

国立環境研究所
研究発表会 予稿集

平成7年6月16日

於：国立環境研究所大山記念ホール

目 次

1. 研究発表講演 (於: 大山ホール)

10:10-10:45	科学者と政策決定者は理解し合えるか ~地球温暖化の総合評価モデリング~ 1
	森田 恒幸 (地球環境研究グループ)
10:45-11:20	マレーシアにおける熱帯林研究: 生物多様性とその保全 7
	可知 直毅 (地球環境研究グループ)
11:20-11:55	人工衛星からオゾン層変動の実態を解明する ~ILASプロジェクト~ 12
	笹野 泰弘 (地球環境研究グループ)
13:45-14:20	地球環境を診断する 18
	藤沼 康実 (地球環境研究センター)
14:20-14:55	エコビークルの開発について 24
	清水 浩 (地域環境研究グループ)
14:55-15:30	東京湾における青潮発生 29
	竹下 俊二 (地域環境研究グループ)
15:45-16:20	ディーゼル排気粒子 (DEP) による肺がん発生の新しいメカニズムについて 36
	嵯峨井 勝 (地域環境研究グループ)
16:20-16:55	中国の大気汚染の現状 42
	安藤 満 (地域環境研究グループ)

2. ポスターセッション 12:30-13:45 (於: 中会議室)

北極圏のカラマツ林 ~木々の年齢から林の歴史を推しはかる~ 49
竹中 明夫 (地球環境研究グループ)
スギ花粉数の計測と花粉症症状 50
松本 幸雄 (地域環境研究グループ)
都市中小河川の有機塩素化合物と有機塩素量 51
相馬 悠子 (地域環境研究グループ) ほか
地球温暖化対策が日本経済に及ぼす影響についてのシミュレーション分析 52
日引 聡 (社会環境システム部)
エネルギー節約と二酸化炭素排出抑制の観点からみたごみ発電の価値は? 53
森 保文 (社会環境システム部) ほか
東アジア地域植生分布モニタリングのためのNOAA AVHRRデータ処理システムの構築 54
清水 明 (社会環境システム部) ほか
バイカル湖地域の古環境変動解析に挑む 55
田中 敦 (化学環境部) ほか
トランスジェニックマウスを用いた環境有害物質の毒性評価の試み 56
遠山 千春 (環境健康部)
温暖化は死亡率に影響を与えるか 57
本田 靖 (環境健康部)

大気大循環モデルを用いた長距離輸送の研究	58
菅田 誠治 (大気圏環境部)	
つくばで観測されたピナツボ火山1991年噴火に由来する ²¹⁰ Pb	59
土井 妙子 (水圏環境部)	
遺伝子操作による植物の環境ストレス耐生機構の解明	60
青野 光子 (生物圏環境部)	
環境情報センターの活動およびデータベースの紹介	61
波多野 実 (環境情報センター)	
地球環境研究センターにおける地球環境モニタリング事業	62
福島 健彦 (地球環境研究センター)	
図で見る地球環境 ~GRID—Tsukuba~	63
宮崎 忠国 (地球環境研究センター)	

研 究 発 表 講 演

科学者と政策決定者は理解し合えるか

～ 地球温暖化の総合評価モデリング ～

森田 恒幸（地球環境研究グループ温暖化影響・対策研究チーム）

1. 超複合的な地球温暖化問題

いま地球環境問題は、我々人類の生き方や社会経済の発展のあり方にかかわる基本的な問題として、世界的に政策対応が急がれている。その中でも特に大きな政策課題と認識されているのが、地球温暖化問題である。

地球温暖化問題は、気象、海洋、生物、大気化学等の自然科学の分野のみならず、経済、エネルギー、技術、国際関係等の社会科学や工学分野にまたがる、大変複雑なメカニズムから生じる。このため、少数の領域の科学的知見を寄せ集めるだけでは、なんら有効な政策は見出せない。非常に広い範囲の領域の断片的な知見を、政策立案に向けて総合化しなければならない。しかし、知的ではあるが専門家ではない政策決定者にとって、このような総合化は至難の技であり、政策決定者の思考を助ける有効なツールの開発が不可欠となってきた。

このツールとは、広い範囲の研究者の英知を政策決定に向けて結集するコンピュータ・モデルのことであり、最近になって、この種の学際的なモデリングの研究が一気に盛んになってきた。このモデルは、総合評価モデル（integrated assessment model）と呼ばれ、経済、エネルギー、大気、海洋、生態系といった分野を包括的に解析する大変に大規模なもので、シミュレーション技術の集大成ともいえるものである。そして、世界の精鋭がこのモデルの開発競争に参加して、凌ぎを削っている。我々の研究チームもその一つである。

我々が開発中のモデルは「アジア太平洋圏温暖化対策分析総合モデル（Asian-Pacific Integrated Model）」、略して「AIM」と呼ばれ、基本部分が既に完成し、いくつかのシミュレーション分析を行っている。本稿では、このAIMの概要について紹介する。

2. アジア太平洋地域に焦点を当てた世界モデル

総合評価モデルと呼ばれる温暖化政策の分析モデルは、人間の活動によって温室効果ガスがどのくらい排出されるか、その温室効果ガスが大気中に蓄積され、気温や地域の気候がどのように変化するか、さらに、この気候変化が各地の自然環境や人間活動がどのような影響や

被害を与えるか、という一連のプロセスを統合して分析するところに特徴がある。これによって、対策の総合的な効果や間接的な効果の判断、政策評価における不確実な要因の判断、対策の費用と効果の比較など、いろいろな政策決定のニーズに体系的に答えることができる。現在のところ、世界には本格的な総合評価モデルが4つあるが、AIMはその1つである。

AIMの特徴はいくつもあるが、他との大きな違いは、世界モデルでありながらアジア太平洋地域に焦点を当てている点である。この地域の各国から排出される温室効果ガスを特に詳細に推定し、また温暖化に伴ってこの地域に生じる各種の影響や損害を特に詳しく分析できるように設計している。しかも、個々の国のモデルはそれぞれの国の研究者と共同で開発し、各国に政策分析ツールとして定着するようシミュレーション技術の移転を図っている。

アジア太平洋地域を特に詳しく扱うことには大きな理由がある。この地域は大きな経済発展のポテンシャルを有しており、温室効果ガスの排出が急激に伸びることが確実である。二酸化炭素の排出量でみると、来世紀末には世界の半分にまで増えると予想される。さらに、一旦気候が変化し始めると、この地域の社会経済は著しい被害を受けることになる。地球温暖化問題の解決には、まずアジア太平洋地域を征することが必要なのである。しかも、わが国は経済援助や技術移転などを通じてこの地域でのリーダーとしての役割が期待されており、政策分析ツールの開発や研究面のサポートにおいてもわが国への期待は大きい。

3. 研究者と政策決定者のインターフェイス

さて、AIMの全体構造を図1に示す。人為起源の温室効果ガスの排出量を予測する温室効果ガス排出（AIM/排出）モデル、排出された温室効果ガスの大気中濃度を予測して温度上昇を推定する温暖化現象（AIM/気候）モデル、それに、気候変化がアジア太平洋地域の自然環境や社会経済に及ぼす影響を推定する温暖化影響（AIM/影響）モデルの三つから構成されている。

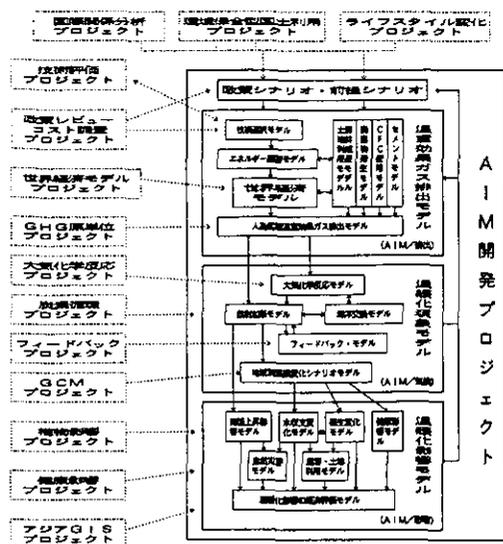


図1 AIMモデルの全体構成と他のプロジェクトとの関係

各々のモデルはさらに細かいサブモデルに分かれ、それぞれのサブモデルには関連する研究プロジェクトの成果を集約する体系となっている。即ち、個々の分野の研究者の知見を総合化して政策決定者に手渡し、また政策決定者の問題意識を個々の研究者に伝えるという、いわばコミュニケーション・インターフェースを構築することが、AIMの基本的な設計方針となっている。

「AIM/排出モデル」の主要部分は、エネルギーモデルと土地利用モデルであるが、特にエネルギーモデルに大きな特徴がある。詳細な技術評価に基づいてエネルギー消費量を部門別に積み上げて推定する技術モデルと、市場均衡を基本にして長期的な経済活動の推移を予測する経済モデルとが統合された構造になっている。これにより、長期的な社会経済の趨勢と各国の個別的な対策の効果との関係を体系的に分析できるようになった。

「AIM/気候モデル」の特徴は、今まで開発されている大気化学反応、海洋交換、放射加熱、等のモデルと、炭素循環等の独自に開発したモデルを一定のフレームに基づいて組み合わせたことにある。こうして完成したAIM/気候モデルによって、温室効果ガスの排出が地球規模の気候を変化させるプロセスと、この地球規模の変化が地域の環境や社会に影響を及ぼすプロセスが、統合して分析できるようになった。

「AIM/影響モデル」については、水資源への影響、植物生態系の変化、健康への影響、海面上昇による影響、農業生産の変化、自然災害のパターンの変化等、

個々の影響を推定するサブ・モデルから構成されている。また、これらの個々の影響が地域の社会経済にどのような影響を及ぼすかについて、総合的に評価するモデルの開発も予定している。これらのモデルの特徴は、独自の地理情報システムの整備によって、10~100キロメートル四方を単位地域とした高解像度の分析が可能な点である。これによって、アジア太平洋地域の温暖化に伴う影響を詳細に分析できるようになった。

4. 省エネ技術の普及に有効な炭素税

AIM/排出モデルでは、人口増加、経済成長、技術革新、各種政策展開等のシナリオを前提として、エネルギー消費量や土地利用変化などを予測し、将来の温室効果ガスの排出量を推定する。

この中で中心となるサブモデルは、先にも述べたとおり、エネルギー・モデルである。このモデルは世界モデルとアジア太平洋地域の国別モデルから構成されている。世界モデルは、エネルギーの国際市場を再現するモデルであり、一方、国別モデルは、部門別に詳細にエネルギー需要量を積み上げて推計するエネルギー需要モデルである。この基本構造を図2に示す。

エネルギー需要モデルでは、まず、将来に必要となるエネルギーのサービス量を推計し、エネルギー効率をこのサービス量にかけ合わせることにより、国別のエネルギー需要量を予測する。この際、エネルギー効率の改善はどの範囲の省エネ技術が選択されるかにより決定される。例えば、日本モデルでは100種以上、中国モデルでは300種以上の省エネ技術が市場に導入されるかどうか評価されている。

このモデルの優れた点は、これらの省エネ技術の導入がその時々々のエネルギー価格により決まるという現象を、忠実に再現していることにある。即ち、エネルギー価格が高くなれば、多少の初期コストが高い省エネ技術であっても、燃費節約の便益の方が大きくなって、省エネ技術のシェアが増える。このような現象を体系的にシミュレーションできるのである。これにより、炭素税を導入してエネルギー価格が上昇した場合、どの範囲の省エネ技術が導入され、エネルギー需要量がどの程度減少し、その結果として二酸化炭素排出量がどこまで減らせるかが、体系的に分析できるようになった。

図3は、我が国におけるシミュレーションの結果を示している。炭素1トン当たり3万円程度の炭素税を導入

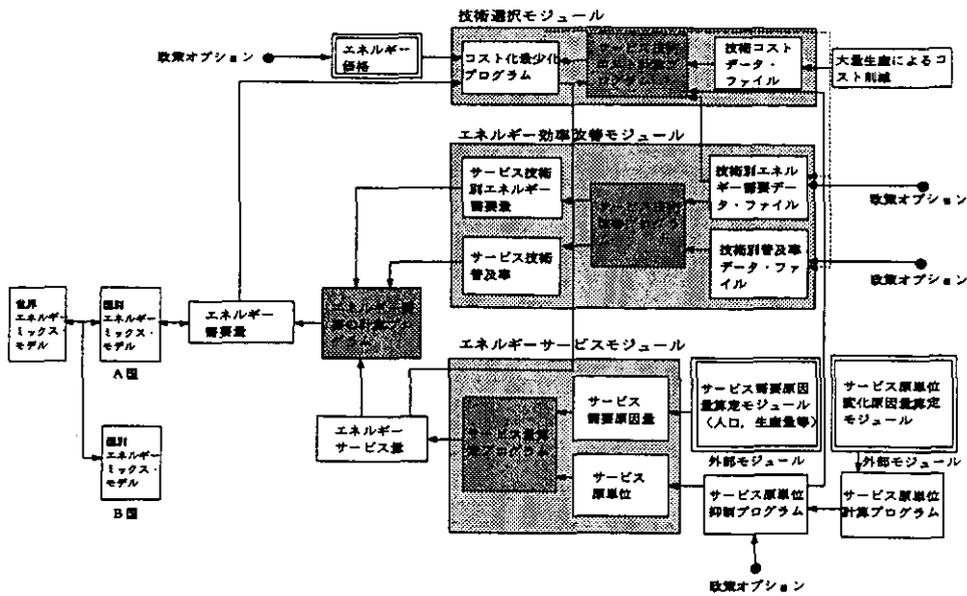


図2 AIMエネルギー需要モデルの基本構造

すれば、家庭、業務および運輸部門の省エネ技術の導入が大幅に進み、2000年で二酸化炭素排出量を1990年レベルに抑制する可能性があることがわかる。また、炭素税の税収を省エネ初期投資への補助金として積極的に活用すると、炭素1トン当たり3千円程度の薄い税率を課した場合でも、一定の条件の下ではトン2～3万円の炭素税に匹敵する効果が得られることがわかる。このようなシミュレーション結果は、それぞれの国の政策決定過程に実際に反映されている。

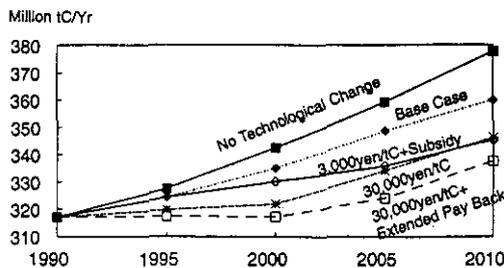


図3 わが国の二酸化炭素排出量の将来予測

5. 世界の二酸化炭素の半分がアジアから

このように国別に見積もられたエネルギー需要量は、世界モデルにより国際市場を通じて調整され、各国の最終のエネルギー消費量が種類別に決定される。そして、この種類別のエネルギーに基づいて将来の二酸化炭素の排出量が推計される。

図4は、こうして推計された各国の二酸化炭素排出量

で、特別な政策を導入しない場合の2100年の値を示している。来世紀末には中国は二酸化炭素の排出量において世界でトップに躍り出るほか、インドも世界4位まで順位を上げる。さらに、日本が4位を維持し、インドネシアと韓国が世界の十大排出国の仲間入りをするなど、アジア太平洋地域からの排出量の急激な増加が予想される。

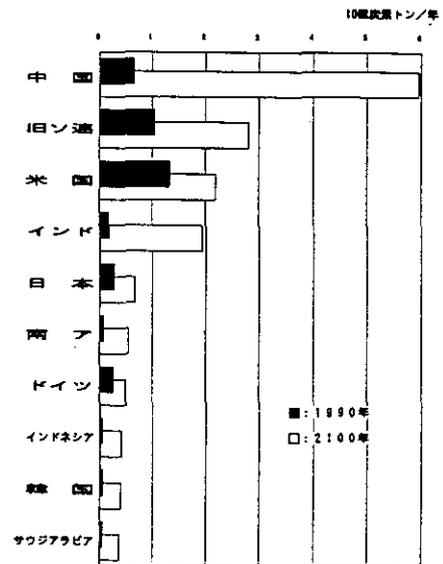


図4 来世紀末のCO₂排出国ベスト10

その結果、この地域の二酸化炭素排出量は、現在のところ世界の4分の1程度のシェアにとどまっているものが、来世紀末には世界全体の半分近くを排出する可能性

がある。

また、エネルギー消費に伴う二酸化炭素排出量のほか、森林減少やセメント生産による二酸化炭素の排出、また土地利用変化によるメタンの排出モデルも用意している。特に、森林減少のモデルについては、過去100年間の森林破壊と人口増加の歴史的データをもとにその関係を分析して、熱帯林の減少の統計的予測モデルを完成させ、今後100年間の森林減少による二酸化炭素フラックスを国別に推定している。

6. 不確実が故に必要な温暖化防止政策

温室効果ガスの排出量が地球規模で推計されると、次に、A I M / 気候モデルを用いて、大気中の温室効果ガスの濃度が決定され、全球的な気温の上昇のシナリオ、さらに地域の気候変化のシナリオが決定される。

まず、炭素循環モデルにより二酸化炭素濃度が決定され、大気化学反応モデルを通じてメタンガスや亜酸化窒素の濃度が決定される。そして、放射加熱モデルを通じて全球的な気温上昇のシナリオが決定されることになる。この際、大気中の化学反応、炭素循環、気温上昇に伴う温室効果ガスの排出量への二次的影響（フィードバック）、海洋との交換の影響などが考慮される。大気化学反応については米国のA M A Cモデル、海洋交換については標準的なボックス拡散海洋吸収モデル、放射加熱についてはI P C C（気候変動政府間パネル）等を用いているが、炭素循環については陸域生態系の肥沃化モデルを開発中である。また、地域的な気候変化については5種類の大循環モデルの出力をもとに推定モデルを作成している。

図5は、特別の温暖化対策が取られなかった場合の全球の平均気温の上昇を予測したもので、1985年以降に予測されたあらゆる温室効果ガス排出の推定値を入力して、その不確実性の幅を示している。気候感度を 2.5°C とした場合、今後百年間に 2°C から 3°C の温度上昇が見込まれる。

このようなシミュレーション分析によって、次のような点が明らかになった。

- (1) 今までに得られた科学的知見と今までの将来の発展に対する認識を前提にすれば、地球の温暖化を否定することは困難であり、温暖化の可能性が非常に高い。
- (2) 社会経済的な不確定要因と自然の不確定要因のいずれもが、温暖化の推定に大きな影響を及ぼす。この両方の

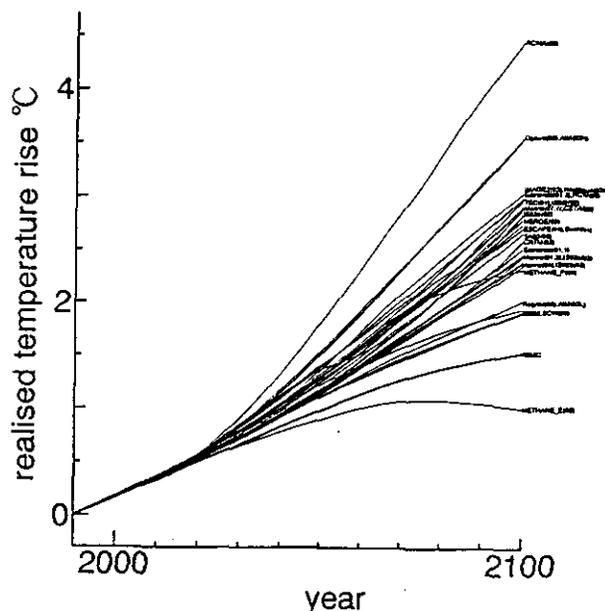


図5 様々な排出シナリオに基づく温度上昇の可能性

要因を勘案すると温暖化の不確実さの幅は非常に大きくなる。

(3) このような不確実さは、現段階での政策オプションの確定が困難であることを示している。不確実さに対応した幅広い政策オプションの検討が必要である。

(4) 自然や社会経済の不確定要因については、今後ある程度不確実さを減らせる可能性があるが、そのためにはかなりの長期間を要する。

(5) 以上のことから、温暖化問題解決のための政策の基本方向は、可能な限り早いタイミングで可能なものから対策を実施し、後世の世代が取り得るオプションの幅を広げ、不確実の程度と範囲を見極めるための時間を稼ぎ、併せて最悪の温暖化シナリオに備えて社会経済システムの適応策を検討しておくことにある。

7. 増加する渇水と洪水のリスク

では、温暖化対策に向けて世界が対応しなかった場合にどうなるのか。

A I M / 影響モデルを用いていくつかの分析結果を紹介しよう。現在までに、水収支変化モデル、植生変化モデル、健康影響モデルの3つが完成し、現在農業影響モデルを開発中である。

まず、陸域の水収支への影響は、地球温暖化の影響の中でも最も重要な視点の一つである。降水量や蒸発量、その頻度及び期間の変化は、水資源の利用、洪水等の自然災害、農業や陸域生態系に大きな影響を与える。こ

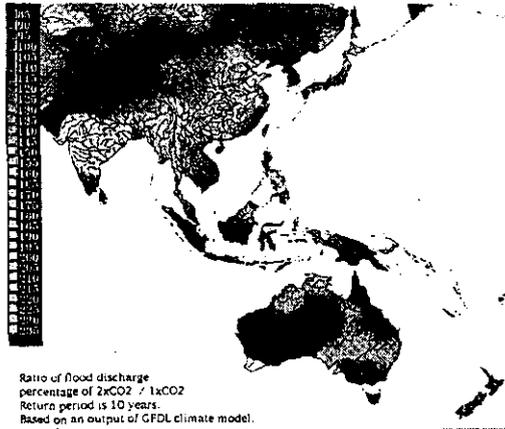


図6 十年確率の洪水時における月間流出量変化

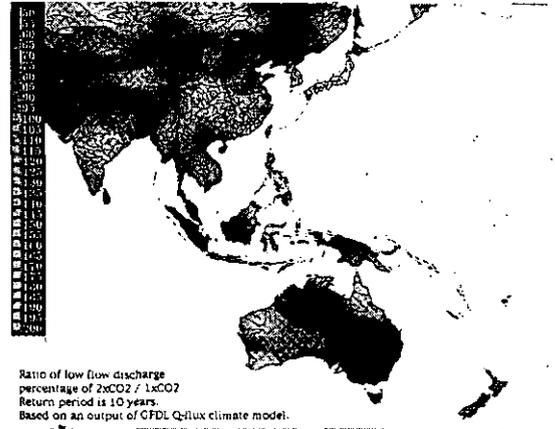


図7 十年確率の渇水時における月間流出量変化

のため、各流域で雨水の流出過程を再現する水資源影響モデルの開発を試みた。このモデルでは降水量、蒸発量、融雪、河川流量により各地域の水収支を決定する部分とともに、地形データに基づいて河川の流出ルートを決める部分で構成されている。

図6、図7は、このモデルを用いて、温暖化により気候が変化したときの表流水の変化で、二酸化炭素濃度が2倍になった時の洪水および渇水のリスクの増減を示す。図6の明るい部分は、十年確率で生じる洪水時の流量が2倍以上に増加する地域で、洪水のリスクの増加が予想される地域である。これらの地域には、インド、中国および日本のそれぞれの一部が含まれる。一方、図6の黒い部分は、10年確率の渇水時の流出量が40~50パーセント程度減少する地域であり、アジア太平洋地域の大変広い地域で温暖化によって渇水被害のリスクが増加することが明らかとなった。洪水時の流出量が増加する地域は必ずしも渇水被害が緩和されるとは限らず、いくつかの地域では洪水のリスクと渇水のリスクが同時に高まることが予想されている。

8. 植物への影響は食糧生産にも

また、自然植生の変化を予測するためのモデルを開発した。このモデルは、現在の植生の分布と、その分布する地域の自然条件との関係をあらかじめ明らかにしておき、気候の変化によってこれらの自然条件がどのように変わり、どの地域の植生の生育条件が損なわれるか予測するものである。詳しくは、それぞれの植生の生育地域の自然条件について、現在観測できる上限値および下限

値をもってこの植生の生育可能範囲とみなし、地球温暖化によってこの範囲を超えてしまう場合に、この地域の植生は変化するとみなしている。

図8はいくつかの気候変動のシナリオの下での自然植生のシミュレーション結果を示している。中国北部からモンゴルにかけての北方針葉樹やカラマツ針葉樹林帯、

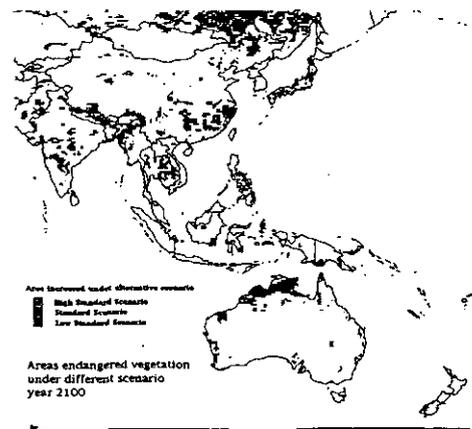


図8 いくつかの温暖化シナリオの下での植生変化の予測

それにチベットやヒマラヤの山岳部凍土地帯が大きな影響を受ける可能性があることがわかる。また、中国南東部の常緑-落葉樹林帯、インドの乾燥落葉樹林帯、インドシナ半島および北オーストラリアなどでも、温暖化により大幅な植生変化が生じる可能性が示されている。

なお、実際の植生遷移のメカニズムは、複雑かつダイナミックであり、本格的に植生変化を分析するため、植生遷移の確率モデルの開発を進めている。

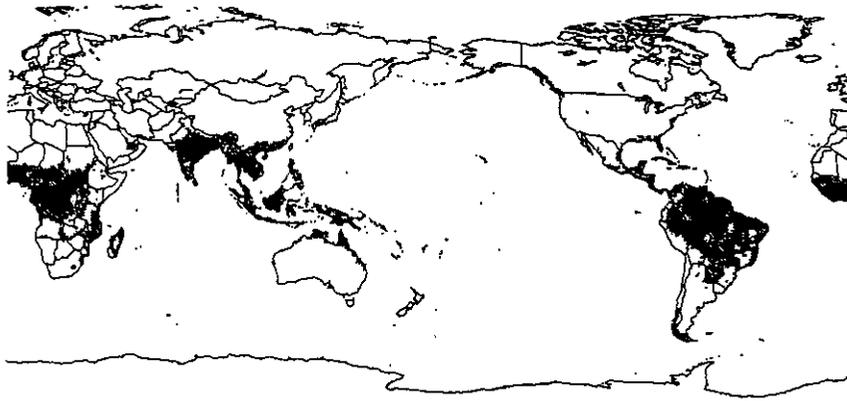


図9 マラリアの安定常在域の拡大予測

一方、植物に影響が生じるということは、食糧生産にも地球温暖化は大きな影響を与えることを示唆している。最近開発した農業影響モデルを使ってこのことを確かめている。今までの予測結果によれば、世界の米の生産量は全体として大きく変化しないが、小麦やジャガイモ等の他の食糧が大幅に減産となる可能性があることがわかった。これらの推定はあくまでも潜在的な影響であり、このような影響に対して人類はどのように適応していけるかについて、さらに検討を進めている。

9. 気候変化の影響は人の健康にも

ところで、地球温暖化の影響のうち、今のところ最も大きな経済的損失が見込まれているものは、人の健康への影響である。地球温暖化は地表付近の気温を上昇させて降水量を増加させるため、マラリアの媒介動物であるハマダラカの繁殖とともに原虫の形成期間の短縮効果をもたらし、世界のマラリア患者を増加させると予想されている。このようリスクを定量的に推定するために、世界規模のマラリア分布の変化予測モデルを開発した。このモデルでは、1)ハマダラカの生息条件（気温変化、土壌水分量等）を明らかにし、2)温暖化により生息条件がどのように変化するか推定する。3)そして、この結果からハマダラカの生息域、繁殖、原虫の形成期間を推定して、4)それぞれの地域におけるマラリア患者の増加の可能性を評価した。

図9は二酸化炭素濃度が2倍になった時点でマラリアのリスクの高い地域がどの程度拡大するかを示す。斜線部分が地球温暖化により新たにマラリアの高いリスクが予想される地域に新たに加わる地域で、アフリカ南部、オーストラリア北部、中国南部、東南アジア、インド、

南アメリカ南部の一部がこれに当たる。これは、マラリアのリスクに曝されている人口が、今よりも10~30パーセント増加することに相当する。

10. いま求められる政策と科学の国際的連帯

以上、A I Mモデルの全体像を簡単に紹介した。このモデルを使って今までにわかったことは、地球温暖化問題を解決するには、今後100年をかけて、我々の社会のあり方や経済発展のあり方、それに我々の生活の仕方を基本的に変えていかなければならないということである。短期的な環境規制や自然保護政策では効果がほとんど期待できない。これからの環境政策には、経済政策やエネルギー・資源政策などを包含し、今後100年以上にわたって通用する「本流としての政策論」が不可欠となっている。

もとより、このモデルを完成させるには、今後多くの作業と国際的連携が必要不可欠である。このため、国内の一研究機関のプロジェクトから、世界の共同プロジェクトへと発展を図っているところである。既に、アジア地域の途上国との共同研究により、国別モデルの開発や改良を進めており、この地域の温暖化対策の評価や国際協調政策の検討に用いられるようになってきている。さらに、米国、オランダ、オーストリア等の研究機関とも、世界モデルの改良のために共同研究を始めており、国際的な政策分析ツールとして活用が図られることを願っている。

マレーシアにおける熱帯林研究：生物多様性とその保全

可知 直毅（地球環境研究グループ森林減少・砂漠化研究チーム）

1. 世界の熱帯雨林

熱帯雨林は、樹高が地上40mを越える地球上で最大のスケールをもつ、最も複雑でかつ最も多様な生物が生活する巨大な生態系である。地球上には熱帯雨林がまとまって存在する地域が3つある。すなわち、赤道アフリカ西部、南米アマゾンと中米東部、そして東南アジアである。これらはおおむね南北回帰線にはさまれた地域に対応し、1年のうち少なくともある期間、赤道気団におおわれる。マングローブ林や熱帯ヒース林が成立する特殊な立地条件の場所を除けば、熱帯林は、乾季の長さによっていくつかのタイプに区分される。乾季が4～6ヶ月も続く場所では、落葉季節林（雨緑林）がみられるが、赤道に近づくと乾季の長さが短くなり、月降水量が100mm以下の月が2ヶ月より短くなると熱帯多雨林が出現する。特に、東南アジアのボルネオ、スマトラ、ニューギニアなどの島やマレーシア半島中部以南には、樹木の大きさ、生物種の豊富さに関して世界で最もよく発達した熱帯多雨林が存在する。

2. 熱帯林の減少

1993年にFAO（国連食糧農業機関）が発表した最終報告によると、世界の熱帯地域90ヶ国の森林面積（閉鎖林と疎林を含む）の合計は、1990年現在1,756万km²であり、1981年～1990年の10年間に154万km²減少したと推定されている。これは、毎年九州の約4倍に匹敵する面積の森林が消失してきたことを意味する。この減少率は、FAO/UNEPが1981年に発表した1981～1985年の5年間の森林減少率の推計値の1.5倍になる。予想をはるかに上回る速度で熱帯林が減少しているのである。近年の熱帯林の減少は、薪炭材の過剰伐採、過度な焼畑耕作や過放牧、あるいは不適切な商業伐採、大規模な山火事などによっている。これらの直接的な森林減少の原因は、熱帯諸国の急激な人口増加や貧困の問題など社会経済的な要因が複雑に関わっている。

3. 熱帯雨林生態系の衰退

熱帯雨林に生息する生物の生存に与える影響は、単に森林面積の減少だけから判断できない。ランドサットの

衛星画像によってアマゾン地域の森林の減少のようすをみると、森林面積の減少に伴って広大な面積にわたって一面に広がっていた森林がいくつもの小さな区画に分断されていくことがわかる。この生態系の細分化の過程は、多くの生物が生存している場としての熱帯雨林の生態系の構造と機能に大きな影響を与える。生態系が細分化されると、それぞれの地域に分散して分布している生物の地域個体群どうしの交流がとだえてしまい、孤立した個体群が滅びてしまう可能性が高まるからである。

4. パソー森林保護区

我々は1992年より「熱帯林の減少に関する研究」の一環としてマレーシア半島部の熱帯雨林を対象にして調査を継続している。そこで、まずパソーの熱帯雨林とはどのようなものか、その概略を述べる（図1）。

