

一般社団法人防衛施設学会主催

# 年次フォーラム2023

(令和4年度年次研究発表会論文集)

令和5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 2023 論文集目次

### 「建設技術」

座長：野々山栄人（防衛大学校 建設環境工学科）

- ① 飛行場におけるドローン運用の問題点とその対策について  
山本来実，日南茂雄（(株) アクティオ），河井孝文（エアロセンス（株））・・・ 1
- ② 埋設物や空洞の調査を飛躍的に効率化！  
ー物理探査による埋設物等調査の新技术ー  
本田一行（国土交通省），金指勝，内藤好裕，楠本浩司（大和探査技術（株））・・・ 9
- ③ 大規模事業におけるクラウドを活用した工事業者間の情報共有について  
森暁雄，小原良子，吉岡正泰，住本英樹，  
大森陽一（パシフィックコンサルタンツ（株））・・・ 15
- ④ ジオセル補強地盤の車両走行性に関する室内模型実験  
宮本慎太郎，宮田喜壽（防衛大学校）・・・ 21

### 「防災・環境」

座長：副島正睦（環境省 水・大気環境局）

- ⑤ 「強かな」防災・応災・減災コンセプト構築の取り組みについて  
～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～  
荻原洋聡，石川友樹（(株) エヌ・ワイ・ケイ）・・・ 23
- ⑥ 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～  
中根圭介（ユーティリティ・ソリューションズ），  
栗田恵子（コアラボ、東京大学大学院）・・・ 33
- ⑦ フィルターイノベーションによる環境修復  
PFAS 水浄化、水・空気の循環利用  
山内仁，西村章，西村聡，角田真之（(株) 流機エンジニアリング）・・・ 41
- ⑧ PFAS 汚染土壌の浄化工法開発に向けた基礎的検討  
梅原悠平，國井聡，赤松佑介，芳賀直樹，竹澤正太郎（前田建設工業（株））・・・ 49
- ⑨ 油含有土壌を対象とした効率的なバイオ処理技術の開発  
日野良太，西川直仁，藤井雄太（(株) 大林組），  
廣瀬孝三郎，松原仁，新里尚也（琉球大学）・・・ 55

### 「地盤・施設防護」

座長：堀口俊行（防衛大学校 建設環境工学科）

- ⑩ 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  
野々山栄人，宮田喜壽（防衛大学校）・・・ 63
- ⑪ インテグリティ試験による杭の健全度調査  
内田篤貴，篠田里子，齊藤弘昭，割ヶ谷隆志（日本物理探査（株））・・・ 65
- ⑫ 衝撃的張力作用時に塑性変形を考慮した緩衝構造の実験的研究  
別府万寿博（防衛大学校），  
西本安志，浮島徹，廣岡宗一郎，西村佳樹（シバタ工業（株））・・・ 71



「建設技術」



# 飛行場におけるドローン運用の問題点とその対策について

ISSUES OF THE DRONE OPERATION AT AIRFIELDS AND ITS COUNTERMEASURE

山本来実\* 日南茂雄\* 河井孝文\*\*

YAMAMOTO Kurumi, HINAMI Shigeo and KAWAI Takafumi

\* (株) アクティオ ICT推進部 ICTサポート課 (〒103-0075 東京都江東区新砂 3-6-41)

\*\*エアロセンス(株) ドローン事業部 兼 ソリューション開発事業部 (〒112-0002 東京都文京区小石川 5-41-10)

キーワード：ICT, 無人航空機, ドローン, 飛行場, 避難

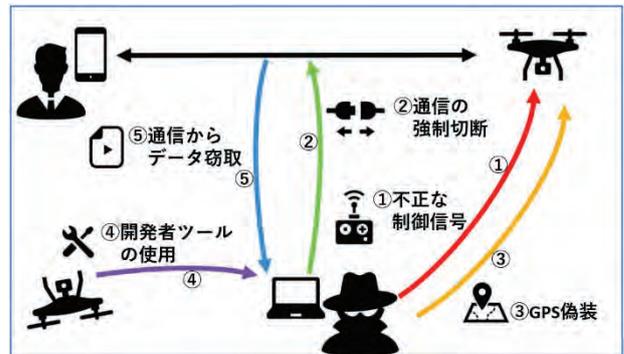
( i-Construction , Unmanned Aerial Vehicle, Drone, Airfield, Evacuation )

## 1. はじめに

建設工事は、建設生産プロセス全体における生産性向上を推進するよう求められている。具体的には調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新に至る各段階における受発注者の連携等を通じて、小型無人航空機（以下、「ドローン」）による3次元測量や ICT 建機の活用等、ICT 活用工事の推進等や、3次元モデルにより、設計から施工、維持管理に至るまでの建設ライフサイクル全体で情報を蓄積し活用する BIM/CIM の積極的な活用が必要である。

特に、飛行場施設においては、広範囲な滑走路や着陸帯などの空港施設を迅速に調査や情報収集を行う観点から、ドローンによる調査は極めて有効である。

このため、本紙は、飛行場におけるドローンの活用にあたり、航空機の運用に支障が生じないように、どのようにドローンを安全に飛行させるかについて検討し、その方法を提案するものである。



図—1 ドローンに対する主なサイバー攻撃の経路例 (参考文献：5)

また、攻撃経路の検討をもとに、模擬攻撃プログラムにより、表—1のとおり脆弱性を検証した結果を示す。

表—1 模擬攻撃による脆弱性の検証 (参考文献：5)

区 分		ドローンA	ドローンB	ドローンC	
ドローン仕様	種 類	トイドローン	汎用ドローン	産業用ドローン	
	離 陸 重 量	約130 g	約320 g	約1,400 g	
	スマートフォンからの操作	○ Wi-Fi Password:無	○ Wi-Fi Password:有 (SSH設定/PW変更可)	—	
	プロボ (2.4GHz無線)	○	○	○	
GPS搭載	—	○	○		
模擬攻撃アタック	不正操作	不正な制御信号	緊急停止 ✓	×	×
		通信の強制切断	不着陸	ホバリング維持 ✓	—
		GPSの偽装	—	×	位置情報の偽装 ✓
		開発者ツールの使用	緊急停止 ✓	緊急停止 ✓	×
	データ漏洩	通信からのデータ窃取	ハッキング修復元	リアルタイム	—

【凡例】 ○：装備あり ✓：模擬攻撃成功 ×：模擬攻撃失敗 —：装備なし/未実施

## 2. ドローンのセキュリティ対策

### 2.1 ドローンに対するサイバー攻撃と対策

飛行場等の施設においてドローンを活用するにあたり、運用方法のほかに、セキュリティ対策として次の2つのリスクがあると考える。

- ① データ漏えい：飛行記録データを含む機微情報の窃取・漏洩
- ② 操縦不能・乗っ取り：上昇・下降等の操作信号や、緊急着陸の信号などを行い、ドローンに使用者の意図しない行動をさせる

サイバー攻撃の概要は、図—1に示す。

### ○サイバー攻撃への主な対策検討

- 通信の暗号化
- 安全な Wi-Fi の使用、Wi-Fi ネットワークの監視
- Wi-Fi 以外の無線通信傍受への対策
- 海外製品依存からの脱却
- 位置情報の改ざん対策

## 2.2 セキュリティ対策を踏まえたドローンの機種選定の提案

ドローンの使用にあたっては、既成品を使用しなければならない。また、飛行場で使用するドローンの機種は、機種が保有する性能のほか、ドローンの不正操縦や乗っ取り及びデータの漏えいのリスクの観点からの検証を行い、機種選定を行うことが必要である。

ドローンの採用にあたっては、セキュリティや機種自体の信頼性を確保しつつ、機種の検証を容易とするため、図-2のフローに従い、選定することを提案する。

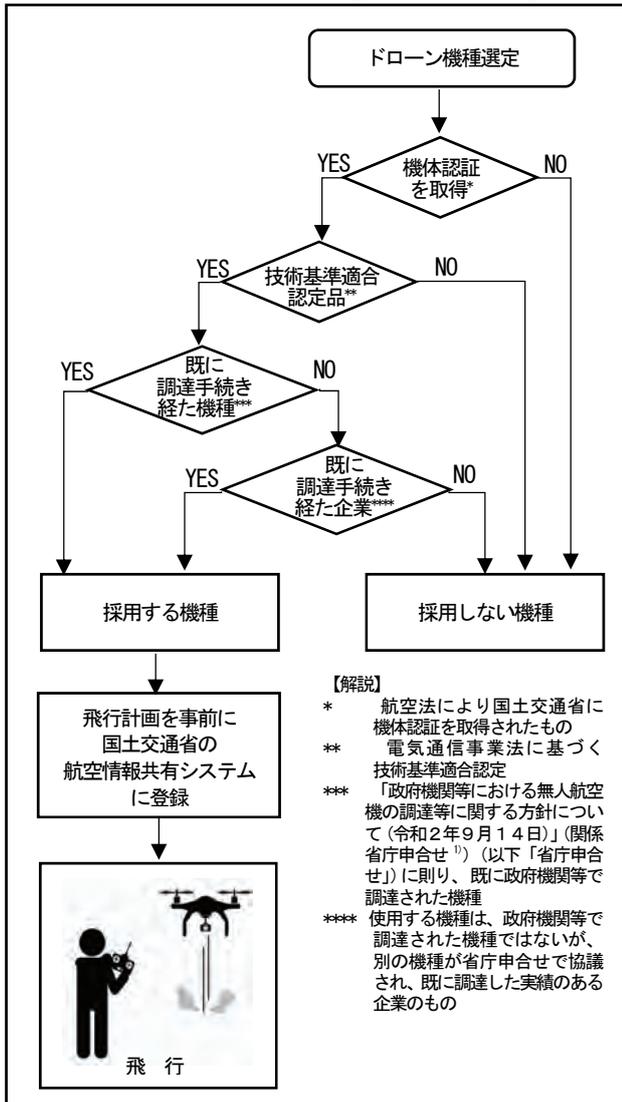


図-2 ドローンの機種選定のフロー(案)

### ○機種選定のフロー

- ① 航空法に基づく、ドローンの機体認証の確認
- ② アクセス制御機能等の対策の観点から、電気通信事業法に基づく「技術基準適合」の認定の確認(技適マークの確認)
- ③ 候補機が、ドローンの調達のための「政府機関等における無人航空機の調達等に関する方針について(令和2年9月14日)」(関係省庁申合せ<sup>1)</sup>)

(以下、「各省申合せ」)の手続きを経た機種である場合、採用

- ④ 候補機が、上記③の機種ではないが、既に各省申合せの手続きを経て、政府等機関に調達した実績のある企業の機種である場合、採用
- ⑤ 選定後は、航空機や他のドローンとの相互間の安全確保のため、国土交通省に「飛行情報共有システム」に登録

次章に示すが、今回の飛行実験で用いたドローンは、機種選定③によるものである。

## 3 緊急時飛行操作実証実験

### 3.1 着陸性能実験の目的

ドローンが飛行場地区を飛行する場合には、航空機の運用に支障が生じないように、航空法に規定する制限表面(進入表面・転移表面・水平表面)外に退避する必要がある。このため、本実験では、ドローンを降下及び水平に退避させる時間を計測し、退避時間と距離との相関を検証する。検証の結果は飛行場運用者との調整の資とする。

ドローンは、機体ごとにメーカーの機体性能が示されているが、機体を降下するにあたっては、対地衝突回避のため、機体性能の運動よりも低い速度で移動することが想定されるため、実機を飛ばして検証することとした。

### 3.2 対地速度と対気速度

飛行速度には、対地速度と対気速度がある。

- ・対地速度：航空機の地表面に対する相対的な速度
- ・対気速度：機体と大気(空気)との相対速度

向かい風のなかを飛行した場合には、「対気速度＝対地速度＋風速」となり、対気速度の値は、対地速度の値より風速の値だけ大きくなる。追い風に飛行した場、対気速度の値は、「対気速度＝対地速度－風速」となり、対地速度の値よりも小さくなる。

$$V_a = V_g + V_w$$

対地速度  $V_g$ 、対気速度  $V_a$ 、風速  $V_w$  (向風を正)

降下速度は、横風があったとしても、航空機の地表面に対する相対的な速度である対地速度をゼロとして、鉛直の速度成分を評価するため、横風の影響はない。

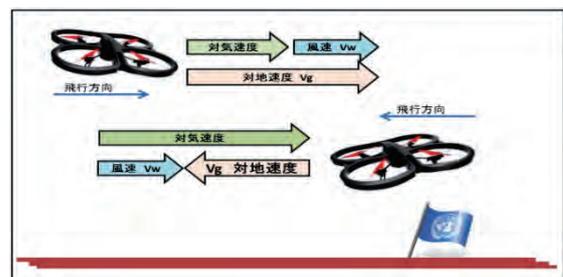


図-3 対地速度と対気速度 3 (参考文献：6)

### 3-3 飛行実験

#### 試験場所)

東京フライトパーク守谷飛行場 (茨城県)

#### 使用した機体)

エアロボ PPK : 型番/AS-MC03-PPK

#### 実証実験日時)

2022年12月16日

#### 気象条件)

地上風速 2 m/s (7.2 km/h)

上空風速 5 m/s (7.2 km/h)、風向き東に 110 度

#### ① 実験場所での速度評価

##### ○実験内容

屋外自然風がある状態で簡単な飛行ルートを飛行後、離発着地点上空 (相対高度 30m) から着陸するまでの時間を計測する。また、相対高度 30m から着陸モードの指示を出したときの操作も記録する。

※計測時注意事項：離発着地点からの相対高度 8m の箇所でスピードが変化。



図—4 実験場所での速度評価

表—2 機体の飛行設定内容

型番	飛行モード	飛行内容	単位
AS-MC03-PPK	自律飛行	上昇スピード	2.0 m/s
		下降スピード	1.5 m/s
		相対高度 8m 以上の下降スピード	1.5 m/s
		相対高度 8m 未満の下降スピード	0.5 m/s
		着陸モードの下降スピード	0.5 m/s

##### ○実験評価内容

実験回数 3 回

高度毎の降下速度と降下時間

##### ○実験の目的

回避に係る自律飛行モードの降下速度の検証を行うため。

#### ○実験状況



図—5 降下速度検証の状況

#### ○結果

表—3 自律飛行モードで着陸するまでに要した時間

1 回目	36.28 sec
2 回目	37.02 sec
3 回目	37.07 sec
平均時間	36.08 sec

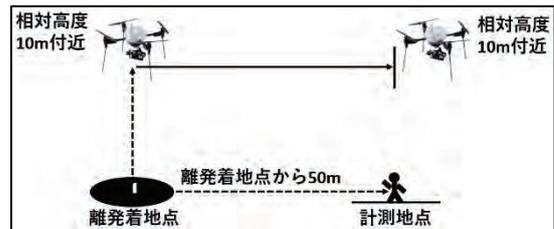
自律飛行モードで離発着地点上空 (相対高度 30m) から着陸するまでに要した時間は平均で約 36.08 秒であった。

#### ② 回避行動の検証 (水平方向移動)

##### ○実験内容

屋外自然風がある状態で、離発着地点上空 (相対高度 10m) から水平方向に移動する飛行を実施。計測地点には関係者が待機し、ストップウォッチで地点通過時のタイムを記録する。計測地点は別途協議。

※計測時注意事項：上空を飛行するため、概算でのタイムとなる。



図—6 回避行動の検証実験 (水平方向移動)

##### ○機体の飛行設定内容

機体の制御：①自律飛行モード (速度 5 m/s)

②マニュアルモード (速度 2 m/s)

③高速マニュアルモード (速度 8m/s)

##### ○実験評価内容

自律飛行、マニュアル飛行 各 3 回

高速マニュアル飛行 1 回

水平方向の移動時間 (50m 地点迄)

※高速マニュアルモードは通常運用で設定できない仕様である。

## ○実験の目的

退避に係る、自律飛行モード、マニュアルモード、高速マニュアルモードで水平方向移動するのに要した時間を比較するため。※高速マニュアルモードは通常運用が出来ない仕様だが、今回は検証データを取得するため1回のみ実証実験を行った。

## ○実験状況



図—7 水平方向移動検証の状況



図—8 水平方向移動検証 (イメージ)

## ○結果

表—4 ①自律飛行モードでの水平移動時間

	時間	速度	カタログスペック
1回目	13.78 sec	3.62 m/s	5 m/s
2回目	13.49 sec	3.70 m/s	
3回目	13.24 sec	3.77 m/s	
平均時間	13.50 sec	3.70 m/s	

表—5 ②マニュアルモードでの水平移動時間

	時間	速度	カタログスペック
1回目	28.84 sec	1.73 m/s	2 m/s
2回目	26.65 sec	1.87 m/s	
3回目	27.26 sec	1.83 m/s	
平均時間	27.60 sec	1.81 m/s	

表—6 ③高速マニュアルモードでの水平移動時間

	時間	速度	カタログスペック
1回目	9.4 sec	5.31 m/s	8 m/s

自律飛行モードで離発着地点上空 (相対高度 10m) から 50m先の地点まで水平方向に移動するのに要した時

間は平均で約 13.5 秒であった。マニュアルモードで離発着地点上空 (相対高度 10m) から 50m先の地点まで水平方向に移動するのに要した時間は平均で約 27.8 秒であった。高速マニュアルモードで離発着地点上空 (相対高度 10m) から 50m先の地点まで水平方向に移動するのに要した時間は 9.4 秒であった。

## ○考察

自律飛行モードで水平移動するのに要した時間はマニュアルモードと比較して約 50%の飛行時間となった。自律飛行モードと比較して高速マニュアルモードで水平移動するのに要した時間は、自律飛行モードで要した時間の約 70%の飛行時間となった。しかし、高速マニュアルモードは通常運用ができない仕様であることに加え、自律飛行モードと比較し操縦難易度が高く、オペレーターが機体の位置を目視しつつ障害物がないかを確認する必要があるなど、人為的なミスが起こる可能性がある。また、測量ミッション中にマニュアルモードに入れて電池残量が 30%になった場合は自動帰還モードに入るため、飛行場でのマニュアルモードは推奨できない。したがって、安全かつ迅速に飛行するには自律飛行モードでの運用が有効と考察できる。

### ③—1 退避行動の検証 (斜め方向移動マニュアル操作)

#### ○実験内容

屋外自然風がある状態で、離発着地点から距離 300m 付近 (地点 A、距離は操作端末上で確認) の上空 (相対高度 50m) でホバリングしている機体を離発着地点上空約 10m まで斜め方向にマニュアル操作を実施し飛行させる。その後自動着陸モードに切り替え、着陸するまでのタイムを記録する。

※計測時注意事項：上空を飛行するため、概算でのタイムとなる。

#### ○機体の飛行設定内容

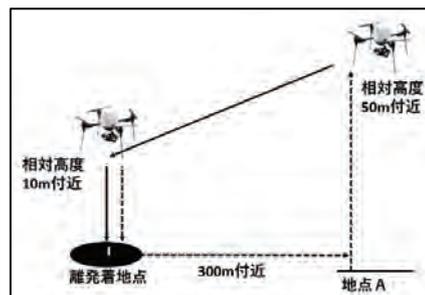
機体の制御：マニュアルモード (速度 2.0 m/s)

着陸時のみ自律飛行モード (速度 0.5 m/s)

#### ○評価内容

マニュアル飛行+自動着陸 3回

着陸までのトータル時間



図—9 退避行動の検証実験 (マニュアル操作)

### ○実験の目的

300m離れた上空の地点から、マニュアルモード（着陸時のみ自律飛行モード）で斜め方向へ帰還するのに要した時間を検証し、同じように自律飛行モードで帰還するのに要した時間を比較するため。

### ○結果

表—7 マニュアル操作で着陸するまでの時間

運動		斜め下降 ①	着陸 ②	合計 ①+②
距離	水平	300 m	0 m	
	鉛直	40 m	10 m	
1回目		156 sec	22.06 sec	178 sec
2回目		156 sec	20.32 sec	176 sec
3回目		157 sec	24.07 sec	181 sec
平均時間		156 sec	22.15 sec	178 sec

マニュアルモードで離発着地点から距離300m先の上空（相対高度50m）にホバリングしている機体を離発着地点上空（相対高度10m）まで斜め方向に移動し着陸するまでに要した時間は平均で約156秒であった。離発着地点上空（相対高度10m）から着陸するまでに要した時間は平均で約22.2秒であった。

上空から斜め方向に移動しながら、下降が出来るモードはマニュアルモードのみである。マニュアルモードで斜め下降運動は、操縦士の練度によるところであるが、3回の実験で、時間に差が出ないことが分かった。

### ③—2 退避行動の検証（RTL 自律飛行操作）

#### ○実験内容

屋外自然風がある状態で、離発着地点から距離300m先（地点A、距離は操作端末上で確認）の上空（相対高度50m）にホバリングしている機体を離発着地点まで自律飛行のまま強制帰還（RTLモード）させる。その自動着陸するまでのタイムを記録する。

※計測時注意事項：上空を飛行するため、概算でのタイムとなる。

#### ○機体の飛行設定内容

機体の制御：自律飛行モード水平移動（速度5m/s）

着陸時のみ自律飛行モード

①相対高度8m以上では速度1.5m/s

②相対高度8m未満では速度0.5m/s

#### ○評価内容

強制自動帰還 3回

水平方向移動時の移動時間

降下時間

トータルの移動時間



図—10 退避行動の検証（RTL 自律飛行操作）

### ○実験の目的

300m離れた上空の地点から、自律飛行モードで帰還するのに要した時間を検証し、同じようにマニュアルモード（着陸時のみ自律飛行モード）で斜め方向へ帰還するために要した時間を比較するため。

### ○結果

表—8 RTL 自律飛行操作で機体が離発着地点上空まで水平移動し着陸するまでの時間

運動		水平 ①	着陸 ②	合計 ①+②
距離	水平	300 m	0 m	
	鉛直	0 m	50 m	
1回目		62 sec	47.25 sec	110 sec
2回目		63 sec	48.62 sec	111 sec
3回目		62 sec	47.68 sec	110 sec
平均時間		62 sec	47.85 sec	110 sec

自律飛行モードで離発着地点から距離300m付近の上空（相対高度50m）でホバリングしている機体を離発着地点まで強制帰還させるのに要した時間は平均で約110秒であった。また、離発着地点上空へ水平移動するのに要した時間は平均で約62秒であった。

### ③ —3 斜め方向移動マニュアル操作と RTL 自律飛行操作との比較

ドローンの位置が水平距離300m、高度50mからの退避させるための時間については、下表で示す。

表—9 斜め方向移動マニュアル操作と RTL 自律飛行操作との移動時間の相関

	斜め方向移動 マニュアル操作 ①	自律飛行操作 ②	差 ①-②
時間	178 sec	110 sec	68 sec

## ○考察

斜め方向へ移動し、下降するマニュアルモードの退避時間は、水平方向へ移動する自律飛行モードと比較すると、約68秒多く時間を要した。

マニュアルモードは、斜め方向に移動するために距離が短縮できるが、操縦を手動で行うために、ドローン自体の速度が遅くなる。このことから、水平距離が長い場合には、退避方法は、自律飛行モードの方が優位である。

### 3-4 飛行場施設の退避方法の提案

ドローンの緊急退避については、マニュアルモードによる斜め下方への短絡を行うのではなく、自律飛行モードにより、安全範囲まで水平飛行を行うことを提案する。

また、制限表面下であっても進入表面の投影範囲では待機せずに、速やかに離脱する。なお、待機高度などの高さの相関については、図-11に示す。



図-11 待機高度などの高さの相関

ドローンの緊急退避方法は次の二通り。

- ドローンの安定的なホバリングができる高度10mを基準に、制限表面の高度が10m以上のなる地表面の投影部分の「ドローン待機エリア」(図-12)でホバリングを行い、マニュアルモードで退避させる方法。
- ホームポイントに自律飛行モードで退避させる方法(ホームポイント：ドローンが離陸、着陸を行う地点)。

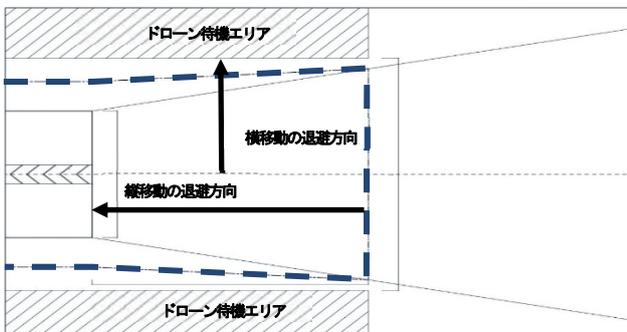


図-12 ドローン待機エリア (案)

なお、海上にあつては、波浪などの影響があることから、海面上10mの位置でホバリングを行い待機する。

また、水平移動の速度は、表-4で示すとおり、カタログスペックで5m/sに対し、実験値は3.70m/s(74%)であった。このことから、退避行動の水平移動の巡航速度は、各メーカーのカタログスペックの70%を採用して、退避時間などを検討することを提案する。

ドローンの退避時間について、緊急発進の信号が発信されてから、ドローンを制限区域から退避させるのに掛かる時間の規定は、各々の飛行場により異なる。退避時間を各々の飛行場で協議した上で、ドローンを飛行させる距離を決めてから運営する必要があると考える。

実験で求められた自律飛行モードでの水平移動の速度は、表-4で3.70m/sであるので、退避距離と時間の相関は表-10で示す。

表-10 緊急退避に係る時間と距離との関係

退避距離	100m	200m	500m	800m
時間	27 sec	54 sec	135 sec	216 sec

## 4 考察

実際に飛行場内の滑走路近くにて、ドローン運用を行うためには、様々な条件をクリアする必要がある。

その一つとして、ドローン運用中に航空機に緊急の離着陸が実施される場合、ドローンを滑走路より素早く退避させる必要がある。

自律飛行モードの飛行速度は、マニュアルモードの飛行速度の2.5倍である。このため、飛行場におけるドローンの運用は、ドローン飛行モードを手動にて滑走路外へ退避するよりも、自律飛行モードにてホームポイントへ帰還させる方法が良いと判断できた。

ホバリングによる退避方法で考えられる懸念点として、マニュアルモードの飛行による人為的なミスの可能性がある点。また、バッテリー残量が30%未満になった場合、ドローンはホバリングモードからRTLモードに切り替わるため、緊急発進中では航空機に近づくような危険な飛行状態に陥る可能性が考えられる。したがって、人為的なミスがなく、ホームポイントに最短で帰還し、安全に緊急退避ができる、自律飛行モードでホームポイントに退避させる方法が最良と考えられる。

実運用方法として、ドローンで確認したい飛行エリアを細かく分割し(例えば4分割など)、飛行エリアを作成。また、滑走路外(制限区域外)に飛行エリア毎のホームポイントを作成し、自律飛行モードでホームポイントにドローンを帰還出来るようにすれば、着陸まで迅速かつ安全に運用することが出来るかと考察する。

また、本紙は、ドローンの機種選定及び飛行場での退避方法について検証したものであり、ドローンを飛行させるためには、操縦者の技能証明や、その他に関連法令に則った手続きや飛行場の運用情報やNOTAM

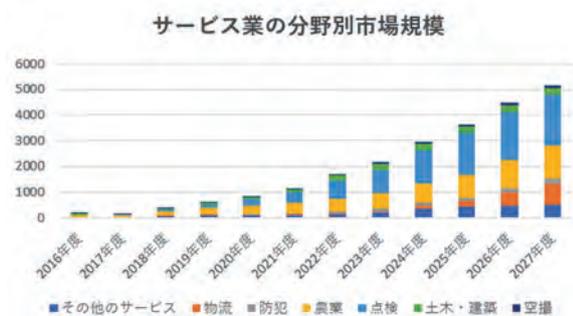
発行の確認、運航計画の調整・周知、現場の安全管理、運航中止の条件の設定、不具合や事故発生時の対応など、飛行場管理者等との調整が必要であることを申し添える。

## 5 ドローンの今後の活用について

ドローンは、建設工事における測量の他に、物流、農業、ドローンで巡回する警備業務、施設の点検及び環境監視などの利活用が期待されている。

市場調査結果（インプレス総合研究所<sup>7)</sup>）では、ドローンサービス市場は2027年度には5000億円を超える規模になると予想されており、今後様々な業界での実用化が促進されていくと考えられる。サービス市場の分野別市場規模は表—11で示す。

表—11 サービス市場の分野別市場規模  
(参考文献：7)



2022年12月に航空法等の一部の改正があり、都市部や第三者上空でも目視外飛行の許可（レベル4）を取れるようになった。

エアロセンスでは、無人地帯での目視外飛行（レベル3）まで対応できる機体としてエアロボウイング（自律飛行・垂直離着陸型固定翼高速飛行ドローン）を販売している。従来のマルチコプタ型ドローンと比較し、1回のフライトで長時間の飛行・撮影が可能なモデルとなっている。



図—13 エアロボウイング

2021年に熊本県人吉市の球磨川にて損害保険会社と連携しエアロボウイングで水害調査を実施した。800ヘクタールを約100分で飛行し、エアロボウイングの撮影データをAIで解析、広域に被災された家屋の浸水高を測定、損害額を算出した。このようにエアロボウイングでの水害調査を行うことで、例えば、極めて広範囲な被災が見込まれる荒川が氾濫した場合、従来型ドローンでは1か月以上の撮影期間を要するところ、数日程度で撮影を終えることができ、より迅速に保険金の支払いが可能となり被災地の早期復興に貢献することを期待されている。また、迅速に広域に災害地被害状況把握ができることから、南海トラフ地震や様々な災害に備えて公共団体や地方自治体への導入が検討されている。



図—14 球磨川広域点検2Dオルソ画像  
約800ヘクタールの面積を処理



図—15 エアロボウイングで実際に撮影した  
熊本県人吉市の被災地域

物流分野ではエアロボウイングを使用した長距離・短時間輸送の実証実験が行われている。直近では2022年12月上旬に鳥取県鳥取市でドローンによる医薬品と食料品の物資輸送実証実験を実施している。

内容はエアロボウイングを使用しA地点の千代田河川敷から、B地点のトリノス神戸まで約11kmの空路を、医薬品を積載し輸送。その後、B地点のトリノス神戸からC地点の江山学園までの約5.3kmは食料品を輸送した。A地点の千代田河川敷からB地点のトリノ

ス神戸まで約 11km の距離を約 13 分、B 地点のトリノス神戸から C 地点の江山学園まで約 5.3km の距離を約 8 分で輸送し、長距離かつ短時間で物資輸送においてはエアロボウイングのような VTOL 型のドローンが有効であることが実証された。

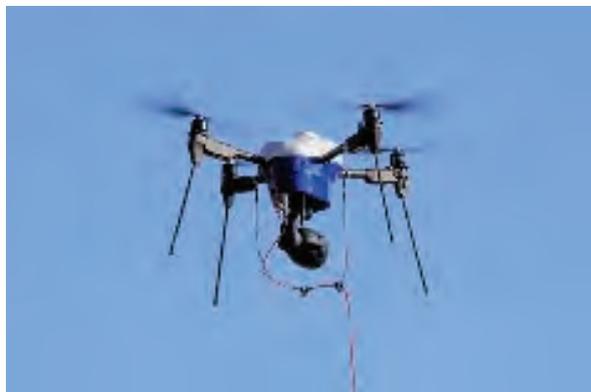
今後は有人地帯で目視外飛行が可能となるレベル 4 対応機種の開発を行い、今後も同様の実験に積極的に協力することでドローン物流の普及と実装に取り組む必要がある。上記のことから、これまでの物流ドローンの導入事例や実証実験の成果を活かし、エアロボウイングのような高性能ドローンの利活用の幅を広げることがドローン業界にとって必須である。



図—16 長距離輸送時の飛行ルート

## 6 最後に

アクティオで扱っているドローンの活用実態について、ドローンを使用した空中写真測量や工事の進捗具合を確認する手段として利用されている。その他に、有線ドローンを使用し、遠隔操作重機の俯瞰映像の提供目的で利用された実績がある。



図—17 遠隔操作重機の俯瞰映像を撮影している有線ドローン

エアロセンスは、企画、開発、設計まで、自社内でワンストップで行っている。機体の生産も日本国内で行っている、国産ドローンメーカーである。また、エアロセンスのドローンは全自動飛行機能を標準装備。飛行経路の生成から撮影設定、カメラコントロールまで手がかからず、安定した運用が可能。ドローンの運用に慣れた方から、初心者まで、安心して運用することが出来る。エアロセンスの測量用製品は、測量現場での実地経験をもとに開発されている。測量現場での作業工程に沿った、扱いやすいワークフローが特長。現場で効率的に運用することが出来る。

### ◎納品先実績（政府機関）

2022 年秋頃に写真測量機体（AS-MC03）を納品。  
それ以前に AS-MC03-T という機体の納品実績あり。

### 参考文献

- 1) 関係省庁申合せ：政府機関等における無人航空機の調達等に関する方針について、令和 2 年 9 月 14 日
- 2) 関係省庁申合せ：IT 調達に係る国等の物品等又は役務の調達手続きに関する申合せ、令和 3 年 9 月 1 日一部改正
- 3) 内閣官房情報セキュリティセンター：政府機関の情報セキュリティ対策のための統一基準（第 3 版）解説書
- 4) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：無人航空機分野 サイバーセキュリティガイドライン Ver.1.0 非対空整の領域における情報セキュリティの対応指針、2022 年 3 月
- 5) 独立行政法人 情報処理推進機構 産業サイバーセキュリティセンター：ドローンセキュリティハンドブック～安全なドローン利活用の勘どころ～、2021 年 6 月
- 6) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：無人航空機性能評価手順書 Ver.1.0（目視内及び目視外飛行編）、2020 年 5 月
- 7) インプレス総合研究所：ドローンビジネス調査報告書 2022、2022 年 3 月

# 埋設物や空洞の調査を飛躍的に効率化！ －物理探査による埋設物等調査の新技術－

Drastically improve the efficiency of investigations of buried objects and cavities  
－ New technology for surveying buried objects by geophysical survey－

本田一行，金指勝，内藤好裕，楠本浩司  
HONDA Kazuyuki<sup>1</sup> and KANAZASHI Masaru<sup>2</sup> and NAITO Yoshihiro<sup>2</sup> and KUSUMOTO Koji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省九州地方整備局別府港湾・空港整備事務所（〒874-0919 大分県別府市石垣東 10-3-15）

<sup>2</sup> 大和探査技術株式会社（〒135-0016 東京都江東区東陽 5-10-4）

キーワード：埋設物調査，空洞調査，効率化，不発弾探査

(Buried object survey, cavity survey, efficiency improvement, unexploded ordnance exploration)

## 1. はじめに

福岡空港内の用地整備に伴い，路面下及びエプロン下に埋設されている埋設物の位置を特定するための調査が発注された。埋設物の多くが磁性を帯びた鋼管等と予想されたことによって，発注時の測定仕様は磁気探査（陸上水平磁気探査）とされていた。

調査地は供用中の空港内であり，調査作業は夜間に限られるとともに，調査面積が 80,000 m<sup>2</sup>を超えていたため，現場作業日数を少なくさせる効率的な調査実施が求められていた。そこで，磁気探査に用いるセンサーの数を 5 本同時に使用する架台及びシステムを製作して，発注者に対して機器使用の承諾許可を得て調査を行った。また，非磁性の埋設物は磁気探査では検知不能なことから，補足調査として地中レーダ探査等を提案し実施した。これによって，より精密な埋設物調査を実施することが出来た。この技術は空港用地内だけではなく，岸壁や道路等の様々な敷地内での実施が可能であり，暗渠・上下水道等の老朽化に伴って発生する路面下空洞に対する調査にも適用できる。

ここでは，より効率的な埋設物調査や空洞調査を可能とする 1 手法について紹介する。

## 2. 埋設物調査での磁気探査

### 2.1 磁気傾度計原理

本探査で使用した磁気探査機は両コイル型磁気傾度計（以下センサーという）と呼ばれるものである。磁界の中でコイルを移動させると，コイルには磁界の変化に比例する起電力を生じる。これを誘導起電力という。これを増幅し記録することにより，磁気異常物の存在を知るこ

とができる。1 つのコイルだけを移動させると地球磁場を含む様々な磁力を感知してしまうため，全く同様に製作した 2 つ目のコイルを 1～2m 離して逆向きに接続している。（図-1 参照）

これにより，地磁気の変動や広い地質的な磁気分布，離れた構造物等からの影響，振動等により生じる起電力は打ち消し合い，地表面下の埋設管や不発弾等の大きさの限られた磁気異常物による磁気の変動に対しては 2 つのコイルの起電力に差を生じ感知することができる。

今回の探査で使用したセンサーのコイル間隔は 1.0m のものを使用した。

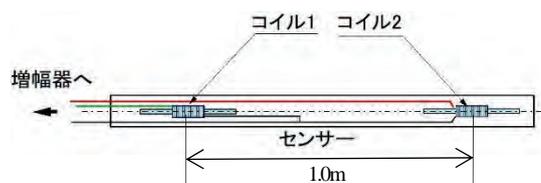


図-1 両コイル型磁気傾度計

### 2.2 陸上水平探査（磁気探査）

発注時の埋設物探査の仕様書の内容は「陸上水平探査（磁気探査）」であった。この探査方法は，1 本のセンサーを探査員が地表面上近くに吊り下げて，探査測線を一定の速度で移動させて磁気異常反応を測定するものであった。測線の間隔は 1.0m であり，1 測線の測定が完了する毎に測量テープを 1.0m 移動させて次の測線とする方式である。取得する記録は記録紙へのアナログ記録である。（図-2 参照）

解析は1測線ごとに磁気異常反応を記録紙上で読み取って、測線配置図上にプロットすることにより、連続する埋設物の位置及び埋設深度を明らかにするものであった。

この探査・解析手法は陸上部での不発弾探査に一般的に用いられるものである

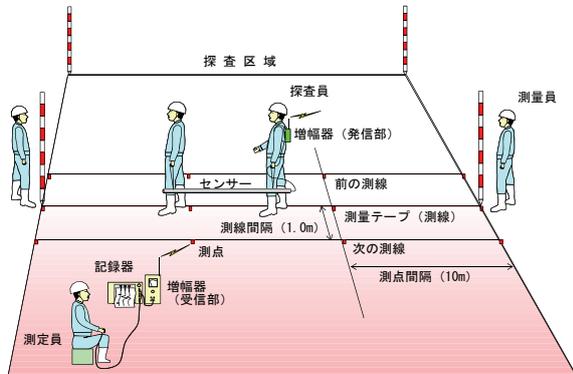


図-2 陸上水平探査 (磁気探査) 概念図

### 3. 開発した機器 (5本/組センサー)

調査は作業時間が限られる夜間作業であり、調査範囲が広いために、効率的な調査が求められていた。そこで、0.75m間隔に並べたセンサー5本を非磁性のタイヤ付きの架台に搭載し、2名の探査員によって人力にて探査測線を一定速度で移動させる探査手法 (システム) を開発した。(図-3,表-1 参照)

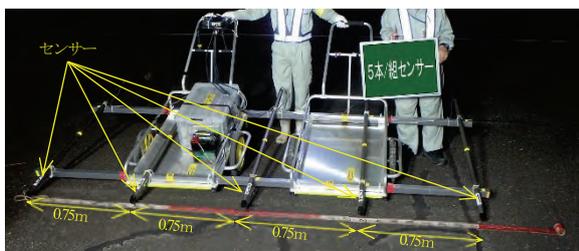


図-3 5本組センサー

表-1 磁気探査機仕様

種類	メーカー	型式	性能
磁気探査機	大和探査技術㈱	DTM-1T	両コイル型磁気傾度計
増幅器	大和探査技術㈱	MAG84063	平衡バランス型入力 不平衡ローインピーダンス出力 6成分、利得34db、2HzLPF
デジタル記録機	日置電機	LR-8431	入力10成分

これを用いる探査方式では、1測線の探査終了毎に測量テープを3m平行移動して次の探査測線とすることができた。(図-4,5,写真-1参照)

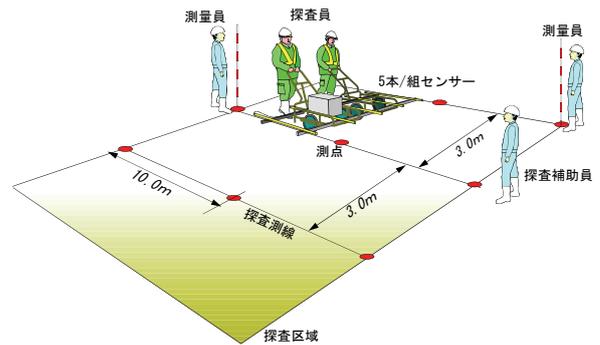


図-4 磁気探査(5本組)概念図



写真-1 5本組センサーによる測定状況

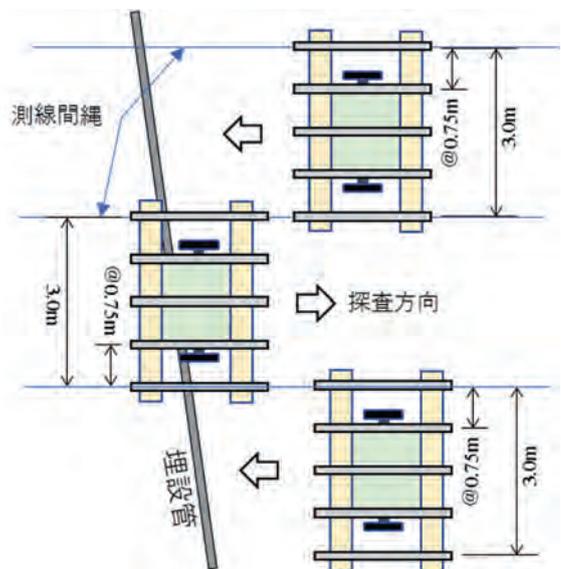


図-5 測定間隔概念図

また、測定記録はデジタルデータで取得し、解析はPC画面上で読み取りを行い、その位置はCAD画面上にプロットして埋設物からの磁気異常点の集約を行った。この探査・解析手法によって、当初計画日数より磁気探査に関わる日数を約1/2以下までに縮減することができた。

