

一般社団法人防衛施設学会主催

年次フォーラム2026

(令和7年度年次研究発表会論文集)

令和8年2月



(一社)防衛施設学会

Japan Society of Defense Facility Engineers

<https://www.jsdfe.org/>

一般社団法人防衛施設学会年次フォーラム 2026 論文集目次

「環境」

座長：副島正睦（統合幕僚学校）

- ① PFAS 含有土壌の加温原位置土壌洗浄による PFAS 除去効果の検証
四宮みゆき、畑中一樹（(株) 竹中土木）、
山崎祐二、外野圭太（竹中工務店）、田中周平（京都大学）・・・ 1
- ② PFAS 汚染土壌の不溶化に関する基礎的検討
國井聡、林夕紀子、森川純、野田兼司、芳賀直樹（前田建設工業（株））・・・ 7
- ③ PFAS 汚染土壌処理技術の実用化に向けた検討
日野良太、西川直仁、日笠山徹巳（(株) 大林組）・・・ 11

「防災」

座長：野々山栄人（防衛大学校）

- ④ 一時的または長期的避難所における持続可能な水利用管理に対する
課題解決に関する検討
荻原洋聡（(NPO 法人) 貯水タンク防災ネットワーク）、
中根圭介（ユーティリティ・ソリューションズ）、
栗田恵子（大野防衛工学研究所）・・・ 17
- ⑤ 緊急時に即応可能な簡易設置型流木対策工の検討
原田紹臣（京都大学）、鳥山悟史、藤田健太郎、須藤信也（日之出水道機器（株））、
小西成治（ヒロセ補強土（株））、石川芳治（東京農工大学）・・・ 25

「基地維持・管理」

座長：小野泰介氏（鋼板製一体形タンク工業会）

- ⑥ 防衛インフラのエネルギー自立化を支える蓄電コンクリートの研究
～電子伝導性コンクリートを基盤とする発熱・蓄電コンクリート～
小熊祥平、ラ・ミントン、青木涼（會澤高圧コンクリート（株））、
劉宏涛（アイザワ技術研究所（株））・・・ 31
- ⑦ PVA 繊維補強コンクリートを用いた装軌車道の長期供用に関する検証
小川敦久、澤田高浩（(株) クラレ）、
大西英二（(株) メルコーポレーション）・・・ 39
- ⑧ 映像鮮明化技術と AI 技術を活用した基地維持管理と基地外周および
沿岸警備システムに関する研究
横山雅俊（株式会社ユニバーサルコンピュータ研究所）・・・ 45
- ⑨ 道路舗装のメンテナンスフリーを可能にした Fe 石灰工法の活用に関する検証
庄嶋芳卓、井真宏（(株) エフイ石灰技術研究所（Fe 石灰技術研究所））・・・ 53

「建設技術」

座長：森島慎太郎氏（日鉄高炉セメント（株））

- ⑩ 補強土壁における補強材の引抜き抵抗メカニズムに関する研究

野々山栄人、宮田喜壽、宮本慎太郎（防衛大学校）・・・57

- ⑪ ボーリング情報などの地盤情報を用いた、地質地盤の特徴の検討および
地質リスクなどの抽出技術に関する報告

三村衛、北田奈緒子（（一財）GRI 財団）・・・59

「環境」

PFAS 含有土壌の加温原位置土壌洗浄による PFAS 除去効果の検証

VERIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF PFAS REMOVAL FROM PFAS-CONTAINING SOIL BY THERMALLY-ENHANCED IN-SITU SOIL FLUSHING

四宮みゆき*, 畑中一樹*, 山崎祐二**, 外野圭太**, 田中周平***

SHINOMIYA Miyuki, HATANAKA Kazuki, YAMAZAKI Yuji, HOKANO Keita and TANAKA Shuhei

* 株式会社竹中土木 技術・生産本部 技術開発部 技研 G (〒136-0075 東京都江東区新砂 1-3-3)

** 株式会社竹中工務店 技術研究所 建設・環境基盤研究部 (〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1)

*** 国立大学法人京都大学 地球環境学堂 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町 36-1)

キーワード：PFAS, 土壌汚染, 地下水汚染, 加温原位置土壌洗浄, 浄化

(Perfluoroalkyl compounds, soil pollution, groundwater pollution, Thermally-enhanced in-situ Soil Flushing, purification)

1. はじめに

ペルおよびポリフルオロアルキル化合物 (PFAS) は、炭素-フッ素結合による極めて高い化学的安定性を特徴とし、1940 年代の開発以来、泡消火薬剤、撥水・撥油製品、半導体製造用途など、産業分野から日用品まで幅広く活用されてきた。しかしながら、難分解性、生物蓄積性および生殖毒性等の有害性が明らかとなり、2000 年代以降、代表的な化合物であるペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS)、ペルフルオロオクタナ酸 (PFOA)、ペルフルオロヘキサンスルホン酸 (PFHxS) は、ストックホルム条約における規制対象物質として指定され、国内においても化審法の第一種特定化学物質に位置づけられている。

水質管理の観点では、PFOS および PFOA が水道水質管理目標設定項目に指定されており、2026 年 4 月からは 50 ng/L を基準値とする水道基準への格上げが予定されている。これにより、水道事業者には基準遵守と定期検査の義務化が見込まれている。全国各地で表流水や地下水における PFAS 汚染が相次いで報告される中、水道水源や生態系への長期的影響が懸念されており、水源の変更や活性炭処理等の緊急対応が実施されている状況である。

土壌環境においては、疎水基を有する PFOS や PFOA が土壌粒子への吸着性を示し、長期間にわたって土壌中に残留することが知られている¹⁾。国内では土壌中 PFAS 濃度に関する基準値は未設定であるものの、海外では土壌含有量の目標値設定に向けた動きがあり、世界各地の

環境調査において土壌からの検出事例が多数報告されている。このような背景から、土壌中 PFAS 濃度の効率的な低減技術の確立が急務となっている²⁾。

土壌からの PFAS 除去技術として、対象区域への注水・揚水による原位置土壌洗浄³⁾が注目されている。溶媒を用いた PFAS 除去の有効性が示されており、特に砂質土壌からの PFAS 溶出において、水を溶媒とした場合に約 90% の除去率が得られること、溶媒温度の上昇により土壌からの液相への移行が促進されることが示されており、注入水に温水を用いること地盤を加温して土壌に吸着した PFAS の液相への移行を促進させ、揚水により効率的に除去・回収できる可能性がある⁴⁾。

本研究では、地盤加温技術を併用した原位置土壌洗浄（以下、加温原位置土壌洗浄）の PFOA 含有土壌に対する有効性を評価することを目的として、室内土壌カラム試験と PFOA 等のペルフルオロカルボン酸類 (PFCAs) 含有砂質土壌に対して温水を用いた原位置浄化の現地実証試験を実施した。

2. 実験の方法室内土壌カラム試験

2.1 試験方法

原位置土壌浄化洗浄を模擬した室内カラム試験の概要を図-1 に示す。カラム試験では、PFOA を含有する砂質土壌 (20% 粒径 D_{20} からの推定透水係数 2.9×10^{-5} m/sec、自然含水比 27.4%、土壌 pH 5.2、土粒子密度 2.6 g/cm³) を供試土壌とし、ガラスカラム ($\phi 30$ mm × 長さ 300 mm、

有効容積約200 mL)に土壌を充填したのちに20℃、35℃、50℃の恒温槽内にそれぞれ設置した。各温度条件下でダイヤフラムポンプにてカラム下部よりイオン交換水を0.3 mL/min 程度となるよう通水し、土壌体積 (Bed Volume、以下 B.V.) の 0~0.5、0.5~1、1~2、2~3、3~5、5~8 倍量の時点までに通水させた各透過液をそれぞれ回収した。B.V.の 8 倍量の通水を終了した時点でカラムを解体し、試験後の土壌を回収した。各透過液中の PFOA 濃度は令和 2 年水質汚濁に係る人の健康保護に関する環境基準等の施行等について (通知) 付表 1⁵⁾に準拠した方法で、土壌試験は土壌中の PFOA、PFOS、PFHxS に係る暫定測定方法⁶⁾に基づいてそれぞれ測定した。

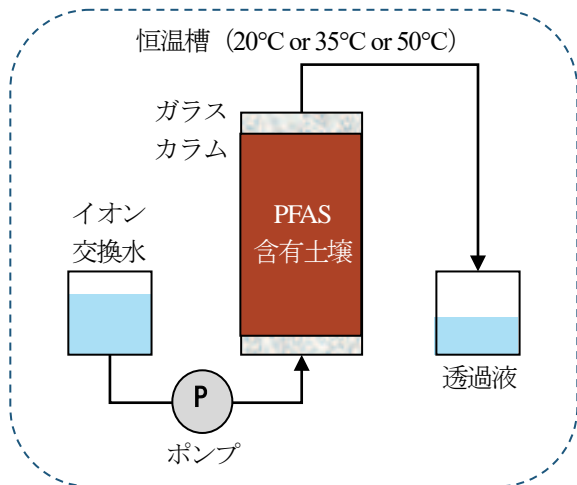


図-1 室内カラム試験の模式図

2.2 試験結果および考察

図-2 に各温度における透過液中 PFOA 濃度の推移を示す。B.V.の 1 倍量までの透過液中の PFOA 濃度は温度が高いほど高くなり、B.V.の 0.5 倍量までの透過液濃度は、20℃で 940 ng/L、35℃で 1,200 ng/L、50℃で 2,200 ng/L であった。B.V.の 8 倍量までの通水で土壌より除去された PFOA の総量は 20℃、35℃、50℃でそれぞれ 52 ng、62 ng、110 ng とこちらも温度が高いほど除去量が多くなった。透過液中濃度が PFOS および PFOA の公共用水域や地下水における暫定指針値 (50 ng/L) 以下となるまでに必要な通液量は、20℃及び35℃は B.V.の 5 倍量であったのに対して、50℃は B.V.の 3 倍量であった。

図-3 に試験前後の PFOA 土壌含有量の変化を示す。原土の PFOA 土壌含有量 1200 ng/kg に対して、試験後の PFOA 土壌含有量は 20℃、35℃、50℃でそれぞれ 210 ng/kg、120 ng/kg、66 ng/kg と大きく低減し、濃度低減率は 83%、90%、95%と温度が高いほど大きくなった。

図-4 に試験前後の PFOA 土壌溶出量の変化を示す。原土の PFOA 土壌溶出量 150 ng/L に対して、試験後の PFOA 土壌溶出量は 20℃、35℃、50℃でそれぞれ 9.7 ng/L、3.5 ng/L、0.9 ng/L となり、原土に対する土壌溶出量の低

減率は 20℃、35℃、50℃で 93%、98%、99%と土壌溶出量も土壌含有量と同様に温度が高いほど低減率は高くなった。表-1 に温度ごとの土壌含有量、土壌溶出量の低減率を整理した。

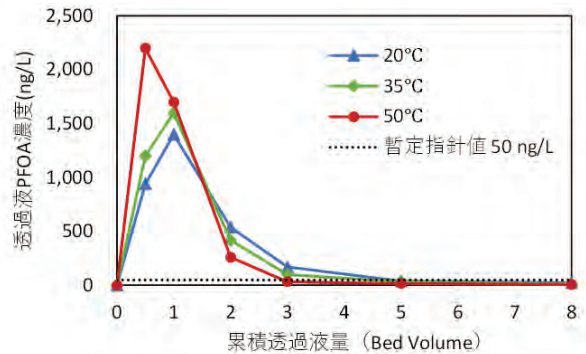


図-2 各温度における透過液中 PFOA 濃度の推移

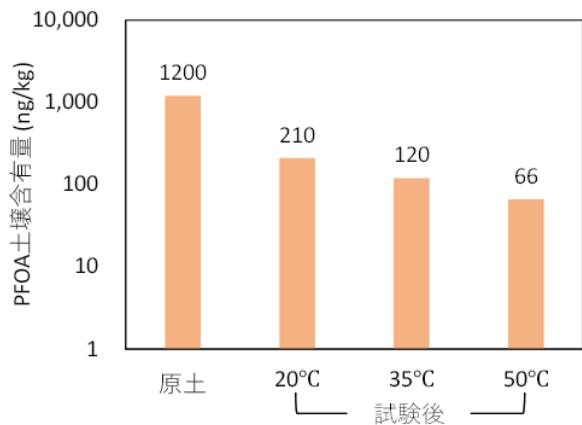


図-3 試験前後の PFOA 土壌含有量の変化

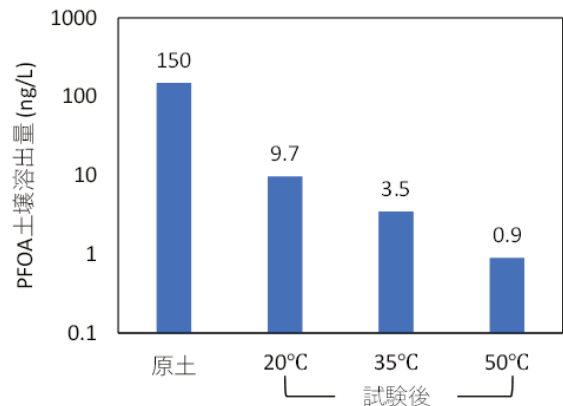


図-4 試験前後の PFOA 土壌溶出量の変化

表-1 各温度における試験後の PFOA 濃度軽減率

	20℃	35℃	50℃
PFOA 土壌含有量	82.5 %	90.0 %	94.5 %
PFOA 土壌溶出量	93.5 %	97.7 %	99.4 %

以上の結果より、温度が高いほど土壌から液相へのPFOAの溶出が促進され、土壌のPFOA濃度低減効果が高くなることが示唆された。地盤加温を併用する原位置土壌洗浄が非加温の場合と比較して効果的なPFOA除去技術となりうると考えられたため、引き続いて実際の地盤にて現地実証試験を行い効果を検証することとした。

3. 現地実証試験

3.1 試験方法

(1) 土壌の選定および試験対象区的设计方法

土壌カラム試験で温水溶媒による浄化が有効と示唆された土壌を採取した地盤を現地実証試験の実施場所とした。試験対象とした土壌における深度別のPFOA含有量および土質情報をそれぞれ図-5、表-2に示す。

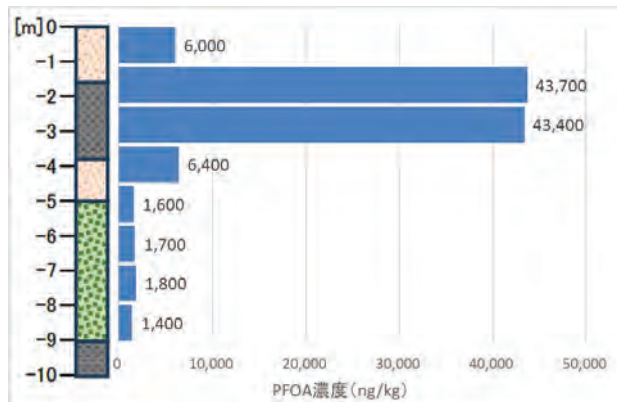


図-5 深度別のPFOA含有量

表-2 対象土壌の土質情報

対象土壌	砂層 (GL-3.8~8.7 m)
推定透水係数	$D_{20}=2.9 \times 10^{-5}$ m/sec
自然含水比	27.40 %
土壌pH	5.2
土粒子密度	2.6 g/cm^3

対象地域では、過去に実施された試験エリア中央のボーリング調査 (GL-1m~8mの深さ1mごと)の結果において、PFOA土壌含有量の最大濃度はGL-1mおよびGL-2mの43,000 ng/kgであった。本研究では、室内土壌カラム試験で温水による浄化が有効と示唆された砂層土壌 (GL-3.8m~8.7m)を原位置土壌洗浄による浄化対象とし、当該層におけるPFOA濃度は1,500~6,400 ng/kgであった。20%粒径 D_{20} からの当該砂層の推定透水係数は 2.9×10^{-5} m/secであった。原位置浄化設備の平面図および断面図を図-6、図-7にそれぞれ示す。試験対象区は、長さ5.0m×幅5.0m×深さ4.9mの矩形体とし、高圧噴射遮水壁で周囲を取り囲んだ。試験区画内に通水用に注水井および揚水井をそれぞれ2地点ずつ、通過液濃

度のモニタリング用に観測井戸を3地点設置した。

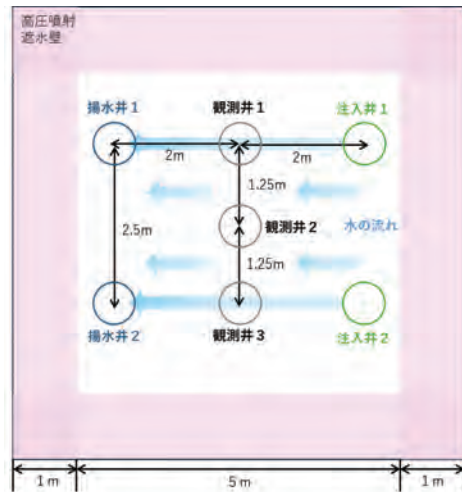


図-6 原位置浄化設備の平面図

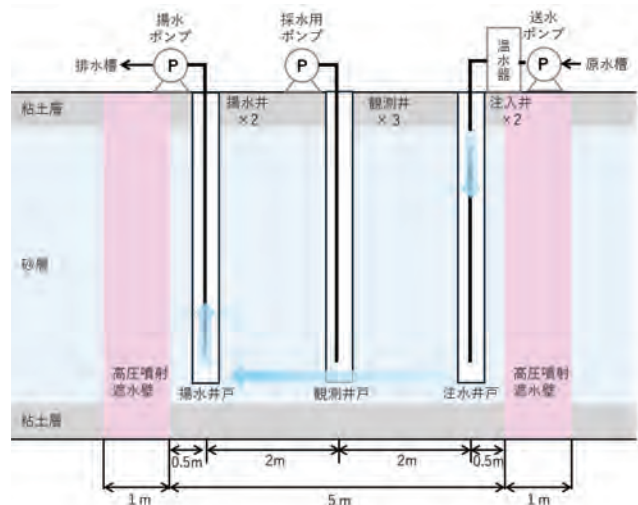


図-7 原位置浄化設備の断面図

(2) 原位置土壌洗浄の通水方法及び条件

各通水条件を表-3に示す。注入井と揚水井の間に、水平距離4.0mに対して注水および揚水による人工的な水位勾配を形成し、水平方向に0.020 cm/min (地盤中見かけ流速)で温水を通水した。温水の注入は、外部加温器を用いて50℃に昇温した上水を注入井に導入した。注入流量は一定の5.0 L/min (井戸2本合計)に設定し、揚水井側では地下水位に応じて5.0~10 L/min (井戸2本合計)の範囲で変動する流量で揚水を行った。

表-3 通水条件

試験対象土量	95 m ³
注水量・通水速度	5.0 L/min (井戸合計)
地盤中見かけ流速	0.020 cm/min
運転時の注入流量	7.2 m ³ /日
初期地盤温度	21.5 °C

(3) 採水および分析の方法

通水開始後の8か月間(計約2か月の稼働停止期間含む)において、観測井及び揚水井の計5地点×17回(B.V.=0.0~11.19)の地下水を採水した。各試料はろ過後、WAXカートリッジを用いて固相抽出を行い、窒素パージで1mLに定容濃縮して、これを分析試料とした。HPLC-MS/MS(Agilent)にて、13種のペルフルオロカルボン酸類(PFCAs; C4~14, 16, 18), 8種のペルフルオロスルホン酸類(PFSAs; C4~10, 12)の計21種のPFASsを対象に定量分析を行った。

(4) 浄化確認のための土壌ボーリング試験

通水試験完了後、試験エリア中央の既調査地点から観測井戸1側に450mmずらした地点で浄化確認のための土壌ボーリングを実施した。土壌はGL-1m~GL-8mまで1mピッチで採取した。

3.2 試験結果および考察

(1) 注入・揚水流量

浄化対象深度の土壌体積(B.V.)に対する注水水量を図-8に示す。運転時の注入流量は概ね計画値(7.2m³/日)と一致し、2台の注入ポンプ、揚水ポンプ間の積算流量の差は10%以内で推移し、大きな偏りなく通水できた。装置稼働日数延べ173日の積算流量1,062.6m³となり、B.V.=11.19相当量を注水し、室内カラム試験で濃度低減効果を確認したB.V.=8.0以上を通水した。

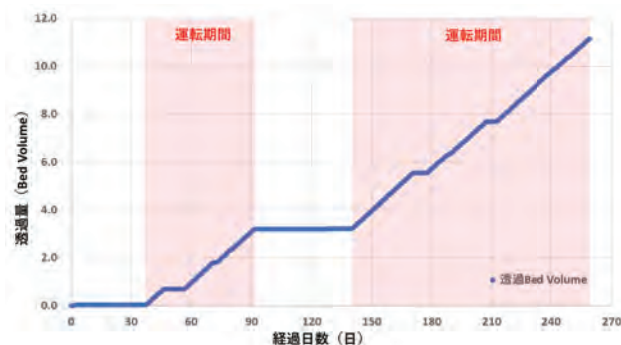


図-8 積算通水流量(Bed Volume)

(2) 地下水位

稼働中の観測井戸、揚水井戸の地下水位を図-9に示す。連続運転開始後の試験エリア内の観測井戸および揚水井戸の地下水位は、停止期間を除き管理値であるGL-1.2m~GL-1.4m程度で推移した。停止期間中は地表付近まで各井戸の地下水位が上昇したが、これは降雨により流入した雨水が遮水性で囲った試験区画内に滞留したためと考えられた。なお、通水期間中の注入井戸1の水位は注入井戸2より高い傾向を示したが、これは注水井戸1周囲の透水性が注入井戸2よりも低いことによ

るものと考えられた。

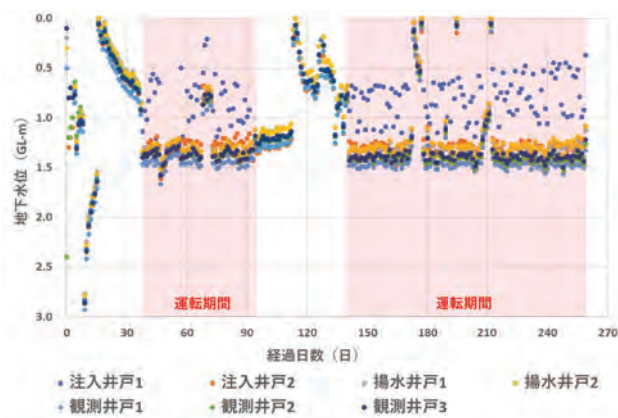


図-9 観測井戸・揚水井戸の地下水位

(3) 地盤温度

地盤温度を図-10に示す。初期地盤温度(22°C程度)に対して試験開始後は徐々に温度上昇した。長期停止期間中には周囲への放熱により温度が低下する傾向が見られたものの、運転再開後に地盤温度は再上昇し、終了時点では、観測井戸で41~42°C、注入井戸で45~47°C、揚水井戸で37°C程度まで地盤温度の上昇が観測された。

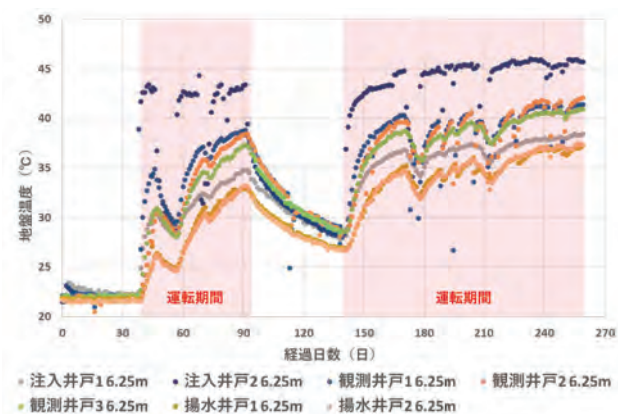


図-10 地盤温度

(4) PFAS 濃度の推移

注入水量(B.V.)ごとの各井戸で採取した地下水のPFOA濃度を図-11に示す。揚水井戸のPFOA濃度は初期2,100ng/L程度で、B.V.=3までに観測井戸2を除く井戸では100~160ng/L程度に減少した。一方で、観測井戸2における濃度低減は他の観測井戸と比べて顕著に遅かった。これは当該井戸が土壌中央部に位置し、水流の影響を相対的に受けにくかったためと推察され、対象エリアに偏りなく通水させることの重要性を示すものと考えられた。PFBA濃度、PFHxA濃度、PFNA濃度を図-12、図-13、図-14にそれぞれ示す。PFHxA濃度、PFNA濃度はPFOA濃度と概ね類似した低減傾向を示したものの、炭素鎖長の短いPFBA濃度の濃度低減傾向は他のPFCAsよりも緩やかであった。

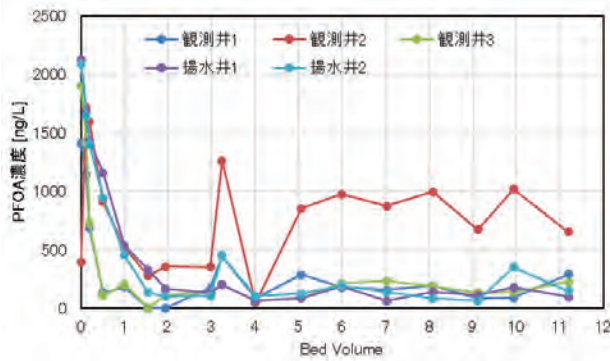


図-11 PFOA 濃度

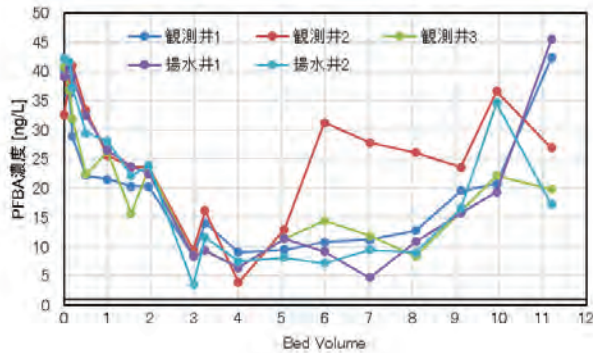


図-12 PFBA 濃度

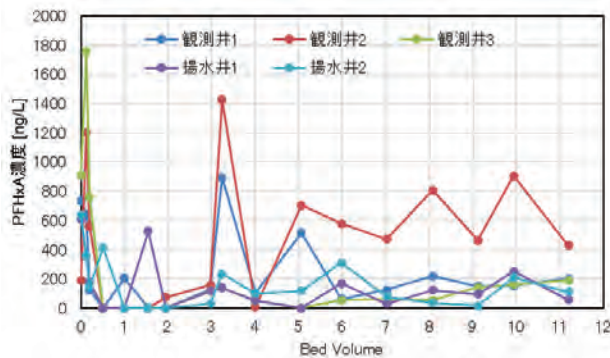


図-13 PFHxA 濃度

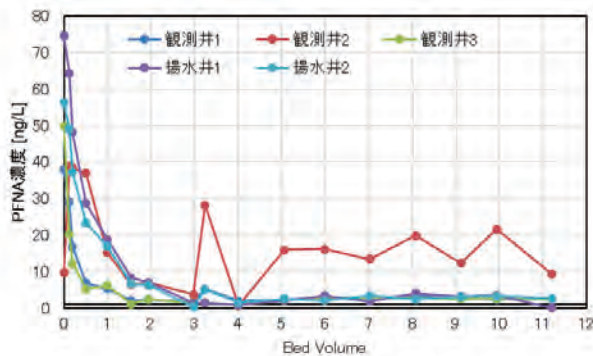


図-14 PFNA 濃度

また、試験開始から B.V.=3 の時点までにおいては、濃度は低下傾向であったものの、B.V.=3 以降では濃度は横

ばいから上昇傾向を示し、この傾向は短鎖 PFASs である PFBA でより顕著に見られた。これは、上部粘土層などに保持された土壤中 PFAS が試験期間中に浄化対象の砂層中地下水に溶出したことによるものと考えられ、より脱着しやすい短鎖の PFBA において溶出の影響を強く受けた可能性が考えられた。

(5) 通水による PFAS 除去量の推定

揚水量と揚水中 PFAS 濃度を基に、本試験において揚水により除去された PFAS 量を推定した結果を図-15 に示す。試験期間において PFOA で 236 mg、計 21 種の PFASs の合計で 441 mg が除去されたものと推定された。

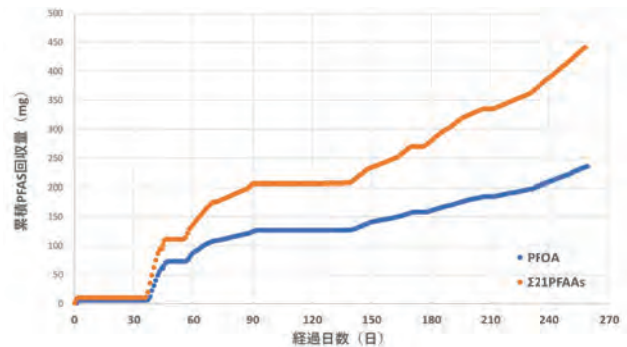


図-15 通水による PFAS 除去量の推定結果

(6) PFAS 濃度低減率まとめ

各井戸での試験終了時点 (B.V.=11.19) の PFAS 濃度と試験期間中最高濃度とを比較し、濃度低減率を表-4 に整理した。濃度低減率は PFHxA、PFOA、PFNA では 62%~100% を示す一方で、中央部に位置し水流の影響を他の相対的に受けにくい観測井戸 2 では他に比べて低い低減率となった。一方、PFBA では濃度低減率は 0%~59% に留まった。

表-4 PFOA 濃度低減率

	PFBA (%)	PFHxA (%)	PFOA (%)	PFNA (%)
観測井 1	0	77	79	93
観測井 2	34	70	62	76
観測井 3	51	89	88	95
揚水井 1	0	90	95	100
揚水井 2	59	82	93	95

(7) 浄化確認調査 (土壌ボーリング)

試験前後の土壌 PFOA 濃度を表-5 に示す。試験対象深度 (GL-4 m~8 m) の土壌中濃度は試験前と比較して 90% 以上の低減が確認され、原位置土壌洗浄により浄化対象深度の土壌中から PFAS を除去できたことが示された。

表-5 試験前後の PFOA 含有量の変化

	検証前 (ng/kg)	検証後 (ng/kg)	濃度低減率 (%)
1m	5,998	6,279	0
2m	43,748	6,566	85
3m	43,393	13,522	69
4m	6,368	4,683	26
5m	1,619	101	94
6m	1,652	43	97
7m	1,805	104	94
8m	1,449	50	97

4. 結論および今後の課題

PFAS 含有土壌に対する加温原位置土壌洗浄の有効性を評価することを目的として、PFOA 含有土壌を用いて室内土壌カラム試験による基礎的な検討を実施した。続いて、室内土壌カラム試験で使用した土壌を採取した土地にて原位置浄化の現地実証試験を実施し、土壌中の PFOA をはじめとする PFCAs の溶出挙動について分析を行った。その結果、得られた主要な知見を以下に記す。

- 1) 室内土壌カラム試験において、温度が高いほど土壌から液相への PFOA の溶出が促進され、土壌の PFOA 濃度低減効果が高いことが示唆された。
- 2) 現地実証試験において、地下水中の PFHxA、PFOA、PFNA の各濃度は概ね類似した低減傾向を示し、地下水中の濃度は通水開始時に比べ 62%~100% 低減された。一方で PFBA は 0%~59% と低い低減率に留まった。
- 3) 通水量 B.V.=3 以降では各 PFCAs 濃度は横ばいから上昇傾向を示し、周囲土壌から地下水への再溶出を受ける可能性が示唆された。PFBA など脱着しやすい短鎖 PFAS においてその傾向はより顕著であった。
- 4) 現地実証試験後の浄化対象深度土壌の PFOA 土壌含有量は 90% 以上の濃度低減が認められ、原位置土壌洗浄による浄化対象深度土壌からの除去効果が確認された。
- 5) 現地実証試験において土壌中央部の井戸では他の井戸に比べ濃度低減が緩やかであり、注入・揚水の制御により対象エリアに偏りなく通水させる重要性が示唆された。

今後は、浄化対象地の土質や汚染状況を踏まえた通水条件の最適化、複数物質を同時に除去する技術の効率化などについて検討を行ってゆく予定である。

参考文献

- 1) Feng, G., Zhou, B., Yuan, R., Luo, S., Gai, N., Chen, H. : Influence of soil composition and environmental factors

on the adsorption of per- and polyfluoroalkyl substances: A review, Science of The Total Environment, 925, 15, 171785,2013.

- 2) Groffen, T., Prinsen, E., Devos Stoffels, O.-A., Maas, L., Vincke, P., Lasters, R., Eens, M., Bervoets, L. : Influence of soil physicochemical properties on the depth profiles of perfluoroalkylated acids (PFAAs) in soil along a distance gradient from a fluorochemical plant and associations with soil microbial parameters, Environ. Sci. Pollut. Res., 30 (2022), 23820-23835, 2019.
- 3) Senevirathna, S. T. M. L. D., Mahinroosta, R., Li, M., Krishna Pillai, K. : In situ soil flushing to remediate confined soil contaminated with PFOS- an innovative solution for emerging environmental issue, Chemosphere, 262, 127606,2021.
- 4) 山崎佑二,外野圭太,吉田邦勝,答島宗史,田中周平 : PFAS含有土壌の加温原位置土壌洗浄に関する基礎検討,地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集,30巻, pp343-345,2025.
- 5) 環境省:水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準等の施行等について(通知)(令和2年5月28日付け環水大発第2005281号・環水大土発第2005282号環境省水・大気環境局長通知),2020
- 6) 環境省:土壌中のPFOS、PFOA及びPFHxSの暫定測定方法について,2023
- 7) 高橋元総,田中周平,山崎祐二,外野圭太,吉田邦勝,答島宗史:原位置浄化パイロット試験による21種PFASsおよび前駆体の土壌からの溶出挙動,環境衛生工学研究 vol.39, p.60-62,2025.

