

二酸化炭素海洋隔離による海洋物質循環過程への影響評価に関する研究

独立行政法人産業技術総合研究所

環境管理技術研究部門 原田 晃・鈴木昌弘・鶴島修夫・山田奈海葉・柴本陽子

平成15～19年度合計予算額 60,393千円
(うち、平成19年度当初予算額 9,764千円)

[要旨]

大規模発生源で捕集した二酸化炭素(CO₂)を海洋に隔離する手法は、大気中CO₂濃度抑制のための極めて有効な対策技術と考えられている。しかし、海洋隔離技術の確立にあたっては隔離されたCO₂が海洋環境に与える影響を的確に評価することが重要であり、特に大気CO₂濃度の上昇に伴い顕在化している海洋表層酸性化問題との関連で強まりつつある環境影響への懸念に対しては適切な科学的知見を提出し国際的なコンセンサスを得ていくことが求められている。CO₂を海洋の中深層に溶解、希釈させる方式の場合、そこで生成される高CO₂濃度、低pHの海水による生物や生態系への直接的影響の評価に加えて、表層から深層への粒子や溶存成分などの物質輸送や物質循環過程に及ぼす影響の評価が重要であり、前者は隔離の技術的な開発研究の中で実施されてきている。本研究では後者に焦点を当て、具体的には炭酸カルシウム沈降粒子の溶解過程、有機物の分解過程に与える影響について検討してきた。

CO₂の放出に伴う炭酸カルシウムの溶解促進効果を評価するために、擬似現場実験で得られたデータを用いて炭酸カルシウムの飽和度から溶解速度を算出する経験式を導いてきたが、19年度はさらに実験データの解析法を改良することによって、溶解促進効果をより精度良く算出することが可能となった。また、18年度までの研究では、仮想的な鉛直1次元の数値シミュレーションにより海洋隔離によって生じる炭酸カルシウム粒子の溶解促進効果を表現していたが、最終年度においては極めて具体的な隔離事業シナリオの下で西部北太平洋域における時系列的3次元マップの作成を行った。日本南方の海域(100km×333km)に5,000万トン/年のCO₂を注入するというケーススタディにおいて、CO₂の隔離は炭酸カルシウム粒子の沈降フラックスに顕著な影響を及ぼさないという結果が得られた。ただし、注入サイト近傍の比較的狭い範囲とはいえ、微量ながらもフラックスが減少する可能性も同時に指摘されたことから、上層からの沈降粒子による物質・エネルギー供給に依存している深海・海底生態系に対して長期的かつ具体的にどのような影響が現れるのかについてはさらなる検討が必要であろう。

有機物の分解、同化、無機化を通じて中深層における物質循環をつかさどる主要な生物群集である細菌群集に対するCO₂隔離の影響を調べるために、細菌の数(全菌数)の変化と生産速度(有機物取り込み速度)を指標とした室内実験を実施してきた。19年度の研究では、全菌数が少なく細菌にとって有用な有機物も乏しい中深層においては、海水の高CO₂化や低pH化の影響はほとんど顕在化しないことが示された。一方、有機物濃度を増加させ活性を増大させた細菌群集においては、強い酸性化(海洋隔離事業においてもエクストリームケースであるが)によって活性が阻害される

という結果が得られた。このことから、例えば有機物に富む沈降・懸濁粒子に付着した高活性の細菌群集の代謝が阻害されることにより有機物の深層への輸送フラックスの増加、栄養塩の再生効率の低減などの影響が生じうる可能性が示唆された。また、特定の化学処理により細菌群集から「生菌」と呼ばれる群集を識別する手法を検討し、CO₂海洋隔離における今後の環境影響評価やモニタリングの中で有用な手法として提案することができた。

[キーワード] 二酸化炭素、海洋隔離、海洋酸性化、炭酸カルシウム、細菌群集

1.はじめに

大気CO₂濃度の抑制のための対策として、CO₂の海洋隔離が検討されており、重要なCO₂排出削減対策オプションと考えられている。わが国は、CO₂の海洋隔離技術や海洋貯留技術に関して、これまで積極的に研究開発を進めてきており、幾つかの技術的な課題のほか、CO₂削減の効果算定法、隔離に伴う海洋環境への影響予測方法などが今後解決すべき課題として残されている。このような中、気候変動枠組み条約第7回締約国会議(COP7)では、CO₂の回収・隔離技術(CCS)についての科学的、技術的な評価をIPCCに勧告することが合意された。これを受けてIPCCは2005年にCCS特別報告書を発行、2006年にインベントリーガイドラインにおいてCCSの取り扱いを議論、2007年の第4次報告書でもCCSについて潜在的に重要なオプションとして明記している。国際的にも海洋隔離技術に対する科学的、技術的評価を行う段階となってきたことから、わが国としても、より一層の科学的な貢献を図る必要があるという観点のほか、今後の温暖化対策としての国内政策オプションとして技術的な確立を促す必要がある。

海洋隔離技術の確立にあたっては、特に海洋環境に与える影響の評価が今後解決すべき大きな課題であることから、これに対する科学的知見の集積が急務である。現在、海洋中への放出、溶解により大気中のCO₂を隔離する技術では、中深層域を隔離の場として想定している。これらの層は表層や海底面よりはその密度が低いものの、多くの海洋生物が生息する場であり、また、表層での生物活動で作られた粒子が運ばれ分解、溶解して再び海水に戻る場として、海洋内での物質循環に重要な役割を果たしている。従って、CO₂の放出によって生成される高CO₂濃度、低pH海水による①生物個体や生態系への直接的影響の評価、②表層から運ばれてきた粒子が分解、溶解して化学成分が海水へ戻る過程が間接的に生態系へ及ぼす影響の評価、など海洋環境の変化に対する科学的評価を行うことが重要になる。このうち①に関する研究は、CO₂の注入方式に直接的に関わる問題として技術的な開発研究の中で実施され始めている¹⁾。このため、本研究では②を対象として集中的な研究を実施する。ここで得られる成果は、IPCCのワークショップ等を通じIPCC報告書に反映させるとともに、IMBER等の国際共同研究への貢献等を通じ、CO₂海洋隔離の国際的コンセンサスに向けた貢献を図る。

2.研究目的

CO₂海洋隔離によって影響を受け、海洋環境を変化させる恐れのある過程のうち、表層から運ばれてきた粒子や溶存成分の分解に関するものには、①炭酸塩、ケイ酸塩など生物起源の粒子状無機物の溶解過程、②有機物が分解して化学成分が海水へ戻る過程(細菌の関わるものを含む)がある。これらの過程が変化すると、引き続いて起こる海底面への粒子輸送が変化し、これに伴う

