

## 地球温暖化現象解明

筑波大学生物科学系助教授

及川 武久

1. 配付された「地球環境研究計画」を見ると、研究組織・体制の欄で、同一の方が多くの研究計画に名を連ねていることに気付く。現在の日本の研究体制が弱体で、やむを得ない面もあるであろうが、やはり本当に実績を上げるには、1人の研究者の担当は1つか、せいぜい2つの課題に限って、集中的に研究に取り組むべきである。

2. 1.に指摘した点と関連するが、私は農水省や科学技術庁の地球温暖化研究関連の検討委員もしており、ここでも環境庁のプロジェクトと同様の、あるいは似た研究プロジェクトが行なわれているので、相互の連絡なり調整が必要であると思う。さらにこれらのプロジェクトの担当者も環境庁のプロジェクト担当者と重複している方も多くいる。このような日本の研究体制が効果的な成果を上げ得るか、非常に疑がわしい。

3. 私が参加した「温暖化現象の解明」検討班で言えば、やはり炭素の missing sinkの問題が重要な研究テーマであると思う。この中で、陸上生物圏のかかわりも集中的に研究すべきである。1964年から1972年にわたって国際生物学事業計画(IBP:International Biological Programme)が行なわれて、地球上の生物量と生産力についての情報がかなり得られたが、まだまだその精度は不十分である。しかもIBP以後20年余が経過しているが、それ以後、組織だった研究が世界的に行なわれていないので、今回の研究でもこの面の研究の充実が是非望まれる。この際、最近進展の著しいremote sensing技術を最大限に応用して、生物量の正確な推定を行なうことが望まれる。

4. 3.の陸上生物圏の炭素フラックスとの関連で言えば、森林伐採、特に熱帯林の伐採と、それに伴う土壌からの炭素放出についても、その推定値に研究者による見積もりに大きな開きがあるし、日本は世界最大の木材、特に南洋材の輸入国である、と言った点からも集中的に調べる必要があると思うが、「熱帯林の減少」班の研究計画にこの問題が取り上げられていないのに、非常に奇異な感じがする。

5. 地球環境研究は、研究を始めたからと言って、早急に解決できる問題ではない。腰を据えて長期的な視野のもとに取り組む必要がある。現在は研究が開始されたばかりであり、しかも地球環境と言う大きな研究対象だけに、広範囲の可能性を考えて幅広く研究に着手しだした段階であるが、今後研究が進むにつれて、大いに成果の上がりそうな課題が必ずいくつかは出てくるものと思う。その時、そのような有望な課題を迅速に選びだし、集中的に研究が行なえるような体制作りが必要である。

## 1. はじめに

近年、人間活動は二酸化炭素の増加を引き起こし、地球環境への影響が指摘されている。このため、海洋がこれに対してどのように応答し、またその緩和にどの程度の役割を演じているかの評価に関心が寄せられている。

化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素は年間 $5.8 \times 10^{15}$  gCと見積もられている。年間増加率から算定される二酸化炭素の大気中への残留量は $3.6 \times 10^{15}$  gCで、残りの $2.4 \times 10^{15}$  gCが今のところ受け皿不明となっている。最も可能性のあるものとしては陸上植物の光合成と海洋であると言う事になっている。しかし、その何れかに決めるには不確定な事が多く、結論は今なお流動的であると言うのが適当であろう。ここでは海洋の光合成がどのような筋道で、その二酸化炭素の吸収と関連しているのかを述べたい。

## 2. 海洋への無機窒素化合物の負荷と光合成

海洋表層では、植物プランクトンの光合成により二酸化炭素、硝酸イオンおよびリン酸イオンを材料として有機物が合成されている。この際三者の量比は既知とされている。通常、この硝酸イオンは下層から有光層に供給され、他の材料物質と反応して有機物を生産している。この場合、硝酸イオンとともに二酸化炭素の除去が行われるが、二酸化炭素、硝酸イオン及びリン酸イオンの量比は常に一定で、この反応で新しく余分の二酸化炭素を吸収するとは考えられない。もし、それがあるとすれば、外来性の硝酸イオン、リン酸イオンの負荷がなければならない。

