが、現地に到着した飛行機から降りるときにコミュニケーションできるだろうかと不安になり始めた。ミャンマー滞在中は複数の協定大学を回り、研究活動の発表や学生交流をした。漠然と留学を考えていた自分にとっては、この海外研修がトライアルでもあった。

④DDPの応募までの経緯

DDPを志望した理由は、主に2つある。1つ目は、学部3年次に仮配属された研究室にいた留学生の存在である。その方はインドネシアの大学から来ており、電気と情報通信に強い関心を持っていたため、（私は）すぐに親近感を持った。親しくなって些細な日常の話をする中で、留学生の困り事を助けるするようになった。その当時、私の英語は拙く、会話中にどう言えばいいのか分からず、スマホの機械翻訳などを使って話すことが多く、もどかしさがあった。学部4年次になると、ゼミの研究室で向かい合わせに過ごし、チューターとして生活支援するだけでなく、宗教などのプライベートな話をしたり、彼の家族と交流したり、関係性が深まった。そして、より一層英語を身につけないといけないと思うようになった。

学部4年次頃から研究および就職で英語が必要だと感じることが日に日に増え、機会があれば留学もいいかなと思ってはいた。（②で述べたように、）偶然にも、学部4年次の卒業論文の発表後に、大学院での3週間の海外研修に誘われ、（大学院進学後に）参加することにした。研修中に引率者の先生方から具体的な留学の可能性に関する話を聞き、同行者だった知り合いの学生がすでにDDP応募を決めていることを知った。これらが2つ目の理由と言える。

これらの経緯から、海外研修終了後すぐに、私も家族に留学について相談し、約1ヶ月の期間でDDPの応募書類の提出や入学試験の面接に臨んだ。その当時の工学研究科のDDP計画が変更され、当初の開始予定よりずれ込むことになり、12月に渡航することになった。

もし一人で派遣されることになったなら、DDPを選択していなかったかもしれない。

⑤DDPにおける学生生活の様子

協定大学での研究は、授業とともに並行して行わざるを得ず、大変だった。日本の大学と異なる制度の協定大学では、週2～3回の授業の受講を必要とする科目が2単位で計算され、修士課程の必要単位数が宮崎大学の制度より6単位多く必要だったこともあり、研究に手を付けられないまま授業に出席するばかりだった。最初の3か月間の平日は、8時から17時まで授業を受け、帰宅後には21時まで復習と予習をしていた。21時以降にようやく食事を取り、英語力の向上のためにNHK Worldの文章を翻訳したりして過ごした。結局、研究に費やせるのは1時間程度だった。そのため、休日を使って研究するようにしたが、停電と重なることがあり、必要な機材が使えないために研究できずに終わる日もよくあった。

数か月もすると授業になれてきて、研究する時間が増えた。しかし、協定大学の指導教員との研究活動では、専門性の微妙な相違もあり、研究で得たデータを提示して口頭の説明を加えるという従来の自分の方法ではうまくいかなかった。そこで、パワーポイントを使って視覚的な説明を入れるように工夫し、次第にスムーズに研究が進むようになった。また、工学研究科の指導教員と頻繁にメールで連絡を取り合いながら、研究活動の報告をしていた。工学研究科の指導教員とは、3か月に1回程度テレビ会議システムで面談しながら指導を受けることができた。

⑥海外滞在中の苦労

困ったことといえば、研究を除くと食事関係だと思う。現地に着いて数日間は現地食で賄えたが、食事が合わなくなり、自炊するようにした。大学周辺には日本で想像するスーパーがなく、（個人経営の屋台のような）露店での買い物では英語が中々通じないため非常に苦労した。週1日くらいで、ほかの日本人学生と一緒に遠方のスーパーに出て買い物をして、生活が維持できていたように感じる。ミャンマーは油を使った料理や辛い食べ物が多く提供されていて、体調を崩すことが度々あった。下痢することがあったり、酷い時には血便が出て2日間入院したりすることもあった。留学前にかけていた海外旅行保険で入院費用は出るものの、海外滞在中は一時建て替えとなり、予想外の費用を自分で支払わなければならなかった。

滞在中の支出は毎月6万円程度で、その内訳は、食費に約2万円、通信費に3～4万円で、買い物に出る際のタクシーで使う交通費の支出もあった。住居費・光熱費は、宿舎を利用していたために無料だった。学生支援機構の奨学金で月7万円を受けることができた。しかし、渡航前の海外保険加入と一時帰国のための航空運賃で多額の費用を払ったことを覚えている。

滞在中の苦労ではないが、DDP派遣にあたっては、研究活動に必要となる特別な性能を持ったコンピュータが協定大学にあるかが一番の心配だった。結局、ミャンマーには研究に必要な機材を持参した。また、就職活動を中心とした留学後のことは不安だった。

苦労したことやつらい経験もあったけど、留学に行かないほうがよかったというつもりはない。留学ではコミュニ

ケーション能力など得るものがあったので、海外に行ったことはよかったと思っている。

⑦海外滞在中に強く印象に残っていること

社会と宗教のつながりの強さが一番心に残っている。日本では、クリスマスや初詣など宗教が文化の一部になっているように感じるが、一方で希薄なものに感じる。しかし、ミャンマーでは、仏教が生活・社会に深くつながっている。ミャンマーの学生や教員が毎日のように（寺院を意味する）パゴダにお参りに行き、誕生日などのイベントの際には、数多くの寺院に参拝している姿を見ることがあり、日本では考えられない経験だった。

また、教員が学内の宿舎で生活しており、私を入れた3名の日本人学生たちもその宿舎の１つに滞在した。宿舎では、学生が遅くまで教員の自宅に出向いて研究について相談している様子を目にした。学生が尊敬の念を持つ教員に対して距離感を取ろうとするにも関わらず、宿舎にまで訪ねていく学生と教員の関係性がとても近く感じられた。ほかの日本人学生たちと共に所属学科の修学旅行に参加した際、引率教員から熱心に歴史や宗教感について教えてもらい、学生と教員の距離感の近さを身をもって実感する機会もあった。

日常的な学生同士の交流にも思い出が多く、ミャンマーにはシャイな学生が多かったものの、仲良くなると親切にしてもらえたことが印象的だった。

⑧帰国後の進路選択の経緯

DDP派遣前には、自分の研究とした電気・通信関係の仕事に就職したいと考えていた。ミャンマーに行って4か月後に協定大学の大型連休があったので、その期間に合わせて日本に帰国し、複数の企業での就職活動をした。帰国中に志望していた1社の採用過程を終了し、ミャンマーに戻ってから内々定を得た。しばらく研究活動を行いながら今後の自分自身について自問自答するようになり、実家の長男であることや地元志向であることなど、いろいろな思いがあって、工学研究科の指導教員と相談した上で日本の企業の内々定を辞退した。その際に工学研究科の指導教員からの助言があり、将来設計に関する思考の整理をしたいと考え、修士課程の終了後には博士課程に進学しようと決めた。博士課程進学を決めてから、ミャンマーでの学生生活中に、博士課程の入学試験となるプレゼン発表を含む口頭試問に向けた準備をしていた。

（博士課程修了後に宮崎大学に一時期勤務し、）2022年4月より宮崎県内の企業に就職を決めた。ミャンマーというあまり例にない場所での留学経験があったことから、会社からはチャレンジ精神とやるときはやる性格を評価してもらった。。その会社では、海外駐在もあるので積極的に希望していきたい。

⑨DDPの経験について深く語る機会

DDP等の留学を考えていた学部生4名程度の個人相談に乗った。その中には複数回の相談に乗った学生もいる。

宮崎大学で開催された研究交流会では、学生も聴衆にいる中で、講演者として体験談発表をした。また、外部機関の雑誌でインタビューを受け、体験談が掲載された。

⑩大学生の後輩たちに伝えたいこと

自分自身が留学してみて、不安なことが多くあった。そのため、留学生を見て困ってそうだったら、助けていきたいと思ったし、観光客に対しても丁寧に対応していくよう心掛けている。せっかく日本まで留学や観光で来ているのならば、楽しかったと今後行ってもらいたいし、自分自身が助けてもらった立場だったからの恩返しでもある。

留学して考え方や他者への対応が変わってきた。英語力だけでなく、今後の人生にも影響を与え、自分自身を見つめなおす機会でもあった。海外に行きたいという学生にはぜひ行ってもらいたいと思うので、（自分が体験した）事実を伝えながら相談に乗りたい。

2.2 日本人男性Ｂさん

Bさんは宮崎県出身で、日南市で家族と暮らしながら、2014年4月に宮崎大学工学部に入学し、2018年4月に工学研究科に進学した。工学研究科では、DDPを使って2018年9月から2019年9月までの約1年間インドネシアに留学した。現在は、東京都内の工学系企業で回路設計エンジニアとして働いている。

①高校までの英語の取組と海外渡航経験

小学校高学年から中学3年生まで、兄が通っていた英語学習塾に通っていた。公文方式の先取り学習をしており、中学生の頃は、部活後に1時間程度塾で学んでいた。塾で英語学習をするようになったことで、英語が分かり、面白いと思った。しかし、熱中するほど面白いと感じることはなかった。英語は科目として不得意ではなかったが、数学のほうが面白いと感じていた。高校の時には、英語は全くと言っていいほどやっておらず、数学にはまっていたこともあり、英語については宿題をやる程度しか時間をかけていなかった。高校卒業までに海外渡航の経験はない。

②宮崎大学工学部への入学理由

地元にあり、国立大学でもあるので、経済面の負担が軽

くなりそうだと思った。工学部に行きたくて選択したというより、宮崎大学の学部の中では一番入学できる可能性が高いと思ったので工学部を選んだ。一方で、高校生の時に静電気の現象を目の当たりにして感動したことがあり、電気工学を勉強したいと思うようになり、さらには、宮崎大学の募集要項の中でも（当時存在した）電気システム工学科に魅力を感じていた。

③大学入学以降の英語の取組と海外渡航経験

学部1年次と2年次の授業では、Eラーニングが多く、あまり記憶に残っていない。教室に集まる対面授業では、工業系の英語を習って単語テストを受けていたことを覚えている。学部3年次の工学英語の授業では、博士課程の留学生が講演に来てくれ、宮崎大学に来た経緯やインドネシアについて話してくれたことを覚えている。

学部3年次に、「海外体験学習」（工学部専門選択科目）でマレーシアに2週間程度の短期研修に行った。これが初めての海外旅行で、外国人との会話自体も人生初に近く、短期研修がとても刺激的だった覚えがある。英語を通じて外国の人と考え方や価値観が違うことを知り、その体験が面白いと思ったのがきっかけで、英語学習を自主的にやるようになった。それ以前から、英語はコミュニケーションツールの一つとして学習しておいて損はないと思っていたが、短期研修を通じて外国人と話す英語コミュニケーションを実際に体験し、改めて英語の重要性を意識した。マレーシアでは多様性を身につける面白さも感じた。短期研修後には、時々昼休みの英会話活動に参加するなど、自主的に英語を話す機会を作ろうとした。また、短期研修で慣れた英語コミュニケーションの維持のために、参考書を購入して付属の音源を聞いたりしていた。

学部4年次には研究室に配属され、その研究室で一人の留学生と出会った。彼とは同室ではなかったので、彼のところに行って英語で話をすることがあった。研究活動の進捗報告の場で、研究室に所属する学生同士の研究内容を理解できたことで、留学生とは研究について話すことが多くなった。

④DDPの応募までの経緯

学部4年次に、所属する研究室の留学生の研究内容を理解し、興味を持つと共に、彼の研究内容の難しさを知った。さらには、彼と工学研究科の指導教員との英語による議論を目の当たりにし、圧倒された。研究活動の進捗報告後に個人的に留学生に話を聞きに行った際、彼に紙面で補足説明をしてもらいながら話してくれた内容を理解できた。その留学生の存在がDDP派遣を考えるきっかけだった。自分の専門性と英語力といった実力が通用するのかを確かめたくなり、DDPを通して海外で自力で生活できるかを試そうと思うようになった。DDPのデメリットなど自分ではあまり深く考えず、家族や友人に相談したところ、周囲から心配する声や反対する意見もなかった。工学研究科（その当時はBさんは工学部に所属）の指導教員に相談した際にも「行ってこい」と応援してもらえた。

DDP派遣に応募するにあたり、学部4年次から修士1年次にかけて工学研究科の担当部署で手続きを確認した。修士1年次の前期に、研究内容を記載したレポートの提出と英語による口頭試問を含むオンライン面接の選考を受けた。

宮崎大学での修士1年次には、ほかの学生より2倍程度多く授業を取ることになり、朝から晩まで授業を受けていた。さらには、工学研究科での研究活動を始めていたり、DDPの入試準備をしたり、ほかの学生よりも勉強と研究の時間を使っていた記憶がある。その当時アルバイトはしておらず、日南市の実家で家族と同居していたため、学業の忙しさを乗り越えた。目の前のことをやっていくのに必死だったが、DDP派遣に対して不安になったことはないように思う。自分にはDDP派遣でやりたいことがあり、両親も応援してくれていた。

⑤DDPにおける学生生活の様子

インドネシアの協定大学では、授業が英語とインドネシア語で別々に開講されていたため、英語でによる業を受けていた。平日は朝から晩まで授業を受け、授業のない空き時間や放課後に研究活動に取り組んでいた。大学内の国際寮に滞在し、一部屋に5人で暮らし、パキスタンや南アフリカ出身の留学生と共同生活をしていた。個室のほかに、共有スペースにトイレ・シャワーと洗面所とリビングルームがあった。共有スペースに台所はないが、食堂では、自分の食べたいものを購入する仕組みだった。

授業の予習・復習に時間がかかり、授業外でも学習をしていたため、共同生活をする留学生から遊びに誘われても出かけずにいた。ただ、誰かの誕生日など特別な時には友人同士の外食に付き合った。研究室の指導教員を始めとする協定大学の教員や職員の方たちには、月1回程度レストランでの外食に連れて行ってもらった。食事中には彼らが家族の話や、日本に行った時の思い出を話してくれ、日本語や日本について英語で話したりした。留学中はほとんど日本語で話す機会がなかったので、帰国したときに日本語が思うように出てこなかったことを覚えている。

家族とは時々電話をする程度だった。日本にいる友人とはLINEを使ってメッセージのやり取りをしていた。宮崎に帰りたくなるようなホームシックになった記憶はない。

研究活動については、協定大学の指導教員と工学研究科の指導教員に対して自分の研究活動の進捗状況を報告し、

それぞれの指導教員からフィードバックをもらう形で指導を受けた。

⑥海外滞在中の苦労

平日の講義の予習・復習が大変だった。平日に終わらなずに週末にすることもあった。協定大学では、留学生対象の英語による講義を受けていた。高度な内容である上に、英語での受講によってさらに難しくなるため、授業について行くので精一杯だった。よく一緒に出席していた現地の学生がいて、その学生は英語が堪能で、（その学生と）講義後に質問しあい、教えあって、理解を深めた。

想像していた以上に自分の考えを伝えるのは大変だった。現地の学生はみんな英語が話せるわけではない。言葉がうまく通じないためにコミュニケーションを図るのに苦労することがあった。そんな時には英語が堪能な現地の学生が通訳に立ってくれ、スムースにコミュニケーションを図れるようになった。

留学の前半は研究が狙い通りにいかず、進捗があまり良くなく、四苦八苦していた。現地の指導教員と工学研究科の指導教員に相談することで、目的と手段が明確化され、ゴールまでのステップを整理して進むことができた。

研究活動に必要な回路設計のためのツールをインストールしたパソコンを日本から持って行けば使えると思っていたが、海外でアクセス権を得られず、研究が思うようにいかなかったので、辛かった記憶がある。自分の予想通りの結果が得られず、工学研究科の指導教員に加え、宮崎大学の技術職員の方に助言を求め、メールとスカイプで連絡を取り合って何とか対応した。日本から持って行ったソフトウェアのライセンスの問題からインドネシアでは使えなかったのだが、うまくいかない原因を探りながらソフトウェアが使えるようになり、本格的に研究活動に入っていった。実際の研究活動では、考えていた手法がうまくいかず、工学研究科の指導教官の助言を受けながら代替措置を幾度か試し、開路を見出していった。

健康面での苦労もあった。協定大学での授業の履修をある程度終えた頃に持病が発症し、1か月ほどインドネシアの自宅で療養した。インドネシアでは手術や投薬ができなかったので、安静にして改善を待つしかなかった。療養中も自宅で研究活動を続けていた。療養後に復学してからも体調を見ながら学業を続けた。また、インドネシアの香辛料を使う料理が原因で下痢に悩まされることがあった。

留学終了後、9月頃に日本に帰国して、急いで就職活動していたが、日本での就職活動時期が一段落している時期でもあり、自分の内定先が決まるか不安だった。

⑦海外滞在中に強く印象に残っていること

協定大学の企画で、留学生のみ50人ほどで2泊3日間の旅行をしたことが印象に残っている。大学のある町からバスで出かけ、現地で楽器演奏、ダンス、伝統的な遊び、郷土料理など現地の文化体験をしたり、（自分は特に何かを紹介することはしていないが、）留学生それぞれの出身国の文化を披露しあったりした。

また、協定大学の別の企画で、各学部の留学生30人ほどが研究発表会を行った。日本への帰国前の7月上旬に開催され、聴衆が約100人いる中で、今まで取り組んだ研究内容を発表しあった。その時、緊張したことをよく覚えている。会場には多国籍の発表者がいて、英語でのやり取りが不安で、どの質問に対しても、「回答になっていないかもしれませんが」と前置きしながら説明していた。相手の質問の意図を正しく汲み取り、的確に回答できているかすごく不安だった。それでも発表後に、自分の発表を聞いていたアメリカ人たちがすごく絶賛していた。達成感はもちろんあったし、褒められたことが単純に嬉しかった。

⑧帰国後の進路選択の経緯

留学中の3月に日本に帰国して1ヵ月間就職活動をした。帰国前にはメールで面接予定日を特別に設けてもらえるように依頼したり、スカイプを用いた一次面接にしてもらったりした。その際、4社の入社試験を受けたが、内定を得られなかった。結局、留学を終えて帰国した9月に改めて就職活動をすることになった。ほとんどの学生は日本で就職活動を終えているため、スタートが遅れている状況で就職活動を再開した。帰国後には逆カルチャーショックのような状態になり、日本の生活になじむのに苦労した。

自分の場合は条件面をあまり重視しておらず、その会社で専門分野と合致するようなことができるかを重視していた。自分がやりたいこと重視で企業を探し、根気強く就職活動をした結果、現在の会社での採用を得た。入社後はすぐに希望の部署に配属され、苦しいこともあるが、楽しく業務をさせてもらっている。そういう意味では、（就職活動全盛期に決まる）大手企業に固執しているわけではなかったこともあり、現在の企業に決まったのでよかったと思っている。マレーシア出身の社員の方がいて、英語で話しかけてくれたり、英語のプレゼンをしてくれたり、職場で英語を使う機会が時々ある。

⑨DDPの経験について深く語る機会

宮崎大学に在学中に、後輩からの相談やウェブ記事での掲載があった。修士課程の修了前の2021年に、DDPの応募を考える学部4年生1名からの相談を受けた。また、就職後、DDPの応募を考える学部4年生1名とのオンライン通話に応じた。学生生活の日常では、研究室の先輩との雑談で体

験談を話すことがあった程度である。現在の職場では、職場の同僚との飲み会の席で話したりする。

⑩大学生の後輩たちに伝えたいこと

DDP派遣を通して、準備力・計画力・実行力・精神力が養えると思う。たくさんの困難が待っているので、それを乗り越えることで大きな自信につながる。困った時は誰かが何かしらの助言はくれるけれど、結局は自分で考えて行動していくしかない。自分で道筋を立て、要所要所で協力を仰ぐ必要がある。

多忙を極めた留学の中、自分と真剣に向き合うしかなかった。やり遂げる力が必要だった。DDPでは、技術者の技術者による技術者のためのカリキュラムが用意されている。1年未満の滞在だが、学ぶ量は多い。技術面の成長が重視されているので、留学先で学んだことは現在の職務でも活かされている。外国人と技術的なことに関する認識のすり合わせでは、協定大学において英語で学んだ知識が非常に役立っている。

3. 体験者の語りから見えたこと

2名の方々の語りからはそれぞれに異なるDDPの応募までの過程や海外での学生生活の様子が見えてきた。Aさんは修士課程に進学してからDDPの応募を決めることになり、Bさんは学部4年次からDDPの応募を考えて準備していた。電気工学という同じ学問分野を専攻していても、ミャンマーとインドネシアでは大学の風土が異なり、生活様式も違うため、AさんとBさんの学生生活は異なる。しかしながら、共通点も多い。たとえば、短期研修での経験を通して海外生活の魅力に気づいたり、工学研究科で所属した研究室における留学生との交流を通して留学に強い関心を持つようになったりしている。また、専門性の高い授業を英語で理解するために自学自習に時間をかけていたり、多忙な学業の合間や休日に時間を捻出して研究活動に勤しんでいたりする。一方で、協定大学の教職員や学生と公私において深く交流した出来事についても触れている。

両者からは海外での生活で体験した多くの苦労話も語られた。研究活動に必要な機材の手配に手こずり、就職活動のために日本に一時帰国せざるをえず、食生活の変化から体調を壊した点は両者に共通する。