パソー森林保護区は、半島マレーシアの南西部ネグリ・センビラン州のシンバン・ベルタン村から6km入った、面積2,450haの森林保護区である。マレーシアの首都クアラ・ Lumpurからネグリ・センビラン州の州都セレンバンまで高速道路で約1時間、そこからウル・ベンドゥルの峠を越え、クアラ・ピラの町を抜けて約1時半かかる。

保護区の大部分は低地フタバガキ林であるが、北東部は約600mの標高があり、丘陵フタバガキ林になっている。保護区の約800haほどは1954年に択伐された後の再生林であるが、中心部の約600haは人間活動の影響が極めて

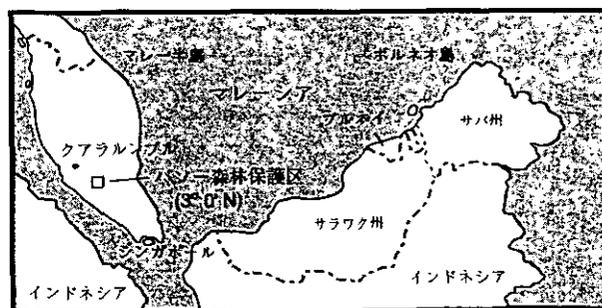


図1 マレーシアの調査地（パソー森林保護区）を示す地図

少ない熱帯低地林である。現在、保護区は南北と西の3方向をアブラヤシのプランテーションによって囲まれている。そのためか、最近倒木の形成頻度が高まってきたようである。

この地域は熱帯多雨林気候下にはいるが、年間降水量が1,850mmとマレーシア半島部の他の地域やボルネオ島に比べると低く、緩やかな季節性が見られる。年による変動も大きいと平均すると一年のうち、1~3月と7~9頃月に比較的雨の少ない時期があり、このときは森林内に所々見られた泥沼地も干上がり、このあたりに頻繁に出没する野豚の足跡が石膏で固めたように白く残っている。

パソールのフロラ（植物相）は豊かである。中心部の50ha中に生育している直径1cm以上の樹木の調査結果によると、その種数は814以上、294属、78科にまたがる。低木で最も出現頻度分布の高い科はトウダイグサ科とバンレイシ科であり、高木では、マメ科とカンラン科である。最も個体数の多い種は、*Xerospermum noronhianum*（ムクロジ科）で全個体数の2.5%を占める。直径30cm以上の木本では、フタバガキ科のショレア属の *Shorea leprosula* が最も多い。パソールの動物相については、1981年の段階で89種の哺乳類の存在が確認されている。ゾウ、トラ、バクなど大型の哺乳動物は近年確認されていない。ネズミ、リス、ツバイ、マメジカなどの小型哺乳類はかなり生息しているが、鳥類は少ない。イノシシは特に50haプロットの湿地に多い。清流が林内にないためか、アリ、シロアリ類以外の昆虫相は貧弱である。また、樹冠部の動物についてはよくわかっていない。

5. 林冠生物学とトライアングルタワー

熱帯林研究において、最も情報が不足している領域は、実は最も活発な生物活動が営まれている林冠部である。それは、地上から50mを越す樹冠の高さまで到達する手段が限られているためである。植物の花が花粉を受け取る仕組みを研究する授粉生態学、植物の開花、結実、展葉などの様式を調べる生物季節学、林冠部の葉の生理活性を測定する生理生態学など、樹冠部を対象にした多くの研究テーマが未解決のまま残されている。そこで、考案されたのが、3本のタワーを建て、その間を渡り廊下（林冠回廊）で三角形につないだ構造のトライアングルタワーである。このタワーが我々のプロジェクトによって1992年にパソール森林保護区の自然林内に建設さ

れた（図2）。林冠回廊の高さは地上30mである。その後1995年に1本のタワーが52mにまで延伸され、森林内外の微気象測定、森林と大気との間の炭酸ガス交換、林冠木の生物季節、樹冠層の昆虫層や鳥類群集の研究、光合成などの林冠層の生理生態学的特性の測定などのために活用されている。



図2 パソール森林保護区に設置された樹冠生物学研究のための樹冠歩道（52mタワーから撮影）

6. 熱帯林の生物多様性

熱帯雨林のスケールの巨大さは、単に高さ方向だけではない。極端なまでに多様な種が生存する熱帯雨林は、生物群集としてみた場合も他の生態系と比べて桁違いに大きい。それでは東南アジアの熱帯林というのはどれくらい、種の多様性が高いのだろうか。本プロジェクトのカウンターパートであるマレーシア森林研究所の調査結果について紹介しよう。調査地は、マレーシア半島の南西部にあるパソール森林保護区である。ここには、森林を構成する樹木の成長と生存過程を長期にしかも大面積にわたって調査しようという大規模プロジェクトの調査サイトが設定されている。これは、50haの調査区を精密に測量して、その中に生えている直径1cm以上の樹木のすべてに標識をつけ、以後5年ごとにそれらの生存と成長

を追跡しようという長期モニタリング計画である。この50haプロットの中に生えている直径1cm以上の樹木は全部で約33万5千本になり、その総種類数は814種におよぶ。

図3は、50haプロットにおける種数と個体数の関係を示したものである。個体数の少ない種ほど数が多いことがわかる。平均して1haあたり直径1cm以上の個体が1本未満の密度でしか存在しない種数だけで278種も存在する。これは全種数814のおよそ1/3にあたる。

表1は、50haプロット内に生育する814種を、成木の大きさによって5つのカテゴリーに分類して、それぞれ、どれくらいの種類数になるかを示したものである。例えば、灌木は直径2cm以下にまでしか成長しないもの、低木は成木の直径が2cm以上10cm以下のものである。さらに、この表では50haの中で成木の大きさに達している個体が1本以上あった種類、すなわち成熟した個体が1本以上あった種類と未成熟な個体しかいない種類にわけて示してある。例えば、高木は全部で311種存在するが、そのうち胸高直径が30cmを越える成熟個体が50haの中に1本以上ある種類は178種、胸高直径が30cmを越える個体が

1本もない種を未成熟個体しか含まない種は133種となる。

50haの中に成熟した個体が1本以上ある種類の割合は、全体では72%になった。すなわち、残りの28%の種類は、50haの中に未成熟な個体しか存在しないわけである。このことから、熱帯雨林の植物群集は種類組成が非常に複雑であることがわかる。

7. 共存のメカニズム

熱帯林にはなぜあんなにたくさんの種類の生き物が生存できるのだろうか。植物は二酸化炭素と水と窒素やリンなどの栄養塩類を共通の「餌」として生活している。もし、餌を同じくする複数の生物種の間はその餌を獲得する能力に違いがあるとすると、結局最も能力の高い、すなわち最も競争に強い種が他の種を駆逐してしまうはずである。一方、全ての生物種が全く同じ競争力であれば種間の区別がつかないのだから、多くの種が共存できるように思えるが、実はこの場合も、それぞれの種の個体数が確率的に変動する偶然の過程の繰り返しの中で、結局長い時間がたった平衡状態では、どれか1種が生き

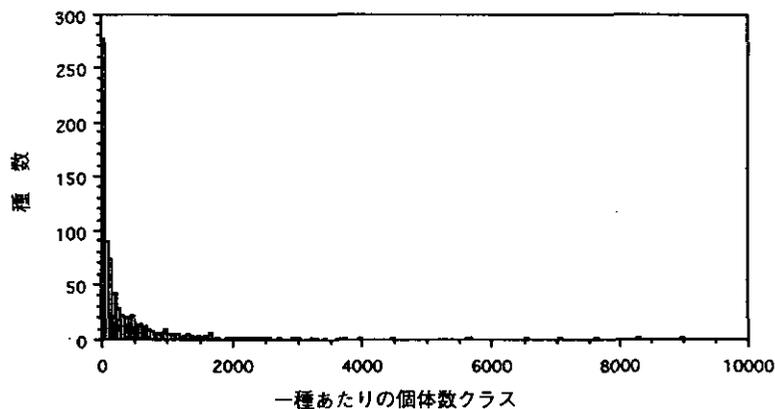


図3 パソー森林保護区に設置された50haプロットにおける、種数—個体数関係
横軸は1種当たりの個体数クラス、縦軸はそれぞれのクラスに入る種数を示す

表1 パソー森林保護区の50ha調査区内に生育する各階層ごとの樹種の数
調査区内に1本以上成熟個体を含む種類数（成熟）と1本も含まない種類数（未成熟）に分けて示す

樹種の分類	成熟個体の胸高直径(cm)	種数			成熟個体を含む種類数の割合(%)
		成熟	未成熟	合計	
灌木	~2	49	0	49	100
低木	2~10	102	8	110	93
亜高木	10~30	220	69	289	76
高木	30~60	178	133	311	57
巨大高木	60~	39	16	55	71
合計		588	226	814	72

残りそれ以外の種はすべて絶滅してしまうことが理論的にわかっている。これは、一度偶然の過程で絶滅した種は二度と復活しないためである。それでは、熱帯雨林ではどのようにしてこれほど多くの植物が共存しているのだろうか。

他の気候帯の植物群落に比べ異常なまでに高い種多様性の謎を説明すべく、これまで様々仮説が立てられきた。例えば、年中高温、高湿度な環境や熱帯林特有の複雑な階層構造が様々な生物の適応を許容する様々な環境を作り出したという説、あるいは地球の歴史的視点から寒冷と乾燥化が非常に厳しかった時期に生物の避難場所のようところが現在の熱帯地方のあたりに出現し、そこへ逃げ込んだ生物が新たな種分化を引き起こし、高い種多様性を生み出したという説などがあげられる。熱帯地方では「冬」という季節的淘汰圧がかからないため、多種多様な生物進化が許容されてきた可能性がある。またここで新たに形成された生物間の相互作用も特異的なものとして崩れることなく継承されてきたのかもしれない。

8. 熱帯林の世代交代

熱帯林の種多様性の少なくとも1/3程度は、林冠を構成する樹木によって維持されており、熱帯林の多様性の維持機構を理解するためには、林冠木の種多様性がどのようにして維持されているかを知ることが不可欠になる。そのためには、熱帯林の樹木がどのようにして更新（世代交代）しているのかがこの問題を解く鍵になる。多くの林冠木では、ギャップダイナミクス（あるいはギャップ更新）といわれるプロセスによって世代交代が行われている。ギャップとは、林冠木が倒れてできた林冠の隙間のことである。ギャップの下には次の世代を担うべき稚樹が多数生育している。これらの稚樹のうちのどれかが、将来林冠の高さまで成長することによって、ギャップが埋められてまたもとの林冠が形成されるのである。熱帯林を含む多くの自然林では、このようにして森林の世代交代が行われている。そこで、このギャップ更新にかかわる様々な要因を定量的に明らかにする研究がさかに行われてきた。また、人間活動によって衰退した森林を修復する際にも、このギャップ更新の過程を上手に利用することが有効である。最近、我々のプロジェクトで行っている研究によって、ともに林冠を構成する種類であっても異なる種類の稚樹は、ギャップに対

して異なる反応を示すことが明らかになったので、その概要を以下に紹介する。

9. 林冠ギャップに対するフタバガキ科稚樹の反応

東南アジアの熱帯林を代表する樹種はフタバガキ科の植物である。フタバガキ科の植物は、どれも高木か巨大高木で、パソアの50haプロットにも7属30種が生息している。そのうち、ショレア属の *Shorea leprosula*（以後ショレアと呼ぶ）とネオバラノカルプス属の *Neobalanocarpus heimii*（以後、現地名のチェンガルと呼ぶ）は、50haプロットに3,000本以上ある比較的個体数の多い樹種である。

パソアの林では1992年11月に3本の木がまとめて倒れて大きな林冠ギャップが形成された。そこで、ショレアとチェンガルの稚樹をこのギャップの直下と、ギャップの縁、さらにもう少し暗い林内の3カ所（3プロット）に移植して、その後の稚樹の成長反応を調査した。

図4は3つのプロットでの稚樹の樹高成長を示したものである。黒丸で示したギャップの中心のプロットで、両種とも最も成長がよかったが、ショレアの方がはるかに高さの成長がよいことがわかる。一方、チェンガルはギャップの中心のもっとも明るい場所でややよい成長を示したが、ギャップの縁のプロットでは、暗い林内のプロットと同様にほとんど樹高成長をしなかった。この結果からは、ギャップが空いた後では、ショレアがチェンガルを凌駕し、結局いつかはショレアがチェンガルを駆逐してしまうように思える。しかし、実際の現象はもっと複雑である。

10. 樹木の住み分けと共存

植物は、葉で光合成を行いその同化産物を使って成長する。一方、樹木が樹高成長をするためには、幹や枝など光合成を行わない支持組織も生産しなければならない。これらの支持組織と葉の相対的な割合を比較してみると、ショレアの稚樹はどのプロットでもチェンガルに比べて支持組織により多くの物質を分配していることがわかった。特に、この傾向はギャップの中心のプロット、すなわち最も早い樹高成長を示したプロットで顕著であった。一方、チェンガルは、相対的に葉により多くの同化産物を分配していた。

実は、ギャップの下はいつまでも明るいとは限らないのである。稚樹が林冠に達する前にギャップのまわりの

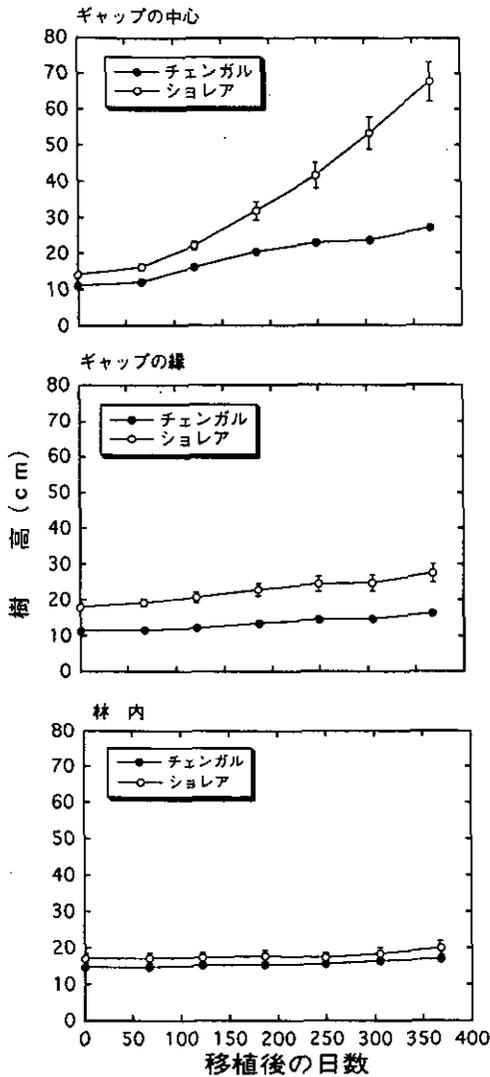


図4 ギャップの中心 (上図), ギャップの縁 (中央) および林内 (下図) での2種のフタバガキ科の種樹 (ショレア, *Shorea leprosula*とチェンガル, *Neobalanocarpus heimii*) の樹高成長。縦棒の範囲は平均値の95%信頼区間を示す

木の横枝がのびてギャップを埋めてしまうこともある。支持器官への分配を多くすることは、樹高成長を早めることにはなるが、成長の途中で例えばギャップが他の個体によって埋められて暗くなると、樹高を稼ぐために投資した枝などの支持器官が物質生産のバランスを取るために負担になってしまう。すなわち、ショレアはギャップに対して楽観的に反応し (ギャップはいつまでも明るい環境である)、チェンガルは悲観的に反応している (ギャップはいつまでも明るいとは限らない) といえる。このように個々のギャップでは、それぞれ種ごとに成長が違って、どの種がギャップを埋めるかは必然の積み重ねで決まるが、その条件は個々ギャップごとにまちまちである。そのため、森林全体でみると空いたギャップをどの種が埋めるかは、確率的にしかきまらないのであろう。このようにして、生態的に一見よく似た多くの樹種の間でギャップ更新の場所を分け合うことが、熱帯林の生物多様性を保つ一つの要因になっているのであろう。

11. おわりに

国立環境研究所で推進している熱帯林研究について、特に生態学的な観点から、熱帯林の生物多様性とその保全をめざした研究について紹介した。熱帯林の減少は、現在最も重要な地球規模の環境問題の一つであるが、同時に熱帯林は熱帯諸国にとって重要な自然資源でもある。極東の温帯に位置する日本の研究者が熱帯の国々で研究を進めるにあたって、他人の庭で仕事をさせてもらっているという謙虚な気持ちを持つことも大切なことであろう。研究とは直接関係はないが、最後に付け加えておきたい。

人工衛星からオゾン層変動の実態を解明する

～ I L A S プロジェクト～

笹野 泰弘 (地球環境研究グループ衛星観測研究チーム)

1. オゾン層破壊は進んでいるか

「北半球のオゾン量低下 世界気象機関がデータ分析」という見出しで、今年(1995年)2月15日付けの朝日新聞(朝刊)に、次のような記事が掲載されている。

「世界気象機関(WMO)は14日、シベリアからヨーロッパ上空の成層圏のオゾン量が1月から2月前半にかけて異常に低いレベルに減っていると発表した。95カ所以上の地上観測局のデータを分析したもので、この期間のオゾン量は通常より25%少なく、記録的に低いといわれた1993年1～2月を下回るという。担当者は『93年はピナツポ山の噴火による微粒子が主因といわれたが、今回は、フロンガスなど化学物質による破壊の可能性が大きい』と述べた。」というものである。

同じく、1月13日付け朝日新聞(夕刊)では、「北極の空、オゾン層は大丈夫? 日米欧の7カ国が調査」という見出しで、北極圏一帯で行われる成層圏オゾン層観測キャンペーン関連の詳しい記事が掲載されている。これによれば、「日本から参加する名古屋大学太陽地球環境研究所の近藤豊教授(45)ら4人は、エスレンジ社内の宿舎に泊まり込んで観測条件が一番良い時期を待つ。

『私たちは化学蛍光式測定器という最新鋭機器で、オゾン層を破壊する危険性のある窒素酸化物の状態調査を担当します。まだ測定前ですが北極圏一帯のオゾン層を取りまく環境は悲観的なものばかり。今回も厳しい結果が予想される』と近藤氏は話す。」とのことである。

少なくなったとは言え、依然、オゾン層破壊に関連するニュースを、新聞などで見聞きすることが多い。あれだけ騒がれたフロンガスとオゾン層の問題である。現状はどうなっているのだろうか。「平成5年度オゾン層の監視結果に関する年次報告書」(環境庁、1994)には、最近のオゾン層の破壊に関して次のように、報告されている。「1993年のオゾン全量の状況は、南極域上空で5年連続、規模の大きなオゾンホールが出現し、冬季北半球でオゾン全量が少なかったことなど、1992年に引き続き全球的に負偏差が卓越する状況であった。(中略)オゾン全量の長期的傾向(トレンド)については、熱帯域を除き、ほぼ全球的に減少傾向が確認され、かつ、1980

年代は1970年代に比べて減少傾向が進んでいることが明らかとなっている。日本上空でも、札幌で減少傾向が確認されている。このような全球的な減少傾向は、既知の自然現象では説明できず、CFC等の大気中濃度が増加したことが主要因であると考えられる。特に1980年代以降の南極オゾンホールの発達は、大気中のCFC等の濃度増加によると考えることが最も妥当である。なお、1992年12月から1993年前半にかけての、北半球高緯度の顕著なオゾン減少については、ピナツポ山の噴火によりCFC等のオゾン破壊作用が強化されたことが原因であるとの説もあるが、断定することはできない。(環境庁、1994)」

さて、オゾン層の破壊の進行をストップさせるべく、国際的な協力により特定フロンを始めとする各種の原因物質の生産の中止が、順次実施されている。この効果が既に大気中のこれらの物質濃度の減少として、現れ始めている。それにも関わらず、まだ成層圏オゾンは減り続けているのは事実である。これは、オゾン層破壊物質が、オゾン層破壊の現場である成層圏に達するまでに、3～5年程度の時間がかかるためである。このため、「地球規模のオゾン層破壊のピークは、今後数年の間に来ると予想されている。そして、その他の条件に変化がないものとするれば、オゾン層の回復には今後50年くらいを待つ必要があると考えられている。(WMO他、1994)」

2. オゾン層破壊について分かっていないこと

それでは、後はただ座してオゾン層の回復を待てばよいのだろうか。研究者はそうは考えていない。何よりも、成層圏で起きている現象が十分に解明し尽くされ、将来予測に微塵の不確定さもないと考えている研究者はいない。むしろ、次々と新しい問題に直面し、理論の見直しを迫られているといっても過言ではない。

前章末尾に記したように、現在行われている将来予測は、現状の環境条件と大きく変わらないという前提に基づいている。果たして、危惧されているような地球の温暖化が進行したとき、オゾン層の破壊の問題はどのよう

に変質していだろうか。

昨年(1994年)の2月に行われた「つくばオゾンワークショップ」において、国内外からの多くの参加者を得て、オゾン層の破壊の現状と研究の方向性についてのレビューと議論がなされた。ワークショップでは、(1)オゾン層の破壊は依然、進行している、(2)高緯度のオゾン減少は、塩素、臭素を含む化学物質が関係するオゾン破壊による、(3)塩素・臭素がオゾン破壊に関わっているが、その詳細なメカニズムは依然、確定的ではない、(4)将来の人工起源物質の放出に伴う種々の非線形性やフィードバックの過程については、さらに分からないことが多く、将来のオゾン層や気候の変化をもたらすかも知れない、といったことが指摘された。したがって、系統立てた観測、プロセス研究、モデル研究は、引き続き行われなければならないとしている。(CGER、1994)

依然、解明が不十分な点として、具体的には(1)オゾン破壊に関する化学過程、(2)極渦のオゾン破壊に対する役割、(3)成層圏エアロゾル(硫酸液滴微粒子)や極成層圏雲の実態と、そのオゾン破壊に及ぼす影響、(4)中緯度の成層圏オゾンの変動の機構、等が挙げられる。

3. オゾン層の観測

オゾン層の破壊に関する実態の把握と、その機構の解明のため、これまでも多くの定常的な観測や実験観測が行われてきた。第1章の最初に述べた「地上観測局」データは、そのような定常的な気象観測網で得られたもので、長期にわたる安定したデータを提供してきており、長期的な変動の解析などに利用されている。また、2番目に述べた「北極圏での総合的な成層圏オゾン層国際共同観測キャンペーン」は、多地点における地上設置の遠隔計測装置による観測、気球や航空機を用いた多様な観測等が、うまく組み合わせられ、所期の研究目的の達成に向けて総合的な観測が行われている。

これらの地上観測、あるいは気球・航空機観測等の利点は高い測定精度が保たれること、観測点を選択することにある程度の融通性があること、多様な観測手段が用いられることなどである。その一方で、観測地点の数に限りがあること、気球・航空機観測等では観測機会がそう多くはとれないことなどが挙げられる。

これらの欠点を補い、広域観測、長期観測を可能にす

るものとして、1970年代終わり頃から、人工衛星を利用したオゾン層の遠隔計測が本格的に行われるようになってきた。人工衛星を利用する最大の利点は、観測範囲が広域に亘ること、2次元的・3次元的な観測が行えること、同一のセンサーで測定を行うのでデータの均質性が保たれることの3点であろう。もちろん、その一方で、観測計画のスタートから実際にデータが取れるようになるまで、非常に長い時間と多額の経費を要するという問題が無いわけではないが、衛星を利用した地球観測からは、他では決して得られないデータを提供でき、得られるデータの量と質から考えると、費用(労力)対効果も高く、実施する十分な根拠がある。

4. 人工衛星を利用したオゾン層の観測で、何が分かる?

特に、オゾンホールが発見で名を成したのが、米国航空宇宙局(NASA)のTOMS(オゾン全量マッピング分光計)センサーである。これは、地表面や大気で散乱された太陽紫外線の、オゾン層での吸収量を分光して測定し、オゾン全量を測定するものである。1日で全球をくまなくカバーすることが出来るが、高度分布を測定することはできない。

オゾン等の高度分布の測定には、地球周縁掃引法(limb scanning)や太陽掩蔽法(solar occultation)といったTOMSとは異なる測定原理に基づく測定が必要となる。地球周縁掃引法による測定は、大気自身が出す赤外線放射を光源とするので、測定のコストが圧倒的に多く、全球的な観測に向いている。しかしながら、光源強度が弱いことから、高い感度の測定器が必要とされ、技術的にも難しいものとなる。センサーの例としては、NASAのCLAES、ISAMS、LIMS等が挙げられる。

ここで報告するILASは、太陽掩蔽法に基づく計測器である。Improved Limb Atmospheric Spectrometer(改良型大気周縁赤外分光計)の頭文字をとっている。太陽掩蔽法に基づく同様の衛星センサーとして、NASAのSAGEIIやHALOEといったセンサーが挙げられる。

これらのセンサーは、太陽光を光源として、太陽光が大気を通過する際に受ける、気体成分等による吸収量を測定して、気体成分の量(濃度)の高度分布を測定する。衛星から見た日の出、日の入り時に測定を行うので、衛星が地球を1周回する度に2回の観測の機会がある。強度の強い太陽光を光源とすることから、信号光が強く、高い観測精度が期待できる。

人工衛星に搭載したセンサーによる観測は、種々の大気成分の高度分布（空間分布）が同時に得られると言う、大きな特徴を持っている（表1参照）。さらに、同一のセンサーが用いられるので、地上からの観測のような機器間の校正の問題などが無い。したがって、全球的な微量成分の分布に関する描像を、比較的短時間のうちに容易に得ることができる。このことは、高層大気中で起きている現象を理解する上で、極めて重要なことである。

表1 代表的な大気センサーによる測定対象

センサー	測定対象
LIMS	H ₂ O, O ₃ , NO ₂ , HNO ₃ , Temp. Press.
SAGE-II	H ₂ O, O ₃ , NO ₂ , aerosols
HALOE	H ₂ O, O ₃ , NO, NO ₂ , HCl, HF, CH ₄ , aerosols, Temp.
CLAES	H ₂ O, O ₃ , CH ₄ , NO ₂ , N ₂ O, HNO ₃ , CFC12, CFC11, HCl, ClONO ₂ , N ₂ O ₅ , aerosols, Temp.
ISAMS	H ₂ O, O ₃ , CH ₄ , NO, NO ₂ , N ₂ O, HNO ₃ , CO, N ₂ O ₅ , aerosols, Temp.
ILAS	O ₃ , NO ₂ , HNO ₃ , N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, CFC11, aerosols, Temp. Press.

さらに、風や気温等の気象データを組み合わせることで、大気の力学的な過程、化学的な過程の理解を深めることができる。また、長期的な変動傾向（トレンド）の把握においても、現象そのものの理解に基づいて、データ質の判定を行えることから、より正確な実態把握が可能となる。

5. ILASによる観測計画

環境庁は、オゾン層の監視及び研究の推進のため、人工衛星を利用した観測を進めることとし、平成元年度より衛星搭載機器（ILAS）の開発に着手した。また、国立環境研究所ではILASデータの処理を始めとする、地上側施設の開発と運用を担当している。

ILASは、文部省宇宙科学研究所が1984年に打ち上げた科学衛星「おおぞら（EXOS-C）」に搭載した、オゾン層観測センサーL A S（Limb Atmospheric infrared Spectrometer）を原型として、改良を加えたものである。ILASは、1996年2月に宇宙開発事業団（NASDA）によって打ち上げが予定されているADEOS衛星（太陽同期準回帰軌道、高度約800km）に搭載される。

以下に少し詳しく、ILASによる観測について紹介したい。

5.1 ILAS測定原理、測定対象

ILASセンサーは、太陽掩蔽法を原理としている。図1に測定原理を模式的に描いている。衛星に搭載されたILASが、衛星から見た日の出、日の入り時に太陽の輝度重心を追いつつ、太陽光強度スペクトル（波長毎の光の強さ）の時間変化を測定する。このスペクトルは、太陽光が地球縁辺の大気層を通過する際に、大気中に含まれる気体成分等によって吸収されることによって起きる。つまり、この吸収スペクトルには大気中の気体成分などの濃度に関する情報が含まれている。さらに、その時間変化は、太陽・衛星・地球の位置関係で決まる、光路の変化に対応している。すなわち、地上からの高度分布に換算することができる。

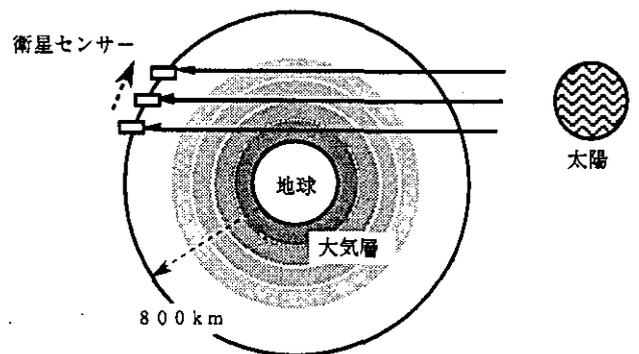


図1 ILAS測定原理。衛星から、地球周縁の大気層を通して太陽光を分光測定する。衛星の進行につれて光路が変化し、異なる高度層の情報が得られる。

ILASの主な測定対象は次の通りである。赤外波長（6.2 μm～11.8 μm）の吸収測定から、オゾン（O₃）、二酸化窒素（NO₂）、硝酸（HNO₃）、一酸化二窒素（N₂O）、メタン（CH₄）、水蒸気（H₂O）等の濃度の高度分布、エアロゾル消散係数等の高度分布が導出される。図2に参考として、接線高度20kmにおける赤外領域での透過率スペクトルを示した。また、可視波長（0.753nm～0.784nm）における酸素分子による吸収測定から、気温、気圧、エアロゾル消散係数の高度分布も同時に導出される。

太陽掩蔽法の特徴は、強度の強い太陽光を光源としていることから、極めて高い精度の測定が可能であることである。また、大気圏外での光源の測定を毎回行って、

これを参照光として大気微量成分による光の減衰を求めることから、自己校正が可能であり、機器の劣化などの影響を受けにくく、信頼性が高いことなどが挙げられる。

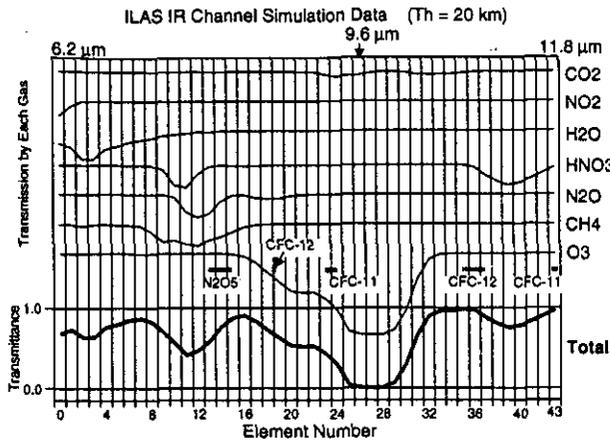


図2 モデル大気をもとにした赤外波長域における透過率の計算例。種々の気体成分の吸収が重畳して測定される。

5.2 観測対象領域

ADEOSは太陽同期の極軌道衛星であり、ILASが太陽を光源とすることから、ILASの測定対象領域は南北両半球の高緯度地域の上空である(図3)。SAGE IIやHALOEは低軌道傾斜角の太陽非同期軌道の衛星に搭載されていることから、測定対象は月日の進行とともに高緯度から赤道域、さらに他の半球の高緯度までの広い範囲を掃引するのに対し、ILASは比較的狭い緯度範囲をゆっくりと掃引する。

ADEOSは1日に地球の周りを約14周するので、南北両半球でそれぞれ14回の測定が行われる。測定点はほぼ同一の緯度帯の円周上の14地点で、約25度ずつ経度位置がずれる。対象高度範囲はおよそ10kmから60km、高度分解能(瞬時視野の高度方向の幅)は2kmである。

5.3 センサーの概要

ILASセンサーは、衛星の進行中に太陽の輝度中心をトラッキングするための追尾系(2軸ジンバルミラー)、入射太陽光を集光・分光する赤外と可視のふたつの分光光学系、信号検出系、電子回路系、電源系を基本要素として持っている。保護カバー(匡体)を外した状態のフライトモデル(PFM)の外観を図4に示す。詳細については文献(例えば、鈴木他、1991)を参照されたい。

