

AG-3-'93

国立環境研究所 地球環境研究年報

平成 4 年 度

環境庁 国立環境研究所

平成4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

地球環境の変化については既に起きていて解決を急ぐ課題と、将来起こり得ると考えられている課題がある。前者は伐採の進む熱帯林とそこに生息する多くの野生生物の消失であり、日本ではまだ顕著な被害が出ていないがいずれ問題となるであろう酸性雨について、さらにオゾン層破壊の影響と対策も緊急の課題である。残念ながらいずれもさらに進行していくと考えられる。将来起こり得る地球環境変化は温暖化に関することがらで、一部には疑問を持つ人がいる。長期の予想であることから現段階で証明することができないだけにいくつもの変化のオプションを考えざるをえない。しかも大気圏、海洋、生物圏、さらに人の社会経済活動の全てがかかわっているだけに、個々のデータの解析も十分説得力のあるものが要求される。

当研究所が地球環境研究総合推進費でこれらの問題に取り組んで3年を経た。研究グループとして8チームが中心になって研究を進めてきたが、本報告書に見られるように研究グループ以外にも研究所内外の多くの方々の寄与も大きなものがある。一方、地球環境研究はいずれも多大の労力を要すること、そして長期間にわたらなければ解明できないことが多いことを考えると、本報告書はまだ緒についたばかりの成果であることをご理解頂きたい。とはいえ、本報告書を通じてそれぞれの研究の将来を見通すことができれば幸いである。これからも多くの方々のご批判、及びご助力をお願いする次第である。

平成5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	5
2.2 地球の温暖化現象解明に関する研究	11
2.3 地球の温暖化影響・対策に関する研究	25
2.4 酸性雨に関する研究	39
2.5 海洋汚染に関する研究	49
2.6 熱帯林の減少に関する研究	55
2.7 野生生物種の減少に関する研究	67
2.8 砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する研究	73
2.9 その他の地球環境問題に関する研究	77
2.9.1 ベ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	77
2.10 総合化研究	79
2.11 課題検討調査研究	91
2.11.1 地球大気環境問題の相互相関の解明に関する予備的研究	91
2.11.2 紫外線の増加がヒトの白内障発症に及ぼす影響に関する予備的研究	92
2.11.3 有害廃棄物の越境移動に係る社会経済的・技術的評価に関する予備的研究	93
2.11.4 アジア太平洋地域における気候変動シナリオの作成に関する研究	94

1. 概 況

当研究所における地球環境研究は、主として環境庁・「地球環境研究総合推進費」と地球環境研究センター経費に依存している。

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、課題研究は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、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。

オゾン層研究では、エアロゾルがオゾンレーザーレーダー観測に及ぼす影響の補正手法の開発、ピナツボ火山噴火による成層圏エアロゾルの高度分布、粒径分布の観測、オゾン層変動の解析手法の高度化、オゾン層破壊に関連するラジカル反応等に関する実験、UV-B照射による発ガン、免疫低下に関する研究、植物に対する波長域の異なる紫外線の作用に関する研究、代替フロン^①のOHラジカルとの反応速度に関する研究、フロン等対策技術に関する環境挙動モデルを用いた研究を行った。

地球の温暖化現象解明研究では、温室効果気体としてメタン、亜酸化窒素の放出源における発生メカニズム、計測手法の研究と、それぞれからの放出量の推定を行った。大気光化学反応としての一酸化炭素放出量については実験的に二酸化炭素の大気と水との間の交換に関する実験条件下での研究を行った。また、陸上植物による二酸化炭素の収支の量的推定を行った。西シベリアの湿原地帯における航空機による二酸化炭素、メタンの高度別の濃度分布の測定からその変動解析を行った。ヤクーツク市周辺の凍土地帯のメタン発生量の観測体制を整備した。気候モデルによる気候変動モデルでは雲の効果を含める長波放射フラックス等の計算スキームを開発した。

地球の温暖化影響・対策研究では、アジア太平洋地域

からの温室効果ガス排出量を予測するために、中国、日本等の国別エネルギー需要モデルを構築するとともに、温暖化がアジア太平洋地域に及ぼす影響を分析するために水資源変化モデルを構築した。また、温室効果ガス削減に有効な技術について、意識調査や産業関連表を用いて技術導入に伴う削減効果を定量的に分析するとともに、電気自動車、断熱材、廃棄物リサイクル等による温室効果ガス削減効果とその普及策について検討した。一方、温暖化影響の研究については、温暖化に伴う植物への影響を数値解析、野外実験および施設実験により検討した。また、健康への影響については、熱ストレスによる影響研究を続けるとともに、中国雲南省や沖縄の現地調査などにより、気候変化に伴うマラリア分布の変化の可能性を分析した。

酸性雨研究では大気、森林(植物)、土壌、水等の自然生態系を構成する諸要素に関し、地上観測、航空機観測、チャンバー実験、フィールド調査等を行った。その結果、大気に関しては日本海上空に大陸起源と推定される高濃度SO₂層が存在すること、植物(樹木)に関しては形成層の化学組成がその生育状態を知る上で重要な指標になる可能性があること、スギの中に環境汚染のタイムカプセルともいべき内蔵樹皮が存在することなどが明らかとなった。また、土壌、水に関しては、土壌や水の酸性化に与える基盤岩石の化学組成や水質との関係について評価を行った。

海洋研究では、地球環境研究センターによる日韓フェリーモニタリングと並行して、乗船調査による海水溶存CO₂分布、蛍光光度(ほぼ植物プランクトンクロロフィル量に対応する)、pHなどの環境要素との関連を調べた。これらのデータを、衛星クロロフィルマッピングにより海洋環境を評価するための基礎とする。また、メゾコズム(隔離水界)において、炭素同位体を用いて、溶存有機炭素→植物プランクトン→動物プランクトンおよびDOC→細菌→微小動物プランクトンの経路の物質フラックス量を求めた。また、日本近海の5測線において採取された動物プランクトンの重金属の分析を行い、生体濃縮に関するメカニズムの研究を行った。

熱帯林研究では、複雑な階層構造を有し、多様な生物

種からなる熱帯林生態系の構造と種多様性の機構の解明を目的として、マレーシア半島部で調査・研究を行った。熱帯林の構造解析では、丘陵フタバガキ林内に永久調査区を設け、胸高直径、樹高、リター量の測定等の各種測定を行った。また、種の多様性の機構解明は林内において稚樹の生存を調査し、これまでに種の多様性の成立に関して提唱されている様々な仮説を立証する試みを行っている。

さらに、このような熱帯林の構造や種多様性の成立・維持機構を研究する上で熱帯林の環境形成作用を明らかにする必要があるため、土壤動物による落葉・落枝の分解過程、微気象要因の測定を行った。

熱帯林の減少を定量化する手法を開発することを目的として、人工衛星 NOAA に掲載された可視近赤外域センサ AVHRR からの画像を用いて東南アジア地域の植生分布の現況およびその変化を調査し、衛星モザイク画像の作成、植生指数分布図の作成および植生変化抽出手法の開発を行った。

野生生物研究ではマレーシア半島部の熱帯林におい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との共同で研究を行っている。森林規模、植生構造、標高などを異にする3つの森林を調査対象として選定し、鳥類、コウモリ類、昆虫類の群集構造比較を行っている。その結果、自然植生の残されている森林ほど野生動物群集の多様性が高いことが明らかになりつつある。昆虫群集では森林の中心部と周辺部とで群集組成が異なることが分かり、森林の中央部でしか生息できない種は森林規模の縮小によって消滅することが示唆された。また、希少野生動物の遺伝的多様性とその保存に関する研究を立ち上げるための準備を行った。

砂漠化研究では、人間活動による砂漠化進行機構を解明するため、インド中央乾燥地研究所 (Central Arid Zone Research Institute) と共同で、インド西部のタール砂漠を試験地として研究を開始した。本年度は、タール砂漠に降雨量の異なる3試験地を選定し、各々の試験地において植生調査を行い乾燥地植物の成長速度と家畜の放牧容量の算出手法の検討を行った。また、水収支、微気象、社会経済等のデータの収集を行い砂漠化進行と人間活動の関連を明らかにするための基礎データとした。さらに、広域的に乾燥地の環境状況を把握するため、人工衛星データ (ランドサット) を用いてタール砂漠の土地利用図と植生図の作成を行った。

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が続けられた。

平成4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4年度からの新規課題、他は平成3年度から発足した継続課題の研究である。

(1) 課題別研究

オゾン層の破壊

- ・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計測技術の開発に関する研究
衛星利用レーザーレーダ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
- ・紫外線の増加がヒト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質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
- ・家庭における二酸化炭素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
- ☆地球温暖化抑制のための汚水・廃棄物処理処分システムの確立と評価に関する研究

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
植物群落の微気象変化作用に関する研究
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-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

砂漠化

- ☆砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する研究

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
- ☆環境資源勘定体系の確立に関する研究
- (3) 課題検討調査研究
 - ☆紫外線の増加がヒトの白内障発症に及ぼす影響に関する予備的研究
 - ☆地球大気環境問題の相互相関の解明に関する予備的研究
 - ☆有害廃棄物の越境移動に係わる社会経済的・技術的評価に関する予備的研究
 - ☆アジア太平洋地域における気候変動シナリオの作成に関する研究

これら多くの研究の期間は3年または5年に設定されており、☆印を付した新規課題以外は、本報告は第2年度目の研究を取りまとめたものである。

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・横田達也・鈴木 睦
社会環境システム部	
資源管理研究室	天野耕二
化学環境部	
計測技術研究室	古田直紀
化学毒性研究室	彼谷邦光・白石不二雄
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	鷲田伸明
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	杉本伸夫・松井一郎・湊 淳
大気動態研究室	井上 元・泉 克幸
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
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・佐治 光
環境統計手法研究官	松本幸雄
客員研究員	40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15kmまでの大気）中では分解せずに成層圏（地上約15～50km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、人の健康や生物およ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、オゾン層の計測および動態解明、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およ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とおして、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、オゾンおよ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全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な目標(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関する極成層圏雲、並びに地球温暖化現象と密接に係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ともに、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、290-320nm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およ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

・フロン代替物質の開発および環境影響評価に関する研究

フロン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、代替フロンおよ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) オゾン層データ解析手法の高度化