底生生物群集への影響が懸念されるほか、海水に回帰する物質の質的变化が生じ、これに伴う海洋生態系への影響が懸念される。そこで、本研究では、CO₂の放出によって作り出される高CO₂・低pH海水の上記過程への影響を、室内および現場実験で求めるとともに、西部北太平洋での実施を想定して、その影響の程度を時空間的に評価する。この結果から、より環境影響の少ない海洋隔離に関する提言をまとめ、国際的コンセンサスに向けた情報提供を行う。

3.研究方法

上述の目的を達成させるため、以下の項目の研究課題を実施する。

(1)海洋中深層域の粒子状物質についての現状の把握

海洋隔離に適していると考えられる西部北太平洋海域を中心に、セジメントトラップ等を用いた懸濁・沈降粒子の観測、海底堆積物の観測および海水の化学分析を実施し、CO₂の海洋隔離によって影響を受ける可能性のある、炭酸塩と有機物についての現状を把握した。セジメントトラップ(日油技研製SMD21-6000) 5台からなる係留系を水深5,716 m の測点A (22°31.65'N, 131°56.00'E) に、4台からなる係留系を水深5,574 m の測点H (23°13.24'N, 131°05.76'E) に設置した。この観測は(財)地球環境産業技術研究機構が「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術研究開発」の一環として実施しているもので、試料の提供を受け炭酸塩の測定を行った。

セジメントトラップ設置中の保存剤には、塩化水銀(最終濃度は1%)と塩化ナトリウム(2.5 g/L)を添加したろ過海水を使用した。海水中から揚収したセジメントトラップ試料は、船上でセジメントトラップ本体から取り外した後に船内の冷蔵庫にて保存した。陸上に持ち帰ったポリエチレン試料瓶中の粒子試料は、1 mm メッシュを通して大型プランクトンやネクトンなどを除去した。1 mm メッシュを抜けた試料は0.6 μm ヌクレオプアフィルターにてろ過し、乾燥後重量を測定して、この値から全粒子束(Total mass Flux)を求めた。その後、めのう乳ばちで試料を粉碎し、それぞれの測定項目に供した。測定項目は、炭酸塩、有機炭素・全窒素、生物起源ケイ酸塩、アルミノ珪酸塩である。

また、本研究において実際に観測された成果に加え、西部北太平洋全体の状況を捉えるために、これまでに産業技術総合研究所(旧資源環境技術総合研究所および地質調査所)が中心になって実施したセジメントトラップ観測結果のデータベース化を行った。海洋隔離の影響評価への利用性向上を目的として、地図(緯度経度)上での比較が容易になるようにGISを利用したデータベースとした。

(2)粒子の分解・溶解および有機物の分解過程に与える高CO₂濃度・低pHの影響評価

無機物である炭酸カルシウム殻の生産とその鉛直輸送(沈降)は海洋生物による海洋炭素循環の主要プロセスの一つに挙げられる。海洋表層で生産され、二酸化炭素放出の現場である中深層域に沈降してきた炭酸カルシウム粒子は、海洋隔離によって引き起こされる高CO₂濃度化、海水の低pH(酸性)化によって、その溶解が促進されると推定された。海水中での炭酸カルシウムの溶解は水圧の影響を顕著に受けることから、中深層における影響予測を正確に行うためには、現場環境に相当する圧力を再現した実験を設計する必要があり、平成16年度から現場水圧を再現できる特殊な高圧装置を用いた実験の検討を実施してきた。図1に溶解実験装置の概略図を示してある。

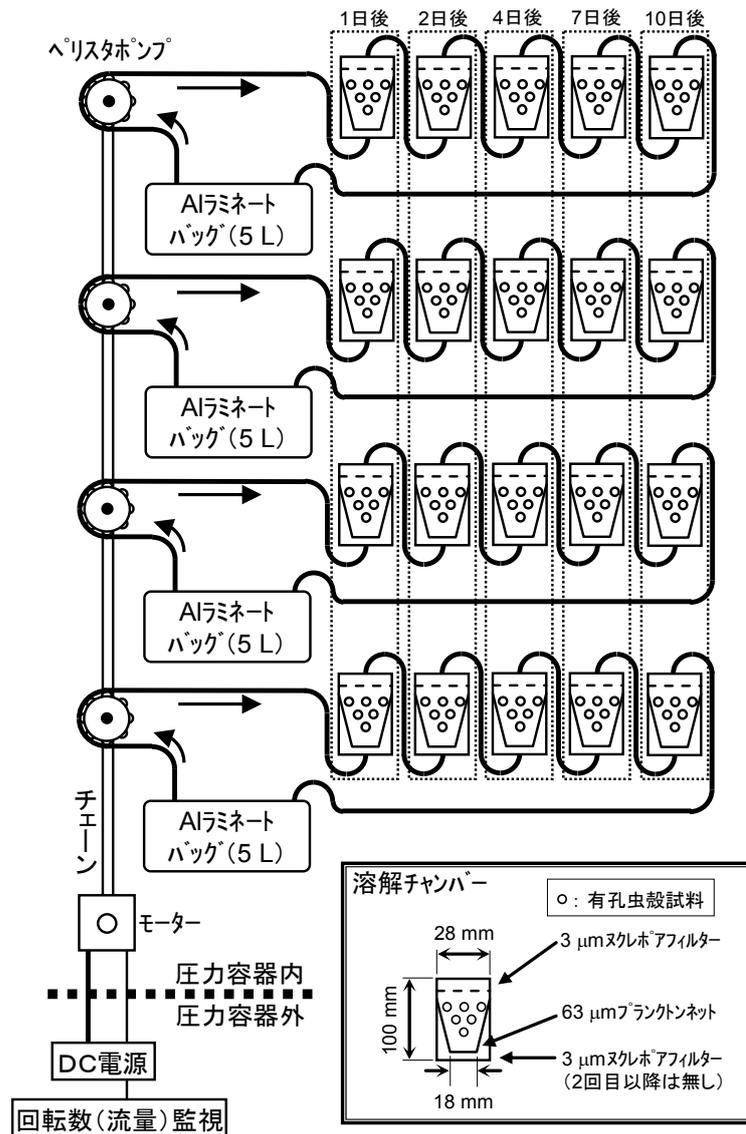


図1. 溶解実験装置の概略図.

