

近畿建設協会研究助成  
発表論文集



一般社団法人

近畿建設協会

# 論 文 集

## 目 次

1. 碍子を含んだ軽量コンクリート充填ステンレス鋼管の曲げせん断特性  
神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 教授 上中 宏二郎 . . . 1
2. 公共財の心理的所有権形成が共創的関与に与える影響  
舞鶴工業高等専門学校 社会基盤メンテナンス教育センター  
特命准教授 嶋田 知子 . . . 9
3. 道路空間の再編と利活用による市街地像の実現手法に関する研究  
大阪公立大学大学院 工学研究科 教授 嘉名 光市 . . . 17
4. 下水汚泥焼却灰からの新規リン回収システムの開発  
福井工業大学 工学部建築土木工学科 教授 高島 正信 . . . 25
5. アーク放電の誘発を利用した設置型自動草刈装置の開発  
近畿大学 農学部農業生産科学科 教授 松田 克礼 . . . 33
6. 3Dデータを用いた水災害時の垂直・水平避難行動モデルのシミュレーションと  
一時避難場所の創出に関する研究  
大阪公立大学工業高等専門学校 総合工学システム学科 講師 白柳 博章 . . . 39
7. 車載型電磁波レーダによる道路橋 RC 床版内部の劣化損傷識別に関する判定手法の構築  
神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 教授 伊原 茂 . . . 47
8. 深層学習による山岳トンネル切羽面の岩盤評価および支保設計に関する研究  
関西大学 環境都市工学部 特命教授 楠見 晴重 . . . 55

※所属等は 2024 年 5 月時点のもので、助成選定時とは異なる場合がございます。



## 碓子を含んだ軽量コンクリート充填ステンレス鋼管の曲げせん断特性

神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 教授 ○上中宏二郎

神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 教授 水越 睦視

近畿大学理工学部 社会環境工学科 教授 東山 浩士

### 1. はじめに

軽量骨材コンクリート<sup>1)</sup>は従来のコンクリート(NC)と比較して 20%程度軽量化が可能である。また、粗骨材のみに軽量骨材を用いたものを軽量コンクリート 1 種(LC1)、細骨材、粗骨材両者に軽量骨材を用いたものを軽量コンクリート 2 種(LC2)としている。しかしながら、LCを用いたはりのせん断強度は NC よりも低下することが言われており、せん断耐力は NC の 70%程度としている<sup>2)</sup>。さらに、LC を鋼管に充填した軽量コンクリート充填鋼管(L-CFT)部材は、従来のコンクリート充填鋼管部材(N-CFT)部材<sup>3)</sup>よりも軽量化が可能となるとともに、LC のせん断補強が可能であると考えられる。

つぎに、ステンレス鋼<sup>4)</sup>は錆びない鋼材であり建設材料にステンレス鋼を用いれば維持管理の低減が期待できる。またステンレス鋼は炭素鋼と同じあるいはそれ以上の降伏強度を有するとともに、破断までのひずみが大きいことが特徴である。

ところで、CFT 部材の大きな特徴は、鋼管内部のコンクリートが拘束効果により三軸応力状態となるため優れた耐震性能を有することが知られている。さらなる耐震性能の向上のためには、軽量化をする方が望ましいが、文献 3)では、充填コンクリートとして軽量コンクリートを用いることは適用範囲外とされている。

このような背景のもと、著者らは L-CFT 部材の曲げ特性に関する実験的検討を行い、曲げ強度算定方法について提案している<sup>5)</sup>。また、LC の細骨材をすべて使用済み碓子(Ceramic Waste, CW)に置き換えた LC(CWLC)を鋼管に充填したものについても実験的な検討を行っており、碓子が曲げ特性に与える影響は見られなかったことを報告している。ここで、CW とは電力会社から廃棄されるセラミック製の絶縁体のことであり、年間約 1 万トンが廃棄されているものである。なお、普通鋼管よりも破断までのひずみが大きいステンレス鋼管にコンクリートを充填したコンクリート充填ステンレス鋼管(CFSST)部材も優れた耐震性能を有すると期待できる<sup>6)</sup>。

本研究では、優れた変形性能を有する CFT に軽量化、ならびに防食の特徴を加えた軽量 2 種コンク

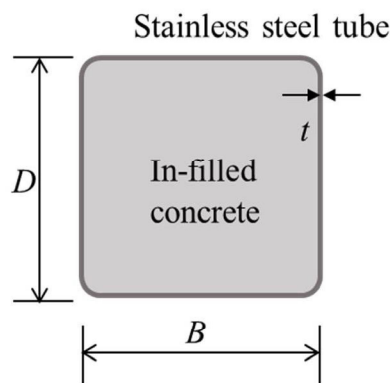


図-1 L-CFSST 部材の断面

表-1 供試体一覧

No.	Tag.	Stainless steel tube				Concrete			
		Width	Thick.	$B/t$	Shear span ratio	$f_y$	$f_u$	$f_c'$	$E_c$
		$B$ (mm)	$t$ (mm)			(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )
1	LC-2	125	3.0	41.7	2	259	630	33.9	16.4
2	LC-4				4				
3	CWLC-2				2			36.6	21.7
4	CWLC-4				4				

表-2 コンクリート配合表

(a)LC

Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				
$W/C(\%)$	$W$	$C$	$S$	$G$
55	175	318	621	564

(b)CWLC

Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					
$W/C(\%)$	$W$	$C$	$FA$	$S$	$G$
55	165	300	20	852	564

リート充填ステンレス鋼管(L-CFSST)部材(図-1 参照)の曲げせん断特性の把握を目的とした実験的検討を行った。実験変数は、せん断スパン比、ならびに碇子の有無である。得られた破壊形式、最大荷重の結果より、LC2 を充填したステンレス鋼管の曲げせん断強度算定方法を提案することを目的とする。

2. 実験方法

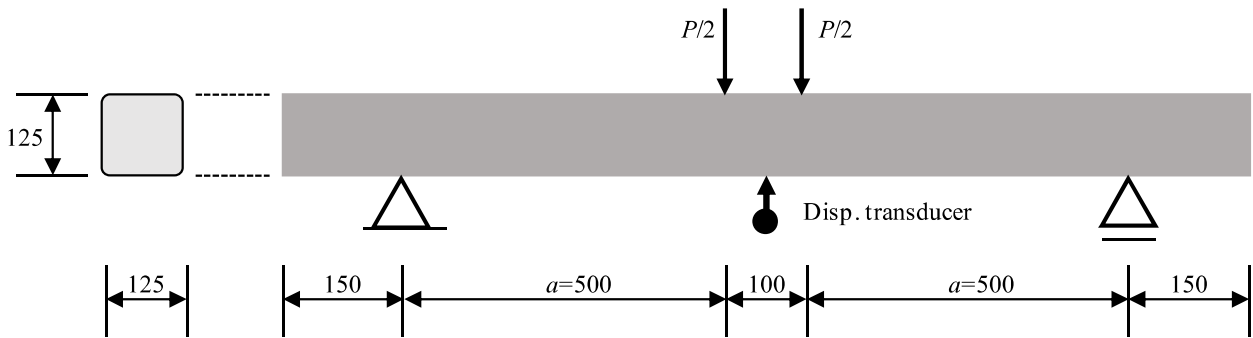
2.1 供試体の概要

表-1 に供試体一覧を示す。供試体名は 2 種類の充填材料(LC2, CWLC)ならびにせん断スパン比(2,4)の合計 4 体である。ステンレス鋼はオーステナイト系の SUS304 を用いている。ステンレス鋼管の幅( $B$ )125 mm, 厚さ( $t$ )3mm であり、本研究でのステンレス鋼管の幅厚比( $B/t$ )は 41.7 となる。なお、ステンレス鋼管の 0.2%強度  $f_y$ , 最大強度  $f_u$  はそれぞれ 259, 630N/mm<sup>2</sup> であり、 $f_u$  は  $f_y$  の 2 倍以上の値となっている。

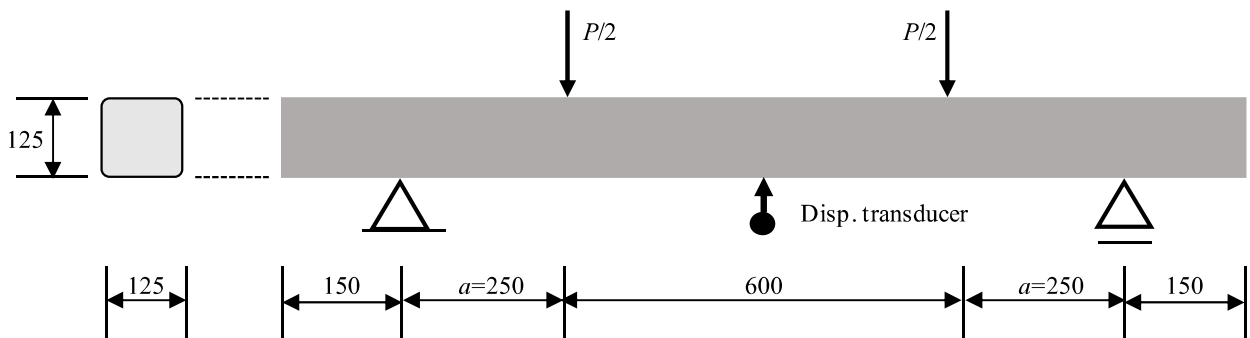
つぎに、充填コンクリートである LC と碇子を混入した CWLC の配合表を表-2 に示す。また、軽量粗骨材、軽量細骨材、および碇子の表乾比重はそれぞれ、1.68, 1.86, および 2.41 であった。なお、CWLC には材料分離を抑制するためフライアッシュ(FA)を用いた。

2.2 載荷方法

図-2 に載荷方法を示す。500kN 載荷試験装置を用いて、載荷はりに集中荷重( $P$ )を与え、対称 4 点曲げ載荷試験方法により供試体に曲げモーメント、ならびにせん断力を作用させた。また、変位計によ



a)せん断スパン比 4



b)せん断スパン比 2

図-2 载荷方法

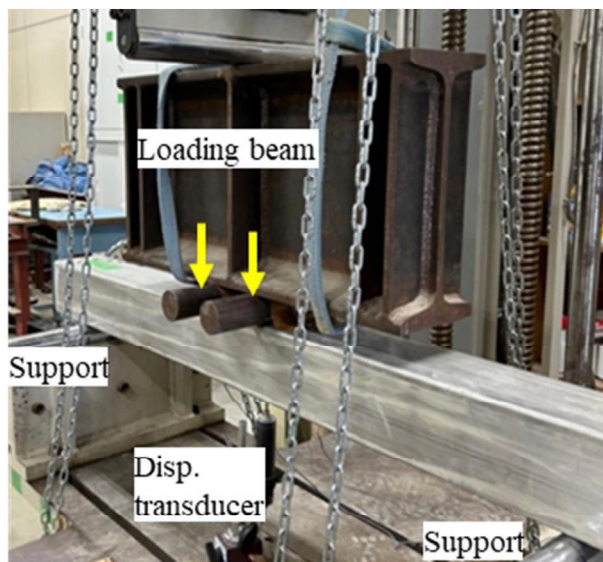
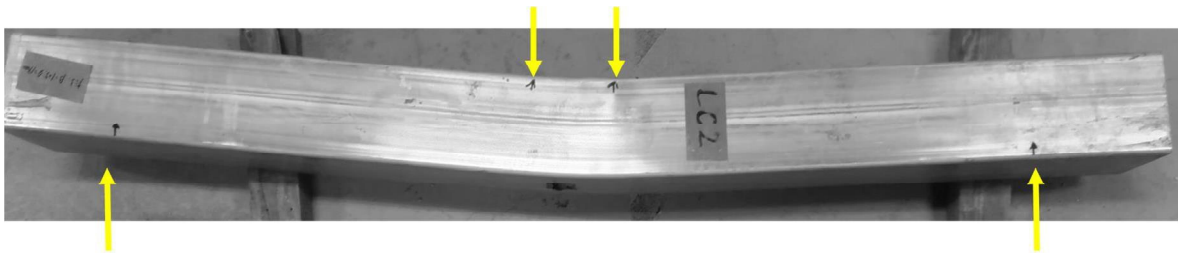


写真-1 载荷風景

りスパン中央のたわみ( $\delta$ )を測定した。さらに、スパン中央の断面上縁，中央，ならびに下縁にそれぞれ 1 枚の一軸ひずみゲージを貼付し，ステンレス鋼管のひずみ状態を測定した。最後に，载荷状態を写真-1 に示す。

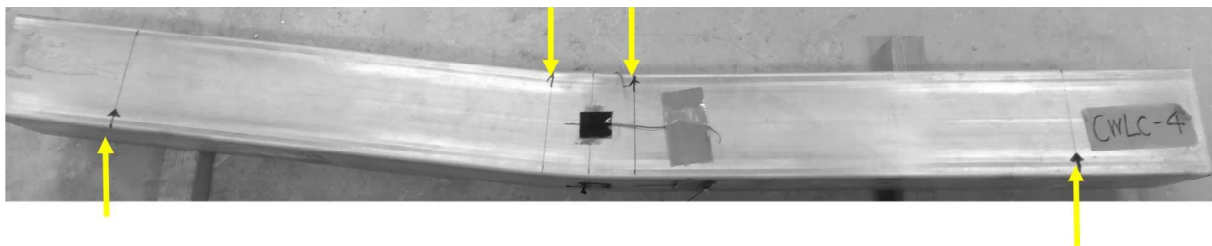


a)LC-4

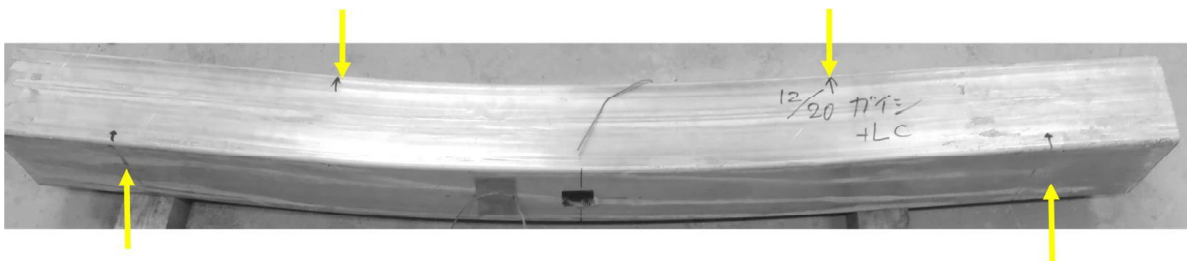


b)LC-2

写真-2 破壊形式 (LC)



a)CWLC-4



b)CWLC-2

写真-3 破壊形式 (CWLC)

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 破壊形式

写真-2, 3 に全供試体の破壊状態を示す。全ての破壊形態は曲げ破壊形式は、ステンレス鋼管が局部座屈を呈して、終局状態に至った。また、引張側では、ステンレス鋼管の降伏が確認されたものの、ステンレス鋼管の破断は見られなかった。さらに、せん断スパン比が2~4の間であれば、せん断スパン比の変化による破壊形式の差異は見られなかった。なお、充填材料が破壊形式に及ぼす影響は見られなかった。

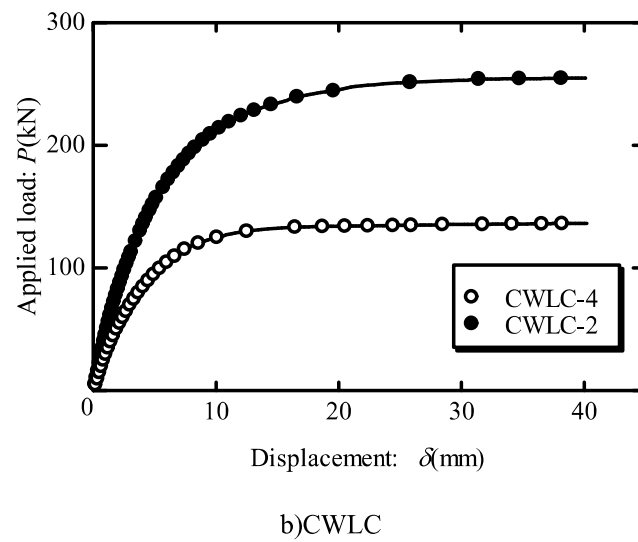
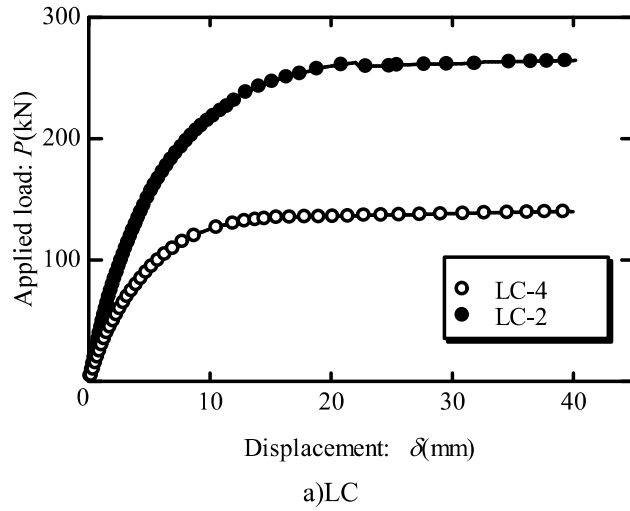


図-3 変形性能

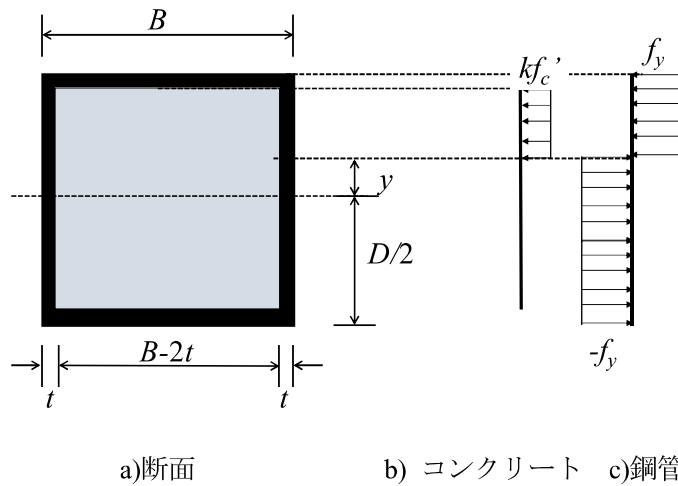


図-4 応力状態

3.2 変形性能

図-3a), b)に載荷荷重( $P$ )とスパン中央の変位( $\delta$ )の関係を示す。全ての供試体において、20mm までの変形までに最大荷重に到達し、その後も断面の高さの 1/3 程度である 40mm 近くにおいても、おお

表-3 実験結果一覧

No.	Tag.	[1]	[2]	[3]	[4]	[1]/[2]	[1]/[3]	[1]/[4]
		$M_{max}$ (kN m)	$M_{est-fy}$ (kN m)	$M_{est-fu}$ (kN m)	$M_{est-fyu}$ (kN m)			
1	LC-2	33.1	20.3	46.4	33.5	1.63	0.71	0.99
2	LC-4	35.3	20.2	46.5	33.5	1.75	0.76	1.05
3	CWLC-2	31.9	20.4	46.6	33.6	1.56	0.68	0.95
4	CWLC-4	34.1	20.4	46.5	33.8	1.68	0.73	1.01

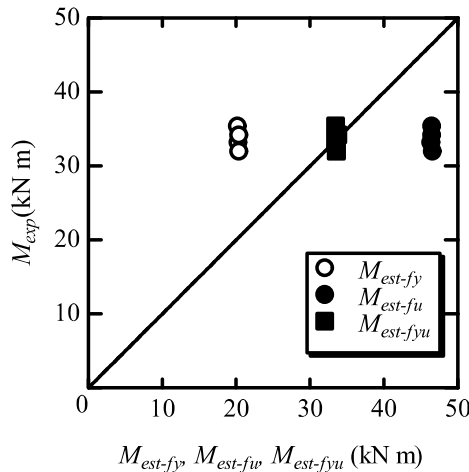


図-5 算定強度と実験強度

むね最大強度を維持しており、変形性能が確認できている。これは、鋼管内のコンクリートが三軸応力状態によるものと考えられ、従来の普通鋼管充填コンクリート部材と同じ挙動であることを示している。さらに、同じせん断スパン比でLC, CWLCを比較しても大きな差異は見られなかった。以上より、LC, および CWLC を充填材に用いたステンレス鋼管部材は十分な変形性能を有していることがわかる。

### 3.3 曲げ強度の算定

著者らが、既報<sup>5)</sup>にて行った炭素鋼管に軽量コンクリートを充填した L-CFT の算定強度を参考に、本実験の L-CFSST の結果との比較を行う。

まず、L-CFSST の終局状態のコンクリートの応力の引張を無視し、ステンレス鋼管が降伏上小田井になっている図-4 のとおりに仮定するとステンレス鋼管、ならびに充填コンクリートの軸力と曲げモーメント( $N_{us}, N_{uc}, M_{uc}, M_{us}$ )は式(1)-(4)のとおりとなる。

$$N_{us} = -4f_y t y \tag{1}$$

$$N_{uc} = k f'_c (B - 2t) \left( \frac{D}{2} - t - y \right) \tag{2}$$

$$M_{us} = f_y t B (D - t) + 2 f_y t \left\{ \left( \frac{D}{2} - t \right)^2 + y^2 \right\} \quad (3)$$

$$M_{uc} = \frac{1}{2} k f'_c (B - 2t) \left( \frac{D}{2} - t - y \right)^2 \quad (4)$$

ここで、ここで、 $B$  : 断面幅,  $D$  : 鋼管の高さ,  $t$  : 鋼管厚,  $k$  : コンクリートの低減係数(=0.85),  $y$  : 断面中央から圧縮領域までの距離をそれぞれ示す。上式より求めた軸力, 曲げモーメントにより, L-CFSST, CWL-CFSST の軸力, および曲げモーメントはそれぞれの和となる。

$$N_{est} = N_{us} + N_{uc} \quad (5)$$

$$M_{est} = M_{us} + M_{uc} \quad (6)$$

軸力の総和を表す式(5)より,  $N_u=0$  となる  $y$  の距離は, 以下の通りとなる。

$$y = \frac{k f'_c (B - 2t) (D - 2t)}{8 t f_y + 2 k f'_c (B - 2t)} \quad (7)$$

式(5)から得られた  $y$  を式(3), (4)に代入し, 純曲げ強度  $M_{est}$  を求めて, 実験曲げ強度( $M_{exp}$ )と比較する。

図-5 に実験曲げ強度と算定曲げ強度の関係を示す。ここで,  $M_{est-f_y}$  は式(6)にステンレス鋼管の 0.2% 強度( $f_y$ )を用いて算定したもの,  $M_{est-f_u}$  は式(6)にステンレス鋼管の最大強度( $f_u$ )を用いて算定したもの,  $M_{est-f_{yu}}$  は式(6)にステンレス鋼管の最大強度と 0.2%強度の平均値を用いたものをそれぞれ示す。なお, これらの値を表-3 にまとめている。

図-5 より, 実験曲げ強度は降伏強度に基づいた  $M_{est-f_y}$  と比較すると安全側になる。これは, 鋼管が降伏点以降も耐力を維持していたことと考えられる。一方, 引張強度に基づいた  $M_{est-f_u}$  と比較すると鋼管は破断に至っていないため危険側の評価となった。このことから, ステンレス鋼材の最大強度と降伏強度の平均の応力( $f_{yu}=(f_y+f_u)/2$ )を用いて計算した  $M_{est-f_{yu}}$  と  $M_{exp}$  を比較したところ, 算定強度は概ね実験強度を予測できることが確認することができた。なお, 本節においても, 充填材料の影響が終局強度に及ぼす影響は見られなかったことを付記する。

#### 4. まとめ

本研究は, 幅厚比が一定のステンレス角形鋼管に軽量コンクリート 2 種(LC2), 軽量碍子コンクリート(CWLC)を充填し, せん断スパン比を実験変数とした曲げせん断実験を行った。結論付けられる事項を列記すると以下のとおりである。

- (1)破壊形式は, ステンレス鋼管圧縮部分の座屈であった。また, ステンレス鋼管の降伏は確認できたものの破断は見られなかった。さらに充填材料の違いによる破壊形式の差異は見られなかった。
- (2)変形性能は, 20mm までの変位でせん断スパン比に関係なくすべての供試体が最大荷重に到達した。その後, 最大強度を保持したまま変形が進行し, 高いじん性が得られていることが確認された。なお, 充填材料が変形性能に及ぼす影響については見られなかった。

(3)既報<sup>5)</sup>に基づいた N-CFT 部材の最大曲げ強度算定方法で比較したところ、降伏強度に基づいた曲げ強度では安全側の評価となった。また、最大強度に基づいた算定強度では危険側となった。そこで、降伏強度と最大強度の平均強度を用いて再計算したところ、実験結果をほぼ予測できることがわかった。

謝辞：実験を行うにあたり、神戸市立工業高等専門学校都市工学科に在籍された 5 年生の学生諸君にご協力をいただきました。また、(一社)近畿建設協会より、研究助成金をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 笠井芳夫編：軽量コンクリート，技術書院，pp. 71-87，2002.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，丸善，p. 191，2017.
- 3) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008.
- 4) ステンレス協会市場開発委員会：ステンレスの初歩，2007.
- 5) 上中宏二郎，水越睦視，東山浩士：軽量骨材および使用済み碍子細骨材を用いたコンクリート充填角形鋼管部材の曲げ特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，日本コンクリート工学会，Vol. 44, No. 2, pp. 667-672, 2022.
- 6) Lam, D. and Gardner, L.: Structural Design of Stainless Steel Concrete Filled Columns, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, Vol. 64, pp. 1275-1282, 2008.



## 公共財の心理的所有権形成が共創的関与に与える影響

○舞鶴工業高等専門学校社会基盤メンテナンス教育センター 特命准教授 嶋田 知子  
舞鶴工業高等専門学校建設システム工学科 教授 玉田 和也  
九州大学大学院芸術工学研究院 准教授 松前 あかね

### 1. 研究目的

#### 1.1. 社会的背景

道路等のインフラは、全ての人々が利用可能な“公共財 (public goods)”であり、各インフラ管理者（主に行政）の責任の下、維持管理・更新等が実施されている。インフラ老朽化が深刻化する一方で、整備・維持管理に必要な財源・技術力・人材が不足（特に地方公共団体）し、市民の安全安心の確保とインフラの持続的利用が課題となっている。これを背景に、インフラメンテナンスにおける市民協働の重要性への認識が高まっているが、インフラ管理実務へ多様なアクターが参画する際の安全・品質の管理や、参画活動の主体的・継続的な運営等、実装へ向けた課題は多い。

国土交通省社会資本整備審議会・交通政策審議会技術部分科会技術部会の提言（令和4年12月）『総力戦で取り組むべき次世代の「地域インフラ群再生戦略マネジメント」～インフラメンテナンス第2フェーズへ～』<sup>[1]</sup>では、第2フェーズで速やかに実装すべき施策として、国民の理解と協力から国民参加・パートナーシップへの進展が示され、多様な主体による「総力戦」での実施体制の構築を図るとされている。行政主導による形式的・手続的な市民参画が主流の現状を脱し、産官学民の多様なアクターが真に協働するインフラ管理の実現が求められている。

#### 1.2. 研究動機

本研究では、インフラ等の公共財管理に対する当事者のモチベーションと行動変容を引き出すファクターとして、“心理的所有権 (psychological ownership)”に着目する。心理的所有権は、経営学・組織行動学の領域で定義された概念で、過去20年間には他領域でも理論的・実証的な観点から研究されている。本研究では、アクターの参画態様の違いが心理的所有権の形成へ及ぼす影響に着目し、公共財管理に対する当事者のモチベーションと行動変容を引き出すための学術的知見を得ること、及び、地域インフラ管理の参加型デザインとして実装可能な知見を得ることを目的とする。

### 2. 研究方針

本研究は、インフラ等の公共財を、共有資源を意味する“コモンズ (commons)”と捉え、コモンズ研究、心理的所有権研究、及び、社会的創造性研究を跨いだ学際的研究として実施する。本研究は社会実装を見据えたもので、成果の実装先として、コモンズ（公共財）管理、特に、地域インフラ管理における市民協働を念頭におくと共に、当該フィールドにおいて実証研究を展開したいと考えている。

本研究は、3ヶ年をかけて、理論段階と実証段階の2段階で実施する。1年目は、先行研究の文献調査、及び、研究構造の構築に重点を置く。また、2年目へ向けて、アクターの参画態様に違いを組んだラボ実験プロトコルと主要な目的変数（心理的所有権、内発的動機づけ、行動変容）の計測尺度と計測方法を検討する。2年目は、ラボ実験プロトコルの詳細を構築し、研究倫理審査を経て被験者による実験を実施する。得られた実験データの分析と仮説検証を実施し、アクターの参画態様を踏まえたコモンズ（公共財）の心理的所有権形成メカニズムの理論モデル、及び、コモンズ（公共財）の心理的所有権の測定尺度

を提案する。3年目は、市民・住民と京都府北部社会基盤メンテナンス推進協議会（舞鶴高専が主催，京都府北部7市町，地元企業代表が参加）の協力を得て，多様なアクターによる実証実験を行い，提案した理論モデルと計測尺度を評価する。

本研究の研究実施スケジュールを表1に示す。

表1 研究実施スケジュール（3ヶ年，2023年度～2025年度）

研究段階	実施内容	年・四半期	1年目				2年目				3年目							
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
<理論段階>	文献調査 (市民協働，心理的所有権，コモンズ，社会的創造性)																	
	研究構造の構築 (リサーチギャップ，コモンズの属性，RQ，仮説)																	
	ラボ実験プロトコルの検討・開発 (参画態様の違いを組み込んだシミュレーションゲーム)																	
	目的変数の計測尺度と計測方法 (心理的所有権，内発的動機づけ・行動変容)																	
	ラボ実験の実施 (研究倫理審査，被験者による実験)																	
	実験データの分析と仮説検証																	
	心理的所有権形成メカニズムの理論モデルの提案																	
	心理的所有権の測定尺度の提案																	
<実践段階>	理論モデルと測定尺度の実証実験の実施																	
	理論モデルと計測尺度の評価																	
	社会実装・アウトリーチへ向けた検討																	

### 3. 研究経過

2023年度（令和5年度）は，本研究の1年目に当たる。

年間通して，4研究分野（地域インフラ管理における市民協働研究，コモンズ研究，心理的所有権研究，及び，社会的創造性研究）を対象に先行研究の文献調査を実施した。

先行研究の文献調査と並行して，本研究の研究構造の構築として，リサーチギャップの調査・視覚化，研究対象とするコモンズの属性の特定，及び，リサーチクエスチョン（RQ）の提示を実施した。

