

CO₂ 海洋隔離技術の開発*

村井重夫**

1. はじめに

地球温暖化ガスとしてのCO₂は大気中濃度低減が求められている。本稿では、CO₂を海洋の中深層へ溶解希釈する海洋隔離技術を紹介する。この隔離技術は図1に示すように、省エネルギーやクリーンエネルギーの拡大などの努力をしても、なお大気へ排出せざるをえないCO₂を火力発電所や製鉄所等で分離回収して海洋へ隔離貯留する技術である。海洋はCO₂を吸収して貯留する自然界の能力を有しており、海洋隔離技術はその能力を促進する技術ともいえる。海水中においてCO₂は大半がHCO₃⁻イ

オンとして溶解するが、長期的には大洋の大循環や海水中の拡散によって、海洋の表面を介して大気と平衡関係にある。したがって、何時かは大気中へ戻る分と大気中から吸収する分が平衡関係になるため、大気中で使用した化石燃料等のCO₂増加分は大気中濃度の増加をきたす(図2参照)[1]。現状の大気中CO₂増加を放置すると、海洋の吸収速度が大気中のCO₂増加速度より遅いため、大気中CO₂濃度は急激に増加すると推定されている。海洋隔離するとその濃度を低く抑えることができ、かつ、最終的に達する平衡濃度への増加時期を遅ら

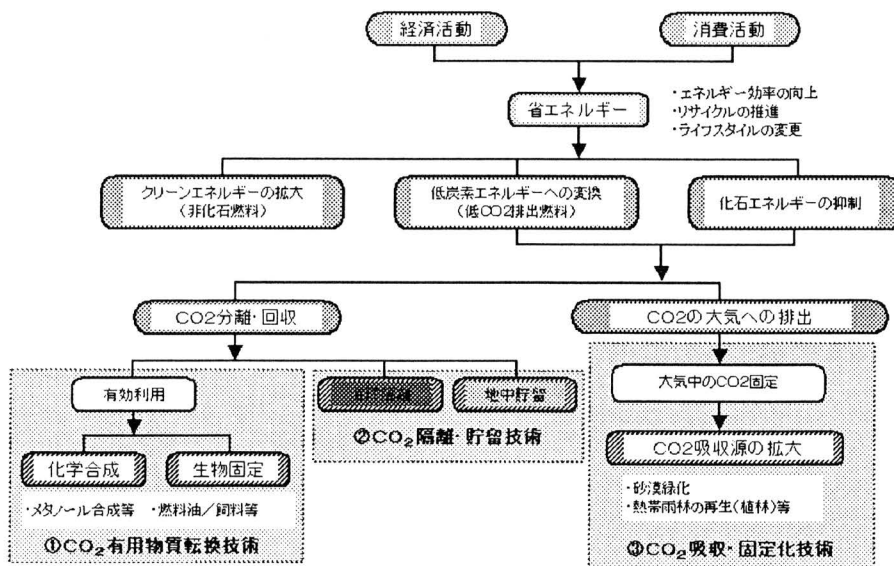
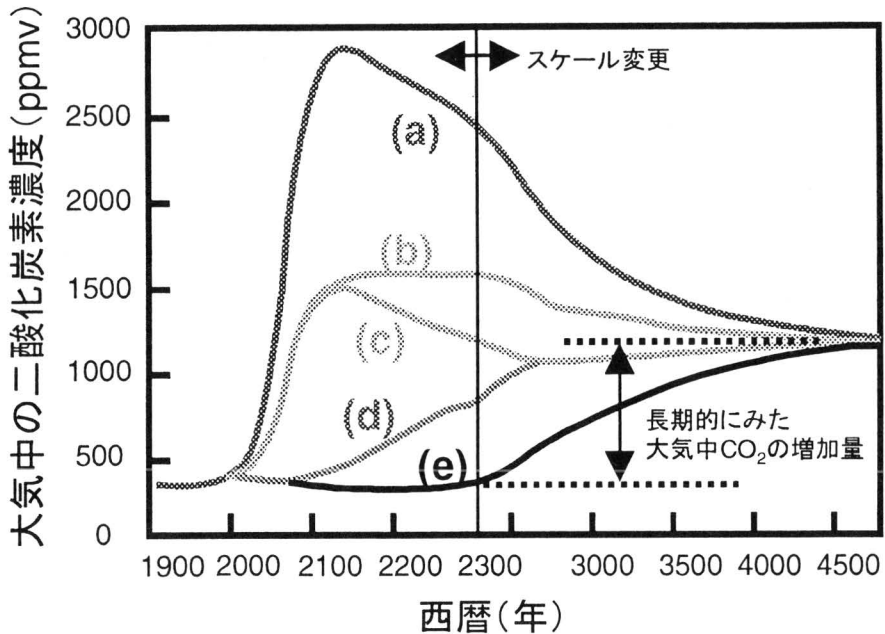