炭酸カルシウムの粒子試料の約20 mgを小型の溶解チャンバーに計り取り、5個のチャンバーをチューブで接続した。これにCO₂濃度(pH)を調整した海水を入れたバッグを接続して、耐圧仕様のペリスタポンプで海水が循環させ、一度の実験で数段階のCO₂濃度を対象とできるように、合計で4~5ラインを同様に作成した。5個のチャンバーのうち1個ずつをそれぞれ実験開始から1日後、2日後、4日後、7日後および10日後に取り出し、チャンバー内に残存している試料の乾燥重量を測定することによって溶解量を見積もった。また、Alラミネートバッグ中の海水も適時採水し、炭酸系成分及びpH等の測定に供した。高压装置自体に水温調整機能が備わっていないため、3年度にわたり季節をかえて実施し、広範なCO₂濃度、圧力、水温化での溶解速度データ収集を行った²⁾。

一方、中深層での物質循環において炭酸カルシウムと同様に重要な役割を果たす有機物（物質の鉛直輸送を担う粒子状有機物及び海洋炭素の主要なリザーバーの一つである溶存有機物）に対

する海洋隔離の影響を評価するために、有機物の代謝、分解、蓄積に深く関わっている細菌(バクテリア)群集の活性を対象とした室内実験を実施した。細菌群集の代謝活性の指標となる全菌数(細菌の数: SYBR GOLD染色後に蛍光顕微鏡で計数)および細菌生産速度(細菌群集による有機物の取り込み速度:³H-ロイシン取り込み速度から計算)について、黒潮沖(30°N, 138°E)、水深2,000mで採取した海水を用いた。各種濃度のCO₂ガス(空気ベース)を吹き込んで酸性化し、全菌数と細菌生産速度を観察した。また、CO₂の高濃度化とpHの低下による影響を識別するために、緩衝液を用いてCO₂濃度を大きく変化させずpHのみを変化させる実験をあわせて実施した³⁾。

(3)海洋隔離による海洋物質循環変化の推定と取りまとめ

二酸化炭素の海洋隔離後の海域において、高CO₂、低pHが海洋物質循環にどのような影響を及ぼすのかを評価するために、(1)(2)より得られた結果からモデル構築に必要なパラメータを抽出し、炭酸カルシウムの溶解速度及び沈降フラックスの変化に着目した鉛直1次元物質循環モデルを構築した。表1に計算条件を示した。

表1 鉛直1次元モデルの計算条件

項目	設定値
計算領域	水深 6,000 m
計算格子数	50
鉛直分解能	等間隔メッシュ (120 m)
初期状態	観測データ ^{*1}
緩和定数	100日
炭酸カルシウムフラックス	40.56 mg/m ² /day
炭酸カルシウム沈降速度	200 m/day

*1 当研究機関で作成中の北太平洋海水化学成分データベース

想定されている海洋隔離シナリオとそのシミュレーション研究^{4,5)}を適用し、本研究で作成したモデルを西部北太平洋の広範な海域に適用することによって3次元的な時系列予測マップを作成した。

4.結果・考察

(1)炭酸カルシウムの溶解に及ぼす高CO₂濃度・低pHの影響

海水へのCO₂の注入に伴う低pH化と炭酸系の平衡状態の変化は炭酸カルシウム粒子の溶解速度を変化させる。溶解速度を決める海水中の炭酸カルシウムの飽和度は、海水の水温、塩分、水圧および炭酸系の濃度によって熱力学的に容易に計算が可能であるが、溶解速度を算出するためには次式において、定数の k と n を求める必要がある^{6,7)}。

$$R = k(1 - \Omega)^n \quad (1)$$

ここで、 R は溶解速度、 k および n は係数、 Ω は飽和度である。 k および n を求めるためには、現場あるいは擬似現場実験により水温、圧力を制御した上で、各種CO₂濃度条件下において溶解速度を

実測し、データの積み重ねの上で経験的に算出する必要がある。しかしながら、実際の海洋中深層においてそのような実験は困難である。本研究では初年度から平成18年度にかけて、特殊高压装置を用いた擬似現場実験を行い、炭酸カルシウム沈降粒子として浮遊性有孔虫の殻を用いた溶解速度の測定を実施してきた。実験結果の一例を図2に示す。

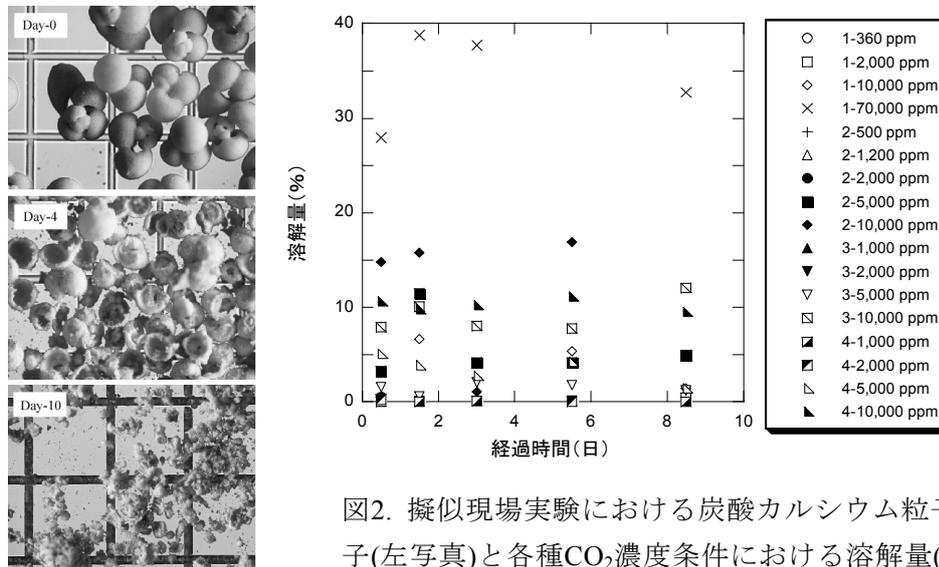


図2. 擬似現場実験における炭酸カルシウム粒子(有孔虫殻)の溶解の様子(左写真)と各種CO₂濃度条件における溶解量(%)の経時変化

実際に溶解が進行した5,000ppm以上の試料について、初期の溶解量から速度を見積り、海水の化学分析から炭酸カルシウムの飽和度(Ω)を求めて、回帰計算により溶解速度定数(k)の近似を行ってきた。19年度はさらに、実験の全期間を通じて溶解速度と Ω の関係を算出する解析法の工夫により、さらに精度の良い式を得ることに成功した(図3)。

