

地球環境問題と海洋に関する

研究レビュー

—— リモートセンシングおよびCO₂対策技術 ——

Review of the studies on global environment and ocean

Recent target of remote sensing and present status of studies on CO₂ in the ocean

海洋開発委員会

鹿島 遼一*

Ryoichi Kajima

ABSTRACT; The Ocean Development Committee of JSCE established the Ocean Environment Research Subcommittee with a view to have it play a role as an antenna of the committee in global environment problems.

The subcommittee has been making efforts to grasp the present status of researches concerning the ocean and global environment, and to survey their information sources. As the information on the subjects should be renewed steadily, it is something like an ever-lasting job. In addition we have a mind to contribute anyhow toward developing environment enhancement technology in coastal and ocean waters. In this report, two topics are introduced: one is the remote sensing technology in the ocean, and the other is the discussions at international workshops on the relationship of CO₂ and ocean, where, as an option of activities to cope with global warming, problems relating to acceleration of storage of CO₂ in the deep ocean environment were discussed.

KEY WORDS; global environment, global warming, ocean, remote sensing, carbon dioxide.

1. はじめに

海洋は地球環境の様々の過程に直接影響するが、その定量的な把握はまだ十分ではないと認識されている。海洋開発委員会では、海洋環境研究小委員会を設置し、地球環境と海洋の関わりに関する情報源について調査するとともに、海洋環境の研究現況の把握に努めている。同時に、持続可能な海域利用の観点から、沿岸海域を主な対象とする、海域環境の保全、修復、および良好な環境の創出に関する具体的な技術開発、ならびにより広い海洋を対象とする管理の考え方について研究討議の輪を拡げる活動を目指している。ここでは、海洋の衛星リモートセンシングで何が測られようとしているか、また温暖化の主要原因物質である二酸化炭素の海洋との関わり、および海洋への貯留というオプションについて何が議論されているかを紹介する。

2. リモートセンシングの現況

2.1 人工衛星による海洋観測

人工衛星による海洋のリモートセンシングは、現在進行している地球環境問題を知る上で重要な計測技術であり、地球規模での観測を継続的に実現できる唯一の方法である。リモートセンシングの特徴として 1)

* 電力中央研究所 我孫子研究所

Abiko Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

広域観測、2)同時観測、3)定周期観測が挙げられる。特に観測が困難で多額の経費を要する海洋観測では期待は大きい。初期においては、衛星による観測は気象観測が主目的であったが、平行して海面温度、海面状態、海流、湧昇流等の地球規模での海洋観測にも利用され、更に多重スペクトルカメラ、走査放射計、マイクロ波放射計、散乱計、高度計による海洋観測も試みられ、海面粗度、海上風、海水分布、海上の雲域や雨域等に加え、有義波高等の調査にも有用であることが確認された。特に合成開口レーダーでは、波の方向まで求められるに到った。

2.2 海洋リモートセンシングに適した波長帯

衛星から海洋の現象を観測する場合、その途中にある大気層や電離層などを透過する電磁波を用いなければならない。海洋リモートセンシングに適した波長帯は、可視光、近赤外、赤外、マイクロ波と分類される。もし大気中に雲や雨がなければ、可視、近赤外および赤外は、海洋リモートセンシングに極めてふさわし

い波長帯だと考えられる。しかし実際は、雲に覆われ観測不能な場合も多い。これに対してマイクロ波帯は雲があっても観測にはほとんど障害がない。ただし雨が降っていると、多少の影響が出てくる。合成開口レーダーは可視および赤外に比べて、高い解像度の画像をもたらしてくれる。

(A) 可視光・赤外

紫外線、赤外線や電磁波は海水を通過できないが、可視光は海面下数十mまで通るので、表層付近の情報を得るために用いている。現在、可視域情報を画像解析することにより、植物プランクトン分布の把握が試みられている。赤外域情報は表面水温分布の把握手法として実用化され、黒潮の蛇行や冷水塊の把握に用いられ、特に最近では漁業情報サービスセンター等からファックス回線を通じて我が国周辺海域における最も新しい水温情報を得ることができる。