図1 海洋隔離技術の各種CO₂削減対策技術に占める位置付け

* 第22回石橋雅義先生記念講演会〔2002年4月27日〕講演 ** (財)地球環境産業技術研究機構 (RITE) CO₂海洋隔離プロジェクト 〒619-0292 京都府相楽郡木津町木津川台9-2



(a)全量大気放出, (b)50%を深度1500 mに注入, (c)50%を海底(4000 m)に注入
(d)100%を深度1500 mに注入, (e)100%を海底(4000 m)に注入

図2 化石燃料由来CO₂の海洋注入に伴う大気中濃度の予測

[Hoffert, M.I. et al., *Climatic Change*, **2**, 53, (1977)]

- ・海洋隔離を実施しなければ、大気中のCO₂濃度は急増します。 ⇒ (a)
- ・海洋隔離により、大気中CO₂濃度の急増を緩和できます。 ⇒ (b)~(e)
- ・いずれの場合でも、長期的には大気中CO₂濃度は一定に落ち着きます。

せることができる。この効果によって、地球温暖化の被害を抑えることができるし、与えられる時間で革新的に有用な温暖化防止技術の開発へ繋ぐことができる。海洋隔離技術以外にCO₂貯留技術として期待されている地中貯留技術や、砂漠緑化や森林再生なども数百年以上のスパンで考えると同様な効果を期待していることになる。

2. CO₂海洋隔離の方法

CO₂を大気から海洋へ隔離する方法としては、図3に示すように回収したCO₂ガスをパイプラインで沿岸部の海水へ溶解希釈する方法と、本報告で紹介する航走船舶で移動しながら海洋の中深層へ液体CO₂を溶

解希釈する方法(Moving Ship方式)と、深海底へ液体CO₂の状態での貯留する方法とがある。

Moving Ship方式は液体CO₂を船舶からパイプで1,000~2,500 mの中深層へ送り込み、5~10 mmの液滴にして海水中へ放出すると、その水深とその水温では比重が軽い液滴が浮上してゆく。その過程でCO₂が海水へHCO₃⁻イオンとして溶解希釈される原理を利用している。液滴が海水中を500~1,000 m上昇してゆく間に徐々に溶解するため、海水の急激なpH低下がおこらないほか、船が航走することによって広い海域へ溶解希釈されるため、この点でも、pHの低下が抑えられる[2]。

