

宮崎大学 工学部
紀 要

MEMOIRS

OF FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF MIYAZAKI

No. 55 November, 2026

FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF MIYAZAKI, JAPAN

宮崎大学 工学部

Editorial Committee
Chairman : Hiroki TAMURA

Kensuke NISHIOKA
Hironori IZAWA
Chihiro MORITA
Meita ASAMI
Takuya HIRATA
Osamu ONISHI
Kunihito YAMAMORI
Kaoru OE
Daisuke MAKI

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. 55, November 2026
CONTENTS

Original Articles

Ko IMAMURA, Chihiro MORITA, Eitaro HORISAWA Verification of Damage Assessment for Steel Structural Members Using Photogrammetry	1
Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO Prediction of chlorine leaching from cement-solidified fly ash using column leaching tests	9
Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO Three-dimensional leaching model of easily soluble substances from cement-solidified fly ash	15
Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO Applicability of easily soluble substance leaching model to chelate-treated fly ash	23
Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO Prediction of calcium concentrations in leachate	31
Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO Prediction of chlorine concentrations in leachate	41
Yutaka DOTE, Tomoo SEKITO Effect of operating conditions for N, P, and K recovery from swine wastewater on treatment performance and fertilizer components	49
Daiki Uto, Kenji Yoshino Electrochemical Characteristics of Lithium-Ion Battery Separators with Protective Layers by MAO Spray Coating	57
Daiki Uto, Kenji Yoshino MAO Spray-Deposited Films and the Influence of Annealing Treatment	61
Hideomi HORITA, Hiroki TAMURA, Yukihiro UCHI Construction of Ground Information Prediction Method Using Public Data – Application of Machine Learning and Gaussian Process According to Regional Characteristics –	65
Mao MORI, Yasuyuki OTA, Kensuke NISHIOKA, Akira NAGAOKA Investigation of Thermoelectric Power Generation Using Heat from Window-Integrated Photovoltaics for ZEB Applications	73
Hirohito OJIMA, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATU Research on Hydrogen Production by Beam - down Solar Concentrator	79
Chihaya TAKUMA, Tetsuro KATAYAMA Extension of ASLA as an Electronic Document Region Detection and Labeling Tool for More Context-Aware Label Generation	83

Takumi ISHIMARU, Makoto SAKAMOTO	
Potential and Evaluation of Mixed Reality Painting Experiences for Addressing the Experience Gap	91
Takurou Ehara, Makoto SAKAMOTO	
Verification of the Effectiveness of Interior Layout Support Using MR	97
Yu Oshikawa, Makoto Sakamoto	
Proposal of a Squat Training Method Combining Muscle Load Visualization Using EMG with Gamification Elements via Gauge Display	101
Kanata HIRANUMA, Makoto SAKAMOTO	
Proposal for “kick-form-analyzer” Kick form Instruction Support System	115
List of Master's Thesis	119
Others	123

目 次

研究報告論文

今 村 公 森 田 千 尋 堀 澤 英 太 郎	：写真計測による鋼構造部材を対象とした損傷評価の検証	1
土 手 裕 関 戸 知 雄	：カラム試験によるセメント固化飛灰からの塩素溶出量予測	9
土 手 裕 関 戸 知 雄	：セメント固化体からの易溶解性物質の三次元溶出モデル	15
土 手 裕 関 戸 知 雄	：易溶解性物質溶出モデルのキレート処理物への適用性の検討	23
土 手 裕 関 戸 知 雄	：浸出水中のカルシウム濃度予測	31
土 手 裕 関 戸 知 雄	：浸出水中の塩素濃度予測	41
土 手 裕 関 戸 知 雄	：養豚廃水からの N、P、K 回収運転条件の処理性能および肥効成分への影響	49
宇 都 大 樹 吉 野 賢 二	：MAO のスプレー塗布による保護膜を有する リチウムイオン電池用セパレータの充放電特性	57
宇 都 大 樹 吉 野 賢 二	：MAO のスプレー塗布による成膜とアニールの影響	61
堀 田 英 臣 田 村 宏 樹 内 幸 彦	：公共データを用いた地盤情報予測手法の構築 －機械学習とガウス過程の地域特性に応じた適用－	65
森 舞 桜 太 田 靖 之 西 岡 賢 祐 永 岡 章	：ZEB 化に向けた窓型太陽電池の熱利用による熱電発電の検討	73
尾 島 啓 仁 長 瀬 慶 紀 友 松 重 樹	：ビームダウン式太陽集光装置による水素製造に関する研究	79
宅 間 千 隼 片 山 徹 郎	：電子文書の領域検出およびラベル生成ツール ASLA における より文脈を考慮したラベル生成のための拡張	83

石丸 巧巳：体験格差に向けた複合現実上でのペイント体験の可能性と考察	91
坂本 真人	
江原 拓郎：MR を用いた模様替え支援の有用性の検証	97
坂本 真人	
押川 優：EMG を用いた筋負荷可視化とゲージ表示によるゲーミフィケーション要素を 坂本 真人 組み合わせたスクワットトレーニング手法の提案	101
平沼 哉天：キックフォーム指導支援システム「kick-form-analyzer」の提案	115
坂本 真人	
修士論文題目一覧	119
その他	123

写真計測による鋼構造部材を対象とした損傷評価の検証

今村 公^{a)}・森田 千尋^{b)}・堀澤 英太郎^{c)}

Verification of Damage Assessment for Steel Structural Members Using Photogrammetry

Ko IMAMURA, Chihiro MORITA, Eitaro HORISAWA

Abstract

In recent years, the deterioration of road bridges has become a serious problem in Japan, necessitating mandatory close-up visual inspections every five years. However, due to challenges such as a shortage of engineers and budget constraints, there is a demand for inspection technologies that are inexpensive, efficient, and offer accuracy equivalent to close-up visual inspections. Therefore, this study aimed to clarify changes in model accuracy due to different shooting methods using 3D models created with Structure from Motion and to accurately calculate damaged areas, such as paint peeling and corrosion. Accuracy verification was performed on test specimens and actual bridges. Verification using test specimens showed that high accuracy results for both dimensional accuracy and damaged areas could be obtained by ensuring a shooting distance of 0.5 m and an overlap rate of 80% or higher. Furthermore, the verification on actual bridges demonstrated the ability to faithfully reproduce the shape of damaged areas.

Keywords: Structure from Motion, Three-dimensional model, Maintenance technique

1. はじめに

日本における道路橋の多くは高度経済成長期に整備されたものであり、近年その老朽化が深刻な課題となっている。建設後 50 年を経過した橋梁の割合は、2025 年度時点で約 42% に達しており、10 年後には約 65% に増加すると予測されている¹⁾。これらの橋梁のうち、9 割以上は地方公共団体によって管理されている。しかしながら、地方公共団体は技術者不足や予算不足といった課題を抱えており、十分な維持管理や点検が行われているとは言い難い状況にある²⁾。

このような背景のもと、国土交通省は 2014 年度より、道路橋に対して 5 年に 1 度の近接目視による定期点検を義務化した³⁾。さらに、2019 年度から開始された 2 巡目の点検では、近接目視と同等の精度が確保できる場合に限り、ドローンなどの新技術を活用した点検手法の導入が認められている³⁾。このことから、安価かつ効率的な橋梁点検手法の確立が求められている。

そこで本研究では、SfM (Structure from Motion) を橋梁点検に応用することで、点検作業の効率化および点検データの一元化が可能であると考えた。SfM とは、複数のデジタル画像から点群データを生成し、対象物の三次元モデルを構築する技術である。近年レーザースキャナを用いた点

検手法が普及しつつあるが、機器が高価であることや専門的な知識が必要であることから、財政的余裕の少ない地方公共団体にとっては導入が困難である。一方、SfM は必要な機器が比較的安価であり、簡便に三次元モデルを作成できる点で有用性が高い。

SfM に関する既往研究では、デジタルカメラで撮影した画像のみを用いて作成した三次元モデルにより、定期点検と同等の損傷確認が可能であること⁴⁾や、生成した点群データから剥落などの損傷領域を三次元的に把握できることが報告されている⁵⁾。また、プロジェクタを用いて対象物に模様を投影することで、点群データの点数および精度を向上させる手法についても研究が行われている⁶⁾。しかし、これらの研究は主にコンクリート構造物を対象としたものであり、鋼構造物を対象とした検討は十分とは言えない。鋼構造物を対象とした研究では、減肉したウェブの断面変化や切削箇所を点群モデルに表現できたこと⁷⁾や、作成したモデルから AI を用いて腐食部分を区別することで損傷領域の把握が容易になること⁸⁾が報告されている。また、腐食した部材の点群データを用いて劣化損傷を反映させた解析モデルの妥当性が検証されている⁹⁾。しかし、寸法や損傷領域の精度検証については行われていなかった。

以上の背景を踏まえ、本研究では SfM により作成した三次元モデルを用いて、鋼構造物における様々な撮影方法が寸法精度に及ぼす影響について検証を行った。また、損傷領域(塗膜剥離や腐食等)の面積算出手法についても検討した。まず、H 形鋼の供試体に損傷を模擬した画用紙を

a)工学専攻環境コース大学院生

b)土木環境プログラム教授

c)土木環境プログラム特別助教

付与し、面積算出精度の検証を行った。さらに、実橋梁における鋼部材の損傷領域を対象として、同様の検証実施した。

2. SfM の概要

三次元データの取得技術は、画像を用いる方法とレーザーを用いる方法に大別できる。SfMはこのうち、画像を用いた三次元形状の復元技術である。これは、異なる位置から撮られた複数枚の画像の重複部分（オーバーラップ部）を解析することにより、三次元モデルを復元するものである。従来の写真測量では、異なる位置から撮られた複数枚の画像から手動で基準点を抽出し、既知座標を与えることでカメラの姿勢と位置を求めているが、異なるカメラや焦点距離で撮影された画像の解析は困難であった。これに対して、SfMも基本原理は同様であるが、既知座標値を入力する以外、解析はほぼ自動化されており、条件の異なる複数のカメラを用いた解析も可能である。一つの画像から数百から数千点の特徴点が抽出され、画像間でマッチングされた後にその点の三次元座標を特定する。特徴点とは、画像上のある点で周囲と比較して色彩や濃淡が異なる点のことである。図1に示すように、二枚の画像上の領域内にそれぞれ存在する特徴点について、周囲との色彩や濃淡の違いの程度を算出し、その値がある判定値に収まる場合にその点を同一点であると判断する。画像上の領域を (i,j) その領域内の特徴点をそれぞれ (p,q) 周囲の輝度を T 、輝度の差の総和を J とすると式(1)のように表される。

$$J(p, q) = \sum_{i, j} |Tp(i, j) - Tq(i, j)|^2 \quad (1)$$

三次元モデル構築の流れを図2に示す。特徴点と各カメラの位置・姿勢の推定値から生成された粗い点群（Sparse point cloud）から各ピクセルの三次元座標を計算し、より高密度な点群（Dense point cloud）を得る。この点群からメッシュデータを作成し、そのメッシュデータに元画像のテクスチャを張り付けることによって実際の外観を反映した三次元モデルが構築できる。

3. H 形鋼での寸法精度検証

3.1 検証方法

本検証では図3に示すH形鋼を対象とした。図4に示すようにH形鋼にあらかじめ側面に2つターゲットを設置し、コンバックスを用いてターゲット間の距離とウェブ高、フランジ幅、フランジ厚を測定した。撮影距離とラップ率の差による寸法精度への影響を検証するために、撮影距離0.5 m、1.0 mのパターンをそれぞれラップ率80%、90%で撮影した。撮影に用いたカメラを表1に示す。

以上の条件で撮影を行った後、Agisoft社製のMetashape

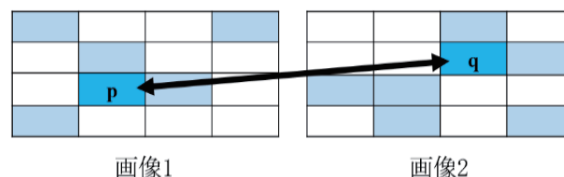


図 1. 特徴点の判定.

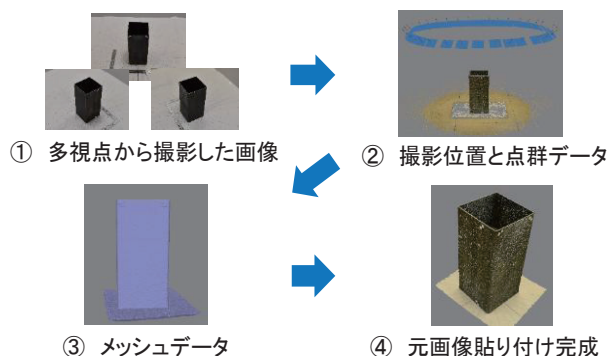


図 2. 三次元モデル構築の手法.



図 3. 検証に用いた H 形鋼.

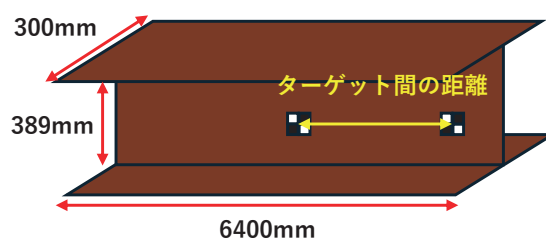


図 4. H 形鋼の模式図.

表 1. 使用カメラ詳細.

		
メーカー	機種	画素数
GoPro	HERO11 Black	5312×2988

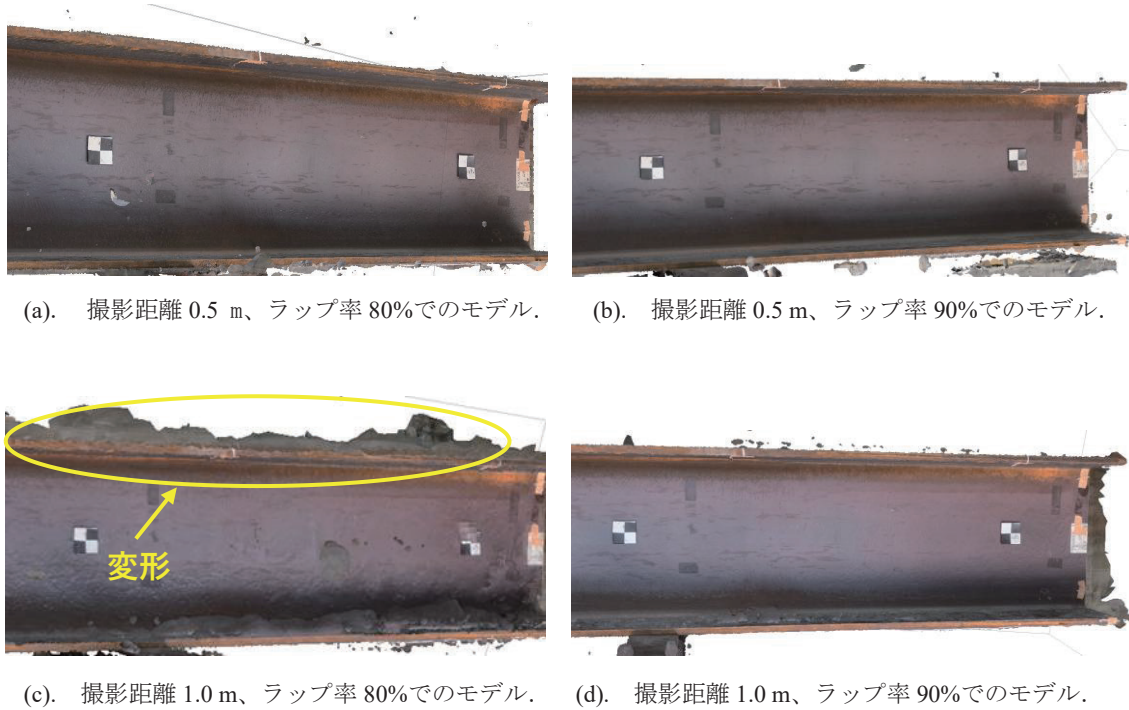


図 5. 作成したモデル

表2. H形鋼モデルの精度.

		ウェブ高			フランジ幅			フランジ厚			形状評価	写真枚数
		実測値 (mm)	再現値 (mm)	誤差 (%)	実測値 (mm)	再現値 (mm)	誤差 (%)	実測値 (mm)	再現値 (mm)	誤差 (%)		
撮影距離 0.5 m	ラップ率80%	389.0	392.0	0.77	300.0	298.2	-0.60	15.0	15.2	1.33	○	117枚
	ラップ率90%	389.0	388.6	-0.10	300.0	297.7	-0.77	15.0	15.1	0.67	○	228枚
撮影距離 1.0 m	ラップ率80%	389.0	372.0	-4.37	300.0	307.4	2.47	15.0	16.0	6.67	△	61枚
	ラップ率90%	389.0	381.2	-2.01	300.0	298.2	-0.6	15.0	15.5	3.33	○	110枚

を用いて SfM 解析により三次元モデルを作成した。作成した三次元モデル上でターゲット間の距離を入力することで、スケールを与えた。コンベックスを用いて測定した実測値とモデル上で計測した再現値から求めた相対誤差により精度の検証を行う。

3.2 検証結果

作成したモデルを図 5、モデルの精度を表 2 に示す。形状の評価として、欠損なく適切に再現できたものを【○】、大まかな形は再現できているものの、ところどころ凹凸がみられるものを【△】とした。撮影距離 0.5 m ではどのモデルも相対誤差が 1%以内であり、形状や欠損もなく精度の高いモデルが作成できた。しかし、撮影距離 1.0 m ではほとんどの箇所では誤差が 1%以上となり精度が低くなった。また、形状に関しても不整合がみられた。特に撮影距離 1.0 m でラップ率が 80%のモデルは相対誤差、形状ともに精度の低い結果となった。この検証結果から撮影距離が遠く

なると相対誤差が大きくなり、形状の評価も悪化することが分かった。

4. 実橋梁における寸法精度検証

4.1 検証方法

撮影した橋梁を図6に示す。前章の検証結果より、撮影距離を0.5 mとしたときに精度の良いモデルが得られたため、実橋梁においてもその傾向がみられるか検証を行った。撮影距離は0.5 mおよび1.0 mのパターンにおいて、ラップ率80%および90%とした。モデル作成後、ターゲット間の長さを基準の長さとして実測値とモデル上で得たウェブ高、フランジ幅の値を比較し相対誤差を算出して精度の評価を行った。

4.2 検証結果

作成したモデルを図6(c)に示す。今回の検証では、図6(c)

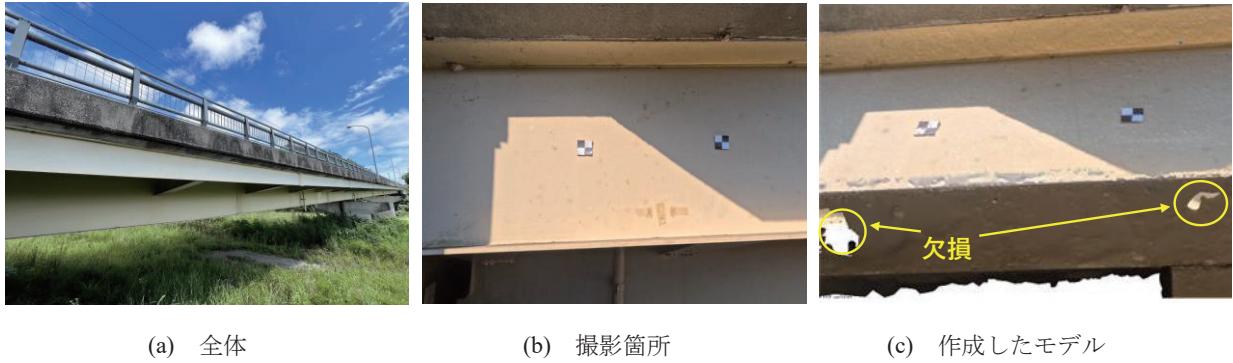


図6. 検証に用いた橋梁.

表3. 実橋梁モデルの精度.

		ウェブ高			フランジ幅			フランジ厚			形状評価	写真枚数
		実測値 (mm)	再現値 (mm)	誤差 (%)	実測値 (mm)	再現値 (mm)	誤差 (%)	実測値 (mm)	再現値 (mm)	誤差 (%)		
撮影距離 0.5 m	ラップ率80%	600.0	598.5	-0.25	222.0	224.5	1.13	14.0	14.2	1.43	△	54枚
	ラップ率90%	600.0	593.3	-1.12	222.0	221.7	-0.14	14.0	13.7	-2.14	△	104枚
撮影距離 1.0 m	ラップ率80%	600.0	597.2	-2.13	222.0	225.0	1.35	14.0	15.9	13.6	△	27枚
	ラップ率90%	600.0	594.5	-0.92	222.0	221.4	-0.27	14.0	14.5	3.57	△	57枚

のようにすべてのモデルに欠損がみられた。特に下フランジ下面で大きな欠損があった。これは下側から撮影した写真が逆光の影響により対象の橋梁が暗く写っていたこと、撮影した橋梁が比較的損傷などの少ない橋梁であったため、特徴点の取得が難しいことが大きく影響したものと考えられる。また、検証結果を表3に示す。H形鋼での検証では撮影距離0.5 mで精度の良いモデルを得ることができたが、今回の検証では相対誤差、形状の評価ともに大きな差はみられなかった。欠損のないモデルを作成するために、逆光の対策や特徴点の取得が難しい橋梁での撮影方法を検討する必要がある。

5. H形鋼における損傷面積の精度検証

5.1 検証方法

鋼部材に生じる腐食や塗膜劣化などの損傷面積が三次元モデルから正確に検出できることを確認するため、3章で用いたH形鋼を対象とした損傷領域の精度検証を実施した。撮影機器やソフトは寸法精度検証の際と同様とした。スケールを与えるために2枚のターゲットを設置した。また、図7に示すように損傷領域に見立てた画用紙を3枚（損傷a:30 mm×30 mm、損傷b:50 mm×50 mm、損傷c:100 mm×100 mm）設置した。その後、ターゲット間の距離と各損傷の寸法をコンベックスで測定した。撮影距離とラップ率の違いが損傷領域の面積算出精度にどのように影響を与えるのか検証した。撮影条件は撮影距離0.5 m、1.0 mのパ

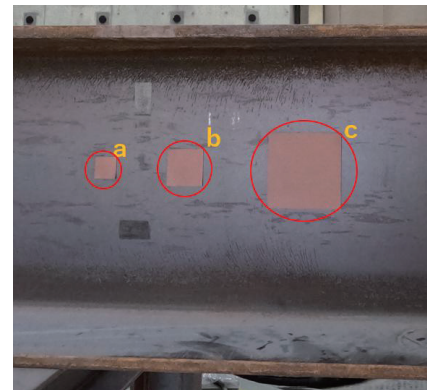


図7. 損傷部分を模した画用紙.

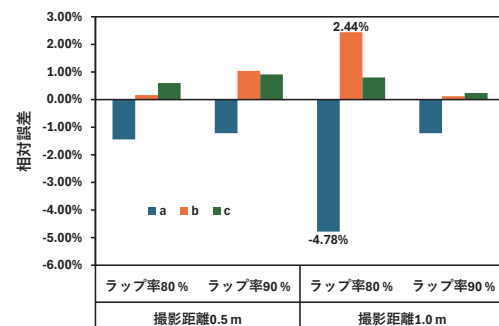


図8. 各モデルにおける損傷面積の相対誤差.

ターンをそれぞれラップ率80%、90%で撮影した。以上の条件で撮影した後、作成したモデル上で各損傷の面積を測定し、実測値と再現値から相対誤差を求めた。モデル上での面積はMetashapeの面積算出機能を用いて求めた。

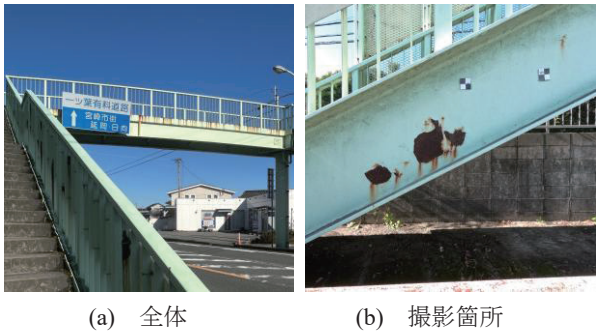


図 9. 歩道橋 A.

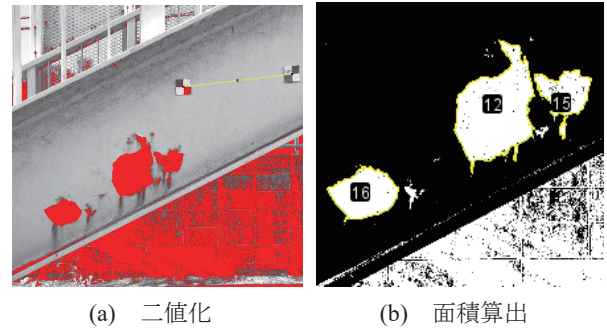


図 12. ImageJ での面積算出.

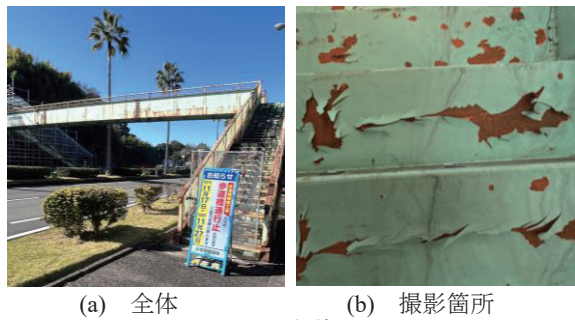


図 10. 歩道橋 B.

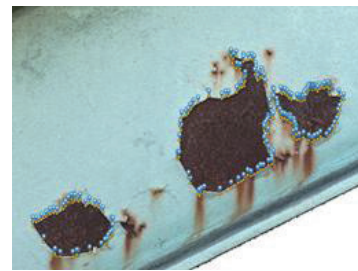


図 13. Metashape での面積算出.

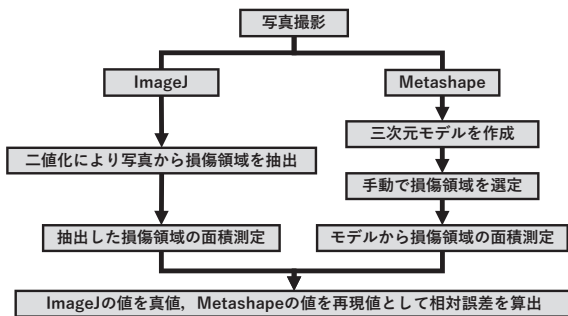


図 11. 損傷面積算出のフローチャート.

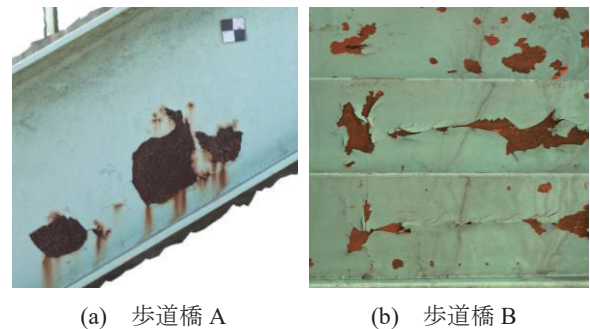


図 14. 作成したモデル.

5.2 検証結果

作成したモデルの精度を図8に示す。すべてのモデルで相対誤差が $\pm 10\%$ 未満であった。撮影距離1.0 mでラップ率ラップ率80%のモデルを除いて変形や欠損もなく精度よく損傷領域を捉えることができ、相対誤差においては1%程度であった。しかし、撮影距離1.0 mでラップ率80%のモデルは比較的精度の低い結果となった。モデルの形状が忠実に再現できておらず対象の画用紙の輪郭がぼやけていたので、面積をうまく捉えることができず、相対誤差が大きくなったと考えられる。

6. 実橋梁における損傷面積の精度検証

6.1 歩道橋における検証

6.1.1 検証方法

図9、図10に対象とした歩道橋2橋を示す。H形鋼での損傷領域の精度検証より撮影距離0.5 mで精度の良い結果が

表4. 歩道橋A, 歩道橋Bにおける塗膜劣化部面積の相対誤差.

	ImageJ	Metashape	相対 誤差	形状 評価
歩道橋 A	30,950 mm ²	30,008 mm ²	3.04%	○
歩道橋 B	36,658 mm ²	34,435 mm ²	6.06%	○

得られたため、撮影距離は0.5 mとし、ラップ率が80%以上となるように撮影を行った。図11に損傷面積算出のフローチャートを示す。実橋梁の損傷形状は不定形であり、実測値を正確に定めることが困難である。このため、実橋梁での検証における実測値については、オープンソースの画像処理ソフトウェアであるImageJを用いて写真から算出したものとした。ImageJを用いた面積算出方法は多田野ら¹⁰⁾の手法を参考にした。ImageJでの面積算出手順は以下のとおりである。まず、面積を実寸で算出するために画像内の既知の長さを与える。今回はターゲット間の距離を与えた。次に輝度によって二値化を行う。閾値を設定し、二値化を行うことで図12(a)のような画像が作成される。解析対象

が赤色で適切に抽出されていることを確認する。その後、Metashapeとの比較のため損傷領域が500ピクセル未満の微小領域を除外し、図12(b)のように面積を算出した。Metashapeでは、図13に示すように損傷領域の輪郭を点で囲むことで面積を算出できる。ImageJで得た値を真値、Metashapeで作成したモデルから得た値を再現値として相対誤差を算出した。

6.1.2 検証結果

作成したモデルを図14、検証結果を表4に示す。歩道橋A、歩道橋Bともに全体的な形状を精度良く再現することができた。これは実橋梁では損傷領域も含めて変色や汚れがあり、特徴点が検出されやすい状態であったためと考えられる。相対誤差は $\pm 10\%$ 以内に収まっていたが、H形鋼で検証した結果と比較して増加していた。これは、Metashapeでは手動で囲んだ部分を面積とするため、この歩道橋Aのように錆が垂れている箇所があると、損傷領域の輪郭が曖昧になり相対誤差が生じやすくなるためと考えられる。

6.2 道路橋における検証

6.2.1 検証方法

対象とした道路橋を図15に示す。また、損傷部分が高い箇所であったため撮影距離は1.5mとし、ラップ率が80%以上となるように撮影を行った。モデルを作成後、モデル上にて計算した再現値と実測値を比較し、相対誤差を算出した。実測値は歩道橋での検証と同様にImageJにより算出した。

6.2.2 検証結果

検証結果を表5に示す。大まかな形状は再現できていたが一部変形がみられた。歩道橋の検証と比較して形状の再現性が低下した理由として光量不足が考えられる。相対誤差に関しては $\pm 10\%$ 以内に収まっていたが、H形鋼で検証した結果と比較して増加していた。これは今回のモデルでは変形がみられ、損傷領域の輪郭がぼやけていたため、正確に面積を算出することができず相対誤差が増加したと考えられる。

7. まとめ

本研究では、H形鋼および実橋梁に対して寸法精度の検証と損傷面積の精度検証を行い、撮影方法の違いが精度に及ぼす影響について検討した。ここで得られた知見、今後の展望を以下にまとめる。

- (1) H形鋼での寸法精度検証について、撮影距離0.5mではラップ率80%、90%ともに誤差が1%以内で形状の再現性が高いモデルを作成できた。
- (2) 実橋梁での寸法精度検証では、全てのモデルで欠損や変形がみられた。また、表面が一樣で比較的欠損のない橋梁では特徴点が取得しにくいいため精度が低くなった。撮影距離やラップ率による影響はみられ



(a) 全体



(b) 測定箇所



(c) 作成したモデル

図 15. 検証に用いた道路橋.

表5. 道路橋の塗膜劣化部面積の相対誤差.

ImageJ	Metashape	相対誤差	形状評価
68,569 mm ²	73,056 mm ²	6.54%	△

なかった。

- (3) H形鋼の損傷面積の精度検証において、寸法精度の検証と同様、撮影距離0.5mで作成されたモデルは撮影距離1.0mで作成されたモデルより面積測定の精度が高くなった。
- (4) 実橋梁での損傷面積の精度検証において、全体的な形状は良く再現することができた。これは実橋梁における損傷部分も含めて変色や汚れがあり、供試体として使用したものよりも特徴点が検出されやすい状態であったためと考えられる。相対誤差に関しては $\pm 10\%$ 以内に収まっていたが、H形鋼で検証した結果と比較して増加していた。

謝辞

本研究を行うにあたり多大なご指導を賜りました中島和俊研究員に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路メンテナンス年報

- https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/r06/r06_08maint.pdf、(2025/12/1 閲覧).
- 2) 国土交通省：3 社会インフラの維持管理の動向
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/html/n1133000.html>、(2025/12/1 閲覧).
- 3) 国土交通省：道路構造物の定期点検の実施にかかる参考資料
https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo7_23.pdf、(2025/12/1 閲覧).
- 4) 木本啓介，松田浩：中小橋梁の点検におけるSfMの活用方法の比較・検証，実験力学会誌，Vol.17，No.4，pp.290-297，2017.
- 5) 塚 大祐，高橋 典之，櫻井 真人，菅野 秀人：SfMを用いた鉄筋コンクリート造部材剥落領域の計測，日本建築学会技術報告集，第30巻，第76号，pp.1269-1274，2024.
- 6) 今井 龍一，中村 健二，塚田 義典，梅原 喜政，新名 恭仁，庄司 康太：コンクリート構造物を対象とした模様の投影による SfM 点群データの高精度化に関する研究，土木学会論文集，Vol.80，No.22，2024.
- 7) 鈴木 紗苗，宮森 保紀，齊藤 剛彦，山崎 智之，ムンフジャルガル ダンビーバルジル，三上 修一：鋼構造部材の3次元点群モデル構築とFEMデータへの自動変換に関する検討，土木学会論文集 F3，Vol.75，No.2，pp.141-149，2019.
- 8) Katrina MONTES, Jiaming LIU, Ji DANG and Pang-jo CHUN：Structure from segmented motion for bridge 3D damage detection using UAV, AI, and MR, Intelligence, Informatics and Infrastructure, Vol.4, Issue2, 2023.
- 9) 日高 菜緒：腐食した対傾構ブレース材の計測点群データを用いた解析モデル生成手法の開発，生活環境向上のための研究報告書，助成研究成果論文集，2023.
- 10) 多田野 渉，早川 慎二郎：微細試料の X 線マイクロ CT 画像解析—ImageJ Fiji を用いた単繊維の開口率および体積の抽出—，X 線分析の進歩，54 巻，pp.119-127，2023.

カラム試験によるセメント固化飛灰からの塩素溶出量予測

土手 裕^{a)}・関戸 知雄^{b)}

Prediction of chlorine leaching from cement-solidified fly ash using column leaching tests

Yutaka DOTE^{a)}, Tomoo SEKITO^{b)}

Abstract

The objective of this study was to propose a method for predicting a chlorine leaching from cubic cement-solidified specimens in column experiments based on the chlorine leaching model. For this purpose, tank leaching tests using cylindrical specimens, and column and tank leaching tests using 4 cm-length cubic specimens were conducted. From the results of the tank leaching tests using cylindrical specimens, the parameters of a one-dimensional model were obtained. The cumulative leaching amount of chlorine in the tank leaching tests using cubic specimens was calculated using the obtained leaching model parameters. And the calculated values were in good agreement with the observed values. Furthermore, by applying a correction factor of 0.13 to the diffusion coefficient, the calculated and observed cumulative leaching amount of chlorine in the column leaching tests showed close agreement. These results demonstrated that the chlorine leaching in column leaching tests could be predicted using the leaching model of cubic specimens with corrected diffusion coefficient.

Keywords: Cement-solidified fly ash, Chlorine leaching model, Model parameters, diffusion correction factor, Tank leaching test, Column leaching test

1. はじめに

令和5年での一般廃棄物の最終処分量は319万トンであり、そのうち焼却残渣量は250万トンに達し、最終処分量に占める焼却残渣の割合は約78%にも及んでいる¹⁾。特に、焼却残渣中の排ガス処理飛灰（安定化処理前）には易溶解性塩類（C1）が多く含まれており、C1:130~170g/kgの含有量が報告されている²⁾。そのため、浸出水の塩類の高濃度化が進行し、農作物への被害など放流先での塩害が報告されており³⁾、浸出水の脱塩処理が行われる場合がある。しかし、脱塩処理によって生成される副生塩の適正な処理、再利用方法が確立されておらず、最終処分場に保管または産廃処理されている⁴⁾。

脱塩処理以外の対策として、塩濃度を下げる方法として、体積の増加によって埋立物の比表面積を小さくすることで、塩類の溶出を抑制することができる⁵⁾。飛灰に対して、重金属の溶出抑制のための安定化処理のうちセメント固化は安定化処理物の体積を抑制することが可能である。

浸出水中のC1濃度を脱塩処理が必要な濃度以下に抑えるためのセメント固化体の大きさや埋立方法を検討する

には、セメント固化体からのC1溶出量を予測する必要がある。浸漬状態でのセメント固化体からの溶出モデルについて、名富⁶⁾は表面溶解が暴露面近傍でのみ生じるとして厚さ δ (m)の表面溶解領域を設定し、表面溶解領域では拡散による溶出を無視し、表面溶解領域中の含有量に比例して溶解速度を表現し、表面溶解領域以外に含まれる易溶解性物質は拡散により移動するモデルを提案した。しかし、浸漬状態の固化体からの溶出量から実際の処分場での降雨条件での溶出量を予測する方法については検討されていない。

そこで、本研究ではC1の溶出量の予測を目的として、セメント固化体の立方体供試体による溶出量予測モデルからより実際の処分場の状況に近いカラム試験溶出量を求める方法を提案した。

2. 実験方法

2.1 用いた飛灰

実験には宮崎市の一般廃棄物焼却施設から2025年5月21日に採取した排ガス処理飛灰を用いた。この施設では排ガス処理に活性炭と消石灰を使用している。採取した飛灰は、排ガス処理後で安定化処理前の飛灰である。入手した飛灰を約5kgずつに取り分け、乾燥させたシリカゲルと

a) 土木環境プログラム教授

b) 土木環境プログラム准教授

消石灰を入れて保存した。

2.2 供試体作成方法

供試体は、飛灰に対するセメントの重量比 30%、(セメント+飛灰)に対する水の重量比 40%になるように作成した。円柱供試体作成には直径 5 cm、高さ 10 cmの円柱モールドを用い、カラム試験用に 3 個、分析用に 1 個作成した。立方体供試体作成には 1 辺 4 cmの亚克力製モールドを用い、カラム試験用、分析用にそれぞれ 1 個作成した。配合条件に従って混練り用の容器に飛灰と蒸留水とキレート剤 ((株) 栗田工業、アッシュナイト S-803) を取り、自動混練り機を用いて混合を行ったあと、モールドに充填しラップをかけ、室温 25℃で 1 週間養生した後、脱型した。

脱型した円柱供試体の重量測定後、タンクリーチング試験に使用する供試体は、上面のみを暴露面とするため、暴露面以外の側面と底面には変成シリコンシーラント ((株) セメダイン、SM-451) を塗って防水を行った。

脱型した分析用供試体の粗粉碎を行い、7 日間乾燥して含水率を測定した後に微粉碎し、含有量試験、シリアルバッチ試験、溶出試験に用いた。

2.3 タンクリーチング試験

円柱供試体では 2L のポリ瓶に蒸留水 1.75L、1 辺 4cm 立方体供試体では 0.9L のハイパックに蒸留水 0.6L を加えた。立方体供試体は全表面積が暴露面となるような台の上に静置した。静置後、所定の時間が経過したら、新しい蒸留水を入れたポリ瓶に供試体を移した。蒸留水の交換時間は 0.0417、0.0833、0.125、0.25、0.5、1、2、4、8、16、32 日目とした。供試体を取り出した後の溶液の一部を 0.45 μm メンブレンフィルターでろ過したろ液に、濃硝酸をろ液に対して 0.5%加えてポリ瓶に入れ、保存した。タンクリーチング試験の反復回数は 3 回とした。

2.4 カラム試験方法

カラム試験では散水後一定時間放置し(この期間を無降雨期間と呼ぶ)、散水を行う事で無降雨期間中に供試体から溶出した C1 を回収した。測定に用いたカラムを図 1 に示す。カラムは亚克力製で、断面が供試体の長さ+4 cm の長さの正方形である。カラムはカラム本体、底板、排水用パイプで構成されている。直径 2 mm のガラスビーズを 2 cm の厚さになるように底板の上に敷き、供試体を設置し、ガラスビーズを供試体の上面 2 cm までビーズを充填させた。底板には直径 1 cm の穴が複数開いており、ビーズが流れないように網を張った。散水方法は、190mL (充填したガラスビーズ層の空隙量相当) の蒸留水を供試体の真上からゆっくりと加えた。蒸留水がある程度排水されたことを確認し次の散水を行い、この作業を合計 3 回行った。カラムからの排水がなくなると (概ね 1 時間程度)、排水の入ったポリ瓶を回収し、カラム上部をラップで覆い、カラム

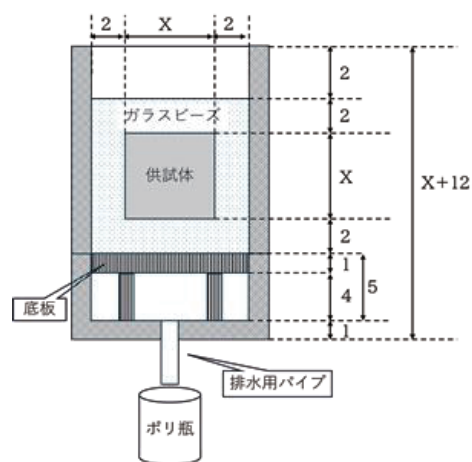


図 1. カラム試験装置の概要 (寸法の単位: cm)

下部の排水チューブをピンチコックで止めた。散水頻度は 1 日 1 回、2 日連続で行い、5 日間放置し(無降雨期間 5 日)、37 日目まで行った。散水期間は 1 日目の散水は供試体周辺空隙を蒸留水で満たすことを目的とし、それ以降の散水は、空隙に溜まっている濃度の高い溶液を洗い流すとともに供試体周辺の空隙内の溶液を蒸留水に交換することを目的としている。ポリ瓶に回収した排水は 0.45 μm 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。残った溶液の EC および pH を測定した。ろ液に濃硝酸を 0.5%加えて保存した。

2.5 供試体性状

2.5.1 含有量試験

含有量分解は、試料 1g、蒸留水 25ml、濃硝酸 2.5ml を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 5 分間煮沸し、冷却した。その後、ガラス繊維織紙 (GF/B) を用いて全量吸引ろ過し、100ml にメスアップし、ポリ瓶に保存した。含有量試験の反復回数は 3 回とした。

2.5.2 シリアルバッチ試験

遠心分離管に試料 10g と蒸留水を 300ml 取り、200rpm で 6 時間振とう後、5000G で 10 分間遠心分離を行った。遠心管の上澄み液を回収し、回収した上澄みの容積を測定した後 0.45 μm メンブレンフィルターを用いてろ過し、濃硝酸をろ液に対して 0.5%加えてポリ瓶に入れ、保存した。固形物の残っている遠心管に 1 回目と同量の蒸留水を加え、上記と同様の操作を行った。これを繰り返して合計 4 回の溶出操作を行った。シリアルバッチ試験の反復回数は 3 回とした。

2.5.3 溶出試験

溶出試験は、L/S=10、200、300、400 の条件でポリ瓶に試料と蒸留水を取り、200rpm で 6 時間振とう後に約 5 分

間静置し、上澄みを $0.45 \mu\text{m}$ 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。残った上澄みの pH と EC を測定した。濃硝酸をろ液に対して 0.5% 加えてポリ瓶に入れ、保存した。溶出試験の反復回数は 3 回とした。

2.5.3 分析方法

Cl 濃度はイオンクロマトグラフィー (Thermo Fisher SCIENTIFIC Inuvion 250351090、カラム AS4A-SC、溶離液 Na_2CO_3 1.8mol/L / NaHCO_3 1.7mol/L) を用いて分析した。空隙率は粗粉碎した分析試料のうち約 1cm 程度のものを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。空隙率測定の反復回数は 3 回とした。

3. 溶出モデル

3.1 一次元溶出モデル

一次元の条件で、表面溶解支配部分となる供試体の表面近傍 (以後、表面溶解領域と呼ぶ) において溶出速度がその領域での含有量に比例する表面溶解モデルと通常の拡散モデルを組み合わせた名富のモデル⁶⁾を用いた。表面溶解モデル式は式(1)で表される。ここで、 M_s (mg/kg) は供試体重量当たりの累積表面溶解溶出量、 δ は表面溶解領域厚さ (m)、 ρ は供試体密度 (kg/m^3)、 A は供試体暴露面積 (m^2)、 W は供試体重量 (kg)、 Q_0 は可溶性含有量 (mg/kg)、 k は表面溶解速度定数 ($1/\text{s}$) である。

$$M_s = \frac{\rho \delta A Q_0}{W} (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

拡散モデルは式(2)を以下の初期条件、境界条件を差分法により解いた。ここで C は濃度 (mg/m^3)、 D は拡散係数 (m^2/s)、 L は供試体長さ (m)、 C_0 は初期濃度 (mg/m^3) (可溶性含有量に供試体密度を乗じて空隙率で除した値) である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

初期条件 : $t = 0, 0 \leq x \leq L - \delta; C = C_0$

: $t = 0, L - \delta \leq x \leq L; C = 0$

境界条件 : $x = L; C = 0$

: $x = 0; \frac{dC}{dx} = 0$

なお、モデルパラメータを求める場合は、長さ方向の分割幅 $\Delta x = 1 \times 10^{-4}$ (m) とした。累積拡散溶出量は式(3)で求めた。ただし、 Δt は時間分割幅、 $C_{n,j}$ は時刻格子 j での供試体表面、 $C_{n-1,j}$ は供試体表面の 1 分割前の濃度である。

$$M_D = \frac{\theta A}{W} \times \sum_{j=1}^j \left\{ \frac{-D \times (C_{n,j} - C_{n-1,j})}{\Delta x} \times \Delta t \right\} \quad (3)$$

累積溶出量 M_T (mg/kg) は表面溶解溶出量 M_s と拡散溶出量 M_D の合計で表される。また、時刻 t_{j-1} から t_j までの間の溶出量を画分溶出量 m_T とし、式(4)で表す。

$$m_T = (m_{S(t,j)} - m_{S(t,j-1)}) + (M_{D(t,j)} - M_{D(t,j-1)}) \quad (4)$$

3.2 三次元溶出モデル

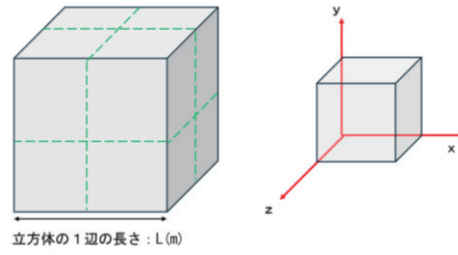


図 2. 1/8 立方体の図

立方体での表面溶解領域の体積 (表面溶解領域体積) を V とすると、立方体供試体の一辺の長さを L (m)、表面溶解領域厚さを δ (m) として次式で表現できる。

$$V = L^3 - (L - 2\delta)^3 \quad (5)$$

よって、立方体の M_s は次式で表される。

$$M_s = \frac{\rho V Q_0}{W} (1 - e^{-kt}) \quad (6)$$

拡散モデルは、図 2 のように立方体の中心から x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ 2 分割し、得られた 1/8 立方体に対して三次元の拡散方程式である式(7)を以下の初期条件、境界条件で差分法を用いて解いた。ここで C は濃度 (mg/m^3)、 D は拡散係数 (m^2/s) である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (7)$$

初期条件 : $t = 0, 0 \leq x \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq x \leq \frac{L}{2}; C = 0$

: $t = 0, 0 \leq y \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq y \leq \frac{L}{2}; C = 0$

: $t = 0, 0 \leq z \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq z \leq \frac{L}{2}; C = 0$

境界条件 : $x = \frac{L}{2}; C = 0$

: $x = 0; \frac{dC}{dx} = 0$

: $y = \frac{L}{2}; C = 0$

: $y = 0; \frac{dC}{dy} = 0$

: $z = \frac{L}{2}; C = 0$

: $z = 0; \frac{dC}{dz} = 0$

拡散累積溶出量は、1/8 供試体の 3 面ある暴露面のうち 1 暴露面 ($(x, y, L/2)$ 面) における各格子点での溶出フラックスの合計量に立方体の表面積を乗じることで計算できる。 $(x, y, L/2)$ 面での溶出量は z 軸方向の溶出量なので、任意の時間格子 j での濃度差は式(8)で表現される。

$$C_{ix, iy, N_{z,j}} - C_{ix, iy, N_{z,j-1}} \quad (8)$$

ここで ix, iy は x 座標、 y 座標の格子点、 N_z は $z=L/2$ での格子点を表す。拡散累積溶出量 M_D (mg/kg) は次式で求めることができる。

表 1. 供試体の空隙率、密度、含水率

実験 ID	空隙率(%)	密度(g/cm ³)	含水率(%)
円柱供試体	33.5	1.79	24.4
立方体供試体	26.7	1.90	22.5
平均	30.1	1.85	23.5
標準偏差	3.4	0.05	0.9
変動係数(%)	11.2	3.0	4.1

表 2. 探索で得られたパラメータ

反復回数	δ (m)	k (1/s)	D (m ² /s)	R^2
1	1.4E-03	1.7E-04	3.1E-10	0.9881
2	5E-04	6.8E-04	2.1E-10	0.9831
3	1.2E-03	2.7E-04	2.5E-10	0.9958
平均	1.3E-03	3.7E-04	2.6E-10	-
標準偏差	4E-04	2.2E-04	4.3E-11	-
変動係数(%)	39	59	17	-

$$M_D = \frac{A_c \theta}{W} \times \sum_{j=1}^j \left[\sum_{ix=1, iy=1}^{N_x, N_y} \left\{ \frac{-D \times \frac{(C_{ix, iy, N_z, j} - C_{ix, iy, N_z-1, j})}{(N+1)^2}}{\Delta x} \right\} \times \Delta t \right] \quad \dots (9)$$

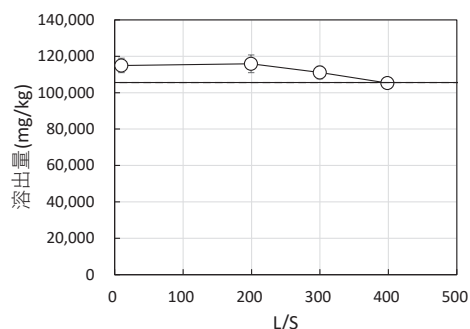
ここで A_c は立方体の全面積(m²)、 θ は空隙率(-)、 N_x 、 N_y は $x = L/2$ 、 $y = L/2$ での格子点を表す。また、 N は x 、 y 、 z 軸方向の空間分割数であり、1 暴露面の全格子点である $(N+1)^2$ で除することで、1 格子点当たりの平均的なフラックスを表している。なお、 $(L/2, y, L/2)$ 、 $(x, L/2, L/2)$ の線(辺の上)では C は 0 (境界条件) となるので濃度差は 0 となる。また、他の立方体と接する辺上の格子点は、その立方体と格子点を共有するので、フラックス、すなわち濃度差は $1/2$ となる。さらに、 $(0, 0, L/2)$ の点は接する 4 つの立方体と共有することになるのでフラックスすなわち濃度差は $1/4$ となる。

4. 結果と考察

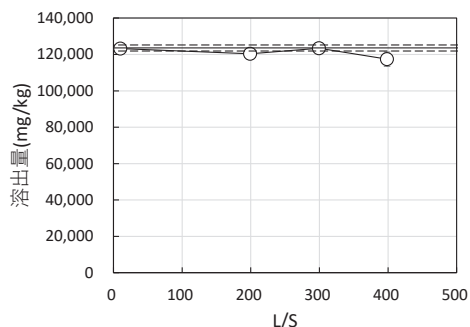
4.1 用いた供試体の特性

供試体の物理特性(空隙率、密度、含水率)を表 1 に示す。空隙率の変動係数が 11.2% と若干大きかったが、密度・含水率の変動係数がそれぞれ 3%、4% と小さく、実験に用いた試料の物理特性に大きなばらつきはないと言えた。

図 3 に L/S と溶出量の関係を示す。図中の実線はシリアルバッチ溶出量を、点線はシリアルバッチ溶出量の 1σ (標準偏差) の範囲を示す。図から円柱供試体では、 $L/S10$ の時の溶出量はシリアルバッチ溶出量よりも 9,000mg/kg 高く、 L/S の増加とともに減少し $L/S=400$ ではシリアルバッチ溶出量と同じになった。また、溶出量の平均は、



a) 円柱供試体



b) 4cm 立方体供試体

図 3. C1 の L/S と溶出量の関係 (実線はシリアルバッチ溶出量、点線はシリアルバッチ溶出量 $\pm \sigma$ の範囲)

112,000mg/kg であり、シリアルバッチ溶出量は 106,000mg/kg と同程度であった。モデル計算で用いる可溶性含有量はシリアルバッチ溶出量よりも大きい溶出試験の溶出量 112,000mg/kg を用いることとした。立方体供試体は、 L/S によらず溶出量はほぼ一定であり、またシリアルバッチ溶出量の平均 $\pm \sigma$ の範囲にあることから、モデル計算で使用する可溶性含有量は、シリアルバッチ溶出量 121,000mg/kg を用いることとした。

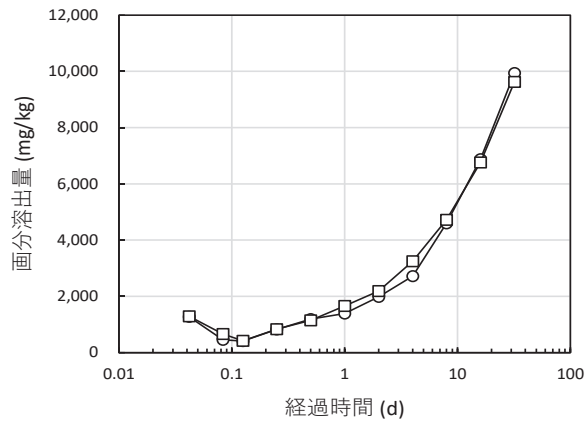
4.2 パラメータ探索結果

探索より得られたパラメータおよび画分溶出量の実測値と計算値の決定係数 (R^2) を表 2 に示す。 R^2 は 0.98 以上であった。最も R^2 が高かった反復回数 3 回目と R^2 が最も低かった反復回数 2 回の実測値と計算値を図 4 に示す。最も R^2 の低かった反復回数 2 回目の C1 でも実測値と計算値はよく一致していた。以上より、今回用いた一次元モデルはセメント固化体からの C1 溶出を表現できたと考えた。

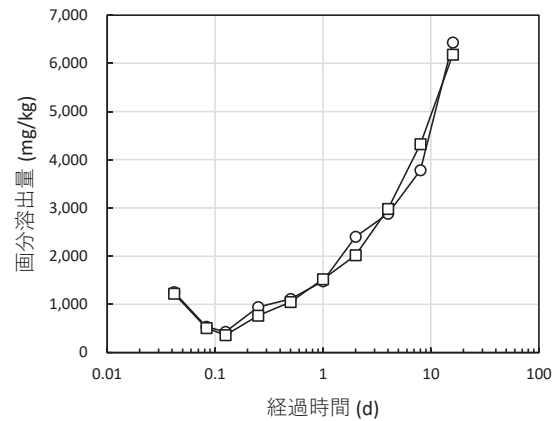
4.3 カラム試験による立方体溶出量予測

4.3.1 タンクリーチング試験結果

図 5 にタンクリーチング試験の累積溶出量を示す。累積



(a) 繰り返し 3 回目 ($R^2=0.9958$)



(b) 繰り返し 2 回目 ($R^2=0.9831$)

図 4. 画分溶出量の実測値と計算値の比較 (○:実測値, □:計算値)

溶出量は、連続した二日分溶出量を二日目の溶出量として累積溶出量を求めた。表 2 のパラメータの平均値を用いた溶出量計算結果も示す (図中の点線)。実測累積溶出量は 16 日目まで増加し、それ以降はほぼ一定となった。これに対して計算値も同様の挙動を示したが、実測値よりも低い値となった (32 日目で実測値の約 84%)。この結果から、三次元モデルのタンクリーチング試験における溶出量の予測は概ね可能であるといえた。

4.3.2 拡散係数の補正

図 5 にカラム試験の累積溶出量の結果も示す。タンクリーチング試験と比較して累積溶出量の増加が遅くなっている。この現象を溶出モデルで表現するために、拡散が遅くなったと考えて拡散係数に補正係数 ε を乗じることで拡散係数を修正した。カラム試験の画分溶出量の実測値と計算値の残差自乗和を最小にするように補正係数 ε を求めた結果、 $\varepsilon=0.13$ が得られた。これを用いて計算したカラム試験の累積溶出量計算値 (実線) も図 5 に示す。累積溶出量の実測値と計算値の R^2 が 0.98 となり、図からも実測値と計算値がほぼ一致しているため、拡散係数を補正することでカラム試験の累積溶出量を予測することが可能であるといえた。

5. まとめ

本研究は C1 の溶出量予測を目的として、セメント固化体による溶出量予測モデルからカラム試験溶出量予測を行った。その得られた知見を以下に示す。

- (1) C1 について、円柱供試体の画分溶出量の実測値と計算値はよく一致しており、一次元モデルは C1 の溶出現象を表現できた。
- (2) C1 について、今回用いた一次元モデルはセメント固化体からの C1 溶出を表現できたといえた。

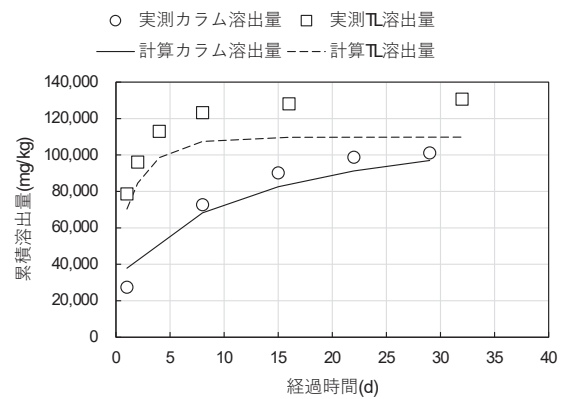


図-5 立方体供試体を用いたタンクリーチング試験およびカラム試験の累積溶出量

- (3) 得られたモデルパラメータを用いて、立方体供試体のタンクリーチング試験の累積溶出量を実測値と比較したところ、計算値は実測値よりもやや低くなったが、三次元モデルのタンクリーチング試験における溶出量の予測は概ね可能であるといえた。
- (4) 立方体供試体のカラム試験累積溶出量はタンクリーチング試験の累積溶出量よりゆっくりと増加した。拡散係数を補正することで (補正係数 0.13) 実測値と計算値をほぼ一致させることができ、立方体からのタンクリーチング試験の溶出モデルからカラム試験の累積溶出量を予測することが可能であるといえた。

謝辞

本研究は令和 7 年度宮崎市地域貢献学術研究助成金の助成を受けた。また、本研究を進めるにあたり、社会環境システム工学科学学生の西水聡章君の協力を得た。

参考文献

- 1) 環境省：日本の廃棄物処理 令和 5 年度版，2025.
- 2) 野馬幸生，貴田晶子：カルシウムスケールの生成に およぼす埋立焼却残渣の影響，廃棄物学会論文誌，Vol. 9, No. 7, pp. 287-295, 1998.
- 3) 柳茂，菅原隆一，高橋紀世子，葛岡勝悦，岩澤理奈，斎藤善則：一般廃棄物最終処分場浸出水及び一般廃棄物焼却灰の塩類調査(第 2 報)，宮城県保健環境センター年報 第 25 号，pp. 66-71, 2007.
- 4) 樋口壮太郎：廃棄物処理処分に伴い排出される副生塩のリサイクルシステムの構築に関する研究，平成 24 年度環境研究総合推進費終了成果報告書，2013.
- 5) 山崎直人：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，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2019.
- 6) 名富大峨：セメント固化体からの易溶解性物質溶出量予測モデルの開発，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2022.
- 7) 黒田敬斗：セメント固化物からの易溶解性物質の 3 次元溶出モデル化，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2025.

セメント固化体からの易溶解性物質の三次元溶出モデル

土手 裕^{a)}・関戸 知雄^{b)}

Three-dimensional leaching model of easily soluble substances from cement-solidified fly ash

Yutaka DOTE^{a)}, Tomoo SEKITO^{b)}

Abstract

The purpose of this study was to examine the applicability of a one-dimensional model for chlorine leaching from cement-solidified fly ash and the applicability of the one-dimensional model to the three-dimension for sodium, potassium, and chlorine. For chlorine, the observed and calculated fractional leaching amounts from cylindrical specimens showed good agreement. This indicated that the one-dimensional model could represent the chlorine leaching phenomenon. For sodium, potassium, and chlorine, no correlation was observed between the void ratio of the cubic specimens and model parameters of the thickness of the surface dissolution zone and the surface dissolution rate constant. The diffusion coefficient of sodium showed a strong positive correlation with the void ratio, and those of potassium and chlorine showed weak positive correlations. The fractional leaching amounts for cubic specimens of cement-solidified fly ash showed good agreement between the observed and calculated values, indicating that the one-dimensional model could be applied to a three-dimensional model.

