

# 2025 年度 土木学会西部支部沖縄会 第 15 回 技術研究発表会

琉球大学 研究者交流会館・50 周年記念会館

2026 年 1 月 21 日

概要集

(2026. 1. 20版)



土木学会西部支部沖縄会

## 会場案内



琉球大学西原口を入り、構内の信号を左に曲がり、左手すぐ。

○ 土木学会継続教育（CPD），CPDS 認定プログラム



# 発表プログラム

2026 年 1 月 21 日

## Time Table

Start	End	プログラム	
9:30	10:00	受 付・登 録	
10:00	10:20	開会式      Room A 開会の挨拶：有住 康則（沖縄会会長） 実施要項の説明：下里 哲弘（沖縄会幹事長）	
10:20	10:30	Break	
10:30	12:00	Session 1    Room A 座長：大城 雄希（琉球大学） 9 編（防災・レジリエンス）	Session 2    Room B 座長：松川 剛（沖縄総合事務局） 8 編（環境保全・計画）
12:00	13:15	Lunch	
13:15	14:45	Session 3    Room A 座長：大湾 朝亮（沖縄県） 7 編（情報技術・耐久性）	Session 4    Room B 座長：入部 綱清（琉球大学） 8 編（建設材料・新工法・計測技術）
14:45	15:00	Break	
15:00	16:30	Session 5    Room A 座長：荒牧 聡（建設技術研究所） 9 編（腐食・防食・維持管理）	
16:30	17:00	Break	
17:00	17:30	閉会式      Room A 優秀発表者賞の表彰：松川 剛（沖縄総合事務局） 閉会の挨拶：大湾 朝亮（沖縄県）	

# Presentation Schedule

## Titles and Authors

○発表時間：7分、質疑応答：3分

○概要集：2頁～6頁（原則、偶数頁）

### ○注意事項

- ・発表者は、各発表セッション開始前に発表パワーポイントを会場パソコンにインストールし、動作状態を確認すること。
- ・発表者および聴講者は、土木学会西部支部沖縄会の会員登録をしてください。なお、土木学会正会員または学生は登録の必要はありません。

Time	Room A
10:30 ↓ 12:00	<b>Session 1：防災・レジリエンス</b> 座長：大城 雄希（琉球大学）
	1 新しい ASR 抑制剤の社会実装に向けた検証に関する基礎研究 ————— 1 琉球大学大学院 ○又吉 秀哉，富山 潤
	2 島袋急傾斜地における斜面崩壊対策の変遷 ————— 3 沖縄県 土木建築部 ○鍵溝 遼治郎
	3 袋詰玉石工の水理実験を対象とした三次元固液連成数値解析 ————— 11 琉球大学大学院 ○高野 宏征，福田 朝生
	4 数値計算による津波が作用する琉球石灰岩海食崖の力学的特性に関する研究 ————— 13 琉球大学大学院 ○橋口 優芽香，琉球大学 金城 旭希，Asil Abdul Naser， 入部 綱清，藍檀 オメル，地殻工学防災研究所 渡嘉敷 直彦
	5 介護福祉施設の風水害被災リスクに関する基礎的分析 ————— 15 琉球大学 ○上田平 満遥，神谷 大介，琉球大学大学院 松井 遥
	6 水害時要支援者に対する宿泊施設の受け入れ能力に関する基礎的分析 ～九州地区を対象として～ ————— 17 琉球大学 ○安部 徳哉，神谷 大介，琉球大学大学院 松井 遥
	7 要介護認定者に対する水害時避難支援の困難度分析 ～九州地方一級水系を対象として～ ————— 19 琉球大学大学院 ○松井 遥，琉球大学 神谷 大介，長崎大学 吉田 護
	8 複数のホースを用いた波エネルギー集約による波力発電 ————— 21 琉球大学大学院 ○丸山 紀信，福田 朝生
	9 JSCE2025 策定プロセスの対話型組織開発への応用 ————— 23 沖縄県 土木建築部 ○西里 雅範

Time	Room B
1030 J 12:00	<b>Session 2 : 環境保全・計画</b> 座長：松川 剛（沖縄総合事務局）
	1. 卵殻由来の水酸化カルシウムを用いたアルカリ活性材料の開発 ————— 31 琉球大学大学院 ○松嶋 義丈, 琉球大学 富山 潤, 花城 有人 (株)バ イオアパタイト 中村 弘一, 黒川 達輝
	2. イグサのリグニンを利用したボタニカルコンクリートの基礎研究 ————— 33 琉球大学 ○徳盛 翔, 富山 潤, 琉球大学大学院 宮本 祐香 (株)興洋エ ンジニアリング 宮城 敏明, 琉球大学総合技術部 花城 有人
	3. 一般廃棄物由来 OHD 焼却灰を用いたジオポリマーモルタルに関する基礎的研究 ————— 35 琉球大学大学院 ○志堅原 悠太, 富山 潤, 比屋根 方新
	4. アセチル化木材粉末を用いたボタニカルコンクリートの耐水性向上と強度特性 に関する研究 ————— 41 琉球大学大学院 ○宮本 祐香, 琉球大学 富山 潤, (株)興洋エンジニアリング 宮城 敏明, 琉球セメント(株) 比屋根 方新
	5. PT 調査を用いた外出行動に関する基礎的分析 ————— 47 琉球大学 ○新里 莉理, 神谷 大介, 東京大学大学院 福田 大輔, 上町 剛志
	6. 平日日中のバス利用者増加を意図した観光周遊分析 ————— 49 琉球大学 ○比嘉 悠, 神谷 大介, 那覇市上下水道局 上間 大輔
	7. 中城湾全体におけるトカゲハゼ保全の取組み —新たな保全対策の提案— ————— 51 沖縄県土木建築部 ○安里 祥, 高良 亨
	8. 首里城正殿の「見せる復興」 ～今しか見られない復元現場のPR～ ————— 57 内閣府沖縄総合事務局国営沖縄記念公園事務所 ○内間 安朗, 與那嶺 盛明

Time	Room A
13:15 ┃ 14:45	<b>Session 3：情報技術・耐久性</b> 座長：大湾 朝亮（沖縄県）
	1. 沖縄近海での地震を想定した津波による湾水振動に関する基礎的研究 —— 61 琉球大学 ○諸見里 安梨，入部 綱清
	2. 数値計算に基づく沖合波高と汀線波高の関係に関する研究 —— 63 琉球大学 ○金城 旭希，入部 綱清
	3. 三次元固液連成数値解析による単一粒径土砂流の乱れ構造 —— 65 琉球大学大学院 ○山口 栄治，福田 朝生
	4. フランジを有する矩形断面の下面の外圧係数に関する基礎的研究 —— 69 琉球大学 ○倉持 武蔵，入部 綱清，下里 哲弘，日鉄エンジニアリング(株) 田村 康行，(株)横河ブリッジホールディングス 加藤 健太郎， 宮地エンジニアリング(株) 山下 修平
	5. MPS 法における流体と剛体の連成計算手法に関する基礎的研究 —— 71 琉球大学 ○眞榮田 栞，入部 綱清
	6. 機械学習によるコンクリート構造物の鉄筋腐食および腐食ひび割れ発生時期の予測に関する基礎研究 —— 73 琉球大学 ○眞榮里 和嵯，富山 潤，花城 有人，ピーエス・コンストラクション(株) 吉見 映輝，琉球セメント(株)比屋根 方新
	7. 長時間(168 時間)運転可能な簡易型非常用発動発電装置について —— 75 南部国道事務所 ○内間 航一郎

Time	Room B
13:15 J 14:45	<b>Session 4 :建設材料・新工法・計測技術</b> 座長：入部 綱清（琉球大学）
	1. 炭素骨材を用いたカーボンニュートラルコンクリート製品の一検討 ———— 79 西松建設(株) ○原田 耕司, 九州大学 佐川 康貴, 柴田 啓太, 日本興業(株) 津郷 俊二, 藤田 総司
	2. デジタル画像計測によるひび割れ変化のモニタリングに関する実験的研究 — 81 琉球大学 ○川東 優香, 下里 哲弘, 大城 雄希, Yasin Mumtaz, 川田建設 垣花 寿
	3. デジタル画像による点群データを用いた鋼部材の評価 ————— 83 琉球大学大学院 ○宮里 啓太郎, 下里 哲弘
	4. LiDAR を用いた観光利用による登山道経年変化計測に関する分析 ————— 85 琉球大学大学院 ○国場 有沙, 琉球大学 神谷 大介, 株式会社日本インシーク 平野 順 俊, 澤口 侑, 摂南大学 大月 庄治, 法政大学大学院 山本 忍, 小宮 涼, 庄司 康太, 日本工営株式会社 浅野 達海, 法政大学 今井 龍一
	5. ケイ酸塩系表面含侵材によるコンクリート養生の効果について ————— 87 (株)ティーオーシー ○親泊 廣安, リベイロブルノ 山里 榮伸, サンキ化工株式会社 木曾 一彦
	6. パーム椰子殻燃焼灰ベースのジオポリマーコンクリートの強度特性に関する基 礎研究 ————— 91 琉球大学大学院 ○瑞慶覧 朝伎, 富山 潤, 花城 有人, 琉球大学客員研究員 リベイロ・ブルノ
	7. 高架上と土中部における照明ポールの振動特性 ————— 93 琉球大学 ○宮里 琉良, 大城 雄希, Yasin Mumtaz, 下里 哲弘
	8. Raspberry Pi を用いた構造ヘルスマニタリングシステムの構築 ————— 95 琉球大学 ○松本 拓樹, 富山 潤

Time	Room A
	<b>Session 5 : 腐食・防食・維持管理</b> 座長：荒牧 聡（建設技術研究所）
	1. 局部腐食形状による切り欠き特性に関する解析的研究 ————— 97 琉球大学 ○古川 雅斗, 大城 雄希, 下里 哲弘
	2. 錆びたボルト試験体に対する各種防食メカニズムの耐食性能評価 ————— 99 琉球大学 ○山本 智大, 下里 哲弘, 淵脇 秀晃
	3. 電気化学的実験による CS 工法の防食性能評価に関する研究 ————— 101 琉球大学大学院 ○真田 大輝, 琉球大学 下里 哲弘, 淵脇 秀晃
	4. 鋼材表面の錆・塩分に対する小型・高出力レーザークリーナーの性能検証 ————— 103 琉球大学 ○西島 翼, 富山 潤, 花城 有人, 琉球ブリッジ(株) 谷中田 洋樹, 古謝 昌 也
15:00 └	5. 電気抵抗法を用いた大気腐食モニタリング技術 ————— 106 JFE スチール(株) 森本 美奈子, ○面田 真孝, 大塚 真司
16:30	6. ステンレス鋼における孔食さびの発生と環境要因の評価 ————— 110 琉球大学 ○大山 詩織, 下里 哲弘, 淵脇 秀晃
	7. ステンレスクラッド鋼の沖縄での暴露試験による評価 ————— 112 JFE スチール(株) ○栗原 康行, ドアン ティーフィン, JFE エンジニアリング 田中 裕明, 琉球大学 下里 哲弘
	8. ステンレスクラッド鋼の機械的性質と延性特性に関する研究 ————— 114 琉球大学 ○宮崎 ひな, 下里 哲弘, JFE エンジニアリング 田中 裕明
	9. ステンレスクラッド鋼板の圧縮耐荷力特性に関する実験的研究 ————— 116 琉球大学 ○田代 楓, 下里 哲弘, JFE エンジニアリング 田中 裕明





## Session 1 防災・レジリエンス

## 新しい ASR 抑制剤の社会実装に向けた検証に関する基礎研究

琉球大学 ○又吉秀哉, 富山潤

### 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性向上には ASR (アルカリシリカ反応) の抑制が不可欠である。本研究では急速膨張性の富山産川砂を対象に ASR 抑制効果が期待される試薬をモルタル表面から含侵させる方法で ASR 抑制効果の検討を行った。

### 2. 使用材料の概要

#### 2. 1 モルタル供試体の概要

本研究では, JIS A 1146 のモルタルバー法<sup>1)</sup>に則ってモルタル供試体 (4×4×16cm) を含侵処理用 3 本, 無処理用 3 本, 合計 6 本作成した。モルタル供試体の配合を表-1 に示す。なお, セメントは普通ポルトランドセメントを使用し, 細骨材は膨張性の高い反応性骨材として富山県産を採用した。

表-1 配合 (単位: g)

セメント	水	細骨材
600	300	1350

#### 2. 2 検討した試薬の概要

予備実験として, 数種類の試薬を混和した供試体を用いた促進膨張試験において, オレイルアルコールに良好な ASR 抑制効果が確認された。これを踏まえ, 本研究では ASR 抑制剤としてオレイルアルコールを採用した。オレイルアルコールは高級脂肪酸アルコールに分類され, コンクリート表面に塗布し, 含侵させることで, 骨材中の反応性シリカと細孔溶液中のアルカリ成分との接触を部分的に遮断し, アルカリシリカ反応の進行を遅延させる可能性がある。また, コンクリート表面に疎水性の被膜を形成することにより, 水分の浸入を抑制し, ASR の膨張に必要な水分供給を低減する効果が期待される。

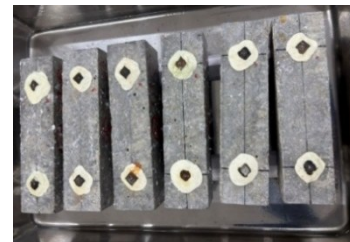
### 3. 促進膨張試験

促進膨張試験として, 50℃飽和 NaCl 溶液浸漬法を採用した。写真-1 に促進膨張試験の様子を示す。膨張試験では 7 日ごとに膨張率を式(1)により算出し, 膨張率が 0.1%を超えるまで浸漬した。0.1%を超えた供試体は,

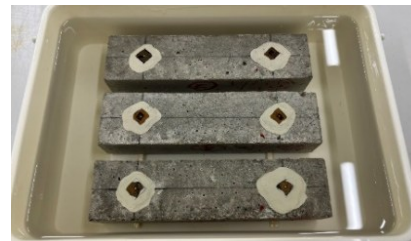
取り出したのち洗浄し 1 週間乾燥させた後, 20℃の環境で, 供試体の半数を抑制剤に浸漬, 残りを乾燥しないように水道水で濡らせた不織布で 1 週間養生した。その後, 温度 35℃, 湿度 95%の環境にすべての供試体を設置し膨張率の測定を行った。模式図を図-1 に示す。

$$E = -\frac{(L - L^0)}{100 - L^0} \times 100 \quad (1)$$

E: 膨張率(%), L: 計測値, L<sup>0</sup>: 初期計測値。



(a)使用する供試体



(b)抑制剤への含侵

写真-1 促進膨張試験の様子

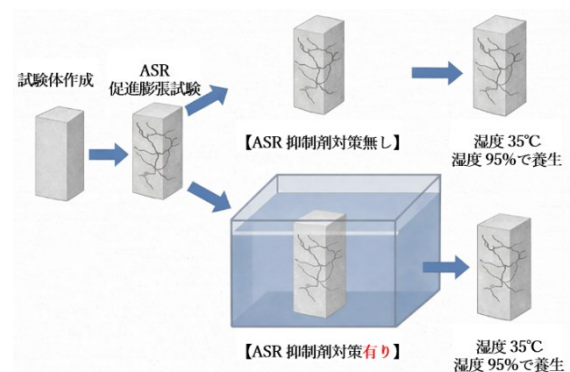


図-1 促進膨張試験の模式図

### 4. 促進膨張試験の結果及び考察

飽和 NaCl 溶液への浸漬開始から現在に至る全期間の膨張率変化を図-2 に示す。図-2 より, すべての供試体において, ASR 発現の指標とされる 0.1%を上回る膨張率が確認されたため, 次段階の処置として 56 日

目より乾燥, 63 日目よりオレイルアルコールへの含浸を開始した。乾燥・含浸期間中に、膨張率の増加勾配が一時的に平坦化しているが、これは NaCl 溶液への浸漬終了に伴う反応速度の低下に加え、乾燥収縮および温度低下に伴う熱収縮の影響によるものである。70 日目以降、全供試体を温度 35°C・湿度 95%の環境へ移置した後は、反応が再活性化し、再び膨張傾向に転じたが、NaCl 溶液浸漬期と比較して膨張速度が低いのは、試験条件の緩和に起因すると考えられる。

図-3 に、63 日目以降の膨張率変化を詳細に示す。図中の点線は抑制剤未処理の供試体、実線は含浸を施した供試体を表す。含浸開始時点での膨張率が近似している供試体①（実線）および②（点線）を比較すると、77 日から 112 日の期間において、①の方が膨張率の増加勾配がわずかに緩やかであった。しかし、他の供試体では、処理の有無による有意な差は確認されず、122 日以降はいずれの供試体でも再び同様の速度で膨張率が増加しており、最終的な膨張抑制には至っていない。

表-2 に示す通り、同一条件で 1 週間乾燥させた後の浸透量を比較すると、水道水の平均含浸率 0.771%に対し、オレイルアルコールは 0.684%に留まった。通常、オレイルアルコールの密度（約 0.85g/cm<sup>3</sup>）は水よりも小さいため、体積換算では水が 4.6cm<sup>3</sup>、オレイルアルコールが 4.8cm<sup>3</sup>と水より多く浸透している計算にはなる。それにも関わらず、図-3 において顕著な膨張抑制効果が認められなかった。

以上の結果から、本試験条件下において、オレイルアルコールによる ASR 膨張抑制効果は限定的であったと判断される。その主要因として、含浸前の乾燥工程が不十分であり、供試体表面の水分量が十分に低減されていなかった可能性が考えられる。この点は、オレイルアルコールと同様に疎水性を有するシラン系表面含浸材の適用事例においても、十分な乾燥が抑制効果の発現に重要であることが報告されている<sup>2)</sup>。

さらに、含浸期間が短かったことに加え、抑制剤が高粘性かつ疎水性であったため、浸透に偏りが生じ、表層部の比較的大きな空隙やひび割れに留まり、ASR 反応が進行する供試体内部の骨材近傍まで十分に到達しなかった可能性が高い。今後は、含水率を定量的に管理した上での含浸処理、含浸期間の延長、および複数回処理による浸透深さの確保を検討し、ASR 膨張抑

制手法の有効性について継続的に検証する必要がある。

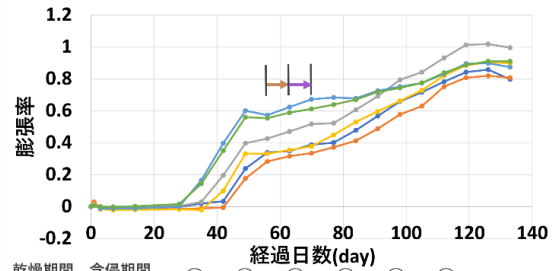


図-2 膨張率の経時変化

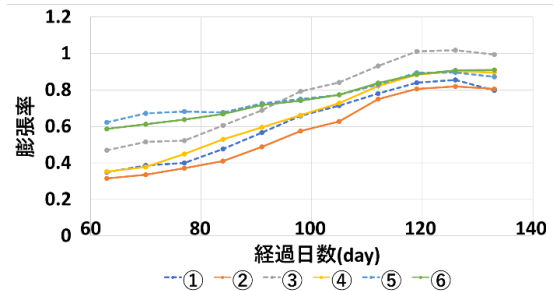


図-3 試薬処理後の膨張率の経時変化

表-2 供試体の水道水および抑制剤含浸量

	含浸前重量(g)	含浸後重量(g)	含浸量(g)	含浸率(%)
①	603	608	5	0.822
②	571.4	575.1	3.7	0.643
③	602.9	607.8	4.9	0.806
④	603.4	607.8	4.4	0.724
⑤	580.8	584.8	4	0.684
⑥	579.5	583.5	4	0.686
水道水の平均値			4.6	0.771
抑制剤の平均値			4.0	0.684

#### 4. まとめ

本研究では、富山県産川砂の ASR 膨張に対するオレイルアルコール含浸の抑制効果を検証した。得られた結果と今後の課題を以下に示す。

- 1) 本試験条件下では明確な膨張抑制効果は認められなかった。これは、抑制剤の高粘性・疎水性に加え、処理前乾燥が不十分であったことにより、薬剤が供試体深部まで十分浸透しなかった可能性がある。
- 2) 今後は、含水率を定量的に管理した含浸条件の最適化により、再検証が必要である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、オリエンタル白石(株)、(株)ティ・エス・プライング、竹本油脂(株)、日本大学小泉公志郎教授から助言を頂いた。ここに記して感謝の意を述べる。

#### 参考文献

- 1) 竹村賢：骨材のアルカリシリカ反応性試験(モルタルバー法)の不確かさ評価, 高知県生コンクリート工業組合, 技術センター, 東部試験所,  
<https://unit.aist.go.jp/riem/ds-rg/uncertainty/club/club6-3.pdf>
- 2) 遠藤裕丈：コンクリート構造物における表面含浸剤の適用手法, 国立研究開発法人土木研究所  
[https://www.pwri.go.jp/jpn/results/tec-info/siryou/2020/fukuokasc/pdf/SC2020\\_fukuoka03.pdf](https://www.pwri.go.jp/jpn/results/tec-info/siryou/2020/fukuokasc/pdf/SC2020_fukuoka03.pdf)



## 島袋急傾斜地における斜面崩壊対策の変遷

沖縄県 土木建築部 中部土木事務所 港湾海岸砂防班 鏑溝 遼治郎

### 1. はじめに

島袋急傾斜地は沖縄本島中部の北中城村に位置し、周囲を住宅に囲まれた斜面である。平成26年の崩壊が契機となり、平成29年1月に急傾斜地崩壊危険区域に指定され、急傾斜地崩壊対策事業が開始された。

平成29年度に実施設計を実施し、令和元年6月には北側半分の法枠工を竣工した。引き続き、残りの法枠工施工に向けた測量作業中に当初設計で想定していなかった地割れを確認した。そこで追加で土質調査を実施したところ新たな椅子型のすべり面を確認したため、令和2年6月に応急対策として仮設防護柵を設置した。その後、斜面変状や地下水位をモニタリングしながら、恒久対策を検討していた矢先の同年9月、梅雨時期の長雨と台風の豪雨により、既設法枠を含む斜面が崩壊した。そのため対策工法を抜本的に見直したうえで、施工時の安全性を確保しながら令和5年9月に竣工した。

本稿では、平成26年度の初動調査から令和5年度の事業概成に至るまでの調査、設計、施工の一連の流れを整理し、斜面変状へどのように対応したかを明らかにする。

### 2. 地区概要と初期調査 (H26～H28)

#### 2.1 地区概要

島袋急傾斜地は北中城村字島袋に位置する東向きの斜面となっており、崖高は13.1m～18.1m、平均勾配は35.5度となっている。この急傾斜地の近辺には学校、病院等の公共的建物は無いものの、急傾斜地の崩壊により危害が生ずる恐れのある人家14戸（要配慮者利用施設含む）が斜面上下部に近接していた。



図 1.1 位置図



図 1.2 既設法枠を含む斜面崩壊状況 (R2.9)



図 1.3 航空写真 (区域指定時)

キーワード 急傾斜, 設計見直し, 流れ盤構造, 椅子型すべり

連絡先 〒901-2155 沖縄県沖縄市美原一丁目6番34号 沖縄県土木建築部中部土木事務所

## 2.2 初期崩壊と区域指定

島袋急傾斜地では、平成 26 年 2 月 7 日の集中豪雨（最大 24 時間雨量 119mm）により一部の斜面が崩れ、崖下の住宅に樹木等がのしかかるなどの被害が生じた（図 2.1）。さらに同年 7 月には台風の豪雨により当該箇所の崩壊が拡大した（図 2.2）。

その後、平成 26 年度に北中城村が実施した調査により、崩壊箇所周辺の地層断面、土質性状、地下水状況などの概要が把握された。

平成 28 年度には沖縄県が区域指定資料作成業務を発注し、新規事業化に向けて予備設計に基づく概算費用算出や費用便益比（B/C）評価を実施した。平成 28 年 10 月には地元説明会を開催し、地権者同意を得て、平成 29 年 1 月 27 日に急傾斜地崩壊危険区域に指定された（図 2.3）。



図 2.1 H26 年 2 月の崩壊



図 2.2 H26 年 7 月の崩壊

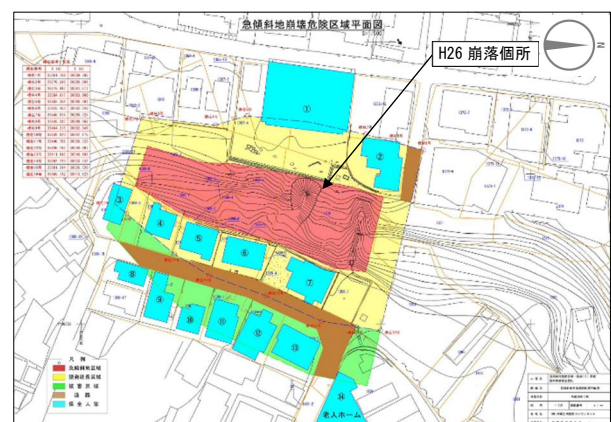


図 2.3 急傾斜地崩壊危険区域平面図

## 2.3 予備設計

対象斜面は、過去の崩壊やすべりにより、上方から下方にかけて急～緩～急の崩壊性地形を成していた。上方部は旧すべり跡を含む急傾斜面（35～62°）で島尻層砂泥岩互層が露頭していた。中腹部の緩斜面（10～25°）は過去の崩壊ブロックの頭部に当たり、下方～末端部の急傾斜面（34～55°）は崩壊土層と強風化砂泥岩盤から成り、切土工により形成された部分が多かった。

予備設計では、現地踏査結果を踏まえ、斜面を 7 つの崩壊ブロックに区分し、これらはその後の設計へと引き継がれた（図 2.4）。

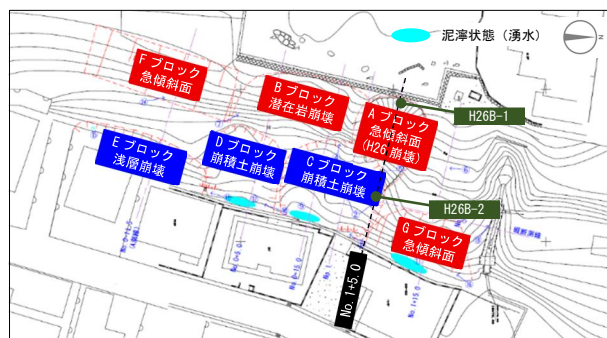


図 2.4 崩壊ブロック平面図（予備設計）

A ブロック	平成 26 年 7 月台風 8 号の豪雨を受けて崩壊している。
B ブロック	A ブロックの滑動に引っ張られ、潜在崩壊を形成している。
C ブロック	A ブロックに由来した崩壊土層から形成され、末端部は明瞭な押出変状を示し、民家に迫っている。斜面下部では湧水による泥濘状態が継続している。
D ブロック	古い崩壊に起源した崩壊土からなり、小崩壊による押出変状がみられ、民家に迫っている。斜面下部では湧水による泥濘状態が継続している。
E ブロック	浅層崩壊の可能性がみられ、局所的に小型土留めブロックが押し倒されたり、表層浸食変状が確認されている。
F ブロック	平均勾配 45°となっており、浅層崩壊跡が確認されている。
G ブロック	勾配 55°以上を成す切土急傾斜面で風化が進行し、粘土化が進んでいる。斜面下部では湧水による泥濘状態が継続している。



斜面地質は、地表より概ね「埋土層（礫混り粘性土）」、「崩積土層（粘性土主体）」と「風化砂泥岩互層」及び「島尻層砂泥岩互層」から成る。

「崩積土層」は、新旧崩壊に起源して、斜面の下方～末端部に層厚 1～2.5m 程度で分布しており、高含水比で軟弱状態にあった。この土層を主体に、二つの崩積土崩壊（C・D ブロック）を形成していた。

「風化砂泥岩互層」は、斜面上方～中腹部に露頭しており、層厚は 1～6m 程度であった。地質構造的には固結粘土に砂岩薄層（ニービ）を介在し、概ね流れ盤を成しており、また本層の上には層厚 1～5m 程度の「埋土層」が存在していた。上方斜面にある「潜在岩崩壊ブロック（B ブロック）」は、この風化岩盤中の流れ盤構造（乖離層理面）をすべりの素因として、地形や土質調査の結果を基に層厚 2～3m 程度の表層崩壊が想定された。

予備設計では、「潜在岩崩壊」と「崩積土崩壊」について、崩壊・崩壊の滑動形態と地形・地質条件に従って、切土法面保護工の選定フロー及び地すべり対策工検討フローを参照し、それぞれ適する対策工法を検討し、ブロックごとに以下のとおり抽出した。

#### 潜在岩崩壊：必要抑止力

（ $Pr=48.4\text{kN/m}$ ）が比較的小さいため、法面保護機能を兼ねた鉄筋挿入工を設置する。

- ・ A・F・G：吹付砕工+鉄筋挿入工
- ・ B：プレート式補強筋法面工

**崩積土崩壊**：崩壊要因は豊富な地下水と軟弱な土層強度のため、末端部に「暗きょ工」を設置し、移動土塊を透水性の良い「かご工」等へ置き換える。

- ・ C, D, E：かご工+明暗渠工

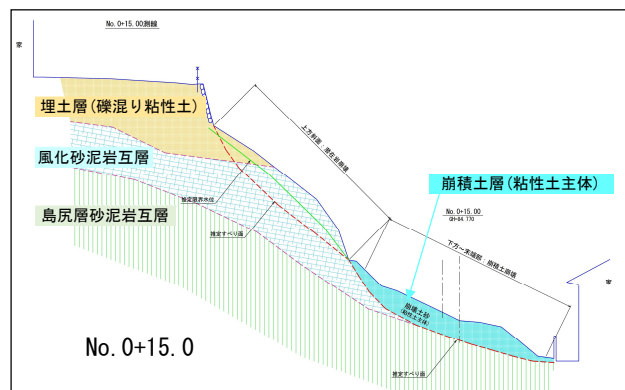
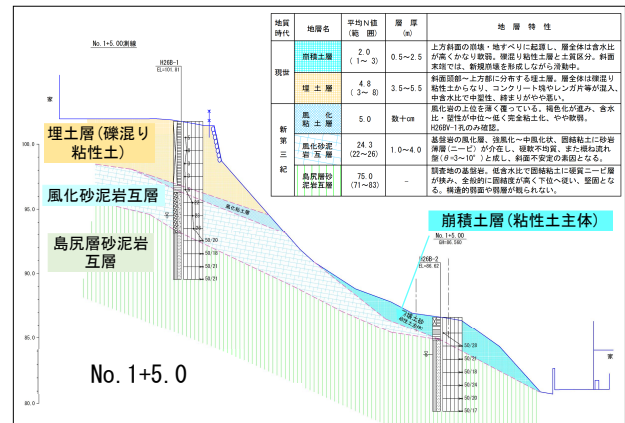


図 2.5 地層断面図（H26 調査）

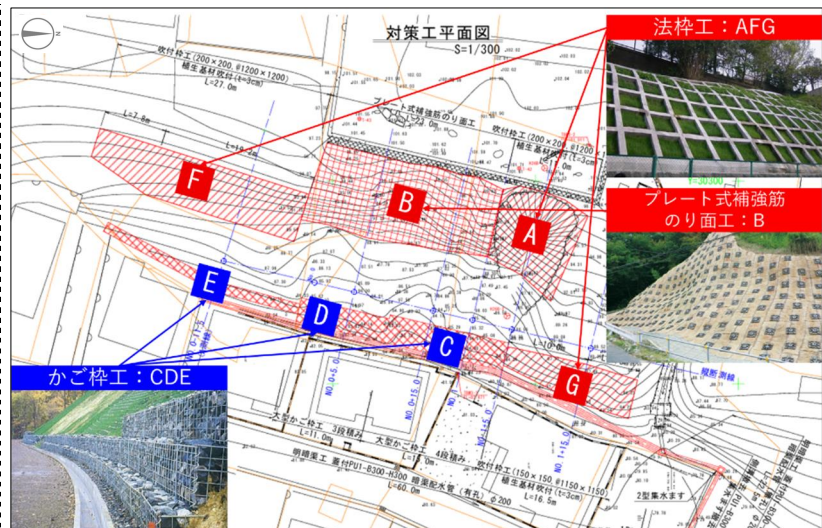


図 2.6 対策平面図（予備設計）



### 3. 実施設計と初期工事の実施 (H29～R1)

#### 3.1 実施設計

平成 29 年度の実実施設計では、地形測量とボーリング調査（2 箇所）を実施し、各ブロックで推定すべり面を想定し、対策工を検討した。その結果、層厚 2m 程度の表層崩壊が想定され、予備設計をほぼ踏襲する形で対策工を以下のとおり設定した。F ブロックについては、地形的に安定勾配での処理が可能なことから、「植生工（切土+植生マット）」へ変更した。

A・B ブロック：	吹付砕工+鉄筋挿入工 (Pr=40.3kN/m)
C・D・E //	カゴ工
F //	植生工
G //	吹付砕工

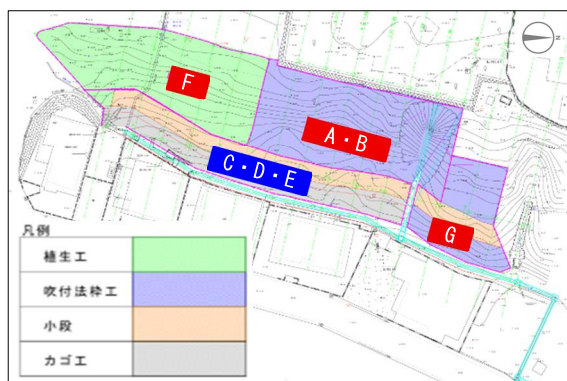


図 3.3 対策平面図 (H29 設計)

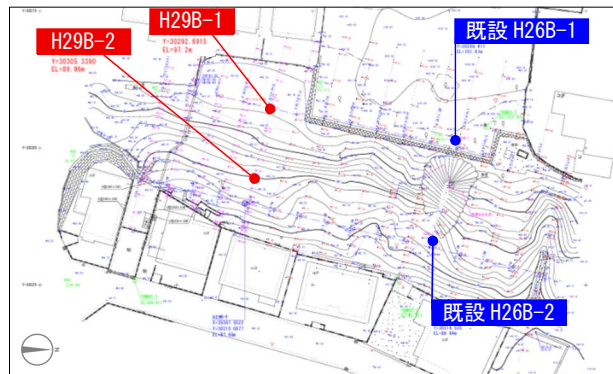


図 3.1 調査計画平面図 (H29 設計)

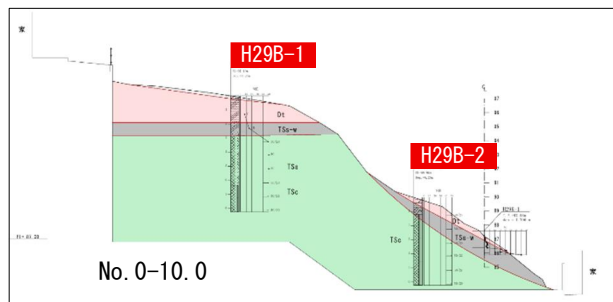


図 3.2 地層断面図 (H29 設計)

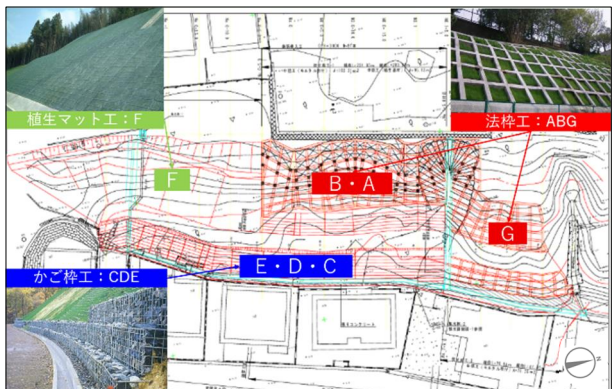


図 3.4 対策平面図 (H29 設計)

#### 3.2 F ブロックの設計見直し

H29 設計を受けて地権者調整を進めたところ、F ブロックについて当初計画していた上部からの機械搬入に対して理解が得られなかった。現地状況を踏まえると斜面下側からの切土は困難なため、対策工法を見直す必要が生じた。そこで R1 設計で F ブロックについて工法の再検討を行った結果、「吹付砕工+鉄筋挿入工」へ変更した。

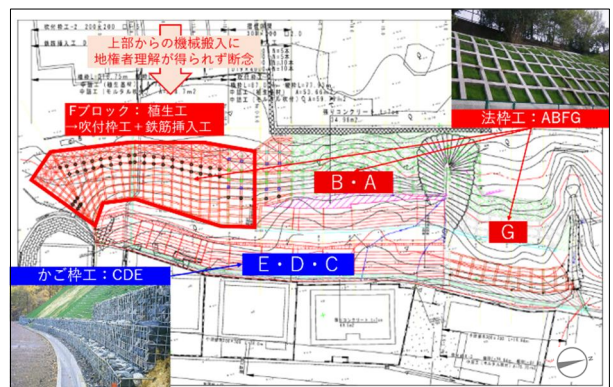


図 3.5 対策平面図 (R1 設計)



### 3.3 初期工事と斜面変状の発現

最初の工事は平成30年9月から令和元年6月にかけて、H26崩壊部分を含むA・Bブロックで吹付砕工+鉄筋挿入工を、Gブロックで吹付砕工をそれぞれ施工した。

しかし、竣工直後の6月末にA・Bブロック頭部で天端モルタル等へのひび割れの発生と、未対策箇所での地割れを確認した。この時点で目立った崩壊はなかったため、定点観測により経過観察していたが、9月に未対策箇所の地割れ部分が崩壊した。



図 3.6 H30 工事竣工状況 (R1.6)

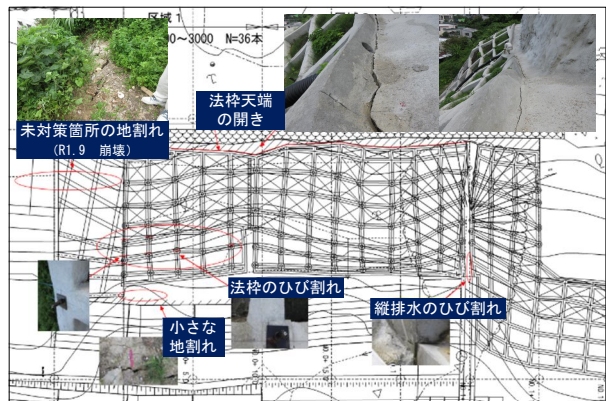


図 3.7 竣工後の変状確認 (R1.6)

### 3.4 地割れの確認と応急対策の実施

R1 工事でFブロックの法枠工を準備していた令和元年10月、斜面上に新たな地割れを確認した。また、斜面上部で隣接する石積み背面地でもひび割れを確認した。そのためR1-2設計で追加調査を実施したところ、椅子型のすべり面が想定された。そこで応急対策として、抑止杭を兼ねた仮設防護柵を追加で設計し、R1 工事の内容を変更して起点部～No.0の仮設防護柵を令和2年7月までに設置した。

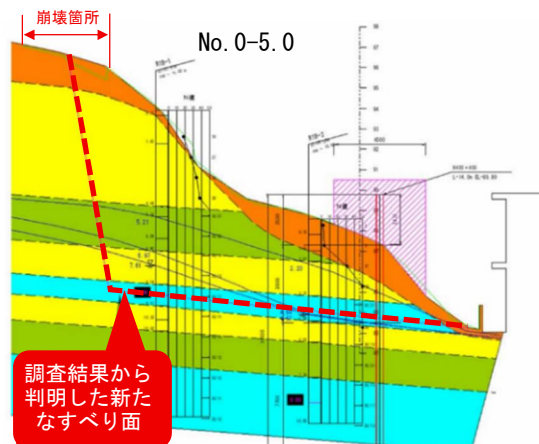


図 3.10 地層断面図 (R1-2 設計)



図 3.11 応急対策・  
仮設防護柵の設置 (R2.7)



図 3.8 地割れの確認 (R1.9~10)

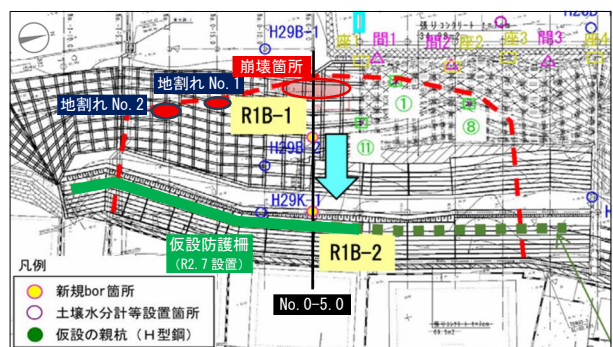


図 3.9 想定されたすべりブロック (R1-2 設計)



#### 4. 崩壊の発生と抜本的な設計見直し (R2~R5)

##### 4.1 大規模な斜面崩壊の発生

令和2年9月、台風に伴う大雨の影響を受けて、既設法枠工を含む斜面崩壊が発生した。斜面下部の民家に迫る位置での幅50mにわたる大規模な崩壊であったが、直前に設置された仮設防護柵等が功を奏し、幸いにも人的被害は回避することができた。

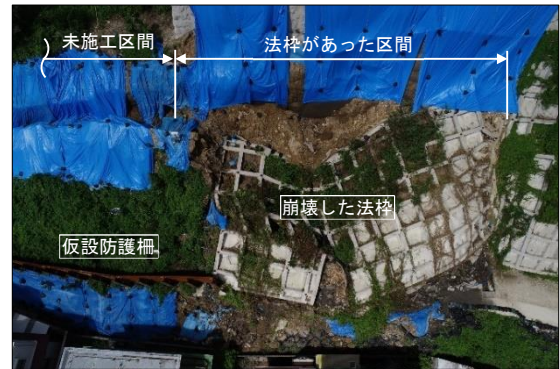


図 4.1 斜面崩落状況 (R2. 9. 18 撮影)

##### 4.2 応急対策の検討

応急対策を行う目的は、地すべりによる被害の拡大防止や早期復旧を図るため、崩れた土塊や法枠を早急に除去する対策工である。本現場では、抑制工として地下水排除工（明暗渠工、横ボーリング工、集水井工）、排土工を採用した。横ボーリング工の配置検討の際は、現場亀裂部の状況から地下水位を想定し、適切な位置・高さとなるよう留意した。

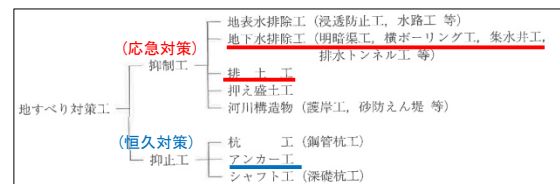


図 4.2 地すべり対策工の分類

##### 4.3 恒久対策の検討

恒久対策である抑止工（アンカー工、抑止杭の2案）の検討にあたっては、応急対策切土法面に対して「施工区間-1：法枠があった区間」、「施工区間-2：未施工区間」にブロック分けを行い、各ブロックの想定すべり面ごとに安定計算を行い、必要抑止力を算出した。経済性等も踏まえ、法枠工+グラウンドアンカーを採用した。

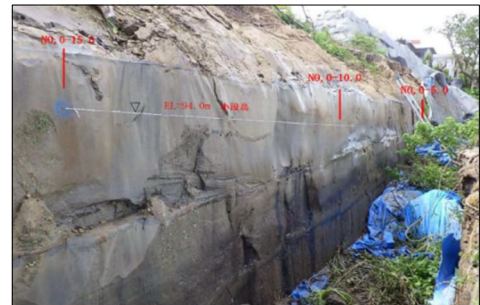


図 4.3 亀裂部の状況

なお、安定計算においては、地下水位と安全率との相関を確認しながら進めたところ、施工時安全率1.05を確保するためには一定以下に地下水位を抑える必要があることがわかった。そこで斜面上部に集水井戸を設置し、基準水位を超える場合はポンプ排水を実施することで、現場の安全確保を図った。

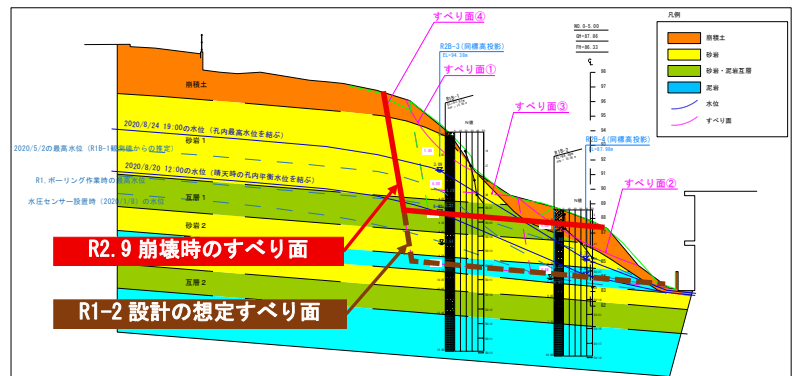


図 4.4 地層断面図 (R2 設計)

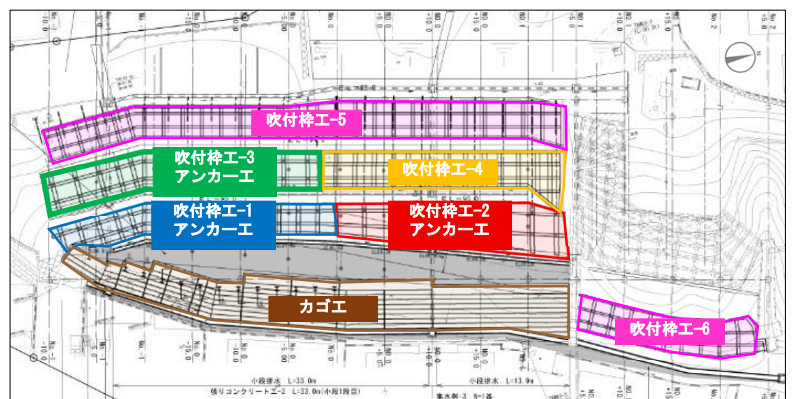


図 4.5 対策平面図 (R2 設計)

#### 4.4 斜面崩壊メカニズム

一連の流れを踏まえると、法枠施工箇所の崩壊は、次のように発生したと推定される。

地すべり頭部亀裂が発生するまでのイメージ図を右図に示す。①が亀裂確認前、②が令和元年6月、③が翌年9月（斜面崩壊）に相当すると考えられる。①の潜在亀裂の段階で、地表面からすべりの発生を予知することは困難であった。

##### 【STEP1 法枠工施工中】

表層水が高角度亀裂（未だ閉口状態）に入り込むようになったが、亀裂の開口には至らなかった。

##### 【STEP2 法枠工施工後】

未施工区間斜面頭部に地割れ発生、令和元年6月の長雨（719.0mm/月）が影響し地下水位が上昇した。同様に亀裂面での間隙水圧が上昇したことにより、せん断抵抗力が低下し滑動した。それにより高角度亀裂が開口した。

##### 【STEP3 杭工事完了までの間】

仮設道路を建設する際の盛土が押え盛土の役割となり、すべり面の滑動をある程度抑制していた（工事業者による観測結果より）。

##### 【STEP4 杭工事完了後】

令和2年8月24日の集中豪雨（181.0mm/日）により末端部で跳ね上げが生じ、すべり面が大きく滑動。令和2年9月18日の集中豪雨（182.5mm/日）で、法枠工施工箇所の斜面が崩壊した。

以上のような流れで崩壊が発生したと考えるのが、さまざまな事象ともっとも整合している。

よって、斜面崩壊に導いた高角度亀裂を開口させた元々の原因は、

主因：表層水が未施工区間の亀裂から既設法枠下の亀裂に流入した

副因：月間雨量700mmを超える長雨

であり、これにより大量の表層水（8/24夜に現地では“滝のように水が落ちる音”を確認）が高角度亀裂に入り込んだこと、地下水位上昇に伴い亀裂面での間隙水圧が上昇したことにより、せん断抵抗力が低下し、滑動した（亀裂が開口した）と考えられる。

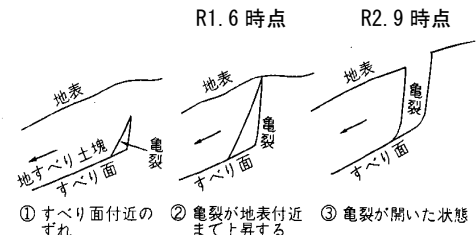


図 4.6 地すべり頭部亀裂発生イメージ

（出典：地すべり・斜面崩壊の予知と対策／渡正亮・小橋澄治，S62）

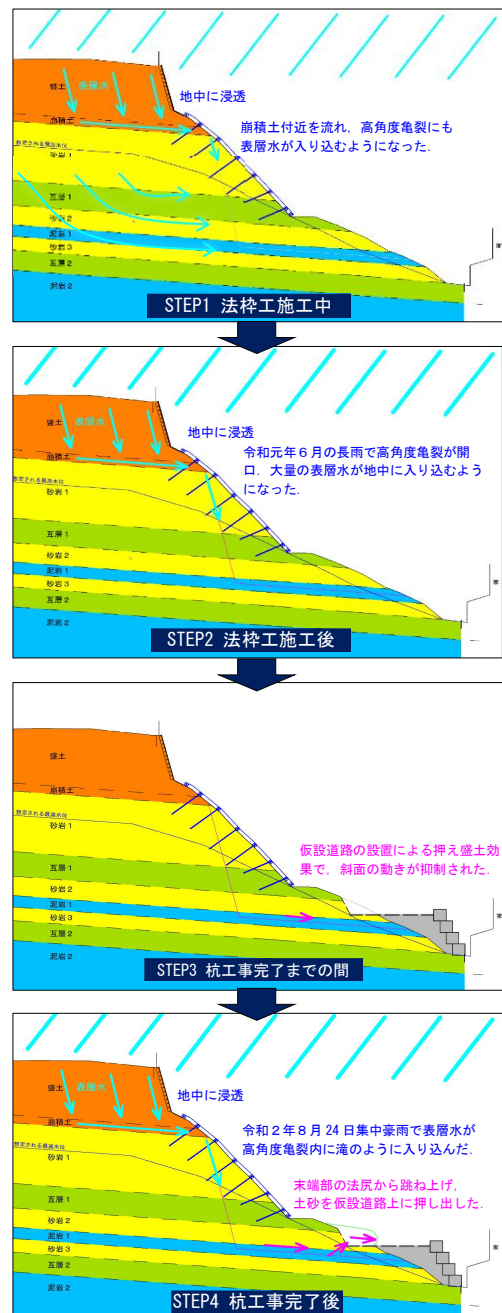


図 4.7 法枠施工箇所の崩壊メカニズム



## 5. 本事例から得られる知見

本事例では、計画通りに完了しなかった初期設計を起点に、現地の変状を捉えながら設計と工事を見直し、最終的に人的被害を防ぎつつ、必要な対策施設を設置できた。全体を振り返ってみると、本事業の遂行には以下の3点が不可欠であったと考えられる。

### ① 変状に応じた柔軟な段階設計（技術面）

当初設計に固執せず、変状に応じて調査・設計を見直すことで人的被害を防ぐことができた。

### ② 地域密着型の合意形成（社会面）

長期にわたる工事において、説明責任とリスク共有の徹底により、住民の信頼を維持できた。

### ③ 設計者と現場管理の協働体制（事業運営面）

各種設計業務や工事調整会議等を通して、設計者が変状に対する現場の判断を支援し、施工管理と協働する体制が有効に機能した。



図 5.1 R3 工事竣工状況（R5.3）



図 5.2 R4 工事竣工状況（R5.9）

## 6. おわりに

島袋急傾斜地は、設計・施工・再設計・施工を経て、災害から住民を守る構造物として機能している。突発的な斜面変状に対して柔軟に設計を見直し、安全を最優先に判断した一連の取り組みは、急傾斜地対策事業の実践知として共有すべきである。

今後、同様に地すべり性や互層構造による崩壊リスクが懸念される箇所において、本事例が参考になれば幸甚である。

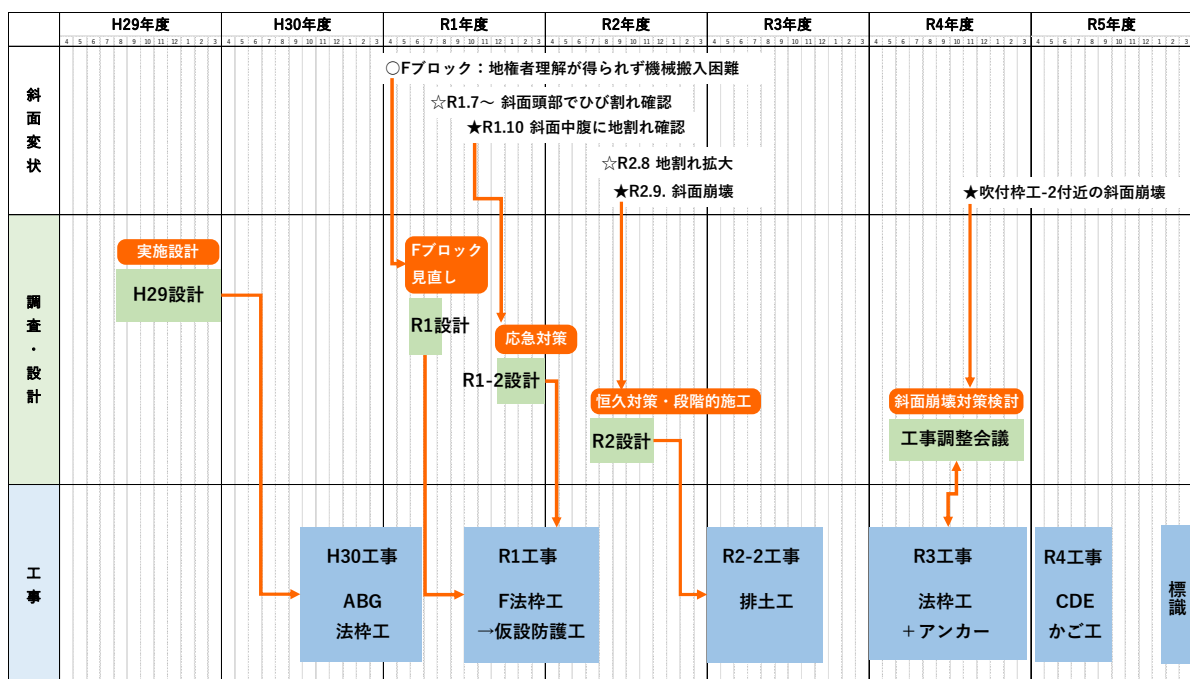


図 5.3 実施設計以降の事業スケジュール

## 袋詰玉石工の水理実験を対象とした三次元固液連成数値解析

○琉球大学 土木学会学生会員 高野 宏征  
琉球大学 土木学会正会員 福田 朝生

### 1. 序論

袋詰玉石は、網状の袋の中に石材を詰め込み作成した、屈とう性を有する袋体状の構造物で、河岸浸食を防ぐことを目的とし、護岸工などに広く用いられている。一般に、袋詰玉石は群体として配置され、袋詰玉石群として水流に抵抗する。水理実験を用いた、水流に対する袋詰玉石工の安定性の検討はされている<sup>例えは1)</sup>が、個々の袋詰玉石が水流から受ける力や袋詰玉石間の相互作用力を測定することは困難であり、1つの袋詰玉石を対象とした安定性の評価は流速のみが用いられている。このため、袋詰玉石群の移動限界状態の検討には課題が残っており、袋詰玉石群の適切な設計法が存在しないのが実情であり、流出してしまう事例が多数見られる。このような流出が発生しないよう、袋詰玉石の一般的な設計法を構築することが重要である。これに向けて、まず袋詰玉石群の流出時の状況を整理し、袋詰玉石群の流出時に個々の袋詰玉石に作用する力である流体力を明らかにする必要がある。

これに対し、福田<sup>2)</sup>らは、種々の形状の固体と流体の三次元連成数値解析法 (Arbitrary Particle Multiphase, 以下 APM と呼ぶ) を活用して、袋詰玉石を再現するモデルを構築し、袋詰玉石の構造、配置についての知見を得た。本研究では、APM を用いて袋詰玉石の一般的な設計法の検討を行うにあたり、高野ら<sup>3)</sup>が行った水理実験を対象に、APM による再現数値解析を実施し、その適用性を確認する。

### 2. 対象とする既往の水理実験

水理実験<sup>3)</sup>では、水路勾配を水平にした水路長 10.28 m、幅 0.6 m、高さ 0.4 m の開水路を用いた。座標原点は水路上流端の水路中央および水路底面にとり、 $x$  軸は流下方向を正とし  $y$  軸は左岸側を  $z$  軸は水路鉛直上向きを正と定義する。図-1 に示す袋詰玉石モデルを  $x = 8$  m 地点の水路中央に設置した。袋詰玉石を袋詰玉石の上下断面の  $x = 7$  m および  $x = 9$  m 断面で流速を測定した。流速は直径 5mm のプロペラ流速計を用い、圧力はピトー管の静圧側に傾斜マノメーターを接続し測定した。流れはほぼ左右岸均等であると考えられるため、流速分布の測定は右岸のみで行った。流量は、概ね袋詰玉石の移動限界に近い値である  $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$  を用いた。

### 3. APM による水理実験の再現数値解析

キーワード 袋詰玉石工、水理実験、三次元固液連成数値解析、流速分布、流体力

連絡先 中頭郡西原町字千原 1 番地 琉球大学工学部工学科 (email:k248524@cs.u-ryukyu.ac.jp)

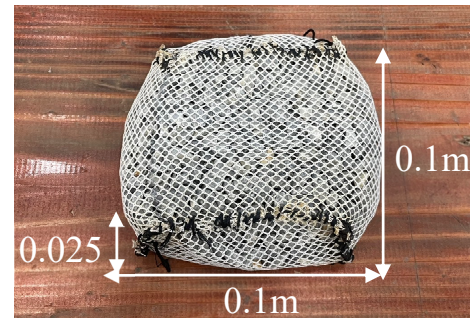


図-1 水理実験で使用した袋詰玉石モデル

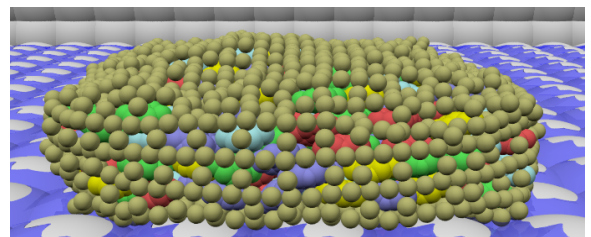


図-2 解析で使用した袋詰玉石のモデル

表-1 袋詰玉石モデルの諸量

水の密度[kg/m <sup>3</sup> ]	1000
中詰材の密度[kg/m <sup>3</sup> ]	2650
中詰材径[m]	0.0078159
網粒子径[m]	0.0038
メッシュサイズ：中詰材径	1:1.56
袋詰玉石寸法[m] (縦×横×高さ)	0.095×0.095×0.0418
袋詰玉石体積[m <sup>3</sup> ]	1.25×10 <sup>-4</sup>

#### (1) APM の解析手法

APM では、形状を維持する袋詰玉石を構成する粒子の運動を Lagrange 的に、袋詰玉石周辺の流れを、粒子径よりも小さな流体計算格子を用いて Euler 的に解いている。Lagrange 的に解かれた袋詰玉石の運動を流体の流れにおいて考慮するため、袋詰玉石を構成する粒子の固相部分を密度が異なる流体とし、全体を非圧縮流れとして解いている。袋詰玉石の流体力は、混相流体として解く流体解析における、固相部分に作用する応力を体積積分することで算出しており、抗力係数などを用いず直接流体力を算出している。解析手法の詳細や運動の基礎方程式は文献<sup>2)</sup>を参考にされたい。

#### (2) 再現数値解析の計算条件

解析で使用した袋詰玉石のモデルを図-2 に示し、表-1 に袋詰玉石モデルの諸量を示す。水路は直径 0.05 m の球粒子を隙間なく敷き詰めて構築している。実験と同様に袋詰玉石モデルを  $x = 8$  m 地点の水路中央に設置した。水路長は、袋詰玉石の上流側は全体的に常流で



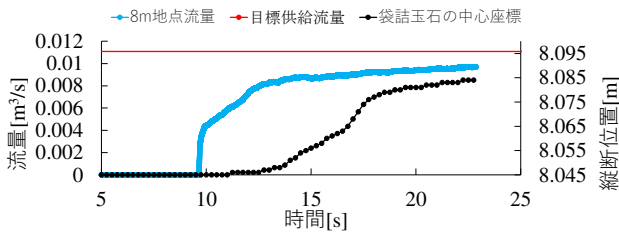


図-3 8m 地点流量と袋詰玉石モデルの中心の

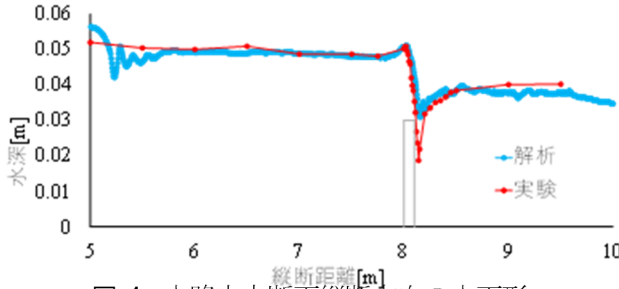


図-4 水路中央断面縦断方向の水面形

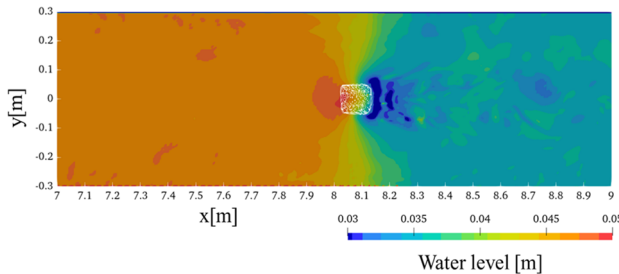


図-5 水路の概略図

あり下流の条件で水面形が決まるため、上流側の水面形の再現性の確認のために上流端まで計算する必要はない。本解析では計算負荷の低減のために、上流側の水路を5m短縮している。各軸の定義は、水理実験と同様に定義する。格子幅が0.005mで、計算ステップは $1.0 \times 10^{-4}$ sである。供給流量は、水路実験で用いた0.011 m³/sを目標とし、この流量まで10sで到達するように設定した。

#### 4. 数値解析結果

##### (1) 袋詰玉石工の座標と流量の時間変化

図-3に袋詰玉石を設置した8m地点の流量と袋詰玉石モデルの中心の縦断位置の時間変化を示す。解析の流量が目標供給流量以下で、袋詰玉石モデルは配置位置から動いてしまっている。しかし、解析時間が20s以降の流量はほとんど定常状態となり、袋詰玉石もほぼ静止しているため、20s以降を検討の対象とする。また、以降の検討には20sから5秒間の平均の値を用いている。

##### (2) 水理実験との比較

図-4に縦断方向の水面形を示す。図-5に20s時点の水表面の高さの分布を示す。図-4より水面形は、袋詰玉石上流側は概ね再現できたものの、袋詰玉石後流の

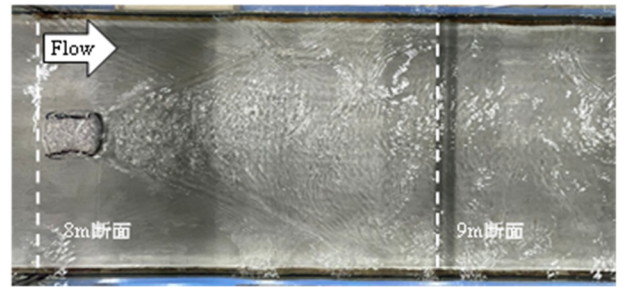


図-6 実験の袋詰玉石後流

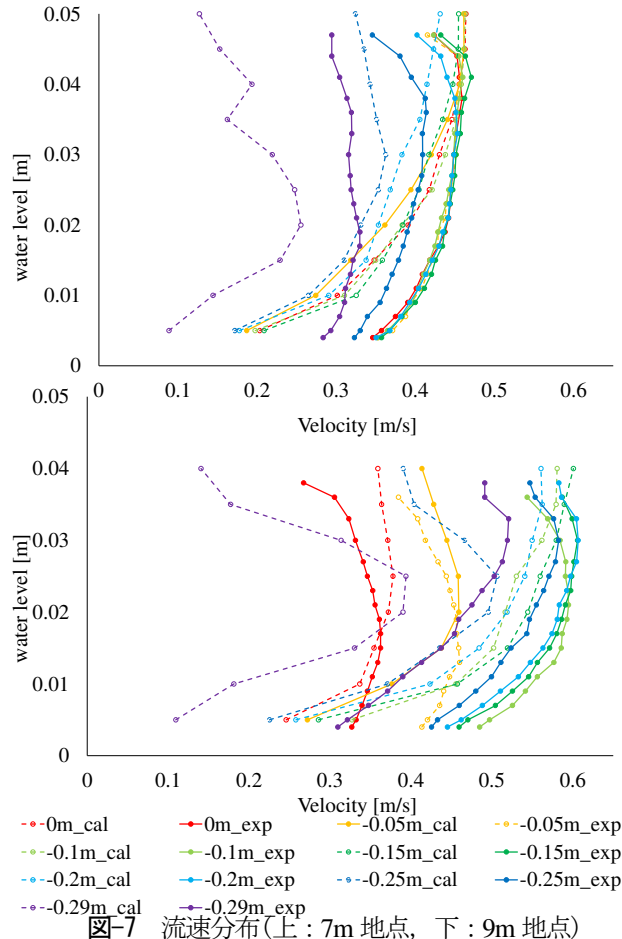


図-7 流速分布(上: 7m 地点, 下: 9m 地点)

水面形は再現できなかった。図-7に上下流断面の流速分布の比較を示す。全体的に実験の流速の値が大きい結果となった。これらの不一致は、水深に対し格子サイズが大きく、後流では高さ方向に6メッシュ程度で流れを解いていることが原因として考えられる。このため、今後は解像度を上げて解析を行う必要があると考えられる。

#### 5. 結論

本研究では、袋詰玉石モデルを用いた水理実験を対象に行った三次元固液連成数値解析を用いることで、流速分布の挙動を概ね捉えることが確認できた。

- 1) 高田ら 河川技術論文集, 7巻, pp.127-132, 2001.
- 2) 福田ら 河川技術論文集, 25巻, pp.463-468, 2019.
- 3) 高野ら 土木学会論文集B1(水工学), 81巻16号, 2025.