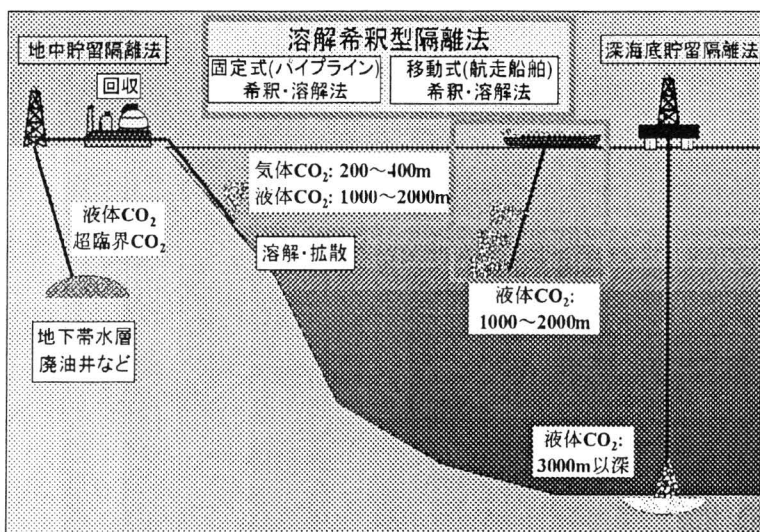


図3 各種海洋隔離技術と地中貯留技術の概念

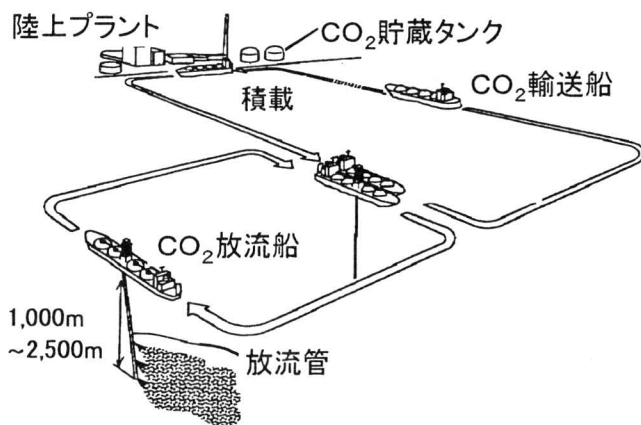
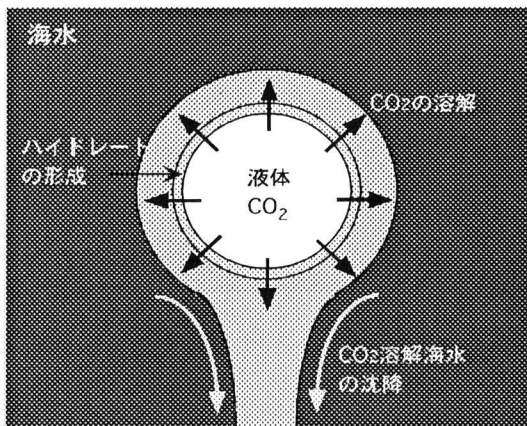


図4 Moving Ship方式による溶解希釈型海洋隔離のイメージ

3. 液体CO₂の特性と溶解の原理

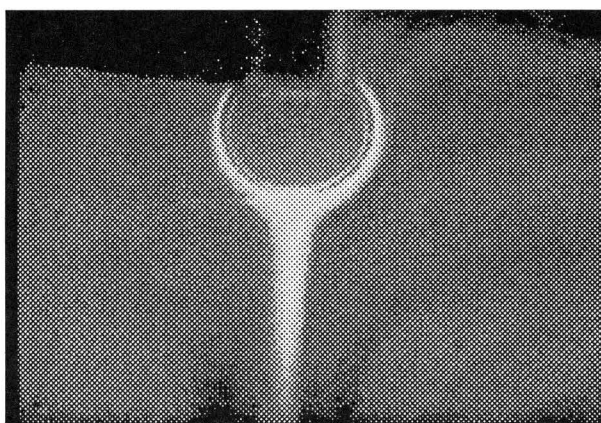
海洋の中深層へ放出された液体CO₂の液滴は、水圧が約100~200気圧、水温が0~10℃ではその表面に固体のハイドレート膜を形成する。液体CO₂はこのハイドレート膜を通して徐々に海水中へ溶解する。CO₂が溶解した海水は比重が重くなり沈降する。一方、ハイドレート膜を形成した液体CO₂の液滴は周辺の海水より比重が軽いため上昇する。計算によると、液滴が5~8mmの場合、約100m上昇する間に液滴は海水中

