

9221 地球温暖化対策としての複合的海洋水利用技術の提案と評価

助成研究者:上山 惟一(大阪大学 工学部)

共同研究者:小島 紀徳(成蹊大学)

:本山 正夫(東洋大学)

海洋を利用する二酸化炭素による地球温暖化問題の対策技術の一つとしての施肥法に着目し、海洋に窒素、リンなどの栄養塩を添加することによる植物プランクトンの増殖促進、海洋表層の二酸化炭素分圧、ひいては大気中の二酸化炭素量の減少を検討した。

本研究では施肥法を工学的に評価するために、物質収支的考察、海洋の炭素循環に基づく時間的応答と海洋中各炭素濃度への影響の考察、肥料製造工程までを含めたエネルギー的評価、検討を行った。

海洋プランクトン中のPNC比に基づき必要肥料量と撒き方を決め、そのときの応答を有機・無機炭素と窒素の非定常循環および光合成による炭素固定を組み入れたBoxモデルにより検討したところ、2、3年の内に施肥の顕著な効果が現れるが、一方表層の有機物量は百年間施肥をしても、現在の貧栄養状態下での濃度の2倍程度となるにすぎないことがわかった。また、肥料製造工程、輸送までを含めたエネルギー的評価を行なったが、この過程でのエネルギー使用により放出される二酸化炭素量は施肥により海洋に取り込まれる二酸化炭素量の9%程度であり、施肥法が実効の期待される地球温暖化対策技術であることが分かった。

9221 地球温暖化対策としての複合的海洋水利用技術の提案と評価

助成研究者：上山 惟一(大阪大学 工学部)

共同研究者：小島 紀徳(成蹊大学)

：本山 正夫(東洋大学)

1. 研究目的

地球環境問題の一つとして、化石燃料の燃焼や熱帯林破壊による二酸化炭素の大気中への放出が主因となっている地球温暖化があげられる。。最近では大気中の二酸化炭素濃度は年間1.5 ppm~2.0 ppmの割合で増加しているが、大気への蓄積量は上記の放出量の半分強にしか過ぎず、残りは海洋が吸収しているのではないかと推定される。一方、吸収された二酸化炭素の深海と表層での交換が遅いため、深海洋内の無機炭素類の濃度は、現在の大气中の二酸化炭素濃度と平衡には至っておらず、海洋の潜在的な二酸化炭素吸収能力は非常に大きい。

本研究では海洋を利用した大気からの二酸化炭素吸収技術として特に施肥法に的を絞り、植物プランクトンにより合成された有機炭素類と炭酸カルシウムの循環を組み入れた海洋のTwo Boxモデル^{3,4)}を用いて施肥法の効果発現時間と環境面への影響に関する工学的評価を行った。あわせて肥料製造工程までを含めたエネルギー的評価を行い、この過程で放出される二酸化炭素量と全二酸化炭素固定量との比較を行った。

2. 研究方法、結果および考察

2. 1. 大気と表層間の物質移動が十分速いとした場合の予備的考察

1978年における化石燃料起源の二酸化炭素の大気への放出量は炭素換算で年間 5.21×10^{15} gである¹⁾。放出された二酸化炭素の固定に必要な肥料中の窒素とリンの量は、Broecker²⁾による海洋生物中のリン:窒素:炭素の比、1:15:120を用いると、それぞれ 7.60×10^{14} gと 1.12×10^{14} gとなる。算出した量の窒素とリンを含む肥料を海洋に散布すると、海洋表層中では貧栄養状態、すなわち肥料量が制限因子となっているため、施肥量に相当する量の炭酸イオン、炭酸水素イオンなどの無機炭素類が植物プランクトンにより有機炭素あるいは炭酸カルシウムとして固定される。植物プランクトンは動物性プランクトン等により最終的には無機炭素類に分解されるが、もしこれが表層で生じるならリン、窒素は再び光合成に用いられるであろうし、一方深海層で生じるなら無機炭素類は深層に溶解し、

数百年以上は表層ひいては大気には還元され無いと期待される。さらには上層に至り、大気に放散された場合でも、無機炭素類がリン、窒素を同伴している限り、上層で再び光合成により同量の二酸化炭素を吸収し得ると考えられる。すなわち、前述で算出した量の窒素、リン分を海洋へ散布すると、植物プランクトンによる海洋表層中の無機炭素類の固定量は化石燃料起源による大気への放出量と同一になると期待される。したがって、もし大気-表層間の移動速度が十分に速く、他の因子（海洋の非定常物理吸収、森林破壊等）を無視することができるとすれば、1978年における化石燃料起源の大気への年間放出量の固定量に見合う肥料を同年中に散布することにより、1978年における大気中の二酸化炭素濃度増加は抑止しうることになる。しかしながら、実際には大気-表層間の物質移動に時間がかかるため、施肥の効果が発現するための必要時間の推定、あるいはその際の表層および深層中での関連する物質の濃度の経時変化を推定するには、以下の非定常的考察が必要となる。