#### 4. 実施効果

磁性を帯びた連続する埋設物からの磁気異常反応が5本のセンサーに捉えられて、記録上に並ぶ形で出現している。(図-6,7参照)

従来の1本センサーによる探査では、出現する磁気測定記録の連続性の確認は読み取った波形位置をプロットした後で判断することになるが、5本組センサーでは埋設物の連続性を確認することが非常に容易であることが判る。

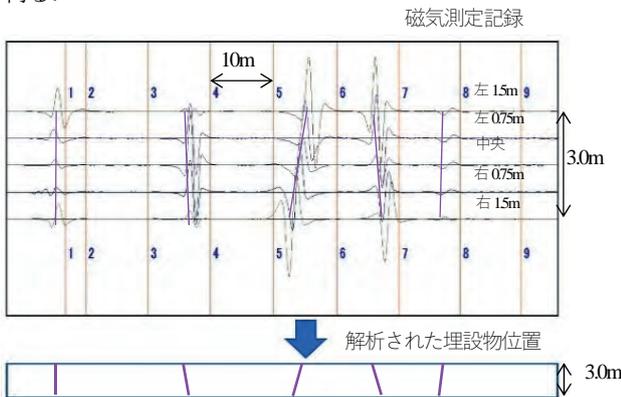


図-6 解析結果 1

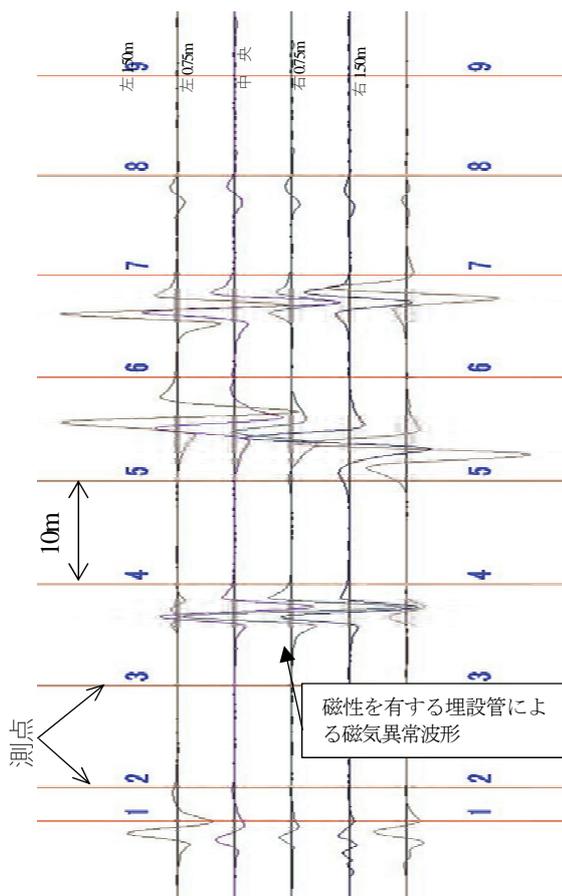


図-7 磁気測定記録例 1 (拡大)

空港用地内においては、埋設物に関する既存資料が存在する。しかし、既存資料に記載の無い埋設物や資料と

異なる場所に埋設されたものも存在するのが実情である。したがって、埋設物調査では、着手前に既存資料を基に測線配置図を計画して、既存資料記載の埋設物位置及び存在有無の確認と、記載の無い埋設物を探すものとなる。図-8には磁気探査結果と既存資料とを比較した記録例を示す。

既存資料では測線No006においては、埋設された「灯火線」からの磁気反応が2カ所で検知されるはずであったが、測点 4・5の間でも連続する磁気反応が検知された。この反応は既存資料には記載の無い埋設物である。このように多連(5本センサー)で行う測定手法が、連続物を容易に判読する良好なツールであることが明らかになった一例である。

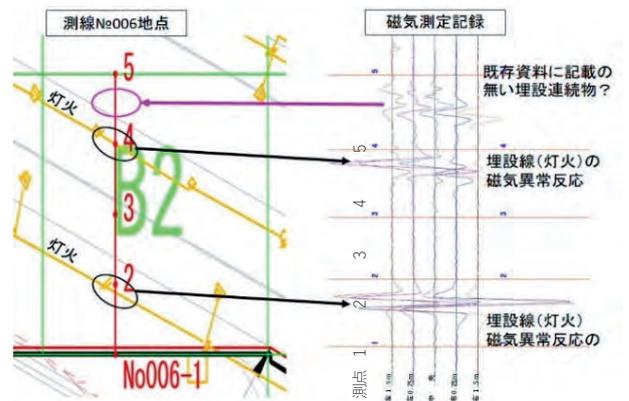


図-8 磁気測定記録例 2

取得した磁気測定記録は波形の読み取りを行って、読み取り位置と磁気量及び埋没深度を計算した後で平面図に磁気量ランク別のマークをして記載する(図-9参照)。

図-10に磁気反応のあった地点へ磁気量ランク別のマークを記載した磁気異常点位置図を示す。

図-10には磁気量ランク別の丸印が連続して連なる様子が認められる。この連続して認められる磁気異常反応が磁性を帯びた管(線)の埋設箇所に対応している。

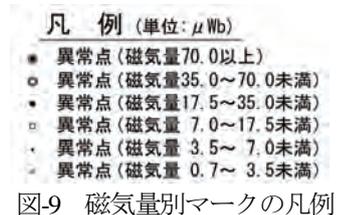


図-9 磁気量別マークの凡例

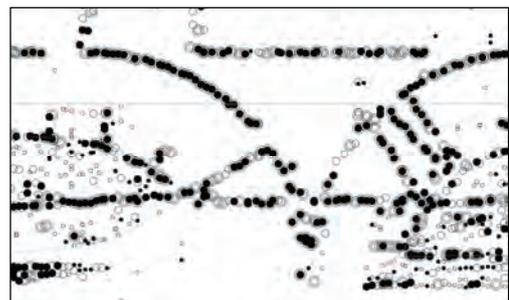


図-10 磁気異常点位置図 (一部抜粋)

## 5. 他手法による探査の必要性・補完

電力ケーブルはケーブル芯が銅性のため非磁性であり、その被覆も磁性を帯びていないが、通電されているケーブルにはその周囲に磁界が発生していたことによって、磁気探査でも検知することができた。また、緑地帯などの裸地に埋設されていたケーブルは保護管（鋼管）に納められていたことによって、磁気反応を取得することが可能であった。一方で、埋設物の内、塩化ビニール製の上下水道管や陶管、あるいは通電されていない電力線などの非磁性のものは磁気探査では検知不能であった。

また、磁気探査で取得した磁気異常波形から算出できる埋設深度は埋設管中心までの距離であることと、埋設管が近接又は上下に存在する場合は埋設深度計算の精度が低くなるため、今後の工事に必要な埋設深度（土被り厚）を正しく求めることが困難であった。（図-11 参照）

そこで、これらの問題を解決する目的として、先行して実施した磁気探査成果を補完するための補足調査として、地中レーダ探査とパイプロケータによる探査を提案して実施した。

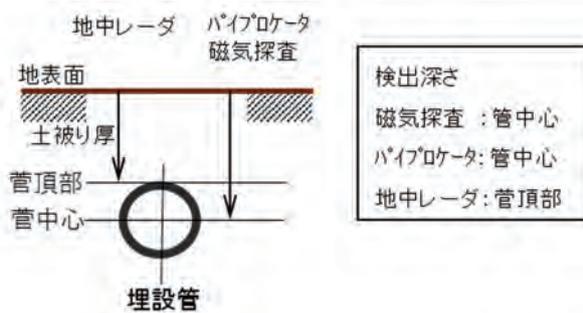


図-11 計測される埋設深度

### 5.1 地中レーダ

使用した地中レーダ探査機は Utility Scan DF(GSSI 社製)である。（表-2,写真-2 参照）

表-2 地中レーダ仕様

種類	メーカー	型式	性能
地中レーダ探査機	GSSI社	Utility Scan DF	デジタル2周波スマートアンテナ 周波数300MHz・800MHz



写真-2 地中レーダ探査状況

地中レーダの測定原理は、地下に向けて発信した電磁波が物性の異なる面で反射して戻ってきた反射波をレーダアンテナで取得して、伝播に要した時間から異物までの距離を求めるものである。（図-12 参照）

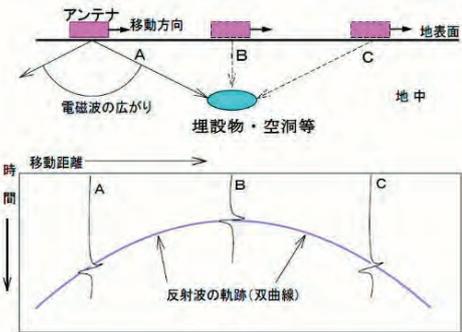


図-12 地中レーダ探査の反射記録概念図

地中に存在する埋設管からの反射記録は図-12 に示すように、電磁波の指向性によって凸状に現れる。図-13 に示す地中レーダの記録（反射断面図）には、埋設物による凸状の反射記録が近接して横並びに浅所（地表面下 0.20m, 0.12m）及びその下方（地表面下 0.55m, 0.55m）に認められる。埋設物が近接していることによって、磁気探査記録の解析では1本の埋設物と判断したが、地中レーダ探査の記録には2本が近接して並び、その上方にはこの下方に埋設物が存在することを明示する鋼線からの反射記録が現れていた。（図-13 参照）

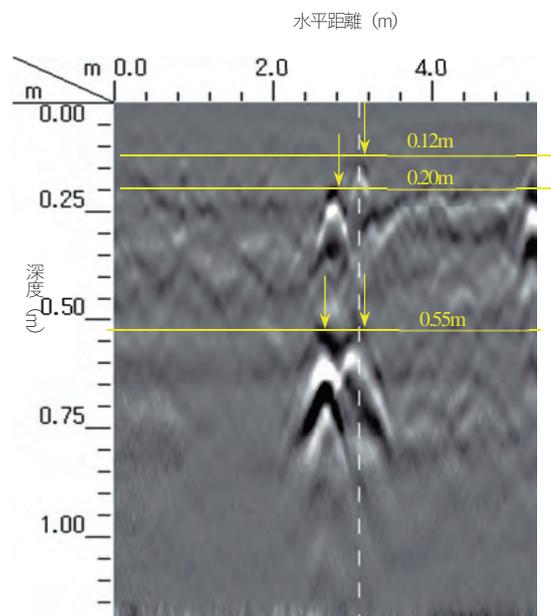


図-13 地中レーダ記録例

このように、磁気探査のみの調査では不確かである情報を地中レーダ探査によって補完して成果をより正しくすることが出来た。

## 5.2 パイプロケータ

さらに補足調査として提案・実施に使用したパイプロケータは MLP-H100（高千穂産業製）である。（表-3 参照）

表-3 パイプロケータ仕様

種類	メーカー	型式	性能
パイプロケータ	高千穂産業	MPL-H100	【送受信周波数】 33kHz, 9.5kHz, 80kHz, 850Hz, 512Hz 商用周波 50/60Hz（受信機） 【深度測定範囲】0-5m/0-30m ※選択式

パイプロケータによる探査方法は、埋設管の一端に発振用のコイルを装着するか、埋設管路上部の地表面上に送信機を設置して、地上の探査員が手に持った受信機のゲージを見ながら埋設管路を特定するものである。その測定原理は、コイル又は送信機によって埋設管が励磁されることで埋設管路に沿って磁界が発生し、その磁界を地表の受信機で計測した際に最も強く計測できる場所が埋設管の直上となるものである。（図-14 参照）



図-14 パイプロケータによる探査

パイプロケータを使用して埋設管路を探る場合には、その埋設管路の一部または一端が既知である必要がある。管路を地表面上でたどることにより、埋設管の連続性を確認することが可能となる。よって、管路の一部が途切れていた場合の確認を行うことが出来る調査法でもある。

本件の調査においては管路の連続性及び埋設深度（地表面～埋設管中心）を確認する補足調査として実施して、成果品精度の向上を図ることができた。

## 6. 空洞調査効率化への寄与

老朽化した下水管や暗渠及び水道管に損傷が発生すると、地下の土砂が吸出しや流出することによって、それらの管路に沿って空隙・空洞が発生する。このような空隙・空洞は徐々にその広がりを増して地表面付近まで発達すると路面陥没などの事故が発生する。よって、陥没事故を未然に防ぐためには定期的な路面下空洞調査が必要になる。

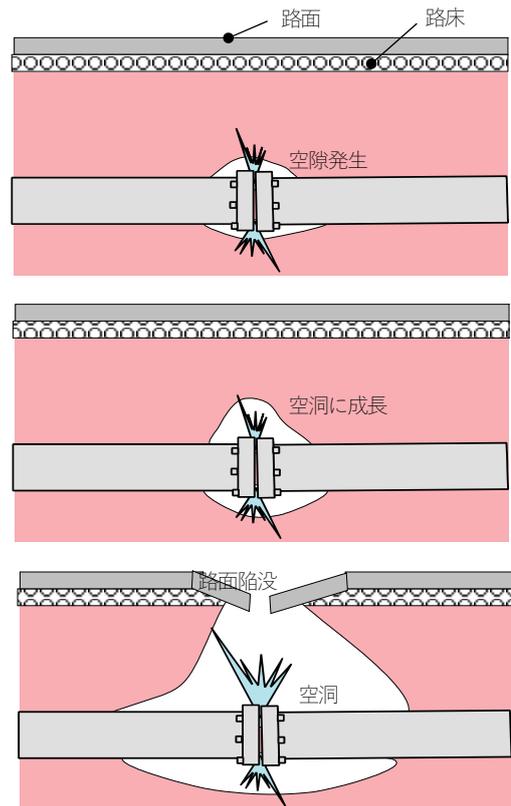


図-15 送水管劣化による空洞

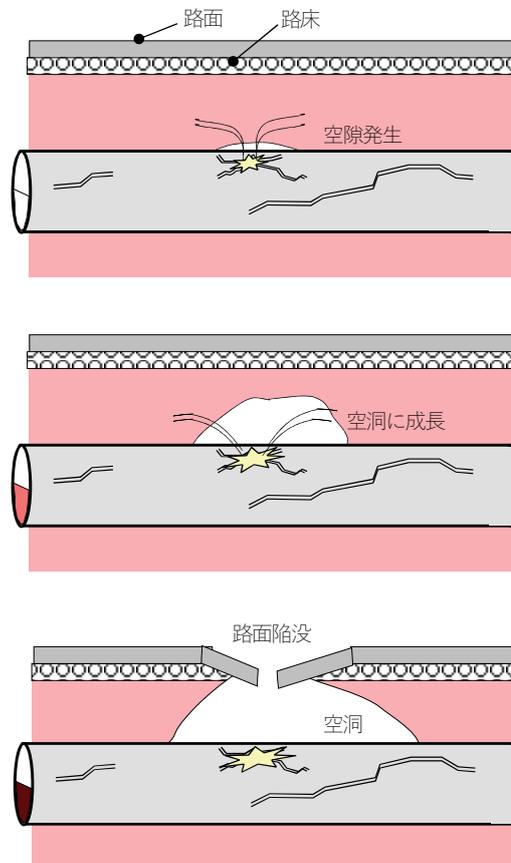


図-16 下水管劣化による空洞

路面下には様々なライフライン（電力、通信、上下水道、ガス等）が埋設されている。老朽化して役目を終えた上下水道管は撤去した後新しい管と交換されるが、複数のライフラインが交換すべき管に近接あるあるいは交差して埋設されていると、古い管は撤去されずに追加的に新たな管の埋設が行われることがある。埋設管路の管理台帳には新しい管の埋設情報が載せられるものの、古い管の情報は不明になることも有る

図-15、16 に示すように、老朽化した上下水道管に損傷が発生すると、地中の土砂が移動する等によって、空隙が生じた後にそれが成長して空洞となり、路床が路面を支えきれなくなった時点で陥没が発生する。この損傷は撤去されなかった古い管でも起こり得る現象である。よって、路面下空洞調査には正確な埋設管類の埋設情報資料が必要であり、この資料を活用することによって埋設管に起因する空洞調査を非常に効率的に実施することができる。

## 7. まとめ

陸上で行われる水平磁気探査は、先の大戦時に投下されて不発となった埋没する不発弾探査で発展してきた探査法である。測定方法は、地表面上 20 cm 程度の高さで水平方向に 1 本のセンサー（磁気探査計）を測線上で人力移動させて測定するものである。今回の空港用地内での埋設物調査においては、調査区域が広く、また作業が夜間に限られていたことから作業日数を減らすための工夫が求められていた。そこで、5 本のセンサーを並べて移動させるシステムを開発して、発注者の承諾を得て使用することができた。

このシステムを用いたことによって、連続する埋設物を通常の 1 本でのセンサーによる探査方法に比べて非常に容易かつ精度良く埋設物の埋設状況を判読することができた。特に埋設物の連続性の判別については探査測定時に瞬時に判断が可能であることから、帰社後の解析結果を待たずに補足測定を行うことができる等、埋設状況調査手法としては飛躍的に効率化された手法といえる。

作業効率は現地での埋設物の埋設状況にもよるが、今回の現場では通常の 1 本センサーによる探査に比べて、約 1/2 以下の作業日数で効率化できたものと考えられる。

また、磁性を帯びない塩ビ管などの探査には地中レーダ探査機を提案・使用することで調査対象物の見落としを防いだ。さらに、地中レーダ探査では埋設物の土被り厚を精度よく調査することが可能なことにより、磁気探査の仕様で発注された埋設物探査の成果品精度を向上することができた。

この技術は、空港用地の埋設物調査だけではなく、埋没する不発弾探査や様々な施設内で適用することができるものである。応用方法の一例としては、路面下に埋設

された上下水道管、暗渠などに沿って発生する可能性のある空洞調査を行う前に、多連の磁気探査機を用いてその管路を明確にすることで、地中レーダ探査機による空洞調査の測線配置を効率よく決めることができる。

管路の情報は既存資料にも整理がされているものの、その資料と埋設位置が合致しないケースも多く見受けられることや、使用を終了したこれらの管が残置されたままになっていることも有ることから、既存資料を参考にしながらも、実測にて管路の状態を確認することが良策であると考えられる。

今後に老朽化し続けるインフラを長寿命化させて有効活用するためには、このような技術開発はますます必要であり、様々な現場での活用が望まれる。

## 8. 今後の開発課題

この調査で使用した磁気傾度計（センサー）はある一定の速度で移動させることが測定条件であるが、現場状況によっては一定速度での移動が適わない場合もある。そこで、センサーの移動速度に依存せずに計測が可能な磁気探査機を用いる多連の磁気探査システムの開発を弊社内において進めているところである。また、このシステムには高精度で位置情報を常時取得できる GNSS を搭載させて、後処理にて一定速度の移動にて測定した磁気測定記録に変換することや、デジタルフィルタ処理によって目的とする探査対象物からの磁気異常波形を明確化させる等、更なる高品質の成果取得を目指していきたい。そして、これらのシステムを有効的に活用して、埋設物調査、空洞調査、不発弾探査等の効率化に寄与していくことが今後の課題である。

以上

## 謝辞

提案した新しい取り組みとなる多成分の磁気探査方法での実施及び補足調査方法についてご理解、ご承認を頂きました業務発注者である国土交通省九州地方整備局博多港湾・空港整備事務所の関係者の皆様には大変お世話になりました。ここに深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 平成 28 年度福岡空港国際線エプロン東側地区現況調査、国土交通省九州地方整備局博多港湾・空港整備事務所、報告書、平成 29 年 3 月

# 大規模事業におけるクラウドを活用した工事業者間の情報共有について

ABOUT INFORMATION SHARING BETWEEN CONTRACTORS USING CLOUD SERVICES IN LARGE-SCALE PROJECTS

森 暁雄\*, 小原 良子\*, 吉岡 正泰\*, 住本 英樹\*, 大森 陽一\*

MORI Akio, OBARA Ryouko, YOSHIOKA Masayasu, SUMIMOTO Hideki and OHMORI Youichi

\* パシフィックコンサルタンツ株式会社（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）

キーワード：情報共有システム、クラウド、コンストラクション・マネジメント(CM), ISMAP, デジタル・トランスフォーメーション(DX)  
( Information Sharing System, Cloud, Construction Management (CM), ISMAP, Digital Transformation (DX) )

## 1. はじめに

建設工事は、事業期間が長期にわたり、地中や自然環境の状況、近隣対応など、施工上のリスクが発現される可能性がある。また、自衛隊等の施設整備においては、工事工程を自衛隊等の部隊運用に反映させる必要がある。このため、工事実施にあたっては、関係者間での情報共有や事前協議等、円滑な工事施工を図るために有効な方策をとる必要がある。

また、建設工事の中でも海上工事は、他の土木工事とは異なり、起重機船や杭打船、浚渫船等の作業船の使用や、海中での潜水作業を伴う工事が多いこと、一般の陸上工事と比較して気象海象条件の影響を強く受けることから、施工計画、施工管理及び安全管理などについて、より関係者が調整して工事を進めていく必要がある。

これより、本稿では、陸上工事だけでなく、海上工事も念頭に、コンストラクション・マネジメント（以下、CMと略す）方式の観点から、地域基盤の整備、管理、適切な事業の執行にあたって、発注者の態勢を補完する方策を述べるものとする。

## 2. 事業関係者間の情報共有について

### 2.1 CM（コンストラクション・マネジメント）

我が国では、地域基盤の整備・管理、適切な公共事業の執行にあたって発注者の体制を補完する一方策として、CM方式が導入されている。

CM方式は、発注者が行ってきた様々なマネジメント業務（発注事務、契約管理、施工管理等）の一部を、発注者とは別の主体に行わせるマネジメント手法であり、工事目的物の品質確保あるいは複数の工事間の円滑な調整を図るだけでなく、コスト縮減や工期短縮等が期待されている。

特に、複数の工事が存在する大規模事業では、CM業務を行うコンストラクション・マネジャー（以下、CMRと略す）が、工事業者から工事の施工時期や施工区域等の施工情報を収集し、各施工段階のコントロールポイントやクリティカルパスの把握等の工事間調整を行い、それらの調整結果を踏まえ、事業全体の課題等に取りまとめ、関係者間で情報共有を図っている。

### 2.2 情報共有のあり方

工事を実施するにあたっては、施工計画を策定する必要がある。しかしながら、施工計画は自然条件や工事周辺環境等により影響を受けるため、不確実性を帯びており、不測の事態におけるきめ細かいマネジメントには適さない。よって、工事現場においては、毎日、CMRを中心に判断し、調整し、照合していくことが必要である。

工事間の情報共有にあつては、工事の結節やクリティカルポイント等において幾度も情報の交換を重ねながらプロジェクトを進捗させていくため、多大な量の情報を作り出すための時間と労力がかかるという課題がある。

現在実施されているCM方式の事業においても、情報の交換が紙媒体の図面や各工事業者が独自で作成する実施工程表などを中心に、調整のたびに手作業による図面や事業全体の工程表の編集が繰り返さされている。このような情報の編集は、注意をしていたとしても、繰り返していくうちにもとの情報から多かれ少なかれ歪められ、本来の情報とは違ったものとなっていく。

古田<sup>1)</sup>は、組織コミュニケーションにおいて情報交換するたびに、情報が72%以下に減衰していくことを示している。この法則に倣い、田原<sup>2)</sup>は、建設工事で計画から設計、施工段階までの2回の情報交換を行う場合、52%程度の情報減衰が生じると述べている。CM方式の建設工事においては、工事監督官からCMR、施工管理を通じて工事業者まで情報交換を行うため、情報の減衰を

模式的に示すと、図-1 のようになり、工事業者に共有される情報は当初の37%程度の情報量となる。また、田原ら<sup>2)</sup>が述べるように、情報は各工事業者に一様に伝わるとは限らないため、図-1 に示す工事業者 A と B で共有できない情報が発生する可能性もある。このように、手作業による情報交換は、情報の脱落や情報の共有不足による施工時の不整合を招き、作業の手戻りを発生させるおそれがあり、効果的とは言えない。

これらのことから、情報共有を容易にするため、関係者が一堂に会して情報交換ができるデジタル化された「情報共有プラットフォーム」を提案する。

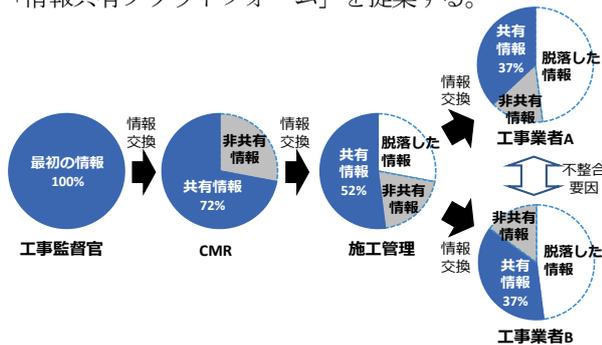


図-1 情報の減衰イメージ (田原ら<sup>2)</sup>を参考に作成)

## 2.2 クラウドを用いた情報共有プラットフォーム

国土交通省では、情報通信技術を活用し、工事施工中において受発注者間で書類等の情報を交換・共有することを支援する情報共有システムを導入しており、情報共有システムに備えるべき機能要件を「工事施工中における受発注者間の情報共有システム機能要件(Rev.5.4)」(国土交通省<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>としてとりまとめている。

また、防衛省においても同様の情報共有システムを活用して、受発注者間での業務の効率化を図っている(防衛省<sup>5)</sup>)。

しかし、国土交通省で導入されている情報共有システムは、あくまで受発注者間の1対1の情報共有を目的とした機能構成となっており(図-2)、CMRと各工事業者の間で横断的に情報を共有する仕組みとはなっていない。

そのため、本稿では、CM方式の大規模事業で必要となるCMRと各工事業者間の情報共有および工事監督官等への情報提供を円滑に促すため、各関係者が接続可能なクラウドを活用した仕組みを「工事業者間情報共有プラットフォーム(以下、工事情報共有PFと略す)」と定義し、次項で提案する。

## 2.3 工事情報共有PFの提案

工事の実施にあたっては、工事着手前に発注者、設計者、CMR、施工管理、工事業者が一堂に会して、フロントローディングを行い、施工条件の整理や各関係者の責任の所在を明確するとともに、安全な工事環境を創出す



図-2 工事施工中における受発注者間の情報共有システム機能要件(Rev. 5.4)(国土交通省<sup>4)</sup>)

ることが必要である。

このため、工事情報共有PFにおいては、工期、設計、施工における課題の解決を図るために、各関係者が接続可能なクラウドを用いた情報共有空間を創出する。

工事施工における情報共有空間としては、小林ら<sup>6)</sup>、<sup>7)</sup>が、図-3に示す二層の協議システムを適宜使い分けて協議を進めることを提案している。

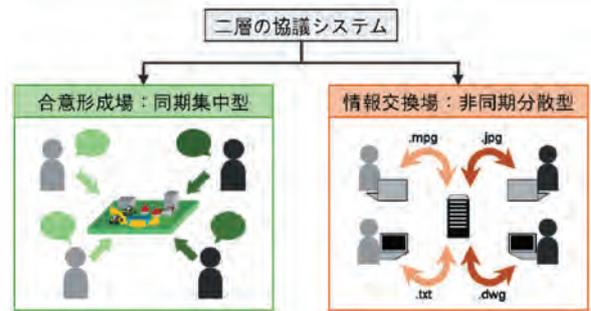


図-3 二層の協議システムの概念(小林ら<sup>6)</sup>、<sup>7)</sup>)

小林ら<sup>6)</sup>、<sup>7)</sup>は、関係者間での二層の協議システムとして、全関係者が一堂に会してモデル空間を利用して協議する「合意形成場(同期集中型)」と、情報共有システムを利用したファイル共有や掲示板等により時間や場所にとらわれずに協議し、その内容の履歴を残す「情報交換場(非同期分散型)」を定義している。

本稿では、小林ら<sup>6)</sup>、<sup>7)</sup>の定義を参考としつつ、CMRが円滑な事業管理を行う観点から、工事関係者の情報共有や協議を円滑に図るために、一堂に会するモデル空間の

みならず、事業実施に当たって関係者全体に必要な情報の共有を図るための空間を「全体共有場」とし、関係者が保有している情報や考えを周知し、個々の関係者間で協議する空間を「個別共有場」と整理した。

工事情報共有 PF では、これらの二層の共有の場で搭載する情報、機能を表-1のように提案する。ここでは、

CIMによる工事対象や周辺環境の3次元データや各工事業者の施工計画を CMR が取りまとめて作成した事業全体のネットワーク工程表、その他 CMR と工事業者間での協議、調整に必要なあらゆる情報を共有することを想定している。なお、国土交通省の「情報共有システム」についても表-1に合わせて示す。

表-1 工事情報共有 PF に搭載する情報と情報共有システムの区分

	工事業者間情報共有プラットフォーム（工事情報共有 PF）	情報共有システム
情報の内容	工事業者が所有する工事情報 工事業者間で共有が必要なその他関連情報	土木工事共通仕様書で定義する「書面」
運用の目的	CMR と各工事業者間での事業全体に関わる横断的な情報共有を図る	受発注者間の1対1の情報共有を図る
システム管理者	CM を想定	工事業者が管理
基準など	任意	工事施工中における受発注者間の情報共有システム機能要件／土木工事等の情報共有システム活用ガイドライン
参考	工事施工中における受発注者間の情報共有システム機能要件 工事情報提供機能（将来の機能）	
搭載する 情報・機能	<b>全体共有場</b> <b>事業全般に関する情報</b> ○掲示板で共有する情報 ・施工不可の時期等のイベント情報 ・各工事業者の月間・週間予定等の施工情報 ・関係者全体に周知したい情報 等 ○工程会議資料（議題・検討状況とその結果） ○各工事業者の実施工程を総括した事業全体のネットワーク工程表 ○事業全体進捗情報 ・ヒートマップなどの進捗管理図 ・工事状況写真 等 ○局所天気予報（基地周辺・海上） ○ユーティリティ図面 ○騒音、振動及び濁度等の環境監視情報 ○ドローンの飛行計画 <b>工程会議</b> ○工事関係者全体参加の遠隔会議 ・各工事業者の監理技術者の本店・支店等からの参加も可能とする ・3D モデルによる工事現場の視覚化 <b>安全管理</b> ○労働災害に関する教育・労働事例やヒヤリハットなどの事象の管理・共有 ○現場作業における危険因子や不安全行動の周知 <b>セキュリティ</b> ○警備カメラ映像（工食用門等） ○入退場者の把握 等 <b>工事車両等の位置情報把握</b> ○工事車両、作業船舶の運搬計画 ○工事車両、作業船舶等の位置情報 ○工事車両、作業船舶等の作業エリアへの入退把握 等	○工事帳票 （土木工事共通仕様書で定義する「書面」） ○受発注者の関係者のスケジュール調整
	<b>個別共有場</b> <b>各工事業者の情報</b> ○各工事業者のフォルダ・ファイル管理 ○各工事業者の施工情報（実施工程表・施工計画書等） ○各工事業者の懸案事項 ○調整が必要となる個別の関係者間で限定された調整空間の創出 等 ※全体共有場で共有された情報も適宜参照する	

## 2.4 工事情報共有 PF の情報セキュリティ

工事情報共有 PF で扱う情報は、工事業者等の民間が所有している情報であるが、特許等の機密情報も含まれることから、受発注者間の情報共有システムと同様のセキュリティ対策を実施することを提案する。

＜情報セキュリティの対策（例）＞

- ・システムと利用者間の通信の暗号化
- ・システムに蓄積する利用者のパスワード等の機微な情報の暗号化
- ・利用者ごとの機能や情報へのアクセス制限による、情報の不当な消去、改ざん対策
- ・ファイアウォール、ウェブアプリケーションファイアウォール、侵入検知/防御システム等による不正アクセス対策 等

また、工事情報共有 PF の運用にあたっては、工事情報共有 PF を稼働させるクラウドの情報セキュリティについても留意する必要がある。現在、国内外には多数のクラウドが存在することから、内閣サイバーセキュリティセンター・デジタル庁・総務省・経済産業省が運営する「政府情報システムのためのセキュリティ評価制度（ISMAP）」で登録されたクラウド上で工事情報共有 PF を運用することで、クラウドの情報セキュリティを確保することを提案する。

なお、ISMAP は、政府が求めるセキュリティ要求を満たしているクラウドを予め評価・登録する制度であり、情報セキュリティに関する JIS 規格である JIS Q (ISO/IEC) 27001,27002 と、クラウドの情報セキュリティに関する JIS 規格である JIS Q (ISO/IEC) 27017 を基礎とし、その他の基準等から必要な内容を追加して管理基準を構成している（図-4）。



図-4 ISMAP 管理基準の構成 (内閣官房・総務省・経済産業省<sup>8)</sup>)

## 2.5 工事情報共有 PF の機能の提案

表-1に示すように、工事情報共有 PF では、情報共有の場に応じた様々な情報の共有を行う。これらの情報共有を行うための基礎となる機能として、遠隔会議や掲示板、ファイル管理、3D モデル空間を提供する機能などが必要となる。

また、これらの機能に加え、昨今のデジタル・トランスフォーメーション（以下、DX と略す）技術を活用する

ことで、CM 業務においてさらなる円滑な工事関係者間の情報共有と生産性向上が期待される。

これより、DX 技術を活用した工事情報共有 PF の機能の一例を以下に提案する。

### ○ネットワーク工程管理

工事工程の調整にあつては、前述のとおり現在は CMR が工事ごとに現場代理人と個別に調整し、手作業で課題の整理と事業の全体工程の作成や遅延が生じた際の調整などを行っており、非効率で情報の偏りが生じるおそれがある。

工事情報共有 PF では、まず CMR が各工事業者の工事工程を集約し、工事間の関係性も含めたネットワーク工程表を作成、共有する（図-5）。これにより、各工事を横断した事業全体のクリティカルパスが把握・共有することが可能となる。

また、その後の工事進捗については、各工事業者から工事の進行に応じて進捗率や見直し工程等の報告を受け、ネットワーク工程表に反映することで、事業全体の工期やコントロールポイントにおける遅延が容易に把握できるようになる。これらの情報を基に、CMR は各工事業者に対して効率的に工程の調整を行うことができると期待される。

さらには、ネットワーク工程表で調整した内容は、工事情報共有 PF を介して、工事監督官等へ随時共有されるため、全体の進捗遅れの把握や対策についての協議、合意形成等を迅速に行うことが可能となると期待される。

ネットワーク工程表で集約した進捗状況は、さらに工事ステップ図と連動させることで、各施設や工区の進捗状況を平面図上で示すことも考えられる。

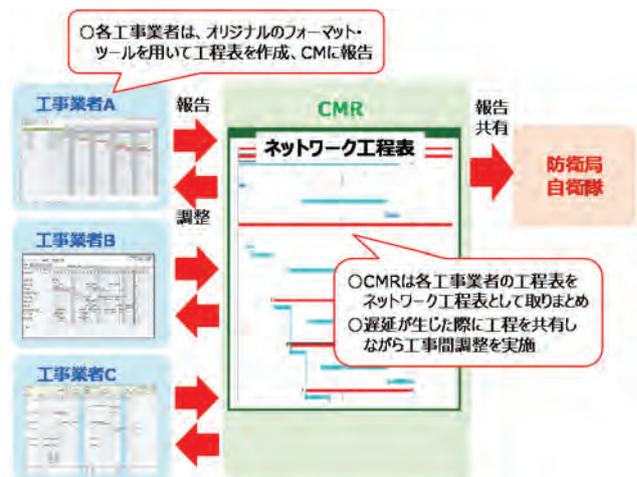


図-5 工事情報共有 PF での工事工程調整

### ○3D モデルによる進捗の見える化

工事進捗の把握において、ネットワーク工程表の進捗率により、数字としての確認は可能であるが、3D モデル空間を活用することで、より視覚的に進捗状況を把握することができる。

3Dモデル空間での進捗状況の把握には、図-6に示すように、まずは3D設計モデルを用意しておく。次に、ドローンにより工事現場の点群を定期的に取り得し、3D点群モデルを作成し、作成した3D点群モデルと3D設計モデルを重ね合わせ、工事情報共有PF上の3Dモデル空間で共有することで、設計に対してどこまで工事が進捗しているかを見える化することができる。

特に、設計時に施工段階ごとに3Dモデルが用意されている場合には、各施工段階において点群モデルと設計モデルとの離れをヒートマップ等で表現することで、工事の遅れなどがより把握しやすくなると考えられる。

なお、ドローンでの点群取得は、基地運用に支障がないよう緊急時に撮影を即時中止できる方策を立てておく必要がある。また、使用する機材については、撮影した情報の流出等を防ぐため、サプライチェーン・リスクに留意した選定が必要である。

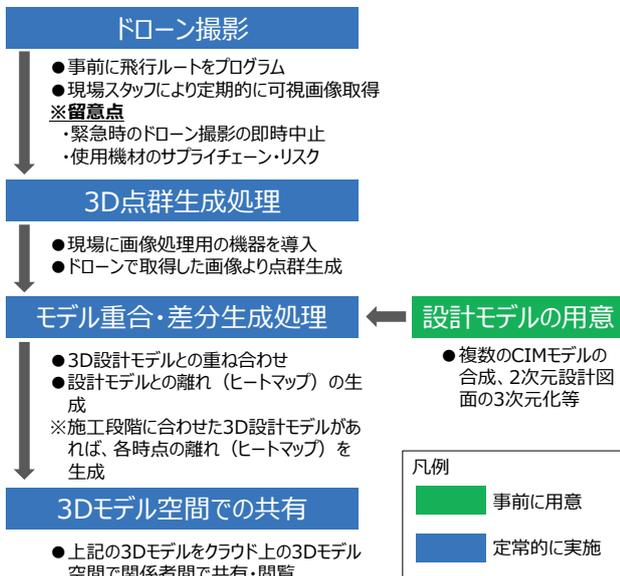


図-6 3Dモデルによる進捗の見える化の流れ

### ○工事状況写真管理による進捗・安全管理

工事施工中には、多くの工事状況写真を撮影し、進捗の確認に利用されている。これらの工事状況写真をスマートフォンで撮影すると、容易にGPSの位置情報や撮影方向を付与することができ、情報共有に有効活用が可能である。

位置情報や撮影方向の情報を付与した工事状況写真は、工事情報共有PFで登録、管理することで、平面図上や3Dモデル空間に紐づけ、工程会議等での進捗の確認に活用できると考えられる(図-7)。

また、事故発生時には、工事監督官をはじめとした関係者に迅速に状況を共有することが求められるが、工事情報共有PFを通して、事故発生箇所や事故の状況を迅速に共有することも可能である。さらに、事故状況を写真とともに記録、蓄積することで、安全管理教育の教材として事故の抑制・削減に活用することも考えられる。

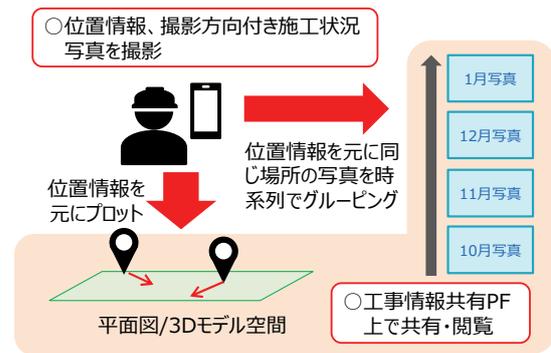


図-7 施工状況写真の共有イメージ

### ○海上工事における土砂流出監視

海上工事においては、埋立土等の周辺海域への流出を防ぐため、汚濁防止膜の設置等により対策を実施しているが、一定程度の土砂流出は懸念される。

土砂流出による周辺海域の環境への影響は、濁度計により点の情報として監視することも考えられるが、面的に影響が広がることから、ドローンでの海面の撮影により監視する方法が考えられる。

ドローンによる監視では、定期的に周辺海域の画像をドローンで撮影し、工事情報共有PFにより関係者間で共有することで、土砂流出の状況把握と対策に関する協議に活用することができる。また、ドローンで取得した画像をAIで分析し、土砂流出範囲を特定することも考えられる(図-8)。