有光層に対する栄養塩の負荷には、主として三つの過程がある。第一は降水及びドライフォールアウトなどの大気降下物による栄養塩の負荷、第二に上昇流や拡散過程による海洋下層から有光層への栄養塩の供給、及び第三に河川水の流入による栄養塩の海洋への負荷等である。

大気から海洋への栄養塩の負荷には降水とドライフォールアウトとによる二つの過程がある。何れも時間的、空間的変動が激しく、海洋表層への地球的規模にわたるフラックスを見積もるには地理的条件を考慮して観測点を選定する必要がある。ここでは比較的データの揃っている北大西洋のサルガッソー海と北太平洋還流域を対象にしてまとめた。

海洋大気降下物の無機窒素化合物としては硝酸及びアンモニウムイオンが主成分である。サルガッソー海及び北太平洋還流域における無機窒素化合物フラ

ックスはそれぞれ20-35及び5-16  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ の範囲であると報告されている。南半球ではこれらの値の数分の一から十分の一程度に減少している。従って、海洋大気降下物による無機窒素フラックスは陸上の人間活動と深く関係しているものと理解される。

これらの測定結果をもとにして得られる全海洋規模の無機窒素化合物（硝酸イオン及びアンモニウムイオン）の供給はサルガッソー海及び北太平洋還流域でそれぞれ26-54及び8-26  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ であると算定される。この値は全海洋規模ではそれぞれ4.3-9.9 及び  $1.3-4.3 \times 10^{13} \text{gN yr}^{-1}$ となる。

これに対して、海水の流動に伴う有光層への硝酸イオンの供給について考えてみよう。下層から有光層への硝酸イオンのフラックスは海水の上昇速度と下層での硝酸イオン濃度、並びに水温躍層における渦拡散定数と硝酸イオンの濃度勾配によって決まる。何れの海域でもこれまでに水温躍層付近での渦拡散定数が $^3\text{H}$ や $^{14}\text{C}$ によって見積もられており、従って海水の上昇速度も分かっている。硝酸イオンの実測値をもとに算定される下層から有光層への硝酸フラックスは22-250（サルガッソー海）及び70-752  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ （北太平洋還流域）であると見積もられる。ただし、先にも述べたようにこの窒素が全部光合成に使われたとしても増えつつある大気中の二酸化炭素のシンクとはなり得ない。

最後に、流入河川による無機窒素化合物の海洋への負荷に関して、主要8河川による河川水の流入量と硝酸イオン濃度とから地球規模での河川による硝酸イオンの負荷量を算定し、それが  $1.3 \times 10^{13} \text{gN yr}^{-1}$ であると見積もられた。

これらの結果から、降水及びドライフォールアウト並びに河川水による有光層に負荷される無機窒素化合物は  $2.8-11.2 \times 10^{13} \text{gN yr}^{-1}$ となり、これは光合成で固定される二酸化炭素の炭素として  $0.16-0.56 \times 10^{16} \text{gC yr}^{-1}$ と算定される。これは人間活動で増加しつつある二酸化炭素のうち、受け皿として海洋が期待されている二酸化炭素量の7-24%に相当している。

### 3. おわりに

大気及び海水の流動、並びに河川水の流入による有光層への無機窒素化合物の負荷を見積もり、これを基礎に固定される二酸化炭素量を算定した。極めて断片的な観測結果を用いたにも拘らず、二酸化炭素の固定量としては十分注目すべき量に相当していた。この事は、今後全海洋規模にわたり、大気及び河川を通しての無機窒素化合物の海洋へのフラックスを組織的にモニターする事的重要性を指摘しているものと判断される。

地球温暖化の科学研究の推進について

1. 国際協同研究の推進

地球環境変化の研究は、問題の性質上、国際的なコーディネーションが重要である。この事は、研究者間で早くから気づかれ、少なくとも地球温暖化と気候変化に関しては良く計画された国際的協同研究計画が作られている。すなわち、地球規模環境変化の物理的側面を受け持つ世界気候研究計画（WCRP）が1980年来立案・実行されており、また、化学的・生物的側面に関わる地球圏・生物圏国際協同研究計画（IGBP）が、1986年に立案され、現在実行段階に移行しつつある。これらの研究計画は、日本の研究者を含む国際的な専門家から成る委員会で十分に討議されたもので、私の見る限り、たいへん良く出来ていると思う。したがって、基本的には、WCRPやIGBPの計画の線に沿って研究を推進する事が重要である。