信号の検出には44素子の焦電型赤外線リアレイを用

いている。これは、熱型検出器としては比較的高感度で、冷却器を必要としないという利点を備えている。

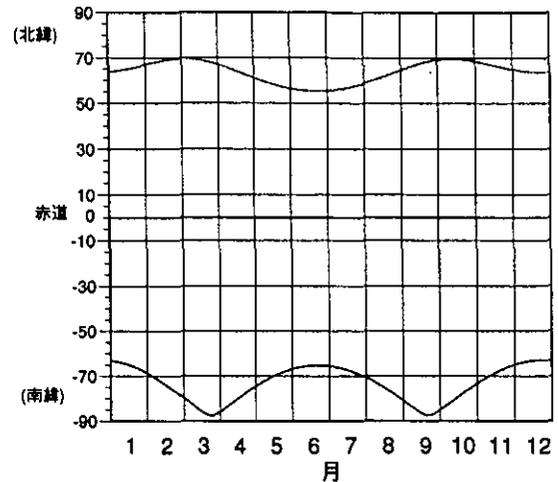


図3 ILASの測定緯度の時間進行。太陽赤緯の季節変化につれて、測定緯度に変化する。

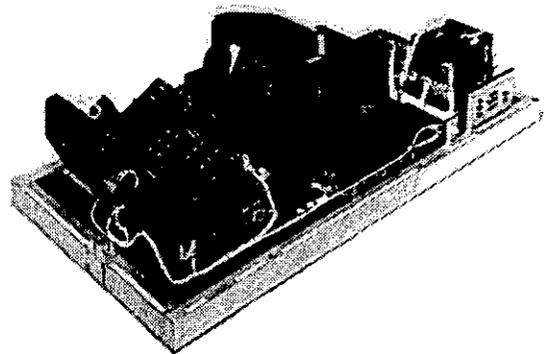


図4 ILAS内部構造。

5.4 データ処理

衛星で収集されたILASデータはデータレコーダーに記録され、地上受信局上空でプレイバックされて地上局で受信記録される。軌道データその他の必要なデータを付加された生データは、宇宙開発事業団より国立環境研究所内に置かれたILAS衛星データ処理運用施設に送付され、高次処理されて、オゾンその他の濃度の高度分布が算出される。

処理済データは、次に述べる検証解析を行い、また機器の性能の劣化などに関する評価を経て、研究者の利用に供される。

5.5 検証実験

衛星観測データは、地上からの独立の、ILASと同期した検証観測データと比較され、機器、データ処理の両面における妥当性が評価される。主な検証実験として、スウェーデンのキルナにおける大気球を用いた観測実験を計画している。ここでは、高精度分析のための大気の大気球の直接採取、赤外分光計・可視分光計等のリモートセンシング、等等、種々の計測器が、約12機の大気球にそれぞれ搭載され、約1カ月の間に観測が実施される。

この他、アラスカにおけるレーザーレーダー、レーザーヘテロダイン分光計、キルナにおける赤外フーリエ分光計、南極昭和基地における可視紫外分光計、オゾンゾンダ、等を用いた検証実験を計画している。

5.6 計算機設備

計算機設備は、定常的なデータ処理運用に必要な性能を持つことは当然のこととして、さらに、アルゴリズムの改良等に伴うデータの再処理のための余裕の能力を持っていることが不可欠である。現在開発中のソフトウェアから推定されるデータ処理に必要な時間（1日分のデータを数時間以内に処理する）から、導入すべき計算機の能力を算定した。本年2月に、ILASデータ処理運用施設計算機システムが導入され、現在、これらの実機を用いたソフトウェアの開発・試験が行われている。

データ処理運用施設は、ILAS衛星データ処理運用施設（ILAS Data Handling Facility: ILAS DHF）と名付けられ、アルゴリズムの研究、運用ソフトウェアの開発試験、研究用の各種データ処理表示ツールの開発に利用されている。衛星打ち上げ後は、定常的な運用に用いられ、同時に研究者支援に活用される。

6. ILASプロジェクトの進め方

衛星観測プロジェクトは、非常に幅広い研究開発業務を、内容として持っている。すなわち、大きく分けると、衛星搭載機器の開発、データ処理運用システムの開発、データ処理運用業務、検証実験、データ利用（オゾン層監視、研究利用）等がある。もとより、環境庁および国立環境研究所の研究者だけでは、これだけの業務をこなすことはできない。とりわけ、アルゴリズム（データ処理計算手順）の研究を始め、検証実験計画、データ利用研究等、多くの研究課題について、所外の研究者の支援が不可欠である。このため、早い時期（平成2年）

からサイエンスチームを組織し、国内外の研究者に参加していただいている。現在、サイエンスチームは19名のレギュラーメンバーを擁している。

衛星搭載機器の開発に関しては、環境庁地球環境部研究調査室のイニシアチブの下に、機器開発メーカーが開発に当たった。概念設計、機器試験、性能試験等には、サイエンスチームメンバーのみならず、内外の多数の研究者の協力を得た。

データ処理運用システムのソフトウェアに反映させるべきアルゴリズムは、主としてデータ処理に関する部分と、運用全般に関わる部分がある。前者は、サイエンスチームメンバーの手によって研究が進められてきている。後者については、主としてソフトウェア開発担当会社が担当している。

既に記したように、衛星観測においては独立の観測実験に基づく検証解析が重要である。そのため、ILASプロジェクトとして最低限、実施すべき検証実験項目を定め、現在、詳細な検証実験実施計画を策定中である。サイエンスチームの中の検証実験サブグループのメンバーの他に、国内外の協力者からなる検証実験チームを組織して、これらの作業を行っている。

ADEOSプロジェクトに関連して、NASDA、通商産業省（ADEOSに搭載されるIMGの提供機関）、環境庁の3者の合同で研究課題公募を行った。これに応募された課題から、外部のレビュワーによる評価に基づき、選定委員会が選定を行った。ILASのみに関連する研究課題として7件が選定された。また、ILASとその他のセンサーとの組み合わせ解析を提案した課題が9件、選定された。国内の研究者が2名、国外が14名である。

ILASプロジェクトを進めるに当たって、プロジェクト検討委員会を外部に組織して、進め方全般についての検討をして頂いてきた。

このように、所内外、国内外の研究者、委託先関係者、関係機関など、ILASに関わる人間の数はプロジェクトの進行とともに、ますます増加してきている。このため、サイエンスチーム、検証実験チーム、プロジェクト検討委員会、公募研究者を横断的にカバーするものとして、ILASセンサーチームを組織した。また、平成3年2月よりILASサイエンスチームニュース（平成7年4月よりILASニュースレターと改称し、英文版も発行開始）の発行を行っている。

7. ILASに期待されること

ILASは、南北両半球の高緯度地方（およそ北緯55～70度、南緯65～88度）の高度約10～60kmの範囲を測定対象領域として、オゾン、硝酸、二酸化窒素、一酸化二窒素、メタン、水蒸気、エアロゾル（極成層圏雲を含む）、気温、気圧、等の高度分布の測定を行う。ある1日をとってみると、南北両半球のそれぞれのある緯度帯上の14点ずつの地点上空が観測される。エアロゾルについては、光の消散係数だけでなく、エアロゾルの種類（硫酸液滴、硝酸水和物、氷の違いなど）についても情報が得られる見込みである。

これらのデータは、オゾン層の変動そのものの監視に使われるのは当然であるが、オゾン層の変動に関わる化学的・力学的な機構の解明に役立てられる。例えば、二酸化窒素、硝酸等の濃度は、それ自身オゾン層破壊に直接寄与するばかりでなく、オゾン層破壊の原因物質である塩素濃度と深いつながりを持っている。水蒸気、気温は極域成層圏に発生する極成層圏雲の消長に密接に関係する。そして、エアロゾル、極成層圏雲の性状は、オゾン破壊に関係する不均一系反応の理解に不可欠のものである。

メタン、一酸化二窒素等は、対流圏起源の比較的反応性の低い物質であるため、成層圏大気、対流圏大気の識別や大気の流れを見るトレーサーとして利用することが出来る。また、気温データと合わせて、大気の力学的な環境を把握することが可能である。

極域ではとりわけ、冬季の極渦の発達・維持、崩壊の過程がオゾンホールとの発達と消滅に、密接に結びついており、ILASデータはこれらの現象の解明に非常に適したデータセットを提供することになる。

これらのILASデータの外部研究者等への提供については、現在のところ次のように考えている。基本的に、データを利用して上に述べたようなオゾン変動の監視、応用研究を行おうとする場合には、データの信頼性を十分に確認した上で、データ利用研究者に提供すべきである。そのための検証解析、機器トレンドの評価等のための研究、アルゴリズム検証等の研究は、主としてサイエンスチームメンバー、公募研究者によってなされる。したがって、これらの研究者に対しては、データが取得され処理された段階で、なるべく早くデータを提供することを考えている。そして、十分に検証されデータ質の評価がなされた時点で、一般研究者にデータの提供を開始

する。

その一方で、データ質の吟味に時間をかけすぎることには、場合によっては新しい現象の発見を遅らせることにもつながる可能性がある。プロジェクトの中心としてデータ処理に当たる我々国立環境研究所の研究者の責任で、適宜、データの公表などを行うことも必要であろうと考えている。

なお、ILASの後継機として、平成11年初頭に打ち上げ予定のADEOS-II衛星に搭載される、ILAS-IIの開発が始まっている。ILAS-IIでは、新たな観測項目が追加されるとともに、高精度化が図られており、オゾン層の継続的な監視と、オゾン層科学研究の一層の充実のためのデータの取得がなされることになっている。

謝 辞

人工衛星を利用した本格的なオゾン層の監視・観測の試みは、我が国ではILASが初めてである。機器の開発のための概念検討から、データ利用計画立案に到るまで、これまでプロジェクトの推進に当たって、極めて多数の皆様のご協力を頂いてきた。また、今後も同様に引き続きご支援を頂くことになる。ここに一人一人のお名前を掲げることができないが、紙面を借りて御礼を申し上げます。

参考資料

- 荒木信博、他：衛星搭載用オゾン観測センサ、National Technical Report, 39, (4), 457-465, (1993)
- 環境庁：平成5年度オゾン層等の監視結果に関する年次報告書, 68pp, (1994)
- 笹野泰弘：改良型大気周縁分光計 (ILAS) による高層大気環境の観測, 日本リモートセンシング学会誌, 13, (4), 73-77, (1993)
- 鈴木 睦、他：オゾン層観測センサ「ILAS」、日本赤外線学会誌, 1, 42-50, (1991)
- CGER: Proceedings of the Tsukuba Ozone Workshop-Global Environment Tsukuba '94-February 16-18, 1994, Tsukuba, Japan, (1994)
- MWO、他：Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994, Executive Summary, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 37 (1994)

地球環境を診断する

藤沼 康実 (地球環境研究センター)

1. はじめに

「公害」から「地球環境」へと環境問題のシフトに相応して、我が研究所も1990年に国立公害研究所から国立環境研究所へと組織が改正され、地球環境研究を推進する組織として地球環境研究グループと共に、地球環境研究センター（以後、センター）が発足した。その事業の一環として、「地球環境研究の総合化」、「地球環境研究の支援」と共に、「地球環境モニタリング」が開始された。

ここでは、当センターで推進している種々の地球環境モニタリング事業を担当している所内外の関係者を代表して、モニタリング事業の概要について紹介する。

2. 地球環境モニタリングとは？

地球環境問題を含め、地球環境に係わる諸現象は、図1に示すように時間的・空間的にそれぞれの占める位置・範囲が異なり、それらの現象が相互に影響を及ぼし、関連しあっている。従来の公害問題が地域・局所的な現象であるのとは異なり、地球環境問題は空間的・時間的にスケールが大きく、因果関係が複雑であり、原因から結果に至るタイムラグが大きく、かつ、歴史的に新しい

問題である。

したがって、地球環境モニタリングは、複雑に絡みあった微細な環境変化を、長期・継続的に監視・把握することにより、①地球環境の現状把握

②現象説明・影響解析

③対策効果の評価・確認

④環境容量の推定

などを行うものである。

このうち、①は温室効果ガスの先駆的な長期観測例として著名なハワイ・マウナロアにおける二酸化炭素(CO₂)観測の開始当初の状況に相当するもので、地球温暖化との関係を想定しつつ二酸化炭素を測定しようとするものであった。ところが、現在では、各地でのモニタリング結果と比較することにより、そのデータは②の役割も果たすようになり、さらに二酸化炭素の排出規制などの各種対策が講じられるようになれば、次第に③の意味あいが増してくる。また、④は現在の種々の環境変化が、どの程度緊急な解決を要する問題であるか否かというリスクアセスメントにおいて貴重なデータを提供するものである。

上述のハワイ・マウナロアにおける二酸化炭素観測は、

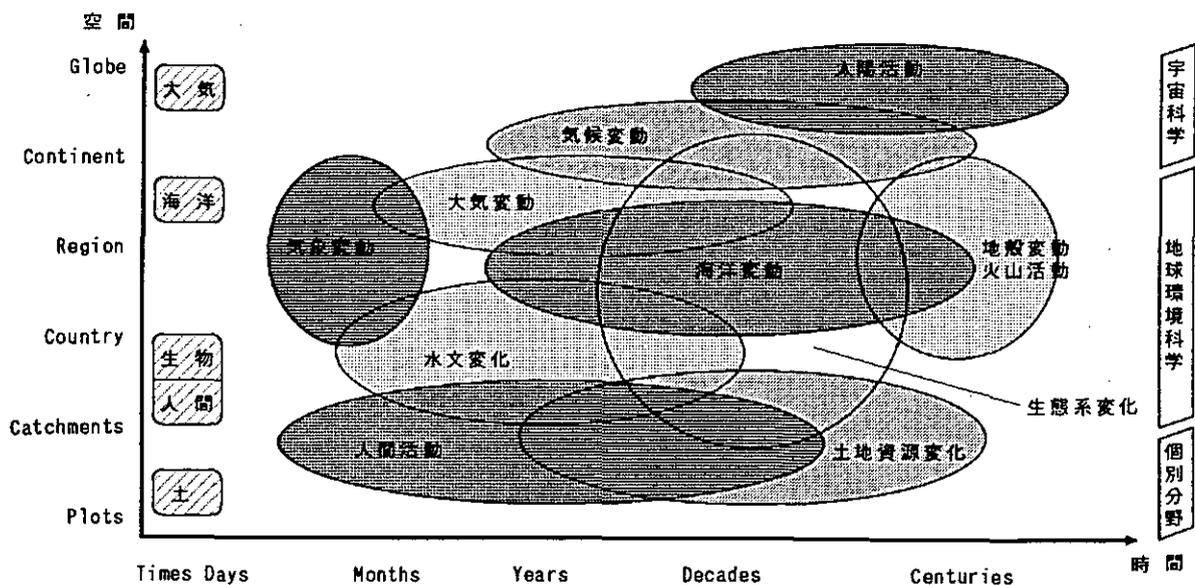


図1 地球環境の諸現象の時間・空間スケールマップ

属人的な観測研究として1958年に開始され、長期間の地道な観測結果から、地球温暖化に対する二酸化炭素の意味合いが確認された。それが世界的な観測網（BAPMoN：バックグラウンド大気汚染観測網）の構築とあいまって、そこからのデータを用いたモデル解析・予測、さらに、国際政治・行政的対応として、1988年にはIPCC（気候変動に係わる政府間パネル）の発足、1992年の気候変動枠組条約の成立へと進展してきており、「観測 → モデル解析・予測 → 国際的取り決め・行政施策」へと、地球環境問題に対するモニタリングの係わり方の典型的な姿が認められる。この例示は、当然、現在実施している全ての地球環境モニタリングにおいても、究極的な目標としているものであり、ネットワーク化（国際的な連携）、研究的な対応、情報の統合化、長期継続体制の確保などの観点に立ったモニタリング体制の構築が不可欠である。

3. センターが実施する地球環境モニタリングのしくみ

我が国では、従来から気象庁、海上保安庁、水産庁などで、それぞれの所管事項に応じて種々なレベルのモニタリングを実施してきたが、国際的な動きと歩調をあわせて策定された「アジェンダ21行動計画」や「環境基本計画」などに対応して、モニタリングへの取り組み方を見直す段階にさしかかっており、国際的な連携下でのモ

ニタリング体制の整備・再構築が各組織・分野で推進されている。

当センターが実施する地球環境モニタリング事業は、上述したような情勢を鑑み、地球環境保全に関する関係閣僚会議で決定される「地球環境保全調査研究等総合推進計画」に基づき、環境庁企画調整局長の私的諮問機関である地球環境等企画委員会が策定した「地球環境モニタリング計画」を踏まえて推進されるものであり、環境庁におけるモニタリング事業として位置づけられている。

当モニタリングの実施体制を図2に示す。所内の研究者から提案されたモニタリングの企画案を所内の意見を踏まえて、センターが調整し、実行計画を作成している。各モニタリング事業の実務は、提案者である所内の研究者を中核として、専門的見地から指導・助言をする所外の有識者、ならびに事業実務を担当／補佐する民間技術支援団体からなる事業実施グループにより実施されている。図3に地上モニタリングの事業実施体制を示すが、事業の実施に当たっては、特に上述した民間技術支援団体の役割が重要になる。

モニタリング事業は、その進展状態によって、原則的に次の3段階に分かれる。

- ① フィージビリティスタディ(FS)；観測対象・手法・体制などの予備的な検討・調査。

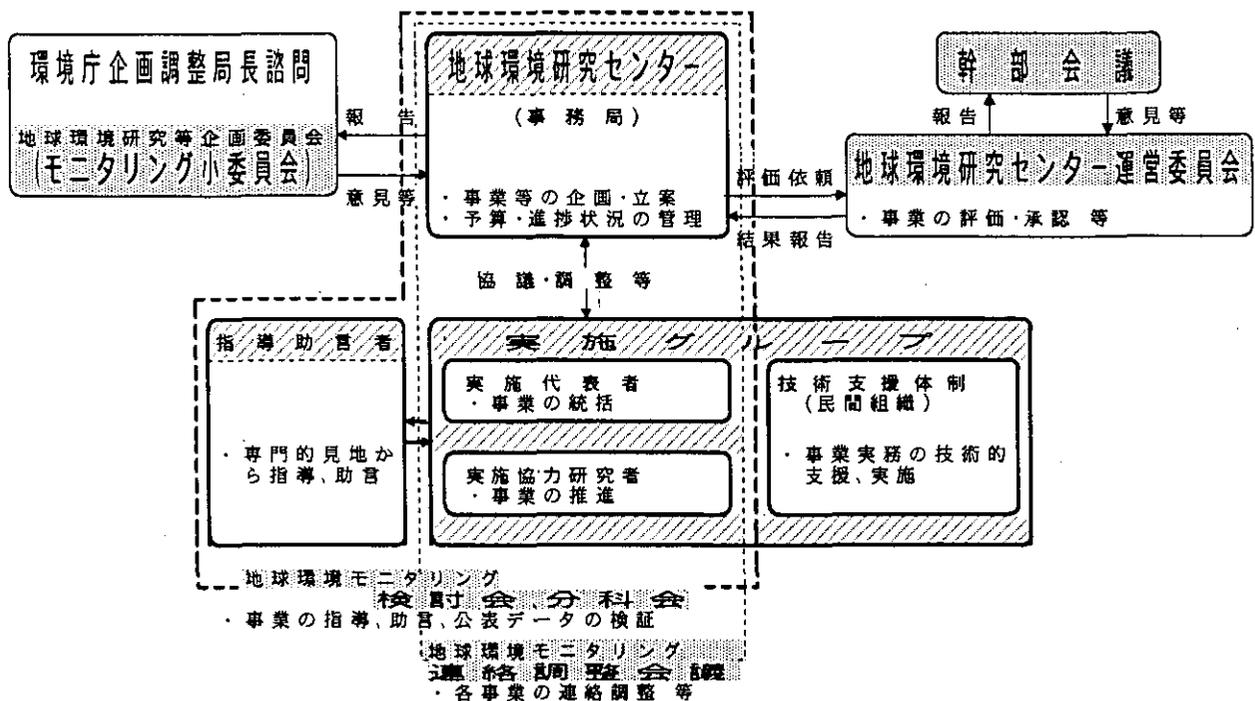


図2 地球環境モニタリング事業の実施体制

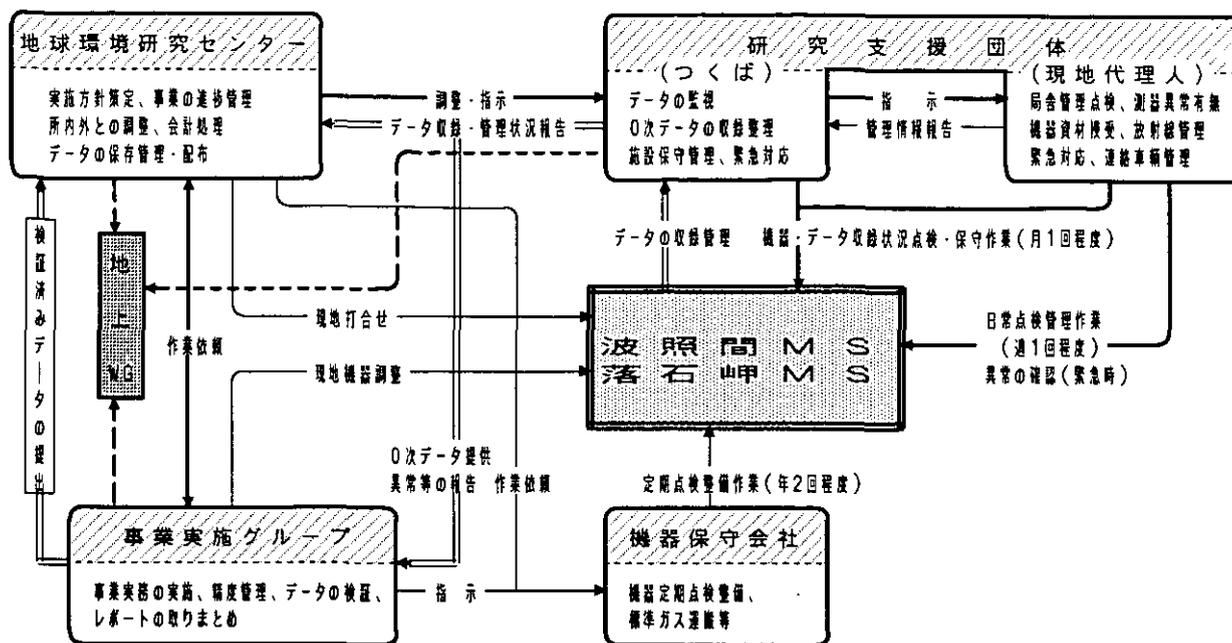


図3 地上モニタリングステーションの事業実施体制

② 試験モニタリング；観測手法・体制の確立。

③ 長期モニタリング；長期・継続的な監視・観測。

現在実施しているモニタリング事業には、地球環境研究総合推進費などによる研究によって開発・確立した手法などに基づいて実施するもの、地球環境研究に不可欠な観測データを提供するもの、あるいは、国際的な取り組みのもとで観測に参画・支援するものなどがある。

予算的にも試験研究費によるものであり、常に地球環境研究と相互補完する視点に立って長期・継続的に推進する「研究モニタリング」である。

4. センターの地球環境モニタリングの概要

現在、当センターで推進しているモニタリング事業の概要を図4に模式的に示す。その対象は、成層圏、対流圏、海洋、陸水、および生物圏などの地球環境全般を網羅する領域にまたがっており、1995年度当初において事業数は13に達している。以下に代表的な事業の概要を紹介する。なお、事業全般、および人工衛星「ADEOS」に係わる衛星観測事業については、それぞれ、本予稿集の「地球環境研究センターにおける地球環境モニタリング事業」、「人工衛星からオゾン層変動の実体を解明する～ILASプロジェクト～」を参照されたい。

4.1 成層圏モニタリング

成層圏に係わる事業は、最もデータ蓄積が進んでいる事業であり、センターが発足以前の1988年から実施してきたオゾンライダーによる成層圏オゾンの観測と本年度から稼働するミリ波分光計による成層圏オゾンの観測を所内で実施する他、国内でオゾン層の破壊が進みやすい北海道地域での成層圏モニタリングの可能性を検討している。加えて、成層圏オゾンの減少により、その人体への影響が危惧されている有害紫外線量を東京・霞ヶ関の第5合同庁舎屋上において観測している。

成層圏オゾンの観測では、現在、オゾンライダーとミリ波分光計の2方式を採用しており、オゾンライダーは高度15～45Kmの低中高度成層圏、ミリ波分光計は45Km以上の高高度成層圏に存在するオゾン量を観測することが可能であり、この組み合わせにより、観測できる高度がほぼ成層圏全域に広がり、かつ、天候の影響も受けにくい観測体制が構築できる。なお、成層圏オゾンの国際観測網であるNDSC（成層圏変動探査ネットワーク）に加盟し、国際的連携の下で観測を推進しており、東アジア地域における数少ない観測点として、国際的責務を果たしている。また、有害紫外線量は、人体への被曝に係わる知見を得るために、人間の主要な生活環境である都市域でブリューワ型分光計を用いてB領域の紫外線（UV-B）の波長別強度を観測している。

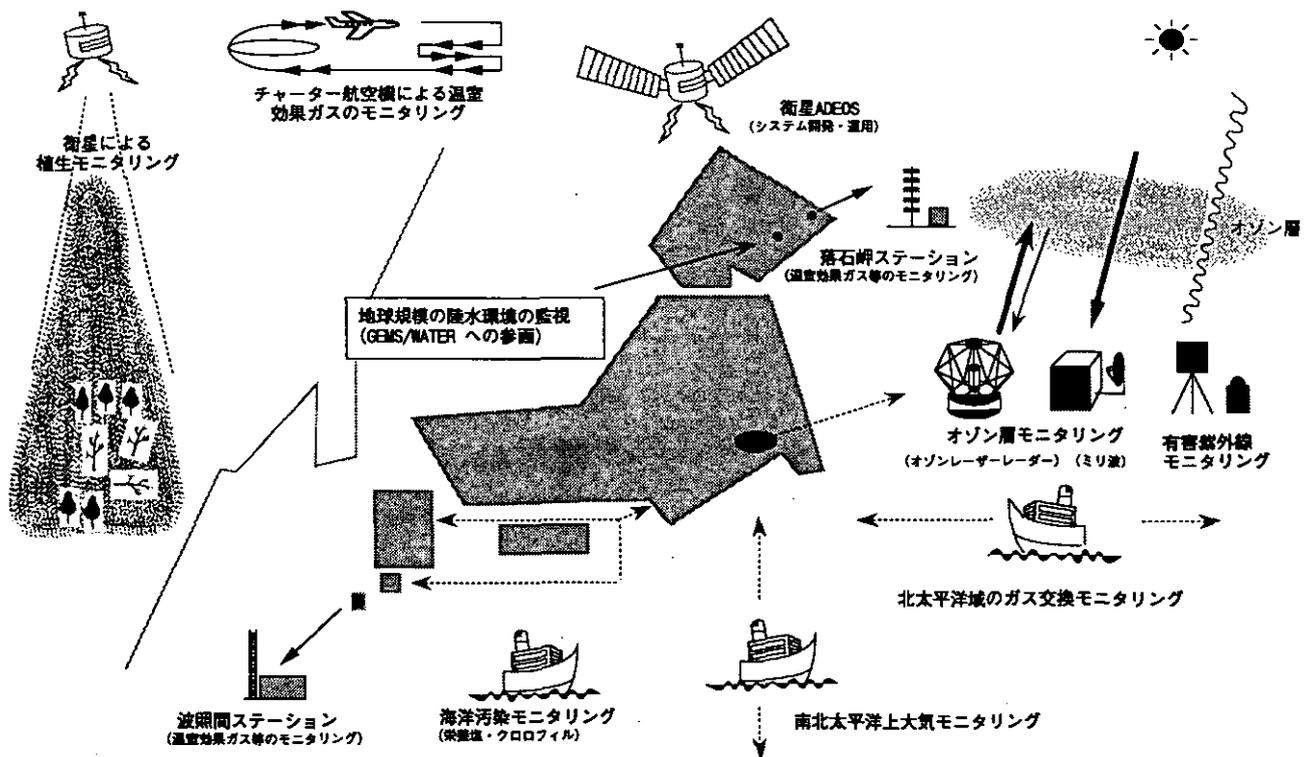


図4 地球環境モニタリング事業の概要

4.2 地上ステーションにおける温室効果ガスのモニタリング

対流圏に係わる事業は、ベースラインレベル濃度の温室効果ガスの観測を主目的としており、ハワイ・マウナロアに所在するNOAAの観測ステーションに対比すべく、1992年に、我が国の最南端の有人島である沖縄県八重山諸島波照間島に太平洋気団に由来する温室効果ガスの観測ステーションを建設し、現在試験モニタリングを経て、ほぼ長期・継続的に観測できる体制が整った。さらに、1994年には、我が国の北東端に位置する北海道根室半島落石岬にシベリア気団・太平洋気団に由来する温室効果ガスの観測ステーションを建設し、現在観測機器を整備しているところである。なお、両ステーションでは、観測システムの全自動・無人運転を目指して、参画している研究者自らが創意工夫して取り組むと共に、ステーションが所在する地方公共団体の環境部局の研究機関（波照間：沖縄県衛生環境研究所、落石岬：北海道環境科学研究センター）、ならびに、地元の地方公共団体（波照間：竹富町、落石岬：根室市）や住民諸氏の協力を得て事業を推進している。

現在両ステーション共に、BAPMoNの温室効果ガスの国際観測網に加盟すべく、観測データの傾向・特性の検

討、観測の基準となる標準ガスの作成・供給体制の整備、ならびに、観測データの検証方法の開発・ハーモナイゼーションの検討を進めている。

波照間ステーションでは、現在二酸化炭素、メタン (CH_4) の温室効果ガスを中心に観測する他、採気する気団の起源を推定するための指標因子として、オゾン、粒子状物質、ラドン、気象因子などを観測している。落石岬ステーションでは、波照間ステーションとはほぼ同様な項目を観測しているが、ステーションが集落や漁港などの温室効果ガスの人為発生源が比較的近隣に位置するために、二酸化硫黄 (SO_2)・二酸化窒素 (NO_2) も指標因子として加えている。両ステーションで得られた観測データと機器などの運転監視情報は、一般電話回線を経由して、つくば(国環研)で遠隔監視・収集できる。なお、波照間ステーションでは、本年度中に温室効果ガスの一酸化二窒素 (N_2O) の観測を開始する予定である。

また、前年(1994年)の八重山諸島では、大型台風の当たり年であり、波照間ステーションにも最大風速70m/sを越す歴史に残る大型台風が続けて3つ来襲し、観測塔や気象測器・大気採取管などが大きな被害を受けた。

4.3 船舶を利用した温室効果ガスモニタリング

温室効果ガスの全球的挙動において、海域が大きな役

割を担っているが、海域の継続的な観測は困難であり、現状では、観測船や繫留ブイを用いた局所的・期間限定的な観測が行われているにすぎない。そのために、当センターでは、定期的・継続的に海域での温室効果ガス等の挙動を観測するために、海運会社の協力を得て、定期航路を航行する民間船舶を利用したモニタリングを現在2航路で推進している。

その一つは、日本～オーストラリア東海岸間を航行するコンテナ運搬船（白馬丸；日本郵船株、年間8往復）に、大気自動採取装置を設置し、太平洋上の温室効果ガス（二酸化炭素・メタン・一酸化二窒素）の南北両半球における濃度分布を緯度で約3度間隔で採取し、分析している。本事業は、本年度から長期モニタリングに移行し、西太平洋域の温室効果ガス濃度の緯度・季節による変動が観測されている。

他は、日本～カナダ西海岸間を航行する木材運搬船（スカグラン号；ノルウェー船籍、年間8～9往復）に、カナダ海洋研究所の協力を得て、コンテナ実験室・海水自動採取分析装置類を設置し、大気と海水中の二酸化炭素濃度・海水の水質を自動観測すると共に、大気を約60km間隔で採取し、大気・海洋間の温室効果ガスの交換・収支を観測するものであり、1994年度に船舶に観測機器等を設置し、現在試験モニタリングを実施している。

4.4 航空機を利用した温室効果ガスモニタリング

温室効果ガスの全球的挙動において、海洋と共に陸域のアマゾン川流域やシベリアの凍土・森林地域における湿地や森林の役割についての見積が十分とはいえない。特に、地球温暖化によるシベリア凍土地域の氷融によるメタンの放出の見積の重要性が問われている。

本事業は、地球環境研究総合推進費による研究課題「シベリア凍土地帯における温室効果のフィードバックの評価に関する研究」との連携のもとで、ロシア共和国中央大気観測所の協力を得て、借上げた航空機を用いて、大気を採取分析している。本年度からは、温室効果ガスの高度分布を観測する予定である。