PFAS 汚染土壌の不溶化に関する基礎的検討

FUNDAMENTAL STUDY ON THE IMMOBILIZATION OF PFAS-CONTAMINATED SOIL

國井 聡*, 林夕紀子*, 森川 純*, 野田兼司*, 芳賀直樹*

KUNII Satoshi and HAYASHI Yukiko and MORIKAWA Jun and NODA Kenji, HAGA Naoki

* 前田建設工業株式会社 ICI 総合センター(〒302-0021 茨城県取手市寺田 5270)

キーワード：有機フッ素化合物, PFAS, 汚染土壌, 不溶化
(PFAS, Contaminated soil, Immobilization)

1. はじめに

有機フッ素化合物の中で、ペル及びポリフルオロアルキル化合物の総称を PFAS と呼び、代表的な物質としてペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS), ペルフルオロオクタノ酸 (PFOA), 及びペルフルオロヘキサスルホン酸 (PFHxS) がある。国内での法規制も進み、PFOS・PFOA・PFHxS は化学物質審査規制法の第一種特定化学物質に指定され、これらを含む製品の製造・輸入・使用が規制されている¹⁾。これらの物質は環境残留性、及び人体蓄毒性が指摘されている。2025 年の 5 月には、炭素数 9~21 の長鎖ペルフルオロカルボン酸(LC-PFCA)とその塩、及び LC-PFCA 関連物質の附属書 A への追加が決定した²⁾。また、令和 5 年 2 月に水質汚濁防止法施行令の一部が改訂され、PFOS・PFOA が指定物質に追加されたことにより、漏出等の事故が発生した際の報告義務が課されることとなった。さらに、同法の要監視項目に位置付けられ、指針値として PFOS・PFOA の合計値 50 ng/L が設定された³⁾。

近年、環境省、及び各自治体を実施した全国的な調査により、日本各地の地下水等において指針値の 50 ng/L を超過する PFAS 汚染の実態が明らかとなっている⁴⁾。PFOS・PFOA・PFHxS は水に溶け易い性質を有することで知られる⁵⁾。土壌に付着した PFOS・PFOA・PFHxS は降雨による地盤への浸透や地下水流動によって拡散すると考えられ、全国的に潜在的な PFAS 汚染土壌が存在している可能性がある。上述した流動性の高さゆえに、PFAS 汚染土壌を起点に二次的な汚染拡大が懸念されており、浄化や拡散防止等の対策が求められる。現時点では土壌中の PFAS 濃度に関する基準値は設定されていないが、水道水への基準や公共揚水域に係る指針値が策定された³⁾ことを受け、今後は土壌への規制についても議論が活発になると考えられる。

PFAS 含有廃棄物に関しては、環境省にて定めた「PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」⁶⁾に則した測定方法や焼却処分のガイドラインと成り得るものがある。一方、PFAS 汚染土壌に関しては、環境省により「土壌中の PFOS、PFOA 及び PFHxS の暫定測定方法について」(以下、暫定測定方法という)が示され⁷⁾、対策技術の開発が進められている段階⁸⁾にあり、明確な指針は現時点では示されていない。一部報告では、PFAS 汚染土壌についても、焼却による PFAS の分解除去が可能であるとする報告もある⁹⁾。しかしながら、汚染サイトから焼却施設へ PFAS 含有汚染土壌を全量掘削し、搬出することは、物理的にも費用面においても困難なケースが多いと想定される。また搬出可能な量は、焼却施設の処理能力に大きく依存してしまい、必要な時に必要な処分が可能とは限らない。そのため、焼却に代わりうる PFAS 汚染土壌に対する浄化技術の開発が急がれている。

そこで、PFAS 含有土壌の対策手法として、不溶化処理に着目した。不溶化処理はオンサイトでの処置であり、汚染土の搬出抑制が可能で方法である。また、地域性に左右されずに施工することが可能である。

海外では、粉末活性炭を対象土壌中に注液分散させ PFAS 汚染の拡散を防止する技術の開発も実施されている¹⁰⁾。一方で、PFAS を吸着した活性炭から PFOS が漏出した事例の報告¹¹⁾もあり、活性炭に吸着した物質の再溶出が懸念される。

筆者らは、PFAS を選択的に捕集する鉱物系の特殊吸着材(以下、鉱物系吸着材という。)を用い、PFAS 汚染土壌と混合することで PFAS を不溶化し、PFAS の土壌中での拡散防止を図ることを目的とする基礎実験を実施した。鉱物系吸着材は、自然由来成分からなる無機系材料を原料としており、地盤材料と混合しても環境に影響をもたらさない。土壌・地下水における PFAS の移動性

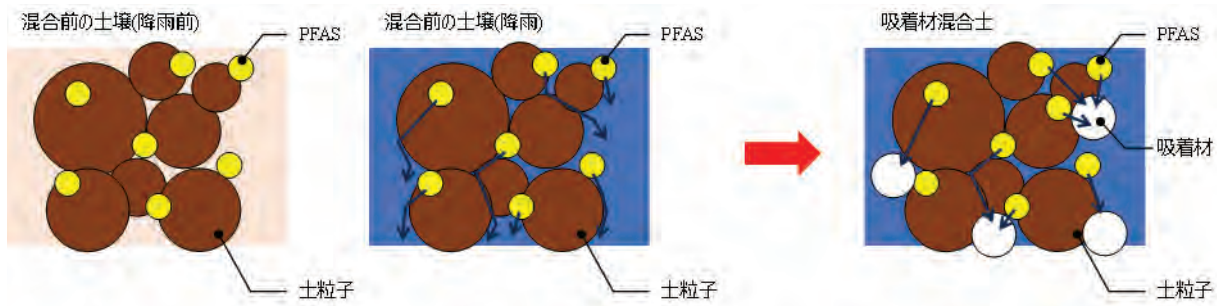


図-1.1 不溶化によるPFAS 汚染拡散防止のイメージ図



写真-2.1 LC-MS/MSの全景



写真-2.1 鉍物系吸着材

表-2.1 鉍物系吸着剤の物性値

土粒子密度	1.775	
自然含水比	1.8	
粒度分布(細粒分)	90.4	
液組成限界	液性限界	52.2
	塑性限界	42.1
	塑性指数	10.1
膨潤力	5.6	

は、地盤の地質や化学的特性に左右されることから知見の収集が必要であるが、土壌に付着したPFASは間隙水に移行し、水の流動と共に拡散すると考えられる。図-1.1に拡散防止方法のイメージ図を示す。これらを鑑み、吸着材とPFAS含有土壌を均一に混合することによって、間隙水を經由して移動するPFOS等を吸着するとともに、オンサイトで処理することにより、搬出時及び輸送時にPFAS含有土壌が飛散するリスクを解消する。

2. 不溶化材の性能確認

2.1 試験方法

鉍物系吸着材の土質物理試験として、土粒子密度(JISA 1202)、自然含水比(JISA 1203)、粒度分布(JISA 1204)、液塑性限界(JISA 1205)、膨潤力(JBAS-104)を測定した。

また、基本的なPFAS吸着性能の確認のため、以下の回分試験を実施した。純水中に、初期濃度100,000ng/L程度となるようにPFAS(PFBA, PFPeA, PFBS, PFHxA, PFHxS, PFHpA, PFOA, PFOS, PFNA)溶液を添加し、PFAS含有水を調整した。この溶液を200mlのポリ瓶に入れ、そこに鉍物系吸着材を26~10,527mg/Lの範囲で各量を添加し、72時間振とう攪拌した。その後、ろ過による固液分離を行い、液相部分のPFAS濃度の測定を行った。吸着材の比較として、PFASを選択的に吸着する鉍物由来の活性炭を用いて同様の試験を実施した。

PFAS濃度の分析は、JIS K 0450-70-10、及び環境省通知〆に従い実施した。PFAS濃度の測定装置は、写真-2.1に示す液体クロマトグラフ質量分析計(LC-MS/MS)を用いて測定を行った。

2.2 結果

本試験にて使用する鉍物系吸着材の外観を写真-2.2に、物性値を表-2.1に示す。鉍物系吸着材は粉末状の物質であり、砂質と同程度の土粒子密度であった。また、膨潤性が5.6、液塑性限界も52.2と小さく、加水しても変質しない材料である。

鉍物系吸着材を用いて実施した回分試験の結果を図-2.1に示す。平衡濃度と吸着量の相関は、Freundlich吸着等温線に従うものとして近似した。各PFASの完全にフッ素化されたC-F炭素数がそれぞれ異なっており、表-2.2に示す。吸着等温線から鉍物系吸着材と活性炭を比較すると、C-F炭素数の少ないPFBA, PFPeA等では、吸着性能が同程度であった。対して、C-F炭素数の大きいPFOSやPFNAでは、平衡濃度が低い場合において、鉍物系吸着材は活性炭のよりも吸着量が少ないことが確認された。全体として、いずれのPFASにおける吸着等温線からも、鉍物系吸着材は平衡濃度が高い場合には吸着量が多く、活性炭と同程度のPFAS除去能力を有していることを確認した。

表-2.2 PFASのC-F炭素数

種類	C-F炭素数	種類	C-F炭素数
PFBA	3	PFHxS	6
PFPeA	4	PFOA	7
PFBS	4	PFOS	8
PFHxA	5	PFNA	8
PFHpA	5		

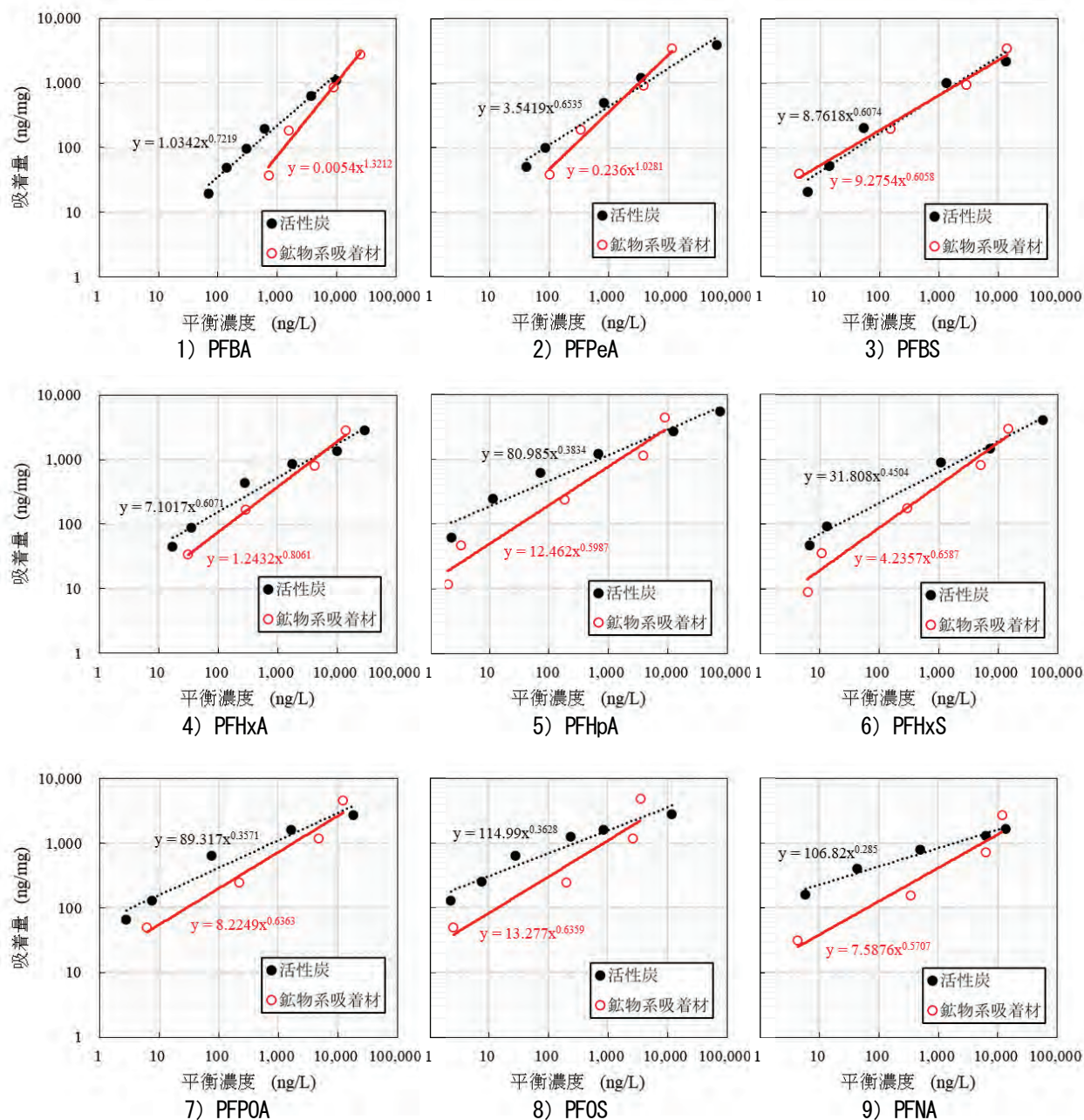


図-2.1 各PFAS成分における吸着等温線の比較

一方で、PFAS 汚染土壌への不溶化材としての適用を検討する際には、土壌中に存在する各種イオン物質や有機物等が吸着材のPFAS吸着能力を阻害する要因と成り得る。また、不溶化材は土壌と混和して用いるため、その状態で吸着能力を発揮する必要がある。PFAS除去に対する選択制を確認するには、PFAS汚染土壌を用いて、懸濁水中での評価を行うことが重要である。

3. PFAS 汚染土壌を用いた不溶化試験

3.1 試験方法

試験の作業フローを図-3.1に示す。PFAS汚染土壌に対する不溶化材の溶出防止効果を確認するため、模擬PFAS土壌を調整した。真砂土に対して、100,000ng/Lの

PFAS(PFHxS, PFOA, PFOS)溶液を添加し、含水比20%程度の模擬PFAS汚染土を得た。この模擬PFAS含有汚染土に対し、鉱物系吸着材を0.5~5wt%添加し、十分に混練し不溶化土壌を作製した。比較として、同様のフローにて活性炭を0.5~5wt%添加した不溶化土壌を作製した。得られた不溶化土壌は、暫定測定方法⁷⁾に準拠した方法により溶出試験を行った。

3.2 結果

鉱物系吸着材を用いた不溶化土壌からの溶出試験結果を図-3.2に示す。無添加の検体における溶出試験では、PFOS濃度が228 ng/L、PFOA濃度が685ng/L、PFHxS濃度が1,326ng/Lであった。鉱物系吸着材を添加するこ

とで、PFOS、PFOA、PFHxSのいずれも検出さなかった。これは、汚染土壌から液相へPFASが溶出したものの、鉱物系吸着材を添加しておくことで、液相のPFASが鉱物系吸着材へ吸着されたと考えられる。最小添加率ケースにおいてもPFAS濃度は定量下限値以下であったため、添加率をさらに低下させた検証を継続中である。

一方で、活性炭を用いた溶出試験結果を図-3.3に示す、無添加の溶出試験では、PFOS濃度が113ng/L、PFOA濃度が681ng/L、PFHxS濃度が1,533ng/Lであった。最小添加率である0.5wt%では、PFOS濃度が27ng/L、PFOA濃度が193ng/L、PFHxS濃度が347ng/Lであった。添加率3%まで増大することで、PFAS濃度が定量下限値以下となった。

これらの結果より、実際の汚染土壌を模擬した不溶化に対する試験ケースでは、鉱物系吸着材が有利となったことが確認された。

4. まとめ

PFASによる土壌環境問題は、今後日本全国で顕在化する恐れがある。PFAS汚染土壌が土中に残置されることで、地下水源等へ二次的にPFAS汚染を拡大させてしまうため、その対策が求められている。本論では汚染拡

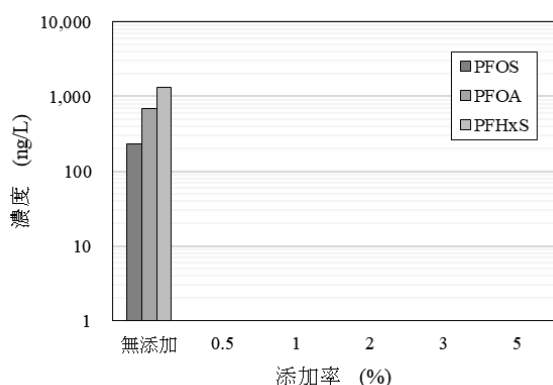


図-3.2 汚染土壌に対する吸着材添加量の影響 (鉱物系吸着剤)

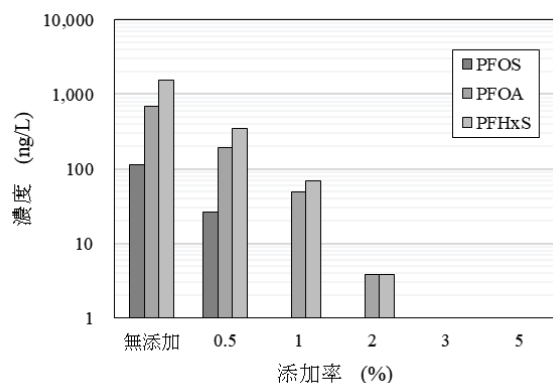


図-3.3 汚染土壌に対する吸着材添加量の影響 (活性炭)

散防止技術として不溶化処理に着目し、基礎的検討を行った。

本論にて、鉱物系吸着材は活性炭と比較して、懸濁水中のPFAS吸着能力が高いことが確認された。今後費用対効果を鑑みながら、PFAS不溶化に必要な最小添加率の検討を進める。

多様なPFAS汚染事案が将来増加すると想定されており、今後も、PFAS処理技術に係る知見の収集と実績構築を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 経済産業省：第一種特定化学物質一覧
https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/kasinhou/about/class1specified_chemicals_list_20250218r.pdf
- 2) 環境省：ストックホルム条約、バーゼル条約およびロッテルダム条約締約国会議の結果について、2025
https://www.env.go.jp/press/press_04897.html
- 3) 環境省：水質基準に関する省令の一部改正及び水道法施行規則の一部改正等について（施行通知）、令和7年6月30日、
<https://www.env.go.jp/content/000325798.pdf>
- 4) 環境省：令和5年度公共用水域水質測定結果、令和7年4月、
<https://www.env.go.jp/content/000310475.pdf>
- 5) 鶴岡佑基, 大石雅也, 鈴木義彦, 松木直樹, 森一星: PFOS, PFOA および PFHxS による土壌・地下水汚染の調査・対策技術の現状, 第27回地下水・土壌とその防止対策に関する研究集会, p1-6, 2022
- 6) 環境省: PFOS および PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項, 2022年9月,
<https://www.env.go.jp/content/000077696.pdf>
- 7) 環境省: 土壌中の PFOS、PFOA 及び PFHxS に係る暫定測定方法, 2023,
<https://www.env.go.jp/content/000140363.pdf>
- 8) 環境省: 「PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業」における対象技術の選定について、令和7年7月24日、
https://www.env.go.jp/press/press_00270.html
- 9) 塩尻大輔, 鈴木奨士, 大山将, 渡辺菜月, 仁平義祐: PFOS 等による土壌・地下水汚染の浄化・対策技術に関する適用性の検討と評価, 第29回地下水・土壌とその防止対策に関する研究集会, p7-12, 2024
- 10) Sormo E et al.: Stabilization of PFAS-contaminated soil with activated biochar, Science of the Total Environment, 763, 144034, 2021
- 11) 吉備中央町原因究明委員会: 河平ダム等における PFOS 及び PFDOA の暫定指針値超過事案に関する報告書, 令和6年9月5日,
<https://www.town.kibichuo.lg.jp/uploaded/attachment/10756.pdf>

PFAS 汚染土壌処理技術の実用化に向けた取り組み

EFFORTS TOWARD THE PRACTICAL APPLICATION OF PFAS-CONTAMINATED SOIL TREATMENT TECHNOLOGIES

日野良太*, 西川直仁*, 日笠山徹巳*

HINO Ryota, NISHIKAWA Naohito and HIGASAYAMA Tetsumi

* 株式会社大林組エンジニアリング本部（〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟）

キーワード：PFAS, 汚染土壌・地下水, 不溶化処理, 原位置土壌洗浄
(PFAS, contaminated Soil and Groundwater, Stabilization and solidification, in-situ soil washing)

1. はじめに

有機フッ素化合物（以下、PFAS）は、撥水・撥油性、熱・化学的安定性等の物性を示すことから、金属メッキ処理剤、水成膜泡消火剤および調理器具コーティング剤等の幅広い用途で使用されている。PFAS に明確な定義はないが、およそ数千種類の物質が特定されており、その管理の在り方について国際的に議論されている。

PFAS の中でもペルフルオロオクタンスルホン酸（以下、PFOS）とペルフルオロオクタン酸（以下、PFOA）およびペルフルオロヘキサンスルホン酸（以下、PFHxS）については、過去に幅広く使用されてきたが、有害性や高い環境残留性等をふまえて、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約（POPs 条約）の対象物質として国際的に製造および使用や排出が制限されている。PFOS と PFOA の直鎖型イオンの構造式を図-1 に示す¹⁾。いずれの物質も炭素とフッ素が直鎖型で多数結合しており、末端がスルホ基かカルボキシル基の構造となっている。

環境中の PFOS および PFOA については、2020 年度に水環境に関する指針値（暫定）（PFOS と PFOA の合算 50 ng/L）が挙げられている。環境省が公表した 2023 年度の PFOS および PFOA の水質測定結果²⁾では、調査を実施した 2,078 地点のうち、242 地点で指針値（暫定）を超過する値が検出され、PFOS および PFOA が環境中に広く存在することが確認された。一方、PFHxS は 2021 年度に水

道水における要検討項目に設定されており、今後も法制度の動向が注目される。一方、都道府県等も地域の実情に応じて調査を実施している。

PFOS および PFOA で汚染された土壌の処理事例は、スラリー化した掘削土壌に対して資材を混合することによる泡沫連行および吸着に伴う洗浄処理がある³⁾。また、原位置処理として、酸化剤を注入した後に地盤内を加熱すること⁴⁾や PFAS 汚染土壌がアルカリ環境で液相に移行しやすくなるという特性を利用したアルカリ資材と酸化剤の併用⁵⁾によって処理効果を促進する技術もある。その他にキャビテーションによる処理⁶⁾、活性炭による地下水の処理などが挙げられる⁷⁾。

著者らは、PFAS のうち、主に PFOS と PFOA による汚染土壌・地下水の処理技術を検討している。検討技術は、汚染土壌・地下水のいずれに対しても適用できるように、PFAS の多くが地盤内において土壌から地下水に移行しやすいという特性⁸⁾を有するという点に着眼している。また、より低コストで低環境負荷な処理技術の開発を目指しており、汚染土壌・地下水から PFAS を分解・除去する技術に加えて、濃度低減や敷地外への汚染拡大防止技術などを開発中である⁹⁾。

本稿では、汚染土壌からの PFAS 溶出を抑制する不溶化処理と井戸を用いて地下水の流れを強制的に大きくし、地盤内から汚染土壌・地下水の PFAS を抽出する原位置土壌洗浄の効率化に関する試験結果について報告する。

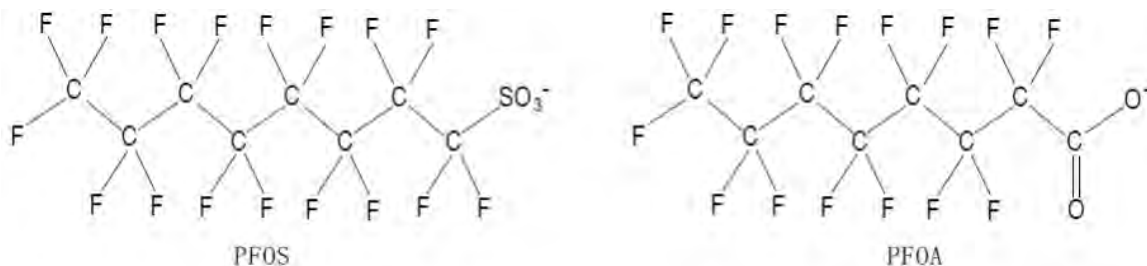


図-1 PFOS と PFOA の構造式（直鎖型イオン）¹⁾

2. 開発技術の概要

2.1 不溶化処理

汚染物質の不溶化処理は、掘削した汚染土壌を現地で不溶化するオンサイト処理（図-2）と汚染土壌を掘削せずに不溶化処理を行う原位置処理（図-3）がある⁹⁾。前者は、掘削土壌に対して不溶化資材を混合した後に埋め戻しまたは場外へ搬出する方法であり、後者は、地盤内の汚染土壌と不溶化資材を建設重機によって混合攪拌¹⁰⁾するか井戸や裸孔等から不溶化資材を地盤に浸透させるものである¹¹⁾。

PFAS 汚染土壌に適用できる不溶化資材について、国内での報告例はないが、ふっ素及びその化合物に適用される不溶化資材は複数の事例が報告されている。大山らは酸化マグネシウムを添加することで不溶化処理した事例を報告している¹²⁾。高橋らは鉄鋼スラグ含有ふっ素に対してアパタイト処理を行い、フルオロアパタイトの形成による鉱物学的不溶化を検討しており、カルシウムやリン酸の添加量が多いほどふっ素の溶出濃度が減少することを示した¹³⁾。亀井らは半水石膏に含まれるアルミナ、酸化カルシウム、硫酸カルシウムの水和反応で生成されるエトリンガイトと高炉セメント B 種により不溶化処理を行った¹⁴⁾。

本検討では、実際の汚染サイトにおける不溶化処理施工中の重機作業および処理後の掘削・積込などのハンドリング性確保を勘案して、不溶化および固化の両方の効果を有する資材を選定することとした。そこで、過去の事例も踏まえて、カルシウム系¹⁵⁾およびマグネシウム系¹¹⁾の資材の内、マグネシウム系の資材を用いた不溶化処理の適用可能性を探索した。ただし、ふっ素は高い電気陰性度を有しており、短い原子間距離である PFAS の C-F 結合を切断するためには、高エネルギーが必要である¹⁶⁾。そのため、フッ化カルシウムやフッ化マグネシウムなどの難溶性の化合物への形態変化は期待できない。一方、正に帯電した媒体と陰イオン性 PFAS の間には静電引力が形成され、陽イオンの架橋効果も静電引力とみなすことができる。また、陽イオンは、有機物よりも吸着性が高いことから PFAS の土壌からの溶出を抑制できる^{17), 18), 19)}。さらに、粉末活性炭は PFAS の吸着性があることが知られている²⁰⁾。そこで、本稿での PFAS 汚染土壌の不溶化処理は、陽イオンと粉末活性炭の吸着および固化を期待して検討するために、PFAS 溶出抑制と強度発現の効果を確認した。

2.2 原位置土壌洗浄

原位置土壌洗浄の概要図を図-4 に示す。本技術は、注水井戸から清水または必要に応じて脱離促進薬剤を注入し、同時に地下水を揚水することにより汚染土壌から対象物質を抽出する。対象物質を抽出した地下水は、揚水井戸から回収して地上に設置した水処理設備で対象物質を分離回収する。つまり、注水井戸と揚水井戸によって地下水



図-2 オンサイト不溶化処理 施工イメージ図

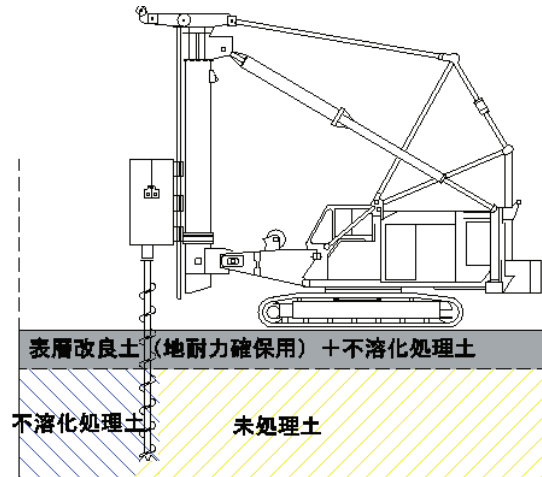


図-3 原位置不溶化処理 施工イメージ図

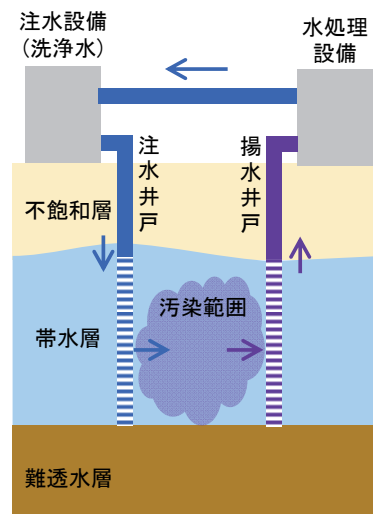


図-4 原位置土壌洗浄 施工イメージ図

流れを強制的に大きくすることで、汚染土壌から対象物質の抽出を促進できる。

本技術の適用性を評価するためには、対象土壌を用いたピーカー試験や通水カラム試験等のトリートバリティ試験を実施する。本稿では、有機物を含む土壌に試薬で濃度調整した模擬汚染土壌を用いた通水カラム試験によって原位置土壌洗浄を模擬した試験結果を報告する。

PFAS 汚染地盤に対しては、原位置土壌洗浄への適用可能性を期待できることを確認したものの、有機物を多く含む地盤に対しては PFAS の土壌吸着性が高くなる²¹⁾ことから洗浄効果が希薄になる可能性があった。そこで、本稿

では、アルカリ環境にすることで土壤中の PFAS の分配係数が小さくなる（土壌から PFAS を剥離しやすくする）という既往文献²²⁾を参考にして、原位置土壌洗浄を効率化するためにアルカリ水と清水を断続的に通水することで、処理地盤の pH 環境の改善ならびに PFAS の濃度低減に関する基礎検討の結果を報告する。

3. 試験方法

3.1 不溶化処理

不溶化処理の適用性は、環境省「令和 6 年度 PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業」²³⁾の一環として実汚染土壌を用いた試験により検討した。今回の実証事業では、掘削した土壌と資材を混合するオンサイト処理を実施した。不溶化処理は、マグネシウム系の資材と固化材、吸着材を併用して、汚染土壌と混合し、土壌からの PFAS 溶出の抑制効果と処理土壌の強度発現を確認することで確認した。使用した資材は、マグネシウム成分として酸化マグネシウム、固化材として高炉セメント B 種、吸着材として粉末活性炭である。

本稿では、室内試験と攪拌機を用いた本試験の結果を報告する。室内試験は、本試験に先立って、土壌に対しての資材の適正な添加量を確認するために実施し、本試験は実施工を考慮して攪拌機を用いて実施した。

室内試験では、土壌 100 g に対して酸化マグネシウムを 3 g、高炉セメント B 種を 14 g、粉末活性炭を 0.5 g もしくは 2 g 添加し、水道水で固化材が固結する程度に含水比を調整した。本試験では、土壌 400 kg に対して酸化マグネシウムを 12 kg、高炉セメント B 種を 56 kg、粉末活性炭を 8 kg 添加し、水道水で固化材が固結する程度に含水比を調整した。

本試験では、実サイトを想定して小型の二軸攪拌機（写真-1）に土壌と資材を投入した後に 1 分間の攪拌を実施した場合の処理効果を確認した。本試験は、12 m×10 m のテント内に底面養生した試験ヤードを設置して実施した。

室内試験と本試験ともに、処理土壌を 7 日間養生した後に分析試料として使用した。土壌溶出量は、環境省による「土壌中の PFOS、PFOA 及び PFHxS に係る暫定測定方法（溶出量試験）」²⁴⁾を適用した。ここで、各物質の定量下限値は、0.2 ng/L である。

また、オンサイト処理では、処理後の土壌を場内運搬ならびに埋戻土として利用するために、一定の強度が必要である。強度発現試験では、直径 5 cm×高さ 10 cm のモールドに充填し、7 日間養生した後、円筒形モールドから脱型した試料体を用いて強度発現について確認した。円筒形モールドへの充填方法は JGS0821（安定処理土の締めをしなない供試体作製）に、一軸圧縮試験は JGS0511（土の一軸圧縮試験方法）に準拠した。



写真-1 本試験の状況

3.2 原位置土壌洗浄

原位置土壌洗浄を模した試験を行うために、土壌に対して試薬を添加し、濃度調整した模擬汚染土壌を使用した。模擬汚染土壌は、土壌と試薬を調製した溶液を液固比 2 で振とうすることで作製した。土壌は、一般に洗浄が困難とされる高有機質土に対する洗浄効果の確認を目的として、珪砂と黒ボク土を重量比で珪砂：黒ボク土＝8：2 で混合した。作製した土壌の粒径分布は 75 μm～2 mm：84.9%、5～75 μm：7.6%、5 μm 未満：7.4%であった。試薬は、WAKO 製の純度 95%を使用した。溶液は、土壌に対してイオン交換水に 20 μg/L（PFOS、PFOA で各 10 μg/L）の試薬を添加した。

模擬汚染土壌の作製工程は、振とう機を用いて 92 rpm において 4～5 cm の水平振とうおよび一定期間の静置する作業を 4 回繰り返した。各工程の時間は、振とう時間を 5 分間、静置期間を 7 日間として合計 28 日間養生した。養生後は、吸引ろ過により上水を除去し、固形分を風乾して模擬汚染土壌を作製した。模擬汚染土壌の土壌溶出量および土壌含有量は、環境省による「土壌中の PFOS、PFOA 及び PFHxS に係る暫定測定方法（溶出量試験、含有量試験）」²⁴⁾を適用した。ここで、各物質の定量下限値は、100 ng/L (ng/kg) である。

洗浄工程の試験では、脱離促進剤としてアルカリ資材であるセスキ炭酸ナトリウム（以下、セスキ）を用いた。試料土壌からの PFAS の脱離促進の効果は、バッチ試験で評価した。バッチ試験は、試料土壌に対して洗浄液（水もしくはセスキ溶液）を加えて、液固比 2、環告 18 号で 10 分間振とうした。振とう後に、5 分間で 3,000 G の遠心分離および 1 μm のメンブレンフィルターで減圧ろ過を行い、土壌に新たな洗浄溶液を加えた。繰り返し回数は 10 回として、10 回目の洗浄後に土壌溶出量および土壌含有量を分析した。

バッチ試験の実施後には、原位置土壌洗浄を模擬した試験として、通水カラム試験を実施した。通水カラム試験では、セスキ溶液を連続的に通水する場合とセスキ溶液と水

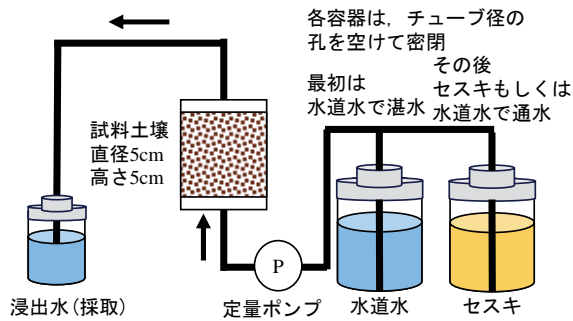


図-5 原位置土壌洗浄を模擬した試験イメージ

水道水を断続的に通水する場合、それぞれにおける処理地盤の pH 変化を評価した。

通水カラム試験の仕様は、既往検討²⁵⁾と同様の仕様とした。試験イメージを図-5に示す。処理対象とする土壌は、内径5cmの亚克力カラムに対して、高さが5cmとなるように充填した。充填土量は、湿潤密度から決定し、ISO/TS 21268-3 (Up-flow percolation test)に準拠して実施した。5層ほぼ均等に分割し、各層で125gのランマーを高さ20cmから3回落下させることで締固めた。対象とするカラム内の間隙水を充填させるためにカラム下端から水道水で浸透し、土壌の上端まで湛水して3日間静置した。その後、カラム下端からセスキもしくは水道水を通水速度0.001 cm/secで流した。また、セスキもしくは水道水の通水量は、間隙水の交換量を示すカラム内の間隙体積と積算通水溶液の体積の比 (PV: Pore Volume) で管理した。また、間隙率は0.3とした。セスキと水道水を断続的に通水するケースは、PV=0~2、10~12、20~22でセスキ、それ以外は水道水を通水した。試料水を採取する頻度は、PV=1~30で採水した浸出水の pH と PFOS を適時分析した。なお、本稿では、土壌の吸着性が高い PFOS のみを記載する。

4. 試験結果と考察

4.1 不溶化処理

図-6に不溶化処理の室内試験の結果を示す。図中のBLは未処理土壌の溶出量測定結果を示しており、PFOAが15,000 ng/L、PFOSが0.2 ng/L未満であった。一方、酸化マグネシウムと高炉セメントB種と活性炭を混合した処理土のケースでは、活性炭の添加量が0.5gのケース(図中の活性炭(少))と2gのケース(図中の活性炭(多))の結果を示す。活性炭(少)は、PFOAが66 ng/Lまで減少し、BLのPFOA濃度に比べると99.6%の溶出量低減効果があった。一方、活性炭(多)は、PFOAが3 ng/Lまで減少し、BLのPFOA濃度に比べると99.9%の低減効果があった。なお、PFOSは未処理土と同様に0.2 ng/L未満であった。

本試験では、攪拌機を用いて処理を実施した。その結果、処理前のPFOA 23,500 ng/Lに対して、PFOA 2 ng/Lと処理前後で99.9%以上の低減効果を確認した。本試験で使用した試料土は室内試験に比べて溶出量が高い土壌であった

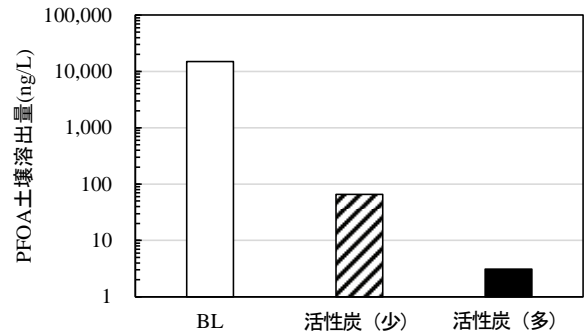


図-6 不溶化処理(室内試験)の試験結果

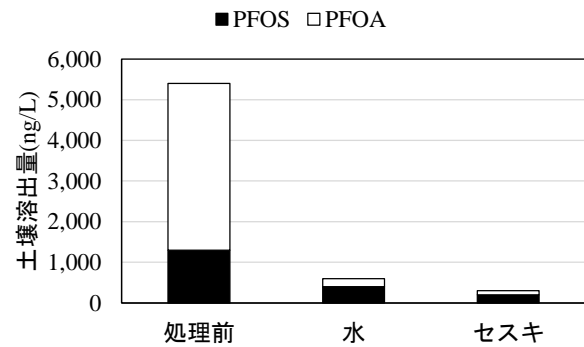


図-7 バッチ試験結果(土壌溶出量)

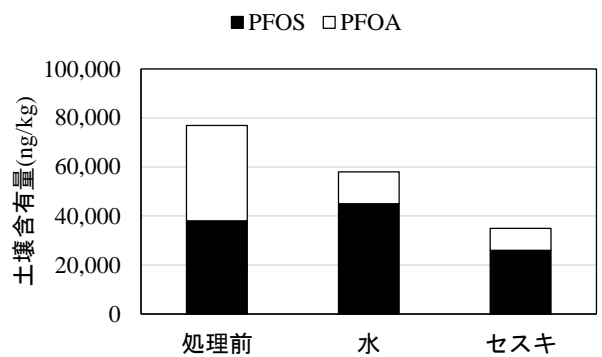


図-8 バッチ試験結果(土壌含有量)

が、十分な溶出量低減効果が得られた。

また、本試験の処理土壌について一軸圧縮強度試験を実施した結果、養生7日目において1,820 kN/m²の強度が得られた。固化処理工法研究会では建設重機の作業地盤として必要な強度の目安を100~200 kN/m²としており²⁶⁾、本処理によって十分な地盤強度が確保できることを確認した。

4.2 原位置土壌洗浄

4.2.1 アルカリ資材の選定試験

図-7と図-8にバッチ試験による試験で用いた模擬汚染土壌の土壌溶出量と土壌含有量の結果を示す。図中横軸の水はイオン交換水、セスキはセスキ炭酸Naを溶液としたことを示す。土壌溶出量は、処理前のPFOSが1,300 ng/L、PFOAが4,100 ng/L、水のPFOSが400 ng/L、PFOAが200 ng/L、セスキのPFOSが200 ng/L、PFOAが100 ng/Lとな