Keywords: Easily soluble substances, Cement-solidified fly ash, Model parameters, Three-dimensional model, Tank leaching test

1. はじめに

令和5年での一般廃棄物の最終処分量は319万トンであり、そのうち焼却残渣量は249万トンに達し、最終処分量に占める焼却残渣の割合は約78%にも及んでいる¹⁾。特に、焼却残渣中の排ガス処理飛灰（安定化処理前）には易溶解性塩類が多く含まれており、Na:19~40g/kg、K:24~55g/kg、Ca:170~280g/kg、Cl:130~270g/kgの含有量が報告されている^{2,3)}。そのため浸出水の塩類の高濃度化が進行し、塩濃度の高い浸出水を放流すると放流先での稲枯れなどの塩害を引き起こすため⁴⁾、浸出水の脱塩処理が行われる場合がある。しかし、脱塩処理によって生成される副生塩の適正な処理、再利用方法が確立されておらず、最終処分場に保管または産廃処理されている⁵⁾。

脱塩処理以外の対策として埋立物の体積の増加により比表面積を小さくし、埋立物からの溶出速度を減少させる方法がある。焼却飛灰は重金属の溶出抑制のために安定化処理されるが、安定化処理方法のうちセメント固化は安定化処理物の体積を制御することが可能である。また、緻密化することにより物理的に拡散移動が遅くなるため⁶⁾、易溶解性成分の溶出を遅らせることで、浸出水中の塩濃度を

より低下させることが期待できる。セメント固化体については、山崎が一辺4cm、6cm、8cmの立方体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、比表面積を小さくすることで塩類の溶出を抑制することを示した⁷⁾。

浸出水中の易溶解性物質濃度を脱塩処理が必要な濃度以下に抑えるための安定化処理飛灰の大きさや、埋立方法を検討するには、安定化処理飛灰からの易溶解性物質溶出量を予測する必要がある。セメント固化体からの溶出量を予測するためのモデル式は一般的に、拡散モデル式による溶出量と、溶出速度が固化体内の可溶性塩類の含有量に比例する表面溶解モデル式による溶出量の合計⁸⁾で表されているが、この場合の累積溶出量は、固化体の含有量を超えてしまい、物質収支がとれない。そこで、名富⁹⁾は表面溶解が暴露面近傍でのみ生じるとして厚さ δ (m)の表面溶解領域を設定し、表面溶解領域では拡散による溶出を無視し、表面溶解領域中の含有量に比例して溶解速度を表現し、表面溶解領域以外に含まれる易溶解性物質は拡散により移動する一次元モデルを提案した。名富、安田¹⁰⁾は暴露面積の異なる円柱供試体に名富のモデルを適用し、その有効性を示した。中野¹¹⁾は空隙率の異なる円柱供試体を用いて、NaとKについて空隙率とモデルパラメータの関係を示したが、Clについては検討されなかった。黒田¹²⁾は一次元モデルを三次元に拡張したが、立方体供試体からの溶出量を表現できなかった。

a) 土木環境プログラム教授

b) 土木環境プログラム准教授

そこで本研究では、セメント固化体からの Cl 溶出について一次元モデルの適用性を検討し、さらに Na、K、Cl について一次元モデルの三次元への適用性を検討した。

2. 実験方法、用いたデータ

2.1 解析・分析に用いた試料

本研究で探索及び考察に用いたデータの出所を示す。パラメーター探索用には、名富⁹⁾の $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ の円柱供試体、安田¹⁰⁾の $\phi 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の円柱供試体、中野¹¹⁾の空隙率を変えた $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ の円柱供試体でのタンクリーチング試験のデータを用いた。また、三次元モデル評価用として、安田の一辺 4cm、6cm、8cm の立方体供試体の実験結果を用いた。供試体作成方法、シリアルバッチ試験、溶出試験、分析方法の概要を以下に示す。

2.1.1 供試体作成方法

飛灰には宮崎県宮崎市の一般廃棄物焼却施設から採取した排ガス処理飛灰を用いた。飛灰、セメント、水の配合条件を表 1 に示す。自動混練り機を用いて混合を行ったあと、モールドに充填しラップをかけ、室温 25℃で 1 週間養生した後、脱型した。

脱型した円柱供試体については、底面と側面に変成シリコンシーラント(セメダイン株式会社、SM-451)を塗って防水した。供試体はタンクリーチング試験用とシリアルバッチ試験用の 2 種類を作成し、シリアルバッチ試験用供試体は、脱型後乾燥して微粉碎したものをを用いた。

2.1.2 シリアルバッチ試験

遠心分離管に試料 10g と蒸留水を 300ml 取り、200rpm で 6 時間振とう後、5000G で 10 分間遠心分離を行った。遠心管の上澄み液を回収し、回収した上澄みの容積を測定した後 0.45 μm メンブレンフィルターを用いてろ過し、濃硝酸をろ液に対して 0.5%加えてポリ瓶に入れ、保存した。固形物の残っている遠心管に 1 回目と同量の蒸留水を加え、上記と同様の操作を行った。これを繰り返して合計 4 回の溶出操作を行った。シリアルバッチ試験の反復回数は 3 回とした。

2.1.3 タンクリーチング試験

ポリ瓶に蒸留水 1.75L を加えて、防水処理した円柱供試体を静置した。静置後、所定の時間が経過したら、新しい蒸留水を入れたポリ瓶に供試体を移した。蒸留水の交換時間は 0.0417、0.0833、0.125、0.25、0.5、1、2、4、8、16、32 日目とした。供試体を取り出した後の溶液の一部を 0.45 μm メンブレンフィルターでろ過したろ液に、濃硝酸をろ液に対して 0.5%加えてポリ瓶に入れ、保存した。

立方体供試体はハイパック (ENTEC、S-61) に L/S=5 となるように蒸留水を加えて供試体を静置した。静置後、円柱供試体と同様に供試体の入れ替えと採水を行った。

表 1. セメント固化供試体配合条件

名前	供試体大きさ	形状	C/A(%)	W/S(%)
名富	$\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$	円柱	40	50
安田	$\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$	円柱	40	40
安田	1 辺 4, 6, 8cm	立方体	40	40
中野	$\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ (空隙率 30%)	円柱	50	30
中野	$\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ (空隙率 35%)	円柱	30	40
中野	$\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ (空隙率 40%)	円柱	20	40

C: セメント重量, A: 飛灰重量, W: 水重量, S: セメントと飛灰の合計重量

2.1.4 分析方法

Na、K の濃度はフレイム原子吸光光度法 ((株) 日立ハイテク、Z-2000 型) を用いて分析を行った。Cl 濃度はイオンクロマトグラフィー (Thermo Fisher SCIENTIFIC Inuvion 250351090、カラム AS4A-SC、溶離液 Na_2CO_3 1.8mol/L / NaHCO_3 1.7mol/L) を用いて分析した。空隙率は粗粉碎した分析試料のうち約 1cm 程度のものを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。空隙率測定の反復回数は 3 回とした。

3. 溶出モデル

3.1 一次元溶出モデル

一次元の条件で、表面溶解支配部分となる供試体の表面近傍(以後、表面溶解領域と呼ぶ)において溶出速度がその領域での含有量に比例する表面溶解モデルと通常の拡散モデルを組み合わせた名富のモデル⁹⁾を用いた。表面溶解モデル式は式(1)で表される。ここで、 M_s (mg/kg)は供試体重量当たりの累積表面溶解溶出量、 δ は表面溶解領域厚さ(m)、 ρ は供試体密度(kg/m^3)、 A は供試体暴露面積(m^2)、 W は供試体重量(kg)、 Q_0 は可溶性含有量(mg/kg)、 k は表面溶解速度定数(1/s)である。

$$M_s = \frac{\rho \delta A Q_0}{W} (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

拡散モデルは式(2)を以下の初期条件、境界条件を差分法により解いた。ここで C は濃度 (mg/m^3)、 D は拡散係数 (m^2/s)、 L は供試体長さ (m)、 C_0 は初期濃度 (mg/m^3) (可溶性含有量に供試体密度を乗じて空隙率で除した値) である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

初期条件 : $t = 0, 0 \leq x \leq L - \delta; C = C_0$

: $t = 0, L - \delta \leq x \leq L; C = 0$

境界条件 : $x = L; C = 0$

: $x = 0; \frac{dC}{dx} = 0$

なお、モデルパラメータを求める場合は、長さ方向の分割幅 $\Delta x = 1 \times 10^{-4}$ (m) とした。累積拡散溶出量は式(3)で求めた。ただし、 Δt は時間分割幅、 $C_{n,j}$ は時刻格子 j での供試体表面、 $C_{n-1,j}$ は供試体表面の 1 分割前の濃度である。

$$M_D = \frac{\theta A}{W} \times \sum_{j=1}^j \left\{ \frac{-D \times (C_{n,j} - C_{n-1,j})}{\Delta x} \times \Delta t \right\} \quad (3)$$

累積溶出量 M_T (mg/kg) は表面溶解溶出量 M_S と拡散溶出量 M_D の合計で表される。また、時刻 t_{j-1} から t_j までの間の溶出量を画分溶出量 m_T とし、式(4)で表す。

$$m_T = (m_{S(t,j)} - m_{S(t,j-1)}) + (M_{D(t,j)} - M_{D(t,j-1)}) \quad (4)$$

3.2 三次元溶出モデル

立方体での表面溶解領域の体積(表面溶解領域体積)を V とすると、立方体供試体の一辺の長さを L (m)、表面溶解領域厚さを δ (m)として次式で表現できる。

$$V = L^3 - (L - 2\delta)^3 \quad (5)$$

よって、立方体の M_0 は次式で表される。

$$M_S = \frac{\rho V Q_0}{W} (1 - e^{-kt}) \quad (6)$$

拡散モデルは、図1のように立方体の中心から x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ2分割し、得られた1/8立方体に対して三次元の拡散方程式である式(7)を以下の初期条件、境界条件で差分法を用いて解いた。ここで C は濃度(mg/m³)、 D は拡散係数(m²/s)である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (7)$$

初期条件： $t = 0, 0 \leq x \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq x \leq \frac{L}{2}; C = 0$

: $t = 0, 0 \leq y \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq y \leq \frac{L}{2}; C = 0$

: $t = 0, 0 \leq z \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq z \leq \frac{L}{2}; C = 0$

境界条件： $x = \frac{L}{2}; C = 0$

: $x = 0; \frac{dC}{dx} = 0$

: $y = \frac{L}{2}; C = 0$

: $y = 0; \frac{dC}{dy} = 0$

: $z = \frac{L}{2}; C = 0$

: $z = 0; \frac{dC}{dz} = 0$

拡散累積溶出量は、1/8 供試体の3面ある暴露面のうち1 暴露面($(x, y, L/2)$ 面)における各格子点での溶出フラックスの合計量に立方体の表面積を乗じることで計算できる。 $(x, y, L/2)$ 面での溶出量は z 軸方向の溶出量なので、任意の時間格子 j での濃度差は式(8)で表現される。

$$C_{ix,iy,N_z,j} - C_{ix,iy,N_z-1,j} \quad (8)$$

ここで ix, iy は x 座標、 y 座標の格子点、 N_z は $z=L/2$ での格子点を表す。拡散累積溶出量 M_0 (mg/kg) は次式で求めることができる。

$$M_D = \frac{A_c \theta}{W} \times \sum_{j=1}^j \left[\sum_{ix=1, iy=1}^{N_x, N_y} \left\{ \frac{-D \times (C_{ix,iy,N_z,j} - C_{ix,iy,N_z-1,j})}{\Delta x} \right\} \times \Delta t \right]$$

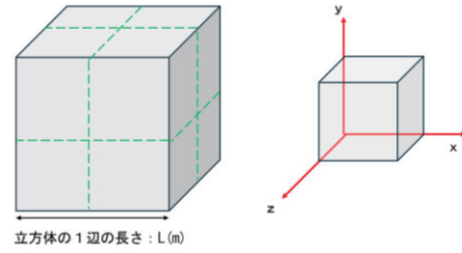


図1. 1/8 立方体の図

表2. 円柱供試体の画分溶出量の実測値と計算値との間の決定係数(R^2)

実験者	供試体直径 (cm)	空隙率 (%)	反復番号	Na	K	Cl
名富	5	43.6	1	0.9820	0.9982	0.9825
安田	10	41.1	1	0.9939	0.9968	0.9926
			2	0.9378	0.9457	0.9631
中野	5	28.8	1	0.9887	0.9633	0.9911
			2	0.9978	0.9780	0.9894
			3	0.9978	0.9851	0.9971
		34.9	1	0.9782	0.9892	0.9955
			2	0.9898	0.9979	0.9921
			3	0.9834	0.9912	0.9950
		38.4	1	0.9715	0.9929	0.9869
			2	0.9899	0.9897	0.9955
			3	0.9892	0.9717	0.9945

注：灰色は各元素で最も低い R^2 を表す。

・・・(9)

ここで A_c は立方体の全面積(m²)、 θ は空隙率(-)、 N_x, N_y は $x = L/2, y = L/2$ での格子点を表す。また、 N は x, y, z 軸方向の空間分割数であり、1 暴露面の全格子点である $(N+1)^2$ で除することで、1 格子点当たりの平均的なフラックスを表している。なお、 $(L/2, y, L/2)$ 、 $(x, L/2, L/2)$ の線(辺の上)では C は0(境界条件)となるので濃度差は0となる。また、他の立方体と接する辺上の格子点は、その立方体と格子点を共有するので、フラックス、すなわち濃度差は1/2となる。さらに、 $(0, 0, L/2)$ の点は接する4つの立方体と共有することになるのでフラックスすなわち濃度差は1/4となる。

4. 結果と考察

4.1 一次元モデルのパラメータ探索結果

4.1.1 モデルの適合性

円柱供試体を用いた溶出試験で得られた画分溶出量と一次元モデルを用いた計算値との間の決定係数(R^2)を表2に示す。3.1で述べたとおり、過去の研究で溶出量の計算式が間違っていたことから、Na、Kについてもパラメータ

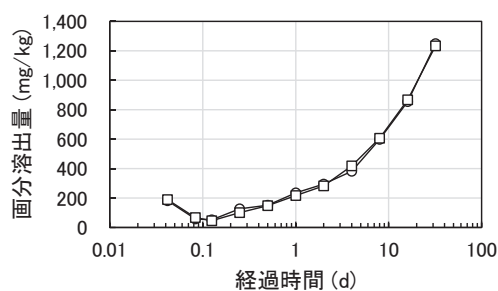
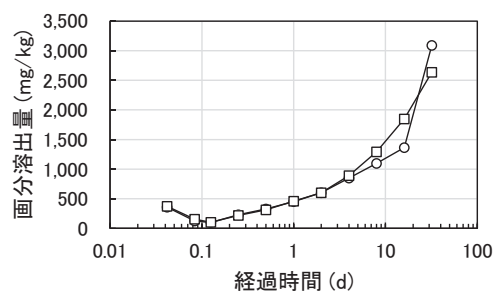
a) 空隙率 28.8% 反復回数 3 回目 ($R^2=0.9978$)b) 空隙率 41.1% 反復回数 2 回目 ($R^2=0.9378$)

図 2. Na についての画分溶出量の実測値と計算値の比較 (○: 実測値、□: 計算値)

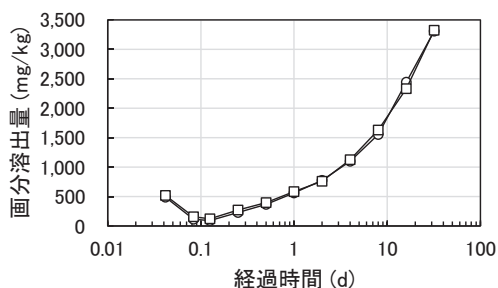
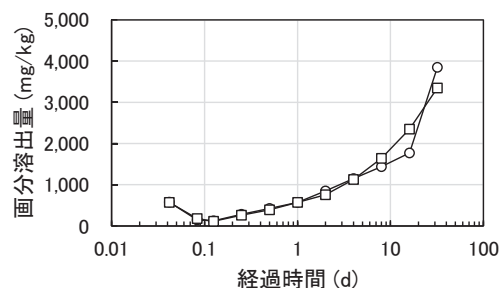
a) 空隙率 43.6% 反復回数 1 回目 ($R^2=0.9982$)b) 空隙率 41.1% 反復回数 2 回目 ($R^2=0.9457$)

図 3. K についての画分溶出量の実測値と計算値の比較 (○: 実測値、□: 計算値)

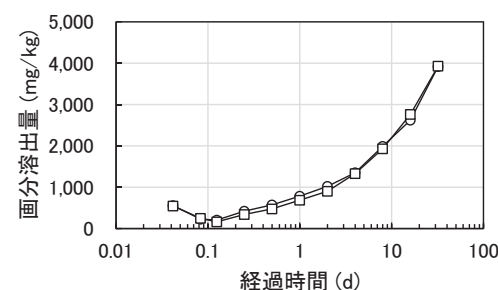
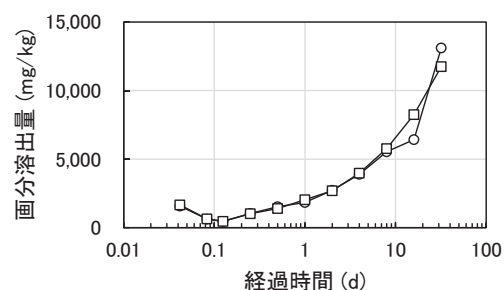
a) 空隙率 28.8% 反復回数 3 回目 ($R^2=0.9971$)b) 空隙率 41.1% 反復回数 2 回 ($R^2=0.9631$)

図 4. Cl についての画分溶出量の実測値と計算値の比較 (○: 実測値、□: 計算値)

を再探索したのでその結果も示す。各元素の最小の R^2 の値の欄を灰色に塗ってあるが、どの元素でも R^2 は 0.93 以上であった。また、Na、K、Cl において最も相関の良い場合と最も相関の悪い場合の確間溶出量の実測値と計算値の比較を図 2、3、4 に示す。Na、K、Cl のそれぞれの最も低い R^2 の計算結果でも実測値と計算値はよく一致しており、一次元モデルは溶出現象を表現できたと言えた。

4.1.2 モデルパラメータと空隙率の関係

各パラメータと空隙率の関係を図 5 に示す。図中のエラーバーは標準偏差を表す。表面溶解領域厚さ δ と表面溶解速度定数 k については空隙率との相関関係はみられな

かった。拡散係数 D については、Na の D は空隙率と強い正の相関が、K と Cl の D は弱い相関が見られた。空隙率と拡散係数の間には式 (10)¹³⁾ の関係が知られている。

$$D = \theta \times D_0 \quad (10)$$

ただし、 θ は空隙率、 D は拡散係数、 D_0 は分子拡散係数である。本研究でも拡散係数が空隙率に比例する同様の結果が得られた。

4.2 立方体供試体の画分溶出量の予測評価

立方体供試体は安田の実験結果であることから、表 3 に示す安田の円柱供試体で求めたモデルパラメータの平均値を立方体供試体からの画分溶出量計算に用いた。立方体

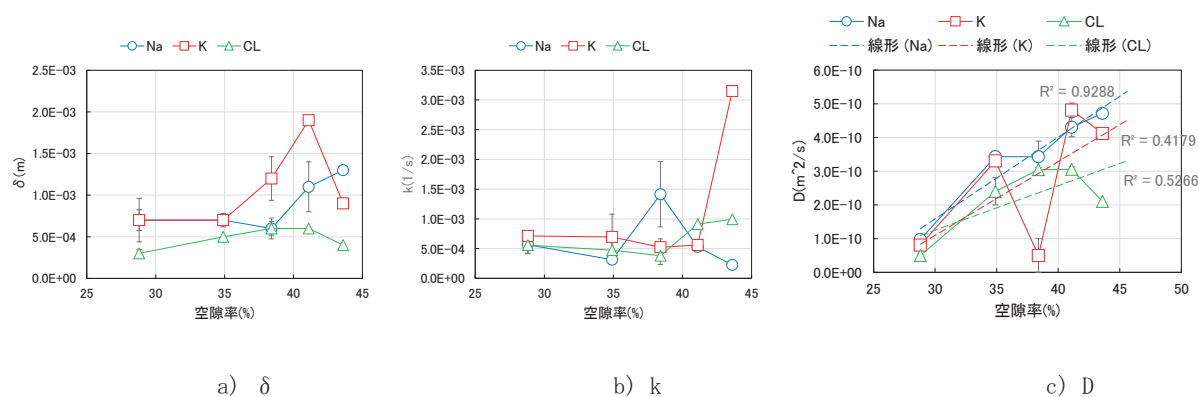


図 5. 空隙率とモデルパラメータの関係

表 3. 円柱供試体の画分溶出量の実測値と計算値の決定係数 (R^2) とパラメータ

	Na				K				Cl			
反復番号	δ (m)	k (1/s)	D (m ² /s)	R^2	δ (m)	k (1/s)	D (m ² /s)	R^2	δ (m)	k (1/s)	D (m ² /s)	R^2
1	1.4E-03	5.10E-04	4.59E-10	0.9939	1.9E-03	5.75E-04	5.03E-10	0.9968	6E-04	9.05E-04	3.14E-10	0.9926
2	8E-04	5.49E-04	4.03E-10	0.9378	1.8E-03	5.45E-04	4.60E-10	0.9457	6E-04	9.20E-04	2.98E-10	0.9631
平均	1.1E-03	5.29E-04	4.31E-10	-	1.9E-03	5.60E-04	4.81E-10	-	6E-04	9.13E-04	3.06E-10	-
標準偏差	3.0E-04	1.98E-05	2.83E-11	-	5.0E-05	1.47E-05	2.13E-11	-	0E+00	7.74E-06	7.99E-12	-
変動係数 (%)	2.7E+01	3.74E+00	6.57E+00	-	2.6E+00	2.62E+00	4.43E+00	-	0E+00	8.49E-01	2.61E+00	-

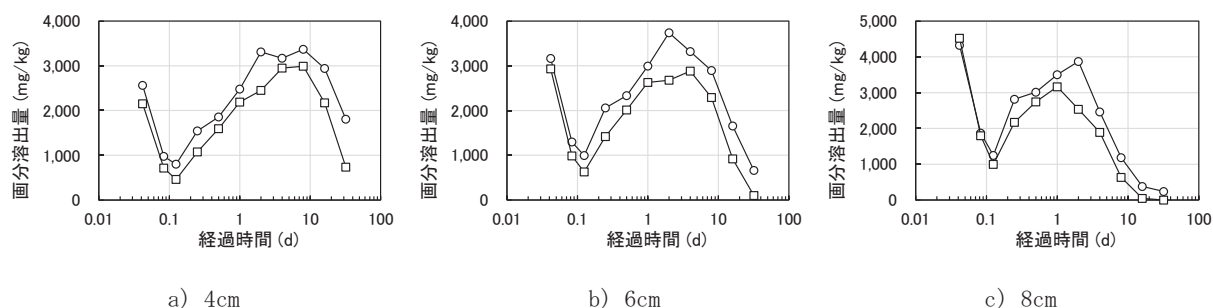


図 6. Na の立方体供試体における画分溶出量の実測値と計算値の比較 (○: 実測値、□: 計算値)

供試体の画分溶出量の実測値と計算値の決定係数を表 4 に、立方体供試体からの画分溶出量の実測値と計算値の比較を図 6、7、8 に示す。立方体供試体における画分溶出量の実測値と計算値の決定係数は、0.76 以上であり、実測値と計算値は概ね良い一致を示した。全体の傾向として、実測値よりも計算値の方が若干低くなる傾向が見られた。しかし、実験開始後の溶出量低下とその後の濃度の増減をよく表現できていると考えられた。よって、本研究で提案した三次元モデル式は Na、K、Cl についてセメント固化体による立方体供試体の画分溶出量の予測に対して適用可能であるといえた。

表 4. 立方体供試体の画分溶出量の実測値と計算値の決定係数 (R^2)

大きさ	Na	K	Cl
4cm	0.9220	0.7656	0.9655
6cm	0.9448	0.7780	0.8903
8cm	0.9050	0.8529	0.8921

5. まとめ

本研究では、セメント固化体からの Cl 溶出について一次

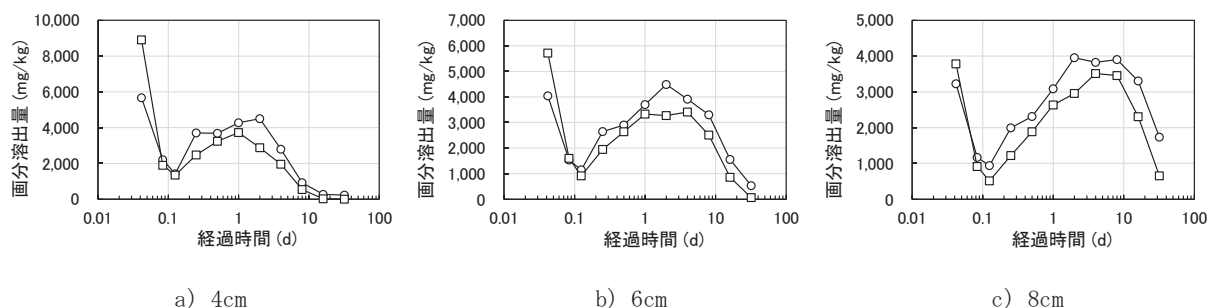


図7. Kの立方体供試体における画分溶出量の実測値と計算値の比較（○：実測値、□：計算値）

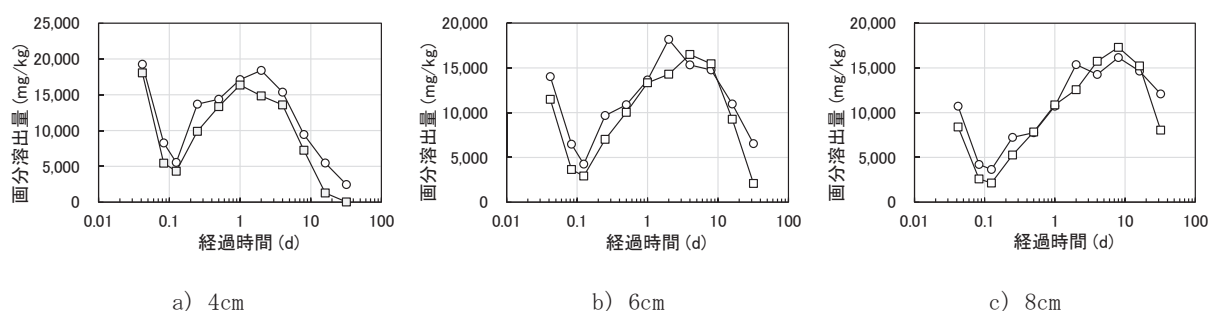


図8. Clの立方体供試体における画分溶出量の実測値と計算値の比較（○：実測値、□：計算値）

元モデルの適用性を検討し、さらにNa、K、Clについて一次元モデルの三次元への適用性の検討を目的とした。得られた知見を以下に示す。

- (1) Clについて、円柱供試体の画分溶出量の実測値と計算値はよく一致しており、一次元モデルはClの溶出現象を表現できた。
- (2) Na、K、Clについて、表面溶解領域厚さ δ と表面溶解速度定数 k については空隙率との相関関係はみられなかった。拡散係数 D については、Naの D は空隙率と強い正の相関が、KとClの D は弱い相関が見られた。
- (3) Na、K、Clについて、セメント固化体による立方体供試体の画分溶出量の予測に対して提案した三次元モデルは適用可能であるといえた。

謝辞

本研究は令和7年度宮崎市地域貢献学術研究助成金の助成を受けた。また、本研究を進めるにあたり、社会環境システム工学科学生谷畑進生君の協力を得た。

参考文献

- 1) 環境省：日本の廃棄物処理 令和5年度版，2025。
- 2) 愈霊傑，為田一雄，劉佳星，重松幹二，樋口壯太郎：浸透水循環による海面最終処分場の水質安定化に関する研究，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol. 35，pp. 143-154，2024。
- 3) 野馬幸生，貴田晶子：カルシウムスケールの生成におよぼす埋立焼却残渣の影響，廃棄物学会論文誌，Vol. 9，No. 7，pp. 287-295，1998。
- 4) 柳茂，菅原隆一，高橋紀世子，葛岡勝悦，岩澤理奈，斎藤善則：一般廃棄物最終処分場浸出水及び一般廃棄物焼却灰の塩類調査(第2報)，宮城県保健環境センター年報，第25号，pp. 287-295，2007。
- 5) 樋口壮太郎：廃棄物処理処分に伴い排出される副生塩のリサイクルシステムの構築に関する研究，平成24年度環境研究総合推進費終了成果報告書，2013。
- 6) Guerrero, A., Goni, S., Moraguse, A., and Dolado, J. S.: Microstructure and Mechanical Performance of Belite Cements from High Calcium Coal Fly Ash, Journal of the American Ceramic Society, 88(7), pp. 1845-1853, 2005。
- 7) 山崎直人：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，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2018。
- 8) Suzuki, K., and Ono, Y.: Leaching characteristics of stabilized/solidified fly ash generated from ash-melting plant, Chemosphere, 71, pp. 922-932, 2008。
- 9) 名富大峨：セメント固化体からの易溶解性物質溶出量予測モデルの開発，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2022。
- 10) 安田匠吾：セメント固化体からの易溶解性物質の溶出量予測のための1次元モデルの検証，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2023。
- 11) 中野夏生：セメント固化飛灰からの塩類溶出予測モデルパラメータへの固化体空隙率の影響，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2024。

-
- 12) 黒田 敬斗: セメント固化物からの易溶解性物質の3次元溶出モデル化, 宮崎大学工学部土木環境工学プログラム卒業論文, 2025.
 - 13) Maria, A-C., Teresa, M., Liliana, P., Antonio, E-P., and Luigi, P.: Reuse of cement-solidified municipal incinerator fly ash in cement mortars: Physico-mechanical and leaching characteristics, *Journal of Hazardous Materials*, 151, 585-593, 2008.

易溶解性物質溶出モデルのキレート処理物への適用性の検討

土手 裕^{a)}・関戸 知雄^{b)}

Applicability of easily soluble substance leaching model to chelate-treated fly ash

Yutaka DOTE^{a)}, Tomoo SEKITO^{b)}

Abstract

This study aimed to investigate the applicability of a one-dimensional leaching model to easily soluble substances (sodium, potassium, calcium and chlorine) from chelate-treated fly ash and the extension of the one-dimensional model to three-dimensional model. Tank leaching tests were conducted using cylindrical and cubic specimens. For the cylindrical specimens, the coefficients of determination between the observed and calculated fractional leaching amounts of sodium, potassium, calcium and chlorine were greater than 0.95, indicating that the one-dimensional model adequately represents the leaching behavior. Furthermore, for sodium, potassium and chlorine, the coefficients of determination for the cubic specimens were greater than 0.86, indicating that the three-dimensional model could roughly represent the leaching behavior from the cubic specimens. This result indicated that the one-dimensional model could be extended to three dimensions. In contrast, for calcium, a disagreement between the observed and calculated fractional leaching amounts in the cubic specimens was observed and this disagreement might be attributed to factors other than pH.

Keywords: Easily soluble substances, Chelate-solidified fly ash, Model parameters, Three-dimensional model, Tank leaching test

1. はじめに

令和5年での一般廃棄物の最終処分量は319万トンであり、そのうち焼却残渣量は250万トンに達し、最終処分量に占める焼却残渣の割合は約79%にも及んでいる¹⁾。特に、焼却残渣中の排ガス処理飛灰（安定化処理前）には易溶解性塩類が多く含まれており、Na: 19~40g/kg-wet、K: 24~55g/kg-wet、Ca: 170~280g/kg-wet、Cl: 130~270g/kg-wetの含有量が報告されている^{2,3)}。そのため浸出水の塩類の高濃度化が進行し、塩濃度の高い浸出水を放流すると、放流先での稲枯れなどの塩害を引き起こすため⁴⁾、浸出水の脱塩処理が行われる場合がある。しかし、脱塩処理によって生成される副生塩の適切な処理、再利用方法が確立されておらず、現状は最終処分場に保管または海面処分場で処理されている⁵⁾。

脱塩処理以外の対策として埋立物の体積を大きくして埋立物重量当たりの溶出速度を低下させる方法がある⁶⁾。焼却飛灰は重金属の溶出抑制のために安定化処理され⁷⁾、安定化処理方法のうちセメント固化とキレート処理は安定化埋立物の体積を変化させることが可能である。浸出水中の易溶解性塩類濃度を脱塩処理が必要な濃度以下に抑

える固化体の大きさを検討するために安定化処理飛灰からの易溶解性塩類溶出量を予測する必要がある。セメント固化体からの溶出量を予測するためのモデル式は一般的に、拡散モデル式⁸⁾と、溶出速度が固化体内の可溶性塩類の含有量に比例する表面溶解モデル式⁹⁾の合計⁹⁾で表わされているが、この場合の累計溶出量は固化体の含有量を超えてしまい物質収支がとれない。そこで名富¹⁰⁾は表面溶解が暴露面近傍でのみ生じるとして厚さ δ (m)の表面溶解領域を設定し、表面溶解領域では拡散による溶出を無視し、表面溶解領域中の含有量に比例して溶解速度を表現し、表面溶解領域以外に含まれる易溶解性塩類は拡散により移動するとする一次元モデルを提案した。名富、安田¹¹⁾は一次元モデルを暴露面積の異なる円柱供試体に適用し、その有効性を示した。中野¹²⁾は空隙率の異なる円柱供試体を用いてNaとKについて空隙率とモデルパラメータの関係を示した。黒田¹³⁾は一次元モデルを三次元に拡張したが、立方体供試体からの溶出量を表現できなかった。一方、安定化処理の78%¹⁴⁾を占めるキレート処理飛灰については大塚¹⁵⁾がキレート処理を行った供試体に対して一次元モデルの適用を検討したが、タンクリーチング試験12時間でキレート処理物が崩壊してしまったため、十分な検討ができなかった。

そこで本研究では、キレート処理物からの易溶解性物質

a) 土木環境プログラム教授

b) 土木環境プログラム准教授

(Na、K、Ca、Cl) の溶出について、一次元モデルが適用できるかどうかを明らかにすることを目的とした。そのために、上面以外に防水処理を行った円柱供試体を用いたタンクリーチングにより一次元への適用性評価を行った。さらに、大きさの異なる立方体供試体を用いたタンクリーチングにより三次元への適用性評価を行った。

2. 実験方法

2.1 用いた飛灰

実験には宮崎市の一般廃棄物焼却施設から 2025 年 5 月 21 日に採取した排ガス処理飛灰を用いた。この施設では排ガス処理に活性炭と消石灰を使用している。採取した飛灰は、排ガス処理後で安定化処理前の飛灰である。入手した飛灰を約 5 kg ずつに取り分け、乾燥させたシリカゲルと消石灰を入れて保存した。

2.2 供試体作成方法

供試体は飛灰に対するキレート剤の重量比が 4%、飛灰に対する水の重量比が 30% となるように作成した。円柱供試体作成には直径 5 cm、高さ 10 cm の円柱モールドを用い、立方体供試体作成には 1 辺 4 cm、6 cm、8 cm のアクリル製モールドを用いた。1 条件につき供試体をタンクリーチング試験用に 3 個、分析用に円柱供試体は 2 個、4 cm 供試体は 3 個、6 cm 供試体は 2 個、8 cm 供試体は 1 個作成した。配合条件に従って混練り用の容器に飛灰と蒸留水とキレート剤 ((株) 栗田工業、アッシュナイト S-803) を取り、自動混練り機を用いて混合を行ったあと、モールドに充填しラップをかけ、室温 25℃ で 1 週間養生した後、脱型した。

脱型した円柱供試体の重量測定後、タンクリーチング試験に使用する供試体は、上面のみを暴露面とするため、暴露面以外の側面と底面には変成シリコンシーラント ((株) セメダイン、SM-451) を塗って防水を行った。

脱型した分析用供試体の粗粉碎を行い、7 日間乾燥して含水率を測定した後に微粉碎し、含有量試験、シリアルバッチ試験、溶出試験に用いた。

2.3 タンクリーチング試験

円柱供試体では 2L のポリ瓶に蒸留水 1.75L、1 辺 4cm 立方体供試体では 0.9L のハイパックに蒸留水を 0.6L、1 辺 6 cm の立方体供試体では 1.7L のハイパックに蒸留水を 1.2L、1 辺 8cm の立方体供試体では 3L のハイパックに蒸留水 2.3L を加えた。立方体供試体は全表面積が暴露面となるような台の上に静置した。静置後、所定の時間が経過したら、新しい蒸留水を入れたポリ瓶に供試体を移した。蒸留水の交換時間は 0.0417、0.0833、0.125、0.25、0.5、1、2、4、8、16、32 日目とした。供試体を取り出した後の溶液の一部を 0.45 μ m メンブレンフィルターでろ過したろ液に、濃硝酸をろ液に対して 0.5% 加えてポリ瓶に入れ、

保存した。タンクリーチング試験の反復回数は 3 回とした。

2.4 供試体性状

2.4.1 含有量試験

含有量分解は、試料 1g、蒸留水 25ml、濃硝酸 2.5ml を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 5 分間煮沸し、冷却した。その後、ガラス繊維織紙 (GF/B) を用いて全量吸引ろ過し、100ml にメスアップし、ポリ瓶に保存した。含有量試験の反復回数は 3 回とした。

2.4.2 シリアルバッチ試験

遠心分離管に試料 10g と蒸留水を 300ml 取り、200rpm で 6 時間振とう後、5000G で 10 分間遠心分離を行った。遠心管の上澄み液を回収し、回収した上澄みの容積を測定した後 0.45 μ m メンブレンフィルターを用いてろ過し、濃硝酸をろ液に対して 0.5% 加えてポリ瓶に入れ、保存した。固形物の残っている遠心管に 1 回目と同量の蒸留水を加え、上記と同様の操作を行った。これを繰り返して合計 4 回の溶出操作を行った。シリアルバッチ試験の反復回数は 3 回とした。

2.4.3 溶出試験

溶出試験は、L/S=10、200、300、400 の条件でポリ瓶に試料と蒸留水を取り、200rpm で 6 時間振とう後に約 5 分間静置し、上澄みを 0.45 μ m 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。残った上澄みの pH と EC を測定した。濃硝酸をろ液に対して 0.5% 加えてポリ瓶に入れ、保存した。溶出試験の反復回数は 3 回とした。

2.4.4 分析方法

Na、K、Ca の濃度はフレイム原子吸光光度法 ((株) 日立ハイテック、Z-2000 型) を用いて分析を行った。Cl 濃度はイオンクロマトグラフィー (Thermo Fisher SCIENTIFIC Inuvion 250351090、カラム AS4A-SC、溶離液 Na_2CO_3 1.8mol/L / NaHCO_3 1.7mol/L) を用いて分析した。空隙率は粗粉碎した分析試料のうち約 1cm 程度のものを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。空隙率測定の反復回数は 3 回とした。

3. 溶出モデル

3.1 一次元溶出モデル

一次元の条件で、表面溶解支配部分となる供試体の表面近傍 (以後、表面溶解領域と呼ぶ) において溶出速度がその領域での含有量に比例する表面溶解モデルと通常の拡散モデルを組み合わせた名富のモデル¹⁰⁾を用いた。表面溶解モデル式は式(1)で表される。ここで、 M_s (mg/kg) は供

試体重量当たりの累積表面溶解溶出量、 δ は表面溶解領域厚さ(m)、 ρ は供試体密度(kg/m³)、 A は供試体暴露面積(m²)、 W は供試体重量(kg)、 Q_0 は可溶性含有量(mg/kg)、 k は表面溶解速度定数(1/s)である。

$$M_s = \frac{\rho \delta A Q_0}{W} (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

拡散モデルは式(2)を以下の初期条件、境界条件を差分法により解いた。ここで C は濃度(mg/m³)、 D は拡散係数(m²/s)、 L は供試体長さ(m)、 C_0 は初期濃度(mg/m³) (可溶性含有量に供試体密度を乗じて空隙率で除した値)である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

初期条件： $t = 0, 0 \leq x \leq L - \delta; C = C_0$

： $t = 0, L - \delta \leq x \leq L; C = 0$

境界条件： $x = L; C = 0$

： $x = 0; \frac{dC}{dx} = 0$

なお、モデルパラメータを求める場合は、長さ方向の分割幅 $\Delta x = 1 \times 10^{-4}$ (m)とした。累積拡散溶出量は式(3)で求めた。ただし、 Δt は時間分割幅、 $C_{n,j}$ は時刻格子 j での供試体表面、 $C_{n-1,j}$ は供試体表面の1分割前の濃度である。

$$M_D = \frac{\theta A}{W} \times \sum_{j=1}^i \left\{ \frac{-D \times (C_{n,j} - C_{n-1,j})}{\Delta x} \times \Delta t \right\} \quad (3)$$

累積溶出量 M_T (mg/kg)は表面溶解溶出量 M_s と拡散溶出量 M_D の合計で表される。また、時刻 t_{j-1} から t_j までの間の溶出量を画分溶出量 m_T とし、式(4)で表す。

$$m_T = (m_{s(t,j)} - m_{s(t,j-1)}) + (M_D(t,j) - M_D(t,j-1)) \quad (4)$$

3.2 三次元溶出モデル

立方体での表面溶解領域の体積(表面溶解領域体積)を V とすると、立方体供試体の一辺の長さを L (m)、表面溶解領域厚さを δ (m)として次式で表現できる。

$$V = L^3 - (L - 2\delta)^3 \quad (5)$$

よって、立方体の M_s は次式で表される。

$$M_s = \frac{\rho V Q_0}{W} (1 - e^{-kt}) \quad (6)$$

拡散モデルは、図1のように立方体の中心から x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ2分割し、得られた1/8立方体に対して三次元の拡散方程式である式(7)を以下の初期条件、境界条件で差分法を用いて解いた。ここで C は濃度(mg/m³)、 D は拡散係数(m²/s)である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (7)$$

初期条件： $t = 0, 0 \leq x \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

： $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq x \leq \frac{L}{2}; C = 0$

： $t = 0, 0 \leq y \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

： $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq y \leq \frac{L}{2}; C = 0$

： $t = 0, 0 \leq z \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

： $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq z \leq \frac{L}{2}; C = 0$

境界条件： $x = \frac{L}{2}; C = 0$

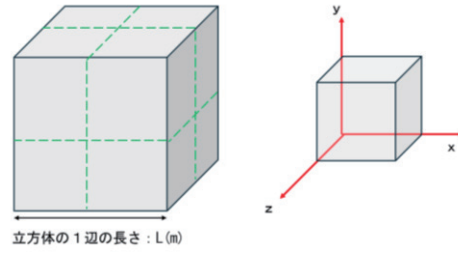


図1. 1/8 立方体の図

： $x = 0; \frac{dC}{dx} = 0$

： $y = \frac{L}{2}; C = 0$

： $y = 0; \frac{dC}{dy} = 0$

： $z = \frac{L}{2}; C = 0$

： $z = 0; \frac{dC}{dz} = 0$

拡散累積溶出量は、1/8 供試体の3面ある暴露面のうち1暴露面($(x, y, L/2)$ 面)における各格子点での溶出フラックスの合計量に立方体の表面積を乗じることで計算できる。 $(x, y, L/2)$ 面での溶出量は z 軸方向の溶出量なので、任意の時間格子 j での濃度差は式(8)で表現される。

$$C_{ix,iy,N_z,j} - C_{ix,iy,N_z-1,j} \quad (8)$$

ここで ix, iy は x 座標、 y 座標の格子点、 N_z は $z=L/2$ での格子点を表す。拡散累積溶出量 M_D (mg/kg)は次式で求めることができる。

$$M_D = \frac{A_c \theta}{W} \times \sum_{j=1}^i \left[\sum_{ix=1, iy=1}^{N_x, N_y} \left\{ \frac{-D \times \frac{(C_{ix,iy,N_z,j} - C_{ix,iy,N_z-1,j})}{(N+1)^2}}{\Delta x} \right\} \times \Delta t \right] \quad \dots (9)$$

ここで A_c は立方体の全面積(m²)、 θ は空隙率(-)、 N_x, N_y は $x = L/2, y = L/2$ での格子点を表す。また、 N は x, y, z 軸方向の空間分割数であり、1暴露面の全格子点である $(N+1)^2$ で除することで、1格子点当たりの平均的なフラックスを表している。なお、 $(L/2, y, L/2)$ 、 $(x, L/2, L/2)$ の線(辺の上)では C は0(境界条件)となるので濃度差は0となる。また、他の立方体と接する辺上の格子点は、その立方体と格子点を共有するので、フラックス、すなわち濃度差は1/2となる。さらに、 $(0, 0, L/2)$ の点は接する4つの立方体と共有することになるのでフラックスすなわち濃度差は1/4となる。

4. 結果と考察

4.1 用いた供試体の特性

4.1.1 供試体の物理特性

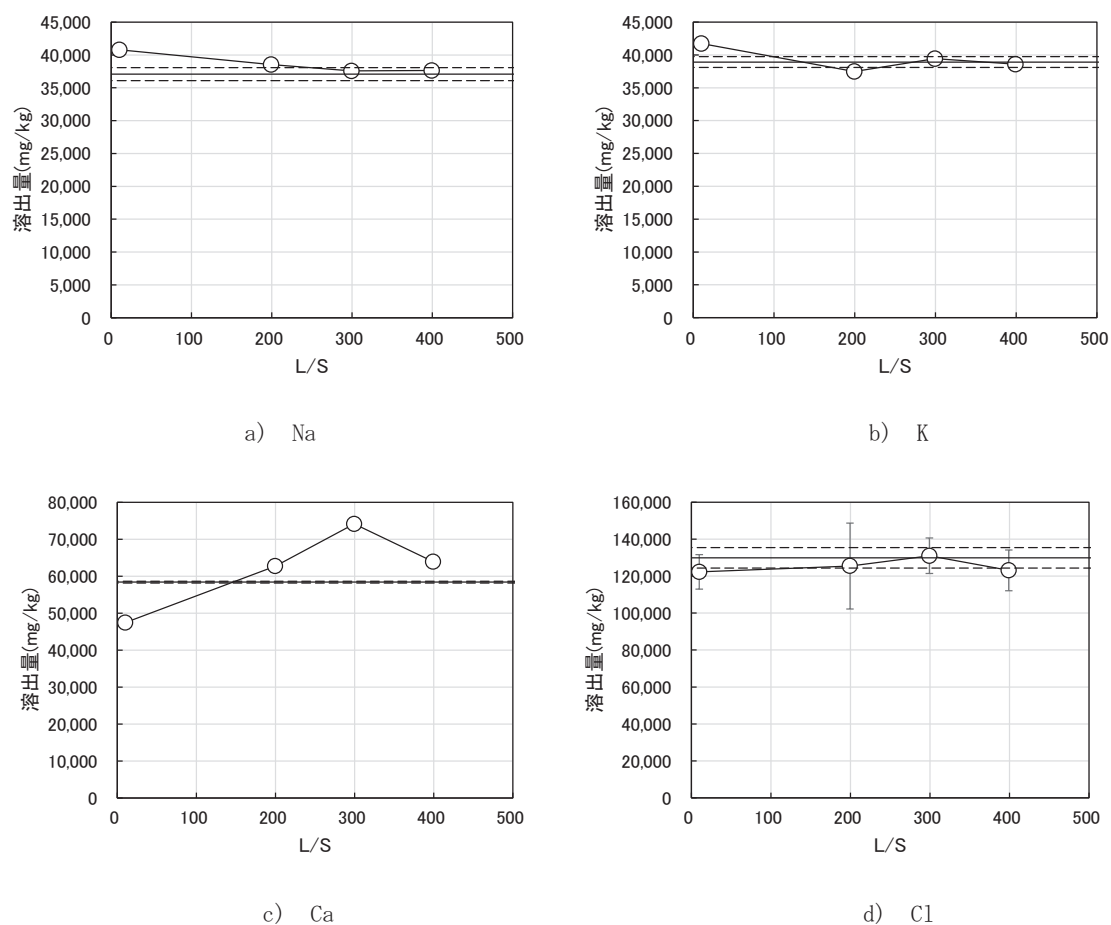


図2. 円柱供試体の溶出量と L/S の関係

供試体の物理特性（空隙率、密度、含水率）を表1に示す。含水率について8 cm立方体供試体の含水率は測定できなかったため円柱供試体、4 cm立方体供試体、6 cm立方体供試体の平均を用いることとした。いずれの変動係数も6%以下であり、実験に用いた試料の物理特性に大きなばらつきはないといえた。

4.1.2 供試体の化学特性

円柱供試体のNa、K、Ca、ClについてL/Sと溶出量の関係を図2に示す。Na、Kの溶出量はL/Sの増加とともに減少し、L/S200以上ではほぼ一定となり、シリアルバッチ溶出量とほぼ同じであった。Clの溶出量は、L/Sによらずほぼ一定の溶出量を示し、シリアルバッチ溶出量とほぼ同じであった。Caの溶出量は、L/Sの増加と共に増加し、L/S=200以降はほぼ一定となり、シリアルバッチ溶出量よりも大きかった。以上からパラメータ探索に用いる可溶性含有量として、Na、K、Clについてはシリアルバッチ溶出量を用い、CaについてはL/S=200以上の溶出量平均値を用いることとした。また、立方体供試体に用いた試料も円柱供試体と同じ挙動を示したので、立方体溶出量計算用に用いる可溶性含有量もNa、K、Clについてはシリアルバッチ

表1. 飛灰の物理特性

	空隙率(%)	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)
円柱供試体	37.0	1.82	21.1
4 cm立方体供試体	33.7	2.10	20.8
6 cm立方体供試体	35.1	1.86	20.7
8 cm立方体供試体	32.5	1.86	20.9
平均	34.6	1.91	20.9
標準偏差	1.7	0.11	0.2
変動係数(%)	4.9	5.8	0.8

注) 8 cm立方体供試体の含水率は残りの3つの平均。

チ溶出量を用い、CaについてはL/S=200以上の溶出量平均値を用いることとした。ただし、8 cm立方体供試体のKについては図3に示す様にL/S=200以上ではほぼ一定となり、シリアルバッチ溶出量よりも大きかったため、L/S=200以上の溶出量平均値を用いた。

4.1.3 供試体の可溶性含有量

可溶性含有量を図4に示す。図中のエラーバーは標準偏差を表す。供試体の違いによらず可溶性含有量はほぼ同程

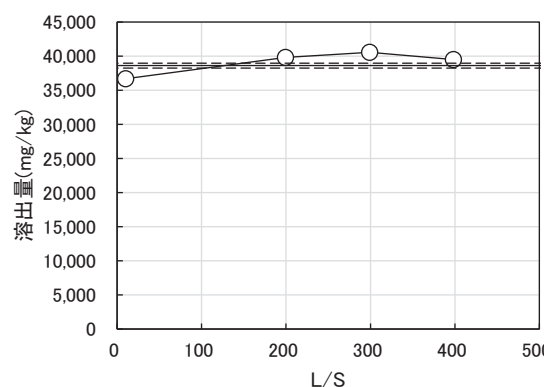


図 3. 8cm 立方体供試体 K の溶出量と L/S の関係

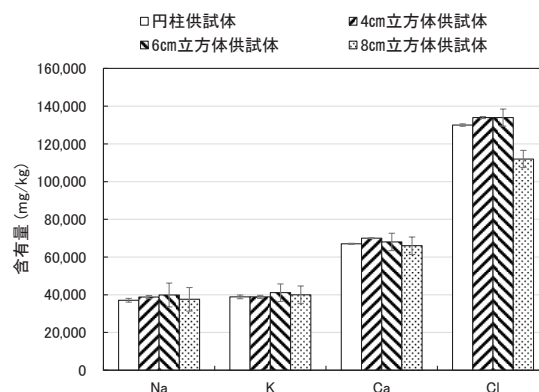


図 4. 可溶性含有量

表 2. 得られたモデルパラメータと実測値と計算値の決定係数 (R^2)

	Na				K			
反復回数	δ (m)	k (1/s)	D (m ² /s)	R^2	δ (m)	k (1/s)	D (m ² /s)	R^2
1	1.1E-03	2.05E-04	4.14E-10	0.9901	1.0E-03	2.99E-04	3.84E-10	0.9914
2	1.0E-03	2.17E-04	3.68E-10	0.9848	1.1E-03	2.81E-04	4.03E-10	0.9934
3	9E-04	2.38E-04	3.05E-10	0.9816	1.0E-03	3.12E-04	3.44E-10	0.9941
平均	1.0E-03	2.20E-04	3.62E-10	—	1.0E-03	2.97E-04	3.77E-10	—
標準偏差	8E-05	1.36E-05	4.47E-11	—	5E-05	1.25E-05	2.46E-11	—

	Ca				Cl			
反復回数	δ (m)	k (1/s)	D (m ² /s)	R^2	δ (m)	k (1/s)	D (m ² /s)	R^2
1	6E-04	1.31E-04	1.16E-10	0.9703	6E-04	5.50E-04	3.32E-10	0.9802
2	3E-04	1.37E-04	9.10E-11	0.9523	9E-04	1.39E-04	4.82E-10	0.9800
3	5E-04	1.43E-04	1.03E-10	0.9517	5E-04	3.08E-04	3.23E-10	0.9697
平均	5E-04	1.37E-04	1.03E-10	—	7E-04	3.32E-04	3.79E-10	—
標準偏差	1E-04	4.77E-06	1.02E-11	—	2E-04	1.69E-04	7.29E-11	—

度であったが、Cl については 8 cm 立方体供試体の値が他の 3 試料の平均値の 84%とやや小さかった。

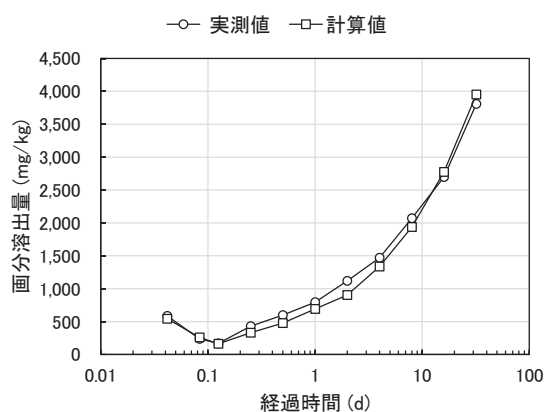
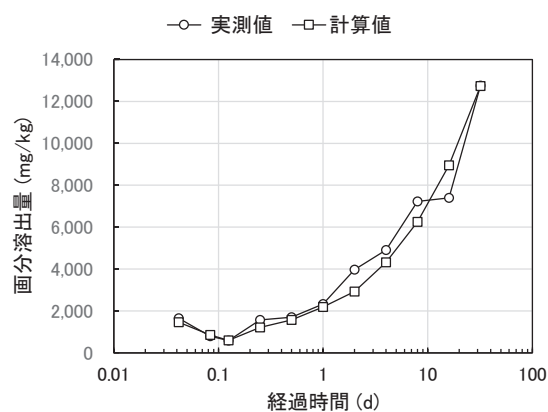
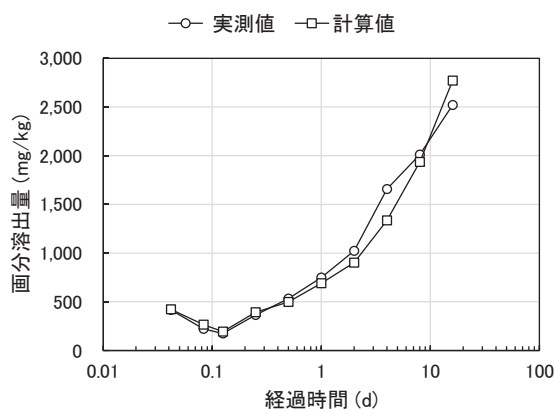
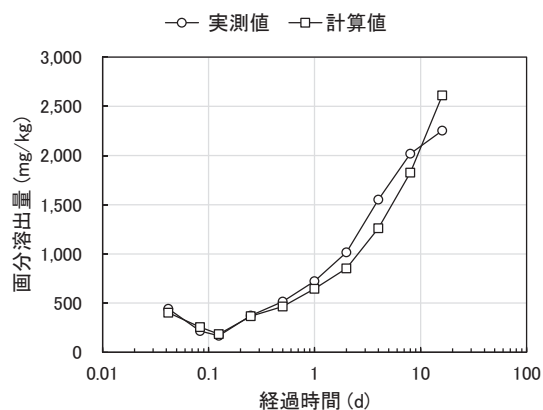
4.2 パラメータ探索結果

探索より得られたパラメータおよび、画分溶出量の実測値と計算値の決定係数 (R^2) を表 2 に示す。なお、拡散溶出が卓越する時間領域 (概ね 0.25d 以降) においては、拡散支配でなくなる実験結果 ($\log(t_i - t_{i-1}) / \log(J_i - J_{i-1}) > -0.35$ となる実験結果。 t_i 、 J_i は、それぞれ i 回目の採水時間、溶出フラックス) ¹⁶⁾ は探索に用いなかった。Na、K 及び Cl の R^2 は 0.97 以上であった。Na、K、Cl で最も R^2 が高かった反復回数 3 回目の K と最も R^2 が低かった反復

回数 3 回目の Cl の実測値と計算値を図 5 に示す。最も R^2 の低かった反復回数 3 回目の Cl でも実測値と計算値はよく一致していた。Ca の R^2 は他の元素よりもやや低かった。Ca の R^2 の最大値と最小値の実測値と計算値を図 6 に示す。Ca については 16d の実測値と計算値の違いが大きかったことが R^2 を小さくさせている原因と考えられた。以上より Na、K、Ca、Cl について、一次元モデルはキレート処理物からの塩類溶出を表現できたといえた。

4.3 立方体供試体の画分溶出量の予測評価

探索より得られたパラメータの平均値を用いて立方体供試体の画分溶出量を予測した。その実測値と計算値の比

a) 反復回数 3 回目 K ($R^2=0.9941$)b) 反復回数 3 回目 Cl ($R^2=0.9697$)図 5. Na、K、Cl の結果のうち画分溶出量の実測値と計算値の R^2 最大と最小の比較a) 反復回数 1 回目 ($R^2=0.9703$)b) 反復回数 3 回目 ($R^2=0.9517$)図 6. Ca の結果のうち画分溶出量の実測値と計算値の R^2 最大と最小の比較表 3. 立方体供試体の画分溶出量実測値と計算値の決定係数 (R^2)

	Na	K	Ca	Cl
4cm 立方体供試体	0.9368	0.9475	0.1315	0.9801
6cm 立方体供試体	0.9073	0.8676	0.0677	0.9459
8cm 立方体供試体	0.9283	0.8605	0.2706	0.9360
平均	0.9241	0.8919	0.1566	0.9540
標準偏差	0.01	0.04	0.08	0.02
変動係数 (%)	1	6	15	2

較を図 7 に、実測値と計算値の R^2 を表 3 に示す。なお、示した結果は 4 cm 立方体供試体の場合は反復回数 3 回目、6 cm 立方体供試体の場合は 2 回目、8 cm 立方体供試体の場合は 1 回目のものである。Na、K、Cl はどの大きさの供試体も概ね経過時間 8 日までは、実測値よりも計算値の方が小さくなり、それ以降では実測値と同程度になった。特に

写真 1. 供試体脱型時側面写真
(6cm 立方体供試体 反復回数 2 回目)

1 時間目で実測値よりも計算値の方が低くなった。この理由として、供試体を脱型する際に写真 1. に示す様に供試体の一部がモールドに付着したため、暴露面がきれいな平面ではなく凹凸ができた。そのため、暴露面積と表面溶解領域の体積が大きくなったことから計算値よりも実測値の方が大きくなった可能性が考えられた。また、 R^2 の変

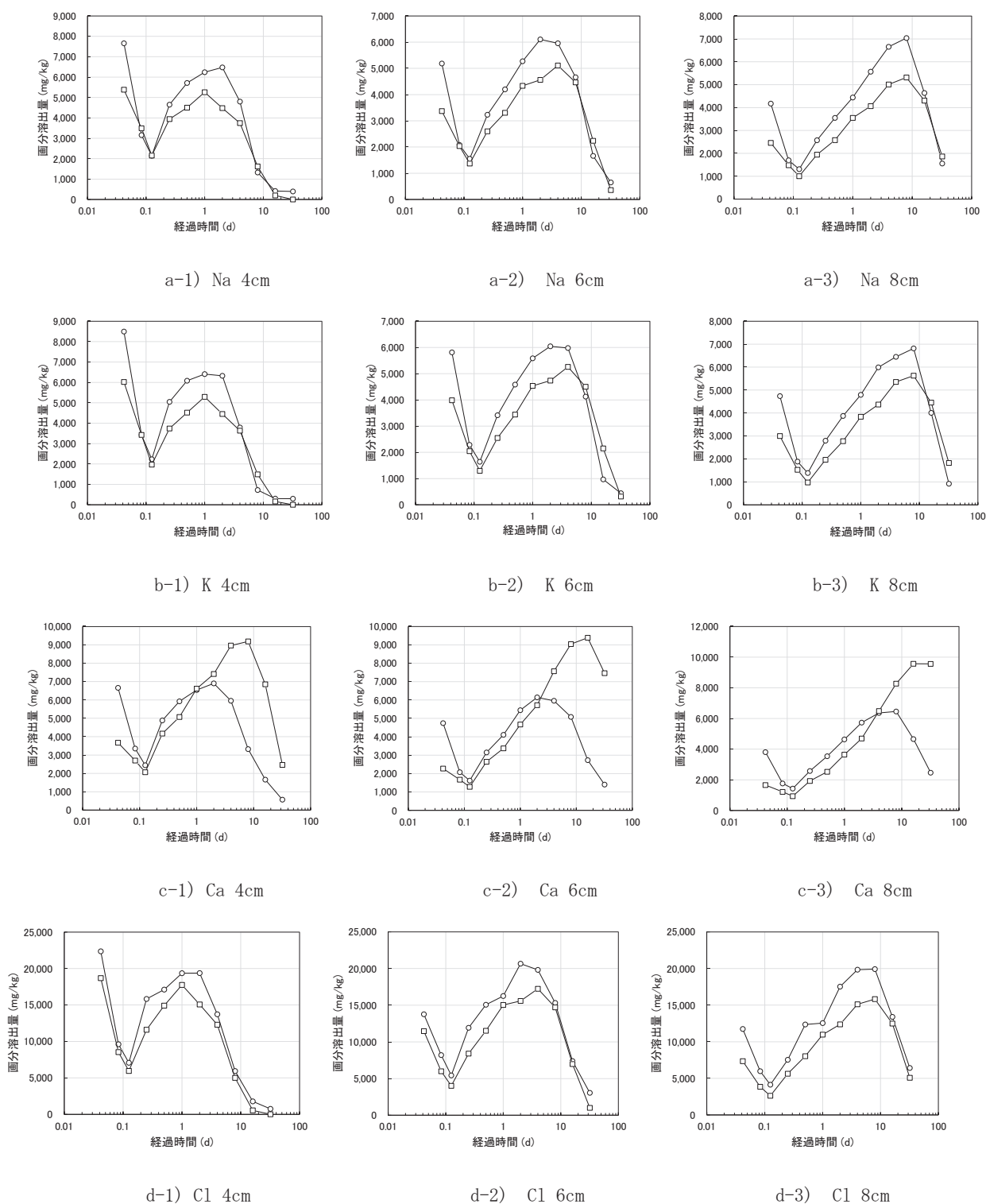


図 7. 立方体供試体の画分溶出量の実測値と計算値の比較 (○：実測値，□：計算値)

動係数は 6%以下と小さく供試体の大きさによる大きな違いはなかった。

Ca は他の 3 つの元素と比較すると画分溶出量の低下は計算値の方が実測値よりも遅れて生じた。これは実際の可溶性含有量よりも計算で用いた可溶性含有量が大きいこ

とを示唆している。計算に用いた可溶性含有量は溶出試験の溶出量を用いたことから、計算に用いた可溶性含有量が実際の値と異なった可能性が考えられた。特に Ca は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の沈殿を作るので、pH の増加と共に Ca 濃度は低下する。そこで、計算に用いた可溶性含有量を決定した各

供試体の大きさの溶出試験の pH (L/S200~400 の平均) とタンクリーチング試験のうち pH が最大だったものを表 4 に示すが、溶出試験とタンクリーチング試験の pH に大きな差は見られなかった。従って、pH による溶出量への影響は少なく、ほかの原因が考えられた。

以上より Na、K、Cl については名富の一次元モデルを三次元に拡張することができたが、Ca については拡張が困難であった。

5. まとめ

本研究では、キレート処理物からの易溶解性物質 (Na、K、Ca、Cl) の溶出について、名富の一次元モデルが適用できるかどうかを明らかにすることおよび、三次元に拡張できるか検討することを目的とした。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) Na、K、Ca、Cl について、円柱供試体を用いた画分溶出量の実測値と計算値の R^2 は0.95以上であり、一次元モデルは溶出現象を表現できたといえた。
- (2) Na、K、Cl について、立方体供試体を用いた画分溶出量の実測値の R^2 は0.86以上を示した。実測値と計算値はある程度一致したので、一次元モデルを三次元に拡張可能だといえた。
- (3) Ca について、立方体供試体を用いた画分溶出量の実測値と計算値の一致度は低かった。その原因として、pH が溶出量に与える影響が大きいのではないかと考えられたが、その影響は小さかったため他の原因が考えられた。

謝辞

本研究は令和 7 年度宮崎市地域貢献学術研究助成金の助成を受けた。また、本研究を進めるにあたり、社会環境システム工学科学学生の東川玲大君の協力を得た。

参考文献

- 1) 環境省：日本の廃棄物処理 令和 5 年度版，2025。
- 2) 野馬幸生，貴田晶子：カルシウムスケールの生成におよぼす埋立焼却残渣の影響，廃棄物学会論文誌，Vol. 9，No. 7，pp. 287-295，1998。
- 3) 愈霊傑，為田一雄，劉佳星，重松幹二，樋口壮太郎：浸透水循環による海面最終処分場の水質安定化に関する研究，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol. 35，pp. 143-154，2024。
- 4) 柳茂，菅原隆一，高橋紀世子，葛岡勝悦，岩澤理奈，斎藤善則：一般廃棄物最終処分場浸出水及び一般廃棄物焼却灰の塩類調査(第 2 報)，宮城県保健環境センタ

表 4. 溶出試験とタンクリーチング試験の pH 比較

	溶出試験 平均値	タンクリーチン グ試験最大値
4 cm 立方体供試体	11.3	11.5
6 cm 立方体供試体	11.4	11.5
8 cm 立方体供試体	11.3	11.4

一年報，第 25 号，pp.66-71，2007。

- 5) 樋口壮太郎：廃棄物処理処分に伴い排出される副生塩のリサイクルシステムの構築に関する研究，平成 24 年度 環境研究総合推進費終了成果報告書，2013。
- 6) 山崎直人：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，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2019。
- 7) 島岡隆行，花嶋正孝：セメント固化による安定化飛灰の埋立処分特性，廃棄物学会誌，Vol5，No.1，pp.32-45，1994。
- 8) Suzuki, K., and Ono, Y.: Leaching characteristics of stabilized/solidified fly ash generated from ash-melting plant, Chemosphere, 71, pp.922-932, 2008。
- 9) Liu, Q., Wang, X., Gao., M, Guan, Y., Wu, C., Wang, Q., Rao, Y., and Liu, S.: Heavy metal leaching behavior and long-term environmental risk assessment of cement-solidified municipal solid waste incineration fly ash in sanitary landfill, Chemosphere, 300, 134571, 2022。
- 10) 名富大峨：セメント固化体からの易溶解性物質溶出量予測モデルの開発，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2022。
- 11) 安田匠吾：セメント固化体からの易溶解性物質の溶出量予測のための一次元モデルの検証，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2023。
- 12) 中野夏樹：セメント固化飛灰からの塩類溶出予測モデルパラメータへの固化体空隙率の影響，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2024。
- 13) 黒田敬斗：セメント固化物からの易溶解性物質の三次元溶出モデル化，宮崎大学工学部土木環境工学プログラム卒業論文，2025。
- 14) 為田一雄，東海林俊吉，樋口壮太郎：焼却施設の働実態調査(焼却残渣編)，廃棄物資源循環学会研究発表会，Vol.31，pp.303-304，2020。
- 15) 大塚恒輝：キレート処理飛灰からの塩類溶出量予測モデルの検証，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2024。
- 16) 肴倉宏史，水谷聡，田崎智宏，貴田晶子，大迫政造，酒井伸一：利用形状に応じた拡散溶出試験による廃棄物熔融スラグの長期的溶出量評価，廃棄物学会論文誌，Vol. 14，No. 4，pp.200-209，2003。

浸出水中のカルシウム濃度予測

土手 裕^{a)}・関戸 知雄^{b)}

Prediction of calcium concentrations in leachate

Yutaka DOTE^{a)}, Tomoo SEKITO^{b)}

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of an aging treatment of chelate-treated fly ash before landfilling and the landfilling of 1m-length cube of chelate-treated fly ash with sodium carbonate on the temporal change in calcium concentration in leachate. The aging treatment was applied to chelate-treated fly ash, and then leaching tests were conducted using the aging-treated fly ash. And tank leaching tests were conducted using the cubic specimens. In addition, the temporal change in calcium concentration in leachate was investigated under conditions with and without leachate volume control. A two-week aging treatment reduced calcium leaching from the chelate-treated fly ash by 27%. The aging treatment might be more economical than insolubilization treatment using sodium carbonate. Calcium concentration in leachate could be predicted using the leaching rates from chelate-treated fly ash and flexible container packed fly ash, and operational data such as the landfilled amount of chelated fly ash and flexible container packed fly ash, and the coverage of the surface area of landfill compartment. Under conditions without leachate volume control, the calcium concentration in the leachate was lower than that under conditions with leachate volume control, and the period from the completion of landfilling to meeting the calcium leachate concentration level (CCL) without calcium removal was shortened. These results indicated that no leachate volume control would be preferable to leachate volume control. Although the two-week aging treatment could reduce calcium concentration in leachate, it had no effect on a shortening of the period from the completion of landfilling to meeting CCL. Although landfilling 1m-length cube of chelate-treated fly ash could reduce calcium concentration lower than that with no aging and two-week aging treatment, it had no effect on a shortening of the period from the completion of landfilling to meeting CCL.