4.5 船舶を利用した東アジア海洋汚染モニタリング

前述した船舶を利用した温室効果ガスモニタリングと同様に、定期航路を航行する民間船舶を利用した海洋の水質モニタリングである。当初は、神戸～韓国釜山間を航行するフェリー船で観測していたが、航路の廃止に伴い、現在では、大阪～沖縄間、および、大阪～別府間を航行するフェリー船（関西汽船株）に海水自動計測装置

と自動採水装置を設置して、我が国沿海の海水の水質を高頻度に観測している。

4.6 GEMS/Water支援事業

UNEP（国連環境計画）では、WHOとWMOと協力して、1977年からGEMS（地球環境監視システム）のもとに、陸水の汚染などの監視情報を収集・統合化するプロジェクト（GEMS/Water）を開始した。

現在、本プロジェクトは第2期目に入り、当センターは、1993年度より、観測の精度管理を行う「リファレンス・ラボラトリー」事業を担当すると共に、1994年度より、我が国の地方公共団体などの河川・湖沼での観測点（20地点）における観測データの取りまとめ、ならびに、GEMS本部との連絡・調整を行う「ナショナル・センター」業務を担当している。同時に、当研究所が十数年来、水質を継続的に観測してきた北海道摩周湖を陸水のベースライン観測点として位置づけ、北見工業大学の協力を得て、長期観測を開始した。

5. 地球環境モニタリングの今後の課題

現在、当センターで推進している事業の大半は、開始されて数年しか経過しておらず、長期・継続的なモニタリング体制が整ったものは2事業にすぎず、ようやく数事業で観測データが公表できるようになった。

その間、センター内での担当者も数世代を経ており、モニタリング事業の問題点・課題の解決も先延ばしにしてきた状況であるが、ここに現時点の担当者としての所感を記す。

5.1 新たな分野・領域への挑戦

現在推進している事業の大半は、地球環境の変化自体を物理・化学的手法を用いて把握することを目指している。しかし、これらの物理・化学的データのみでは、人間生活を取りまく環境を的確に把握することはできない。したがって、物理・化学的な地球環境の変化によって、あらゆる生物・生態系、あるいは人間活動がいかに影響を受けるのかを地道にモニタリングすることが必要になる。例えば、地球温暖化によって植生がシフトし、それが他の生物にどのように影響を与え得るのかを予測するためには、長期にわたる生態系についての調査・観測が必要になろう。

5.2 国際的連携の強化

当然のことながら、地球環境モニタリングを確度が高く、より効果的な成果が得られるものにするためには、

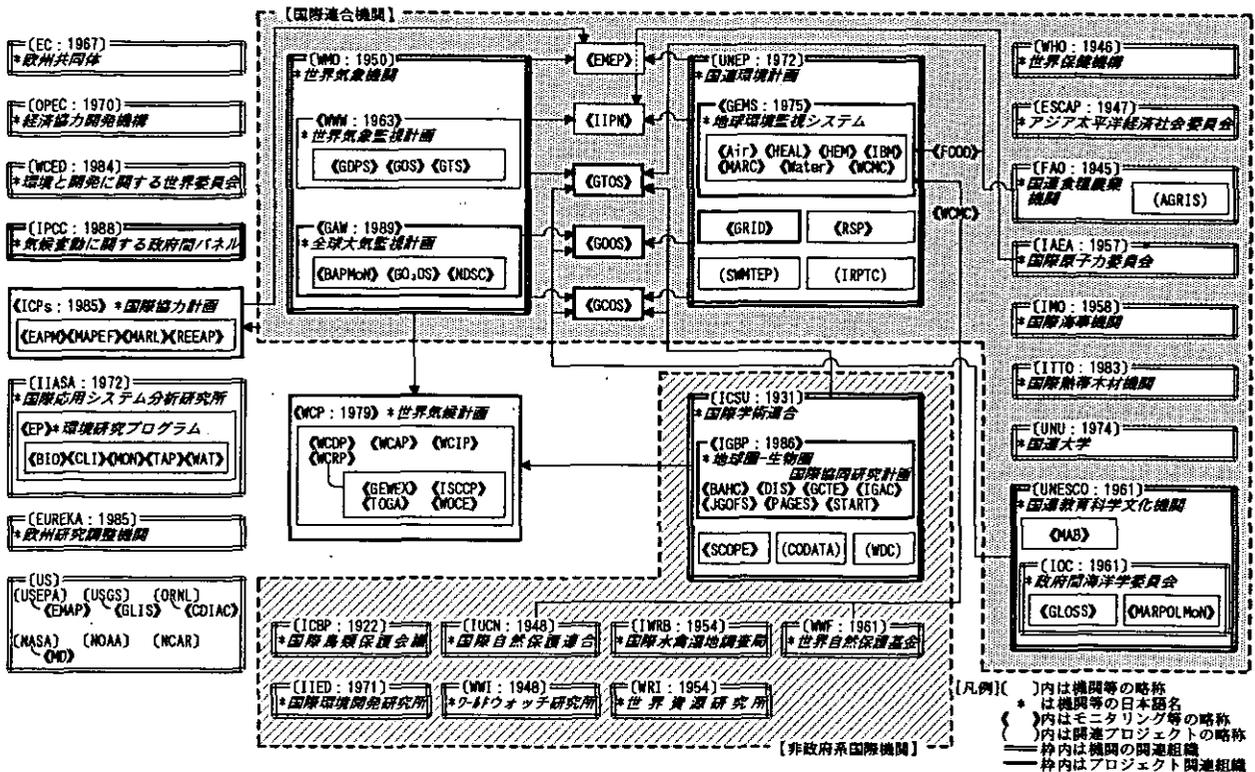


図5 地球環境モニタリングに関連する主な国際機関の体系

国際的な連携のもと推進することが不可欠である。

図5に地球環境モニタリングに関する主な国際機関の体系を示すが、当センターで推進する事業の大半はこれらの体系のもとに位置づけられると共に、諸外国との協力・共同事業として実施されており、世界的なネットワークに積極的に参画することは不可欠である。また、アジア・太平洋域における地球環境モニタリングの中核機関としての機能を持つことも、国際的な責務と考えられる。

5.3 モニタリングデータの検証と精度管理

地球環境モニタリングは、国際間の観測結果の比較、および、時間的にも長期間にわたる環境の変動や変化を検出する必要があるため、国際的に観測機関で行うべき精度管理、長期にわたるモニタリングのための精度保証、観測方法の国際的ハーモナイゼーションなどについて、特別な配慮が必要である。

例えば、GEMS/Water支援事業では、「リファレンス・ラボラトリー」業務において、アジア地域の観測点における観測データの精度管理のための標準試料の作成と配布・評価事業を担当しており、観測精度の維持・向上に努めている。また、温室効果ガスモニタリングにおいては、既知濃度の標準ガスがあつて、はじめて値付けがで

きるものであり、高精度の標準ガスの供給体制の確立が不可欠である。

5.4 事業実施体制の整備

モニタリング事業の予算的措置は、事業の展開に伴い順調に伸びている。しかし、事業を推進するための人的資源は、当センターを含め所内ではほとんど増加しておらず、事業実施体制をいかに整備するかが、今後の事業の進展の大きな制限要因となる。

現在推進しているモニタリング事業の大半は、属人的な色彩が強く、事業が長期にわたり継続するためには、実施主体を所外に漸次拡張することを考えると共に、事業実務を実質的に担当/支援する民間技術支援団体を早急に育成・整備する必要がある。

また、当センターのモニタリング事業の特徴の一つは、当センターが独自の観測用プラットフォームを所有するのではなく、民間船舶（ボランティア・シップ）の協力を得て事業を推進しているように、民間協力を積極的に導入していることにある。

このような民間協力の導入や地方公共団体などの協力・連携を強化することが、事業の実施体制の整備の早道にもなり、地球環境モニタリング事業について広く理解を得ることにもつながるのではないだろうか。

エコビークルの開発について

清水 浩（地域環境研究グループ 交通公害防止研究チーム）

1. 概要

平成6年度より3年間の予定で「環境保全に対応した陸上移動媒体（エコビークル）に関する基礎研究」の研究が開始された。

本研究は車社会が抱える環境、エネルギー、事故、渋滞の4つの問題を抜本的に解決することを目的とした総合的な取り組みのうちの基礎的研究を行う。本研究では4つの目標を達成するための手段として、（1）新技術を盛り込んだ電気自動車技術を主体とし、（2）これに太陽電池による充電の補助機能を持たせ、（3）車体を小型化するという概念を盛り込んだ車輛を開発する。さらに（4）センサー技術を駆使して車に衝突防止機能を付加することと、（5）渋滞をより良く解消するために道路を多層構造で利用するマルチデッキという技術について基礎研究を行う。

2. 研究体制

本研究は環境庁国立環境研究所をはじめとして4つの国立研究所と全国5つの大学が参加して行われる。また、本研究全体に指導、助言を与えるためにエコビークル検討会（座長、茅陽一東京大学工学部教授、検討委員40名）を組織している。

本研究は主に科学技術庁振興調整費省際基礎研究の枠組みで行われるが、技術に対する評価については環境庁地球環境研究総合推進費の下で行われる。また、本研究で開発される車体の基本的構成要素である駆動システムについては、公害健康被害補償予防協会の健康被害予防事業の中で行われる調査研究で開発されたものを有効に利用する。

さらに、本研究を遂行するに当たって必要な試作品の開発にはダイハツ工業株式会社を初めとして当面12社が参加する。

3. 研究内容

（1）エコビークル基本車輛の開発

本研究における最も重要な課題はエコビークルの基本車輛の開発である。

本開発の特徴は以下のとおりである。

- ①新しい技術の採用により高性能化、高機能化を図る。
ここで採用する技術は、
 - （a）新しい駆動システム
 - （b）新しいフレーム（バッテリービルトイン式フレーム構造）
 - （c）新しい電池管理技術である。
 - ②超小型車でありながら次の3つの要素を兼ね備えている。
 - （a）安全性が高い
 - （b）動力性能が高い
 - （c）乗員一人分の空間は十分に広い
 - ③環境とエネルギー問題に十分に対応するために次の3つの条件を備えている。
 - （a）動力が電気であるため走行中に排ガスを全く出さず、騒音も小さい。
 - （b）車体全体を高効率化していることと、小型であることのために著しく低燃費である。原油を発電用の1次エネルギーとして用いる場合でも市街地で1リットル当たり約60kmの走行が可能である。これは軽自動車の約4分の1のエネルギーで走行できることに相当する。
 - （c）さらに、車は走行する時間よりも駐車している時間が圧倒的に長いことを考慮に入れて、主に駐車中に太陽電池を用いて充電を行う。
- 以上の特徴に加えて、この車輛の形態は2人乗りタンDEM型とする。
- この形態は内燃機関自動車ではドイツのメッサシュミットで一時試みられた程度であるが、電気自動車であることと、ここで採用する新しい技術の導入により、合理性と実現性が大いに増すことになった。
- 本形態の合理性は
- （a）駐車空間が著しく小さくでき、かつ走行のための車線幅が狭くできること
 - （b）デザインの自由度が増し、空気抵抗を本質的に小さくできること
 - （c）側面からの衝突安全性に十分な配慮を払いつつ、

一人分の乗車空間を広くとることがきである。

また、電気自動車および新しい技術による本形態の実現の可能性の増大については

(a) バッテリービルトイン式フレーム構造の採用により重心が低くなるため、車体幅が狭くなくても車輛の安定性はむしろ向上する。

(b) 新しいドライブシステムの採用により、エンジンルームに相当する空間が不要になり、限られた車体長の中に十分な広さの車室空間を確保することが可能となる。

(c) 電気自動車は車体を小型化しても騒音、振動等は大きくならず居住性の低下に必ずしもつながらないことである。

基本車輛の仕様の概要を表1と外形デザインの例を図1に示す。

同表より、この車の外形形状は長さが軽自動車の規格と同一であり、幅は同規格より20cm狭い。幅を120cm以下に抑える理由は現在の大型車の幅の規格が2.5mとなっていることや駐車場1台分の幅が同じく2.5m程度であることを考慮し、駐車容易さ等を考慮してこの半分より少し小さな幅とした。

定員は2名であるが、過程でのセカンドカーの利用を考える場合には後席には子供2人も乗れることを想定している。

一充電走行距離は時速100kmの定速走行で約130km、10モードでは約170kmとなる見通しである。この性能があれば日常の用途には十分な見込みである。

原油換算での燃費は1リットル当たり60km以上となる見込みで、これは軽自動車の約4倍の性能ということになる。

加速性能は17秒程度であり、これは同クラスの車に比べてかなり速い。

モーターの出力は1個当たり20kwでこれを左右の後輪に2個ずつ取り付ける。モーターの種類はブラシレスDCモーターである。電池は従来型の鉛電池を用いる。

外形デザインは多種、多様なものが考えられるが、多くの候補の中から、居住性、外観としての魅力、空気抵抗等を考慮して選択される。

(2) 衝突防止機能の基礎研究

衝突防止機能は各センサーの組み合わせにより、車と

車、車と人、車と物体の衝突を未然に防止することを主眼としている。これまで同種の試みは数多いが、本研究では鉄道の安全性が極めて高いことに着目し、その理由を(a)線路をはみ出さない機能、(b)信号で確実に止まる機能、(c)前方の車輛に追突しない機能を備えているためであると分析した上で、同様の機能を車にも付加することが特徴である。

また、車の場合には鉄道と異なり、車線の変更、右折の際の対向車との衝突、歩行者との接触も事故の大きな原因となることも考慮して、これらについても未然に防止することを狙いとしている。

本研究では衝突を防止するための方式についての基礎研究を行うものである。

(3) マルチデッキ

道路に必要な機能には(a)交通流を流す機能、(b)そこで人々が楽しむ機能、(c)エネルギー、水、情報を伝える配管、配線を敷設する機能の3つが要求されている。これまで(c)の機能は地中や空中が使われることが多かったが、(a)、(b)の機能はほとんどが地表面に平面的に配置されていた。そのため、道路の面積を拡張し続けても機能が十分に満たされないという状況が続いて来た。この点を解消するために、機能ごとに道路を多層構造化するという考え方がマルチデッキである。

本研究では、この概念の実現可能性を評価するために現実に則した設計を試みる。

4. エコビークルに取り上げる新しい技術

(1) 新しい駆動システム

かつて、本研究の代表者らの提案により、IZAという名の電気自動車が開発されたが、ここではダイレクトドライブ方式という車輛の中にモーターを組み入れる技術を開発した。本研究では、モーターとホイールの間ギアを挿入し、より小型で高効率化を図った新しい駆動システムを開発する。

その図を図2に示す。

(2) 新しいフレーム(バッテリービルトイン式フレーム(BBF))

従来の電気自動車の電池はボンネット内、トランクルームまたは床上に置かれていたため、室内空間が著しく損なわれることやバッテリーを保持する構造物、部品

表1 エコビークル基本車両仕様

1. 主要寸法
 - ・全長 : 3. 3 m 以下
 - ・全幅 : 1. 2 m 以下
 - ・全高 : 1. 4 m 以下
2. 重量
 - ・乗車定員 : 2 名、または大人 1 名 + 子供 2 名
 - ・総重量 : 8 0 0 k g 程度
3. 性能
 - ・一充電走行距離 : 1 3 0 k m 以上 (1 0 0 k m / h 定速走行)
1 7 0 k m 以上 (1 0 モード)
 - ・燃費 : 6 0 k m / l 以上 (1 0 モード、原油換算)
 - ・最高速度 : 1 3 0 k m / h 以上
 - ・常用速度 : 6 0 k m / h 程度
 - ・加速性能 : 1 7. 5 秒以下 (0 ~ 4 0 0 m)
4. 0 秒以下 (0 ~ 4 0 k m / h)
 - ・登坂性能 : 3 0 % 以上
4. モーター、インバーター
 - ・モーター種類 : ブラシレス D C
 - ・最大トルク : 6. 5 k g ・ m
 - ・最高回転数 : 8 5 0 0 r p m
 - ・制御方式 : サイン波 P W M
 - ・制御用素子 : I G B T
5. 電池
 - ・種類 : 密閉式鉛蓄電池
 - ・容量、電圧 : 4 0 A h 程度、4 V
 - ・個数 : 6 0 個
 - ・重量 : 3 0 0 k g
6. シャーシ
 - ・全体構造 : フレーム付き車両構造
アルミ製バッテリービルトイン式フレームを採用
 - ・懸架装置 : 基本的に良路走行を前提とする
 - ・操舵系 : 指定しない
 - ・制動装置 : ホイールインモーター方式、後輪ドラムブレーキ採用
 - ・タイヤ&リム : 1 3 インチ、低転がり摩擦タイヤ採用
7. 駆動装置
 - ・駆動方式 : インホイールモーター
 - ・駆動輪数 : 2 輪駆動
 - ・減速機 : モーター組み込み遊星歯車
 - ・変速機 : なし
8. ボディー
 - ・外形 : 低空気抵抗ボディーを追求したものとする
ボディー外板部及びソーラーウイングへ太陽電池搭載想定
9. その他電装品
 - ・太陽電池 : 電力供給の補助機能として搭載
 - ・補機 : エアコン、残存容量計、ランプ類、充電器

図1 エコビークル外形デザインの例

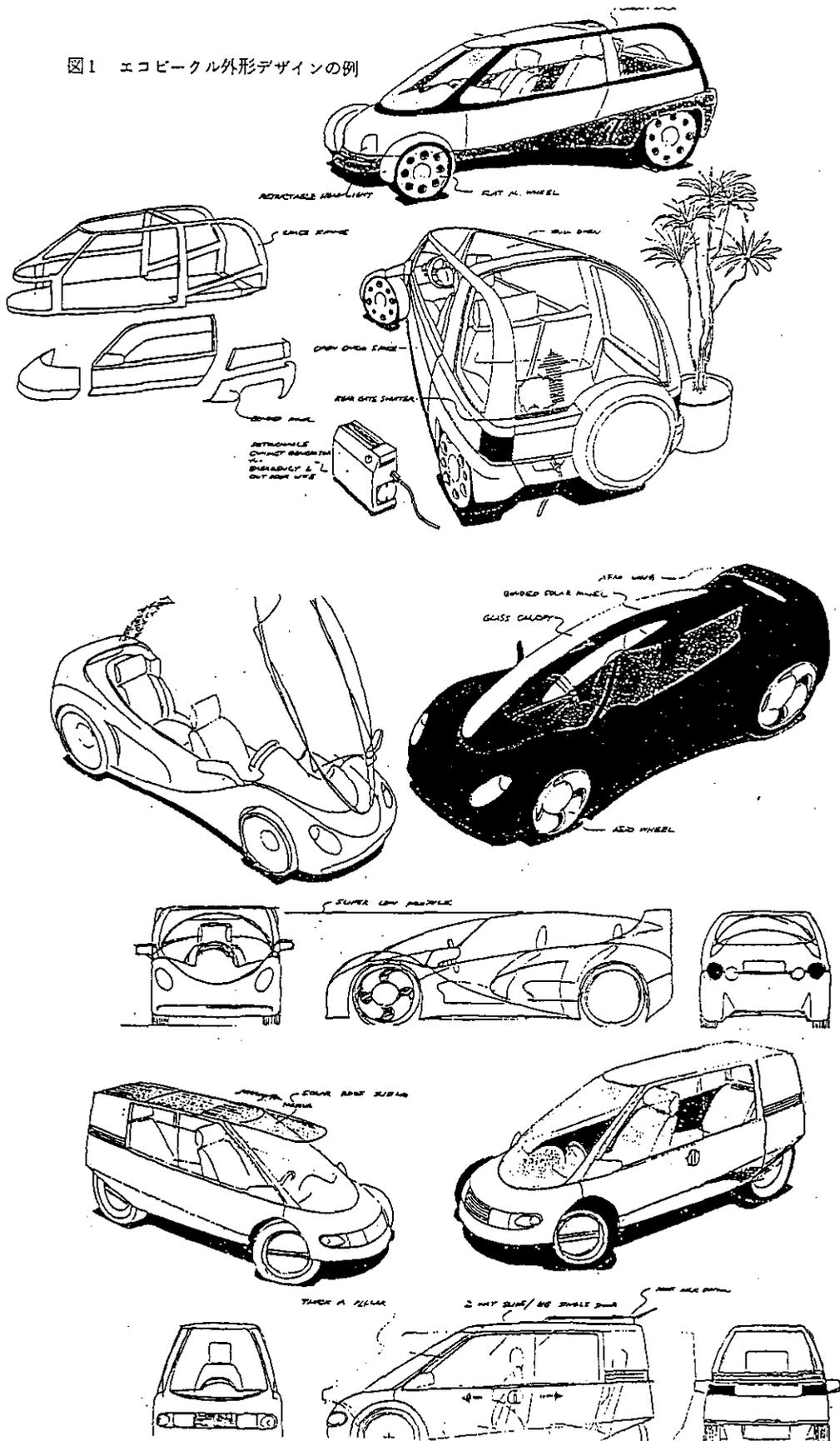
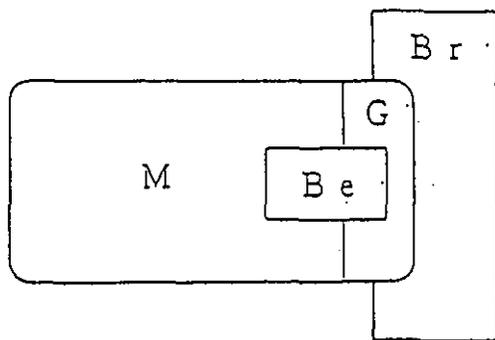


図1 エコビークル外形デザインの例



M : モーター
 Be : ベアリング
 G : ギア
 Br : ブレーキ

図2 新しい駆動システムの構図

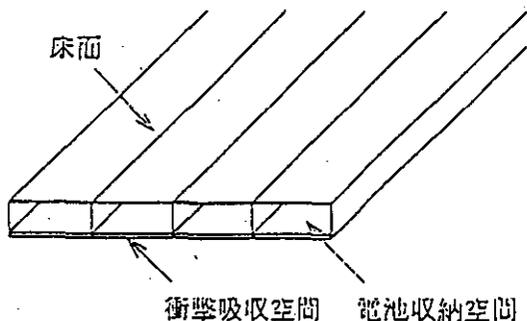


図3 バッテリービルトイン式フレームの概念図

がかなりの重さになるなどの不都合があった。

この問題を解決するため、バッテリービルトイン式フレーム (BBF) は、アルミニウムの押出成形材を図3のように連ねてフレームとして用い、この中に電池を組み込むものである。

(3) 新しい電池管理技術

これまで、電池の性能は十分に管理された室内で測定されることが多かった。だが、現実にはあらゆる気候条件の下で、利用される電気自動車用電池の性能は室内で測定された性能を大きく下回ることが指摘されており、このことが電気自動車の評価を下げる一つの要因でもあった。この問題を解決するには、個々の電池の温度差を小さくし、個々の電池ごとに充電を行うことができるようにし、個々の電池の性能の把握を可能にすることが重要であることが明らかになってきた。

本研究においては、以上の3点を考慮した電池管理技術を導入することにより、電池が本来持っている性能を十分に引き出すことを目的にしている。

5. 研究スケジュール

研究スケジュールは表2のとおりである。同表より基本車輛の試作については6年度は詳細設計を行った。この中で車体の基本コンセプトが決められ、外形形状のレンダリングが約20種類作られ、代表的な画についてモックアップと1/5スケールモデルが作られた。

駆動装置については詳細設計を完了し、部品の製作がほぼ完了している。

BBFについてはアルミニウムの押し出し型材を製作した。

電池については電極が完成した。

7年度は引き続き車体の実施設計を完了し、車輛試作が行われる予定である。

表2 研究スケジュール

	6年度	7年度	8年度
基本車輛の試作	基本設計	車輛試作	性能評価
衝突防止機能	センサーの方式開発	運転シミュレーション開発	システムの基本設計
マルチデッキ	機能設計	機構設計	地域別の詳細設計

東京湾における青潮発生

竹下 俊二（地域環境研究グループ海域保全研究チーム）

1. はじめに

大都市圏を後背地に有する内湾は、流入する汚濁負荷量が大きく上、地形的に汚濁物質が蓄積しやすい閉鎖性の特徴をもっている。このため、昭和53年度から東京湾、伊勢湾、大阪湾の三海域についてCODを指定項目として総量規制が実施されてきた。しかし、これら海域の水質は他の水域に比較して環境基準の達成率が依然として低い。なかでも、東京湾は公共用水域水質測定結果（1987～1989年）によると、湾内全測定点における窒素、リン濃度の年平均値は伊勢湾、大阪湾のそれを大幅に上回っており、汚濁（富栄養化）の進行が著しい。

海域の富栄養化がもたらす悪影響は、赤潮の発生のみならず、底層の貧酸素化を引き起こすことによって海域環境に対し、種々のインパクトを与える。東京湾の北東部では毎年夏から初秋にかけて、しばしば青潮の発生がみられる。青潮現象は、1963年頃から現れはじめ1980年～1994年の15年間で約110件、延べ日数にして160～170日に及んでおり、周辺海域では悪臭の発生や魚介類のへい死など水産業への被害等が社会問題化している。今日、青潮の発生機構の解明とともに、発生予測手法の確立が待望されているところである。

このような社会的背景を踏まえて、平成3年度から実施してきた特別研究「閉鎖性海域における水界生態系機構の解明及び保全に関する研究」では、①貧酸素水塊の動態把握と青潮発生機構解明、②海域における微小生物食物連鎖に関する研究、③人間活動と沿岸環境価値との関連、の3つのサブテーマを設定した。本報告では、これら3テーマで得られた成果のうち、青潮発生のメカニズム、発生予測手法について紹介する。

2. 青潮研究の概要

2.1 青潮現象と青潮発生機構

青潮は海水表面が白濁状の青色ないし青緑色を呈する現象である。赤潮が植物プランクトンの異常増殖という生物過程を経て引き起こされるのと違って、青潮の発生は、物理・化学過程で起こる。これらの過程は、①底層水中の酸素が堆積有機物の分解時に消費され、貧酸素状態から無酸素状態に達する過程、②離岸風的作用によっ

て生ずる無酸素水塊の湧昇過程、③湧昇水中に多量に含まれる硫化物が海表面で酸化され、着色する過程である。①から③に至る過程で、魚介類は硫化水素の発生と酸欠状態にさらされることから、しばしば生存が脅かされる。青潮発生の機構は、現在上述の3過程（段階）によるものと考えられている。しかし、湧昇流に関しては純粋な流動現象だけでは説明できないなど不明な部分が多く、詳細な研究が不足している。

2.2 青潮発生事例

表1 東京湾奥における青潮発生事例(1989～1993年)

年次	発生年月	発生海域	発生状況
1989年	6月20日	船橋航路内 船橋地先～千葉市 幕張地先	小規模 中規模
	7月4日		
	8月5日		
	9月24日		
	10月2日		
10月29日			
1990年	6月27日	酉浜～稲毛地先、千葉港 稲毛地先～千葉市 市川地先～市原市 船橋地先 千葉港内 幕張地先	着色なし
	8月4日		
	8月5日		
	9月7日		
	9月8日		
	9月27日		
1991年	6月24日	船橋航路内 船橋航路～酉浜 市川航路、海浜公園地先 船橋航路 酉浜	アサリへい死
	8月5日～8日		
	8月8日～10日		
	8月12日～14日		
	8月16日～18日		
1992年	6月1日	船橋航路～酉浜～幕張地先 千葉港 船橋航路～酉浜、千葉港 船橋航路～酉浜 市川航路～船橋航路～酉浜 葛西臨海公園地先～市川港 千葉港、船橋航路～酉浜	中規模
	6月11日		
	6月19日		
	7月2日		
	8月3日～6日		
	9月6日～11日		
1993年	10月6日～8日		
	6月2日	江戸川～養老河口 千葉港～検見川 船橋港～幕張地先、千葉港 浦安～千葉港 千葉港 船橋航路 酉浜～幕張地先	中規模
	7月1日～2日		
	7月8日		
	7月21～24日		
	8月27日		
	9月10日		
	9月22～23日		

東京湾北東部で最近5年間に観測された青潮発生事例（表1）やそれ以前の観測例によると、発生海域は浦安から千葉港の範囲にわたっており、なかでも船橋港・航路から幕張沖に集中していることがわかる。発生時期は6月から9月末がほとんどで、10月も2年に1度ほどみられる。また、これまでの調査ではおよそ10年ごとに大規模発生が観測されている。

3. 本研究の特徴

本研究は、青潮発生予測手法の確立を目指して、①青潮発生海域調査の実施、②室内実験による湧昇流の実験的研究と数値シミュレーションモデルによる流れの解析、③気象データを加えた発生要因と発生機構の検討、④①～③を踏まえた青潮発生予測とその適合性の検討を行った。

4. 青潮発生海域調査

4.1 調査方法

過去の発生事例を基に、現場調査を東京湾北東部海域とした(図1)。Stn. AおよびStn. Cはそれぞれ船橋航路脇、航路突端部、Stn. Bは湾中央、Stn. Dは幕張沖である。調査は、春期から秋期にかけて毎月、冬期は隔月に1回、青潮が発生しやすい9月は4～8日間連続して行った。測定は青潮発生に重要な貧・無酸素水塊の動態を把握するために、水中溶存酸素量(DO)・水温・塩分の水平・鉛直分布および気象要素として、風速、風向、気温、気圧、日射量、曇量などの項目について行った。また、水質調査として全有機炭素や窒素、リンなど栄養塩類および硫酸還元細菌など微生物調査も行った。

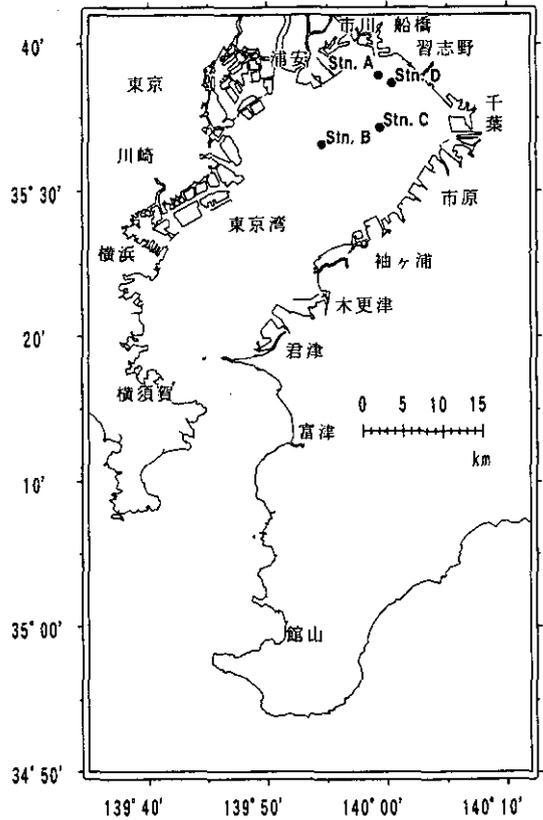


図1 東京湾調査地点

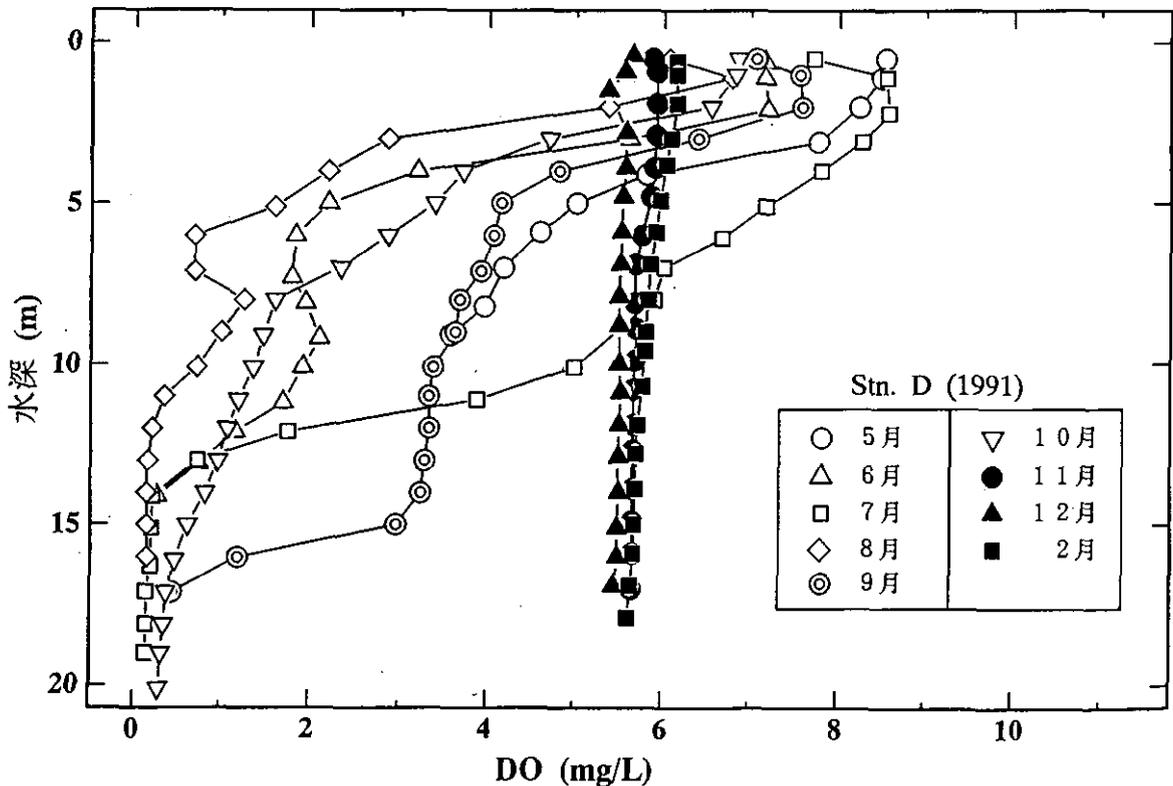


図2 東京湾奥における溶存酸素の季節変化

4. 2 調査結果

4. 2. 1 貧(無)酸素水塊の動態と水温・塩分の成層構造

青潮発生海域で溶存酸素が年間を通じてどのように減少・回復を繰り返しているのか、測定した典型例を図2に示した。夏に入ると、底層に貧酸素化(DO < 3 mg/l)がみられはじめ、ついには最悪の無酸素状態に達する。この状態は数カ月におよび、生物の生息できない環境となる。やがて晩秋から冬期になると、DOの値は増大し、飽和濃度に回復するとともに生物が棲める状況が生まれる。つまり、海水の鉛直混合の抑止力の大小を考えると、表層と底層の水温差(塩分差)が拡大する夏は大きく、表層と底層の水温差(塩分差)が縮小する冬は小さい。