った。土壌含有量は、処理前の PFOS が 38,000 ng/kg、PFOA が 39,000 ng/kg、水の PFOS が 45,000 ng/kg、PFOA が 13,000 ng/kg、セスキの PFOS が 26,000 ng/kg、PFOA が 8,900 ng/kg となった。このことから、土壌溶出量に関しては、水のみでも処理前に比べて 80% 程度の低減効果がある。しかしながら、土壌含有量では 25% 程度の低減効果であった。一方、セスキを溶液とした場合は、土壌溶出量が 90% 程度、土壌含有量は 40% 程度の低減効果があった。また、水のみ土壌含有量において PFOS 濃度が若干上昇した原因に関しては、今後検討する。以上のことから、脱離促進資材として用いたセスキにより洗浄効果が高くなることが示された。

4.2.2 原位置土壌洗浄を模した試験

図-9 ならびに図-10 に通水カラム試験による浸出液の pH 変化と浸出水の PFOS 濃度を示す。セスキを連続通水した場合は、継続的に pH が上昇し PV=30 で 10 程度となった。一方、セスキと水道水を断続通水した場合は、pH が増減し PV=30 で 9 程度となった。水道水のみを連続通水すると PV=30 で 7 程度となった。浸出水の PFOS 濃度は、セスキを断続で通水することによってセスキを連続で通水するよりも、浸出水の濃度が短期間で高濃度となった。つまり、カラム内の土壌ならびに水に含まれた PFOS が抽出されたと考えられる。

以上のことから、セスキと水道水を断続的に通水することで処理対象の土壌の pH が大きく変化せず、洗浄水も高アルカリとならないことから水処理設備への負担が小さくなると考えられる。また、土壌と水から効率的に PFOS が抽出されることが示唆された。

5. まとめ

本稿では、PFAS で汚染された土壌・地下水に対して、PFAS の特性を考慮して開発した処理技術として、不溶化処理と原位置土壌洗浄処理の検討結果を示した。

不溶化処理に関しては、環境省「令和 6 年度 PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業」²³⁾の一環として実汚染土壌を用いて検討した。その結果、室内試験と本試験のいずれにおいても、酸化マグネシウムと高炉セメント B 種と粉末活性炭を混合することによって未処理土に比べて 99.9% 以上の溶出量低減効果を確認した。また、処理土壌は固化処理工法研究会が示す 100~200 kN/m² を満たすことから、建設重機の作業地盤としては十分な強度を確保できていることを確認した。

原位置土壌洗浄では、PFAS 汚染地盤に対して低環境負荷な原位置浄化技術として検討した。その結果、バッチ試験では、セスキ炭酸ナトリウムを脱離促進剤として使用することで、高有機物土壌でも処理効果が高くなる傾向があることを確認した。通水カラム試験では、セスキと水道水

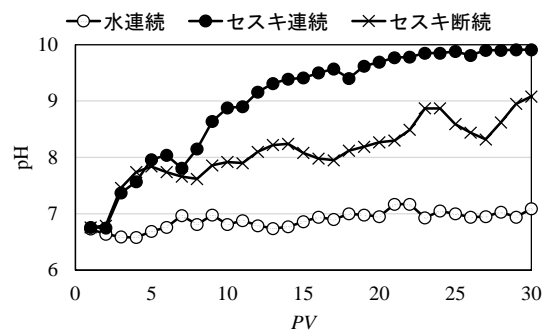


図-9 通水カラム試験結果 (pH)

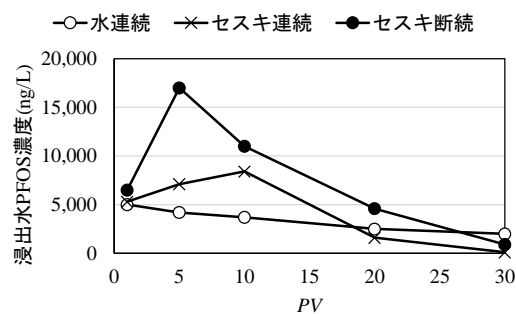


図-10 通水カラム試験結果 (PFOS)

を断続的に通水することで pH が大きく変化しない結果となった。これは、処理地盤の pH 環境の改善に加えて、処理期間中の水処理設備への負担を小さくできると考えられる。つまり、本処理技術の適用は、処理地盤の環境負荷の低減と水処理設備の薬剤使用量の低減に伴う低コスト化に繋がることを示唆された。

今後の課題としては、不溶化処理土壌の長期安定性²⁷⁾、原位置土壌処理に対して土質の異なる地盤への適用可能性などが残っていると考える。今後も効率的な処理技術の開発および検討を進め、実際の汚染サイトにおける実証試験なども行いたい。

本稿に含まれるデータは、環境省「PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業」²³⁾を通じて得た成果の一部を用いています。発表に際しては環境省及び関係者の許可を得ていますが、実証事業の最終評価を得る前の段階のものとなります。

参考文献

- 1) 環境省：中央環境審議会水環境部会環境基準健康項目専門委員会（第 13 回）資料 7-2, 2010 年 9 月 24 日, <https://www.env.go.jp/council/09water/y095-13b.html>.
- 2) 環境省：令和 4 年度公共用水域水質測定結果及び地下水質測定結果について, 2025 年 4 月 25 日報道発表資料, https://www.env.go.jp/press/press_04658.html.
- 3) 青木陽士, 稲田ゆかり, 隅倉光博, 加藤雄大, 倉部美彩子, 小島啓輔：土壌洗浄・分級による有機フッ素化合物 (PFOS/PFOA) の浄化検討, 第 27 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.294-299, 2022.
- 4) 佐藤徹朗, 瀬野光太, 窪田成紀, 中島誠：PFOS/PFOA を対象とした電気発熱法ハイブリッドによる原位置土壌・地下水浄化

- 技術の開発, 第 26 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.178-181, 2021.
- 5) 日野良太, 鎌田明秀, 西川直仁: 有機フッ素化合物 (PFAS) 汚染土壌・地下水の処理技術の開発, 防衛施設学会年次フォーラム, pp.53-58, 2024.
 - 6) 大山将, 松生隆司, 大坪修平, 宇川岳史: 環境水中に含まれる PFOS/PFOA のキャビテーション技術による分解処理に関する基礎的検討, 第 27 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.300-305, 2022.
 - 7) 中島誠, 瀬野光太, 佐藤徹朗, 平裕貴, 西村章, 西村聡: 粉末活性炭添着プリーツフィルターを用いた PFOA/PFOS 汚染地下水処理に関する検討, 第 27 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.103-108, 2022.
 - 8) 鶴岡佑樹, 大石雅也, 鈴木義彦, 松本直樹, 森一星, 潜在的規制物質の調査・対策スキームの検討部会: PFOS、PFOA 及び PFHxS による土壌・地下水汚染の調査・対策技術の現状, 第 27 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.1-6, 2022.
 - 9) 地盤工学会: 土壌・地下水汚染の調査・予測・対策, 地盤工学会, pp.168-177, 2003.
 - 10) 上岡誠一, 粕谷衛: 土壌に含有する 6 価クロムのセメント系固化材による原位置不溶化処理に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.664, VII-17, pp.43-54, 2000.
 - 11) 西田憲司, 三浦俊彦, 日笠山徹巳, 平井恭正, 土光政伸, 森田一太, 大澤誠司: 微細な酸化鉄粒子の地盤注入による汚染拡散防止手法の実証試験, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.145-146, 2013.
 - 12) 大山将, 奥村正孝, 保賀康史, 西村良平: 酸化マグネシウム系材料による固化・不溶化処理技術, 地盤工学会誌, Vol.57, No.7, pp.20-23, 2009.
 - 13) 高橋史武, 坂井仁, 島岡隆行, 中居直人, 北村洋樹: 電気炉スラグ含有フッ素のアパタイト処理による不溶化メカニズムの検討, 土木学会論文集 G, Vol.72, No.7, III_pp.351-359, 2016.
 - 14) 亀井健史, 蓬萊秀人: 高炉セメント B 種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.91-98, 2009.
 - 15) 福武健一, 三浦俊彦, 日野良太, 亀田健太郎, 日笠山徹巳: ふっ素汚染土壌に対する不溶化処理の事例, 土木学会第 74 回年次学術講演会, pp.VII-76, 2019.
 - 16) 石川延男: フッ素化合物をめぐる化学技術の進歩, 有機合成化学, 第 42 巻, 第 9 号, pp. 770-774, 1978.
 - 17) Zhou et al.: Effective sorption of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on hexadecyltrimethylammonium bromide immobilized mesoporous SiO₂ hollow sphere, Chemosphere, Vol. 90, pp. 2461-2466, 2013.
 - 18) Xing et al. : The complex effect of DOM on PFOA and PFOS transport: Considering the interference of solution ionic strength and cation type, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 10, 108619, 2022.
 - 19) Ziwen Du · Shubo Deng · Yue Bei · Qian Huang · Bin Wang · Jun Huang · Gang Yu : Adsorption behavior and mechanism of perfluorinated compounds on various adsorbents—A review, Vol.274, pp.443-454, 2014.
 - 20) 木村功二, 藤井滋穂, 田中周平, 邸勇, 野添宗裕: 粉末活性炭による残留性有機フッ素化合物類の吸着除去特性および影響要因の検討, 環境工学研究論文集, Vol. 45, pp.301-308, 2008.
 - 21) Heesoo Eun, Eriko Yamazaki, Yu Pan, Sachi Taniyasu, Kosuke Noborio, Nobuyoshi Yamashita : Evaluating the Distribution of Perfluoroalkyl Substances in Rice Paddy Lysimeter with an Andosol, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol. 19, 10379, 2022.
 - 22) Thi Minh Hong Nguyen, Jennifer Bräunig, Kristie Thompson, Jack Thompson, Shervin Kabiri, Divina A. Navarro, Rai S. Kookana, Charles Grimison, Craig M. Barnes, Christopher P. Higgins, Michael J. McLaughlin and Jochen F. Mueller : Influences of Chemical Properties, Soil Properties, and Solution pH on Soil–Water Partitioning Coefficients of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs), Environmental Science & Technology, Vol. 54, Issue 24, 138133, 2023.
 - 23) 環境省: PFOS 等の濃度低減のための対策技術の実証事業, https://www.env.go.jp/press/press_04808.html, 2025 年 4 月
 - 24) 環境省: 「PFOS, PFOA に関する Q&A 集」及び「PFAS に関する今後の対応の方向性」等について, 2023 年 7 月 31 日, https://www.env.go.jp/press/press_01977.html.
 - 25) 三浦俊彦, 井出一貴, 久保博, 藤井研介, 西田憲司: ほう素汚染地盤への原位置洗浄処理の適用, 大林組技術研究所報, No.71, 24, 2007.
 - 26) 固化処理工法研究会: 技術資料 https://www.kokashori.jp/pdfs/tech/tech_chap4.pdf, 2020.
 - 27) 日野良太, 三浦俊彦, 福武健一, 西田憲司, 森下智貴, 日笠山徹巳, 江種伸之: 水銀およびふっ素によって汚染された地盤の原位置不溶化に伴う長期安定性に関する評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.15, No.3, pp.563-571, 2020.

「防災」

一時的または長期的避難所における持続可能な水利用管理に対する課題と提言

“Challenges and Strategies for Sustainable Water Use in Short- and Long-Term Evacuation Facilities”

荻原洋聡*, 中根圭介**, 栗田恵子***

OGIHARA Yousou, NAKANE Keisuke and KURITA Keiko

(筆者1)* NPO法人 貯水タンク防災ネットワーク

(筆者2)** ユーティリティ・ソリューションズ代表、技術士（総合技術監理部門、上下水道部門）、防災士

(筆者3)*** 大野防衛工学研究所、災害医療コーディネーター

キーワード： 災害時水利用管理、避難所、短期避難、長期避難、持続可能性、レジリエンス、貯水タンク、災害対応インフラ

(Emergency Water Management, Evacuation Facilities, Short-Term Shelter, Long-Term Shelter, Sustainability, Resilience, Water Storage Tanks, Disaster Response Infrastructure)

1. はじめに

1.1 災害時における水利用の重要性

日本は地震や台風などの自然災害が頻発する国であり、災害発生直後から避難所における水の確保は、被災者の健康維持および衛生管理の観点から極めて重要な課題である。特に、安全な飲用水および生活用水の持続的かつ安定的な供給は、避難生活の質や生命の安全に直結するため、その確保と管理体制の強化が喫緊の課題となっている。¹⁾²⁾

さらに近年、国民保護の観点から武力攻撃を想定した避難施設（シェルター）の整備が重要視されている。しかしながら、我が国においてはその建築に関する十分な経験が蓄積されていないのが現状であり、災害対応と並行して水資源の確保・管理を含む包括的な避難施設的设计・運営体制の構築が求められている。³⁾

1.2 避難所の種類（短期・中長期）と特徴

避難所は大きく「短期（または、一時）避難所」と「中長期避難所」に分類できる。短期避難所は災害発生直後に一時的に避難するための施設であり、利用期間は、おおむね数時間から1日程度である。一方、中長期避難所は仮設住宅等を含み、数日から数か月に及ぶ避難生活を想定した施設である。そのため、衛生環境の維持、生活用水の安定供給、管理体制の継続性など、持続可能な生活基盤の構築が不可欠となる。

ただし、日本政府（内閣府・防災担当）は「短期避難所」「中長期避難所」という法的定義を設けていない。代わりに、災害対策基本法等において「指定緊急避難

場所（短期的避難のため）」と「指定避難所（一定期間の生活を伴う避難のため）」を区別しており、これが事実上「短期」「中長期」の役割分担に相当する。本稿では便宜上、両者を「短期避難所」「長期避難所」として用いる（表-1）。⁴⁾

さらに、行政用語として「避難施設」という表現は一般的ではなく、多くの場合「避難場所」と「避難所」が区別されている。すなわち、避難場所は災害直後に命を守るための一時的な空間を指し、避難所は災害後に生活を継続するための滞在施設を意味する。本稿でもこの区別に基づき用語を整理する。

表-1 短期避難所と長期避難所について

区分	目的・役割	主な特徴
短期避難所 (=指定緊急避難場所/避難場所)	居住者等が災害から命を守るために緊急的に避難する施設又は場所	津波ビルのような建築物の他に公園や広場などの場合もある
長期避難所 (=指定避難所/避難所)	避難した居住者等が災害の危険がなくなるまで一定期間滞在し、又は災害により自宅へ戻れなくなった居住者等が一時的に滞在する施設	衛生環境の維持、生活用水の安定供給、管理体制の継続性、持続可能な生活基盤の構築が求められる

1.3 既存研究・制度の概観

避難所における水利用に関する研究は、1995年の阪神・淡路大震災以降、生活用水に関する市民意識調査をはじめ、災害時の給水・入浴支援、災害用井戸や貯水タンクの活用方法など、多岐にわたって蓄積されてき

た。また、政府は避難所生活における水利用管理に関する指針を策定し、良好な生活環境の確保や水の「適材適所」利用を促進する具体的なガイドラインを提示している。⁵⁾ しかしながら、これらの制度や技術が現場で十分に機能しているとは言い難く、地域特性や運用体制を踏まえた柔軟な対応が求められているのが実情である。加えて、我が国では武力攻撃事態に対応するための避難場所や避難所の運用経験は未だ存在せず、この技術的知見の不足が課題となっている。

1.4 本研究の目的と意義

本研究は、災害発生時から復興過程に至る避難所における水利用管理について、短期的および長期的な視点から現状の課題を整理し、持続可能な水利用の実現に向けた具体的な方策および制度的提言を行うことを目的とする。特に、最新の被災地ニーズ調査や現場での活動報告を踏まえ、技術・制度・人材の連携による実効性の高い水利用モデルの構築を目指すものである。これにより、今後の防災・減災政策の実践に資する知見を提供するものであり、レジリエンスの高い避難所運営の実現に寄与すると考える。

2. 避難所の時空間・目的による整理と思考過程

避難所の設置形態は、発生した災害事象に応じて設置数、範囲等が多種多様となることから、考察すべき対象要因と範囲をできるだけ絞り込んで明確にする必要がある。

前章では、避難所を滞在期間の長短で分類したが、避難所設置に係る事象の種類（災害対策基本法及び国民保護法等の対象）に基づく設置目的でさらに分類すると表-2 のようになる。

災害の相違によって、設置される避難所の数・規模は大きく変動し、考察すべき対象は多岐にわたる。例えば、対象とする1避難所あたりに必要な「機能」と「1人あたりに必要となる物品量等」を把握することにより、全体所要の見積もりが容易になる。すなわち、(1品目についての必要量) = (1人/1日当たりの所要量) × (所要日数) の基本公式に基づき算定することになる。ところが、物品ではない「水」に関しては、表-2に示すいずれの避難所においても、「生命維持に必要な飲用水」と「生活維持のための生活用水」の所要量を数値的に特定することは困難である。生存・生活に必要な基本数量は、平常時・非常時に関わらずほぼ一定量と考えられるので、非常時も乗り越えて行けるような給水体制の仕組みを整えることが、持続可能な水管理の達成に繋がることになる。

災害時に生じる水飢餓状態は、断水に伴う支援給水車の前に長い待ち行列ができる光景に現れている。何故この光景が消滅することが無いのか？それは、水飢餓状態を解消する手段が「給水」だけに頼っているこ

表-2 目的による避難所の分類

目的	区分	概要	想定避難期間	全国の指定数
一時退避	指定緊急避難場所 (根拠法:災害対策基本法)	災害の危険から命を守るために緊急的に避難をする場所であり、市町村長により、 洪水、崖崩れ、土石流、地滑り、地震、津波、大規模な火事等の災害種別ごとに指定	数時間~1日程度	約115万
	指定避難所(根拠法:災害対策基本法)			約108万
仮の生活	一般避難所	災害による被害を受けた方または受ける恐れのある人が、一定期間避難生活をするための 一時的な滞在施設	数日~数か月程度	約82万
	福祉避難所	災害時に高齢者・障害者・乳幼児・妊産婦など「 要配慮者 」を受け入れるために特別に指定された避難所		約2.7万
	自主避難所 (根拠法:なし)	自治会や神社など指定避難所以外に地域住民が独自に定めた避難所で、個人や世帯で判断した在宅避難や車中・テント泊についても含む	—	—
	その他の避難関連施設 (根拠法:なし)	津波避難ビル、臨時的に開設する民間施設など	—	—
攻撃防御	※) 緊急一時避難施設 (根拠法:国民保護法)	爆風等 からの直接の被害を軽減するための 一時的な避難 に活用する施設で、コンクリート造り等の堅ろうな建築物や地下街、地下駅舎等の地下施設を指定	数時間から数日程度	約6.1万
	※) 特定臨時避難施設 (根拠法:国民保護法)	着上陸侵攻、ゲリラや特殊部隊による攻撃、弾道ミサイル攻撃及び航空攻撃の4つの種類の 武力攻撃事態を対象 とし、それらに伴う爆弾、砲弾、通常弾頭による爆風等から身を守る	~2週間程度	先島諸島の5市町村で整備予定
※)いずれの区分にも「核兵器」に関しては触れられていない				

とに起因している。「給水支援」を行うためには、「水源の確保」、「浄水化」、「給水」といった一連の作業が必要である。そして、その後の「排水処理」につながる一連の水運用が行われて初めて「持続的な給水」が可能となる。水飢餓の解消に対しては、総合的対応の観点から検討すべきである。

表-2の短期避難所・長期避難所について考察を進めるが、短期の避難では衛生確保のための水の必要量は限定的である。しかし数日の経過を境にその必要量は大幅に増加することから、本研究では、長期避難所における持続可能な水利用管理について考察する。考察の手順は、

- ① 2024年1月に起きた能登半島地震発災直後に、自主開発浄水装置を用いて「生活給水」支援をした現地実績から「1人/1日あたりに必要となる生活水量」について取得したデータを分析する。
- ② 分析にあたっては、「給水可能量」が避難所の生活環境や衛生状態のみならず、心理状態にも影響を及ぼすことを考察する。
- ③ そして、避難所に必要な機能と課題について、「核シェルター」(つくば市・日本核シェルター

協会のモデルルーム研修)を参考例として考察する。

3. 避難生活において必要となる水の特徴と排出先

避難所における生活用水の管理を検討する際には、その水源・供給水質・水量、さらに排出先までを考慮する必要がある。

3.1 水源の特性

前述したように、避難生活において必要となる水は、「飲用水」と入浴・洗濯・清掃等に用いる「生活用水」に大別される。

飲用水は、ペットボトル等の備蓄水や給水車による配布が主である。一方、生活用水として利用可能な水源は「無限」と「有限」に区分され、それぞれ以下の特徴を有する。

- **水量無限の水源例**：井戸（確実性は高いが地震により使用不可となった例あり）⁶⁾、河川（豊富だが季節、降雨で水質変動あり）、池・貯水池（規模が十分であれば有効）
- **水量有限の水源**：学校プール（25m プールで 300～400m³）、貯水タンク（容量は少なくパネル式では破損例あり）⁷⁾、防火水槽（消防当局との調整が必要）

3.2 要求水質

飲用水の必要量は、1人/1日3リットル(L)が基準となっている。⁸⁾ 水質については、災害時においても健康上の安全を確保するため、日本水道協会が「震災等の非常時における水質試験方法」を策定し、最低限の測定項目を規定している。⁹⁾

なお、過去の大規模地震においては生活用水の不足が顕著な課題として指摘されており(図-1)¹⁰⁾、能登半島地震においても深刻な困難となった。ここに、生活用水には明確な水質基準が規定されておらず、用途に応じて自己管理を求めることになっている。

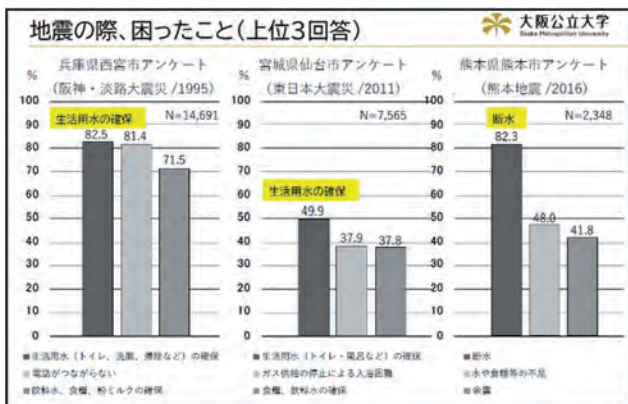


図-1 大規模地震の際の困りごと調査結果¹⁰⁾

3.3 避難生活で必要とされる水の量

(1) スフィア基準の内訳

能登半島地震の避難所では、飲用水は発災後1～2日で配布が開始され、比較的短期間で供給が行き届いた。

一方、生活用水は数日後に必要性が高まり始めたものの、断水が長期化した地域では十分な供給が困難なため生活に支障をきたしていた。

国際赤十字等が示す(通称)スフィア基準¹¹⁾によれば、生存に必要な最低水量は1人/1日15Lとされている。ただし基準書には、「この数値は最適値ではなく、長期間避難生活を送っている人にとっては適切ではない。

(中略)都市部の中間所得層では、健康と尊厳を保つためには最低でも1人あたり1日50Lが適切な量であるかもしれない。」と記載されている。

ここに、必要な最低水量とされる15Lの内訳にはシャワー・洗濯・清掃が含まれておらず、平時に豊富な水資源を享受している日本においては、1人/1日15Lの基準を適用する際に慎重な検討が必要である。(図-2)

ニーズ	量(リットル/人/日)	状況に応じて考慮される事項
生存に必要な水: 水の摂取量(飲料および食べ物)	2.5-3	気候や生理的個人差による
衛生上の行動	2-6	社会的および文化的規範による
基本的な調理	3-6	食べ物の種類や社会的および文化的規範による
基本的な水の総量	7.5-15	

図-2 スフィア基準の水量の内訳¹¹⁾

(2) 自治体が段階的に水を確保する目標例

災害発生(発災)以降において、段階的に水確保の目標を設定している自治体も多い。

例として、熊本市の地域防災計画(図-3)や千葉県企業局の水道事業震災対策基本計画(表-3)を示す。この計画では、発災後10日を経過した時点で1人/1日100L程度を確保する目標がみられる。

(2) 応急給水の目標水量	
給水量は、災害発生後3日間については、飲料水として3ℓ/人・日を目安とし、応急復旧の期間としては4週間以内を目標とする。	
○発災直後～3日間: 1人/1日3ℓ(飲料水(生命維持))	
○10日目まで: 1人/1日20ℓ(飲料水+炊事等(最低生活維持))	
○21日目まで: 1人/1日100ℓ(上記+洗濯水等(制限はあるが生活可能))	
○28日目まで: ほぼ通常生活(自宅での入浴等)	

図-3 熊本市の水確保の目標¹²⁾

表-3 千葉県の水確保の目標¹³⁾

応急給水の目標水量				
区分/内容	期間	期間の設定内訳	目標給水量	水量の用途内訳
第1次段階 (混乱期)	震災時から3日まで	震災直後の混乱期のため、浄・給水場及び指定場所での給水、運搬給水並びに住民の備蓄水などによって対処する期間。	3(L/人・日)	生命維持のため最小限必要な水量。
第2次段階 (復興期)	4日から10日まで	浄・給水場及び指定避難場所での給水、運搬給水により給水量の増量を図る期間から、応急復旧の進捗に伴い、仮設給水栓などを設置し対処する期間。	20(L/人・日)	簡単な炊事、洗面等最低生活を営むための水量から、浴用、洗濯等に必要水量まで。
	11日から21日まで		100(L/人・日)	
第3次段階 (復興期)	22日から28日まで	概ね1戸1検程度が確保される期間から、平常給水を行うまでの期間。	250(L/人・日)	第2次段階から平常時までの水量。

(3) 能登半島地震被災地での実測値

著者らは七尾市立小丸山小学校避難所において、2024年1月23日から3月22日まで生活水の供給を行い、避難所運営に関する有用なデータを得た。この避難所では、最大約100人、平均63人が避難生活を送る中、学校プールの水を浄化装置で処理し、水量制限なく温水シャワー、洗濯機、掃除用水栓等に供与した。

その結果として、延べ3,800人に対して約95,800Lの水を供給した。ただし、下水が使えなかったためトイレ洗浄水は含んでいない。その間の避難者1人あたりの使用水量を換算して示したのが、図-4である。トイレ水利用、および節水型水循環型シャワーの使用を除いた場合、避難者1人1日あたりの水利用量は約33Lであった。このデータから、トイレ用途や夏場の利用水量増加を考慮するとスフィア基準に併記されている1人1日50Lが妥当な数値であることを示している。

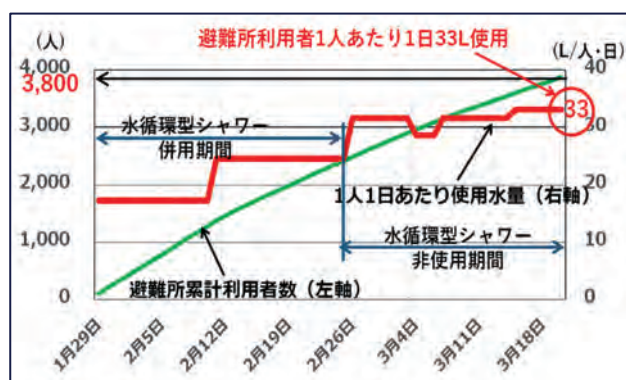


図-4 避難者1人あたりに換算した使用水量

3.4 排出先

水管理においては、生活排水の排出先を確保することも不可欠である。排出先としては以下が挙げられる。

- 下水道：基本的に重力流下であるが、液状化等によ

り逆流の可能性がある。

- 雨水側溝・河川：無処理で放流されるため、農業・漁業等の用途への影響を考慮する必要がある。

3.5 学校プールの有効性

全国に避難所指定学校が約3万あり¹⁴⁾、約2.4万の小中高등학교にプールが設置されており¹⁵⁾、小学校のプールでも300m³以上の容量があるものが多い。

表-4は、避難生活での使用水量を1人1日50Lとした場合に、生活人数別に何日間で何m³の水が必要になるかを試算したものである。この表から、300m³以上の容量があるプールを水源とすれば200人が30日、あるいは100人が60日間、生活用水を確保できる可能性がある。

表-4 避難生活者の人数に必要な水量

人数	日数	必要水量(m ³)
50	10	25
	20	50
	30	75
	60	150
100	10	50
	20	100
	30	150
	60	300
200	10	100
	20	200
	30	300
	60	600

4. 医療・生活面からの課題

短期あるいは長期避難所における持続可能な水利用管理については、避難者の医療および生活の側面から検討する必要がある。とりわけ、衛生や感染症リスク、高齢者や要配慮者における水利用ニーズ、医療支援体制と水利用の関連性、さらに水不足が生活の質に及ぼす心理的・社会的影響について、医療公衆衛生の観点から課題を整理する。

4.1 避難所生活における衛生・感染症リスク¹⁶⁾

短期あるいは長期避難所の別にかかわらず、多数の避難者が限られた空間で共同生活を送るため、呼吸器感染症や感染性胃腸炎などが集団発生しやすい環境となる(表-5)。特に断水や給水量の制約下では、手洗い・トイレ洗浄・入浴などの生活用水が不足し、ノロウイルス等の感染症、皮膚トラブル、口腔衛生悪化など、多様な健康被害が顕在化することが報告されている。

表-5 避難所で流行しやすい感染症

分類	感染症名	主な感染経路	主な症状
呼吸器感染症	新型コロナウイルス感染症	飛沫感染、接触感染、エアロゾル感染	発熱、咳、頭痛、喉の痛み、味覚障害、嗅覚障害など
	インフルエンザ	飛沫感染、接触感染	38℃以上の高熱、関節痛、頭痛、喉の痛み、咳、鼻水など
	肺炎球菌性肺炎	飛沫感染	発熱、咳、胸痛など
	マイコプラズマ肺炎	飛沫感染	咳、発熱、頭痛、倦怠感など
	結核	空気感染	長引く咳、発熱、倦怠感、体重減少など
	麻疹(はしか)	空気感染、飛沫感染、接触感染	発熱、咳、鼻水、眼脂(めやに)、発疹など
消化器感染症	水痘(水ぼうそう)	空気感染、飛沫感染、接触感染	発熱、全身性の発疹(水疱)など
	ロウイルス感染症	経口感染(食品、水)、接触感染	吐き気、嘔吐、下痢、腹痛、発熱など
	ロタウイルス感染症	経口感染、接触感染	嘔吐、白っぽい下痢(乳幼児に多い)、発熱など
	細菌性食中毒(0157、サルモネラなど)	経口感染(汚染された食品、水)	腹痛、下痢、血便、発熱、嘔吐など
皮膚・その他	疥癬(かいせん)	接触感染	激しいかゆみ、皮膚の発疹(丘疹、結節)など
	伝染性膿痂疹(とびひ)	接触感染	水疱や膿疱ができ、それが破れてびらんになる
	破傷風・ガス壊疽	創部感染(ケガをした傷口から菌が入る)	破傷風:けいれん、開口障害など / ガス壊疽:患部の腫れ、激痛、ガス発生など
	ツツガムシ病	ダニ媒介感染	発熱、発疹、刺し口(黒いかさぶた)など

2011年3月11日に起きた東日本大震災や近年の地震災害では、手洗い設備の不足やトイレ清掃の遅れが嘔吐・下痢症の集団発生と関連したことが指摘されている。また、断水が長期化した避難所では、シャワーや手洗いの機会が十分に確保できず、生活用水が使えないことが、感染症リスクと避難者の健康悪化を加速させたとの報告もある。

こうした事例から、飲用水の確保だけでなく、手指衛生・トイレ・簡易入浴・洗濯などを含む「生活用水」の最低限の量と適切な水質を計画的に確保することが、持続可能な水利用管理において不可欠であることがわかる。

4.2 高齢者・要配慮者の水利用ニーズ¹⁷⁾

長期避難所では、高齢者、障害者、妊産婦、乳幼児、慢性疾患患者など、いわゆる要配慮者が多数避難することもある。これらの人々は水不足や衛生環境の悪化による影響を受けやすい。要配慮者支援マニュアルや避難所運営ガイドライン¹⁸⁾では、スペースの確保や見守り体制の構築に加え、水・食料・トイレといった基礎的な生活環境への配慮が重要であるとされている。

特に高齢者では、脱水や誤嚥性肺炎のリスクが高く、飲水量の確保、口腔ケア、トイレへのアクセス性が健康維持に直結する。一方で、トイレ環境の不備から水分摂取を意図的に控える行動が生じる可能性もある。要介護高齢者や障害のある避難者の場合、オムツ交換、部分清拭、褥瘡予防のための清潔保持など、介護に伴う水利用ニーズが増加し、一般の避難者とは異なる水の量・水質・利用パターンを前提とした計画が求められる。

したがって、避難所では要配慮者が一定割合を占めることを前提とし、福祉避難室の設計や屋内安全確保を行う施設の設置においては、水利用計画に医療・介護ニーズを組み込むことが不可欠であると考えられる。

4.3 医療支援体制と水利用の関係

令和6(2024)年1月1日に発生した能登半島地震において、著者の一人が避難所の医療支援体制について情報収集した結果、診療や投薬といった「医療行為」とどまらず、水の利用が感染対策、慢性疾患の管理、口腔ケア、リハビリテーションなどの「保健・生活支援」と密接に結びついていた。すなわち、これらの活動はすべて水の利用に依存している。

例えば、簡易診療所や医療班が活動するスペースでは、手洗い場や排水設備の有無が医療安全の管理と直結していた。さらに、血圧測定や採血後の処置、医療器具の簡易洗浄などにも一定量の水が必要とされた。また、石川県七尾市の公立能登総合病院がまとめた「令和6年能登半島地震活動報告書」¹⁹⁾によれば、病院の貯水槽が破損し、発災直後から101名の透析患者が金沢市などの透析医療機関へ救急搬送される事態が発生した。透析は大量の水を必要とするため、断水の影響を最も受けやすい医療行為である。

さらに、災害医療体制や保健師活動の現場では、長期避難生活の中で糖尿病や高血圧などの慢性疾患の悪化、口腔衛生の低下、精神疾患の増悪が問題となっていた。その背景には、水分摂取不足や清潔保持の困難さがあり、現地の看護師からも強く印象に残る証言が得られた。

以上の教訓から、避難所の医療支援計画においては、医療班の配置や動線設計に加えて医療行為および保健活動に必要な水量・水質を見積もり、臨時医療スペースの給水計画に反映させる視点が不可欠であると言える。

4.4 避難所での水不足が生活の心理的・社会的影響に及ぼす影響^{20),21)}

避難所生活では、入浴や洗濯ができないことによる不快感や羞恥心、他者からの視線への過敏さが、ストレスや睡眠障害、さらには対人関係の悪化につながることを指摘されている。すなわち、水不足は身体的健康のみならず、避難者の心理的・社会的側面にも大きな影響を及ぼす。

とくに、長期化する避難生活においては、清潔を保てない状況が「人としての尊厳」の低下として受け止められ、自己評価の低下や社会的孤立、抑うつ、アルコール問題などを引き起こし、災害関連死につながり得る健康リスクを増大させる可能性がある。

また、トイレ環境の不備から水分摂取を控えたり、混雑を避けるために排泄を我慢する行動は、身体的リスクに加えて慢性的な不安感や苛立ちを増幅させ、避難所内のトラブルや住民間の軋轢の要因となり得る。

こうした心理的・社会的影響を軽減するためには、「命を守る最低限の水」の確保から、「入浴・洗濯・トイレ・手洗いなど生活の質や尊厳を維持するための水

利用」を避難所設計や防災施設計画に数値化しておく必要がある（表-6）。

表-6 水不足が生活面に及ぼす影響から考える避難所設備

領域	具体的影響	結果	対策(例)	必要な避難所設備
医療	病院機能の停止・手術・透析停止、器具消毒困難	医療活動の停滞、感染症拡大	外部からの給水支援の確保。消毒用アルコールや使い捨て医療器具の備蓄・利用。優先度の低い治療の延期。	簡単な医療スペース(海自の船の医療室に近い部屋)、ベッド、救急カート-DMATカーの標準装備程度での医療品の備え
衛生面	手洗い・調理困難、給水制限	水系感染症、食中毒、皮膚疾患	手指消毒剤の徹底的な配布と利用指導。簡易トイレの設置と管理強化。飲料水と生活用水の分離。	トイレ、シャワーブース、洗面所、洗濯場、調理スペース
個人健康	脱水、熱中症、精神的ストレス	高齢者・慢性疾患患者に深刻	定期的な体調確認(巡回・問診)。飲料水の優先配布と水分補給の奨励。専門職による精神的なケア(聴聴など)。	簡単な医療スペース、ソファ、椅子(医療に準ずる)
社会	保健所機能の低下、避難所衛生悪化	公衆衛生活動の停滞	連絡手段の確保、避難所における衛生リーダーの育成と組織化。清掃・ごみ処理ルールの徹底。	衛星電話、スターリンク、通信のためのWiFi設備、ごみ置き場

