

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14330

研究課題名（和文）電位センサーを活用した新たな海底堆積物の動態把握システムの開発

研究課題名（英文）Development of a novel redox sensor for sediment dynamics in coastal areas

研究代表者

Kim Kyeongmin (Kim, Kyeongmin)

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・特任助教

研究者番号：40943650

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は海底堆積物の動態を把握するための新しい手法として、海水および堆積物の電気化学特性を利用した新しいセンサーの開発を目的とした。研究期間中、海水及び堆積物の電気化学的特性を明らかにする基礎研究、海水（水質）を対象としたセンサーの開発、堆積物を対象としたセンサーの開発、機械学習を適用したセンサーを用いた水質及び堆積物動態の予測技術の開発に区分されて実施された。電位が捉える溶存酸素濃度の特性を利用して、年間水質環境が大幅に変わる沿岸域で連続的かつ長期的に水質を計測する電位センサーの実証に成功した。約8ヶ月間連続測定した電位結果をもとに、底層の貧酸素水塊の発生および解消メカニズムを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

例えば港湾施設においては、本センサーの活用によりこれまで連続的な計測手法の不在でできなかった台風などのイベント現象発生直後の地形変化を素早く把握するのに活用できる。さらに、本センサーと機械学習を応用したシスの隙間から約一週間後の貧酸素水塊および巻き上げの発生を予測することが可能であり、漁業および養殖業の被害を最小化するのに活用可能である。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a sensor that utilizes the electrochemical properties of seawater and sediments as a novel method to understand the dynamics of seafloor sediments. During the research period, the study was divided into several phases: basic research to elucidate the electrochemical properties of seawater and sediments, development of sensors targeting seawater (water quality), development of sensors targeting sediments, and development of technology to predict water quality and sediment dynamics using sensors with applied machine learning. By leveraging the characteristics of dissolved oxygen concentration detected by potential, we successfully demonstrated the continuous and long-term measurement of water quality in coastal areas where the annual water quality environment changes significantly. Based on the potential results measured continuously for about 8 months, we elucidated the mechanism of the occurrence and dissolution of hypoxic water masses in the bottom layer.

研究分野：環境工学

キーワード：水質計測センサー 燃料電池型センサー 水質予測システム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航路は基準値以上の水深と幅を常に保つ必要があり、例えば国土交通省関門航路事務所では、航路全域にわたる深浅測量を年1回行い、浚渫を実施している。深浅測量は、測量船による音波測量を行っているのが現状である。しかし、音波測量は運用コストがかかり、台風等のイベント後に追加で音波測量を実施することは難しい。また、音波測量は堆積層と浮遊泥を見分けることが困難であり、埋没量を過大評価するおそれがある。例えば、信濃川河口に位置する新潟港の場合、信濃川から供給される土砂が不定期に港内で堆積するため、航路・泊地の浚渫が計画的に行うことができない。本研究では、底泥の電位特性を理解することにより、電気的手法を航路埋没計測に応用し、これらの問題の解決を目指す。

水の電位は、水質と密接な関連があり、水処理施設・飲料水等の水質を判断する尺度として活用されている。水層の電位はイオンの酸化還元反応によって決定される。イオンの種類によって固有の電位を持っているため、電位から水質を決定付けるイオンの種類・濃度が推定できる。一方で海底泥には、イオン・有機物・粘土粒子が固有の電位を有しているため、電位の示す意味を理解することは難しい。

底泥中の有機物は、低分子有機物(有機酸等)と高分子有機物(腐植物質・フェオフィチン等)の2つの有機物種に大分できる。低分子有機物は、低いエネルギー準位(0.3Vの高い電位)を持ち、微生物によって分解されやすい。一方で、高分子有機物は、高いエネルギー準位(-0.6Vの低い電位)を持つため、還元した底泥は低い電位を示す。つまり、底泥の電位は、高分子有機物の電気化学的特性を表しているパラメータである。しかし、底泥内の有機物は構造を断定できないだけでなく、底泥の電位を計測できる手段の未実現により、底泥内有機物の電位特性の知見が十分でない。