一旦生成した底層無酸素水塊は、たとえ強い水温・塩分成層(大きな水温差・塩分差)が存在していても、水温より低い北偏風(離岸風)が連吹すると、底層水が湧昇しながら表層に輸送される(図3)。同時に、自然対流が生じるために、鉛直混合が盛んに起こり、青潮発生前の強い成層は、青潮発生中に崩壊して、水温・塩分の鉛直分布がほぼ一様となる(図4)。

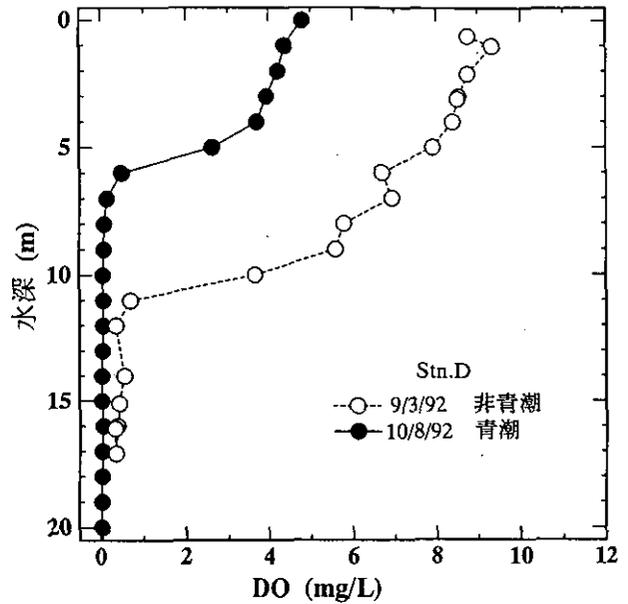


図3 東京湾奥における青潮・非青潮時の溶存酸素鉛直分布

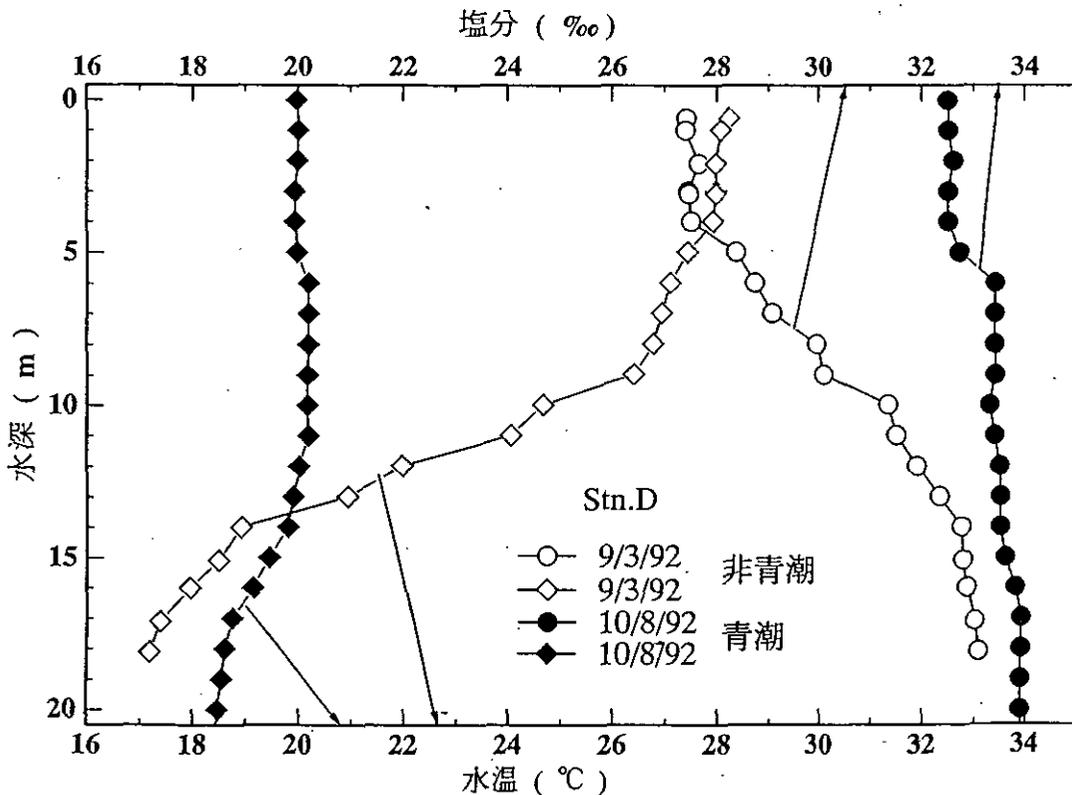


図4 東京湾奥における青潮・非青潮時の水温・塩分鉛直分布

4. 2. 2 水温・塩分の成層構造に及ぼす海面冷却の影響

青潮発生メカニズムを解明する上で底層水の挙動を明らかにすることは極めて重要であり、従来の研究ではその挙動は水理学的に捉えられてきた。本研究の初期段階で、過去の青潮発生時の気象データ（気温、風向、風速など）と、海水温の変化を解析した結果、気温と表層付近の水温に明瞭な低下が観測されていた。海表面で発生した自然対流は鉛直混合流となって成層を弱めるように働くことから、湧昇流が加速され、青潮の発生をしやすくするものと考えた。そこで、青潮発生前後の大気-海洋間の熱収支を計算した結果、青潮発生時は夏にもかかわらず、海面から大気中への放熱が起こっており（図5）、自然対流の発生と鉛直混合の存在が確認できた。なお、正味の熱流束は全天日射量から太陽放射熱量、潜熱輸送量および顕熱輸送量を差し引いて求めた。

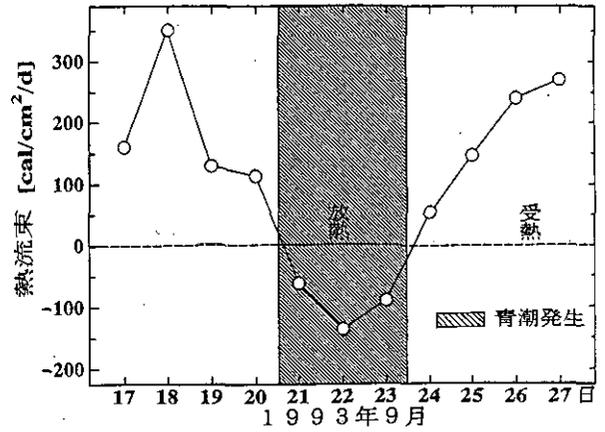
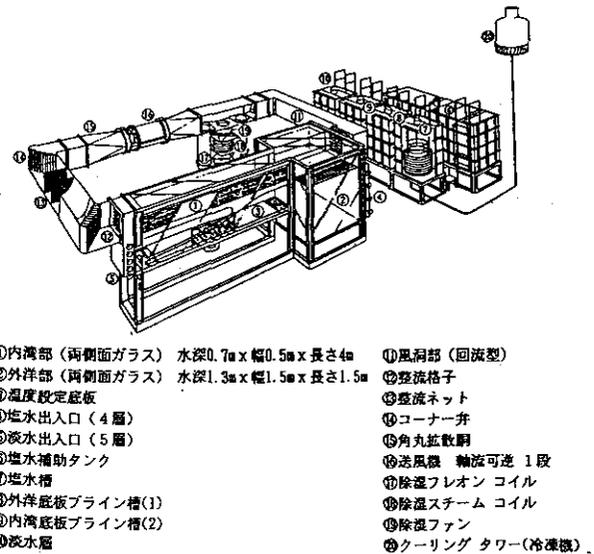


図5 東京湾奥における青潮・非青潮時の海面熱収支

5. 室内実験

5. 1 実験装置および方法

内湾で形成された水温成層と塩分成層はどのような条件で崩壊していくのかを明らかにするために、内湾密度流装置（図6）を使った室内再現化実験を行った。本装置は内湾模擬部（水路）、外洋模擬部（水槽）から構成されており、水路と平行に離岸風または向岸風を連吹するための風洞が装備されている。



- ①内湾部（両側面ガラス） 水深0.7m x 幅0.5m x 長さ4m
- ②外洋部（両側面ガラス） 水深1.3m x 幅1.5m x 長さ1.5m
- ③温度設定基板
- ④塩水出入口（4層）
- ⑤淡水出入口（5層）
- ⑥塩水補助タンク
- ⑦塩水槽
- ⑧外洋底板ブライン槽(1)
- ⑨内湾底板ブライン槽(2)
- ⑩淡水層
- ⑪風洞部（回流型）
- ⑫逆流格子
- ⑬整流ネット
- ⑭コーナー弁
- ⑮角丸拡散脚
- ⑯送風機 軸流可逆 1段
- ⑰除湿フロン コイル
- ⑱除湿スチーム コイル
- ⑲除湿ファン
- ⑳クーリング タワー（冷凍機）

図6 内湾密度流実験装置

5. 2 実験結果

5. 2. 1 水温・塩分成層の崩壊

実験は、表1などの従来の青潮発生事例で観測された気象条件を設定して行った。初期条件（ $t=0$ ）として、内湾部の水路内に青潮発生前の温度・塩分成層を形成させた。一方、離岸風の条件として、風洞の気流温度を海水温より4~6℃低く、また風速を4m/sと8m/sに設定した。図7は湾奥部で測定した水温鉛直分布を示す。初期にあった水温成層が離岸風の連吹を受けると、数時間後に崩壊し、表層（水面）から底層まで一様な水温となることが分かる。一方、塩分成層についても同様に、成層崩壊がみられ、水面から底面まで均一な塩分分布となっている（図8）。これまでに得られた青潮発生前後における東京湾観測結果がこれら室内実験によって検証された。

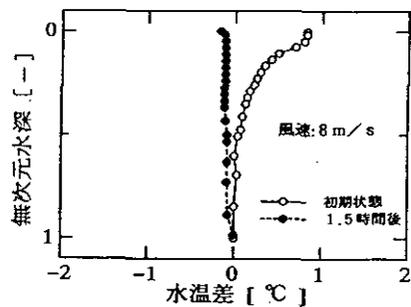


図7 青潮発生時の気象条件における装置内水温鉛直分布

5. 2. 2 流れの可視化実験

青潮発生に重要な成層崩壊過程を詳細に検討するために、水路内流れの軌跡を可視化した。内湾奥部にある底層の水塊（写真1）は、湾中央部から湾奥に向かう流れ（向岸流）に伴って、岸壁では湧昇流となって水面に輸送されていることが確認された（写真2）。この時、

表層付近では水面冷却によって生じた冷水塊が下降流となり、次第に鉛直混合を増幅させながら、やがて湧昇流を伴った鉛直循環流が形成される様子も観察された。

6. 数値シミュレーション

青潮発生時は、湾奥の沿岸部で鉛直流れが支配的になっていることから、鉛直2次元流動モデルを用いて流向・流速と塩分（密度）分布を求めた。図9は、図7、8の実験と同一条件を与えたときの計算結果例である。図は内湾密度流装置内のフローパターンを示したものであり、全体として上層では離岸流が、下層では逆向きの向岸流がみられる。さらに、向岸流は、湾奥で湧昇流となって上層に移動しており、実験結果と同様な鉛直循環流の形成が認められる。

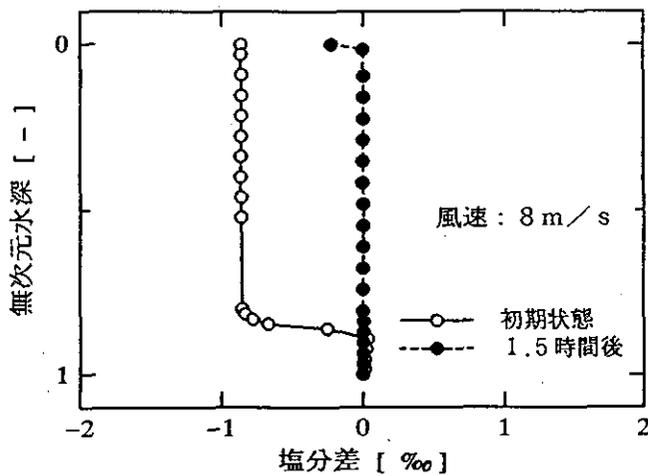


図8 青潮発生時の気象条件における装置内塩分鉛直分布

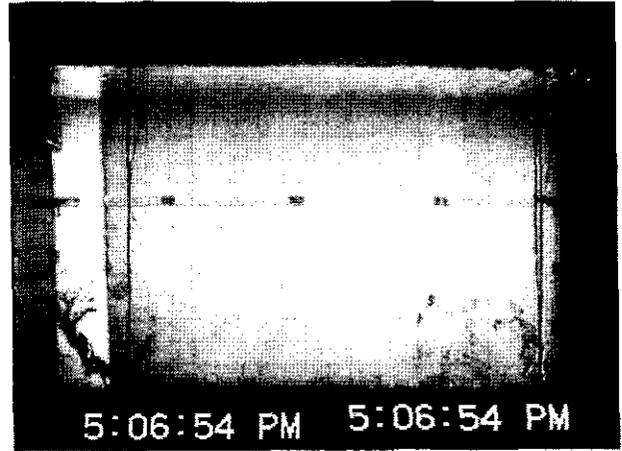


写真1 装置内流れの可視化（湧昇流発生開始）

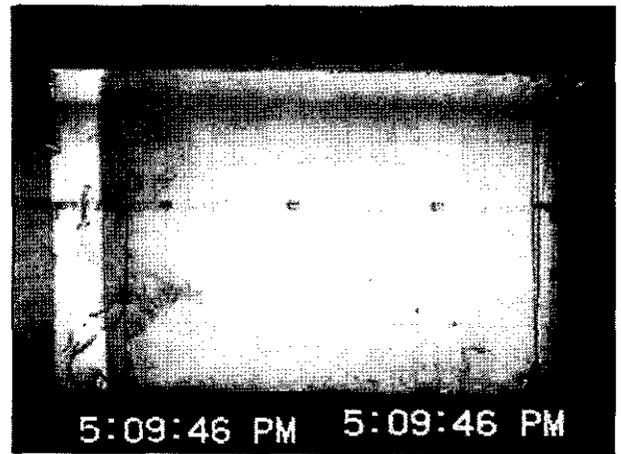


写真2 装置内流れの可視化（湧昇流発生中）

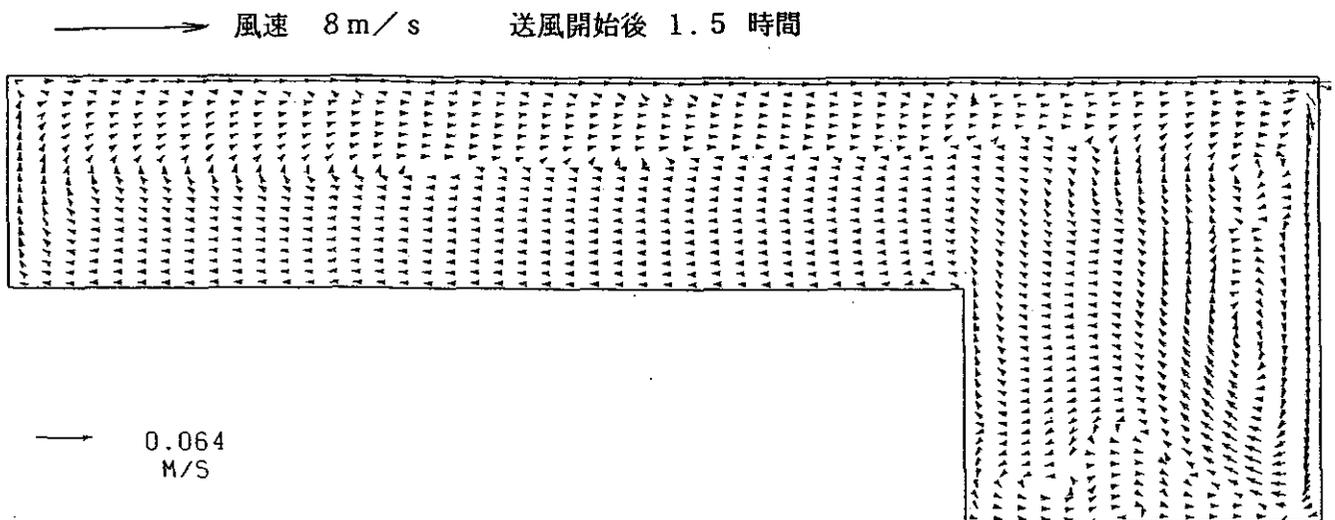


図9 鉛直2次元モデルによる装置内の流向・流速の数値計算結果

7. 青潮発生条件の特定化と発生予測の適合性

上述の海域調査、室内実験および数値計算によって、青潮現象は、底層無酸素水塊の流動に熱移動が深く関与していることが示された。すなわち、湧昇流の発生要因として、従来提唱されていた離岸風による吹送流とは別に、海面冷却に起因する鉛直混合の相乗作用の存在が明らかになった。そこで、これらの知見と気象に関する諸データのうち、青潮発生と最も相関の高いパラメータの抽出を行った。その結果、最も基本的で、シンプルな発生因子と発生条件を特定し、図式化した(図10)。条件1は貧・無酸素水の存在を意味し、条件2は離岸風による湧昇流の発生を表しており、風向は東京湾の位置と形状から定まる。ここには記していないが、風速が大きくなると成層を破壊し、底層水の湧昇因子となる。例外的に、風速が9m/s以上では次の条件3を満足しない場合に青潮発生がみられる。条件3は海面冷却によって生ずる自然対流が鉛直混合・湧昇流を促進し、青潮を起りやすくすることを意味している。

条件2、3を示す具体例として、1993年7月における風向と日平均気温の変化の推移が青潮発生にいかにかかわっているかを示した(図11)。北偏風に連動して一定値以上の気温の低下がみられると、青潮が発生することをよく表している。

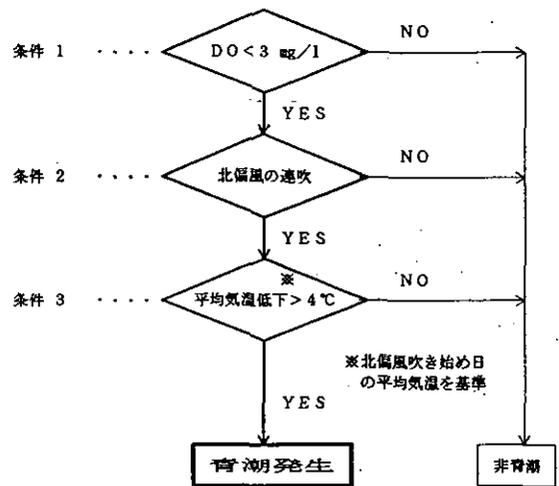


図10 東京湾における青潮発生条件

1989年から1993年までの5年間に東京湾で発生した青潮は合計31件、延べ54日が確認されている。これら全事例について、条件1、2、3を満足しているのか否かを調べた結果、延べ54日中50日が満足しており、青潮発生の約93%を説明することができた。

今後、青潮発生の予報に発展させるためには、初夏から秋にわたる水中溶存酸素、水温、塩分の連続観測ステーションの設置と、少なくとも一兩日の気象データ(風向、風速、気温など)の予測精度向上が望まれる。

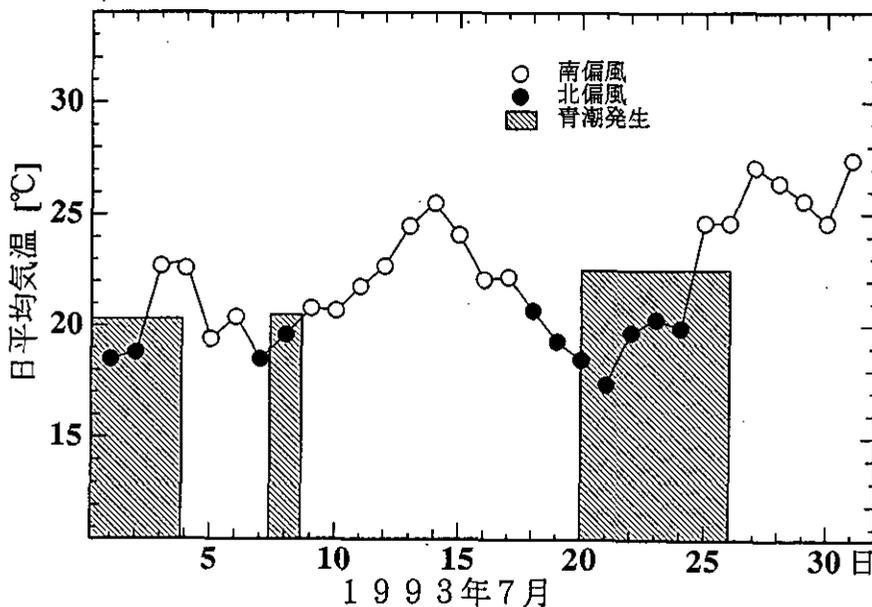


図11 青潮発生時における日平均気温と風向(千葉港周辺)

8. おわりに

我が国の内湾の中には、総量規制海域というまでもなく、その他の海域でも夏期に、貧酸素化状態になっているところは多々みられる。それらは主として海水交換を著しく抑制する浚渫窪地など海底地形の影響が大きいことを考慮すると、今後は港湾内の海底構造に関する調査研究も重要であると考ええる。

底層の貧・無酸素化は、エビ、タコ、カニ、アサリな

ど底生魚介類のへい死や青潮発生を招くばかりか、底泥からの栄養塩類の溶出を促進させる作用があることから、海域の富栄養化状態が改善されない要因の一つとなっている。本年2月末環境庁から告示された、東京湾、大阪湾の全窒素、全リンに係る環境基準の水域類型の指定は富栄養化防止対策の一環として機能するものであるが、併せて貧酸素化対策につながることを願っている。

ディーゼル排気微粒子 (DEP) による 肺がん発生の新しいメカニズムについて

嵯峨井 勝 (地域環境研究グループ大気影響評価研究チーム)

1. 研究の背景と概要

1.1. 日本人の肺がんによる死亡率の増加傾向とその原因 について

日本人の肺がんによる死亡率は年々増加の一途をたどっている。図1に示すように、93年度の男性のデータは、既に胃がんの死亡率を追い越し、死因の1位になっている⁽¹⁾。この肺がんによる死亡率増加の原因として喫煙や食事が主なものと考えられており、中でも喫煙は肺がん発生の最大の危険因子とされている。しかし、最近増加している肺がんは喫煙の影響の高い扁平上皮がんではなく、喫煙の影響の最も低い腺がんであり、喫煙だけでは近年の肺がん死亡率の増加を説明できない。このようなことから、最近の肺がん増加の原因として喫煙に加えて大気汚染物質のかかわりも疑われている。

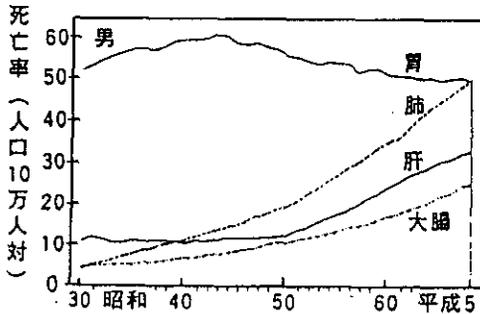


図1 日本人男性10万人当たりの部位別がん死亡率の年次推移⁽¹⁾

1.2. ディーゼル排気暴露による発がん実験について

ディーゼル排気 (DE) が肺がんを発生させることは米、独、スイス、日本等の6つの研究機関から報告されている⁽²⁾。図2にはこれら6施設で2年間にわたってラットを用いて行われた大規模な発がん実験の結果を示した。データ間にはかなりのばらつきがあるが、全体的には一定の量-反応関係がある。

一方、このDEによる発がんのメカニズムは、図3に示すように、ディーゼル排気微粒子 (DEP) 中のベンゾ(a)ピレンやニトロアレン等の強力な発がん物質が肺細胞内でDNAと結合してDNA-付加物を作り、これ

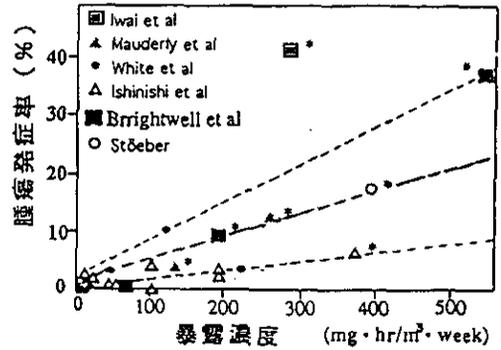


図2 世界6施設でのラットへのディーゼル排気 (DE) 2年間暴露による発がん実験の結果⁽²⁾
横軸はDEP濃度と暴露時間を掛けた1週間当たりの総暴露量を示し、縦軸は腫瘍発生率を示す。

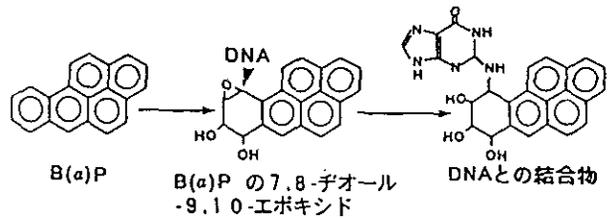


図3 ベンゾ(a)ピレン (BaP) の代謝活性化とDNA-付加物の生成

により遺伝情報が攪乱されてがん化に進むものと考えられてきた。事実、これら DEP中の発がん物質が強い変異原性を示し、かつ動物実験でもこれらの発がん物質が様々な臓器にがんを作る際にDNA-付加物を生成することを示す報告が多い⁽³⁾。

1.3. 発がん物質を全く含まない粒子による発がん

一方、このような研究は沢山あるが、DEP中に含まれるニトロアレン等の量はDEPの1g当り数 μ gから数十 μ g程度で非常に微量である。これに対し、発がん実験に用いられている量はmg単位であり、その間の濃度

の開きが非常に大きいこと等から、ニトロアレン等が実際の発がんにどの程度関与しているのかが議論的になっている。このような時に、DE暴露と発がん物質を全く含まないカーボンブラック(CB)や酸化チタン(TiO_2)をDE中のDEPと同じ濃度にして、ラットに2年間暴露したところ、3者の発がん率はほとんど同じであったという結果が報告された^(4,5)。この事実もDNA-付加物の生成が発がんに及ぼす役割に疑問が持たれている根拠の一つとなっている。この事実は、肺の中でマクロファージが粒子を貪食する時に放出するスーパーオキシド(O_2^-)やヒドロキシラジカル($\cdot OH$)をはじめとする活性酸素やフリーラジカルが発がんに大きな役割を果たしていることを示唆している。このような例としてアスベストが有名である。

1.4. 肺がん発生に及ぼす食事因子の関与について

先に触れた食事因子についてみると、最近の日本人の高脂肪、高カロリー食への食生活の変化が肺がん増加の大きな要因になっていると指摘されている。一方、 β -カロチンやビタミンA、E、Cやセレンウム等の活性酸素を消去する作用を持つ物質(抗酸化物質)を多量に摂取する人々には肺がん発生率が低いという報告があり、それらの中でも、特に β -カロチンが有効であるという報告が多い。このことも、肺がん発生に活性酸素やフリーラジカルが深く関わっていることを示唆している。

1.5. 我々の研究目的とその概要

そこで我々は、本来の目的であるDEの発がん性及びリスク評価を行うためには様々な角度からの作用メカニズムの解析が重要と考え、その一つとしてDEPによる発がんにおける活性酸素の役割を明らかにすることを試みた。

DEPによる発がん、本当に活性酸素やフリーラジカルが重要なかわかりを持っているとするならば、まず、①DEPが活性酸素を多量に産生するかどうか、②DEPが産生する活性酸素がDNA損傷を引き起こすかどうか、さらに、③生体内で活性酸素が増える条件下では発がん率が上昇するかどうか、ということに加えて、逆に、④活性酸素やフリーラジカルを消去する作用を持つ抗酸化剤等の摂取によって発がん率は低下するかどうか等が示されなければならない。以下にはこれらについて行った実験結果を紹介したい。

2. DEPの肺毒性と活性酸素産生能

2.1. DEPの気管内投与によるマウスの死亡率とSODによる死亡率抑制効果について⁽⁶⁾

まず、DEPが活性酸素を産生することに気づいた実験を紹介する。DEPを0.05%のTween80を含むリン酸緩衝液に溶かし、マウスの気管内へ投与し、その後24時間以内の死亡率(図4)を調べたところ、0.6mg投

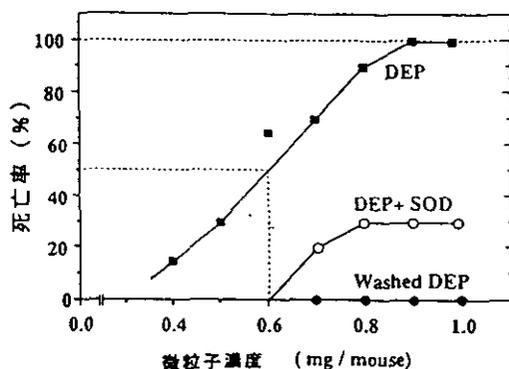


図4 ディーゼル排気微粒子(DEP)の気管内投与によるマウスの死亡率曲線とSODによる死亡率抑制効果⁽⁶⁾

DEP, ディーゼル排気微粒子のみを1回気管内投与した場合の死亡率曲線; DEP+SOD, DEP投与1時間前にPEG-SODを尾静脈から投与した場合の死亡率曲線; Washed-DEP, DEPをメタノールで充分洗浄して残ったススの部分を気管内投与した場合の死亡率曲線;

与では50%が死亡し0.9mg投与では100%のマウスが死亡した。なお、このマウスの死因は肺の中へ水分が漏れ出てくる肺水腫であった。

一方、DEPを気管内投与する1時間前に、活性酸素の一種である O_2^- を分解する酵素(スーパーオキシドディスムターゼ、SOD)を予め尾静脈から投与しておくと、100%のマウスが死亡する量のDEPを投与しても、死亡率は30%以下に低下した。この結果はDEP毒性の本体は O_2^- あるいはそれから派生した $\cdot OH$ 等の活性酸素であることを示唆している。

2.2. DEPからの O_2^- 、 $\cdot OH$ 等活性酸素産生

2.2.1. 化学反応によるDEPからの活性酸素の生成

前項で、DEPが O_2^- を産生している可能性が示唆されたので、この化学反応を試験管内のチトクロームC還元法で調べた。 O_2^- を産生を示すチトクロームCの還元反応はインキュベーション時間につれて増加し、この増加はDEP量に依存していた。さらに、この反応系にSOD