2. 2. 非定常モデルによる計算の概要

2. 2. 1. 施肥法の概要と仮定

大気中の二酸化炭素濃度については、1959年1月1日までを定常状態（一定）、それ以降1977年まで施肥は行わずに化石燃料の放出による大気中二酸化炭素濃度の増大を求め、そして1978年1月1日から施肥を開始したと仮定して計算を行なった。また化石燃料の年間放出量を簡単のため1978年1月1日から一定と仮定した。

リン、窒素と炭素の比が、前述の比となるように施肥を行い、全ての肥料は植物プランクトンに固定されると仮定した。この仮定は貧栄養状態下では妥当な仮定である。以下では、大気からの窒素固定は考えず、またリン、窒素の比が一定であることから窒素のみの挙動を追うこととするが、リンについても全く同様である。

施肥量の経時変化としては、第一に施肥を行わない場合を(1)、第二に1959年から1978年までに化石燃料から大気に放出された二酸化炭素のうち、大気に残留したすべての二酸化炭素を吸収しうる肥料量を1978年1年間で散布する場合を(2)、同量を1978年から1987年までの10年間に均一に散布する場合を(3)、1978年一年間の二酸化炭素の大気残留量を吸収しうる量を1978年から毎年散布する場合を(4)、1978年における化石燃料からの二酸化炭素年間放出量を吸収しうる量を毎年散布する場合を(5)と以下では記すことにする。

それぞれの方法における海洋へ投入した施肥中窒素量の経時変化をFig. 1に示した。以上の条件下で次節のモデルによる非定常解析を行い、大気中二酸化炭素濃度および表層、深海中の炭素、窒素の濃度の経時変化を求めた。

2. 2. 2. 植物プランクトンを考慮したTwo Boxモデルを用いて施肥の効果を評価するために導入した仮定

栄養元素を加えた場合の生物学的な炭素循環の非定常変化を評価するため、深海層での有

機炭素の分解速度を深海層での有機炭素濃度に一次と仮定し、その速度定数を K_0 とした。

一方深海層においては炭酸カルシウムは不飽和であり、深海層での炭酸カルシウムの濃度は常に $0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ であるとした。なお、表層では炭酸カルシウムは過飽和であり、かつカルシウムイオンは十分多量に存在しているので、光合成の制限因子とはならない。

施肥を行わない場合には海洋内での栄養塩の循環量に変化せず、植物プランクトンによる炭素の固定量は一定、 A とおくことができる。一方施肥を行なった場合は、蒔いた肥料は表層中で植物プランクトンによりすべて固定され、そのときの固定速度の増加分を A' とした。表層で植物プランクトンに固定された有機炭素類に含まれる窒素とリンは、最終的には深海層で分解し栄養塩となる。そのため施肥を行なった場合には、深海層の栄養塩濃度が徐々に上昇し海洋内での栄養塩の循環量は増加する。栄養塩の循環量の増加による植物プランクトンの固定速度の増加分を海洋内の窒素循環から求め、 A'' とした。なお栄養塩である窒素分は、表層における植物プランクトンの固定に使われるため常に不足しており、表層の窒素濃度は $0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ とした。

2. 2. 3. 植物プランクトンの挙動を考慮したTwo Boxモデルの収支式と初期条件

1959年1月1日を定常状態と仮定し、化石燃料起源の二酸化炭素の大気への単位大気体積当りの放出量と大気中二酸化炭素の収支式⁴⁾をEqs. (1),(2)のように与えた。初期条件すなわち1959年での大気中の二酸化炭素濃度を観測値¹⁾である315.57 ppmとした。

$$r_a(t) = (2.57 \times 10^{15} / 12 \cdot V_a) \cdot \exp\{0.37 \cdot (t-1959)\} \quad (1)$$

$$V_a \cdot (dCa/dt) = [-k_{am}(Ca-Ca_0) + k_{am} \cdot \xi \cdot Ca_0 / C_{is_0} \cdot (C_{is} - C_{is_0})] \cdot Sur + r_a(t) \cdot V_a \quad (2)$$

