研　究　報　告

令和　７　年　４　月　２１　日

公益財団法人　前田記念工学振興財団

理 事 長　　岸　　利 治　　殿

研究代表者

所　属　：静岡大学グローバル共創科学部

氏　名　：Kim Kyeongmin

研究課題名：セルフパワードセンサーと機械学習を用いた海底泥の動態予測による海洋インフラ施設の効率的な管理システムの提案

助成金額：　　１００万円

研究実施期間：自　令和６年４月１日　～　　至　令和７年３月 31 日

研究報告　令和６年度　i-construction 分野 No.3

セルフパワードセンサーと機械学習を用いた海底泥の動態予測による海洋インフラ施設の効率的な管理システムの提案

Seabed dynamic prediction system using self-powered sensor and machine learning for efficient management of marine infrastructure facilities

静岡大学グローバル共創科学部　助教　Kim Kyeongmin

（研究計画ないし研究手法の概略）

1. はじめに

海洋インフラ施設（護岸、洋上風力発電基礎、港湾構造物など）は、海底地形の変動（侵食・堆積）に強く影響される。従来の測深技術（単一ビーム・マルチビーム）や光学カメラ、音響測深は、高頻度・連続的なモニタリングに限界があり、調査船の手配や視界不良（水濁度・懸濁物）による計測精度低下といった課題があった。また、従来型センサー（電気伝導度、pH、潮位計など）は、設置に外部電源や定期的なメンテナンスを要し、長期連続運用のコストと労力が大きい。

本研究では、海中における溶存酸素を燃料とする、燃料電池型センサー（Fuel-Cell-Type Sensor: FCT センサー）を開発し、自己発電で電流・電位を連続取得することで、海底堆積環境の物理的・化学的状態を高頻度にモニタリング可能とするシステムを提案する。また、得られた長期観測データを機械学習モデル（RNN 系）で解析し、1 週間先の堆積動態を予測する枠組みを構築することを最終目標とする。

FCT センサーは、アルミニウム（Al）またはマグネシウム（Mg）を陽極、グラファイトを陰極とし、海水中の DO（dissolved oxygen）還元反応により電流を自己生成する。電流値は含水比や粒度構成といった底質物理特性と相関し、開回路電位（OCV）は底質中の環境を反映することを実験室試験で明らかにした。

2. 研究方法

2.1 センサー設計・製作

本研究では、自己発電型の燃料電池型センサー（FCT センサー）を設計・製作した。陽極には室内実験用に純度 99.95 %のアルミニウム棒（直径 10 mm×長さ 50 mm)、現地試験用に純度 99.5 %のマグネシウム棒を用い、陰極には同径の等方性グラファイト棒を採用した。各電極端部にはチタン線を巻きつけ、銅線へはんだ付け後にアクリル製防水テープで密封することで長期水中設置に耐える構造とした。センサーは外部抵抗(R_{ext})（室内：516 Ω、分極試験：5 Ω-5.1 kΩ）を介して電圧ロガー（GL240）に接続し、開回路電位（OCV）および閉回路電位・電流（CCV）を 1 分または 10 分間隔で連続取得した。電流(I)はオームの法則で算出し、内部抵抗(R_{int})は以下の式で求めた：

$$R_{int,cell} = R_{int,cat} + R_{int,ano} = \left(\frac{V_{oc}}{V_{cc}} - 1\right) R_{ext}$$

2.2 室内実験

2.2.1 溶存酸素-電流相関試験

人工海水 10 L 槽内で FCT センサーを完全に沈設し、硫酸ナトリウム添加により DO を徐々に

低下させながら、DO 計（WTW Multi 3420）と電流計を 10 分間隔で約 50 時間測定した。得られたデータは電流が DO 濃度に対してほぼ線形に比例し（I = 0.0202 × DO − 0.0158, R^2 = 0.98)、溶存酸素をセンサー燃料かつセンシング指標として利用可能であることを実証した 。

2.2.2 底質別分極曲線試験

砂、浚渫泥、下水処理泥を試料とし、R_{ext} を 5.1 kΩ から 5 Ω まで順次切替えて各擬似定常状態の電位-電流特性を取得した。理論上の開回路電圧約 2.48 V に対し実測では約 0.8 V が得られ、砂質・海水中では内部抵抗約 800 Ω で高電流、泥質では約 1.5 kΩ で低電流を示した。各媒体で内部抵抗-電流の傾きは一致し、底質の空隙率や透水性といった物理的要因が電流応答を支配することを示した 。

2.2.3 流動泥含水比依存試験

浚渫泥を 1 L 容器に試料充填し、回転攪拌（100 rpm）で一定湿潤比を維持しながら 1.5 時間ごとに人工海水を注入し含水比を 239%から 365%へ漸増させ、1 秒間隔で電流を連続測定した。含水比増加に伴い電流は漸増し、航行管理上の流動泥限界（1150-1200 kg/m³）領域で明瞭な電流飽和を観測。従来の音響・光学手法では検出困難な高含水泥層の識別が FCT センサーで可能であることを示した 。