へ溶けてしまう。したがって、水深1,000m以上深いところへ放出すれば、液滴は水深500m以上の海洋生物が多い浅い表面層へは上がって来ず、生物への影響は抑えられる。このような液滴の特性は種々の物性測定データの元にしたシミュレーションの計算結果や、高圧水槽中でのCO₂液滴挙動の観察実験結果によって確認されている[3, 4]。図5はその模式図と、高圧水槽中の液滴周辺をレーザーを用いて観測した結果である。液滴の極周辺はpHが約4まで低下し



CO₂液滴の溶解模式図

- ・液滴は浮上
- ・溶解した周辺は沈降

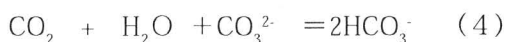


レーザーを用いたCO₂液滴の可視化写真

- ・液滴周辺の薄色部分
pH = 3.8~4.2
- ・周辺部分
pH = 5.4~6.0

図5 溶解希釈型海洋隔離における液体CO₂の溶解過程

ていることが分かる。なお、放出する水深が3,000 m以上の深さになると、液体CO₂は比重が海水より重くなり、海底へ向けて沈降し海底へ貯留される。これは、深海底貯留法として研究されている。



3. 海洋中深層への希釈モデル

中深層へ放出されたCO₂は次式(1)~(3)の平衡関係に左右されるので、溶解して(4)式の反応によって80%以上がHCO₃⁻イオンになり、海水のpHを若干低下させる。



この反応と液体CO₂の放出量、放出速度、液滴サイズ、放出船の速度等をもとに海水中のpH分布を流体力学のモデルを用いてシミュレーションした計算結果が図6である[5]。X軸は船の方向と逆の方向へ海水の流れを想定している。Y軸は水深2,000 mの放出点から鉛直方向海面へ向かっての距

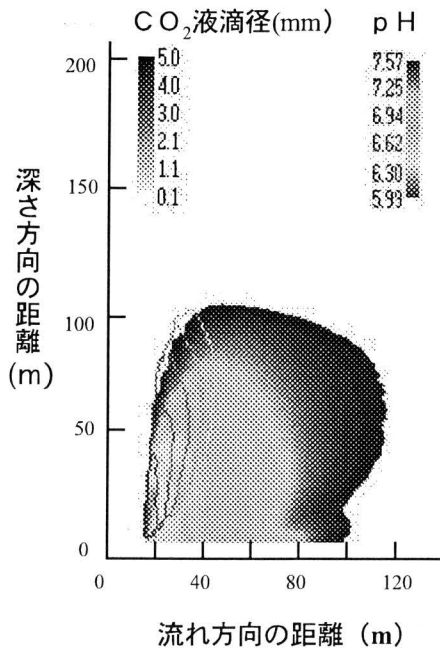


図6 放出された液滴のサイズ分布とCO₂が溶解した海水のpH分布

離を示している。放出された5mmの液滴は等高線図で示されたように約100m上昇する間に0.1mmまで小さくなる。また、海水のpHは放出点近傍では約6.0と低くなっているが、高さで100mの場所では約7.5まで回復している。X軸方向でも100m離れた場所では約7.5まで回復している。この計算は放出ノズルを1個のみ想定したものであり、CO₂供給船は放出パイプの後方に図6の分布を引きずって走行することになる。なお、この場合ノズルの幅は小さいので、pH分布の幅はせいぜい数mである。すなわち、カーテン状のpH分布を形成する。したがって、放出後、時間とともに周辺海域へ更に希釈してゆく。今、100km四方の海域で水深1,000~2,000mの水塊へ年間1,000万tのCO₂を溶解希釈したとすると、そのCO₂が均一希釈されたときの最終的な

