

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01539

研究課題名（和文）CO2自然漏洩海域における高濃度検知指標の検証と生態系モデルへの実装

研究課題名（英文）Verification of the indices of high CO2 concentration detection in a natural CO2 leakage sea and its implementation in ecosystem model

研究代表者

佐藤 徹 (Sato, Toru)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：30282677

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：海底下CO2貯留では、予期せぬ漏洩に備えて海水中CO2濃度の監視が要求される。しかし、CO2濃度は光合成などの生物活動の影響を受けるため、漏洩を自然変動から識別する指標が必要となる。令和3年度および4年度は、長崎県橘湾のCO2自然漏洩海域および、館山沖での人為的CO2放出実験にて、漏出点まわりに同心円状にCO2濃度を観測し、漏出を自然変動とする偽陰性を回避できた。また、観測点情報から漏洩位置を高精度に推測する逆計算法を用いて、観測点の最適配置法を開発した。令和5年度は、漏出判断のため、館山沖のCO2濃度を学習させた機械学習法を開発し、他海域の海水データを分析し、適切な結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

理論上、相関が高い指標は漏洩を自然変動と誤判断する確率を減らすことが可能なはずである。ただし、提案する高相関指標を含む複数指標を用いて、海底下に貯留したCO2の予期せぬ漏洩を検出するためには、それを実証する必要があった。この研究では、自然CO2漏洩海域にて、新たな指標を併用する手法が、高精度に擬陽性のみならず偽陰性を回避できることを確認した。さらに、機械学習法を用いることで、科学的根拠のない閾値を用いることなく、漏出と自然変動を識別することができた。これは海底下CO2貯留事業において、高コストの再調査の頻度を格段に下げるといった社会的なニーズも非常に高い成果と言える。

研究成果の概要（英文）：Offshore CO2 storage requires monitoring of seawater CO2 concentration in case of unexpected leaks. However, since CO2 concentration is affected by biological activities such as photosynthesis, an index is needed to distinguish leakage from natural fluctuations. In 2021 and 2020, CO2 concentrations were observed in concentric circles around the leakage point in the natural CO2 leakage area of Tachibana Bay, Nagasaki Prefecture and the artificial leak off the coast of Tateyama. As a result, false negatives caused by natural fluctuations due to leakage could be avoided. We also developed a method of the optimal placement of observation points using an inverse method that accurately estimates a leak location from observation point information. In 2020, we developed a machine learning method that learned the CO2 concentration off Tateyama and analyzed seawater data from other areas to determine leakage, and were able to obtain appropriate results.

研究分野：海洋環境工学

キーワード：CCS CO2海中漏洩 海水中CO2濃度 海洋調査 溶存酸素 機械学習

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素回収・貯留 (CCS) は、二酸化炭素 (CO₂) の排出を大幅に削減する技術である。CO₂ を貯蔵する場所の1つは、キャップロック層の下の海底帯水層となる。しかし、このアプローチには、検出されていない断層や、放棄された井戸、大規模な地震等により、CO₂ が海に漏出する潜在的なリスクがある。したがって、海水中の二酸化炭素濃度を監視することが法的に義務付けられている。もし万が一海中から高い CO₂ 濃度が検出された場合、海洋への漏出が起きたかどうかを判断することが重要となる。

しかし、海水の CO₂ 濃度は、主に光合成や呼吸などの生物活動の影響により大きな空間的および季節的な変動をする。漏洩による CO₂ の濃度変化を自然変動から識別するための指標が必要となる。研究代表者は、近年、高い相関を有する新たな指標を提案し、従来の指標と新たな2つの指標を併用することで海水中 CO₂ 濃度の自然変動を漏出とのミスジャッジ (偽陽性) を回避できる可能性があることを示した。

ただし、この手法による偽陽性の回避は、当然ながら 100% ではなく、偽陽性の発生する確率を低減するというにとどまっていた。また、逆に漏洩であるのに、漏洩でないと判断する可能性 (偽陰性) もあり、偽陽性回避と表裏の問題となっていた。

2. 研究の目的

そこで本研究は、まず、研究代表者が考案した2つの指標と従来指標を用い、自然 CO₂ 漏出海域にて CO₂ 漏洩を確実に異常値として検出し、自然変動とミスジャッジする偽陰性を回避できるか確認することを目的とした。

次に、海水中の CO₂ 関連濃度の複数の指標に関する先行研究を参考にしつつ、偽陽性と偽陰性をともに回避するための新たな手法を提案する。

3. 研究の方法

令和3年度は、CO₂ 自然漏出海域として長崎県橘湾の雲仙岳のふもとの橘湾を対象として、AUV に搭載したサイドスキャンソナーにより CO₂ 自然漏出点を確定し、その点を中心とした概略同心円状に採水を実施し、DIC、TA、DO を測定した。

次に令和4年度は、データの信頼性を向上することを目的として、再度長崎県橘湾にて季節を変えて同様の観測を実施し、漏出点近傍及び遠方のデータを得、これを分析した。さらに、漏出を自然変動とミスジャッジする偽陰性を回避するための指標の閾値を決定するため、採水・指標による CO₂ 漏洩検知能力と、自然漏洩海域では判然としない漏出流量との関係を明らかにするため、館山沖の実海域にて CO₂ を人為的に一定流量で放出し、正確な同心円状の位置で採水し、その分析結果から漏出を検知できる範囲を確実に把握した。

