

AG-2-'92

# 国立環境研究所 地球環境研究年報

平成 3 年 度

環境庁 国立環境研究所

## 平成3年度国立環境研究所地球環境研究年報 の発刊に当たって

本研究所は、我が国の環境研究の中心的役割を果たすために、昭和49年に環境庁の附属機関「国立公害研究所」として設立され、大気、水、土壌、生物など人間を取り巻く環境保全のための研究を行ってきました。しかしながら人間活動の影響が、地域的な環境のみならず、地球的規模に拡大されるにつれ、従来には考えられなかった新たな環境問題に対応することが求められるようになり、これらに本格的に取り組むため、平成2年7月当研究所は「国立環境研究所」に名称変更をするとともに、地球環境研究グループの設置をはじめとする大幅な組織の衣替えをし現在に至っています。

当研究所における地球環境研究は、組織変更以前には特別研究として実施してきましたが、平成2年度環境庁に、地球環境研究総合推進費が創設されたことと連動し、地球環境研究の各分野ごとにプロジェクトチームを構成し、その現象の解明、影響の予測、対策などについて研究を進めています。また同年10月には地球環境研究センターが設置され、分野別に行われている研究の総合化に関する研究を担当しています。

当研究所における地球環境研究の成果につきましては、昨年より「地球環境研究年報」として公表してまいりました。地球環境問題は、これまでの環境問題と比べ、対象が巨大かつ広範なものであり、その成果の取りまとめについても、必ずしも分かりやすい形になっていない面も多いと思われれます。十分でない点につきましては今後いっそう改善を加えて行きたいと考えておりますので、関係者のご叱正を頂ければ幸いに存じます。

平成4年8月

国立環境研究所

所長 市川 惇 信

# 目 次

1 概 況 .....	1
2 地球環境研究総合推進費による研究	
2.1 オゾン層の破壊に関する研究 .....	7
2.2 地球の温暖化現象解明に関する研究 .....	15
2.3 地球の温暖化影響対策に関する研究 .....	29
2.4 酸性雨に関する研究 .....	51
2.5 海洋汚染に関する研究 .....	67
2.6 熱帯林の減少に関する研究 .....	75
2.7 野生生物種の減少に関する研究 .....	93
2.8 その他の地球環境問題に関する研究 .....	101
2.8.1 ヘルンヤ湾岸の原油汚染等が地球環境に及ぼす影響の評価に関する研究 .....	101
2.9 総合化研究 .....	107
2.10 課題検討調査研究 .....	125
2.10.1 乾燥地・半乾燥地の砂漠化に伴う環境影響予測に関する予備的研究 .....	125
2.10.2 環境勘定体系の確立に関する予備的研究 .....	126
2.10.3 火山噴火がオゾン層に及ぼす影響に関する予備的研究 .....	127
2.10.4 衛星搭載大気センサーデータの検証及び国際共同利用に関する予備的研究 .....	128

# 1. 概 況

国立環境研究所においては、平成2年度における研究所改組に伴って地球環境研究グループが発足し、同時にこの年から環境庁において「地球環境研究総合推進費」予算が発足することとなり、当研究所での「地球環境研究」が本格的に開始されることとなった。

当研究所における地球環境研究は、必ずしも環境庁・「地球環境研究総合推進費」のみならず、科学技術庁・「科学技術振興調整費」・「海洋開発及び地球科学技術調査研究促進費」、文部省・「科学研究費」等によっても一部研究が行われているが、本年報においてはその中心である「地球環境研究総合推進費」による研究について取りまとめて報告する。

地球環境研究総合推進費による課題は

- (1) 課題研究
- (2) 総合化研究
- (3) 課題検討調査研究

の3つのカテゴリーに区分されているが、これらの内の「課題研究」は地球環境研究の大部分を占める個別要素にかかわる研究であり、「課題検討調査研究」は原則として翌年度から課題研究を立ち上げたり、見直しを行ったりするためのフィージビリティ・スタディである。当研究所で担当しているこれらの研究課題は8研究分野、合わせて約40課題にわたっており、地球環境研究グループだけでなく、基盤研究部の多くの研究者がかかわって研究を推進している。これに対して「総合化研究」は、課題別研究の総合化、研究分野の横断化を行うためのもので、平成2年度に同じく発足した地球環境研究センターが中心となって研究を推進している。

各研究課題は、平成2年度より開始されたものもあれば、3年度に新たに開始されたものもある。したがって、本報告書の内容は平成3年度中に得られた知見を中心に、各研究プロジェクトチーム（各研究分野に対応）ごとに研究成果及び研究の進捗状況をまとめたものである。

各分野ごとの平成3年度の主要な成果及び進捗状況について要約を以下に述べる。行われた研究の全体及び詳細は、各プロジェクトごとの本文を参照願いたい。

オゾン層研究では、ピナツボ火山エアロゾル及びオゾン層の動態把握と変動機構の解明、地上衛星間長光路吸収観測におけるドップラーシフトの利用手法の開発、衛星搭載レーザーレーダーの意義に関する調査、代替フロンがオゾン層に及ぼす影響に関するチャンバー実験、一次元モデルなどの改良、紫外線が人体や細胞に及ぼす影響とメタロチオネインの防御効果の解明、可視光の存在下における紫外線の植物影響の解明、代替フロンとOHラジカルの反応速度定数の決定、フロンなど対策技術の評価のための環境挙動推定モデルの作成などを行った。

地球の温暖化現象解明研究では、メタンなどの温室効果気体の大気中寿命、すなわち大気中での除去過程の中心的役割を果たしているOHラジカルの濃度を支配する大気中CO収支の決定に不可欠である植物起源炭化水素の光酸化反応機構とその中でのCO収率を、光化学チャンバーを用いた大気モデル実験により明らかにした。今回求めたイソプレンからのCO生成量と先に研究所において求められたテルペンからのCO生成量を合わせると  $233 \times 10^{12} \text{gC/年}$  となった。これによりCO収支の評価が大幅に改善された。

地球の温暖化影響・対策研究では、温暖化対策に関しては、まず、アジア太平洋地域からの温室効果ガスの排出量を予測し、削減策を評価するために、インドネシア温室効果ガス排出モデル

を構築した。また、温室効果ガス削減に有効な技術について、意識調査の結果や産業連関表を用いて技術導入に伴う削減効果を定量的に推定した。温暖化影響については、まず、温暖化が我が国の植生分布に及ぼす影響について、メッシュデータを用いて植生の北方へのシフトの可能性を予測した。また、健康への影響については中国雲南省での現地調査などにより気象の変化によるマラリア分布の変化の可能性を分析した。

酸性雨研究では、国際大気化学研究計画（IGAC）の一環として大気汚染物質の世界的な3大排出地域の1つである東アジア地域の大陸性気塊が太平洋上の対流圏大気に与える影響評価を目的とする航空機調査（PEACAMPOT プログラム）を計画し、温暖化現象解明研究チーム、国内大学、地方公害試験研究機関、韓国、中国の研究者との共同観測を行った。1991年10月に東シナ海、黄海、日本海上空での航空機観測を行うと同時に、地上測定局でも、酸性雨前駆体ガス、雨水成分、エアロゾルの観測を行い、総合的なデータの解析を進めている。

海洋研究では、地球環境モニタリングとして行われている日韓フェリーの植物プランクトンクロロフィルの連続計測データの解析から初夏のブルーミング（増殖）、盛夏の栄養塩枯渇、秋季のブルーミングなど、顕著な海洋環境変動が見いだされた。

熱帯林研究では、平成3年8月以降、専門分野を異にする国立環境研究所の7名の研究者が数回に渡ってマレーシア半島部に分布する熱帯林に行き調査を行った。熱帯林を構成する熱帯樹種の光合成速度は、温帯樹種のそれと比較して、決して高いものではないことが判明した。また、熱帯林再生のキーファクターである種子、実生苗の存在に関しては、生育場所の環境条件のみならず小型哺乳類や昆虫による食害の影響が大きく、食害によってほとんどの個体が消滅する結果が得られた。さらに、雲や雨のために、熱帯降雨林での積算日射量は温帯におけるそれと大差ない結果が得られている。

野生生物種研究では、マレーシア半島部の熱帯林において研究を行うことを決めた。本年度は、マレーシア側の共同研究機関としてマレーシア森林研究所、マレー大学、マレーシア国立大学を選び、共同研究の折衝を行った。研究調査地点はクアラルンプールの東方約15kmに位置するウルランガット地区に決定し、調査を開始した。この地域では、森林タイプと野生生物種の多様性の関連を研究する。また、平地林と野生生物群集を比較するために、パソ林（クアラルンプールの南東約70km）にも調査区を設けた。

砂漠化研究では、砂漠化に伴う環境影響予測に関する研究を本格的に立ち上げるための準備を行った。前年度に引き続き砂漠化の影響研究をどのように進めるべきかを国内の有識者からなる委員会を設け、検討を重ねた。さらに、シンポジウムを開催し、報告書を作成した。このようにして収集した知見に基づいて、平成3年11月にインドの砂漠化危険地帯の調査地選定と相手方研究機関の共同研究の可能性を打診するために研究所から3名、日本野生生物研究所から1名の研究者が現地に行った。その結果、インド西部のジョドプル周辺に分布するタール砂漠を研究対象として精力的に研究を行っている中央乾燥地研究所（CAZRI）と共同研究を行えることが明らかになった。

衛星観測研究では、地上衛星間のレーザー長光路吸収測定法による大気微量成分の計測手法の開発、衛星搭載レーザーレーダーによる大気環境評価手法に関する研究、次世代の衛星搭載大気センサーの基礎的研究のほか、地球観測プラットフォーム技術衛星（ADEOS）に搭載される大気センサー（ILAS, RIS）のデータ処理アルゴリズムの研究、データ処理・運用システムの開発にかかわる研究を実施した。

なお、平成3年度地球環境研究総合推進費により国立環境研究所において行われた研究課題は以下のとおりである。これらの内☆印を付した課題は平成3年度からの新規課題、他は平成2年度から発足した継続課題の研究である。

(1) 課題別研究

オゾン層

- ・オゾン層の時間的・空間的変動の動態解明に関する研究
  - オゾン層観測データ等を用いたオゾン層変動の総合的解明に関する研究
- ・新型レーザーレーダー計測技術の開発に関する研究
  - 衛星利用レーザー長光路吸収計測技術の開発に関する研究（分光計測法の開発）
- ・成層圏オゾン層の物理的・化学的変動機構の解明とオゾン層変動の予測に関する研究
  - オゾン層破壊に関与する光化学反応の解明に関する研究
  - 成層圏オゾン層の物理的変動機構の解明とモデル予測の高度化に関する研究
- ・紫外線の増加が人の健康に及ぼす影響に関する研究
  - 紫外線による免疫機能等生体防御機能の低下に関する研究（発がんリスクの促進影響）
- ・紫外線の増加が植物に及ぼす影響に関する研究
  - 紫外線の植物への影響の作用機構に関する研究
- ・フロン等代替物質の開発と環境影響評価に関する研究
  - フロン等代替物質の開発及び環境影響評価に関する研究（フロン等代替物質の対流圏分解物の環境影響評価に関する研究）
- ☆フロン等対策技術の総合評価に関する研究
  - フロン等対策技術の環境影響評価に関する研究

地球の温暖化

- ・温室効果気体等の組成・濃度の時間的・空間的変動の動態解明に関する研究
  - 反応性温室効果気体（メタン・NMHC等）の動態解明に関する研究
- ・メタン・亜酸化窒素の放出源及びその放出量の解明に関する研究
  - バイオマス燃焼による放出量の解明に関する研究
  - 閉鎖性水域からの放出量の解明に関する研究
- ・温室効果気体等の大気化学反応過程の解明に関する研究
  - 温暖化関連気体の大気中での光化学反応機構の解明に関する研究
  - 温暖化関連気体の大気中での反応速度の測定に関する研究
- ・海洋における炭素の循環と固定に関する研究
  - 海洋プランクトンによる炭酸ガス固定能力に関する研究
  - 海洋沈降粒子による炭素の沈降フラックスに関する研究
- ・陸上生態系における炭素循環機構の解明に関する研究
  - 自然陸域生態系における炭素循環系の定量的解析に関する研究
- ☆シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究
  - メタン濃度の測定と放出量の評価に関する研究
  - 大気中二酸化炭素濃度の測定及びフラックスの測定に関する研究
- ☆気候モデルによる気候変動評価に関する研究
  - 気候変動予測モデルの開発・改良に関する研究
  - 気候変化に係わる雲の大気物理過程の解明に関する研究

- ・地球の温暖化が植物に及ぼす影響の解明に関する研究
  - 自然植生の分布への影響の解明及び予測に関する研究
- ・地球温暖化による都市環境の影響評価及び対策に関する研究
  - 都市環境への影響の評価システムの開発と総合評価に関する研究
- ・地球温暖化による人類の生存環境と環境リスクに関する研究
  - 熱波・熱ストレスの健康影響に関する研究（個人影響（個人の生理学的影響）に関する研究）
- ☆動物媒介性感染症の拡大予測に関する研究
- ・地球温暖化対策技術の評価及び評価方法の開発に関する研究
  - 民生・生活関連分野の温室効果ガスアナリシス、対策技術探索、個別技術評価に関する研究（二酸化炭素の発生アナリシスと対策技術探索、評価に関する研究）
- ☆アジア太平洋地域における温暖化対策分析モデル（AIM）の構築に関する研究
  - アジア太平洋地域における温室効果ガス排出・吸収モデルの構築に関する研究
  - アジア太平洋地域における温暖化の影響評価モデルの構築に関する研究
  - アジア太平洋地域における社会発展等の基本シナリオの設定に関する研究
- ☆家庭等における二酸化炭素排出抑制システムに関する研究
  - 家庭等における二酸化炭素抑制システムのための建造物の断熱構造化の普及促進に関する研究
  - 家庭等における二酸化炭素抑制システムのための太陽エネルギーの利用促進に関する研究
  - 家庭等における二酸化炭素抑制システムの導入に関する研究（家庭等におけるエネルギー消費が都市環境に及ぼす影響とエネルギー消費の推移に関する研究）
- ☆電気自動車の普及促進による二酸化炭素排出抑制交通システムへの転換に関する研究
  - 電気自動車の普及阻害要因の分析
  - 地域導入システムの総合評価と電気自動車の普及に資するモデル車両の設計

#### 酸性雨

- ・東アジアにおける酸性・酸化性物質の動態解明に関する研究
  - 酸性・酸化性物質等の動態解明のための地上観測に関する研究（酸性・酸化性物質等の動態解明のための地上観測に関する研究）
  - 東アジアにおける大気動態解明のための航空機等を用いた観測に関する研究（航空機観測のための酸化性物質の高感度計測システムの開発及び汚染物質輸送、変質等の解析に関する研究）
- ・植物に与える酸性及び酸化性物質の影響に関する研究
  - 自然植物系における酸性及び酸化性物質の影響に関する研究
- ・酸性降下物の陸水・土壌への影響機構に関する研究
  - 日本における集水域の酸性化予測と陸水・土壌生態系への影響に関する研究
  - 地質・土壌の酸性雨に対する水文・地質学的応答特性に関する研究
- ☆東アジアにおける酸性・酸化性物質の制御対策とその評価に関する研究
  - 東アジアにおける酸性雨原因物質の排出量及び発生量分布の将来予測に関する研究
  - 東アジアにおける酸性雨原因物質の排出抑制技術とその評価に関する研究

#### 海洋汚染

- ・大陸棚海域循環過程における沿岸－外洋の物質フラックスに関する研究
  - 海洋物質循環の変動機構に関する研究

- ☆海洋物質循環の長期変動に関する研究（海底堆積物の化学組成を用いた長期海洋環境の変動に関する研究）
- ・海洋汚染物質の海洋生態系への取り込み及び循環に関する研究
  - 海洋プランクトンの海洋汚染物質の取り込み及び循環に関する研究
- ☆イカ類肝臓の蓄積物質による全海洋環境監視計画に関する研究（肝臓中蓄積物質の検索に関する研究）
- ・衛星可視域データのグローバルマッピングによる広域環境変動に関する研究
  - 衛星可視域データによる広域海洋環境の指標化に関する研究

#### 熱帯林

- ・熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究
- ・熱帯林生態系における野生生物種の多様性に関する研究
  - 動植物種の生活史及び相互関係の多様性に関する研究
- ・熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究
  - 植物群落の微気象改変作用に関する研究
  - 植物群落及び土壌生物の土壌環境形成に関する研究
- ☆熱帯林生態系の修復に関する研究
  - 自然更新機能の解析に関する研究
- ☆NOAA AVNHRR（LAC）画像データを用いた東南アジア地域の植生指数図及び植生分布図作成手法に関する研究

#### 野生生物

- ☆森林破壊が野生生物種の減少に及ぼす影響の機構に関する研究

#### その他

- ☆ペルシャ湾岸の原油汚染等が地球環境に及ぼす影響の評価に関する研究
  - 油井火災などの大気環境に及ぼす影響の評価に関する研究（油田火災に伴う大気汚染が周辺地域に及ぼす影響の評価に関する研究）
  - 原油流出等が海洋環境に及ぼす影響の評価（ペルシャ湾岸の海水流動解析に関する研究）
- （2）総合化研究
  - ・持続的発展のための世界モデルに関する研究
- ☆地球環境保全のための社会経済システムのあり方に関する国際比較研究
- （3）課題検討調査研究
  - ・乾燥地・半乾燥地の砂漠化に伴う環境影響予測に関する予備的研究
- ☆環境勘定体系の確立に関する予備的研究
  - 自然資源勘定体系の確立及びその経済的価値づけに関する予備的研究
- ☆火山噴火がオゾン層に及ぼす影響に関する予備的研究
- ☆衛星搭載大気センサーデータの検証及び国際共同利用に関する予備的研究
- ☆開発途上国における地球環境保全対策の社会経済影響の評価に関する予備的研究



## 2. 地球環境研究総合推進費による研究

### 2.1 オゾン層の破壊に関する研究

#### 〔研究組織〕 地球環境研究グループ

統括研究官	秋元 肇
オゾン層研究チーム	○中根英昭・林田佐智子
温暖化現象解明研究チーム	坂東 博
衛星観測研究チーム	笹野泰弘・杉本伸夫・横田達也
化学環境部	
計測技術研究室	古田直紀
環境健康部	
病態機構研究室	遠山千春・藤巻秀和・青木康展
大気圏環境部	
部長	鷺田伸明
大気物理研究室	光本茂記・花崎秀史
大気反応研究室	今村隆史・三好 明
高層大気研究室	鈴木 睦
大気動態研究室	井上 元・泉 克幸・松井一郎・湊 淳
生物圏環境部	
環境植物研究室	大政謙次・清水英幸
環境微生物研究室	渡辺 信・佐竹 潔
地域環境研究グループ	
上席研究官	三浦 卓
有害廃棄物対策研究チーム	中杉修身
新生生物評価研究チーム	近藤矩朗
環境統計手法研究官	松本幸雄
客員研究員	36名

#### 〔研究概要〕

フロンガス（クロロフルオロカーボン；CFC）は非常に安定な化合物であり、無臭、不燃などの数々の特長を持っているため、スプレー製品、冷媒、洗浄剤、発泡剤などに幅広く使用されている。安定であるために、対流圏（地上約 15 km までの大気）中では分解せずに成層圏（地上約 15～50 km の大気）に達し、紫外線によって分解されて塩素原子を放出し、この塩素原子が連鎖反応的に成層圏オゾン層を破壊する。フロンのほか、消火剤に含まれるハロンから放出される臭素原子もオゾン層を破壊することで知られているが、このほか、四塩化炭素、メチルクロロホルム等も問題となっている。

フロン等によるオゾン層破壊は 1970 年代から警告されていたが、南極オゾンホールという予測をはるかに上回る深刻な事態として人類の前に姿を現した。また、中緯度においても冬季には、モデル予測を上回るオゾンの減少トレンドが検出されているが、その原因は解明されていない。

したがって、今後フロン等によるオゾン層破壊がどの程度まで進行し、人の健康や生態系にどの程度の被害を与えるのかについては、定量的に把握されているわけではない。また、特定フロン等の全廃を実現するための代替フロンの開発が急務であるが、そのためには代替フロンの環境影響評価手法の確立が必要である。

このような状況においてオゾン層破壊の研究にまず求められるものは、現実のオゾン層の変動を詳細に把握し、変動機構を解明することであり、それと同時にオゾン層の正確な将来予測に必要な諸過程に関する理論的、実験的研究と、それに基づいたモデル予測の高度化を行うことである。また、オゾン層の破壊によってもたらされる紫外線（UV-B）の増大が、人の健康や生物及び生態系に及ぼす影響を定量的に把握することが必要である。

本研究では、上に述べた研究に対する要請を踏まえ、オゾン層の計測及び動態解明、オゾン層の変動機構、将来予測手法、オゾン層破壊の健康影響評価、植物影響評価、代替フロンの環境影響評価、フロン等対策技術の環境影響評価に関する研究を行う。

### 課題1 オゾン層の時間的・空間的変動の動態解明に関する研究

・オゾン層観測データ等を用いたオゾン層変動の総合的解明に関する研究

成層圏オゾンのレーザーレーダー観測手法及び観測データの解析手法の高度化を行うと共に、衛星データとの比較、レーザーレーダー以外のオゾン層測定手法との同時観測を含めたオゾン層変動の解明のための総合的観測の実施等を通して、オゾン層変動の動態を明らかにする。さらに、オゾン濃度鉛直分布データの解析等を通じて、オゾン層の長期変動の把握等を行う。

### 課題2 新型レーザーレーダー計測技術の開発に関する研究

(1) 衛星利用レーザー長光路吸収計測技術の開発に関する研究

分光計測法の開発：オゾン層破壊の実態把握のためには、オゾン及びオゾン層破壊に関連する種々の分子を高感度・高精度で測定する必要があるが、衛星利用レーザー長光路吸収法はそのための重要な技術の一つである。衛星利用レーザー長光路吸収計測技術の確立のためには、測定対象分子ごとの最適な分光測定手法の選択、有望なレーザー光源についての特性の評価と最適なレーザー光源の選定、測定データから大気微量分子の高度分布と気柱量を求めるためのアルゴリズムの開発が必要である。このために、既存の赤外レーザーを用いた分光測定実験とレーザー波長特性調査を行うと共に、測定に必要な高精度のレーザー波長掃引機構の開発、信号検出・処理装置の検討、データ解析手法の開発を行い、衛星利用長光路吸収測定の基本技術を確立する。

(2) 衛星搭載レーザーレーダーによる地球大気環境の評価に関する研究

成層圏オゾン層破壊、地球温暖化等に関係する地球規模大気環境の評価のための衛星搭載レーザーレーダーの開発に係る基礎的研究として、衛星搭載レーザーレーダーによる地球大気環境評価の具体的目標（目的、目標性能）の設定に係る検討、開発すべき機器使用の検討のためのシミュレーション、地球大気環境評価のためのデータ利用方法に関する調査を行う。特に、成層圏オゾン層の破壊に係る極成層圏雲、並びに地球温暖化現象と密接に関係する雲の広域分布計測に関する調査に重点を置く。

### 課題3 成層圏オゾン層の物理的・化学的変動機構の解明とオゾン層変動の予測に関する研究

(1) オゾン層破壊に関与する光化学反応の解明に関する研究

光化学反応の実験的解明：数値モデルに組み込む多くの光化学反応の中には、反応機構や反応速度係数について十分解明されていないものがある。特に、ラジカル反応については多くの反応速度係数が未決定である。本研究では、物理化学的手法による反応機構、反応速度係数に関する研究と光化学チャンバーによるオゾン層破壊反応の実験的シミュレーションを組み合わせ、オゾン層破壊反応の解明を行う。さらに、フロン、ハロン、代替フロンのオゾン破壊能を決定するための実験を行う。

光化学反応のモデル化：光化学チャンバー内で行うオゾン層破壊のシミュレーション実験の結果をモデル計算と比較検討することにより、光化学反応機構に関する知見が得られ、光化学反応モデルを改良することが可能になる。本研究では、オゾン層破壊のモデル計算に必要な光化学反応モデルを開発すると共に、エアロゾルの表面における不均一反応を組み込む手法について検討を行う。

#### (2) 成層圏オゾン層の物理的変動機構の解明とモデル予測の高度化に関する研究

気相光化学反応、放射、拡散過程を含む一次元モデルを開発し、種々のフロン等規制シナリオ、代替シナリオに基づくオゾン層の将来予測を行うと共に、オゾンレーザーレーダー等によって観測されるオゾン濃度の変動機構の解明を行う。さらに、オゾンホールに関連して重要な力学過程である、極渦崩壊過程の数値シミュレーション手法の高度化を行う。

#### 課題4 紫外線の増加が人の健康に及ぼす影響に関する研究

・紫外線による免疫機能等生体防御機能の低下に関する研究

発がんリスクの促進影響：紫外線、特にUV-Bの増加による免疫系などの生体防御機能の低下機構を、実験動物や培養細胞に紫外線を照射し、紫外線量と発がんの量－反応関係、免疫担当細胞への影響、がん関連遺伝子と生体防御タンパク質の発現への影響等を検討することにより明らかにし、紫外線による発がんリスクの促進影響を評価する。さらには、紫外線による発がんに対する発がんプロモーターの影響について検討し、紫外線による発がんリスクの促進影響について評価を行う。

#### 課題5 紫外線の増加が植物に及ぼす影響に関する研究

・紫外線の植物への影響の作用機構に関する研究

オゾン層破壊により増加する紫外線UV-Bによる、植物の成長、増殖の阻害作用機構を明らかにするために、290～320 nmの紫外線について、高等植物の成長阻害の作用スペクトルを明らかにすると共に、紫外線受容物質の推定、UV-Bの活性酸素防御系酵素に与える影響、可視光による回復、種々の植物種、環境条件における紫外線の影響の比較、可視障害の画像診断法の検討を行い、紫外線の植物への影響の作用機構を解明する。また、微細藻類の増殖・光合成に及ぼす紫外線の影響の藻類種間差について検討する。さらに、環境条件と紫外線吸収物質含有量及び紫外線感受性との関係を比較し、植物の紫外線防御機構を推定する。

#### 課題6 フロン等代替物質の開発と環境影響評価に関する研究

・フロン等代替物質の開発及び環境影響評価に関する研究

フロン等代替物質の対流圏分解物質の環境影響評価に関する研究：物理化学的手法を用いて、フロン代替物質の大気バックグラウンドでの光分解・光化学反応速度を調べ、二次生成物の生成濃

度を推定する。また、成層圏における光分解速度を測定し、分解生成物の定量的関係を明らかにする。さらに、代替フロン及び二次生成物の環境濃度の推定を行い、その生体影響を評価する。

#### 課題7 フロン等対策技術の評価に関する研究

##### ・フロン等対策技術の環境影響評価に関する研究

フロン等対策による多様な環境影響を総合的に予測・評価するために、フロン等対策技術の実施が人の健康や生態系等に及ぼす影響の同定と定性的な評価、定量的に評価するための環境挙動モデルの開発、化学物質の物理化学的性状のデータの整備等を行う。そして、これらの結果を用いて、フロン等対策技術の環境影響の定量的評価を試みる。

#### 〔研究成果〕

それぞれの課題において研究計画に沿った研究成果が得られているが、ここではその一部について紹介する。

#### (1) オゾン層の総合的観測

オゾン層の動態を把握し、その変動機構を解明するためにはオゾン、エアロゾル等の成層圏微量物質や気温等の気象要素を総合的に観測し、さらに全球データを含めて解析することが必要である。この一連の研究は課題1と課題3(2)を通して行われているが、ここでは第一段階であるオゾン層の総合的観測に向けての研究について報告する。

地上からの成層圏の総合的観測については、国際的にも「成層圏変化検出のためのネットワーク(NDSC)」の構想の中で、レーザーレーダー、マイクロ波(ミリ波)分光計、赤外分光計、可視・紫外分光計を中心とした観測拠点の準備が進められているが、国内的にもこれらの測器による観測のポテンシャルが蓄積されてきており、オゾン層総合的観測に関する研究を本格的に立ち上げる時期がきている。また、1991年6月にはフィリピンのピナツボ火山が大噴火を起こし、その結果として今世紀最大量の成層圏エアロゾルが生成されている。このため、光学的原理に基づくオゾン層観測において各種の系統誤差が生じており、その評価が必要になっている。

このような背景の下に、1991年12月、1992年1月、2月に、国立環境研究所、東北大学理学部、名古屋大学理学部によるレーザーレーダー、赤外ヘテロダイン分光計、ミリ波分光計による遠隔計測及び、国立環境研究所(12月)、国立環境研究所・高層気象台(1月、2月)によるオゾンゾンデ観測を行った。観測項目は、オゾン高度分布(レーザーレーダー、赤外ヘテロダイン、ミリ波、オゾンゾンデ)、エアロゾル高度分布(レーザーレーダー)、気温(レーザーレーダー、オゾンゾンデ)、風向・風速(オゾンゾンデ)、メタン・ $N_2O$ 高度分布(赤外ヘテロダイン分光計)である。

観測結果の一部を図1に示す。異なった測器によるデータをつなぎ合わせることによって、地上から高度60km以上までのオゾン、気温の高度分布が得られている。エアロゾル層の中心は高度20km付近にあった。図に示したデータの他に、赤外ヘテロダイン分光計によるオゾン、メタン、 $N_2O$ の高度分布が高度約8~30kmにおいて得られている。大気球による観測を除けば、日本においてこのような成層圏における総合的な鉛直分布データが得られたことはこれまでに例がない。

なお、レーザーレーダーによる成層圏オゾン観測においては、通常308nmの波長のレーザー光と351~355nmの波長のレーザー光を使用するが、ピナツボ火山起源エアロゾルのような大

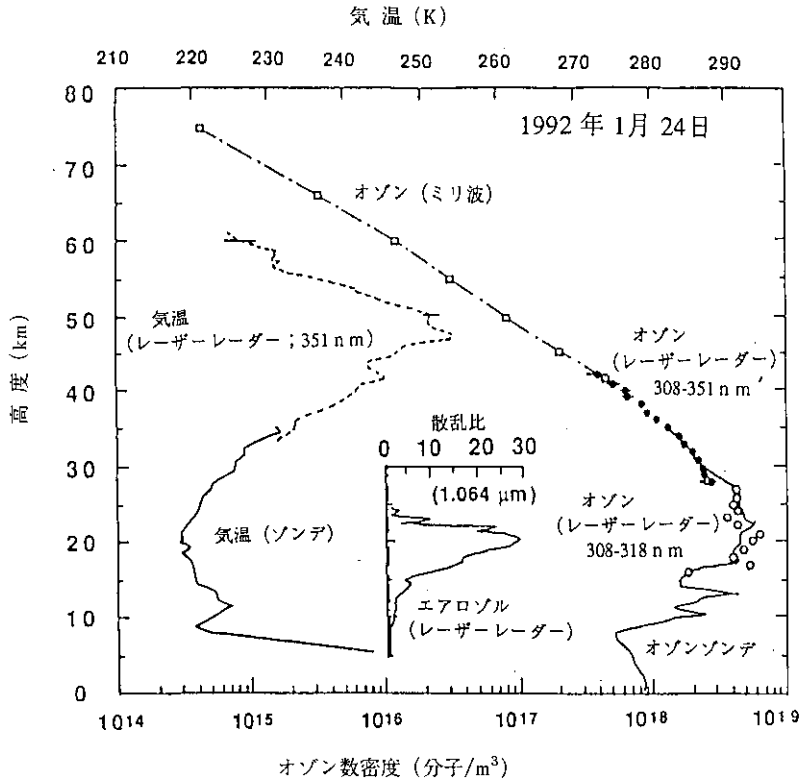


図1 オゾン層集中観測におけるオゾン、気温、エアロゾル高度分布観測の一例  
 レーザーレーダー（ライダー）観測は国立環境研究所、ミリ波分光計観測は名古屋  
 大学理学部、オゾンゾンデ観測は国立環境研究所・高層气象台によって行われた。  
 ミリ波分光計のオゾン数密度は41.6 kmにおいてレーザーレーダーによって得ら  
 れたオゾン数密度に規格化されている。

量のエアロゾル存在下ではエアロゾルの散乱による系統誤差が大きくなる。この系統誤差は2波長の差が大きいくほど大きくなるが、国立環境研究所では、エアロゾルの影響の補正が可能なように308 nm, 351 nmに加え、339 nmのレーザー光を使用しているほか、1991年12月からはさらに313 nmのレーザー光を導入した。図1には高度28 kmまでは308~313 nmの波長組から得られるオゾン高度分布、28 km以上では308~351 nmの波長組から得られるオゾン高度分布を示した。ピナツボ火山起源エアロゾルの存在する高度においても、波長差の小さな308~313 nmの波長組から得られるオゾン高度分布とオゾンゾンデによって得られるオゾン高度分布の差は小さい。現在、エアロゾルによる系統誤差を補正する手法を開発しているが、本集中観測の結果は補正手法の検証のためにも使用する予定である。

## (2) 衛星利用レーザー長光路吸収分光計測技術の開発

本研究は、衛星にリトロリフレクターを搭載し地上から発射したレーザー光を反射させて地上で受信することにより、往復の光路中の大気微量分子の吸収スペクトルを計測する手法の開発を

目的とする。計測手法の概念を図2に示す。この手法は原理的に高精度の計測が期待され、またレーザーの選択により各種の分光手法が応用できる。本研究では技術的に信頼性が高く、多種類の大気微量分子の測定に利用できるパルス炭酸ガスレーザーを用いた分光測定手法の開発を行った。この手法では、人工衛星が高速で移動することによって生じる反射光のドップラーシフトを利用する。ドップラーシフトは地上局から見た衛星の位置に依存して変化するので、レーザー波長を掃引することなく吸収スペクトルを測定できる。図3にモデル計算による大気の透過スペクトルとオゾンの測定に用いるレーザーラインの一例を示す。図中に示す波数領域のオゾンの高分解の吸収スペクトルが測定され、その形状を解析することによってオゾンの高度分布が求められる。炭酸ガスレーザーの基本波及び第2、第3高調波を用いて、オゾンのほかに、メタン、炭酸ガスなどの高度分布と、CFC 12,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ などのカラム量が測定される。

測定に用いる炭酸ガスレーザーには、波長幅が狭いこと、発振線をすばやく切り替えられることが要求される。また、高調波が高効率で発生できることが必要である。特に重要となる炭酸ガスレーザーの高調波発生及びレーザー波長の制御に関する基礎技術について実験的な研究を実施

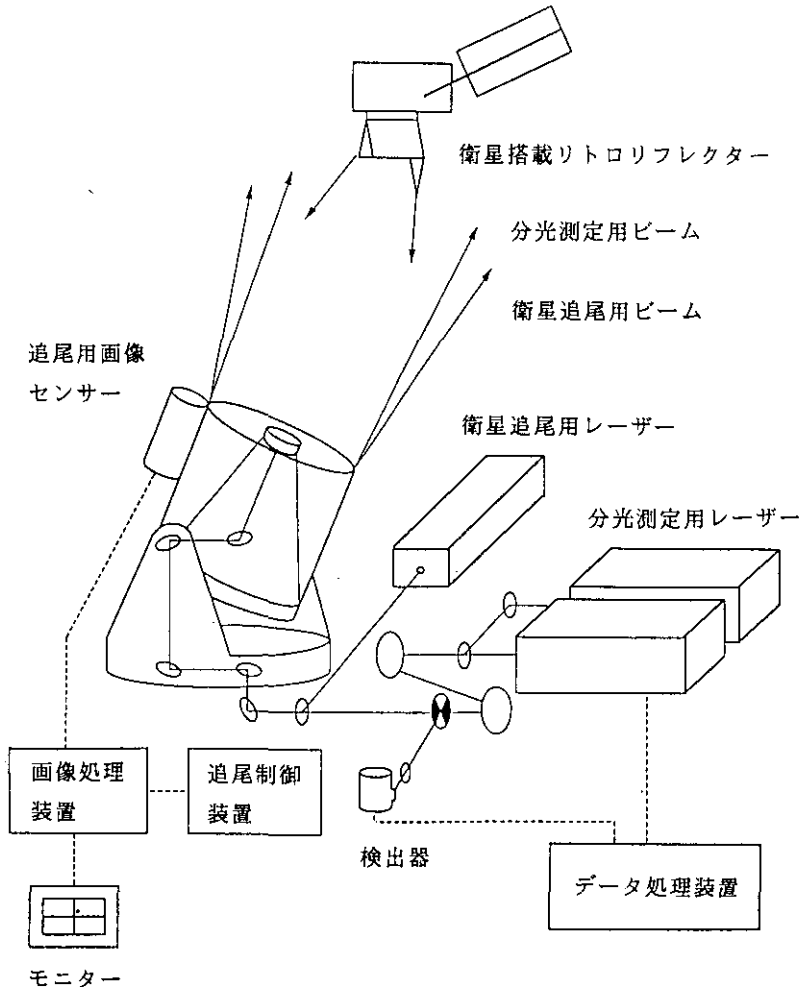


図2 衛星利用レーザー長光路吸収計測手法の概念

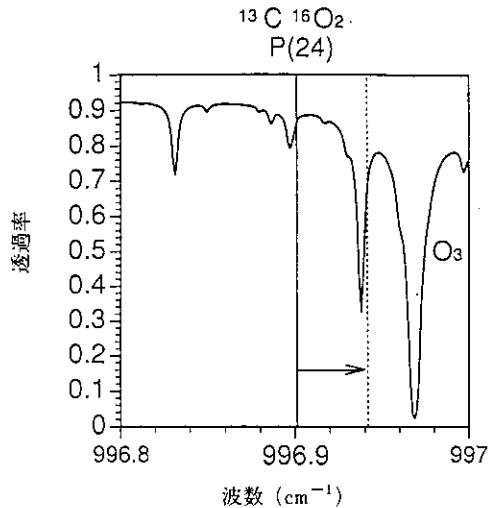


図3 モデル大気の透過スペクトル（地上衛星間片道）とオゾン測定に用いる炭酸ガスレーザーの発振線の一例  
 反射光の波数はドップラーシフトにより、図中に示す領域で変化する。

し、測定に必要な特性が達成できることを確認した。現実的なレーザー出力を仮定して、衛星からの反射光の検出感度を評価した結果、レーザーの1ショットの測定で100以上の高い信号対雑音比が得られることが示された。

一方、測定される吸収スペクトルから測定対象分子の高度分布を求めるためのデータ解析手法について、オゾン为例として最適なアルゴリズムの検討を行った。また、個々の測定対象分子の濃度測定の精度を具体的に評価するために、レーザーの送受信からデータ解析までの全ての過程を考慮したシミュレータープログラムを作成した。現在、これを用いた評価作業を進めている。今後、地上実験及びレーザーヘテロダイン分光計による大気スペクトルの実測データを用いて、吸収線パラメーターの校正と分光計測手法の検証を行う計画である。

### (3) 紫外線による生体防御機能の低下に対するメタロチオネインの防御効果に関する研究

オゾン層の減少に伴う、生体に有害な紫外線（UV-B, 310-280 nm）量の増加により皮膚がん、白内障などの疾患が増加することが危惧されている。UV-Bの照射により、生体が本来備えている生体防御機能の低下が引き起こされることが知られているが、これはUV-Bによる皮膚がんの発症の機序の中で重要な位置を占めると考えられている。UV-Bの線量と皮膚がんのリスクの関係を予測するためには、UV-B線量と生体防御機能の低下の間の量-作用関係、障害作用の紫外線波長依存性（作用スペクトル）、並びにUV-Bの障害作用の機構を明らかにすることが必須の課題である。また同時に、UV-B照射量の増加により生じた生体の障害を、生体防御機能を賦活化することにより回復させることを意図した研究も必要である。我々の研究においては、UV-Bにより引き起こされる免疫機能のかく乱、発がん遺伝子と発がん抑制遺伝子の発現調節の障害、並びにUV-Bの照射で発生する活性酸素による障害作用機構の検討を行っている。同時に、活性酸素に対する防御機能を活性化させることにより、UV-B照射により発生した活性酸素が原因と考えられる障害を軽減させる可能性の検討も行っている。

UV-B照射により発生する活性酸素に対する生体防御機構として、グルタチオン（GSH）等の役割が報告されているが、生体にとって極めて有害な活性酸素に対して生体は二重、三重の防御する機構を備えている。例えば、重金属暴露やストレスに応答して生体内で誘導生成されるタンパク質であるメタロチオネイン（MT）はその一つであると考えられている。そこで本年度は、MT、及びグルタチオンエステルのUV-B照射に対する防御効果を検討した。

UV-Bをヘアレスマウスへ照射すると、まず肉眼的に観察されたのは紅斑であった。さらにUV-B照射後、照射量に依存して炎症性浮腫によると考えられる皮膚組織重量の増加が観察された。すなわち、無処置群の平均重量が0.23gに対して6 kJ/m<sup>2</sup>照射群では0.30g、12J/m<sup>2</sup>照射群では0.42g照射量に依存して有意に増加していた。亜鉛の投与により、重量は0.30gと減少し、無処置群に比べてやや高いが、炎症の抑制効果が認められた。さらに、UV-B照射によりマウスの背部皮膚において非タンパク性SH基並びに総GSH及び還元型GSHの減少が認められた。他方、脂質過酸化の指標であるMDAは、照射量に依存して増加する傾向を示した。亜鉛投与によりMTが増加している条件下、並びにグルタチオンエステル投与により組織中GSHレベルを保つ条件下においては、12 kJ/m<sup>2</sup>の強度のUV-B照射の場合に観察されたMDAの顕著な増加は、有意に抑えられる傾向が判明した（図4）。皮膚組織中のMT濃度は無処理、及びUV-B照射のマウスの間には有意な違いは認められないが、亜鉛投与後照射したヘアレスマウス皮膚でのMTレベルは7～8倍に増加しており、MTの合成が明確に認められた。以上の実験結果は、UV-B照射によって発生することが知られている活性酸素の除去に、細胞中のSH基が関与しており、さらに皮膚で誘導されたMTがUV-B照射による影響を抑えることを示唆している。今後、UV-B照射に対するMTの防御効果についてより詳細に検討を行うと共に、UV-B照射による発がんモデルにおけるMTの効果について検討する予定である。

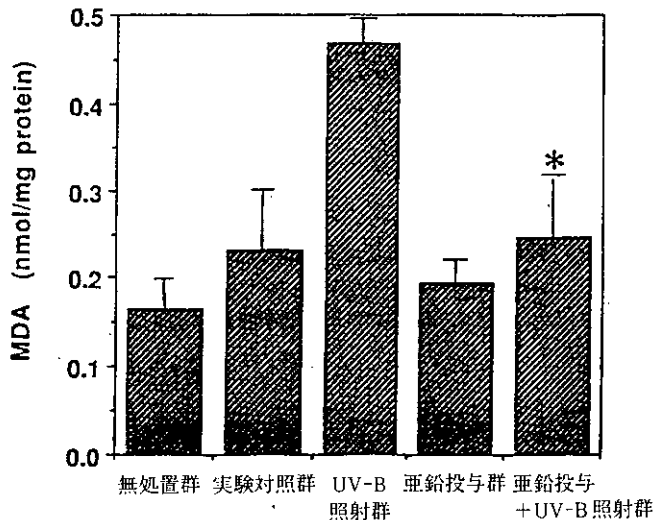


図4 UV-B照射による脂質過酸化に対する亜鉛投与の防御効果



## 2.2 地球の温暖化現象解明に関する研究

### 〔研究組織〕 地球環境研究グループ

統括研究官	秋元 肇
温暖化現象解明研究チーム	○坂東 博・横内陽子・酒巻史郎・野尻幸宏・ 竹中明夫
酸性雨研究チーム	村野健太郎・畠山史郎
森林減少・砂漠化研究チーム	古川昭雄
化学環境部	
計測技術研究室	向井人史
動態化学研究室	田中 敦
大気圏環境部	
部 長	鷺田伸明
大気物理研究室	光本茂記・高薮 縁・花崎秀史
大気反応研究室	今村隆史・三好 明
高層大気研究室	沼口 敦
大気動態研究室	井上 元・泉 克幸・内山政弘
水圏環境部	
部 長	渡辺正孝
生物圏環境部	
環境微生物研究室	高村典子
客員研究員 10名、共同研究員 4名	

### 〔研究概要〕

人口増加と生活の高度化に伴うエネルギー消費の拡大により、人類の活動は地球環境にさまざまな影響を与えている。なかでも地球の温暖化は最も重大な地球環境問題として広く社会の関心を集めている。温暖化の主要因として二酸化炭素の大気中濃度の増加が挙げられるが、メタン・亜酸化窒素・ハロカーボン類・対流圏オゾンといった大気微量成分の濃度も増加し続けていることが知られており、これら物質の持つ温室効果が近い将来において二酸化炭素と同程度に温暖化に寄与する可能性も指摘されている。

二酸化炭素とハロカーボン類の濃度増加の主原因が人為活動であることは明らかであるが、それ以外の温室効果気体に関しては、その発生源の把握も十分ではなく、大気中濃度増加の原因については不明の部分が多い。また、濃度増加の原因の分かっている二酸化炭素に関しても、現在の知見から推定される大気からの除去量と放出量とから計算される大気中残存量は、現実に観測されている大気中濃度の増加量に比べて高い値となっており、その収支が明らかになっていない。このように、温暖化の原因である温室効果気体の動態—すなわち発生・輸送・変質・除去の過程—の把握という入り口の問題ですら未解明のままに温暖化の将来予測がなされているのが現状である。また、温室効果気体の動態把握・濃度変動の将来予測が可能になったとしても、それにより引き起こされる気候変動を定量的に評価するためには、気候を支配している物理過程、たとえば放射伝達、雲の生成・消滅にかかわる物理過程、大気—陸域、大気—海洋間相互作用等が定量

的に記述できなければならない。さらには、地球の温暖化が進行した場合に、温室効果気体の放出量の変化や、雪氷・雲量変化による地球のアルベドの変化といったフィードバック効果についても定量的な評価が必要である。地球温暖化現象の解明では、温室効果気体濃度の増加とそれによる気候変動の発現機構について未解明のまま残されているこれらの問題に関して明らかにすることが急務の課題である。

当研究所では、環境庁の地球環境研究総合推進費における地球の温暖化現象解明分野において、以下に掲げる(1)～(5)の課題を平成2年度より開始し研究を行っている。また平成3年度より新たに(6)、(7)の課題を開始した。本報告では、各研究課題の中で当研究所が行っている研究概要を以下に紹介し、〔研究成果〕において平成3年度の研究実施状況ならびに研究成果の一部を述べる。

### (1) 温室効果気体等の組成・濃度の時間的・空間的変動の動態解明に関する研究

温室効果気体には二酸化炭素やメタンのようにそれ自身が放射活性な気体(直接的温室効果気体)と、大気中の反応を通して直接的温室効果気体の生成・消滅に影響を与えることによって間接的に温室効果をもたらす気体(反応性温室効果気体)が存在する。メタンは直接的温室効果気体でもあるが、非メタン炭化水素、一酸化炭素、窒素酸化物と共に大気中の一連の光化学反応により大気中OHラジカル濃度を左右して他の直接的温室効果気体の寿命に影響を与え、また直接的温室効果気体の一つである対流圏オゾンの生成に影響する。また、有機硫黄化合物は大気中での反応により硫酸を生成し、その硫酸はエアロゾルとなったり雲凝結核となって大気の温室効果に大きな影響を与える。1992年のIPCC補足報告書ではこれら反応性温室効果気体による間接的温室効果の重要性が指摘されながら、科学的知見の不足から定量的な評価は見送られることとなった。本研究では、このような反応性温室効果気体の大気中での時間的・空間的変動を明らかにすることを通して大気的光化学反応活性を見積もり、間接的温室効果の解明を目的とする。

本年度は、前年度に検討した各種の反応性温室効果気体の測定方法と大気採取方法に基づき、以下の観測・研究を行った。

- ・日本近傍のバックグラウンド地域における炭化水素類濃度の季節変動
- ・西太平洋・日本周辺海域上空における炭化水素類・窒素酸化物の空間分布(航空機観測)
- ・ジメチルサルファイドの大気中濃度とその変動

### (2) メタン・亜酸化窒素の放出源及びその放出量の解明に関する研究

近年になって、世界のバックグラウンド地域におけるメタン・亜酸化窒素濃度の経年的な観測結果から、それらの大気中濃度は増加し続けており、その毎年の増加率が各々約1.0、0.3%であることが明らかになってきている。しかし、それらの増加の原因となると、放出源の多様さ、個々の放出源ごとの不均一性による変動幅の大きさ等の複雑さから、一致した見解が得られるに至っていない。したがって、推進費における本研究課題では自然及び人為的過程で生成するメタン及び亜酸化窒素の各種放出源における発生メカニズムや動態、計測手法、放出変動及び放出源別の大気への放出量評価を明らかにすることを目的としている。

メタン・亜酸化窒素の主要な放出源と考えられているものの内、当研究所においては次の放出源

- ①森林火災や焼畑農業といったバイオマス燃焼過程
- ②湿地・湖沼・内湾といった閉鎖性水域

からの発生機構の解明及び放出量評価を目的とするサブテーマを平成2年度より開始した。本年度は、以下の研究を行った。

- ・ 燃焼炉実験による各種バイオマス燃焼排ガス中の気体成分の組成分析 (サブテーマ①)
- ・ 霞ヶ浦における湖水中メタン濃度の季節変動と変動要因の解明及び大気中へのメタン放出量の推定 (サブテーマ②)

### (3) 温室効果気体等の大気化学反応過程の解明に関する研究

大気中微量成分気体には二酸化炭素やメタンのようにそれ自身が放射活性な気体 (直接的温室効果気体いわゆる温室効果気体) と、大気中の反応を通して直接的温室効果気体を生成したり、その大気中寿命に影響を与えることによって間接的に温室効果をもたらす気体 (反応性温室効果気体) が存在する。大気中に放出された気体がどの程度温暖化に寄与するかはその気体の対流圏寿命や他の温室効果気体 (例えば対流圏オゾン) の生成効率など大気中での化学反応に依存する。すなわち温暖化への寄与を見積もるには温室効果気体の大気中寿命にかかわる大気化学反応速度定数の正確な決定や、反応性温室効果気体の生成に関わる大気反応の機構の解明と反応速度の正確な決定が不可欠である。以上のような観点から、本研究課題では2つのサブテーマ

