

課題名	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		
担当研究機関	独立行政法人産業技術総合研究所		
研究期間	平成15-19年度	合計予算額 (当初予算額 へース)	60,393千円(うち19年度 9,764千円)
研究体制	(1)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)		
研究概要	<p>1.序(研究背景等)</p> <p>大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度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、極めて有効な技術と考えられている。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いるが、幾つかの技術的な課題のほか、CO₂削減の効果算定法、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、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。このことから、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。</p> <p>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CO₂を隔離する技術では、海洋の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、海洋での物質循環過程に重要な役割を果たしている。従って、CO₂の放出によってできる高CO₂、低pH海水による①生物個体や生態系への直接的な影響の評価、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を経て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。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。</p> <p>2.研究目的</p> <p>CO₂の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も懸念される。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。</p>		

3. 研究の内容・成果

(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の注入は、海洋表層から深層に物質を輸送する主要成分の一つである炭酸カルシウム沈降粒子の溶解を促進することが予測される。前年度までに深海(1,000~3,000m)の現場環境を再現する特殊高压装置を用いた擬似現場溶解実験を繰り返し実施し、高CO₂、低pH環境下における炭酸カルシウム粒子の溶解速度の測定データを蓄積してきた。昨年度までは、実験期間の一部のデータを抽出し溶解速度定数を算出する解析法を用いてきたが、本年度は個々の実験の全期間のデータを利用する解析法を工夫することによって、CO₂濃度と溶解速度の関係をより精度良く見積もることが可能となり、その結果

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

の式を得た。ここで、 R は溶解速度(%/日)、 Ω は炭酸カルシウムの飽和度を表し、相関係数は0.93であった。現在のところ、実際の海域にCO₂を放出して行う現場実験の実施は難しい状況にあるため、数値シミュレーションによる予測実験が適切である。昨年度までは、隔離によるCO₂の濃度上昇幅や拡散状況に関する具体的なシナリオが乏しい状況の中で鉛直1次元のシミュレーションを実施してきた。本年度は、関係研究機関が地球シミュレータを用いて開発した極めて詳細なCO₂隔離・拡散シミュレーションモデル(ケーススタディ)の結果を適用し、初年度に取りまとめた沈降粒子フラックスデータベース、当研究機関において開発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)および上述で得られた溶解速度算出式を用いて、3次元シミュレーションを実施した。

日本の南方海域(19-22°N, 133-134°E)の100×333kmの範囲において、水深1,000~2,500mに毎年5,000万トンのCO₂を30年間放出するというシナリオにおける西部北太平洋海域でのCO₂濃度分布予測に基づき、炭酸カルシウムの飽和度、溶解速度、沈降フラックス等に関して詳細な3次元予測マップ(時系列で表示可能)を作成した。一例として、図1に3次元予測マップより抽出した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の分布を示した。この図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水平・鉛直断面について容易にマッピングが可能である。

水深2,000mにおいて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今後の課題であるが、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。