施肥による植物プランクトンの固定速度の増加分 A' と栄養塩の循環量の増加による植物プランクトンの固定速度の増加分 A'' を考慮したため、表層中の無機炭素類、有機炭素類、炭酸カルシウムの収支式は、Eqs. (3),(4),(5)となる。

$$L_s \cdot (dC_{is}/dt) = -3/2 \cdot (A+A'+A'') + (k_{md}+U_v)(C_{id}-C_{is}) + k_{am}(Ca-Ca_0) - k_{am} \cdot \xi \cdot Ca_0 / C_{is_0} \cdot (C_{is} - C_{is_0}) \quad (3)$$

$$L_s \cdot (dC_{os}/dt) = (A+A'+A'') + (k_{md}+U_v)(C_{od}-C_{os}) - U_{sp} \cdot f_p \cdot C_{os} \quad (4)$$

$$L_s \cdot (dC_{cs}/dt) = 1/2 \cdot (A+A'+A'') + (k_{md}+U_v)(C_{cd}-C_{cs}) - U_{sp} \cdot C_{cs} \quad (5)$$

また深海層での有機炭素の分解速度を深海層での有機炭素濃度に1次としたため、深海層中の無機炭素類と有機炭素の収支式は、Eqs. (7),(7)のようになる。一方、深海層での炭酸カルシウムの収支式はEq. (8)となる。

$$L_d \cdot (dC_{id}/dt) = -(k_{md}+U_v)(C_{id}-C_{is}) + K_0 \cdot C_{od} + K_c \quad (6)$$

$$Ld \cdot (dCod/dt) = -(kmd+Uv)(Cod-Cos) + Usp \cdot fp \cdot Cos - Ko \cdot Cod \quad (7)$$

$$Ld \cdot (dCcd/dt) = -(kmd+Uv)(Ccd-Ccs) + Usp \cdot Ccs - Kc = 0 \quad (Ccd=0 : \text{const}) \quad (8)$$

炭酸カルシウムの溶解速度 Kc は(8)式より与えられることになる。海洋表層と深海層での栄養塩中の窒素の収支式は、Eqs. (9),(10)となる。

$$Ls \cdot (dCns/dt) = -1/8 \cdot (A+A'') + (kmd+Uv) \cdot Cnd = 0 \quad (Cns=0 : \text{const}) \quad (9)$$

$$Ld \cdot (dCnd/dt) = 1/8 \cdot Ko \cdot Cod - (kmd+Uv) \cdot Cnd \quad (10)$$

Eq.(9)から植物プランクトンによる固定速度の増加分である A'' を求めた。定常状態と仮定した1959年1月1日における海洋中の炭素類濃度および窒素濃度と初期条件でのパラメーターをTable 1に示した。また初期条件での海洋表層と深海層の窒素濃度は、観測値⁹⁾からそれぞれ $0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ と $0.036 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ とした。

2. 3. 計算結果

2. 3. 1. 施肥法の大気中二酸化炭素濃度に対する影響

施肥による大気中二酸化炭素濃度に対する効果をFig. 2に示す。この結果から全ての散布方法で効果があることがわかる。しかしながら、1979年での二酸化炭素濃度が1978年初頭より減少するのは2)のみである。その他の方法では1年程度遅れて減少しはじめる。また施肥量が同じである2)と3)を比較すると、1990年から3)の方が2)よりも二酸化炭素濃度は若干低くなり、施肥量が同じでも蒔き方により効果が異なることがわかる。これは2)大気中の二酸化炭素濃度が急激に減少し、そのため大気からの物質的吸収量が減少するためと考えられる。

また、本計算で用いた施肥法の内、最も施肥量が少ない4)の場合でも、施肥開始後数年間で、大気中二酸化炭素濃度は減少するようになり、従って、施肥法に対する海洋の応答時間は数年以下と考えられる。

2. 3. 2. 海洋中の炭素類濃度と深海中の窒素濃度の経時変化

施肥による海洋中の炭素濃度類と深海層中の窒素濃度の経時変化をFigs. 3, 4に示す。

2)の表層中の無機炭素類濃度は施肥を行なったときに、一旦減少するが急激に初期濃度近くにまでもどる。その後、ゆっくりと施肥前の値に近づく。これは施肥により一度無機炭素が有機炭素となるが大気-表層の交換係数が表層-深海層の交換係数と比べて大きいいため、その分が大気から年のオーダーで補給されることを示す。表層中の有機炭素類と炭酸カルシウムは光合成により急激に約2倍まで増加するが、このことから光合成成分が沈降により深海へ運ばれるまでに時間遅れがあることがわかる。一方3)の場合無機炭素類濃度は施肥をおこなってもほとんど減少しない。また有機炭素類と炭酸カルシウムも2)の場