彼らは主体的にDDP応募を考え始めていたが、家族や指導教員といった近しい人間からの応援で最終的にDDPを決断したことが分かった。留学中も日本にいる指導教員からの手厚いサポートを受けながら問題を解決している。つまり、工学系の日本人学生が中長期的な留学を選ぶ過程では、体験を通した海外生活への強い関心や研究活動における留学生との親密な交流がきっかけになりやすく、本人の選択を支える周囲の精神的な応援が必要であり、さらには学生の海外での研究活動を日本から支える技術的なサポートが必須であると言えるだろう。つまり、中長期的な留学を選ぶ日本人学生を増やすには、宮崎大学工学部は、学部段階において海外生活を体験する機会、研究活動を通した留学生や外国人研究者との交流、指導教員と学生の信頼関係と相互理解を深める環境をきちんと整え、留学希望者に対してDDP体験者の経験を共有する必要がある。

AさんもBさんも主張しなかったが、DDP派遣という滅多にない経験を通して、「前に踏み出す力」とされる主体性と実行力、「チームで働く力」とされる柔軟性と傾聴力と情況把握力とストレスコントロール力、「考え抜く力」とされる課題発見力と計画力と想像力といった社会人基礎力を体得した様子が伺える[3]。留学中の苦労やトラブルを経験する過程で問題解決能力を身につけ、開発途上国での生活を通して異文化対応力を手に入れている。それらの能力は、国際社会で活躍する日本人に求められている。Aさんは、現在の会社での採用にあたって、日本にいるだけでは体得しにくい能力を評価されたと語った。Bさんは、職場で外国人労働者と積極的に交流していると語る。AさんもBさんも日本の企業で働き始めて間もないが、海外展開している企業でグローバルエンジニアとして活躍する将来が期待される。

4. おわりに

コロナ感染症の流行によって、留学を始めとする海外渡航の道が一時期途絶える事態ともなった。2020年度日本人学生留学状況調査結果によれば、コロナ感染症流行前の2019年度には107,00人を超えていた学生数が2020年度には約1,500人に激減した[4]。日本政府は、「トビタテ！留学JAPAN」の推進などを軸に、2027年を目途に激減した日本人学生の留学をコロナ禍前の水準に回復することを目指している[5]。日本人学生の留学を増やしたい背景には、AさんやBさんのような様々な能力を身につけた人財が日本で求められているからだろう。宮崎大学工学部も、課題探求能力、創造性、コミュニケーション能力、 自主的・総合的な的確な判断、豊かな人間性といったジェネリックスキルを備えた工学系人財の育成を教育目標にしている。

AさんもBさんも工学部の後輩のためになるならばと研究協力を快諾してくださり、インタビュー中は穏やかな笑顔を見せ、特に留学中の出来事を懐かしそうに思い出しながら表情豊かに語る様子が印象的であった。しかしながら、両者の語りを十分に引き出せなかったかもしれないという反省と、彼らの指導教員からの話も参考にすれば客観

的でより深い分析につなげられたかもしれないという反省がある。その反省は体験者の語りを聞ける今後の機会に活かさねばならない。

謝辞

3時間以上にも及んだインタビューに協力してくださったDDP体験者の2名の方々に、この場を借りて心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

1) 文部科学省: 我が国の大学と外国の大学間におけるダブル・ディグリー等、組織的・継続的な教育連携関の構築に関するガイドライン, 文部科学省ホームページ, 2010/05/13. https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo4/houkoku/1294338.htm (accessed 2023/02/03)
2) Benesse: 海外進学・留学ラボ～日本と海外の２つの学位を取得 ダブル・ディグリー・プログラムとは？, Benesse Corporation ホームページ, 2018/05/13. https://ww.benesse-glc.com/lab/blog/jyouhou180513 (accessed 2023/02/03)
3) 経済産業省: 「人生 100 年時代の社会人基礎力」説明資料, https://www.meti.go.jp/policy/kisoryoku/ (accessed 2023/02/04)
4) 日本学生支援機構: 2020年度日本人学生留学状況調査結果, pp. 1-3, 日本学生支援機構, 2022.
5) 文部科学省: 高等教育を軸としたグローバル政策の方向性～コロナ禍で激減した学生交流の回復に向けて, 2022. https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/kagaku/2022/mext_00002.html (accessed 2023/02/04)

スマートフォンを利用した VR の視点切り替えの実装と効果について

別府　雅敏 a)・坂本　眞人 b)

Implementation and Effectiveness of Viewpoint Switching in VR Using Smartphones

Masatoshi Beppu, Makoto Sakamoto

Abstract

Since 2016, dubbed the first year of VR, virtual reality (VR) has become familiar. One factor is that streaming services (YouTube, Netflix, etc.) have started offering VR content. Increasingly, people are experiencing VR on their smartphones to experience these services. By using smartphones, VR can now be enjoyed by anyone inexpensively without the need to purchase an expensive, dedicated head-mounted display (HMD). For this reason, there have been numerous studies on VR experiences to date. In particular, There have been various studies on how to reduce VR sickness, which has a negative impact on the VR experience. However, among them, there are only a few examples of studies that focused on the user's viewpoint during the VR experience and studied the effects of the change in viewpoint.

Therefore, this study focuses on the user's viewpoint during the VR experience. Three VR games with the same content but different viewpoints (first-person, third-person, and viewpoint switching) were created, and the effects of the different viewpoints on the VR experience were examined by comparing their completion times and responses to a questionnaire after the VR experience.

Keywords: Smart phone, Viewpoint switching, VR, VR games, VR sickness

1.　はじめに

1.1　VR の基礎知識

バーチャルリアリティ（VR）とは、コンピューターを用いて人工的な環境 を作り出し、あたかもそこにいるかのように感じさせる[1]技術である。日 本語では、仮想現実と呼ばれゲームなどの娯楽用３D コンテンツの他、産業用途では、技術習得訓練や、仮想空間での試作や設備の検証などへの活用 が注目されている[2]。

VR コンテンツを視聴するためには、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）と呼ばれる専用の機器が必要である。HMD は、左右の目の視差を用いた立体映像による VR の表示装置の総称[2]であり、ゴーグルのような形状のディスプレイを両目に覆いかぶせるように頭部に装着する[2]。多数の会社から様々な種類の HMD が開発され、販売されているが、これらには主に独立して稼働するもの、パソコンに接続した状態で使用するもの、スマートフォンを使用するものなどがある。特に、スマートフォンを使用するものは比較的安価に入手することができ、VR 体験をより身近なものにしている。

1.2　研究背景

近年、ストリーミングサービス（YouTube、Netflix など）が VR コンテ ンツを提供するサービスを開始し、より身近に VR を体験することが可能になった。これらのサービスは専用の HMD を使用する他にも、スマートフォンを利用し体験することも可能である。そのため、スマートフォンを利用して VR を体験する機会も増加している。 ところで、VR 体験には VR 酔いが発生する可能性がある。VR 酔いは、VR 体験に良い影響を与えるものではない。そのため、現在まで VR 酔いの発生を抑制する研究が多く行われている。しかし、それらの研究の多くは専用の HMD を利用した VR 体験についての研究をしたものが主である。そのため、スマートフォンでの V 体験に対して研究を行った例は少ない。

現在、様々な種類の VR 酔い軽減法について研究が進められている。その中で、VR 体験をしている人が VR 酔いをしているかによって軽減処方を適応するかを決定する研究[3]では、リアルタイムで VR 酔い軽減手法を適応することでも効果を発揮することが確認されている。また、HMD アクショ ンゲームにおける視点切り替えによる軽減手法の研究によって視点を切り替 えた場合[4]でも、酔い状態が悪化することがないことが確認されている。しかし、上記の２研究は専用の HMD での VR 体験につい

a) 工学専攻機械・情報系コース大学院生
b) 工学基礎教育センター教授

て研究されたものであり、スマートフォンでの VR 体験についての研究が十分になされているとは言えない。また、視点切り替えによる軽減手法[4]では、特定の行動中にのみ視点を切り替えるものになっており、ユーザーの VR 体験の状態に合わせて視点が切り替えるものではないといった問題点が存在する。

本研究では、先行研究を踏まえて VR 体験の状態に合わせた視点切り替えシステムを構築し、そのシステムでの VR 酔い軽減効果や操作感、没入感の変化について調べ、視点変更の利点について検証する。そのため、実験としてスマートフォンで VR 対応の簡易的なゲームを開発する。開発したゲームを１人称視点と３人称視点、視点切り替えの３種類で体験し、体験後アンケートに回答する。そのアンケート結果からスマートフォンでの VR 体験においての視点切り替えの利点と欠点についての考察を行う。

2. 研究手法

2.1 開発環境

開発環境は、表１に示す通りである。

表１：開発環境

	使用した型番
OS	Windows10
Unity	2021.3.0f1
VR ゴーグル	VRG-M02BK
スマートフォン	OPPO Reno5 A

今回の研究では、専用の HMD は使用せず一般的に使用されている Android 型スマートフォンを利用して VR 体験を提供するものとする。その際にスマートフォンは VR ゴーグルに挿入し、VR ゴーグルとスマートフォンを合わせて使用することで HMD と同様の働きをする。

2.1.1 Unity

Unity とは、Unity Technologies が提供するインタラクティブなリアルタ イム 3D（RT3D）コンテンツを制作して動作させるための、世界をリードするプラットフォーム[5]である。月間アクティブユーザーは 28 億人を突破しており、主にモバイルゲームで大きなシェアを持つ。また、スクリプティングには C ＃が使用される。初版である 1.0 は、2005 年 6 月 28 日に公開され、現在まで改良や機能が追加されている。

2.1.2 HMD

ヘッドマウントディスプレイ（HMD）とは、左右の目の視差を用いた立体映像による VR（仮想現実）の表示装置の総称[2]である。パソコンに有線接続した状態で使用するもの、独立して使用できるもの、スマートフォンを VR ゴーグルに挿入して使用するものに大きく分類することができる。

同じ分類の HMD の中にも、Singla らが行った研究[6]からもわかるように VR 酔いが発生いしやすいかの違いが存在している。

2.2 実験内容

視点切り替えの効果を観測するため、同様の内容で VR 体験時の視点のみが違う簡易的な VR 型のゲームを作成した。各視点での VR 体験終了後に、アンケートに回答する。課題の達成時間とアンケートの回答の２つの視点から、VR 体験における視点切り替えが VR 体験に対して与える影響を考察する。

2.2.1 VR ゲームの概要

制作したゲームは、等間隔に配置された 12 個のオブジェクトを自身のキャラクターを操作することで回収していくと言う内容である[7]。ゲームを開始すると 5 秒のカウントダウンが始まり、カウントダウンが 0 になるまでキャラクターを動かすことができない。カウントダウンが終わると、時間の計測が始まってキャラクターを移動させることが可能になる。時間の計測は、12 個のオブジェクトをすべて回収すると停止し、記録した時間を画面に表示する（**図 1**）。これと同様の内容であり、視点がそれぞれ一人称（**図 3**）、三人称（**図 4**）、切り替えの 3 種類を作成した。視点切り替えでは、一人称視点からゲームが開始され、特定の条件で三人称視点に変更される。視点が切り替わる条件は、キャラクターがステージの壁と接触した時に一人称から三人称に切り替わる。三人称視点の状態で、新たにオブジェ クトを一つ回収すると一人称視点に切り替わる。視点切り替えで、すべてのオブジェクトを回収した場合、記録された時間とともに、一人称視点から三人称視点に切り替えられた回数も表示される（**図 5**）。

一人称、三人称、切り替えのすべてのゲームで頭を動かした方向に視点が移動する。キャラクターの移動方向は、視点の方向によっては変化せず、常に前後左右は固定されている状態での操作となっている。

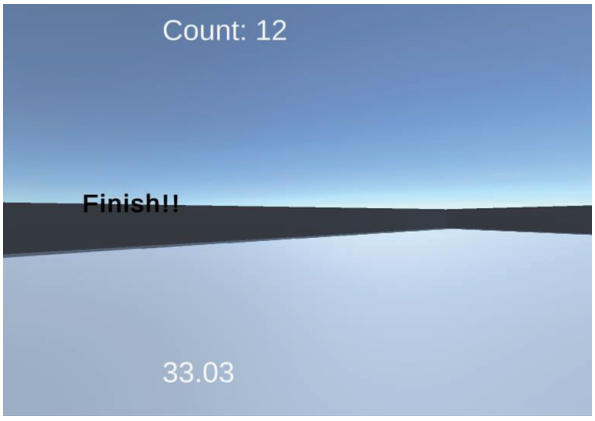


図 1：一人称終了時

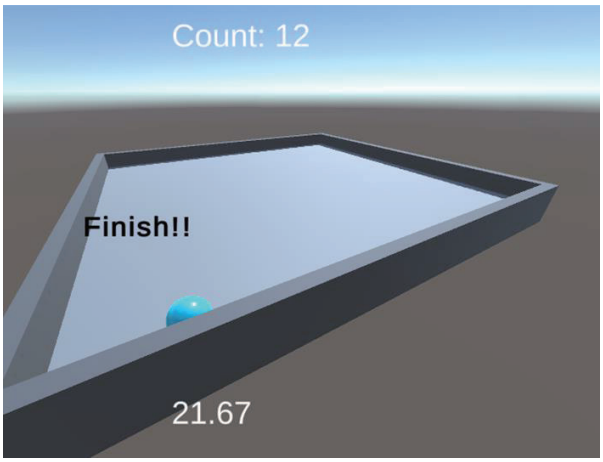


図 2：三人称終了時

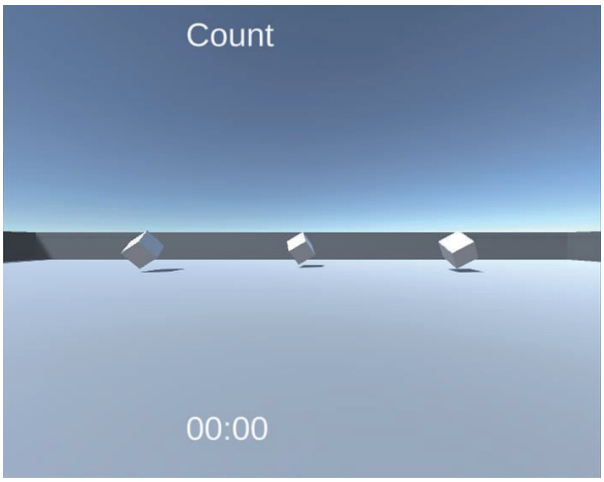


図 3：一人称視点

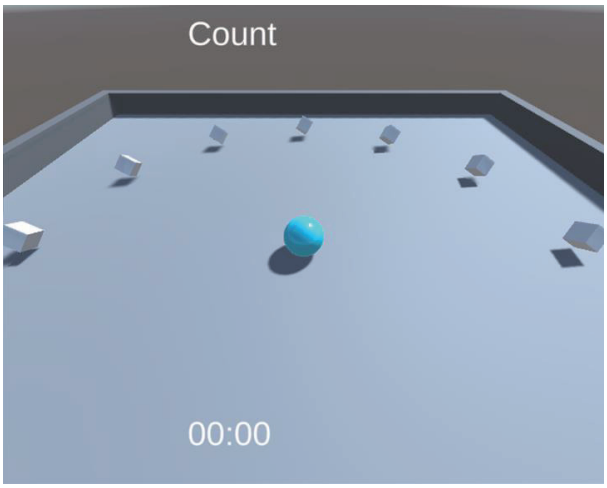


図 4：三人称視点

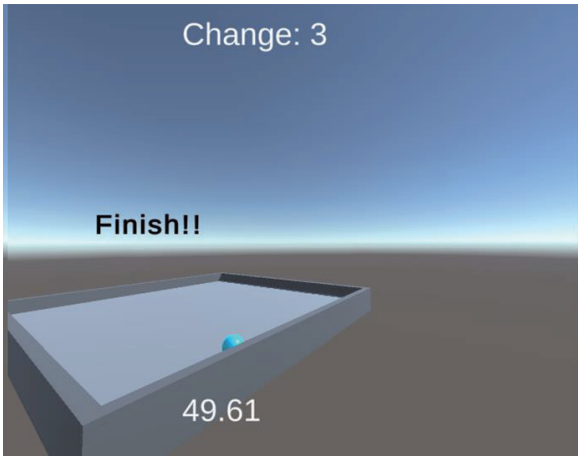


図 5：切り替え終了時

2.2.2 プログラム

今回作成した VR ゲームで使用したプログラムの機能についてまとめる。 Unity で使用するため、言語は C#で記述されている。

CameraController.cs

カメラの位置を指定した物体に追随するようにするプログラム。作成したすべての VR ゲームで同じプログラムを使用している。今回の実験では、プレイヤーである球体の動きに合わせてカメラを動かすために使用した。

GyroScript.cs

カメラの向きをスマートフォンに動きに合わせて変更するプログラム[8)]。 作成したすべての VR ゲームで同じプログラムを使用している。

Rotator.cs

物体を回転させるプログラム。今回の実験では、回収目標のオブジェクトを回転させるために使用した。作成したすべての VR ゲームで同じプログラムを使用している。

PlayerController.cs

プレイヤーキャラクターを操作するプログラム。一人称視点と三人称視点では同様のプログラムを使用しているが、視点切り替えのみプログラム内部に視点を切り替えるプログラムが追加で記載されている。

また、キャラクターの操作以外にも画面に表示するものの制御と時間計測も行っている。

2.2.3 アンケートの概要

アンケートは Google Forms で作成し、それぞれのゲームをしたのちに体験した VR の種類に合わせたアンケートに回答してもらう。アンケートは、 性別・年齢・没入感・VR 酔いをしたか・操作感はどうだったか・クリアタイムについて質問をする。また、視点切り替えを体験した後のアンケートは それらに追加して、視点を切り替えた回数についても質問する。没入感については５段階、VR 酔いと操作感については 4 段階で評価をしている。

2. 2.4 実験手順

実験は下記の手順で行った。

1. 今回体験してもらう VR ゲームのルールと操作方法の説明をする
2. スマートフォンをあらかじめ挿入した VR ゴーグルをバンドと焦点を調節して装着して椅子に座ってもらう
3. 一人称視点の VR ゲームを体験してもらい、その後一人称視点用のアンケートに回答してもらう
4. 三人称視点の VR ゲームを体験してもらい、その後三人称視点用のア ンケートに回答してもらう
5. 視点切り替えの VR ゲームを体験してもらい、その後視点切り替え用 のアンケートに回答してもらう

3. 結果・考察

3.1 結果

宮崎大学工学部に在籍する２０代の男性１２名を対象に実験を行った。

3. 1.1 没入感・VR 酔い

没入感は、とても良かった・良かった・普通・悪かった・非常に悪かった の 5 段階で評価している。VR 酔いについては、かなりした・した・ほとん どしなかった・しなかったの 4 段階で評価している。没入感はとても良かったを 5、非常に悪かったを 1 とし、VR 酔いはかなりしたを 4、しなかったを 1 と数値に置き換えて記述する。また、没入感とは VR の世界観にどこまで集中できたかを指している。今回のゲームの場合、自分がキャラクターとなってオブジェクトを回収していると感じることができたかについて回答している。 被験者にランダムな番号を割り当てそれぞれのアンケートに対する回答を以下の表 2 および表 3 にまとめた。

没入感

表 2：没入感

被験者	一人称	三人称	切り替え
1	5	5	5
2	4	4	4
3	4	4	4
4	4	4	4
5	3	3	3
6	4	5	5
7	4	3	4
8	5	2	4
9	5	3	4
１０	3	5	3
１１	4	3	3
１２	4	4	4

VR酔い

表 3：VR 酔い

被験者	一人称	三人称	切り替え
1	3	1	3
2	1	1	3
3	3	1	3
4	2	2	2
5	2	1	2
6	1	1	1
7	3	3	3
8	1	1	1
9	1	1	1
１０	3	1	3
１１	2	2	3
１２	1	1	1

3.1.2 クリアタイム

各 VR ゲームで、すべてのオブジェクトを回収するまでに経過した時間を 小数第二位まで記録した。クリアタイムはすべて秒である。一人称視点から三人称視点に切り替わった回数も同時に記録している（表4）。

表4：クリアタイムと切り替え回数

被験者	一人称	三人称	切り替え	回数
1	54.00	28.10	50.50	5
2	43.65	20.00	48.82	3
3	51.02	22.45	43.79	4
4	52.62	15.54	54.77	3
5	52.16	15.78	45.84	5
6	62.19	14.62	54.07	2
7	56.72	17.70	57.70	7
8	91.42	39.67	60.50	5
9	44.43	19.32	38.83	1
１０	58.65	15.05	45.42	5
１１	61.35	34.53	53.40	3
１２	64.40	23.80	51.50	5

3.2　その他

ここでは、アンケートに設けた自由記述欄に記載された内容について各視点ごとにまとめる。記載されている内容を原文の状態で記載している（表5～表7）。

一人称視点

表5：一人称視点に対する自由記述

難しかった。バックの加速で目が疲れた
操作を理解するのに少々時間がかかった
とにかく操作が難しかった
向いた方向と操作方向が一致していないので直感的な操作が難しかった

三人称視点

表6：三人称視点に対する自由記述

酔いはなく一人称の時よりやりやすかった。
操作感については PC ゲームに 慣れているかどうかが影響されていると思う
玉そのものになったというより玉を操作している感覚の方が近い
操作がしやすいと言うより操作に慣れた感じがする
覗き込む視点が周りを見渡す際に動かし安くなった
三人称視点の方が一人称に比べやりやすかった。慣れもあると思うが、クリア時間も大幅に早まった。