第4四半期は，ラボ実験プロトコルの開発に着手した。また，目的変数となる心理的所有権及び内発的動機づけの計測尺度について，先行研究の文献調査を実施した。

本研究の成果として，研究構造の構築過程を日本創造学会第45回研究大会デジタルポスター発表へ投稿した。発表内容は，日本創造学会第45回研究大会論文集に掲載された。

### 4. 研究成果

#### 4.1. 先行研究

##### 4.1.1. 地域インフラ管理における市民協働研究

土木学会論文集，インフラメンテナンス実践研究論文集，及び，建築学会技術報告集から，コモンズ（公共財）管理への市民協働に関する文献を抽出し，研究動向と既存の知見を調査した。

市民協働の先行研究として，大野らは，地域住民が公共施設の管理に関わる領域を地域インフラと定義し，地域協働への地域住民の参画を促すには，各主体が健全に地域で活動できる基盤と，各主体間の対話から各主体が役割を認識することの必要性を示している（大野・高木 2013）<sup>[2]</sup>。浅野らは，市民による橋の維持管理モデル「橋のセルフメンテナンスモデル」の構築と実践事例（浅野・岩城 2022）<sup>[3]</sup>から，今井らは，周南地域を拠点とする任意団体「しゅうニャン橋守隊」の活動と実践事例（今井・海田・西本・岡本・中越・小山 2022）<sup>[4]</sup>から，市民協働がもたらす様々な効果を考察している。これらの実践事例は，産官学民による主体的な活動，高い継続性・発展性，全国での類似活動の立ち上げ支援による水平展開にお

いて共通しており、心理的所有権が作用したことを示す個々人の動機、態度、行動への影響が観察される。「橋のセルフメンテナンスモデル」と「しゅうニャン橋守隊」の活動には高い継続性・発展性があり、特に、「しゅうニャン橋守隊」の活動では、参加者同士が共感・協働というキーワードで響きあい、各々の立場で関心をもつことがインフラメンテナンスのスタートラインであることが共有されている<sup>[4]</sup>ことから、共創的協働が実現されている可能性がある。

高橋らは、全国の参加型公共施設事例を対象に、計画プロセスと運営段階の市民参加の実態の関連性の体系的考察を試みている。この中で「主体の所在（行政，市民）」「参加の範囲（活動，運営）」の2つの軸に沿って運営段階の市民参画形態を4つに分類・定義（図1）し、市民主体の能動的な活動及び運営への参加が少数であることを示すとともに、運営段階の主体形成を促す計画段階の参加手法の特性について考察している（高橋・森永・伊藤，2015）<sup>[5]</sup>。この研究では、市民参加の継続性について、各段階の市民参加の有無と市民グループの形成・継続との関係が示されているが、市民参加におけるアクターの参画態様との関係は検討されていない。

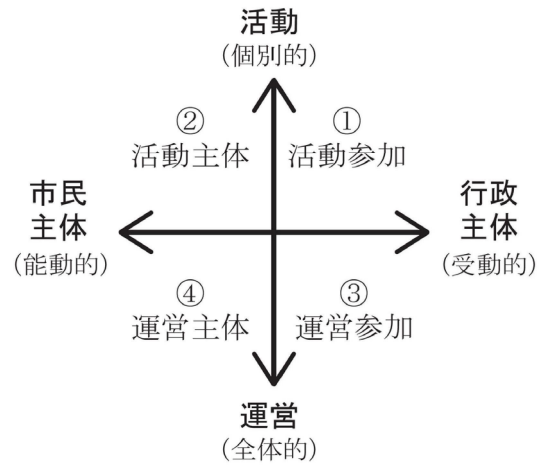


図1 開館後の市民参画形態の分類  
出典：高橋ら(2015)p.755<sup>[5]</sup>

#### 4.1.2. 心理的所有権研究

Web of Science で"psychological ownership"をトピック検索した結果、最も被引用数が最も多かった原著論文“Toward a Theory of Psychological Ownership in Organizations”（Pierce, J.L., T. Kostova, and K.T. Dirks. 2001）<sup>[6]</sup>の引用文献と被引用文献を基に、本研究目的を踏まえて調査対象を抽出し、心理的所有権の概念、心理的所有権のレベル、及び、心理的所有権とステューワードシップ行動について整理した。

#### 心理的所有権の概念

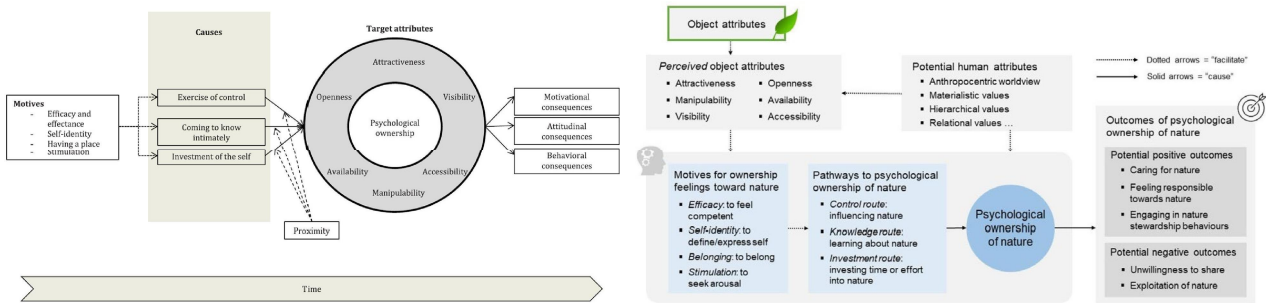
心理的所有権（psychological ownership）とは、所有の対象（物質的または非物質的）またはその一部が「自分のもの」である、すなわち「それは私のものだ！」、と感じる状態（Pierce et al., 1991）<sup>[7]</sup>であり、ある対象に対して心理的な結びつきを感じ（Pierce, Kostova, & Dirks, 2001, 2003）<sup>[6][8]</sup>、その対象を大切にしようと努力し、その対象の利益のために行動を向ける動機づけがある状態（Furby, 1978）<sup>[9]</sup>を反映している。心理的所有権の核心は、所有欲と対象に心理的に結びついている感覚（Pierce et al., 2001）<sup>[8]</sup>である。この心理的所有権という概念は、Pierce らによる組織論の文脈において研究が始まったが、2000年代以降は、コモンズ研究領域やマーケティング研究領域でも心理的所有権に関する研究が増加している。

心理的所有権は、所有欲の動機となる人間の基本的な欲求（表2左欄）と心理的所有権を形成する先行要因（表2右欄）によって生起される（Pierce, Kostova, & Dirks, 2001, 2003）<sup>[6][8]</sup>。基本的な欲求について、有効性は制御と能力を感じたい欲求、自己アイデンティティは自己を定義して理解したい欲求、帰属は所属／愛着の対象が欲しい欲求、刺激は活性化や覚醒を求めたい欲求、をそれぞれ意味している。先行要因について、対象のコントロール量、対象への詳細な知識の度合い、及び、対象への自己投資の度合いは、個人が対象に対して感じている心理的所有権の度合いと、それぞれ正の因果関係がある（Pierce et al., 2001）<sup>[6]</sup>とされている。

また、各文脈における心理的所有権の概念モデルが示されている。マーケティングの文脈の概念モデル（Jussila et al., 2015）<sup>[10]</sup>、及び、自然の文脈の概念モデル（Xiongzi Wang et al., 2022）<sup>[11]</sup>を、図2を示す。

表 2 所有欲の動機となる人間の基本的な欲求と心理的所有権を形成する先行要因<sup>[6][8]</sup>

所有欲の動機となる人間の基本的な欲求	心理的所有権を形成する先行要因
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 有効性 (efficacy and effectance)</li> <li>・ 自己アイデンティティ (self-identity)</li> <li>・ 帰属 (belonging, having a “home”)</li> <li>・ 刺激 (stimulation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 対象を制御すること (controlling the target)</li> <li>・ 対象を詳しく知ること (coming to know the target intimately)</li> <li>・ 対象に自己投資すること (investing the self into the target)</li> </ul>



(a) マーケティングの文脈における概念モデル

出典：Jussila et al.(2015)p.122<sup>[10]</sup>

(b) 自然の文脈における概念モデル

出典：Xiongzhi Wang et al.(2022)P.4<sup>[11]</sup>

図 2 心理的所有権の概念モデル

**心理的所有権のレベル**

Pierce らは、個人レベルと集団レベルの心理的所有権について、個人的心理的所有権 (individual psychological ownership : IPO) は、所有の対象 (またはその対象の一部) が “私のもの” であるという個人的認知・感情状態 (Pierce et al., 1991) <sup>[7]</sup>, 集団的心理的所有権 (collective psychological ownership : CPO) は、所有の対象 (またはその対象の一部) が集団的に “私たちのもの” であるという集団的認知・感情状態 (Pierce et al., 2010) <sup>[12]</sup>と位置づける。CPO の出現には、IPO の動機 (表 2 左欄) に加えて社会的アイデンティティの欲求が重要な動機づけの役割を果たし、また、IPO の先行要因 (表 2 右欄) を集団的に共有する経験を、CPO 形成の先行要因とする (Pierce et al., 2010) <sup>[12]</sup>。Pierce らは、レベル間の移行は 3 段階で起こり、CPO は IPO の延長線上にあるとするが、Martinaityte らは、2 つのレベル間の移行の中間段階、つまり、対象が “私たちのもの” であるという個人的認知・感情状態を個人レベルの集団的心理的所有権 (individual-level CPO : I-CPO) と定義し、プロジェクトの文脈では IPO, I-CPO, CPO は共存可能とする理論的拡張を試みている (Martinaityte, Unsworth & Sacramento, 2020) <sup>[13]</sup>。この他、Pierce らは、ワークチームの文脈から仕事の集団的心理的所有権 (job-focused collective psychological ownership : J-CPO) を定義し、実証的かつ実質的な調査から、J-CPO がチームワークデザインとチームパフォーマンスの関係において重要な集団的心理的所有権の状態である可能性を明示している (Pierce et al. 2020) <sup>[14]</sup>。

Pierce らは、CPO について、共有された対象-経験関係をめぐる集団過程に従事した 2 人以上の相互依存的な個人の間で到達した集団的認知 (Pierce et al. 2018) <sup>[15]</sup>とも説明する。Cooke は、この集団的認知という共有メンタルモデルの出現について、「チームメンバーが互いに認知的に協調し、アイデアを統合し、新しい知識を創造する」相互作用を通して起こる (Cooke 2015) <sup>[16]</sup>としている。

**心理的所有権とステewardシップ行動**

心理的所有権とステewardシップ行動については各文脈で先行研究があるが、Peck らは、原著論文 “Caring for the Commons: Using Psychological Ownership to Enhance Stewardship Behavior for Public Goods” (Peck et al. 2021) <sup>[17]</sup>において、個人的心理的所有権が公共財 (コモンズ) の利益のために実際のスチュ

ワードシップ行動を変化させることを、初めて実証的に示した。具体的には、個人レベルの行動介入によってコモンズへの個人的心理的所有権を操作し、スチュワードシップを努力的ケア行動（ゴミ拾いなど）や金銭的貢献によって測定する実験を実施し、心理的所有権の増大がこうした責任感を増大させること、他者の存在を示す手掛りとなる数値記号により責任が拡散することを示した。Peck らの研究は、コモンズ管理には、明示的な社会的メッセージや罰則ではなく、IPO 先行要因に基づく個人レベルの行動介入という内発的に動機づけられた行動的解決策が利用できるかもしれないことを示唆している。

4.1.3. コモンズ研究

IASC (International Association for the Study of the Commons) の Web サイト<sup>[18]</sup>によると、コモンズの本来の意味は、中世ヨーロッパで共同体が「共有」していた土地の管理方法に由来し、最も一般的には、多くの人々が共有する自然的・文化的な資源の広範な集合を指す言葉として使われ、伝統的コモンズは、森林、漁場、地下水資源など（自然資源コモンズ）が挙げられる。新しいコモンズについて、Hess は、「文化コモンズ」 cultural commons, 「地区コミュニティコモンズ」 neighborhood commons, 「インフラストラクチャーコモンズ」 infrastructure commons, 「知識コモンズ」 knowledge commons, 「医療および健康コモンズ」 medical and health commons, 「市場コモンズ」 market as commons, 「グローバルコモンズ」 global commons, という7つのセクターの分類を示している (Hess, Charlotte 2008) <sup>[19]</sup>。

Schranz は、コモンズとは、一般的にアクセス可能な資源を利用し、集団的に管理し、組織化するコミュニティ・ベースのプロセスであり、モノと知識の両方を指すとしている (Schranz 2023) <sup>[20]</sup>。また、Pouri らは、共有の本質を、個人やコミュニティが所有するリソースに、所有権はそのままに多くのユーザーがアクセスできることとしている (Pouri & Hilty 2021) <sup>[21]</sup>。これらは、所有権の所在に関わらず、財をアクセス性（排他的か非排他的か）で分類した上、非排他的なものをコモンズとみる考え方である。

4.1.4. 社会的創造性研究

アクターの参画態様による影響に着目し、先行研究の調査を実施し、ラボ実験プロトコルの開発に資する知見を整理した。

松前らは、通常協働の観点から議論されるヒューマンファクターについて、より内なる共創造性に着目し共創造性に着目し、協力的 (co-operative) 協働と共創的 (co-creative) 協働の比較実験を通して、共創のメカニズムにおいて相互主観性を始めとする主要な構成要素を位置づけ、それを動的モデルとして提案している (松前・永井 2018) <sup>[22]</sup>。この中で、松前らは、「共創」を「個々人間において共同化段階を共有し、何かを共に創出する協働」、「協力」を「個々人間において共同化段階を共有せず、所与の目標を達成するための協働」と定義し、協働 (collaboration) の類型の概念図 (図 3) を示している。また、共創的/協力的デザインワークの実施中に記録した各被験者の動的状態をあらゆる波形類型を質的比較・量的比較により可視化し、専門家らの相互主観性評価と合わせて相互主観性形成の有無及び程度を評価する手法を示している。

共同化 (socialization) 段階は、野中による知識創造の SECI モデルの第一フェイズ (暗黙知の共有) であり、共同化とは、経験を共有することによって、メンタル・モデルや技能などの暗黙知を創造するプロセスである。経験、ものの見方、動機がことなる複数の個人間での暗黙知の共有が、組織的創造性を起こすためのきわめて重要なステップとされ、また、個人の感情、想い、メンタル・モデルの共有が、相互信

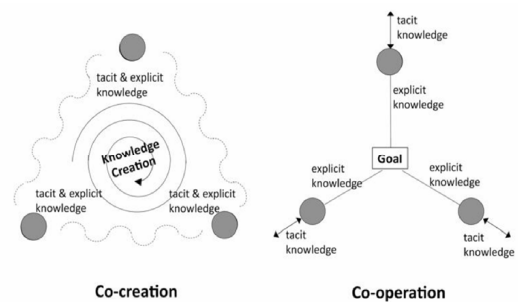


図 3 協働の類型：共創と協力  
出典：松前,永井(2018)p.22



頼を築くために必要であるとされている（野中・竹内 1996）<sup>[23]</sup>。Schefflen は、共通理解を形成するときの「相互作用リズム」の重要性を強調し、コミュニケーションとはある状況に存在する情報を同時の共有することであると主張している（Schefflen 1982）<sup>[24]</sup>。また、Condon は、コミュニケーションは実情に応じた同時的な現象であり、人びとはそこで起きつつある変化を感じてその感覚を共有し、行動へと動かされるのであると論じている（Condon 1976）<sup>[25]</sup>。野中はこれを、「コミュニケーションは人々の体を通り抜ける波のようなものであり、全員がその波の波長と同調した時に最高潮に達する」と言い換えており（野中・竹内 1996）<sup>[24]</sup>、共同化には、個々人間の内面の状態が大きく影響すると考えられる。

## 4.2. 研究構造

### 4.2.1. リサーチギャップ

本研究が対象とする研究領域におけるリサーチギャップを特定するため、Web of Science の検索機能を用いて本研究に関するキーワード検索（検索範囲：すべてのテキストフィールド）を実施し、検索結果を視覚化した（図 4）。図中の“ ”内はキーワードを、数字は検索結果（件数）を示す。本研究は、コモンズ管理（“commons” & “sharing” OR “public” & “management”）において、アクターの参画態様の違い（共創性の有無）（“creativity” OR “co-creation”）が心理的所有権の形成（“psychological ownership”）へ及ぼす影響を明らかにするものである。図中の赤線で示す部分に概要し、今回特定されたりサーチギャップと合致している。

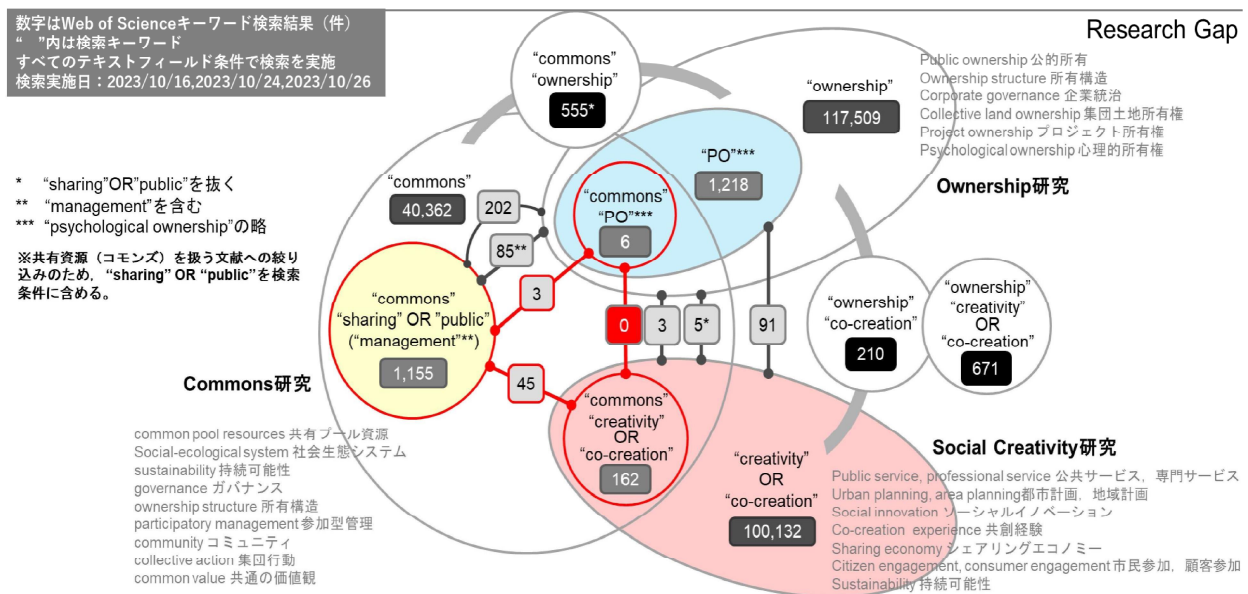


図 4 本研究対象領域におけるリサーチギャップ

### 4.2.2. リサーチクエスション

先行研究（4.1.）とリサーチギャップ（4.2.1.）を踏まえ、本研究では次の 2 つのリサーチクエスションに取組む。RQ1 はリサーチギャップを埋める学術的知見を得るもので、RQ2 は実証研究への展開と社会実装可能な学術的知見を得るものである。

**RQ1：コモンズへの参画態様の違いが心理的所有権に与える影響**

**RQ2：心理的所有権がコモンズに対する内発的動機づけと行動変容に与える影響**

4.2.3. 対象とするコモンズ

本研究の対象領域を、所有権（ownership）研究軸と創造性（creativity）研究軸上によって視覚化したものを図5に示す。所有権研究軸は、アクセス性による財の分類を用いて、排他的な財と非排他的な財に分割し、創造性研究軸は、共同化の有無による関与の分類を用いて、共創的協働（co-creative collaboration）と協力的協働（co-operative collaboration）に分割した。図中の赤線で囲った部分がRQ1を示す。

Pauriらは、デジタル・シェアリング・エコノミーにおける共有の3つの基本的な側面には、共有の技術的側面（共有可能な資源）、共有の社会的側面（共有の実践）、共有の調整面（デジタル・プラットフォーム）があるとし、シェアリングの技術的側面と社会的側面を分類するマトリックス（図6）を示している（Pauri & Hilty 2021）<sup>[21]</sup>。これを参考に、コモンズの特性を整理したものを図7に示す。本研究で対象とするコモンズの特性は図中のハッチ部で示され、対象とするコモンズを定義する5つの要件（①非排他的、②物質、③耐久財、④フィジカル空間で共有、⑤多様なアクターが共有）が明示された。

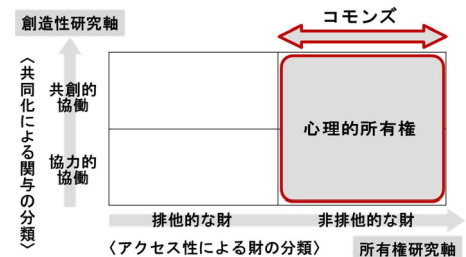


図5 本研究の対象領域

Technical aspect of sharing	Transferring ownership		Bartering	Exchange				n.a.				
			Gifting	Gifting				n.a.				
			Redistribution	Re-use				Second-hand market				
	Consumable immaterial good	Consumable information	Personal communications	Digital Sharing Economy (DSE)					Selling volatile information			
		Time	Sharing time						Selling time			
	Consumable material good	Things of sufficient availability	Shared consumption						Selling material goods			
		Things of abundant availability										
	Durable immaterial good	Durable information	Sharing content						Licensing			
		Competence	Helping						(Self-) Employment			
	Durable material good	Free capacity	Shared use						Renting			
Idle capacity												
	Most informal / most formal practices	Small group, traditional sharing	Large group, no reciprocity or compensation						Large group, informal reciprocity or compensation	Large group, formal reciprocity or compensation	Large group, monetary compensation per service unit	Formal market economy
	Excluded by definition	Social aspect of sharing										

図6 シェアリングの技術的側面と社会的側面を分類するマトリックス

出典：Pauri, Hilty (2021) p.133<sup>[21]</sup>

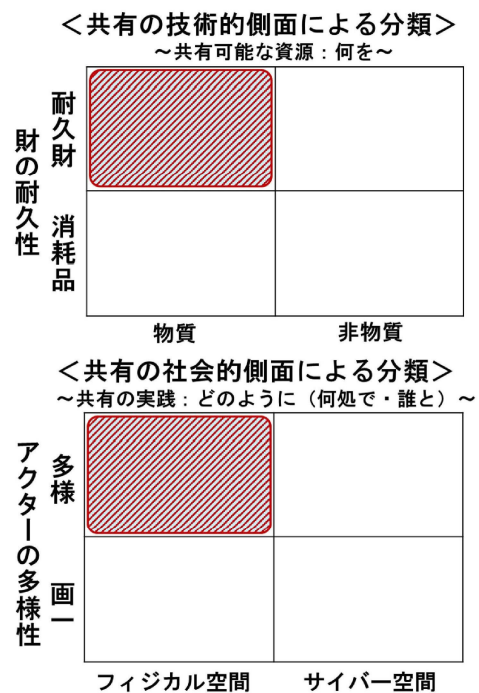


図7 対象とするコモンズの特性

5. まとめ

2023年度は、本研究全体のフレームワークを提示することを目標とした。先行研究の文献調査、及び、研究構造の構築に重点を置くことで、コモンズ研究、心理的所有権研究、社会的創造性を跨ぐ研究領域におけるサーチギャップの明示、学際的研究価値の認識に繋がった。これを基に、本研究の2つのリサーチクエスションと本研究の対象領域を特定した。また、デジタル・シェアリング・エコノミー研究の知見を用いて本研究で対象とするコモンズの特性を整理し、対象とするコモンズを定義する5つの要件（①非排他的、②物質、③耐久財、④フィジカル空間で共有、⑤多様なアクターが共有）を明示した。

2024年度以降は、2023年度に構築したフレームワークを土台として、研究を加速・推進する。

## 謝辞

本研究は、令和5年度近畿建設協会研究助成を受けて実施した。

## 参考文献

- [1] 国土交通省社会資本整備審議会・交通政策審議会技術分科会 技術部会 提言（令和4年12月）
- [2] 大野沙知子 高木朗義. 2013. “地域協働によるインフラストラクチャー管理の要件 - 岐阜県中津川市を事例に -.” 土木学会論文集 f4（建設マネジメント） Vol. 69(No. 4): 121- 28.
- [3] 浅野和香奈・岩城一郎. 2022. “橋のセルフメンテナンスに参加する市民の安全を守る 10 の活動に際する規約の導入と改善.” 1(1):1-10.
- [4] 今井努・海田辰将・西本忠章・岡本知也・中越 亮太・小山諒子. 2022. “周南地域における橋守活動・土木広報の実践と市民協働を踏まえた維持管理に関する考察.” 1(1): 70- 79.
- [5] 高野洋平・森永良丙,・伊藤里佳. 2015. “公共施設の計画プロセスと運営段階における市民参加の持続性に関する研究.” 日本建築学会技術報告集 21(48): 753- 58.
- [6] Pierce, J.L., T. Kostova, and K.T. Dirks. 2001. “- Toward a Theory of Psychological Ownership in Organizations ,Academy of Management.” The academy of management review 26(2): 298-310.
- [7] Jon L .Pierce , Stephen A . Rubenfeld and Susan Morgan Published by : Academy of Management Stable URL : Http://Www.Jstor.Com/Stable/258609 REFERENCES Linked References Are Avai.” 16(1): 121-44.
- [8] Pierce, J.L., T. Kostova, and K.T. Dirks. 2003. “The State of Psychological Ownership: Integrating and Extending a Century of Research.” Review of General Psychology 7(1): 84-107.
- [9] FURBY, L. 1978. POSSESSION IN HUMANS - EXPLORATORY-STUDY OF ITS MEANING AND MOTIVATION. Volume6. Issue1. Page49-65
- [10] Jussila, Iiro, Anssi Tarkiainen, Marko Sarstedt, and Joseph F. Hair. 2015. “Individual Psychological Ownership: Concepts, Evidence, and Implications for Research in Marketing.” Journal of Marketing Theory and Practice 23(2): 121-39.
- [11] Wang, Xiongzhi, Kelly S. Fielding, and Angela J. Dean. 2023. “‘Nature Is Mine/Ours’: Measuring Individual and Collective Psychological Ownership of Nature.” Journal of Environmental Psychology 85(November 2022): 101919.
- [12] PIERCE, JON L., and IIRO JUSSILA. 2010. “Collective Psychological Ownership within the Work and Organizational Context: Construct Introduction and Elaboration.” Journal of Organizational Behavior: 810-34.
- [13] Martinaityte, Ieva, Kerrie L. Unsworth, and Claudia A. Sacramento. 2020. “Is the Project ‘Mine’ or ‘Ours’? A Multilevel Investigation of the Effects of Individual and Collective Psychological Ownership.” Journal of Occupational and Organizational Psychology 93(2): 302-27.
- [14] Pierce, Jon L., Dahui Li, Iiro Jussila, and Jianyou Wang. 2020. “An Empirical Examination of the Emergence of Collective Psychological Ownership in Work Team Contexts.” Journal of Management and Organization 26(5): 657-76.
- [15] Jussila, Iiro, Anssi Tarkiainen, Marko Sarstedt, and Joseph F. Hair. 2015. “Individual Psychological Ownership: Concepts, Evidence, and Implications for Research in Marketing.” Journal of Marketing Theory and Practice 23(2): 121-39.
- [16] Cooke, N. J. (2015). Team cognition as interaction. Current Directions in Psychological Science, 24, 415-419.
- [17] Peck, Joann, Colleen P. Kirk, Andrea W. Luangrath, and Suzanne B. Shu. 2021. “Caring for the Commons: Using Psychological Ownership to Enhance Stewardship Behavior for Public Goods.” Journal of Marketing 85(2): 33-49.
- [18] International Association for the Study of the Commons: IASC <http://www.iasc-commons.org/>
- [19] Hess, Charlotte,2008, Mapping the new commons, Social Science Research Network. (1356835)
- [20] Christine Schranz(ed), 2023 ,Commons in Design \_<https://doi.org/10.47982/bookrxiv.41>
- [21] Pouri, Maria J., and Lorenz M. Hilty. 2021. “The Digital Sharing Economy: A Confluence of Technical and Social Sharing.” Environmental Innovation and Societal Transitions 38(May 2020): 127-39.
- [22] Matsumae, Akane, and Yukari Nagai. 2019. “Dynamic Mechanism of Co-Creation to Form Intersubjectivity among Individuals in Various Contexts.” Journal of Japan Creativity Society 22: 21-38.
- [23] 野中郁次郎 and 竹中弘高, 知識創造企業. 東京: 東洋経済新報社, 1996.
- [24] Schefflen, Albert E. 1967. “On the Structuring of Human Communication.” American Behavioral Scientist 10(8): 8-12.
- [25] William S . Condon Source : Sign Language Studies , WINTER 1976 , No . 13 ( WINTER 1976 ) , Pp . 285-318 Published by : Gallaudet University Press Stable URL : <https://Www.Jstor.Org/Stable/26203180>.” 1976. 13(13): 285-318.