合と比べてゆるやかに上昇を示しており、2)と比べ海洋に与える影響が少ないと考えられる。

5)の場合の海洋内の炭素濃度類濃度の施肥開始してから100年間の経時変化をFig. 5に示す。表層中の有機炭酸類濃度と炭酸カルシウム濃度は施肥開始後約20年間でほぼ2倍まで増加するがその後はほとんど増加しない。一方、深海層中の無機炭素類濃度は、表層中の有機炭素類と炭酸カルシウムの濃度が増加する間はほとんど変化がないが、表層中の有機炭素類と炭酸カルシウムの濃度が安定した後に徐々に増加し始める。大気に放出された二酸化炭素をすべて吸収するために必要な量の施肥を行い、二酸化炭素を海洋へ吸収させても、表層中の有機炭素類濃度の上昇が現在の貧栄養状態での濃度の2.5倍程度であることから富栄養化の恐れは少ないと思われる。炭酸カルシウムの濃度が2.25倍程度までしか増加せず、過飽和状態にある海洋表層への影響が少ないと期待される。

2. 4. エネルギー的評価

2. 4. 1. 現状の肥料生産量およびその海洋への影響の評価

施肥法は、生産した肥料を海洋に直接散布するものであるが、現状でも肥料生産は行われており、その一部は海洋に流入している。そこでまずエネルギー評価に先立ち、現状の肥料生産量およびその海洋への影響について述べる。1986年に世界中で消費された肥料に含まれた窒素、リン量はそれぞれ 7.00×10^{13} 、 3.32×10^{13} gである⁶⁾。消費された全肥料量が海洋に流入したと仮定すると、海洋に流出した肥料中の窒素、リンにより固定される大気中の二酸化炭素の固定量は前述の比より炭素換算でそれぞれ 4.80×10^{14} g·year⁻¹、 4.89×10^{14} g·year⁻¹となる。なおリンを基準として計算する場合、窒素量は不足するが窒素固定細菌による海洋中への窒素の固定を仮定すると不足分は補える可能性はある。約 5.0×10^{14} gは二酸化炭素の年間放出量の約1/10の量である。一方前報⁴⁾より2BMからの推定値と大気残留量の観測値との差は1959年から1988年までに炭素換算で 3.08×10^{16} g程度である。海洋に流入する窒素リンがミッシングシンクにある程度寄していることがわかる。仮定として消費された肥料の全量が海洋に流出したと考えているので、実際はこの結果より少ない可能性があるが、一方河川を通じて海洋に流入する洗剤や生活排水あるいは森林破壊等の原因で土壤に含まれる窒素、リン分も影響している可能性があり、検討する必要があると思われる。

2. 4. 2. 肥料を生産するのに必要なエネルギーの算出

肥料の製造と輸送のためのエネルギー使用に伴い放出される二酸化炭素量を考察し、施肥法が二酸化炭素の固定に実質的に寄与するかを検討する。条件として、海洋へ蒔く肥料は固体窒素肥料の中で窒素含有量が46 wt%⁵⁾と最も高い尿素と、リン酸系の肥料であるよう成リン肥料（リン酸20 wt%）⁵⁾とし、海洋へ投棄するリン分と窒素分が前述の1:15となると仮定する。また輸送・散布手段として船舶を用い、施肥により赤潮などの海洋汚染の

影響がでにくいように港から半径1000 kmの広範囲に蒔くとして検討した。尿素製造プロセスとして三井東圧完全循環D法⁹⁾、よう成リン肥料製造プロセスとして電炉法¹⁴⁾を仮定したときの、製造プロセスの原単位をTables 2, 3に示した。尿素肥料製造については、ナフサを原料とした水蒸気改質法⁹⁾によるアンモニア合成に必要なエネルギーも考慮した。

ここで電力を熱エネルギーから電気エネルギーへの変換効率を39 %⁸⁾として計算し、蒸気に必要なエネルギーを 1.27×10^6 Paでの沸点における蒸気エンタルピー(0°C水基準)より求めた。ここでは施肥量を、1978年における二酸化炭素の年間放出量を固定する分に相当する量、すなわち(5)の場合を仮定して計算したが、他の場合についても換算は容易である。1978年における化石燃料起源の大気への二酸化炭素の年間放出量は炭素換算で 52.1×10^{14} g \cdot year⁻¹であり、前述の植物プランクトンにより固定される窒素、リン、炭素のモル比から、必要な尿素肥料とよう成リン肥料の重量は、 1.65×10^{15} g \cdot year⁻¹、 1.28×10^{15} g \cdot year⁻¹となる。Table 2, 3から尿素肥料とよう成リン肥料を製造するのにエネルギーは 2.44×10^{19} J \cdot year⁻¹となる。肥料製造に必要なエネルギーを重油で供給すると仮定すると、重油の燃焼熱は放出される二酸化炭素量1 tonあたり 1.43×10^{10} J¹²⁾であるから、二酸化炭素の放出量は 1.71×10^{15} g \cdot year⁻¹と計算される。