5. 中長期的避難所のモデル施設における水利用管理への提言

5.1 核シェルターモデルルーム（つくば市）の水利用対策に対する考察

中長期的避難施設の水利用管理を検討する目的で、著者らは茨城県つくば市に設置されているシェルターのモデルルーム（写真-1）を訪問（2025年11月5日）した。本施設は、外部からの衝撃および各種災害に対する防護を目的とした地下構造物である。



写真-1 中長期的避難施設としてのモデルルーム（地上外部から地下への入口部）

本施設は、とくに核攻撃を含む広範な緊急事態への対応を想定した地下型シェルターとして設計されている。

鉄筋コンクリート（RC）の函型構造で、爆風・放射線・振動のそれぞれに対する耐性能を確保している点が特徴的である。とくに、核・生物・化学兵器（NBC）防護性能があるとしている。出入口にはエアロック付き二重扉が装備され、換気設備にHEPAフィルターと活性炭層を組み合わせた多段式ろ過システムが採用さ

れている。また、内部をわずかに陽圧に維持することで、気密性を保持して外部からの汚染物質侵入を防止する性能となっている。さらに、外部電力が途絶した場合にも、蓄電池を備えており、換気等の生命維持機能を継続できる設計となっているとのことである。

避難所における水の管理は感染症などの抑制に重要で、とくに長期的な避難所においては生存に関わる問題である。現在、本施設においては未整備である。今後の水管理システムの整備にあたっては、例えば、深井戸水を主水源とし雨水回収を補助水源とする多重的確保体制の構築、シャワーや洗面からの排水（グレーウォーター）を浄化処理してトイレ洗浄や発電機冷却水として再利用するクローズド・ループ型水循環システムの標準装備化などの実装を提言する。

5.2 開設・運営の実践と改善

飲用水供給は備蓄水の配布および給水車の巡回により対応可能であり、能登半島地震においても大きな混乱は生じなかった。

一方、生活用水は多様な用途に対応する必要があり、機材の確保方法（備蓄か搬入か）を事前に計画することが不可欠である。対口支援が到着するまでの間は地元のみで開設・運営を行う必要があるため、避難所運営に特化した訓練が求められる。具体的には、機材の展開・設置・稼働を伴う数日間の生活体験を通じて操作に習熟し、課題を抽出・改善することが重要である。

5.3 医療・衛生面からの提言（感染症予防、健康維持）

避難所における持続可能な水利用管理は、感染症予防と健康維持の必須要件である。断水や給水制約下では衛生水の不足が感染症や健康被害を増幅させるため、飲用水のみならず手洗い・トイレ・入浴・洗濯に必要な水量と適切な水質の管理を計画的に実施することが不可欠である。とくに、高齢者や要配慮者は脱水、誤嚥性肺炎、褥瘡などのリスクが高いため、介護・医療ニーズを前提とした水利用計画が求められる。

さらに、医療支援体制は診療や投薬にとどまらず、感染対策や慢性疾患管理、口腔ケアなど水に依存する活動と密接に結びついており、臨時医療スペースの給水計画に反映させる必要がある。加えて、水不足は避難者の尊厳や精神的健康に深刻な影響を及ぼし、社会的孤立や震災関連死の要因となり得る。したがって、第4.4節で述べたように、避難所設計や防災計画においては「命を守る最低限の水の確保」を必須要件とし、さらに「生活の質と尊厳を維持するための水利用を数値化し、事前に議論・準備」しておくことが極めて重要である。

しかし現状では、避難所における生活用水について、具体的な必要水量や水質に関する統一的な規定はほとんど整備されていない。第3節などで示した知見を

踏まえ、災害フェーズ（緊急時・復旧期など）の違いを考慮した上で、最低限確保すべき水量と、用途別（飲用・非飲用）の必要水質を早急に標準化・基準化することを提言する。

6. 非常時の水管理について（まとめ）

本研究で考察した結果は、以下の通りである。

(1) 本研究では、避難所の種類を「短期避難所」と「中・長期避難所」と区分して、避難所の目的に応じた分類で整理した。

その上で、避難生活の期間が短期または中・長期に関わらず、生命維持及び生活維持のためには「水」の確保が必要不可欠であるという観点から考察を行った。そして、2024年能登半島地震発災の支援データに基づいて、1人/1日当たり必要な最低水量を提示した。

また、避難所における給水は、生命維持のみならず、衛生環境、精神面にも波及する観点の重要性が認識できた。

(2) 本研究では、短期および中長期避難所に焦点を当て、水管理について考察した。避難所における持続可能な水管理は、「集水（雨水）」～「水源」～「浄水」～「給水」～「排水」～「排水処理」という「水の流れの結節点」に沿った連続的な観点から対処していく必要がある。つまり、安定・持続可能な水質・水量確保のための技術的改善（設備更新・モニタリングシステム等）が求められる。

(3) 著者の一人は、2023～24年に厚生労働省の日本戦没者遺骨収集現地調査に参加する機会を得て、パプアニューギニアの熱帯雨林のジャングルで4回のキャンプを体験した。湿度90%以上、年間降水量8,000mm超のスコールによる豊富な天水があっても水道施設は無いという環境であった。それでも人々の生活は成り立っている。

一方、豊富な雨水がありながら、1時間近くをかけてキャンプ地まで水を運んでくれる子供たちの姿を目にして、その労苦を軽減するためにも調査参加2回目以降は、雨水を集水して生活用水として使用しつつ、その一部を浄化（浄水）して飲用水を確保する方法を子供たちに伝えることを試みた。

テント用の小屋組みに掛けたブルーシート屋根の下にテントを張った。そして、ブルーシートに降り注ぐスコール雨水を集水し、水源とした。その水源を生活用水とし、その水源から、浄水ポンプで飲用水を確保することを現地検証した。（写真-2）

その後滞在した、ブーゲンビル島ブインの宿泊施設では、屋根に降り注ぐスコールの雨水を貯水タン

ク(9000L×2基)に貯留・貯水し、それを全ての生活用として所要をまかなっている。

このように、与えられた資源を、有効に日ごろ使いながら、非常時を平然と乗り越えて行けるような「持続可能な自立・自律的な水管理」を目指しつつ、

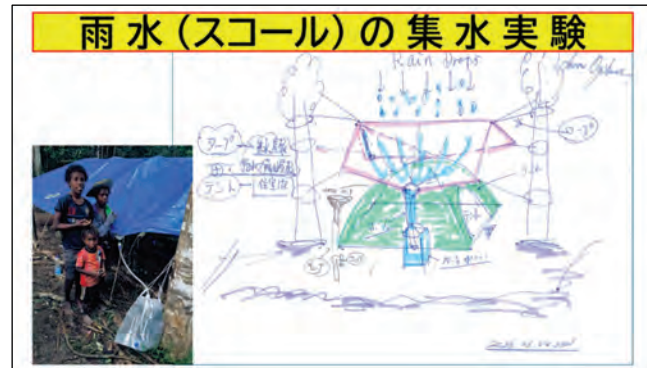


写真-2 パプアニューギニアにおけるスコールの集水実験

各結節点となる機能強化の観点から、たとえ原始的であっても確実な手法の一例として参考にしながら、身の回りの検証を進めていく所存である。

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くのアドバイスをいただいた防衛大学校名誉教授 大野友則先生、I・T・O株式会社、クリタック株式会社、NPO法人日本核シェルター協会など多くの皆様に、ここに深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 荻原洋聡：「強かな」防災・応災・減災コンセプト 構築取り組みについて ～NPO法人貯水タンク防災ネットワーク(Chonet)を通じた活動事例～、一般社団法人防衛施設学会年次フォーラム2023 論文集, 23-32, 2023
- 2) 中根圭介他：災害時の避難生活を支援する「非常用生活用水浄化装置」の開発 ～衛生的でストレスのない被災生活のために～、一般社団法人防衛施設学会年次フォーラム2023 論文集, 33-40, 2023
- 3) 内閣官房 国民保護ポータルサイト, 内閣官房副官房補(事態対処・危機管理担当):特定臨時避難施設の技術ガイドライン(第2版), (令和6年6月)
- 4) 災害対策基本法, 第4章 第2節 指定緊急避難場所及び指定避難所の指定等(第49条の4—第49条の9)
- 5) 内閣府(防災担当): 避難生活における良好な生活環境の確保に向けた取組指針, (令和6年12月改定)
- 6) 社団法人 全国さく井協会: 東日本大震災による井戸

- の被害調査報告書, 平成 24 年 7 月
- 7) 中央大学 平野研究室ホームページ, 貯水タンクの地震被害調査と対策
<https://hirano.r.chuo-u.ac.jp/sloshing/category1/>
(2025.01.05閲覧)
 - 8) 農林水産省ホームページ, 『大事な水、どうやって備えますか?』
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/foodstock/imadoki/ima-doki02_10.html (2025.01.05閲覧)
 - 9) 公益社団法人日本水道協会: 『震災等の非常時における水質試験方法 (上水試験方法-別冊)2024』
 - 10) 大阪公立大学 遠藤崇浩: 『災害用井戸の必要性』 (災害時地下水利用ガイドライン説明会、2025 年 3 月 19 日)
 - 11) 国際赤十字・赤新月運動他: 『スフィアハンドブック 人道憲章と人道支援における最低基準』, 106-107, 2018
 - 12) 熊本市: 『地域防災計画 令和7年度(2025 年度)版本編』, p309
 - 13) 千葉県企業局: 『企業局水道事業震災対策基本計画』, 令和 7 年 3 月, p33
 - 14) 文部科学省大臣官房: 『避難所となる学校施設の防災機能強化の推進について(通知)』, 令和 7 年 6 月 25 日
 - 15) スポーツ庁: 『体育・スポーツ施設現況調査 中間報告書』令和 7 年 9 月, p9
 - 16) アドホック委員会: 被災地における感染症対策に関する検討委員会報告, 大規模自然災害の被災地における感染制御マネジメントの手引き, 一般社団法人日本環境感染症学会, S1-77, 2014
 - 17) 厚生労働省: 被災地での健康を守るために 平成 23 年 7 月 25 日版
<https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/hoken-sidou/dl/disaster-110722.pdf> (2025.01.05閲覧)
 - 18) 内閣府(防災担当): 避難所運営ガイドライン, 平成28年4月
 - 19) 公立能登総合病院: 令和 6 年度能登半島地震 活動報告書, 令和 7 年 4 月
<https://www.noto-hospital.nanao.ishikawa.jp/wp-content/uploads/2025/04/c52b129f40c22cb023886d4b9d264b2e.pdf> (2025.01.05閲覧)
 - 20) 永幡幸司・金子信也・福島哲仁, : 避難所における生活環境の問題とストレスとの関係について, 科学研究費補助金 基盤研究(B)17310089 研究報告書, 福島大学, 2007.
 - 21) 金 吉晴(研究代表者): 『災害時の精神保健医療に関する研究』 厚生労働行政推進調査事業費補助金 障害者政策総合研究事業(精神障害分野), 平成 28 年度 総括・分担研究報告書, 2017.

緊急時に即応可能な簡易設置型流木対策工の開発

DEVELOPMENT OF RAPID-DEPLOYMENT, EASY-TO-INSTALL DRIFTWOOD COUNTERMEASURE STRUCTURES FOR EMERGENCY RESPONSE

原田紹臣*, 烏山悟史**, 藤田健太郎**, 須藤信也**, 小西成治***, 石川芳治****

Norio HARADA, Satoshi KARASUYAMA, Kentaro FUJITA, Sinya SUDO, Seiji KONISHI and Yoshiharu ISHIKAWA

* 博士（工/農）京都大学大学院農学研究科（〒606-8502 京都市左京区北白川追分町）

** 日之出水道機器株式会社（〒812-0043 福岡市博多区堅粕5丁目8-18）

*** ヒロセ補強土株式会社（〒541-0146 大阪市中央区平野町2-6-6）

**** 博（農）東京農工大学名誉教授（〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8）

キーワード：流木対策工，実験，緊急対応，螺旋杭基礎，災害復旧

(*Driftwood countermeasure structures, experiments, emergency response; helical pile foundations, disaster recovery*)

1. はじめに

森林は、大気中における二酸化炭素の吸収によって地球温暖化防止に貢献する地球環境保全機能、木材等の林産物を算出・供給する木材等生産機能等、国土保全機能等の多面的な機能が期待されている¹⁾。一方、近年における地球温暖化²⁾等の影響を受けて、これまでの観測記録を上回る豪雨が多発し、増水時における河岸の侵食による立木や倒木の流出、溪流沿いの斜面崩壊に伴う土砂や樹木の流出等、山地河川や森林域における流木化による被害が顕在化している（例えば、図-1）³⁾。なお、流木災害は森林資源の喪失とともに、人命・財産への被害や漁業等の産業活動への被害等の川上から川下までの流域全体に対して影響を与える⁴⁾。今後、流木被害の軽減に向けた更なる流木対策の推進が望まれている¹⁾。

このような中、これらの豪雨に伴った水災害の激甚化・頻発化等を踏まえ、堤防の整備、ダムの建設・再生などの対策をより一層加速するとともに、集水域から氾濫域にわたる流域に関わるあらゆる関係者が協働して水災害対策を行う流域治水等の推進が求められている^{5),6)}。一方、地震等により崩壊した斜面上の倒木の二次移動防止について、緊急的に対策を講じるための簡易的な流木対策工が必要となる。なお、現在において流木対策工については試行的に提案されている（例えば、7),8),9)）。しかしながら、これらの流木対策工は安定性を確保するため、比較的規模の大きなコンクリート基礎を必要とするものなどが多く、簡易的かつ省人化で即応可能である新たな

流木対策工の提案が求められている。また、これらの流木対策工の効果的な配置に関する更なる知見の整理が必要⁷⁾である。そこで、本研究では、地震後等の緊急時において即応可能な簡易設置型の流木対策工を開発するとともに、その効果的な配置について提案する。

2. 簡易設置型流木捕捉工の開発

緊急時にも即応可能な新たな流木対策工として、簡易的にあと施工が可能な流木捕捉工を提案する。なお、提案する流木捕捉工（捕捉杭）の適用例を図-2に示す。図-2に示すとおり、上流から流下してくる流木を、複



図-1 地震後の能登半島豪雨による流木による被災事例

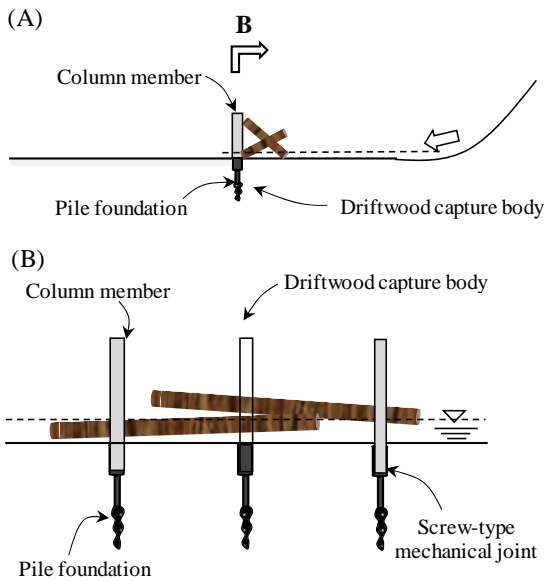


図-2 提案する流木捕捉工の適用例 (上:断面, 下:正面)

数の捕捉杭を自由な間隔や方向で、並立に設置して捕捉する構造である。以降に、提案する流木捕捉杭の構造について示す。図-2 (下) に示すとおり、今回提案する流木捕捉杭 (Driftwood capture body) は、上部の流木捕捉柱部材 (Column member) と下部の杭基礎 (Pile foundation) で構成されるものである。なお、これらは挿入方式での接合 (一部、コンクリート併設) により一体化を図る構造で、図-3 に示すとおり維持管理で求められる流木捕捉柱部材 (上部) を簡易的に設置交換するため、コンクリートの部分撤去により柱部材が着脱・分離可能な構造としている。

また、既施設や対策工周辺における安定性能や、あと施工時における施工性の向上を考慮して、図-4 に示す杭基礎 (螺旋状) とし、杭頭を貫入方向へ打撃すると自律的に回転しながら地盤内で固定化させる構造体としている。その際、貫入方向に対して、漸次縮径する先細りの杭先端部を有する棒状の杭本体部と、杭本体部の外周面に杭先端部の一部または全部の外周面に沿ったスパイラル状としており、杭本体部が地盤に貫入する際の地盤からの反力を杭本体部の回転力に変換させる羽根面を有する構造としている。これらの工夫により、大規模なコンクリート基礎の打設による安定化を必要とせず、人力等による地盤 (N 値≒40 まで) への打設による施工が可能となる。一方、土石流等の外力作用時において、一般的に構造上の弱部と想定される接合部 (上部の流木捕捉柱部材: 基部) に対して、流木捕捉柱部材 (円筒体: 流木捕捉軸柱) 内に細長状の四角筒体を挿入させた補強が可能となる (図-5: 右上)。また、図-3 に示す継手については、挿入方式の簡易的な接合方法を採用している (図-5: 右下)。

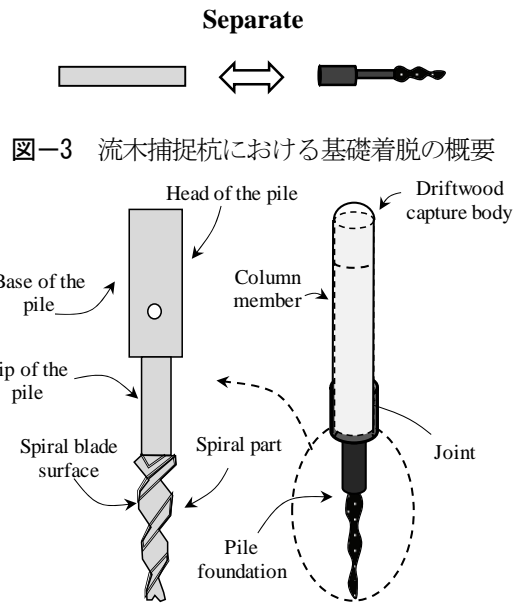


図-3 流木捕捉杭における基礎着脱の概要

図-4 流木捕捉杭の構造およびその基礎形状

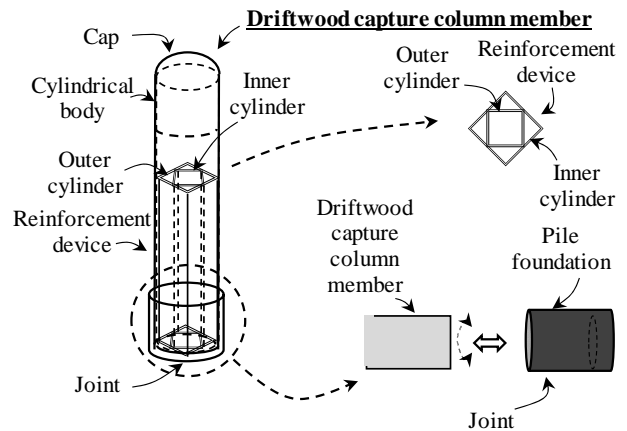


図-5 流木捕捉杭の詳細構造 (内部補強と継手構造)

ここで、これらの流木捕捉杭の配置に際して、林道や家屋等の保全対象 (図-1) より山側の河道や空地において、比較的自由に設置することを基本としている。なお、流木捕捉杭の設置間隔については、想定される最大流木長の 2 分の 1 程度¹¹⁾を目安とする。また、図-4 に示す独立した基礎の採用により、河道内における横断方向の略直線状での任意による配置や、流水や地形条件を考慮した略扇形状又は略逆扇形形状による自由な配置が可能となる。さらに、道路際の縦断方向に略直線状での任意による配置も可能である。

ここで、提案する流木捕捉杭の安定性能に関して、一般的な土石流を想定して、道路への流木流出 (図-1) 防止を目的とした沿道 (アスファルト舗装部, 地盤 N 値: 10 程度) への設置を想定した流木等の外力作用 (図-6) 時における荷重¹²⁾を構造物に載荷させた衝撃試験 (条件: 表-1) の実施により検証する。実施した衝撃試験の結果によると、表-1 に示す荷重作用条件に対して、一

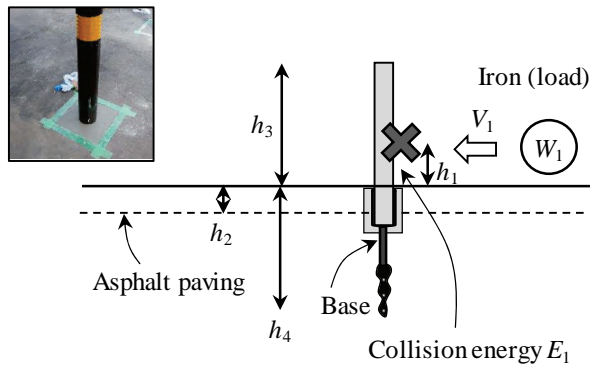


図-6 実験概要 (荷重載荷試験)

表-1 実験条件

		Unit	Value
Weight	W_1	kg	1805
Load position value	h_1	mm	200
Pavement thickness	h_2	mm	140
Capture body length	h_3	mm	850
Pile length	h_4	mm	850
Collision speed	V_1	km/h	47.1

部変形しながらも十分に機能することが示唆された。なお、紙面の関係より、詳細については報告できないため、今後、別途で報告する予定とする。

3. 配置条件の違いが捕捉機能に与える影響

前述までに提案する自由に配置が可能な流木捕捉工における捕捉機能の高度化を目的に、図-2 (上) に示す空間等を対象にした流木捕捉工 (捕捉杭) の配置条件 (詳細な設置位置) の違いが捕捉機能に与える影響について、基礎実験に基づいて考察する。

(1) 流木の流出や回転特性を考慮して提案する流木捕捉工配置に関する概要

これまでの災害事例⁴⁾等を参考に、新たに提案する流木対策工 (捕捉杭) の配置条件の違いが捕捉機能に与える影響について検討する。ここで、河道内等に流木捕捉杭を設置する場合、一般的に流木だけでなく芥等による河道閉塞等の影響が懸念される。また、流木捕捉時における用地の確保や、日常的な維持管理に対して留意する必要がある⁹⁾。その際、流木はその比重より水面付近を面内で回転することが想定され、流木捕捉工の直上流における流れの変化による影響が考えられる。なお、緩勾配区間から急勾配への急激な変化 ($V_{n-1} \ll V_{n+1}$) による影響を受ける場合、流木が流れ方向に回転 (例えば、

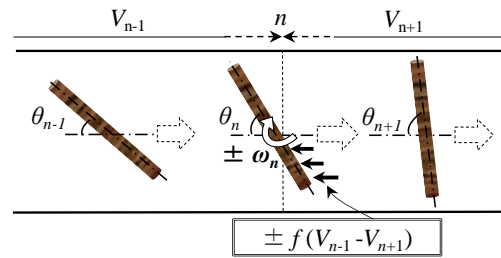


図-7 期待する流水中における流木回転機構の概要図

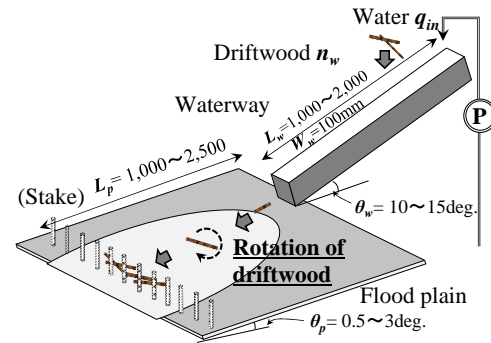


図-8 実験水路の概要

図-7; ω_n が一方向へ回転) し、一般的に用いられる流木捕捉工の杭間隔 (最大流木長の半分)¹¹⁾では十分に捕捉せず流木がそのまま杭間を通過してしまうことが懸念される¹³⁾。一方、杭間隔を顕著に狭くした場合、前述に示すとおり、日常的な芥や流木等の閉塞防止のための多大な維持管理が別途に必要となる。

そこで、比較的広い杭間隔配置においても効果的に流木を捕捉するためには、流木捕捉が優位となる方向 (図-7: 流れに対して直角方向: $\theta_{n+1} \gg$) へ回転¹³⁾させることが有効である。その際、一般的に急勾配から緩勾配へ流れが顕著に変化 ($V_{n-1} \gg V_{n+1}$) する場合、流木が流れ直角方向へ回転 (ω_n が+方向へ回転) する特性を活用し、山地河川における治山堰堤等の土石流堆積地や沿道等の平坦地への設置に着眼した流木捕捉工の配置が有効であると考えられる (図-2)。以降に、本稿では急峻な流路から緩勾配の平坦地へ流下する際に期待される流木の回転 (図-7) に着眼した実験に基づいて考察する。

(2) 実験概要

流木が効果的に捕捉可能であると考えられる流れが急勾配から緩勾配へ急変する箇所における流木捕捉工の設置に関する有効性を検証するための実験に使用した急拡水路 (直線水路及び平面氾濫台) を図-8 に示す。図-8 に示すとおり、実規模に対して約 1/100 程度の縮尺を想定して、傾斜させた直線水路 (幅 10 cm) の上流から水 (q_m)、流木 (ただし、円形材料、流木長 8 cm、乾燥状態での比重: 約 0.75、手動により投入: 時間あたりの投入速度が概ね 1 本/0.5 秒) を供給し、下流の平面氾濫台

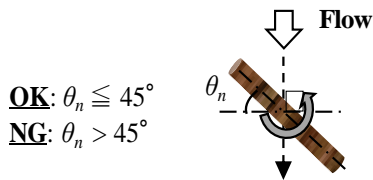


図-9 流木回転の制御効果の評価に関する定義図

表-2 実験条件

CASE	q_{in} (l/s)	ϕ_1 (mm)	θ_w (deg.)	θ_p (deg.)	L_w (m)	L_p (m)
1-1	0.25					
1-2	0.80				1.0	
1-3		1.6		2.0		
1-4						1.0
1-5		2.8				
1-6			15	1.0	2.0	
1-7	0.50			3.0		
1-8				0.5		
1-9		1.8				2.0
2-1					0.5	1.0
2-2				2	2.0	2.0
2-3	0.80	2.8			1.0	1.0
2-4	0.50	1.6	10	0.5		

における流木捕捉直前での流木の軸方向 θ_n (図-9) をそれぞれ計測している。流木の投入に関して、群集で流下する流木は捕捉されやすいことが知られており¹⁴⁾、これらの影響を軽減するため、流木を単体で投入している。また、流木の供給条件(初期投入方向)の違いが流木の回転制御効果(図-7)に影響を与えないように配慮するため、流木の方向を、流れの水平面内において全方向にほぼ同じ割合となるように投入している。

水路の傾斜角は土石流流下区間(10度¹¹⁾以上)を基本としている。また、流木の投入位置 L_w や平面氾濫台における流木方向の評価(図-9)位置(捕捉工位置) L_p をそれぞれ変化させている(図-8)。なお、予備実験において、流水への土砂混入、流木の枝付加、流木の投入速度等の違いによる影響について事前に把握している。

各実験条件の違いが流木の回転等に与える影響を考慮して流木捕捉工の最適な配置について提案するため、流量(q_m)、水路勾配(直線水路: θ_w 、平面氾濫台: θ_p)、流木径 ϕ_1 等を変化させて、それぞれの条件における流木の回転(制御:図-9)効果を比較している。また、手動での流木投入による影響等を低減するため、実験は同じ条件(表-2)で3回実施して平均化を図っている。

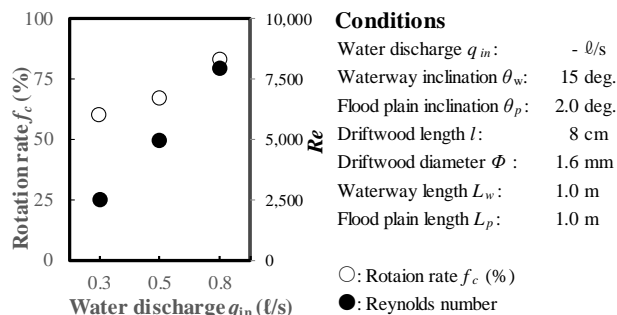


図-10 供給流量の違いによる流木回転効果の変化

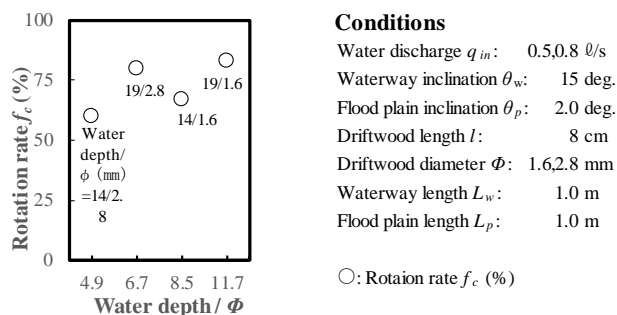


図-11 流木径や水深の違いによる流木回転効果の変化

(3) 実験結果及び考察

前述に示すとおり、流木は一般的に水平面内方向における回転が想定される。そこで、実験結果における流木の回転に関して、評価時における流れの変化に伴う流木の回転効果(流木の回転率) f_c は、

$$f_c = n_0 / n_w \quad (1)$$

と表される。ここに、 n_0 は平面氾濫台上で計測位置 L_p において θ_n が45度以上(図-9)であった流木の本数、 n_w は流木の全供給(図-8)本数である。以降に、実験条件の違いが流木の回転効果に与える影響について考察する。

供給流量の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-10に示す。図-10に示すとおり、流量及びレイノルズ数(ただし、直線水路)が大きくなるに伴って、流木回転効果が顕著となった。実験中の観察によると、直線水路から平面氾濫台へ流木が運搬される際、その上下流で発生する流速差の影響を受けて流木が回転¹³⁾(図-9)するため、流量が大きくなるに伴って、この上下流の流速差が顕著になったことによるものと考えられる。

次に、堰堤堆砂域等における流木径や水深の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-11に示す。図-11に示すとおり、流木径が細く水深が大きくなるに伴って回転効果が顕著となった。実験中の観察によると、前述と同様に水深(流量)が大きくなるに伴って上下流の流速差が顕著になるとともに、流木の重量が小さくなるに伴って流れの影響を受けやすくなったことによるものと考えられる。これより、河道幅が狭く流下する流木規模が小

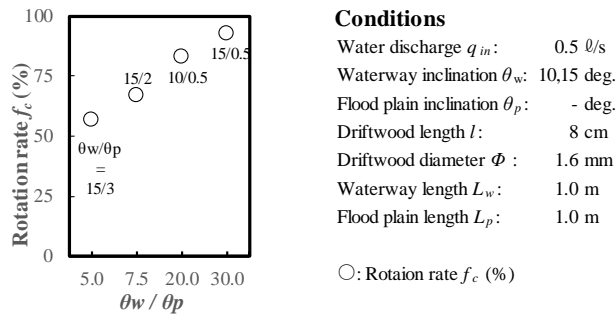


図-12 河床勾配変化の違いによる流木回転効果の変化

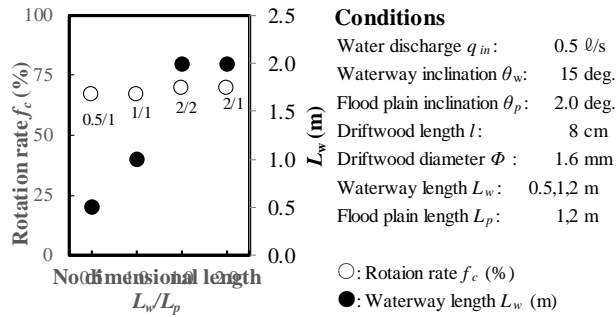


図-13 流木の流下延長の違いによる流木回転効果の変化

さい上流域においては、特に、流れの影響を受けやすいものと考えられる。

河床勾配の変化（直線水路と平面氾濫台との勾配比）の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-12 に示す。図-12 に示すとおり、河床勾配に影響を受けた流速の変化が流木の回転効果に影響（図-7）を与えることが確認された。これらより、上流の急勾配河道に設置された既設治山堰堤の堆砂域等における流木捕捉工設置の有効性について示唆された。

一方、流木の流下延長（流木の投入位置 L_w 、平面氾濫台における流木方向の評価位置 L_p ：図-8）の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-13 に示す。図-13 に示されるとおり、流木の流下延長等は流木の回転効果に殆ど影響を与えないことが確認された。実験中の観察によると、流木回転は前述にも示すとおり、流速の変化付近において主に発生したことによるものと考えられる。これらの結果より、道路沿での谷部との間における平坦地や既設治山堰堤の堆砂域（例えば、図-14）等に見られる地形やそれに伴う流れの変化を活用すると、流木捕捉工としての杭を比較的に広い間隔で経済的に配置させることが可能となり、維持管理や土地利用等においても有効であることが示唆された。ただし、本実験は基礎的な実験であるため、今後、更なる検討が望まれる。

最後に、これらの具体的な適用事例を図-14 や図-15 に示す。図-14 に示すとおり、上流域における当該治山堰堤は更に上流2カ所からの溪流（0字谷：急勾配河道）の合流地点であり、高さ1m程度の放水路¹⁰⁾（水通し¹¹⁾）

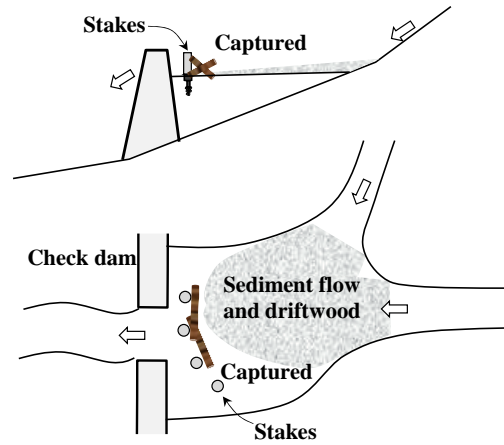


図-14 既設治山堰堤での流木捕捉機能向上としての流木捕捉工の配置（堆砂域における流木捕捉）提案

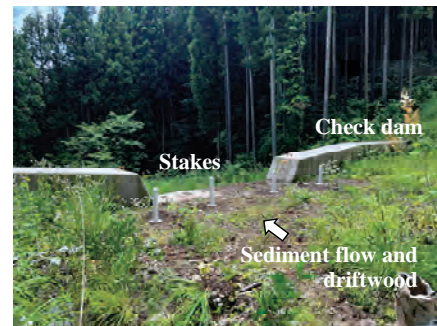
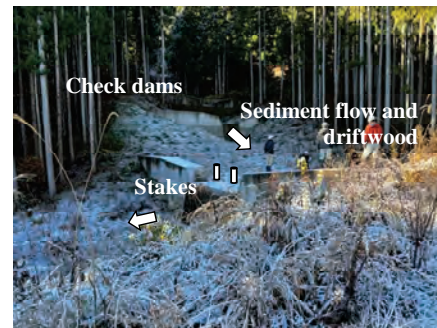


図-15 あと施工流木捕捉工の設置事例（上：隣接する林道から撮影、下：堆砂域から設置後に撮影）

袖部により河道中央部に流れが集約されており、この放水路の直上流に捕捉工を流入する流れに対応した円弧上に配置して捕捉するのが、効果的であると考えられる¹³⁾。また、図-15（上）に示されるとおり、当該堆砂域は既設山間道路に隣接しており、日常的な維持管理や捕捉された流木の除去が容易であると想定される。一方、当該流域は上流域であるため、流域集水面積も小さく、放水路を通過する流水の水深は浅いものと考えられる。そこで、従来の流木捕捉杭（上部捕捉体長の最低長：2m¹⁵⁾）の代替として、新たに小型の捕捉工（捕捉体長：約1m、図-15）を提案する。なお、本構造の小型化により、施工性においても有効であると考えられる。今後、これらの設置による流木捕捉効果についてモニタリングし、報告する予定である。

4. おわりに

本研究では、地震後等の緊急時において即応可能な簡易設置型の流木対策工を開発するとともに、その効果的な配置について提案した。

得られた成果を以下に要約する。

- 1) 本研究において、耐荷性、維持管理、安全性、コスト等に配慮し、人力で施工が可能な螺旋形状の杭基礎を接合させて分離可能な新たな流木捕捉工（捕捉杭）を提案した。
- 2) 提案する流木捕捉工の流木捕捉機能を更に高めるため、急勾配変化を有する地形条件の変化に伴った流木挙動に着眼した水路実験結果に基づいて、最適な配置条件を提案した。
- 3) 提案する流木捕捉工の社会実装例について示した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、群馬県環境森林部には試行現場の提供および実施の機会をご提供いただいた。国土防災技術株式会社には各種調整に多大なご尽力を賜った。さらに、水山高久京都大学教授、里深好文立命館大学教授、小杉賢一朗京都大学教授からは、終始、技術的なご指導と有益な助言を賜った。ここに記して深謝申し上げる。

参考文献

- 1) 林野庁：森林・林業白書，2024.
- 2) IPCC: Sixth Assessment Report, 2022.