Keywords: Chelate-treated fly ash, Calcium concentrations, Leachate, Prediction

1. はじめに

令和5年度において、一般廃棄物の最終処分量の319万トンに対して焼却残渣は250万トンと約8割に相当する¹⁾。その焼却残渣には多くのCaが含まれており、主灰中には160g/kg～190g/kg^{2,3)}、排ガス処理飛灰中には54～280g/kg^{4,5)}、キレート処理飛灰中には160g/kg⁴⁾、セメント固化処理飛灰中には83～200g/kg⁴⁾のCa含有量が報告されている。排ガス処理飛灰のCa含有量が多い理由は、排ガスの中和処理のために主に消石灰Ca(OH)₂が使われているからであり⁶⁾、中和剤のうち消石灰を84%の施設で使用しているとの報告がある⁷⁾。

焼却残渣にCaが含まれていることによって、浸出水中にもCaが含まれ、その濃度は最大で1900mg/Lの例もある⁸⁾。浸出水中のCaが高濃度になると、浸出水処理施設でのポンプ、攪拌翼にカルシウムスケールが付着し、種々の支障をきたす⁸⁾。そのため、浸出水処理施設では、スケール発生防止のためにスケール分散剤や炭酸ソーダ併用凝集

沈殿が用いられる⁹⁾。しかし、浸出水中のCa濃度を科学的に予測できず、処理コストが見込めないといった問題点がある。そのため、浸出水中のCa濃度の予測を行う必要がある。また、浸出水処理でCa除去を行わないことも重要であるので、浸出水中のCaを低減する必要がある。

浸出水中のCa濃度予測についての既往の研究では、日降水量、日平均気温、月埋立量、調整池中の水量、廃棄物槽内の貯蔵浸出水量、日浸出水量、浸出水質をデータとした、ニューラルネットワークモデル¹⁰⁾、湧き出し項を含む移流拡散モデル¹¹⁾を用いた予測や、埋立地をセル状に分解し、セルからの溶出予測¹²⁾が行われている。しかし、これらは実際の処分場への適用事例がない。

浸出水中のCa濃度を低下させる方法として炭酸化がある。炭酸化の方法の一つがエージングであり、飛灰を空気に接触させることで、空気中のCO₂と飛灰中のカルシウムを反応させ、炭酸カルシウム(CaCO₃)を生成させることで、CO₂を固定化するものである¹³⁾。もうひとつが炭酸添加であり、焼却主灰に対して炭酸溶液を散水することでCaCO₃を生成させ、浸出水濃度を低下させるものである¹⁴⁾。

瀬戸山は、処理飛灰からの易溶解性Caの溶出のみを考慮し、1年間のCa溶出率を用いることで、処理飛灰埋立

a) 土木環境プログラム教授

b) 土木環境プログラム准教授

表1. 炭酸化处理のための混合条件

炭酸添加率(モル%)	0	0.2	2	20
飛灰(g)	600			
キレート(g)	24			
炭酸ナトリウム濃度(g/L)	0	1.08	10.8	108
炭酸ナトリウム溶液(g)	240			

量、埋立区画の被覆状況のデータから浸出水中の年平均 Ca 濃度を表現できることを示した¹⁵⁾。また、炭酸ナトリウム添加による Ca 濃度低下はわずかであり、埋め立て終了から廃止までの期間短縮の影響は小さいことがわかった。

また、Ca 濃度を低下させる別の方法として、埋立物の体積を大きくして、埋立物重量当たりの溶出速度を低下させる方法がある。焼却飛灰は重金属等の溶出抑制のために安定化处理されるが、安定化处理方法のうちセメント固化とキレート処理は安定化処理物の体積を抑制することが可能である。山崎¹⁶⁾はセメント固化体の比表面積を小さくすることで塩類の溶出を抑制できることを示した。土手ら¹⁷⁾は塩類溶出モデルを用いてキレート処理飛灰からの塩類溶出量を予測できることを示した。

そこで本研究では、飛灰を埋立前にエージングすることの浸出水中 Ca 濃度経時変化への影響を評価することを目的とした。また、飛灰を一辺 1m の立方体に成形して埋め立てたときの浸出水濃度への影響も検討した。

2. 実験方法

2.1 用いた飛灰

実験には宮崎市の一般廃棄物焼却施設から 2025 年 5 月 21 日に採取した排ガス処理飛灰を用いた。この施設では排ガス処理に活性炭と消石灰を使用している。採取した飛灰は、排ガス処理後で安定化処理前の飛灰である。入手した飛灰を約 5 kg ずつに取り分け、乾燥させたシリカゲルと消石灰を入れて保存した。

2.2 炭酸化处理

2.2.1 エージング処理

エージング処理のために、飛灰に含水比 20%、キレート添加率 4%となるように蒸留水、キレート剤((株)栗田工業 アッシュナイト S-803)を加えて自動混練機で混練した。試料をバットに移し、室温で放置し、1 日に 1 回攪拌した。エージング期間を 0 日、1 日、1 週間、2 週間とし、所定の期間後 105℃で 1 日乾燥させて放冷後重量を測定し、バットを揺すって空隙を作って再度乾燥させた。これを 1 日当たりの重量減少率が 0.5%未満になるまで続けた。乾燥終了後に微粉碎し、溶出試験、含有量試験に用いた。

2.2.2 炭酸ナトリウム添加処理

表 2. 溶出モデルパラメータ決定実験の配合条件

飛灰	650g
キレート	26g(4%)
炭酸ナトリウム溶液	195g(30%)

エージング処理との比較のために炭酸ナトリウム添加処理も行った。炭酸ナトリウム添加処理のための混合条件を表 1 に示す。炭酸添加率とは、炭酸化处理する前の試料の溶出試験を行い、最大カルシウム溶出量(モル換算)に対する添加した炭酸ナトリウムのモル比を表す。所定量の試料と炭酸ナトリウム溶液を加え、混練を行った後、バットに混練りした試料を移してバット全体に広げた。試料をバットごとに重量測定してからバットをラップで密封し、24 時間放置した。24 時間後に重量を測定し、105℃に設定した乾燥機で 1 日乾燥させて、放冷後重量を測定し、バットを揺すって空隙を作って再度乾燥させた。これを 1 日当たりの重量減少率が 0.5%未満になるまで続けた。乾燥終了後に微粉碎し、溶出試験、含有量試験に用いた。

2.3 供試体からの溶出モデルパラメータ決定実験

2.3.1 供試体作成方法

供試体は、表 2 に示す配合によって作成した。配合条件の値はモールド 2 個分である。円柱供試体作成には直径 5 cm、高さ 10 cm の円柱モールドを用い、供試体をタンクリーチング実験用に 3 個、分析用に 1 個作成した。配合条件に従って混練り用の容器に飛灰とキレートと炭酸溶液を取り、自動混練機を用いて混合を行ったあと、モールドに充填し、ラップをかけ、室温 25℃で 1 週間養生した後、脱型した。

脱型した円柱供試体の重量測定後、タンクリーチング実験に使用する供試体は、上面のみを暴露面とするため、暴露面以外の側面と底面には変成シリコンシーラント((株)セメダイン、SM-451)を塗って防水を行った。

脱型した分析用供試体の粗粉碎を行い、7 日間乾燥して含水率を測定した後に微粉碎し、溶出試験、含有量試験に用いた。

2.3.2 タンクリーチング実験方法

ポリ瓶に蒸留水 1.75L を加えて、防水処理した円柱供試体を静置した。静置後、所定の時間が経過したら、新しい蒸留水を入れたポリ瓶に供試体を移した。蒸留水の交換時間は 0.0417、0.0833、0.125、0.25、0.5、1、2、4、8、16、32 日目とした。供試体を取り出した後の溶液の一部を 0.45 μm メンブレンフィルターでろ過したろ液に、濃硝酸をろ液に対して 0.5%加えてポリ瓶に入れ、保存した。

2.4 カラム実験

表 3. 立方供試体混合条件

立方供試体の 1 辺の 長さ	飛灰 (g)	キレ ート (g)	炭酸ナト リウム 溶液 (ml)	キレ ート /灰 (%)	溶液 /灰 (%)
4cm	351	14	106	4	30
6cm	1, 101	44	331	4	30
8cm	2, 550	102	765	4	30

2.4.1 供試体作成方法

供試体作成には一辺 4 cm、6 cm、8 cm のモールドを用い、供試体をカラム実験用および分析用に作成した。表 3 に示す配合に従って円柱供試体と同様に作成、養生した。養生完了後に分析用供試体は、円柱供試体と同様に分析試料の処理を行った。また、試料の一部を空隙率様にポリ瓶に保存した。

2.4.2 カラム実験方法

カラム実験では散水後一定時間放置し（この期間を無降雨期間と呼ぶ）、散水を行う事で無降雨期間中に供試体から溶出した C1 を回収した。測定に用いたカラムを図 1 に示す。カラムはアクリル製で、断面が供試体の長さ+4 cm の長さの正方形である。カラムはカラム本体、底板、排水用パイプで構成されている。直径 2 mm のガラスビーズを 2 cm の厚さになるように底板の上に敷き、供試体を設置し、ガラスビーズを供試体の上面 2 cm までビーズを充填させた。底板には直径 1 cm の穴が複数開いており、ビーズが流れないように網を張った。散水方法は、4cm 供試体に 190 mL、6 cm 供試体に 310mL、8cm 供試体に 460mL（いずれも充填したガラスビーズ層の空隙量相当）の蒸留水を供試体の真上からゆっくりと加えた。蒸留水がある程度排水されたことを確認し次の散水を行い、この作業を合計 3 回行った。カラムからの排水がなくなると（概ね 1 時間程度）、排水の入ったポリ瓶を回収し、カラム上部をラップで覆い、カラム下部の排水チューブをピンチコックで止めた。散水頻度は 1 日 1 回、2 日連続で行い、5 日間放置し（無降雨期間 5 日）、37 日目まで行った。散水期間は 1 日目の散水は供試体周辺空隙を蒸留水で満たすことを目的とし、それ以降の散水は、空隙に溜まっている濃度の高い溶液を洗い流すとともに供試体周辺の空隙内の溶液を蒸留水に交換することを目的としている。ポリ瓶に回収した排水は 0.45 μ m 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。残った溶液の EC および pH を測定した。ろ液に濃硝酸を 0.5% 加えて保存した。

2.5 試験方法

2.5.1 含有量試験

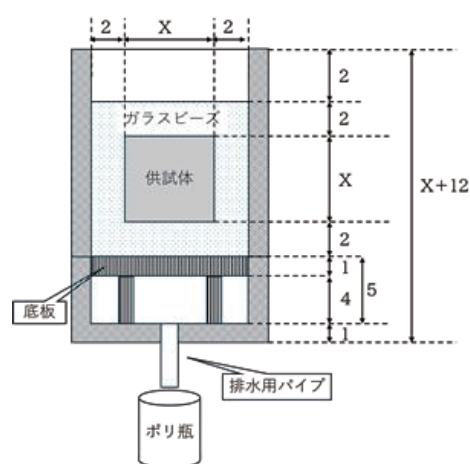


図 1. カラム実験装置の概要 (寸法の単位: cm)

含有量分解は、試料 1g、蒸留水 25ml、濃硝酸 2.5ml を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 5 分間煮沸し、冷却した。その後、ガラス繊維織紙 (GF/B) を用いて全量吸引ろ過し、100ml にメスアップし、ポリ瓶に保存した。含有量試験の反復回数は 3 回とした。

2.5.2 溶出試験

溶出試験は、L/S=10、200、300、400 の条件でポリ瓶に試料と蒸留水を取り、200rpm で 6 時間振とう後に約 5 分間静置し、上澄みを 0.45 μ m 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。残った上澄みの pH と EC を測定した。濃硝酸をろ液に対して 0.5% 加えてポリ瓶に入れ、保存した。溶出試験の反復回数は 3 回とした。

2.5.3 分析方法

Na、K、Ca、Mg の濃度はフレイム原子吸光光度法（株日立ハイテック、Z-2000 型）を用いて分析を行った。空隙率は粗粉碎した試料のうち約 1cm 程度のものを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。空隙率測定の反復回数は 3 回とした。

3. 溶出モデル

3.1 一次元溶出モデル

一次元の条件で、表面溶解支配部分となる供試体の表面近傍（以後、表面溶解領域と呼ぶ）において溶出速度がその領域での含有量に比例する表面溶解モデルと通常の拡散モデルを組み合わせた名富のモデル¹⁸⁾を用いた。表面溶解モデル式は式(1)で表される。ここで、 M_s (mg/kg) は供試体重量当たりの累積表面溶解溶出量、 δ は表面溶解領域厚さ (m)、 ρ は供試体密度 (kg/m^3)、 A は供試体暴露面積 (m^2)、 W は供試体重量 (kg)、 Q_0 は可溶性含有量 (mg/kg)、 k は表面溶解速度定数 ($1/\text{s}$) である。

$$M_s = \frac{\rho \delta A Q_0}{W} (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

拡散モデルは式(2)を以下の初期条件、境界条件を差分法により解いた。ここで C は濃度(mg/m^3)、 D は拡散係数(m^2/s)、 L は供試体長さ(m)、 C_0 は初期濃度(mg/m^3) (可溶性含有量に供試体密度を乗じて空隙率で除した値)である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

初期条件: $t = 0, 0 \leq x \leq L - \delta; C = C_0$

: $t = 0, L - \delta \leq x \leq L; C = 0$

境界条件: $x = L; C = 0$

: $x = 0; \frac{dC}{dx} = 0$

なお、モデルパラメータを求める場合は、長さ方向の分割幅 $\Delta x = 1 \times 10^{-4} (\text{m})$ とした。累積拡散溶出量は式(3)で求めた。ただし、 Δt は時間分割幅、 C_{nj} は時刻格子 j での供試体表面、 $C_{n-1,j}$ は供試体表面の1分割前の濃度である。

$$M_D = \frac{\theta A}{W} \times \sum_{j=1}^j \left\{ \frac{-D \times (C_{nj} - C_{n-1,j})}{\Delta x} \times \Delta t \right\} \quad (3)$$

累積溶出量 M_T (mg/kg) は表面溶解溶出量 M_S と拡散溶出量 M_D の合計で表される。また、時刻 t_{j-1} から t_j までの間の溶出量を面分溶出量 m_T とし、式(4)で表す。

$$m_T = (m_{S(t,j)} - m_{S(t,j-1)}) + (M_{D(t,j)} - M_{D(t,j-1)}) \quad (4)$$

3.2 三次元溶出モデル

立方体での表面溶解領域の体積(表面溶解領域体積)を V とすると、立方体供試体の一辺の長さを $L (\text{m})$ 、表面溶解領域厚さを $\delta (\text{m})$ として次式で表現できる。

$$V = L^3 - (L - 2\delta)^3 \quad (5)$$

よって、立方体の M_s は次式で表される。

$$M_s = \frac{\rho V Q_0}{W} (1 - e^{-kt}) \quad (6)$$

拡散モデルは、図2のように立方体の中心から x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ2分割し、得られた1/8立方体に対して三次元の拡散方程式である式(7)を以下の初期条件、境界条件で差分法を用いて解いた。ここで C は濃度(mg/m^3)、 D は拡散係数(m^2/s)である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (7)$$

初期条件: $t = 0, 0 \leq x \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq x \leq \frac{L}{2}; C = 0$

: $t = 0, 0 \leq y \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq y \leq \frac{L}{2}; C = 0$

: $t = 0, 0 \leq z \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq z \leq \frac{L}{2}; C = 0$

境界条件: $x = \frac{L}{2}; C = 0$

: $x = 0; \frac{dC}{dx} = 0$

: $y = \frac{L}{2}; C = 0$

: $y = 0; \frac{dC}{dy} = 0$

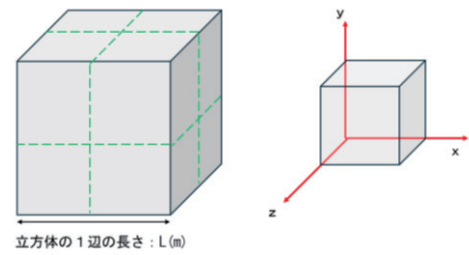


図2. 1/8立方体の図

: $z = \frac{L}{2}; C = 0$

: $z = 0; \frac{dC}{dz} = 0$

拡散累積溶出量は、1/8 供試体の3面ある暴露面のうち1暴露面($(x, y, L/2)$ 面)における各格子点での溶出フラックスの合計量に立方体の表面積を乗じることで計算できる。 $(x, y, L/2)$ 面での溶出量は z 軸方向の溶出量なので、任意の時間格子 j での濃度差は式(8)で表現される。

$$C_{ix, iy, Nz, j} - C_{ix, iy, Nz-1, j} \quad (8)$$

ここで ix, iy は x 座標、 y 座標の格子点、 Nz は $z=L/2$ での格子点を表す。拡散累積溶出量 M_D (mg/kg) は次式で求めることができる。

$$M_D = \frac{A_c \theta}{W} \times \sum_{j=1}^j \left[\sum_{ix=1, iy=1}^{Nx, Ny} \left\{ \frac{-D \times (C_{ix, iy, Nz, j} - C_{ix, iy, Nz-1, j})}{\Delta x} \right\} \times \Delta t \right] \quad \dots (9)$$

ここで A_c は立方体の全面積(m^2)、 θ は空隙率(-)、 N_x, N_y は $x = L/2, y = L/2$ での格子点を表す。また、 N は x, y, z 軸方向の空間分割数であり、1暴露面の全格子点である $(N+1)^2$ で除することで、1格子点当たりの平均的なフラックスを表している。なお、 $(L/2, y, L/2)$ 、 $(x, L/2, L/2)$ の線(辺の上)では C は0(境界条件)となるので濃度差は0となる。また、他の立方体と接する辺上の格子点は、その立方体と格子点を共有するので、フラックス、すなわち濃度差は1/2となる。さらに、 $(0, 0, L/2)$ の点は接する4つの立方体と共有することになるのでフラックスすなわち濃度差は1/4となる。

4. 結果と考察

4.1 エージング処理のCa溶出量への影響

飛灰およびエージング処理をした飛灰の元素含有量を図3に示す。エージング期間によらず含有量は飛灰含有量とほぼ同じであった。エージング期間2週間の場合のみCaの含有量が飛灰含有量よりも低かったが、これは分析試料を採取するときに含有量の低い試料を採取してしまったと考えられる。次に飛灰および炭酸ナトリウム添加処理をした飛灰の元素含有量を図4に示す。Na含有量は炭酸ナトリウムの添加率とともに増加した。これは、炭酸ナ

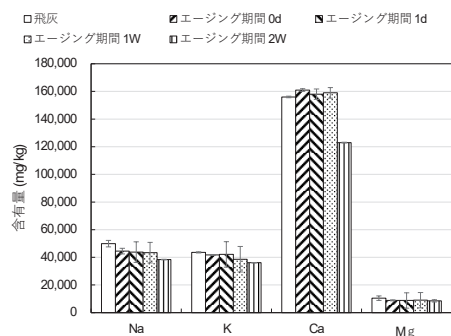


図 3. 飛灰およびエージング処理をした飛灰の元素含有量

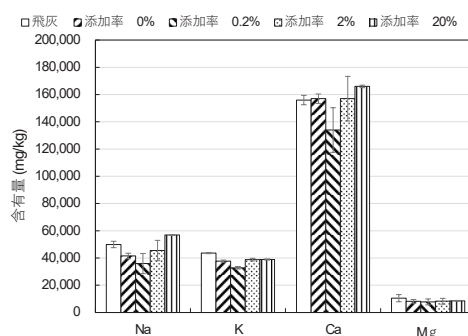


図 4. 飛灰および炭酸ナトリウムの添加処理をした飛灰の元素含有量

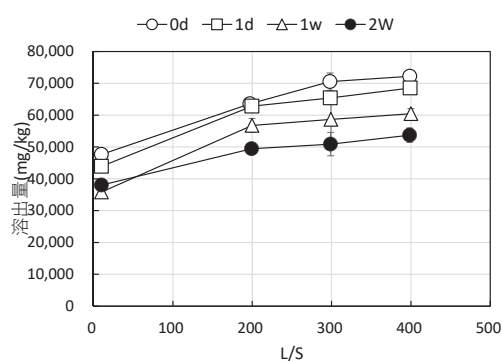


図 5. エージング期間の L/S 比ごとの溶出量

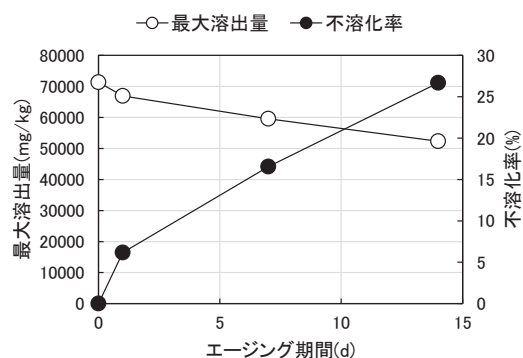


図-6. エージング期間における最大溶出量と不溶化率

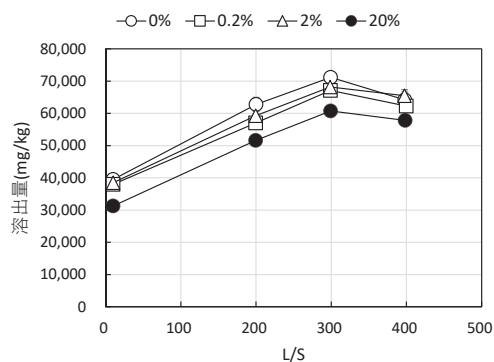


図-7. 各添加率の L/S 比ごとの溶出量

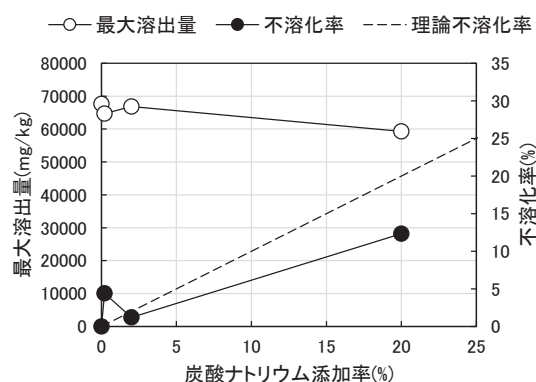


図 8. 各添加率における最大溶出量と不溶化率と理論不溶化率

トリウムが Na を含んでいるためである。Ca は炭酸ナトリウムの添加率によらず、ほぼ一定であった。

図 5 に各エージング期間の L/S 比ごとの溶出量を示す。L/S が増加すると溶出量も増加し、L/S が 300~400 でほぼ一定となった。そのため、L/S300~400 の平均を各エージング期間の最大溶出量とした。図 6 にエージング期間における最大溶出量と不溶化率を示す。不溶化率はエージング期間 0d に対する各エージング期間の最大溶出量の減少量をエージング期間 0d の最大溶出量で除したものである。不溶化率はエージング期間の増加とともに増加し、エージング期間 2 週間で 27%であった。このことからエージング処理は Ca を不溶化させ、期間が長ければより高い不溶化効

果を得ることができるとわかった。

4.1.2 炭酸添加処理の結果

図 7 に各添加率の L/S 比ごとの溶出量を示す。L/S が増加すると Ca 溶出量も増加し、L/S300 以上でほぼ一定となった。L/S300~400 の平均を各添加率の最大溶出量とした。図 8 に各添加率における最大溶出量、不溶化率、理論不溶化率を示す。不溶化率は添加率 0%に対する各添加率の最大溶出量の減少量を添加率 0%の最大溶出量で除したものである。また、図中の点線は理論不溶化率(=炭酸ナトリウ

表 4. 飛灰のフレコン梱包・開梱の時期および埋立区画

年度	H18	H19	H20	H21	H22	H23
A 区画	フレコン埋立 →H27にA区画 で開梱	フレコン埋立 →H27にA・B区 画で開梱	フレコン埋立 →H27にB区画 で開梱		フレコン埋立 →H27にB区画 で開梱	フレコン埋立 →H27にB区画 で開梱
B 区画			フレコン埋立 →H26にB区画 で開梱	フレコン埋立 →H26にB・D区 画で開梱	フレコン埋立 →H26にD区画 で開梱	フレコン埋立 →H25にD区画 で開梱

ム添加率)である。不溶化率は添加率とともに増加し、炭酸ナトリウム添加率 20%で 12%となり、理論不溶化率よりも低かった。原因として、養生時間が 1 日では足りなかったことが考えられる。

エージング処理 2 週間の不溶化率が炭酸ナトリウム添加率 20%の理論不溶化率を上回ったことから、十分な敷地が確保できれば炭酸ナトリウムを添加せずともエージングにより Ca 溶出量を減らすことができ、エージング処理の方が経済的である可能性が示された。

4.2 浸出水濃度予測モデルパラメータの決定

4.2.1 処分場の概要と浸出水濃度計算方法

本研究で対象とした処分場(エコクリーンプラザみやざき)では H17 年度の 4 月から埋立を開始し、R17 年度に埋め立てを終了する予定である。埋立地は A、B、C、D の 4 区画に分かれ区画面積はそれぞれ 9,000m²、12,500m²、8,000m²、11,500m²である。H24 年度まで主灰を熔融した熔融固化物とキレート処理飛灰を埋め立てていたが、H25 年度から熔融処理をやめたことにより、熔融固化物の代わりに主灰の埋立が開始された。埋立区画表面の状況として中間覆土の他に、浸出水量を抑えるために不透水性のブルーシートや UV シート(以後これらシートと呼ぶ)などで埋立作業の行われていない区画を覆っている場合があった。埋立中の区画でも埋立作業を行っていない部分をシートで覆っていることがあった。また、当該埋立地では Cl 濃度が浸出水設計値よりも超過したため、表 4 に示すとおり H18 年度から H23 年度の間はフレコン(1m³)に飛灰を梱包して埋め立て、H25 年度から H27 年度にかけて開梱した。Cl については、H27 年度以降は脱塩処理は行わず、浸出水量を浸出水調整池で希釈して 9,500mg/L 以下にして下水道に放流している。

浸出水発生係数は、宮崎市から提供された R4.4 月から 9 月の全区画の降水量に対する浸出水量の比として算出した 0.39 とした。これは、一部の区画ではシートによる被覆が行われていたため、不確実性の大きい数値である。宮崎市から提供されたデータは月ごとの埋立量(主灰、処理飛灰ごと)、埋立作業区画、シートによる被覆状況、浸出水中 Ca 濃度、および年降水量である。

浸出水 Ca 濃度を予測するにあたり、埋立作業の行われていない区画については、シートによる被覆が行われてい

れば浸出水発生係数を 0 とし、被覆が行われていない場合は 0.39 とした。埋立作業が行われている区画で一部シートによる被覆が行われている場合であっても浸出水発生係数は 0.39 とした。以下の式で区画ごとの年間浸出水発生量を求めた。

区画ごと年間浸出水発生量(m³)=年降水量(m)×区画面積(m²)×区画ごとの雨水浸透月割合×浸出水発生係数

なお、雨水浸透月割合は 12 か月のうち雨水が埋立区画に浸透する月数(すなわち、区画全面がシートで被覆されていない月数)の割合である。1 年間の浸出水発生量は、区画ごと年間浸出水発生量の全区画の合計量で求めた。月ごとの埋立量は処理飛灰、主灰の埋立作業を行っている区画数で除して各区画に均等に割り振った。熔融固化物から Ca 溶出は生じないとした。

本研究では、瀬戸山⁹⁾が提案した当該年度に埋め立てられたキレート処理飛灰の可溶性含有量から一定量の Ca が溶出するとの考え方に則り、キレート処理飛灰からの溶出率を α とし、各区画の年間埋立量に(1-含水率)と可溶性含有量と溶出率を乗じることで得られた各区画での溶出量の合計量を 1 年間の溶出量とした。(1-含水率)を乗じる理由は、可溶性含有量は乾燥重量当たりであり、埋立量は湿重量であるため、埋立量を乾燥重量に変換するためである。含水率は焼却施設から排出される実際のキレート処理飛灰の値を用いた。また、フレコン梱包飛灰からの溶出率を β とした。開梱された飛灰は、開梱されるまでにフレコン内に残存した Ca 量が開梱された区画に埋め立てられたとして溶出率 α を用いて溶出量を求めた。1 年間の平均浸出水濃度は 1 年間の溶出量を 1 年間の浸出水量で除することで求めた。パラメータは濃度の実測値と計算値の残差自乗和が最小になるようにエクセルのソルバーを用いて求めた。

4.2.2 溶出率の決定と予測方法の評価

図 9 に埋立が開始された H17 年度から R6 年度までの浸出水中 Ca 濃度の実測値と計算値を示す。可溶性含有量はエージング 0 d の最大溶出量である 71,400mg/kg を用いた。決定されたパラメータは、 $\alpha=0.0205$ 、 $\beta=0.0240$ であった。実測値と計算値の決定係数 R²は 0.73 であり、実測値と計算値は良い一致を示した。フレコン梱包飛灰からの溶出率の方が飛灰溶出率よりも小さくなると予想されたが、結果としてフレコン梱包飛灰溶出率の方が若干大きくなった。この原因として、埋立中にキレート処理飛灰が凝

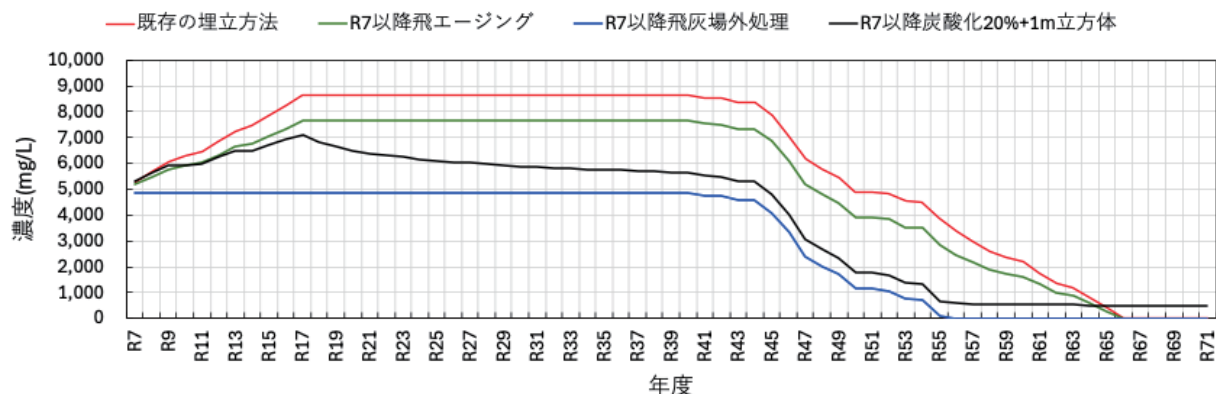


図 10. R7 年度以降の Ca 濃度経時変化（浸出水発生抑制なし）

結して溶出率が低くなった可能性が考えられた。

以上から、キレート処理飛灰からおよびフレコン梱包飛灰の Ca の溶出のみを考慮して、Ca 溶出率を用いることで、キレート処理飛灰埋立量、埋立区画の被覆状況のデータから浸出水中の年平均 Ca 濃度を表現できた。

4.3 浸出水濃度への炭酸化の影響

4.3.1 長期予測方法

宮崎市では、前述したとおり C1 については浸出水を 9,500mg/L 以下に調整池で希釈して下水道放流しているが、浸出水の C1 濃度は H30 年度以降増加傾向にあり、希釈を行う調整池容量の不足が懸念されている。そこで、R7 年度以降の浸出水濃度予測として、浸出水発生抑制なしの場合と、浸出水発生抑制の 2 つの場合についての浸出水濃度予測を行った。浸出水発生抑制ありの場合、R7 年度から埋め立てが終了する R17 年度までは埋立作業区画以外をシートで被覆し、R18 年度以降は 2 区画を 1 セット（A・B 区画と C・D 区画）として 2 年おきにシートで被覆するものとした。浸出水発生抑制なしの場合は、R7 年度以降シートによる被覆を行わないとした。

4.3.2 浸出水発生抑制なしの場合

図 10 に浸出水発生抑制なしの場合の R7 年度から R17 年度までエージング 2 週間の処理を行ったキレート処理飛灰を埋め立てた場合と、エージングなしで埋め立てた場合（既存の埋立方法と呼ぶ）の埋めた場合、および R7 年度からキレート処理飛灰を場外処理した場合（キレート処理飛灰の埋立量 0）の浸出水濃度予測結果を示す。R7 以降の可溶性含有量は既存の埋立方法では R6 年度までと同じ値を、エージング 2 週間処理の場合は、4.1.2 で得られたエージング 2 週間処理での最大値 52,300mg/kg を用いた。

既存の埋立方法では、埋立が R17 年度まで濃度は増加し、R49 年度まで一定となり、R50 年度から減少した。宮崎市では、Ca 除去なしの未処理で放流できる基準は Ca 濃

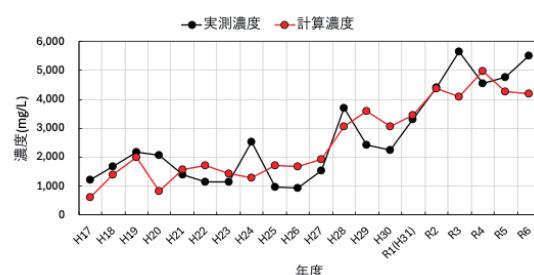


図 9. R6 年度までの浸出水中 Ca 濃度の実測値と計算値

度 100(mg/L)（以後、未処理基準と呼ぶ）であるが、R66 年度で未処理基準を満足し、埋立終了から 49 年が必要であった。

エージング 2 週間処理した場合は、既存の埋立方法と同様の濃度変化を示したが、既存の埋立方法と比べて濃度が低くなった。これは、R7 年度以降の可溶性含有量がエージング 2 週間処理の場合の方が低いことによる。エージング 2 週間処理により最大濃度はエージングなしの 88%に低下させることができることが分かった。100mg/L 以下となる時期は、エージング処理 2 週間でも R66 年度で、100mg/L 以下になる年数は既存の埋立方法と変わらなかった。

場外処理した場合は、R55 年度（埋立終了から 38 年）で未処理基準をした。

4.3.3 浸出水発生抑制ありの場合

図 11 に浸出水発生抑制ありの場合の Ca 濃度経時変化を示す。浸出水量を抑制すると、既存の埋立方法、エージング 2 週間処理、場外処理のどの場合でも R71 年度（埋め立て終了後 54 年）でも濃度の減少傾向は見られなかった。これは、浸出水量を抑制することで Ca の溶出が制限され、浸出水発生抑制なしの場合よりも抑制ありの場合の方が残存 Ca 量が 0 になるまでの時間が長くなるためである。

エージングなしおよびエージング 2 週間処理で Ca 濃度が 2 年おきに高低を繰り返し、A・B 区画をシートで被覆していない時に高くなった。これは、浸出水量は A・B 区

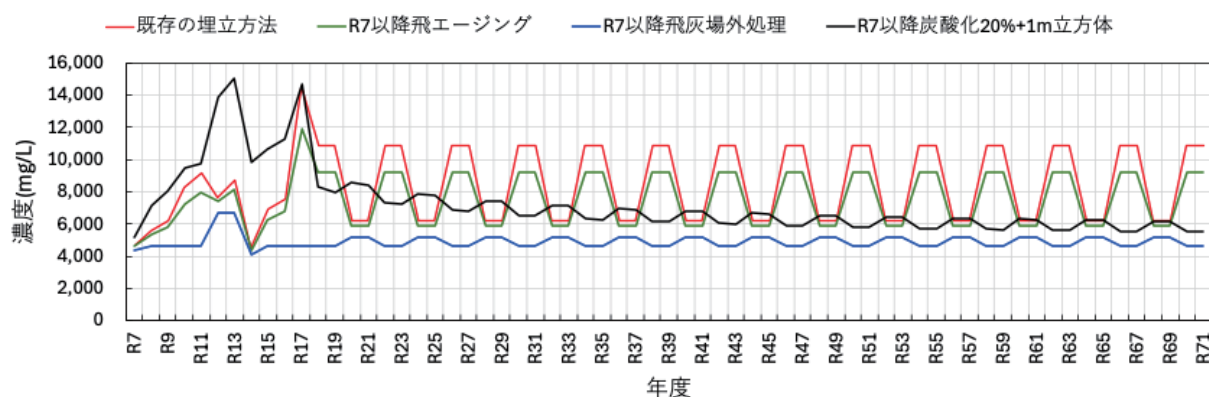
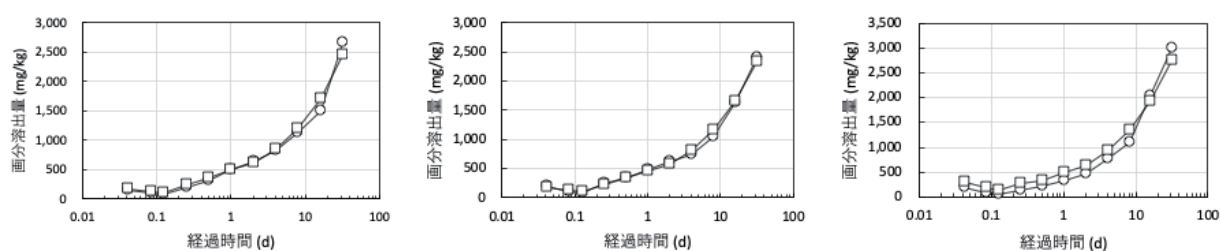


図 11. R7 年度以降の Ca 濃度経時変化（浸出水発生抑制あり）



a) 反復回数 1 回目

b) 反復回数 2 回目

c) 反復回数 3 回目

図 12. 円柱供試体の画分溶出量の実測値と計算値（○：実測値、□：計算値）

画をシートで被覆しているときの値は、C・D 区画をシートで被覆しているときの値に対して 0.90 倍であり、その差は小さいが、埋め立てが終了する R17 年度までの飛灰の埋立量が A・B 区画で 124,976t で C・D 区画の 69,390t の約 2 倍多いため、A・B 区画をシートで被覆していない時の溶出量が多くなるため、浸出水濃度が高く、シートで被覆しているときに浸出水濃度が低くなるからである。また、場外処理の場合に高低のサイクルが他の 2 条件と逆転しているのは、場外処理の場合は R7 年度以降のキレート処理飛灰の埋立量は 0 なので、R6 年度以前の埋立量を比較すると C・D 区画の埋立量は A・B 区画の埋立量の 1.16 倍多く、また、前述したように浸出水量は C・D 区画をシートで被覆していない時の方が、A・B 区画をシートで被覆していない時の 0.90 倍であるからである。

以上より、浸出水量を抑制しない方が Ca 濃度を低減でき、処分場の埋立終了から未処理基準を満足するまでの期間を短縮できることから、浸出水量を抑制しない方が好ましいといえた。また、既存の埋立方法と比べてエージング処理をした方が Ca 濃度は低減できるが、未処理基準までの期間短縮に対するエージングの影響はみられなかった。

4.4 立方体で埋め立てた場合

4.4.1 溶出モデルパラメータ

炭酸 20%添加率のナトリウム円柱供試体を用いたタン

表 5. 探索で得られたパラメータ

反復回数	δ (m)	k (1/s)	D (m ² /s)	R^2
1 回目	5E-04	1.58E-05	6.40E-11	0.9835
2 回目	4E-04	1.82E-05	5.90E-11	0.9956
3 回目	4E-04	1.66E-04	8.20E-11	0.9901
平均	4E-04	6.66E-05	6.83E-11	-
変動係数 (%)	12	105	14	-

クリーニング実験から得られたパラメータを用いた画分溶出量の実測値と計算値を図 12 に示す。得られたパラメータを表 5 に示す。実測値と計算値はよく一致しており、用いたモデルから Ca の溶出量を予測できると言えた。

4.4.2 拡散係数の補正

土手ら¹⁹⁾によると、カラム実験の累積溶出量はタンクリーニング実験の場合よりも遅れ、溶出モデルの拡散係数を補正することで、カラム実験の累積溶出量を表現できることが報告されている。カラム実験の画分溶出量を最小にするように拡散係数の補正係数 ϵ を求めた。なお、モデルパラメータである δ 、 k 、 D は表 5 の平均値を用いた。図 13 にカラム実験の累積溶出量の実測値と計算値を、図 14 に補正係数と供試体大きさの関係を示す。4cm 供試体の実測値と計算値の一致度は低いが、6cm 供試体と 8cm 供試体についてはよく一致していた。また 3 種類の供試体の補正

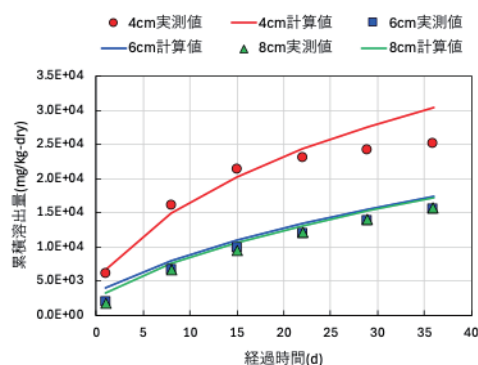


図 13. カラム実験の累積溶出量の実測値と計算値

係数は同程度の値であったことから、長期溶出についての補正係数は3つの補正係数の平均値である 0.060 を用いることとした。

4.4.3 立方体で埋め立てた場合の浸出水濃度への影響

R7 年度から R17 年度まで炭酸ナトリウム添加率 20%の飛灰を一边 1m の立方体に成形して埋め立てた場合の浸出水濃度も浸出水発生抑制なしの場合と抑制ありの場合の結果もそれぞれ図 10、図 11 に示す。1 年間の溶出量は溶出モデルから計算された埋立経過 i 年 1 年間の乾燥重量当たり溶出量に処理飛灰含水率(14.7%(実測値))と 1 年間の埋立量を乗ずることで求めた。また、R7 年度以降の炭酸ナトリウム添加 20%の飛灰の可溶性含有量は 4.1.3 で得られた炭酸ナトリウム添加 20%の最大溶出量を用いた。

浸出水発生抑制なしの場合、埋立が終了した R17 年度に最大となったあと減少し、R65 年度以降はゆっくりと減少した。しかし、R71 年度で未処理基準を満足しなかった。濃度が R57 年度以降ゆっくりと減少する理由は、場外処理の結果から分かる様に R6 年度までに埋め立てられた飛灰からの溶出は R56 年度(39 年)埋立終了後で終了する。その後は立方体に成形した飛灰からのみ Ca の溶出が継続するが、1m 立方体の溶出率(図 15)は埋立経過後 39 年以降非常にゆっくり減少することから、R56 年度以降の Ca 溶出量低下はわずかであるため、濃度低下もゆっくりと生じる。

浸出水発生抑制ありの場合も、R17 年度以降振動しながら、浸出水発生抑制なしの場合と同様の挙動を示した。

以上のことから、飛灰を一边 1m の立方体に成形して埋め立てることで、R17 年度以降の濃度は既存の埋立方法やエージング 2 週間処理よりも低くできるが、未処理基準達成までの期間を短縮する効果は見られなかった。

5. まとめ

本研究ではエコクリーンプラザみやぎを対象として、飛灰を埋立前にエージングすることおよび飛灰を一边 1m

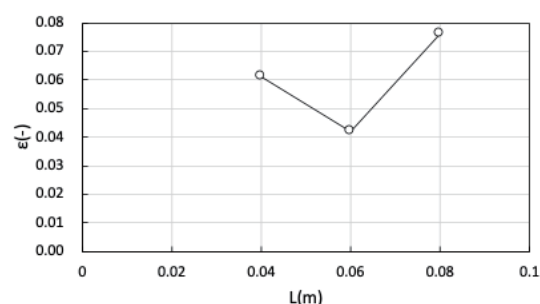
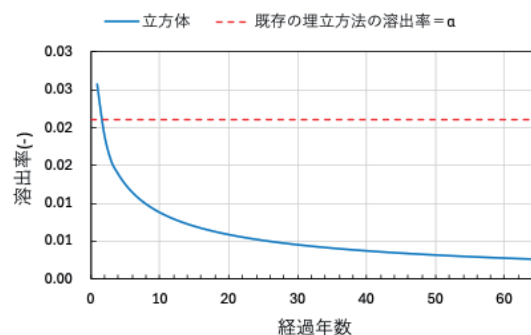
図 14. 供試体の大きさと拡散係数補正係数 ε の関係

図 15. 1m 立方体の溶出率

の立方体に成形して埋め立てることの浸出水中Ca濃度経時変化への影響を評価することを目的とした。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) エージング処理を2週間行うことにより、キレート処理飛灰からのCa溶出を27%不溶化することができた。不溶化効果はエージング期間が長いほど効果的であった。また、十分な敷地が確保できれば炭酸ナトリウムを添加せずともエージングによりCa溶出量を減らすことができ、エージング処理の方が経済的である可能性が示された。
- (2) キレート処理飛灰からおよびフレコン梱包飛灰のCaの溶出のみを考慮して、Ca溶出率を用いることで、キレート処理飛灰埋立量、埋立区画の被覆状況のデータから浸出水中の年平均Ca濃度を表現できた。
- (3) 浸出水量を抑制しない方が浸出水中Ca濃度を低減でき、処分場の埋立終了から未処理基準を満足するまでの期間を短縮できることから、浸出水量を抑制しない方が好ましいといえた。
- (4) 既存の埋立方法と比べてエージング処理をした方がCa濃度は低減できるが、未処理基準までの期間短縮に対するエージングの影響はみられなかった。
- (5) 飛灰を一边1mの立方体に成形して埋め立てることで、埋立を終了したR17年度以降の濃度は既存の埋立方法やエージング 2 週間処理よりも低くできるが、未処理基準達成までの期間を短縮する効果は見られなかった。

謝辞

本研究は令和7年度宮崎市地域貢献学術研究助成金の助成を受けた。また、本研究を進めるにあたり、社会環境システム工学科プログラム学生の中津季悠君の協力を得た。

参考文献

- 1) 環境省：日本の廃棄物処理 令和5年度版，2025.
- 2) 飯野成憲，辰市祐久，肴倉宏史：エアテーブル選別における都市ごみ焼却主灰中の金属の選別特性，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol. 31, pp. 98-107, 2020.
- 3) 高地春菜，久保田洋，繁泉恒河，正木祥太，阪口真以，田中悟：ステップ加熱式炭素分析による炭酸化前後の焼却灰中炭酸塩の評価，第34回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 521-522, 2023.
- 4) 野馬幸生，貴田晶子：カルシウムスケールの生成におよぼす埋立焼却残渣の影響，廃棄物学会論文誌，Vol. 9, No. 7, pp. 287-295, 1998.
- 5) 田久保圭祐，水谷聡，貫上佳則，年見寛和：薬剤処理飛灰中の余剰キレート薬剤による通水されたPbの不溶化現象，第34回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 489-490, 2023.
- 6) 樋口壮太郎，東海林俊吉，為田一雄：焼却施設の稼働実態調査（排ガス編），第31回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 279-280, 2020.
- 7) 向山 和晃，黄 仁姫，松尾 孝之，松藤 敏彦：アンケート調査および飛灰分析によるごみ焼却排ガス中酸性ガス乾式処理の機構解明，第27回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 357-358, 2016.
- 8) 野馬幸生，貴田晶子：最終処分場におけるカルシウムスケール生成の予測，廃棄物学会論文誌，Vol. 9, No. 5, pp. 215-223, 1998.
- 9) 堀井安雄：高濃度浸出水処理技術の現状と課題，廃棄物資源循環学会誌，Vol. 26, No. 1, pp. 35-46. 2015.
- 10) Ishii, K., Sato, M., and Ochiai, S.: Prediction of leachate quantity and quality from a landfill site by the long short-term memory model, Journal of Environmental Management, Vol. 310, pp. 1-9, 2022.
- 11) 石森洋行，永元加奈美，石垣智基，山田正人：特別管理廃棄物埋立層からの高濃度浸出水の挙動を予測するための数理モデルと校正パラメータの取得方法，およびカラム溶出試験に基づくモデル検証，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol. 33, pp. 39-53, 2022.
- 12) 為田一雄，宋雨霖，伊藤智祥，李南勲，樋口壮太郎：浸出水中のCl⁻濃度予測手法の開発に関する研究，第29回廃棄物資源循環学会研究発表会，2017. pp. 519-525, 2018.
- 13) 喜多山周平，谷垣信宏，福田尚倫，中田谷直広，坂元真理子，重政祥子，大地佐智子，清水俊樹，遠藤雄樹，藤原大，森岡泰樹，清水正也：廃棄物焼却施設におけるCCUS技術の開発状況，廃棄物資源循環学会誌，Vol. 36, No. 1, pp. 26-36, 2025.
- 14) 久保田洋，繁泉恒河，肴倉宏史，佐藤研一：焼却主灰早期安定化のための散水処理と鉛不溶化処理の組み合わせ検討，廃棄物資源循環学会誌，Vol. 30, pp. 48-61, 2019.
- 15) 瀬戸山晴哉：焼却残渣炭酸化の浸出水中Ca濃度に与える効果，宮崎大学工学部 工学科 土木環境工学プログラム卒業論文，2025.
- 16) 山崎直人：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，宮崎大学工学部土木環境工学科卒業論文，2018.
- 17) 土手裕，関戸知雄：易溶解性物質溶出モデルのキレート処理物への適用性の検討，宮崎大学工学部紀要（投稿中）
- 18) 名富大峨：セメント固化体からの易溶解性物質溶出量予測モデルの開発，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2022.
- 19) 土手裕，関戸知雄：カラム試験によるセメント固化飛灰からの塩素溶出量予測，宮崎大学工学部紀要（投稿中）

浸出水中の塩素濃度予測

土手 裕^{a)}・関戸 知雄^{b)}

Prediction of chlorine concentrations in leachate

Yutaka DOTE^{a)}, Tomoo SEKITO^{b)}

Abstract

The objective of this study was to predict the temporal change in chlorine concentrations in leachate generated from the landfill site, Eco Clean Plaza Miyazaki. Leaching tests and serial batch tests were conducted using bottom ash and chelate-treated fly ash, and tank leaching tests using cubic specimens. Chlorine concentration in leachate could be predicted using the leaching rates from bottom ash, chelate-treated fly ash, and flexible container packed fly ash, and operational data such as the landfilled amount of bottom ash, chelated fly ash, and flexible container packed fly ash, and the coverage of the surface area of landfill compartment. It was found that without leachate volume control, it took 19 years after landfill completion to meeting the chlorine concentration level (CCL) in leachate that allowed the leachate to be discharged into the sewer system without dilution of leachate. Furthermore, no leachate volume control could shorten the time to meet CCL by 24 years compared to leachate volume control. Although landfilling 1m-length cube of chelate-treated fly ash could shorten the time to meet CCL, treating chelated fly ash outside the landfill site would be more effective to shorten the time to meet CCL.