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。最近の動向として、国際的な共同観測、ネットワーク観測などにおいて、短期間の内に観測データを処理し、さらに補助データ等も用いて基本的な解析を行うことが必要となってきた。その際、対話的に大量のデータを扱うことが不可欠である。そこで、ワークステーション上にオゾン等鉛直分布観測データ、TOMSデータ、全球客観解析データ等を用いて、オゾン層変動を解析するシステムを開発した。システム機能構成の概要を図1に示す。本年度はシステムの骨格を完成すると共に、全球客観解析データ、高層気象データ等、オゾン変動の力学的側面の解析に必要な部分を作成した。

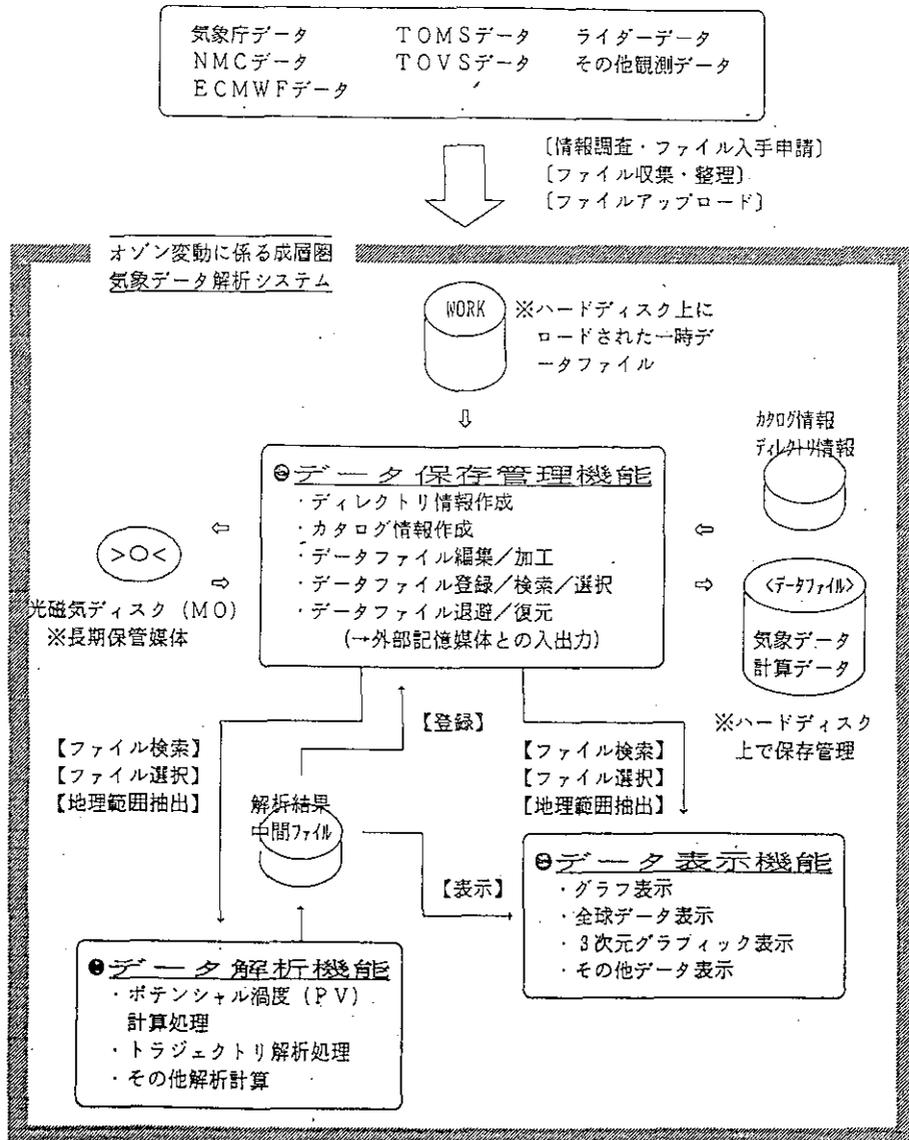


図1 オゾン変動解析システムの概要

成層圏データ解析システムの場合には、使用するデータの入れ替わり、追加が頻繁に行われるだけでなく、データごとにフォーマットが異なり、さらには次元が異なるという複雑さがある。そこで、統一したフォーマットにデータを加工するのではなく、読み込んだデータを原型に近い形で蓄積し、カタログ情報によって管理する方式を採用した。この場合、既存の解析プログラムを利用することが比較的容易である。研究者は、①データの指定、②適用する解析手法の指定、③データ表示の方法の指定、を行うだけで解析作業を行うことができる。本年度は、全球客観解析データを用いたポテンシャル渦度の計算と表示、トラジェクトリの計算と表示を行ったが、水平、鉛直二次元表示等を迅速に行うことが可能であり、

効率的にデータ解析を行う見通しが得られた。なお、計算には気象庁客観解析データを使用した。

(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地上衛星間で往復させて、大気中の微量分子を高感度、高精度で計測する手法を確立することを目的とする。本研究では光源としてパルス炭酸ガスレーザーを用い、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した分光測定手法を開発した。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。炭酸ガ

スレーザーの基本波および第二、第三高調波を用いて、オゾンのほかに、メタン、炭酸ガスなどの高度分布と、CFC12, HNO₃, N₂O, COなどのカラム量が測定される。

光源として用いるパルス炭酸ガスレーザーには、波長幅が狭いことと発振線をすばやく切り替えられることが要求される。このため、前年度に引き続いてレーザー波長の制御技術に関する実験的な研究を実施し、時間ゲート・ゲインセル法という新しい手法を開発した。この手法により発振線を切り替えた後に極めて短時間のうちに狭帯域発振(単一縦モード)を実現できることを示した。

炭酸ガスレーザーおよびその高調波を用いた地上衛星間レーザー長光路吸収測定シミュレーター・プログラムを作成し、測定およびデータ解析アルゴリズムの評価を行った。図2はオゾン測定の場合の受信信号のシミュレーション結果である。図の横軸は時間すなわち衛星の位置を表し、縦軸はレーザー1ショット当たりの受信信号光子数を示す。シミュレーションでは現実的な地上設備のパラメータ、リトロフレクターの反射特性、大気吸収などのパラメータをすべて考慮した。図2では2台のレーザーを用い、1台を参照用の波長R(34)に固定し、もう1台をオゾンの吸収のある2つの波長R(18)とR(20)の間で1秒ごとに切り替えている。図の結果は、測定において十分な受信信号強度が得られることを示している。図3は、図2のシミュレーションデータに、反転法を用いたデータ解析プログラムを適用して、オゾンの高度分布を導出した結果を示す。シミュレーションで仮定したプロファイルと解析で得られたプロファイルを比較して示した。両者はよく一致している。

第三高調波を用いたメタンの測定についても同様の方法で高度プロファイルが導出できることが示された。また、CFC12については炭酸ガスレーザーの4つの波長を切り替えることによってカラム量を高精度で測定できることが示された。

一方、衛星搭載用リトロフレクターの設計について、本研究ではリトロフレクターを構成する3枚の鏡面の1面に緩やかな球面を含む新しい設計手法を開発したが、実際に球面を含むリトロフレクターを試作し、干渉計を用いて反射波面の評価実験を行った。この結果、理論どおりの特性が得られることが確認された。また、これに関連して、干渉計を用いて球面を含むリトロフレクターの貼り合わせ角度を測定し、製作精度を評価するための手法を開発した。

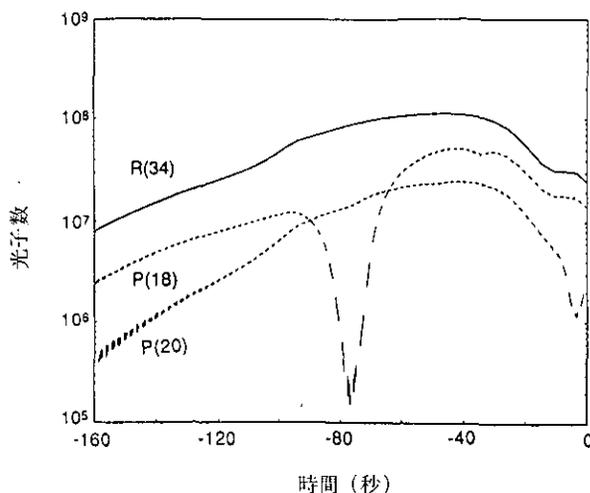


図2 衛星利用レーザー長光路吸収法によるオゾン測定の受信信号強度のシミュレーション

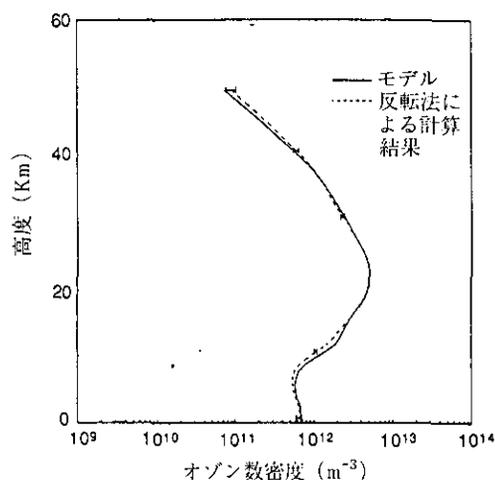


図3 シミュレーションデータより反転法により導出したオゾンの高度分布

以上、衛星利用レーザー長光路吸収法のための分光測定手法の要素技術に関する研究を行った。今後、各測定対象分子の測定についてさらに詳細に研究するとともに、衛星光学追尾装置と合わせた計測システムを構成するための技術の開発に関する研究を行う計画である。

(3) 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

肥満細胞は皮膚をはじめ生体のほとんどの組織に存在し、即時型過敏反応のみならずインターロイキン類(IL-1,3,5,6)やインターフェロン- γ 、腫瘍壊死因子(TNF α)など種々のサイトカインを産生・放出して免疫応答での調節や分化に関連していることが最近明らか

かにされている。これまでにUV-B領域の波長は遅延型過敏症（DTH）や接触過敏反応の抑制，抑制性T細胞の誘導その他免疫系の抑制を導くことが指摘されているが，吸収スペクトル特性との関連は不明である。このスペクトル特性とUV-Bの影響との関連を明らかにする目的で，本年は300nmのUV-Bの影響を骨髄細胞から肥満細胞が分化する培養系を用いて検討した。

マウス骨髄細胞に0.56~70mJ/cm²のUV-Bを照射して，2週，3週後に肥満細胞分化の指標を測定した。総付着細胞数については対照と比べ変化はみられなかったが，顆粒合成を表し肥満細胞の指標となるアルシアンブルーの染色性については，3週後で14と70mJ/cm²のUV-B群で低下がみられた。分化した肥満細胞中のヒスタミン含量については低下の傾向がみられたが，有意ではなかった。細胞表面上のIgE受容体の発現に関しては，対照群にくらべ有意な増加がみられた（図4）。分化した肥満細胞をL929細胞と共に培養し，遊離したTNF α をELISAで測定したが有意な差はみられなかった。