(B) マイクロ波

リモートセンシングに使用されているマイクロ波は現在1GHz から2～3GHz。下限は電離層を透過し且つ人為的な電波との干渉を避けるという条件で決まり、上限は受信機の性能で決まるものである。上限は、最近の著しいエレクトロニクス技術の進歩に伴い今後さらに高い周波数帯まで伸びるものと考えられる。

マイクロ波放射計は、観測対象を考えるとサウンダーとイメージャーの二種類に分けることができる。前者は大気(温度及び水蒸気量)の垂直分布を測定するものであり、後者は大気を含めた地球表面から放射されるマイクロ波を観測するセンサである。マイクロ波高度計は、距離トラッキングレーダの一種であり、プラットフォームから海面までの距離すなわち高度を電波伝播時間を利用して計測する装置である。これより、海面波高を50cmの精度で計測する。合成開口レーダーは、マイクロ波(Lバンド～Xバンド)を使用し、昼夜の別なく雲の有無によらず、光学センサーをしのぐ高分解能が得られる能動型の電波センサーであり、海面の情報や凹凸・傾斜を高解像度、高コントラストで観測できる。今後さらに利用は広がると予測されている。海上の風向風速をモニターするセンサーとして、マイクロ波散乱計がある。これは、風に強い相関を示すさざ波の波長と同程度のマイクロ波を用いて、海面からの反射電力を高い精度で計測するレーダーであり、データを推計的に処理することにより、海上風の風向風速を得るものである。

2.3 リモートセンシングから得られる物理量と観測機器

リモートセンシングは地球環境問題を組織的にモニターする有力な一手段であり、人工衛星リモートセンシングにより地球環境の種々の分野にわたる多くの物理量を観測することができる。表-1に研究分野毎の重要な物理量、観測機器および対応する環境問題を示す。表中には既に機能を停止して、現存しない機器も含まれている。海洋リモートセンシングの応用が現在本格化しようとしているが、得られる情報は表層付近のものに限られている。もちろん、表層付近だけの情報と言っても、従来には考えられなかった優れた質を

表1 研究分野毎の重要な基礎物理量・リモートセンシング観測機器及び対応する環境問題

分類	重要な基礎物理量	観測機器	対応する環境問題
大気圏化学	対流圏微量気体の鉛直分布 成層圏オゾン等微量気体の鉛直分布 水蒸気・微量気体の鉛直分布 エアロゾル、巻雲の分布 CO2 等温室効果気体の鉛直分布	ファブリ・ペロー分光計 ミリ波放射分光計 ファブリ・ペロー分光計 グレーティング・スペクトロメータ（紫外） グレーティング・スペクトロメータ（赤外） レーザレーダ グレーティング・スペクトロメータ（赤外） マイケルソン・フーリエ赤外分光計	オゾン層の破壊 地球の温暖化
大気・海洋 大循環	降雨の3次元観測 海面水温、水蒸気鉛直分布 海面水温 水蒸気鉛直分布 海上風ベクトル 海面高度 海上風ベクトル、波浪スペクトル 大気風ベクトル	降雨レーダ マイクロ波放射計 可視熱赤外放射計（高スペクトル分解能） レーザレーダ 散乱計 レーダ高度計 合成開口レーダ ドップラ・レーザレーダ	気候システムにおける 地球規模の水、エネルギー循環
雪氷圏・ 気候変動	ジオイド、海水分布、氷床等高線図 氷床高度、質量変化 雪水面積、融解域、積雪水量 海水分布、温度分布 積雪水量、海水分布	レーダ高度計 レーザレーダ マイクロ波放射計 可視熱赤外放射計（高スペクトル分解能） 合成開口レーダ	南極、グリーンランド の氷床融解による海面 上昇
海洋生物過程	クロロフィル濃度、DOM 海上風ベクトル	可視熱赤外放射計（高スペクトル分解能） 散乱計	温室効果に関わる炭素 循環、海洋汚染
水文過程	降水量、雲水量 降水量、水蒸気量、積雪量 水蒸気鉛直分布 雲、植生分布、地表面温度 土壌水分量、積雪水量	降雨レーダ マイクロ波放射計 レーザレーダ 可視熱赤外放射計（高スペクトル分解能） 合成開口レーダ	防災、水利用を含む気 候変動予測モデルの確 立
植生循環	砂漠化、土壌水分量 クロロフィル、植生分布 植生分布、土壌水分量	可視熱赤外放射計（高スペクトル分解能） 可視熱赤外放射計（高空間分解能） 合成開口レーダ	熱帯林の減少、酸性雨 による森林破壊、砂漠 化、土壌汚染
固体地球	火山噴出ガス分布、温度 炭酸塩岩石分布 地形、地質 測地	可視熱赤外放射計（高スペクトル分解能） 可視熱赤外放射計（高空間分解能） 合成開口レーダ 宇宙レーザ測距	地球規模の長期のCO ₂ 循環、地核変動