## 数値計算による津波が作用する琉球石灰岩海食崖の力学的特性に関する研究

琉球大学大学院 橋口優芽香, 琉球大学 金城旭希, Asil Abdul Naser, 入部綱清  
琉球大学 藍檀オメル, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷直彦

### 1. はじめに

沖縄本島南部には琉球石灰岩からなる海食崖が広く分布しており、その基部にはノッチが発達している。一般的に海食崖は、ノッチが深さ方向へ成長するにつれてノッチ上部に位置する崖は自重により次第に不安定となり、最終的に崩落に至ることが知られている。

自重のみを外力として海食崖の安定性を評価した既往研究として、Tokashiki and Aydan<sup>1)</sup>は崩壊事例および安定事例を比較し、崖高と浸食深さの関係に基づいて岩盤強度の観点から安定性能の評価を行っている。一方、Kogure and Matsukura<sup>2)</sup>は、自重と津波作用によって破壊し得る海食崖の限界崖高の推定を試みている。しかしながら、津波によるノッチ深部の引張応力を推定する際に用いられている波圧は、防波堤に水平に作用する波圧式を準用したものであり、ノッチ内部に生じる複雑で局所的な圧力分布を十分に考慮していないという課題が残されていた。そこで筆者らは、流体計算を用いてノッチを有する海食崖に作用する津波波力を計算し、津波が作用する際にノッチ深部で発生する引張応力を力学的に評価した。その結果、崖高が大きいほど波に対する抵抗性が増す一方で、高の大きさによっては崖が崩壊する可能性があることを示唆した<sup>3)</sup>。

本研究では、Tokashiki and Aydan<sup>1)</sup>が整理した崩壊事例および未崩壊事例を、筆者らが得た津波作用時の引張応力の観点から再検討し、津波規模に応じた海食崖の崩壊可能性について新たな知見を提示する。

### 2. ノッチ有する海食崖の主応力計算

#### (1) 流体計算による津波波力の算出

流体計算に用いる海食崖のモデルを図-1に示す。

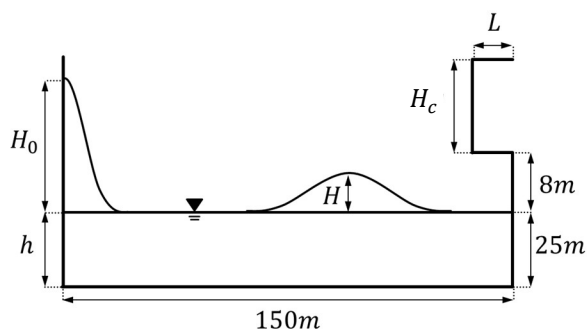


図-1 海食崖モデル

ここでLはノッチの深さ、 $H_c$ は海食崖の高さである。また、海食崖は剛体とし、計算条件としてノッチの深さと崖の高さおよび津波の波高を変化させる。ノッチ内部に作用する波力を計算するための津波はモデルの左端から

孤立波を発生させる。ここで孤立波の波形は以下の式で与えられる。

$$\eta = H_0 \sinh^2 \left( \sqrt{\frac{3H_0}{4h^3}} r \right) \quad (1)$$

$\eta$ は孤立波の波形、 $H_0$ は孤立波の初期波高、 $h$ は水深、 $r$ は波高最大位置からの水平距離である。それぞれの計算ケースを表-1に表す。

表-1 計算ケース

ノッチの深さL(m)	4	6	8
崖の高さ $H_c$ (m)	1~25	1~25	1~25
初期波高 $H_0$ (m)	12, 16	12, 16	12, 16
入射波高H(m)	6, 8	6, 8	6, 8
水深h(m)	25		
時間刻み幅(s)	0.005		
粒子間距離(m)	0.2		
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,000		

ここで、すべてのケースで水深25mとする。孤立波はモデル左端に右半分だけ発生させるため、入射波高は初期波高の12mと16mに対して半分の波の高さである。粒子間距離については0.2m、初期時間刻み幅は0.005sに設定しクーラン条件に応じて自動調節を行う。

図-2にノッチの深さ6m、入射波高8mの場合における津波がノッチに作用する様子を示す。図-2(a)は初期状態から0.2秒後を示しており、時間の経過とともに、孤立波は波高が初期値の半分となって入射する(図-2(b))。その後、孤立波はノッチ深部に到達し、ノッチ内壁の上方向に海食崖を持ち上げるように津波波力が作用している(図-2(c))。

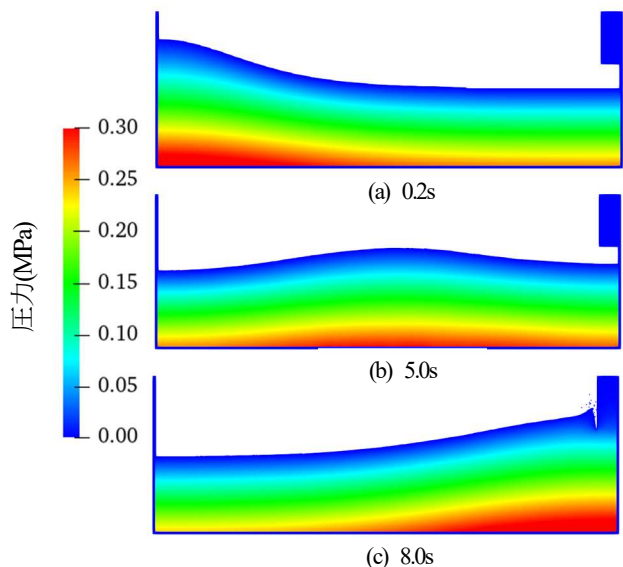


図-2 津波がノッチに作用する様子

キーワード：海食崖、ノッチ、津波、流体計算、固体計算

連絡先：琉球大学工学部

## (2) 固体計算の外力としての津波波力の決定方法

前節では、ノッチの内壁に上向きに作用する津波波力を得たが、この津波波力からノッチ深部に作用する引張応力の時系列を算出する。長方形断面にかかる引張応力は以下の式で算定する。

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (2)$$

$M$ はモーメント、 $Z$ は断面係数である。ここで $Z$ の断面係数は次式で表される。

$$Z = \frac{bH_c^2}{6} \quad (3)$$

ここで、 $b$ は長方形断面の横の長さであり 1m、 $H_c$ は海食崖の高さである。

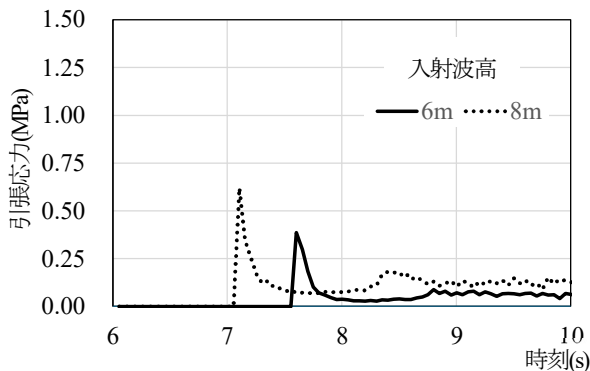


図-3 ノッチの深部に生じる引張応力の時間履歴

図-3に、海食崖の高さを6mとした場合のノッチ深さ6mにおけるノッチ深部に生じる引張応力の時間履歴を示す。ここでは、津波により発生する引張応力が最大となる時刻の波力を固体計算における外力として採用するため、海食崖の自重は考慮していない。図-3より、ノッチの深さや入射波高に関わらず、津波衝突直後に引張応力が最大となることが確認された、また、この傾向は他のノッチの深さの場合についても同じであった。したがって、津波衝突直後に作用する波力を固体計算における外力として採用する。

## (3) 海食崖の主応力分布

図-4に、自重のみが作用する海食崖の主応力分布を示す。値が正は引張である。図-4より崖の上部に最大引張応力が発生していることが確認できる。

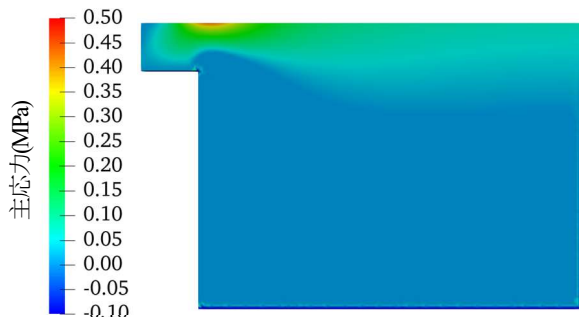


図-4 自重のみが作用する海食崖の応力分布  
(ノッチの深さ6m、崖の高さ5m)

図-5に自重および津波作用下の海食崖の固体計算の結果を示す。津波の作用により、引張応力はノッチの深部に集中しており、自重のみの場合に見られた崖上部の引張応力はほとんど認められなかった。このことから、津波が作用した瞬間にノッチ深部に亀裂が発生し、その後、自重のみにより崩壊が進行する可能性が示唆された。

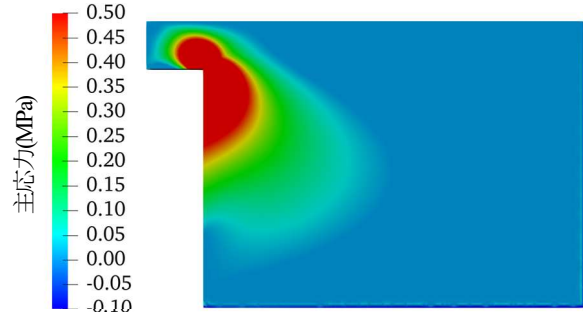


図-5 自重と津波作用下の海食崖の応力分布  
(ノッチの深さ6m、崖の高さ5m)

## 3. ノッチ有する海食崖の力学的安定性評価

図-6に Tokashiki and Aydan<sup>1)</sup>の観測結果と、本研究で引張応力が琉球石灰岩の破壊強度範囲である4MPa未満であった計算結果を併せて示す。

計算によって4MPa未満の引張応力が得られたケースは、すべて観測による安定領域に含まれていた。

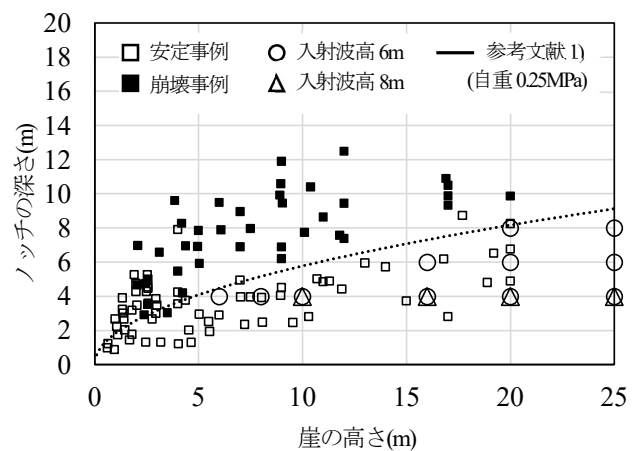


図-6 観測結果と数値計算結果の比較

## 4. おわりに

本研究では、計算によって4MPa未満の引張応力が得られたケースは、すべて観測による安定領域に含まれていた。しかし、4MPaは実験で得られる琉球石灰岩の破壊応力の上限値であり、現地での破壊応力より大きな値であるので、今後も検討が必要である。

### 参考文献

- 1) Tokashiki, N. and Aydan, Ö., *JSCE*, Vol.66, No.2, pp.397-406, 2010.
- 2) Tetsuya, K. and Yukinori, M., *Marine Geology*, pp.14-23, 2012.
- 3) 橋口優芽香, 入部綱清: 数値計算による津波が作用する琉球石灰岩の海食崖の力学的評価, 土木学会論文集, Vol.81, No.17, 25-17202, 2025.

## 介護福祉施設の風水害被災リスクに関する基礎的分析

琉球大学 ○上田平満遥 神谷大介  
琉球大学大学院 松井遥

### 1. はじめに

近年、日本各地で自然災害が激甚化・頻発化しており、地域社会の災害対応能力の強化が求められている。なかでも豪雨災害の発生により、介護施設が被災する事例が多数報告され、多くの高齢者が犠牲となっている<sup>1), 2)</sup>。高齢者の中でも避難時に支援を要する災害時要支援者は、身体的・認知的な制約から自力での迅速な避難が難しく、災害時における被害が集中しやすい。特に、入居型の介護施設においては、利用者の日常的な生活の場が被災する可能性があり、災害時に備えた避難確保計画や、施設間の支援連携体制の構築が極めて重要である。

そこで本研究では、入居・宿泊型の介護施設の立地と台風（浸水・土砂・高潮）を考慮した豪雨災害の想定区域から、被災する介護施設数を把握する。また、施設の種類、入所定員およびベッド数を用いて、豪雨時の市区町村内における受け入れ可否を明らかにすることを目的とする。

### 2. 分析方法

本研究では、厚生労働省が公開する入居・宿泊型の介護施設の情報と、国土交通省の国土数値情報で提供されている洪水浸水想定区域<sup>3)</sup>・土砂災害警戒区域<sup>4)</sup>・高潮浸水想定区域<sup>5)</sup>（以下、洪水・土砂・高潮）を用いて分析を行う。高潮については、公表済みの15都府県のみを分析対象とする。また宿泊型の介護施設については、短期入所生活介護、短期入所療養介護、小規模多機能居宅介護、看護小規模多機能居宅介護を対象とする。

施設の名称・位置情報については、厚生労働省のオープンデータ<sup>6)</sup>を利用する。また、施設の入所定員・ベッド数といった詳細な情報は、厚生労働省の介護サービス情報公表システム<sup>7)</sup>から取得する。入居型の施設が、宿泊型の施設を運営している形態も存在するため、取得したベッド数の情報

表-1 全国を対象とした想定区域内外の施設数

想定区域	区域内施設数		区域外施設数	
	入居	宿泊	入居	宿泊
洪水	13,385	6,556	22,805	11,177
土砂	2,320	1,241	33,870	16,492
洪水または土砂または高潮	15,992	7,875	20,198	9,858

表-2 15都府県を対象とした想定区域内外の施設数

想定区域	区域内施設数		区域外施設数	
	入居	宿泊	入居	宿泊
高潮	3,068	1,275	12,699	5,438
洪水かつ土砂かつ高潮	7	0	15,760	6,713

表-3 想定区域内外の入所定員・ベッド数

想定区域	区域内施設		区域外施設	
	入居型施設 入所定員 (人)	宿泊型施設 ベッド数 (床)	入居型施設 入所定員 (人)	宿泊型施設 ベッド数 (床)
洪水	586,765	155,657	1,065,397	293,193
土砂	103,939	33,964	1,548,223	414,886
高潮	149,851	33,954	625,970	145,471

表-4 市区町村内における想定区域外施設での受け入れ可否の市区町村数

想定区域	市区町村数			
	計	受け入れ不可能	一部受け入れ可能	全員受け入れ可能
洪水	1,127	174	629	324
土砂	684	64	224	396
高潮	185	24	95	66

を利用して重複したものを1つの施設にまとめる。

これら取得した介護施設の位置情報と想定区域を重ね合わせ、想定区域内外の施設数を把握し、属性情報を用いて詳細な分析を行う。具体的には、入居型施設を満床と仮定し、想定区域内の入所定員の合計と想定区域外の宿泊型施設のベッド

数の合計を比較する。

### 3. 分析結果

表-1, 表-2 より, 入居・宿泊型の区別なく全施設の4割以上が, 洪水, 土砂, 高潮いずれかの想定区域内に位置しており, 相当数の施設が被災リスクを抱えている。また全施設の約 37%が洪水, 約 7%が土砂, 約 19%が高潮それぞれの想定区域内に立地していた。特に洪水かつ土砂かつ高潮想定区域内には, 要介護認定を受けた入所者のみの入居型施設である7施設が立地していた。

表-3 は, 想定区域内外の入居型施設の定員数と宿泊型施設のベッド数を表す。その結果, 日本全体で見たとき, 土砂以外では, 想定区域内の入居型施設の全ての入所者を想定区域外の宿泊型施設のベッド数では受け入れることは不可能であった。

表-4 に, 想定区域外の宿泊型施設のベッド数から想定区域内の入居型施設の入所定員を減ずることと得られた, 市区町村内における想定区域外の宿泊型施設の受け入れ可否を示す。その結果, 全員受け入れ可能であったのは, 土砂では半数以上, 洪水や高潮では約 3 割程度の市区町村であった。

### 4. 考察

結果から介護施設の被災リスクは, 災害種別ごとに異なる地形的特徴と密接に関連していることが示された。洪水の区域内に位置する施設は, 全体の中でも特に多くの施設が該当していた。日本では, 可住地が限られているうえに河川の水面よりも低い土地に居住地が存在している地域もあるため, 豪雨時には広範囲で浸水被害が発生しやすいという脆弱性がある。一方, 土砂の区域内に位置する施設は全施設の1割未満にとどまっていた。これは, 急傾斜地や山間部といった土砂災害リスクの高い地域では, そもそもの立地が相対的に少ないことと指定区域が狭いことが理由として挙げられる。高潮は沿岸部に限定されるが, 台風の接近といった強風と大雨が同時に発生する可能性が考えられるため避難行動がより困難となる可能性が高い。またいずれのリスクにおいても, 区域外の宿泊型施設のベッド数が不足している市区町村が存在しており, 特に洪水では, 対象施設数が多

く広域的な避難需要が生じやすいと考えられる。

### 5. おわりに

本研究では, 全国の入居・宿泊型の介護施設を対象として, 洪水, 土砂および高潮の想定区域との位置関係を分析し, 各市区町村における介護施設の被災可能性と避難受入能力を明らかにした。その結果, いずれかの想定区域内に位置する施設は全施設の4割以上を占めており, 多くの介護施設が被災リスクを抱えていることが確認された。また, 市区町村単位で想定区域内の入所定員と区域外の宿泊型施設のベッド数を比較した結果, 洪水, 土砂, 高潮のいずれのリスクにおいても, すべての入所者を域外施設へ避難させることが困難な自治体が多数存在することが示された。

今後は, 施設の階数が記載されている入居型の介護施設に着目して, 浸水時の浸水深に応じた水平避難や垂直避難の可能性を含めた避難可能性の分析を行う。また道路情報を含めた分析を行うことで, 想定区域内の施設利用者が, 継続して介護を受けられる安全な地域にある他の介護施設への避難の可能性を施設間の距離や接続性, 施設の許容量の観点から検討する。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 JP22H00222, JP23H00197, JP24K15538 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- 1) 総務省消防庁: 平成 28 年版 消防白書, 2016.
- 2) 内閣府: 令和 3 年版 防災白書, 2021.
- 3) 国土交通省: 国土数値情報ダウンロードサイト, 洪水浸水想定区域 (河川単位), 2024.
- 4) 国土交通省: 国土数値情報ダウンロードサイト, 土砂災害警戒区域, 2024.
- 5) 国土交通省: 国土数値情報ダウンロードサイト, 高潮浸水想定区域, 2024.  
(公表済み都府県: 青森県, 千葉県, 東京都, 神奈川県, 愛知県, 三重県, 大阪府, 兵庫県, 山口県, 徳島県, 香川県, 福岡県, 佐賀県, 大分県, 宮崎県)
- 6) 厚生労働省: 介護サービス情報の公表システムデータのオープンデータ (2025 年 6 月末時点), [https://www.mhlw.go.jp/stf/kaigo-kouhyou\\_opendata.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/kaigo-kouhyou_opendata.html)
- 7) 厚生労働省: 介護事業所・生活関連情報検索, <https://www.kaigokensaku.mhlw.go.jp>
- 8) 国土地理院: 地理院地図, <https://maps.gsi.go.jp>

## 水害時要支援者に対する宿泊施設の受け入れ能力に関する基礎的分析 ～九州地方を対象として～

琉球大学 ○安部 徳哉  
琉球大学 神谷 大介  
琉球大学大学院 松井 遥

### 1. はじめに

我が国では、災害関連死が深刻な社会問題となっており、令和6年能登半島地震<sup>1)</sup>では、災害関連死者数に占める高齢者数の割合が高いことが指摘されている。特に、避難所生活により高齢者の体調が悪化し、要介護状態や死に至ることが課題である。このため、避難先において介護の継続ができる体制の確保が重要である。

高齢者の避難先としては福祉避難所の利用が望ましいが、その数は十分ではない<sup>2)</sup>。そこで、三重県の防災関係協定に記されているような<sup>3)</sup>、介護の継続が可能な宿泊施設を避難先として確保する取り組みが注目されている。

以上を踏まえ、本研究では近年の気候変動を背景に水害に着目し<sup>4)</sup>、九州地方の各市町村を対象として、浸水想定区域内に居住する要配慮者（以下、水害時要支援者）数を、浸水想定区域外の宿泊施設を用いて、受け入れ可能かを明らかにする。具体的には、水害時要支援者数と宿泊施設の客室数を各市町村ごとで比較し、要支援者数と客室数より、受け入れ可否を評価する。なお、本研究では沖縄県および離島は対象外とする。

### 2. 浸水想定区域外の宿泊施設の受け入れ可能人数と水害時高齢者の比較

#### (1) 宿泊施設のデータセット

本研究では表-1のデータを使用し、以下の手順で浸水想定区域外に位置する宿泊施設を算出する。

- (i) 各県の政令指定都市、中核市、その他市町村において a に記載されている宿泊施設総数を満たすように宿泊施設の位置情報を取得する。b から e の順番で取得し客室数も情報があれば同時に取得する。客室数情報がない施設は客室数を1とする。
- (ii) (i)で取得したデータと浸水想定区域を重ね合

表-1 使用データの出典及び記載情報

	出典	記載情報
a	令和5年度衛生行政報告例 <sup>5)</sup> （厚生労働省）	「旅館・ホテル営業」の ・宿泊施設総数 客室総数
b	生活衛生関係営業許可施設（厚生労働省）	・旅館業法に基づく種別 施設名
c	県・市町村 公式ホームページ	・住所 ・客室数
d	非DMO型観光団体 公式ホームページ	
e	旅行予約サイト ・楽天トラベル <sup>6)</sup> （楽天グループ株式会社） ・じゃらんnet <sup>7)</sup> （株式会社リクルート） ↳客室数の検索のみ利用	

表-2 比較パターン

パターン	要介護度
1	65歳以上
2	要支援 1,2      要介護 1,2,3,4,5
3	要支援 2      要介護 1,2,3,4,5
4	要介護 1,2,3,4,5
5	要介護 2,3,4,5
6	要介護 3,4,5
7	要介護 4,5
8	要介護 5

わせ、浸水想定区域外に位置する宿泊施設を抽出する。

なお、収集した宿泊施設数が a の値と異なる地域があるが、これは令和5年度以降の新規開業や廃業届未提出による可能性が考えられる。

#### (2) 水害時要支援者の比較パターン別の受け入れ可否評価手法

本研究では表-2のパターンの場合として、各市町村における浸水想定区域内に居住する高齢者と浸水想定区域外に位置する宿泊施設の客室数の比較を行う。その後、受け入れ能力がない市町村について、パターン2から順に比較し初めて受け入れ

キーワード 福祉避難所、宿泊施設、浸水想定区域

連絡先 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科 E-mail : e225510@cs.u-ryukyu.ac.jp



可能になるパターンを集計する．なお，各市町村の浸水想定区域内に居住する高齢者は松井ら<sup>8)</sup>の算出方法を用いる．

### (3) 隣接する市町村への避難を考慮した場合の受け入れ評価手法

表-2 のパターン別に，客室数が不足している市町村において，隣接する市町村への避難を考慮した場合の受け入れ可否を明らかにする．なお，各市町村の浸水想定区域内に居住する高齢者と客室総数は考慮しない．

## 3. 分析結果と考察

図-1 より，長崎県全体と大分県，熊本県，宮崎県の内陸部分においては，他と比較して水害時要支援者のうち要介護度が低い高齢者を含めても，受け入れが可能になることが明らかとなった．これは図-2 に示すように，長崎県の客室数の多さや，内陸部分の各市町村における浸水想定面積が小さいことが影響していることが考えられる．また各県内で，隣接する市町村への避難を考慮した際，図-3 より，福岡県のみ要介護5まで限定しても受け入れが厳しい市町村が存在した．これは，都市部から離れた地域の宿泊施設の少なさや高齢者の多さが原因であると考えられる．しかし，要介護5のみで隣接する他県も含めた市町村への避難を考慮すると，すべての市町村で受け入れ可能であった．

## 4. おわりに

宿泊施設で高齢者全員の受け入れを行うことは困難であり，介護の必要性に応じ，要介護度の高い高齢者を優先する必要性が明らかになった．他県を含めた隣接市町村への避難にすると，多くの市町村で対応可能な市町村が増えたことは，県を跨いだ広域な支援計画の必要性を示唆している．

本研究では，隣接する市町村への避難において，水害時高齢者と客室総数を考慮していない．このため，今後は実際に想定される人数に対して，隣接する市町村の宿泊施設の利用可否を分析する．

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP22H00222，JP23H00197，JP24K15538 の助成を受けたものである．

## 参考文献

- 1) 内閣府：令和7年版 防災白書 | 特集 第1章 第1節 令和6年能登半島地震の概要と被害状況，2025．
- 2) 内閣府：令和6年度都道府県別の指定避難所数等の確保状況，2024．

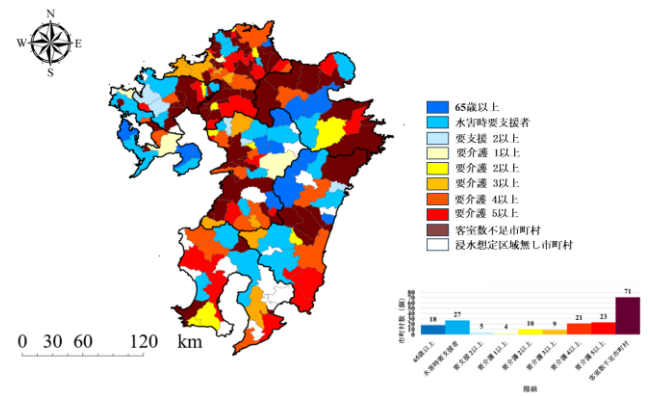


図-1 市町村別受け入れ可能パターン

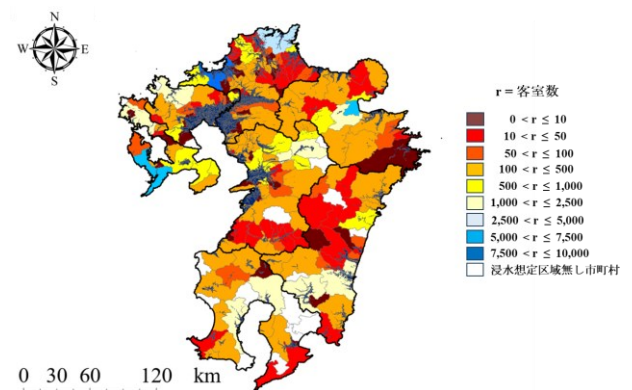


図-2 市町村別客室総数及び浸水想定区域図

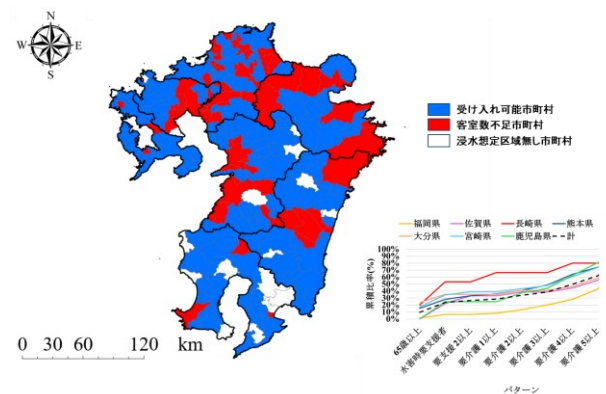


図-3 要介護5までにおける市町村別受け入れ能力

- 3) 三重県：防災関係協定締結状況一覧表，2025．
- 4) 国土交通省\_気象庁：気候変動レポート，2024．
- 5) 厚生労働省：令和5年度衛生行政報告例，2024．
- 6) 楽天グループ株式会社：楽天トラベル，<https://travel.rakuten.co.jp/> (2025年12月3日閲覧)
- 7) 株式会社リクルート：じゃらん net，[https://www.bing.com/search?q=じゃらん&form=ANNH01&refig=6964989cba254edbaefe4e79e7178f25&pc=PNTS\(2025年12月3日閲覧\)](https://www.bing.com/search?q=じゃらん&form=ANNH01&refig=6964989cba254edbaefe4e79e7178f25&pc=PNTS(2025年12月3日閲覧))
- 8) 松井遥，神谷大介，吉田護：高齢化の進展による水害時の避難行動要支援者支援に関する地域分析，地球環境シンポジウム，Vol. 81，No. 27，2025．(掲載予定)

## 要介護認定者に対する水害時避難支援の困難度分析 ～九州地方一級水系を対象として～

○琉球大学大学院 松井 遥  
琉球大学 神谷大介  
長崎大学 吉田 護

### 1. はじめに

近年、豪雨災害の激甚化・頻発化が進む中、多様な主体が協力し、流域全体で水害リスクの低減を図る「流域治水」の考え方が推進されている<sup>1)</sup>。その取組の一環として、住民の主体的な行動を促すマイタイムラインの普及が図られている。しかし、住民個々の状況に応じた避難支援の検討は十分ではなく、特に自力避難が困難な要介護認定者に対する具体的な支援策が課題となる<sup>2)</sup>。

そこで本研究では、九州地方の 20 の一級水系を対象とし、浸水想定区域内に居住する要介護認定者（以下、水害時要支援者）の将来予測および流域ごとの避難困難度を明らかにする。

### 2. 避難支援困難度の分析方法

#### (1) 水害時要支援者と支援者の算出方法

水害時要支援者の算出は、500m メッシュの年齢階級別人口を 100m メッシュの建物用地に人口を按分させ、浸水想定区域を重畳させることにより、5 歳階級別の被災人口を算出する。その後、市区町村別要介護認定者率を掛け合わせ、水害時要支援者数を算出する。詳細は、松井ら<sup>3)</sup>を参照されたい。

#### (2) 避難支援能力の分析方法

本研究における避難困難度とは、水害時要支援者の避難時に、必要な人的支援を確保することの難しさを示すものである。具体的には、(1)で算出した水害時要支援者を分母とし、生産年齢人口から第二号被保険者を除いて算出した支援者数から流出人口を差し引いた値を分子とする昼間の水害時要支援者一人当たりの支援者数（以下、一人当たり支援者数）を算出する。一人当たり支援者数が多いことで、要介護度や協力割合に関係なく避難支援の対応が可能となる。一人当たり支援者数の評価基準として、一対一対応と一対二対応を用

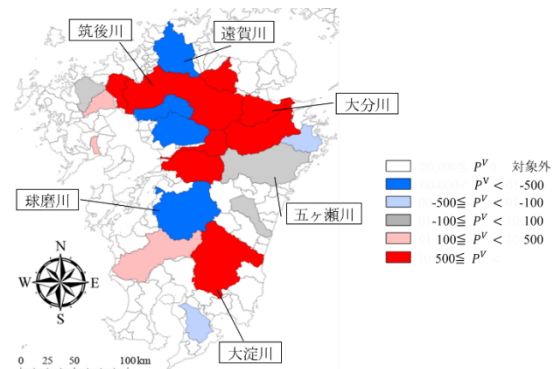


図-1 2020 年と 2050 年と比較した  
水害時要支援者の増減数 $P^V$

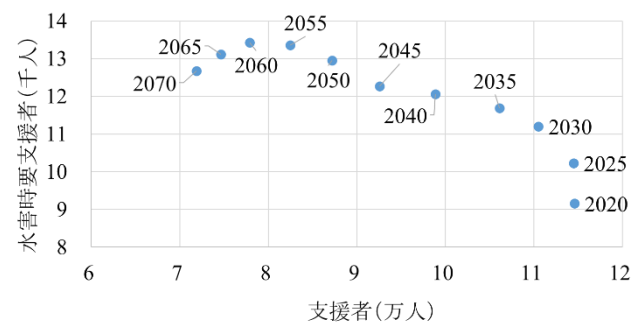


図-2 (A)の支援者と水害時要支援者の推移(大淀川)

いる。一対一対応は、水害時要支援者がフレイルや要支援 1 の場合、支援者数は 1 人でも避難支援が可能である。一対二対応は、車椅子など支援者が 2 人以上必要な要介護度が高い水害時要支援者の支援を想定している。一対一対応と一対二対応は避難支援の最低基準である。

### 3. 避難支援困難度の分析結果

#### (1) 水害時要支援者の結果

図-1 に 2020 年と 2050 年の水害時要支援者数の増減数 $P^V$ を示す。その結果、水害時要支援者が増加する水系(A)と減少する水系(B)に分けられる。図-2、図-3 にそれぞれの一例を示す。水系(A)は、11 水系存在しており、水系(B)は 9 水系存在した。特に遠賀川水系では、30 年間で 2,000 人以上も減少した。



遠賀川水系は、福岡県小竹町や香春町など今現在、高齢化率が 40%を超えている市町村が多く、将来的に高齢者が減少することが要因の一つであると考えられる。

(A)は、共通して県庁所在地や都市部や地方中核市などの都市部を流れる水系が多い。これらの地域では医療・介護サービスが充実しているため、高齢者や水害時要支援者が地域外へ転出せず、継続して居住する傾向が強いことが要因と考えられる。(B)は、中山間地や地方小都市・農村部を流れる河川が多く、過疎化が強い傾向にある。

## (2) 避難困難度の分析結果

水害時要支援者と支援者について、(A)の場合、今後は支援者の減少が見込まれるのに対し、水害時要支援者は増加するため、災害時における住民同士の相互支援のみでは避難支援が困難となる可能性が高い。反対に(B)の場合、支援者と水害時要支援者ともに減少するため、支援者の減少率が水害時要支援者の減少率を上回った場合困難となる。図-4 に、(A)の一例として、筑後川水系の市区町村別一人当たり支援者数を示す。一人当たり支援者数が2以下になる市町村は存在しなかった。しかしながら、下流部に位置する佐賀県みやき町や福岡県大木町、上流部に位置する熊本県小国町や大分県九重町などは、一人当たり支援者数が4未満となっており、避難支援の協力が6割以上必要となる。一人当たり支援者数が多い市町村は、福岡県久留米市と大分県日田市、佐賀鳥栖市であった。久留米市や鳥栖市は生産年齢人口が多いことが要因であると考えられる。日田市は、高齢化率が非常に高い一方で、介護認定者率は全国平均を下回っていた。このため、一人当たりの支援者数は他地域に比べて多い結果となったと考えられる。特に日田市では「週一通いの場<sup>4)</sup>」などの介護予防活動が展開されており、これらの取組が高齢者の身体機能維持などの介護予防に一定の効果をもたらしめている可能性が示唆される。

## 4. おわりに

本研究では、九州地方の一級水系を対象に水害時要支援者の将来予測および流域ごとの困難度を明らかにした。その結果、約半数の水系で水害時要支援者は増加し、支援者は減少する。また、支

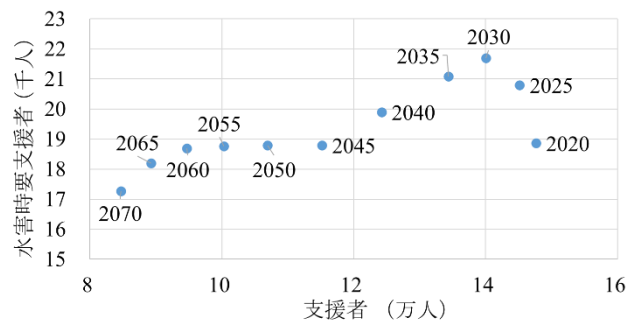


図-3 (B)の支援者と水害時要支援者の推移（遠賀川）

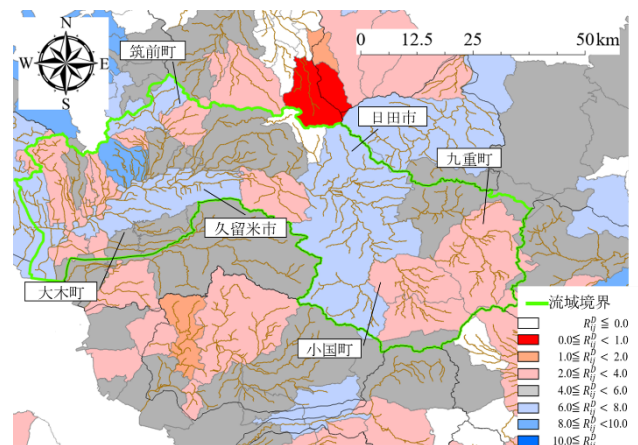


図-4 2050 年における水害時要支援者数

援者と水害時要支援者の推移の分析において地方部は水害時要支援者が減少し、都市部では、増加することが明らかとなった。これらの結果は、久留米市などのように同一市町村内に就業機会が存在する地域において、災害時の人的支援体制の確保が容易となる可能性を示しており、介護予防の取組は、水害時要支援者数の抑制を通じて、福祉分野のみならず防災分野においても一定の効果を持つ可能性がある。

本研究では、流域および市区町村単位で分析を行ったが、今後は共助の観点から空間的詳細度を上げた分析を行うこととする。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP22H00222，JP23H00197，JP24K15538 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：流域治水の推進，2021。
- 2) 国土交通省：流域治水プロジェクト，2021。
- 3) 松井遥，神谷大介，吉田護：将来推計人口を用いた水系別の避難支援困難度に関する分析～109 水系を対象として～，土木計画学研究・講演集，2025。
- 4) 日田市役所：日田市 週一通いの場，2025。 [https://www.city.hita.oita.jp/soshiki/fukushihokenbu/chojufukushika/chojufukushi/kenko\\_fukushi/korei\\_fukushi/16517.html](https://www.city.hita.oita.jp/soshiki/fukushihokenbu/chojufukushika/chojufukushi/kenko_fukushi/korei_fukushi/16517.html) (2025 年 12 月 12 日閲覧)

## 複数のホースを用いた波エネルギー集約による波力発電

○土木学会学生会員 琉球大学 丸山紀信  
土木学会正会員 琉球大学 福田朝生

### 1. はじめに

沿岸に設置された従来の波力発電装置は、フラップ等の大きな構造物を介して波エネルギーを集約している。しかし、このような構造では応力集中を招き故障しやすく、また、構造物の規模が大きいため、一度故障が発生すると修理が容易ではない。さらに、テトラポッド等を有する既存の防波堤や人工リーフ等がある場所に発電設備を建設する事は容易ではない。そこで応力集中を避け、維持管理が容易でかつ、既存の海岸構造物にも容易に設置できる、柔軟性に富んだ波力発電装置が求められている。

本研究では、これらの課題に対応するため新たに複数本のホースを水中に設置して、ホースにより波エネルギーを集約する発電システムを提案する。本研究はこの発電システムの基礎的研究として、提案した発電システムを用いた実験により、発電機に接続された電球の点灯する様子の確認を行い、波エネルギーを集約する。設置するホースの本数を変更することで、提案する発電システムの性能を確認する。

### 2. 実験の概要および評価方法

#### (1) 実験の概要

実験の概要を図-1 に示す。本実験は琉球大学工学部の所有する全長 30m、幅 5m、高さ 2m の屋外大型造波水槽にて行う。造波水槽中間の人工リーフ上段に内径 38 mm の透明ホースを図-2 のように複数本（1～6 本）し、人工リーフ後方で継ぎ手を用いて複数本のホースを 1 本に集約させている。集約させたホースの先端部分の拡大図（図-1 中のオレンジで囲んだ部分）を図-3 に示す。ホース先端部には電球を備えた小型のプロペラ発電機を設置した。ホース内に出口の径が小さくなるような塩ビ管を挿入しており、入射波によって生じた空気流がプロペラのみに当たるようにしている。規則波を発生させるとホース内に空気流が生じ、プロペラが回転して発電をする仕組みである。ホースの本数を変更しながら実験

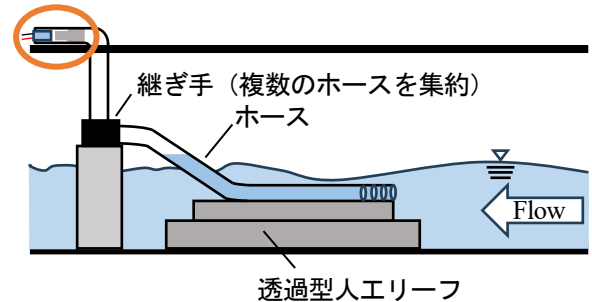


図-1 実験の概要

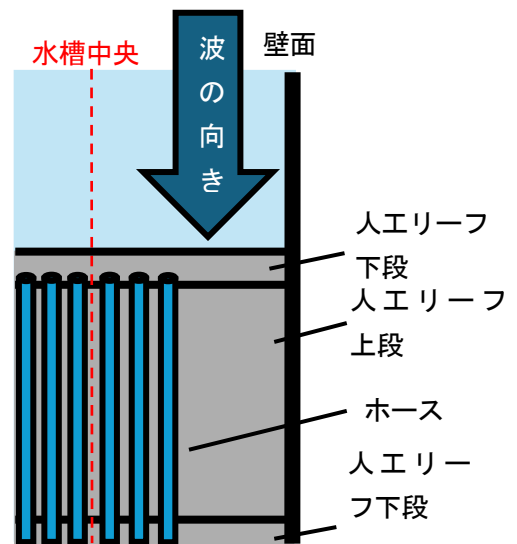


図-2 水槽上からの図

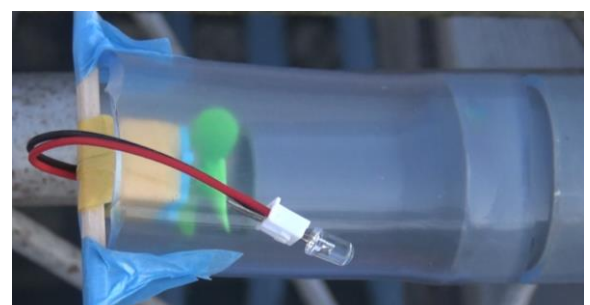


図-3 集約させたホースの先端部

表-1 実験条件

ホースの本数	水深(m)	波高(m)	周期(s)
3本	0.45m	0.225m	5s
4本			
5本			
6本			

キーワード 波力発電, 波エネルギー, 規則波, 砕波

連絡先 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科 E-mail : maruyama\_slmy@u-ryukyu.ac.jp

を行い、ホースの本数に対して電球の点灯の様子を確認した。

## (2) 実験条件

実験条件を表-1に示す。ホース1, 2本時には、発電機のプロペラが回転せず発電を行うことができなかったため、省略してある。

## 3. 実験結果

### (1) 空気流によるプロペラの回転

人工リーフ上段に固定したホースが波を受け、それによってホース内を流れる空気流は、ホース内から大気中へ流れ出るものと、大気中からホース内に流れ込むものの2種類がある。ホース3本以降では、双方の空気流でプロペラが回転しており、空気流によってプロペラが逆回転している様子も確認できた。

### (2) 発電中における電球の点灯について

図-4～図-7に電球の点灯の様子を示す。図中の矢印は、ホース内を流れる空気の向きを示している。ホース3, 4本用いた時は、大気中からホース内に流れ込む空気流の時、プロペラの回転に対して電球の点灯が確認できなかった。それに対して、ホース5, 6本用いると、大気中からホース内に流れ込む空気流の際もプロペラが回転して発電を行うことができ、双方向の空気流で発電を行っている様子が確認できた。

## 4. おわりに

造波水槽内にホースを設置して発電の実験を行ったところ、ホース2本までは発電を行うことができなかったが、ホース3本以上用いると発電を行うことができ、波エネルギー集約による発電を行うことができた。ホースの本数ごとの、電球点灯の様子を確認したところ、ホースの本数を増やすと、双方向の空気流でプロペラが回転して発電を行うことが確認できた。

今後は、プロペラの回転によって生じる電圧と電流を測定して電力を算出し、これを用いて波から得られたエネルギーの定量化を行う。また、ホースの本数や配置を変更して、波エネルギーをよ

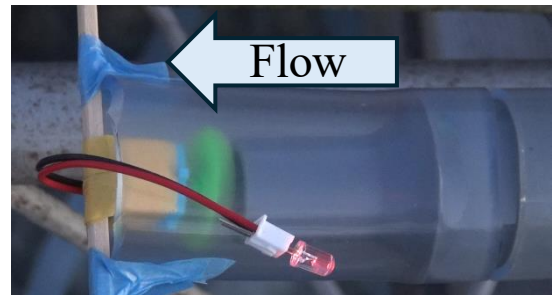


図-4 ホース内から大気中へ空気が流れた時の点灯の様子（ホース3本）

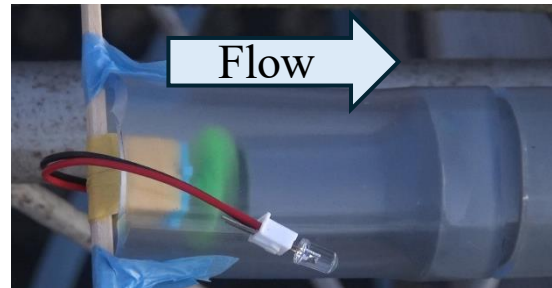


図-5 大気中からホース内へ空気が流れた時の点灯の様子（ホース3本）

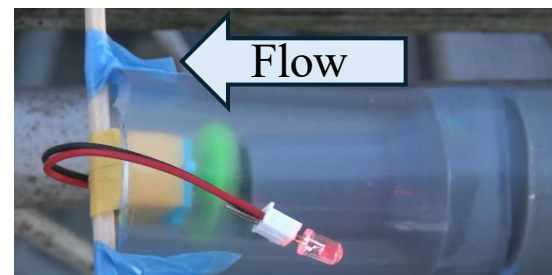


図-6 ホース内から大気中へ空気が流れた時の点灯の様子（ホース6本）

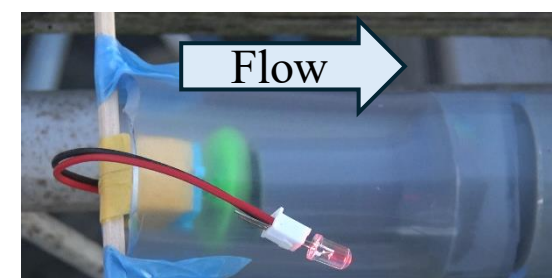


図-7 大気中からホース内へ空気が流れた時の点灯の様子（ホース6本）

り集約するシステムの開発を目指す。

## 参考資料

- 1) 近藤俣郎・上原春男・木方靖二・宮崎武晃・谷野賢二：海洋エネルギー利用技術，pp. 43 - 94，1996年

## JSCE2025 策定プロセスの対話型組織開発への応用

沖縄県土木建築部 都市計画・モノレール課 企画班 西里 雅範

### 1. はじめに

令和5年 11 月～令和7年5月の間、「土木学会 企画部門 企画委員会」に参加し、土木学会の新5か年計画「JSCE※12025」の策定に携わった。

私は、地方公共団体からの参加者として、技術系職員のキャリア支援や地域との繋がり強化などの提案を行いつつ、土木学会・土木界の第一線で活躍される委員間の議論から多くの学びを得た。

本稿では、そこで得た知見を実務組織の運営改善に活かす例として、JSCE2025 の策定プロセスを沖縄県土木建築部に適用し、職員全員が参加した対話型組織開発によるマネジメントの提案を行う。これにより、人材不足や職員の仕事に対するモチベーションの低下といった課題に対応し、組織の一体感や将来への展望を強めることができると考えている。

現状分析 WG			
主査	下大 蘭 浩	東日本旅客鉄道㈱	事業者
主査補佐	山後 宏樹	東日本旅客鉄道㈱	事業者
副査	清野 聡子	九州大学	学・支部
副査	大原 美保	東京大学	学
副査	加藤 隆	大成建設㈱	ゼネコン
	中井健太郎	名古屋大学	学
	秋山 成央	日本工営㈱	コンサル
	小柳 桂泉	JICA	海外
	本丸 哲也	NEXCO 東日本	事業者
	玉石 宗生	国土交通省	国交省
	矢島 良紀	土木研究所	研究所
	吉見 雅行	産総研	研究所
	西里 雅範	沖縄県	地方公共団体
	小松 淳	日本工営	リエゾン※2;
		ビジネスパートナーズ㈱	コミュニケーション部門
	嵩 直人	鹿島建設㈱	リエゾン:技術推進機構
	井上 雅志	㈱エイト日本技術開発	リエゾン:国際部門
	谷 ちとせ	土木学会関西支部	支部事務局
	高野美和子	土木学会関東支部	支部事務局
	二瓶 貞洋	(公社)土木学会	本部事務局
	中島 敬介	(公社)土木学会	本部事務局
オブザーバー	福田 大輔	東京大学	企画委員会幹事長
	三輪 準二	(公社)土木学会	専務理事
	宮城 大助	中央復建コンサルタンツ㈱	2024 年度 会長プロジェクト

### 2. 土木建築部の課題と組織マネジメントの必要性

#### 2.1 土木建築部における課題認識

土木建築部においても、全国同様多くの課題を抱えるが、特に深刻なのが人材不足である。土木職では土木系学科以外の理系学科へのリクルート活動等で、人材不足に対応してきたが、近年の採用売り手市場により、特に上級採用者が激減している。

令和5年度の土木上級採用は7名だったが、令和6年度は5名、令和7年度は1名と、初級や特別枠を入れても年々欠員数は増加傾向にあり、臨時的任用職員で補っているものの、その応募も低調な状況で、加えて近年、離職も相次いでいる。

以上の採用難や離職状況に鑑みると、職員数減少の一途、限られた職員で組織を運営するための業務の見直し・改善や、新技術導入による生産性の向上は喫緊の課題だと考える。

キーワード JSCE2025 マネジメント 策定プロセス 組織

連絡先 〒900-8570 沖縄県那覇市泉崎 1-2-2 沖縄県土木建築部 都市計画・モノレール課



## 2.2 土木建築部における組織マネジメントの必要性

採用難や離職状況の要因としては、民間の初任給上昇や実力主義による昇給システムに比べ、公務員の年功序列の給与体系や昇任システムが魅力的に捉えられていないことが最大の要因だとは思いますが、仕事に対する「やりがい」の低下も一因だと考えられる。

「やりがい」は、自分の仕事が社会の役に立っている実感や、難しいことを乗り越えた時の達成感などで得られるが、インフラ整備がある程度充足する中、インフラ整備により住民から感謝される機会の減少や、限られた予算での維持管理の限界、高度化・多様化する住民への対応、煩雑化していく業務手続きなどを背景に、かつてに比べ仕事から「やりがい」を得ることが難しい状況にあると考える。

なお、土木における仕事の「やりがい」については、土木本来の使命として、土木学会でも「土木・土木技術者の使命」として再確認されており、我々も職責として相応の自覚を持つからこそ、インフラの担い手として業務を遂行できている。

### （土木の使命）

・常に、長期的かつ大局的な展望を保ちながらも、時代の変化を敏感に捉え、さまざまな課題や社会からの要請に応え、公益の増進を図るための不断の努力を続けること。

### （土木界、土木学会、土木技術者の使命）

・土木界が行ってきたこれまでの経験を踏まえ、様々な社会の課題解決に向けて、さらには持続可能であり、次世代が夢と希望を持つことができる社会の構築に向けて、今まさに我々がすべきことを考え、それらを活動に移すことによって、将来の社会をより良いものに変えていくこと。

### 「社会と土木の 100 年ビジョン」

また、私が土木総務課在籍時（H29・H30）に取りまとめた「土木建築部業務マネジメント」において、「良好な組織の条件とされるのは『統一の目標』と『相互信頼関係』とされており、土木建築部はいずれの条件も備え、それらが『組織文化』の形成に寄与している。」ことを報告している。

以下に、土木建築部の「『組織文化』を形成する2大柱」として示す。

I の柱：県民の暮らしを維持改善するためのインフラ施設の供給という「統一の目標」

II の柱：共通の現場体験を基にした縦横に張り巡らされた仲間との「相互信頼関係」

その中で、「統一の目標」については、技師を目指した動機のため説明は不要としたが、仕事に「やりがい」を得にくくなっている状況、土木系学科以外の技師の急増と先輩技師が多忙なことによる若手技師への指導不足、仕事に対する価値観の多様化などにより、「統一の目標」が揺らぐことを危惧している。そこで、前回の業務マネジメントから6年経過し、社会環境や組織の状況が急速に変化するなか、再度、組織のマネジメントに取り組む必要があると考えている。

## 2.3 組織マネジメントの手法

JSCE2025 は、最新のマネジメント手法に則り策定されており、その立案プロセスや計画の構成自体が組織マネジメントや計画立案の手本となり、参考にすべき示唆を多分に含むが、主に土木学会員を対象としていることから、一読しただけではその深い意図や価値に気づきにくい内容となっている。

そこで、私が JSCE2025 の構成・立案プロセスの簡素化・構造化を試みたところ、「複合的なマネジメント手法」として整理できたことから、『対話型組織開発テンプレート(JSCE2025 モデル)』（図1）と称して、土木建築部の組織マネジメントへの適用を提案する。

これにより、土木建築部における採用難や離職状況に対応し、組織運営の効率化による生産性の向上や、仕事における「やりがい」の醸成に繋がると考えている。

### 3. 対話型組織開発テンプレート(JSCE2025 モデル)

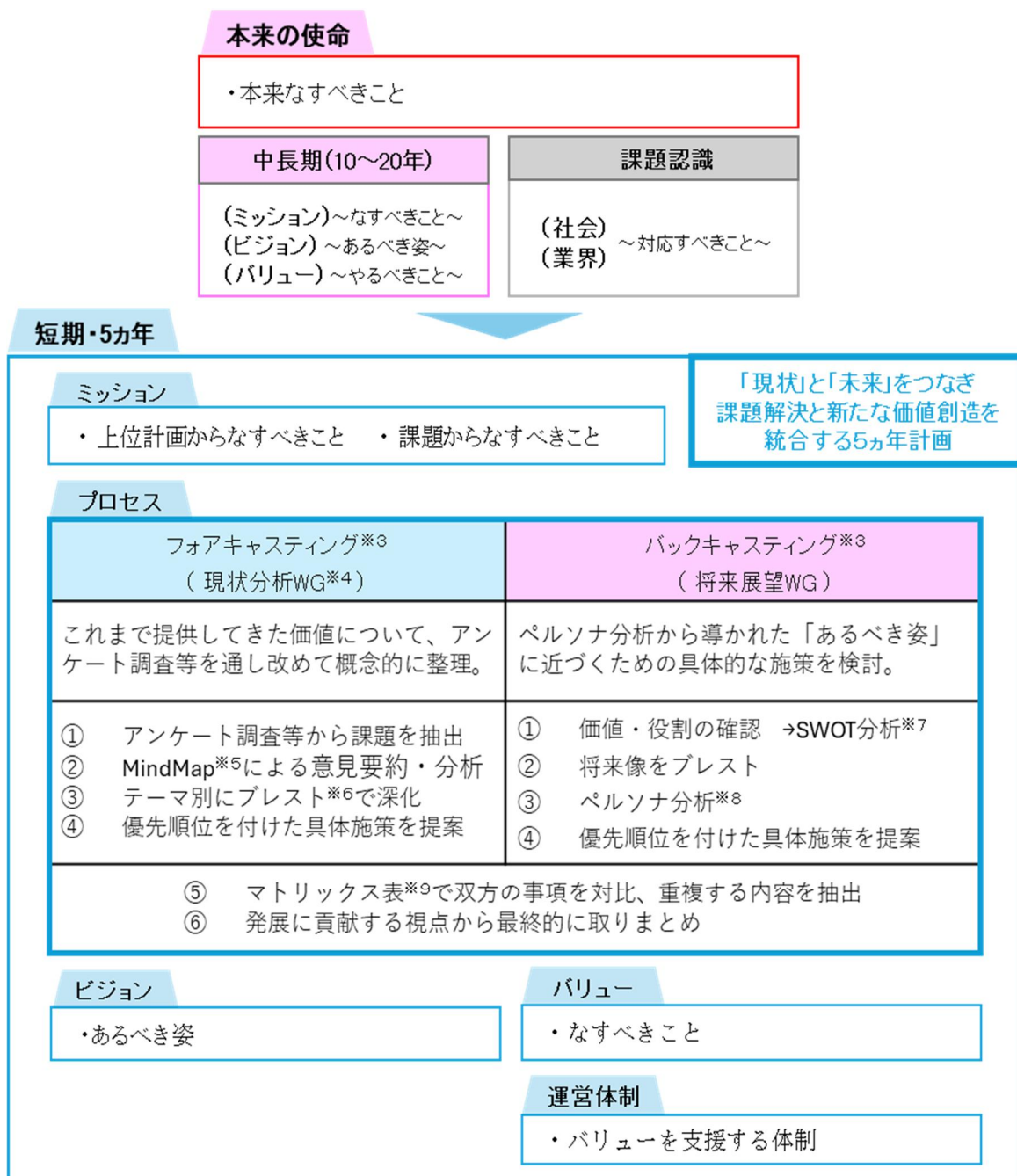


図1. 対話型組織開発テンプレート(JSCE2025 モデル)

#### 3.1 対話型組織開発テンプレートの解説

##### 3.1.1 対話型組織開発

現代は、変化が激しくて先行きが見えにくく、判断を行うことが難しい VUCA※12 の時代と言われ、こうした時代に対応するため、組織の存在意義や役割を明確にするため、ミッション・ビジョン・バリューの策定が必要とされる。

JSCE2025 では、土木学会企画委員会のもと2つの WG が置かれ、会員同士の対話を通じ、土木学会におけるミッション・ビジョン・バリューを示した計画が立案された。このように会員同士の対話から

ボトムアップで組織を動かす手法は、『対話型組織開発』と呼ばれ、組織の当事者たちが自律的に対話を繰り返すことで現状を再認識し、新しい意味付けをしながら、継続的な組織変革を促す手法として、変化の激しい現代において、組織の柔軟な対応能力を高めることができるとされている。

### 3.1.2 テンプレートの構成

最上段に「本来の使命」を据え、「中長期的な計画」や「近年の課題認識」から「短期的な計画」を導く構造となっている。計画に関しては、「ミッション(なすべきこと)・ビジョン(あるべき姿)・バリュー(やるべきこと)」から構成され、「バリューを支援する運営体制」まで組み込まれている。

ミッションからビジョン・バリューを導くプロセスとして、フォアキャスティングによる現状分析 WG とバックキャスティングによる将来分析 WG の2つのアプローチから、現状と未来を繋ぎ課題解決と新たな価値創造を統合する形態が取られている。

## 3.2 土木学会での適用例

土木学会においても、VUCA の時代、土木に深く関わるもののうち、近い将来、確実に起こり得ると考えられる(課題認識)社会動向と土木界が直面する課題、それに対応する土木学会のあり方が求められることから、JSCE2025 では、(本来の使命)不変的な土木の使命の確認と、土木学会の(中長期計画)中長期的なミッション・ビジョン・バリューについて再確認したうえで、(短期ミッション)VUCA<sup>※10</sup> 時代における諸課題に対応するため、土木学会が主として(短期ビジョン)目指すべき方向性や(短期バリュー)取り組むべき活動、将来に亘っても活力のあるコミュニティとして存在しうるための(運営体制)組織体制や運営の在り方を示している。

## 3.3 土木建築部への適用案

土木建築部への具体的な適用として、組織が目指す方向性であるミッションは幹部が示す必要があるが、ビジョン・バリューについては、立案プロセス(表1)に則り、全職員が参加した対話型組織開発で行うことを提案する。

表 1. 立案プロセス

「フォアキャスティング」 現状分析 WG	「バックキャスティング」 将来展望 WG
これまでの時代を担ってきた中堅技師	これからの時代を担う若手技師
「土木建築部」が提供してきた価値について、アンケート調査等を通し改めて概念的に整理。	「土木建築部」の強みを確認し、ペルソナ分析から導かれた「あるべき姿」に近づくための具体的な施策を検討。
① アンケート調査等から課題を抽出 ② MindMap による意見要約・分析 ③ テーマ別にブレストで深化 ④ 優先順位を付けた具体施策を提案	① 価値・役割の確認 →SWOT 分析 ② 将来像をブレスト ③ ペルソナ分析 ④ 優先順位を付けた具体施策を提案
⑤ マトリックス表で双方の事項を対比、重複内容を抽出 ⑥ 「土木建築部」の発展に貢献する視点から取りまとめ	

### 3.3.1 2つアプローチ

「フォアキャスティング」はこれまでの時代を担ってきた中堅技師、「バックキャスティング」はこれからの時代を担う若手技師が主体となることで、世代間の相違を確認しつつその差を埋め、「現状」と「未来」をつなぎ課題解決と新たな価値創造を統合する計画立案が可能だと考える。

### 3.3.2 WG の進め方

WG に際しては、LoGo チャット(庁内チャットツール)の活用で、時間的・空間的な制約を受けず意見の集約が可能である。一方、人数が多いと議論発散の可能性もあるため、参加者については挙手制を原則とし、テーマや職種等でショート WG に分け、互いに状況を共有するなど工夫が必要である。

また、挙手制では参加者が集まりにくいことも想定されるが、積極的に参加される職員間の議論を通した相互承認による相乗効果や、彼らを介した周囲の職員に対する積極性の誘発等が、組織の「やりがい」に繋がると考えている。

### 3.3.3 部内外への発信

アンケート調査や検討状況の照会を通すことで、参加者以外の意見の取り込みや合意形成が図られ、全員参加の形態を取ることができる。さらに、その取組みを対外的にオープンにすることで、魅力ある職場であることが外部へも伝わり、職員採用へも貢献できるものだと考える。