2. 4. 3. 肥料の運搬に必要なエネルギーの算出

肥料の運搬で使用する船舶(タンカー)の性能^{6) 13)}をTable 4に示す。肥料を散布するのに必要な一年間の船舶の延べ隻数は 6.10×10^3 隻となり、消費される重油の総重量は 2.28×10^{12} gである。この量は1984年における全世界の重油消費量の約0.3 %(6.42×10^{14} g)に匹敵する。重油の密度と燃料発熱量は、 0.8 g \cdot cm⁻³と 4.27×10^4 J \cdot g⁻¹¹²⁾なので船舶による運搬に必要なエネルギーは 9.74×10^7 J \cdot year⁻¹となる。船舶の輸送による二酸化炭素放出量は肥料と同様に重油基準で炭素換算で 1.87×10^{12} g \cdot year⁻¹となり、すなわち 5.21×10^{15} gの炭素換算の海洋への二酸化炭素固定量に対し、0.036 %であり、無視小であることがわかる。さらに広範囲に散布するとしてもほぼ同様の結論となろう。肥料製造プラントと船舶からの二酸化炭素の放出量の合計は9.04 %となる。なお現在話題となっている他の微量元素(Fe等)については生産エネルギーコストは十分小さいものと考えられる。

3. 今後の課題

本モデルで用いた大気-表層間の炭素交換の緩衝係数は一定と仮定したが、施肥を行なうと海洋表層水の成分とpHが変化し、緩衝係数も変わることが予想される。緩衝係数の影響を考慮したモデルにより施肥による効果と環境に与える影響を評価する必要がある。加えて施肥成分自身によるpH変化も考慮する必要がある。海洋への施肥の効果が有効となるための散布密度・速度を、海洋における循環速度、光合成を基に算出する必要があると思われる。全海洋容積を 1.37×10^{18} m³、大循環のオーダーを千年とすると、循環速度は 10^{15} m³ \cdot year⁻¹のオーダーである。一方、海洋中のリンの濃度は $2 \sim 3 \times 10^{-3}$ mol \cdot m⁻³であ

り、天然でのリン循環量は約 3×10^{12} mol \cdot year $^{-1}$ となる。これは、上述のリンの年間散布リン量にほぼ匹敵する値である。海洋の実状が貧栄養状態とすれば影響は少ないとも考えられるが、実施に当たっては十分な検討が必要であると考えられる。今までにpH変化やリンを考慮したモデルは、Sarimiento¹⁵⁾らやSiegenthaler¹⁶⁾らにより報告されている。しかし、それらのモデルで行っている考察は、少なくとも数100年オーダーであり、数10年オーダーでの考察が必要となる施肥法の評価と直接的には結びつかないと考えられる。

肥料生産に必要なエネルギーが予想以上に大きく、また施肥法により化石燃料起源の二酸化炭素年間放出量を固定するためには、現在の肥料生産量の10倍が必要となる。そのため肥料の製造プラントが新たに必要となる。しかしながら、栄養塩である窒素、リンを含む廃棄物、例えば活性汚泥などを活用する、あるいは東京湾などの局地的汚染源を遠洋に輸送するなどの方法については、輸送エネルギーコストが小さいことから検討の要があろう。

本研究では二酸化炭素のみに焦点を当てたが、現実には供給した栄養元素の化学変化も問題となろう。例えば、一部の窒素が亜酸化窒素として放出されるとすれば、二酸化炭素の放出抑制以上に、負の効果をもたらす可能性もある。この面での検討も必要である。

またTwo Box Modelそのものについても、1959年を出発点として1978年までの大気中の二酸化炭素濃度経時変化を説明するには海洋表層の厚みを一般的に言われている値の10倍に相当する800mと仮定しなければならないなど、実際の海洋中の物質移動を考察する上で改善する余地が残っている。この点については地球規模の海洋流動のシミュレーションあるいは水槽を用いた相似実験などの知見を組み込んでいく必要がある。