次に，マウス骨髄細胞をIL-3存在下で5~6週間培養し，分化した正常肥満細胞にUV-Bを照射して1週

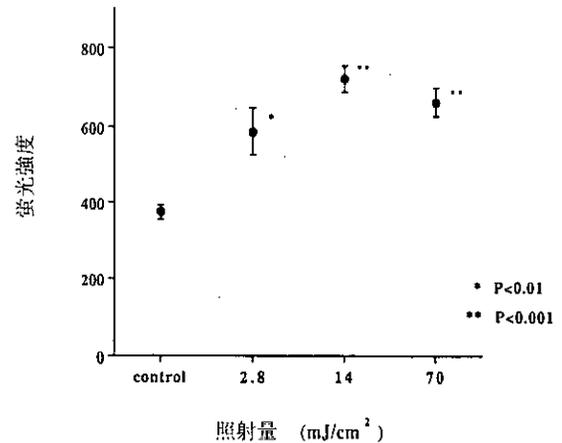


図4 UV-B照射を受けた骨髄細胞より分化した肥満細胞でのIgE受容体の発現増強

後に上記の指標について検索した。細胞数の変化については14と70mJ/cm²照射で有意な低下がみられた。IgE受容体の発現では増加がみられたが，細胞内ヒスタミン含量，TNF α 遊離については対照群との間に有意差はみられなかった。

現在，異なる波長のUV-B照射による影響について検討中である。

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	鷺田仲明
大気物理研究室	光本茂記・高藪 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、現在の増加がその割合で進むとして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(6)、(7)の課題を平成3年度よりそれぞれ開始し研究を行っている。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4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

二酸化炭素やメタンのようにそれ自身が地球からの赤外放射に対して活性な気体(直接的温室効果気体)ばかりでなく、非メタン炭化水素(NMHC)、窒素酸化物(NO_x)や硫黄化合物のように光化学反応により大気OHラジカル濃度を左右して温室効果気体の寿命に影響を与えたり、また温室効果物質(例えば、対流圏オゾン、硫酸エアロゾル等)を生成する、ことにより間接的に大気の温室効果の大きさを支配している気体(反応性温室効果気体)も地球の温暖化に大きな役割を果たしている可能性が指摘され(IPCC補足報告書、1992年)、このような間接的温室効果についても定量的な見積もりを行う必要性が認知されてきた。そのためには、大気中における反応性温室効果気体の分布・変動等その動態に関する科学的知見が必要不可欠であるにもかかわらず、現状ではその知見が明らかに不足している。本研究では、間接的温室効果にかかわってくる大気微量成分の内重要なものについて、その大気中濃度の測定手法の確立を行うと共に、その方法を用いて実際のフィールド観測を行いこれら微量成分の時間的・空間的変動の様子を明らかにする。さらには、大気の光化学反応活性を評価し、その変動を支配している要因を明らかにすることを目的とする。

平成4年度は、これまで進めてきたメタン・NMHC、 NO_x および有機硫黄化合物の観測を継続すると共に、以下の項目について観測・解析を行った。

- ・バックグラウンド地域における炭化水素類濃度の分布・季節変動
- ・日本周辺海洋上の大気中窒素酸化物濃度の分布
- ・大気中イソプレンとその反応生成物の濃度変動

(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、地球環境研究総合推進費における本研究課題では自然および人為的過程で生成するメタンおよ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、放出変動およ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および放出量評価を目的とするサブテーマを1990年度より開始した。本年度は、以下の研究を行った。

- ・バイオマス燃焼試料中のメタンの $\delta^{13}\text{C}$ 値の測定および日本におけるバイオマス燃焼からのメタン・亜酸化窒素放出量の見積もり(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)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、その他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かか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 $100 \times 10^{15} \text{gC/y}$ 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 $2 \sim 3 \times 10^{15} \text{gC/y}$ の二酸化炭素の正味の吸収があるとされている。しかしながら、残念ながら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。

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：前年度に引き続き大型純粋培養装置を用いて植物プランクトン(供試藻類: *Chltonella*)の増殖に伴う炭素移動の計測実験を行った。本種に摂取された全炭酸の83%がPOCに、17%がDOCとなることが判明した。また本種の増殖に伴い大気側から海洋側に吸収された CO_2 は、本実験装置においては $K_L = 7.2 \text{mm/day}$ 推定された。炭素マスバランスが保たれている実験系の完成により大気-海洋-海産藻類間の炭素動態の定量的解析が可能になった。

(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。

1990年にはおおよその調査地域の選定を行ったが、1991年には、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および環境測定機器の設置等を行い、適宜測定を開始した。1992年には、融雪直後から測定を開始し、年間を通しての測定を行った。

(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、1991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

1991年度にはロシア共和国の中央高層大気観測所および凍土研究所との共同研究の合意が成立し、1992年度に本格的な現地観測とそのデータ解析を開始した。航空機によるハンティマンシスク市付近における西シベリア湿地、東シベリアヤクーツク市および北極海沿岸のチクシ市付近のそれぞれタイガ、ツンドラ地域での二酸化炭素・メタンの濃度分布を測定した。また、ヤクーツク市において二酸化炭素・メタンの通年観測の体制整備を行った。

(7) 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

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、およ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1991年度より本研究課題を開始した。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1990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)。

[研究成果]

各研究課題ごとに1992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

バックグラウンド地域における炭化水素類濃度の分布・季節変動：NASAのPEM-West航空機観測に参加して測定した炭化水素類(NMHC)の濃度分布について解析を行った。太平洋上のバックグラウンド大気では海面から圏界面付近までNMHCはほぼ均一な鉛直分布を示すのに対して、大陸由来の大気の場合、下層ではバックグラウンド大気の数倍の濃度があり、高度と共に濃度が低下しバックグラウンド大気の濃度レベルに近づく鉛直分布が得られた(図1)。また、グアム島付近の太平洋中央側では均一なNMHCの分布が観られるのに対して、西太平洋側(インドネシア北方)では低濃度でNMHCやCO₂、CO濃度が高くなる事例も観測された。これらの観測から、西太平洋上大気に対するアジア・東南アジア地域からの汚染負荷の実態が明らかにされた。このような陸域からの汚染質の負荷はNMHCに限らず窒素酸化物(NO_x)においても観測された。

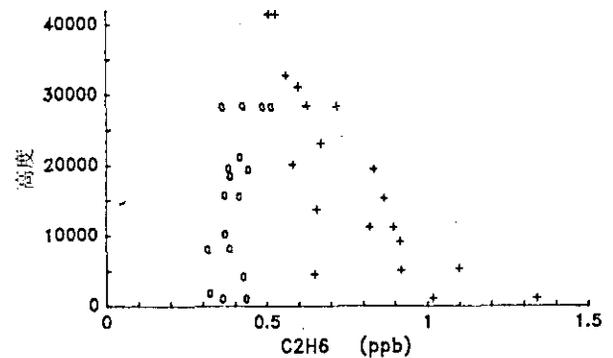


図1 大陸性気塊(+：日本の東方海上)および海洋性気塊(o：日本の東南海上)中でのエタン濃度の高度分布

1988年から継続している大気の清浄な遠隔地域定点(納沙布岬、小笠原母島、石垣島)での通年観測から、大気中のNMHC濃度は7、8月に低く1、2月に高い測定値が得られた。南極昭和基地の大気では夏の1、2月に低く晩冬の9、10月に高く、濃度・季節変動の振幅の値共に他地点より低い結果を得た。これらは大気の光化学活性(主にOHラジカルによる除去)を反映しているものと考えられる。

日本周辺海洋上の大気中窒素酸化物濃度の分布：PEACAMPOT(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)調査において、日本周辺の海洋

上大気中のNO_yの測定を行った。1991年10月の東シナ海、黄海、日本海海洋上で観測した気塊を、NO_y・オゾン・気温・湿度の測定値をもとに性質の異なる気塊に分類した。気塊ごとの各項目の平均値を表1に示す。NO_y濃度を指標にして比較すると、約0.5ppb以下(ハッチなし)、1.2ppb以上(ハッチ付き)とその中間(ハッチ付き)の濃度を示す気塊でオゾン・気温・湿度に共通性がみられ、おおまかにいて表2に示すように3種類に分けることができた。

表1 PEACAMPOT'91で観測された日本周辺海洋上の高度3 kmにおける大気中の窒素酸化物・オゾン濃度と大気温度・相対湿度

Area	Date	Data #	[NO _y]/ppb	[NO]/ppb	[O ₃]/ppb	Temp/°C	R. Hum/%
長崎 ↑↑ 与論	10/05	[05-1]	0.56±0.04	0.04±0.02	52±1	9.6±0.1	<1
		[05-2]	0.50±0.02	0.03±0.01	64±3	10.9±0.6	<1
		[05-3]	0.65±0.05	0.04±0.02	20±1	12.7±0.5	72±5
	10/06	[06]	1.25±0.23	0.03±0.01	43±3	12.6±0.9	79±7
長崎 ↑↑ 与論	10/07	[07]	0.51±0.15	—	51±6	8.0±1.4	6±5
	10/08	[08]	0.47±0.14	—	45±4	10.6±2.7	7±9
長崎 ↑↑ 新潟	10/10	[10-1]	0.17±0.03	—	57±4	10.4±0.6	<1
		[10-2]	0.69±0.07	—	42±2	9.3±0.2	69±4
新潟	10/11	[11-1]	0.79±0.06	—	52±5	9.2±0.7	58±6
		[11-2]	0.41±0.10	0.02±0.05	56±2	10.8±0.7	8±5
		[11-3]	0.40±0.06	0.03±0.01	67±2	12.7±0.9	<1

表2 今回観測された日本周辺海洋上の10月の自由対流圏大気の特徴とその移流経路

表1. Data #	[NO _y]/ppb	[NO]/ppb	[O ₃]/ppb	Temp/°C	R. Hum/%	Back Trajectory
ハッチなし	≤0.5	(0.02~0.04)	≥50	≤11	<10	大陸北深部(ハルビン、満州)
ハッチなし	0.7~0.8	(<0.02)	40~50	~9	60~70	北朝鮮沖合~能登沖合
ハッチなし	≥1.2	(<0.02)	≤40	≥12	50~70	中国南部工業地帯

