二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発： 特にその生物影響予測研究について*

石坂丞二† 大隅多加志†

Biological Impact Studies in the Project “SEA-COSMIC: Study of Environmental Assessment for Carbon Dioxide Ocean Sequestration for Mitigation of Climate Change”

Joji Ishizaka ** and Takashi Ohsumi ††

1. はじめに

二酸化炭素 (CO₂) を始めとする温室効果気体の大気中での濃度上昇が気候変化をもたらす懸念は、現在広く受け入れられるに至っている。1995 年に発効した気候変動枠組み条約は、大気中の温室効果気体の濃度安定化を要請しており、1997 年 12 月京都で開催された第 3 回締約国会議 (COP-3) では、2010 年までの温室効果気体排出削減の数量化された目標が取り決められた。温暖化ガスの大部分を占める CO₂ は、ほとんどが化石燃料起源であり、その放出量を減少させることは容易でない。エネルギー利用の効率化・非化石エネルギー源の導入などの本来的な対策の進展についての、我が国および世界での現実的な見通しを踏まえると、CO₂ 集中発生源からの回収と処分という技術的方策についても、実際に採用される可能性のある技術として真剣な検討が必要となっている。

我が国の電力業界では、1990 年代に入ってから CO₂ 回収を实行するために大規模ボイラーの適用が精力的に取り組まれ、化学的吸収法については吸収液の改良、物理吸着法については吸着材形状の改良の研究が進められている。大型化と排熱回収によって CO₂ 回収のためのエネルギーは、現状での発電出力に対して、LNG 火力発電で 5%、石炭火力発電で 9% 程度まで低減できる見通しが立っている。従って CO₂ の回収処分は、処

分する立地条件があれば技術的には可能な段階に来ている。

回収した CO₂ の処分に関しては、海底下などの地中の帯水層等に注入する方法と、海洋に処分する方法が考慮されている。このうち地中処分に関しては、すでにガスを用いて石油を効率的に掘り出す技術があるために、1996 年 10 月にはノルウェーの国有石油会社 STATOIL 社が北海の天然ガス田で、生産された天然ガス中の CO₂ を分離回収し、帯水層へ注入する事業が開始された。その量は年間 100 万トン (ノルウェーの CO₂ 排出量の 3% 相当) に達しており、商業規模である。これは地球環境保全を明確な目的とする CO₂ 処分の最初の試みであり、今後のエネルギー産業の動向を占うものとして注目される。

一方、海洋への処分に関しては、地中への処分と異なり直接生物圏へ影響を及ぼすことの懸念から、まだ研究段階である。海洋は物理・化学・生物のどの観点でも、未知の部分が多く、CO₂ 海洋処分の海洋環境、特に海洋生態系に与える影響を論ずるには、現状の科学的知見は極めて不十分である (大森, 1997)。通産省では、「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発 (SEA-COSMIC)」プロジェクトを、平成 9 年度から 5 か年計画で新エネルギー産業技術開発機構 (NEDO) に補助金として交付し、これを (財) 地球環境産業技術研究機構 (RITE) と (株) 関西総合環境センターが受注した。ここでは CO₂ の海洋隔離が、環境影響面で実行可能な技術であるかどうかの検討を行うために、環境影響評価技術の研究を行う予定であり、生物への影響はその重要な目的の一つである。ここでは、プロジェクト開始時の 1997 年 8 月に、電力中央研究所で開かれた生物影響予測に関するワークショップで議論された内容を中心に、プロジェクトの中での生物関係の計画に関して述べる。

* 1998 年 6 月 17 日受領; 1999 年 3 月 10 日受理

† 資源環境技術総合研究所; 〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-3

† (財) 電力中央研究所我孫子研究所; 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646, 現住所: 長崎大学水産学部; 〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14

** National Institute for Resources and Environment, 16-3 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan. Present address: Faculty of Fisheries, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo, Nagasaki 852-8521, Japan

†† Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko Research Laboratory, 1646 Abiko, Abiko, Chiba 270-1194, Japan

Fig. 1. CO₂海洋隔離の模式図 (西尾, 私信)