## 道路空間の再編と利活用による市街地像の実現手法に関する研究

○大阪公立大学大学院 工学研究科 教授 嘉名光市  
大阪公立大学大学院 現代システム科学研究科 准教授 阿久井康平

## 1. はじめに

近年、戦後に整備された市街地の道路や広場などが更新期を迎えるなか、改めてその役割が問い直されている。とくに今後の道路空間のあり方を展望する際には、中心市街地の活性化、コンパクトシティやウォーカーブルシティなど今後の市街地のあり方に呼応し、市街地像の実現に向けた様々な取組を先導・牽引する役割が求められる。こうしたなか、全国各地で積極的に道路空間再編や利活用が行われている。特に近畿圏では、歩行者利便増進道路制度（ほこみち）が大阪、神戸、姫路などで先行して導入されるなど、その活用が期待されている。多様な市街地特性を有する近畿圏において道路空間の再編や利活用から市街地像の実現を展望するには、先駆的・先進的な取組の収集とその効果等の検証、萌芽的な取組の収集や近年の動向の把握・分析等が急務である。

## 2. 研究構成・内容

以上より本研究では、道路空間の再編や利活用に関し、(1)先進事例調査と(2)新たな制度に係る動向調査、2種類の調査を実施した。(1)では、先進的な道路空間再編事例を対象に、効果検証調査等を実施した。(2)では、歩行者利便増進道路制度（ほこみち）に着目し、その指定・運用状況に関する全国調査、抽出事例に対する詳細調査を行った。それぞれの概要は以下である。

(1)先進事例調査

道路空間再編・利活用に関する先進事例は、国の資料等により、一定収集・整理されている<sup>1)~3)</sup>。また、出口、野原、三浦らによるストリートデザインマネジメントに関する一連の研究<sup>4)~6)</sup>によって、道路空間再編・利活用に関する事業プロセスの解明、空間的特徴の分析等の研究蓄積が進んでいる。一方、道路空間再編・利活用の効果を多面的に調査・分析した研究は未だ多くはみられない。

そこで本研究では、メインストリートのモール化や駅前交通広場の広場化、そこにおける利活用の促進、道路空間と沿道建築空間が一体となった景観誘導など、道路空間再編・利活用の取組が多様に展開されている大阪市中心部を対象に利用者の滞留実態や景観への影響等の効果検証調査を行った。

また、市街地像の実現という観点から、都市全体の公共空間再編と連動し、道路空間再編を検討している八戸市中心街に着目し、その検討プロセス等を調査した。

(2)新たな制度の動向調査

近年、道路空間利活用のための新たな制度である「歩行者利便増進道路制度（ほこみち）」の導入が全国的に進められているが、その指定・運用に関する動向や全国傾向は未だ調査されていない。そこで、ほこみちを積極的に運用している松本市、福山市、熊本市を対象に、ほこみちの導入プロセスや運用実態等に関する詳細調査を実施した。また、詳細調査を踏まえてアンケート調査票を設計し、ほこみちの指定・運用状況に関する全国アンケート調査を実施した。

※ (1)先進事例調査 については、一部、過年度に実施した調査結果のとりまとめに要する経費として、本研究助成金を使用した。以下報告書には、全ての調査結果を掲載する。

3. 先進事例調査の結果

3-1. 大阪・御堂筋の道路空間再編社会実験における滞留スポットの利用実態に関する調査

大阪のメインストリート・御堂筋では、フルモール化に向けた取組が進んでいる。難波駅から北側に向けて順次整備が進むほか、社会実験が繰り返し行われている。本調査が対象とした「2期整備区間」は、既に側道の歩行者空間化が完了した区間である。2022年10~11月に実施された社会実験において、2期整備区間では、歩行者空間上に設置される滞留施設（座具）等の最終形を目指した検証が行われた。本調査では、2期整備区間のうち御堂筋の東側・西側街区を調査対象とし、この東西街区における滞留者数・滞留位置、滞留行動の内容や多様性等を調査した。調査期間は社会実験の実施前・実施期間中である。

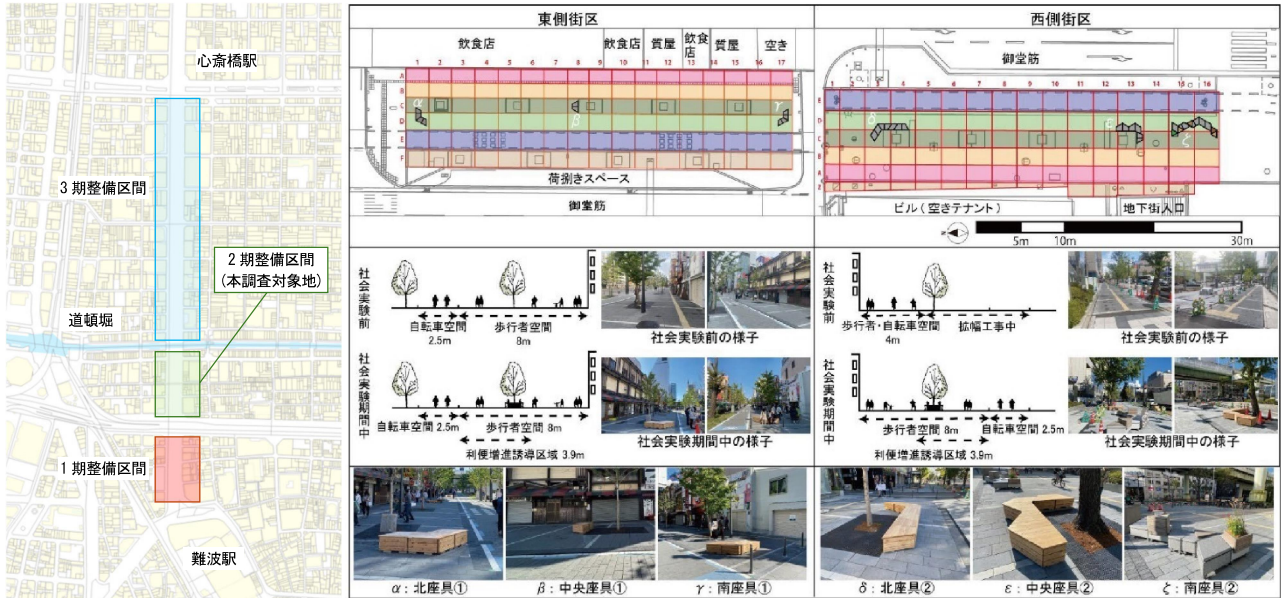


図 3-1.1 調査対象の概要

調査結果の例を図 3-1.2 に示す。社会実験前よりも実験中が、平日よりも休日が、滞留者数が多かった。滞留者は沿道の店舗位置や交差点位置を関係するほか、座具を設置することで座具周辺に滞留が発生しやすいことが明らかとなった。座具を利用した滞留行動の内容は、休憩や飲食等が増加した。また、通行者や滞留者数の違いが座具周辺の滞留行動に影響することが明らかとなった。調査まとめを図 3-1.3 に示す。

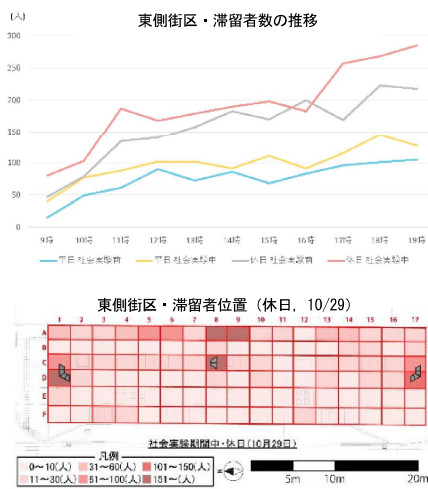


図 3-1.2 調査結果の例

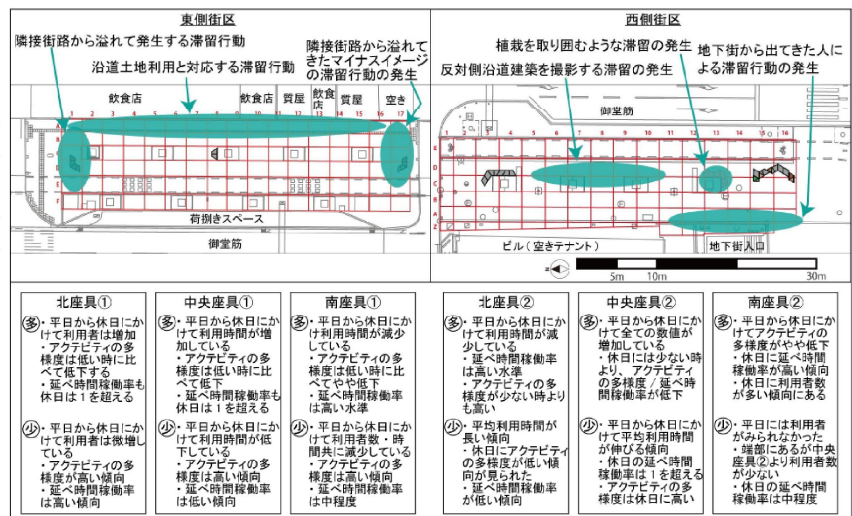


図 3-1.3 滞留場所による特性と各座具の滞留者数の違いによる特徴



3-2. 大阪・御堂筋の道路空間・沿道空間の変化に伴う低層部の景観影響評価

大阪のメインストリート・御堂筋は、区間ごとに幅員、街区構成、沿道建築物の規模等が異なり、また、近年は側道の歩行者空間化や歩道への滞留施設の設置等による道路空間再編・利活用も進んでいる（図 3-2.1）。本調査では、道路空間再編・利活用に伴う沿道景観への効果検証のため、御堂筋の低層部における景観の印象評価を行った。

はじめに、御堂筋低層部の写真を各街区端点から撮影し、景観の構成を精査し、御堂筋低層部の景観を代表する 31 枚の写真を選定した。また、社会実験時の写真やフォトモンタージュ等を用いて、道路空間再編・利活用のパターン（歩道への滞留施設の設置等）を踏まえた写真 26 枚を撮影・作成し、合計 57 枚の写真を用いて被験者への SD 法による印象評価実験を行った。そして、実験結果から因子分析を行い、道路空間再編・利活用のパターンごとに因子得点の比較分析を行った。調査結果を以下に示す。

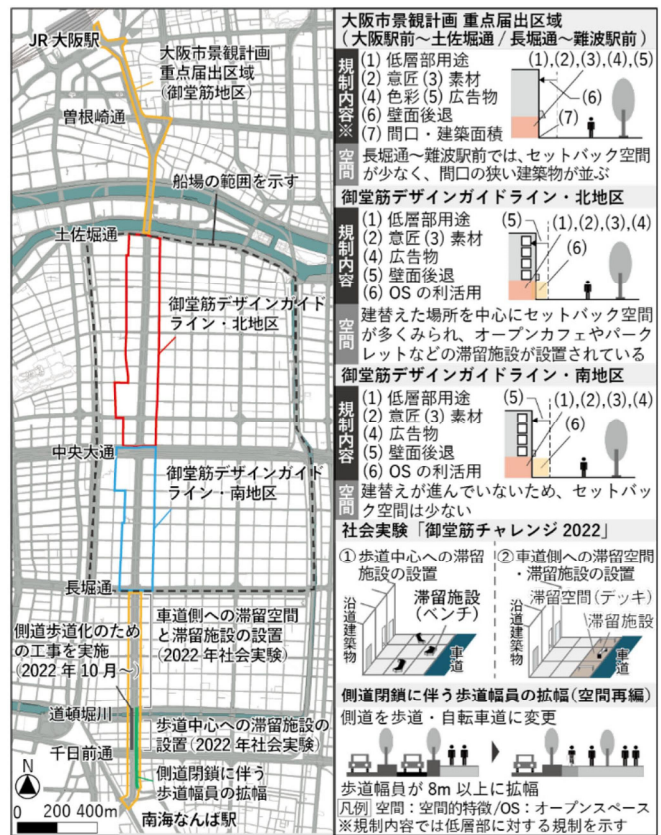


図 3-2.1 御堂筋の概要

**分析 I：**御堂筋低層部を代表する写真 31 枚を用いた SD 法による印象評価と因子分析を行った結果、第 1 因子を「シンボル性」、第 2 因子を「快適性」、第 3 因子を「活動性」と解釈した（表 3-2.1）。

**分析 II：**2022 年の社会実験では、歩道中心や車道へのベンチ設置、車道へのウッドデッキ（WD）設置が行われた。この写真を用い、分析 I に準じて因子分析を行った。因子得点の比較から快適性と活動性の向上等の効果を把握した（図 3-2.2）。

**分析 III：**歩車道部への滞留施設の設置を前提に、複数タイプの施設を検討し、フォトモンタージュにより写真を作成した。この写真を用いて、分析 I に準じて因子分析を行った。因子得点の比較から、活動性の向上等の効果を把握し、特にパークレットが効果的という結果を得た（表 2）。

表 3-2.1 分析 I・因子分析の結果

項目	因子			
	第 1 因子	第 2 因子	第 3 因子	共通性
3. 魅力的な - 魅力的でない	1.037	-.205	.373	.988
16. 美しい - 美しくない	1.010	-.033	-.021	.985
15. 立派な - 貧相な	.997	-.107	.161	.912
13. 好きな - 嫌いな	.961	-.045	-.282	.954
8. 調和している - 違和感のある	.959	-.019	.191	.945
1. 統一感のある - 統一感のない	.948	-.107	-.334	.926
7. 印象的な - ありふれた	.851	-.090	.399	.800
17. 安心な - 不安な	.779	-.185	-.631	.957
5. 落ち着いた - 落ち着きのない	.767	.240	.115	.886
6. すっきりした - ごちゃごちゃした	.719	.323	-.485	.948
14. 奥行きのある - 奥行きのない	.486	.077	-.021	.281
9. 開放的な - 閉鎖的な	.156	.830	.119	.952
11. 歩きやすい - 歩きにくい	.364	.740	-.116	.904
10. 自然的な - 人工的な	.366	-.675	-.070	.371
12. 明るい - 暗い	.258	.612	.349	.921
2. にぎやかな - さびしい	-.019	.008	.976	.959
4. 派手な - 地味な	.006	.066	.955	.973
18. 親しみのある - 親しみのない	.389	.207	.578	.732
因子間相関	第 1 因子	1.000	.533	.030
	第 2 因子	.533	1.000	.433
	第 3 因子	.030	.433	1.000

表 3-2.2 調査結果のまとめ

分析	滞留空間・滞留施設の設置位置	因子の評価		
		シンボル性	快適性	活動性
分析 II	①歩道中心へのベンチの設置	▲	▲	○
	②車道側へ WD とベンチを設置	○	○	○
分析 III	滞留施設の設置種類	シンボル性	快適性	活動性
	①ベンチの設置	▲	▲	○
	③パークレットの設置	—	—	◎
	④オープンカフェの設置	—	—	○

◎：評価が大きく向上 ○：評価が向上 ▲：評価が少し向上  
 —：評価に変化なし ▲：評価が少し低下 △：評価が低下

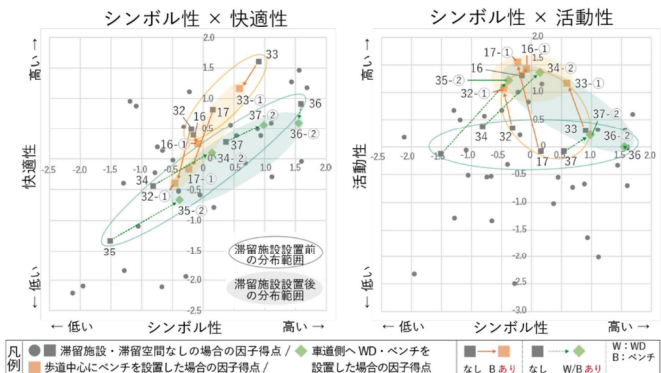


図 3-2.2 分析 II における因子得点の比較

3-3. 人中心の空間に転換された大阪中心部「なんば広場（仮称）」における歩行・滞留実態の調査

大阪・南海電鉄なんば駅前の「なんば広場（仮称）」は、タクシープールから広場に転換された先進事例である。2023年11月に供用開始され、広場西側には多様な利用を意図したベンチ等が設置されている。本調査では、2022年に実施された当該地周辺の交通量調査結果を踏まえ、広場周辺の交通量を調査し2022年結果と比較・分析した。また広場西側の滞留行動調査を行った。調査期間は2023年11～12月である。

交通量調査の結果、周辺通りと広場部分の結節点である地点 A-C では交通量が増加した。広場整備の効果によって周辺への円滑な移動が促されたと考えられる。広場内の地点 D では減少していたが、広場内を自由に移動することができるようになったことで、様々な動線が選択されるようになった結果と考えられる（以上、図 3-3.1）。滞留行動調査の結果は、滞留者数・滞留組数は休日に特に多く、飲食や写真撮影等の多様なアクティビティが確認された（図 3-3.2）。

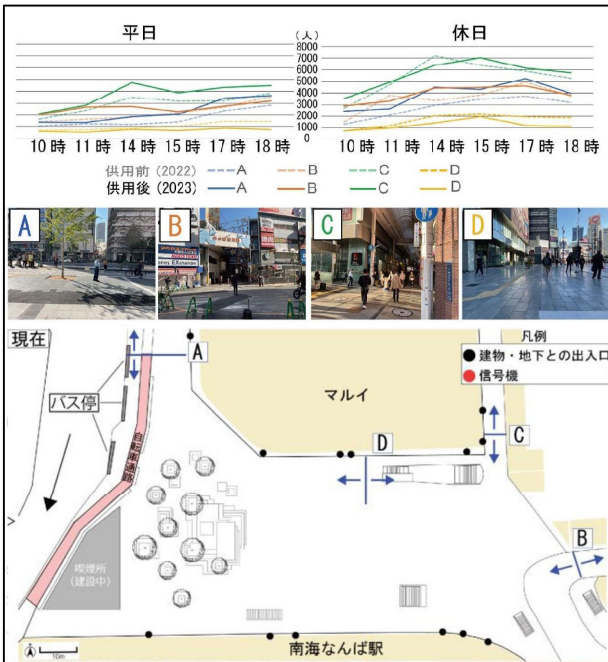


図 3-3.1 交通量調査の結果

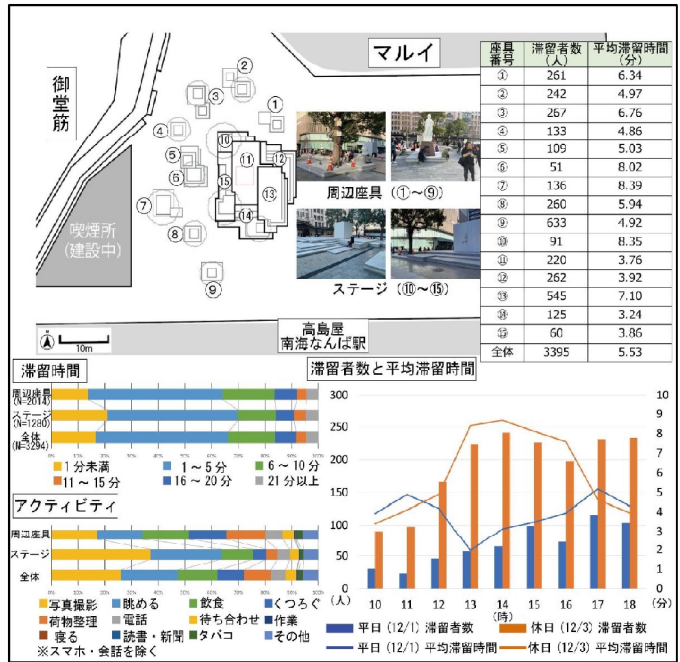


図 3-3.2 滞留行動調査の結果

3-4. 八戸市中心街における公共空間再編と連動した道路空間再編の検討プロセス

八戸市中心街では、八戸ポータルミュージアム「はっち」開業(2011年)を皮切りに、八戸ブックセンター(2016年)、八戸まちなか広場「マチニワ」(2018)などの公共施設が官民連携で再整備・運営されている。また古くから、中心街メインストリートのR340号を舞台とした祭礼、ホコテン等のイベントが行われてきた。このように公共空間の再編や利活用が進められていた八戸市中心街では、R340号の再編（車道削減・歩道拡幅）を見据えた実証実験が2022年から行われた。

本調査では、中心街全体の公共空間再編・利活用からR340号実証実験に至る検討プロセスを市役所担当者へのヒアリングにより調査した。結果、従来より道路をイベント的に活用することはあったものの、当初、道路空間再編は全く意図されていなかったことを把握した。その中で地元大学からまちづくり提案を受けたことで、機運醸成につながり、R340号社会実験を実施することになったことを明らかにした。また、実証実験にあたってはイベント等のノウハウをいかに関係者の連携体制が構築されたこと、その成果がR340号の再編案に反映されていることを把握した。



図 3-4.1 八戸市中心街での取組



4. 新たな制度の動向調査の結果

4-1. 歩行者利便増進道路制度（ほこみち）の事例調査

ここでは、道路空間の街の活性化への活用や賑わい創出等を目的とし、2020年11月に施行された歩行者利便増進道路制度（以下：ほこみち制度）に着目し、その展開プロセスと運営手法を明らかにし、その課題や展望を考察することを目的とした。まず、2021年9月発行の国土交通省道路局「ほこみちのとりくみ」（事例集）に記載される全国の全119路線の歩行者利便増進道路の事例のうち、対象路線、指定日、指定路線区間、有効幅員、利便増進施設、占用主体の属性、占用料等の情報が確認できる79路線に絞った。79路線のうち、路線数の多さと指定日の早さの観点から、仮説として制度展開に積極的と考えられる自治体に着目することとし、松本市、福山市及び熊本市の3都市を抽出した。

松本市、福山市、熊本市において【ほこみち制度に関する制度展開以前の道路空間利活用の実態】【コロナ占用特例時における道路空間利活用の展開】【制度展開の目的】【路線選定のプロセス】【コロナ占用特例から移行した指定路線】【関連する将来ビジョン】【プラットフォーム形成】【利便増進施設のデザインのプロセスと内容】【制度展開を通じた効果】【制度展開を通じた課題】【制度展開の展望】に関する調査項目を体系化し、ヒアリング調査を通じてこれらの実態を明らかにした。なお、松山市には令和5年11月22日、福山市には11月29日、熊本市には令和6年3月18日にヒアリング調査を実施した。

松本市のほこみち指定路線は、国道が国道143号の1路線、県道が松本塩尻線の1路線、市道が1059号線、1095号線、2024号線、2805号線、2518号線、2279号線、2517号線の7路線と全9路線ある（図4-1.1）。1059号線では松本城・三の丸俱樂部が占用主体となっており、利便増進施設としてテーブル、ベンチ、看板が挙げられる。ベンチに関しては、県産材を用いて地元の木工作家がデザイナーとして作成し、占用管理は各店舗が行うなどの事例が確認できた。

福山市のほこみち指定路線は、市道の三之丸2号線、三之丸3号線、福山駅前2号線、元町延広1号線、霞1号線、胡町船町線、福山駅箕沖幹線の全7路線がある（図4-1.2）。福山駅箕沖幹線では福山伏見町商店会が占用主体となっており、利便増進施設として机・椅子が9か所、屋台が8台となっている。特徴として、屋台の貸し出しを行っており、利便増進区域において誰でも利活用可能な場を提供している。

熊本市のほこみち指定路線は、市道の手取本町新市街第1号線（下通アーケード）、新市街下通り2丁目第1号線（サンロード新市街アーケード）、手取本町下通2丁目第1号線（駕町通り）、花畑町安政町第1号線（城見町通り・三年坂）、上通上林町第1号線（上通並木坂）、水前寺公園第1号線（水前寺参道）、東町1丁目画図東2丁目1号線（ピアレスク）のうち「上通アーケード」区間を除く全7路線があ



図 4-1.1 松本市の指定路線



図 4-1.2 福山市の指定路線

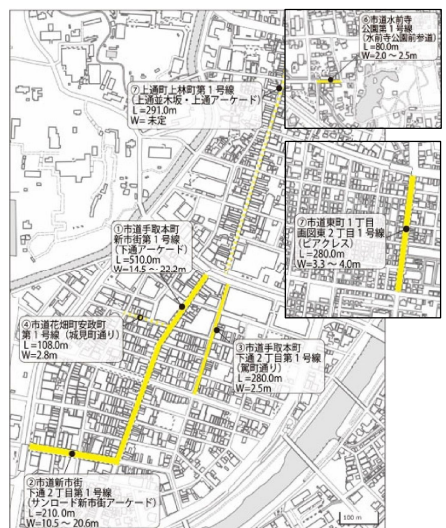


図 4-1.3 熊本市の指定路線

る(図 4-1.3)。ほこみち制度後の利便増進施設として「下通アーケード」の野菜売台、「ピアレスク」での熊本工業高校が制作したベンチを商店街が設置・占用するなどの事例が確認できた。また、占用物については市が許可シールを交付し、占有者が占有物に許可シールを貼付、道路空間での展開を図っている。

例えば、【制度展開の目的】では、3都市ともにコロナ占用特例以降も市民からの要望があり、ほこみち制度への展開が図られた。【プラットフォームの形成】では松本市の「大名町通り」では「松本城・三の丸俱樂部」,「辰巳の御庭」では「緑町町会」と通りごとに占有者はいるものの、行政と地域が議論・調整を行う明確なプラットフォームはなく、年に一回の会合「町場の縁側作戦」の場で情報交換会が行われていることが明らかとなった。福山市では「中心市街地ネットワーク」という地元発意のプラットフォームの存在が明らかとなり、行政職員が事務局を担っている。各路線の占有主体である商店会や商店街振興組合と緩やかなネットワークを構築し、定期的な意見交換を行うなど、合意形成の円滑化にも繋がっている。熊本市では中心市街地のアーケード商店街(新市街・下通り・上通り)を対象に「道路空間環境保全及び活用協議会」を開催、各商店街関係者や商工関係者、金融機関等を委員に、警察・消防・市の各部署(食品保健課・建築指導課・土木総務課ほか)等をアドバイザーとし、イベント等の必要事項の事前調整を行うなど、プラットフォームの役割として機能していることなどが分かった(表 4-1.1)。

表 4-1.1 松本市・福山市・熊本市におけるほこみち制度の展開や運営手法のまとめ

	松本市	福山市	熊本市
制度展開以前の道路空間利活用の実態	● 特に見当たらない	● 久松商店街(12702元町延店1号線)で2000年頃に歩車共存道路の議論が行政と商店街振興組合で行われ空間デザインとして展開	● これまでも地元商店街振興組合等が主催するイベントは定期的に開催され、イベント占用許可を実施 ● 下通アーケード等では、制度展開以前も店外や市道中央部において売台が展開されている区間もみられた
コロナ占用特例時における道路空間利活用の展開	● コロナ期間における飲食店等の規制へ対する施策として運用	● コロナ期間における飲食店等の規制へ対する施策として運用	● コロナ期間における飲食店等の規制へ対する施策として運用
制度展開の目的	● コロナ占用特例以降も継続して市民から道路空間利活用の要望があり、歩行者利便増進制度(ほこみち制度)を適用	● コロナ占用特例以降も継続して市民から道路空間利活用の要望があり、歩行者利便増進制度(ほこみち制度)を適用	● コロナ占用特例の導入において、市から地元商店街等へ制度の周知を図り、制度利用の希望があった団体・路線にコロナ占用特例を適用 ● その後、コロナ占用特例終了のタイミングで地元の意向を確認し、歩行者利便増進制度(ほこみち制度)に移行
路線選定のプロセス	● 占有主体から道路空間利活用の申請があったものを順次指定	● 占有主体から道路空間利活用の申請があったものを順次指定	● 占有主体から道路空間利活用の申請があったものを順次指定 市道上通上林町第1号線(上通並木坂)の「上通アーケード」はほこみち路線でなかったが、市からアプローチを回り令和6年度からほこみち指定(商店街側にも看板等を出すために占用許可が必要である意識醸成)
コロナ占用特例から移行した指定路線	● 市道全7路線(①大名町通り(市道1059号線)、②辰巳の御庭(市道1095号線)、③本町通り(市道2024号線)、④伊勢町通り(市道2805号線)、⑤公園通り(市道2518号線)、⑥市道2279号線、⑦市道2517号線)(2021年にほこみち指定)	● 市道全7路線(①三之丸2号線、②三之丸3号線、③福山駅前2号線)、④元町延店1号線(久松商店街)、⑤蔵1号線(久松商店街)、⑥湖町船町線(本通商店街)、⑦福山駅真沖幹線(伏見町)のうち、①～⑥の6路線(いずれも2021年9月21日にほこみち指定) ● ⑦福山駅真沖幹線(伏見町)はコロナ占用特例からの移行ではなく2022年7月11日に指定	● 市道全7路線(①市道手取本町新市街第1号線(下通アーケード)、②市道新市街下通り2丁目第1号線(サンロード新市街アーケード)、③市道手取本町下通2丁目第1号線(駕町通り)、④市道花畑町改訂第1号線(城見町通り・三年坂)、⑤市道上通上林町第1号線(上通並木坂)、⑥市道水前寺公園第1号線(水前寺参道)、⑦市道東町1丁目自画区画2丁目1号線(ピアレスク)のうち、⑦の「上通アーケード」区間を除く7路線)
関連する将来ビジョン	● 松本城を核としたまちづくり(『松本市総合計画』『松本城三の丸エリアビジョン』)	● 福山駅前利用を通じたまちの活性化(『福山駅前周辺デザイン計画』『福山駅前広場整備基本方針』)	● 『ウォークフル推進事業』の一端として公共空間の賑わい創出を目的としたほこみち制度の導入促進
プラットフォーム形成	● 既存の『お城下町まちづくり推進協議会』『お城周辺地区まちづくり推進協議会第1ブロック』『お城周辺地区まちづくり推進協議会第2ブロック』、松本城三の丸エリアビジョンにおける『三之丸エリアプラットフォーム』は存在するが、ほこみち制度に関連するプラットフォームは見当たらない ● エリア全体の占有者が一堂に介して話し合うプラットフォームはないが、年に1回「街場のえんがわ作戦」という情報交換会でほこみち制度を紹介	● 「中心市街地ネットワーク」(行政職員が事務局を担い、占有主体である商店会や商店振興組合とネットワークを構築) ● 行政と地域が定期的な意見交換を行うなど、合意形成の円滑化にも繋がっている。ネットワークは商店街主体のイベント実施の際など、行政とのやり取りを円滑に図る中間組織としても機能	● 平成22年から中心市街地のアーケード商店街(新市街・下通り・上通り)を対象に「道路空間環境保全及び活用協議会(道路空間活用会議)」を開催。各商店街関係者や商工関係者、金融機関等を委員に、警察・消防・市の各部署(食品保健課・建築指導課・土木総務課ほか)等をアドバイザーとし、3カ月ごと・年4回開催、向こう3カ月のイベントの予定等を共有し、必要事項を事前調整しており、プラットフォームの役割として機能
利便増進施設のデザインのプロセスと内容	● 大名町通りでは地元の木工作家を中心に県産材を使用したベンチの制作・展開が確認された ● その他の指定路線では既製品のベンチを展開	● 福山駅真沖幹線(伏見町)では地元ニーズの高まりから、利便増進区域で利活用可能なまちのシェアスペース「伏見デニム屋台」の制作が行われ、行政との協議や連携も確認できた。 「伏見デニム屋台」は占有主体である伏見町商店会が管理し ● しており、貸与可能である。現地に設置されているQRコードから利用規約や使用料が確認できるとともに、利用予約が可能である。 「伏見デニム屋台」の構想・制作は、伏見町の30~40代店主や事業主が協働で実施。建築関係の関係者も携わっている。	● ほこみち制度後に新たに制作された占有物として「下通アーケード」での野菜売台 ● 「ピアレスク」では熊本工業高校が制作したベンチが商店街に提供、設置・占用 ● 占有物は占有主体(商店街)から提出されるリスト・写真で管理し、占有物件が増える場合はリストを更新・提出。市が許可シールを必要枚数交付し、占有者は占有物に許可シールを貼付。申請・許可は年度単位。24時間設置は不可、店舗等の営業時間の中で管理できるものを認めている
制度展開を通じた効果	● 市が占有主体にアンケート調査を行い新規顧客の獲得や交流機会の創出に寄与している等の意見が示された。また、アンケート調査を通じて、占有主体間での情報交換の必要性も意見に挙げられている	● 現状では効果検証は未実施	● 道路空間活用のイベント(ストリートテラス新市街:2023.3)では、歩行者通行量の増加が確認できたり、参加者からも好評の意見
制度展開を通じた課題	● コロナ禍を経て、飲食店舗内での営業が可能となり、事業展開としても採算がとれるようになり、屋外空間の利活用機会が減少している意見も挙げられている	● 現状では特に見当たらない	● 従来より設置されていた店舗看板等は実態としては違法占用にあたる。市として将来的に道路空間の様々な使い方に発展していけば良いという思いはあるが、占有物のコントロールに課題がある ● 日常面では、立て看板等の設置に関する案件が多く、歩行者が寝られるような空間創出には課題がある
制度展開の展望	● 市がほこみち制度展開の新たな指定路線を検討中	● 市としては、福山駅真沖幹線(伏見町)の利便増進施設「伏見デニム屋台」の事例のように、公共空間を活用し自治会の取り組みとして、自分たちの運営に当てていくといった地元主体の自立したまちづくりや取り組みを支えていきたいとのこと ● 商店会等で活動するプレイヤーが市に相談に来る状況にはあるので、こうした意識醸成に加えて、市も連携しながら地元発意の意向や取り組みが現れるよう支える必要がある	● 指定路線⑤市道上通上林町第1号線(上通並木坂)のうち「上通アーケード」は、コロナ特例を利用していなかった。周辺商店街で歩行者利便増進制度(ほこみち制度)の展開が進むなか、「上通アーケード」においても地元から制度利用の希望があり、令和6年4月から申請を受け占用開始の予定 ● 今後、銀座通り、シャワー通りでの指定を検討中である。銀座通りは車通りが多いなど、警察と慎重に協議している。また、沿道に銀行が多くほこみち制度以後、活発に利活用されるのか検証する必要がある