視点切り替え

表7：視点切り替えに対する自由記述

一人称の場合は自分の位置が分かりにくかったが、3 人称切り替えができることでやりやすかった。
いきなり視点が変わるので VR 酔いしやすいように感じた、 壁にぶつかって俯瞰的に見た時に今いる場所が分かるのが面白いと思った
コツがいる、三人称にしてから隣を取ってみたいな攻略法がありそう
とにかく一人称が操作しにくい
視点切りかえが起こった際に自身の位置がとっさに把握出来ず苦労した
視点切り替えのタイミングで図形感覚の認識がズレて酔いやすかった

4.　考察

実験結果より、一人称視点でのクリアタイムより三人称視点でのクリアタ イムが短い結果となった。また、一人称視点と視点切り替えの間にクリアタイムの大きな差は無い結果となった（図6）。ここで、短縮した時間に着目すると一人称視点と三人称視点とのクリアタイムの差が大きいほど、一人称 視点を視点切り替えに変更した場合短縮できる時間が大きくなっている。一人称視点と三人称視点とのクリアタイム差と一人称視点と視点切り替えとのクリアタイムの差の相関係数は0.64 となっており、正の相関があると言える(図7)。

上記より、一人称視点と三人称視点との操作精度に大きな差がある人ほど 視点切り替えは有用であると考えられる。ただし、必ずしもクリアタイムが短くなるとは言えないので注意が必要である。

切り替え回数と一人称からの短縮時間の相関係数は0.18であり、相関関係は存在しないと考えられる。また、切り替え回数と三人称視点からの増加時間でも同様に相関関係は存在しないと言える(図8)。

VR酔いについては、三人称視点が一番VR酔いをしないという結果となった。しかし、一人称視点と視点切り替えの間にVR 酔い発生の大きな差は無い。このことから、視点切り替えはVR酔いに対して大きな影響を与えることはないと言える。

没入感に関しては、一人称と視点切り替えとの間に大きな差は認められず、三人称と視点切り替えでは視点切り替えの方が優位のスコアを示した。 よって、一人称視点と視点切り替えのは三人称視点でのVR体験と比べて没入感が高いと言える。

以上の結果より、VR 映像などの没入感を重視するVRコンテンツでは一人称視点でのVR体験が優れており、VRゲームなどのVR酔いが高い確率で発生する可能性があるものは三人称視点でVRコンテンツを提供することにより、より良いVR体験を提供することができると考えられる。

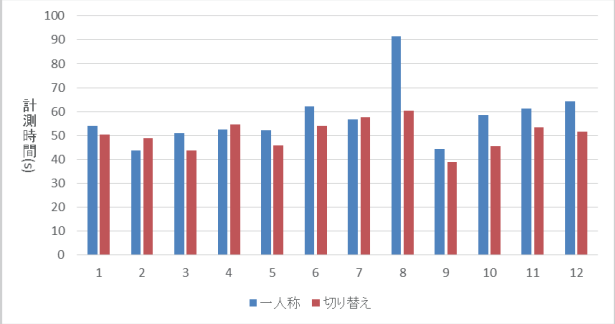


図 6：一人称と切り替えの時間比率

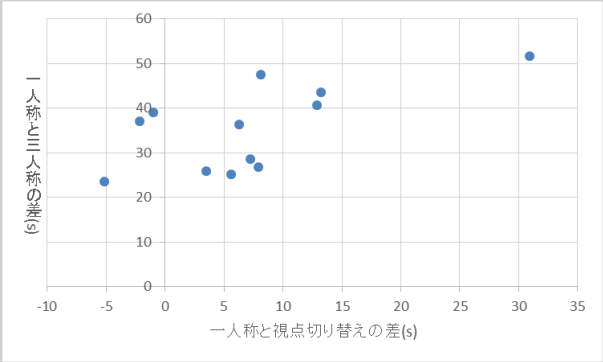


図 7：一人称と三人称の差と一人称と切り替えの差

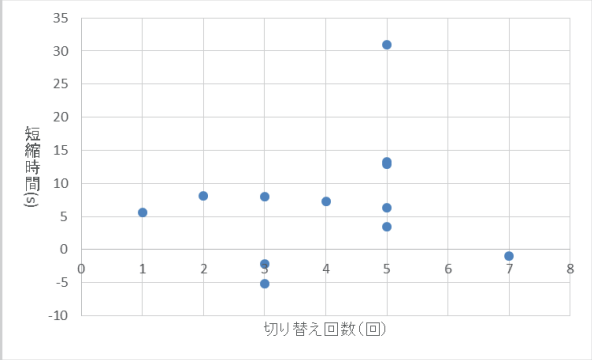


図 8：三人称と切り替えの時間増加と切り替え回数の関係

5. おわりに

本研究では、VR 体験において視点切り替えシステムの構築とその優位性について考察した。結果としては、視点切り替え機能を利用することで、一人称視点と比べて没入感を現象させることなく操作制度を上昇させることに 成功した。そのため、VR ゲームなどの没入感を維持しつつ操作制度も向上させなければならない VR コンテンツには、視点切り替え機能が有効であると言える。

しかし、今回行った実験では対象者に偏りがあり、一般的に同様の結果が 得られるかは未知数である。また、今回使用した VR コンテンツは短時間のものであり、より長時間の実験では異なる結果が得られる可能性もある。この２つの点は今後の課題となる。

最後に、本研究を行うにあたり貴重なご意見を頂いた坂本研究室、ならびに実験に協力して頂いたすべての皆様に深く感謝の意を表する。

参考文献

1)Goo 辞書，バーチャルリアリティー https://dictionary.goo.ne.jp/word/バーチャルリアリティー/#jn173010 (2022-12-22).

2) KEYENCE,HMD,Iot 用語辞典 https://www.keyence.co.jp/ss/general/iot-glossary/hmd.jsp (2022-12-22).

3) JuHye Won, MS; Yoon Sang Kim, PhD A New Approach for Reducing Virtual Reality Sickness in Real Time: Design and Validation Study JMIR Serious Games , 2022, vol.10, iss.3, pp.1-10.

4) 湯川智浩、林篤司、岩下志乃、HMD アクションゲームにおける視点切り替えによる酔い軽減手法 ヒューマンインタフェース学会論文誌 , 2015 , 17 , 1 , p.441-444.

5) Unity Technologies, 当社について https://unity.com/ja/ourcompany (2022-12-22).

6) Singla A, Fremerey S, Robitza W, Raake A, Measuring and comparing QoE and simulator sickness of omnidirectional videos in different head mounted displays, 2017 Ninth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 2017, 10.1109/qomex.2017.7965658.

7) NO システム,NO ライフ ，Unity でミニゲーム「玉転がし」を作成 https://nosystemnolife.com/unity-rollaball/ (2022-12-5) .

8) FREE SWORDER , 【メモ】Unity で作ったゲームをスマホ VR に対応させる方法 https://freesworder.net/unity-smartphone-vr/ (2022-12-5).

映像制作のカスタマイズに関する基礎研究

井手　理智[a)]・坂本眞人[b)]

Basic Study on Customization of Video Production

Masatomo IDE, Makoto SAKAMOTO

Abstract

When creating a video includes characters, The background colors, text colors, and fonts to be combined with the target characters are created in video editing software, using color palettes and customized materials, The decision is made after many hours and repeated simulations. When using free background-free characters or original characters, in beginners with limited experience in video editing and limited knowledge of color schemes, the time required will be much greater. Therefore, in this study, we developed a simulation method for beginners who do not have much experience in video editing and knowledge of color schemes, this study is a prototype of a program that can help reduce the time required for trial-and-error and simulation of customization of backgrounds and text suitable for background-less character images. The results of the evaluation experiment showed that the system was efficient in customizing backgrounds and text to suit the background-less character images, but that the interface needed improvement.

Keywords: Color Schemes, Customized Image, Video Editing, Web Font

1. はじめに

あるものを宣伝・理解を深めてもらうための「プロモーションビデオ」をはじめ、クライアント側へ情報をより分かりやすく伝え、より興味を引くための手段として動画が用いられることが近年増加傾向にある。講談社が運営する、BtoB 向けマーケティング情報コンシェルジュサイト『C-station』が 2018 年 3 月に日本国内在住の男女 3～74 歳 4,500 名を対象として、楽天インサイトへの委託で実施したキャラクターパワーリサーチ [1)]によれば、キャラクターを広告に用いることで半数以上が、「目にとまりやすくなる（63.6％）」「無意識に視野に入ってくる（52.9％）」といった「注目・興味を引く」ことにおいて肯定的回答をしている。このことから、そういった対象に動画への興味を抱かせるために、ゆるキャラやイメージキャラクターといった、二次元キャラクターを動画に含めることが、有効な手段といえるだろう。動画中にキャラクターを登場させる際には、視認性を落とさず、キャラクターを魅力的に見せ視聴者を引き付けるために、キャラクターを引き立てる背景やそれらの色に合わせて対象のキャラクターに組み合わせる背景色やテキスト色、フォントは、動画編集ソフトにおいて、カラーパレットやカスタマイズ済みの素材(テンプレート)を用いて、合っているかを実際に試していき、最適なものを見つけていく。つまり、多くの時間とシミュレーションの繰り返しが必要なのだ。無背景のフリー素材のキャラクターやオリジナルのキャラクターを用いる場合、動画編集の経験と、配色の知識が浅い初心者においては、かかる時間はより増えるだろう。そこで本研究では、動画編集の経験と、配色の知識が浅い初心者向けの、無背景のキャラクター画像に適する背景とテキストのカスタマイズについてその試行錯誤とシミュレーションの時間を削減する一助になるプログラムの試作を行うことにした。

a)　工学専攻機械・情報系コース大学院生
b)　工学基礎教育センター教授

2. プログラムの仕様

2.1. プログラム試作環境

プログラムの試作は以下の環境で行った（表 1）。

表 1：プログラム試作環境

OS	Windows 10 Pro
メモリ	16GB
プロセッサ	Intel(R) Core(TM) i7-7700CPU 3.60GHz
GPU	Intel(R) HD Graphics 630
プログラミング言語	HTML,CSS,JavaScript,MySQL

2.2. プログラムのフロー

このプログラムは、現時点ではローカルサーバを介して動作する Web ページであり、キャラクター画像のアップロード、登録情報一覧表示を担う「ベースページ(/)」アップロードした画像のクリック位置からメインカラー・アクセントカラーを決定、更新するページ(/image_analyze)、４つの 2 択項目からキャラに合うフォントを決定するページ(/font)、登録情報をもとに、背景とテキストをカスタマイズして、出力画像を生成、ダウンロードするページ(/image_design)の 4 ページから成る。

プログラムの流れを以下に簡単に示す。

1. 無背景キャラクター画像をアップロード

2. キャラクター画像のクリック位置の RGB 値を取得
3. 2 で取得した値をカラーコード化し、メインカラーとして登録
4. 2, 3 を再度繰り返し、アクセントカラーとして登録
5. 4 つの評価項目からフォントの種類を決定
6. 登録した 3 つの情報をもとに、背景とテキストをカスタマイズ
7. 出力画像生成・ダウンロード

また、各ページへの遷移図を下に示す（図 1）。これより、各ページの機能についての詳細を記す。

2.2.1.　ベースページ(/)

本プログラムのベースページ。画像アップロードを受け付け、各値の設定ページへの遷移と情報一覧の機能を持つ。

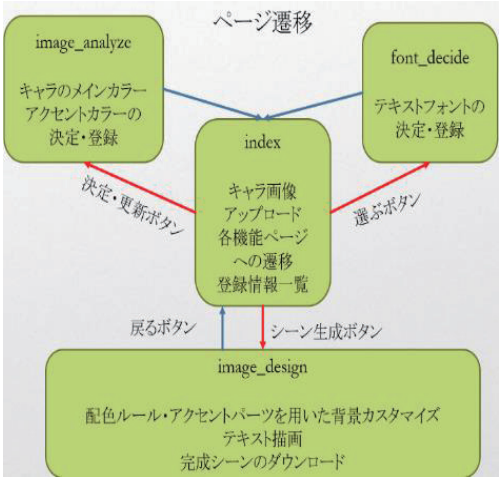


図 1：ページ遷移図

［構成と操作手順］

1. 無背景のキャラクター画像(jpeg, png)をアップロード
2. 画像一覧が更新され、アップロードした画像が表示される
3. ボタン群（図 2※1）よる遷移先ページにて、メインカラー・アクセントカラー・フォントの値を設定していくと情報群（図 2※2）が更新される

図 2：ページ全体図(/)

2.2.2.　カラー設定ページ(/image_analyze)

図 3 上枠は以下の方法で色を選ぶ箇所である。このページで再表示された画像の中から、ユーザのクリックによりメインカラー・アクセントカラーを決定する。図 3 下枠には、現在値および、このページにて決定した変更値を表示。「この色に決定する」ボタンで、下枠で指定した変更値を新たなメインカラー・アクセントカラーに設定

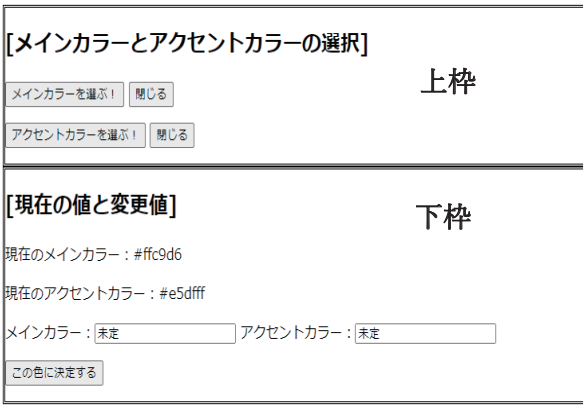


図 3：ページ全体図(/image_analyze)

できる。

図 4：メインカラー設定パート

[構成と操作手順（※図 4 参照）]
1.「メインカラーを選ぶ！」ボタンをクリックすると、ボタン下部に画像が表示される。
2.画像内から、メインカラーに設定したい色を持つ部分をクリックすると、その位置の RGB 値を読み取り、カラーコード化して変更値として図 3 下枠に表示される。画像下部にある「決定」ボタンをクリックすると選択した色が正方形で表示される。
3.アクセントカラーも、「アクセントカラーを選ぶ！」ボタンより、同様の方法で色を選ぶ。
4. 図 3 下枠「この色に決定する」ボタンで 1~3 で選んだメインカラー・アクセントカラーの値を登録できる。登録と同時に、ベースページへ遷移する。

2.2.3. フォント決定ページ(/font)

対象の画像（キャラクター）のイメージに合うフォントを 4 つの 2 択項目の選択の組み合わせによって決定する。項目の組み合わせと、対応するフォントを表 2 に示す。

表 2：対応フォント一覧

Cool(0) or Cute(1)	Digtal(0) or Hands On(1)	Thick() or Thin(1)	Unique Value 0：small 1：large	対応フォント
0	0	0	0	あずきフォント [2]
0	0	0	1	からかぜ [3]
0	0	1	0	たぬき油性マジック [4]
0	0	1	1	めもわーる [5]
0	1	0	0	JK ゴシック L[6]
0	1	0	1	PixelMPlus[7]
0	1	1	0	ラノベ POP[8]
0	1	1	1	うたミンフォント [9]
1	0	0	0	マキナス 4-flat[10]
1	0	0	1	KouzanOTF[11]
1	0	1	1	しょかきうたげ [12]
1	1	0	0	游明朝 Light
1	1	0	1	刻明朝フォント [13]
1	1	1	0	装甲明朝 [14]
1	1	1	1	源界明朝 [15]

※表 2 における「ユニーク性」とは、下図 5 のように、角の丸みや筆跡が特徴的であるものを（large）、明朝体や游明朝など、レポートや報告書によく用いられる、特徴が少ないものを（small）としている。

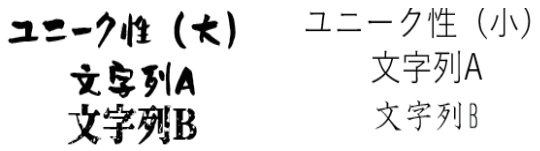


図 5：ユニーク性分類のサンプル

[構成と操作手順（※図 6 参照）]
1. 4 つの 2 択項目「かっこいい　かわいい」「デジタル風　手書き風」
「太い　細い」「ユニーク性（大）　ユニーク性（小）」について、イメージと最も合致する組み合わせを選択する。
2. 「この組み合わせのフォントに決定」ボタンでフォントの種類を登録。登録と同時にベースページへ遷移。
※図 6 右下の「Sample はこんな感じ！」とある部分は、現在の組み合わせで適用されるフォントを視覚的に確認するためのものである。

図 6:ページ全体図(/font)

2.2.4. シーン生成ページ(/image_design)

これまでに設定してきたメインカラー・アクセントカラー・フォントの情報をもとに実際にシーンを生成する。主に、以下のことを機能として備える。
・テキストの登録、描画
・メインカラー・アクセントカラーを使用した簡易背景の生成
・カスタマイズパーツによる背景の装飾
・完成イメージはダウンロード可
※キャラクター画像、テキスト、背景パーツはすべて、図 7 赤枠[960*540(px)]に描画される。

図 7:ページ全体図(/image_design)

2.2.4.1. テキスト描画

入力欄にテキストを入力し、登録ボタンで対象テキストが登録テキスト一覧に表示される。テキストサイズと枠内における相対位置[x,y]を決め、「この位置で描画する」ボタンで描画できる。図 8 中の「大体この辺り！」は描画座標の現在値を示す指標の役割のため設置。表示・非表示を任意で切り替えられる。

図 8：テキスト描画部分

2.2.4.2. 簡易背景描画

設定されたメインカラー・アクセントカラーの値に 7 種類の配色アルゴリズムと簡単な 2 色配置計 9 種類の簡易背景を 4 つのボタンによって切り替えて描画できる。

・統一感を出す(図 9,10)
・白と黒を使用した簡単な 2 色背景(図 11)
・メインカラーとアクセントカラーを用いた簡単な 2 色背景(図 12)

図 9 統一感を出す背景（明）図 10 統一感を出す背景（暗）

図 11：白黒の 2 色簡単背景　図 12：メインカラーとアクセントカラーを用いた 2 色簡単背景

・メインカラーを用いたグラデーション背景（図 13~17）

図 13：2 色グラデーション　図 14：3 色グラデーション

図 15：4 色グラデーション　図 16：5 色グラデーション

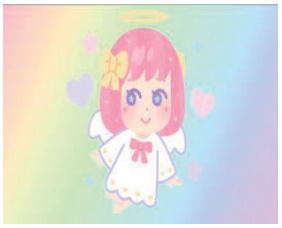


図 17：6 色グラデーション

2.2.4.3. カスタマイズパーツによる装飾

パターン描画パート下にあるパーツ画像をクリックすることで、枠内にカスタマイズパーツを描画できる。

「ストライプ柄背景」、「立ち絵に影付け」の他、図 18 のチェック欄に✓をつけていくことで表示されるカスタマイズパーツが増える（図 19）。

図 18:カスタマイズパーツ(default)

図 19：カスタマイズパーツ(another's) [16),17),18)]

2.3. 7 種類の配色法

ここで、適用した 7 種類の配色法とそのアルゴリズムの実現において活用した理論を記述する。

2.3.1. ダイアード配色

色相差が 180°ある 2 色を使用する配色 [19)]。
ダイアード配色における 1 色目の色相値を x°とすると、後続の色相値は以下の式で表される。
(x+180)°
ダイアード配色の色相値：[x,x+180]
※もし、各値が 360 を超えた場合、360 を減算する。

2.3.2. トライアド配色

色相差が 120°ずつある 3 色を使用する配色 [20)]。
トライアド配色における 1 色目の色相値を x°とすると、後続の色相値は以下の式で表される。(i は番数を表す。)
(x+120*(i-1))°
トライアド配色の色相値：[x,x+120,x+240]
※もし、各値が 360 を超えた場合、360 を減算する。

2.3.3. テトラード配色

色相差が 90°ずつある 4 色を使用する配色 [21)]。
テトラード配色における 1 色目の色相値を x°とすると、後続の色相値は以下の式で表される。(i は番数を表す。)
(x+90*(i-1))°
テトラード配色の色相値：[x,x+90,x+180,x+270]
※もし、各値が 360 を超えた場合、360 を減算する。

2.3.4. ペンタード配色

色相差が 72°ずつある 5 色を使用する配色 [22)]。
ペンタード配色における 1 色目の色相値を x°とすると、後続の色相値は以下の式で表される。(i は番数を表す。)
(x+72*(i-1))°
ペンタード配色の色相値：[x,x+72,x+144,x+216,x+288]
※もし、各値が 360 を超えた場合、360 を減算する。

2.3.5. ヘクサード配色

色相差が 60°ずつある 6 色を使用する配色 [23)]。
ヘクサード配色における 1 色目の色相値を x°とすると、後続の色相値は以下の式で表される。(i は番数を表す。)
(x+60*(i-1))°　ヘクサード配色の色相値：
[x,x+60,x+120,x+180,x+240,x+300]
※もし、各値が 360 を超えた場合、360 を減算する。

3. 評価実験

作成したプログラムについて、以下のことを確かめるため、評価実験を行った。

- 作成目的の達成具合
- 出力画像（カスタマイズイメージ）のクオリティ満足度
- ユーザーインターフェース（UI）の評価点と改善点の把握

【実験内容】

実験内容は以下の 2 つのことを行った。

- 作成したプログラムを操作して、16 種類の無背景画像から 1 つを選択し、アップロードからカスタマイズを行い、完成イメージをダウンロードする。
- 評価アンケートに回答する。