表 1. ①～⑥に箇条書きで示した各 WG の具体的な進め方や統合の仕方については、詳細に報告するには紙面が足りないため、本稿末に参考掲載する「JSCE2025 の概要」や、土木学会 HP の「JSCE2025 基本文書」及び資料編を参照頂きたい。

土木学会 HP: <https://committees.jsce.or.jp/JSCE20XX/JSCE2025> →



## 4. おわりに

今回提案した『対話型組織開発テンプレート(JSCE2025 モデル)』は、組織マネジメントにおいて右に示すような効果が期待される他、計画立案を含め多方面に適用可能で、関係者や組織が大きく複雑になるほど効果を発揮するものである。

- ・「やりがい」と目的意識の再構築
- ・世代間の意識の差を埋める
- ・共有共著されたビジョンの創造
- ・新しい才能を引き付ける文化の醸成
- ・VUCA の時代に対応できる組織の構築

現職となる都市交通計画においても、都市計画・モノレール課と交通政策課など部を跨ぎ関連する組織間での目標の共通化や、各計画間の役割の明確化に役立っており、より強固な連携に効果を上げている。

さらに混迷を極める VUCA の時代、将来社会をより良いものにしていくためには、これまでにない発想と取組が求められ、それを動かす組織と若い力の底上げが必須である。

本論文を機に多様な議論が交わされ、組織マネジメントが具体化することで、「やりがい」に満ちた組織が持続できるよう、今後も一技師として尽力する所存である。



## 【参考】JSCE2025 の概要

土木学会では 1998 年以降、活動の目標や計画を中長期計画として定め取り組んでおり、2020 年版の公表以降、「土木学会5か年計画(JSCE20XX)」として、各々の時代背景や環境等に基づき5年ごとに立案され、四半世紀に渡り活動してきた。

その最新版となる JSCE2025(2025～2029 年度)は、JSCE20XX の変遷をふまえ、次の四半世紀を見据えた「土木学会」のあり方を捉え直す契機とすることを目的に作成され、土木学会全体の活動の方向性を示す計画かつ当該期間における土木学会の組織運営および活動の指針を示すものとなっている。その内容を簡素化・構造化したものを図2に示す。

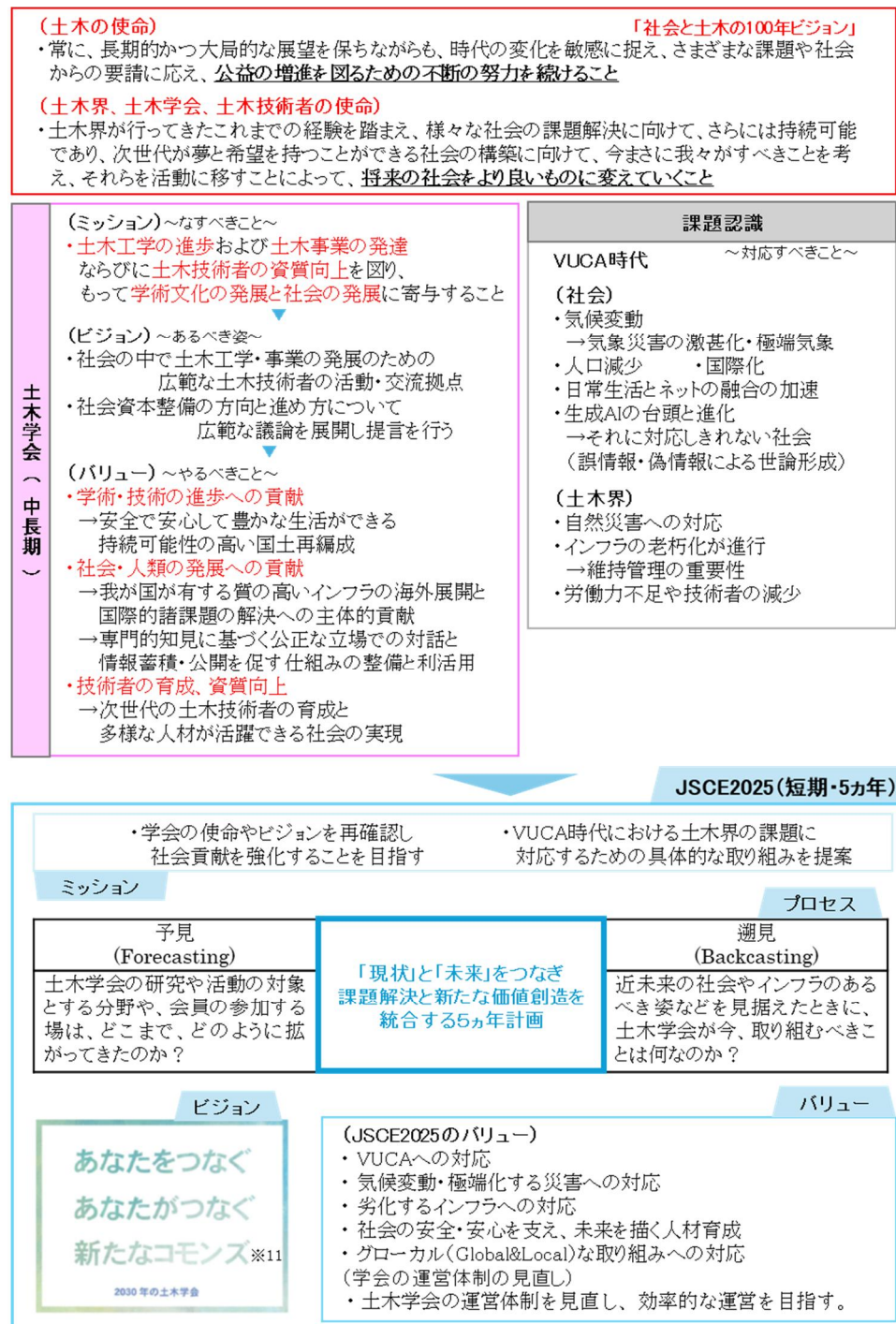


図2. JSCE2025 の構成

会議は原則オンラインで行われ、表2の立案プロセスに則り、目的別に表3のオンラインツールが無料の範囲で用いられた。

表2. 立案プロセス

「フォアキャスティング」	「バックキャスティング」
土木学会の研究や活動の対象とする分野や、会員の参加する場は、どこまでどのように広がってきたのか？	近未来の社会やインフラのあるべき姿などを見据えたときに、土木学会が今取り組むべきことは何なのか？
▼	▼
<p><b>現状分析 WG</b></p> <p>現在の学会という「場」と「活動」およびこれまで提供してきた価値について、アンケート調査等を通し改めて概念的に整理された。</p> <p>① アンケート調査等から課題を抽出 ② MindMap による意見要約・分析 ③ テーマ別に4つのショートワーキングで深化 ④ 優先順位を付けた 12 の提言にまとめ</p>	<p><b>将来展望 WG</b></p> <p>以下の手順で課題を抽出。ペルソナ分析から導かれた「あるべき姿」に近づくための具体的な施策が検討された。</p> <p>① 土木学会の価値・役割の確認 →SWOT 分析による強みの抽出 ② 土木学会の将来像をブレスト ③ ペルソナ分析 ④ 施策の検討</p>
<p>⑤ マトリックス表で双方の事項を対比、重複する内容を抽出 ⑥ 「学会」の発展に貢献する視点から最終的に取りまとめ</p>	

表3. 使用されたツール

目的	ツール名	機能
資料共有	Dropbox	インターネット上のストレージスペース。ファイルやフォルダを保存、共有、管理できる。
会議	Zoom	オンラインで会議やコミュニケーションを円滑に行うための Web 会議ツール。
アンケート調査	Google Forms	アンケート、テスト、イベント参加申込みなど、様々な用途のフォームをオンラインで作成・共有・集計できる。
意見要約	ChatGPT	文章作成や要約、翻訳など、日常生活だけでなく、ビジネスでも役立つ生成 AI サービス。
意見分析	Miro	チームの共同作業を支援する Web 上のホワイトボードサービス。主として MindMap を使用。
文書校正	Google ドキュメント	オンライン文書作成サービス。複数人での同時編集や、Google ドライブへの自動保存など機能を有する。

## 【用語集】

- ※1 JSCE(Japan Society of Civil Engineers):土木学会の英名
- ※2 リエゾン(Liaison):フランス語で「橋渡し」「つなぎ」などの意味で、組織間の仲介を担う人材。
- ※3 フォアキャスティング (ForeCasting)、バックキャスティング (BackCasting) :フォアキャスティングは「現在」を起点に未来を予測する考え方である一方、バックキャスティングは「未来の理想」を起点とし、そこから現在へと逆算して計画を立てるアプローチ。
- ※4 WG (Working Group) :特定の課題解決やプロジェクト推進のために設けられる専門的な作業部会やチーム
- ※5 MindMap(マインドマップ):人間の自然な思考プロセスを反映したノート法。全体を一目で見渡すことができ統合的に考えるのを促すため、思考整理、記憶、アイデア発想などに威力を発揮。
- ※6 ブレスト:Brainstorming(ブレインストーミング)」の略語。特定のテーマについて参加者が自由に意見やアイデアを出し合い、解決策や新しい考え方を生み出す会議・発想手法。
- ※7 SWOT 分析: Strength(強み)、Weakness(弱み)、Opportunity(機会)、Threat(脅威)の頭文字をとった、企業や事業の現状を分析するためのフレームワーク。
- ※8 ペルソナ分析:マーケティング手法の一つで、サービスのターゲットとなる顧客像(ペルソナ)を、架空の人物として詳細に設定し、その顧客の行動や思考を分析し、商品・サービスの開発や戦略・施策を検討するための手法。
- ※9 マトリックス表:「行」と「列」によって表現された縦横に広がるチャートのこと。全体像の把握、要素の洗い出し、関係性の明確化、優先順位付けなどが視覚的に整理される。
- ※10 VUCA(ブーカ): Volatility(変動性)、Uncertainty(不確実性)、Complexity(複雑性)、Ambiguity(曖昧性)の頭文字を取った略称。変化が激しく、先行きが見えにくく、複雑で、曖昧な現代の状況を表すビジネス用語。
- ※11 コモンズ(共有地):特定の個人や集団が独占的に所有・管理するのではなく、不特定多数の人々が共同で利用したり、管理したりできる資源や場所を指す。



## Session 2 環境保全・計画



## 卵殻由来の水酸化カルシウムを用いたアルカリ活性材料の開発

琉球大学 ○松嶋義丈, 富山潤, 花城有人, (株)バイオアパタイト 中村弘一, 黒川達輝

### 1. はじめに

食品残渣（食品廃棄物）である卵殻は貴重なカルシウム資源ではあるが臭いが強くそのままでは使用できない。その臭いは卵殻を燃焼させることで消臭できるが、焼成時に卵殻膜からアルカリガスが発生するため、焼成炉を破壊してしまうこともあり、年間約 26 万トンも廃棄されている<sup>1)</sup>。近年、卵殻膜を効果的に剥離させ、焼成過程でアルカリガスを発生させず、バイオアパタイトを合成し、化粧品や歯磨きなど高付加価値の製品の原料に使用されている<sup>2)</sup>。その使用量は限定的で、別の用途への展開が必要である。そこで本研究では、卵殻からバイオアパタイトを合成する過程で生じた水酸化カルシウムを用いた環境負荷低減型コンクリートの開発を目的に、バイオマス燃焼灰、高炉スラグ微粉末を活性フィラーとし、卵殻由来の水酸化カルシウムをアルカリ刺激および水和に必要な水酸化カルシウムとしたアルカリ活性材料<sup>3,4)</sup>（アルカリアクティベイトマテリアル, Alkali-Activated Materials, 以下 AAMs と称す）の検討を行った。

### 2. 使用材料

本研究で使用した材料の種類、記号、密度を表-1 に示す。また、表-2 に化学組成を示す。

本研究で用いた配合は、材齢 7 日において圧縮強度 24 N/mm<sup>2</sup>以上の発現を目標としたモルタルを用いた予備実験の結果に基づき決定した。活性フィラーとしては、パーム椰子殻燃焼灰（(株)リュウクス製、以下、PKS 燃焼灰）、高炉スラグ微粉末（石膏無添加、ブレーン比表面積 4,090 cm<sup>2</sup>/g）、および水酸化カルシウム粉末（(株)バイオアパタイト提供）を採用した。なお、Ca(OH)<sub>2</sub> は、アルカリ刺激とカルシウム供給源の役割を持つ。また、フレッシュ性状の向上を目的として、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。細骨材には本部産石灰岩砕砂を、粗骨材には同産地の石灰岩砕石を用い、材料の地域性および一貫性にも配慮した配合とした。

表-1 使用材料

材料	種類	記号	密度(g/m <sup>3</sup> )
結合材	高炉スラグ微粉末 (石膏なし)	BS	2.91
	PKS 燃焼灰	PKS	2.4
	水酸化カルシウム	Ca(OH) <sub>2</sub>	2.24
水	水道水	W	1.0
骨材	細骨材	S	2.64
	粗骨材	G	2.7
混和剤	AE 減水剤	AE	—

表-2 各種材料の化学組成

試料名	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	その他
WG	72.0	2.2	10.0	0.45	15.55
SF	94.0	0.55	0.37	0.43	3.65
PKS	56.0	3.2	24.0	2.0	14.8
BS	31.0	11.0	51.0	3.6	3.4
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	100.0	0	0

(単位: wt%)

### 3. 実験概要

#### (1) 配合

前述したモルタルを用いた予備実験の結果から決定したコンクリートの配合を表-3 に示す。

表-3 AAMs の配合(W/B=35%)

練り混ぜ水(W) (kg/m <sup>3</sup> )		活性フィラー (結合材(B)) (kg/m <sup>3</sup> )			骨材	
					細 (kg/m <sup>3</sup> )	粗 (kg/m <sup>3</sup> )
W	AE	PKS	BS	SF	S	G
170.5	4.5	100	300	100	795	847

W:水, AE:高性能 AE 減水剤(B×0.9%), PKS: PKS 燃焼灰, BS: 高炉スラグ微粉末, SF: シリカフューム, S: 細骨材, G: 粗骨材

#### (2) 試験方法および試験体作製方法

圧縮引張試験は JIS A 1108, スランプフロー試験は JIS A 1150, 曲げ強度試験は, JIS A 1106 に基づいて行った。

### 4. 結果および考察

#### (1) 試験体概要

圧縮強度試験体 (φ10×20cm)を写真-1 に、曲げ強度

キーワード: 卵殻由来水酸化カルシウム, アルカリアクティベイトマテリアル, 圧縮強度, 曲げ強度, 流動性  
連絡先: 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地 琉球大学大学院理工学研究科社会基盤デザインプログラム 建設材料学研究室 E-mail: matsushima\_s6pf@cs.u-ryukyu.ac.jp

試験体 (10×10×40cm)を写真-2に示す。写真から本材料の見た目は、セメントコンクリートとほぼ同じであることがわかる。養生は、常温で封緘養生とした。



写真-1 圧縮強度試験体 (φ10×20cm)      写真-2 曲げ強度試験体 (10×10×40cm)

## (2) 試験結果

スランプフロー試験の結果、スランプフロー値の平均は510mmであり、良好な流動性を示した。このことから、本研究で使用したセメント用の高性能 AE 減水剤は、本材料に対して流動性の改善に有効であることが確認された。

圧縮強度試験および曲げ強度試験の結果をそれぞれ、図-1、図-2に示す。図-1に示す圧縮強度試験の結果より、本材料は材齢7日で目標強度(24 N/mm<sup>2</sup>以上)に達し、初期材齢において十分な強度発現を示した。また、材齢14日および28日においても強度増進が確認され、28日では35 N/mm<sup>2</sup>を上回る圧縮強度を得た。

一方、図-2に示す曲げ強度試験の結果より、曲げ強度は圧縮強度に対して1/5～1/8の範囲にあり、セメントコンクリートと同様の傾向を示した。さらに、卵殻という廃棄物を活用した材料である点は、資源循環型社会の構築に寄与する点で大きな意義を有している。今後は、長期強度、耐久性の検討を進める必要がある。

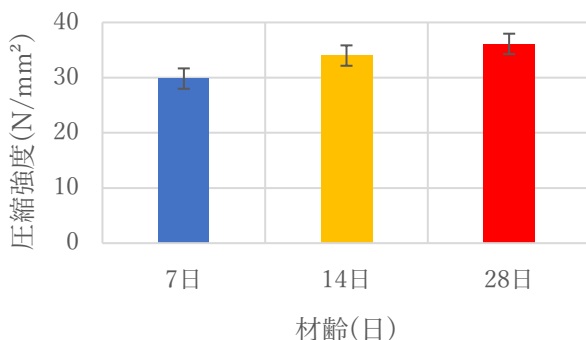


図-1 圧縮強度結果

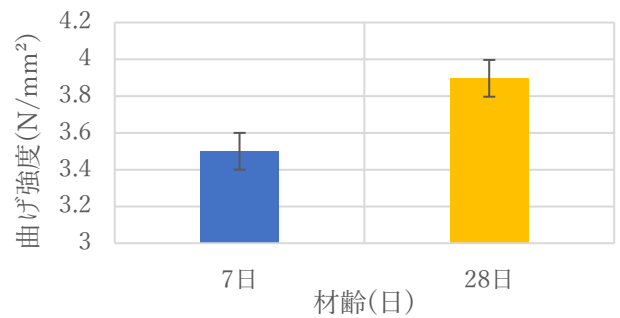


図-2 曲げ強度結果

## 4. まとめ

本研究では、卵殻由来の水酸化カルシウムの有効利用拡大かつ環境負荷低減が可能な建設材料の開発を目指し、AAMs への卵殻由来の水酸化カルシウムの適用可能性について強度特性、流動性に関する基礎的検討を行った。得られた知見と今後の課題を示す。

- (1) 本研究で使用したセメント用の高性能 AE 減水剤は、本検討材料の流動性改善に有効であることが確認された。
- (2) コンクリートの圧縮強度試験の結果、材齢7日で目標強度に達し、さらに材齢14日、28日において強度増進を確認した。
- (3) 曲げ強度は圧縮強度に対して1/5～1/8の範囲にあり、セメントコンクリートと同様の傾向を示した。
- (4) 今後は、長期強度、耐久性の検討を行う予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、PKS 燃焼灰は㈱リュウクス、高炉スラグ微粉末は、日鉄高炉セメント(株)よりご提供頂いた。ここに記して感謝の意を述べる。

## 参考文献

- 1) 環境省：環境白書(第2章)平成23年度、[https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h24/pdf/2\\_1.pdf](https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h24/pdf/2_1.pdf) (2024年11月15日閲覧)
- 2) 沖縄県：沖縄県廃棄物処理計画(第5期) <https://www.pref.okinawa.jp/> (2024年11月15日閲覧)
- 3) 株式会社バイオアパタイト HP: <https://bioapatite.jp/> (2024年11月15日閲覧)
- 4) 田恵太, 松永久宏, 吉澤千秋, 小泉公志郎, 皆川浩, 久田真: アルカリ活性剤のモルタルへの高炉スラグ細骨材の適用性に関する基礎的検討(Journal of the Society of Materials Science, Japan), Vol. 71, No. 3, pp. 311-318, Mar. 2022
- 5) J. S. Van Deventer, J. L. Provis, P. Duxson and D. G. Brice : Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials, Waste and Biomass Valorization, Vol.1, No.1, pp.145-155, 2010

## イグサのリグニンを利用したボタニカルコンクリートの基礎研究

琉球大学 ○徳盛翔, 富山潤, 琉球大学大学院 宮本祐香,  
(株)興洋エンジニアリング 宮城敏明, 琉球大学総合技術部 花城有人

### 1. はじめに

近年, 建設業界においては持続可能性や環境負荷低減が重要な課題となっており, 従来のセメント系材料に代わる新たなエコマテリアルの開発が求められている. 一方でイグサは, 畳表や工芸品などに用いられてきたが, 畳の製造過程で総使用量に対して40%以上のイグサが廃棄されているという現状がある<sup>1)</sup>. そこで本研究では, イグサを用いた植物性コンクリート(ボタニカルコンクリート)の強度特性, 耐水性に関する検討を行った. 宮本らによる先行研究では, ベチバーを用いたボタニカルコンクリートにおいて耐水性に課題があると結論付けられている.<sup>2)</sup> また本研究にて, イグサを用いたボタニカルコンクリートにおいても耐水性を十分確保できなかったため, 本研究では, リグニンを多く含んでいるシロアリの排泄物(以下, シロアリリグニン)の粉末を植物粉末と混ぜ合わせることで耐水性の向上を試みた.

### 2. 実験方法

#### 2.1 ボタニカルプレート(植物粉末のみ)

##### (1) 強度特性評価(曲げ強度)

試験体は植物粉末を金型に入れ, 熱プレスすることで作製する. 温度, 圧力, 時間のそれぞれをパラメータに作製し, 曲げ試験機で曲げ強度試験を行った. 曲げ強度の目標として, 一般的なパーティクルボードにおける曲げ強度(18N/mm<sup>2</sup>以上)を目標値とした. 試験体は各条件に付き 3 個ずつ作製した. 試験体作製条件は以下のとおりである.

ケース 1 (温度条件, 固定: 時間 5 分, 圧力 17.5MPa)  
50°C, 100°C, 160°C, 180°C, 200°C (5 水準)

ケース 2 (圧力条件, 固定: 時間 5 分, 温度 180°C)  
10.5MPa, 17.5MPa, 35.1MPa (3 水準)

ケース 3 (時間条件, 固定: 温度 180°C, 圧力 17.5MPa)  
3 分, 5 分, 7 分, 10 分, 15 分 (5 水準)

以上の条件で試験体を作製し, 曲げ強度に対する基礎的検討を行った. 曲げ試験機を写真-1, 作製した試験体を写真-2 に示す.



写真-1 曲げ試験機

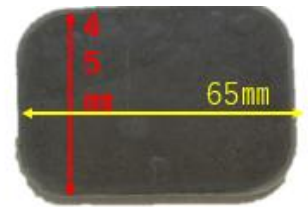


写真-2 試験体

##### (2) 耐水性評価

イグサ粉末を使用したボタニカルプレートの耐水性を評価するために, JISA 5908 に沿って吸水試験を実施した. 耐水性の目標として, パーティクルボードにおける吸水厚さ膨張率(24 時間浸漬後 12%以下)を目標値とした. 試験前の試験体の厚さを $t_1$ , 試験後の試験体の厚さを $t_2$ とし, 吸水厚さ膨張率 $t$ を式(1)より求めた.

$$t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (1)$$

#### 2.2 ボタニカルコンクリート(植物粉末+廃コンクリート粉末)

##### (1) 強度特性評価(曲げ強度)

イグサ粉末と廃コンクリート粉末(以下, 廃コン)を混合したボタニカルコンクリートの曲げ強度の評価を行った. イグサ粉末と廃コンクリートの混合比率は, 質量比 10:0, 7:3, 5:5, 4:6 の 4 配合とした. 試験体作製条件は 2.1 の結果を参考に温度 180°C, 圧力 17.5MPa, 時間 5 分とした.

##### (2) 耐水性評価

イグサ粉末と廃コン粉末を混合したボタニカルプレートの耐水性の検討として, 2.1(2)と同様に吸水試験を実施した. 試験は質量比 7:3, 5:5 の 2 配合とした.

キーワード: イグサ, リグニン, ボタニカルコンクリート, 曲げ強度, 耐水性

連絡先: 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース  
建設材料学研究室 E-mail: [e225536@cs.u-ryukyu.ac.jp](mailto:e225536@cs.u-ryukyu.ac.jp)

## 2.3 シロアリリグニンによる耐水性改善

シロアリリグニン粉末を混合したボタニカルコンクリートの耐水性の検討として 2.1 (2) と同様に吸水試験を実施した。シロアリリグニンを 250 $\mu$ m 以下と 500 $\mu$ m 以下にふるい分けたものの 2 種類を、それぞれイグサ粉末とシロアリリグニン粉末の質量比 7:3 で混合して作製したもので実施した。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 ボタニカルプレート

図-1 に温度をパラメータ(ケース 1)にしたときの曲げ強度試験の結果を示す。図より、温度と曲げ強度は相関関係を示し、180 $^{\circ}$ C以上では赤線で示す目標強度(18N/mm $^2$ )を大きく上回っていることが分かる。一方でケース 2 およびケース 3 では、曲げ強度に顕著な変化は見られなかった。図-2 に吸水試験の結果を示す。図より、浸漬 1440 分後(24 時間)の吸水厚さ膨張率が非常に高く、赤線で示す目標値(12%以下)を満足しなかった。

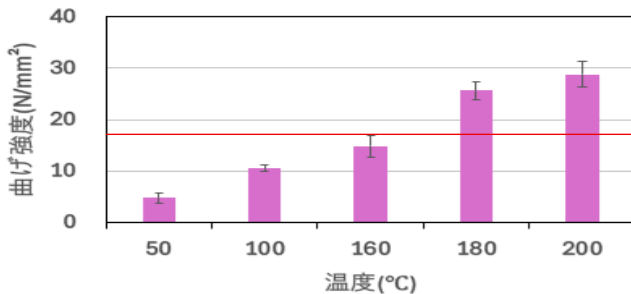


図-1 温度をパラメータとした条件

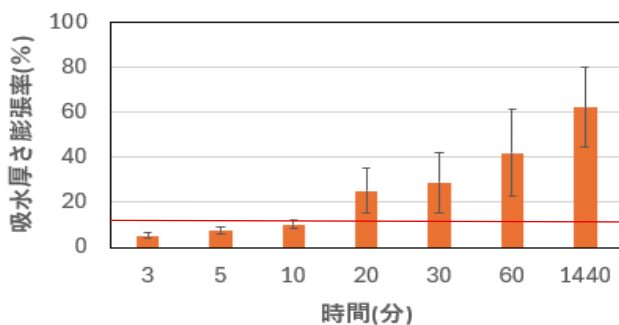


図-2 吸水厚さ膨張率

### 3.2 ボタニカルコンクリート

図-3 にイグサ粉末と廃コン粉末の配合割合ごとの曲げ強度を示す。この図より、廃コンの混合比率が増すにつれ強度は低下するが、5:5 の比率までは目標強度(18N/mm $^2$ )を満足する結果を得た。一方、耐水性に関しては 1440 分後(24 時間)の吸水厚さ膨張率が、7:3 の比率で約 38%、5:5 の比率で約 29%となり、目標値(12%未満)に達することができなかった。

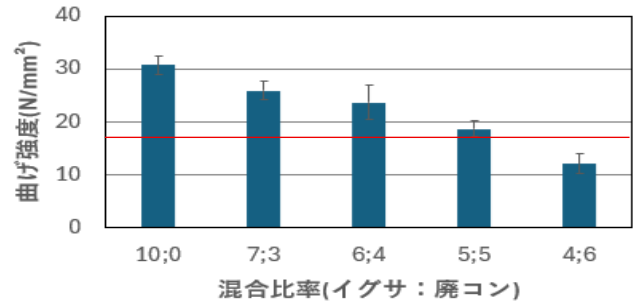


図-3 ボタニカルコンクリートの曲げ強度

### 3.3 シロアリリグニンによる耐水性改善

図-4 はイグサのみ、250 $\mu$ m 以下のシロアリリグニン混合、500 $\mu$ m 以下のシロアリリグニン混合の 3 種類のボタニカルプレートの吸水厚さ膨張率の結果を比較した図である。図より、基準値は満足することはできなかったが、シロアリリグニンを混合することにより耐水性が大きく改善できることが確認できた。

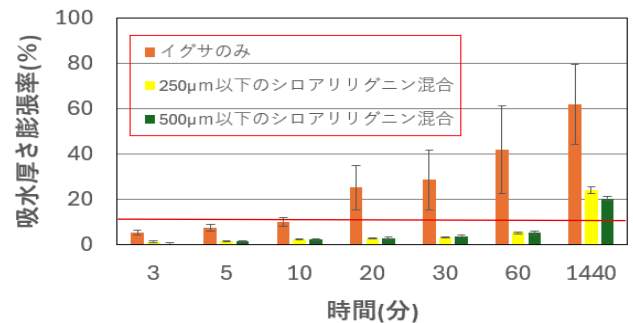


図-4 シロアリリグニン混合の吸水厚さ膨張率

## 4. まとめ

本研究では、イグサを原料としたボタニカルプレートおよびボタニカルコンクリートの曲げ強度と耐水性の評価を行った。曲げ強度については十分な水準を示した。耐水性についてはシロアリリグニンを混和することにより顕著な改善効果が認められた。謝辞：琉球大学研究共創機構 地域連携推進室特任准教授 宮國泰史先生にシロアリコロニーの採取についてご指導頂いた。JSPS 科研費 JP24K07621 (代表：富山潤) および令和 7 年度沖縄イノベーション・エコシステム共同研究推進事業「シーズ育成型」の助成を受けて実施した。ここに記して感謝の意を述べる。

### 参考文献

- 1) TATAMI ReFAB PROJECT.AWRD, <https://awrd.com/creatives/detail/14954869>
- 2) 宮本裕香, 富山潤, 桐野龍, 諏訪竜一: ベチバリーグニンを利用したボタニカルコンクリートの基礎研究, コンクリート年次論文集, Vol.47, No.1, p738-743, 2025

## 一般廃棄物由来 OHD 焼却灰を用いたジオポリマーモルタルに関する基礎的研究

琉球大学大学院 ○志堅原悠太, 富山潤, 比屋根方新

### 1. はじめに

近年, カーボンニュートラルに向けた取組みが進められており, セメント・コンクリート分野においても CO<sub>2</sub> 排出量削減が重要な課題である<sup>1)</sup>。このような背景から, ポルトランドセメントを用いず, アルミノシリケート粉末 (活性フィラー) とアルカリ活性剤の反応により硬化体を得るジオポリマーは, CO<sub>2</sub> 排出量削減の観点から注目されている<sup>2)3)</sup>。ジオポリマーは副産物系材料の有効利用が可能である一方, 原材料の種類や粉体特性, 配合条件によりフレッシュ性状および強度発現が大きく変化し, 適用にあたっては材料特性に応じた配合設計が必要となる。特にモルタル・コンクリートとしての施工性確保の観点から, 流動性と強度を両立させる配合条件の整理が重要である。また, 島嶼地域である沖縄県においては資源制約が大きく, 廃棄物の再資源化と地域内利用を含む循環型資源利用の構築が求められている<sup>4)</sup>。

一方, 廃棄物処理プロセスの高度化に伴い, 処理残渣として無機質粉体 (再生セラミック) の建設材料への利用が期待されている。本研究で対象とする OHD (Hydro Oxygen Destroyer) 処理は, 強い酸化作用を利用して有機物を分解し, 無機成分を主体とする粉体を得る処理技術の一つである。OHD 処理により得られる焼却灰は, 従来の活性フィラー (フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末等) と起源や性状が異なる可能性があり, ジオポリマー材料として利用するためには, フレッシュ性状および強度特性の基礎的整理が不可欠である。今後, 地域内資源循環の観点からも, こうした処理残渣の建設材料利用に関する知見の蓄積が求められる。

そこで本研究では, 一般廃棄物由来の OHD 処理残渣 (以下, OHD 焼却灰) を活性フィラーとして用いたジオポリマーモルタルの流動性および圧縮強度 (材齢 1 日・7 日) を評価する。さらに既往研究で用いら

れた PKS 燃焼灰系配合と比較し, 材料特性差がフレッシュ性状および強度発現に及ぼす影響を整理する。加えて, OHD 焼却灰系における流動性が支配的課題となることを踏まえ, 分散剤添加量, 細骨材率 (s/a), W/B, およびアルカリ活性剤量 (NaOH) 等の配合因子が流動性と強度に及ぼす影響を系統的に検討し, 流動性改善に向けた基礎的知見を得ることを目的とする。

### 2. 使用材料

本研究では, 活性フィラーとして OHD 焼却灰, 高炉スラグ微粉末 (BS) およびシリカフューム (SF) を使用した。アルカリ活性剤には水酸化ナトリウム (NaOH) を用い, 流動性および可使時間確保を目的としてジオポリマー用混和剤 (アニオン系重縮合物, 以下, 分散剤) を併用した。細骨材には JIS R 5201 に規定される標準砂を使用した。

#### 2.1 OHD 焼却灰の概要および基本性状

OHD 焼却灰は, OHD (Hydro Oxygen Destroyer) 処理により得られる一般廃棄物由来の無機質粉体であり, 研究用に提供を受けた。本研究で示す各試験には 2025 年 8 月 20 日受領ロットを使用した。受領時は, 複数袋であったため, 使用前に全袋を混合して均一化した。モルタル試験には原則として受領状態の粉体を用い, 化学組成等の分析に使用する試料は, 含水の影響を避ける目的で 100°C で 24 時間乾燥させた。

OHD 焼却灰の密度, 比表面積および強熱減量 (ig.loss) を表-1 に示す。比較のため, PKS 燃焼灰, BS および SF の値を併記した<sup>5)</sup>。OHD 焼却灰は PKS 燃焼灰に比べて強熱減量が大きく, 粉体特性の違いがフレッシュ性状および反応挙動に影響する可能性がある。

キーワード: ジオポリマー, OHD 焼却灰, 高炉スラグ微粉末, モルタルフロー, 圧縮強度

連絡先: 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地 琉球大学大学院理工学研究科工学専攻社会基盤デザインプログラム 建設材料学研究室 E-mail: shikembaru\_snpp@cs.u-ryukyu.ac.jp



表－1 粉体の性状

材料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積	ig.loss(%)
OHD 焼却灰	2.38	2230cm <sup>2</sup> /g	10.1
PKS 燃焼灰	2.37	3033cm <sup>2</sup> /g	6.1
BS	2.91	4100cm <sup>2</sup> /g	-0.2
SF	2.25	17.7m <sup>2</sup> /g	1.3

## 2.2 化学組成

OHD 焼却灰, PKS 燃焼灰, BS および SF の化学組成を表－2 に示す。OHD 焼却灰は SiO<sub>2</sub> および Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が相対的に少なく CaO を多く含むため、反応に寄与する成分を補う目的で BS および SF を併用した。なお、本研究では材料間の組成差の把握を目的として、主要成分を整理した。

表－2 使用材料の化学組成 (%)

材料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> +K <sub>2</sub> O	Cl	ig.loss
OHD 焼却灰	23.20	5.59	36.30	9.66	1.79	10.1
PKS 燃焼灰	50.90	5.25	24.60	N.D.	1.33	6.1
BS	35.03	14.13	44.34	0.28	N.D.	-0.2
SF	95.29	N.D.	N.D.	N.D.	0.07	1.3

## 2.3 アルカリ活性剤および分散剤

NaOH および分散剤は固形材料であり、活性フィラーの単位量 (B) に対する所定の添加率 (B×%) から添加量を算定した。各材料は所定量の水に溶解して溶液として添加した。

## 3. 試験体作製および試験方法

練混ぜには容量 4 L のホバートミキサーを用いた。OHD 焼却灰, BS および SF を 30 秒空練り後、所定量の溶液 (NaOH, 分散剤を溶解) を加えて 30 秒間練り混ぜた。次いで標準砂を投入し 1 分間練り混ぜ、30 秒間かき落とし後、さらに 1 分 30 秒間練り混ぜた。練混ぜ直後にモルタルフロー試験 (JIS R 5201) を実施し、φ5×10 cm 円柱供試体を作製した。供試体は封緘養生 (20℃) とし、圧縮強度試験は所定材齢 (1 日, 7 日) に JIS R 5201 に準拠して実施した。

## 4. 実験結果および考察

本研究では、既往研究 (PKS 燃焼灰系) における目標性能を参考に、材齢 7 日の目標圧縮強度を 24 N/mm<sup>2</sup> 以上、目標フロー値 (15 打) を 200 mm 以上と設定した。まず、材料の硬化体としての成立性を確

認するため、圧縮強度を優先して活性フィラー比

(OHD 焼却灰:BS:SF) を検討し、基準配合 (Ref) を決定した。次いで、Ref を基に、分散剤添加量

(DA), 細骨材率 (s/a), W/B をパラメータとして流動性改善の検討を行った。さらに、得られた結果を PKS 燃焼灰系の既往結果と比較し、活性フィラーの違いがフレッシュ性状および強度発現に及ぼす影響について考察した。

### 4.1 目標圧縮強度 (材齢 7 日 24 N/mm<sup>2</sup> 以上)

#### (1) 配合

材齢 7 日の圧縮強度 24 N/mm<sup>2</sup> を目標強度として実験を行った。配合設計はコンクリートを想定し、モルタル配合表には粗骨材の単位量を除いた値を示している。

活性フィラーの総単位量を 500 kg/m<sup>3</sup> に固定し、OHD 焼却灰, BS および SF の質量混合比を変化させた 3 配合を検討した。既往研究 (PKS 燃焼灰系) で採用された配合比 (300:150:50 kg/m<sup>3</sup>) を基準とし、OHD 焼却灰の割合を増加させた 350:100:50 kg/m<sup>3</sup> (No.1), 同一割合の 300:150:50 kg/m<sup>3</sup> (No.2), および BS の割合を増加させた 250:200:50 kg/m<sup>3</sup> (No.3) とした。配合を表－3 に示す。なお、NaOH 添加率, 分散剤添加率および総水量は既往研究に倣い、同一添加率で設定した。

表－3 配合表 (単位量 kg/m<sup>3</sup>)

No.	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					添加剤 (B×%;固形)	
		W	OHD	BS	SF	S	DA	AC
1	32	160	350	100	50	709	1.0	4.4
2	32	160	300	150	50	802	1.0	4.4
3	32	160	250	200	50	807	1.0	4.4

W:水, B:バインダー (OHD+BS+SF), OHD:OHD 焼却灰, BS:高炉スラグ微粉末, SF:シリカフューム, S:細骨材, DA:分散剤, AC:アルカリ活性剤, 細骨材率:49%, 消泡剤 (固形):B×1.0%

#### (2) 実験結果

図－1 に配合 No.1~No.3 のモルタル供試体における材齢 1 日および 7 日の圧縮強度を示す。併せて、既往研究で報告されている PKS 配合の結果を引用し、比較対象として示した。図－1 より、OHD 焼却灰系では、材齢 7 日において No.1 (16.99 N/mm<sup>2</sup>), No.2 (22.27 N/mm<sup>2</sup>), No.3 (26.35 N/mm<sup>2</sup>) となり、BS の配合割合を増加させるほど圧縮強度が増加した。No.3 は材齢 7

日に目標強度  $24 \text{ N/mm}^2$  を達成したため、以降の検討では No.3 を Ref とする。

一方、既往研究の PKS 配合 (PKS:BS:SF=300:150:50) は材齢 7 日に  $29 \text{ N/mm}^2$  であり、同一割合の No.2 (OHD:BS:SF=300:150:50) と比較して強度が高い。したがって、OHD 焼却灰系では PKS 燃焼灰系と同一の活性フィラー比を適用しても同等の強度発現が得られず、材齢 7 日の強度確保には BS 比率を相対的に高める必要があることが示された。

材齢 1 日においては No.2 および Ref (No.3) が PKS 配合より高い値を示した。OHD 焼却灰系では初期強度が得られやすい一方、材齢 7 日における強度発現は BS 比率の影響が大きい傾向が確認された。

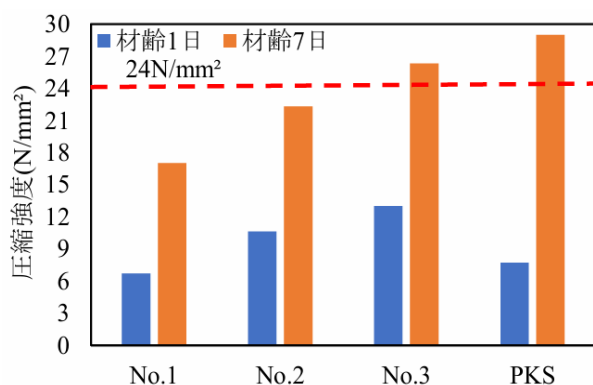


図-1 圧縮強度試験結果

#### 4.2 目標フロー値 (15 打 200mm 以上)

図-2 に 0 打および 15 打フロー値を示す。OHD 焼却灰系の 15 打フローは No.1 で 131 mm, No.2 で 140 mm, Ref (No.3) で 138 mm であり、配合間の差は小さく、低い値で頭打ちとなった。0 打フローにおいても同様に、No.1 で 104 mm, No.2 で 103 mm, Ref で 102 mm と配合間差は小さい。一方、PKS 配合の 15 打フローは 340 mm (0 打フロー: 315 mm) であり、OHD 焼却灰系と比較して大幅に高い。以上より、OHD 焼却灰系は PKS 燃焼灰系に比べて流動性が著しく低く、配合設計における支配的課題は流動性の確保であることが確認された。

なお、OHD 焼却灰系と PKS 燃焼灰系でフロー値に大きな差が生じた要因を把握するため、両粉体の粒度分布を測定した。図-3 に累積粒度分布 (体積基準) を示し、代表粒径として d10, d50, d90 (累積体積分率 10, 50, 90% に対応する粒径) を図中に併記した。

これらの数値を表-4 に示す。OHD 焼却灰は PKS 燃焼灰と比較して d50 および d90 が大きく、粒度が相対的に粗い傾向を示した。粒度の粗大化は粉体の充填性や有効水量に影響し、ペーストの流動性低下を招く要因となり得る。したがって、OHD 焼却灰系でフローが低い値で頭打ちとなったことには、粉体物性 (粒度分布等) の違いが関与している可能性がある。

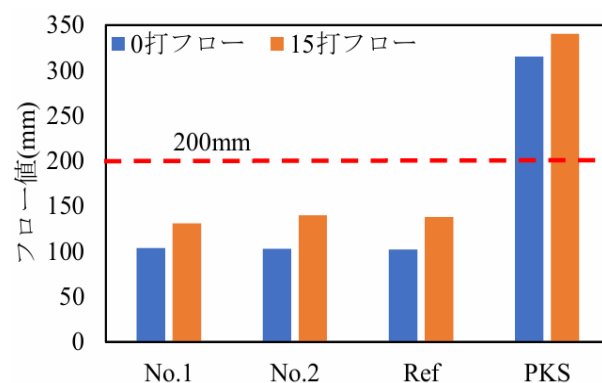


図-2 モルタルフロー試験結果

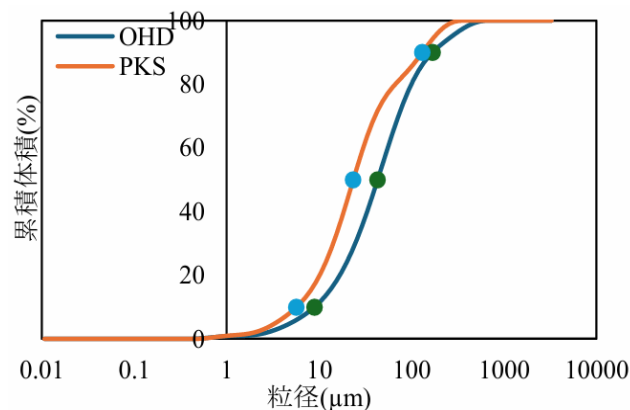


図-3 OHD 灰および PKS 灰の累積粒度分布

表-4 粒度分布の代表粒径

試料	d10(μm)	d50(μm)	d90(μm)
OHD 焼却灰	8.94	43.08	169.35
PKS 燃焼灰	5.72	23.54	131.38

#### 4.3 流動性改善の検討 (分散剤, s/a, W/B)

OHD 焼却灰系における流動性確保を目的として、Ref (No.3) を基に配合因子の影響を検討した。本節では分散剤添加率 (DA), 細骨材率 (s/a) および W/B の影響を示す。各検討は原則として 1 因子のみを変更し、フロー (0 打・15 打) および圧縮強度 (材齢 1 日・7 日) により評価した。Ref~WB40 の配合条件および結

果を表-5 に示す。

分散剤添加量を 1.0% (Ref) から 2.0% (DA2.0) および 3.0% (DA3.0) へ増加させた場合、0 打フローは 108~109 mm, 15 打フローは 150~155 mm であり、流動性の改善は限定的であった。一方、材齢 7 日の圧縮強度は DA2.0 で 27.93 N/mm<sup>2</sup>, DA3.0 で 29.27 N/mm<sup>2</sup> となり、Ref (26.35 N/mm<sup>2</sup>) と同等以上の強度が得られた。

s/a を 49% (Ref) から 52% (SA52) または 46% (SA46) へ変更した場合も、0 打フローは 104~109 mm, 15 打フローは 145~148 mm となり、顕著な改善は認められなかった。材齢 7 日の圧縮強度は SA52 で 25.79 N/mm<sup>2</sup>, SA46 で 23.84 N/mm<sup>2</sup> であり、s/a の変更は流動性改善に寄与しないだけでなく、条件によっては強度低下を伴うことが示された。

一方、W/B を 32% (Ref) から 36% (WB36), 40% (WB40) へ増加させた場合、0 打フローは 127 mm, 148 mm, 15 打フローは 167 mm, 191 mm まで増加し、

流動性改善に対して W/B 増加が有効であることが確認された。しかし、材齢 7 日の圧縮強度は WB36 で 23.87 N/mm<sup>2</sup>, WB40 で 19.73 N/mm<sup>2</sup> となり、W/B 増加は強度低下を伴う傾向が明確となった。

以上より、本研究範囲では分散剤増量および s/a 変更の流動性改善効果は限定的であり、W/B 増加が最も直接的にフローを改善する一方、目標強度 (材齢 7 日 24 N/mm<sup>2</sup> 以上) とのトレードオフが生じることが示された。そこで次章では、W/B に依存しない流動性改善の可能性および流動性支配因子の整理を目的として、NaOH 添加率、粉体混合比、ならびに W/B=42% 条件に関する追加検討の結果を示す。

## 5. 追加検討 (流動性支配因子の整理)

流動性支配因子の整理を目的として、Ref に対し (i) NaOH 添加率の低減, (ii) 粉体混合比 (OHD/BS 比) の拡張, (iii) W/B=42% 条件下での NaOH 添加率変化,

表-5 配合条件別の実験結果

配合	変更因子	OHD:BS:SF (kg/m <sup>3</sup> )	W/B (%)	s/a (%)	DA (B×%)	NaOH (B×%)	0 打 (mm)	15 打 (mm)	1 日 (N/mm <sup>2</sup> )	7 日 (N/mm <sup>2</sup> )
Ref	基準(No.3)	250:200:50	32	49	1.0	4.4	102	138	13.02	26.35
DA2.0	分散剤増	250:200:50	32	49	2.0	4.4	109	150	9.76	27.93
DA3.0	分散剤増	250:200:50	32	49	3.0	4.4	108	155	11.36	29.27
SA52	s/a 増	250:200:50	32	52	1.0	4.4	104	145	13.43	25.79
SA46	s/a 減	250:200:50	32	46	1.0	4.4	109	148	13.29	23.84
WB36	W/B 増	250:200:50	36	49	1.0	4.4	127	167	11.20	23.87
WB40	W/B 増	250:200:50	40	49	1.0	4.4	148	191	9.27	19.73

表-6 配合条件別の実験結果 (追加検討)

配合	変更因子	OHD:BS:SF (kg/m <sup>3</sup> )	W/B (%)	s/a (%)	DA (B×%)	NaOH (B×%)	0 打 (mm)	15 打 (mm)	1 日 (N/mm <sup>2</sup> )	7 日 (N/mm <sup>2</sup> )
Na3.4	NaOH 低減	250:200:50	32	49	1.0	3.4	109	144	N.D.	24.50
Na2.4	NaOH 低減	250:200:50	32	49	1.0	2.4	112	157	N.D.	22.58
Mix200/250	粉体比変更	200:250:50	32	49	1.0	4.4	109	142	N.D.	28.22
Mix150/300	粉体比変更	150:300:50	32	49	1.0	4.4	110	146	N.D.	32.73
WB42	W/B 増	250:200:50	42	49	1.0	4.4	161	213	N.D.	19.08
WB42+Na5.4	W/B 増+ NaOH 増	250:200:50	42	49	1.0	5.4	148	193	N.D.	16.81
WB42+Na6.4	W/B 増+ NaOH 増	250:200:50	42	49	1.0	6.4	129	171	N.D.	14.75

の3系列の追加検討を実施した。追加検討の配合条件および結果を表-6に示す。なお、追加検討では主として材齢7日の圧縮強度を指標として比較した。

### 5.1 NaOH 添加率低減の影響

OHD 焼却灰系ではフローが低い値で頭打ちとなることから、NaOH 添加率を低減により反応進行を緩和し、流動性改善の可能性を検討した。W/B および粉体混合比は Ref と同一とし、NaOH 添加率のみを 4.4% (Ref) から 3.4% (Na3.4) および 2.4% (Na2.4) へ低減させた (表-6)。

Na3.4 および Na2.4 の 15 打フローはそれぞれ 144 mm, 157 mm であり、Ref (138 mm) と比較して増加した。0 打フローも 109~112 mm となり Ref(102 mm) より増加した。一方、いずれも目標フロー 200 mm には到達しなかった。材齢 7 日の圧縮強度は Na3.4 で 24.50 N/mm<sup>2</sup> (目標達成), Na2.4 で 22.58 N/mm<sup>2</sup> (未達) であった。以上より、本研究条件では NaOH 添加率の過度な低減は強度確保を困難にする可能性があり、流動性と強度の両立点として NaOH 添加率 3.4% 程度が一つの候補となることが示された。

### 5.2 粉体混合比 (OHD/BS 比) の拡張

粉体側条件の影響を明らかにするため、活性フィラー総量および W/B を一定として、OHD 焼却灰と BS の混合比を変更した。Ref (OHD:BS:SF=250:200:50) に対し、OHD 焼却灰の割合を低減し BS 割合を増加させた Mix200/250 および Mix150/300 を作製した (表-6)。

Mix200/250 および Mix150/300 の 15 打フローはそれぞれ 142 mm, 146 mm であり、Ref (138 mm) と同程度であった。一方、材齢 7 日の圧縮強度は 28.22 N/mm<sup>2</sup>, 32.73 N/mm<sup>2</sup> となり、BS 割合の増加に伴い強度が大きく向上した。したがって、本研究範囲では粉体混合比の変更は流動性改善には有効でないが、強度確保には BS 比率が支配的であることが示唆された。

### 5.3 W/B=42%条件下での NaOH 添加率変化の影響

本節では、W/B 増加によりフローが確保された条件 (W/B=42%) において NaOH 添加率を変化させ、溶液条件が流動性および強度に及ぼす影響を整理した。

W/B=42%へ増加させた WB42 では、0 打フロー161 mm, 15 打フロー213 mm となり、目標フロー200 mm

を満足したが、材齢 7 日の圧縮強度は 19.08 N/mm<sup>2</sup> となり、W/B 増加による流動性改善は強度低下を伴うことが確認された (表-6)。

W/B=42%条件下で NaOH 添加率を増加させた WB42+Na5.4 および WB42+Na6.4 では、15 打フローは 193 mm, 171 mm へ低下し、材齢 7 日の圧縮強度も 16.81 N/mm<sup>2</sup>, 14.75 N/mm<sup>2</sup> と低下した。以上より、本研究範囲では NaOH 添加率の増加は流動性および強度の改善に寄与しないことが示された。

### 5.4 追加検討結果の整理

図-4 に、各種検討における 15 打フローと材齢 7 日圧縮強度の関係を示す。W/B 増加系はフローを大きく改善する一方で強度低下を伴い、トレードオフが明確である。粉体混合比の変更は強度を増加させるがフローはほぼ変化せず、NaOH 添加率低減はフローをわずかに改善するものの目標フローには到達しない。分散剤増量および s/a 変更の効果は限定的であった。

以上より、流動性改善には W/B 増加が最も有効である一方、強度確保との両立が課題であり、流動性の頭打ちには粉体物性に起因する有効水量低下等が関与している可能性がある。

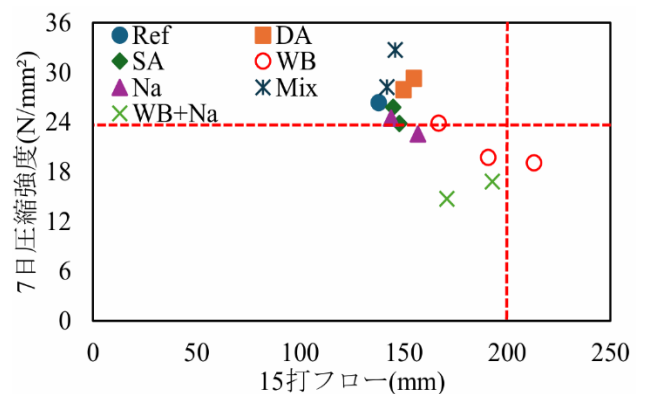


図-4 各配合におけるフローと強度の関係

## 6. CO<sub>2</sub> 排出量削減効果

### 6.1 算定方法及び条件

本節では、本研究で採用した基準配合 (Ref) について、材料製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を概算し、普通ポルトランドセメント系コンクリート (参考配合) および既往研究 (PKS 燃焼灰系) と比較する。CO<sub>2</sub> 排出量は材料  $i$  の単位量  $m_i$  (kg/m<sup>3</sup>) と CO<sub>2</sub> 排出原単位  $u_i$  (kg-CO<sub>2</sub>/t) の積の総和として式(1)により算定した。

$$E = \sum u_i m_i \times \frac{m_i}{1000} \quad (1)$$



ここに、 $E$  :  $\text{CO}_2$  排出量 ( $\text{kg-CO}_2/\text{m}^3$ ) である。算定はコンクリートを想定し、細骨材 (S) および粗骨材 (G) を含めた。NaOH および分散剤は固形材料として加算し、添加量は結合材量  $B$  ( $=\text{OHD}+\text{BS}+\text{SF}$ ) に対する所定添加率 ( $B\times\%$ ) から算定した。 $\text{CO}_2$  排出原単位は既往研究との比較可能性を確保するため、松本らの算定条件に整合させた (表-7)。なお、PKS 焼却灰は既往研究に倣いカーボンニュートラルとして 0 ( $\text{kg-CO}_2/\text{t}$ ) とした。本研究で用いた OHD 焼却灰についても、廃棄物処理残渣 (副産物) としてカットオフ (0 扱い) を仮定し、比較の基準を統一した。

表-7 材料別  $\text{CO}_2$  排出原単位 ( $\text{kg-CO}_2/\text{t}$ )

材料	$\text{CO}_2$ 排出原単位( $\text{kg-CO}_2/\text{t}$ )
C	762.7
BS	26.5
SF	19.6
S	3.5
G	2.8
NaOH	1200
DA	1880
W	0
PKS 焼却灰	0
OHD 焼却灰	0
C:セメント, BS:高炉スラグ微粉末, SF:シリカフェューム, S:細骨材, G:粗骨材, NaOH:アルカリ活性剤, DA:分散剤, W:水	

## 6.2 配合別 $\text{CO}_2$ 排出量および内訳

表-8 に配合別  $\text{CO}_2$  排出量を示す。Ref は本研究の基準配合 ( $\text{OHD}:\text{BS}:\text{SF}=250:200:50$ ,  $B=500 \text{ kg}/\text{m}^3$ , NaOH 添加率 4.4%, 分散剤添加率 1.0%) であり、細骨材  $S=797 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 粗骨材  $G=853 \text{ kg}/\text{m}^3$  を含む。比較対象として、既往研究の PKS 配合 (松本ら No.1) および参考配合 (普通コンクリート) の  $\text{CO}_2$  排出量を併記した。

表-8 配合別  $\text{CO}_2$  排出量 ( $\text{kg-CO}_2/\text{m}^3$ )

配合	$\text{CO}_2$ 排出量 ( $\text{kg-CO}_2/\text{m}^3$ )	備考
Ref (本研究)	47.26	本研究算定
PKS 配合	45.9	文献値
参考配合 (OPC)	270.5	文献値

表-8 より、Ref の  $\text{CO}_2$  排出量は参考配合に比べて大幅に小さく、概算で約 82.5% の削減に相当することがわかった。

## 7. まとめ

本研究では、OHD 焼却灰を活性フィラーとして用

いたジオポリマーモルタルについて、流動性および圧縮強度を評価し、既往研究 (PKS 焼却灰系) との比較を通じて材料特性差の影響を整理した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 活性フィラー比の検討より、BS 比率の増加に伴い材齢 7 日におけるモルタルの圧縮強度は増加し、 $\text{OHD}:\text{BS}:\text{SF}=250:200:50$  で目標強度  $24 \text{ N}/\text{mm}^2$  以上を満足した。
- 2) OHD 焼却灰系のフロー値は低く頭打ちとなり、分散剤添加量  $\cdot s/a \cdot$  NaOH 添加率低減  $\cdot \text{OHD}/\text{BS}$  比の変更による改善は限定的であった。一方、W/B 増加はフローを改善するが強度低下を伴い、トレードオフが明確となった。
- 3) 粒度分布より、OHD 焼却灰は PKS 焼却灰に比べて  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  が大きく、粉体物性が低流動性に關与している可能性が示唆された。  
また、 $\text{CO}_2$  排出量の概算では、Ref は普通コンクリートの参考配合に比べて約 82.5% の削減に相当した。

## 参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会、カーボンニュートラルを目指すセメント産業の長期ビジョン  
<https://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/220324.html>  
(2025 年 12 月 16 日確認)
- 2) 一宮一夫：低炭素で高バインダーとしてのジオポリマー～セメント産業への期待～、セメント・コンクリート, No.890, pp.20-23, 2020
- 3) 原田耕司、一宮一夫、津郷俊二、池田攻：ジオポリマーの諸性質に関する一考察、コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1894-1899, 2012
- 4) 沖縄県：沖縄県廃棄物処理計画 (第 5 期) (第 5 章)  
[https://www.pref.okinawa.jp/\\_res/projects/default\\_project/\\_page\\_/001/004/210/shorikeikaku5\\_05.pdf](https://www.pref.okinawa.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/004/210/shorikeikaku5_05.pdf) (2025 年 12 月 11 日閲覧)
- 5) 松本周作、富山潤、入仲良紀、謝花一成：パーム椰子殻焼却灰を使用したジオポリマーモルタルに関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp1177-1182, 2024

## アセチル化木材粉末を用いたボタニカルコンクリートの耐水性向上と強度特性に関する研究

琉球大学大学院 ○宮本祐香 琉球大学 富山潤

(株)興洋エンジニアリング 宮城敏明, 琉球セメント (株) 比屋根方新

### 1. はじめに

ボタニカルコンクリートは環境負荷の低い新素材として期待されている<sup>1)</sup>が、主要材料である植物資源の吸湿性に起因する耐水性の低さが、実用化に向けた大きな課題となっている<sup>1, 2)</sup>。

植物細胞内の親水性水酸基を疎水性のアセチル基に置換するアセチル化処理<sup>3)</sup>は、植物材料の吸湿性を抑制し、耐水性を向上させる手法として知られている。本研究では、ボタニカルコンクリートの耐水性改善におけるアセチル化の有効性を検討することを目的とし、高度なアセチル化処理が施された「アコヤ (以下アセチル化木材)」<sup>4)</sup>の削りカスを用いたボタニカルプレート (植物粉末のみ) とボタニカルコンクリート (植物粉末+廃コンクリート粉末) を製作し、強度特性および耐水性の評価を行った。また、ボタニカルプレートのみ比較対象として、未アセチル化の植物材料の「ベチバー (イネ科)」を用いた耐水試験<sup>2)</sup>を行い、アセチル化木材粉末との比較を行った。

### 2. 使用材料

#### 2.1 アセチル化木材粉末

本研究では、写真-1に示すアセチル化木材を粉末状に粉砕したものを使用し、評価を行った。木材粉末のSEM画像(100倍)を図-1に、木材粉末の粒度分布 (レーザー回折式) を図-2示す。図より、粒径 100  $\mu\text{m}$ 以下の繊維状のことが多いことが確認できる。また、ボタニカルコンクリートの強度や耐水性は、結合材として使用するリグニンの量に影響を受ける。本研究では、山田らによって提案されたTBPH法<sup>5)</sup>によりリグニン含有量を分析した。その

結果を図-3に示す。図より、木材粉末のリグニン含有量は 1g 当たり約 0.24g ほどであり、比較として分析したベチバー (0.36g) より、含有量が少ないことが確認できた。



写真-1 木材粉末

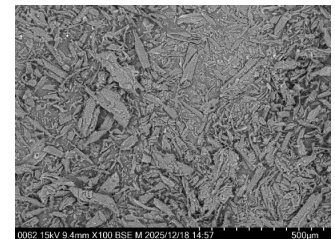


図-1 木材粉末のSEM画像 (100倍)

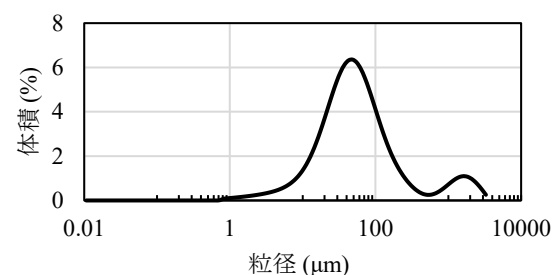


図-2 木材粉末の粒度分布

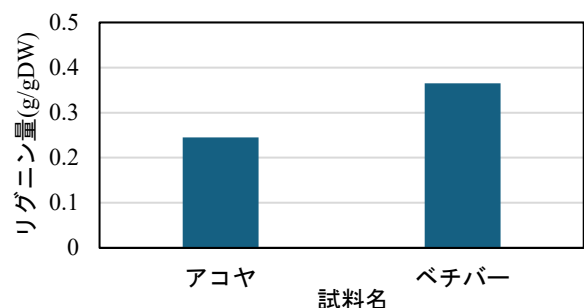


図-3 アコヤとベチバーのリグニン含有量

#### 2.2 廃コンクリート粉末

本研究で使用した廃コンクリート粉末 (以下、廃コン粉末) は、コンクリート橋脚から塩分分析用にコア抜きし、微粉砕した余剰分を使用した。廃コン

キーワード：ボタニカルコンクリート、アセチル化、リグニン、曲げ強度、耐水性

連絡先：〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地 琉球大学大学院理工学研究科システム情報工学プログラム建設材料科学研究室 E-mail: miyamoto\_s2o2@cs.u-ryukyu.ac.jp

粉末の粒度分布(レーザー回折式)を図-4に示す。図より、廃コンの最大粒径は800 $\mu\text{m}$ 程度である。また、主な化学組成は表-1に示す。沖縄の骨材は石灰岩砕石、砕砂が使用されているため、相対的にカルシウムが多いことが分かる。

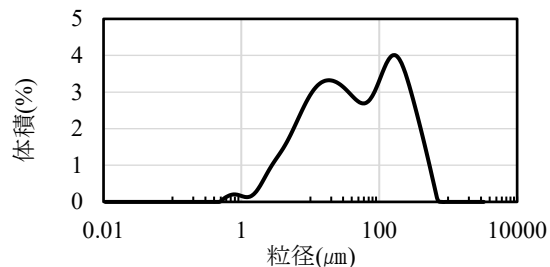


図-4 廃コンクリート粉末の粒度分布

表-1 廃コンクリート粉末の主な化学組成 (EDX-XRF)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
15.3	2.63	5.03	74.6	0.566	15.3	0.142	0.55

## 2.3 ベチバー粉末

ボタニカルプレートの耐水性能の比較対象として、ベチバーを粒径100 $\mu\text{m}$ 以下程度に粉砕したものを使用した。

## 3. 試験体作成方法

アセチル化木材粉末を金型に入れ、熱プレスすることで形成体(以下、試験体)を作製する。使用した熱プレス機(ASONE, H300-15, 0~15t)を写真-2に示す。メス側(縦横65mm×45mm)、オス側(縦横64mm×44mm)の金型を使用し、写真-3に示す形状で厚さが約3mmになるように約10gの試料を金型に詰め作製した。