を加えるとチトクロームCの還元は認められなくなった。また、この O_2^- 産生は核磁気共鳴 (ESR) によっても証明された。

DEPを様々な有機溶媒で分画して、各画分の O_2^- 産生能を調べたところ、n-ヘキサン画分には9%存在し、ベンゼン画分には20%、メタノール画分には58%と圧倒的に多くがこの画分中に存在し、残査のDEP中にも14%ほど認められた。メタノール画分中にはポリフェノールやキノン系化合物が存在していることが知られている。このため、 O_2^- はこれら物質の自動酸化反応によって生じているものと推測される。

2.2.2. 肺内酵素によるDEPからの活性酸素の生成⁽⁶⁾

前項に述べたポリフェノールやキノン系化合物は一般的に、NADPHの存在下で薬物代謝酵素のチトクロームP-450還元酵素(P-450 red-ase)によって代謝され、その時、酸素を一電子還元して O_2^- を生じることが知られている。

そこで、前項の化学反応系に精製したP-450 red-aseとNADPHを加えたところ、 O_2^- 産生は6.5n moles/min/100 μ g·DEPとなり、酵素がない場合の30倍以上に増加した。この反応系で得られた O_2^- と $\cdot OH$ の生成もESRによって確認できた。

これらの結果より、DEPから O_2^- および $\cdot OH$ が生成する可能なメカニズムを図5に示した。すなわち、DE

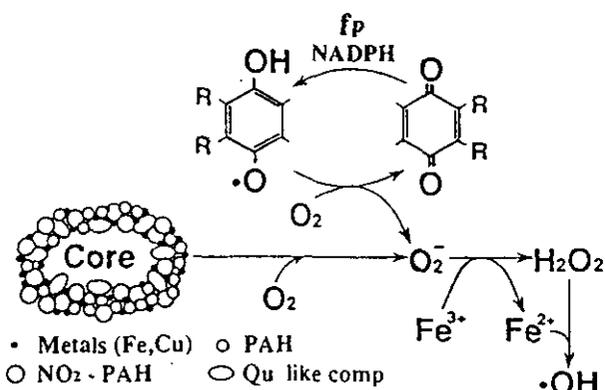


図5 ディーゼル排気微粒子(DEP)からの活性酸素生成メカニズムの推定図

P中に含まれている種々のキノン系化合物が化学的な自動酸化反応やP-450 red-aseの代謝によってセミキノンラジカルを生じる。このラジカルは非常に不安定なため

酸素を一電子還元して O_2^- に変える。この O_2^- は H_2O_2 を経てDEP中の鉄や銅の触媒によるFenton反応によって $\cdot OH$ を生じているものと考えられる。

2.2.3. 肺胞マクロファージによる活性酸素の生成

肺胞マクロファージ(AM ϕ)は肺内に侵入してきたバクテリアや粒子状物質を貪食して処理する清掃屋であり、侵入者を殺す武器として O_2^- をはじめとする種々の活性酸素を発生する。試験管内でモルモットの肺胞マクロファージとDEPを共存させると対照群の約3倍に相当する1.8n moles O_2^- /min/10⁶個AM ϕ の O_2^- 産生が認められ、DEPは肺内での活性酸素の生成を促進していることが認められた。

3. DEPに由来する活性酸素によるDNA損傷

3.1. DEPによる試験管内でのDNA損傷

DEPのメタノール抽出液+NADPH+P-450red-ase系にプラスミド-DNAを加えて25℃、60分間インキュベーションした後に、反応液の一部をアガロース電気泳動で調べたところ、ほぼ完全に一本鎖DNA切断が起こっていた。この時、 $\cdot OH$ のスカベンジャーであるDMSOを添加するとDNA鎖切断はほぼ完全に阻害された。

また、DEPとDNAとをインキュベーションするとDEP濃度に依存して8-ヒドロキシデオキシグアノシン(8-OHdG)の生成も認められた⁽⁷⁾。これらのことより、DNAはDEP由来の $\cdot OH$ によって損傷を受けていることが示唆される。

3.2. DEPによる肺内DNA損傷⁽⁷⁾

DEPが実際に生きている動物の肺の中でDNA損傷を起こしているかどうかを調べることは、DEPによる発がんに関与していることを述べる上で重要である。

我々は、DEPをマウスの肺に1回だけ気管内投与したあとで、経時的に8-OHdG生成量の変化を調べたところ、1~2日後に最高値となり、DEP投与量が0.3mgの時に対照群の5倍に増加していた。しかし、それ以上の濃度群では8-OHdG生成量は低下する傾向を示していた。これは、DEPは遺伝毒性のみならず、細胞毒性も強いことによると思われる。また、数代にわたって脂肪分が16%の高脂肪食を摂取していたマウスの8-OHdG生成量は4%の普通脂肪食摂取動物の約5倍であった。このマウ

スに0.3mg DEPを投与すると8-OHdG生成量はさらに2倍増加した(図6)⁽⁷⁾。この時の8-OHdG生成率は10⁵個のDNA塩基当たり数十個であった。一方、DEP中の発がん物質によるDNA-付加物の生成率が10⁷⁻⁸個の塩基当たり数十個⁽⁸⁾とされているのに比べると、約100~1,000倍近く高い値である。

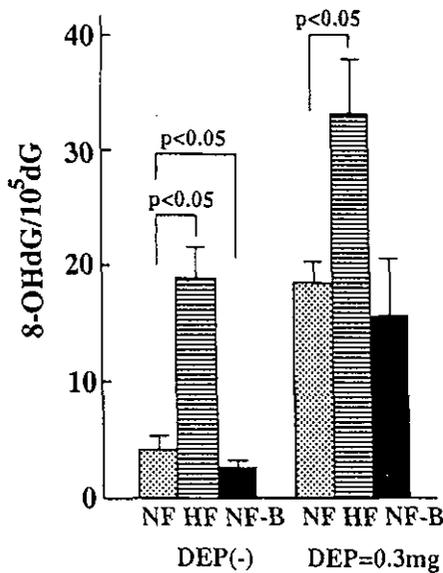


図6 ディーゼル排気微粒子(DEP)投与による肺内8-ヒドロキシデオキシグアノシン(8-OHdG)生成と高脂肪食およびβ-カロチンの影響⁽⁷⁾
NF、普通脂肪(4%)食群；HF、高脂肪(16%)食群；NF-B、普通食+0.02%β-カロチン添加群

以上の結果は、DEPは生きている動物においてもDNA損傷を引き起こし、その損傷は高脂肪食摂取でさらに増加することを示しており、このような条件下では発がん率も増加する可能性を示唆している。

そこで次に、DEPによる実際の発がんに及ぼす高脂肪食の影響について検討した。さらに、活性酸素消去能を有する食事性β-カロチンの影響についても検討した。

4. DEPによる肺腫瘍発生と高脂肪食摂取の影響^(9, 10)

マウスに一匹当たり、0.05mg、0.1mgおよび0.2mgのDEPを週1回ずつ、10週間(10回)にわたって気管内投与した。同時に、それらのマウスにコーン油4%を含む普通脂肪食及びコーン油16%を含む高脂肪食を与え続け、1年後の肺腫瘍発生率を調べた。図7-A^(9, 10)に示すように普通脂肪食のマウスの良性腫瘍(腺腫)発生

率は13~31.0%となり、0.1mg DEP投与群の腫瘍発生率が最も高く、0.2mg投与群ではむしろ腫瘍発生率が低下していた。この結果には再現性が認められた。高脂肪食を摂取させたマウスの肺の良性腫瘍発生率は普通脂肪食摂取群よりもさらに高く、その発生率はそれぞれ25~43.3%となった。また、高脂肪食摂取群の場合も0.1mg投与群の腫瘍発生率が最も高く、0.2mg投与群では低下していた。さらに、普通脂肪食摂取群と高脂肪食摂取群の悪性腫瘍(腺がん)の発生率を比較すると、0.05mgのDEPを投与され、普通脂肪食を摂取していた群では30匹中1匹であったものが、高脂肪食群では5匹に増加し、0.1mg DEP投与群では普通脂肪食群で0匹、高脂肪食群では4匹に増加していた。明らかに、高脂肪食摂取群で悪性腫瘍の発生率が高くなっていった。

また、両脂肪食群とも0.1mg DEP群で悪性腫瘍の発生率が最も高く、0.2mg投与群では低下していた。その理由は、次のように考えられる。すなわち、DEPはDNA損傷などの遺伝毒性を示すだけでなく、かなりの細胞毒性をも持つため、DEP濃度が一定以上になるとがん化した細胞すら殺してしまうので、発がん率が低下するものと思われる。

5. DEPの肺腫瘍発生に対するβ-カロチンの影響

β-カロチンは活性酸素やフリーラジカルを消去する作用を持っている。実験は前項と全く同じ条件でDEPを気管内投与し、前記の普通脂肪食および高脂肪食のそれぞれに0.02%のβ-カロチンを添加した飼料を1年間与えた。図7-B^(9, 10)に示すように、β-カロチン添加の普通脂肪食を摂取した群の肺の腫瘍発生率は、10~3.3%となり、β-カロチン無添加群と同様に、0.1mg DEP投与群の腫瘍発生率が最も高かった。β-カロチン添加群の普通脂肪食群と高脂肪食群の腫瘍発生率を比較すると、やはり高脂肪摂取群の方が高かった。また、β-カロチン無添加群(図7-A)と添加群(図7-B)の腫瘍発生率を比較すると、DEPの0mg群と0.05mg群では普通脂肪食群、高脂肪食群共にβ-カロチン添加群の方が良性腫瘍発生率が若干低くなった。一方、悪性腫瘍の発生率を比較すると、β-カロチン添加群の方が無添加群より明らかに低くなり、特に0.05mg DEP群と0.1mg DEP群では顕著であった。

以上のように、DEPによる発がん率は高脂肪食で上昇し、β-カロチンによって低下することが示され、この

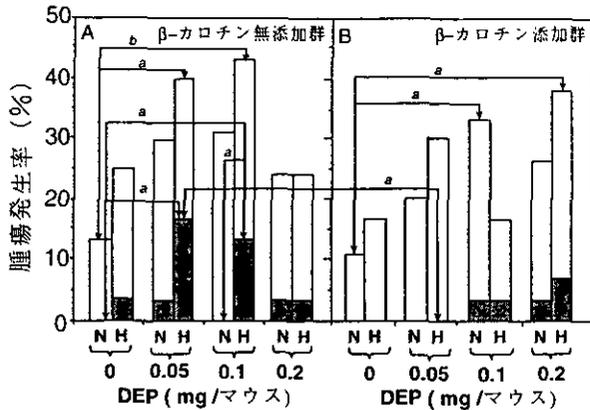


図7 ディーゼル排気微粒子(DEP)の繰り返し気管内投与による肺腫瘍発生率に及ぼす高脂肪食とβ-カロチンの影響。(9, 10)

A欄. 普通脂肪食(N)と高脂肪食(H)摂取マウスにおける腫瘍発生率;
 B欄. 普通脂肪食(N)と高脂肪食(H)のそれぞれにβ-カロチンを添加した飼料を摂取させたマウスの肺腫瘍発生率.
 良性腫瘍: □, 悪性腫瘍: ■
 N, 4%のコーン油を含む普通脂肪食投与群;
 H, 16%のコーン油を含む高脂肪食投与群;
 a, p<0.05; b, p<0.01;

傾向は悪性腫瘍において特に顕著であった。このことは、DEPによる発がんには活性酸素やフリーラジカルが深く関与していることを示唆している。

6. DEPによる発がん研究の現状と問題点

これまで、DEによる発がんのメカニズムは、DEP中の発がん物質、すなわちベンゾピレンやニトロアレン等の強力な発がん物質が肺の細胞内DNAと結合してDNA-付加物を作り、これにより遺伝情報が攪乱されてがん化に進むものと考えられてきた。

一方、DEP中に含まれるニトロアレン類の量は非常に微量であるのに対し、発がん実験に用いられている量は非常に高濃度で、その間の濃度に大きな開きがあること等から、ニトロアレン等が実際の発がんにどの程度関与しているのかが問題とされていた。これに加えて、発がん物質を全く含まないCBやTiO₂でもその発がん率はほとんど同じであったということが報告された。この発がんメカニズムは充分に明らかにされている訳ではないが、肺の中でマクロファージがCB等の粒子を貪食する時に放出する傾向は悪性腫瘍において特に顕著であった。このことは、O₂⁻や・OHをはじめとする活性酸素や

フリーラジカルが大きな役割を果たしているものと考えられている。

このような結果から考えると、DEP投与による発がんはDEPそのものが発生する活性酸素に加えて、CBやTiO₂の場合と同様に、肺胞内のマクロファージ等がDEPを貪食し、これを処理しようとする時に放出する活性酸素とDEP内に存在する鉄や銅等の微量重金属等の作用によって生じた・OHによる可能性が考えられる。一方、DEPによる他の発がんメカニズムとして、肺内で発生したがん細胞を殺す免疫監視細胞の機能をDEPが低下させる可能性も考えられる。最近、活性酸素が免疫監視機能を弱めたり、β-カロチンに免疫監視機能を活性化作用があること等が知られるに及んで、DEPによる発がんには免疫監視機能の変化も深く関わりがあるものと考えられる。

これらの事実から、従来のように、DEP中の発がん物質の変異原性試験やDNA-付加物生成だけでなく、図8に示すように、発がんにおける活性酸素の役割の解明に加えて、マクロファージやTリンパ球などの免疫監視

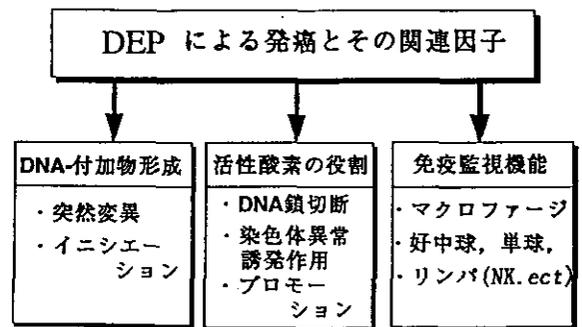


図8 DEPによる発がんに関連すると考えられる3つの因子

機能に及ぼす影響の評価も重要な課題として研究される必要があろう。このように広範なメカニズムを検討することによって、はじめてDEPによる発がんの真のリスク評価も可能になるものと考えられる。

本研究の詳細は総説⁽⁹⁾を参照されたい。

7. まとめ

本稿では、ディーゼル排気(DE)中の主要汚染物質であるディーゼル排気微粒子(DEP)の腫瘍発生に及ぼす新しいメカニズムとしての活性酸素の役割を述べた。要旨は以下の通りである。

①DEPはその成分中のポリフェノールやキノン系化合

物の自動酸化反応、P-450還元酵素による反応および肺胞マクロファージの貪食作用等によって O_2^- 、 $\cdot OH$ を生じている。

- ②DEPから生じた上記活性酸素は試験管内あるいは生体内でDNA損傷の指標である8-ヒドロキシデオキシグアノシン(8-OHdG)の生成や一本鎖DNA切断等を高頻度で起こした。
- ③マウス1匹当たり、0.05mg、0.1mg、および0.2mgのDEPを毎週1回ずつ、10週間投与すると、1年後に肺がんが発生した。この時、高脂肪食を与えられたマウスの肺がん発生率は普通脂肪食を与えられたマウスの悪性腫瘍発生率より4～5倍高かった。
- ④一方、活性酸素、フリーラジカルを消去する β -カロチンを餌に混ぜて与えると、上記の腫瘍の発生率は著しく低下した。特に、悪性腫瘍で顕著であった。
- ⑤これらの事実は、DEPによる発がんのメカニズムとして活性酸素も重要な役割を果たしていることを示唆している。

参考文献

- 1) 厚生省・統計情報部「人口動態統計月報(概数)」1994年2月発表
- 2) McClellan, R.O.: Health effects of exposure to diesel exhaust particles. *Ann. Rev. Pharmacol. Toxicol.*, 27, 279-300 (1989)
- 3) 常盤 寛: 芳香族炭化水素ニトロ誘導体の変異原性、発がん性とその危険度. *大気汚染学会誌*, 27, 78-84 (1992)
- 4) Mauderly, J.L. et al.: Pulmonary toxicity of inhaled diesel exhaust and carbon black in chronically exposed rats. Part I, Neoplastic lung lesions. *Health Effect Instit. Res. Rep.*, No. 68 (1994).
- 5) Dungworth, D. L., Mohr, U. et al: Pathologic effects of inhaled particles in rat lungs. Associations between inflammatory and neoplastic processes. In Mohr, U., Dungworth, D. L., Mauderly, J. L., Oberdorster, G. (eds), *Toxic and Carcinogenic Effects of Solid Particles in the Respiratory Tract*. ILSI Press, Washington, D.C. pp.75-98 (1994).
- 6) Sagai, M., Saito, Y., Ichinose, T., Kodama, M., Mori, Y.: Biological effects of diesel exhaust particles. I. In vitro production of superoxide and in vivo toxicity in mouse. *Free Radi. Biol. Med.*, 14, 37 (1993).
- 7) Nagashima, M., Kasai, H., Ichinose, T., Sagai, M. et al.: Formation of an oxidative DNA damage, 8-hydroxyguanosine, in mouse lung DNA after intratracheal instillation of diesel exhaust particles and effects of high dietary fat and beta-carotene on this process. *Carcinogenesis*, 16, in press (1995).
- 8) Gallagher, J.U., Lewtas, J. et al. Formation of DNA adducts in rat lung following chronic inhalation of diesel emissions, carbon black and titanium dioxide particles. *Carcinogenesis*, 15, 1291 (1994)
- 9) 嵯峨井 勝、市瀬 孝道: ディーゼル排気微粒子(DEP)による肺癌発生と活性酸素の役割. *日本環境変異原学会誌*, 16, 275 (1995)
- 10) Ichinose, T. and Sagai, M.: Effects of high dietary fat and β -carotene on lung carcinogenesis induced by diesel exhaust particles (DEP) and 4-nitroquinone-1-oxide. *Cancer Res.*, 投原中.

中国の大気汚染の現状

安藤 満（地域環境研究グループ健康影響国際共同研究チーム）

1. 経済成長と環境汚染の狭間で

多くの開発途上国においては、人口の増加と急速な都市化の進行に加え、経済の成長と生活レベルの向上により、化石燃料の消費が増加し続けている。なかでも資源的に豊富かつ安価な石炭の大量消費は、地球環境へ強い圧迫を加えながらも、今後とも進行していくと予想される。開発途上国にとって先進国に追いつくことは、国家的悲願となっており、負の遺産としての地球環境問題への理解にはかなりの時間が掛かると予想される。

このように化石燃料の大量消費は先進国同様、開発途上国にとっても経済成長の基盤になってはいるが、それでも経済成長に伴う環境汚染については、各国とも比較的深刻な対処をしている。特に健康影響に結びつく環境汚染に関しては、マスメディアを通じた報告が重大な関心を集めている。さらに開発途上国の環境問題は、風土に由来するものも多く、全く新しい環境科学上の課題に取り組まなければならないことが多い。

石炭中には地質由来の様々な汚染物質が含まれており、石炭燃焼時に生成する汚染物質と同時に、これら地質由来の汚染物質による影響が問題となる。開発途上国の環境に関する国際共同研究としては、このような多彩な環境問題を解決するためには、先進国を含む世界各国と協力して研究を進める必要がある。

2. 豊富な石炭資源の利用と環境汚染

中国においてはエネルギーの石炭依存率は約80%と非常に高いが、省によっては98%を占めると報告されている。石油消費の抑制のため今後とも石炭に依存し工業化を進めていかざるを得ないが、石炭燃焼の拡大は、浮遊粉じんや有害大気汚染質を中心とした深刻な大気汚染の進行を招来している。工業での使用に加え、地域暖房、屋内暖房、調理用熱源として生活域において大量の石炭が使用されているため、大気汚染と共に屋内汚染は特に著しいものとなっている。写真1と2に、数日隔てた北京市の大気汚染の状況を示す。（写真1、2参照）

石炭中には硫黄分や有害化学物質が多く含まれ、石炭燃焼時には多量の大気汚染質を排出することとなる。現在も引き続き脱硫技術や粉じん除去技術は研究されてい

るが、「投資-効果」面からみて、地域暖房や家庭用に用いられる多数の中小規模の燃焼器具にまで適用するのはかなりの困難を伴っている。（写真3参照）

特に貧しい農村部においては、石炭を屋内暖房や調理に用いる際、十分な排気装置を備えていない場合さえある。このため次善の策として、家庭用石炭燃焼器具に対して、排気用煙突を普及させる政策が進められている。石炭燃焼に伴う影響は、大気汚染による膨大な人口に及ぶ健康障害をはじめとして、酸性雨による農業や自然生態系の破壊等として顕在化しつつある。世界保健機関や国連環境計画によると、人口膨張の圧力と経済発展により開発途上国の大気汚染や自然破壊は著しくなりつつあり、住民の呼吸器系疾患を中心とした健康障害が深刻化する事態が明らかにされている。このような開発途上国型の大規模な大気汚染は、特に資源の豊富な中国において顕著である。

3. 中国の大気汚染

中国は12億の人口を抱えながら、豊富な石炭に支えられ近年急激な高度経済成長を成し遂げつつある。この結果、都市部と農村部において著しい大気汚染が起こっており、屋内汚染の進行と相まって、住民の大気汚染質への暴露が著しいものとなっている。中国の1993年における大気汚染質の年間発生量は

煤じん	1,416万トン
亜硫酸ガス	1,795万トン
工業粉じん	617万トン

と報告されている。この他にも地質由来の様々な汚染物質が燃焼とともにガスもしくはエアロゾルとして気中に飛散する。

現在は中国政府の汚染防止政策によって少なくなっはきたが、使用されている石炭燃焼器具には、屋内の地面に直接掘ったコンロや石造りのストーブのような旧式の汚染の著しいものもあった。現在広範に使用されているストーブやコンロは、屋内汚染を緩和するため煙突を備え付けるよう指導されている。（写真4参照）

しかしながら硫黄含量の高い質の悪い石炭を使用する地域では、燃焼によって高濃度の亜硫酸ガスや浮遊粉じ

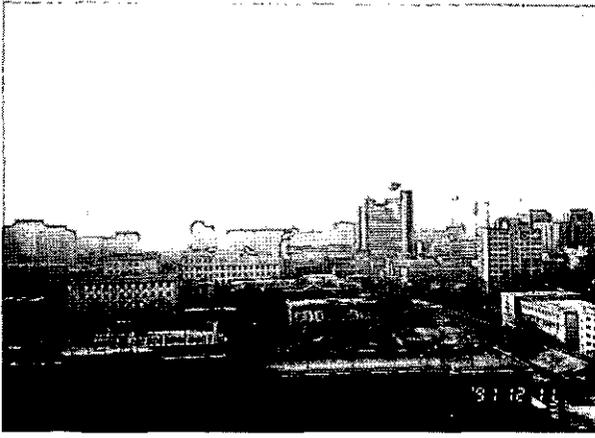


写真 1



写真 2



写真 3

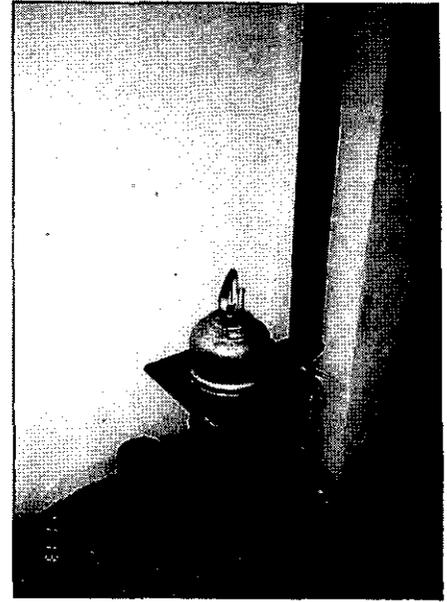


写真 4



写真 5

んが発生するため、大気汚染が深刻化している。特に屋内暖房や調理の際の熱源として高濃度の硫黄を含有する石炭を使用する地域においては、屋内汚染が著しい。高濃度の亜硫酸ガス汚染や浮遊粉じん汚染に伴い、住民の暴露に伴う健康影響が危惧されている。

地域によっては石炭中に地質由来の汚染物質が高濃度に含まれており、燃焼生成物と同時に地質由来の汚染物質による健康リスクが問題となる。特に劣悪な石炭を使用している地域においてはこれら汚染物質による屋内汚染が著しく、汚染地域に居住する住民のなかに著しい健康障害を生じている。

4. 中国北京市の大気汚染の現状から

急速な市場経済化を進める中国は化石燃料、特に石炭の宝庫でもあり、この豊富な石炭を利用した中国における急速な工業化の進行と、地域暖房としての石炭燃料の大量使用は、中国北京市においても進められてきた。石炭燃焼時には、亜硫酸ガス、浮遊粉じん、化学物質等が多量に発生する一方、石炭灰の発生量が膨大になる。

北京市の亜硫酸ガスの発生源は

工業	20.3万トン
発電所	12.6万トン
調理	12.4万トン
家庭用ストーブ	7.3万トン

(WHO/UNEP, 1993)

とされ、大気汚染に加え調理用熱源や家庭用ストーブとしての石炭使用による著しい屋内汚染の付加は、大気汚染による健康影響の発生を危惧させる状況にある。勿論日本を含む先進国においても石炭火力発電用に大量の石炭を使用しており、石炭燃焼による大気汚染と健康リスクの防止は今後とも重要な意味を持っている。

中国の都市における石炭の大量使用による大気汚染に対して、交通機関を主要発生源とした日本の都市大気汚染とを対比し、住民の暴露リスクを比較検討する必要があると考えられる。このため、浮遊粒子状物質（SPM）、多環芳香族化合物（PAH）、ガス状物質について、大気汚染と屋内汚染の実態を比較した。調査は中国北京市の住宅地と東京都の道路沿道周辺の住宅地において、国立環境研究所と中国予防医学科学院環境衛生・衛生工程研究所が共同して実施した。

5. エネルギー源による大気汚染の違い

北京市においては家庭用熱源として石炭、石炭ガス、天然ガスを使用する地区が存在する。このため調査地区は北京市の石炭、石炭ガス、天然ガス使用地区および、東京都の幹線道路沿道周辺の住宅地に設定し、調査対象家屋と調査協力者を選定し、主に冬期を中心として暖房期に実施した。（写真5参照）

北京市および東京都の両大都市においては、冬期のSPMの汚染状況は、夜間逆転層が形成される間著しく高濃度となる。特に北京市においては、昼間も工場や地域暖房等に使用される石炭の燃焼によって、深刻な大気汚染が観測される。（図1参照）

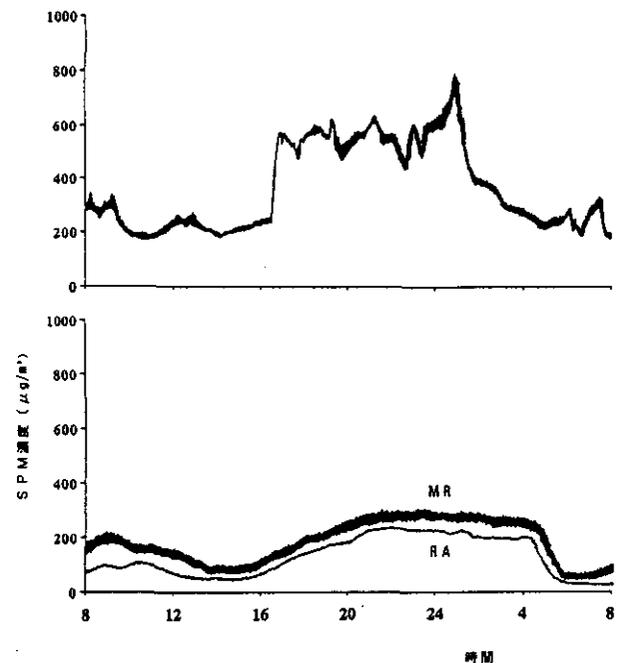


図1 中国北京市の住宅地（上図）、東京都の幹線道路および周辺住宅地（下図：MR、RA）におけるSPM濃度の日変動

中国北京市のSPM、亜硫酸ガス、PAH等の大気汚染の実態は、住宅地域によって著しく異なり、石炭使用地区の汚染が最も著しく、石炭ガス使用地区がこれに次ぎ、天然ガス使用地区の汚染が最も少ない。屋内汚染の状況も大気汚染ほどではないが、石炭使用地区の汚染が最も著しい。このため個人暴露量も大気汚染、屋内汚染を反映して石炭使用地区住民の暴露量が最も多い。（図2参照）

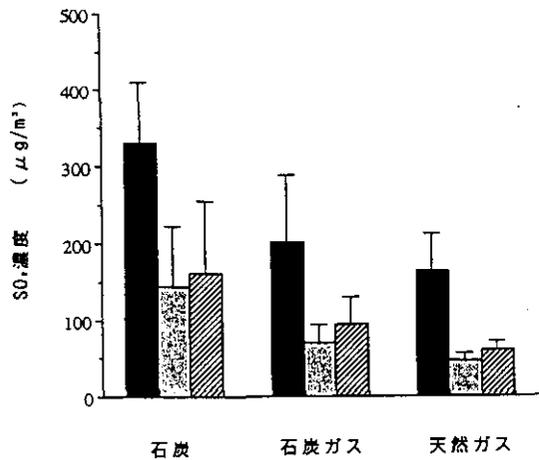


図2 中国北京市の石炭使用家庭、石炭ガス使用家庭、天然ガス使用家庭における亜硫酸ガスの大気汚染(■)、屋内汚染(▨)、個人暴露量(▧)。

石炭使用地区の大気汚染、屋内汚染が最も著しいため、住民の暴露リスクを低減化していくためには、家庭用熱源を石炭から石炭ガスや天然ガスに切り替えていく

必要がある。このため、北京市は長期の都市計画の一環として、家庭用熱源の切り替えを実施していく予定である。

6. 東京都と北京市の大気汚染の比較

北京市の亜硫酸ガスの大気汚染のレベルは平均 $233 \pm 73.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、同時期の東京都の幹線道路の周辺の $46.8 \pm 8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に比べ5倍の高濃度の汚染状況で、住民の健康への配慮が必要である。

亜硫酸ガスと異なり北京市における二酸化窒素の汚染は平均 $68.2 \pm 11.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、同時期の東京都の幹線道路の周辺の $111 \pm 4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の60%と未だ低値である。北京市においても自動車交通の普及に伴い、今後排ガス中の窒素酸化物に対する配慮が必要になると考えられる。

浮遊粉じんの粒径別濃度は、東京都、北京市とも類似し $7.0 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 、 $1.1 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 、 $0.43 \mu\text{m}$ 以下の各粒径にピークが観察される。北京市のSPM濃度は平均 $217 \pm 94.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、同時期の東京都の道路沿道周辺の住宅地の $57.6 \pm 21.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に比べ4倍に近い高濃度の汚染状況を示す。

発ガン性多環芳香族化合物ベンツピレンの大気汚染

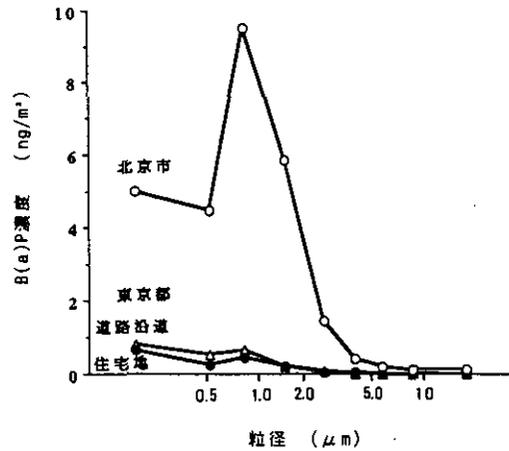


図3 中国北京市および東京都における大気中ベンツピレンの粒径別濃度

は、 $2 \mu\text{m}$ 以下の微小粒子部分に著しい高濃度が観測される。東京都および北京市いずれにおいても微小粒子部分の濃度が著しく高いため、住民の暴露リスクの低減化のためには、微小粒子の発生の抑制策が必要と考えられる。

(図3参照)

また屋内濃度と屋外濃度の間には有意な相関が観られ、大気中ベンツピレン濃度の増大につれ、屋内濃度も増大していく。このため暴露リスクの低減化のためには大気汚染の防止が欠かせない。北京市におけるベンツピレンの大気汚染のレベルは $33.7 \pm 17.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり東京都の道路沿道や周辺の住宅地の $2.25 \pm 0.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に比べ15倍の高濃度の汚染状況にある。