注目すべき事は、WCRPにしてもIGBPにしても既に、長い年月をかけて検討を続けてきたもので、最近の2～3年地球温暖化が、国際政治の課題になってから対症療法的に作られたものではないことである。このため、両計画の内容には一見して地球温暖化研究と結びつきが明かではないものもある。例えば、WCRPの中の主要副計画の一つである熱帯海洋、地球大気研究計画（TOGA）は、自然の気候変動であるエルニーニョ・南方振動現象のメカニズムを明らかにし、大気・海洋結合モデルでの予測を可能にしようとするものである。この研究は、しかし、一面において温室効果ガス増加による気候変化を推定するには不可欠である。日本の気候に大きな役割を果たしている梅雨と夏季の乾燥状態、台風の発生数と強さなどはすべて、西太平洋赤道地域の暖水プールの温度と広がりによって支配されているといっている。したがって、その生成・維持のメカニズムを明らかにし、温暖化した時に暖水プールがどうなるのかを知ることは、前記の諸現象がどのように変化するかを正しく予想するために絶対に必要である。エルニーニョ・南方振動現象の原因は、この西太平洋赤道域の暖水プールの変動にあると考えられており、1992～93年を中心に暖水プールが、大気と相互作用して変動するメカニズムを調べるTOGA

— COARE (Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) が実行されており、日本の大学・国立研究機関も参加しているが、このような活動を着実にやっていく事が重要である。

## 2. 気候モデルの改良と基礎研究の重視

地球温暖化に伴う気候変化を予測するには、気候モデルによって数値実験を行うことは今や広く知られている。しかし、気候システムの数値モデル開発の歴史はまだ浅く、モデルは極めて未熟な段階にある。実際、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第1作業部会が活動を開始した時点で結果の出ていた、CO<sub>2</sub>倍増平衡気候の計算は、水平分解能 (メッシュサイズ) が500～1000 kmという粗いものであった。1950年代に始まった天気の数値予報のためのモデルは、今では100 km程度の細かい格子を用いているが、1970年代までコンピューター能力の制約から、300 km以上の粗い格子で、その結果、温帯低気圧の構造や動きをうまく表現できず、予報の精度は長い間低迷して当事者を苦しめた。気候モデルに使われていた500 km以上の格子間隔は、数値天気予報の経験の上に不十分であることが証明されていたものを、「予備的研究」のため計算機資源の節約を考えて使っていたのである。社会的な要求が余りにも早く突然にやって来たので、研究としてはリハーサル段階にあるもので本番に使わざるを得なかったのが実情である。IPCCの作業が始まってから急いでまとめられた分解能2倍 (格子間隔250 km) の3つのモデルの結果は、現状気候の再現性からみてもIPCCの目的に一応かなうものであった。モデルの分解能の問題は単純に計算機資源の投入で解決できるから、そのための行政当局の努力が望まれる。

気候モデルの欠陥は、分解能ばかりではない。モデルは、基本的には物理の方程式に立っていると言ってよいが、実際には格子間隔以下の小規模現象の効果を取り入れる (パラメタリゼーション) ために、観測と単純な物理的考察に立った経験則が用いられている。雲の発生とその日射反射効果、積雲対流による熱・水蒸気・運動量の鉛直輸送・海洋中の鉛直・水平の混合過程などは、そうしてモデルに組み込まれている。気候モデルは、これら多数の「個別物理過程」を素子とする集積回路のようなものである。当然、これら物理過程のひとつひとつの精度を上げる (真の自然の状態に近づける) ことが必要であり、それには個別過程を対象として気象学、海洋物理学、陸水雪氷学などの基礎研究を全面的に推進する必要がある。