①大気中での光化学反応機構の解明

②大気中での反応速度の測定

の下に、本年度は以下の研究を行った。

- ・ 自然起源炭化水素からの地球規模一酸化炭素放出量の実験的推定 (サブテーマ①)
- ・ 代替フロン物質の大気光酸化反応分解生成物の同定と分解機構 (サブテーマ①)
- ・ 反応速度定数決定のための実験手法の高精度化・高感度化 (サブテーマ②)

### (4) 海洋における炭素の循環と固定に関する研究

海洋と大気は海面を通じた気体交換によって、およそ  $100 \times 10^{15}$  gC/y の二酸化炭素をやりとりしているが、吸収、放出の差分としておよそ  $2 \sim 3 \times 10^{15}$  gC/y の二酸化炭素の正味の吸収があるとされている。しかし、その直接的な証拠がないのが現状である。海洋が吸収している二酸化炭素の正味の量を明らかにすること、環境条件の変化で起こるであろうその吸収能の変化を見積もることが、今後続くであろう二酸化炭素の人為的放出に対する海洋の応答として研究されなければならない点である。

当研究所においては、本研究課題で海洋における重要なプロセスの内

①植物プランクトンの二酸化炭素固定能とその環境因子依存性

②表層海水からの正味の炭素除去量とその深層海水中の分解過程

の解明を目的とするサブテーマを平成2年度より開始した。本年度は特に以下の研究を行った。

- ・ 窒素、リンの各制限因子のコントロールによる植物プランクトンの炭素固定実験 (サブテーマ①)
- ・ 海洋沈降粒子の化学形態、生成年代、陸起源物質の寄与解明のための化学分析手法の開発 (サブテーマ②)

### (5) 陸上生態系における炭素循環機構の解明に関する研究

陸上生態系では、植物の光合成作用による大気中の二酸化炭素の固定のほか、植物自身による呼吸、植物遺体の微生物による分解などのプロセスによる二酸化炭素の再放出が営まれている。

炭素の蓄積量としても、出入りのフラックスの大きさとしても、陸上生態系は地球レベルの炭素循環系のなかで重要な位置を占めているが、残念ながら、その定量的な把握はいまだ不十分であり、これまでに提出された見積もりはいずれも大きな不確定性を含むものである。

陸上生態系が、大気中の二酸化炭素の上昇と、それに伴う気候の変化にどのように応答するのだろうか。また、その結果、二酸化炭素濃度と気候システムにどのようなフィードバック効果を及ぼし得るのだろうか。これらの問いに正確に答えるためには、陸上生態系の炭素収支の現状をはじめ、多量の基礎データの地道な集積が必要である。

本研究の目的は、陸上生態系の炭素収支の解明の一環として、日本の冷温帯に分布する森林に調査地を設けて、その地点の炭素収支の解析を行うことである。

平成2年度には、おおよその調査地域の選定を行ったが、平成3年度には、調査区の設定・基礎的な植生調査・有機物の動きを測定するための諸器材及び環境測定機器の設置等を行い、適宜測定を開始した。平成4年度には、融雪直後から測定を開始し、年間を通しての炭素の動きを把握する予定である。

#### (6) シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究

シベリア・アラスカ・カナダ・グリーンランドなどに存在する永久凍土地帯は地表の20~30%を占める。これらの地域では、厳しい環境にもかかわらず針葉樹林があり南部では農業も行われている。この森林や草原で固定された炭素は、小動物や腐敗細菌の活動が低いため、特に夏季に広く出現する湿原では腐敗せず、大量に蓄積され泥炭化する。このため、凍土地帯は二酸化炭素の大きな吸収源となっていると予想される。一方、シベリア中央部は近年温暖化により凍土氷解、地盤の軟弱化、倒木の増加を招いており、裸地化がさらに凍土の氷解を招いている。このため、大量に蓄積された腐植が嫌気性細菌により分解され、メタンとして大量に大気中に放出されている可能性がある。また、凍土深層部にあるメタンハイドレイドの氷解によるメタン発生の可能性も指摘されており、実際露出している氷の中に大量のメタンが含まれているという報告もある。

したがって、これらの地域が温暖化に対する効果・温暖化のフィードバック効果で果たす役割は大きいと予想され、それらの定量的な評価を行うことは重要である。このような観点から、平成3年度より本研究課題を開始し、当研究所では以下のサブテーマを中心に研究を開始した。

- ①メタン濃度の測定と放出量の評価に関する研究
- ②二酸化炭素濃度の季節変動の測定と二酸化炭素収支に関する研究

研究のフローを図1に示す。

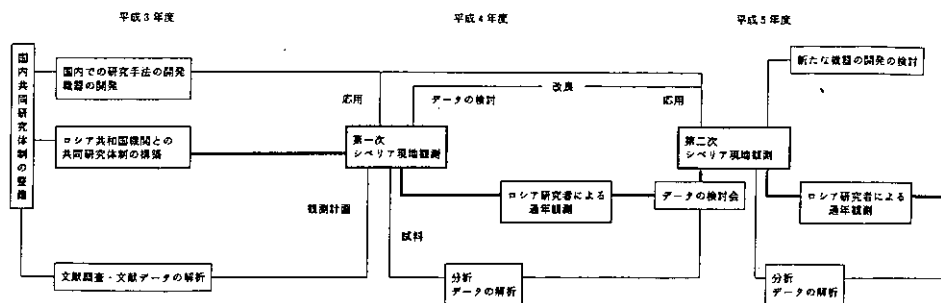


図1 シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究

## (7) 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

二酸化炭素その他の温室効果ガスの増加に伴い、地表面近くの大気温度の上昇、降水分布・乾燥度の変化等の気候変動がもたらされることが予測されている。その気候変動が人類の生活・産業にとって好ましくない影響を及ぼすことが懸念され、二酸化炭素の排出量を制限するなどの対応策が議論されている。しかし、その基礎となるべき気候変動予測には多くの不確実性が残されている。したがって、信頼できる予測を与えるような優れた気候モデルの開発を行うことが緊急に必要な課題である。

現在の気候モデルにおいて気候予測の不確実性をもたらしている大きな要因としては、海洋循環過程、種々の陸地面過程、及び雲に関連した諸過程等の取扱いの不十分さがあげられる。

そこで、精密な気候モデルの開発と気候システムの諸過程の解明を目的として平成3年度より本研究課題を新たに開始した。本研究課題では、以下のサブテーマ

### ①気候モデルの開発・改良に関する研究

### ②気候変化に係わる雲の大気物理過程の解明に関する研究

を設定し、研究を行った(サブテーマ②は平成2年度に1研究課題として開始されていたものを、本研究課題のサブテーマとして組替えたものである)。研究のフローを図2及び図3に示す。

## 〔研究成果〕

各研究課題ごとに平成3年度における研究の実施状況と、得られた成果のうち重要なものについてその内容を以下に紹介する。

### (1) 温室効果気体等の組成・濃度の時間的・空間的変動の動態解明に関する研究

日本近傍のバックグラウンド地域における炭化水素類濃度の季節変動：反応性温室効果気体のうち特にメタン・非メタン炭化水素の対流圏大気中での動態を明らかにすることを目的として、日本近傍のバックグラウンド地点と想定される、北海道納沙布岬、小笠原母島、沖縄県石垣島北部の3か所で大気採取を実施して炭化水素類の季節変動調査を行った。いずれの炭化水素類も光化学反応活性の高い夏季に濃度が低く、冬季に高い季節変動を示す。平成3年夏季の炭化水素濃度の測定から得られた大気中の光化学反応(OHラジカルとの反応)に対する寄与見積もりは、メタンの寄与を1とした場合、非メタン炭化水素全体による寄与は納沙布、小笠原、石垣で各々0.57、0.23、0.24であった。このように、バックグラウンド地域においても非メタン炭化水素の光化学反応活性への寄与がかなり高いことが分かった。今後、温室効果気体の対流圏寿命や大気反応による2次生成を考える場合、非メタン炭化水素の存在と役割を考慮する必要がある。

西太平洋・日本周辺海域上空における炭化水素類・窒素酸化物の空間分布：平成3年9～10月にアメリカ航空宇宙局(NASA)によって実施された西太平洋地域の大規模航空機観測(PEM-West)に参加して日本及び中国大陸の周辺海上、グアム島近傍の熱帯域で炭化水素類の空間分布調査を実施した。また、この航空機観測と一部共同観測の形で同時期に当研究所が中心になって行った東アジア航空機調査国際共同研究(PEACAMPOT)のなかで、日本周辺海域上空における炭化水素類及び窒素酸化物等反応性温室効果気体の空間分布の測定を行った。

ジメチルサルファイド(DMS)の大気中濃度とその変動：前年度実施した西太平洋上の大気調査により、大気反応がDMSの重要な消失過程となっていること、及びその反応により生成するメタンスルホン酸(MSA)は北半球高緯度域で相対的に高濃度となるという結果を得た。本年度はこのDMSの変動要因を検討するため、定点(当研究所大気モニター棟)における連続観

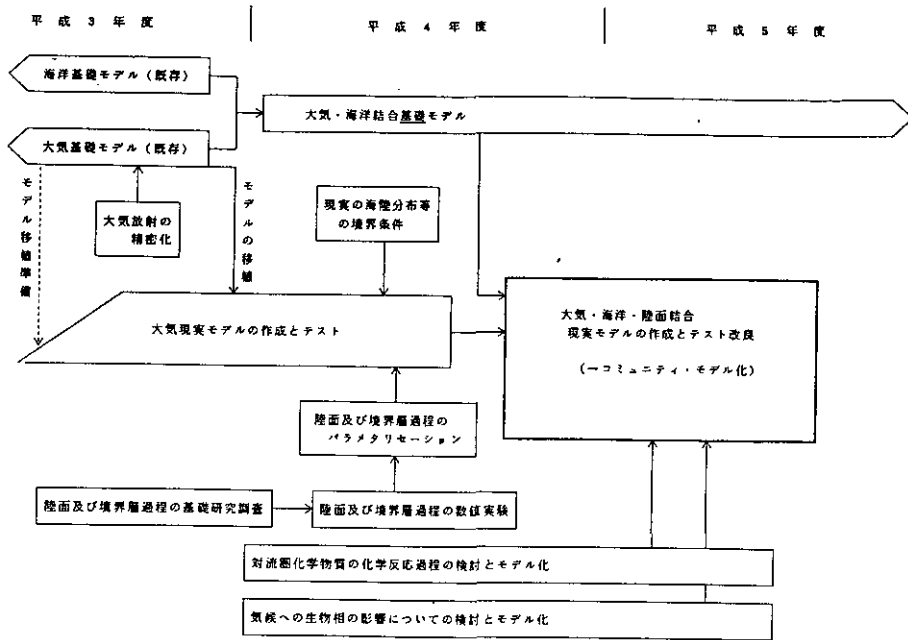


図 2 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

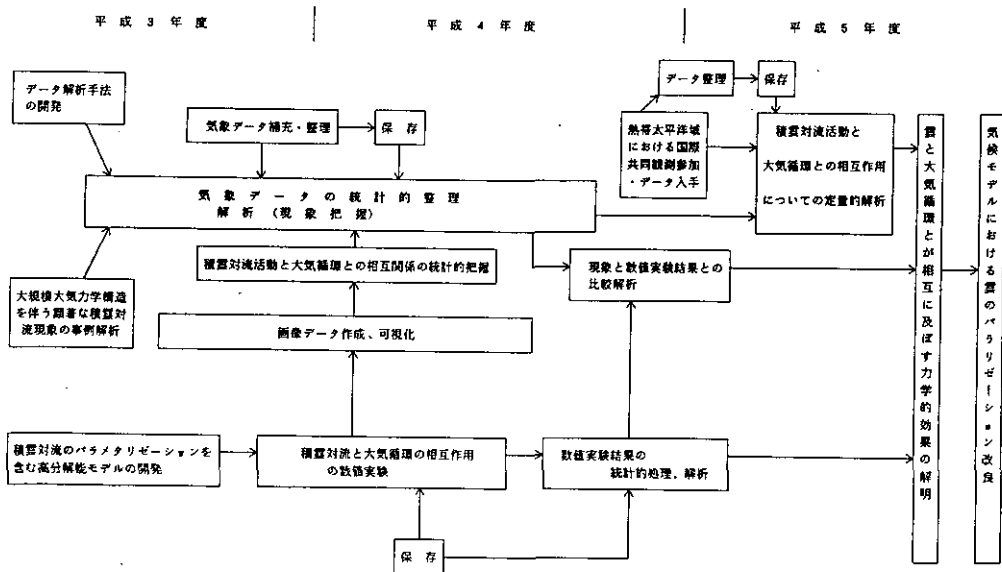


図 3 気候変化にかかわる雲の大気物理過程の解明に関する研究

測 (7~12月)を行った。測定結果の例をオゾン濃度及び気温(モニター棟の常時監視データ)と共に図4に示す。この地域における大気中DMS濃度は日中より夜間の方が高くなる傾向があり、また、オゾンとの強い負の相関を示した。つくばの地理的關係からは海風となる東-南風の際に高濃度のDMSが出現すると予測されたが、DMS濃度と風向との間には顕著な相関は見られ

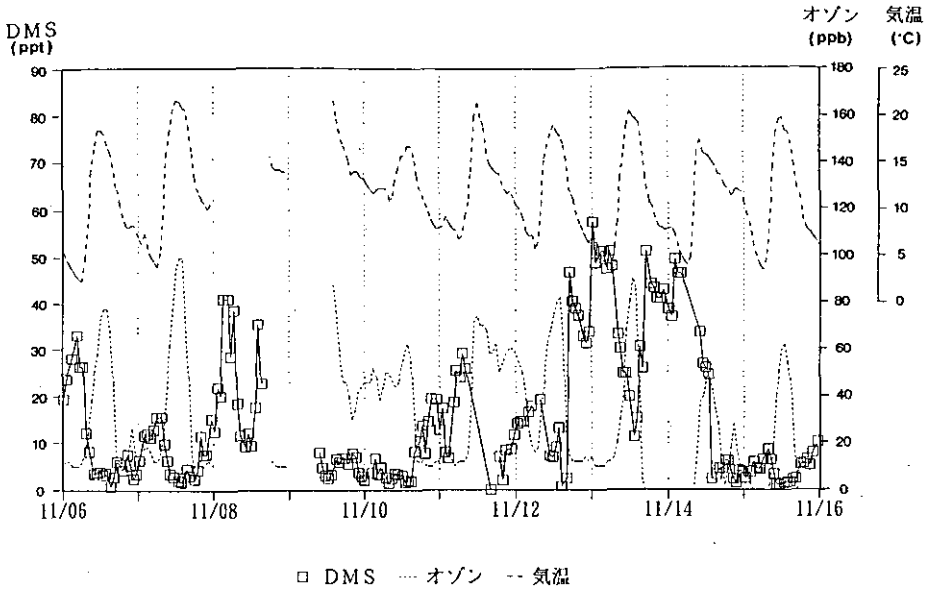


図4 つくば(国立環境研究所大気モニター棟)における大気中ジメチルサルファイド(DMS)とオゾン濃度の日変化の比較(1991年11月6~16日)

なかった。このことは海洋以外にDMSの重要な発生源のあることを示唆するもので、具体的には土壌や植物等が考えられる。DMSの発生源としての土壌の役割を調べるために、土壌中DMSの測定を行った。DMSのように揮発性の高い物質の土壌中濃度を調べるために土壌試料の加熱気化を用いる新しい採取法を開発した。この方法を用いて当研究所内の数種類の土壌を分析した結果、DMSの存在量は土壌1g当たり数ngで、これは海水中のDMS濃度に匹敵するもので、地球上のDMS発生源として土壌も重要であることが示唆された。

## (2) メタン・亜酸化窒素の放出源及びその放出量の解明に関する研究

燃焼炉実験による各種バイオマス燃焼排ガス中の気体成分の組成分析：バイオマス燃焼からのメタン(CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)の放出量を評価するためには、バイオマス燃焼で放出される各種微量成分気体の濃度を測定し、各成分の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)に対する相対的な排出原単位を求めることは重要である。本年度は、燃焼実験装置を用いて日本における代表的な燃焼バイオマスである赤マツ、稲ワラ、モミ殻について燃焼実験を行い、燃焼排ガス中のCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、一酸化炭素(CO)、窒素酸化物、C<sub>2</sub>~C<sub>4</sub>の非メタン炭化水素(NMHC)について分析を行った。燃料中の炭素分の内約75~99%はCO<sub>2</sub>として排出され、低温燃焼条件ではその割合は75~87%程度の範囲で比較的一定した割合を示す。CO<sub>2</sub>に次いで比率の高い含炭素気体成分はCOで、CH<sub>4</sub>の占める割合は2%以下であった。また、①CH<sub>4</sub>は低温燃焼状態で発生比率が高く、逆にN<sub>2</sub>Oは高温の火炎燃焼条件下で発生比率が高くなる、②含水量の多いバイオマスほどCH<sub>4</sub>、CO、NMHCの排出量が多い、③稲ワラ、モミ殻ではCOの発生比率が赤マツに比べ非常に高い、④赤マツではNMHCの排出量が多い、といった特徴が明らかになった。

霞ヶ浦における湖水中メタン濃度の季節変動と変動要因の解明及び大気中へのメタン放出量の推定：天然湿地を含む水域は、世界のメタン放出の約2割を占める大きな発生源である。我が国

の水域からのメタン放出量はわずかであるが、水域におけるメタン生成現象とその分解過程を明らかにする研究は、熱帯・寒帯域が大きな面積を占める湿地からのメタン放出現象の解明に対し有効な知見をもたらす。本研究では、霞ヶ浦を対象水域として湖水中メタン濃度の観測を中心に研究を行った。観測は1990年4月より毎月継続し、現在までで2年間の濃度変動を得た。1990年と1991年の湖水中平均濃度のピークはいずれも夏季から秋季にかけて現れ、各々234及び1023 nMで4倍程度の差があった。ただしその他の季節の水中メタン濃度及びその変化パターン、すなわち春の比較的低い濃度、夏の終わりから秋の初めの高い濃度、11月の最低濃度、冬の比較的高い濃度という周年変動パターンに再現性があることが確かめられた。

濃度データと水温・風速（当研究所霞ヶ浦臨湖実験施設での観測値）を用いて、水面から大気へ拡散するメタンフラックスが算定できた。霞ヶ浦からのメタンフラックスの年平均値は1990、1991年度で、各々1.1、2.0 gCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/yであり、我が国の水田からの面積当たりのフラックスより約1桁小さな値であった。

メタン濃度の変動の原因を明らかにするために、湖水中のメタン酸化速度を月ごとに測定した。水中のメタン酸化速度は3～6月の間極めて小さく、この間は実質的に湖底質で生成したメタンが水中で消滅することなく大気に放出される。7月以降は水中のメタン酸化活性が高まり、水中でのメタン酸化分解量が増加する。図5に、湖水中の酸化分解量と大気への拡散量の算定値を示した。この両者の和が底泥からのメタン放出量を表すと考えている。これらの結果から、富栄養湖沼である霞ヶ浦では、7～9月の生物生産量の大きな時期には湖底質で24～41 mg/m<sup>2</sup>/dという水田と大差のないメタン生成があるが水中での酸化によって大気へのフラックスがあまり大きくならないこと、11月のメタン濃度の著しい低下はメタン生成量の減少と低下しない酸化活性の両者の効果であることが分かった。また、冬期の濃度上昇は水温の低下による大気への拡散フラックスの減少が影響していることも明らかとなった。

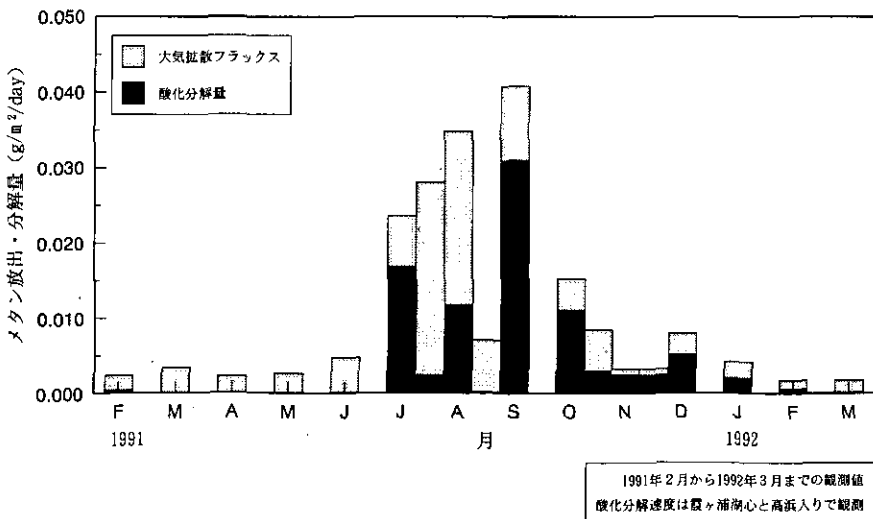


図5 霞ヶ浦におけるメタン生成と除去過程（湖水中での酸化分解量と大気への拡散フラックス量）



### (3) 温室効果気体等の大気化学反応過程の解明に関する研究

自然起源炭化水素からの地球規模一酸化炭素 (CO) 放出量の実験的推定：地球温暖化をもたらす大気中物質のうち、メタンに代表される炭化水素類の主要な除去過程は、「大気の掃除屋」である OH ラジカルとの反応である。近年の大気中メタンの増加は、その放出源の増加のみでは説明できず、化石燃料燃焼から放出される CO によって「掃除屋」OH ラジカルの減少がもたらされている可能性が指摘されている。図 6 に大気中の CO 濃度が増加したときに推定されるメタン濃度増加の加速の様子を示す。このような大気中の光化学反応の変化を解明する上で、大気中への CO の放出量の推定は重要な鍵を握っている。現在、自然起源炭化水素（主としてイソプレン・テルペン）からの CO 放出量は、化石燃料の燃焼による放出量と同程度かそれ以上と推定されており、その正確な見積もりが必要とされている。本研究では、一昨年度に当研究所で行われたテルペンからの CO 放出量の推定に引き続き、イソプレンからの CO 放出量の実験的推定を行った。

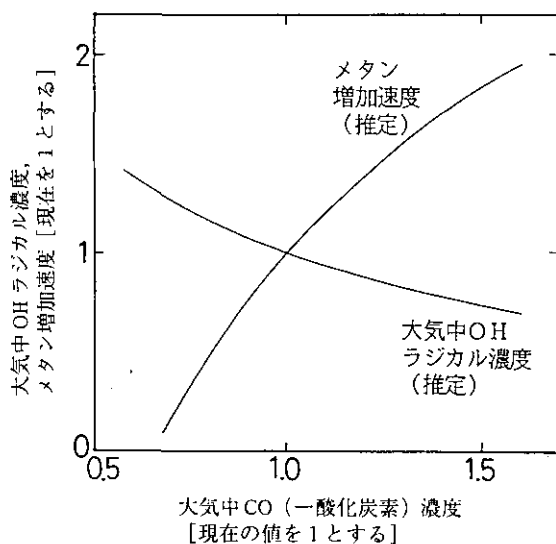


図 6 大気中への一酸化炭素 (CO) 放出がもたらすメタン濃度増加の加速 (推定)

実験は光化学チャンバー装置を用いて行った。実験条件の違い [反応中間体である  $RO_2$  ラジカルが、a) 主として一酸化窒素 (NO) と反応する場合、b) 主として  $HO_2$  ラジカルと反応する場合] によってイソプレンの光酸化の機構は大きく異なることが見いだされた。イソプレンからの CO 生成は、a) の条件下で 50% (炭素数比)、b) の場合で 10% (炭素数比) であることが実験的に明らかにされた。この結果は実大気中での CO 生成量の上限及び下限を与えるものである。この結果と大気中の NO 及び  $HO_2$  ラジカルの濃度の推定値を用いることにより、実大気中でのイソプレンの光酸化による CO 生成量が推定された (39% [炭素数比], 137 TgC/yr)。一昨年度得られた、テルペンからの推定 CO 放出量との和は Logan らによる自然起源炭化水素からの推定 CO 放出量とよく一致している (表 1)。本研究によって実験的に、より精度の高い推定値を得ることができたと考えられる。

表1 自然起源炭化水素からの地球規模 CO 放出量

炭化水素	年間放出量 <sup>a)</sup> (TgC/y)	CO 放出量 (TgC/y)
イソプレン	350	137 <sup>b)</sup>
テルペン	480	96 <sup>c)</sup>
		合計 233
		(Logan ら <sup>d)</sup> による推定値: 240)

a) Zimmerman ら [Geophys. Res. Lett. **5**, 679(1978)]

b) 本研究

c) 島山ら [J. Geophys. Res. **96**, 947(1991)]

d) Logan ら [J. Geophys. Res. **86**, 7210(1981)]

代替フロン物質の大気光酸化反応分解生成物の同定と分解機構: 分子内に水素を含むハロカーボン (HCFC) はフロン代替品として今後その使用が考えられているが, HCFC 自身のみならずその対流圏大気中での分解反応生成物も温室効果を持つことが懸念されている。前年度の研究において, 光化学反応チャンバーを用いた模擬大気反応実験から, 類似の HCFC であってもタイプの異なる分解生成物を与えることを見いだした。本年度は, HCFC の種類による分解機構の違いを明らかにすることを目的として類縁ハロカーボン類の分解反応を系統的に調べた。-CHCl<sub>2</sub>基を持つ一連のハロカーボン, HCFC-123 (CHCl<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>), -122 (CHCl<sub>2</sub>CClF<sub>2</sub>), -121 (CHCl<sub>2</sub>CCl<sub>2</sub>F) と, ペンタクロロエタン (CHCl<sub>2</sub>CCl<sub>3</sub>) について分解実験を行った。HCFC-123 では, 分子骨格の C-C 結合を残したままの分解生成物を収率 100% で与えるのに対して, 分子内の Cl 原子数が増えるに従って (すなわち, -123, -122, -121, ペンタクロロエタンの順に) C-C 結合が切れた生成物の収率が高くなること分かった。この傾向は, C-C 結合の切れる反応の反応熱変化の傾向とよい一致を示した。

反応速度定数決定のための実験手法の高精度化・高感度化: 大気中に放出された気体の消滅過程として重要な OH ラジカルとの反応速度定数決定の高精度化を目的として, cw-リング色素レーザーを用いたレーザー光分解-レーザー誘起蛍光法の開発を行った。開発された手法を大気反応として重要な反応系 OH+CO→H+CO<sub>2</sub> に適用し, 反応速度定数の測定を行い, 従来の手法 (5%) に比べ高精度化 (1%) されたことを確認した。また, 汎用的でかつラジカルの選択的検出が可能な光イオン化質量分析法の改良に取り組み, 約 100 倍の高感度化に成功した。この改良により, メタンの光酸化反応で重要なステップである CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub>+NO 反応の速度の直接測定が可能となった。反応速度定数が直接測定できた結果, 従来間接法によって求められていた値より 30% 大きな値であることが見いだされた。

#### (4) 海洋における炭素の循環と固定に関する研究

窒素, リンのコントロールによる植物プランクトンの炭素固定実験: 本研究では, 大気-海洋間での二酸化炭素の移動及び植物プランクトンの光合成による炭素固定を, 環境因子を制御した実験系で再現し炭素の動態を詳細に把握することを目的としている。本年度は大型純粋培養装置を用いて植物プランクトン (供試藻類: *Chattonella*) を培養し, 増殖に伴う細胞内炭素・窒素・リン及び溶存態窒素・リン及び pH, 全炭酸の計測を 1 日 1 回行った。同時に大気部 CO<sub>2</sub> 濃度を

連続的に測定した。細胞増殖に伴って昼間は光合成により大気部  $\text{CO}_2$  濃度の減少、pH の上昇が観測されるとともに、夜間は細胞の呼吸による大気部  $\text{CO}_2$  濃度の上昇が測定された。細胞増殖は溶存態無機炭素・窒素・リン濃度比により最小元素の制限により停止した。さらに植物プランクトンの増殖に伴う炭素・窒素・リン循環モデルを開発し、本実験結果との検証を行った。窒素・リン制限条件の場合、本モデルは実験結果をよく再現していることが判明した。

海洋沈降粒子の化学分析手法の開発：サブテーマ②では、海洋深層水への炭素の正味の移行量であるところの炭素を含む粒子状物質の鉛直輸送過程を解明することを目的としている。そのために、西部太平洋の外洋域で深度別に時間系列的に沈降粒子を採取する実験を始めた。粒子に含まれる炭素及び他の元素の存在量、存在形態を化学分析すると、沈降に伴う粒子の分解過程や、陸域からもたらされる物質の水平輸送状況が解明され、海洋炭素循環の理解を深める情報が得られる。実際の試料採取には観測船の利用と組織的作業が必要で、本研究では東京大学海洋研究所、名古屋大学水圏科学研究所との共同作業、共同分析で研究を行っている。本年度は、1) 粒子の化学形態分析のための表面分析手法の応用研究、2) 粒子の沈降過程の解明のための放射性同位元素の分析研究、3) 炭素同位体の分析による粒子の生成年代推定の研究を行った。主な試料として、日本海溝を含む日本近海の沈降粒子捕集装置で得たものを用いたので、陸起源物質の寄与の状況とその時間的な変化を示す証拠が得られた。1992 年秋に、2 年間係留してある西部太平洋赤道域の捕集装置を回収し、外洋域での沈降粒子束とその化学組成に関する分析を行って、海洋炭素循環とのかかわりを明らかにする。

#### (5) 陸上生態系における炭素循環機構の解明に関する研究

冷温帯林（奥日光落葉広葉樹林）における有機物のフラックスと存在量に関して栃木県奥日光の標高約 1500 m に成立している落葉広葉樹林内に広さ 1400  $\text{m}^2$  の調査区を設定して、基礎的な植生調査、有機物の動きを測定するための諸器材の設定、環境測定機器の設定等を行い、適宜測定を開始した。1991 年は、機器の設定等を行いながらの測定であったため、年間の炭素収支を完結した形で示す段階には至っていないが、以下のような基礎データが得られた。

生物体の現存量の推定：調査区内の高木すべてに標識を付して地図上に記録し、その種名及び胸高直径を測定した。胸高断面積は調査区面積のはほぼ 1% であった。

有機炭素量の推定：林床に多数見られる、分解過程にある倒木すべてに標識を付して地図上に記録した。現在の高木とほぼ同じ程度の本数の倒木があることから、倒木が完全に分解までに要する時間は、高木の寿命と同程度、すなわち 100~200 年ほどであろうと推察される。

調査区の一部、300  $\text{m}^2$  の区画に分布する、太さ 1 cm 以上のすべての落枝を回収し、その乾燥重量の測定と炭素含有率の分析を行った。1 年後に再び落枝量を調べ、1 年間に新たに供給された落枝の量を求める予定である。

炭素フラックスの推定：高木及びササの落葉・落枝の速度を求めめるため、開口面積 0.5  $\text{m}^2$  のネットを作成して調査区内の 10 点に配置し、適宜、ネット内の落葉・落枝を回収して乾燥重量の測定、炭素含有率の分析を行った（表 2）。

土壌の物理環境の測定：土壌中に含水量及び温度センサーを埋設して無雪期を通じて連続測定を行った。高木層が鬱閉した状態では、土壌はほぼ常に湿潤な状態にあり、土壌での有機物の分解が乾燥によって抑えられることはほとんどないだろうと推察される。

表2 奥日光の落葉広葉樹林で測定した有機物のフラックスと存在量

	乾燥重量 (g/m <sup>2</sup> )	サンプル数	変動係数 %	炭素含有率 %	炭素量 (g/m <sup>2</sup> )
調査期間(1991年5~11月)中のフラックス					
高木の落葉速度	268.7	0.5m <sup>2</sup> ×10	20.2	46.3	124.3
高木の落枝速度 (径<1cm <sup>2</sup> )	56.7	0.5m <sup>2</sup> ×10	85.5	48.5	27.6
地表に分布する有機物の存在量					
中, 大型落枝	99.7	100m <sup>2</sup> ×3	20.1	48.4	48.2
ササ起源の植物遺体	207.6	0.5m <sup>2</sup> ×10	52.0	48.0	99.6

### (6) シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究

本研究課題は外国(シベリア)でのフィールド研究が中心であることから、外国側との共同研究体制を構築することや現地予備調査等の研究準備が必要である。本年度は、本研究課題の開始年度であり、このような研究準備を中心に研究課題の推進が行われた。

共同研究体制の構築：1) 1991年5月に北海道大学低温科学研究所を訪問したソ連科学アカデミー(当時)凍土研究所所長、副所長両氏と、研究協力の可能性について協議を行った。2) 1991年10月に当研究所から研究者がロシア共和国サハ自治共和国ヤクーツクを訪問し、研究協力の具体的な内容について協議し、合意文書を作成した。3) 1992年3月にロシアから凍土研究所所長他が来日した際、国立環境研究所との間で研究協力の合意文書に署名し、共同研究の体制が確立した。

予備現地調査：1991年10月の環境研究所研究者のヤクーツク訪問の際、シベリアの凍土地帯の現地予備調査を行った。シベリア凍土地帯におけるメタン、二酸化炭素の環境濃度・発生量等に関する従来の研究状況・データについての情報収集を行った。その結果、この地帯における両気体の研究例は極めて少なく、また問題点も多いことから、この地域にガスクロなどメタン分析器を持ち込み、高精度の測定を通年行うことができるならば、それは初めての測定といってもよく、地球環境問題に対する貢献が大きいことが分かった。さらに、現地観測実施に当たっての物資調達・電力・輸送等の条件について問題点の洗い出し及び検討を行った。

### (7) 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

気候モデルの開発・改良に関する研究(サブテーマ①)では、簡単な大気物理過程を含む大気モデルのテスト及び陸面過程の表現の改良を行った。

簡単な大気物理過程を含むモデルのテスト：比較的簡単な大気物理過程を組み込んだ大気大循環モデル(GCM)を作成し、海面水温等の平均的な観測値を境界条件として与えて時間積分を行い、その結果を検討した。モデルの基本的な部分には大きな問題がないことが確認されたが、大気放射過程、陸面過程等の表現が不十分であるため、定量的な結果にはまだ多くの問題がある。例えば7月の降水量においては、ヒマラヤ、インドネシア、サヘル付近等で過多となっており(図7)、今後の改良が必要である。

陸面過程の表現の改良：地中の熱伝導、土壌水分の変化等が考慮された陸面過程モデルを作成し、1次元モデルによるテストを行った。

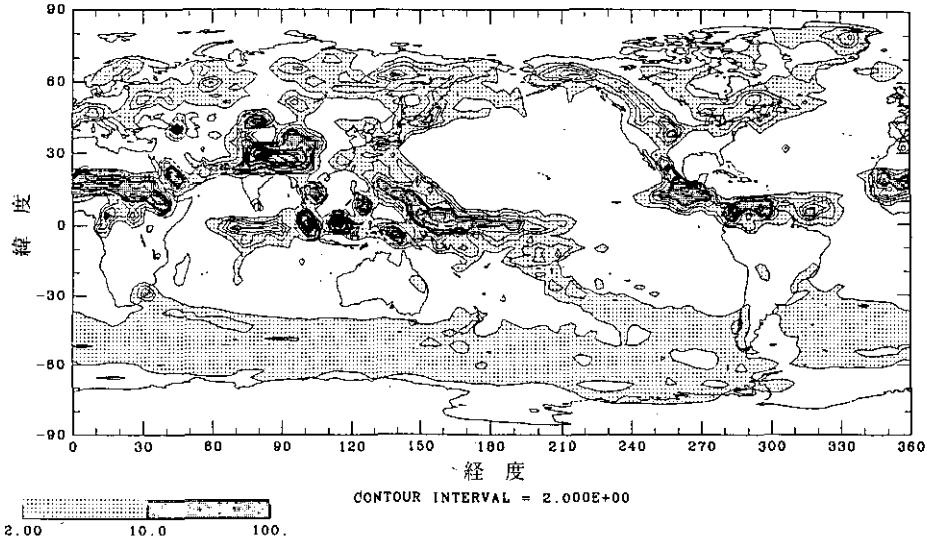


図7 モデルで計算された7月の降水量の分布 (単位: mm/d)

気候変化にかかわる雲の大気物理過程の解明に関する研究(サブテーマ②)では、衛星データを用いた現象解析と、高分解能大気モデルを用いた数値実験を行った。

衛星データを用いた現象解析: 熱帯太平洋域は大陸分布の影響により東西風分布や海面水温等の平均状態が経度方向に大きく異なる。本研究では、大気・海洋の平均場(気候)状態の相違に伴う熱帯海洋上における数千 km の積雲-大気擾乱結合システムの力学構造の特性の変化について気象衛星観測による雲及び全球気象データ(1980~1989年の6~8月期)を用いて調べた。観測データから平均的な擾乱の特性を経度帯別に解析した結果は、日付変更線付近と西太平洋域の積雲-擾乱システムの力学構造が明らかに異なっていることを示した。この結果は、気候モデルにおいて妥当な積雲対流のパラメタリゼーションを選択するにはこのような数千 km スケールの現象を正しく表現していることの検討が必要であることを示している。

高分解能大気モデルの数値実験: 比較的高分解能(分解能1度程度)の、簡単な大気物理過程を含む大気モデルを用い、積雲活動と擾乱及び平均場との相互関係に関する数値実験を開始した。

## 2.3 地球の温暖化影響対策に関する研究

### 〔研究組織〕 地球環境研究グループ

統括研究官 秋元 嶺

温暖化影響・対策研究チーム ○森田恒幸・甲斐沼美紀子・増田啓子

### 地域環境研究グループ

統括研究官 内藤正明

交通公害防止研究チーム 清水 浩・森口祐一

水改善手法研究チーム 稲森悠平

都市大気保全研究チーム 若松伸司・上原 清・鶴野伊津志

大気影響評価研究チーム 安藤 満

### 社会環境システム部

環境経済研究室 小野宏哉・青柳みどり・日引 聡

環境計画研究室 近藤美則

情報解析研究室 安岡善文

### 環境健康部

保健指標研究室 山元昭二

環境疫学研究室 小野雅司

### 水圏環境部

土壌環境研究室 細見正明・恒川篤史

### 生物圏環境部

環境植物研究室 大政謙次・名取俊樹・清水英幸

分子生物学研究室 田中 浄・榊 剛

### 地球環境研究センター

総括研究管理官 西岡秀三

研究管理官 原沢英夫

客員研究員 10名

### 〔研究概要〕

地球温暖化問題は、いま最も注目を集めている地球規模の環境問題である。

周知のとおり地球温暖化問題とは、大気中の炭素ガスやメタンガスなどの温室効果ガスの濃度が増加することによって地球上の平均気温が上昇し、海面水位の上昇、降水パターンの変化、農林水産物の生産や自然生態系の変化などの各種の影響が生じる問題をいう。この問題が注目を集める大きな理由は、第1に、深刻な被害が地球規模で予想されており、第2に、その解決のためには長期間にわたって膨大な費用を注ぎ込む必要があり、第3に、このような大きな問題にもかかわらず未だ科学的に解明されていない部分が多く残されていることである。このため、いま世界中の研究者がこの問題の解明に取り組んでいる。

地球温暖化問題の未解明点は大きく3つある。第1は、地球温暖化のメカニズムであり、大気中の温室効果ガス濃度の変化とそれによる地球の気候変化の仕組みについて、多くの不確実な点が残されている。第2は、地球温暖化の影響であり、温暖化やそれに伴う海面上昇により自然環

境や社会経済にどのような影響が及ぼされるかについては、解明されていないことが多い。第3は、地球温暖化の防止対策についてであり、各種の対策技術や政策の有効性を評価するためには、関係する技術システムや社会経済システムの体系的解明とそのモデル化が必要である。

本報告では、地球温暖化の影響と防止対策、すなわち、第2と第3の未解明の点に関して、最近の当研究所の研究活動を紹介します。図1は、地球環境研究総合推進費によって平成3年度に実施された地球温暖化の影響と防止対策に関する研究プロジェクトの一覧を示している。全部で9つのプロジェクトが動いており、当研究所ではこのうち、水収支への影響及び海面上昇の影響を除いた次の7つを担当している。

(1) 地球温暖化の防止対策についての研究

- ①予測モデル開発：政策や防止技術の効果判定のための計算機シミュレーションモデルの開発
- ②対策技術評価：温暖化防止技術の評価手法の開発と民生部門を中心にした各種技術の評価
- ③電気自動車普及：電気自動車導入の効果の総合評価と普及促進のための各種方策の検討
- ④家庭等の対策普及：断熱材、太陽エネルギー等の普及促進のための各種方策の検討

(2) 地球温暖化の影響に関する研究

- ①植物影響研究：施設実験及び予測モデルによる植物個体や自然植生への影響の解明
  - ②健康影響研究：施設実験やフィールド調査等による人の健康や生存環境への影響の解明
  - ③都市影響研究：都市のエネルギー利用、水利用、大気汚染、防災等への影響と適応策の解明
- 以下に、各研究プロジェクトの活動状況と成果を紹介する。

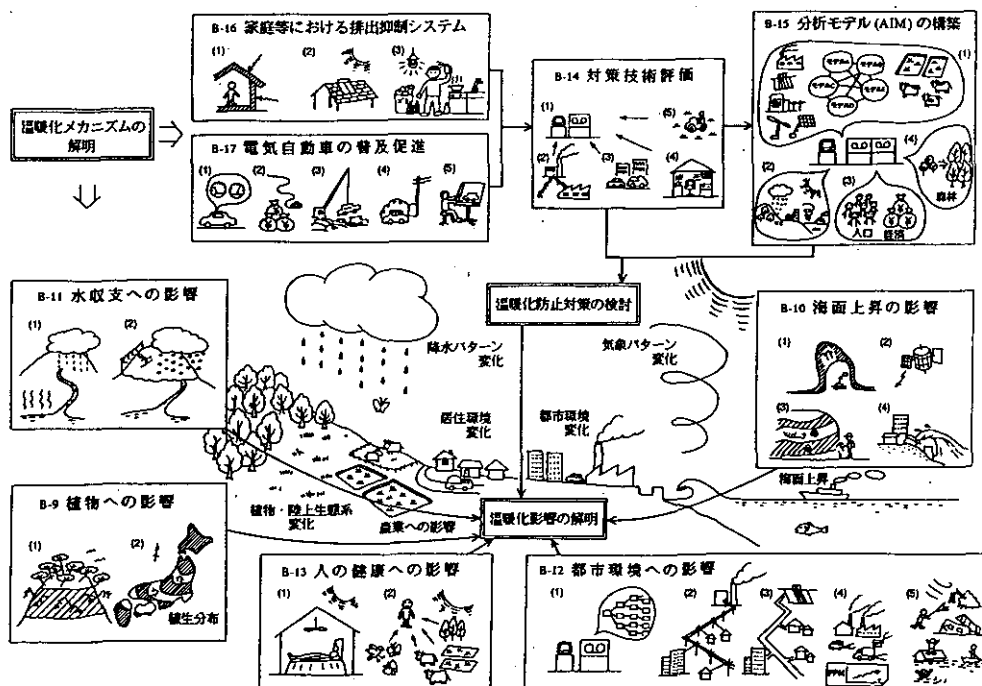


図1 地球温暖化の影響及び防止対策に関する研究の全容

[研究成果]

(1) 予測モデルの開発に関する研究

まず、炭素税などの経済的手段、省エネ政策、エネルギー転換政策、植林政策などを導入した場合、温室効果ガスの排出量がどの程度削減され、その結果として地球温暖化をどこまで抑えることができるかについて、総合的に予測するための計算機シミュレーション・モデルを開発している。このモデルは、アジア太平洋地域温暖化対策分析モデル (AIM) と呼ばれ、アジア太平洋地域の各国の温暖化対策の効果を地球環境の変化及び世界の社会経済トレンドとのかかわり合いの中で評価することを目的としている。

AIMの全体構造は、図2に示すとおり、人為起源の温室効果ガス排出モデルを核にして、自然起源温室効果ガス排出モデル、温室効果ガス反応・循環モデル等から構成され、将来は温暖化影響の評価モデルをリンクする予定にしている。人為起源温室効果ガス排出モデルは、エネルギー消費、土地利用変化、農業生産等の温室効果ガス排出の原因になる社会経済活動のモデルの中心であり、それぞれ世界モデルとアジア太平洋地域のモデルから構成されている。アジア太平洋地域モデルは、この地域の18か国についてそれぞれ作成し、世界モデルとリンクする計画である。

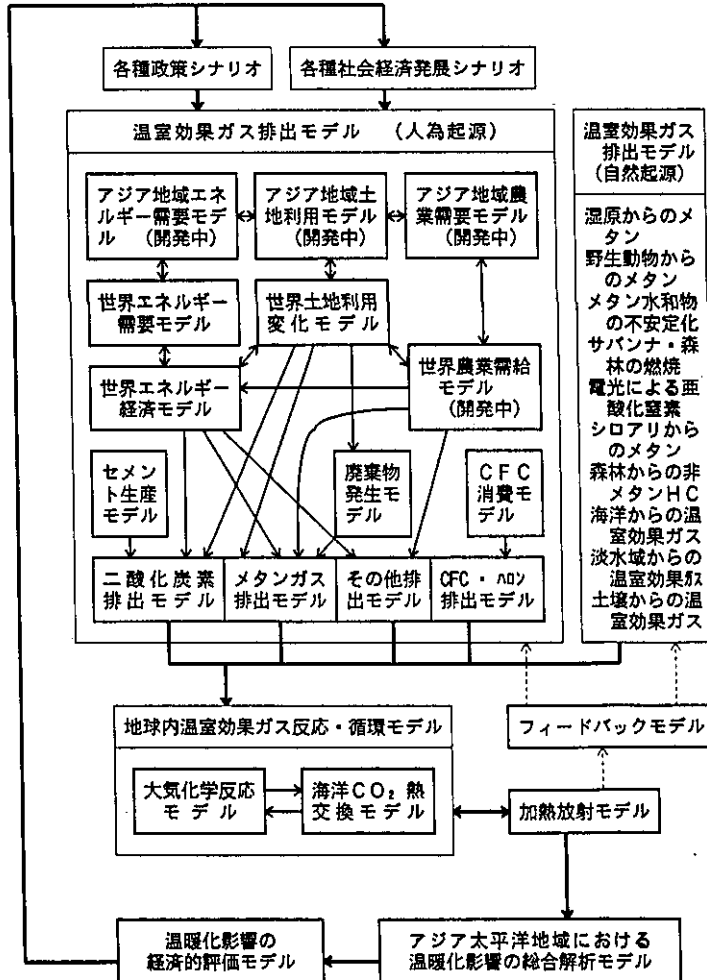


図2 アジア太平洋地域温暖化対策分析モデル (AIM) の全体構成



本プロジェクトは平成2年度に始まり、既に世界モデルが概成しているため、本年度は、アジア太平洋地域の国別モデルの開発とこの国別モデルと世界モデルとのリンケージを中心に研究を進めた。図3は発展途上国からの人為起源温室効果ガス発生モデルの全体構成を示している。国別のプロトタイプモデルはインドネシアを対象に作成し、エネルギー需要モデル、土地利用モデル、農業モデル等の個別モデルを開発して、全体フレームに従ってこれらを有機的にリンクさせた。さらに、この国別モデルを世界モデルにリンクさせてシミュレーションを行い、インドネシアの将来の温室効果ガスを予測した。

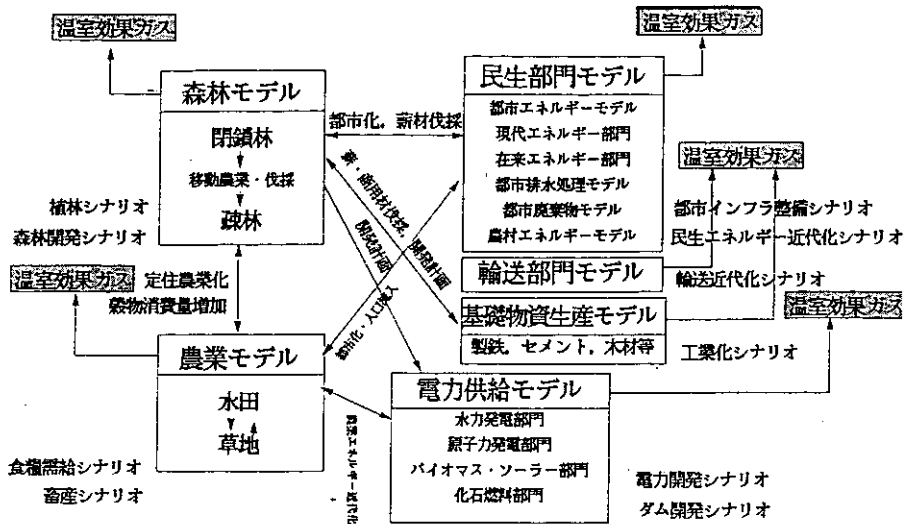


図3 途上国からの人為起源温室効果ガス発生モデル

図4及び図5は、自然体シナリオで進んだ場合のインドネシアの二酸化炭素及びメタンガスの排出量をそれぞれ発生源別に予測した結果である。二酸化炭素については、工業、交通、エネルギー転換部門からの排出量が着実に伸びるとともに、森林破壊による大量の二酸化炭素の放出が来世紀中頃まで続くという傾向が示されている。また、メタンガスについては、水田からの排出量が着実に増加するとともに、パイプラインからの漏洩による放出が来世紀に入って急激に増加する可能性があることを示唆している。