Keywords: Bottom ash, Chelate-treated fly ash, Chlorine concentrations, Leachate, Prediction

1. はじめに

環境庁の調査によると、令和5年での一般廃棄物の最終処分量は319万トンであり、そのうち焼却残渣量は250万トンに達し、最終処分量に占める焼却残渣の割合は78%にも及んでいる¹⁾。特に、焼却残渣中の主灰には2.8~40g/kg-wet、飛灰には130~170g/kg-wetのClが含まれているため²⁾、浸出水中のCl濃度は平均8,820mg/Lと高濃度であることが報告されている³⁾。このような高濃度の浸出水中は、農作物、生態系への被害など浸出水処理水の放流先で塩害を発生させる⁴⁾。そのため、浸出水処理における脱塩や希釈処理が行われている。

宮崎市の一般廃棄物最終処分場であるエコクリーンプラザみやざき(埋立面積41,000m²、4区画埋立)では浸出水処理水を下水道放流している。その際、Cl濃度約20,000mg/Lの浸出水原水を希釈処理して、下水道の受入基準9,500mg/Lを満足させている。最終処分場を廃止するためには、浸出水の水処理が不要になるまで浸出水濃度が低下していることが必要であり、最終処分場の廃止までの維持管理コストを見積もるためには、Cl濃度について受入基準以下になるまでの時間を予測することが重要である。

浸出水濃度予測については、湧き出し項を含む移流拡散

モデルを用いた方法⁵⁾や、埋立地をセル状に分割し、1セルからの浸出水濃度をCl含有量を用いた埋立セルピーク濃度予測式を設定することで予測⁶⁾する方法があるが、これらは、実際の処分場への適用事例が無い。また、日降水量、月埋立量、調整池中の水量、廃棄物槽内の貯蔵浸出水量、日浸出水量、浸出水質をデータとして、ニューラルネットワークモデルを用いて浸出水濃度を予測⁷⁾する方法では、廃棄物からの溶出データを用いていない。処分場を1つのボックスと捉えてClの溶出率を用いて物質収支をとる方法⁸⁾では、オープン型実処分場のデータを用いて浸出水中のCl濃度を表現できることを示したが、処分場面積が2,800m²と小さく区画埋立を行っていない処分場を対象としており、本研究で対象とするエコクリーンプラザみやざきのように区画埋立を行っている処分場への適用は検討されていない。以上のように既存の予測方法には様々な問題がある。一方、瀬戸山⁹⁾はCaについてではあるが、埋め立てられた処理飛灰からの易溶解性Caの溶出率を唯一のパラメータとして、実処分場の埋立量、浸出水量、埋立区画の被覆状態のデータから浸出水中Ca濃度の経時変化を表現した。

また、廃止までの期間を短くすることも維持管理コストの低減の観点から重要である。浸出水中の塩濃度を低下させる方法として、埋立物の体積を大きくして、埋立物重量当たりの溶出速度を低下させる方法がある。焼却飛灰は重金属等の溶出抑制のために安定化処理されるが、安定化処理方法のうちセメント固化とキレート処理は安定化処理

a) 土木環境プログラム教授

b) 土木環境プログラム准教授

物の体積を抑制することが可能である。山崎¹⁰⁾はセメント固化体の比表面積を小さくすることで塩類の溶出を抑制できることを示した。土手ら¹¹⁾は塩類溶出モデルを用いてキレート処理飛灰からの塩類溶出量を予測できることを示した。

そこで、本研究ではエコクリーンプラザみやぎを対象として、浸出水中 C1 濃度の経時変化を予測することを目的とした。また、飛灰を一边 1m の立方体に成形して埋め立てたときの浸出水濃度への影響も検討した。

2. 実験方法

2.1 用いた飛灰

C1 の浸出水予測モデルに必要な最大溶出量を求めるために、主灰については瀬戸山の卒論⁹⁾で得られた溶出溶液を C1 の分析に用いた。飛灰については、瀬戸山の卒論で採取した試料を実験に用いた。以下にその概要を示す。実験には宮崎県宮崎市の排ガスの中和处理として $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を吹き込んでい一般廃棄物焼却施設から 2024 年 5 月 17 日に提供されたキレート処理飛灰(以後、処理飛灰と呼ぶ)を乾燥し、微粉碎してビニール袋に入れペール缶で保存した。ビニール袋の 1 枚目と 2 枚目の間内にシリカゲル・ CO_2 吸収剤のペトリ皿を入れて、ビニール袋の口を縛って保存した。本研究では、この試料を乾燥して用いた。また、カラム実験には、2025 年 5 月 21 日にエコクリーンプラザみやぎで採取した飛灰を用いた。

2.2 カラム実験

2.2.1 供試体作成方法

供試体作成には一边 4 cm、6 cm、8 cm のモールドを用い、供試体をカラム実験用および分析用に作成した。供試体は飛灰に対するキレート剤の重量比が 4%、飛灰に対する水の重量比が 30% となるように混練り用の容器に飛灰と蒸留水とキレート剤((株)栗田工業、アッシュナイト S-803)を取り、自動混練り機を用いて混合を行ったあと、モールドに充填しラップをかけ、室温 25℃ で 1 週間養生した後、脱型した。分析用供試体については、脱型した供試体の粗粉碎を行い、105℃ で 7 日間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、残りの試料を微粉碎し、含有量試験、溶出試験、シリアルバッチ試験に用いた。

2.2.2 カラム実験方法

カラム実験では散水後一定時間放置し(この期間を無降雨期間と呼ぶ)、散水を行う事で無降雨期間中に供試体から溶出した C1 を回収した。測定に用いたカラムを図 1 に示す。カラムはアクリル製で、断面が供試体の長さ+4 cm の長さの正方形である。カラムはカラム本体、底板、排水用パイプで構成されている。直径 2 mm のガラスビーズを 2

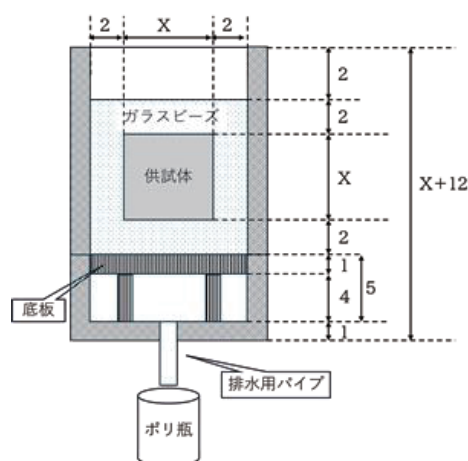


図 1. カラム実験装置の概要 (寸法の単位: cm)

cm の厚さになるように底板の上に敷き、供試体を設置し、ガラスビーズを供試体の上面 2 cm までビーズを充填させた。底板には直径 1 cm の穴が複数開いており、ビーズが流れないように網を張った。散水方法は、4cm 供試体に 190 mL、6 cm 供試体に 310mL、8cm 供試体に 460mL (いずれも充填したガラスビーズ層の空隙量相当) の蒸留水を供試体の真上からゆっくりと加えた。蒸留水がある程度排水されたことを確認し次の散水を行い、この作業を合計 3 回行った。カラムからの排水がなくなると(概ね 1 時間程度)、排水の入ったポリ瓶を回収し、カラム上部をラップで覆い、カラム下部の排水チューブをピンチコックで止めた。散水頻度は 1 日 1 回、2 日連続で行い、5 日間放置(無降雨期間 5 日)し、37 日目まで行った。散水期間は 1 日目の散水は供試体周辺空隙を蒸留水で満たすことを目的とし、それ以降の散水は、空隙に溜まっている濃度の高い溶液を洗い流すとともに供試体周辺の空隙内の溶液を蒸留水に交換することを目的としている。ポリ瓶に回収した排水は 0.45 μm 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。残った溶液の EC および pH を測定した。ろ液に濃硝酸を 0.5% 加えて保存した。

2.3 試験方法

2.3.1 含有量試験

含有量分解は、試料 1g、蒸留水 25ml、濃硝酸 2.5ml を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 5 分間煮沸し、冷却した。その後、ガラス繊維織紙 (GF/B) を用いて全量吸引ろ過し、100ml にメスアップし、ポリ瓶に保存した。含有量試験の反復回数は 3 回とした。

2.3.2 溶出試験

溶出試験は、L/S=10、200、300、400 の条件でポリ瓶に試料と蒸留水を取り、200rpm で 6 時間振とう後に約 5 分

間静置し、上澄みを $0.45\mu\text{m}$ 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。残った上澄みの pH と EC を測定した。濃硝酸をろ液に対して 0.5% 加えてポリ瓶に入れ、保存した。溶出試験の反復回数は 3 回とした。

2.3.3 シリアルバッチ試験

遠心分離管に試料 10g と蒸留水を 300ml 取り、200rpm で 6 時間振とう後、5000G で 10 分間遠心分離を行った。遠心管の上澄み液を回収し、回収した上澄みの容積を測定した後 $0.45\mu\text{m}$ メンブランフィルターを用いてろ過し、濃硝酸をろ液に対して 0.5% 加えてポリ瓶に入れ、保存した。固形物の残っている遠心管に 1 回目と同量の蒸留水を加え、上記と同様の操作を行った。これを繰り返して合計 4 回の溶出操作を行った。溶出試験の反復回数は 3 回とした。

2.3.4 分析方法

Cl 濃度はイオンクロマトグラフィー (Thermo Fisher SCIENTIFIC Inuvion 250351090、カラム AS4A-SC、溶離液 Na_2CO_3 1.8mol/L / NaHCO_3 1.7mol/L) を用いて分析した。空隙率は粗粉碎した試料のうち約 1cm 程度のものを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。空隙率測定の反復回数は 3 回とした。

3. 立方体溶出モデル

表面溶解支配部分となる供試体の表面近傍 (以後、表面溶解領域と呼ぶ) において溶出速度がその領域での含有量に比例する表面溶解モデルと通常の拡散モデルを組み合わせた名富¹²⁾ のモデルを用いた。立方体での表面溶解領域の体積 (表面溶解領域体積) を V とすると、立方体供試体の一辺の長さを $L(\text{m})$ 、表面溶解領域厚さを $\delta(\text{m})$ として次式で表現できる。

$$V = L^3 - (L - 2\delta)^3 \quad (5)$$

よって、立方体の M_s は次式で表される。

$$M_s = \frac{\rho V Q_0}{W} (1 - e^{-kt}) \quad (6)$$

ここで、 $M_s(\text{mg/kg})$ は供試体重量当たりの累積表面溶解溶出量、 ρ は供試体密度 (kg/m^3)、 W は供試体重量 (kg)、 Q_0 は可溶性含有量 (mg/kg)、 k は表面溶解速度定数 ($1/\text{s}$) である。

拡散モデルは、図 2 のように立方体の中心から x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ 2 分割し、得られた 1/8 立方体に対して三次元の拡散方程式である式 (7) を以下の初期条件、境界条件で差分法を用いて解いた。ここで C は濃度 (mg/m^3)、 D は拡散係数 (m^2/s)、 C_0 は初期濃度 (mg/m^3) (可溶性含有量に供試体密度を乗じて空隙率で除した値) である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (7)$$

初期条件 : $t = 0, 0 \leq x \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq x \leq \frac{L}{2}; C = 0$

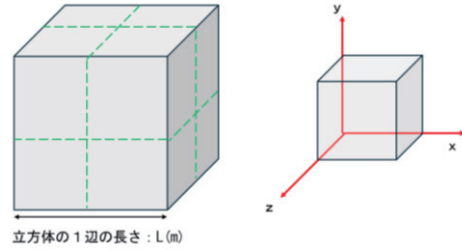


図 2. 1/8 立方体の図

: $t = 0, 0 \leq y \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq y \leq \frac{L}{2}; C = 0$

: $t = 0, 0 \leq z \leq \frac{L}{2} - \delta; C = C_0$

: $t = 0, \frac{L}{2} - \delta \leq z \leq \frac{L}{2}; C = 0$

境界条件 : $x = \frac{L}{2}; C = 0$

: $x = 0; \frac{dC}{dx} = 0$

: $y = \frac{L}{2}; C = 0$

: $y = 0; \frac{dC}{dy} = 0$

: $z = \frac{L}{2}; C = 0$

: $z = 0; \frac{dC}{dz} = 0$

拡散累積溶出量は、1/8 供試体の 3 面ある暴露面のうち 1 暴露面 ($(x, y, L/2)$ 面) における各格子点での溶出フラックスの合計量に立方体の表面積を乗じることで計算できる。 $(x, y, L/2)$ 面での溶出量は z 軸方向の溶出量なので、任意の時間格子 j での濃度差は式 (8) で表現される。

$$C_{ix, iy, N_{zj}} - C_{ix, iy, N_z - 1, j} \quad (8)$$

ここで ix, iy は x 座標、 y 座標の格子点、 N_z は $z=L/2$ での格子点を表す。拡散累積溶出量 $M_D(\text{mg/kg})$ は次式で求めることができる。

$$M_D = \frac{A_c \theta}{W} \times \sum_{j=1}^j \left[\sum_{ix=1, iy=1}^{N_x, N_y} \left\{ \frac{-D \times (C_{ix, iy, N_{zj}} - C_{ix, iy, N_z - 1, j})}{(N+1)^2 \Delta x} \right\} \times \Delta t \right] \quad \dots (9)$$

ここで A_c は立方体の全面積 (m^2)、 θ は空隙率 (-)、 N_x, N_y は $x = L/2, y = L/2$ での格子点を表す。また、 N は x, y, z 軸方向の空間分割数であり、1 暴露面の全格子点である $(N+1)^2$ で除することで、1 格子点当たりの平均的なフラックスを表している。なお、 $(L/2, y, L/2)$ 、 $(x, L/2, L/2)$ の線 (辺の上) では C は 0 (境界条件) となるので濃度差は 0 となる。また、他の立方体と接する辺上の格子点は、その立方体と格子点を共有するので、フラックス、すなわち濃度差は $1/2$ となる。さらに、 $(0, 0, L/2)$ の点は接する 4 つの立方体と共有することになるのでフラックスすなわち濃度差は $1/4$ となる。

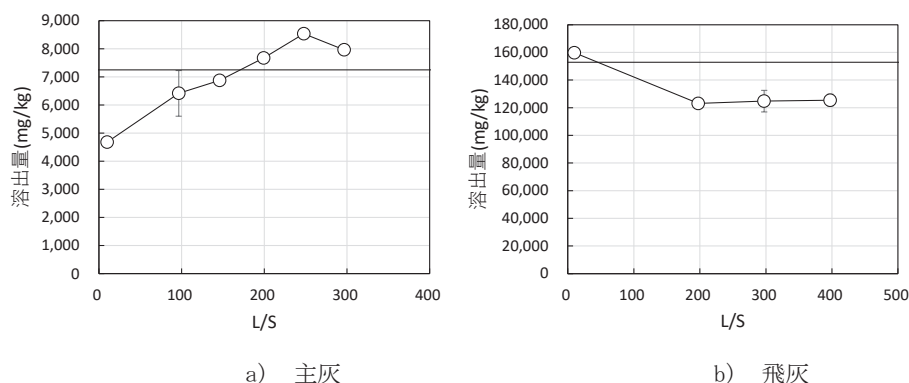


図 3. 主灰と飛灰の溶出量と L/S の関係(実線：シリアルバッチ溶出量)

表 2. 飛灰のフレコン梱包・開梱の時期および埋立区画

年度	H18	H19	H20	H21	H22	H23
A 区画	フレコン埋立 →H27 に A 区画 で開梱	フレコン埋立 →H27 に A・B 区 画で開梱	フレコン埋立 →H27 に B 区画 で開梱		フレコン埋立 →H27 に B 区画 で開梱	フレコン埋立 →H27 に B 区画 で開梱
B 区画			フレコン埋立 →H26 に B 区画 で開梱	フレコン埋立 →H26 に B・D 区 画で開梱	フレコン埋立 →H26 に D 区画 で開梱	フレコン埋立 →H25 に D 区画 で開梱

4. 結果と考察

4.1 含有量、シリアルバッチ試験溶出量

表 1 に主灰と飛灰の CL 含有量、シリアルバッチ溶出量、シリアルバッチ溶出率を示す。飛灰の CL 含有量は、主灰の含有量の 21 倍であった。シリアルバッチ溶出率は、主灰、飛灰とも 92% 以上で、含まれている CL は非常に溶出しやすい形態であった。

4.2 溶出試験結果

図 3 に主灰と飛灰の CL 溶出量と L/S の関係を示す。図中の実線はシリアルバッチ溶出量を示す。主灰は L/S が大きくなると溶出量は増加し、L/S=200 以降はほぼ一定となった (L/S=200 以降の平均溶出量 8,060 mg/g)。飛灰は L/S が大きくなると溶出量は減少し、L/S=200 以降は一定となった。浸出水溶出濃度予測に用いる可溶性含有量は、主灰の場合は L/S=200 以降の平均値がシリアルバッチ溶出量よりも大きいことから、主灰の可溶性含有量として 8,060 mg/kg を用いることとした。また、飛灰についてはシリアルバッチ溶出量の方が飛灰の L/S=10~400 の平均の溶出量 (133,000 mg/kg) よりも大きいことから、飛灰の可溶性含有量としてシリアルバッチ溶出量 153,000 mg/kg を用いることとした。

4.3 浸出水濃度予測モデルのパラメータの決定

4.3.1 処分場の概要と浸出水濃度計算方法

表 1. 主灰と飛灰の CL の含有量、シリアルバッチ溶出量、シリアルバッチ溶出率

	主灰		飛灰	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
全含有量 (mg/kg)	7,700	961	164,000	2,820
シリアルバッチ溶出量 (mg/kg)	7,250	67	153,000	6,030
シリアルバッチ溶出率 (%)	94.2	-	92.9	-

本研究で対象とした処分場 (エコクリーンプラザみやぎ) では H17 年度の 4 月から埋立を開始し、R17 年度に埋め立てを終了する予定である。埋立地は A、B、C、D の 4 区画に分かれ区画面積はそれぞれ 9,000m²、12,500m²、8,000m²、11,500m² である。H24 年度まで主灰を溶融した溶融固化物と処理飛灰を埋め立てていたが、H25 年度から溶融処理をやめたことにより、溶融固化物の代わりに主灰の埋立が開始された。埋立区画表面の状況として中間覆土の他に、浸出水量を抑えるために不透水性のブルーシートや UV シート (以後これらシートと呼ぶ) などで埋立作業の行われていない区画を覆っている場合があった。埋立中の区画でも埋立作業を行っていない部分をシートで覆っていることがあった。また、当該埋立地では CL 濃度が浸出水設計値よりも超過したため、表 2 に示すとおり H18 年度から H23 年度の間はフレコン (1m³) に飛灰を梱包して埋め立て、H25 年度から H27 年度にかけて開梱した。CL については、H27 年度以降は脱塩処理は行わず、浸出水を浸出水調整池で稀釈して 9,500mg/L 以下にして下水道に放流している。

浸出水発生係数は、宮崎市から提供された R4.4 月から

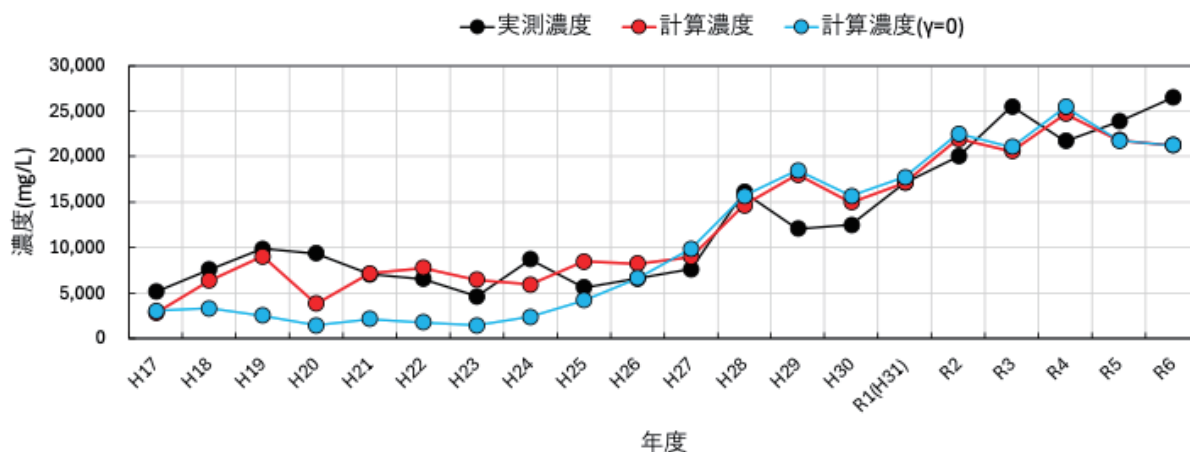


図 3. R6 年度までの浸出水中 C1 濃度の実測値と計算値

9 月の全区画の降水量に対する浸出水量の比として算出した 0.39 とした。これは、一部の区画ではシートによる被覆が行われていたため、不確実性の大きい数値である。宮崎市から提供されたデータは月ごとの埋立量（主灰、処理飛灰ごと）、埋立作業区画、シートによる被覆状況、浸出水中 CL 濃度、および年降水量である。

浸出水 CL 濃度を予測するにあたり、埋立作業の行われていない区画については、シートによる被覆が行われていれば浸出水発生係数を 0 とし、被覆が行われていない場合は 0.39 とした。埋立作業が行われている区画で一部シートによる被覆が行われている場合であっても浸出水発生係数は 0.39 とした。以下の式で区画ごとの年間浸出水発生量を求めた。

区画ごと年間浸出水発生量 (m^3) = 年降水量 (m) $\times$ 区画面積 (m^2) $\times$ 区画ごとの雨水浸透月割合 $\times$ 浸出水発生係数

なお、雨水浸透月割合は 12 か月のうち雨水が埋立区画に浸透する月数（すなわち、区画全面がシートで被覆されていない月数）の割合である。1 年間の浸出水発生量は、区画ごと年間浸出水発生量の全区画の合計量で求めた。月ごとの埋立量は処理飛灰、主灰の埋立作業を行っている区画数で除して各区画に均等に割り振った。溶融固化物から C1 溶出は生じないとした。

本研究では、瀬戸山⁹⁾が提案した当該年度に埋め立てられた主灰・飛灰の可溶性含有量から一定量の C1 が溶出するとの考え方に則り、主灰からの溶出率を α 、飛灰からの溶出率を β とし、各区画の年間埋立量に (1-含水率) と可溶性含有量と溶出率を乗じることで得られた各区画での溶出量の合計量を 1 年間の溶出量とした。(1-含水率) を乗じる理由は、可溶性含有量は乾燥重量当たりであり、埋立量は湿重量であるため、埋立量を乾燥重量に変換するためである。含水率は焼却施設から排出される実際の主灰・飛灰の値を用いた。また、フレコン梱包飛灰からの溶出率を γ とした。開梱された飛灰は、開梱されるまでに

フレコン内に残存した C1 量が開梱された区画に埋め立てられたとして溶出率 β を用いて溶出量を求めた。1 年間の平均浸出水濃度は 1 年間の溶出量を 1 年間の浸出水量で除することで求めた。パラメータは濃度の実測値と計算値の残差自乗和が最小になるようにエクセルのソルバーを用いて求めた。

4.3.2 溶出率の決定と予測方法の評価

図 3 に埋立が開始された H17 年度から R6 年度までの浸出水中 C1 濃度の実測値と計算値を示す。決定されたパラメータは、 $\alpha=0.119$ 、 $\beta=0.043$ 、 $\gamma=0.053$ であった。実測値と計算値の決定係数 R^2 は 0.82 であり、実測値と計算値は良い一致を示した。フレコン梱包飛灰溶出率を 0% とし、 α 、 β を求め計算した濃度も図に示すが、フレコン梱包期間の H18 年度から H24 年度の計算値が実測値よりも低くなり、フレコン梱包飛灰からの溶出を考慮することは妥当といえた。フレコン梱包飛灰からの溶出率の方が飛灰溶出率よりも小さくなると予想されたが、結果としてフレコン梱包飛灰溶出率の方が若干大きくなった。この原因として、可溶性含有量を R4 年の飛灰を用いて求めているので、埋立開始当初の可溶性含有量と異なっている可能性や、埋立中に飛灰が凝結して、溶出率が低くなった可能性が考えられた。

以上から、主灰、処理飛灰およびフレコン梱包飛灰からの C1 の溶出のみを考慮して、C1 溶出率を用いることで、主灰、処理飛灰埋立量、埋立区画の被覆状況のデータから浸出水中の年平均 C1 濃度を表現できた。

4.4 浸出水濃度予測結果

4.4.1 長期予測方法

宮崎市では、前述したとおり C1 については浸出水を 9,500mg/L 以下に調整池で希釈して下水道放流している

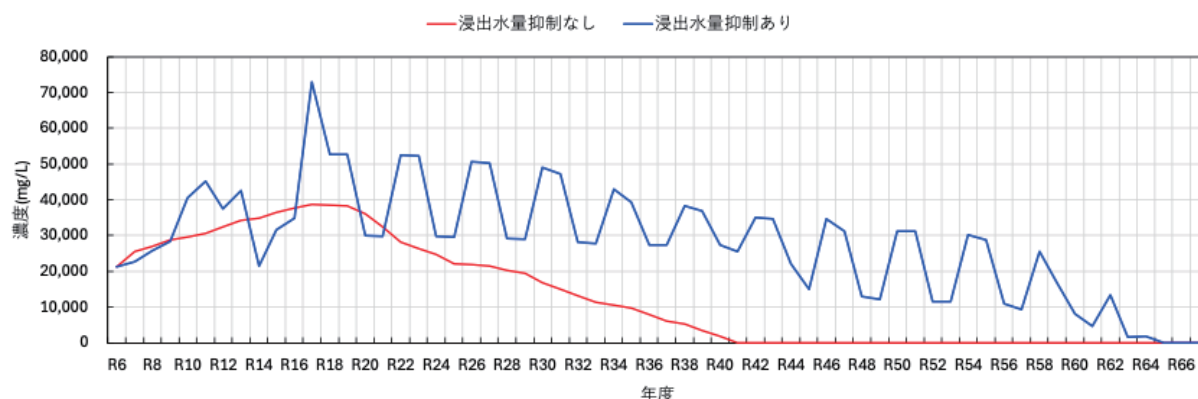


図4. R7年度以降のC1濃度の経時変化(既存の埋立方法)

が、図3に示すとおり浸出水のC1濃度はH30年度以降増加傾向にあり、稀釈を行う調整池容量の不足が懸念されている。そこで、R7年度以降の浸出水濃度予測として、浸出水発生抑制なしの場合と、浸出水発生抑制の2つの場合についての浸出水濃度予測を行った。浸出水発生抑制ありの場合、R7年度から埋め立てが終了するR17年度までは埋立作業区画以外をシートで被覆し、R18年度以降は2区画を1セット(A・B区画とC・D区画)として2年おきにシートで被覆するものとした。浸出水発生抑制なしの場合は、R7年度以降シートによる被覆を行わないとした。

4.4.2 浸出水発生抑制なしの場合

図4にR7年度以降の浸出水発生抑制なしの浸出水濃度予測結果を示す。浸出水発生抑制なしの場合、C1濃度は埋立が終了するR17年度まで増加し、38,800mg/Lに達した後減少し続けR36年度には下水放流基準の9,500mg/Lを下回った。希釈せずに下水道に放流できる濃度に低下するまで埋立終了後19年必要であることがわかった。

4.4.3 浸出水発生抑制ありの場合

一方、浸出水発生抑制ありの場合のC1濃度についても図4に示すが、R17年度で72,900 mg/Lとなった後、2年おきに増加と減少を繰り返して徐々に減少し、R60年度には下水放流基準の9,500mg/Lを下回った。希釈せずに下水道に放流できるまで埋立終了後43年必要であることがわかった。

浸出水発生抑制ありの場合、C1濃度がR17年度で大きく異なる原因は、R16年度とR17年度の浸出水量と溶出量の違いにある。R16年度の浸出水量は9,230m³でR17年度は6,610 m³であり、0.67倍減少している。これは、暴露している区画面積がR16年度が12,500m²でR17年度が9,000m²であるため、R17年度のほうが浸出水量が小さくなっている。R16年度の溶出量は 3.2×10^{11} mgでR17年度は 4.9×10^{11} mgであり、1.5倍増加している。よって、R16年度からR17年度にかけて溶出量が1.5倍増加し、浸出水量が0.57倍減少しているため、溶出量/浸出水量で計算される

C1濃度が2倍増加している。

浸出水発生抑制ありの場合、R18年度～R56年度までで高い値と低い値で約2倍の差がある。濃度は溶出量と浸出水量で決定され、浸出水量はR18年度～R56年度の間14,400m³～15,900m³であり変動が少ない。一方、溶出量は例えば、R20年度とR21年度がC・D区画で 4.3×10^{11} mg溶出し、R22年度とR23年度はA・B区画で 8.3×10^{11} mg溶出しており、2倍増加している。このようにA・B区画の溶出量が2倍程度違うために浸出水濃度も2倍異なる。

浸出水量を抑制しない方が、抑制した場合に比べて下水放流基準を満足するまでの時間が24年短縮され、浸出水の最大濃度も抑制した場合の1/2倍に抑制できることから浸出水量を抑制しない方が良いといえた。

4.4.4 飛灰を場外処理した場合

浸出水発生抑制なしの場合に、R7年度より処理飛灰を場外処理した場合を図5に示す。参考のために図4に示した発生抑制なしの既存の埋立方法の結果も示す。飛灰を場外処理することで、R24年度(埋立終了後7年)に9,500mg/Lを下回り、既存の埋立方法と比べて12年短縮された。また、浸出水濃度は既存の埋立方法の場合の濃度よりも低くなった。

同様に浸出水発生抑制ありの場合の結果を図6に示す。灰を場外処理することで、R46年度(埋立終了後29年)に9,500mg/Lを下回り、既存の埋立方法と比べて14年短縮された。また、浸出水発生抑制有りの場合と同様に浸出水濃度は既存の埋立方法の場合の濃度よりも低くなった。

4.5 立方体で埋め立てた場合

4.5.1 拡散係数の補正

西水¹³⁾によると、カラム実験の累積溶出量はタンクリーチング試験の場合よりも遅れ、溶出モデルの拡散係数を補正することで、カラム実験の累積溶出量を表現できることが報告されている。カラム実験の画分溶出量を最小にするように拡散係数の補正係数 ϵ を求めた。なお、モデルパ

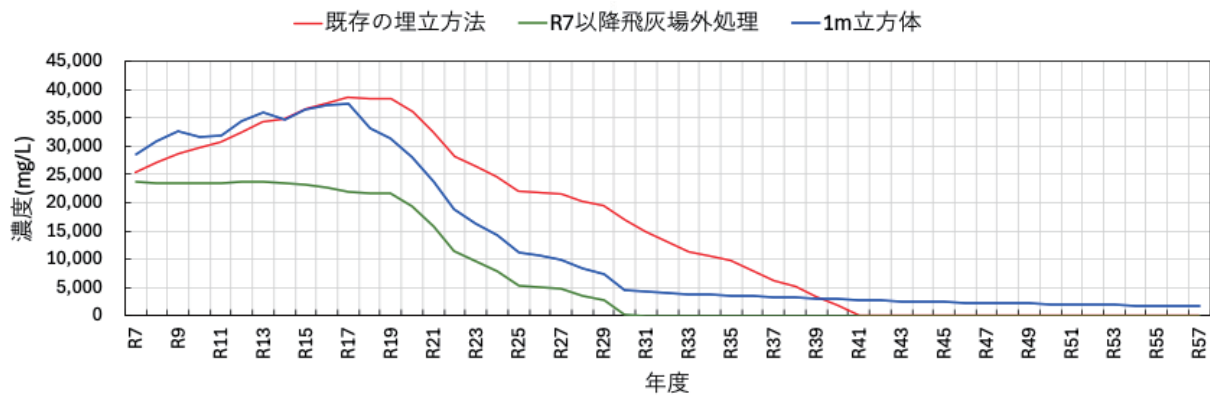


図5. R7 年度以降に飛灰を場外処理あるいは立方体形成埋立を行った場合のC1 濃度の経時変化
(浸出水発生抑制なし)

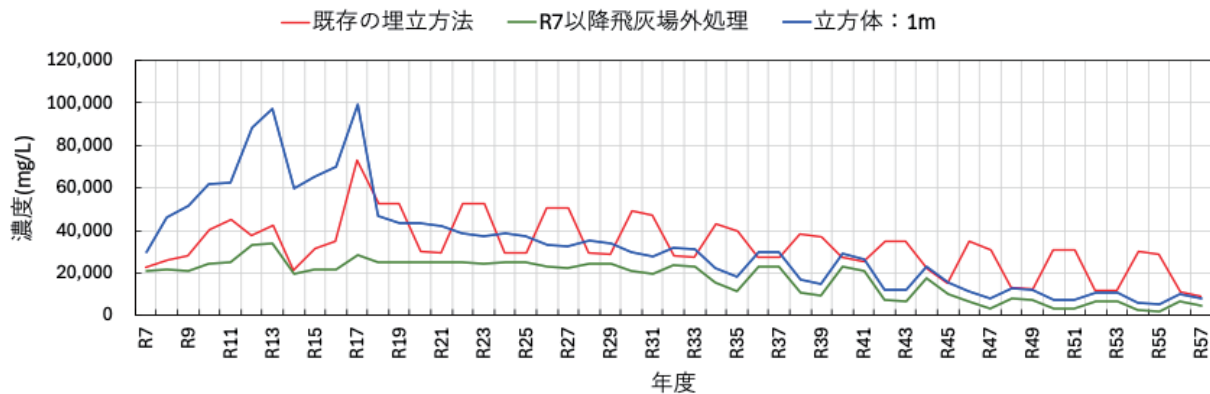


図6. R7 年度以降に飛灰を場外処理あるいは立方体形成埋立を行った場合のC1 濃度の経時変化
(浸出水発生抑制あり)

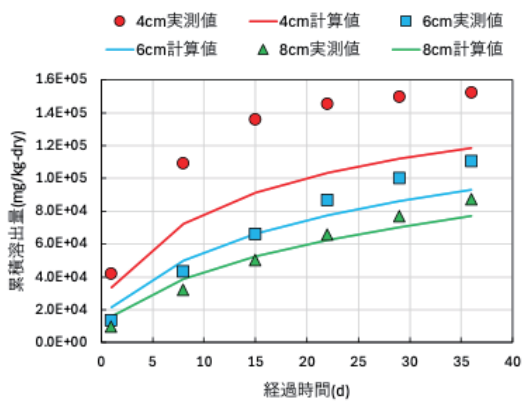


図7. カラム実験の累積溶出量の実測値と計算値

ラメータである δ 、 k 、 D は土手ら¹¹⁾ の円柱供試体タンク
リーチング試験で得られた値の平均値を用いた (表 3)。
図 7 にカラム実験の累積溶出量の実測値と計算値を、図 8
に補正係数と供試体大きさの関係を示す。4cm 供試体の実
測値と計算値の一致度は低いが、6cm 供試体と 8cm 供試
体の補正係数は同程度の値であったことから、長期溶出に
ついての補正係数は 6cm 供試体と 8cm 供試体の補正係数

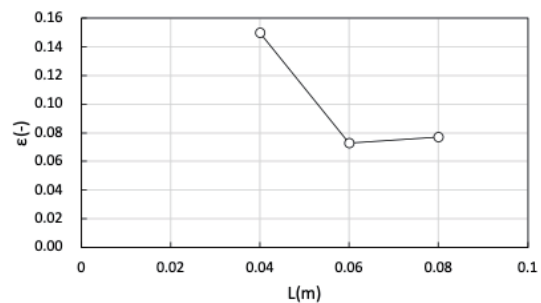


図8. 供試体の大きさと拡散係数補正係数 ε の関係

表 3. 溶出モデルパラメータ

δ (m)	k (1/s)	D (m ² /s)
7E-04	3.32E-04	3.79E-10

の平均値である 0.075 を用いることとした。

4.5.2 立方体で埋め立てた場合の浸出水濃度への影響

R7 年度から R17 年度まで飛灰を一辺 1m の立方体に成形
して埋め立てた場合の浸出水濃度も浸出水発生抑制なし
の場合と抑制ありの場合の結果もそれぞれ図 5、図 6 に示
す。1 年間の溶出量は溶出モデルから計算された埋立経過

i 年 1 年間の乾燥重量当たり溶出量に処理飛灰含水率 (14.7% (実測値)) と 1 年間の埋立量を乗ずることで求めた。浸出水発生抑制なしの場合、R28 年度 (埋立終了後 11 年) で 9,500mg/L を下回った。埋立が終了する R17 年度までは立方体で埋め立てた方が既存の埋立よりも若干高くなった。これは、立方体の溶出率を図 9 に示すが、埋立 2 年目までは立方体の溶出率が既存の埋立方法の溶出率よりも高いためである。浸出水発生抑制ありの場合、R57 年度 (埋立終了後 40 年) で 9,500mg/L を下回った。

以上のことから、飛灰を一边 1m の立方体に成形して埋め立てることで、9,500mg/L 以下になるまでの期間を短縮することが可能であることが分かった。また、短縮年数は浸出水発生抑制なしの場合 8 年、無しの場合が 2 年で浸出水発生抑制なしの方が立方体成形の効果が大きかった。

5. まとめ

本研究ではエコクリーンプラザみやざきを対象として、浸出水中 Cl 濃度の経時変化を予測することを目的とした。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 主灰、処理飛灰およびフレコン梱包飛灰からの Cl の溶出のみを考慮して、Cl 溶出率を用いることで、主灰、処理飛灰埋立量、埋立区画の被覆状況のデータから浸出水中の年平均 Cl 濃度を表現できた。
- (2) 希釈せずに下水道に放流できる濃度 (9,500mg/L) に低下するまで既存の埋め立て方法では、浸出水発生抑制なしの場合で埋立終了後 19 年、発生抑制有の場合で埋立終了後 43 年必要であることがわかった。
- (3) 飛灰を一边 1m の立方体に成形して埋め立てることで、9,500mg/L 以下になるまでの期間を短縮することが可能であることが分かった。また、短縮年数は浸出水発生抑制なしの場合 8 年、抑制有りの場合が 2 年で浸出水発生抑制なしの方が立方体成形の効果が大きかった。
- (4) R7 年度から場外処理を行った場合、既存の埋立方法と比べて 9,500mg/L 以下になるまでの期間が、浸出水発生抑制なしの場合 12 年、発生抑制ありの場合 14 年短縮された。
- (5) 浸出水濃度が 9,500mg/L 以下に低下するまでの期間を短縮するためには、浸出水発生を抑制するよりも抑制しない方が好ましい。飛灰を立方体に成形して埋め立てることも期間短縮には効果的であるが、飛灰を場外処理するほうがより効果的であるといえた。

謝辞

本研究は令和 7 年度宮崎市地域貢献学術研究助成金の助成を受けた。また、本研究を進めるにあたり、社会環境システム工学科学学生の山下涼平君の協力を得た。

参考文献

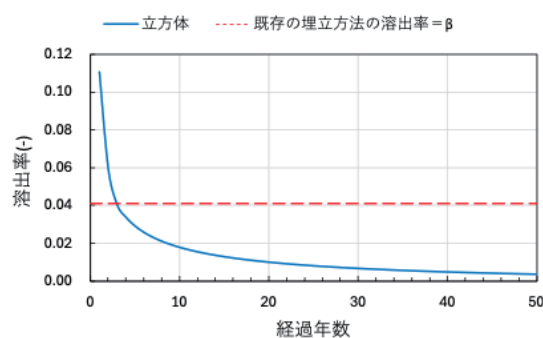


図 9. 1m 立方体の溶出率

- 1) 環境省：日本の廃棄物処理令和 5 年度版，2025.
- 2) 野馬幸生，貴田晶子：カルシウムスケールの生成におよぼす埋立焼却残渣の影響，廃棄物学会論文誌，Vol. 9，No. 7，pp. 287-295，1998.
- 3) 今岡 務，林口 昌典，山家 通宏，西嶋 渉：一般廃棄物最終処分場浸出水の水質特性とトリハロメタン生成能，土木学会論文集，No. 734/VII，p. 67-74，2003.
- 4) 柳茂，菅原隆一，高橋紀世子，葛岡勝悦，岩澤理奈，斎藤善則：一般廃棄物最終処分場浸出水及び一般廃棄物焼却灰の塩類調査 (第 2 報)，宮城県保健環境センター年報，第 25 号，pp. 66-71，2007.
- 5) 石森洋行，永元加奈美，石垣智基，山田正人：特別管理廃棄物埋立層からの高濃度浸出水の挙動を予測するための数理モデルと校正パラメータの取得方法，およびカラム溶出試験に基づくモデル検証，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol. 33，pp. 39-53，2022.
- 6) 為田 雄一，宋 雨霖，伊藤智祥，李 南勲，樋口 壮太郎：浸出水中の Cl-濃度予測手法の開発に関する研究，都市清掃，第 70 巻，第 339 号，pp. 519-525，2017.
- 7) Ishii, K., Sato, M. and Ochiai, S.: Prediction of leachate quantity and quality from a landfill site by the long short-term memory model, Journal of Environmental Management, 310, 114733, 2022.
- 8) 池田勇太，古市 徹，石井一英，藤山淳史：汚濁物質収支モデルを用いた最終処分場の安定化の判定に関する研究〜クローズドシステム処分場とオープン型処分場を対象として〜，土木学会論文集 G (環境)，Vol. 71，No. 6，pp. II_405-II_414，2015.
- 9) 瀬戸山 晴哉：焼却残渣炭酸化の浸出水中 Ca 濃度に与える効果，宮崎大学工学部土木環境工学プログラム卒業論文，2025.
- 10) 山崎直人：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，宮崎大学工学部土木環境工学科卒業論文，2018.
- 11) 土手裕，関戸知雄：易溶解性物質溶出モデルのキレート処理物への適用性の検討，宮崎大学工学部紀要 (投稿中)
- 12) 名富大峨：セメント固化体からの易溶解性物質溶出量予測モデルの開発，宮崎大学工学部社会環境システム工学科卒業論文，2022.
- 13) 土手裕，関戸知雄：カラム試験によるセメント固化飛灰からの塩素溶出量予測，宮崎大学工学部紀要 (投稿中)

養豚廃水からの N、P、K 回収運転条件の処理性能および肥効成分への影響

土手 裕^{a)}・関戸 知雄^{b)}

Effect of operating conditions for N, P, and K recovery from swine wastewater on treatment performance and fertilizer components

Yutaka DOTE^{a)}, Tomoo SEKITO^{b)}

Abstract

This study aimed to clarify the effect of operating conditions for N, P, and K recovery from swine wastewater with batch-type reactors on treatment performance and fertilizer components. Batch experiments were conducted under nine operating conditions (agitation intensity (AI) and agitation time (AT)), each in triplicate. For treatment performance, the effect of operating conditions was not significant for the yield of air-dried matter (ADM) and yield of raw water for biological treatment (RWBT): the sedimentation ratio decreased with increase in AI. For element recovery rate from raw water to ADM, the effect of operating conditions was not significant for N and P. The recovery rate of K increased with increase in AI. The effect of operating conditions was not significant for total concentration for N, P, and K. For citric acid-soluble content in ADM, the effect of operating conditions was not significant for P. Although citric acid-soluble content of N and K increased with increase in AI, the variance of mean values was much small so that the effect of AI would be small. Material balance result indicated that the loss of ammonium in reaction/settlement process and air-dry process by evaporation of ammonia would be negligible. Total N concentration in RWBT could meet the effluent standard for N. The load of P in RWBT to biological treatment was light. Thus, it was expected that biological treatment could reduce P concentration in effluent to meet the effluent standard for P. Furthermore, the citric acid-soluble contents of N, P, and K in ADM satisfied the official standards for fertilizers, demonstrating that the obtained matter could be utilized as a fertilizer.

Keywords: Batch-type operating conditions, Ammonium, Phosphorus, Potassium, Swine wastewater, Fertilizer components

1. はじめに

養豚廃水には高濃度の窒素(N)、りん(P)、カリウム(K)が含まれており、平均でN濃度が500~6000mg/L、K濃度が400~2000mg/L¹⁾、P濃度が18~425mg/L²⁾との報告がある。これらは富栄養化をもたらす原因となるため、水質汚濁防止法により生活環境項目において、内湾に河川等を通じて排水が流入する地域に係るN・Pの排水基準として一律排水基準(窒素:120mg/L、リン:16mg/L)が定められている。しかし、達成させることが著しく困難と認められる畜産農業等の一定の業種に対しては、暫定排水基準(窒素:130mg/L、リン:22mg/L)が設定されており³⁾、一律排水基準を満足させる処理方法の開発が急務である。一方でN、P、Kは化学肥料原料として用いられているが、世界的な人口増加や、新興国の経済成長、所得水準の向上により食糧需要の増加が見込まれている⁴⁾。人口の増加に対応し

た農業生産によってN、P、Kの需要が増加することは明らかであり、リン、カリウム鉱石の世界的な枯渇が懸念⁸⁾されている。一方で、日本はリン、カリウム鉱石が産出されず、それら消費量のほぼ全量を輸入に頼っている^{5,6)}。また、日本では、主要な供給先国からの輸出の停滞やウクライナ情勢の影響等により、供給途絶のリスクが顕在化しているとして、2022年12月に公表された「肥料に係る安定供給確保を図るための取り組み方針」においてリン酸アンモニウムが支援対象とする肥料原料に指定された⁷⁾。したがって、日本国内でP、K資源を再資源化する必要がある。以上のことから、養豚廃水からN、P、Kを回収することは水環境保全および肥料原料の日本国内での資源循環確立の観点から重要である。

養豚廃水からN、P、Kを回収する方法にリンと窒素をリン酸アンモニウムマグネシウム(MgNH_4PO_4)として回収するMAP法とリンとカリウムをリン酸カリウムマグネシウム(MgKPO_4)として回収するMPP法が検討されているが^{8~10)}、回収に最適なpHが異なることからMAPおよびMPPの同時回収に注目した研究は少ない。筆者らは、P残存濃度

a) 土木環境プログラム教授

b) 土木環境プログラム准教授

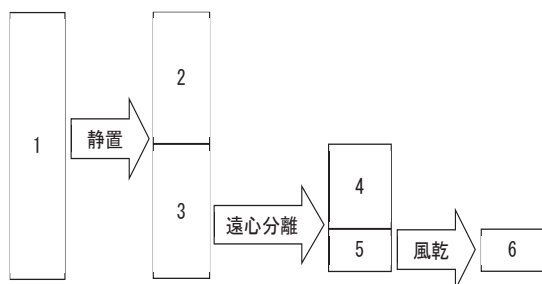


図1. 反応終了後の試料処理プロセス

1. 反応溶液, 2. 静置後上澄水, 3. 静置後沈殿物, 4. 遠心後上澄水, 5. 遠心後沈殿物, 6. 風乾物

を排水基準以下に保ち、79%以上の高い回収率でPとKとNを同時に回収できる条件($\text{pH}=10.5$ $\text{P}/(\text{N}+\text{K})=1.3$ 、 $\text{Mg}/\text{P}=1.2$)を決定した¹¹⁾。しかし、実際の回収プロセスを想定した運転条件については検討されていない。

本研究では、実際の回収プロセスとして、回分式反応プロセス、固液分離プロセス、回収物の風乾プロセスを想定し、回分式反応槽の運転条件が固液分離液中の濃度や風乾物の回収率・肥効成分などへの影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 養豚廃水および原水の調整

実験に用いた養豚廃水は、宮崎県内の養豚場から高分子凝集剤（ウォーターエージェンシー、ヘルスブロック C-808L）を使用し、機械分離による固液分離後の養豚廃水を採取した。溶存態濃度測定用に養豚廃水を $0.45\mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過した。全濃度用試料は養豚廃水 50mL に濃硝酸 2mL を加えて冷蔵庫で保存し、後日、 $0.45\mu\text{m}$ のメンブランフィルターを用いて吸引ろ過した。回収実験のための原水は、原水中の $\text{P}/(\text{N}+\text{K})$ ($\text{NH}_4\text{-N}$ と K の合計に対する P のモル比。以後、 $\text{NH}_4\text{-N}$ を N と表記する。) が 1.3、 Mg/P が 1.2 となるように H_3PO_4 溶液 (45,000mg/L)、 MgCl_2 溶液 (25,000mg/L) を養豚廃水に加えて調整した後、冷蔵庫で保存した。養豚廃水と同じ方法で原水的全濃度分析用試料と溶存態濃度分析試料を得た。

2.2 回収実験

2.2.1 想定プロセスと実験装置

本実験で想定するプロセスを図1に示す。原水を回分式反応槽で pH を一定に保ちながら攪拌し所定の反応時間後静置した（反応・静置プロセスと呼ぶ）。静置後、上澄水を回収し、残った沈殿物を遠心分離した（遠心分離プロセスと呼ぶ）。遠心分離後に上澄水を回収し、残った沈殿物を風乾し（風乾プロセスと呼ぶ）、風乾物を得た。静置後上澄水と遠心後上澄水は実プロセスでは生物処理されるので、本論文ではこの二つの上澄水を合わせたものを生物

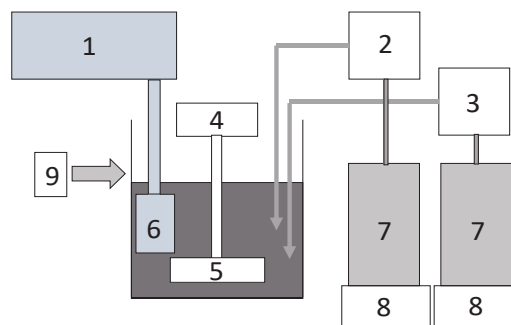


図2. 実験装置概要図

1. pH調整器, 2. pH制御用ポンプ, 3. 添加用ポンプ, 4. 攪拌器, 5. 攪拌翼, 6. pH電極, 7. 5MのNaOH, 8. はかり, 9. 反応槽

処理原水と呼ぶ。以下に、具体的な実験手順を示す。回分式反応装置の概略を図2に示す。反応槽には2L ビーカーを用い、攪拌には攪拌機と長方形攪拌翼を用いた。pH調整前の反応槽へのNaOH添加は添加用ポンプ3を用い、反応槽のpHコントロールはpH調整器と5MのNaOH制御用ポンプ2を用いた。添加した5MのNaOH量を測定・記録するためにデジタルはかりを用いた。検討する攪拌強度（G値で表す）の3条件（G値 31.4sec^{-1} （攪拌速度:50rpm、反応体積:1.5L）、G値 71sec^{-1} （攪拌速度:75rpm、反応体積:1L）、G値 109sec^{-1} （攪拌速度:100rpm、反応体積1.0L））で反復回数3回の回分式反応実験を行った。所定量の原水を100rpmで攪拌しながら5MのNaOHを添加しpHを約10に調整した後、設定pHを10.5で制御を開始し、pHが10.45に達してから所定時間（0.5、1、2時間）攪拌を継続した。このpHが10.45に達してからの攪拌している時間を攪拌時間と呼ぶこととする。攪拌終了後1時間静置した後、サイフォンを使って反応槽から沈殿物界面の10mm上まで上澄水を処理水受けに回収した。また、回収した上澄水の重量と反応槽に残った沈殿物の重量を測定した。

静置後上澄水中の溶存態濃度分析用に、回収した上澄水を $0.45\mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過し、ろ液約100mLに濃硝酸を0.5mL加えて冷蔵庫で保管した。静置後上澄水中の全濃度試料は、回収した上澄水をよく攪拌しながらポリ瓶に取った後、養豚廃水的全濃度試料と同じ処理を行ない分析用試料を得た。静置後沈殿物の全濃度測定用に反応槽中の沈殿物約30g取り、蒸留水を約20mL加え、養豚廃水中の全濃度試料と同じ処理を行った。沈殿物の含水率を測定するために、反応槽内の沈殿物をよく混合し、ビーカーに約30g程度取り、 105°C で48時間乾燥させた。

反応槽に残っている沈殿物をよく混合して遠心管に約400g取り、5,000Gで5分間遠心分離を行った後、上澄水をビーカーに移し、上澄水の重量と遠心管に残った残渣重量を測定した。遠心後上澄水中の溶存態濃度分析用に、回収した上澄水を $0.45\mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過し、ろ液約100mLに濃硝酸を0.5mL加えて冷蔵庫で保管し

表 2. 養豚廃水および原水の分析結果 (mg/L)

		pH	K	Mg	P	NH ₄ -N	P/(N+K)*	Mg/P*
養豚廃水	全濃度	8.33	689	28.4	42.7	890	—	—
	溶存態濃度	—	694	17.9	35.4	815	—	—
原水	全濃度	2.96	587	2,120	2,510	612	—	—
	溶存態濃度	—	581	2,210	2,490	576	1.2	1.1

* : モル比

表 2. 処理性能指標

	F 値	G 値の回帰係数の p 値	攪拌時間の回帰係数の p 値	平均	最小	最大
沈降率 (%)	0.0590	0.0234	0.4639	60.7	55.8	70.2
風乾物収率 (g/L-原水)	0.9961	0.9302	0.9979	20.9	20.4	22.1
生物処理原水収率 (L/L-原水)	0.4865	0.2963	0.5691	0.944	0.912	0.958

た。ビーカー中の溶液をよく混合して全濃度測定用に約 50g 取り、養豚廃水の全濃度試料と同じ処理を行った。遠心分離後の沈殿物の全濃度測定用に約 20g 取り、蒸留水を 30mL 程度加え、養豚廃水の全濃度試料と同じ処理を行った。

さらに、風乾試料を得るために、遠心管内の沈殿物をよく混合し、沈殿物約 40g をプラスチックバットに取り、室温で乾燥（風乾）した。乾燥は直前の重量に対する減少重量が 0.5%以下になるまで継続した。風乾試料を粉碎し、風乾試料の全含有量分析のために風乾試料約 0.5g をコニカルビーカーに取り、蒸留水 10mL、濃硝酸 1.0mL を加え、よく攪拌した後 0.45 μ m のメンブランフィルターを用い吸引ろ過を行い、分析用試料を得た。風乾物の含水率については粉碎した風乾試料を 105℃で 1 日乾燥させて測定した。

2.2.2 分析方法

風乾物 1.00g を 500mL のポリ瓶に加え、2%クエン酸 150mL を加えポリ瓶を密閉後、30℃に設定した恒温振とう機で 40rpm で 1 時間振とうした。振とう終了後、ポリ瓶に蒸留水を 100mL 加えてよく混合した。0.45 μ m のメンブランフィルターを用いてろ過して、ポリ瓶にろ液を 50mL 取り濃硝酸 0.25mL を加えたものを分析試料とした。

静置後上澄水全濃度、および溶存態濃度、静置後沈殿物、遠心後上澄水全濃度、および溶存態濃度、遠心後沈殿物、風乾物の全含有量および可溶性含有量について P を ICP AES (SIMADZU、ICPS 8100) で、K と Mg をフレイム原子吸光光度法 (日立、Z2000) で分析した。また N はインドフェノール青吸光光度法で分析した。

3. 結果と考察

3.1 養豚廃水および原水

養豚廃水および原水の分析結果を表 1 に示す。N、P、K の溶存態濃度は全濃度とほぼ一致しており、養豚廃水では主に溶存態で存在していた。原水の pH は 2.96 と養豚廃水よりも低い、これは P/(N+K) 比を調節するためにリン酸溶液を加えたためである。原水中の N、P、K の溶存態濃度も全濃度とほぼ一致しており、N、P、K は原水中では主に溶存態で存在していた。P/(N+K)、Mg/P は目標とした値 1.3、1.2 よりもそれぞれ 0.1 ずつ低かった。

3.2 処理性能

表 2 に示す 3 つの処理性能指標について検討した。沈降率は反応後の体積に対する静置後上澄水体積の比（体積はいずれも反応槽ビーカーの目盛りを目測して得た）、風乾物収率は処理原水重量に対する風乾物重量の比とした。生物処理原水収率は静置後上澄水と遠心後上澄水（静置後沈殿物を全量遠心分離していないので、遠心後の上澄水回収率（遠心分離処理前重量に対する遠心分離後上澄水の比）を静置後沈殿物に乗じて得た）の合計を原水として、原水体積に対する生物処理原水体積（原水、生物処理原水とも比重 1 として重量を体積換算）の比とした。

表中には各処理性能指標を目的変数とし、G 値および攪拌時間を説明変数とした場合の回帰分析結果を示している。有意水準 0.05 で検討した結果、風乾物収率と生物処理原水収率の F 値については、回帰式には意味がなく（F 値＜有意水準）、G 値および攪拌時間は影響を与えたとは言えなかった。沈降率については G 値の回帰係数の p 値が有意水準以下であり、回帰係数が負であったことから、G 値の増加とともに沈降率が減少する傾向が見られた。沈降率は平均で約 60%であり、沈降性はあまりよくなかった。静置後沈殿物の含水率（平均 96.4%、範囲：95.6%～97.0%）も高いことも考慮すると、静置では固液分離が不十分であり、遠心分離等が必要であると言えた。風乾物収率から、原水 1L から平均で約 20g の風乾物を回収できることが分

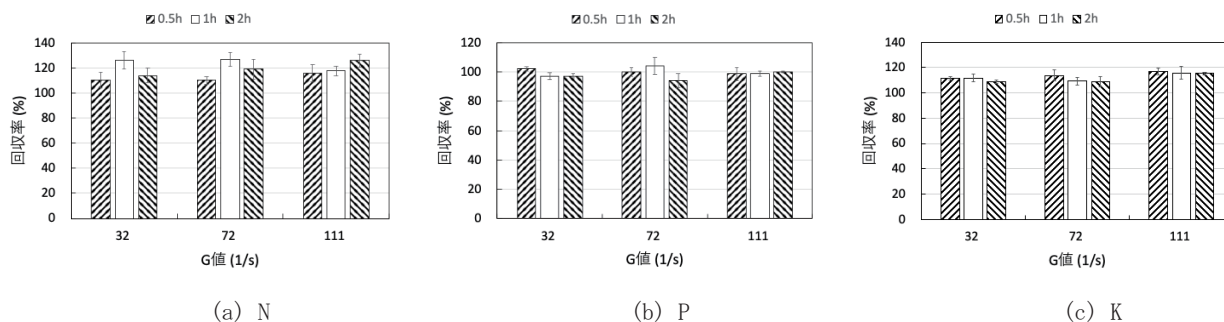


図3. 全体の物質収支

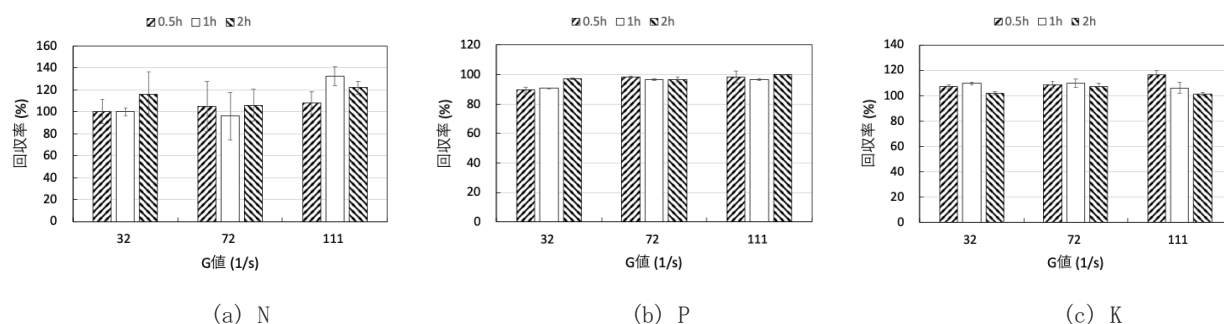


図4. 反応・静置プロセスでの物質収支

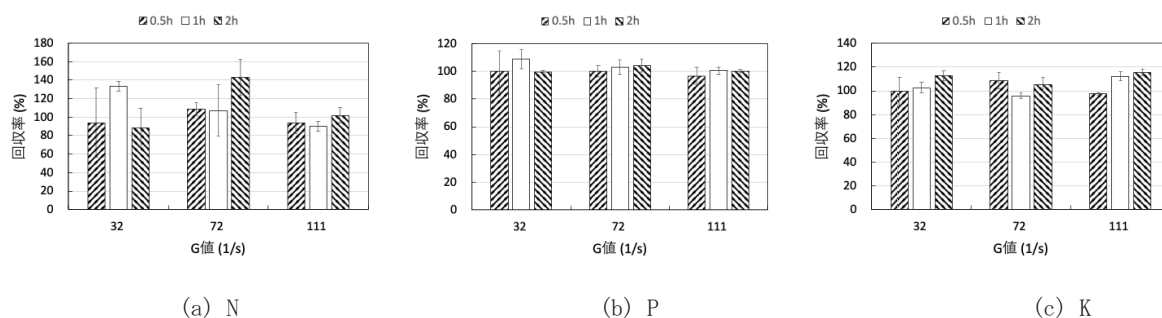


図5. 反応・静置プロセスでの物質収支

かった。生物処理原水収率から、原水 1L のうち約 0.95L が生物処理に供されることが分かった。

3.3 物質収支

3.3.1 プロセスの物質収支

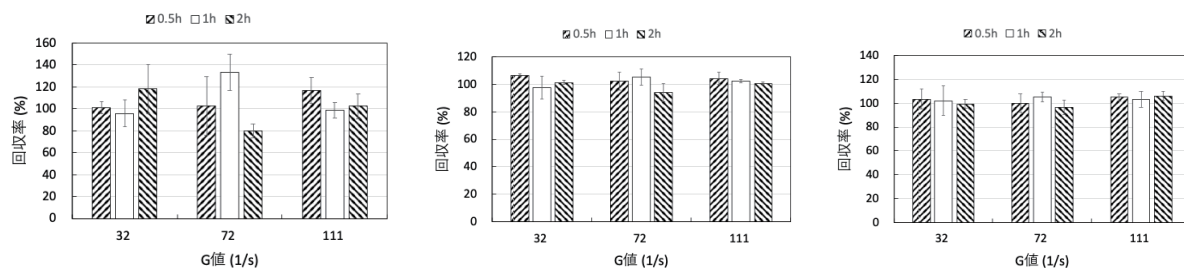
N、P、K について、原水中の元素重量に対する生物処理原水および風乾物に移動した元素重量の合計の比をプロセス全体の物質収支として図3に示す。棒グラフは反復3回の平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示す。P については9条件の回収率が概ね100%であったが(範囲: 94%~104%)、N については9条件の平均回収率の平均は118%(範囲: 110%~127%)、K については112%(範囲: 109%~117%)で処理原水中の重量に対して10~20%過剰に回収された。

反応・静置、遠心分離、風乾の各プロセスでの各元素の

回収率を図4~図6に示す。P、K についてはどのプロセスでも概ね100%の回収率であった。N については反応・静置プロセスで平均110%(範囲: 96%~132%)、遠心分離プロセスで平均107%(範囲: 89%~143%)、風乾プロセスで平均105%(範囲: 80%~133%)であり、平均回収率はどのプロセスでも概ね100%であるが、他の元素と比べてばらつきが大きかった。N については、反応・静置プロセスおよび風乾プロセスでアンモニアの揮散が懸念されたが、それぞれのプロセスでの収支が100%を大きく下回ることがないことから、アンモニアの揮散による損失は小さいと考えられた。

3.3.2 生物処理原水および風乾物への回収率

原水中の元素重量に対する生物処理原水および風乾物に回収された元素重量の比を図7に示す。ただし、100%となるように補正している。原水中のN、P、K はそれぞれ

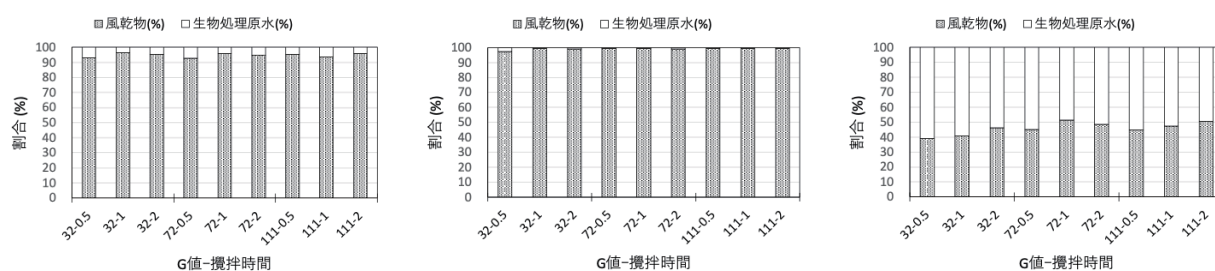


(a) N

(b) P

(c) K

図 6. 風乾プロセスでの物質収支

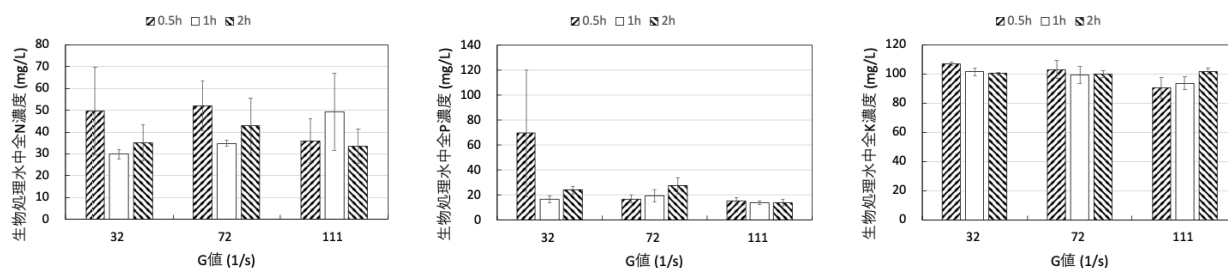


(a) N

(b) P

(c) K

図 7. 生物処理水原水、風乾物への回収率



(a) N

(b) P

(c) K

図 8. 生物処理原水中全濃度

平均で 95%、99%、46%が風乾物として回収された。N、P に対して K の風乾物としての回収率が低い理由は、本実験での pH 10.5 では MAP に比べて MPP の方が沈殿しにくい条件であるため、原水中の N、P の多くが MAP と回収されるが、K が MPP として回収される割合が低く溶存態として残っているからである。表 3 に風乾物への回収率を目的変数としたときの回帰分析結果を示すが、N、P については F 値が有意水準より大きく回帰式に意味はなく、運転条件は原水中 N、P の風乾物への回収率に影響を与えなかった。K については F 値および G 値の回帰係数の p 値が有意水準より小さく、また G 値の回帰係数が正であったことから、特に G 値が風乾物への回収率に正の影響を与えと言えた。K については溶存態が多いので、攪拌強度を上げることにより MPP の生成が増えたため、G 値の正の影響が見られたと考えられた。

表 3. 風乾物への回収率を目的変数としたときの回帰分析結果

	F 値	G 値の回帰係数の p 値	攪拌時間の回帰係数の p 値
N	0.4799	0.9915	0.2446
P	0.2675	0.1571	0.4350
K	0.0453	0.0492	0.0711

灰色：有意水準(0.05)以下

3.4 生物処理原水中の全濃度

図 8 に生物処理原水中全濃度を示す。N の全濃度は全ての運転条件で N の一般排水基準値の 120mg/L を満たしていた。

P の全濃度は平均で 24mg/L (14mg/L~69mg/L) であった。なお、濃度が最大になった条件(G 値 32 sec⁻¹、攪拌時間

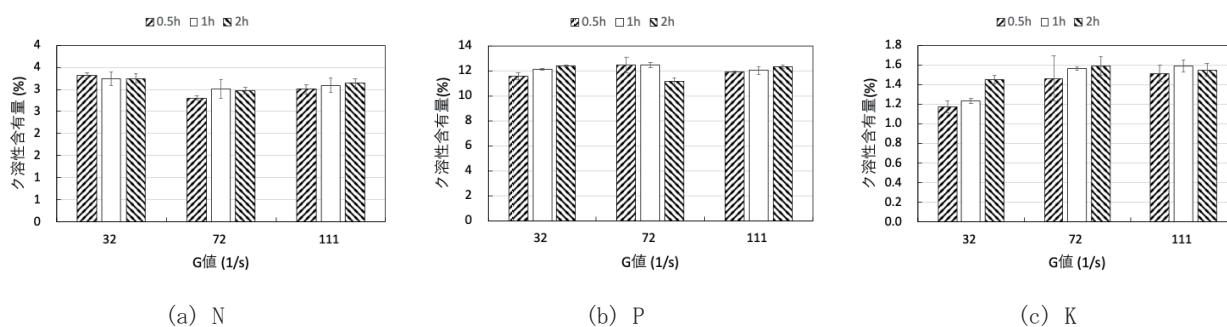


図 9. 風乾物中のク溶性含有量

表 4. 風乾物のク溶性含有量(%)を目的変数としたときの回帰分析結果

	F 値	G 値の回帰係数の p 値	攪拌時間の回帰係数の p 値	平均	最小	最大
N	0.0203	0.0337	0.0510	3.1	2.8	3.3
P	0.8879	0.8793	0.6458	12.0	11.1	12.5
K	0.0013	0.0004	0.2524	1.5	1.2	1.6

灰色：有意水準(0.05)以下

0.5h)では、反復3回の実験のうち2回が濃度39mg/L、28mg/Lであったが、1回(反復回数1回目)が濃度141mg/Lとなったため平均値が69mg/Lと高かった。これは、反復回数1回目の静置後および遠心後上澄水の全濃度が沈殿物を多く混入しているために、他の反復回数の濃度よりも大きいこと、特に遠心後上澄水の全濃度が大きく、沈殿物の混入が多いことが理由であった。よって、各プロセスにおいて上澄水回収、特に遠心分離後上澄水回収の際に沈殿物の混入を防ぐことが、生物処理原水中のP濃度を低減するために重要であると言えた。

Pの一律排水基準16mg/Lを満たしていた条件はG値111(1/s)のみであった。排水基準を満たさなかった理由としては、静置後および遠心後上澄水の溶存態濃度は最大でも排水基準を下回る12mg/Lであったことから、固液分離での沈殿物混入が原因であると言えた。また、先ほど述べたPの全濃度が最大となったG値32 sec⁻¹、攪拌時間0.5hを除いた全濃度の最大値は27mg/Lであり、表1に示した養豚廃水の濃度の63%と低いことから、生物処理原水の生物処理へのP負荷は養豚廃水を直接生物処理するよりも小さく、生物処理による排水基準達成が期待できた。

Kの生物処理原水濃度は平均で378mg/L(343mg/L～420mg/L)であった。

生物処理原水中の全濃度を目的変数とした回帰分析の結果、N、P、Kともに回帰式のF値とG値、攪拌強度の偏回帰係数のp値が有意水準5%よりも大きいことから回帰式に意味なく、運転条件は生物処理原水中の全濃度には影響を与えたとはいえなかった。

3.5 風乾物中のク溶性含有量

図9に風乾物のク溶性含有量と運転条件との関係を示す。また、表4に風乾物のク溶性含有量を目的変数とした

ときの回帰分析結果を示す。ク溶性のN含有量は平均で3.1%(範囲:2.8%～3.3%)であった。ク溶性N含有量については、回帰式は有意であり、説明変数のうちG値の偏回帰係数が有意であった。ただし、平均値の変動範囲が0.5%と小さいことから、運転条件がク溶性N含有量に与える影響は小さいと考えられた。

ク溶性のP含有量は平均で12%(範囲:11%～12%)であった。ク溶性P含有量の回帰式に意味はなく、運転条件がク溶性P含有量に影響を与えたとはいえなかった。

ク溶性のK含有量は平均で1.5%(範囲:1.2%～1.6%)であった。回帰式は有意であり、説明変数のうちG値の偏回帰係数が有意であった。ただし、変動幅が0.4%と小さいことから、運転条件がク溶性K含有量に与える影響は小さいと考えられた。

混合動物排せつ物複合肥料の公定規格¹²⁾ではNに関しては全含有量として1%-NH₄-N(1%-N)、PとKについてはク溶性含有量として1%-P₂O₅(0.22%-P)、1%-K₂O(0.42%-K)である。N、P、Kのク溶性含有量の範囲も表4に示すが、回収した風乾物のク溶性含有量は公定規格を満たしており(Nについてはク溶性含有量を全含有量と見なした)、肥料として利用可能であることが分かった。

4. まとめ

本研究では、回分式反応槽の運転条件のN、P、Kについての処理性能指標への影響評価および、回収物中の肥効成分への影響を明らかにすることを目的として、回分式の反応装置を用いて実験を行った。得られた主な知見を以下に示す。

(1) 回分式処理の処理性能指標のうち風乾物収率と生物処理原水収率については、今回検討したG値および攪拌時間は影響を与えたとはいえなかった。沈降率につい

てはG値の増加とともに沈降率が減少する傾向が見られた。

- (2) 原水から風乾物への回収率については、N、PについてはG値および攪拌時間は影響を与えたとは言えなかった。KについてはG値が風乾物への回収率に正の影響を与えと言えた。Kについては溶存態が多いので、攪拌強度を上げることによりMPPの生成が増えたため、G値の正の影響が見られたと考えられた。
- (3) 生物処理原水中の全濃度については、N、P、KともにG値および攪拌時間は影響を与えたとは言えなかった。
- (4) 風乾物のク溶性含有量については、PについてはG値および攪拌時間は影響を与えたとは言えなかった。NとKについてはG値が正の影響を与えたが、平均値の変動範囲が小さいことから、運転条件がNとKのク溶性含有量に与える影響は小さいと考えられた。
- (5) 物質収支から、Nについては、反応・静置プロセスおよび風乾プロセスでのアンモニアの揮散によるNの損失は小さいと考えられた。また、原水中のN、P、Kはそれぞれ平均で95%、99%、46%が風乾物として回収された。
- (6) 生物処理原水中の全濃度については、Nの全濃度は全ての運転条件でNの一般排水基準値の120mg/Lを満たしていた。生物処理原水中のP濃度を低減するために各プロセスにおいて上澄水回収、特に遠心分離後上澄水回収の際に沈殿物の混入を防ぐことが重要であると言えた。また、生物処理原水の生物処理へのP負荷は養豚廃水を直接生物処理するよりも小さく、生物処理による排水基準達成が期待できた。
- (7) 風乾物のN、P、Kク溶性含有量は公定規格を満たしており、肥料として利用可能であることが分かった。

謝辞

実験を行うにあたり宮崎大学工学部 社会環境システム工学科の中拂陽介氏、宮崎大学工学部 土木環境工学プログラムの中道陽翔氏の協力を得た。

参考文献

- 1) 田中康男：養豚汚水における生物化学的酸素要求量(BOD)負荷量原単位の検討，日本養豚学会，Vol. 59，

No. 1, pp. 18-28, 2022.