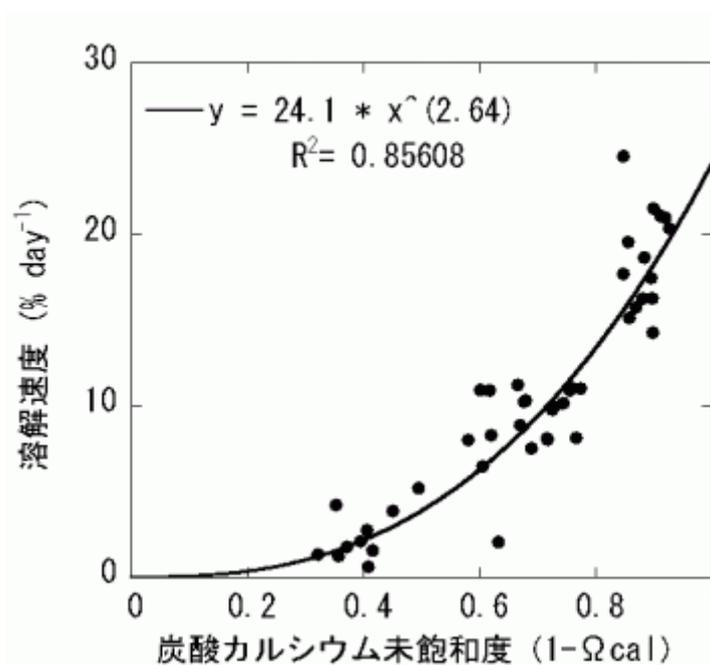


図3. 炭酸カルシウムの未飽和度に対する溶解速度の解析値と両者の相関。

得られた式は以下の通りである。

$$R = 24.1 \times (1 - \Omega)^{2.64} \quad (2)$$

この経験式を用いることによって、任意の条件下(塩分、水温、水圧、炭酸系濃度、炭酸カルシウムフラックス)における溶解促進効果を算出することが可能となり、平成18年度までの研究では、非常に仮想的ではあるがCO₂の注入により水深1,000~2,000mの層で全炭酸濃度が~10%増加した場合のフラックス(溶解速度)の変化を鉛直1次元の数値計算により定量化してきた。平成19年度は、より具体的な隔離シナリオに基づいた詳細なCO₂濃度の3次元時系列分布予測の下で西部北太平洋の広範な海域における溶解促進効果の定量・視覚化に取り組んできた。隔離のシナリオは(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)の「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響評価予測技術」プロジェクトにおいて提案されているMoving Ship方式⁸⁾によるCO₂海洋隔離技術について、日本の南方海域(亜熱帯EEZ内、19-22°N、133-134°E)の100km×333km、水深1,000~2,500mにCO₂放流船を用いて年間5,000万トン注入するケース⁴⁾を参考とした。また、このケーススタディに基づいた30年間にわたるCO₂濃度(拡散)分布状況について地球シミュレータを利用して計算された海洋循環モデル(OGCM)を適用した⁵⁾。3次元マッピングには対象海域における炭酸カルシウムの飽和度の詳細分布が必要となるが、これには当研究機関で作成中の北太平洋海水化学成分データベース(炭酸系をメインとする)を利用し、飽和度の計算に必要な各種物理化学パラメータを収集した。あわせて、炭酸カルシウム沈降粒子のフラックスについては、本研究初年度においてデータベース化した西部北太平洋の沈降粒子フラックスGISデータベースを利用した。図4は、沈降フラックスデータベースから、水深~1,500mにおける炭酸カルシウムフラックスと沈降粒子中の炭酸カルシウム含有率(全フラックスに対する炭酸カルシウムフラックスの寄与度)を緯度ごとに示したものである。

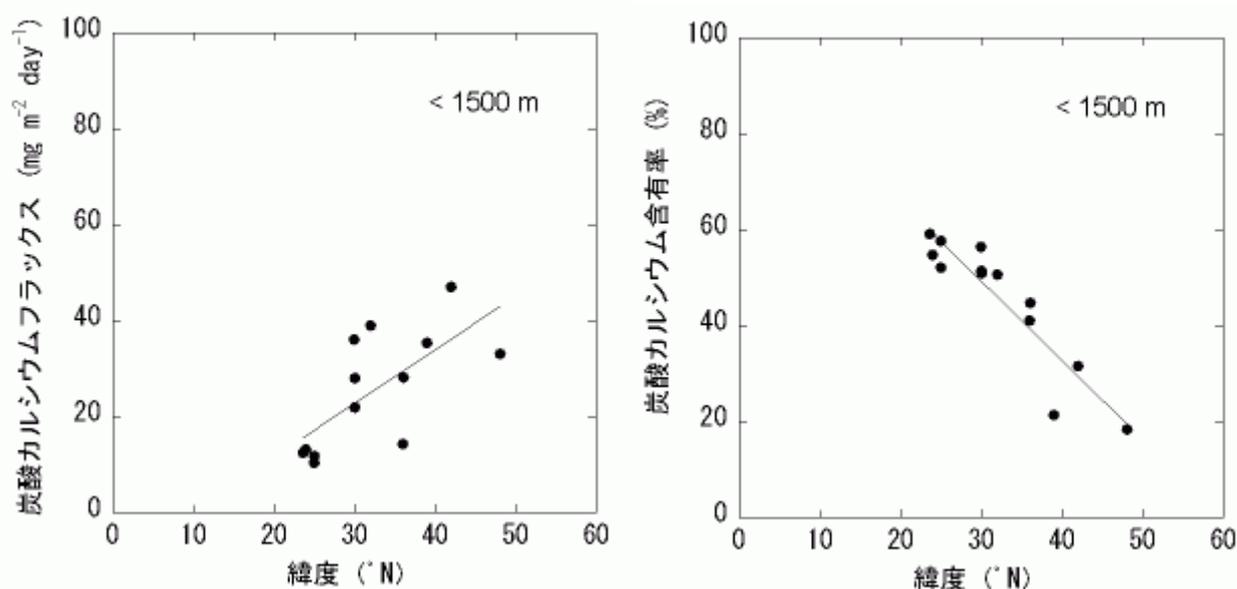


図4. 緯度ごとの炭酸カルシウム沈降フラックスと沈降粒子中の炭酸カルシウム含有率。

フラックスは表層での生物生産性が高い高緯度海域で高くなっている。一方、低緯度海域では

フラックスは低いものの、炭酸カルシウム含有率が顕著に高くなっており、CO₂の海洋隔離が実施された場合、沈降粒子のフラックスへの影響は低緯度海域でより顕著に現れると推測される。なお、数値計算においては炭酸カルシウムのフラックスを緯度ごとにデータを平均したものを用いた。