このプロトタイプモデルを適用して、平成4年度から他のアジア太平洋地域の各国モデルを順次開発することになるが、この際の入力条件やパラメータを決定するため、対象となる18か国の各種データを収集した。これらのデータは表1に示すように、人口、経済、工業、農林業、エネルギー、交通、都市整備、耐久消費財、労働生産性等について、過去のトレンド、主要な政策、政策を踏まえた将来予測を含む膨大な内容である。これらのデータを解析して、来年度より本格的なモデル開発を進める予定である。

なお、アジア太平洋地域への温暖化影響の総合評価モデルに関しては、本年度はこの地域で既に実施されている温暖化影響研究をレビューするとともに、温暖化影響の経済評価に関して今まで提案されてきた評価手法の適用可能性について検討した。表2には、アジア太平洋地域において今までに予測されている温暖化影響を整理している。これらのレビュー結果をもとにして、平

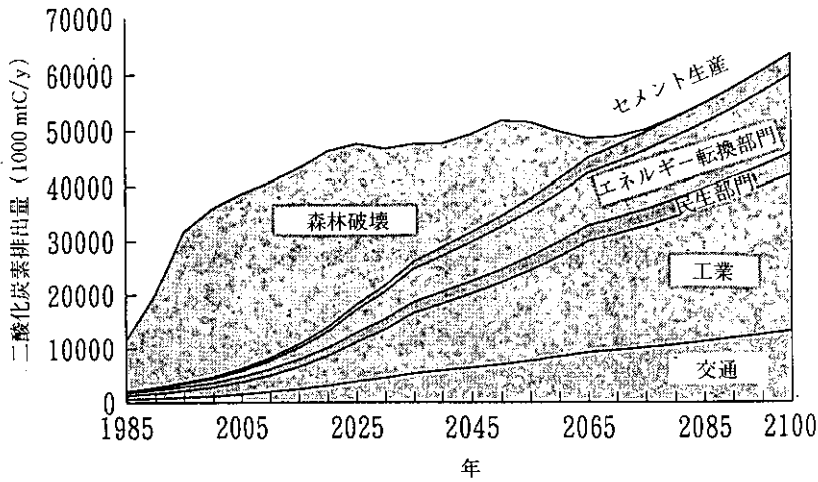


図4 インドネシアにおける二酸化炭素排出量の予測

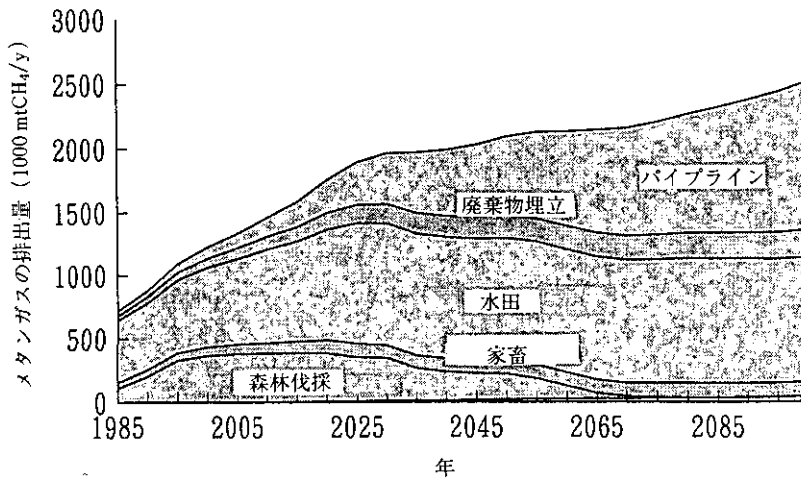


図5 インドネシアにおけるメタンガス排出量の予測

成4年度からは温暖化影響の総合評価モデルの開発に着手する予定である。

## (2) 対策技術の評価に関する研究

次に、温暖化対策技術の評価に関しては、温暖化がどんな技術によってどこまで防げるかを明らかにするため、

- ①社会のどの分野からどれだけの量の温室効果ガスが発生しているか（温室効果ガスアナリシス）
- ②どのような技術的対策がありうるか（技術の探索）
- ③コストや社会的受容性など、多くの視点からの技術評価（個別技術の評価）
- ④どの技術をどのように開発し、普及させればどの程度の効果があるか（対策技術の総合的評価）

表1 アジア太平洋地域対策分析モデル (AIM) 構築のための必要情報  
— 国別モデルの前提条件設定のための収集情報一覧 —

調査事項	過去のトレンド	主要な政策	政策むねと 将来予測
全般的動向	最近特に注目すべき トレンド	社会経済に特に大き な影響を与えている 政策	今後の発展を左右す る主要な要因
人口成長分枝	人口、世帯数、年齢 ・地域分布のトレンド	主要な人口政策	人口の予測事例
経済発展分枝	経済発展のトレンド	主要な経済発展計画	経済発展の予測事例
工業振興分枝	主要な工業 (鉄鋼、 化学、非鉄、紙パ、 窯土石) のトレンド	主要な工業振興政策 (可能な新規工業 開発の位置を含む)	工業発展の予測事例
農業振興分枝	主要な農業生産 (米 作、畜産) のトレンド	主要な農業振興政策 (対外保護政策を含)	農業生産の予測事例
林業振興分枝	主要な森林伐採とそ の用途のトレンド	主要な林業振興政策 (植林政策を含む)	林業生産の予測事例
エネルギー供給分枝	エネルギー源別のエネルギー 供給のトレンド	主要なエネルギー政策	エネルギー供給の予測事 例
エネルギー効率改善 分枝	エネルギー効率改善のト レンド	主要な省エネ政策	省エネの予測事例
交通運輸分枝	交通量・輸送量のト レンド	主要な交通運輸政策	交通・運輸の予測事 例
都市整備分枝	都市整備 (都市規模、 下水・廃棄物処理施 等) のトレンド	主要な都市インフラ 整備政策	都市インフラ整備の 予測事例
耐久消費財普及 分枝	耐久消費財普及のト レンド	主要な耐久消費財普 及政策	耐久消費財の普及予 測事例
労働生産性向上 分枝	労働生産性 (GDP /労働者数) のトレンド	主要な労働生産性向 上政策	労働生産性の向上予 測事例

の手順で研究を進めており、当研究所ではおもに民生部門における対策に関する研究を分担している。

温室効果ガスアナリシスに関しては、我が国の二酸化炭素の排出量を過去 25 年間について部門別、起源別に推計し、その推移を解析した。オイルショック以降、産業部門の排出量が横ばいなのに対し、民生部門と運輸部門の排出量は GDP の伸びとほぼ連動して、また、一般廃棄物の焼却による排出量は GDP の伸び以上に増加していることが明らかとなった (図 6)。1990 年現在、民生部門から直接排出される量は全排出量の約 11 % にすぎないが、電力などの 2 次エネルギー消費に伴う排出を加えると約 25 % を占める。一方、産業関連表を用いて、経済活動のどのよう

な最終需要が二酸化炭素と結び付いているかを分析した結果、民間消費支出によるものが全体の約半分を占めることが分かった(図7)。したがって、民生部門における対策を考える上では、エネルギー消費の面だけでなく、日常生活での物資やサービスの消費にも目を向けることが重要であることが明らかとなった。

技術の探索及び個別技術評価については、家電製品の使用、自家用車の使用、資源の有効利用、ライフスタイルなどに関して、家庭で実行できると考えられる対策を56項目挙げ、一般市民を対象とした意識調査により、各対策項目の社会的受容性を調査した。図8は各項目に対する実行可能性の回答結果を、今後「取り入れられる」とした回答率の高かった順に並べたものである。この調査と並行して、各対策項目の実施によりエネルギーや資源の消費量とそれに伴う二酸化炭素排出量がどれだけ削減されるかを求めた。実行された場合の削減量が大きいものとしては、自家用車使用の抑制、自家用車の燃費・排気量の考慮、断熱に配慮した住宅の建築、太陽熱温水器

表2 予測される気候変動の影響(将来予測)

分野 国名	農 業	林 業	天然資源
中 国	<ul style="list-style-type: none"> <li>・農業生産力を少なくとも5%減少</li> <li>・作物収量の増加または減少</li> <li>-早魃と乾燥地化</li> <li>-降雨量線の移動</li> <li>-塩水化</li> <li>-夏期の乾熱風</li> <li>-台風襲来の頻度と強度</li> <li>-防疫費の1~5%増</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CO<sub>2</sub>濃度と種苗の成育研究</li> <li>・重要材木種の成育研究</li> </ul>	
インドネシア	<ul style="list-style-type: none"> <li>・米、大豆、トウモロコシ、魚、エビの収量の減少。</li> <li>・土壌侵食による耕作適地の減少。</li> <li>・事例研究用の脆弱地域</li> <li>-Citarum、Brantas、Saddan川流域</li> <li>-Krawang、Sbang地域</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・三河川流域の土壌侵食増大、肥沃度低下。</li> <li>・Brantas流域の土壌侵食3~27%増加。</li> </ul>
日 本	<ul style="list-style-type: none"> <li>・米の収量増加。北日本の収量安定化。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・北日本の森林破壊と損失。</li> </ul>	
大韓民国	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気候帯の変動による作物収量、雑草、病虫害影響。</li> <li>・GISSモデルは16%の穀物収量減。</li> <li>・移植時期を遅らせるケースでは18%増。</li> </ul>		
マレーシア	<ul style="list-style-type: none"> <li>・10%の太陽放射熱減でトウモロコシの収量2%減少。</li> </ul>		
タ イ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・米から他の作物への転作でメタンの放出抑制。</li> <li>・米の収量はBASOとGISSシナリオでは減少、BAVAシナリオでは増加。</li> <li>・米の収量減は適切な処置で克服可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CO<sub>2</sub>放出は森林伐採の抑制と森林再生の促進で減少可能。</li> </ul>	
ベトナム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・米作に打撃—メコンデルタRed River中央北部沿岸。</li> </ul>		

表2 (つづき)

	水資源	エネルギーと人間居住	海洋	氷雪と永久凍土	その他
中国	<ul style="list-style-type: none"> <li>・氷河と湖の縮小</li> <li>・表流水の減少</li> <li>・地下水面の低下</li> <li>・土壌水分の減少</li> <li>・旱魃の頻発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人間居住に対する海面上昇の影響研究 (海洋の項参照)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・浸水域 92,000 ~125,000 km<sup>2</sup></li> <li>・影響をうける人口6,700~7,000万人</li> <li>・堤防構築費400万円/km</li> <li>・塩田 養殖場の損害</li> <li>・海面上昇が耕作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・永久凍土は0.5 ~2℃の上昇で20年間に25~50%融解。</li> </ul>	
インドネシア	<ul style="list-style-type: none"> <li>・土壌侵食増による水源涵養地のシルト沈積の加速—Brantas流域。</li> <li>・灌漑水受容地の30%拡大—</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・食糧供給 エネルギー、生産 水資源に問題発生。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海面上昇による影響—ジャワ北部スマトラ東部 スラウェシ南部。</li> </ul>		
日本	<ul style="list-style-type: none"> <li>・洪水と旱魃の増加。</li> <li>・モデルを利根川流域で適用。</li> <li>・琵琶湖水源地冠雪量増加、富栄養</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・降水量の減少は水力発電を低下、電力供給量の変化。</li> <li>・病気 ガン、生物へのオゾン暴露時間の影響。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海面上昇の一般的な影響、定量的アセスメントへの枠組研究。</li> <li>・海岸防災費用の見積り</li> </ul>		
大韓民国					<ul style="list-style-type: none"> <li>・気温上昇3~4℃</li> <li>・降水量 春期5%増</li> </ul>
マレーシア	<ul style="list-style-type: none"> <li>・洪水による損失 980万M\$</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・インフラの損失。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1mの海面上昇で農地1,000km<sup>2</sup>と、マングローブ林6,500km<sup>2</sup>の消滅。</li> <li>・マングローブ林</li> </ul>		
タイ		<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭 褐炭のシェアは1991年 (13%) から</li> </ul>			
ベトナム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・飲料水の量と質。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉄道 高速道路 橋 住宅、学校が損害。</li> <li>・1mの海面上昇—移住</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・降雨パターンと乾期、雨</li> </ul>

の利用などの項目があげられた。

これらの結果を組み合わせることにより、社会的受容性を考慮した上で各対策項目がどの程度の排出削減効果があるかを求めることができる。また、実施された場合の削減量は大きい社会的受容性の低い項目を中心に、対策の受け入れを阻害している要因を分析し、対策の実行を促進するための知見を提供することも今後の課題である。

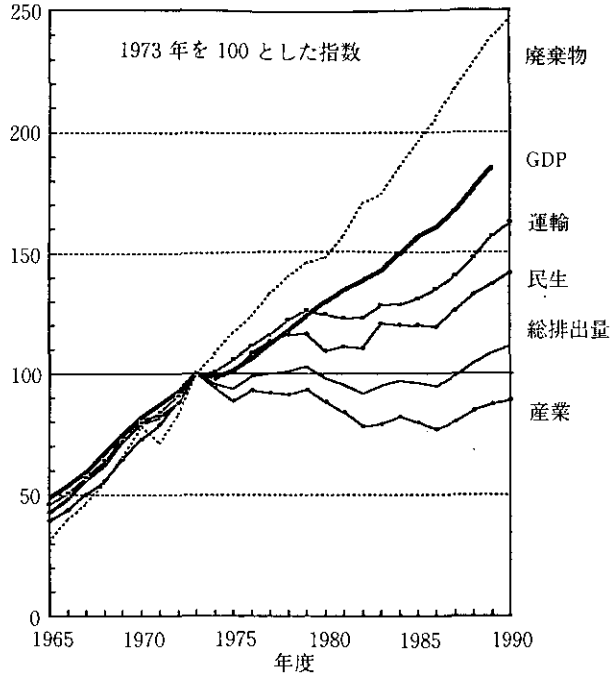


図6 部門別二酸化炭素排出量とGDPの推移

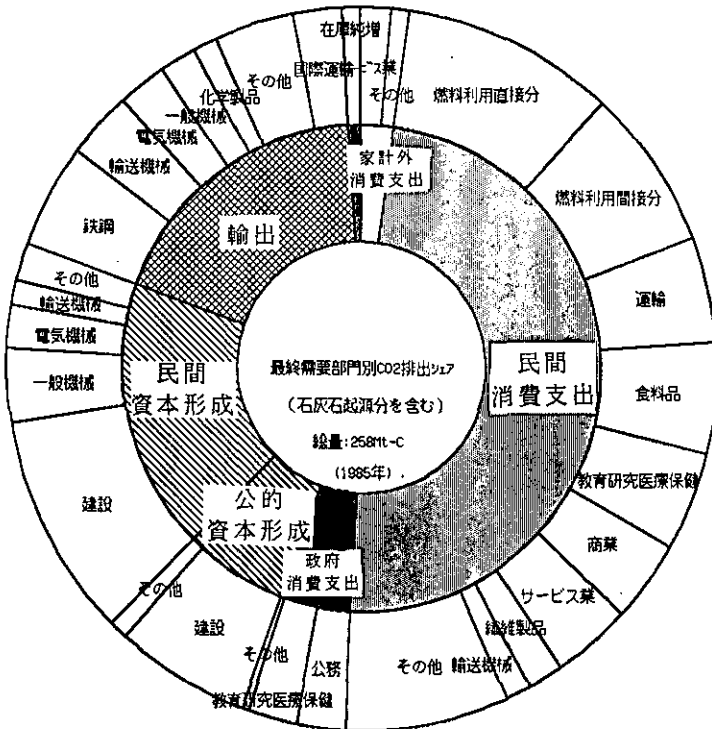


図7 経済活動の最終需要から見た二酸化炭素排出構造  
内周：最終需要の分類  
外周：各最終需要分類でCO<sub>2</sub>排出を誘発した財の種類

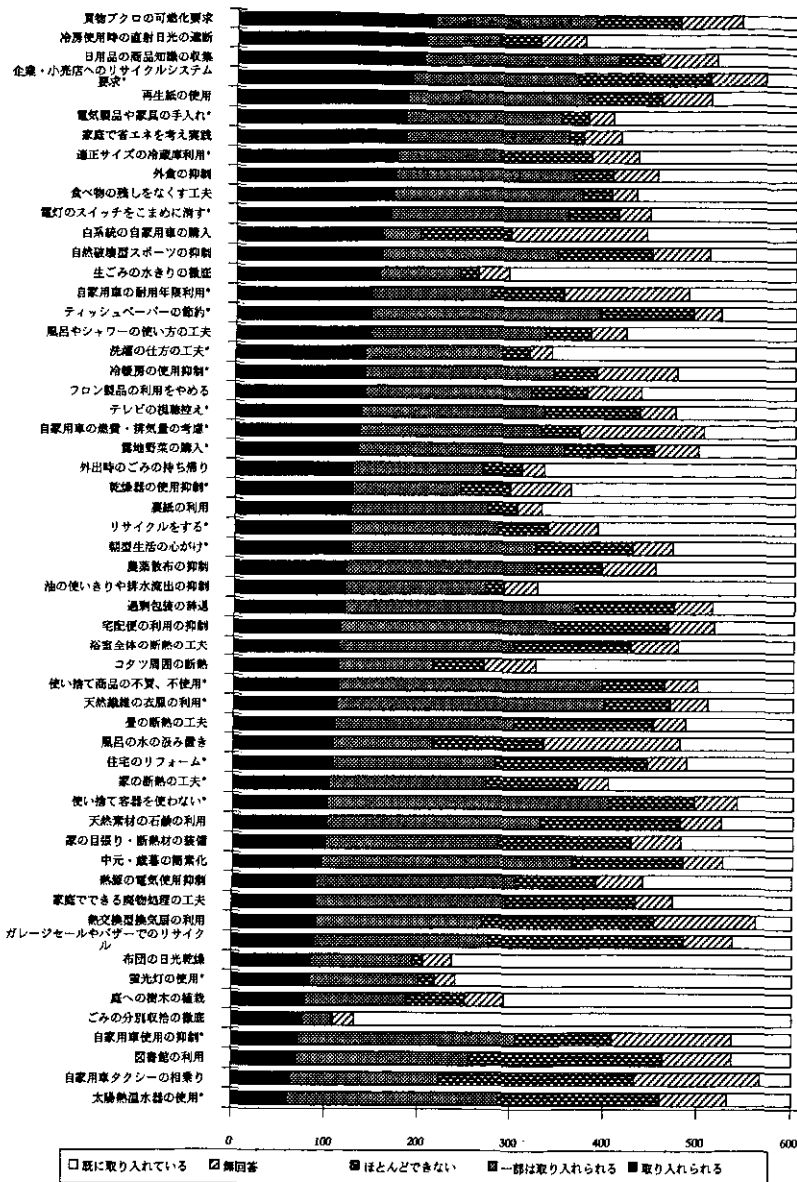


図8 二酸化炭素削減行動56項目の実行可能性の回答結果

### (3) 電気自動車の普及促進による二酸化炭素排出抑制交通システムへの転換に関する研究

以上の技術評価によって二酸化炭素削減に効果のある多くの技術が選び出されたが、中でも電気自動車の有効性は特記すべきものである。

我が国における部門別二酸化炭素排出シェアによると、運輸部門は20%で、そのうち85%が自動車から排出されている。また、自動車からの排出量はGDPの伸びに比例して増えており、今後も排出量が益々増加することが懸念されている。自動車からの排出を抑えるためには自動車

の低燃費化もさることながら、低公害車の導入が重要である。わけても、電気自動車はエネルギー効率が著しく高いことなどのため排出量の大幅な低減が期待できる。だが、これまでの電気自動車にはいくつかの問題があり、普及台数は極くわずかである。

本研究では、電気自動車の導入がふさわしい分野について検討を行い、さらに、普及のための社会システム作りに関する研究を行うことを目的としている。具体的には、導入分野別の車両の走行実態を踏まえて、要求される性能と機能を検討するとともに、電気自動車の二酸化炭素削減効果、経済性、性能及び機能の総合的予測・評価を行い、電気自動車により代替可能な導入分野を検討する。さらに、電気自動車の普及促進の観点から、普及阻害要因の分析、電池等構成要素のリサイクルシステム、及び給電・充電システム等インフラストラクチャーの整備方策、地域導入システムの総合評価等について検討を行う。

本年度は特に次の成果があった。

- 1) 乗用及び業務用に用いられる各種自動車の使用実態に基づく利用分野別のモデルの抽出
- 2) 物流用の電気自動車の普及阻害要因の使用実績に基づいた実態調査、及び物流用の電気自動車の実走行調査
- 3) 電気自動車用電池資源の物質収支についての現状把握と電池資源に関する調査、及びそれに基づくデータベースの構築
- 4) 電気自動車の適正な車両運行支援システムと電力供給システムの概念設計
- 5) 大量普及のための社会システムの基本設計と、普及に供するモデル車両の性能に関する定量的解析

上記成果のうち、5)に関連してモデル車両の性能評価のために開発したシミュレーションプログラムを紹介する。このプログラムは図9に示すように動力性能評価プログラム、運動性能評価プログラム、個別要素特性評価プログラムからなっている。動力性能評価プログラムは各コンポーネントの特性を与えると、一充電走行距離、最高速度、加速性能、燃料消費率を定められた条件の下で計算する機能を持っている。このプログラムを用い、4人乗りの乗用車を仮定し、かつ各コンポーネントに入手可能な最高レベルのものを使用するものとして計算した最高速度と加速性能の計算結果を図10に示す。この図から最高速度は160 km/h、0～400 m 加速時間は18秒が得られる。

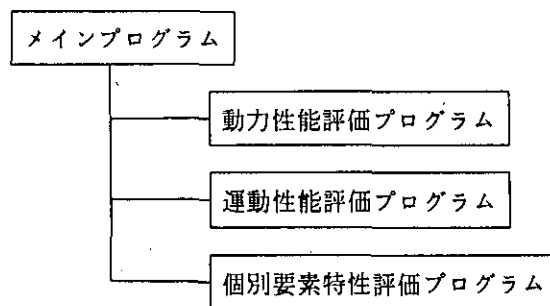


図9 シミュレーションプログラムの基本構造



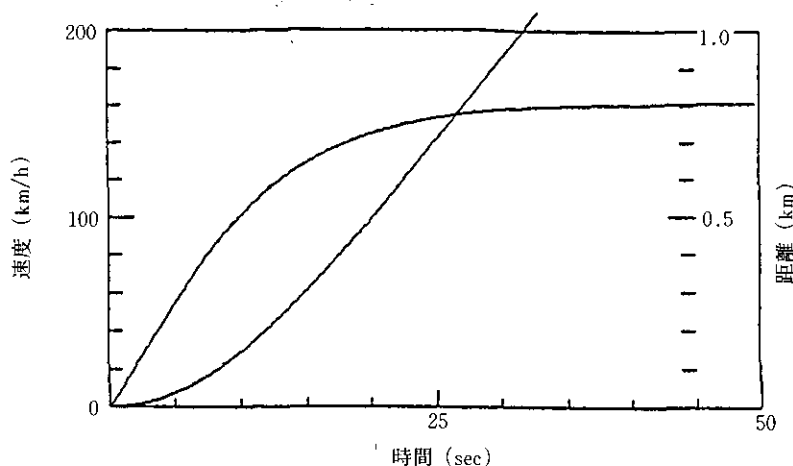


図10 シミュレーションプログラムによる計算例

#### (4) 家庭等における二酸化炭素排出抑制システムに関する研究

温暖化対策技術の適用を検討する場合、家庭等の民生部門の検討は重要である。我が国のエネルギー消費は近年増加の傾向にあるが、中でも民生部門の伸びは目覚ましく、その中の家庭用の需要は1980年から1990年の間に24%以上の伸びを示している。また、1990年度における二酸化炭素の総排出量のうち民生部門の寄与率は23%、その中でも家庭用の寄与率は16%近くあるとされており、今後温暖化対策を図る上でこの分野における各種技術の普及促進は重要な役割を果たすものと言える。このため、二酸化炭素排出抑制の観点から、家庭における省エネシステムの最適化及びライフスタイルのあり方等について検討を行う。

具体的には、建築物の断熱構造化の推進、省エネ型の建築物に普及促進、建築物における太陽エネルギーの利用の促進、家庭等における冷暖房温度の適正化、エネルギー抑制システムの導入、エネルギー効率の高い住宅用機器の利用促進等を図るため、その現状の把握、普及促進を阻害している要因の解析、モデル建築物の設計やユーザーへの情報伝達手法等対策に検討、社会・経済的効果の分析などを行うため下記の項目の研究を行うことにしている。

##### ①家庭等における二酸化炭素排出抑制のための建築物の断熱構造化の普及促進に関する研究

住宅の断熱構造化の現状把握、普及のための阻害要因の解析、並びに普及促進のための対策の検討を行う。具体的にはある程度普及が進んでいる北海道地域とあまり断熱化が普及していない本州地域を比較検討する。これらの検討結果に基づいて断熱構造住宅の普及促進のための施行法、設計指針、ネットワークシステムの構築を検討する。

##### ②家庭等における二酸化炭素排出抑制のための太陽エネルギー利用促進に関する研究

家庭における太陽熱等の自然エネルギー利用の現状把握と普及のための阻害要因の解析を行い、利用促進の方法を検討する。具体的には太陽熱給湯などをとりあげる。これらの検討結果に基づいて太陽エネルギー利用促進のための施行法、モデルシステム、ネットワークシステムの構築を検討する。

##### ③家庭等における二酸化炭素排出抑制システムの導入に関する研究

家庭等におけるエネルギー消費が都市環境に及ぼす影響とエネルギー消費の推移等に関する研究を行う。具体的には家庭等におけるエネルギー消費が都市気候、都市大気汚染等に及ぼす影響

をデータ解析，モデル実験，数値計算等により定量的に明らかにする。このためにモデル都市におけるエネルギー消費の推移等に関する実態調査を同時に実施する。

この結果をもとに二酸化炭素発生量の少ない住生活と家庭エネルギー消費，並びに都市環境との関連分析を行う。

平成3年度においては住宅の断熱化と住宅における太陽熱の利用に関する現状評価並びに仙台市及びその周辺地域を対象として家庭におけるエネルギー消費の推移に関するアンケート調査を実施した。平成4年度は研究用モデル住宅における断熱効率，太陽熱利用効率並びに居住性の解析を行うとともに，気象特性を考慮した住宅基本マニュアルの基礎的な検討を行う。また家庭エネルギーの利用実態の解明と都市環境との関連性の検討を行う。研究の全体構成を図11に示す。

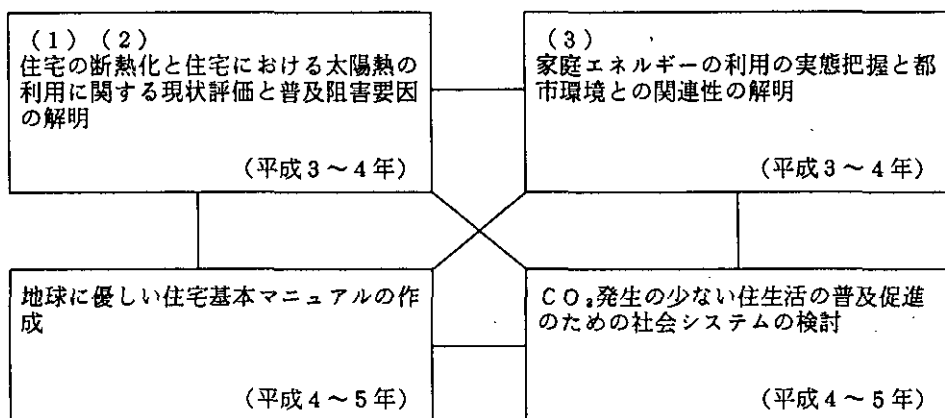


図11 家庭等における二酸化炭素排出抑制システムに関する研究の全体構成

### (5) 植物影響に関する研究

一方，温暖化が防ぎきれなかったときにどのような影響が出てくるかについて，まず，植物影響の研究から紹介する。

この研究では，気温上昇や二酸化炭素濃度の増加などによって植物個体や植生にどのような影響を及ぼすかを分析している。植物個体に及ぼす影響については，以下のような知見が得られた。

1) 気温が上昇すると対流圏のオゾン濃度が増加する可能性があるといわれている。そこで，二酸化炭素濃度の増加とオゾン濃度の増加が複合したときに植物がどのような影響を受けるかについて実験を行った。その結果，二酸化炭素が増加して，オゾン濃度が高い場合は，暴露の初期に二酸化炭素による促進とオゾンによる抑制効果が大きく植物に影響を与え，暴露が長期間になるとオゾンによる抑制の影響が小さくなっていくことが分かった。

2) 日本における南限種のひとつであるオンタデの分布南限域の富士山富士吉田側 2600 m 付近において 1991 年 8 月に野外調査を行い，オンタデの葉温の日周変化を測定した。その結果，オンタデの葉温は，雲や霧の発生に伴って大きく変動するが，雲や霧が認められない日中に 8 月の平気気温 (12.2℃) より約 17℃ も高い 29℃ 台になることが分かった。この温度は，前年度のトロント実験においてもオンタデの生育阻害が認められた温度域であった。

3) 温暖化による開花や落葉時期の変化を予測するシミュレーションモデルを開発し，いくつ

かの分析を行った。表3に月平均気温との関係を示した。開花日についてみると1月平均気温が1℃上昇すると全国平均でツバキが7.51日、ウメは6.07日早くなる。紅葉については、9、10月平均気温が1℃上昇した場合、全国平均で4日前後遅くなる。これらの結果を用いて温暖化による植物影響マップを作成した。

また、植生に及ぼす影響については、我が国の自然植生のポテンシャルシフトを推定した。前年度は、クラスレベルの植生のシフトを予測したが、本年度はさらに下位の区分であるオーダーから群団に相当するレベルの植生シフトを予測した。方法としては、まず、残存自然植生とその気候条件との関係を説明するモデルを構築し、そのモデルの気候パラメータを変化させることにより予測を行った。モデルとしては、ファジーモデルとロジモデルの2つのタイプのモデルを試みた。その結果、ロジモデルの方が的中率が高かった。そこで、ロジモデルの気候パラメータを変化させることにより、ポテンシャルシフトの予測を行った。条件としては、年平均気温1℃上昇、2℃上昇、3℃上昇の3通りについて試みた(表4)。その結果、年平均気温1℃上昇によって、全国379,611メッシュのうち、その約23%に相当する86,565メッシュで現在の植生分類とは異なる植生分類に推定されることが分かった。

#### (6) 健康影響に関する研究

次に、温暖化の健康影響についての研究を紹介する。この研究は地球温暖化の健康影響に関し、国内外において社会医学的調査を実施すると共に、人工環境制御下でのモデル実験に基づくシミュレーションの結果と有機的に結合し、次世代を中心とした人類の健康リスクを予測していくことを目的としている。このため第1に、内陸性気候帯において観察される夏期の異常高温や、ヒートアイランド現象による熱帯夜等の熱ストレスによる直接的健康影響の予測、第2に、熱帯域の拡大に伴うマラリア、デング等の熱帯病の地上・拡大の可能性を検討する間接的健康影響の予測について、研究を行っている。

まず、温暖化による健康リスクと手法開発に関する研究については、IPCCの地球温暖化による気温上昇量の予測を適用して、細胞、組織、個体レベルの障害と適応現象を解明するため、調査とモデル実験を行った。国内では内陸性気候の長野県を対象に、海外では大陸性気候の中国南部を対象に調査を実施し、この調査結果に基づいて人工環境制御下でのモデル実験を行った。

その結果、高温環境下では摂食量が減少し成長抑制が見られる一方、中枢神経による体温維持機能が破綻し、深部体温が上昇することが分かった。図12に示すように、熱ストレス下の実験動物の肝臓における生化学的变化としては、深部体温上昇の初期にラジカル障害が引き起こされ、熱ストレスの負荷の続く間、脂質過酸化障害が継続することが分かった。脂質過酸化障害は細胞の膜構造の変性や、代謝機能の低下に結びつくため、広範な生体障害作用へと進展する恐れが強い。また、熱ストレス下の肝細胞においては、細胞の恒常性維持のための数種の熱ショックタンパクが誘導されていた。熱ストレスは免疫系に対しても顕著な影響を及ぼしているが、感染抵抗性の低下に結びつく免疫系の変化については、緊急を要する重要な研究課題と考えられる。

夏期の暑熱の死因別死亡に及ぼす影響を予測するため、人口動態統計を用い1984年から1988年の5年間にわたり疫学的解析を行った。図13に示すように、敗血症に関する死亡月別集計の結果、夏期における死亡の増大が観察された。夏期の暑熱による免疫系への影響が予想されたため、今後細胞性免疫と液性免疫への影響を検討する予定である。さらに特定疾患発生の季節変化について、疫学調査を進めつつある。

今後、モデル実験及び暑熱下の疫学調査研究と有機的に結合し、GCMモデルによる夏期の暑

表3 温暖化における生物季節（植物）と月平均気温との関係

植物種	開花日・時期	相関(地点数)	1°C上昇した場合の早遅(平均)	備考(開花及び紅葉・落葉日の特徴)
ツバキ	11/15-5/1	C I (15) 1 (16)	1.4-25.3日 (7.89日) 早 4.8-14.4日 (7.51日) 早	北部ほど小さく、南部で大きい。 内陸部と沿岸部の差が大きい。
ウメ	1/16-5/19	C I (29) 1 (16)	1.8-12.9日 (5.54日) 早 4.1-7.8日 (6.07日) 早	関東以西の太平洋側は1月中、東日本の太平洋側は2月中、東北、北陸は3~4月、北海道は5月
タンポポ	2/1-5/12	C I (22) 2 (14) 3 (13)	1.0-16.1日 (3.22日) 早 2.7-7.7日 (4.51日) 早 2.9-7.3日 (4.91日) 早	西日本、東海、関東では、2~3月中、北陸、東北は4月、北海道は5月。
ソメイヨシノ 開花	3/25-5/9	C I (12) 3 (61) 4 (5)	1.0-1.7日 (1.30日) 早 1.7-4.3日 (3.35日) 早 2.4-4.0日 (3.22日) 早	関東以西の太平洋沿岸と九州で3月中、西日本全域、関東、北陸西部、東北部の沿岸部で4月上旬中、北海道は5月
満開	4/1-5/14	3 (61) 4 (9)	1.7-3.6日 (2.74日) 早 2.4-3.4日 (3.03日) 早	開花日から満開日までの日数は地域によって異なり5~8日で開花の遅い地方は満開までの日数は短い
イチョウ発芽	4/2-5/12	3 (30) 4 (10)	1.4-4.3日 (2.50日) 早 2.2-3.9日 (3.00日) 早	内陸部を除く西日本、関東、東海の沿岸部は4月上旬、その他の地域でもほぼ4月中。月平均気温の1ヶ月の単相関の方が良い。
ヤマツツジ	4/4-5/30	4 (26) 3 (9) 3,4 (25) 2,3 (15) 2-4 (12)	2.1-3.7日 (2.60日) 早 1.6-3.6日 (2.47日) 早	西日本、東海、関東、北陸西部、東北部・沿岸部では、4月中
ノダフジ	4/9-6/8	4 (38) 3 (28) 3,4 (31)	1.2-4.7日 (2.61日) 早 1.2-3.7日 (2.38日) 早	西日本、東北、関東、北陸西部では4月中
アジサイ	5/23-7/20	4-6 (13) 3-5 (12)		全国的に月平均気温の1月ごとの単相関は余り良くないが、3,4,5月または、4,5,6月や5,6,7月の3ヶ月との相関は高く現れる。
サルスベリ	5/28-8/23	6 (19) 7 (12) 5-7 (33) 6,7 (14)	2.9-10.8日 (6.38日) 早 2.7-7.9日 (4.28日) 早	九州南部で7月半ばで、約1ヶ月で東北まで観測される。月平均気温との関係は1ヶ月より3ヶ月(5,6,7)との相関が最も高い
ヤマハギ	7/19-10/4	8 (5)		全国的に月平均気温との単相関も重相関も悪く、6,7,8月の平均気温との単相関が良い地点が十数点あるのみである
ススキ	8/10-10/21	7-9 (12) 6-8 (11)		東日本から北日本では太平洋沿岸を除き8月中。平均気温との関係は、3ヶ月との相関が高くつい2ヶ月の相関が良い
イロハカエデ 紅葉	10/24-12/7	W I (7) 9 (9) 10 (5) 11 (5)	0.6-1.2日 (0.86日) 遅 2.3-7.8日 (4.02日) 遅 2.7-8.0日 (4.24日) 遅 1.9-5.8日 (3.88日) 遅	中部以北の内陸部、東北部で10月中、その他地域は11月中。
イチョウ 落葉	11/2-12/16	10 (17) 11 (8)	2.0-6.9日 (4.39日) 遅 2.0-4.8日 (2.75日) 遅	
コナラ 落葉	11/6-12/21	W I (6) 10 (9) 11 (13) 9-11 (24) 10-12 (8) 10,11 (7)	0.3-1.2日 (0.62日) 遅 2.4-7.2日 (3.92日) 遅 1.4-5.7日 (3.38日) 遅	紅葉から落葉までの日数は20日前後遅れる。 1ヶ月より3ヶ月の相関のほうが高い地点が多い

C I : 寒さ指数、W I : 温量指数

表4 年平均気温1℃上昇が植生分布に及ぼす影響の予測

	年平均気温1℃上昇を仮定した場合の推定								計	
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧		
推定された現在の自然植生	①	226 41.4	272 49.8	0 0.00	48 8.8	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	546 0.1
	②	0 0.0	9166 56.1	4633 28.4	1602 9.8	928 5.7	0 0.0	0 0.0	0 0.0	16329 4.3
	③	0 0.0	0 0.0	55679 82.5	10510 15.6	1311 1.9	0 0.0	0 0.0	0 0.0	67500 17.8
	④	0 0.0	0 0.0	0 0.0	71538 84.8	2102 2.5	10700 12.7	0 0.0	0 0.0	84340 22.2
	⑤	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	16204 59.8	10906 40.2	0 0.0	0 0.0	27110 7.14
	⑥	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	100642 70.9	41313 29.1	0 0.0	141955 37.4
	⑦	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	37284 94.3	2240 5.7	39524 10.4
	⑧	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	2307 100.0	2307 0.6
	計	226 0.1	9438 2.5	60312 15.9	83698 22.1	20545 5.4	122248 32.2	78597 20.7	4547 1.2	379611 100.0

各カラム上段は3次メッシュ(約1km×1km)の頻度、下段は各行における構成比(%), 丸数字は植生分類をあらわし、それぞれ①コケモモ・ハイマツオーダー(高山帯・寒帯植生), ②シラビソトウヒオーダー(亜高山帯植生), ③チシマザサ・サナ群団Ⅰ(オオバボダイジュ・ミズナラ群落など北海道型冷温帯植生), ④チシマザサ・サナ群団Ⅱ(日本海型冷温帯植生), ⑤スズカケ・サナ群団(太平洋型冷温帯植生), ⑥シキミアカガシオーダー(内陸型暖温帯植生), ⑦イズセンリョウ・ウスダジイ群団(沿岸型暖温帯植生), ⑧ボチョウジースダジイ群団(亜熱帯植生)である。

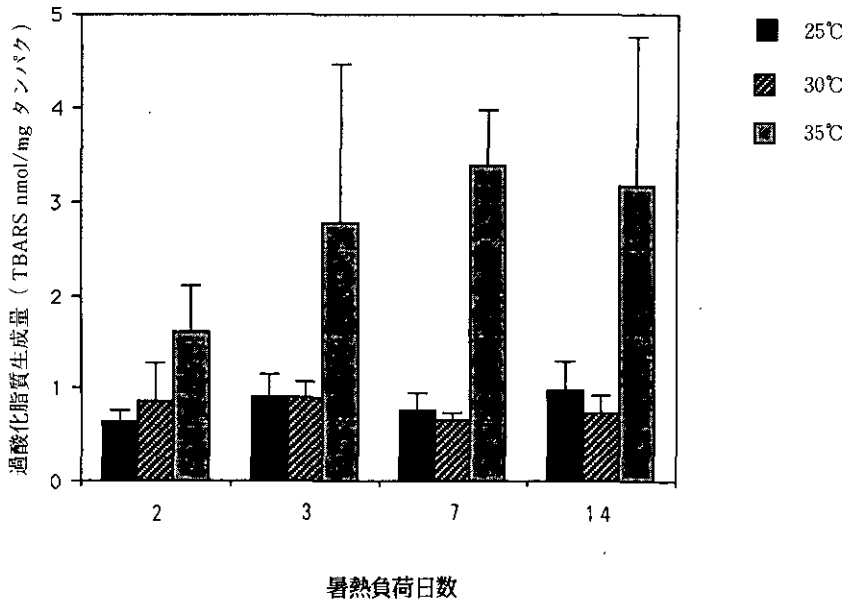


図12 熱ストレス負荷による肝臓の脂質過酸化の障害

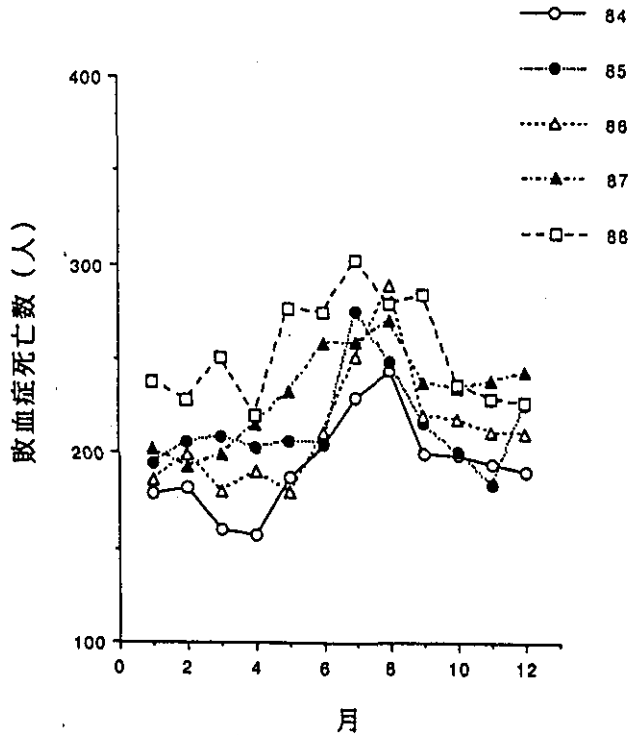


図13 敗血症の月別死亡数

熱の上昇量の予測値に基づき、次世代を中心とした人類の健康リスクのシミュレーションを行う予定である。

一方、動物媒介性感染症の拡大予測に関する研究については、マラリア及び媒介蚊の分布と地理的気象条件との関連を明らかにするために、①東南アジア地域におけるマラリア分布北限の一つと考えられている中国雲南省における現地調査、②沖縄における過去のマラリア流行の歴史、及び③現在の沖縄における媒介蚊の分布、について検討を行った。

まず、中国雲南省における現地調査については、雲南省南部に位置する西双版纳(シーサンパーナ)の向東(シャンドン)とその周辺地域で予備調査を実施した。この結果によれば、向東におけるマラリア陽性率は約10%で、周辺地域を含めればマラリアの有病地から無病地までを連続して選ぶことが可能と思われる。これにより、マラリア分布と気象条件との関連を示すデータの入手が可能となろう。

また、沖縄におけるマラリアの流行の歴史については、図14に示すように、1945年戦火の拡大とともに、山岳地への避難が始まるとマラリア罹患者数が急増したが、1958年以降患者発生は減少し、1962年には患者発生は見られなくなったことが分かった。この間の種々マラリア防あつ対策が施されており、決してマラリア流行に必要な自然環境が消失したためではないことには、十分留意すべきである。

次いで、沖縄における媒介蚊の分布の現況については、マラリア媒介蚊であるコガタハマダラカ、シナハマダラカは一時期消滅したと考えられていたが、現在では再び、石垣島や宮古島等において市街地を離れた溪流等に普通に生息していることが確認されている(図15)。気象条件のみを考えれば、我が国においてもマラリア媒介蚊及びマラリア原虫の生息は現在でも可能である

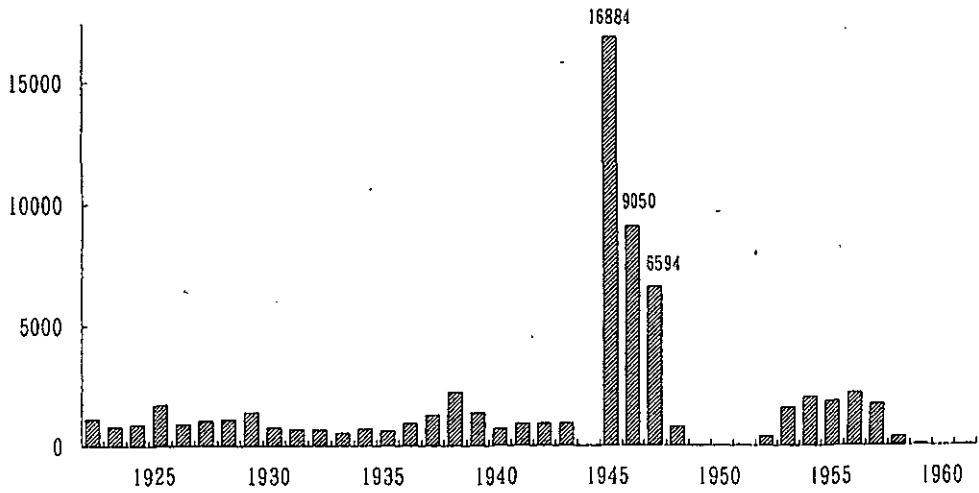


図14 沖縄県八重山群島におけるマラリア罹患者数の年次推移 (黒島直規, 1976)  
1944年度は不明。

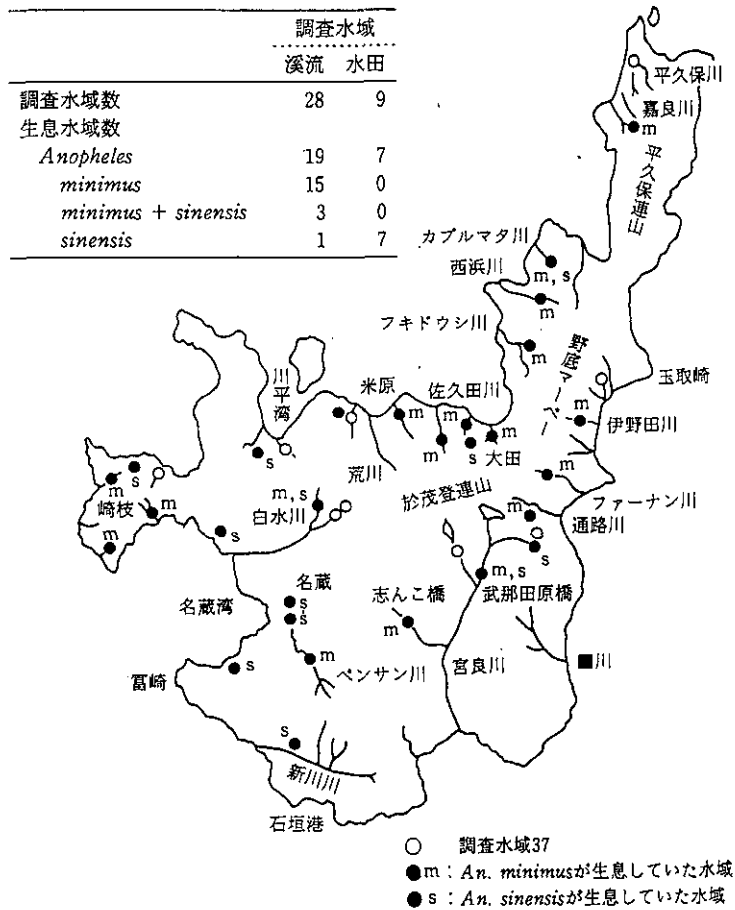


図15 石垣島における *Anopheles* 属幼虫の生息調査 (1990年8月9日~15日)

ことを裏付けた。

今後、これらの調査データを用いてマラリア流行モデルを利用したシミュレーションにより、温暖化によるマラリア分布域をできるだけ正確に予測することが必要である。

### (7) 都市環境への影響に関する研究

最後に温暖化の都市影響に関する研究を紹介する。この研究は、人間活動や財産それに人口が集中する都市において、温暖化影響がどのように現れるかを総合的に解析しようとするものである。平成2年度においては、国立環境研究所で開発した知識ベース・システムを適用して、温暖化の都市影響を総合的に評価するシステム開発の可能性について検討した。平成3年度では、この知識ベースの改良を試みるとともに、知識ベースに入力するデータを収集して、このデータをもとにいくつかの分析を行った。

まず、知識ベースの改良については、知識ベースとモデリング支援システムとのリンケージを改良して、温暖化の都市環境影響モデルの基本構造を収集された知識から推定する2つの方法について検討した。1つは、知識の構造からダイレクトにいくつかの簡単なモデル構造を推定し、この構造に直観的なパラメータを与えて思考実験を支援する方法で、他の1つは、知識の構造とともに実際の定量的データから最も望ましいモデル構造を推定して、統計的にパラメータを推計する方法である。後者のリンケージについてはいくつかの解決すべき問題点が確認され、平成4年度に継続して実施する予定である。

次に、知識ベースに入力するデータについては、地球温暖化の都市影響や人間居住への影響に関して今までに世界各国で実施されている研究報告、約60件を収集してその知識の概要をレビューした。表5はそのうち、まとまった成果の得られているもので、影響の直接的原因及び影響の種類によって分類整理している。この表に示すとおり、今までに温暖化の都市影響分野で研究された主な対象は、海面水位の上昇に伴う都市災害や土地資産への影響である。これに比べると、温度上昇や降水パターンの変化による影響の研究は数が少なく、蒸発量増加、水温上昇、二酸化炭素濃度の増加による都市影響についてはほとんど研究がなされていない。この調査結果によって、今後の評価総合システムの開発方針にいくつかの再検討が不可欠であることが明らかとなった。第1に、今のところ温暖化の都市影響に関する体系的知見が得られておらず、総合評価が非常に難しいこと、第2に、したがって総合評価に際しては専門家の直観による知識データの補完が不可欠であること、第3に、総合評価の方法論について、確定できない要因の数とその不確実性の幅が大きいことから、不確実さを前提として総合評価の方法論を再検討する必要があること、である。これらの設計条件をもとに、平成4年度においても総合評価システムの開発を継続する予定である。