実験環境を以下の表に示す。

表 3:実験環境

OS	Windows 11 Home
メモリ	8GB
プロセッサ	Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU 1.80GHz
GPU	Intel(R) UHD Graphics 620
実行環境	ローカル

4. 結果

実験は、高校 3 年生～大学 4 年生の学生 13 名に行った。被験者が生成した入力画像と出力画像のペアの一部

（図 20、21）と、評価アンケートの回答結果をまとめ記す。

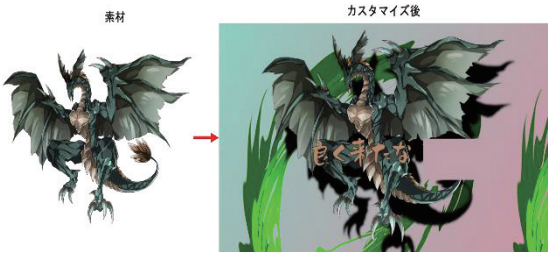


図 20：実験結果 例 1

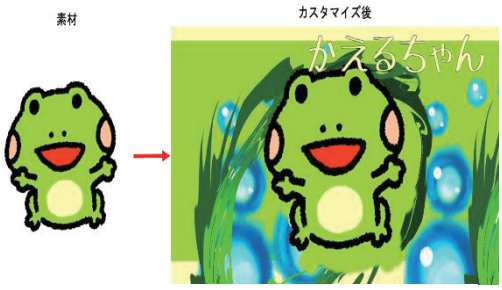


図 21：実験結果 例 2[24)]

【アンケート結果　n=13　n…被験者数】

- 作成目的の達成具合
  Q.　自分で 1 から作るよりも簡単かつ、短時間で作れると感じた

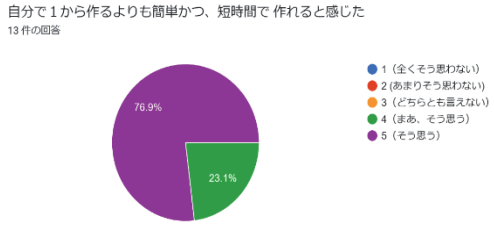


図 22：アンケート結果 1

- 出力画像のクオリティ満足度
  Q. 生成シーンへの満足度

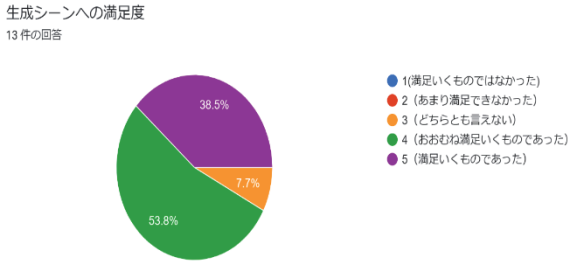


図 23：アンケート結果 2

- UI の評価点と改善点
  - ➢　ベースページ(/)

【評価点】

画像アップロードまでの操作がシンプルで分かりやすかった

【改善点】

アップロードした画像は新しい順に上から並べた方が良い

- ➢　カラー設定ページ(/image_analyze)

【評価点】
色をキャラクター画像から決めるアルゴリズム
【改善点】
スクロールの手間
読み取った色をすぐ確認できない
一部ボタンの認識がしづらい

- ➢　フォント決定ページ(/font)

【評価点】
フォントを決めるアルゴリズム
右側のサンプルで実際のフォントを簡単に確認できる
【改善点】
ユニーク性の意味が伝わりづらい
一部の文字が非表示になる

- ➢　シーン生成ページ(/image_design)

【評価点】
事前にカスタマイズパーツがあり加工に困らない
【改善点】
スクロールの手間
カスタマイズパーツやテキストは 1 つずつリセットしたい
カスタマイズパーツの描画座標編集機能が欲しい
一部ボタンの見つけづらさ

5.　考察

今回、13 名に協力してもらいプログラムの試用と評価アンケートを実施した。

本プログラムの作成目的である「無背景のキャラクター画像に適する背景とテキストのカスタマイズについてその試行錯誤とシミュレーションの時間を削減する」に関する質問：「自分で 1 から作るよりも簡単かつ、短時間で作れると感じた」に対し、被験者全員から肯定的な回答を得られたことから、効果があったと考えられる。テキストの視認性については、自動で配色されたテキストは見やすかったかという問いに対して高い評価を多く得たが、同じ色の背景とテキストが重なってしまうような特定の場合において視認性が著しく低下するため、自動

で配色する方法を増やすなどして対応の必要がある。
また、4 つすべてのページにおいて、ユーザーインターフェースに関する改善の指摘があった。そのうち、以下の 3 点については今後解決の手法を調査する必要がある。
【カラー設定ページにおける改善点】
・色の読み取りを画像オリジナルサイズでなくてもできるアルゴリズムへ
【シーン生成ページにおける改善点】
・カスタマイズパーツやテキストは１つずつリセットしたい
・カスタマイズパーツの描画座標編集機能が欲しい
上記 3 点を除く問題点においては、改善案を以下の表に示す。

表 4：改善可能な問題点

対象ページ	問題点	改善案
ベースページ	最新のアップロードした画像が一番下に来るため、見つけづらい	データベースからのデータ集合を id 基準に降順で受け取る
カラー設定ページ	取得した色がすぐ確認できない	確認用の正方形を画像の右横に配置 ↓ 画像の縮小化
カラー設定ページ	一部ボタンの見えづらさ	ボタンの拡大化と間を広げる
フォント決定ページ	ユニーク性の意味が伝わりづらい	ユニーク性について、 図解を含む 説明ダイアログを作る
フォント決定ページ	一部の文字が非表示になる	一部の漢字やアルファベットに非対応であるため、 類似する別のフォントの探索か、有料版の導入
シーン生成ページ	スクロールの手間	描画枠の位置をスクロールに追従するよう改善
シーン生成ページ	一部ボタンの見つけづらさ	カーソル変化を加える 色を変える・境界線で囲むなどの特徴をつける

また、より使いやすく、完成までのフローを簡単化するためプログラムに以下のアップデートを今後加えていきたい。
・AI を使ったメインカラー・アクセントカラーの決定
：ユーザに画像をクリックさせる手間を省ける。
・ユーザ ID とパスワードの導入によるユーザごとのページ表示
：複数ユーザからの登録情報を分離でき、ベースページをスクロールする手間を軽減できる。
・ユーザがカスタマイズに使用したカスタマイズパターンや背景の組み合わせをデータベースに保存
：ページを再読み込みしても、編集データをすぐに復元できる。

6. 結論

本研究では、配色の知識と動画編集経験が浅い初心者向けに、無背景のキャラクター画像に適する背景とテキストのカスタマイズについてその試行錯誤とシミュレーションの時間を削減する一助となるプログラムの試作を行った。
プログラムに関しては、作成目的の達成度・完成した出力画像の満足度・完成までに導入した手法において高い評価を得られた。しかし、ユーザインタフェースについては改善点が多い結果となった。今後は、さらなる手順の簡単化と、今回の実験で分かったユーザインタフェースの改善を行いより使いやすいプログラムへとアップデートしていきたい。

7. 謝辞

本研究にあたり、評価実験およびアンケートにご協力頂いた皆様に深く感謝の意を表する。

参考文献

1)https://c.kodansha.net/news/detail/36532/ (2023/4/26 閲覧).
2)http://azukifont.com/font/azuki.html (2022/12/23 閲覧).
3)https://enuoka.booth.pm/items/1219316 (2022/12/23 閲覧).
4) http://tanukifont.com/tanuki-permanent-marker/ (2022/12/23 閲覧).
5)http://modi.jpn.org/font_memoir.php (2022/12/23 閲覧).
6)http://font.cutegirl.jp/jk-font-light.html (2022/12/23 閲覧).
7)https://itouhiro.hatenablog.com/entry/20130602/font(2022/12/23 閲覧).
8)http://www.fontna.com/blog/1706/(2022/12/23 閲覧).
9)https://palettype.booth.pm/items/177908 (2022/12/23 閲覧).
10)https://moji-waku.com/makinas/ (2022/12/23 閲覧).
11)https://opentype.jp/kouzangyousho.htm (2022/12/23 閲覧).
12) https://shokaki.booth.pm/items/1492419 (2022/12/23 閲覧).

13)https://freefonts.jp/font-koku-min.html
(2022/12/23 閲覧).
14)http://flopdesign.com/blog/font/5228/
(2022/12/23 閲覧).
15)https://flopdesign.com/blog/font/5146/
(2022/12/23 閲覧).
16) https://flowerillust.com/pop.html
(2023/1/19 閲覧).
17)https://photo-step.co.jp/illustkobo/
(2023/1/19 閲覧).
18) https://nanamiyuki.com/ (2023/1/19 閲覧).
19)https://www.colorsample.com/colorschemes/rule/dyads/ (2023/1/6 閲覧).
20)https://www.colorsample.com/colorschemes/rule/triads/(2023/1/6 閲覧).
21)https://www.colorsample.com/colorschemes/rule/tetrads/(2023/1/6 閲覧).
22)https://www.colorsample.com/colorschemes/rule/pentads/(2023/1/6 閲覧).
23)https://www.color-sample.com/colorschemes/rule/hexads/
(2023/1/6 閲覧).
24) https://hiyokoyarou.com/ (2023/1/19 閲覧).

Blender におけるユーザの選択時誤作動を防ぐ拡張機能の検討

森本　光喜[a)]・坂本　眞人[b)]

A Study on Extensions to Prevent User Selection Malfunctions in Blender

Kouki MORIMOTO, Makoto SAKAMOTO

Abstract

In recent years, three-dimensional computer graphics (3DCG) technology has been used for descriptive representation in animation and film, as well as for character models in games. 3DCG modeling technology, which is the foundation of 3DCG technology, can be easily performed by anyone using the open-source freeware 3DCG rendering software Blender. However, Blender, which is basically a manually operated software, can cause user errors due to its manual operation. In this study, we focused on the problems of selection omissions when selecting a range of arbitrary objects with the mouse and the visibility of vertex coordinate values when moving arbitrary objects and developed a program to solve these problems as a new add-on for Blender. The purpose of this add-on is to assist the user's operation of Blender.

Keywords: 3Dmodel, Multiple selection vertices, Vertex index, Visualization, Work efficiently

1. はじめに

今日３次元コンピュータグラフィックス(3DCG)技術は、アニメ・映画等のエンターテインメントコンピューティングの分野だけでなくインターネットのウェブサイトコンテンツやインダストリアルインテリア、医療の分野や企業のプレゼンテーションの場など、様々な分野で活用されており、多くの人々が３DCG 技術を常日頃目の当たりにしているのではないだろうか。３DCG 技術は着々と進歩しており、３DCG 技術の活用で実現できることが多く考えられ、今後もさらに需要が増えていく将来性ある分野と言える。[1-3)]

著者が所属する研究室は、2022 年 7 月 30 日と 31 日に米良電機産業株式会社が創立 70 周年を記念に開催したイベントでは宮崎大学部農学部の SDGs をテーマにした活動報告を設けた展示会に AR・VR 体験として提携した。AR 体験コーナーでは、来場客が特有のアプリをインストールした携帯端末のカメラ機能で様々なキャラクターがプリントされたカードを読み込み、携帯端末でキャラクターのアニメーションを閲覧する体験ができた。一方、VR 体験コーナーでは、予め用意した VR 体験ができるゴーグルを用意し、来場客が装着したゴーグルを通して AR 同様のキャラクターアニメーションを 360 度で鑑賞する体験ができた。その AR や VR の映像の中で複数のゆるキャラの３DCG モデルを制作した（図 1)。

結果的にイベントは特に問題もなくやり遂げることができたのだが、3D モデルを制作する際に使用した Blender ソフトの仕様についていくつか誤操作を招きかねない問題点が生じた。本研究では 3DCG レンダリングソフト Blender を用いた 3D モデル制作における問題点を解決し、より効率的に制作を行える補助を拡張機能として、新たなアドオンを開発した。

図 1. イベント時に自身で手掛けたオリジナルのゆるキャラ例

2. 研究背景

まずは本論文で取り上げる Blender の誤操作を生じる問題点について提示していく。問題点は以下の通りである。

［問題 1］: マウス操作時の任意オブジェクトの範囲選択における選択漏れ

［問題 2］: 任意オブジェクトの移動における頂点座標の数

a）工学専攻機械・情報コース大学院生

b）工学基礎教育センター

値の視認性

［問題1］について

Blender で 3DCG モデルを制作する時、ユーザは基本的にマウス操作、キーボード操作を行いながら制作していく。任意のモデルを制作する際、はじめにユーザはメニューからオブジェクトを追加し、そのオブジェクトの頂点、辺、面を独自で移動させる必要がある。オブジェクトは頂点、辺、面の各要素で範囲選択ができ、選択された範囲に含まれる要素には同時に移動、削除などの次の操作が行える。しかし、これらの操作はユーザが手動でマウスのドラッグ操作を行うため、範囲選択に任意の要素が入っておらず次の動作に支障をきたす場合がある（図2）。

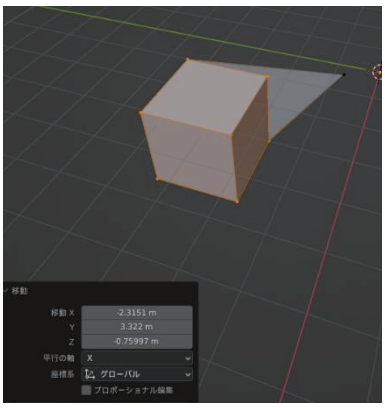


図 2.　範囲選択がうまく操作できず、失敗している様子

［問題2］について

Blender は初期設定で 3D ビュー画面の右端にあるアイテムタブで選択した頂点の座標が表示されており、ユーザは閲覧することができる。しかし、単一の頂点であれば頂点の座標が表示されるが、複数の頂点を選択している場合は各頂点の座標を同時に表示することはなく、選択した頂点の中点座標を表示するのみに切り替わる（図3）。

また、3D モデルを制作する場合、回転移動や平行移動を行う際にキーボード操作で座標の数値を入力してその数値分の動作を行うことができる。したがってオブジェクトに様々な変化を重ねて仕上げていく 3DCG モデル制作ではユーザが操作をするために頂点の座標を簡潔な数値に整えておくことが後の制作過程において有用である。

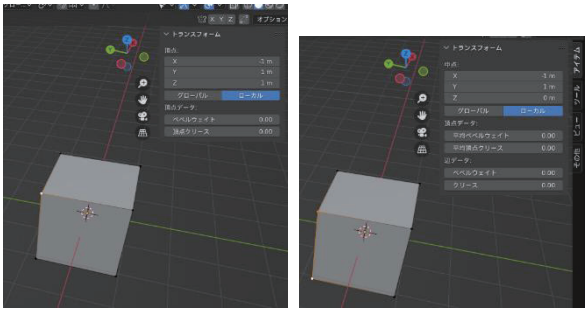


図 1.　座標表示が複数の頂点を選択した際に中点表示に切り替わる様子

Blender で 3D 制作を行う際、いくつかの機能には隣接した頂点同士の軌道関係により処理が制限されるものがある。これらを防ぐためには頂点の座標を座標軸で揃える必要がある。

以上より本研究では、［問題1］で挙げている頂点の選択漏れを防ぐために、ユーザが全体の頂点選択をするような操作をした際に対象のオブジェクトの頂点がすべて選択されていない場合、3D ビュー画面内に警告文を表示し、選択されていない頂点を視認できる機能を開発した。また、［問題2］を解決するために、選択した頂点の座標を 3D ビュー画面内に表示し、選択した頂点を視認できる機能を開発した。

3.　開発環境

以下表1は、本研究の開発環境である。

表 1.　開発環境

OS	Windows10 21H2
プロセッサ	Intel(R)　Core(TM)　i7-7700 CPU @ 3.60GHz
プログラミング言語	Python
ツール開発	Blender 3.1.2

※本研究で使用した Blender は、Blender 内で日本語翻訳機能を設定した状態で使用しているものである。

4.　機能の実装

本研究で開発したアドオンの基本的な動作は、以下の操作を行った状況下で使用されるものとする。

1. ユーザは Blender を起動し、Layout タブで 3D モデルを制作するワークスペースを用意する。今後の動作はすべて Layout タブで行われている操作である。
2. ユーザはオブジェクトの対話モードを“編集モード”、選択モードを“頂点選択モード”にそれぞれ切り替えて行う。
3. ユーザは任意のオブジェクトに対し、マウス操作で頂点選択を行う。

本研究では実行処理を便宜上二つの機能に分け、Blender にある UI のボタン操作で処理を実行する。以下二つの機能を「機能1」「機能2」とする。

機能 1.

1　オペレーターボタン「1:start」をクリックする。

2　オペレーターボタン「1:start」が「1:stop」に表示切替えをする。

　2.1　任意のオブジェクトの選択された頂点の数が1~2 個、またはすべての頂点数でない時、以下 2.1.1~2.1.3 の処理を行う。

2.1.1 3D ビュー画面上の左上部に「全選択されていません」と緑色の強調テキストで警告文を描画表示する。

2.1.2 警告文の下部に「↓未選択の頂点一覧↓」と緑色のテキストで強調表示し、その下部にユーザが任意のオブジェクトの選択されていない頂点のインデックス番号を赤色の羅列で描画表示する。

2.1.3 2.1.2 で表示された頂点のインデックス番号を該当する各頂点の近傍に赤色で描画表示する。

2.2 任意のオブジェクトの選択された頂点の数が 1~2 個、またはすべての頂点数である時、2.1 の処理は行われない。

2.3 オブジェクトの対話モードが“編集モード”以外に切り替わった時、2.1～2.2 の処理は行われない。

3 オペレーターボタン「1:stop」をクリックする。

4 オペレーターボタン「1:stop」が「1:start」に表示切替えをする。

4.1 処理を終了する。

機能 1 では、2.1 で任意のオブジェクト選択された頂点の数がすべての頂点数でない時の他に、選択された頂点の数が 1~2 個の時も処理を行うとしているが、これはオブジェクトのメッシュ構成は頂点数が 3 個の時からであり、選択した頂点の数が 1,2 個の時ではユーザが全選択の操作をしないと推測できることから処理を加えたものである。

2.1.2 で、任意のオブジェクトの選択されていない頂点のインデックス番号を描画表示するとしているが、インデックス番号とは Blender 内で構築するオブジェクトのポリゴンを作るための頂点結び順配列のことを頂点インデックスといい、頂点インデックスを構成するオブジェクトの各頂点に振られている番号のことである。通常ユーザが Blender を操作する時、オブジェクトの各頂点インデックス番号を視認することはできない。本研究で開発したアドオンでは頂点インデックス番号を描画表示することで。ユーザがオブジェクトの各頂点を識別することを可能にしている。[4)]

2.1.3 で頂点のインデックス番号を該当する各頂点の近傍に描画表示するとしているが、この機能によりユーザが選択されていない頂点を直接識別することを可能にしている。ユーザが全選択を頂点選択漏れにより誤操作を起こした場合、ユーザはこの機能で表示された頂点のインデックス番号を頼りに再選択を見直すことができる。

また、2.1.1~2.1.3 では、警告文「全選択されていません」と「↓未選択の頂点一覧↓」は緑色のテキストで描画表示し、頂点の近傍に描画表示する頂点のインデックス番号は赤色で描画表示するとしているが、これは色彩心理学に基づいている。色彩心理学では、赤は警告的な意味を有する色で、身体への影響として交感神経を優位にし、脳を興奮させる作用があると言われている。よって結果として疲労につながりやすいため、今回大きく強調表示をする警告文では赤色ではなく、ユーザの目に負担をかけにくい緑色を使用している。一方、今回の頂点インデックス番号は一時的な注意を引き付ける目的のため、赤色を使用している。[5)]

機能２.