写真-2 熱プレス機

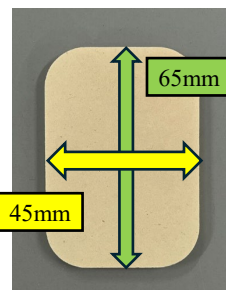


写真-3 作製した試験体

## 4. 実験方法

### 4.1 ボタニカルプレート

### (1) 強度特性評価 (曲げ強度試験)

試験体を温度、圧力、時間のそれぞれをパラメータに作製し、図-5(a)に示す曲げ試験機(卓上型圧縮引張試験機:最大荷重500N)で曲げ強度試験を行った。図-5(b)に曲げ試験模式図を示す。試験体は1つの条件につき、3個作製した。また、載荷速度は10mm/minと設定した。試験体作製条件を以下に示す。

#### ケース1 温度をパラメータとした条件(表-2)

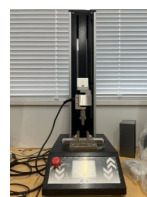
熱プレス時の温度を50 $^{\circ}\text{C}$ 、100 $^{\circ}\text{C}$ 、160 $^{\circ}\text{C}$ 、180 $^{\circ}\text{C}$ 、200 $^{\circ}\text{C}$ の5水準とし、圧力35.1MPa、時間5分を固定とした。

#### ケース2 圧力をパラメータとした条件(表-3)

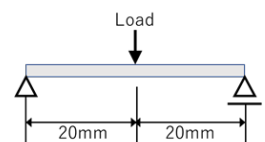
熱プレス時の圧力を10.5MPa、17.5MPa、35.1MPaの3水準とし、温度200 $^{\circ}\text{C}$ 、時間5分を固定とした。なお、圧力の管理は、荷重制御のため3t、5t、10tで載荷した。

#### ケース3 時間をパラメータとした条件(表-4)

熱プレス時の時間を3分、5分、7分、10分の4水準とし、温度200 $^{\circ}\text{C}$ 、圧力35.1MPaを固定とした。



(a) 曲げ試験機



(b) 曲げ試験模式図

図-5 曲げ試験の概要

表-2 作製条件(ケース1)

温度( $^{\circ}\text{C}$ )	圧力(MPa)	時間(分)
50	35.1(10t)	5
100		
160		
180		
200		

表-3 作製条件(ケース2)

温度( $^{\circ}\text{C}$ )	圧力(MPa)	時間(分)
200	10.5(3t)	5
	17.5(5t)	
	35.1(10t)	

表-4 作製条件(ケース3)

温度( $^{\circ}\text{C}$ )	圧力(MPa)	時間(分)
200	35.1(10t)	3
		5
		7
		10

## (2) 耐水性評価

アセチル化木材粉末で作製したボタニカルプレートの耐水性の検討として JIS A 5908 に沿って吸水試験を実施した。なお、耐水性評価の目標設定としてパーティクルボードの基準値（吸水厚さ膨張率）<sup>5)</sup>や既往の研究の値（吸水率）<sup>6)</sup>と比較した。アセチル化木材粉末を使用した試験体は温度 200℃、圧力 35.1MPa、時間 5 分の条件で作製し、ベチバー粉末を使用した試験体は温度 160℃、圧力 35.1MPa、時間 5 分の条件で作製した。試験体 1 体に対して、200mL の水を入れたビーカーを準備し、水中に合計 24 時間浸した。試験開始から 3 分後、5 分後、10 分後、20 分後、30 分後、60 分後、1440 分後（24 時間後）に試験体を水中から取り出して時間計測を中断し、紙製タオルで試験体表面の水分をふき取り、試験体の厚さと質量を計測した。試験体の厚さは試験体を 4 等分する線に合わせて 3 点を計測し、その平均とした。試験前の試験体の厚さを  $t_1$ 、重さを  $m_1$ 、試験後の試験体の厚さを  $t_2$ 、重さを  $m_2$  とし、吸水厚さ膨張率  $t$  と吸水率  $m$  を式(1)、(2)より求めた。

$$t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (1)$$

$$m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

## 4.2 ボタニカルコンクリート

### (1) 強度特性評価（曲げ強度試験）

4.1 で行った試験結果をもとに、アセチル化木材粉末に廃コン粉末を混合したボタニカルコンクリートの曲げ強度の評価を行った。アセチル化木材粉末と廃コン粉末の混合比率は、質量比 10:0、7:3、6:4、5:5、4:6、3:7 の 6 配合とした。試験体作製の温度、圧力、時間の条件は、4.1 の結果を参考に温度 200℃、圧力 35.1MPa、時間 5 分とした。試料は、アセチル化木材粉末と廃コン粉末を計量後に 2 分程度かき混ぜて混合した。比較に用いた配合条件 10:0 の曲げ強度の結果は、4.1 の試験で得たデータを使用した。写真-4 に作製したボタニカルコンクリートの試験体を示す。

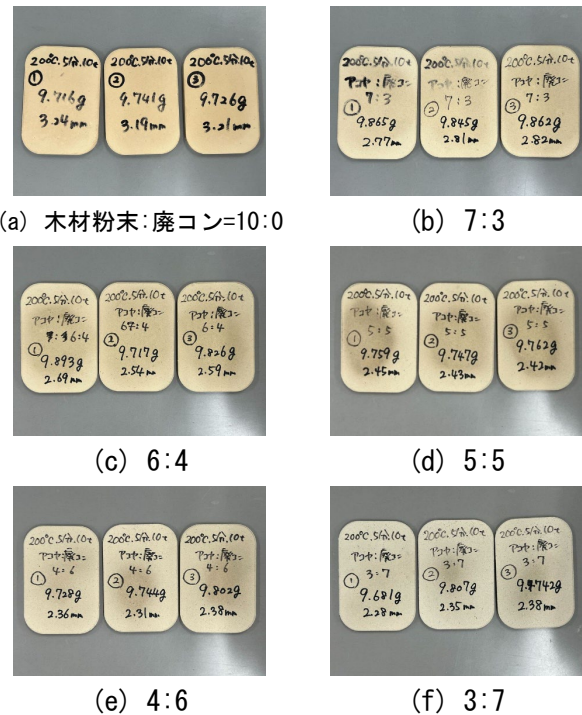


写真-4 ボタニカルコンクリート試験体

## (2) 耐水性評価

ボタニカルコンクリートの耐水性の検討として、ボタニカルプレートと同様に JIS A 5908 に準じて吸水試験を実施した。試験方法は 4.1(2)と同様に行い、吸水厚さ膨張率  $t$  と吸水率  $m$  を算出した。耐水性評価の目標設定も同様とした。

## 5. 結果及び考察

### 5.1 ボタニカルプレート

#### (1) 強度特性評価（曲げ強度試験）

##### a) 温度をパラメータとした条件（ケース 1）

曲げ強度試験結果を図-6 に示す。この図より、温度が高くなるに従い、曲げ強度が高くなることが確認できた。

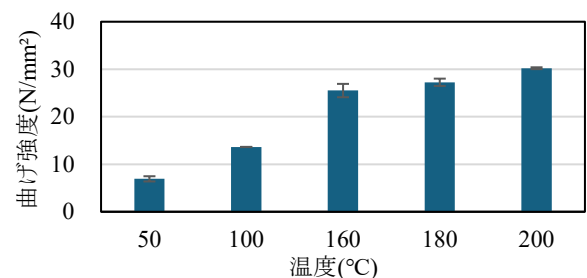


図-6 曲げ強度試験結果（ケース 1）

##### b) 圧力をパラメータとした条件（ケース 2）



曲げ強度試験結果を図-7に示す。図より、圧力の増加に伴い曲げ強度は向上する傾向が認められたが、温度条件ほどの明確な差は見られず、強度は約27~30N/mm<sup>2</sup>の範囲であった。

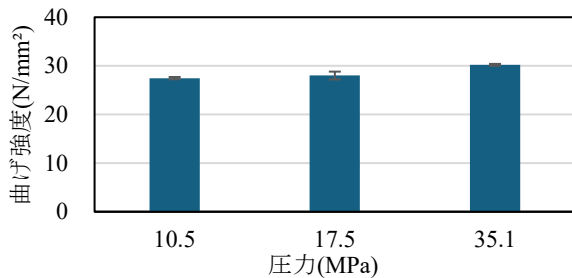


図-7 曲げ強度試験結果（ケース2）

#### c) 時間をパラメータとした条件（ケース3）

曲げ強度試験結果を図-8に示す。図より、プレス時間を5分以上とすることで、曲げ強度は約30N/mm<sup>2</sup>に達し、安定した強度発現が得られることがわかる。これらの結果を踏まえ、以降の検討ではプレス時間5分を試験体作製条件として採用した。

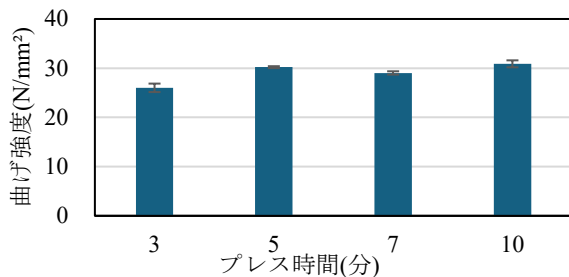


図-8 曲げ強度試験結果（ケース3）

#### d) 密度と曲げ強度の関係

ケース1~3で作製した試験体の密度と曲げ強度の関係を図-9に示す。いずれの条件においても、密度の増加に伴い曲げ強度が向上する傾向が認められた。一方、100℃で作製した試験体は近似曲線から外れる挙動を示した。これは、リグニンの軟化点が約160℃であることに起因すると考えられる。

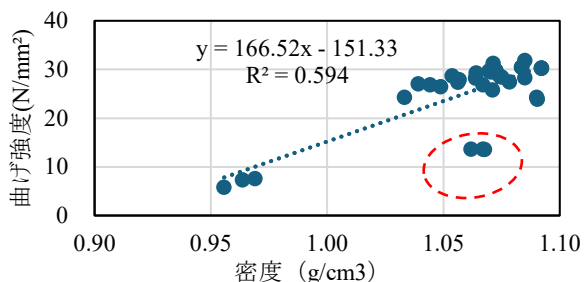
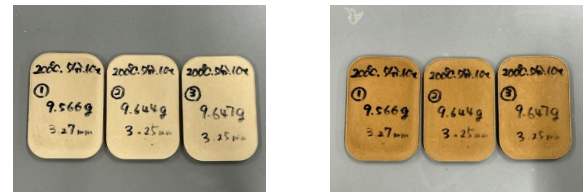


図-9 密度-曲げ強度

#### (2) 耐水性評価

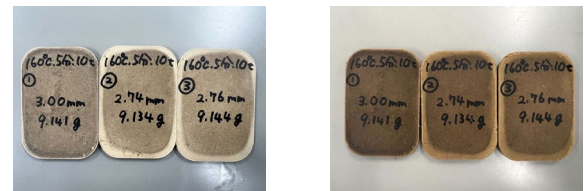
写真-5 および写真-6に、それぞれアセチル化木材およびベチバーを用いた試験体の吸水試験前後の様子を示す。また、図-10に吸水厚と膨張率、図-11に吸水率の変化を示し、赤線はパーティクルボードの基準値を示す。アセチル化木材試験体の浸漬24時間後における吸水厚と膨張率は約2.8%、吸水率は約16%であり、JIS A 5908に示される基準値(吸水厚と膨張率12%以下<sup>5)</sup>、吸水率20%以下<sup>6)</sup>)を満足した。一方、比較用に作製したベチバー試験体では、浸漬24時間後の吸水厚と膨張率が約26%、吸水率が約51%と高い値を示した。以上より、植物材料のアセチル化は、ボタニカルプレート<sup>®</sup>の耐水性向上に有効であると考えられる。



(a) 試験前

(b) 試験後

写真-5 吸水試験前後の試験体  
(アセチル化木材粉末)



(a) 試験前

(b) 試験後

写真-6 吸水試験前後の試験体  
(ベチバー粉末)

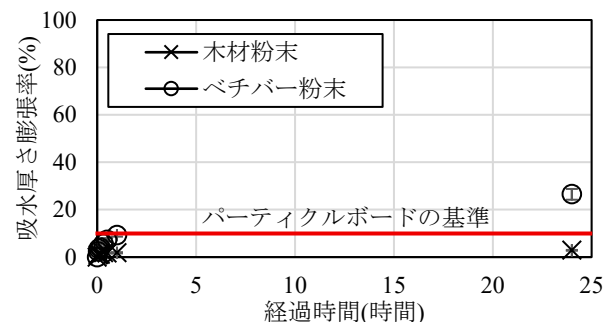


図-10 吸水厚と膨張率

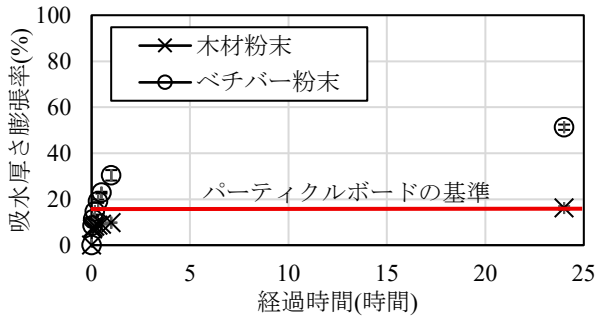


図-11 吸水率

## 5.2 ボタニカルコンクリート

### (1) 強度特性評価 (曲げ強度)

アセチル化木材粉末と廃コン粉末を混合したボタニカルコンクリートの曲げ強度結果を図-12に示す。この結果より、配合割合 5:5 のとき強度が高くなっているものの、廃コン粉末の配合割合が増えるほど、強度が低下する結果となった。配合割合 5:5 で強度が高くなった原因として、リグニンがアルカリ条件下であると溶解しやすくなることが考えられる<sup>1)</sup>。また、図-13に試験体の SEM 画像を示す。色の白い部分が廃コン粉末を、色の黒い部分が隙間を、その他の色の部分がアセチル化木材粉末を示す。配合割合が 10:0 のボタニカルプレートでは、隙間が見られるものの、リグニンの溶解により木材粉末同士が結合していることが分かる。しかし、廃コン粉末の配合割合が高くなるほど、隙間が多くみられるため、リグニンの接着効果を十分に得られなかったことが、強度低下に繋がったと考えられる。

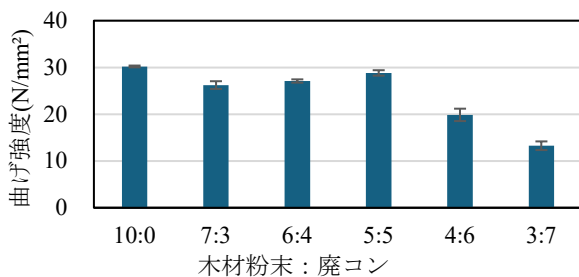


図-12 ボタニカルコンクリートの曲げ強度試験結果

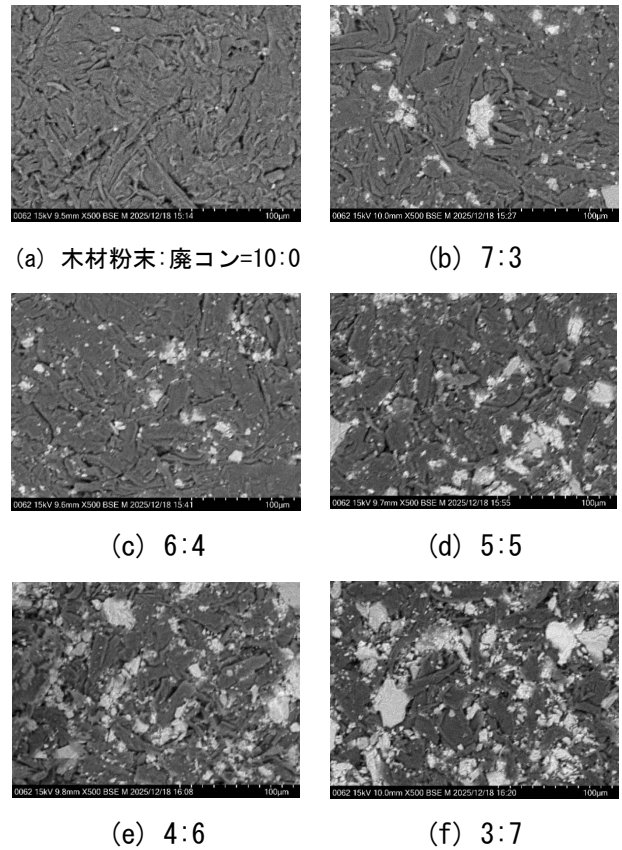
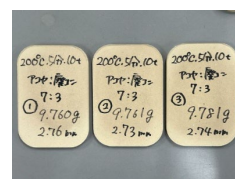


図-13 ボタニカルプレート・コンクリート SEM 画像 (500 倍)

### (2) 耐水性評価

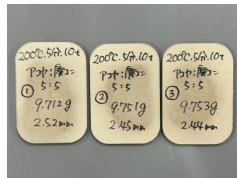
写真-6に吸水前後の試験体の様子を示す。また、図-14に吸水厚と膨張率の変化を、図-15に吸水率の変化を示す。浸漬 24 時間後の吸水厚と膨張率はいずれの配合条件も約 2%~3%を示す結果となった。また、浸漬 24 時間後の吸水率は廃コンの混合割合が増えるほど若干増加したが、約 14%~19%の範囲であった。これらより、アセチル化木材粉末を用いたボタニカルプレートおよびボタニカルコンクリートの耐水性は、目標値であるパーティクルボードの基準値を満足する結果となった。



(a) 7:3 試験前



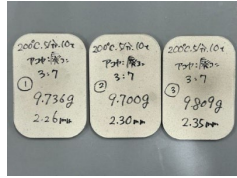
(b) 7:3 試験後



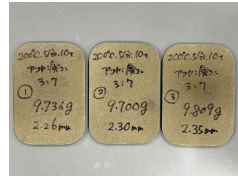
(c) 5:5 試験前



(d) 5:5 試験後



(e) 3:7 試験前



(f) 3:7 試験後

写真-6 吸水試験前後の試験体

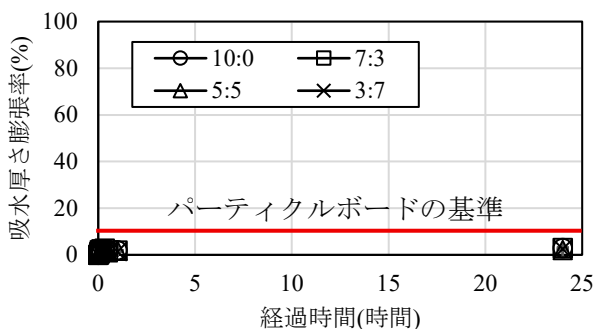


図-14 吸水厚さ膨張率

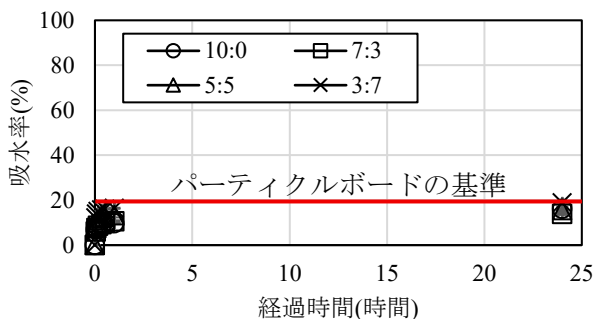


図-15 吸水率

## 6. まとめ

本研究では、アセチル化した木材粉末を使用したボタニカルコンクリートの力学的特性および耐水性に関する基礎的検討を行った。得られた知見と今後の課題を以下に示す。

- (1) ボタニカルプレートの曲げ強度は、温度 200℃、圧力 35.1MPa、時間 5 分で作製した試験体が、最も高い値となった。
- (2) ボタニカルプレートの耐水性は、目標値を満足した。また、比較対象であるベチバーと比べて、明確な改善が見られることから、植物材料のア

セチル化することは、耐水性改善に有効な方法の 1 つと考えられる。

- (3) ボタニカルコンクリートの曲げ強度は、配合割合 5:5 のとき高くなるものの、廃コン粉末の割合が高くなるほど強度が低下する結果となった。
- (4) ボタニカルコンクリートの耐水性はいずれの配合条件も吸水厚さ膨張率、吸水率ともに目標値を満たす結果となった。
- (5) 今後は、様々な植物材料をアセチル化したボタニカルコンクリートの耐水性評価を行う必要がある。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP24K07621（代表：富山潤）および令和 7 年度沖縄イノベーション・エコシステム共同研究推進事業「シーズ育成型」の助成を受けて実施した。各種分析には、琉球大学研究基盤統括センターの分析機器を使用した。また、アセチル化木材サンプルについてコントン建築設計事務所の蒲池史子様、池上産業株式会社の坪倉真琴氏、株式会社新洋よりご提供いただいた。ここに記して感謝の意を述べる。

## 参考文献

- 1) Ren Wei, Yuya Sakai: Improving the properties of botanical concrete based on waste concrete, wood, and kraft lignin powder, ELSEVIER, Vol.397, 2022.1
- 2) 宮本祐香, 富山潤, 桐野龍, 諏訪竜一: ベチバーリグニンを利用したボタニカルコンクリートの基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.47, No.1, p738-743, 2025
- 3) 長谷川祐: 気相アセチル化による木材の高耐久化に関する研究, 博士論文, 2020
- 4) アコヤとは | 高耐久化天然木材「アコヤ」: <https://accoya.woody-art.jp/accoya/> (2025 年 12 月 19 日閲覧)
- 5) Yamada,H, Takahashi,S., Yamashita,K., Miyafuji,H., Ohno,H., and Yamada,T. : High-throughput Analysis of Softwood Lignin Using Tetra-n-butylphosphonium Hydroxide(TBPH),BioResources,Vol.12,No.4,pp.93 96-9406,Oct.2017
- 6) 日本工業規格: JIS A 5908:2022 パーティクルボード
- 7) 長谷川将八郎, 岡田幹夫, 山岸祥恭: ネマガリタケ・パーティクルボードの吸水率と厚さ膨張について, 北海道立総合研究機構, 林産試験場月報 1965 年 3 月号, pp.1965.



## PT 調査を用いた外出行動に関する基礎的分析

琉球大学 ○新里莉理 神谷大介  
東京大学大学院 福田大輔 上町剛志

### 1. はじめに

近年、日本では高齢化の進行に伴い、高齢者を含むすべての住民の移動を確保し、持続可能な地域交通を構築することが重要な政策課題となっている<sup>1)</sup>。特に沖縄本島中南部では、自家用車の分担率が72.5%<sup>2)</sup>と高く、自家用車依存の都市構造が形成されている。その結果、公共交通の利用分担率は低く<sup>2)</sup>、慢性的な道路交通渋滞が生じている。更に近年は、運転手不足等により路線バスの減便が進み公共交通サービス水準も低下している。他方沖縄県は、所得水準が全国最下位で生活保護率も高く、構造的な貧困問題を抱えている<sup>3)</sup>。自家用車を保有しづらい低所得層にとって、移動手段の制約は移動権の喪失や社会参加の低下につながる。こうした状況は、交通条件が社会参加を阻害する「交通における社会的排除(TRSE: Transport-Related-Social-Exclusion)」<sup>4),5)</sup>の典型例である。Lucas<sup>4)</sup>は、アクセシビリティの低さが低所得層の就労・医療・買い物等の機会を制約し、交通不利と社会的不利が重なることで生活機会の不平等が拡大すると指摘している。しかし、交通条件と個人属性の相互作用が外出行動に及ぼす影響を実証的に検討した研究は限られており、特に、自家用車依存が強い地方都市圏では知見が乏しい。

そこで本研究の目的は、沖縄本島中南部において、外出行動の有無に着目し、個人属性および交通条件の重なりが外出行動に及ぼす影響を明らかにする。

### 2. PT 調査を用いた基礎的分析：単純集計

本研究では、令和5年沖縄本島中南部都市圏パーソントリップ調査（以下、PT）のマスターデータを用い、外出行動の基礎的傾向を把握するために単純集計を行った。高齢者以外(5~64歳)と高齢者(65歳~)を比較するため、年齢層別にみた平日1日の外出頻度を図-1に示す。この結果から、高齢者では「外出なし(0回)」の割合が高く、高齢者以外と比べて外出頻度が全体的に低い傾向が確認できる。

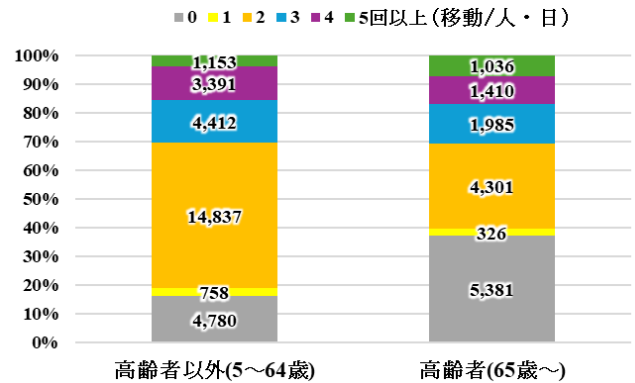


図-1 年齢層別にみた外出頻度

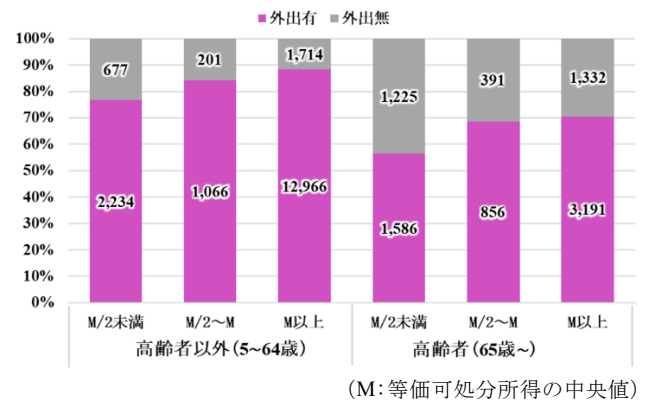


図-2 外出有無と所得階層別のクロス集計

### 3. クロス集計

2.の結果から、年齢層によって外出行動の傾向が大きく異なることが示された。そこで本章では、高齢者以外と高齢者に分けて外出の有無に着目したクロス集計分析を行う。あわせて、沖縄県における自家用車依存および貧困問題の背景を踏まえ、所得と自家用車利用可否が外出行動に及ぼす影響を検討する。なお、本研究における所得階層の区分は、等価可処分所得の中央値をMとした上で、M/2未満を相対的貧困層、M/2以上M未満(M/2~M)を中間層、M以上を非相対的貧困層と定義する。

#### (1) 外出有無×所得

年齢層別かつ所得階層別に外出有無の構成割合を比較したクロス集計を図-2に示す。高齢者以外で

キーワード 自家用車依存、沖縄本島中南部、交通における社会的排除、外出の有無

連絡先 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科 E-mail: e225501@cs.u-ryukyu.ac.jp



は、所得階層が低くなるにつれて外出しない人の割合が高まる傾向がみられ、所得水準が外出行動に一定の影響を及ぼしていることが分かる。一方、高齢者では全体的に外出しない人の割合が高く、高年齢と低所得が重なることで外出率がより低下する傾向が確認された。

## (2) 外出有無×所得×自家用車利用可否

自家用車依存が強い沖縄では、自家用車を利用できるか否かは、日常的な外出機会を大きく左右する重要な交通条件である。そこで、所得階層に加えて自家用車利用可否に着目し、外出行動との関係をより詳細に検討するため、所得階層別かつ自家用車利用可否別に外出有無の構成割合を比較した。高齢者以外を対象とした分析結果（図-3）を見ると、所得階層と自家用車利用可否の組み合わせによって外出行動に明確な違いがみられる。特に相対的貧困層（M/2未満）では、自家用車を利用できない場合に外出していない人の割合が高く、低所得層において自家用車利用可否が外出行動に大きく影響していることが示唆される。

次に高齢者に限定した分析結果（図-4）を見ると、所得階層に関わらず、自家用車を利用できない場合に外出していない人の割合が大きく増加していることが確認できる。特に相対的貧困層（M/2未満）では、自家用車を利用できない場合に外出率が著しく低下しており、経済的不利と交通条件の不利が重なることで外出行動が強く制約されている可能性が示唆される。

これらの結果から、外出行動は低所得・高年齢・自家用車利用不可といった不利な条件が重なる層において、外出制約が強まる TRSE<sup>4),5)</sup>の構造が確認された。

## 4. おわりに

本研究では、PTを用い、外出行動の有無に着目した単純集計およびクロス集計を行った。その結果、外出行動は年齢に加え、所得階層、自家用車利用可否といった社会経済的要因および交通条件と密接に関連していることを明らかにした。しかし、これらの分析では複数要因の同時的な影響を評価することができない。

今後は、外出有無を被説明変数とする二項ロジットモデルによる多変量分析を行う。更に、外出行動

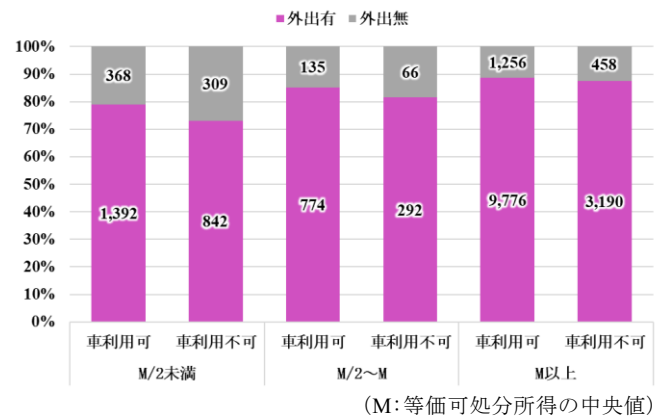


図-3 所得階層と自家用車利用可否による外出有無の比較（高齢者以外：5歳～64歳）

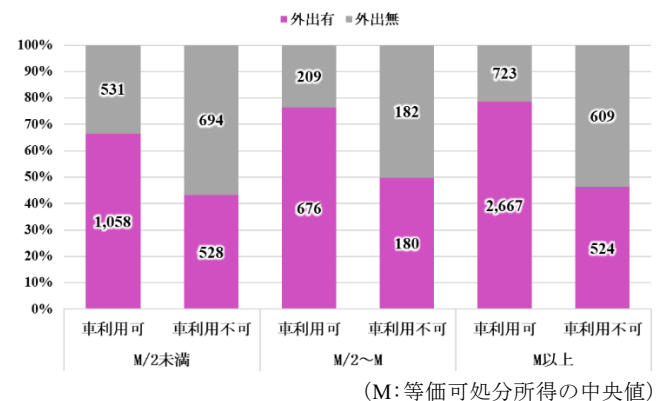


図-4 所得階層と自家用車利用可否による外出有無の比較（高齢者：65歳～）

を外出頻度や移動距離・時間といった指標へ拡張し、移動特性に影響を与える要因をより詳細に把握したい。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H00222, JP23H00197, JP24K15538 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：地域の公共交通を取り巻く現状と検討の視点・課題，2023
- 2) 沖縄県：沖縄本島中南部都市圏 パーソントリップ調査，[https://www.ogb.go.jp/-/media/Files/OGB/Unyu/koutsu/ridezain/suishin-shiryō1-3\\_250327.pdf](https://www.ogb.go.jp/-/media/Files/OGB/Unyu/koutsu/ridezain/suishin-shiryō1-3_250327.pdf)(2025年6月24日閲覧)
- 3) 内閣府沖縄総合事務局：沖縄交通・デザインの狙いについて，[https://www.ogb.go.jp/-/media/Files/OGB/Unyu/koutsu/ridezain/oki-ri-shiryō1\\_231106.pdf](https://www.ogb.go.jp/-/media/Files/OGB/Unyu/koutsu/ridezain/oki-ri-shiryō1_231106.pdf)(2025年12月10日閲覧)
- 4) Lucas, K. : Transport and social exclusion: Where are we now?, Transport Policy, Vol. 20, pp. 105–113, 2012.
- 5) Luz, G. and Portugal, L. : Understanding transport-related social exclusion through the lens of capabilities approach, Transport Reviews, Vol. 42, No. 4, pp. 503–525, 2022.

## 平日日中のバス利用者増加を意図した観光周遊分析

琉球大学 ○比嘉悠 神谷大介

那覇市上下水道局 上間大輔

### 1. はじめに

沖縄県は自家用車の依存度が極めて高い車社会となっている。令和5年度の沖縄中南部都市圏パースントリップ調査から代表交通手段分担率をみると、自家用車が約7割を占め公共交通は1割に満たない結果となっている<sup>1)</sup>。また、図-1（株式会社ブログウォッチャー提供データより作成）から県民の平日の移動量は7時台、17時台でピークとなっており、これらの時間帯で慢性的な交通渋滞を誘発している。

このような状況下で、高齢化によるバス運転手不足は深刻化しており、路線の減便や廃止が相次いでいる。そこで、公共交通網再編の際に、公共交通維持の観点から図-1及び図-2（図-1と同様に作成）に示す、県民の公共交通利用が少ないと考えられる平日日中を対象に移動距離が長い観光客の移動を反映したダイヤに変更することは有益だと考えられる。

上間・神谷<sup>2)</sup>は人流データを用いて、観光客の回遊エリアを設定し、一日のエリア間の移動量からみた公共交通の運行本数の整合性を評価している。しかし、平日日中時間帯に限定した分析は行われていない。そこで本研究では、この時間帯における観光客の移動量からみた公共交通の運行本数の整合性を評価することを目的とする。

### 2. 人流データ

上間・神谷<sup>2)</sup>と同様に、株式会社ブログウォッチャーが提供するスマートフォンアプリ由来のGPS(Global Positioning System)情報を分析データとして用いる。具体的には、2023年の平日日中（9時台～15時台）を対象とし、1地点に15分以上滞在した履歴を基に算出された、500mメッシュ単位の県外居住者OD(Origin-Destination)移動量（トリップ数）を集計対象とする。

### 3. 公共交通運行データとエリア間連繫関係

運行データは上間・神谷<sup>2)</sup>と同様に沖縄本島内を

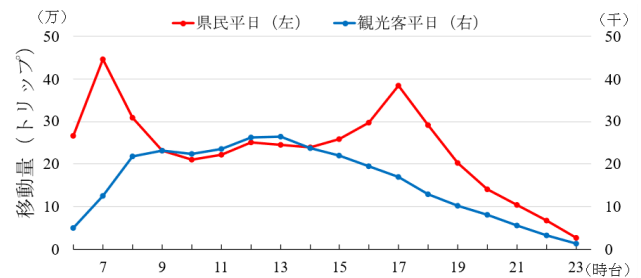


図-1 沖縄本島における時間帯別移動量

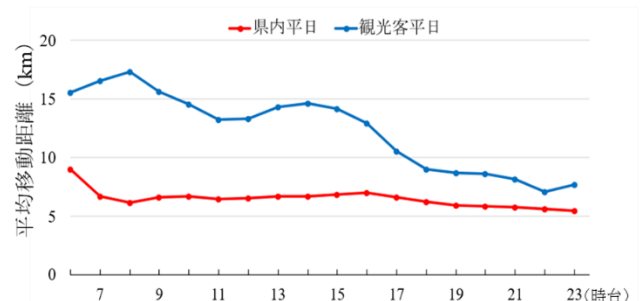


図-2 図-1における平均移動距離

運行する372路線の平日ダイヤを用いる。

次に、運行ダイヤを用いてエリア間の公共交通による結びつきを「連繫関係」と定義する。連繫関係に対して運行本数を組み合わせることで集計を行い、エリア間の運行本数を表す指標として「連繫関係強さ」を導出する。具体的な処理手順は上間・神谷<sup>2)</sup>を参照されたい。

### 4. エリア間連繫関係強さからみた公共交通網

エリア間の連繫関係強さと、移動量をエリア間距離別に比較する。それぞれの最大値を100に基準化した連繫関係強さ $L_{xy}$ と移動量 $T_{xy}$ を算出し、(1)式に示すエリア間公共交通供給度 $S_{xy}$ を求めた。この散布図について、10km未満のエリア間を図-3に、10km以上のエリア間を図-4に示す。データラベルはO→Dのエリア番号とし、そのエリア内の代表スポットを表-1に示す。

$$S_{xy} = L_{xy} - T_{xy} \quad (1)$$

図-3及び図-4から移動量と連繫関係強さが20以下

キーワード 公共交通維持, 人流データ, 観光周遊

連絡先 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科 E-mail : e225515@cs.u-ryukyu.ac.jp

に集中している。これは観光客の周遊ルートが特定のパターンに固定化されていることに加え、既存の公共交通網が移動実態に即していない可能性が考えられる。図-3の左上の赤い部分に示す通り移動に対して連繋関係強さが大きいエリア間が存在し、そのエリア間 OD には国際通りを含むことがわかる。これは、国際通りを含むエリアに那覇バスターミナルや複数のモノレール駅が存在していることが考えられる。一方でモノレール駅が首里城を含むエリアには含まれておらず、エリアの隣接するメッシュには含まれていた。以上を踏まえると徒歩圏を考慮してエリアを拡大すると連繋関係強さは大きくなることが全エリアでいえる。図-4は、図-3に比べて連繋関係強さが大きいエリア間が減少した。これは、10km以上のエリア間を直接つなぐ路線が少ないことが考えられる。また、移動が比較的多いエリア間 ( $T_{xy} \leq 50$ ) に着目すると、アメリカンビレッジ→国際通り、海洋博公園→国際通りで運行本数が不足していることが明らかとなった。

## 5. おわりに

本研究では、平日日中における観光客の移動実態に基づき、既存の公共交通網の評価を行った。分析の結果、10km以上のエリア間では、10km未満の区間に比べて連繋関係強さが大きいエリア間が少なくなった。このような区間では「那覇空港―北谷ゲートウェイ」のような拠点整備は有効である。現在、沖縄県内では複数の交通結節点の整備計画が検討されており、本研究の成果はそれらに活用できる可能性がある。今後は、本研究で用いた公共交通運行データを日中時間帯に限定して連繋関係強さを算出し、観光客の移動需要との整合性を評価する分析へと発展させることとする。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H00222, JP23H00197, JP24K15538 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 沖縄県；令和7年度取り組み内容について、沖縄県公式ホームページ、[https://www.pref.okinawa.jp/\\_res/projects/default\\_project/\\_page\\_/001/012/938/genkyoubunseki.1-2.pdf](https://www.pref.okinawa.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/012/938/genkyoubunseki.1-2.pdf) (2026年1月5日閲覧)
- 2) 上間大輔，神谷大介：観光客の訪問エリアと移動からみた沖縄本島の公共交通網に関する分析，土木計画学研究・講演集，Vol.70，2024。

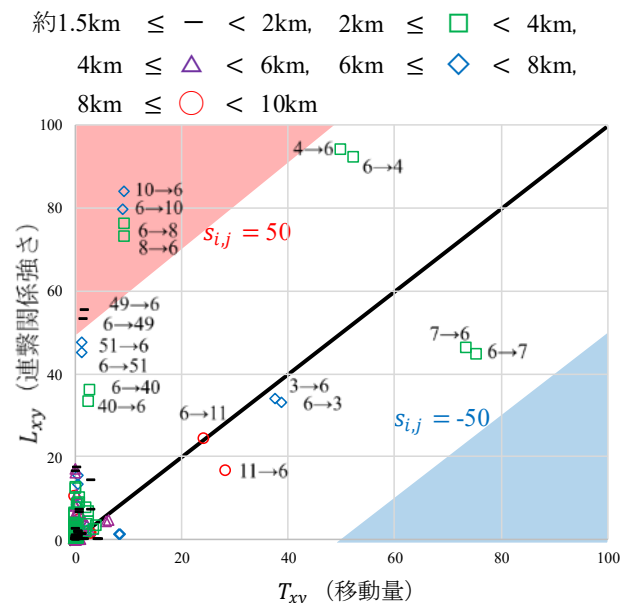


図-3 エリア間距離 10km 未満における公共交通供給度

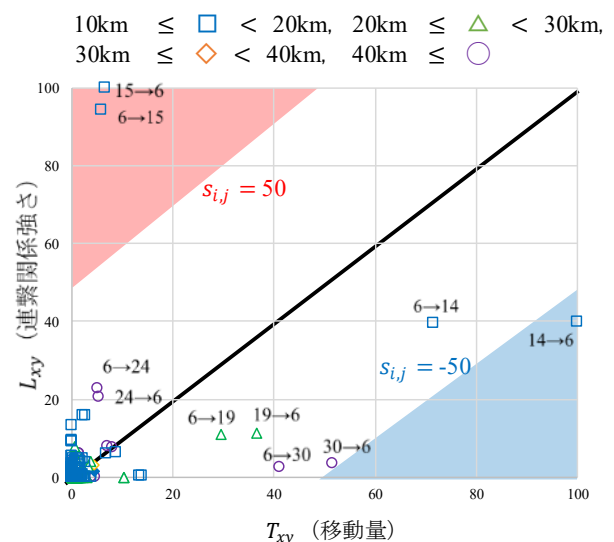


図-4 エリア間距離 10km 以上における公共交通供給度

表-1 各エリア内施設名一覧

エリア番号	エリア内スポット
3	沖縄アウトレットモールあしびなー
4	赤嶺駅
5	沖縄ハーバービューホテル (那覇市泉崎)
6	国際通り
7	首里城
8	古島駅
10	ホテルアラクージュオキナワ (浦添市港川)
11	沖縄コンベンションセンター
14	アメリカンビレッジ
15	ミュージックタウン音市場
19	ムーンビーチ
24	名護市営市場
30	海洋博公園
40	沖縄セルラースタジアム那覇
49	天久ファミリースポーツランド
51	A&W 牧港店



## 中城湾全体におけるトカゲハゼ保全の取組み —新たな保全対策の提案—

沖縄県 土木建築部 港湾課  
○安里 祥 高良 亨

### 1 はじめに

重要港湾に指定されている中城湾港では、沖縄島中南部東海岸地域の経済基盤として、国内外の物流・産業拠点、交流・賑わい拠点等として整備を進めている。こうした中で、港湾開発とトカゲハゼ(*Scartelaos histophorus*)(図-1)(以下「本種」という。)をはじめとした自然環境の保全への調和に配慮した事業実施が求められた。そのため沖縄県では、トカゲハゼを自然環境の指標種と位置づけ、調査・研究を行うとともに、港湾整備事業に伴う様々な保全対策を実施してきた。

特に、1995年度に策定された「中城湾全体におけるトカゲハゼ保全計画」<sup>1)</sup>(以下「現行計画」という。)に基づく保全対策は、持続可能な範囲で継続される順応的管理の典型的な事例として、港湾事業関係機関だけでなく各方面にその成果が認識されていた。

本稿では、まず本種の保全対策の事例等について報告する。そして、これまでに得られた知見を基に現行計画の見直しを行い、トカゲハゼ保全と港湾整備の両立を図る指針を検討したので、その内容と今後の保全対策について提案する。



図-1 トカゲハゼ  
左(成魚ペア)、右(求愛ジャンプ)  
写真提供：株式会社沖縄環境保全研究

### 2 トカゲハゼ保全の意義と港湾整備について

#### (1) 本種について

本種は、潮の引いた干潟上を活発に動き回ることができる半陸生のハゼ科の一種である。沖縄県では、ムツゴロウを除く3種類(トビハゼ、ミナミトビハゼ、トカゲハゼ)が確認され、総称して「トントンミ」と呼ばれ親しまれている。<sup>1)</sup>

本種は日本では沖縄島の中城湾及び大浦湾にその生息が知られ、沖縄島における生息が世界の分布の北限となっている。その独特の分布パターンから生物地理学的にも重要な種と考えられている。(図-2)

さらに、環境省レッドリスト及び沖縄県レッドデータブックで絶滅危惧ⅠA類(CR)に指定されているほか、2024年度末時点において、中城湾全体の個体数は約1,200個体を確認している程度である。<sup>2)</sup>

なお、県が本種の調査を開始した1988年時点の個体数は約700個体である。



図-2 トカゲハゼの主要生息地

(沖縄県地図情報システムより矢印等を加えて一部加工)

#### (2) トカゲハゼ保全の意義

干潟に生息する生物の多くは一つ一つの独立した干潟で個別に生活史が成立するのではなく、多くは周辺に分布する干潟のネットワークにより生活史が成立<sup>3)</sup>している。本種についても同様に、浮遊仔魚期には湾内の水深20m付近を漂い、その後、潮流に乗って再び泥干潟に着底する。<sup>4)</sup>(図-3)

そのため、中城湾内の本種の個体群は湾全体で維持され、同湾の自然環境を指標する種と考えられる。

したがって、本種の個体群維持と生息環境の保全は、中城湾全体の泥質干潟生態系の保全につながる重要な役割を果たす。

キーワード 中城湾港、港湾開発、環境保全、トカゲハゼ、泥質干潟生態系

連絡先 〒900-8570 沖縄県那覇市泉崎 1-2-2 E-mail:asatosyo@pref.okinawa.lg.jp



### (3) 本種に配慮した港湾整備

県は新港地区の整備に当たり、自然環境に配慮した港湾整備を実施すべく本種の生息環境の保全と個体群の維持に重点を置いた a)～c)からなる保全対策を講じてきた。各保全対策の概要については第4章で述べる。

- a) トカゲハゼ人工増殖等の技術開発調査(人工増殖・種苗放流)(1991年～2005年)
- b) トカゲハゼ生息地の創出に関する調査(試験造成地の造成)(1994年～1999年)
- c) 現行計画策定と同計画に基づいた保全対策の実施(1995年～現在も継続)

なお、a)b)は新港地区工事中に講じられた対策であり、2007年の工事終了に伴い対策を終えている。c)現行計画に定められた「4月～7月は工事を行わないとした工事時期の調整」等については、中城湾全体に適用している。

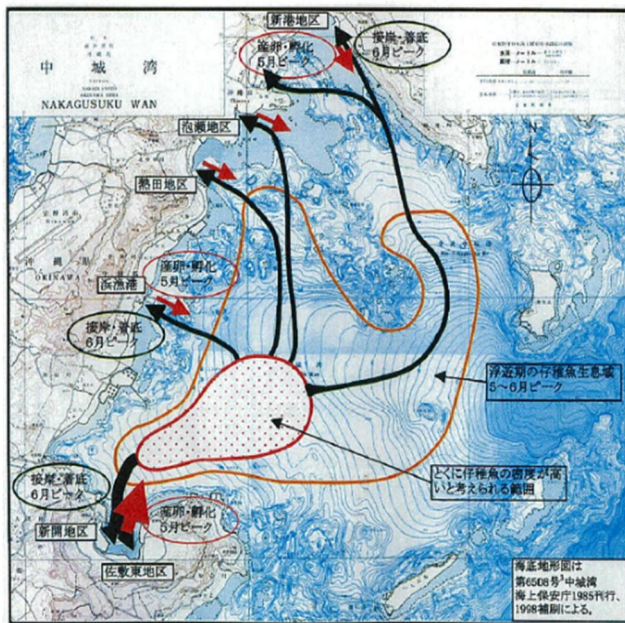


図-3 本種仔稚魚の分布状況<sup>5)</sup>

### 3 本種の現状

本種成魚個体数及び着底幼稚魚の最大概算個体数の変遷を図-4に示す。また、成魚及び稚魚の状況並びに中城湾全体における生息環境状況を以下に示す。<sup>2)</sup>

#### (1) 成魚の生息数の変遷

中城湾全体における成魚の生息数(繁殖期直前の3月)は、2002年度をピークに2015年度まで減少した。その後は増減を繰り返し、2021年～2022年度には緩やかに増加したものの、2023年度には減少、2024年度には再び増加した。

#### (2) 着底幼稚魚の最大概算個体数の変遷

中城湾調査地区における着底幼稚魚数は、2001年～2002年度および2010年度に35,000尾を超えるピークを記録した。しかし、2013年度以降は10,000尾前後で推移し、数年おきに(2015年、2019年、2023年)10,000尾を下回っている。

#### (3) 中城湾全体における生息環境状況

成魚及び着底幼稚魚の90%以上は佐敷東地区と新港地区に集中しているが、1988年から1999年度までは佐敷東地区が主体であった。しかし、新港地区における試験造成地の造成や人工増殖した稚魚の放流により2000年～2004年度には比率が逆転した。その後、人工種苗の放流停止や外来種の影響により新港地区の個体数は減少、近年では外来種駆除や佐敷東地区からの稚魚移送放流の効果で回復傾向を示している。

### 4 本種保全対策について

#### (1) 保全対策の概要

- a) トカゲハゼ人工増殖等の技術開発調査(人工増殖・種苗放流)<sup>6)</sup>

1991年から人工増殖による人工孵化・種苗生産技術の開発・確立を目的とした人工増殖技術開発を開始し、1995年から

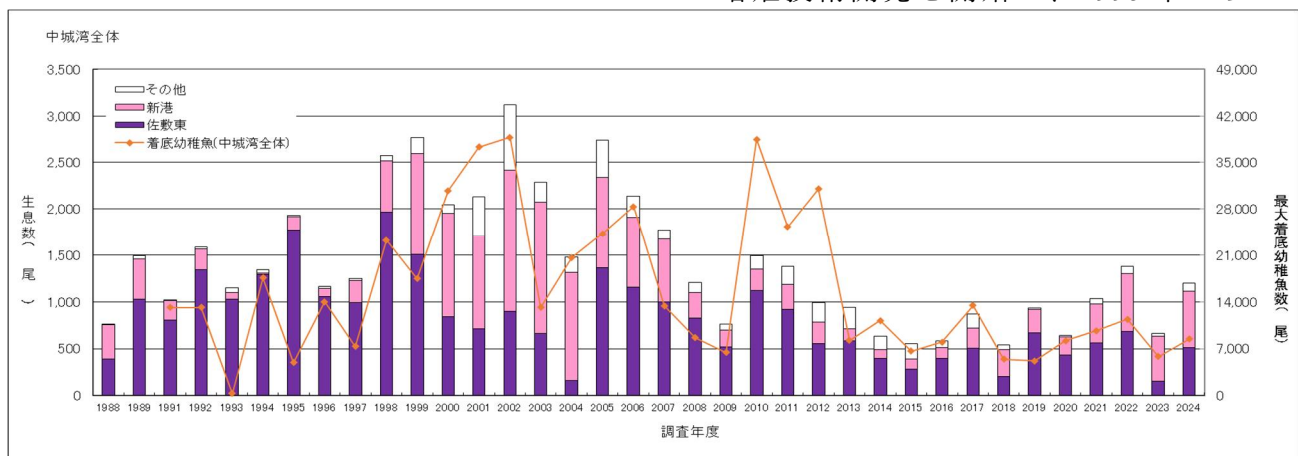


図-4 中城湾全体におけるトカゲハゼ成魚及び稚魚の個体数遷移状況

2005 年にかけて種苗放流を実施、新港地区における個体数の回復・維持に努めた。1997 年からは人工増殖や自然下より採卵した卵のふ化、稚魚の育成が可能になり、約 4,500 個体の稚魚を放流した。(図-5)



図-5 屋外における飼育水槽(左)  
人工増殖の稚魚の放流(右)

#### b) トカゲハゼ生息地の創出に関する調査(試験造成地の造成)<sup>6)</sup>

新港地区に 8 カ所、計約 26,000 m<sup>2</sup> の試験造成地を造成した。(図-6)試験造成地には人工増殖で得られた稚魚を放流したほか、野生の着底幼稚魚が定着し、継続して個体が確認された。



図-6 新港地区における試験造成地の位置

#### c) 現行計画の策定と同計画に基づいた保全対策の実施<sup>1)</sup>

現行計画には、本種生息域の保全のため、3～5月の産卵期には生息地近傍での大きな振動を伴う工事を実施しない、4～6月の孵化仔魚の分散期及び5～7月の着底稚魚の接岸・着底期には生息地周辺陸域及び海域での工事は行わない等の各種工事等における本種生息圏への配慮が示されている。

#### (2) 保全対策の効果と課題

これまで実施してきた保全対策によって、特に新港地区は中城湾内で随一の本種生息地となるまでに個体数が回復するなど一定の効果が確認されているが、実施した

保全対策については以下に示す課題がある。

#### a) 人工増殖技術の確立

人工増殖技術の確立により、本種の人工的な個体数維持が可能となったが、中城湾における本種は遺伝的に単一の集団を形成していると考えられるため、環境の変化等に対応できない可能性がある。<sup>6) 7) 10)</sup>

#### b) 試験造成地の造成<sup>6) 7)</sup>

試験造成地などの構造物は人工構造物であり、天然の生息環境と類似する環境を維持するためには、泥客土や改修など継続的な管理が必要となる。(図-7)



図-7 新港地区試験造成地の機能低下の例

#### c) 現行計画の保全対策の遵守<sup>1)</sup>

中城湾港沿岸で工事を行う場合、本種の保全のため毎年4～7月は工事を停止する期間を設けている。工事を停止する措置を講じているのは、影響を回避することであり、全国的にみて環境保全の観点からは画期的な対策である<sup>8) 12)</sup>。しかしながら、保全対策を遵守することで本種の保全にどの程度効果があったかは明らかになっていない。また、これまで生息が確認されていない海域・沿岸域においても保全対策を実施している現状である。したがって、これらの点については港湾・海岸整備等と環境保全の両立の観点から、現行計画に基づき実施する保全対策の効果及び適用範囲の合理性について、これまでの調査結果等を踏まえた検証が必要である。

### 5 その他中城湾全体における課題と対応策

#### (1) 外来種に関する対応

新港地区では親水性護岸の一部にマングローブテラスが整備された。そこに沖縄島を生育域としない種であるヒルギダマシ(*Avicennia marina*)(図-8)が植樹され、2002年に定着しているのが確認<sup>7) 9)</sup>された。その後、繁茂したヒルギダマシが本種の生息域を覆い生息域を圧迫したことで、生息範囲、個体数は減少した。沖縄県は2015年～2017年度に約110,000 m<sup>2</sup>で駆除を実施(図-9)したが、2024年度末現在も実生株が確認されており、専門家からは、ヒルギダマシの根絶には今後十数年か



かる可能性が示唆されている。そのため、中城湾の干潟生態系を保全するため港湾管理者のみならず、地域住民や中城湾周辺自治体等が一体となった継続的な防除の取組みが必要である。

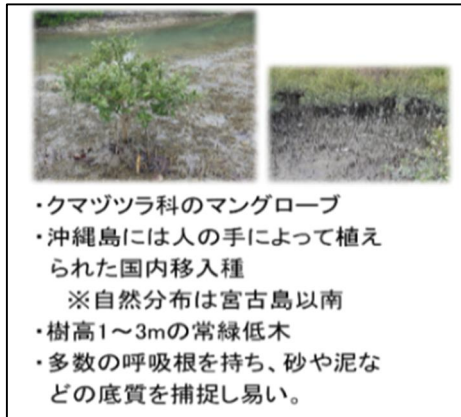


図-8 ヒルギダマシ



図-9 ヒルギダマシ伐採状況

## (2) 佐敷東地区の砂州の変化

佐敷干潟を縦断するように伸びていた砂州が、静穏で閉鎖的な環境である内干潟を形成していたことで、佐敷東地区は湾内における本種の最大生息地であった。しかし、台風による砂州の分断や移動に伴い内干潟の面積が徐々に縮小し、2024年3月時点で砂州はほとんど接岸した状況となった。砂州の分断・移動は、干潟の泥の流出や底質の砂質化を招くこととなり、本種の生息には不適な環境になりつつあると考えられる。(図-10)



図-10 佐敷東地区砂州の移動状況  
(赤枠：主要生息地(内干潟))

## 6 トカゲハゼ保全対策に関する新たな提案について

現行計画の遵守については、本種をはじめとした干潟生態系を保全するために重要である一方、港湾の発展、災害の未然防止等を進めるためには、今後、開発と環境保全をよりうまく両立させることが重要であることから、現行計画における課題を整理し見直しを図ることで保全対策の合理化を図った。

### (1) 現行計画の見直し

現行計画に基づき実施する保全対策の効果及び適用範囲の合理性の検証のために、「工事の自粛期間」及び「工事の実施及び構造物の存在による影響」の2点について見直しを行った。

#### a) 工事の自粛期間

過去17年間(平成20年～令和6年)の着底幼稚魚の最大概算生息数の調査結果をもとに中城湾全体及び各地区の着底・分散のピーク時期を推測すると表-1のとおりであり、4月に着底分散のピーク時期は確認されなかった。

表-1 各地区のトカゲハゼの着底のピーク時期及び現在の工事の運用

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
現地調査結果による着底ピーク												
中城湾全体												
新港地区												
佐敷東地区												
泡瀬地区												
熱田地区												
中城(浜漁港)地区												
西原・与那原地区												
佐敷新聞地区												
文献による着底ピーク												
海上工事をできるだけ行わない期間												
海上工事実施期間												

：分散のピーク時期(推定) 赤：着底のピーク時期

#### b) 工事の実施及び構造物の存在による影響の検討

これまで集積した知見から、工事の実施及び構造物の存在による本種への影響について、図-11及び表-2のとおり整理した。

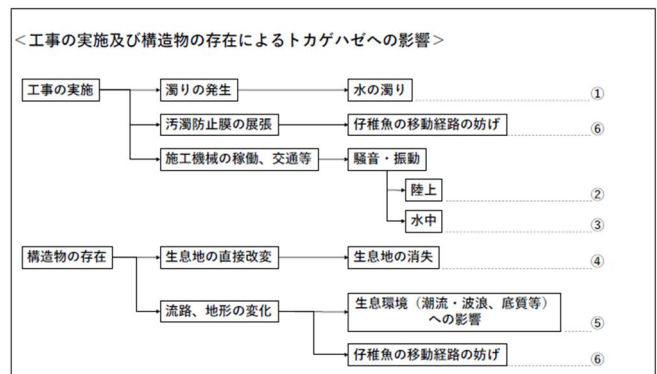


図-11 工事の実施及び構造物の存在によるトカゲハゼへの影響フロー

表-2 工事の実施及び構造物の存在によるトカゲハゼへの影響の程度

考えられる影響	影響の程度	理由及び条件
工事の実施による影響	①水の濁り	△ 成魚は泥干潟に生息するため水の濁りによる影響はほとんどないと考えられるが、濁りの稚魚への影響は不明な点が多いため、汚濁防止膜を展張する必要がある。
	②騒音・振動(陸上)	× 過去に実施した調査より影響はほとんどないと考えられる。
	③騒音・振動(水中)	× 文献調査より、影響は小さいと考えられる。
	⑥稚魚の移動経路の妨げ	△ 汚濁防止膜の展張に伴う稚魚移動の妨げを防ぐため稚魚の移動経路の幅として80m程度確保することにより、影響はほとんどないと考えられる。
構造物の存在	④生息地の消失	○ 生息地に対する直接的な地形の変更を伴うため、生息地へ与える影響があると考えられる。そのため、工事ごとに適切な環境保全措置を講じる必要がある。
	⑤生息環境(潮流・波浪、底質等)への影響	× 泡瀬地区における埋立地の存在を参考に、生息地から800m以上距離を確保することにより、トカゲハゼの生息環境への影響はほとんどないと考えられる。
	⑥稚魚の移動経路の妨げ	△ 汚濁防止膜の展張に伴う稚魚移動の妨げを防ぐため稚魚の移動経路の幅として80m程度確保することにより、影響はほとんどないと考えられる。

## (2) 検討結果

(1)a,bの整理・検討の結果、時期による工事の中止ではなく、本種の生活史に合わせた対策を講じることが両立を図る上で有効と考えられたことから、現行計画の保全対策の運用方針を見直すこととした。(図-12、表-3)

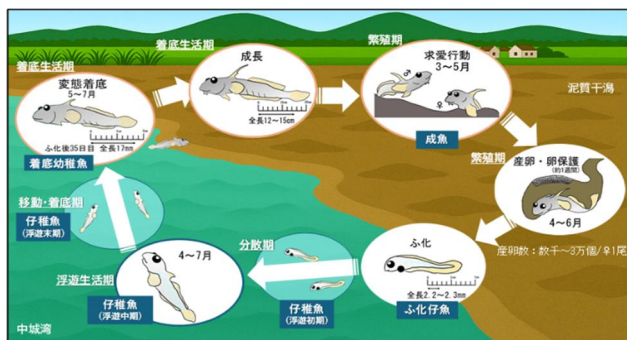


図-12 トカゲハゼの生活史

表-3 トカゲハゼ生活史への影響の検討結果

生活史	干潟域		海域				干潟域
	成魚		ふ化仔魚・仔稚魚				着底幼稚魚 成魚
	繁殖期	求食	浮遊初期	浮遊中期	浮遊後期	着底直後	着底生活期
影響要因	3~5月	4~6月	4~6月	4~7月	5~7月	5~7月	通年
①水の濁り	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	汚濁防止膜を展張することで影響を小さくできると考えられる	汚濁防止膜を展張することで影響を小さくできると考えられる	汚濁防止膜を展張することで影響を小さくできると考えられる	汚濁防止膜を展張することで影響を小さくできると考えられる	成魚に対する影響は小さい
②騒音・振動(陸上)	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい
③騒音・振動(水中)	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい
④生息地の直接改変	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい
⑤生息環境(潮流・波浪、底質等)への影響	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい
⑥仔稚魚の移動経路の妨げ	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい	成魚に対する影響は小さい

## (3) 新たな保全対策の提案

前述の検討を基に、今後環境の保全と開発の両立が図れるよう、以下に示す新たな保全対策を提案する。

### a) 港湾開発を行う事業者の取組み姿勢

中城湾内で開発を行う事業者は年間を通じて事業規模に関わらず、事業に伴う環境対策として本種保全に取組み、事業場所・規模・事業実施時期に応じた保全策、モニタリングを行う。

### b) 本種の生活史を踏まえた配慮事項

現行計画及び現行計画策定以降の保全対策の運用方針を見直した結果、中城湾全体で一律に海上工事をできるだけ行わない期間を設けるのではなく、本種の生活史を踏まえた配慮事項を参考に保全対策を講じること、今後は、各開発事業者が本種の保全に関する取組みを適切に実施しながら事業を進め、本種とその取り巻く環境の保全、湾内・沿岸地区における開発・整備の調和を図ることができると考える。

## 7 現行計画改訂版の作成(「中城湾におけるトカゲハゼ保全指針」案)について

トカゲハゼの保全については、現行計画でトカゲハゼの生態の知見と、開発事業を行う場合のトカゲハゼへの留意事項が示された。その後、様々な保全対策が実施され、中城湾全体で一律に海上工事をできるだけ行わない期間(4~7月)を設定し、運用されてきた。また、この方針に従って、長年にわたり、トカゲハゼの生息状況に関するモニタリング調査が実施されてきた。

こうした情報の蓄積及び近年の中城湾港に期待される機能の増加、防災対策の必要性、環境との共生・調和に向けた取組みの重要性の高まりなどを受け、港湾開発と自然環境保全の調和を図りながら事業を進めることを目的とし、「中城湾におけるトカゲハゼの保全指針—港湾開発と保全の両立を目指して—」(案)として新たな指針の検討をおこなった。

指針案では、新たに検討した配慮事項を参考に順応的管理の考え方も踏まえた開発事業者のトカゲハゼの保全に関する取組みの検討、特に事業特性や地域特性を勘案し、必要となる保全対策等の実施を求めている。

また、中城湾港における海岸等整備の推進と良好な干潟生態系等保全の両立を達成するために、各開発事業者、港湾管理者、県民等がそれぞれの立場から本種の保全に取り組める計画となるよう、学識経験者、行政機関からのご意見等を聴きながら2025年度中の策定を目指し取りまとめをおこなっている。



## 8 まとめ

本種は、現行計画が策定されてから約30年間で港湾整備における重要な存在となった。

沖縄の自然環境としてこれまで注目されなかった泥干潟において、本種をはじめとする半陸生生物が形成する干潟生態系の保全は、生物多様性の観点からも沖縄を代表する自然環境であり、非常に重要である。そして、人と本種ひいては干潟生態系との共存は、未来にわたり共有すべき沖縄の財産であると考ええる。

今後も継続していく港湾整備等の生活基盤の開発は必要不可欠ではあるが、持続可能な開発の実施に当たっては、事業者自らが事業特性、地域特性を適切に把握し、保全対象(生活環境、自然環境)・手法等を明確に理解することで、より効率的かつ効果的な保全対策に取り組むことができると考える。