また、工事情報共有PFを通して、監視状況を周辺自治体や住民に提供し、適切な土砂流出の監視・管理を行っていることを周知することにも活用できると考えられる。

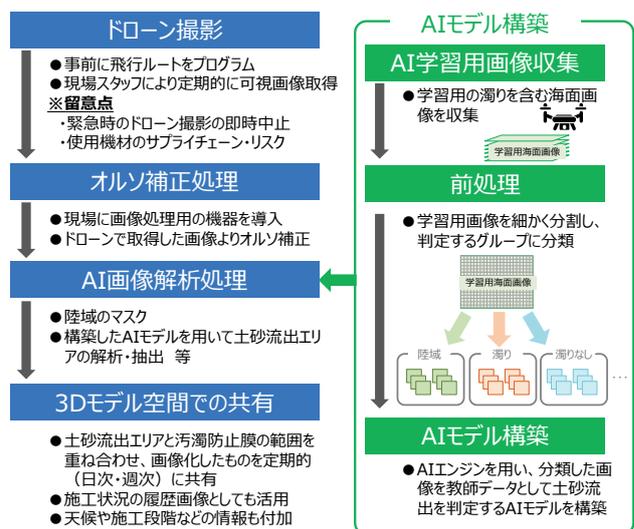


図-8 AI分析による土砂流出範囲の特定の流れ

### ○埋立土・資材運搬管理

海上工事においては、埋立土や消波ブロックの運搬管理が必要である。

これらの運搬において、工事車両での運搬の場合は、

一般交通への影響の監視が必要である。これらの対策として、GPS 端末等により工事車両の位置を取得し、工事情報共有 PF において取得された位置情報を集約・共有することで、工事車両の集中を抑制するための待機指示や、計画外のルートでの走行があった場合は正指示などの適切な車両運搬管理に活用できると期待される（図-9）。

また、工事車両の入場する作業エリアのスペースが限られるような場合には、作業エリア内の車両数を位置情報から把握し、車両入退場管理に活用することも考えられる。

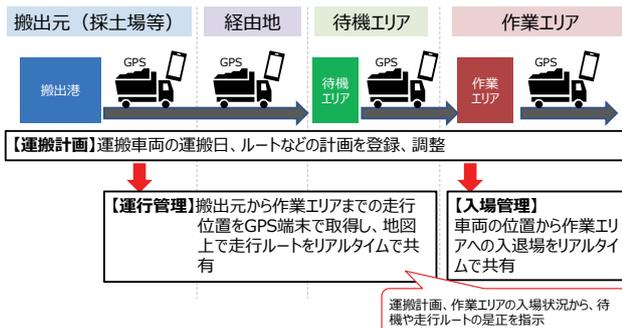


図-9 工事車両による埋立土・資材運搬管理イメージ

作業船舶での運搬の場合は、複数の工事で同時に海上の作業エリアに入船すると、混雑が発生し、作業に支障をきたすおそれがある。そのため、工事情報共有 PF において、各工事業者の運搬計画を事前に共有、調整し、また、作業船舶の位置情報を GPS 端末や船舶自動識別装置（以下、AIS と略す）から取得・共有することで、円滑な海上作業に寄与できると期待される（図-10）。

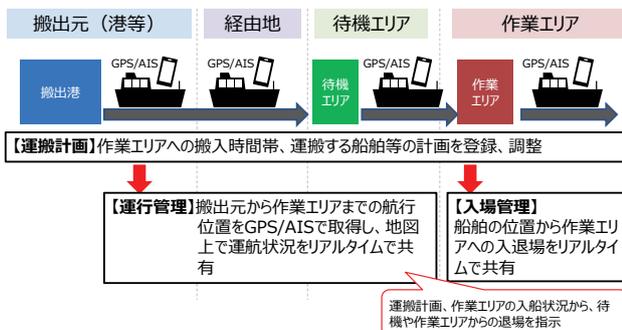


図-10 作業船舶による埋立土・資材運搬管理イメージ

#### 4. まとめ

大規模事業では、CMR と複数の工事業者間での様々な情報の共有、交換が必要であり、関係者間で情報の脱落や情報の共有不足が生じると、施工時の不整合や作業の手戻り、ひいては事業全体の工期に大きな遅延を及ぼす恐れがある。

本稿では、大規模事業における事業全体の関係者間での情報共有を円滑に促すための仕組みとして工事情報共有 PF を提案した。また、昨今の様々な DX 技術の活用による生産性向上等についても提案した。

ここで提案した仕組みが今後検討、導入されることで、発注者の態勢が補完され、地域基盤の整備、管理および適切な事業の執行の一助となることを期待したい。

#### 謝辞

本論文の執筆にあたり、防衛省地方協力局地域社会協力総括課計画調整室の国武正大室長、公益財団法人防衛基盤整備協会の松田隆繁理事をはじめ多くの方々よりご助言、ご助力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 古田興司, 平井孝志: 組織力を高める, 東洋経済新報社, 2005
- 2) 田原孝, 矢吹信喜: 構造物情報の一元化と RFID の活用による情報利用の効率化に関する研究, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.72, No.2, I\_29-I\_41, 2016
- 3) 国土交通省: 工事施工中における受発注者間の情報共有システム機能要件 (Rev.5.4) 【要件編】, 令和 4 年 3 月
- 4) 国土交通省: 工事施工中における受発注者間の情報共有システム機能要件 (Rev.5.4) 【解説編】, 令和 4 年 3 月
- 5) 防衛省: 情報共有システムの実施要領について (通知), 令和 2 年 12 月 18 日
- 6) 小林優一, 野間卓志, 小林一郎, 緒方正剛: 新水前寺駅地区交通結節点改善事業におけるマネジメントの実践に関する一考察, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.73, No.4, I\_45-I\_54, 2017
- 7) 小林優一, 緒方正剛, 小林一郎, 柿本竜治: 包括的モデル空間の提案と運用に関する一考察, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.76, No.2, I\_72-I\_81, 2020
- 8) 内閣官房・総務省・経済産業省: 政府情報システムのためのセキュリティ評価制度 (ISMAP) について, 令和 2 年 6 月 3 日

## ジオセル補強地盤の車両走行性に関する室内模型実験

Material properties and applications of Geocell

宮本慎太郎\*, 宮田喜壽\*\*

MIYAMOTO Shintaro and MIYATA Yoshihisa

\* 防衛大学校講師 建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

\*\* 防衛大学校教授 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：ジオセル，地盤補強，模型実験  
(Geocell, Soil reinforcement, Model test)

### 1. はじめに

災害時の復旧道路や建設現場での仮設道路など、短期間での施工性や使用性が重要になる土工構造物は多い。時間的な制約のある中で道路施工を考えると、現地土の活用や重機利用を最小限にした施工など、様々な現場状況に柔軟に対応できる地盤技術の開発が重要になる。筆者らは、そのような技術を考える上で、ジオセルによる地盤補強技術<sup>1)</sup>に着目した検討を行っている<sup>2)</sup>。ジオセルは、図-1に示すように、高分子材料からなるシートを一定間隔で熱融着したものである。それを現場で立体展開することでハニカム構造体を構築し、現地土等をセル内に充填することで補強地盤を形成する。ジオセルは、その展開機能により、運搬性、施工性が高いことが特徴であり、迅速かつ簡易に道路を施工できる技術になり得る<sup>3)</sup>。

本文では、ジオセルを用いた地盤補強技術を復旧道路や仮設道路に適用することを目的として、車両走行時のジオセルの補強効果を明らかにするための模型実験を行った。ジオセルの寸法を変化させた条件で、剛性車輪の移動荷重模型実験を行い、車両走行時のジオセルの補強効果やそのジオセル寸法の影響を明らかにする。

### 2. 室内模型実験の概要と方法

車両走行時のジオセルによる補強効果を明らかにするために、剛性車輪（以下、単に「車輪」）を移動させて車輪の鉛直・水平変位を計測する移動荷重模型実験を行った。実験装置の概要を図-2に示す。本装置は土槽と車輪を荷重・移動させる荷重枠から構成される。土槽寸法は長さ1200mm、幅305mm、高さ400mm、車輪寸法は直径400mm、幅300mmである。土槽と車輪の幅が同等の平面ひずみ条件となる。車輪の鉛直荷重と移動速度は、それぞれペロフ

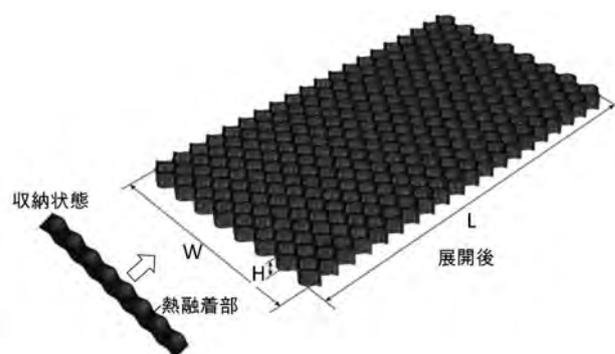


図-1 ジオセルの概要

ラムシリンダとモータにより制御する。実験では、一定の鉛直荷重状態で、一定の移動速度で車輪を水平移動させ、車輪の水平・鉛直変位を計測した。

今回の実験では、車輪の荷重条件は、鉛直荷重  $P_v = 1.64, 3.27, 6.54 \text{ kN/m}$  の3種類、移動速度  $v = 130 \text{ mm/min}$  は一定とし、土槽内を10往復、20回荷重するものとした。土試料は、一面せん断試験と同様のケイ砂6号であり、相対密度が  $D_r = 50\%$  になるように模型地盤を作製した。ジオセル模型も一面せん断試験と同様のPET製の高分子シートを用いて作製した。模型実験では、ジオセルの形状を四角形で近似し、ユニットセルの目合い幅  $w$  は60mmで一定とし、高さ  $h$  を30, 60, 90mmと変化させたケースについて検討した。

### 3. 室内模型実験の結果と考察

移動荷重模型実験の結果として、土槽長さ方向の中心位置における車輪の荷重回数と沈下量の関係を整理した。結

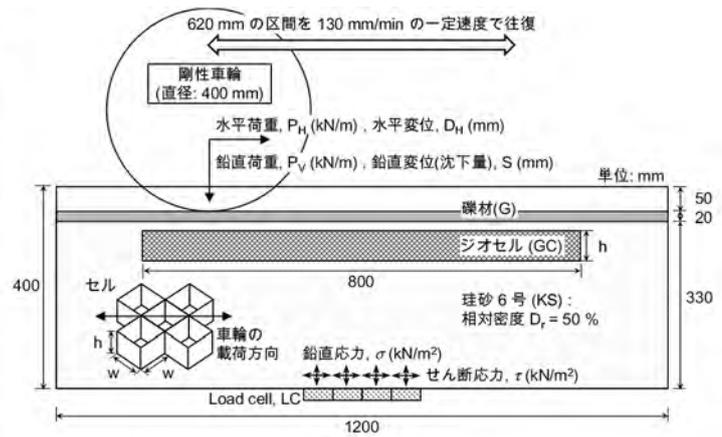
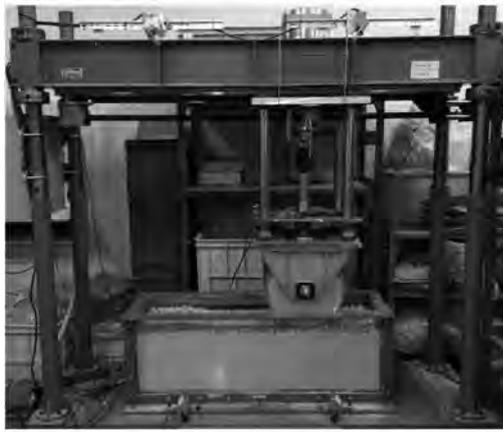


図-2 剛性車輪の移動載荷模型実験装置の概要

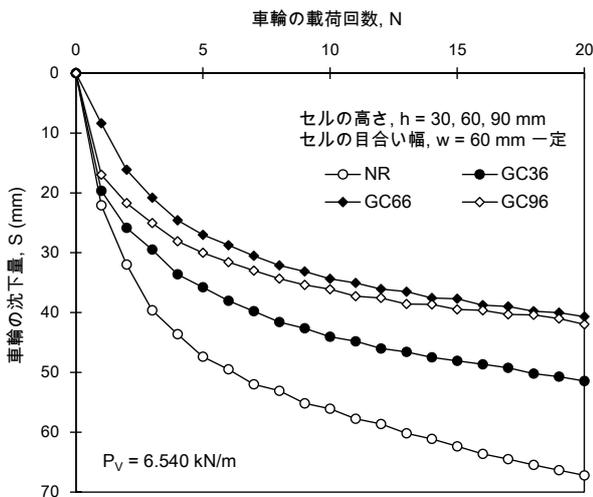


図-3 車輪の載荷回数と沈下量の関係

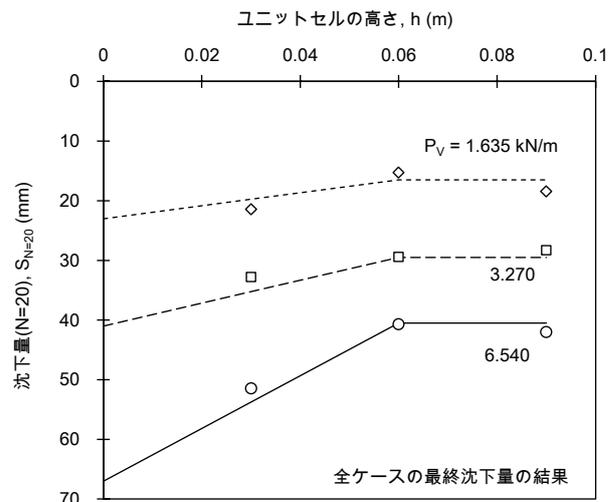


図-4 セル高さと最終沈下量の関係

果の一例として、車輪の鉛直荷重  $P_V = 6.540 \text{ kN/m}$  における結果を図-3に示す。さらに、載荷回数  $N = 20$  の車輪の沈下量を最終沈下量とし、最終沈下量とユニットセル高さ  $h$  の関係を図-4に示す。実験結果より、無補強、ジオセル補強ともに載荷回数に伴い沈下量が大きくなることがわかる。ジオセル補強ケースでは無補強ケースに比べて、車輪の沈下量が  $0.5 \sim 0.8$  程度に抑制された。鉛直荷重の異なるケースでもその傾向は同様であったが、図-10からも分かるように、鉛直荷重が大きいほど、沈下抑制効果は大きくなる。さらに、ユニットセルの高さの影響は、セル高さが大きくなると沈下抑制効果は大きくなり、今回の実験では、 $h = 60 \text{ mm}$  以上で沈下抑制効果が一定になる傾向を示した。

## 5. まとめ

本研究では、ジオセルを用いた地盤補強技術を復旧道路や仮設道路へ適用することを目指して、剛性車輪の移動載荷模型実験を行った。ジオセルで補強することによって、車輪の移動載荷時の沈下量を抑制できることを示した。その

ような補強効果は、ジオセルの高さに大きく依存することを明らかにした。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、東京インキ株式会社より、ジオセルに関する情報や材料の提供を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) Webster, S.L.: Investigation of beach sand. -Trafficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concept. Report GL-79-20, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1979.
- 2) 宮本慎太郎, 宮田喜壽: 道路復旧への適用を想定した展開式セル地盤補強材の構想と補強効果に関する検討, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol.77, No.2, pp.118-128, 2021.
- 3) 川俣さくら, 原田道幸, 大山亮貴, 宮本慎太郎: ジオセルの材料特性と適用例, 防衛施設学会年次フォーラム, Paper No. C1, 2021.

「防災・環境」



「<sup>したた</sup>強かな」防災・応災・減災コンセプト構築の取り組みについて  
～ 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 ～

A PROPOSAL OF PERSEVERING CONCEPT FOR  
PREVENTION-REACTION-DEDUCTION DISASTER MANAGEMENT  
～ EXAMPLES OF NPO CHONET ACTIVITIES ～

萩原洋聡\*, 石川友樹\*\*  
OGIHARA Yousou and ISHIKAWA Tomoki

\* 参事 株式会社 エヌ・ワイ・ケイ（〒104-0028 東京都中央区八重洲 2-6-16 北村ビル 2階）

\*\* 専務 株式会社 エヌ・ワイ・ケイ（〒104-0028 東京都中央区八重洲 2-6-16 北村ビル 2階）

キーワード： 強か、防災、応災、減災、貯水タンク、ネットワーク、Chonet  
(*persevering, prevention, reaction, de-duction, disaster, water-reservoir tank, Network, Chonet*)

## 1. はじめに

当社（日本容器工業グループ 株式会社エヌ・ワイ・ケイ）は、昭和2年の創立以来、酒、醤油を主体とする醸造関係の容器を主業とし、昭和29年に理化学研究所と共同研究した我が国で初めてのプラスチックライニングタンクへと進化、醸造タンクの大型化・高性能化のニーズに応えてきた。その後、水槽類、貯湯槽、パイプなど給排水衛生設備の建築設備関連ライニング製品に進出するにあたり、醸造用タンクと同様の品質を実現するため、水槽は鋼板製一体型・全溶接による耐震型の構造とした。

特に、鋼板製一体型貯水タンクの耐震性・対津波耐性については、2011年の東日本大震災の地震動と、石巻港の大津波に耐えた実績・実証事例を有している。石巻工業港（@宮城県石巻市雲雀野）の埠頭先端(図-1, 写真-1)に船舶給水施設として、当社が納入したポンプ室付受水槽（100 m<sup>3</sup>×1基）、受水槽（100 m<sup>3</sup>×2基）の計3基（耐塩害仕様）が設置されていた（写真-2）。現地では、2011年3月11日当日の震度6弱の地震後、5mの津波に晒され、水槽外装部分の凍結防止用断熱材が剥き出しにされるも、3基の水槽本体は地震動で破壊されなかったばかりが、津波にも流されず生き残った（写真-3）。それに留まらず、自動緊急遮断弁が作動したことにより、水槽内には『生命維持に必要不可欠な水道水』が湛えられていたのである（写真-4）。しかしながら、水槽内に蓄えられていた水道水は使用されることは無かった。なぜなら、貯水タンク周辺の諸施設の壊滅的破壊のため、給水所要自体が無くなって、給水機能を発揮できないだけでなく、最終的には撤去されるという意外な結末に至った。

実はこの点こそ、ライフラインが果たすべき、極めて重要かつ深刻な問題の本質を示している。すなわち、「生命維持に必要不可欠な水」を確保する貯水タンクだけが生き残ったとしても、その水を配水・給水するためには、ポンプ、それを動かす電力、配管系統等を経て、必要とする人・場所まで繋がっていなければ、所要・所期の目的を果たせないという当たり前の現実である。さらに、受水槽が新鮮な水の供給を受けることができないなら、給配水機能を継続することはできないという「足元・原点」を忘れてはならないということである。

本論タイトルの枕詞「強（したた）かな」とは、危機状態に陥っても、何か盤石・万能の強力な力で雄々しく乗り越えるというのではない。もとより、危機状態に陥らないように先手必勝で事前の策を打つことが危機管理の要諦と心得ているが、我々は自ら制御しえない地球・自然都合の自然現象（天変地異、自然災害等）を一方向的に受ける不利な立場にある。その不利な状態に陥っても、そこで使える手段（ハードウェア）と知恵（ソフトウェア）を駆使して、しぶとく立ち上がり、生き延びていくという図太さ・逞しさを意味する。それを内包する災害対応力（応災力）を涵養することは、各個人の「自助力」を高め、ひいては「自立力」の向上に繋がり、共助・公助レベルと合わせて「国家・国土の強靱化」に寄与できないだろうか。各個の優れた技術（Know\_HOW）を、多様な人・組織・機関等を介し繋ぐこと（Know\_WHO）によって、各個で行き詰っている壁を壊し、越えて行けるのではないかという模索から、当社では、NPO 法人 貯水タンク防災ネットワーク（貯ネット→Chonet）を設立したものである。本論では、活動概要、特に筆者担当の「出前講座」事例を紹介することにより、情報共有、情報交換、新たなムーブメント展開を期待するものである。



図-1 及び写真-1 石巻工業港及び当社水槽設置場所



写真-2 東日本大震災以前 写真3 東日本大震災直後

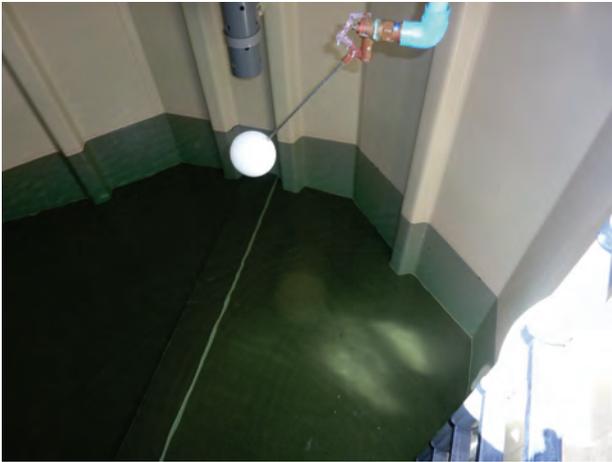


写真4 緊急遮断弁作動により水槽内に確保された水道水

## 2. NPO 法人 貯水タンク防災ネットワーク【Chonet】の理念及び設立経緯

近い将来必ず発生すると予測されている東海、南海、東南海地震、あるいはこれらが連動した巨大地震などにおいて、生命維持に欠かせないライフラインの一つである『水』の確保は大変重要である。ところが、ひとたび地震が発生するとライフラインは遮断され、避難所や給水所では被災者が水を受け取るために行列をなす光景が繰り返されている。また、透析病院での診療不能の主因は水の供給遮断であったと言われており、そのような状況下で、個々の医療機関から行政へ給水車による水の供給を要請しても届かないという事態も発生した。貯水タンクは、平時に飲料水及び生活用水を供給する役目だけでなく、災害等の非常時に水をストックする役目を担っている。厚生労働省は災害などでの断水発生時における診療用の水3日分の備蓄を災害拠点病院、救急救命センターなどに求めており、貯水タンクは非常時のライフライン確保の手段として期待されている。しかし、これま

での大地震では貯水タンクに生じるバルジングやスロッシング現象により、貯水タンクが破損し、被災地域の医療や生活に多大な影響を及ぼしている（図-2）。

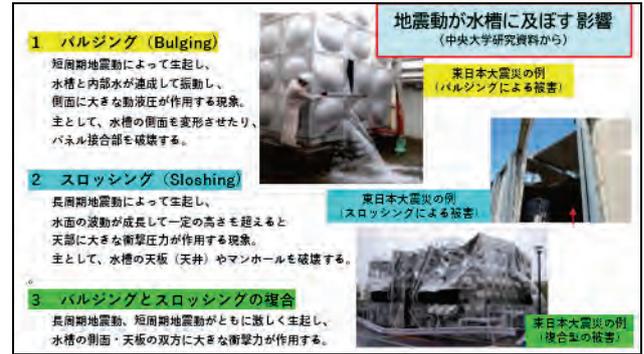


図-2 地震動が水槽に及ぼす影響

このような事例・原因分析から、災害時の貯水タンクの利活用について広く周知する必要がある。更に、①災害の発生以前に、貯水タンクを活用できるよう準備しておくこと。②避難所や病院などの給水拠点施設と自治体とのネットワークをつくり、いざというとき素早く稼働できる体制を作っておくこと。③地震時に貯水タンクが破損しないようにしておくこと。そのような普段からの活動が必要不可欠である。我々は、これまで中央大学理工学研究所平野研究グループ（中央大学総合政策学部・平野廣和教授主催）と、地震時における貯水タンクの被災について調査研究をしてきた。しかしながら、研究グループの研究成果を防災減災に有効につなげるには、貯水タンクの運用を含めたソフト面についても深く関わることが重要と認識するも、研究グループだけの活動では困難となっている。そこで、他団体との連携、拠点施設と自治体とのネットワーク作り、情報発信といった活動のため、我々の活動に賛同する誰もが参加できる団体として、特定非営利活動法人を設立することを決意した。特定非営利活動法人として、我々は災害時における貯水タンクの活用に関わる事業を通じて、災害に強いまちづくりと地域の安全安心に寄与することを目指すものである。所定の手続きを経て、令和元年10月17日に東京都知事より以下のとおり認証された（図-3）。



図-3 認証書



図-4 Chonet HP 初期画面

名 称 貯水タンク防災ネットワーク  
 代表者の氏名 吉川 榮治 <https://www.chonet.org>

## 2.2 Chonet（貯水タンク防災ネットワーク）の活動現状

令和元年 10 月に創立された NPO 法人 Chonet のホームページ初期画面（図一四）には、現時点で 3 つの主要活動主体が表示されている（[NPO Chonet 貯水タンク防災ネットワーク](#)）。

### ① 中央大学総合政策部 平野廣和研究室

貯水タンクには主として、(i)FRP 製パネルタンク (ii) ステンレス製パネルタンク、(iii)鋼板製一体型貯水タンクの 3 種類がある。これら各種タンクの過去の地震被害等の事例把握に基づき、工学的な分析・解析を行ってその原因を明らかにし、具体的な対策を提案している。[パネルタンクの地震被害に関する調査記録や実験映像 鋼板製一体形タンクと他形式タンクのパルジング振動応答特性の比較](#)

東日本大震災では、津波被害や原発事故が被害の中心にあるように考えられがちであるが、貯水槽の耐震問題に関しては、東日本大震災の被害調査で最新の基準で設計・製作されていた貯水槽が、スロッシング現象やパルジング現象等が原因となって壊れていることが判明している。さらに熊本地震では、多くの上水道用の貯水槽が被害を受け、熊本市内では災害拠点病院等で水を蓄える貯水槽が使用不能となった。その結果、これらの病院では、大量に水を使い生命に直結する人工透析を行っている患者を受け入れられなくなる等、『命の水』が危機となる事例が発生した。そこで、まず熊本地震での貯水槽の被害の極一部を紹介し、次に地震災害発生時の『命の水』を守るために、既存の貯水槽の耐震性能の向上を目指し、産学連携で施工性の容易さ、経済性、衛生面を追求して開発した、「浮体式波動抑制装置」に関する紹介を行っている。

### ② TOKYO\_DIEMAS（東京都透析医会）

（公社）日本透析医会は、人工透析療法に関する①調査・研究、普及、教育事業、②研究助成事業、③安全対策事業を 3 本柱として事業を行っている。東京都においては、おもに東京 23 区を対象にした東京透析研究会と多摩地区を対象にした（一社）三多摩腎疾患治療医会が、それぞれの地域で活動を担っている。また、東京都の災害時透析ネットワークとしては、区部では東京都区部災害時透析医療ネットワークが、多摩地区では、三多摩腎疾患治療医会の災害時ネットワークがある。東京都透析医会の主たる業務は、東京透析研究会、東京都区部災害時透析医療ネットワークと三多摩腎疾患治療医会および日本透析医会との情報交換・共有を行った上で、地域の透析医療に貢献することにある。災害対策は最も重要な事業で、2018 年 5 月に災害対策委員会を設立し、東京都における透析患者の災害対策を包括的に取りまとめる組織として、緊急時透析情報共有マップン

グシステム（Tokyo DIEMAS）の開発・運営、東京都福祉保健局、東京都臨床工学技士会、東京都災害時透析看護の会、透析患者の代表の方、電力、水道の担当部局、透析関連企業との連携、関東の他県との広域連携など災害対策に関する業務を幅広く行っている。また、新型コロナウイルス感染症が透析施設においても拡大しており、透析患者の病床も大変逼迫している中、パンデミックも災害の一種ととらえ、関連機関と連携して、情報発信・共有など対応している。

### ③ 出前講座（ユスフ大佐の出前防災講座）

筆者（荻原）は、東日本大震災を海上自衛隊・八戸航空基地で勤務中に遭遇し、津波被害を受けた八戸市内への災害派遣業務等に従事した体験をベースに、それを伝承するだけでなく、自ら身を以て実地検証した具体的な対応策を紹介・提示することによって、各自の「自助（力）」を「自立（力）」に向上する一助になることを目指している。以下、本論では筆者が担当している「出前講座」の活動状況を主として紹介する。

## 3. 出前講座【ユスフ大佐の出前講座】の活動状況

### 3.1 出前講座の目的

筆者が青森県八戸で遭遇した東日本大震災当日の夜、東北地方では雪が降り、津波から辛うじて生き永らえながらも、闇の中で凍死による多数の犠牲者が出た。夏場であれば保たれたであろう生命も、①厳冬期②夜間③屋外の厳しい 3 条件が揃うとそれを護ることができない厳しい事実と直面した。誰にも等しく手を差し伸べたくとも、公助のリソースも限られており、優先順位に沿って割り当てられることになる。公助の支援が届くまでは、自助・共助のあらゆる手段を活かして乗り越えてもらうしかなかった。だが、その悔しさ、もどかしさも、計り知れない犠牲者の前には何の言い訳にもならない。

本年（2023 年）は、関東大震災から 100 年目、東日本大震災からは 12 年目の年である。現在の小学 6 年生（12 歳）の子供たちが誕生した頃の出来事であって、彼（女）らに体験としての記憶も知識もない。東日本大震災は貞観地震（869 年）以来、約 1000 年ぶりの巨大津波地震とされているが、そのような大震災を体験し生き延びる側に在る自分にとって、犠牲者に対するせめてもの償いと供養があるとすれば、その一つはその地震の本体・本性・実態を突き止めて、後世への教訓として遺すことではないのか？人は誰も、自ら体験したこと以上のことを理解することは困難である。その限界を超えるためにも、次世代を担う未体験の世代にそれを伝え続けることによって、防災・応災・減災の理解者と、自ら考えて行動する人材の育成の一つの場・手段となりえるのではないのか？その想いを原動力に、筆者の実体験をベー

スにしたものが、「ユスフ大佐の防災・応災・減災セミナー」である。その主要構成を表-1に示す。

表-1 ユスフ大佐の防災・応災・減災セミナー概要

「ユスフ大佐」とは、筆者がアフリカ・ディブチ共和国での海賊対処活動拠点整備の事前調整任務で滞在中についたニックネームである。地元カウンターパートが、筆者の名前（Yousou）は、地元でも一般的な Youssouf（ユスフまたはヨセフ）とそっくりだということで「今日から君はユスフと名乗れ！」と言われたのがきっかけである。

まず、近年発生した震度7クラスの地震の分類・分析を実施した（1995年阪神淡路大震災、2004年新潟中越地震、2011年東日本大震災、2016年熊本地震、2018年北海道胆振東部地震）。

筆者は、それぞれの地震の特徴、被害の分類、死因分析等の考察から、被災した場合でもサバイバルするために必要なハードウェアの具体的な道具や資器材の検証は我が身を以て実施してきた。（詳細は2020年の防衛施設学会年次フォーラム文献を参照されたい。）特筆すべきは、防風雨雪・防寒のための雨露を凌ぐテント（写真-5）とマイ防災バッグ（写真-6）の有効性である。



写真-5 官舎窓開放による八戸越冬隊による越冬検証

八戸勤務は単身赴任という自由気儘な環境（家族への配慮不要）の下、あえて官舎のガス契約をせず、電気・水道の契約のみで窓を解放し室内にテントを展張したまま、そこでの起居により3冬を過ごして検証した（八戸

越冬隊長記録参照）。八戸の厳冬期1月は零下10℃を下回る期間もあるが、インナーをフライシートで覆う空気断熱2層構造となるテント内は、自身の体温のみで15℃前後を維持できる快適空間であることを実証・体得できた。



写真-6 マイ防災バッグの携行内容物

雨・風・露・雪を遮る空間が確保できた後は、生命を維持・繋ぐための「食」確保の可否が致命的となる。その手段として「マイ防災バッグ」が如何にあるべきかを追究している。特に配慮している点は“Simple is the Best!”、特殊な器材・燃料や複雑精密な器具でないことである。「厳冬期・夜間・屋外」の被災時を想定して以下の基本セットを各バッグに収納している。発災直後の気が動転している状態から、ある程度心の余裕ができる段階に応じて、楽器（フルート、ミニサクソ）を含む必要最小限であっても、確実に機能する物品を選別収集し試行・試用継続中である。まずはお腹を満たし（腹と身体の足し）、やがて心を満たす（心の足し）ニーズの時間・心理状況変化も考慮・反映している。

- ① 火打ち石（マッチ不要で30000回点火可能）
- ② THERMOS保温水筒+浄水キット（SAWYER）
- ③ マグカップ類（チタン製2層：保温タイプ）
- ④ 食器（折り畳みスプーン・フォーク・箸）
- ⑤ 火力源（ガスコンロ）
- ⑥ 発電・充電機能付きBBQコンロ（木材燃料）
- ⑦ 携行食品（チョコレート、ナッツ等）
- ⑧ ペットボトルの米（「晴天の霹靂」2合分）
- ⑨ 太陽光充電によるLED照明器具 等
- ⑩ フルード、オカリナ等の楽器

自ら体得・納得したことの一つは、防災用品・器具等は、災害発生後に使うのではなく、それらを日常生活の中で使い慣れる（日ごろ使いする）べきということである。非常時にも役立つものを、日頃使いしながらか、万一の状況に陥ってもいつものように使いながら乗り切っていくことが本来の目的を達成するという発想・考え方・切り口であり、平時も非常時も連続して乗り越える一方法になり得ると考えている。

### 3.2 防災・応災・減災コンセプトの提唱

『防災・減災』に関しては、災害を局限するためにも災害を未然に防止（『防災』）し、最終的に『減災』を目的とするものであるが、災害の前〔BEFORE〕と後〔AFTER〕である、『防災』と『減災』の切り口や考え方で良いのだろうか？何らかの災害が発生するまでは、発災以前の備える段階である。ひとたび発災してしまえば、如何に素早く初動対応して被害を局限するかという段階、即ち、『応災』の概念が重要なのではないのだろうか？その『応災』効果の成否が、以後の被害の連鎖や被害の軽減に直結するのではないのか？その結果が『減災（被害の極限）』という成果に至るのではないのか？という問題意識を筆者らは抱いてきた。本論における第2の論点は、『防災』と『減災』を繋ぐ『応災』概念の提唱と考察である。

表-2 は、表-3 とともに、各種事象に対する主体として、国家レベルで対応すべきこと（国防：国家防衛：公助）、各自が居住するコミュニティーレベルで対応すべきこと（民防：民間防衛：共助）、そして、各個人レベルで常に意識して我が身を護るために必要な『防災』・『応災』・『減災』の個人防衛意識（自助）の涵養としてのフル・スケールをカバーするマトリックスとして分類整理したものである。『人は城、人は石垣、人は堀、情けは味方、仇は敵なり（武田信玄）』とあるように、国家が国民を遍く護ることは当然だが、それ以前に個人の自存・自立による自己完結度が、その国の底力の反映になると筆者は考えている。

表-2 自助・共助・公助の時空間影響範囲イメージ

国家土木計画 [ 防災・応災・減災 ] 哲学			
タイトル	国家土木計画 [ 防災・応災・減災 ] 哲学		
目的	自助・共助・公助		
3本柱	国家防衛	民間防衛	防災・応災・減災
[3防]柱	[国家防衛]	[民間防衛]	[Before-After]
項目	1 国家目標	急務改善	天災地災
	2 国家利益	【我が事として】	【予期 VS テロ】
	3 国家戦略	コミュニティーへの	敵を識ること
	4 世界および日本の過去	依存と活用	・万全の準備と柔軟な対応
	5 世界および日本の未来	→ 日本社会固有の	・被害の連鎖
	6 脅威の異種もり	善さの復活・再構築	【予期】【起】【収】
	7 脅威への対処		【メタリクランダム】
	8		【常折の連鎖】
核心理念	・ 堅土構木 ・ 磐石は人が ・ 人 物 学 ・ 真【誠心】(まごころ)と情熱 ・ 国家観・歴史観・宇宙観	・ スイス登壇発狂 ・ 122と121 ・ 米国の成功 ・ 戦士の空論を回復 ・ できることを自らに着手開始	① 備 ② 防 ③ 救 ④ 復 ⑤ 復 ⑥ 復 ⑦ 復 ⑧ 復 ⑨ 復 ⑩ 復 ⑪ 復 ⑫ 復 ⑬ 復 ⑭ 復 ⑮ 復 ⑯ 復 ⑰ 復 ⑱ 復 ⑲ 復 ⑳ 復 ㉑ 復 ㉒ 復 ㉓ 復 ㉔ 復 ㉕ 復 ㉖ 復 ㉗ 復 ㉘ 復 ㉙ 復 ㉚ 復 ㉛ 復 ㉜ 復 ㉝ 復 ㉞ 復 ㉟ 復 ㊱ 復 ㊲ 復 ㊳ 復 ㊴ 復 ㊵ 復 ㊶ 復 ㊷ 復 ㊸ 復 ㊹ 復 ㊺ 復 ㊻ 復 ㊼ 復 ㊽ 復 ㊾ 復 ㊿ 復

表-3 は、地球規模で生起しうる危険・脅威を考えるにあたり、生起しうる具体的な現象とその規模による空間スケールと、『防災』・『応災』・『減災』という時間変化の要素（時間スケール）との2つの座標軸で分類したものである。これにより、時空間フル・スケールの現象への適用と、時々刻々変化する現象・状況の容易な把握が期待できる。脅威の要因（種類）と烈度に対処するには、個人レベルで対応するものから国家レベルで対応しなければならないものまでである。昨今周知

される「自助・共助・公助」の範疇にも重なる。表-3中の左側の空間スケール欄には、対象スケール・レベルに応じ代表的な類例を列挙している（国家有事、テロ、原子力事故、地震、津波、風水害等々）。そして、空間スケールに列挙した脅威の要因は、単独で起きることもあるし、場合によっては、いくつかが同時あるいは連続して生起し、いわゆる複合災害に発展することもあるだろう。まさに、東日本大震災では、地震と津波と原子力発電所の3要因が重なり、重大な原子力事故発生に直面することになってしまった。表-3中の右側の時間スケール欄には、事象の分岐点となる発災以前（未然・予防）の『防災』段階と、発災以後の対処・対応段階としての『応災』段階に分類し、さらに、『応災』段階においては、時間の経過と被害の連鎖の目安・節目として1次被害段階、2次被害段階、3次被害段階、4次被害段階のマトリックスを設定した。『応災の手際の良し悪し』が『減災の程度＝被害の極限』に直結する。

表-3 災害要因・烈度の時空間での脅威認識リスト

時 空 間	空 間										時 間		
	要 因 ・ 烈 度 [ ケース ]										国家防衛 [ 国防 ]		民間防衛 [ 民防 ]
対 応 レベル スケール	有 害 事 象	原 子 力 事 故	地 震	津 波	風 水 害	土 石 流	火 山	カ ス 爆 発	油 タ ン ク	パ ン ミ ッ ク	防 災	応 災	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	未 然 未 災	1 次 被 害 段 階	
国民 (自助・共助) 防 災													
防 災													
時 間													

特に表-3 は、岩国管理隊長に着任して間もない2001年9月11日、米国で同時多発テロが生起した際、岩国基地（米国海兵隊）内はいきなり DEFCON\_3 となり、有事の米軍の対応ぶりを内側から学ぶ貴重な機会に遭遇し、ヒントを得たものである。基地のハードウェアと、基地運用のソフトウェアをバランスよく組み合わせてこそ、その機能を最大限に発揮できるという観点である。以後、対テロ戦争の時代に突入し、イラクやアフガニスタン等で多発する自爆テロ、更には昨今のウクライナ戦争のような事象は日常茶飯事となっている。

防衛省自衛隊の究極の任務は国防であって、東日本大震災等における災害派遣活動は自衛隊の任務の一つ（One of them）に過ぎない。単に地震や津波という自然災害のみではなく、およそあらゆる種類の危険の存在が常在する環境に我々は置かれていることを再認識する必要がある。そして、益々混迷の度を深める世界情勢の中での安全確保を考える時、我々は安全を脅かす対象を的確に把握・評価した上で、明確・明瞭・簡明・具体的な対処法の考え方（哲学）を確立すること無くして、任

務・目的達成は難しいだろう。その判断座標軸として、複数目標に同時対処するイージズシステムの考え方を、同時多発しうる複合自然災害にも適用できると考えた筆者は、ディブチに向かう前年（2008年の夏頃）、未熟ながらも、個人的な施設道（哲学・理念）として整理・羅列したものが表-2、表-3及び図-5である。

究極の大混乱の中にあっても寸秒を争う対処・対応が必要な場面で、ハードとソフトの両面でどのように対処すべきかを冷静に判断する一助になればと思う。

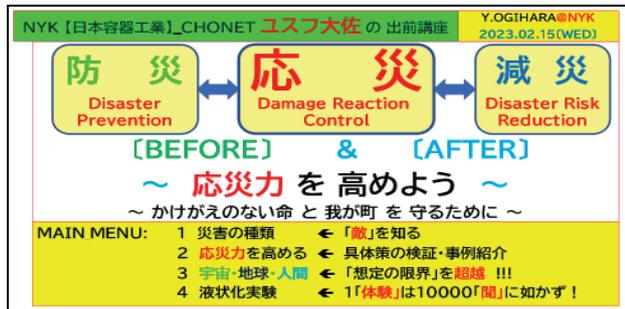


図-5 防災・応災・減災コンセプト

### 3.3 具体的かつバランスの取れた論と証拠の模索事例

本論では筆者が担当している「出前講座」は「防災・応災・減災コンセプト」を提示するが故に、「論」より「証拠」でもなく、「証拠」より「論」でもない、「論」と「証拠」のバランスが善くなるように相互検証を（悶絶しながら模索）継続している。