- 3) 海津正倫：緊急撮影空中写真にもとづく能登半島豪雨災害による地形変化，2025年日本地理学会春季学術大会，2025.
- 4) 石川芳治：山地小溪流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究，京都大学博士学位論文，1990.
- 5) 福岡捷二：近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える，河川技術論文集，Vol. 28，pp. 457-462，2022.
- 6) 国土交通省・林野庁：流域治水と連携した森林整備・治山対策の具体的取組事例，https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/pdf/renkei_siryu03/siryu05.pdf，2024.
- 7) 林野庁：土石流・流木対策指針，2023.
- 8) 中澤敏雄：既設治山ダムを活用した流木捕捉工の開発～流木災害防止緊急治山対策プロジェクト～，水利科学，Vol. 65，No. 1，pp. 44-62，2021.
- 9) 加藤翔吾，岩谷栄林，福井 治，岩見収二，上杉大輔，柳田隆一，松井康彦，池田和也，吉田大貴，内田龍彦：流木捕捉池内の流況制御を考慮した流木捕捉施設配置の設計，河川技術論文集，Vol. 29，pp. 545-550，2023.
- 10) 林野庁：治山技術基準（総則・山地治山編），2023.
- 11) 国土交通省 砂防部：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，国総研資料，Vol.904，2016.
- 12) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，2021.
- 13) 原田紹臣，高山翔揮，里深好文，水山高久，中谷加奈：不透過型砂防堰堤における鋼製部材を用いた流木対策工の捕捉機能に関する基礎的な実験，土木学会論文集 B1，Vol.73，No.4，pp. I_1351-I_1356，2017.
- 14) 原田紹臣，高山翔揮，里深好文，水山高久，中谷加奈：既設不透過型砂防堰堤における流木対策の高度化に関する提案，土木学会論文集 B1，Vol.74，No.4，pp. I_1219-I_1214，2018.
- 15) 砂防・地すべり技術センター：新編・鋼製砂防構造物設計便覧 令和 3 年版，2021.

「基地維持・管理」

電子伝導性コンクリートを基盤とする発熱・蓄電コンクリート ～防衛施設におけるエネルギー保障と継続運用性の向上に資するスマートマテリアル～

HEATING AND ENERGY-STORING CONCRETE BASED ON ELECTRON-CONDUCTIVE CONCRETE
～A SMART MATERIAL THAT ENHANCES ENERGY SECURITY AND OPERATIONAL RESILIENCE FOR DEFENSE FACILITIES～

小熊祥平*、ラ・ミントン**、劉宏涛***、青木涼****
OGUMA Shohei and HLA Min Tun and RYU Koto and AOKI Ryo

- * 會澤高圧コンクリート（株）未来開発本部本部長（〒101-0021 東京都千代田区外神田5丁目3-1 秋葉原OSビル8F）
- *** 會澤高圧コンクリート（株）「ec³」PJリーダー（〒979-1522 福島県双葉郡浪江町大字請戸字北迫1-3）
- *** アイザワ技術研究所（株）主席研究員（〒979-1522 福島県双葉郡浪江町大字請戸字北迫1-3）
- **** 會澤高圧コンクリート（株）福島RDMセンター長（〒979-1522 福島県双葉郡浪江町大字請戸字北迫1-3）

キーワード：電子伝導性コンクリート、コンクリート、ロードヒーティング、コンクリート系スーパーキャパシタ
(*Electronic-Conducting Concrete, Concrete, Road Heating, Concrete-based Supercapacitor*)

1. はじめに

コンクリートは現代の建設材料として不可欠であり、防衛施設や社会インフラの基盤材料として広く用いられている。高い剛性・成形自由度・耐久性を有し、長期にわたり構造性能を発揮することが期待される一方で、近年の防衛インフラには構造性能に加えて、エネルギーの確保とマネジメント（エネルギー保障）という新たな役割が求められている。センサーや監視カメラ、通信機器、ゲート制御、環境モニタリングなど電力を必要とする機器は増加の一途をたどっており、非常時における電力供給の途絶は防衛施設の機能喪失に直結するリスクとなる。

蓄電コンクリートは、コンクリート内部にカーボンネットワークを形成して電子伝導性を付与し、発熱機能や蓄電機能を持たせたスマートマテリアルである。これにより、コンクリートそのものを蓄電体として活用し、太陽光発電などの再生可能エネルギーを利用したノングリッドの電源供給や停電時の非常用電源確保に寄与できるほか、通電により発熱体として機能させることで、融雪・凍結防止を通じて防衛施設の継続運用性（レジリエンス）向上に資することが期待される。

本研究では、ロードヒーティング用途を想定した「発熱するコンクリート」について、電気抵抗率および圧縮強度の基礎物性を確認した上で、 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ および $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ の低温環境下でパネル供試体に通電し、表層厚さや電極種別が温度分布および電気抵抗の変化に与える影響を評価した。

さらに、「電気を蓄えるコンクリート」については、電気抵抗率・圧縮強度に加え、サイクリックボルタンメトリ

ー（CV）試験により蓄電特性（エネルギー密度等）を評価するとともに、内部電解質の乾燥抑制に資するコンクリートハウジングの封止性能を確認し、実用化に向けた材料・構造の妥当性を検討した。この結果をもとに防衛施設におけるエネルギー保障や計測運用性への寄与を明らかにする。

なお、本研究は米マサチューセッツ工科大学（MIT）との共同研究として推進しており、社会実装を見据えた検討を進めている。

2. 電子伝導性コンクリートの概要

コンクリートは、セメントと水との水和反応によって生成される水和物が骨材同士を結合することで硬化する材料である。この硬化過程において、毛細管空隙やゲル空隙といった微細な細孔が形成され、これらがコンクリート内部に連続的に分布する（図-1）。

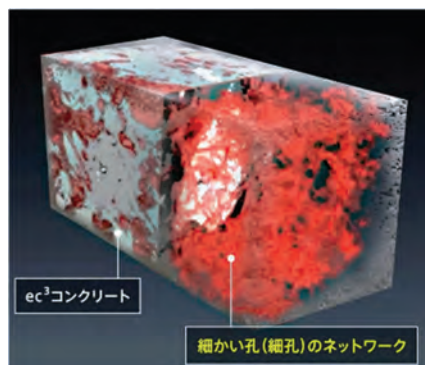


図-1 コンクリート内部の細孔の分布イメージ

このような細孔構造を有するコンクリートに疎水性を有するカーボンブラックを添加すると、カーボンブラック粒子は水に分散せず、水和反応にも取り込まれないため、セメント水和物の周囲や細孔壁面に沿って凝集・分布する特性を示す。その結果、カーボンブラック粒子同士が連結した三次元的なネットワーク構造が形成され、コンクリート内部に電子の移動経路が確保される。

このようにして電子の伝導が可能となったコンクリートは、従来の絶縁体としての性質とは異なり、電流を流す機能を有する材料となる。本稿では、このような性質を示すコンクリートを「電子伝導性コンクリート」と定義する。

2.1 電子伝導性コンクリートのメカニズム

カーボンブラックを添加したコンクリートの導電性発現メカニズムは、主に二つの理論で説明される。一つは「導電性パス理論」であり、カーボンブラック粒子が互いに接触して連続的な導電経路を形成する理論である。もう一つは「トンネル効果理論」であり、粒子間が直接接触してなくても、間隔が非常に小さく、かつ十分な印加電圧が備える場合には、電子が障壁を「トンネル効果」により透過し、電流が流れる現象である。したがって、電子伝導性コンクリートの電気特性は、カーボンブラックの添加量、分散状態、粒子間距離、および形成されるネットワークの連続性に大きく依存する。

電子伝導性コンクリートは、コンクリート内部に形成されたカーボンネットワークを、電子がこれら 2 つのメカニズムにより通過することで、電流を流すことが可能な材料である。

この電子伝導性コンクリートを応用することで、自己発熱を利用したロードヒーティングや床暖房に展開可能な「発熱するコンクリート」と、蓄電池として機能する「電気を蓄えるコンクリート」という二つの機能を発現させることができる。以下に、それぞれのメカニズムについて順に説明する。

2.2 「発熱するコンクリート」のメカニズム

「発熱するコンクリート」は、電子伝導性コンクリートに通電する際に発生するジュール熱により、コンクリートを温め、ロードヒーティングとして活用可能なコンクリートである。これは、通電時に電子が炭素原子と衝突した振動エネルギーによりジュール熱が生まれ、発熱する。この熱がコンクリート表面まで伝導し融雪することが可能となる（図-2）。

2.3 「電気を蓄えるコンクリート」のメカニズム

二つの電子伝導性コンクリートの電極の間に電解質を含浸させたセパレーターを挟み、電圧を印加すると、二

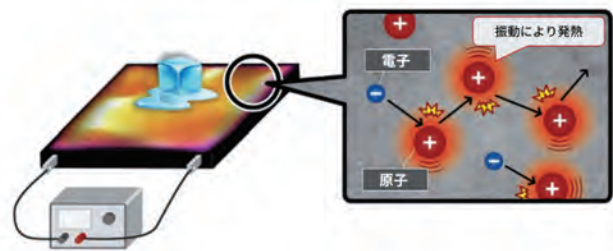


図-2 発熱コンクリートのメカニズム

つの電極はそれぞれ正極および負極として分極する。正極側では正電荷が電極表面に引き寄せられ、これに対応して電解質中の陰イオンが電極へ引き寄せられて蓄積する。一方、負極側では電子が電極側に蓄積し、これに対応して陽イオンが集積する。結果として、各電極と電解質の界面に電気二重層が形成され、エネルギーが貯蔵される。

放電時には、外部回路を介して両電極を接続することで、負極側に蓄えられた電子が外部回路を通じて正極側へ移動し、電流が流れる。以上の蓄電・放電過程は主として界面での電荷分離と移動に基づく物理過程であるため、繰り返しの充放電が可能であり、蓄電コンクリートはスーパーキャパシタ型蓄電デバイスとして機能する（図-3）。

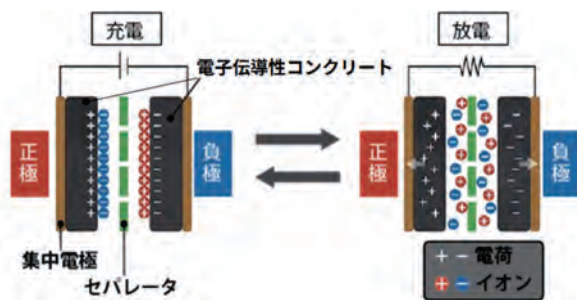


図-3 電気を蓄えるコンクリートのメカニズム

3. 電子伝導性コンクリートの実証試験

本研究では、電子伝導性コンクリートを基盤とする「発熱」および「蓄電」の両機能に着目し、防衛施設を含むインフラ構造物におけるエネルギー保障と継続運用性への適用可能性を検討するため、実証試験を実施した。本章では、発熱パネルを用いた低温環境下での発熱挙動の評価と、蓄電コンクリートの蓄電特性の検証を行う。

3.1 「発熱するコンクリート」の基礎性能試験

本研究に先立ち、「発熱するコンクリート」を応用したロードヒーティング用途への適用可能性を把握することを目的に、前試験として発熱パネルを用いた低温環境下での発熱性能に関する実証試験を実施した。前試験は、2024年12月から約3か月間、札幌市大通公園で行った（写真-1）。

本前試験で用いた発熱パネルは、モルタルにカーボン



写真-1 札幌市大通公園における発熱試験風景

ラックを添加して電子伝導性を付与した材料により製造したものである。低電圧 (30V 以下) での運用を想定し、材料の電気抵抗率を約 $1 \Omega \cdot m$ に設定することで、24V 印加時に約 10A の電流が流れ、 $240 W/m^2$ 程度の発熱量が得られるよう設計した。

本前試験では、北海道建設局のロードヒーティング設計指針において道南・道東エリアの設計発熱量として示されている $240 W/m^2$ を参考条件として検討を開始した。当該条件では、この条件ではパネル表面温度が比較的高くなる傾向が確認されたため、発熱量を段階的に低減して評価を行った。その結果、外気温が約 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ の条件においても、発熱量を約 $120 W/m^2$ まで低減した状態で安定した発熱挙動が得られることを確認した。

以上の結果は、本研究における発熱性能設計の指針を得るための前試験として位置づけられる。一方で、モルタル材料では強度および耐久性の観点から、車路などの荷重条件が厳しい用途への適用が困難であると考えられたため、本研究では材料をモルタルからコンクリートへ移行し、適用範囲の拡大を目的とした試験を実施した。

3.1.1 発熱パネルの構造

発熱パネルは、基層および表層に普通コンクリートを用い、中間層に電子伝導性コンクリートを配置した三層構成とした (図-4)。

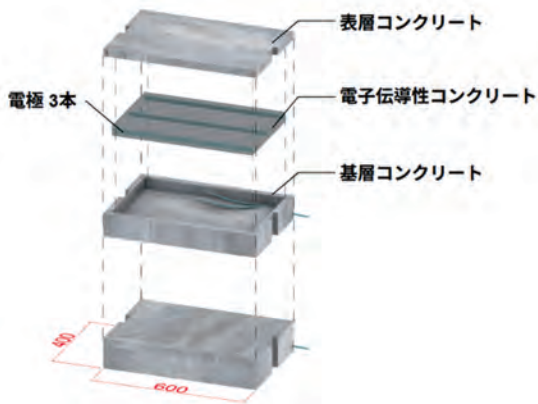


図-4 発熱パネルの構造：図に注記を追記

中間層の発熱コンクリートには、電極を 230mm 間隔で3本埋設し、電極からコンクリートへ電流を面的に供給する構成とした。これにより、電流分布の偏りを抑制

し、パネル内部における温度ムラの低減を図った (図-5)。

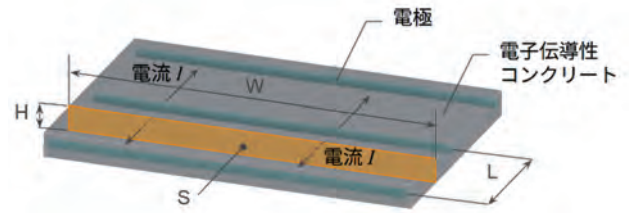


図-5 電気抵抗率算定に用いる電極間距離Lと通電断面積A

本試験用の発熱パネルは、電圧 30V を印加した際に電流 1.95A が流れ、パネル表面の発熱量が $200 W/m^2$ 以上となるよう設計した。この条件において回路全体として必要となる抵抗は $R=15.4 \Omega$ である。抵抗率 ρ は、電極間距離を L、通電断面積を S とすると、次式により求められる。

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (1)$$

以上より、目標抵抗率を $2.0 \Omega \cdot m$ と設定し、これを満足するカーボンブラックの添加量および配合条件を決定するための配合試験を実施した。あわせて、当該配合に対する圧縮強度試験を行った。

3.1.2 発熱パネルの製造方法

発熱コンクリートパネルの製造は、逆打ち工法により実施した。まず、表層コンクリート中にひび割れ防止を目的としたグラスファイバーメッシュを配置して打設し、生コンクリートの安定化を目的として、 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ の蒸気養生を1時間以上行った。次に、中間層であるカーボンブラック層を打設し、層内にバサルトメッシュを配置した後、再度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ の蒸気養生を1時間以上実施した。最後に、基層コンクリートとして鉄筋および鉄筋メッシュを配置・打設し、発熱コンクリートパネルを製造した (写真-2)。



写真-2 発熱パネルの製造風景

3.1.3 使用材料

使用材料を表-1 に示す。

表-1 使用材料

材料	種類又は品名	メーカー、産地	物性等
セメント	早強ポルトランドセメント	太平洋セメント(株)	密度 3.16g/cm ³
水	地下水	工場敷地内	
細骨材	砕砂	双葉砕石富岡事業所	2.62g/cm ³
粗骨材	砕石 1305	双葉砕石富岡事業所	2.68g/cm ³
混和剤	高性能AE減水剤	フローリック SF500S	密度 1.07g/cm ³
カーボンブラック	TOKABLACK #4500	東海カーボン株式	BET比表面積 58 m ² /g

配合は W/C=42.5 %、スランプ 2cm のコンクリート性状で設計した。

3.1.4 「発熱するコンクリート」の基礎物性試験

発熱パネルとして使用するためには、電気的特性と機械的特性の両方を満足する必要がある。そのため、発熱パネルの設計に必要な基礎物性として、電気抵抗率と圧縮強度試験を実施し、配合の正当性を評価した。

本試験では、電気抵抗率は $2.0 \Omega \cdot m$ 以下、材齢 14 日において、圧縮強度 20N/mm^2 以上とすることを目標とした。

3.1.5 基礎物性試験の結果と考察

(a) 電気抵抗率

電気抵抗率は、カーボンブラックを添加した電子伝導性コンクリート試験体に電極の一部を埋設し、電圧を印加した際に流れる電流を測定することで算出した (写真-3)。



写真-3 試験体

初めに、この試験体に直流電源装置を用いて電圧 (V) を印加した際に、流れる電流 (I) を測定した結果から電気抵抗 (R) を算出した。

$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

次に、電極間の距離 (L) と埋設した電極面積 (S) から

電気抵抗率を算出した。その結果、材齢 7 日における電気抵抗率は $1.3 \Omega \cdot m$ が得られた。 $2.0 \Omega \cdot m$ を下回っている事から目標を満足していることが確認できた。

(b) 圧縮強度

圧縮強度評価は、製品と同一の養生条件で行い、管理材齢 4 週において、JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して圧縮強度試験を実施した。

その結果、圧縮強度は材齢 14 日において 26N/mm^2 、材齢 28 日において 32N/mm^2 が得られた。材齢 14 日において 20N/mm^2 以上を確保しており、目標とした圧縮強度を満足していることが確認できた。

3.1.6 パネル形状での発熱試験

本試験では、テストピースではなく、3.1.1 に示した発熱パネルと同一構造の供試体を用いて発熱試験を実施した。これは、表層コンクリート厚がパネル内部の温度分布に及ぼす影響を評価する必要があることに加え、電極種別の相違によりパネル全体の電気抵抗および発熱挙動が変化する可能性があるためである。

発熱試験は、恒温室内の雰囲気温度を冬期の低温環境を想定した -7°C および -10°C の 2 条件に設定して実施した。発熱パネル内部には内部温度計測用として熱電対を 5 か所に埋設した (図-7)。通電条件は、中央の電極を正極、両側の 2 本の電極を負極とし、平均発熱量が 200W/m^2 となるように制御した。

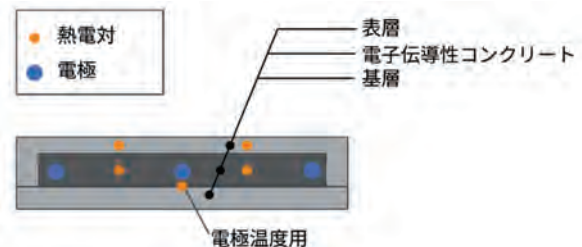


図-7 発熱パネルの熱電対埋設位置

3.1.7 発熱試験の結果と考察

(a) 表層厚さの違いによる温度分布の比較

試験に使用した発熱パネルは、基層厚さ 50 mm、中間層 (電子伝導性コンクリート) 厚さ 50 mm とし、表層厚さを 30 mm (パネル C1)、20 mm (パネル C2)、40 mm (パネル C3) の 3 条件とした。これら 3 条件について、発熱パネル内部の各測定点における温度変化および温度差を比較評価した。

その結果、表層厚さ 30 mm および 40 mm のパネル (C1、C3) では、表層厚さ 20 mm のパネル (C2) と比較して温度差が小さく、温度分布が比較的均一となる傾向が確認さ

れた (図-8)。

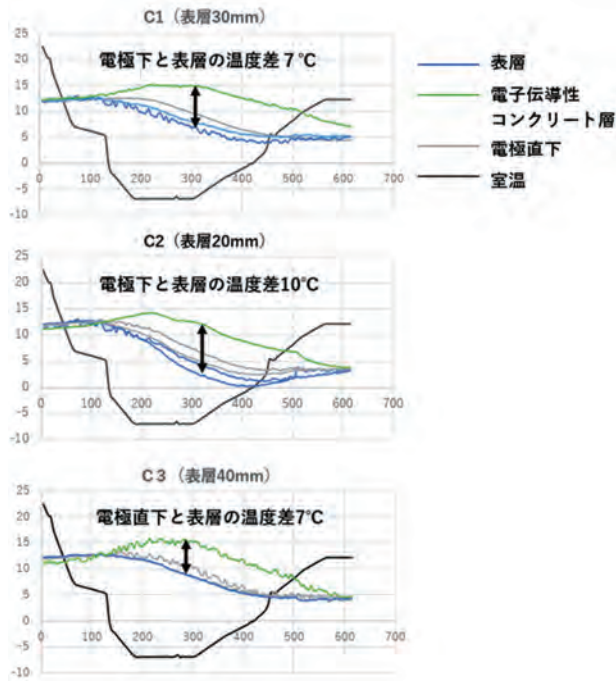


図-8 表層ごとの発熱パネルの温度推移

(b) 電極の選定

発熱パネルに使用する電極について、表層厚さを 30mm に統一した条件下で、以下の 4 タイプの電極を用いた比較試験を行った。

- A. ステンレス筋
- B. メッキ筋
- C. ステンレス筋+メッキ筋
- D. 炭素繊維

製造した各試験体について電気抵抗を測定し、材齢および低温環境条件下における電気抵抗率の変化を評価した (図-9)。

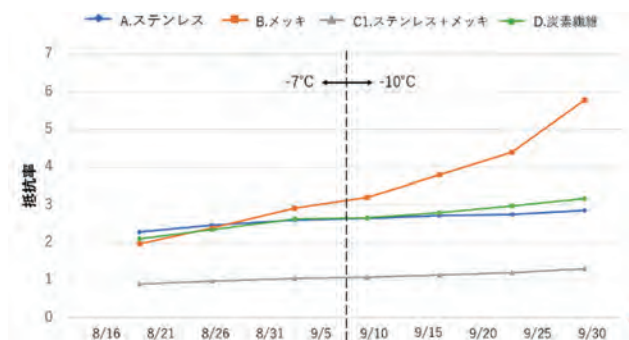


図-9 抵抗率の推移

-7°Cの環境下では、いずれの試験体においても電気抵

抗率の上昇が確認されたものの、通電による発熱は維持可能であった。一方、-10°Cの環境下では、パネルB (電極: メッキ筋、表層厚 30mm)、およびパネルD (電極: 炭素繊維、表層厚 30mm) において、電気抵抗率が著しく増加し、低電圧条件下での発熱が困難となった。

これに対し、パネルA (電極: ステンレス筋、表層厚 30mm) では、-10°Cの環境下においても電気抵抗率の増加が比較的小さく、低電圧による安定した発熱が可能であった。また、これらの試験体では表面温度分布における温度差も小さいことが確認された。

以上の結果から、低温環境下での安定した発熱性能を確保するためには、電極材料としてステンレス系を用いることが有効であることが示された。

3.2 「電気を蓄えるコンクリート」の性能試験

「発熱するコンクリート」では、所定の電圧でジュール熱を得ることが目的であるため、電気抵抗率のみ確認した。一方、「電気を蓄えるコンクリート」は電極と電解質界面での蓄電挙動を把握し、可逆性や作動特性を確認する必要がある。そこで本試験では、電気抵抗率の確認に加え、蓄電性能の評価手法として試験体を用いたサイクリックボルタンメトリー試験 (CV 試験) を実施した。また、本研究では、セメントペーストにカーボンブラックを添加することで導電性を付与した配合 (w/c=140%) とした。

本稿では、このような性質を示すセメントペーストを「カーボンセメントペースト」と定義する。

3.2.1 「電気を蓄えるコンクリート」の構造

「電気を蓄えるコンクリート」は、カーボンセメントペーストで製造した二つの電極の間にセパレーターを介させた構造を1セルとし、1セルあたり約1Vの出力が得られる。さらに、このセルを25層積層することで、25V相当の出力を有する積層体を構成した。本試験では、この25層積層体をコンクリートハウジング内に収めて封止したものを1ユニットとし、これを4ユニット直列に接続することで、100V相当の出力が得られる設計とした (図-10)。なお、使用した電解液は塩化カリウム水溶液であり、電位窓は約1.0~1.23Vである。

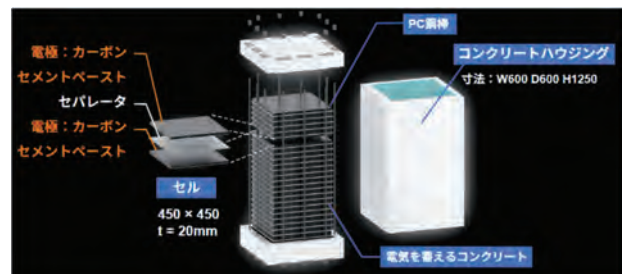


図-10 「電気を蓄えるコンクリート」の構造

3.2.2 使用材料

使用材料を表-2に示す。

表-2 使用材料

材料	種類又は品名	メーカー、産地	物性等
セメント	早強ポルトランドセメント	太平洋セメント㈱	密度 3.16g/cm ³
水	地下水	工場敷地内	
混和剤	高性能AE減水剤	シーカ® ビスコリート SP8HU	密度 1.07g/cm ³
カーボンブラック	ケッチェンブラック EC600JD	ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ株式会社	BET比表面積 1,270 m ² /g

3.2.3 「電気を蓄えるコンクリート」の基本物性試験

「電気を蓄えるコンクリート」は、電極間距離が大きい場合、セパレーターを湿潤させている電解質内におけるイオンの移動距離が増加し、出力の低下を招く。また、電気抵抗が大きい場合には、電子輸送損失の増大により発熱や効率低下が生じる。このため、電極間距離および材料の電気的特性を適切に制御することが重要である。そこで本試験では、材料の電気的特性として電気抵抗率を測定するとともに、蓄電性能の評価手法としてサイクリックボルタムメトリー試験 (CV 試験) を実施し、電気容量を評価した。

3.2.4 基本物性試験の結果と考察

(a) 電気抵抗率

3.1.5と同様に電気抵抗率の試験を実施した。その結果、電気抵抗率は材齢の進行に伴い低下し、材齢28日では0.2 Ω・mを示した。

電気を蓄えるコンクリートに使用する電極のサイズは45 cm×45 cm、厚さ2 cmであり、電気抵抗率から算出される電気抵抗は約0.02 Ωとなった。以上より、蓄電体として十分に低い内部抵抗を有していることを確認した。

(b) サイクリックボルタムメトリー試験 (CV 試験)

「電気を蓄えるコンクリート」のユニットで用いる電極サイズは45cm×45cm厚み20mmであるが、同寸法の試験体では流れる電流値が大きく、試験が出来る装置が確保できなかったため、直径50 mm、厚み20 mmの円形の試験体とした(写真-4)。試験体は製造した翌日に脱型し、電解液に1日以上浸漬した。その後、2つの試験体に、電解質で湿潤させたセパレーターを介在したセルを構成してCV試験を行った(図-11)。

なお、CV試験はポテンシostatを使用して行い、スキャンレート (v) は0.2mv/sと0.1mv/sの2つの条件とした。

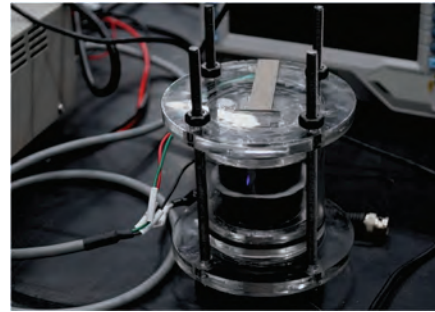


写真-4 CV試験用の試験体

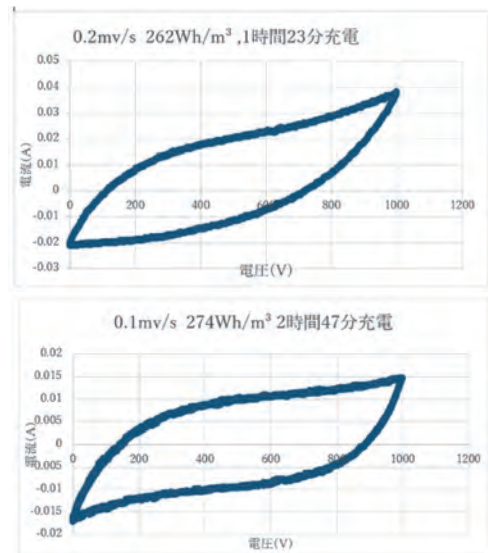


図-11 CV試験結果

CV試験において、電流応答が比較的安定している場合、CV曲線における平均電流 (I_{avg}) とから算出できる。初めに、静電容量 (C) を以下の近似式により算出した。

$$C = \frac{I_{avg}}{v} \quad (3)$$

次に、得られた静電容量 (C) と電位窓 (ΔV) から、エネルギー容量 (E) は次式により算出した。なお、体積で正規化することでエネルギー密度 (Wh/m³) を算出した。

$$E = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 \quad (4)$$

掃引速度を0.2 mV/sとした場合、エネルギー密度は262 Wh/m³である。一方、掃引速度を0.1 mV/sまで低下させた場合、エネルギー密度は274 Wh/m³に増加する。

この結果から、本試験体ではどちらのスキャンレートでも目標値を上回るエネルギー密度が得られた。また、掃引速度を低下させることで充電時間が長くなり、電解液中の

イオンが細孔内部まで十分に拡散・蓄積されるため、見かけの蓄電容量が増加する傾向が示唆された。

なお、実寸スケールでの達成可否は、内部抵抗や電解液浸透性等の影響を踏まえ、別途検証が必要である。

3.2.5 コンクリートハウジングの性能試験

「電気を蓄えるコンクリート」ユニットに用いるコンクリートハウジングには、内部電解質の乾燥を抑制し、乾燥に起因する電気抵抗の増加および蓄電容量の低下を防ぐため、高い気密性が求められる。さらに、電極間の接触抵抗を低減して安定した電気特性を確保する目的で、電極に鉛直荷重を付与し密着させる必要がある。本ユニットでは、ハウジング内部を貫通するPC鋼棒に緊張力を導入することで、電極に鉛直荷重を加える構造とした。

以上を踏まえ、本試験では、漏水試験によりハウジングの気密（封止）性能を確認するとともに、付与する鉛直荷重を段階的に変化させた条件で電気抵抗を測定し、適切な鉛直荷重条件を決定する。

(a) 密閉性試験

本試験では、組立て前にコンクリートハウジングの下蓋と中間部の接合部にゴム材を介在させ、全ねじにより締結した。次に、中間部上端まで水を注入し、1週間静置して漏水の有無を確認した。

その結果、試験期間中に漏水は認められず、本構造は電解液の乾燥抑制に必要な密閉性を有することが確認された（写真-5）。



写真-5
漏水試験風景

(b) 電極同士の密着性試験

本試験では、ユニットに鉛直荷重を徐々に加えていき、電気抵抗値を測定した。この結果から、鉛直荷重を加えるほど抵抗下がっている傾向がみられた（図-12）。

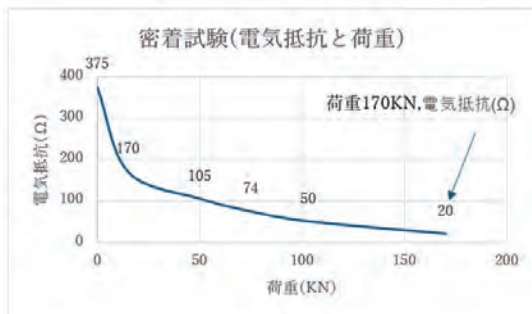


図-12 鉛直荷重ごとの電気抵抗値

4. 電子伝導性コンクリートの活用例

「電気を蓄えるコンクリート」は、コンクリート自体が

エネルギー貯蔵体として機能する点に特徴があり、従来のバッテリーや蓄熱体とは異なる運用が可能となる。これに対し、「発熱するコンクリート」は、通電によるジュール発熱を利用して融雪・凍結防止を行うことができ、寒冷地における運用性および安全性の向上に寄与し得る。本章では、これらの特長を踏まえ、蓄電および発熱（融雪）の観点から有効と考えられる適用例を示す。

4.1 建築物・シェルターへの適用

「電気を蓄えるコンクリート」を用いた建材を建築物やシェルターに適用することで、建物全体を分散型の蓄電体として機能させることが期待される。これにより、平時には負荷平準化や系統電源依存の低減に寄与し、非常時には停電時の非常用電源として最低限の電力供給を確保できる。

また、本技術で採用する電気二重層コンデンサ(EDLC)型蓄電は、充放電の切り替えが速く高出力特性を有するため、瞬低・停電発生時にも照明、センサー、通信機器等の重要負荷へ迅速に給電できる利点がある。以上より、本技術は非常用電源としての即応性に加え、平時・非常時を通じた自立電源(オフグリッド)運用の基盤としても有効である。

4.2 道路・滑走路・港湾舗装への適用

道路舗装や滑走路、港湾施設のエプロン部など、広い面積を有するコンクリート舗装に蓄電機能を持たせることで、以下のような利用が想定される。

- ・ 滑走路端灯、誘導灯などの航空灯火設備のバックアップ電源
- ・ 降雪時や凍結時に発熱コンクリートを通電加熱することで路面・スロープの融雪

とくに、将来的に電動車両や無人搬送車(AGV)の充電インフラと組み合わせることで、「充電機能を備えた舗装体」としての応用も期待される。

4.3 地下構造物の非常用電源

地下施設では、避難誘導灯、換気設備、監視カメラなど、停電時にも稼働が求められる機器が多い。コンクリート躯体に蓄電コンクリートを用いることで、通常時は系統電源のピークシフト・ピークカットに活用し、停電時には自立型の非常用電源として機能させるといった運用が可能となる。また、バッテリールームを別途設ける必要がないため、スペース効率の向上や火災・漏液リスクの低減にも寄与する。

4.4 再生可能エネルギーとのハイブリッド利用

離島や山間部など、系統電源が脆弱な地域では、太陽光・風力発電と蓄電コンクリートを組み合わせることで、ノングリッド型エネルギーシステムを構築できる。護岸・防波堤や斜面对策工に蓄電機能を付与すれば、波浪・地盤変位センサー、監視カメラ、通信中継機などへの電源供給を構造物自身から行うことができ、保守点検の省力化と系統からの自立性向上が期待される。

5. まとめ

電子伝導性コンクリートを基盤とする発熱・蓄電コンクリートは、防衛施設におけるエネルギー保障および継続運用性（レジリエンス）の向上に資する可能性を有する次世代材料技術である。本研究では、「発熱するコンクリート」について低電圧条件下での発熱挙動を実証し、寒冷地における融雪・凍結防止を通じて、防衛施設の運用安全性および即応性向上への適用可能性を示した。

また、「電気を蓄えるコンクリート」については、25層積層セルをユニット化し、4ユニットを直列接続することで100V相当の出力を得る構成を想定し、電気抵抗率およびCV試験による蓄電特性評価を行うとともに、コンクリートハウジングによる封止性能を確認した。これにより、構造体と一体化した蓄電機能の成立性を示した。

本技術は、太陽光発電等の再生可能エネルギーと組み合わせることで、系統電源に依存しないノングリッド型の電源供給を可能とし、発電量変動の平準化や電力の安定供給に寄与し得る。特に、停電、燃料途絶、設備損傷といった非常時においても、必要最小限の電力供給を維持する分散型電源として機能する点は、防衛施設における重要な利点である。さらに、本技術はセメント・骨材等の一般的な建設材料とカーボンブラックを基本要素として構成でき、国内で調達可能な材料を中心に製造できることから、調達の確実性および長期運用性の観点においても優位性を有する。

以上より、電子伝導性コンクリートは、防衛施設および重要インフラにおいて、構造機能とエネルギー機能を融合した新たな価値を提供する基盤技術として大きな可能性が示された。

参考文献

- 1) Carbon-cement supercapacitors as a scalable bulk energy storage solution (2023)
- 2) 日経クロステック／日経コンストラクション「発熱性や蓄電性を持つコンクリート、実現目指して會澤高圧コンクリートとMITが連携」2024.5.31
- 3) 會澤高圧コンクリート（株）[蓄電コンクリート]
<https://www.aizawa-group.co.jp/>

PVA 繊維補強コンクリートを用いた装軌車道の長期供用に関する検証

LONG-TERM DURABILITY OF TRACKWAYS MADE OF PVA FIBER REINFORCED CONCRETE

小川敦久*, 澤田高浩**, 大西英二***

OGAWA Atsuhisa, SAWADA Takahiro and ONISHI Eiji

*工博 株式会社クラレ 繊維カンパニー繊維資材事業部産資開発部 主管（〒702-8045 岡山県岡山市南区海岸通 1-2-1）

**株式会社クラレ 繊維カンパニー繊維資材事業部産資開発部（〒702-8045 岡山県岡山市南区海岸通 1-2-1）

***株式会社メルコーポレーション 代表取締役社長（〒103-0023 東京都中央区日本橋本町3丁目4番5号）

キーワード：装軌車道，コンクリート舗装，PVA 繊維，耐久性

(Trackway, concrete pavement, PVA fiber, durability)