7. 中国の大気汚染の今後

以上の結果を総合すると、中国においては石炭燃焼に伴う深刻な大気汚染と屋内汚染が起こっており、汚染は石炭使用家庭に著しいことを示している。中国では対策をとりつつあるが、石炭使用に伴う大気汚染は、今後とも継続すると考えられる。石炭燃焼に由来する様々な健康リスクを予防していくためには、世界各地の暴露が著しいと予想される地域を中心に、暴露リスクの低減化のためにさらに国際共同研究を進める必要があると考えられる。

ポスターセッション

北極圏のカラマツ林 ～木々の年齢から林の歴史を推しはかる～

竹中 明夫（地球環境研究グループ温暖化現象解明研究チーム）

1. 北極圏の森林と地球の温暖化

人間が排出している二酸化炭素やメタン、フロンガスといった、いわゆる温室効果気体のために、地球全体の温暖化が進行しているのではないかとされている。計算機モデルを使った研究では、もし温暖化が起こるなら、とくに高緯度地方で温度の上昇がいちじるしいだろうと予想されている。

ユーラシア大陸の北極圏では、北緯70度前後まで森林が成立しているが、その北には高木が生育しないツンドラが広がっている。ロシアの東部、シベリア地方では、もっぱらカラマツの仲間が北限の林を作っている。ぎりぎりの環境条件のなかで生きている北極圏のカラマツは、温暖化の影響を受けずにはいないだろう。気候の変化の森林への影響を予想するためには、北極圏の厳しい環境のなかでこれまで森林がどのように維持されてきたかを知りたい。というわけで、まずは今の森林の過去の歴史をさぐれないだろうか、と考えた。

2. 林の歴史を調べる

季節による気候の変化が大きい地域では、木の材に年輪ができる。地面の近くで年輪を数えれば木の年齢がわかるし、幹の途中で年輪数を数えれば、何年前にその高さまで育ったかがわかる。さらに年輪の幅を調べれば年毎の成長のよしあしの手掛かりも得られる。ある森林を構成している木々の年齢と過去の成長の様子を調べれば、林全体の歴史をかいま見することもできるだろう。そんなねらいで、1994年の夏、シベリア北極圏の2ヶ所のカラマツ林で調査を行なった。1ヶ所はレナ川の河口近くの都市ティクシからヘリで1時間ほど、もう1ヶ所はエニセイ川の近くの都市ノリリスクからやはりヘリで1時間ほどのところである。どちらも北緯は70度以上で、夏は一日太陽が沈まない。

3. 新しい木が生えるとき、生えないとき

図に、2ヶ所の調査地でのカラマツの年齢の分布を示した。ティクシの林では、樹齢が60年前後の個体が飛び抜けて多く、100年から140年前に定着した木はいない。150年以上の年齢層には、まんべんなくいろいろな年齢の

木がいて、樹齢が300年から400年の個体もめずらしくない。個々の木の高さと年齢の関係をみると、若い個体では年齢とともに樹高も高くなっているが、100年を越えたものでは年齢と高さは関係がなく、どんなに年をとった個体でも5m前後にとどまっていた。これ以上の高さになることが困難な、北極圏の環境の厳しさがうかがわれる。

一方、ノリリスクの林では、木の年齢は100から110年を中心として、50から150年のものがほとんどを占めた。木の高さは7m前後である。この場所では、数本ずつの木がごく近接して生えており、それらの木立は10m以上の広い間隔で分布していた。それぞれの木立の中の個々の木の年齢は、数十年の範囲でばらついていた。こうした様子から、新しい木の定着に適した条件は数m程度のスケールの狭い範囲で発生し、その条件が数10年持続する間に順次新しい木が入ってきた、という過去の歴史が想像される。

4. 新しい木が生えるための条件は？

ティクシの林では新しい木が生えるのにとってもよい時期と悪い時期があるらしいこと、ノリリスクの林では木が生えられる場所が限られていることがわかった。では、具体的にどのような条件が新しい木の定着を制限しているのだろうか？気候の変動が森林の分布に与える影響を考えるには、この条件を明らかにしていくことが今後の重要な課題となる。

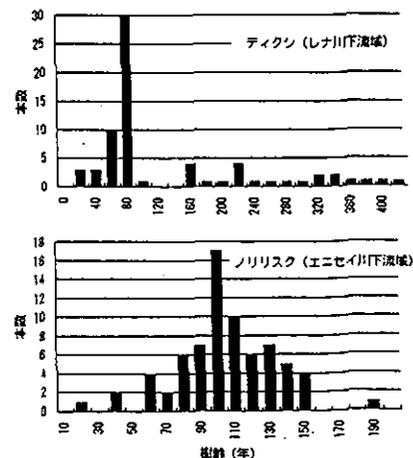


図1 シベリア北部のカラマツ林での木の年齢の分布

スギ花粉数の計測と花粉症症状

松本 幸雄（地域環境研究グループ）

空気中に飛散するスギ、ヒノキなどの「空中花粉」は、いわゆる「花粉症」の原因といわれています。「花粉情報」テレフォンサービスで「花粉数」をお知らせしていることをご存知の方もいるでしょう。ところで、「花粉情報」の中で知らせている「花粉数」とは、何でしょう。残念ながら空中に浮かんでいる花粉の数を直接測ったものではありません。

この発表では、まず、普通に行われている「花粉数」の測り方を説明し、次にその値が空中を飛んでいる花粉の数とどのような関係にあるかをデータで示します。最後に、花粉症の症状の程度と「花粉数」との関係を調査した結果を紹介いたします。

1. 通常の花粉数測定法

現在、「花粉数」のほとんどの測定は、ダーラム（Durham）式採集器を用いています。この方法では、顕微鏡用のスライドガラスの上にワセリンを薄く塗り、一昼夜、水平上向きに放置して（地上約1m）、スライドガラス上に花粉を採集します。次に、このスライドガラスを染色し、カバーガラス（1.8cm四方）をかけてカバーガラス内の花粉を顕微鏡でのぞいて数えます。最後に、カバーガラスの面積（3.24cm²）で割って、1cm²当たりの「花粉数」を求めます。この「花粉数」の単位は「一日当たり1cm²当たりの捕捉個数」ということに注意して下さい。

ダーラム式採集器による方法は、安く簡便で長期にわたって観測するのに適していますが、一番の問題点は、濃度（単位体積当たりの空気中の飛散個数）を測定できないという点です。それは、スライドガラス面に捕まえられる花粉とガラスに接触する空気の体積との関係がこの方法ではわからないためです。

空気中の花粉濃度を求めるために強制的に吸引あるいは回転して、空気の体積との関連をはっきりさせる装置が考案されていますが、これらは高価だけでなく長期の測定には向いていません。

2. 空気中の花粉濃度の測定

そこで、国立環境研究所では大気汚染の調査のために

開発した空気中の「チリ」（浮遊粒子状物質 SPM）の採集装置を用いて花粉を採集してみました。この方法は、吸入する空気の量を一定にして、その中のチリの量を測ることにより、単位体積空気当たりのチリの量を求めるものです。チリの代わりに花粉を採集すれば、花粉の「濃度」（単位体積中の花粉個数）が求められます。この装置を、ダーラム式採集器と平行して運転することにより、ダーラム式採集器で求めた「花粉数」と、空気中に飛散する花粉の単位体積当たりの個数との関係を調べることができます。

この結果、気象条件などによる乱れはありますが、ダーラム式採集器による「花粉数」は、単位体積当たりの花粉の個数とほぼ比例していることが確かめられました（図参照）。ダーラム式による「花粉数」のほぼ1.2倍が、空気1m³中の花粉数に対応します。

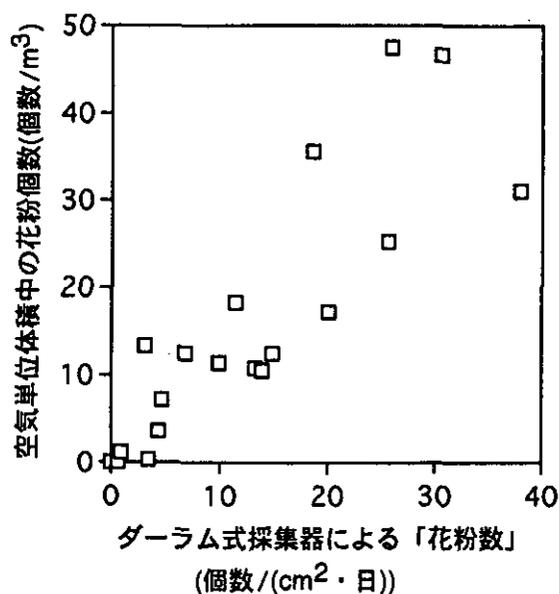


図 ダーラム式採集器による「花粉数」（横軸）とSPM採集装置による空気単位体積中の花粉個数（縦軸）

3. 花粉数と症状の程度

職員と家族の方々をお願いして、花粉症の毎日の症状の程度と、その日の「花粉数」との関係进行调查しました。会場にて紹介いたします。

都市中小河川の有機塩素化合物と有機塩素量

稲葉 一穂、白石 寛明、相馬 悠子（地域環境研究グループ化学物質健康リスク評価チーム）

1. はじめに

先端産業の進歩と共に、化学製品の多様化や高付価値化が要求され、量は少ないけれど非常に多種類の化学物質が生産、使用されるようになってきました。また将来生産される化学物質の種類はますます増加すると予想され、それに伴って環境にはさまざまな化学物質が放出されます。一つ一つの量は少ないけれど、環境に放出される化学物質は総量としては増加することが考えられます。そこでどのような種類の化学物質がどのような環境に、どのぐらい存在し、複合してどのような影響を及ぼすかという化学物質の総合影響評価が必要になってきます。

有機塩素化合物は、化学工業製品の中でもその種類、割合は非常に多く、またその反面製造等が規制されているものに有機塩素化合物が多く入っています。これは安定性、殺菌殺虫作用といった有機塩素化合物の有用性が難分解性、有毒性といった環境汚染につながっていることを示しています。

これらのことを踏まえて我々は環境中の有機塩素化合物の影響を体系的に評価するための研究を行っています。その一部としてモデル地域とした都市中小河川でどのような有機塩素化合物が検出され、どのような発生源が考えられるか、河川底質にはどのような有機塩素化合物が残っているかを調査した結果を示します。

2. 河川水中の有機塩素化合物と有機塩素量

都市の河川水中には、揮発性有機塩素化合物（トリクロロエチレン、クロロホルム等）、塩化ベンゼン類、トリスクロロエチルホスフェート（TCEP、プラスチック難燃剤）、農薬、塩化メトキシベンゼン類、トリクロサン（デオドラント剤）といった有機塩素化合物が検出されます。その中で塩化ベンゼン類と塩化メトキシベンゼン類は、都市河川の大部分の河川で検出されます。防虫剤であり生活排水を通して河川に流出してくるp-ジクロロベンゼンが量的に一番多いのですが、塩化メトキシベンゼン類は工業的にあまり使用されていません。そこでこれらの起源を推定するために、10河川21地点の河川水中の塩化ベンゼン、塩化メトキシベンゼン類の異性体別

分析を行い、物質間の相関を調べました。その結果塩化メトキシベンゼンの中でも量的に多い2,5-ジクロロアニソール、1,4-ジクロロ-2,3-ジメトキシベンゼンはp-ジクロロベンゼンとの相関が強く、p-ジクロロベンゼン由来と推定され、微生物による反応で生成したと考えられました。その他にフェノールが塩素化されて生成したと考えられる塩化メトキシベンゼンもみられました。

河川水中の有機化合物を活性炭に吸着して、熱分解し出てくる塩素量を測定したのをTOX（全有機ハロゲン量）と言います。このTOXとGCMS（ガスクロマトグラフ質量分析計）で検出された有機塩素化合物の塩素量を比較しますと、GCMSで検出される塩素量はTOXの10~20%です。残りの大部分の有機塩素量が何に由来するかを推定するために、まず住宅地域を流れる河川（綾瀬川）で生活排水由来の有機塩素量がどれぐらいになるかを、調べてみました。河川水中の生活排水量を河川水中の合成洗剤量から推定して、一人一日あたり有機塩素量として70mg排出していることがわかりました。このうち水道水由来の有機塩素量は約40%という推定になりました。

3. 河川底質中の有機塩素化合物

東京、埼玉、千葉、茨城、京都、大阪の河川で底質に残る有機塩素化合物の調査を行いました。底質中の有機化合物はごく近傍の影響を受けることが多いため、工業地域では近くの工場の影響によって様々な化合物が検出されます。それとは逆に工業地域の多くの河川底質で共通に検出されたのがPCB（ポリ塩化ビフェニル）です。住宅地域の河川では検出される有機塩素化合物は共通しており、デオドラントシャンプーや殺菌石鹸に含まれる殺菌剤のトリクロサン、トリクロカルバン、防虫剤のp-ジクロロベンゼンが検出されました。プラスチック難燃剤のTCEPも生活排水が多い河川底質に検出されました。

地球温暖化対策が日本経済に及ぼす影響についてのシミュレーション分析

日引 聡（社会環境システム部環境経済研究室）

1. 環境保護を優先させるか、消費を優先させるか？

地球温暖化の原因といわれている物質の一つに二酸化炭素があります。この物質については、世界的に、その排出量などの程度、そしてどのように削減したらよいかなどについて、現在、国際会議の場などで盛んに議論されています。生物の呼吸などの自然現象を除くと、二酸化炭素発生の主要因は、石炭や石油、天然ガスなどの化石燃料の燃焼です。二酸化炭素の排出量を削減するためには、化石燃料の消費量を減らす必要があります。しかし、化石燃料は、企業が生産を行うために必要なエネルギーであるため、化石燃料の消費量が削減されるならば、そうでない場合に比べて、企業の生産は減少し、国内総生産（GDP）は減少します。このため、私たちは、ある程度の所得の低下を我慢してでも、温暖化を防ぎ、豊かな地球環境のもとで生活することを選ぶか、温暖化によってある程度地球環境が悪化しても、高所得による豊かな消費生活を選ぶかという選択をしなければなりません。

2. 研究の目的

私たちが、上で述べたような選択を行うために必要な情報は、

(1) 二酸化炭素の排出をどの程度抑制すれば、どの程度温暖化の度合を抑制でき、それによって、どれくらいの被害を防ぐことができるか。（温暖化を防ぐ利益）

(2) 二酸化炭素の排出をどの程度抑制すれば、どの程度経済に影響が及び、その結果、私たちの所得あるいは生活水準が低下するか。（温暖化を防ぐ費用）

です。

この研究の目的は、この2つの情報のうち、(2)を推定することにあります。具体的には、2000年以降の二酸化炭素の排出量を1990年の排出レベルにまで抑制するために、2000年時点で炭素税¹を導入する政策を実施した場合、

(1) 課される炭素税の水準はどれくらいか？それによって、石油、石炭、天然ガス、電力の価格はどの程度上昇するか？

(2) (もしこのような政策を行わなかった場合と比べて) 国内総生産（GDP）はどの程度減少するか？

を、1985～2030年の期間について推定することです。

¹ 炭素税とは、化石燃料に含まれる炭素分（二酸化炭素の原因となる物質）に比例してかけられる税金。これを課すことにより、石炭などの炭素分を多く含む燃料の価格がそうでない燃料（石油や天然ガス）の価格より大きく上昇する。

3. 方法と結果

この研究は、

(1) 日本経済に関する経済モデルを開発する。

(2) 温暖化対策を行わなかった場合（基準ケースと呼ぶ）に、1985～2030年の間において日本経済の成長率、経済全体のエネルギー消費量、二酸化炭素の排出量はどのようになるかをシミュレーションする。

(3) 炭素税を導入した場合（炭素税ケースと呼ぶ）に、基準ケースと比較して、日本の国内総生産やエネルギー供給量はどの程度減少するかをシミュレーションする。という手順で行われます。

開発した経済モデルを使って得た計算結果は以下の通りです。（基準ケース）

(1) 石油や都市ガスの価格は年率平均2%、電気の価格は年平均1.3%で上昇し、2030年における石油や都市ガスの価格は、1995年のその2倍、電気の価格は1.5倍になる。

(2) 1995年以降の実質国内総生産（GDP）は、年平均1.5～2.0%の間で安定的に成長し、2030年の実質GDPは1995年のその1.7倍になる。

(3) 1995年以降の一次エネルギー供給は、年平均0.7%で増加し、2030年の一次エネルギー供給は1995年のその1.3倍になる。

(4) 1995年以降の二酸化炭素排出量は、年平均0.6%で増加し、2030年の二酸化炭素排出量は1995年のその1.2倍になる。

（炭素税ケース）

(1) 2000年において導入される炭素税の水準は、炭素1t当たり40,000円であり、年々その水準は高くなり、2030年では、90,000円になる。これによって、石油、都市ガス、電気の価格は、それぞれ年平均3.9%、3.3%、2.2%で上昇する。

(2) 2000年以降の実質国内総生産（GDP）は、基準ケースと比較して、各年平均1.2%減少する。

(3) 2000年以降の一次エネルギー供給は、基準ケースと比較して、各年平均20%減少する。2030年の一次エネルギー供給は1995年のそのより2%少なくなる。

(4) 二酸化炭素排出量は、基準ケースと比較して、2000年には28%削減される。以降年々削減率は大きくなり、2030年には44%になる。

エネルギー節約と二酸化炭素排出抑制の観点からみたごみ発電の価値は？

森 保文、乙間 末廣（社会環境システム部資源管理研究室）

1. 使うのと取れるのどっちが多い？

ごみ焼却場に発電施設を付置し、焼却のみでは無駄に捨てられるエネルギーを回収することが多くなってきた。ごみ発電によるエネルギーの回収は一般の発電所の発電量を減少させ、結果的に地球温暖化ガスである二酸化炭素（CO₂）排出量をも削減する。

しかしごみ発電のためには発電機などの施設を追加的に設けねばならず、これらの施設の製造にエネルギーが消費され、CO₂も排出されている。またごみ焼却場そのものの建設などにもエネルギーが投入されている。

本研究では、はたしてごみ発電は本当にエネルギーとCO₂排出量を削減しているのかを推定する。

2. ごみ発電に必要なもの

ごみ発電においては、場内消費電力(A)、ごみ発電をしないごみ焼却場においても必要な施設（以下本体と呼ぶ）の建設・補修・解体、収集車の製造およびごみ収集に必要なエネルギー(B)および発電のために必要な施設即ちボイラーと発電機および蒸気復水設備（以下発電施設と呼ぶ）の建設・補修・解体に必要なエネルギー(C)が入力され、発電によりエネルギー(D)が出力される。

したがって、発電量(D)とその他(A+B+C)を比べる必要がある。

3. ごみ発電は立派な発電所だ

以下に結果を簡単にまとめる。(1)ごみ焼却場の施設では土木建築の部分（つまり建屋）の量が圧倒的に大きい。(2)ごみ焼却場建設およびごみ収集に必要なエネルギーの内、鉄などの材料を作るのに必要なエネルギーが約4割を占める。この内土木建築が68%を占める。(3)発電量は発電施設だけでなく、処理場に関する全エネルギーに比べても非常に大きい(図)。ごみ焼却場を建設し、ごみを収集し、発電することは、トータルとしてエネルギーを生産している。(4)CO₂の場合も、ごみ発電により削減されるCO₂排出量は、ごみ発電施設に関するCO₂排出量に比べて非常に大きく、ごみ発電は、トータルとしてCO₂排出量を削減している。(5)一般の火力発電所と比較すると、ごみ発電のエネルギー収支は石油

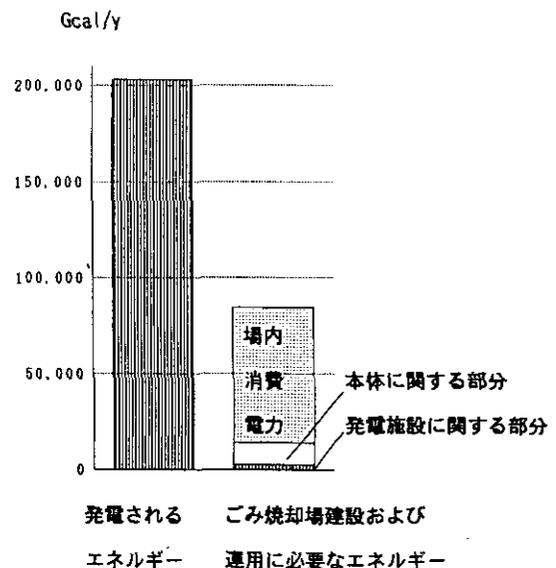


図 ごみ発電で使うエネルギーと取れるエネルギー

火力発電所のほぼ半分、LNG火力発電所の約倍である。火力発電とほぼ等しい能力といえる。

結局、ごみ発電は使うものより取れるものの方が予想以上に大きいのである。また発電効率が、通常のごみ発電よりもかなり低い値の場合でも、エネルギー生産およびCO₂排出量削減の面からは、ごみ発電は有効なので、ごみ発電はもっと採用されるべきである。

4. ごみ発電をもっと活かすには

本結果からごみ発電をさらに利用するために必要なことをあげると次のようになる。場内消費電力を小さくできれば、さらにエネルギーやCO₂を削減できる。

土木建築によるエネルギー消費量が多いので、土木建築物を再利用することが望ましい。

5. 今後の課題

(1)灰の埋め立て、汚水処理などごみ焼却場の外で行われる処理についての検討。(2)コスト面からの解析・検討。(3)ごみ処理の他の方法、例えばリサイクルとの比較。などが今後の課題である。

東アジア地域植生分布モニタリングのためのNOAA AVHRR データ処理システムの構築

清水 明、安岡 善文、杉田 幹夫¹、徳村 公昭²(社会環境システム部情報解析室)

1. 概要

今年1月、沖縄県の黒島(石垣島の近く)にNOAA衛星受信設備が開設され稼働を開始した。8月には、国立環境研究所でも同様の受信設備が稼働を開始する予定であり、両設備を合せて、今後の東アジア地域の植生分布等の環境モニタリングに重要な役割を期待されている。現在これらのデータ処理システムの構築を行なっているが、実際に処理を行なう機器を会場に展示するので御覧いただきたい。

2. NOAA衛星は

アメリカ海洋大気庁の気象衛星で、高度約850km、周期102分で地球を南北に周回する極軌道衛星である。この衛星は、軌道面と太陽との相対的な角度が一定な太陽同期軌道であるため、1日に2回ほぼ同じ時刻に通過しながら観測データを地上に送信してくる。さらに、衛星は通常2個以上運用されていることから、高い頻度で観測データが得られる。主力センサーは、AVHRR(改良

型超高分解能放射計)で、これは可視から赤外までの合わせて5チャンネルの放射計で、直下の分解能は1.1kmである。他に、TOVS(タイロス現業用垂直測定装置)、SEM(宇宙観測モニタ)等が搭載されている。

3. 観測範囲は

軌道に沿った幅約2,700km、長さ約5,000km(真上を通る場合)である。受信局から東西に大きく外れる軌道も合わせると、図に示す地域が観測可能である。特に黒島の設備は、我が国のNOAA衛星AVHRR受信設備としては最も南に位置し、東南アジア方面の観測に関して最も有利な場所にある。

4. 発展性

以上述べた、高頻度・広範囲の観測、搭載センサーの特徴、さらに地理的な利点等から、今後当設備から得られるデータは、植生分布に限らず東アジアの環境モニタリングに関する多くの可能性を持っているといえる。

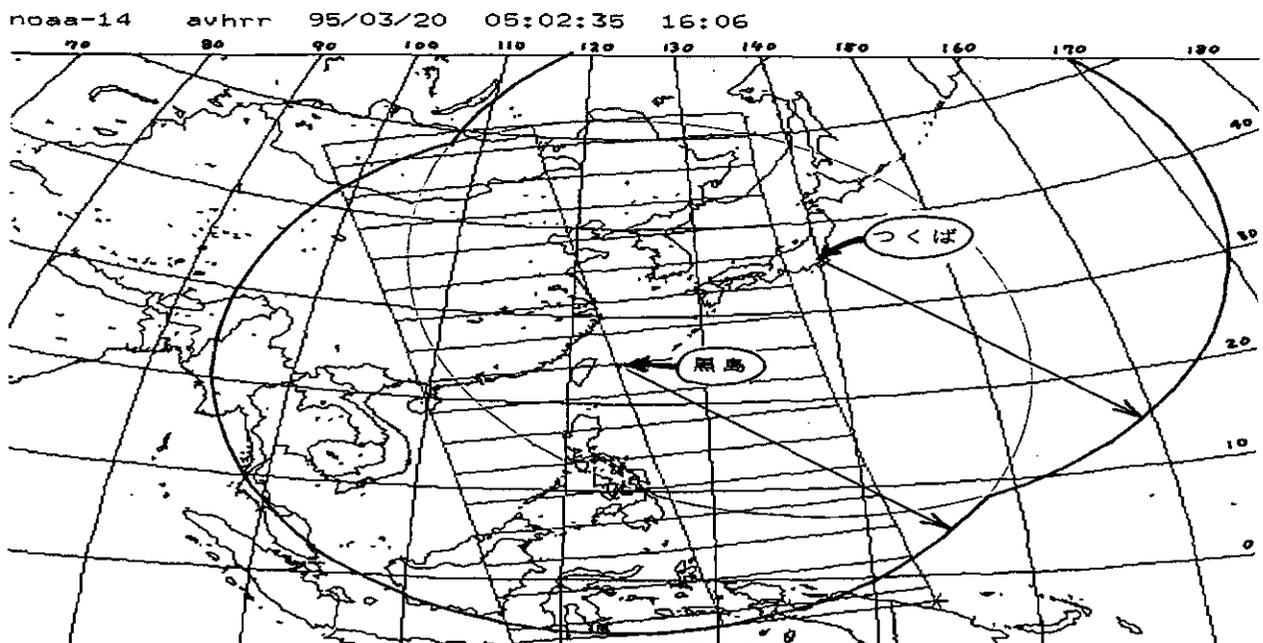


図 黒島とつくばのNOAA受信設備の観測範囲

¹ 科学技術特別研究員、² 共同研究員(中日本航空株式会社)

バイカル湖地域の古環境変動解析に挑む

河合 崇欣、田中 敦、柴田 康行、相馬 光之（化学環境部）、高松 武次郎（水圏環境部）
相馬 悠子（地域環境研究グループ）、功刀 正行（地球環境研究グループ）

1. 研究の背景と概要

地球環境変動への人為的影響の評価をより緻密なものにするためには、非人為的（自然に起こる）変化の姿を正確に知っていなければならない。特に、地球環境問題の様に広い範囲の長期の変化を推測しようとする、その十倍位の長期の自然の変化を予測できる必要がある。また、生態系を指標とするような場合、新しく引き起こされた変化が周りに馴染んで、安定になるのにも長い時間がかかる。その様な変化の方向と行き着く先を予測できるように初めて、環境影響評価とそれを踏まえた科学的な環境計画が可能になる。

旧ソ連邦科学アカデミー最高幹部会議は、1988年11月、バイカル湖を世界の科学者に開放し、国際共同研究によって基礎科学を大きく花開かせることを決定した。これを具体化する形で、1991年にバイカル国際生態学研究センター（BICER）が発足した。ここには、拠出金を出して運営委員会メンバーになったアメリカ、ベルギー、日本、イギリス、スイスの研究機関やグループを初めとして、既に20余ヶ国から延べ500人余の研究者がバイカル湖の研究のために訪れたと言われる。

ここでは、①現存生態系の解明、②千数百種に上る固有生物種の成り立ちを解明しようとする系統・進化解析と並んで主要研究プロジェクトの一つとなっている、③バイカル湖地域の3,000万年の歴史を記録する湖底堆積層柱状試料の解析による長期古環境再現への挑戦を紹介する。

2. この地域の歴史と気候の特徴

バイカル湖は、最大透明度が40mを越し、かつての摩周湖とならぶ世界有数の清澄な湖として有名である。今から3,000万年ほど前にこの地域の地面が大きく裂けて、この湖の形成が始まった。世界で最も古く最も深いこの湖は、その後現在に至るまで少しずつ広がり、深まり続けており、「生まれつつある大洋」とも呼ばれている。バイカル湖は、世界最大のユーラシア大陸のなか、中央シベリアの南東部のモンゴルとの国境に近いタイガ（寒帯針葉樹林）の中にある。

ここは、シベリア高気圧の生まれる世界で最も典型的な内陸性気候の地である。夏と冬の気温差が時に80度を越す。これは、長期の気候変化の周期をつくり出している氷河期と間氷期の温度差にも反映され、この地域の平均気温の差は世界で最も大きく、14度にもなると言われている。現在世界中で大騒ぎしている地球温暖化の気温上昇が3～4度であることと比べてみていただきたい。

この地域は、南のモンゴルの乾燥地域が広がると乾燥し、南下すると豊かな針葉樹林に包まれる。気温の低下と乾燥化は地上の生物が長い歴史の中で経験してきた、最も深刻な環境の変化（悪化）であろう。この地域の気候がどの様な変化をしてきたかを知ることは、地球の環境変動を議論し、理解する上で避けて通れない。さらに、この地には、この様な環境の激変をくぐり抜けて、この地にしっかりと根を下ろして生き続けている固有の生物が沢山おり、これらの生物がどの様にして生き延びて増えてきたかを知ることは、自らが作り出した環境の変化におびえる現代の人類に対する大きな示唆を与えることにもなると期待される。

3. バイカル湖地域の気候変動再現

バイカル湖の湖底には、3,000万年の間に積もった厚い泥の層が広がり、最大8,000mを越すことが分かっている。この堆積層の中には、それぞれの時代に湖に流れ込んできた物や湖の中の生物の遺骸が、古い物から順々に積もって、沢山含まれている。

湖底の堆積層を、層を乱さないように注意深く採取して、それぞれの層に含まれている生物の化石や外から流れ込んできた鉱物を詳細に調べれば、長期にわたって変化してきたこの地域の環境（気候や生物相）を再現できるに違いない。

どの様にして試料を採り、どの様な機械を使って、どの様な情報を集めていこうとしているのか。どの様な国から、どの様な人達が集まり、この仕事に取り組んでいるのか。この挑戦にはどんな意味があるのか……。

トランスジェニックマウスを用いた環境有害物質の毒性評価の試み

遠山 千春 (環境健康部)

1. 「トランスジェニックマウス」とは？

遺伝子工学技術の進歩により、本来、体内に賦与されていない遺伝子を導入することにより、新たなタンパク質等を体内で作ることができる実験動物（トランスジェニック動物）が開発されてから既に15年ほどになる。最近では、生体内において通常は機能している遺伝子を働かさないようにした人為的遺伝子を導入する技術が確立され、この遺伝子が作り出すタンパク質を持たない実験動物が作製されている。この技術により、そのタンパク質がどのような機能を持っているのかを実験的に証明することが可能となった。

2. メタロチオネインとは？

生体には、約10万種類のタンパク質が存在するが、メタロチオネインは、そのうちの一つである。このタンパク質は、アミノ酸61個からできあがっており、そのうちの20個がシステインというSH基を含むアミノ酸であり、そのため重金属を結合しやすい性質を有する変わったタンパク質である。このタンパク質は、重金属が体内に吸収されると肝臓、腎臓などで合成されるという特徴も有する。

このタンパク質が重金属の毒性を抑える役割を持っていることは既に良く知られているが、パラコート、四塩化炭素などの有害化学物質や紫外線等によって細胞内で発生する活性酸素を除去する役割があるのではないかということも報告されてきた。しかし、このことは、まだ解答が得られていない。

このメタロチオネインには、これまで2種類の亜型があることが認められてきたが、最近では、別の亜型が脳の神経抑制因子としてアルツハイマー病の発症に関与するとの報告もあり、また、舌組織や精巣には他の亜型が存在することを示唆する報告もある。

3. メタロチオネイン欠損マウスを用いて何がわかるか。

最近、メタロチオネインの亜型のうち1および2（以下、MT-1、MT-2と略す）の遺伝子の発現を抑えたマウスがオーストラリアの研究グループにより作成された。そこで、我々は彼らと共同で、このマウスの特徴を明らかにし、毒性の評価に利用できるかどうかを検討した。

(1) 様々な臓器への重金属の取り込みや分布に、メタロ

チオネインがどのように寄与しているのか。

(2) これまでメタロチオネインが無いために毒性が出やすいと言われていた精巣には、本当にメタロチオネインは無いのか。

(3) 活性酸素の除去作用をメタロチオネインは持っているのか。

4. これまでに明らかになってきたこと

メタロチオネイン欠損マウスとこれに対して遺伝子が正常なC57Bl/6Jマウスにカドミウムを投与し、肝臓、腎臓、脾臓などの組織中のカドミウムの蓄積量とメタロチオネインの誘導合成量を調べた。その結果、メタロチオネイン欠損マウスにおいては明らかに誘導合成が抑えられていることが確認された。また、カドミウムの臓器への蓄積には差がないが、例えば、肝臓からのカドミウムの他の臓器への移動にはメタロチオネインの存在の有無が関与していることが予測された。