4-2. 歩行者利便増進道路制度（ほこみち）の指定・運用に関する全国調査

4-1 で対象とした「ほこみち」は、2023年5月時点で119路線（国土交通省道路局「ほこみちのとりくみ」、2021年9月）が指定され、一定の実績が蓄積されてきた。そこで、本調査では、ほこみちの指定・運用に関する全国的な動向を把握・分析するため、全国アンケート調査を実施した。アンケートの対象は、ほこみちを指定・運用する全国の道路管理者（全48者）である。アンケート調査票の設計にあたっては、4-1の成果を参考にした。アンケートの概要は表4-2.1の通りである。以降より、アンケート結果のうち主要なものを抜粋して示す。

①路線の基礎情報

ほこみちは、路線指定後に歩道等に特例区域を定め、占有希望者が占有を申請しこれに対して占有許可が出される。ほこみちの進捗として特例区域の指定状況、占有申請・許可の状況を見ると、特例区域指定済で占有申請・許可ありが64%（67路線）である。指定路線の延長は様々である。歩道幅員は、4m以上あるものが多かった。また、通行規制による歩道化等も含めて全面を歩道化している路線が24%あった（商店街のアーケード等と思われる）。

②ほこみち指定までの経緯

ほこみち以前から利活用が行われていた路線は、コロナ禍以前26%、コロナ禍契機（いわゆるコロナ特例占有）57%である。コロナ禍以前から利活用があった27路線では、その経緯として地元発意が56%に対し、ほこみち指定の経緯における地元発意は37%と少ない。ほこみちにおいては、行政（道路管理者や地元市区町）が主導的な役割を果たしていることを明らかにした。

ほこみち指定の狙いは多様である。賑わいの創出が90%を占めることは制度の主旨を鑑みると当然と言えるが、これ以外にも公共空間の有効な活用、沿道店舗や周辺エリアの活性化が狙いとなっている路線が5割程度ある。一方、この狙いに対応する効果検証の調査状況としては、ほこみちの検証に関して何らかの調査やデータ蓄積等を行っている路線は多くはなかった。ほこみちの狙いが多様である反面、その効果を適切に検証する手法が共有されていないと考えられる。

表 4-2.1 アンケートの概要と配布回収状況

配布・回収の期間	2023年11月1日～12月31日				
調査の方法	紙面の郵送（e-mailで補足）				
調査の形式	選択式（SA：単一回答、MA：複数回答）、自由記述式				
調査の内容	路線の基本情報	・ほこみちの進捗（特例区域の指定状況、占有申請・許可の状況） ・指定路線の延長、歩道幅員構成、道路空間再編等の有無			
	路線の周辺状況	・路線周辺の土地利用、路線沿道の土地利用・建物用途、沿道敷地との関係			
	ほこみち指定までの経緯	・ほこみち指定以前の道路空間利活用の状況／その経緯／その制度 ・ほこみち指定の経緯、ほこみち指定の狙いと達成状況、効果検証の状況			
	道路空間利活用の状況	・ほこみちによる占有者の特性、占有物の内容 ・イベント時の占有物の内容、イベントの内容や出店者 ・占有物のデザイン調整等の方法など			
都市政策との関係	・上位調整計画との関係 ・ほこみち指定路線周辺エリアの都市政策上の位置付け				
配布・回収状況	道路管理者別	配布	回収数	回収率	
	国交省・地方整備局	5者	8路線	5者（100%）	8路線（100%）
都県	14者	25路線	14者（100%）	24路線（96.0%）	
市	29者	86路線	25者（86.2%）	73路線（84.9%）	
小計	48者	119路線	44者（88.8%）	105路線（88.2%）	
ほこみちが位置する市区町別	東北地方	3市	5路線	3市（100%）	5路線（100%）
関東地方	4市区	10路線	4市区（100%）	10路線（100%）	
中部地方	17市町	41路線	17市町（100%）	40路線（97.6%）	
近畿地方	6市	8路線	4市（66.7%）	6路線（75.0%）	
中国地方	9市	40路線	7市（77.8%）	32路線（80.0%）	
九州地方	4市	15路線	3市（75.0%）	12路線（80.0%）	
小計	43市区町	119路線	38市区町（88.4%）	105路線（88.2%）	

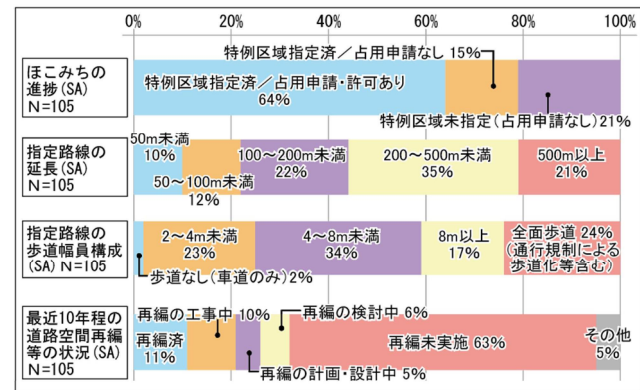


図 4-2.1 路線の基礎情報

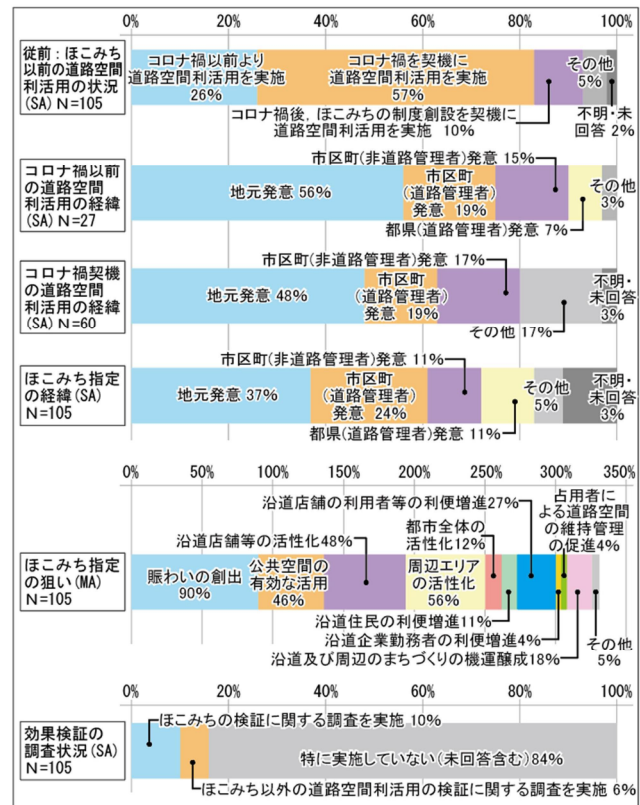


図 4-2.2 ほこみち指定までの経緯

③ほこみち占用の状況

ほこみち占用の状況は、特例区域が指定済で占用申請・許可がある 67 路線を対象とする。

占有者の組織形態は商店街組織、その構成メンバーは沿道の地権者・賃借者が多いが、他にも行政関係者など多様である。占有者の地域貢献活動は、占用物の管理等に関わるものが多いが、道路清掃等、公的な取組も確認した。

ほこみちによる占用物は、テーブルセット、ベンチなど、屋外での休憩や食事、滞在・滞留を意図した施設が設置されている場合が多いことが分かった。これに看板・広告物、販売台・陳列台が続く。これらは一般に商店街をはじめ道路上に設置されることが多い物件であり、これまで道路に設置されていた物件を適切に占用物として扱えるなど、制度的・受皿的な機能をほこみちが有すと考えることができる。

賑わい創出や良好な景観形成のための占用物の内容やデザインの調整状況について、僅かであるが取組状況を把握した。デザインの調整に関しては、地元団体による自主的な占用物の製作、地元大学と連携した占用物のデザイン・製作、景観条例等に則した占用物のデザイン・製作等が挙げられた。デザインの対象は、ベンチやパラソルが多く、これらはデザインによって使われ方が変わったり、アイレベルにあるため景観に影響しやすいと考えられるものである。これら占用物のデザイン配慮の状況も確認した。

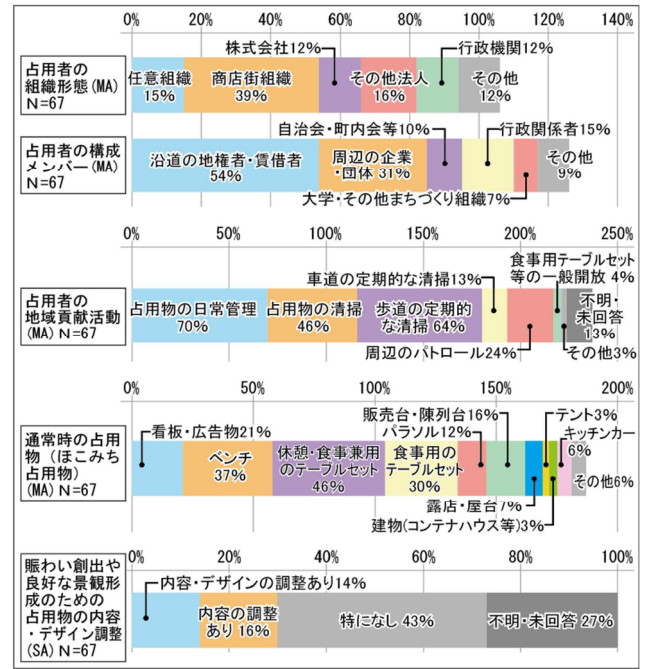


図 4-2.3 ほこみち占用の状況

5. まとめと今後に向けて

先進事例調査では、道路空間の再編・利活用による人々の滞留行動等への効果、景観面への効果等を解明した。これらの成果は、今後、新たに道路空間の再編や利活用に取り組む際、参考になるものとする。

新たな制度の動向調査では、ほこみちの事例調査、全国調査を行った。事例調査からは、ほこみち制度がこれまでの道路空間における占用や取り組みの受皿として機能していることや、新たな道路空間の利活用のニーズや展開を図る際の手段としての役割を担っている特徴を示した。全国調査からは、占用物は滞在・滞留施設が多いこと、受皿的な機能も有すること、占用物のデザイン配慮の状況等を明らかにした。実際に新たにほこみちを指定・運用する際には、滞在・滞留の拡大を目指すのか、占用物による街路景観のトータルデザインを優先するのか等、方向性に違いが出てくると考えられる。そこで、今後は先進事例調査の結果と融合させ、人々の滞留行動を生むほこみちの使い方、景観への効果が高いほこみちの使い方を模索するなど、新たな展望が考えられる。そのためにも、ほこみちの制度展開はまだ初動期と言えることから、今後も継続的にその動向を調査・分析する必要がある。

【参考文献】

- 1) 国土技術政策総合研究所：道路空間再編・利用事例集，2018。
- 2) 国土交通省都市局：官民連携による街路空間再構築・利活用の事例集，2018。
- 3) 国土交通省都市局：街路空間等の再構築・利活用のプロセス事例集 ～中小都市版～，2018。
- 4) 出口ほか：ストリートデザインマネジメント-公共空間を活用する制度・組織・プロセス，学芸出版社，2019。
- 5) 野原ほか：街路・沿道連携型ストリートデザインマネジメントの展開プロセスに関する研究，都市計画論文集，51(3)，pp611-618，2016。
- 6) 三浦ほか：ニューヨーク市「ラゾ」プログラムによる街路利活用とマネジメント，土木学会論文集 D3，72(2)，pp138-152，2016。



# 下水汚泥焼却灰からの新規リン回収システムの開発

福井工業大学建築土木工学科 教授 高島正信

## 1. はじめに

リンは生物にとって必須元素であると同時に、枯渇が懸念される元素でもある。わが国に輸入されるリンは食糧、肥料、飼料などとして年間約 56 万トンにのぼり、そのうち約 1 割が下水道に流入しているが、ほとんどが焼却灰として埋立処分されたり、公共用水域に放流されたりする<sup>1)</sup>。リンの 100% を輸入に頼る日本にとって、リンを効率的にリサイクルできれば、資源の有効活用や環境汚染の防止に貢献できる。さらに昨今では、ウクライナ-ロシア戦争が開始されて以来、肥料の不足と高騰が問題となっている（図 1 参照）。

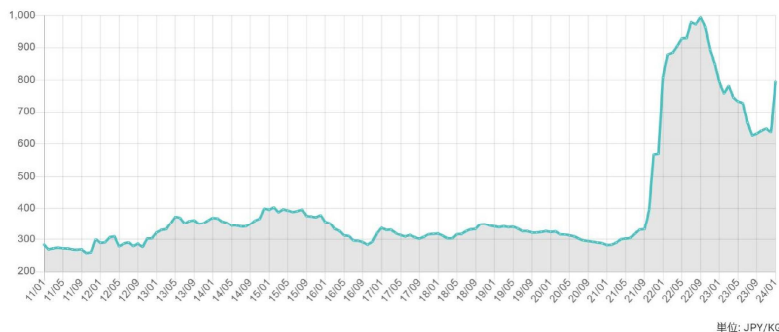


図 1 リン輸入 CIF 価格の推移<sup>2)</sup>

下水汚泥焼却灰は、10%近いリン (P) を含み、膨大な量が日々排出されていることから、リン回収の絶好の対象となりうる。下水汚泥焼却灰を対象とした場合、実用化された方法として灰アルカリ抽出法があり、岐阜市と鳥取市で稼働している。これに対し、国内に実施はないが灰酸抽出法も存在し、100% 近くのリン溶出が可能であるものの、リンと一緒に溶出する他金属の分離や副産物の処理などが課題である。一方で、焼却灰に含まれる鉄やアルミニウムは、下水処理においては無機凝集剤として有用である。

海外では、灰酸抽出法に基づく方法が下水汚泥焼却灰に適用され、複数の実基が建設されているということである<sup>3)</sup>。また、国内における実用化レベルのシステムとして新潟大学<sup>4)</sup>で開発された酸とアルカリを用いる二段階溶出などが発表されているが、詳細が不明な部分もある。

本研究の目的は、下水汚泥焼却灰に強酸を添加する灰酸抽出法に基づき、沈殿分離法、吸着法という酸抽出液からのリン回収方法について実験的に工程・条件を検討し、新規リン回収システムを構築することである。今回は、リンとともに鉄およびアルミニウムも回収の対象とした。

## 2. 主な下水汚泥からのリン回収技術

現在、国内で実用化されている汚泥処理系における主なリン回収技術を表 1 にまとめ、以下には MAP 晶析法と灰アルカリ抽出法について概説する。

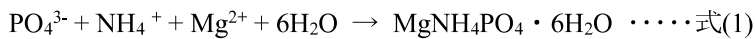
### 2.1 MAP 晶析法

晶析 (crystallization) とは、溶解度の濃度依存性、温度依存性などを利用して溶液から目的成分を結晶化させ、選択的に分離する操作のことで、純度の高い結晶が得られる。汚泥処理系における脱水ろ液や嫌気性消化汚泥からのリン除去・回収に MAP 法が適用されている。この方法は、リン酸 (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) をリン酸

表 1 汚泥処理系における主な実用化リン回収技術

種類	方法	設置場所
脱水ろ液	MAP 晶析法	島根県、福岡市
嫌気性消化汚泥	MAP 晶析法	神戸市
焼却灰	灰アルカリ抽出法	岐阜市、鳥取市

マグネシウムアンモニウム (Magnesium Ammonium Phosphate ; MAP) の結晶として回収し、処理対象から除去する技術である。回収された MAP 結晶は、肥料三大要素 (窒素、リン酸、カリ) のうちの窒素とリン酸を含むことから、化成肥料として肥料登録することで、資源としての有効利用が可能となる。本法の反応は、式(1)で表される。



嫌気性消化汚泥のように固形物を多量に含む場合にも適用可能であり、全リン回収率として 40%程度が報告されている<sup>5)</sup>。

## 2.2 灰アルカリ抽出法

灰アルカリ抽出法は、焼却灰に水酸化ナトリウム溶液を添加してリン酸イオンを溶出させるもので、リン酸は焼却灰中のリン酸鉄とリン酸アルミニウムから主に溶出すると推測される。抽出液と焼却灰の混合物は、その後脱水機などを用いて固液分離し、液体に消石灰を加えることによってリン酸カルシウムを主成分とするリン酸塩を得る。

回収リン酸塩は肥料として登録・販売することができる。例えば、最初に本設備が設置された岐阜市<sup>6)</sup>では、「岐阜の大地」という名称で JA を通じた販売が行われている。また、処理灰は建設資材として再利用することができ、トータルシステムで見たときの本法の長所となる。下水汚泥焼却灰からの全リン回収率として 50%程度が得られるようである。

## 3. 実験方法

実験はすべて室温で実施し、酸溶液には有害金属分析用、その他の薬品には試薬特級、希釈水などには蒸留水を使用し、容器類は事前に酸洗浄した。各液の pH 調整には 10 mol/L 水酸化ナトリウムと 10 mol/L 塩酸を原則使用し、状況によってはそれらより低濃度のものも使用した。沈殿物と液体の分離には高速遠心を用い、その条件は 10,000 rpm、5 分間とした。また、沈殿物は一晩以上乾燥してその後の工程に供した。

### 3.1 供試焼却灰

下水汚泥焼却灰は、福井県北部にある下水汚泥焼却施設から採取し、乾燥後使用した。下水汚泥の由来は、福井市など近隣の下水処理施設が中心である。

### 3.2 灰酸抽出

塩酸の濃度と量の影響をみる実験では、焼却灰 10 g と濃度 1 または 2 mol/L の塩酸 25、50 または 100 mL をプラスチック容器に入れ、約 1 日間、80 rpm で振とうし、数時間静置した後の上澄み液を抽出液とした。大量に作成する場合は、ガラスビーカーと大型スターラーを使用した。

### 3.3 沈殿分離法

灰酸抽出液中のリン酸を、一旦主にリン酸鉄およびリン酸アルミニウムの沈殿として分離し、その後にリンはリン酸カルシウム (固体)、鉄は水酸化鉄 (固体)、アルミニウムはアルミン酸イオン (液体) として分別回収する方法である (図 2)。リン酸鉄、リン酸アルミニウムとリン酸カルシウムの沈殿が優先するおおよその pH 範囲を表 2 に示す。本法は、表 2 などを参考に、一次沈殿 pH を酸性側にしてできるだけ

リン酸カルシウムおよび重金属水酸化物の沈殿形成を排除することをねらいとしている。リン酸カルシウムに含まれるリンは、その後の工程では原理上回収できないものである。

原則、反応にはガラスビーカー、撹拌には速度約 300 rpm のスターラーを使用し、フィルムで覆って水分の蒸発を防いだ。実験の手順は、以下のようなものである。

- 1) 酸溶出液 75mL に 10 mol/L 水酸化ナトリウムを加え pH3.0、3.5、4.0 または 5.0 で約 5 時間、スターラー撹拌した。その後遠心分離によって上澄み液を分離し、一次沈殿物（リン酸鉄+リン酸アルミニウム分画）を得た。
- 2) 乾燥した沈殿物 0.3 g に 1 mol/L 水酸化ナトリウム 30 mL を加え、約 5 時間、80 rpm で振とうした。その後遠心分離によって二次沈殿物（水酸化鉄分画）を分離し、二次上澄み液を得た。
- 3) 二次上澄み液に塩化カルシウム二水和物をリンに対するモル比で約 1.8 倍加え（Ca/P=約 1.8）、約 5 時間、スターラー撹拌した。その後遠心分離によって三次沈殿物（リン酸カルシウム分画）と三次上澄み液（アルミニウム溶液分画）を分離した。

一次沈殿物からのアルカリ添加によるリン酸溶出をみる実験では、一次沈殿物0.3 gと濃度0.25、0.5、1、2または5 mol/Lの水酸化ナトリウム溶液15または30 mLをプラスチック容器に入れ、約1日間、80 rpmで振とうし、遠心後の上澄み液を溶出液とした。

### 3.4 吸着法

リン酸吸着剤には多孔質水酸化鉄（高橋金属㈱、滋賀県長浜市）を用いた。その写真を図3に示す。手順は酸溶出→吸着→脱着→再生であり、概略は次のようである。まず酸溶出液にリン酸吸着剤を加えて pH 約 2.5 に調整し、80 rpm で振とうしながら約 1 日間吸着させた。次いで、水を切ったリン酸吸着剤に 10%水酸化ナトリウム溶液を加えて 80 rpm で約 1 日間反応させ、吸着したリン酸を脱着した。なお、リン酸吸着剤の再生には塩酸を使用し、pH が約 2.5 で安定すると再生完了とした。

鉄とアルミニウムの回収は、pH 調整による沈殿分離を利用した。リン酸吸着後の酸溶出液に水酸化ナトリウム溶液を加えて pH 約 6 とし、形成した沈殿物を遠心分離によって分離した後、その沈殿物を塩酸で溶解したものを鉄+アルミニウムの回収溶液とした。

### 3.5 分析方法

pH 測定には、複合ガラス電極（9625-10D、HORIBA）を接続した pH 計（F-53、HORIBA）を用いた。酸性側の pH 校正には校正液 1.68 を使用した。PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P は、アスコルビン酸法（Standard Methods<sup>®</sup> 4500E）により分光光度計（DR3900、Hach）を用いて測定した。金属濃度は、原子吸光光度計（Z-5010、日立ハイテクノロジーズ）によるフレイム法で定量した。また、焼却灰元素含有量の分析には、硝酸-塩酸湿式分解法（Standard Methods 3030F）を採用した。なお、沈殿物は乾燥後、希薄酸溶液に溶解して分析に供した。

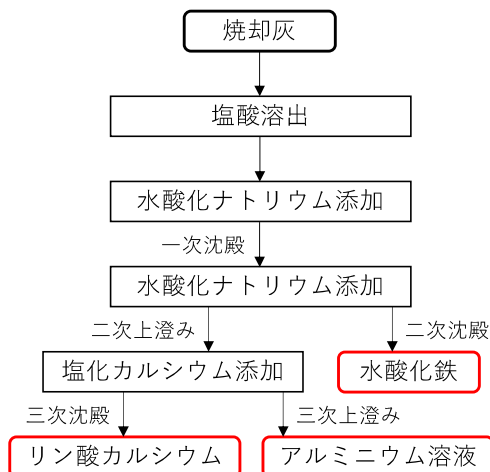


図2 沈殿分離法の手順

表2 リン酸沈殿物の pH に対する優先種<sup>7)</sup>

pH	優先種
～約 3	リン酸鉄
約 3～6	リン酸アルミニウム
約 6～	ヒドロキシアパタイト



図3 リン酸吸着剤の写真

4. 実験結果および考察

4.1 灰酸抽出

塩酸を通じて添加された焼却灰 1 g 当たりの水素イオン量とリン酸溶出率を図 4 に示す。また、分析した元素について酸溶出液の平均濃度を表 3 に示す。肥料の品質評価では数種類の重金属類が規制されるが（後出の表 7 参照）、ここではそのうち Cd、Ni、Cr および Pb を測定対象とした。

図 4 からわかるように、水素イオン添加量が増すにつれリン酸溶出率は上昇し、水素イオン添加量 0.010 mol/g 以上でリン酸溶出率がほぼ 100% に達した。これは焼却灰からのリン酸溶出は酸の種類によらずリン量当たりの水素イオン添加量で決定されるという大下ら<sup>9)</sup>の報告と一致する。この結果に基づき、その後の実験では 1 mol/L 塩酸溶液を L/S 比 10 で適用した。後述するように、後段のアルカリ工程を経ることで一次沈殿物からの重金属類排除が期待できるので、この工程に廃酸を利用して薬品費用を節約できる可能性がある。

4.2 沈殿分離法

1) 一次工程

今回、酸溶出液からの一次沈殿（リン酸鉄+リン酸アルミニウム画分）の pH として、3.0、3.5、4.0 および 5.0 を検討した。主な反応は式(2)および(3)のように考えられ、pH 上昇につれてリン酸鉄とリン酸アルミニウムの沈殿物が形成する。



両式におけるモル比より、本法が成り立つには酸溶出液中 Fe と Al の合計モル数が PO<sub>4</sub>-P のモル数を超えていなければならない。表 3 から (Fe+Al)/P モル比は平均 1.1 と、わずかながら 1 を上回っていた。

一次沈殿後の上澄み液中における残存濃度を、主要元素について図 5 にプロットする。図より、PO<sub>4</sub>-P は pH4.0 以上で陽イオンとの沈殿によってほぼ消失している。陽イオンについては、pH の上昇につれ Fe と Ca が徐々に低下していたのに対し、Al は pH3.0 の時点ですでにかなり低くなっていた。一般にこれら陽イオンとリン酸の沈殿は pH とともに増加し（残存濃度は低下し）、また、表 2 に示すように、低めの pH ではリン酸鉄の形成がリン酸アルミニウムより優先すると予想された。しかし、今回の結果はリン酸アルミニウム沈殿が優先していたことが示唆される。筆者による以前の研究<sup>10)</sup>では予想通りであったので、この理由は不明である。また、今回は沈殿物と上澄み液の固液分離として高速遠心分離を採用したが、pH3.0~3.5 では固液分離性が良くなく、その影響も少々あると思われた。実規模になった場合を含め、固

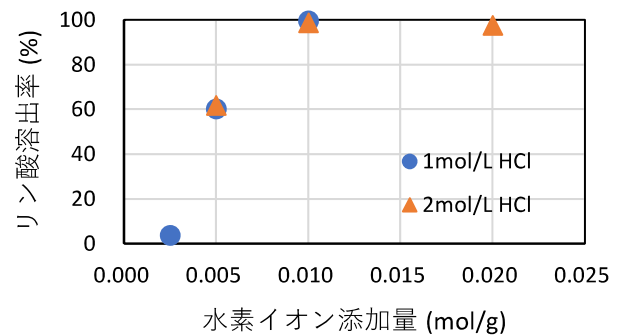


図 4 塩酸溶液による下水汚泥焼却灰からのリン酸溶出率

表 3 酸溶出液の平均組成

成分	濃度
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	5,320 ± 270
Fe (mg/L)	4,300 ± 280
Al (mg/L)	2,980 ± 150
Ca (mg/L)	5,190 ± 450
Cd (mg/L)	0.042 ± 0.003
Ni (mg/L)	4.9 ± 0.5
Cr (mg/L)	9.3 ± 0.2
Pb (mg/L)	44 ± 1

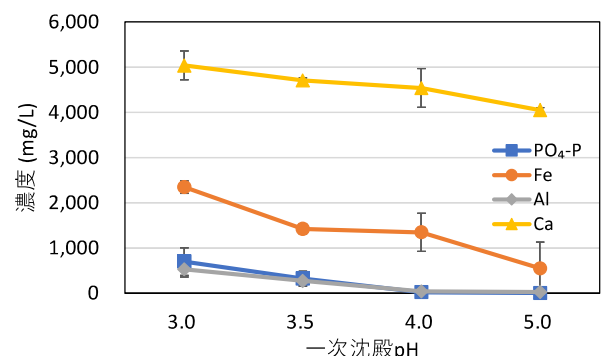


図 5 一次工程における主要元素の上澄み液中残存濃度

液分離法については検討課題である。

2) 二次工程およびアルカリリン酸溶出

得られた一次沈殿物に強いアルカリ溶液を加えると、鉄は水酸化物として沈殿し、アルミニウムはアルミン酸イオンとして溶解し、リン酸はどちらの場合も放出され溶解すると推定される (式(4)、(5))。

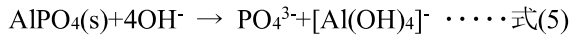
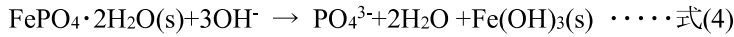
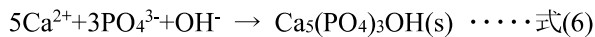


図 6 には、一次沈殿物からのアルカリリン酸溶出の結果を示す。一次沈殿物重さ当たりの水酸化物イオン量が 0.10 mol/g においてリン酸溶出率が最大となった。この結果に基づき、本研究では一次沈殿物に対し 1 mol/L 水酸化ナトリウムを水酸化物イオン量 0.10 mol/g になるように添加した。

3) 三次工程および回収率

二次沈殿後の上澄み液にカルシウム塩を加えると、リン酸カルシウム (ヒドロキシアパタイト) が沈殿し (式(6))、遠心分離によってリンを含む沈殿物とアルミン酸イオンが溶解した上澄み液に分離できる。



リン酸カルシウム、水酸化鉄、アルミニウム溶液の各画分でそれぞれ回収されたリン、鉄およびアルミニウムの回収率を図 7 に示す。式(2)~(6)などの反応は pH 値で重なる部分もあるため、完全に分別回収するのは困難である。図 7 より、酸溶出液からの平均リン回収率は一次沈殿 pH3.5~4.0 で 80%前後と高くなり、最大は pH4.0 において 82%に達した。国内で唯一実用化された灰アルカリ抽出法のリン回収率は 50%付近なので<sup>9)</sup>、それを上回っていた。