※DOM: Dissolved Organic Matter (溶存有機体) 出典: 中西 功 “地球環境に関する基礎物理量のデータベース化とその提供システム” 日本リモートセンシング学会誌、第11巻、第1号(1991)

有する資料である。しかし、海洋をより詳細に理解するには、深層の情報も必要となることは言うまでもない。しかし、深層の情報を衛星から得ることは、一部の場合を除いて現在のところ困難であり、また将来にも大きな期待は持てない。そこで、垂直的な海洋の情報は海上に設置したブイあるいは漂流ブイから直接に求め、これらを衛星に送信して地上局に電送する方法がとられている。

2.4 アルゴスシステム

人工衛星を利用した海洋のデータ収集システムの1つにアルゴスシステムがある。特に本システムは一般の不特定多数の利用者が海洋・大気等の物理・化学的観測や野生生物の行動観測等の環境データ取得のために利用できる唯一の衛星データ収集システムである。基本的なデータ収集は、地球表面上に設置された固定あるいは移動のデータ収集プラットフォーム用送信機から送信されるデータを衛星が受信して再び地上に送り返しデータ処理される。データ処理センターは、フランス宇宙局に隣接するサービスアルゴス社に設置されており、ここで処理されたデータは、各ユーザーに配布される。本システムは、中高度極軌道衛星であるNOAA 2台で全世界をカバーしており、データ伝送のみでなく、送信機電波のドップラーシフトを利用して送信

機の位置測定が可能である。本システムの特徴は衛星の軌道高度が低いため送信機が小出力で済むこと、送信機は、小型、軽量、低コストにできる利点があり、欧米諸国では、広く利用されており、我が国でも利用者が増えつつある。

観測データを取得する方法には、フランスのサービスアルゴス社経由により、国際テレックス回線網、国際データ送信網、磁気データ等で入手する方法、また利用者が受信機を持ち、衛星から直接データを受信する方法がある。受信機でデータを取得する場合は、リアルタイムデータとなるが、その条件として衛星を中心として半径 2,500km以内に送信機と受信機がある場合にのみ可能となる。

3. 海洋におけるCO₂対策技術の現況

CO₂と海洋の関わりに関する国際ワークショップ（1991, 1993 電力中央研究所主催）^{5), 6)}における発表・討議の概要を紹介し、現況の報告とする。

3.1 地球表層の炭素の循環⁴⁾

大気中のCO₂は水と反応して酸になり、これが岩石の風化に消費されて、溶けた物質（カルシウムや重炭酸イオン）は河川から海に運ばれる。海洋では運び込まれた炭素はプランクトンなどによって炭酸カルシウムの殻として海底堆積物になり、これと同数のCO₂が大気へ放出される。海底堆積物の大部分は海洋プレートの潜り込みによって、いずれは大陸地殻の下に移動し、岩石の変成作用によってCO₂を生じる。このCO₂は火山ガスとして、また大気へ帰る。これが1億年オーダーの炭素の循環である。さらに、人為起源外の大気中のCO₂の変動要因として大気・海洋間の交換と陸上植物活動がある。海洋には沈み込んでから1000年オーダーの深層水と2000年で世界の海を回るベルトコンベアー循環がある。海洋中の炭素の循環については、この海洋循環に生物活動が絡む。

陸上植物に比べると海洋生物の量は1/500であるが、有機物の年間生産量は陸上植物のそれに匹敵する。植物プランクトンが光合成で作出す有機炭素（1次生産）の9割が海洋表層で酸化分解され、無機炭酸塩に戻る。残りの有機物は粒子状で沈降し、バクテリアなどの作用で無機炭素などとして深層水に放出される。この大気からCO₂を吸収し、深海へ運ぶサイクルを生物ポンプと称している。この作用により、深海は大気中にある量の2倍の炭素を貯蔵している。深海では、地圏からの直接のCO₂供給以外に地球エネルギー（熱水湧出）による化学合成による有機化合物の生産とその後のCO₂への変換がある。この量は深海環境における有機炭素の量としては無視し得ない量と見積もられている。