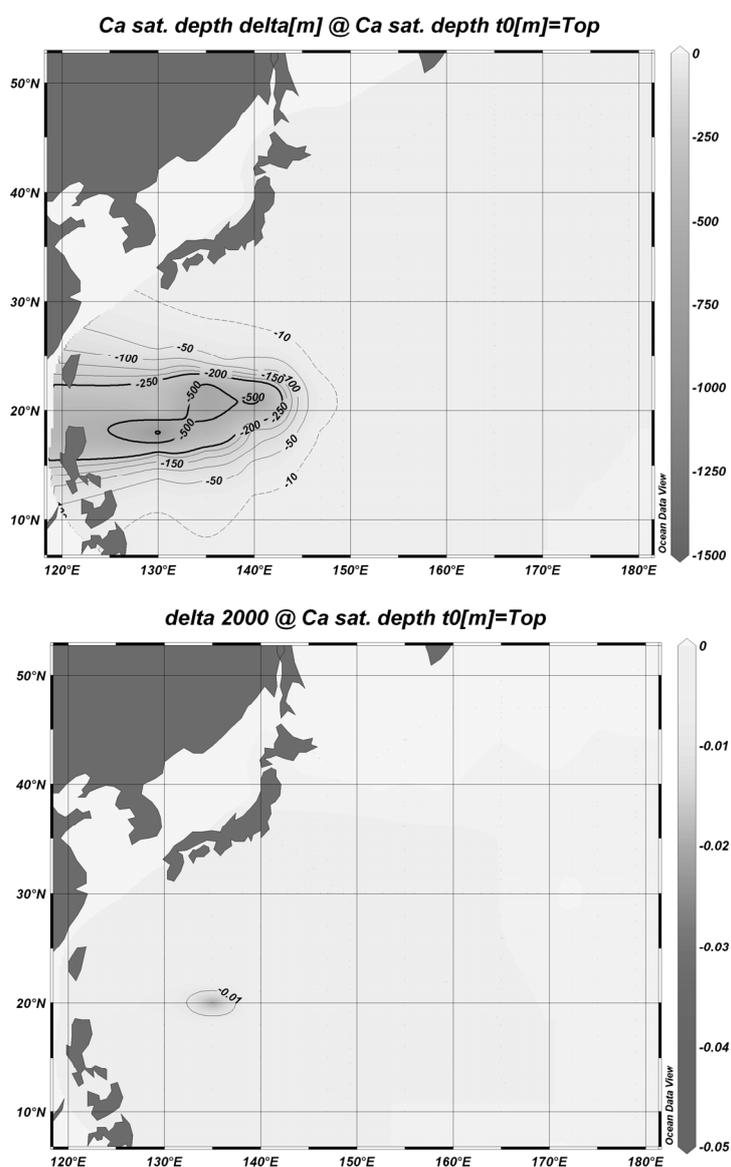


図5. 3次元予測マップから抽出した、CO₂注入から30年目の炭酸カルシウムの飽和深度(m)(上)および沈降粒子フラックス(mg/m²/day)(下)の初期値との差分。

図5は、一例として炭酸カルシウムの飽和深度および水深2,000m層における沈降フラックスの注入開始後30年目時点における初期値との差分を、水平分布図として示したものである。ここに示した以外の項目や時間についても、任意の水深あるいは鉛直断面について容易にマッピング可能である。検出された炭酸カルシウムのフラックスの減少量(初期値との差分)は約0.01mg/m²/day

で、隔離実施前のフラックスに対して0.05%以下と非常に小さかった。またその範囲もCO₂の投入海域のごく近傍の狭い海域に限定されており、CO₂隔離による顕著な影響は認められなかった。実際にどのような規模で隔離事業が展開されるのかについてはまだ不明の点が多いものの、今回用いたケーススタディは発生源におけるCO₂の回収から輸送船・放流船の運航まで工学的な検証の下で提案されたものである。事業として現実性が高いシナリオであると同時に、沈降粒子の溶解促進に伴う海洋物質循環過程への影響が少ないという観点からも高く評価できる。

(2)海洋細菌群集の代謝活性に及ぼす高CO₂濃度・低pHの影響

海洋の表層では一次生産者である植物プランクトンを始めとする種々の生物群集による活発な生産(CO₂の取り込み)と有機物分解(CO₂の放出)が行われている。一方、海洋隔離の実施が想定される水深 1,000~3,000m の中深層ではプランクトン類の生物量は表層と比較して非常に少なく、細菌群集が生物量(バイオマス)の大部分を占める⁹⁾。これらの細菌群集は表層から運ばれてくる有機物(沈降粒子および溶存有機物)の分解、同化、無機化あるいは栄養塩類の再生を通して、海洋の物質循環過程に深く関わっている¹⁰⁾。本研究では、海洋中深層の海水中の主要な炭素リザーバーのひとつである有機物について、栄養塩としても重要な有機態リン化合物の外洋域における鉛直分布と化学形に関する観測データを収集している。西部北太平洋中の日本近海から外洋域の広範な海域のデータを解析したところ、~5,000 m までの溶存有機態リンおよび粒子状有機態リン濃度の鉛直分布が明らかとなり、有機炭素に比べて有機態リン濃度が極めて低く、中深層ではほとんど枯渇していることが分かった¹¹⁾。従って、CO₂の海洋隔離はリン(有機態リン)の循環に伴う影響を及ぼさないと判断された。そこで、細菌群集に対する影響評価においても炭素を中心とした視点からの検討を実施した。

本研究では、細菌群集の代謝活性の指標となる全菌数および細菌生産速度について、各種濃度のCO₂、pH環境下における変化を調べた。実験には黒潮沖(30°N, 138°E)、水深2,000mで採取した海水を用いた。この海水に2,000、5,000、10,000ppmのCO₂ガス(空気ベース)を吹き込んで酸性化し、暗所、4°Cの条件で培養して、全菌数と細菌生産速度の経時変化を観察した。海水のpHは原海水で7.6、CO₂により酸性化処理した試料でそれぞれ7.4、7.1、6.8であった。また、CO₂の高濃度化とpHの低下による影響を識別するために、緩衝液を用いてCO₂濃度を大きく変化させずpHのみを変化させる実験をあわせて実施した。海水にトリス・マレイン酸緩衝液を加えることによって、pHを5.7から7.9に調整して、同様に全菌数と細菌生産速度を測定した。図6に培養実験14日目におけるpHに対する全菌数と細菌生産速度の値を示した。

CO₂吹込みによる実験では、酸性化(高CO₂濃度化)による抑制効果は顕著ではなかったが、これは実験に使用した中深層の海水中においてもともと全菌数、細菌生産速度ともに値が低いことも一因であると考えられる。一方、緩衝液によりpHを変化させた実験系においては、弱アルカリ領域で全菌数、細菌生産速度の著しい増加が見られ、酸性側で顕著な低下が観察された。緩衝液にはトリスおよびマレイン酸という、化学構造が単純で細菌にとって非常に利用しやすい有機物が高濃度で含まれていることから、細菌群集はこれらの有機物を利用しておそらく最適pH条件である弱アルカリ領域で著しい増殖活性を示したものと推測される。さらに酸性化に伴う活性の低下は、潜在的にはこれらの細菌群集の増殖や代謝活性が低pH条件によって抑制されることを示唆するものである。しかし、緩衝液の実験で影響が顕著であったpH7以下の領域は実際の海洋隔離に