2. CO₂の海洋隔離とその位置づけ

海洋隔離のためのCO₂投入技術としては、いくつかの方法が想定されており、特にその投入の深度をもとに3つに分けることができる (Fig. 1). 表層に投入することは技術的には最も容易であるが、投入後速やかに大気へ放出されてしまうことが想像される。また環境面でも生産性の高い表層に投入することは、その影響も大きいことが考えられる。一方、水深3000mを越す深海で投入すると、液状のCO₂の比重は海水よりも重くなり、海底に蓄積されるため、海底の窪地等に液状のCO₂を貯留する方法も提唱されている。この方法は、狭い窪地などの空間に多量のCO₂を半永久的に蓄積できるとは言え、深海でのCO₂の挙動など不確定な要素が非常に多く技術的には比較的困難であり、また貯留する海域では底生生物の死滅を招く可能性がある。

最後に、1000-3000m程度の中層に放流する技術が考えられる。この深度ではCO₂は浮上するが、投入時に充分小さい液滴にしておけば、溶解・拡散することが考えられる。CO₂の海洋隔離を最初に提案した Marchetti (1977) は、地中海の水が大西洋にでて沈み込むことを利用して、中層に運ぶことも提案している。船舶を走行しながら投入すれば、さらに広範囲に薄い濃

Fig. 2. Hoffert *et al.* (1979) の図をもとに作成した海洋隔離をした場合としない場合に想定される、大気中CO₂濃度の変化の概念図

度で散布し、環境への影響も少なく押さえることが可能であると考えられる (Nakashiki *et al.*, 1995). 「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」では、特にこの最後の海洋中層への希釈放出法での隔離を想定している。

海洋隔離技術は大量発生源で分離されたCO₂を海洋に処分する技術であるが、一般の廃棄物の海洋投棄と大きく二つの点で異なっている。一つは、現状でもCO₂が大気中へ「投棄」されており、それが原因で地球温暖化による気候の変化が危惧されていることである。つまり現在の人類の生活そのものが、すでに地球の環境を変化させつつあり、海洋隔離技術はそれを緩和する手段として考えられている点である。

二点目は、現在は人間の放出速度よりも、CO₂の海洋への溶解速度が遅いため大気中へ蓄積しているが、仮に化石燃料を全て使い果たしてCO₂の放出が止ると、いずれは海洋が大気と平衡状態に達するまで溶解していくことである。現状では放出されているCO₂のうち約半分 (5.5 GtC/年) が大気中に留まっているものの、残りのうちの少なくとも2GtC/年が大気を通じて海洋に吸収されていると考えられており、すでに産業革命以降120 GtCの人為起源の炭素が海洋に溶け込んでいると言われている (Siegenthaler and Sarmiento, 1993). つまり海洋隔離技術は、それを行わなくても大気を通じていずれは海洋に溶解するCO₂を、人為的に海洋に溶解することによって大気をバイパスする手段として考えられている点である。このことから海洋隔離は、大気中のCO₂濃度のピークを除く技術と位置付けられている (Fig. 2, Hoffert *et al.*, 1979)。

これらの二点は、CO₂の海洋隔離を決して正当化するものではないが、CO₂の利用量削減や海洋以外の処分方法がない場

合、CO₂を人為的に海洋に投入し溶解速度を増加させることは、大気への蓄積と温暖化を防止する一つの選択肢となることは間違いない。

3. 海洋隔離の環境影響

国際エネルギー機関(IEA)の温暖化ガス(GHG)研究開発プロジェクトにおいては、海洋隔離技術に関するワークショップを過去4回開いており、その第2回目では生物影響の問題が議論されている(Ormerod and Angel, 1996)。日本からは、大隅(電中研)、白山(東大、現京大)、大森(東水大)の3人が出席している。ここでの議論では、CO₂の海洋隔離に伴う生物影響に関する基本的な指針として、1)絶滅する種があつてはならない(生物多様性の維持)、2)生態学的分断化(例えば鉛直移動や物質輸送への影響)があつてはならない、3)CO₂放出の軽減策を取らないことによる生物資源への影響より環境を悪化してはならない、4)pHやCO₂濃度等、重要な変化を表すスケールを設定することが必要である、の4点が提案されている。