2.3 海域フィールド試験

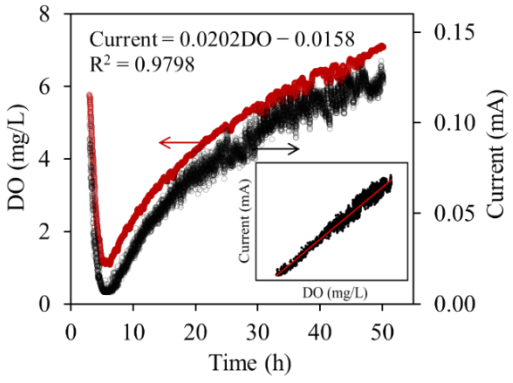
フィールド試験は、宇部港（33° 55′ 58.89″ N, 131° 13′ 15.93″ E、水深約 4.4 m）で実施した。直径 10 cm・長さ 40 cm の円筒コア内部に 5 cm 間隔×7 層の Mg-グラファイト電極対を配置し、1 分間隔で約 5 時間連続測定を行った。測定中の平均流速は ADCP で約 40 cm/s と確認した。並行して同位置で採取した堆積コア（直径 10 cm×長さ 50 cm）を 3 cm 毎に区分し、湿潤比・LOI・粒度分布を分析することで、センサー信号と底質物性の関係を評価した

（実験調査によって得られた新しい知見）

3. 結果と考察

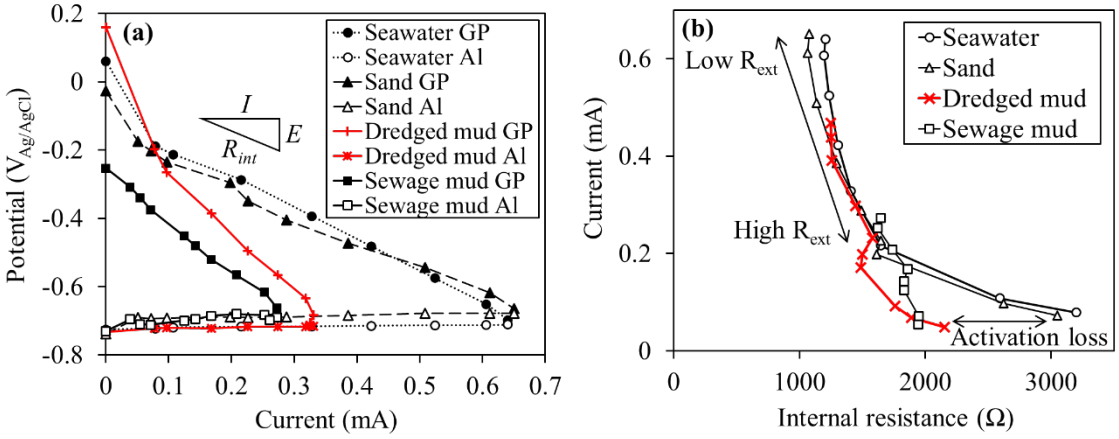
3.1 溶存酸素によるセンシング

室内試験で明らかになった I-DO の高い線形相関（R^2 = 0.98）は、センサー電流が溶存酸素濃度を正確に反映することを示し、FCT センサーが DO 計測装置として機能しうることを実証した。海域試験でも水層（Ch.1-2）と底層での電流差から、DO 分布の変化をリアルタイムにモニタリングできた。



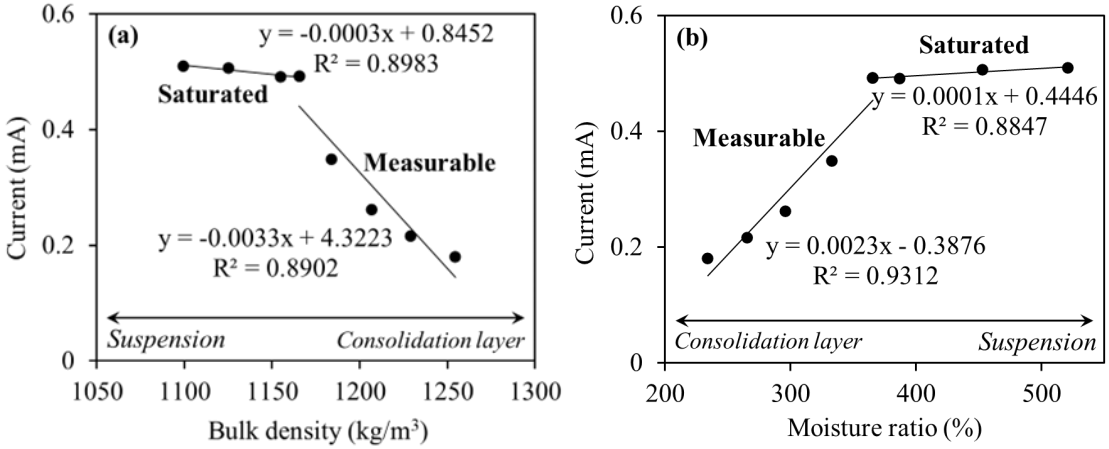
3.2 物理的堆積環境の判別

分極曲線試験結果から、砂・浚渫泥・下水処理泥のいずれでも内部抵抗-電流傾きが一致し、空隙率や透水性といった物理的環境が電流量に対する主要因であることを示した。これは、底質粒度や含水比を電気的に定量化する新たな手法として有望である。