においてもCO₂投入サイト近傍のごく限られた水塊に限定されると考えられ、実際の事業においてここで観察されたような顕著な影響が直ちに現れるとは考え難い。また上述したように、代謝に必要な有用有機物が高濃度で存在した場合に初めて影響が発現しうることから、緩衝液の実験結果をもって直ちに隔離の影響が顕著であるとは言えず、むしろCO₂吹込み実験の結果から、投入現場至近の海域においても影響の度合いは小さいと考えることが妥当であろう。しかしながら、全般的に細菌活性の低い中深層であっても、例えば有機物に富む沈降粒子に付着した高い活性を持つ細菌群集などは、むしろ緩衝液実験の結果を反映する可能性もあり、有機物の沈降フラックスへの影響という観点での検証の必要性を強く示唆する結果である。

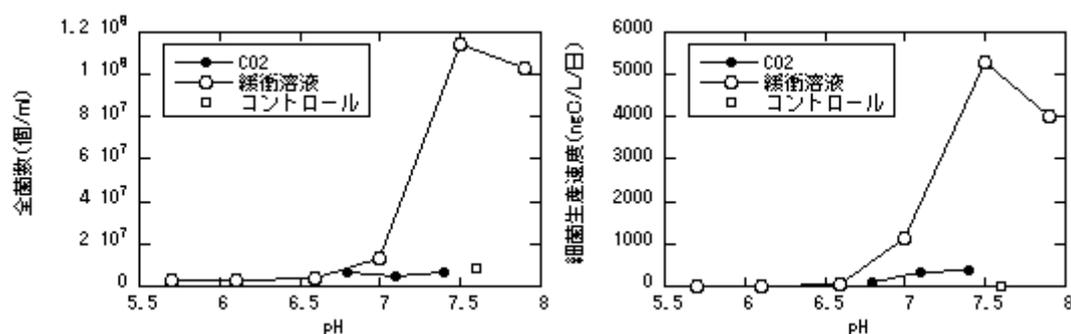


図6. CO₂吹き込みおよび緩衝液添加により酸性化した海水中(培養14日目)の全菌数(左)と細菌生産速度(右)

海洋に生息する細菌群集は、その全てが一様に高い活性を持つわけではない。顕微鏡下での観察では同様の個体として認識されるものの、実際には休眠状態のような極めて代謝活性の低い状態にあるものが多数存在していることが指摘されている¹¹⁾。高い活性を維持しているものを「生菌」と定義することができるが、これらを細菌群集の中から特異的に検出、定量化するためには前処理が必要となる。本研究では、海水試料に細胞分裂阻害剤(ナリジクス酸)を添加することによって、生菌を特異的に検出する手法¹²⁾を適用している。阻害剤の添加により、生菌は分裂が阻害されるものの、活性が維持されているため有機物を取り込み、その細胞は伸張もしくは肥大するのに対し、活性の無いあるいは極端に低い細菌は生長が抑制される。図7は蛍光顕微鏡観察により生菌を捉えた顕微鏡写真であり、背景に点のように移っている他の細菌に対して著しく伸張、肥大化していることが分かる。



図7. 培養実験における細菌群集の蛍光顕微鏡写真. 丸で示したものが伸張もしくは肥大した生菌、背景の輝点はその他の細菌.

CO₂の吹き込みおよび緩衝液の添加によって処理した海水を10日間培養した際の全菌数に占める生菌数の割合を図8に示した。結果は上述の全菌数、細菌生産速度の結果と同様であり、CO₂

の吹き込み実験では影響が小さかったものの、緩衝液による実験では中性付近における生菌数割合の増加と酸性化に伴う顕著な減少が認められた。

生菌数を指標にした実験結果そのものは、昨年度までの研究でも得られていた全菌数や細菌生産速度の結果を踏襲するものであるが、今後の検討項目を考える上で、いくつかの有益な情報を提供するものである。まず、生菌数の測定には細菌生産速度の測定では必要な放射性同位体を必要とせず、船上や室内実験において特殊な研究施設や厳しい実験条件の制約を要しないことである。このことは、今後の科学的研究はもちろん、事業化レベルの環境影響評価やモニタリングの実施において極めて有益である。次に、現場の細菌群集の寄与による各種反応や物質代謝は全細菌群集の中でも実際には活性の高いこれら生菌によって駆動されていると考えられることから、生菌群集の種組成やその役割、分布を明らかにすることによって、海洋隔離の影響をより詳細に抽出することが可能になると期待される。近年、海洋中深層には古細菌を始めとする従来知られていなかった特殊な機能を持つ細菌群集の存在が報告されており¹³⁾、さらにそれらの一部は海水中の重炭酸を同化する能力を持つことが指摘されている。本研究で検出された生菌群集と、これらの未知の微生物群集との関係を明らかにすることは、海洋隔離の影響評価ばかりでなく、海洋微生物学や物質循環研究における重要な新知見を提供するものと期待される。

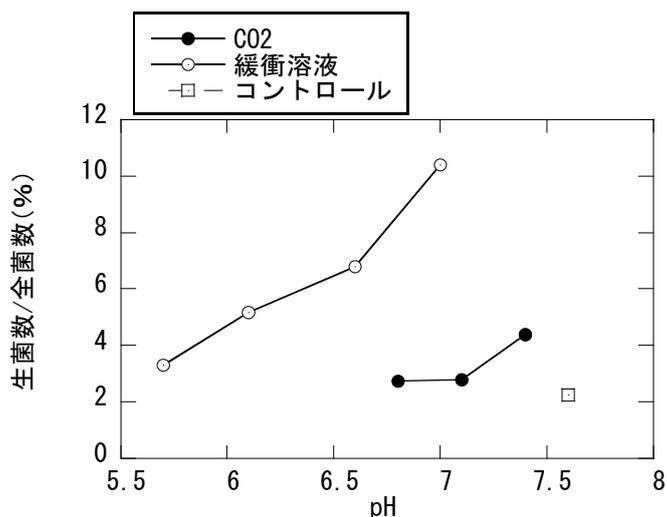


図8. 全菌数に占める生菌数の割合.