Nomenclature

| | | |
|-----|---|---|
| A | = subtractive rate of fixation and decomposition of carbon by plant biota without fertilization | [mol·m ⁻² ·y ⁻¹] |
| A' | = additional fixation rate of carbon directly by fertilization | [mol·m ⁻² ·y ⁻¹] |
| A'' | = additional fixation rate of carbon by circulation of added nutrient | [mol·m ⁻² ·y ⁻¹] |
| C | = concentration | [mol·m ⁻³] |
| fp | = fraction of POC in TOC | [-] |
| k | = exchange coefficient | [m·y ⁻¹] |
| Kc | = rate of solution | [mol·m ⁻² ·y ⁻¹] |
| Ko | = rate constant of decomposition | [m·y ⁻¹] |
| L | = length | [m] |
| r | = rate of emission from fossil fuel | [mol·m ⁻³ ·y ⁻¹] |
| Sur | = surface of sea | [m ²] |
| t | = time | [year] |
| U | = velocity | [m·y ⁻¹] |
| V | = volume | [m ³] |
| ξ | = buffer factor | [-] |

<subscripts>

| | |
|----|----------------------------------|
| 0 | = initial |
| a | = atmosphere |
| am | = between atmosphere and surface |
| c | = CaCO ₃ |
| d | = deep |
| i | = inorganic carbon |
| md | = between surface and deep |
| n | = nitrogen |
| o | = organic carbon |
| s | = surface |
| sp | = sedimentation |
| v | = vertical direction |

Literature cited

- 1) Bolin,B:"Carbon cycle modelling",SCOPE16(1981)
- 2) Broecker,W.,S.:"Chemical Oceanography", Translated by N.Niizuma,"Kaiyo Kagaku Nyumon", Tokyo Daigaku Shuppankai, Tokyo, p.12(1981)
- 3) Inaba,A.,Y.Shindo and H.Komiyama:Kagaku Kogaku Ronbunshu,16,1120(1990)
- 4) Horiuchi,K.,T.Kojima and A.Inaba:Kagaku Kogaku Ronbunshu, 18, 471(1992)
- 5) Kagaku Kogyo Nippo Sha (Ed.):"Kagaku Kogyo Nenkan 1990 Ban", Kagaku Kogyo Nippo Sha,Tokyo, p331,(1990)
- 6) Kokusai Rengo Toukei Kyoku (Ed.):"Sekai Toukei Nenkan 1985/86", Hara Shobo, Tokyo, p519,(1989)
- 7) Kokusan Engine Data Book Henshuiinkai:"Kokusan Engine Data Book", Sankai Do, Tokyo,p158(1988)
- 8) Komiyama,H. et al,"Chikyu Ondanka Mondai Handbook",Ai Pi Si, Tokyo, p.144, (1990)
- 9) ibid. p.420-430
- 10) ibid. p.465-469
- 11) Kagaku Kogaku Kyokai,"Kagaku Purosesu Shusei Tekisuto Ban",Tokyo Kagaku Dojin, Tokyo, p.25,(1971)
- 12) Neneryo Kyokai (Ed.):"Neneryo Binerane",Korona Sha, Tokyo, p.298 (1984)
- 13) Nitusogokenkyujo (Ed.): "Buturyu Handbook", Daiyamondo Sha, Tokyo, p.401, (1981)
- 14) Norinsuisansho Hiriyokikaika (Chief Ed.): "Hiryoyoran 1990 Nendo Ban", Norintoeki Kyokai, Tokyo, p.88 (1990)
- 15) Sarimiento, J. L. and R. Toggweiler:Nature, 308, 621(1984)
- 16) Siegenthaler, U and T. Wenk:Nature, 308, 624(1984)

Table 1 Initial conditions for model

| | | | |
|---|------------------------|--|------------------------|
| Ls=75 | [m] | Ld=3125 | [m] |
| Cis ₀ =2.01 | [mol·m ⁻³] | Cid ₀ =2.44 | [mol·m ⁻³] |
| Cos ₀ =0.33 | [mol·m ⁻³] | Cod ₀ =0.055 | [mol·m ⁻³] |
| Ccs ₀ =0.103 | [mol·m ⁻³] | Ccd ₀ =0 | [mol·m ⁻³] |
| Cns ₀ =0 | [mol·m ⁻³] | Cnd ₀ =0.036 | [mol·m ⁻³] |
| A=2/3·(kmd+Uv)(Cid ₀ -Cis ₀) | | [mol·m ⁻² ·year ⁻¹] | |
| Ko=-2/3·(kmd+Uv)(Cid ₀ -Cis ₀)/Cod ₀ | | [m·year ⁻¹] | |
| Kc=(kmd+Uv+Usp)·Ccs | | [mol·m ⁻² ·year ⁻¹] | |
| Usp={2/3·(Cid ₀ -Cis ₀)+(Cod ₀ -Cos ₀)}· (kmd+Uv)/(fp·Cos ₀) | | [m·year ⁻¹] | |
| fp=0.1 | [-] | | |
| kam=λ·(0.95·Cis ₀ ·Ls+0.84·Cid ₀ ·Ld)/ {Ca ₀ ·(1-0.95)} | | [m·year ⁻¹] | |
| (kmd+Uv)=λ·0.84·Ld/0.11 | | [m·year ⁻¹] | |