東日本大震災の地震の素性を突き止めるべく、まず着手したのは、日本全国で、いつ、どのように地震が発生しているのかを俯瞰的に知りたいという素朴な疑問・欲求だった。地震発生データのデータはそれだけでもビッグデータであって、単に羅列しただけでは何も見えてこない。あれこれ迷った挙句、日本気象協会が時々刻々発表する「過去の地震情報（日付の新しい順）- 日本気象協会 [tenki.jp](http://tenki.jp)」の各地震データを私有 PC のエクセル表で、①震源域毎に、②発生マグニチュード毎にランク付けして、1地震を1個の星（★）印として対応欄にひたすらプロットするという極めて単純な地震日記を、その切り口で記録を進めて行った。合わせて、過去に遡っての記録を進めた。地震の専門家でもない現役時代だったので、スキマ時間を使いながら 1994 年から 2023 年（今日）までの全記録を1枚にまとめ可視化したものが図-6 である。この1枚の図-5 を得るまでに延べ7年を要した。しかしながら、手作業で書き込んだ図表の記憶は、脳内に地震絵巻として残っている。

更に、国土地理院は 1997 年から 2017 年までの 20 年間で日本全国の GPS ポジションが地殻変動に伴って変動した軌跡を「電子基準点がとらえた日本列島の地殻変動（国交省国土地理院）」で公表している。

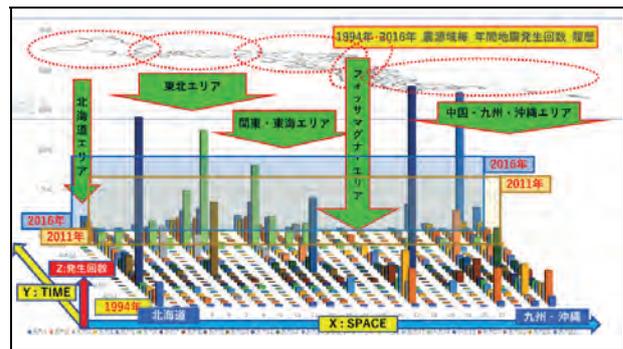


図-6 1994年から2016年の日本全国の震源域毎における地震発生回数の時空間分布

【 X軸：全国震源域 Y軸：時間（1995～2016年） Z軸：各震源域毎・各年累計の地震発生回数 】

そこで、地震発生回数の時空間分布（図-6）に、国土地理院が公表した 1997～2017 年の日本全国 GPS の水平移動距離のアニメーション・プロットを重ねて表示したものが図-7 である。特に 2011 年以降、日本全国の GPS データの水平挙動はそれ以前に比べて劇的な水平方向変動を示している。その 20 年間の累積水平変位量から逆算・推算すると、日本付近では主として 3 カ所に回転軸を持ち、かつ、連続体として異なる回転方向を有する回転運動が作用しているように見える。これらを統合的に組み合わせると、日本列島は、西日本側と東日本側とは異なる方向から日本本土を押し曲げようとする 2本の単純梁の組み合わせで構成され、その 2本の単純梁がフォッサマグナ付近で支点を共有する構造と捉えることができる。日本列島の背骨（脊梁山脈）が逆 S 字形を形成していることにも符号することは興味深い。このように、地震発生回数と GPS 水平移動の変化が対応付けられる一例である。さらに、2016 年の台湾～沖縄～桜島噴火～熊本地震～鳥取沖地震と、沖縄トラフに沿う一連の地震発生状況は、現時点では比較的に静穏ではあるものの、何れ発生が予想される南海トラフ地震の予兆現象であると筆者らは理解している。その対策にあたって、可視化を併用する具体的解釈方法の展開が期待できる（図-8）。

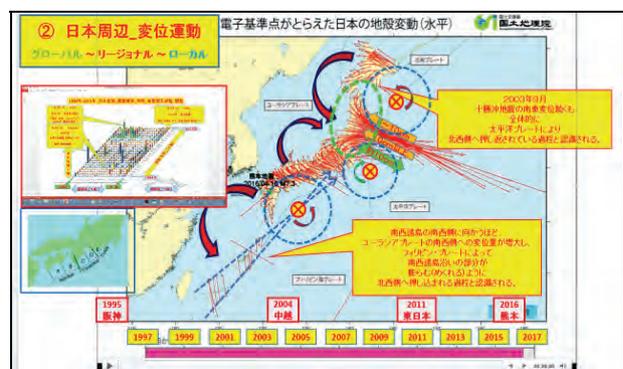


図-7 GPS 水平変位量（1997-2017年;国土地理院）

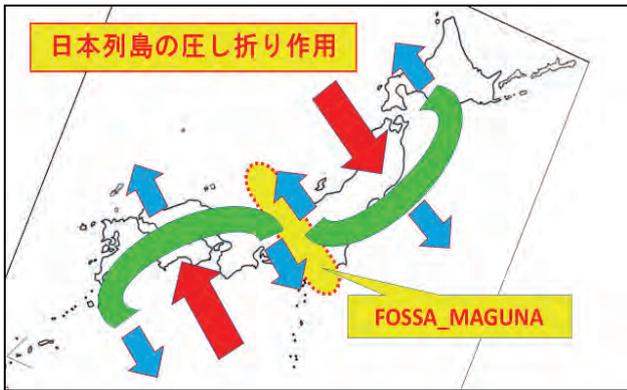


図-8 日本列島に作用している応力背景

#### 4.1 実地検証・取材・事例紹介

これまで、勤務した日本全国各地を含め、さまざまな場所で出前講座を実施させていただいた。筆者の視野・判断が偏狭に陥らないためにも、未知・未踏の現場を我が身・我が眼で確認して識ることを心がけている。特に印象深い取材事例を紹介したい。

##### 4-1 北海道・知床\_斜里町\_ウトロ地区津波避難訓練 ～ 厳冬期・流氷の「氷塊混じりの津波」の想定～

知床半島先端の国立公園地域に隣接する斜里（しゃり）町ウトロ地区は人口約1500名の地区に、年間150万人超の観光客が来訪する観光地である（写真-7）。日々4000人以上の外来客が滞在している環境で、網走沖の活断層による海底地震発生後は10数分で津波が襲うという想定下、2019年2月、流氷が接岸する厳寒期にウトロ地区・内閣府合同で津波避難訓練が実施・検証され筆者も参加した。部外者を含む観光道路沿いの除雪ボランティア作業に引き続き避難訓練である（写真-8）。東日本大震災の津波に流氷塊が混じっていたら？と戦慄を覚えた想定だった。訓練実施担当者は、訓練とはいえ実際の津波避難警報サイレンを吹鳴することが、不特定多数の観光客のパニックを誘発するのでは？という深刻な危惧を懐いていた。しかし何と！それは杞憂に終わった。北国の建物は殆んどが2重窓構造となっているので断熱・遮音性が高く、津波警報（音波）は室内には届かず聞こえないという新鮮、かつ、当たり前な？それでいて意外な発見があった。この一事例が示すように、その土地特有の災害形態を配慮した自助・共助態勢構築と検証の重要性を再認識させられた。また、高齢者等だけでなく多数の観光客は現地地理に疎い隠れた避難弱者としての考慮・対処の必要性を痛感した。



写真-7 流氷が接岸する北海道斜里町ウトロ地区



写真-8 国道334号線沿い除雪ボランティア作業後、高台の避難場所への津波避難訓練に移行（気温-25℃）

#### 4.2 三陸沿岸の復興状況（気仙沼、女川の取り組み）

青森～岩手～宮城～福島太平洋沿岸（三陸沿岸含む）に沿って「3.11 伝承ロード」として、東日本大震災の教訓を学ぶための震災伝承施設を「震災伝承ネットワーク協議会」が繋いでいる。筆者らは、これまでに数回、八戸～（八戸線）～久慈～（三陸リアス線）～釜石～（釜石線）～花巻を踏査した。殆どの沿岸部は、長大な護岸堤防が築かれており、堤防の天端より低いところからは、海は見えない。堤防の後背地は居住が認められていないため、広大な空間（空地）となっているか、太陽光発電等に使用されているようだ。殆どの地区では、隣近所の関係（コミュニティ）が復活しないままの状態に苦しんでいる。ハードウェアだけでなく、日常生活の中で築かれていた目には見えないが大切な心の繋がり（ソフトウェア）の復活・復興が伴っていないのだ。

その中で、気仙沼と女川は、その両方をバランスよく復興達成しているように見える。

気仙沼は、カキ養殖が盛んなところであるが、過去の赤潮被害等の調査から、海水中のミネラル不足がプランクトンの生育を阻害していることが判明した。「森は海の恋人」という自然循環の考え方から、平成元年から漁師が森に木を植える事業を開始した。その結果、東日本大震災の津波でカキ筏等はすべて失ったものの、海中にはそれまでに蓄積された牡蠣の稚貝と豊富なプランクトンが育っていたことから、翌年には操業を復活している。

そして、山と川と海の流れを断ち切らないために、気仙沼の海岸には防潮堤を建設しない選択をした。

女川は、復興に当たり、町長が先頭に立って①生活基盤・生業となる水産加工施設の再建を優先し、②高台移転のために切り開く土を、防潮堤とその後輩部の空間を埋めることによって、町自体が防潮堤を内に込めた構造にした。③コミュニティー単位で高台移転をするにあたり、震災以前の所有土地面積の大小に関わらず、各戸100坪とする再開発を行ったので、従前のコミュニティーも維持されている。各自のふるさとの深い想い入れと、その努力・創意工夫の好事例であり、引き続き取材等を進めたい。

#### 4.3 福島第1原発の復旧現状

産経新聞の福島第1原発視察ツアーに参加する機会を得た。構内では、線量計を装着し、各原子炉建屋近傍まで立ち入ると警報音が響く。土提の陰に入れば警報音も低下するなど、目には見えない放射線放射の実情を体験した。水蒸気爆発を起こして剥き出しになった鉄骨が折り重なり、鬼気迫る1号機建屋の他、処理水保管のため、まるで貯水タンクのジャングルのような光景にも廃炉処理の困難さを痛感した。だが、最も心を痛めたのは、期間困難地域を通過する時であった。人氣が全くなく、国道沿いの自動車販売店は、3月11日1446当時のまま、割れ遣ったショーウィンドウのガラスが氷柱のように垂れ下がり、展示場には風雪に晒され風にはためくカタログ類が移動バスの車窓から見えた。山際に近い住宅の中には、樹木やツタ類に呑み込まれようとしているものもある。あの日のままの空間と、今我々の日常の空間が、実は今この瞬間もこの日本国土上に共存している現実・事実を忘れていないだろうか？今一度、再考・再認識すべきではないだろうか？

#### 4.4 一条堤防@静岡県浜松市

東日本大震災の津波被害の現実から、甚大な津波被害が想定される南海トラフ巨大地震に備え、2012年6月に一条工務店からの300億円の寄付金を原資に、静岡県・浜松市・一条工務店が、浜名湖・今切口から浜名バイパス沿いに天竜川河口までの約17.5kmにかけて防潮堤を整備開始し、レベル2の地震・津波に対してH=13~15mの防潮堤を6年9か月かけて構築したものである(図-9)。万里の長城をイメージするような巨大堤防が太平洋岸に延々と続いている。近傍で容易に入手できる砂礫等にセメント、水を添加し、簡易な混合設備により製造されるCSG工法(Cemented Sand and Gravel)が採用された。写真-6のマイ防災バッグ(約15kg)を背負って歩いたが、徒歩で約6時間を要する長大な堤体(写真-9)であった。浜松市を創業地とする一条工務店が、東日本大震災の津波被害を目の当たりにし、早晚発生が

予想される南海トラフによる津波被害軽減のための自らの多額の寄付を以て、事前予防的に実行し完成させた情熱と先見の実行力に圧倒されるばかりである。



図-9 一条堤防@浜松市 写真-9 堤体@浜名湖

### 3.5 関東・関西 Extreme Walk 100Km

2022年、関東・関西で開催された100Kmを26時間以内で歩くイベントに参加した。

関西100Kmは姫路城～明石城～大阪城のルートである。全く土地勘も無く、全体のペース配分を誤って体力消耗(あおり運転?)、第2チェックポイントの明石城40Km地点で無念のリタイアに終わった(図-11)。

一方、関東100Kmは、小田原城～江の島～横浜～明治神宮外苑までの100Kmのコースを、21時間19分で完歩できた(平均時速4.7Km/h)(図-10)。これは、事前に3回に渡って全区間を踏査したことにもよるが、終始マイペースを崩さずに歩みを刻んだからである。その事前踏査で、筆者は1kmを平均約1400歩15分で歩くのが安定していることを掴んだ。従って、時速4km/hの歩速とみなせる。また、東海道線は東京～小田原間の約100Kmを100分程で走行するので、東海道線の速度は、分速1Km(時速60Km/h)であり、筆者の15倍の速度となる。ましてや、東海道新幹線は、小田原～東京間を約30分で走行するから、筆者の約50倍の速度に相当する。

おそらく、人間の歩行能力等は、石器時代から殆ど変わっていないと思うが、日頃何気なく乗っている電車、新幹線の速さ便利さが如何に凄いものなのか！100Kmを実際に歩き通してみても、初めて体感・体得・納得できた次第である。便利な社会が当たり前過ぎてまた、同時に、東日本大震災の不意打ちを食らった時のことを思い出す。まずは我が身の安全確保をしたうえで、自分自身にできることは、自分の手が届く範囲、目が届く範囲のことしか対応できないという悲しいまでの限界とその現実である。スーパーマンは助けに来てはくれないのだ！



図-10 関東100Km



図-11 関西100Km

避難するにせよ、救助にあたるにせよ、その第1撃を受けた直後、その時あなたは生き残っているのですか？他の人を助けたいという想いはあっても、その原点・現実を忘れていませんか？今回の100kmウォークを通して自分自身に改めて問いかける機会となった。

#### 4 今後に向けて

##### 4.1 ドローンの利活用の模索

2022年に航空法が改正され、重量100g以上の無人航空機（ドローン等）は航空法の適用を受けることとなり、国交省の飛行許可申請手続き等が必要である。免許制へ移行する見込みである。通常は、当社製品の納入、納入後の維持整備・調査等のために、災害時等は工場敷地内、周辺の状況把握等にも自力で活用できる体制構築を目指している。現時点で、JUIDAによる、無人航空機操縦技能証明及び無人航空機安全運航管理者証明取得済みである。

##### 4.2 可搬式貯水槽 NW-12 の可能性追求

東日本大震災で、甚大な被害を受けた航空自衛隊・松島航空基地では、海水も浄水可能な浄水装置で水は確保できたが、その水を保管する容器が無かったという教訓から、災害時に給水拠点として活用できる、移動可能な貯水槽 NW-12 が考案された（図-12、写真-10）。

水槽寸法 1.3W×3.05L×1.19H 満水 3.25 m<sup>3</sup>

運用（使用）場面として、(1) 災害派遣や国際平和協力等地域給水拠点 (2) 大震災や大事故における受水槽の損傷に対する給水施設の解説 (3) 島嶼地域に対する給水施設の開設等を考慮し、航空自衛隊の16か所の基地で保有されている。



図-12 可搬式貯水槽 NW-12

平成30年の西日本豪雨における災害派遣では、航空自衛隊・築城航空基地から、NW-12を73式大型トラックに搭載し、さらにその一式をC-2輸送機で、東広島空港まで空輸した後、現地での給水支援活動に従事した実績がある（写真-11）。給水拠点にNW-12を設置するこ

とができれば、給水車でNW-12に給水し、給水車は他のタンクへの効率的配水・給水に専念できることになる。かつてのように、給水車に長い列ができ、給水車のタンクが空になるまで拘束される事態は回避されるであろう。給水車とNW-12又は、浄水装置とNW-12とのコンビネーション、組み合わせによる機動性の向上・可能性についての活かし方を検証したいと考えている。



写真-10 可搬式貯水槽 NW-12



写真-11 H30年西日本豪雨災害派遣で活躍するNW-12

##### 4.3 他活動団体等とのネットワーク化推進

貯水槽から、その水を使う場所、人への繋がりを辿りながら、既メンバーである東京透析医会や、Chonetのチャンネルを通じて繋がった Utility Solutions（ユーティリティ・ソリューションズ）の浄水装置とのコラボ、介護施設における防災・応災・減災対策など、新たな可能性を追求する所存である。

##### 4.4 機動出前寺子屋 & キッチンカー Salon De KATA（サロン・ド・カータ）

以上述べてきたことがらの集大成として、(1) 出前講座 (2) 語り場・溜まり場の機能を具現するために、機動出前寺子屋&キッチンカーの運用化を最終目標とし

て思案中である（筆者調理師免許取得済み）。具体的には以下の主テーマを設定している（図-13、写真-12）。

- ① 東北地方等の復興住宅巡りをしながら元気を取り戻す一助となり、
- ② 米村でんじろう先生流儀の鮮やかな可視化による防災サイエンス的な出前講座等により、防災・応災・減災の意識醸成の語り場・溜まり場とする。
- ③ 平時は、元気・癒し・励ましの場として、
- ④ 災害時はそのまま、被災者への炊き出し屋台（食事提供機能）として運用する。
- ⑤ あるいは、当面・当座の日常社会問題となっているコロナ禍蔓延の制約環境下で困っている子ども食堂（日々）の一助としての活用もできよう。一方的に食事を与えるというのではなく、共に調理してそれを囲んで仲間といただくという一連の所作を通じて、料理する楽しさ、喜んでもらえる喜びを共有して共育〔自らも子ども達と共に育つ〕する。さらには、地域・まちづくりにも寄与できるはずである。

そのような活動の場を通じて、大言壮語する事無く、デクノボー精神（雨ニモマケズ・・・）で世の為・人の為の一助である生き方（働き方ではなく）を試みたいと考えている。「防災・減災」とは、単に災害・災いへの対処が目的ではなく、それを乗り越え永く生き抜く智慧（サバイバル）としての「応災力」と共にあるべきとの視点から、再考・検証を継続する所存である。



図-13 Salon De KATA（サロン・ド・カータ）の暖簾



写真-14 機動出前寺子屋 & キッチンカーのイメージ

## 5 おわりに

Chonet の理念の根幹は「Know HOW と Know WHO」にある。各個の特徴や技（Know HOW）を究めていくことは、自分なりの得意技の深みと幅を広げることになる。その井戸を深堀りしていくと、いつの間にか地下水脈に至るようなものだろう。そこで、気付くだろう。自分だけの井戸（Know HOW という特技としての縦糸）と、他の人々それぞれが掘っている井戸が、実は知らないうちに、共通の地下水脈（Know WHO）という人の繋がりとしての横糸で繋がっていることに、である。「Know HOW という縦糸」と「Know WHO という横糸」の組み合わせや織り合わせ具合次第で、丈夫で多様な模様の生地に仕上がっていくのだろう。

「強くて、しなやかなニッポンへ」というサブタイトルの国土強靱化基本計画（平成 30 年 12 月 14 日閣議決定）にもあるように、「強さ」と「しなやかさ」を持った安全・安心な国土・地域・経済社会の構築に向けた「国土強靱化」（ナショナル・レジリエンス）を推進することにも叶うと考える。

特に、Chonet では、現場レベル、個人レベルで秀でた自立力（Know HOW）による縦糸と、多様な人々、団体等（Know WHO）による横糸を紡ぎながら「強（したた）かな」ネットワーク構築を目指したい。

### （参考文献）

- 1) [NPO Chonet 貯水タンク防災ネットワーク](#)
- 2) <https://www.chonet.org/>
- 3) [NYK 日本容器工業グループ 株式会社エヌ・ワイ・ケイ \(nyk-tank.co.jp\)](#)
- 4) [貯水タンクを地震から守れ！ | 中央大学 平野研究室 \(chuo-u.ac.jp\)](#)
- 5) [東京都透析医会 \(tokyo-touseki-ikai.com\)](#)
- 6) [過去の地震情報（日付の新しい順） - 日本気象協会 tenki.jp](#)
- 7) [電子基準点がとらえた日本列島の地殻変動（国交省国土地理院）](#)
- 8) [畠山 重篤, 鶴飼 哲夫: 牡蠣の森と生きる-「森は海の恋人」の30年 中央公論新社 pp1-176, 2019](#)
- 9) [土屋信行: 災害列島の作法—女川町の奇跡 防潮堤のない復興まちづくり 主婦の友インフォス, 2022](#)
- 10) [君は見たか、巨大地震に備えた国内最大級の防潮堤 寄付金 300 億円のできた浜松の一条堤が圧巻すぎる/ライフ/社会総合/デイリースポーツ online \(daily.co.jp\)](#)
- 11) [国土強靱化基本計画（平成 30 年 12 月 14 日閣議決定） \[kk-honbun-h301214.pdf \\(cas.go.jp\\)\]\(#\) \[国土強靱化 | 内閣官房ホームページ \\(cas.go.jp\\)\]\(#\)](#)

# 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～

### DEVELOPMENT OF SUPPORT DEVICE AND SYSTEM FOR LIVING WATER PURIFICATION IN DISASTER AREAS - For Hygienic and Stress-Free Life in Disaster area -

中根圭介\*, 栗田恵子\*\*

NAKANE Keisuke and KURITA Keiko

\* (筆者1) 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2) コアララボ代表、東京大学大学院教育学研究科科目等履修生

キーワード：生活用水、災害、避難所、ろ過、災害関連死

(Living Water, Disaster, Shelter, Filtration, Disaster-related deaths)

## 1. はじめに

我が国では、近年頻発する自然災害で、長期にわたる避難生活が避けられないものとなっている。

この論文では、被災者の悲しみや不安な生活状況を少しでも取除く助けになりたいと考え自作した「非常用生活用水浄化装置」について、開発状況を報告する。

### (1) この開発に取り組んだ理由

水処理専門メーカーのエンジニアであった筆者1が、被災地での生活の質の向上、すなわちQOL (Quality of Life) に取り組むきっかけとなったのは、熊本地震(2016年)、西日本豪雨(2018年)と連続して異なるタイプの大災害が各地を襲い、多くの被災者が長期にわたり避難所等でストレスを抱えていることを報道等で知ったためである。

2019年の内閣府・防災担当の調査では、図-1に示すように熊本地震の際の避難所滞在中に最も不足していたものとして「生活用水」があげられている<sup>1)</sup>。

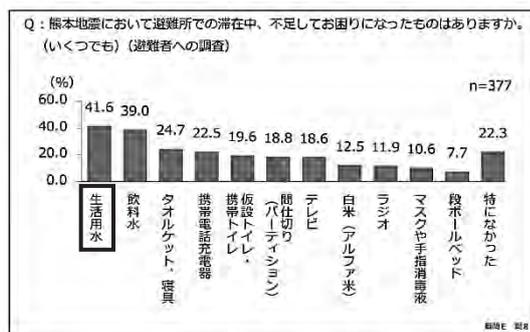


図-1 熊本地震における避難者への調査

一般に「生活用水」の定義として「飲料水」を含む場合があるが、今回我々の論文では、「生活用水」とは図-1の区分に従い、「飲用を前提とせず、風呂・シャワー、洗濯、清掃・洗い物、トイレなどに比較的多量に用いる水」として用語を定義し使用することとした。

同様な避難所での生活用水に対する要望は、1995年に発生した阪神・淡路大震災の際の「市民意識調査『最も困ったのは生活用水』」にも課題提示されていた<sup>2)</sup>。

しかし約20年後に発生した熊本地震でも、ほとんど改善が進んでいないことが明確になった。

そこで筆者1は、所属先企業に「生活水のニーズにこたえる事業」を提案したが不採用となった。

だがその後も筆者1は社会のニーズに応えたい思いが強く、2020年に独立して事業化を目指すこととした。

### (2) 先行調査

#### a) 政府の取り組み

政府の方針として「避難所における良好な生活環境の確保に向けた取組指針」<sup>3)</sup>には、図-2に示すように生活用水対策の重要性が明記されている。

#### (3) 生活水の確保

飲料水の他に、トイレや避難所の清掃、洗濯、器材の洗浄などの用途に欠かせない「生活水」の確保が必要になる。命の継続に不可欠な飲料水は支援物資として確保されるが、その他の用途の水についても、感染症の防止等、衛生面の観点から、衛生的な水を早期に確保できるようタンク、貯水槽、井戸等の整備に努めることが望ましいこと。

図-2 避難所における備蓄等

また同取組指針では、避難所の機能として「被災者の避難所における生活環境の整備に必要な措置を講ずるため、(略)入浴及び洗濯の機会確保(略)」とし、以下も備えるべき資材としている(図-3)<sup>3)</sup>。

優先順位を考慮して、必要に応じ、次の設備や備品を整備するとともに、(略)  
 エ 洗濯機・乾燥機、洗濯干し場  
 オ 仮設風呂・シャワー

図-3 避難所の機能

b)対象となりうる避難所の数

被災後の滞在が長期化することを想定して資材を備蓄する「指定避難所」の数は、最新の「防災白書」<sup>4)</sup>によれば、2014年度の48,014ヶ所から、2021年12月1日現在では81,978ヶ所に増加しており、より密度の高い面での対応が求められる。

c)南海トラフ地震における被害想定

内閣府(防災担当)の「南海トラフ巨大地震の被害想定について(施設等の被害)」<sup>5)</sup>では、被害を次のように想定している。

① 断水：被災直後の被害

最大約3,570万人が断水し、東海三県の約6~8割、近畿三府県の約4~6割、山陽三県の約2~5割、四国の約7~9割、九州二県の約9割が断水すると想定される。

② ライフライン復旧推移(上水道)

発災約1ヶ月後では、東海三県で約1~2割、近畿三府県で数%、山陽三県で数%、四国で約1~2割、九州二県で約1割の需要家が断水したままであるが、これら15府県全体では9割以上の断水が解消される。

③ 避難者数

避難者は断水の影響を受けて1週間後に最大で約880万人発生し、避難所への避難者は1週間後に最大で約460万人と想定される(図-4)<sup>5)</sup>。

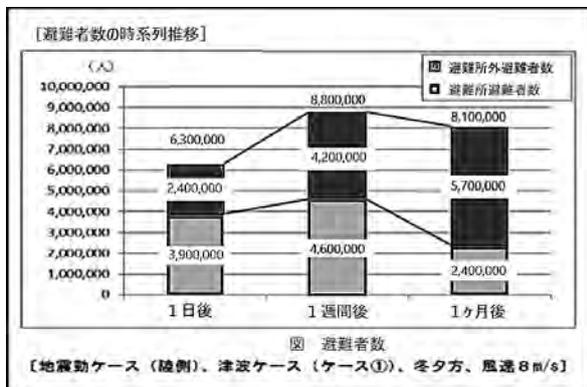


図-4 避難者数の時系列推移(南海トラフ地震)

d)首都直下地震の想定における被害想定

東京都では2022年5月に10年ぶりに被害想定を見直した<sup>6)</sup>。

耐震化の進捗などにより被害規模は縮小しているが長期にわたり市民生活に甚大な影響が出ることが予想されている。

①上水道

東京都の見直し後の想定では以下のようになっている(表-1とも)<sup>6)</sup>。

「断水率は都心南部直下地震で最大となり、都内の断水率は平均で26.4%と想定される。復旧が概ね完了するのは、都心南部直下地震で約17日後になると想定される。」<sup>6)</sup>

「水道管路以外の施設(浄水施設等)の被災や、受水槽や給水管など利用者の給水設備の被災等は、定量評価結果には含まれていないため、被災状況により、被害が大幅に増加し、復旧期間が長期化する可能性がある点に留意する必要がある。」<sup>6)</sup>

表-1 上水道・断水率予想(東京都)

表 上水道 断水率				
	都心南部直下地震	多摩東部直下地震	大正関東地震	立川断層帯地震
東京都	26.4%	25.8%	15.7%	4.7%
区	34.1%	28.6%	19.5%	0.3%
多摩	9.2%	19.5%	7.2%	14.5%

表 上水道 復旧推移(断水率)				
	都心南部直下地震	多摩東部直下地震	大正関東地震	立川断層帯地震
1日後	26.4%	25.8%	15.7%	4.7%
3日後	26.4%	25.8%	15.7%	4.7%
1週間後	16.8%	12.2%	4.5%	0.0%
1か月後	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

② 避難者数(1都4県)

家屋被害が最大になると想定される、冬の18時、風速15m/sの条件で発生した場合、避難所生活者は1都4県で4日後に約390万人、1ヶ月後で約270万人と想定されている(図-5)<sup>7)</sup>。



図-5 被害想定結果:東京湾北部地震 M7.3の場合

### ③避難所の開設期間

「避難者に係る対策の参考資料(内閣府防災情報)」<sup>8)</sup>では、避難所開設期間は地域により長短はあるが、最大で2ヶ月以上が想定されている(図-6)<sup>8)</sup>。

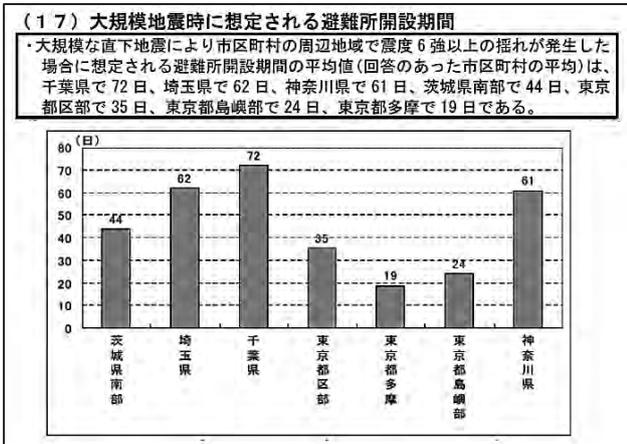


図-6 首都直下地震時に想定される避難場所開設期間

#### e) 自衛隊の入浴支援について

被災地における生活用水ニーズの主要なもの1つとして、入浴・シャワーがある。

現状、稼働可能な入浴施設(ホテル、旅館、温浴施設等)の活用他に、自衛隊の入浴支援がある。

全国22の部隊に「野外入浴セット2型」が備えられており、それぞれゆかりの名が付けられている。災害派遣の三要件(緊急性、非代替性、公共性)を考慮して開設されるが、利用する被災者にしほしの安らぎを与えている<sup>9)10)</sup>。

表-2は、平成30年以降の大規模災害で自衛隊の支援活動を集計したものである。入浴支援は住民向けの給水支援と並んで、最も被災市町村からの要望が高いことがわかる<sup>11)</sup>。

表-2 自衛隊の活動状況の例

資料1-③ 調査対象市町村における自衛隊の活動状況

区分	災害名					計
	平成30年7月豪雨	平成30年北海道胆振東部地震	令和元年西日本豪雨	令和元年東日本豪雨	令和2年7月豪雨	
自衛隊の支援を受けた市町村数	4	12	16	41	14	87
① 人命救助	4	1	0	20	8	33
② 給水支援(住民向け)	3	9	10	10	5	37
③ 給水支援(医療機関向け)	1	1	1	5	0	8
④ 給食支援	1	4	0	4	1	10
⑤ 入浴支援	3	5	12	11	5	36
⑥ 医療支援	0	2	0	0	0	2
⑦ 災害廃棄物等処理	2	0	0	16	2	20
⑧ 道路除排	2	1	5	12	5	25
⑨ 物資輸送	2	6	0	6	8	22
⑩ 防疫支援	3	0	0	4	0	7
⑪ 電力復旧支援(創生等時表)	0	0	10	4	0	14
⑫ 家里応急処置(ブルーシート展開)	0	0	15	0	1	16
⑬ その他	0	5	1	16	3	25

(注) 当省の調査結果による。

## 2. 生活用水供給の必要性

自然災害のうち最も規模が大きく、被災者数が多くなるのは、大規模地震であろうと筆者らは推測している。

前述の様に首都直下地震では2~3ヶ月の避難所開設が予想される中で、風呂・シャワー、洗濯、清掃・洗い物、トイレなどの生活用水ニーズは1日も欠かすことができない。

また避難所ではCOVID-19対策に加え、高齢者や被治療者、障がい者、乳幼児など災害弱者の利用を前提としなければならない。

そこで筆者2のもと、生活用水を供給する装置に求められる課題を整理し、開発の目標に加えた。

### (1) 装置の必要条件

必要な装置の開発条件は以下とした。

- ・「生活用水」に特化し多量の水を安定供給すること(「飲用水」は厚生労働省で51項目の水質基準があり被災環境での維持管理にリスクがあること、給水車や備蓄水という代替性があるので用途を明確に限定する)
- ・限られた台数を必要な場所で利用できるよう、可搬式であること
- ・多量の水が必要となるので水源を確保すること
- ・停電、断水、ガス不通でも稼働できること
- ・専門知識がなくとも動かせること
- ・故障や消耗品切れのリスクがないこと

### (2) 医療者の立場からの意義

筆者2は、西新宿に災害拠点病院である東京医科大学の新病院を開院するに際し、新たに作成された災害時の運用マニュアル(BCP)が機能するかどうか確認する立場(災害医療救護通信エキスパート、医療安全管理学の研究者)であった。

医療の視点で避難生活でのQOL向上(特にストレス低減)を考え、生活用水の必要価値を明確にした(図-7)<sup>12)</sup>。

- ・泥や汗で汚れた体を洗い流すことは、感染防止、精神衛生にとっても有効である<sup>12)</sup>
- ・入浴による効果は、精神衛生、感染予防、睡眠の確保、免疫力の向上などが認められている<sup>12)13)</sup>
- ・医療行為や調理等では手指洗浄が必須だが、まず生活用水の流水で十分に流したのち、浄水で仕上げ洗いすることで、浄水や消毒剤の使用量削減につながる<sup>12)</sup>
- ・衣類や下着の洗濯により、感染症発症の防止効果が期待できる<sup>12)</sup>
- ・避難所のQOL向上が災害関連死の削減につながる。(感染症、水のないストレス：トイレを我慢する、基礎疾患の悪化など)<sup>14)</sup>
- ・ご遺体処理の際にも多量の水が必要であり、生活用水は好適である。ご遺体の尊厳が守られる<sup>14)</sup>
- ・災害を想定したシミュレーション訓練は、反復練習をすることで訓練効果が上がるという研究があ

る<sup>16)</sup>

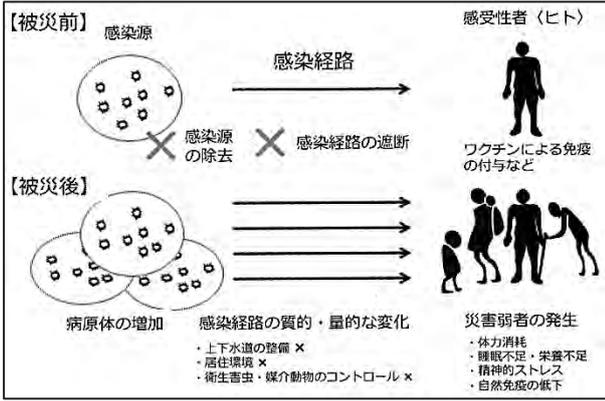


図-7 公衆衛生基盤の破壊による感染症の増大

### 3. 装置開発とスペック

以上のように開発目標が明確になったため、筆者1は前職企業やその取引先の協力を得ながら、装置開発を行った。

市場には、20社程度の災害用水処理装置が市販されているがその長所短所を把握し、真に活用されるために開発コンセプトを明確にした。

他社製品を概観すると、飲用を謳っているものが多く、フィルター材に分離膜(精密ろ過膜:MF膜、限外ろ過膜:UF膜、逆浸透膜:RO膜)を採用しているものが多い。これらの膜は分離精度は高いが、ろ過分離した濁質が膜の目詰まりを招き、徐々に処理水量が低減する。そのため定期的なフィルター材(カートリッジ)の交換が必要となるが、単価が数千~数万円することが多く、消耗品コスト、備蓄コストの負担増となりかねない。

#### (1) 開発コンセプト

筆者1は既存製品と異なり生活用水に特化することで、必要かつ十分な性能とするべく以下のコンセプトを明確化し、段階的な開発工程で製作にあたった。

#### a) コンセプト

開発コンセプトは以下のとおりである(図-8)。

**開発コンセプト**

- ・「生活用水」に特化
  - 飲料水は備蓄水・給水車等に任せ、要求水質による供給の多元化で効率的な被災地対応
- ・衛生的な処理水を多量に生産
- ・使いやすいこと
  - 移動、操作、電源確保 容易なこと
- ・維持管理が安価なこと
- ・「使い慣れて」実践に役立つこと
  - 消耗品コストを気にせず、防災訓練等で積極的に実運用でき、いざという時のために操作に慣れてもらう
- ・消耗品の入手リスクが少ないこと

図-8 開発コンセプト

#### b) 目標水質

処理水質は厚生労働省の浴槽水、遊泳プール水基準である安全性に根拠がある値と同程度と設定した。参考として飲用水に適用される水道水基準51項目も併記する(表-3)。

表-3 処理目標水質

本機は 厚生労働省の 浴槽水、プール水程度と設定		
原水条件	水質項目	本機 処理水水質(設計値)
	①水素イオン濃度	原水とほぼ同じ
	②濁度	5度以下
有害物質等や人体に触れることが不適切でない水源(プール、池、川、井戸、受水槽、防火水槽等)	③有機物量	過マンガン酸カリウム消費量 25mg/L以下
透視度の目安は1m。プール水面から底の模様や沈降物が見える程度。	④遊離残留塩素濃度	0.4mg/L以上
	⑤大腸菌	規定せず。
	⑥一般細菌	④遊離残留塩素濃度を満たすことで不活性化するものとする
	⑦レジオネラ菌	規定せず。

水道水基準では、下記51項目+残留塩素を満たすことが必須

一般細菌、大腸菌、カドミウム及びその化合物、水銀及びその化合物、セレン及びその化合物、鉛及びその化合物、ヒ素及びその化合物、六価クロム化合物、亜硝酸態窒素、シアン化合物イオン及び酸化シアン、揮発性無機窒素及び亜硝酸態窒素、フッ素及びその化合物、有機炭素及びその化合物、宮城化有機炭素、4-ジオキサシス、2-シクロロエチレン及びトランス、2-シクロロエチレンシクロメタン、テトラクロロエチレン、トリクロロエチレン、ベンゼン、塩化水素、クロロホルム、シクロロメタン、シクロクロメタン、臭化水素、トリクロロメタン、トリクロロエチレン、ジメチルジクロロメタン、プロピルアルコール、ホルムアルデヒド、亜硝酸態窒素、亜硝酸イオン、アルミニウム及びその化合物、銅及びその化合物、亜鉛及びその化合物、ナトリウム及びその化合物、マンガン及びその化合物、酸化銅イオン、カルシウム、マグネシウム等(硬度)、亜硝酸態窒素、亜硝酸イオン、シアン化合物イオン、2-メチルシロルノール、非イオン界面活性剤、フェノール類、有機電解質有機酸(「TOC」の値がpH、味、臭気、色度、残留塩素濃度)

#### c) 全体構成

実際の使用状況を予測し、水処理装置廻りを含む全体構成を示したものが図-9である。

すなわち、水源となるプール、貯水タンク等の貯留水をポンプで吸引し、かつ加圧ろ過し、その後活性炭で溶解性物質を吸着したのちに塩素系消毒剤を添加し、利用先に送水する。

停電時でも利用できるように、電源と一体で可搬できることが必要である。

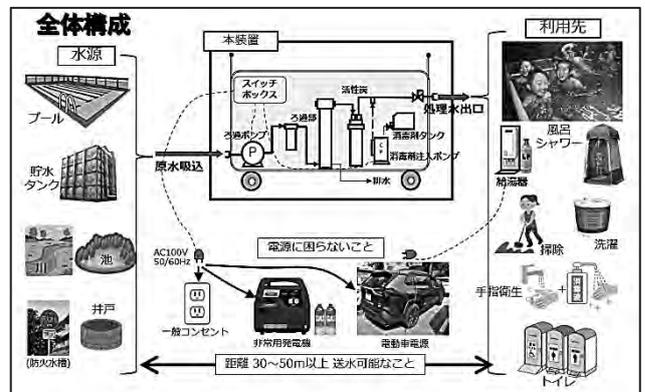


図-9 全体構成

#### (2) 開発工程と採用した技術

筆者1は、2018年からイメージ化した内容を順次開発に取り組んだ。

当初検討をPhase1、試作組み立てをPhase2、そしてプロトタイプ機製作をPhase3とし、各段階での課題と採用技術をまとめる。

#### a) Phase1 2018年(前職在籍時)~2020年前半

Phase1では機材類を購入し、仮組み立てで性能を評価した(表-4)。

表-4 Phase1 検討事項と採用技術

技術要素	技術課題	検討事項	採用技術
処理水量	同時に複数の水栓が利用できる	ろ過ポンプ能力と関連する。	最大2,000L/時とする
電源	全国で容易に手に入る電源で稼働すること	装置全体が家庭用コンセント (AC100V-1500W,50/60Hz) で動くこと	ポンプ類の選定により最大で600W以内となった。
ろ過方法	長時間性能が安定し、消耗品コストが安価なこと	消耗品の備蓄が経済的な負担にならない技術として、パウダーコーティングろ過を評価	パウダーコーティングろ過を採用
ろ過ポンプ	信頼性、低コスト、メンテナンスが容易	実績のある国内メーカー品を採用	トップメーカーの井戸用ポンプを採用
安全性	処理水が誤って口に入っても事故にならないこと	採用素材の安全性と、処理水の衛生確保	①フィルター用パウダーは食品添加物認定品を採用 ②後段に活性炭使用と塩素消毒剤を注入

