

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2014～2016

課題番号：26303019

研究課題名(和文) 英国における海洋漏出CO₂の環境影響評価のための実海域実験研究課題名(英文) Field observation of CO₂ seeping into the ocean in UK for environmental impact assessment

研究代表者

佐藤 徹 (Sato, Toru)

東京大学・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) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：英国での実海域CO₂漏洩実験が中止となったため、24年度に実施した実海域実験の環境回復調査を実施することとした。海底に漏出したCO₂の位置と流量を推定する数値解析法を開発した。海底下堆積層の電気比抵抗を測定する電極付き信号ケーブルを開発し、電気探査と自然電位の計測が地中のCO₂のモニタリング手法として適用できることを示した。pHセンサ、pCO₂センサにつき、長期間計測が可能な基板を開発し、pH/pCO₂のマッピング観測や鉛直観測から、海中漏出CO₂のモニタリング手法を確立した。CO₂放出実験前の堆積物試料について、間隙水の移流拡散が圧入停止後のCO₂消失の主要因でないことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We decided to investigate environmental recovery of the field experiment conducted in 2012 because the field observation of CO₂ seepage in the real sea in the UK was cancelled. The numerical analysis method to detect the location and rate of CO₂ seepage has been developed. Signal cable with electrodes with an electric resistivity of sea bottom sediment was developed, and showed that measurement of electric survey and electric self-potential survey can be applied as the monitoring technique of CO₂ in the sediment. A long measurement substrate about a pH sensor and pCO₂ sensor were developed, and the monitoring technique of subsea seepage CO₂ was established from a mapping observation of pH/pCO₂ and a vertical observation. It was cleared that the advection/diffusion of pore water is not a prim factor of CO₂ disappearance after the stop of CO₂ injection of the former CO₂ release experiment.

研究分野：海洋環境

キーワード：海洋工学 海洋探査 海洋利用 海洋保全

1. 研究開始当初の背景

温暖化対策として、火力発電所等の排ガスからCO₂を回収し、地中に貯留するCO₂の分離回収と貯留(Carbon Dioxide Capture and Storage: CCS)が考えられている。我が国では、大陸棚での海底下1000-2000mの帯水層に超臨界状態のCO₂を注入する浅海域地中貯留実証実験が、2016年から苫小牧沖にて経済産業省により実施されている。

CCSの実施のために重要になるのが社会的受容性である。そのため地層構造の貯留性能評価手法の開発、貯留層内のCO₂挙動解析などの貯留可能性のほかに、万が一漏洩した場合の貯留層外部へのCO₂移行解析などの環境影響評価手法の開発が不可欠となる。

このような中、平成24年、海水中に漏出したCO₂の物理的、化学的、生態学的などの環境影響を評価するため、英国において海底堆積物中からCO₂を放出する、世界初の実証実験(QICSプロジェクト)が日英共同で行われた。水深12m、海底下10mの浅海堆積層中に、80~120kg/日のCO₂を30日間放出し、CO₂の堆積層中および海水中での挙動と生物相への影響を観測するもので、本研究代表者と研究分担者はこれに参画し、漏洩サイト近傍において物理化学的、生化学的な知見を得ることができた。

2. 研究の目的

本研究では、海底下の帯水層や石炭層などの地質構造でのCO₂貯留を対象に、一般国民のCCSに関する認知と理解を得るために必要不可欠な環境影響評価手法を開発する。そのために、当初英国において平成27年に計画されている実海域CO₂漏洩実験に参画し、海水中や堆積層中のCO₂の移動、溶解、拡散といった物理化学的現象を観測・予測する技術を開発することで環境影響評価手法を開発するとしていた。ところが、英国側の事情により、平成27年度の実海域CO₂漏洩実験が中止されたため、申請書でも述べていた通り、平成24年度に実施された実海域実験の環境回復調査を平成28年度に実施することとし、環境影響評価手法の開発を実施した。

3. 研究の方法

(1) 実海域堆積層中のCO₂挙動予測法の開発

平成24年の数値シミュレーションでは、地下構造の不均質さのデータがなかったため堆積層中の漏洩経路や漏洩時間などの予測は現実と異なったものとなった。そこで堆積層の不均質さを導入し、漏洩経路、漏洩時間の予測計算を実施する。

(2) 実海域海水中のCO₂挙動予測法の開発

平成24年の実海域実験では堆積層中に放出したCO₂の全てが海中に漏洩しなかったと推測されている。また海底面から気泡状で漏出したCO₂と溶存体で漏出したCO₂の量も確定されていない。そこで平成24年の実験に

つき、堆積層中残存量、気泡状・溶存体漏出量のおおよその予測を実施する。また、漏出位置、漏出量予測法を開発する。

(3) 実海域堆積層中のCO₂挙動観測法の開発

これまで開発してきた堆積物中pHセンサを用い、平成24年の実海域実験と同じ海域において、4年経過後の堆積物中pHを観測し、環境回復度を調査する。また、平成24年で適用の可能性が示された電気探査による堆積層中のCO₂挙動のモニタリングの実証実験およびその解析を行う。