- 2) 田中康男：養豚汚水浄化処理過程におけるリンの動態，日本養豚学会誌，Vol. 60, No. 1, pp. 17-26, 2023.
- 3) 農林水産省：畜産経営に関する排水基準について，https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/t_info/02_haisui/index.html（閲覧日 2026 年 3 月 29 日）
- 4) 農林水産省：食糧の安定供給に関するリスク検証（2022），https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/anpo/risk_2022.html（閲覧日 2026 年 3 月 29 日）
- 5) Uchida, Y., Watanabe, C., and Hasegawa, M. : Phase Equilibria in High Phosphate-Containing Slag without CaO Saturation at Elevated Temperature, ISIJ International, 63(1), pp. 20-29, 2023.
- 6) 葛 蓉：自然農法実践の初期段階における土壌動物と土壌硬度の特性，食農と環境，No. 34, pp. 1-11, 2024.
- 7) 農林水産省：肥料に係る安定供給確保を図るための取組方針，<https://www.maff.go.jp/j/press/nousan/gizyutu/attach/pdf/221228-1.pdf>（閲覧日 2026 年 3 月 29 日）
- 8) Song, Y., Yuan, P., Zheng, B., Peng, J., Yuan, F., and Gao, Y.: Nutrients removal and recovery by crystallization of magnesium ammonium phosphate from synthetic swine wastewater, Chemosphere, Vol. 69, pp. 319-324, 2007.
- 9) Wang, J., Burken, J. G., Zhang, X., and Surampalli, R.: Engineered struvite precipitation: Impacts of component-ion molar ratios and pH, Journal of Environmental Engineering, Vol. 131, pp. 1433-1440, 2005.
- 10) Yamaguchi, S., Ohura, S., Harada, H., Akagi, K., Yoshiharu, M., Kawakita, H., and Biswa, B. K.: Simultaneous crystallization of phosphate and potassium as magnesium potassium phosphate using bubble column reactor with draught tube, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 1, pp. 1154-1158, 2013.
- 11) 土手裕，関戸知雄：養豚廃水からのカリウム回収率向上と回収後溶液の生物処理への影響，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol. 31, pp. 38-46, 2020.
- 12) 農林水産省：肥料の品質の確保等に関する法律に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件，2024.

MAO のスプレー塗布による保護膜を有する リチウムイオン電池用セパレータの充放電特性

宇都大樹 ^{a)}・吉野賢二 ^{b)}

Electrochemical Characteristics of Lithium-Ion Battery Separators with Protective Layers by MAO Spray Coating

Daiki Uto, Kenji Yoshino

Abstract

Lithium-ion batteries (LIBs) were widely used in mobile devices and electric vehicles; however, improving their safety remains a critical issue. In this study, a polyethylene (PE) separator was modified by spray-coating a methylaluminoxane (MAO)/N-methylpyrrolidone (NMP) precursor solution to form a thin Al_2O_3 -based protective layer. The MAO/PE separator exhibited significantly suppressed thermal shrinkage during annealing, indicating improved thermal stability. Electrochemical impedance spectroscopy revealed a slight increase in separator resistance, which had a negligible impact on charge–discharge behavior. Full-cell tests demonstrated stable operation up to 4.5 V. At high cutoff voltages (4.35–4.5 V), the MAO/PE separator showed reduced irreversible capacity, higher coulombic efficiency, and suppressed interfacial resistance growth after cycling. These results indicated that MAO spray coating is an effective approach to enhance the thermal stability and high-voltage durability of PE separators.

Keywords: *Lithium-ion battery, Separator, Thermal stability, Methylaluminoxane (MAO), spray deposition,*

1 はじめに

リチウムイオン電池は高出力、高エネルギー密度などの特徴から、さまざまなモバイル機器や電気自動車のバッテリーとして使用されている。一方で、発火や爆発の事故が多数報告されており、安全性の向上が急務である¹⁾。リチウムイオン電池は主に正極、負極、電解液、セパレータの部材で構成されており、電極間を電解液を介してリチウムイオンが行き来することで充放電が行われる。また、セパレータにはポリエチレン(PE)やポリプロピレン(PP)の多孔質膜が用いられ、電解液を含侵することでリチウムイオンの移動を可能にし、正極と負極の物理的な接触を防ぐ役割がある。しかし、熱安定性が低いという課題があり、PE セパレータの場合、約 135 °C で溶融が開始する²⁾。そこで近年では、セパレータ表面に Al_2O_3 、 SiO_2 などのセラミック粒子とバインダーを含むスラリーをシートコーティング法で塗布し、セパレータ表面に保護膜層を作製することで、熱安定性を向上させる研究が多数報告されている^{3,4)}。しかし、セパレータの厚さが数 μm 増加し、リチウムイオン電池作製時のエネルギー密度の低下が懸念される⁵⁾。さらにスラリー作製は多段階の工程であり、乾燥に時間を要する^{6,7)}。

我々は、これまでに PP セパレータや PP/PE/PP 三層構

造セパレータに修飾されていない新規材料メチルアルミノキサン(MAO) を N-メチルピロリドン(NMP)で希釈した前駆体溶液(MAO/NMP)をスプレー塗布し、セパレータ内部に保護膜を作製することで熱安定性が向上することを確認した^{8,9)}。

本研究では修飾されていない新規材料メチルアルミノキサン(MAO)を N-メチルピロリドン(NMP)で、Al 濃度 1 wt%に希釈した前駆体溶液(MAO/NMP)を用いて、大気中で大面積成膜が可能なスプレー塗布法を行い、 Al_2O_3 保護膜を作製し、セパレータの熱安定性について調査した。

2 実験方法

セパレータはポリエチレン(PE)製を使用した。ガラス板にセパレータを張り、大型スプレー装置を用いて大気中で MAO/NMP 溶液(Al:1 wt%、東ソーファインケム製)を 10 mL/h の速度で 6 分間スプレー塗布した。MAO は、 $(\text{Al}(\text{CH}_3)\text{O})_n$ を持つ有機アルミニウム化合物である。スプレーのキャリアガスには N_2 ガスを使用し流量は 8 mL/min であった。また基板温度は 50 °C に設定した。

作製した試料は表面観察にはレーザー顕微鏡、走査型電子顕微鏡(SEM)、組成分析にはエネルギー分散型 X 線分光法(EDX)を使用した。セパレータのイオン伝導性はステンレス電極を用いた、電気化学インピーダンス分光法(EIS)により評価した。測定にはステンレス電極と、電解液とし

a)工学専攻電気・半導体コース大学院生

b)電気電子システムプログラム教授

て過塩素酸リチウム (LiClO_4) (エチレンカーボネート (EC) : ジメチルカーボネート (DMC) = 1:1 vol%) を使用し、周波数範囲 0.1~7 MHz、振幅 10 mV で測定を行った。熱安定性はアニール前後のセパレータの収縮率から評価した。セパレータを 20×20 mm の大きさにカットし 110~135 °C で 20 分間のアニール試験を行った。収縮率は以下の式より算出される。

$$\text{収縮率 (\%)} = \frac{l_{\text{before}} - l_{\text{after}}}{l_{\text{before}}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 l_{before} および l_{after} はそれぞれアニール前およびアニール後のセパレータの長さである。

充放電特性はラミネートセルを作製し評価した。正極には LiCoO_2 、負極にはグラファイト (Graphite)、セパレータには PE または MAO をスプレー塗布した PE(MAO/PE) を用いた。電解液は 1.0 M LiPF_6 (EC : DMC = 1:1 vol%) にビニレンカーボネート (VC) 1 wt% を添加した溶液を使用した。セルは 45 °C 恒温下で充放電試験を行い、充電は 1 サイクル目は 4.2 V、2 サイクル目は 3.5 V、3 サイクル目は 4.5 V のカットオフ電圧で行った。また充放電容量から式 (2) よりクーロン効率を算出した。

$$\text{クーロン効率 (\%)} = \frac{\text{放電容量 (mAh/g)}}{\text{充電容量 (mAh/g)}} \times 100 \quad (2)$$

また、インピーダンス測定 (EIS) により、セルの全体の内部抵抗を評価した。

3 実験結果

3.1 表面観察

レーザー顕微鏡による表面観察の結果を図 1 に示す。(b) の MAO/PE には (a) PE で見られない島状の堆積物が点状に分布しているのが確認された。これらの堆積物は直径約 30 μm であり、セパレータ全体に分布しており、膜厚の増加はないと考えられる。以前の報告で、MAO/NMP のスプレー塗布により溶液がセパレータ内部に浸透することで、膜厚を増加させずポリプロピレンセパレータの多孔質内部に Al_2O_3 保護膜が作製されることが示唆された^{6,7)}。ポリエチレンセパレータを使用した本研究においても同様の現象が起こったと考えられ、表面に点状に分布する堆積物はスプレー塗布によって形成された、アモルファスの Al_2O_3 を含む物質であると考えられる。

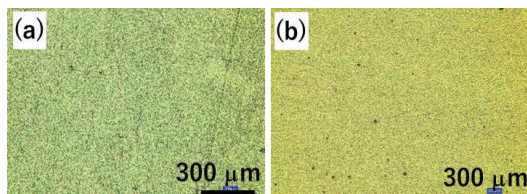


図 1. レーザー顕微鏡による表面観察

3.2 アニール実験

図 2 にアニール前後のセパレータの外観写真を示す。

PE では、100 °C 付近から外形の歪みが徐々に顕在化し、120 °C 以上では縁部の波打ちや変形が明確に観察された。さらに高温条件では、局所的な収縮が進行し、セパレータ形状が大きく崩れている様子が確認された。一方、MAO/PE セパレータでは、同一アニール条件においても外形の保持性が高く、未塗布 PE で顕著であった縁部の波打ちは抑制されていた。図 3 に、アニール前後のセパレータ面積から算出した収縮率とアニール温度の関係を示す。MAO/PE は、全温度域にわたり未塗布 PE よりも収縮率が低い値を示し、MAO のスプレー塗布による熱収縮抑制効果が明確に確認された。MAO 由来の無機被覆層がセパレータ表面に形成されることで、アニール時の高分子鎖の運動や収縮挙動が物理的に拘束され、熱変形が抑制された可能性が考えられる。ただし、LIB のさらなる高出力化・高耐熱化が求められる中で、より高温域においても寸法安定性を維持できるよう、さらなる熱安定性の向上が今後の課題である。

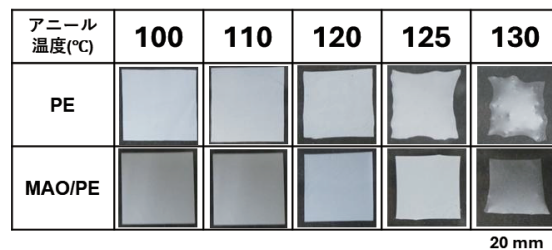


図 2. アニール後のセパレータの外観写真

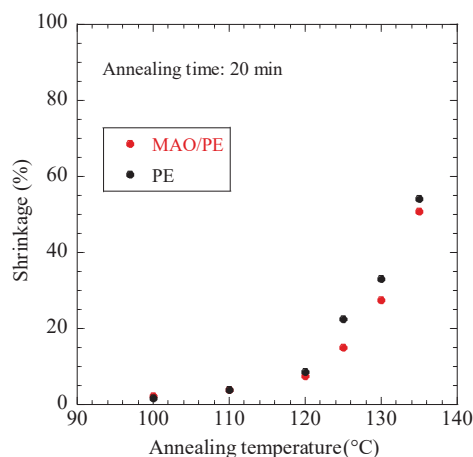
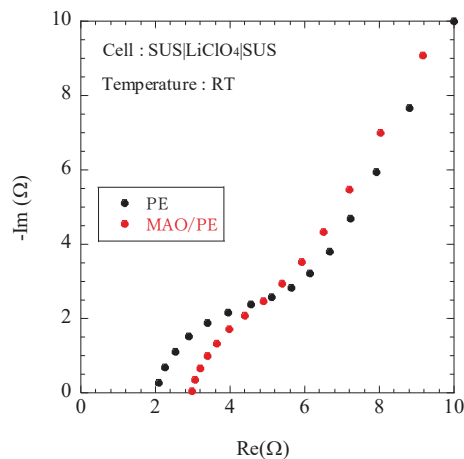


図 3. アニール後のセパレータの収縮率

3.3 インピーダンス測定

図 3 にステンレス電極を用いて測定したセパレータのインピーダンス測定の結果を示す。PE は抵抗が 2.10 Ω であったのに対し、MAO/PE は 2.97 Ω であり、抵抗が微増したことが確認された。これはレーザー顕微鏡で観察された堆積物が、リチウムイオンの移動経路を部分的に遮断していると考えられる。



3.4 フルセル試験

塗布前の PE 及び MAO/PE を用いたセルを作製し、充放電性能を評価した。1 サイクル目の 4.2 V、2 サイクル目の 3.5 V、3 サイクル目の 4.5 V の PE セパレータおよび MAO 塗布 PE (MAO/PE) セパレータのいずれにおいても、充電過程では電圧が段階的に増加し、設定したカットオフ電圧に到達していることが確認された。また、放電過程においても電圧は連続的に低下しており、異常な電圧変動や不安定な挙動は認められず、MAO/PE を用いた場合でも、フルセルの充放電反応が適切に進行していることが示された。

図 5(a)に各充電電圧における充放電容量を示す。また、図 6 に各充放電電圧に対するクーロン効率を示す。4.2 V では、PE および MAO/PE のいずれにおいても充電容量に対し放電容量が大きく低下し、クーロン効率は PE が 82.3 %、MAO/PE が 81.2 %となった。これは、初期サイクルにおける界面形成や副反応に起因する不可逆反応が支配的であるためと考えられる⁹⁾。2 サイクル目の 4.35 V 以上の条件では、4.2 V において顕著であった初期サイクルに起因する不可逆容量の影響は大きく低減しており、放電容量が増加したことによりクーロン効率は高い値を示した。また、4.35 V 以下の条件では、MAO/PE は PE と比較して充放電容量およびクーロン効率がやや低下したが、4.5 V では PE が 94.9 %であるのに対し、MAO/PE が 96.1 %となりクーロン効率が PE を上回った。

図 7 に 4.5 V 充電後のフルセルについてインピーダンス測定を行った結果を示す。PE および MAO/PE のいずれのセルにおいても、高周波数側の実軸切片に続いて中周波数領域に半円が観測された。高周波数側の実軸切片は MAO/PE がわずかに高い。これはセパレータの EIS で示された、セパレータの抵抗の微増に起因すると考えられる。また、中周波数領域に現れる半円に着目すると、MAO/PE を用いたセルでは、PE と比較して半円径が小さいことが確認された。一般に、中周波数領域の半円は、電極/電解液界面における電荷移動抵抗や界面抵抗成分を反映する

と考えられている。本結果より、MAO/PE セパレータを用いた場合には、高電圧条件下における界面劣化や副反応に起因する抵抗成分の増加が抑制され、4.5 V におけるクーロン効率の向上が示唆された。

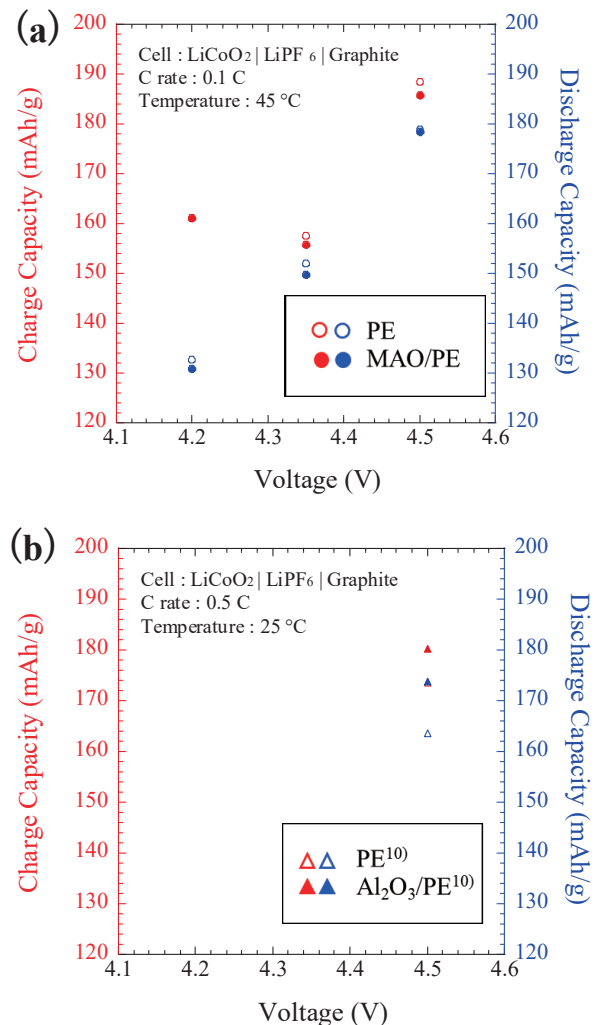


図 5. (a)各電圧における充放電容量と(b)文献値¹⁰⁾

報告されている ALD を用いて Al_2O_3 コーティングセパレータを作製した充放電容量とクーロン効率を図 5(b)と 6 に示す。充放電容量およびクーロン効率は、本研究の MAO/PE とほぼ同等であったが、文献中の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PE}$ は PE に対して充放電容量とクーロン効率ともに明確な改善が見られた。これは $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PE}$ が PE よりも抵抗が低いことに起因すると考えられる¹⁰⁾。本研究ではインピーダンス測定より、セパレータの抵抗の増加が確認され、これが充放電容量のわずかな低下と 4.35 V 以下のクーロン効率の低下を引き起こしたと考えられる。しかし、4.5 V では MAO/PE のほうがクーロン効率は高くなったことから、MAO/PE は、高電圧条件下において容量そのものを増大させるものではないが、不可逆反応および界面抵抗の増大を抑制することで、充放電反応の可逆性を維持していると考えられる。

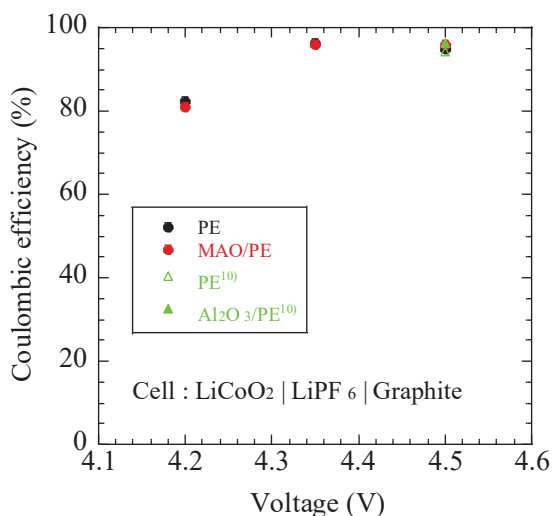


図 6. 各電圧におけるクーロン効率と文献値¹⁰⁾

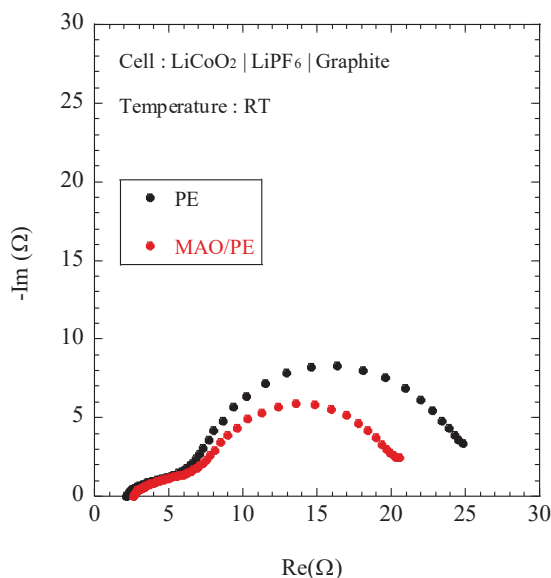


図 7. 4.5 V の充電後の EIS 結果

4 結論

本研究では、PE セパレータに MAO/NMP 溶液をスプレー塗布し、熱安定性、イオン伝導性、充放電特性について評価した。MAO のスプレー塗布によりアニールによる収縮が抑制され、熱安定性の向上が確認された。また EIS より、セパレータの抵抗の微増が確認されたが、充放電への影響は無視できるものであった。4.5 V の高電圧条件の充放電では正極電解液界面の抵抗の増加が抑制され、クーロン効率を向上させた。以上の結果から、MAO のスプレー塗布は PE セパレータの熱安定性を向上させるだけでなく、充放電特性を改善する有望な手法であることが示された。

参考文献

- 1) K.T. Selvi, K. A. Mangai, J. Anita Lett, I. Fatimah, S. Sagadevan: Exploring the electrode materials for high-performance lithium-ion batteries for energy storage application. *Journal of Energy Storage*, Vol.92, 112208, 2024.
- 2) J. He, X. Li: Recent materials development for Li-ion and Li-S battery separators *Journal of Energy Storage*, Vol.112, 115541, 2025.
- 3) D. Fu, B. Luan, S Argue, M. N. Bureau, I. J. Davidson: Nano SiO₂ particle formation and deposition on polypropylene separators for lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, Vol.206, pp325–333, 2012
- 4) Q. Wang, J. Yang, Z. Wang, L. Shi, Y. Zhao, S. Yuan: Dual-Scale Al₂O₃ Particles Coating for High-Performance Separator and Lithium Metal Anode, *Energy Technol*, Vol.8, 1901429, 2020.
- 5) Gao-Long Zhu, Yu-Yu He, Yun-Long Deng, Ming Wang, Xiao-Yan Liu, Li-Ping Wang and Jian Gao: Dependence of Separator Thickness on Li-Ion Battery Energy Density, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.168, 110545, 2021.
- 6) Q. Wang, J. Yang, Z. Wang, L. Shi, Y. Zhao, S. Yuan: Dual-Scale Al₂O₃ Particles Coating for High-Performance Separator and Lithium Metal Anode. *Energy Technol*. Vol.8, 1901429, 2020.
- 7) S. Cheng , R. Deng , Z. Zhang, Q. He, Y. Zheng, H. Liao, X. Fu, J. Lu, Y. Jiang, Y. Gao: A novel Al₂O₃/polyvinyl pyrrolidone-coated polyethylene separator for high-safety lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources* Vol.614 234964, 2024.
- 8) M. Imai, T. Kubota, A. Miyazawa, M. Aoki, H. Mori, Y. Komaki, K. Yoshino: Ultra-Thin Layer Inside Separator Deposited by Spray Pyrolysis Using Methylaluminoxane Solution, *Cryst. Res. Technol*, Vol.58, 2200203, 2022.
- 9) M. Imai, T. Kubota, A. Miyazawa, M. Aoki, H. Mori, Y. Komaki, K. Yoshino: Al₂O₃ Thin Layer Formed inside Porous Membrane Using Spray Synthesis Method and Its Application, *Crystals*, Vol.14, 195, 2024.
- 10) J. Gong, S. Shi, S. Cheng, K. Yang, P. Zheng, Y. Xu, J. Chai, Y. Zheng, Z. Liu, M. Xie: High-performance and safe lithium-ion battery with precise ultrathin Al₂O₃-coated polyethylene separator. *Applied Surface Science*, Vol.659, 159918, 2024.

MAO のスプレー塗布による成膜とアニールの影響

宇都大樹^{a)}・吉野賢二^{b)}

MAO Spray-Deposited Films and the Influence of Annealing Treatment

Daiki Uto, Kenji Yoshino

Abstract

Methylaluminoxane (MAO) films were deposited on Si substrates by a spray-coating method and subsequently annealed at temperatures ranging from 500 to 1200 °C to investigate their crystallization behavior. X-ray diffraction revealed that amorphous or metastable alumina phases were formed below 900 °C, while thermodynamically stable α - Al_2O_3 was clearly obtained after annealing above 1000 °C. The lattice parameters of the α - Al_2O_3 phase were consistent with reported values, and the crystallite size slightly increased with annealing temperature. Raman spectroscopy detected weak Al_2O_3 -related peaks only for the 1000 °C sample, whereas higher-temperature samples showed reduced film signals due to surface roughening and morphological inhomogeneity. SEM and surface profilometry indicated crack formation and island-like structures, accompanied by increased surface roughness at higher annealing temperatures..

Keywords: Lithium-ion battery, Separator, Methylaluminoxane (MAO), spray deposition, Al_2O_3

1. はじめに

リチウムイオン電池(Lithium-ion battery, LIB)は、高エネルギー密度、高動作電圧および優れたサイクル特性を有することから、携帯電子機器や電気自動車、大規模蓄電システムなど幅広い分野で利用されている。一方で、過充電や外部短絡、内部欠陥などに起因する異常発熱による発火・爆発事故が報告されており、安全性向上は依然として重要な課題である¹⁾。

LIB においてセパレータは、正極と負極の直接接触を防ぐと同時に、電解液を保持しリチウムイオンの移動を可能にする重要な構成要素である。一般に用いられるポリエチレン(PE)やポリプロピレン(PP)などのポリオレフィン系多孔質膜が使用される。また、セパレータには、電気絶縁性、機械的強度、熱安定性、化学的安定性、そして高いイオン伝導性などの特性が求められる²⁾。そこで近年では、これらの特性向上を目的として、市販の PE、PP セパレータ表面のセラミック粒子による保護膜層を形成する研究が多数報告されている^{3,4)}。

特に、酸化アルミニウム(Al_2O_3)は地球上に最も豊富に存在し低価格であり、高い熱安定性、電気絶縁性および化学的安定性を有することから、セパレータ表面へのコーティング材料として注目されている。

Al_2O_3 を成膜する方法は真空法と非真空法の2つに分類することができる。真空法は真空蒸着法、スパッタリング法、CVD(化学気相成長)法などがあり、膜厚や組成、結晶性を精密に

制御できるという利点を有する一方で、装置が高価であり、大面積化や量産への適用に課題がある。非真空法はスピンコート法、ディップコート法、スプレー法があり、大気圧下で成膜が可能で、装置構成が簡便かつ低コストであることに加え、大面積成膜が可能である。LIB 用セパレータには Al_2O_3 粒子を含むスラリーをシートコーティングにより塗布する方法が主流である。この方法は低温で成膜ができ、大型の装置を必要としない。また、スプレー法は、一定の距離を離れたホットプレート上に静置した基板材料にノズルから原料溶液を噴霧させ、原料と基板材料を化学反応させ、薄膜を形成させる方法である⁵⁾。

我々は、これまでに新規材料であるメチルアルミノキサン/N-メチルピロリドン(MAO/NMP)溶液を PP セパレータに基板温度 50 °Cでスプレー塗布した。結果、薄膜の厚さを増加させることなく、膜内部の細孔側壁に Al_2O_3 の極薄な多結晶層を形成された。また、セパレータの熱安定性が向上することが報告した^{6,7)}。

MAO を使用し平滑な基板上に Al_2O_3 を作製した例はない。本研究では、Si 基板上に結晶性 Al_2O_3 の作製を目的とし、MAO をスプレー塗布法により Si 基板上に成膜し、アニール処理を施し、その物性を評価した。

2. 実験方法

スプレー成膜法を用いた。原料溶液として、メチルアルミノキサンを N-メチルピロリドン(NMP)で希釈した MAO/NMP 溶液(Al 濃度:4.0 wt%)を使用した。基板には P 型シリコンウ

a)工学専攻電気・半導体コース大学院生

b)電気電子システムプログラム教授

エハ((111) 面)を用い、基板温度を 80 °Cに保持した状態で成膜を行った。スプレー成膜時の塗布量は 1 mL とし、シリンジ送り速度は 0.33 mL/min、キャリアガス流量は 8 L/min とした。キャリアガスには窒素(N₂)を用い、成膜は N₂雰囲気下で行った。成膜後の試料に対して、赤外線ランプを用いたアニール処理を行った。アニールは急速昇温・降温が可能な RTA 方式とし、昇温速度および降温速度はいずれも 20 °C/min とした。所定のアニール温度に到達後、その温度で 60 分間保持し、その後同じ速度で冷却を行った。アニール温度は 500 ~1200 °Cの範囲で設定した。アニール処理後の基板について、X 線回折(XRD)による結晶構造解析により評価した。 α -Al₂O₃ は六方晶であるため格子定数は(1)関係式より、結晶子サイズは(2)の式の Scherrer の式より算出した。

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (1)$$

ここで、面間隔 d 、面指数(hkl)、 a 、 c 軸の格子定数を示す。

$$t = \frac{0.9 \cdot \lambda}{B \cdot \cos\theta} \quad (2)$$

ここで、 B は半値幅(rad)、 λ は入射角の波長、 θ 反射角(rad)を示す。また、ラマン分光分析による相同定、走査電子顕微鏡(SEM)による表面形態観察、および段差計による表面粗さの評価を行った。

3. 実験結果

3.1. X 線回折(XRD)

図 1 に Si 基板、As-depo.(基板温度(T_s):80 °C)、ならびに 500~1200 °Cでアニール処理した試料の XRD パターンを示す。図中下部には比較のため、 α -Al₂O₃の ICDD パターンを併記した。なお、縦軸は対数表示である。まず、Si 基板では 28 °付近に強い回折ピークが確認された。As-depo. (T_s =80 °C) 試料および 500~700 °C試料においても、Si 基板由来するピーク以外の明瞭な回折ピークは確認されなかった。これは、成膜直後から 700 °C程度までの温度域では、MAO 由来成分が長距離秩序を持つ結晶相として十分に成長しておらず、主にアモルファス、あるいは XRD では検出困難な極微結晶である可能性を示す。一方、800 °Cおよび 900 °C試料では、基板ピークとは別に、約 45 °、67 °付近においてブロードピークが観測された。これは γ -Al₂O₃に起因するピークであることが示唆される⁹⁾。さらに、1000 °C以上では、ICDD に示した α -Al₂O₃のピーク位置と整合する複数の回折ピークが明瞭に現れた。以上より、1000 °C以上の高温アニールにより、MAO 由来の膜が熱力学的に最も安定な α -Al₂O₃相へ相転移し、結晶化が進行したと結論づけられる。一般に酸化アルミニウムは、アモルファス相や準安定相(γ 、 θ など)を経由して α 相へ転移することが知られており、本研究の結果はこの相変化と一致する⁹⁾。

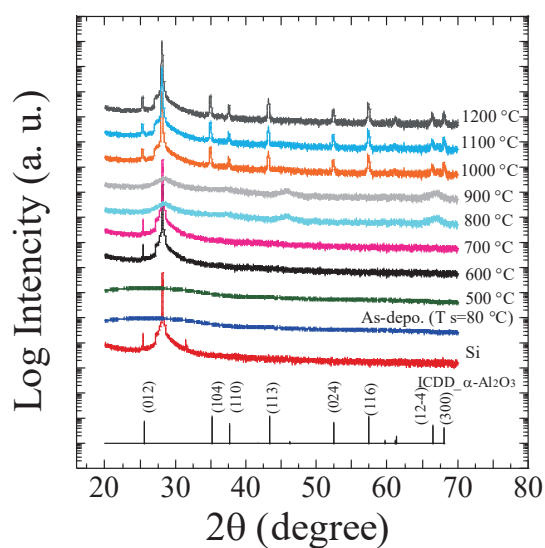


図 1. XRD 測定結果

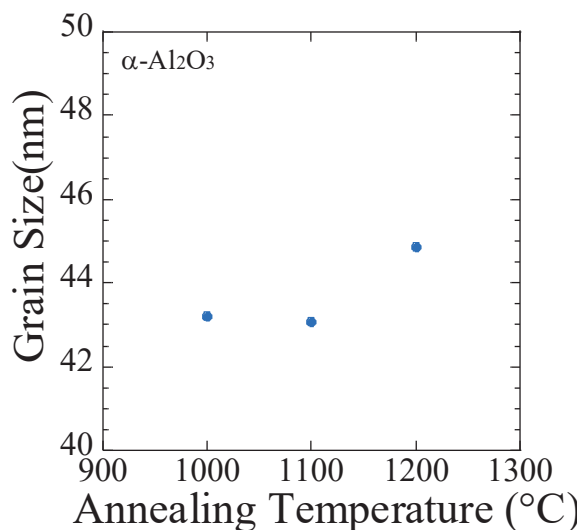


図 2. XRD 結果から算出した結晶子サイズ

また α -Al₂O₃のピークが確認された 1000~1200 °Cから格子定数を式(1)を用いて算出した。いずれの温度においても a 軸は 4.776 Å、 c 軸は 12.925 Å であり、 α -Al₂O₃の格子定数と概ね一致しており、アニールによる顕著な結晶格子の歪や組成変化は生じていないことが示唆される¹⁰⁾。

図 2 に 1000~1200 °Cの結晶子サイズを示す。結晶子サイズは 35 °C の(104)面のピークから式(2)を用いて算出した。900~1000 °Cでは約 43 nm であったが、1200 °Cで 44.8 nm に増加した。高温での保持により、結晶粒界のエネルギーが低下し、熱力学的に安定な状態を目指して粒成長が進んだと考えられる。

3.2. ラマン分光分析

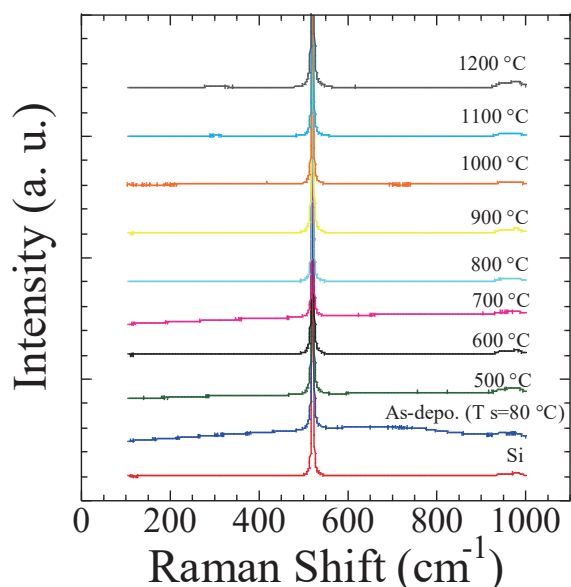


図 3. ラマン分光分析結果

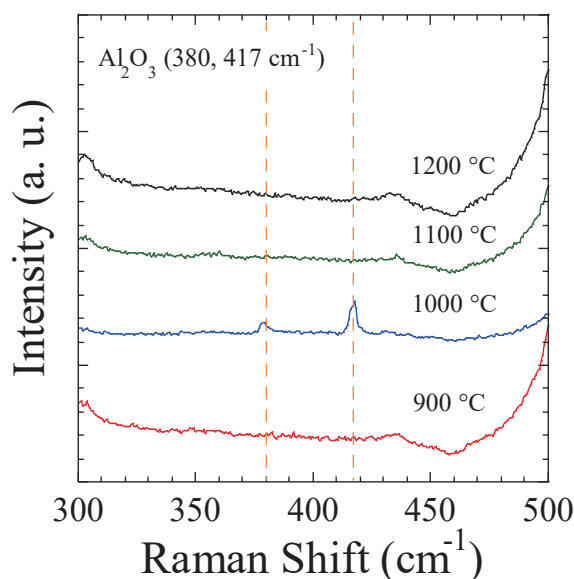


図 4. アニール温度 900~1200 °C の 300~500cm⁻¹ におけるラマン分光分析結果

図 3 に Si 基板、As-depo.(Ts=80 °C)、ならび 500~1200 °C でアニールした試料のラマンスペクトルを示す。全測定範囲では、いずれの試料においてもラマンシフト約 520 cm⁻¹ 付近に Si 基板に由来する強いピークが観測され、膜に起因するピークは明瞭には確認されなかった。そこで、図 4 に XRD で α -Al₂O₃ のピークが確認された 900~1200 °C 試料のうち、Al₂O₃ のピークが現れた 300~500 cm⁻¹ の波長

領域のスペクトルを示す。図 2 より、1000 °C 試料においてのみ、約 380 cm⁻¹ および 417 cm⁻¹ 付近に弱いピークが確認された。これらのピークは Al₂O₃ に起因するラマンバンドとして報告されており、1000 °C で Al₂O₃ の形成が示唆され、これは前述の XRD の結果と一致する⁸⁾。

一方で、XRD では 1000 °C 以上で α -Al₂O₃ の形成が示唆されたにもかかわらず、ラマン分光で 1100 °C および 1200 °C 試料において Al₂O₃ 由来ピークは明瞭に確認されなかった。これは、ラマン測定が表面近傍の局所情報に強く依存することに加え、高温アニールに伴う表面粗さの増大やクラック形成、背景成分の増加、ならびに膜厚や被覆の均一性により、膜由来信号が相対的に低下した可能性によるものと考えられる。

また XRD では、800 °C および 900 °C で γ -Al₂O₃ 相が生成されたことが示唆されている。しかし、 γ -Al₂O₃ はラマンアクティブではないため、ピークが観測されなかったと考えられる⁸⁾。

3.3. 表面観察 (SEM)

図 5 のに (a) スプレー塗布前の Si 基板、(b) As-depo.(Ts=80 °C)、(c) 900 °C、(d) 1000 °C、(e) 1100 °C、(f) 1200 °C でのアニール後試料の SEM 画像を示す。いずれのスプレー塗布の試料においても、クラックを有し島状に分裂しており、この構造様式自体はアニール温度によらず共通して観察された。それぞれの島状の膜は比較的平滑な表面と明瞭な輪郭を有しており、膜上には微細な粒子状構造が点在して観察された。この島状の膜のサイズはアニール温度の上昇に伴い小さくなる傾向を示した。アニール温度の上昇により膜内に発生・蓄積する熱応力が増大し、クラックが進行したため、結果として島状構造が細分化されたと考えられる。

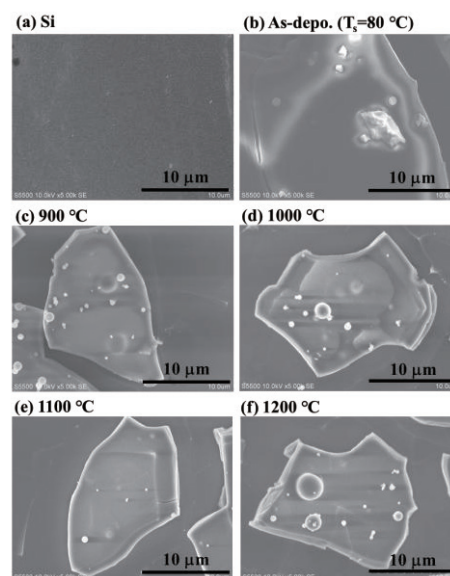


図 5. SEM による観察結果

XRD で α - Al_2O_3 のピークが確認された 1000~1200 °C のうち、1100、1200 °C でラマン分光分析のピークが確認されなかった。これは、アニール温度の上昇によるクラックや膜の細分化により、膜の検出可能な面積の低下によるものと考えられる。

3.4. 段差計

図に各温度でアニールした基板の表面粗さ R_{rms} を示す Si 基板に比べ、As-depo. ($T_s=80$ °C) 試料では表面粗さが増加しており、スプレー塗布により基板表面に膜が形成されたことが確認された。また、アニール温度の上昇により、表面粗さは増加する傾向を示した。As-depo. ($T_s=80$ °C) と 1100 °C のサンプルを比べると、As-depo. ($T_s=80$ °C) が 1310 nm であることにに対し、1100 °C のサンプルは 2981 nm であり、約 2 倍以上、表面粗さが上昇されたことが確認された。これは、SEM で観察された、アニール温度の増加による膜の微細化により、表面高さ分布のばらつきが大きくなったことに起因すると考えられる。

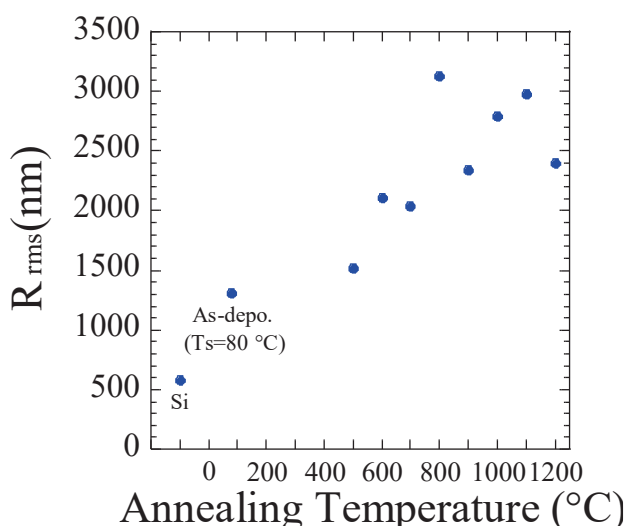


図 6. 段差形による表面粗さ測定結果

4. 結論

スプレー塗布により MAO を Si 基板上に初めて成膜し、アニールを行った。アニール後の基板の XRD より 1000 °C 以上のアニールにより安定な α - Al_2O_3 が形成されることが明らかとなった。この結果はラマン分光分析の結果からも示唆される。また膜の形態はクラックを有する島状のものであり、アニール温度の上昇により、膜の微細化により、表面粗さは増加する傾向を示した。これらの結果は、MAO スプレー塗布で得られた膜の結晶化挙動と形態変化を示す。

参考文献

- 1) K.T. Selvi, K. A. Mangai, J. Anita Lett, I. Fatimah, S. Sagadevan: Exploring the electrode materials for high-performance lithium-ion batteries for energy storage application. *Journal of Energy Storage*, Vol.92, 112208, 2024.
- 2) Q. Liu, Z. Yu, Y. Hu, M. Tang, Q. Zhang, M. Ye: Designing Advanced Separators Toward Lithium-Ion Batteries, *Adv. Energy Mater.* Vol.15, e03217, 2025.
- 3) D. Fu, B. Luan, S. Argue, M. N. Bureau, I. J. Davidson: Nano SiO_2 particle formation and deposition on polypropylene separators for lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, Vol.206, pp325–333, 2012
- 4) Q. Wang, J. Yang, Z. Wang, L. Shi, Y. Zhao, S. Yuan: Dual-Scale Al_2O_3 Particles Coating for High-Performance Separator and Lithium Metal Anode, *Energy Technol*, Vol.8, 1901429, 2020.
- 5) K. Yoshino, H. Tominaga, Y. Komaki, M. Imai, T. Higashi, T. Minemoto, Q. Shen, S. Hayase: Low-Temperature Growth of ZnMgO Thin Films by Atmospheric Spin-Coating Using Diethylzinc Solution, *Journal of Electronic Materials*, Vol.52, 5134–5139, 2023.
- 6) M. Imai, T. Kubota, A. Miyazawa, M. Aoki, H. Mori, Y. Komaki, K. Yoshino: Ultra-Thin Layer Inside Separator Deposited by Spray Pyrolysis Using Methylaluminoxane Solution, *Cryst. Res. Technol*, Vol.58, 2200203, 2022.
- 7) M. Imai, T. Kubota, A. Miyazawa, M. Aoki, H. Mori, Y. Komaki, K. Yoshino: Al_2O_3 Thin Layer Formed inside Porous Membrane Using Spray Synthesis Method and Its Application, *Crystals*, Vol.14, 195, 2024.
- 8) V. Edlmayr, M. Moser, C. Walter, C. Mitterer: Thermal stability of sputtered Al_2O_3 coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol.204, 1576–1581, 2010.
- 9) S. Lamouri, M. Hamidouche, N. Bouaouadjaa, H. Belhouchet, V. Garnier, G. Fantozzi, J. F. Trelkat: Control of the γ -alumina to α -alumina phase transformation for an optimized alumina densification, *boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, Vol.56, 47–54, 2017.
- 10) A. Kirfel, K. Eichhorn: Accurate structure analysis with synchrotron radiation. The electron density in Al_2O_3 and Cu_2O , *Acta Cryst.*, Vol.A46, 271–284, 1990.

公共データを用いた地盤情報予測手法の構築 —機械学習とガウス過程の地域特性に応じた適用—

堀田 英臣^{a)}・田村 宏樹^{b)}・内 幸彦^{c)}

Construction of Ground Information Prediction Method Using Public Data — Application of Machine Learning and Gaussian Process According to Regional Characteristics —

Hideomi HORITA, Hiroki TAMURA, Yukihiro UCHI

Abstract

While obtaining geotechnical information is indispensable for safe urban development, practitioners face two major challenges. First, the density of physical boring surveys is limited by cost and environmental constraints. Second, although a vast amount of public geotechnical data has been released by the government, its use in construction practice remains limited to visual inspection, and data-driven utilization has not yet progressed. To address these issues, this study constructed a system to predict "soil classification" and "N-values" at unsurveyed locations, using public boring survey data as training data. A comparative verification using "Machine Learning" and "Gaussian Processes" as prediction models revealed distinct regional characteristics: Gaussian Processes are suitable for regions with stable strata, whereas Machine Learning is suitable for "uneven regions" characterized by significant ground undulations. Based on these findings, an "Unevenness Score" was proposed as an index to quantify ground complexity. The results demonstrated that adaptively switching prediction models based on this score (with a threshold of 3.0) improves prediction accuracy compared to the uniform application of a single model.

Keywords: Machine learning, Gaussian process, Ground information prediction, Public data, N-value

1. はじめに

安全な都市開発において正確な地盤情報の把握は不可欠であるが、実務には大きく2つの課題が存在する。

第一に、ボーリング調査の実施制約である。地盤情報を知らうと思うと、ボーリング調査が必要になるが、そのボーリング調査は1地点の調査だけでも多大な費用と工期を要するため、広範な現場であっても実施数は限定され、得られる情報はあくまで「点」に留まるのが現状である。このため、地層の急激な変化（不陸）を見落とすリスクがあり、これが施工トラブルやコスト増大の要因となっている。

第二に、既存データの未活用である。国は「公共データ」として膨大なボーリング結果を公開しているが、現状は近隣参照などの限定的な利用に留まり、データサイエンスを用いた高度な予測への活用は進んでいない。

このような背景から、公共データから地盤情報を予測する研究は行われている[1][2]。しかし、これらの多くは

評価地域を一括で扱っており、地盤の複雑さといった地域特性が予測モデルに与える影響については十分に考慮されていない懸念がある。

そこで本研究では、地盤の安定性や複雑性といった「地域特性」に着目し、公共ボーリングデータを活用した未調査地点の予測を通じて、特性に応じた最適な予測モデル（機械学習・ガウス過程）および学習半径を解明することを目的とする。

2. 予測モデル

本研究では、性質の異なる2種類のモデルを用いて地盤情報の予測を行う。

2.1 ガウス過程（GP）

地盤工学における空間補間手法としては、古くからクリギング（Kriging）が一般的に用いられてきた。しかし、クリギングはバリオグラムモデルの選定やパラメータのチューニングに専門的な知識と多大な労力を要するという課題がある。これに対し、ガウス過程（Gaussian Process: GP）は、カーネル関数の最適化を対数尤度最大化によって自動化できるため、客観的かつ効率的な予測が可能である。

a)工学専攻先端情報コース大学院生

b)工学教育研究部工学科電気電子システムプログラム教授

c)工学研究科先端情報コース教授

本研究では、地盤情報の空間的な連続性を考慮するため、距離に応じた相関を表現できる GP を採用する。GP は予測値と同時に予測分散（不確かさ）を算出できる利点を持つ一方、地層の急激な変化などの非線形な挙動の表現には限界がある。

2.2 Extra Trees (ET)

上述の統計的手法に対し、データ駆動型的手法として機械学習の一種である Extra Trees (ET) を採用する。ET は決定木をベースとしたアンサンブル学習手法であり、各ノードの分割をランダムに行うことで、ランダムフォレスト以上に過学習を抑制できる特性を持つ。地盤データは、支持層の急激な起伏（不陸）や土質の不連続な変化といった複雑な非線形性を有する。ET はこのような複雑なパターンをデータから直接学習する能力に優れており、GP が苦手とする急峻な地層変化の予測において有効な手法となり得る。

3. データセットと 2 段階予測

3.1 データセットの概要

本研究では、国土交通省らが公開する「国土地盤情報検索サイト (KuniJiban)」[3] にて公開されている、東京都内の公共ボーリングデータ約 23,670 地点を対象とした。

収集したデータには、各地点の空間情報（緯度・経度・孔口標高）および深度方向の地盤情報（深度・土質区分・N 値）が含まれる。本研究の予測対象は、建築設計において極めて重要な指標である、土の種類を示す「土質区分」と、地盤の硬締め具合を示す「N 値」の 2 指標である。

元のボーリングデータは、土質変化に応じた数 cm 単位の層厚で記録されており、サンプリング間隔が一定ではない。一方で、N 値は標準貫入試験の実施間隔である深度 1.0m ごとに測定されるのが一般的である。そこで、解析の標準化を図るため、すべてのデータを深度 1.0m ピッチでリサンプリングし、各深度における土質情報を N 値の測定位置へ紐付ける前処理を行った。これにより、情報の粒度を統一し、機械学習モデルが学習可能な形式へと再構築した。

3.2 2 段階予測プロセス

地盤情報は、定性的な「土質区分」と定量的な「N 値」という性質の異なる 2 つの指標で構成される。地盤工学的な知見に基づけば、N 値の分布傾向は土質区分に大きく依

存する。例えば、粘性土は N 値が低く安定する傾向にあるのに対し、砂礫層は N 値が高くばらつきも大きい。このように、N 値は「どの土質に属しているか」というコンテキストに強く影響される。

したがって、これらを独立した変数として別々に予測するのではなく、「先に土質を特定することで、N 値の予測精度を高められる」という仮説が成り立つ。本研究ではこの仮説に基づき、予測プロセスを以下の 2 段階に分割する手法を構築した。

Step 1 : 土質区分の予測

第 1 段階では、対象地点の空間情報（緯度・経度・標高）および深度を入力変数とし、その地点の土質区分を予測する。このステップにより、未調査地点における土質区分の構成を推定する。

Step 2 : N 値の予測 第 2 段階では、空間情報と深度に加え、Step 1 で予測された「土質区分」を新たな入力特徴量としてモデルに与え、最終的な N 値を予測する。これにより、モデルは「この深度は砂層である」といった情報を前提として N 値を推論できるため、地質特性を反映した高精度な予測が可能となる。

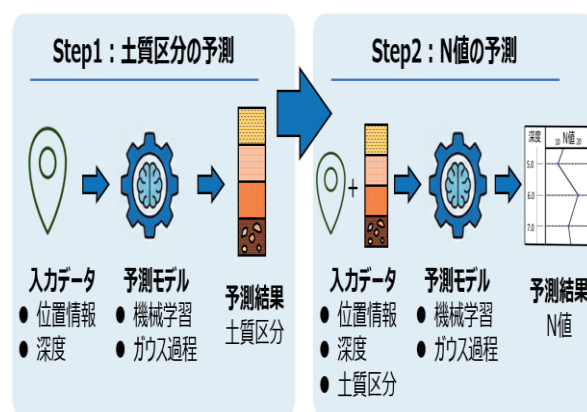


図 1. 地盤予測の 2 段階プロセス概要

4. 地域特性に応じた予測性能の検証

4.1 不陸の定義と予測の重要性

地盤情報の予測において、最も大きな課題となるのが地盤の「不陸（ふりく）」である。不陸とは、地層の境界や建物を支える支持層の深さが、水平方向に対して一定ではなく、急激に変化している状態を指す。安定した地域では、数地点のボーリングデータから周囲の地層を容易に推定できる。しかし、不陸が顕著な地域では、わずかに数メートル隣であっても支持層の深さが数メートル単位で変動す

ることがある。このような地点で予測を見誤ると、杭が支持層に届かない「支持層未達」や、建物の重みで不均一に沈む「不同沈下」を招くなど、施工上の重大なリスクに直結する。したがって、地盤予測モデルには、単なる全体の平均的な精度だけでなく、不陸のような局所的な変化をいかに正確に捉えられるかが求められる。

4.2 検証地域の選定

本研究では、地盤の複雑さが予測精度に与える影響を明らかにするため、対照的な特性を持つ以下の2つの地域を検証対象として選定した。

1. 安定地域（練馬区・杉並区周辺）

- 範囲：北緯 35.7° ～ 35.8°
東経 139.6° ～ 139.7°
- データ数：1,687 地点
- 地学的特徴：武蔵野台地上に位置し、関東ローム層が厚く堆積している。地層が水平方向に規則正しく連続しており、施工経験的にも「地質リスクが少なく安定している」と判断されるエリアである。

2. 不陸地域（渋谷・四谷周辺）

- 範囲：北緯 35.66° ～ 35.67°
東経 139.68° ～ 139.74°
- データ数：330 地点
- 地学的特徴：武蔵野台地が中小河川によって浸食されて形成された地域。台地面（関東ローム層）と谷底低地（沖積層）が複雑に入り組んでおり、わずか数百メートルの範囲内で支持層深度が急激に変化する特徴を持つ。



図 2. 安定地域・不陸地域の選定場所

4.3 実験方法

上述した特性の異なる2地域において、予測地点の周囲に存在する既存のボーリングデータをどの程度の範囲まで参照すべきかを検証した。具体的には、学習に用いる近隣データの参照範囲（以下、学習半径）を 0.1km から 1.0km まで 0.1km 刻みで段階的に拡大させ、各半径における予測精度の推移を算出した。

本実験では、各地域からランダムに選定した 100 地点を「評価用地点」として固定した。学習半径を変化させる際も、これら 100 地点の場所は変えず、それぞれの評価地点

を中心とした指定半径内に含まれるボーリングデータを学習データとしてモデルを構築し、予測を行った。

これにより、同一の地点群に対して「参照範囲を広げることが予測精度の向上に寄与するのか」、あるいは「遠方のデータを参照することがノイズとなり精度を低下させるのか」を定量的に観測した。予測モデルにはガウス過程および機械学習を用い、地域特性（安定・不陸）ごとの最適な学習半径およびモデルの適合性を比較・検証した。

4.4 評価方法

予測精度の評価には、以下の2つの指標を用いた。

1. 土質区分の評価（正解率：Accuracy）

地層全体の再現性を確認するため、全深度における土質の一致率を算出した。評価の手順として、まず 4.3 節で選定した固定 100 地点のそれぞれにおいて、地表面から最終深度までの予測を行う。次に、全 100 地点の全深度における「予測された土質」と「実際の土質」を 1 メートルピッチで照合し、その総判定数に対する正解数の割合を算出する。例えば、固定 100 地点の深度の合計（データ総数）が 2,000 サンプルであった場合、分母となるこの「2,000」という数値は、学習半径を変化させても一定である。これに対し、参照する周辺データ（半径）が変わることで、モデルが導き出す予測結果、すなわち「正解数」が変化する。この正解数の推移を百分率で表すことで、学習半径の変化が土質予測に与える影響を定量化した。具体的な算出式を以下に示す。

$$\text{正解率(\%)} = \frac{\text{正解数の合計}}{\text{予測数の合計}} \times 100$$

ここで、予測数の合計とは固定 100 地点における全深度の判定サンプル数の総和であり、学習半径によらず不変である。この指標を用いることで、各モデルが参照範囲の拡大に伴って、どれだけ精度を向上・維持させられるかを評価した。