濃度増加分は約1ppmである。中深層のCO₂濃度は通常2,000~2,500ppmであり、1ppmの増加は許容できる可能性が高い。

4. 生物への影響

海洋中深層への溶解希釈型海洋隔離は周辺海域へのpH低下を低く抑える方法ではあるが、CO₂の環境への影響を調べCO₂の希釈率や希釈方法を改善する必要がある。CO₂の生物への影響を調べた結果の1つを図7に示す。中層プランクトンを採取し、そのまま船上でCO₂曝露試験をおこなった結果である。中層プランクトンの死亡率は、CO₂の分圧が2,900 μ atmあると、明らかに通常の530 μ atmの場合と比較し大きくなっている。2,900 μ atmは、数%のCO₂濃度であり、本報告の溶解希釈方法ではCO₂放出ノズルの極近傍のみで予測され、放出海域全体では予想されない濃度である[6]。このほか、ヒラメを用いた実験では血液へのCO₂の影響を調べたり、ウニの発生段階でのCO₂の影響を調べたりしている。いずれも高濃度のCO₂では何らかの影響が見られる[7]。CO₂が低濃度の場合の生物への影響については、ウニについてのCO₂曝露試験の結果が報告されている[8]。この結果では約200ppmのCO₂増加でウニの成長率に差異が見出されている。このことは、溶解希釈によるCO₂の濃度の増加分を約200ppm以下に抑えることが重要であることを意味しており、中深層溶解希釈法は前節で述べたように最終的にはCO₂は計算上1ppmの増加にとどまるので、生物への影響は低く抑えられる可能性が高い。なお、200ppmのCO₂濃度の増加で生物影響が見出されたことは、CO₂の隔離や貯留を行わないと大気中のCO₂増加によって海洋の全表面で近々何らかの生物影響が出て来ることを意味している。

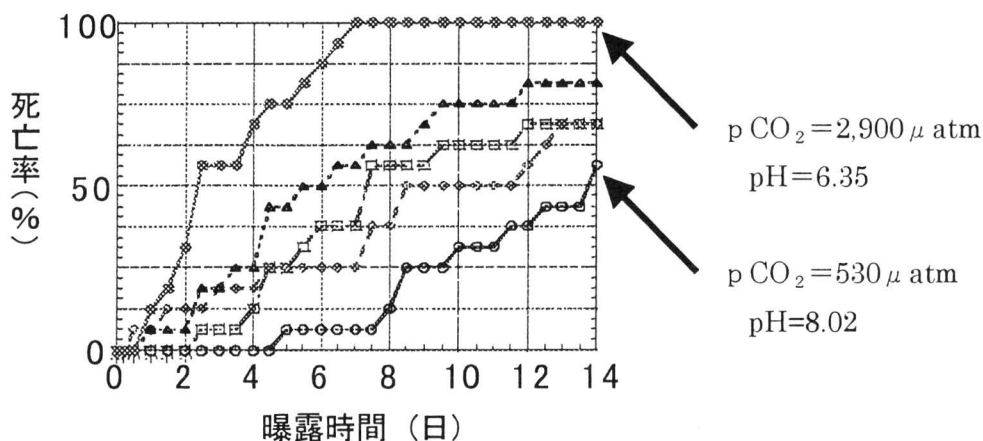


図7. 中層プランクトンの船上CO₂曝露実験の結果

5. 海洋隔離サイトの必要条件

CO₂海洋隔離の水域としては100 km四方を想定しているが、その水塊の条件としては、1,000 ~ 2,500 m の水深、0 ~ 10℃ の水温であること以外に、隔離したCO₂が海洋表面へできるだけ上がってこないことがある。北部大西洋で沈降し北部太平洋で湧昇する大洋大循環の流れが知られているが、その周期は約2,000年といわれており海洋隔離の貯留時間を大局的に制限することになる。北西部太平洋についていえば、その中深層を調査した結果によると、1,000~2,000 m の水深では潮汐流は観測されるが、大きな上昇流は観察されていない[9]。図8は、日本近海における全炭酸の分布を調査した結果であり、1,000~3,000 m の深さに約2,300 ~ 2,400 μmol/kg の高濃度層が観測されている。この全炭酸の分布から見る限り、表面層へ上昇する高濃度層は見られないので、CO₂を海洋隔離するサイトとしての条件を備えている。海洋隔離サイトとしては、物理的な条件以外に生物学的にも考慮が必要である。通常、1,000 ~ 2,000 m の