表1の個々の気塊に対して実施された流跡線解析の結果は、表2に示した3つの分類ごとにほぼ共通の移流経路を示した。すなわち、表1の中でハッチなしで分類される各気塊はほぼ共通して中国大陸北西深奥部からバイカル湖・満州上空を経る移流経路を示す。したがって、これらの気塊は北半球高緯度の人為汚染の少ない大気の状態を反映したものと考えられる。一方、表1で共通のハッチを施した2種類の気塊はその種類の中でほぼ同じ移流経路を示すことから、同じ気塊を捉えたものと考えられる。NO_y濃度の特に高い(ハッチ付き)の気塊は、中国南部揚子江流域の工業地帯上空を経てきており、この地域の汚染が西太平洋海洋上の大気の状態に影響を与えていることがこの結果から明らかである。

このようにして分類した気塊ごとのNO_yとオゾン濃度の関係をプロットしたのが図2である。バックグラウ

ンド対流圏での光化学オゾン生成に対して現在のバックグラウンド大気組成ではNO_x(=NO+NO₂)が制限因子になっているとされており、NO_yが0.5ppb以下の濃度でNO_yとオゾン濃度の間に正の相関があることが予想される。しかしながら、この観測結果では図から明らかのようにNO_yとオゾンの間に逆相関がみられ、NO_yとオゾンの関係は予想とは逆の結果となった。

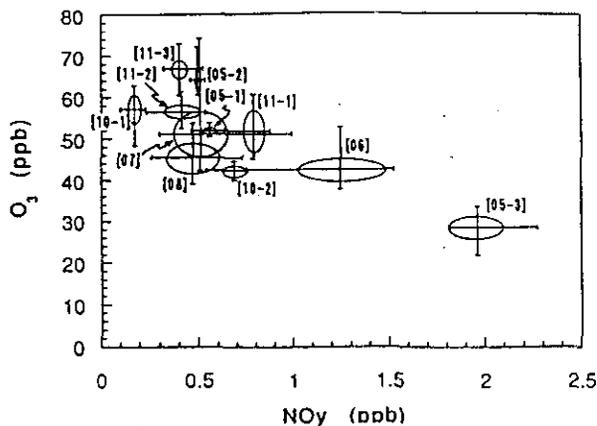


図2 O₃濃度とNO_y濃度の関係
[]内数字:表1のData#に対応。
楕円の大きさ:各平均値(楕円重心位置)の標準偏差(1σ)。
バー:各測定値の最大・最小値の範囲。

1992年11月に実施された第2回目のPEACAMPOT観測では、NO_yの高度分布を中心に測定を行った。測定結果は現在解析中である。

大気中イソプレンとその反応生成物の濃度変動: グローバルなイソプレン放出量は人為起源炭化水素を上回りメタンに匹敵するとされている。イソプレンの大気酸化反応ではメチルビニルケトン(MVK)、メタクロレイン(MAC)が一次生成物として高収率で生成する。本研究ではイソプレンおよびMVK、MACを同時に連続的に分析できるシステムを開発し、林内大気中のイソプレン、MVK、MACの連続測定を実施してその変動要因の解析を行った。フラックスの大きい夏季には、イソプレン、MVK、MACのいずれも日中に最大となる日変化を示した(図3)。これはイソプレンの放出が気温と日射量に依存し、MVK、MACを生成する反応が日中に最大となるためと考えられる。日中のMVK/イソプレン、MVK/MAC比はほぼ一定の値を示し、それらの比は、OHラジカル反応を考えた場合の収率と反応性からの予測と一致した。また、夜間に観測されたMVK/イソプレ

ン比の増大は速いイソプレレン-NO₃反応が起きていることを示唆した。

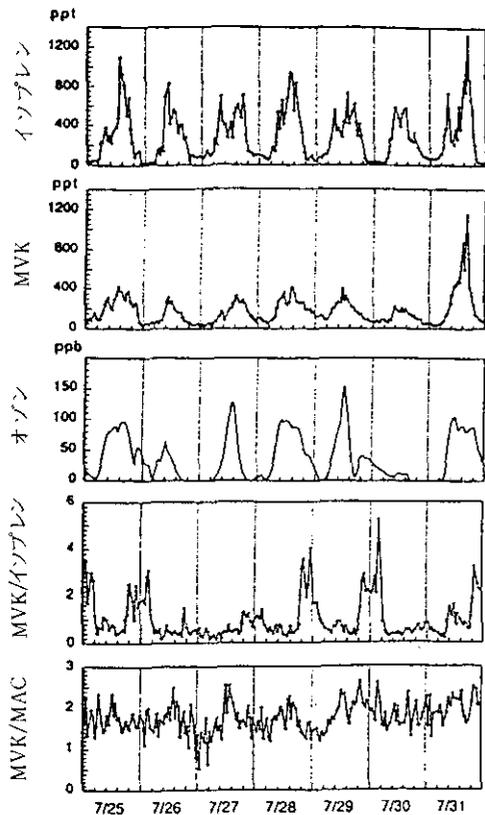


図3 イソプレレン、MVK、オゾン濃度およびMVK/イソプレレン比、MVK/MAC比の日変動
(1992年7月25～31日、つくばの松林内にて)

(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

日本におけるバイオマス燃焼からのメタンおよび亜酸化窒素放出量の見積もり：植生分布・農産物・林産物等の統計資料から日本における燃焼バイオマス量を推計し、前年度までのバイオマス燃焼実験から求めた排出係数を使って、メタン・亜酸化窒素の放出量を見積もった。

・日本における燃焼バイオマス量の推計：グローバルには焼き畑農業や森林開墾に伴うサバンナ・森林の樹木の燃焼と、エネルギー源としての木材燃焼が燃焼バイオマス量の半分近くを占めるとされている。これに対し、日本では農業廃棄物（米・麦生産に伴うもの）および木材（森林火災、薪炭等、林産材廃棄物）が燃焼バイオマスの大半を占めるものと考えられる。本研究では、日本における燃焼バイオマス量の推計を農業廃棄物と木材に

対象を絞って行った。

〔農業廃棄物〕

日本における全バイオマス純生産量のうち水田区分が13.4%、畑地が6.5%を占めており、農業関係では米作関連で生産されるバイオマス量が最も多い。米麦生産に伴い農業廃棄物として発生する副産物（もみがら・稲わら）のバイオマス量は1991年度において約 15.4×10^{12} g dm（乾燥重量、この内約80%は米作による）と推計される。この値に焼却処理に回される率（もみがら・稲わらで各々27および4%（1990年度））を掛けると、日本で燃焼する農業廃棄物のバイオマス量として年間 1.28×10^{12} g dmの値を得る。

〔木材〕

日本では、林野火災で焼損する面積は全樹林面積（存在バイオマス総量約 1.3×10^{15} g dm）の約0.005%（1990年度）である。したがって林野火災によって被害にあうバイオマス量としては最大でも 7×10^{10} g dm/y程度と推計され、燃焼するバイオマス総量に占める林野火災の寄与は小さい。一方、林業統計等によれば各種用途（製材、パルプ・チップ、薪炭等）に利用されている木材のバイオマス量は総量で $(50 \sim 90) \times 10^{12}$ g dm/yもある。しかし、燃料としてのバイオマスである薪炭材としての木材需要はこの内の0.5%程度にしか過ぎず、燃焼バイオマス総量に占める割合は小さい。

本研究において今回初めて推計し、燃焼バイオマスとしてその重要性を指摘したものに、薪炭材以外の木材使用の中で廃棄物として出てくる木材副産物（のこくず、樹皮、チップダスト）の燃焼が挙げられる。これに関しては十分な調査資料がないものの、数少ない統計資料から用材（製材用、パルプ・チップ用、合板用）としての利用に伴う副産物バイオマス量として日本全体で年間 9×10^{12} g dmが発生し、その内 2.1×10^{12} g dm程度のバイオマスが燃料として焼却されていると推計できた。

以上の推計を含め、日本における年間燃焼バイオマス量の推計値を表3の左カラムに示す。

・メタン・亜酸化窒素放出量の推計：上記推計値を用い、前年度に実施したバイオマス燃焼実験により求めたメタン・亜酸化窒素の排出係数（バイオマス燃焼により発生するメタン・亜酸化窒素の二酸化炭素に対する生成濃度比で、メタンでは稲わら：1.2%（以下同じ）、もみがら：1.6、木材：1.5、亜酸化窒素：バイオマスの種類によらず約0.005）を基に、メタン・亜酸化窒素の放出

表3 日本における項目別年間燃焼バイオマス量とそれによるメタン・亜酸化窒素放出量の見積もり

項目	燃焼バイオマス量		メタン放出量 (g CH ₄ /yr)	亜酸化窒素放出量 (g N ₂ O/yr)
	乾重(g dm/yr)	炭素量(g C/yr)		
森林火災	7.1×10 ¹⁰	3.6×10 ¹⁰	3×10 ⁸	3×10 ⁸
燃料用木材燃焼	220.7	116.8	197.5	191
①薪	7.1	3.7	7	6
②炭	3.6	3.1	0.5	5
③用材副産物	210	110	190	180
木炭製造	18.4	9.6	24	—
農業廃棄物焼却	128	45	78	75
①もみがら	76	26	50	43
②わら	52	19	28	32
総計	374×10 ¹⁰	175×10 ¹⁰	303×10 ⁸	269×10 ⁸

量の見積もりを行った。結果を表3の右カラムに示す。

本研究で見積もった日本におけるバイオマス燃焼によるメタン・亜酸化窒素の放出量は年間30GgCH₄および0.27GgN₂Oとなり、これまでに報告されている唯一の推計値0.8~1.6GgCH₄と0.03~0.07GgN₂O(「メタン等排出量分析調査結果報告書」1990年度環境庁委託業務日本環境衛生センター編)を大きく上回った。その最大の原因は、従来の見積もりでは木材燃焼特に用材用木材副産物と農業廃棄物の燃焼が入れられていなかったことによる。両者の合計で従来のバイオマス燃焼量見積りの約20~40倍となった。このように大幅な上方修正があってもなお、日本のバイオマス燃焼が日本のメタン・亜酸化窒素総放出量(年間0.9~1.6TgCH₄, 60~94GgN₂O:同上文献)およびグローバルなバイオマス燃焼からのメタン・亜酸化窒素放出量(年間20~80TgCH₄, 0.6~3TgN₂O:IPCC補足報告, 1992)に対する寄与は極めて小さい。