この過程で検討・採用したろ過方法である、パウダーコーティングろ過は「プレコートろ過」の一種で、スリット(隙間約60μm)構造の芯材(ステンレス製)に、隙間より小さい無機質パウダー(珪藻土系の天然素材、径約30μm)を一気に流すことにより、ブリッジ効果でパウダーの集合で濁質をからめとり、水をろ過するしくみである。

濁質の捕捉性に優れ、流量低下が起きにくい特長がある。

また、消耗品がわずかなパウダーのみで、消耗品コストが極めて安く、廃棄物の量も少ないことが最大の利点である。

ろ過のしくみを図-10に示す。

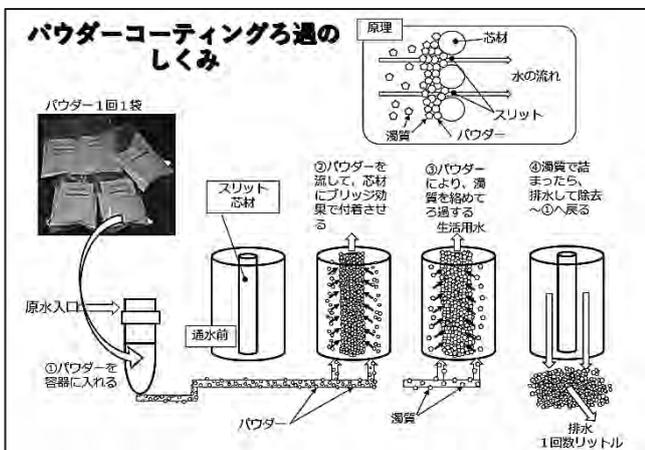


図-10 パウダーコーティングろ過のしくみ

図-10を参考にろ過工程を以下に解説する。

- ① パウダー約100グラムを容器入れる
- ② 原水と共にパウダーを流し、芯材の表面にブリッジ効果で付着させる
- ③ パウダーが濁質を絡めとりろ過する(ろ過径：数μm)
- ④ 濁質により目詰まりしたらパウダーと一緒に重力で排水して廃棄する(1回数リットル)
- ⑤ ①へ戻る

b)Phase2 2020年後半～22年前半

Phase1の検討結果を反映した試作機の製作(試作1号機、試作2号機)

資金的制約等から主要機器のみ購入し、組み立ては自作とした。

Phase2での検討内容を表-5に、試作1,2号機の外觀を写真-1に示す。

表-5 Phase2 検討事項と採用技術

技術要素	技術課題	検討事項	採用技術
可搬性	軽量コンパクトであること	2,000L/時の能力機として、他社より軽量、最小体積とする	アルミフレームの利用
操作性	電源供給が容易なこと	家庭用コンセント、ポータブル発電機、車載コンセントのいずれでも動くこと	実機にて確認済み
	作業要因が少なくシンプルなこと	バルブ等の手動操作部の合理化	操作バルブ3台で運転可能
故障リスク	故障が少なく、調達が容易なこと	故障リスクがある電気製品は、通常即納可能な市販品とする	ろ過ポンプ、消毒用ポンプに採用
消耗品リスク	専用消耗材が必要量備蓄されていること	1週間以上消耗品不足とならない量を、あらかじめ納入する	水200トン以上のろ過ができる消耗品を付属
ランニングコスト	訓練で頻繁に使用しても経済的負担が少ないこと	パウダーコーティング・フィルターのコスト明確化	標準3,000L処理して消耗品代100円程度 シャワー1人当たり2円程度
衛生管理	消毒剤の濃度管理	同時使用量が増減しても塩素濃度が一定にする	流量計と消毒剤注入ポンプの比例制御採用
環境負荷低減	廃棄物等の環境負荷が小さいこと	発生する廃棄物の精査	廃棄物は、天然素材のパウダーと補足した濁質のみで環境負荷ゼロ

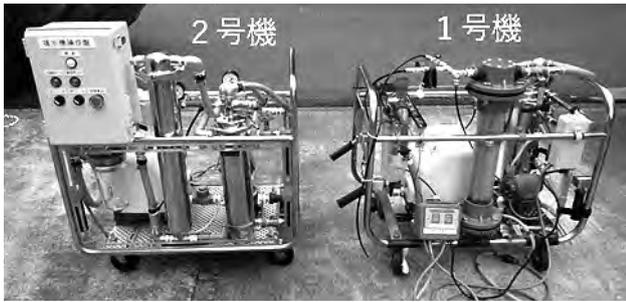


写真-1 試作2号機(左)と同1号機(右)

c)Phase3 2022年後半～現在  
 実機を想定したプロトタイプ(3号機)製作～完成  
 Phase2 までの知見を反映し、モデル機となる3号機を自作した。  
 このプロトタイプ機の構成は図-11の通りである。

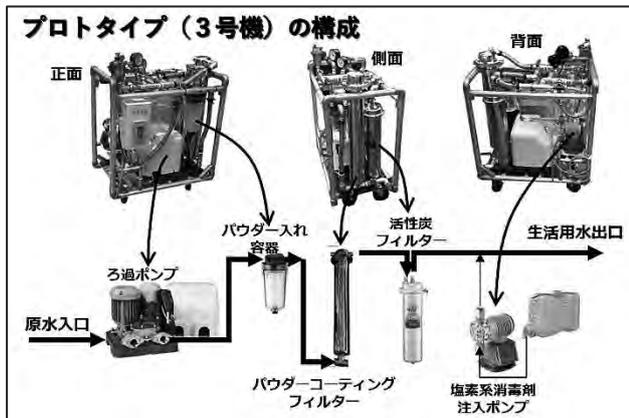


図-11 プロトタイプ(3号機)の構成

またポータブル発電機と簡易洗濯機と組み合わせた外観を写真-2に示す。



写真-2 プロトタイプ(3号機)と周辺装置の組み合わせ例

#### 4. 開発の達成状況

DIY製プロトタイプ機の現状の到達点は以下の通りである。

##### (1) 特長

開発した装置の特長をまとめる。

- ・メインのパウダーコーティング・フィルターは、

- ・水処理最大手・栗田工業グループの製品を採用
- ・安全のためパウダーは食品添加物を採用
- ・最終ポイントに塩素系消毒剤を添加
- ・処理水量はシャワーノズル4口程度が同時使用可能な、1時間当たり最大2,000L/時
- ・取水部から使用先まで距離30～50m以上の送水が可能
- ・電源は100V-50/60Hz兼用、最大600W以下  
ポータブル発電機やEV車・HV車からの給電も可能
- ・サイズ 幅70cm×奥行40cm×高さ90cm、50kg
- ・パウダー交換頻度：実績で1回あたり3,000L処理程度
- ・消耗品のパウダーは、100回分を付属品納入  
24時間連続稼働で1週間分以上の運転が可能
- ・活性炭カートリッジによるバックアップ対策  
(色・匂い等の除去)
- ・消耗品や故障時の交換部品等は、極力広く市販されており、災害時等にも入手が容易なものを採用

写真-3にろ過の原水と処理水の様子、写真-4に、車載状況と車載コンセントからの給電の例を示す。



写真-3 ろ過原水(左)とろ過処理水(右)



写真-4 車載の様子と車載コンセントからの給電

##### (2) 主な仕様

本装置の主な仕様を図-12にまとめる。

最大処理水量：2,000L/時 (シャワー4口同時使用可能)
処理水質：(厚労省基準)浴槽水、プール水並み
送水距離：取水部～使用先 30～50m以上
電源：AC100V(50/60Hz) - 約600W
概算寸法：700L×400W×900H 装置体積 0.252m <sup>3</sup>
輸送重量：約50kg
付属品 パウダー100回分 (24時間連続で1週間以上運転可能な回数分)
活性炭フィルター 3本

図-12 主な仕様

## 5. 評価と現状の課題

### (1) 医療の視点からの評価

災害時において、被災者が生活上で様々な感染症に感染するリスクは、被災直後から上昇する。時間経過とともに、患者発生数は増加する傾向がある(図-13)<sup>12)</sup>。

避難所などでの感染症の予防が、被災者の健康状態改善さらには死亡率(災害関連死)低下に寄与するといっても過言ではない<sup>12)</sup>。

例えば、2020年からのCOVID-19の国内流行を見ても、感染後年齢にかかわらず基礎疾患の重症化で死亡する事例も多数報告されている<sup>17)</sup>。

感染症を予防するには手指衛生、入浴、洗濯などでウイルスや細菌などを洗い流すことが一番の予防策となる<sup>12)</sup>。

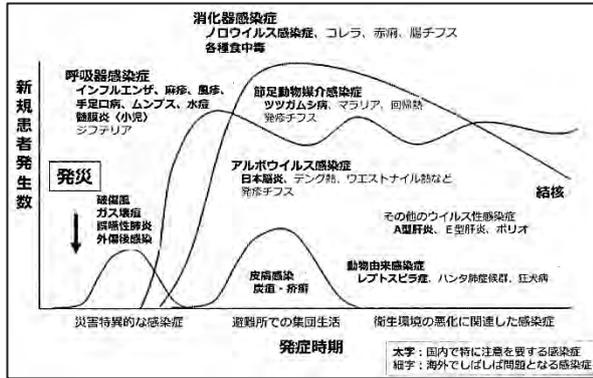


図-13 災害後に問題となる感染症と発症時期

災害発生時には、DMAT/自衛隊/消防/警察等による緊急救援活動が来るまで、被災者は避難所などで持ちこたえなければいけない(図-14)<sup>12)</sup>。



図-14 災害後のフェーズ(時期)と感染制御のための活動

DMATにかかわる医師たちの研究チームはすでに南海トラフ地震を想定したシミュレーション訓練を行っており、その研究チームによると、南海トラフ地震が起きた際にDMATチームは34%程しか災害地にチーム派遣ができないと警告を発している<sup>18)19)</sup>。

災害救援活動隊が来ることの出来ない避難所は、生活水を確保しなければならない。この時に「非常用生活用水浄化装置」を備えてあれば、災害発生直後から

プールの水などを避難所の生活用水に利用できる。このことは避難所の感染症対策に寄与することとなり、避難所生活の質を向上させることが期待できる。

避難所に生活用水浄化装置を備えることは、1つの有効な対策と考える。

### (2) 現状の課題

本論文では、避難生活における生活水の供給に対して、水処理およびその電源の解決法を提案した。

現状の課題として、以下の解決に向けての取組みが必要と考えている。

- 避難所あるいは他の使用先において、用途や季節によりお湯のニーズは必須と考えている。現状、多量の水を容易に加熱するコンパクトな装置がないが、これについては生活用水加熱に用いる非常用LPガス湯沸し器(可搬式)を実用化する目途がたった。今後具体化してゆきたい。
- 経済性として、3,000L程度をろ過して消耗品コストが100円程度、シャワー1人(使用量50L)換算で約2円の目途がたったが、その利点を活かしてコストを気にせず防災訓練等で積極的に使って慣れることが、開発目的の一つである。そのため様々な機会での周知活動を続けたい。

## 6. 結論

本研究では、被災地での生活用水を供給するために、2,000L/時の能力を有する装置および供給システムの開発を行った。

開発した装置は、本体容積が0.252m<sup>3</sup>、重量50kgという小型であり、また使用電力が100V-600W以下の運用機能性を有している。

## 7. おわりに

十分な生活用水、特に温水の供給は、不便な生活の解消のみならず、被災者の健康確保、ひいては災害関連死の低減、復興の早期化など、有効な一法と考えられる。

今回、災害時の避難生活における生活水のニーズに対する技術的提案を行った。

この装置の普及により、自衛隊の入浴支援・給水支援と両輪で被災地生活のQOLが向上することを切望する。

## 8. 謝辞

本開発を遂行するにあたり、多くのアドバイスをいただいたNPO法人貯水タンク防災ネットワーク(Chonet)、装置化に協力いただいたクリタック株式会社、ここに深謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 内閣府, 平成 28 年度避難所における被災者支援に関する事例等報告書, 2017. 4, p45
- 2) 国土交通省 近畿地方整備局 震災復興対策連絡会議, 阪神・淡路大震災の経験に学ぶ, 2002. 1, 第 2 章 1 図 7  
<https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/daishinsai/2.html>  
(2023. 1. 2 閲覧)
- 3) 内閣府 (防災担当), 避難所における良好な生活環境の確保に向けた取組指針, 2013. 8, p12, p15
- 4) 令和 4 年度 防災白書 p84
- 5) 内閣府政策統括官 (防災担当), 南海トラフ巨大地震の被害想定について (再計算) ~施設等の被害, 2019. 6, p10, p12, p35
- 6) 東京都防災会議, 首都直下地震等による東京の被害想定報告書, 2022. 5
- 7) 中央防災会議 首都直下地震対策専門調査会, 首都直下地震対策専門調査会報告, 2005. 7
- 8) 内閣府防災情報, 避難者に係る対策の参考資料, p3, p193
- 9) 防衛省自衛隊HP, 入浴支援で活動で活躍する部隊,  
[https://www.mod.go.jp/j/approach/defense/saigai/saigai\\_item/nyu.html](https://www.mod.go.jp/j/approach/defense/saigai/saigai_item/nyu.html) (2023. 1. 2 閲覧)
- 10) Public Relations Office of the Government of Japan HP, 被災者の心身に安息もたらす自衛隊の入浴支援,  
[https://www.government.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/201903/201903\\_05\\_jp.html](https://www.government.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/201903/201903_05_jp.html) (2023. 1. 2 閲覧)
- 11) 総務省行政評価局, 自衛隊の災害派遣に関する実態調査 - 自然災害への対応を中心として - 結果報告書, 2022. 3, p48
- 12) 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ージメントの手引き, 一般社団法人日本環境感染症学会, S1-77, 2014
- 13) 石澤 太市, 入浴法および入浴習慣が心身に及ぼす影響に関する研究, 金沢大学大学院博論, pp. 1-67, 2014
- 14) 内閣府, 災害関連死事例集, 本編,  
[https://www.bousai.go.jp/taisaku/hisaisyagousei/pdf/jirei\\_01.pdf](https://www.bousai.go.jp/taisaku/hisaisyagousei/pdf/jirei_01.pdf) (2023. 1. 2 閲覧)
- 15) 中川武子, 東日本大震災被災自治体における遺体対応関連業務に, 自治体学, 33, Vol. 2, 51-56p, 2020
- 16) 大野木恵子, チーム医療の質的向上を目指したシミュレーション教育の効果—ノンテクニカルスキルの視点から—, 東京医科大学雑誌, 77, Vol. 1, 77p, 2019
- 17) 2022. 9. 7 新型コロナウイルス感染症対策 アドバイザリーボード資料 3-9, COVID-19 レジストリに基づく死亡事例の分析  
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000987073.pdf>  
(2023. 1. 2 閲覧)
- 18) Hideaki Anan, Investigation of Japan Disaster Medical Assistance Team response guidelines assuming catastrophic damage from a Nankai Trough earthquake, Acute Medicine & Surgery, Vol. 4, pp. 300-305, 2017
- 19) NHK ニュース「ヒーローは助けに出来ない 南海トラフ地震 医師からの警告」2022. 12. 22 放送  
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20221220/k10013927421000.html> (2023. 1. 2 閲覧)

# フィルターイノベーションによる環境修復 PFAS 水浄化、水・空気の循環利用

ENVIRONMENTAL REMEDIATION WITH FILTER INNOVATION. PFAS WATER TREATMENT, CYCLIC USE OF WATER AND AIR.

○山内仁\*, 西村章\*\*, 西村聡\*\*\*, 角田真之\*\*\*\*

YAMAUCHI Hitoshi\*, NISHIMURA Akira\*\*, NISHIMURA Satoshi\*\*\* and KAKUTA Masayuki\*\*\*\*

\* 流機エンジニアリング アジア・アフリカ環境ソリューション室（〒108-0073 東京都港区三田3-4-2 いちご聖坂ビル）

\*\* 流機エンジニアリング 代表取締役会長（同上）

\*\*\* 流機エンジニアリング 代表取締役社長（同上）

\*\*\*\* 流機エンジニアリング 新事業企画 市場開発室（同上）

キーワード：プリーツフィルター、添着層、PFAS、環境修復、水処理、粉末活性炭（PAC）、循環再利用  
(Pleated filter, Attached thin layer, PFAS, Environmental Remediation, Water Treatment, PAC, Circular Reuse)

## 1. はじめに

地域によっては宝の水とも呼ばれている地下水。その多くは澄み渡り、腐らない。地下水が腐らない理由は、地層の働きによるためである。地表から地中にしみ込んだ雨水や河川水の中の腐る原因となる有機物や細菌類が地層の物理的な過剰な吸着作用によって取り除かれる。この結果、水は腐りにくい清浄な地下水に生まれ変わる。ただ、地下水の流れは非常に遅い。地下水の流れる速さは、1m/日～1m/年程度である<sup>1)</sup>。このため、地層による自然の浄化作用には広い空間と長い時間が必要になる。一例として、富士山山麓の小池浜、丸池、柿田川などの湧水は、涵養後いずれも15年前後の年数を経た水<sup>2)</sup>と考えられている。

このゆっくりとした自然の営力による水の浄化作用を、装置として実現したのがECOクリーンLFPである。LFPのLはLiquid(液体=水)、FはFilter(フィルター)、PはPowder(機能性粉体)を意味する。弊社独自のプリーツ型フィルターに機能性粉体を添着した新しい水処理技術である。もちろん、この装置では広い空間や長い時間も必要としない。

昨今、地下水に溶け出したPFAS(有機フッ素化合物)などの地下水汚染がニュースにもなっている。工場用水・洗浄水などの循環再利用、排水リサイクルなど、水中の汚濁物質を除去したいというニーズはたくさんある。本装置は、PFAS、VOC(揮発性有機化合物)、BOD・COD・

TOC、チッ素・リン等の有機物や有機溶剤、難分解性物質の除去に加え、色度、臭気など様々な汚濁物質(又は溶存物質)の除去ができる。しかも、エネルギーコストが低く、少ないCO<sub>2</sub>排出の水処理技術となっている。本稿ではこのECOクリーンLFPによる水浄化能力について説明する。さらに、プリーツフィルターを用いた水・空気の循環利用システムについても紹介する。

## 2. ECOクリーンLFPによる水質汚濁の浄化効果

ECOクリーンLFP(略称、LFP)による浄化効果の一例を紹介する。写真-1は実際にLFPを用いて処理した畜産排水である。脱色・脱臭が難しいといわれていた畜産排水。見て分かる通り、左の処理前は濃い茶色がかかった色をしているが、右の処理後のものは無色透明となっている。

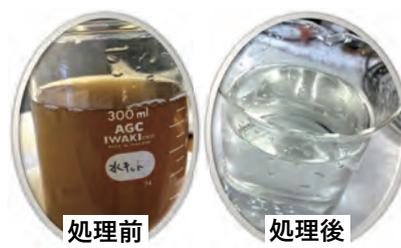


写真-1 畜産排水の処理前と処理後

実は右の処理後のものでは、色度だけでなく、臭気も除去されている。水道水と見間違えるほどである。もちろん、CODやBODなどの水質指標も大幅に低減している。

PFAS、COD、BOD、リンおよびVOCの処理試験の結果を表-1に示した。それぞれ除去率99%を超える高い性能の処理ができています。特に微量でも有害性が指摘されているPFASに対しては、処理後の濃度は不検出又は原水の1万分の1以下が期待できる。次に、このような高い浄化効果がどのような原理で発揮されるかについて解説する。フィルターに機能性粉体を添着しているところに秘密がある。

表-1 LFPによる水処理試験結果

対象物質	単位	原水濃度	LFP処理後濃度	除去率	
PFAS	PFOA	ng/L	102,752	2.5	99.99%以上
	PFOS	ng/L	2,200	N.D 1未満	/
	PFOS+PFOA + PFHxS	ng/L	292	N.D 1未満	
COD	mg/L	3,600	12	99.7%	
BOD	mg/L	500	5	99%	
リン	mg/L	600	1	99.8%	
VOC	トクロロエチレン	mg/L	19	N.D 0.001未満	99.99%以上
	トリクロロエチレン	mg/L	11	N.D 0.001未満	99.99%以上

### 3. 機能性粉体とフィルターへの添着とは

機能性粉体とは、活性炭、ゼオライトおよびMOF（金属有機構造体）など、さまざまな物質の吸着、触媒、イオン交換など優れた機能を持つ多機能材料の粉体である（表-2）。LFPでは処理対象に応じて機能性粉体の種類を選択するが、ここではLFPでの実績が最も多い粉末活性炭を用いて説明する。“活性炭を添着する”とは、フィルターに厚さ1mm程度の粉末活性炭膜（粉末活性炭添着層、以下添着層）をはるイメージである（写真-2）。



写真-2 フィルター単体（左）と粉末活性炭（黒）を添着したフィルター（右）、実機では円筒状のPleats Filterを使用。

活性炭の膜で水をろ過することにより、溶存物質が活性炭に接触し、吸着除去される。ろ過する際の原水が添

着層を通過時間は5秒から20秒程度である。薄い活性炭層であるにもかかわらず、ろ過水はゆっくりと添着層を通過する（図1参照）。

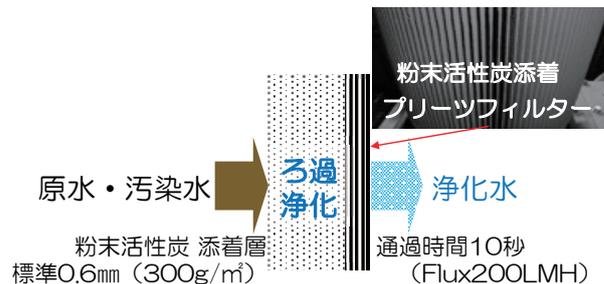


図-1 LFPでのPleats Filterと粉末活性炭（PAC）添着層（Attached thin layer）

表-2 水処理で用いられる代表的な機能性粉体と機能

材質	概説	機能
活性炭	材質が石炭、ヤシ殻、竹等よりなる多孔質体	脱臭・脱色、有機物化合物（PFAS、VOC）、窒素・リン、金属イオンの吸着除去に使用
ゼオライト	天然または人工鉱物よりなる多孔質体	水中のアンモニアの吸着除去に期待
MOF（金属有機構造体）	人工的に合成された金属イオンと有機分子からなる多孔質体	アンモニアの吸着・濃縮・脱着に期待。水中での構造維持が課題

### 4. 活性炭が細粒化すると“なぜ”能力が高まるのか？

活性炭が細粒化すると活性炭の体積あたりの表面積が広がる。一般的な直径5mmの粒状活性炭と弊社が使用している直径12μmの粉末活性炭とでは、粉末活性炭の単位体積あたりの表面積は粒状活性炭のおよそ500倍になる（表-3）。

表-3 従来技術・粒状活性炭吸着処理とLFPとの比較

PFAS処理技術	従来技術 粒状活性炭吸着処理	本システム LFP	
使用方法	吸着池 <sup>3)</sup> や吸着塔 <sup>4)</sup> でろ過	フィルターに粉末活性炭を添着・ろ過	
設定	形状・比重	球形、かさ密度0.5g/cm <sup>3</sup> 、比重1.8	
	直径	直径5mm	直径0.012mm
物性	体積当り表面積	3.1 cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup>	1500 cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> 【約500倍の表面積】
	粒子間隙	球充填で最大1.8mm	0.004mm 【粒子間隙1/500】
能力	SV※1	4.7~6.3	100~200 【20~30倍の処理量】
	吸着平衡時間	24~60時間	10秒で十分

※1：空間速度（SV）：1時間あたり、活性炭（ろ材）の何倍相当の水を処理するかの概念

また、粉末であることで空間中に存在する活性炭粒子の密度は高く、粒子と粒子の間隙が狭くなる。粉末活性炭の大きさを仮に直径1mとすると、粒状活性炭の間に空いた間隙は180mにもなる(図-2(上))。両脇にいる粒状活性炭が“鬼ごっこ”の鬼だと考えると、溶存物質はどうなるか。間隙が大きいので、溶存物質は水の流れと共に下流側にどンドン逃げてしまう。一方、粉末活性炭を添着させた場合は図-2(下)の状態になる。間隙はわずか40cmぐらいである。これだと、水は狭い間隙を通過していくので、溶存物質は活性炭に効果的に引きつけられていく。溶存物質は逃げきれずに活性炭に効果的に捕まってしまう。これが、活性炭が細粒化・粉末になることで吸着能力が向上する仕組みである。私たちはこの仕組みを“鬼ごっこ理論”と名づけている。

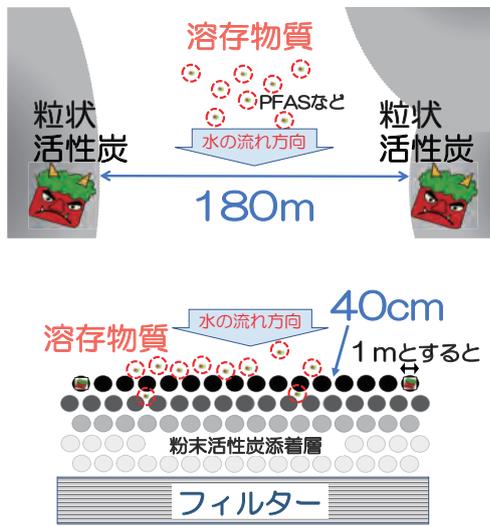


図-2 (上) 粒状活性炭の場合と、(下) 粉末活性炭をフィルターに添着した場合の間隙(粉末活性炭の直径を1mとした場合)

さらに、LFPにはもう一つのオリジナル性がある。PFASの一種PFOAの入口濃度を設定10万ng/Lとして、LFPで処理された水の濃度(出口濃度)変化を図-3に示した。ろ過水が添着層を通過する時間が約10秒、通水初期の出口濃度は2.5ng/Lである。出口濃度は通水と共にゆっくり加速しながら上昇し、通水量120Lを過ぎた後、出口濃度の急な上昇が認められる。この通水量と濃度の関係を記憶していただきたい。ここには添着層内での吸着と濃度勾配の特徴が表れている。

また、原水のPFOA濃度約10万ng/Lとして、液中の粉末活性炭量(=活性炭密度)を変えて(原水200mLに対し、粉末活性炭量A=0.1mg、B=0.5mg、C=3.0mg)添加・振とうし、振とう(反応)時間と液中濃度低減の関係を調べた。この結果、活性炭密度別に、反応時間と濃度は以下の①関係式で近似された(図-4)。

$$\text{上記の関係は } y = ax^{-n} \quad \dots \text{①}$$

ここで、y:濃度 ng/L、x:反応時間、a:反応1秒後の濃度、n:活性炭量(活性炭密度)により決まる常数

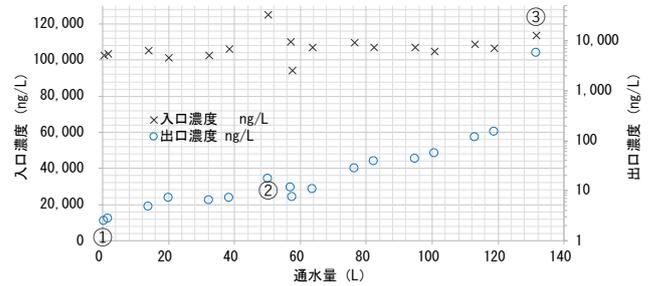


図-3 LFPによる水処理 処理に伴うPFOA入口濃度と出口濃度の変化

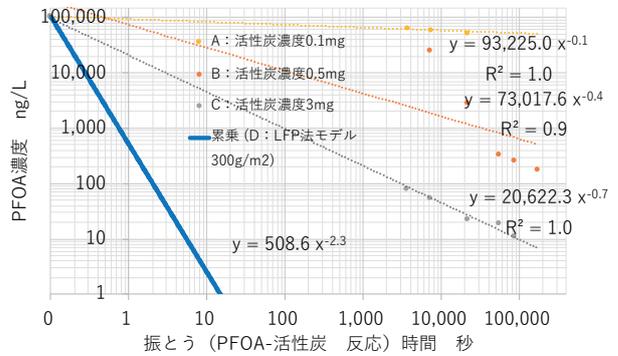


図-4 振とう・反応時間とPFOA濃度の低減

①関係式を、LFPでの「通水初期、粉末活性炭添着層通過時間(反応時間)10秒で出口濃度2.5ng/L」の条件に当てはめると、この条件での関係式は②となる。

$$y = 508.6 x^{-2.3} \quad \dots \text{②}$$

②式をLFPの「反応時間と濃度低減の関係」のモデルとして、前述の図-1に挿入したのが図-5である。

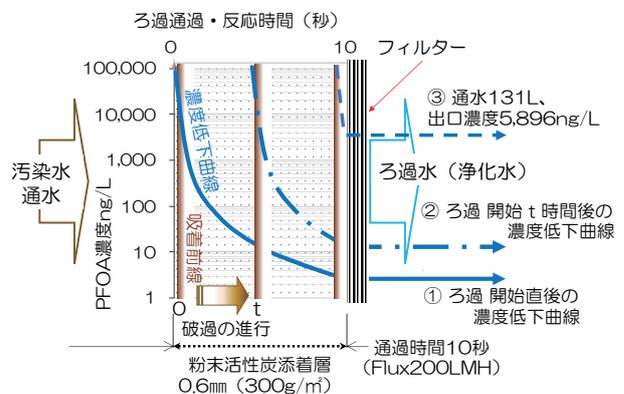


図-5 原水の移動と“ろ過・浄化”の進行(図中の①、②、③は図-3の①、②、③に対応する)

溶存物質の吸着は添着層の前列から行われる（図—5 参照）。原水入口側で高い濃度の溶存物質と接し吸着除去が行われている活性炭の最前列を“吸着前線”と呼ぶと、この吸着前線直後の濃度低減は急激と考えられる。活性炭は少ない量でより高い液中濃度に接している方がその吸着容量は大きくなる<sup>5)</sup>。吸着前線ではこの状態にあり、粉末活性炭の能力を最大限活かした吸着が行われていると考える。また、この吸着前線は活性炭が破過するに従い後方（図—5 の右側）に移動する。しかし、添着層の後方には未だ吸着能力に余裕がある活性炭が控えており、吸着前線が後方に移動しても高い吸着効果は維持される。

この“鬼ごっこ理論”と“吸着前線”の概念で水処理を行うのがLFPであり、多機能材料を粉体化した機能性粉体の能力を効果的に活かす仕組みである。

## 5. 従来技術・粒状活性炭吸着処理等とLFPとの能力比較

従来技術である粒状活性炭吸着処理等とLFPとの比較を次に説明する。

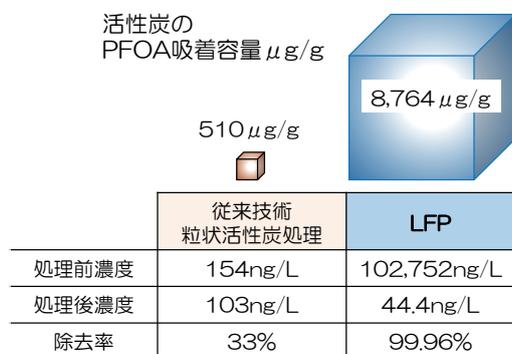
### 5.1 浄化能力の比較

粒状活性炭吸着処理（以下、GAC）とLFPとの処理能力の比較を表—4に示した。

表—4 粒状活性炭吸着処理とLFPとの比較

PFAS 処理技術		従来技術・粒状活性炭吸着処理 (GAC)	本システム LFP
能力	SV※1	4.7~6.3 <sup>3)</sup>	100~200 【20~30 倍の処理量】
	吸着平衡時間	24~60 時間	10 秒で十分

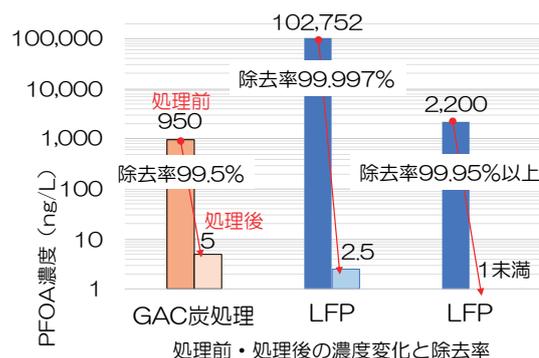
※1：空間速度 (SV)：1 時間あたり、活性炭 (ろ材) の何倍相当の水を処理するかの概念



図—6 活性炭 1g あたりの PFOA 吸着容量

LFPでの空間速度 (SV) はGACの20~30倍であり（表—4）、GACに比べてコンパクトな装置となる。また、吸着平衡時間はGAC24~60時間に対して10秒で十分であり、急速な高精度処理が可能である。

また、活性炭のPFAS吸着量を示す吸着容量はGAC<sup>6)</sup>と比べて16倍（図—6）である。LFPは活性炭を効率的に利用しているといえる。さらに、除去率はGAC 99.5%<sup>7)</sup>に対しLFPは99.99%以上（図—7）。低濃度から高濃度にかけて適用できる技術である。



図—7 処理前・処理後の濃度変化、除去率

### 5.2 廃活性炭発生量・CO<sub>2</sub>排出量・経済性・コストメリットの比較

従来技術とLFPによる廃活性炭発生量・CO<sub>2</sub>排出量・経済性・コストメリットについて、事例に基づいた試算を行った。試算を行った条件等を表—5に示す。

表—5 比較検討試算の条件

項目	条件・根拠情報	図版
廃活性炭発生量	PFAS濃度 200ng/L、30t/h 連続処理 従来技術 GAC 及び LFP：オンサイト処理 GAC の情報：文献 6) の粒状活性炭交換頻度等	8
CO <sub>2</sub> 排出量	LFP：PFAS濃度 200ng/L、30t/h 連続処理 従来技術 GAC：文献 8) の情報	9
処理単価	PFAS濃度 200ng/L、30t/h 連続処理 従来技術 GAC 及び LFP：オンサイト処理	10
処理費用	PFAS濃度 6 万 ng/L、貯留水 200t 処理 従来技術：場外搬出・焼却処分、市場単価 LFP：オンサイト処理・機器レンタル	11
採算性	工業用水 9 万 t/年使用する工場 従来技術：水道水購入、用水後処理下水排水 LFP：排水処理・処理水の循環再利用	12

図-8 に廃活性炭排出量を示した。廃活性炭発生量は従来技術に比べて1/10である。

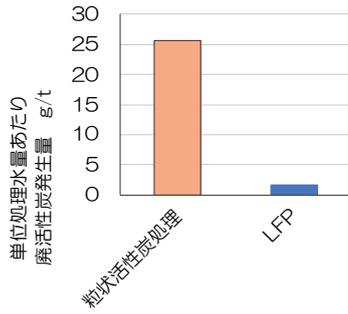


図-8 廃活性炭発生量

次にCO<sub>2</sub>排出量である。LFP法での処理では単位処理水量あたりのCO<sub>2</sub>排出量(試算値)は0.18kg/m<sup>3</sup>であった従来の粒状活性炭処理や膜分離処理でのCO<sub>2</sub>排出量<sup>9)</sup>に比べて1/4~1/7のCO<sub>2</sub>排出量である(図-9)。LFP法では活性炭の吸着容量が多くなることから、従来方法に比べて廃活性炭発生量やCO<sub>2</sub>排出量を低減することができるといえる。

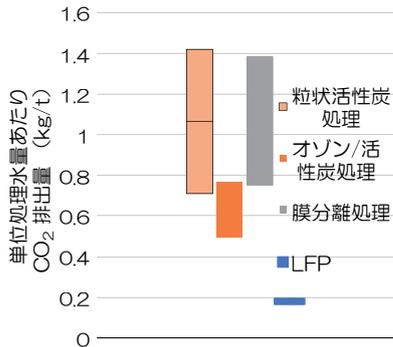


図-9 各処理方法でのCO<sub>2</sub>排出量

図-10 は経済性の比較である。処理単価は従来技術・粒状活性炭吸着処理と比べて約1/3となっている。

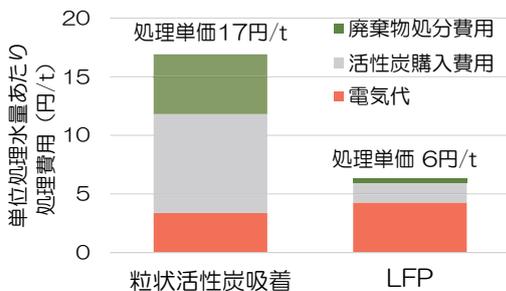


図-10 コスト比較・処理単価

また、原水200tを焼却処分した場合と、LFPでのオンサイト処理を行なった場合の比較である(図-11)。処理費用は概ね1/10となる。

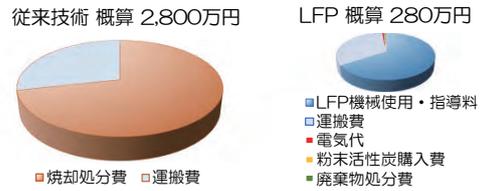


図-11 コスト比較・処理費用

図-12 は採算性の比較である。LFPではインシヤルコストを含め2年5ヶ月ほどで従来技術とコスト同等になり、3年目には約3,000万円のコストダウンとなる。

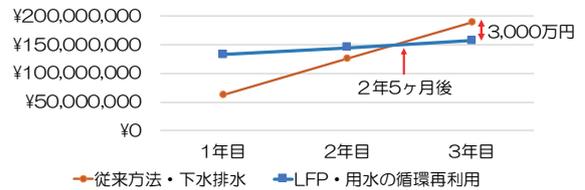


図-12 採算性の比較、インシヤル+ランニングコスト

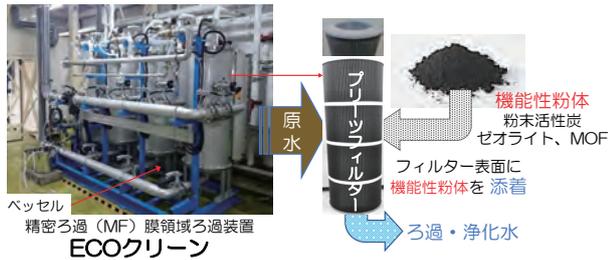
## 6. “鬼ごっこ理論”を装置化したLFPの解説

ECOクリーンLFPは、先ほど解説した“鬼ごっこ理論”を装置化している。粉末活性炭を添着し、溶存物質をろ過吸着、活性炭の洗浄剥離・再添着まで、すべて自動で行える。活性炭は粒子サイズが小さいほど比表面積が大きくなり、また、粒子内拡散距離が短くなることから吸着速度や吸着量が向上することが知られていた<sup>9)</sup>。しかしながら従来の水処理では、粉末活性炭の飛散、水との分離、沈殿活性炭の後処理または再生などに問題が多く、下水や産業排水のように連続処理を必要とする場合には粉末活性炭に代わり、粒状活性炭による処理法が主流になってきた<sup>10)</sup>経緯があった。ECOクリーンLFPはこの機能性粉体の取り扱いの煩雑さを解決した。

活性炭は吸着を続けると徐々に吸着能力が低下する。吸着能力が一定水準まで下がったときには、適度な力を加えると粉体は液体や気体のように流動、分散、添着するといった機能性粉体の性質を利用して、フィルター表面の機能性粉体の入れ替えを行う。流体制御に強みをもつ当社ならではの技術が生かされている。

装置の概要と処理フローを次に示す。主な装置構成は

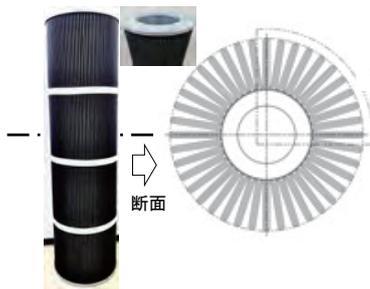
ブリーツフィルターと同フィルターを格納するベッセル（図—13）である<sup>11)</sup>。



図—13 ECO クリーン LFP・本体のブリーツフィルターとベッセル、ろ過・浄化の仕組み

### 1) ブリーツフィルターと処理量

ブリーツフィルターは山折りした襷が放射状に開いた円筒型の成形フィルター（図—14）で、ベッセル内に格納されている。標準フィルターの面積は1本あたり40-50 m<sup>2</sup>、大きさはφ400×1,200mm。フィルター膜のろ過精度は0.15 μm×99.95%となっている。フィルター1本当の水処理量は5~15 m<sup>3</sup>/時間で、処理量を増やす場合にはフィルターおよびこれを格納するベッセルを増やすことで実現できる。