CO₂の海洋における反応を図1に示す。

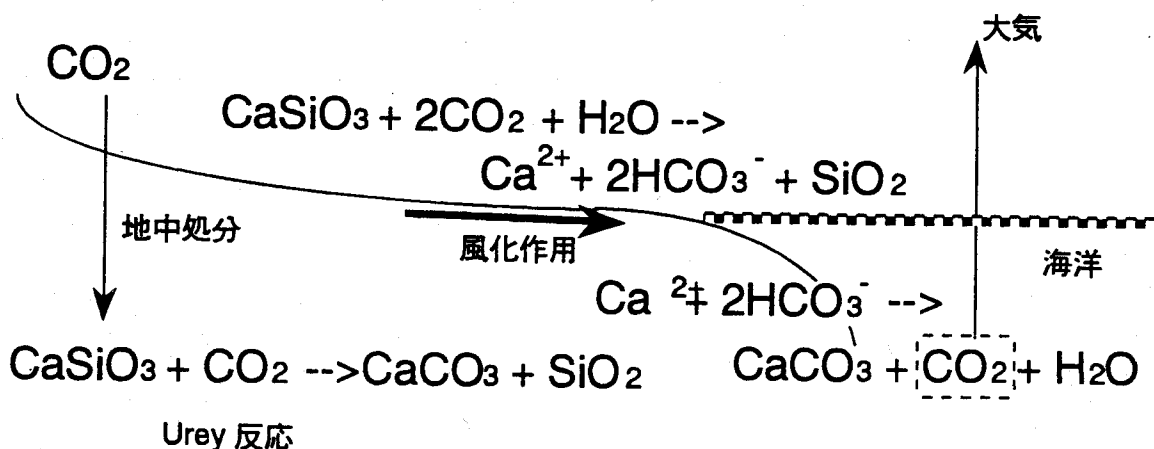


図1 海洋におけるCO₂の反応⁶⁾

3.2 CO₂処分の選択肢

化石燃料の燃焼は、光合成によって有機炭素にCO₂が取り込まれたものを酸化によって直接大気に戻す人為的ポンプである。これに伴う大気中へのCO₂排出量は6ギガトンC／年に近づきつつある。温室効果に対して有効なCO₂回収処分量は、ギガトンCのオーダーである必要がある。地球全体での処分（貯蔵）容量は算定が難しい。表2に、CO₂の保管場所としての潜在的な貯蔵所サイズとしての順位付けを示す。

表2 CO₂の貯蔵容量と処分費用（回収・圧縮を除く）⁶⁾

処理方法	潜在的CO ₂ 貯蔵容量 (GT C)	CO ₂ 処分費用 (\$/TC)
海洋処分	20,000,000	5 1)
陸上処分	大量	45 2)
滞水層注入	87	79 3)
枯渇油井注入	83	14 4)
枯渇ガス井注入	42	14 4)
石油高次回収法	4	0 5)
地球規模での森林管理	50-100	3.5 6)

- 1) 100kmパイプライン+注入水深500m, 600kg/s CO₂
- 2) 固化だけの追加エネルギー
- 3) 60kg/s CO₂
- 4) 陸地のガス田、輸送費用を含む
- 5) 経済的に成立するものとする
- 6) CO₂回収費用を含まず

いずれの選択肢も 貯蔵所として十分な容量を持っているので、どれかが単独で採用されることはまず無いであろう。海洋は他のどれよりも大きな容量を持つ貯蔵所である。貯蔵所としては大気へのCO₂の還流を制御することが必要で、大気からの隔離期間が100年未満では温室効果の軽減に大して役立たない。因みに、日本における人為起源のCO₂生産は年間約60億トンと見積もられ、これは液体CO₂にして10km×10km×60mに相当する。