この結果には一次沈殿 pH が大きく影響していると考えられ、pH 4.0 は初期の灰酸抽出法に関する研究である高橋ら<sup>11)</sup>と同じ最適 pH 値である。一次沈殿後の残存濃度 (図 5) と水質化学の理論を考慮すると、pH が上がるとリン酸鉄+リン酸アルミニウムの沈殿が増加し、リン回収率が高まるはずである。その一方で、一次沈殿 pH の上昇はリン酸カルシウム沈殿を増加させ、この分はリン回収されない (水酸化鉄分画に移行)、リン回収率が低下すると推測される。一次沈殿 pH 5.0 でのリン回収率の低下は、この影響が出たものと考えられる。

水酸化鉄画分の鉄については回収率 55~90%、アルミニウム溶液画分のアルミニウムについては回収率 75~82%と、一部を除きまずまずの回収率が得られている。この場合も一次沈殿 pH が影響し、特に鉄については一次沈殿後の上澄み残存濃度が高

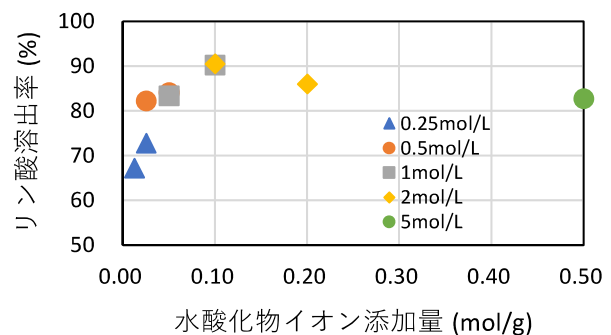


図 6 水酸化ナトリウム溶液による一次沈殿物からのリン酸溶出率

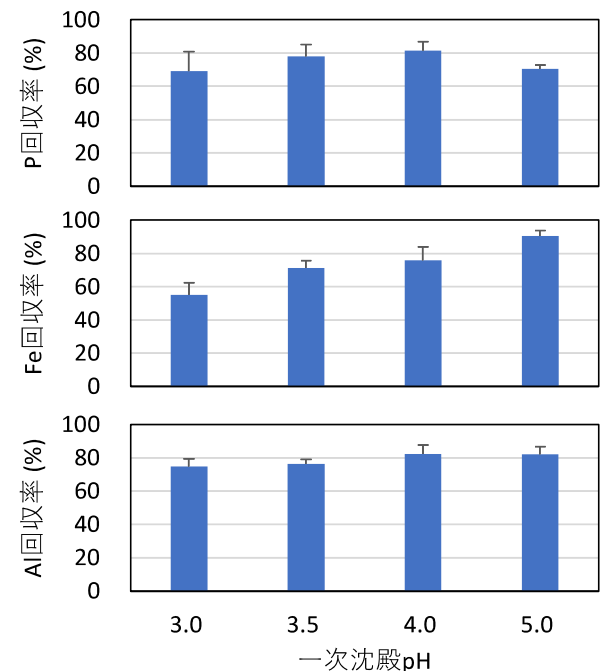


図 7 各画分で得られたリン、鉄およびアルミニウムの回収率 (上からリン酸カルシウム画分中のリン、水酸化鉄画分中の鉄、アルミニウム溶液画分中のアルミニウム)

いと回収率が低くなる傾向が顕著であった。一方、アルミニウムについては、一次沈殿上澄み液において87%以上も除去されていたことから、一次沈殿 pH の回収率への影響が小さかったと考えられる。

なお、全工程を通じたリン、鉄およびアルミニウムの回収率を、一次沈殿後の上澄み液と各画分に存在する量を合計することにより表 4 に示す。算出された全工程回収率の平均はおよそ 95%から 101%の範囲にあり良好であった。

表 5 には得られたリン酸カルシウム沈殿物の平均組成、表 6 には水酸化鉄沈殿物とアルミニウム溶液の平均組成をまとめる。また、表 7 には参考資料として、農林水産省告示<sup>12)</sup>において副産肥料に対して広く適用される有害成分の許容値を示す。測定成分について、リン酸カルシウム沈殿中の有害重金属類は許容値よりおよそ 20~300 倍以上低く、肥料利用が可能になると思われる。また、鉄およびアルミニウムについてみると、一次沈殿 pH の上昇とともに含有率が高まっており、一次沈殿物により多く取り込まれたことが原因となっていると思われる。

表 6 より、水酸化鉄沈殿とアルミニウム溶液については、それぞれの画分に鉄、アルミニウムが濃縮されているのがわかる。その一方で、特に水酸化鉄画分では、他成分も多く含有されており、純度としては低いものであった。重金属を含む金属の多くは、アルカリ pH で水酸化物として沈殿しやすく、本法においては一次沈殿工程で沈殿物に含有されたものはその後の水酸化鉄画分に集約されることになる。この水酸化鉄画分を含めすべての画分において重金属類やカルシウムを徹底的に減少させるには、手順が複雑化

表 4 全工程におけるリン、鉄およびアルミニウムの回収率

	一次沈殿 pH			
	3.0	3.5	4.0	5.0
P (%)	98 ± 5	100 ± 10	99 ± 4	101 ± 3
Fe (%)	95 ± 10	99 ± 10	98 ± 10	101 ± 6
Al (%)	99 ± 10	95 ± 5	97 ± 5	99 ± 4

表 5 得られたリン酸カルシウム沈殿物の平均組成

	一次沈殿 pH			
	3.0	3.5	4.0	5.0
P (%)	11 ± 1	10 ± 1	10 ± 1	9.5 ± 1.8
Fe (%)	0.094 ± 0.022	0.12 ± 0.02	0.13 ± 0.01	0.16 ± 0.04
Al (%)	0.66 ± 0.43	0.93 ± 0.53	0.84 ± 0.34	1.8 ± 0.6
Ca (%)	28 ± 2	25 ± 2	24 ± 2	23 ± 4
Cd (%)	<0.0002			
Ni (%)	<0.003			
Cr (%)	<0.008			
Pb (%)	<0.004			

表 6 得られた水酸化鉄沈殿およびアルミニウム溶液の平均組成

		一次沈殿 pH			
		3.0	3.5	4.0	5.0
水酸化鉄沈殿	P (%)	5.5 ± 0.2	4.8 ± 0.6	4.6 ± 0.1	6.7 ± 2.2
	Fe (%)	19 ± 3	18 ± 1	19 ± 2	17 ± 2
	Al (%)	2.1 ± 0.1	2.2 ± 0.1	2.4 ± 0.1	2.3 ± 0.4
	Ca (%)	7.3 ± 2.1	5.8 ± 2.9	6.4 ± 2.2	5.6 ± 1.8
アルミニウム溶液	P (mg/L)	170 ± 30	86 ± 86	81 ± 67	110 ± 60
	Fe (mg/L)	1.0 ± 0.4	0.73 ± 0.09	1.5 ± 0.6	1.1 ± 0.5
	Al (mg/L)	2,100 ± 100	2,300 ± 100	2,500 ± 200	2,200 ± 400
	Ca (mg/L)	7.6 ± 3.8	21 ± 17	21 ± 18	48 ± 59



するが、別途それらを除去する工程などを組み込む必要があると思われる（例えば、カルシウムの石こうとしての除去）。

汚泥処理などでの凝集剤は通常数%の濃度で利用され、得られたアルミニウム溶液中のアルミニウム濃度は 0.2%強と低いものであった。今回、アルミニウムは溶液のまま回収したが、pH 中性に調整などすれば沈殿乾燥物として回収でき、用途が広がる可能性がある。

下水汚泥などからのリンの分離回収はコストのかかることが問題視されている。しかしながら、岩手県<sup>13)</sup>による精力的な研究では、灰酸・灰アルカリ抽出法での使用に適当な廃酸および廃アルカリが見出されており、それらを利用すれば少なくとも薬品コストの削減は見込められると思われる。

4.3 吸着法

図 8 に、吸着剤によるリン酸吸着速度を示す。1 時間で大半が吸着され、その後緩やかになった。この結果を基に、吸着時間約 24 時間（1 日）を採用した。

今回は酸溶出液を希釈し、リン酸濃度約 1400 と 2900 mg/L を用いた。本法においては、リン、鉄およびアルミニウムは液体の状態では回収され、さらに鉄とアルミニウムは混合されたままである。得られた回収率を図 9 に示す。リン回収率は初期リン酸濃度約 1400 mg/L で約 83%と良好であったが、同約 2900 mg/L で約 71%に低下した。鉄は 70%前後、アルミニウム 90%前後と、吸着法では両元素とも比較的良好な回収率が得られた。製造会社<sup>14)</sup>によると、 $PO_4^{3-}\text{-P}$  が数千 mg/L 程度まで適用可能なようであるが、リン酸濃度が上がると妨害物質の濃度も上がるためその悪影響が考えられる。初期リン酸濃度に比例して吸着剤の必要量が増えるうえ、リン回収率も低下するため、適用できるリン酸濃度に限界があると思われる。

5. 結論

本研究では、下水汚泥焼却灰の酸溶出液に対して沈殿分離法と吸着法を適用し、新規のリン回収システムの構築を試みた。また、副産物として鉄とアルミニウムの回収についても検討を行った。得られた結果を整理すると、以下のようなものである。

1) 沈殿分離法

- ・下水汚泥焼却灰への塩酸および水酸化ナトリウムの添加と沈殿物の遠心分離を組み合わせ、三段階から

表 7 農林水産省告示による普通肥料の許容含有量の例（副産肥料のリン酸  $P_2O_5$  含有率 25%を仮定した場合<sup>12)</sup>）

成分	許容値
As (%)	0.10
Cd (%)	0.00375
Ni (%)	0.25
Cr (%)	2.5
Ti (%)	1.0
Hg (%)	0.0025
Pb (%)	0.15

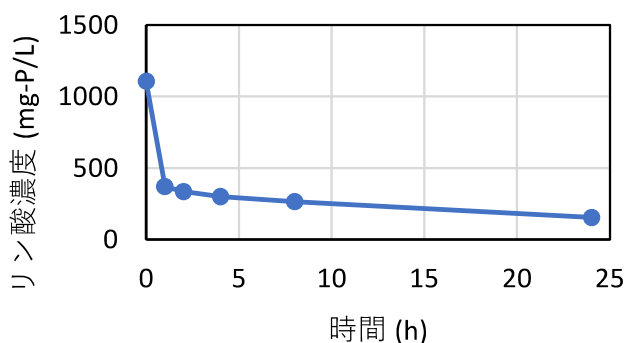


図 8 吸着法におけるリン酸濃度の変化

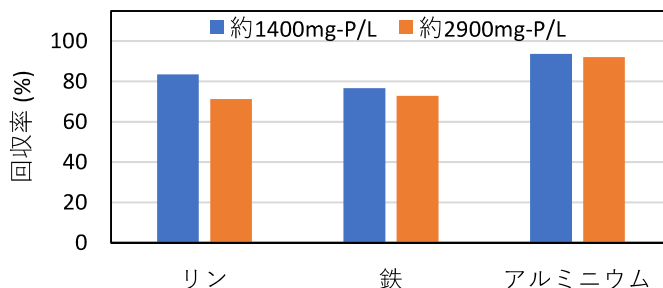


図 9 吸着法による回収率まとめ

なるリン、鉄およびアルミニウムの回収システムを考案した。

- ・リン回収率は最大 82%に達することが確認され、このときの一次沈殿 pH は 4.0 であった。
- ・得られたリン酸カルシウム沈殿は重金属類に関して含有量が十分に低いものであった。
- ・鉄とアルミニウムについては 80%前後の回収率が得られたが、他成分の混合が多かった。

## 2) 吸着法

- ・主対象のリンについて 80%以上の回収率が得られる条件が見出された。
- ・酸溶出液のリン酸濃度が上昇すると、本法は不利になることが認められた。

今後は経済性の検討が必要であり、特に水酸化ナトリウムをはじめとする薬品、沈殿物と上澄み液を分ける固液分離などの費用が課題となる。薬品については、廃酸・廃アルカリなどの再利用が有力な候補の一つになる。また、リン回収後の残液（一次上澄み液）の処理処分や処理灰などのリサイクルについても検討を要する。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：下水道におけるリン資源化の手引き、2010.
- 2) 財務省：貿易統計リン輸入 CIF 価格の推移、2024.
- 3) Cohen, Y., Enfält, P. and Kabbe, C.: Production of clean phosphorus products from sewage sludge ash using the ash2phos process, International Fertiliser Society Conference, Brussels, Belgium, 5th June, 2019.
- 4) 金熙濬：下水汚泥灰からリン系肥料製造と残渣の資源化、新潟大学地域創生推進機構、2018.
- 5) 古賀大輔、荻野隆生：下水消化汚泥からのリン回収技術、エバラ時報、No. 249、8-13、2015.
- 6) 中川博：岐阜市における下水汚泥焼却灰からのリン回収事業、水環境学会誌、Vol. 34(A)、16-20、2011.
- 7) Stumm, W. and Morgan, J. J.: *Aquatic chemistry*, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York, 1996.
- 8) APHA, AWWA and WEF: *Standard methods*, 2000.
- 9) 大下和徹、岩下真理、高岡昌輝、武田信生：下水汚泥焼却灰からの湿式リン抽出方法の体系化、環境工学研究論文集、Vol. 40、395-404、2003.
- 10) 高島正信：下水汚泥焼却灰からのリン酸鉄を介したリン回収の基礎検討、第 49 回日本水環境学会年会、493、2015.
- 11) 高橋正昭、加藤進、男成妥夫、田城寺英夫：各種焼却灰からのリン、金属等資源回収技術開発研究 (V) - 下水汚泥焼却灰からのリン酸塩回収方法、三重県環年報、No.4、27-31、2002.
- 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、第 1053 号、2023.
- 13) (地独) 岩手県工業技術センター：いわて発戦略的地産地消型リン資源循環システムの研究、環境研究総合推進費補助金研究 事業総合研究報告書、2013.
- 14) 高橋金属株式会社：多孔質リン・フッ素吸着材エコリッジパンフレット、2011.



## アーク放電の誘発を利用した設置型自動草刈装置の開発

近畿大学農学部農業生産科学科 教授 松田克礼

### 1. 研究概要

電気柵の柵線に動物の濡れた鼻が近づくと、アーク放電（空中放電）が起こり、動物を通して電荷が大地に移動する。同様に、植物が伸長して柵線に近づくと、空中放電が誘起され、電荷は植物体を通して大地に移動する。この現象を利用すれば、成長して柵線に近づく雑草に空中放電によるダメージを与え、その伸長を抑制できる。そこで本申請では、空中放電の誘発を利用した雑草感知センサーへの応用と、センサーを適用した全自動の設置型草刈装置の開発を試みた。この装置を除草したい場所に設置し、太陽電池で稼動すれば、人手を介さず全自動での草刈が可能になる。また、道路脇や中央分離帯に設置することにより、従来の除草作業が軽減され、作業者の安全性を確保できるとともに、交通渋滞の回避も可能になる。

本申請の草刈装置は、設置式の全自動であることから、人手に頼らない次世代の雑草管理技術の提案になると期待できる。

### 2. 研究の背景

空中放電は、導体表面に存在する電荷が別の導体に移動する現象である。空中を移動できる距離は、導体間の電位差と移動先の電気伝導度に依存している。さらに、空中放電の誘起には、移動先の導体がアースに接地されていることが必須の条件となる。通常、植物は大地に根を張っており、アースに接地された状態である。一方、電気柵からの電荷は、回路を移動する通常の電流と異なり、導体の表面を移動する。電荷にとって水の表面は移動しやすい導体である。電荷は、水分子が存在すれば、抵抗を受けることなく、その表面を自由に移動できる。植物は多くの水分を含んでおり、電荷は、植物体表面をアースに接地されている導体として移動できると考えられる（図1）。本研究の新規性は、電気柵の柵線と植物の距離に対応して、誘発される空中放電を雑草感知センサーに応用することである。さらに、本研究では、雑草感知センサーと植物がもつ水分特性を組み合わせ、全自動の設置式草刈装置の開発を試みた。

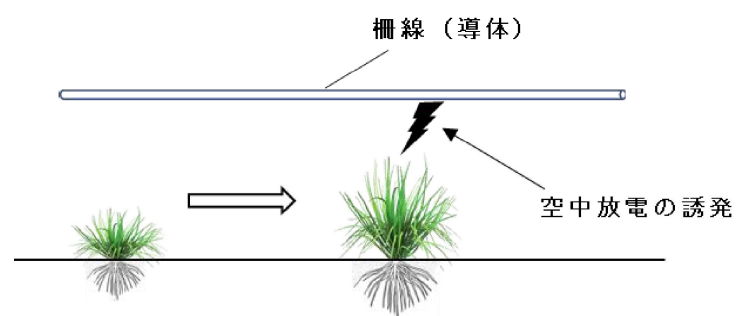


図1. 雑草による空中放電の誘発

### 3. 研究の目的

高速道路における植栽作業の9割以上が、のり面や道路脇、中央分離帯の除草作業である。傾斜の少ない道路脇や路肩の作業には、芝刈りロボットやトリマー式の自走草刈機を取り入れ、安全と景観保護のため定期的に除草を行っている。また、傾斜のあるのり面やその道路脇の除草には草刈機を取り付けた多目的作業用トラック（ユニモグ）なども利用されている。しかしながら、道路わきには街

路樹、中央分離帯には低木や草花が植え込まれており、現状の植栽作業は、草刈り機による熟練者の手作業が中心となっている。また、近年、設置面積が増加傾向にある大型の太陽光発電施設においても、雑草が下の架台からパネル面にまで伸長し、従来の手作業に代わる除草方法の開発が期待されている。そこで、本申請では、獣害対策として市販されている電気牧柵器を利用し、雑草の成長によって誘発される空中放電を感知センサーとして利用した‘設置式の全自動草刈装置’の開発を試みることにした。

現在、農薬を効率よく植物に吸着させるため、静電気の帯電を利用した農薬散布法が開発され、実用化されている。しかしながら、現在のところ、空中放電による除草技術は開発されていない。本研究の独自性は、申請者らが害虫防除システムとして取り組んできた空中放電技術を発展させ、人手に頼らない‘設置式全自動草刈装置’を開発することにある。この草刈装置は2つの特徴をもっている。ひとつは、伸長してくる雑草の頂芽または葉に狙いを定め、誘発された空中放電のダメージによって、雑草の伸長を全自動で抑制できることである。もうひとつは、いったん設置すれば、雑草感知センサーにより、雑草は全自動で一定の高さに伸長抑制され、人手によるメンテナンスを必要としないことである。雑草は大地に根を張っていることから常にアースに接地された導体であると考えられる。柵線から遠い位置（3～5 cm）の場合、雑草は感知されず、空中放電は誘発されない。雑草が伸長して柵線から1～2 cmまでに近づくと、1秒間に1回の空中放電を受けることになる。また、複数の雑草が同時に近づくと、柵線は、最も近い雑草を感知して放電を与え、その後、次の雑草への放電を開始する。空中放電は、柵線により全自動で認識され、雑草は常に一定の高さに管理されることになる。本システムで使用する電源は、一般に市販されている電気牧柵器である。この電源は、1秒間に1回の電圧を0.03秒間印加するパルス式を利用している。すなわち、ジュール熱の発生は無く、火災の発生や人体への影響を引き起こすことはない。設置式としては、柵線をエキスパンドメタルや金属格子などに置き換え、柵線で得られた結果をもとに、効率的に除草できる条件を検討することとした。

#### 4. 研究の位置づけ

イノシシ対策の電気柵は、地上から20～30 cmの高さにアルミの柵線を張り、イノシシの湿った鼻が柵線に近づくと、鼻に向かって空中放電が起こる仕組みである。ただし、イノシシの脚が大地に接触し、アースとして接地していることが必須の条件である。イノシシの脚が石や草、木の上にあると、空中放電は発生せず、効果を発揮できない。空中放電の発生には、放電を受ける側がアースに接地していることが重要なポイントとなる。また、成長した植物が柵線にもたれかかったり、接触したりした場合でも、植物に対して放電は起こらない。事前の実験から、植物は不完全な導体で、植物体の長さが10～15 cm程度までなら電荷は移動できるが、それより長くなると表面抵抗が大きくなり電荷が移動できなくなることを確認している。さらに、植物体の長さとの抵抗の関係を調べたところ、比例関係にあることが分かった。そこで本研究では、柵線で得られた雑草の感知条件を参考に、雑草の抑制範囲を線から面に広げ、エキスパンドメタルや金属格子を利用して広範囲の雑草が感知され、空中放電が誘発される設置式の草刈装置の開発を試みることにした。

化学的な除草に関しては農薬の開発も進み、ラウンドアップのように、多くの雑草に対して有効な除草剤も存在している。しかしながら、長期的な使用による薬剤耐性をもつ雑草の出現が懸念され、また、環境保全の観点からも薬剤による除草は縮小傾向にある。さらに、除草剤により雑草を根こそぎ枯死させると、土壌が安定して保持されなくなり、豪雨による被害の増大が危惧される。代替りの手段として、防草シートが利用されているが、耐久性や産業廃棄物処理の問題から、現在では熟練者

の手による草刈作業が中心となっている。一方、草刈作業の機械化も進められ、平面を作業するラジコン式やハンドガイド方式の草刈作業車、ある程度の斜面に対応できる重機カッターを取り付けたクサカルゴンなどが利用されている。しかしながら、道路脇にはガードレールとその支柱、スノーポールや道路標識などが設置されており、機械作業できる範囲は限られている。国内外を問わず、草刈作業は薬剤散布から機械的草刈作業に移行しており、有効な草刈方法の開発が期待されている。また、再生可能エネルギーの利用を目的として、世界規模で大型のソーラー発電施設の設置が進んでいる。このソーラーパネルの架台周辺の雑草も問題となっており、足場が邪魔になって薬剤散布も難しく、ラジコン式だけでなく、手作業による草刈も困難な状況となっている。そこで本申請では、この課題に着目し、空中放電の誘発を利用した設置式の全自動草刈装置を提案することとした。本装置で誘発された空中放電による電流は、エキスパンドメタルや金属格子から植物体を通して大地へ流れるが、植物の根は大地の内部に存在しているため、静電遮蔽されて影響を受けない。すなわち、雑草が枯れるのは、先端部分から地面までの範囲に収まり、根は生存した状態で残ると考えられる。

5. 研究の方法

本研究では、単子葉類および双子葉類の雑草の導体特性を調査し、全ての雑草に適用できる金属導体と雑草の先端との距離の関係を明らかにする。また、それぞれの雑草の導体特性から金属導体と地面との距離関係を調査し、すべての雑草において空中放電が誘発される最適条件を決定する。次に、

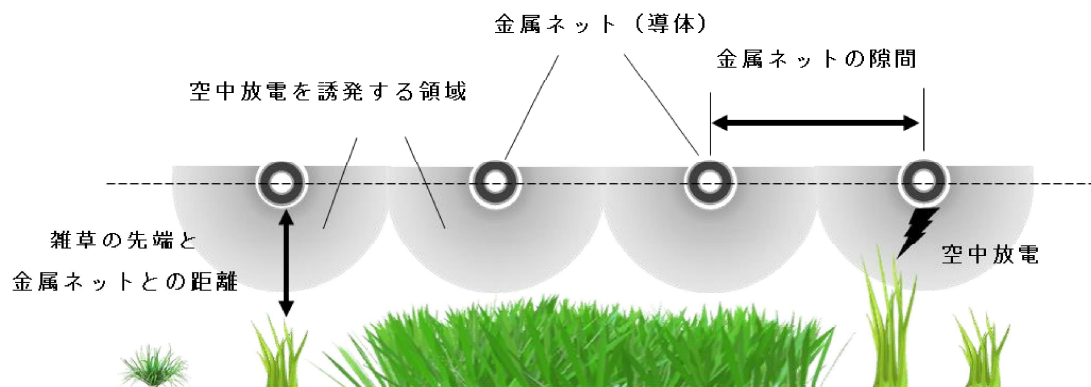


図2. 空中放電が誘発される大地からの金属ネットまでの距離と空中放電が誘発される領域

金属導体が雑草を感知できる領域を調べ、導体を配置する間隔や装置の基本構造を確定する（図2）。

決定した条件で、金属導体の構造をエキスパンドメタルやパンチングメタル、亀甲金網などに変更して全自動の設置式草刈装置を作製し、実験圃場の畦道や実験温室の周辺、路肩の歩道に設置して雑草の抑制効果を検討する。また、1年草や多年草、種子で増える雑草や地下茎で増える雑草など、異なる雑草に対する効果を調査する。さらに、天候や気温、湿度などの自然環境の変化に対してもその有効性と耐久性を検討する。次に、大学への進入路の道路脇や路肩、ガードレールの架台部分に本装置を取り付け、通常的环境下における有効性と問題点を調査する。確認された問題点には改良を加え、装置の改善を継続する。また、大学に設置されている太陽光発電施設の架台に装置を取り付け、蔓性雑草などの繁殖能力の大きい雑草に対する効果についても検討する。

6. 研究の結果

【導体電極の材質と除草装置の基本的構造および雑草に及ぼす効果について】

本研究では、単子葉類および双子葉類の雑草の導体特性を調査し、全ての雑草に適用できる導体電極の材質と雑草の先端との距離関係を検討した。また、それぞれの雑草の電気的特性から導体電極と地面との距離関係を調査し、すべての雑草において空中放電が誘発される最適条件を決定した。

導体電極の材質について：ステンレス線、アルミ線、鋼線、鉄線において差はなく、導電性のある金属であれば使用可能であることが明らかとなった。

除草可能な雑草の種類について：調査した単子葉類および双子葉類のすべての雑草において空中放電が誘発され、雑草の生育が抑制された（表 1）。

表 1. アーク放電の誘発によって成長を抑制された雑草

双子葉植物		単子葉植物	
和名	学名	和名	学名
ハコベ	<i>Stellaria media</i> (L.) Vill.	エノコログサ	<i>Setaria viridis</i> (L.) P. Beauv
ヤハズエンドウ	<i>Vicia sativa</i> subsp. <i>nigra</i> (L.) Guss.	メヒシバ	<i>Digitaria ciliaris</i> (Retz.) Koel
ハツジオン	<i>Erigeron philadelphicus</i> L.	オヒシバ	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn
シロクローバー	<i>Trifolium repens</i> L.	スズメノカタビラ	<i>Poa annua</i> L.
コニシキソウ	<i>Euphorbia supina</i> Rafin.	スズメノテッポウ	<i>Alopecurus aequalis</i> Sobol.
ノコギリソウ	<i>Achillea alpina</i> L.	カラスムギ	<i>Avena fatua</i> L.
セイヨウタンポポ	<i>Taraxacum officinale</i> Weber	チガヤ	<i>Imperata cylindrica</i> (L.) Beauv
オオイヌノフグリ	<i>Veronica persica</i> Poir.	ツユクサ	<i>Commelina communis</i> L.
ホトケノザ	<i>Lamium amplexicaule</i> L.	ヤマヌカボ	<i>Agrostis clavata</i> Trin.
オウショウヨモギ	<i>Artemisia princeps</i> Pampanin	イタリアンライグラス	<i>Elymus tsukushiensis</i> Honda var. <i>transiens</i>
カタバミ	<i>Oxalis corniculata</i> L.	カモガヤ	<i>Dactylis glomerata</i> L.
チドメグサ	<i>Hydrocotyle sibthorpioides</i> Lam.	メリケンカルカヤ	<i>Andropogon virginicus</i> L.
オオバコ	<i>Plantago asiatica</i> L.	スズメノヒエ	<i>Paspalum dilatatum</i> Poir.
オオワダチソウ	<i>Solidago altissima</i> L.	シヨクヨウガヤツリ	<i>Cyperus esculentus</i> L.
アキノノゲシ	<i>Lactuca indica</i> L.	キタメヒシバ	<i>Digitaria ischaemum</i> (Schreb.) Muhlenb.
ノゲシ	<i>Sonchus oleraceus</i> L.	アオスゲ	<i>Carex breviculmis</i> R. Brown
ヤエムグラ	<i>Galium aparine</i> L.		
オニタビラコ	<i>Youngia japonica</i> (L.) DC.		
ヒメジョオン	<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.		
セイヨウニガナ	<i>Crepis capillaris</i> Wallr.		
コセンダングサ	<i>Bidens pilosa</i> L.		
シロザ	<i>Chenopodium album</i> L.		
スベリヒユ	<i>Portulaca oleracea</i> L.		
ナガバギシギシ	<i>Rumex crispus</i> L.		
オウチカタバミ	<i>Oxalis dillenii</i> Jacq.		
へらバヒメジョオン	<i>Erigeron strigosus</i> Muhl.		
クワクサ	<i>Fatoua villosa</i> (Thunb.) Nakai		
メマツヨイグサ	<i>Oenothera biennis</i> L.		
オオアレチノギク	<i>Conyza sumatrensis</i> (Retz.) E. Walker		
オウショウヨモギ	<i>Artemisia vulgaris</i> L.		