今回示した内容を参考に、工事に係る環境保全の考え方の一助となれば幸いである。

## 【参考文献】

- 1) 沖縄県,「中城湾全体におけるトカゲハゼ保全計画」(1995年)
- 2) 沖縄県,「令和6年度中城湾港生物調査報告書」(2024年)
- 3) 環境省,「干潟生態系に関する環境影響評価技術ガイド」(2008年)
- 4) 沖縄県,「トカゲハゼのはなし」第二訂(1998年)
- 5) 沖縄県,「中城湾全体におけるトカゲハゼ保全対策報告検討会のまとめ」(2001年)
- 6) 沖縄県,「平成19年度中城湾港新港地区トカゲハゼ生息状況等監視調査委託 総合報告書」(2007年)
- 7) 沖縄県,「平成25年度中城湾港生物調査報告書」(2013年)
- 8) 細谷誠一,「トカゲハゼ：沖縄島中城湾における泥質干潟生態系の保全」魚類学会誌 61: 109-114
- 9) 平中晴朗,「沖縄県中城湾のトカゲハゼの保全に配慮した移入マングローブの大規模駆除の取り組み」応用生態工学 22(1): 103-108(2019年)
- 10) 中村 匡聡・岡村哲郎(国土環境)・高木基裕(愛媛大農),「中城湾におけるトカゲハゼの遺伝学的集団解析」日本水産学会大会講演要旨集 639(2002年)
- 11) 沖縄県,「中城湾全体におけるトカゲハゼ保全に係る監視調査計画」(1998年)
- 12) 環境省, 環境影響評価情報支援ネットワーク 生物の多様性分野 平成15年度検討会

首里城正殿の「見せる復興」～今しか見られない復元現場のPR～

内閣府 沖縄総合事務局 国営沖縄記念公園事務所  
○内間 安朗, 與那嶺 盛明

1. はじめに

内閣府沖縄総合事務局国営沖縄記念公園事務所(以下「公園事務所」という)では、令和元年10月31日未明に発生した火災で焼失した首里城の復元整備を推進している。首里城復元に向けた「三本柱」として、火災で焼失した首里城を新しい知見を踏まえ復元する「首里城復元」、復元の現場や過程を一般へ公開・発信する「段階的公開」、それらの実施を通じた「地域振興・観光振興への貢献」を据え、令和8年秋の正殿復元を目指している。このうち「段階的公開」、「地域振興・観光振興への貢献」を推進するため「見せる復興」に取り組んでいる。「見せる復興」は、正殿復元事業を「今しか見ることができない」機会と捉え、事業の効果的な理解促進、復元工事中から観光振興・地域振興に資することを目指している。

本稿では、これまでの公園事務所の取組を紹介するとともに、その効果や課題について報告する。

2. 「段階的公開」に関する取組み

(1) 正殿復元工事が始まる前の取組み

首里城火災では、正殿を含む9棟の建物が被災した(写真1)。工事が始まる前の取組として、建物の焼失により露出した正殿遺構の公開や、被災した大龍柱の展示、復興展示室での火災遺物の展示などを行った。

正殿遺構は建物の土台(基壇)となる石積みであり、世界遺産にも登録された国指定史跡で、火災前は正殿の床面から部分的に展示していた。火災で正殿が焼失したことにより、露出した遺構を風雨から保護する施設を整備する必要が生じたが、その際に来園者が遺構を見ることができるよう工夫し、正殿復元工事に着手する前しか見ることのできない貴重な機会として公開した(写真2)。

大龍柱は首里城正殿の正面中央に配置される龍をかたどった石柱である。火災の影響を受けながらも自立し原形を保っていたが、そのままでは展示に耐えられなかったため台座から取り外し、下之御庭に整備した補修展示室にて、来園者に公開しながら補修作業を行い展示を行った(写真3)。

(2) 木材倉庫・原寸場、素屋根の公開

正殿復元工事の着工に向けて、木材倉庫や、復元に用いる木材などの大きさを実物大の図面に起こす原寸場の整備が決まったことから、職人の作業状況を来園者が直接見られるよう木材倉庫に見学エリア

を設けた。

木材倉庫見学エリアは令和4年9月に完成したが、完成直後は木材が搬入されておらず作業が行われていなかった。そこで、木材倉庫での作業を来園者にイメージしていただけるよう職員の発案で、職員自らがモデルとなり、これから行われる作業の様子を撮影しパネルとして展示した(写真4)。これにより、来園者による事業の理解促進につながった。

令和5年8月には正殿復元工事のための素屋根が完成した。内部は3階建てとなっており、これに合わせ各階に見学エリアを設けた(写真5)。3階では屋根の上棟を行う宮大工や、瓦葺きをする瓦職人の作業が、2階では龍をかたどった陶製の龍頭棟飾の設置作業が、1階では正殿全体を彩る朱い漆を塗布する漆職人の作業が見られるというように、各階において様々な職人の技や工事過程を見ることができる施設



写真1: 火災直後の首里城 (R元. 11. 1撮影)



写真2: 正殿遺構と展示施設



写真3: 焼け残った大龍柱を補修して展示



写真4: 木材倉庫見学エリア (職員がモデルとなったパネル展示)







だけでなく、この仕事を選んだ理由ややりがいなど、若手職人一人一人の目線に立った記事とすることで、若い世代の関心を高めるよう工夫した<sup>1)</sup>。

### (3) ボランティアや特別体験プログラムの実施

自ら体験することで首里城復元への関心を高めてもらうため、ボランティアや特別体験プログラムを実施した。

火災後に多額の寄付金が集まったことや、応援の言葉が多数寄せられたことから、首里城復元の力になりたいという来園者の想いを形にするため、復元工事のボランティアを企画した。公園事務所で検討を重ね、火災被害を受けた瓦や石材を細かく砕き、正殿の復元材料として再利用する「首里城正殿赤瓦シャモット製作」や、漆塗りの原料である「ニービ（細粒砂岩）の粉製作」をボランティアイベントとして実施した(写真10)。累計4.2万人が参加し、「新たな正殿に自分も関わった材料が使われることは嬉しい。完成したらまた来たい」という声をいただいた。

復元工事では宮大工や漆職人など多数の職人が作業に従事しており、建設業への関心を高めるため、職人の技に実際に体験できる「宮大工体験」や「ベンチ仕上げ体験」、「弁柄塗り体験」などを企画した。普段触ることのない専用の工具や塗装作業などを通してものづくりを身近に感じられるイベントを行い、累計約6,500人が参加した(写真11)。

地域との連携を深めるとともに、沖縄の将来を担う若い世代にも関心を持ってもらえるよう、学生の参画による広報として復元現場の今を学生目線で切り取る写真展を企画した。「写真甲子園」等で実績を有する県内の学校を職員が直接訪問し、趣旨を説明して協力を依頼、賛同いただいた4校の写真部の学生に復元現場を撮影していただき、その写真を園内で展示するとともに、HPで公開した(写真12)。学生からは「首里城の歴史と文化に触れる機会を得た。」「写真を通じて、貴重な文化を知らせる役割を果たすという使命感が湧いた。」という感想をいただいた。

## 4. 最新の取組み状況と効果

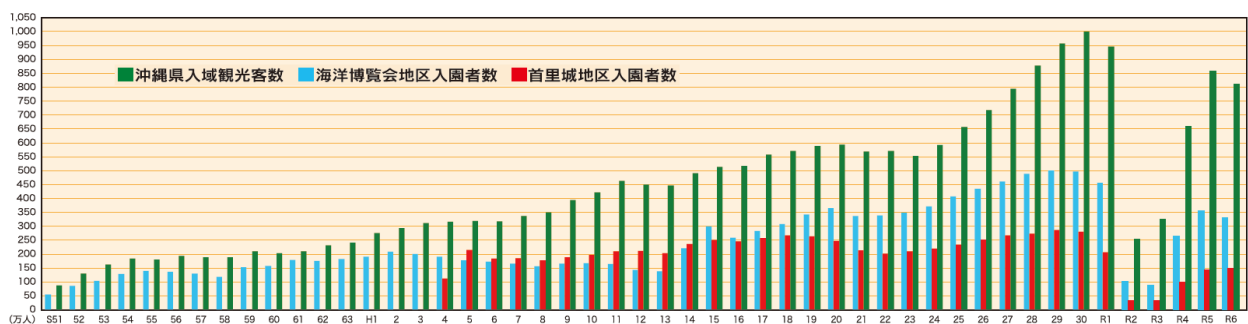


図1：入域観光客と公園入園者の推移

「見せる復興」の取組により、火災後に一部開園した令和2年度から令和6年度までに約450万人が来園した。来園者の推移は、令和2年度の約34万人から、令和3年度35万人、令和4年度100万人、令和5年度145万人、令和6年度が168万人と増加傾向となっている(図1)。復興過程を見せる取組を行わなければ、これほど多くの来園者数には達しなかったと考えられ、火災後の正殿遺構の公開を皮切りに、精力的に作業する職人や徐々に復興する正殿の姿の公開・発信に



写真10：ボランティア（ニービ（細粒砂岩）の粉製作、赤瓦シャモット製作）



写真11：やりがんな体験、弁柄塗り体験



写真12：高校生による写真展



写真13：仮囲いへのパネル展示（素屋根見学エリア閉鎖後）



取り組んだ成果であると考え。

令和7年6月からは工事の進展に伴って素屋根解体が始まり見学エリアも閉鎖したため、素屋根内で作業状況を見ることができなくなった。

素屋根解体中も「見せる復興」に取り組むため、工事現場と見学エリアを仕切る仮囲いにタイムラプス画像を展示し、時系列で正殿が復元していく様子が分かる展示を企画した。基礎工事から建方、上棟、瓦葺きなどの工事の進展が、順路に沿って歩きながら見られ、正殿壁面の塗装が、木地から黒く塗られ、さらに赤く変わっていく過程、龍頭棟飾の製作過程などのパネルを作成、展示を行った（写真13）。作業過程を時間軸に沿って展示したのは初めてだったため、展示と同時に来園者が写真を撮る姿が多く見られた。

また、来園者の声や園内の様子から、見学エリア閉鎖に伴い首里城を象徴するものや撮影スポットがないという課題が分かった。そこで、正殿の屋根に設置している鬼瓦の実物を展示し、職人の技を目の前で見られる工夫を行った。鬼瓦は6体製作し、選定した4体を正殿屋根に取付けており、残りの2体を今回展示することとした。正殿屋根に設置する鬼瓦は、正殿完成後は下から見上げることしかできない。同じ材料、同じ職人の手で製作された鬼瓦を、間近で見られるという体験を提供でき、撮影スポットにもなっていることから設置の効果は大きいと考える（写真14）。

素屋根解体が進むと来園者は見学デッキから正殿の外観を見ることができるようになったが、工事用の仮囲いが支障となり正殿の上部しか見えない状態であった。そこで、仮囲いの一部を透明パネルに変更し、来園者に正殿の外観が見えるような取組を行った。当該箇所は見学エリア入口あたり、今までは正殿が見えなかったため、ほとんど素通りされていた。透明パネルに変更することで、入場してすぐに正殿を正面から見ることができ、撮影スポットになるとともに素屋根解体の状況やこれから取り組む正殿復元工事の進捗を見てもらいやすくなった（写真15）。

首里城復元の期間中も、多様な主体に首里城公園をより活用してもらえるよう、行催事基準を暫定的に見直しを行った。これにより、民間による「夜首里城」や、美ら島財団による「酔い、宵いイベント」という夜間イベントが新しい試みとして実現した。「夜首里城」はライトアップやプロジェクションマッピングで城内を演出し、昼間とは異なる首里城の魅力を発信した。「酔い、宵いイベント」は首里地域の飲食店や泡盛酒造所などを招き、公園内で地元の酒や食べ物を楽しめる交流の場を設けた（写真16）。いずれも「夜」という今まで活用されてい

なかった時間を有効活用し、新たな需要創出や地域振興に寄与する取組となっており、引き続き取り組んでいきたい。

## 5. おわりに

本稿では、公園事務所で行ってきた「見せる復興」の取組み事例を紹介した。近年では「魅せる現場」と題して工事現場を積極的に公開する動きも生まれてきている<sup>2)</sup>。公共事業は国民に事業に関心を持ってもらうことが重要であり、また今後に向けて建設業に関心を持ってもらうことも大切である。首里城復元工事の「見せる復興」の試みが、一つの好事例になっているのではないかと考えている。今後も「見せる復興」を継続しながら令和8年秋の正殿完成、その後の北殿をはじめとした残りの復元工事に向け機運を醸成していく。



写真14：後之御庭への鬼瓦の展示



写真15：透明パネルの設置



写真16：「夜」を活用したイベント

## 参考文献及び補足

1) 公園事務所での youtube 動画及びインタビュー記事は下記を参照

[https://youtu.be/93kTevh\\_zY4?si=SUwItLBAQIB194xN](https://youtu.be/93kTevh_zY4?si=SUwItLBAQIB194xN)

<https://oki-park.jp/shuri-jo/fukkou/7455>

2) 関東地方整備局では「現場見学 ～魅せる！現場～」と題して、現場見学ガイドや出前講座などを行っている。

<https://www.kkr.mlit.go.jp/kengaku/index.html>



## Session 3 情報技術・耐久性

## 沖縄近海での地震を想定した津波による湾水振動に関する基礎的研究

琉球大学 諸見里安梨, 琉球大学 入部綱清

### 1. 緒言

巨大地震（ $M_w9$  以上クラス）に伴う津波が甚大な被害をもたらすことは、2011 年東北地方太平洋沖地震をはじめとする多くの事例により広く認識されている。一方で、 $M_w7-8.5$  クラスのいわゆる中規模地震に伴う津波は、「巨大津波に比べれば被害は限定的である」と暗黙のうちに評価されがちである。しかし、津波の周期が湾の固有周期に近い場合、地震規模が中程度であっても湾内で波高が著しく増幅する可能性がある。

本研究では、湾内の水面の振動理論で算出した沖縄県の3つの港湾の固有周期と、理論的に地震の規模から求めた津波の周期や、津波シミュレーションから推定される津波の周期を比較し、従来の津波の規模から推定する評価では見落とされがちな危険性を確認することを目的とする。

### 2. 港湾の固有周期

港湾の1次固有周期 $T_{bay}$ は式(1)に示す式で計算する。

$$T_{bay} = \frac{4L_{bay}}{\sqrt{gh_{bay}}} \quad (1)$$

ここで $L_{bay}$ は振動方向の代表長さ（湾口～湾奥までの距離）、 $h_{bay}$ は代表水深（湾内の平均水深）、 $g$ は重力加速度である。

図-1に那覇新港の航空写真と振動方向の代表長さを示す。港の形状が複雑であるため、代表長さとして比較的長い箇所と短い箇所の2箇所を選定する。本研究では、赤線で示す2.6kmおよび3.5kmとした。



図-1 那覇港（新港ふ頭）の振動方向の代表長さ  
(Google Earth より作成)

表-1に、沖縄県の3つの港湾における代表長さ、代表水深と固有周期を示す。代表長さは図-1と同じ方法で、代表水深は沖縄県が示している資料より最大水深を採用した。那覇港は 921~1,240 秒の固有周期であり、中城港は 673~1,311 秒、運天港は 639 秒であった。

キーワード：津波，固有周期，湾水振動，数値計算

表-1 港湾の固有周期

港湾名	代表長さ (m)	代表水深 (m)	固有周期 (s)
那覇港(新港ふ頭)	2,600~3,500	13	921~1240
中城湾港(新港)	1,900~3,700	13	673~1311
運天港(上運天)	1,500	9	639

### 3. 地震の規模による津波の波高と周期

断層長さ $L_{fault}$ とモーメントマグニチュード $M_w$ の関係は次式<sup>1)</sup>を用いる。

$$\log_{10} L_{fault} = 0.63M_w - 2.9 \quad (2)$$

津波は理論的には孤立波であり、波長は無限度である。しかし実際の津波には波長が存在する。本研究では津波の波長を断層長さと同程度と仮定し、津波の周期は、断層長さを震源付近の水深における長波の波速で除した値とする。

モーメントマグニチュード $M_w$ と汀線での津波波高 $H_m$ の関係は次式<sup>2)</sup>を用いる。

$$H_m = AM_w \exp(bM_w) \quad (3)$$

ここで $A$ と $b$ は定数で、それぞれ0.0004と0.9である。

表-2に琉球海溝付近で地震が発生した場合の津波の規模と、津波の周期を示す。モーメントマグニチュード $M_w$ が9.0以上では周期が2,248秒以上であり、表-1で示したすべての港湾の固有周期より大きかった。一方、那覇港と中城湾港は、モーメントマグニチュード $M_w$ が8.6程度、運天港は8.1程度の周期と一致した。このことから、モーメントマグニチュード $M_w$ が9.0未満で発生する津波においては、港湾内の水面が振動する可能性があり、表-2に示されている津波の波高より大きな波高が堤防に作用する可能性が示唆される。

表-2 琉球海溝付近での地震の規模と津波の周期

地震の規模	水深 (m)	断層長さ (m)	周期 (s)	波高 (m)
$M_w 7.0$	7,000	32,359	124	1.5
$M_w 7.5$		66,834	255	2.6
$M_w 8.0$		138,038	527	4.3
$M_w 8.5$		285,102	1,089	7.1
$M_w 9.0$		588,844	2,248	11.9
$M_w 9.5$		1,216,186	4,643	19.6

### 4. 琉球海溝付近で想定される地震で発生する津波シミュレーション

津波シミュレーションは iRIC-ELIMO<sup>3)</sup>によって行う。津波の発生源として、表-3に示す沖縄県が想定している3連動の断層モデル<sup>4)</sup>の1つを用いる。

連絡先：琉球大学工学部



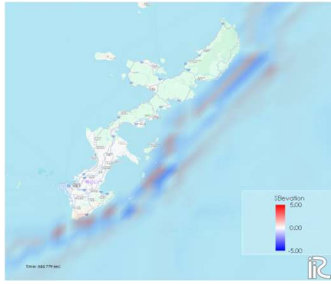
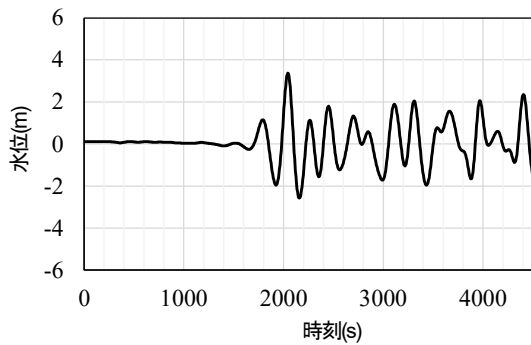
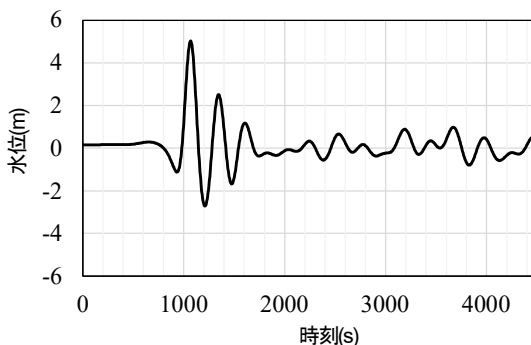


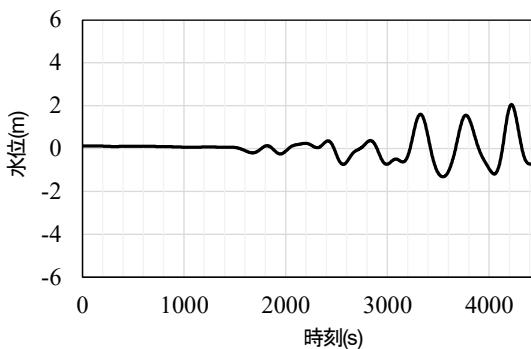
図-2 津波波高の分布 (Google Earth より作成)



(a) 那覇港



(b) 中城湾港



(c) 運天港

図-3 湾外の水位履歴

図-2に津波が沖縄の東側に到達した時刻の波高のコンター図を示す。表-3示している断層モデルで計算した津波の伝播の様子を示す。本島東側中央部あたりに大きな波高が到達しているのが確認できる。

図-3は港湾の湾外の水位履歴である。那覇港では第2波の波高が高く、その後も3m程度の波高が算出された。また、中城湾港では第1波の波高が高く、第3波以降は比較的小さな波高であった。運天港については、しばらく小さな波高の波が続き、第1波から1,500秒後に3m程度の波高が算出された。表-4は湾外の水位履歴をゼロアップクロス法によって波別解析を行った結果である。波高については最大波高、周期については地震が発生して4,500秒までで得られた個々の波の周期の範囲を示す。波高については中城湾港が最も高く6.1m、周期については、各港で最小値には違いがあったが、最大値は420秒から460秒に近い値であった。この値は、表-1に示す固有周期より小さな値であったが、湾内の代表長さの取り方によっては、十分に注意すべき周期差である。

表-4 津波シミュレーション結果

港湾名	最大波高(m)	周期(s)
那覇港 (新港ふ頭)	5.2	150~420
中城湾港 (新港)	6.1	260~460
運天港 (上運天)	3.2	440~450

## 5. 結言

本研究では、港湾の固有周期と津波の周期の関係に着目し、湾水振動の危険性を評価した。その結果、中規模地震に伴う津波であっても、条件によっては港湾内で水位が増幅する可能性があることを示した。

## 参考文献

- 1) Allen, T. I. and Hayes, G. P., Alternative Rupture-Scaling Relationships for Subduction Interface and Other Offshore Environments, Bulletin of the Seismological Society of America (2017) 107 (3): 1240–1253.
- 2) Aydan, Ö. and Tokashiki, N., Tsunami boulders and their implications on the potential for a mega-earthquake along the Ryukyu Archipelago, Japan, Bulletin of Engineering Geology and the Environment (2019) 78:3917-3925.
- 3) iRIC, <https://i-ric.org/solvers/elimo/>
- 4) 沖縄県：沖縄県津波浸水想定設定業務委託報告書，平成27年3月。

表-3 3連動断層モデル

	経度 (上端) (度)	緯度 (上端) (度)	長さ (km)	幅 (km)	すべり量 (m)	走向 (度)	傾斜角 (度)	滑り角 (度)	断層深さ (km)	$M_w$
震源1	128.806	25.728	100	50	12	225	12	90	5	8.2
震源2	129.172	26.196	100	50	12	218	12	90	5	8.2
震源3	129.756	26.812	100	50	12	218	12	90	5	8.2

## 数値計算に基づく沖合波高と汀線波高の関係に関する研究

琉球大学 金城旭希, 琉球大学 入部綱清

### 1. 緒言

2011年東北地方太平洋沖地震津波により、沿岸域に甚大な被害が生じた。この経験を踏まえ、将来発生が想定される南海トラフ巨大地震などに備え、防災計画において、津波浸水深の適切な評価が重要となっている。

津波研究においては、最大遡上高に着目した乾宮が数多く行われ、地形条件や波形条件との関係について多くの知見が蓄積されている。一方で、人々の生活圏に直接影響を及ぼす浸水深、すなわち汀線波高に着目し、沖合で与えられる波高条件との関係を体系的に整理した研究は多くない。

実務的な津波想定では数値計算によるハザードマップ作成が行われているが、研究段階で新たな条件が加わる場合に対応するため、沖合条件から浸水規模を簡便に推定できる手法の開発は重要である。

そこで、本研究では、東日本大震災津波の観測データ<sup>1)</sup>と粒子法<sup>2)</sup>の一種である MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法<sup>3)</sup>による数値計算を用い、沖合波高と汀線波高の関係を検討する。

### 2. 東北地方太平洋沖地震の観測データの整理

#### (1) GPS 波高計位置および浸水深の観測地点と観測値

津波観測データとして、土木学会海岸工学委員会・東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (TTJT) による速報値<sup>1)</sup>を用いた。GPS 波浪計による沖合観測データと、その周辺沿岸における浸水痕跡調査結果を整理した。

図-1に、東北地方太平洋沖地震津波における浸水痕跡の観測地点と観測値、および沖合波高の評価に用いた GPS 波浪計の設置位置を示す。

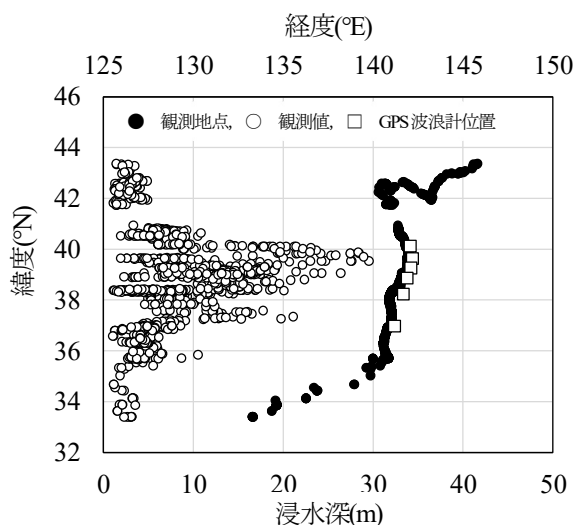


図-1 観測地点と観測値および GPS 波浪計位置

#### (2) 沖合波高データの算定

沖合波高に関するデータは、東北地方太平洋沖地震津波時に GPS 波浪計により観測された記録を用いた。本研究では、各観測点における津波波形の最大値を沖合波高  $H$  とし、GPS 波浪計の設置位置の水深を沖合水深  $h$  と定義した。得られた沖合波高と水深から、相対波高  $H/h$  を表-1のように算定した。

表-1 GPS 波浪計での観測値

GPS 波浪計	最大波高 $H$ (m)	水深 $h$ (m)	$H/h$
岩手北部沖	4.0	125	0.032
岩手中部沖	6.3	200	0.032
岩手南部沖	6.7	204	0.033
宮城北部沖	5.7	160	0.036
宮城中部沖	5.6	144	0.039
福島県沖	2.6	137	0.019

#### (3) 汀線波高データの算定

汀線波高に関するデータは、東北地方太平洋沖地震津波における浸水痕跡調査結果を用いた。各 GPS 波浪計付近の代表地点を中心として南北 8 分の幅の沿岸を対象とし、汀線から内陸方向に距離 0~100m をケース 1、0~200m のケース 2 として、それぞれの範囲における浸水高の平均値を算定した。本研究では、この平均浸水高を汀線波高  $H_s$  (添え字の数値は汀線からの距離) と定義した。各地域の汀線波高と沖合波高の比 ( $H_s/H$ ) を表-2に示す。

表-2 代表地点の汀線波高沖合波高比

代表地点 (GPS 波浪計)	$H_{s,100}/H$	$H_{s,200}/H$
久慈港 (岩手北部沖)	2.20	1.93
宮古港 (岩手中部沖)	1.02	1.04
釜石港 (岩手南部沖)	1.74	1.78
気仙沼港 (宮城北部沖)	2.15	2.22
女川港 (宮城中部沖)	2.15	2.43
塩屋埼 (福島県沖)	1.92	2.16

### 3. MPS 法による数値計算

津波の遡上や砕波といった大変形自由表面流れを再現するため、本研究では格子を必要としないラグランジュ型の粒子法である MPS 法を用いた。MPS 法は、自由表面の追跡が容易であり、津波の遡上計算への適用性が高い<sup>3)</sup>。

#### (1) 計算モデル

計算対象は、一様勾配を有する海岸地形とし、沖合か

ら汀線に向かって津波が進行する二次元モデルとした。計算モデルの概略を図-2に示す。沖合水深を $h$ ，入力波高を $H_0$ ，沖合波高を $H$ ，汀線付近で得られる最大波高を汀線波高 $H_s$ とする。数値計算では，沖合波高および海底勾配 $\tan \beta$ を変化させて計算を行った。

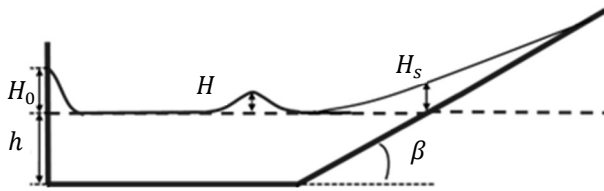


図-2 計算モデル

## (2) 波形条件および計算条件

沖合から入射させる津波波形は孤立波とし，初期水位分布を次式で与えた。

$$\eta = H_0 \operatorname{sech}^2 \left( \sqrt{\frac{3H_0}{4h^3}} r \right) \quad (1)$$

ここで， $\eta$ は孤立波の波形， $r$ は孤立波の波峰からの水平距離である。数値計算に用いた主な諸元を表-3に示す。

表-3 数値計算諸元

$H_0$ (m)	0.02~0.100
$h_0$ (m)	0.2
$\tan \beta$	1/20, 1/10, 1/5
$L$ (m)	3
粒子径(m)	0.005
時間刻み(s)	0.001
粒子数(個)	約 50,000

図-3に，MPS法による津波の遡上過程の計算結果の一例を示す。沖合から入射した孤立波が海岸斜面上を伝播し，時間の経過とともに水位が上昇して汀線方向へ遡上する様子が確認できる。

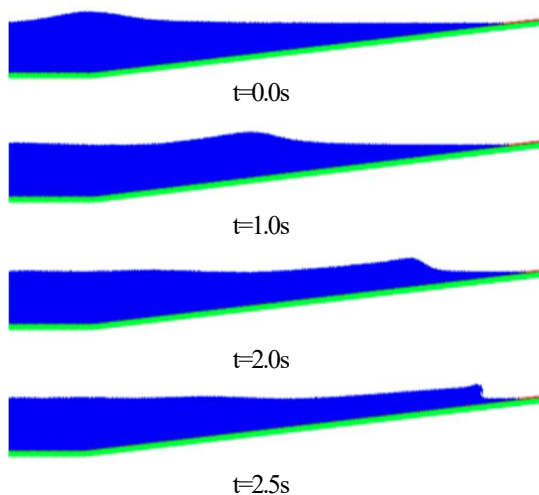


図-3 津波の遡上計算の結果

## 4. 数値計算結果と観測データの比較

図-4に，数値計算結果および観測データを，横軸を相対波高 $H/h$ ，縦軸を汀線波高比 $H_s/H$ として示す。数値計算結果は，海底勾配の違いにより $H_s/H$ の値に差が生じるものの，いずれの場合も $H/h$ の増加に伴い， $H_s/H$ が減少する共通の傾向を示した。この傾向は，沖合から汀線に向かう過程で生じる波の浅水変形による波高増幅と，砕波に伴うエネルギー散逸の寄与が，沖合波高の増加に伴って変化するためと考えられる。特に $H/h$ が大きい領域では，砕波の影響が顕著となり，汀線付近での波高増幅が抑制される傾向が確認された。また，観測データは数値計算結果の分布範囲内に概ね収まっており，沖合波高と汀線波高の関係について，数値計算が観測データの傾向を定量的に再現していることが示された。

計算結果 : ●  $\tan \beta = 1/20$ , ▲  $\tan \beta = 1/10$ , ■  $\tan \beta = 1/5$

観測データ : ○  $H_{s,200}$ , □  $H_{s,100}$

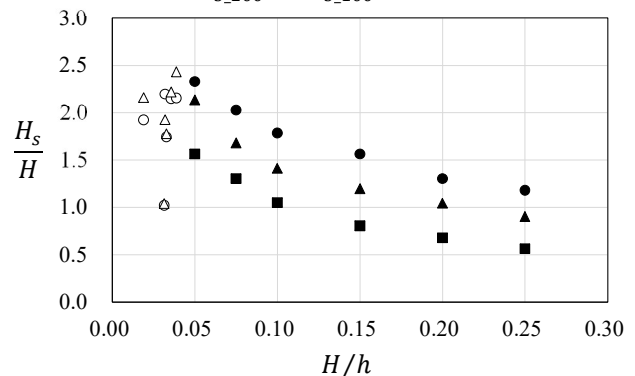


図-4 数値計算結果と観測データの比較

## 5. 結言

本研究では，2011年東北地方太平洋沖地震津波の観測データとMPS法による数値計算を用い，沖合波高と汀線波高の関係について検討した。数値計算結果はいずれの条件においても，沖合相対波高の増加に伴い汀線波高比が減少する傾向を示し，観測データとの比較から，その関係を定量的に再現できることが確認された。これらの結果は，数値計算に基づく詳細な津波計算やハザードマップ作成を前提としつつ，それらを実施する前段階において，沖合条件から沿岸部の浸水規模を概略的に把握するための基礎的知見として有用である。

## 参考文献

- 1) 土木学会海岸工学委員会・東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (<http://www.coastal.jp/tjt/>) による速報値
- 2) 越塚誠一：粒子法，丸善，2005。
- 3) 入部綱清，渡邊忠尚，仲座栄三，Rahman MD. Mostafizur：粒子法による波の遡上計算，土木学会論文集 B1(水工学)，68(4)，I\_1549-I\_1554，2013.3。

## 三次元固液連成数値解析による単一粒径土砂流の乱れ構造

○土木学会学生会員 琉球大学 山口栄治, 土木学会正会員 琉球大学 福田朝生

### 1. 序論

土砂流の連続体モデルの構築には, 粒子の乱れによる運動量交換を適切に考慮した応力モデルが必要である. しかし, 水理実験<sup>例え<sup>1)</sup></sup>では, 高濃度の土砂流の粒子スケールの詳細な乱れを計測することは困難である. そのため, まず粒子の乱れ構造の実体を明らかにすることが, 応力モデルの高度化に繋がる.

山口<sup>2)</sup>らは, 礫粒子群と水の三次元運動の連成解析モデル<sup>3)</sup> (Arbitrary Particle Multiphase, 以下 APM とよぶ) の解析結果から, 離散的に限られた波数の乱れエネルギー Spektral を算出した. 一方で, 応力構造に関わる, 連続的な波数に対するエネルギー Spektral の分布や乱れの非等方性が, 水のみの流れと比較してどのように変化するかは検討されていない.

本研究では, APM により, 3 種類の勾配の等流の土砂流と, 乱れの比較のため, 水のみ流れを解析し, 各方向の乱れ強度と連続的な波数についての乱れエネルギー Spektral を調べ, 土砂流の乱れ構造の特徴を明らかにする.

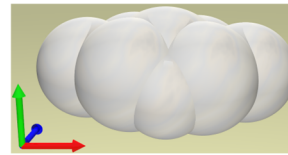
### 2. APM による土砂流の数値解析

#### (1) APM の解析手法

APM では, 流体は粒子-流体混合系の一流体モデルにより, 粒子よりも小さな計算格子で Euler 的に解く. 粒子の運動を反映するため, 固相部分は密度の異なる流体として与え, 全体を非圧縮性流れとして解いている. 粒子群の解析では, 流体力は, 固相部分に作用する応力を体積積分して評価し, 剛体の運動方程式を用い, 個別要素法で個々の粒子の運動を解く. 解析の基礎式と詳細は, 文献<sup>3)</sup>を参照されたい.

#### (2) 単一粒径土砂流の解析条件と方法

解析粒子の形状を図-1 に示す. 粒子は粒径  $d = 2.18 \text{ mm}$ , 密度  $\rho^s = 2,620 \text{ kg/m}^3$  とした. 粒径は, 礫粒子と同一体積の球の直径で定義した. 解析粒子の



a: 長径  $a/d = 1.49$   
b: 中径  $b/d = 1.00$   
c: 短径  $c/d = 0.72$   
Shape Factor  $c\sqrt{ab} = 0.590$

図-1 解析に用いた粒子の形状

表-1 各ケースの解析条件

水路勾配 $\theta$	6.4°	10.5°	14.4°
初期水位 $h_0$	0.0282 m	0.02895 m	0.00426 m
粒子群の初期投入量 $V^s$	5.61 $\times 10^{-5} \text{ m}^3$	7.64 $\times 10^{-5} \text{ m}^3$	1.66 $\times 10^{-4} \text{ m}^3$

内部摩擦角は,  $\phi = 39.2^\circ$  である<sup>2)</sup>. 水路長, 幅は 0.1m であり, 等流を形成するため, 縦断方向を周期境界とする. 流体計算格子は, 粒径  $d$  の 1/8 サイズ (0.2725mm) である. 流下方向を  $x$ , 左岸方向に  $y$ , 水路床から垂直上向きを  $z$  の正の方向と定義した.

土砂流の各解析ケースの条件を表-1 に示す. 解析では, 最初に水平な水路に初期投入量  $V^s$  の粒子群を投入した. 次に, 粒子群を堆積させた水路に解析の底面に対する水位が  $h_0$  となるように水を与え, 瞬間的に水路に勾配  $\theta$  をつけて土砂流を発生させた. また, 勾配を設定してから時刻を  $t$  と定義する.

#### (3) 水のみ流れの解析方法

土砂流との乱れ構造の比較を行うため実施した, APM による水路勾配 6.4° の水のみ流れの解析では, まず同一勾配の土砂流の解析と同量の粒子を, 水平水路上に堆積させた. 次に, 同じ勾配の土砂流の解析結果の河床高以上の粒子は除き, 残存粒子は固定して, 土砂流 (6.4°) と同様な粗度の固定床とした. その後, 土砂流 (6.4°) と同量の水を与え, 瞬間的に勾配 6.4° を設定して水流を発生させた.

### 3. 解析結果による単一粒径土砂流の乱れ構造

各解析結果の流動深平均の流速が時間的に落ち着いて,  $t = 9 \text{ s}$  時点以降を平衡状態とした. 解析結果の  $t = 9 \text{ s}$  時点の 3D 画像 (図-2) のアニメーションを確認すると, 粒子の複雑な渦運動が確認された. こ

キーワード 単一粒径土砂流, 乱れエネルギー Spektral, 乱れ強度, 固液混相流 3 次元解析, 土砂濃度  
連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科 E-mail : yamaguchi.ryudai@gmail.com



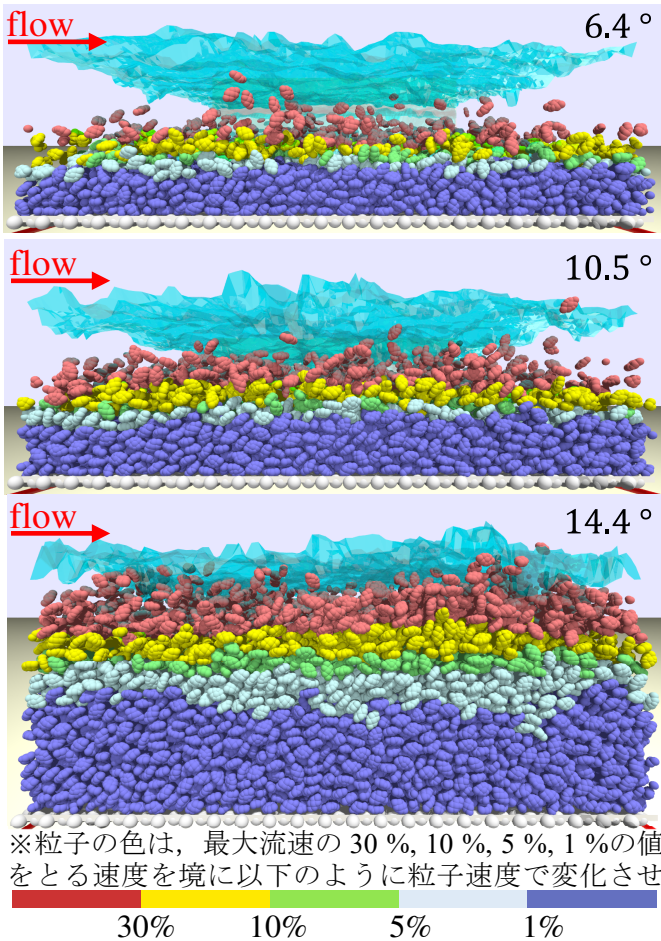


図-2 単一粒径土砂流の数値解析結果の 3D 描画  
のような乱れによる応力のモデル化を考えるうえで、  
乱れの等方性やスケールごとの乱れの大きさ等の乱  
れ構造を理解することは重要である。本研究では、こ  
れらの乱れ構造を APM の解析結果から分析する。

### (1) 各方向流速の乱れ強度

等流の土砂流の乱れの等方性を確認するため、解  
析結果から混相流の  $i$  方向流速  $u_i$  について縦断平均  
値からの差を  $u_i'$  と定義した。そして、平衡状態の  
 $t = 9\text{ s} \sim 13\text{ s}$  における、 $u_i'$  の 2 乗平均の平方根を乱  
れ強度  $u_i^{\text{RMS}}$  と定義して算出した。図-3 に、 $t = 9\text{ s} \sim$   
 $13\text{ s}$  における  $x$  方向の平均流速  $\bar{u}_x$  の最大値を除し  
てそれぞれ無次元化した、横断方向中央位置におけ  
る、無次元乱れ強度  $\bar{u}_i^{\text{RMS}}$  と  $x$  方向の無次元平均流  
速  $\bar{u}_x$  の鉛直分布を示す。図の縦軸は、高さ  $z$  を解析  
の流動深で除して無次元化した高さ  $z^*$  で示してい  
る。また、図には、 $t = 9\text{ s} \sim 13\text{ s}$  において平均化し  
た粒子の体積濃度  $c$  も併せて示した。

図より、いずれの解析ケースも  $x$  方向の乱れ強度  
が大きい。一方、各方向の乱れ強度の相対的な大きさ

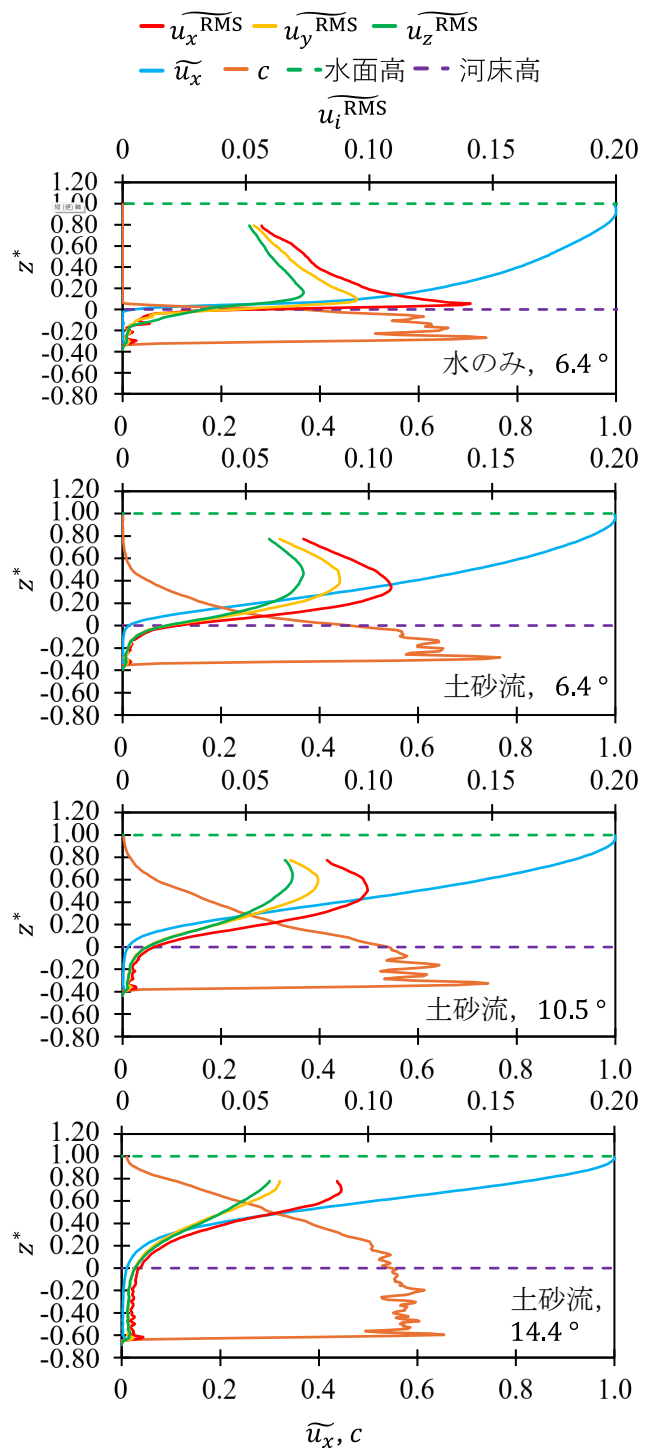


図-3 各方向流速の乱れ強度の鉛直分布

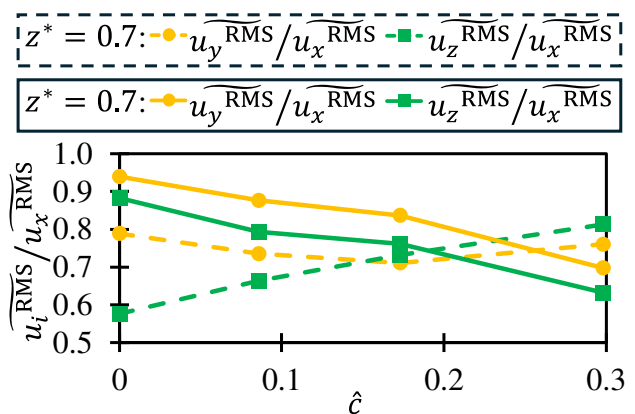


図-4 粒子濃度と各方向の無次元乱れ強度の比

は高さ毎に、またケースごとに異なり、乱れの等方性が各ケースで変化している。

このようなケース毎の乱れの等方性を明確にするため、図-4 に、各ケースの  $x$  方向の乱れ強度  $\overline{u_x^{\text{RMS}}}$  に対する、 $y, z$  方向の乱れ強度  $\overline{u_y^{\text{RMS}}}$ ,  $\overline{u_z^{\text{RMS}}}$  のそれぞれの比について、参考に  $z^* = 0.1, 0.7$  の結果を示す。図の横軸は、各ケースの別を表す一般的な諸量として、流動深平均の体積濃度  $\hat{c}$  とした。

図より、実線の  $z^* = 0.7$  の場合、 $x$  方向の乱れ強度に対する  $y, z$  方向の乱れ強度の比は、体積濃度の増加に伴い小さくなっている。このため、流れの表層では、勾配の急な高濃度土砂流ほど、 $x$  方向の乱れが卓越し、異方性が顕著になることがわかる。また、点線の  $z^* = 0.1$  の場合、黄色の  $x$  方向に対する  $y$  方向の乱れ強度の比は、濃度の変化に対して約 0.8 でほぼ横ばいである。緑色の  $z$  方向の乱れ強度は、濃度の増加で相対的に大きくなり、 $y$  方向の乱れ強度に近くなる。これは、高濃度土砂流は低濃度の流れと比較して、河床付近で乱れがより等方的に近くなることを表す。

## (2) 等流状態の土砂流のスケール毎の乱れ

スケール毎の乱れの大きさを調べるために、フーリエ解析を行い、各時刻の高さ毎の横断方向中央位置の乱れエネルギー  $K$  とそのスペクトル  $A$  を次式で算定した。

$$K = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{u_i'(x)u_i'(x)}{2} dx = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi}{L} A(k_n) \quad (1)$$

$$A(k_n) = \frac{L}{2\pi} \frac{a_i(k_n)a_i(k_n) + b_i(k_n)b_i(k_n)}{4} \quad (2)$$

$$k_n = \frac{2n\pi}{L} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

$$a(k_n) = \frac{2}{L} \int_{-L/2}^{L/2} u_i(x) \cos k_n x dx \quad (4)$$

$$b(k_n) = \frac{2}{L} \int_{-L/2}^{L/2} u_i(x) \sin k_n x dx \quad (5)$$

ここに、 $u_i$  は解析結果の  $i$  方向流速、 $u_i'$  は  $u_i$  についての縦断平均値からの変動、 $k_n$  は周期数  $n$  に対する波数、 $L$  は水路長 0.1m である。式 (1) の中央の辺と最右辺の等号は、パーセバルの定理で結ばれる。式 (1) より、各波数  $k_n (\neq 0)$  のスペクトル  $A$  は乱れエネルギー  $K$  に対する寄与を表す。

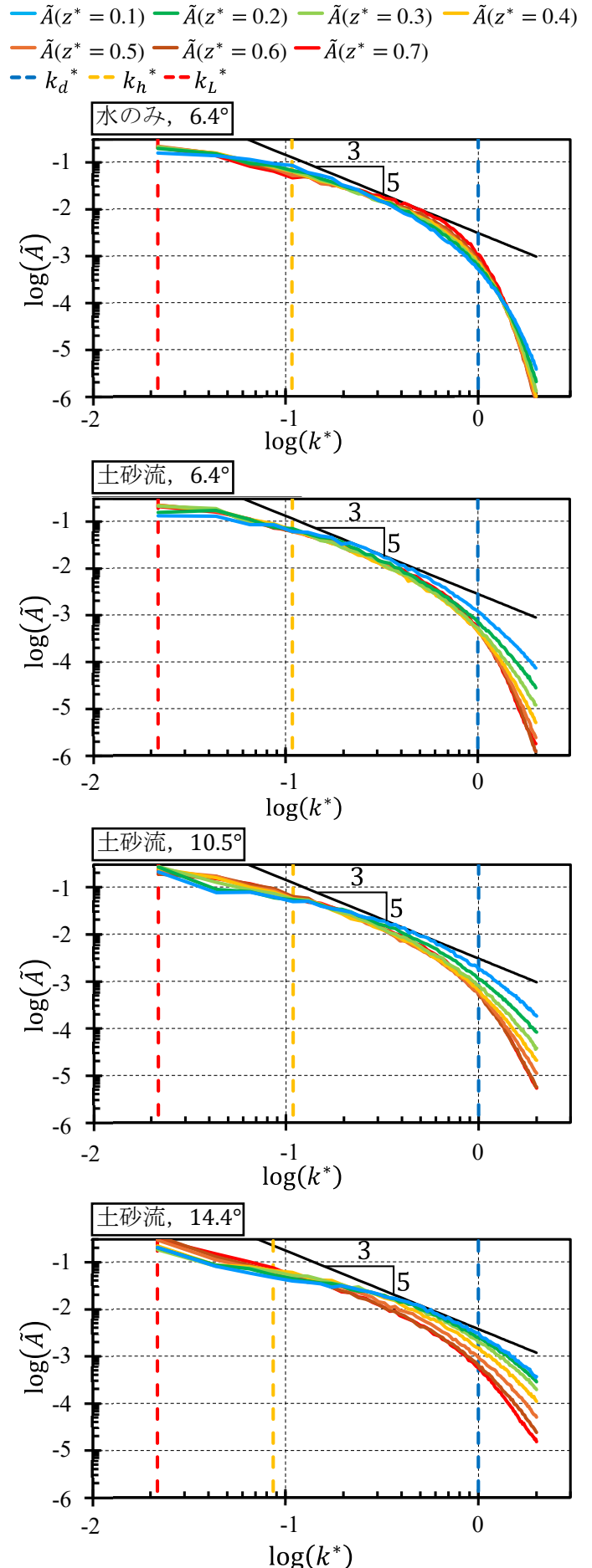


図-5 乱れエネルギー Spektral の波数分布

図-5 に、平衡状態の  $t = 9 \text{ s} \sim 13 \text{ s}$  における平均スペクトル  $\bar{A}$  を無次元化した  $\tilde{A}$  の波数分布  $z^*$  毎に示す。図の横軸の波数  $k^*$  と縦軸のスペクトル  $\tilde{A}$  は、それぞれ次式で無次元化した。

$$k^* = \frac{k}{k_d} \quad (6)$$

$$\tilde{A}(k^*) = \frac{2\pi \bar{A}(k)}{L \bar{K}} \quad (7)$$

ここに  $k$  は任意の波数、 $k_d (2\pi/d)$  は粒径  $d$  の波数、 $\bar{K}$  は  $t = 9 \text{ s} \sim 13 \text{ s}$  で平均化した乱れエネルギーである。ここで、式 (7) で算出した各波数の無次元スペクトル  $\tilde{A}$  は、式 (1) の関係から  $\bar{K}$  に対する寄与を割合として示す。参考に、スケールの小さい方から、粒径、流動深、水路長のスケールの無次元波数を、それぞれ  $k_d^*, k_h^*, k_L^*$  と定義して、図に点線で示した。さらにコロモゴロフの  $-5/3$  乗の直線も参考に示した。

図より、水流のみの分布では、無次元高さ  $z^*$  毎に大きな違いはみられない。しかし、土砂流は  $z^*$  が低いほど、波長の小さな高波数領域のスペクトルが大きく、また水路勾配が急なほど波数に対するスペクトルの低下の傾きが緩くなる傾向がみられる。

このような高波数と低波数のスペクトルの比をより明確に考察するため、図-6 には、土砂流の各ケースの無次元スペクトル  $\tilde{A}$  について、 $k^* = 1$  のスペクトルに対する、 $k^* = 0.1$  のスペクトルの比  $\tilde{A}(0.1)/\tilde{A}(1)$  と体積濃度  $\hat{c}$  との関係について、参考に  $z^* = 0.1$  と  $0.7$  の結果を示す。

図より、各ケースで  $z^* = 0.7$  よりも  $z^* = 0.1$  の方が  $\tilde{A}(0.1)/\tilde{A}(1)$  小さく、河床に近いほど種々のスケールのスペクトルが近くなることを示す。これは、河床ほど体積濃度が高く、粒子スケールの乱れの強度が、全体の乱れの強度に対して大きな割合を占めることを表す。また、 $z^* = 0.1$  と  $0.7$  のいずれも、濃度の増加に対して減少傾向を示している。すなわち、高濃度の土砂流ほど、異なるスケールの乱れのスペクトルが近い値をとることを示す。この傾向は、 $z^* = 0.7$  でも確認されることから、高濃度の土砂流は低濃度の土砂流よりも水面付近まで種々のスケールの乱れが混在するような状態であると考えられる。本研究により、土砂濃度および流動高さに応じた、特徴的な乱れ構造が明らかとなった。

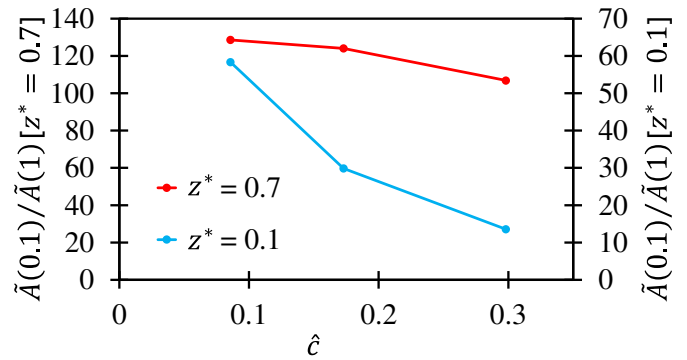


図-6 粒子濃度と無次元スペクトルの比の関係

#### 4. 結論

本研究では、APM を用いて勾配の異なる 3 ケースの単一粒径土砂流とおよび、乱れの比較のため水の流れを解析した。そして、解析結果から、等流状態における各方向の乱れ強度と乱れエネルギーのスペクトルを高さに算出し、乱れ構造を分析した。

乱れ強度の分析から、水面付近では、高濃度の土砂流ほど流下方向の乱れ強度が他方向の乱れ強度と比べて相対的に大きくなり、非等方的な乱れになる傾向を示した。一方、河床付近ほど、高濃度の土砂流ほど等方的な乱れに近くなる傾向を示した。

乱れエネルギースペクトルの分析により、河床付近ほど、波数の増加に対する高波数側のスペクトルの減衰傾向は弱く、異なるスケールのスペクトルの値が近くなる傾向が確認された。これは、体積濃度の高い場合ほど、流れに対して粒子運動に起因する乱れの寄与が大きくなるためと考えられる。また、高濃度の土砂流では、水面付近でも高波数側のスペクトルの減衰は小さいまま維持され、水面付近においても種々のスケールの渦が混在し、複雑な渦構造となっていることが確認された。

#### 参考文献

- 1) Sun, J., Gao, T., Fan, Y., Chen, W. and Xuan, R., *Powder Technology*, Vol.344, pp.883-896, 2019.
- 2) 山口栄治, 福田朝生, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.78, No.2, I\_895-I\_900, 2022.
- 3) Tomoo Fukuda, Shoji Fukuoka, *Advances in Water Resources*, Vol. 129, pp. 297-310, 2019.



## フランジを有する矩形断面の下面の外圧係数に関する基礎的研究

琉球大学 倉持武蔵, 入部綱清, 下里哲弘, 日鉄エンジニアリング (株) 田村康行

(株) 横河ブリッジホールディングス 加藤健太郎, 宮地エンジニアリング (株) 山下修平

### 1. 緒言

既往の研究では、台風接近時における多機能防食デッキに作用する風圧を実橋計測により把握し、実環境下での風圧特性が明らかにされている<sup>1)2)</sup>。一方、台風時の風況は非定常性が強く、橋梁周りの流れ場も複雑であることから、得られた風圧データを設計や防災評価に適用するためには、風圧データから得られる外圧係数の評価方法を含めた整理が不可欠である。

そこで本研究では、多機能防食デッキを有する橋梁周りの流れ場を想定し、防災的観点から危険側を考慮した外圧係数分布の評価方法を整理・定義した上で、基本的な形状モデルを用いて強風時における外圧係数の分布特性を明らかにすることを目的とする。

### 2. 数値計算概要

多機能防食デッキを有する橋梁周りの流れ場を想定し、フランジを有する矩形断面周り流れ場をCfdOFによって3次元非定常で計算する。ただし、計算領域の奥行はメッシュの最大寸法の4つ分程度の疑似3次元である。

図-1に数値計算のモデルと境界条件を示す。計算領域左端より10m/sで風を流入として与え、モデルの下面に作用する外圧係数を算出する。パラメータとして、矩形断面の高さ $H$ 、フランジの長さ $L$ 、矩形断面上面と計算領域の上端までの長さ $h$ の3種類とした。

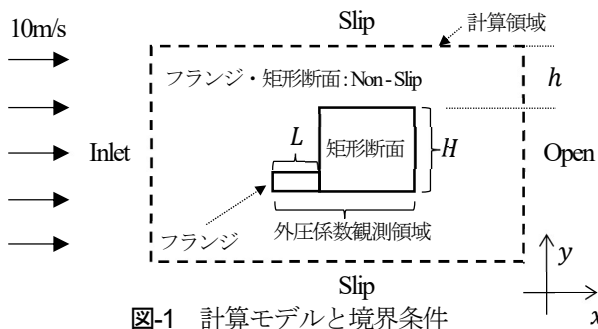


図-1 計算モデルと境界条件

矩形断面上面と計算領域の上端までの長さ $h$ については、矩形断面下面から計算領域下端までの長さと同様な場合（計算ケースA）と、 $h$ が0の場合（計算ケースB）の2ケースとした。 $h$ を0とした理由は、計算領域の上端を床板として仮定し、矩形断面上面がこれに接する条件を与えることで、橋梁断面を模擬するためである。矩形断面の下面は長さ20.0mで、計算領域の寸法は計算ケースAの場合、 $x$ 方向に100m、 $y$ 方向に100mである。矩形断面とフランジを合わせて計算モデルと呼び、外圧係数観測領域は計算モデルの下面とする。

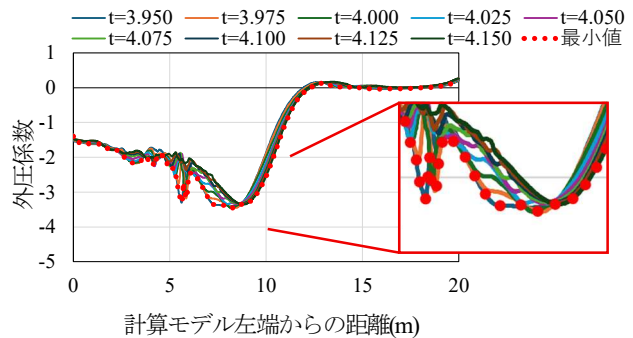


図-2 外圧係数の時間的な変動とその最小値

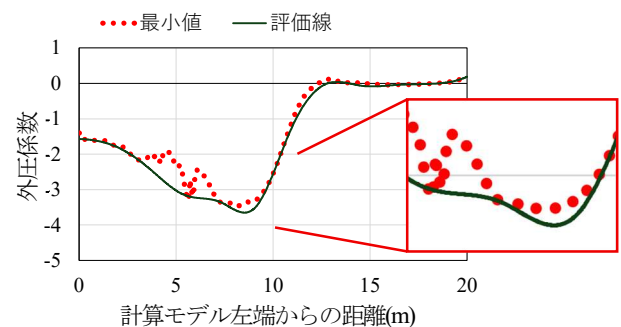


図-3 外圧係数の最小値と評価線

### 3. 外圧係数の算出方法

外圧係数 $C_{pe}$ とは物体に作用する流体の圧力 $P$ を基準となる動圧で無次元化した量で、形状による圧力分布の違いを表す指標であり、次式で表される。

$$C_{pe} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ は流体の密度で今回は空気密度で $1.2 \text{ g/m}^3$ 、 $U$ は基準となる速度で、今回は図-1で示されている流入速度で $10 \text{ m/s}$ である。

### 4. 外圧係数の評価方法

非定常な流れ場においては、外圧係数の分布は時間的に大きく変動するため、外圧係数をどのように評価するかの判断は必ずしも容易ではない。そこで本研究では、数値計算により得られた外圧係数の時系列分布に対して、2つの処理を順に適用することで、外圧係数の評価線を得る。

図-2に1つ目の処理として、複数の時刻における外圧係数分布に対し、各位置で最小値を抽出した結果を示す。図中の赤点は、各位置において時系列中で最も小さい外圧係数を示したものであり、最小値を選択することで、外圧係数を危険側で評価することができる。

キーワード：外圧係数、フランジ、数値計算

連絡先：琉球大学工学部



図-3には、図-2で得られた最小値分布に対して2つ目の処理を施して得られた外圧係数の評価線を示す。本研究では、観測された外圧係数を位置の関数として3次スプラインにより平滑化した。スプライン関数は観測領域を複数の区間に分割し、各区間を3次多項式で表現するとともに、関数値および1階・2階微分の連続性を満たす。近似曲線の係数は分位点回帰に基づいて決定し、防災的観点から外圧係数の負の大きな値を代表させるため、下側分位( $r=0.05$ )を採用した。これにより、瞬間的な極値のばらつきを抑えつつ、外圧係数の分布を空間的に滑らかな評価線として整理することができる。また以降、最も強い負圧が生じたときの外圧係数を、本研究における外圧係数の最大値と定義する

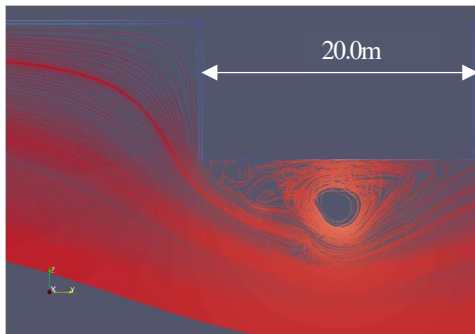


図-4 計算ケース B・ $H = 1.0\text{m}$ ・ $L = 0.00\text{m}$ の流線

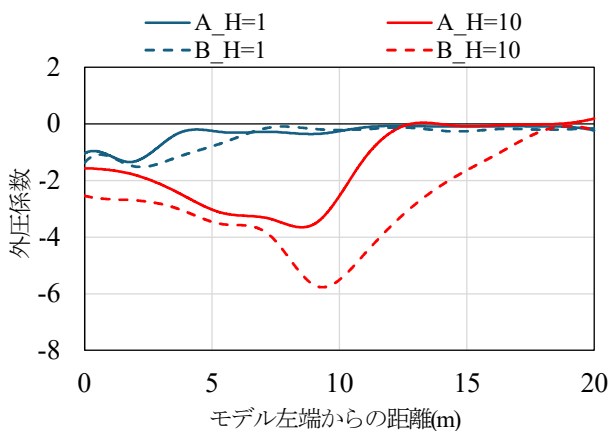


図-5 フランジ長さ $L=0.00$

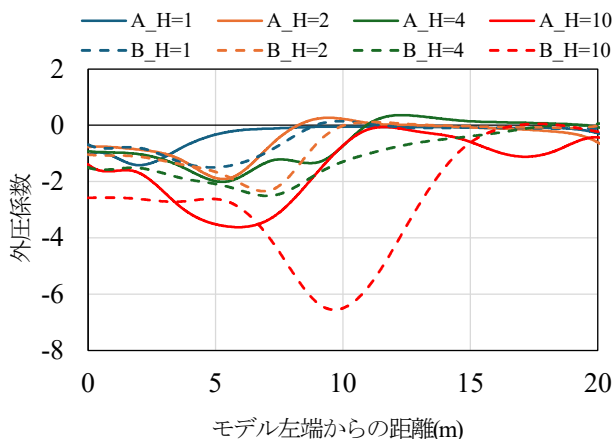


図-6 フランジ長さ $L=0.10$

図-4に計算ケース B, 矩形断面の高さ  $1.0\text{m}$ , フランジの長さ  $0.0\text{m}$  (フランジがない) の場合の矩形断面の下面の流線を示す。矩形断面の側面に流れが衝突し、下面側に回り込んでいる様子が確認できる。さらに計算モデルの左端で流れは剥離を起こし、計算モデル下面に接する渦が発生している。このような場合、計算モデル下面には負圧が発生する。

図-5にフランジがない場合における、計算ケース A と B, および矩形断面の高さの違いによる外圧係数の分布を示す。計算ケース A と B の結果の違いについては、B が A より外圧係数の負の最大値が高く、おおむね同じ位置で観測された。外圧係数の高い領域については B の方が風下にまで及んでいた。また、矩形断面の高さによる違いについては、高さ  $10\text{m}$  の場合の方が下面に回り込む流れの流速が速くなり、外圧係数は高くなっている。

図-6にフランジがない場合における、計算ケース A と B, および矩形断面の高さの違いによる外圧係数の分布を示す。外圧係数の負の最大値については、フランジがない場合と同様に B の方が高かったが、最大値の位置については同じ位置ではなく、B の方が風下側であった。外圧係数の高い領域については、フランジがない場合と同様、B の方が風下にまで及んでいた。また、矩形断面の高さによる違いについては、高さが高くなるほど、外圧係数が大きくなり、その差も大きくなった。

## 5. 結言

このようにフランジの長さによって、外圧係数の最大値やその発生位置、高い外圧係数の領域が変化することが確認された。特にフランジ長さ  $0.10\text{m}$  では、計算ケース B において外圧係数の最大値の位置が風下側へ移動し、外圧係数の高い領域もより風下にまで及ぶ傾向がみられた。これはフランジの付加により、下面近傍のはく離および渦の形成の位置が変化し、圧力低下域が風下方向へ移動したためと考えられる。さらに、矩形断面の高さが高いほど下面に回り込む流れが強まり、外圧係数が増大する傾向が確認されたことから、フランジ長さの影響は断面高さによる回り込み流れの強さと相互に作用して現れることが示唆される。

## 参考文献

- 1) 山下修平, 田村康行, 加藤健太郎, 磯部喬幸, 田井政行, 下里哲弘: 台風環境下における鋼桁下面に設置した多機能防食デッキの風圧分布特性, 土木構造・材料論文集 第39号, 2023.12.
- 2) 磯部喬幸, 下里哲弘, 山下修平, 浅野文佳, 田村康行, 加藤健太郎: 台風下と強風下における橋梁周りの風圧特性に関する実測的研究, 第13回土木学会西部支部沖縄会技術発表講演会, 2024.1.