中深層の生物現存量は少なく、CO₂の濃度が低い場合は影響が少ないと推定される。化学的には、CO₂の海洋隔離は海洋の自然現象である前記(4)式の化学平衡をHCO₃⁻イオン増加の方向へ若干促進することになる。したがって、これらのことも含めて海洋隔離のサイト選定を行う必要がある。なお、生態系の変化や生物多様性なども含めた環境影響評価や、海洋の炭素循環への影響評価などは今後の検討課題である。

6. 海洋隔離技術の位置付け

わが国においては海洋隔離が地理的に有利なため、今後、大いにこの技術の開発を進めるとともに、この技術への社会的認知を高める必要がある。地球温暖化対策として緊急避難的にこの技術を使わなければならないことを想定して、この技術の準備をしておく必要がある。図9はCO₂の排出量削減をどのような技術で達成するかをシミュレーションした結果であり、各技術の削減量または貯留量を示したものである[10]。この計算の前提条件によれば、海洋

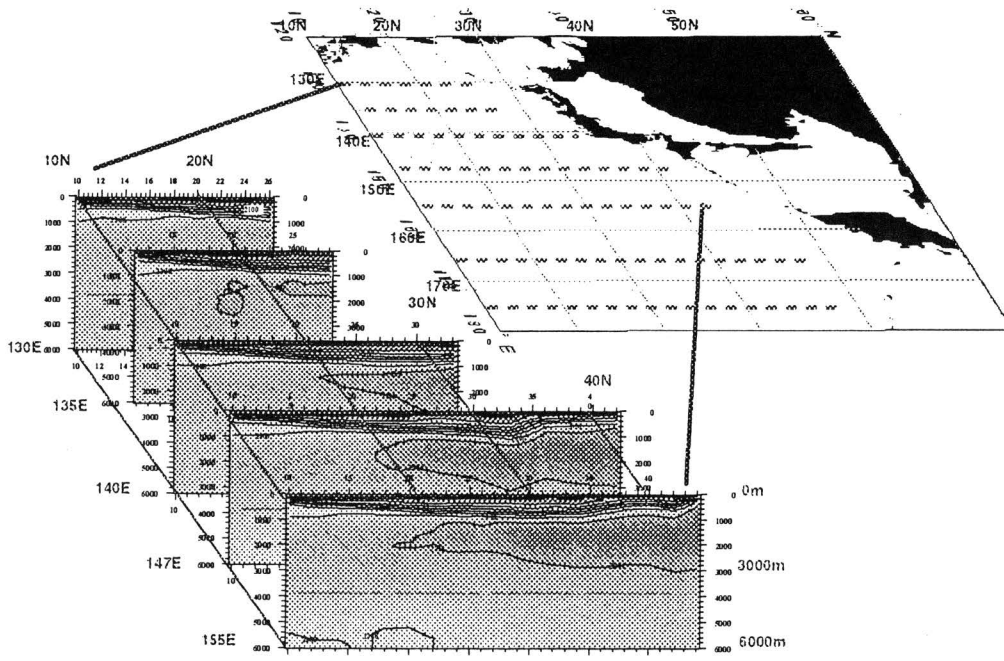
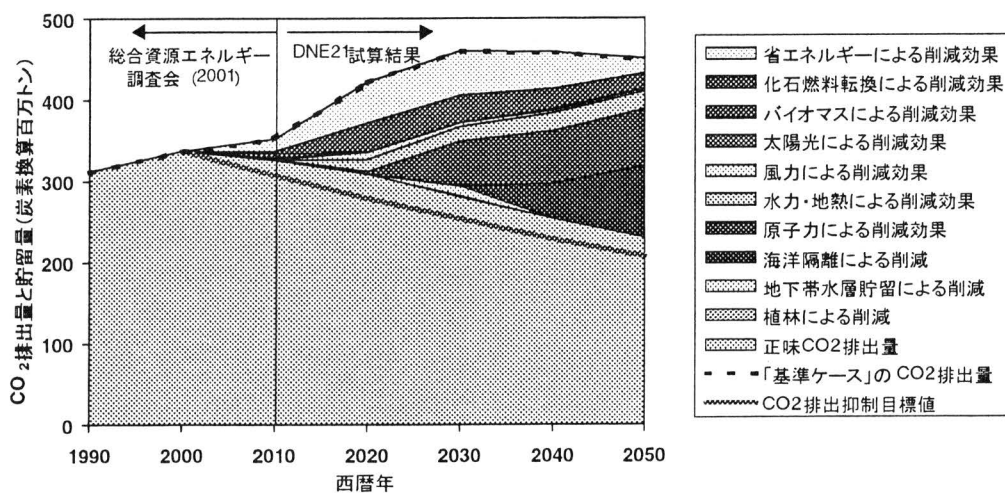