【自然環境下における除草効果について】

次に、ひとつの導体電極が雑草を感知できる領域を調べ、導体を配置する間隔や装置の基本構造を確定し、導体の構造をエキスパンドメタルやパンチングメタル、亀甲金網などに変更して自動草刈装置を設置して雑草の抑制効果を検討した。また、1年草や多年草、種子で増える雑草や地下茎で増える雑草など、異なる雑草に対する効果を調査した。さらに、天候や気温、湿度などの自然環境の変化に対してもその有効性と耐久性を検討した。

除草装置の構造について：導電性をもつ電極の構造として、エキスパンドメタル、亀甲金網、平織金網、溶接金網、クランプ、パンチングメタルにおいて差はなく、目合いが30mm以下であれば使用可能であることが明らかとなった。

雑草の種類について：表 1 に示すように1年草、多年草、種子繁殖性、地下茎性など、調査したすべての雑草で抑制効果を確認できた。

【長期間の稼働による実用化試験について】

次に、大学への進入路の道路脇や路肩、ガードレールの架台部分に本装置を取り付け、通常的环境



下における有効性と問題点を調査した。また、大学に設置されている太陽光発電施設の架台に装置を取り付け、蔓性雑草などの繁殖能力の大きい雑草に対する効果についても調査した。その結果、すべての設置区において、有効な雑草抑制効果を確認できた。

【近畿大学農学部への進入路で実施した結果】



【実験圃場の温室脇で実施した結果】

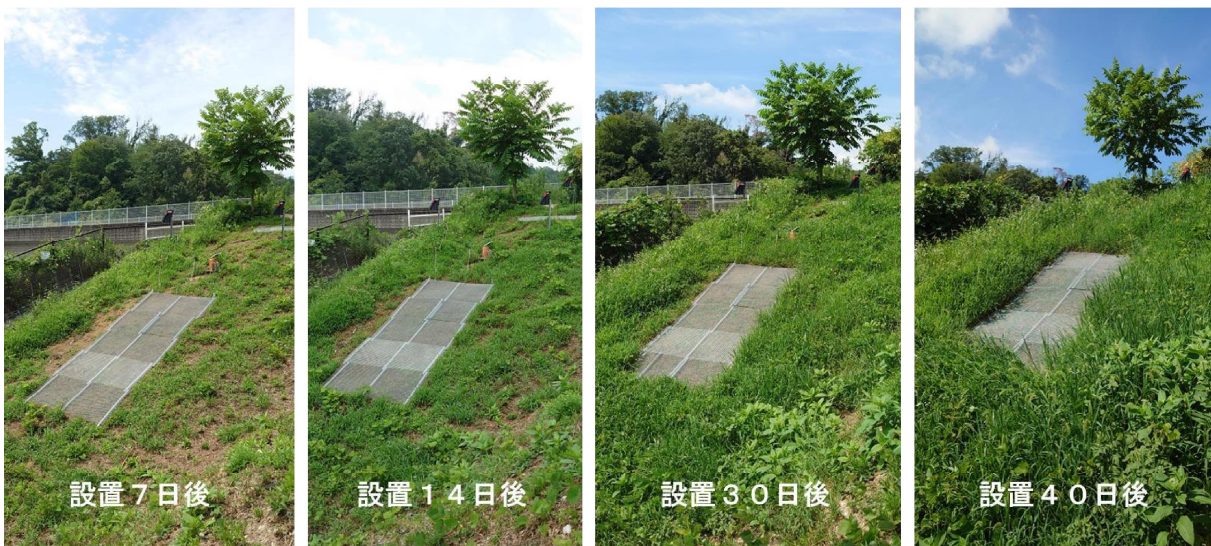




【実験圃場の進入路の路肩で実施した結果】



【農学部構内の傾斜地で実施した結果】



7. 研究業績

論文発表：A Simple Electrostatic Apparatus for Controlling Weeds on Slopes without Causing Soil Erosion.

Yoshinori Matsuda, Koji Kakutani, Hideyoshi Toyoda.

American Journal of Civil Engineering and Architecture, 2024, 12(1), 1-7.

DOI: 10.12691/ajcea-12-1-1

Pub. Date: January 04, 2024

知的財産権：雑草抑制装置

出願番号 特願 2024-29724

出願日 2024 年 2 月 29 日

# 3D データを用いた水災害時の垂直・水平避難行動モデルの

## シミュレーションと一時避難場所の創出に関する研究

大阪公立大学工業高等専門学校 総合工学システム学科 都市環境コース 講師 白柳 博章

### 1. 研究の背景と目的

日本は、地震による津波、台風による高潮、河川氾濫など、様々な水災害リスクを抱えている。これらの災害から人命を守るためには、迅速かつ適切な避難行動が不可欠である。従来水災害に対する避難計画は、安全な場所へ移動する「水平避難」を前提としている。しかし、近年では、浸水速度の速い都市部で、水平避難が困難なケースも増えている。そこで注目されているのが、「垂直避難」である。これは、高台や建物の高層階など、水没しない場所に避難する方法である。垂直避難は、短時間で安全な場所へ移動できるという利点があるが、現状の水害対策においては、水平避難を前提として計画されており、国土交通省や地方自治体も重要性を明言しているものの、垂直避難行動に対する定量的な評価がなされていないという課題があると考えられる。

そこで、本研究では大阪市此花区において大規模な高潮・津波が発生した場合を想定し、3D-PLATEAU データを活用し、津波・高潮の浸水による屋上避難施策に伴う一時収容者数の試算と地区格差に対する定量的評価を行った。各章の概要を以下に示す。

第2章では、分析に用いる3D-PLATEAUデータの概要を示すとともに、水災害に対する防災避難計画の現状と課題を整理する。

第3章では、第2章での課題を踏まえ、水災害に対する垂直水平避難モデルと屋上避難施策の提案を行う。

第4章では、大阪市此花区における春日出北1丁目を評価対象地域として、垂直水平避難モデルと屋上避難施策による一時収容者数の試算を行う。

第5章では、大阪市此花区を対象として第4章と同様の試算を行った上で、大字ごとの避難所充足率の格差評価についての記述を行う。

第6章では、本研究のまとめを行った上で、今後の課題と研究の展望について示す。

### 2. 水災害に対する防災避難計画の現状

#### 2.1 3D-PLATEAUの概要

垂直避難行動に対する定量的評価を行うにあたり、国土交通省では2022年度に全国123都市の3D都市モデル（3D-PLATEAU [プラトー]）のオープンデータ化を完了させ<sup>1)</sup>、順次3Dデータの整備対象都市の拡大やデータ拡張が行われている現状にある。これは、今まで2Dが主流であった空間情報を3Dに拡張したものであり、PLATEAU上で3Dのハザードマップも作成可能となっている。図-1は3D-PLATEAUデータを利用して春日出北1丁目の建物と道路状況を図示したものである。3D-PLATEAUから使用した主なデータは各建物の高さ、階数、建物の構造種別、津波高潮の最大浸水深である。

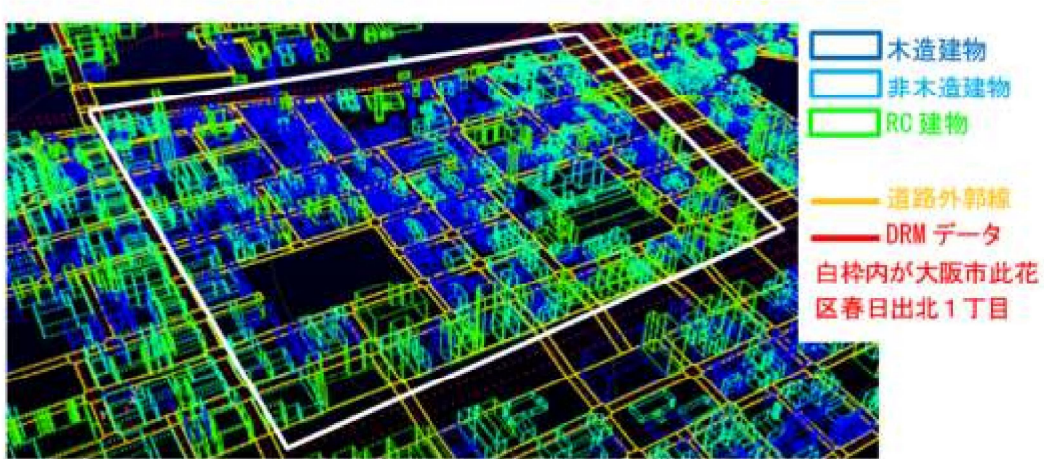


図-1 春日出北1丁目内の建物・道路の3D化

2.2 水災害に対する防災避難計画の現状

現状の防災避難計画では、図-2に示すように、水害のリスクが高まった避難対象地域について地域全体に居住する人々全員①②を避難所へ水平移動③にて避難所④へ避難させることが基本となっている。よって避難地域内における建物の配置・面積・階数といった属性が考慮されておらず、当然建物内で安全な階②や危険な階①も不明なままである。

また、避難対象地域にいる全ての人が避難所に逃げるという前提で避難計画が立てられているが、実際に水害が発生した場合には、図-2の④のような近くの高い建物に行くか、建物内での安全階②に逃れるという行動が多くを占めていると考えられ、避難計画と現実に乖離が起きている状況である。

図-2を見ても明らかなように、水平移動③が長くなるにつれ、避難者が浸水に遭遇するリスクが高まる。よって、水平移動③をできるだけ少なくするような、一時避難所の創出が急務である。

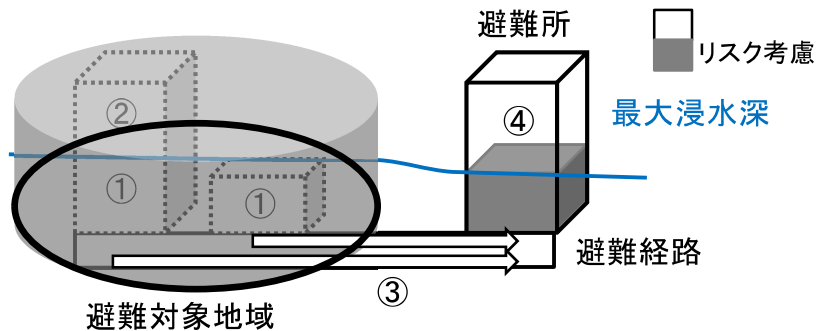


図-2 水災害に対する防災避難計画の現状イメージ

3. 水災害に対する垂直水平避難モデルと屋上避難施策の提案

3.1 垂直水平避難モデルの提案

2.2で述べた水害に対する現状の避難計画の課題に対する解決方法の1つとして、本研究では、3D-PLATEAUデータを用いた垂直水平避難モデルを提案する。そのイメージを図-3に示す。

なお、各建物の高さを階数で除することにより、その階数の高さを抽出した。その高さと同浸水高さを比較し、安全な階かどうかの判定を各建物・各階ごとに行った。

そして、A)すでに安全な階にいる人はその場所にとどまる、B)安全な階が存在する建物にいるがその場所が安全でない人は、上の階に垂直避難する、C)安全な階が存在しない建物にいる人は、一時避難所へ垂直水平避難するものと仮定した。



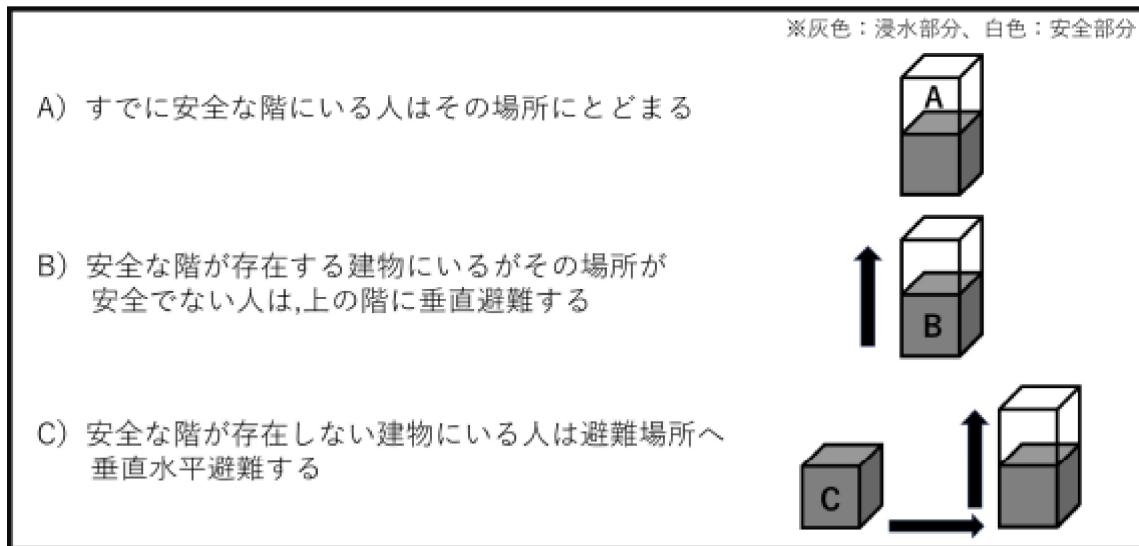


図-3 垂直水平避難モデルのイメージ

### 3.2 一時避難における屋上避難施策の提案

図-3 の B)C)の人数が、一時避難場所である津波避難ビルでの収容人数を上回る場合には、津波避難ビルだけではなく、他の一時避難場所の創出を行う必要がある。本研究では、新たな一時避難場所として、中高層建物の屋上を活用するとして屋上避難施策の提案を行なった。

一時避難場所を建物の屋上に限定した理由としては、建物のセキュリティ等の関係上、建物内部を避難場所として利用するよりも、建物所有者や居住者の理解を得やすく、施策の実現可能性が高いと考えたからである。さらに、水害そのものの破壊力や地震による被害、火災などの水害とは別の災害の発生を考慮し、一時避難場所として利用する建物を RC 造の建物に限定した。

## 4. 春日出北 1 丁目における垂直水平避難モデルと屋上避難施策による一時収容者数の試算

### 4.1 評価対象地域の概要

評価対象地域は、大阪湾に面し、海拔 0m 以下のエリアが広がる大阪市此花区とし、まずは大阪市此花区の区役所がある春日出北 1 丁目にて、提案した垂直水平避難モデル・屋上避難施策に基づく試算を行った。なお、春日出北 1 丁目の昼間人口は 1,777 人、夜間人口は 1,403 人、建物軒数は 530 軒であり、住宅地と商業地が混合した地区である。

### 4.2 津波・高潮により想定される最大浸水深

大阪市における 3D-PLATEAU データには、建物ごとに津波・高潮により想定される最大浸水深がすでにデータ化されている。表-1 に此花区における津波・高潮の浸水高さの平均値・最大値、ならびに地盤標高の平均値・最大値・最小値を示す。

表-1 此花区の津波、高潮、地盤標高に関するデータ

	平均値(m)	最大(m)	最小(m)
津波	4.16	5.08	
高潮	7.42	8.45	
地盤標高	-1.78	2.47	-2.36

## 4.3 安全な階が存在する建物軒数

当該地区において表-2 に階数ごとの建物軒数と津波・高潮により安全な階が存在する割合を示す。その結果、4 階以上の建物は津波・高潮の両パターンとも、安全な階が必ず存在する。3 階建ての建物を対象としたとき、津波の場合 129 軒中 126 軒が安全な階と判定された。しかし、高潮の場合 28 軒のみが安全とされた。次に 2 階建ての建物を対象としたとき、津波の場合 311 軒中 54 軒が 2 階を安全な階と判定され、高潮の場合 2 軒のみとなった。津波の場合、3 階から 2 階にかけての安全な階が存在する割合が 97.7%から 17.4%に減少した。高潮の場合、4 階から 3 階にかけての割合が 100%から 21.7%に減少した。

表-2 階数ごとの安全な階が存在する割合

	建物軒数	津波 (%)	高潮 (%)
4階以上	40	100	100
3階	129	97.7	21.7
2階	311	17.4	0.6
1階	50	0	0

## 4.4 すでに安全な階にいる人数、安全な階に避難する人数、避難所に避難する人数の算定

当該地区において昼間人口を図-3 に示す垂直水平避難モデルを適用した結果を表-3 に示す。各建物・階の人口の算出については、建物の階ごとの面積は建物ごとに記載されている図形面積に等しいと仮定した上で、さらに人口を図形面積に応じて建物の階ごとに割り振ることにより算出した。

その結果、津波の場合 A) 661 人、B) 574 人、C) 542 人と算定され、C) の避難所へ避難すべき人数の割合は地区全体の人数のおよそ 30%となった。高潮の場合 A) 356 人、B) 385 人、C) 1,036 人と算定され、避難所に避難すべき人数の割合は 58%となった。

表-3 津波・高潮における垂直水平避難モデルの算定結果

	津波	高潮
A)	661	356
B)	574	385
C)	542	1036

## 4.5 津波避難ビルの現状

4.4 より、春日出北 1 丁目の昼間人口 1,777 人のうち、津波が発生した際に 1,116 人が何かしらの避難行動をとる必要があり、そのうち 542 人が水平避難を行う必要があるということがわかった。高潮が発生した際には 1,421 人が避難行動を、1,036 人が水平避難を行う必要があるとわかった。此花区には大阪市が指定した津波避難ビルとなっている建物が 103 棟あるが、春日出北一丁目には老人ホーム 1 棟のみが指定されている。その想定収容人数は 501 人であるため、当該地区では想定される避難人口に対し、津波避難ビルの想定収容人数が足りていない試算となった。

## 4.6 屋上避難が可能な人数の算定

此花区にある津波避難ビルの中で、屋上にのみ避難が推奨されている建物が 5 棟存在するため、それらの建物の屋上面積から各避難ビルの想定避難人数を割り、その平均を求めることで一人当たりの避難に必要な面積を算出した。その結果一人当たりの避難に必要な面積は 4.46 m<sup>2</sup>であると分かった。これを用いて、春日出北 1 丁目において、一時避難所として使用できる建物の屋上をすべて解放した際にどれだけの人が

避難できるかの分析を行なった。その結果、2,045 人が収容可能であるという結果が得られ、本施策により、春日出北 1 丁目の昼間人口 1,777 人を上回っていることから、十分な収容者数を大字内で確保できているといえる。また春日出北 1 丁目に存在する避難所として活用可能な建物の屋上をすべて解放することが不可能であるとしても、全体の約 89%を解放できれば理論上は春日出北 1 丁目の昼間人口全員を収容することができ、高潮が発生した際に避難の必要がある 1,421 人の収容を考えた場合、全体の約 40%を解放できれば、老人ホームの想定収容人数 501 人を除いた 920 人の収容が理論上可能である。

5. 此花区における大字ごとの避難所充足率の格差の評価

5.1 此花区における津波避難ビルの整備状況

此花区の津波避難ビルの所在地情報、想定避難人数のデータを用いて、此花区の各大字が昼夜間人口に対して収容人数を満たしているかどうかの判定を行った。

判定結果は、此花区の昼間人口が存在する 57 大字のうち、避難ビルの収容人数が昼間人口を上回る大字は 16 大字、夜間人口が存在する 45 大字のうち避難ビルの収容人数が夜間人口を上回る大字は 15 大字となった。このことから、現在の指定避難ビルのみでは、過半数の大字で避難場所が不足していることが明らかとなった。

5.2 此花区における屋上避難が可能な人数の算定

前章と同様の分析を此花区のすべての大字について行った。各建物の建築面積・構造種別ならびに高潮の最大浸水深は 3D-PLATEU のデータ、各大字の昼夜人口は平成 27 年度の国勢調査のデータを用いた。なお、区域内の RC 構造物かつ高潮の最大浸水深を超えている建物の屋上が避難可能であると仮定した。

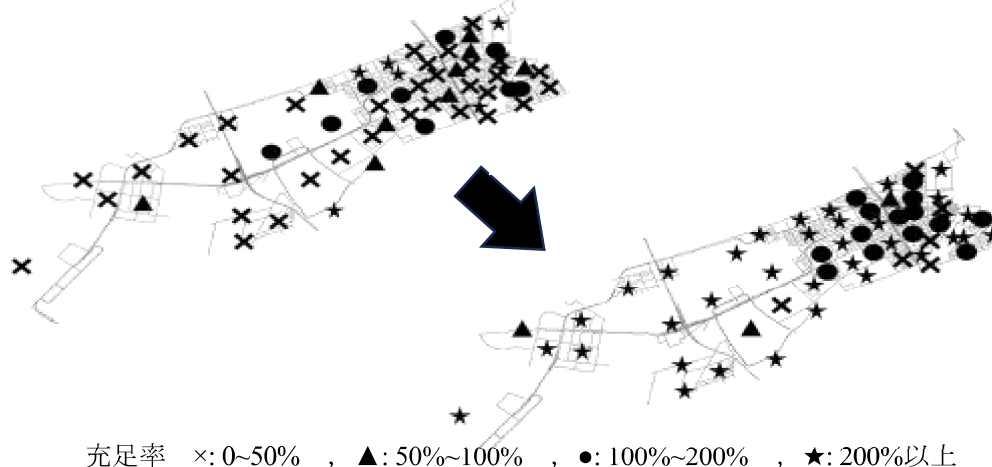
その結果、昼間人口において収容人数を満たしている（充足している）大字は表-4 に示すように 57 大字中 49 大字、夜間人口においては 45 大字中 39 大字となった。仮に此花区全体で RC 構造物の屋上が 100%一時収容可能とするなら約 200,000 人の一時避難場所を創出できるとわかった。

表-4 屋上避難施策による充足大字数の比較

	大字数	施策前	施策後
昼	57	16	49
夜	45	15	39

5.3 避難所充足率の大字ごとの格差

大字の人口に占める屋上避難における収容者数の割合を避難所充足率と定義し、屋上避難施策前後での避難所充足率を算出し図示したものを図-4、図-5 に示す。



充足率 ×: 0~50% , ▲: 50%~100% , ●: 100%~200% , ★: 200%以上

図-4 昼間人口から見た避難所充足率の変化

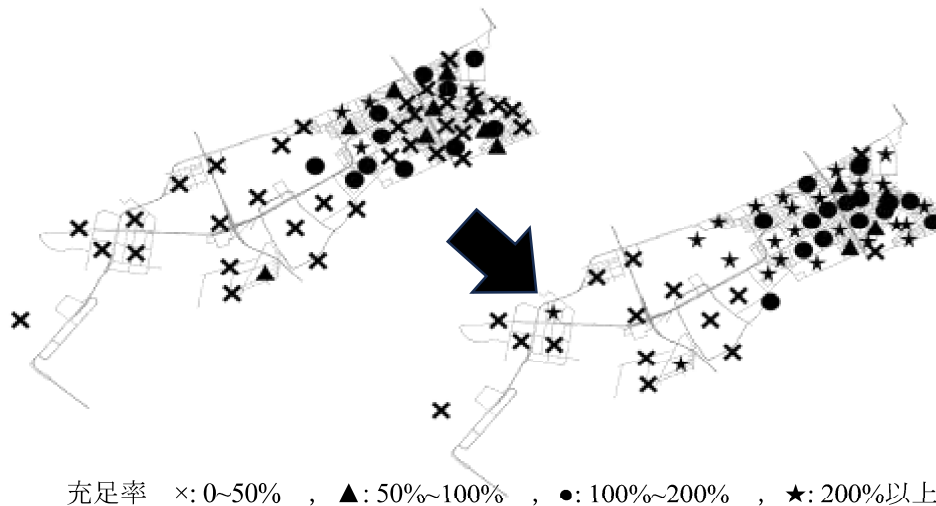


図-5 夜間人口から見た避難所充足率の変化

この施策を行うことで、8割を超える大字が収容人数を満たすことができる。また昼夜両方とも避難所充足率が100%以上となる大字が増加しているため、時間帯によって避難ができなくなる可能性を低減できる。

## 6. 本研究のまとめと今後の課題・展望

大阪市此花区において大規模な高潮・津波が発生した場合を想定し、3D-PLATEU データを活用し、津波・高潮の浸水による屋上避難施策に伴う一時収容者数の試算と地区格差に対する定量的評価を行った結果、此花区全体でRC構造物の屋上が100%一時収容可能とするなら、此花区の人口（昼間人口81,835人、夜間人口66,656人）のおよそ2.4~3.0倍の約200,000人の一時避難場所を創出できることを数量的に示すことができた。また、屋上避難施策により、大字での避難場所充足率を大幅に改善することが出来、これは、水平避難を大字内で行える防災避難計画が可能であることを示せたといえる。

しかしながら、屋上避難施策を実行し、避難者が垂直水平避難を適切に実現できるために、必要となる課題は数多い。今後の課題と展望を以下(1)~(5)に整理して示す。

### (1) 屋上避難施策に関する課題

屋上を一時避難場所として利用するこの施策は、建物内部を避難所として活用するよりもセキュリティなどの関係上ハードルが低いと考えられるが、屋上を一時避難場所として利用可能な建物のほとんどは民間のものであり、屋上が一般に開放されていない場合は、緊急時のセキュリティの緩和措置や、施策協力における税制等の優遇策を進めることにより、住民と自治体との協力体制を深める必要がある。

また、此花区においては昼夜どちらも充足率が不足している大字が約15%存在する。これらの大字では、大字間での水平避難が必要であり、周辺の大字を含んだ住民と自治体との協力体制を深める必要がある。

### (2) 避難者の分布と属性に関する課題

今回は人口を建物内に分布させて分析を行ったが、建物外にいる人（自動車や鉄道の利用者など）の避難について考慮する必要がある。水害が発生した場合は垂直避難が必要であるが、身体が不自由な人は垂直移動に時間を要する、または不可能になってしまうという問題も存在する。

### (3) 避難ルートに関する課題

津波や高潮が発生した際にはそれ以前に、地震や強風が都市を襲っていると考えられ、家の倒壊や道路そのものの破損といった理由で避難ルートが寸断されてしまうといったことが起きる可能性が高い。そのため、木造建物が密集する狭い道路の場合には、災害時の通行確率を考え、避難ルートの対象から外して分析を行う必要がある。

また、避難時間に関するシミュレーションを行った上で、できるだけ総避難時間を最小化する、もしくは避難時間の最大値を小さくする施策について検討を深める必要がある。

### (4) ハザードマップ、防災計画への適用への模索

現在、ハザードマップは様々な水害を想定したものが公表されている。これに加え、3Dデータを用いた防災計画がハザードマップなどに適用されると情報が高度化するとともにより複雑なものになってしまう可能性がある。情報の複雑化が避難行動へ混乱を招く危険性もあり、映像での避難シミュレーションを行うなど、住民にわかりやすい情報提供を模索していく必要がある。それが、住民の避難意識の向上や街の減災上の欠点などがより分かりやすい形で伝わるなどの大きな利点が得られると考える

### (5) 3Dデータとリンクさせたより高度な浸水シミュレーションへの模索

3D-PLATEUの浸水深のデータは複数地点で大阪府が公表している水防法に基づいた水害ハザードマップと浸水深の範囲に入っているため、ハザードマップと全く異なるデータである可能性は低い。しかしながら、水害が発生した際の浸水深を時系列で知るためには、道路の配置や幅員、建物の正確な形状、排水機能、地形などのデータを含めた浸水シミュレーションを行う必要があるが、今回分析に用いた最大浸水深はPLATEUのデータに付加されていたものをそのまま用いており、浸水シミュレーションがどのような条件で行われ結果を得たかの詳細は不明であった。

そこで、3Dデータとリンクさせたより高度な浸水シミュレーションが構築できれば、浸水深を時系列で知ることができ、さらに動画やシミュレーション映像で示すことができれば、より効果的な垂直水平避難への誘導へとつながることが期待できる。

## 7. その他

**【謝辞】**

当報告書は、一般社団法人近畿建設協会の 2023 年度研究助成をもとに作成を行いました。これにより学会での論文発表ならびに質疑応答の機会を得ることができ、本研究に深みを増すことができたことを、この場を借りて深く御礼申し上げます。また、共同研究者の大阪公立大学工業高等専門学校 総合工学システム学科 都市環境コース 特任教授 北村 幸定先生から貴重な意見・助言をうかがうことができました。さらに、卒業研究を通して、高田 大貴君、松山 傑君に多大な作業を行っていただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

**【参考文献】**

- 1) 国土交通省 3D-PLATEAU HP : <https://www.mlit.go.jp/plateau/> (2023/12/28 閲覧)
- 2) なぜ PLATEAU はオシャレなの、コストは?! 中の人にいろいろ聞いてみた  
<https://ken-it.world/it/2021/03/why-plateau-is-so-fashionable.html> (2024/01/26 閲覧)
- 3) 大阪市此花区 HP : 此花区内の津波避難ビル指定状況  
<https://www.city.osaka.lg.jp/konohana/page/0000170143.html>
- 4) 総務省 HP : 大阪市 平成 27 年国勢調査 大阪市町丁目別昼間人口  
<https://www.city.osaka.lg.jp/toshikeikaku/page/0000430820.html>

**【添付論文】**

- 1) 白柳博章・北村幸定:大阪市此花区における南海トラフ地震の津波浸水想定に対する垂直・水平3D避難シミュレーションと一時避難場所の創出, 日本地域学会 第60回年次大会, 2023.10
- 2) Hiroaki SHIRAYANAGI & Yukisada KITAMURA : Estimation of rooftop evacuation capacity for constructing a vertical–horizontal 3D evacuation simulation against tsunamis and storm surges, 63th ERSA, 2024.08 (abstract is accepted)



# 車載型電磁波レーダによる道路橋 RC 床版内部の 劣化損傷識別に関する判定手法の構築

神戸市公立大学法人神戸市立工業高等専門学校  
都市工学科 教授 伊原 茂

## 1. 研究背景

現在、道路橋では5年に1回の定期点検が義務化されている中、交通荷重を支える RC 床版の点検においては、RC 床版下面側からの接近目視点検が一般的である。一方、RC 床版上面側からの点検は、交通規制を伴うことから、広範囲にわたる点検は極めて困難であり、RC 床版上面側の内部劣化損傷状況の把握が十分できていないのが現状である。その結果、近年、車両走行性に影響を与える可能性のある舗装損傷箇所において RC 内部の水平ひび割れ（写真-1）や RC 床版上面の土砂化（写真-2）が多く報告されている。1960 年代以降の高度経済成長期に建設された都市高速道路等の道路橋 RC 床版は、厚さが 200mm を下回るものが多く、RC 床版下面側に縦桁、全面鋼板等による補強が実施されてきたが、現在、更新（造り替え）の時期を迎えている。しかし、莫大な費用と時間を要するため、更新は容易に実施することはできない。このような状況下において、RC 床版の長寿命化を図るためには、的確な点検・診断技術が急務な課題である。



写真-1 RC床版内部の水平ひび割れ



写真-2 RC床版上面の土砂化

## 2. 研究目的

本研究では、写真-3 に示すような電磁波レーダを搭載した車両を用いて、交通規制を行うことなく車道を走行することにより、RC 床版上面側内部に発生する水平ひび割れと土砂化を識別判定できる手法を構築することを目的とする。具体的には、水平ひび割れ、土砂化に関して、模擬損傷を入れた供試体を作製し、電磁波レーダを用いて反射波形の違いに着目して分析評価し、損傷を識別判定できる分析手法を構築することをめざす。



写真-3 電磁波レーダを搭載した計測車両

## 3. 研究内容

### 3.1 実験方法

昭和 39 年道路橋示方書で設計された RC 床版は、現行設計と比較して床版厚が薄く 180mm 以下が多いため、実橋を踏まえ、舗装厚 80mm（基層 40mm+表層 40mm）の下に RC 床版の上半分を模擬した 90mm 部分を対象として、内部損傷を模擬した供試体を作製し、電磁波レーダを用いて識別できるかどうか

か実験で検証する。本研究では、車載型電磁波レーダとして地中レーダの適用を考えており、その計測原理は、図-1 に示すとおりである。送信された電磁波は、誘電率、導電率等の電気的特性の異なる物質の境界で反射波を生じる性質を利用して、その反射波を解析することにより物質内部の探査を行うものである。アンテナ部から送信される電磁波（送信波）が物質中を伝搬し、比誘電率の異なる物質の境界で反射が生じるため、その反射波をアンテナ部で受信して、送信してから受信されるまでの時間差で反射が生じた深さを求めることができる。また、地中レーダを搭載した計測車両を用いる代わりに、車載型と同性能の写真-4 および表-1 に示す手押し型電磁波レーダを用いることとした。また、比較検証のため、鉄筋探査等の構造物点検で使用される写真-5 および表-2 に示すハンディ型電磁波レーダを用いて計測し、測定機器による損傷検知能力の違いについて検証する。