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:1990年以来観測を継続している霞ヶ浦の溶存メタンの測定を継続するとともに、これまでに単発的に観測したその他の国内湖沼におけるメタン測定データを解析した。また、中栄養湖である野尻湖の溶存メタン濃度の観測を春期から秋期にかけて行った。その結果、摩周湖、田沢湖のような貧栄養湖では表層メタン濃度が10nM程度であるのに対し、貧ないし中栄養湖に分類される十和田湖、中禅寺湖では20~30nM、中栄養湖の野尻湖、富栄養湖の霞ヶ浦でははるかに高い濃度となることが分かった。野尻湖

では5月の80nMから夏に向けて濃度が増大し、夏の最大生産となる時期に300nMに近い濃度となり、その後減少した。霞ヶ浦では、2年前から確認しているのと同様な夏から秋のはじめの最大濃度と11月の極小濃度の季節変化が再現した。最大濃度は湖心域で300nM程度であるが富栄養化した湾部ではさらに高くなって1000nMを越すこともあった。このように湖沼の栄養度とその表層メタン濃度には強い相関があることが明らかになった。

内湾域でのメタン生成と放出の現象の観測のために、東京湾の調査を繰り返し行った。東京湾のメタン濃度は大気平衡の2~4nMに対してははるかに過飽和であった。平均的な表層のメタン濃度は、外海に近い地点(横浜沖)では30~50nMであるのに対し、湾奥部(羽田沖から千葉沖にかけて)では平均100nM程度まで濃度が高くなった。一方、底層水において溶存酸素の減少に伴うメタン濃度の増大が認められたが200nMを越すことは希であった。ところが表層水で時に200nMを超え最大1850nMにも及ぶ高濃度が見られた。これには、塩分との逆相関があることから、陸水の流入との関係が認められた。ただし、通年の観測データから判断すると平均的な東京湾海水のメタン濃度は霞ヶ浦のような富栄養化した湖沼よりかなり低く、その大気へのフラックスは大きくないことが明らかとなった。

(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

温暖化関連気体である代替フロンの大気中における分解反応に関する研究:オゾン層を破壊する能力(ODP)や温暖化能力(GWP)の大きいフロン11(CFC-11, CCl₃F)などの特定フロンの代替物質として、水素を含むハロカーボン類(HCFCs, HFCs)が代替フロンとして検討され、既にHFC-134a(CH₂FCF₃)はクーラーの冷媒として使用されている。これらの代替フロンは、対流圏中ではOHの水引き抜き反応で分解し、対流圏での寿命が短く、HCFC代替フロンのODPとGWPは小さい。またHFC代替フロンは塩素原子を含まないのでODPは0であるが、GWPは0でなく対流圏の寿命に依存している。本研究では寿命が長く、温室効果気体であるCH₂FCF₃(HFC134a, 寿命:13.1~15.5年, GWP(CFC-11を1として):0.22~0.39)の塩素原子を用いた引き抜き反応によって開始される酸化分解反応について検討

し、実際の大气中の反応を推定した。

図4は、 CH_2FCF_3 、 Cl_2 、 O_2 、 N_2 の反応混合気体の紫外光照射による赤外吸収スペクトルの変化を示している。光照射で生成した Cl の水素引き抜き反応で、 CH_2FCF_3 は分解し、 CF_3CFO 、 CHFO 、 CF_2O 、 HCl 、 CO 、 CO_2 が生成することが明らかになった。 CHFO は反応初期に生成し、その後消滅する中間生成物である。これらより、 CH_2FCF_3 の酸化分解反応スキームは図5と推定される。 CH_2FCF_3 は酸化され、 CF_3CHFOO から CF_3CHFO を生成する。 CF_3CHFO は、C-F結合が強固なため CF_3CHO が生成する可能性は小さく、 O_2 の水素引き抜きにより CF_3CFO を生成するか、C-C結合の開裂から CHFO と CF_3 を生成すると推定された。よって CF_3CFO の生成量より、C-C結合の開裂率が得られ、図4の実験条件下では70%と見積もられたが、反応系の酸素分圧などの実験条件により変化する。また図4の150分照射したスペクトルの解析により、 CF_3 が酸化され CF_2O あるいは $\text{CF}_3\text{OOOCF}_3$ を生成していることが明らかになった。また CHFO は Cl の水素引き抜き反応で分解し、 $\text{CF}(\text{O})\text{O}_2$ ラジカルから $\text{CF}(\text{O})\text{O}$ ラジカルや CFO-OO-CFO を生成し、 $\text{CF}(\text{O})\text{O}$ は、 F 原子と CO_2 を生成すると推定

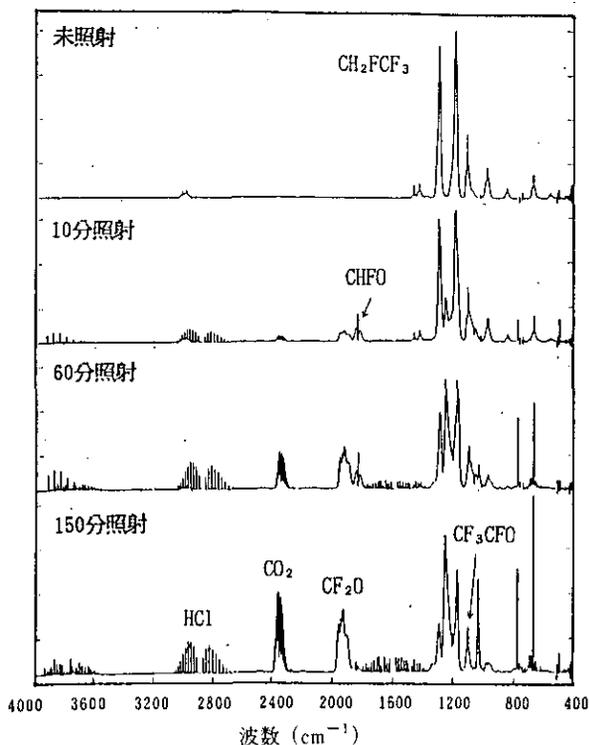


図4 CH_2FCF_3 (HFC-134a)(1Torr)、 Cl_2 (1Torr)、 O_2 (100Torr)、 N_2 (400Torr)の混合気体の光照射による赤外スペクトルの変化

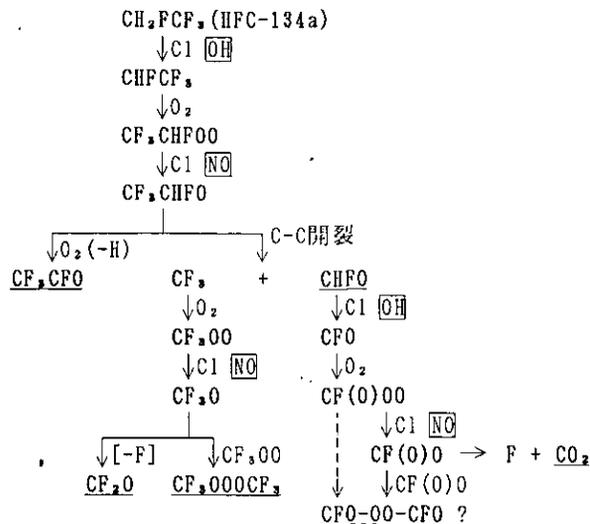


図5 CH_2FCF_3 (HFC-134a)の塩素原子により開始される酸化分解反応の機構
□内は実際に大气中で反応するラジカル、 $\text{O}_2(-\text{H})$ は O_2+R の水素引き抜き反応、実験で観測された生成物を下線で示した。

される。実際の大气(対流圏)中では、 CH_2FCF_3 は OH ラジカルにより分解反応が開始されるが、成生物は室内実験との結果と大きな差はないと推定される。しかし $\text{CF}(\text{O})\text{O}$ では NO との反応なども考慮する必要があり、より詳細な研究が必要である。

またHFC-134aは、長寿命で一部は成層圏に侵入し $\text{O}(^1\text{D})$ と反応し、 OH との反応と同様に CF_2O を生成する。すでに成層圏において、 CCL_2F_2 の分解成生物と推測される CF_2O の存在が報告されており、多量のHFC-134aが大气中に放出されると成層圏の CF_2O 濃度を増加させ、温暖化に寄与するであろう。このようにHFC-134aは、それ自身による温室効果だけでなく、分解成生物による温室効果もあわせて評価する必要がある。

パーオキシラジカルとNOとの反応速度の決定:メタン等の反応性温室効果気体の大气中での消滅過程は OH 水ラジカルとの反応によっている。 OH ラジカルとの反応による消滅は同時に大气光酸化サイクルに取り込まれることを意味する。大气光酸化サイクルを構成する様々な素反応過程においてラジカルの生成・消滅が繰り返されることになる。メタンの大气反応の基本をなすサイクルは図6に示されている。

CH_3O_2 や HO_2 などのパーオキシラジカルと NO との反応はこのサイクルをささえる重要な反応であることが分かる。それ故、これらの反応速度定数の決定は温暖化に

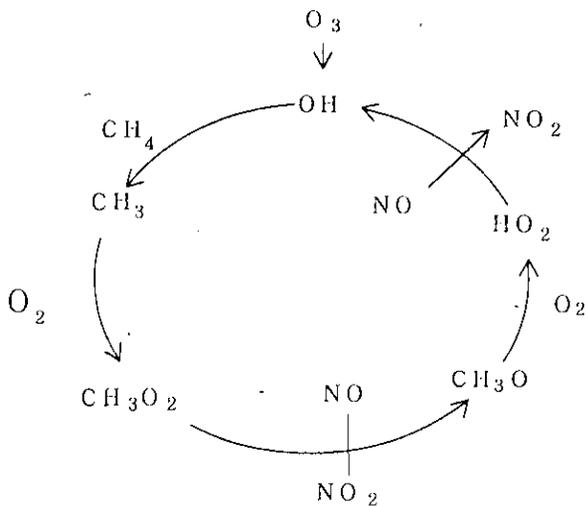


図6 メタンの酸化サイクル

係る大気反応のモデリングのために重要であり、より正確な反応速度定数の測定が望まれる。本課題ではパルスレーザー光分解-光イオン化質量分析法を用いて RO_2 ラジカルの直接検出と、反応によるその濃度の減衰の測定を行った。イオン化光源の改良等によって光イオン化質量分析法の感度を従来の50~100倍向上させることに成功し、基本的な有機パーオキシラジカルである CH_3O の直接検出が行われた。さらにメタンの大気光酸化サイクルで重要な $CH_3O_2 + NO \rightarrow CH_3O + NO_2$ の反応速度を測定し、反応速度定数を決定した。求められた速度定数の値は $(11.2 \pm 0.5) \times 10^{-12} \text{cm}^3 / \text{molecule} / \text{s}$ であり、従来の推奨値 $(7.6 \times 10^{-12} \text{cm}^3 / \text{molecule} / \text{s})$ に比べ約50%大きな値であった。今回の測定はパルス法によって CH_3O_2 ラジカルがはじめて直接計測されたものであり、得られた速度定数は従来の測定値より厳密なものであると考られる。