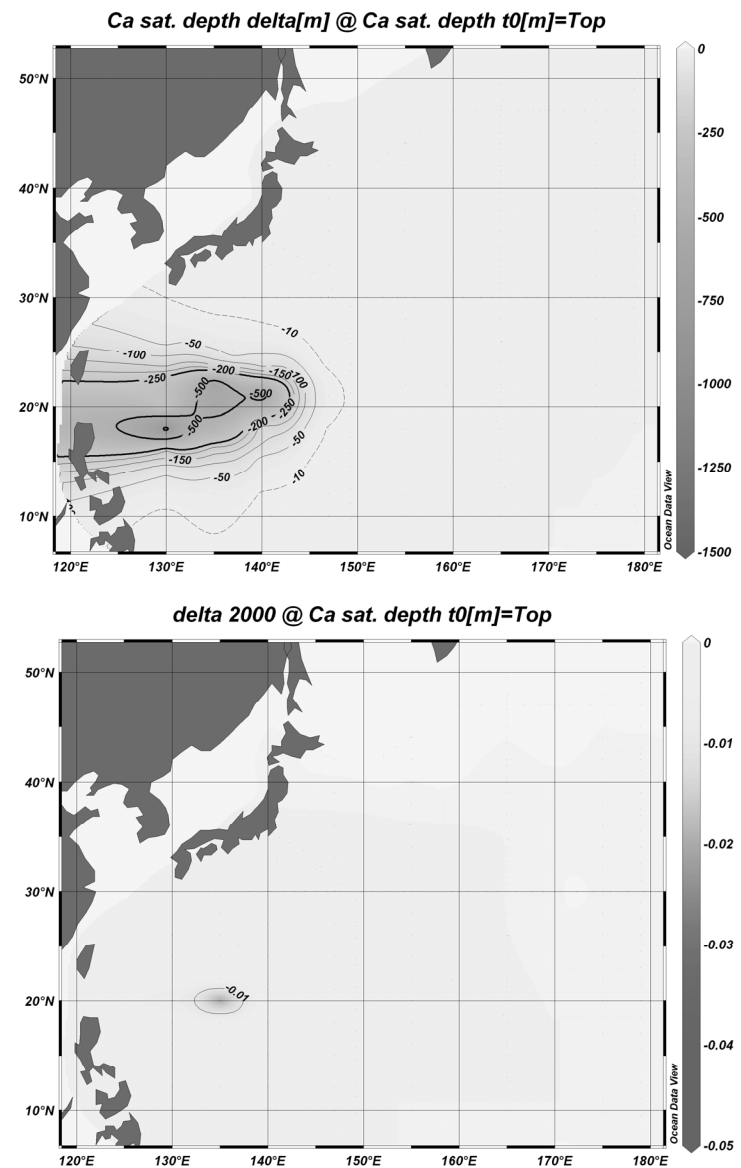


図1. 3次元予測マップから抽出した、CO₂注入から30年目の炭酸カルシウムの飽和深度(m)(上)および沈降粒子フラックス(mg/m²/day)(下)の初期値との差分。

(2)海洋細菌群集の代謝・活性に及ぼす高CO₂・低pHの影響

細菌は海洋隔離の実施が想定される水深1,000～3,000mの海洋中深層におけるバイオマス(生物量)の大部分を占める重要な生物群集であり、表層で生産され中深層に運ばれてくる有機物の分解、同化、無機化を通して海洋の物質循環過程に深く関わっている。昨年度までの研究では、試料海水にCO₂を注入し実験室で培養を行うことにより細菌群集の代謝、活性に対する影響を調査してきた。本年度はさらにCO₂濃度増加とpH低下による影響を判別するために緩衝溶液の添加によりpHを調整(酸性化)した実験系を設定し、全菌数と細菌生産速度を測定した。

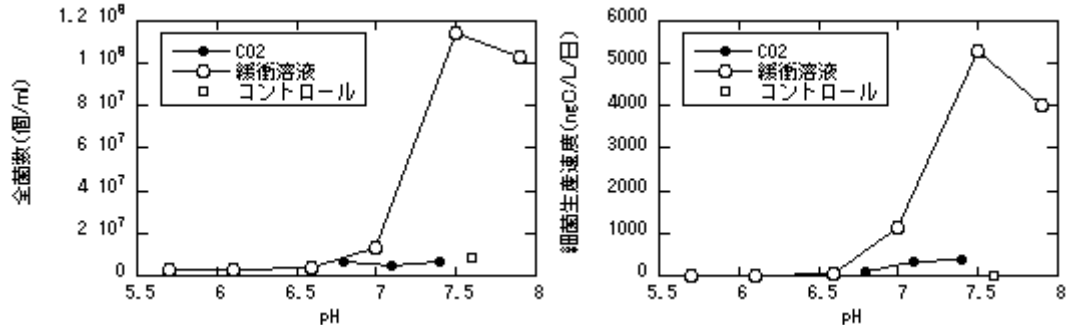


図2. CO₂吹き込みおよび緩衝溶液添加により酸性化した海水中(培養14日目)の全菌数(左)と細菌生産速度(右)

培養14日目の結果を図2に示したが、CO₂の注入では細菌群集の活性に顕著な変化は見られなかった。緩衝溶液による酸性化実験では弱アルカリの領域で全菌数と細菌生産速度の著しい増加が見られ、酸性化に伴い顕著な減少が認められた。即ち、もともと生物量も活性も低い中深層の細菌群集に対しては、CO₂の注入に伴う酸性化が見かけ上は顕著な影響を及ぼさないことを示唆している。一方、緩衝溶液を添加した実験系では、緩衝液中に細菌にとってエネルギー源となる有機物が多量に含まれていたため、弱アルカリ領域ではこれらの有機物により細菌の活性が増強されるとともに、酸性化の影響も顕著に顕在化したと推測される。中深層の大部分は、細菌にとって利用可能な有機物が乏しい環境にあるため、本実験で示されたようにCO₂の影響は直ちには現れない可能性が高い。しかし中深層においても、例えば懸濁粒子や沈降粒子のように有機物が高濃度で濃縮されたホットスポットとも呼ばれる微小環境が存在しており、その表面には細菌群集が付着し活発な代謝を行っている。本研究の緩衝溶液を用いた実験は、結果的にこれら高活性の付着細菌群集への影響を検出した可能性が考えられる。付着細菌群集は沈降有機物粒子の分解、可溶化において重要な役割を果たすことから、CO₂隔離による潜在的影響の一つとして今後も検討を進めることが重要である。

全菌数と細菌生産速度を指標に用いたこれらの実験を通して、中深層から採取した海水中において、そこに存在する細菌群集全体ではなく一部の種が特に高い活性を示し、酸性化による影響もこの一部の種の活性変化によって生じている可能性を見出してきた。そこで、海水に細胞分裂阻害剤を添加することにより、これら高活性の細菌(「生菌」と定義)を識別、定量する手法を適用した。