図—14 ブリーツフィルターの外観および断面形状

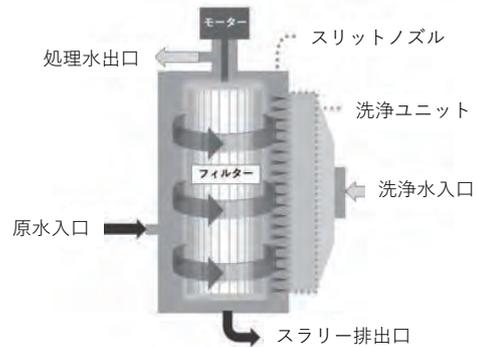
### 2) 粉末活性炭添着方法と処理フロー

処理フローの概要は以下のとおりである。

- ① 予め調製した粉末活性炭懸濁液をブリーツフィルターでろ過、粉末活性炭をフィルター表面に添着させて粉末活性炭の薄層をフィルター表面に形成する（以下、添着層）。活性炭量は標準 300g/m<sup>2</sup>~700g/m<sup>2</sup>で、添着層の厚さは約 0.6 mm~1.4mm になる。
- ② 原水を添着層でろ過して汚濁物質を吸着除去する。ろ過する際の透過流束（Flux）は 100~400LMH（L/m<sup>2</sup>/h）である。活性炭量が 300g/m<sup>2</sup>、Flux が 200LMH の場合でろ過水が添着層を通過する時間は約 10 秒。
- ③ 粉末活性炭は汚濁物質を吸着するにつれ、その吸着能力は低下する。活性炭が十分な吸着能力を喪失した状態を“破過”という。この破過のタイミングは、

事前に活性炭の対象物質吸着容量を知った上で、処理水の濃度や処理量により把握する。

- ④ 活性炭が破過するタイミングで、自動で活性炭の入れ替えを行う。圧力水を添着層へ噴射することにより、フィルター表面から使用済み粉末活性炭を洗浄剥離・排出する（図—15）。次に、再び新たな粉末活性炭をフィルター表面に添着させて添着層をフィルター表面に形成する。



図—15 フィルター自動洗浄の仕組み

## 7. 沖縄での事例

LFP の研究開発は、沖縄県での環境汚染問題を知った女性エンジニア（沖縄県浦添市の総合建設企業・株式会社太名嘉組に所属）が、「破壊されつつある沖縄の環境・生物多様性をなんとかしたい」想いで、PFAS 処理方法について弊社に問い合わせた時から具体化した。その後、現地原水が弊社に届けられ、弊社が持っていた要素技術と同現地水を用いた試験を重ねることでLFPを装置化した。

野湾市「ていーちがー公園」（写真-3）では、水質改善施設整備工事が進められているが、株式会社太名嘉組が浄化方法としてLFPを選定し、令和4年度宜野湾市発注の水質改善施設整備工事でLFP浄化システムが採用された。



写真—3 LFP が採用された「ていーちがー公園」

## 8. 水・空気の循環利用

LFP を組込んだ排水処理プラント（洗浄水の循環再利用）がプラスチックリサイクル工場の洗浄ライン排水処理（用水の95%再利用）で採用され、令和4年から稼働している。さらに、小規模事業者向けの水処理装置として Pleats Filter を用いた ECO クリーン MINI がある（写真—4）。この装置は、非常用給水（池や河川水をろ過、濁りや細菌類を除去して供給）やアルカリイオン電解水との組合せで排水ゼロの洗濯システムを構成する。



（左）写真—4 ECO クリーン MINI （右）写真—5 FP (Filter Powder) 法 排気処理・脱臭装置。建屋内に置き、屋内空気の循環利用を可能とした

空気の浄化技術に FP (Filter Powder) 法（写真—5）がある。この技術は LFP と同様にフィルターに機能性粉体を添着させ、添着層で空気をろ過する装置である。フィルターのろ過能力（ろ過精度は  $0.15\ \mu\text{m} \times 99.95\%$ 、HEPA filter なみ）で、浮遊粒子状物質（SPM）や微小粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）などを除去するとともに、機能性粉体で VOC や悪臭物質を除去する装置である。この装置でも多機能材料を粉体化して使用するため、従来の方法（粒状活性炭吸着処理など）と比べると低いエネルギーコストで高い処理効果を期待することができる。

## 9. 資源循環に向けた今後の展望

ECO クリーン LFP はフィルター技術で機能性粉体の能力を効果的に活かす水処理方法である。この方法を用いることにより、環境課題を解決しながら従来方法よりエネルギーコストを削減することが可能になる。

しかしながら、LFP にも課題はある。その一つは、対象原水が機能性粉体を添着したフィルターでろ過できなければこの処理方法は使えないことである。発生元ごとに様々な水質である原水に対してろ過ができるように、殺菌、浮遊物質やコロイド物質の処理、有機物のオゾン分解処理、油分の除去等の前処理のカスタマイズが重要である。また、現状の機能性粉体では吸着除去が苦手な物質がある。例えば塩類であるが、これらを除去するた

めに RO 膜（逆浸透膜）の力を借りる場合もある。汎用的に水処理効果を高めるために、より能力の高い機能性粉体の検索が今後も必要であり、紹介いただけたら幸いである。

LFP では使用した機能性粉体がヤシ殻活性炭や天然ゼオライト、吸着した物質が窒素・リン等の無害な物質の場合には、廃活性炭は脱水してバイオマスや肥料などでの「再資源化」ができる。都市下水、畜産排水の処理などでは窒素・リンの循環再利用で社会貢献したい。

### 参考文献

- 1) 地下水・湧水の疑問 50 (2020) : 公益社団法人日本地下水学会, p15.
- 2) 土 隆一(2011): 富士山の地下水・湧水. 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編: 富士火山. 日本火山学会, p. 375-387.
- 3) 福原次朗, 石嶺孝児, 仲門拓磨, 塩川敦司, 矢野慎太郎, 奥古田亨 (2019) : 粒状活性炭処理における有機フッ素化合物吸着特性の評価, 令和元年度全国会議(水道研究発表会) 令和元. 11, p. 870-871.
- 4) 高田光康, 樋口進, 中野武 (2010) : 処分場浸出水中の有機フッ素化合物(PFCs)の活性炭処理による除去, 第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表講演集, p245-246.
- 5) 西村章, 山内仁(2022) : 新技術・プリーツフィルター機能性粉体法 (略称 LFP 法) による PFAS 汚染地下水の浄化, 化学装置 8 月号, p. 56-61.
- 6) 沖縄県企業局 (2021) : 北谷浄水場粒状活性炭実施設計業務委託報告書
- 7) 稲田康志, 林広宣, 服部晋也, 森口泰男, 宮田雅典 (2010) : 有機フッ素化合物の淀川水系における動向と浄水処理過程における挙動, 第 54 回日本水道協会関西西地方支部研究発表会発表概要集, p. 79-82.
- 8) 津野洋, 西村文武, 高部祐剛, 林佳史, 谷井信夫, 丸野紘史, 高木明寛 (2013) : 廃棄物埋立処分場におけるオンサイト型 PFCs の除去・処理技術の開発-省資源、省エネルギー、省メンテナンスを考慮した実現可能な処理技術の選定と評価-, 有機フッ素化合物の最終処分場における環境流出挙動の解明と対策技術に関する研究, 平成 24 年度環境研究総合推進費補助金研究事業研究報告書 有機フッ素化合物の最終処分場における環境流出挙動の解明と対策技術に関する研究 (平成 25 年 3 月), 環境省, p. 77-83.
- 9) 安藤直哉, 松井佳彦, 松下拓, 大野浩一, 佐々木洋志, 中野優 (2008) : 活性炭の超微粉化が活性炭吸着に与える効果, 環境工学研究論文集, 第 45 巻, p. 309-315.
- 10) 浦野紘平 (1975) : 活性炭による排水処理, 有機合成科学, 第 33 巻第 5 号, p. 333-341.
- 11) 西村章, 西村聡(2020) : 濁水処理コスト 1/10 を実現した革新的膜処理装置(ECO クリーン), 一般社団法人 日本産業機械工業会主催 第 46 回優秀環境装置表彰資料, p. 39-57.



# PFAS 汚染土壌の浄化工法開発に向けた基礎的検討

## Fundamental research for soil remediation method to soil polluted by PFAS

梅原悠平\*, 國井聡\*, 赤松佑介\*, 芳賀直樹\*\*, 竹澤正太郎\*\*\*

Yuhei UMEHARA, Satoshi KUNII, Yusuke AKAMATSU, Naoki HAGA, Shotaro TAKEZAWA

\*前田建設工業株式会社 土木事業本部 土木技術部(〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2)

\*\*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)

\*\*\*前田建設工業株式会社 土木事業本部 CSV・地域戦略部(〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2)

キーワード : PFAS, PFOS, PFOA, PFHxS, 土壌洗浄, 土壌浄化, 溶出試験  
(PFAS, PFOS, PFOA, PFHxS, Soil washing, Soil Remediation, Dissolution test)

### 1. はじめに

PFAS とは有機フッ素化合物の総称であり、このうち、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ン酸 (PFOA) 及びペルフルオロヘキサンスルホン酸(PFHxS)は熱や化学的に安定で、かつ優れた界面活性を示し、撥水剤や表面処理剤、泡消火剤等の様々な用途で用いられてきた。しかし、化学的に非常に安定である故に、環境中で分解されず、環境残留性や生物濃縮性、毒性についても懸念されている。

国際的な動きとして、平成 21 年 5 月に開催された残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約(以下「POPs 条約」)第 4 回締約国会議において PFOS とその塩が条約付属書へ採択され、令和元年 5 月に開催された POPs 条約第 9 回締約国会議において PFOA とその塩および関連物質が、令和 4 年 6 月に開催された POPs 条約第 10 回締約国会議において PFHxS とその塩および関連物質が新たに追加採択されている。

一方、日本国内では平成 22 年 4 月 1 日に、「PFOS 又はその塩」を化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律の第一種特定化学物質に指定、製造及び輸入の許可制、使用制限等の処理を講じ、令和 3 年 10 月 22 日には「PFOA 又はその塩」もその対象に追加している。PFHxS 及びその塩に関しては、令和 4 年 11 月に 3 省合同会合において第一種特定化学物質への指定に係わる審議が行われ、輸入禁止等の措置に関する審議を行った上で、令和 6 年春以降に施行されることが見込まれている。その

他、厚生労働省は令和 2 年に水質管理目標設定項目の目標値を PFOS 及び PFOA の合計値が 50ng/L 以下と設定し、環境省も人の健康の保護に関する要監視項目の指針値(暫定)として、同様に PFOS 及び PFOA の合計値で 50ng/L 以下と設定し、これらの物質の規制基準が定められる機運にある。<sup>1,2)</sup>

また、環境省が実施した令和 2 年度の有機フッ素化合物を対象とした調査では、国内 143 地点(河川・地下水・湧水)のうち 21 地点(河川・地下水・湧水)において、PFOS 及び PFOA の暫定目標値の超過が確認されている<sup>3)</sup>。一部の河川・地下水・湧水において、暫定目標値を超える濃度の PFOS 及び PFOA が検出されていることから、潜在的には相当数の土壌・地下水汚染サイトが存在していることが想定され、これら物質の溶出・拡散に対して早期に対策を講じることが望ましい。

本研究では土壌からの PFAS 溶出特性の知見を得るために、PFAS 汚染土壌の浄化に向けた基礎的な検討を実施した。

試験対象の土壌として、珪砂(6号)と粘土(木節粘土)を混合し、調整した(以後、土壌 A とする)、及び沖縄県内で市販されている赤土(以後、土壌 B とする)の 2 種類を用い、PFAS 溶液を添加、混合し、乾燥させることで「PFAS 模擬汚染土」を作製した。

ここでは、PFAS 模擬汚染土の洗浄による PFAS 溶脱効果と洗浄時に発生する PFAS 含有洗浄水の処理を検討した。なお、本研究における PFAS とは、PFOS、PFOA に加え、今後規制が想定される PFHxS を対象とした。

## 2. PFAS 模擬汚染土の洗浄溶媒と作製条件の検討

### 2. 1 洗浄溶媒の検討

PFAS 模擬汚染土の洗浄溶媒の検討を実施した。比較に用いた溶媒は純水に加え、5%メタノール水溶液、5%エタノール水溶液、5%アセトニトリル水溶液を供した。PFOS(>98%, 東京応化工業社製)、PFOA(>98%, 東京応化工業社製)、PFHxS カリウム塩(>95%, Angene Chemical 社製)を試薬として用い、各物質の濃度が 50,000ng/L となるように PFAS 溶液を調製した。この PFAS 溶液 100 $\mu$ L を 100mL ポリプロピレン製容器に分取した土壌 A(珪砂：粘土 =25 : 75) 5g に添加し、均一になるよう混合した。溶出試験は各溶媒を 50mL 加え、振とう(200rpm、6 時間)し、その後、遠心分離(3000rpm、10 分)にて上澄み液を回収の上、メタノールで 100mL に定容した。また、残渣中の PFAS 濃度を確認するため、遠心分離にて得られた残渣に 30mL のメタノールを加え、振とう(200rpm、30 分)、超音波照射後(30 分)、遠心分離(3000rpm、10 分)にて上澄み液を回収した。この操作を 3 回繰り返した後、3 回全ての回収液を合わせ、メタノールにて 100mL に定容した。これらの溶液を 0.45  $\mu$ m メンブレンフィルター (ADVANTEC 社製)にてろ過後、溶液を 1mL 分取し、内部標準を添加して LC/MS/MS にて測定を行った。

### 2. 2 土壌 A の配合設定

珪砂と粘土の混合比率が PFAS の洗浄効果に与える影響を確認した。珪砂と粘土の混合比率は、100 : 0、75 : 25、50 : 50、25 : 75、0 : 100 とし、PFAS 模擬汚染土の作製方法、溶出試験方法は 2. 1 と同じ操作を実施、溶媒には純水を使用した。

### 2. 3 PFAS 模擬汚染土 作製方法の検討

珪砂と粘土を 25 : 75 で混合した土壌 A を使用し、以下の 3 方法にて作成方法を検討した。

#### <作製方法①>

2. 1 で使用した試薬を用い、各物質の濃度を 50,000ng/L、500,000ng/L となるよう純水で調製し、PFAS 水溶液とした。土壌 A 5g に対し、各濃度の PFAS 水溶液 1mL を添加し混合、室温で風乾後、粉碎した。

#### <作製方法②>

各物質の濃度が 500ng/L、2,500ng/L、10,000ng/L に調製した PFAS 水溶液 1000mL を 500g

の土壌 A に添加し、振とう機にて 5 分間振とうした後、24 時間静置した。これを、遠心分離にて残渣を回収し、30°C で 24 時間乾燥した後、粉碎した。

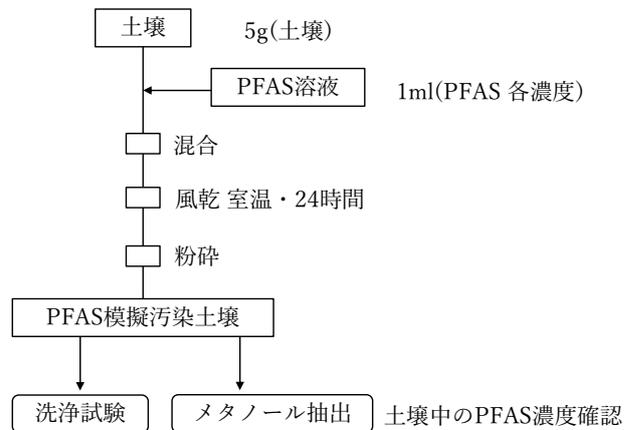


図 1 PFAS 模擬汚染土作製方法①

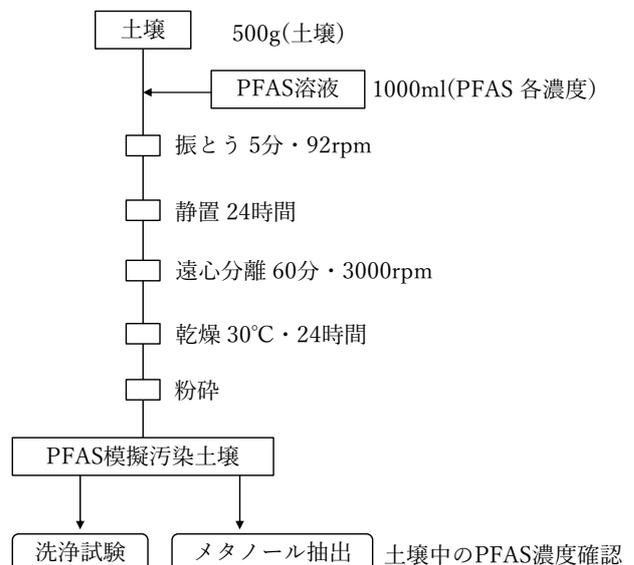


図 2 PFAS 模擬汚染土作製方法②

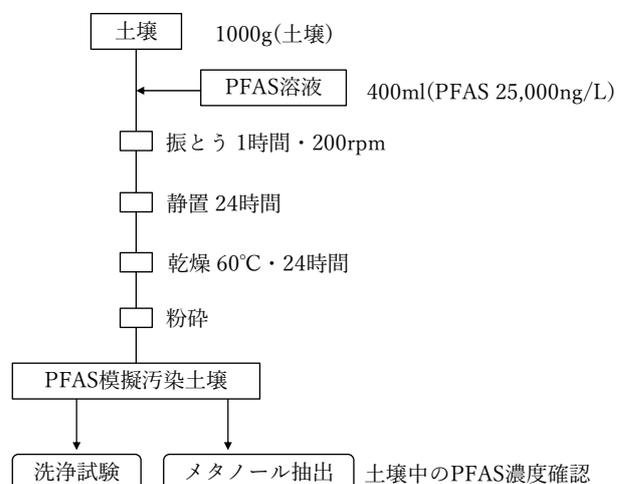


図 3 PFAS 模擬汚染土作製方法③

### <作製方法③>

各物質の濃度が 25,000ng/L となるよう純水で希釈し、PFAS 水溶液を調整した。土壌 A 1000g に対し、PFAS 水溶液 400mL 加え、振とう機にて 1 時間 200rpm で振とうし、その後、室温で 24 時間静置した。静置後、試料をバットに取り出し、60°C の乾燥機で乾燥後、粉碎した。

作製方法①～③で調整した PFAS 模擬汚染土は、2. 1 で前述した溶出試験と同様の操作により、LC/MS/MS 分析によって評価を行った。

また、PFAS 模擬汚染土中の PFOS、PFOA 及び PFHxS の初期濃度測定のため、2. 1 で前述した PFAS 分析手順(メタノールによる抽出)にて測定を行った。

### 2. 4 分析方法

LC は ExionLC(SCIEX 社製)、カラムは Kinetex C18 2.6 $\mu$ m 50 $\times$ 3.0mm(Phenomenex 社製)、MS は QTRAP4500(SCIEX 社製)を用いた。また、LC 及び MS/MS の設定条件は以下を採用した(表 1)。

表 1 LC/MS/MS 測定条件

LC条件			
機器名称	SCIEX社製	ExionLC	
カラム	Phenomenex社製 Kinetex® C18 2.6 $\mu$ m 50 $\times$ 3.0mm		
注入量	15 $\mu$ L		
カラム温度	40°C		
移動相	A液: 0.02%ギ酸、2mM酢酸アンモニウム含有水 B液: メタノール		
	0 ~ 8.25min	A液: 80%→2.0%	B液: 20%→98%
	8.25 ~ 11min	A液: 2.0%	B液: 98%
	11 ~ 11.1min	A液: 2.0%→80%	B液: 98%→20%
	11.1 ~ 15min	A液: 80%	B液: 20%
流速	0.6mL/min		
MS/MS条件			
機器名称	SCIEX社製	QTRAP4500	
イオン化法	ESI Negative		
SRM条件	PFOS	499→80(定量用)	499→99(確認用)
	PFOA	413→369(定量用)	413→169(確認用)
	PFHxS	399→80(定量用)	399→99(確認用)
	<sup>13</sup> C <sub>8</sub> -PFOS	507→80	
	<sup>13</sup> C <sub>8</sub> -PFOA	421→376	
	<sup>13</sup> C <sub>3</sub> -PFHxS	402→80	



写真 1 LC/MS/MS 装置写真

### 2. 5 結果と考察

洗浄溶媒の比較結果を以下の図 4 に示す。各水準における溶媒への PFAS 類の回収率にばらつきはあるものの、溶媒の種類によって、回収率が大きく異なる傾向は認められず、純水のみで洗浄効果が発現される結果を得た。以上より、洗浄溶媒としては純水を採用し、今後の検討を行うこととした。

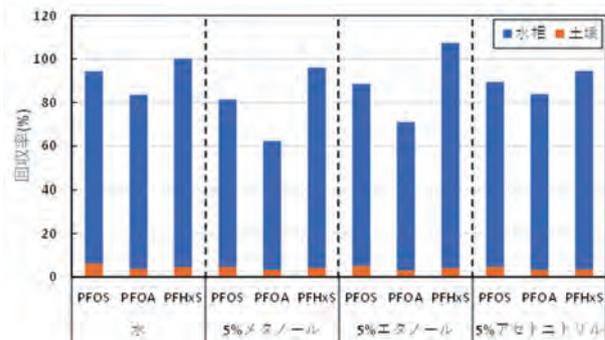


図 4 PFAS 模擬汚染土の洗浄時における溶媒の影響評価

土壌 A の配合設定検討の結果を以下の図 5 に示す。粘土の配合が割合増加するに従い、PFAS の土壌への残存割合が増加する傾向が見られた。また、各配合において、土壌への残存量は PFOS>PFOA>PFHxS となる傾向が見られた。以降の検討では、PFAS の土壌への残存量が多く、洗浄試験として厳しい条件となる珪砂:粘土=25:75 を土壌 A の配合として採用した。

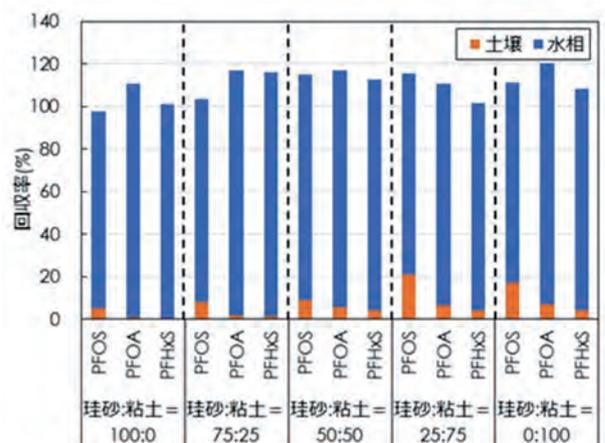


図 5 珪砂と粘土比率を変化させた土壌 A の PFAS 模擬汚染土溶出試験結果

作製方法①～③を用いて作製した PFAS 模擬汚染土の溶出試験結果を以下の図 6 に示す。各水準において結果に多少のばらつきはあるものの、土壌への残存量として、PFOS>PFOA ≈ PFHxS となる傾向が

見られた。また、全てのケースにおいて吸着している PFAS の 8 割以上が水相に溶出することから、土壌の作製方法、作製時の PFAS 濃度は PFAS の土壌への吸着作用に特段の影響が無いことが示唆された。よって、作製方法③を採用した。

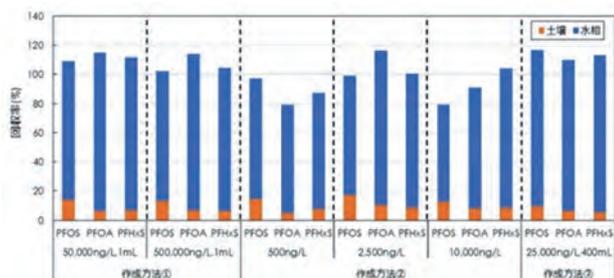


図 6 PFAS 模擬汚染土の作製方法及び PFAS 溶液濃度の違いによる水への溶出挙動の確認

### 3. PFAS 模擬汚染土壌の洗浄試験

#### 3. 1 バッチ式による PFAS 模擬汚染土の繰り返し洗浄試験

土壌 A 及び土壌 B を用い、2. 2 作成方法③にて作製した PFAS 模擬汚染土を 100mL のポリプロピレン製容器に各 5g ずつ分取し、純水 50mL を加え、振とう(200rpm、2 時間)した。その後、遠心分離(3000rpm、10 分)にて上澄み液を回収し、この操作を 3 回繰り返した。各回収液をメタノールで 100mL に定容した。この溶液を 0.45 μm メンブレンフィルター(ADVANTEC 社製)を用いてろ過後、溶液を 1mL 分取し、内部標準を添加して LC/MS/MS にて測定を行った。



写真 2 洗浄試験状況写真

表 2 洗浄液(上澄み液)の pH

	pH
土壌 A	6.45
土壌 B	7.51

### 3. 2 結果と考察

バッチ式における PFAS 模擬汚染土の繰り返し洗浄試験結果を以下の図 7、8 に示す。PFAS 模擬汚染土に含まれる PFAS 全量に対し、洗浄回数 2 回目で 9 割以上の PFAS が水へ溶出した。更に、洗浄 3 回目では土壌 B の PFOS を除き、洗浄液中の PFAS 濃度が検出下限値以下になることを確認した。土壌 A と土壌 B を比較すると、土壌 B の方が土壌中に PFAS が残存する傾向が見られた。



図 7 繰り返し洗浄試験結果(土壌 A)

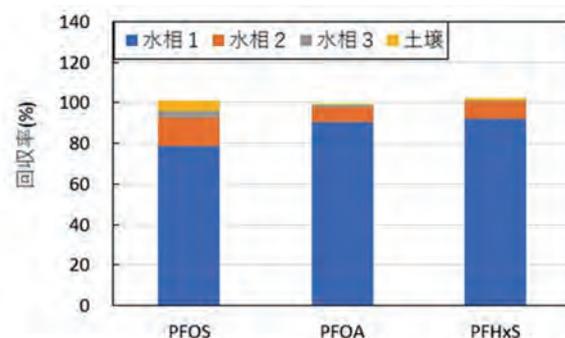


図 8 繰り返し洗浄試験結果(土壌 B)

### 4. 土壌洗浄時に排出される PFAS 含有排水の処理検討について

#### 4. 1 実験方法

PFAS 模擬汚染土の洗浄水を以下の方法にて作製した。2. 1 にて作製した PFAS 模擬汚染土 100g を 2000mL のポリプロピレン製容器に分取し、純水 1000mL を加え、振とうした(200rpm、6 時間)。その後、遠心分離(3000rpm、10 分)にて上澄み液を回収した。更に、土壌 A の洗浄水は 0.45μm のフィルターでろ過を実施し、ろ液を PFAS 洗浄水とした。

カラム試験には Φ11mm、長さ 30cm のガラスカラム(桐山製作所社製)とポンプ(東京理化学機械社製)を

使用した。吸着材には粒状活性炭とイオン交換樹脂を用い、カラムにフィルターを設置した後、吸着材を各 20mL ずつ充填した。通水速度は SV=10 とし、30 分ごと(100mL ずつ)サンプリングを行った。回収した溶液は必要に応じてメタノールにて希釈、0.45  $\mu\text{m}$  メンブレンフィルター(ADVANTEC 社製)を用いてろ過後、溶液を 1mL 分取し、内部標準を添加して LC/MS/MS にて測定を行った。



写真3 カラムによる吸着試験状



写真4 吸着材  
(左：イオン交換樹脂、右：粒状活性炭)

表3 吸着材の PFOS 吸着容量

	粒状活性炭	イオン交換樹脂
吸着容量 (ng/mg)	87	858

※破過濃度を 50ng/L とした際の PFOS 吸着容量

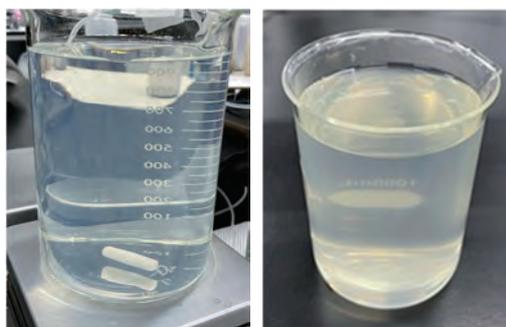


写真5 PFAS 汚染土壌洗浄水  
(左：土壌 A、右：土壌 B)

## 4. 2 結果と考察

土壌 A 及び土壌 B を用いた PFAS 模擬汚染土の洗浄水におけるイオン交換樹脂による処理試験結果を以下の図 9、10 に示す。ここで、PFAS 濃度の目標値を PFOS と PFOA の合計値で 50ng/L 以下と設定した(PFHxS は参考値としてグラフに表記)。土壌 A、土壌 B ともにイオン交換樹脂を用いることで処理開始直後から 5 時間まで PFAS を検出下限値以下まで除去できることが確認できた。また、粒状活性炭においても今回の実験条件では、イオン交換樹脂と同様の結果が得られた。

本試験では各吸着材の破過容量を確認できなかったものの、表 3 に示すようにイオン交換樹脂は粒状活性炭と比較して約 10 倍の PFOS 吸着容量を有していることを確認している。そのため、PFAS 含有洗浄水処理においてもイオン交換樹脂を用いることで、長期の PFAS 吸着性能が維持されることが想定される。

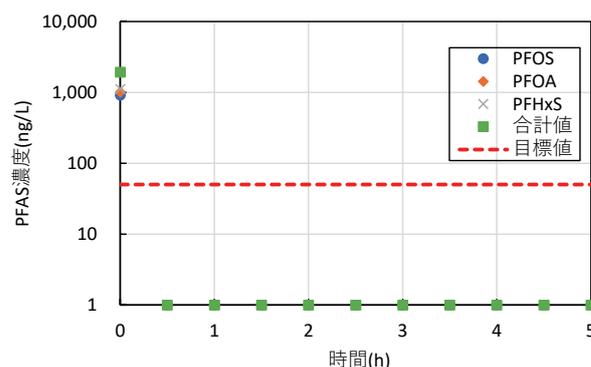


図9 カラムによる PFAS 吸着試験結果  
(土壌 A×イオン交換樹脂)

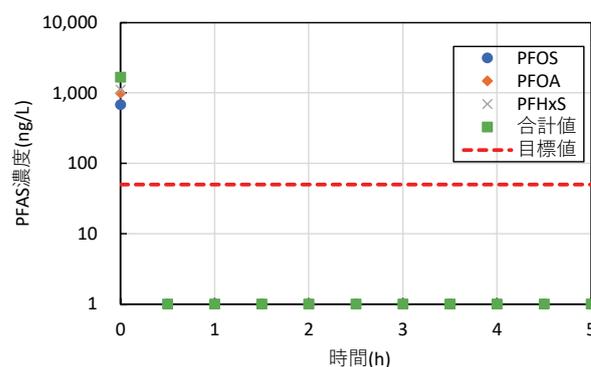


図10 カラムによる PFAS 吸着試験結果  
(土壌 B×イオン交換樹脂)

## 5. まとめ

・PFAS 模擬汚染土に使用する土壤 A の珪砂/粘土比の検討を行ったところ、粘土比率が多い土壤ほど、つまりは粒径の小さな土粒子が多い土壤ほど、洗浄操作において PFAS の土壤への残存量が増加する傾向が見られた。本研究では PFAS の残存量が多く、洗浄試験としては厳しい条件となる珪砂：粘土 =25：75 を試験の土壤 A として採用した。

・土壤 A 及び土壤 B を用いて PFAS 模擬汚染土を作製し、バッチ式繰り返しによる PFAS の水洗浄試験を実施したところ、PFAS は水相へ溶出し、土壤中の PFAS 濃度を検出下限値以下まで除去できることを確認した。

・土壤 A と土壤 B の比較では、土壤 B の方が土壤洗浄後に PFAS が土壤に残存しやすい傾向であった。

・PFAS 模擬汚染土の洗浄時に排出される PFAS 含有洗浄水をイオン交換樹脂及び粒状活性炭を用い、カラム試験による吸着実験を行ったところ、PFAS 濃度を検出下限値以下まで吸着できることが確認できた。

## 6. 今後の課題と展望

・本研究では 2 種類の土壤について洗浄試験を実施したが、土質により PFAS の土壤からの溶出挙動が異なったため、性質の異なる他の土壤についても水による洗浄の適応検討が必要である。

・実環境で汚染された土壤に関しても、試験対象として、データを蓄積する必要がある。

・本研究では基礎的検討としてラボスケールでの土壤洗浄試験としたが、今後はドラムウォッシャー等を用いてスケールアップを行い、その適応性と課題について検討する必要がある。

・当社は、既に土壤洗浄技術、及び SS 分を取り除く設備を付帯した PFAS 汚染水処理装置(De-POP's ION)有しており<sup>4)</sup>、実サイトでの運用を想定して、以下のフローでの PFAS 汚染土処理技術を構築中である。

- ① PFAS 汚染土を掘削
- ② 土壤洗浄プラントにて水洗
- ③ 土壤と洗浄水を分離
- ④ 当該装置にて洗浄水中の PFAS を除去

## 土壤洗浄プラント



PFAS 含有  
土壤洗浄水

## PFAS 水処理装置



図 11 PFAS 汚染土壌浄化システムイメージ

## 参考文献

- 1) 厚生労働省, 令和元年度第2 回水質基準逐次改正検討会資料, (2020).
- 2) 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の施行等について, (2020).
- 3) 環境省, 令和2 年度有機フッ素化合物全国存在状況把握調査結果一覧(PFOS 及び PFOA), (2021).
- 4) 第 16 回ミリタリーテクノフェア発表資料「イオン交換樹脂を用いた PFOS/PFOA 吸着処理システム「De-POP's ION<sup>TM</sup>」(2022)

## 油含有土壌を対象とした効率的なバイオ処理技術の開発

### DEVELOPMENT OF EFFICIENT BIOREMEDIATION TECHNOLOGY FOR OIL-CONTAMINATED SOIL

日野良太\*, 西川直仁\*, 藤井雄太\*\*, 廣瀬孝三郎\*\*\*, 松原仁\*\*\*, 新里尚也\*\*\*\*

HINO Ryota, NISHIKAWA Naohito, FUJII Yuta, HIROSE Kosaburo, MATSUBARA Hitoshi and SHINZATO Naoya.

\* 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）

\*\* 株式会社大林組技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640）

\*\*\* 琉球大学工学部（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地）

\*\*\*\* 琉球大学熱帯生物圏研究センター（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地）

キーワード：油含有土壌，バイオ処理，発酵資材，バガス灰

(*Oil Contaminated Soils, Bioremediation, Fermentation Materials, Bagasse Ash*)

#### 1. はじめに

土壌汚染対策法（以下，法）が2003年に施行されてから日本各地において土壌・地下水汚染の事例が顕在化している。一般社団法人土壌環境センターの調査では，2021年時点で法に則った土壌調査及び対策工事の件数が年間4,600件程度に及んでいる<sup>1)</sup>。

一方，油含有土壌は，法の対象外ではあるものの，油臭や油膜による生活環境への悪影響を回避するため，環境省の油汚染対策ガイドライン<sup>2)</sup>に則った対応が望まれる。油含有土壌が顕在化する場所としては，製油所跡地やガソリンスタンド跡地，一般の工場跡地の他に，返還された米軍基地跡地等があげられる。また，基地跡地では，油含有土の他に DDT などの難分解性農薬が埋設されていた事例も報告されている<sup>3),4)</sup>。

油含有土壌は，油の種類や濃度によって処理方法が異なる。ガソリンや灯油など炭素数が少ない軽質系の油に対しては，掘削した土壌をオンサイトで微生物の活動により分解するバイオ処理によって油の濃度低減が可能となる<sup>5)</sup>。本処理では，土壌中の油分解微生物を活性化させる資材を添加し，油の分解を促進させる。浄化の程度は周辺環境や土壌の性質に依存することから，実用の際には現地に適した資材を選定・添加する必要がある。

油含有土壌をバイオ処理で浄化するにあたって，微生物の活性を維持するために窒素やリンなどの栄養源が必要であるとともに，土壌の温度を管理する必要がある。さらに，微生物の活性には，処理期間中の十分な酸素供給が必要であるため，細粒分を多く含む土壌に対しては，土質改良が求められる。ここで，土質改良を行う際には，土壌中の微生物が死滅しないような改良後の土壌が中性域となるような資材を用いることが望まれる。

土壌の温度管理に関しては，実験により 15°C における油の分解速度は 25°C の約 1/2，10°C では 25°C の約 1/3 になることが確認されている<sup>6)</sup>。筆者らは，外的な熱エネルギーを与えることなく，植物由来の発酵資材を油含有土壌に添加することにより，微生物の発酵熱を利用して土壌温度を管理できる方法について検討した<sup>7)</sup>。

一方，細粒分の多い土壌に対する土質改良材としては，これまでオガクズや堆肥，製紙スラッジ，生石灰，中性域で改良可能な鉱物系改良材<sup>8)</sup>などを用いた事例がある。また，バイオ処理を促進する資材としては，臭気抑制効果を兼ねたノニオン系の界面活性剤<sup>9)</sup>，酸性域の国頭マーヅを対象として pH 調整を兼ねた琉球石灰岩<sup>10)</sup>などが挙げられる。島尻マーヅと国頭マーヅは，細粒分を多く含む通気性が悪いという共通の特徴を有するが，土壌 pH は，前者は中性域，後者は酸性域にある。したがって，添加する資材には，土質改良効果と pH 調整機能を両有することが要求される。また，土質改良効果だけでなくバイオ処理促進効果も持つことが望ましい。

筆者らは，琉球列島に存在する特殊土壌（島尻マーヅ，国頭マーヅ）を対象として，土質改良とバイオ処理促進の両方の効果がある資材を探索してきた。島嶼である琉球列島で処理を行う場合，本州からの運送および加工手間が必要なく，年間を通して入手できる資材を選定することが望ましいことも考慮し，土質改良とバイオ処理促進の両方の機能を兼ね備えた資材として，製糖所の製糖工程で発生するサトウキビの搾りかすであるバガスを燃焼させたバガス灰を選定した。

本研究では，筆者らが開発した植物由来の温度管理用の植物由来発酵資材と，バイオ処理促進と土質改良の両方の機能を持つ浄化促進資材であるバガス灰の両者について，油含有土壌の浄化効果を評価した。

## 2. バイオ処理の工法

掘削した油含有土壌のオンサイトでのバイオ処理方法には、大別してバイオパイル工法とランドファーミング工法がある。両工法ともに、油含有土壌に対して微生物の栄養となる無機栄養塩類や浄化促進資材を添加し、酸素供給を促進することにより油の分解を促進する。バイオパイル工法では、2m 前後のパイル（畝）状に積み上げた土壌の底部に吸引管または送気管を設置し、土壌中に通気することにより酸素供給を行う工法である（図-1）。一方、ランドファーミング工法は、0.5m 程度の高さで土壌を広げ、定期的な攪拌により酸素供給を行う工法であり、広い用地が確保できる場合に適用される（図-2）。



図-1 バイオパイル工法



図-2 ランドファーミング工法

## 3. 温度管理によるバイオ処理の効率化

### 3.1 資材の性状

本研究で使用した開発資材を図-3に示す。化学特性は、含水比が9%、BOD(生物化学的酸素要求量)が310mg/g、TOC(全有機炭素)が45%、TN(全窒素)が29mg/gであった。BODが高いことから微生物などの生物によって分解されやすい。また、栄養源としてTN(全窒素)が



図-3 開発資材

高い値を示していた。試験方法は、表-1で後述する。

### 3.2 施工事例1～油槽所跡地の事例～

油槽所跡地の約 30,000m<sup>3</sup> の重油汚染土壌に適用した事例を記載する。本例における土中温度、外気温、土中二酸化炭素濃度の変化の測定例を図-4に、油分濃度（ノルマルヘキサン抽出物質）の測定例を図-5に示す。本例では、開発資材を土量に対して0.5%添加しており、浄化開始とともに土中温度は上昇し、約10日でピークを迎えた。浄化期間中の土中温度は25～40℃の範囲にあった。油分濃度の減少も14日目までの早い時期に起きていることが確認できている。また、図-6に石油を分解する能力のある微生物数（石油資化性菌数）の変化の測定例を示す。標準区（開発資材無添加）と比べ、特殊資材区（開発資材添加）では最高温度を記録する10日目を挟んで14日目までに石油資化性菌の数が大きく増加することが確認できる。この事例では、開発資材を使用しない場合に3ヶ月程度かかっていた施工が1ヶ月ないし1.5ヶ月に短縮し、それに伴いコストも低減することができた。

### 3.3 施工事例2～大規模石炭ガス工場跡地の事例～

本事例は、大規模石炭ガス工場跡地のベンゼンを含む油含有土壌に適用したもので、対象土量は約5,000m<sup>3</sup>であった。土壌は細粒分を多く含む高粘性土で、添加資材として無機栄養塩と開発資材の他に、通気性を確保する