## MPS 法における流体と剛体の連成計算手法に関する基礎的研究

琉球大学 眞榮田 葉, 入部 綱清

### 1. はじめに

粒子法の一つである Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法は、自由表面を有する流体運動や大変形問題に適した数値計算手法として広く用いられている<sup>1)</sup>。特に、水面への物体の衝突を伴う問題においては、他の手法に比べ、流体と剛体の相互作用を比較的簡単に取り扱える点に大きな利点がある。一方で、MPS 法では圧力勾配項の離散化に起因する数値的不安定性が指摘されており、これを抑制するためのさまざまな改良手法が提案されてきた。

圧力勾配計算に関しては、粒子間の圧力差を用いる基本的な手法に加え、圧力和を用いた安定化手法などが知られている。しかし、これらの手法が流体と剛体の連成計算に及ぼす影響については、十分な比較検討がなされているとは言い難い。そこで本研究では、圧力勾配計算手法の違いが、静水圧分布および流体と剛体の連成挙動に与える影響を明らかにすることを目的とし、数値計算結果と実験結果との比較を通じて検討を行う。

### 2. MPS 法の圧力勾配計算手法

粒子 $i$ を基準に、粒子 $j$ の圧力 $P$ を 2 次以降の項を省略して表すと次式となる。

$$P_j = P_i + (x_j - x_i) \left( \frac{dP}{dx} \right)_i \quad (1)$$

式(1)を整理すると次式となる。

$$\left( \frac{dP}{dx} \right)_i = \frac{P_j - P_i}{x_j - x_i} \quad (2)$$

MPS 法では、粒子 $i$ における勾配を近傍粒子との相互作用の重み付き和で評価し、式(2)の右辺は次式となる。

$$\left( \frac{dP}{dx} \right)_i = \frac{d}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{P_j - P_i}{|x_j - x_i|} \frac{x_j - x_i}{|x_j - x_i|} w \right] \quad (3)$$

式(3)は、MPS 法における圧力勾配項の基本式である。 $w$  は重み関数、 $n_0$  は重み関数の和、 $d$  は次元数である。MPS 法では、式(3)の数値的不安定性を抑制するため、粒子 $i$ の圧力 $P_i$ を最小圧力 $P_{i,min}$ に置き換える安定化手法が提案されており、本研究ではこれを基本手法と呼ぶ。一方で、式(3)の圧力差 $(P_j - P_i)$ を圧力和 $(P_j + P_i)$ に置き換える安定化手法も提案されており、これを和手法と呼ぶ。本研究では、これら二つの手法を用いた流体と剛体連成計算を実施し、その計算結果を比較する。

### 3. 圧力勾配計算手法の違いによる静水圧計算

基本手法と和手法の流体計算に対する違いを確認するため、図-1 に示す水槽モデルで、静水圧分布を計算し比

較を行う。水槽の深さは 20cm である。

図-2 に静水圧分布のコンター図、図-3 に静水圧と水深の関係を示す。両手法とも静水圧分布は水深に比例している。また、圧力の理論値として水槽の底で 1,980Pa であるため、両手法とも精度良く計算できていることが確認できる。

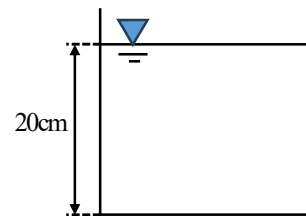


図-1 水槽モデル

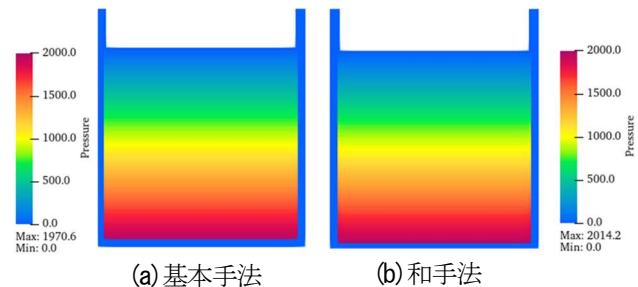


図-2 基本手法と和手法の静水圧コンターの比較

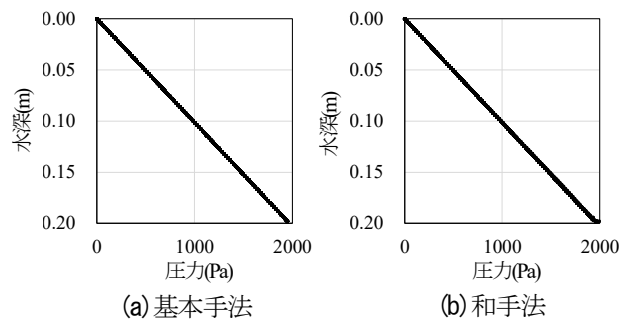


図-3 基本手法と和手法の静水圧分布の比較

### 4. 流体と剛体の連成計算と実験との比較

基本手法と和手法の流体と剛体の連成計算に対する違いを確認するため、図-2 に示すモデルで、数値計算を行い、同条件の実験との比較を行う。

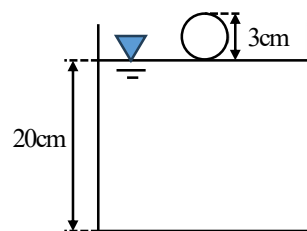


図-4 水槽内への円柱落下モデル

水槽の水深は20cm, 円柱の直径は3cm, 円柱の材質はアクリルで, 密度は $1.19\text{kg/m}^3$ である。

図-5, 図-6 に基本手法と和手法の計算結果, 図-7 に実験結果を示す。計算結果は, 基本手法は初期状態から1.0s 後までに剛体が底に達しているのに対し, 和手法では水表面付近で浮く結果となった。一方で, 実験結果は基本手法と同様に1.0s 後までに剛体は底に到達した。

図-8 に円柱の中心の変位を示す。基本手法と実験結果はともに底に到達するが, 基本手法は約8.5s 後に底に到達するのに対し, 実験では約1.15s 後であった。ここで, 実験で剛体が底に到達する時刻については, 前タイムステップからの補間で求めている。

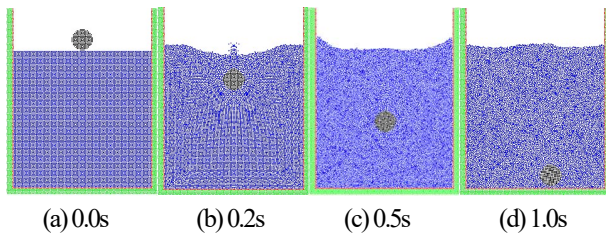


図-5 基本手法による水槽内への円柱落下の計算結果

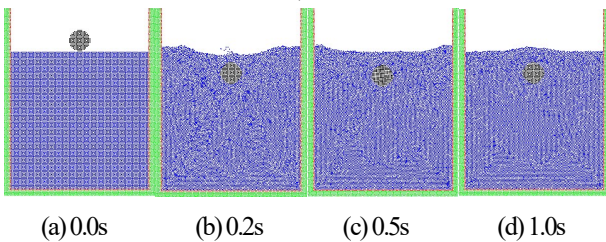


図-6 和手法による水槽内への円柱落下の計算結果

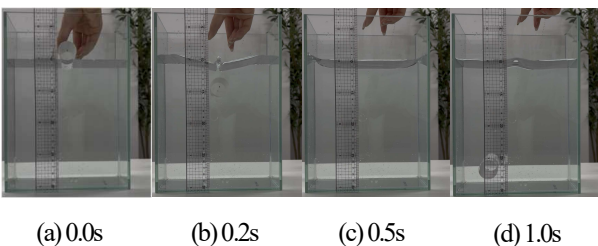


図-7 実験による水槽内への円柱落下の結果

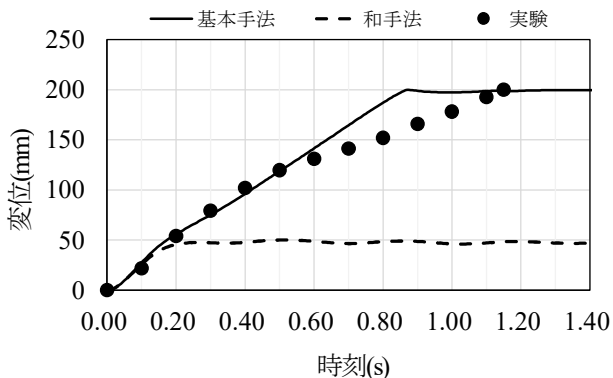


図-8 基本手法, 和手法, 実験の変位の比較

## 5. 混合手法による数値計算

前章までの結果より, 流体計算では, 基本手法および和手法のいずれにおいても静水圧分布が理論値と良好に一致することが確認された。一方, 流体-剛体連成計算では, 剛体挙動に差が生じた。そこで本研究では, 流体計算には基本手法を用い, 剛体の圧力勾配計算に混合手法を導入する。混合手法では, 式(4)のように剛体表面粒子の圧力勾配を, 圧力差項と圧力和項にそれぞれ重み係数  $\alpha$ ,  $\beta$  を乗じた上, それらを足し合わせて算定する。

$$\left(\frac{dP}{dx}\right)_i = \frac{d}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{\alpha(P_j - P_{i,min}) + \beta(P_j + P_i)}{|x_j - x_i|} \frac{x_j - x_i}{|x_j - x_i|} w \right] \quad (4)$$

図-9 に  $\alpha:\beta$  の組み合わせによる計算結果の比較を示す。 $\alpha:\beta$  が 0.7:0.3 の場合, 実験結果と良好な一致を示した。

図-10 に混合手法 (0.7:0.3) による水槽内への円柱落下計算結果を示す。図-7 の実験結果と比較して良好な一致を示した。

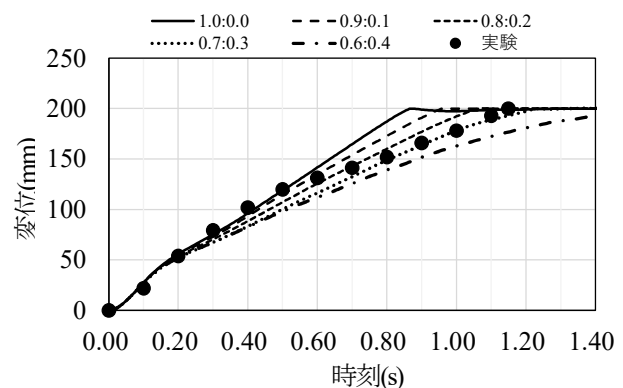


図-9 混合手法と実験の変位の比較

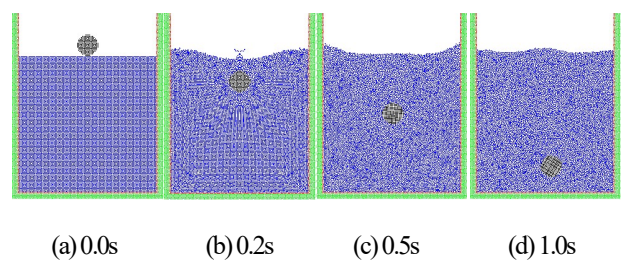


図-10 混合手法 (0.7:0.3) による水槽内への円柱落下計算結果

## 6. おわりに

本研究では, MPS 法における圧力勾配計算手法の違いが流体-剛体連成挙動に及ぼす影響を検討した。剛体に作用する圧力勾配の計算に混合手法を導入することで, 実験結果と良好に一致する挙動が得られた。

## 参考文献

- 1) 越塚誠一: 粒子法, 丸善, 2005.



## 機械学習によるコンクリート構造物の鉄筋腐食および腐食ひび割れ発生時期の予測に関する基礎研究

琉球大学 ○眞栄里和嵯, 富山潤, 花城有人,  
ピーエス・コンストラクション(株) 吉見映輝, 琉球セメント(株) 比屋根方新

### 1. はじめに

沖縄県は四方を海に囲まれた島嶼環境であり、常に多量の飛来塩分が供給されるため、コンクリート構造物の塩害が深刻な問題となっている。特にコンクリート構造物内の鉄筋の腐食は、表面に変状が現れるまで外観からの把握が困難である。したがって、予防保全の観点から、変状が表面に現れる前に腐食状況を予測し措置することが重要である。当研究室の既往の研究では、環境作用、建設位置、構造物特性(W/C, かぶり, ひび割れなど)を入力とした機械学習モデルを構築し、コンクリート構造物の鉄筋腐食開始時期と腐食ひび割れ発生時期の予測が可能であることを示した<sup>1)</sup>。本研究では、既往モデルの高度化を目的に、新たに「那覇市」のデータを追加し、学習モデルを構築した。構築した学習モデルに対して、島嶼県における予測精度の検証を行うとともに、コンクリート構造物の鉄筋腐食開始時期と腐食ひび割れ発生時期を精度よく予測することが可能か検討した。

### 2. 機械学習を用いた塩害劣化予測手法

#### 2.1 解析条件とデータセットの拡張

機械学習によるコンクリート構造物の劣化予測に必要な実測データが不足しているため、本研究では、コンクリート構造物の長期性能照査支援ソフトウェア(LECCA)<sup>1), 2)</sup>を用い、様々な環境作用、建設位置、構造物特性(W/C, かぶり, ひび割れなど)を設定し、腐食発生および腐食ひび割れ発生時期を算出し、入力値を説明変数、腐食発生および腐食ひび割れ発生時期を目的変数としたデータセットを構築した。

既往の研究<sup>1)</sup>では塩害環境の異なる3地点(与那国, 新潟, 山口)を選択していたが、本研究ではこれに加え、新たに「那覇市」を対象地点として追加した。(表-1)。コンクリート構造物の条件として、セメント種類は普通ポルトランドセメントとした。コンクリート条件や飛来塩分モデル(宇多モデル<sup>1), 2)</sup>な

どの基本設定は既往研究を踏襲し、那覇の気象・地形条件を反映したデータを学習用・評価用データとして拡張した。コンクリート構造物の条件を表-2, 陸上構造物の境界条件を表-3に示した。

表-1 対象とした地域

地域区分	気象データの指定		気象データから算出した結果
	都市名	利用年	平均風速(m/s)
A	与那国	標準年	5.28
B	新潟	標準年	2.9
C	山口	標準年	1.39
A	那覇	標準年	3.05

表-2 コンクリート構造物の条件

水セメント比(%)	かぶり(mm)	ひび割れ深さ(mm)		
35	50	0	25	50
50	70	0	35	70

表-3 陸上構造物の境界条件

設定位置		波浪条件のパラメータ	
汀線からの距離(m)	海面からの高さ(m)	波浪条件	海岸地形条件
1	2	日本海側	岩礫性
50	5	太平洋側	砂礫
100	10		
200			

#### 2.2 ランダムフォレスト

本研究は機械学習の一種であるランダムフォレストを用いた<sup>3)</sup>。ランダムフォレストのアルゴリズムでは、データの説明変数をランダムに選択し、決定木を構築する処理を複数回繰り返し行い、各決定木の推定結果の多数決や平均値により分類や回帰を行う方法である(図-1参照)。

学習に用いた説明変数は、表-1から表-3に示したLECCAの入力値12個を想定し、LECCAから得た腐食発生時期、腐食ひび割れ発生時期の2016個のデータを8:2の割合(ホールドアウト法<sup>3)</sup>)で学習用データと評価用データに分け、決定木の本数は10、決定木の深さは無制限として学習を行った。

キーワード：ランダムフォレスト, 飛来塩分, 腐食発生時期, コンクリート構造物, 塩害劣化予測

連絡先：〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース 建設材料学研究室



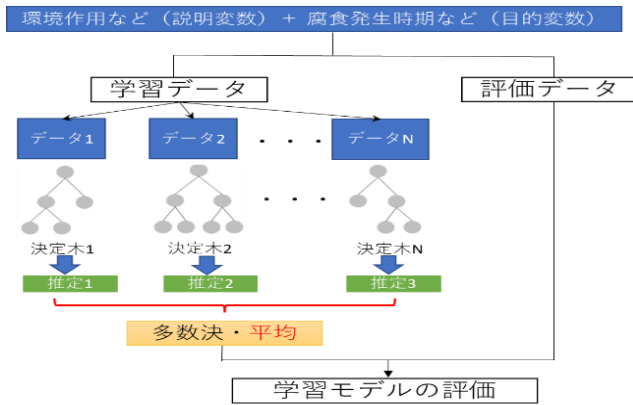


図-1 ランダムフォレストの概要図

### 3. 推定結果及び考察

#### 3.1 説明変数（特徴量）の重要度を考慮した再選択

図-2 に 12 つの説明変数を用いた腐食発生時期と腐食ひび割れ発生時期の推定結果を示す。この結果より、本モデルの決定係数は、0.99 以上と高い推定精度を示していることがわかる。つぎに、表-5 に説明変数（特徴量）の本推定に対する重要度を示す。この結果より、重要度と既往の研究から年間平均飛来塩分量、表面濃度、見かけの拡散係数、発錆塩化物イオン濃度を除いた残り 8 つを説明変数に選択し、学習させた際の推定精度の検討結果を次節に示す。

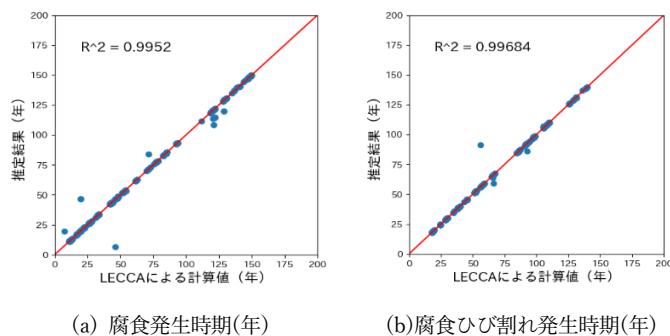


図-2 推定結果（説明変数 12 つ）

表-5 特徴量の重要度

(a) 腐食発生時期

順位	特徴量	重要度
1	表面濃度(kg/m <sup>3</sup> )	0.317887
2	かぶり(mm)	0.223305
3	W/C(%)	0.139449
4	見かけの拡散係数(cm <sup>2</sup> /年)	0.11447
5	平均風速(m/s)	0.060676
6	ひび割れ有無	0.051468
7	発錆塩化物イオン濃度(kg/m <sup>3</sup> )	0.048259
8	汀線からの距離(m)	0.032148
9	年間平均飛来塩分量(mdd)	0.00598
10	海面からの高さ(m)	0.004774
11	海岸地形条件	0.001411
12	波浪条件	0.000172

(b) 腐食ひび割れ発生時期

順位	特徴量	重要度
1	見かけの拡散係数(cm <sup>2</sup> /年)	0.306294
2	表面濃度(kg/m <sup>3</sup> )	0.22156
3	発錆塩化物イオン濃度(kg/m <sup>3</sup> )	0.156165
4	かぶり(mm)	0.154027
5	W/C(%)	0.097765
6	平均風速(m/s)	0.052224
7	ひび割れ有無	0.004656
8	年間平均飛来塩分量(mdd)	0.003738
9	汀線からの距離(m)	0.003087
10	海面からの高さ(m)	0.00023
11	波浪条件	0.000206
12	海岸地形条件	0.000049

#### 3.2 最適化された説明変数を用いた推定結果

ここでは、3.1 の結果から説明変数を、W/C、かぶり、ひび割れ有無、汀線からの距離、海面からの高さ、波浪条件、海岸地形条件、平均風速の 8 つとした推定結果した結果について考察する。

図-3 に腐食発生時期、腐食ひび割れ発生時期の推定結果を示す。両結果ともに決定係数が 0.99 を超えており、説明変数を 12 つから 8 つに減らしても高い推定精度が得られていることがわかる。

これらの特徴量は、設計図書や外観調査および現地踏査、気象データ整理から得ることができ、飛来塩分の調査など新たに追加しなくてもよいことを示している。なお、今回の検討結果は、LECCA を用いた入力値および推定値を用いた学習結果であるが、LECCA は、10 年間の国内の気象観測値をデータベース化しており、各地の気象条件、また、信頼性の高い計算モデルが採用されていることから、学習用および評価用データとして、妥当なものであると考える。

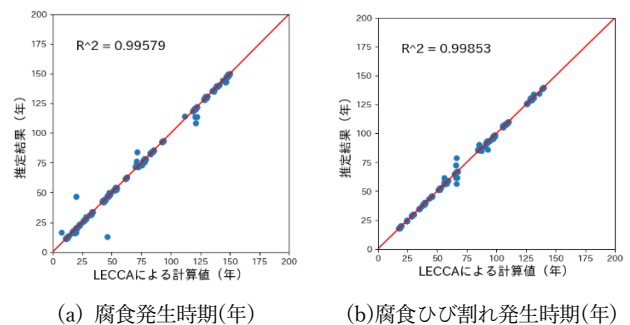


図-3 推定結果（説明変数 8 つ）

### 4. まとめ

本研究では、LECCA による計算値を特徴量とし、対象地点として那覇市を新たに加え拡張した場合においても、説明変数を最適化したランダムフォレストを用いることで、腐食発生時期および腐食ひび割れ発生時期を精度良く推定することができた。

### 参考文献

- 1) 吉見映輝・富山潤・須田裕哉：機械学習によるコンクリート構造物の塩害劣化予測に関する研究，日本コンクリート工学会年次論文集，Vol. 44，No. 1，pp. 478-483，2022.
- 2) コンクリート構造物の長期性能シミュレーションソフト作成委員会：コンクリート構造物の長期性能評価—環境外力の評価手法—，コンクリート工学，Vol.50，No.10，pp.946-950，2012.10
- 3) 須藤秋良：スッキリわかる Python による機械学習入門，株式会社インプレス，2020.10.

# 長時間(168 時間)運転可能な 簡易型非常用発電発電装置について

内間 航一郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>内閣府 沖縄総合事務局 南部国道事務所 防災情報課 (〒900-0006 沖縄県那覇市おもろまち2-1-1)

国土交通省が所管するCCTVカメラや道路情報板等には、災害などによる停電時でも作動するよう非常用発電装置が設置されており、その停電補償時間については、現在のところ、殆どが24時間または72時間となっている状況である。内閣府沖縄総合事務局では、沖縄総合事務局防災業務計画に準拠して、非常用発電装置に関する設計及び施工において168時間の停電補償時間を確保するよう方針を決めているところであるが、令和5年台風6号の被害などを踏まえ、その取り組みを加速させている。本論文は、当局管内で168時間対応の非常用発電装置を導入する必要性と、その非常用発電装置の技術的内容を紹介するものである。

キーワード 非常用発電装置、168時間、CCTVカメラ、道路情報表示装置

## 1. 沖縄総合事務局における停電対策

### (1) 令和5年台風6号による被害

令和5年8月、沖縄地方を襲った台風6号は最大瞬間風速が50m/sを越え、多いところで700mmを超える大雨を観測した。沖縄県内各地では土砂災害(写真-1)や高潮・高波に伴う浸水などの被害を受けた。

また、大規模停電が発生し、沖縄県の総戸数633,670戸のうち最大215,800戸が停電し(停電率34.1%) (図-1)、最長停電時間は166時間53分となった。この停電により、県内の一般家庭のみならず沖縄総合事務局開発建設部(以下、「開建部」という。)が所管するCCTVカメラや道路情報板の運用にも多大な影響を受けた。CCTVカメラや道路情報板には、商用電源が停電した場合でも作動するよう簡易型非常用発電装置(以下、「発電装置」という。)を設置しており、停電時には発電装置から対象設備へ電力供給が行われるようになっている。



写真-1 沖縄県浦添市沢峠の土砂災害状況

台風6号の影響により南部国道事務所管内のCCTVカメラや道路情報板において商用電源が停電した設備があったため、当該設備においては発電装置により電源供給した。しかしながら、起動した発電装置の停電補償時間は24時間であり、停電長期化の影響により燃料切れを起こした発電装置15箇所が確認された。燃料切れを起こした発電装置負荷のCCTVカメラや道路情報板は、停電中に作動せず、台風の被害状況の把握や、道路利用者への情報提供などが適切に行えない事態となった。

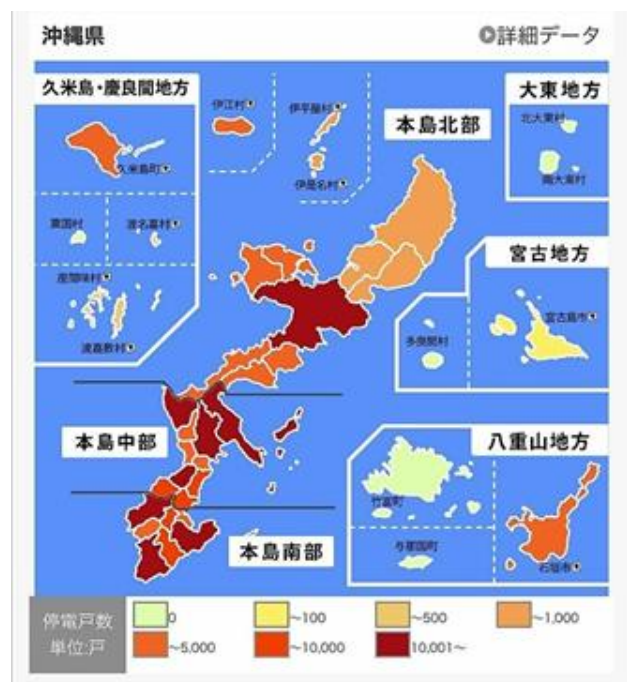


図-1 令和5年8月2日午後2時5現在の停電状況



## (2) 停電補償時間

「電気通信施設設計要領・同解説（電気編）」では、CCTVカメラや道路情報板に関する停電対策用電源設備については「重要度」などを踏まえ、適切な停電補償時間を検討するものとされている。開建部では、台風などの災害時にCCTVカメラや道路情報板が非常に有用な設備であることなどを勘案して、これら設備は全て「重要度」の高いものであると位置付けている。

また、沖縄総合事務局防災業務計画では、道路状況などの地域特性などを踏まえ、重要拠点設備に関する発電装置は原則として7日間（168時間）以上の停電補償時間を確保するものとされている。これらのことから、開建部では、管内のCCTVカメラや道路情報板は重要拠点設備の停電補償時間に準じるよう方針を決めた。今後、新設や更新対象となっている発電装置の設計及び施工においては、168時間以上の停電補償時間を確保することとしている。

## (3) 与那原交差点CCTVカメラの発電装置

前述の（１）、（２）を踏まえ、開建部ではCCTVカメラや道路情報板における発電装置の168時間対応の取り組みを加速させることとなった。

先般、与那原交差点CCTVカメラ（図一2、写真一2）を新設したため、それに伴い当該設備のための168時間以上運転可能な発電装置（写真一3）も設置した。以降、その発電装置などの技術的内容を紹介する。



写真一2 与那原交差点CCTVカメラ



図一2 与那原交差点CCTVカメラの設置箇所



写真一3 168時間以上運転可能な発電装置

## 2. 発電装置の概要

### (1) CCTVカメラの電源条件

与那原交差点CCTVカメラの電源条件を表―1に示す。

表―1 CCTVカメラの電源条件

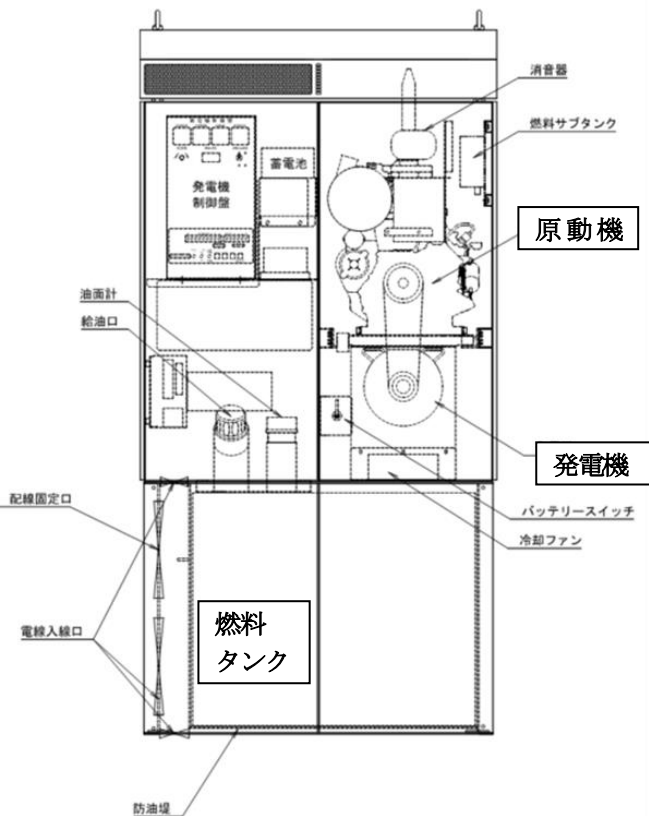
相数	単相 2 線式
電圧	AC100V
周波数	60Hz

### (2) 発電装置の構造及び諸元

発電装置の外観を写真―3に示す。また、構造を図―3に、外形寸法を表―2に示す。なお、発電装置の諸元は表―3のとおりである。

表―2 発電装置の外形寸法

幅	900mm
奥行	450mm
高さ	1830mm



図―3 発電装置の構成図

表―3 発電装置の諸元

発 電 機	型式	同期交流発電機
	運転時間	168 時間以上
	定格出力	1.2kVA
		1.2kW
	定格電圧	100V
	定格電流	12A
	相数	単相 2 線式
	定格力率	100%
	周波数	60Hz
	極数	2 極
原 動 機	定格回転数	3600min-1
	冷却方式	自己通風式
	励磁方式	ブラシレス励磁方式
	絶縁の種類	F 種
	型式	立形液冷 4 サイクルディーゼルエンジン
	運転時間	168 時間以上
	定格出力	4.05kW
	定格回転数	メーカー回転数
	気筒数	1 気筒
	総排気量	0.276L
	冷却方式	空冷式
	使用燃料	軽油
	燃料消費量	0.77L/h
	燃料タンク容量	満油燃料 140L
	潤滑油	API クラス : CF SAE による分類 : 10W-30
	潤滑油量	全量 1.3L
	潤滑方式	トロコイドポンプによる強制潤滑
	始動方式	電気始動方式

## 3. 168 時間対応における技術的工夫

### (1) 火災予防条例を考慮したタンクの容量

火災の予防に関する事項のうち、消防法の委任を受けたものや、地方的な事情により必要とされるもの、自主的に安全性効能のため規制すべきもの等について、各自治体で火災予防条例を定めている。与那原町を含めた 3 自治体から構成されている「東部消防組合本部」が定めている火災予防条例によると、燃料タンク（軽油）の容量が 200L 以上 1000L 未満の場合、燃料タンクは「少量危険物」として取り扱われる。少量危険物として取り扱われると、燃料タンクと原動機どうしは 2m 以上の水平距離を確保するか、または防火上有効な遮へいを設ける必要がある。従って、発電装置のサイズを大きくする、あるいは燃料タンクと原動機を遮へいするような構造にしなければならない。しかしながら、与那原交差点CCTVカメラを設置した箇所は国道沿いの狭い歩道であり、その近傍に発電装置を設置することを踏まえると、サイズの大きい発電装置は不適である。加えて、コスト縮減などの観点から、168 時間対応の発電装置の製作にあたっては、既存の 24 時間または 72 時間対応の発電装置の仕様を基本として、その変更を最小限に行うことが望ましい。サイズを大きくする、または特殊な遮へい



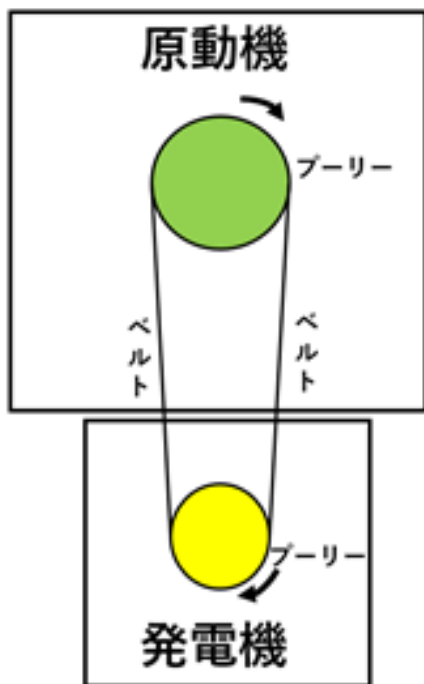
物を設けるには大幅な仕様変更を伴うので、これらのことは避けたほうがよい。

以上のことを踏まえると、168 時間の停電補償時間を確保しつつも燃料タンクの容量は 200L 未満に抑えることが求められる。

## (2) プーリーの歯数比の調整

発電装置のうち原動機と発電機については、何かしらの方法で、適切に原動機側の出力を発電機側の入力へ伝達させる必要がある。一般的に、原動機で生じた動力（回転力）は円形状の部品であるプーリーに伝わり、摩擦や噛み合いを利用するベルトを介し、発電機側のプーリーにも動力（回転力）が伝達され電気を発生させている。その際、素朴な方法として、原動機側のプーリーと発電機側のプーリーについて同一の歯数にする場合がある（以下、「同歯数比」という）。この方法だと、原動機と発電機の定格回転数は同一である必要がある。

別の方法として、プーリーやベルトを介して接続し、原動機側のプーリーと発電機側のプーリーのそれぞれの歯数を異なるように調整する方法がある。この場合、原動機の定格回転数を発電機のそれよりも低い値で運転させることができ、プーリーの歯数比を利用して原動機の低い定格回転数を発電機の定格回転数まで増速させることができる（図—4）。そのため、燃料効率の高い回転数で原動機を運転できるため、従来の 24 時間または 72 時間対応の発電装置においてはこの方法を用いてきた。また、従来の 24 時間または 72 時間対応の発電装置において、燃費向上を目的としたプーリーの歯数比調整を行っている。



図—4 回転数の調整

24 時間または 72 時間対応の発電装置で採用されている歯数比を用いて、定格出力を 1.2kVA で 168 時間連続運転させるための燃料消費量や必要容量を検討したので、その結果を表—4 に示す。なお、前述の同歯数比の方法を用いた場合の結果も比較値として示す。

表—4 168 時間対応に必要な容量(1.2kVA の場合)

方法	歯数比調整	同歯数比
燃料消費量	0.77L/h	0.86L/h
必要容量	129.4L	144.5L

表—4 より同歯数比の方法を用いた場合でも、必要容量は 144.5L となり、200L 未満に抑えられるので燃料タンクは少量危険物としては取り扱われない。従って、発電機の定格出力が 1.2kVA の時は、同歯数比の方法を用いることは特段問題ないが、燃費の観点から歯数比調整の方法を採用した方が良いので、与那原交差点 C C T V カメラにおける発電装置はこの歯数比調整の方法を用いている。

次に、前述の歯数比調整の方法で発電機の定格回転数を定格出力 3kVA で 168 時間連続運転させるための燃料消費量や必要容量を検討したので、同歯数比の方法を用いた場合の結果と併せて表—5 に示す。

表—5 168 時間対応に必要な容量(3kVA の場合)

方法	歯数比調整	同歯数比
燃料消費量	1.15L/h	1.25L/h
必要容量	193.2L	210.0L

表—5 より同歯数比の方法を用いると、必要容量は 210.0L となり、200L を超えることとなり燃費タンクは少量危険物として扱われる。そのため、3kVA の発電装置を 168 時間連続運転させるにあたり、この同歯数比の方法を採用することができない。一方、歯数比調整の方法にした場合、必要容量が 193.2L となり、200L 未満に抑えることができる。この結果より、今後導入予定である管内の一般的な道路情報板における発電装置においても、歯数比調整の方法が適用可能であることが確認できた。

## 4. おわりに

本論文では、168 時間以上の停電補償時間を確保した発電装置を沖縄総合事務局管内に導入するその必要性を説明し、実際に 168 時間対応の発電装置を製作するにあたり、どのような技術的工夫を用いたのかを述べた。

筆者が所属する南部国道事務所の管内でも、168 時間対応の発電装置を導入しつつあるが、いまだ 24 時間対応の発電装置が大多数を占めている。今後は、台風などの災害時に停電が起きた場合でも、C C T V カメラや道路情報板が有効に活用できるよう、168 時間対応の発電装置の導入拡大を行っていく予定である。

最後に、本論文を執筆するにあたり、ご協力いただいた関係者の皆様に深謝いたします。

## <参考文献>

- 1) 内閣府 沖縄総合事務局：第 1 2 回沖縄防災連絡会 令和 5 年台風第 6 号災害について—資料 1— (2023 年)
- 2) 沖縄タイムス：台風 6 号 沖縄県内の停電、総戸数の 3 割超に 34 市町村に拡大 (2023 年)
- 3) 一般社団法人 建設電気技術協会：電気通信施設設計要領・同解説（電気編）（平成 29 年版）
- 4) 内閣府 沖縄総合事務局：沖縄総合事務局防災業務計画 (2022 年)
- 5) 東部消防組合本部：東部消防組合例規集 (2022 年)



## Session 4 建設材料・新工法・計測技術

## 炭素骨材を混入したカーボンニュートラルコンクリート製品の一検討

西松建設（株） 正会員 ○ 原田耕司  
九州大学 正会員 佐川康貴 学生会員 柴田啓太  
日本興業（株） 津郷俊二 藤田総司

### 1. はじめに

コンクリートの分野でも、二酸化炭素排出量の削減が望まれている。現状では、高炉スラグ等の産業副産物を使用することで原料となるセメント消費量を削減することにより、二酸化炭素排出量を削減する技術が一般的に使用されている。しかし、本技術だけでは二酸化炭素排出量の削減は可能であるが、カーボンニュートラル（以降、CN と呼ぶ）にすることは不可能であった。

一方、バイオマスを原料とするバイオ炭（炭素骨材）は、J-クレジット制度<sup>1)</sup>では方法論として承認されており、理論上はバイオ炭を 1 kg 混入すると約 3.7kg の二酸化炭素をコンクリートに固定化するものと試算される。著者らは、バイオ炭を混入したコンクリートの特性についてこれまで検討を行い、バイオ炭はコンクリートの材料として使用できることを確認している<sup>2)</sup>。しかし、現状ではバイオ炭の供給量が少なく、CN コンクリートを一定量製造するには、ベースとなるコンクリートの配合は二酸化炭素排出量が少ないものが適している。

そこで、本研究では二酸化炭素排出量が少ないベースコンクリートにバイオ炭を混入した、CN コンクリート製品を開発することを目指して、試験室レベルで製品を製造して検討を行ったものである。なお、本研究ではバイオ炭を骨材に置換して使用するため、以降ではバイオ炭を炭素骨材と呼ぶことにする。

### 2. 実験概要

#### 2. 1 対象コンクリート製品

炭素骨材の密度は普通の骨材より小さいため、コンクリートに混入した際、炭素骨材が浮き上がる可能性が懸念された。そこで、対象製品としては写真-1 のような固練りコンクリートを使用する即脱型の普通ブロック製品（JIS A 5371 プレキャスト無筋コンクリートの推奨仕様 B-3 インターロッキングブロック）とした。

#### 2. 2 炭素骨材について

本研究では、国内産（福岡県八女市）の竹を 350℃以上で焼成して 3 mm 以下に粉碎した写真-2 のような炭素骨材を使用した。

#### 2. 3 使用材料

炭素骨材は、表-1 に示すように密度 1.635 のものを使用した。なお、熔融スラグ骨材はリサイクル材の有効利用およびコスト低減のために使用した。



写真-1 製品の一部



写真-2 炭素骨材の一例

表-1 使用材料

種類	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	備考
水	W	1.00	水道水
セメント	C	3.16	普通ポルトランドセメント
高炉スラグ微粉末	BFS	2.91	ブレン値 4,000
粗骨材	G	2.62	3 分砂利（最大粒径 9mm）
粗砂	S	2.60	5mm 以下
熔融スラグ骨材	RS	2.76	5mm 以下
炭素骨材	YT1	1.635	粒径 3mm 以下、国内産
界面活性剤	AD	1.0	すべりを良くする混和剤

表-2 配合

種類	YT1 混入率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
		W	C	BFS	G	S	RS	YT1	AD
N	0	137	177	278	877	858	131	0	4.6
YT1	25	137	177	278	843	825	126	44	4.6

バイオ炭、炭素骨材、カーボンニュートラル、J-クレジット、コンクリート製品



## 2. 4 配合

配合は、表-2 に示すように炭素骨材無混和の配合（N）と、CN コンクリートになるように炭素骨材をセメント質量に対して 25% 混入した配合（YT1）の 2 種類について検討を行った。なお、炭素骨材は骨材に置換して使用した。

## 2. 5 製品の製造方法

練混ぜは、ミキサに粉体および骨材を入れ 30 秒空練りを行い、その後、混和剤入りの水を投入して 3 分間本練りを行い排出した。

練り上がったコンクリートを型枠へ投入して（写真-3 (a)）、即脱プレス装置で 1 秒振動をかけ、その後、コンクリート上面をならしプレス板を設置してプレスをかけながら振動を 3 秒かけ（写真-3 (b)）、直ちに脱型した（写真-3 (c)）。脱型後の製品は、20℃で 2 時間前置きを行った後、40℃6 時間で養生を行った。

## 2. 6 試験項目

今回は、JIS A 5371 の規格に準拠して、寸法および曲げ強度を確認した。なお、試験は材齢 7 日で実施した。

## 3. 実験結果

炭素骨材を用いた YT1 配合の寸法は、表-3 に示すように規格値を満足している。一方、曲げ強度は、N 配合も YT1 配合も規格値を満足していない。これは、今回は試作用の即脱プレス装置を用いたのでプレス力が若干小さくなり、いずれも強度が小さくなったものと考えられる。なお、炭素骨材は、写真-4 に示すように製品内に均一に分布しているのがわかる。

表-3 寸法および曲げ強度

種類	寸法 (mm)			曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )
	長さ	幅	厚さ	
N	226.2	112.1	58.3	4.90
YT1	226.2	112.3	61.2	4.45
規格値	227±2.5	112±2.5	60±2.5	5.0



(a) 材料投入



(b) プレス工程



(c) 脱型

写真-3 製品の製造方法



写真-4 曲げ試験後の断面  
(黒い点が炭素骨材)

## 4. まとめ

本研究では、試験室レベルで製品を製造して検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 炭素骨材を混入した CN コンクリートで、即脱型の普通ブロック製品を製造した。
- 2) 製品内の炭素骨材は均一に分布していた。
- 3) 製品の寸法については JIS の規格値を満足できたが、曲げ強度については JIS の規格値を満足していなかった。ただし、これは製造装置の特性によるものと考えられる。

今後は、規格値を満足する製品の製造を目指して、実機を用いて研究・開発を進める予定である。

### 【参考文献】

- 1) J-クレジット制度 HP, “方法論”, <https://japancredit.go.jp/about/methodology/>, (参照 2026-1-6)
- 2) 原田耕司, 佐川康貴, 木村宇希, 柴田哲太, 畠山繁忠, 山口光俊: 炭素骨材を混和した CN コンクリートの実機ミキサでの製造について, 令和 6 年度土木学会西部支部研究発表会, V-008, 2025.3

## デジタル画像計測によるひび割れ変化のモニタリングに関する実験的研究

琉球大学 ○川東優香、下里哲弘、大城雄希、Yasin Mumtaz 川田建設 垣花寿

### 1. 研究背景と目的

プレストレストコンクリート桁（以降、PC 桁）において、PC 鋼材の腐食による劣化事例が報告されている。劣化した PC 桁の供用時安全性を確保するためのモニタリングが重要である。塩害により PC 鋼材が腐食破断するとプレストレスが減少し、曲げひび割れが発生するがそのひび割れ幅の変化をモニタリングできれば、維持管理・安全性診断の有効な判断材料になる。本研究では、塩害劣化したプレテンション方式 PC 桁の静的載荷試験を実施し、デジタル画像計測技術を用いて、撤去した実桁で曲げひび割れの追跡・検知性能の検証を行った。

### 2. 実験方法

#### 1) ひび割れ幅計測方法

本実験ではひび割れ幅を計測するにあたり、現在実橋で使用されているクラックスケールとデジタル画像計測技術を用いた。クラックスケールの計測範囲は 0.10mm~1.40mm である。デジタル画像計測の計測範囲は、プレート間隔 0~20mm、計測誤差は 0.2mm 以下<sup>1)</sup> である。デジタル画像計測の測定方法は、計測対象のひび割れの両側に図 1 に示す幾何学記号のプレートを貼り付け、スマートフォンで撮影する。その写真画像をクラウドにデータ送信し、専用アプリで解析されたひびわれ幅がグラフ化され、瞬時に手元のタブレット等へ返信されるシステムである。デジタル画像計測の計測原理を図 1 に示す。計測対象であるひび割れを挟んで貼付した計測用プレートの撮影画像に対して画面解析処理を行う。計測用プレートは 2 枚 1 組であり、撮影画像上の幾何学記号の位置を特定し、幾何学記号間の距離を画素数で算出する。幾何学記号の寸法は既知であるため、算出した画素数を実距離(mm)に変換する。

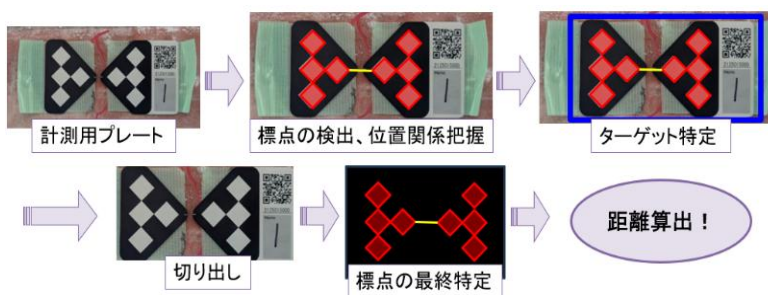


図 1 デジタル画像計測の計測原理

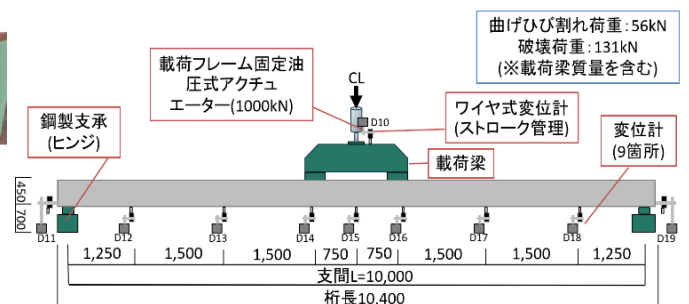


図 2 静的載荷試験方法

#### 2) 実験方法

本実験で使用した PC 桁は約 40 年供用された 10 本の桁である。各桁の PC 鋼材は塩害劣化が確認されている。本実験では、PC 鋼材の損傷度別に 5 体を対象とした。本研究では図 2 に示す静的載荷実験における荷重増加ステップに対して撮影し、ひび割れ幅のモニタリング計測を実施した。静的載荷試験において、載荷開始後に最初に観察された曲げひび割れを計測対象とし、ひび割れを挟んで計測用プレートを 1 組貼付した。載荷による変位に応じて載荷を一時停止し、計測用プレートが画像の中心付近となるよう、スマートフォンを用いて撮影を行った。併せて、計測用プレートと同位置において、クラックスケールにより曲げひび割れ幅を計測した。

キーワード デジタル画像測量、プレテンション方式 I 型、静的載荷試験、曲げひび割れ幅、モニタリング測定値

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科 Email e225541@cs.u-ryukyu.ac.jp

### 3. 実験結果

図 3.1～図 3.3 にひび割れ計測の結果を示す。G10 は無補修の基本桁である。G9 は PC 鋼材に軽微な損傷が確認されている。G4 は補修および補修部の断面欠損を有するである。図 3 では荷重の増加に伴いひび割れ幅が増加する挙動が、クラックスケール計測およびデジタル画像計測の双方で確認された。最大誤差は 0.149mm であり、機器仕様である計測誤差 0.2mm 以下に収まっている。図 4 においても、荷重増加に対応したひび割れ幅の増加が確認され、追跡挙動はクラックスケール計測結果と概ね一致している。最大誤差は 0.088mm であり、仕様上の誤差範囲内であるが、一部にマイナス値が確認された。図 5 では、荷重の増加に伴うひび割れ幅の増大は確認されるものの、両計測手法間で計測値が大きく乖離する点が認められた。最大誤差は 0.781mm であり、誤差範囲 0.2mm を大きく上回る結果となった。該当荷重時のプレート画像を見てみると、撮影時の焦点ずれにより画像の解像度が低下していた。大きく値が異なる原因として、解像度低下により計測精度に影響を及ぼした可能性が考えられる。以上より、桁によって差異は認められるものの、全体としてはデジタル画像計測により目視計測と同様のひび割れ幅追跡が可能であることが確認された。ただし、一部のデータではばらつきが大きい。

### 4. 考察およびまとめ

本研究では、劣化した PC 桁の静的載荷試験のひび割れ幅計測において、クラックスケール計測と同等の曲げひび割れ幅の追跡・検知性能の検証を行った。クラックスケール計測と同様の追跡傾向を示すデータもある一方、ばらつきが生じるデータも確認された。ばらつきが生じる要因として、測定位置や PC 桁の構造的特性、プレート撮影画像の解像度低下などが考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 点検支援技術性能カタログ BR030066-V0025

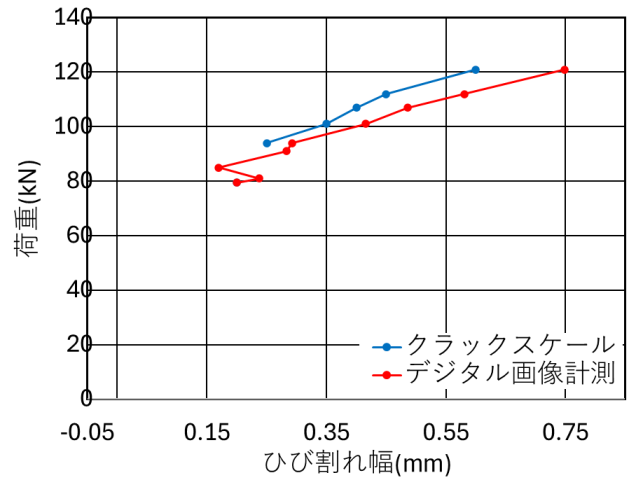


図 3 荷重-ひび割れ幅(G10)

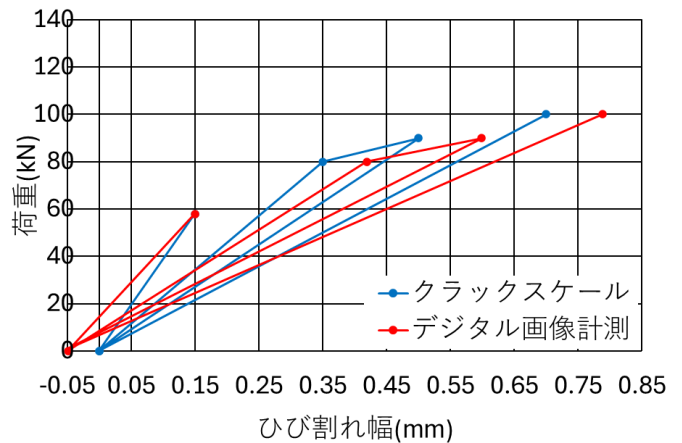


図 4 荷重-ひび割れ幅(G9)

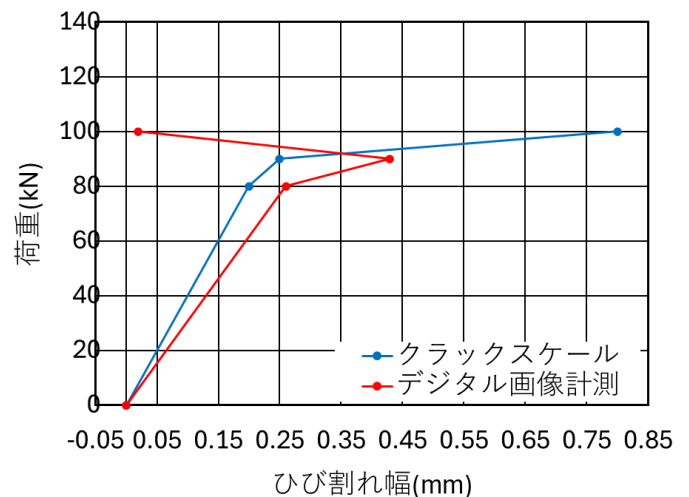


図 5 荷重-ひび割れ幅(G4)



## デジタル画像による点群データを用いた鋼部材の評価

琉球大学大学院 ○宮里啓太郎, 下里哲弘

### 1. 研究背景・目的

鋼構造物の維持管理においては、腐食による板厚の減少や、座屈などの変形を把握することが重要である。現在、板厚の計測には超音波板厚計(図 1)などの接触的かつ点的な計測手法が広く用いられている一方で、計測点が限定されるため、部材全体の形状や変形を面的に把握することが課題である。

近年、レーザースキャナを用いた三次元計測により、鋼部材全体を高密度な点群として取得し、形状や変形を評価する研究が進められている。しかし、レーザ計測は、設置や計測に手間を要することから、簡易的な維持管理への適用に制約がある。

一方、写真測量による点群生成は、市販のカメラやスマートフォンを用いて比較的容易に三次元点群を取得できる手法であり、低コストかつ高い簡便性を有する。しかし、写真測量によって生成される点群は、精度やノイズの影響が懸念されており、鋼部材の評価への適用性については十分に検討されていない。本研究では、写真測量により生成した点群データを用いて、鋼部材の板厚(形状)および座屈変位(変形)を評価した。また、レーザ変位計による計測結果との比較を通して、写真点群の有効性および限界を明らかにすることを目的とする。

### 2. 写真測量および点群処理方法

対象とした試験体は鋼部材の座屈試験体である。

(図 2) 試験体の周囲を 360 度回りながら、上下方向を含む複数の角度から写真撮影を行った。撮影枚数は約 130 枚、撮影距離は約 0.5 m とし、屋外環境下で撮影を実施した。撮影時には背景を単純化し、既知の部材寸法をスケール基準として用いた。

点群データの生成には、写真測量機能を備えた Polycam を使用した。生成直後の点群データには試験体以外の点群が含まれるため、CloudCompare を用いて背景点の除去や試験体領域の抽出を行った。また、X 軸を鋼板の長手方向、Y 軸を板幅方向、Z 軸を面外方向と定義するように点群を整理した。(図 3.4.5)



図 1. 超音波板厚計



図 2. 座屈試験体(1140mm×370mm×9mm)

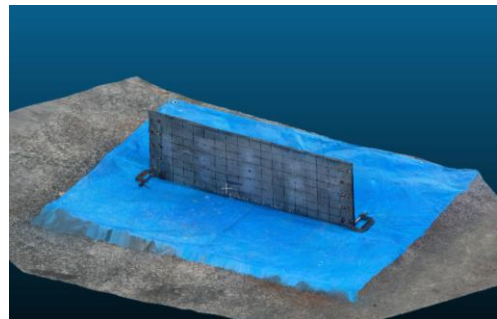


図 3. 写真測量から作成した点群データ

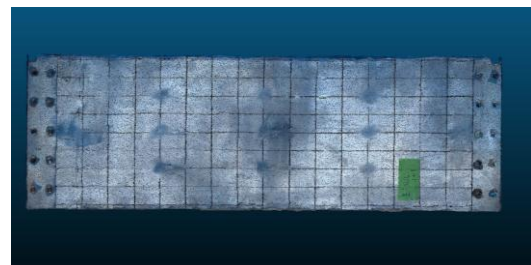


図 4. 抽出した点群データ

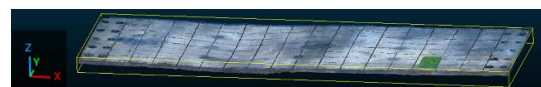


図 5. 座標を定義した点群データ

キーワード：写真点群, 点群データ, 鋼部材, 座屈変位, 点群解析

連絡先：〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 琉球大学大学院理工学研究科システム情報工学プログラム



### 3. 板厚および座屈変位の評価結果

作成したモデルの板幅、板厚についてそれぞれ五ヶ所で距離計測を行った。板幅の寸法値 370mm に対して、測定値の平均値が 367.85mm、標準偏差 0.94mm、相対誤差が-0.58%だった。一方、板厚は、寸法値 9mm に対して測定値の平均値が 10.063mm、標準偏差 0.935mm、相対誤差が+11.8%だった。面内寸法については十分な精度が確認されているので、点群データのスケール補正は正しく行われていると考える。一方、板厚については、点群の Z 方向差分を用いて評価を行った結果、実寸 9 mm に対して過大評価が生じた。これは、点群のノイズや点のばらつきによる影響であり、写真点群を用いた板厚方向評価の限界を示している。

次に、座屈変位の評価方法を説明する。試験体の座屈の腹を避けた比較的水平的箇所を切り取った。選択した水平領域の点群に対して最小二乗法を行うことで、水平な基準平面を作成した。(図 6) この基準面を座屈前状態の試験体表面と模擬する。次に、作成した基準平面と各点群データまでの距離を算出し、これを座屈前状態からの相対的な面外変位として定義した。(図 7) 基準面からの距離に応じて色を付け、カラーマップを作成した。(図 8) 得られた変位分布を可視化した結果、試験体中央部において基準平面からの距離が大きく、座屈変位が集中する傾向が明瞭に確認された。この評価結果をレーザー変位計による計測結果と比較すると、試験体中央で座屈変位が集中することが確認され、座屈腹の位置および変位分布の形状は概ね一致した。

### 4. まとめ

本研究では、写真測量により生成した点群データを用いて、鋼部材の板厚および座屈変位の評価を行った。板幅については良好な精度が得られた一方、板厚や変位量の厳密な定量評価には課題が残った。しかし、写真点群を用いることで、座屈腹の位置や変形分布を面的に把握できることを示した。以上より、写真点群は鋼部材の変形形態把握において有効な手法であることが示唆された。

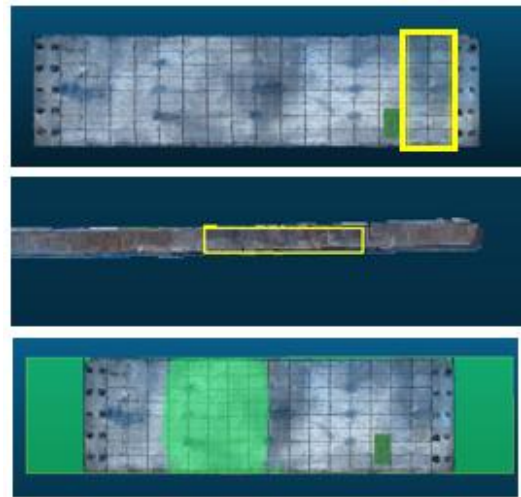


図 6 基準平面の作成

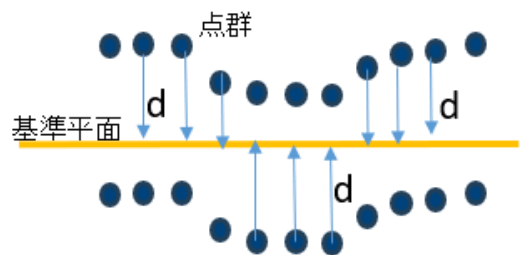


図 7 距離計算のイメージ

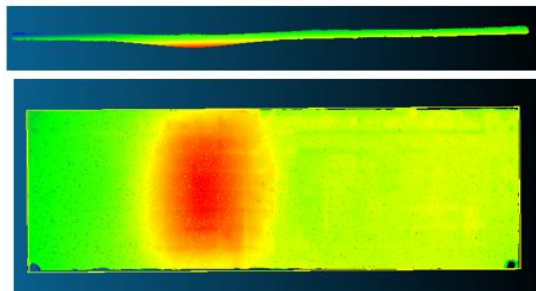


図 8-1 写真点群のカラーマップ

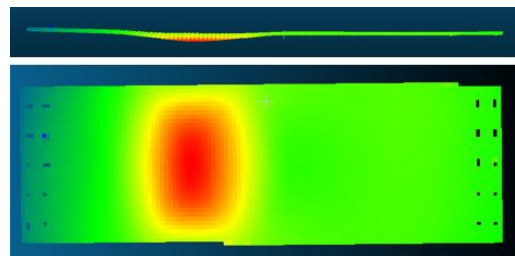


図 8-2 レーザー点群のカラーマップ

## LiDAR を用いた観光利用による登山道経年変化計測に関する分析

琉球大学大学院 ○国場有沙

琉球大学 神谷大介

株式会社日本インシーク 平野順俊

澤口 侑

摂南大学 大月庄治

法政大学大学院 山本 忍

小宮 涼

庄司康太

日本工営株式会社 浅野達海

法政大学 今井龍一

### 1. はじめに

近年、オーバーツーリズムが世界的な課題とされる。登山道では自然環境への負の影響が懸念され、その影響が自然の回復能力を上回ると生態系破壊に繋がる。これに対し自然環境を観光資源とする地域では持続可能な観光<sup>1)</sup>に向けた適切なマネジメント<sup>2)</sup>が求められる。しかしモニタリングや管理者不足の課題は残る。世界自然遺産への登録で観光需要増加が見込まれる西表島においても、現状のモニタリング<sup>3)</sup>として変化が予想される地点での杭間の道幅計測や定点写真による評価がされ、対象が限定的、非定量的といった課題がある。