特にこの3番目の点は重要であるため、ここでこのままCO₂の放出を放置した際の海洋への影響を考えてみよう。すでに産業革命以降海洋に溶け込んだCO₂によって、pHは0.1ほど低下していると考えられる。もしも化石燃料を全て消費し、それが海洋と平衡になるとpHは現在の8から7.5に減少することが予想され(Haugan and Drange, 1996)、この変化自体が海洋生態系に影響を及ぼす可能性がある。また地球温暖化が進めば、海表面水温も上昇し、場合によっては海洋の成層化が強まり、栄養塩の供給が弱まる可能性もある(Woods and Barkmann, 1993)。さらに、最近の大気-海洋の結合モデルを利用した研究では、極域での海表面水温の上昇と降雨量の増加によって、深層水形成が停止する可能性も言われており(Manabe and Stouffer, 1994)、これによって海洋のCO₂吸収能力が弱まるほか、停止したことにより海洋生態系へ多大な影響を与えることも考えられる(Broecker, 1997)。

また海面上昇が起こることはよく知られており、珊瑚礁等の沈下なども心配されている他、極域での解氷の減少によって海水周辺の高生産水域がすでに減少していると言う報告もある(de la Mare, 1997)。このように海洋隔離などの対策を行わない状態でも、温暖化による人類や陸上生態系への影響以外に、海洋環境へも多くの変化が起こる可能性があり、海洋隔離の影響評価を行う際には、これらの影響との比較を考慮して行わなければならない。

一方、海洋隔離技術が行われた際の環境影響としては、放出

点近傍でCO₂濃度が上昇し、海水のpHの低下を招き、そこに生息する海洋生物に少なからず影響を与えることが容易に予想される。従ってCO₂の海洋隔離実施の是非を議論するにあたり、放出点近傍での生物に対する影響をできるだけ正確に予測する必要がある。現在までにCO₂やpHの変化に対する海洋生物の影響の研究として、飼育が比較的容易な種を選び、その個体や個体群にCO₂を添加したり、pHを変化させる実験が行われている。その結果、pH6を下回るとほとんどの生物が死滅すると考えられている。Auerbach *et al.* (1997)とCaulfield *et al.* (1997)はこれまでのこういった研究をまとめ、高CO₂濃度水(低pH水)への接触時間とpH値で、生物の死滅する割合を決め、放流地点周辺の影響範囲をモデル化している。しかし、これまでの実験の多くはCO₂の麻酔効果や酸性雨の影響等を調べるために行われた研究であり、特にCO₂を海洋に投入したときの影響の為の研究はほとんど行われていないのが実状である。

4. 「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」での生物関係の研究

上記のような現状を受けて、通産省では「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」を開始した。そこでは低温高圧下でのCO₂の挙動、局所的な影響が少ないようにCO₂を希釈して中層に放出する技術の開発、日本周辺で中層に放流した時に高CO₂の水塊がどう移動していくか等の他に、生物への影響の研究が行われている。生物関係の研究として、1)単一種実験、2)魚類実験、3)メソコスム実験、4)ベンチスケッチ開発、5)海洋生物調査、の5つの観点から進めている。以下にそれぞれの意義と方針を述べる。

4.1. 単一種実験

単一種に対するCO₂の暴露実験は、CO₂の生物への影響を調べる最も基本的な実験である。これまでいくつかの生物で、pH低下等の影響の実験的研究が行われている。しかし、これらの研究に用いられたデータは、CO₂以外の物質でpHを下げるなど、必ずしも実験条件がCO₂海洋隔離の影響を評価するために適切ではない。また実験室内で飼育可能な浅海の生物を用い、比較的短時間の実験により生物の生死を判別したものがほとんどである。海洋隔離でCO₂を放出する中深層に生息する生物は、環境の攪乱に非常に敏感だと思われるが、それらに関する研究例は皆無である。

従ってプロジェクトでは、以下の4点を優先的に研究すべきと考え進めている。

- (1) CO₂の影響を受けやすいと考えられる生物群, 特に炭酸カルシウムの殻を持つ生物への影響
- (2) 影響を受けやすい生活史上の時期での影響
- (3) 長期, 特に世代を超えた影響
- (4) 中深層生物など放出が想定される環境に生息する生物に対する影響

4.2. 魚類実験

海洋生物の中でも, 魚類は海洋生物資源の主要構成要素であり, また日本人にとっても親しみのあることから, 魚類への影響評価は必須である。海洋生物の中でも魚類に関する知見は, その量と質において比較的充実しているが, その生態, 生理の情報に関して現時点では不十分である。CO₂の海洋隔離で考慮しなければならない問題の一つに, pH 値の変化がある。この問題については, 北欧や北アメリカで顕著になった酸性雨に関連して, 1970 年代から魚類影響が詳細に調べられた。しかし, 酸性雨問題では対象魚種が淡水魚類であり, 浸透圧調節や血液の酸塩基平衡調節の機能が異なる海産魚類に, これらの知見を直接適応することは難しい。