精巣においては、これまでメタロチオネインがないとの報告や、仮にあったとしてもカドミウムの毒性の防御には働いていないとの見解が支配的であった。今回の研究から、C57Bl/6Jマウスにおいてはメタロチオネインが存在することが判明した。また、メタロチオネイン欠損マウスでは、カドミウムにより出血を伴う傷害が生じるが、C57Bl/6Jの精巣は傷害を受けにくいことから、メタロチオネインが毒性の軽減に寄与していることが判明した。

パラコートや四塩化炭素の毒性はメタロチオネイン欠損マウスでは現れやすい傾向がある。また、生理的な状態において、メタロチオネイン欠損マウスの肝臓の脂質の過酸化の程度は、正常なマウスの数倍と高くなっており、活性酸素の除去にメタロチオネインが関与しているのかもしれない。いずれも今後の詳細な研究が必要である。

5. まとめ

特定のタンパク質の発現を抑えたトランスジェニックマウスを用いた毒性評価の試みは、世界的にも、端緒についたばかりである。こうした新たな実験材料を用いた、分子環境毒性学研究は、これからの研究の重要な研究領域となるであろう。

温暖化は死亡率に影響を与えるか

本田 靖 (環境健康部環境疫学研究室)

温暖化の影響による死亡増加には、熱波の直接的な影響による生理的調節の破綻、すなわち熱射病、台風発生の増加による災害死、また気温の増加に伴う動物の棲息地域の変化が間接的にもたらす伝染病などもあるが、一般的な死亡、すなわち循環器疾患、呼吸器疾患なども気温の影響を受ける。未来の予測には、上に述べた様々な死亡を総合的に推測することになる。ここではそのうちの一般的な死亡に関する現状の観察からの単純な温暖化の影響予測と、予測の問題点について述べる。

図は九州における日最高気温区分別総死亡率を示す。この図から、たとえば男1億人が最高気温33℃以上の日を1日過ごすとして、2,106人死亡することがわかる。死亡率は28~33℃で最低で、その両側ではより高くなるというV字型を示す。暑すぎても寒すぎても生存に負荷がかかることを考えれば、V字型になることの理解は容易であるが、最低の死亡率がどの温度で起こるか、V字型のシャープさはどの程度かといったことには様々な要因が関与する。V字の修飾因子として主なものには、死因、年齢、気候(に対する馴化)、社会・経済・文化的要因があげられる。

死因別では、循環器疾患、呼吸器疾患が気温の影響を受けやすく、がんはほとんど影響を受けない。がんが影響を受けないのは、がん患者はほとんどが空調の整った病院で死亡するからであろう。

年齢別にみると、幼児・学童期には夏の事故によると思われる高気温での高死亡率がみられるが、死亡率そのものは非常に低い。20歳~30歳代まではほとんど気温の影響を受けないが、以後、加齢によって死亡率の上昇とともにV字型がシャープになっていく。

気候との関連では、寒い地方ほど、最低の死亡率を示す気温が低く、寒い日の死亡率も低い傾向を示す。このことは、一つには馴化(気候に対する慣れ)によるものと考えられる。もう一つには、社会・経済・文化的な要因が関係している。例えば、北海道では暖房施設が整っており、家屋の構造も外に暖気を逃がしにくい構造になっている。これらを含んだ広い意味での適応現象が起こったといえよう。

以上のように、実際に考慮すべき要因は多いが、第一

ステップとして、「九州において図1に従って死亡が起こり、1972年から1990年までの気温が常に実際よりも3℃気温が高かった」という非常に単純な仮定で計算を行うと、この期間の死亡数は実際よりも2%少なかったはず、という結果が得られた。もちろん、33℃以上の区分で3℃の上昇が起これば、死亡率は図1のものよりも高くなると推測されるし、上に述べたような多くの要因、特に適応現象の影響もあり、これをそのまま信じるわけにはいかない。予測の方法は異なるが、二酸化炭素(CO₂)倍増による温暖化により、アメリカ15都市で7,000人の死亡増加が見込まれるという報告もみられる。今後、より精度の高い予測をするためには、各地域の上記の基礎的な研究に加え、人口の年齢構造、死因、生活様式の経年的な変化の予測、馴化の影響の解析など、まだまだ多くの研究が必要である。

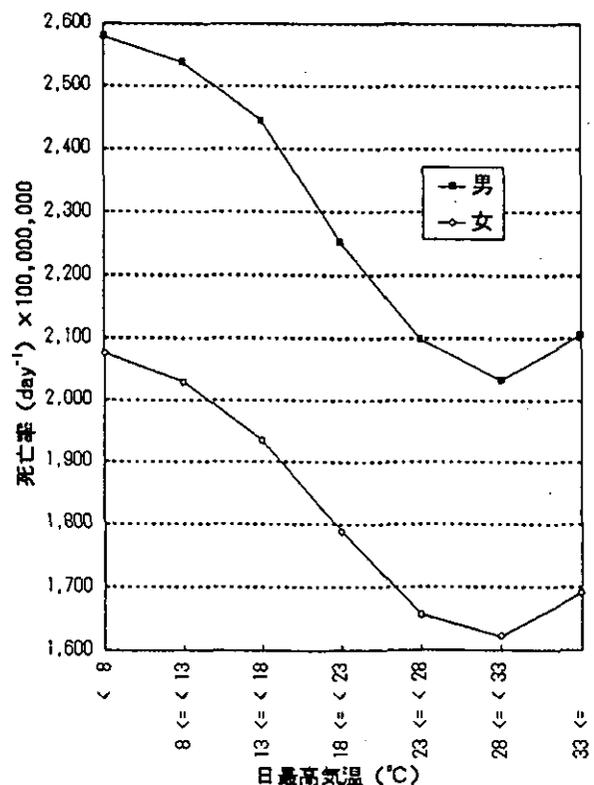


図 九州における日最高気温と総死亡率との関係 (1972年-1990年)

大気大循環モデルを用いた長距離輸送の研究

菅田 誠治 (大気圏環境部大気物理研究室)

1. 研究の背景

地球大気の全球的振舞い(大気大循環)に大きな影響を及ぼす大気中の微量物質の分布を決める上で、大気運動による移流は、特に対流圏から下部成層圏にかけて重要な要因の一つである。今後の数値モデル(大気大循環モデル、気候モデル)による気候変動評価に、微量物質の空間分布変化によるフィードバックを取り込む際に、どの程度の細かな現象スケールまで移流過程で考慮すべきかを評価しておく必要がある。

本研究では、物質の鉛直輸送に大きな寄与を持つと考えられる積雲による鉛直上昇流が、物質の空間分布にどの程度の影響を与えるかを、大気大循環モデルのデータを用いた粒子追跡モデルを用いて検証する。

2. 大気大循環モデル(GCM)と粒子追跡モデルの概略

GCMでは運動方程式や熱力学式等を時間積分することによって、各格子区画での速度、温度、水蒸気量等が求められる。さらに、格子の水平スケール(本研究だと緯度・経度として約5度)以下のスケールの現象は、パラメタリゼーションによって取り入れられている。例えば積雲の場合、各格子区画ごとに積雲の有無と量を判断し、積雲による降水、温度変化、雲頂高度、雲底高度、積雲内の鉛直質量輸送量等が計算されている。

GCMの速度場と積雲に関するデータを粒子追跡モデルの基礎データとする。積雲を考慮しない場合(以下、「積雲なし」と呼ぶ)には風のみに従って、粒子(仮想的パッシブトレーサー)が動くとする。積雲を考慮するときは(以下、「積雲あり」と呼ぶ)、積雲なしの計算に加えて、粒子が積雲の存在する格子区画に存在して、かつ、雲底高度より下に位置するときには、積雲の存在量に応じた確率で雲頂高度へと瞬時に輸送されるとする。一方、積雲外の粒子は補償下降流の影響を受ける。

粒子の初期位置は、北半球中緯度域(30~60度)の地表から500m。粒子数は約4万4千個であり、緯度経度方向に0.5度おき、鉛直には1層である。

3. 結果

積雲ありなしどちらの場合でも約1ヵ月で粒子は中高緯度の対流圏内で分散する(図1)。全粒子の約四割が低緯度域に流入している。粒子数の鉛直分布を比較すると、図2(a)に示されるように中高緯度域では、積雲

ありの方が地表付近の粒子数が約半分と少なく、逆に上空では多くなっている。一方、低緯度域では積雲の有無による地表付近の粒子数の違いは高々1割程度であった。

約1年経つと、粒子は対流圏内に全球規模で広がり初期位置依存性が分からないほどになる。この時点での中高緯度域での鉛直分布は、1ヵ月後の時点とは逆に地表付近で積雲ありの方が多く、上空では積雲なしの方が多くなっている(図2b)。低緯度域では、この時点でも積雲のありなしによる鉛直分布の違いは小さい。

4. 考察

積雲ありの場合は、鉛直方向の大気のかき混ぜが促進されるので、1年後に、積雲ありの場合の方が地表付近の粒子数が増えるという結果は意外である。中緯度の高度約10kmに位置するジェット気流に粒子が一旦入り込むと強い西風のために流され続けて、出てくるまでに長い時間を要することに関係すると考えられるが、今後の解析が必要である。

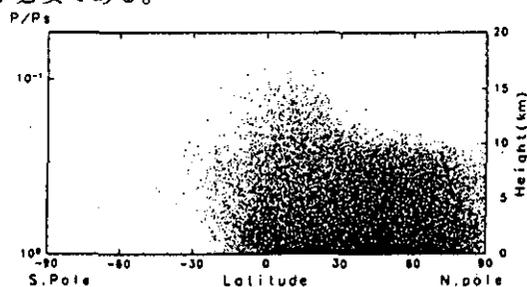


図1 一ヵ月後の全粒子位置の南北鉛直断面図
積雲ありの場合。

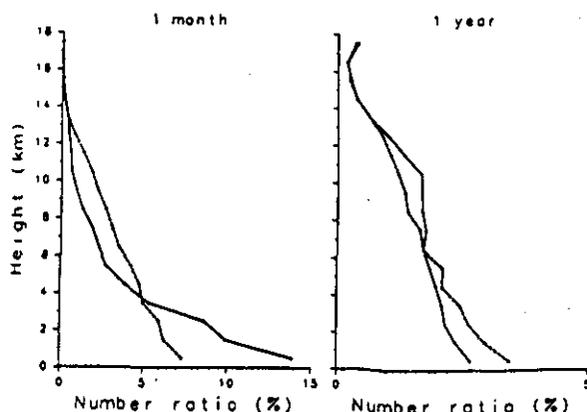


図2 一ヵ月後(a)と一年後(b)における北半球中高緯度(北緯35度以上)での粒子数の鉛直分布。実線が積雲なし、点線が積雲あり。横軸は全粒子数に対する百分率

つくばで観測されたピナツボ火山1991年噴火に由来する ^{210}Pb

土井 妙子 (水圏環境部土壌環境研究室)

1. はじめに

大気中の ^{210}Pb は、地殻から放出された ^{222}Rn の壊変生成物の1つでエアロゾルに付着して存在している。エアロゾルには宇宙線により主として成層圏内で生成する ^7Be も付着しているため、同一試料により両核種の濃度変動を観測することが可能である。大気中の両核種の濃度は、春季と秋季に高く、夏季に低くなる季節変動があり、また、両核種の月別平均濃度の相関はよいので、この変動は、成層圏下部に滞留している両核種が、春季と秋季に対流圏に供給されて濃度の増大が引き起こされる結果と解釈される。

1991年6月に起こったピナツボ火山の噴火による噴煙は、気象衛星の観測によると、成層圏内29kmまで達している。このマグマに含まれていたウラン系列核種のうちで揮発性の大きい鉛の同位体の ^{210}Pb もこの時成層圏内に注入されたと考えられる。この ^{210}Pb が本邦の大気中で濃度変化として観測できるかどうかをみるために、噴火活動後の大気中濃度の観測を行い、活動前の観測結果と比較検討した。

2. 観測方法

エアロゾルは、つくば市の当研究所の3階建ての建物の屋上でハイボリウム・エアサンプラーを用いて毎日あるいは数日ずつ連続して捕集した。吸引速度は1分間に 1m^3 である。1日の大気吸引量は約 $1,500\text{m}^3$ である。フィルターには、ガラス繊維フィルター (Gelman, Type A/E) を用いた。フィルター上に採取されたエアロゾルの量は100~300mg程度で、その時々気象条件によって左右された。試料採取後フィルターを円盤状に加圧成形して測定試料とし、 ^7Be は477keVの γ 線を高純度Ge検出器で、 ^{210}Pb は46keVの γ 線を低エネルギー光子検出器で測定した。測定時間は1試料あたり $(1\sim 20)\times 10^4$ secで、測定に供せられるフィルターの部分は全面積の約80%である。

3. 結果と考察

図1は、1991年6月から1992年5月までの大気中の ^{210}Pb と ^7Be の濃度変動を示したものである。1991年12月と1992年1月にはピナツボ噴火以前の3年間に比べて ^{210}Pb の濃度増大が見られる。また、図2に示すように、 ^{210}Pb と ^7Be の濃度比は、1991年10月頃から増大し、本邦の大気中の ^{210}Pb が宇宙線生成核種の ^7Be に比較して増加していることを示している。一方、ライダーにより成層圏

エアロゾルの量の変化が測定されているが、この観測結果によると、ちょうどこの時期にピナツボ噴火起源のエアロゾルが本邦上空に到来している。これらの観測結果を考えると、観測された過剰の ^{210}Pb はピナツボ噴火に由来しているものと推測される。同じ時期に見られる ^7Be 濃度の小さな増大は、成層圏から対流圏に降下するエアロゾルの増加を反映しているものと考えられ、 ^{210}Pb 濃度の増加分の一部にはこの影響も含まれていると考えられる。

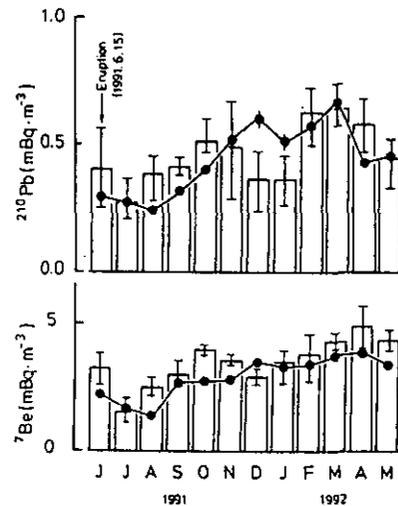


図1 ピナツボ火山1991年6月噴火後と噴火前(1988~1990年)につくばで観測された大気中の ^{210}Pb と ^7Be 濃度の比較
(●: 噴火後1991~92; □: 噴火前1988~90)

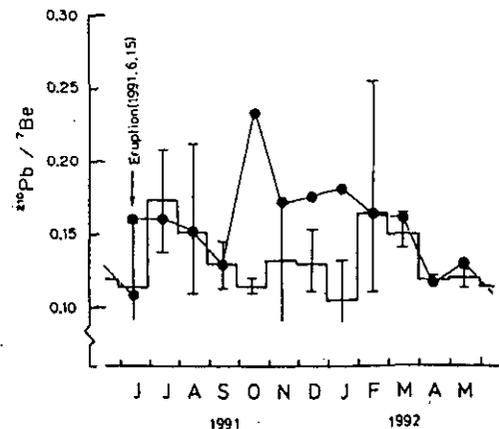


図2 ピナツボ火山噴火後と噴火前につくばで観測された大気中の ^{210}Pb と ^7Be 濃度の比
(●: 噴火後1991~92; □: 噴火前1988~90)

遺伝子操作による植物の環境ストレス耐性機構の解明

青野 光子 (生物圏環境部分子生物学研究室)

1. 環境ストレスと活性酸素

植物は、低温・乾燥や紫外線、また除草剤や大気汚染ガスといった様々な要因によって傷害を受ける。この傷害の原因として考えられるものに活性酸素がある。活性酸素とは、スーパーオキシド (O_2^-) や過酸化水素 (H_2O_2) などの、反応性に富む酸素の分子種であり、タンパク質や脂質などの生体物質に損傷を与えて生体にいろいろな傷害を引き起こす。活性酸素は光合成などの反応に伴って常に植物細胞内で発生しているが、照射下やストレス状態で増加し、様々な要因によって引き起こされる傷害に関与していると考えられる。一方、植物にはこれらの活性酸素から身を守るための仕組みとして、図に示すような活性酸素の消去反応系が存在する。この反応系の酵素の活性を遺伝子操作によって改変し、植物の環境ストレス耐性の変化を調べることで、活性酸素の傷害への関与、また活性酸素消去系の環境ストレス耐性機構における重要性を示すことができると考えた。

2. 活性酸素消去系酵素の遺伝子操作

活性酸素消去系酵素のうち、グルタチオンレダクターゼ (GR) の遺伝子进行操作し、この酵素の活性が対照に比べて高いトランスジェニック植物と低いトランスジェニック植物とを作出した。植物はタバコ品種 SR1 を用いた。GR 活性の高いものは、大腸菌 GR 遺伝子を導入することによって得た。低いものは、ホウレンソウ GR cDNA を本来の方向とは逆向きにつないで導入し、タバコの従来の GR の遺伝子発現を阻害する、というアンチセンス法によって作出した。

また、同じく活性酸素消去系酵素の一つであるスーパーオキシドジスムターゼ (SOD) の酵素活性をやはり遺伝子操作により高めたトランスジェニック植物を、GR 活性を高くしたトランスジェニック植物と交配し、SOD、GR 両方の酵素活性が共に高いトランスジェニック植物を作った。

3. 環境ストレス耐性の検討

作出したトランスジェニック植物の環境ストレス耐性を対照と比較するために、除草剤パラコートによる処理

を行った。パラコートは、細胞内の電子供与体から電子を受容し、それを酸素に付与することによってスーパーオキシドを発生させ傷害をもたらすと考えられている。パラコート処理した葉片を照射下で蒸留水に浮かべ、漏出する電解質の量を反映する蒸留水の電気伝導度を測定し、細胞の傷害の度合いを調べた。また、葉片の退色 (葉緑素の分解) の観察および葉緑素含量の測定を行った。

その結果、GR 活性の高いトランスジェニック植物では対照よりもパラコート耐性が高く、GR 活性の低いトランスジェニック植物ではパラコート耐性も低いことが示された。つまり、GR 活性と、パラコートによって起こる環境ストレスに対する耐性の間には、正の相関関係があることがわかった。

また、SOD と GR 両方の酵素活性が高いトランスジェニック植物では、対照よりも高いパラコート耐性を持つばかりではなく、どちらか一方のみの酵素活性が高いトランスジェニック植物と比較しても高いパラコート耐性を示すことがわかった。

4. 考 察

これらの結果は、環境ストレスによる傷害の原因に活性酸素があり、さらに活性酸素の消去系が植物の環境ストレス耐性に非常に重要であることを示唆している。また、この系の酵素である GR、SOD がともに活性酸素の消去系の重要な因子であり、両者の協調的な働きが効果的であることもわかった。

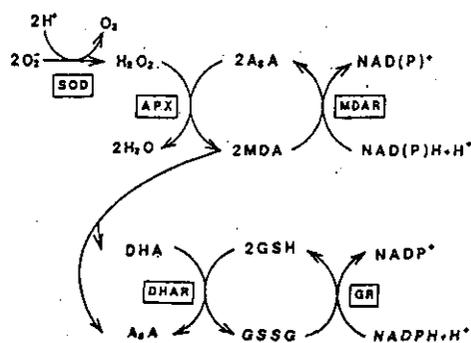


図 植物の代表的な活性酸素消去系

AsA: アスコルビン酸、MDA: モノデヒドロアスコルビン酸、DHA: デヒドロアスコルビン酸、SOD: スーパーオキシドジスムターゼ、APX: アスコルビン酸ペルオキシダーゼ、MDAR: モノデヒドロアスコルビン酸レダクターゼ、DHAR: デヒドロアスコルビン酸レダクターゼ、GR: グルタチオンレダクターゼ。

環境情報センターの活動およびデータベースの紹介

波多野 実（環境情報センター情報管理室）

1. 環境情報センターの活動

環境問題への取組みに当たっての体系的な関連情報の整備の重要性については、かつての公害が激化した年代以降、環境状況、被害の実態を把握するため種々の調査が行われ、それらのデータの集積が環境基準、排出基準の設定に実を結び、公害の改善に大きく寄与することとなってきたところからみても、言うまでもないところである。

また、近年においては、地球規模での環境汚染、化学物質による低濃度環境汚染問題等の様々な問題が目ざされるようになり、環境情報の体系的整理、随時利用可能なシステム構築の必要性がますます高まってきている。

このような背景の下に、環境情報センターは国立環境研究所の中に、環境の保全に関する国内および国外の資料の収集・整備・提供を行うための組織として、平成2年7月1日に設置された。

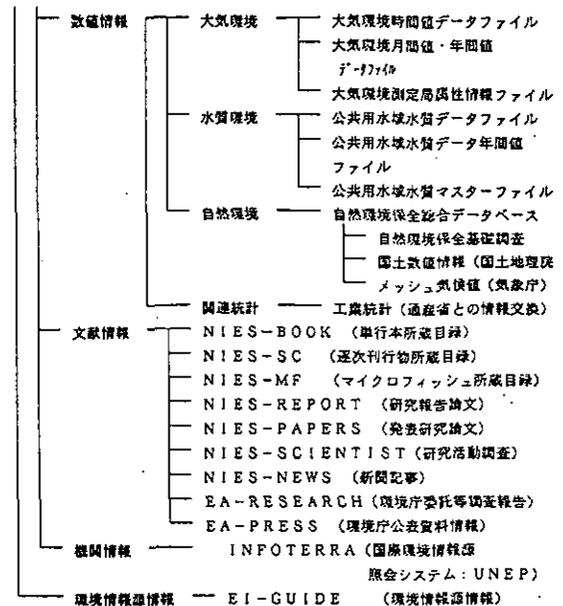
【業務の概要】

- (1) 7. 電子計算機システムおよびネットワークの整備、管理、運営による研究者に対する電算機利用環境の提供
 - イ. 外部機関等（国際機関を含む）との情報交換
 - ・ 環境情報ネットワーク（EI-NET）
 - ・ 国際環境情報源照会システム（INFOTERRA）
（情報管理室）
- (2) 7. 環境の状況等を示す環境情報および環境データベースに関する収集、整備、提供
 - イ. 環境情報の処理技術の整備、提供
（情報整備室）
- (3) 7. 環境研究に関する文献情報の収集、整備、提供
 - イ. 図書室の管理
 - ウ. 研究成果等の刊行
（研究情報室）

2. データベースの紹介

これまでの環境庁および都道府県から収集・整理した環境情報、独自に整備した環境情報のうち、コンピュータ処理が可能なものをまとめて、センターでは「環境データベース」と呼んでおり、環境研究及び環境行政の支援に広く利用されている。

環境データベース



3. 環境情報提供システム

環境基本法において、国民等が自主的な環境保全活動を推進するために環境情報の収集・整備・提供を行うことが国の責務とされたことを踏まえ、下記のような事業を行うことを目指している。

(1) 環境情報源情報の収集・整理・提供

政府機関、都道府県、民間団体等が所有している環境情報について情報源情報として取りまとめ、情報に関する案内業務を行う。

(2) 環境情報の収集・整備

政府機関等の整備する環境情報のうち、環境保全の推進にとって重要なものを系統的に収集・整理し、提供に適した形態に整備する。

(3) 環境情報の通信等による提供

収集・整備された環境情報を編集・加工して、国民、民間団体、都道府県等にパソコン通信、FAX通信等により提供する。

(4) パソコン通信による環境情報の相互交流支援

パソコン通信による電子掲示板システム（BBS）を開発・運営することにより、国民、民間団体等の間でのイベント、活動事例、対策技術等の環境保全活動に係る情報の交流を支援する。

地球環境研究センターにおける地球環境モニタリング事業

福島 健彦 (地球環境研究センター観測第一係)

地球環境センターは、平成2年度より、地球環境研究や行政施策に必要な基礎データを得ることを目的として地球環境モニタリング事業(地球環境変動因子や地球環境変動による影響等の継続的監視・観測)を実施している。同事業は、様々な事象についての個別のモニタリング、国連環境計画と世界保健機関が共同で行っている地球環境監視システム/水環境プロジェクト(GEMS/Water)等の国際ネットワークの支援事業、地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)に搭載するオゾン層等観測センサー等のデータ処理運用システムの開発、運用等よりなる。本発表では前二者について紹介する。

各地球環境モニタリング事業は所内研究者を中核に、所内外の研究者の協力を得て、外部団体を活用して推進されている。各事業は進捗状況により、フィージビリティスタディ(実施可能性の検討。原則1年間)、試験モニタリング(試験的に観測を行い、手法・体制を確立。原則3年間)、長期モニタリング(長期的、継続的な観測。3年ごとに事業見直し)の3段階に分類され、新規提案時、段階移行時、事業見直し時に「モニタリングに係る地球環境研究センター運営委員会」のヒアリング・評価を受けた上で事業を推進することとしている。

長期または試験モニタリング段階にある事業およびGEMS/Water支援事業の概要を表に示す。

表 平成7年度地球環境モニタリング事業一覧

段階	事業名	事業概要	開始年月
長期モニタリング	オゾンレーザレーダーによる成層圏オゾン層モニタリング	オゾンレーザレーダーにより高度15~45kmに位置する成層圏オゾンの鉛直分布を観測する	1988.9~
	定期船舶を利用した南北太平洋上大気モニタリング	日~豪間の定期船舶(日本郵船)を利用して、太平洋上大気の温室効果ガスの南北両半球の濃度分布を3°の間隔で定期的に自動採取し、測定する	1992.3~
試験モニタリング	ミリ波による成層圏オゾン層モニタリング	1995年に所内研究本館(III)に設置予定のミリ波分光計による45Km以上の高高度に分布するオゾンの鉛直分布の観測体制を検討する	——
	有害紫外線モニタリング	オゾン層破壊に伴う大都市地域での有害紫外線の増大を監視するため、東京霞ヶ関でリユウ型分光光度計とUV-B計で観測する	1993.11~
	リモートセンシングによるアジア地域の植生指数分布モニタリング	NOAA/AVHRR画像データを集成し、東南アジア地域全体の解像度1kmの雲なし画像を合成し、それらの画像をもとに植生指数分布図を作成する	1993~
	シベリア上空における温室効果ガスに係る航空機モニタリング	ロシア連邦の観測用航空機を共同運航して、シベリア上空の温室効果ガスの空間高度分布・フラックスを継続的に観測する	1992~
	地上ステーションモニタリング ・波照間モニタリングステーション ・落石岬モニタリングステーション	地上観測施設により温室効果ガスのベースラインを全自動無人観測する ・沖縄県八重山諸島波照間島に設置;太平洋気団の観測 ・北海道根室市落石岬に設置;シベリア気団・太平洋気団の観測	1992.5竣工 1994.6竣工
	定期船舶を利用した東アジア海域海洋汚染モニタリング	定期船舶を利用して、人為影響が顕著な大陸棚海域の海洋環境因子の広域分布を定期的に自動観測する ・神戸~釜山(大阪国際フェリー) ¹⁾ 、大阪~那覇・別府(関西汽船) ²⁾	1)1991.6~ 1993.2 2)1994.1~
	定期船舶を利用した北太平洋域大気-海洋間ガス交換収支モニタリング	日~加間の定期船舶(ノルウェー船籍)を利用して、北太平洋域での大気-海洋間の温室効果ガス等の交換収支を定期的に自動観測する	1995.3~
フィージビリティスタディ	北域成層圏モニタリング	日本の中でO ₃ 層破壊が進みやすい北海道において成層圏O ₃ のモニタリングの可能性を検討する	——
	イカを指標生物とした海洋汚染モニタリング	イカを指標生物とした海洋汚染のモニタリングの可能性を検討する	——
	温帯湖沼とその集水域における生態系モニタリング	中禰寺湖をケーススタディとして、地球温暖化の温帯湖沼の集水域生態系への影響を観測する手法と体制を検討する	——
その他	GEMS/Water支援事業 ・リファレンス ラボラトリー ・ナショナル センター ・摩周湖ベースラインモニタリング	GEMS/Waterにおける東アジア・太平洋域の中核として事業を支援する ・各測定点における精度管理のため、評価用標準試料を作成し、配布する ・国内の河川トレンドステーションを取りまとめ、測定データを管理する ・陸水環境のベースラインステーションとして摩周湖で水質を観測する	1993~ 1994~ 1994~

図で見る地球環境 ～GRID-Tsukuba～

宮崎 忠国（地球環境研究センター）

地球の温暖化や森林減少など、地球環境問題は現在緊急の課題となっていますが、地球全体として環境のようすはどうなっているのでしょうか。ここでは、パネル展示やパソコンを使ったデモンストレーションにより、地球環境のようすを視覚的に紹介します。

1. GRID-Tsukuba

国立環境研究所地球環境研究センターは、平成3年5月に国連環境計画（UNEP；ユネップ）／地球資源情報データベース（GRID；グリッド）のセンターとなりました。現在GRIDのセンターは世界に11カ所ありますが、その中の8番目のセンターとして、GRID-Tsukubaが誕生したわけです。

GRID-Tsukubaでは、次の4つの活動を進めています。

- 1) 日本をはじめとした各国の研究者や行政担当者にGRIDの環境データを提供すること
- 2) 国立環境研究所の環境研究やモニタリングによって得られたデータ、特に社会・経済データについて、

GRIDに登録し、世界で行われている環境研究等に役立てること

- 3) 地理情報システムやリモートセンシング技術の開発を行い、環境分野へ応用すること
- 4) 地球環境についての研究や政策の検討を行うにあたりGRIDデータの利用を促進すること

2. PGRID（ピーグリッド）

本日の国立環境研究所研究発表会では、パネル展示の他にPGRID（ピーグリッド）というソフトを用いたデモンストレーションを行います。PGRIDは、GRIDの活動やGRIDが提供しているデータをパソコンの画面に表示し紹介するソフトです。PGRIDでは、標高、植生（植物の量及び種類）、二酸化炭素の排出量の分布等の画面表示が可能のほか、地球の温暖化や森林減少に関する説明図やデータも見るできるようになっています。

本日は皆さんにも実際に操作していただけるよう準備してお待ちしております。

<<PGRID（ピーグリッド）>>

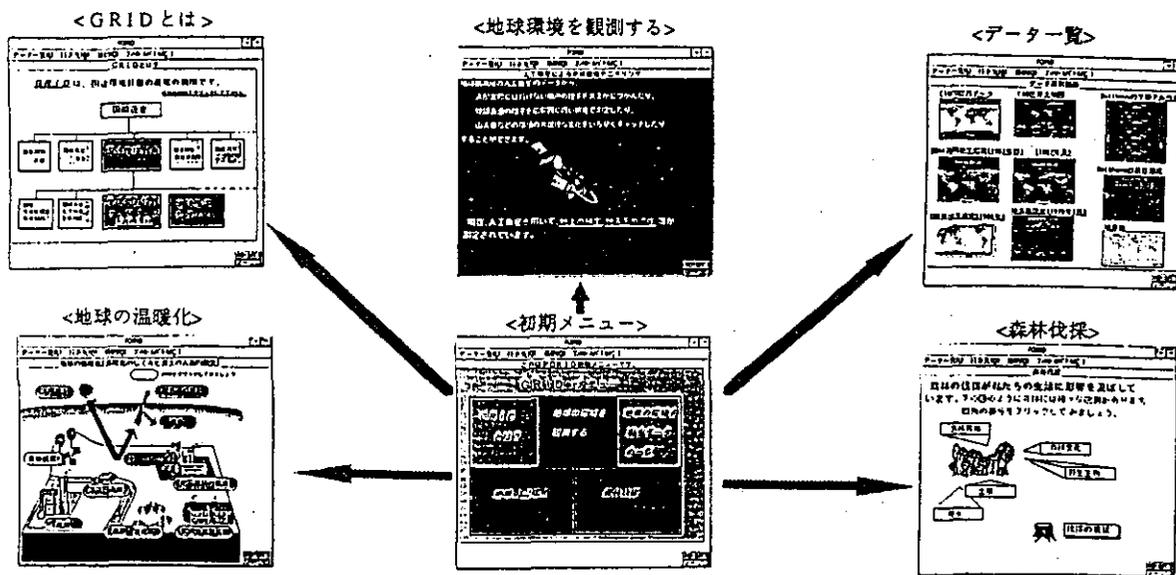


図 GRIDの活動や提供データについて紹介するパソコンソフト（PGRID）の構成