基礎研究の重要性の好例は、内部重力波の効果である。気候モデルの第一人

者である G F D L の真鍋博士は 1 9 8 3 年に、東大に滞在されていたが、当時彼は、G F D L のモデルで分解能を上げると（球関数展開の自由度を増やすと）現状気候のシミュレーション結果が悪くなる（北半球高緯度の偏西風が強くなり過ぎる）という奇妙な事実に悩まされていた。世界の他の研究者（数値天気予報センター）も同様のことに気づいていた。これは、分解能が良くなると温帯低気圧が偏西風を強める効果が「正しく」表現されるようになるため、北半球の小山岳による内部重力波の抵抗効果を取り入れないとバランスがとれないためである。先に記した I P C C 作業中にまとめられた分解能の高いモデルには、内部重力波の効果を取り入れてはじめて良い結果を出した。内部重力波の効果の重要性は、筆者のものを含め中間圏（高度 5 0 ～ 9 0 km）大気大循環の研究から気づかれ、それから下層大気モデルにも導入されたものである。また、この内部重力波の効果の検証には、京都大学超高層電波研究センターの M U レーダーが最も役立っていることも忘れてはならない。

### 3. 国際協力による地球観測

W C R P や I G B P の基本戦略は、モデリング、個別過程研究（process study）、地球規模観測の 3 本柱を相互に支え合うようにして研究を進めていくことにある。地球規模観測には当然のことながら国際協力を必要とするが、日本はその経済力と技術力の故に、枢要な役割を果たすことが期待されている。特に、人工衛星による地球観測に関しては、1 0 年余り前に行われた Global Atmospheric Research Programme の地球規模実験において 5 個の静止気象衛星の中の 1 個を受け持ち、引き続き維持している実績、さらに近年、海洋観測衛星 M O S 1、M O S 1 b を打ち上げた実績から、日本（N A S D A）は、アメリカ（N A S A）、ヨーロッパ（E S A）と並ぶ 3 極のひとつとして不可欠の役割を担っている。現在開発中で 1 9 9 5 年打ち上げ予定の総合地球観測衛星 A D E O S、開発研究中で N A S A との共同で 1 9 9 6 年打ち上げ予定の熱帯降雨観測衛星 T R M M は、W C R P や I G B P の実施に不可欠のものである。

1 9 9 0 年 1 1 月に行われた第 2 回世界気候会議（S W C C）において、全地球気候観測システム（Global Climate Observing System - G C O S）の構築が提案され、現在計画立案中であるが、その大きな柱の一つは衛星からの地球観測で、特に 1 9 9 0 年代後半に打ち上げられる国際協力による極軌道プラットフォーム（P O P）を組み合わせた総合観測システムである。この中には、N A S D A で計画中的の J - P O P が含まれ、更に、水循環を中心とした W C R P の副計画・全球エネルギー水循環実験計画（G E W E X）の中で風の直接観測

と、TRMMに引き続く降雨観測を分担することが望まれている。

G COS のもう一つの柱は、衛星では不可能な海洋内部の観測である。海洋内部の諸過程は、CO<sub>2</sub>を溶かし込んでそれをプランクトンの作用で有機物に変えたり、温室効果で高温になった表層水を深海へ運び込み、代わりにフレッシュな深層水を湧きあがらせて温暖化を遅らせたり、地球温暖化予測のキーを握っている。そこで、ちょうど全世界の気象機関で毎日気象観測を行っている様に定常的な海洋観測網 (Global Ocean Observing System-G O O S) を作り上げようというのが、G COS のもう一つの柱である。G O O S の実施には (筆者の記憶では)、年間25億ドルを要するという野心的計画であるが、太平洋に面する世界国家の一員として日本は積極的に取り組んでいく必要があるだろう。