一方、温暖化による都市廃棄物処分場への影響についても、研究を行っている。廃棄物埋立処分地において、メタン放出量とメタン放出量に影響を与える気象条件との関係を明らかにすることを目的として、埋立終了後、約7年が経過した廃棄物埋立処分地に設置されているガス抜き井戸で1年間、メタンガス放出量の連続測定を行った。同時に降水量や気温などの気象項目も連続測定を行った。ガス抜き井戸からのメタン放出量はかなりの時間変動を示した。その変動は地上気圧の影響を受けており、地上気圧が低下傾向にあるときにはメタン放出量は増加し、地上気圧が上昇傾向にあるときにはメタン放出量は減少した。晴天時の地上気象が安定しているときでも、大潮潮汐による地上気圧の24時間周期に伴ってメタン放出量にも24時間周期が認められた。以上の結果は、廃棄物埋立地からのメタンガス回収技術を確立する上で、埋立槽内の圧力と吸引圧



表5 温暖化の都市影響に関する収集知識一覧

現象 影響	温度上昇	降水パターン変化	積雪の 減少	蒸発量 の増加	水温の 上昇	CO2濃 度の上昇	海面水位の上昇
エネルギー消費	<ul style="list-style-type: none"> <li>・温暖化による暖房費削減予測</li> <li>・カリフォルニア-2010年の電力消費予測、年間電力消費増加</li> <li>・ニュージーランド-暖房費減少</li> <li>・インドネシア-消費量増加</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シナリオを用いた五大湖地域流出予測</li> <li>・地下水、居住、輸送網への影響</li> </ul>					
水資源、水利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カナダ-地下水の減少、都市での漏水</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・都市の水供給への影響</li> <li>・北欧-降水量と流量の増加</li> <li>・地中海周辺域-流量増加による水不足</li> <li>・日本-水管理システムの圧迫</li> <li>・ニュージーランド-水質悪化</li> <li>・イギリス-水管理システムの再設計</li> <li>・デラウェア川-顕著な水量低下</li> <li>・ニューヨーク-水不足</li> <li>・五大湖-水消費量減少・増加の予測</li> </ul>					<ul style="list-style-type: none"> <li>・塩水化問題</li> <li>・オーストラリア-南西部の大都市（パース）の水供給の減少</li> </ul>
水環境		<ul style="list-style-type: none"> <li>・地中海沿岸-氾濫による港湾都市の影響</li> <li>・地中海周辺域-流量増加による水不足</li> <li>・日本-干ばつの長期化、降水期間の短期化</li> <li>・ニュージーランド-降水量増加</li> <li>・イギリス-年平均降水量増加、最高水量の季節変動の増大</li> <li>・フィラデルフィア-塩水侵入</li> </ul>					<ul style="list-style-type: none"> <li>・海岸侵食対策</li> </ul>
大気質	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人体や都市大気への影響評価</li> <li>・酸性雨への影響</li> <li>・成層圏オゾン破壊の地上への影響</li> <li>・大気中のオキシダント濃度オゾン濃度上昇による汚染拡大</li> </ul>						
近郊農業							<ul style="list-style-type: none"> <li>・都市域への洪水、塩水化、地下水面上昇などの影響予測</li> </ul>
都市緑地							
レクリエーション環境							

表5 (つづき)

現象 影響	温度上昇	降水パターン変化	積雪の 減少	蒸発量の増加	水温 上昇	CO2 濃度の 上昇	海面水位の上昇
都市災害		<ul style="list-style-type: none"> <li>・低窪高地域で洪水</li> <li>・シナリオを用いた洪水による被害予測</li> <li>・地中海沿岸-氾濫による港湾都市の影響</li> <li>・日本-低地の氾濫</li> <li>・ニュージーランド-洪水多発、下水道の氾濫、熱帯サイクロン被害増大、海岸侵食による家屋被害、河川付近の洪水、地下水面上昇による有機物土壌上の家屋の住居不能、嵐の頻度増による貯水タンクの効果半減、集中豪雨による斜面の不安定化、家屋の風害は減少、洪水頻度増大、河口付近の洪水で住居不可能</li> </ul>					<ul style="list-style-type: none"> <li>・海岸地域での相対的危険性や影響</li> <li>・豪雨による排水、下水設備に影響</li> <li>・都市域への洪水、塩水化、地下水面上昇などの影響予測</li> <li>・シナリオを用いた洪水による被害予測</li> <li>・3つの海水準上昇</li> <li>・ビデオマッピングを用いた海岸侵食被害予測、人口流入問題</li> <li>・イギリス-河口域に発達した産業都市への脅威</li> <li>・ニュージーランド-洪水、海岸侵食</li> <li>・中国-1m上昇で7200万人、70都市の水没、エジプト-800万人の難民、ナイジェリア-洪水・侵食被害(ラゴス)、ブラジル-大都市の侵食・浸水被害、マレーシア-海岸侵食、ダカール塩水侵入、サヘル地域の干ばつ</li> </ul>
土地資産		<ul style="list-style-type: none"> <li>・地中海沿岸-氾濫による港湾都市の影響</li> <li>・ニュージーランド-洪水増で軟弱基盤による建設問題</li> </ul>					<ul style="list-style-type: none"> <li>・海岸地域での相対的危険性や影響</li> <li>・海岸侵食</li> </ul>
都市住民健康	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人体や都市大気への影響値</li> <li>・人体、生物、病気への影響</li> </ul>						
交通	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カナダ-輸送網の崩壊</li> <li>・極地方-船交通可能期間の増長、道路冬季維持費軽減</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・五大湖-内陸水上交通の運搬許容量の減少</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・西アフリカ、中央アフリカ海岸地域-河口域に発達した都市への脅威</li> <li>・高速道路に打撃</li> </ul>
移住	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カナダ-人口移動(居住空間の崩壊)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ビデオマッピングを用いた海岸侵食被害予測、人口流入問題</li> <li>・太平洋諸島からの移民の受け入れる家屋のレンタル業の発達</li> <li>・バンラデッシュ-洪水による都市域への人口流入</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ビデオマッピングを用いた海岸侵食被害予測、人口流入問題</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>・建造物、橋、高速道路、発電所に打撃</li> <li>・洪水による都市域への人口流入(西アフリカ、中央アフリカ海岸地域、バンラデッシュ)</li> <li>・シナリオを用いた洪水による被害予測</li> <li>・北米大西洋岸、メキシコ沿岸のバリアー島の多くの都市(ガルベェストン、マイアミビーチ、メリーランド、オーシャンシティ、アトランティックシティ)、三角州地帯及び湿地帯の都市(カルカッタ、上海、バンコク、ジャカルタ、東京、大阪、ロンドン、ロッテルダム、ヴェニス、ニューオーリンズ)の危機</li> <li>・サヘル地域-干ばつによる人口流入</li> </ul>

力とのバランスが重要な操作要因であることを示すものである。

廃棄物埋立処分地からの温室効果ガスの発生抑制対策として、埋立工法の改良の検討を行った。具体的には、内径 485 mm、高さ 50 m の塩化ビニール製の廃棄物埋立模型槽に都市ゴミを充てんし、1 基の模型槽は底部から 6.25 l/時間の空気を吹き込む好気性埋立槽でもう 1 基は空気を遮断した嫌気性埋立槽とし、これらを感度 0.1 kg から 2 t まで計算できる大型重量計に乗せた。埋立廃棄物の重量変化は、日降水量、蒸発散量、浸出量、浸出水中の蒸発残留物量とガス化消失量による物質収支から決定される。ガス化消失量を好気性の場合は二酸化炭素、嫌気性の場合は二酸化炭素及びメタンとして、物質収支式から求めた。ここで、これら温室効果ガスの発生源を埋立廃棄物中の易分解性有機物と考え、易分解性有機物量当たりのガス化消失量を無次元化してガス化率として定義して、ガス化率の経時変化を求め、好気性及び嫌気性の埋立工法別予測モデル式を導出した。

#### (8) おわりに

地球温暖化の防止対策や影響に関する研究は非常に広範囲な対象を含み、また大変多くの研究領域にまたがっている。このため、国内外の研究者との交流や共同研究を進めるとともに、着実な研究推進体制を確立するよう努力しているところである。

## 2.4 酸性雨に関する研究

### 〔研究組織〕 地球環境研究グループ

統括研究官	秋元 肇
酸性雨研究チーム	○溝口次夫・村野健太郎・畠山史郎・佐竹研一・ 河合崇欣
温暖化現象解明研究チーム	野尻幸宏
地域環境研究グループ	
都市大気保全研究チーム	若松伸司
社会環境システム部	
情報解析研究室	須賀伸介
化学環境部	
計測技術研究室	向井人史
計測管理研究室	西川雅高
動態化学研究室	田中 敦
大気圏環境部	
大気反応研究室	福山 力
水圏環境部	
水環境工学研究室	海老瀬潜一
土壌環境研究室	高松武次郎・服部浩之・土井妙子
生物圏環境部	
環境植物研究室	大政謙次・名取俊樹・藤沼康実・清水英幸・ 戸部和夫
生態機構研究室	岩熊敏夫・多田 満
分子生物学研究室	田中 浄・榊 剛
客員研究員	35名、共同研究員 5名

### 〔研究概要〕

地球環境問題は 1980 年代の半ばから世界の科学者あるいは国際政治の場で注目され、論議されている。このうち、酸性雨は成層圏オゾン層の破壊や地球の温暖化等の問題と並び現実的かつ、緊急の課題となっている。

ヨーロッパ大陸中東部、北東部及び北米大陸東部では 20 年以上前から酸性雨による森林の枯損、陸水域の酸性化による水生生物の死滅が顕在化し、国際的な越境汚染問題として論議されてきた。

我が国ではこれまでのところ、欧米のような大きな被害は出ていないが、最近、関東地方、中国地方、北九州地方の一部でスギ、モミ等の被害が問題となっている。我が国は昭和 30 年代の終わりから、酸性雨の原因物質である SO<sub>2</sub> の排出量の削減に努めており、環境中の SO<sub>2</sub> 濃度はエネルギー消費量の増大にかかわらず低いレベルが保たれている。しかし、東アジア地域はヨーロッパ大陸、北米大陸に次いで酸性雨の前駆体物質である SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> の排出量が多く、今後さらに増大することが予想されている。酸性雨は大気圏、水圏、土壌圏、生物圏などあらゆる環境に関与

する問題である。したがって、その解明には自然科学の多くの研究者からなる学際的、総合的な研究が必要である。本研究ではそのために当研究所の他のグループ、基盤研究部門及び大学、地方公害・環境研究機関からも多くの研究者の参加を得て総合的に研究を推進している。

酸性雨の生成機構、輸送過程及び地上への降下メカニズム、人体、動植物、建造物などへの被害の定量化、土壌、陸水域の酸性化プロセスの解明、それらの有効な対策を樹立するための総合的な研究を遂行するためには少なくとも10年程度の研究期間が必要であるが、本プロジェクトでは、3か年の研究計画を立てた。

本年度は3か年計画のうち2年目に当たり、次の4課題について研究を行った。

なお、本研究で酸性雨とはそれが与える被害の観点から単に湿性（雨、雪など）の降下物だけでなく、乾性の降下物及びガス状の酸性物質、酸化性物質も含めてということとしている。

#### （1）東アジアにおける酸性雨の動態解明に関する研究

ヨーロッパ大陸、北米大陸では前述したように酸性雨の被害が古くから顕在化していることもあって、酸性雨の大気中での反応、生成機構、その輸送プロセスなどもかなり解明されている。

我が国を含めた東アジア地域では酸性雨の動態はまだほとんど明らかになっていない。東アジア地域でのこれらの動態解明のためには東シナ海、日本海上空での反応、生成が特に重要である。

東アジア地域において地上の発生源から大気中へ放出されたSO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>が、大気中でヒドロキシルラジカル等の過酸化物質と反応して硫酸や硝酸に酸化されるメカニズムと、それらがエアロゾルや雲に取り込まれて輸送され、地上へ到達するプロセスを明らかにするため次の研究を行う。

- 1) 東アジアにおける酸性雨及び関連物質の動態解明のための地上モニタリング及び東アジアからの酸性雨の影響を的確に評価するための地上モニタリング
- 2) 東シナ海及び日本海上空での航空機観測とデータの解析
- 3) 地上モニタリング及び航空機観測のための微量酸性、酸化性物質計測システム及び校正システムの開発
- 4) 酸性霧の生成と汚染物質の取り込みプロセスの研究
- 5) 酸性、酸化性物質の物理的、化学的過程の研究

以上が3か年の研究課題である。年次計画をブロック図で示す（図1）。

#### （2）自然植物系における酸性雨の影響に関する研究

“酸性雨”の自然植物系への影響を考える上で、特に硫黄、窒素、カリウム、カルシウム、マグネシウム、アルミニウム、重金属等の諸元素の生物地球化学的挙動を的確に把握することが重要である。そこで、これらの元素のうち本年度は特に硫黄及び鉛に注目して研究を進めた。硫黄については、以下に示すように植物試料や土壌試料に含まれる各種の硫黄化合物の化学形態別定量分析手法を検討し、植物及び土壌試料への応用を行った。また、鉛については特にICP-MS法及び固体ゼーマン原子吸光法による分析手法を検討し、スギの樹皮及び木質部の分析を行うとともに、鉛等による植物試料の汚染の経時変化を評価するためのプレート被覆法を考案してその検討を開始した。さらに、“酸性雨”の自然植物系への影響を室内実験によって検証するため前年度製作した霧（フォグ）チャンバーを用いた植物の生長及び生理機能に関する研究も行った。

- 1) 樹木へ及ぼす影響が大きいと考えられる酸性霧暴露チャンバーの開発とそれを用いた実験
- 2) 実験に供する針葉樹（スギやモミ）の育成方法の開発
- 3) フィールドにおいて樹木の枯損の原因を明らかにするためのオープントップチャンバー法

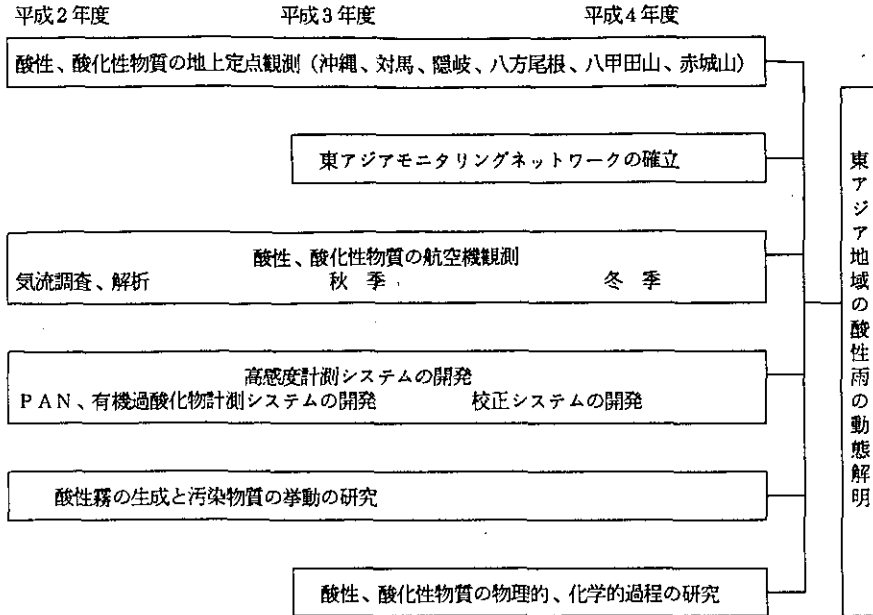


図1 東アジアにおける酸性雨の動態解明に関する研究

及び配置法による実験手法の開発

- 4) 高感度分析法を用いた樹木各部の元素分析法の確立と樹木枯損原因の追求
- 5) 赤外線画像計測法を用いた樹木枯損の早期評価法の確立
- 6) 酸性降下物のモニタリングのための指標植物の検索

研究の年次計画をブロック図で示す(図2)。

### (3) 酸性降下物の陸水、土壌への影響機構に関する研究

環境庁の第1次酸性雨調査の結果によると我が国の酸性降下物量は欧米の被害が顕在化している地域と余り変わらない。しかし、同時に行われた湖沼の調査では酸性降下物によると思われる酸性化は確認されていない。陸水域の酸性雨による影響は土壌の酸性化から始まる。我が国の土壌中での酸性降下物の挙動を明らかにし、土壌中和能の定量化及び各陸水域の酸性化を予測するために次の研究を行う。

- 1) 酸性降下物量の計測と陸水域酸性化予測のためのモニタリング
- 2) 酸性化しやすいと推定される湖沼や河川の調査と解析
- 3) 土壌中和能推定のための研究
- 4) 降雨流出水質に及ぼす酸性雨の影響の研究
- 5) 湖沼や河川の酸性化が水生生物相に与える影響の研究

研究の年次計画をブロック図で示す(図3)。

### (4) 東アジアにおける酸性雨原因物質の制御対策とその評価に関する研究

東アジア地域はヨーロッパ大陸、北米大陸に次いでSO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>など酸性雨前駆体物質の発生量

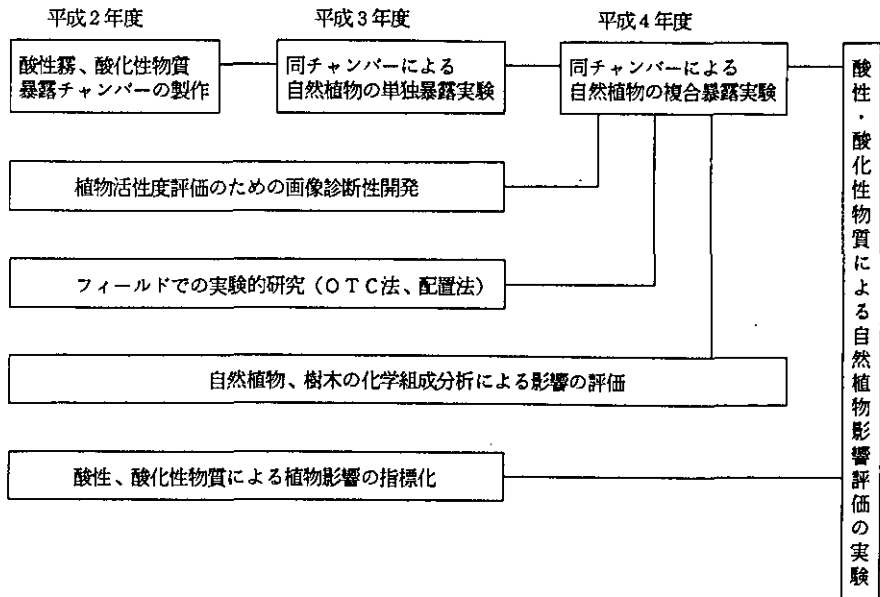


図2 自然植物系における酸性雨の影響評価に関する研究

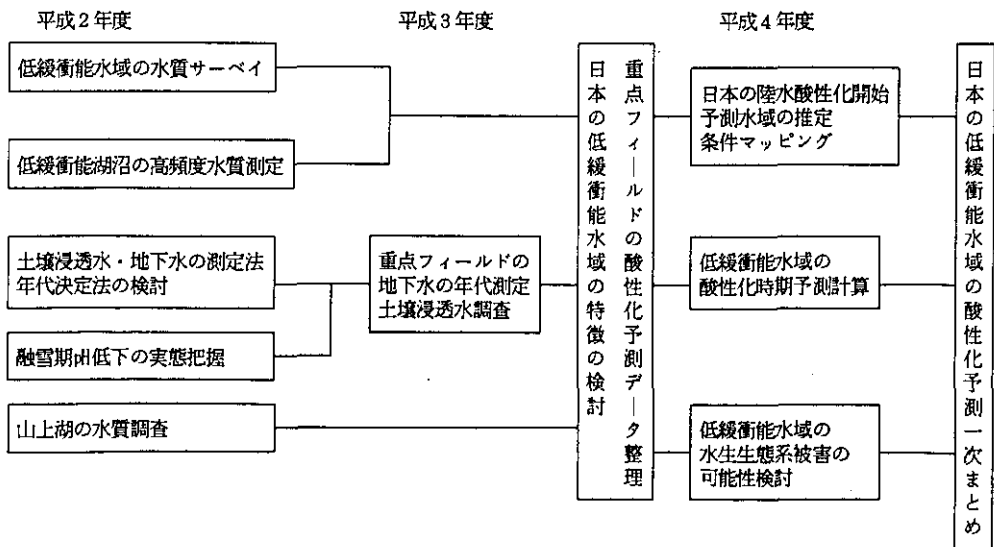


図3 酸性降下物の陸水、土壌への影響機構に関する研究

の多い地域である。この地域には中国、インドなど多くの人口を抱え、エネルギー消費の潜在能力を持つ途上国が存在する。したがって、これらの地域のSO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>の排出量の現状を正確に把握し、産業構造の進展等の予測と合わせて、将来の排出量をできるだけ正しく予測すること、及びこれらの地域から排出されるSO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>などを効率的に制御するための技術を評価するために次の研究を行う。

- 1) 東アジア地域における酸性雨原因物質の排出量の推定と将来予測に関する研究
  - 2) 東アジア地域におけるエネルギー形態の将来予測に関する研究
  - 3) 排煙脱硫及び脱硝装置の評価に関する研究
  - 4) 流動層燃焼プロセス技術の評価に関する研究
  - 5) 開発途上国における脱硫及び脱硝の最適プロセスに関する研究
- 研究の年次計画をブロック図で示す(図4)。

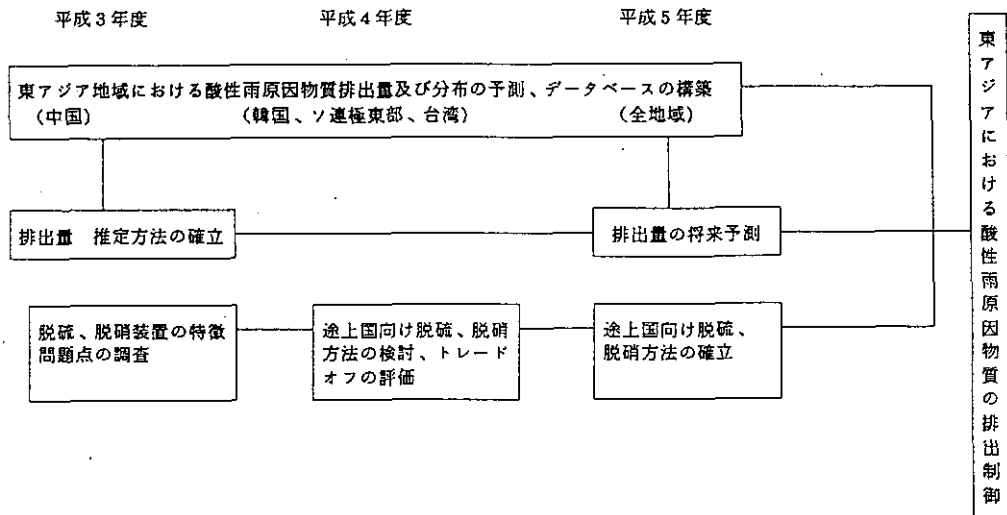


図4 東アジアにおける酸性雨原因物質の制御対策とその評価に関する研究

〔研究成果〕

(1) 東アジアにおける酸性、酸化性物質の動態解明に関する研究

1) 地上観測に関する研究

東アジアにおける酸性、酸化性物質の動態解明のために、南西諸島(沖縄本島、西表島、奄美大島)、日本海(隠岐島)、及び国内の適地(八方尾根、八甲田山)を選定し、雨水成分、エアロゾル成分、オゾン等の地上観測を継続している。

① 沖縄辺戸岬大気化学研究ステーションにおける観測

オゾン濃度の観測が行われたほか、ステップサンプラーによるエアロゾルの捕集分析が9月下旬～11月上旬に行われた。オゾン濃度は日内変化をほとんど示さず、ステーションは人為起源物質の影響が少ない低汚染地域であることが明らかとなった。エアロゾル中の化学成分の経時変化によると、Al、Si、Fe等の土壌起源物質とS、Naは異なる変動を示している。また、Sは海塩起源と人為起源の加わった成分でありNaと同一変動を示す部分と異なる変動を示す部分があ



る。

## ②隠岐島における観測

洗浄比について：冬期と夏期の個々の雨に関して洗浄比を求めた場合の雨量と洗浄係数の間には、冬期はほぼ一定の関係式が得られるが、夏期はばらつきが大きくなった。しかし、夏期のデータのいくつかの点は冬期のデータから求めた回帰直線上に乗っており、洗浄係数に季節差のない場合もあることが分かった。残りの点は、すべてが洗浄係数が小さくなっており、雨の降り方による違いが現れている。その理由として、降雨強度が極端に大きいような雨の場合（どしゃぶり）や、雨を降らしている上空の暖かく湿った空気と地上で観測している下層の空気の気団が異なることなどが考えられる。本年度の観測から前年度のように粉じんの1か月平均値を地上のデータとして用いた場合には、特に夏期の場合は実際の洗浄比を示していないことが考えられる。

気流線解析について：気象庁の客観解析データを用いて、バックトラジェクトリーの手法より、隠岐島に到達している気流を3日間さかのぼって計算した。この解析を毎日繰り返し、どのような気流によって隠岐島の気団が影響されているかを検討した。図5、6は夏、冬のそれぞれ1か月間のトラジェクトリーの結果である。冬期はほとんどが大陸から気団が来ていることが明らかである。一方、夏期には太平洋からの気団の影響がかなり強くあることも分かる。この解析により、隠岐島で観測される冬期の成分が大陸に影響されていることがうかがえる。

硫酸イオン濃度のトレンドについて：粉じん中の化学成分の中で、硫酸イオン濃度はここ7年ばかりデータが出ているが、その長期トレンドは大気中濃度の微増を示している。冬期だけではなく夏期においても濃度増加が見られており、近年の日本海周辺の発生量の増加があると考えられる。その一つには、桜島を含む火山活動の活発化であろうと考えられる。1988年以來、桜島や阿蘇山の活動が活発化しており、島根県の観測によっても、桜島火山の影響と考えられるSO<sub>2</sub>の高濃度が観測されている。これは、広域的に硫黄酸化物の放出量の増加があることを示す。冬期での硫酸イオンの増加は火山以外にも人為的な増加の要因が潜在的に存在するため今後のトレ

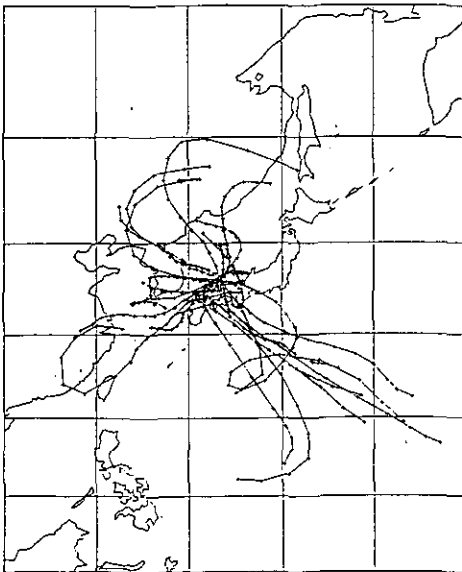


図5 1990年8月の1か月間のトラジェクトリー

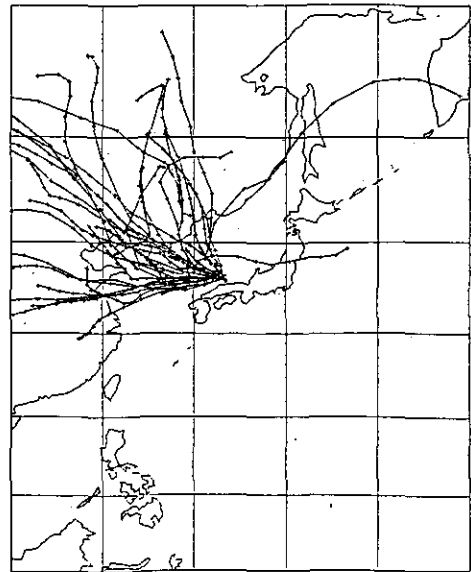


図6 1990年12月の1か月間のトラジェクトリー

ンドに注目する必要がある。

### 2) モニタリングネットワーク構築のためのワークショップ開催

韓国、中国、旧ソ連を中心として東アジア地域の研究者を招へいして、東アジア地域のモニタリングネットワーク構築のためにワークショップを開催した。

### 3) IGAC/PEACAMPOT 航空機調査及び集中地上観測

東アジアの太平洋岸地域は工業の発展と人口の増加により、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、炭化水素等の大気汚染物質の排出量が急速に増加している地域である。SO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>が大気中に放出されれば、これらの酸化反応により硫酸塩や硝酸塩の降水量が増加し、いわゆる酸性雨の被害が我が国を含む東アジア諸国において拡大することが懸念される。そこで、本研究ではIGAC計画（国際地球規模大気化学計画）に基づき、PEACAMPOTプログラム（太平洋上の対流圏大気に対する東アジアの大陸性気塊の影響）と名付けた航空機調査を、韓国、中国を含めた国際共同観測として行った。

本観測の科学的目標は以下のとおりであった。

①東アジア地域における1次及び2次汚染物質の長距離輸送と沈着の過程を明らかにする。この目的のため、粒子状物質の定性、定量を行う。

②東アジア地域における大気汚染物質の輸送と化学変化過程を明らかにする。この目的のため、オゾン、PAN等の酸化性物質及びその前駆体である炭化水素、NO<sub>x</sub>の空間分布・濃度変化を測定する。

本観測において観測の主な対象とした汚染質と測定方法は表1のとおりである。これ以外に外気温、湿度、全天日射及びUVも測定されている。なお、使用航空機はCESSNA 404型（所属：昭和航空（株））である。観測は長崎大村空港を基地として以下の日程及びルートで行った。

①10月5・6日：長崎－与論島 往復

②10月7・8日：長崎－ソウル 往復

③10月10・11日：長崎－新潟 往復

観測結果の一例として10月6日の観測で得られたオゾンの濃度変化を図7に示す。

さらに航空機観測時には集中的な地上観測を沖縄本島、対馬、隠岐島、八方尾根で実施した。観測項目を表2に示した。ステップサンプラーによるエアロゾルの捕集分析が9月下旬～10月上旬に行われた。エアロゾル中の化学成分の経時変化を図8に示した。Al、Si、Fe等の土壌起源物質は対馬と沖縄で似た変動を示しているが、S、Naは2地点で異なる変動を示している。ま

表1 観測項目及び測定方法

測定項目	測定方法
オゾン	(紫外線吸収法)
NO <sub>x</sub>	(オゾン化学発光法)
非メタン炭化水素	(真空容器採集法)
SO <sub>2</sub> 、HCl、NH <sub>3</sub>	(含浸フィルター法)
アルデヒド類	(カートリッジ捕集法)
無機エアロゾル	(ハイボリューム・サンプラー)
エアロゾルの形態	(インパクター法)
一酸化炭素	(真空容器採集法)

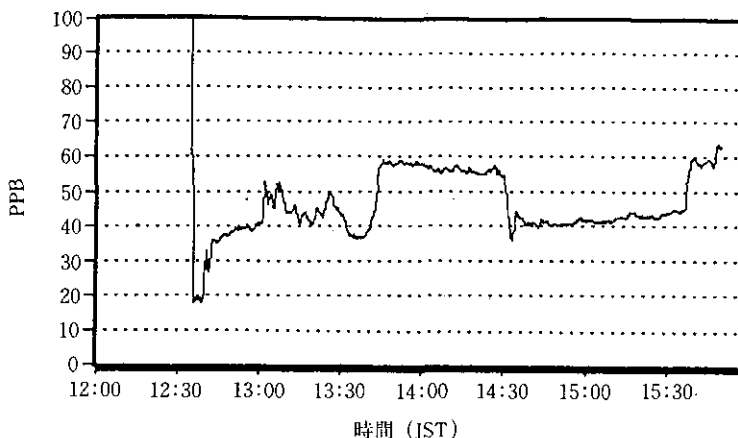


図7 1991年10月6日の与論島—長崎間のオゾン濃度

表2 集中地上観測地点と観測項目

測定項目	観測地点				サンプリング装置	分析法
	隠岐	対馬	沖繩	八方		
雨	○	○	○	○	バケツ式	
O <sub>3</sub>	○	○	○	○	Dasibi O <sub>3</sub> 計	UV
SO <sub>2</sub>	○	○	○	○	ローボリューム	IC
NH <sub>3</sub>	○	○	○	○	〃	IC
HNO <sub>3</sub>	○	○	○		デニューダー	IC
HNO <sub>3</sub>		○			拡散スクラバー	IC
NO <sub>2</sub>					拡散チューブ	
RCHO		○			ミストチャンバー	IC
RCOOH		○			〃	IC
PAN		○		○	冷却トラップ	ECD-GC
CO	○					NDIR
NO <sub>y</sub>	○					CL
S, Metal	○	○	○	○	ステップサンプラー	PIXE
Inorg. Ions	○	○	○	○	ローボリューム	IC
EC, OC	○	○	○	○	ハイボリューム	Cフライバー
MSA	○	○	○		テープサンプラー	IC

た、八方尾根は標高が高く雲の中であり、隠岐島と含め両地点はすべての成分で濃度が低かった。

#### 4) 微量酸化性物質の計測システムの開発

有機過酸化物のうちヒドロペロキシド類は自然起源の炭化水素とオゾンとの反応で生成することが知られており、関東地方のスギ枯れ等植物の被害に関連している可能性がある。しかし、こ

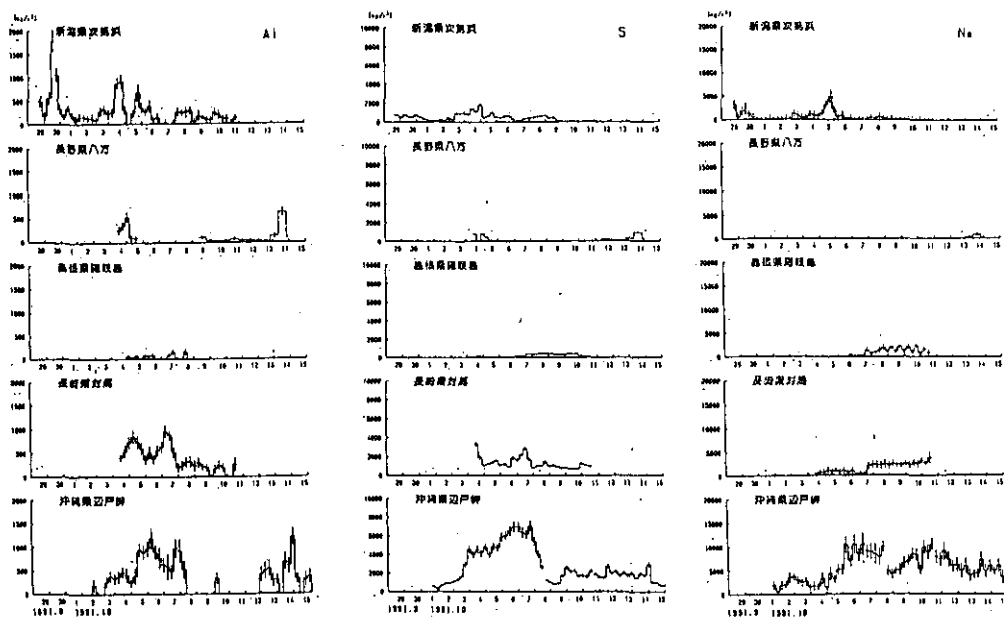


図8 国内5地点におけるAl, S, Na濃度の経時変化

れらヒドロペロキシド類の収率や生成機構に関する情報は現在のところ極めて少ない。本研究では前年度構築した高速液体クロマトグラフィー化学発光検出器の有機過酸化物分析システムを用い、イソブレンーオゾン反応によって生成するヒドロペロキシドの分析を試みた。反応には内容積  $4\text{ m}^3$  のエアゾルチャンバーを用い、生成物を蒸留水に捕集したのち分析した。図9に示すように数種類の過酸化物が検出されたが、従来重要な生成物と考えられていた過酸化水素の生成がほとんど見られないことは注目値する。最も高収率のピークは保持時間の一致からメチルヒドロペロキシド ( $\text{CH}_3\text{OOH}$ ) とヒドロキシメチルヒドロペロキシド ( $\text{HOCH}_2\text{OOH}$ ) と考えられる。

## (2) 自然植物系における酸性雨の影響に関する研究

### 1) 硫黄の化学形態別定量分析手法の検討と応用

酸性雨などによって植物—土壤生態系に負荷された硫黄は、系内で移動や形態変化などを繰り返す。結果的に生態系に何らかの影響を及ぼす。そのため、その影響を評価するには、負荷された硫黄の生態系内での形態を知ることが重要である。この観点から、土壤や植物試料に含まれる硫黄の形態を分別定量する方法を確立した。分析できた硫黄の形態は、全量硫黄、硫酸、硫化物、黄鉄鉱、元素状硫黄及び有機硫黄である。また、有機硫黄をエステル硫酸、スルホン酸、チオール及び炭素鎖硫黄に分別する方法も同時に確立した。①全量硫黄：試料(約  $30\text{ mg}$ )を  $30\%$  の過酸化水素水 ( $3\text{ ml}$ )を用いて二重容器の高圧ポンプで酸化分解 ( $140^\circ\text{C}$ ,  $4\text{ h}$ )した後(植物試料の場合には、微量の酸化鉄を触媒として加える)、 $50\%$  のフッ酸 ( $500\ \mu\text{l}$ )を用いてホットプレート上で追加分解する。分解液は、一度蒸発乾固させた後、 $0.1\text{ M}$  炭酸ナトリウム溶液を加えて振とうし、抽出された硫酸をイオンクロマトグラフィー (IC) で分析する。②硫酸：約  $100\text{ mg}$  の試料を  $5\text{ ml}$  の  $0.1\text{ M}$  炭酸ナトリウムまたは  $2\%$  酢酸 (アンモニア水で  $\text{pH } 3.5$  に調整) で抽出し、ICで分析する。③硫化物：窒素置換した反応容器(容器の説明は省略)に試料(約  $100\text{ mg}$ )

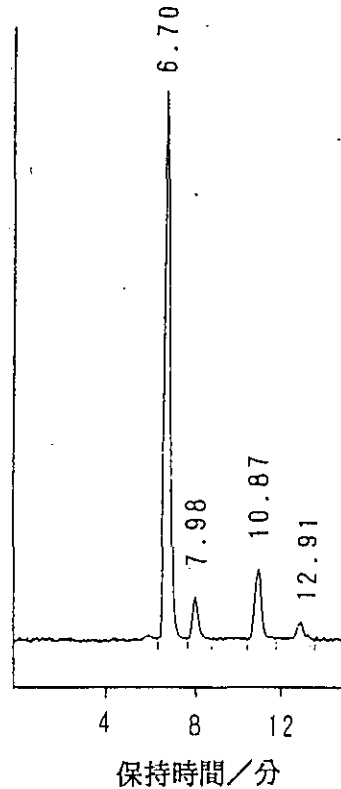


図9 ヒドロペルオキシド類のクロマトグラム

を取り、6%の塩酸ヒドロキシルアミンを含む9M塩酸(10ml)を加えた後、加熱(約105℃)しながら窒素通気(10ml/min)を行って(1.5h)硫化物を分解する。発生する硫化水素は少量の過酸化水素を含む0.1M水酸化ナトリウム溶液に捕集し、ICで分析する。④黄鉄鉱：窒素置換した反応容器に試料(約100mg)と砂状亜鉛(1g)を取り、10%の塩化第一スズ(2水和物)を含む35%塩酸(20ml)を滴々加えて分解する。塩酸溶液を加え終わり、水素ガスの発生が穏やかになれば、溶液を加熱(約105℃)しながら窒素通気(2h)を行って分解を完了させる。発生する硫化水素は③と同様にして分析する。⑤元素状硫黄：試料(約100mg)に10%酢酸亜鉛(100 $\mu$ l)を加えて酸化を防止しながらシクロヘキサン(3ml)で2回抽出する。抽出液は反応容器に取り、溶媒を揮散させた後、④と同様の方法で硫黄を分析する。④の分析値には、硫化物や元素状硫黄からの硫黄も含まれるので、黄鉄鉱の濃度は、④の分析値から③と⑤での値を差し引いて求めた。有機硫黄は、全量硫黄から硫酸と④での値を差し引いて求めた。本法を火山性酸性土壌やその周辺の植物試料に適用して手法の信頼性を検討した結果、大変良好であることが確認できた。

## 2) スギの鉛汚染及びプレート被覆法の予察的検討

過去30年間にわたってスギ樹皮に蓄積した鉛の量を評価するため、日光及び屋久島で採取した樹齢約350年スギの樹皮を深さ方向に分析した。日光の試料は、日光街道スギ並木から採取したもので、管理のためのアルミニウム製のプレート(4×14cm)がアルミニウム製の釘で固

定されている。このプレート直下と上下の樹皮、及び非汚染地域である屋久島のスギ樹皮とを比較した。試料は、カミソリで表層から 0.5 mm 以下の厚さにはく離し、フッ素樹脂製容器中で、硝酸蒸気によって加圧分解した後、主成分、微量成分は ICP 発光分光法により、鉛はビスマスを用いて、ICP 質量分析法により分析した。

屋久島試料の最表層（厚さ 0.14 mm）では、他の層に比べわずかではあるが、いくつかの元素で汚染が認められた。表層の鉛濃度は 3.5 ppm で、深さとともに急速に濃度が減少し、約 0.1 ppm 以下となった。また、日光試料でも深い部分では 0.1 ppm 以下となり、木質部ではさらに濃度が低く、ブランクと同等のレベルとなった。したがって、植物自身の持つ樹皮中の鉛のバックグラウンド値が、0.1 ppm 以下であることが確認された。

日光の 3 本の試料（R5973, R5975, R5985）では、多くの元素（Al, Cu, Fe, Pb, V, Zn など）の深さ分布の形は類似したものとなり、屋久島と同様、表層に高濃度を示し、深層で低濃度となった。しかし、表層鉛が 20~150 ppm の値を示したように、その濃度分布、いいかえれば汚染の程度は一様ではない。

日光の場合、想定される汚染源としては、アルミニウムのプレート自身からくるもの、沿道を通行している自動車等の排出粒子や、汚染した土壌粒子の巻き上げ、樹幹流による葉等に蓄積した粒子の流失と樹皮への浸透などがあげられる。プレート由来を除いて、いずれも類似した組成を持つと予想される。プレート自身からの汚染の可能性は存在するが、以下の点からその可能性は低いと考える。スギに打ち付けられたプレート中の鉛濃度は約 23 ppm で、非プレート部の樹皮に含まれる鉛よりも低い濃度であった。それに加えて、プレート直下にはプレートの溶解によって生じた約 10 % もの高濃度のアルミニウムが含まれる部分が見いだされたが、高濃度アルミニウム部の鉛濃度は、非プレート部に比べて同等かそれ以下であった。したがって、プレートの溶解とそこに含まれていた鉛の析出が、樹皮表層に見られた多くの元素の集積の主たる起源とは考えられない。ただし、R5975 の非プレート部試料では、鉛とアルミニウムの相関係数が 0.99 と非常に高く、確かに、ある一定の組成を持った汚染源に支配されていることが示唆された。最上層の樹皮がはく落してから経過した時間の長さや汚染源である道路に対するプレートの方向、雨水の浸透しやすい位置にプレートがあったかどうかなどの変動要因が、濃度差に反映されていると考えられる。また、屋久島の場合、日光と比較して直接的な汚染源と接しておらず、長期間にわたる広域的な汚染を受けた結果、表層にわずかな濃度増加として検出されたものといえる。

以下のように蓄積量を求めた。深層の鉛濃度が表層に比べて無視できるほど低いため、深さ分布の積分が外部から受けた汚染の蓄積量と考えられる。さらに、試料中に検出された鉛濃度と試料の量及び試料の面積から計算した鉛総量をプレート部、非プレート部で比較することで、プレートが打たれて以後の鉛蓄積量が計算できる。その量は、3 本の試料でそれぞれ、4.5 (R5973), 1.8 (R5975), 5.0 mgPb/cm<sup>2</sup> (R5985) であった。

このように、樹皮とプレートとの組み合わせにより、過去における汚染の蓄積量をさかのぼって評価できることが示された。しかし、もともとモニタリング用に設定されたものではないため、初期値に関するデータや条件設定、コンタミネーション対策などが不十分である。材料からの汚染が少なく、長期安定なプレートを用い、吟味された実験計画を立てることで、今後進行しつつある環境変化を樹皮を利用して、モニターできると考えられる。この手法については今後プレート被覆法ととしてさらに検討を進める予定である。

### 3) 植物の生長及び生理機能に関する研究

野外において観測される酸性霧のpHは酸性雨のそれよりもかなり低く、植物に直接的な被害を与えることが懸念されている。そこで、酸性霧の植物影響を実験的に検討するために開発した酸性霧暴露装置（フォグチャンバー）を用いて、その基本的な性能を検討するとともに、環境制御室内に同チャンバーを設置し、草本及び木本植物をpH 2～3の酸性霧に数日～数週間暴露し、葉面可視障害の発現や植物の生長、光合成活性に及ぼす影響について実験的検討を加えた。また、長期間の酸性雨処理の植物影響を解析するために、30週間にわたってpH 2～4の人工酸性雨を植物体地上部に与え、落葉や生長に及ぼす影響について検討した。さらに、酸性雨によって引き起こされる土壤酸性化の植物影響を解析するために、土壤への酸添加処理を行い、土壤のpHやアルミニウムイオン溶出量と樹木の生長や生理活性との関係について検討した。一方、光化学オキシダントの森林衰退に及ぼす影響を明らかにするため、人工光型の環境制御室内で木本植物を始めとする種々の植物を、0.1ppmオゾンに数週間暴露し、これら植物の生長や光合成などの生理機能、またクロロフィルなどの生体成分に及ぼすオゾン長期暴露の影響について検討した。

一方、野外における森林衰退の現状を、福岡県や兵庫県において継続的に調査し、森林衰退度を明らかにするとともに、雨水のpHや成分、またオゾンなどのガス状汚染物質濃度や、樹木・植生・土壤・着生植物の状態などとの関係についても、前年度に引き続き検討を加えた。本年度はこれらの野外調査時の手法についてもいくつかの検討を行った。野外における森林衰退との関係が注目されている酸性霧や、林外雨、林内雨、樹幹流等の種々の採取方法についてこれまで報告された方法や独自の方法について詳細に検討した。また、酸性雨の植物影響の一つと考えられる葉からの必須微量元素の溶脱を評価するために、樹木の葉内微量元素の分析について基礎的検討を行った。さらに、酸性・酸化性物質の影響の指標として、地衣植物からのイオン成分の溶脱についても新たに検討を加えた。

### (3) 酸性降下物の陸水、土壤への影響機構に関する研究

#### 1) 日本における集水域の酸性化予測と陸水・土壤生態系への影響に関する研究

「日本でも陸水の酸性化が起こるとしたら、いつ頃、どこから始まるか」という視点から、日本の最弱点を絞り出すことを目標に、酸性岩を主たる母岩とする7つの変成帯に流域を持つ河川、湖沼のアルカリ度を中心に調べた。測定を高頻度化して現場の変動を十分に追跡するために自動採水器とデータロガーを用いた。土壤動物への影響に関する文献調査を行った。

前年度末の段階で、酸性降下物の影響に対する抵抗力を示す流域の緩衝能と現在の酸性物質の負荷の状況と将来の変化予測とから、飛騨変成帯に属し、冬の酸性物質総負荷量が多い日本海側の若狭湾以北に含まれる北アルプス日本海側流域が、国内では最も早く酸性化する可能性がある地域であると推定した。しかし、現在はこの地域でもまだ酸性化は見られないだけでなく、また、調査結果は、北アルプス北端の日本海側斜面を下る河川のアルカリ度は0.2meq/l以上あり、まだ余裕があることが示された。

北海道の一部で現在の負荷量でも局所的・一時的に酸性化が起こっている可能性やそれに近い状態の観測結果・資料も得られたが、以後、積雪量が少なく融雪期のpH低下は観測されていない。また、日本では、融雪初期のpH低下は余り顕著に起こらない場所も多いことが示唆された。東アジア地域の経済発展に伴う負荷量の増大も予測されているので、日本でも陸水域の酸性化による生態系被害が出る可能性を否定できないという指摘もあるが、負荷量増加についての信頼性の高い予測が必要である。奥日光の外山沢では8月終わりから9月初めの大雨による増水に伴って、

アルカリ度が最大4倍にも増大し、他の溶存元素もそれぞれ増減不変様々な濃度変化を示すことが見いだされた。

前年度調査・研究の中心フィールドを北アルプス北側流域におき、国内の低緩衝能地域での調査結果と比較しながら研究を進めたが、緩衝能の小さい頂上付近では、雪はむしろ塩基性で、酸負荷量の大きい高度の小さい地域は十分な酸中和能を有することが示され、現状では、すぐに酸性化が起こる心配は少ないことが示された。

日本の変成帯と調査地点及びpH、電導度(水温)、アルカリ度を表3に示す。一般に溶存成分の濃度は同じ河川でも集水域面積が小さい上流部で値が小さいのでこれは目安である。集水域の酸塩基反応にも重要な未知の部分があることも示されたが、以上の調査・研究の結果から、酸性化の時期と生態系影響に関する正確な将来予測をするための十分な研究と迅速かつ適切な発生源対策の必要性が示唆された。