Table 2 Unit for urea fertilizer ¹³⁾

| urea | naphtha | CO ₂ | power | steam | water |
|----------|---------|-----------------|-------------------------------------|-------|----------------|
| 1.0 | 0.299 | 0.750 | 5.83 | 0.85 | 55 |
| ton | ton | ton | kWh | ton | m ³ |
| (46 % N) | | | (1.27 × 10 ⁶ Pa) (25 °C) | | |

Table 3 Unit for urea fertilizer ¹⁴⁾

| fused phosphate fertilizer | serpentinite | phosphorite | power |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------|
| | 0.450 | 0.750 | 1000 |
| 1 ton | ton | ton | kWh |
| (20 % P ₂ O ₅) | (31 % P ₂ O ₅) | | |

Table 4 Performance of ship ^{6.13)}

| | |
|---------------------------|---|
| diesel engine | $3.75 \times 10^6 \text{ W} \times 4$ |
| capacity tonnage | $4.80 \times 10^4 \text{ ton}$ |
| power | $2.94 \times 10^7 \text{ W}$ |
| specific fuel consumption | $1.77 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ |
| fuel consumption | $5.20 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ |
| velocity | $2.78 \times 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ |

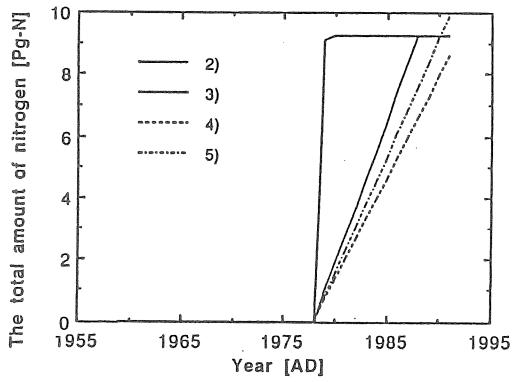


Fig. 1 Amount of nitrogen involved in the fertilizer into ocean on each case

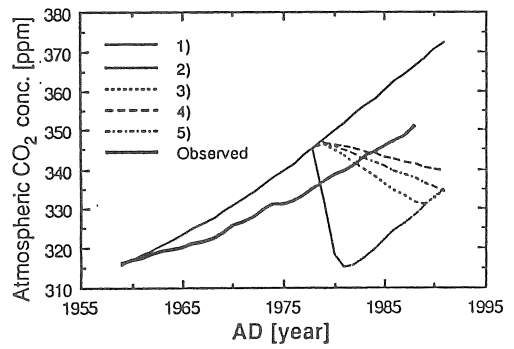


Fig. 2 Observed and numerically expected values of carbon dioxide concentration in atmosphere

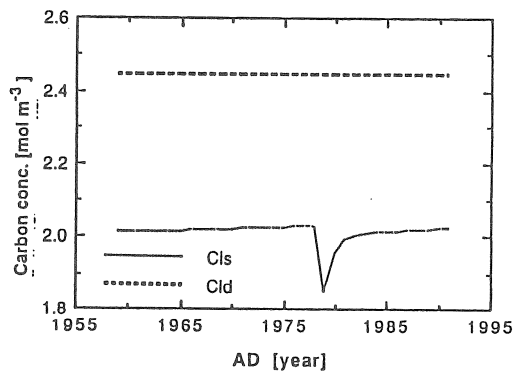
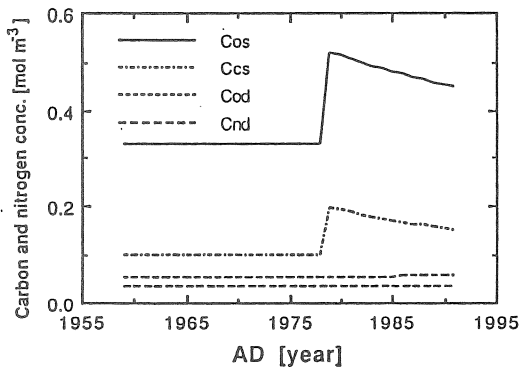