2. N 値の予測精度評価（平均絶対誤差：MAE）

次に、地盤の硬締めり具合を示す定量的な指標である「N 値」の予測精度を評価した。特に実務上の施工リスクを考慮し、本研究では「支持層」における N 値の予測精度に着目した。支持層の判定基準は、建築基礎構造設計指針に基づき、以下の3つの条件をすべて満たす地層とする。

- 土質区分が「砂質土」または「礫（れき）質土」であること
- N 値が 30 以上であること
- 上記の状態が深度方向に 3 メートル以上連続していること

評価の手順として、固定 100 地点のうち、実際に上記の支持層条件を満たしている区間（深度）のみを抽出する。その支持層区間において、「実際の N 値」と「予測された

N 値」の差(誤差の絶対値)を算出し、その平均値である平均絶対誤差 (MAE : Mean Absolute Error) を指標とした。具体的な算出式を以下に示す。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \text{実測 N 値}_i - \text{予測 N 値}_i \right|$$

例えば、実際の支持層区間における N 値が 40 であり、モデルによる予測が 35 であった場合、そのデータの誤差は 5 となる。この計算を、学習半径ごとに固定 100 地点の「支持層内」の全サンプルに対して行い、平均値を算出した。これにより、参照範囲(学習半径)の変化が、建物を支える重要な地層の N 値予測にどのような影響を与えるかを検証した。

以上の 2 指標を用いることで、土質という定性的な情報と、支持層深度という施工リスクに直結する定量的な情報の両面から、各モデルおよび学習半径の有効性を多角的に検証した。

5. 検証結果と考察

5.1 安定地域における検証結果

安定地域における、学習半径の変化に伴う予測精度の推移を図 3 に示す。図中の赤線はガウス過程、青線は機械学習を示し、実線は土質区分の正解率、点線は N 値の MAE の推移をそれぞれ表している。

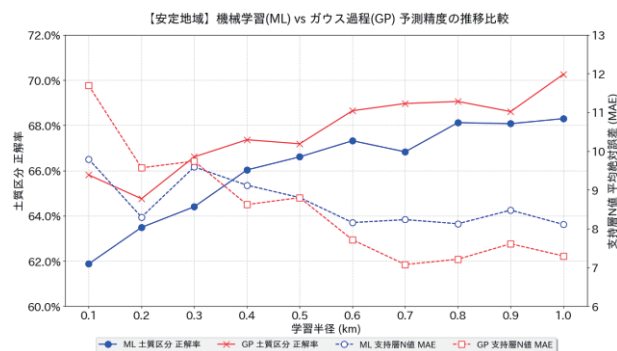


図 3. 安定地域における学習半径と予測精度の関係

全体的な傾向として、安定地域においては学習半径を拡大させるほど両モデルの精度が向上する傾向が見られた。特に土質区分においては、すべての学習半径においてガウス過程が機械学習を一貫して上回る精度を示した。一方で N 値の予測精度については、学習半径 0.5km までは機械学習が優位であったものの、0.5km を超えるとガウス過程の精度向上が顕著となり、精度が逆転した。

このように、安定地域において広範囲のデータを参照するほど予測精度が向上し、最終的にガウス過程が最も優れた性能を示した要因として、対象地域の地質構造が挙げられる。安定地域は、地層が水平方向に規則正しく連続して

堆積している。そのため、より広域のボーリングデータを参照するほど、地質構造の全体像(マクロな傾向)をモデルが捉えやすくなるポジティブな効果が働いたと考えられる。

特にガウス過程は、近傍のデータに高い重みを与えつつ、距離に応じて統計的な推論を行う特性を持つ。地層の連続性が高い環境下では、この距離依存の重み付けが有効に機能し、広範囲のデータから地層の連続性を正しく抽出できたと推察される。

以上の結果から、地盤構造が単純で安定した地域においては、学習半径を 1.0km まで広範に設定し、予測モデルとしてガウス過程を採用することが、土質・N 値の両面において最も有効であると判断できる。

5.2 不陸地域における検証結果

不陸地域における、学習半径の変化に伴う予測精度の推移を図 4 に示す。

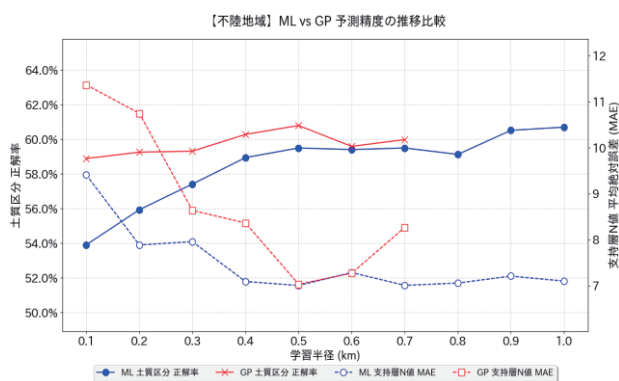


図 4. 不陸地域における学習半径と予測精度の関係

検証の結果、不陸地域においては安定地域とは大きく異なる挙動が確認された。まず機械学習に着目すると、土質区分および N 値のいずれの指標においても、学習半径の拡大に伴って精度が着実に向上し、半径 1.0km において最も高い精度を記録した。これに対し、ガウス過程は学習半径 0.5km 付近をピークとして、それ以降は半径を拡大させるほど逆に精度が悪化するという「精度の逆転現象」が生じた。

このように、不陸地域においてガウス過程の精度が低下した要因として、ガウス過程が持つ「距離依存の空間補間」という特性が、複雑な地盤構造においては負の影響を与えたことが考えられる。不陸地域では、わずかな距離で地層が不連続に変化するため、参照範囲を広げすぎると周囲の異なる地質データがノイズとして処理され、予測値が平滑化(平均化)されてしまったものと推察される。なお、ガウス過程は計算負荷が非常に高く、本実験環境においても学習半径 0.7km を超えた段階でメモリ不足により計算不能となった。このことから、不陸地域のようなデータ密度

の高いエリアにおいて、ガウス過程を広域に適用することには実務運用上の制約も存在する。

一方で、機械学習が半径 1.0km まで精度を向上させ続けたのは、決定木ベースのアルゴリズムが、地形の不連続な変化を「非線形なパターン」として柔軟に学習できたためである。不陸地域のような地質リスクの高いエリアにおいては、単純な統計的補間よりも、大量のデータから局所的な特徴を抽出する機械学習の有効性が示された。

以上の結果から、地層の起伏が激しい不陸地域においては、ガウス過程よりも機械学習を採用することが適しており、学習半径を 1.0km まで広げて十分な学習データを確保することで、高い予測精度が得られることが明らかとなった。

6. 不陸スコアの提案

6.1 不陸スコアの定義と算出方法

第 5 章の実験結果より、対象地域の地盤特性（安定・不陸）に応じて最適な予測モデルが異なることが明らかとなった。実務において未調査地点の予測を適切に行うためには、対象地点の特性に合わせてモデルや学習半径を使い分けることが望ましい。

しかし、実務上の大きな課題は、予測を行いたい未調査地点が「安定地域」に属するのか「不陸地域」に属するのかを、事前のボーリング調査なしに判断することが困難である点にある。既存の地質図等でおおまかな傾向は把握できるものの、数メートル単位での急激な変化の有無を客観的に判別する指標はこれまで存在しなかった。

そこで本研究では、予測を行う前に、周辺の既存公開データのみを用いてその地点の地盤の複雑性を定量化する新たな指標として「不陸スコア」を提案する。

不陸スコアの具体的な算出手順を以下に示す。

1. データの選別（目的外データの除外）：

対象地点を中心とした半径 1.0km 以内のボーリングデータを抽出する。この際、支持層の把握を目的としない簡易的な表面調査（短尺のボーリング）によるノイズを排除するため、**全データのうち調査深度が深い上位 70%のデータのみを抽出する。**

2. 表層除外：

人工的な埋土や造成の影響を排除し、自然堆積層本来の起伏を純粋に評価するため、**地表面から深度 3m までの表層データを除外する。**

3. 水平スライス：

除外区間より深いデータに対し、深度方向へ 50cm 間隔で水平断面を切る。

4. 土質種類のカウント：

各断面において出現する土質区分の種類数をカウントする。土質は「礫・砂・シルト・粘土・ローム・その他」の最大 6 種類とする。

5. 平均化：

全断面の種類数を合計し、断面数で除した平均値を算出して不陸スコアとする。

不陸スコアの算出例を図 5 に示す。例えば、ある 4 つの断面における土質の種類数が、深度 11.5m で 1 種類、11.0m で 2 種類、10.5m で 2 種類、10.0m で 3 種類であった場合、合計値（8）を断面数（4）で除した「2.0」がその地点の不陸スコアとなる。スコアは 1 か 6 の範囲をとり、1 に近いほど地盤が安定しており、数値が大きくなるほど水平方向の土質変化が激しい「不陸」の度合いが高いと判定できる。

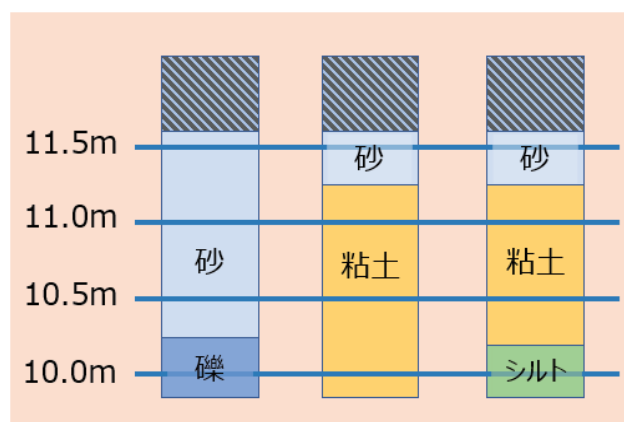


図 5. 深度ごとの土質種類数カウントとスコア算出例

6.2 不陸スコアを用いたモデル選定基準の検証

6.2.1 適用事例による検証（1 地点での検証）

提案した不陸スコアが、実際の地盤の複雑性をどの程度正確に反映しているかを検証するため、対照的な特性を持つ地点においてスコアの算出を行った。

まず、地層が比較的連続している安定地域の代表地点において算出を行った結果、算出例を図 6 に示す通り、不陸スコアは **3.119** となった。

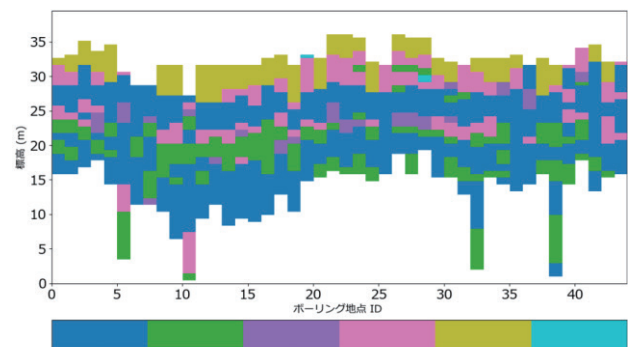


図 6. 安定地域における算出事例（スコア：3.119）

これに対し、台地と谷底が入り組み水平方向の土質変化が激しい不陸地域の代表地点では、図 7 の通りスコアは 4.693 という高い値を記録した。

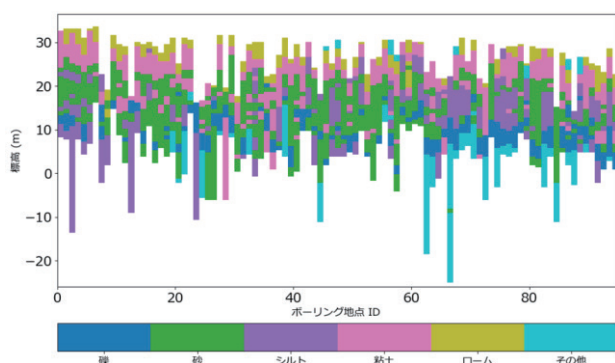


図 7. 安定地域における算出事例 (スコア : 4.693)

この結果から、不陸スコアは、目視による地学的特徴の把握と整合しており、水平方向の地層変化が著しい地点において、その複雑性を客観的かつ感度良く数値化できることが確認された。

6.2.2 100 地点への適応結果

次に、検証対象とした全 100 地点に対し、不陸スコアを算出した結果を図 8 に示す。図は、安定地域と不陸地域それぞれのスコア分布を箱ひげ図で表したものである。

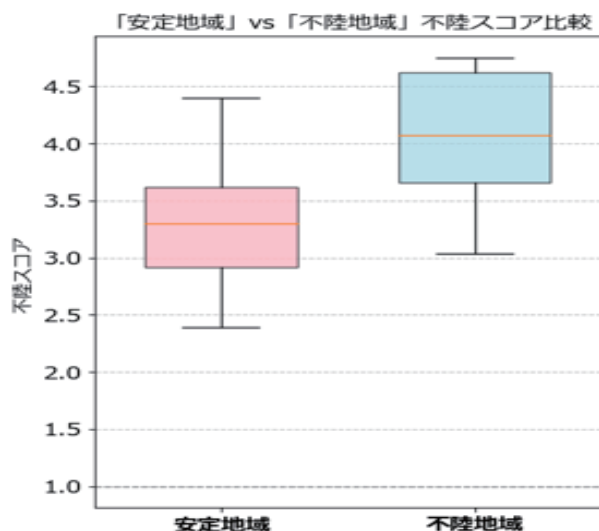


図 8. 安定地域と不陸地域における不陸スコアの分布

箱ひげ図の分布を確認すると、安定地域の地点はスコアの低い範囲に集中しているのに対し、不陸地域の地点は高スコア側に広く分布しており、両地域の地質的な不連続性の差異が本指標によって明確に峻別できていることがわかる。

本研究では、算出した不陸スコアに基づき、ガウス過程と機械学習を適応的に切り替える運用を提案する。検証の結果、モデル選定の閾値を「3.0」に設定した。この数値設定は、予測精度の最適化に加え、実務における施工リスクの回避を最優先としたものである。

地盤予測におけるリスクを検討すると、安定地域において機械学習を適用した際の精度低下は限定的であり、実務上の致命的な問題には至りにくい。一方で、**不陸地域においてガウス過程を適用することは、施工上の甚大なリスクとなる。** ガウス過程は空間的な連続性を重視するため、地層の急激な変化（不陸）を平滑化して予測する傾向がある。そのため、本来警戒すべき複雑な地層変化を見落とし、地盤沈下や施工不良を招く危険性を孕んでいる。

図 8 のスコア分布を確認すると、**不陸判定された地点の最低不陸スコアはすべて 3.0 以上**となっている。そこで、不陸の兆候を確実に捉え、不適当なモデル選択によるリスクを完全に排除するために、安全側の閾値として 3.0 を設定した。

これにより、地層変化が激しい地点を機械学習の適用範囲として安全側に網羅し、施工上の重大なトラブルに直結する不陸の見落としを確実に防止できる。一方で、安定地盤と判定された地点にはガウス過程を適用することで、空間的な連続性を最大限に活かした予測精度の向上が可能となる。このように、不陸スコアに基づきモデルを適応的に切り替える手法は、実務における「施工リスクの回避」と「予測精度の最大化」を両立させるシステムであると考えられる。

7. 結論

本研究では、公共ボーリングデータを用いた未調査地点の地盤予測において、地域特性に応じた最適モデル選定手法を構築した。得られた知見を以下にまとめる。

(1) 地域特性とモデル適合性の解明

地層が連続的で平滑な「安定地域」では、空間的な相関を考慮するガウス過程が高い予測精度を示す一方、地層変化が激しい「不陸地域」では、局所的な変化に柔軟に対応できる機械学習が有効であることを明らかにした。また、いずれのモデルにおいても、**周辺 1km の広域まで学習範囲を広げることで予測精度を最大化できる**ことを確認した。

(2) 不陸スコアによる客観的評価の実現

地質断面の多様性に着目した「**不陸スコア**」を提案し、地盤の複雑性を定量的に評価することを可能とした。本指標を用いることで、安定地盤を低スコア、複雑な地盤を高スコアとして定量化でき、地学的判断を客観的数値で裏付ける有効な感度を有していることを実証した。

(3) 施工リスクを考慮した適応的予測モデルの構築

実務運用において、本研究では安全側の閾値として「**スコア 3.0**」を設定し、モデルを適応的に切り替える予測体制を確立した。この手法により、以下の2点を実現した。

- **施工リスク回避：**
不陸地域を機械学習の適用範囲として安全側に網羅し、施工上の重大なトラブルを招く急激な地層変化の見落としを確実に防止する。
- **精度の最大化：**
安定地盤と判定された地点にはガウス過程を適用することで、空間的な連続性を最大限に活かした予測強度の向上を実現する。

参考文献

- 1) Akari Inc.: “オープンデータを用いた N 値予測の試み”, Tech Blog, 2025.
- 2) M. Abukmeil, and others: “Machine learning analysis of borehole data for geotechnical insights”, Geotechnical and Geological Engineering, 2024.
- 3) 国土交通省・国立研究開発法人土木研究所:
“国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」”,
<https://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/>, (参照 2026-01-24).

ZEB 化に向けた窓型太陽電池の熱利用による熱電発電の検討

森 舞桜^{a)}・太田 靖之^{b)}・西岡 賢祐^{c)}・永岡 章^{b)}

Investigation of Thermoelectric Power Generation Using Heat from Window-Integrated Photovoltaics for ZEB Applications

Mao MORI, Yasuyuki OTA, Kensuke NISHIOKA, Akira NAGAOKA

Abstract

In Zero Energy Buildings (ZEBs), the effective use of renewable energy technologies is essential for reducing building energy consumption and achieving carbon neutrality. Photovoltaic (PV) modules are increasingly being installed not only on rooftops, but also on façades and window areas as building-integrated photovoltaic systems. Window-integrated PV modules are attractive because they can generate electricity while maintaining the function of windows in buildings. However, PV modules absorb a large amount of solar radiation during operation, and their surface temperature can rise significantly. Since the power generation efficiency of PV modules generally decreases as temperature increases, thermal management is an important issue for improving their performance and reliability. At the same time, the heat generated by PV modules can be regarded as a useful thermal energy source rather than wasted energy. The temperature range of window-integrated PV modules can reach approximately 50–80 °C under solar irradiation, which is suitable for low-temperature heat utilization. This study focuses on the combined use of window-integrated PV modules and thermoelectric generators. Thermoelectric generators can directly convert a temperature difference into electrical energy, and therefore they have the potential to recover unused heat from PV modules. By utilizing both the electrical output and the thermal energy of PV modules, this system may contribute to improving the overall energy performance of ZEBs. Therefore, this study investigates the feasibility of thermal energy harvesting from window-integrated PV modules for thermoelectric power generation.

Keywords: Zero Energy Buildings, Photovoltaic, Thermoelectric

1. はじめに

我々の生活は、大量のエネルギーを消費することによって支えられている。日本は現在、全発電量の約 6 割を火力発電が担っておりその燃料の大部分は輸入に依存している。将来的な脱炭素化を見据えると、再生可能エネルギーの導入拡大は急務である。電力需要の増加は電化によって、現状よりもさらに増加する可能性が極めて高い。その中で、建築物単位で省エネルギーと創エネルギーを両立させる Zero Energy Building (ZEB) による、太陽光発電を中心とした自給自足型エネルギーシステムが重要視されている。ZEB とは、建物だけで太陽電池を主力とした自家発電を行い、その供給した電力を用いて、建物内で自家消費することで電力消費を実質ゼロにする概念である。高層ビルや大型商業施設を ZEB 化することによって、建築物の電力消費を低減させることが可能である²⁾。さらにはこれまで使われてこなかった未利用スペースで発電ができれば、太陽光発電を設置するために必要な山間部や平地を得るための森林伐採等をせずに済む可能性もあり、特に窓面への太陽電池導入は、建築外装と一体化しながら発電が可能である点から都市利用スペースで

発電ができれば、太陽光発電を設置するために必要な山間部や平地を得るための森林伐採等をせずに済む可能性もあり、特に窓面への太陽電池導入は、建築外装と一体化しながら発電が可能である点から都市部での普及が期待されている。日本における太陽光発電の累積導入量は年々増加しており、世界的に見ても太陽光発電システムの導入は拡大を続けている。日本は 2023 年時点でアジア太平洋地域において第 3 位の累積導入量を有しており、今後もさらなる普及が見込まれる。一方で、日本は中国やアメリカと比較して国土面積が小さく、設置可能な用地には制約がある。このため、自国でのエネルギー創出を推進するには、これまで十分に活用されてこなかった空間の有効利用が、カーボンニュートラル実現に向けて重要となる。

太陽電池は運転時に 50～80 °C まで温度上昇し、その結果として発電効率が低下するという課題を抱える³⁾。したがって、窓型太陽電池に対する熱マネジメント技術は ZEB 実現に向けて重要な研究課題となっている⁴⁾。一方で、この温度上昇は未利用熱の存在を意味しており、近年ではその有効活用手法として、熱を直接電気に変換できる熱電発電が注目されている。熱電発電は可動部を持たず小型化が容易であり、建築外装への分散配置に適していることから、ZEB との高い親和性を有する。本研究では、窓型太陽電池を熱源として着目し、熱電素子の設置可能性について検討した。

a) 工学研究科先端情報コース大学院生

b) 電気電子システムプログラム准教授

c) 電気電子システムプログラム教授

2. 実験方法

2.1 設置方法

図1に示す宮崎大学に設置された窓型太陽電池を熱源として利用し、その熱電発電性能を評価した。図1より、太陽電池設置窓の窓枠部分が高温となっていることが確認される。対象とする窓型太陽電池は南向きに設置されており、年間を通じて直達日射を受けやすい環境にある。本研究では、窓型太陽電池の発熱により生じる温度勾配を熱電発電に利用することを目的として、太陽電池設置窓の窓枠および同一方位に位置する太陽電池未設置窓のそれぞれに、 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ の熱電発電素子 (TG) を設置した。また、太陽電池設置窓および未設置窓における日射量と発電量、ならびにTGの発電量との関係について検討した。日射量は直達日射計および水平日射計を用いて測定した。



図1. 宮崎大学に設置した窓型太陽電池

2.2 冷却方法

日中における電圧特性、温度特性および熱流特性を計測した。熱電発電では温度差の確保が発電量に大きく影響するため、冷却方式の違いによる発電量の変化についても検討した。本研究では、大気との自然温度差、ヒートシンク、水冷用金属(図2)の3種類の冷却方法を用いた。ヒートシンクは放熱により冷却し、水冷用金属はチラーを用いて水を循環させることで冷却した。

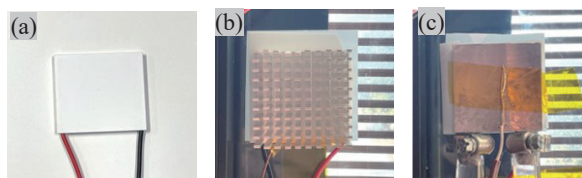


図2. 各冷却方法の装置図

(a) 無冷却のTG、(b)ヒートシンク、(c)水冷用金属

3. 実験結果および考察

3.1 太陽光未設置窓における熱電特性

図3に2025年8月14日(10:00~17:00)の晴天日における太陽電池未設置窓の温度、設置TG出力電圧、熱流束および日射量を示す。

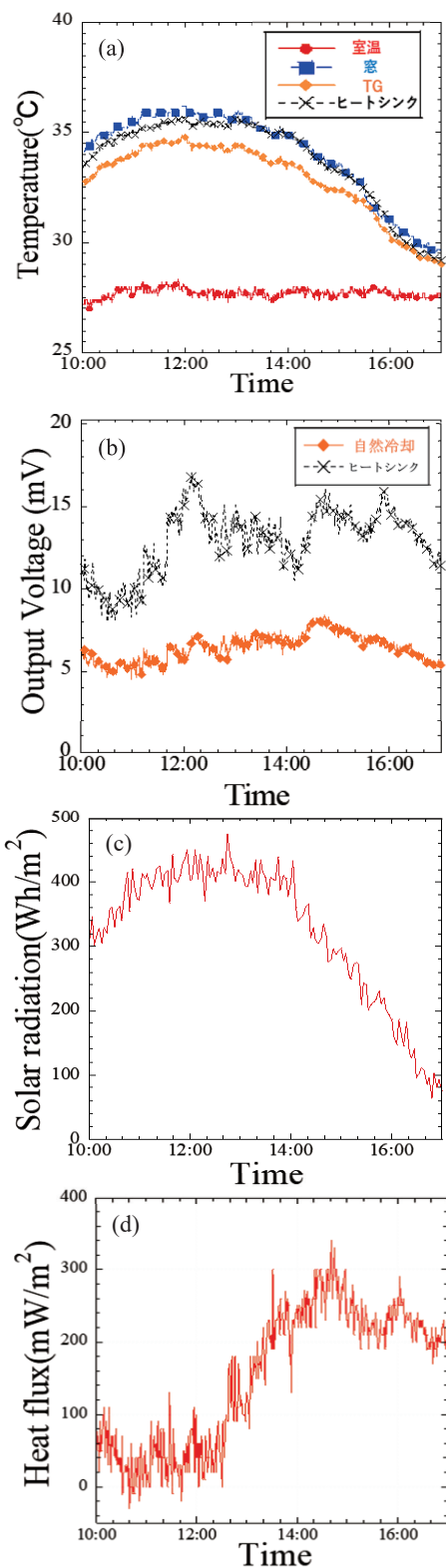


図3. 2025年8月14日における太陽光未設置窓の各種パラメーター(a)各温度、(b)各出力電圧、(c)日射量、(d)熱流束

窓と室温との温度差が約 10°C のとき、TG の出力電圧は最大約 8 mV であった。一方、ヒートシンクを取り付けた場合には、放熱効果により温度差が増大し、出力電圧は最大約 18 mV まで向上した。また、TG の出力電圧の増減は日射量の変動と対応しており、ヒートシンク使用時に出力電圧が最大となる時刻に日射量も最大となった。これらの結果から、日射量の変動が TG の出力電圧に影響を与えていると考えられる。さらに、熱流束の結果より、熱が窓から室外へ移動していることが確認され、室温を冷却源として利用可能であることが示唆された。

3.2 窓型太陽光電池における熱電特性

図 4 に 2025 年 8 月 14 日 (10:00~17:00) の晴天日における窓型太陽電池の温度、設置 TG 出力電圧、熱流束および日射量を示す。窓と室温との温度差が約 3°C のとき、TG の出力電圧は最大約 5 mV であった。これは、窓型太陽電池の表面温度が日射により上昇し、自然空冷条件下においても TG 両端に温度差が形成されたことを示している。一方、ヒートシンクを取り付けた場合には、放熱効果により温度差が増大し、出力電圧は最大約 10 mV まで向上した。さらに、水冷システムを用いた場合には、出力電圧は最大約 20 mV に達し、3 条件の中で最も高い発電性能を示した。出力電圧は冷却方法に大きく依存しており、水冷時には出力電圧の変動が顕著に観測された。これは、水冷に用いたチラーが一定温度に達すると冷却を行う制御機構によるものと考えられる。水冷は高い出力電圧を示す一方で電力を消費するため、冷却方法については今後さらなる検討が必要である。以上の結果から、窓型太陽電池における未利用熱を熱電発電により回収できる可能性が示され、ZEB における熱マネジメント技術としての応用が期待される。

3.3 夏季と冬季の熱電発電比較

夏季 (2024 年 8 月 5 日) および冬季 (2024 年 12 月 8 日) の晴天日における太陽電池未設置窓の TG 出力電圧の比較を示す。TG の出力電圧は、冬季の方が夏季よりも高い値を示した。一般に夏季の方が日射量は大きい、太陽電池は垂直に設置されているため、太陽高度の違いが窓面への入射日射量に大きく影響する。すなわち、夏季は太陽高度が高く、日射は窓面に対して斜めに入射するのに対し、冬季は太陽高度が低く、窓面に対してより正対に近い角度で入射する。このため、冬季の方が窓面に入射する日射量が増加し、その結果として高い出力電圧が得られたと考えられる。

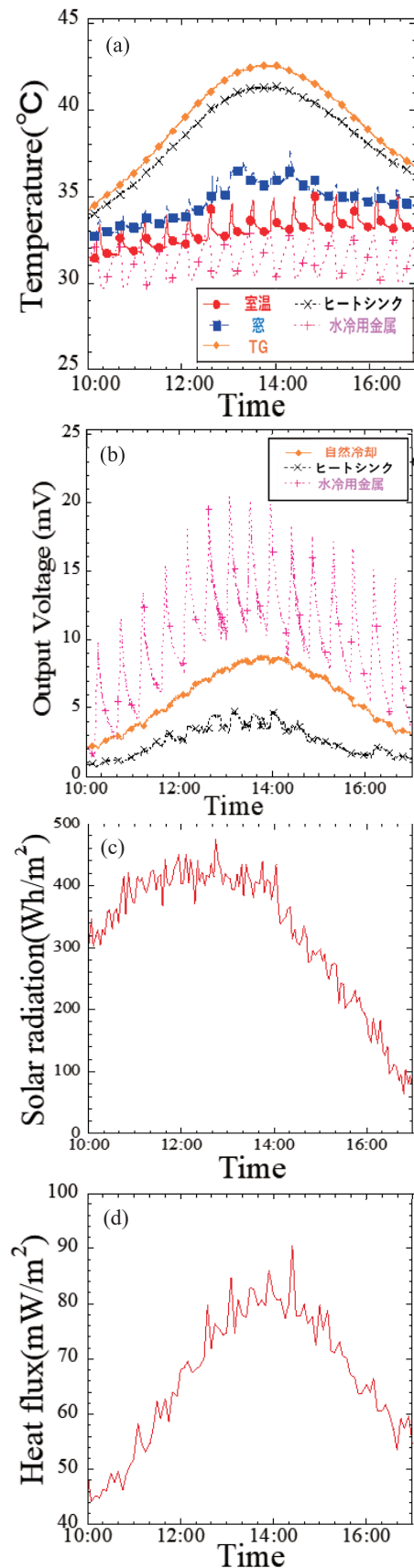


図 4. 2025 年 8 月 14 日における窓型太陽電池の各種パラメーター(a)各温度、(b)各出力電圧、(c)日射量、(d)熱流束

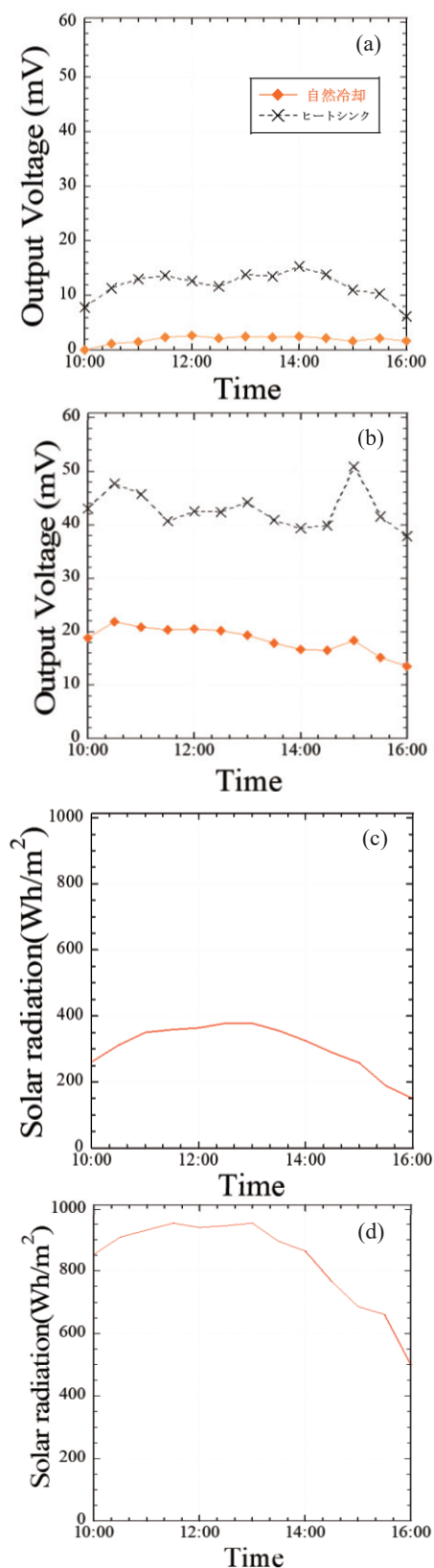


図 5. 夏季および冬季の熱電発電比較(a)2024 年 8 月 5 日の出力電圧 (b)2024 年 12 月 8 日の出力電圧(c) 2024 年 8 月 5 日の日射(d)2024 年 12 月 8 日の日射量

3.4 冷却方法の検討

本研究では、自然冷却、ヒートシンク、水冷用金属の 3 種類の冷却方法を用いて、冷却方式の違いが熱電発電性能に与える影響を検討した。その結果、水冷用金属を設置した場合に TG の出力電圧が最も大きくなり、冷却側の温度を低下させることが熱電発電性能の向上に有効であることが確認された。これは、熱電発電において高温側と低温側の温度差が出力電圧に大きく影響するためであり、冷却性能の向上により TG 両端の温度差が拡大したためと考えられる。

一方で、水冷方式は高い冷却性能を有するものの、チラーやポンプによる水循環を必要とするため外部電力を消費する。このため、得られる発電量に対して冷却に要するエネルギーが増大する可能性があり、ZEB への応用の観点からは必ずしも最適な冷却方法とは言えない。そこで本研究では、新たな放熱機構の導入により冷却側の熱伝達率を向上させ、発電性能のさらなる向上を図る。

具体的には、検討対象として Metal-organic framework (MOF) に着目した。MOF は水の吸着・脱離に伴う熱移動を利用することで、外部電力を必要としない冷却材料としての応用が期待される。夜間や低温・高湿度環境では水分を吸着し、日中の温度上昇時には吸着水が脱離する。この脱離過程において熱が消費されるため、冷却効果が発現する可能性がある。

先行研究においては、最大で起電力が 100 % 向上することが確認されている。しかしながら、水の吸着・脱離およびそれに伴う冷却メカニズムについては十分に解明されていない⁹⁾。そこで本研究では、図 7 に示すように、MOF を担持したアルミニウム基板をホットプレート (40 °C) 上に設置した熱流束センサ上に配置し、熱流束を測定した⁹⁾。併せて、湿度および水分の吸着量・脱離量についても測定を行った。

本研究では、MOF-801-P を用いた。MOF-801-P はフマル酸 5.8 g と $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 16 g を DMF/ギ酸中に溶かし、130°C で 6 時間加熱して白色沈殿を得た。

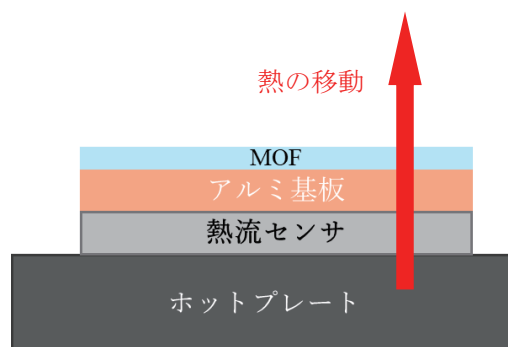


図 7. MOF の熱流計測方法

表 1. 各工程における MOF の質量

	質量
乾燥後	452.67 mg
熱流束計測前	573.64 mg
熱流束計測直後	546.70 mg

表 2. MOF における水の吸着量及び脱離量

湿度(平均)	水の吸着量	水の脱離量
79.5 %	120.97 mg	26.94 mg

室温が一定の条件下において、熱流束は 250～300 W/m² であった。この結果から、MOF を用いることで熱源から冷却側への熱移動が生じており、一定の冷却効果を有する可能性が示唆された。また、水の吸着量に対して脱離量が小さいことから、吸着した水分の一部のみが脱離したと考えられる(表 1-2)。特に、窓型太陽電池への応用を想定した場合、日中は太陽電池表面温度の上昇により水分の脱離が促進され、夜間には外気温の低下および湿度の上昇により MOF が再び水分を吸着することが期待される。したがって、MOF を用いた冷却手法においては、昼間の脱離による冷却と夜間の吸着による再生過程を繰り返す、吸着・脱離サイクルの確立が重要である^{6,7)}。今後は、MOF の種類、担持量、基板材料、設置位置および通気性などの条件を最適化し、窓型太陽電池の実環境下において安定した冷却効果が得られる条件を検討する必要がある。

本研究で検討した MOF は、水の吸着・脱離を利用した冷却材料として、窓型太陽電池と熱電発電素子を組み合わせたシステムへの適用可能性を有する。今後、MOF による冷却効果と TG の出力電圧との関係を明らかにすることで、ZEB に向けた窓型太陽電池の熱利用システムの高効率化が期待される。

4. 結論

本研究では、窓型太陽電池を熱源とした熱電発電システムに着目し、冷却方式の違いが発電性能に与える影響を評価するとともに、未利用熱の有効活用の可能性について検討した。その結果、冷却性能の向上により TG 両端の温度差が拡大し、出力電圧が向上することを確認した。特に、水冷方式においては最も高い出力電圧が得られ、冷却側温度の低減が発電性能の向上に有効であることが明らかとなった。一方で、水冷方式は外部電力を必要とするため、ZEB への応用を考慮すると課題が残る。

季節変化の影響として、窓面に対する日射の入射角の違いにより、冬季において高い出力電圧が得られることを示し、窓型太陽電池の設置条件が熱電発電性能に大きく影響することを明らかにした。

外部電力を必要としないパッシブ冷却手法として MOF に着目し、その吸着・脱離に伴う熱移動により冷却効果が

得られる可能性を示した。基礎評価の結果、MOF は一定の熱流束を示し、冷却材料としての有効性が示唆された。今後は、MOF の最適条件の検討および熱電発電素子との組み合わせによる性能評価を進めることで、窓型太陽電池における未利用熱の回収と ZEB に向けた高効率な熱利用システムの実現が期待される。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(23K26603)、公益財団法人東電記念財団 2024 年度研究助成(基礎研究 No. 23-006)の助成の下に行われた。

参考文献

- 1) <https://www.isep.or.jp/archives/library/15325>, (accessed 2026.04.21)
- 2) <https://www.env.go.jp/earth/earth/ondanka/zeb/03.pdf>, (accessed 2026.04.21)
- 3) Emeka H *et al.*, Thermal control of crystalline silicon photovoltaic (c-Si PV) module using Docosane phase change material (PCM) for improved performance. *Solar Energy*, Vol.234, p203-221, (2022).
- 4) Jehad Adeeb *et al.*, *Journal of Ecological Engineering*, Vol. 20, p249, (2019).
- 5) A.A. Günay *et al.* Metal-organic framework coated porous structures for enhanced thermoelectric performance Vol. 255, (2022).
- 6) H. Liu *et al.*, Passive thermal management of electronic devices using metal-organic framework, *Cell Reports Physical Science*, Vol. 4, (2023).
- 7) H. Kim *et al.*, Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates, *Nature Communications*, Vol. 9, (2018).

ビームダウン式太陽集光装置による水素製造に関する研究

尾島 啓仁^{a)}・長瀬 慶紀^{b)}・友松 重樹^{c)}

Research on Hydrogen Production by Beam - down Solar Concentrator

Hirohito OJIMA, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATU

Abstract

In recent years, energy resource depletion and environmental issues, including global warming associated with greenhouse gas emissions, have become increasingly serious. Clean hydrogen production through a two-step water-splitting cycle using cerium oxide particles has attracted attention as a potential solution to these problems. To promote uniform heating of the particles, a double-cylinder hydrogen production reactor equipped with two piston-driven stirring mechanisms was designed and fabricated. Heating experiments were carried out using a beam-down solar concentrator at University of Miyazaki. Furthermore, the particle agitation behavior inside the reactor was analyzed through a comparison between experimental results and simulations conducted using YADE.

Keywords: Hydrogen, Two-step water splitting cycle, Beam-down solar concentrator

1. 緒言

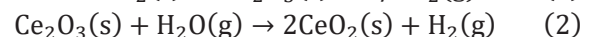
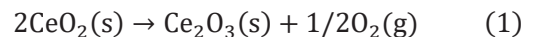
近年、一次エネルギーである石油や天然ガスの資源枯渇が問題視されている。これらの確認埋蔵量や生産量は数十年で枯渇してしまう¹⁾。そこで、これらの資源に代わる代替エネルギーとして、水素が脚光を浴びている。中でも、化石燃料を使用せず、再生可能エネルギーである太陽光から得られる熱を用いたグリーン水素に着目した²⁾。

宮崎大学では 2012 年にビームダウン式太陽集光装置が設置され、太陽光エネルギーを用いた加熱、蓄熱の研究が行われており、太陽光エネルギーを熱に変換し幅広い分野に活用している。この装置を用いて水素製造が可能となれば再生エネルギーから温室効果ガスを排出しない新たな燃料を作り出すことができ、脱炭素社会、持続可能な社会の実現に大きく貢献する。

本研究室は、集光した太陽光を利用した金属酸化物の二段階加水分解サイクルによる水素製造に着目し、水素製造装置の開発を行ってきた。この方法は一段階目である高温での太陽熱解離による金属酸化物の還元ステップ、二段階目の水分解による水素製造ステップに分けられる。

グリーン水素の製造を行うために有効な手段の一つとして、セリア粒子を用いた二段階加水分解サイクルがある。化学反応式は以下ようになる³⁾。式(1)で示される一段階

目の酸素放出ステップでは、酸化セリウムを太陽熱エネルギーにより 1400℃に加熱し、熱還元反応を起こす。式(2)で示される二段階目の水素生成ステップでは、400-600℃のセリウムに水蒸気を接触させて水分解することで、水素の生成及びセリウムの再酸化をさせる。再酸化されたセリウムを用いることでサイクルが回り、再び水素を作り出すことができる。



本研究の目的は、水素製造のための加熱実験を行うために、令和 5 年度に開発された二重円筒型水素製造反応器を改良することである。また、水素製造装置の設計および運転条件の最適化を図るため、シミュレーションにより装置内部の粒子の攪拌状態を把握する。

2. 実験装置

2.1 ビームダウン式太陽集光装置

2012 年度に宮崎大学にビームダウン式太陽集光装置が設置された⁴⁾。ビームダウン式太陽集光装置の概略図を図 1 に示す。この装置の集光原理は、太陽光が地上のヘリオスタットでタワー上部の楕円鏡の第一焦点に集光され、第二焦点にある CPC により更に光が濃縮される。濃縮された光により、CPC 下に設置されたレシーバ内を加熱する。

a)工学専攻機械コース大学院生

b)機械知能プログラム教授

c)機械知能プログラム助教

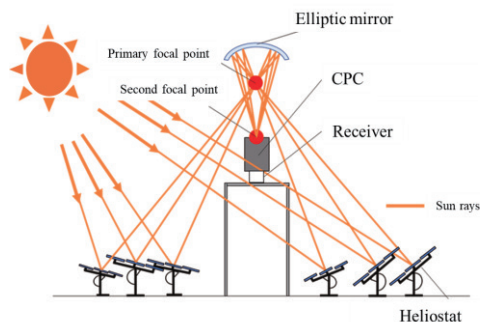


図 1. ビームダウン式太陽集光装置の概略図.

2.2 固体攪拌型蓄熱レシーバ

攪拌式蓄熱レシーバは平成 28 年度に宮崎大学で製作された、ビームダウン式太陽集光装置用の反応器である⁵⁾。攪拌式蓄熱レシーバの概略図を図 2 に示す。これは二重円筒型水素製造反応器のもととなる装置で、2つのピストンが互いに逆方向に移動して、レシーバ内部の粒子を攪拌する機構を持っている。光が入るレシーバの入口は、ビームダウン式太陽集光装置の CPC と同じ開口径であり、集光された太陽光による内部の加熱が可能となっている。円筒の径が大きいため、粒子移動の可視化が容易となっており、攪拌状況の調査に使用した。

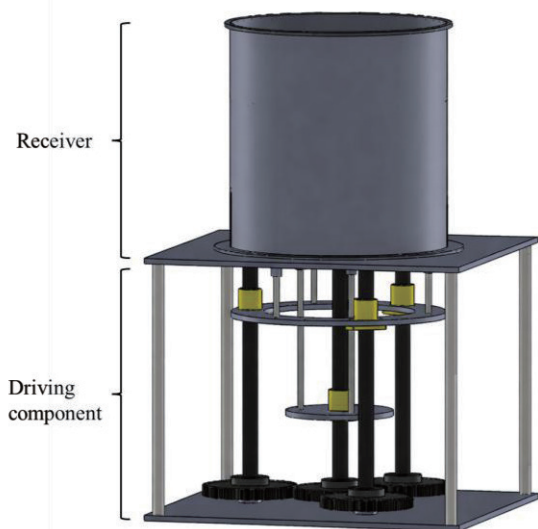


図 2. 攪拌型蓄熱レシーバの外観.

2.3 二重円筒型水素製造反応器

令和 5 年度に開発された二重円筒型水素製造反応器を図 3 に示す⁶⁾。二重円筒型水素製造反応器は、固体攪拌型蓄熱レシーバと同様に、2つのピストンが互いに逆方向に移動する機構を備えており、これにより、加熱された粒子を攪拌し、反応器内部の温度の均一化を図っている。また、水素製造のための気体の吸排気口が設けている。さらに、温度測定のための熱電対挿入パイプを取り付けている。この装置を用いてビームダウン式太陽集光装置でのセリア粒子の加熱実験を行った。

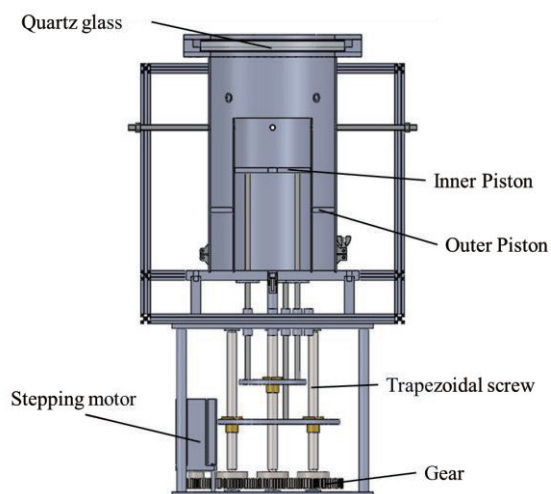


図 3. 二重円筒型水素製造反応器の概略図.

3. 実験目的および実験方法

3.1 ビームダウン式太陽集光装置での加熱実験

二重円筒型水素製造反応器を用いたビームダウン式太陽集光装置でのセリア粒子の加熱実験を行った。本実験の目的は、実際に水素製造を行う際に反応に使うセリア粒子を用いた加熱実験を行うことで、攪拌条件による温度上昇幅や温度分布による攪拌具合を調査することである。

セリア粒子の加熱実験条件を表 1 に示す。

表 1. セリア粒子を用いた加熱実験条件.

Piston Stroke [mm]	150
Piston speed [mm/s]	0.04
Types of particles	Cerium oxide
Particle diameter [mm]	4
Number of piston reciprocations	1
From the bottom edge of the CPC outlet distance to moving-bed surface [mm]	125

次に、反応器内の温度測定位置を図 4 に示す。実験時の直達日射量(DNI:Direct Normal Irradiance)とヘリオスタットの稼働数を図 5 に示す。

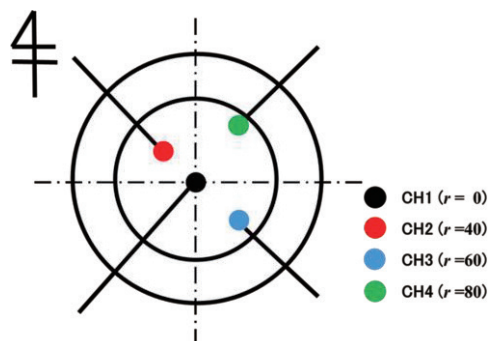


図 4. 加熱実験での温度測定位置.

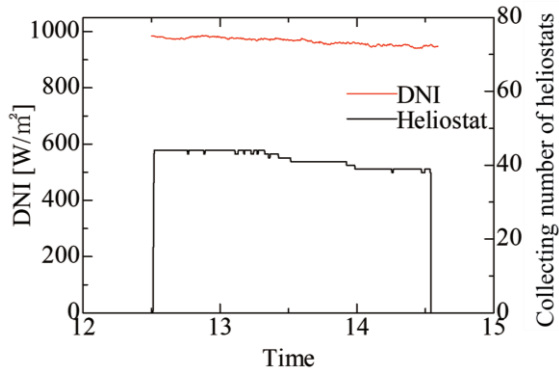
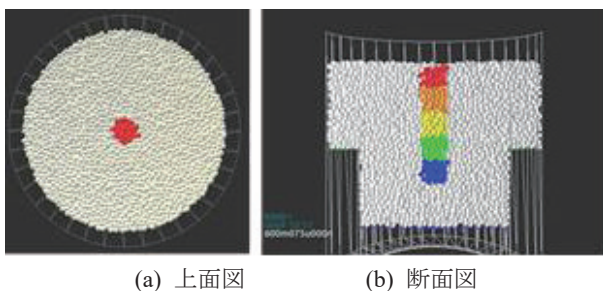


図 5. 直達日射量(DNI)とヘリオスタットの稼働数.

3.2 固体攪拌型蓄熱レシーバでの攪拌実験とYADEによるシミュレーション

攪拌型蓄熱レシーバのピストン駆動による攪拌の状況を確認するために、5 mmのステンレス球を5色に着色したものをを用いた攪拌実験を行った。着色粒子は、レシーバの中心位置に直径50 mm、高さ方向には一色あたり45 mm間隔で、赤、オレンジ、黄、緑、青の順に配置した。

レシーバ内部の粒子の攪拌状況を把握するために、YADE(Yet another dynamic engine)を用いたシミュレーションを行った。YADEは、離散要素法に焦点を当てた離散数値モデル用の拡張可能なオープンソースフレームワークである⁷⁾。攪拌型蓄熱レシーバのモデルを作成し、攪拌実験とピストン速度、ストロークは同条件で、図6(a)のように中心から直径50 mmの範囲で、図6(b)のように高さ45 mmの間隔で、赤、オレンジ、黄、緑、青の着色した粒子を投入している。また、計算処理を高速にするため、粒子径を10 mmに設定した。ヤング率も実際のアルミナよりも小さな値に設定したが、結果に問題ないことは過去の研究⁹⁾により検証済みである。



(a) 上面図 (b) 断面図

図 6. 攪拌調査の初期位置.

実験結果

4.1 ビームダウン式太陽集光装置での加熱実験

ビームダウン式太陽集光装置でのセリア粒子の加熱実験結果を図7に示す。最高温度に達した後に加熱しても粒子温度は上がらないため、それ以降はエネルギー損失となる。そのため、今回の実験条件であるピストン速度0.04 mm/sでは速度が遅いと考えられる。ピストン運動が逆転して約

30分経過した所で、全CHが約200℃となり、その後温度分布も逆転する。このことから、ピストンが上下運動することで、粒子は攪拌されながら加熱されていることが分かる。加熱温度は最高で400℃程度にしか到達しなかったが、これは稼働したヘリオスタットが88基中の40基程で、半数以下であり、反射鏡の経年劣化に加えて、ヘリオスタットの中には、稼働はしているが太陽を追尾していないものもあることから、全稼働時に比べて集光量が少ないためである。

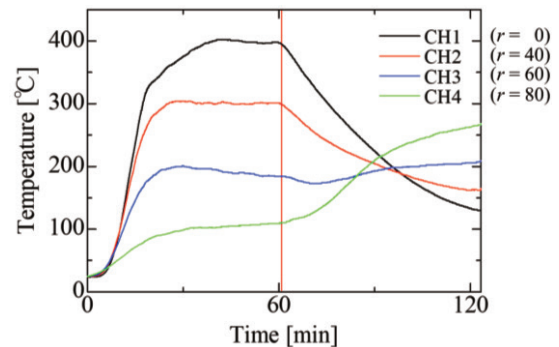


図 7. セリア粒子の加熱実験結果.

また、実験中に粒子がピストンと円筒の隙間に挟まり、ピストン駆動が停止してしまった。そのため、二重円筒型水素製造反応器の改良を行った。ピストン部の改良では、粒子がピストンと円筒の隙間に入り込まないように、銅板を設置した。銅板をピストンの外径より大きめに切り、外周を立ち上げ、隙間を塞いだ。その上にステンレスたわしを敷き、割れやすいセリア粒子とピストンの間にクッション性を持たせ、粒子にかかる衝撃を軽減させた。これは粒子がピストン部まで到達しないようにする狙いもある。

水素製造を行う際は、セリア粒子の化学反応が必要となる。熱還元ステップの加熱段階ではセリア粒子が再び酸化しないように不活性ガスである窒素ガスなどを注入し、水素生成ステップの加水分解では水蒸気を反応器内に注入しなければならない。そのための配管の設置を行い、反応器内のガスが外に漏れないように密閉した。

4.2 固体攪拌型蓄熱レシーバでの攪拌実験とYADEによるシミュレーション

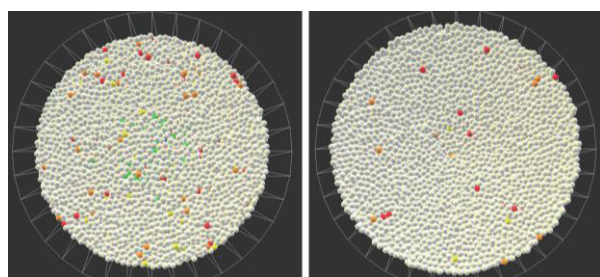
攪拌実験では、ピストンの往復回数が6往復目の上死点、下死点での結果を図8に示す。粒子層の表面には赤とオレンジ色の着色粒子が多く見られた。また、緑、青色の粒子は見えなかった。本実験はストロークを150 mmに設定してピストンを動かしたが、表面から約100 mmの粒子層しか攪拌されていないため、150 mmのストロークは短いことが分かった。着色粒子は上死点、下死点ともに外円筒壁まで到達していることから、平面方向の攪拌は十分にできていると考えられる。また、ピストンの6往復目以降は、表面に現れる各着色粒子の比率や、目視で確認できる分布範囲に大きな変化はなかった。そのため、今回の実験条件

では6往復で定常状態になると判断し、シミュレーションとの比較も6往復目の状態で行う。6往復目のシミュレーション結果を図9に示す。



(a) 上死点 (b) 下死点

図8. 着色粒子を用いた攪拌実験の結果.



(a) 上死点 (b) 下死点

図9. シミュレーションの結果.

6往復目の実験、シミュレーションでの上死点、下死点での着色粒子の面積割合をパーセント表示で算出したものを図10に示す。6往復目の着色粒子の面積割合の合計差は1ポイント未満である。色別の面積割合に差があり、シミュレーションでは攪拌実験で見られなかった緑の着色粒子がわずかに出ている。これは、シミュレーションの粒子の径が10mmであるため、粒子間の隙間が大きくなり、移動層表面に現れた着色粒子だけでなく、表面より下の層の着色粒子まで見えていたためである。

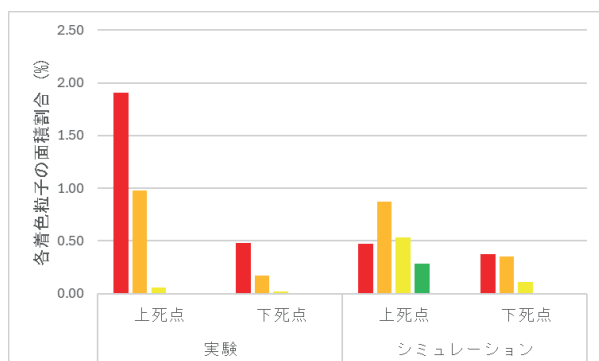


図10. 各条件での着色粒子の面積割合.

移動層表面に出てくる着色粒子の合計に差はほとんどないが、各着色粒子の面積割合には差が生じた。これは粒子径や初期位置の差異によるものだと考えられる。シミュレーションの結果は、実験と同じような傾向が見られたた

め、条件を変更したシミュレーションを行うことで、効率的な加熱ができるストロークや粒子の投入量など、攪拌条件の検討を行うことは可能である。

4. 結論

令和5年度に開発した二重円筒型水素製造反応器は、集光した太陽光を用いたセリア粒子の二段階水分解反応を行うことで、グリーン水素を得ることができる。本研究では、ビームダウン式太陽集光装置での加熱実験から得られた結果をもとに二重円筒型水素製造反応器の改良を行った。また、水素製造反応器内部の粒子流動シミュレーションを行ったことで、以下の結論を得た。

1. 二重円筒型水素製造反応器にピストン部の改良を施すとともに、配管設置、反応器内部の密閉を行った。
2. 着色粒子を用いた攪拌実験とシミュレーションの結果を比較し、各着色粒子の割合に多少の差はあったものの、高さ方向、平面方向から見た攪拌具合はほとんど同じであったため、シミュレーションを用いた反応器の形状の決定や攪拌条件の選定は有用であることが分かった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、装置製作や実験の際、ご助言・サポートしていただいた木村正寿技術職員、三宅琢磨技術職員、田之上二郎技術職員、濱畑貴之技術職員、矢野康之技術職員に深く感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 西川 正史: 水素エネルギーシステムの開発課題と現状, J. Plasma Fusion Res., Vol.80, No.1, pp.5-11, 2004.
- 2) Bidattul Syirat Zainal: Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 189., Part A 113941, January 2024.
- 3) Stéphane Abanades: Thermochemical hydrogen production from a two-step solar-driven water-splitting cycle based on cerium oxides, Solar Energy Volume 80, Issue 12, December 2006, pp. 1611-1623
- 4) 俵 彰吾: ビームダウン式太陽集光装置のための水素製造用反応器の開発, 令和5年度宮崎大学修士論文, 2023.
- 5) 畑 奉佑: 機械攪拌式蓄熱装置の蓄熱温度均一化の検討, 平成29年度宮崎大学卒業論文, 2017.
- 6) 西原 太輝, 山鹿 友也: 太陽熱を利用した水素製造装置の開発 (太陽シミュレータ用反応器の検討), 令和5年度宮崎大学卒業論文, 2023.
- 7) <http://yade-dem.org/doc/>, (accessed 2024/1/30)

電子文書の領域検出およびラベル生成ツール ASLA における より文脈を考慮したラベル生成のための拡張

宅間 千隼^{a)}・片山 徹郎^{b)}

Extension of ASLA as an Electronic Document Region Detection and Labeling Tool for More Context-Aware Label Generation

Chihaya TAKUMA, Tetsuro KATAYAMA

Abstract

Electronic documents are increasingly used because they reduce paper consumption and management costs, but in many cases they still remain only substitutes for paper documents. To promote richer use of electronic documents, we have developed ASLA (Automatic Segmentation and Labeling tool using AI), which segments a document into regions and automatically generates labels representing the content of each region. However, the existing ASLA mainly generates labels from information contained in each region itself or from limited text near figures and tables, and therefore cannot sufficiently generate context-aware labels by using heading, caption, and annotation information related to each region. In particular, it cannot assign heading information to body-text regions or auxiliary information such as captions and annotations to figure and table regions. In this study, we extend ASLA to generate more context-aware labels for body-text, figure, and table regions. Specifically, we redesign the detection classes of the layout detection model, construct parent-child relationships among detected regions, and extend the labeling module to use heading, caption, and annotation information. Application examples and evaluation results confirm that the extended ASLA works correctly on actual document images and can generate more context-aware labels than the existing ASLA.