また, 海産魚類は多様性に富んでおり, 実験結果から普遍的な知見を得ようとする場合, 実験供試魚の選定に細心の注意を払わなければならない。例えば, 環境変動の大きい沿岸の一部の底生魚類種では, CO₂濃度の増大に耐性を有することが予想される一方で, 環境変動の比較的小さい外洋の表・中層を高速で回遊する種については, その影響は全く未知である。さらに, 生活史に伴う影響の解明も欠かせない。特に留意しなければならないのは, 魚の資源量を左右する初期生活史への影響である。卵期, 仔魚期および稚魚期において著しい形態, 生態, 生理変化を経る魚類では, 発育段階毎に環境水の CO₂濃度の増大に対する反応が異なることが予想される。

特に CO₂海洋隔離の影響評価には, いわゆる深海魚類への影響解明のための知見を充実させなければならないが, 深海魚類に関する情報は極端に少ない。また影響試験を行うための材料の確保も困難であるため, 当面は安定して確保が可能な浅海魚類に関しての卵・仔稚魚の耐性試験と成魚の生理実験を行う予定である。

4.3. メソコスム実験

これまでの CO₂海洋隔離に関わる生物影響は, 実験室において飼育可能な単一種での実験で評価されている。これらの室内実験は, 生物個体の生死等特定の生命現象に対する基本的な影響を調べるためには有用であるが, 多数の生物種が混在して生活している群集あるいは生態系への影響を評価できるとは言

えない。一方, 海洋観測等の自然の観察においては CO₂濃度増加の影響を直接評価することは困難である。仮に CO₂濃度を変化させることができたとしても, 現象解析のためのコントロール実験や再現性実験は困難であり, 解析できる現象が限られる。このような単一種の実験と海洋観測の間を結ぶアプローチとしてメソコスム実験がある。メソコスム実験では単一種の実験で得られない生物間の相互作用に関するデータが得られると同時に, 海洋観測では困難な実験の再現性あるいは任意の条件設定が可能である。これら三つの実験は決して独立の実験ではなく, 互いの短所を補うべくそれぞれの特性に合わせて実施され, 最終的な評価へとつながるものである。

実際の海洋においては, 生物間の相互作用があり室内実験で確認できなかった微小な影響が食物網を通じて拡大される可能性がある。しかしながら, 現時点においてそれら全ての現象を予測することは不可能である。よって CO₂が付加されたときの生態系に与える影響として, 個体数・生物群集組成・および種間の関係に, どのような変化が現われるのかを定性的に調べ, その後現象を特定し定量化を試み, 最終的には CO₂の拡散モデルと組み合わせ, CO₂海洋隔離時に起こる生態系の変化を予測することが必要である。

現実の海洋隔離では, 中深層に CO₂を放流することが予想されるが, 中層の生態系を模擬することは情報の不足はもとより, 試料のサンプリング, 環境の再現の面からも困難である。一方, 中深層に放流した場合でも, 表層に高濃度の CO₂を含んだ海水が到達する可能性が否定できないこと, また海洋隔離等の対策を取らずに大気中の CO₂濃度が上昇し, 海水へ溶け込んだ場合に表層生態系に影響を及ぼすことから, 表層の生態系への影響評価も重要となる。このような状況から当面は, 沿岸表層の生態系を実験対象とし, 取り扱う生物種は動物プランクトンのサイズまで, 時間的には一週間以上生態系を維持した状態で行うことが考えられる。

4.4. ベンティックチャンバー開発

前述したように, 単一種の実験では群集レベルへの影響評価はできないために, 特別な実験方法が必要である。しかし, 生物量が少なくかつ捕獲の困難な外洋域の中層性の生物群集を利用して, 実験的に評価することは特に難しい。そこで, 実験の対象とすることができる程度に生物量が多いとされる深海底のベントス群集を対象として, 底泥を直接容器で囲い, 現場環境の状態を保ちながら種々の実験を実施できる装置, すなわちベンティックチャンバーを利用して影響評価をする手段が考えられる。