## 2) 地質・土壌の酸性雨に対する水文地質学的応答特性に関する研究

日本で河川や湖沼の酸性化が顕在化していない主たる理由は、適度の保水性と浸透能を持った塩基性の厚い土壌層が流域の緩衝能を大きなものに行っているためであると思われる。このままさらに酸性雨が降り続いた場合や酸の負荷量が増えた場合の流域酸性化の将来予測をより精度よく行うことと併せて、酸性降下物に対する日本の集水域の特徴を示すことを目標として、土壌浸透層の酸中和力に関する特性を評価するために、①深さごとの地下水の平均滞留時間(年代)を測定し、流路分配を推定する方法を検討し、トリチウム-3He/4He比法を用いて井水試料の年代決定を試みた。②塩基成分の溶脱が進み酸に対する中和力が小さくなっている関東ローム層及びシラスのなかで乱試料を採取し、カラム実験による浸透能及び吸着性・反応性の測定を行った。③土壌層表面付近の浸透水の移動に伴う無機元素の移動溶脱・地下からの供給・イオン交換などを現場で測定する方法を開発する目的でイオン交換樹脂を充てんしたポーラスカップの機能試験を行った。結果はこの方法が有望であることを示した。

土壌浸透層の緩衝能の定量的評価を進めるには、浸透層の酸中和容量、浸透水流路分配と滞留時間、風化による土壌層の生成速度などについて十分正確に知る必要がある。

地下水や土壌層の試料は、河川・湖沼水の試料に比べて格段に採取が困難なため精度のよい定量的な結論を得るためには、必要十分な試料を手に入れる条件を整えることが必要である。

表3に北アルプス山上湖の双六池で観測された、降水の酸塩基度によって変わる池の酸塩基度の変化を示す。これは、集水域の緩衝能がきわめて小さいことを示すものである。

## (4) 東アジアにおける酸性雨原因物質の制御対策とその評価に関する研究

### 1) SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 排出量の現状

中国、インド、韓国をはじめ東南アジア25か国の1975年から5年ごとのSO<sub>2</sub>及びNO<sub>x</sub>の排出量を化石燃料の消費量から推定した。中国、インド、韓国については地域ごとの分布量を推算した。化石燃料中の硫黄含有量、NO<sub>x</sub>への排出係数など、まだ不確定要素はあるが、先進国(13か国)との燃料と排出量(SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>)との割合と比較して妥当な推定値であると考えられる。

### 2) SO<sub>2</sub>及びNO<sub>x</sub>の排出制御手法

現在、我が国をはじめ北米、ヨーロッパなどの先進諸国で実用化されあるいは試験運用されている排煙脱硫及び脱硝プロセス、及び重油脱硫装置を網羅し、それぞれの特徴と問題点を抽出し



表3 河川の電導度, pH, アルカリ度

採取日	採取地点	電導度	水温	pH	アルカリ度
[北九州三郡変成帯河川]					
900328	那珂川最上流部細流	26.5	7.3	6.18	128
900328	同下村市境流入	31.5	9.3	7.63	170
900328	同南畑ダム流入部	36.3	10.3	7.49	209
900328	同発電所上碧水楼	40.3	10.8	7.60	218
900328	同南面里	52.2	11.7	7.89	379
900328	室見川椎原	30.5	10.0	7.36	159
900328	おかさぎ川志水橋	45.7	11.7	7.65	265
[領家変成帯内河川]					
900326	六甲天王ダム	146	10.2	7.74	1144
900326	同洞川湖出口	48.7	12.0	7.56	161
900326	同布引谷砂防ダム	60.0	8.7	7.76	326
900326	同住吉川霊園下	69.5	10.4	7.80	625
900326	都賀川新大橋下	110.4	10.8	7.96	754
[飛騨変成帯河川]					
901103	青木湖左岸	29.7	14.4	7.64	255
901103	木崎湖右岸	34.0	15.0	9.17	147
901104	鹿島川矢沢伏流	17.6	7.7	7.28	225
901104	鹿島川同合流点上	33.7	9.8	7.37	335
901104	梓川島々谷川上	140	9.9	7.45	417
901105	鳥川本沢三又	21.5	7.3	7.32	220
901105	鳥川二沢二号橋	17.9	8.5	7.24	293
900829	北ア双六池	7.1	---	5.81	-68
900904	同 上	8.5	---	5.90	-49
900906	同 上	9.9	---	5.85	-35
900909	北ア鷺羽池	5.0	---	5.16	-11
901012	同湖岸	3.3	7.5	5.24	-21
901012	同湖心表層	2.8	6.6	5.15	-14
901012	同湖心中層	9.2	7.5	5.38	-12
[秋田市岩見川水系三内川]					
901016	中芝沢中流左流入				203
901016	中芝沢橋下	33.3	11.4	7.68	273
901016	中芝沢橋下右流入	38.2	11.9	7.77	269
901016	中石沢水位観測所上	39.9	12.4	7.16	265
901016	同 上	39.9	12.4	7.16	261
901016	井出無沢橋上	40.7	12.4	7.50	277
901016	井出無沢	39.1	13.3	7.23	243
[日高変成帯内河川]					
910305	幌満川				536
910305	楽古川上楽古橋	21.3	4.1	7.34	148
910305	野塚川 R336	21.1	1.2	7.66	183
910305	豊似川 R336	28.6	2.9	7.53	274
910305	札内川瓢箪橋	21.7	0.2	7.82	216
910305	戸蔭別川拓成橋	20.1	0.1	7.40	217

た。

#### ①排煙脱硫プロセス

排煙脱硫方式には湿式法、半乾式法及び乾式法があるが、石灰によるSO<sub>2</sub>の吸収を基本としたものが多い。湿式法では石灰-石こう法、マグネシウム石こう法、塩化カルシウム石灰-石こう法、亜硫酸吸収法、アンモニア水溶液吸収法、希硫酸吸収法及び水酸化マグネシウム法がある。半乾式法にはスプレードライヤー法及び乾式石灰石、水スプレー法がある。また、乾式法には乾式石灰石法、乾式消石灰法、石炭灰利用乾式脱硫法、活性炭吸着法及び電子線照射法がある。

#### ②排煙脱硝プロセス

排煙脱硝プロセスには湿式法及び乾式法がある。湿式法には酸化反応を基本としたものと還元を基本としたものがあるが、乾式法は還元反応に基づいている。湿式法ではアルカリ吸収法、酸化吸収法及び亜硫酸塩還元法がある。乾式法には接触還元法、接触分解法及びモレキュラーシーブ法がある。なお、燃焼プロセスからのNO<sub>x</sub>の排出低減技術にはこのほかに低NO<sub>x</sub>バーナーの使用、二段燃焼法などがある。

#### ③排煙脱硫脱硝同時処理プロセス

排煙脱硫及び脱硝を同時に行うプロセスも何種類かが実用化されており、興味ある方式も採用されている。アンモニア注入電子線照射法、活性炭吸着/アンモニア接触還元法、酸化銅吸着還元法、循環流動層燃焼法などがある。

#### ④重油脱硫技術

燃料油の硫黄分を除去するのがSO<sub>2</sub>の排出制御のためには最も有効であり、そのための技術開発は古くから行われている。原油蒸留による残渣油を熱分解法、ガス化脱硫及び直接、間接脱硫によって硫黄分が除去されるが水素添加脱硫方式が基本である。

## 2.5 海洋汚染に関する研究

### 〔研究組織〕 地球環境研究グループ

統括研究官	秋元 肇
海洋研究チーム	○原島 省・切刀正行
地域環境研究グループ	
海域保全研究チーム	木幡邦男
水圏環境部	
部長	渡辺正孝
土壌環境研究室	高松武次郎
水環境工学研究室	原田茂樹
社会環境システム部	
情報解析研究室	須賀伸介
生物圏環境部	
環境微生物研究室	高村典子

### 〔研究概要〕

人間活動の結果生じる諸物質は最終的にはすべて海洋に流れ込んでおり、その結果として海洋でどのような現象が起こり、また、逆に海洋の環境変化が地球環境に対してどのような影響を及ぼしているのかを明らかにすることが地球環境の保全を図る上で急務となっている。海洋に流入する物質には、炭酸塩や各種栄養塩のように、海洋プランクトンの増殖に大きな影響を及ぼすものや、有害化学物質のように食物連鎖の中で生物濃縮を起こすものなどそれぞれの物質の特性等により異なった挙動をする。また、海洋は不均等な系であり、環境の空間分布や時間変動が顕著であり、しかも、これらの変動は複雑な海洋生態系を通して地球物理学的・生物化学的な素過程の連環（ダイナミカルリンク）によって生ずるものである。したがって、海洋環境で起こっている現象を把握するためには、物質ごとに物理的・生物的な輸送速度（フラックス）を見積もり、海洋生態系における各素過程の持つ機能を解明するとともに、それら素過程間の連環を明らかにする必要がある。

#### （1）大陸棚海域循環過程における沿岸－外洋の物質フラックスに関する研究

沿岸から外洋へ向けての物質循環フラックスを生み出すものの中で、①潮汐、②風及び③水温・塩分に基づく密度の3要素が複雑に作用し合った流動は海洋物質循環の中の物理的な輸送フラックスを生み出す。一方、海洋生態系を通しての生物・化学過程は海洋物質循環の中でも最も重要な要素である生物化学フラックス（Biochemical flux）を生み出す。生物・化学過程に基づく物質循環素過程を現場隔離生態系を用いて種組成変化とそれに伴う化学環境動態解明、及び安定同位体を用いた物質循環経路や循環速度の解明を行う必要がある。さらに、それら実験・観測データを用いて生物・化学過程に基づく物質循環のモデル化を行う必要がある。一方、海洋物質循環の変動の歴史は、沿岸域、大陸棚や南極海の海底堆積物中に記録をとどめている。この堆積物中の長期海洋物質循環機構を解明することは、地球環境変動や海洋汚染物質の機構解明にとって最も重要かつ有効な方法と考えられる。採取した海底堆積物試料に含まれる各種微化石、微量金属

元素含有量，有機物質，人為的化學汚染物質等の分析から長期にわたる海洋物質循環の変遷を明らかにする必要がある。

当研究所においては本研究課題の中で，①海洋物質循環の変動機構に関する研究を平成2年度より，さらに平成3年度には，②海底堆積物の化学組成を用いた長期海洋環境の変動に関する研究を開始した。

### (2) 海洋汚染物質の海洋生態系への取り込み，生物濃縮と物質循環に関する研究

人間活動により海洋にもたらせられる汚染物質（重金属や有害化学物質など）は，まず一次生産者に摂取され，捕食を通して次第に高次捕食者へと取り込まれていく。動物プランクトンは，食物連鎖の底辺近くに位置する生物で，海洋での物質循環に重要な役割を果たすとともに，そこに含まれる汚染物質濃度は局所的な海域の汚染状況をよく反映する。本研究では，日本近海で採取した動物プランクトンの汚染物質濃度を分析し，汚染物質の海洋生態系への取り込み経路と濃縮機構，ならびに汚染物質の食物連鎖を通しての循環機構を明らかにしようとしている。

### (3) 人工衛星可視域データによる広域海洋環境指標化に関する研究

植物プランクトンバイオマス量は，クロロフィル量に代表され，栄養塩などの海洋環境要素に依存している。化学量は通常リモートセンシングの対象になりにくい，クロロフィル量は，可視光域データ（海水色）という形で，衛星によるマッピングが可能である。したがって，クロロフィル量に基づいて，リン，窒素循環への人為介入や自然起源による海洋環境変動を指標化することが有力である。ただし，衛星取得量は，海洋の比較的上層の間接的な光学的情報であるから，海洋環境のパラメータと衛星取得量の関連を明らかにしてゆく必要がある。

## [研究成果]

### (1) ① 海洋物質循環の変動機構に関する研究

平成3年度は生物化学過程に起因する物質循環機構を明らかにするため，自然海域に存在する海洋生態系をそのまま捕獲し，連続観測実験，セディメントトラップ実験及び<sup>13</sup>C安定同位体を用いた無機態炭素の物質循環経路と循環速度の計測実験を行った。実験開始後7月24～28日にかけてケイ藻類が卓越し，その後8月3日までは渦ベン毛藻類，ケイ藻類ともに同程度の現存量であった。8月3日から渦ベン毛藻類へ遷移し，ケイ素制限となっていたためケイ藻類は増殖することができなかった（図1，2）。植物プランクトン分画（GF/F及び20 $\mu$ m）への炭素フラックスは7月28日には92及び140 $\mu$ gC/l/4hrであったが，ケイ藻の減少及び沈降により7月28日には20 $\mu$ m分画への炭素フラックスは急激に減少（約10 $\mu$ gC/l/4hr）した（図3）。GF/F分画への炭素フラックスはクロロフィルaの変動によく合致しており，特に8月5日に炭素フラックスのピークが現れ，1日遅れてクロロフィルaのピークが見られるのは摂取した炭素を用いて分裂を行い，翌日のクロロフィルaに反映されるためである。8月1日の100 $\mu$ m分画への炭素フラックスのピーク及び8月8～10日の200 $\mu$ m分画への炭素フラックスの増加は，動物プランクトンによる捕食によるものである（図4）。光合成速度は全実験期間を通じて10～20 $\mu$ gC/l/hr/ $\mu$ gChl-a程度であるが，8月8日は21.6 $\mu$ gC/l/hr/ $\mu$ gChl-aと高い光合成速度を示している。しかし8月8日のクロロフィルa現存量は1.85 $\mu$ g/lと低い値となっており，8月8日には大きい捕食圧が働いていたと考えられる。このように植物プランクトンの増殖に伴う物質循環は窒素，リン，シリカ等の親生物元素濃度とともに捕食も大きく影響していることが判明した。

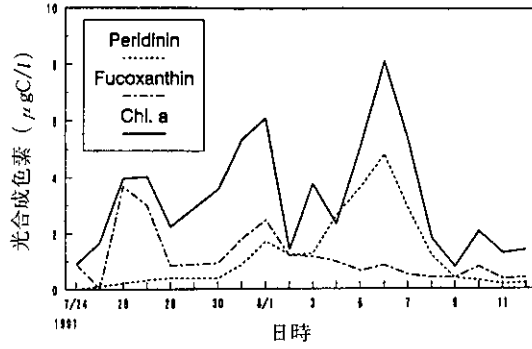


図1 表層 (0.5 m) における色素の変遷

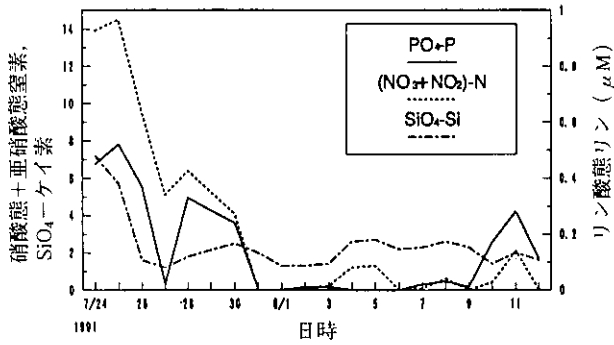


図2 表層 (0.5 m) における溶存態窒素, リン, シリカ濃度の変化

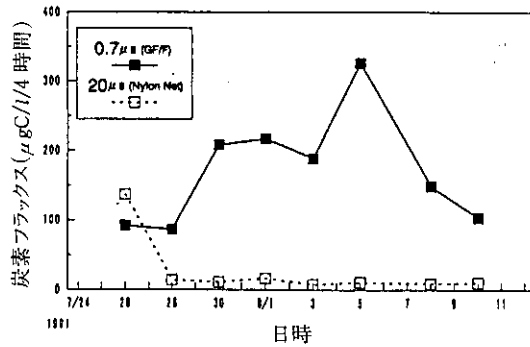


図3 植物プランクトン分画 (0.7 µm, 20 µm) への炭素フラックスの変化

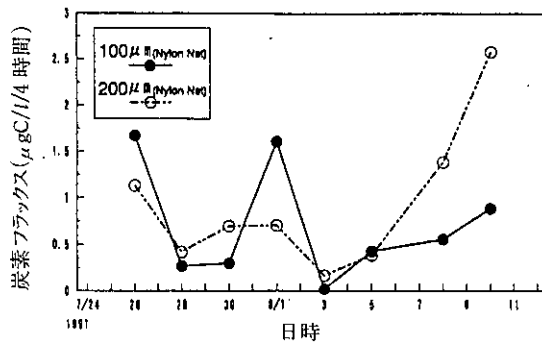


図4 動物プランクトン分画 (100 µm, 200 µm) への炭素フラックスの変化

沈降物中のフェオ色素は動物プランクトンによる捕食を受けたことにより、クロロフィルが分解して形成されたものである。実験期間中クロロフィル現存量(0~5m積算値)は平均 $12.1 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ である。一方クロロフィル $a$ とフェオ色素の和としての沈降量は平均 $8.6 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ であり、このうちフェオ色素は平均 $3.0 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ でありクロロフィル $a$ は平均 $5.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ であった。これにより植物プランクトン現存量の約70%は沈降してしまう。その中で捕食を受けず直接沈降するものは植物プランクトン現存量の45%程度であり、捕食を受けた後ペレットとして沈降してくるものは植物プランクトン現存量の約25%程度である。植物プランクトンが直接及び捕食によりペレットという形で沈降することによる鉛直物質フラックスの推定が可能となった。

(1) - ② 海底堆積物の化学組成を用いた長期海洋環境の変動に関する研究

平成3年度は南極海域のエンゲビー沖海域ケルゲレン海台にて採集した柱状試料GC1002について中性子放射化分析を行った。

GC1002柱状試料の一部は $63 \mu\text{m}$ のふるいにかかけ、分離された $63 \mu\text{m}$ 以上の粗粒粒子について有孔虫の有無が調べられている。それによると0.4~0.8m, 1.7~2.2m, 3.0~3.9mの部分に浮遊性有孔虫を多く含むことが顕微鏡下で確認されている。今回、中性子放射化分析により得られたCaの鉛直分布はこの $63 \mu\text{m}$ 以上の粒子中の顕微鏡観察結果を定量的に裏付けるものとなっている。特に3.2~3.9mにかけての深い部分では乾燥試料中最大16% (重量%)ものCaが含まれており、大量の有孔虫が存在していたことが判明した。Feの鉛直分布は1.8~2.5mにかけて5%程度と多く、深い部分ではFeは低い濃度になっている(図5)。その他Al, Zn, Mn,

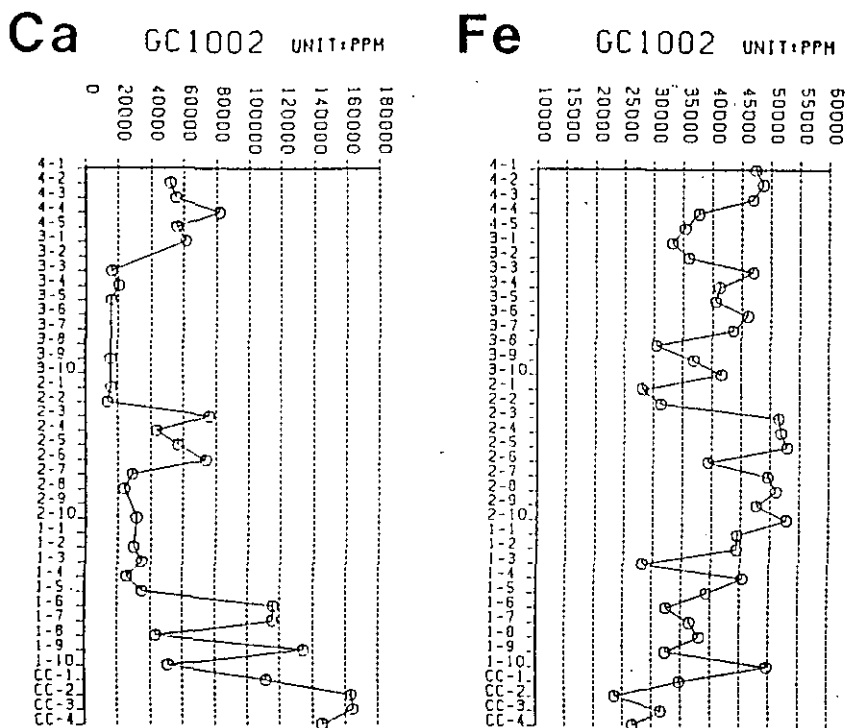


図5 堆積物試料(GC 1002)中のCa, Feの鉛直分布

Co, Ba, Sc, La, Hf, Ce, Crについてもその鉛直分布が得られている。

現在、柱状試料の年代測定が行われておらず、ケイ藻類種組成からの大まかな年代推定がなされている段階である。さらに有機物等については分析が行われておらず、元素分布だけからではその解析は困難な状態である。南極海周辺海域は湧昇流に伴ってリン酸も硝酸も高濃度であり、植物プランクトンの生産量はその栄養塩の量からは本来もっと多くあってもいいと考えられている。しかし現在、それが低く抑えられているのはこの海域への鉄の供給が小さく、鉄が植物プランクトンの生産の律速因子のためではないかと考えられる (Martin *et al.*, 1990)。ポストーク氷床コア中のアルミニウム量等から推定される大気を通してのダストに伴う鉄の供給は、最終氷期には間氷期の50倍あったと推測されている。氷期には、このダストに伴う鉄の供給により植物プランクトンが栄養塩を利用して増殖したことが大気の二酸化炭素濃度を低下させた原因ではないかと考えられている。しかし南極海海底堆積物中の化学組成についての分析と有孔虫をはじめとする生物組成を含めた詳細なデータ蓄積は始まったばかりであり、今後行うべき重要な課題である。

## (2) 海洋汚染物質の海洋生態系への取り込み、生物濃縮と物質循環に関する研究

前年度までの結果から、プランクトンネットを用いて日本近海から採取した動物プランクトン(バルク試料)には、遠沈やフルイによる洗浄を行っただけでは容易に除去できない無機物が混入しており、それはプランクトンの消化器官などに取り込まれたものであると推定した。そのため、バルク試料の分析によって動物プランクトン本来の元素組成を知るのは困難であった。そこで本年度は、既に提案した2種類の酸で生体組織と生体組織+無機物を選択的に湿式分解する方法をより詳しく検討した。また、船上での試料の保存方法の改良や実体顕微鏡を用いた種別試料の分別・採取を行った。

本年度に明らかとなった点を以下に要約する。

1) ネットで採取した試料(バルク試料)では、しばしば高濃度のアルミニウム、ケイ素、スカンジウム、チタン、鉄などが検出され、無機物の混入が認められる。試料は、0.328 mm 目の相当に荒いネットで採取したものであるため、無機浮遊粒子が混入した可能性は少ない。また、試料外部に付着した無機物は、試料の洗浄、特にフルイを用いた洗浄によりほぼ完全に除去されていると思われるにもかかわらず、無機物はよく洗浄した試料にも残存した。これらのことから、バルク試料に混入する無機物は、プランクトンの消化器官などに取り込まれたものである可能性が高い。

2) 硝酸だけで分解した試料と硝酸とフッ酸の混酸で分解した試料の分析値の差から、無機物の混入量とその質が評価できる。また、混入無機物の影響を完全に除くのは不可能であるが、分解に硝酸のみを用いれば、バルク試料についてもプランクトンの生体組織が持つ本来の元素組成を知ることができる。その場合、試料重量として灰分量を補正した値を用いる必要がある。上記2種類の酸分解法で得られた分析値の差を地殻元素組成と比較して(図6)、検討した結果、Si, Al, K, Ti, Ba及びScなどの土壌や底泥に比較的均一に存在し、しかも地殻から可溶化され難い元素では両者の間に非常に良い相関が見られた。一方、人間によく利用され、環境で動きやすいためしばしば特定の環境に偏在する重金属などは、プランクトン試料に混入した無機物に高濃度で含まれた。この富化された重金属種のパターンは廃棄物汚泥のものと類似しているため、混入無機物は、土壌や底泥などの粒子と人間活動を反映した浮遊粒子(例えば投棄汚泥など)で構成されている可能性が高い。

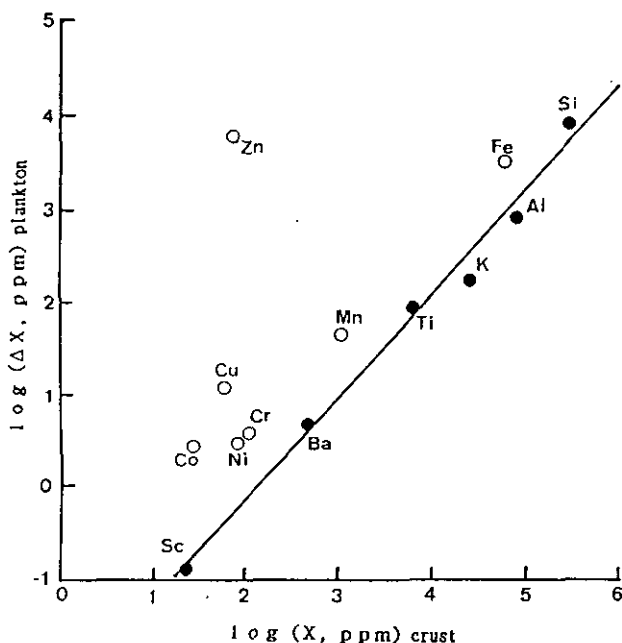


図6 硝酸分解と硝酸/フッ酸分解によって求められた動物プランクトンの元素濃度の差と地殻元素組成との比較

$\Delta X$  : (硝酸/フッ酸分解による分析値) - (硝酸分解による分析値)。

3) 試料の船上での保存に関して、採取試料をそのまま $-4^{\circ}\text{C}$ で保存するだけでは不十分な場合があります(特に温度が不安定となった場合)、1991年の試料で付着微生物あるいは試料自身の体内酵素によると見られる試料の部分変質が観察された。そこで、船上で試料を保存瓶に移すときに、アジ化ナトリウムを約 $0.01\text{M}$ となるように加えて $-4^{\circ}\text{C}$ で持ち帰る方法を検討し、良い結果を得た。

### (3) 人工衛星可視域データによる広域海洋環境指標化に関する研究

平成2年度には、主にVOS (Volunteer Observation Ship) による、海域の時空間連続計測の概念設計を行った。この概念設計に基づいて、地球環境研究センターの業務として、クロロフィルと溶存態栄養塩の自動計測機器の開発が行われ、平成3年度末に神戸と釜山間を結ぶフェリー「檀皇」への設置工事と海上試験が行われた。平成3年度には、同船への乗船調査を行い、植物プランクトン属性の調査を行った。

植物プランクトンの属性としては、種組成及びマクロな量としてのクロロフィル量のほかに、その細胞粒子濃度、サイズ分画が重要である。VOS上で効率的にデータを採取するため、近畿大学と共同で、ファイバーを経由したレーザーによる蛍光粒子計測法(以下、Bio-Particle Counterの略称BPCを用いる)を發展させた。

図7は、日韓フェリー上での連続計測による、釜山-神戸間のpH、塩分(S)、水温(T)、蛍光度(FI)を示す。蛍光光度とpHが相関を持っているのが見てとれる。これは光合成による $\text{CO}_2$ 吸収のため、pHが上がるためと考えられる。

BPCの室内実験により、サイズ分画ごとに体積を概算して積分した量とクロロフィル計測値



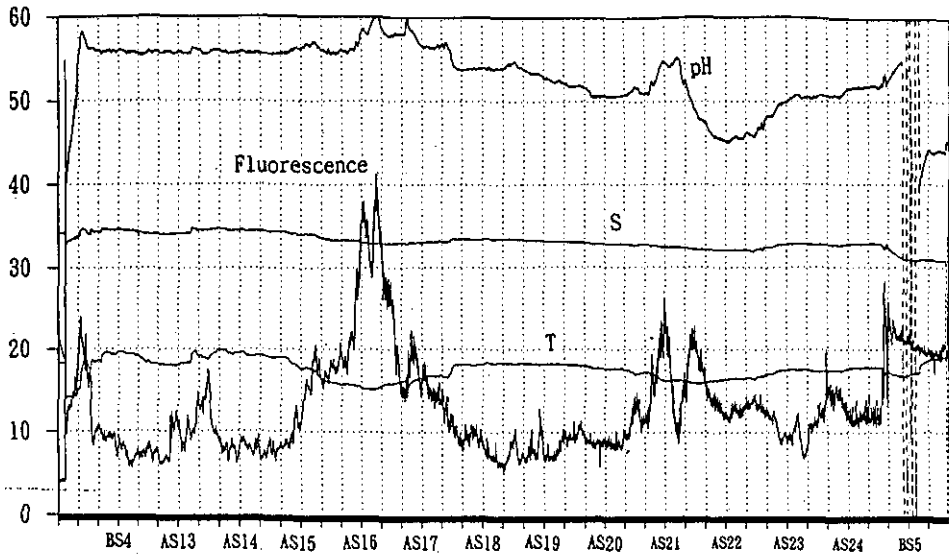


図7 連続計測記録による pH, 塩分, 水温, 蛍光度の空間分布

との間によい相関があることが確認できた。ただし、プランクトン種ごとに、相関の度合いが異なることも見られた。また、サイズの検出限界の検討を行い、 $6\sim 60\mu$  であることが確認された。これらの室内実験と並行してフェリーの取水サンプルの計測を行った。図8は図7と同じ航海での、粒子サイズ組成の空間分布を示す。各サイズ分画の総和はクロロフィル量あるいは蛍光度の空間分布とよく対応している。また、比較的大きいサイズ分画 ( $>20\mu$ ) の粒子数が栄養塩濃度によく対応しているようである。

以上、フェリーの連続取水による計測データから、海洋のクロロフィル分布が海洋環境要素を反映しているとともに、pH等が植物プランクトンバイオマスに依存していることが確認された。また、海洋の生物量・化学量ともに、空間的に非常に非均質 (heterogeneous) であり、従来の離散的な海洋観測では十分とはいえないことも推測される。また、図7以外の日時のデータの処理により、植物プランクトンのブルーミング、栄養塩枯渇、補給、回帰等による、時間変動が顕著なことが分かった。また、このことから、時系列的な意味でも、衛星のクロロフィルマップか、あるいはVOSによる海域の常時観測が必須であることが分かる。衛星とVOSは相補的な役割を果たす。すなわち、衛星データ値を確定するためには、VOSによる海洋の実測データが必要になるし、衛星によって、面データへの拡張が得られる。また、オペレーショナルな意味だけでなく、このような常時モニタリングデータが確保された上で、海洋生態系・環境変質の解析を行うことが重要となる。

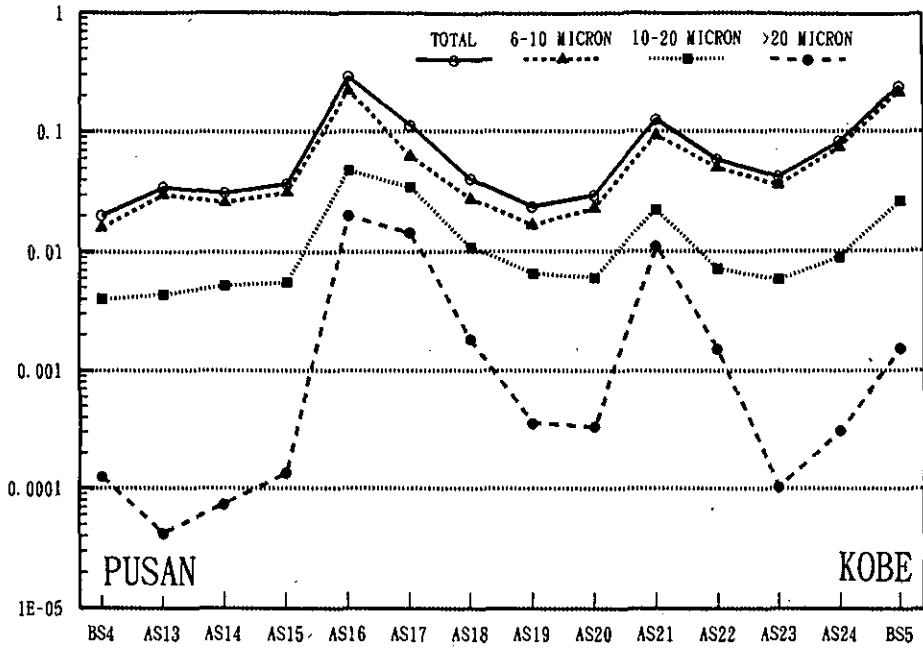


図8 レーザー蛍光による植物プランクトン粒子数のサイズ分画の空間分布  
縦軸の単位は1 l 当たり  $10^6$  個。

## 2.6 熱帯林の減少に関する研究

### 〔研究組織〕 生物圏環境部

上席研究官	安野正之
地球環境研究グループ	
森林減少・砂漠化研究チーム	○古川昭雄・宮崎忠国・可知直毅
野生生物保全研究チーム	○椿 宜高・高村健二・奥田敏統
温暖化現象解明研究チーム	竹中明夫
社会環境システム部	
情報解析研究室	安岡善文
資源管理研究室	乙間末廣
共同研究員	2名

### 〔研究概要〕

本研究は、「熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究」、「熱帯林生態系における野生生物種の多様性に関する研究」、「熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究」、「熱帯林生態系の修復に関する研究」、「NOAA AVHRR (LAC) 画像データを用いた東南アジア地域の植生指数図及び植生分布図作成に関する研究」の5研究課題よりなっている。この研究に参画している研究機関は、国立環境研究所の他に森林総合研究所、農業生物資源研究所、熱帯農業研究センター、東京大学、名古屋大学、京都大学、大阪市立大学、愛媛大学、九州大学、岩手大学と日本野生生物研究センターである。以下に、各課題の内容と国立環境研究所が携わっている各サブテーマの研究目的を記す。

#### (1) 熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究

野生生物の宝庫でもある熱帯林の減少は大規模で、多くの野生生物種が消滅、もしくは棲息場所が狭くなって種の維持が困難になっているといわれている。現在、熱帯林伐採跡地への植林が試みられているが、過去に熱帯の各地で見られた熱帯林更生にはほど遠い。とりわけ単一樹種による植林では、動物種の極端な減少を防ぐことばできない。このような事実を考えると、自然条件における熱帯林生態系の基本的な知識、特にその環境と構造に関しての知識が研究の基盤として必要である。

以上の研究目的にしたがって、この研究課題においては森林内環境の特性の基礎調査を行いそれと植生型の関係、各植生型における代表的な樹種の特長、分布様式、動物相の特徴などの基本的な研究を行う。

#### (2) 熱帯林生態系における野生生物種の多様性に関する研究

熱帯林に生息する生物は、地球上に生存している生物の50~80%になるといわれている。しかし、熱帯林の伐採によってこのような動植物種が減びたり、種の維持が困難なほどに生息地が狭められている。一度減じた種は、二度と地球上に戻ることはなく、生物資源の保存、確保といった面からも緊急に解決しなければならない問題である。さらに悪いことには、熱帯林にどのような種が生息しているのかさえも分かっていない。以上の観点に立って、本研究では、熱帯林生態

系において見られる野生生物種の多様性について、動植物の個体群動態、生活史及び動植物の相互関係に関する生態学的知見の蓄積とその応用を目指す。

### (3) 熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究

熱帯林の急激な減少が地球環境に多大な影響を与えているとの考えがある。すなわち、熱帯林の年間降水量は温帯林の4倍以上にもなり、その約半分が蒸発散によって大気中に放出されている。さらに、熱帯林の伐採や焼払いによって熱帯林がCO<sub>2</sub>のシンクではなくソースになっているとの見解もある。しかし、環境形成要因としての熱帯林の役割に関して、実際のデータに基づいた解析はほとんどなされていないのが現状である。一方で、熱帯林の伐採は土壌の急速な劣化をもたらし、森林の再生を困難にしているとの報告がなされている。そこで、本研究では、熱帯林内外の微気象要因の測定、土壌形成に対する熱帯林構成生物の役割を解明することによって、熱帯林及びそれを取り巻く周辺地域の気候に対する影響と周囲環境の熱帯林生態系への影響を現地調査とモデルの構築によって解析し、地球的規模での熱帯林の環境形成作用を明らかにする。

### (4) 熱帯林生態系の修復に関する研究

乱伐や開発によって破壊された森林の生物資源と生態系の機能を回復させるためには、熱帯林生態系の持つ自己修復機能を利用して自然林の修復を図ることが重要であり、その機構を解明しこれらの知見に基づく熱帯林修復手法の開発が急務である。

この研究課題では、熱帯林生態系の復元に寄与する修復機能の解明を最終的な目的とし、熱帯林生態系の自然更新機能の解析に関する研究を行う。この研究で目指していることは、皆伐によって土壌荒廃が回復不可能になることを避け、択伐による森林資源の獲得を行うべきであるとの提言をするための科学的根拠を得ることである。しかし、択伐によれば熱帯自然林が必ず回復するとは限らない。そこで、どのような機構で更新が進行するかを解明し、熱帯林修復に対して貢献できる知見を集積する。これらの研究によって得られた知見と技術は、荒廃した熱帯自然林生態系の効率的な修復に寄与するものと期待される。さらに、ここで得られた知見は、熱帯地域以外の自然林修復にも応用が可能である。

### (5) NOAA AVHRR (LAC) 画像データを用いた東南アジア地域の植生指数図及び植生分布図作成に関する研究

東南アジア地域において、大洪水、台風、異常高温といった従来見られなかった大型災害が近年発生し、大きな被害に見舞われている。これらの現象の一因として森林減少による中規模の気象変動が指摘されており、森林減少の実態を正確な調査・解析によって把握することが緊急課題となっている。1990年10月に開催されたITTOの国際会議においても、森林の広域的な現状調査の必要性が指摘され、リモートセンシングの活用が期待されている。

本研究では、人口衛星NOAAに搭載されたセンサーAVHRRからの画像データ(LAC, 1km分解能)を用いて、東南アジア地域の森林の現況及びその変化を調査する手法を開発する。すなわち複数の衛星画像からモザイク画像、広域植生指数分布図、広域植生図を作成し、さらにそれらの時系列図より地域の植生環境の変化を調査する手法を開発する。

## 〔研究成果〕

### (1) 熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究

#### 1) マレーシアの低地フタバガキ林における埋土種子の組成と空間構造

##### ①はじめに

熱帯林の持つ多様性は、さまざまなレベルで見られる空間的な森林構造の異質性に負うところが大きい。この研究では種の空間分布構造を解析し、空間構造を形作るプロセスとしての種子散布の種特性を調べることにより、熱帯林の空間的な異質性 (Heterogeneity) 及びその維持システムを解明することを目的としている。現在までの研究ではその手始めとして、低地フタバガキ林の埋土種子の組成とその空間分布に関する調査を実施した。

##### ②調査方法

調査地はパソー森林保護区で、明瞭な優占種を持たず、高い種多様性を持った低地フタバガキ林である。マレーシア森林研究所 (FRIM) によって作られた 100×200 m の調査区内で 20 m 間隔の格子状に 40 か所の地点で、各 33×33×2 cm (0.1 m<sup>2</sup>; 2 l) の森林土壌を採取し、篩を用いて径 1.4 mm 以上の種子を抽出した。ここで得られた種子を分類し、さらに生死を知るために軟 X 線を用いて種子内部を透視し、一部の充実種子については発芽試験を実施した。一方、埋土種子の同定のために調査地周辺に生育するマカラングなどの数種類で結実している個体から種子サンプルを採取して同定用標本を作成した。

##### ③調査結果

埋土種子の同定ができたのは一部の種のみであるが、約 20 種類が出現し、出現個体のうち過半数を *Macaranga* spp. が占めた。平均埋土種子密度は 160/m<sup>2</sup> (うち *Macaranga* spp. が 105) で、出現種のうち個体数が多かったのは *Macaranga hosei* (76.8/m<sup>2</sup>) *M. heynei* (21.6) *M. hypoleuca* (4.9) *Girouneria* spp. (33.0) であった。空間分布を見ると、極めて集中的な分布を示し、ほとんどが親木の下にしか埋土種子を持たないことが分かった。また、*Macaranga* では約 90 %、*Girouneria* では 100 % が発芽力のない中空種子であった。

鳥によって広く散布されると考えられるマカラングの種子が親木の近くにしか分布しないのは、パソーにおいてマカラングの種子散布を担う鳥類相が欠落していることを示唆し、また、直接的な結果として調査地域で見られる林冠ギャップに典型的な先駆種であるマカラングの稚樹が極めて希にしか出現しないことが観察された。

#### 2) 植生の反射スペクトル測定

熱帯地方の植生の基礎的な反射スペクトルを把握するために、ポータブルフォトメータ (阿部設計 2703 MM 型) を用いて、各種の植物の反射スペクトルの測定を行った。使用したフォトメータは、400~1050 nm の波長範囲を 17 バンドに分光し、対象物からの反射光の強度を測定する装置である。平成 3 年度は、このポータブルフォトメータを用いて、7 月 31 日の LANDSAT-5 号及び 8 月 2 日の MOS-1 号衛星の飛来に同期して、クアラルンプールを中心とする半径約 50 km の地域で、各種の植生 (熱帯雑木林、パーム椰子林、ゴム林、マングローブ林、畑、芝等) 及び土壌、水、砂地、人工物等の反射スペクトルの測定を行った。また、8 月 7 日には、ランカウイ島において、LANDSAT-5 号の上空通過に合わせて、同様なスペクトル計測を行った。測定されたデータは絶対輝度値校正を行った後、計算機処理の可能なスペクトルデータベースとしてデータベース化した。ここで得られたスペクトルデータは樹種の違いによる反射スペクトルの差、植物の活性度と反射スペクトルの関係、衛星画像データを利用した熱帯林の植生分類、熱帯林の減少や回復状況の把握等のための基礎データとする。

## (2) 熱帯林生態系における野生生物種の多様性に関する研究

### 1) 生態的特性の異なる樹種の定着過程に及ぼす動物の影響

#### ①はじめに

多くの熱帯の森林群落は種組成的に非常に不均一で、数ヘクタールにも及ぶ広大な面積の中に数個体の同一種しか見いだせないほどの高い多様性を保っている。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、さまざまな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さまざまな生物の適応を許容するニッチェ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 (Refugia) のような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 (Mabberley 1992)。確かに熱帯地方では“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のであろう。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可能性がある。

このような背景から Janzen (1970-1971) や Richards (1973) は動物と植物の相互作用に着目し、熱帯林の種多様性にかかわる興味深い仮説を打ち立てている。それによれば、熱帯林では大型ほ乳獣から微少な昆虫に至るまで多様な植食性の動物相が存在し、それぞれが特定の植物と“食う-食われる”の関係を持っているという。親個体の回りにはこの特異的な関係を持った捕食者が高密度で存在し、親の回りではその高い捕食圧のためにあまり子供は育たず、遠くへ飛ばされた個体がよく育つと予想している。

この説は熱帯林での捕食者の多様性と動植物の種特異的な相互作用を前提としている。また、多くの植物が遠方にまで種子を散布する能力を持つという仮定に基づいている。たしかに親木が死んだ跡を別の種の個体が埋めるように更新が起これば種の多様性はそうでない場合に比べて高く維持できる。Janzen はその後も南米熱帯林においてこの説を裏付けるようなデータの提示を行っているが、東南アジアでの報告例は知られていない。

本研究の目的は南米やアフリカの熱帯林とは種組成、多様性、森林構造等において異なった様相を示すといわれる東南アジアの熱帯林で樹冠構成種の実生の生存率と種特異的な捕食者の関係を調査し、これらの機構が種多様性にどの程度貢献しているかを明らかにすることである。

#### ②調査方法

調査地はマレーシア・クアラランブール郊外 (Kepong) にある FRIM の敷地内の実験林と Negeri Sembilan 州の Pasoh である (北緯 2°59', 東経 102°19')。

Pasoh では、最近アメリカの Ashton らによってこの森の中心部に 50 ha の大面積プロットが設置され、直径 1 cm 以上の植物の直径や位置情報がすべて記録されている。この地域は熱帯多雨林気候下に入るが、年間降水量が 1850 mm (Manokaran & Kochummen, 1990) 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のが平均すると 1 年のうち、1~3 月と 7~9 月頃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。

調査の対象とする植物は、フタバガキ科 *Dryobalanops aromatica* (現地名 Kapur), *Neobalanocarpus hemii* (同 Chengal), ウルシ科の *Pentaspadon motylei* (同 Pelong) である。

Kapur はマレー半島部とボルネオ島に分布し、30 m 以上にも達する大木となる (Symington, 1974)。FRIM の敷地内の丘陵地には高木層の構成種が Kapur からだけなる森林がある。この

Kapur は 1930 年代、種子や苗として人の手によって植えられたものである。Chengal は樹高 50 m 以上の大径木になる植物でマレー半島の低地から海拔 1000 m の地域まで広く分布している。Chengal の特徴として他の多くのフタバガキ科の植物と異なり種子に羽がついていないことがあげられる。

Pelong は羽状複葉をもつ枝を樹冠部に広げている。Pelong も高さ 40~50 m 以上の林冠木となりマレー半島に広く分布している。年 2 回の花期 (3~5 月, 10~11 月) を持つという。属名の *Pentaspadon* は 5 つの不稔性の雄ずいを意味する。

Kapur に関しては 1991 年 8 月に FRIM の敷地内にある Kapur の森の中の調査区 (約 1 ha) で集めた種子を以下の 4 つの処理に分け、それぞれの処理区における実生、種子の生存率を調べた。4 つの処理は集めた種子をそのまま林内に直播きにした場合、育苗床で発芽させて林床に移植した場合 (子葉期)、2 週間程度まで育苗床で生育させて移植した場合 (4 葉期)、2 か月程度まで育苗して移植した場合 (6 葉期) である。これらを、Kapur の優占する林と Kapur がまったく生育していない森 (Non-Kapur) へ移植した。

調査区 (約 1 ha 程度) で平均して 1 日当たり 300 個以上の種子を集めることができた。この種子は休眠性がなく地上に落下した種子は早ければ 2~3 日で発芽した。播種直後に草食獣 (げっし類、野豚) の被食が認められた。ほとんどの場合、播種後 1~2 日の間にほとんどの種子が被害を受けたため、プロテクトケージを設けた (網目の大きさ 18×8.5 mm)。

Pelong と Chengal は林床に当年生の実生と思われる個体が多数見つかったことと、種子の採取ができなかったため、自然に生育している実生個体を調査の対象にした。Pelong の調査地では親木から東西南北の 4 方向に放射状にのびた線上に 5 m 間隔で 1×1 m から 3×3 m のプロットを設置し、そのプロット内でマーキングした実生個体の生存率を調べた。

また、林床の光環境の違いによって実生の生長や生存率が影響を受けることも考えられるので、Kapur や Pelong については樹冠の粗密状態が異なる場所を選んで実生を移植しそれらのモニタリングを行うことも試みた。

どの種の実生についても 1 週間ごとに生存個体数、葉の回転率、被食の程度などをチェックしさらに 1 月ごとに各個体の高さ、地際直径を測定し地上部現存量の推定を試みた。

### ③調査結果

#### Kapur

第 1 回の調査では各プロットに 72 個の種子をまいた。ほとんどの種子が 1 週間以内に発芽するのでこれ以降の残存個体数は実生の個体数を示す。また、第 3 回目の調査では被害を最小限にとどめるため、Kapur と Non-Kapur の林内に分散してまき (12 本の木を選んでその株元に 8 個ずつまいた)、それを落ち葉で覆って隠したりしてみたがその効果は認められなかった。Kapur の実の殻斗と堅果のすき間から出てくる芳香性の白液が捕食者を誘引している可能性がある。第 1 回目と第 3 回目 (第 2 回目は第 1 回目とほとんど同様の傾向になったので省略) の実験では Non-Kapur の森にまいたもののほうが Kapur の森にまいたものに比べて高い生存率を示し、種特異的な捕食者説を暗示させる結果であったが、第 4 回目の実験では両者の関係が逆になり Non-Kapur の森にまいた種やそれから発芽した実生の方が早く消失した。このときの種子の捕食も草食獣によるものと思われ、発芽後 25 日頃まで掛けておいたプロテクトケージの効果がよく表れている。

主たる捕食者であると思われるげっし類や野豚の採食による Kapur の実生期 (子葉期, 4 葉期, 6 葉期) での日当たりの死亡率はほぼ一定で、約 4~7 %/d であり、Kapur と Non-Kapur の森

との間ではほとんど差が認められなかった。概して種子から実生に至るまでの過程での死亡率はまいた時期によって変動するようで、種子の直播きよりも子葉期、子葉期よりも4葉期まで育苗して移植したものの方が生存率が若干高くなった。

Kapurの実生の生存率に親木からの距離が有効に働いているかどうかという点に関しては今回の調査結果は否定的であった。これは、種子や実生を食べた捕食者の行動域がKapurの森とNon-Kapurの森の両方にまたがっていたためかも知れない。すなわち、捕食者の活動期がKapurの種子散布時期と重なっており、この捕食者は種子の供給がない時期は他の植物の種子あるいは別の植物を餌としている何でも屋 (generalist) である可能性が高い。多くのフタバガキ科の植物がそうであるようにKapurもまた隔年結実性を示すという (Symington, 1974)。ある特定の植物の種子のみを食物源とする動物にとって、その種子が定常的に得られなければ、その動物が種子を捕食するためだけの目的で親個体の周辺に固執するとは考えにくい。すなわち、このような植物では種子散布から種子の定着に至るまでの過程において種特異的な捕食者がその植物の分布に参与している可能性は低いといえる。このような植物で親個体の回りに子供が少ないとすれば、それはむしろ種子定着後の実生生長過程における種特異的な植食性昆虫などによる影響ではないかと考えられる。

#### Pelong, Chengal

Pelongの被食された個体の割合は非常に低く、植食性の昆虫による食痕と思われる小さな穴が葉身に残っている程度である。草食獣によって採食されたものは認められなかった。