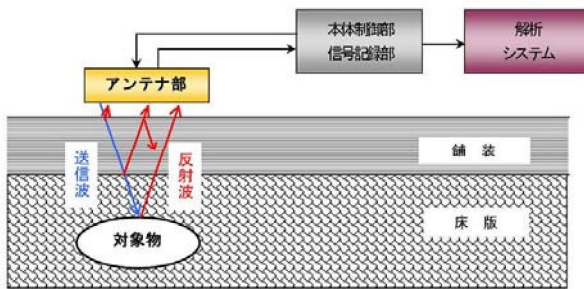


図-1 電磁波レーダの計測原理



写真-4 手押し型電磁波レーダ

表-3 実験ケース

ケース	表面乾燥状態		ケース	湿潤状態	
1	健全		9	健全	
2	水平ひび割れ	空隙0.5mm	10	水平ひび割れ	空隙0.5mm
3	水平ひび割れ	空隙1.0mm	11	水平ひび割れ	空隙1.0mm
4	水平ひび割れ	空隙2.0mm	12	水平ひび割れ	空隙2.0mm
5	水平ひび割れ	空隙3.0mm	13	水平ひび割れ	空隙3.0mm
6	水平ひび割れ	空隙15mm	14	水平ひび割れ	空隙4.0mm
7	土砂化	粗骨材（乾燥）	15	水平ひび割れ	空隙4.5mm
8	土砂化	細骨材+粗骨材（乾燥）	16	水平ひび割れ	空隙7.5mm
			17	水平ひび割れ	空隙10mm
			18	土砂化	粗骨材（乾燥）
			19	土砂化	粗骨材（湿潤）
			20	土砂化	細骨材+粗骨材（乾燥）
			21	土砂化	細骨材+粗骨材（湿潤）

### 3. 2 供試体概要

図-2～図-9 に供試体概要図を示す。図-3～図-5、図-7、図-9 は、計測方向に対して直角方向の断面図である。なお、供試体の平面寸法は、供試体端部における反射波の影響および信号の安定性を踏まえ、端部から 200mm 程度を影響範囲と考え、幅 900mm、計測方向に 1200mm とした。実験ケースは、表-3 に示すとおりである。RC 床版の水分状態については、表面乾燥と湿潤に分けて上側鉄筋に沿って発生する水平ひび割れの高さを変えたり、かぶり部分（30mm）の土砂化の材料構成を変えたりして供試体を作製した。

供試体の断面構成としては、数多くのケースを比較的容易に実施できるように、平面寸法 300mm×300mm、厚さ 40mm の舗装体（表層と基層ともに密粒 13mm）、厚さ 30mm と 60mm のコンクリート平板（強度：27N/mm<sup>2</sup>）は、接着させずに積み重ねて設置した。また、水平ひび割れを模擬するために、空隙 15mm の場合を除いて、平面寸法 50mm×50mm、比誘電率が約 2 のポリカーボネード製の板を厚さ 60mm のコンクリート平板上の各ブロックの四隅に設置して高さを調整し、空隙 15mm の場合は、発泡ス

表-1 手押し型電磁波レーダの仕様

項目	仕様	
調査速度	5km/h	
データ取得間隔	1cm～	
探査幅	路面下空洞	1.0m
	舗装・橋梁	0.9m
探査深度	約 1.0m	



写真-5 ハンディ型電磁波レーダ

表-2 ハンディ型電磁波レーダの仕様

項目	仕様
レーダ周波数	2.7GHz
探査深度	約 60cm



チロールを使用した。土砂化は、粗骨材だけの場合と細骨材と粗骨材を質量比 3 : 2 でブレンドした場合の 2 ケースとした。粗骨材は、厚さ 30mm のコンクリート平板をハンマーで砕いて 1 辺が 30mm 程度のもを選別し、細骨材は市販の約 4mm~9mm 混合の砕石を使用した。湿潤状態の設定については、防水シートを用いて厚さ 60mm のコンクリート平板の半分である 30mm まで水張り状態をつくり、1 週間その状態を継続した。コンクリート平板の表面乾燥および湿潤状態に関しては、写真-6 に示す床版防水工用に開発された電気抵抗式水分計（含水率 6%以下）を用いて、コンクリート平板のカウント値を測定し、図-10 に示す関係に基づいて確認した。写真-7~写真-12 に現場供試体設置状況および計測状況を示す。

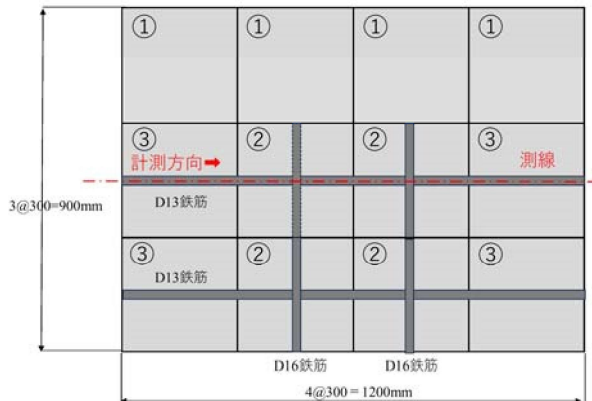


図-2 供試体平面図（ケース 1~6）



写真-6 電気抵抗式水分計<sup>1)</sup>

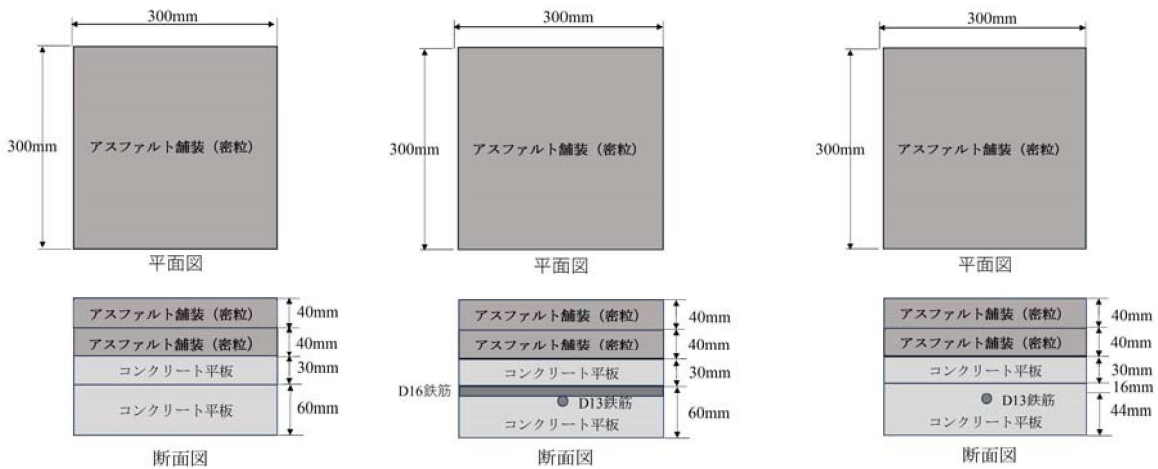


図-3 鉄筋なし (Type①)

図-4 2方向鉄筋あり (Type ②)

図-5 配力鉄筋あり (Type ③)

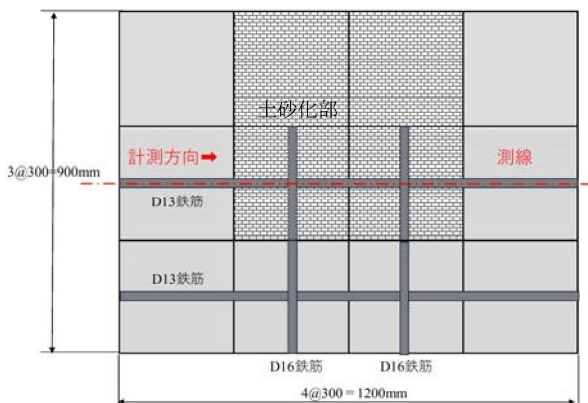


図-6 土砂化供試体平面図（ケース 7, 8, 18~21）

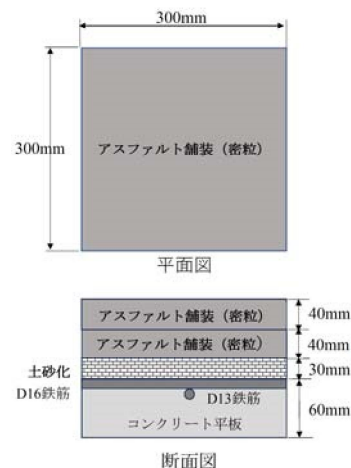


図-7 土砂化断面図



写真-7 コンクリート平板の設置状況



写真-8 舗装体の設置状況

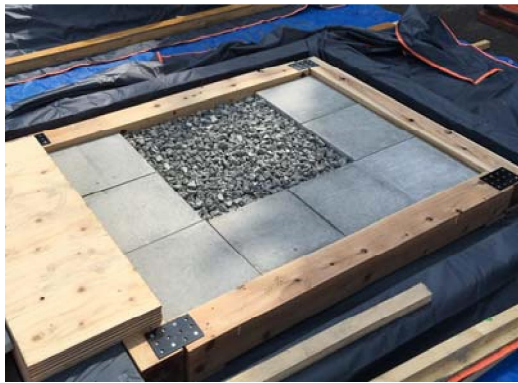


写真-9 土砂化（粗骨材のみ）作製状況

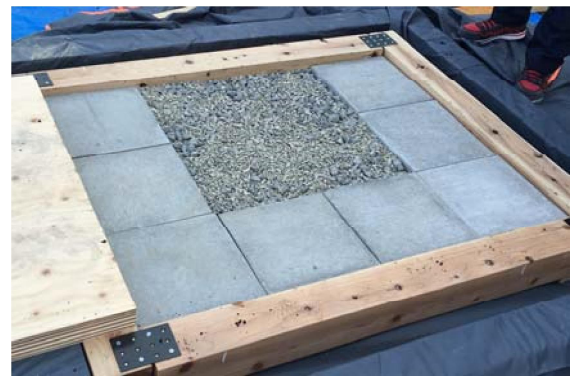


写真-10 土砂化（細骨材+粗骨材）作製状況



写真-11 手押し型電磁波レーダの計測状況



写真-12 ハンディ型電磁波レーダの計測状況

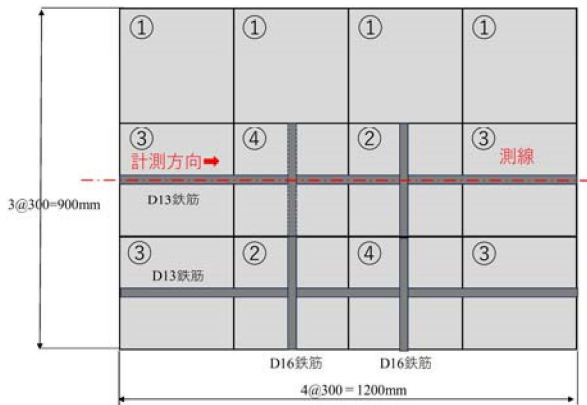


図-8 供試体平面図（ケース 9～17）

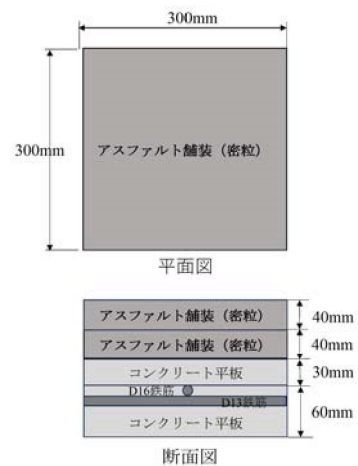


図-9 2方向鉄筋あり（Type ④）

4. 計測結果および考察

4. 1 ハンディ型電磁波レーダの計測結果および考察

図-11 は、ハンディ型電磁波レーダによる測定画像の一例である。反射波形は+側が白色、-側が黒色とし、波形の大きさに応じて色付けされる。比誘電率が低い鉄筋は白色、比誘電率が低い空気層は黒色で表示される。図-12～図-21 に実験ケースの中で代表的な主鉄筋位置における深度方向の反射波形と測線下における画像を示す。なお、コンクリートの比誘電率は 5 とした。舗装部分 (80mm) とコンクリート板の境界は、反射波形が大きく変化している位置であり、明確に特定することができた。主鉄筋の検知は可能であるが、その下に位置する配力鉄筋については、反射波形が見られず、検知することはできなかった。水平ひび割れは、空隙 2mm の場合において検知が可能であることが判明した。それよりも小さい 0.5mm, 1.0mm の場合、反射波形および画像に変化が見られないことから識別は困難であると考えられる。次に、土砂化については、反射波形および画像が他のケースと比べて著しく異なる状況が見られた。粗骨材のみの場合と粗骨材および細骨材をブレンドした場合の違いは見られなかった。また、模擬した土砂化はかぶり厚さ 30mm の範囲であるが、土砂化の深さまでは検知ができなかった。どのケースにおいても、表面乾燥と湿潤では目立った違いは見られなかった。

コンクリート表面の水分状態	カウント値の目安									
① 絶乾状態	10	55								
② 乾燥状態		60	132							
③ 表面乾燥状態		137		230						
④ 湿潤状態			235	306	520					
⑤ 濡水状態					521	744				
		100	200	300	400	500	600	700		
	電気抵抗式水分計 (カウント値)									

図-10 コンクリート水分状態とカウント値の関係<sup>1)</sup>

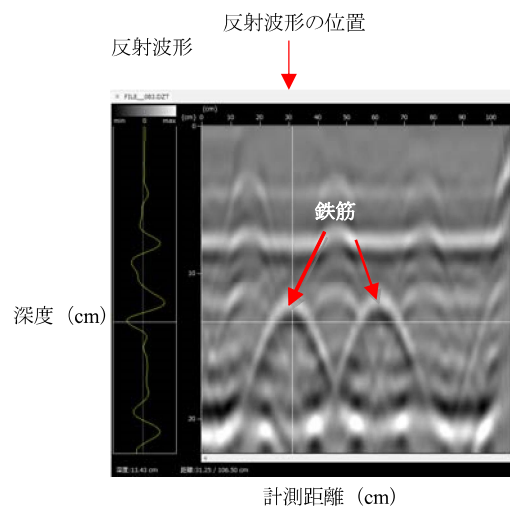


図-11 ハンディ型電磁波レーダの測定画面

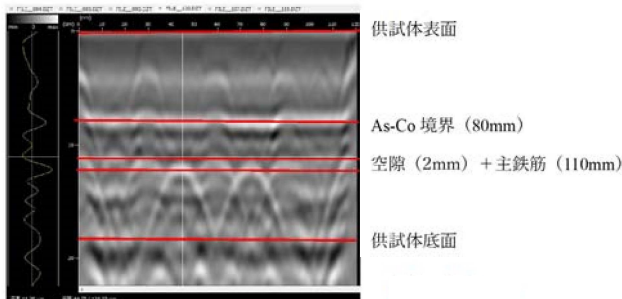


図-12 水平ひび割れ (表面乾燥, 空隙 2mm)

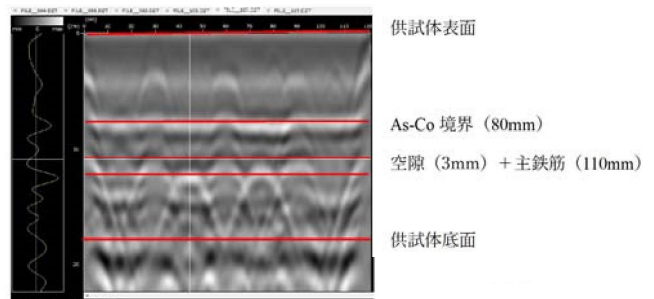


図-13 水平ひび割れ (表面乾燥, 空隙 3mm)

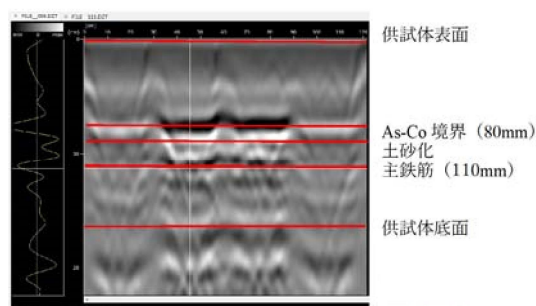


図-14 土砂化 (表面乾燥, 粗骨材 (乾燥))

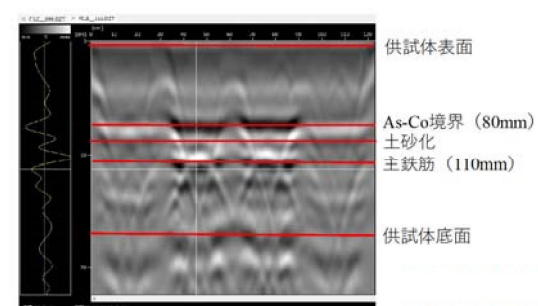


図-15 土砂化 (表面乾燥, 粗骨材+細骨材 (乾燥))



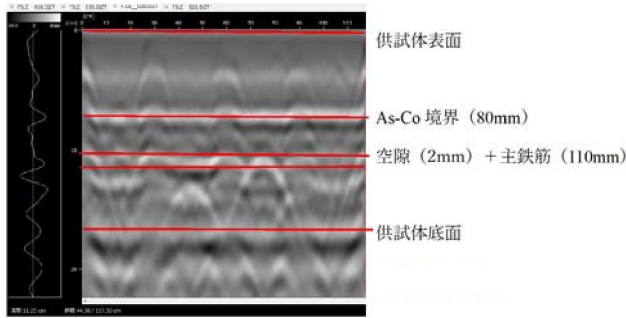


図-16 水平ひび割れ (湿潤, 空隙 2mm)

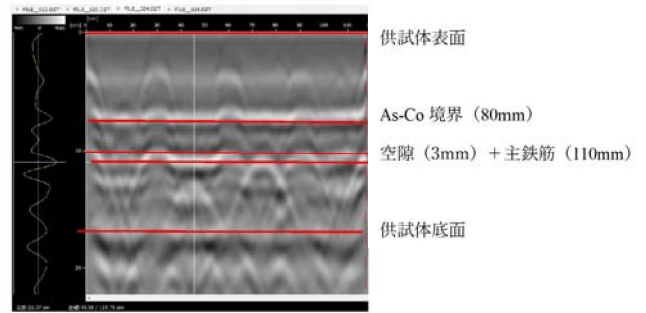


図-17 水平ひび割れ (湿潤, 空隙 3mm)

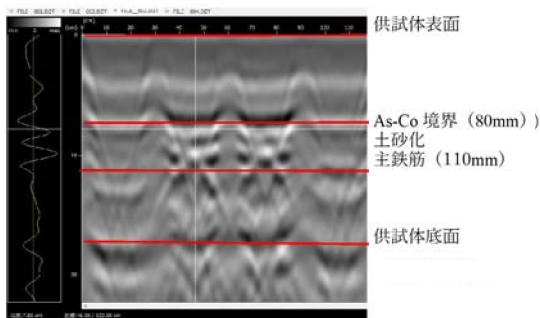


図-18 土砂化 (湿潤, 粗骨材+細骨材 (乾燥))

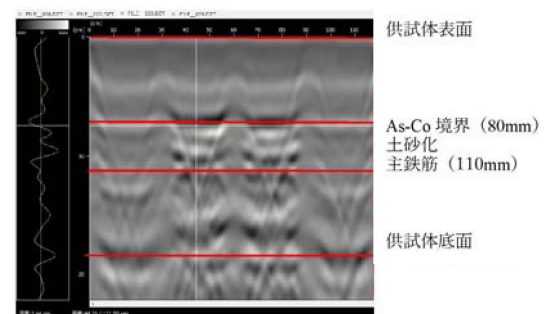


図-19 土砂化 (湿潤, 粗骨材+細骨材 (湿潤))

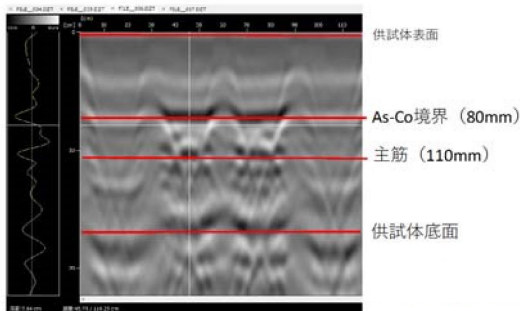


図-20 土砂化 (湿潤, 粗骨材 (乾燥))

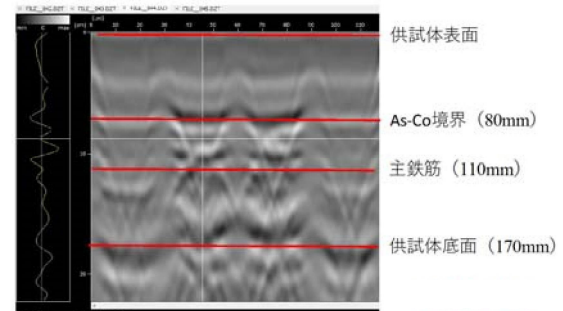


図-21 土砂化 (湿潤, 粗骨材 (湿潤))

4. 2 手押し型電磁波レーダの計測結果および考察

図-22 は、手押し型電磁波レーダによる測定画像の一例である。反射波形は+側が黒色、-側が白色とし、波形の大きさに応じて色付けされる。図-23～図-30 に実験ケースの中で代表的な主鉄筋位置における深度方向の反射波形と測線の沿った画像を示す。なお、コンクリートの比誘電率は7とした。舗装部分 (80mm) とコンクリート板の境界は、反射波形が大きく変化している位置であり、明確に特定することができた。主鉄筋の検知は可能であるが、その下に位置する配力鉄筋については、主鉄筋で反射するため、検知することはできなかった。表面乾燥状態の場合、水平ひび割れが模擬する空隙 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm では、空隙ゼロの場合と比べ

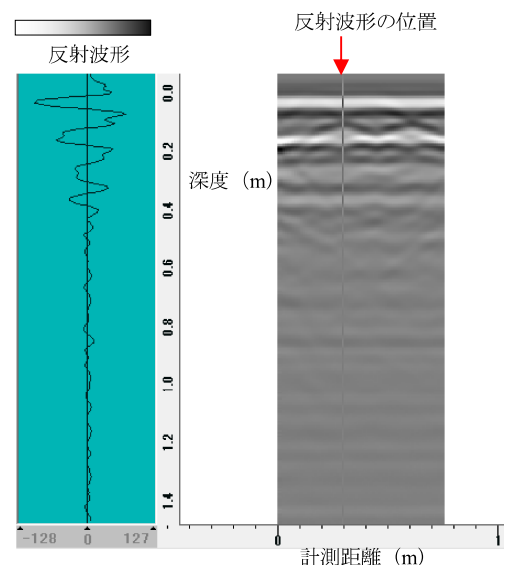


図-22 手押し型電磁波レーダの測定画像

て、違いが見られなかった。空隙 3mm のときに反射波形に微弱な変化が見られたが、空隙の影響によるものか否かについて特定することはできなかった。また、土砂化については、反射波形が他のケースと比べて著しく乱れており、画像に関しても異なる状況が見られた。粗骨材のみの場合と粗骨材と細骨材をブレンドした場合の違いは見られなかった。しかし、かぶり厚さ 30mm 部分の土砂化に対して、土砂化の

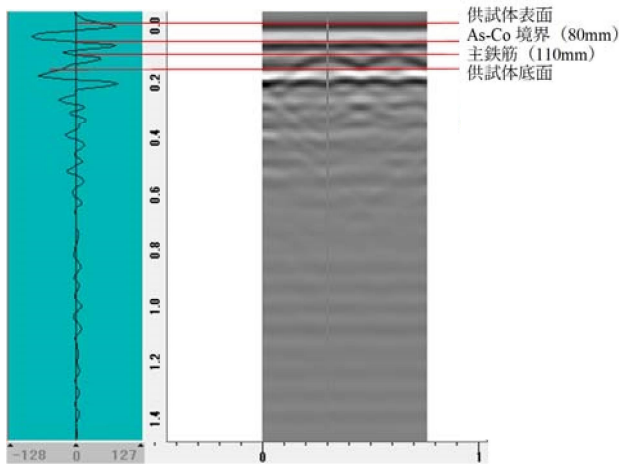


図-23 健全 (表面乾燥)

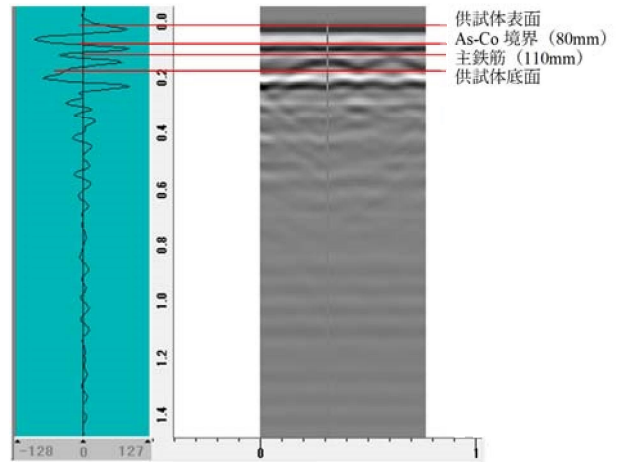


図-24 水平ひび割れ (表面乾燥, 空隙 3 mm)

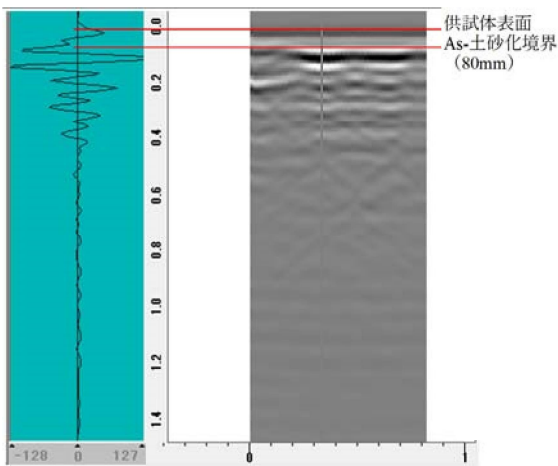


図-25 土砂化 (表面乾燥, 粗骨材のみ)

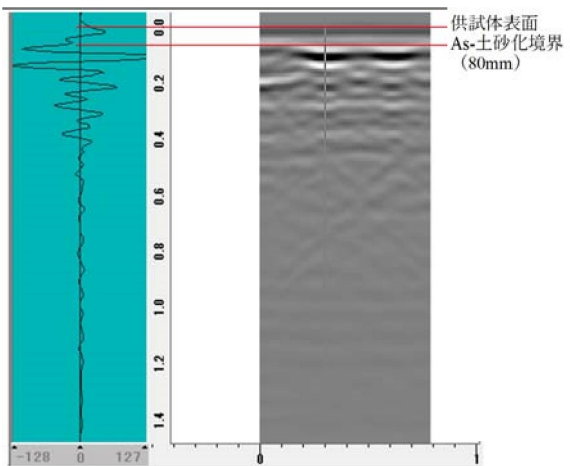


図-26 土砂化 (表面乾燥, 粗骨材+細骨材)

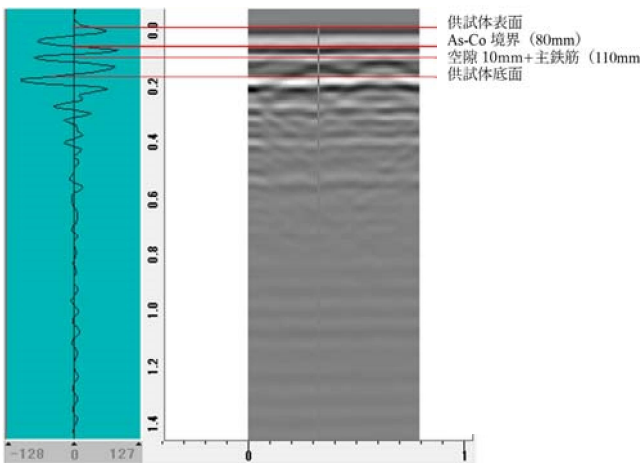


図-27 水平ひび割れ (湿潤, 空隙 10 mm)

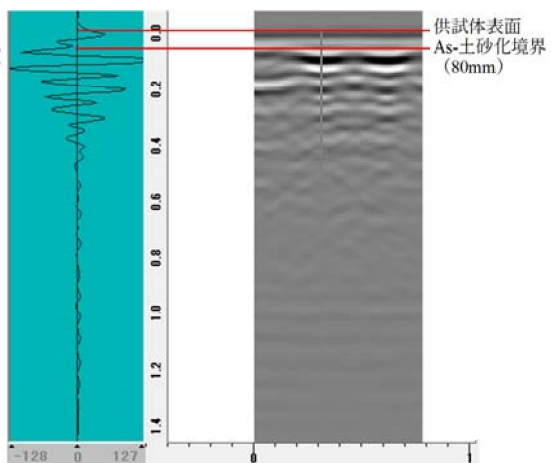


図-28 土砂化 (湿潤, 粗骨材 (湿潤))

深さについては検知することができなかった。一方、湿潤状態の場合、空隙 10mm においてひび割れ検知が可能であることが判明した。それよりも小さい空隙では、反射波形および画像に変化が見られないことから識別は困難であると考えられる。どのケースにおいても表面乾燥と湿潤では、目立った違いは見られなかった。

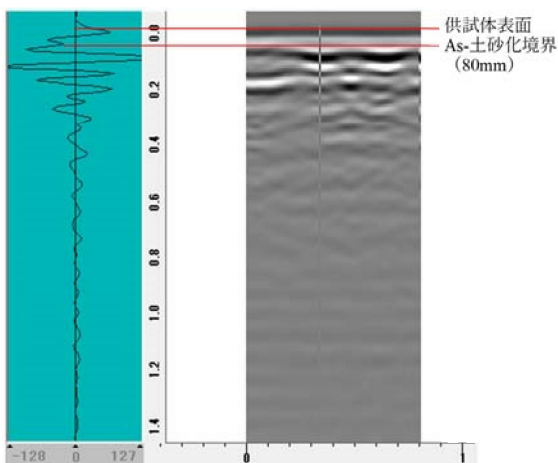


図-29 土砂化(湿潤, 粗骨材+細骨材(乾燥))