1. はじめに

陸上自衛隊の各駐屯地、演習場が所管する装軌車道の路面は、履帯を装着した重量の大きな車両が多数走行することにより、繰り返しの大きな荷重に加えて表面が著しく摩耗する。特に目地部はコンクリートのエッジの損耗が先行し、そこからひび割れや磨滅が進行して路面の損傷を促進している様子が見られる。そのため装軌車道の定期的なメンテナンスを行う必要があり、主に部隊施工で対処されているが、訓練の一助として活用できる反面、修繕費用の負担が大きい。

一方、近年合成繊維を用いた短繊維補強コンクリートが広く活用されるようになり、トンネル二

次覆工コンクリートの補強・ひび割れ抑制¹⁾や、高架橋上部工のひび割れ抑制・剥落対策²⁾などに多く使用されてきた。短繊維補強コンクリートは、数 mm から数十 mm の長さに切断した繊維を混入したセメント系複合材で、鉄筋などの補強材と異なり材料全体が均一に補強されたものであり、破壊靱性に優れることから鉄筋を減殺することもできる³⁾。

このような短繊維補強の特性を生かし、セメント性のアルカリに対する耐久性に優れ、セメントとの良好な接着力を有する合成繊維であるビニロン（ポリビニルアルコール繊維、以下 PVA 繊維とする）を装軌車道に適用することで、鉄筋を

表-1 配合及びフレッシュ性状

	W/C	S/a	単位量(kg/m ³)						繊維添加前			繊維添加後		
			W	C	G	S	SP	F	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
T-0	40.0	46.2	175	438	911	762	4.38	—	15.1	5.1	22.1	—	—	—
T-1	40.0	48.2	185	463	853	772	3.70	15.6	18.0	5.4	22.3	13.0	4.8	23.8
T-2	40.0	60.0	190	475	649	950	4.28	22.1	22.5	5.0	22.0	15.5	4.0	24.0

C：普通ポルトランドセメント(太平洋セメント製，密度 3.14g/cm³)

G：砕石(岡山県御津産，骨材最大粒径 20mm，密度 2.62g/cm³，実積率 59.2%)

S：砕砂(岡山県御津産，密度 2.62g/cm³，粗粒率 2.67)

SP：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

大幅に減殺し、施工やメンテナンスの負担を削減することを目的として検討を行った。

2. PVA 繊維補強コンクリートの特性

当該検討に際して、まず PVA 繊維補強コンクリートの各種特性の評価を行った。装軌車道への適用を念頭に置いているため、コンクリートの基本的な機械的特性である圧縮強度、曲げ強度に加え、ひび割れ発生傾向、履帯によるコンクリートの摩耗を考慮した摩耗特性についても評価した。

試験に供した配合、及び各種試験体を作製した際のフレッシュ性状を表 1 に示す。配合は実際のコンクリート舗装で用いられる配合を参考にした。短繊維の混入量の増加につれて砂比(S/a)が大きくなっているが、これはコンクリート中への短繊維の分散を考慮したためであり、これによって材料分離や短繊維の絡合が生じない、良好な混合状態とスランプを確保することができた。PVA 繊維は、既往の研究^{3),4)}を参考に直径 0.67mm、長さ 30mm の太径繊維と直径 0.1mm、長さ 12mm の細径繊維を併用した。細径繊維は、主にひび割れ発生から拡大初期にモルタル部分で生じる微細なひび割れ開口の架橋を目的とし、太径繊維は、主にひび割れが拡大してからの補強に効果を発揮させることを目的として選定した。

PVA 繊維補強コンクリートは、先にベースとなるプレーンコンクリートを作製し、フレッシュ性状を確認した後に所定の PVA 繊維を投入、60 秒間の追い練りを行って製造した。得られたフレッシュ状態の PVA 繊維補強コンクリートは、所定の各種試験用型枠に打ち込んだ。採取した試験体は、100φ×200 圧縮試験体(JIS A1108)、100×100×400 曲げ試験体(JIS A1106)及びひび割れ発生傾向観察用リング試験体(ASTM C1581 参考)である。圧縮試験体及び曲げ試験体は打設後 24 時間 20°C環境下に静置した後に脱型し、20°C水中養生にて 28 日経過後に試験に供した。なお曲げ試験では、PVA 繊維を添加しない試験体として、断面中央長手方向に D6-SD345 の鉄筋を 1 本挿

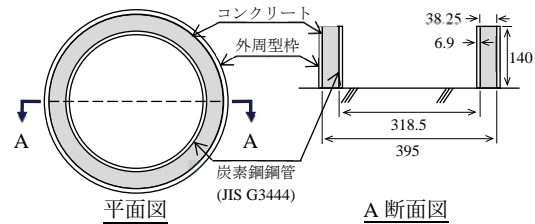


図-1 リング試験体

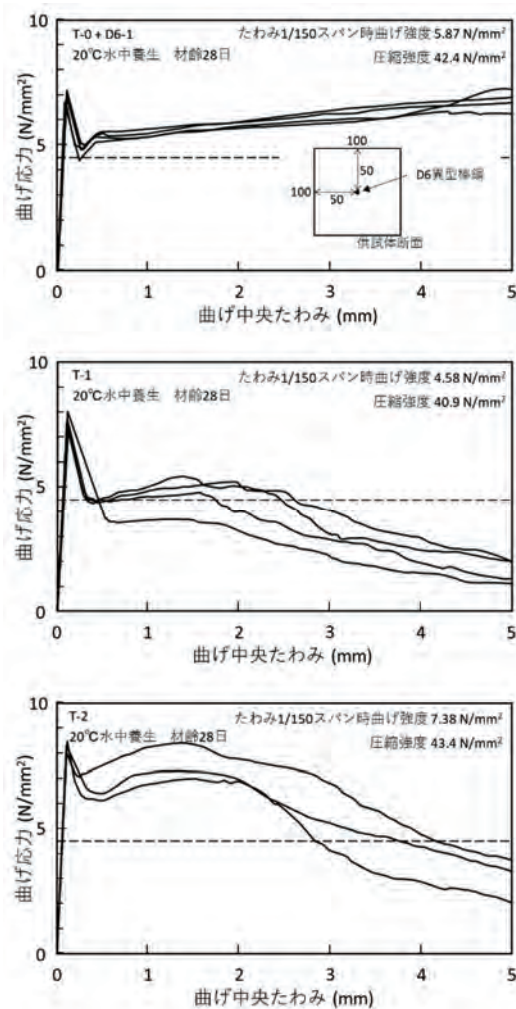


図-2 曲げ試験結果及び圧縮強度

入(鉄筋比約 0.32)した試験体を比較対象とした。ひび割れ発生傾向観察用リング試験体は、図 1 に示すような内側に鋼管を配した中空円筒の試験体であり、打設後 24 時間経過した後に外周の型枠を脱離し、20°C60%RH 環境下に曝露、水分蒸散によって外周面に発生する乾燥収縮ひび割れの観察を行った。

得られた PVA 繊維補強コンクリートの圧縮強

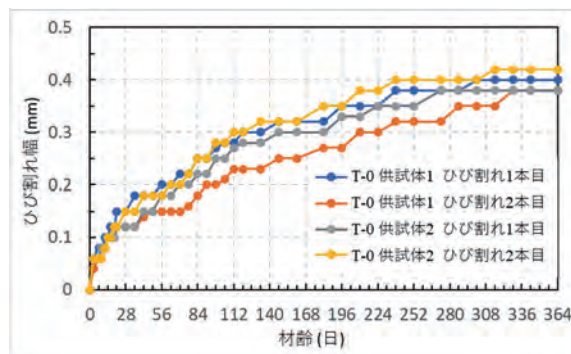
度、曲げ破壊特性を図 2 に示す。PVA 短繊維補強により、材齢 28 日の時点で初期ひび割れ後も設計曲げ強度相当の $4.5\text{N}/\text{mm}^2$ を上回ることが確認された。また繊維添加量の増大により初期ひび割れ後の最大応力が増大し、特に繊維添加量 $22.1\text{kg}/\text{m}^3$ では最大曲げ強度 $7.38\text{N}/\text{mm}^2$ と、約 1.6 倍程度の安全率が見込めると考えられる。

図 3 に、リング試験体による、無補強コンクリートと PVA 繊維補強コンクリートとの 12 か月間のひび割れ開口変化を示す。材齢 3 か月において、無補強コンクリートでは最大 0.4mm のひび割れが観察されているが、PVA 繊維補強によって、 $15.6\text{kg}/\text{m}^3$ では最大 0.12mm 、 $22.1\text{kg}/\text{m}^3$ では最大 0.10mm のひび割れ幅にとどまり、PVA 繊維の混入によって乾燥収縮ひび割れによるひび割れ拡大の抑制も期待できる結果であった。

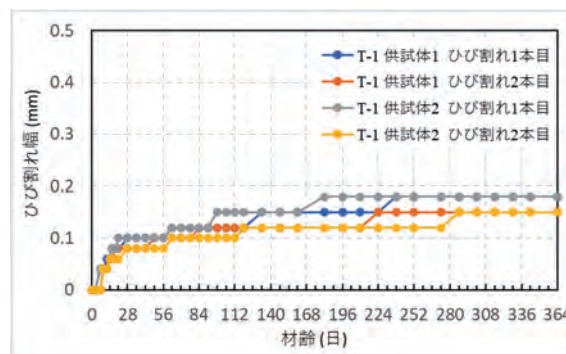
以上の結果を元に、アスファルト舗装の摩耗試験であるラベリング試験により、舗装面の耐摩耗試験を実施した^{5),6)}。供試体は表 1 の配合にて鉄筋補強及び PVA 繊維補強 2 種類を準備した。試験結果を写真 1 及び図 4 に示す。ラベリング試験後の試験体表面を観察すると、表層のモルタルがほぼ磨滅して粗骨材が露出しており、わだち掘れも大きく、表面の摩耗の進行が確認された。これに対して PVA 繊維補強試験体では、表面への粗骨材の露出は少なく、摩耗減量も少ない結果となった。PVA 短繊維補強コンクリートでは、材料全体に均一に PVA 繊維が分散しているため、チェーンの繰り返し打撃による損傷に対して、表層のモルタル部分が補強されていることによって損傷が抑制された結果であろうと推察される。

3. 装軌車道への適用検討

曲げ試験の結果より、PVA 繊維を $15.6\text{kg}/\text{m}^2$ 以上添加することで鉄筋比 0.32% の RC 同等の曲げ補強性能が期待できること、乾燥収縮ひび割れの抑制や、履帯を想定した摩耗に対する耐久性が期待できることなどから、陸上自衛隊西部方面隊玖珠駐屯地内の装軌車道更新工事の際に、PVA 繊



(a)無補強コンクリート(T-0)



(b)PVA 繊維補強コンクリート(T-1)

図-3 リング試験体のひび割れ開口経過

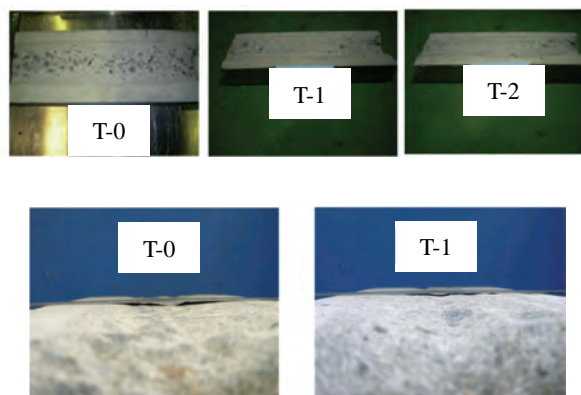


写真-1 ラベリング試験後の試験体摩耗面

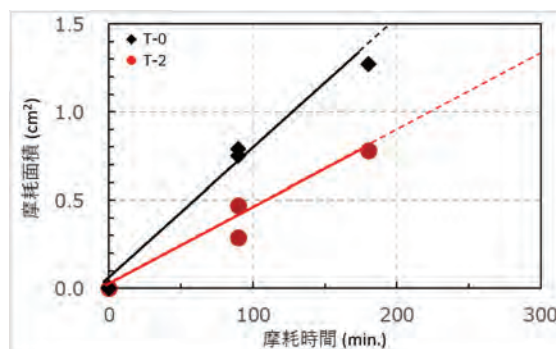


図-4 ラベリング試験による摩耗減量

維補強コンクリートの部分的使用を決定した。

適用現場は図 5 に示すような平たん部と傾斜部を含む幅約 5.5m、延長約 41m で、従来工法である RC 舗装を平たん部約 20m に、PVA 繊維補強コンクリート舗装を傾斜部約 21m に実施した。舗装厚は約 250mm である。目地は幅方向に 5m 間隔で設置し、RC 舗装は車道中央延長方向にも 2.5m ピッチで設置した。目地部には、不陸防止のため丸鋼棒で差し筋を行った。延長方向は D16 のタイバーを設置、RC 舗装部の幅方向は D16 のスリップバーを設置した。PVA 繊維補強コンクリート舗装部は、延長方向への D16 のタイバー設置のみとした。配筋は、RC 舗装部では延長方向に D16-SD345 を 150mm ピッチで、幅方向に

D13-SD345 を 150mm ピッチで格子状に組み、舗装表面から 50mm の深さ部分に配した。また舗装端部は当時の道路施設設計要領を参考に図 6 のように鉄筋を配した。

4. 現地施工

使用した配合を表 2 に示す。RC は同じく道路施設設計要領を参考に設計強度 30N/mm² とし。PVA 繊維補強コンクリートは上述の物性試験で用いた配合を参考に、駐屯地近郊の生コンクリートメーカーにて配合検討の上決定された。コンクリートは工場のバッチ式プラントで製造した。PVA 繊維補強コンクリートは、前もってベースのコンクリートを製造した後に PVA 繊維を人力で投入、追い練りを 60 秒行って製造した。練り

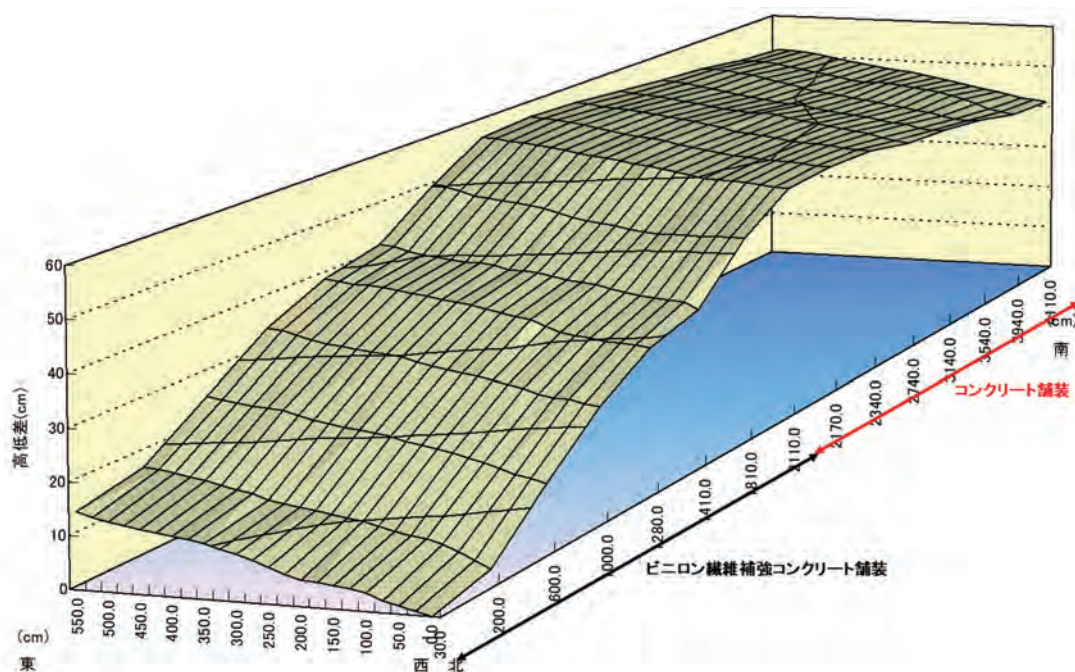


図-5 施工現場概要

表-2 実施工における配合及びフレッシュ性状

	W/C	S/a	単位量(kg/m ³)						繊維添加前			繊維添加後		
			W	C	G	S	SP	F	スラン プ(cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	スラン プ(cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
RC 部	48.1	43.3	165	343	767	1023	0.686	—	15.1	5.1	22.1	—	—	—
PVA 繊維 補強部	45.1	57.0	205	455	692	897	0.91	15.6	18.0	5.4	22.3	12.5	4.6	22.8

C：普通ポルトランドセメント(住友大阪セメント製，密度 3.15g/cm³)

G：砕石(大分市大字片島字山ノ神産，骨材最大粒径 20mm，密度 2.65g/cm³，実積率 58.5%)

S：砕砂(大分市大字片島字牛踏産，密度 2.60g/cm³，粗粒率 2.65)

SP：AE 減水剤(標準 I 型)

上がったコンクリートは、コンクリートアジテータ車にて現地に搬送した。搬送時間は20～30分程度で、打設前に現地でスランプ、空気量を確認、いずれもスランプ12cm前後、空気量5%前後であった。PVA 繊維補強コンクリートは排出全量を目視確認したが、ファイバーボールは確認されなかった。RC 舗装部では鉄筋を配して幅方向にスリップバーを設置、千鳥状に2日間に分けて打設した。PVA 繊維補強コンクリート舗装部は鉄筋を省略して延長方向のタイバー設置のみであったため、1日で打設を完了した。いずれもコテ仕上げ後に箒目仕上げとした。その後シートを敷設して3日間養生を実施した後、7日目より供用開始した。なお本施工は2023年1月28日に株式会社ミヤマによって実施された。

5. 供用後の観察

供用後の舗装面の摩耗について、定期的に現地観察を行った。観察して評価した項目は、目地部の損傷、舗装面の変状である。目地部については、わだち部分における、目地を挟んだ舗装コンクリートの損耗程度並びに目地材の損耗程度について、目視観察と断面の欠損状態を測定し(写真2)、図7のように欠損面積を算出した。

目地部の損傷の経過について、図8及び写真3に示す。RC 舗装部では1年経過頃から舗装コンクリートの端部の損耗が顕在化して経時的に損耗幅が増大した。目地両側の端部損耗幅の増大につれて目地材が磨滅して失われるようになり、10年経過時点で、目地近傍で最大で幅550mm、深さ20mmの大きなくぼみへの成長が確認された。一方PVA 繊維補強コンクリートでは、5年経過頃から舗装コンクリートの端部損耗が顕在化し、10年経過時点でも最大で幅320mm、深さ数mmにとどまっており、PVA 繊維補強による摩耗耐久性の向上が確認された結果となっている。

舗装面の変状については、表面の摩耗状態の目視観察に加えて、施工した車道の最低部を基点とし、打設後58日経過時点での高さを基準とした

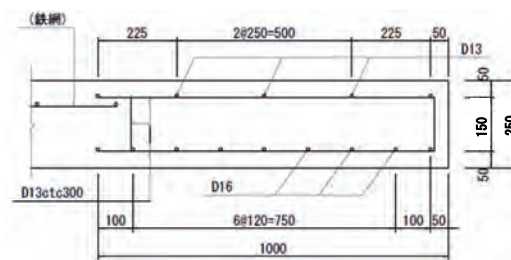
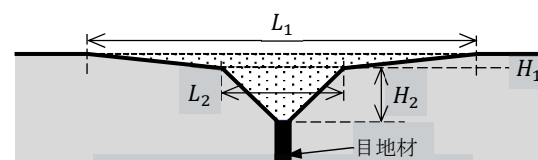


図-6 RC 舗装端部の配筋図



写真-2 目地部周辺の損耗量計測状況



$$S = \frac{H_1 \cdot (L_1 + L_2)}{2} + \frac{H_2 \cdot L_2}{2}$$

図-7 目地部の損傷寸法の算出



PVA 繊維補強 普通コンクリート
a) 1年経過時(2014年)



PVA 繊維補強 普通コンクリート
b) 11年経過時(2024年)

写真-3 路面の状態

深さ方向の変化を幅方向 250mm ピッチ, 延長方向 5000mm ピッチで記録したが, 増減が見られ, 路面の摩耗による変動を追跡できなかった. 理由は明らかではないが, 装軌車両等の走行に起因する大きな荷重の繰り返し载荷によって, 装軌車道下部の地盤がわずかずつ変形している可能性が推察される. 一方, 路面の摩耗状況の目視観察によれば, その差が確認されている. 写真3に見られるように, 10年経過時点で普通コンクリートの路面には多くの粗骨材が露出している一方, PVA 繊維補強コンクリートの路面は粗骨材の露出は少なく, 路面の摩耗が抑えられている.

6. まとめ

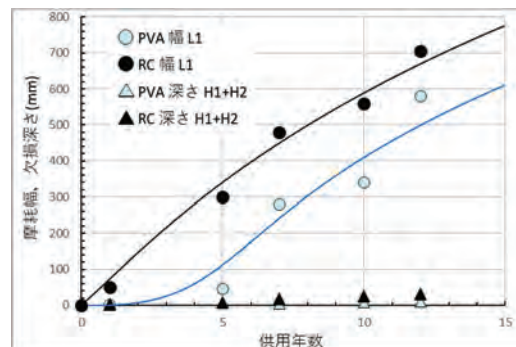
PVA 繊維をコンクリートに混入することにより, コンクリート表面の損傷, 摩耗が低減される効果が確認されたことを受け, 装軌車道への適用を提案し, 実施工に供した. スランプ低下を考慮して配合を調整することにより, 普通コンクリートと同様の施工を行うことが可能であった. また PVA 繊維の補強効果を生かして無筋構造とすることで施工の工程を大幅に簡略化することができた. 施工した装軌車道について 10年以上にわたる経過観察を行った結果, 履帯による舗装面の摩耗が軽減され, 特に目地部の損耗が抑制されていることが明らかになった.

謝辞

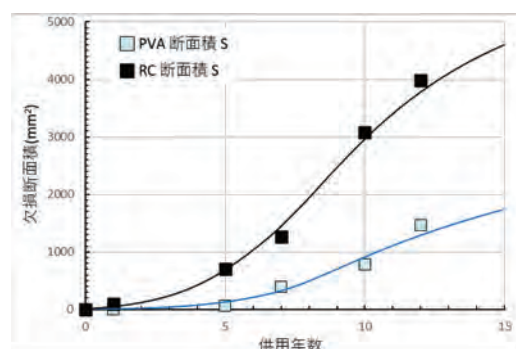
陸上自衛隊西部方面隊玖珠駐屯地の皆様には, 本件適用ならびに補修部の長期にわたる現場観察に対し, 多大なるご協力と貴重なご助言を賜った. また株式会社アネットの皆様には, PVA 繊維補強コンクリートの製造, 品質管理に際し, 設備の使用と配合調整等多くの技術的なご協力をいただいた.

参考文献

- 1) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株): トンネル施工管理要領(繊維補強覆



(a) 幅(L1), 深さ(H1+H2)



(b) 欠損面積(S)

図-8 目地部の損傷寸法の経時変化

工コンクリート編), 令和6年7月など

- 2) 築嶋大輔, JR 東日本における品質確保に向けた取り組み, 建設マネジメント技術, 2016年12月号 pp33-41 など
- 3) 川又篤・松岡茂・村本勝巳・高橋貴蔵・渡邊忠朋・関根悦夫・小川敦久・飯田江理夫, 短繊維補強コンクリートによるまくらぎ直結軌道の試験施工, 土木学会第68回年次学術講演会(平成25年9月), pp1069-1070
- 4) 川又篤・高橋貴蔵・掘越哲郎・松岡茂, 繊維補強セメント系複合材料の基礎性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vo.28, No.1, pp.389-394, 2006
- 5) 日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧 第3分冊 第3章 試験編, pp.695-700, 2007.6
- 6) 新村亮・桜井邦昭・高山昌大・石川健, ラベリング試験による耐摩耗性の評価と各種耐摩耗性改善対策の効果検証, コンクリート工学年次論文集, Vo.33, No.1, pp.689-694, 2011

映像鮮明化技術と AI 技術を活用した基地維持管理と 基地外周および沿岸警備システムに関する研究

STUDY ON BASE MAINTENANCE AND PERIMETER COASTAL SECURITY SYSTEMS UTILIZING VIDEO CLARIFICATION AND AI TECHNOLOGY

横山雅俊*
YOKOYAMA Masatoshi

*工博（株）ユニバーサルコンピュータ研究所（〒542-0086 大阪市中央区西心斎橋 1-9-16）

キーワード：映像鮮明化, 人工知能, 深層学習, 施設維持管理, 外周警備, 異常予測, クラウド
(Video Clarification, Artificial Intelligence, Deep Learning, Facility Maintenance, Perimeter Security, Anomaly Prediction, Cloud)

1. はじめに

1.1 背景と目的

防衛施設における警備、監視、施設管理の分野では、映像情報が重要な役割を果たしている。基地（駐屯地）、港湾施設、飛行場、関連インフラにおいては、侵入検知や異常把握のみならず、日常的な設備点検や環境監視においてもカメラ映像が広く活用されている。

一方、実運用環境では、夜間、逆光、霧、降雨、降雪、もや、照明条件の偏りなどにより、カメラ映像の視認性が著しく低下する場面が多い。このような状況下では、人による目視確認が困難になるだけでなく、AIによる物体認識や状況解析も成立しないケースが少なくない。

近年、AI技術の進展により、画像認識や行動解析を警備や施設管理に応用する試みが進んでいるが、その多くは「良好な映像入力」を前提としている。入力映像の品質が不十分な場合、AIの性能を十分に発揮できないという課題がある。

著者はこれまで、悪条件下の映像を対象とした映像鮮明化システムを開発し、防衛施設学会において段階的に報告してきた¹⁾²⁾³⁾。本論文では、これらの技術を基盤として、映像鮮明化とAI技術を組み合わせることで、従来は困難であった状況認識や判断支援および補修提案を可能とするアプローチについて報告する。

図-1 は本研究で扱う鮮明化によって可能になる AI 解析の一例である。本研究では図-2 の AI 連携モデルを対象とする。外周警備の AI 活用では AI 異常予測の展開を説明する。

1.2 本論文の位置づけ

本論文は、厳密な理論解析やアルゴリズムの詳細より、実装・実運用・導入を重視した技術研究報告として位置づける。特許出願準備中のため、鮮明化処理システムや AI 判断ロジックの詳細については技術思想、効果、適用事例を中心に論述する。

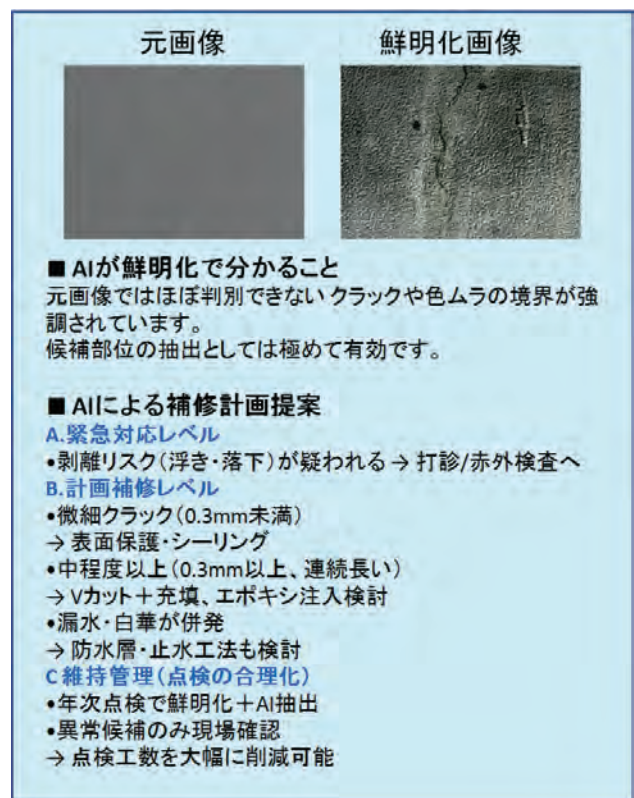


図-1 AIによる解析例

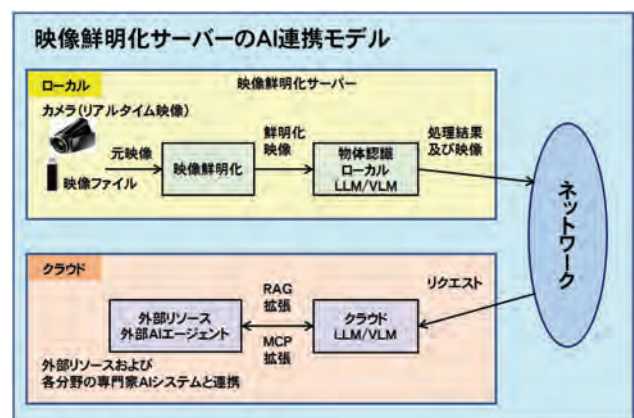


図-2 映像鮮明化サーバーの AI 連携モデル

2. 映像鮮明化技術の概要

2.1 従来の映像処理技術の課題

従来の映像改善技術としては、コントラスト補正、明るさ調整、ノイズ低減、シャープネス強調などが一般的に用いられてきた。しかし、これらの処理は、AIによる画像認識を前提とした設計ではなく、処理後の映像がAIにとって必ずしも解析しやすいものになるとは限らなかった。

2.2 本研究における映像鮮明化の考え方

本研究で扱う映像鮮明化技術は、単なる見た目の改善ではなく、画像内の微小な輝度変化を捉え「映像から解析可能な情報を抽出する」ことを可能としている。すなわち、人の目だけでなく、AIによる物体認識や状況解析に耐えうる映像品質を確保することを重視している。

さらに、防衛施設や警備用途ではリアルタイム性が重要であるため、本装置ではリアルタイム処理とファイル処理をどちらも行える構成を採用している⁴⁾⁵⁾。

図-3 は映像鮮明化によって AI 物体認識が可能になった例である。

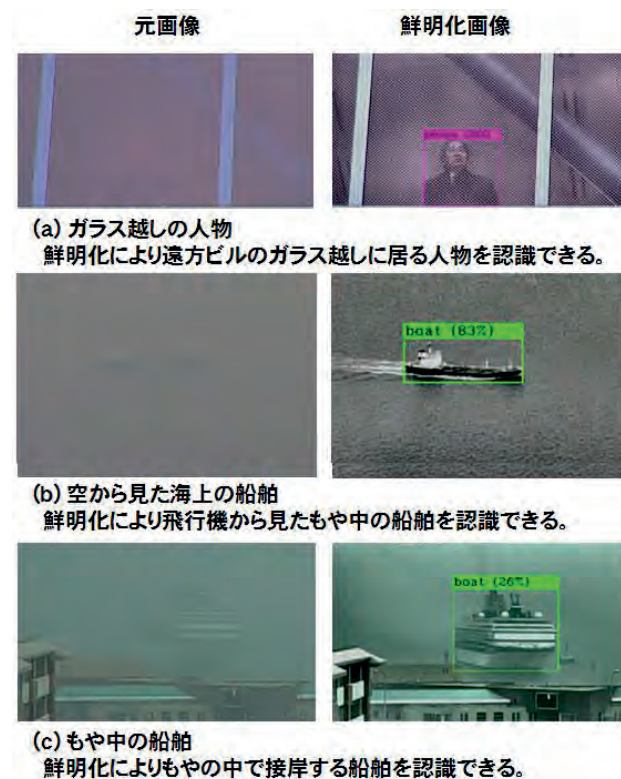


図-3 映像鮮明化による AI 物体認識可能例

2.3 映像鮮明化の事例

2025 年には、除雪車向け映像鮮明化装置として、降雪地域に多数の導入実績がある。これらは実運用環境において稼働しており、降雪時の視界確保に寄与している。

図-4 に降雪道路の鮮明化例を示す。



図-4 降雪道路の鮮明化例

3. AI 対応映像鮮明化装置の構成

3.1 全体構成の概要

AI 対応映像鮮明化装置は、図-2 のとおりカメラから取得されるリアルタイム映像、または既存の映像ファイルを入力とし、まず映像鮮明化処理を行い、その結果を AI 解析に入力する構成を基本としている。

従来の映像改善が主に人の視認性向上のみを目的としていたのに対し、本装置では「AI が安定して解析できる映像状態を生成すること」を主目的としている。

処理はローカル環境で完結する構成を基本としつつ、解析内容保護やセキュリティポリシーを重視した通信環境によって、ネットワーク経由でクラウド AI と連携する柔軟な構成となっている。

3.2 AI の要素技術

本節では、本研究で扱う AI 要素技術を整理する。

(1) 物体認識

物体認識は、画像や映像の中から人物、車両、船舶、設備などの対象物を検出・識別する技術である。近年では深層学習を用いた手法が主流となっており、監視カメラや防犯用途、交通分野などで広く利用されている⁶⁾。

ただし、物体認識は入力映像の品質に大きく依存するため、霧や降雪、暗所などでは認識率が大きく低下する。

このため、物体認識の前段として映像鮮明化を行うことは、AI 性能を安定させる上で重要である。

(2) ディープラーニング

ディープラーニングは、多層のニューラルネットワークを用いて特徴を自動抽出する学習手法である。画像認識、音声認識、自然言語処理など幅広い分野で利用されている⁷⁾。

映像解析分野では、ディープラーニングによって従来は人手で定義していた特徴量を自動的に学習できるようになった一方、学習データの質と入力映像の状態が結果に大きな影響を与える。

(3) LLM (Large Language Model)

LLM は、大量のテキストデータを学習した大規模言語モデルであり、文章理解、要約、推論、指示生成などが可能である。近年では、映像解析結果を文章として説明したり、判断理由を提示する用途でも活用が検討されて

いる⁸⁾。

防衛施設や警備分野では、AI の判断結果を人が理解しやすい形で提示することが重要であり、LLM はそのインタフェースとして有効である。

LLM の基盤となる自然言語理解研究は 1970 年代に遡る。筆者が大阪大学で AI 研究を始めた当時、Winograd による SHRDLU は、「Pick up a big red block.」といった自然言語命令を機械が理解・実行した初期の言語モデル代表例であった。

当時はルールベースかつ計算資源の制約から汎用化は困難であったが、言語理解と知識処理を統合する思想は、現代の LLM へと継承されている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。

(4) VLM (Vision Language Model)

VLM は、画像や映像と自然言語を統合的に扱うモデルであり、視覚情報に対する意味理解や説明生成を可能とする。

例えば、「この映像に映っている状況を文章で説明する」「異常の可能性を言語化する」といった用途が想定され、監視・警備分野において人と AI の協調を実現する技術として注目されている。

(5) RAG (Retrieval Augmented Generation)

RAG は、LLM の出力を外部データベースや知識情報と組み合わせて生成する手法である。LLM 単体では学習時点(ナレッジカットオフ)以降の知識を持たないため、最新情報や組織固有の知識を扱う場合に RAG が有効となる。

防衛施設においては、内部規程、点検基準、過去の事例などを安全に参照しながら判断を行うことが重要であり、RAG による知識拡張は有効な手段となる。

また、運用上は、運用単位ごとに管理されたベクトルストア(文書や画像などの情報を意味的特徴量として数値化し、高速に類似検索・参照を行うためのデータ管理基盤)を検索対象とすることで、組織固有の知識を安全に参照する構成が可能である。

(6) AI エージェント

AI エージェントは、特定分野に特化した判断や解析を行う AI システムである。例えば、構造物診断、設備劣化判定、海象解析などの専門分野 AI が考えられる¹³⁾。

本研究では、映像鮮明化と一次解析を行った結果に基づき、必要に応じて専門 AI エージェントと連携する拡張性を想定している。

(7) MCP (Model Context Protocol)

MCP は、LLM や VLM が外部の専門 AI やシステムと安全に連携するための仕組みである。これにより、単一の AI モデルでは対応しきれない専門領域に対して、適切な AI エージェントを呼び出すことが可能となる。

各要素の関連を図-5 に示す。

3.3 API (Application Programming Interface) 連携

AI システムを実運用に組み込む上で、API は不可欠な

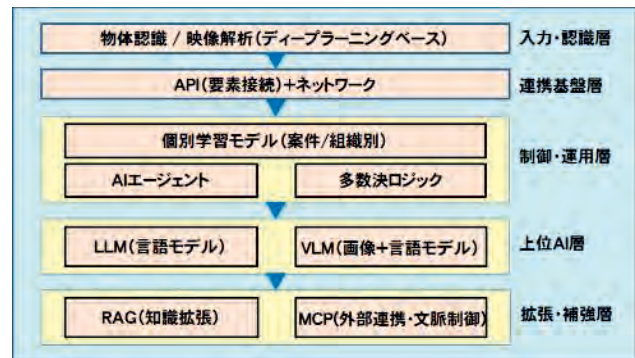


図-5 AI 要素技術の相関図

要素である。API とは、ソフトウェア同士が機能やデータを安全かつ効率的に連携するための標準化された接続仕様であり、個々の内部実装を意識することなく、外部機能呼び出すことを可能にする。

なお、大規模言語モデル(LLM)を提供するクラウド AI サービスの API を利用した解析では、利用量に応じた従量課金が発生する。本研究では、管理された API 環境下の解析において、画像解析および文章生成が実用的な応答時間で実行可能であることを示唆する。