2. 研究の目的

本研究は、底泥の電気化学的特性の解明と電気化学的・物理的特性の相関関係の確立を目的とする。さらに、既存技術の限界点(イオンの電位の計測)を克服した電位センサーの開発を目指す。これにより、電位を海底挙動の表すパラメータとして検討する。最終的には、電位センサーを用いて、航路の堆積層厚・軟弱度を常時計測するシステムを構築する。

3. 研究の方法

(1) 技術的検討：①電極素材の検討 電極素材の検討は、バイオ電極において重要な課題である。電極材料(白金、炭素等)による応答性の違いは、微生物付着の特性に依存する。金属・炭素電極を併用することにより、有機物・泥粒子を組み入れた底泥の電気化学的特性を解明できる。②泥粒子の電気的特性の把握 バイオ電極の素材である炭素繊維は、金属に比べて電気容量が数千倍高く、泥粒子の表面電位を組み入れた電位を捉えることが確認されている。電極の素材による測定対象の細分化に関する知識を得る上で、泥粒子の静電気力を測定するのに適した炭素電極加工法を探索する。

(2) 現地での実証：③電圧計防水/無線通信 年間堆積量が約30cmの内湾で実証を行う。安定的なデータ確保のため、テレメトリー技術メーカーと協力し、電圧計の防水/無線通信法を確立する。④基準電極の長期評価 基準電位として提案する電位不変層電位の長期安定性を評価する。電位不変層の電位は季節的に変動するため、電位が一定の深さを把握するため最低1年間の連続調査を行う。泥の電位が安定せず、基準電極として活用できない場合、安定性が確保されている金属材料(例えば鉄)を添加する手法で対応する。⑤電位-物理的性状の相関関係の調査 柱状採泥を行い、泥の物理的性状(密度、粒度分布、含水比)・電気化学的性状(電位、酸化還元イオン濃度、有機物量、有機物性状)の関係性を調査する。

4. 研究成果

(1) 本研究は海底堆積物の動態を把握するための新しい手法として、海水および堆積物の電気化学特性を利用した新しいセンサーの開発を目的とした。研究期間中、海水及び堆積物の電気化学的特性を明らかにする基礎研究、海水(水質)を対象としたセンサーの開発、堆積物を対象としたセンサーの開発、機械学習を適用したセンサーを用いた水質及び堆積物動態の予測技術の開発に区分されて実施された。電位が捉える溶存酸素濃度の特性を利用して、年間水質環境が大幅に変わる沿岸域で連続的かつ長期的に水質を計測する電位センサーの実証に成功した。約8ヶ月間連続測定した電位結果をもとに、底層の貧酸素水塊の発生および解消メカニズムを解明した。例えば港湾施設においては、本センサーの活用によりこれまで連続的な計測手法の不在でできなかった台風などのイベント現象発生直後の地形変化を素早く把握するのに活用できる。さらに、本センサーと機械学習を応用したシスの隙間から約一週間後の貧酸素水塊および巻き上げの発生を予測することが可能であり、漁業および養殖業の被害を最小化するのに活用可能である。

(2) 低酸素は世界中の沿岸地域における長年の環境問題だが、技術的および経済的困難により

正確かつ継続的な時空間モニタリングが妨げられている。この研究は、新しい容量性電位差センサーを開発することにより、季節性の低酸素状態の動態を高解像度で監視することを目的としている。この研究の基礎となる仮説は、(1) 容量性炭素電極が酸化還元エネルギーを充電し、過電圧を生成するというものである。(2) 過電圧は酸化還元エネルギーを増幅された信号として反映する。季節性低酸素に対する容量性電位差センサーの有効性を、日本の福山内湾で夏から秋にかけて調査した。調査地域は、上層の淡水と下層の塩水の強い成層を持つ汽水域であった。酸化還元平衡環境である水面では、過電圧により容量電位が0.7 Vまで増加した。これは、溶存酸素の酸化還元エネルギーが35倍に増幅されることに相当する。対照的に、底層では、容量性電位がネルンスト方式で応答し、硫化水素の拡散が調査地域の底部の低酸素水塊の直接の原因であることが確認された。酸化還元反応の垂直不連続層は、容量電位の0.05 Vとして定義された。この閾値は、季節性低酸素症の時空間ダイナミクスを直観的に示している。主成分分析により、溶存酸素濃度が容量電位の主な決定要因であることが確認された。さらに、この新規な電位差センサーは、弱く調整された酸化還元対を捕捉できないという従来の酸化還元電位センサーの限界を克服する。容量性ポテンシャルは、層状構造が光合成のための環境(表層水温と好氣的条件)を保護し、潮汐とともに溶存酸素を定期的に海底に供給し、全層の低酸素状態を抑制していることを示した。結論として、容量性ポテンシャルは溶存酸素の化学活性に関する時空間情報を提供し、これは低酸素ダイナミクスのメカニズムを解明するための新しいアプローチである。