そこで著者ら<sup>4), 5)</sup>は、GNSS (Global Navigation Satellite System)測位不可の沖縄県八重山郡竹富町西表島のエコツアールートとして利用される登山道で LiDAR (Light Detection And Ranging) 及び SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)搭載機器で複数時期の3次元点群データ(以下、点群)を取得した。植生進退として幅員方向、地形変化として鉛直方向の差分を可視化し、登山道経年変化計測1次スクリーニングへのLiDARの適用可能性を示した。しかし、幅員方向は登山道の大部分を占める曲線区間は対象としていない。

したがって、本研究の目的は、曲線区間を含めた登山道における観光利用による自然環境への影響の定量的な評価方法を示すこととする。具体的には、曲線である登山道を直線に座標変換し、幅員・鉛直方向の差分から体積変化を明らかにする。この結果を登山道利用者数と比較する。これは、持続可能な観光地マネジメントに向けた観光容量の設定に資すると考える。

### 2. LiDAR 計測の概要及び処理方法と結果

本調査では、西表島浦内川エコツアールートを3



図-1 方向と基準線の定義

次元計測デバイス NavVis VLX で計測した。第1回(2022/9/20~21)に628,505,474、第2回(2023/5/8~9)に308,826,297、第3回(2024/4/5~6)に317,347,607、第4回(2024/9/10~11)に164,604,484の点を取得した。全37の既知点とSLAMにより点群を形成し、CloudCompareで差分算出する。ソフト上では3次元直交座標系で東西にX軸、南北にY軸、また鉛直上向きにZ軸が定義される。以下ではソフトの機能名を「」に記す。本稿では、既知点間中央の不動と考えられる点のずれが水平・鉛直方向それぞれ0.050m以下の10区間(約410m)を対象とする。

まず前処理として、各時期の点群を基準線に沿って座標変換し対象空間を定義する。基準線は、全調査の点群において地表付近の植生と重ならないように幅員中央に「Extract Sections」で設定する。この接線方向(図-1の進行方向)の累積距離がY座標となるよう曲線である登山道の点群を座標変換する。基準線との法線方向(図-1の幅員方向)の距離をX座標とし、Z座標とRGB値は元のままとする。対象空間として、幅員差分では、X座標-1.500m以上1.500m以下の範囲を「Cross Section」により抽出する。さらに地形の凹凸を考慮し地面から0.200m以上0.500m以下の高さを草本層として抽出する。鉛直差分では全調査の草本層のうちX方向の基準線に最も近い点を「Rasterize」により抽出し、平準化したポリラインの内側を「Interactive Segmentation Tool」により抽出する。このうち地面から0.500m以下の高さを抽出する。

キーワード 3次元点群データ, LiDAR, 差分, エコツアールート, モニタリング

連絡先 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学大学院理工学研究科 E-mail: k248522@cs.u-ryukyu.ac.jp

次に、連続期間毎に時系列の前の調査回を基準とした差分を「2.5D Volume」により算出する。パラメータは幅員・鉛直方向ともに 0.050m のずれまで許容したため、この約 85%が含まれるようグリッド幅を（幅員差分は YZ、鉛直差分は XY 平面）0.075m と設定する。幅員差分では空白グリッドを対象空間の境界で補間し基準線との最近点を、鉛直差分は補間せず Z 方向の最下点を比較する。幅員・鉛直差分の正負それぞれの合計にグリッド幅 0.075m の二乗を乗じて体積を求める。

自然環境への影響の例として、植生の後退は幅員方向の拡がり、地面の締固めや浸食は鉛直方向の下降として表れる。反対に台風等の自然的要因で倒木・落石・落葉が発生すると鉛直方向上昇の体積が増加することが考えられる。

各調査期間における幅員差分の 0.100m 階級別を対象区間全体の変化体積の合計を図-2 に示す。この際、全調査期間を比較するため差分点の数を 100 に基準化している。結果の合計より、植生の後退を示す拡幅の変化体積は減少し、回復を示す縮幅の変化体積は増加していることがわかる。

### 3. 観光利用データの概要及び処理方法と結果

観光利用データとして、赤外線を利用した環境省設置の登山道利用者カウンタにより取得された浦内川船着場地点の流入の時間別利用者数を用いる。LiDAR 計測期間を包含するよう第 1～2 回(2022/9/20～2023/5/9)に 232 日間(5,568 時間)、第 2～3 回(2023/5/8～2024/4/6)に 335 日間(8,040 時間)、第 3～4 回(2024/4/5～2024/9/11)に 160 日間(3,840 時間)とし各期間で集計する。自然環境へ負の影響を与えると考えられる要因として日利用者数の最大値及び合計を、自然回復に寄与する要因として無利用（日利用者数合計が 0）連続日の最大日数及び 3 日以上合計日数を算出する。

図-3 より、日利用者数最大値及び合計は減少、無利用連続日の最大日数及び 3 日以上合計日数は増加している。図-2 と比較すると利用者数増加が植生後退に影響していることがわかる。

### 4. おわりに

本研究では、LiDAR 計測により、浦内川登山道の曲線区間を含めた幅員・鉛直方向の体積変化を明らかにした。観光利用データと比較した結果、

(m)	第1回～第2回		第2回～第3回		第3回～第4回	
以上～未満	拡幅	縮幅	拡幅	縮幅	拡幅	縮幅
1.200～1.300	0.000	0.401	0.000	0.000	0.000	0.000
1.100～1.200	0.372	1.475	0.000	0.000	0.000	0.000
1.000～1.100	1.691	6.013	0.000	6.417	0.000	0.000
0.900～1.000	2.446	6.437	3.798	13.255	2.336	4.643
0.800～0.900	6.192	10.345	3.454	17.037	2.128	2.158
0.700～0.800	10.763	15.657	13.507	19.341	0.000	9.470
0.600～0.700	19.003	18.876	17.156	30.116	8.039	16.093
0.500～0.600	25.012	37.305	18.725	36.335	10.803	35.033
0.400～0.500	39.930	40.749	49.326	53.525	16.014	48.514
0.300～0.400	57.555	52.180	39.882	61.623	26.106	76.761
0.200～0.300	78.792	68.875	49.780	65.740	46.281	72.877
0.100～0.200	103.262	81.070	62.022	76.997	54.260	94.193
0.000～0.100	75.011	58.021	63.136	70.920	59.133	62.656
合計	420.029	397.404	320.786	451.306	225.099	422.397

図-2 幅員方向差分階級別を対象区間全体における変化体積の合計(×10<sup>2</sup>cm<sup>3</sup>)

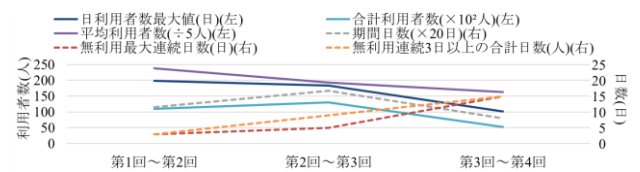


図-3 登山道利用者数代表値

利用者数の増減や無利用連続日数が自然環境に影響していた。これより、GNSS 測位不可の登山道における観光利用による自然環境への影響の定量的評価の可能性を示した。さらに発展させ観光容量の指標を構築することで、定量的根拠として持続可能な観光地マネジメントに寄与すると考える。

今後は、ずれが大きい区間を補正し、全区間における自然環境の変化を整理する。また、植生の進退に影響を及ぼすと懸念される短期的な利用者数増加も踏まえ分析する。さらに、実用に向け、安価な調査機器による計測、誤差の検証を行う。

**謝辞：**本研究は JSPS 科研費 JP22H00222, JP23H00197, JP24K15538 の助成を受けた。調査には、株式会社中央建設コンサルタントの福原和人氏及び金城真也氏にご協力いただいた。ここに記し感謝の意を示す。

### 参考文献

- 1) 国連世界観光機関駐日事務所：持続可能な観光の定義，<https://unwto-ap.org/why/tourism-definition/>（2026 年 1 月 6 日閲覧）
- 2) 環境省：地域循環共生圏とは，<http://chiikijunkan.env.go.jp/>（2026 年 1 月 6 日閲覧）
- 3) 環境省沖縄奄美自然環境事務所：令和 7 年度奄美大島、徳之島、沖縄島北部及び西表島世界自然遺産地域科学委員会、モニタリング計画に基づく中間評価シート（案），2025。
- 4) 国場有沙，神谷大介，平野順俊，澤口侑，大月庄治，山本忍，小宮涼，庄司康太，浅野達海，今井龍一：3 次元点群データを用いた登山道のデジタルアーカイブ化とその活用，AI・データサイエンス論文集，Vol.5，No.3，p.557-562，2024。
- 5) 国場有沙，神谷大介，平野順俊，澤口侑，大月庄治，山本忍，小宮涼，庄司康太，浅野達海，今井龍一：登山道幅員の経年変化計測に対する LiDAR の適用，AI・データサイエンス論文集，Vol.6，No.3，pp.240-246，2025。

## ケイ酸塩系表面含侵材におけるコンクリート養生の効果について

株式会社ティーオーシー ○親泊寛安 リベイロブルノ 山里榮伸  
サンキ化工株式会社 木曾一彦

働き方改革が本格的に施工され建築土木・港湾土木においては残業や祝日勤務が厳しく規制される中、コンクリートの品質管理の1つであるコンクリート養生も例外なくその対象となっている。従来技術では最低5日間の連続湿潤状態を保つために土日祝日をまたいで施工管理をしなくてはならない。また大規模な床面積の建築や階層ごとの床スラブの養生日数の短縮化は大きなテーマとなっている。そこで物理的な養生工法から化学的な養生工法に変えることで工程管理、日数の簡易化、省力化が可能となり実質的に徐々にではあるがそれが浸透しつつある。化学的養生工法の一例としてケイ酸塩系表面含侵材の採用があげられる。

ケイ酸塩系表面含侵材の短期間におけるコンクリートの養生効果と合わせて継時におけるコンクリートの品質向上について従来のコンクリート養生工法である散水シート養生と比較して検証を行った。

ケイ酸塩系表面含侵材は、建築土木のひび割れ部の止水や床コンクリートの表面強化など使用目的に応じた配合は様々であるがコンクリート養生を第一の目的として配合を行った。

一般的にコンクリート養生はC-S-H結晶が大量生成される打設から約7日の間にコンクリート表面からの水分蒸散をシートやフィルムなどで物理的に密着密閉し連続湿潤に保ちコンクリートの自己乾燥を乗り切ることで安定した呼び強度を発現、合わせて初期の乾燥収縮ひび割れを防ぐものである。同様にケイ酸塩系表面含侵材も一般的養生期間に合わせて施工をする。鉛直面では型枠脱型直後、床面では左官工の平滑押さが完了し触手による硬さが確認された後に噴霧器などで規定量を散布することとする。

床面ではコンクリートが露出状態であるため鉛直面と比べると施工タイミングは早くなる。

養生に適したケイ酸塩の配合においては低濃度（3倍希釈：原液1+水2の配合）とした。高濃度のままでは表層だけの急激な反応、高い粘性による不拡散などむしろ若齢コンクリートの水和反応のバランスを崩すからである。またC-S-H結晶が成熟期を迎える前段階は粗大空隙がまだ多いことからより深く主成分を届けることで少しでも反応の均一化を図る狙いがある。平均塗布量は1回散布の約200cc/m<sup>2</sup>である。塗布後は自然乾燥を待ち乾燥したら養生は完工となる。その後の散水やシート、マットなどの養生保護は行わない。膜形成はなく艶や着色もなく乾燥すると元のコンクリートそのものになる。

反応原理はケイ酸塩と未水和の水酸化カルシウムとの反応によるC-S-Hゲルの生成（ポゾラン反応）である。 $\text{NaSiO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 = \text{CaSiO}_3$

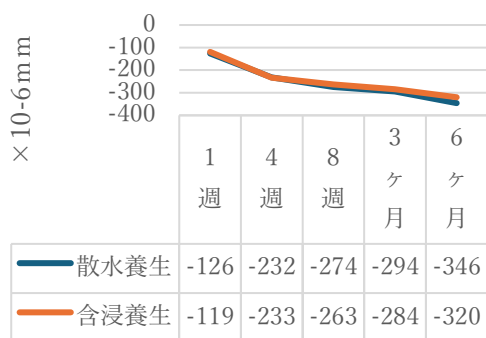


比較試験) ※含侵養生=ケイ酸塩

### 1. 長さ変化率試験 (JIS-A1129-3)

試験機関：沖縄生コンクリート協会 コンクリート配合 18-8-40

試験供試体作成日：2013/11/17



### 2. 圧縮強度試験

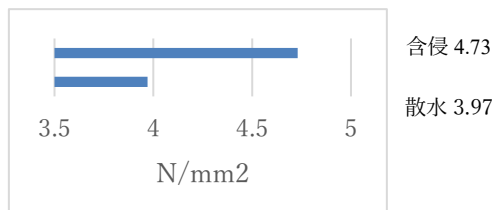
試験機関：南建工業株式会社 コンクリート配合：18-8-40 供試体作成 2013/11/17

	4週	6ヶ月	12ヶ月
■ 標準 (水中)	24.6	28.1	28.3
■ 散水+シート	27.9	30.6	31.5
含侵養生	27.4	31.5	32.3

### 2. 曲げ強度試験

試験機関：(一財) 沖縄県建設技術センター コンクリート配合：18-8-40

供試体作成日 2017/11/17 養生：565 日



### 3. 中性化試験

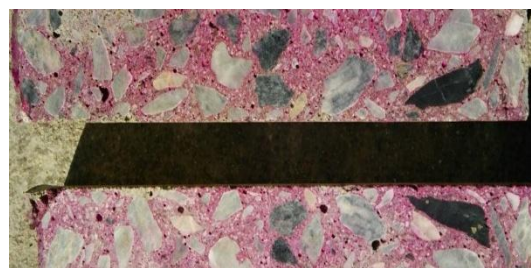
試験機関：(一財) 沖縄県建設技術センター コンクリート配合：18-8-40

試験供試体作成日：2014/6/4 試験日：2016/1/7 養生日数：583 日

試験結果 単位：mm

	散水シート養生	含侵養生
中性深さ	3.0	0.5

含侵養生) 中性化 0.5mm



散水シート養生) 中性化 3.0mm



### 4. 塩化物イオン試験

試験機関：(公財) 沖縄県建設技術センター 塗布日 2016/6/2 試験日 2021/6/2

暴露日数：5 年

塩化物イオン濃度(kg/m³)

採取深さ	0～20mm	20～40mm	計	比率
散水	0.271	0.100	0.371	1.00
含侵養生	0.086	0.071	0.157	42.3

含侵養生 098-831-6007

## 5. 水分保持目視試験

試験供試体作成から試験実施日まで 5 日間



NO	養生	状況
1	標準（水中）	内部に水分が充填している
2	気乾（5 日間 湿潤）	乾燥状態である
3	含侵	水分が確認できる

## 6. 現場コンクリートひび割れ目視確認 沖縄県本部ケーソン製作工事 2016/11/1 30cm×50cm×5cm N21



散水シート養生（5 日間）

7 日後ひび割れ確認

## 比較試験評価について

養生工法の違いは即ち養生のメカニズムの違いでありその性能効果は時間軸で検証すると差異が出てきた。JIS A 1129 長さ変化率試験では乾燥収縮による寸法変化をダイヤルゲージ法を用いて測定したが 28 日経過あたりまで 2 つの養生工法の差異はないが時間の経過とともに含侵養生の方が寸法変化が鈍化してきている。同様なことが圧縮強度試験においても見られた。つまり 28 日経過辺りまで 2 つの養生工法の強度にほとんど差異はないが継時とともに含侵養生の方が数値が上がってきている。「公共建築工事仕様書（建築工事編）」土木学会「コンクリート標準示方書（施工編）」には 15℃以上で約 5 日間の湿潤養生を標準値として記載されている。C-S-H 結晶の連続構造の形成を促進して 28 日の強度を確保する点において 2 つの養生工法はほぼ同じ性能効果を示しているがそれ以降の C-S-H 結晶の継続性において含侵養生は優位になってきていると考えられる。中性化深度や塩化物イオンの侵入量データにおいて継時とともに散水養生と含侵養生の数値が開きが出てきているのは C-S-H 結晶による表層部の緻密性が影響していると考えられる。表層部の緻密化を検証するため含侵養生単体による摩耗性試験 JIS A1453[建築材料及び建築構成部分の摩耗試験方法（研磨紙法）]を行った。

試験機関：（一財）建材試験センター

耐摩耗試験・質量減少率 供試体 N3

	減少量 g	比率%
無塗布	0.42	100
含侵養生	0.24	57

耐摩耗性試験・摩耗深さ 供試体 N3

	摩耗深さ mm	比率%
無塗布	0.07	100
含侵養生	0.06	86

プレーンなコンクリート供試体に対して耐摩耗性が上がっていることは含侵養生のポゾラン反応による表層部の緻密化の結果と考えられる。

建築分野においてコンクリート素地状態での完工は意匠的には皆無であり何らかの仕上げを行うためケイ酸塩系表面含侵材によるコンクリート表層部の緻密性が塗装・左官などの付着性へどのような影響を与えるか検証を行った。

試験機関：(一財) 日本塗料検査協会東支部  
土木学会 {2018 年制定} コンクリート標準示方書 {基準編} JSCE-K531-2013 6. 表面被覆材の付着強さ試験方法 4.1 標準状態試験体の試験方法に準ずる

供試体：100×600×30mm コンクリート平板  
試験体養生期間)

- A. カチオンプライマー約 1 時間半+アクリルシリコン塗料約 1 週間
- B. ケイ酸塩系表面含侵材約 4 日間+アクリルシリコン塗料約 1 週間

引張ヶ所数：N5

試験装置：建研式接着力試験器

	N1	N2	N3	N4	N5	平均
A	1.73	1.71	1.41	1.16	1.89	1.58
B	2.33	2.05	2.56	2.3	1.67	2.18

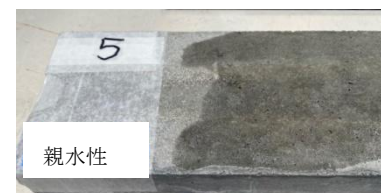
A 破断状況



B 破断状況



基材 (コンクリート) からの破断は A=14% に対して B=26% であり付着強度に大きな差が出ている。A は樹脂膜を形成するが B は含侵するため膜形成はない故に塗装材とコンクリートは直接の密着となる。またコンクリート表面は親水性となるため塗装材の付着補助となる。



ケイ酸塩系表面含侵材の養生効果について呼び強度発現以降の C-S-H 結晶の増伸は緩やかになるが従来の養生工法と比較すると増伸は大きいことが各種試験結果から推測できる。また C-S-H 結晶の継続は毛細管空隙の減少につながり中性化や塩化物イオン侵入量の抵抗性を高める一方、塗装・左官材のプライマー効果を有することが確認できる。

以上の点から従来の養生工法よりもコンクリート物性向上の面でみると優位性があると判断する。

## パーム椰子殻燃焼灰ベースのジオポリマーコンクリートの強度特性に関する基礎研究

琉球大学 ○瑞慶覧朝伎, 富山潤, 花城有人, 琉球大学客員研究員 リベイロ・ブルノ

### 1. 研究背景および目的

近年, 地球温暖化対策や資源循環の観点から, セメント使用量の削減を目的とした低炭素型コンクリートの開発が進められている. その中でも, 産業副産物を主原料とするジオポリマーコンクリートは, 製造時の CO<sub>2</sub>排出量を大幅に低減できる材料として注目されている.

沖縄県では, 2021 年 7 月よりカーボンニュートラルなバイオマス発電所である「沖縄うるまニューエナジー株式会社 中城バイオマス発電所」の運営が開始されており, 同発電所では, 燃料としてパーム椰子殻を使用され, 年間約 6,000~7,500 t のパーム椰子殻燃焼灰が発生している<sup>2)</sup>. 現在, これらの燃焼灰はコンクリート用混和材やバイオマス系泥土改質材としてリサイクルされ, 土木工事, 農地改質, 牛舎敷料などに利活用されている. 参考文献<sup>3)</sup>では, パーム椰子殻燃焼灰 (以下, PKS 燃焼灰) を基材としたジオポリマーモルタルの強度および流動性に関する基礎的検討が行われている. 本研究では, その発展として, PKS 燃焼灰を活性フィラーとして用いたジオポリマーコンクリートの強度および流動性を, 普通セメントコンクリートおよび低セメント型コンクリートと比較検討した.

### 2. 実験概要

#### (1) 使用材料

本研究では, 活性フィラーとして PKS 燃焼灰, 高炉スラグ微粉末, シリカフュームを使用した. また, アルカリ活性剤には水酸化ナトリウム (NaOH) を使用した. 流動性, 可使時間を確保するため, 化学混和剤として, ジオポリマー用混和剤 (アニオン系重縮合物) (以下, 分散剤) を使用した. 細骨材には石灰岩砕砂を, 粗骨材には石灰岩碎石を使用した. 使用した活性フィラーの化学組成を表-1 に, 材料の種類, 記号, 密度を表-2 に示す.

表-1 蛍光 X 線分析による化学組成分析結果

試料名	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	その他
SF	94	0.55	0.37	0.43	3.65
PKS	56	3.2	24	2.0	14.8
BS	31	11	51	3.6	3.4

(単位: wt%)

表-2 使用材料

種類	材料名	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
活性フィラー	高炉スラグ微粉末 (石膏なし)	BFS	2.91
	PKS 燃焼灰	PKS	2.4
	シリカフューム	SF	2.2
結合材	セメント	C	3.14
水	水道水	W	1.0
細骨材	石灰岩砕砂	S	2.64
粗骨材	石灰岩碎石	G	2.7
アルカリ活性剤	水酸化ナトリウム水溶液	AC	1.27
分散剤	アニオン系重縮合物	GP	1.1
混和剤	高機能 AE 減水剤	AE	—

#### (2) 配合

本研究におけるジオポリマーコンクリート (以下, GPC) の配合は, 松本らの研究<sup>4)</sup>で報告された配合条件をもとに, 一部条件を調整して用いた. GPC の配合を表-3 に, 比較用に製作した普通セメントコンクリート (以下, OPC) および低セメント型コンクリート (以下, LCC) の配合を表-4 に示す.

表-3 GPC の配合

W/B	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
	PKS	BFS	SF	S	G	W	AC	GP
29%	300	150	50	822	818	68.5	88	15

表-4 OPC・LCC の配合

種類	W/B	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		C	PKS	S	G	W	AE	
OPC	61%	284	0	924	928	174	1.995	
LCC	58%	271	28	914	928	174	1.995	

#### (3) 試験項目および実験方法

試験項目および試験方法を表-5 に示す. フレッシュ性状として, OPC および LCC はスランプ (JIS A 1101) と空気量 (JIS A 1128) を, GPC はスランプフロー (JIS A 1150) と空気量 (JIS A 1128) を測定した. GPC は高い流動性を示したため, スランプに代えてスランプフロー試験を実施した. また, 供試体寸法 φ100×200 mm のものを用い, 硬化性状として, 圧縮強度 (JIS A 1108) および静弾性係数 (JIS A 1149) を測定した. OPC は水と反応, GPC は脱水 (縮重合) 反応と硬化条件が異なるため, 養生条件は OPC および LCC は 20°C で水中養生

キーワード: PKS 燃焼灰, コンクリート, ジオポリマー, 圧縮強度, 静弾性係数

連絡先: 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース  
建設材料学研究室 E-mail: zukeran\_sd6c@cs.u-ryukyu.ac.jp



とし、GPC は硬化後に脱型し、20°Cの部屋で気乾養生とした。

表-5 試験項目および方法

配合	試験項目	試験方法	備考
OPC LCC	スランプ	JISA 1101	18±3cm
	空気量	JISA 1128	4.5±1.5%
	圧縮強度	JISA 1108	材齢： 7日・14日 28日・56日
	静弾性係数	JISA 1149	材齢： 7日・28日
GPC	スランプフロー	JISA 1150	60±10cm
	空気量	JISA 1128	2±1%
	圧縮強度	JISA 1108	材齢： 7日・14日 28日・56日
	静弾性係数	JISA 1149	材齢： 7日・28日

### 3. 実験結果

#### (1) フレッシュ性状

得られたスランプ試験及びスランプフロー試験、空気量試験の結果を表-6 に示す。OPC はスランプ 18.3 cm、空気量 4.8%、LCC はスランプ 19.0 cm、空気量 4.1%、GPC はスランプフロー 55.0 cm、空気量 2.4% となり、それぞれ目標値の範囲内となることを確認した。

表-6 フレッシュ性状の測定結果

種類	指標	結果
OPC	スランプ (cm)	18.3
LCC		19.0
GPC	スランプフロー (cm)	55.0
OPC	空気量 (%)	4.8
LCC		4.1
GPC		2.4

#### (2) 強度特性

得られた圧縮強度試験結果を図-1 に、静弾性係数と各材齢における圧縮強度の関係を図-2 に示す。一般に、静弾性係数は圧縮強度との相関を示すが、微細空隙構造や乾燥収縮に伴う微細ひび割れの影響を受けやすい。本研究において GPC は、空気量が約 2.4% と低く、28 日材齢で圧縮強度 38.7 N/mm<sup>2</sup> を示した一方、静弾性係数は 25.7 kN/mm<sup>2</sup> と相対的に低かった。これは、連行空気量よりも、未反応粒子やゲル空隙を含む微細空隙構造、および乾燥に伴う微細ひび割れが剛性に影響した可能性を示唆している。GPC はアルミノシリケート種の縮重合により硬化体骨格を形成するため、養生中の含水状態や乾燥履歴の影響を受けやすい。本研究では気乾養生としたことから、乾燥収縮や微細ひび割れの進行により、圧縮強度の増加に対して静弾性係数が低く評価されたと考えられる。

また、LCC において材齢の進行に伴い静弾性係数が低下した点についても、試験時の含水状態や端面条件に加え、乾燥収縮に起因する微細ひび割れの影響が考えられる。水中養生であっても、供試体の乾湿状態や試験条件により静弾性係数は変動するため、LCC の剛性変化はこれらの条件を考慮して解釈する必要がある。

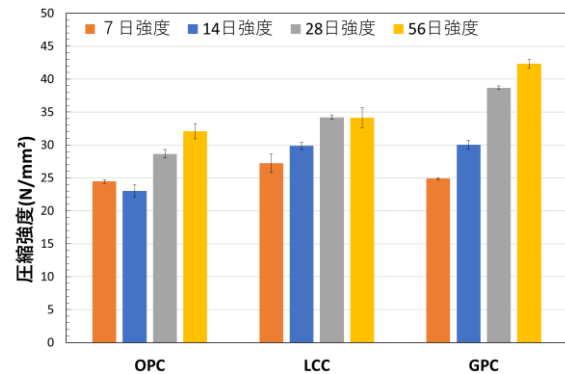


図-1 圧縮強度試験結果

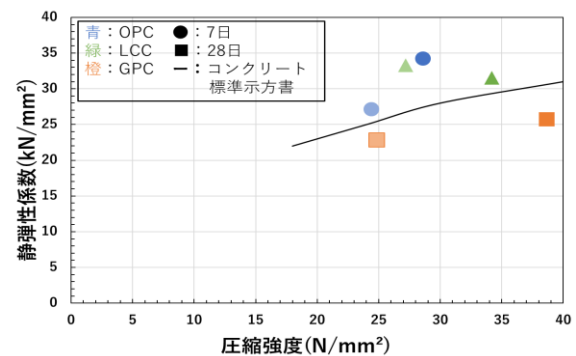


図-2 圧縮強度と静弾性係数の関係

### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) GPC は圧縮強度が 25 から 39 N/mm<sup>2</sup> と増加した一方、静弾性係数は 22 から 25 kN/mm<sup>2</sup> に留まり、強度増加に比べて剛性の増加が小さい傾向を示した。
- 2) LCC は圧縮強度が 27 から 34 N/mm<sup>2</sup> へ増加したにもかかわらず、静弾性係数は 33 から 31 kN/mm<sup>2</sup> へ低下し、OPC と異なる挙動を示した。

### 参考文献

- 1) 一宮一夫, 池田攻, 上原元樹: 低炭素で高機能バインダーとしてのジオポリマー～セメント産業への期待～, セメント・コンクリート, No.890, pp.20-23, 2020.4
- 2) 松本周作, 富山潤, 入仲良紀, 謝花一成: パーム椰子殻燃焼灰を使用したジオポリマーモルタルに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, No.46, pp.46, 2024.6

## 高架上と土中部における照明ポールの振動特性

琉球大学 宮里琉良, 大城雄希, Yasin Mumtaz, 下里哲弘

### 1. 背景と目的

道路照明ポールは設置環境により風外力の受け方が異なり、振動特性や疲労損傷リスクに差が生じる可能性がある。特に高架上の照明ポールは周囲が開放的で風の影響を受けやすく、渦励振を含む風振動が発生しやすい。一方、土中部の照明ポールは地盤拘束の影響を受け、高架上とは異なる振動応答を示すと考えられる。既往研究では、照明ポールの応答特性と疲労損傷の可能性について<sup>2)</sup>、加速度とひずみを同時計測し、振動応答と疲労特性を評価する手法の提案<sup>1)</sup>、設置条件や損傷状態の違いが照明柱の振動特性に与える影響について<sup>3)</sup>は検討している。しかし、高架上と土中部という異なる設置条件下の照明ポールを対象に、加速度・ひずみを同時計測し、振動応答および疲労特性を一貫して比較した研究は十分に確認されていない。そこで本研究では、高架上および土中部に設置された照明ポールを対象に、加速度・ひずみ・風速の同時計測を行い、設置条件が振動特性および応力特性に及ぼす影響を検討した。

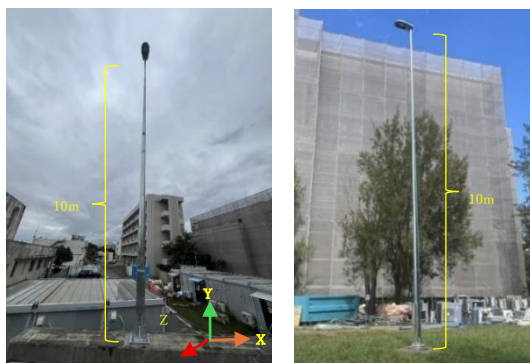


写真1 照明ポール

### 2. 研究方法

本研究では写真1に示す照明ポールを、土中部では掘削孔に基礎ケーシングを挿入して設置し、高架上ではアンカー設置後に立ち上げ固定した。ここで、灯具正面を基準として、左右方向をX軸、鉛直方向をY軸、奥行き方向をZ軸と定義する。いずれの条件においても、設置後に計測機器を取り付け、現地環境下で計測を実施した。写真2の加速度計は照明ポール中腹部および上部(4・5m、10m位置)に設置し、X(左右)、Y(鉛直)、Z(奥行)方向の三軸成分を128Hzで計測した。土中部では4m・10m、高架上では5m・10mの2か所に設置した。写真3のひずみゲージは基部付近に貼付し200Hzで計測し、風速は写真4の三次元超音波風向風速計を用いて高架上約5m位置で40Hzにて取得した。取得した加速度データは周波数解析にり、固



写真2 加速度計



写真4 超音波風向風速計



写真3 ひずみゲージ

キーワード 照明ポール、振動特性、設置条件、疲労

連絡先 〒903-0213 西原町千原1 mail:e225529@cs.u-ryukyu.ac.jp

有振動数の推定および設置条件による振動応答の違いを評価した。

### 3. 結果と考察

加速度データの周波数解析により得られた加速度波形および周波数スペクトルについては、紙面の制約から代表例として X 軸成分のみを図 2、3 に示す。また、解析より、照明ポールには約 1.5Hz（1 次モード）および約 6Hz（2 次モード）の明確な卓越周波数が確認され（表 1）、土中設置ポールおよび高架上ポールの双方で同様のモード構成を示した。観測期間の風況は図 1 に示すように最大瞬間風速 5.6m/s、最大平均風速 2.3m/s と穏やかであり、ひずみから算出した応力範囲は 2.2~5.2MPa で、疲労照査に用いた打ち切り限界 21MPa を下回った。以上より、本観測条件下では照明ポールの振動は主として構造特性に支配され、主要振動成分は約 1.5Hz および約 6Hz に集中している。また、疲労損傷リスクは低い状態にあると考えられる。

### 4. まとめと今後の計画

高架上および土中部の照明柱を対象に、加速度・ひずみ・風速の同時計測を行い、主要固有振動数、約 1.5Hz（1 次モード）、約 6Hz（2 次モード）を明らかにした。観測風況下では応力範囲は最大 5.2MPa であり、疲労損傷リスクは低い状態であった。

今後は強風・台風時データを追加取得し、累積疲労損傷度の算定、設置条件の異なる照明ポールの振動応答特性の違い、疲労損傷度の比較を行う。

表 1 周波数解析結果

	土中部				高架上			
	10m		4m		10m		5m	
	1次モード	2次モード	1次モード	2次モード	1次モード	2次モード	1次モード	2次モード
X	1.48Hz	5.93Hz	1.50Hz	5.93Hz	1.48Hz	5.94Hz	1.48Hz	5.94Hz
Y	1.50Hz	5.93Hz	1.50Hz	5.93Hz	1.45Hz	5.68Hz	1.45Hz	5.94Hz
Z	1.51Hz	5.89Hz	1.50Hz	5.88Hz	1.45Hz	5.68Hz	1.45Hz	5.68Hz

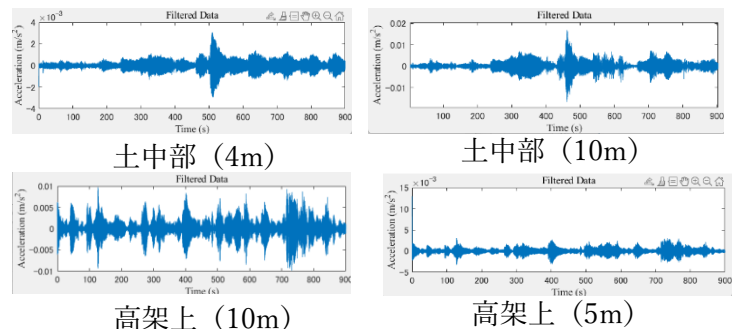


図 1 加速度波形

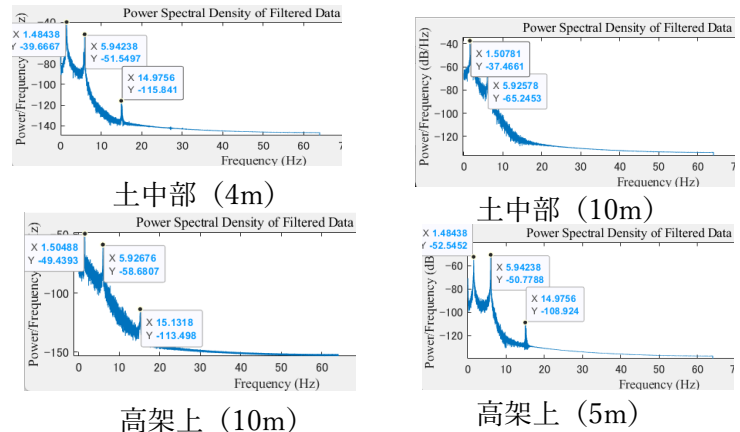


図 2 周波数スペクトル

### 参考文献

1. 田井政行, 澤田知幸, 下里哲弘, 日和裕介: 無線加速度センサを用いた照明柱の疲労損傷度推定法の提案, 土木学会論文集, Vol.75
2. 松村恭寛: 経亜熱帯島嶼環境下における道路照明柱の応答特性
3. 井舎英生, 北田俊行, 山口良, 徳増健: 道路橋における照明柱・標識中の振動特性に関する基礎的研究, 鋼構造論文集, 第 11 巻 (第 43 号), pp147-158, 2004.9

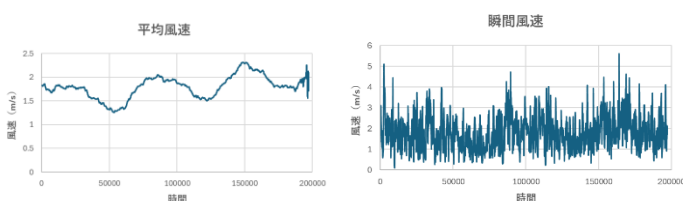


図 1 平均風速・瞬間風速

## Raspberry Pi を用いた構造ヘルスマニタリングシステムの構築

琉球大学 ○松本拓樹, 富山潤

### 1. はじめに

日本国内の道路橋やトンネル等の社会インフラは供用年数の増加に伴い老朽化が進行している。近接目視点検は現地作業の負担が大きく、安全性確保や人材不足の影響も受ける。画像をディープラーニングで解析して変状を自動検出する研究が進む一方、現場適用には機材・計算環境の準備や運用など導入面の課題が残る。また、現状の物体検出ではひび割れ形状を十分に表せず、長さ・幅の定量化が難しいため、本研究では画像中の対象物を画素単位で分類・抽出する手法であるセグメンテーションによりひび割れ領域を抽出したマスク(二値画像)から長さ  $L_{px}$  と幅  $W_{p95}$  (画素) を算出する。また、Raspberry Pi (小型・低価格のコンピュータ) 実装を見据え、軽量モデルの推論結果を整理する。

### 2. 使用技術と手法

#### 2.1 物体検出とセグメンテーション

物体検出は対象物の位置を矩形 (Box) で与えるのに対し、セグメンテーションは対象領域をマスク (Mask) として画素単位で抽出する。ひび割れは細長く分岐や途切れを伴うため、Box のみから幅や長さを定量化することは難しい。本研究ではマスクを用いることで、幅・長さの算出を可能にする。

#### 2.2 YOLO の概要と YOLO11-seg<sup>1)</sup>

YOLO は 1 段階方式の物体検出モデルであり、入力画像から推論までを単一の処理系で実行できるため高速である。本研究では YOLO11-seg を用い、ひび割れ領域をインスタンスごとのマスクとして出力させる<sup>2)</sup>。推論結果として、各インスタンスのマスクと信頼度を取得する。

#### 2.3 マスクからの長さ・幅算出

図-1 に、ひび割れの推論マスク (RAW) から長さ・幅を算出する流れを示す。まず、推論で得たひび割れ領域 (白) を二値マスクとして扱い、太く出やすい部分を補正して最終マスク (AUTO) を得る。次に、

AUTO を細線化して中心線を抽出し、中心線の画素数を長さ  $L_{px}$  とする。幅は中心線上でマスク境界までの距離  $d$  を用い、局所幅  $w = 2d$  を求め、代表値として  $W_{p95}$  (95 パーセンタイル) を採用する。

### 3. 実験方法

#### 3.1 使用データセット

本研究では、ひび割れセグメンテーションモデルの学習および推論・計測処理の評価のため、表-1 に示す 2 種類のデータセットを用いた。crack-seg はひび割れ領域を主対象とし、学習 (train/val) と推論・計測の動作確認 (test) に用いた<sup>3)</sup>。roads\_and\_bridges は路面・橋梁など多様な背景を含み、未知環境に対する汎化性能の確認 (test) に用いた<sup>4)</sup>。

表-1 使用データセットの概要

データセット名	使用目的	使用分割・枚数
crack-seg <sup>3)</sup>	学習 計測処理の評価	train 3717 val 112 test 200
roads_and_bridges <sup>4)</sup>	汎化性能の確認	test 144

#### 3.2 学習環境とモデル構築

学習は Google Colaboratory (GPU 使用) 環境 (Google 提供クラウド計算環境) で、YOLO11n-seg を用いた。画像入力サイズは  $IMGSZ=640$  とし、100 epoch 学習した。val データの Mask mAP が最大となった epoch の重み (best.pt) を採用し、以降の推論に用いた。

#### 3.3 推論条件

推論は YOLO11-seg を用い、入力サイズ  $IMGSZ=640$ 、信頼度閾値  $conf=0.25$  で実行した。得られたマスクは元画像解像度に復元して二値化し、図-1 に示す手順で長さ  $L_{px}$  と幅  $W_{p95}$  を算出した。マスク補正は距離変換に基づく収縮 ( $SHRINK\_ALPHA=0.50$ ,  $MIN\_RADIUS=1.00$ ) を基本とし、補正により長さが大きく減少する場合は軽い収縮 (erosion, 1 回) に切り替えた。

キーワード: ひび割れ, Raspberry Pi, コンクリート, Yolo, セグメンテーション

連絡先: 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース 建設材料学研究室 E-mail: e225523@eve.u-ryukyu.ac.jp



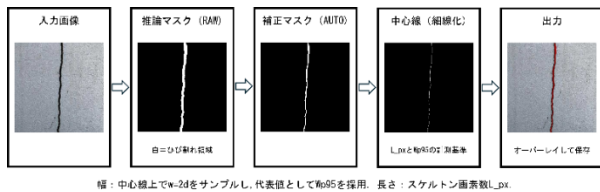


図-1 ひび割れ長さ・幅の算出フロー ( $L_{px}$ ,  $W_{p95}$ )

## 4. 結果および考察

### 4.1 学習結果

図-2 に示すよう 100 epoch の学習ログを用い、Mask mAP50-95 が最大となる epoch (best) と最終 epoch (last) を比較した。Mask mAP50-95 は best=0.224, last=0.211 であり、学習中盤で汎化性能が最大となる傾向が確認された。以降の推論および寸法計測には best.pt を用いた。

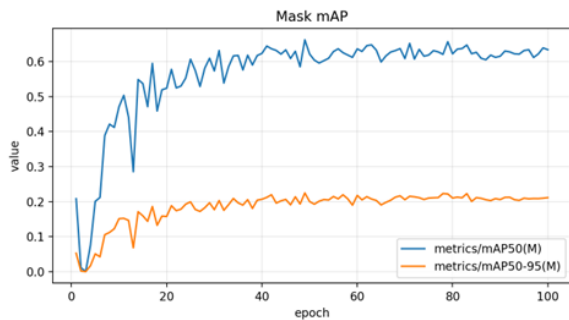


図-2 YOLO11-seg における Mask mAP の学習曲線

### 4.2 推論結果と幅・長さ算出の挙動

図-3 に、推論マスクから幅 ( $W_{p95}$ )・長さ ( $L_{px}$ ) を算出した代表例を示す。RAW マスクは背景テクスチャ等の影響で太く出ることがあるが、補正 (REF/FB) によりひび割れの中心部を残した最終マスク (AUTO) を得ることで、計測が安定する。幅は中心線上で  $w=2d$  をサンプルし、外れ値の影響を受け難い代表値として  $W_{p95}$  を用いた。一方、分岐や途切れを含む場合、中心線画素数に基づく長さ  $L_{px}$  は枝分かれ分を含み、端点間の実長と一致しないことがある。



図-3 推論マスク補正 (REF/FB) と幅・長さ算出の例 (AUTO は FB を採用)

### 4.3 Raspberry Pi での実装

Raspberry Pi 上で YOLO11-seg のリアルタイム推論を行い、マスクから  $L_{px}$ ,  $W_{p95}$  を算出できることを確認した (図-4(a))。一方、FB 採用が多く、マスクが実ひび割れより太めとなる例が見られた (図-4(b))。これは背景や照明の影響で RAW が膨張し、REF で途切れが生じやすいことが要因と考えられる。



(a) 良好な例

(b) 課題の残った例

図-4 良好例と課題例

## 5. まとめ

本研究では、YOLO11-seg の推論マスクからひび割れの長さ  $L_{px}$  と幅  $W_{p95}$  (画素) を算出する手法を検討した。以下に得られた知見と課題を示す。

- 1) 距離変換に基づく補正 (REF) とフォールバック (FB) により最終マスク (AUTO) を生成し、計測の安定化を図り、良好な結果を得た。
- 2) また、Raspberry Pi 上でリアルタイム推論の動作を確認した。
- 3) 今後は、現場画像の追加学習や条件調整によりマスク形状の改善を行い、長さ指標の高精度化を検討する。

### 参考文献

- 1) Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. and Farhadi, A.: You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.779-788, 2016.
- 2) Ultralytics: Ultralytics YOLO Documentation, <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
- 3) Ultralytics: Crack Segmentation Dataset, <https://docs.ultralytics.com/datasets/segment/crack-seg/>
- 4) Ghaffar, D.: Roads and Bridges Cracks (YOLOv8 format), Kaggle, <https://www.kaggle.com/datasets/danishghaffar786/roads-and-bridges-cracks-yolov8-format>



## Session 5 腐食・防食・維持管理

## 局部腐食形状による切り欠き特性に関する解析的研究

琉球大学 ○古川雅斗、大城雄希、下里哲弘

### 1. 研究の背景・目的

鋼橋の劣化現象の一つに腐食があり、腐食の進行により耐荷力の低下が懸念される。特に、高力ボルト継手部近傍に生じる母材の局部腐食は、継手耐力の低下に対して注意を要する。これは、ボルト連結板周辺の母材部では、腐食生成物に塩分が付着しやすく、降雨による濡れ状態が他部位よりも長時間持続する。このため、当該部位において局部的な腐食が生じやすいためである。腐食が生じることで、図1のような溝状腐食が生じる。溝状腐食が生じることで鋼材の伸びが発揮しなくなり破断する。既往研究では、切り欠き特性を FEM 解析により評価する際、破壊は Mises 応力のみに依存するのではなく、静水圧応力にも依存することが報告されている。また、多軸応力状態の影響が大きいほど、より低い Mises 応力においても破壊に至ることが示されている。先行研究では、高力ボルト継手近傍の母材腐食を局部減肉と全体的減肉に分類し、レーザー計測と引張試験により、減肉の進行に伴い最大荷重・最大変位が低下し、降伏応力は切欠き強化により上昇する傾向を示すことを明らかにした。また、減肉形状と延性特性の関係を定性的に示したが、定量的評価には至っていない。本研究では、局部腐食形状による切り欠き特性が部材強度に与える影響について解析を行い、切り欠き特性が強度へ与える

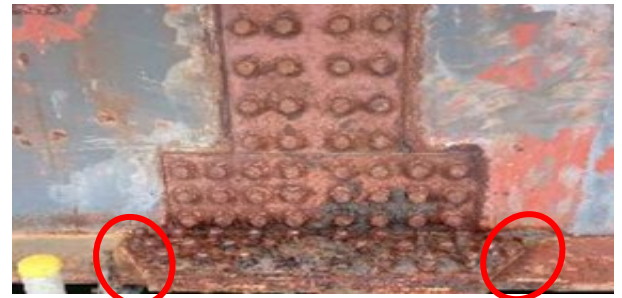


図1 溝状腐食が生じた鋼材

影響を評価可能な解析手法の構築を目的とする。

### 2. 研究方法

本研究では、Abaqus を用いた FEM 解析により、先行研究の引張試験から得られた降伏応力およびひずみを用いて解析モデルを構築する。まず、解析結果と実験結果の整合性を確認し、両者が良好に一致する解析モデルの妥当性を検証する。次に、検証した解析モデルを用いて、さまざまな局部腐食形状を有する解析モデルの解析を行い、その結果を先行研究の実験結果と比較する。これにより、実験結果に近づく FEM 解析手法について検討を行う。

#### (1)腐食模擬使用試験体

先行研究のレーザー計測の結果を基に製作したタイプ A、(腐食なし)、タイプ B(局部腐食)の二種類の腐食模擬試験体モデルを使用する。図2に試験体モデルを示し、表1に試験パラメータを示す。

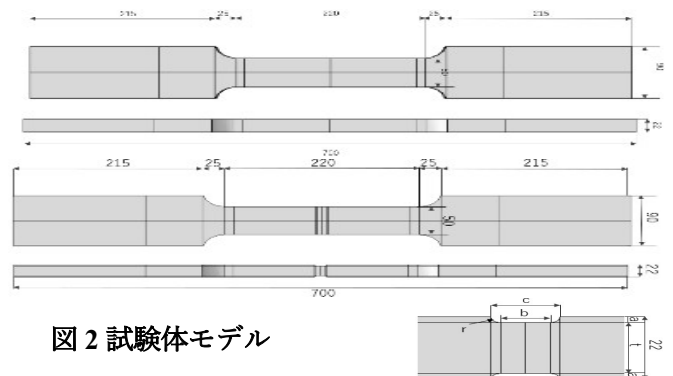


図2 試験体モデル

表 1 試験体パラメーター

種類	母材厚	溝形状				
		深さ a(mm)	底辺幅 b(mm)	全幅 c(mm)	R加工半 径r(mm)	溝部板厚 t(mm)
TypeA	22	溝加工なし				
TypeB-r2-0	22	2	0	4	2	18
TypeB-r2-10	22	2	10	14	2	18
TypeB-r2-20	22	2	20	24	2	18
TypeB-r2-50	22	2	50	54	2	18

キーワード FEM 解析 切り欠き 局部腐食

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 (e-mail : e225532@cs.u-ryukyu.ac.jp)



### 3. 結果・比較

図3に荷重-変位および応力-ひずみ関係を示す。解析結果より、タイプBでは底辺幅の増加に伴いタイプAに近づくことから、底辺幅の増加により切欠き特性の影響が低減すると考えられる。図4に底辺幅0、10、20、50の切欠き部における実験結果と解析結果の応力-ひずみ関係を示す。図4(a)、(b)、(c)、(d)では両者に乖離が見られ、特に図4(a)、(b)では切欠きの影響により鋼材の伸びが十分に発揮されていないことが要因と考えられる。図5はタイプBの底辺幅0、10を含む全試験体の応力-ひずみ関係を示す。切欠き部であるB点では大きな乖離が確認され、解析では切欠きの影響を評価できていないことが示唆される。さらに、Abaqus で用いられる Von Mises 降伏条件は偏差応力のみに基づくため、三軸応力状態が支配的な切欠き部の影響を評価できないと考えられる。

$$\sigma_v = \sqrt{\{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)\}}$$

$\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ ：各方向の垂直応力

$\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$ ：せん断応力

$\sigma_v$ ：von Mises 相当応力

$\sigma_y$ ：材料の降伏応力

### 4. まとめと今後の課題

以下に本解析で得られた知見を示す。

- 1) 局部腐食を模擬したタイプBでは底辺幅の増加に伴い、荷重-変位および応力-ひずみ挙動が腐食なしのタイプAに近づき、切欠き特性の影響が低減することが確認された。
- 2) 底辺幅0および10を中心に、切欠きの影響により鋼材の伸びが十分に発揮されず、実験結果と解析結果の乖離が生じた。
- 3) 切欠き部(B点)では、実験結果と解析結果に大きな乖離が見られ、解析では切欠きの局所的挙動を適切に評価できていないことが示された。
- 4) Von Mises 降伏条件は三軸応力状態を考慮できな

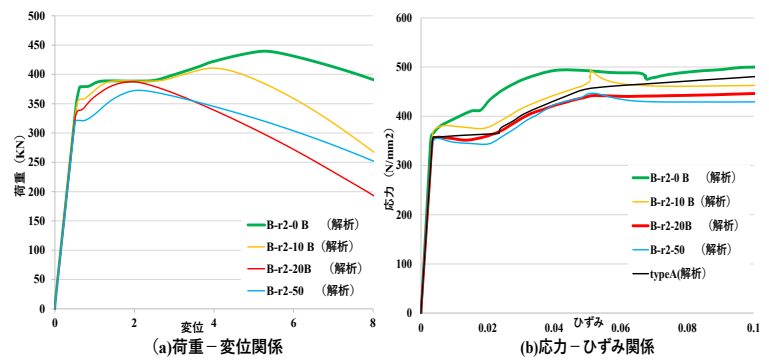


図3 解析結果

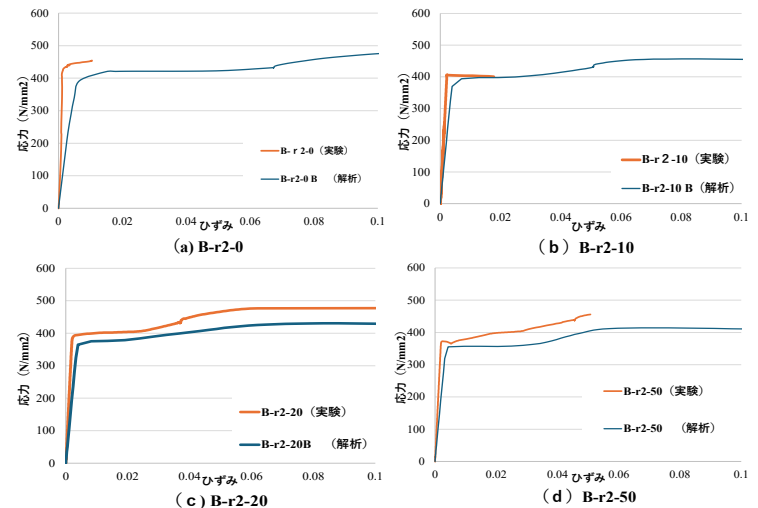


図4 各ケースにおける切り欠き部の応力-ひずみ関係比較

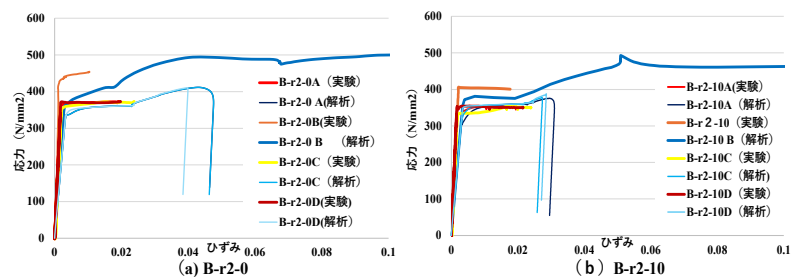


図5 底辺幅0、10における計測点ごとの応力-ひずみ関係比較

いため、切欠き部における降伏・延性挙動の評価に限界があることが明らかとなった。

今後、本研究で用いた模擬試験体で降伏条件を変更した FEM 解析を行う予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 窪田 稜穂、小木曾 慎、佐藤 拓哉、笠原 直人、2016、延性破壊－局部破損メカニズムを説明する破壊曲面の提案、日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集、J0310104 (一般社団法人 日本機械学会)
- 2) 小田 脩斗、下里 哲弘、ムムタズ ヤシン、田中 裕明、2024、高力ボルト継手近傍母材部の局部腐食形状と継手耐力特性、土木学会西部支部沖縄会 技術研究発表会講演論文集。

## 錆びたボルト試験体に対する各種防食メカニズムの耐食性能評価

琉球大学 ○山本智大 下里哲弘 淵脇秀晃

### 1. はじめに

沖縄地域の沿岸部では、高温多湿な気候と海塩粒子の影響により、橋梁鋼構造物の腐食が深刻な問題となっている。特にボルト締結部は、水分や塩分が滞留しやすく、腐食が局所的に進行しやすい部位である。現行の防食仕様では、沖縄特有の厳しい塩害環境下において十分な耐食性能が確保できない場合があり、腐食が進行したボルト部材に対して高い防錆・防食性能を有する技術の選定が求められている。そこで本研究では、錆びたボルト試験体に各種防食方法を適用し、沖縄の塩害環境下におけるそれぞれの耐食性能を実験的に評価することを目的とした。

### 2. 実験概要

#### 2. 1 試験体概要

本試験では、実構造物における施工時の不確定要素を考慮して写真2、3のようにナット、ボルトにカットを施し、塗膜欠陥を模擬した試験体を用い、塩水噴霧試験および複合サイクル試験を段階的に実施する。各種防錆方法が、カット部からの発錆および錆汁の発生、塗膜のめくれや膨れ、および破れなどの劣化進展に及ぼす影響を評価する。

#### 2. 2 試験方法

##### (1) 塩水噴霧試験

塩水噴霧試験は JIS Z 2371 に準拠し、写真-4 のように塩水噴霧試験機を用いて実施した。試験槽内温度は 35℃ とし、5% の食塩水を連続噴霧した。試験体は所定の角度で設置し、24 時間ごとに目視観察を行い、塗膜カット部からの発錆、錆汁の発生、および塗膜の膨れやめくれ等の劣化状況から、防食メカニズムの違いによる耐食性能を比較した。

##### (2) 複合サイクル試験

複合サイクル試験は、塩水噴霧試験を 1000 時間実施した後の試験体を対象に、写真-5 のように恒温恒湿機 (LHL-113, エスベック製) を用い、湿潤工程 (35℃・

相対湿度 90%、2 時間) および乾燥工程 (40℃・相対湿度 50%、6 時間) を 1 サイクルとし、1 日 3 サイクル繰返した<sup>(1)</sup>。加えて、1 日 1 回、各ボルトに対して 5% の食塩水を噴霧した。試験中は、ボルト塗膜カット部を

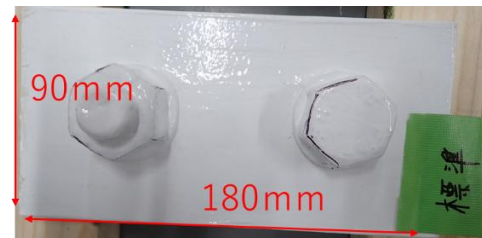


写真-1 標準試験体表面

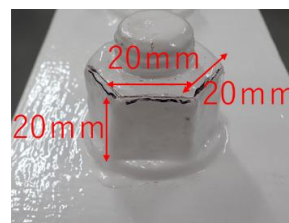


写真-2 ナットカット部

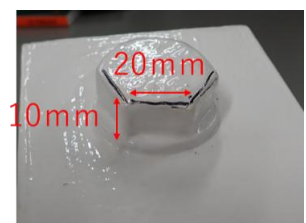


写真-3 ボルトカット部



写真-4 塩水噴霧試験機および試験体設置状況



写真-5 複合サイクル試験機および試験体設置状況

表-1 試験体の塗装系仕様および防食メカニズムの一覧

試験体	標準仕様	試験体 A	試験体 B	試験体 C
塗装系	C5 塗装系	エポキシ樹脂塗料	亜鉛犠牲防食	エポキシ樹脂塗料
防食メカニズム		さび浸透型, 極小粒子	犠牲防食型, 亜鉛粒子	大気遮断型, 金属フレーク粒子
膜厚 (μm)	310	210	335	210

キーワード: 各種防錆メカニズム, 防錆被膜耐久性, 錆びたボルト試験体, 耐食性能評価, 塩害

連絡先: 〒903-0213 西原町字千原 1 番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース E-mail: e215533@cs-u-ryukyu.ac.jp

表-2 塩水噴霧試験実験結果

試験体 (塗装仕様)	試験開始	発錆	錆汁発生	試験終了
標準仕様				
試験時間	0h	24h	120h	1000h
試験体A (エポキシ樹脂塗料)				
試験時間	0h	24h	48h	1000h
試験体B (亜鉛犠牲防食)				
試験時間	0h			1000h
試験体C (エポキシ樹脂塗料)				
試験時間	0h	24h	48h	1000h

中心に、発錆、錆汁の発生、および塗膜の膨れやめくれ等の劣化状況を目視により観察した。

### 2-3 評価方法

試験体の腐食状況および塗膜劣化を把握するため、目視観察および写真撮影を24時間ごとに実施した。膨れや剥がれが認められた場合は、その大きさをクラックスケールにより測定し、標準塗装を基準として各防食方法の耐食性能を相対的に評価した。

## 3. 実験結果と考察

### 3-1 塩水噴霧試験考察

表-2 より、塩水噴霧試験では、塗膜欠陥が腐食の起点となり施工品質が耐食性に影響することが分かった。標準仕様や試験体A・Cは早期に発錆したのに対し、亜鉛犠牲防食型の試験体Bは優れた防錆効果を示した。これにより、高塩分環境では電気化学的犠牲防食が初期耐食性に重要であると示唆される。

### 3-2 複合サイクル試験考察

表-3 より、複合サイクル試験では、標準仕様と試験体Aが腐食や塗膜劣化を抑制し、同程度の防錆効果を示した。試験体Bは犠牲防食により鋼材の腐食を抑えつつ白錆が発生し、優れた防錆効果を示した。一方、試験体Cは塗膜膨れが進行し、防錆効果は低かった。防錆メカニズムの違いが劣化の形態に影響することが示唆される。

表-3 複合サイクル試験実験結果

試験体 (塗装仕様)	試験開始	発錆	膨れ発生	試験終了
標準仕様				
試験時間	0h			500h
試験体A (エポキシ樹脂塗料)				
試験時間	0h			500h
試験体B (亜鉛犠牲防食)				
試験時間	0h	51h		500h
試験体C (エポキシ樹脂塗料)				
試験時間	0h		51h	500h

## 4. まとめ

カット錆びボルト試験体を用いて各防錆方法の耐食性能を比較した。

- (1) 塩水噴霧試験では、さび浸透型・遮断型は早期発錆が見られ、亜鉛犠牲防食型は高い初期耐食性を示した。
- (2) 複合サイクル試験では、犠牲防食型は白錆、遮断型は塗膜膨れとして劣化が現れる傾向が確認された。施工時欠陥を含む環境下でも、犠牲防食型塗料は初期耐食性確保に有効である。

今後は長期耐久性や塗膜欠陥形状の影響の解析が課題である。

## 参考文献

- (1) 三木ら；無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標及び耐候性評価方法の提案，土木学会論文集，No738，I-64，pp. 271-281，2003



## 電気化学的実験による CS 工法の防食性能評価に関する研究

琉球大学 ○真田大輝, 下里哲弘, 淵脇秀晃

### 1. はじめに

鋼橋の腐食部位の中で写真 1-1 に示すような桁端部や連結部, ボルト部は, 他の構造部位と比べて早期に腐食損傷が生じている. 残存さびを有したうえでも長期間防食が可能となる防食工法として低温低压型金属溶射である Cold Spray (以下, CS) 技術の開発が行われている<sup>1)</sup>. CS 技術による皮膜の積層は, 金属粒子の融点・軟化温度より低温のガスを専用ノズルで超音速に加速させ鋼材面に衝突させることで, 固相のまま密着させる技術である.

既往研究<sup>2)</sup>では, 残存さびを有した鋼板にスプレーガン移動速度を 15mm/sec で高速施工した時, 5mm/sec で施工した時と比べて平均膜厚は低下した. その一方で, 密着力は既存の CS 工法と同等の 10Mpa を満たし, 写真 1-2 のような断面観察結果から十分に亜鉛皮膜が形成されていたことを確認している.

本研究では, 残存さび上に CS 施工で形成される亜鉛皮膜の防食性について自然電位測定を用いて電気化学的に評価した.

### 2. 実験方法

#### (1) CS 施工条件

本研究では, 写真 1-3 の CS 機器を使用した. 試験鋼板については, 亜鉛皮膜の防食性を確認するために黒皮を除去した新材鋼板とワイヤーブラシでケレン後の残存さび厚約 75 $\mu$ m の錆鋼板を使用した. また, 施工速度は標準速度 (5mm/sec) と 3 倍速 (15mm/sec) の 2 つの条件で施工を行った.

#### (2) 複合サイクル試験

図 2-2 に示した条件で乾湿繰り返し複合サイクルによる腐食促進試験を行った.

#### (3) 自然電位測定

写真 2-3 のような条件で試験体を作成し, ビーカー内に加工した試験片, 銀塩化銀電極, 3 パーセントの塩水を入れ 20 分間浸漬させる. その後, ポテンシヨスタットを利用して 5 分間計測を実施する.