5.本研究により得られた成果

中深層における物質循環過程の中でも特にCO₂の海洋隔離の影響が顕著と推測される炭酸カルシウム沈降粒子の溶解に関して、定量的な予測や評価に必要な各種パラメータの取得が達成された。これまでに蓄積、整備した沈降粒子のフラックスデータ、海洋化学成分データベースおよび詳細なCO₂隔離のシミュレーションモデルを統合することにより、極めて具体的な隔離シナリオに基づいた炭酸カルシウム溶解促進効果の3次元時系列マッピングの構築を達成できた。実際の事業計画ごとに物理(流動・拡散)シミュレーションや追加的的化学データ(海水の化学組成等)の収集が必要になるが、ここで得られたパラメータは様々なケースに対して容易に適用可能なものである。CO₂海洋隔離の国際的コンセンサスに向けた貢献という本研究の主目的に関しては、科学的知見の積み上げとこのような定量的・視覚的な影響評価の結果の提示により、海洋隔離のリスクと便

益を分かりやすく提示・公開していくことで達成されていく。

細菌群集の代謝活性への影響を調べた室内実験からは、CO₂隔離の顕著な影響が直ちには発現しない可能性を示すことができたが、沈降粒子に付着する細菌群集の代謝など、物質循環により密接に関わる要素については更なる研究の必要性も示されている。そのため、有機物や栄養塩類などの物質循環過程への影響については、明確な定量的影響の度合いを提示するにはいたっていない。比較的単純な化学反応系である炭酸カルシウム粒子の溶解過程に対し、複雑な要因の絡み合う微生物反応に関しては、中深層の条件をどのように反映した実験系が最も適切であるのかについても検討の余地がある。さらに、海水中の化学成分(炭酸系を含む)や沈降粒子のフラックスデータに比較し、微生物群集の分布や活性に関する利用可能なデータベースは現状では極めて限られている。今後は、これまでの成果、例えば生菌という新しい指標を利用しながら、より適切な評価手法の開発を進めるとともに、実証的な予測のために必要となる現場データの蓄積に向けての提言を行っていくことが重要である。

本研究プロジェクトの進行中においても、2005年IPCCのCCS特別報告書¹⁴⁾の発行、2006年IPCCインベントリーガイドライン¹⁵⁾、2007年IPCC第4次報告書¹⁶⁾の取り纏めなど通じて、地球温暖化問題に対する国際的、社会的な認識は大きな転換を迎えた。また、COP、COP/MOPにおいてもCCSをCDMの一環に位置付けるための道筋が立てられつつあり、海洋隔離を含むCCSの実証的な研究促進は急務となってきている。一方で、ロンドン条約1996年議定書、OSPAR条約等において海底下地層貯留の事業化が認められる中、海洋中深層隔離については具体的な進展に乏しく、さらなる科学的知見の集積とそのパブリックアクセプタンスが不可欠となってきている。このように、CO₂隔離の実施に向けた国際的動向は依然として不透明な部分が残されていることは否めない。しかし、具体的なシナリオの下、注入したCO₂流の拡散状況の物理モデルによる予測、上昇したCO₂濃度や低pH化による生物群集への急性および慢性影響の把握、そして本研究で進められてきたような長期的な物質循環過程への影響をより具体化し、系統化された影響予測の結果やその手法を広く公開していくことが重要である。その上で、これらの成果が国際的な枠組や研究者コミュニティの中で精査されていくことによって、今後の温暖化予測・対策の構築の中で海洋隔離に対するコンセンサスが得られていくように、実績のある我が国の研究者コミュニティが努力することが肝要である。具体的には、これまでの成果を礎として大規模な現場実験も視野に入れた中長期的な環境影響評価研究を目指し、適切な実験研究計画の立案(サイト選定、モニタリング、評価項目の抽出等)に貢献することが挙げられる。さらに上述したように、ロンドン条約1996年議定書の改定等により、CO₂の海底下地層貯留は実証から実施段階へと移行しつつあるが、これまで中深層隔離に対する研究において蓄積してきた本研究の成果は、海底からのCO₂の潜在的漏洩に対する影響予測に積極的に導入されていくであろう。その中で、モニタリングや評価手法としての信頼性を一層高め、さらにその延長として海洋中深層隔離の客観的、科学的評価の土壌が醸成されていくと期待される場所である。

6. 引用文献

- 1) Kita, J. and T. Ohsumi (2004): Perspective on biological research for CO₂ ocean sequestration. *J. Oceanogr.*, 60, 695-703.
- 2) Tsurushima, N, M. Suzumura, N. Yamada and K. Harada (2008): Dissolution rate of calcium

- carbonate in high pCO₂ seawater under high pressure, Proc. OCEANS '08 MTS/IEEE KOBE-TECHNO-OCEAN '08, 印刷中.
- 3) Yamada, N., M. Suzumura, N. Tsurushima and K. Harada (2008): Impact on bacterial activities of ocean sequestration of carbon dioxide into bathypelagic layers, Proc. OCEANS '08 MTS/IEEE KOBE-TECHNO-OCEAN '08, 印刷中.
 - 4) 増田 良帆, 山中 康裕, 笹井 義一, 藤井 賢彦 (2008): 海洋大循環モデルによる年間5000万トン注入ケースのシミュレーション, 海洋理工学会誌, 印刷中.
 - 5) Masuda, Y., Y. Yamanaka, Y. Sasai, M. Magi and T. Ohsumi (2008): A numerical study with an eddy-resolving model to evaluate chronic impacts in CO₂ ocean sequestration, Int. J. Greenhouse Gas Control. 2, 89-94
 - 6) Morse, J.W. and F.T. Mackenzie (1990): Geochemistry of Sedimentary Carbonates, Elsevier, Amsterdam.
 - 7) Morse, J.W. and R.S. Arvidson (2002): The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals, Earth-Sci. Rev., 58, 51-84.
 - 8) 尾崎 雅彦 (2007): CO₂回収貯留と海洋への隔離技術, 月刊海洋, 39, 361-366.
 - 9) Yamaguchi, A., Y. Watanabe, H. Ishida, T. Harimoto, K. Furusawa, S. Suzuki, J. Ishizaka, T. Ikeda and M.M. Takahashi (2004): Latitudinal differences in the planktonic biomass and community structure down to the greater depths in the Western North Pacific, J. Oceanogr., 60, 773-787.
 - 10) Boyd, P.W. and T.W. Trull (2007): Understanding the export of biogenic particles in oceanic waters: Is there consensus?, Prog. Oceanogr., 72, 276-312.
 - 11) Suzumura, M. and E.D. Ingall (2004): Distribution and dynamics of various forms of phosphorus in seawater: insights from field observations in the Pacific Ocean and a laboratory experiment, Deep-Sea Res. I, 51, 1113-1130.
 - 12) Kogure, K., U. Simidu and N. Taga (1979) A tentative direct microscopic method for counting living marine bacteria, Can. J. Microbiol., 25, 415-420.
 - 13) Herndl, G.J., T. Reinthaler, E. Teira, H. Aken, C. Veth, A. Pernthaler and J. Pernthaler (2005): Contribution of Archaea to total prokaryotic production in the deep Atlantic Ocean, Appl. Environ. Microb., 71, 2303-2309.
 - 14) IPCC (2005): Carbon Dioxide Capture and Storage.
 - 15) IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
 - 16) IPCC (2007): Climate Change 2007 Synthesis Report.