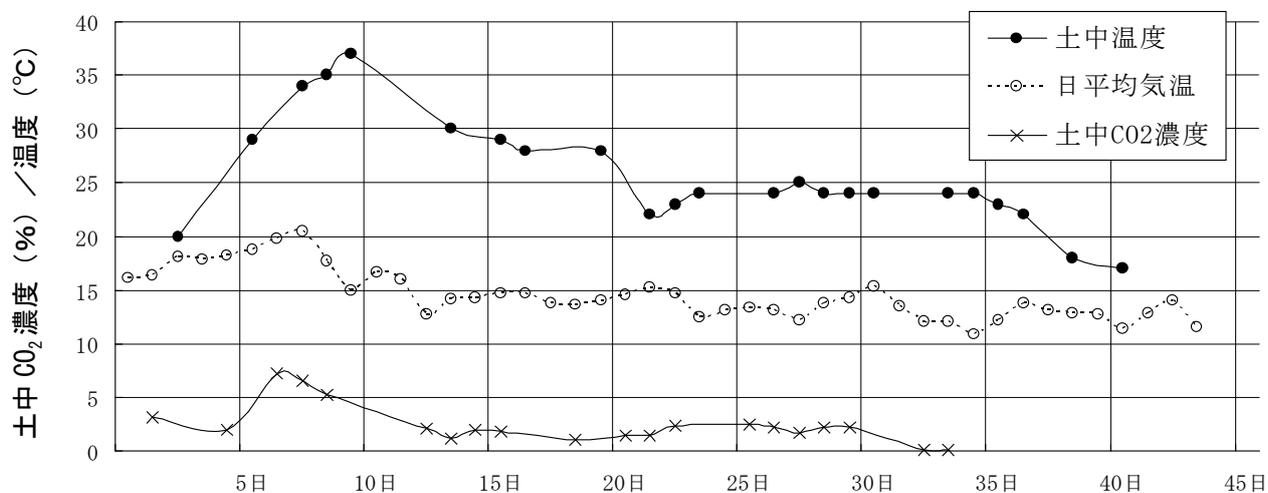


図-4 土中温度および土中CO<sub>2</sub>の経時変化

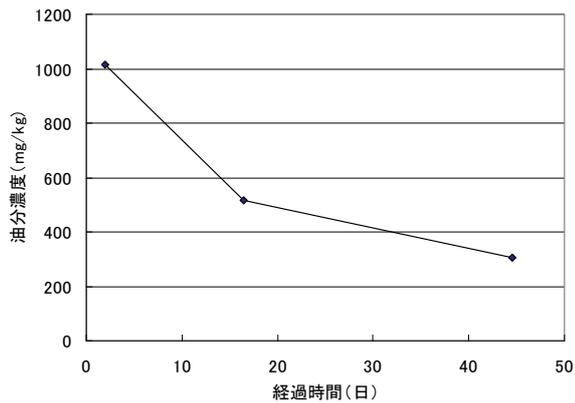


図-5 油分濃度の経時変化

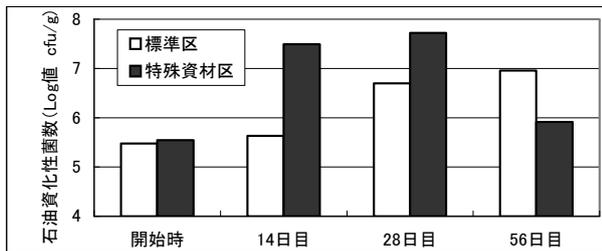


図-6 石油資化性菌数の変化



図-7 施工状況

ためにチップ材を混合し土質改良を行った。また、1週経過後にはパイルの切替し（攪拌曝気）を行っている。その結果すべてのパイルにおいて2週間程度でベンゼンが土壌溶出量の基準値（0.01mg/L）以下となった。

### 3.4 施工事例3～ガソリンスタンド跡地の事例～

本事例は、狭隘な処理ヤードしか確保できないガソリンスタンド跡地のベンゼン汚染土に対して適用した事例である。敷地面積が約700m<sup>2</sup>と狭く、かつ近隣への騒音上の配慮から通気時間（設備稼働）を平日の8時間とした。浄化は6月から7月にかけて実施しており、この間、外気温は20～35℃近くまでの間で推移したが、開発資材を添加したことにより土中温度は40℃程度まで上昇し、微生物活性が促進されていることが確認された。また、対象物質のベンゼンは、初期の土壌溶出量が溶出量基準（0.01mg/L）の4倍で確認されていたのが、浄化開始後20日には定量下限（0.001mg/L）未満となった。

表-1 試験に用いた土壌の性状

項目	単位	島尻マージ	国頭マージ	測定方法
土粒子の密度	g/cm <sup>3</sup>	2.8	2.8	JIS A 1225
粒度分布	>2mm	%	0.0	JIS A 1204
	75μm～2mm	%	1.0	
	5μm～75μm	%	30.3	
	<5μm	%	68.7	
含水比	%	33.7	38.9	JIS A 1203
pH	—	8.0	4.6	土壌環境分析法
EC	mS/m	16.7	5.3	土壌環境分析法
一般細菌数	個/g	5.0×10 <sup>5</sup>	1.1×10 <sup>3</sup>	JIS K0102

表-2 資材の物理化学性状

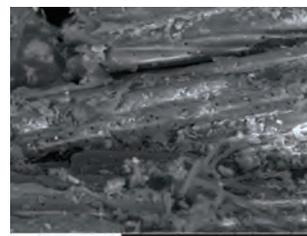
項目	単位	バガス	バガス灰	測定方法
含水比	%	131.0	17.3	JIS A 1203
BOD	mg/g	97.0	<0.5	JIS K 0102
TOC	%	46.0	1.2	JIS K 0102
TN	mg/g	3.7	0.1	底質調査方法
TP	mg/g	0.5	2.7	底質調査方法
pH	-	4.1	11.3	土壌環境分析法



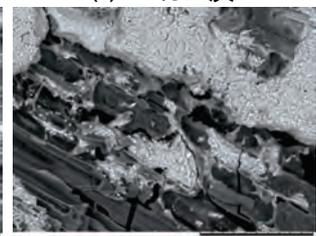
(a) バガス



(b) バガス灰



(c) バガス (SEM 画像)



(d) バガス灰 (SEM 画像)

図-8 バガスおよびバガス灰

## 4. 琉球諸島における特殊土壌の処理に関する適用性

### 4.1 資材および土壌の性状

試験に用いた土壌は、沖縄県で採取した。島尻マージと国頭マージの土質性状を表-1に示す。島尻マージと国頭マージの土粒子の密度は2.8g/cm<sup>3</sup>であり、粒度分布は島尻マージの75μm未満が99%、国頭マージの75μm未満が69%程度と大部分が細粒分であった。pHは、島尻マージが中性域、国頭マージが酸性域であり、一般細菌数は島尻マージが国頭マージよりも高い値を示していた。

本研究で検討している浄化促進材は、バガス灰であり、燃焼前のバガスとの性状比較を行った。それぞれの物理化学性状を表-2、バガスおよびバガス灰の外観写真を図-8に示す。pHは、バガスが酸性域であり、バガス灰がアルカリ域であった。TOCは、燃焼することによってバ



図-9 試験状況（室内試験）

ガス灰が低い値を示した。栄養源として、TN はバガスが高い値となり、TP はバガス灰が高い値を示した。

#### 4.2 室内試験の方法

室内試験は、養生中の温度を 25°C に保つために恒温設備内で実施した。しかしながら、島尻マーヅと国頭マーヅは、非常に乾燥しやすい土質であり、乾燥に伴い微生物の活動が低下する可能性が懸念された。そこで、恒温設備内の湿度を琉球列島の夏季の湿度と同程度の 50%～70% となるように加湿した。

試験は、模擬汚染土壌を用いて実施した。模擬汚染土壌に使用した土壌は、風乾した島尻マーヅと国頭マーヅを目開き 4.75mm のふるいで通したものとした。ふるい通過分の土壌に対して、軽油を TPH（全石油系炭化水素）10,000mg/kg 程度となるように添加した後に 7 日間養生して模擬汚染土壌を作製した。

バイオ処理は、含水比が高く土質改良が必要な場合を想定して実施した。具体的には、模擬汚染土壌に対して、土壌重量比で無機栄養塩類として窒素とリンを添加した。添加率は、既往文献<sup>10)</sup>に則り、炭素（軽油添加量の内の 45%）：窒素：リン=100:10:1 とした。ここで、窒素肥料は尿素（窒素成分：46%）、リン肥料は過リン酸石灰（リン成分：17.5%）を用いた。その後、土壌の含水比を 35% となるようにイオン交換水を添加した。

試験では、浄化促進材として、バガス灰を土壌重量比の 5%、10%、30% で添加した 3 ケースと添加なしの合計 4 ケースで実施した。作製した試料土壌は、図-9 に示すとおりバットに高さ 3cm 程度のパイル状で成型し、通気を阻害せず、過度な乾燥を避けるために表面にブルーシートを掛けて養生した。養生期間中は、7 日毎に全体重量を測定した上で減少した水分を試料土壌に混合し、養生開始の 7 日後、14 日後、28 日後に分析試料を採取した。採取した試料土壌を用いて、油臭・油膜、一般細菌数、pH の分析を行った。それぞれの分析方法は、油臭・

表-3 油臭の判定基準

段階	内容
0	無臭
1	やっと認知できるにおい (検知閾値濃度)
2	何のにおいであるかがわかる弱におい (認知閾値濃度)
3	らくに油臭が認知できるにおい
4	強い油臭
5	強烈な油臭

表-4 油膜の判定基準

段階	内容
1	濁りなし
2	わずかな濁り
3	油状痕・縞
4	多数の油状痕・縞
5	多量の油膜層

油膜が表-3 と表-4 の基準で判定し、一般細菌数は希釈平板法（土壌環境分析法）、pH はガラス電極法（土壌環境分析法）で測定した。

#### 4.3 室内試験の結果および考察

図-10 から図-13 に室内試験結果を示す。図中の島尻は島尻マーヅ、国頭は国頭マーヅを指しており、凡例は土壌に対して添加したバガス灰の重量割合である。

図-10 より、島尻マーヅの pH はバガス灰の添加の有無に係わらず 8 前後から大きな変動は見られない。一方、国頭マーヅの pH は、バガス灰の添加量に応じて変動しており、5% 添加したときに 7 付近の中性域となっている。なお、30% 添加した場合でも 8 程度であることが分かる。一般細菌数は、島尻マーヅと国頭マーヅのいずれにおいても、バガス灰の添加量に応じて増加傾向にあり、国頭マーヅは添加なしに比べて 2 週目で 2 オーダー以上の増加が確認できる（図-11）。

油の浄化効果に関しては、図-12 および図-13 より、油臭・油膜ともにバガス灰の添加量に応じて低下傾向にある。島尻マーヅでは、バガス灰を 10% 以上添加することで添加なしに比べて 28 日間で油臭が 4 から 1～2、油膜も 4 から 2 に低下している。一方、国頭マーヅでは、バガス灰を 10% もしくは 30% 添加することで添加なしに比べて 28 日間で油臭が 2 から 1 未満、油膜も 3 から 1 未満に低下している。

以上より、バガス灰を添加することで、島尻マーヅと国頭マーヅのいずれに対しても一般細菌数が増加傾向となり、特に、国頭マーヅに対しては中性域への改良効果と微生物の栄養源としての寄与が考えられる。さらに、バガス灰内部は多孔質であることから（図-8(d) 参照）、

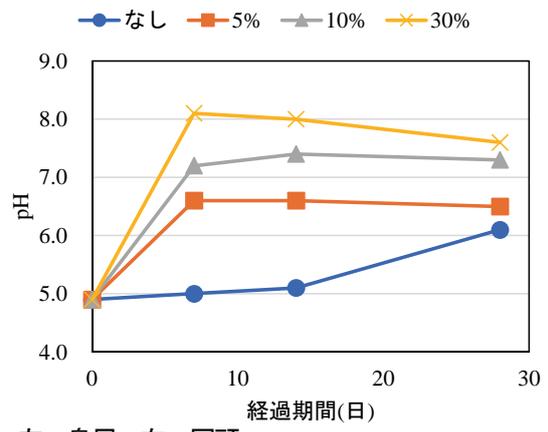
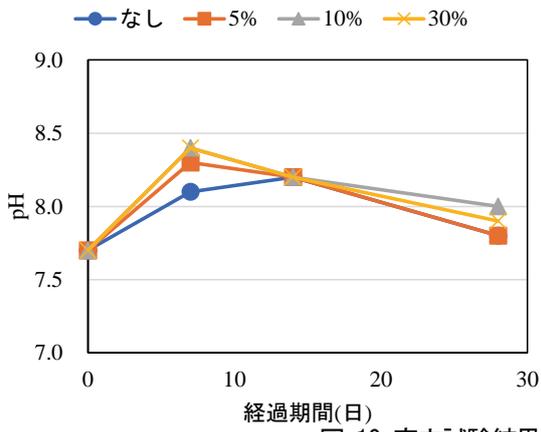


図-10 室内試験結果 (pH) 左：島尻, 右：国頭

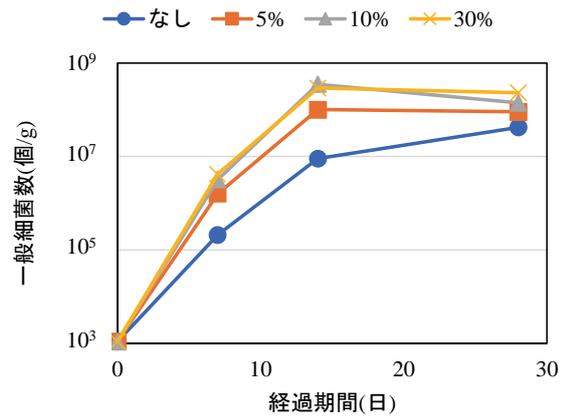
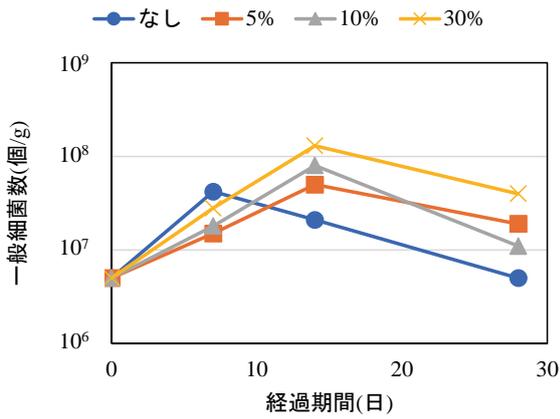


図-11 室内試験結果 (一般細菌数) 左：島尻, 右：国頭

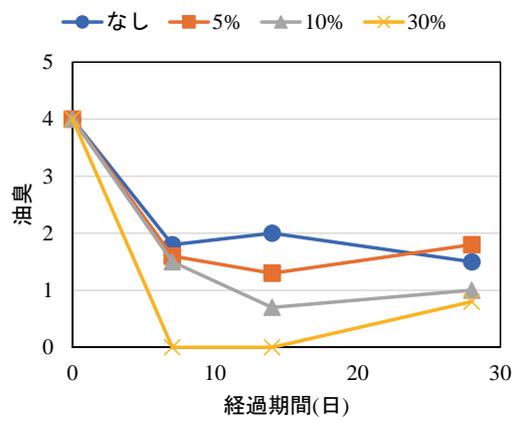
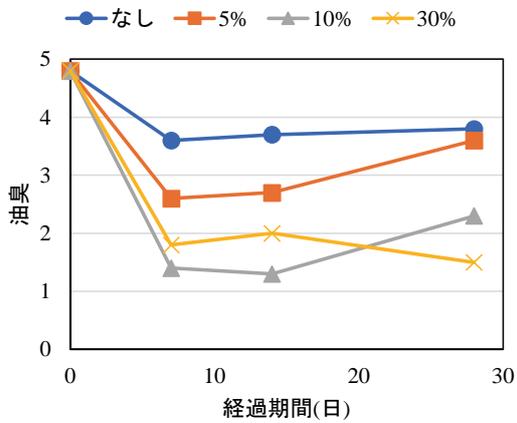


図-12 室内試験結果 (油臭) 左：島尻, 右：国頭

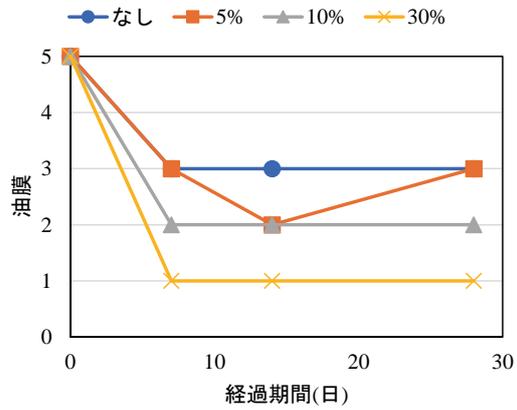
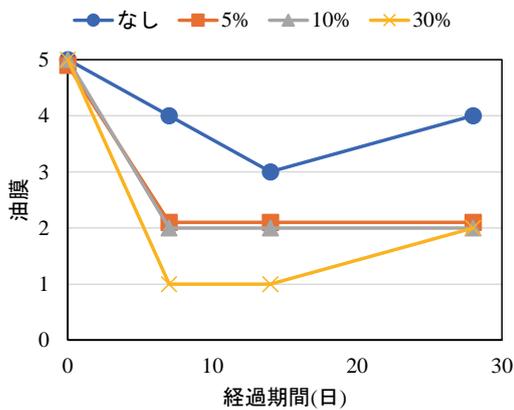


図-13 室内試験結果 (油膜) 左：島尻, 右：国頭

細菌が増加しやすい環境であることも要因として考えられる。また、油の浄化効果も確認できたことから、バガス灰は浄化促進材として適用可能であることが示唆される。

#### 4.4 現地試験の方法

現地試験では、気温や湿度の変動を考慮したバイオ処理効果を確認するために琉球大学構内において2022年2月から4月に実施した。試験で用いた模擬汚染土壌とバイオ処理のための窒素やリンの添加仕様は、前項の室内試験と同様である。一方、浄化促進材の添加量は、室内試験の結果を参照にして表-5のとおりとした。また、現地でのバイオ処理の試験は、図-14 のステンレス缶（φ20cm）に1kgの供試土壌を容器の半分程度まで投入および養生し、降雨が供試土壌に接触しないようにシートで屋根を設置した。養生期間中の混合と水の添加は、1日もしくは2日に1度として、分析試料の採取頻度および分析項目は室内試験と同様とした。

#### 4.5 現地試験の結果および考察

図-15 から図-18 に現地試験結果を示す。図中の凡例は、表-5 に示した通りである。

図-15 より、島尻マージと国頭マージの pH は、室内試験と同様にバガス灰を添加することで国頭マージが中性域に変化している。一般細菌数も室内試験と同様に、バガス灰を添加することで対照区やバイオに比べて1オーダー以上の増加が確認された（図-16）。なお、国頭マージの初期の一般細菌数が室内試験よりも多いが、これは、模擬汚染土壌を作製してから現地試験を開始するまでに数カ月が経過していたことから、その間に一般細菌が自然増殖したためと考えられる。

油の浄化効果に関しては、図-17 および図-18 より、油臭・油膜ともにバガス灰を添加することで低下傾向にある。島尻マージと国頭マージも、バガス灰を添加することで対照区およびバイオに比べて28日間で油臭が3から1~2、油膜も3から2に低下している。

以上より、高温・多湿の琉球列島でバイオ処理の養生試験を行った場合でも、バガス灰を添加することで油の浄化効果が促進されることが分かる。

#### 5. おわりに

本研究では、油含有土壌のバイオ処理を効率的に処理する方法を検討した。植物由来の資材を油含有土壌に混合することで、発酵熱に伴う温度上昇とともに資材自体に含まれる栄養源によって微生物の活性化が可能となり、油含有土壌を効率的に浄化できた。また、3 事例において油だけでなく法の対象物質であるベンゼンに対しても浄化効果があり、狭隘な敷地でも適用可能であることを紹介した。

一方、琉球列島に存在する特殊土壌（島尻マージ、国

表-5 試験ケース（現地試験）

ケース	土質	栄養塩	土質改良材	凡例名
1	島尻マージ	なし	なし	対照区
2		あり	なし	バイオ
3		あり	バガス灰20%	バガス灰
4	国頭マージ	なし	なし	対照区
5		あり	なし	バイオ
6		あり	バガス灰20%	バガス灰



図-14 試験状況（現地養生）

頭マージ）を対象として、油含有土壌のバイオ処理を検討した。島尻マージと国頭マージを対象とする場合、高い土質改良効果と pH 調整機能を両有し、かつ、微生物の栄養源となることが要求される。そこで、琉球列島で入手可能なサトウキビの搾りかすであるバガスを燃焼させたバガス灰の適用可能性を検討した。バイオ処理資材としてのバガス灰の適用可能性は、室内試験および現地試験によって評価した。その結果、国頭マージではバガス灰を添加することで pH を中性域に改良でき、島尻マージと国頭マージともに一般細菌数が増加しており、油の浄化効果が向上したことを確認できた。

以上のことより、開発資材を混合することによる温度管理と琉球列島の製造業の副産物であるバガス灰を用いることによる土質改良効果と微生物促進効果に伴い、油含有土壌のバイオ処理効果を促進できることを確認した。その中でも、本州から島嶼への運搬費や特別な前処理が不要なバガス灰の使用は、バイオ処理の適用の幅を広げることが可能だと考えられる。

今後は、現地でバイオパイル工法を想定した通気を加えた処理方法の検討や微生物の活動を考慮した油の浄化効果の数値解析モデルを用いた評価<sup>11)</sup>などを行う予定である。

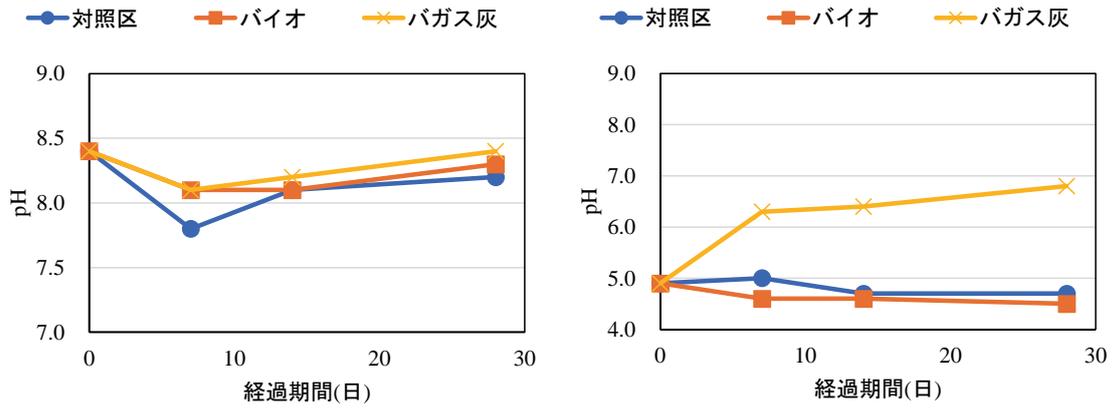


図-15 現地試験結果 (pH) 左：島尻, 右：国頭

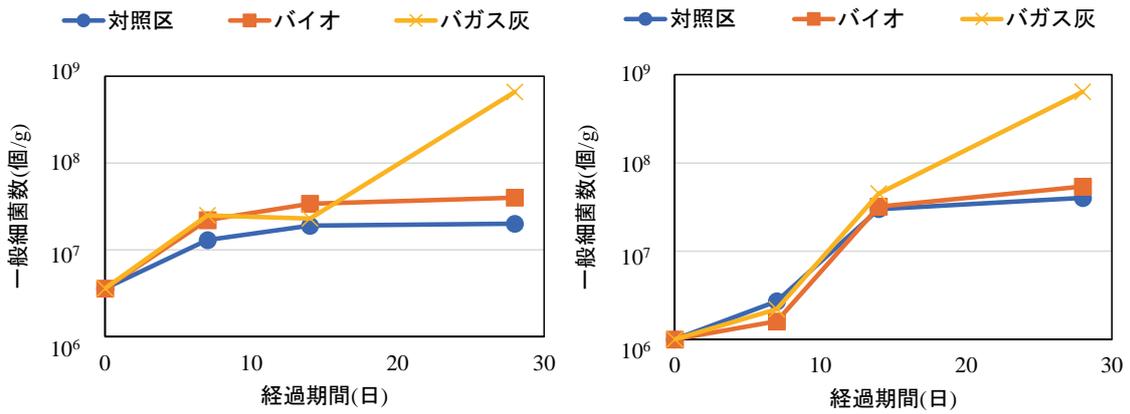


図-16 現地試験結果 (一般細菌数) 左：島尻, 右：国頭

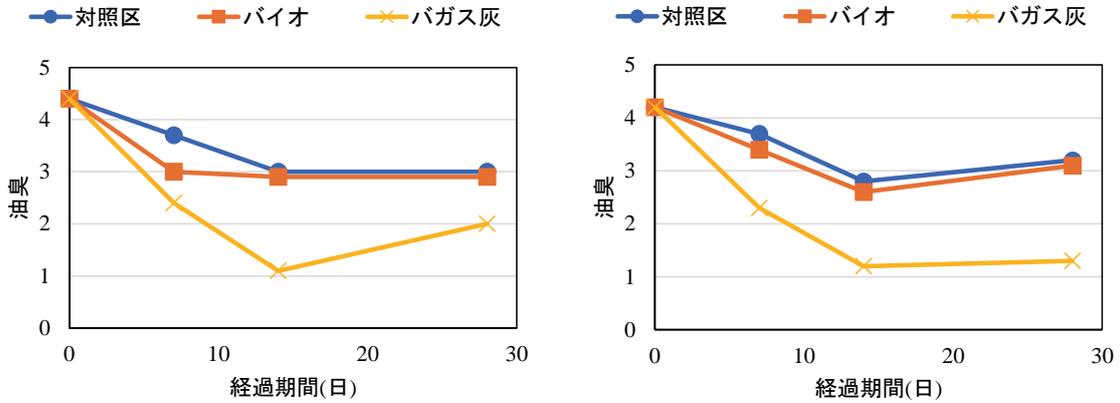


図-17 現地試験結果 (油臭) 左：島尻, 右：国頭

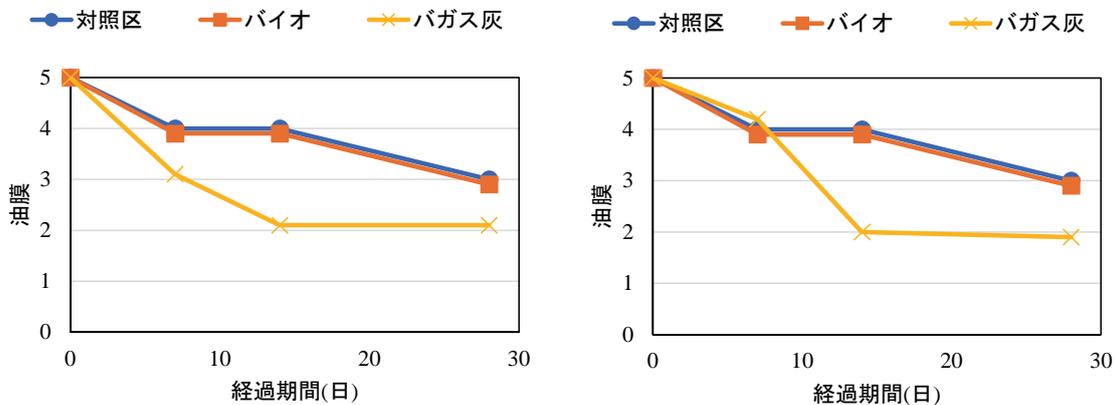


図-18 現地試験結果 (油膜) 左：島尻, 右：国頭

### 参考文献

- 1) 一般社団法人土壌環境センターHP :  
[https://www.gepc.or.jp/04result/press\\_2021.htm](https://www.gepc.or.jp/04result/press_2021.htm),  
2022.12.22 参照.
- 2) 環境省：油汚染対策ガイドライン-鉱物油を含む土壌  
に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対  
応の考え方-, pp.1-21,資料 B-1, 2006.
- 3) 沖縄タイムズ：2016年1月9日記事,  
<https://www.okinawatimes.co.jp/articles/-/22574>.
- 4) 沖縄防衛局：2017年8月22日記事,  
<https://www.mod.go.jp/rdb/okinawa/07oshirase/kanri/kanri-info/290822oshirase.pdf>.
- 5) 石川洋二：油汚染土のバイオレメディエーション, 環  
境科学会誌, Vol.20, No.5, pp.381-388, 2007.
- 6) 四本瑞世, 千野裕之, 石川洋二：油汚染土のバイオレ  
メディエーションに関する研究(その6),大林組研究  
所報, No.67, pp.1-6, 2003.
- 7) 井出一貴, 三浦俊彦, 山田祐樹, 高田尚哉, 光本純, 稲積真  
哉：土壌の分級選別処理における速効型中性系土質改良材  
の開発, 材料, Vol.69, No.1, pp.69-74, 2020.
- 8) 大島義徳, 大西健司, 西川直仁, 石川洋二：油含有土  
壌のバイオ処理促進剤の開発, 環境浄化技術, 2016.
- 9) 中野拓治, 中村真也, 松村綾子, 高畑陽, 崎濱秀明, 大城秀  
樹, 幸地優作, 平田英次：油で汚染された国頭マージ土壌  
のバイオレメディエーションの実用化に関する研究, 農業  
農村工学論文集, pp.I\_11-I\_20, 2020.
- 10) EPA：How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for  
Underground Storage Tank Sites, IV-1～IV-27, 2004.
- 11) 西村伊吹, 日野良太, 大西健司, 西川直仁, 松原仁：油分解  
菌による油汚染土浄化モデルの開発と時間的・空間的分解  
パターン解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.3,  
pp.307-318, 2022.

# 「地盤・施設防護」



# 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

BEHAVIOR OF ANCHOR REINFORCEMENT AND SOIL FOR DEVELOPMENT OF LIMIT STATE DESIGN

野々山栄人\*, 宮田喜壽\*\*  
NONOYAMA Hideto and MIYATA Yoshihisa

\*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）

キーワード：アンカー補強材, 引抜き抵抗, 模型実験  
(*anchor reinforcement, pull-out resistance, physical modeling*)

## 1. はじめに

壁面材とアンカー補強材とで盛土材を拘束補強することで安定を保つ多数アンカー式補強土壁は、適用可能な盛土材料の種類も多く、様々な社会インフラ建設で用いられている。現在の設計では、主動土圧を基本に補強材力を推定し、補強材が破断しないよう、引き抜けないようにタイバーの種類や補強材長が決定される<sup>1)</sup>。性能設計への移行に伴い、このような設計をより高度化する必要性が生じている。

本研究は、多数アンカー式補強土壁の設計のうち、アンカー補強材の引抜き抵抗の評価法を対象にした。現在、-1に示すような破壊メカニズムが想定され、引抜き抵抗力が評価されている。しかし、実際のメカニズムは十分に解明されておらず、三次元効果や土被り効果を考慮する必要性について、実験結果に基づき検討するというのが研究の内容である。

従来、補強材の土中挙動は、外部からの観察できないため、未解明な部分が多々あった。本研究では、透明土を用いる新しい模型実験技術<sup>2)</sup>を用いて、この問題について取り組んだ。本文は、アンカープレートの水平方向の引抜き抵抗メカニズムを三次元的に可視化できる模型実験装置の開発を行い、その有効性を検証した結果を報告するものである。

## 2. アンカープレートの引抜き可視化実験

本研究では、補強土構造物の一種である多数アンカー式補強土壁工法の引抜き抵抗メカニズムを明らかにするために、アンカープレートの引抜き過程を三次元的に可視化できる模型実験装置の開発を行った (-2)。開発した模型実験装置は、三次元地盤変位を観察するためのアクリル製側壁を有する模型土槽 (-2) とアンカープレ

ートを所定の荷重条件で引抜くことができる荷重装置から構成されている。模型土槽は、幅590mm、高さ360mm、奥行き290mmの土槽となっており、-2に示したように、滑車を介して、鉛直上向きにワイヤーを引くことで、アンカープレートを水平方向へ引抜くことを可能とした。アンカープレートは、幅  $b$  および高さ  $h$  が 50mm、厚さ  $t=6$ mm の正方形の版状で、その中心に直径 8mm、長さ 218mm のアンカーロッドが取り付けられている。ロッドの先端部の穴に直径 2mm のワイヤーがつけられ、その末端は荷重装置に接続されている。実験に用いた透明粒子と整合液は、石英ガラス粒子 ( $\rho_s=2.214\text{g/cm}^3$ ,  $D_{50}=1.2$  mm,  $e_{\max}=1.018$ ,  $e_{\min}=0.707$ , 屈折率 1.4585) と流動パラフィン (屈折率 1.4556 と 1.4616 の流動パラフィンを混合して、液温 20°C で石英ガラスの屈折率に合わせたもの) である。模型地盤は、液温調整を伴う液中落下法<sup>3)</sup>により作製した。実験ケースは、相対密度 80% (密な地盤) の地盤に対し、アンカープレートの設置深さ  $Z$  を変えて 2 通りの実験を実施した。  $Z$  は、Case1 では 50mm、Case2 では 200mm である。透明地盤内の透明粒子の 3 次元挙動を可視化するために、トレーサー粒子を一定間隔で 3 台のカメラから重ならないように階段状に配置した。トレーサー粒子には、着色した石英ガラス ( $\rho_s=2.214\text{g/cm}^3$ ,  $D_{50}=2.5$ mm,  $e_{\max}=1.022$ ,  $e_{\min}=0.734$ , 屈折率 1.4585) を使用した。

両ケースの実験で得られた引抜き抵抗力和変位の関係を -3 に示す。Case1 では、変位量の増加に伴い、抵抗力は増加し、ある変位量に達したところで、抵抗力は一定となった。アンカープレートの設置深さが深い Case2 についても、変位量の増加に伴い、抵抗力は増加し、ある変位に達したときにその増加割合が変化した。

次に、得られた画像を用いて 3 次元 PTV 画像解析を実施し、トレーサー粒子の三次元変位を解析した。得られたトレーサー粒子の変位から、逆距離加重法による空間

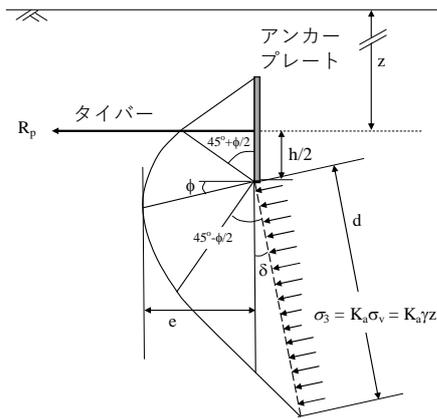


図-1 多数アンカー工法的设计で仮定している引抜き抵抗メカニズム<sup>1)</sup>

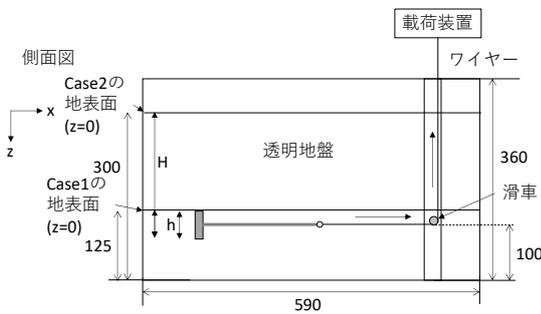


図-2 実験の概要

補間を用いて、地盤の三次元変位分布を算出した。得られた結果から、土槽中央断面について結果を整理した。初期状態から、引抜き抵抗力と変位関係の傾きの変曲点（図中の赤矢印）間の変位ベクトルを図-4、図-5にそれぞれ示す。図中の赤枠がアンカープレートの初期位置、黒色と赤色のベクトルがそれぞれ地盤とアンカープレートの変位ベクトルを示している。また、青色の実線は観測結果から推定した中央断面位置での破壊線、黒色の実線はアンカーロッドの位置をそれぞれ示している。Case1では、アンカープレート前面では、プレートの引抜きに伴い地盤が変形し、地表面付近まで地盤変位が生じている。アンカープレート背面では、地盤がアンカープレートの引抜きに伴って生じた空間に落ち込むように変位していることが確認できる。次に、Case2では、土被りの影響でCase1とは異なる変形モードを示し、その破壊線は既往の研究で仮定されている破壊メカニズムとは異なる結果であった。

### 3. まとめ

本研究では、補強土構造物の一種である多数アンカー式補強土壁工法の引抜き抵抗メカニズムを明らかにするために、アンカープレートの引抜き過程を三次元的に可視化できる模型実験装置を開発した。地盤内を可視化する

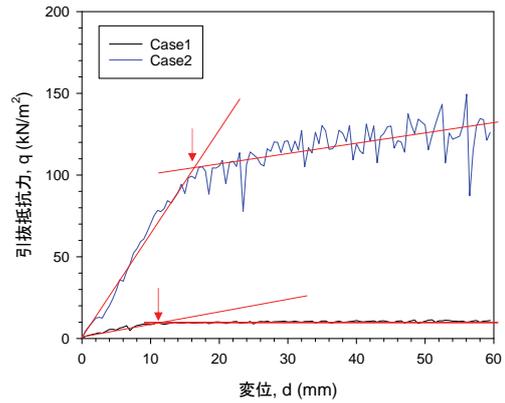


図-3 引抜き抵抗力と変位の関係

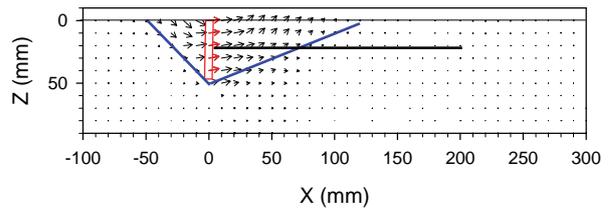


図-4 変位ベクトル (Case1, 中央断面)

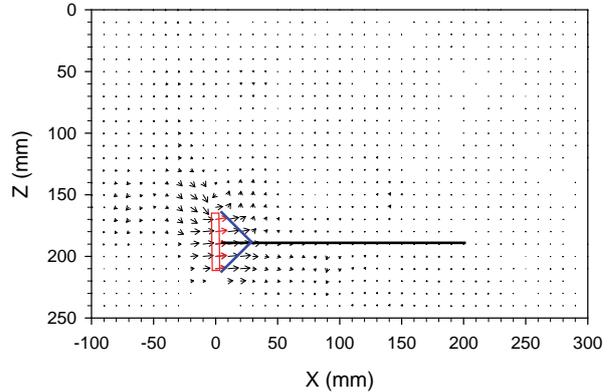


図-5 変位ベクトル (Case2, 中央断面)

るために、透明土を用いた模型実験技術を用いて可視化実験を実施した。アンカープレート引抜き時における地盤の三次元的破壊モードの可視化に成功した。それらの結果はアンカーの設置深さに大きく依存することを明らかにした。

### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 神崎達也, 山本圭祐, 宮田喜壽, 野々山栄人, 高野大樹, 森川嘉之: 粒状体の屈折率整合可視化実験における模型地盤作製法に関する基礎的検討, 第43回土木学会関東支部技術研究発表会, 講演概要集 (CD-ROM), III-21, 2016.