CO₂の海洋隔離に伴った環境影響評価のためのベンティック

チャンバーに必要な仕様は、(1) ワイヤーに頼ることなく投入・揚収できる、(2) 堆積物表面を乱すことなく、上下に開いた容器を底泥に刺し、上蓋をすることができる、(3) 上蓋にはスターラーが付いており、容器内底泥直上水を静かに攪拌できる、(4) 溶存酸素メータなどの各種センサー、およびトレーサーなどの注入と試水の採取ができる注射器を取り付けることができる、(5) 底泥に刺さった状態を保って、直上水-底泥に関する実験を実施できる、(6) 実験終了後は容器下部にも蓋をし採泥が可能である、(7) 装置の各駆動はプログラムに従って内蔵されたタイマーにより行う、というものである。

この装置による実験は、チャンバーにより閉鎖系とすることによって、現場水域において保たれている定常状態が完全には保てないという問題が残る。しかし、少なくとも採泥試料もちいて陸上施設で実験する時に生じる水温や圧力の変化はないので、実際の CO_2 濃度の上昇に対する深海群集の応答に近いものを再現することができるものと期待される。

実際には浅海での予備実験で検討を充分重ねた上で、目標水深を 1000m とした外洋での実験を実施することが考えられる。また実験では、安定同位体の ^{13}C や ^{15}N でラベルした有機物を底泥上に添加し、その鉛直下方向への時間変化を追跡する、あるいはサイズ別ベントスの有機物取り込み速度を推定する等の実験、直上水中の溶存酸素・栄養塩の経時変化の観測などの実験から、行動・生産量・呼吸量・溶出量等への影響を評価することが考えられる。

4.5. 海洋生物調査

先に述べたように CO_2 を 1000~3000m の海中に放出した場合、放出域周辺を中心として、 CO_2 濃度の増加とそれに伴って pH の低下が生じることになる。この結果、その周辺に生息する生物への致死作用や代謝の低下、有孔虫などの炭酸カルシウム殻形成不全などの直接的な影響の可能性が考えられる。また動物プランクトンの日周・季節的・個体発生的な鉛直移動に対する障壁作用や糞など沈降粒子の形成の阻害、細菌の分解低下が生じた場合には、物質フラックスの質的・量的な変化による下層生態系への影響など、間接的な問題も起こる可能性がある。しかし、 CO_2 の海洋隔離を検討する際に必要とされる西部北太平洋の中深層の生物を対象とした調査は少なく、その現存量・種類組成・生活史・物質循環への役割などいまだ情報が充分とはいえない。このため西部北太平洋での海洋調査により、 CO_2 が放出された場合に直接的に影響を受ける可能性のある中深層の生物相の把握が特に必要とされる。

西部北太平洋の中深層のプランクトン、マイクロネクトン相については、Vinogradov (1968) や、放射性廃棄物海洋処分に

伴う海洋生物等に関する調査 (東海区水産研究所, 1975; 1982), Kikuchi and Ohmori (1985) などの調査事例に限られている。これらによると、亜寒帯域では表面付近と 500~1000m 付近で生物量と生物多様度が極大を示し、中深層の生物相は必ずしも貧困ではないことが指摘されている。また、動物プランクトンについては、鉛直移動ハシゴ説 (Vinogradov, 1962) にみられるように生物間の相互作用が鉛直的に重なり合いながら深層に続くということも考慮する必要がある。

このため、海洋調査においては表層から海底直上の 6000m 程度までのプランクトンを中心に、海底のベントスまで含めた群集構造を押さえることを目標とする。またネクトンについては、中深層において重要なサイズ群であり、今後検討していく必要があると考えている。生物相や生物による物質循環の速度の把握に関しては、データのばらつきの大きさを考慮し、3~4 点の代表点を設けて毎年繰り返し調査を実施することを計画している。

5. 終わりに

以上のように、通産省では CO_2 の海洋隔離の環境影響に関する研究を開始した。始めに述べたように、温暖化ガスが増加し地球温暖化が危惧される中で、 CO_2 の海洋隔離は一般の海洋投棄とは多くの点で異なっている。人類が化石燃料に依存した生活を行っているかぎり、人為的な CO_2 の放出は継続され、海洋自体も温暖化ガスの挙動や地球温暖化と無関係な訳ではない。従って、海洋や海洋生物を研究している研究者は、単に地球環境問題の対策である CO_2 の海洋隔離の可能性を始めから否定するのではなく、このまま温暖化ガスが増加した場合の海洋への影響との比較も含めて、真剣に議論を行う必要がある。