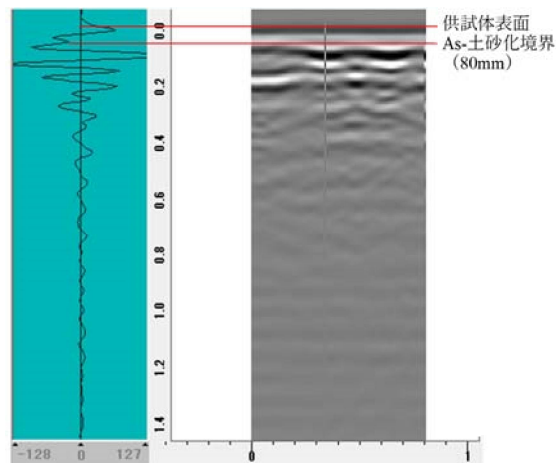


図-30 土砂化(湿潤, 粗骨材+細骨材(湿潤))

## 5. まとめ

上記に示す供試体を用いた計測結果による知見は、以下のとおりである。水平ひび割れに関しては、ハンディ型電磁波レーダでは、空隙 2mm 程度であれば検知可能、一方で、手押し型電磁波レーダでは、空隙 10mm 程度であれば、湿潤状態において検知可能と考えられる。また、土砂化の有無について、ハンディ型および手押し型の電磁波レーダともに検知できることが判明したが、土砂化の深さに関して特定することはできなかった。なお、コンクリート平板の水分状態として、表面乾燥と湿潤で目立った差は見られなかった。

以上より、本実験結果だけでは、RC 床版内部の損傷識別手法を構築することは困難であり、更なる詳細検討が必要であると考えられる。滞水と水平ひび割れの関係、土砂化に関しては、その有無だけではない。道路管理者にとって、土砂化深さが比較的浅い段階における RC 床版の内部損傷の発見は、舗装を維持管理する上でも重要であることから、土砂化深さを変えて引き続き検証する必要がある。今後、これらを踏まえ、新たな供試体を作製し、更なる識別検知の可能性について、詳細研究を進めていきたいと考えている。

謝辞：本研究は、令和 5 年度一般社団法人近畿建設協会および一般財団法人日工記念事業団の研究助成の援助を受けて、阪神高速技術株式会社およびジオ・サーチ株式会社の協力により実施した。関係各位に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 谷倉泉, 榎園正義, 後藤昭彦: 床版防水工における水分計の適用性に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.59A, pp.1112-1123, 2013.3

# 深層学習による山岳トンネル切羽の岩盤評価および支保設計に関する研究

関西大学環境都市工学部 教授 ○楠見晴重, 尹禮分

## 1. 研究背景および目的

NATM (New Austrian Tunneling Method) 工法地山の強度を活用して周囲の地層と一体化することでトンネルの強度を得ている。そのため、地山等級区分に基づき標準的な支保パターンが設定されるが、トンネル施工時には技術者の目視による掘削断面すなわち切羽の状況（岩判定）を観察・計測し、その結果から最適な支保パターンが決まる。「安全性」および「経済性」を確保した合理的な施工を行うために、切羽面の岩盤評価に基づいた適切な支保パターンの決定が重要となり、通常、岩盤評価は各現場における技術者によって、あらかじめ決められた評価項目にしたがって点数付けを行う。一方、熟練した技術者や建設現場での人材不足などのなかで、人工知能 (Artificial Intelligence, AI) や情報通信技術 (Information and Communication Technology, ICT) を建設現場に取り入れ、人間の判断や経験を活かしながら客観的でかつ標準的な評価手法として確立しようとする動きがある。

そこで、山岳トンネル施工時の作業における熟練技術者の目視から支保パターンの判定までの過程に機械学習を導入し、技術者を支援するトンネル切羽の岩盤判定システムおよび支保パターン決定システムの構築を目的とする。トンネル建設現場から収集されたデータを用いて検証する。具体的には、深層学習を用いて、9項目4段階の切羽観察様式の割れ目の3項目や風化変質に関する評価項目を活用し、トンネル切羽面の岩盤評価に対する適用性について検討する。割れ目の3項目では、CNN (以下 Convolutional Neural Network) を用いて検証し、風化変質の項目では、CNN と HSV 色空間を用いて解析を行った。また、CNN の可視化技術である Gradient-weighted Class Activation Map (Grad-CAM) を適用し、CNN が実際に岩盤亀裂を判断根拠として評価できるかを検証する。最後に、上記で得られた、割れ目、風化変質の評価点を基に、Support Vector Machine (以下 SVM) を用いて支保パターン設計を行う。

## 2. 切羽の岩盤評価および支保パターン

岩盤判定において切羽を観察する際、国土交通省が設定した基準となる、評価区分判定の目安として統一された9つの項目 (表-1) を、切羽を図1で示すように右肩、天端、左肩の3つに分けて評価し、1つの切羽に対して計27個の項目に1~4点の点数が施工者の判断によって付けられる。その後、定められた計算方法によって、1つの切羽につき1つの点数が求められる。この点数を評価点とする。評価点に基づき、切羽から地山の状態を確認した後、地山を支えるために適切な支保構造を設定するが、その支保パターンにはB, CI, CII, DI, DII, DIIIがある。

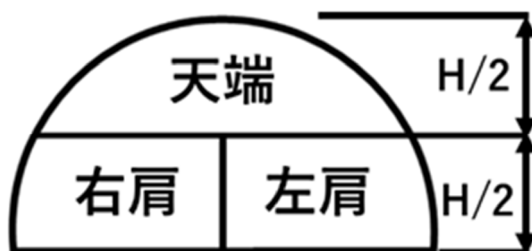


図1 天端、左肩、右肩の分け方 (H: 上半掘削高さ)



表 1 切羽面の評価項目一覧

評価項目	評価点 1	評価点 2	評価点 3	評価点 4
切羽の状態	安定	鏡面から岩塊が抜け落ちる	鏡面の押し出しを生じる	鏡面は自立せず崩れ、あるいは流出
素掘面の状態	自立	時間がたつと緩み肌落ちする	自立困難掘削後早期に支保する	掘削に先行して山を受けておく必要がある
圧縮強度	$\sigma_c \geq 100\text{Mpa}$ ハンマー打撃跳ね返る	$100\text{Mpa} > \sigma_c \geq 20\text{Mpa}$ ハンマー打撃で砕ける	$20\text{Mpa} > \sigma_c \geq 5\text{Mpa}$ 軽い打撃で砕ける	$4.5\text{Mpa} > \sigma_c$ ハンマー刃先食い込む
風化変質	なし・健全	岩目に沿って変色、強度やや低下	全体に変色、強度相当に低下	土砂状、粘土状、破碎、当初より未固結
割れ目の頻度	間隔 $d \geq 1\text{m}$ 割れ目無し	$1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	$20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	$5\text{cm} > d$ 破碎当初より未固結
割れ目の状態	密着	部分的に開口	開口	粘土を挟む、当初より未固結
割れ目の形態	ランダム方形	柱状	層状、片状、板状	土砂状、細片状、当初より未固結
湧水	なし・滲水程度	滴水程度	集中湧水	全面湧水
水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	崩壊、流出

### 3. CNN と Grad-CAM の概要

CNN は昨今、画像認識分野で広く活用されている深層学習の一種で、画像を入力データとしていくつかの特徴的な機能を持った層に通して画像分類を行う。層の構成は、複数の畳み込み層、プーリング層からなる特徴抽出部と全結合層からなる識別部に分かれている。入力画像データは、まず、畳み込み層で複数のフィルタを活用して画像の特徴を検出し、次にプーリング層で計算量を削減するために、畳み込み層から入力された特徴量マップのサイズを縮小する。これらの処理が繰り返され、全結合層でこれまでの層で検出された特徴の組み合わせから予測結果に分類する。そして、順伝播（入力から出力へ情報が伝わる）で得られた出力値と予め用意されている教師値との誤差を求め、それを逆伝播（出力から入力へ情報がさかのぼる）し、勾配降下法を使用して各層の重みとバイアスを調整、誤差を最小化することで最適なモデルを構築する。

Grad-CAM は CNN による出力結果の判断根拠を可視化する技術であり、予測値と全結合層の前の畳み込み層で生成された各特徴量マップとの勾配を利用する。まず、順伝播で特徴量マップと出力結果を求め、次に求めた出力結果を利用して逆伝播し、各特徴量マップの勾配を計算する。勾配の大きい pixel ほど予測結果に寄与しているため、計算された勾配をヒートマップ化することで CNN が画像のどの部分に着目して判定しているのかを確認できる。

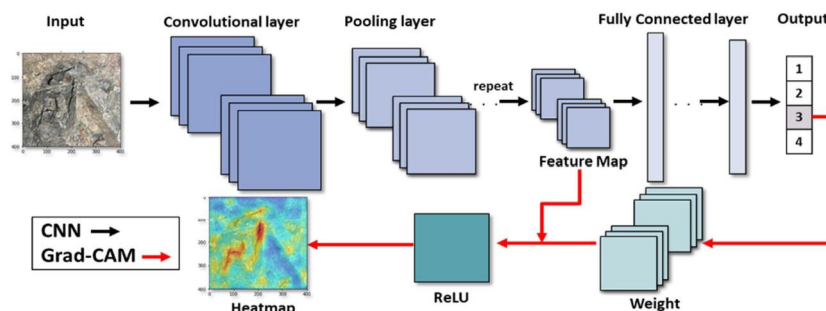


図 2 CNN と Grad-CAM の概略図

4. HSV (Hue・Saturation・Value) 色空間

HSV 色空間とは、色を「色相(Hue)」, 「彩度(Saturation)」, 「明度(Value・Brightness)」の3要素で表現する方式である。色相は、赤や緑といった具体的な色を定義する要素、彩度は、色相で定義された色の鮮やかさ・濃さを表す要素、明度は、色相で定義された色の明るさ・暗さを表す要素である。HSV 色空間の利点としては、細かな色の調整が可能である点や、色の調整が容易であるといった点が挙げられる。図3に3要素を示す。

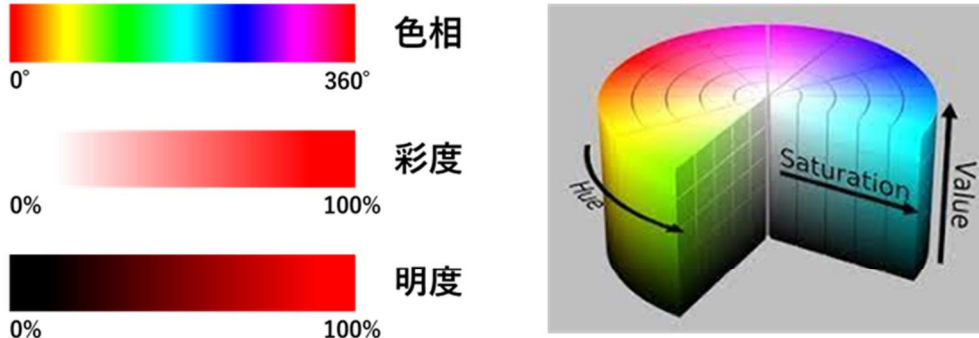


図3 HSV 色空間の3要素

5. SVM の概要

本章では、機械学習の一種であるサポートベクタマシン (Support Vector Machines, 以下 SVM という) について述べる。SVM は、特にパターン分類や関数近似の効果的な方法として注目を集めている。この方法の大きな特徴としては、マージン最大化による分離超平面の生成およびカーネル法を用いることである。

例えば、学習データ  $\{(x_i, y_i), i = 1, \dots, \ell\}$  に対し、 $y_i = +1$  or  $-1$  のいずれをとる 2 値の分類問題を考える。通常、与えられた問題は線形分離が不可能であり、このとき、ある非線形関数  $\Phi$  を用いて高次元の特徴空間へ写像 ( $z = \Phi(x)$ ) する (図 4)。これによって、線形分離可能な状態となり、以下のような分離超平面を見つけることになる：

$$f(x) = w^T z + b \tag{1}$$

そのあと、 $f(x_i) \geq 0$  ( $y_i = +1$ ) ,  $f(x_i) \leq 0$  ( $y_i = -1$ ) のように分離されるとする。

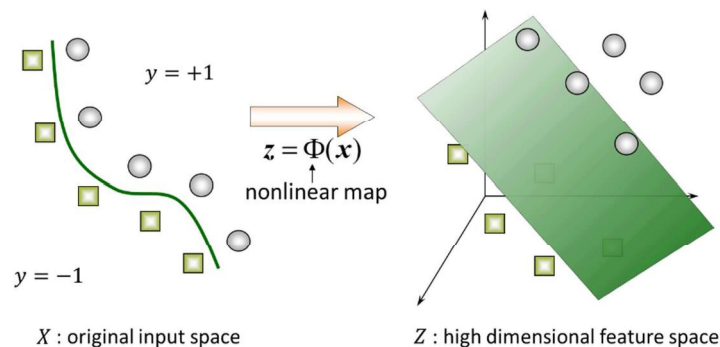


図4 データの高次元特徴空間への写像

6. 評価指標

表 2 に多クラス分類の混同行列を示す。データサイエンス技術を用いて「予測モデル」を生成した際に、そのモデルの性能を定量的に計測することが必要である。評価指標とはモデル性能を図るため

の計算式である。本研究では、予測結果全体がどの程度真値と一致しているかを表す正解率(Accuracy)、陽性と予測したものの内、実際に陽性だったものの割合を表す再現率(Recall)、実際に陽性であるものの内、陽性と予測することが出来た割合を表す適合率(Precision)の 3 指標を使用する。また、正解率は式(2)、再現率は式(3)、適合率は式(4)で表すことが出来る。

表 2 多クラス分類の混同行列

		CNNによる予測結果		
		A	B	C
実際の評価点	A	TrueA (TA)	FalseB(A) (FBA)	FalseC(A) (FCA)
	B	FalseA(B) (FAB)	TrueB (TB)	FalseC(B) (FCB)
	C	FalseA(C) (FAC)	FalseB(C) (FBC)	TrueC (TC)

$$\text{正解率} = \frac{TA + TB + TC}{TA + FBA + FCA + FAB + TB + FCB + FAC + FBC + TC} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{再現率} = \frac{TA}{TA + FBA + FCA} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{適合率} = \frac{TA}{TA + FAB + FAC} \times 100 \quad (4)$$

## 7. CNN による岩盤亀裂に関する評価点判定

### (1) 解析概要

本解析では、切羽画像を入力データ、9 項目 4 段階切羽観察様式の割れ目に関する評価項目 (E) 割れ目の頻度、(F) 割れ目の状態、(G) 割れ目の形態の評価点を出力データとし、CNN の学習、モデルの構築、検証を行い、岩盤亀裂に対する評価を実施する。入力前の画像処理は、図 5 に示すように、現場で撮影された切羽全景画像を支保が映り込まない範囲でトリミングをし、実際の 1m に相当する 400px×400px の単位で左肩、右肩部を 10 分割、天端部を 14 分割する。分割した画像から鏡吹付や鏡ボルトが映っている画像を除去したものを解析データとして扱う。また、実際の現場では分割画像ではなく、天端、左肩、右肩で評価点を付けているので、出力された複数の分割画像に対する評価点を天端、左肩、右肩に集約して再評価を行う。

教師データを表 2 に示す。表 3 の教師データは、熟練技術者が各分割画像に対して修正した評価点である。過去に、全景に対する評価点を分割画像に流用して解析を行ったが、明らかに健全な切羽分割画像を評価点 3 や 4 という扱いにして学習をしていた問題を確認した。この問題を解決する為に、各分割画像に対して評価点の修正を行った。テストデータは、表 4 に示した切羽全景画像を 2307 枚に分割した画像を使用する。また、使用した切羽画像は、主に火成岩（花崗閃緑岩）と堆積岩（砂岩・泥岩）で構成されている。

本研究で使用する CNN は、4 つの畳み込み層、3 つのプーリング層、3 つの全結合層で構成されており、プーリング層は Max Pooling、活性化関数は CNN 部と NN 部では ReLU 関数、出力層では Softmax 関数を使用し、多層の学習の際に生じやすい過学習を防止するために Dropout 層を NN 部に追加する。尚、学習する

際の epoch 数を 300 回, batchsize を 16 と設定し, 予測値と教師値を求める損失関数, 重みとバイアスを調整する勾配降下法のアルゴリズムは, それぞれ categorical crossentropy, Adagrad を使用する。

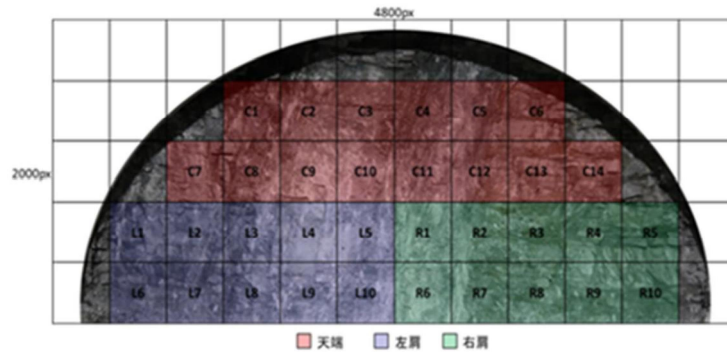


図 5 切羽画像と分割メッシュのマッピング関係

表 2 評価点判定の教師データ

評価項目	全データ (枚)	1 点 (枚)	2 点 (枚)	3 点 (枚)	4 点 (枚)
(E)	476	69	159	139	109
(F)	460	69	214	96	81
(G)	307	71	10	150	76

表 3 評価点判定のテストデータ (分割前)

評価項目	全データ (枚)	1点(枚)	2点(枚)	3点(枚)	4点(枚)
(E)	315	2	122	181	10
(F)		35	233	40	7
(G)		81	3	223	8

(2) 解析結果

図 6 は, CNN による岩盤亀裂に関する評価点判定結果である。評価項目 E の正解率は 77.5%, 評価項目 F の正解率は 76.4%, 評価項目 G の正解率は 74.1% という結果になった。評価項目 E の評価点 1 の再現率 (recall), 適合率 (Precision) が低い理由はテストデータの枚数が不十分であるからと考えられる。また, 誤判別している切羽画像の多くが, 割れ目間隔が非常に狭く, 割れ目深さが浅い切羽画像だった。このような切羽画像を CNN は健全と判断していた。評価項目 F で誤判別している切羽画像の多くが評価点 2, 3 点の画像であった。評価項目 F の評価基準である, 「2. 部分的に開口」と「3. 開口」の違いが CNN にとって判断が困難であるという結果となった。評価項目 G で誤判別している切羽画像の多くは, 学習枚数の少ない評価点 2 の画像であった。しかし, 学習枚数が極端に少ないにも関わらず, 正解に判別できていた画像もあったことから, 学習枚数を増やすことでこの問題は解決されると考えられる。

次に Grad-CAM の結果を示す。評価項目 E と評価項目 F の Grad-CAM の解析では, 亀裂のある岩盤の判断基準は正しいが, 4 点である土砂と 1 点である健全な岩盤の判断基準が似ているといった問題点があった。図 7 に評価項目 G の評価点 4, 1 の画像を示す。図 7-(a) のような評価基準が岩盤亀裂を対象としていない 4 点の画像において, CNN の着目度が亀裂部分で低く, その周辺の土砂・細片状態で高いことを確認した。また, 図 7-(b) のような亀裂がない 1 点の岩盤では, 画像全体において CNN の着目度が高くなっていることを確認した。このことから, 評価項目 G では評価基準に沿った判断が出来ていることを確認した。

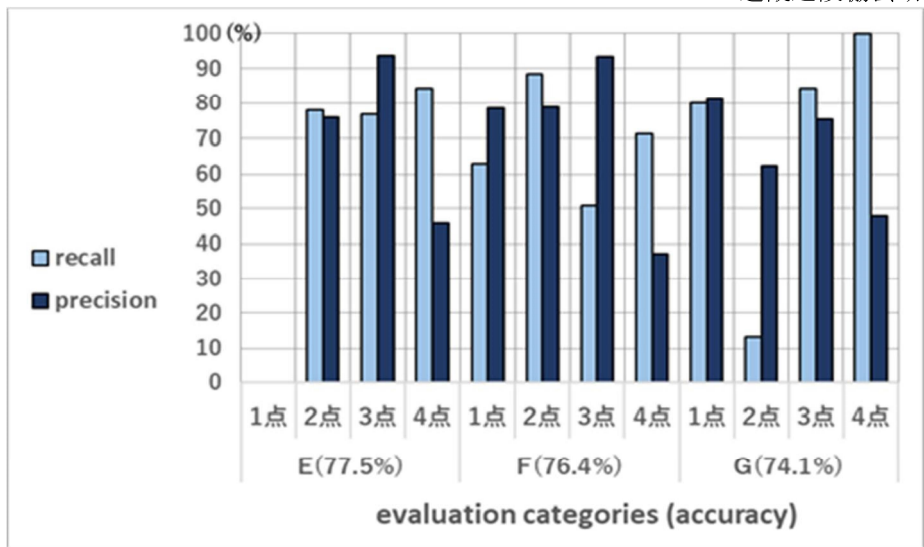


図 6 CNNによる岩盤亀裂に関する判定結果

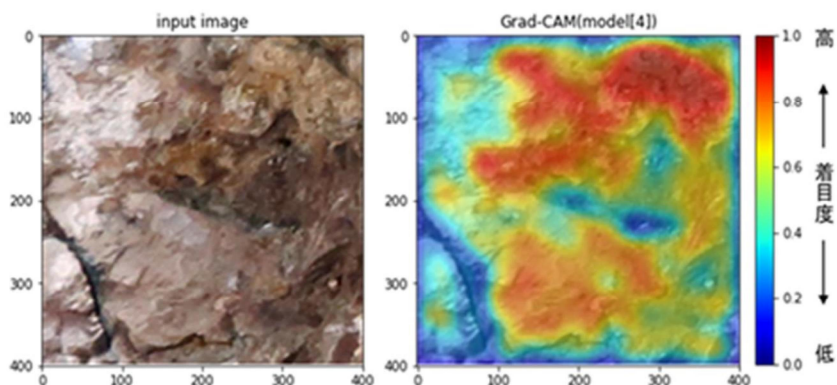


図 7-(a) Grad-CAMの結果(Gの4点の場合)

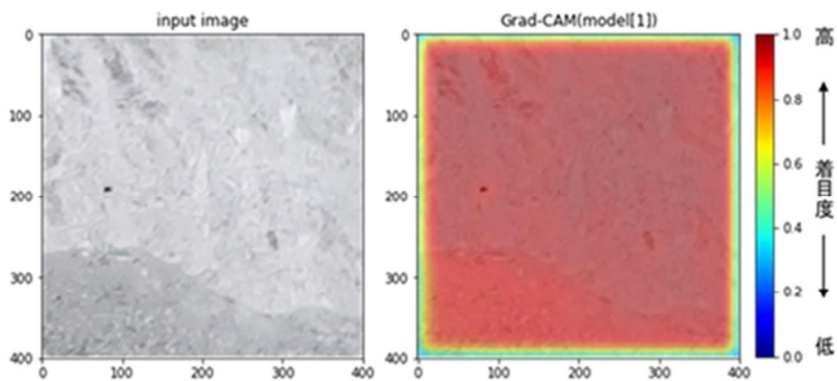


図 7-(b) Grad-CAMの結果(Gの1点の場合)

8. CNNによる岩盤風化に関する評価点判定

(1) 解析概要

本解析では、切羽画像を入力データ、9項目4段階切羽観察様式の風化変質に関する評価項目(D)風化変質の評価点を出力データとし、CNNの学習、モデルの構築、検証を行い、岩盤風化に対する評価を実施する。入力前の画像処理は、図5に示すような切羽全景画像を、800px×2000px(天端、左肩、右肩単位)で分割する。分割した画像から鏡吹付や鏡ボルトが映っている画像を除去したものを解析データとして扱う。表4に本解析で使用した画像データを示す。この画像を教師学習用とテスト用8:2の割合で分けてCNN解析を行った。CNNモデルの学習・検証方法は、より正当な評価を行うために、k分割交差検証(k=5)を



適用する。これは、全データを5つのグループに分け、4つのグループでCNNモデルの学習を行い、残り1つのグループでモデルの検証を実施し、それを5回繰り返す方法で、それを2セットして作成された検証損失が最小値時の10個のモデルで評価を行う。学習の際のモデルの構造、ハイパーパラメータは7章と同様の条件で行う。

表 4 岩盤風化解析で使した画像

評価項目	合計(枚)	1点(枚)	2点(枚)	3点(枚)	4点(枚)
(D)	1350	170	858	139	109

また、風化変質の評価は風化変色箇所に着目して評価することが多いので、HSV色空間を用いて切羽画像の風化変色箇所を抜き取った、図8-(b)のような加工画像も解析に使用し、無加工画像を用いた解析と加工画像を用いた解析で正解率に変化があるのかを比較検討する。



図 8-(a) 元の切羽画像

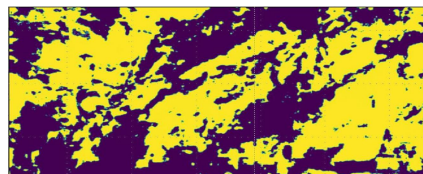


図 8-(b) HSV加工画像（黄：風化変色箇所）

(2) 解析結果

図9はCNNによる岩盤風化に関する評価点判定の結果である。図9を見てわかる通り、風化面積抽出加工を施した画像での解析は、無加工画像での解析よりも正解率が約13%向上した。このことから、風化変質を評価する際に実際の現場では色相を重要視していることが分かった。CNNの予測が外れた原因として考えられるのは、写真のみでは岩芯部の固さを考慮することが出来なかったからであると考えられる。本解析では、風化変質の表面的な要素を強調して解析を行ったので、この解析に圧縮強度、穿孔エネルギー等の内面的な情報を与えて解析を行うことで、表面的な要素と内面的要素の2つを考慮した解析を行うことが可能になるのではないかと考えられる。

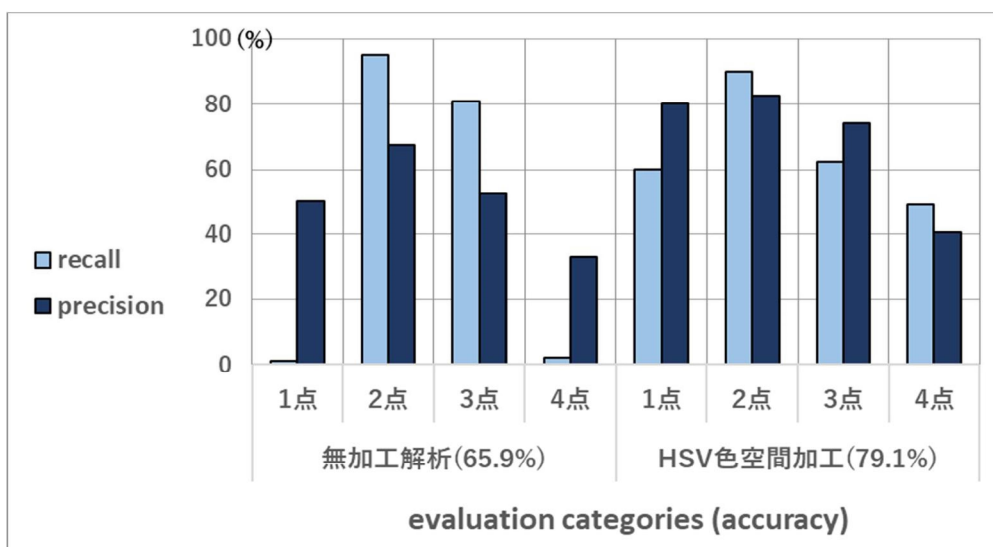


図 9 CNNによる岩盤風化に関する判定結果

### 9. SVM を用いた支保パターン設計

#### (1) 解析概要

7 章, 8 章で CNN は岩盤亀裂及び岩盤風化評価において一定の水準で評価することが出来るという結果を得た。そこで, 本解析では先程紹介した CNN 解析方法を用いて切羽画像の評価点を予測し, その結果を入力データ, 支保パターンを出力データとして SVM の学習, モデルの構築, 検証を行う。この解析で用いる教師データ (5503 個) の採用支保概要を表 5, テストデータ (467 個) の採用支保概要を表 6 に示す。具体的な解析方法として, 2 パターンのテスト用データを用いて解析し, 比較を行う。1 パターン目は, 9 項目 4 段階切羽観察様式全ての評価点を現場技術者が実際に評価した評価点を使用する。それに対して, 2 パターン目のテストデータは, 9 項目 4 段階切羽観察様式の内, (D) 風化変質, (E) 割れ目の頻度, (F) 割れ目の状態, (G) 割れ目の形態の 4 項目を, 技術者の評価点から CNN で評価した評価点に置き換えたデータを使用する。この 2 つのテストデータの結果を比較することで, 本研究の CNN 解析方法が現場の評価点設定, 及び支保パターン選定に適用可能か判断することが出来ると考えた。尚, 教師データは両者共通のデータを使用する。

表 5 SVM による支保パターン判定 (教師データ)

支保パターン	合計	CI	CII	DI	DII
データ数	5503	236	3167	1973	127

表 6 SVM による支保パターン判定 (テストデータ)

支保パターン	合計	CI	CII	DI	DII
データ数	467	52	183	206	26

#### (2) 解析結果

表 7-(a)は, 1 パターン目のテストデータを用いた結果である。表 7-(b)は, 2 パターン目のテストデータを用いた結果である。この両者の結果を比較すると, 後者のテストデータを用いた解析の正解率が高いという結果となった。また, 両混同行列において, 誤判定の分布が非常に類似していることを確認した。この結果より, (D) 風化変質, (E) 割れ目の頻度, (F) 割れ目の状態, (G) 割れ目の形態の 4 項目において, CNN を用いて設定した評価点は, 実際の支保パターン判定で適用可能であることを確認した。

表 7-(a) パターン 1 の SVM 結果

正解率 69.8%		SVMによって予測された支保パターン			
		CI	CII	DI	DII
実際の支保パターン	CI	0	52	0	0
	CII	0	138	45	0
	DI	0	25	181	0
	DII	0	0	19	7

表 7-(b) パターン 2 の SVM 結果

正解率 72.2%		SVMによって予測された支保パターン			
		CI	CII	DI	DII
実際の支保パターン	CI	0	51	1	0
	CII	0	157	26	0
	DI	0	32	174	0
	DII	0	0	20	6

### 10. おわりに

地山等級判定における切羽の観察から割れ目, 風化変質に関する評価点の判定までの過程に深層学習の一種である CNN を導入し, トンネル切羽面の岩盤評価に対する適用可能性について検討した。また, 本研究で提案した CNN 解析方法で決定した評価点を基に, SVM を用いて支保パターン判定を行った。今回得られた成果は効率よく適正な施工に役に立つと期待する。