1 オペレーターボタン「2:start」をクリックする。

2 オペレーターボタン「2:start」が「2:start」に表示切替えをする。

2.1 任意のオブジェクトの選択された各頂点のインデックス番号とグローバル座標（x, y, z）を３Ｄビュー画面の左下部に青色のテキストで描画表示する。

2.2 2.1 で表示された頂点のインデックス番号を該当する各頂点の近傍に青色で描画表示する。

2.3 オブジェクトの対話モードが“編集モード”以外に切り替わった時、2.1～2.2 の処理は行われない。

3 オペレーターボタン「2:stop」をクリックする。

4 オペレーターボタン「2:stop」が「2:start」に表示切替えをする。

4.1 処理を終了する。

機能 2 では、2.1 で任意のオブジェクトの選択された各頂点のグローバル座標を描画表示するとしているが、グローバル座標とは三次元空間そのものの位置を表す座標のことを指す。グローバル座標と対になるものをローカル座標という。ローカル座標とは、3D 空間に配置されるオブジェクトを基準とした座標の事を指す。本研究で開発した機能ではオブジェクト全体が３D ビュー画面上を移動した際も座標の更新を行うためローカル座標ではなくグローバル座標を採用した。これにより、ユーザが複数のオブジェクトを追加し、3D ビュー画面上でオブジェクトが移動されても、任意の頂点の座標を視認しながら操作を行うことができる。

また、2.1～2.2 では、任意のオブジェクトの選択された各頂点のインデックス番号とグローバル座標、頂点の近傍に描画表示する頂点のインデックス番号は青色で描画表示するとしているが、これは色彩心理学に基づいている。今回のテキストは実行操作中常に表示されるものであるため、ユーザの目に負担をかけにくい青色を使用している。

機能 1、機能 2 は同時進行の使用が可能である。

機能 1、機能 2 ではユーザが本機能を使用する際に手数がかかることを防ぐため、オペレーターボタンを一度クリックすると、もう一度クリックするまで連続的に使用できるものとしている。

また、本機能はすべてオブジェクト対話モードが“編集

モード”の場合にのみ実行できるモジュールで開発しているため、本来当モジュールの実行処理中に“編集モード”から切り替えるとBlender本体でエラーが発生しフリーズ（応答なし）を起こすため、処理が実行されないままBlender本体を強制終了する必要がある。その対策として本機能では、オブジェクト対話モードが“編集モード”以外に切り替わった時処理の実行を中断するようにしている。

5. 実行結果

プログラムを実行した状態で、オブジェクトを選択すると図4のようなUIが追加される。このUIからボタンを押し、機能を使用する。

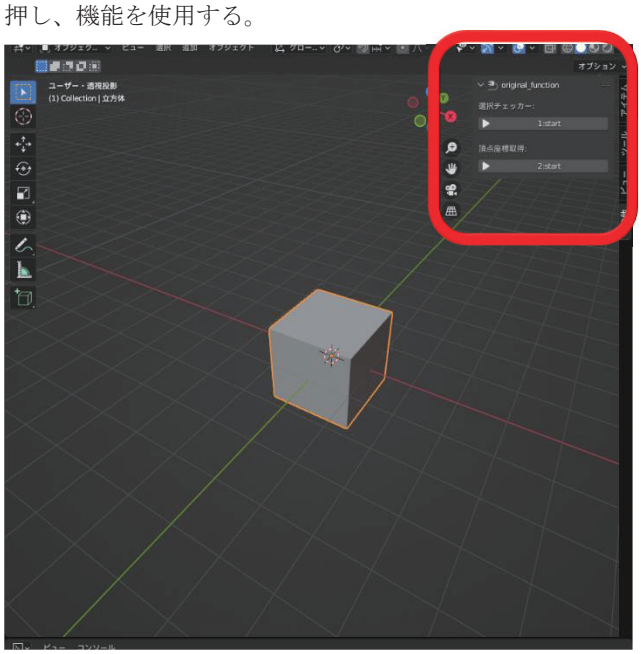


図 2.　本アドオンを導入した際のUI

本論文では操作1と操作2の場合で、実行結果を記述する。

5.1 操作1

以下の操作を行い、実行した結果を記述する。

1　オブジェクト“立方体メッシュ”を用意する。
　“立方体メッシュ”：頂点数は8
2　オブジェクト対話モードを“編集モード”、選択モードを“頂点選択モード”とする。
3　ボタン「1:start」を押す
4　以下の四通りの操作を行う
　4.1　オブジェクトの頂点を1つ選択する
　4.2　3D ビュー画面に回転などの視点変更を行わない状態の下、範囲選択でオブジェクトの全体を囲うようにマウス操作を行う。
　4.3　オブジェクトの頂点を全て選択する。
　4.4　オブジェクトの頂点を2つ選択する。
5　ボタン「1:stop」を押す
6　ボタン「2:start」を押して4〜5同様の操作を行う。
7　オブジェクトをx軸方向に+2.0だけ平行移動する。
8　頂点を1つ選択し、z軸方向に+2.5だけ平行移動する。

5.2 操作1の実行結果

以下の図5は「1:start」と「2:start」の両方のボタンを押している状態で操作1の手順4.2を実行した結果である。図5では、4章で紹介した機能1と機能2の両方が同時に実行できていることがわかる。

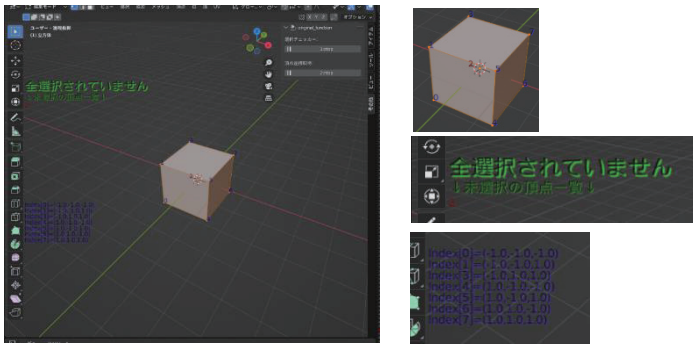


図 5.　操作1の手順4.2を実行した結果

6. 考察

5章で記述した実行結果から、本研究で開発したアドオンはオブジェクトの頂点を全選択していなかった際に「全選択されていません」の警告文と共に未選択の頂点インデックスを提示することが確認できた。

また、本来Blenderに付属されている機能では、複数の頂点の座標を随時同時に確認できるものは無かったが、本研究で開発したアドオンは実行結果の通り、実行中は複数の頂点の座標(x, y, z)が頂点インデックス番号と共に3Dビュー画面上で表示されるため、簡単に選択した頂点のグローバル座標を視認できることが確認できた。

本機能を使用する必要が無い時は、ボタンを切り替えることで3Dビュー画面上の他の情報の妨げにならないことも確認できた。

以上のことから、本研究で開発したアドオンは目的の機能を明確に実現し、実装出来ていると言える。

本論文ではオブジェクトが単純なもので実行した。次に、より複雑なオブジェクトを対象に本アドオンが実用できるかの応用検証をする。以下の図6は、2章の研究背景で記述した米良電機産業株式会社との提携イベントで実際に運用した、サクラマスのゆるキャラの3DCGモデルに本アドオンを適用した結果である。

本 3DCG モデルは 5 章の実行結果で使用したオブジェクトよりもはるかに上回る頂点数を保有しているオブジェクトであるため、頂点のインデックス表示に影響が出ると推測できる。

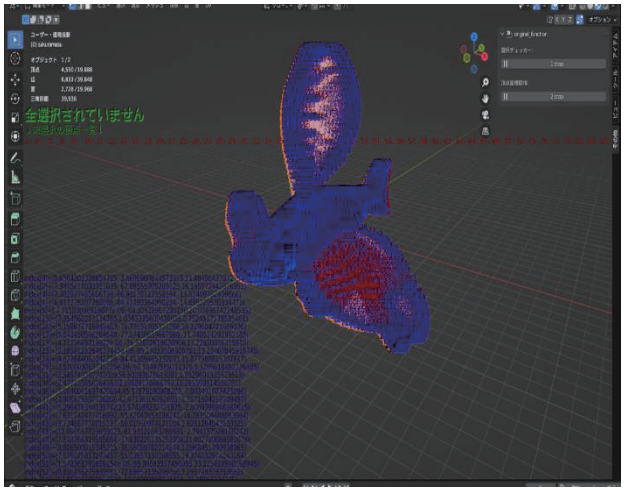


図 6.　「1:start」「2:start」をそれぞれ起動し、視点方向を切り替えず、範囲選択でオブジェクト全体を囲うようにマウス操作した結果

図 6 では、選択された頂点の数がはるかに多いことから 3D ビュー画面上ですべての頂点の情報を表示することが困難であることがわかる。

以上のことから、本アドオンは頂点数がはるかに多いオブジェクトに対しても実行処理を行うことが可能であるということが確認できた。しかし、図 6 の様に表示が難しい場合があることが確認できる。

しかし、変わらず複数の頂点の座標の表示が可能であり、頂点がすべて選択されていない場合は警告文を表示に成功しているため、本来のマウス操作時の任意オブジェクトの範囲選択における選択漏れと任意オブジェクトの移動における頂点座標の数値の視認性の問題提示に関しては達成できていると言える。

7.　結論

本論文では、Blender を使用する際にユーザが起こす誤作動の一部を防ぐために、オブジェクトの頂点が全選択されていない状況下での警告文の表示と、選択した複数の頂点のグローバル座標の提示を目的とし Blender には無いあらたな機能を持つアドオンの開発に成功した。

今後はこのアドオンを使用して、ユーザの操作補助になりえるかの評価実験の数を重ねるべきである。また本論文では Blender を研究対象にしたが、本アドオンが Blender 以外の他の 3DCG モデリングソフトで実行できるか親和性を確かめる必要がある。

本アドオンの機能で取得したオブジェクトの情報を元に 2 章の研究背景で記述した、面張り等の隣接した頂点の軌道関係に影響される操作の補助を行えると推測する。しかし、本機能の処理はいずれもオブジェクトの対話モードが“編集モード”である場合にのみ実行できる関数を使用している。したがって、“オブジェクトモード”で行う関数は並行して処理することができなかった。この並行処理を実現すると、軌道から外れた頂点をスクリプトの処理で軌道上に移動させることができると私は推測している。このオブジェクトの別対話モードとの並行処理が今後の課題として挙げられる。

また、6 章で記述したはるかに多くの頂点数を保有するオブジェクトが対象の場合に、テキストの表示が重なることを解消することも今後の課題である。

8.　謝辞

本研究の遂行にあたり、ご支援およびご協力頂いた米良電機産業株式会社ならびに宮崎大学の皆様に心から感謝の意を表する。

参考文献

1) CG で課題を解決！どんな時に CG が使われる？－その１－
https://www.h-products.co.jp/topics/entry/2020/04/01/000000_28
2) デザイナーの視点で見た 3DCG のススメ
http://3dcg.homeip.net/3d_process/3d_about_02.php
3) 3D アニメーションを動画活用するメリット・効果について解説！｜動画制作・広告動画・プロモーション動画は動画作成ツール【メディア博士】 (media-hakase.com)
https://media-hakase.com/column/article/page_909.html#link1
4) その 30　気になる頂点インデックスの意義 (marupeke296.com)
http://marupeke296.com/DXG_No30_VertexIndexBuffer.html
5) 赤は疲れる？緑は疲れない？疲れにくい配色について考えてみた ｜ ベイジの日報 (baigie.me)
https://baigie.me/nippo/2020/09/15/nevertired-color-tsukamoto/

アニメーションの中割りアルゴリズムによるキャラクターの描写Ⅲ

武村　架[a)]・園田　彰悟[b)]・坂本　眞人[c)]　・飯干　淳志[d)]

Description of the Character by the Inbetweening Algorithm for Animation Ⅲ

Kakeru TAKEMURA, Shogo SONODA, Makoto SAKAMOTO, Atsushi IIBOSHI

Abstract

The number of foreign visitors to Japan continues to increase year after year. As a result, the amount of travel spending by foreign visitors to Japan also continues to increase year after year. This is due to various measures implemented by the Japan Tourism Agency, and computer animation is one of the tourism support measures. However, the number of visitors to the country has plummeted due to the impact of the new coronavirus since 2020. Each regional tourist city must take various initiatives to recover as a tourist destination. I wondered if I could support each tourist city by creating animations such as tourist characters. The problem with computer animation is that it is time-consuming to produce. In this study, we used an algorithm created based on the Miura algorithm, which is a typical mid-sectioning algorithm. We created an animation focusing on the movements and facial expressions of a character named "Chihomaro" from the Maroudo Sake Brewery in Takachiho Town.

Keywords:　Animation, Mid-sectioning method, Miura algorithm Tourism support

1.　はじめに

日本の訪日外国人旅行者数は年々増加し続けており、それに伴い訪日外国人旅行者の旅行支出額も年々増加し続けている。その背景には、観光庁が「観光立国実現に向けたアクション・プログラム」を策定し, 様々な施策を打ち出していることが大きく、コンピュータアニメーションも観光支援施策の 1 つである。しかし、2020 年初頭からの新型コロナウイルス感染拡大により、全世界で渡航制限が行われ、訪日客数は 3 月以降激減。それに伴い、インバウンド宿泊者数は前年比 90%台の減少が続いた。国内旅行も、緊急事態宣言が発令され、不要不急の外出、県境をまたぐ移動の自粛などで大きく減少。政府肝いりの政策である GoTo キャンペーンで昨夏以降は宿泊者の増加も見られたが、感染第 2 波、第 3 波の影響もあり、12 月に入り再び減少に転じた。[5-11)]

そのため、各地方の観光都市は、より一層、観光地としての復旧を目指し、様々な取り組みを行わなければならない。

そこで、制作過程を簡単にする方法の一つである、コンピュータの中割り法を用いて、観光キャラクターなどのアニメーションを制作し、各観光都市の支援ができないかと考えた。コンピュータアニメーションは制作に時間がかかるという問題点を抱えているが、コンピュータを用いた中割りを行うことで、2 枚のキーフレームと言われる画像データから、一連の中間画像を自動生成と、高速モニタリングを行うことができるようになる。

本研究では、代表的な中割りのアルゴリズムである Miura アルゴリズムをもとに作成されたアルゴリズムを用いて、高千穂のまろうど酒造の「ちほまろ」のキャラクターの簡単な動作と表情の目に着目したアニメーションを作成した。[3, 12, 13)]

2.　原理

2.1.　中割り法

従来の手書きアニメーションにおける中割り手法（in-between）としては、大量の絵を多人数の協

a）工学専攻機械・情報系コース大学院生
b）工学部情報システム工学科学部生
c）工学基礎教育センター教授
d）（株）高千穂ムラたび代表取締役

同作業者が描く“キーフレーム法”が採用されてきた。すなわち、アニメーションの流れの中で動作の主要な変化点の絵を１人の“キーアニメーター”が描き、これらの絵を参考にしながら中間フレームの多数の絵を複数の“補助アニメーター”が描き、全体を統合して１本のアニメーションを効果的に完成していく

コンピュータを用いたキーフレーム法の利点としては、第１に高速モニタリングが行えることである。従来は、中間画像を描かなければキャラクターの動きのチェックが行えなかったが、中割り法を利用することにより、中間画像の自動生成とそのモニタリングが行え、細かい動きの調整ができるようになる。

第 2 に、コンピュータ中割り法を用いて制作したフレーム画像は次の処理である彩色を容易にする。

第 3 に、精密な動きの発生が可能になる。コンピュータにより対象物体の正確な物理法則に従った動きを算出し、表示することができる。

第 4 に、3 次元的な動きの表現が可能になる。従来、3 次元物体の複雑な動きに対する中割りは極めて困難であった。例えば宇宙空間内に数多くの大小様々な隕石が飛翔するシーンなどはセルアニメーションでは困難な作業であったが、コンピュータでは比較的容易に画像生成を行える。

2.2. 原理

Miura アルゴリズムは、データを連続的に入力した場合、つまり２つのキーフレームの関連性が強い場合に限り、物体の動きに自然さを与えることができる。

このアルゴリズムは６個の座標データより１個の中間画像の座標を求める手法であり、２つのキーフレームが時間的に接近しているときに、効果的であるが、そうでないときは中間画像に歪を発生させてしまう。

2.3. 修正版アルゴリズム

Miura アルゴリズムでは一方のキーフレームが他方のキーフレームに依存してしまうため、今回の研究では Miura アルゴリズムをもとに作成された中割りアルゴリズムを使用する。修正版アルゴリズムは 2 枚のキーフレームの関連性が弱い場合やデータが不連続に入力された場合でも中間画像を生成することができる。[1, 2)

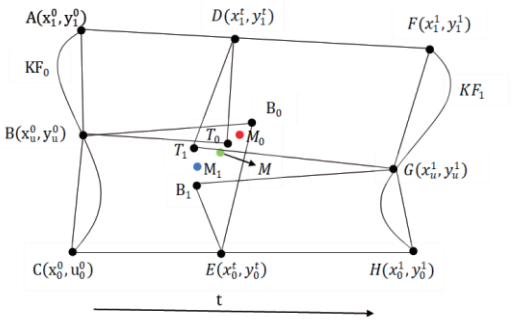


図 1：修正版アルゴリズム

図 1 における中間画像の端点 D,E について、中間画像の端点$M_p(x_0^t, y_0^t)$および$M_p(x_1^t, y_1^t)$については式(1)により求める。

$$x^t = (1-t)x^0 + tx^1$$
$$y^t = (1-t)y^0 + ty^1 \qquad (1)$$

その他については、次の式(2)より求める。

$$P(x_u^t, y_u^t) = (1-t)A^0 + tA^1 \qquad (2)$$

次にKF_0基準と考え、AD、AB を二辺とする平行四辺形を考える。これによって得られる第 4 点を$T_0(x_{T0}, y_{T0})$とする。また、CB、CE を二辺とし同様に$B_0(x_{B0}, y_{B0})$を求める。

この 2 点を用いて次式より$M_0(x_{M0}, y_{M0})$を求める。

$$x_{M0} = (1-K_0)x_{T0} + K_0 x_{B0}$$
$$y_{M0} = (1-K_0)y_{T0} + K_0 y_{B0} \qquad (3)$$

ただし、 $K_0 = \frac{\sqrt{(x_u^0-x_1^0)^2+(y_u^0-y_1^0)^2}}{\sqrt{(x_0^0-x_1^0)^2+(y_0^0-y_1^0)^2}}$

次にKF_1基準とし、同様に DF、FG より$T_1(x_{T1}, y_{T1})$を、GH、HE より$B_1(x_{B1}, y_{B1})$を求め、式(4)より、$M_1(x_{M1}, y_{M1})$を求める。

$$x_{M1} = (1-K_1)x_{T1} + K_1 x_{B1}$$
$$y_{M1} = (1-K_1)y_{T1} + K_1 y_{B1} \qquad (4)$$

ただし、$K_1 = \frac{\sqrt{(x_u^1-x_1^1)^2+(y_u^1-y_1^1)^2}}{\sqrt{(x_0^1-x_1^1)^2+(y_0^1-y_1^1)^2}}$

式(3)、(4)より求めたM_0、M_1より中間画像の座標$M(x_M, y_M)$を式(5)より求める。

$$x_M = (1-L)x_{M0} + Lx_{M1}$$
$$y_M = (1-L)y_{M0} + Ly_{M1} \qquad (5)$$

ただし、$L = \frac{\sqrt{(x_1^t - x_1^0)^2 + (y_1^t - y_1^0)^2}}{\sqrt{(x_1^1 - x_1^0)^2 + (y_1^1 - y_1^0)^2}}$

式(5)を用いて、時間パラメータ t を一定にしたときの座標 M を直線で接続することにより、時間 t における中間画像が得られる。ここで、実際の L の値は、 t の値と等しくなる。

3.　シミュレーション結果

まろうど酒造「ちほまろ」のキャラクター一体を使用したシミュレーションを行った（図 2、3）。キーフレームとなる 2 つの画像データの中割りを行い、なめらかな中間画像が生成されるかシミュレーションを行った。2 つの画像は節点数を等しく設定し、データ数が一対一になっている。

図 2:ちほまろ　図 3：ちほまろのキャラクター

動作環境は以下の表 1 に示す通りである。

表 1：動作環境

OS	Microsoft Windows 10 Pro
環境	Eclipse
言語	Java

図 4 では、キーフレームとなる画像の腕が体の前面に描かれているため中間画像で体の線と腕が重なって描画されてしまい、アニメーションとして不自然な描写になった。それを修正すべく、右手の変化後の座標を洋服の線に重ね、対処しようと試みたが、図 5 のように、左手では不可能であることと、右手の中間画像におおきな歪みが生じた。また、下半身(図 6)も同様の結果となった。しかし、腕や足を曲げる動作についてはなめらかに中間画像が生成できた。

図 4：ちほまろのキャラクターの上半身 1

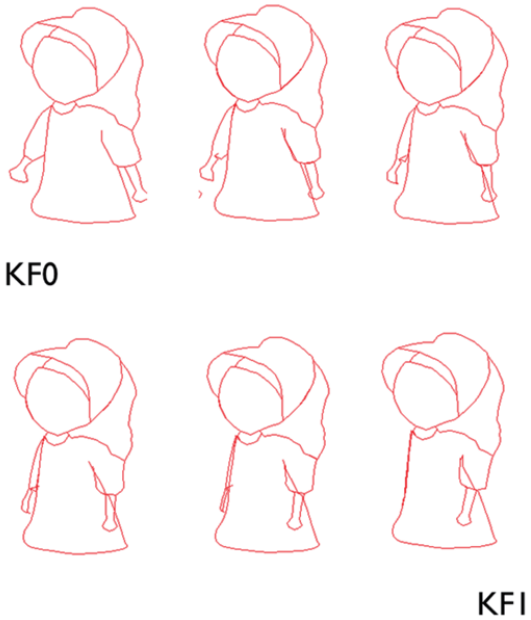


図 5：ちほまろのキャラクターの上半身 2

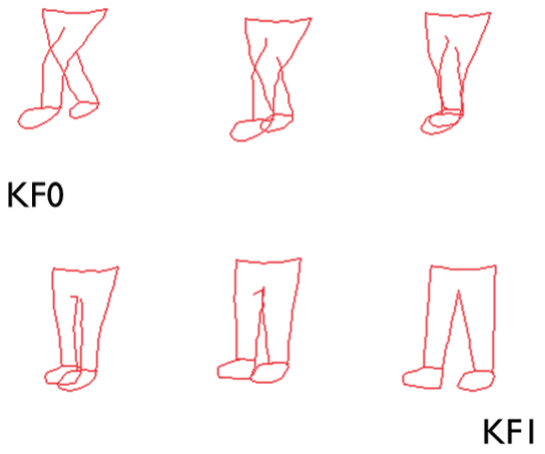


図 6：ちほまろのキャラクターの下半身

図 7 は、２つのキーフレームを目に近づけた画像で、X 軸対称でかつ、Y 座標の最大値と始点または終点の差を小さくしたものである。４枚目の中間画像の始点に不自然な線が描写されているものの、中間画像がなめらかに変化していることが分かる。