さらに、最も基本的なパーオキシラジカルである HO_2 ラジカルに対しても同じ方法を用いた測定を行った。 $HO_2 + NO \rightarrow OH + NO_2$ 反応は様々な大気物質の対流圏寿命を支配する OH ラジカルの再生反応として重要である。 HO_2 ラジカルを十分な S/N で検出するために Ar 共鳴ランプの形状の変更やさらにチャンバーの改造により使用可能なランプの本数を 1 → 2 本に増す工夫を行った結果、 HO_2 ラジカルが直接検出され、上記の反応の速度測定が可能となった。その結果、 $HO_2 + NO \rightarrow OH + NO_2$ 反応の速度定数として $(6.5 \pm 0.8) \times 10^{-12} \text{cm}^3 / \text{molecule} / \text{s}$ の値が得られた（これまでの推奨値： $8.3 \times$

$10^{-12} \text{cm}^3 / \text{molecule} / \text{s}$ ）。この値は従来のフロー法によって求められていた値より約20%小さな値であることが分かった。

(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：大型純粋培養装置内に大気-海洋間での二酸化炭素の移動および植物プランクトン（供試藻類：*Chattonella*）の光合成による炭素固定を再現させ、炭素動態を詳細に計測した。実験開始後8日目までの増殖率は $\mu = 0.68 / \text{day}$ 、8日目以後は $\mu = 0.11 / \text{day}$ であり、炭素制限によりその増殖が低下した。植物プランクトンに摂取された全炭酸の83%が POC（粒子態有機炭素）に、17%が DOC（溶存態有機炭素）として増加した。この DOC は細胞内に同化された炭素の内細胞外に排出されたもので、海洋表層における DOC の起源としての由来とその量を推定する上で重要な知見である。pH と全炭酸から求められた pCO_2^{Water} と実測された大気中 pCO_2^{air} はともに植物プランクトン増殖に伴って減少し、大気側から海洋側への CO_2 吸収は本実験系では $K_L = 7.2 \text{mm} / \text{day}$ と推定された。本制御実験系は炭素マスバランスがとれており、大気-海洋-海産藻類間の炭素動態の定量的解析が可能となった。

外洋域での沈降粒子による炭素の沈降フラックスとその季節変動、海域特性などを明らかにするために、グアム島南東の海域にセディメントトラップ装置を設置した。また、陸域からの物質の負荷に対応して変動する粒子の沈降フラックスを解析するとともに、沈降による粒子の分解過程を解析する目的で、日本海溝南部の海域にセディメントトラップ装置を設置した。これらの作業は東京大学海洋研究所を中心とする研究グループと共同で行った。

また、1986年以来継続している日本海溝房総沖のセディメントトラップ（5000m 深と9000m 深）で採取された試料の化学分析を行った。その結果、9000m の深海底で捕集された粒子試料では、炭酸カルシウム粒子がほぼ完全に溶解されることが明らかとなり、深海での炭酸塩の海水への回帰量を算定することができた。

(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

1991年に、栃木県奥日光の標高約1500m に成立してい

る、林床にササが密生した落葉広葉樹林内に広さ1400m²の調査区を設定して、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などを行い、適宜測定を開始した。1992年には、以下のような測定を行った。

林床に多数みられる倒木の直径と長さを測定した。これに、一部のサンプルから求めた密度および炭素含有率を掛けて、倒木中に含まれる有機炭素量を推定した。

1992年に太さ1 cm以上の中型落枝をすべて回収した300m²の区画で、1年後に再び落枝の回収を行い、1年間の落枝量を推定した。

調査区内の10点に落葉落枝採取用のネットを配置し、高木からの落枝、落枝量を求めた。また、林床の10点でササの落葉落枝を定期的に回収した。

調査区内の5地点で、深度別に土壌サンプルを採取し、植物体の地下現存量および土壌有機物量の測定を行った。以上の結果の概略を表4に示した。

表4 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

	蓄積量 (g/m ²)	有機炭素量 (gC/m ²)
倒木	2,740	1,190
中型落枝	100	48
ササ地上部		
葉	37	9
稈	285	133
ササ地下部		
生	509	185
枯死	87	24
根(除ササ)		
生	613	123
枯死	25	9
落葉層	913	177
土壌		16,700

	フラックス (g/m ² /yr)	炭素フラックス (gC/m ² /yr)
高木からの落葉・ 小型落枝	428	198
高木から中型落枝	24	12
ササの落葉、枯死稈	38	16

赤外線ガス分析装置を用いて土壌表面からの二酸化炭素の放出速度(土壌呼吸速度)を測定するシステムを作成した。このシステムを使用して、8~11月まで、毎月3~4日にわたって土壌呼吸速度の連続測定を行い、その時間・空間変動を解析した。その結果、土壌呼吸速度

は地表面温度に敏感に反応して変動すること、同じ調査区内でも地点により2~3倍程度の変動があること、また同一地点でも、季節によって温度依存性が変化することが明らかとなった。

(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

1991年度に、ロシア科学アカデミー凍土研究所およびロシア気象委員会中央高層大気観測所(CAO)との共同研究体制が構築された。1992年度はこれに基づき北海道大学、東北大学などの協力を得てシベリアでの観測を行った。

航空機による温室効果気体の観測: CAOの気象観測機イリュージン-18を共同運航し、二酸化炭素、メタンの空間分布測定を行った。同機は100人乗りの旅客機を気象観測用に改造したもので、GPS、高度レーダーなどのナビゲーション装置、日照や地表面温度の測定器を含む気象測器を装備している。観測器用の机などが設置されているため、搭乗できる観測員の人数は32人である。日本側からは11名が乗り込み、二酸化炭素、メタン、オゾン、一酸化炭素、二酸化硫黄、水素、水分などを測定した。また、約300本のボトルサンプリング(地球環境研究センターの100本を含む)を行い、日本に持ち返った後で二酸化炭素、メタンの高精度分析、機上で測定しなかった亜酸化窒素、二酸化炭素の安定同位体比などを測定した。

1992年の航空機観測の第1の目的は、航空機上で温室効果気体などをリアルタイムで測定する方法を開発することである。二酸化炭素は非分散赤外吸収法による連続測定器で測定し、330ppmと380ppmの標準ガスで較正を行った。防振対策、温調対策などにより測定精度は0.3ppmが達成できた。感度スパンの長時間安定性など若干の改良の余地はあるが、全体としては必要な性能を満たせた。メタンはFIDガスクロで測定し、2.2ppmの標準ガスで較正を行った。測定精度は0.012ppmであり、地上で測定した場合に比較して精度としては満足できる水準が達成できた。しかしながら1回の測定に約4分必要とし、4回の測定に1回標準ガスを測定する必要があり、一つの信頼できる値を求めるのに20分程度必要とする。このため高度分布を例えば5高度で求めるとすれば2時間を必要とし、この間に混合層の高度など気象条件が変動することもある。フラックスを求めるための観測

としては総合的に未だ改良を加えたり、方法自体の再検討しなくてはならない。フラスコサンプリングは概ね順調に行われたが、サンプリングのため大量に空気を流す場合の除湿能力など検討改良の余地がある。一酸化炭素の測定はガスクロが安定になるまでの時間が10時間以上必要で、航空機の観測のように1時間未満のウォーミング時間では不十分であること、また、標準ガスの流量が不十分な場合汚染を受けることなどから、信頼できる観測値が得られなかった。通夜暖機運転や標準ガスを多量に流すなど検討を進める必要がある。

第2の目的は、シベリアでのメタン、二酸化炭素の濃度分布の概略を把握することである。シベリアでは二酸化炭素・メタンの濃度測定の例はなく、どの程度の濃度が、どのような濃度勾配を持って分布しているかについては、全く情報が無い。このため、測定地点としては、世界最大の湿地である西シベリア低地（オビ河）と、東シベリアの凍土地帯の中央にあるヤクーツクと北極海を結ぶレナ河流域を選んだ。時期としては最も気温が高く、生物の活動が盛んであると予想される7月後半を選んだ。また、トランジットも6000~7000mの自由対流圏を長時間飛行することになるので、広範囲の温室効果気体の分布に関するデータが得られるため、観測を継続した。

一般に低高度ほどメタン濃度が高く、二酸化炭素の濃度は逆に低いという結果が得られた。これは、地表面にメタンの発生源、二酸化炭素の吸収源があることから、予想されたことである。高高度では偏西風による混合のため緯度方向にはかなり均された値となっており、同緯度ではどこでも大きな差はない。メタンの濃度勾配（地表面濃度が高高度の世界平均からどれだけずれているかに対応）は、チュメン（西シベリア）で最も大きく強い発生源があることを示し、ついで、トムスク、ヤクーツク（東シベリア）、チクシの順であった。チクシは北極海沿岸にあり、最高気温が10度程度で地温が5度前後と低く、生物活性が低くメタンの放出が少ないためと考えられる。二酸化炭素は逆にヤクーツクが最も大きな勾配を持ち、タイガの森林の影響が強いことを示している。

第3の目的は、メタンや二酸化炭素のフラックスを測定することである。西シベリア低地の中心にあるハンチマンシク付近で、7月18~22日まで、湿地からのメタンの発生量や森林による二酸化炭素の吸収量を評価することを目標とした観測を行った。この時期気象的には安定で、風速も弱い状態であったので、メタンや二酸化炭

素の高度分布とその変動を測定し、気象データとあわせて濃度勾配法という方法でフラックスを求める方針を選んだ。風の方向に飛行しメタンの濃度の水平分布を求めるとも試みたが、測定精度内で勾配を求めることができず、この方式でフラックスを求める方法はとらなかった。北極海から3000km離れたこのあたりでも海拔は100mに過ぎず、降水はほとんど海に向かって流れないので、広い範囲にわたって湿原や湖沼が分布している。その植生や水位は多様かつ複雑で、生物起源のメタン発生量は場所による依存性が強いことが予想される。メタンの空間分布の空気力学的な解析からフラックスを求める方法は、ある広がりでの平均値を示しており、この地域の全メタン放出量を推定するには有効な方法といえる。求められたメタンのフラックスは $0.12\text{--}0.06\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ であり湿地からのフラックスとしては平均的な値である。フラックスの時間変化、場所による違い、季節変化などから年間のメタン放出量を推定する必要があるが、今回の測定でその手がかりがつかめた。