Fig. 3 Time variation of carbon and nitrogen concentrations in ocean in case 2)

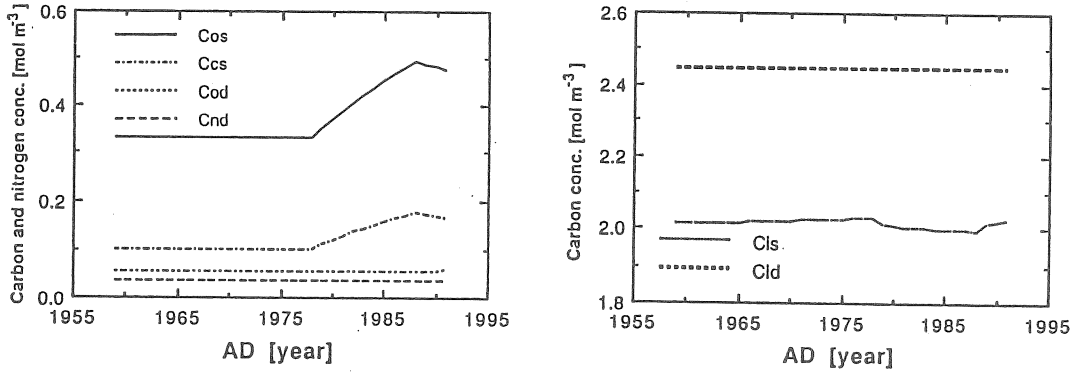


Fig. 4 Time variation of carbon and nitrogen concentrations in ocean in case 3)

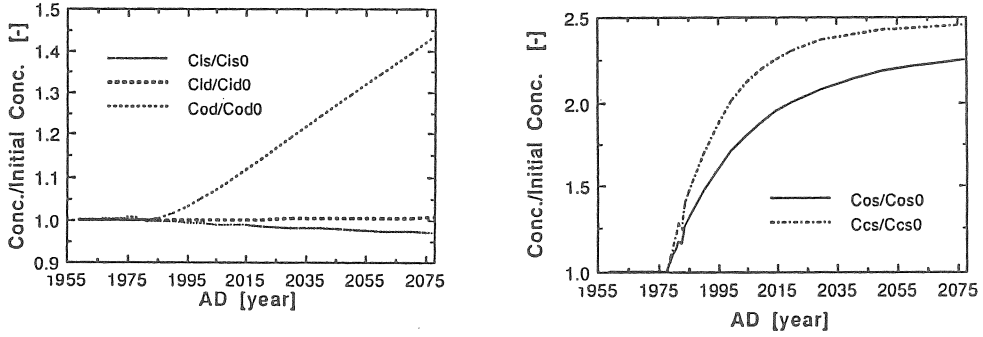


Fig. 5 Time variation of carbon and nitrogen concentrations in ocean in case 5)

Proposal of Comprehensive Sea Water Utilization and Its Evaluation for Countermeasures against the Global Warming

Korekazu UHEYAMA

Department of Chemical Engineering, Faculty of Science Engineering,
Osaka University

Toshinori KOJIMA

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Engineering,
Seikei University

Masao MOTOYAMA

Department of Applied Chemistry, Faculty of Engineering, Toyo University

Summary

Focusing on the fertilization technique as one of the countermeasures against the global warming using the ocean, the effects of fertilization of ocean with nutrients, such as nitrogen and phosphate, are examined on the propagation of the plant biota, and on the decrease in the surface-ocean partial pressure of CO_2 , which enhances the drawing down CO_2 from the atmosphere.

In the present study, we evaluated the validity of this countermeasure from the view points of mass balance, energy balance and dynamics. By using the two box model, we numerically simulated the time-varying effects of fertilization for several ways of fertilization, considering recirculation of the inorganic /organic carbon and nutrients and carbon fixation by plant biota, where the desired amounts of nutrients were determined on the bases of PNC ratio in the plant biota in ocean.

The results indicated that this technique possibly have an expected effect on the restraint of the increase in atmospheric CO_2 within a few years, while its effect on the oceanic organic carbon in the surface is only doubling the present thin concentration for hundredyears' fertilization. The energy evaluation also indicated that the amount of CO_2 produced from the manufacture and transportation of the fertilizer of both N and P is no more than 9 % of the amount that is expected to be taken up into the ocean from the atmosphere.