図8 日本近海における全炭酸（溶存態無機炭酸）の分布



- 京都議定書 附属書 I 国（先進国）について2010年削減目標（日本：1990年比 -6% 等）を実現。
- それ以降、年率1%で更に削減。
- CO2排出許可証購入は正味CO2排出量の10%まで。

図9 CO₂削減計画対策効果の試算例

隔離は2,030年頃には本格的にCO₂削減に寄与することが求められる。

7. おわりに

本報告では、海洋の中深層へ溶解希釈する海洋隔離技術をその方法、原理、生物影響、隔離サイト、その必要時期について紹介した。本研究は主に、新エネルギー／産業技術開発機構（NEDO）からの委託を受けて地球環境産業技術研究機構（RITE）と関西総合環境センター（KANSO）が実施した「CO₂海洋隔離に伴う環境影響予測技術研究開発」の成果である〔RITEのホームページ参照：<http://www.rite.or.jp>〕。

参考文献

- [1] M. I. Hoffert, Y. C. Wey, *Climatic Change*, **2**, 53, (1979)
- [2] M. Ozaki, J. Minamiura, Y. Kitajima, S. Mizokami, K. Takeuchi, K. Hatakenaka, *J. Mar. Sci. Technol*, **6**, 51, (2001)
- [3] Y. Song, B. Chen, M. Nishio, S. Someya, T. Uchida, M. Akai, Proc. of the 5th Int. Symp. on C&E 2002, p. 54, (2002) Tokyo
- [4] S. Someya, B. Chen, H. Akiyama, M. Nishio, K. Okamoto, *J. Flow Visual. Image Process.*, **6**, 243, (1999)
- [5] B. Chen, M. Nishio, Y. Song, M. Akai, Proc. of the 5th Int. Symp. on C&E 2002, p. 42, (2002) Tokyo
- [6] 渡辺雄二, 石田 洋, 山口 篤, 石坂丞二, *海洋*, **33**, 813 (2001)
- [7] 石松 惇, 林 正裕, 喜田 潤, *海洋*, **33**, 802 (2001)
- [8] Y. Shirayama, Proc. of the 5th Int. Symp. on C&E 2002, p. 177, (2002) Tokyo
- [9] 平成11年度成果報告書（NEDO委託）"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（海洋調査及びCO₂隔離能力評価技術の開発）", 関西総合環境センター, 平成12年3月
- [10] 友田利正, 秋元圭吾, *RITE NOW*, **42**, 10, (2001)