第4の目的は、二酸化炭素などの広域の分布を求め、大気圏と生物圏の相互作用を取入れた大気大循環モデルを検証するデータをとることである。同一緯度での二酸化炭素の経度方向の分布は、低気圧や高気圧の影響による大気の鉛直方向の運動や、南北の大気の大気圏の侵入、局地的な大気の大気圏の擾乱による強い上下混合などによって影響を受ける。したがって、たとえば1ヶ月の平均的な分布を求めれば、その地域での植生（人間活動）による二酸化炭素の吸収（放出）量が求められるはずであり、GCMと比較すべきデータとなるであろう。そのような長期の測定は困難であるので、とりあえず1~2回の測定を行うこととした。約6000kmのトランジットの測定のうち、高度を下げて観測を行った場所を除き、低気圧の影響を強く受けた場合を別にすると、東に行くほど二酸化炭素の濃度が低下する傾向が求められた。

地上での長期連続観測：航空機による観測が空間的な把握が出来全体的な素描が得られるという特徴とするが、時間的にある限られた一時期のものであるという制約を持っている。これと相補的な観測として、地上で長期連続観測を行うことは大気圏・生物圏の相互作用を把握する上で重要である。

凍土地帯のほぼ中央にあるヤクーツク近郊で、ロシア科学アカデミー凍土研究所との共同研究として二酸化炭素・メタンの大気中濃度の通年観測を開始した。二酸化

炭素やメタンの地表面濃度は気象条件などにより大きく変動することが予想されること、また、研究予算が少ないことから、測定精度は劣るが安価で、維持費も少なく済むガスクロによる測定法を採用した。

現地は世界中で最も大陸性の気候であることから、夏と冬の寒暖の差は激しく、月平均気温で70度、最高最低気温の差は100度を超える。1991年度から、測定器がこの条件下で正常に稼働するかどうか、維持管理体制をどう作るか、物資の輸送をどうするかなどについて事前調査を行った。その結果、大量に必要な水素、窒素、空気などのガスについては現地で補給が望めないこと、日本から運搬した場合は運搬コストがかかりすぎること、もし5年以上運転するならば、これらの気体を生産する装置を開発、購入した方が安くつくことなどが判明した。そのため、1992年度は必要な気体を現地で生産する装置を持ち込み自立的に観測が可能な体制を整えることとし、全部で5トン近くの機材を航空機をチャーターして運搬した。多くを必要としない標準ガスやデータ記録媒体などは、必要に応じて航空機で運搬することとした。考えられるあらゆる故障に対応するため大量の交換部品を初年度チャーター機で資材を輸送する際に持ち込んだ。また、測定器は現地で調達したコンテナラボ内に設置し、大容量ヒーターなどで保温を施すこととした。測定は完全自動化し、凍土研究所が定期的に点検を行うこととした。

観測場所はヤクーツクの西約40kmにあるテレビ・ラジオの中継所を選定した。その理由は、①北西風が卓越する風配であるヤクーツクの西方にあるためヤクーツク市の排ガスの影響を受けないこと、②高度120mの鉄塔があり、80m以下のどの高度からでも大気の採取が可能であること、③比較的安定な電力の供給があり、停電時もディーゼル発電機から供給されるので、ラボの温度が下がり機器が破壊される危険性がない、④管理者が常駐しているので盗難防止や事故に対応できる。

しかしながら、次のような事情から連続観測はまだ開始されていない。

①コンテナラボ内の気温の不均一性から床においた水素発生器の水が凍結するなどの事故による機器の損傷(室内の温度差は予想をはるかに超え20度にまでなる)。

②データ収録、機器コントロールのパソコンや機器の盗難(現在は、研究者がパソコンなどの機器を持って50km離れた観測地点に行き、測定を終えて持って帰る

方法で観測を継続している)。

③凍土研究所の研究者がガス分析やパソコンに習熟していないことから、些細なトラブルに対応できない。また、当研究所の外国旅費が限定され、また、海外出張の手続きに長い期間が必要であるため現地を緊急に訪問できないことから、問題に敏速に対応できていない。

データ解析とモデル計算：航空機観測のデータ解析としては、流跡線解析による気流場の影響の検討、気流の垂直成分の解析などをCAOの協力を得て行った。また、メタンの発生源強度と全球気流場の客観解析データを組み合わせた計算を行い、西シベリアのメタンの拡散と移流がどのように起こっているかを検討した。

(7) 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

大気モデルへの現実的な物理過程の導入とその評価：開発中の大気大循環モデルに、①雲の効果を含めた高精度の放射計算スキーム、②物理的機構に基づいた積雲計算スキーム、③雲微物理を考慮した層雲計算スキーム、④融雪、土壌水分移動を改良した陸面過程サブモデル、等の現実的かつ物理機構に準拠した大気物理過程のパラメタリゼーションを組み込み、その評価を行った。観測された海面水温を境界条件として与えて時間積分を行い、その結果を各種の観測データと比較した結果、大気の状態とその季節変化の定性的なふるまいについて良好な結果を示すことが確認された。ただし、水蒸気量、降水量、雲量、大気の放射収支(図7)等の水循環に直接にかかわる量の再現性、および成層圏における温度構造等に関しては多くの問題点があり、上述の大気物理過程に関してさらに改良する必要があることが判明した。

1次元モデルによる陸面過程の検討：大気-陸地表面-地中間のエネルギー、水分の交換過程を鉛直次元モデルにより詳しく調べた。陸面過程については、対応するデータが極めて乏しいため、できるかぎりデータに依存しない形でのモデルを作る必要がある。そこで、将来にわたっても取得が困難と思われるデータの一例として、「地下水面」(土壌水と地下水との境界)の深さについてのセンシティブリティ・チェックを行った。その他、地中の物理的性質を表す各種パラメータが、大気-地表面間の相互作用に及ぼす影響について調べた。

観測データによる雲の変動の解析：熱帯の積雲対流活動の短周期変動が緯度、季節、エルニーニョ等の大規模

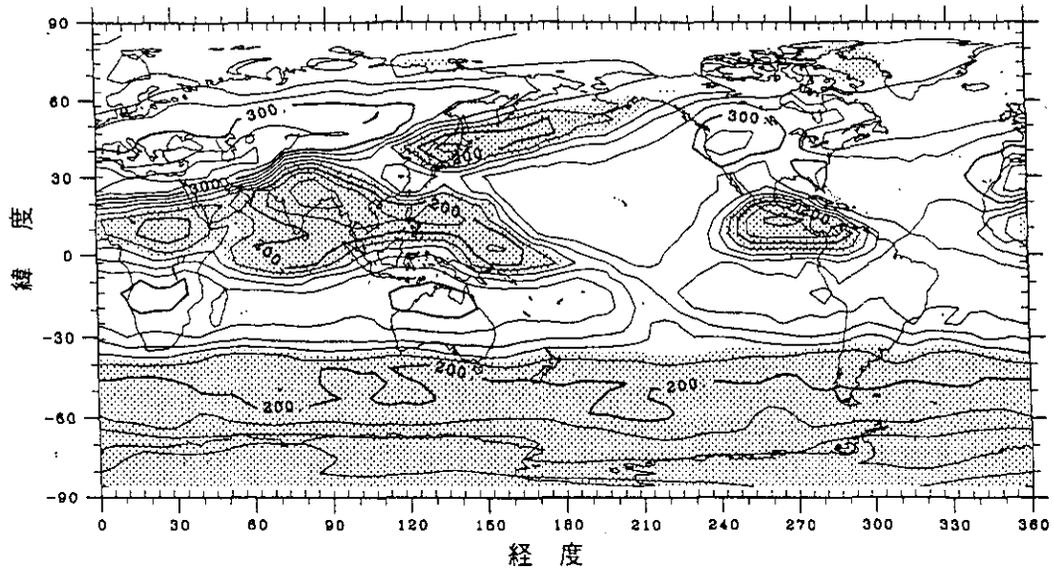


図7 モデルで計算された7月の大気上端における長波放射フラックス (単位 W/m^2)

気候変化によりどのように変化するかを解析し、地球規模の大気状態と雲活動との関係を調べた。気象衛星による1980～89年の雲のデータを統計的に解析した結果、雲の組織化の特徴に顕著な季節依存性、緯度・海面水温分布依存性が存在することを示した。例えば海面水温の緯度分布の季節変化と西進する雲活動の時間スペクトルとを比較すると、1～2日の短周期成分は海面水温の最高

温域に卓越するのに対し、時間スケールが長くなるほど温度傾度の大きい高温水域の端の領域で卓越する傾向があることが示された。また、1992年11月～1993年2月にかけて西太平洋暖水域で行われた海洋-大気相互作用の国際観測実験 (TOGA-COARE) に参加し、積雲対流活動を含めた海洋-大気現象について今後より詳細な解析の可能なデータの収集を開始した。

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 肇
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・松重一夫・今井章雄
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	
部 長	後藤典弘
環境経済研究室	青柳みどり・日引 聡・川島康子
環境資源研究室	乙間末広・森 保文
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	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
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	19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。

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、地球環境研究総合推進費に基づいて環境庁全部で9つのプロジェクトが進められており、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
- ⑤汚水・廃棄物処理システム評価：廃棄物・汚泥処理・処分システムの構築、対策手法の開発

(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：動物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。

〔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と気候変化による各種影響の程度を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1に示すとおり温室効果ガス排出モデル(AIM/emissions)と温暖化影響モデル(AIM/impacts)を核にして、温室効果ガス反応・循環モデルと地球気候変化モデルが両者をつなぐ構造になっている。