図3. 緩衝溶液添加海水中の生菌の蛍光顕微鏡写真。丸で囲んだ伸張・肥大した細胞が生菌、背景の輝点はその他の細菌。

全菌数に占める生菌数の割合を指標として、CO₂吹き込みおよび緩衝溶液添加による酸性化の影響を調べたところ、上述した全菌数や細菌生産速度と同様の結果が得られ、これらの生菌が中深層におけるCO₂隔離の影響指標となりうることを示唆された。これら生菌は、細菌群集の中で少数派ではあるが、中深層の物質循環過程の主役として極めて重要な役割を果たしていると考えられる。

4. 考察

これまでもCO₂の海洋隔離に伴う海水の高CO₂濃度化、低pH化による特定の生物種に対する急性影響や生理活性変化に関する研究が実施され、重要なデータが蓄積されているところである。本研究

では、隔離の舞台となる海洋中深層での重要な物質循環過程に着目し、特に沈降粒子の溶解促進効果について検討してきた。深海における実験の物理的な困難さや、国際条約等における海域での CO₂ 放流実験に対する厳しい制約もあり、現場での実験が難しい状況であったが、擬似現場実験法により炭酸カルシウム沈降粒子の溶解速度算出パラメータを取得することができた。これと並行して収集・蓄積してきた現場海域のデータ(沈降フラックス、海水化学成分)と組み合わせることによって、隔離事業のシナリオ(隔離海域や規模等)に応じた解析、影響評価が可能となった。ここで示した隔離シナリオに関しては、炭酸カルシウム沈降フラックスに対する顕著な直接的影響は認められなかったが、長期間にわたる高 CO₂ 海水の滞留が、深海への炭素供給において間接的、長期的な影響を及ぼす可能性については今後も検討が必要である。また、今回の隔離シナリオで想定した低緯度海域の中深層は、炭酸カルシウムの飽和度が元来高く(過飽和の状態)、CO₂ 隔離による飽和度の低下も溶解を顕著に促進させるには至らなかったとも考えられる。しかし、例えば高緯度海域では炭酸カルシウムの飽和度が低く、またフラックスの絶対値も大きいことから、CO₂ 隔離に対してより鋭敏に反応し、顕著な溶解促進が引き起こされる可能性が否定できない。従って、適切な評価のためには個別の事業(海域や規模)ごとに詳細な隔離・拡散シミュレーションを実施した上で、本研究で示した手法を適用することが求められる。

細菌群集への影響について本研究で提案した生菌数という新しい指標は、細菌生産速度の測定のように現場での使用が制限される放射性同位体を用いることなく利用可能なことから、実際の CO₂ 隔離の影響評価やモニタリングにおいて有用な手法の一つとして期待される。また、これらの生菌を構成する細菌の種組成や特性、代謝等を明らかにすることは、隔離による細菌群集への影響が物質循環過程にどのように現れるのかを解明する上で重要である。本研究を通じて、CO₂ 隔離に伴う低 pH 海水の生成が、バクテリアやあるいは酵素の活性に作用し、有機物分解過程あるいは栄養塩再生過程に潜在的な影響を及ぼす可能性が示唆された。しかし、上述の炭酸カルシウムの溶解促進効果で示した 3-D シミュレーションのような定量的、視覚的な影響評価を提示するためには、その元となる現場海域の生化学データの蓄積が不十分である。現在、海洋観測の重要性が認識され、複数の大型観測プロジェクトも進行中であるが、物質循環において極めて重要な微生物群集や生化学反応過程についても積極的にデータが収集していくことが重要な課題として挙げられる。

近年、大気 CO₂ 濃度の増加に起因する海洋表層の酸性化が深刻な問題として認識されてきている。EU の OSPAR 条約を始めとして、この表層酸性化問題と CO₂ 隔離技術を短絡的に関連させることにより、科学的検証が不十分なまま、海洋隔離による潜在的な影響を過剰に問題視する動きも見られる。一方で、温暖化ガスの排出削減の重要性、緊急性についての認識も IPCC AR4 の発行や G8 サミットなどの議論の場において着実に高まってきており、膨大なポテンシャルを持つ海洋の CCS 技術は削減対策オプションとして依然重要である。このような状況において、海洋隔離の実施に向けて国際的コンセンサスを得るためには、リスクと便益について冷静な判断がなされるように、隔離によって生じる環境影響について科学的な知見を十分に提示することが必要であり、特にパブリックアウトリーチの一環としては影響の度合いの定量化、可視化が不可欠である。従って、まずは本研究のように擬似現場実験や数値シミュレーション等によってデータを蓄積し、予測される影響の度合いを定量的に提示していくとともに、さらにより進んだ段階においては、現場での大規模実験による検証作業も必要となってくる。そこでは条約等の国際的枠組の中でコンセンサスを得た上、なおかつ実験そのものが著しい環境影響を引き起こすことのない適切な規模やサイト選定が求められるが、CO₂ 隔離に対する従来研究(物理モデル、生物への影響評価)と本研究(物質循環過程への影響評価)は、幅広い時空間スケール(注入現場水塊、海域スケール、大洋スケール)での影響に関する知見を提供し、適切な検証と議論を進める環境を醸成していく上で欠かせないものである。