親木から南北、東西にのばしたトランセクト上での実生の残存率を見ると、親木の近隣域で残存率が東西、南北両方向とも低下し、Janzen (1970) らの仮説を裏付ける結果となっているが、死亡要因については現在解析中で、種特異的な捕食者が関与しているかどうかは今後の調査の進展に伴い明らかになってくるものと思われる。一方E5、S5等の親個体からいちばん離れた地点でも残存率が低下している。この原因について、親個体から離れるに従い親株と特異的な共生関係にあった菌類などによる実生の生長促進作用が低下することが考えられるが、この点も推測の域をでない。もしこういった要素が実生の生存率に強く影響するとすれば、種特異的な捕食者による効果と相まって親木からある一定の距離を置いた地点で実生の生存率が最大になる可能性がある。Janzen (1970)、Richards (1973) らは実生の個体密度が親個体からある一定の距離を置いたところで最高値に達するというモデルを提示しているが、生存率について、このようなモデルが成立するかどうかについては触れていない。

さらに、親個体から離れた場所では個体密度が非常に低いため、わずか数個体の枯死が全体の生存率に大きく影響する効果も無視できない。

また、実生個体密度と生存率の間には有意な関係が認められなかった。林床の実生密度は高いところで  $15\sim 17\text{ m}^{-2}$  であった。調査しているエリア (約  $50\times 50\text{ m}$ ) の中でマーキングした個体は約 600 個体に及ぶ。高さは  $10\sim 20\text{ cm}$ 、地際直径が  $1.5\sim 2\text{ mm}$  程度、地上部現存量は  $30\sim 150\text{ mg}$  程度の範囲にほとんどの個体が納まる。いずれも調査開始時期 (1991年8月測定時) の値である。これより1か月おきの現存量の変化を調べたが林冠がすいた比較的明るい林床以外ではほとんど増加していない。

これだけの密度で実生が生育しているにもかかわらず、低木層、亜高木層にはこの種が見あたらない。何年かに一度、まとまった種子供給があり、林冠にギャップが生じるまで実生の状態で待機しているのか、あるいは毎年種子供給があるがほとんどの実生が1年以内に消滅してしまうのか、今のところ不明である。実生の死亡が何によるのか、またそれは親木との距離によってど



う変わるのかは継続調査の結果を待たねばならない。

Chengal に関しては 1991 年 11 月に調査を開始して、まだ 1 回分のデータしか得ておらず、生存率や個体生長に関する解析や考察ができるまでには至っていない。Zainudin (1990) は Pasoh の森で Chengal の実生生長と発芽について調査を行い、実生の個体密度は親から離れるにしたがい減少し、その生存率は実生の密度、林冠のギャップの有無に強く影響を受けるという報告を行っている。残念ながらこの報告においては実生の生存率と親からの距離との関係や動物による採食の影響などの詳しい解析が行われていない。本種は前述のように種子に羽がついていない。種子についている羽が必ずしも種子散布の飛距離の拡大に有効に働いていないのではないかという説 (Whitmore, 1984) もあるが、種特異的な捕食者と種子散布能力との関係を解きあかす上でも興味深い植物である。

#### ④今後の課題

現在のところ親木に特異的な捕食者のためにその回りで子供があまり育たないという仮説は種によって当てはまる場合とそうでない場合があるということがいえそうである。もちろん今回の結果だけで熱帯林の種多様性と宿種特異的な捕食者との関係を論ずることは不可能である。ただ、種子落下から稚樹に生長するまでの過程で関与する捕食者も変化し、それらが種特異的であるかどうかによって実生の定着率や分布範囲が影響をうけるということが予想される。また親木がパイオニア種であるか極相種であるかによって捕食者とのかかわり方が異なる可能性があるのでこの点についても今後対象種を絞って調査する必要があると考えられる。

さらに植物は樹齢に応じて動物に対する防御機能を変化させることが知られているが、実生から稚樹にいたる過程においてこれらの防御機能がどう変化するかという点も重要である。

### 2) 熱帯樹種の光合成速度と気孔コンダクタンス

#### ①はじめに

熱帯樹種の光合成速度がどの程度あるのかについての知見は極めて乏しい。過去には、極めて高い光合成速度が報告されたこともあったが、その後の報告では温帯樹種と比較して高くはないとの報告もなされている。そこで、潜在的な光合成速度を求めるために、マレーシア農科大学のキャンパスに植栽されている熱帯樹種の光合成速度と気孔コンダクタンスの日変化を測定した。

#### ②調査方法

光合成速度の測定には ADC 社製の光合成ポロメーターを用い、気孔コンダクタンスの測定には Li-Cor 社製のポロメーターを用いた。

#### ③調査結果

樹種による差異を明らかにするため、気孔コンダクタンスと光合成速度の日変化の測定結果から、それぞれを光との関係で示した。測定点のバラツキは、測定手法によるものと思われ、光の測定と CO<sub>2</sub> や H<sub>2</sub>O の測定に要する時間が異なるためと、天候によるための測定数の少なさが原因である。測定地点では午後には降雨によって測定が中断されるため、温帯では 1 日の変化が得られるのに対して、熱帯では午後の測定結果を得るのは極めて困難であるからである。

気孔コンダクタンスを測定した 8 種の熱帯樹種の中では (図 1), *Millettia atropurpurea* が最も高い値を示したが、それでも温帯樹種の中でも高い気孔コンダクタンスを有する樹種と比較すると約 1/2 以下であった。この値は、温帯の常緑樹種の気孔コンダクタンスに近く、熱帯樹種の気孔はそれほど開いていないことを示している。

熱帯樹種の気孔コンダクタンスが低いことの一因として、周囲の湿度が高く (80% 以上にもなる)、気孔がそれほど開かないことが考えられる。また、温帯での測定結果から、概して常緑

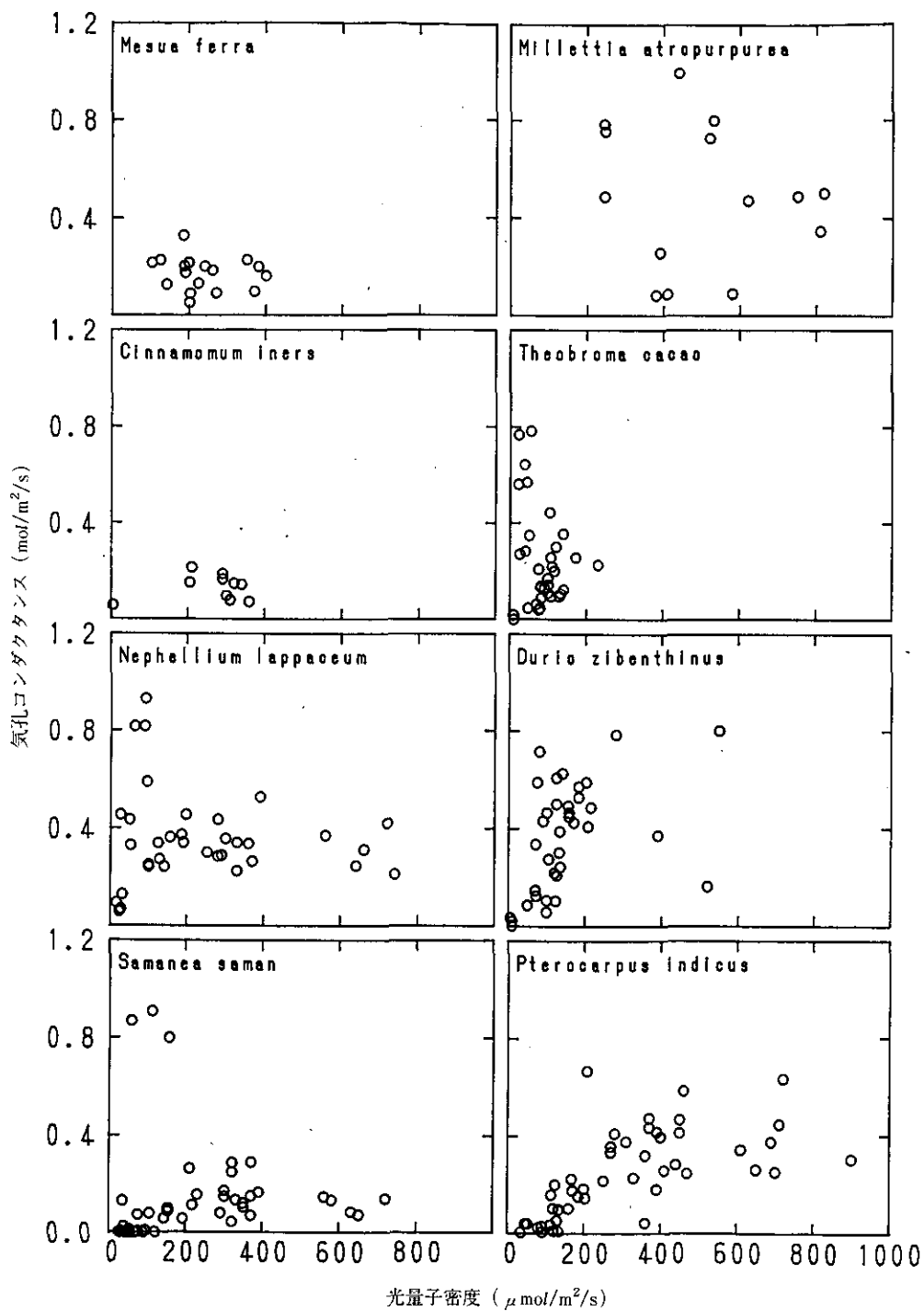


図1 熱帯樹種の光量子密度と気孔コンダクタンスとの関係

樹の気孔コンダクタンスは落葉樹のそれよりも低く、落葉樹の気孔コンダクタンスの約 1/2 程度しか有しない樹種による差異も考えられる。一般に、樹木の気孔は葉の裏面にのみ分布し、草本植物と比較すると気孔の大きさは小さく密度が高い。この傾向は常緑樹で顕著である。小さい気孔と気孔密度の高さは、拡散の概念から考えれば高い気孔コンダクタンスを示すはずであるが、実際には気孔密度と気孔コンダクタンスとの間には相関関係が見られず、気孔密度と気孔開度との積とが気孔コンダクタンスと正の相関関係を有することから、気孔密度よりも気孔開度が気孔コンダクタンスを支配する要因としては大きいものと考えられる。それゆえ、熱帯樹種や温帯の常緑樹種の気孔が大きく開くことはなく、その結果として気孔コンダクタンスが低いのであろう。

光合成速度も気孔コンダクタンスと同様に、温帯の落葉広葉樹の値と比較すると 1/2 から 1/3 の値を示すにすぎなかった (図 2)。今回測定した熱帯樹種は 3 種にしかすぎなかったので、熱帯樹種の光合成速度が全て低いとは言い切れないが、8 種で測定した熱帯樹種の気孔コンダクタンスの結果から、その他の樹種の光合成速度も決して高くはないと考えられる。すなわち、光合成速度の律速因子である気孔コンダクタンスが低いことから、熱帯樹種の光合成器官への CO<sub>2</sub> の供給は低く、その結果として光合成速度が低いであろうことが推測できるからである。

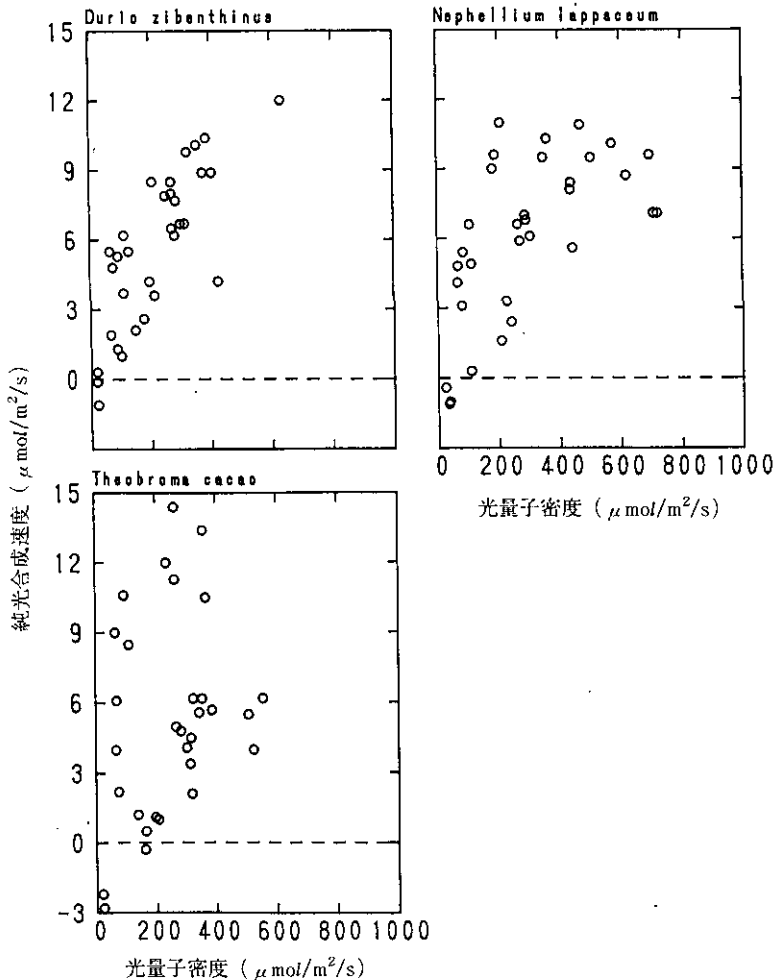


図 2 熱帯樹種の光量子密度と光合成速度との関係

### (3) 熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究

#### 1) 直径成長の季節性

1991年8月に、マレーシアのパソー国有林において現地調査を行った。気象観測塔設置予定地に隣接するマレーシア森林研究所の永久方形区(2ha)内に、より多くの個体が生育している樹種を対象にデンドロメータの装着を行った。デンドロメータは38樹種197個体に装着した。装着時には、その個体の樹冠が林冠上部にとどいているか、林冠内にあるか、林冠下にあるのかを記録した。1991年11月に再測定を行ったのち2週間間隔で継続測定を行っている。

再測定を行った1991年11月8日から1992年3月17日までの130日間に、7個体に装着したデンドロメータが破損したり紛失したりして測定不能となったため、現在は190個体について測定を継続している。バンドタイプのデンドロメータは、装着後しばらくのあいだバンドのゆるみのために測定値がふらつく、いわゆるFirst year slackが起こることがあるが、本調査では装着後3か月目に測定を継続測定を開始したためデータのふらつきは認められなかった。

測定した190個体のうち51個体は、130日間でまったく成長していなかった。また、0.1mmしか成長しなかった個体が30個体で、1mm以上成長したのは44個体で全体の21%にすぎなかった。肥大成長が最も大きかったのは、*Endospermum malaccense*で5.2mmの増加があった。比較的大きな直径成長を示した樹種間にも成長過程に違いが見られ、常時肥大成長を行っていた樹種と肥大成長速度に変化が見られた樹種があった。また、同種内でも直径成長過程に個体差が見られた。

#### 2) 林内稚樹の葉群動態

1991年3月に、ケボンのマレーシア森林研究所の植林地内に生育している先駆性樹種の*Macaranga gigantea* 1個体と*Macaranga hypoleuca* 3個体について、それぞれの主軸及び各枝の最下位葉の下に白ペンキで印をつけ頂端までの長さを測定し、葉数を数えた。1991年8月に再測定を行ったところ、約3か月で各枝のほとんどの葉が入れ替わっていた。しかし、葉痕を調べたところ必ずしも先に展開した葉が先に落葉しているというわけではなかった。現在は、3月にマークした4個体8枝に新たに5個体(*M. hypoleuca*, 4個体;*Macaranga recurvata*, 1個体)7枝を加えて、各個葉の展開及び落葉過程を追跡している。

1991年8月に、パソー国有林において、林床に生育している樹高0.5~3mの*Shorea*属の稚樹(*S. obaris*, 7個体;*S. acuminata*, 1個体;*S. pauciflora*, 5個体)を対象に、葉群動態に関する測定を開始した。1991年の11月に再測定を行ったところ、多くの個体は、上部の枝は伸張り新たな葉を展開していたのに対し、下部の枝は伸張も停止し葉の展開も起こっていなかった。

#### 3) 落葉の分解による土壌形成

##### ①はじめに

熱帯域に存在する土壌は、落葉・落枝の分解が温帯域に比較して極めて速いためにその層が薄いことが知られている。さらに、熱帯域の中でも熱帯多雨林地帯では年間降水量が温帯林の4倍以上にもなり、裸地になった場合の土砂の流出が激しいといわれている。そのため、熱帯林の伐採による裸地化は土壌の急速な劣化をもたらす森林の再生を困難にしているとの報告がなされている。そこで、本研究では、熱帯林土壌の形成過程を明らかにするために、土壌形成過程における植物群落構成種と土壌生物の役割を解明することを目的とする。

一方、熱帯林における養分循環の機構の把握には、土壌の分解系における落葉落枝などの有機物の分解過程についての研究が必要である。本計画において、マレーシアのパソを中心とした低地熱帯雨林の落葉分解過程、土壌の有機物堆積様式、土壌動物の個体群及び群集の動態・分解能

力についての調査をマレーシア国の研究者と共同研究する。

森林に供給される落葉落枝などの有機物は、土壤生物の住み場所と食物源となっている。また、土壤生物により有機物は分解され無機化されて養分が植物に供給されている。この調査では、まずマレーシア森林研究所の *Dipterocarpus baudii* の人工林とパソのフタバガキ科の森林において年間に供給される有機物量とそれに含まれる無機養分量の測定を目的としている。

また、熱帯降雨林における樹種の構成は多様であることを反映して、これまで落葉の分解は、混合した落葉を用いた分解実験から研究されてきているが、樹種別の落葉分解の実験例は少ない。

熱帯の樹木の落葉の分解様式を、土壤条件と樹種の形態の関係から明らかにすることを目的として、マレーシア森林研究所の *D. baudii* の 60 年生の森林において分解の実験を 7 月から開始した。葉の厚さ、硬さなどの形態的ならびに養分的に異なる *D. baudii*、*Dipterocarpus kerii* と 2 次遷移初期に出現する *Endospermum malaccense*、*Elateriospermum tapos* の 4 種を分解実験の材料として選んだ。種類の落葉の分解過程を調査することから、熱帯林の樹木の落葉の分解様式を明らかにする。

### ②調査方法

パソとマレーシア森林研究所の森林に調査区を設定して、各調査区に面積 0.5 m<sup>2</sup> の円形のリタートラップをそれぞれ 10 個を 1991 年 7 月に設定した。その後、1 か月間隔でリターの回収を行った。現在、1991 年 7 月から 1992 年 3 月までのリター量を測定している。

マレーシア森林研究所の試験地に 20×20 m の調査地を設定し、1991 年 7 月に調査地付近から新鮮な落葉を採取して分解の材料とした。各樹種について 100 枚の落葉を採集し、実験室で 40℃ の条件下で乾燥させた。乾燥の後、各樹種についての落葉の重量を測定した。表 1 に単葉の重量を示す。

表 1 分解に用いた樹種の単葉の重量

<i>Dipterocarpus kerii</i>	0.96(g)
<i>Dipterocarpus baudii</i>	1.93
<i>Elateriospermum tapos</i>	2.30
<i>Endospermum malaccense</i>	1.26

熱帯の樹木の葉のサイズは大きいので、1 種について 8 枚の落葉をサンプル単位として落葉サンプルを準備した。落葉分解の実験は、1991 年 7～12 月までの 6 か月間にわたり行った。分解の実験を 1991 年 7 月から開始した。20×20 m の調査区内に 2×2 m の調査区を 10 個設け、各々の分解調査区に 4 種の樹木の落葉サンプル（8 枚、合計 32 枚）を林床の落葉を除去した後に設置した。分解の実験の開始後 10 個の分解調査区から無作意に 2 区を選び落葉を回収した。

回収した落葉は風乾の後、重量、葉面積、土壤動物による摂食跡を計測し、研究室に持ち帰り窒素、リン、カリ、カルシウムなどの養分の分析を行う。さらに、分解に伴うセルロース、リグニンなどの有機物の分析を行う。

### ③調査結果

現在、8、9、10、12、1 月に回収した落葉について、分解速度、分解に寄与する要因、含有成分の減少様式を分析する予定にしている。

#### 4) 土壌の堆積腐植層の微細形態の観察

##### ①はじめに

森林生態系における分解様式は、土壌に堆積する土壌有機物の量や形態に反映されている。さらに、熱帯林の土壌での分解過程の結果は、土壌断面の形態に反映されている。熱帯林では有機物堆積の少ない、おもに落葉層からなるムル型の土壌有機物の堆積をしめすが、同じムル型の土壌においても立地条件に対応して落葉層の堆積量は異なることが観察された。

分解様式、土壌断面形態の形成は、森林の立地条件を反映している。本調査では、土壌水分条件の異なる森林を調査地として選定した。乾燥した条件の調査地として、パソの森林保護区が選定された。さらに、湿潤な立地条件の森林としてマレーシア森林研究所の *D. baudi* の人工林とクアラルンプール近郊のゲンチン高地の高度 1000 m 付近の森林を選んだ。これらの異なる立地条件の森林において 1991 年 7 月に土壌と土壌堆積腐植の微細の観察を行った。

##### ②調査方法

1991 年 7 月にパソ、クアラルンプール近郊のゲンチン高地森林、マレーシア森林研究所の *D. baudi* において土壌に堆積する有機物の量を推定した。調査地に斜面の上部から谷に向かって調査線を設定し、調査線にそって 2 m 間隔で土壌堆積腐植の厚さを測定した。同時に、堆積量の推定のために 400 ml の採土円筒を用いて土壌堆積腐植を採集する。

土壌堆積腐植の形態の観察、堆積量の推定を行うことにより、調査森林における有機物分解の速度と分解の様式を明らかにする。

##### ③調査結果

3 つの森林における土壌堆積腐植の調査地内での堆積量の平均値と変動量を検討する。調査線に沿って土壌有機物の重量の測定を行い、森林における土壌堆積腐植の量を推定した。3 つの熱帯林での土壌堆積腐植層の特徴と重量を表 2 に示す。

表 2 3 つの熱帯林での土壌堆積腐植層の形態と重量

場 所	森 林 の 特 徴	土 壌 堆 積 腐 植 層 の 形 態	土 壌 堆 積 腐 植 層 の 重 量
パソ	フタバガキ科の熱帯雨林	ムル型	4.30(t/ha) -0.53
ゲンチン高地の森林	低山地林	ムル型	3.92 -0.45
FRIM*の <i>D.baudi</i> の人工林	低山地林	ムル型	4.89 -0.27

\*マレーシア森林研究所

この結果をもとに土壌の堆積腐植量は 1 ha 当たりの量により評価し、これまでの温帯森林での土壌の堆積腐植の量と比較を行う。

土壌の堆積腐植層は、いずれの林分においてもムル型であり落葉層から成り立っていた。パソとゲンチンでの土壌堆積腐植には、カビにより分解の進んだ落葉が多く見られたが、F 層は余り発達していなかった。人工林の土壌堆積腐植は、おもに新鮮な落葉から成り立っていた。

土壌堆積腐植の量は、温帯の森林の約半分程度であった。毎年、供給される落葉量は、温帯に較べて熱帯では多く、分解が速く進行することを示唆している。

## 5) 土壤動物群集の動態様式

### ①はじめに

熱帯林は、温度的にはやや画一的な環境条件のもとに発達しているが、熱帯地域内での降水量の相違を反映して異なる土壤の水分条件が認められ、こうした土壤の水分条件を反映して異なった森林が成立している。

これまで熱帯林における土壤動物の動態についての研究例は、乾燥地域での熱帯林におけるシロアリの研究を中心に進められてきている。しかし、熱帯地域での異なる土壤の水分条件下に発達した各種の森林生態系における土壤動物の群集の比較研究の例は少ない。

今回の調査において乾燥した森林の土壤動物群集の構成と動態をパソの森林保護区において重点的に行い、パソの森林の土壤動物群集の特徴を、クアラルンプール近郊の比較的湿った条件の森林を比較調査区として土壤動物の群集の調査を行うことにより明らかにする。

土壤動物の群集の調査は、優占的な土壤動物の個体数変動、トビムシの群集変動から調査する。さらに、土壤動物群集の研究から得られた結果を基にして、パソ及びマレーシア森林研究所の森林での分解過程における土壤動物の役割を明らかにする。

### ②調査方法

パソとマレーシア森林研の落葉分解の調査区において土壤動物の調査を行う。調査期間は1991年7月から2年間行う。1か月おきに各調査区から15の土壤コアを採集し、実験室で土壤動物抽出装置を用いて土壤動物の抽出を行う。採集した土壤動物は、液漬標本として持ち帰り、トビムシ、ササラダニ、中気門ダニについては種の同定と個体数の計測を行う。他の動物群は科、目のレベルに分類する。

### ③調査結果

土壤動物の個体数の推定を1991年7月から1992年3月まで行った。土壤動物の個体数は、温帯の森林土壤に較べてきわめて少なく、1m<sup>2</sup>当たり5,000~10,000個体程度であった。土壤動物では、ササラダニ、トビムシが優占している点は、温帯と変わらなかった。

## 6) 材分解におけるシロアリの役割

### ①はじめに

熱帯林において枯死材の分解はシロアリによって担われているといわれているが、熱帯林によってはシロアリが少なく他の食材性昆虫が多い場所も存在する。そこで、シロアリを中心にした食材者群内の競争とその材分解に対する影響を明らかにすることを目指した。

### ②調査方法

2か所の低地熱帯林において材分解実験を行った。調査地はクアラルンプールの森林研究所内林地とクアラルンプール東南東約70kmのパソ森林保護区とで行った。直径5cmほどの木を長さ20cmに切り、地面上に置かあるいはシロアリに食われないように地面より数cm上につるすかして、その後の食われ方を追跡した。材の樹種はそれぞれの調査地に生えていたもので、クアラルンプールは*Dryobalanops aromatica*、パソは*Quercus gemelliflora*を用いた。

### ③調査結果

両調査地とも地面上に置いた材のほとんどすべてがシロアリによって食われたが、つるした材はシロアリに食われず、かつ他の食材性昆虫(例えばカミキリ)にも食われなかった。材の重量減少速度はパソの*Q. gemelliflora*ではシロアリに食われた場合が食われない場合より顕著に速かったが、クアラルンプールの*D. aromatica*では両方の場合で目だった差がなくシロアリの摂食が遅いことが分かった。この違いの解明のため別の実験を計画中である。

#### (4) 熱帯林生態系の修復に関する研究

##### 1) 熱帯林内外の光環境

###### ①はじめに

生物種の多様性に富む熱帯林の消滅は、単に熱帯産樹木資源の枯渇による建築資材やチップの供給が不足し価格の高騰を招くといった経済的損失に現われるのみではない。熱帯林の消失は、野生生物の生息環境を狭め、希少な野生生物種の絶滅をもたらしている。

一方、熱帯林の再生のために早生樹種を用いた造林による施策が行われている。しかし、早生樹種による単一樹種を用いた造林では、熱帯産の材の供給には有効であり、熱帯域の産業振興には多大の貢献をするものの、多様な生物種の復元を計ることは到底不可能であるといっても過言ではないであろう。単一樹種による造林では、植物種の多様性が失われるばかりではなく、植物種を食糧として生存している動物種の減少を招くことにもなる。植食性動物は、餌のし好性があり、いかなる植物種でも餌としているのではなく、特定の植物種の果実や葉を餌としており、他の植食性動物種とて餌のレベルで住み分けを行っている。すなわち、単一樹種による造林によって熱帯林の再生が行われたとしても、植物種の多様性が失われるのみではなく、動物種の減少にもなるということ認識するべきであろう。そこで、本研究課題では、自然林の再生をどのように行うべきかの知見を得るために、熱帯林の天然更新に焦点を絞り、天然更新が容易に観察できると思われるギャップ更新について、これまで温帯林で得られている知見を踏まえ、本年度はギャップの環境要因、とりわけ光環境に的を絞って調査を行った。

熱帯に分布する森林は物質生産量が温帯林と比較して高いといわれている。温帯林と熱帯林との生産量の差を決めている要因として考えられるものに、植物種の違いのほかにも光、温度、湿度、降雨量といった環境要因がある。光は植物の成長に第一義的に作用する環境要因であり、熱帯地域は赤道に近いこともあり、温帯地域と比較して光強度が高いものと考えられる。そこで、熱帯と温帯における光環境の違いを明らかにするために熱帯林内外の光環境を調べた。

###### ②調査方法

低地林が保全されているパソールのマレーシア森林研究所試験林で1991年8月8日から9月3日まで、ギャップサイズを異にする4地点とオープンエリアで光量子密度の日変化を測定した。光量子密度を測定した各地点の全天写真を図3に示した。光量子密度の測定には小糸製のカンタムセンサーを用い、出力をコーナースステムの1チャンネル、データロガーに集録した。集録したデータは計算機で処理し、7時から20時までのデータについて図4に示した。

###### ③調査結果

オープンエリアでの光量子密度の変化から、最大光量子密度は $1000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ を超えることもあるが、15時頃には降雨のために光量子密度が著しく低下し、低下が最も顕著であった9月3日には、14時以降は光量子密度が $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下にまでなった。

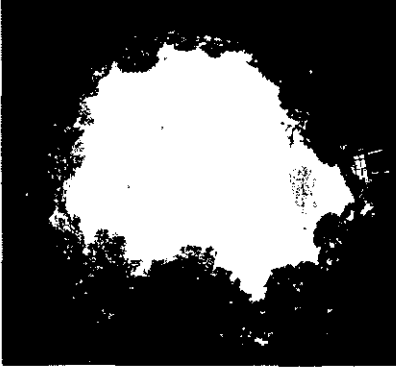
比較的開けたギャップ2の地点では、12時頃と15時頃に2つのピークが見られた。これは、ギャップの構造に起因するもので、西側の樹冠部が空けているためである。

一方、ギャップ3では13時頃に高い光量子密度が観察され、その他の時間帯における光量子密度は $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下であった。同様の傾向はギャップ4でも観察され、ギャップ3、4の樹冠部は真上のみが空いているギャップ構造であることが、全天写真と光量子密度の日変化から明らかである。

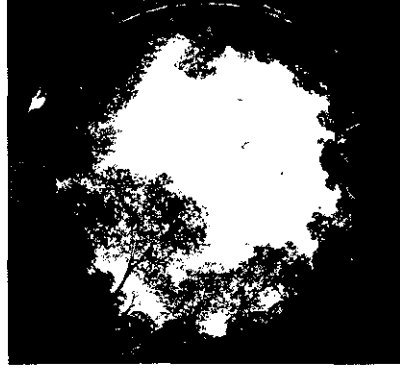
ギャップ5の地点は、全天写真からも明らかなように、樹冠部は閉鎖されており、 $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下の光量子密度が林床に降り注いでいるだけである。



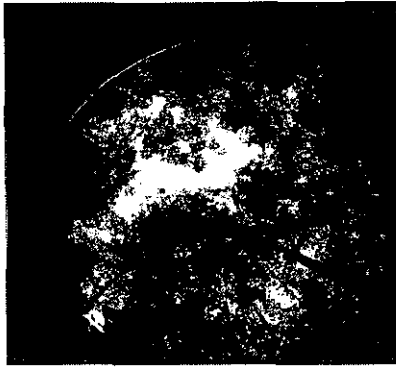
裸地



ギャップ1



ギャップ2



ギャップ3



ギャップ4

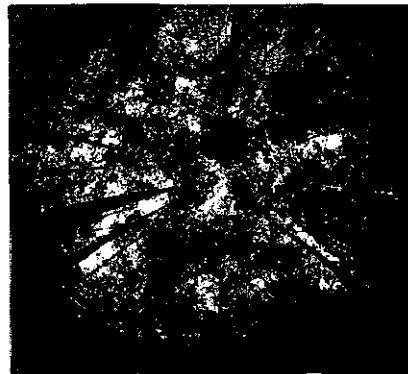


図3 異なったサイズのギャップの全天写真

林床には、どの地点でも稚樹が見られたが、稚樹の高さはギャップ2から5に光量子密度が低下するにしたがって低くなる傾向が見られた。現在、このギャップサイズを異にした地点に実生苗を植栽し、成長速度を測定している。今後、得られた光のデータと成長速度の関係から、ギャッ

1991年8月31日

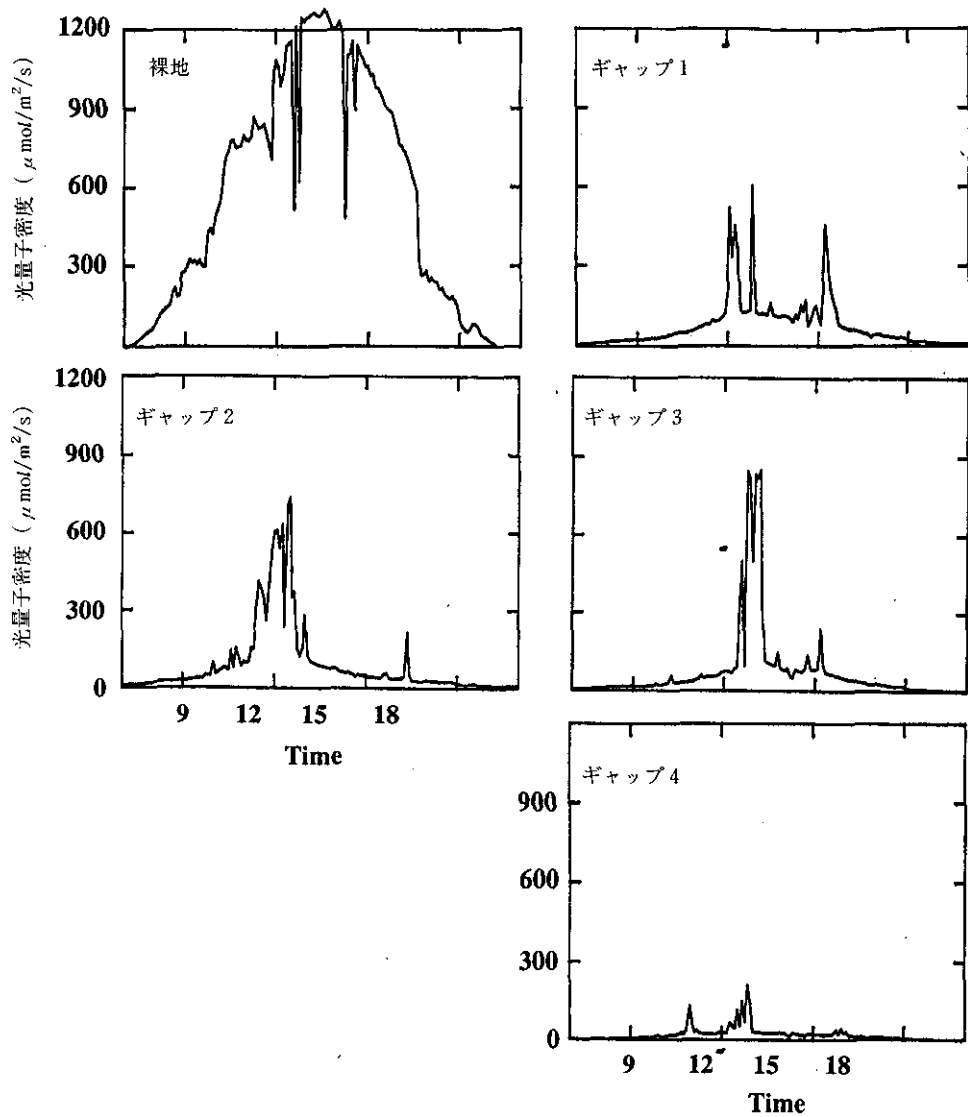


図4 異なったサイズのギャップにおける光量子密度の日変化

ブ内に生育する実生の光利用効率を明らかにする計画である。

## 2) 微気象観測のためのタワーの建設

熱帯林生態系の生物種を調査し、生息密度や樹種構成、植物の生理機能等を調査、測定して熱帯林生態系の有する特有な現象を把握するには、そこでの環境特性を的確に把握する必要がある。すなわち、植物の成長にとって重要な要因である光環境一つをとっても、熱帯林内外の光の水平、垂直分布を経時的に測定することが重要である。また、熱帯林全体の熱、水、CO<sub>2</sub>収支を求めるためにも、これらの環境要因の水平、垂直分布の測定が必要不可欠である。

上に述べたような熱帯林内外の気象要因を測定するには、どうしても気象測器を設置するため

のタワーが必要である。さらに、熱帯林の樹冠部で生物種がどのような挙動をしているかを知ることが、熱帯林の多様性を知る上でも避けて通れないことである。このような気象観測用のタワーを建設すれば、樹冠部での光合成の測定も可能になり、これまでは地上でしか観察し推測しかできなかった樹冠部に生息する生物種を容易にしかも精度高く観測することが可能になる。

以上の見地に立って、現地で資材を購入し、現地の労働力を使用してタワーを建設した。それまでの樹高の測定によって、タワーを建設する予定地での突出木は40m以上になるものの、その他の多くの木の樹高は30mであることから、30mのタワーを建設すれば、生物種の観察、測定には充分であろうと考えた。また、気象要因を観測するには樹冠部から突き抜けたタワーが必要で、そのためには40mタワーが必要となってくる。

一方、気象要因の観測のみにタワーを建設するのであれば1本のタワーでも充分であるが、樹冠部での生物種の調査のためには、樹冠部を面的に動いて調査できるようなタワーが望ましい。そこで、経費や安全性、利便性等を考慮して30mのタワー2本と40mのタワー1本を建て、タワーの間を橋で連結し、面的調査が可能となるように設計した。タワーは1辺が20mの正三角形になるように配置した。

完成したタワーの写真を図5、6に示した。図5では40mのタワーが樹冠部から上に突き出ているのが分かる。また、図6ではタワーとタワーの間を橋で連結しているのが分かる。すべての材質はアルミニウムアロイでできており、腐食も起きにくく、長期間にわたる使用が可能である。また、熱帯地方では雷雨の頻度が極めて高いため各タワーには避雷針を設置してある。このため、雷雨の時にはタワーの最上部では落雷の危険性があるが、タワー内部は安全である。雷雨時に起こる強風によってもタワーはほとんど揺れることもなく、信頼性の高いタワーが完成した。

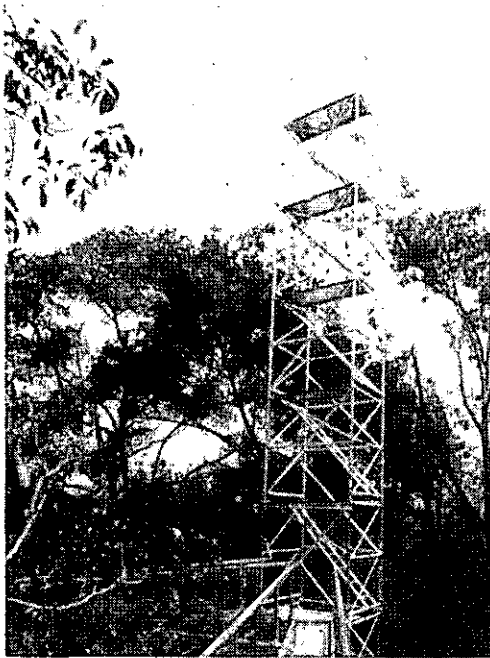


図5 40mタワーの概要  
樹冠部から突き出ているのがよく分かる。



図6 タワー間を結ぶ橋の概要  
橋には手すりも設けてあり、落下防止になっている。

#### (5) NOAA AVHRR (LAC) 画像データを用いた東南アジア地域の植生指数図及び植生分布図作成に関する研究

東南アジア地域の植生状況を把握するための手法の確立を目指し、観測日と軌道の異なる複数の NOAA 衛星データを用いて地域のモザイク画像及び植生指数分布図を試作した。

対象地域及び使用データ：インド及びインドシナ半島全域を含む北緯 0～35 度，東経 66～110 度を対象地域とした。使用した衛星データは，赤道直下で 1 画素 1.1km の解像度を有する NOAA AVHRR(LAC)画像で観測期間が 1989 年 12 月 7 日から 1990 年 3 月 2 日までの 11 シーンである。

作成方法：各シーンは，可視・近赤外チャンネルをアルベドに，熱赤外チャンネルを輝度温度に変換し，さらに 1 シーン内のパステラディアンズ相対補正したのち，地上基準点 (GCP) と 3 次多項式による幾何補正を行った。各種補正をした全シーンを用いてモザイク合成をするとともに，可視・近赤外チャンネルから正規化植生指数 (NVI) を算出しその分布図を作成した。なお，雲除去は NVI と熱赤外チャンネルを用いて画素単位で行った。

図 7 と図 8 はそれぞれ試作された東南アジア地域のモザイク画像と正規化植生指数分布図である。これにより，モザイク画像と正規化植生指数分布図の作成に見通しがたち，また，より精度良いモザイク画像作成には高度な幾何補正手法の開発が必要であることが明らかになった。今後，各種補正手法の高度化，植生分類手法の開発，及び異時点モザイク画像の比較による植生変化抽出手法の開発を目指す。

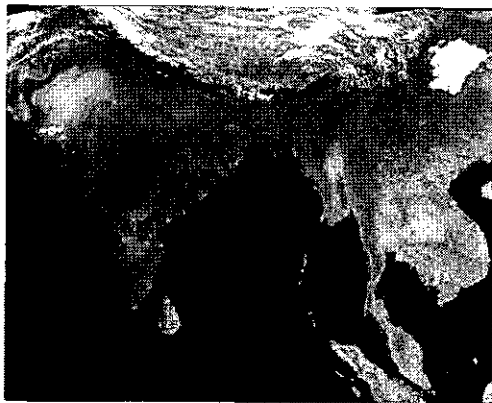


図 7 NOAA AVHRR のモザイク画像

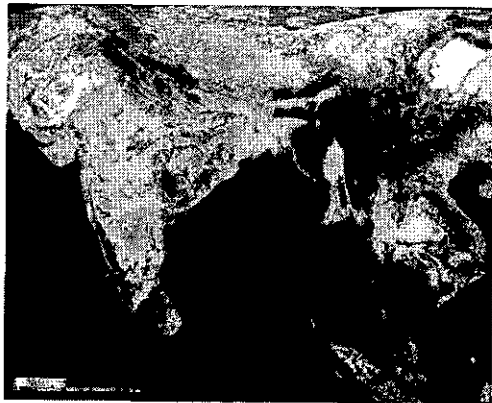


図 8 正規化植生指数図

## 2.7 野生生物種の減少に関する研究

〔研究組織〕 生物圏環境部

上席研究官

安野正之

地球環境研究グループ

野生生物保全研究チーム

○椿 宜高・高村健二・奥田敏統・永田尚志

森林減少・砂漠化研究チーム

○古川昭雄・可知直毅

〔研究概要〕

野生生物種の減少は熱帯地域をはじめとして地球上のあらゆる場所で生じている。そして、狩猟対象となる種の乱獲や環境汚染を除けば、野生生物種の減少の主な原因は開発による森林、湿地、草原などの生息地の破壊にあるといわれている。この研究では複数のタイプの野生生物生息地における種多様性の差異を明らかにすることによって、森林破壊に伴う野生生物種の減少の機構解明を行う（図1）。本研究は国立環境研究所、森林総合研究所、日本野生生物研究センター、鹿児島経済大学による共同研究であり、研究期間は平成3～5年度までの3か年である（図2）。

研究はマレーシア国の熱帯降雨林で行うことに決定した。本年度は、マレーシア側の共同研究機関としてマレーシア森林研究所（Forest Research Institute Malaysia）、マレー大学（University of Malaya）、マレーシア国立大学（Universiti Kebangsaan Malaysia）を選び、共同研究の折衝を行った。

研究調査地点はクアラルンプールの東方約15 kmに位置するウルランガット（Hulu Langat）に決定した。この地域には、熱帯林が標高500～1500 mまで広がっている。しかも、その中には原生林、二次林、植林地がモザイク状に分布するので、森林タイプと野生生物種の多様性の関

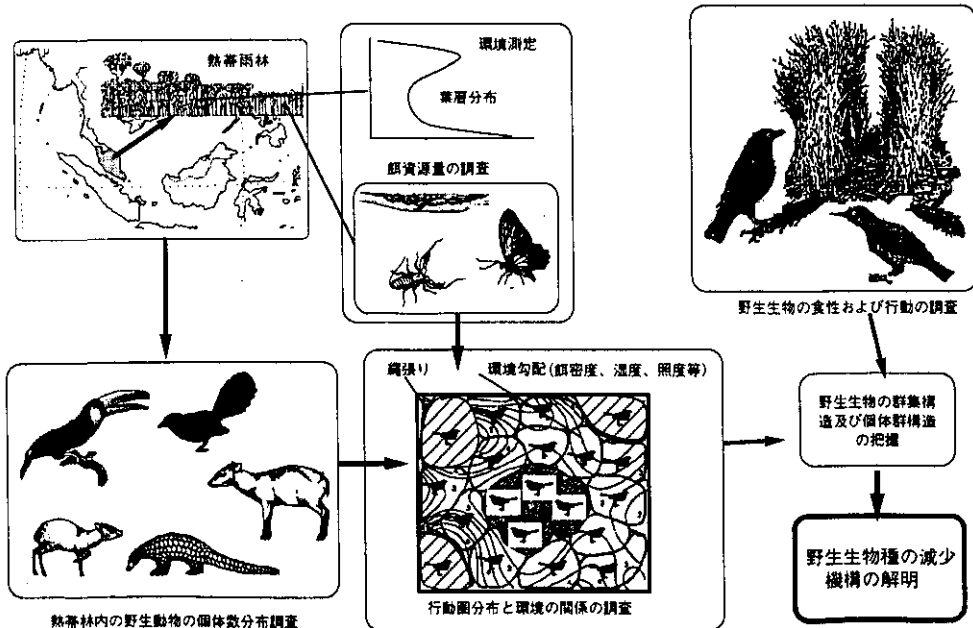


図1 研究計画の概念図

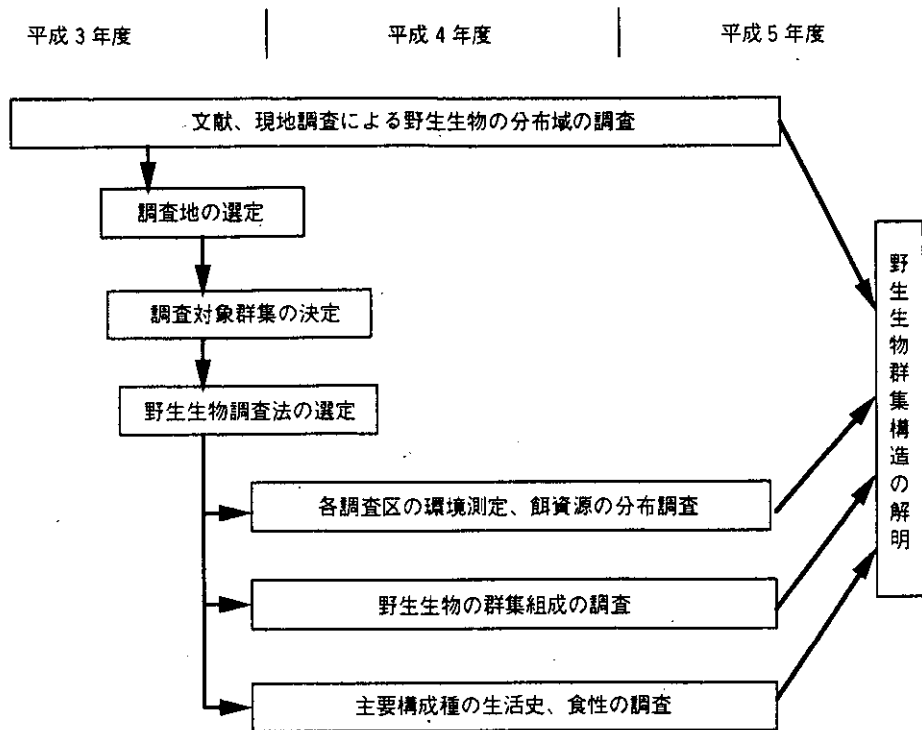


図2 野生動物種の減少に関する研究の年次別計画

連を研究するには絶好の地域であると思われる。本年度はこの地域内にまず2つの調査区域（山地原生林地帯と植林地帯）を設け、野生動物相の調査を開始した。

また、平地林と野生動物群集を比較するために、パソー（Pasoh）林（クアラランプールの南東約70km）にも調査区を設けた。ここにはマレーシア半島の中でわずかに残された低地熱帯降雨林が存在する。ただし、その周囲は開発されたオイルパームやゴムのプランテーションになっており、森林規模はかなり縮小され、かつ孤立化した森林となっている。この森林では、野生動物の種数や個体数は、すでにかなり減少しているようである。パソーとウルランガットを比較することによって、森林規模の縮小が野生動物群集に与える影響を評価できることが期待される。

### 【研究成果】

#### （1）パソー林における糞虫群集

植物の被度が糞虫の分布を大きく左右することはよく知られた事実である。植物の影響は人間が作った裸地と森林とで糞虫の種類及び個体数を調べるとよく分かる。さらに、特定の種について裸地と森林を横切るライン上の個体数の変化を調べることでその影響が把握できる。さらに、その森林に生息する野生動物の種類や個体数によっても、糞虫の群集構成は影響を受ける。

したがって、糞虫の種類組成は糞虫そのものの種多様性を表現しているばかりでなく、同じ場所に住むは哺乳類や鳥類などのセキツイ動物の種多様性を代弁する指標として有用である。

ピットフォールトラップを使うことによって、パソー林の糞虫の種多様性を明らかにするとともに、森林の周辺部から中心部分への種類組成の変化を明らかにし、森林の大きさと種多様性の

関係を分析するための資料を収集した。

今日までに少なくとも 22 種類の糞虫がパソール林に生息し、ある種類は中心部だけで採集され、ある種類は周辺部だけで採集されることが分かった。また、中心部、周辺部に限らず、どこでも採集される種類もある。