(1) AI システムにおける API の役割

AI における API は、以下のような役割を担う。

- ・映像、画像、センサーデータを AI 処理エンジンに送信
- ・解析結果(AI 認識結果、確信度、メタ情報等)を受信
- ・外部の知識ベース、専門 AI、推論エンジンと連携
- ・クラウド AI とローカルシステム間の機能分離

これにより、ローカル処理とクラウド処理を柔軟に組み合わせた分散 AI 構成が可能となる¹⁴⁾。

(2) API による疎結合設計の重要性

API を用いた設計の利点は、各機能を疎結合に保てる点にある。

例えば、映像鮮明化、物体認識、異常検知、自然言語による解釈・報告生成といった各機能を API で接続することで、個別機能の更新・差し替えが容易、特定ベンダや特定モデルへの依存を低減、セキュリティ要件に応じた構成変更(ローカル完結/クラウド併用)が可能、といった実運用上のメリットが得られる。

防衛・重要インフラ分野では、将来的な技術更新や調達条件の変化に対応できる柔軟性が特に重要であり、API 中心の設計はその基盤となる。

(3) セキュリティ観点から見た API

API は外部接続点であるため、セキュリティ設計が不可欠である。一般に以下の対策が組み合わせられる。

- ・認証・認可(API キー、トークン、証明書など)
- ・通信の暗号化(TLS 等)
- ・利用範囲・回数制限(レート制御)
- ・ログ取得・監査

これらにより、「誰が・いつ・何を呼び出したか」を管

理可能とし、不正利用や情報漏洩リスクを低減する。

特にクラウド AI を利用する場合、API を通じて送信されるデータ内容を制御することで、機密情報を含まない要約・特微量のみを送信する構成など、情報区分に応じた運用が可能となる。

(4) 本研究における API の位置付け

本研究で扱う AI 対応映像鮮明化装置においても、API は以下の目的で重要な役割を果たす。

- ・映像鮮明化処理結果を物体認識 AI へ受渡
- ・ローカル AI 解析結果を必要に応じてクラウド AI へ連携
- ・専門分野 AI や外部解析システムと将来的に接続可能
このように API を基盤とした構成とすることで、運用要件・セキュリティ要件・将来拡張性を両立した AI システムを実現できる。

3.4 AI 連携モデルの段階的構成

本装置では、用途や運用条件に応じて段階的に AI 連携を拡張できる構成を想定している。

M1：従来モデル

鮮明化映像をそのまま利用

M2：クラウド LLM/VLM 連携モデル

鮮明化映像をクラウドに送信し、高度な解析を実施

M3：ローカル物体認識モデル

ローカル環境で物体認識を行い、通信量と遅延を低減

M4：ローカル VLM モデル

映像の意味理解をローカルで行い、セキュリティ強化

M5：ローカル+クラウド連携モデル

一次解析はローカル、高度解析はクラウドで実施

M6：RAG 拡張モデル

組織固有の知識を活用した判断支援

M7：MCP 連携モデル

専門 AI エージェントと連携した高度解析

本論文では、これらの構成を拡張可能なモデルとして提示するに留める。

3.5 個別学習モデルの扱い

映像解析では、施設や用途ごとに異なる特徴を学習した個別モデルが有効である。本装置では、個別学習モデルをローカルまたはクラウドに安全に保持し、用途に応じて切り替えて利用する構成を想定している。

これにより、汎用モデルでは対応が難しい環境固有の条件にも柔軟に対応可能となる。

3.6 多数決ロジック

重要判断では、単一 AI の出力に依存せず、複数モデル/複数ソースの合議（投票・順位統合・整合性評価）により確信度を定量化し、最終判断は監査可能な形で人が担保する設計が望ましい。

実装パターンの例を以下に示す。

(A) アンサンブル（多数決）：

・物体検出や異常検知などで、複数モデルの結果を投票または信頼度加重して判定

(B) RAG の“多数決”に近いもの：

RAG 自体が標準で多数決するというより、実運用では

- ・複数検索（複数ベクトルストア/複数検索器）
- ・順位統合で根拠候補を統合
- ・その後、LLM が根拠の整合性で判定

といった”統合ロジック”を入れる。これは広い意味で“多数決/合議制”に相当する。

(C) LLM を複数走らせて自己一致：

同一質問を複数回生成し、結論の一致度で確信度を上げる。

3.7 AI 活用におけるセキュリティ対策

防衛関連用途における AI 活用では、性能や利便性だけでなく、情報保全および供給網（サプライチェーン）リスクを含めたセキュリティ設計が不可欠である。特にクラウド型 AI を利用する場合には、認証・管理された法人向けサービスや API 提供形態に限定し、入力・出力データが原則として公開学習に利用されない設定で運用することが基本要件となる。

運用面では、利用者や組織単位での権限制御、利用上限管理、監査ログ取得などを一元的に管理可能な運用基盤を採用することで、利便性と統制を両立した安定運用が可能となる。クラウド AI の安全性は、サービス提供側の統制と利用者側の運用設計の双方が適切に機能して初めて確保される。

また、ローカル設備とクラウド AI 基盤をネットワーク接続する場合には、通信経路に対する情報漏洩対策が不可欠である。具体的には、通信データの暗号化に加え、VPN や閉域網の利用、通信経路の認証・アクセス制御を組み合わせることで、盗聴・改ざん・なりすまし等のリスクを低減する必要がある。防衛関連用途では、ネットワーク層を含めた多層的なセキュリティ設計（Defense in Depth）を前提としたシステム構成が求められる。

4. 映像鮮明化と AI 解析の適用事例

本章では、映像鮮明化技術と AI 解析を組み合わせることで、従来の目視確認や未鮮明化映像では把握困難であった現象を検知・解釈し、さらに運用上の判断や対策提案へとつなげられる可能性を、具体的な事例を通して示す。

4.1 映像鮮明化による物体認識性能の向上

近年の監視・警備・施設管理分野では、AI による物体認識が広く用いられている。しかし、AI の認識性能は入力映像の品質に大きく依存し、低コントラスト、暗所、

逆光、霧、降雪といった条件下では、誤検知や未検出が頻発する。

図-3 に示したように、元画像では人物や物体の輪郭が背景に埋もれ、AI が十分な特徴量を抽出できない状況であっても、映像鮮明化を適用することで、輪郭情報やテクスチャ情報が強調され、AI による物体認識が成立しやすくなる。

本研究における鮮明化処理は、人間の視認性向上だけでなく、AI が利用可能な特徴量を増強する前処理として機能しており、結果として認識率の向上や誤検知率の低減に寄与する。この点は、映像鮮明化を AI 解析と組み合わせる意義の基本となる。

4.2 航空機後気流の鮮明化と AI 解析

4.2.1 鮮明化による後気流構造の可視化

航空機の飛行に伴って発生する後気流（後流乱流、翼端渦、排気噴流等）は、通常の可視光映像では背景の雲や空の輝度変動に埋もれ、視認が困難である。元画像では、機体そのものは確認できるものの、その後方に生じる空気の乱れや密度変化はほとんど識別できない。

一方、映像鮮明化を適用すると、機体後方に帯状・線状の構造が顕在化し、元画像では不可視であった流体構造が「観測対象」として浮かび上がる。

4.2.2 元画像と鮮明化画像の解析差

連続フレームを用いた解析では、元画像のみを対象とした場合、機体後方における時間変動（揺らぎ）の兆候はわずかに検出されるものの、線状構造や方向性を持った後気流として特定することは困難であった（図-6）。

一方、鮮明化画像では、フレーム間差分、時間分散、方向性解析などにおいて、機体後方に有意な構造が確認でき、AI 解析による現象の分類や定量化が可能となる。

この結果から、鮮明化処理は後気流解析の成立条件を満たすために不可欠な前処理であることが示唆される。



図-6 航空機後気流の鮮明化

4.2.3 排気噴流と後気流の識別可能性

離陸時の映像では、翼端渦とは別に、エンジン直後を起点とする2本の帯状構造が鮮明化によって可視化される事例が確認された（図-7）。これらは、エンジン排気に伴う高温・高速度の噴流による密度差や屈折率変化が、鮮明化によって陰影として強調されたものと考えられる。

このように、鮮明化画像を AI で解析することで、「翼

端を起点とする後流乱流」と「エンジンを起点とする排気噴流」といった異なる現象を、発生位置や形状特性から区別する可能性が生まれる。

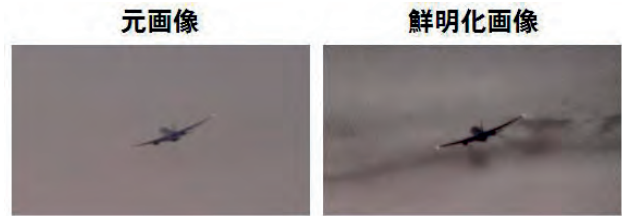


図-7 航空機排気噴流の鮮明化

4.2.4 航空監視や気象状況認識への示唆

これらの結果は、航空安全分野における後気流監視や、視認性の低い航空機に対する補助的な航空監視への応用可能性を示唆する。また、雲の可視化による気象状況の詳細な把握を通して気象状況認識の可能性も生まれる。

4.3 施設管理への応用

図-8 に示すように、防衛施設学会において重要なテー

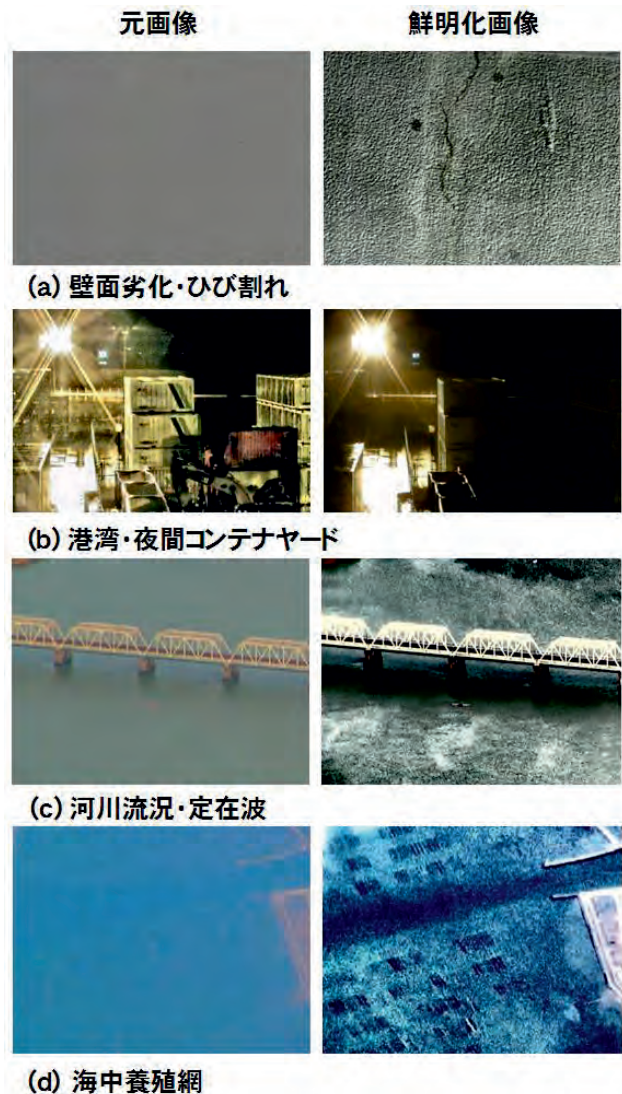


図-8 AI 解析の鮮明化例

マである施設管理に対しても、映像鮮明化と AI 解析の組み合わせは有効である。

・壁面劣化・ひび割れ検知

建築物の外壁・内壁における劣化点検では、ひび割れ（クラック）の初期段階は肉眼での判別が困難であり、点検者の熟練度に依存しやすいという課題がある。特に微細なクラックは、汚れや塗装のムラと混在し、定期点検において見落とされる可能性が高い。

本研究では、壁面画像に対して映像鮮明化処理を適用した後、AIによる画像解析を行った。鮮明化画像では、元画像では背景に埋もれていた線状構造が明瞭となり、複数の微細なクラックが連続・分岐する形状として確認できた。これにより、単なる表面汚れと劣化兆候を区別可能な状態となる。

冒頭で図-1 に示した AI 解析結果からは、当該クラックが表層劣化に起因する可能性が高く、放置した場合には雨水浸入や内部劣化へ進行するリスクが示唆された。

特に、クラック周辺に見られる色調変化は水分影響の兆候であり、早期対応が望ましいと判断される。

このように、映像鮮明化と AI 解析を組み合わせることで、従来は目視点検に依存していた壁面劣化検知を定量的に支援できる可能性がある。今後、時系列画像を用いたクラック進行度の評価や、劣化形態に応じた補修方法の自動提示へ展開することで、計画的な施設維持管理への応用が期待される。

4.4 港湾・夜間コンテナヤードへの応用

港湾やコンテナヤードでは、夜間の強照明や逆光環境が監視の妨げとなる。元画像では、強い光源周辺のハレーションにより、暗部の構造物や人物が埋もれてしまう。

映像鮮明化を適用すると、光源周辺に隠れていたコンテナや構造物が可視化され、暗部情報が回復する。これにより、侵入検知、異常行動検知、物体放置検知といった監視 AI の実用域を拡張できる可能性がある。

特に、事案発生時や特定時間帯のみ鮮明化を適用する運用と組み合わせることで、誤検知を抑えつつ監視性能を向上させる構成が考えられる。

4.5 水域・環境監視への応用

4.5.1 河川流況・定在波の検出

河川監視映像において、元画像では水面が一様に見える場合でも、鮮明化により定在波や流速差、渦構造が強調される。これらのパターンは、流量変化や上流の降雨状況に応じて変化するため、時系列解析と組み合わせることで災害予兆監視への応用が期待できる。

4.5.2 海中養殖網の可視化

浅海域では、条件が整えば水深数メートル程度の海中構造物が、上空からの映像でも把握可能となる。鮮明化

により、養殖網やロープ状構造が可視化され、漁業支援や沿岸監視への応用が考えられる。

防衛用途では、不審ダイバーや水面近傍の物体の兆候抽出といった補助的監視への応用可能性があるが、本論文ではあくまで「光学鮮明化が監視対象を拡張し得る」点を示すに留める。

4.6 映像鮮明化と AI 解析による拡張性

本章で示した事例から、映像鮮明化と AI 解析を組み合わせることで、従来は目視や未鮮明化画像では把握困難であった現象を検知・解釈し、さらに運用上の判断や対策提案へとつなげられる可能性が示された。

鮮明化は単なる可視化に留まらず、AI 解析を前提とすることで、状況把握・異常検知・問題解決支援へと価値を拡張する技術である。

5. 外周警備への AI 応用

5.1 基盤システム SOLPAK4 の概要

SOLPAK4 は、防衛施設や重要インフラを対象とした外周警備システムであり、一定の監視エリアを複数のセンサーおよび監視カメラで囲繞する構成を採用している。

監視エリア周囲にはフェンスセンサーや赤外線センサーを配置し、港湾などの沿岸施設においては海上部分を除いた陸域を中心に警備を行う。

各センサーは区画単位で発報管理されており、侵入などの異常が検知されると、該当区画に連動した監視カメラが自動的に旋回・ズーム動作を行い、現場映像を取得する。同時にスピーカーから警告音が自動放送され、侵入抑止を図る。発報事案は映像として記録されるとともに、ネットワークを介して中央の管理部署へ自動通報され、必要に応じて警備員が現場へ急行する運用となっている。

本論文では、2025 年に報告した図-9 の SOLPAK4 を元に AI 技術を組み合わせた高度化の可能性について論述する。



図-9 SOLPAK4 の画面と構成例

5.2 外周警備における従来課題

従来の外周警備システムにおいては、以下のような課題がある。

第一に、カメラ監視と侵入検知センサー（フェンス、赤外線など）が断片的に運用されるケースが多く、情報

の統合的判断が困難である点である。単一センサーの発報に依存した運用では、風や動物などによる誤報が多発し、警備員の負担増加につながる。

第二に、センサーやカメラの設置条件によって生じる死角の問題である。監視カメラの視野外や、センサー感度の低い区画が存在すると、実際の侵入事案を見逃すリスクが高まる。

これらの課題に対し、AI 技術を活用して複数のセンサー情報や映像情報を統合的に解析することで、誤報抑制や死角補完が可能になると考えられる。

5.3 4次元状況把握による異常予測の考え方

SOLPAK4 における AI 活用の中核的概念として、「4次元の状況把握」が挙げられる。これは、監視対象の空間的な位置情報（平面位置および高さの3次元）に、時間軸を加えた4次元情報として事案を把握・学習する考え方である。

具体的には、過去に発生した複数の侵入事案について、発生場所、発生時刻、侵入経路、検知センサーの種類などを時系列データとして蓄積する。これらのデータをAIにより解析することで、将来発生し得る異常の発生場所および日時を推論し、重点警備区画を事前に設定することが可能となる。

図-10の推定事案に示す例では、地点①②③で過去に侵入事案が発生した場合、それらの空間的・時間的傾向をもとに、地点④における将来の侵入リスクをAIが予測する。本例では高さ情報は一定であるが、将来的には高低差を含めた三次元的侵入経路の分析も想定される。

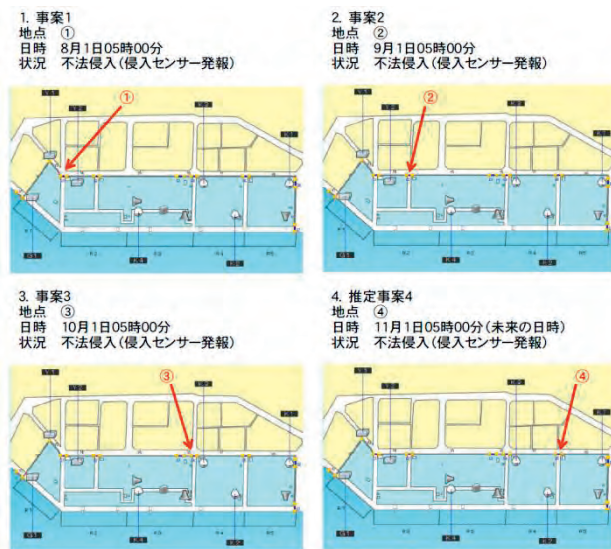


図-10 推定事案例

5.4 4次元異常予測を支える基礎技術

4次元異常予測とは、侵入事案を空間3次元（位置・高さ）と時間軸を含む時空間データとして統合的に扱い、過去に発生した事案の発生位置、発生時刻および遷移パターンの学習により、将来発生し得る異常事象の発生確

率、想定位置および想定時刻を推定する考え方である。

このような異常予測を実現するための基礎技術には、以下が挙げられる¹⁵⁾。

- (1) 事案発生密度の時間変化を捉える時空間ホットスポット推定
- (2) 侵入経路や事案発生順序を学習する系列予測
- (3) 周辺条件を考慮して発生可能性を評価するリスクスコアリング
- (4) 事件性の事案を推定する行動特性に基づく分析

これらの技術を警備区画単位で適用することで、将来的な異常発生の可能性が高い区画や時間帯を事前に把握し、重点警備区画の設定や抑止的な警備運用を支援することが可能となる。

5.5 SOLPAK4 と AI フェンス・AI カメラ連携構想

近年では、フェンスセンサー自体にAIを組み込み、振動波形をFFT解析することで、風による揺れ、よじ登り、切断といった事象を識別するAIフェンスが実用化されつつある¹⁶⁾。これにより、従来課題であった誤報の大幅な低減が期待できる。

また、AIカメラでは人物や車両、船舶などの物体認識結果をメタ情報（ONVIF Mプロファイル）として出力できるようになっており、これらの情報をSOLPAK4の警備制御ロジックに取り込むことで、より高度な判断が可能となる¹⁷⁾¹⁸⁾。

これらAIフェンス、AIカメラ、映像鮮明化技術を連携させることで、単一センサーに依存しない多層的な警備システムが構築できる。本構想は、防衛省が進める駐屯地警備のリモート化・省人化方針とも整合しており、戦略拠点向け警備システムとしての適用が期待される。

5.6 沿岸警備への応用例

沿岸部や港湾施設においては、陸域だけでなく海上・水中を含めた警備が求められる。2025年の論文で提案した海上ブイ警備システム（図-11）は、各種カメラ、レーザー、センサーを装備した海上ブイが異常を検知すると、空中ドローンや水中ドローンを自動発進させ、異常箇所の探索・確認を行う構想である¹⁹⁾。

この探索プロセスにおいて、AIによる判断は極めて有効である。映像鮮明化によって取得した高品質な映像をAIが解析し、異常の有無や危険度を評価することで、不要なドローン発進を抑制しつつ、迅速な対応が可能となる。

SOLPAK4の外周警備システムと同様のAI技術を沿岸警備に応用することで、広域かつ複雑な警備対象に対しても効率的な監視体制を構築できると考えられる。

6. おわりに

本論文では、映像鮮明化技術とAI技術を組み合わせ

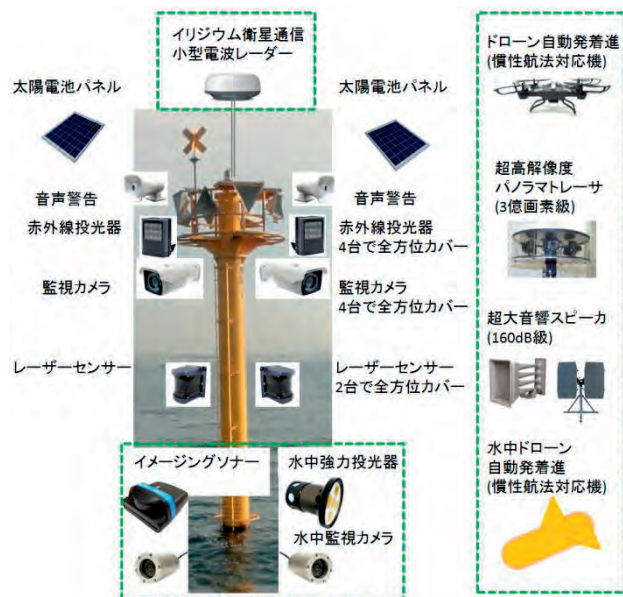


図-11 海上ブイ警備システム概念図

た監視・警備・施設管理への応用について論述した。特に、AI 対応映像鮮明化技術を用いることで、従来は判別困難であった状況や対象を可視化し、AI による認識・判断精度を向上できることを示した。

また、外周警備システム SOLPAK4 を例に、センサー情報と映像情報を時系列に解析することで、異常検知にとどまらず、将来の事案予測や重点警備へと発展させる可能性を示した。本論文では技術思想と効果を中心に示し、各技術の詳細な実装手段については特許による保護を前提としている。

AI 技術は深層学習を中心に今後も急速に進展すると考えられ、監視・警備分野においてもその活用範囲はさらに拡大していくと予想される。今後は、より多くの実運用事例を通じて、本論文で論述した手法の有効性を検証し、防衛施設分野における実践的な警備システムとしての確立を目指したい。

謝辞

本研究および論文執筆の機会を与えて下さった、大和探査技術株式会社の関係者に感謝いたします。

本論文で扱った映像鮮明化装置について貴重なご意見をいただいた、陸上自衛隊施設学校、陸上自衛隊水陸機動教育隊、陸上自衛隊富士学校、海上自衛隊佐世保総監部、海上自衛隊佐世保警備隊水中処分隊、防衛装備庁電子装備研究所、防衛装備庁陸上装備研究所、防衛装備庁艦艇装備研究所、三井造船株式会社(現株式会社三井E&S)、株式会社 IHI、株式会社大林組、海洋総合開発株式会社の方々に感謝いたします。

本論文で扱った外周警備システムについて貴重なご意見をいただいた神戸市港湾局、株式会社神警エンタープライズ、阪神国際港湾株式会社、大阪港湾局の方々に感

謝いたします。

加えて、筆者が大阪大学基礎工学部大学院在籍時に人工知能研究の基礎を学んだ、故田中幸吉大阪大学教授に深甚なる敬意と感謝の意を表します。田中幸吉教授は、参考文献7)「人工知能ハンドブック」の編者としても知られ、日本における人工知能研究の黎明期からその発展を牽引された第一人者であり、本研究の思想的基盤は同研究室での学びに負うところが大きいものです。

参考文献

- 1) 横山雅俊:防衛分野における映像鮮明化技術の活用,防衛施設学会平成 29 年度年次研究発表会,2018 年 2 月
- 2) 横山雅俊:IoT・映像鮮明化・AI 技術を活用した施設管理と防衛分野展開,防衛施設学会平成 30 年度年次研究発表会,2019 年 2 月
- 3) 横山雅俊:映像鮮明化技術と AI 技術を活用した外周警備システム~SOLPAK4~, 防衛施設学会令和 6 年度年次研究発表会,2025 年 2 月
- 4) 防衛省 AI 活用推進基本方針,防衛省,2024 年 7 月
- 5) 防衛白書,防衛省,2025
- 6) チーム・カルポ:DETR & 最新・物体検出アーキテクチャ入門,秀和システム,2025 年 7 月
- 7) 下田倫大,杉澤宏樹,太田満久,久保隆宏,有山圭二:TensorFlow 活用ガイドー機械学習アプリケーション開発入門,技術評論社,2018 年 1 月
- 8) 布留川英一:OpenAI GPT-5 / ChatGPT 人工知能プログラミング実践入門,ポーンデジタル,2025 年 9 月
- 9) 田村進一,柳原圭雄,唐沢博:人工知能の世界,技術評論社,1985 年 9 月
- 10) Avron Barr,Edward A.Feigenbaum,田中幸吉,淵一博:人工知能ハンドブック,共立出版,1983 年 4 月
- 11) T. Winograd:言語理解の構造,産業図書,1976 年 8 月
- 12) Frederick Hayes-Roth, Donald A. Waterman, Douglas B. Lenat:エキスパート・システム,産業図書,1985 年 6 月
- 13) 御田稔,大坪悠,塚田真規:AI エージェント開発/運用入門 [生成 AI 深掘りガイド],SB クリエイティブ,2025 年 10 月
- 14) 日経ソフトウェア,林祐太,滝伸次:ローカル LLM 実践入門,日経 BP,2024 年 12 月
- 15) 古村龍也,崔部俊毅:図解 犯罪心理分析マニュアル,同文書院,1997 年
- 16) 光ファイバー振動検知センサーFD508,オプテックス株式会社,2024 年
- 17) 映像セキュリティ委員会:調査研究報告書「画像解析と AI を活用した防犯カメラシステム」,2023 年 3 月
- 18) 映像セキュリティシステムにおける標準化 (ONVIF) 動向と当社の取り組み,パナソニックシステムネットワークス,2013 年
- 19) ZSB シリーズゼニハイスーパーブイ,株式会社ゼニライトブイ,2024 年

道路舗装のメンテナンスフリーを可能にしたFe石灰工法の活用に関する検証

VERIFICATION OF THE USE OF FE-LIME METHOD THAT ENABLED MAINTENANCE-FREE ROAD PAVEMENT

庄嶋芳卓*, 井真宏**

SHOJIMA Yoshitaka and I Masahiro

* 工（博）（株）エフイ石灰技術研究所（Fe石灰技術研究所）（〒811-3114 福岡県古賀市舞の里4-4-5）

** 工（博）同社 取締役社長

キーワード：Fe石灰工法，メンテナンスフリー，多層弾性理論，ひび割れ，IRI，わだち掘れ，平たん性
(*Fe-lime method, maintenance-free, multilayer elasticity theory, cracks, international roughness index, rutting, flatness*)

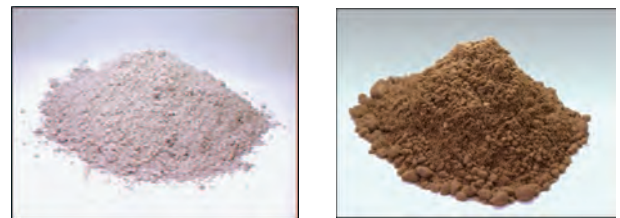
1. はじめに

国土交通省および防衛省は、安全保障環境を踏まえた対応を実効的に行うため2022年12月に閣議決定された国家安全保障戦略¹⁾に基づき『特定利用空港・港湾』を指定し「円滑な利用に関する枠組み」を設けている。さらに、平素から円滑な自衛隊の人員・物資輸送等に資するよう、『特定利用空港・港湾』と自衛隊の駐屯地等とのアクセスの向上に向け、道路ネットワークの整備を図るため2025年度から『特定利用空港・港湾』に加えて、『道路』も追加された。なお、北海道と沖縄県では、当該年度から道路ネットワークの整備が進められている。

また、防衛省では、政府が平成25年に取りまとめた「インフラ長寿命化基本計画」に基づき、平成27年10月に「防衛省インフラ長寿命化計画」を策定した。特に、令和5年度から9年度までの5年間は、新たな計画の発表により、主要な防衛施設の強靱化が加速している。この長寿命化計画では、新技術の導入やメンテナンスサイクルの着実な実施などが取組みとして明記されている。

一方、国土交通省では、各地方整備局が発行している設計要領に準じて道路整備を行っている場合が多い。九州地方では、アスファルトコンクリート舗装およびセメントコンクリート舗装の『路床の構築』において、Fe石灰処理土を用いて安定処理層を構築するFe石灰工法が普及²⁾しており、設計要領³⁾にも明記されている。

そこで本稿では、福岡県・佐賀県の両駐屯地内の舗装を対象に、施設内では実績のほとんどないFe石灰工法を適用した事例について、理論的設計法を用いてメンテナンス時期を推定した。さらに、供用後に多目的路面性状測定器を用いて調査・検証した結果を報告する。



(a) Fe石灰

(b) Fe石灰処理土

写真-1 Fe石灰とFe石灰処理土

表-1 (a) 標準設計簡便表（設計CBR 6相当）

区間のCBR (%)	0.1~0.5 未満	0.5~1.0 未満	1.0~1.5 未満	1.5~2.0 未満	2.0~2.5 未満	2.5~3.0 未満
Fe石灰処理厚 80%の場合	35 cm	30 cm	25 cm		20 cm	
90%の場合	35 cm	30 cm	25 cm		20 cm	15 cm
100%の場合	35 cm	30 cm	25 cm	20 cm		15 cm

表-1 (b) 標準設計簡便表（設計CBR 8相当）

区間のCBR (%)	0.1~0.5 未満	0.5~1.0 未満	1.0~1.5 未満	1.5~2.0 未満	2.0~2.5 未満	2.5~3.0 未満
Fe石灰処理厚 80%の場合	40 cm	35 cm		30 cm		25 cm
90%の場合	40 cm	35 cm	30 cm		25 cm	
100%の場合	40 cm	35 cm	30 cm	25 cm		20 cm

2. Fe石灰処理土とFe石灰工法の概要

Fe石灰工法とは、軟弱路床上に消石灰（約75%）と1/1,000mm以下の微粉酸化鉄（約25%）からなる地盤改良材であるFe石灰（写真-1 (a)）を砂質土や礫質土に混合したFe石灰処理土（写真-1 (b)）を用いて安定処理層を構築した工法である。Fe石灰工法は、行政の指導のもとでの試験施工などによって得られたデータと現場条件等を総合して導き出された値に基づく標準設計簡便表を用いて、Fe石灰処理厚を決定し設計している。標準設計簡便表の1例を表-1 (a)、(b) に示す。しかし、

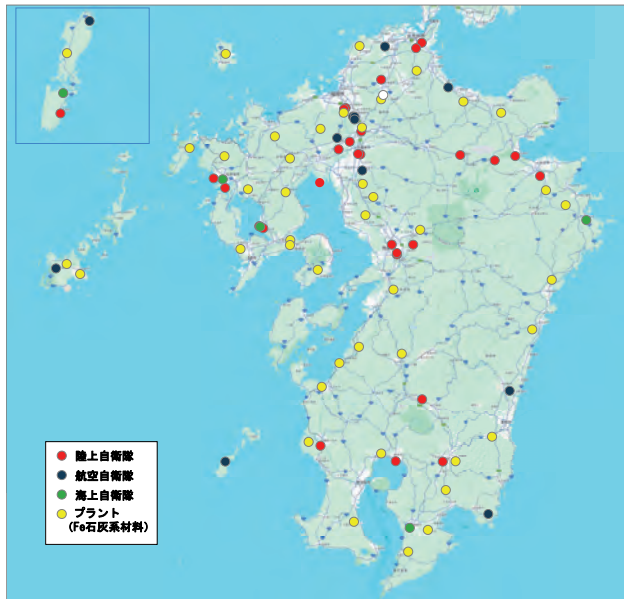


図-1 自衛隊基地・駐屯地・分屯地とプラント

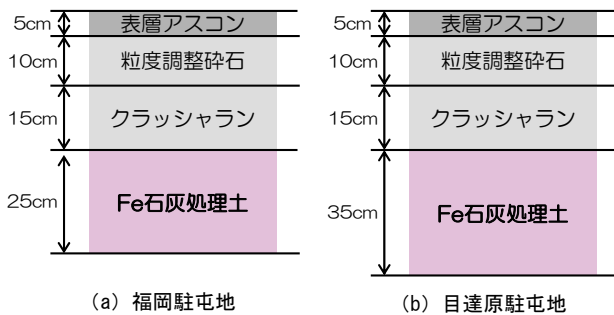


図-2 舗装構成

Fe石灰工法は、軟弱路床の改良工法の1つであるサンドイッチ舗装工法に位置付けられているため、多層弾性理論による解析が必要となることから舗装断面が決定した時点で二層弾性体の近似計算⁴⁾によってたわみ量を算出し判定・検証している。ここで、Fe石灰処理土は、原則として、九州内に設置されている43基のプラントによる中央混合方式が採用されており、九州内の基地や駐屯地、分屯地に対し容易に供給が可能(図-1)である(離島を除く)。

3. 駐屯地内舗装の舗装設計

3-1. 概要

福岡駐屯地(福岡県春日市)および目達原駐屯地(佐賀県吉野ヶ里町)内の舗装の修繕工事では、CBR試験による事前調査の結果、原地盤の路床が軟弱(CBR=3%以下)のため構築路床が必要となった。これらの路線は、周辺住民への影響(道路交通振動や施工時の粉塵等の問題)および工期短縮などの制限があったため、路床構築工法としてFe石灰工法が選定された。そこで、舗装構成は、

表-2 弾性係数とポアソン比

	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
アスファルト混合物	4,000	0.35
上層路盤	300	0.35
下層路盤	200	0.35
路床(構築路床)	10CBR	0.40

表-3 疲労破壊回数とメンテナンスの時期

	疲労破壊回数 (回)		メンテナンス時期(舗装寿命) (年)	
	アスファルト混合物層	路床(構築部除く)	アスファルト混合物層	路床(構築部除く)
福岡駐屯地	58.2×10^5	26.3×10^5	48.5	21.9
目達原駐屯地	69.5×10^5	37.3×10^5	57.9	31.0



写真-2 多目的路面性状測定器

前述した簡便表を基に想定した上で多層弾性理論による解析・照査を行った上で、道路施設設計要領に記載されている T_A および H も満足する断面を、最終的な決定断面とした。なお、解析方法は理論的設計方法⁶⁾に基づき、多層弾性理論(GAMES⁷⁾)を適用した。

3-2. 多層弾性理論による解析

両駐屯地の舗装構成は、図-2に示す。また、多層弾性理論に用いた弾性係数とポアソン比(表-2)は舗装設計便覧などを参考に設定した。

解析の結果、路床部の疲労破壊回数は福岡駐屯地で 2.63×10^6 回、目達原駐屯地で 3.73×10^6 回となった。またメンテナンスの時期(舗装寿命)は、疲労破壊回数を疲労破壊輪数(30,000回/年)と信頼度90%(係数=4)で除した値とした。ここで、信頼度90%とは、設計した舗装構造が設定した期間内に破壊しない確率が90%であることを意味する。なお、表-3は両駐屯地の結果である。一般的なアスファルト舗装の設計期間は10年であることから、両駐屯地の舗装は、解析上、Fe石灰工法を適用したことで2倍以上メンテナンス時期を伸ばすことが可能となった。



(a) 福岡駐屯地



(b) 目達原駐屯地

写真-3 ひび割れ写真

一方、アスファルト混合物層は、路床以上に舗装寿命の長い解析結果が得られた。これは、弾性係数を1か月ずつ設定せずに、1年間の平均気温から推定したことで、暑い時期に弾性係数が低下する影響を受けないため、生じたものと思われる。車両の走行や太陽光などを直接受けるため劣化が懸念され、解析結果より早期にメンテナンスが必要と思われる。

4. 駐屯地内舗装の事後調査の概要

福岡および目達原の両駐屯地内舗装の事後調査は、供用後に舗装点検要領⁹⁾に記載されている診断項目であるひび割れ、IRI（国際ラフネス指数）、わだち掘れおよび平坦性（乗り心地）を実施した。なお、調査は（株）トノックス製の多目的路面性状測定器（写真-2）を用いた。

4-1. 福岡駐屯地の事後調査結果と考察

福岡駐屯地内の舗装は、設計CBR6の区分N₃（LC-2相当）で延長約50mである。調査時期と位置は、それぞれ舗装後10か月後にIWP（内側車輪通過位置）とOWP（外側車輪通過位置）で実施した。測定間隔は、IRIで0.05m、わだち掘れおよび平坦性で1.5mとした。