図 7：ちほまろのキャラクターの目

4.　結論

ちほまろの体の中割りは、図 4 ではキーフレームとなる画像の腕が体の前面に描かれているため中間画像で体の線と腕が重なって描画されてしまい、アニメーションとして不自然な描写になった。それを修正すべく、右手の変化後の座標を洋服の線に重ね、対処しようと試みたが、図 5 のように、左手では不可能であることと、右手の中間画像におおきな歪みが生じた。また、下半身も同様の結果となった（図 6）。しかし、腕や足を曲げる動作についてはなめらかに中間画像が生成できた。ちほまろの表情（目）については、さまざまな条件で試した結果、図 7 の２つのキーフレームをより目に近づけた画像で、X 軸対称でかつ、Y 座標の最大値と始点または終点の差を小さくしたものが中間画像に歪みなく変化していた。

また、ちほまろの体や表情では、キーフレームの画像を描く際に、曲線部分などをより細かく表すために、接点数が多くなってしまった。そのためデータ量も大きくなり処理時間が長くなってしまった。

5.　今後の展望

本研究では、コンピュータによる中割り法を用いた観光キャラクターの中間画像および人の手の動きの中間画像の生成を行った。人の指の動きやキャラクターの腕や足を曲げたりする動作、表情（目）の変化、どれも動き自体はなめらかに生成できた。しかし、人の手の動きと表情の変化では、始点から不自然な線が見られ、改善が必要である。特に、アニメーションにおいてキャラクターの表情はキャラクターの感情や心理描写を表す重要な部分であるため、表情の中割りについてはこれからも研究が必要である。

また、キャラクターの腕が体の線と重なって中間画像が生成され、その改善策として右手の変化後の座標を洋服の線に重ね、対処しようと試みたが、中間画像が大きく歪んでしまった。このことからキャラクターを描画できる動きに制限があると感じた。

総括として、本研究では、観光キャラクターのアニメーションこそ作成できたものの、観光支援を行えるほどのアニメーション作成には至らなかった。

今後の課題として、始点からの不自然な線の修正と 3 次元を考慮したキャラクターの動きについての研究が必要になる。主に、始点、終点での歪みが多く見受けられたので、画像データを作成する際はなるべく変化のない部分を始点と終点として設定するといった工夫や端点が歪まないようなアルゴリズムの修正が必要である。

6.　謝辞

本研究に際して、多くの助言を頂いた坂本研究室の皆様に深く感謝致します。

参考文献

1) 安居院猛、中嶋正之、大江茂：コンピュータアニメーション、産報出版、1983.
2) 友添直子：コンピュータアニメーションの中割り法に関する研究、平成17年度宮崎大学工学部情報システム工学科卒業論文、2006.
3) 那須航：中割り法を用いた観光キャラクターのアニメーションに関する研究、平成30年度宮崎大学工学部情報システム工学科卒業論文、2019.
5) やまとごころ.jp ｜ HOME ｜データインバウンド[Online].
https://yamatogokoro.jp/inbound_data/43651/
6) 日本経済団体連合会｜活動[Online].
https://www.keidanren.or.jp/journal/times/2021/0805_02.html
7) JTB総合研究所｜観光データベース｜観光統計[Online].
https://www.tourism.jp/tourism-database/stats/
8) 国土交通省観光庁　観光統計[Online].
https://www.mlit.go.jp/common/001441385.pdf
9) 国土交通省観光庁｜観光庁ホーム｜統計情報・白書｜統計情報｜経済波及効果[Online].
https://www.mlit.go.jp/kankocho/siryou/toukei/kouka.html
10) 国土交通省観光庁　訪問外国人消費動向調査[Online].
https://www.mlit.go.jp/kankocho/siryou/toukei/content/001335741.pdf
11) やまとごころ｜HOME｜インバウンドコラム[Online].
https://yamatogokoro.jp/column/corona_world/40098/
12) 高千穂町｜ホーム｜くらし・行政｜行政情報｜町の紹介・歴史｜高千穂の概要[Online].
https://www.town-takachiho.jp/top/gyosei/shokai/738.html
13) 高千穂ムラたび[Online].
http://takachiho-muratabi.com/

プロジェクションマッピングによる視覚的錯覚を用いた速度抑制についての基礎研究

武村　架[a)]・児玉　尚[b)]・坂本　眞人[c)]

Basic Study on Speed Suppression Using Visual Illusion by Projection Mapping

Kakeru TAKEMURA, Sho KODAMA, Makoto SAKAMOTO

Abstract

More than 98% of fatal traffic accidents in Japan that occurred at speeds above 60 km/h were caused by exceeding the posted speed limit. According to the National Police Agency, there is a link between driving speed and visual ability, with more than 90% of the information needed for driving dependent on vision. Road surface markings that use visual illusions as a speed inhibitor. There are various types of road surface markings that are made to look three-dimensional by changing the color and material of the paint, without any physical unevenness. Speed control is important to reduce traffic accidents. It is important to handle road markings more efficiently. Projection mapping of road surface markings is expected to have a more immediate effect than preparing them on the ground. Therefore, in this study, road surface markings are projected by projection mapping to check their effect on human walking speed.

Keywords: Optical illusions, Projection mapping, Traffic sign, Walking speed

1.　はじめに

日本での交通事故について、警察庁が 2021 年 2 月に発表した「交通事故の発生状況等について」によると、時速 60 キロ以上で発生した死亡事故の 98%以上が、規制速度超過であることが分かった。警察庁によると、走行速度と視覚能力には関連性があり、運転に必要な情報の 90%以上が視覚に依存される。速度を出すと視野が狭くなり、例えば時速 40 キロの場合の視野が 100°であるのに対して、時速 130 キロの場合は 30°にまで狭まる。

速度の抑制を行うものとして路面標示がある。路面標示として、立体に見えるものが最近よく使用されている。これは視覚的な錯覚により速度を抑止させるものである。人間が錯覚を起こし道路に何もないのに、障害物があると認識し、運転が自然と慎重になってしまう。物理的な凹凸をつけずに、塗装の色や素材をかえて立体に見せる路面標示は「ソリッドシート」という商品名があるが、一般的にはイメージハンプと呼ばれる。ソリッドシートにも様々なタイプがあり、三角柱の立体物が路面に転がっているように見える「マウンテンタイプ（図 1)」や通行帯を狭く見せることでアクセルから足を離させる「ブロックタイプ（図 2)」がある。これらは生活道路以外でも、高速道路などでも利用されている。[2-4)]

図 1:マウンテンタイプ

a)　工学専攻機械・情報系コース大学院生
b)　工学部情報システム工学科学部生
c)　工学基礎教育センター教授

図 2:ブロックタイプ

交通事故を減らすには速度抑制が必要である。また、速度抑制を自然に行うためには、先ほど述べたような路面標示をより効率的に扱うことが大事なのではないかと考えた。路面標示をプロジェクションマッピングにより行うことができれば、トンネル内など使用できる箇所は限られるが、1つ1つ地面に用意するより即時的な効果が期待できるのではないかと考えた。

プロジェクションマッピングとは、プロジェクターを用いて立体物に映像を投影する表現技法のひとつで、時には音と同期させる技術の総称である。この技法は主に芸術作品などの表現方法と見られるものが多い。近年では、プロジェクターの低価格化と高機能化に伴い、高輝度プロジェクターを複数台利用した規模の大きなプロジェクションマッピングが様々な場所で行われている。例えば、日本でもディズニーランドなどで利用されている。20 台のプロジェクターから投射された映像と、レーザーやサーチライトなどの特殊効果により、“シンデレラ城を巨大な絵本”に演出することで、ゲストをファンタジックな世界で魅了している。また、料理に映像を投影することで、味覚だけでなく、視覚も楽しませてくれるものや、スポーツなど参加型の応用例もある。[1)]

そこで本研究では、プロジェクションマッピングにより路面標示を投影し、スピードを出し過ぎてしまう道路での車の速度を抑制することを目標とする。その基礎研究として、立体に見える路面標示を投影する動画を作成し、プロジェクションマッピングにより、数名の人間の歩行速度に影響が出るかどうかの実験を行い、それと同時に、どのような路面標示がより効果を発揮するのかを心理的効果を含め、実際にタイムを計測することにより、明らかにした。

2. 実験

2.1. 開発環境

開発環境及び使用機器は以下の通りである。[5-9)]

表 1：開発環境

OS	Microsoft Windows 10 Pro
環境	Processing
言語	C++
プロジェクター	NEC MODEL No.NP-VE282

また、投影用の映像を投影用の映像を Processing で製作した。映像は全部で 4 種類作成した（図 3～6）。

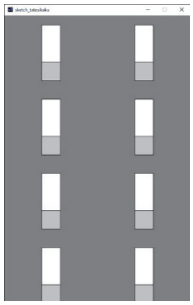


図 3：縦長四角形

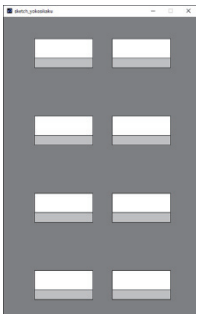


図 4：横長四角形

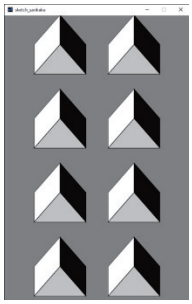


図 5：三角形

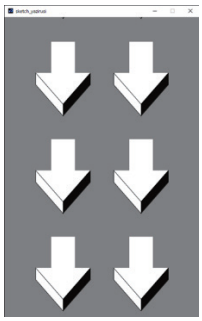


図 6：矢印

2. 2.　実験内容

実験は学生 5 名を対象に、暗い室内で行った。何も投影されていない床と Processing で製作した映像を投影した地面を 5m 歩く時間を計測した。計 5 パターンを 3 回ずつ計 15 回歩いて頂き、歩行速度がどう変化するのかを調べた。すべての測定が終了したとき、被験者にどの映像が最も歩きにくかったのかを質問し、回答して頂いた（図 7）。

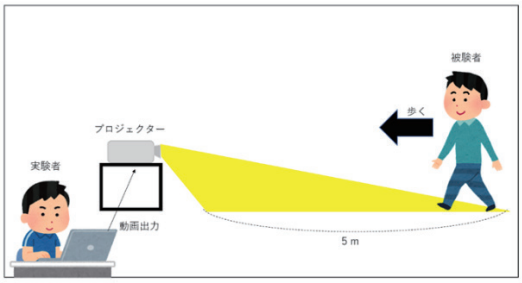


図 7：実験環境

3.　実験結果および考察

実験によって得られた測定結果は以下のようになった（表 2）。

表 2：測定結果

	映像なし (s)		縦長四角 (s)		横長四角 (s)		三角 (s)		矢印 (s)	
1	6.18	平均6.11	6.75	平均6.83	6.48	平均6.33	6.86	平均6.84	6.87	平均6.71
	6.16		6.91		6.11		6.90		6.45	
	5.98		6.83		6.41		6.75		6.80	
2	5.55	平均5.46	6.01	平均6.07	5.70	平均5.81	6.21	平均5.90	6.03	平均6.12
	5.33		6.15		5.89		5.88		6.13	
	5.50		6.06		5.83		5.60		6.21	
3	4.83	平均4.81	4.95	平均5.07	5.16	平均4.94	5.38	平均5.17	5.43	平均5.33
	4.73		5.00		4.81		5.15		5.35	
	4.86		5.26		4.84		4.98		5.20	
4	6.18	平均6.01	7.65	平均7.46	7.03	平均6.97	8.40	平均8.07	7.85	平均7.57
	6.25		7.46		6.53		8.11		7.56	
	5.61		7.28		7.36		7.71		7.30	
5	5.43	平均5.42	5.44	平均5.63	5.91	平均5.76	5.75	平均5.65	5.43	平均5.13
	5.38		5.83		5.56		5.78		4.91	
	5.45		5.63		5.82		5.43		5.06	

縦長四角を投影した場合は平均＋0.65 秒、横長

四角を投影した場合は平均＋0.40 秒、三角を投影した場合は平均＋0.77 秒、矢印を投影した場合は平均＋0.76 秒されており（小数第二位四捨五入）、タイムが遅くなった順（効果が表れた順）としては、三角、矢印、縦長四角、横長四角の順となった。

被験者 5 の矢印を除いてすべての場合で普通歩きよりもタイムが遅くなった。最も歩きにくいという意見があったのは、三角の標示であった。被験者 2 のみが縦長四角が最も歩きにくいと感じたと述べた。

4. 結論

被験者 5 の矢印を除いてすべての場合で普通歩きよりもタイムが遅くなった結果から投影された表示で効果を発揮できるといえる。最も歩きにくいという意見があったのは、三角の標示であった。被験者 2 のみが縦長四角が最も歩きにくいと感じたと述べた。しかし、実際の結果と心理的な影響は必ずしも一致しておらず、最も歩きにくいと感じても、実際のタイムには現れないこともあることが分かった。障害物の有無だけでなく、配置にも関係性がある。

5. 今後の展望

プロジェクションマッピングを用いた実際の歩行並びに交通での速度抑制実現の可能性を見出すことができたと考える。今回作成した動画について、より立体感のあるものや、図形の配置の工夫などによっても更なる効果を期待できる。しかし、あまりにも影響が強すぎると驚いてしまう可能性があり、効果が期待できる適切な映像を模索する必要がある。

6. 謝辞

本研究にあたり、実験に協力頂いた方々に深い感謝と敬意を表する。

参考文献

1)東京ディズニーランド”シンデレラ城が巨大な絵本”に、初のプロジェクションマッピング ｜ F.M.J. magazine｜エフ・エム・ジェー マガジン [Online].
https://fashionmarketingjournal.com/2014/06/tdl-once-upon-a-time-pu.html

2)いくつ見たことある？立体に見える路面標示「イメージハンプ」 ｜ トヨタ自動車のクルマ情報サイト[Online].
https://gazoo.com/column/daily/16/08/17/

3)スピード違反はやっぱり危険！死亡事故件数で明らかに ｜ くるくら [Online].
https://kurukura.jp/safety/210316-70.html

4)（題目）プロジェクションマッピングによる視覚的錯覚を用いた歩行速度の考察
（著者）上田 進太郎（所属） 公立はこだて未来大学 情報アーキテクチャ学科 [Online].
http://www.kazushi.info/wp-content/uploads/2015/09/150130_ueda.pdf

5)【超基礎】簡単にプログラミング（Processing）で円を描く！ ｜ アートを服に、 [Online].
https://alackblog.com/programingcircle

6)【超基礎】簡単にプログラミング（Processing）で四角形を描く！ ｜ アートを服に、 [Online].
https://alackblog.com/programmingrect

7)[Processing×Java] 関数の使いかた[Online].
https://qiita.com/masterkeaton12/items/bf15215816f2edfd43bb

8) P5 Code School Chapter2「図形の描画」[Online].
https://p5codeschool.net/tutorial/chapter2/

9) Processing、図形を動かす｜マコトのおもちゃ箱 ～ぼへぼへ自営業者の技術メモ～ [Online].
http://piyopiyocs.blog115.fc2.com/blog-entry-1118.html

右手を認識対象としたマーカーレス型 WebAR の試作

濵砂　桜太[a)]・坂本　眞人[b)]

Prototype of Markerless WebAR by Using Right Hand as Object of Recognition

Ota HAMASUNA, Makoto SAKAMOTO

Abstract

The author's laboratory had the opportunity to have people experience AR technology at a corporate event. However, our marker-based AR application had various problems. Therefore, we developed an AR system that solves those problems and conducted evaluations experments. Development was done by using Google's MediaPipe Hands to recognize the right hand and place objects in appropriate positions based on the 3D coordinates obtained. We also developed it as a WebAR that does not require the installation of a dedicated application. The evaluation experiment was conducted on a total of 20 participants, including university students, for the purpose of verifying the objective usability of this system, including object positioning and rotation. The results of the evaluation experiment showed relatively good results, with few subjects responding that they felt uncomfortable with the position and rotation of the objects, although improvements were found in the handling of postures that MediaPipe Hands could not recognize and in the revision of the 3DCG.

Keywords:　3DCG, Augmented reality, Markerless, MediaPipe, Vector, Web

1.　はじめに

著者の所属する研究室では、2022 年 7 月 30 日から 7 月 31 日にかけて開催された『第 12 回米良電機企業グループ統合展示会「宮崎の自然との共存」』（図 1）にて、来場者に AR 技術を体験してもらう機会があった。その展示会で我々は、Unity で開発したマーカー型 AR アプリケーション（図 2）を事前に 3 台のスマートフォンにインストールし、それらを貸し出す方法で体験してもらった。そのため、次のような問題点が発生した。

- 来場者のスマートフォンでは体験できない
- 貸し出すスマートフォンを使いまわすことによる新型コロナウイル感染症感染の危険性
- 貸し出すスマートフォンの充電
- マーカーの欠損、マーカーの設置場所の確保

これらの問題を解決するための方法として、平面や空間を認識対象としたマーカーレス型 WebAR が挙げられる。有名な事例として、Apple の公式サイト[1)]や LOWYA AR[2)]がある。これらは商品を AR 表示することで、現実世界でのサイズ感や色合いを確認することができる。しかし、いずれもスマートフォンの画面操作によるオブジェクトの移動や回転を行うため、展示会やイベントなどの娯楽を目的とした用途では没入感に欠ける。

そこで、本研究では、右手を認識対象としたマーカーレス型 WebAR の開発を行った。右手を認識対象とすることで、マーカー型のような現実のマーカーの動きにオブジェクトが追従する良さを残すことができる。

図 1.　第 12 回米良電機企業グループ統合展示会

図 2.　開発したマーカー型 AR アプリケーション

a)　工学専攻機械・情報系コース大学院生
b)　工学基礎教育センター教授

2.　開発手法・開発

2.1　本システムの概要

本研究では、Google 社の提供する MediaPipe Hands[3]を使用して右手の認識を行い、得られた 3 次元座標から表示するオブジェクトの適切な位置と向きを計算する。また、ユーザーが専用のアプリケーションのインストールを必要としない WebAR として開発を行う。

2.2　手を認識対象とした AR の先行研究

既存する、手と仮想物体とのインタラクション操作を実現するための研究の多くが、Leap Motion Controller などの外部デバイスを使用している。しかし、その一方で、加藤晴久（2012）の「てのひら AR」[4]では、てのひらとカメラの相対的姿勢及び位置を、カメラから得られた画像の指の線分を利用することで推定する手法を提案していた。さらに応用例として、てのひらの姿勢を変化させるだけで、直感的な操作で制御できるアプリランチャーの UI を開発していた。我々の研究においても、展示会やイベントを想定しており、スマートフォン 1 台だけで体験できる AR システムを実現したいため、非常に参考になる。

2.3　開発環境

本研究における開発環境及び、使用したライブラリなどを以下の表 1 に示す。また、ファイル構成を図 3 に示す。

表 1.　開発環境及び使用したライブラリなど

PC の OS	Windows 10 Pro
ソフトウェア	Blender 3.1.2
	Visual Stadio Code 1.74.3
テスト用端末	Redmi Note 9T（Android 11）
	iPad mini（第 5 世代）（iPadOS 16.3）
ライブラリなど	A-Frame
	AR.js
	MediaPipe Hands

```
│─index.html
│─script.js
└─assets
      │─sbutterfly.glb
```

図 3.　ファイル構成

2.4　開発手順

本研究は、以下の手順に沿って開発を行った。

① Blender で 3DCG モデルを glTF 形式で出力
② HTML ファイルの作成及びコード編集
③ JavaScript ファイルの作成及びコード編集
④ GitHub Pages で公開、テスト用端末で動作確認

2.4.1　手順①

Blender で 3DCG モデルを glTF 形式（sbutterfly.glb）で出力。3DCG モデルは展示会で使用した自作の蝶（図 2）のうち 1 匹をそのまま使用する。以下の図 4 が Blender での蝶、図 5 が glTF 形式に変換した蝶である。

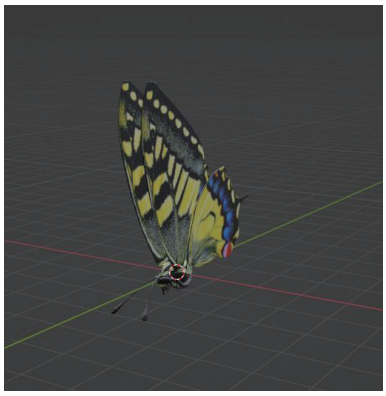


図 4.　Blender での蝶

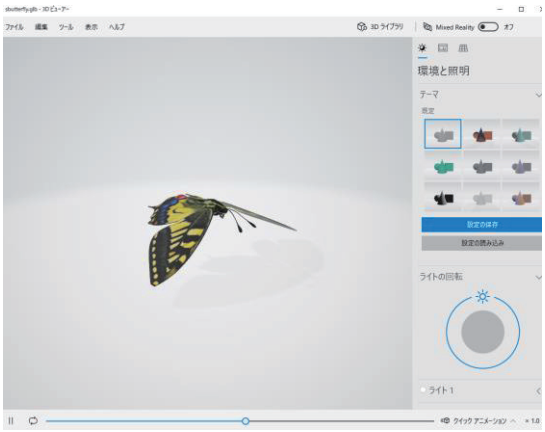


図 5.　glTF 形式

この蝶の 3DCG モデルは、ポリゴン数が 17,468 で構成されており、10 フレームで羽を広げ、10 フレームで羽を閉じる、計 20 フレームのアニメーション設定を行っている。