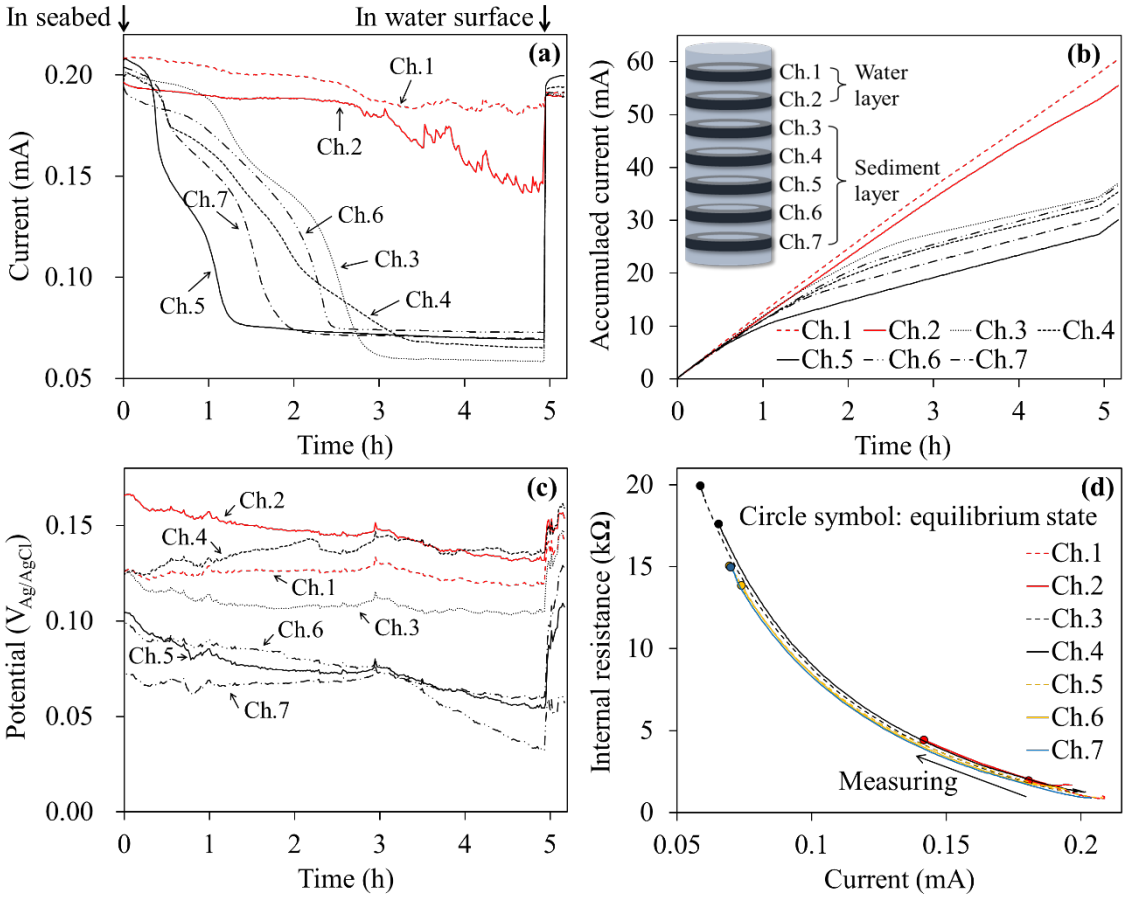
3.3 流動泥層の検出

流動泥含水比依存試験では、含水比 1150-1200 kg/m³領域で電流応答が飽和し、従来技術では検出困難な高含水比泥層を FCT センサーが高感度に識別できる可能性を示した。これにより、流動泥や軟弱層の分布把握に大きく貢献しうる。



3.4 化学的環境の識別

海域試験において、開回路電位（OCV）は砂層で 0.1-0.3 V、浚渫泥・下水処理泥で約-0.35 V／-0.41 V に安定し、化学的環境を判別可能であることが示された。電流指標と合わせて用いることで、物理的堆積状態だけでなく化学的環境も同時に可視化できる点が画期的である。以上の成果を基盤に、今後はセンサー製造の標準化と長期安定性試験、得られた信号を用いた RNN 系機械学習モデルによる短期予測の実地検証を進め、海洋インフラの予兆的維持管理システムへの応用を図っていく。



（ 発 表 論 文 ）

1. Kim, Kyeongmin; Hibino, Tadashi; Nakagawa, Yasuyuki. 2025. A fuel-cell-type seabed-level sensor for monitoring bathymetric evolution. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 109281. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109281