目視によるひび割れは、写真-3(a)に示すとおりほとんど確認できず5%以下であった。IRI、平坦性、わだち掘れの結果および診断の目安を表-4に示す。いずれの測定位置においても結果は「健全」であった。これらの結果は、調査時期が施工後10か月後であり供用期間が短いことに加え、大型車通行のほとんどない舗装であったことが要因と考えられる。また、わだち掘れ量が健全の基準値に比べ極端に小さいことから、路床・路盤の支持力低下が起因する圧縮変形は起こっていないことも確認できた。ゆえに、当該路線では多層弾性理論の解析結果と類似した傾向が見られ、路床部のメンテナンスフリー（一定期間のメンテナンス不要）が実証された。

図-3は平坦性の計測結果であり、IWPとOWPで変位傾向はほぼ同じであった。また、図-4はIRIの計測結果である。IRIは、中間地点以降でIWPとOWPにズレが見られるが同じ傾きであった。

表-4 診断結果と目安

		ひび割れ率 (%)	IRI (mm/m)	わだち掘れ (mm)	平坦性 (mm/m)
福岡駐屯地	IWP	5未満 (目視)	2.850	2.710	2.00
	OWP	5未満 (目視)	2.656	2.710	2.26
目達原駐屯地	IWP	5未満 (目視)	2.581	1.999	1.86
	OWP	5未満 (目視)	2.376	2.429	1.90
健全性の基準	健全	20未満	3未満	20未満	3未満
	表層機能保持段階	20以上40未満	3以上8未満	20以上40未満	3以上8未満
	修繕段階	40以上	8以上	40以上	8以上

4-2. 目達原駐屯地の事後調査結果と考察

目達原駐屯地内の舗装は、設計CBR6の区分LC-2で延長約102mである。追跡調査は、舗装後1年6か月後に福岡駐屯地同様、IWPとOWPで実施した。測定間隔も福岡駐屯地と同様とした。

目視によるひび割れ（写真-3(b)）、IRI、平坦性およびわだち掘れの結果は、全ての項目で「健全」（表-4）であった。さらに、福岡駐屯地同様、わだち掘れ量から路床・路盤の支持力低下が起因する圧縮変形はなく、路床部のメンテナンスフリーも実証できた。

図-5は平坦性、図-6はIRIの計測結果である。

5. おわりに

本研究では、Fe石灰工法を適用し、理論的設計法に基づく多層弾性理論を用いて設計を行った駐屯地内の舗装に対し、供用後に舗装点検を行い路床部のメンテナンスフリーであることを明らかにした。具体的には、まず多層弾性解析により疲労破壊回数を算出し、通常10年程度である路床のメンテナンスの時期（舗装寿命）が20年以上であることを推測した。次に、供用後の状態や実測データから表層だけでなく路床破損の状態を推定し、理論設計と同じような傾向であることを確認した。

今後は、追跡調査を進めるとともに、防衛施設に関連道路や装軌車用道路、滑走路の路床・路盤にだけでなく、永久構造物（擁壁・暗渠・側溝など）の基礎に対してもFe石灰工法による支持力強化とメンテナンスフリーを目指し、さらなる研究を進めていきたい。

謝辞

九州防衛局調達部土木課には、本研究についてご教示していただきました。また、福岡駐屯地業務隊管理科営繕班および目達原駐屯地総務部管理課営繕班には、本研究に必要な調査を快く許可していただきました。ここに謝意を表します。

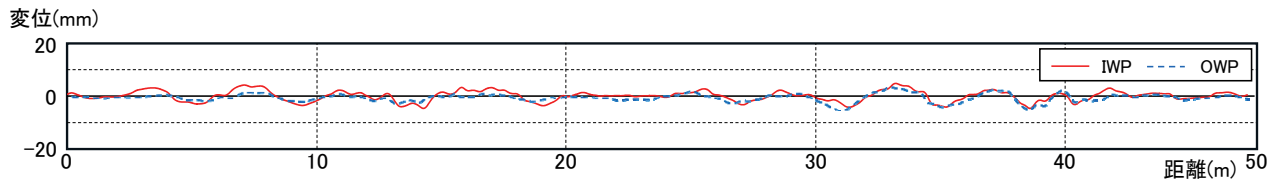


図-3 平たん性 (福岡駐屯地)

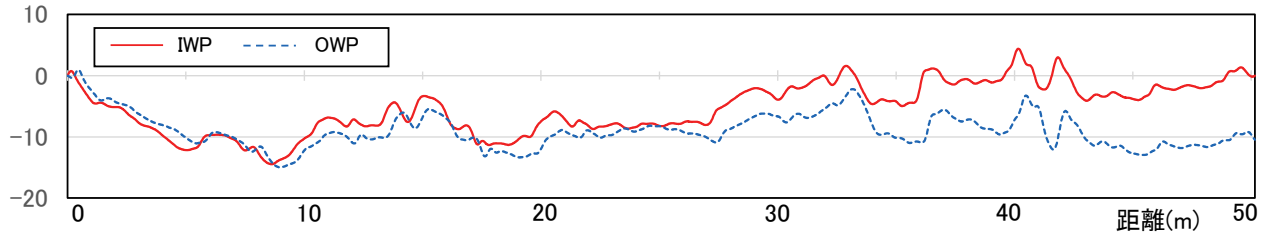


図-4 I R I (福岡駐屯地)

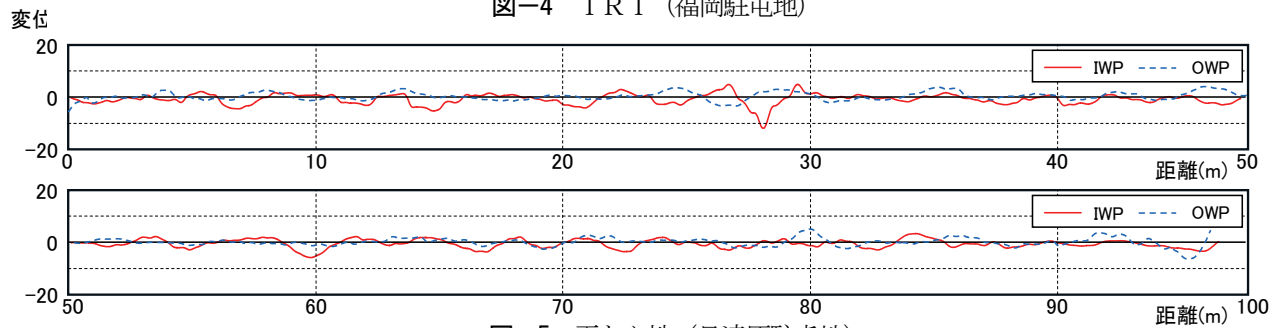


図-5 平たん性 (目達原駐屯地)

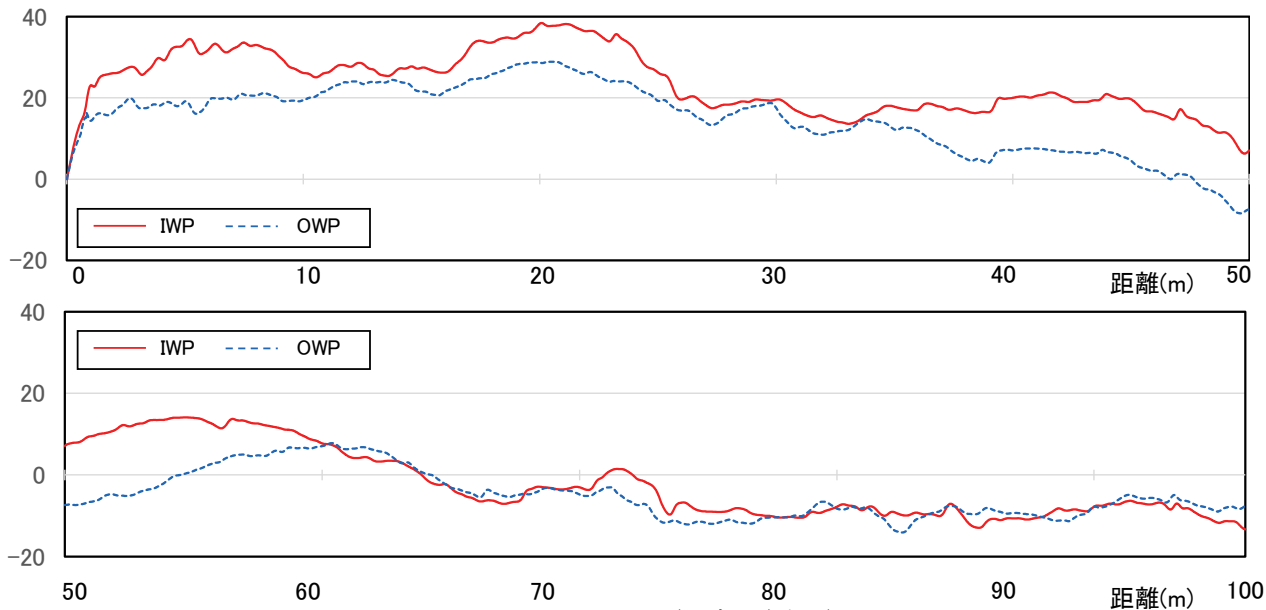


図-6 I R I (目達原駐屯地)

参考文献

- 1) 国家安全保障会議決定及び閣議決定：国家安全保障戦略について（令和4年12月16日），
<https://www.cas.go.jp/jp/siryou/221216anzenhoshounss-j.pdf>
- 2) 阿部頼政, 井清, 溝口孝芳：Fe石灰工の開発と発展, 舗装, Vol.28, No.9, pp16-22, 1993.
- 3) 国土交通省 九州地方整備局：土木工事設計要領 第三編 道路編, p 道 1-176, 2023.
- 4) 土質工学会：土質工学ハンドブック 1982年版, pp856-859, 1982.
- 5) (公社) 土質工学：舗装工学ライブラリー12, p100, 2015.
- 6) (社) 日本道路協会：舗装設計便覧, pp109-144, 2006.
- 7) (社) 日本道路協会：舗装設計便覧, pp281-283, 2006.
- 8) 国土交通省 道路局 国道・防災課：舗装点検要領, pp8-10, 2017.

「建設技術」

補強土壁における補強材の引抜き抵抗メカニズムに関する研究

THE PULLOUT RESISTANCE MECHANISM OF REINFORCEMENT MATERIAL IN REINFORCED WALLS

野々山栄人*, 宮田喜壽**, 宮本慎太郎***

NONOYAMA Hideto, MIYATA Yoshihisa and MIYAMOTO Shintaro

*博（工） 防衛大学校准教授 システム工学群建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

**博（工） 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

***博（工） 防衛大学校准教授 システム工学群建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

キーワード：アンカー補強材，引抜き抵抗，模型実験，可視化
(Anchor reinforcement, pullout resistance, model test, visualization)

1. はじめに

補強土構造物に関する技術は、さまざまな社会基盤整備において広く利用されている。盛土材、アンカー補強材、壁面材によって安定を保つ多数アンカー式補強土壁は我が国で開発された工法であり、適用可能な盛土材の種類も多く、信頼性ベースの限界状態設計法への円滑な移行が期待されている。

本研究では、多数アンカー式補強土壁の設計のうち、両面にアンカーが敷設される補強土壁を対象とし、アンカー補強材の引抜き限界状態に対する評価法の高度化を目的として、三次元可視化模型実験を実施した。実験では、地盤内部および土中の補強材の挙動を観察するため、透明土を用いた模型実験技術¹⁾を用いた。著者らが開発した模型実験装置²⁾をベースに、両面補強土壁におけるアンカープレートの引抜き抵抗特性を観察できる実験システムを構築し、複数のアンカープレートの相対設置が引抜き抵抗に及ぼす影響を検討した。

2. アンカー補強材の引抜き可視化実験

今回の模型実験の概要と実験装置を図-1 および図-2 に示す。用いた装置は、模型地盤の三次元変形場を観察するためのアクリル製側壁を有する実験土槽と、両面補強土壁の配置条件を考慮した3本のアンカー補強材模型（以後、補強材）から2段目の補強材を所定の速度条件で引抜くことができる載荷装置から構成される。実験土槽の寸法は、幅590mm、高さ360mm、奥行き290mmである。図-1に示すように、滑車を介して、変位制御方式で鉛直上向きにワイヤーを引くことで、補強材を水平方

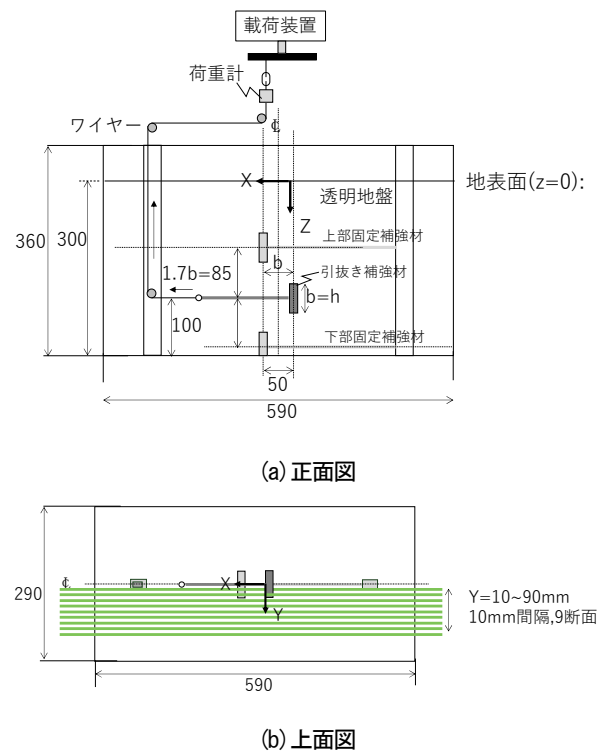


図-1 可視化模型実験の概要

向へ引抜くことができる機構となっている。補強材は、一辺が50mm、厚さ $t=8\text{mm}$ を有するアクリル製の正方形版状プレートと、直径8mm、長さ110mmのロッドで構成される。ロッドの先端部の穴に直径2mmのワイヤーがつけられ、その末端は載荷装置に接続した。引抜き速度は 1mm/min とした。

実験ケースは表-1に示す通りで、相対密度80%（密な地盤）の地盤に対して実験を実施した。引抜く補強材の

設置深さ z を 200mm, 固定した補強材の設置深さ z は 115, 285mm, 鉛直方向および水平方向の補強材間隔を 85 および 50mm とした。

透明地盤内の土中挙動を可視化するために、引抜き量 2mm ごとに载荷を停止し、図-2 に示したトラバーサを利用し、土槽中央断面 ($Y=0\text{mm}$) を基準とし、 $Y=10\text{mm}$ から 90mm まで 10mm ごとにシートレーザー発生装置 (出力: 5W) を移動させ、9 断面の写真を撮影し、可視化した。

補強材の引抜き抵抗力和変位の関係を図-3 に示す。引抜き抵抗力は引抜き量の増加に伴い増加し、ある変位に達すると抵抗力は降伏するが、その後も抵抗力は増大し続けた。

補強材の引抜きに伴う地盤の変形過程について、撮影画像を用いて 2次元 PIV 画像解析 (ソフトウェア: Flow-PIV) を実施し、断面ごとのトレーサー粒子の速度場を解析した。解析では、初期状態と引抜き量 10, 20, 30mm の画像を使用した。得られた各断面の二次元速度場の一例として、 $Y=10\text{mm}$ の断面で引抜き量 20 から 30mm における供試土の変位増分場を図-4 に示す。ここで、図-4 中の黒色のベクトルは、トレーサー粒子の変位増分ベクトルであり、青線は補強材の初期位置および初期地盤位置を、赤線は現行設計における引抜き抵抗メカニズム³⁾をそれぞれ示している。図-4 より土中の拘束圧および補強材の重りの影響で、固定した上部補強材背面の浅層地盤において変形が卓越したが、補強材で囲まれた領域では、引抜き量に関係なく、補強材と拘束圧との影響で、土の変形が拘束されることが明らかになった。

3. まとめ

本研究では、代表的な補強土壁のひとつである多数アンカー式補強土壁を対象に、著者らが開発した模型実験装置をベースに、両面補強土壁におけるアンカープレートの引抜き抵抗特性を観察できる実験システムを構築し、複数のアンカープレートの相対設置が引抜き抵抗に及ぼす影響を検討した。その結果、補強材引抜き時の地盤挙動として、三次元的破壊モードの可視化に成功し、両面アンカーでは、アンカー補強材が囲まれた領域では土の変位が拘束されることが明らかになった。

参考文献

- 1) Iskander, M., Bathurst, R.J. and Omidvar, M: Past, present and future of physical modeling with transparent soils, ASTM Geotechnical Testing Journal, 38(5), pp.557-573, 2015.
- 2) 野々山栄人, 宮田喜壽: 限界状態設計法構築のためのアンカー補強材の土中挙動解明に関する研究, 防衛施設学会令和4年度年次研究発表会, 10, 2023.
- 3) 土木研究センター: 多数アンカー式補強土壁工法 設計・施工マニュアル, 第4版, 2014.

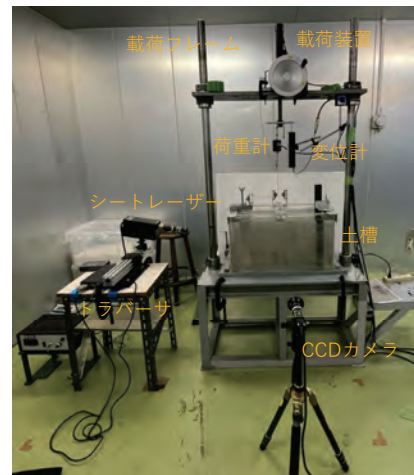


図-2 可視化実験システム

表-1 実験ケース

相対密度	Dr	%	80
プレート幅	B	mm	50
プレート高さ	h	mm	50
補強材設置深さ:可動	z	mm	200
補強材設置深さ:固定	z	mm	115, 285
補強材間隔:鉛直方向		mm	85
補強材間隔:水平方向		mm	50

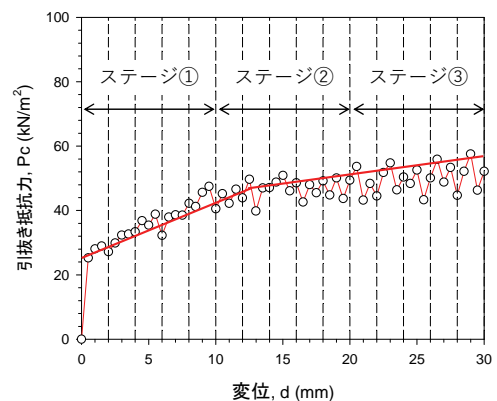


図-3 引抜き抵抗力と変位の関係

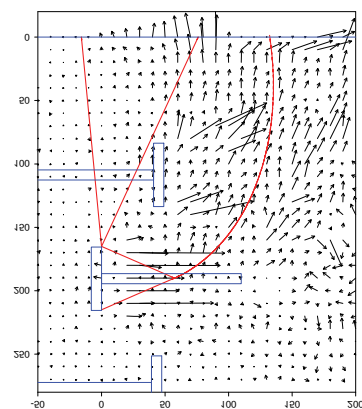


図-4 観察された引抜き抵抗メカニズム

ボーリング情報などの地盤情報を用いた、地質地盤の特徴の検討および地質リスクなどの抽出技術に関する報告

A REPORT ON THE INVESTIGATION OF GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND EXTRACTION TECHNIQUES FOR GEOLOGICAL RISKS USING SUBSURFACE DATA SUCH AS BOREHOLE INFORMATION.

三村 衛*, 北田 奈緒子**
MIMURA Mamoru and KITADA Naoko

* 博（工）一般財団法人 GRI財団（〒540-0008 大阪市中央区大手前2-1-2 国民會館大阪城ビル6階）

** 博（理）一般財団法人 GRI財団（〒540-0008 大阪市中央区大手前2-1-2 国民會館大阪城ビル6階）

キーワード：ボーリング調査、地質学的分析、地質リスク、地盤調査技術、地盤情報

(*Borehole surveys, Geological analysis, Geological risk evaluation, Geotechnical investigation techniques, Geoinformation*)

1. はじめに

ボーリング調査は、建築物の基礎設計や地盤改良、地下水調査など大規模な建設工事や地盤の安全性評価に不可欠であり、また、採取した土のサンプルを用いて地質の構成や土質の特性、支持力などを把握することができる基本的な調査である。調査は事業毎に実施されることが多いが、一方で工事予定地以外での調査は調査用地の確保が難しいなどの要因でボーリング情報が希薄になる場合が多い。

大阪平野部では基盤までの未固結層の層厚が1,000mを超え、地下400m以浅には海成粘土と砂層の互層が分布する平野部および港湾部の建設工事には沈下問題や建設時のトラブルが多発する。それらの問題を解決するためには、多方面の学識者や実務者、公共事業を進める行政が相互協力し、地下地盤の堆積状況の把握や特徴の取りまとめが不可欠であり、互いのデータを示すことや既存情報を活用することが有効であると考えられた。このような背景を抱え、1980年代半ばより、土質工学会関西支部（現地盤工学会関西支部）の研究委員会が発足した。これを発端に“関西陸域”と“大阪湾海域”の地盤情報データベースの構築と地盤研究の活動が始まり、現在の「関西圏地盤情報ネットワーク（KG-NET: Kansai Geo-informatics Network）」に至っている。

本報告では、地盤情報（ボーリングデータ）と現地調査を組み合わせることや地質学、応用地質学、地盤工学を組み合わせた検討を行うことで、より正確な地盤性状や地質断面図を作成することで地質リスクを抽出することが可能となった事例などを紹介する。

2. 関西地域の地盤による堆積場の特徴と地質地盤の検討について

大阪平野部の地下には、海生粘土層と砂層が互層状に分布するが、実際にボーリング調査を行うと、粘土と砂が交互に分布する。建設工事の際に実施されるボーリング調査では、構成粒子の大きさの違い（粘土や砂、礫など）の区分と一定間隔で実施される標準貫入試験によるN値の値を用いて数本のボーリングを用いて断面図を作成することが多い。一般的に堆積物は、平野部では水平に近い堆積構造を示すこと、新しい地層は上部に堆積していくことを基本として、N値と岩相を用いて断面図を作成する。しかし、平野部であっても堆積構造は決して水平構造ばかりではなく、活断層による地殻変動や河川部における下方浸食などもあって、実際には複雑になる。そのため、実際には、N値と岩相だけで断面図を作成した場合、実地盤と異なる場合がある（図-1）。そこで、広域的に堆積場の特徴を把握することと、ボーリング調査時にサンプリングした土を用いて地質学的な検討を行うと、堆積年代が特定し、地層断面を作成すると、水平に堆積していると考えていた地層が大きく傾斜していることが把握できる（図-2）。KG-NETでは、地域ごとの地質特性や土質特性をまとめた「新関西地盤」を発刊し、地域の表層地盤の基本情報を公表している。地質学的な検討とは、堆積環境を把握するための花粉分析や微化石調査、堆積年代を把握することが可能な潜在火山灰分析などが挙げられる。ただし、これらの分析結果が揃っても、堆積場の環境変化と土粒子との関係を含めた堆積学的知見などを総合して判断することになる。

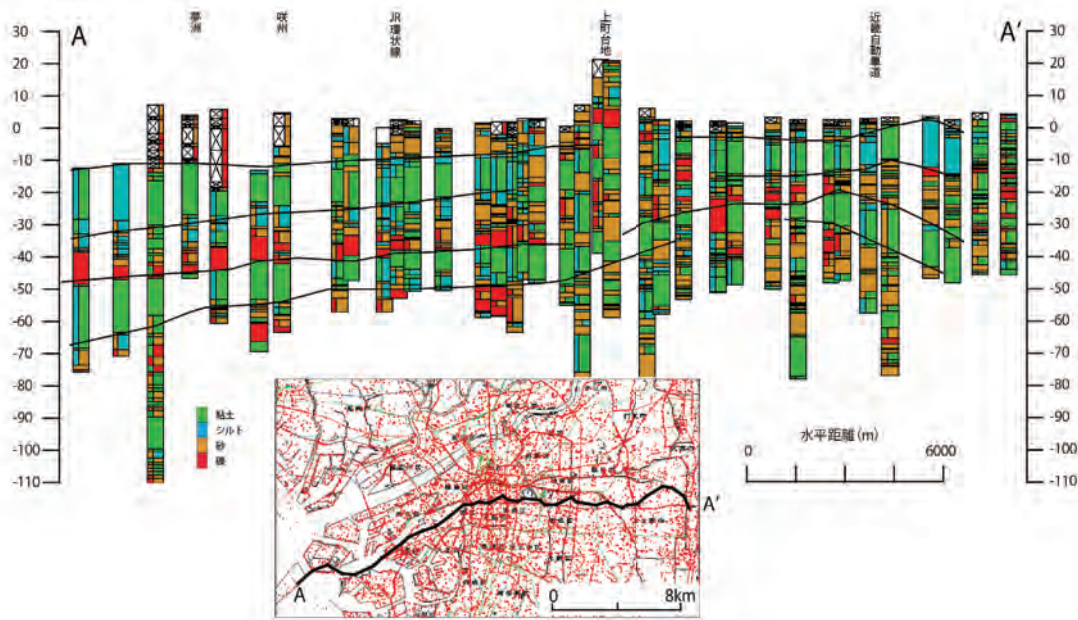


図-1 ボーリング柱状図の土層とN値から地層対比した事例

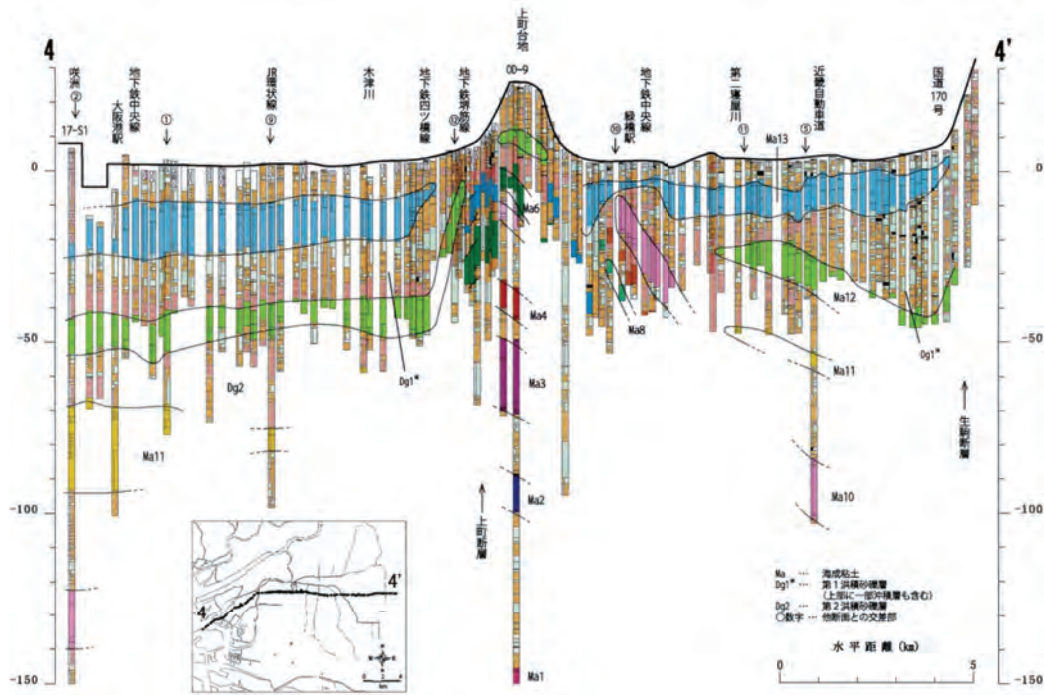


図-2 地質分析結果を反映した地層断面図¹⁾

特に、気候変動に關係する堆積場の変化は土質特性の変化とも密接な關係があることから留意が必要である。

3. 地質リスクの考え方やその事例

建設工事の際に発生するトラブルの要因が地質地盤にある場合、その特徴(地質地盤リスク)を事前に把握することで対策を講じることが可能である。平野地下の堆積構造は複雑な場所もあり、それらの分布や特徴が知られていても、どのようなカテゴリーで形成されたのか、

その堆積要因や堆積環境を知ることによって、工事前にリスクの高い地域や地盤を抽出することができる。京都盆地の表層地盤のうち、沖積層の地層を粒度の違いで取りまとめた図-3を示す。京都盆地には、桂川、宇治川、木津川の3つの河川が流れているが、それぞれ河川上流部の地質、特に山地の岩盤の種類が異なる。そのため、流下する土粒子の種類が異なることが明瞭に理解できる。木津川は上流部が花崗岩分布地域であり、花崗岩は風化すると砂(マサと呼ぶ)に変化することから、木津川の流域は砂層が優勢であり、液状化などのリスクが高くな

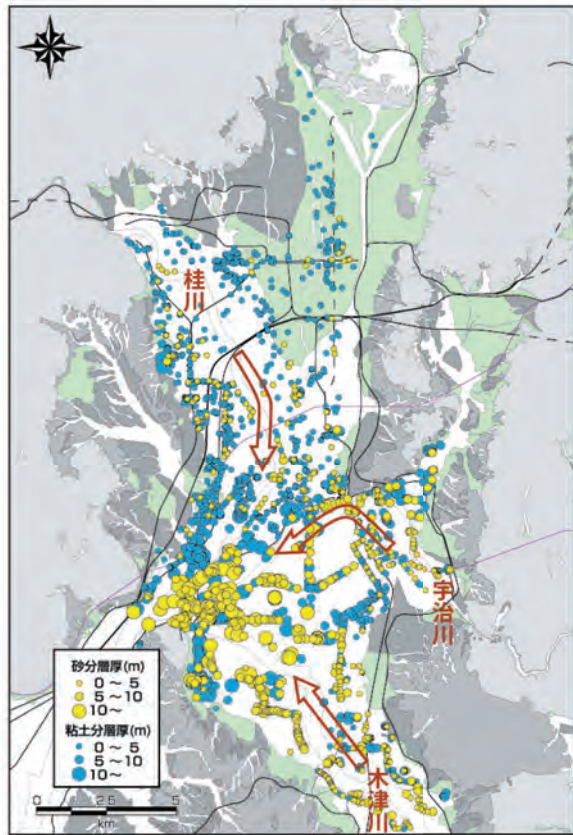


図-3 京都盆地の沖積層の特徴 (一部加筆)²⁾

る。一方、桂川や宇治川の上流部は堆積岩（泥岩、砂岩、チャート）が主となり、河川周辺には礫層が主体で一部粘土層が分布する。

一般的に「旧河道」と呼ばれる明治以前の河川の通過跡とは別に、完新統（沖積）の初めに形成された河谷浸食跡の谷地形などが伏在しており、線状構造物（トンネルや道路、鉄道など）などが通過する場合には、地層の急な変化やそれに伴う強度、地盤特性の変化などに留意が必要である（図-4）。

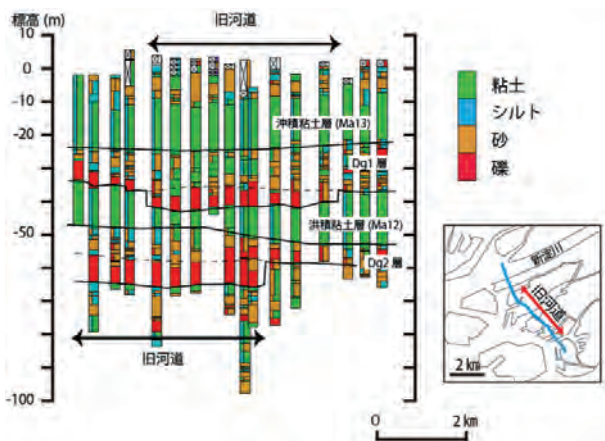


図-4 平野地下に伏在する旧河道の谷地形³⁾

上部沖積砂層の分布をボーリングデータより抽出し図-5 に示す。これは、縄文海進時に広く海が拡大（海水面が上昇）していたためであり、その当時の海浜に該当する。平野部で特に層厚の厚い（黄色）部分は地表から数m～10m 付近に分布する砂で、地下水位も高いことから、液状化に留意が必要な地域である。東西断面図を図-6 に示す。このような旧河道や縄文温暖期の海岸線付近に形成された海浜砂による液状化リスクの検討は施設建設時に必要となるため、地質リスクの高い場所の有無の判断やリスクが高い場合の地盤改良についての検討が必要となる。同様に耐震検討の際の工学的基盤や支持地盤（支持層）の特定に対しても、現地調査による1本のボーリングのみでなく、周辺地域の地盤の状況も把握して地盤モデルの作成を行うことが望ましく、周辺のボーリング調査報告書を収集して検討することで、調査地域の地質リスクを把握し、現地における適切な調査と地質断面図を作成することができ、設計に対しても有用な情報となる。

さらに近年では活断層に関する調査検討の活断層が通過する地域では、通常のボーリング調査だけでは正確な地質断面図の作成は困難で、地質学的な調査分析と検討が必須となる。

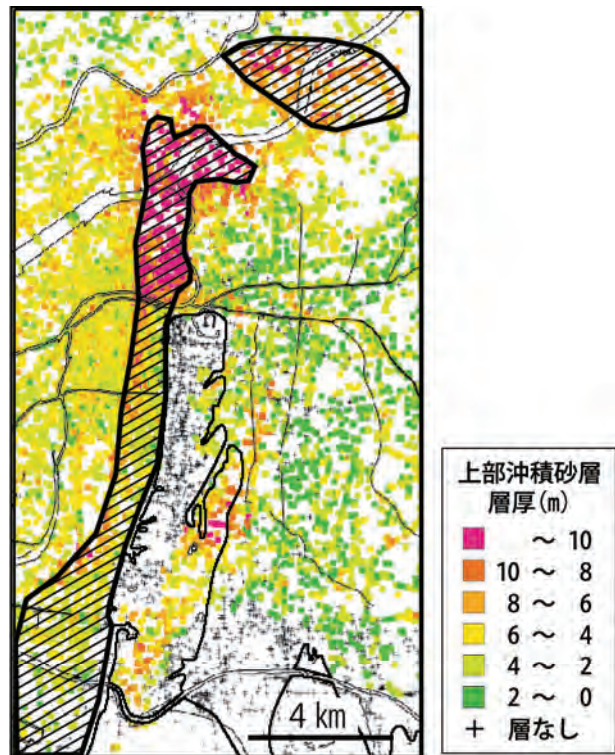


図-5 上部沖積砂層の層厚分布図³⁾

上町台地（黒線で図中に記入）の西側および北部に層厚の厚いエリアが認められる。その分布域を斜線で示す。

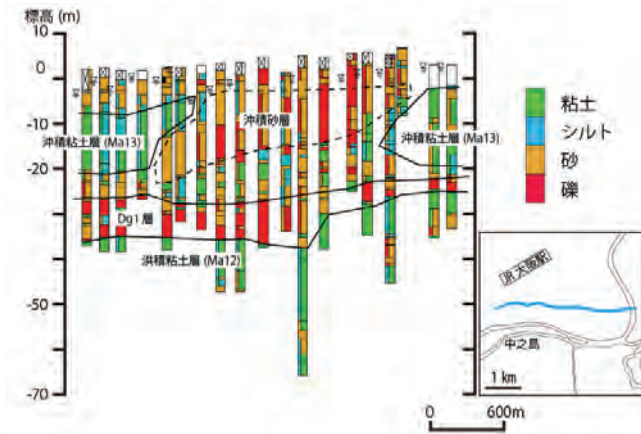


図-6 上町台地の北側の東西断面図³⁾

同深度の西側、東側に粘土層が分布し、砂層は粘土層と同時異相の関係にある。

4. まとめ

関西地域における KG-NET の活動の一部を紹介するとともに地域の地質を理解し、建設施工時の地質リスクの問題や調査事例を示した。同様の検討は、ボーリング調査データを収集することが可能であり、これまでも関西地域の都市部のみでなく、福岡市や大分市、氷見市などでも検討実績がある。近年では、国交省の *kunijiban* などによって行政が実施したボーリング調査データは一般公開されていることから、どの地域でも検討は可能であり、開発計画地の周辺の地質概要や地質リスクの把握から、適切な調査計画を検討することも可能である。

参考文献

- 1) KG-NET・関西圏地盤研究会：新関西地盤 大阪平野から大阪湾、354p., 2007.
- 2) 関西圏地盤情報活用協議会(2002)：新関西地盤 京都盆地、196p.
- 3) 北田奈緒子：地盤情報の活用による地質地盤リスク評価、地盤工学会誌, vol.70, No.5, PP.10-13, 2022

年次フォーラム 2026 令和7年度年次研究発表論文集

発行所 一般社団法人 防衛施設学会
160-0003 東京都新宿区四谷本塩町15番7号 松原ビル3F
TEL : 03-6273-0328 FAX : 03-3292-1485
E-mail : gakkai@jsdfe.org
<https://www.jsdfe.org/>

印刷所 株式会社大應
〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目7番5号
TEL : 03-3292-1488

ISBN 978-4-907956-68-4

当該出版物の内容を転載する場合は、必ず（一社）防衛施設学会の許可を得て下さい。