2.4.2　手順②

Visual Studio Code で、HTML ファイル（index.html）の作成及びコード編集を行う。この HTML ファイルでは、表 1 で示した 3 つのライブラリなどの読み込み及び、A-Frame と AR.js における 3DCG モデルとカメラの設定を行う。

A-Frame[5]とは、2015 年に MozVR チームが開発したもので、3D/AR/VR 体験を構築するための、オープンソースの Web フレームワークであり、AR.js と連携させることで簡単に WebAR を実装できる。座標系は、スクリーンから自分へ向かう方向を正の Z とした右手座標であり、HTML と Entity-Component を用いて 3D ワールドを作成する。

まず、各ライブラリの読み込みは、head タグ内で CDN から読み込む。A-Frame を読み込む際は、Blender で設定したアニメーションを再生するために aframe-extras も追加で読み込む。

次に、A-Frame と AR.js における 3DCG モデル（蝶）とカメラの設定は、以下の図 6 に示すような親子関係で設定を行う。

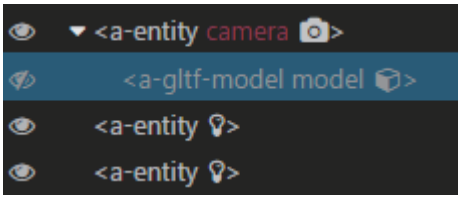


図 6.　3DCG モデル（蝶）とカメラの親子設定

3DCG モデル（蝶）は、MediaPipe Hands で取得した 3 次元座標を用いて表示するため、カメラの子として設定を行い、カメラを原点としたローカル座標で扱う必要がある。また、3DCG モデル（蝶）は、visible = “false”としておき、手を認識していない間は表示しないように設定を行う。

2.4.3　手順③

Visual Studio Code で、JavaScript ファイル（script.js）の作成及びコード編集を行う。この JavaScript ファイルでは、MediaPipe Hands から手指ランドマークの 3 次元座標を取得後、3DCG モデル（蝶）の適切な位置と向きを計算し、HTML の属性値の書き換えを行う。本研究では、3DCG モデル(蝶) が右手の人差し指に追従するように計算を行う。

MediaPipe Hands とは、Google 社が提供するオープンソースの機械学習ソリューションフレームワークである。Leap Motion Controller との性能比較は、先行研究の生野優輝、外村佳伸（2020）「手指ジェスチャー認識に向けた Leap Motion と MediaPipe の比較検討」[6]で検証されており、その研究結果を踏まえ、本研究では、MediaPipe Hands を使用する。MediaPipe Hands は、以下の図 7 に示す通り指先及び関節、計 21 個のランドマークの 3 次元座標を results.multiHandLandmarks という配列に格納し出力する。

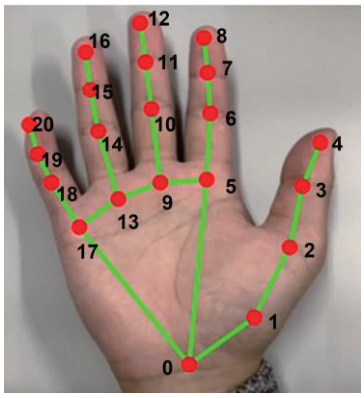


図 7.　MediaPipe Hands

MediaPipe Hands で得られる 3 次元座標における、X 座標と Y 座標は、画面左上を(0 , 0)、右下を(1 , 1)とする正規化されたスクリーン座標であり、Z 座標は手首（0 番）をほぼ 0 とした相対座標であり、X,Y 座標と同じような尺度で出力される。

本研究では、3DCG モデル（蝶）の位置を以下の計算で算出し、HTML の属性値を書き換える。

- Z 座標

前述した通り、MediaPipe Hands で出力される Z 座標は、手首を 0 とした相対座標で、カメラからの距離でないため、ワールド座標における正確な Z 座標を得ることができない。従って、本研究では、透視投影の距離が遠いほど物体が小さく見る特性を利用し Z 座標を決定する。計算に用いる座標は人差し指の MP 関節（5 番）と手首（0 番）の 2 点に絞り、1 フレーム前との線分比を用いる。

- X 座標

決定した Z 座標、A-Frame で設定した視野角、ブラウザ上で表示する領域のアスペクト比を用いて、MediaPipe Hands で得られたスクリーン座標をワールド座標へ変換する。算出方法は、以下の図 8 及び数式の通りである。

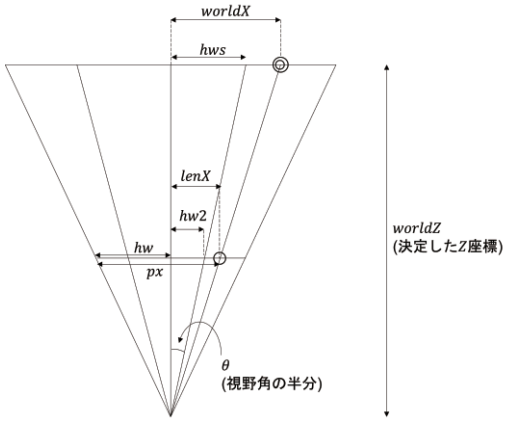


図 8　X 座標の算出方法

$$hws = worldZ \times \tan\theta$$
(本研究では、$\theta = 20^{\circ}$)

$$hw = \frac{window.innerWidth}{2}$$
($window.innerWidth$：ブラウザ上で表示する領域の横の長さ)

$$hw2 = \frac{hw}{asp} \left(※asp = \frac{window.innerWidth}{window.innerHeight} \right)$$
($window.innerHeight$：ブラウザ上で表示する領域の縦の長さ)

$$px = x \times window.innerWidth$$
(x: MediaPipe Handsで得た人差し指のx座標)

$$lenX = px - hw$$

$$\therefore worldX = lenX \times \frac{hws}{hw2}$$

● Y 座標

Y 座標も X 座標と同様に、決定した Z 座標、A-Frame で設定した視野角、ブラウザ上で表示する領域のアスペクト比を用いて、MediaPipe Hands で得られたスクリーン座標をワールド座標へ変換する。算出方法は、以下の図 9 及び数式の通りである。

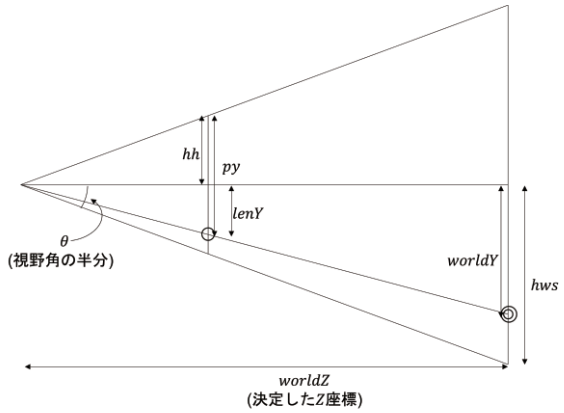


図 9.　Y 座標の算出方法

$$hws = worldZ \times \tan\theta$$
(本研究では、$\theta = 20^{\circ}$)

$$hh = \frac{window.innerHeight}{2}$$

$$py = y \times window.innerHeightlen$$

$$Y = py - hh$$

$$\therefore worldY = lenY \times \frac{hws}{hh}$$

次に、本研究では、3DCG モデル（蝶）の向きを、手首（0 番）・人差し指の MP 関節（5 番）・薬指の MP 関節（13 番）の 3 点からなる三角形（図 10）の法線ベクトルと、真正面へ向かうベクトル（0 , 0 , 1）との Z-Y 平面上での角度差を X 軸、Z-X 平面上での角度差を Y 軸の回転とし算出する。また、本研究では、回転を右手の無理のない動き（X,Y 軸ともに 180 度）に限定する。

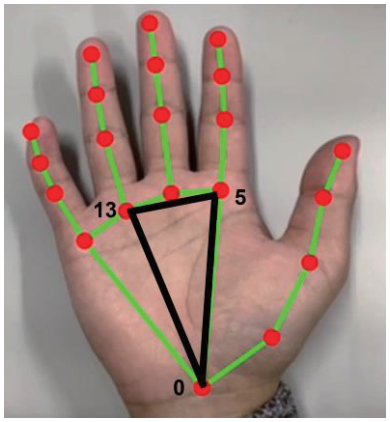


図 10.　計算で用いる 3 点

以下、計算式である。

● 定義

$point[i].j$: i番目のj座標　（例　$point[0].x$: 手首のx座標）

$V013$: 手首から薬指のMP関節へ結んだベクトル

$V05$: 手首から人差し指のMP関節へ結んだベクトル

$Vnormal$: 算出した法線ベクトル

$Vnomal.j$: 算出した法線ベクトルのj成分（jがxの時、x成分）

X: Z − Y平面上での角度差

Y: Z − X平面上での角度差

● 計算式

$$V013 = \begin{pmatrix} point[13].x - point[0].x \\ point[13].y - point[0].y \\ point[13].z - point[0].z \end{pmatrix}$$

$$V015 = \begin{pmatrix} point[5].x - point[0].x \\ point[5].y - point[0].y \\ point[5].z - point[0].z \end{pmatrix}$$

$$Vnormal = V013 \times V015 \quad (\text{外積})$$

$$\cos X = \frac{Vnormal.z}{\sqrt{(Vnormal.z)^2 + (Vnormal.y)^2}}$$

$$\therefore X = \arccos X$$

$$\cos Y = \frac{Vnormal.z}{\sqrt{(Vnormal.z)^2 + (Vnormal.x)^2}}$$

$$\therefore Y = \arccos Y$$

2.4.4　手順④

GitHub Pages で公開し、テスト用端末で動作確認（図 11）を行う。

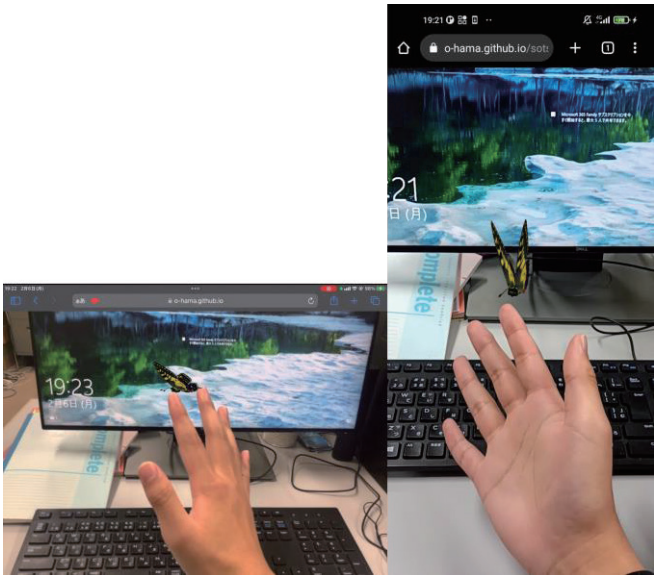


図 11.　動作確認（左：iPad mini、右：Redmi Note 9T）

動作確認は、iPad mini は Safari、Google Chrome、Firefox を、Redmi Note 9T は Google Chrome のブラウザを用いて行った。人差し指の指先に追従し、手のひらの向いている方向に 3DCG（蝶）が向くことを確認できた。

3. 評価実験

3.1 評価方法

3DCG モデル（蝶）の位置や回転を含む本システムの客観的な使用感を検証する目的で、小中学生 5 名、大学生 13 名、40 代の社会人 2 名の計 20 名を対象にアンケート式の評価実験を行った。小中学生の 5 名はテスト用端末の iPad mini（第 5 世代）を使用してもらい、他の 15 名にはそれぞれ所有している端末で行ってもらった。以下の表 2、表 3、図 12 は、その 15 名の実行環境である。

表 2. 端末

OS	端末名	人数
iOS	iPhoneSE	1
	iPhone11	1
	iPad Air（第 4 世代）	1
	iPhone12	5
	iPhone12 mini	1
	iPhone13	1
	iPhone13 Pro	1
Android	Galaxy S9	1
	Google Pixel 6a	1
EMUI	HUAWEI nova 5T	1
Windows	PC	1
合計		15

表 3. OS のバージョン

OS バージョン	人数
iOS 15	2
iOS 16	9
Android 10	1
Android(バージョン記述なし)	1
EMUI 12	1
Windows 10	1
合計	15

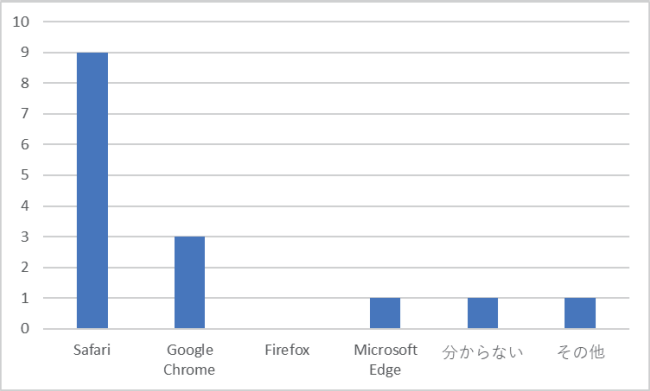


図 12. 使用したブラウザ

実行環境としては、iPhone12 の iOS16、Safari の組み合わせが最も多かった。

以下、選択式のアンケート内容である。それぞれ、最もあてはまると思ったものを選択してもらった。

- 蝶の動きはスムーズでしたか？
  - ✓ そもそも見ることができなかった
  - ✓ かなりカクカクしていた
  - ✓ カクカクしていた
  - ✓ 少しカクカクしていた
  - ✓ スムーズだった
  - ✓ とてもスムーズだった
- 手を止めたとき、人差し指の位置と蝶の位置にずれがありましたか？
  - ✓ そもそも見ることができなかった
  - ✓ かなりずれていた
  - ✓ ずれていた
  - ✓ 少しずれていた
  - ✓ ずれていなかった
  - ✓ 全くずれていなかった
- 蝶の回転に違和感がありましたか？
  - ✓ そもそも見ることができなかった
  - ✓ 回転しなかった
  - ✓ かなりあった
  - ✓ あった
  - ✓ 少しあった
  - ✓ なかった
  - ✓ 全くなかった

3.2 実験結果

以下の図 13、14、15 に結果を示す。

- 蝶の動きはスムーズでしたか？

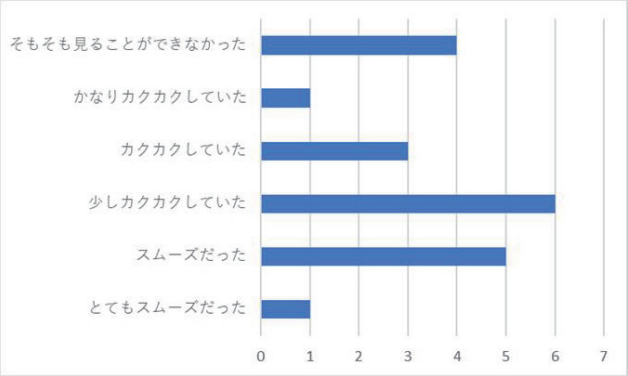


図 13. 蝶の動きのスムーズさへの質問結果

- 手を止めたとき、人差し指の位置と蝶の位置にずれがありましたか？

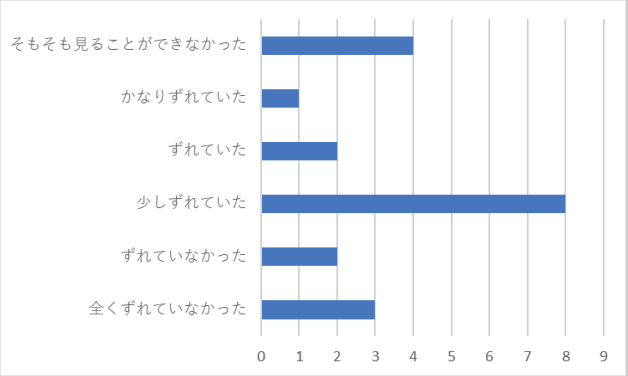


図14. 人差し指と蝶の位置への質問結果

- 蝶の回転に違和感がありましたか？

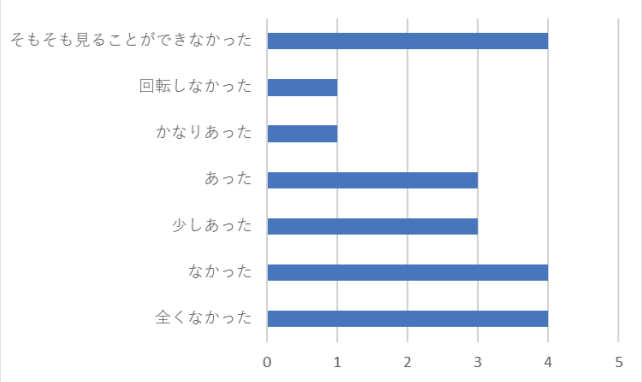


図15. 蝶の回転への質問結果

4. 考察

まず、3 つの質問で「そもそも見ることができなかった」と回答があったのはそれぞれ 4 名であり、いずれも回答者が一致している。以下の表 4 にその 4 名の実行環境を示す。

表 4. 見ることができなかったと回答があった実行環境

端末	OS	ブラウザ
HUAWEI nova 5T	EMUI 12	Google Chrome
iPhone13	iOS15.6.1	Safari
iPhoneSE	iOS15.5	Safari
iPhone12	iOS16	Safari

HUAWEI nova 5T の被験者は、本評価実験の被験者の中では、1 名のみの端末及びバージョンであり、本システムが対応していなかったと考えられる。自由記述の欄に「そもそもカメラが起動しなかった」と回答があったためブラウザから端末のカメラへのアクセスが拒否された可能性が高い。

iPhone13、iPhoneSE の被験者は、2 名とも OS のバージョンが iOS15 で、本システムは iOS15 で動作しないことが分かった。テスト用端末の iPad mini（第 5 世代）に関しても開発の初期段階の際は iOS15 だったため動作しなかった。iOS15 で動作しない原因は、判明していない。

iPhone12 に関しては、全く同じ環境の被験者が 4 名存在し、いずれも正しく動作しているため、システム上の原因はないと考えられる。

次にスムーズさへの質問は、「かなりカクカクしていた」「カクカクしていた」と回答があったのは合計で4名だけであり、比較的良い結果が得られた。しかし、「少しカクカクしていた」が6名で最も多く、スムーズに動かない原因としてはMediaPipe Handsのfpsが挙げられる。MediaPipe Handsは、動作環境によっては、スムーズに動かすために十分なfpsが出せない場合がある。

次に、人差し指と蝶の位置への質問は、「かなりずれていた」「ずれていた」と回答があったのは合計で3名だけであり、比較的良い結果が得られた。しかし、「少しずれていた」と回答があったのは8名で最も多かった。考えられる原因として挙げられるのは、カメラのレンズの歪みを考慮していないことである。レンズの特性上画面中央から離れるほど歪みが強くなり、実際の座標と画面に表示される座標では違いがうまれる。よって、本システムは端末のレンズの歪みによって位置のずれ方が大きく変化してしまう可能性が高いと考えられる。

最後に、蝶の回転への質問は、「回転しなかった」「かなりあった」「あった」「少しあった」と回答があったのは合

計で8名であり、「なかった」「全くなかった」は合計で8名であったため、おおよそ半々の結果となった。考えられる原因として挙げられるのは、MediaPipe Handsが認識しづらい手の姿勢があり、回転途中で蝶が消えてしまうことである。特に、蝶の真横を見るためには、手を横にする必要があり、指が重なってしまうため21個の指先及び関節ランドマークが認識しづらくなってしまう。途中で蝶が消えることは回転の違和感に大きく影響すると考える（図16）。

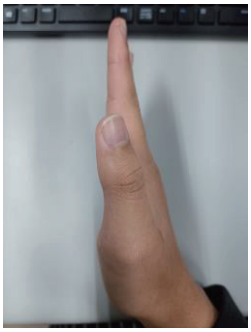


図16.　MediaPipe Handsの苦手な姿勢

5.　結論

本研究では、以下のマーカー型 AR アプリケーションの問題点を解決する目的で、右手を認識対象としたマーカーレス WebAR を開発し、評価実験を行った。

- 来場者のスマートフォンでは体験できない
- 貸し出すスマートフォンを使いまわすことによる新型コロナウイル感染症感染の危険性
- 貸し出すスマートフォンの充電
- マーカーの欠損、マーカーの設置場所の確保

しかし、評価実験の結果から、対応していない実行環境への対応、MediaPipe Hands の fps 及び苦手な姿勢への対応、レンズの歪みへの対応などの改善点が挙げられ、十分に目的を達成することができなかった。しかし、正しく動作した環境下での客観的な使用感としては、「少しずれていた」などの回答者数が多く、全体を通して見ると、比較的良い結果が得られたため、目的を十分に達成するための可能性を示唆することができたと考える。

6.　今後の研究

今後の研究としては、前述した改善点への対応を行いたい。特に、展示会やイベントなどにおいて、対応していない実行環境が多く存在することは致命的であると考える。

また、本システムでは3DCGモデルを単に表示するだけであったため、新たに、手を使ったシミュレーションなどができるようなARシステムの開発にも挑みたい。

7.　謝辞

本研究にあたり、ご支援およびご協力頂いた宮崎大学ならびに米良電機産業株式会社の皆様に心より感謝の意を表する。

参考文献

1) https://www.apple.com/jp/iphone,（accessed 2023/4/23）
2) https://www.low-ya.com/features/ar,（accessed 2023/4/23）
3) https://google.github.io/mediapipe/solutions/hands.html,（accessed 2023/4/23）
4) 加藤　晴久:てのひら AR, 映像情報メディア学会誌, Vol.66, pp.866-871, 2012.
5) https://aframe.io,（accessed 2023/04/24）
6) 生野　優輝, 外村佳伸: 手指ジェスチャー認識に向けた Leap Motion と MediaPipe の比較検討, 2020 年度 情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集, 2020.