[研究成果の発表状況]

(1)誌上発表(学術誌)

- ① Suzumura, M. and Ingall, E.D.: Deep-Sea Research I, 51, 1113-1130 (2004)
“Distribution and dynamics of various forms of phosphorus in seawater: insights from field observations in the Pacific Ocean and a laboratory experiment”
- ② Suzumura, M.: Talanta, 66 (2), 422-434 (2005)
“Phospholipids in marine environments: a review”.

(2)口頭発表

- ① 柴本陽子、原田晃：2004年度日本海洋学会秋季大会(2004)
「北太平洋における間隙水中の栄養塩類」
- ② Ogawa, H., Fukuda, H., Imai, K., Saotome, N., Kubo, A., Suzumura, M., and Koike, I.: Aquatic Sciences Meeting(2005)
“Latitudinal variation of dissolved organic matter in surface waters of the western North Pacific”
- ③ 鈴木昌弘、原田晃、鶴島修夫：シンポジウム - 海洋生物地球化学と生態系研究の統合研究に向けて - (2005)
「二酸化炭素の海洋中層隔離に関する環境影響評価と海洋学的展望」
- ④ 柴本陽子、原田晃：2005年度日本地球化学会年会 (2005)
「間隙水から見積もられた外洋域のSi fluxについて」
- ⑤ 原田晃、柴本陽子：2005年度日本海洋学会秋季大会 (2005)
「西部北太平洋における堆積物中の ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb の分布の特徴」
- ⑥ 山田奈海葉、原田 晃、鈴木 昌弘、鶴島 修夫：SOLAS/IMBER合同ワークショップ (2006)
「 CO_2 隔海洋隔離に関する有機物代謝過程の影響評価(KH06-2研究計画)」
- ⑦ 鶴島 修夫、原田 晃、鈴木 昌弘、山田奈海：SOLAS/IMBER合同ワークショップ (2006)
「 CO_2 の海洋中深層への隔離に関する環境影響評価について」
- ⑧ 原田晃、鶴島修夫、鈴木昌弘、福原達雄、後藤浩一、佐藤智郎、中村哲也：2006 Western Pacific Geophysics Meeting(2006)
“Dissolution Rate Change of CaCO_3 for Increasing CO_2 in Seawater”
- ⑨ 鈴木昌弘、鶴島修夫、山田奈海葉、原田晃：2006年日本海洋学会周期大会シンポジウム (2006)
「二酸化炭素海洋隔離は深層での物質循環にどのように影響するか？」
- ⑩ 山田奈海葉、鈴木昌弘、鶴島修夫、原田晃：2007年度日本海洋学会春季大会(2007)
「二酸化炭素の海洋隔離技術に対する細菌群集への影響評価」
- ⑪ 鈴木昌弘、鶴島修夫、山田奈海葉、原田晃：2007年度日本海洋学会春季大会(2007)
「二酸化炭素の海洋隔離による炭酸カルシウム沈降粒子の溶解促進作用の検証」
- ⑫ 鈴木昌弘、山田奈海葉、鶴島修夫：平成19年度 産総研 環境・エネルギーシンポジウム シリーズ1 持続可能な社会構築のための環境技術イノベーション(2007)
「二酸化炭素の海洋隔離技術における環境影響評価 - 海洋の物質循環過程に対する影響は？」
- ⑬ 山田奈海葉、鈴木昌弘、鶴島修夫、原田晃：2007年度日本海洋学会秋季大会(2007)
「酸性化された中深層海水中において活性を持つ細菌の割合」
- ⑭ 山田奈海葉、鈴木昌弘、鶴島修夫：海洋研シンポジウム、西部北太平洋亜寒帯域・亜熱帯域の特徴と相互作用－中深層における生物・化学相互作用の問題－(2008)
「二酸化炭素の海洋中深層隔離－細菌群集への影響評価」
- ⑮ 山田奈海葉、鈴木昌弘、鶴島修夫、原田晃：2008 Ocean Sciences Meeting (2008)
“Bacterial activity in the laboratory experiments simulating ocean CO_2 sequestration”

- ⑯ 山田奈海葉、北山貴世、鈴木昌弘：2008年度日本海洋学会春季大会(2008)
「細胞外加水分解酵素活性に対する海洋酸性化の影響」
- ⑰ 山田奈海葉、鈴木昌弘、鶴島修夫、原田晃：OCEANS'08 MTS/IEEE KOBE-TECHNO-OCEAN '08 (2008)
“Impact on bacterial activities of ocean sequestration of carbon dioxide into bathypelagic layers”
- ⑱ 鶴島修夫、鈴木昌弘、山田奈海葉、原田晃：OCEANS'08 MTS/IEEE KOBE-TECHNO-OCEAN '08 (2008)
“Dissolution rate of calcium carbonate in high pCO₂ seawater under high pressure”

(3)出願特許

なし

(4)受賞等

なし

(5)一般への公表・報道等

- ① “二酸化炭素海洋隔離 –適切な環境影響評価のあり方について–”、鈴木昌弘、原田晃、月刊海洋、39 (6)、pp. 357-360、2007.6
- ② “海洋中深層の物質循環に対する二酸化炭素海洋隔離の影響”、鈴木昌弘、鶴島修夫、山田奈海葉、原田晃、月刊海洋、39 (6)、pp. 374-382、2007.6
- ③ “Dissolution rate of calcium carbonate in high pCO₂ seawater under high pressure”、鶴島修夫、鈴木昌弘、山田奈海葉、原田晃、Proc. OCEANS '08 MTS/IEEE KOBE-TECHNO-OCEAN '08 (印刷中)
- ④ “Impact on bacterial activities of ocean sequestration of carbon dioxide into bathypelagic layers”、山田奈海葉、鈴木昌弘、鶴島修夫、原田晃、Proc. OCEANS '08 MTS/IEEE KOBE-TECHNO-OCEAN '08 (印刷中)

(6)その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

- 総合科学技術会議における地球温暖化研究イニシャティブシンポジウム「気候変動の現在と将来戦略」において、研究成果報告集に本研究の成果を掲載した(講演要旨集・成果報告集 p. 207-208)。
- 2006年9月25日、2006年日本海洋学会秋季大会(開催地：名古屋)においてシンポジウム「二酸化炭素海洋隔離：適切な環境影響評価のあり方について」を主催した。
- 2007年7月26日、2006 Western Pacific Geophysics Meeting(開催地：北京)Biogeochemical Approaches to Purposeful CO₂ Ocean Storageと題する講演セッションをコンビナートして開催した。

今後さらに2008 Western Pacific Geophysics Meeting(2008年7月、開催地ケアンズ)においてSpecial session 「Purposeful CO₂ Mitigation to Ocean Environment and Biogeochemical Approaches for its Evaluation」を主催するなど 引き続き成果の広報・普及に努める。