CO₂処分の費用は80-300 US\$/TCの見積もりがある。処理・処分費用は、CO₂回収費用、液化するための圧縮費用、パイプラインによる深海まで等の輸送費用、最終的な処分費用等からなる。一般には、回収・圧縮・運搬費用に比較して、最終処分費用の占める割合は小さい。石炭火力発電所の煙道でCO₂を回収すると発電費用が50%増になると試算されている。表2には、同じく回収・圧縮をのぞく処分費の試算例を示す。特に海洋処分は経済的であり、対策検討上の欠かせない重要オプションであるといえよう。

3.3 CO₂の深海底への輸送と中層希釈の技術

深海底貯留： 深海底に貯留されたCO₂の溜まりは周囲環境にある程度影響を与えるかも知れない。しかし、その範囲は周囲に限定される。液体CO₂を陸上からパイプラインシステムを用いて深海まで経済的

に輸送できるようなところは、わが国ではほとんどなく、船上からの放出パイプシステムに限定される。

(1) 放流専用船からパイプ放流 放流パイプは荒天時にも収容しなくて済むように設計する。

(2) 半潜水式海上プラットフォームからのパイプ放流 荒天時パイプ収容は可能。上記システムともDPSは必要。航行速度は(1)の1/2。

(3) フローティング・パイプ 深海底に係留されたフローティング・パイプにCO₂タンカーを接続し、放流。

(4) テンションレグ・プラットフォームからのパイプ放流 水深3000mを考えるとかなり高額か。

中層放流： この方法は希釈放流により、局所的に生物へ致命的な影響を与えず、数百年の隔離期間を期待できるものと考えられる。

(1) 放流地点で希釈放流 海上プラットフォームへ輸送し、そこで希釈して放流する。

(2) 放流する直前に希釈 輸送は上記と同様。希釈はパイプで実現(エダクター、デフューザー)。

(3) 海中散布 液体CO₂を海洋中層に液滴として散布しながら移動。

3000m以深の深海底貯留にはフローティング・パイプ方式、1000m程度の中層放流には放流船曳航パイプ方式が工学的には有望である。CO₂対策としては海底パイプライン方式による海洋処分や、生物ポンプを効率化する鉄肥沃化方式も提唱されている。

3.4 実験的取り組み

低温高圧の環境下では海水・CO₂は安定な水和物を形成する。CO₂の高圧下での正確な密度などを含む基本的物性も最近の研究対象である。この水和物は潜水調査船「しんかい6500」により実海域で見いだされている。また、ドライアイスと同じく調査船で深海へ持ち込んで挙動を観察するなどの実験的試みもおこなわれた。また、この系の多相平衡のモデルや水和物形成のシミュレーション手法なども発表された。

3.5 環境問題

深海底貯留では海水のpH低下で有孔虫が深刻な影響をこうむる。深海生物コミュニティは個体数は少ないが、種は多様であり、遺伝子資源を失う可能性がある。種の多様性を保つ点から、処分は限定された海域で面積的な拡がりに対してバリエーションが効くような方法を考慮するべきである。また、CO₂が海底堆積物で中和される可能性もある。CO₂を閉じこめる可能性や逆に早く消散させる方法については、周辺化合物との反応などを考慮する必要がある。実験が重要になる等々の指摘がなされた。また、処分されたCO₂の長期的挙動、影響を明らかにするには地球規模の炭素循環過程の研究成果を反映することが重要である。要は、地球規模的な影響検討、局限された領域での生態系に与える影響の予測等を踏まえて、現在無意識的に行っている大気中処分の地球環境に与える影響とのリスクの比較を行うことが課題である。

参考文献

- 1) 海洋観測衛星委員会“宇宙からの海洋研究は、いまー現状認識と将来展望ー”、日本海洋学会(1988)
- 2) 日本リモートセンシング学会“10周年記念特集リモートセンシングの過去・現在・未来”日本リモートセンシング学会誌、第11巻、第1号(1991)
- 3) 鷲尾幸久“アルゴス(AGROS)システム”、JAMSTEC、第2巻、第2号(1990)
- 4) 野崎義行“地球温暖化と海”、東京大学出版会(1994)
- 5) 電力中央研究所“第1回CO₂と海洋とのかかわりに関する国際ワークショップ(1991) 成果論文集
- 6) 電力中央研究所“第2回CO₂と海洋とのかかわりに関する国際ワークショップ(1993) 成果論文集