(4) 実海域海水中のCO₂挙動観測法の開発

これまで開発してきた海水中pH/pCO₂センサおよび大気中CO₂マッピング技術を用い、平成24年の実海域実験と同じ海域において、4年経過後の海水中pHを観測し、環境回復度を調査する。

(5) 海底堆積層中に漏洩したCO₂に関する環境影響評価手法の構築

堆積物試料の採取と化学分析につき、放出4年後の堆積物試料採取、炭酸塩の生成量、栄養塩類および重金属濃度の残存量につき計測を実施する。さらに、平成24年の実験で明らかにされなかった堆積物のより深い層(0.3m以深)の試料についても同様の化学分析を実施する。実施した研究成果をまとめることで、比較的浅い堆積物中と海水中における、CO₂の漏出を想定した場合の環境影響評価手法を構築する。

4. 研究成果

(1) 実海域堆積層中のCO₂挙動予測法の開発

平成24年度に英国側で実施された弾性波探査結果を利用して、海底下堆積層内の不均質さについて検討し、地下でのCO₂挙動を予測するための数値シミュレーションに適用する地下モデルの再構築を行った。

(2) 実海域海水中のCO₂挙動予測法の開発

CO₂の海中拡散モデルの高精度化として、これまで半閉鎖湾を対象に潮流のみを扱ってきたが、潮流と海流を同時に扱うことができるように、数値計算プログラムを改造した。対象を、平成27年度からCO₂海底下貯留実海域実験が開始された苫小牧沖とし、苫小牧沖における海流影響を含めた漏出CO₂の拡散シミュレーションを行った結果、潮位の再現に成功し、水温・塩分も安定した結果が得られた。CO₂漏洩シミュレーションでは、気泡の半径の違いによる濃度の上昇の仕方の違いなどが確認された。さらに、2012年のCO₂放出実験の測定情報と海洋シミュレーションを元に、海底下に貯留したCO₂が海底面に漏出した際の、漏出位置と漏出流量を推定する数値解析法を開発し、2次元流場および当該実海域を対象にしたテスト計算により、開発した手法の検証を行った。

(3) 実海域堆積層中のCO₂挙動観測法の開発

平成24年に実施された英国Ardmacknish湾の浅海底CO₂放出実験地において、平成24年と同様の電極配置および計測システムで、

平成 28 年 5 月 23 日～25 日に自然電位の計測を、5 月 26～27 日に電気探査を実施した。平成 24 年と 28 年の海底下電気比抵抗構造の変化から、CO₂ 放出実験時に CO₂ の気泡が湧出していった海底の地下数 m の領域で電気比抵抗が増大していることが判った。この領域は弾性波探査の結果から CO₂ が一時的に留まっていると評価された領域とほぼ整合している。また、海底自然電位の計測では、通常の内自然電位は 10～20mV 程度の変動であったが、CO₂ 放出実験時に CO₂ の放出流量を毎分 60 リットルから 80 リットルに増大させた時に自然電位が通常より数十 mV 増加することなどが確認された。以上より、電気探査と自然電位の計測が CO₂ のモニタリング手法として適用できることが示された。

(4) 実海域海水中の CO₂ 挙動観測法の開発

平成 28 年 5 月に予定している英国での浅海域 CO₂ 放出実験に先立ち、既開発のセンサ制御基板、pH センサ基板、pCO₂ センサ基板について、長期間の計測が可能なそれぞれの基板を設計・試作した。また、九州大学水産実験所沖合海域においてサイドスキャンソナーの作動確認試験を実施した。さらに、堆積物のより深い層から間隙水を採取可能とするステンレス製の間隙水採取器につき、直径を 2.5cm とすることで強度を確保し、約 1.1m の深さの試料が採取可能な装置を開発した。国内の実験室での試験に加えて、英国の協力機関のダイバーによる現場試験も実施し、堆積物粒度が比較的粗い観測実験実施海域においても使用可能であることを確認した。合わせて、平成 24 年当時に解析が不十分であった堆積物中の微量金属の挙動を把握することを目的として、循環型溶出実験システムを構築し、実験条件やシステムの性能把握に係る基礎的検討を実施した。これらの準備を経て、平成 28 年に、CO₂ 噴出場所付近での海底直上海水中 pH/pCO₂ および堆積物中 pH の連続計測を実施し、残留 CO₂ の影響はないことを確認した。さらに、東京海洋大学の館山ステーション沖において、海底からの CO₂ 漏洩を想定したドライアイス実験を実施した。海底にドライアイスを設置し、pH/pCO₂ のマッピング観測や鉛直観測を行い、CO₂ 漏洩時の CO₂ 拡散状況や海洋環境変動についての実測データを取得した。