修士論文題目一覧

井　　達　哉 環境系コース(A) N-アルキル置換ゲルマニウム-N-混乱ポルフィリン錯体の合成
石橋　竜　也 環境系コース(A) カリックス[4]アレーン誘導体への良溶媒探索と金属抽出特性に及ぼす影響の評価
岩切　雄　飛 環境系コース(A) 塩酸系での Au(III) の溶媒和抽出に適した抽出溶媒の機械学習探索
江　上　　樹 環境系コース(A) オンデマンドで表面改質が可能な新規多孔性マイクロカプセルの調製
川崎　敦　史 環境系コース(A) シュードモナス属細菌のサリチル酸代謝酵素遺伝子群の転写制御に関する研究
北　嶋　　優 環境系コース(A) 多フッ素化界面活性剤/ナノシート複合体における励起エネルギー緩和過程の解析
黒木　貴　裕 環境系コース(A) 逆ライデンフロスト効果を利用した粒子状クライオゲルの調製とリン脂質含浸によるアミノ酸のキラル吸着
笹貫　一　馬 環境系コース(A) 配列にヒスチジン残基を含むトリペプチドを配位子とした金属有機構造体の開発
澤尾　綾　音 環境系コース(A) 難水溶性薬物へのキャリアとなる両親媒性テトラペプチドの構造最適化研究
首藤　賢太郎 環境系コース(A) カチオン性ポルフィリン錯体を増感剤とする一重項酸素生成に対する粘土吸着効果
瀬ノ口　ジョシュア　勇気 環境系コース(A) ゲルマニウム-N-混乱ポルフィリン錯体の光物性に対する金属イオンの添加効果
十亀　侑　矢 環境系コース(A) 光学分割あるいは不斉反応を用いた光学活性なプリスタン酸の合成
髙島　彩　華 環境系コース(A) 糖連結リンポルフィリン錯体の合成における軸配位置換反応の非対称化
武元　佑　樹 環境系コース(A) 多糖類誘導体キラルセレクターにおけるキラル認識
溜水　大　和 環境系コース(A) 水溶性成分を内包したタンパク質マイクロカプセルのリン脂質膜被覆による徐放制御
寺田　敬　斗 環境系コース(A) 拡張アンサンブル法によるβ 1,3 グルカン溶液構造の解析
野田　虎大郎 環境系コース(A) 多糖類複合体結晶構造におけるリガンド分子の拡散挙動
野田　陽　介 環境系コース(A) ｐＨ応答分子を添加した固体粒子内包マイクロカプセルの調製と放出制御
濵内　莉子　　環境系コース(A) N-ラウロイルサルコシンを基体とした深共晶溶媒の創出と白金族金属の選択的分離に関する基礎的研究
藤田　歩果　　環境系コース(A) 水溶化を目的としたエチレングリコール置換 N-混乱ポルフィリンの光機能性
藤波　寛人　　環境系コース(A) 環境浄化に寄与するゲノミックアイランドの探索と機能解析
藤野　彩未　　環境系コース(A) リンポルフィリン錯体への水素添加によるクロリン錯体の合成
松本　茉李南 環境系コース(A) 有機溶媒を用いない深共晶溶媒によるレアメタルの抽出特性とその抽出機構の解明
若松　寿　紀 環境系コース(A) 単分散銀ナノワイヤーの新規調製法の開発と反応機構の解明
伊東　悠　介 環境系コース(B) 活性炭吸着と凝集・泡沫分離を利用した抗菌薬の超高感度一斉検出・定量法の開発
河末　竜　弥 環境系コース(B) 簡易治山技術による斜面安定効果の定量評価に向けた実斜面計測
汐　川　　晶 環境系コース(B) 機能性防錆塗装システムにおける腐食進行特性に関する研究
杉　山　　航 環境系コース(B) 河岸のヨシ等のイネ科植物がビーチの細菌汚染源である可能性に関する調査研究
田岡　美智帆 環境系コース(B) FEM 解析による土留部材引抜同時充填工法適用時の周辺地盤の変形予測手法の検討
田中　凌　央 環境系コース(B) ダムの影響を考慮した機械学習による河川生物分布モデルの構築
玉井　荘一郎 環境系コース(B) コロイド吸着と泡沫濃縮を利用した溶存遊離 DNA の超高感度検出・定量法の開発
恒成　果　穂 環境系コース(B) 沿岸部の掘り込み地形が津波流体力の軽減に及ぼす効果について
那須　龍　斗 環境系コース(B) 粘土地盤に打設された木杭の鉛直支持力発現機構に関する研究
堀田　智　之 環境系コース(B) 家畜ふん堆肥の施肥土壌を介した薬剤耐性菌の作物汚染の評価
本多　雅　匠 環境系コース(B) UAV と SfM 技術を活用した橋梁点検手法に関する基礎的検討
眞邊　雄　元 環境系コース(B) UAV 空撮画像解析による湖水クロロフィル分布評価手法の開発
間部　哲　志 環境系コース(B) 大腸菌群増殖抑制効果を持つクリンカアッシュを利用した土木資材の開発
峯田　陽　生 環境系コース(B) 分布型流出モデルを用いた低流量期間における広域水文水理量の推定
DINI RAKHMANI 環境系コース(B) ENVIRONMENTAL IMPACT OF SMALL-SCALE BROILER CHICKEN MANURE MANAGEMENT IN BULUKUMBA, INDONESIA
石田　辰　徳 エネルギー系コース(C) Ｘ線 SOI-CMOS 検出器のサブピクセル応答評価手法の確立
岩切　優　人 エネルギー系コース(C) MOVPE 法によって作製された InAs/GaSb 超格子の中赤外発光の励起強度および温度依存性
大窪　純　矢 エネルギー系コース(C) 格子不整合系 III-V 族化合物半導体における転位すべり面の異方性が電気特性に与える影響
岡本　晃　一 エネルギー系コース(C) ケステライト化合物 (Cu1-xAgx)2ZnSnS4 の結晶成長および熱電特性評価
木村　太　一 エネルギー系コース(C) アルミン酸ストロンチム蛍光体の発光とトラップ準位の関係

櫛山　爽	エネルギー系コース(C)	レーザ受光用 InGaAsP 光電変換素子の高効率化
楠　康平	エネルギー系コース(C)	Ｘ線分光撮像衛星 XRISM に搭載する軟Ｘ線撮像検出器 SXI の衛星熱真空試験における分光性能の評価
坂倉　光紀	エネルギー系コース(C)	蛍光、反射スペクトルを用いた牧草の粗タンパク質含量推定
迫田　理久	エネルギー系コース(C)	電子線照射によって Si 中に導入された格子欠陥の熱処理回復
佐藤　俊近	エネルギー系コース(C)	Be 型 X 線連星における X 線スペクトルとパルス周期の解析
髙木　俊作	エネルギー系コース(C)	微傾斜 GaAs 基板上に ALE 法を用いて意図的に N 分布を制御した GaAsN 薄膜の N の取り込み評価
高千穂　公大	エネルギー系コース(C)	スペクトルを考慮した垂直太陽電池における発電量推測および窓型シースルー太陽電池の性能解析
中川　翔太	エネルギー系コース(C)	メタモルフィック成長を用いた GaAs 基板上中赤外発光素子の研究
永﨑　誠人	エネルギー系コース(C)	PLD 法により Si(111)7 × 7 面上に吸着した金粒子の観察
初田　龍汰	エネルギー系コース(C)	マグネターのパルスプロファイル変化
平田　健人	エネルギー系コース(C)	車載太陽電池における動的日影の影響と発電量減少緩和法の検討
平田　康史	エネルギー系コース(C)	GaAs 基板上の格子緩和 InAs（Sb）層のラマン分光法による評価
福岡　廉斗	エネルギー系コース(C)	BH 連星 4U1543-475 の X 線強度と降着円盤の関係
宮﨑　啓太郎	エネルギー系コース(C)	CCD シミュレーターを用いた Chandra Ｘ線天文衛星搭載 CCD 検出器 ACIS の非線形応答の研究
森田　浩右	エネルギー系コース(C)	フォトルミネッセンス法による SOI 基板上に成長した SiGe 膜の結晶性評価
山本　尚輝	エネルギー系コース(C)	InGaAs/GaAsP 超格子太陽電池のキャリア輸送特性に及ぼす歪補償と間接遷移バンドの影響
有村　知将	エネルギー系コース(D)	2 段構成 CMOS コンパレータにおけるシステマティックオフセット電圧低減手法に関する研究
安藤　優作	エネルギー系コース(D)	ディジタルおよびアナログの両信号を活用した CMOS ニューロン素子に関する研究
井上　翔斗	エネルギー系コース(D)	直接誘導胎児心電心拍信号による脳障害児発症防止に関する胎児心拍数パターン解析の新たな指標の検討
宇野　太智	エネルギー系コース(D)	プラスチックレンズ一体型集光型太陽電池の屋外動作解析および屋外発電量予測モデルの構築
海老原　晴	エネルギー系コース(D)	プラズモニック導波路を用いた屈折率センサの基礎特性
大野　楓真	エネルギー系コース(D)	腫瘍を想定とした人体頭部の電波影響に関する数値的評価
大森　健道	エネルギー系コース(D)	3 次元スロット導波路における光波伝搬特性に関する研究
上鶴　伸明	エネルギー系コース(D)	逐次比較型 ADC の DAC ブロックにおけるキャパシタアレイの比精度向上のための容量入れ替え法に関する考察
川口　哲平	エネルギー系コース(D)	モールド変圧器模擬試料中の部分放電劣化に関する研究
川越　悠聖	エネルギー系コース(D)	牛の顔領域を用いた個体識別と摂食時間推定に関する研究
河端　晃生	エネルギー系コース(D)	車載太陽電池モジュールに対する多遮蔽物日射量モデルの構築
香田　顕司	エネルギー系コース(D)	ポリマー材料の長期信頼性評価と劣化診断技術の開発
髙橋　航太	エネルギー系コース(D)	深紫外 LED 光を用いた PET の表面改質とその物理過程の解明
田中　晴樹	エネルギー系コース(D)	ウェーブレット変換を用いた部分放電検出技術の高度化
谷口　良典	エネルギー系コース(D)	デルタ・シグマ変調器のための完全差動 CMOS フォールデッドカスコードオペアンプの設計とその応用
寺師　康平	エネルギー系コース(D)	励磁突入電流の抑制手法の高度化に関する基礎研究
冨田　将成	エネルギー系コース(D)	車載向けデルタ・シグマ AD コンバータのためのアーキテクチャに関する考察
永里　光司郎	エネルギー系コース(D)	電圧制御遅延線路を用いた時間領域コンパレータの設計と解析
野口　徹太郎	エネルギー系コース(D)	変圧器の巻線のレアショート時における部分放電特性
林　公輝	エネルギー系コース(D)	多入力 FG-MOSFET の可変しきい電圧特性を活用した CMOS アナログ集積回路に関する研究
林田　高典	エネルギー系コース(D)	手の運動症状を伴う疾患を鑑別するための新しい非接触法の検討
春山　剛瑠	エネルギー系コース(D)	フットタッピングテスト動画によるパーキンソン病の診断に関する研究
日髙　一生	エネルギー系コース(D)	工場内の作業効率化のための作業員検出・追跡に関する研究
平松　泰地	エネルギー系コース(D)	誘電体バリア放電による軸腐病菌の殺菌条件の検討
深江　亘	エネルギー系コース(D)	6.6 kV 水トリー CV ケーブルの加速劣化試験における電荷量推移

本村　優弥	エネルギー系コース(D)	画像処理技術を用いた牛の追跡に関する研究
若杉　郁斗	エネルギー系コース(D)	プリズムを用いた光入力素子の結合効率改善に関する研究
SWE ZIN LINN HTET	エネルギー系コース(D)	Experimental Study on Resistive Conditions of Bypass Diodes Damaged by Exposure to Standard Lightning Impulse Voltages
TIN ZAR WIN KO	エネルギー系コース(D)	Monitoring on Voltage and Current Characteristics of Bypass Diodes Exposed to Standard Lightning Impulse Voltage
Cho Cho Mar	エネルギー系コース(D)	Cattle Detection and Tracking for Behavior Analysis
荒瀬　太希	機械･情報系コース (E)	表面筋電位を用いた足首関節装具制御システムに関する研究
荒武　成道	機械･情報系コース (E)	遠隔制御による豚の体重測定に関する研究
池田　諒	機械･情報系コース (E)	後付け可能な電動車椅子用安全支援装置の開発
岡部　光汰	機械･情報系コース (E)	放牧環境下での牛のモニタリングを目的とした姿勢遷移と群行動の判別手法
沖　泰聖	機械･情報系コース (E)	伝達関数の係数に着目したワイヤレス給電システムの最適化について
炊江　洸孝	機械･情報系コース (E)	CNN を用いた文字フォントからの感情推定
春日　圭太	機械･情報系コース (E)	Yb 添加ジルコン酸バリウムを電解質としたプロトン伝導性セラミック燃料電池電極反応機構の解明
黒川　将太郎	機械･情報系コース (E)	ケーブル移動カメラを用いたマンゴー栽培の数値化に関する検討
小松　裕紀	機械･情報系コース (E)	複数の刺激を用いた仮想空間上の流体の触感の再現方法
坂田　大地	機械･情報系コース (E)	圧電センサを用いた無呼吸低呼吸指数算出アルゴリズムに関する研究
辻野　悟史	機械･情報系コース (E)	豚の体重に応じた自動選別装置に関する研究
鶴村　淳	機械･情報系コース (E)	複数ターゲットへの無線給電による実験的研究について
堂園　航汰	機械･情報系コース (E)	機械学習によるペロブスカイト型酸化物中のプロトンおよび正孔伝導度予測と可視化ソフトの開発
砥上　真久	機械･情報系コース (E)	ジェスチャ推定が可能な Alter-Ego ロボットを用いた直感的投球支援システムの開発とその動作制御手法
徳永　圭佑	機械･情報系コース (E)	ニッケルフェライトの低温合成に適した水熱処理用前駆体の調製条件
長友　勇樹	機械･情報系コース (E)	特徴点自動認識による豚の体温測定
中山　瞬一	機械･情報系コース (E)	ワイヤレス給電のための結合係数の近似と推定について
西村　真治	機械･情報系コース (E)	スポーツ画像に対する三次元姿勢推定における関節角度を使用した推定精度の改善
福田　唯人	機械･情報系コース (E)	電界結合方式によるワイヤレス給電の基本原理について
福永　哲也	機械･情報系コース (E)	高濃度 Sc 添加ジルコン酸バリウムを電解質としたプロトン伝導性セラミック燃料電池の緩衝層の検討
道内　雅己	機械･情報系コース (E)	ワイヤレス給電における周波数応答特性とその同定
PWINT PHOO WAI	機械･情報系コース (E)	Applying deep learning and GrabCut algorithms in hands-free automatic pig weight measuring system
横山　大輝	機械･情報系コース (E)	多様な管内での推進能力の拡大を目的としたハイブリッド型移動メカニズム
上岡　野歩	機械･情報系コース (F)	三成分速度型ボアホール地震計の試作および性能評価
宇佐見　俊博	機械･情報系コース (F)	特殊火山性土の有害ガス吸着材としての利用
碓井　侑希	機械･情報系コース (F)	慣性センサを用いたカヤックの動作分析システムの開発
岡原　諒	機械･情報系コース (F)	回流水槽による定速流中に置かれた 2 角柱まわり流れに関する研究
楠木　達也	機械･情報系コース (F)	筋強剛測定装置の開発
近藤　大輝	機械･情報系コース (F)	Ni-W 電着工具の製作に関する研究―めっき膜の密着性と工具寿命の関係についての検証―
近藤　理人	機械･情報系コース (F)	ビームダウン式太陽集光装置のための蓄熱粒子循環型熱交換器の開発
佐藤　和	機械･情報系コース (F)	フロートリング型半月板インプラントの製作と荷重分散性の評価
並松　大地	機械･情報系コース (F)	小型無人航空機用翼型の空力特性に関する研究
林　駿之介	機械･情報系コース (F)	ガラス繊維強化プラスチックを再利用した多孔質セラミックスの有害ガス吸着材としての利用
開　大鑑	機械･情報系コース (F)	機械要素の曲げ疲労強度評価に関する研究（強度設計指標の考察）
福山　みさき	機械･情報系コース (F)	圧電バイモルフ片持はりを用いた振動発電の電気出力に及ぼす先端質量及び負荷抵抗の影響
駒山　泰成	機械･情報系コース (F)	ステッピングモーターを用いた釣り用しゃくり機の開発

松本	大世	機械・情報系コース (F)	円板状半月板モデルを用いた半月板切除量に伴う膝関節の力学的特性変化のシミュレーション
山中	凌汰	機械・情報系コース (F)	ツインスクリュ膨張機による ORC 発電システムの検討
山村	拳志郎	機械・情報系コース (F)	特殊火山性ボラ石の有効利用に関する研究
石橋	宗一郎	機械・情報系コース (G)	筋電位による個人認証手法の実現に向けた複数点計測による精度向上の検討
岩永	拓朗	機械・情報系コース (G)	縮小版の結果を再利用するコリドールの解析
上田	高寛	機械・情報系コース (G)	空間データを対象とした分散 MQTT システム Gamma の実装と評価
小板	弦ノ介	機械・情報系コース (G)	AKAZE 特徴点を学習した SuperPoint による特徴点マッチング
菅	健将	機械・情報系コース (G)	自然言語仕様書を入力とした機械学習による VDM++ 仕様書自動生成ツール VGML の開発
田河	雅輝	機械・情報系コース (G)	同一環境下における機械学習アルゴリズムの侵入検知精度比較評価
竹内	大貴	機械・情報系コース (G)	X 線 CCD のイベント抽出システムの開発
田邉	英介	機械・情報系コース (G)	深層学習による動画像の連続フレームからの物体検出
田谷野	凌	機械・情報系コース (G)	遅延リスクを考慮したスケジュール管理のための意思決定支援システムの開発
東郷	拓弥	機械・情報系コース (G)	CNN による渦巻き錯視の認識
浪崎	誠也	機械・情報系コース (G)	神経回路における不変性・選択性のジレンマ
武藤	崇史	機械・情報系コース (G)	VDM++ 仕様を対象としたテストケース自動生成ツール BWDM の実用性向上を目的とした適用範囲の拡大
王	藝晗	機械・情報系コース (G)	色の恒常性を利用した CAPTCHA のユーザビリティ向上のための検討

宮崎大学工学教育研究部学術刊行物規程

（平成24年4月1日制定）

改正　平成29年10月17日　令和3年10月19日

（趣旨）
第1条　この規程は、宮崎大学工学教育研究部が学術刊行物として刊行する宮崎大学工学部紀要（以下「紀要」という。）の投稿及び編集・刊行に関して、必要な事項を定める。

（目的）
第2条　紀要は、工学部における学術研究の成果並びに活動状況を発表し、学内外との学術交流を果たすことを目的とする。

（投稿資格）
第3条　投稿代表者は、工学教育研究部の教員とする。

（編集）
第4条　紀要の編集は、宮崎大学工学教育研究部広報・地域連携委員会（以下「広報・地域連携委員会」という。）が行う。

（刊行）
第5条　紀要は、電子媒体で年1回刊行する。
2　投稿締切日、電子化経費、その他紀要の刊行に関連する必要事項は、広報・地域連携委員会で決定するものとする。

（書式等）
第6条　紀要の原稿は、広報・地域連携委員会の指定する様式によるものとする。

（掲載の区分等）
第7条　紀要への投稿物の掲載に当たっては、次に掲げる区分を設ける。
(1)　紀要論文
(2)　資料
2　前項第1号への投稿は、和文又は英文を原則とし、未発表論文であるものとする。その掲載に当たっては、関係教員了承済みのものを原則とする。
3　第1項第2号への投稿は、調査・実験などで得られた有益な資料などを対象とし、その採否は広報・地域連携委員会が行う。

（著作権の帰属）
第8条　紀要に掲載された投稿物の著作権は、原則として工学教育研究部に帰属し、工学教育研究部はそれらの投稿物を「宮崎大学学術情報リポジトリ」に登録できるものとする。

（雑則）
第9条　この規程に定めるもののほか、紀要の投稿及び編集・刊行に関する必要事項は別に定める。

附　則
1　この規程は、平成24年4月1日から施行する。
2　宮崎大学工学部学術刊行物規程は廃止する。

附　則
この規程は、平成29年10月17日から施行し、平成29年4月1日から適用する。

附　則
この規程は、令和4年4月1日から施行する。

編集委員長　田　村　宏　樹
編 集 委 員　西　岡　賢　祐
稲　田　飛　鳥
入　江　光　輝
横　山　宏　有
大　西　　修
片　山　　晋
出　原　浩　史

研究報告論文は、宮崎大学学術情報リポジトリに掲載されています。

(https://miyazaki-u.repo.nii.ac.jp/)

MEMOIRS OF FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF MIYAZAKI
No.52

(宮崎大学工学部紀要　第52号)

令和５年８月　　日　発行

編集兼発行者　宮　崎　大　学　工　学　部
宮崎市学園木花台西１丁目１番地
電話 0985（58）2872