謝辞

本稿の執筆に当たっては、以下にあげるプロジェクトの生物関係委員および担当者の協力を得た。

石田洋 (関西総合環境センター)

喜田潤 (海洋生物環境研究所中央研究所)

竹内和久 (三菱重工長崎研究所・地球環境産業技術研究機構長崎分室)

渡辺雄二 (関西総合環境センター)

白山義久 (京都大学大学院理学研究科附属瀬戸臨海実験所)

池田勉 (北海道大学水産学部)

内田有恒 (京都大学農学部)

高橋正征 (東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学系)

References

- Auerbach, D.I., J.A. Caulfield, E.E. Adams and H.J. Herzog (1997): Impacts of ocean CO₂ disposal on marine life: I. A toxicological assessment integrating constant-concentration laboratory assay data with variable-concentration field exposure. *Environment Modeling and Assessment*, **2**, 333-343.
- Broecker, W.S. (1997): Thermohaline circulation, the achilles heel of our climate system: Will man-made CO₂ upset the current balance? *Science*, **278**, 1582-1588.
- Caulfield, J.A., E.E. Adams, D.I. Auerbach and H.J. Herzog (1997): Impacts of ocean CO₂ disposal on marine life: II. Probabilistic plume exposure model used with a time-varying dose-response analysis. *Environmental Modeling and Assessment*, **2**, 345-353.
- de la Mare, W.K. (1997): Abrupt mid-twentieth-century decline in Antarctic sea-ice extent from whaling records. *Nature*, **389**, 57-60.
- Haugan, P.M. and H. Drange (1996): Effects of CO₂ on the ocean environment. *Energy Convers. Mgmt.*, **37**, 1019-1022.
- Hoffert, M.I., Y.-C. Wey, A.J. Callegari and W.S. Broecker (1979): Atmospheric response to deep-sea injections of fossil-fuel carbon dioxide. *Climate Change*, **2**, 53-68.
- Kikuchi, T. and M. Omori (1985): Vertical distribution and migration of oceanic shrimps at two locations off the Pacific coast of Japan. *Deep-Sea Res.*, **2**, 837-851.
- Manabe, S. and R.J. Stouffer (1994): Multiple-century response of a coupled ocean atmosphere model to an increase of atmospheric CO₂. *J. Climate*, **7**, 5-23.
- Marchetti, C. (1977): On geoengineering and the CO₂ problem. *Climate Change*, **1**, 59-68.
- Nakashiki, N., T. Ohsumi and N. Katano (1995): Technical view on CO₂ transportation onto the deep ocean floor and dispersion at intermediate depths. p. 183-193. In: *Direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide*, eds. by N. Handa and T. Ohsumi, TERRA-PUB, Tokyo.
- 大森信 (1997) 海洋における二酸化炭素処分—海洋生物学・環境サイドからの検討, 水産の研究, **16**, 4-5.
- Ormerod, B. and M. Angel, Eds. (1996) *Ocean Storage of Carbon Dioxide, Workshop 2 - Environmental Impact*. IEA Greenhouse Gas R & D Programme, Cheltenham, 131pp.
- Siegenthaler, U. and J.L. Sarmiento (1993): Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature*, **365**, 119-125.
- 東海区水産研究所 (1975): 放射性個体廃棄物の海洋処分に伴う海産生物等に関する調査報告書, 昭和 47~49 年度, 水産庁東海区水産研究所, 111pp.
- 東海区水産研究所 (1982): 放射性個体廃棄物の海洋処分に伴う海産生物等に関する調査報告書, 昭和 52~55 年度, 生物, 水産庁東海区水産研究所, 59pp.
- Woods, J. and W. Barkmann (1993): The plankton multiplier—Positive feedback in the greenhouse. *J. Plankton Res.*, **15**, 1053-1074.
- Vinogradov, M.E. (1962): Feeding of the deep-sea zooplankton. *Rapp. et Proc.-Verb. Cons. Internat. Explor. de la Mer.*, **153**, 114-120.
- Vinogradov, M.E. (1968): *Vertical Distribution of the Oceanic Zooplankton*. Nauka, Moscow, 320pp.