(5) 海底堆積層中に漏洩した CO₂ に関する環境影響評価手法の構築

Ardmuckinish 湾の堆積物の化学組成（金属・栄養塩・炭酸塩）に関するベースラインデータを取得するため、平成 24 年度に採取された CO₂ 放出実験前の堆積物試料について蛍光 X 線分析とリンの形態別分析を実施した。地球化学参照試料と比較したところ、反応性に富む鉄の酸化物の含量が少ないことが分かった。一方リンの形態では、detrital（破屑性）の成分を多量に含んでおり、同湾の堆積物が比較的不活性な成分に富むことを明らかにした。平成 24 年の CO₂ 放出実験では、

注入した CO₂ の多くが水中まで到達せず堆積物内に蓄積・残存していると見積もられた。しかし堆積物表層の溶存 CO₂ は注入停止後、速やかに消失しており、注入 CO₂ の最終的な挙動は明らかになっていない。堆積物内の長期的な変化と観測の行なわれていないより深い層の調査を行なうため、平成 28 年 5 月に現地観測を実施した。前年度に開発した採取器により、最深 125cm の間隙水と 55cm の堆積物の試料採取に成功したが、CO₂ の圧入地点と参照地点の化学性状に有意な差は認められず、この層には溶存 CO₂ が残留していなかった。またトレーサー実験および連続モニタリングの結果から、間隙水の移流・拡散などの物理現象は圧入停止後の CO₂ 消失の主要因でないことが示された。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 12 件)

Chiaki Mori, Toru Sato, Yuki Kano, Hiroyuki Oyama, Dmitry Aleynik, Daisuke Tsumune, Yoshiaki Maeda. Numerical study of the fate of CO₂ purposefully injected into the sediment and seeping from seafloor in Ardmucknish Bay. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 38 (2015) 153 - 161. doi:10.1016/j.ijggc.2014.11.023, 査読あり、国際共著、オープンアクセスではない

K. Shitashima, Y. Maeda and A. Sakamoto: Detection and monitoring of leaked CO₂ through sediment, water column and atmosphere in sub-seabed CCS experiment. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 38, 135-142 (2015).

doi:10.1016/j.ijggc.2014.12.011、査読あり、オープンアクセスではない

Tsukasaki, A., M. Suzumura, A. Lichtschlag, H. Stahl and R.H. James, Phosphorus behavior in sediments during a sub-seabed CO₂ controlled release experiment. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 38 巻, 2015 年, 102-109, doi:10.1016/j.ijggc.2014.12.023, 査読あり、国際共著、open access ではない

〔学会発表〕(計 28 件)

Ayumi Tsukasaki, Natalie Hicks, Peter Taylor, Masahiro Suzumura, Anna Lichtschlag, Henrik Stahl, Rachael H. James. The dynamics of pore water in subsurface sediments at the site of controlled CO₂ release

experiment. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017年5月22日, 幕張メッセ (千葉市, 千葉県)

K. Shitashima. Natural analogue study for ocean acidification. ASLO2017, 2017年3月1日, Honolulu (USA).

海江田秀志、鈴木浩一、城森明: 英国浅海底 CO2 放出実験 (QICS) サイトにおける電気探査. 物理探査学会第135回学術講演会, 2016年10月26日, 室蘭工業大学 (室蘭市, 北海道).

佐藤 徹. CCS のニーズとリスク、そして新展開. 第47回海洋工学パネル, 2016年1月25日, 日大駿河台キャンパス1号館大会議室 (千代田区, 東京都), 招待講演.

Ryosuke Sakaizawa, Toru Sato, Hiroyuki Oyama, Takero Yoshida. Numerical Simulation of Fate of CO2 Seeping from Seabed Considering Tidal and Ocean Currents. 25st Int. Offshore and Polar Eng. Conf., 2015年6月21-26日, Kona (USA).

塚崎あゆみ・鈴木昌弘・Anna Lichtschlag・Henrik Stahl・Rachael H. James, 海域 CO2 地中貯留技術に係る CO2 漏洩実証実験における堆積物中のリンの動態解明, 日本海洋学会春季大会, 2015年3月22日, 東京海洋大学 (品川区, 東京都).

海江田秀志. 「二酸化炭素回収・貯留 (CCS) における調査・研究小委員会」の活動の方向性について. 土木学会エネルギー委員会講演会, 2015年3月18日, 土木学会 EF 会議室 (新宿区, 東京都), 招待講演

K. Shitashima, Y. Maeda, A. Sakamoto: Monitoring of leaked CO2 through sediment, water column and atmosphere in sub-seabed CCS experiment, Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, 2014年7月31日, レイトン札幌ホテル (札幌市, 北海道).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://lemons.k.u-tokyo.ac.jp/ccsea/index.html>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

下島 公紀 (SHITASHIMA, Kiminori)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号: 70371496

鈴木 昌弘 (SUZUMURA, Masahiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・環境管理研究部門・研究グループ長

研究者番号: 90357301

海江田 秀志 (KAIEDA, Hideshi)

一般財団法人電力中央研究所・地球工学研究所・研究参事

研究者番号: 90371400

(3) 連携研究者

塚崎 あゆみ (TSUKASAKI, Ayumi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・環境管理研究部門・研究員

研究者番号: 40585402

大山 裕之 (OYAMA, Hiroyuki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号: 90443176