糞虫は普通その行動と機能によって 3 つのグループに分類することができる。第 1 のグループは糞の中に入り込み卵を糞の中に産みつけるし、自分でも糞を餌としている比較的小型の糞内生活者である。糞の中に巣や子育てのための小部屋を作ったりすることはなく、直接糞の中に卵を産みつける。温帯ではマグソコガネ族 (Aphodiinae) の大部分が糞内生活者であるが、熱帯ではこのグループはあまり多くないことが多くの研究者により報告されている。第 2 のグループは糞の真下にトンネルを掘り糞の一部をトンネルの奥に運び込んで産卵するトンネル掘りである。トンネルの奥に詰めた糞は子の餌としてだけでなく、成虫の餌にもなるらしい。ダイコクコガネ族 (Coprini) の多くがこのグループに入るが、その中のエンマコガネ属 (Onthophagus) が主なメンバーである。エンマコガネ属は種類が多く、世界各地で糞虫群集の優的な分類群となっている。第 3 のグループは、糞の球を作って適当なところまで運び、そこで糞を埋める穴を掘って産卵する大型のころがし屋である。糞の球はこの餌としてだけ利用される。系統分類学的に新しい種類がこの行動を示すといわれ、ダイコクコガネ族の中の一部がこのグループに入る。

まだサンプル数が少ないが、今までの調査から次のようなことがいえよう。

1) 糞虫群集の調査はこれまでに、スラウェシ北部 (Knight, 1988), サラワク (Hanski and Hammond, 1986), 南アフリカ (Davies *et al.*, 1988), 象牙海岸 (Camberfort and Walter, 1991), ガボン (Camberfort and Walter, 1991) などの熱帯地域で行われたことがある。我々の調査結果をこれらの調査結果と比較すると、パソール林内の糞虫個体数と種類数がきわめて少ない。おそらく、これはパソール林の特殊性 (孤立した林であること、周囲をオイル椰子やゴムのプランテーションに囲まれ、そこでは除草剤や殺虫剤が多用されていることなど) によるものと考えられるので、マレーシア半島内の他の森林でも同様な調査を行い、比較する必要があると考えられる。

2) 熱帯降雨林では糞内生活者は少ないことが知られている。かれらは普通は草地に見られるからである。パソール林においては糞虫のほとんどはトンネル掘りであり、この点は他の研究と一致している。しかし、林縁部で 9 月に多数の糞内生活者が採集された。そして、ここではトンネル掘りはほとんど採集されていない。この月に雨が少なかったのが、その原因であると考えられた。つまり、森林の周辺地域は乾季と雨季の影響を受けやすく、本来乾燥した草地に生息する糞内生活者が、雨が少なく乾燥してしまった周辺地域に一時的に侵入したのだらうと思われる。雨の多くなった 10 月にはこの仲間は森林からいなくなってしまった。

3) 今回の調査ではピットフォールトラップの餌として牛の糞を用いた。腐肉や果物を使った、他の動物の糞を使うと異なった種類の糞虫が採集される可能性が高い。パソール林の糞虫群集を網羅するためには、今後さまざまなトラップを利用する必要があるだろう。

## (2) フタバガキ科樹木の種子捕食性昆虫

熱帯雨林では、樹木がさまざまな形や性質の種子や果実を生産する。たとえば、東南アジアの熱帯雨林ではフタバガキ科の樹木が生み出す種子は大きさ、形、比重、成分などの特徴が樹種によって大変に変異に富んでいる。これらの種子は森林に住んでいる多種の昆虫を含めたさまざまな動物にとって重要な食物資源である。従来の研究により、植物食性の昆虫は限られた数の植物種を利用するように特殊化していることが知られているので、異なった種の昆虫が異なった樹種

の種子を利用しているとも考えられる。

この研究では、種子への捕食圧が選択圧として働いてフタバガキ科の種子の大きさに影響を与えるかどうかには焦点をあてて計画を立てた。種子1個あたりにどれだけの量のエネルギーを与えるのが最適かは、種子の数を増やす方向とそれとは逆に1個の種子当たりの重量を増やす方向のどちらの方向で親木が利益を最大にし得るかによると考えられる。どの方向に進むか、あるいは両方向の中間のどのあたりで安定するかは、個々の種子の生残可能性と個々の種子を形成するのに要する投資量との釣り合いで決まる。例えば、種子の発芽・生残に影響する温度・湿度・雨量・土壌成分などの物理的環境条件が異なれば、種子の側の生残に最適なやり方も異なってくると考えられる。さらに、捕食者がどの大きさの種子を食うかも種子の大きさが決定される場合の選択圧となり得る。

種子の捕食者が種子に影響する筋道は少なくとも次の3とおりが考えられる。①捕食者が種子の大きさを判別した上で大きい方の種子から食べる。②捕食者が種子の大きさを判別した上で小さい方の種子から食べる。③捕食者は種子の大きさを選択せず、ただ適切な樹種の種子を選択することに集中する。捕食が種子の大きさの進化に与える影響の大きさを調べるためには、捕食者が種子にかかわる頻度及びその方法を明らかにすることが必要である。この研究では現地名カプールというフタバガキ科の *Dryobalanops aromatica* を材料に選び、捕食圧と種子の大きさとの関連を調べた。

フタバガキ科のカプール *D. aromatica* の成木から落下してきた新鮮な種子を集めて、それらの種子から出現する昆虫を採集しその種類相を明らかにし、また種子が発芽するかどうかを記録した。種子の採集は、カプール植林地の林床で大きさに関係なく新鮮な種子を拾った。場所はマレーシア森林研究所構内で、期日は1991年7月15日と17日であった。採集した種子は0.1gの精度で湿重量を測定した。その後、1個ずつ透明なプラスチック容器に入れて容器ごと室内に保管し、昆虫が種子から出現するまで37日間待った。各種子の検査は毎週行い、同時に種子の発芽しているかどうかを記録した。

合計591個の種子を採集した。採集した種子の重量の頻度分布を図3に、また各重量階級の種子のうち発芽した種子とゾウムシ、ゾウムシ以外の鞘翅目、鱗翅目、膜翅目、双翅目のそれぞれの昆虫が出現した種子の割合を百分率で図4に示した。種子の重量は0.3~9.9gにわたり平均±標準偏差は $2.97 \pm 2.00$ gであった。採集した種子のうち10.7%の63個が発芽した。発芽した種子の平均重量は $7.18 \pm 1.60$ gであったのに対して、発芽しなかった種子の平均重量は $2.46 \pm 1.34$ gであり、大きい種子が発芽することが分かった。

集めた種子のうち39.3%の232個の種子から昆虫が出現した。また平均重量は $2.61 \pm 1.05$ gで、軽いか中ぐらいの重さの種子から昆虫が出現した。昆虫の出現した種子のうち発芽した種子はわずか3個であったので、昆虫に食われた種子はほとんど発芽しないことが分かった。1個の種子から出現した昆虫の数は20匹までで、それらは鞘翅目、鱗翅目、膜翅目、双翅目のいずれかに属していた。

今回の調査では、発芽しなかったが昆虫も出現しなかった種子が50.5%にも上った。これらの種子では、種子の中でその種子を食べた昆虫が死んでいる可能性があり、種子内での昆虫の死亡を調べる必要が認められた。

また、昆虫が出現したのは軽いか中ぐらいの重さの種子にほとんど限られるのは、昆虫かあるいは樹木の側からなんらかの選択が働いていると考えられる。例えば、昆虫成虫が小さい種子を選んで産卵しているか、あるいは種子が小さい未熟な段階で昆虫に産卵されるとその種子は成長



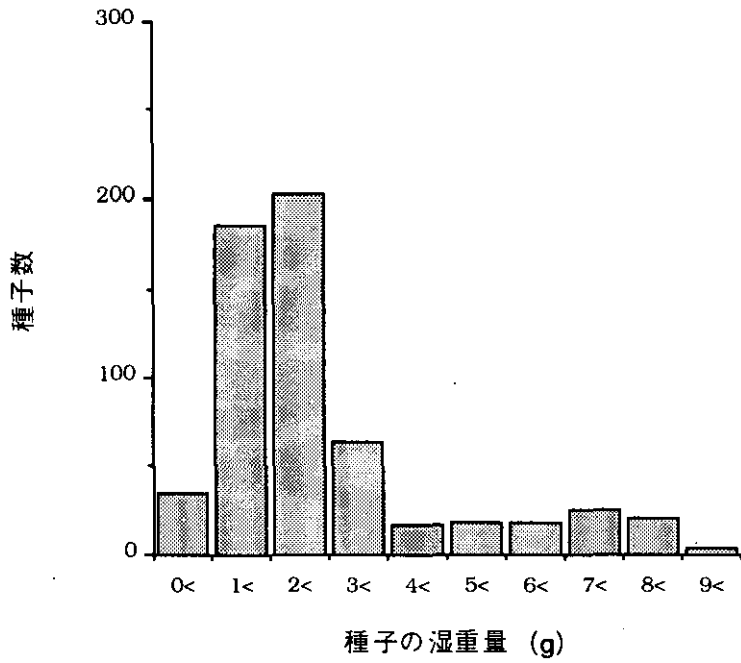


図3 カプル種子の湿重量頻度分布

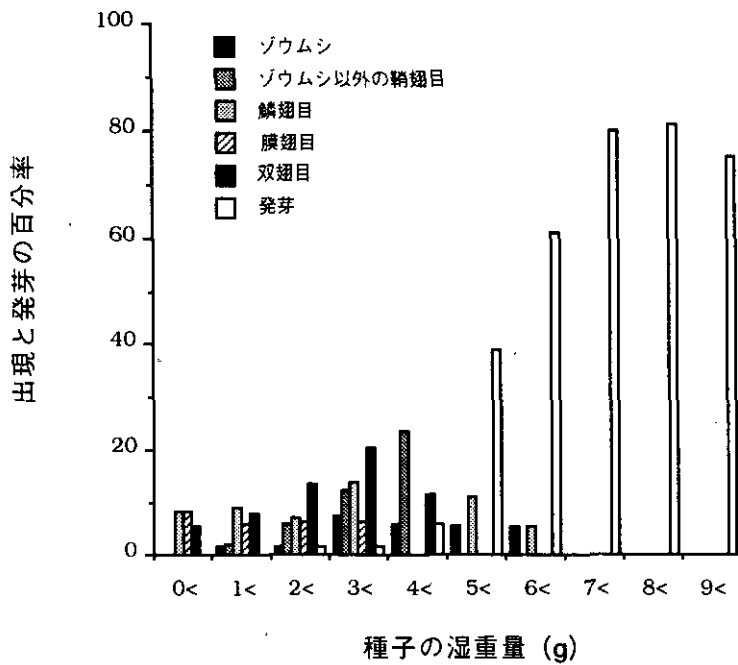


図4 カプル種子からの昆虫出現率と種子の発芽率

しなくなるという場合が考えられる。このことを検証するには、昆虫の産卵行動の観察が欠かせないので今後それも含めて調査対象を広げる予定である。

### (3) 低地熱帯林と低山地熱帯林における鳥類群集

マレーシア半島部において記録されている 621 種類の鳥類のうち、約 370 種は熱帯林及びその林縁を主な生息域にしている。さらに、熱帯林に生息する鳥類の 60 % は、スダ地域固有種である。これらの種は、フタバガキ科の混生する低地熱帯林、低山地熱帯林、マングローブ林の 3 つの森林地域で適応放散し、種分化してきたと考えられている (Wells 1988)。林縁や樹冠部に生息する種を含めて 282 種類は低地熱帯林、96 種は高地熱帯林、約 50 種類はマングローブ林に起源を持つとされている (Nisbet 1968)。低山地熱帯林において高地熱帯林のグループと低地熱帯林のグループが出会うことになるが、低地林種の 75 %、高地林種の 50 % は低山地林に進出していない。また、低山地熱帯林の 57 % はスダ地域の固有種であるのに対して、高地熱帯林では 16 %、マングローブ林では 10 % が固有種であるに過ぎない。しかし、マレーシア半島部においては、低地性熱帯林はほとんど残っていない。この研究では、隔離された低地熱帯林と大面積の低山地熱帯原生林及び二次林の鳥類群集の多様性を明らかにするとともに、森林の大きさや植生と鳥類群集構造を分析する資料を収集する予定である。研究調査地点は、低地熱帯林としてクアラルンプール東南東約 70 km に位置するパン森林保護区と低山地熱帯林としてクアラルンプール東方約 15 km に位置するヌアング山麓、ウルランガット地域のパングスン森林保護区を選んだ。

本年度は、マレーシア側共同研究者との研究内容の議論を行うとともに、予備調査を行った。各調査地域においてライトランセクトセンサスとカスミ網による捕獲標識を平行して行った。また、各調査地での鳥類群集構造を明らかにするために、各種の採食行動を記録した。

予備調査において、捕獲された鳥類リストを表 1 に示した。ギルドタイプは、林床昆虫採食者 (LGI)、ブッシュ葉層昆虫採食者 (SFGI)、樹上葉層採食者 (TFGI)、樹幹昆虫採食者 (BGI)、ヒタキ型採食者 (FCI)、花蜜-昆虫採食者 (I/N)、果実-昆虫採食者 (I/F)、樹上性果実食者 (AF)、地上性果実食者 (TF)、その他 (Misc) に分類してある。パングスン森林保護区では 6 日間の調査で 20 種類 62 個体が捕獲されたが、パン森林保護区では同じ調査日数で 13 種 31 個体が捕獲されたにすぎなかった。捕獲結果から得られたパン森林保護区の鳥類の相対密度も、2.3 個体/日・網であり、パングスン森林保護区の相対密度、3.1 個体/日・網、に比して明らかに少なかった。

マレーシア半島部の熱帯林鳥類群集の種組成の 25 % はチメドリ科であり、さまざまなニッチに適応放散している (Wells 1988)。パン森林保護区においては、林内に生息する鳥類群集の 32 % がチメドリ科で構成され、多く記録された種類はタンビムジチメドリ (*Trichastoma malaccense*)、サビイロムジチメドリ (*T. bicolor*) であったのに対し、パングスン森林保護区では種組成の 45 % がチメドリ科で占められタンビムジチメドリに加えて、チャイロチメドリ属 *Malacopteron*、モリチメドリ属 *Stachyris* が多かった。また、次に大きな割合を占めているグループは、熱帯林に特異的な果実-昆虫採食者であるヒヨドリ科のグループであった。したがって、今後、植生や森林のサイズがマレーシアの鳥類群集に及ぼす影響を明らかにするためには、この 2 つのグループ (科) に注目する必要があるだろう。

表1 各調査地域において捕獲された鳥類リスト

	キルト・タイプ	体重	ハソ	ウレンガット
カワセミ科				
<i>Ceyx erithacus</i>	Misc	16.9	6	0
キツツキ科				
<i>Gecinulus viridis</i>	BGI	130.0	0	2
ヒヨドリ科				
<i>Pycnonotus atriceps</i>	I/F	25.8	0	5
<i>Criniger bres</i>	I/F	35.9	1	2
<i>Criniger phaeocephalus</i>	I/F	30.1	3	0
<i>Criniger ocharaceus</i>	I/F	43.3	0	2
<i>Hypsipetes criniger</i>	I/F	15.0	5	2
チメドリ科				
<i>Trichastoma malaccense</i>	LGI	22.9	3	7
<i>Trichastoma bicolor</i>	TFGI	27.2	3	0
<i>Trichastoma rostaratum</i>	TFGI	16.6	1	0
<i>Malacopteron cinereum</i>	TFGI	15.9	2	4
<i>Malacopteron magnirostre</i>	SFGI	20.1	0	4
<i>Malacopteron albogulare</i>	SFGI	15.0	1	0
<i>Stachyris poliocephala</i>	SFGI	22.6	0	7
<i>Stachyris nigriceps</i>	SFGI	16.0	0	5
<i>Alcippe brunneicauda</i>	TFGI	14.7	0	1
ツグミ科				
<i>Erithacus cyane</i>	SFGI	15.1	0	3
<i>Copsychus pyrropygius</i>	SFGI	41.6	1	0
<i>Enicurus rufficapillus</i>	SFGI	32.2	0	1
ウグイス科				
<i>Abroscopus sepriciliaris</i>	TFGI	7.3	0	1
ヒタキ科				
<i>Ficedula dumetoria</i>	FCI	9.8	0	2
<i>Ficedula mugimaki</i>	FCI	11.0	0	1
<i>Hypothymis azurea</i>	FCI	11.4	1	0
<i>Niltave grandis</i>	FCI	28.2	0	1
タイヨウチョウ科				
<i>Anthreptes simplex</i>	I/N	8.5	0	1
<i>Hypogramma hypogrammicum</i>	I/N	11.0	3	1
<i>Arachnothera longirostra</i>	I/N	12.9	1	10

## 2.8 その他の地球環境問題に関する研究

### 2.8.1 ペルシャ湾岸の原油汚染等が地球環境に及ぼす影響の評価に関する研究

#### 〔研究組織〕 地球環境研究グループ

統括研究官	○秋元 肇
酸性雨研究チーム	溝口次夫
社会環境システム部	
情報解析研究室	須賀伸介
水士圏環境部	
部長	渡辺正孝

#### 〔研究概要〕

湾岸戦争をもたらしたクウェートの油田火災は700本以上の油井を炎上させた。これらの油井燃焼に伴う大量の汚染物質の大気中への放出は、クウェートをはじめとするペルシャ湾岸一帯の人体・動植物の被害及び気候への影響を憂慮させた。クウェートの油田火災はこれまでのどの人為起源汚染よりも大規模であり、したがってその影響も地球的規模に及ぶことが考えられた。クウェートを中心に大気汚染の影響の著しい地域を対象とした人体への影響の評価及びペルシャ湾岸一帯への気候変動も含めた大気汚染の影響を評価することを目的として本研究を実施した。

一方、湾岸戦争にかかわるペルシャ湾での原油流出は、ペルシャ湾の海洋環境破壊をもたらし、野生生物の絶滅や漁業資源への影響が心配されている。湾岸諸国水資源は海水淡水化プラントに大きく依存しており、原油流出に伴うプラント稼働停止の危険性が示唆された。キングファハド石油鉱物資源大学(KFUPM)では流出原油分布予測(GULFSLIK II)を行ったが、初期の予測段階で大きな予測誤差を生じた。この原因としてペルシャ湾全体の流動モデルの不備が指摘され、KFUPMとの会談の結果、流動モデルを改良することによりGULFSLIK IIの予測精度を向上させることが合意された。

このような経緯を踏まえ、運輸省気象研究所、農林水産省中央水産研究所、海上保安庁水路部との共同研究をスタートさせたが、国立環境研究所においては次のサブテーマを行った。

#### (1) 油田火災などに伴う大気汚染が周辺地域に及ぼす影響の評価に関する研究

クウェート油田火災によって大気中へ放出された汚染物質は、通常の化石燃料の燃焼排ガス、自動車排ガス成分とはその種類、量、性状がかなり異なっていることが予測された。その理由の一つは燃焼温度がかなり低いこと及び不完全燃焼の比率が高いことである。油井火災に伴うクウェート及びその周辺地域での大気汚染物質を調査し、人体影響などの観点から評価すること及び燃焼排ガスの及ぶ範囲と気候への影響をシミュレーションすることを目的として研究を行う。

#### (2) ペルシャ湾の海水流動解析に関する研究

ペルシャ湾の海水流動はホルムズ海峡からの潮汐流、チグリス・ユーフラテス川から河川流入及び海表面からの水分蒸発に伴う塩分分布と水温分布が形成する密度分布に起因する密度流、及び年間平均風速が約6～7mの北西風に起因する吹送流により支配される。乱流に基づく鉛直

混合をも考慮した3次元クロージャーモデルによりペルシャ湾の海水流動の解析を行う。本研究の成果はKFUPMとの研究協力の一環として位置づけられる。

## 【研究成果】

### (1) 油田火災などに伴う大気汚染が周辺地域に及ぼす影響の評価に関する研究

1991年12月17～19日までの3日間クウェート国内4か所(図1)で測定した大気汚染成分の結果を以下に示す。SO<sub>2</sub>、NO、NO<sub>2</sub>は全地点で測定したが、いずれも簡易サンプラーでサンプリングし、日本へ持ち帰って分析した。SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>は筆者らが開発した多孔性テフロンサンプラーを用い、吸収液にはトリエタノールアミン溶液を用いた。NO<sub>2</sub>は従来から用いられているフィルターパッチ式サンプラーを用いた。また、NO、NO<sub>2</sub>は横浜公研式サンプラーによってサンプリングを行った。SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>はいずれの地点も低濃度であったが、NOは高濃度を記録した。O<sub>3</sub>はブルガン油田地域だけで測定した。紫外線吸収式自動測定機を用いたので測定値はリアルタイムで処理されている。非汚染地域特有の日変化パターンを示し、8～39ppbの範囲であった。

浮遊粒子状物質は10ミクロンカッター付ハイボリュウムサンプラーを用いてジャハラ病院及びブルガン油田地帯で測定した。VOCs及びPAHsは、ハイボリュウムサンプラーによって得られたろ紙上の粉じんを分析した。C<sub>1</sub>～C<sub>4</sub>までの軽炭化水素類は石英ガラス製ボトル(容量5l)でサンプリングした空気を分析して求めた。またC<sub>6</sub>～C<sub>8</sub>までの芳香族炭化水素類をTenaxTAを充てんしたガラスカラムでサンプリングしたものを分析した(図2)。また、マンソリヤ、ジャハラ及びブルガン油田地帯の土壌を持ち帰り分析した。

油田火災鎮火後のクウェート国内のSO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>の濃度は非常に低く我が国の非汚染地域よりむしろ低濃度であった。特に、高濃度地域と予想していたブルガン油田地域が最も低い値を示した。油田だけでなく周辺の工業地域のほとんどが湾岸戦争で破壊され、まだ再開していないので当然の結果であるといえる。ブルガン油田以外の3地点のNOが高濃度を示したが、それぞれ、すぐ近くに駐車場の影響と考えられる。ハイボリュウムサンプラーによって得られた浮遊粒子状物質の値はSO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>に比べて高い値であった。4地点ともC<sub>1</sub>～C<sub>4</sub>までの軽炭化水素類を分析するために石英ガラスボトルによるサンプリングを行いFID-ガスクロマトグラフで分析した。また、TenaxTAを充てんした石英ガラスカラム(4×170mm)でサンプリングした空気はC<sub>6</sub>～C<sub>8</sub>までの芳香族炭化水素をガスクロマトグラフ質量分析計で分析した。C<sub>1</sub>～C<sub>4</sub>までの軽炭化水素類は我が国の都市域と同程度であった。ブルガン油田地域の値がいずれも最も高い値であった。芳香族炭化水素類は我が国の都市域の値よりもはるかに低く、ブルガン油田地帯で最も低い値を示した。このことは自動車などがソリン系からの放出物が多く他の石油化学産業からの排出が少ないことを推定させた。ブルガン油田地点の分析値のうち、12月19日の最後の2回分のエタンからイソブタンまでの値がそれまでの値の約10倍を示す高い値を記録した。ポンプで吸引してサンプリングしたため、電源が必要であり、ドイツグループの測定車用の電源の供給を受けたが、それまでは近くにある原油の池の風上に位置していたため低濃度であったが、12月19日の2回分は風向きが変わり風下となったためと推定される。原油池の直接の影響を受けると軽炭化水素類は高濃度になることが確認できた。ハイボリュウムサンプラーによって得られた浮遊粉じん中のPAH<sub>s</sub>の分析値は我が国の都市域での値よりもはるかに低い値であった。マンソリア、ジャハラ及びブルガンの各測定地点周辺の土壌の分析値から特に異常はなかったが、ブルガン油田の土壌からはNaイオン、Clイオンが高濃度で検出された。これは消火作業に海水を使用したためと思われる。また、ブルガン油田の土壌の「黒い砂」からダイオキシン類の分析を試みたが前処

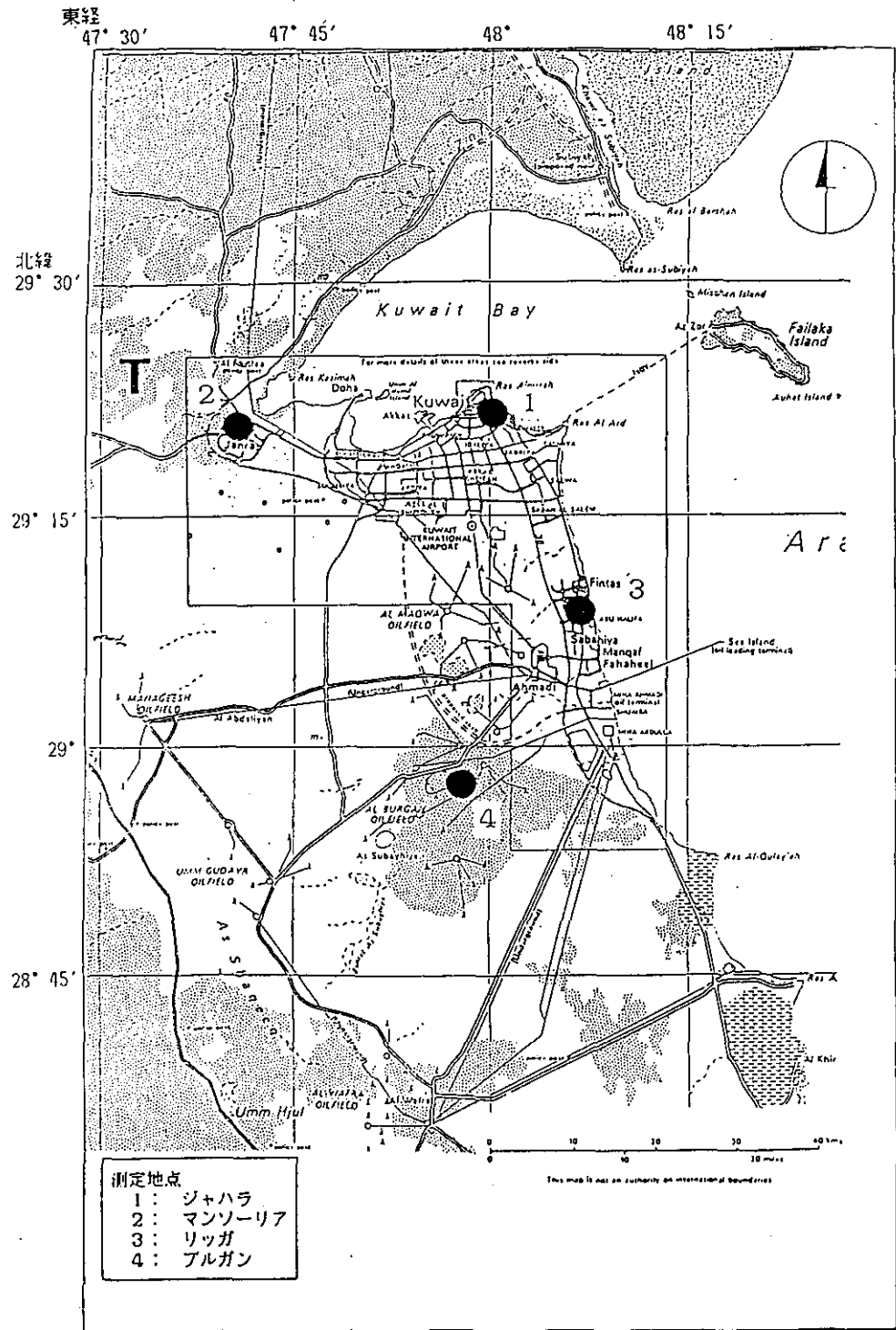


図1 測定地点

理操作が困難なため、まだ結果がでていない。他の地点の土壌からはダイオキシンは検出されていない。

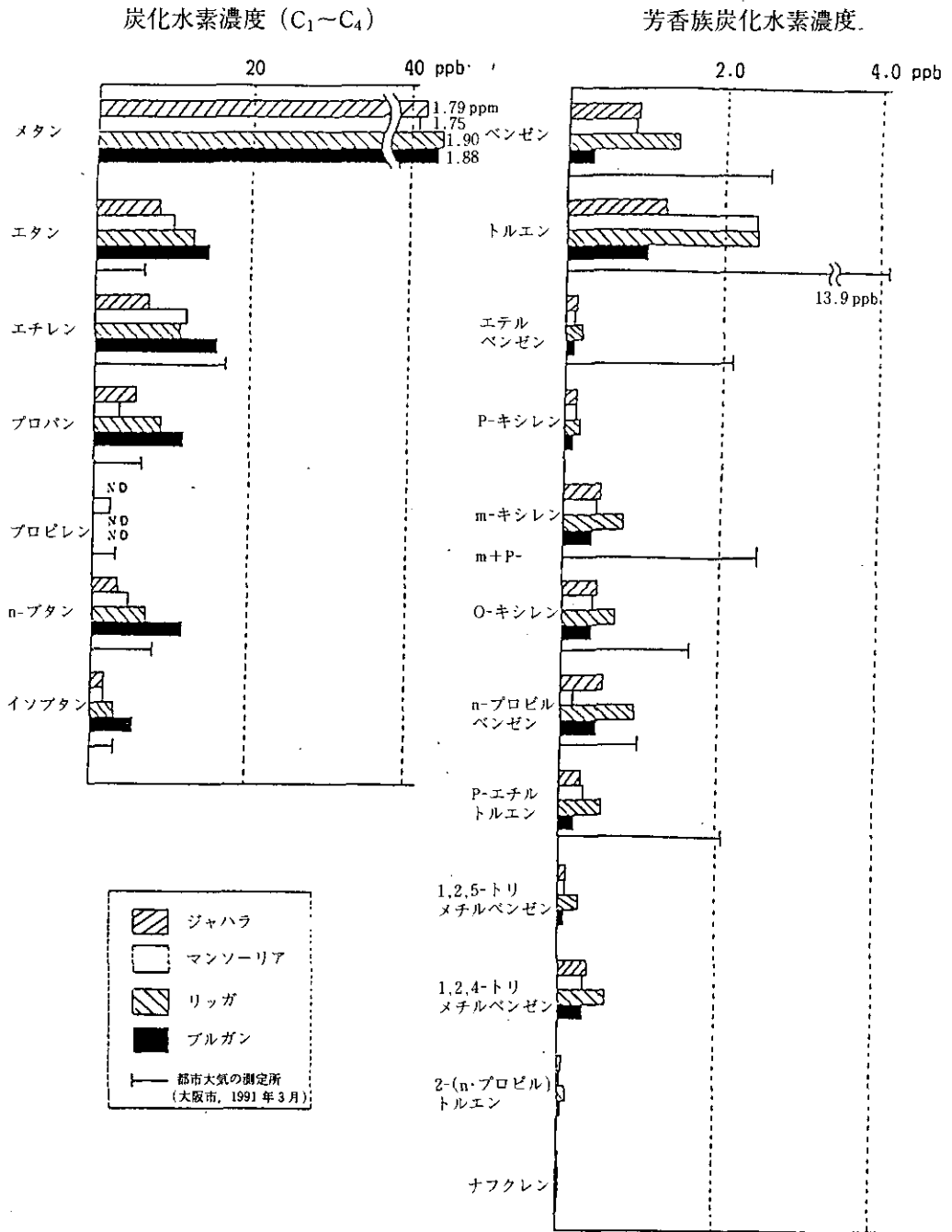


図2 炭化水素類の測定結果

(2) ベルシャ湾の海水流動解析に関する研究

本解析で用いられたモデルはBlumberg and Mellor (1983, 1987), Blumberg and Herring (1987)により用いられた3次元モデルである。シミュレーションは1991年1月1日~2月20日までの50日間について行った。メッシュサイズは10km格子で鉛直に10層をとった。初期値とし

て水温・塩分分布は Sailing Direction, Pub. 170 より与えた。潮汐については Bandar Abbas と Little Quoin Island で得られている調和定数をホルムズ海峡で与えた。チグリス・ユーフラテス川からの淡水供給量は World Water Balance and Water Resources of the Earth (UNESCO 1978) をもとに各月平均流出量を推定した (建設省土木研究所)。トルコ山岳地帯雪解け水を源流とするため 4 月がそのピーク流出量を与える。風のデータはカフジにおける約 25 年間の頻度分布をもとに、北西 6 m/s, 南東 6 m/s の風をそれぞれ 2 月 1~10 日及び 2 月 11~20 日の間与えた。

湾岸の 14 点で水位変動の調和定数が求められている。その中の Jazirat Halul で得られている水位変動とシミュレーション結果の比較は良好な一致を示した。

北西風 6 m/s を与えたときの 2 月 10 日の表層及び 9 層目の日平均流速分布を図 3 に示す。吹送流とチグリス・ユーフラテス川河川流入とが相まって、クウェート沖から沿岸に向かう強い流れが存在している。第 1 次政府調査団としてダーランからイラク、クウェート沖上空の偵察飛行を行ったとき、チグリス・ユーフラテス川河川水が塩水と混合することなく強いフロントを形成し、クウェート沿岸に向けて流れていることを確認している。原油流出地点はこのクウェート沿岸に向けての流れの中に位置しており、その後の原油流動に大きな影響を与えたものと考えられる。9 層目の水平流速分布は塩分成層に基づく表層とは逆の流れがクウェート沿岸からチグリス・ユーフラテス川及びイランに向けて流れている。このような底層流の存在は沈降したタールボールのイラン側沿岸への移送をもたらすものと思われる。チグリス・ユーフラテス川河口域で

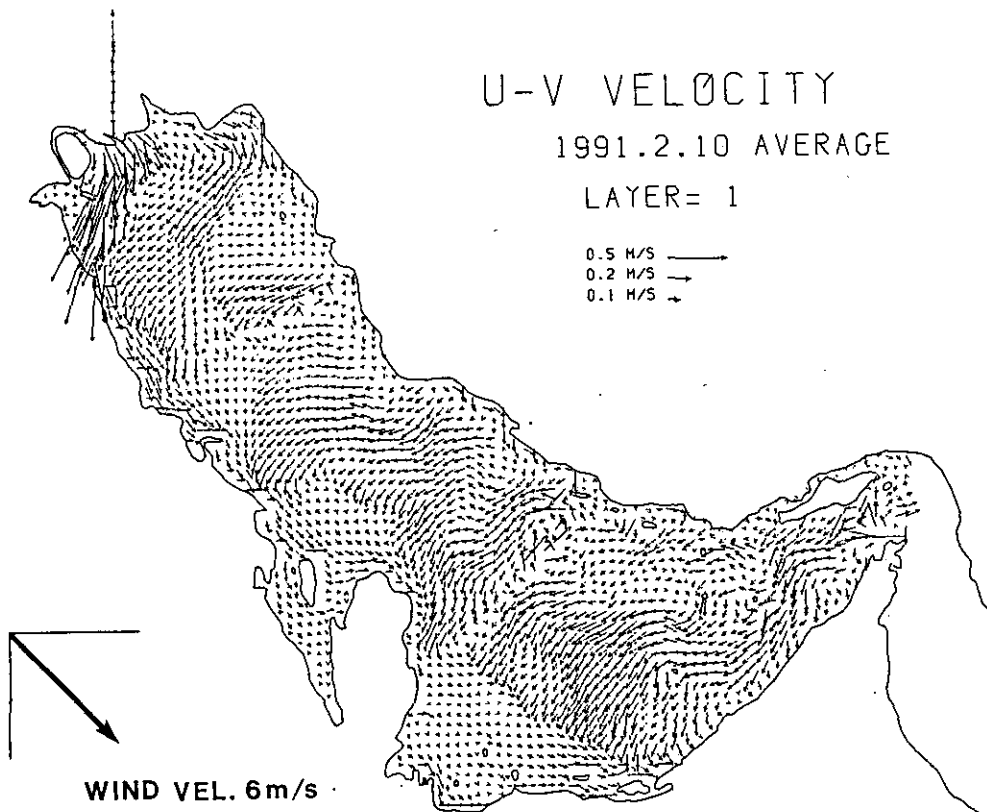


図 3 1991 年 2 月 10 日における表層での水平流速の平均値



の鉛直流速分布は、湾に流入した河川水の表層の広がり、及び下層での塩分の濃い水の流れ込みによる塩水くさびを再現している。上記計算に続けて、2月10日から南東風6 m/sを10日間与えたが、2月20日のシミュレーション結果は、かなり複雑な流況が出現しており、吹送流が卓越した海域であることがうかがえる。クウェート沖に浮標を投入し北西風を6日間、その後南東風を20日間吹かせ浮標の動きを追跡した。浮標は流速に乗って流れていくものと仮定して計算を行った。今回の浮標分布予測値は、米国沿岸整備隊及びNOAAが観測している現場海域での原油分布の中でも、特徴的な沿岸への吹き寄せと沖合いでの広がりを定性的に説明し得る結果を与えた。

## 2.9 総合化研究

### 〔研究組織〕 地球環境研究センター

総括研究管理官	○西岡秀三
研究管理官	植弘崇嗣・原沢英夫
地球環境研究グループ	
温暖化影響・対策研究チーム	森田恒幸・甲斐沼美紀子・増田啓子
地域環境研究グループ	
交通公害防止研究チーム	森口祐一
社会環境システム部	
環境経済研究室	小野宏哉・青柳みどり
客員研究員	2名

### 〔研究概要〕

地球環境研究センターにおいては地球環境研究総合推進費による総合化研究を実施している。この「総合化研究」という特殊な研究領域は、分野別に実施されている個々の研究プロジェクトと違い、次の3つの役割を持っている。

第1に、地球環境研究は「課題別研究」により分野ごとに研究プロジェクトが推進されているが、これらの個々の分野にまたがる研究領域や共通する研究領域を体系的かつ集中的に解析する「横断的研究」。

第2に、個々の研究プロジェクトの成果を総合的かつ体系的に集約して、政策の具体的な展開に資する知見を提供する「政策研究」。

第3に、個々の研究領域の重要性を地球環境問題の解決という観点から総合的に評価する「リサーチ・オン・リサーチ」。

これらの役割を担って、平成2年度及び3年度においては3つの研究に着手している。まず、総合的な世界モデルの開発をめざした「持続的発展のための世界モデルの開発に関する研究」（世界モデル研究）、環境と経済を統合する評価体系づくりをめざした「環境資源勘定体系の確立に関する予備的研究」（環境勘定研究）、さらに、地球環境問題に共通する社会経済システムの変革方向を探る「地球環境保全のための社会経済システムのあり方に関する国際比較研究」（社会システム研究）である。2番目の環境勘定研究はフィージビリティスタディの段階で、平成4年度から本格的なプロジェクトを実施する予定である。

表1には、これら3つの研究の役割が整理してある。

まず、「世界モデル研究」は平成2年度から実施しているもので、個々の研究プロジェクトの成果を活用しながら地球環境の変化を総合的に予測する「環境総合モデル」と、この環境変化に影響を及ぼす経済活動を分析する「世界経済モデル」の2つを開発中である。この研究により、具体的な政策展開につながる知見を総合化したり、地球環境研究全体の推進方針や各分野に共通する経済的前提を明らかにすることができる。

一方、「環境勘定研究」は環境資源や環境汚染物質のフローとストックに着目して、個々の地球環境問題を横断的に解析することを目的としている。この解析によって、自然の劣化や環境の汚染の収支決算を毎年集計し、それを経済的価値に換算することによって、従来の国民経済計算

表1 現行の総合化研究一覧

研究テーマ 研究の役割	世界モデル研究 (モデル)	環境勘定研究 (評価)	社会システム研究 (前提)
分野横断 的研究	個々の研究分野 間の相互関係の モデル化	個々の研究分野 を環境資源及び 環境汚染物質の フローとストックによ り統一的分析	各種地球環境問 題の原因として 共通した社会経 済システムの国 際比較分析
政策研究	個々の研究成果 の総合化と総合 予測モデルの開 発並びに世界経 済モデルの開発	環境と経済を統 合する評価体系 の構築	地球環境にやさ しい社会経済シ ステムの解明
つち つち	地球環境変化へ の感度という観 点から個々の研 究分野の重要性 評価	人間社会へのイ ンパクトという 観点から個々の 研究分野の重要 性評価	

体系に環境の大切さを反映することもできる。

また、平成3年度から開始した社会システム研究においては、各種の地球環境問題の原因になっている社会経済活動をより体系的に解明するため、これらの活動の基礎となる社会経済システムの基本構造を国際比較により分析するものである。本年度は、都市構造、産業構造、ライフスタイルの3つをとりあげて国際比較に着手し、これらの構造の差が地球環境への負荷にどのような影響を及ぼしているかを分析しており、地球環境にやさしい社会経済システムのあり方を見いだしたいと考えている。

以下では、世界モデル研究及び社会システム研究の2つについて平成3年度の研究成果をとりまとめる。なお、環境勘定研究については、平成3年度はフィージビリティ研究の段階であるため、その成果は「課題検討調査研究」の項にとりまとめている。

## 〔研究成果〕

### (1) 世界モデル研究

地球的規模の環境問題を体系的に解明し、総合的な問題解決の方策を検討するためには、地球温暖化、オゾン層破壊、森林破壊、砂漠化、海洋汚染などの個別の問題の相互関係を明らかにして地球環境問題全体の構造を把握するとともに、地球環境保全と世界経済の間のトレードオフを

分析して、持続的発展の基本条件を見いだしていく必要がある。このため、従来からローマクラブの「成長の限界」や「西暦 2000 年の地球」などにおいて地球環境モデルが作成され、また、計量経済モデルを用いて環境保全投資の経済影響が検討されてきたが、近年の科学的知見の蓄積を基礎にしたより体系的な研究が求められている現状にある。本研究は、地球環境研究総合推進費に基づく総合化研究として、個々の課題別研究の成果及びIGBP や IPCC などの国際機関の要請や成果に基づいて、地球環境問題を横断的・総合的に検討するとともに、世界経済との関係を検討することによって、持続的発展のための基本的条件を見だし、また、国際機関の研究活動に貢献することを目的としている。

平成 3 年度においては、環境総合モデルの開発と経済モデルの開発に関する研究を進めた。このうち環境総合モデルについては、地球環境—経済系のすべてにわたる知見を総合化するフレームワーク・モデルの開発及び地球環境に関する自然現象を総合的に解析する 3 次元物質循環モデルの開発を進めた。また、経済モデルについては、地球温暖化と経済成長に関する数量モデルの比較分析及び世界モデルの開発を進めた。以下にこれらの成果の概要を紹介する。

#### 1) 地球環境フレームワーク・モデルの開発

地球環境問題の相互の関係やそれに関連する社会経済活動をマクロにとらえて、地球環境問題の構造やその重要なプロセス、それに問題の解決方針を見いだすためには、個々の課題別研究や海外の研究活動から得られた知見を体系的に蓄積し、総合的に組み合わせるシステムが必要である。このため、人類の発展→その発展を支える基本的人間活動→これらの人間活動に不可欠な活動要素→これらの活動要素から生じる廃物→活動要素や廃物により変化する地球環境→地球環境変化によって生じる人間社会への影響→これらの影響による人類の発展の制約、といった一連の体系的分析が可能となるフレームワークモデルの開発を進めている。この構造は図 1 に示すように 7 つの指標群と 8 つのマトリクスによって構成され、各マトリクスの要素に科学的知見がファイリングされる仕組みになっている。

このフレームワークモデルの管理のため、4 つのサブシステムからなる支援システムを開発中である。第 1 に、フレームワークモデルのオペレーション制御と管理を担当する「コントロールサブシステム」、第 2 に、指標項目やマトリクス要素の増減や構造モデルの修正を管理する「モデル修正サブシステム」、第 3 に、構造モデルの項目間関係の修正やパラメータの修正を管理する「関係修正サブシステム」、第 4 に、各指標の状態を分かりやすく表示する「状態表示サブシステム」、第 5 に、関係や構造の根拠となる各種知識を管理する「知識ベースサブシステム」である。平成 3 年度においては知識ベースサブシステムを除く基本プログラムが完成しており、今後、詳細部分のシステム開発や知識ベースの開発、さらにこのモデルに入力する各種の知見の収集を行う予定である。

#### 2) 3 次元物質循環モデルの開発

地球環境問題相互の関係をより詳細に分析するためには、3 次元の大気輸送・変換プロセスをシミュレーションできる 3 次元物質循環モデルの開発が必要である。このため、図 2 に示す枠組みのもとでモデル開発を進めている。このうち大気輸送・変換サブモジュールでは、排出した大気汚染物質の大気中での移動・反応を算定するため、全球を水平方向 5 度メッシュに区分し、鉛直方向には  $\sigma$  座標を用いて地形の影響を考慮して、移流、反応、沈着のモデル化を試みた。移流計算は Russell らが用いた 2 次モーメント法を使用し、対流混合には Heimann らが GISS-GCM の

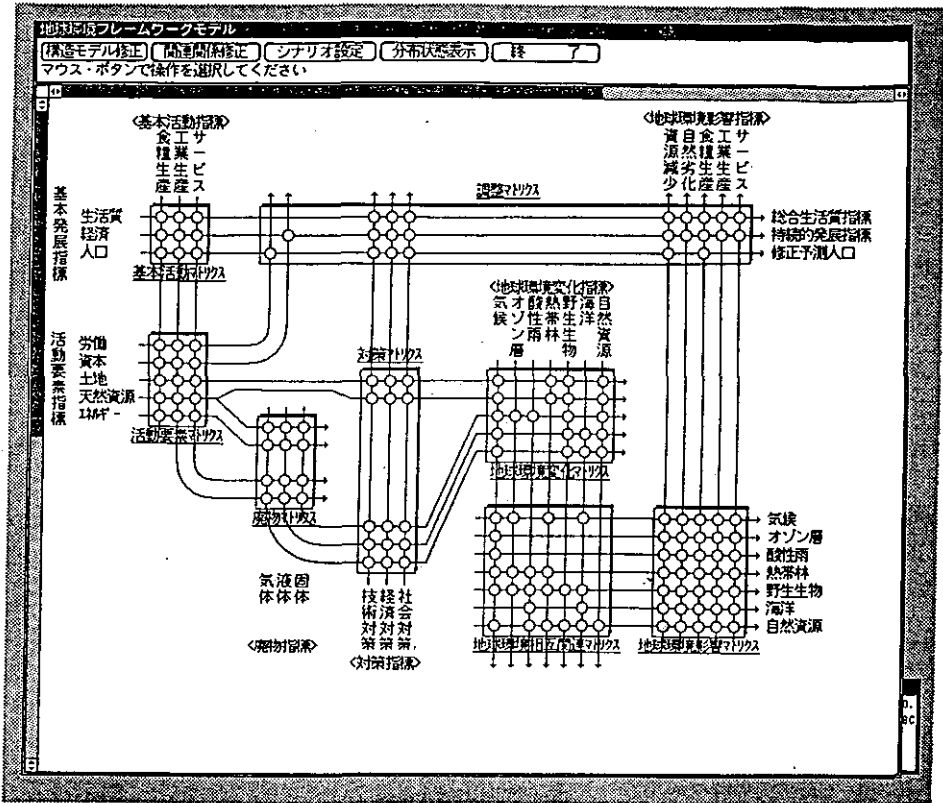


図1 地球環境フレームワークモデルの構造

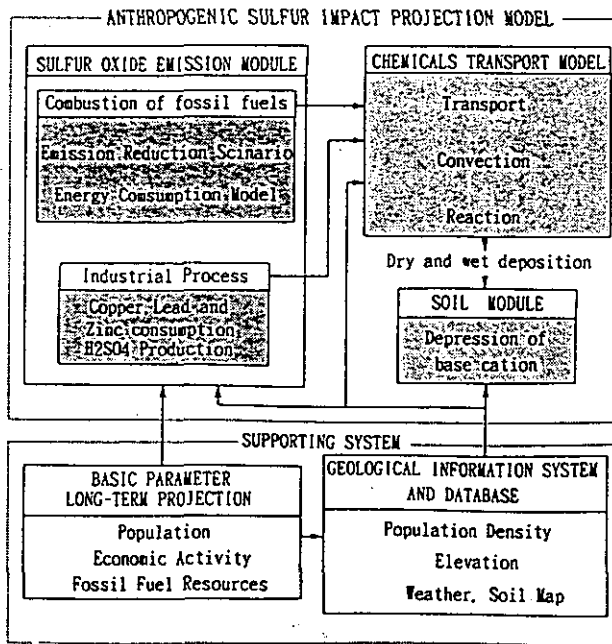


図2 3次元物質循環モデルの基本フレーム

計算結果から算出したパラメータ値を用いた。また、輸送中に発生する反応、沈着等に関しては、池田らの研究を参考にして大気中の  $\text{SO}_2$  濃度、 $\text{SO}_4^{-2}$  濃度及び雲中に取り込まれた  $\text{SO}_4^{-2}$  の大気換算濃度の関係を定式化した。

このモデルを用いて、人為起源の酸性降下物、特に硫黄酸化物の地球的なスケールでの環境影響を解析した。図3は、西暦2100年時点での硫黄酸化物の年沈着量の分布を予測したものである。前提としたシナリオは、中位人口増加、中位経済成長の標準（自然体）シナリオである。これにより、人為起源の硫黄酸化物排出の超長期的かつ地球規模での環境影響が解析できる見通しがつき、他の地球環境問題との相互関係を解析する第一歩が得られた。