#### 4. 研究者養成

以上すべての研究を推進していく上で、最大の鍵となるのは研究者である。地球環境研究全般に言えることであるが、気候変動研究の専門家の数は世界的にみて不足している。第2回世界気候会議でも、気候モデルの現状と問題点について報告した英国気象局のJ. Mitchellは、問題点として雲の取り扱いなどをあげた後、最大の問題として“Lack of trained people”を指摘していた。過去数10年超大国として世界全体の面倒をみてきたアメリカは、早くから地球全体の気象、気候の研究に力を入れ厚い研究者層をもっているが、経済復興のため全力投球をしてきた日本は、直接利益をもたらさない気象、気候、海洋、陸水雪氷学などの研究には人的資源を注いでこなかった。すなわち、研究ポジションを十分作らなかった。(このため、真鍋博士をはじめ優秀な人材が、アメリカに多数渡って、気候モデルの研究は日本人研究者が独占していた。) 日本の大気科学・海洋科学の基礎研究者数はアメリカの1/10~1/20であり、人口比を考えても1ケタ少ない。フロンによるオゾン層破壊のアセスメントに関して、独自のモデルによる研究なしにモントリオール議定書にサインした先進国は日本のみであったと思う。研究費は、アメリカがG N P の20 ppm、イギリスが6 ppmであるのに対して、日本は1 ppm弱である。経済力にふさわしいBurden Sharingを求められている現在、“秩序のコスト”の負担をし得ない日本が人的資源を人類生存のインフラストラクチャーに投入することは、世界に貢献する有力な途であると思う。



1. 地球温暖化現象解明グループ

(1) 大気科学中心の解析が行なわれているが、精度の向上が望まれる。しかし現在の知識、精度でメッシュの切り方に工夫ができないだろうか。単一なメッシュの切り方ではなく、陸地の多い所で細かく、太平洋などでは荒くするような方法が可能であるかどうか検討してほしいと思う。

(2) 大気科学では大気と雲が中心になっているが、これに対する海洋の効果をもっと取り入れる必要がある。地球の進化の歴史を見ても地球環境に海洋は重要な役割を果たしてきた。現在、海洋、大気連結のシミュレーションが行なわれるようになったが、海洋の効果を有効に取り入れるシミュレーションが必要である。最近、海洋における水の循環過程が明らかになってきているので、これらを合理的に組み近似を成立させることが望ましい。特に南極海、北極海における海水の効果と、海水中のポリニアを通しての熱移動のモデルを作りあげることが必要であろう。

2. 地球環境研究全体としての今後のあり方

(1) 観測の強化：火山、地震の例でみられるように、火山噴火、地震発生時における観測は協力体制の下で行なわれ、成果をあげているが、定常観測の不足を痛感する。異常を発見するためには定常を知ることが重要である。既にバックグラウンドは求められない状態にあるかもしれないが、現在の定常観測の実施を強く希望する。

(2) 異分野間の総合的研究体制の確立：例えば酸性雨の研究にしても、酸性雨発生メカニズムを明らかにすることはもちろん大切であるが、今後必要なことは降水後の影響の研究である。そのためには森林生態学の協力が必要であり、土壌学の協力が必要である。異分野間の興味の対象はそれぞれ異なると思われるが、ひとつの目的に向かって、分担と総合が行なわれなければ成果をあげることにはできない。現在の地球環境問題の研究には自然科学のみならず、時として社会科学系の人々の協力、あるいは経済学系の人との協力が必要となる場合も考慮しておくべきであろう。

### 3. 地球環境に関する研究体制について

(1) 研究体制の一本化：研究者間の連絡を密にし、研究の効率を高めることが必要である。同じようなシミュレーションをいくつかの研究機関で並列に走らせるのは意味がない。現在地球環境の研究は個人プレーで行なうことのできる内容ではない。個人のアイデアは大切であるが総合的解析はグループで行なうべきである。

(2) 研究費の有効利用：検討会でも発言があったように学際的研究が省際的に行なわれるべきであって、各省庁間で連絡をとり、実効のある予算執行を行なうべきである。省庁間のみならず、官学民の共同体制を確立すべきである。地球環境の研究は高エネルギー物理学と同様に真の共同研究によってのみ成果が期待できるものである。

### 4. その他

地球環境問題は小手先で処理すべき問題ではなく、地球の46億年の歴史と進化の中での的確に把握すべきものであり、単なる対処療法ではかえって悪い方向へ進展する可能性を持つ。

従来の研究の積み重ねの上に立って研究を進めていくことはもちろん大切であるが、若い人々の新しい発想を必要とするものである。発想の転換と知の創造が現在人類を救うための基本的条件となるであろう。