また、漏洩位置が不明の場合に、その漏洩位置を高精度に推測する数値逆計算法を用いて、観測点の最適配置法を新たに開発した。

令和5年度は、偽陽性と偽陰性をともに回避するための新たな手法として機械学習法 (ML) を取り入れることとした。ML には、ロジスティック回帰とニューラルネットワークという2つの「教師あり学習法」を適用し、CO₂ 関連濃度の線形相関指標の入力パラメーターを使用して ML モデルに学習させる。このため、再度、海底から CO₂ を放出した館山沖で CO₂ 関連濃度の現地測定を実施し、学習用の漏出 (異常値) データを作成した。

4. 研究成果

CO₂ 漏出海域での観測の結果、各 CO₂ 関連濃度指標とも漏出点の中心からの距離 2~5m の地点で高濃度を記録した。その他の地点では漏出を検出できなかった。漏出点の南西方向 2~5m の地点で、使用した全ての指標により漏出を確実に感知したことで、自然変動とミスジャッジする偽陰性を回避できることが確認できた。

観測点の最適配置法については、(1)対象海域につき、最小観測影響濃度 (LOC) を基に、濃度の移流拡散を解いて、ある漏出量 Q に対する観測範囲を決定し、(2)対象海域のどこから漏出した

としても、その位置を高精度に予測することができるような観測位置に関する無次元数(水平ペクレ数 Pe_0 と鉛直ペクレ数 Pe_z)の閾値を 海域毎の代表流速と渦拡散係数、成層強さから求め、(3)上記閾値を満たしつつ、貪欲法を用いて、海域カバー率が 1 であり、かつ最小数の観測点群を求め、(4)巡回セールスマン問題を用いて、上記観測点群をすべて結ぶ最適航路を求め、(5)観測点数、航行距離から分析試料数、観測日数等を求め、コストを計算、(6)上記プロセスを漏出量 Q を変えて繰り返すことで、いくらコストをかければ、最低何 ton/year の漏出量まで確実に観測できるか、あるいは最低何 ton/year の漏出量まで観測したいならいくらコストが必要かがわかるという手法を開発した。

また漏出の影響を受けない海水(通常値)データも取得し、これらを用いて、学習した ML モデルを適用して、他の海の CO_2 関連濃度データを判断したところ、適切な結果を得ることができた。今後の課題として、学習用の漏出(異常値)データ数を増やし、より精度を高めることがあげられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kanao Shunsuke, Sato Toru	4. 巻 133
2. 論文標題 Optimization method of water-quality observation positions in offshore CCS sites using the adjoint marginal sensitivity method	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Greenhouse Gas Control	6. 最初と最後の頁 104108 ~ 104108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijggc.2024.104108	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 Shuxuan Sun, Toru Sato, Keisuke Uchimoto, Yuji Watanabe	4. 巻 112
2. 論文標題 Applicability of CO2-related concentration indicators by classifying various seawaters in the world	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Greenhouse Gas Control	6. 最初と最後の頁 103489:1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijggc.2021.103489	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 Shunsuke Kanao, Toru Sato	4. 巻 232
2. 論文標題 Numerical estimation of multiple leakage positions of a marine pollutant using the adjoint marginal sensitivity method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers and Fluids	6. 最初と最後の頁 105195:1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2021.105195	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 金尾 俊介、佐藤 徹
2. 発表標題 アジョイント法を用いた海底下CCS における観測点の最適配置決定手法の開発
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toru Sato
2. 発表標題 Recent Movements and Some Challenges of CCS in Japan
3. 学会等名 UKCCSRC Spring Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鈴木 渚、熊埜御堂 凌佑、尾張 聡子、下島 公紀
2. 発表標題 長崎県橘湾における海底・海水環境の地球化学
3. 学会等名 2023年度日本地球化学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口 三亜佳、下島 公紀
2. 発表標題 CCSにおけるCO2初期漏洩検知を目的とした最適なモニタリング技術の検討
3. 学会等名 2023年度日本地球化学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 下島 公紀
2. 発表標題 CO2海洋・海水中隔離と海底下・海水CCSの技術 (貯留CO2の漏洩検知技術)
3. 学会等名 資源工学部会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunsuke Kanao, Toru Sato
2. 発表標題 Study for accurate estimation of positions and volumetric fluxes of CO2 seepage from the seafloor
3. 学会等名 16th Int. Conf. Greenhouse Gas Control Technol. (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡村拓歩、前田義明、佐藤 徹、下島公紀
2. 発表標題 海底下 CCS における漏洩検知手法の利点と欠点および今後の対策
3. 学会等名 海洋理工学会 令和4年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡村拓歩、孫庶軒、鈴木優美、下島公紀、佐藤徹、前田義明、小池訓弘、金尾俊介、未永弘、田中姿郎、尾張聡子、熊埜御堂凌佑
2. 発表標題 海中漏洩検知指標の問題点および新指標の提案と対策
3. 学会等名 海洋理工学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金尾俊介, 佐藤徹
2. 発表標題 海底からの二酸化炭素漏出点の高精度な推定のための検討
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021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
研究 分担 者	下島 公紀 (Shitashima Kiminori) (70371490)	東京海洋大学・学術研究院・教授 (12614)	

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
---------	---------