Keywords: document layout analysis, labeling, region dividing, parent-child relationship

1. はじめに

電子文書は、紙の消費削減や維持、管理コストの削減の観点で有用であり、利用が広まりつつある。しかしながら、電子文書は紙の代用にとどまっているという現状がある。

そこで我々は、電子文書の新たな活用を目指し、文書を構成要素ごとの領域に分割した上で、その内容を表すキーワードや文章をラベルとして自動生成するツール、ASLA (Automatic Segmentation and Labeling tool using AI) を開発している¹⁾。ASLA は電子文書内の「どこに、何が」書かれているかを定義できるため、視線計測などの他技術と組み合わせることで、例えば重要事項説明が確実に閲覧されたかを判定するコンプライアンスチェックや、顧客が熟読した箇所に基づく興味関心の分析など、高度な業務支援を可能にすると、我々は考える。また、検出した各領域に対して、その意味を表すラベルを自動付与することで、電子文書のアクセシビリティ向上やデータ管理の効率化にもつながると考える。

一方で、既存の ASLA¹⁾ は、主として領域自身の情報、あるいは図表の近傍に存在する限られたテキスト情報に基づいてラベルを生成するため、各領域に関連する文脈を

十分に考慮したラベルを生成できていない。例えば、既存の ASLA は文書画像を入力として、図 1 に示す領域描画画像と、図 2 に示す解析結果 CSV ファイルを生成する。しかし、図 1、および、図 2 に示すように、本文領域に対するラベルはその領域内の文字列から生成するため、その本文領域がどの見出し領域に属するのかを反映したラベルは生成できない。また、図領域に対しては直下の 1 つのテキスト領域、表領域に対しては直上の 1 つのテキスト領域の文字列だけをラベル生成に用いるため、図領域および表領域の内容理解のために必要となる注釈などの補足情報を反映したラベルは生成できない。

そこで本研究では、ASLA を拡張し、本文領域、図領域、および表領域に対して、より文脈を考慮したラベルを生成できるようにすることを目的とする。具体的には、領域検出用の学習済みモデルにおける検出クラスを見直し、本文、キャプション、注釈などを区別して検出できるようにする。さらに、検出した領域間に親子関係を構築し、その関係に基づいて見出し領域の文字列やキャプション領域、および注釈領域の情報を本文領域、図領域、および表領域に付与することで、文脈情報を反映したラベルを生成する。

本論文では、まず ASLA の拡張内容について述べる。次に、拡張後の ASLA を実際の文書画像に適用し、その出力結果を示す。最後に、領域検出精度、親子関係構築、

a)工学専攻・先端情報コース大学院生

b)情報通信プログラム教授

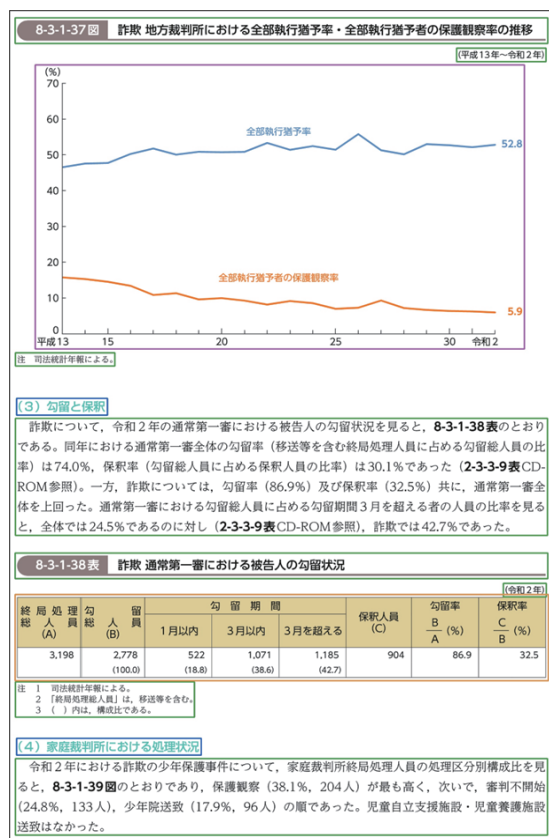


図1. 既存のASLAが出力する領域描画画像の一部。

248, 217, 2048, 304, text, 猫, 詐欺, 推移, 執行, 保護, 観察, 予者, 地方裁判
1740, 320, 2042, 366, text, 和, 平成
316, 377, 1969, 1343, figure, 注司法統計年報による。
249, 1356, 585, 1401, text, 統計, 年報, 司法
253, 1511, 560, 1568, sectionHeader, (3) 勾留と保釈
249, 1579, 2047, 1977, text, 被告, 状況, 終局, CD, 通常, 期間, 参照, 勾留,
248, 2037, 2048, 2124, text, 被告, 状況, 通常, 拓, 勾留, 詐欺, モ, 矯
1898, 2140, 2043, 2186, text, 和
248, 2178, 2050, 2471, table, (令和2年)
249, 2475, 854, 2595, text, 構成, 終局, 統計, 移送, 処理, 年報, 司法, 人員
253, 2667, 877, 2724, sectionHeader, (4) 家庭裁判所における処理状況
249, 2736, 2047, 2996, text, 少年院, 審判, 和, 施設, 少年, 児童, 令, 人員,

図2. 既存のASLAが出力する解析結果CSVファイルの一部。

および、関連研究との比較を踏まえて考察する。

2. ASLAの拡張

本研究では、既存のASLAを拡張し、本文領域、図領域、および表領域に対して、より文脈を考慮したラベルを生成できるようにする。拡張後のASLAの構造を、図3に示す。具体的には、以下の4つの拡張を行う。

- データセットの作成および学習済みモデルの生成

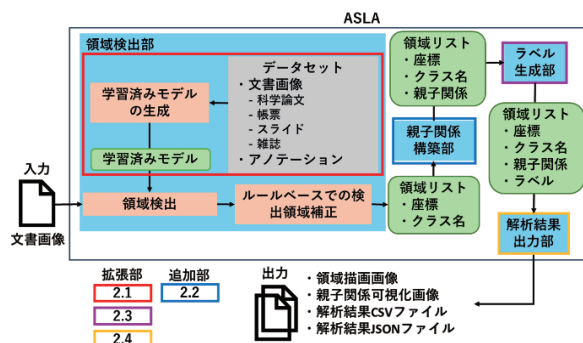


図3. 拡張後のASLAの構造。

表1. 既存と拡張後のデータセットの文書画像枚数。

	訓練	検証	テスト
既存	1585	290	286
拡張後	1189	148	150

表2. 既存と拡張後のデータセットのクラス構成。

既存	拡張後
本文	本文
	著者
	キャプション
	注釈
見出し	見出し
タイトル	タイトル
ページヘッダー	ページヘッダー
ページフッター	ページフッター
ページ番号	ページ番号
図	図
表	表

- 親子関係構築部の追加
- ラベル生成部の拡張
- 解析結果出力部の拡張

以降、それぞれについて述べる。

2.1 データセットの作成および学習済みモデルの生成

既存のASLAと拡張後のASLAの領域検出モデル生成に用いるデータセットの文書画像枚数を表1に、検出クラス構成を表2に、それぞれ示す。拡張後のASLAでは、2.2節で述べる親子関係構築部において、見出しと本文、図表とキャプション、図表と注釈の対応付けを行うため、表2に示すようなクラス構成とする。また、データセットに用いる文書画像は、科学論文形式、帳票形式、スライド形式、および雑誌形式の4種類である^{2,3,4,5)}。

表 3. 拡張後の ASLA における
領域検出用学習済みモデル生成時の設定.

項目	設定
仕様ライブラリ	MMDetection
検出モデル	Co-DETR
バックボーン	Swin-T
事前学習済みモデル	なし（スクラッチ学習）
エポック数	25
入力画像サイズ	800 × 800
学習データ	訓練: 1189 枚、検証: 148 枚
最適化手法	AdamW
学習率	0.0001
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti

ここで、既存の ASLA で用いていたデータセットには重複データが含まれているため、拡張後の ASLA では既存のデータセットのうち、合計 674 枚を除外し、改めて訓練用データ、検証用データ、およびテスト用データに分割する。

本研究では、表 1 に示す拡張後のデータセットの文書画像を用い、表 2 に示す拡張後の検出クラス構成に基づいてアノテーションを行ったデータセットを手作業で作成する。さらに、このデータセットを用いて、領域検出用の学習済みモデルを生成する。なお、学習済みモデルの生成には、物体検出ライブラリである MMDetection⁶⁾ を用いる。拡張後の ASLA における領域検出学習済みモデル生成時の設定を、表 3 に示す。

2.2 親子関係構築部の追加

検出した領域のクラス情報と位置関係をもとに、見出し領域と本文領域、図領域および表領域とキャプション領域、および、注釈領域の間の親子関係を、ルールベースで構築する。この実現のために、親子関係構築部を追加する。本処理部は、領域検出部から、各領域のバウンディングボックス座標、および、クラス情報を入力として受け取り、構築した親子関係データを生成し、ラベル生成部に渡す。

まず、見出し領域と本文領域の親子関係を構築する。次に、図領域および表領域とキャプション領域、図領域および表領域と注釈領域の親子関係を構築する。最後に、それらの結果を統合し、ラベル生成部が利用するための階層構造データを生成する。

見出し領域と本文領域の親子関係構築処理の流れを図4に、図領域および表領域とキャプション領域の親子関係構築処理の流れを図5に、それぞれ示す。なお、注釈領域についても同様に候補を探索して親子関係を構築するが、注釈領域については、距離が150px以下の候補をすべて子として登録する。最後に、これらの親子関係データを統合し、図6に示すような単一の階層構造データを生成する。

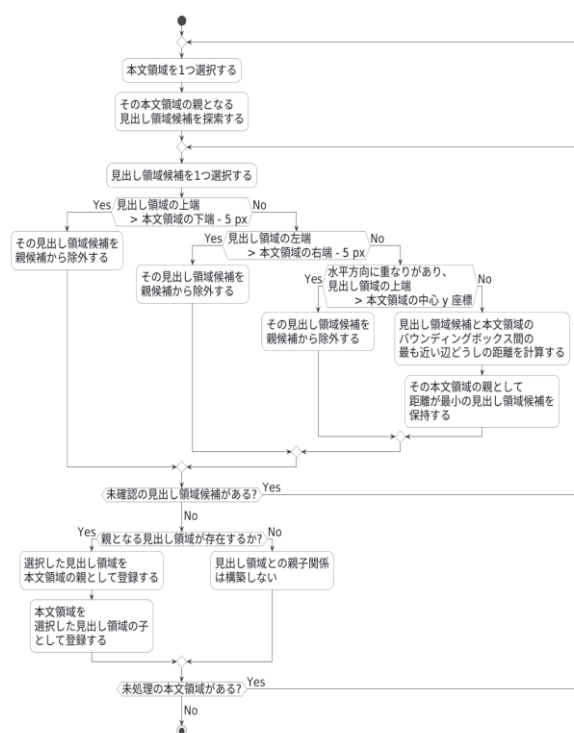


図 4. 見出し領域と本文領域の親子関係構築処理の流れ.

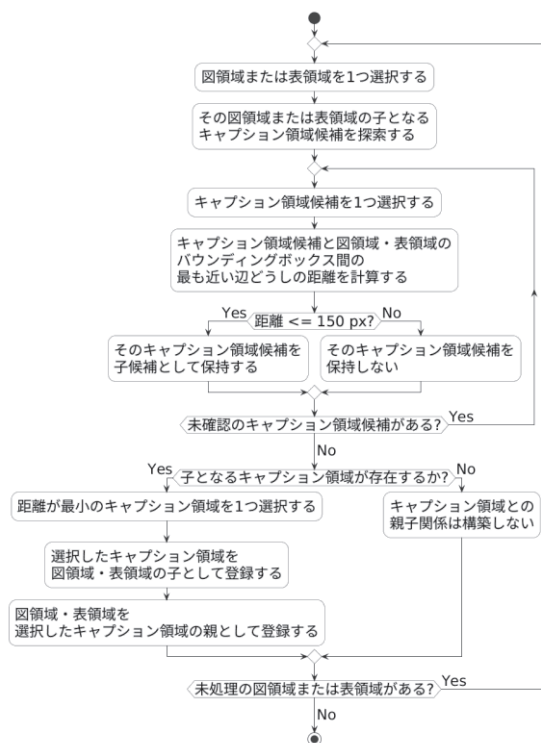


図 5. 図領域および表領域とキャプション領域の
親子関係構築処理の流れ.

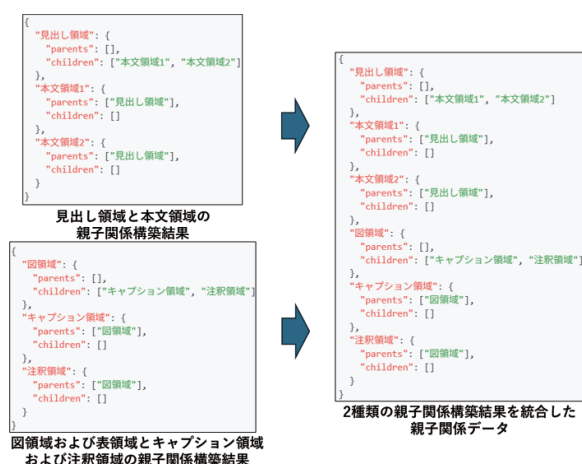


図6. 親子関係構築部が生成する親子関係データの概要。

2.3 ラベル生成部の拡張

既存の ASLA では、本文領域に対しては、その領域内から抽出した文字列に対して形態素解析を行い、名詞群をラベルとして付与する。また、図領域および表領域に対しては、特定の位置関係にあるテキスト領域をキャプションとして割り当て、その文字列をラベルとして付与する。

これに対して拡張後の ASLA では、親子関係構築部が生成した階層構造データも利用してラベル生成を行う。本文領域に対しては、対応付けた見出し領域の文字列と、本文領域自身から抽出した名詞群を組み合わせることで内容ラベルを生成する。また、図領域および表領域に対しては、対応付けたキャプション領域の全文と、注釈領域から抽出した名詞群を組み合わせることで内容ラベルを生成する。これにより、既存の ASLA よりも文脈を考慮したラベルを生成できるようにする。拡張後の ASLA におけるラベル生成規則を、表4に示す。

2.4 解析結果出力部の拡張

既存の ASLA では、領域描画画像、および、解析結果 CSV ファイルを出力する。これに対して拡張後の ASLA では、上記に加え、領域検出部で生成した各領域のバウンディングボックス座標、クラス情報、親子関係構築部で生成した親子関係データ、および、ラベル生成部で生成したラベルを用いて、親子関係可視化画像、および、解析結果 JSON ファイルを出力する。

解析結果 CSV ファイルには、領域検出部で生成した各領域のバウンディングボックス座標、クラス情報、および、ラベル生成部で生成した内容ラベルを出力する。これにより、各領域に対して最終的に付与したラベルを表形式で確認できるようにする。解析結果 JSON ファイルには、領域検出部で生成した各領域のバウンディングボックス座標、クラス情報、ラベル生成部で生成した内容ラベル、および、親子関係構築部で生成した親子関係データを含む階層構

表4. 拡張後の ASLA の各領域のラベル生成規則。

領域種別	ラベル生成規則
本文領域	親の見出し領域の文字列 + 本領域の名詞群
著者領域	本領域の文字列
キャプション領域	本領域の文字列
注釈領域	本領域の名詞群
見出し領域	本領域の文字列
タイトル領域	本領域の文字列
ページヘッダー領域	本領域の文字列
ページフッター領域	本領域の文字列
ページ番号領域	本領域の数字
図領域	子のキャプション領域の文字列 + 子注釈領域の名詞群
表領域	子のキャプション領域の文字列 + 子注釈領域の名詞群

造データを出力する。これにより、ラベル生成結果だけでなく、親子関係構築結果もデータとして保持できるようにする。また、領域描画画像には、領域検出部で生成した各領域の位置情報、および、クラス情報を用いて、入力文書画像上に各領域をクラスで色分けした矩形を描画する。さらに、親子関係可視化画像には、領域検出部で生成した各領域のバウンディングボックス座標、および、親子関係構築部で生成した親子関係データを用いて、各領域間の親子関係を、親から子に向かう矢印で描画する。

3. 適用例

本章では、拡張後の ASLA が実際の文書画像に対して正しく動作することを確認する。適用対象として、表1に示す拡張後のデータセットのうち、図7に示す雑誌形式のテスト用文書画像1枚を用いる。ここで、図7の文書画像は、図1と図2を出力する際に用いた入力画像と同一である。拡張後の ASLA が、図7の文書画像に対して出力した領域描画画像を図8に、親子関係可視化画像を図9に、解析結果 JSON ファイルを図10に、解析結果 CSV ファイルを図11に、それぞれ示す。

これらより、拡張後の ASLA は、領域クラスをもとに親子関係を構築し、本文領域に対しては見出し領域の情報を、図領域および表領域に対してはキャプション領域および注釈領域の情報を反映した内容ラベルを生成できることが確認できる。

4. 考察

4.1 拡張後の ASLA の領域検出精度に関する考察

2.1 節で述べた拡張後の検出クラス構成に基づく学習済みモデルについて、拡張後の ASLA における領域検出精度を、表5に示す。表5より、ルールベース処理を適用し

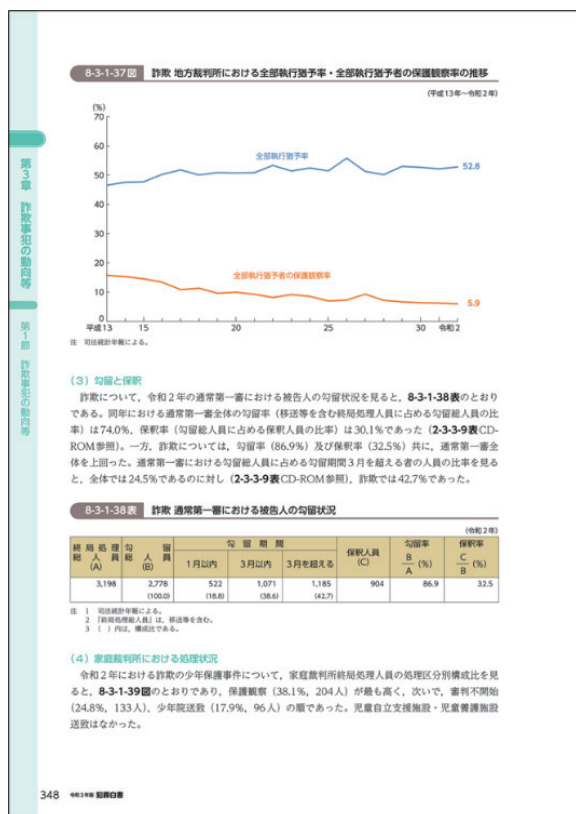


図 7. 適用例の入力画像。

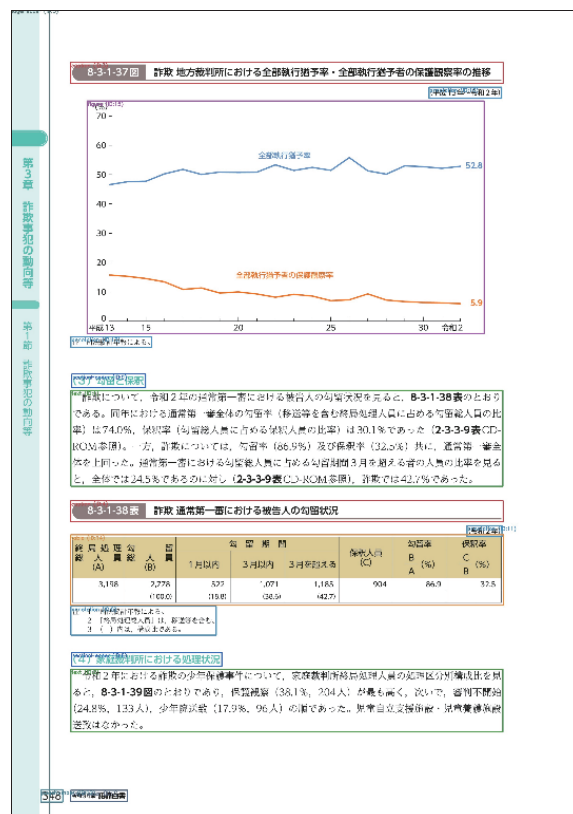


図 8. 適用例で出力した領域描画画像。

ない場合の全体の mAP は、 $mAP@[0.50:0.95]$ で 0.7696 であり、本研究で新たに生成した領域検出モデルが、各要素を一定の精度で検出できていることを確認できる。したがって、本データセットにおいては、本研究で導入した検出クラス構成に基づいて、領域検出用の学習済みモデルを生成できていると言える。

一方で、ルールベースでの検出領域補正処理の適用前後を比較すると、ルールベース処理を適用した場合の全体の mAP は、 $mAP@[0.50:0.95]$ で 0.4640 となり、精度が大きく低下している。これは、適用例で用いた文書画像のように背景色を含む場合に、ルールベース処理によって領域が必要以上に拡張し、かえって適切な領域検出を妨げることがあることが要因の一つと考える。そのため、今後は背景色を含む文書画像への対応を検討するとともに、既存の ASLA のルールベース処理の適用方法や必要性について再検討する必要があると考える。

4.2 親子関係構築の精度に関する考察

適用例より、見出し領域と本文領域、図領域および表領域とキャプション領域、図領域および表領域と注釈領域の間に親子関係を構築できることを確認した。また、その結果を利用することで、本文領域には見出し情報を、図領域および表領域にはキャプションおよび注釈の情報を反映したラベルを生成できることを確認した。このことから、拡張後の ASLA は既存の ASLA よりも文脈を考慮したラ



図 9. 適用例で出力した親子関係可視化。

```

{
  "region_id": 9,
  "bbox": [
    253,
    1511,
    560,
    1568
  ],
  "label": "sectionHeader",
  "content_label": "(3) 勾留と保釈",
  "hierarchy": {
    "parents": [],
    "children": [
      1
    ]
  }
},
{
  "region_id": 1,
  "bbox": [
    249,
    1579,
    2047,
    1977
  ],
  "label": "text",
  "content_label": "(3) 勾留と保釈,比率,E,保釈,月,参照,移送,勾留",
  "hierarchy": {
    "parents": [
      9
    ],
    "children": []
  }
}

```

図 10. 適用例で出力した
解析結果 JSON ファイルの一部。

ベル生成に有効であると考え。

一方で、本研究では親子関係構築の正解データを作成していないため、親子関係構築精度を定量的には評価できていない。今後は、親子関係の正解データを作成し、親子関係構築精度を定量的に評価する必要がある。

4.3 関連研究

Wang ら⁷⁾は、文書解析を領域分割、読み順予測、階層構造構築の3段階に分けて行う手法を提案している。これにより、文書内の各要素を検出するだけでなく、要素同士の順序や階層関係も含めて文書全体の構造を扱っている。

また、Chen ら⁸⁾は、文書内の要素を検出するだけでなく、要素間の関係をグラフ構造として表現する手法を提案している。Chen らの手法では、親子関係、順序関係、参照関係を扱っており、本文と図表の参照関係のように、離れた領域間の関係も表現することを目指している。

これに対して本研究では、検出した領域のクラス情報と位置関係に基づいて、見出し領域と本文領域、図領域および表領域とキャプション領域および注釈領域の親子関係をルールベースで構築し、その結果をラベル生成に利用した。これにより、本文領域には見出し情報を、図領域および表領域にはキャプションや注釈の情報を反映した、より文脈を考慮したラベルを生成できるようにした。

```

x1,y1,x2,y2,label,content_label
-7,-9,161,3376,pageHeader,
124,3236,215,3288,pageNumber,348
253,1511,560,1568,sectionHeader,(3) 勾留と保釈
249,1579,2047,1977,text,(3) 勾留と保釈,比率,E,保釈,月,参照,移送,勾留,和,人員,比,通常,
253,2667,877,2724,sectionHeader,(4) 家庭裁判所における処理状況
249,2736,2047,2996,text,(4) 家庭裁判所における処理状況,家庭,区分,保護,事件,令,審判,児童,構成,
248,3239,484,3286,pageFooter,令和3年版 犯罪白書
248,2178,2050,2471,table,"にま当屋ただ:達 SER 通常第一才における被告人の勾留状況,司法,年報,移送,
316,377,1969,1343,figure,"にま当屋ただ:達 SER 通常第一才における被告人の勾留状況,司法,年報,移送,
248,217,2048,304,caption,"にま当屋ただ:達 SER 通常第一才における被告人の勾留状況,司法,年報,移送,
248,2037,2048,2124,caption,"にま当屋ただ:達 SER 通常第一才における被告人の勾留状況,司法,年報,移送,
249,2475,854,2595,annotation,"司法,年報,移送,人員,終局,A1d,統計,処理,構成"
1740,320,2042,366,annotation,"F,和,令"
1898,2140,2043,2186,annotation,"和,令"
249,1356,585,1401,annotation,"統計,YE,年報,司法"

```

図 11. 適用例で出力した
解析結果 CSV ファイルの一部。

一方で、本研究では見出し同士の階層構造や、本文と図表の参照関係までは扱っていない。今後は、Wang らのような階層構造や、Chen らのような参照関係も取り入れることで、近くの領域だけでなく離れた領域の情報も利用し、文書全体の文脈をより反映したラベル生成を目指す。

5. おわりに

本研究では、電子文書の領域検出およびラベル生成ツール ASLA を拡張し、本文領域、図領域、および、表領域に対して、より文脈を考慮したラベルを生成できるようにした。具体的には、新たな検出クラスのデータセットの作成と学習済みモデルの生成、親子関係構築部の追加、ラベル生成部の拡張、および、解析結果出力部の拡張を行った。

適用例より、拡張後の ASLA は実際の文書画像に対して正しく動作し、本文領域には見出し情報を、図領域および表領域にはキャプション領域や注釈領域の情報を反映したラベルを生成できることを確認した。また、拡張後のクラス構成に基づく領域検出モデルは、mAP@[0.50:0.95]で 0.7696 を達成した。

以上より、拡張後の ASLA は、既存の ASLA よりも文脈を考慮したラベル生成に有効であると考え。

今後の課題を以下に示す。

- 親子関係構築処理の定量評価
- 領域検出精度の向上
- ルールベース処理の改善
- より多様なクラス間の親子関係の構築とラベル生成

参考文献

- 1) 柿木 幹太: 深層学習による文書画像の領域分割およびラベル生成ツール ASLA の実用性向上を目的とした領域分割機能の拡張, 宮崎大学大学院修士学位論文, 2025.
- 2) 名古屋大学: 名古屋大学学術機関リポジトリ, <https://nagoya.repo.nii.ac.jp/>, (2026/4/21 閲覧).
- 3) 電気・情報関係学会九州支部連合大会: 2021 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, <https://sites.google.com/jceee-kyushu.jp/2021/>, (2026/4/21 閲覧).
- 4) デジタル庁: e-Gov ポータル Data Catalog Site,

表 5. 拡張後の ASLA の領域検出精度.

	mAP					
	領域検出モデルのみ			領域検出モデル + ルールベース処理		
	@0.50	@0.75	@0.50:0.95	@0.50	@0.75	@0.50:0.95
本文	0.8576	0.8355	0.7811	0.6317	0.5574	0.5264
著者	1.0000	1.0000	0.9086	1.0000	1.0000	0.7757
キャプション	0.9101	0.9101	0.7278	0.5013	0.2372	0.2634
注釈	0.8843	0.8167	0.7012	0.8271	0.6562	0.5502
見出し	0.7954	0.7651	0.6144	0.6203	0.2585	0.3061
タイトル	0.9287	0.8824	0.8030	0.4944	0.4082	0.3866
ページヘッダー	0.9895	0.9740	0.8152	0.3007	0.1071	0.1495
ページフッター	0.9406	0.8412	0.7025	0.9406	0.3315	0.4882
ページ番号	0.9802	0.8242	0.6597	0.4246	0.1040	0.1646
図	0.9080	0.8782	0.8060	0.6847	0.6541	0.5918
表	0.9556	0.9523	0.9463	0.9565	0.9443	0.9011
全体	0.9230	0.8800	0.7696	0.6710	0.4780	0.4640

<https://data.e-gov.go.jp/info/ja/>, (2026/4/21 閲覧) .

- 5) 国立国会図書館: 国立国会図書館デジタルコレクション, <https://dl.ndl.go.jp/>, (2026/4/21 閲覧) .
- 6) OpenMMLab: MMDetection, <https://github.com/open-mmlab/mmdetection/>, (2026/4/21 閲覧) .
- 7) J. Wang, K. Hu, Z. Zhong, L. Sun, and Q. Huo: Detect-order-construct: A tree construction based approach for hierarchical document structure analysis, Pattern Recognition, Vol.156, No.110836, 2024.
- 8) Y. Chen, R. Liu, J. Zheng, D. Wen, K. Peng, J. Zhang, and R. Stiefelhagen: Graph-Based Document Structure Analysis, The Thirteenth International Conference on Learning Representations, 2025.

体験格差に向けた複合現実上でのペイント体験の可能性と考察

石丸 巧巳^{a)}・坂本 眞人^{b)}

Potential and Evaluation of Mixed Reality Painting Experiences for Addressing the Experience Gap

Takumi ISHIMARU, Makoto SAKAMOTO

Abstract

Access to arts experiences often varies by socioeconomic factors and locality, creating a significant "experience gap." This research presents a low-barrier Mixed Reality (MR) 3D-painting system on Meta Quest 3, enabling intuitive spatial drawing in everyday environments. We conducted two studies: a field experiment with children at a public festival and a controlled study with university students comparing 2D and 3D creative tasks. Results indicate that MR 3D painting significantly enhances immersion, perceived creativity, and self-efficacy compared to traditional 2D drawing. While the system effectively expands access to creative experiences in domestic and educational spaces, findings suggest that further scaffolding is required to facilitate depth-oriented expression and seamless spatial collaboration.

Keywords: Mixed Reality (MR), 3D Painting, Human-Computer Interaction (HCI), Experience Gap, Creativity Support

1. はじめに

子どもの学校外における体験活動は、学業成績のみならず、自己効力感、意欲、社会情動的スキルに大きな影響を与える。しかし、こうした機会へのアクセスは家庭の経済状況や居住地域に左右されるのが現状である。そのため、日常的な環境で参加障壁を低減できる低負担なアプローチが求められている。

VR/MR/AR といった XR 技術は、現実環境にガイドやフィードバックを重ねることで、体験活動を支援する手段として研究されてきた。音楽の練習、スポーツトレーニング、キャリア教育などの分野において、先行研究は XR が没入感や達成感といった体験の質を高め、継続的な関与を支援する可能性を示している。本研究ではこれらを踏まえ、MR 技術が身近な空間で実施可能な創造的体験を同様に支援し得るかを調査する。

一方で、MR における 3 次元的な創造活動は、従来の 2D 描画とは認知的に異なる。初心者、特に子どもにとって、3D のアイデアを形成し、それを空間的なストローク（線）に変換することは困難を伴う場合がある。したがって、本研究の核心的な課題は、(i) 日常空間での導入が容易な「低負担」であることと、(ii) 創造活動としての「有意義な体験価値」を両立させることにある。

これに対処するため、本研究では Meta Quest 3 上に低負担な MR 3D ペインティングシステムを実装した。本システムは、身近なデスク環境でのカラー描画を可能にし、ネットワーク（Photon PUN）を介したストローク共有による共同制作も支援する。評価として、学園祭での子どもを対象とした実地調査と、大学生を対象とした統制実験の 2 つのユーザスタディを実施した。没入感、達成感、創造性、自己効力感、継続意図、操作性、および共同作業に関する指標を収集し、MR による芸術体験が、最小限の準備でアクセスを拡大するための現実的な選択肢となり得るかを検証する。

本研究の貢献：

- (1) 共同制作機能を備えた、日常空間向けの MR 3D ペインティングシステムの提案
- (2) 二段階の評価を通じた、低負担な MR 創造体験の設計指針の導出

2. 先行研究

2.1. 体験格差（学校外体験）

放課後活動や課外活動への参加は、自己効力感、社会情動的スキル、学業達成と正の相関があることが報告されている[1][2][3]。一方で、全国調査や公的統計

a) 工学専攻先端情報コース大学院生

b) 工学基礎教育センター教授

では、世帯の経済状況による学校外体験の機会や支出の格差が記録されている[4][5]。例えば全国調査によれば、低所得世帯の子どもの約3人に1人が過去1年間に学校外体験が「ゼロ」であり、所得層間で約2.6倍の格差が生じている[4]。公的データも、低所得世帯ほど体験活動を含む学校外活動費が少ないことを示している[5]。これらを総合すると、体験活動は有益である一方で、依然として大きなアクセス格差が存在していることがわかる。

2.2. 体験活動における XR

XR は、スポーツ、音楽、職業体験などの分野において、没入的な文脈やその場でのガイドを提供することで、アクセスが困難な活動を可能にするために用いられてきた[6][7][8]。日常的あるいはリソースの限られた環境での調査では、高いエンゲージメントが報告される一方で、デバイスの準備や技術的な問題、トラッキングスペースの確保、利用者の習熟といった実用的な制約が成果を左右することが強調されている[9][10]。本研究ではこれらの知見に基づき、身近な空間で動作する低負担な MR ペインティング活動を調査し、XR 支援による創造的制作（メイキング）の実現可能性とユーザ体験を評価する。

2.3. 芸術・美術館体験における XR

全国調査[4]で特定された5つの体験領域のうち、本研究では文化・芸術活動、特に創造的体験の入り口として「絵画」に焦点を当てる。美術館や芸術の文脈における先行研究では、VR/MR が受動的な形式（VR360 など）と比較して存在感やエンゲージメントを高めることが示唆されているが、その効果にはばらつきがあり、認知的トレードオフを伴う可能性も報告されている[11][12][13]。しかし、先行研究の多くは鑑賞（appreciation）に重点を置いており、MR が手軽な文化体験としての「能動的な制作（creation）」や「共同制作（co-creation）」をいかに支援するかは十分に明らかになっていない。そこで本研究では、MR 3D ペインティングを鑑賞のみならず創造的体験として評価し、多次的な主観指標を用いて共同制作の成果を検証する。

3. MR 3D ペインティングシステム

Meta Quest 3（パススルーMR）を用いた MR 3D ペイ

ンティングアプリを構築した。利用者は、グリップボタンでペンを持ち、人差し指のトリガーで描画し、A ボタンで7色のパレット切り替え、B/Y ボタンでトーンモードを切り替える（図1）。ストロークは、ペン先の位置をサンプリングして構築されたワールド座標系の LineRenderer であり、移動距離がしきい値（ $\text{minDist}=0.01\text{m}$ ）を超えた場合のみ頂点を追加する仕組みとした（線幅は 0.01m に固定）。複数人による共同制作は、Photon PUN を用いて共有ルームに参加することでサポートされ、ストロークの初期情報（色・幅）と頂点情報を RPC ベースのストリーミングで同期し、各ローカル環境で即時にレンダリングを行うことにより、ネットワーク同期による遅延から起こる VR 酔いを軽減した。

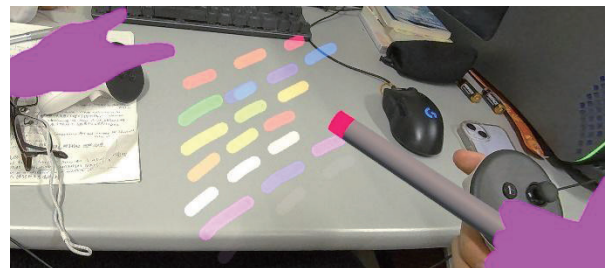


図1 色変更と空中描画の様子

4. 実験方法



図2 実験の様子

4.1. 参加者

子どもを対象とした学園祭での実地調査（ $N=10$ 、7～10歳、および保護者1名：37歳）と、大学生を対象と

した統制実験 (N=10、21~24 歳) を実施した (図 2)。子どもは単独またはペアで参加し、単独の場合は保護者または実験者が共同制作のパートナーを務めた。

4.2. 手順

学園祭の参加者は、パススルーMR 環境での自由な 3D 描画のみを体験した。子どもたちの多くが 3D 空間でも平面的なスケッチを描く傾向が見られたため、大学生のペアに対しては「2D 自由描画」「3D 自由描画 (奥行きを含めるよう依頼)」「3D 課題描画 (木/車/家)」の 3 条件を同一参加者内で実施し、その後に Photon の共有ルームでの共同装飾タスクを行った (図 3)。



図 3 作品例(左:ヴィオラ、右:ツリー)

4.3. 指標と分析

各条件の後、没入感、達成感、創造性、自己効力感、継続意図、操作性に加え、自由制作に関する 2 項目 (アイデア想起と意図通りの描画) を 5 段階リッカート尺度で評価した。これらの指標は、XR 学習やインタラクション研究[7]で一般的に用いられる構成概念を参考にし、制作に特化した達成感や自己効力感などを加えて拡張したものである。共同制作については、共存感、やり取りの自然さ、相手理解、効率性、衝突回避、操作性を評価した。分析では、条件ごとの中央値および参加者内の変化量 (Δ) を報告する。

5. 結果

5.1. 子どもと保護者

学園祭において、自由制作セッションの後、8 項目に

ついて評価を行った (N=10)。

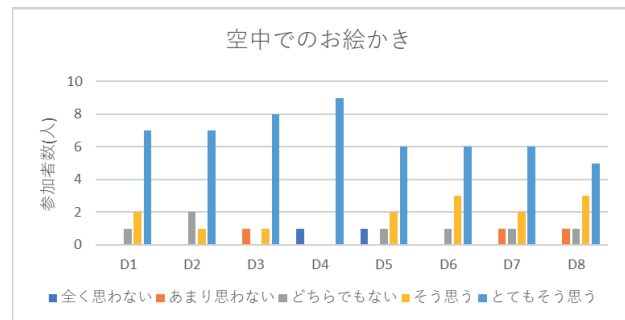


図 4 自由空中描画

全体的な評価は非常に高く、8 項目のうち 7 項目で中央値=5[IQR 4-5]、残る「描きたいものが描けた」でも中央値=4.5[4-5]であった。すべての項目で賛同率 (4-5) は 80-90%に達し、トップボックス率 (5) は 50-90%の範囲であった。特に継続意図 (中央値=5[5-5]、90%が最高評価) とアイデア想起 (中央値=5[5-5]、80%が最高評価) で強い支持が得られた。操作性も良好であり (中央値=5[4-5])、本システムが摩擦の少ない空中 3D ペイントを支援していることが示唆された。

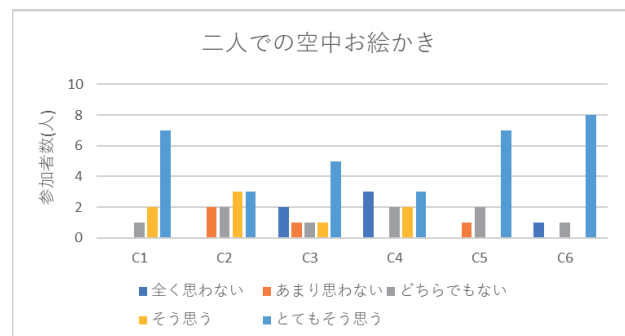


図 5 二人での空中お絵かき

共同タスク後、6 項目の共同制作指標について評価を行った (N=10)。共存感は高く (中央値=5[IQR4-5])、衝突回避も概ね良好であった (中央値=5[3-5])。操作性・視認性は高い評価を得た (中央値=5[5-5])。一方で、コミュニケーションの自然さと相手理解は中程度 (それぞれ中央値 4 および 4.5) であった。効率性は最も低く (中央値 3.5[1-5])、共同作業のメリットはタスク構造に依存する可能性が示唆された。

5.2. 大学生

大学生 (N=10) は、2D 描画、MR 3D 自由描画、MR 3D 課題描画の 3 条件を実施した。8 項目の平均を条件

ごとの総合スコアとして算出した結果、MR 3D 自由描画は 2D 自由描画よりも高いスコアを得た(中央値 4.50 [IQR3.66–4.59]vs3.75[3.03–4.34])。10 名中 8 名の参加者において、2D から 3D へのポジティブな変化が確認された (Δ 中央値+0.44、ウィルコクソンの符号付き順位検定 $p=0.0488$)。対照的に、課題(お題)を追加すると自由 3D と比較してスコアが低下する傾向が見られたが(中央値 4.00、 Δ 中央値-0.31)、この差は統計的に有意ではなかった ($p=0.375$)。

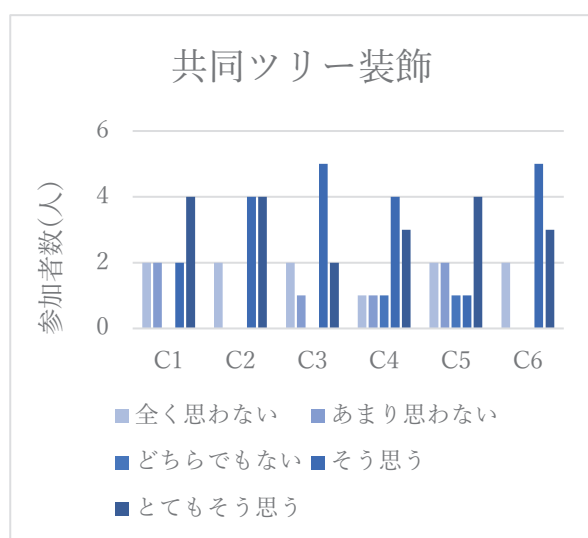


図 6 共同ツリー装飾

共同ツリー装飾タスク後の評価では、やり取りの自然さや視認性は高く評価された(中央値 4)。しかし、衝突回避については評価が低く(中央値 3.5[2–5]、賛同率 50%)、共有 MR タスクにおいて空間的な協調(物理的な位置取り)が依然として実用的な課題であることが示された。

6. 考察

全体として、低負担な MR 3D ペインティングは日常空間での創造的体験を提供し、芸術体験へのアクセス拡大という目標を支え得ることが示された。同時に、2つの実用的な課題も観察された。

第一に、空間表現を促す足場かけの重要性である。実験 1 では、多くの子供が 3D 空間でも平面的なスケッチを描く傾向が見られた。子供たちは普段 2D 上で絵を描いており、3D 上での絵を描く経験・知識が不

足していたことが考えられる。そのため、適切な誘導や指導が必要であることが考えられる。しかし、大学生を対象にした実験では、課題有りのほうが、課題無しより評価が下がり、自由描画の重要性も示唆され、自由度を持たせつつ、足場かけを作ることが重要であることが考えられる。

題二に、共創を誘発するタスク設計の必要性である。実験 1 の学園祭環境では、自由描画における自発的な共同制作には限界が見られた。これに対し、実験 2 では「ツリー装飾」という共通目標を導入したことで、会話や役割分担といった協調行動が明確に引き出された。この結果は、MR におけるソーシャルな創造体験を成立させるためには、物理的な空間共有だけでなく、共通の対象物を介した目的意識の共有(タスク設計)が極めて重要であることを裏付けている。

被験者からは、消しゴムや保存機能といった実用的な機能への要望とともに、「VR/MR で“作る”ことは“見る”体験より新鮮だった」というフィードバックが得られたことは、今後の操作性向上と継続的利用に向けた指針となる。

また、今回の実験は単発のものとなり、今後は段階的な実験を同じ対象に繰り返し行うことで、幼少期の成長と MR 上でのペイント体験の関連をより深く調べる必要がある。

7. 結論

本研究では、Meta Quest 3 を用いた低負担な MR 3D ペインティングシステムを提案した。システムはパススルーMR での空中描画と、共有ルームを通じた共同制作を可能にする。学園祭での子ども・保護者および大学生を対象とした 2 つの調査を通じて、概ね肯定的な評価が得られ、大学生においては 3D 描画が 2D 描画よりも高く評価された。一方で、子どもにおける奥行き表現の不足や、共有目標のない共同制作の難しさが課題として確認された。結論として、MR は身近な空間での創造的芸術体験へのアクセスを広げる可能性を有しているが、奥行き表現を促す支援策と、協調を促進するタスク設計が重要であると言える。

謝辞

本論文の作成にあたり、イベントへの参加機会を頂いた坂本真人教授、実験を行った学園祭でのスペースをお貸しいただいた宮崎大学工学基礎教育センター准教授川崎典子先生には、深く感謝、御礼申し上げます。

また、実験に参加して下さった被験者の方々、学園祭において実験の補助をしていただいた研究室の方々に深く感謝いたします。

参考文献

1. [J. A. Durlak, R. P. Weissberg and M. Pachan, A Meta-Analysis of After-School Programs That Seek to Promote Personal and Social Skills in Children and Adolescents, American Journal of Community Psychology, vol. 45, no. 3–4, 2010, pp. 294–309, doi:10.1007/s10464-010-9300-6.](#)
2. [E. Covay and W. Carbonaro, After the Bell: Participation in Extracurricular Activities, Classroom Behavior, and Academic Achievement, Sociology of Education, vol. 83, no. 1, 2010, pp. 20–45, doi:10.1177/0038040709356565.](#)
3. [文部科学省, 「青少年の体験活動の推進に関する調査研究 報告書」, 2021 年 3 月.](#)
4. [公益社団法人チャンス・フォー・チルドレン, 「子どもの『体験格差』実態調査 最終報告書——全国小学生保護者 2,097 人調査」, 2023 年 7 月 4 日.](#)
5. [文部科学省, 「平成 30 年度子供の学習費調査の結果について」, 2019 年 12 月 18 日.](#)
6. [T. Nozawa, E. Wu, F. Perteneder and H. Koike, Visualizing Expert Motion for Guidance in a VR Ski Simulator, Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2019 Posters, Los Angeles, CA, USA, 2019, pp. 64:1–64:2, doi:10.1145/3306214.3338561.](#)
7. [V. Amm, K. Chandran, L. Engeln and M. McGinity, Mixed Reality Strategies for Piano Education, Frontiers in Virtual Reality 5, 2024, Article 1397154, doi:10.3389/frvir.2024.1397154.](#)
8. [M. Holly, C. Weichselbraun, F. Wohlmuth, F. Glawogger, M. Seiser, P. Einwallner and J. Pirker, VRChances: An Immersive Virtual Reality Experience to Support Teenagers in Their Career Decisions, Multimodal Technologies and Interaction 8\(9\), 2024, 78, doi:10.3390/mti8090078.](#)
9. [U. Han, Applying Virtual Reality \(VR\) for Immersive Experiential Learning in Underserved Rural Schools, Practitioner Proceedings of the 9th International Conference of the Immersive Learning Research Network \(iLRN 2023\), 2023, doi:10.56198/ITIG2E8D9.](#)
10. [J. Laine, T. Korhonen and K. Hakkarainen, Primary School Students' Experiences of Immersive Virtual Reality Use in the Classroom, Cogent Education 10\(1\), 2023, Article 2196896, doi:10.1080/2331186X.2023.2196896.](#)
11. [P. Ariya, N. Wongwan, P. Worrugin, K. Intawong and K. Puritat, Immersive Realities in Museums: Evaluating the Impact of VR, VR360, and MR on Visitor Presence, Engagement and Motivation, Virtual Reality 29\(3\), 2025, Article 117, doi:10.1007/s10055-025-01201-5.](#)
12. [H. Shahab, M. Mohtar and E. Ghazali, Virtual Reality in Museums: Does It Promote Visitor Enjoyment and Learning?, International Journal of Human–Computer Interaction 39\(18\), 2023, pp. 3586–3603, doi:10.1080/10447318.2022.2099399.](#)
13. [Y.-T. Kuo, E. Garcia Bravo, D. M. Whittinghill and Y.-C. Kuo, Walking into a Modern Painting: The Impacts of Using Virtual Reality on Student Learning Performance and Experiences in Art Appreciation, International Journal of Human–Computer Interaction 40\(23\), 2024, pp. 8180–8201, doi:10.1080/10447318.2023.2278929.](#)

MR を用いた模様替え支援の有用性の検証

江原拓郎^{a)}・坂本真人^{b)}

Verification of the Effectiveness of Interior Layout Support Using MR

Takurou Ehara, Makoto SAKAMOTO

Abstract

This study aimed to clarify the differences in psychological impact on the decision-making process when considering redecorating, by comparing cases where redecorating is done solely through imagination with those where mixed reality (MR) is used. Participants were divided into two groups, and a comparative experiment was conducted using conceptualization time and subjective evaluations via questionnaires. Psychological burden, decision confidence, satisfaction, and spatial evaluation were established as evaluation indices, and an overall evaluation score was calculated using subscales and weighting. The results showed that while conceptualization time increased under the MR condition, a reduction in psychological burden and improvements in decision confidence and satisfaction were observed. Furthermore, the relationship between psychological burden and decision confidence may change. Therefore, it is considered that using MR to support redecorating is an effective method for improving the quality of decision-making.

Keywords: MR, interior layout support, decision-making, psychological burden

1. 研究背景

模様替えは居住環境の快適性を向上させる有効な手段であるが、完成後の部屋の状態を事前に正確に想像することは難しく、多くの人にとって心理的負担の大きい作業となっている。家具の大きさや配置バランス、生活動線への影響を頭の中だけで予測することには限界があり、「失敗しそう」「後悔しそう」といった不安が意思決定を困難にしている。近年、VR (Virtual Reality) や MR (Mixed Reality) 技術の発展により、現実空間に仮想物体を重畳表示し、空間構成を視覚的に確認することが可能となっている。これにより模様替え後の状態を事前に体験的に把握できる環境が実現しつつある。しかし、従来研究では操作性や臨場感の評価が中心であり、「模様替え時の心理的負担」[1]や「意思決定の確信度」[2]といった心理的側面を定量的に評価した研究は十分に行われていない。

2. 研究目的

本研究の目的は、MR を用いた模様替え支援が、利用者の意思決定過程における心理的負担、意思決定確信度および満足度に与える影響を明らかにすることである。想像のみで模様替えを検討する場合と、MR を用いて検討する場合を比較する実験を行い、構想時間およびアンケートによる主観評価を用いて定量的に検証する。

3. システム概要

本研究では、MR を用いた模様替え支援アプリケーションを開発した。被験者は実空間内に仮想家具モデルを重畳表示し、家具の位置や向きを変更しながら配置案を検討することができる。

使用機器は MR 対応ヘッドマウントディスプレイを用い、Unity によりアプリケーションを実装した。実空間の床面および壁面を基準として家具モデルを配置することで、模様替え後の空間を視覚的に確認できる構成とした。

4. 実験方法

4.1 被験者条件

a) 工学専攻先端情報コース大学院生

b) 工学基礎教育センター教授

被験者に対し、以下の 2 グループで模様替え検討を行わせた。

- A グループ：想像のみで模様替えを検討
- B グループ：MR アプリを用いて模様替えを検討

4.2 実験手順

1. タスク説明
2. 構想開始(時間計測)
3. 配置検討
4. 完成判断
5. アンケート回答

5. 評価指標 (アンケート内容)

本研究では、模様替え支援における MR 利用の有効性を評価するため、客観評価および主観評価の 2 つの観点から評価を行う。客観評価では、思考及び意思決定に要した時間を計測した。主観評価ではアンケートを実施した。アンケートは 7 段階評価 (1: 悪い~7: 良い) で構成し、以下の下位尺度を設定した。

- 空間感スコア (S_space)：空間の良さ・配置の妥当性
- 快適・安心スコア (S_comfort)：部屋の総合評価・安心感
- 負担スコア (S_load)：迷い・頭の負担・悩みの度合い
- 意思決定スコア (S_decision)：後悔しにくさ・想像しやすさ

各尺度の向きを統一した後、重み付けを行い、総合評価スコアを算出した。

6. 実験結果

構想時間については、A グループが 4.57 分だったのに対し B グループは 9.42 分となった。B グループ (MR 使用) の方が A グループ (想像のみ) よりも長くなる傾向が確認された。図 1 に示す。

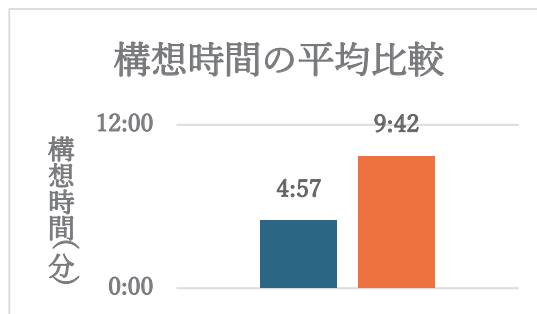


図 1. 構想時間の平均比較

一方で、やり直し回数は B グループにおいて大きく減少した。主観評価においては、心理的負担に関する項目 (迷い、頭の負担、構想時間外の悩み) で B グループが高い評価値を示した。また、意思決定スコアおよび満足度についても B グループが A グループを上回る表 1 の結果となった。

表 1. 各項目の平均比較

	Aグループ		Bグループ	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
構想時間	4:57	0.10964	9:42	0.13642
やり直した回数	1.4166	1.505	0.1538	0.3755
構想時間外に悩んだ度合い	2.0833	1.3789	1	1.2247
部屋の総合評価	7	1.3484	8.7692	1.0919
実生活の想像	4.6666	1.9227	6.4615	0.6602
後悔するか	4.75	1.8647	5.923	0.6405
構想時間中の迷い	3.25	1.4222	5.5384	1.7133
頭の負担	3.3333	2.2292	5.8461	1.0681
空間の良さ	5.0833	1.1645	5.9231	1.4411

下位尺度を統合した総合評価スコアにおいても、多くの被験者で MR 条件が高い値を示し、MR を用いた模様替え支援が総合的に高く評価される表 2 の結果となった。

表 2. 総合評価スコアの平均。

	Aグループ	Bグループ
空間感	5.0833	5.2308
満足度	7	8.76923
負担	3.2916	5.69231
意思決定	4.7083	6.19231

7. 考察

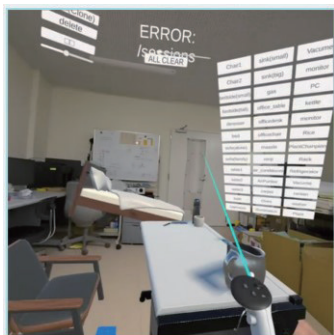
MR 条件では構想時間が増加したが、やり直し回数の減少および心理的負担の低下が確認された。この結果は、MR が意思決定を遅らせたのではなく、より慎重で検証的な意思決定を促したことを示唆している（図2参照）。

想像のみで検討する場合、被験者は頭の中で空間を構築し判断を行う必要があり、高い認知負担が生じる。一方、MR 環境では家具配置結果を視覚的に確認できるため、空間認知処理が外部化され、心理的負担の軽減につながったと考えられる。

また、相関分析より、心理的負担と意思決定確信度との間に関係が認められたことから、MR は意思決定過程の心理構造そのものに影響を与える可能性が示唆された。



(a) 模様替え前の例



(b) 模様替え後の例

図2. MR を用いた模様替え支援の様子

8. まとめ

本研究では、MR を用いた模様替え支援が意思決

定過程に与える心理的影響を実験的に評価した。

その結果、MR を利用することで心理的負担が低減し、意思決定確信度および満足度が向上することが確認された。

構想時間は増加するものの、やり直し回数の減少および総合評価スコアの向上から、MR は「短時間で決める」ための支援ではなく、「納得して決める」ための意思決定支援手法であると位置付けられる。

本研究は、MR を用いた模様替え支援を心理的側面から定量的に評価した点に意義があり、今後は住宅設計支援や製品選択支援などへの応用が期待される。

9. 今後の課題

- 被験者数の増加及び多様化
 - 長期利用による影響の検証
 - 生理指標との組み合わせ
 - システムの軽量化・操作性の改善
- などがあげられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、坂本真人教授には丁寧かつ的確なご指導をいただき、心より感謝申し上げます。また、実験にご協力いただいた坂本研究室の皆さまにも深く感謝いたします。そして的確なアドバイスをしていただいた友人たちや関わってくださったすべての人に、この場を借りて深い感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 城、仁士、吉田、浩之、”個人空間における快適さに関する研究”、神戸大学発達化学研究紀要、pp.152-163、1994.
- [2] Sweller, J., Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning, Cognitive Science, Vol. 12, No. 2, pp. 257-285, 1988.

EMG を用いた筋負荷可視化とゲージ表示によるゲーミフィケーション要素を組み合わせたスクワットトレーニング手法の提案

押川 優^{a)}・坂本 真人^{b)}

Proposal of a Squat Training Method Combining Muscle Load Visualization

Using EMG with Gamification Elements via Gauge Display

Yu Oshikawa・Makoto Sakamoto

Abstract

Strength training is essential for maintaining health and building an attractive physique, yet many people struggle to stick with it. One reason for this is that they fail to feel the effects of strength training. To maximize the effects of strength training, mastering proper form is essential. Therefore, I embarked on this research to reduce the number of people who quit strength training by visualizing muscle load in real time during workouts. We are developing a system that uses machine learning to visualize muscle load from user form, enabling muscle load visualization without requiring electromyography. At present, it is possible to estimate muscle load, but the accuracy of this estimation is low. Therefore, we are currently experimenting to improve the accuracy of muscle load estimation.