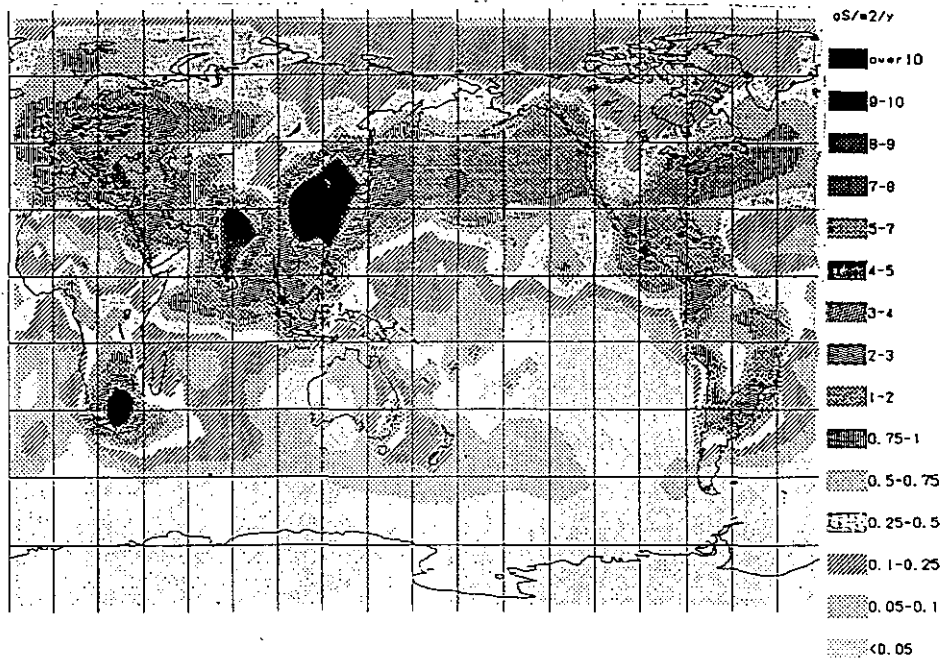


図3 硫黄酸化物沈着量の分布、2100年

### 3) 地球温暖化と経済成長に関する数量モデルの比較分析

経済発展に伴う二酸化炭素排出量の増大、温暖化防止対策がマクロ経済に及ぼす影響等、地球環境保全と経済成長の関係について分析するために各種の数量モデルが開発されつつある。これらのモデルをレビューしてその構造をやシミュレーション結果を比較分析することは、モデルの改良方向や新たなモデルの設計条件を見出すために不可欠な作業である。このため、この種の国内モデル及び世界モデルを詳細に検討した。

まず我が国の経済への影響については、表2に示すように今までに7つの数量モデルが開発されている。このうち、2つのモデルは長期予測モデル、他の5つのモデルは中期予測モデルである。これらの数量モデルを用いて、二酸化炭素の排出量を安定化するためにどの程度の対策が必要かを分析し、次いで二酸化炭素排出量の安定化を図る場合にGNPがどの程度減少するかを予測している。二酸化炭素排出量の安定化に要する課税率は、炭素税で1炭素トン当たり25,000～30,000円、エネルギー税は石炭で30～100%の間で推定されている。二酸化炭素排出量の安

表2 地球温暖化対策が日本のマクロ経済に及ぼす影響についての数量モデルとその予測結果の一覧

原典	モデルの概要	標準ケースでの予測結果	CO <sub>2</sub> 削減対策とその影響	検討課題
後藤則行 (1991)	詳細なエネルギー部門をもつ動態の市場均衡モデル。一次エネルギー5種類、二次エネルギー9種類、需要部門は産業9部門と民生部門。計画期間は1990-2040年。	●GNP平均増加率: 3.42% (～2000年) (年当たり) 3.18% (～2010年) ●CO <sub>2</sub> 排出量増加率: 2.73% (～2000年) (年当たり) 1.53% (～2010年)	●CO <sub>2</sub> 排出量安定化のため25,000円/炭素トンの炭素税が必要(今後50年間の平均) ●この課税によるGNPの減少は0.5%程度(対標準, 全期間平均, 税収還元有)	新エネルギー開発などの供給面での代替戦略やエネルギー利用効率向上などの検討が必要。
筑井甚吉 (1991)	動学化された産業連関の計画モデルで、計画期間中の消費のフローを最大化する消費ターンバイク・モデル。産業22部門。計画期間は1989-2010年。	●GNP平均増加率: 3.8% (～2000年) (年当たり) 2.7% (～2010年) ●CO <sub>2</sub> 排出量増加率: 2.0% (～2000年) (年当たり) 1.5% (～2010年)	●家計部門エネルギー消費の伸び率を半分に、産業部門も石油ショック程度の省エネ ●この対策によるGNPの減少はなし。	産業構造と価格変化との関係を入れたモデルの改良が必要。
山地憲治 (1990)	世界エネルギーモデル、多部門モデル、エネルギー間競争モデル、9地域モデルからなる中期経済予測モデル。産業13部門、エネルギー10種類。1988-2005年を対象。	●GNP平均増加率: 3.9% (～2000年) (年当たり) 3.1% (～2005年) ●CO <sub>2</sub> 排出量増加率: 2.2% (～2000年) (年当たり) 0.9% (～2005年)	●CO <sub>2</sub> 排出量安定化のため31,500円/炭素トンの炭素税が必要(全期間平均) ●この課税によるGNPの減少は期間内最大5.0%程度(対標準/対付, 税収還元有)	補助金の効果、国際的な産業構造調整の効果、新技術や自然エネルギーの検討が必要。
伊藤浩吉 (1988)	一般的なマクロ経済モデルに簡略なエネルギーモデルを連結して、エネルギー価格や省エネ投資の影響をモデル化。1988-2010年を対象。	●GNP平均増加率: 3.8% (～2000年) (年当たり) ●CO <sub>2</sub> 排出量増加率: 2.8% (～2000年) (年当たり)	●CO <sub>2</sub> 排出量安定化のため石炭100%、石油80%、LNG60%課税を1995年～導入 ●この課税によるGNPの減少は期間内最大6.0%程度(対標準/対付, 税収還元有)	省エネ対策の効果、産業構造調整の効果、技術革新の考慮等の検討が必要
伴金美 (1991)	エネルギー価格により要素代替や技術進歩を決定する産業モデルと動学的な最適行動を決定する消費需要モデルを中心としたマクロ計量モデル。1991-2000年を対象。	●GNP平均増加率: 2.8-5.8% (年当たり) (～2000年) ●CO <sub>2</sub> 排出量増加率: 2.3% (～2000年) (年当たり)	●CO <sub>2</sub> 排出量安定化のため石炭30%、石油24%、LNG16%課税を導入。 ●課税によるGNPの減少は1991年1.1%～2000年0.3%(対標準, 税収還元有)	価格効果についての技術的裏付けの検討が必要。
山崎茂樹 (1991)	一般的なマクロ経済モデルに、エネルギー価格と省エネ投資の影響を反映できるように改良し、課徴金の効果と税収の省エネへの還元効果を分析。1990-2010年を対象。	●GNP平均増加率: 3.63% (全期間) (年当たり) ●CO <sub>2</sub> 排出量増加率: 0.67% (全期間) (年当たり)	●CO <sub>2</sub> 排出量安定化のため17,500円/炭素トンの炭素税が必要(全期間平均) ●この課税によるGNPの減少はなし。	省エネ投資効果についての技術的裏付け、17,500円/炭素トン消費型産業の想定との整合性について検討が必要
森俊介 (1990)	エネルギーの価格や供給量制限による消費者余剰の変化を分析する簡略な計量経済モデル。一次エネルギー5種類、二次8種類。コージェネ導入を設定。	●GDP平均増加率: 3.75% (～2000年) (年当たり) 3.25% (2000年～) ●CO <sub>2</sub> 排出量増加率: 1.58 (～2000年) (年当たり) 0.47 (2000年～)	●CO <sub>2</sub> 排出量安定化のため17,500円/炭素トンの炭素税が必要(全期間平均) ●この課税によるGNPの減少は期間内最大3.6%(対標準シナリオ税収還元無)	需要側セクタの細分化、国際的調整メカニズムの検討などが必要。

定化によるマクロ経済への影響については、標準ケースと比較したGNPの減少の割合でみると、0～6%の間で大きくバラついている。このような予測のバラつきには、モデルの構造の差とともに、前提条件やパラメータの違いも大きく影響している。特に、技術効率の改善や技術革新等の技術にかかわる諸前提、エネルギーの価格弾力性と代替弾力性の値、それに税金の還元方法の違い等を明らかにする必要がある。

一方、世界経済に対する温暖化対策の影響を予測するため、今までに10以上の数量モデルが開発されている。これらのモデルを使った予測では、温暖化を防止する対策によって世界の経済成長率が0.3～0.5%・ポイント低下するという悲観的な結果から、低下したとしても0.01%・ポイント以下であるとする楽観的な結果までさまざまである。これらの結果は、予測の諸前提が異なるため、昨年から経済協力開発機構(OECD)が中心となって、同じ前提条件の下で5つの世界経済モデルによる予測が行われ、その結果が比較されている。表3には、OECDに参加した5つのモデルとその予測結果の一覧が示してある。二酸化炭素排出量増加率を2%削減するために、炭素税は1炭素トン当たり2000年で97～388米ドル、2020年で283～332米ドルが必要で、その経済影響は標準ケースのGNPと比較して、2000年0.3～3.7%、2020年で1.2～1.9%減少するという予測結果が出ている。これらの予測結果は我が国の国内予測モデルの結果よりも経済影響が小さめに出ているが、予測値のバラツキは依然として大きい。OECDにおける検討によれば、予測値が違ってくる主要な原因として4つの点をあげている。第1に、エネルギー利用効率改善(AEEI)に関する仮定で、これの違いにより標準ケースでの二酸化炭素排出量の伸びが大きな影響を受ける。第2は、クリーン・エネルギーを供給する技術(バックストップ・テクノロジー)に関する仮定、第3は、要素代替の弾力性(ESUB)の値で、いずれも炭素税の税率に直接影響を及ぼす。第4は、炭素税の税収の還元方法で、この還元をうまく行うことにより経済への影響を緩和することが可能である。今後の検討が必要である。

これまでの数量モデルによる予測から得られた知見は、次のようにまとめることができる。第1に、二酸化炭素排出量を安定化するために必要な課税の率は、1炭素トン当たり20,000～30,000円と比較的一致した結果が得られていること、第2に、しかし、この課税に伴う我が国の経済への影響の予測値には、かなりの開きがあること、第3に、諸外国に比較すると我が国の二酸化炭素抑制の経済的コストは概して高めに推計されていること、である。

これらの知見とともに、今までの検討結果から経済への影響を緩和するいくつかの重要な示唆も示された。これらを次にまとめてみよう。

第1に、市場メカニズムを活用した方策の検討がぜひとも必要である。二酸化炭素抑制の経済的コストは大きく、市場メカニズムを活用してこのコストを減少させる必要がある。国内的な環境税や補助金がまず検討される必要があるが、さらに、国際的にも経済的手段の導入も検討すべきである。国際的に二酸化炭素排出権を売買する制度を導入した場合は、経済への影響は半減するという予測もある。第2に、環境にやさしい技術の開発や採用を促す方策が必要である。マクロ経済への影響は、技術革新によって大幅に緩和される。我が国の自動車排ガス規制の際に、低燃費エンジンの開発とそれに伴う需要創出効果により、経済が活発化したことは記憶に新しい。このような効果を引き出すために、補助金等の積極的な方策も検討が必要である。第3に、発展途上国を支援する方策が必要である。環境保全投資のための財源調達や技術移転によって、途上国の経済影響は大幅に緩和される。また、先進国に比べて途上国の二酸化炭素抑制コストは小さく、途上国の対策を推進することが世界的にみてより経済的効率が高いといえる。第4に、これらの方策が有効に働くために、市場メカニズムを適切に維持する必要がある。エネルギー転換、



表3 地球温暖化対策が世界のマクロ経済に及ぼす影響についての数量モデルとその予測結果の一覧

モデル名	モデルの概要	地域 分割	標準ケースでの CO <sub>2</sub> 排出量の予測 (10億トン)	CO <sub>2</sub> 排出量増加率を2%削減する場合の予測(世界計又は世界平均)		
				排出量(10億トン)	炭素税(米ドル/トン)	対標準GNP減少率
Mann-Richels (Global 2100)	詳細なエネルギー部門をもつ動学的最適化モデル。バックストップ技術を含めてエネルギー9種。将来の予想をベースにした最適化行動を含む。石油のみ貿易可能で、他のエネルギーは貿易されず。2095年まで予測。	5	6.00 (1990年) 6.97 (2000年) 9.52 (2020年)	6.00 (1990年) 5.72 (2000年) 5.26 (2020年)	0 (1990年) 171 (2000年) 323 (2020年)	0.0% (1990年) 3.7% (2000年) 1.8% (2020年)
Edmonds-Reilly (ERM)	詳細なエネルギー部門をもつ部分均衡型シミュレーションモデル。一次エネルギー6種、二次エネルギー4種。化石燃料は貿易可能で、世界的な需給均衡により価格が決定される。エネルギー部門とマクロ経済のリンクは極めて単純。2100年まで予測。	9	5.77 (1990年) 6.71 (2005年) 8.18 (2020年)	5.77 (1990年) 4.97 (2005年) 4.50 (2020年)	0 (1990年) 112 (2005年) 283 (2020年)	0.0% (1990年) 0.8% (2005年) 1.9% (2020年)
OECD-GRBEN	OECDが開発中の地球環境モデル。逐次型動学的一般均衡モデル。一次エネルギー4種、二次エネルギー2種。完全な貿易リンクをもち、交易条件変化の影響も考慮される。排出権売買もモデル化。2020年まで予測。	9	5.05 (1990年) 6.00 (2000年) 8.53 (2020年)	5.05 (1990年) 4.92 (2000年) 4.71 (2020年)	0 (1990年) 97 (2000年) 332 (2020年)	0.0% (1990年) 0.3% (2000年) 1.2% (2020年)
IEA	国際エネルギー機関(IEA)が開発した詳細なエネルギー部門をもつ中期計量経済モデル。OECD諸国のみを対象。エネルギー5種(ただし製品の細目は多い)。マクロ経済とのフィードバックはない。外挿期間は2005年までと短い。	10	3.05 (1990年) 3.50 (2000年) 3.65 (2005年)	3.04 (1990年) 2.80 (2000年) 2.74 (2005年)	0 (1990年) 256~388 (2000年) 376~548 (2005年)	
Whalley-Whigle	比較静学的一般均衡モデル。エネルギー2種。貿易を含む。全地域で共通の炭素税を課し、課税の国際的帰着を分析することを主眼とする。1990年から2100年の110年間を一期とするため途中の過程の分析はできない。	6			870 (2100年)	13.5% (2100年)

産業構造の転換、国際間の調整等の成否は市場メカニズムに委ねられており、このダイナミズムを維持することが不可欠である。以上の検討課題に加えて、予測モデルの方法論上の課題についても検討が必要である。特に、技術革新やそれに対する補助金の効果をどのように取り扱うかはすべてのモデルに共通した課題となっている。さらにより根本的には、地球環境への投資による便益も正当に評価できるような経済モデルの開発が望まれる。

#### 4) 世界経済モデルの開発

地球環境の保全と世界経済の成長との関係を解析する数量モデル開発の第一歩として、中期計量経済モデルの開発を進めている。このモデルは図4に示すように、29カ国及び7地域からなる世界経済モデルであり、先進国においては生産能力面と金融面の2つの制約条件を伴ったケインズ型の需要主導タイプのモデルで、方程式数は1国/地域当たり80本、途上国においては需給調整を伴った供給主導型のモデルで、方程式数は1国/地域当たり60本である。これらの各国/地域モデルは4種類の貿易マトリクスによって連結され、この貿易マトリクスを媒介にして各国の生産・貿易及び価格変動の国際的波及メカニズムが定量的に把握できるようになっている。さらに、工業品生産モデル及び食料・粗原料・燃料生産モデルに環境汚染セクター及び自然環境セクターを連結して、地球環境と経済成長との関係が分析できる。

本モデルは現在のところ試験的にシミュレーションを行ってモデルの改良を試みている段階にあり、政策評価に用いるにはもう少し時間が必要である。しかし、いくつかの試験的なシミュレ-

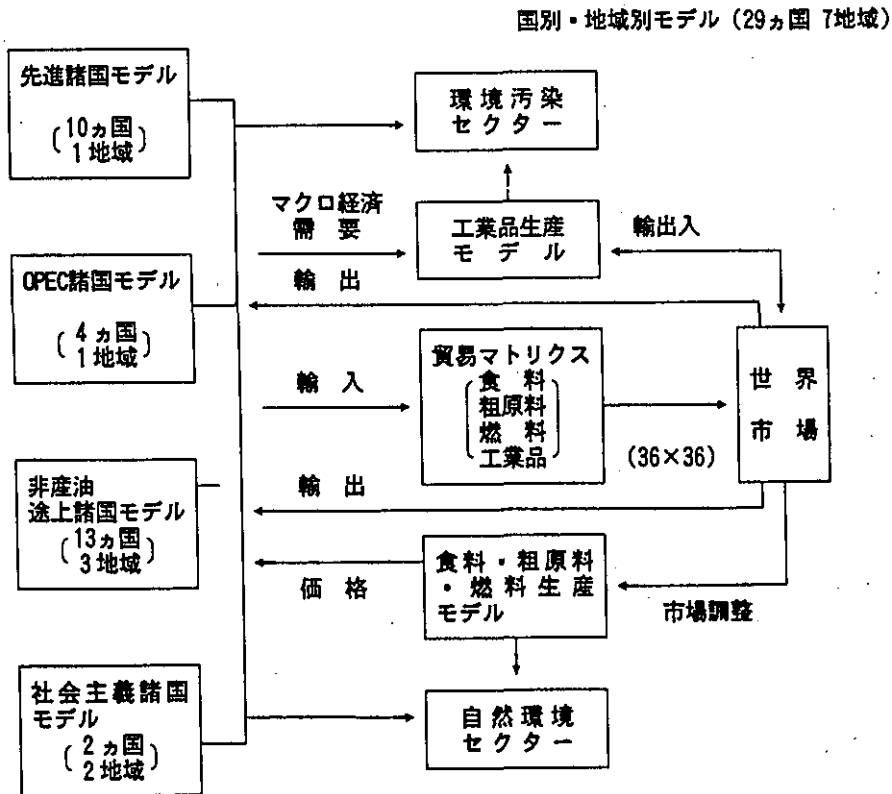


図4 開発中の世界経済モデルの概要

ションは実施しており、表4及び表5にはこれらの中間的な結果の一部を掲げている。表4は西暦2000年までの二酸化炭素排出量及び国内総生産の各国別トレンドを、また、表5は先進7か国のエネルギー価格を20%増加させた場合の二酸化炭素排出量の削減効果と国内総生産の減少分を予測したものである。

## (2) 社会システム研究

地球環境保全のためには個別の分野の各種対策とともに、個々の分野に共通する経済構造、都市構造、エネルギー構造、ライフスタイル等の社会経済システムの基本構造を変革していく必要がある。これらの社会経済システムのあり方は、各国の社会制度や文化によって大きく異なり、総合的な国際比較研究が必要である。このような研究については、地球温暖化防止行動計画において環境保全型社会システムの必要性を掲げる等、今後の地球温暖化への対応方針を検討する上からも緊急を要している。本研究は、経済構造、都市構造、エネルギー構造、ライフスタイル等の地球環境保全の基本となる社会経済システムのあり方について各方面の専門家の参加により国際的な比較研究を行い、個別の分野別の保全対策の前提条件や対応方針を総合的に明らかにすることを目的とする。

本研究は平成3年度より開始したため、初年度の研究としては、種々の学識研究者からの助言を得ながら3年間の研究方針を検討するとともに、地球温暖化問題を対象にして社会経済システムとのかかわりについてのケーススタディを実施し、特に都市構造や都市配置と地球温暖化問題との関係について実証分析を試みた。以下にこれらの成果の概要を紹介する。

表4 中期計量モデルを用いたCO<sub>2</sub>排出量の予測

	1. CO <sub>2</sub> (million ton)		2. GDP (1980 billion \$)	
	1990	2000	1990	2000
Japan	263.4	266.9	1646	2295
U.S.	1411.3	1490.1	3645	4830
Canada	112.1	108.3	370	498
U.K.	154.4	157.1	674	901
France	86.8	71.5	815	1056
W.Germany	190.9	180.6	956	1224
Italy	104.1	109.3	556	712
Australia	75.9	99.1	208	268
New Zealand	5.7	6.2	28	32
3. CO <sub>2</sub> Intensity (CO <sub>2</sub> /GDP)*				
	1990	2000	2000/1990	
Japan	0.160	0.116	0.725	
U.S.	0.387	0.309	0.798	
Canada	0.303	0.217	0.716	
U.K.	0.229	0.174	0.760	
France	0.107	0.068	0.636	
W.Germany	0.200	0.148	0.740	
Italy	0.188	0.154	0.819	
Australia	0.365	0.370	1.014	
New Zealand	0.203	0.194	0.956	

Note : \* million ton/billion \$

表5 先進7か国に20%のエネルギー税をかけた場合の効果  
(対標準シナリオ増減%)

	GDP		
	1990	1995	2000
1. United States	-.390	-2.455	-2.189
2. Western Europe	-.057	-.351	-.395
3. Developed Asia-Pacific	-.166	-1.182	-1.152
4. Eastern Europe	.001	.026	.027
5. China, etc.	-.042	-.289	-.257
6. Middle East	-.013	-.169	-.261
7. Africa	-.003	.047	.145
8. Latin America	-.066	-.436	-.409
9. South East Asia, etc.	-.039	-.365	-.447
10. World	-.139	-.885	-.847
	CO <sub>2</sub>		
	1990	1995	2000
1. United States	-.444	-4.179	-4.454
2. Western Europe	-.358	-1.710	-1.800
3. Developed Asia-Pacific	-.100	-.935	-.971
4. Eastern Europe	.001	.018	.018
5. China, etc.	-.035	-.237	-.211
6. Middle East	-.004	-.136	-.301
7. Africa	-.031	-.212	-.245
8. Latin America	-.093	-.769	-.798
9. South East Asia, etc.	-.025	-.317	-.392
10. World	-.175	-1.343	-1.345

#### 1) 研究方針の検討

地球環境保全に大きな影響を与える社会経済システムの基本構造には、経済・金融システム、技術システム、ライフスタイル、エネルギーシステム、資源環境システム、農業システム、工業システム、都市・交通システム、法システム、文化・倫理システム等があるが、このうち、経済・金融システム、都市・交通システム、及びライフスタイルに焦点を当てて、研究の基本方針を検討した。この際、表6に示す15名の専門家に対してヒアリングを行い、それぞれの分野における研究の切り口について助言を得た。その結果、まず、各国ごとに環境保全のパフォーマンスが比較できるような指標の作成とそのためのデータ収集が必要であること、経済・金融システムについてはこのパフォーマンス指標の作成後に焦点を絞った比較分析の方針を立てること、都市・

表6 研究方針検討の際のヒアリング対象者とヒアリングテーマ一覧

分野等	氏名	所属・現職	話題提供テーマ	
経済・金融分野	アドバイザー	宇沢 弘文	新潟大学経済学部教授	経済・金融分野全般にわたるコメント
	サロン講師	国則 守生	日本開発銀行 設備投資研究所主任研究員	「海外における取組状況」
	サロン講師	藤原 正寛	東京大学経済学部教授	「正統派経済学からみた地球環境問題」
	サロン講師	間宮 陽介	神奈川大学経済学部助教授	「暮らしの質としての経済学と地球環境問題」
	ヒアリング対象者	寺西 俊一	一橋大学経済学部教授	「政治経済学的視点からみた地球環境問題」
都市構造分野	サロン講師	武内 和彦	東京大学農学部助教授	「生態都市の再生」
	サロン講師	岩村 和夫	建築都市設計工房 岩村アトリエ代表	「環境と共生する建築計画」
	サロン講師	越塚 武志	筑波大学社会工学科教授	「都市配置論」
	サロン講師	フーチェン・ロー	国際連合大学プログラム 参事官	「巨大都市化と地球環境問題」
ライフスタイル分野	サロン講師	中山 茂	神奈川大学経営学部教授	「環境意識の歴史的変遷」
	サロン講師	肥田野 登	東京工業大学社会工学科教授	「家族論からみたライフスタイル」
	サロン講師	吉田 昭彦	産能短期大学能率科教授	「途上国の人口問題とライフスタイル」
	サロン講師	野田 正彰	京都造形芸術大学教授	「生活スタイルの比較文明論」
	ヒアリング対象者	守住 信貴	電通マーケティング局参事 地球環境プロジェクト主宰	「地球環境問題とマーケティング」
	ヒアリング対象者	木全 ミツ	(株)イオンフォレスト代表取締役 ポディショップ経営	「地球環境問題と企業の取組み」

交通システムに関してはいくつかの都市をとりあげた詳細なケース・スタディが必要となること、ライフスタイルについては背景となる家族関係や企業関係、それに国民の幸福観等についても併せて分析する必要があること、などを重点的に勘案することになった。

## 2) 地球温暖化を対象にしたケーススタディ

地球温暖化問題の解決にとって、社会経済システムの基本構造の改革は重要な政策オプションである。このため、地球温暖化問題と社会経済システムの関係について種々の側面からケーススタディを実施した。検討対象とした社会システムは、まず第1に、日々の生活においてエネルギーや自然資源の消費量を減らす可能性のある「ライフスタイル」の転換、第2に、経済活動や生活

活動が集積する都市においてエネルギー消費を抑制する可能性がある「都市構造や交通システム」の転換、第3に、人と物の移動や資源の消費を節約させる可能性を持つ「情報システムの」転換、第4に、環境保全型の産業活動や経済取引を導く方向で改革が検討されている「産業や市場を支えるシステム」の改良、第5に、農業分野からの温室効果ガス排出を抑制したり、森林による二酸化炭素固定を促進するための前提条件となる「農林業を支えるシステム」、第6に、発展途上国の経済活動を環境保全と両立させるための基本条件となる「人口増加と経済成長との関係を調整するシステム」である。これら6つの対象を検討するため、表7に示す研究会を設立してこの研究会のメンバーによりケーススタディを行った。その主要な結果は以下のとおりである。

①ライフスタイルについて

・榎屋は「エネルギーに係るライフスタイルの変化を促す政策」において、21世紀にはいずれにしてもライフスタイルに言及しなければならなくなる状況を踏まえて、個人の省エネルギー行動の効果を計算し、各方面での省エネルギー活動に加えてライフスタイルの変化により、20年後のエネルギー消費は10～18%減少する見通しを示した。そのためには、「エネルギー消費を人々に気付かせるでだて」「賞・コンテストによる奨励」「補助金」「無駄の多い技術に対する税金・罰金制度」を使うべきであるとした。

・青柳は「地球温暖化防止のための消費者学習」で、日本の600世帯への調査から、消費者の自発的な行動を促進することにより、二酸化炭素排出量を全国排出量の5.3%減少する可能

表7 地球温暖化防止のための社会経済システムの構造改革に関する研究会のメンバー一覧

青柳みどり	国立環境研究所社会環境システム部	農業経済
井村秀文	九州大学工学部	環境システム
宇田川武俊	前農業環境研究所環境管理官	農業システム
小川直宏	日本大学経済学部・人口研究所	人口問題
熊崎 実	筑波大学農林学系	森林経済
倉板智子	会計事務所	環境監査
鈴木利治	名古屋経済大学	エネルギー経済
榎屋治紀	システム技術研究所	エネルギーシステム
名和小太郎	新潟大学法学部	法情報
西岡秀三	国立環境研究所地球環境研究センター	環境管理 (座長)
林 良嗣	名古屋大学工学部	都市政策
松岡 駿	京都大学工学部	衛生工学
盛岡 通	大阪大学工学部	環境工学
森田恒幸	国立環境研究所地球環境研究グループ	環境政策 (幹事)
事務局	環境庁企画調整局地球環境部研究調査室	
	財団法人 環境調査センター	
	株式会社 ニッセイ基礎研究所	

性があることを示し、環境教育が実質的に地球環境保全に効果的であること、個人が行動に参加できるような地域に根ざした環境保全グループの育成を強調した。

・盛岡は「生活様式の組み換えによる共生型社会システムの構築」において、自然と共存する都市づくり、より質の高い消費行動、他者への思いやり、環境学習と自主的取り組み、草の根的な環境審査を通じて、循環と共生を基調とした社会づくりをめざすべきだとし、このために都市再構築計画（Eco-pleis 21）とライフデザイン（Ecolife 21）、そしてこれらの改革の拠点として地球環境都市（Global human-ecopoleis）づくりを提案した。

#### ②都市・交通・情報システムについて

・松岡・森田・有村は「都市構造および都市配置と温暖化」で、都市構造や国土利用の適正化に向けて、都市とエネルギーに関する研究をサーベイし、世界主要都市の詳細なデータを集めて統計的に分析することによって、高密度な都市を国土に適度に分散させること -Decentralized Location of Compact Cities- が地球に優しい国土形成と都市像であることを示唆した。

・林は「環境負荷削減のための都市の土地利用・交通政策」において、都市における交通エネルギー消費と環境負荷について国際比較を試み、エネルギー消費が都市形態のコンパクトさと交通インフラの供給水準に依存しているとし、環境負荷の削減のためには、先進国では公共交通施設の整備促進のために開発利益還元システムの改善が、また、発展途上国においては交通インフラ整備への先進国の炭素税等の還流、などが必要とした。

・名和・中里は「省資源未来型新聞の提案」において、森林資源とエネルギーの消費にかかわる情報メディアである新聞のシステムを、「ファクシミリ型新聞」にすることによって資源とエネルギーを約半分に節減可能であることを示した。これは高度情報化社会における資源・エネルギー消費が、一層の情報化を工夫することによって改善していけるという、「人間の知恵」への信頼に基づく提案である。

#### ③経済・市場システムについて

・倉坂は「地球温暖化防止のため環境監査制度の提案」において、とかく環境配慮なしに活動を拡大しがちな企業の仕組みの中に、環境への影響を最小化させるようなメカニズムを埋め込むための「エコ経営サイクル」を提案した。これは、企業が自己の活動がいかに環境に影響を与えているかの実態監査を行い、これを外部へ明らかにすることによる情報監査によって、経営内部に環境配慮が自動的に行われる仕掛けを作ろうとするものである。

・鈴木は「省エネルギー型社会・経済構造への接近」において、先進諸国を省エネルギー構造に向けるための方策として、可能な限りの厳しい基準を提案したエネルギー消費者（生産者）を市場的に保護する「市場競争型規制基準」のメカニズムづくり、製品生産に伴う間接的エネルギー消費節減のための「エネルギー家計簿」の導入や「エネルギーバジェット管理支援機構」の設立を提案した。さらに途上国に省エネルギーの定着を進めるための「エネルギー技術ネットワーク」の形成の必要性を指摘した。

・井村は「経済的手法によるCO<sub>2</sub>排出量削減：額面割引型排出許可証の提案」で、環境効果、経済的効率性、公平性、実効可能性とコスト、受容性といった経済的インセンティブの評価項目に照らし合わせて、二酸化炭素排出者に現時点の排出量からスタートして年々一定率で減少していく「額面割引方式による排出許可証」を交付することが適切であるとの提案を行った。

#### ④農林業システムについて

・宇田川は「持続的農業生産システムのための営農技術と地域管理」において、アジア地域の農業生産性がここ10年間に、必ずしも土地拡大や施肥だけの原因でなく30%増加している現

状に基づき、土地基盤の整備とともに、地域に合った生産システムを再評価し、農家・非農家、農村・都市間のローカルな物質循環を活用した収量安定化をめざした営農技術を定着させるべきであることを述べた。

・熊崎は「熱帯林における炭素吸収林の可能性と限界」で、重要な炭素吸収林である熱帯林を農地拡大の動きと組み合わせて保全する可能性について、フィリピンの契約農林、タイの契約造林等の実例をもとに検討した。その結果、農民の経済的自立を可能にするような形の長期的視点に立った自発的な「農民造林」こそが、炭素吸収林を守り育てる道であることを示している。

#### ⑤人口－経済システムについて

・小川は「アジアにおける人口変動と経済成長」で、人口抑制効果について実証的に取り組み、アジア各国における人口の動向を分析し、出生抑制による人口成長率の鈍化が人的物的深化を進め、1人当たり所得を拡大するメカニズムを確認した。これに基づき、アジア途上国において一層の出生抑制策に向けての国際協力を推進すること、さらに国家長期計画のなかに経済と環境の関係を配慮するための人的トレーニング、出生及び次世代に対する環境影響の研究推進を要望した。

#### ⑥目標・組織・研究について

・森田・松岡は「環境に配慮した経済目標体系の導入」において、地球環境の大切さを国家の政策の根幹に反映させるためには、その指針となっている経済指標の体系を修正する必要があるとして、共存共栄、地域参加、子孫繁栄の3つの基本方向のもとで環境と経済を統合する目標体系を構築することを提案し、国家のみならず地方公共団体の開発政策の目標にもこの体系を導入すべきとした。

・井村は「地球温暖化防止の世界的枠組み：地球的公共財理念に基づく大気CO<sub>2</sub>管理長期計画」において、世界のCO<sub>2</sub>排出総量管理をめざして、例えば先進国3～2トン/人、途上国1トン/人の年間炭素排出量を設定したとしてスタートした場合の予測を行い、これを確実に実行するために、現在及び将来世代から付託された任務として地球公共財の保全・管理を行う国際機構の設立を提案した。

・西岡は「アジアの環境をより良くするために」のなかで、地球環境保全推進のためには途上国の状況に関するデータが不足していること、さらに途上国をも含めた共同行動のためには科学の段階からの共同化が不可欠であることを強調し、地球環境科学に特有な「自律分散型研究」のマネジメントをアジア地域で推進していくことが、長期的な日本の国際貢献になるとして、「アジア地球環境研究コンソーシアム」の設立を提案した。これは現実に科学者や政府間でも一部検討されている構想である。

### 3) 都市構造及び都市配置に関する実証分析

地球温暖化と深いかわりを持つ社会システムの基本構造のうち、特に都市構造に焦点を当てて過去の研究のレビュー、世界の都市データの収集、及びこれを用いた国際比較分析を行った。

まず、都市構造に関して二酸化炭素排出の主たる原因であるエネルギー消費との関係を分析した研究は、1960年代から多く出されている。とりわけ、輸送部門のエネルギー消費に着目して都市構造との関係を検討したものが多い。これらの研究から、都市のエネルギー消費に影響を及ぼす要因には、人口密度、人口配置、土地利用の混在化、公共交通機関、道路施設整備、都市規模、都市形状、都市配置、住民の特性などがあり、これらの要因が図5に示すようなメカニズムを通じてエネルギー消費に影響を与えてる可能性があることが分かった。例えば、人口密度が高





ると、図6に示すとおり明確な関係があることが分かる。人口密度が高いコンパクトな都市ほど1人当たりの二酸化炭素排出量は少ない。次に、一国における都市の空間的配置、すなわち国土のなかの都市の分散の度合いと二酸化炭素排出量との関係について実証的分析を試みた。都市の空間的な散らばりを表す指標として、人口分布からみた国土の重心と各都市との距離を $r_i$ 、各都市の人口を $p_i$ 、その国の総人口を $P$ 、その国の都市数を $N$ として、次のような都市分散度を定義した。

$$(\text{都市分散度}) = \left( \sum_{i=1}^N p_i \times r_i^2 / P \right)^{1/2}$$

各国の都市分散度と1人当たり二酸化炭素排出量との関係について、各国の豊かさや自動車の普及率、国土面積、エネルギー価格といった各種の影響している要因を取り除いたうえで解析してみると、図7に示すように先進国のデータにおいて明確な関係を見いだすことができた。先進国においては都市の空間配置が分散すればするほど、輸送部門からの1人当たり二酸化炭素排出量が減少していく傾向がはっきりと読み取れる。このことは、分散的な都市配置が地球温暖化を防ぐうえで望ましいということが、少なくとも先進国でいえることを示している。ただし、発展途上国のグループについてはこのような関係が見られなかった。

以上の分析結果は、少なくとも先進国において、コンパクトな都市を分散的に配置させることが地球温暖化の防止のために望ましい方向であると示唆している。地球環境保全の観点からの都市研究が是非とも必要であり、都市政策の中で地球環境保全を配慮する必要があることが明らかとなった。

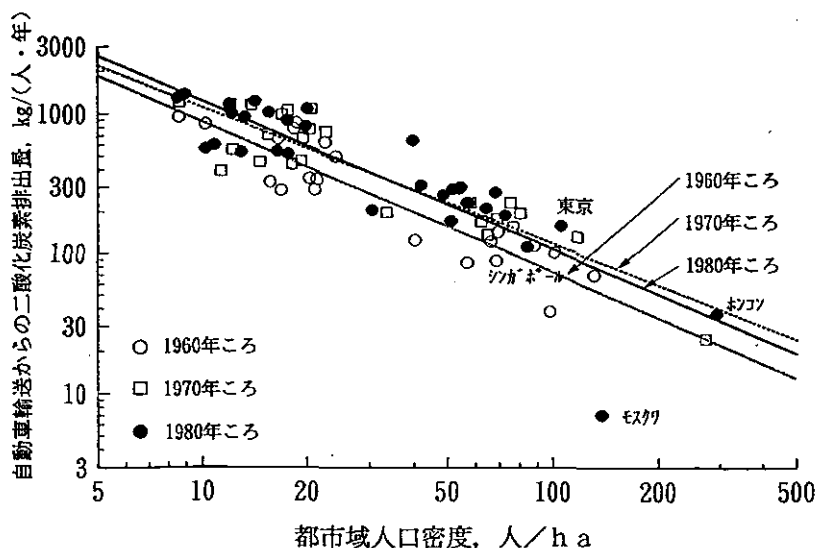


図6 都市域人口密度と二酸化炭素排出量の関係

輸送部門からの1人当たり二酸化炭素排出量 (炭素トン/人・年)  
 (自動車保有台数・国土面積・石油価格による補正値)

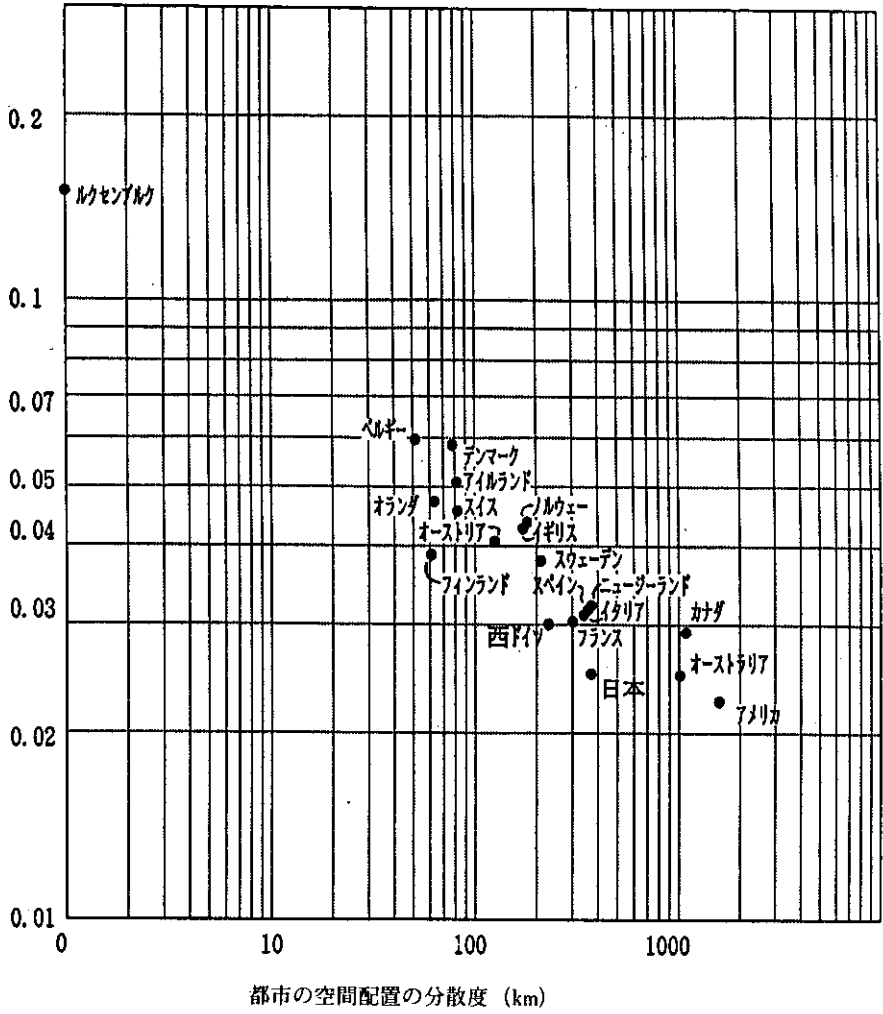


図7 都市の空間配置の分散度と二酸化炭素排出量との関係（先進国の場合）

## 2.10 課題検討調査研究

### 2.10.1 乾燥地・半乾燥地の砂漠化に伴う環境影響予測に関する予備的研究

〔研究組織〕 地球環境研究グループ

森林減少・砂漠化研究チーム ○古川昭雄・宮崎忠国

水圏環境部

地下環境研究室

大坪國順

土壌環境研究室

恒川篤史

〔研究概要〕

乾燥・半乾燥地域における砂漠化現象は、人口の急激な増加に伴う耕作地の拡大や酷使、薪炭としての樹木の伐採、羊や牛などの過放牧等による環境資源の不適正な利用が原因であると考えられている。このような地域で人為的要因による砂漠化現象を制御し砂漠化に伴う環境への影響を予測するためには、これらの地域の生態系の現状とその変化、土壌、水文あるいは気象学的な環境変化と人間活動の関係を把握するとともに、それらの地域の植物、土壌、水文特性等の環境容量を産出する手法の開発を行い、人間活動と砂漠化危険地域の環境容量の観点から人為的要因による砂漠化進行機構を解明、さらには予測することが急務である。

本研究は、平成4年度から予定されている本格的な砂漠化研究のための予備的研究である。そのため、平成3年度は、平成2年度に引き続き、砂漠化問題研究検討委員会を開催し、国立環境研究所において行うべき砂漠化研究について、研究対象とする砂漠及び共同研究機関の選定等についての討論を行った。この結果、国立環境研究所として、(1)乾燥・半乾燥地域における砂漠化に及ぼす人間活動の影響評価に関する研究、(2)砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する国際比較研究、を行うこと。また、研究対象砂漠をインドのタール砂漠とすることが決定された。さらに、砂漠化問題研究検討委員会の決定に従い、1991年11月、インド、中央乾燥地研究所(Central Arid Zone Research Institute)及び中央土壌水保護研究教育機関(Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute)を訪問し、砂漠化共同研究の可能性を打診した。この結果、中央乾燥地研究所から本研究の共同研究機関としての内諾を得た。

## 2.10.2 環境勘定体系の確立に関する予備的研究

【研究組織】	地球環境研究センター	
	総括研究管理官	○西岡秀三
	地球環境研究グループ	
	温暖化影響・対策研究チーム	森田恒幸
	地域環境研究グループ	
	交通公害防止研究チーム	森口祐一
	社会環境システム部	
	環境経済研究室	小野宏哉

### 【研究概要】

1987年に「持続可能な発展」をメインテーマとする報告書がWCEDによって発表されて以来、環境保全と経済発展の両立を目指した新しい評価体系の確立が緊急課題となった。環境資源勘定に関して世界銀行、世界資源研究所、国連統計機関などが先導的研究を行い、1989年以降、G7サミットからの要請によりOECDでも検討が進められてきた。国連統計機関は、1993年のSNA改訂に際して環境勘定を付加的勘定として算定するように各国に求める予定である。

こうした状況下において、精度の高い環境勘定を作成する手法を確立することが急務であるが、対象とする環境や自然資源の範囲が広く、また環境汚染や自然資源の経済的価値を推計するには多くの方法の適用を検討する必要があることから、今後の研究を体系的かつ効率的に進めるための予備的検討を行った。このため、文献による過去の研究事例の調査、国際会議等を通しての最新情報の収集、二国間での共同研究実施体制の検討、資源貿易や海外への汚染負荷移転に関する海外現地調査、及び代表的な手法の適用による環境・自然資源の経済的価値の試算を行った。

文献調査においては、物的勘定を中心としたノルウェー、フランス等の事例、自然資源の減耗分をGDPから差し引くWRI等の事例、勘定体系に関する世界銀行のレビュー、国連統計機関による環境勘定と国民経済計算体系の枠組みの検討などについて調査した。事例によって自然資源勘定あるいは環境勘定という用語の意味がかなり異なることを認識したうえで勘定の対象とすべき環境及び自然資源の範囲の検討、物的勘定と経済的勘定を接合するための理論的枠組みの検討を行い、併せて我が国でこれまでに行われてきた環境汚染や自然資源の貨幣価値による評価手法のレビューを行った。

また、UNEP主催の環境資源勘定に関する国際会議への出席、OECD環境委員会の活動の調査、中国國務院発展研究中心との間での「日中自然資源・環境勘定ワークショップ」の開催等を通じて、諸外国、国際機関における最新の取り組み状況の調査と今後の共同研究体制の検討を行った。また、東南アジア諸国と我が国の間での資源貿易について現地調査、資料収集を行った。さらに、具体的な勘定表作成に向けた予備的検討として、二酸化炭素排出及び木材資源利用についての物量勘定表を試作した。さらに、環境汚染や自然資源の貨幣価値による評価手法の具体的な適用を試み、ヘドニック法を用いた大気や都市緑地などの価値、推定対策費用に基づく二酸化炭素排出及び熱帯林利用のコストを試算し、手法の有効性を検討した。これらの予備的検討により、次年度以降の研究の重点課題及び問題点が明らかにされた。

### 2.10.3 火山噴火がオゾン層に及ぼす影響に関する予備的研究

〔研究組織〕 地球環境研究グループ

オゾン層研究チーム ○中根英昭・林田佐智子

衛星観測研究チーム 笹野泰弘

大気圏環境部

大気動態研究室 松井一郎

〔研究概要〕

1991年6月12日及び15日に、今世紀最大規模の噴火を引き起こしたフィリピンのピナツポ火山は、約20メガトンの二酸化イオウを成層圏にもたらした。このため、成層圏エアロゾル（半径0.01～数ミクロンの微粒子）が大量に発生し、全球に拡散した。このエアロゾルの影響の一つとして、成層圏エアロゾル表面で引き起こされる不均一反応によって成層圏オゾンの約10%が破壊される可能性が指摘されている。

このような、緊急事態に対し、本研究課題においては、成層圏エアロゾル層の観測を、大型レーザーレーダー、オリオールメータで継続的に行うと共に、オゾンレーザーレーダー、オゾンゾンデによるオゾン観測を含めた、オゾン、エアロゾル同時集中観測を実施した。

その結果、図1に示すように1992年1～3月にかけてエアロゾル層高度分布及び、粒径分布に関するデータを集積することができ、不均一反応速度を決定するエアロゾル表面積の推定が可能になった。また、火山噴火がオゾン層に及ぼす影響に関するこれまでに行われた研究について調査し、今後の研究に対する課題を明らかにした。

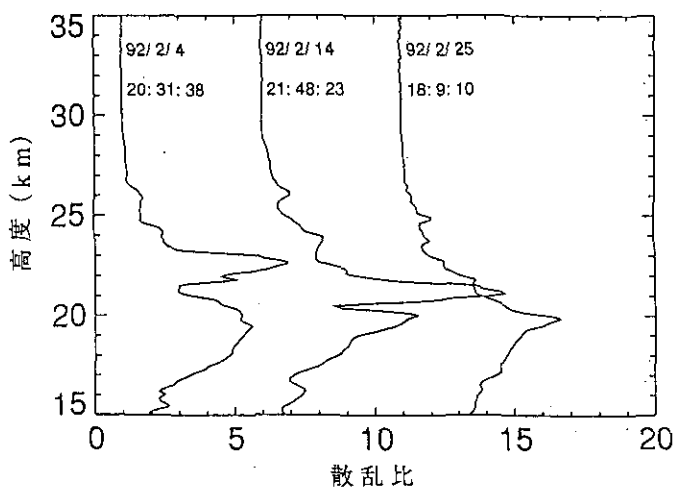


図1 エアロゾル高度分布の変化

エアロゾル濃度は散乱比（空気による散乱との比；空気のみによる散乱の場合には1）によって表わされている。

## 2.10.4 衛星搭載大気センサーデータの検証及び国際共同利用に関する予備的研究

【研究組織】 地球環境研究グループ

衛星観測研究チーム ○笹野泰弘・杉本伸夫・横田達也

大気圏環境部

高層大気研究室 鈴木 睦

大気動態研究室 湊 淳

### 【研究概要】

平成6年度末に打ち上げが予定されている地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)には改良型大気周縁赤外分光計(ILAS)を始めとする各種の大気センサーが搭載され、地球規模の大気環境の監視が行われる。通常、衛星搭載のリモートセンサーによる計測データは、地上からのその他の手段による同時観測データと比較検証することで、機器の正常動作の確認、データ処理手法の妥当性の保証が行われる。ADEOS搭載センサーについても同様に、データを有効に利用して行くためには、検証作業が必要であり、このためには国内外の関連研究機関などの協力が不可欠となる。しかし、我が国ではこれまで衛星搭載の大気センサーに関する検証実験の経験がなく、検証実験の企画立案に困難をきたしている。また、今後のデータ利用に関する共同研究体制の確立に向けて関連機関との調整に入る必要がある。

そこで、本研究では次の事項について調査検討を行った。

- (1) 米国等の衛星センサー検証実験についての情報の収集、分析
- (2) 国内外の機関における地上からの観測体制についての調査検討
- (3) 検証実験の実施に係る基本方針の検討
- (4) ILASの観測対象地点(緯度、経度)の時系列変化に関するシミュレーション
- (5) 地上設置型可視紫外分光計を用いた成層圏微量成分高度分布計測手法に関する予備的検討

平成3年度 編集小委員会

委員長 相馬光之

委員長代理 高松武次郎

委員 柳橋泰生  
伊東喜司  
中根英昭  
高村健二  
松本幸雄  
兜真徳  
須賀伸介  
彼谷邦光  
鈴木本明  
光高茂  
植村典  
松弘崇  
井文子

事務局

国立環境研究所地球環境研究年報

平成3年度

---

平成4年8月31日

編集 国立環境研究所 編集小委員会

発行 環境庁 国立環境研究所

〒305 茨城県つくば市小野川16番2

電話 0298-51-6111 (代表)

---

印刷 株式会社イセブ

茨城県つくば市天久保2-11-20

本年報は再生紙を使用しています。