# インテグリティ試験による杭の健全度調査

INVESTIGATION OF PILE INTEGRITY BY INTEGRITY TESTING

内田篤貴, 篠田里子, 齊藤弘昭, 割ヶ谷隆志\*

UCHIDA Atsuki, SHINODA Satoko, SAITOH Hiroaki and WARIGAYA Takashi

\* 日本物理探査株式会社 企画本部（〒143-0027 東京都大田区中馬込 2-2-12）

キーワード：インテグリティ試験, 弾性波速度, 杭  
(Integrity testing, Elastic wave velocity, pile)

## 1. はじめに

高度成長化時代に蓄積されてきた膨大なインフラ施設の再利用は、環境問題の観点から、非常に重要な課題である。

本論においてはその対策として、建築構造物を建て替える場合における既存杭等の下部構造物の再利用を適切に実施するための手法の1つであるインテグリティ試験について検討する。

既存杭は、比較的大規模なビル、橋梁基礎等の構造物に利用されているが、新築する際には再利用せず、引抜き工事が行われている場合が多いのが実情である。

経済性や環境負荷低減等のために、既存杭を再利用する場合も見られるようになりつつあるが、杭が健全であるか否かを判断したうえで再利用しなければならない。杭によっては必ずしも、健全な状態とは言えないものもあり、再利用に適さない場合もあり得るため、健全性を評価した上で再利用することが必要である。

これらの問題を解決するため、本論に示すような実施例は、既存杭の再利用の適正な促進、再利用を計画する設計者や建築基準法上の建築確認を行う機関にとっても、有効なものであると考えられる。既存基礎の再利用技術が一般的になって行けば、新設の基礎工事が適切に行われるか否かで、再利用時の工事費などに影響を及ぼす事にも繋がる。この技術は、基礎施工の品質向上や適正化を一層進める意味においても、貢献できる技術であると考えている。

国土交通省においては、施設の機能や性能に不具合が生じてから対策を行う「事後保全」から、不具合が発生する前に対策を行う「予防保全」へ転換し、持続的・効率的なインフラメンテナンス実現を推進している。

さらに、我が国のインフラは、その多くが高度経済成長期以降に整備されており、建設から半世紀以上経過す

る構造物の割合が加速度的に増加するなかで、社会経済活動の基盤となるインフラの維持管理・更新を計画的に進めていく必要がある。

その問題を解決するためには、定量的な計測が最善であるが、膨大な構造物を対象とするため、調査方法が簡便で経済的負担が少なく、定性的評価が可能な調査方法も必要である。

本報告は、既設杭等の健全性の評価にインテグリティ試験を適用した事例の報告である。表-1 はインテグリティ試験の適用対象を整理したものである。

表-1 インテグリティ試験の対象

事象	対象	目的
建設・建築	基礎杭の再利用	杭の損傷の有無
工事中の支障物	想定外の埋設杭	杭、矢板の長さ
防災	標識、街路灯	損傷の有無

## 2. 測定原理

本論で使用したインテグリティ試験は、杭長、杭断面の変化、クラック等の性状について杭頭を打撃することにより（図-1）、杭中を伝播する弾性波がインピーダンスの異なる境界で反射する現象を利用して杭の長さ、健全度を診断する装置である。

インテグリティ試験は、杭頭に与える衝撃をきわめて小さくすることで、地盤抵抗を無視できるという低ひずみ法（low-strain）の仮定に基づき試験を行っている。

杭頭から入力された波動は、杭の下端に向かう波として伝播し、杭断面変化部、杭先端部で反射し、杭頭に戻ってくる。杭の種類別に弾性波速度を設定することにより、反射波の到達時間(t)を式(1)に代入することで杭長や断面変化位置を推定することができる（図-2）。



図-1 インテグリティ試験状況

$$L=(C \times t) / 2 \quad (1)$$

ここで、  
 L : 杭の長さ  
 C : 杭の弾性波速度  
 t : 反射波の到達時間

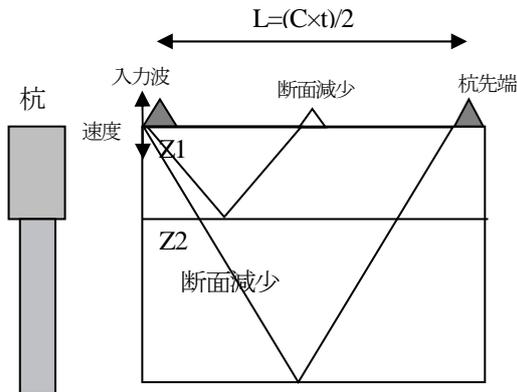


図-2 断面変化による波形の変化

杭体が損傷等により断面変化する場合は、杭頭に打撃を与えて発生する波は杭下端に向かい伝搬するが、断面変化点に達すると一部は反射して杭頭に向かい、他は透過して更に進行する。この時の速度に関する反射率  $r$  および透過率  $t$  は式 (2)、式 (3) で定義される。

$$r = (z_2 - z_1) / (z_2 + z_1) \quad (2)$$

$$t = 2z_1 / (z_1 + z_2) \quad (3)$$

ここで、

r : 反射率

t : 透過率

z1 : 1層目のインピーダンス

z2 : 2層目のインピーダンス

一般にインピーダンス  $Z$  は杭の断面積を  $A$ 、弾性係数を  $E$  とすると、式(4)であらわされる。

$$Z = AE / C \quad (4)$$

ここで、

A: 杭の断面積

E: 弾性係数

C: 杭の弾性波速度

### 3. 調査方法

試験は、図-3 に示すように杭の表面にセンサを固定し、プラスチックハンマの打撃位置は、杭の表面で平滑な部分とした。弾性波を正確に伝えるため、打撃方向は杭に対して伸長方向とした。波形記録の信頼性を上げるため、必要に応じて打撃位置を変え数回試験を行った。計測波形は、計測した加速度を微分し速度で表示している。縦軸は速度、横軸は波動の伝播時間から計算した杭の深度である。時間と杭の深度の関係は式(5)のとおりである。

$$t = 2L / c \quad c = \sqrt{E / \rho} \quad (5)$$

ここで、t : 反射波の到達時間

L : 杭長 (支柱の打撃位置から先端までの距離(m))

E : 支柱のヤング率

$\rho$  : 支柱の密度

c : 弾性波速度

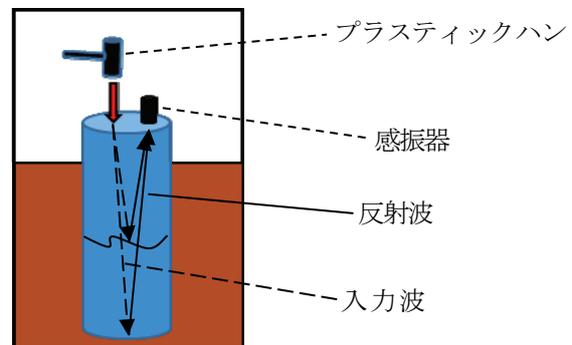


図-3 試験の模式図

健全性の判定は、図-4 に示すように、打撃位置から杭先端までの波形内に急激な凹凸の特徴の有無を確認し判定する。特に、入力波と同じ上向き (凸型) の波形は断面の減少を示すため、留意して確認する必要がある。

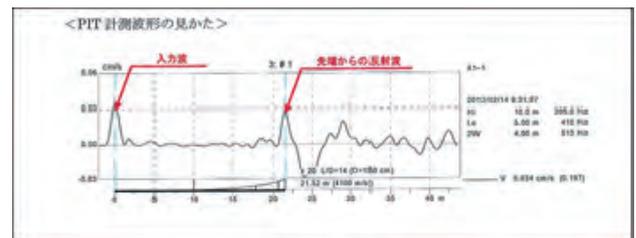


図-4 計測波形例

試験に必要な入力パラメータを表-2 に示す。

表-2 設定パラメータ

	設定項目	単位
①	杭の直径または面積	cm または cm <sup>2</sup>
②	杭の長さまたは表示する長さ	m
③	杭の設定弾性波速度	m/sec
④	測定感度	1~32

杭の弾性波速度は、材質別に一般的な値を用いた。表-3 は、山本・他(2008)による杭の弾性波速度である。

表-3 杭の種類別設定弾性波速度の例

対象物	設定弾性波速度	備考
鋼管杭	5110m/s	山本・他 2008
コンクリート杭	3849~3889m/s	同上
既製コンクリート	4800m/s	同上
SC杭	5000m/s	同上

表-4 は、使用したインテグリティ試験使用機材の仕様を示したものである。

表-4 インテグリティ試験の仕様

項目	仕様
感度	50mV/g
加速度計測定レンジ	±100g ショック：30,000g
周波数特性	0.7~9000Hz
振幅直線性	±1%
共振周波数	40KHz
サンプリング周波数	1MHz
寸法	135mm x 104 mm x 52 mm
重量	450g

#### 4. 調査例

杭の長さと同様の試験例をそれぞれ示す。

##### 4.1 杭の長さ

長さ 13m の鋼管について杭長の測定を実施した。測定結果を図-5 に示す。初動と反射波のピークに黒矢印を記した。

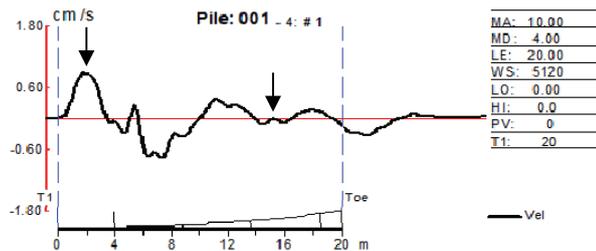


図-5 インテグリティ試験結果

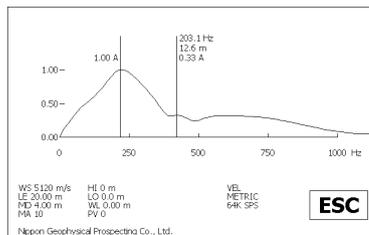


図-6 図-5 の波形のフーリエ変換

図-5 の波形にフーリエ変換を行い、それによって得られた共振周波数を基に式(6)を用いて杭長の検証を行った。フーリエ変換結果を図-6 に示す。

鋼管の弾性波速度は、一般的な 5120m/s とした。

$$L = C_p / 2 \times f_p \quad (6)$$

ここで、

L：鋼管の長さ

Cp：鋼管の弾性波速度

f<sub>p</sub>：共振周波数

図-5 および図-6 の結果に基づき、杭の長さは 12.6 ~ 13.1m と算定された。杭長の算定は、材質の弾性波速度に大きく依存するため、正確な弾性波速度を設定することが、精度向上につながる。

##### 4.2 杭の健全度

図-7 は調査により得られた杭別の波形例を示す。ヤング率や密度が減少しインピーダンスが低下した場合は、入力波と同じ向きの反射波が戻ってくる。したがって、支柱先端からの反射波は通常、入力波と同じ向きとなる。インピーダンスの減少と同様の反射波となるのは、クラック等の欠損があり鋼材のヤング率が低くなっている場合である。

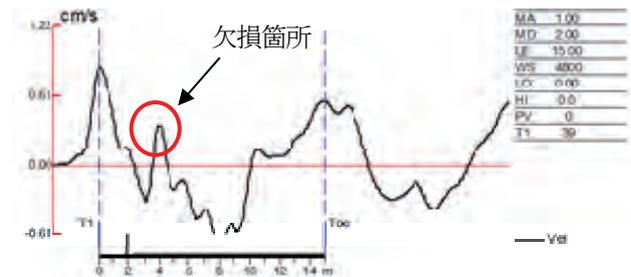


図-7 測定記録例

杭種	測定記録	健全度
矢鋼		不健全
H鋼		不健全
鋼管		健全
松杭		健全

図-8 鋼材別測定波形例

図-7は、長さ15mのH型鋼の記録例である。4.5m付近、10.5m付近にインピーダンスの減少が認められ、強度の低下が検出された。図-8は鋼材別の測定波形例である。健全、不健全の判定結果も併記した。

## 5. 健全度の評価

健全度の分類は、インテグリティ試験により得られた波形の特徴から杭の健全程度を国土交通省（2019）の分類を利用し、区分案を作成した。区分した結果を図-9に示す。

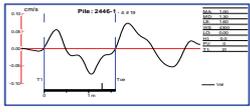
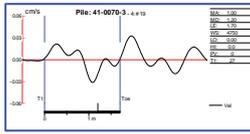
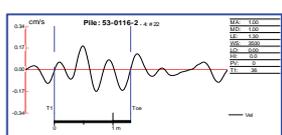
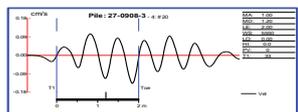
波形と特徴	
健全	 <p>入力波と反射波の間に、上側に凸の波形がない</p>
予防保全	 <p>入力波と反射波の間にある上に凸の波形振幅が初動より小さい</p>
早期措置	 <p>入力波と反射波の間にある上に凸の波形の振幅が初動より大きい</p>
	 <p>上に凸の波形の振幅が連続する</p>

図-9 インテグリティ試験波形と健全度

図-9は、インテグリティ試験結果が、今後の対策の緊急度や対策の優先順位の指標となることを目的として作成している。

## 6. 健全度評価の検証

インテグリティ試験により、早期措置が必要と判断された街路灯支柱の交換時期に合わせ、処分する支柱を提供いただき、劣化が認められた地際付近について工業検査を実施し、インテグリティ試験結果の妥当性について検証した。試験は以下の5項目について実施した。

### ① 外観目視

埋設部を中心に外観目視検査を行い、腐食状況、溶融亜鉛めっきの劣化状況を明確にした。

### ② 形状測定

3D スキャンにより、変形の有無を計測した。

### ③ 硬さ測定

ビッカース硬さ測定器による硬さ測定を行った。

### ④ 金属組織検査

断面のマクロ組織、ミクロ組織観察を行った。

### ⑤ 肉厚測定

街路灯を45度ごと、5cm間隔で超音波による肉厚測定を実施した。

## 6.1 外観目視

埋設部の地際部付近は腐食しており、180°～360°側の半周にわたり減肉（最大減肉深さ0.6d）が認められた。さらに深い部位にはスケールが固着していた。

膜厚計を用いて溶融亜鉛めっき厚さを測定した結果、87～191 μmでありまた、0.6d 腐食部のめっき厚さは45 μmと測定された。

「JIS H 8641 溶融亜鉛めっき」によると2種55（HDZ55）の平均めっき膜厚μm（参考値）は76以上であるため、腐食部においては残存皮膜が十分ではなかった。



図-10 工業検査に用いた支柱

(上段：全景，下段：腐食部の拡大)

## 6.2 形状測定

図-11 に 3DS キャン結果 (180 度, 270 度) を示す。全体的には 163.688mm の円筒径と近似している。円筒に対してプラス変位は青～紫の、マイナス変位は黄色～赤のカラーマップで示した。地際部を基準とすると、ボックスの上が 180～270°にかけてマイナス変位として 11.6mm の変形が見られる。これはボックスの溶接による変形の可能性がある。

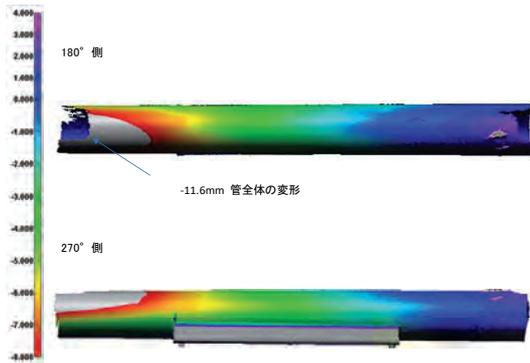


図-11 3D スキャンによる形状測定

地際腐食部腐食深さ測定結果は以下の通りである。  
0°側に発生している腐食部 周囲との差より  
 $+0.277 - (-0.345) = 0.622\text{mmd}$   
90°側に発生している腐食部 周囲との差より  
 $+0.107 - (-0.237) = 0.344\text{mmd}$

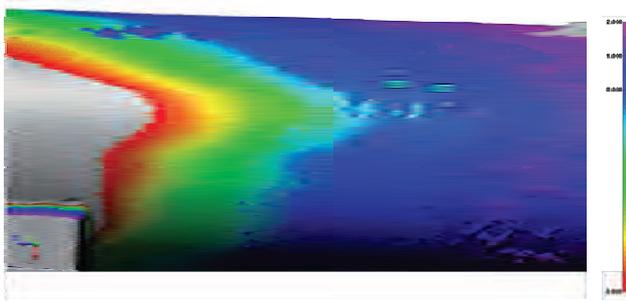


図-12 90度方向からみた腐食部分の拡大

## 6.3 硬さ測定

断面組織観察試料の硬さ測定を行った。使用したビッカース硬さ (HV) 硬さ測定器は、AKASHI HARDNESS TESTER AVK-A (荷重 1kgf) である。

測定位置は埋込み試料断面の外表面層部から深さ 0.25mm の位置より内面側へ 0.5mm ピッチで測定した。ビッカース硬さ HV から引張強さ MPa への換算は、SAE J417「硬さ換算表」のデータから作成したグラフによった。

溶融亜鉛めっきが残存している内外表面層に近い部位は比較的硬く、中央部はやや軟らかい傾向がある。断面

B, C は外面腐食により溶融亜鉛めっき皮膜が無くなっている。

平均硬さは 141.0～150.1HV であり、推定される引張強さは 456.0～484.2MPa である。健全部と比較して腐食部がやや軟らかいが、いずれも JIS 規格値 400MPa 以上であり強度上は特に問題はなかった。

## 6.4 金属組織検査 (マクロ組織, ミクロ組織)

長手方向 4 断面 (健全部, 0.4d 腐食部, 0.6d 腐食部, 錆膨れ部) について金属組織検査を行った。



図-13 0.4d 腐食部 マクロ組織写真ノーエッチ倍率×8



図-14 0.6d 腐食部 マクロ組織写真ノーエッチ倍率×8

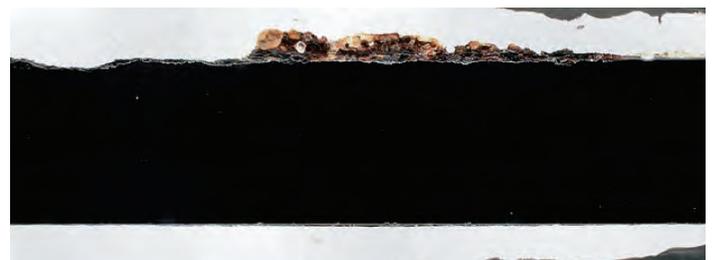


図-15 錆膨れ状況 厚さ 1mm 以上の錆が固着倍率×10



図-16 外面 皮膜の剥がれ 倍率×200

健全部の溶融亜鉛めっきの亜鉛層は腐食が進み合金層が露出し始めた状態である。残存皮膜は十分に厚いですが、部分的に皮膜が剥がれかかった部位もある。

腐食部については亜鉛めっきが腐食により完全に無くなって鉄素地から発錆した状態である。あばた状の錆の膨れが認められる部位もあり、既に防錆力はないと考えられる（図-15）。

内面側の亜鉛めっきはいずれも比較的健全な状態であり、耐食性は問題ないと考えられる。マイクロ組織はいずれもフェライト+パーライト組織を呈している。

外面、中間、内面のマイクロ組織、健全部と腐食部のマイクロ組織を比較して大きな違いは見られなかった。

全体的に圧延により延ばされた面状の非金属介在物が顕著に認められ、表層付近の面状介在物に沿って腐食が進展して層状に脱落している部位が認められた。

## 6.5 肉厚測定

図 6-9 は街路灯支柱下部の肉厚調査結果である。地際周辺の肉厚測定をそれぞれ 30 度ごとに全周測定し、肉厚等高線を作成した。地際より-0.15m において、腐食が進み肉厚の減少、錆による肉厚の増加が発生していたことが検証された。

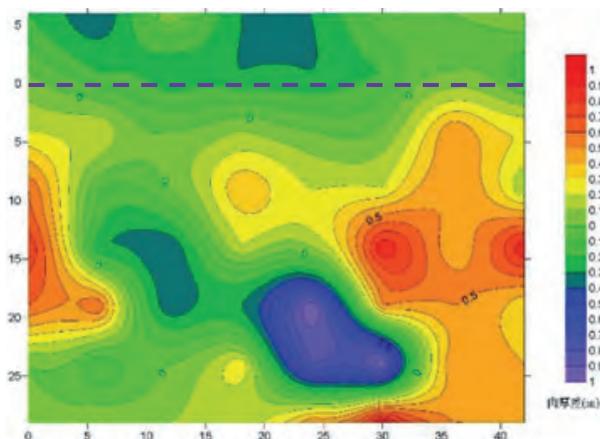


図 6-9 街路灯支柱の地際肉厚測定結果展開図

(肉厚 4.7mm に対して、暖色系が肉厚増加、寒色系が肉厚減少、紫の破線は地際を示す。)

## 7. まとめ

インテグリティ試験は、非破壊で杭等の健全性を経済的に評価することが可能である。定性的な調査方法であるため材質、おおよその長さ等杭の諸元が判明しているときは有効な手法であると考えられる。

インテグリティ試験により早期措置が必要と判断された杭について、工業検査により定量的な劣化程度を計測した結果、地際から-0.1~0.2m の深度において肉厚の減少、錆による膨張が発生していることが確認された。こ

の検査結果により、インテグリティ試験は、杭の健全度を正しく評価しているが検証された。

この技術は杭に限らず、街路灯、標識等の支柱の健全性にも活用することができる。目視では判定が困難な想定できない支柱の倒壊を、未然に防ぐ観点からも有効な手法の 1 つであると考えられる。

## 8. 今後の展望

杭の劣化の程度については、図-9 に示す通り定性的判断に委ねているが、今後は過去の計測データを再検討し、劣化の評価に反射率(r)の数値を反映し、定量的な評価が可能となるよう改善していきたい。

### 参考文献

- 1) 国土交通省道路局 国道・技術課, 2019, 附属物(標識・照明施設等)定期点検要領.
- 2) 魚本 健人, 加藤潔, 広野進: コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ5 コンクリート構造物の非破壊検査, 日本コンクリート協会, 1990.
- 3) 佐々木健一, 熊谷 崇之, 李 相勲, 2008, 衝撃弾性波法による鋼管構造物根入れ深さ測定システム構築のための基礎的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会(平成 21 年度), 1-6.
- 4) 山本 辰徳 正, 桑山 晋一, 小嶋 英治, 2008, 衝撃載荷試験に用いる杭の縦波伝播速度に関する検討, 第 43 回地盤工学研究発表会, 1261—1262.
- 5) 内田 篤貴・愛甲崇信・伊藤明・城之内明: 街路灯倒壊リスクを回避するためのインテグリティ試験の活用, 第 11 回地質リスクマネジメント事例研究発表会, pp.70~75, 2020.10.

# 衝撃的張力作用時に塑性変形を考慮した緩衝構造の実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON SHOCK ABSORBING SYSTEM CONSIDERING PLASTIC DEFORMATION AT IMPACT TENSION

別府万寿博\*, 西本安志\*\*, 浮島徹\*\*\*, 廣岡宗一郎\*\*\*\*, 西村佳樹\*\*\*\*\*

BEPPU Masuhiro, NISHIMOTO Yasushi, UKISHIMA Toru, HIROOKA Souichiro and NISHIMURA Yoshiki

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

\*\*博（工），シバタ工業株式会社，品質環境保証室（〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地）

\*\*\*シバタ工業株式会社，技術本部（〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地）

\*\*\*\*シバタ工業株式会社，技術本部海洋技術課（〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地）

\*\*\*\*\*シバタ工業株式会社，技術本部建設設計課（〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地）

キーワード：緩衝材，ゴム，塑性変形，チェーンリンク，衝撃的張力

(Shock absorber, Rubber, Plastic deformation, Chain link, Impact tension)

### 1. 緒言

衝撃的な力が作用する箇所には，一般的にゴムなどの緩衝材を配置するなどの衝撃緩衝機構を設けることが多い。これらの緩衝材は，衝撃力の作用する大きさや状況，取り付けられるスペースなどを考慮して，材料や性能などが決定される。例えば，衝撃力が繰り返し作用する場合は，作用する衝撃力に対して安定的な機能発揮が求められるため，設置スペースにかかわらず，緩衝材の性能は弾性範囲内での応答が望ましい。一方で，単一的に作用する衝撃力に対しては，設置スペースが確保できる場合には緩衝材の弾性範囲内で対応することも可能であるが，設置スペースが狭小な場合は材質を工夫するなどして塑性変形をも考慮して，確実に機能を発揮させることが望ましいと考えられる。

そこで，衝撃的な張力が作用するような索材としてチェーン部材に着目した。チェーン部材にゴムなどの衝撃緩衝材が組み込まれている例として，チェーンリンク間にもゴムを充填させて一体化したラバーチェーン構造があり，衝撃緩衝機構としての有効性が衝撃実験などで検証されている<sup>2),3),4)</sup>。しかしながら，作用する衝撃力が単一の場合でかつ設置スペースが限られ，チェーンリンク数が制限されるような場合は，チェーンリンク間に充填する材質が単なるゴムではなく，塑性変形領域を考慮しかつ高エネルギー吸収性能を示す緩衝材が望まれる。

そこで，塑性変形を期待した鋼製パイプとゴムを複合化した緩衝材をチェーンリンクと一体化した図-1 に示すような新たな緩衝機構を提案した<sup>5)</sup>。本緩衝機構は，



図-1 塑性変形を利用した緩衝機構  
(ラバーリンク機構)

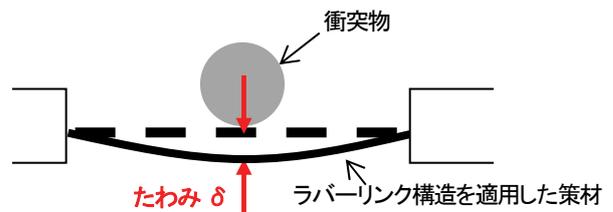


図-2 ラバーリンク機構を適用した索材  
の変形イメージ

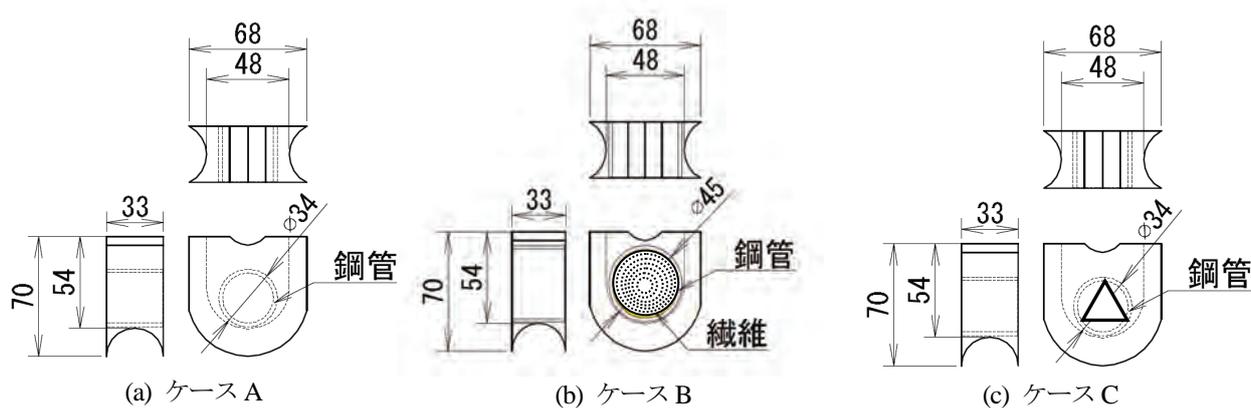


図-3 供試体の種類

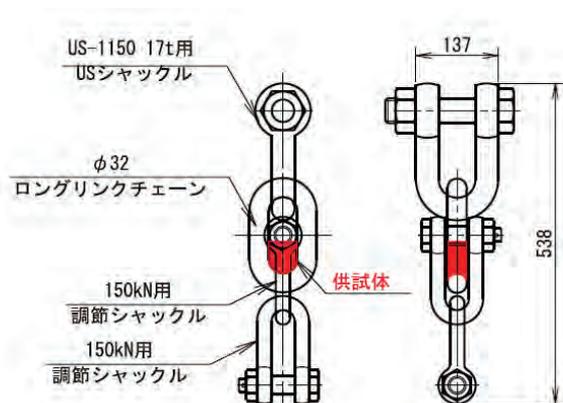


図-4 供試体の設置位置



写真-1 静的載荷実験状況

ゴムの衝撃緩和特性を活かしつつ鋼製パイプが圧縮されることによる塑性変形にて高いエネルギー吸収性能を発揮することを期待したものである。また、図-2 に示すように、素材に伸び変形能力を付与することでたわみを発生させることにより本機構が全体として変形することで、作用する張力を軽減させることも期待できる。

本研究では、この緩衝機構の静的力学特性を評価するとともに、衝撃力が作用するような速度条件化での載荷実験を行い、実供用時で想定されるような速度レベルにおいても確実に機能を発揮できるかについて考察した<sup>9)</sup>。また、この緩衝機構を適用した実構造物への適用事例についても紹介する。

## 2. 静的および高速載荷実験

### 2.1 供試体

本実験に使用する供試体は、図-3 に示すように、3種類とした。ゴムの中にφ34mmの鋼製パイプ（材質：STK400）を入れたケース A、さらにケース A の鋼製パイプをφ45mmとしてその中に繊維を同心円状に積層埋



写真-2 高速載荷実験状況

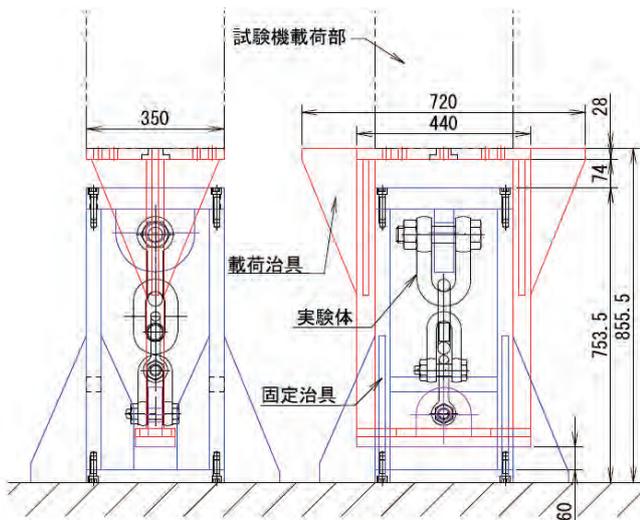


図-5 静的および高速載荷実験に用いた試験治具

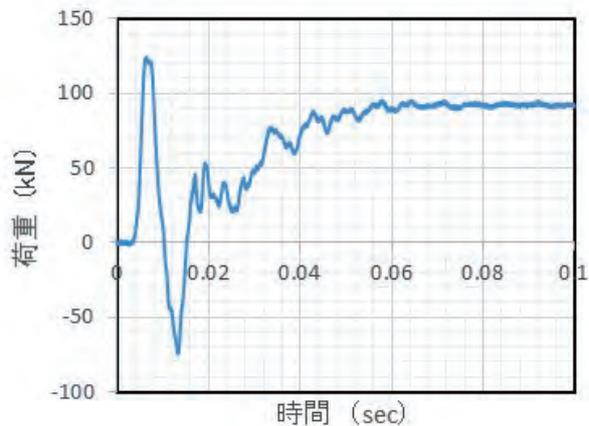


図-6 荷重～時間関係の一例（ケースA）

設したタイプBとφ45mmの鋼製パイプの中を鋼材にて補強したケースCの3種類を用いた。ここで、ケースBは鋼製パイプの中に積層繊維補強ゴムの充填することで強度増加を期待したものであり、ケースCは鋼製パイプを鋼材で補強することによる強度増加を期待したものである。

これらの供試体を図-4に示すように、φ32mmロングリンクチェーン（材質：KSBC50）と一体化して連結させた。

## 2.2 実験条件

静的載荷実験は、写真-1に示すように、シバタ工業が所有する300kNアムスラー万能試験機（株島津製作所製）を用い、測定項目は載荷点荷重と載荷点変位とし、載荷速度は $8.3 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ とした。

高速載荷実験は、写真-2に示すように、防衛大学校が所有する1000kN中速度高圧載荷装置（株前川試験機製作所製）を用いた。測定項目は、ロードセルによる載荷点荷重とレーザ式変位計による載荷点変位とした。載荷速度は1.0m/secとし、測定項目のサンプリング間隔は $1.0 \times 10^{-5} \text{sec}$ と設定した。

いずれの実験も図-5に示すような治具を用いて、試験装置を圧縮載荷することにより、供試体を組み込んだ機構に引張力が作用するようにした。

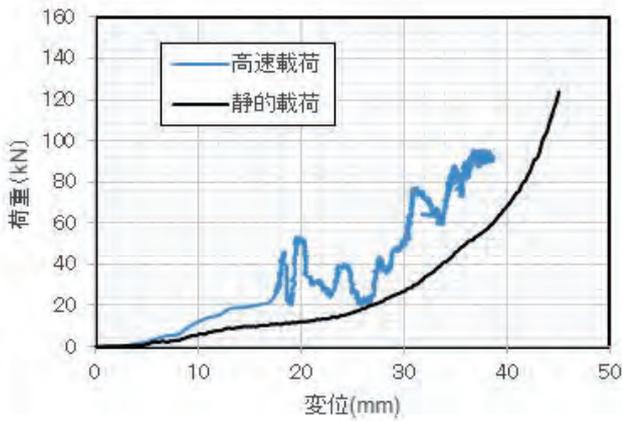
## 3. 実験結果および考察

本実験で得られた高速載荷実験における荷重～時間関係の一例を図-6に示す。いずれの供試体においても載荷初期に荷重のピーク波形が見られた。これは、一方を試験機の載荷側、もう一方を試験機テストベッドに固定しているが、その軸線が厳密に一致していないために生じたものと考えられる。さらには、供試体（緩衝材）が介在するため、その軸線のずれの影響がさらに顕著になったものと推測される。よって、この載荷初期に相当する部分を除去し、この部分は静的載荷実験結果から速度効果を考慮するなどして包括的に荷重～変位関係を求めることとした。

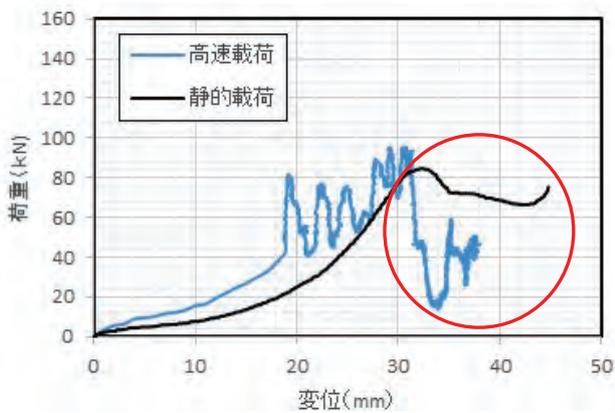
それぞれのケースで得られた静的載荷および高速載荷における荷重～変位関係を図-7に示す。また、表-1に変形量35mmでの吸収エネルギー量を静的載荷と高速載荷で比較した。

図-7および表-1より、静的載荷では鋼製パイプが降伏することで荷重～変形量関係には明確な変局点が見られ、さらに、変形が進行するにつれてゴムの圧縮変形と鋼製パイプの塑性変形によって、同形状のゴム単体の緩衝材よりもより大きな吸収エネルギー量を有するといえる。特に、ケースBの静的載荷では、鋼製パイプの塑性変形に加え、埋設繊維の破断が生じることで最も大きい吸収エネルギー量を示した。

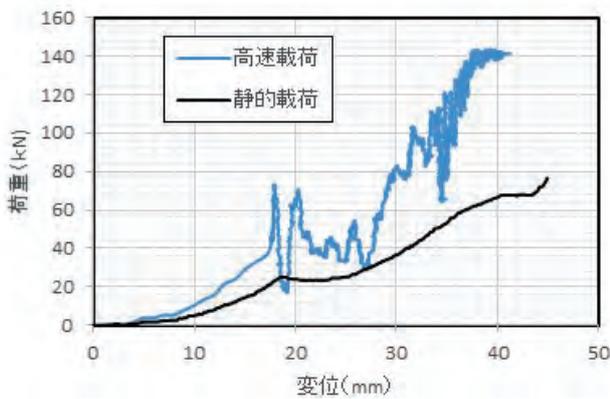
また、静的載荷と高速載荷を比較すると、ケースAとケースCでは、速度依存性による荷重の増加が認められるものの、両載荷ともほぼ同じような力学特性を有することが確認された。しかしながら、ケースBについては、



(a) ケース A



(b) ケース B



(c) ケース C

図-7 実験で得られた荷重～変位関係

変形量 32mm 程度から静的載荷と比較して高速載荷では荷重が大きく低下する傾向を示した。これは、写真-3 に示すように、静的載荷では徐々に圧縮されるため、軸線のずれを解消しつつ安定した性能を発揮できたのに対し、高速載荷では軸線のずれに加え鋼製パイプに充填した積層繊維補強ゴムの剛性が高いため、積層繊維補強ゴ

表-1 吸収エネルギー量の比較 (35mm 変形時)

	吸収エネルギー (kN-m)	
	静的載荷	高速載荷
ケース A	0.51	0.96
ケース B	1.10	1.29
ケース C	0.71	1.24



写真-3 供試体の傾き

ムと鋼製パイプとの接着力とのバランスにより、積層繊維補強ゴムの埋設繊維の破断が生じる前もしくは破断初期に横方向への飛び出したためと考えられる。このことは、ケース C にて、鋼製パイプの中を鋼材にて溶接補強し一体化することで強固に接着したものでは見受けられなかったことから、鋼製パイプの中に充填する材料の剛性と接着力のバランスが高速載荷のような衝撃力が作用する場合は特に重要であると推察される。よって、本研究で使用した 3 種類の供試体では、静的載荷と高速載荷での変形挙動の安定性や吸収エネルギー量から、ケース C が望ましいと考えられる。

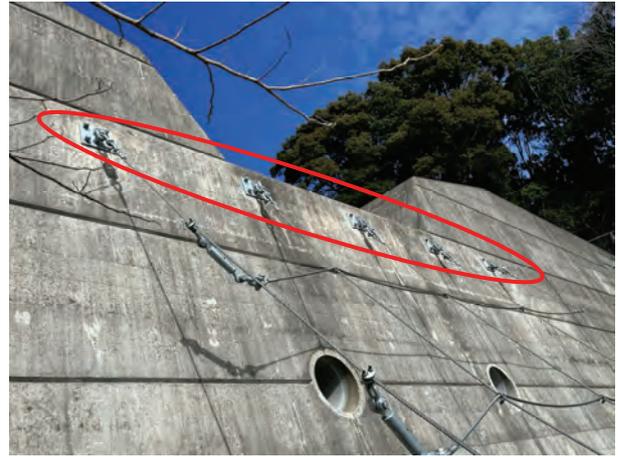
#### 4. 実構造物への適用事例

本研究で実施した塑性変形を期待した鋼製パイプとゴムを複合化した緩衝材をチェーンリンクと一体化したラバーリンク機構を実構造物に適用した事例を紹介する。

本適用事例は、写真-4 に示すように、砂防堰堤から流出した流木を捕捉するワイヤーネット構造の端部に本機構を付与したものである。流木捕捉時にワイヤーネットの伸び変形能力とラバーリンク機構の変形によってた



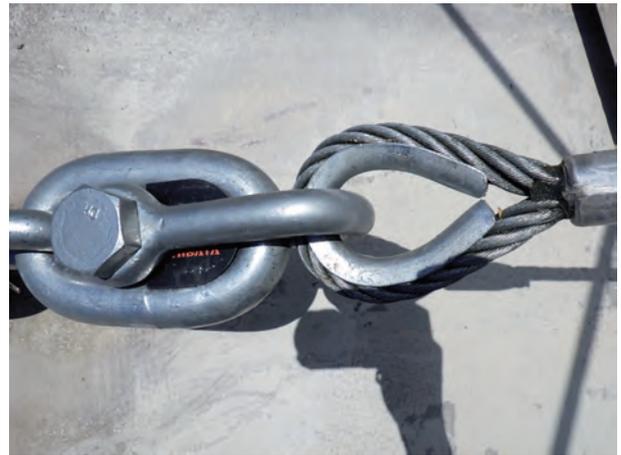
(a) 適用事例の全景



(b) 法面固定部の状況



(c) 法面固定部の拡大



(d) ラバーリンク機構部拡大

写真-4 ラバーリンク機構を適用した流木捕捉工

わみを発生させることで、作用する張力を軽減させるものである。特に、ラバーリンク機構は、写真-4(b)のように法面固定部側に設置することで、たわみ変形による張力緩和に加えて、法面固定部へ作用する衝撃力を緩和することを期待したものである。

## 5. 結言

本研究は、ラバーリンク機構の静的および高速載荷実験を行い、その力学特性を評価するとともに実供用時でも確実に機能を発揮できるかについて評価することを目的としたものである。本研究で得られた成果を要約すると以下の通りである。

(1) ラバーリンク構造の静的載荷実験を行った結果、リンク間で鋼製パイプが圧縮されることによる塑性変形によって高いエネルギー吸収性能を発揮することが確認された。

- (2) 静的載荷と高速載荷では、鋼製パイプ内に充填する材料の剛性と鋼製パイプとの接着強度のバランスが変形挙動に影響を与えることが確認され、より接着強度が大きいものの方が載荷速度の変化に対して安定した挙動を示すことが確認された。
- (3) 本研究で使用した3種類の供試体では、静的載荷と高速載荷での変形挙動の安定性や吸収エネルギー量から、鋼製パイプの中を鋼材にて補強したケースCが望ましいといえる。
- (4) 静的載荷と高速載荷で同様な挙動を示す場合は、実供用下で想定される速度レベルにおいても確実に機能を発揮できるものと考えられ、変形量や吸収エネルギー量など静的特性による設計が保守的な評価を与えると考えられる。
- (5) 最後に本研究の成果をもとに、ラバーリンク機構の実構造物への適用事例として、流木捕捉ワイヤーネットに適用した施工事例を紹介した。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、適切なご指導およびご助言をいただきました防衛大学校石川信隆名誉教授、大野友則名誉教授ほか、ご協力いただきました関係者の方々に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 例えば、(社)日本ゴム協会 ゴム技術フォーラム編：ゴム材料の土木・海洋用途をさぐる、ポスティコーポレーション、1997.01.
- 2) 伊藤敏弘、石川智男、石川信隆、池田啓士、加藤正実、生駒信康：供用下の高架橋における落橋防止システムの設計・施工、橋梁と基礎、pp.45-50、1999.04.
- 3) 小野田忠弘、西村佳樹：鋼製チェーン式弾性型水平部材の横棧付きコンクリートスリット砂防えん堤への適用について、砂防学会研究発表会概要集、pp.464-465、2007.05.
- 4) 山口聖地、宮松信隆、西村佳樹、西本安志、別府万寿博：流木の衝突を模擬した弾性チェーンの実験的研究、2020 年度砂防学会研究発表会概要集pp.291-292、2020.5.
- 5) 西本安志、浮島徹、廣岡宗一郎、別府万寿博：「張力作用時における塑性変形を考慮した緩衝機構の実験的研究」、令和元年度土木学会全国大会、第74回年次学術講演会講演概要集、I-263、2019.09.
- 6) 西本安志、浮島徹、廣岡宗一郎、別府万寿博：「衝撃的張力作用時における塑性変形を考慮した緩衝機構に関する実験的研究」、土木学会第12回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2019.12
- 7) 西本安志、梶田幸秀、石川信隆、西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究、構造工学論文集 Vol.46A, pp1865-1874、2000.03.

## 年次フォーラム 2023 令和 4 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 978-4-907956-52-3

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。