Keywords: Image processing, Long Short-Term Memory(LSTM), Machine Learning(ML), Muscle training

1. はじめに

健康を維持し、魅力的な身体をつくるうえで筋トレは欠かせないものである。しかし同時に、筋トレを継続することは非常に難しく、多くの筋トレ初心者が筋トレによる恩恵を受けることができないまま筋トレをやめてしまっているという現状がある。

近年、日本における筋トレ人口は増加傾向にあり、年1回以上の筋トレ実施率は2000年の7.3%^[1]から、2024年には15.9%へと大幅に上昇している。一方で、1年以上継続して筋トレを行える人の割合はわずか4%^[2]にとどまっており、多くの人が「効果を実感できない」や「つらい」などの理由で筋トレをやめてしまっている。

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

いる。このように、筋トレ初心者にとって、筋トレを継続することは非常に難しく、多くの筋トレ初心者が筋トレによる恩恵をうけることができていない。

筋トレの効果を得るために最も重要なのは、正しいフォームの習得である。そこで著者は、正しいフォームで筋トレを行えるよう支援することで、前述した「効果が実感できない」という理由で筋トレをやめてしまう人を減らすことができ、より多くの筋トレ初心者が筋トレによる恩恵を受けられるようになるのではないかと考えた。また、「つらい」という理由で筋トレを継続できない人を減らすためには、ゲーミフィケーションの導入が有効であると考えた。ゲーミフィケーションとは^[3]、ゲームの特性である「ユーザを引き付けて楽しませる」要素を活用して課題解決を図る取り組みである。著者は本研究にゲーミフィケーションを取り入れることで、ユーザに筋トレに楽しさを見出し、筋トレをやめてしまう初心者をより多く減らすことができるのではないかと考えた。

本研究では、EMGを用いて筋負荷を可視化しユーザにフィードバックする手法、ゲーミフィケーションを応用したスクワットトレーニング手法を用いて筋トレ初心者へのアプローチを試みる。

2. 研究概要

2.1. スロースクワット

本研究では、数あるトレーニング種目の中でも、カメラの正面に立ち、モニターを見ながらトレーニングできる、十分なスペ

ースがあれば機器を使用せずにトレーニングできる、下半身全体の筋肉を同時に効果的に鍛えることができるという観点からスクワットを採択した。また、いくつか種類があるスクワット種目の中でもスロースクワットを採用した。

スロースクワット^[4]とは、一般的なスクワットよりも動作速度を落とし、ゆっくりと時間をかけて実施するスクワットである。動作をゆっくり行うことで、筋肉に大きな負荷をかけつつ、関節への負担が小さいためである。

本来は1回の動作に約5秒をかけることが推奨されるが、本研究では初心者でも無理なく実施できるよう、下降動作3秒、上昇動作2秒とする条件を設定した。

2.2. 研究概要

本研究では、ユーザが筋トレしている様子をカメラで撮影し、その映像からMediaPipe および筋負荷推定モデルを用いて筋負荷を推定し、可視化する。これにより、ユーザはモニターを通して自身の動作と筋負荷を同時に確認することができる。図1に、筋負荷を推定し可視化している様子を示す。



図1:筋負荷を推定、可視化している様子

また、本研究ではスクワットの下降動作および上昇動作ごとに採点を行い、各動作

終了時に評価結果をモニター上でフィードバックする。もし動作中にフォームが崩れていた場合には、どのようにフォームが崩れていたかリアルタイムでモニター上に表示する。さらに、トレーニング終了時に100点満点で総合得点を表示するとともに、各評価項目の評価回数、フォームが崩れていた回数、総合的なフィードバックを行う。これによりユーザは動作ごとにフォームを修正しながら、高得点を目指して楽しみつつトレーニングを行うことができる。図2に動作ごとのフィードバックを行っている様子、図3に総合的なフィードバックを行っている様子を示す。



図2:動作のフィードバックを行っている様子



図3:総合的なフィードバックを行っている様子

動作中は膝関節角度、経過時間の2つの指標をゲージ形式で表現する。下降動作では、腰を下ろして膝関節角度が小さくなる

ほどゲージが減少し、上昇動作では、腰を上げて膝関節角度が大きくなるほどゲージが減少する。経過時間については、下降動作では3秒、上昇動作では2秒かけてゲージが減少する。ユーザは、両方のゲージが同時に減少するよう動作を行うことで、頭の中で秒数を数える場合よりも正確にスロースクワットの動作時間を守ることができる。

また、膝関節角度のゲージ、経過時間のゲージの差が30%以下になった場合、ゲージの色が変化するようにしている。これにより、ユーザは色の変化を目標として動作を行い、その状態を維持しながらトレーニングを行うことで、楽しみながら正しい動作時間を意識できる。図4に、動作中のゲージ表示の様子を示す。



図4:膝の関節角度、経過時間をゲージ表示している様子(上)、ゲージの色が変化している様子(下)

3. 研究手法

3.1. EMG を応用して筋負荷を可視化

しユーザにフィードバックする

手法

3.1.1. 筋電計測

本研究では、スクワットにおける対象筋を大腿四頭筋に定め、筋電計測を行った。計測では 200 回のスクワットを行う過程を計測した。200 回のスクワットの内訳は、正しいフォームでのスクワット 100 回、間違っただけのフォームでのスクワット 100 回である。

間違っただけのフォームのスクワットとは、可動域が半分のスクワット、膝が前に出ているスクワット、腰をそった状態でのスクワット、上半身が前に倒れているスクワットの 4 種類である。

なお、筋電計測には無線筋電計測機である Delsys Trigno システム^[5]を使用し、センサには、Wireless surface EMG sensors を使用した。

3.1.2. MediaPipe を用いたデータ取

得

筋電計測の際のスクワットを撮影し、その動画から、上半身と地面の角度、膝関節角度、太腿と地面の角度、しゃがみ具合(1 が直立、0 が完全にしゃがみこんでいる)、速度、加速度のデータを取得した。

次に、EMG データと MediaPipe により取得したスクワットデータとの間に生じるタイムラグを解消する処理を行った。このタイムラグは、筋電計測に使用した Delsys Trigno の仕様によるものであり、約 1 秒のタイムラグである。

また、データ取得のフレームレートも異なり、EMG データは 1 秒間に約 148.17 回計測される一方、MediaPipe によるデータ取得は 1 秒間に約 30.86 回である。そのため、両データを結合する際、このタイムラグ、フレームレートの差異を補正する処理を行った。

さらに、筋負荷推定モデルを使用すると、計算量が増加する影響でさらに座標取得のフレームレートが約 $1/4.4286$ 倍低下するため、フレームレートの差異を補正する処理を施したデータにフィルタリングを行った。

3.1.3. 筋負荷推定モデル構築

スクワットデータ、EMG データの結合データを用いて、筋負荷推定モデルを構築した。モデルを構築するにあたって、Kares を用いた LSTM モデル、2929 のサンプル数、6 の特徴量、22 の時系列長を持つ結合データを使用した。

3.2. ゲーミフィケーションを応用した

スクワットトレーニング手法

本研究では、スクワットの評価およびゲーミフィケーションを行うことでゲーミフィケーションを応用したスクワットトレーニングを実

現する。評価については、「スクワットスピード」、「フォーム」の2つの観点から評価を行う。

3.2.1. スクワットスピードの評価

スクワットスピードの評価では、各動作の所要時間を計測し、1動作につき10点満点で採点する。したがって、5回分スクワットが完了すると、合計100点満点でスクワットスピードの評価を行うことができる。本研究では、スロースクワットの動作を下降動作3秒、上昇動作2秒で行うものとし、この基準時間に基づいて表1に示す採点基準を設定した。また、各動作がどの評価に該当したかを記録し、スクワット終了時にその内訳を表示する。

表1:スクワットスピードに関する採点基準

評価の フィード バック	点数 (点)	下げ動作に 要した時間 (秒)	上げ動作に 要した時間 (秒)
Bad	4	0.0~0.7	0.0~0.5
Good	6	0.7~1.2	0.5~1.0
Great	8	1.2~2.0	1.0~1.5
Perfect	10	2.0~	1.5~

3.2.2. スクワットフォームの採点

ユーザがスクワットを行う中でフォームが崩れてしまった場合には、その内容を画面上に表示するとともに、スクワットスピードが基準通りであっても、当該動作の採点を一律2点にした。本研究で対象とするフォームの崩れは膝がつま先より前に出ているスクワット、上半身が過度に前傾し、

肩がつま先より前に出ているスクワット、膝が内側に入っているスクワット、可動域が浅いスクワットの4種類である

さらに、トレーニング1セットの中で、これらのいずれかのフォーム崩れが3回以上記録された場合には、総合フィードバックとして、以下のフォーム改善のための注意点を提示し、ユーザが次のトレーニングで修正できるよう支援する仕組みとした。

- **膝がつま先よりも前に出ているスクワットを3回以上行った場合**

膝前に障害物などをおいて膝を前に出さない意識でスクワットしましょう。

- **上半身が過度に前傾し、肩がつま先より前に出ているスクワットを3回以上行った場合**

足裏全体で地面を踏むようにすると、重心が安定します。

- **膝が内側に入っているスクワットを3回以上行った場合**

膝が内に入らないよう、膝にゴムチューブを巻いてスクワットしてみましょう。

- **可動域が浅いスクワットを3回以上行った場合**

可動域を広くとる意識を持つ、柔軟性を高める努力をしましょう。

3.3. 膝関節角度、経過時間ゲージ

動作中は膝関節角度、経過時間の2つの指標をゲージ形式で表現する。膝関節角度ゲージの上限は、下降動作ではスクワットカウント機能と同じ150度、上昇動作では90度とし、下限は、下降動作では90度、上昇動作では150度とした。下降動作と上

昇動作の区別を容易にするため、ゲージおよび評価文字の色は、下降動作を赤、上昇動作を青に設定した。

また、膝関節角度ゲージと経過時間ゲージの差が 30% 以下となった場合には、動作の正確性が高いと判断し、ゲージが黄色に変化するように設定している。

4. 結果と評価

4.1. EMG を応用して筋負荷を可視化

しユーザにフィードバックする

手法

テストデータをモデルに入力したところ、モデルが実測値と同じような出力がされた。また、MSE は右足の筋負荷推定が約 0.0022278、左足の筋負荷推定が約 0.0024774 であった。図 5 にテストデータをモデルに入力した際の右足の筋負荷推定値、実測値のグラフ、図 6 に左足の同様のグラフを示す。

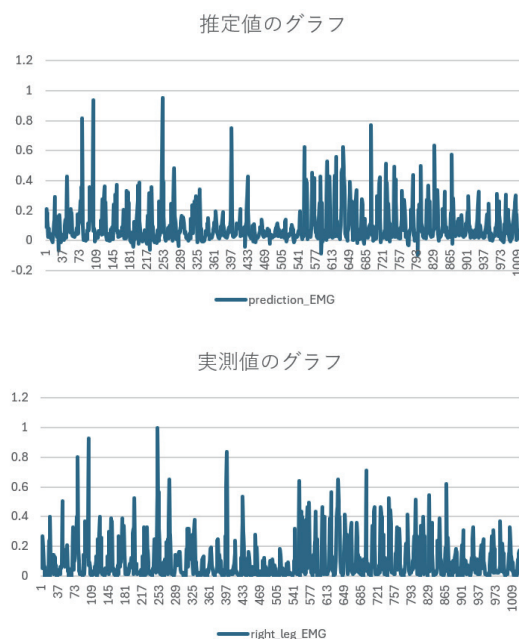
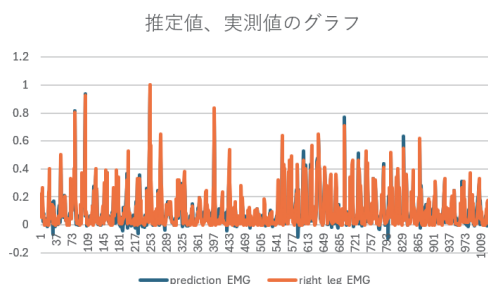
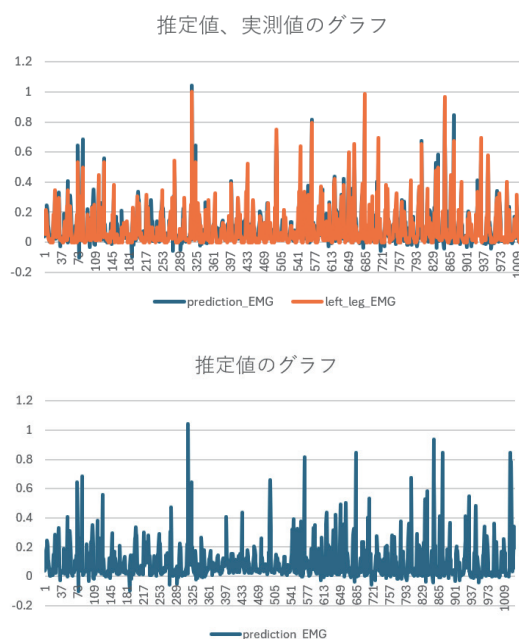


図 5: テストデータをモデルに入力した際の右足の筋負荷推定値、実測値



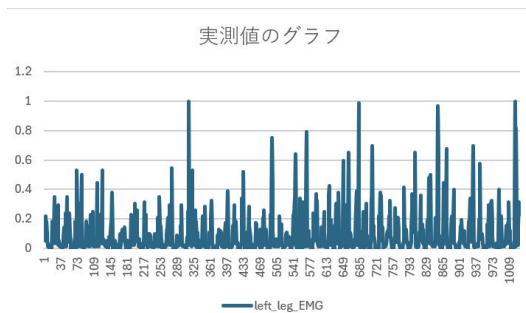


図 6: テストデータをモデルに入力した際の左足の筋負荷推定値、実測値

本手法により作成した筋負荷推定モデルが適切に筋負荷を推定できているか検証を行った。本手法では、179cm 男性である著者から取得した EMG、スクワットデータを使用して筋負荷推定モデルを作成している。そのため、著者以外のユーザが使用した場合でも適切に筋負荷推定が行われるかを確認する目的で、156cm 女性の被験者、著者自身の 2 名を対象として検証を行った。

検証では、正しい可動域、狭めの可動域、上半身を前傾しすぎている姿勢を交えて 10 回程度のスクワットを行い、動作の中で推定した筋負荷、スクワットデータを比較して適切に筋負荷が推定されているか確認した。

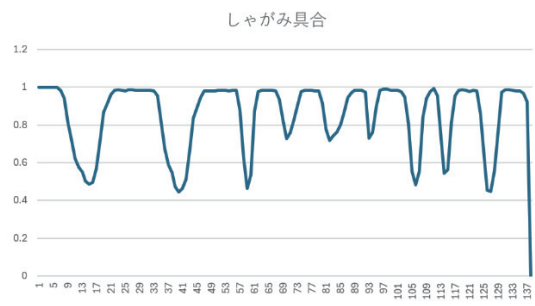
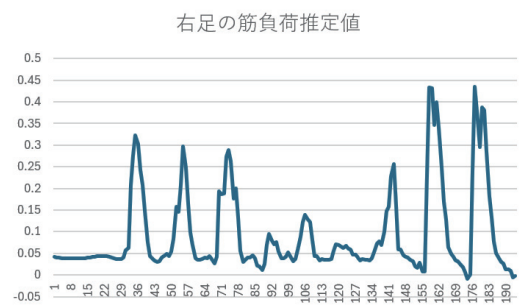


図 7: 著者の両足筋負荷推定値、しゃがみ具合



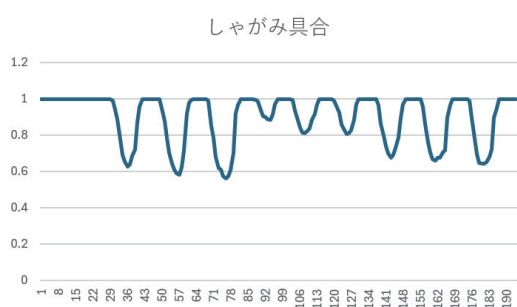


図 8:167cm 女性の両足筋負荷推定値、しゃがみ具合

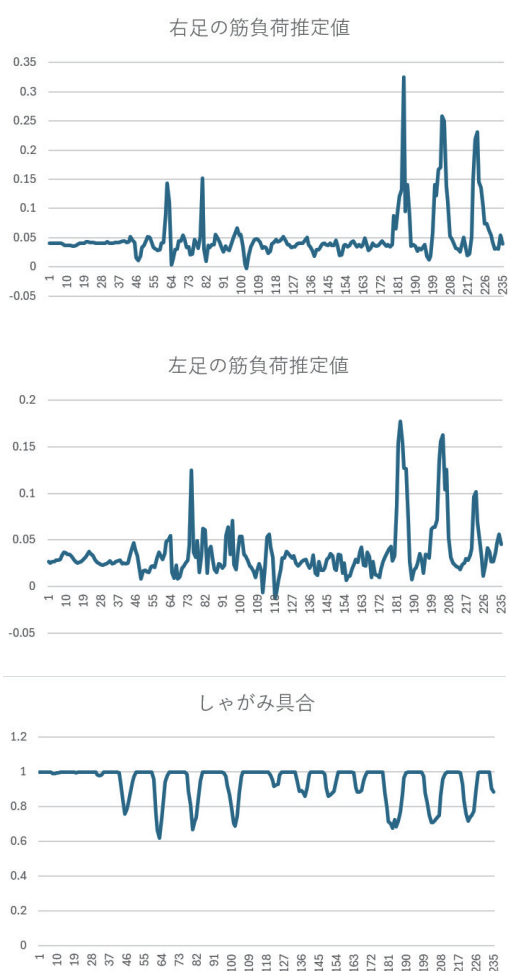


図 9:156cm 女性の両足筋負荷推定値、しゃがみ具合

図 7 に著者の両足筋負荷推定値、しゃがみ具合、図 8 に 156cm 女性の同様の項目を示す。図 7、8 を見ると、両被験者でしゃが

み具合が小さくなっているタイミングできちんと筋負荷が大きくなっているため、著者以外のユーザが使用しても適切なタイミングで筋負荷推定が行われているといえる。

一方、検証を通しての最大筋負荷推定値をみると、右足は 0.48127、左足は 0.43432 と、正規化後の最大値である 1 と比べて乖離がみられた。

テストデータを入力した時のモデルの出力値は、筋負荷推定値の正規化後の最大値と乖離がないにも関わらず、リアルタイムでの筋負荷推定値と、筋負荷推定値の正規化後の最大値の間に乖離がみられた原因として、学習データを作成時と検証時でカメラの位置、フレーミング角度が異なることが考えられる。カメラの位置、フレーミング角度が異なることで、学習データ作成時と同様のスクワット動作を行っていても、学習データ作成時と異なる関節角度を取得してしまい、モデルが適切な筋負荷推定をすることができなかったのではないかと考えられる。

また、全被験者を通して、右足の筋負荷推定値の方が大きめに推定されたという結果になった。この原因として、学習データの両足 EMG の差が考えられる。図 10 に学習データの両足 EMG のグラフを示す。このグラフを見ると、橙色の左足 EMG の値が全体的に小さめになっている。実際に足ごとに EMG 値の平均値をとると、右足で 0.000082V、左足で 0.000074V であった。このように両足で EMG 値に差が出た原因として、筋電計測値のセンサの取り付け位置が考えられる。センサを取り付ける位置が左右の足でわずかにずれていたことから、

両足間に EMG 値の差が生じたのではないかと考える。

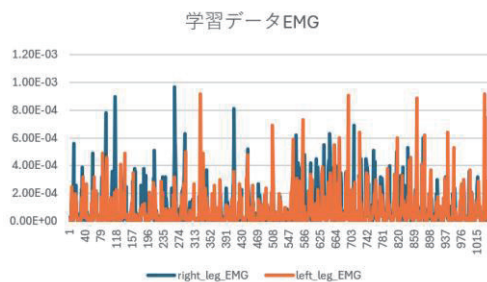


図 10:学習データの両足 EMG

図 11 に 156cm 女性の両足と地面の角度、両膝の角度を示す。図 25 を見ると、しゃがみ具合が同様であるにもかかわらず、筋負荷推定値が低くなっている箇所がある。このことから、しゃがみ具合だけでなく、膝の角度、太腿と地面の角度など、他の特徴量も踏まえて筋負荷を推定できていると考えられる。

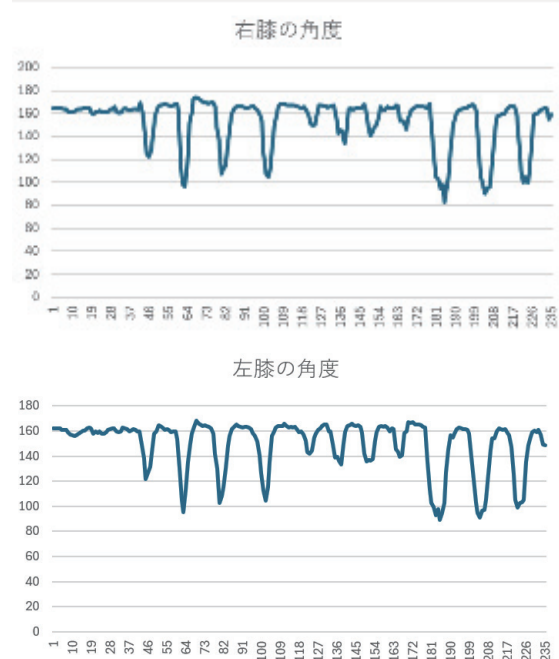
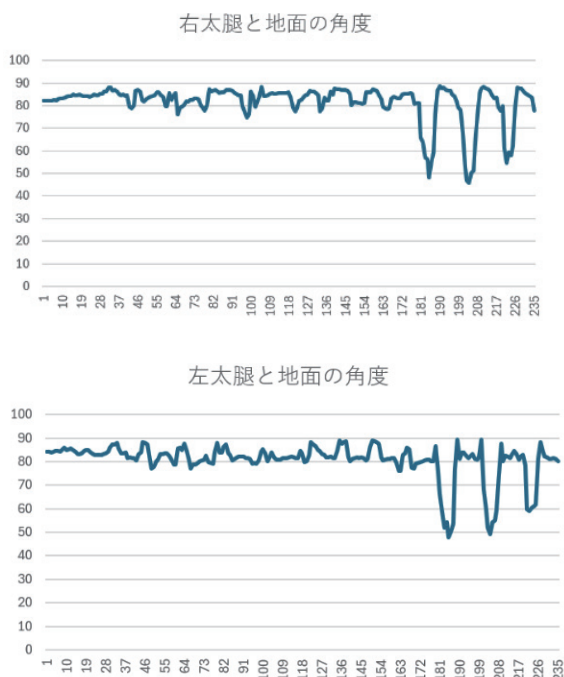


図 10:156cm 女性の両足と地面の角度、両膝の角度

4.2. ゲーミフィケーションを応用したスクワットトレーニング手法

ゲーミフィケーションを応用したスクワットトレーニングの有効性を検証するため、評価実験を実施した。実験では、ゲージ表示の有無によってユーザーのスクワットスピードの正確性に有意差が生じるかの検証、ゲーミフィケーションを取り入れたトレーニングに対する主観的評価の収集の2点を目的とした。

まず、ゲージ表示の有無によるユーザーのスクワットスピードの正確性の違いを確認するため、被験者にゲージ表示有り、ゲージ表示無し両方でトレーニングを実施してもらった。その後、各条件における動作評価のうち、最高評価である Perfect 評価の獲得回数を比較した。被験者は10代から50代の男女23人である。

双方のトレーニングでの Perfect 評価の

平均獲得回数の結果は、ゲージ表示有りのトレーニングでは約 3.59 回、ゲージ表示無しのトレーニングでは約 2.95 回であり、ゲージ有りのトレーニングの方が約 1.22 倍多い結果となった。

しかし、ウィルコクソンの符号順位検定を実施すると、 $T=68.5$ となり、 $n=18$ 、有意水準 5% の臨界値である 47 を上回り、有意差は見られないという結果になった。

これらの結果から、ゲージ表示の有無による Perfect 評価獲得回数に有意差は見られなかったものの、ゲージ表示は適切なスクワット速度でのトレーニングを補助できる可能性があると考えられる。

アンケートでは、以下の 5 項目について質問を行った。

1. ゲージ表示機能は使いやすいか
2. ゲージ表示機能はトレーニングの質の向上につながると感じたか
3. ゲージ表示あり・なしのどちらの方がトレーニングしやすかったか
4. 得点表示や評価表示などのゲーム要素は、初心者がトレーニングを行う上で有用だと感じたか
5. トレーニング中のフォーム崩れ表示機能、および終了後のフィードバック機能は、初心者のトレーニングの質向上に必要だと感じたか
6. トレーニングの質向上に役立つと感じた点、良かった点
7. 改善した方がいい点、要望

質問 1、2、4、5 の質問は 5 段階評価で回答してもらい、質問 3 はゲージ表示有り、無しのどちらかを選んでもらい、質問 6、

7 の質問は自由記述で回答してもらった。
図 11、12、13、14、15 に質問 1~5 の回答結果を示す。

経過時間、膝の角度がバーで表示される機能は使いやすかったですか？
22 件の回答



図 31: 質問 1 の回答結果

経過時間、膝の角度がバーで表示される機能はトレーニングの質向上に繋がると感じましたか？
22 件の回答

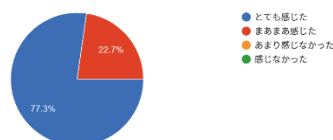


図 32: 質問 2 の回答結果

バー有りverとバー無しverどちらが使いやすかったですか？
22 件の回答

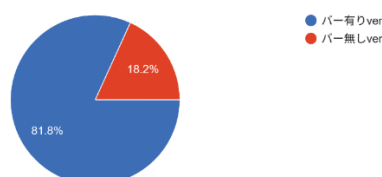


図 33: 質問 3 の回答結果

得点が表示されたり、評価が表示されるなどのゲーム...がトレーニングする上で必要だと感じましたか？
22 件の回答

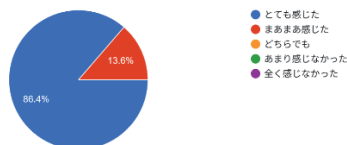


図 34: 質問 4 の回答結果

トレーニング中にフォームの崩れを表示する機能、...トレーニングの質向上に必要だと感じましたか？
22 件の回答

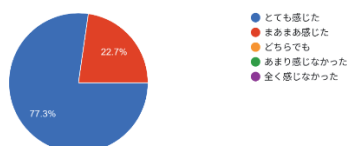


図 35: 質問 5 の回答結果

これらの回答結果から、質問 1~5 のすべてにおいて概ね肯定的な評価が得られたことが分かる。特に、多くの被験者が「ゲージ表示がある方がトレーニングしやすい」と回答した。一方で、4名の被験者は「ゲージ表示がない方がトレーニングしやすい」と回答していた。理由を直接確認したところ、「ゲージ表示があると、そちらに意識が向いてしまい、トレーニングに集中できない」という意見が得られた。この結果から、多くのユーザにとってゲージ表示はスクワット速度を意識したトレーニングに有効である一方、一部のユーザにとってはトレーニングの妨げになる可能性があることが示唆された。したがって、本手法を広く活用してもらうためには、ゲージ表示の有無をユーザが選択できる機能を設けることが望ましいと考えられる。

また、筋トレ初心者のトレーニングの質向上に関する「評価表示・得点表示などのゲーミフィケーション要素」、「フォーム崩れのリアルタイムフィードバック」、「トレーニング終了後の総合的なフィードバック」については、全ての被験者が「とても必要」「まあまあ必要」と回答した。これらの結果から、本研究が提案するゲーミフィケーションを用いたアプローチは、筋トレ初心者に対して有効な支援手法となり得ると考えられる。

自由記述欄で回答してもらった質問 6 では、

- 点数だけでなく、Perfect などの評価が同時に表示されていて良かった
- 楽しくトレーニングできた
- 点数化されることでゲーム性が生ま

れ、取り組みやすかった

- 秒数や角度が表示されるのが良かった
- 姿勢を確認できた
- 時間を意識でき、より筋肉に効いていると感じた
- ユーザに求められる操作が少なく使いやすい

などの意見が得られた。これらの結果から、多くのユーザが本手法を用いたトレーニングを楽しみながら行い、トレーニングの質の向上を実感できたといえる。

一方、質問 7 の自由記述では、

- フォントを背景付きにするなど、画面が見やすいととっても良い
- ゲージを気にしてしまうため、数字での時間表示だけでよい
- UI を整理してほしい
- もっとゲーム性を持たせ、他者と競えるようにしてほしい
- 文字が見づらい
- BGM があるともっと楽しく筋トレできそう
- フィードバックにキャラクター性を持たせると面白い

などの意見が寄せられた。「文字が見づらい」「UI を整理してほしい」といった指摘に対しては、回答でも意見として出ているが、フォントに背景を付加することで視認性を改善できる可能性が高い。本手法では、トレーニング環境の明るさや背景によって文字色が見えにくくなる場合があるため、この改善策は有効であると考えられる。

また、「より強いゲーム性がほしい」という意見に対し、今後の展望として、オンラインランキングや継続日数の競争機能、各ユーザにキャラクターを持たせ、トレーニングによってキャラクターを育成する要素、そのキャラクターで対戦する機能などを導入することで、さらにゲーム性を高めることができると考える。

「BGM があるとより楽しくなる」という意見についても同意見であり、音楽を付与することでトレーニングのモチベーションを高められる可能性がある。

さらに、「ゲージを気にしてしまう」という意見があった点については、前述したように、ゲージ表示のオン／オフ切り替え機能を導入することでユーザ個々の好みに対応できると考える。

「フィードバックにキャラクター性を持たせると面白い」という意見に対しても同意見であり、前述した書くユーザにキャラクターを持たせるなどの機能に追加して、自身のキャラクター、他ユーザのキャラクターがフィードバックしてくれるといった機能を追加するとよりフィードバックにキャラクター性を持たせることができると考える。

5. 考察

5.1. EMG を用いて筋負荷を可視化しユーザにフィードバックする手法

EMG を用いて筋負荷を可視化しユーザにフィードバックする手法の考察について記述していく。本手法を用いて作成した筋負荷推定モデルは、適切なタイミングで筋負荷を予測することができているが、想定される出力値より小さい値を出力した。出

力値が想定よりも小さくなってしまった原因として、学習データを作成する際、検証を行う際のカメラの位置、フレーミング角度が異なることで、学習データ作成時と同様のスクワット動作を行っていても、学習データ作成時と異なる関節角度を取得してしまっていることが考えられる。著者は、この原因を解決する手法として、2つの手法を提案する。

1つ目の手法は、トレーニング時のカメラ位置、フレーミング角度を学習データ撮影時のカメラ位置、フレーミング角度に合わせるという手法である。学習データ作成時のカメラ位置、フレーミング角度をあらかじめ計測しておき、ユーザがトレーニングを行う際、そのカメラ位置、フレーミング角度でカメラを設置するのである。この手法のメリットは、厳密に学習データ作成時の環境を再現することでより高精度で筋負荷推定を行うことができる点である。しかし、デメリットとして、ユーザが学習データ作成時のカメラ位置、フレーミング角度にカメラを設置しなければならず手間がかかるという点、トレーニングを行う環境によっては学習データ作成時のカメラ位置、フレーミング角度にカメラを設置できない点がある。

2つ目の手法は、様々なカメラ位置、フレーミング角度から取得した学習データを用いて筋負荷推定モデルを作成する手法である。様々なカメラ位置、フレーミング角度から取得した学習データを用いて筋負荷推定モデルを作成することで、1つ目の手法より精度は落ちるが、学習データ作成時とトレーニング時のカメラ位置、フレーミング角度の違いによる影響を少なくするこ

とができるのではないかと考える。

また、本手法で用いた特徴量について考察する。本手法で作成した筋負荷推定モデルは、筋負荷がかかっているフォームでスクワットを行った時は出力値が大きくなっており、膝が前に出るなど、筋負荷が小さくなるフォームでスクワットを行ったときは出力値が小さくなっていった。このことから、本手法により作成したモデルは1つの特徴量に縛られず筋負荷推定を適切に行うことができている、本手法で用いた特徴量は、フォームごとの筋負荷を適切に推定するために適切な特徴量であったといえる。

5.2. ゲーミフィケーションを応用したスクワットトレーニング手法

ゲーミフィケーションを応用したスクワットトレーニング手法の考察について記述していく。まず、膝関節角度、経過時間をゲージ表示する機能についてであるが、ゲージ表示有りのトレーニングの方が、最高評価である Perfect 評価の回数が約 1.22 倍多いことが実験によりわかった。

そして、実験と同時に行ったアンケート調査によると、ゲージ表示機能の使いやすさ、ゲージ表示機能のトレーニングへの有効性、ゲーミフィケーションを応用したトレーニングのトレーニング初心者への有効性、フォーム崩れ表示機能、フィードバック機能の有用性について高い評価を得ることができた。特に、動作を評価する機能、採点を行う機能、フォーム崩れ表示機能、膝関節角度、秒数をゲージ表示する機能については自由記述の設問でも好意的な意見をもらうことができた。

一方で、「フォントが見づらい」、「もっ

とゲーム性を持たせて他のユーザと競えるようにしてほしい」、「BGM がほしい」、「フィードバックにキャラクター性を持たせると面白そう」などの意見が出た。著者は、これらの意見の中でも「他のユーザとの競争性」をさらに高めるような機能を加えることで、他のユーザと切磋琢磨しながら筋トレできるようになるため、筋トレ初心者の方がさらに楽しみながら筋トレをできるようになると考える。そのため、本手法の今後の展望として、オンラインランキング機能、トレーニングによってキャラクターを育成、対戦させる機能を追加するなどして「他のユーザとの競争性」を高めることが最優先であると考えられる。

6. おわりに

本論文では、筋トレ初心者が筋トレをやめてしまう代表的な原因である「効果を実感できない」、「つらい」という原因を解消するため研究概要、研究手法、結果と評価、考察について述べてきた。

本研究では結果として、EMG を用いて筋負荷を可視化しユーザにフィードバックする手法は、「効果を実感できない」という原因を解消するにはまだ不完全であるが、ゲーミフィケーションを応用したスクワットトレーニング手法は「つらい」という原因を解消するだけではなく、「効果を実感できない」という原因も解消することができた。

今後、より「効果を実感できない」という原因を解消するためには、EMG を用いて筋負荷を可視化しユーザにフィードバックする手法の学習データ作成時、トレーニング時のカメラ位置、フレーミング角度の

違いによる影響をなくす必要があり、「つらい」という原因を解消するためには、他のユーザと競争させるなど本手法により高いゲーム性を持たせる必要があると著者は考える。

また、この2つの手法の融合の仕方として、2つの手法を同時に使用することはトレーニングのしやすさの観点から考えると、現実的ではないため、ユーザに合わせてそれぞれの手法を提案できるような環境を構築することが必要であると考え。具体的には、スロースクワットの動作速度を改善したいユーザ、楽しみながら筋トレをしたいユーザにはゲーミフィケーションを応用したスクワットトレーニング手法を提案し、フォームを定着させるために筋負荷を意識しながら筋トレをしたいユーザには筋トレをしたいユーザには EMG を用いて筋負荷を可視化しユーザにフィードバックする手法を提案する必要があると考える。

以上が、著者が大学院で行った研究である。将来的にはこの研究がさらに発展し、多くの筋トレ初心者が筋トレを継続することができる環境を生み出してくれることを祈るばかりである。

参考文献

- [1] 笹川スポーツ財団, “筋トレ人口国内の禁欲トレーニング推計人口は約 1,629 万人”[Online].
https://www.ssf.or.jp/thinktank/sports_life/data/workout.html(参照 2025-06-16)
- [2] Sandro Sperandei , Marcelo C. Vieira, Arianne C. Reis , “Adherence to physical activity in an unsupervised setting: Explanatory variables for high attrition rates among fitness center members,” Journal of Science and Medicine in Sport, Volume 19, Issue 11, pp.916-920, 2016 年 11 月.
- [3] KPMG, “人材育成におけるゲーミフィケーションの効果と今後の可能性”[Online].
<https://kpmg.com/jp/ja/home/insights/2024/11/ki-hr-gamification.html>
- [4] Sports navi, “スクワットをゆっくり行うメリットとは。スロースクワットの効果とやり方 ”.[Online].<https://sports.yahoo.co.jp/column/detail/2024071800027-spnavido>(参照:2025-12-08)
- [5] DELSYS,[Online].<https://delsys.com/japan>(参照:2025-12-11)

キックフォーム指導支援システム「kick-form-analyzer」の提案

平沼 哉天^{a)}・坂本真人^{b)}

Proposal for “kick-form-analyzer” Kick form Instruction Support System

Kanata HIRANUMA, Makoto SAKAMOTO

Abstract

In recent years, human pose estimation has gained considerable attention in fields such as education, healthcare, and sports science because of its potential for quantitative motion analysis. In sports instruction, objective evaluation of athletic movements is essential for improving performance and providing effective feedback. However, conventional motion analysis methods often depend on specialized equipment, such as motion capture systems or multiple depth cameras, which require high costs and controlled environments. These limitations make their application difficult in school education and amateur sports setting. In addition, many educational sports environments face challenges such as a shortage of experienced instructors and limited technical knowledge among coaches. Therefore, there is a strong demand for accessible and low-cost technologies that can support motion analysis and skill acquisition. This study focuses on the use of monocular vision-based pose estimation to address these issues. By representing human motion as time-series joint coordinate data, it becomes possible to analyze and compare athletic forms objectively, contributing to more effective sports instruction support.

Keywords: MediaPipe, Pose Estimation

1. 序論

近年、姿勢推定や人間の動作解析に関する研究は、教育、医療、スポーツ分野をはじめとする多様な分野において注目を集めている。特にスポーツ分野においては、競技者の動作を客観的かつ定量的に評価することで、技術者の高度化や競技力向上につながる取り組みが進められている。従来の動作解析では、モーションキャプチャシステムや複数台の RGB-D カメラを用いた手法が多く提案されてきた[1][2]。これらの手法は高精度な姿勢推定を可能とする一方で、専用機器の導入コストが高く、設置環境が限

定されるといった課題を有している。

このような背景の中、単一の RGB カメラのみを用いて高速かつ高精度な姿勢推定を可能とする MediaPipe[3]が注目されている。MediaPipe は一般的な Web カメラやスマートフォンで取得した映像から人体の骨格情報を推定できるため、低コストかつ幅広い環境での利用が可能である。

また、日本の中学校およびここにおける部活動では、専門的な競技経験を有しない教員が指導に当たる割合が高く、指導の専門性不足や教員の過重労働が社会的課題となっている[4]。スポーツ指導を支援する技術的手法の確立は、こうした課題の解決にも寄与すると考えられる。

本研究では、MediaPipe を用いてサッカーのペナルティーキック動作を対象としたキ

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

ックフォームの比較評価および指導支援システム「kick-form-analyzer」を試作し、その有用性と課題について検討することを目的とする。

2. 原理

2.1 MediaPipe

本研究では、姿勢推定の基盤技術として Google が開発した機械学習フレームワーク MediaPipe[3]を用いる。MediaPipe は、入力画像や動画に対して、前処理、推論、後処理を段階的に実行するパイプライン構造を有しており、高速かつ安定した推論が可能である。

MediaPipe Pose は、単一の RGB 画像または動画を入力とし、人体の全身姿勢を構成する 33 点のランドマークを推定する姿勢推定手法である。各ランドマークは 2 次元座標(x, y)および相対的な深度情報(z)を含む 3 次元情報として出力される。これにより、静的姿勢のみならず動作の時系列解析が可能となる。

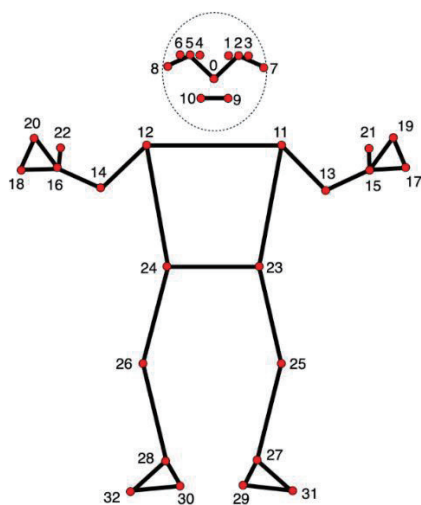


図 1. MediaPipe Pose における全身ランド

マーク

MediaPipe Pose は CPU 環境でも高速な推論が可能であり、特別な計算資源を必要としない点が大きな特徴である。一方で、カメラ視点や照明条件、遮蔽の影響を受けやすく、推定誤差が生じる可能性がある点には留意が必要である。

2.2 ペナルティーキック

ペナルティーキックとは、サッカー競技において反則により与えられる直接的な得点機会であり、ゴールから 11m 離れたペナルティーマークからボールを蹴る[5]。短時間で高い再現性と精度が求められる動作であり、キックフォームの違いが結果に大きく影響する。本研究では、動作区間が明確であり比較が行いやすい点から、ペナルティーキックを解析対象とした。

3. 指導支援システムの開発

3.1 開発環境

本研究で試作したシステムは、Windows 10 pro 環境上で Python を用いて開発した。姿勢推定には MediaPipe Pose を用い、動画の入出力および描画処理には OpenCV を使用した。被験者のキックフォーム動画は iPhone14 を用いて宮崎大学陸上競技場内サッカーコートにて撮影した。

3.2 システム概要

本システムは、被験者のキックフォーム動画および理想フォーム動画を入力とし、

MediaPipe Pose によって骨格情報を抽出する。その後、各関節の座標データを時系列として取得し、理想フォームと被験者フォームの比較評価を行う構成になっている。

3.3 プログラムの内部

システムは main.py をエントリーポイントとし、姿勢推定、動作比較、評価、可視化の各機能をモジュール化して実装した。MediapipeProcessor は動画から関節座標を抽出し、Comparator は単純フレーム対応付けおよび Dynamic Time Warping (DTW) による時系列アライメントを行う。Evaluator は関節誤差の算出と統計処理を担当し、Visualizer は比較結果を動画として可視化する。

4. 実験

4.1 実験設定

実験では、理想フォームとしてプロサッカー選手のペナルティーキック動画[6]を使用し、被験者を四方から撮影した動画を入力データとした。比較手法として、単純フレーム対応付けと DTW を用いた 2 種類の手法を実装し、それぞれについて評価を行った。

4.2 実験結果

各実験における平均誤差および診断結果を表 1 および表 2 に示す。

表 1. 単純フレーム対応付けによる結果

×0.5	Average Error	Feedback	×0.25	Average Error	Feedback
front	0.3063	Needs improvement	front	0.2884	Fair
back	0.1732	Fair	back	0.2073	Fair
left	0.2935	Fair	left	0.2185	Fair
right	0.1876	Fair	right	0.2360	Fair

表 2. DTW による結果

×0.5	Average Error	Feedback	×0.25	Average Error	Feedback
front	0.3072	Need improvement	front	0.2946	Fair
back	0.1744	Fair	back	0.1981	Fair
left	0.286	Fair	left	0.2548	Fair
right	0.1895	Fair	right	0.1519	Fair

また、比較動画の一例を図 2 に示す。



図 2. 比較動画のスクリーンショット

4.3 考察

実験結果より、システムはエラーなく動作し、骨格描画および比較評価が可能であることを確認した。一方で、被験者の関節座標位置が理想フォームと近い場合、フォームの良否に関わらず誤差が小さく算出される傾向が見られた。この結果は、姿勢推定精度および評価指標の設計に改善の余地があることを示唆している。

5. 結論

本研究では、MediaPipe を用いたサッカーのキックフォームの比較評価および指導支援システムを試作した。単一カメラ映像から骨格情報を取得し、DTW を用いた時系列比較を導入することで、低コストかつ簡便な動作解析手法を実現した。今後は、関節角度や祖王泰一を考慮した特徴量の導入、姿勢推定精度の向上、ユーザインターフェイス

の改善を行い、より実用的な指導支援システムへの発展を目指す。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたり、坂本真人教授には丁寧かつ的確なご指導をいただき、心より感謝申し上げます。また、実験にご協力いただいた坂本研究室の皆さまにも深く感謝いたします。そして的確なアドバイスをいただいた友人たちや関わってくださったすべての人に、この場を借りて深い感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Sungjin Hong, Yejin Kim, Dynamic Pose Estimation Using Multiple RGB-D Cameras, Sensors, 3865, MDPI, 2018.
- [2] Christian Zimmermann, Tim Welschelhold, Christian Dornhege, Wolfram Burgard, and Thomas Brox, 3D Human Pose Estimation in RGBD Images for Robotic Task Learning, arXiv, Cornell University, 2018.
- [3] Google, Mediapipe solutions guide — google ai edge - gemini api[Online]. <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide?hl=ja>
- [4] 公益財団法人日本スポーツ協会, 指導者育成委員会, 学校運動部活動指導者の実態に関する調査, 令和3年7月[Online].
- [5] 公益財団法人日本サッカー協会, 競技規則日本語訳, Laws of the Game 25/26[Online]. <https://www.jfa.jp/documents/pdf/socce>

[r/lawsofthegame_202526.pdf](https://www.youtube.com/watch?v=SI7uHitFec)

[6] プロの練習を見る, スペイン代表 PK 練習 2021.3 Spain: Penalty Kick Practice[Online].

<https://youtu.be/6eh4SA2IVUA?si=ygoXLySI7uHitFec>

修士論文題目一覧

- 篠原 千尋 A. 環境応用化学分野 天然深共晶溶媒に対する難水溶性薬物の溶解性の比較検討
- 長友 鳳潤 A. 環境応用化学分野 ジ-(2-エチルヘキシル)リン酸による金属抽出挙動に対する希釈溶媒の影響
- 長谷川 雄大 A. 環境応用化学分野 塩酸系での Au(III) 抽出に適した新規アルコール類の開発
- 横田 裕樹 A. 環境応用化学分野 高い Au(III) 抽出能力と低い水溶解度を兼ね備えた抽出溶媒の機械学習探索
- 荒木 愛斗 A. 環境応用化学分野 シュードモナス属細菌の α -トルイル酸分解系遺伝子群の機能解析
- 荒木 美穂 A. 環境応用化学分野 グアニジル化キトサンライブラリの構築
- 井上 舞香 A. 環境応用化学分野 ゲルマニウム-N-混乱ポルフィリン錯体を増感剤とする光電子移動反応系の構築
- 上田 大翔 A. 環境応用化学分野 シクロデキストリン包接挙動の分子論的研究
- 大木 場 慧 A. 環境応用化学分野 イオン液体中におけるセルロース結晶繊維の溶解度指標
- 大西 鈴音 A. 環境応用化学分野 生物発光共鳴エネルギー移動を利用した赤色生物発光の高効率化
- 小野田 一成 A. 環境応用化学分野 ソフトマテリアルにおける分子力場パラメータの開発指針
- 上土井 晴輝 A. 環境応用化学分野 多孔質マイクロカプセルへの酵素内包とシリカ被膜による漏出抑制の効果と活性評価
- 木村 悠希 A. 環境応用化学分野 TOPO を基体とした深共晶溶媒の創出と In^{3+} および Li^{+} の高選択的抽出分離
- 島 廻 光希 A. 環境応用化学分野 軸配位子にモルホリノ基を有するリンポルフィリン光増感剤のリソソーム集積性に対するリンカー効果
- 新地 友美 A. 環境応用化学分野 低エネルギー光励起によるスズ-N-混乱ポルフィリン錯体を増感剤とする一重項酸素生成反応
- 杉田 優奈 A. 環境応用化学分野 リンポルフィリン錯体の水素化によるクロリン類の形成過程とその光機能性評価
- 須磨 美月 A. 環境応用化学分野 フェルギノールからアビエタン型 o-キノン類・カテコール類およびその類縁体への変換
- 土井 悠理乃 A. 環境応用化学分野 非晶性糖集合体を保護剤に用いたグルコースオキシダーゼ内包シリカナノカプセルの調製および活性評価
- 中島 弘貴 A. 環境応用化学分野 アセチル化度を制御したキトサン誘導体の溶解性
- 中田 三智 A. 環境応用化学分野 ルミノール反応を利用した水溶性有機色素によるウシヘモグロビンの光損傷過程の解析
- 永山 欧佑 A. 環境応用化学分野 タンニン酸分子包摂多孔性マイクロカプセルの調製に向けた基礎的研究
- 西川 亮也 A. 環境応用化学分野 フィタン酸およびプリスタン酸の両ジアステレオマーの合成
- 長谷部 智大 A. 環境応用化学分野 未利用資源「鶏冠」を用いたゲル材料の創製
- 濱上 真成 A. 環境応用化学分野 キトサンを骨格としたクライオゲルへのトリプシン固定化および特性評価
- 林田 和也 A. 環境応用化学分野 耐火用ケイ酸系塗布剤への水酸化アルミニウムの添加効果
- 林田 真希 A. 環境応用化学分野 軸配位子に環状アミノ基を有するリンポルフィリン錯体の酵母菌に対する光殺菌活性評価
- 日高 祐誠 A. 環境応用化学分野 ビフェニル分解性細菌の重複した芳香族化合物分解経路の機能解析
- 福元 健太 A. 環境応用化学分野 疎水性テトラペプチドを用いた超分子メタロゲルの開発
- 藤川 大雅 A. 環境応用化学分野 ポリ乳酸の加水分解酵素に対するドッキング解析
- 矢野 海竜 A. 環境応用化学分野 新規キラルアゾベンゼンを用いた層状複合体の作製と光応答挙動
- 小野 隼輔 B. 社会環境システム工学分野 数理モデルを用いた宮崎県を対象とする消毒ポイント設置を考慮した口蹄疫防疫計画評価
- 宮崎 颯也 B. 社会環境システム工学分野 実ネットワーク適用に向けた大規模噴火災害に対する事前避難計画モデルの計算効率化
- 池内 亮磨 B. 社会環境システム工学分野 3次元データによる橋梁の点検手法に関する研究
- 井上 敦司 B. 社会環境システム工学分野 膨張コンクリートの仕事量評価システムの再構築
- 大平 悠貴 B. 社会環境システム工学分野 廃ガラスの化学反応 / 体積変化を活用したプレキャストコンクリート製品の開発
- 勝木 熙 B. 社会環境システム工学分野 方財・長浜海岸を対象とした三次元数値モデルによる土砂輸送の特性評価
- 近藤 廉 B. 社会環境システム工学分野 粉末活性炭吸着・凝集泡沫濃縮法による河川水中のカビ臭原因物質の高感度定量法の開発
- 中野 夏生 B. 社会環境システム工学分野 マグネシウム水溶液を用いたセメント混合処理土の劣化予測に関する研究
- 野崎 康平 B. 社会環境システム工学分野 環境 DNA の移流と放出を考慮した河川における魚類生物量推定手法の開発
- 野田 勘司 B. 社会環境システム工学分野 侵食防止を目的とした森林作業道マルチング材に関する実験的検討
- 船隈 亮太 B. 社会環境システム工学分野 海水飛沫から検出される病原細菌の菌種と界面化学特性
- 三上 優貴 B. 社会環境システム工学分野 濁水における環境 DNA の挙動と PCR 阻害低減手法の評価
- 水口 嶺 B. 社会環境システム工学分野 種の存在量を用いた底生動物分布モデルの転用精度向上に向けた検討
- 光成 耕大 B. 社会環境システム工学分野 簡易治山工による浸透能向上効果とそのメカニズムの検討
- 森 勇輔 B. 社会環境システム工学分野 各種廃棄物由来材料の大腸菌抑制効果の評価と機構解明
- 森 本 菖 B. 社会環境システム工学分野 A1 系溶射皮膜の高腐食環境下における大気腐食挙動
- 山田 慶裕 B. 社会環境システム工学分野 木材の吸水特性を考慮した木材補強粘土の圧密挙動に関する研究

- RIZKY ALMARENDRA B. 社会環境システム工学分野 Seasonal Variations and Land Use Influence on Macroplastic Pollution in the Metro River, Indonesia
- WIRAWAN PUTRA
- 大久保 敦広 C. 電子物理工学分野 蛍光スペクトル解析によるマンゴー軸腐病早期検出技術の開発
- 大下 隆也 C. 電子物理工学分野 レーザ受光用 InGaAsP 光電変換素子の高電圧化・高効率化
- 國武 幸一郎 C. 電子物理工学分野 InGaAs/GaAsSb スーパールミネッセントダイオードの作製と光干渉断層撮影への適用検討
- 高島 陸人 C. 電子物理工学分野 InGaAs/GaAsSb Type-II 量子井戸への InGaAs 緩和層導入による発光強度向上
- 樋口 蓮 C. 電子物理工学分野 固体高分子形水電解に金属イオン種が及ぼす影響の探索
- 福岡 顕太郎 C. 電子物理工学分野 垂直に設置した営農型太陽光発電の稲作への応用検討
- 牧ノ瀬 開人 C. 電子物理工学分野 反射スペクトルの機械学習によるマンゴー軸腐病の早期検出
- 松林 海紀 C. 電子物理工学分野 X線 CT 画像を用いた曲面太陽電池の非破壊検査技術の検討
- 三浦 昌真 C. 電子物理工学分野 カルコバイライト化合物 ZnSnAs_2 における熱電特性のデータ駆動型最適化
- 宇都 大樹 C. 電子物理工学分野 MAO を用いたリチウムイオン電池用セパレータの性能向上
- 浦野 翔大 C. 電子物理工学分野 光ヘテロダイン光熱変位信号の時間変化解析に基づく教師あり機械学習による Si の熱拡散率およびキャリア寿命の推定
- 榎田 海渡 C. 電子物理工学分野 ファブリペロー干渉計 (FPI) を用いた屈折率測定用ファイバーセンサーの開発
- 遠藤 聡馬 C. 電子物理工学分野 SnS への BaSnS 混晶化技術に関する研究
- 大崎 進太郎 C. 電子物理工学分野 孔の深さ及び気孔率を同時制御した Porous Si (001) 基板が GaAs 薄膜成長に与える影響
- 奥田 大晴 C. 電子物理工学分野 格子整合系 InAs/GaAsSb 超格子の温度依存 PL スペクトルを用いた発光メカニズム解析
- 角谷 昂亮 C. 電子物理工学分野 TlBr 検出器における軟 X 線の応答評価
- 鎌田 信壱 C. 電子物理工学分野 半導体中性子検出器における B-10 成膜法の研究
- 黒木 瑛介 C. 電子物理工学分野 超高層大気を観測する ISS 曝露部搭載 X 線カメラの開発と評価
- 古藤 隼人 C. 電子物理工学分野 ALE 法で作製した GaAsN/GaAs 超構造における N 分布の面内不均一性評価
- 齊藤 悠人 C. 電子物理工学分野 SOI-CMOS 検出器によるミュオン特性 X 線を用いた元素分布可視化手法の研究
- 佐久間 桃子 C. 電子物理工学分野 Porous Si 基板における気孔率および孔の深さが GaAs 薄膜成長の表面に与える影響
- 佐々木 悠任 C. 電子物理工学分野 Zynq MPSoC を用いた機械学習モデルによる粒子識別処理の開発と評価
- 岳本 廉央 C. 電子物理工学分野 X線分光撮像衛星 XRISM に搭載した軟 X 線撮像検出器 SXI の軌道上エネルギー較正手法の改善と分光性能評価
- 中島 魁耶 C. 電子物理工学分野 PL 測定による InGaAs/GaAs/GaAsP 圧縮歪超格子太陽電池のキャリア輸送解析
- 淵田 悠太 C. 電子物理工学分野 大面積 X 線 SOI-CMOS 検出器 XRPIX11 の分光性能評価と分光性能の向上に向けた研究
- 松島 司 C. 電子物理工学分野 X線分光撮像衛星 XRISM を用いた超新星残骸 SN1987A の X 線スペクトルにおける爆発噴出物寄与の評価
- 山元 康平 C. 電子物理工学分野 MOVPE 法で作製した InAs/GaAsSb 超格子の光学的特性に対する量子井戸層数と As 組成の影響
- 吉田 大雅 C. 電子物理工学分野 SPP 構造を有する X 線 SOI-CMOS 検出器 XRPIX8b の開発
- 吉山 巧一 C. 電子物理工学分野 金属複合酸化物をベースにした半透明な水分解用電極触媒の開発
- 石川 太一 D. 電気システム工学分野 牛の摂食検知と摂食時間管理に関する研究
- 椎原 陽 D. 電気システム工学分野 歩行中の乳牛に対する上方視点 3D カメラを用いた個体識別に関する研究
- 清水 祐一朗 D. 電気システム工学分野 顔特徴と耳標番号の相互補完による牛の自動個体識別に関する研究
- 早津 匡裕 D. 電気システム工学分野 実計測された日影パターンを用いた車載用太陽電池ストリング構成最適化
- 福家 翼 D. 電気システム工学分野 プラズモニク導波路光分波器の特性解析
- 向井 直希 D. 電気システム工学分野 移動体用太陽電池における高性能発電量予測モデルの構築
- 山口 寛人 D. 電気システム工学分野 非線形光学材料を用いたスロット導波路全光スイッチに関する研究
- 井上 拓也 D. 電気システム工学分野 高 PSRR のためのビルトインレギュレータアーキテクチャを用いたアナログ集積回路の提案
- 梶 鼓実 D. 電気システム工学分野 高分子材料の複合界面における放電現象の観測及び解析
- 梶谷 伶 D. 電気システム工学分野 埋設物探査技術の研究
- 木村 謙介 D. 電気システム工学分野 深紫外 LED 光を用いた PI 基板の表面改質
- 谷口 将太 D. 電気システム工学分野 同期型コンパレータを用いた時間領域増幅器の設計に関する研究
- 堂込 卓良 D. 電気システム工学分野 高周波電磁界問題に見られる反復法の悪収束性に対する数理的解明
- 中元 大翔 D. 電気システム工学分野 深紫外光を照射した PET 基板表面の親水化とそれに関わる化学反応過程

- 肥田 木 拓 D. 電気システム工学分野 深紫外光照射による LTCC 表面の親水化
- 松本 佑 哉 D. 電気システム工学分野 油入変圧器におけるレヤショート現象の特性
- 溝口 幸 輝 D. 電気システム工学分野 MOS キャパシタを用いた 2 入力 FG-MOSFET における線形化手法及び初期電荷除去法の提案
- 山田 大 雅 D. 電気システム工学分野 並列高周波電磁界解析の収束性改善に向けた検討
- 松本 航 太朗 E. 環境ロボティクス分野 非負値行列因子分解のための勾配に基づく乗法更新則
- 飯山 貴 冬 E. 環境ロボティクス分野 高濃度 Sc を添加した BaTiO_3 および BaSnO_3 を電解質としたアノード支持型燃料電池の開発
- 井上 大 一 E. 環境ロボティクス分野 スペクトログラム特徴量を用いた多ラベル分類モデルによるリズムゲーム譜面生成
- 井村 成 吾 E. 環境ロボティクス分野 杭施工におけるリアルタイム施工性判断の検討
- 浦川 大 和 E. 環境ロボティクス分野 VR 環境における姿勢推定とモーション分類による国際会話支援
- 大窪 諒 平 E. 環境ロボティクス分野 カメラによる保育器内新生児の身体計測
- 川上 廉 太 E. 環境ロボティクス分野 機械学習による多元素置換セラミックスのプロトン伝導率予測と精度の検証
- 古賀 亮 多 E. 環境ロボティクス分野 カメラによる豚の体重推定のための自動背骨検出
- 須本 雄 太 E. 環境ロボティクス分野 SPT 地盤情報と施工ログを活用した機械学習による杭施工時間の予測
- 高崎 慶 十 E. 環境ロボティクス分野 Ni-Cu をアノードとしたプロトン伝導性セラミック燃料電池の開発
- 田村 周 E. 環境ロボティクス分野 カメラによる豚の体重測定のための姿勢判別
- 西川 輝 E. 環境ロボティクス分野 カメラによる豚のソーティングシステムに関する研究—投影面積による体重推定精度の比較—
- 東 瑛 介 E. 環境ロボティクス分野 ニューラルネットワークを用いた動画のブラー除去
- 堀田 英 臣 E. 環境ロボティクス分野 公共データを用いた地盤情報予測手法の構築 —機械学習とガウス過程の地域特性に応じた適用—
- 村上 裕 太 E. 環境ロボティクス分野 カメラを用いた非接触配管計測
- 盛満 優 雅 E. 環境ロボティクス分野 $\text{BaZr}_{0.3}\text{Yb}_x\text{Sc}_{0.2-x}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$ ($x=0.0, 0.1, 0.2$) をカソードにしたプロトン伝導性セラミック燃料電池の電極反応機構の解明
- 五十嵐 廉 E. 環境ロボティクス分野 高濃度 Cu 置換水酸化ニッケルの溶媒熱処理による α 型および β 型の結晶成長と無置換水酸化ニッケルの水熱処理による新規層状構造の創出
- 永樂 恵 裕 E. 環境ロボティクス分野 $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ 高結晶微粒子分散系 (ゾル) の合成方法の確立と燃料電池用電極触媒担体への応用
- 黒木 雅 人 E. 環境ロボティクス分野 湿式合成した高結晶性四酸化三マンガンへの銀触媒担持と塩基性条件下での電気化学特性
- 恒成 尚 俊 E. 環境ロボティクス分野 β 型構造を保持・安定化する Ti 置換水酸化ニッケルの開発と二次電池正極特性
- 桑原 海 杜 E. 環境ロボティクス分野 コイル間距離の変動による電力低下を抑制するワイヤレス給電補償回路の提案
- 茂谷 健 汰 E. 環境ロボティクス分野 送電側計測による無線電力伝送の電力推定と電力制御
- 矢羽田 桂 都 E. 環境ロボティクス分野 無線電力伝送範囲を拡大するための軸ずれを利用したコイルの形状と配置
- 和田 智 哉 E. 環境ロボティクス分野 障害物があるときの無線電力伝送における電気回路モデルの構築
- 川津 駿 斗 E. 環境ロボティクス分野 多様な管内環境に適応可能な尺取虫型移動機構及び打音検査ユニットの開発
- 竹下 千 喜 E. 環境ロボティクス分野 エビを模倣した遊泳モデル及び水中ロボット用メカニズムの創出と実装
- 山川 健 伸 E. 環境ロボティクス分野 インフラ構造物における勾配変化法および減衰曲線法を用いた欠陥方向推定手法
- 山根 晟 之 E. 環境ロボティクス分野 AI 技術を用いた多変量生体情報による母豚の生理状態予測モデルの構築
- 渡辺 拓 哉 E. 環境ロボティクス分野 葉面の画像セグメンテーションとネットワーク構築による葉フェノタイピング手法
- 掛井 春 輝 F. 機械設計システム工学分野 往復摩擦試験による半月板インプラントの摺動特性評価
- 園田 高 大 F. 機械設計システム工学分野 ミニブタによる半月板インプラントの埋植試験に関する研究
- 原 田 楓 F. 機械設計システム工学分野 膝関節の有限要素モデルによる半月板インプラントの圧力分散効果の解析
- 石作 颯 太 F. 機械設計システム工学分野 波形状光ファイバを利用した伸長・屈曲計測のための小型・柔軟なセンサの開発
- 岩本 侑 真 F. 機械設計システム工学分野 非加圧固定串刺し法を用いた高質な串食材制作法に関する研究
- 内田 優 大 F. 機械設計システム工学分野 炭素鋼 S45C における縦弾性係数と応力ひずみ予測の均一性評価
- 内山 怜 和 F. 機械設計システム工学分野 改良された二段菱形機構ハーベスターの設計最適化および力増幅率, 耐久性, 発電性能評価
- 大橋 遼 太郎 F. 機械設計システム工学分野 地面効果下における翼型下面形状が空力特性に及ぼす影響に関する研究
- 折本 壮 麻 F. 機械設計システム工学分野 高密度ポリエチレン / マイクロカプセル化パラフィン複合材料の作製と熱的および引張特性評価
- 甲斐 拓 海 F. 機械設計システム工学分野 音響校正器ピストンホンに生じるノイズ発生原因の解明とその対策
- 甲斐 渉 F. 機械設計システム工学分野 弾性体内蔵ギヤクラックの推進性能評価ならびに性能向上に向けた解析的検討
- 数森 皓 太 F. 機械設計システム工学分野 Ni-W 電着工具の製作に関する研究—2 層めっき時におけるめっき膜状態の検証—

- 加瀬 雄 翔 F. 機械設計システム工学分野 ドライ環境下での PEEK-PTFE 軸受の熱変形と疲労摩耗に対する冷却の影響
- 上 門 海 F. 機械設計システム工学分野 指の屈伸抵抗測定に関する研究
- 神 谷 彪 F. 機械設計システム工学分野 ポンプ配管系固体伝搬音を抑制するためのフレキシブル継手の最適設置法に関する研究
- 神 原 龍 樹 F. 機械設計システム工学分野 円形断面の柔軟タイミングベルトを用いた 2 軸差動関節の開発
- 栗 田 博 F. 機械設計システム工学分野 長期短期記憶ネットワークを用いたマンゴーの収穫量予測 —データ解析と性能評価—
- 高 橋 輝 至 F. 機械設計システム工学分野 足形状が変形する受動歩行ロボットのための溝カム機構を用いた足変形機構の開発
- 竹 山 航 平 F. 機械設計システム工学分野 Ni-W 電鍍工具の開発に関する研究—電鍍膜状態の検証—
- 塚 本 創 斗 F. 機械設計システム工学分野 小野式回転曲げ疲労試験機の設計製作と試験片の設計製作に関する研究
- 中 原 蒼 惟 F. 機械設計システム工学分野 炭素鋼の曲げ疲労と引張疲労強度の同等性の検証
- 廣 瀬 晃 太 F. 機械設計システム工学分野 円柱周り流れの計測融合シミュレーションにおけるフィードバック点配置及び物理量が再構築精度に与える影響に関する研究
- 福 島 夢 未 F. 機械設計システム工学分野 3D プリント製作部品の曲げ疲労強度評価に関する研究
- 藤 田 航 奨 F. 機械設計システム工学分野 形状復元性のための弾性材料を充填した小型折り紙ロボットの開発
- 布 藤 拓 海 F. 機械設計システム工学分野 4D Flow MRI 用解析ソフトウェアが大動脈に対する計測融合シミュレーションに与える影響に関する研究
- 矢ヶ崎 龍 平 F. 機械設計システム工学分野 乾燥水中サイクル環境下での PEEK ラジアル軸受のなじみプロセスの一考察 (回転速度 600rpm と 1200rpm の場合)
- 山 川 里 玖 F. 機械設計システム工学分野 移動層を利用した太陽熱による水素製造に関する研究
- 山崎 晃 士 朗 F. 機械設計システム工学分野 4D Flow MRI データを用いた物理法則に基づく機械学習による血流場再構成手法の開発
- 山下 健 士 朗 F. 機械設計システム工学分野 摩擦振動を抑制するためのディスクグライнда用防振ハンドルの開発
- RADITYA HELMI F. 機械設計システム工学分野 APPLICATION OF THERMAL ENERGY STORAGE INTO FOOD DRYING TECHNOLOGY
- FAKHRUDDIN
- 天 木 大 介 G. 情報システム工学分野 Emotion-Anchored Contrastive Learning を用いた日本語テキストからの感情抽出
- 有 留 直 希 G. 情報システム工学分野 Web ページのレイアウト不具合の発見時間削減を目的とした視覚的回帰テストツール MIXVRT の開発
- 石 丸 巧 巳 G. 情報システム工学分野 MR 3D ペインティングで創造体験へのアクセス拡大
- 岡 村 篤 G. 情報システム工学分野 ペルセウス座銀河団の観測データを用いた XRISM 衛星搭載 Xtend の較正
- 小 椋 駿 嵩 G. 情報システム工学分野 XRISM 衛星で観測したケンタウルス座銀河団の鉄輝線の解析
- 押 川 優 G. 情報システム工学分野 EMG を用いた筋負荷可視化とゲージ表示によるゲーミフィケーション要素を組み合わせたスクワットトレーニング手法の提案
- 川 越 彪 雅 G. 情報システム工学分野 自然言語処理モデルを用いたマルウェアログの画像化によるマルウェア分類の研究
- 木 村 優 哉 G. 情報システム工学分野 電子フォーム作成を目的とした記入欄自動検出およびラベル割付ツール FLAT の開発
- 木村 怜 生 菜 G. 情報システム工学分野 深層学習モデルを用いた椎茸の自動品質検査手法の提案と評価
- 斉 藤 功 樹 G. 情報システム工学分野 線幅が広がった鉄 K 輝線の構造解析
- 椎 木 皓 太 郎 G. 情報システム工学分野 動的 Token 選択と可変層 Vision-Transformer を用いた Vision Language Model の提案と評価
- 戸 高 快 彦 G. 情報システム工学分野 深層学習モデルによる医用画像の分類および異常検知の構築と検討
- 西 秀 峻 G. 情報システム工学分野 位置情報タグとドローンを活用した阿蘇放牧牛の位置追跡手法に関する研究
- 根 木 原 滉 G. 情報システム工学分野 テストカバレッジの向上を目的とした Java 自動テストツール JARTGPT の拡張
- 穂 満 晃 大 G. 情報システム工学分野 軽量接触信頼度フィルタを用いた Speculative CCD のゴースト衝突削減手法の提案と評価
- 森 茂 蒼 士 G. 情報システム工学分野 耳標と牛顔画像の併用による牛個体識別
- 山 下 徳 貴 G. 情報システム工学分野 単一誘導心電図の Recurrence Plot 画像を用いた異常分類モデルの構築
- 山 根 秀 太 G. 情報システム工学分野 対話型 AI における Differentiable Neural Computers を用いた根拠文検索器の精度向上
- 和 田 晃 典 G. 情報システム工学分野 短期記憶を支える速い結合をもつ神経回路の数理モデル
- AUNG SI THU MOE 国 際 プ ロ グ ラ ム RGB-Thermal AI: Next-Generation System for Calf Identification and Health Monitoring
- PYAE PHYO KYAW 国 際 プ ロ グ ラ ム Dairy Cow Identification and BCS Estimation Based on 3D Point Cloud Using RGB-D Camera
- SU YI MON 国 際 プ ロ グ ラ ム Energy Yield Analysis of Vehicle-Integrated Photovoltaics in Asia

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
	井	澤	浩	則
	森	田	千	尋
	浅	見	明	太
	平	田	拓	也
	大	西		修
	山	森	一	人
	大	榮		薫
	真	木	大	介

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.55

(宮崎大学工学部紀要 第55号)

令和8年9月29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) 2871