(3) 富栄養河口で発生する低酸素症は、長短期記憶(LSTM)モデルを使用して予測された。0、1、12、24時間の予測タイムステップ(PTS)を設定。定量的な情報を提供する容量性電位(CP)溶存酸素(DO)濃度は、降水量、潮位、塩分濃度、水温とともに予測変数として使用された。まず、DO濃度の年次変化はK平均法クラスタリングを使用して3つの段階(過飽和、枯渇、安定)に分類された。一番影響力があった変数はCPであった。LSTMはDOフェーズと低酸素の発生を予測するために実装された。12時間のPTSによる枯渇段階と低酸素症の発生の同時予測では、CPと他の変数を使用した場合の精度は92.1%であった。これは、CPを使用しない場合よりも3.3%高かった。CPと他の変数を併用して枯渇相と低酸素非発生を予測する場合、精度は61.1%であり、CPを使用しない場合よりも5.5%高くなった。CPと他の変数を併用した場合、すべてのPTSで総合精度が最高であった。全体として、CPの使用と機械学習技術により、短期および長期の両方の低酸素症の発生を正確に予測できる。これにより、水産養殖と環境管理における災害に積極的に対応する機会が提供される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 FURUKAWA Taito, KATAYAMA Ryoya, KIM Kyeongmin, TAKAHASHI Takumi, HIBINO Tadashi	4. 巻 78
2. 論文標題 電位測定による水質変動の把握と実用性の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_835 ~ I_840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_i_835	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 TAKAHASHI Takumi, KATAYAMA Ryoya, KIM Kyeongmin, HIBINO Tadashi	4. 巻 78
2. 論文標題 閉鎖水域での水質測定システムの提案	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_769 ~ I_774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_i_769	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kim Kyeongmin, Nakagawa Yasuyuki, Takahashi Takumi, Yumioka Ryota, Hibino Tadashi	4. 巻 836
2. 論文標題 High-resolution monitoring of seasonal hypoxia dynamics using a capacitive potentiometric sensor: Capacitance amplifies redox potential	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 155435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2022.155435	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Park Seongsik, Kim Kyunghoi, Hibino Tadashi, Sakai Yusuke, Furukawa Taito, Kim Kyeongmin	4. 巻 15
2. 論文標題 An Antifouling Redox Sensor with a Flexible Carbon Fiber Electrode for Machine Learning-Based Dissolved Oxygen Prediction in Severely Eutrophic Waters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 2467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w15132467	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 SAKAI Yusuke, FURUKAWA Taito, KIM Kyeongmin, HIBINO Tadashi	4. 巻 79
2. 論文標題 WATER QUALITY MEASUREMENT USING ELECTRIC POTENTIAL OF BIOFILM IN TIDAL FLATS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-18016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Park Seongsik, Kim Kyunghoi, Hibino Tadashi, Kim Kyeongmin	4. 巻 196
2. 論文標題 Machine learning-based prediction of seasonal hypoxia in eutrophic estuary using capacitive potentiometric sensor	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Marine Environmental Research	6. 最初と最後の頁 106445
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marenvres.2024.106445	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 K. Kim, Y. Nakagawa, T. Hibino, T. Nishimoto, K. Ajiki
2. 発表標題 A fuel cell type sensor for continuous monitoring of seabed deposition and erosion
3. 学会等名 17th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kim Kyeongmin, 中川康之, 日比野忠史, 西本高志, 阿式邦弘
2. 発表標題 電気化学センサーを用いた海底堆積物の動態監視システムの開発と応用
3. 学会等名 第70回海岸工学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Kim, Y. Nakagawa, T. Hibino
2. 発表標題 Development of batteryless sensor for coastal sedimentation
3. 学会等名 19th International Conference on Civil and Environmental Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
韓国	Pukyong National University		