写真 1-1 鋼橋の腐食損傷の例

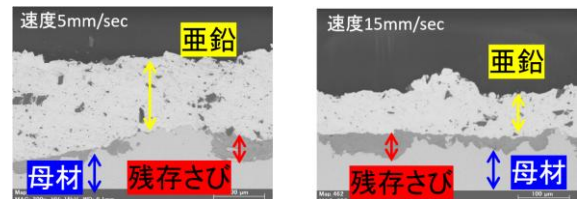


写真 1-2 施工速度の違いによる断面状態

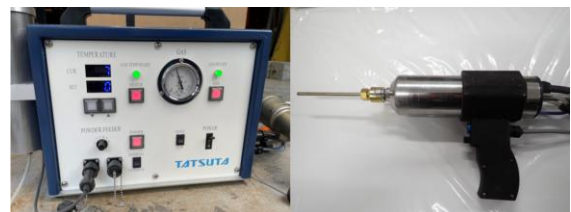


写真 1-3 CS 機器

試験体種類	施工速度
錆鋼板	5mm/sec(標準速度)
新材鋼板	15mm/sec(高速速度)

表 2-1 施工パラメータ

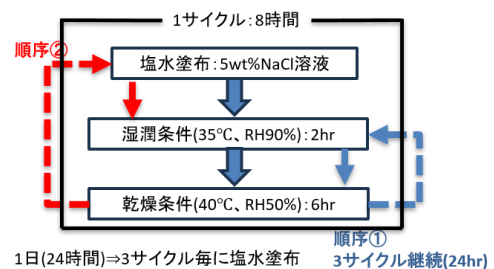


図 2-2 複合サイクル条件

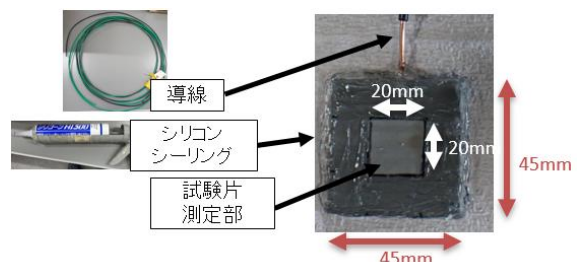


写真 2-3 自然電位測定用試験体作成

キーワード 残存さび, 低温低压型金属溶射, 防食性能, 自然電位測定

連絡先 琉球大学大学院理工学研究科社会基盤デザインプログラム (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)



### 3. 試験結果

複合サイクル試験 (0, 90, 210 サイクル) の外観観察結果を写真 3-1, 写真 3-2, 写真 3-3 に示す。また、表 3-4, 図 3-5 に自然電位の測定結果を示す。

#### (1) 0 サイクル(0 日目)

初期状態では、すべての試験体で亜鉛の自然電位  $-1.00\text{Vvs. Ag/AgCl}$  の卑な値を確認することができた。

#### (2) 90 サイクル(30 日目)

90 サイクルを経過時、さび上に高速施工した試験体(鍍\_15mm/sec)のみ $-0.62\text{Vvs. Ag/AgCl}$  まで著しく貴化していた。外観観察では、この条件のみ赤さびが発生していることが確認できた。一方、さび鋼板上に標準速度で施工した試験体(鍍\_5mm/sec)は、新材上に CS 施工した試験体と同様の自然電位 $-0.9\text{Vvs. Ag/AgCl}$ を確認した。

#### (3) 210 サイクル(70 日目)

210 サイクルを経過時、残存さび上に 15mm/sec で高速施工した試験体(鍍\_15mm/sec)は、炭素鋼の自然電位 $-0.4\text{Vvs. Ag/AgCl}$ の貴な値を示した。また外観観察は、残存さび上に 15mm/sec で高速施工した試験体(鍍\_15mm/sec)のみ赤さびの発生が確認できた。この結果から、炭素鋼の自然電位に近づいた状態では、亜鉛皮膜による犠牲防食効果が発揮されていないことがわかる。一方、さび鋼板上に標準速度で施工した試験体(鍍\_5mm/sec)は、新材上に CS 施工した試験体と同様に卑な自然電位を示した。

### 4. まとめ

本研究では、残存さび上に CS 施工で形成される亜鉛皮膜の防食性について自然電位測定を用いて電気化学的に評価を行った。

初期状態 (0 サイクル) ではすべての試験体において亜鉛の自然電位 $-1.00\text{Vvs. Ag/AgCl}$ が確認された。

残さび上に 15mm/sec で高速施工した場合、早期に自然電位が貴化した。炭素鋼の自然電位 $-0.4\text{Vvs. Ag/AgCl}$ 近傍では、赤さびが顕著に表れていたため、亜鉛皮膜による犠牲防食効果が十分に発揮していないことが明らかとなった。

引き続き促進試験と自然電位測定を継続していき、他施工条件との腐食挙動の変化を明らかにしていく。

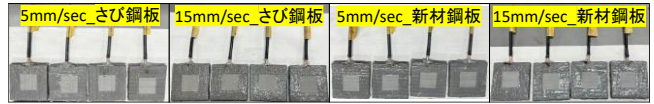


写真 3-1 0 サイクル時の外観観察

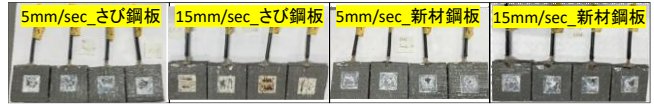


写真 3-2 90 サイクル時の外観観察

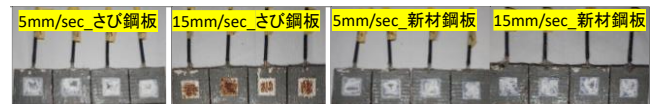


写真 3-3 210 サイクル時の外観観察

試験体	鍍_5mm/sec	鍍_15mm/sec	新_5mm/sec	新_15mm/sec
0	-1.022	-0.999	-1.009	-1.009
30	-0.966	-0.884	-0.973	-0.975
60	-0.946	-0.819	-0.934	-0.951
90	-0.910	-0.615	-0.874	-0.912
120	-0.884	-0.523	-0.824	-0.848
150	-0.862	-0.443	-0.792	-0.800
180	-0.852	-0.454	-0.749	-0.736
210	-0.803	-0.416	-0.729	-0.691

表 3-4 自然電位測定結果

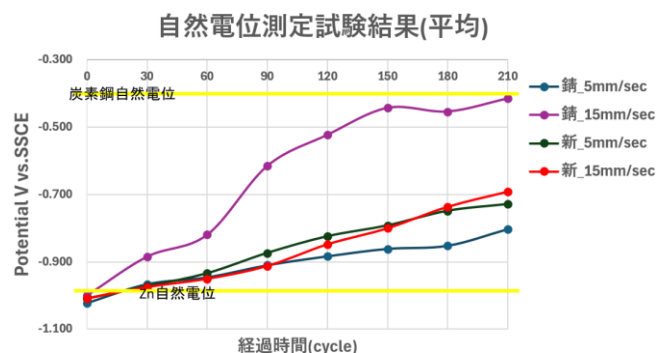


図 3-5 自然電位試験結果

### 参考文献

- 1) 清川昇悟, 井口進, 木村雅昭, 下里哲弘: コールドスプレ-技術で生成する金属皮膜を適用した高力ボルトの防食性能と機械的性質, 日本鋼構造協会, 鋼構造論文集, 第 24 巻(第 93 号), pp. 65-72, 2017. 3.
- 2) 真田大輝, 下里哲弘, 淵脇秀晃: 改良型ノズルホルダーを用いた CS 工法の成膜性評価, 第 14 回 土木学会西部支部沖縄会, 2025. 1

## 鋼材表面の錆・塩分に対する小型・高出力レーザークリーナーの性能検証

琉球大学 ○西島翼, 富山潤, 花城有人, 琉球ブリッジ(株) 谷中田洋樹, 古謝昌也

### 1. はじめに

沖縄県は高温多湿な島嶼環境かつ飛来塩分の影響を強く受けるため、鋼構造物の腐食が進行しやすい。橋梁や港湾施設では、腐食抑制のため錆および付着塩分の定期的な除去が不可欠であるが、従来のブラスト処理やディスクグラインダーによる除錆は、粉塵・騒音の発生や作業負担、環境影響といった課題を有する。このため、近年ではレーザーによる錆除去技術が注目されている<sup>1)</sup>。既往研究<sup>2)</sup>では、高出力連続波レーザーによる鋼材表面の素地調整により、腐食生成物の除去効果が報告されているが、装置の大型化や高コストが課題である。そこで本研究では、小型高出力レーザークリーナー（以下、レーザージェッターとする）を用い、鋼材表面の錆および付着塩分の除去性能を基礎的に評価した。

### 2. 実験概要及び評価方法

#### 2.1 対象構造物及び試験条件

本研究では、海上橋建設現場の仮設橋鋼管柱を試験対象とした。測定箇所は腐食の程度により数か所選定した(領域: 15×15cm)。試験では対象箇所に対してレーザー照射を行い、レーザー処理前後に錆厚と付着塩分量を測定し、それぞれの除去効果を評価した。

#### 2.2 レーザー照射条件及び使用機器

本研究で使用したレーザージェッターを写真-1に示す。本機は最大出力 2.0kW である。レーザー照射距離は 70cm を目安に、錆の除去状況を目視で確認しながら走査した。なお、錆厚測定には錆厚計を、付着塩分量はハンドヘルド蛍光 X 線分析装置を用いた。



写真-1 小型・高出力レーザージェッター

### 2.3 評価方法

本研究では、レーザー照射による除錆および除塩効果を評価するため、外観観察、錆評点に基づく腐食度評価、ならびに錆厚および付着塩分量の測定を実施した。なお、腐食程度の評価には、一般社団法人 日本橋梁建設協会（以下、橋建協）が示す錆評点<sup>3)</sup>を用い、レーザー照射前後における鋼材表面の状態を比較した。評価は、レーザー照射前後の鋼材表面を同一箇所と比較することにより行い、これらの結果に基づいてレーザー処理の有効性を検討した。

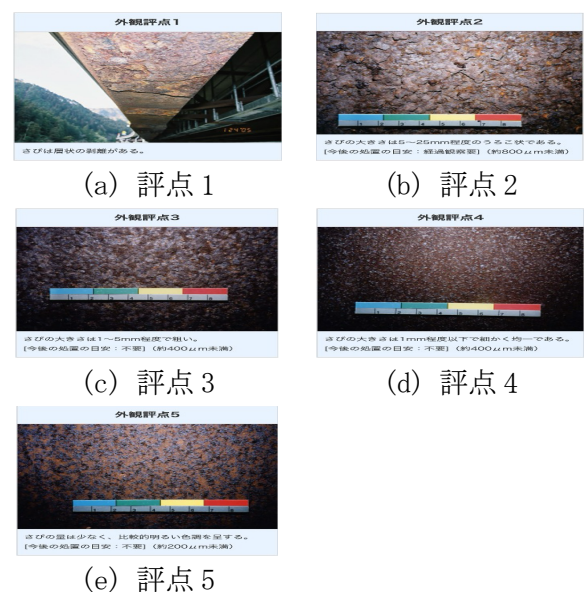


図-1 橋建協の錆評点(1～5)<sup>3)</sup>

### 2. 現場試験結果及び考察

図-2 にレーザー照射前後の外観を示す。評点4の中程度腐食部位では、錆層が良好に除去され、金属光沢を有する表面が現れるなど高い除去効果が目視で確認された。一方、評点1の重度腐食部位では、レーザー照射後も浮き錆の一部が残存する様子が見られた。これは、浮き錆層が厚く不均一であることに起因すると考えられ、今回の照射条件では完全な除去には至らなかったものと推察される。

表-1 から表-4 にレーザー照射前後における錆厚および付着塩分量の測定結果を示す。錆厚は評点4及び評点1ともに、60～70%程度の減少が確認された。付

キーワード：鋼材腐食、付着塩分、レーザークリーナー、ディスクグラインダー、錆

連絡先：〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース 建設材料学研究室 E-mail: e225420@eve.u-ryukyu.ac.jp

着塩分は評点4及び評点1ともに、95%程度の減少が確認された。錆厚及び付着塩分ともに、評点4の方が減少率が高いことが確認された。

以上より、小型・高出力レーザークリーナーは、中程度の腐食状態にある鋼構造物に対して高い有効性を有し、沖縄の厳しい塩害環境下においても実構造物への適用が可能であると考えられる。



(a) レーザー照射前 (b) レーザー照射後

図-2 評点4(上)及び評点1(下)の外観(2.0kW 条件)

表-1 レーザー照射前後の錆厚の変化(評点4)

測定点	照射前(μm)	照射後(μm)	減少率(%)
1	119.0	29.0	75.6
2	97.0	27.0	72.2
3	148.0	48.0	67.6
平均	121.3	34.7	71.8

表-2 レーザー照射前後の錆厚の変化(評点1)

測定点	照射前(μm)	照射後(μm)	減少率(%)
1	150.0	33.0	78.0
2	166.0	57.0	65.7
3	207.0	77.0	62.8
平均	174.3	55.7	68.8

表-3 レーザー照射前後の塩分の変化(評点4)

測定点	照射前	照射後	減少率(%)
1	9910ppm	480ppm	95.2
2	1.5%	520ppm	96.5
3	3.9%	750ppm	98.1
平均	2.1%	583ppm	96.6

表-4 レーザー照射前後の塩分の変化(評点1)

測定点	照射前	照射後	減少率(%)
1	5.6%	740ppm	98.7
2	6.0%	2340ppm	96.1
3	5.2%	4930ppm	90.5
平均	5.6%	2670ppm	95.1

#### 4. まとめ

本研究では、腐食した鋼管柱を対象に、レーザージェッターの錆および塩分除去効果の確認を行った。得られた知見と今後の課題を以下に示す。

- (1) 評点4の中重度腐食部位では錆が良好に除去され、錆厚及び付着塩分の低減が確認された。
- (2) 一方、評点1の重度腐食部位では浮き錆の一部が残存し、腐食状態に応じた照射条件の最適化が課題として示された。
- (3) 以上より、本手法は沖縄の厳しい塩害環境下における鋼構造物の維持管理において、有効な除錆・除塩技術となり得る可能性が示唆された。

謝辞：本研究は、「令和7年度 県内大学等の研究成果活用に向けた可能性検討補助金」を受けて実施した。また、沖縄県中部土木事務所中城湾港建設現場事務所に実証実験現場の提供を頂いた。ここに感謝の意を示す。

#### 参考文献

- 1) Hatori, T., Saito, H., Ichikawa, Y., Ogawa, K., Kato, Y., Motomura, K., Nakano, M., and Yamashita, N.: *Suggestion of a New Repair Technique for Steel Structures by Low-Pressure Cold Spray and Laser Cleaning*, Materials Transactions, Vol. 64, No. 10, pp. 2515-2522, 2023.
- 2) 貝沼重信, 庄樹森, 劉偉傑, 原口学：高出力連続波レーザーで素地調整した鋼材の表面特性に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.78, No.2, pp.213-230, 2022.
- 3) 日本橋梁建設協会 HP：さび評点の目安,

<https://www.jasbc.or.jp/sabi/meyasu.html> (2026 年 1 月  
8 日閲覧)





# 電気抵抗法を用いた大気腐食モニタリング技術

JFE スチール株式会社 森本 美奈子, ○面田 真孝, 大塚 真司

## 1. 背景および目的

腐食劣化が進行した鋼構造物の増加に伴い, 従来から実施されてきた目視や打音検査以上の維持管理の高度化が必要になっている. 近年では, 補助的な検査機器・技術として, 超音波厚さ計・探傷器やドローンが収集した画像から腐食を検出する AI などが使用され始めた. しかし, これら技術は現場作業を必要とするため, 労力が多くかかる. そこで, 現場作業が不要な腐食モニタリング技術の適用を考えた. この技術には ACM(大気腐食モニタリング)センサ<sup>1)</sup>, EIS(電気化学インピーダンス)センサ<sup>2)</sup>, ER(電気抵抗式)センサ<sup>3)</sup>などが存在するが, 鋼材の減肉による電気抵抗の増加から, 経験式などを用いずに直接腐食量を算出することで, 高い測定感度を有する ER センサを対象に, 大気腐食環境への適用を検討した.

## 2. 市販センサの性能検討

### 2.1 実験方法

ER センサには図 1 に示すフランス腐食研究所製の AirCorr-O<sup>4)</sup>を用いた. センサ幅 2 mm, 厚さ 250  $\mu\text{m}$  で温度補償用の参照部を有する. 腐食が平均的に進行すると仮定し, 式(1)のように腐食量を算出した.

$$CD = t_{init} \left( \frac{R_{ref,init}}{R_{sens,init}} - \frac{R_{ref}}{R_{sens}} \right) \dots (1)$$

ここで, CD は腐食量/ $\mu\text{m}$ , t は初期のセンサの厚さ/ $\mu\text{m}$ , R は抵抗値/ $\Omega$ (ref:参照部, sens:計測部, init:初期)とする. 本センサを沖縄の海浜部とジャカルタの都市部の暴露試験場に設置した. 同時に温湿度, 飛来塩分量の計測を行った. 飛来塩分量は JIS Z 2382 のドライガーゼ法を用いて計測を行った. また, センサ計測精度評価のため, 150 $\times$ 70 $\times$ 3 mm に機械加工し, 端面と裏面をシールした JIS G 3106 の溶接構造用圧延鋼材 SM490A を同時に暴露試験に供した. 化学組成は表 1 に示す. 評価期間は約 1 年とした.



図 1 市販センサ外観

表 1 供試鋼の化学組成

(mass%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Sol. Al	N	O
SM490A	0.094	0.19	0.69	0.018	0.004	0.028	0.003	0.002

### 2.2 結果および考察

沖縄の年平均の環境は, 気温: 23.3 $^{\circ}\text{C}$ , 相対湿度: 77.4%, 飛来塩分量: 0.99 mdd と高い飛来塩分量が特徴の地域であった. 一方, ジャカルタは気温: 30.1 $^{\circ}\text{C}$ , 相対湿度: 73.2%, 飛来塩分量: 0.05 mdd と高い気温が特徴の地域であった. これら環境におけるセンサの腐食量の経時変化を図 2 に示す. 沖縄において,

キーワード 大気腐食, 炭素鋼, 腐食モニタリング技術, 電気抵抗法

連絡先 〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1 E-mail: m-omoda@jfe-steel.co.jp

初期はセンサと試験片の腐食量が一致したものの、途中からセンサの腐食量が試験片より大きくなった。一方で、ジャカルタにおいては、センサの腐食量は試験片より小さくなった。

まず、沖縄における腐食量の乖離において、高飛来塩分量の影響でセンサに虫食い状の局所的な腐食が発生していた。径が 0.5~1 mm 程度の小さなものが複数発生した状態であった。本センサでは腐食は平均的に進行すると仮定して、腐食量が算出されるため、この部分の電気抵抗の大きく増加し、センサ全体の抵抗値を大きく増加させることで、センサの腐食量が実際より大きくなったと考えられる。

次に、ジャカルタにおける腐食量の乖離において、この地域の特徴を考えると気温が高く、直射日光も強い。今回使用したセンサは薄く、データ記憶部が内蔵されたプラスチック箱に接着されているため、比較として使用した試験片と熱容量の差が大きい。そのため、薄いセンサの方が乾燥しやすくなり、腐食が進行する濡れ時間が短くなることで、腐食量が小さくなったと考えた。検証のため、0.3, 1, 3 mm と板厚を変化させた試験片の大気暴露試験を実施したところ、0.3 mm の板厚では 3 mm の板厚より約 15%腐食量が小さく、板厚が薄いほど腐食量が小さい結果が得られた。

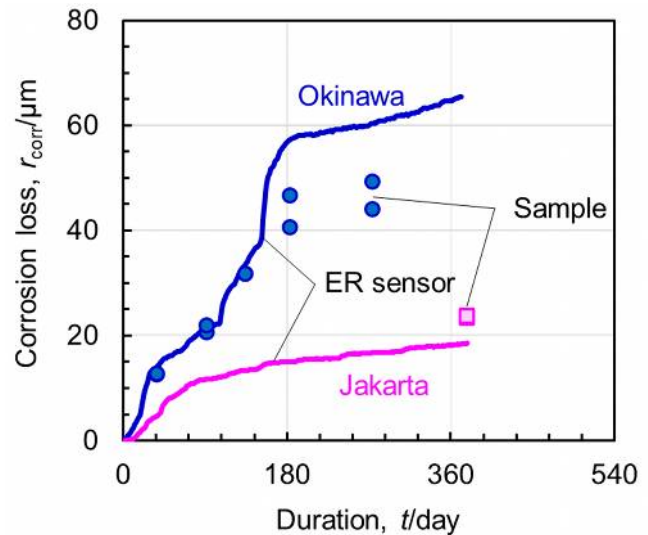


図2 市販センサの腐食量の経時変化

### 2.3 センサ構造の改良指針

以上から、大気腐食環境に適したセンサ構造の改良指針を図3に示すように考えた。高塩化物環境における局所的な腐食の対策として、局所的な腐食が発生しにくい構造にした場合、実環境と異なる腐食評価となってしまう。そこで、虫食い状の腐食が発生しても、その部分の電気抵抗の増加が全体の電気抵抗に

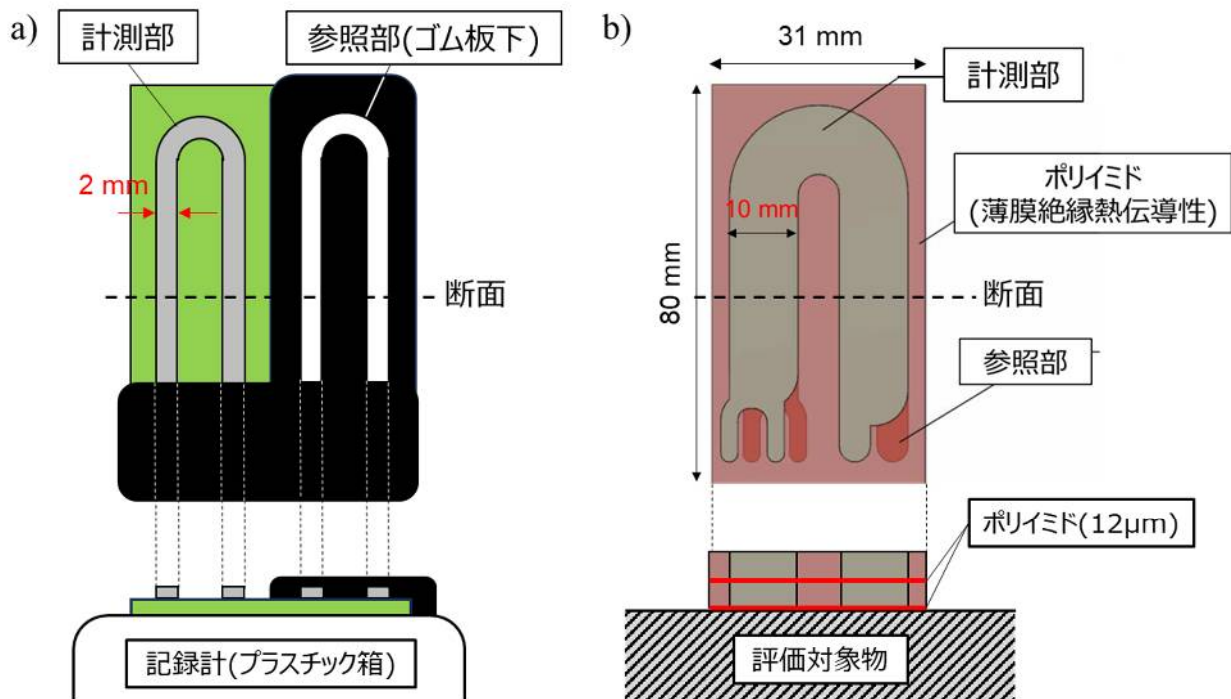


図3 改良センサの概略図

a) 従来センサ b) 改良センサ

およぼす影響を低減させる指針とした。発生した局所的な腐食部分の径は 0.5~1 mm だったため、センサの幅を従来の 2 mm から 10 mm とすることで、局所的な腐食が発生してもセンサ全体の電気抵抗の影響を大きく抑制することができる。但し、その弊害としてセンサの初期電気抵抗値が小さくなることで測定感度が低下する。そこで、センサを長くすることで初期抵抗値の低下を防いだ。これにより、センサは大きく取り回しが困難になるが、その対策として、計測部と参照部を積層構造化することでサイズ拡大を最小限に留めた。

次に、センサと評価対象物のサイズの差による濡れ時間の違いの対策として、それらの温度変化を揃えるために、12  $\mu\text{m}$  の高熱伝達フィルムであるポリイミドを介して、センサを評価対象物と密着させることを考えた。

### 3. 改良センサの性能評価

#### 3.1 実験方法

板厚を 200  $\mu\text{m}$  に機械加工した JIS G 3106 の溶接構造用圧延鋼材 SM490A から 2.3 に記載の構造の改良センサを図 4 のように作製した。記録計には、コロジエ(株)製の SRCM-301R を用いた。本計測系一式および比較のため従来センサとして使用したフランス腐食研究所製の AirCorr-O を沖縄雨掛環境において、大気暴露試験に供した。正しい腐食量の指標とするため、150×70×3 mm に機械加工し、端面と裏面をシールした SM490A の腐食試験を同時に設置した。改良センサは、温度変化を揃えるために腐食試験片と同様の試験片に高熱伝達接着剤(4.220W/m·K)で固定した上で、試験を実施した。評価期間は約 1 年とした。



図 4 改良センサ外観

#### 3.2 実験結果および考察

改良センサの評価結果を図 5 に示す。従来センサ、改良センサともに腐食量の経時変化は計測できている。しかし、従来センサにおいては、腐食試験片の腐食量から約 40~90%腐食量が乖離したのに対して、厳環境対応型腐食センサは 5~15%の乖離に抑制できており、想定通りの結果が得られた。今回示したセンサの改良指針により測定精度が改善していることから、雨掛環境および高飛来塩環境における市販センサの精度低下の推定原因は正しかったと考えている。

今回の改良センサの形状は、課題解決の 1 つの手段であり、センサの計測部に発生する局所的な腐食の影響の最小化、センサと評価対象物の温度変化の同期を取ることが出来れば、この他の環境においても、電気抵抗法を用いて精度良く評価対象物の腐食量を評価することは可能である。

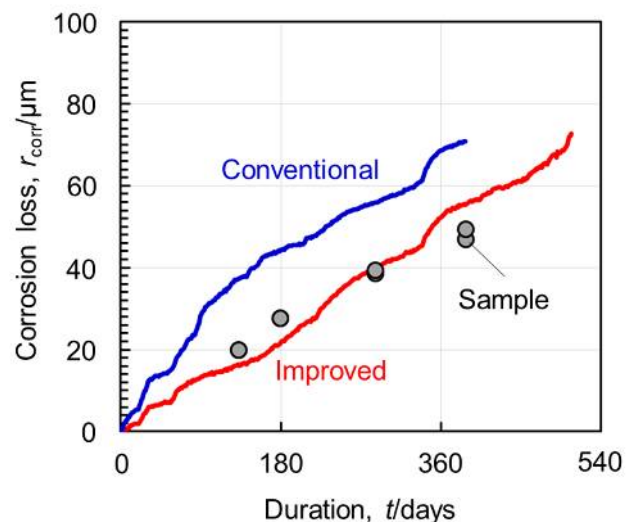


図 5 従来センサと改良センサの性能比較



#### 4. まとめ

- ✓ 大気腐食環境において従来の ER センサを適用した場合、高飛来塩環境や直射日光の強く温度の高い雨掛環境で、計測精度が大きく低下する場合があった。
- ✓ これは、高飛来塩環境では、センサの計測部に局所的な腐食が発生し、その部分で電気抵抗が大きく増加することで全体の電気抵抗に大きな影響をおよぼし、腐食が平均的に進行すると仮定して算出されるセンサの腐食量が実際より大きく出力されたためと考えられる。直射日光の強く温度の高い雨掛環境では、センサと評価対象物のサイズ差に起因する熱容量の違いにより、濡れ時間が異なるためと考えられる。
- ✓ これらの課題は、センサの幅広化による局所的な腐食により大きく増加する電気抵抗がセンサ全体の電気抵抗におよぼす影響の低減と、高熱伝達フィルムを介してセンサと評価対象物を密着して温度変化を揃えることで解決可能であった。
- ✓ このように、測定環境に応じてセンサ構造を最適化することで、電気抵抗法を用いて詳細な腐食量の経時変化を測定することが可能となる。

#### 参考文献

- 1) S. Motoda, Y. Suzuki, T. Shinohara, et al, *Zairyo-to-Kankyo*, **43**, p.550 (1994).
- 2) M. Yamamoto, H. Katayama and T. Kodama, *J. Japan Inst. Metals*, **65**, p. 465 (2001).
- 3) M. Omoda, D. Mizuno, S. Miura, and N. Ishikawa, *Zairyo-to-Kankyo*, **67**, p.292 (2018).
- 4) T. Prosek; M. Kouril; L. R. Hilbert; Y. Degres; V. Blazek; D. Thierry; M. Ø. Hansen, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, **43**, 2, p.129 (2008).

## ステンレス鋼における孔食さびの発生と環境要因の評価

琉球大学 ○大山詩織, 下里哲弘, 淵脇秀晃

### 1. 研究の背景と目的

鋼橋の維持管理において、腐食は劣化要因の一つとなっており、特に鋼橋の桁端部は一般部に比べて閉鎖的な箇所であるため飛来塩分や土砂、雨水などが蓄積されやすい場所であることから、腐食が進行しやすい部位となっている。<sup>1)</sup> この課題に対して、耐食性に優れたステンレス鋼材の適用が検討されているが、耐食性の高いステンレスは非常に高価なため、費用と耐食性のバランスをとることが重要である。

そこで、本研究では、ステンレス鋼の橋梁実用化にむけて、環境要因による使用ステンレス鋼の判断基準を作成することを目的とし試験を行った。

### 2. 試験方法

腐食の要因として湿度、温度、塩分に着目し、それぞれ腐食との比較を行った。

腐食率は JIS G 0595 「ステンレス鋼の表面さび発生程度評価方法」を用いて計測した。表-1 を判断基準としてレイティングを行いヒートマップを作製した。

レイティングは SUS821L と、SUS304 の両方で行い、湿度、温度、塩分との比較は SUS821L 側にて実施した。

#### 2.1 湿度（濡れ時間）

EL-USB-2 を使用し、11/26~12/25 の約 1 か月間 10 分毎にデータをとった。腐食に影響を及ぼす目安となる相対湿度 80%Rh 以上の時間を算出し、これを濡れ時間として孔食腐食との関連性を調べた。

#### 2.2 温度（表面温度）

熱電対を使用し、11/26~12/25 の約 1 か月間 10 分毎にデータをとった。設置箇所ごとの表面温度の違いが出やすい午後 15 時付近の表面温度を用いてデータ整理を行った。

#### 2.3 塩分（表面塩分濃度）

SNA-3000 表面塩分計（図-5）を使用し、11/12~12/17 の約 1 か月間の付着塩分についてデータをとった。

### 3. 試験結果と考察

レイティング結果を図-6 と図-7 に示す。腐食率については、ウェブ上部、ウェブ中部、ウェブ下部、フランジ上面、フランジ下面の平均値を算出し、湿度、温度、塩分との比較を行った。

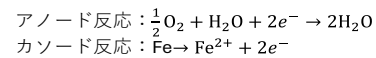


図-1 孔食の発生モデル



図-2 琉球大学構内暴露試験橋



図-3 試験箇所

表-1 レイティングナンバーに対応する標準写真

レイティングナンバー	さび発生面積率(%)	標準写真
0	100	
1	69	
2	47	
3	32	
4	22	
5	15	
6	2.7	
7	0.41	
8	0.062	
9	0.0093	



図-4 計測機器



図-5 SNA-300 表面塩分計

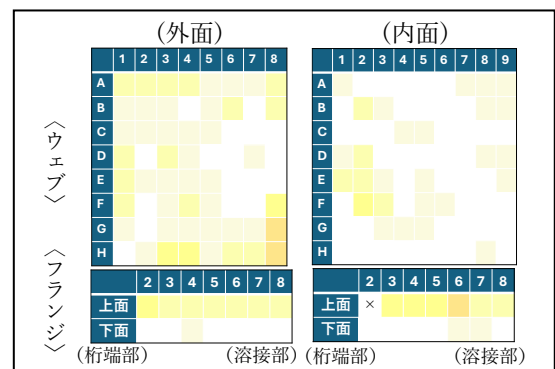


図-6 SUS821L レイティング結果

キーワード 付着塩分、表面温度、濡れ時間、孔食、レイティング

連絡先 〒903-0213 沖縄県西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース

E-mail : e225528@u-ryukyu.ac.jp

ウェブ上部と下部の腐食率が比較的高くなっており、ウェブ下部はフランジ上面に溜まってる電解質が跳ね返るため腐食率が高いと考える。また、SUS821L 外面には腐食とは異なる黒い斑点が複数箇所見られた。(図-8)

### 3.1 湿度と腐食率との関連性

湿度（濡れ時間）と腐食率との比較を表した散布図を図-9に示す。縦軸の濡れ時間は、計測を行った約1か月で相対湿度 80%Rh 以上となった時間の総和をとっている。散布図の相関係数は-0.72 と強い負の相関が見られ、近似線の係数はおよそ-279.73 となっていることから、濡れ時間が長いほど腐食が進行しやすいことが分かる。

### 3.2 温度と腐食率との関連性

晴れの日の表面温度と腐食率との比較を表した散布図を図-10、雨の日の表面温度との比較を表した散布図を図-11に示す。縦軸の表面温度は、設置個所により温度の差が大きい 13 時~17 時の各場所の平均温度をとっている。相関係数は、晴れの日は-0.56、雨の日は-0.52 と両者とも中程度の負の相関が見られ、近似線の係数はともに負となっていることから表面温度が高いほど腐食が進行しやすいことが分かる。

### 3.3 塩分と腐食率との関連性

表面塩分濃度と腐食率との比較を表した散布図を図-12に示す。相関係数は-0.57 と中程度の負の相関が見られ、近似線の係数はおよそ-28.51 となっていることから、表面塩分濃度が高いほど腐食が進行しやすいことが分かる。

## 4. まとめ

本研究では、SUS821L を対象に、湿度、温度、塩分の腐食との関連性を明らかにすることを目的として試験を実施した。以下に本研究のまとめを示す。

- 1) 濡れ時間と腐食の相関係数は-0.72 と強い負の相関が見られ、濡れ時間が長いほど腐食が進行しやすい
- 2) 表面温度と腐食の相関係数は晴れの日が-0.56、雨の日は-0.52 と中程度の負の相関が見られ、表面温度が高いほど腐食が進行しやすい。
- 3) 表面塩分濃度と腐食の相関係数は-0.57 と中程度の負の相関が見られ、表面塩分濃度が高いほど腐食が進行しやすい。

今後は、3 か月ごとに同様の試験を行い、計測する時期ごとの違いを見る。また、SUS304 側で同様の計測と比較を行い、SUS821L 側の結果との比較を行う。

## 5. 参考文献

- 1) 望月大地：鋼 I 桁橋における構造部位別の腐食特性と効果的な防食法に関する研究, 2023
- 2) 与世田兼人, 下里哲弘, 田中裕明：ステンレスクラッド鋼の腐食促進試験による耐食性の評価, 2024
- 3) 田中裕明, 栗原康行, 下里哲弘：ステンレスクラッド鋼の腐食促進試験による耐食性の評価II, 2025

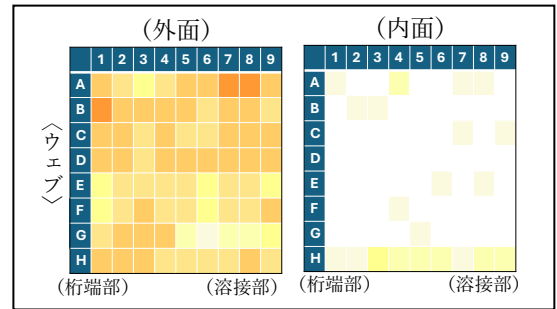


図-7 SUS304 レイティング結果

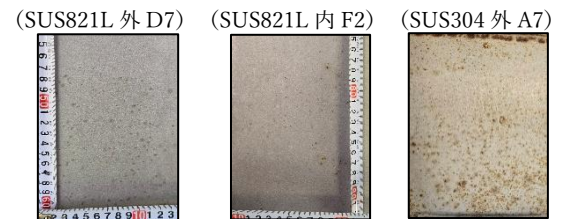


図-8 腐食の様子

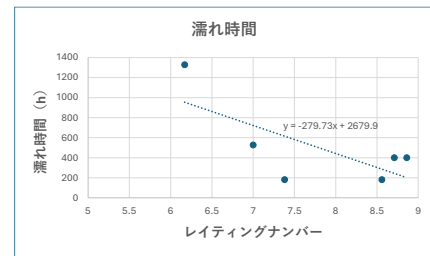


図-9 濡れ時間-腐食

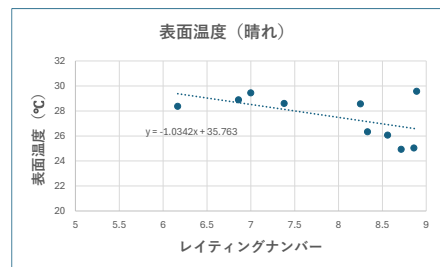


図-10 表面温度(晴れ)-腐食

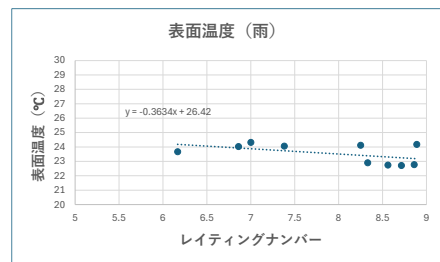


図-11 表面温度(雨)-腐食

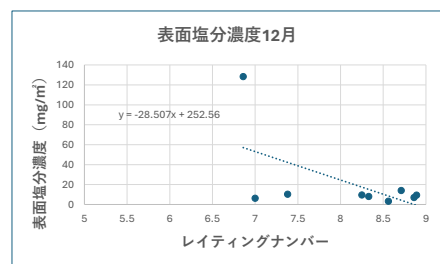


図-12 表面塩分濃度-腐食

## ステンレスクラッド鋼の沖縄での暴露試験による評価

J F E スチール ○栗原 康行、ドアン ティーフイン

J F E エンジニアリング 田中 裕明

琉球大学 下里 哲弘

### 1. はじめに

クラッド鋼は、図1に示すように溶接構造用圧延鋼材（炭素鋼）を母材とし、その表面に合せ材として主に耐食性に優れた金属を重ね合わせた複合鋼板であり、合せ材にステンレス鋼を用いたものはステンレスクラッド鋼（図1）と呼ばれる。日本で初めて主要部材にステンレスクラッド鋼を採用した手取川橋では、厳しい塩害環境下における維持管理負荷の低減を目的とした高耐久橋梁の実現に成功している<sup>1)</sup>。しかし、ステンレスクラッド鋼の鋼橋への適用拡大を図る上では、架橋環境に応じた最適な合せ材の材質選定が重要な課題である。本論文では、高温多湿かつ腐食環境の厳しい沖縄地区において、実橋梁を模擬した試験体による暴露試験を実施し、橋梁用途に適した合せ材の選定および溶接部を含む耐食性評価について整理する。手取川橋では、最も耐食性の高い耐海水性ステンレス（JSL310Mo）を合せ材として採用したが、本検討では、各種合せ材を用いた溶接部を含む試験体に対し、沖縄の腐食環境の異なる2か所で長期暴露試験を実施している。その概要と途中経過について述べる。

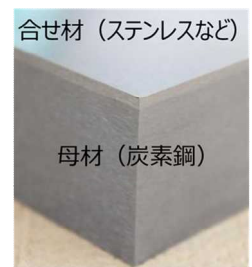


図1 ステンレスクラッド鋼

### 2. 暴露試験

#### 2. 1 暴露環境

ステンレスクラッド鋼は複合鋼板であり、母材である炭素鋼を溶接した後にステンレス鋼を被覆溶接するため、炭素鋼成分の溶け込みによる成分希釈が発生し、溶接部の耐食性能が低下する懸念がある。また、実構造では板の曲げ加工や角部の溶接が存在するため、これらの部位における腐食耐久性を対象として暴露試験を実施した。暴露環境としては、都市部の琉球大学（以下、琉大）周辺および沿岸部の辺野喜を選定した（図1）。これらの場所でのガーゼ法による飛来塩分量の月ごとの計測結果（2023～2024年）を図2に示す。計測結果より琉大では、0.1～0.4mdd程度、辺野喜では、0.5～4.4mdd程度で、特に11月～3月の冬季には最大4.4mddの大きな値が観測されている。これは、辺野喜の位置関係から冬季のユーラシア大陸からの北西の季節風の影響を大きく受けていると考えられる。試験体の設置と屋外暴露を開始したのは、辺野喜が2024年8月1日から、琉球大学が2024年7月31日である。



図1 暴露試験場所

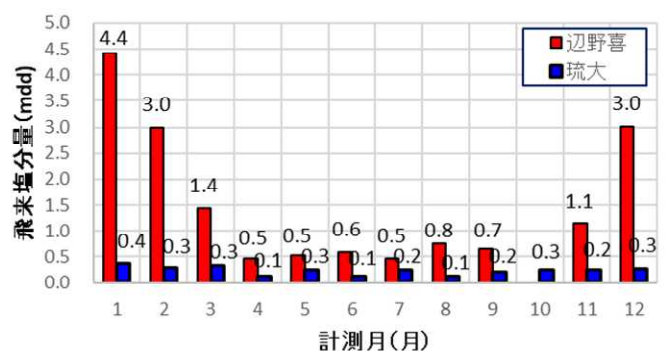


図2 計測月による飛来塩分量の傾向

キーワード ステンレスクラッド鋼, 暴露試験

連絡先 〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1-1 J F E スチール株式会社 TEL: 044-322-6638



## 2. 2 試験体

試験体は溶接部を主な対象とし、平滑部および曲げ加工部も含む、鋼橋箱桁構造を模擬した試験体（図3）を用いた。合せ材の材質<sup>2)</sup>は、手取川橋で採用された耐海水性ステンレス鋼 JSL310Mo に加え、SUS304、SUS316L、SUS329J3L を選定した。各材質の概要を表1に示す。溶接は、炭素鋼側は炭素鋼用の溶材外面のステンレス合せ材側には、腐食耐久性を考慮した溶材を選定している。

表1 合せ材の種類と孔食指数（PI 値）

合せ材材質	系	主成分	PI 値
SUS304	オーステナイト系	18Cr+8Ni	18
SUS316L	オーステナイト系	17Cr-12Ni-2.5Mo	25
SUS329J3L	二相系	22Cr-5Ni-3Mo-0.15N	34
JSL310Mo	オーステナイト系	25Cr-23Ni-4.5Mo-0.2N	43

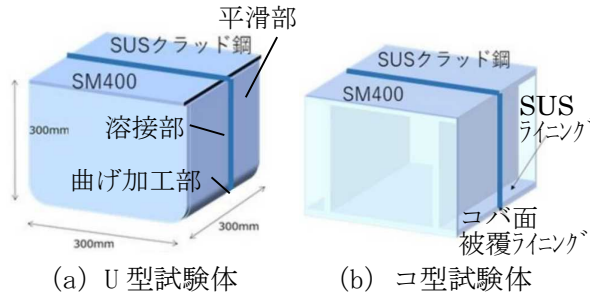


図3 暴露試験体

## 3. 試験結果

暴露開始約1年4ヶ月後の琉大と辺野喜での暴露試験体の状況を表2に示す。都市部である琉大では、1年4ヶ月では、すべての鋼種と試験体計上で目立った錆は観測されていない。一方、辺野喜の飛来塩分量は沖縄の中でも非常に厳しい環境となっているが、JSL310Moの試験体ではさびが発生していない。

表2 暴露試験の表面状態（1年4か月の暴露実施）

場所	辺野喜（1年4ヶ月後：2025/11/6）		琉大（1年4ヶ月後：2025/11/5）	
試験体	U型試験体	コ型試験体	U型試験体	コ型試験体
SUS304	全面にさび発生	わずかにさび発生	極わずかにさび発生	極わずかにさび発生
SUS316L	部分的にさび発生	わずかにさび発生	極わずかにさび発生	わずかにさび発生
SUS329J3L	極わずかにさび発生	極わずかにさび発生	極わずかにさび発生	わずかにさび発生
JSL310Mo	さび未発生	さび未発生	さび未発生	さび未発生

## 4. まとめ

沖縄の辺野喜のような腐食環境の厳しい環境でも JSL310Mo は表面さびが発生しておらず、沖縄沿岸部での鋼橋適用の可能性が示せた。琉大のような内陸の都市部では、汎用ステンレスの SUS304 でも表面さびはわずかにしか発生しないことから、腐食環境によっては合せ材の選択が広げられる可能性を示すことが出来た。

## 参考文献

- 1) JSSC No.62 「耐食性に優れたステンレスクラッド鋼の橋梁への適用とその特性：栗原ら」 2025.7
- 2) 土木学会西部支部「ステンレスクラッド鋼の腐食促進試験による耐食性の評価Ⅱ：田中ら」 2025.1

## ステンレスクラッド鋼の機械的性質と延性特性に関する研究

琉球大学 ○宮崎ひな 下里哲弘 JFE エンジニアリング 田中裕明

### 1. 研究背景と目的

ステンレス鋼は耐食性に優れる一方で高価であり、炭素鋼は安価であるものの耐食性に劣るという課題がある。これらの欠点を補う材料として、合せ材にステンレス鋼、母材に炭素鋼を用いたステンレスクラッド鋼が注目されている。本研究では、引張試験によりステンレスクラッド鋼の引張強度および降伏強度、ならびに延性特性を評価した。さらに、実験結果と板厚比による理論値を比較することで、クラッド比換算式(下記式)の適用性について検討することを目的とした。

$$E_0 = \frac{(t_{SUS}E_{0SUS} + t_{SM}E_{0SM})}{t_{SM} + t_{SUS}} \quad \sigma_B = \frac{(t_b\sigma_{Bb} + t_c\sigma_{Bc})}{t_b + t_c} \quad \sigma_y = \frac{(t_b\sigma_{yb} + t_c\sigma_{yc})}{t_b + t_c}$$

### 2. 実験方法

本研究では合せ材に SUS316L、母材に SM490A を用いたステンレスクラッド鋼を対象として、ステンレスクラッド鋼から抽出した SUS316L と SM490A の単材とクラッド比が 0.177 と 0.333 のステンレスクラッド鋼について引張試験を実施した。試験体の形状を図 2.1、図 2.2 に試験体の板厚およびクラッド比を表 2.1 に示す。

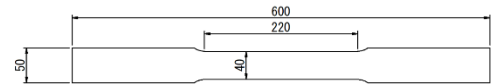


図 2.1 引張試験体(1A 号)

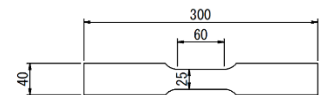


図 2.2 引張試験体(5 号)

表 2.1 試験体の板厚およびクラッド比

	ステンレスクラッド鋼				合わせ材単体	炭素鋼単体
	A-316L1-1	A-316L1-2	A-316L2-1	A-316L2-2	B-316L1-1~1-3	B2-SM490A1-1~1-3
合わせ材厚(mm)	1.88	1.88	1.67	1.69	1.50	—
炭素鋼厚(mm)	8.72	8.72	3.34	3.39	—	8.27
全厚(mm)	10.60	10.60	5.01	5.08	1.50	8.27
クラッド比	0.177	0.177	0.333	0.333	—	—
試験体サイズ (JIS Z 2241)	1A 号		5 号		5 号	

### 3. 実験結果と考察

#### 1) 機械的性質

##### ① 応力-ひずみ

応力-ひずみ曲線を比較すると、ひずみゲージにより計測可能であった範囲において SUS316L 側および SM490A 側の挙動に顕著な差は確認されなかった。弾性域から降伏初期にかけては、SUS 面 SM 面ともほぼ同様の勾配および応力を示しており、クラッド材においても構成材が一体となって変形していることが分かる。一方で、本試験ではひずみの増大に伴いひずみゲージが破断しており、それ以降の大ひずみ域における挙動は直接的には計測できていない。そのため、SUS316L と SM490A の延性特性の違いが顕在化するのには、ひずみゲージ破断後の塑性変形領域である可能性が高い。このことから、応力-ひずみ曲線上で材料間の差が明確に現れなかった要因として、測定が弾性域から降伏初期に限定されていた点が挙げられる。

##### ② ヤング率

応力-ひずみ曲線において顕著な差が確認されなかった一方で、ヤング率(図 3.1.2)や降伏挙動(図 3.1.3)、さらには破断に至るまでの変形様式には試験体間で差が見られた。単体材である

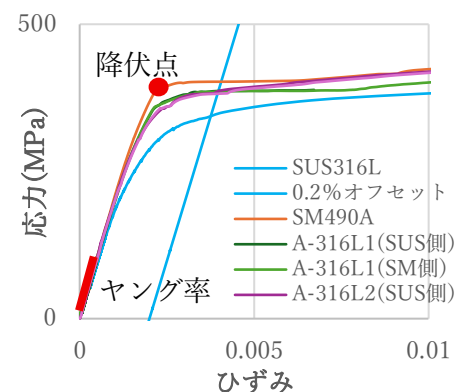


図 3.1.1 応力ひずみ曲線

キーワード 引張試験 クラッド鋼 機械的性質 延性特性

連絡先 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科

E-mail e225518@cs.u-ryukyu.ac.jp

SUS316L および SM490A のヤング率から算出した理論値と比較すると、クラッド材のヤング率は概ね近い値を示したものの、全体として理論値よりやや低い傾向が確認された。

ヤング率は弾性域における初期変形挙動を支配する指標であり、この差は引張初期段階においてすでに変形の不均一性が生じることを示唆している。これは、界面近傍での微小な不整合や、製造過程で導入された残留応力の影響により、単純な複合則が成立しなかったためであると考えられる。

### ③ 降伏点/0.2%耐力

クラッド材の降伏点は、単体材である SUS316L および SM490A の中間的な値を示した。また、クラッド比が大きくなるにつれて、降伏点は SUS316L の値に近づく傾向が見られた。

これは、降伏挙動が主として SUS316L の割合に依存していることを示している。一方で、理論値との間にはわずかな差が存在しており、降伏が層ごとに同時に生じていない可能性が示唆される。前節で述べたヤング率差により弾性域での応力分担が不均一となり、その結果、塑性変形の開始タイミングが SUS316L 側と SM490A 側でずれたことが、降伏挙動に影響を与えたと考えられる。

### 2) 延性特性

図 3.2.1、図 3.2.2 より伸びおよび絞りの結果を比較すると、クラッド鋼はいずれも単体材の中間的な値とはならないことが確認された。特に A-316L1（クラッド比 0.177）では、SM490A よりも伸びが小さく、延性が低下する結果となった。一方、A-316L2（クラッド比 0.333）では、A-316L1 と比較して伸びが増加しており、SUS316L の延性特性がより強く反映されていることが分かる。また、図 3.2.3 より A-316L1 では降伏後において他の試験体と比較して大きな面外変位が確認された。この面外変位は、SUS316L と SM490A の弾塑性特性差に起因して引張方向に対して曲げ変形が生じた結果であると考えられる。曲げ変形が発生することで局所的なひずみ集中が発生し、材料が本来有する延性を十分に発揮する前に早期破断に至ったと推察される。絞りについても、クラッド鋼は単体材のような均一な断面収縮を示さず、構成材間の変形拘束により局所的な変形が抑制された結果、中間的な値とはならなかったと考えられる。以上の結果より、クラッド鋼の延性特性はクラッド比のみで一義的に決定されるものではなく、ヤング率差および降伏点差に起因する初期変形の不均一性や塑性開始のずれ、さらにそれに伴う面外変位などの変形様式に強く依存することが明らかとなった。したがって、クラッド鋼の延性評価においては、単純な材料定数の比較だけでなく、変形挙動そのものを考慮した評価が重要である。

### 4. まとめ

本研究では、SUS316L、SM490A およびステンレスクラッド鋼に対して引張試験を行い、クラッド比と機械的特性および延性特性の関係について、以下の知見を得た。

- 1) 応力-ひずみ関係において、クラッド材においても炭素鋼とステンレス鋼が一体となって変形していることが確認された。
- 2) ヤング率および降伏点ともに、クラッド比換算の理論値と概ね近い値を示した。
- 3) クラッド比の増加に伴い降伏点は低下する傾向が見られた。
- 4) 延性特性については、クラッド材の伸びおよび絞りはいずれも単体材の中間的な値とはならなかった。特にクラッド比 0.181 の A-316L1 では面外変位が確認された。今後、この要因について FEM 解析等で探求していく。

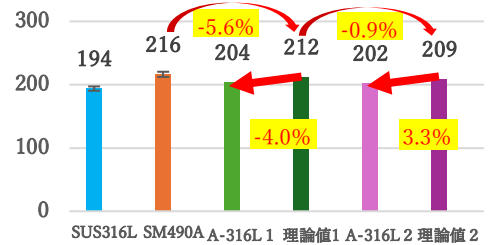


図 3.1.2 ヤング率

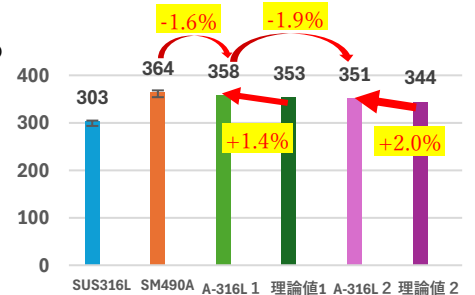


図 3.1.3 降伏応力/0.2%耐力

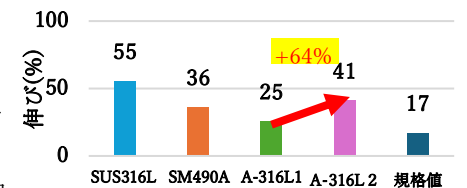


図 3.2.1 伸び

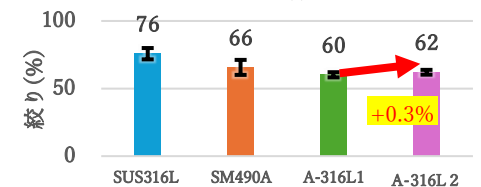


図 3.2.2 絞り

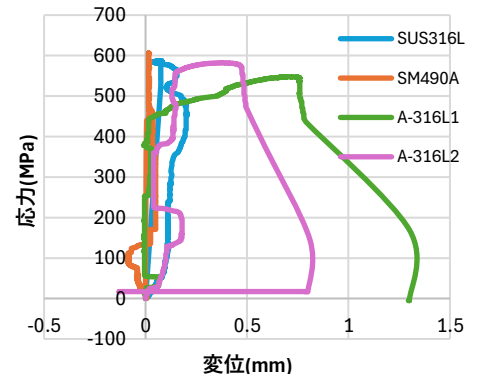


図 3.2.3 面外変位



## ステンレスクラッド鋼板の圧縮耐荷力特性に関する実験的研究

琉球大学 ○田代楓 下里哲弘 JFE エンジニアリング 田中裕明

### 1. 研究背景と目的

沖縄地域は、全国の中でもインフラ構造物の腐食環境が特に厳しい地域として知られており、鋼橋の耐久性の向上および維持管理コストの削減を目的として、ステンレス鋼の適用に関する検討が進められている。その中で、炭素鋼母材にステンレス鋼を圧延過程で重ね合わせるステンレスクラッド鋼（以下、クラッド鋼）は、ステンレス鋼単体と比較して経済性に優れることから、実用性の高い材料として注目されている。そこで本研究では、道路橋示方書において規定されている軸方向圧縮耐荷力に焦点を当て、クラッド鋼を適用した両縁支持板の圧縮耐荷力特性を明らかにするとともに、炭素鋼との相違を明確にすることを目的とした。

### 2. 研究方法

#### 2.1 実験ケースおよび供試体

本研究では、幅 350mm、高さ 1000mm の両縁支持板について圧縮耐荷力実験を実施した。供試体は、表-1 に示すとおり板厚 9mm の炭素鋼単体 (SM490YA) と、板厚 9mm の炭素鋼に板厚 1.5 mm のステンレス鋼を合せ材としたクラッド鋼 (SM490YA+JSL310Mo, SM490A+SUS316L) とした。各種鋼材の強度特性を表-2 に示す。

#### 2.2 実験装置および計測項目

実験には万能試験機 2000kN を用いた。図-1 に試験条件を示す。境界条件は、供試体の高さを十分に確保し、端部の拘束の影響を低減することで、4 辺単純支持とした。ひずみゲージは、供試体 1 体あたり 18 点取り付けした。鉛直方向の変位は供試体 1 体あたり 2 点、板の面外変位は供試体の一方の面に 9 点 (図中 1~9) の計測点を設置し、他方の面には長手方向および幅方向の中心軸上に 5 点の計測点を配置した。また、レーザー変位計 (繰り返し精度: 2 $\mu$ m) を用いて供試体の初期不整および、試験後の座屈モードを計測した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 初期不整

実験実施前にレーザー変位計を用いて供試体の形状を計測し、各供試体の初期不整は道路橋示方書の

表-1 供試体ケース

試験体	単位	E-490Y-1-1	E-310Mo-1-1	E-316L-1-1
厚さ : t	炭素鋼	mm	9	9
	SUS	mm	—	1.5
	全体	mm	9	10.5
材質	炭素鋼	—	SM490YA	SM490A
	SUS	—	JSL310Mo	SUS316L
試験体数	枚	1	1	2
幅 : b	mm	350	350	350
幅厚比パラメータ : R	—	0.99	0.88	0.78

表-2 各種鋼材の強度特性

材料	耐力 (N/mm <sup>2</sup> )		ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	
	公称値	実験値	公称値	実験値
SM490A	315以上	317.6	205000	216400
SM490YA	365以上	447.7	205000	213300
SUS316L	175以上	301.1	193000	193800
JSL310Mo	300以上	481.7	—	188400
E-316Lクラッド鋼	295	370.4	203286	207229
E-310Moクラッド鋼	355	452.6	—	199357

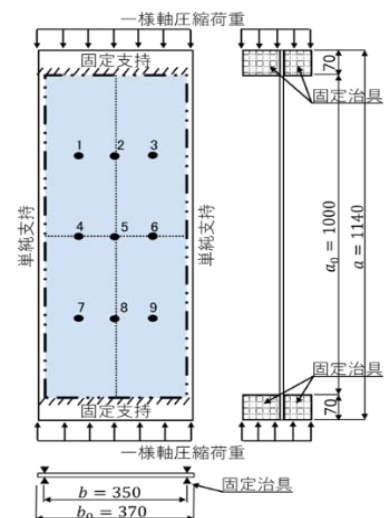


図-1 試験条件

キーワード ステンレスクラッド鋼, 両縁支持板, 座屈特性, 圧縮耐荷力試験

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部 E-mail : e225543@cs.u-ryukyu.ac.jp



基準値 (L/150, W/150) を満足していることを確認した。

### 3.2 荷重-鉛直変位曲線

図-2 に荷重変位曲線を示す。炭素鋼単体 (E-490Y-1-1) とクラッド鋼 (E-310Mo-1-1) の座屈荷重に大きな差が見られないことから、クラッド鋼は炭素鋼と同等以上の座屈強度を有すると評価できる。一方で、最大荷重はクラッド鋼の方が高く、ステンレス鋼を合せ材として有することにより、座屈後においても変形の進行に伴い耐荷力を保持・増加する挙動を示した。

### 3.3 塑性ひずみの広がり

座屈荷重は鋼板表裏のひずみの分岐が最初に確認された荷重とした。各座屈発生時および最大荷重時における塑性域の広がりを図-4 に示す。図より、座屈発生時には弾性座屈である。一方、最大荷重時には塑性域が進展している。

### 3.4 耐荷力曲線

実験結果を炭素鋼の耐荷力曲線上にプロットした結果を図-5 示す。その結果、実験値はいずれも耐荷力曲線を上回ることが確認された。ここで、クラッド鋼の幅厚比パラメータを算定する際に用いる降伏耐力およびヤング率は、クラッド比を考慮した理論式 (式-1) により算出した。

$$\sigma_y = \frac{t_1 \cdot \sigma_1 + t_2 \cdot \sigma_2}{t_1 + t_2} \quad \text{— (式-1)}$$

$\sigma_1$  : 母材の降伏点  $\sigma_2$  : 合せ材の降伏点

$t_1$  : 母材の厚さ  $t_2$  : 合せ材の厚さ

これより、道路橋示方書で設定された耐荷力曲線は、クラッド鋼に対しても安全側に適応可能であると考えられる。

### 4. まとめ

- 1) 炭素鋼とクラッド鋼の座屈荷重に顕著な差は見られず、クラッド鋼は炭素鋼と同等以上の座屈強度を有すると評価できる。
- 2) クラッド鋼は道路橋示方書の炭素鋼の耐荷力曲線にクラッド比換算の幅厚比を用いることで、耐荷力を評価適用可能である。

#### 【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅱ鋼橋・鋼部材編），丸善出版，2017。
- 2) 松下裕明，矢吹哲弘，有住康則，下里哲弘：ステンレス鋼－構造用鋼ハイブリット圧縮補剛版の耐荷力評価，土木学会論文集，2013

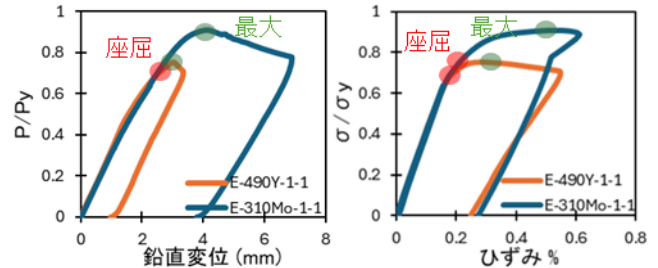


図-2 荷重変位曲線

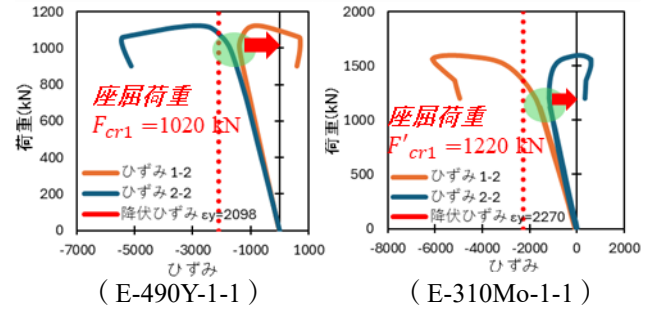


図-3 荷重－ひずみ関係

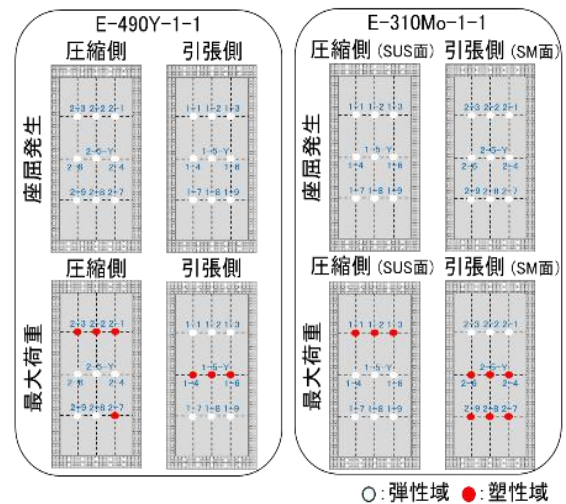


図-4 塑性域の広がり

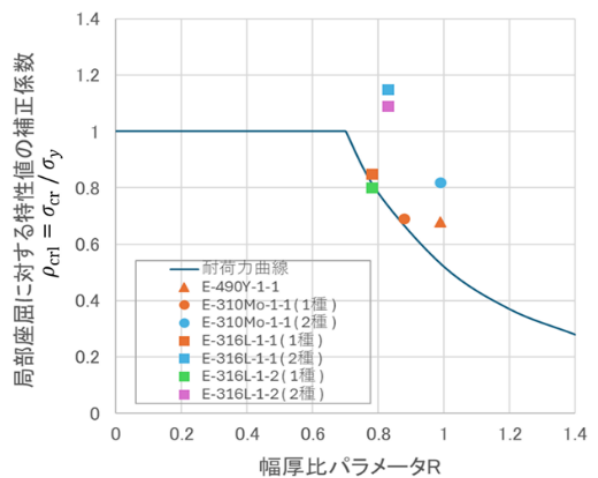


図-5 耐荷力曲線