まず、温室効果ガス排出モデルは、エネルギー消費、

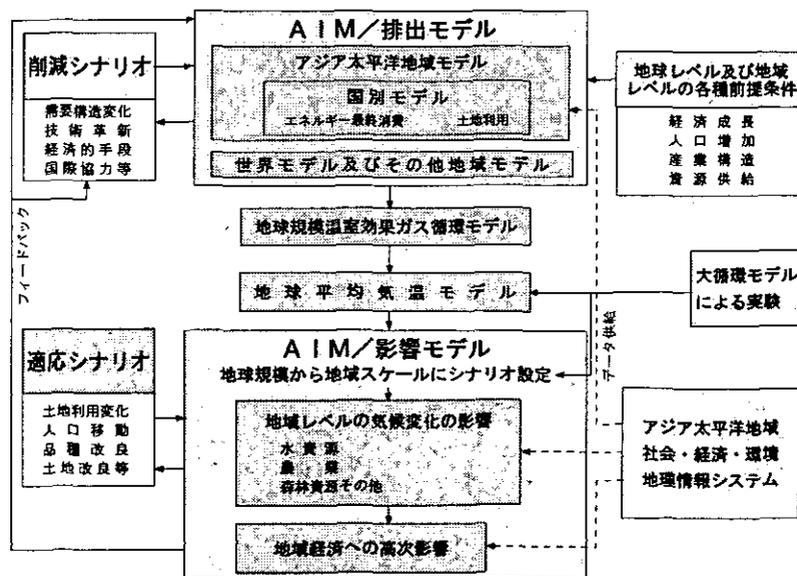


図1 AIMの全体構成

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を再現したもので、アジア太平洋地域のモデルと世界モデル（その他地域のモデルと世界全体の整合性を調整するモデルからなる）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カ国のそれぞれについて国別モデルを作成する計画である。前年度までに世界モデルとインドネシア・モデルを完成させており、本年度は中国モデル、日本モデルそれに韓国モデルの作成に着手している。これらの国別モデルの主要な部分は、図2に示すエネルギー需要モデルである。このモデルは、エネルギーサービス量を予測するモジュール、エネルギー効率の改善を算定するモジュールおよびエネルギー効率算定の基礎になる省エネ技術の選択モジュールから構成され、サービス種別にエネルギーサービス量とエネルギー効率を掛け合わせてエネルギー需要量を算定する仕組みになっている。

中国モデルでは、エネルギーサービス量はインドネシア・モデルと同様に4つのセクターごとに算定されるが、エネルギー効率改善の度合いは30の技術の導入シナリオに基づいて設定される。図3は、人口の伸びを来世紀末で16.6億人、経済成長率を2025年間まで毎年5.3%、その後3.9%と仮定して、標準ケースおよび省エネ政策導入ケースのもとでエネルギー需要量を予測したもので

ある。省エネ政策の導入によって来世紀末のエネルギー需要量を半分近くに抑える可能性があることを示している。一方、わが国のモデルの特徴は、エネルギー効率算定のための省エネ技術選択モジュールを本格的に装備している点にある。このモジュールでは、表1に示すように産業、民生、商業、運輸等の100を越える省エネ技術を対象に、コスト・データおよび省エネ可能量等のデータを入力して、エネルギー価格あるいは補助金に基づいて省エネ技術の導入を判断する。このモデルは、現在のところ開発の最終段階にあり、このモデルを基本型にして他の国に適用を試みる予定である。このため、平成4年度においては、韓国およびタイの二か国について適用のための基礎調査を実施した。さらに、今までに完成したモデルと世界モデルをリンクさせて、アジア太平洋地域からの将来の二酸化炭素排出量を推定した。図4には、1985年と2100年の二酸化炭素排出量を比較して示している。インド、中国、マレーシア、インドネシア、タイ、バングラデシュ等からの二酸化炭素排出が急激に伸びることが分かる。

一方、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、前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

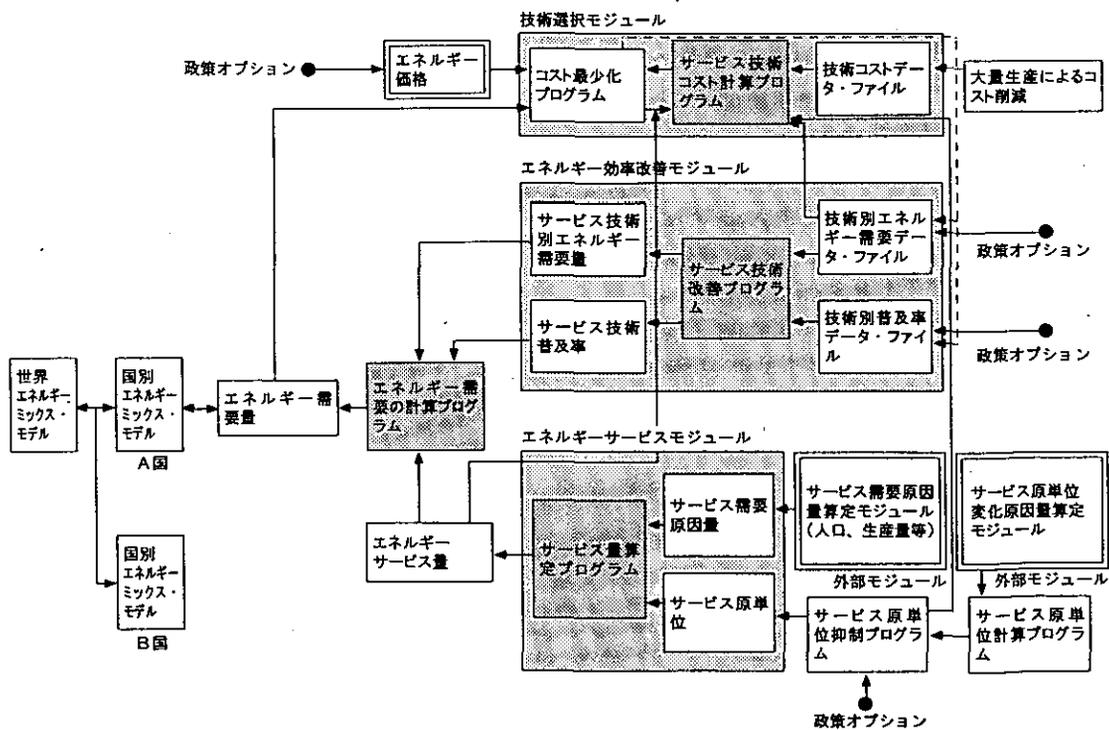


図2 エンドユーザ・エネルギー需要モデルの構成

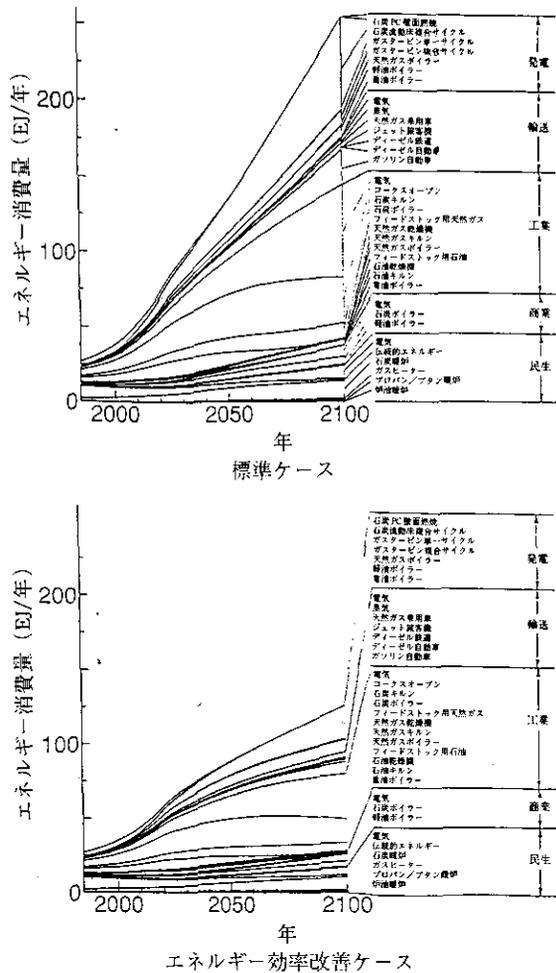


図3 中国におけるエネルギー需要の予測

用可能性について検討したが、本年度は、水資源の変化モデルを中心にして温室効果ガス影響モデルを開発し、アジア太平洋地域の気候変化シナリオを作成してその影響を試算した。まず、気候変化シナリオについては、今までに実施されたGCMによる実験結果を基にして、図5に示すように各月の気温、降水量、土中水分量の変化をメッシュ地図に落とすことによって作成した。一方、水資源の変化を予測するために、アジア太平洋地域の河川、標高、各集水域の特性データを入力して、集水域モデルを作成した。図6には、このモデルにおける集水域のユニットと各ユニットにおける表流水の相対的レベルを示している。図7は、集水域モデルに気候変化シナリオを入力して、アジア太平洋地域の水資源の変化を予測したものであり、降水量の変化のみならず温度変化による蒸発量の変化も考慮したものである。二酸化炭素濃度2倍時に中国やミャンマーにおいて水資源の不足が示唆される結果となっている。

平成5年度以降は、各国の温室効果ガス排出モデルの

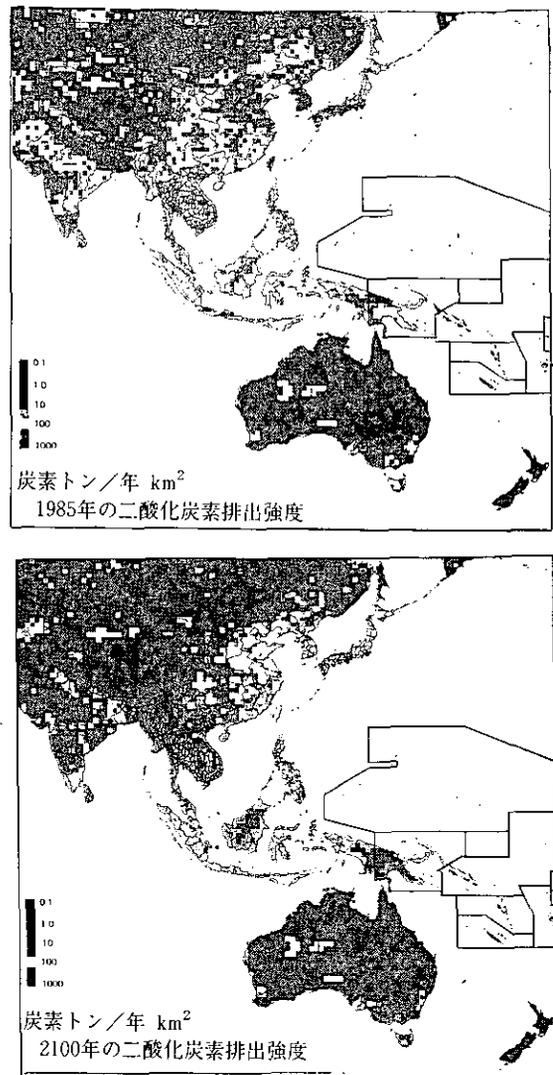


図4 アジア太平洋地域における二酸化炭素排出量の推定

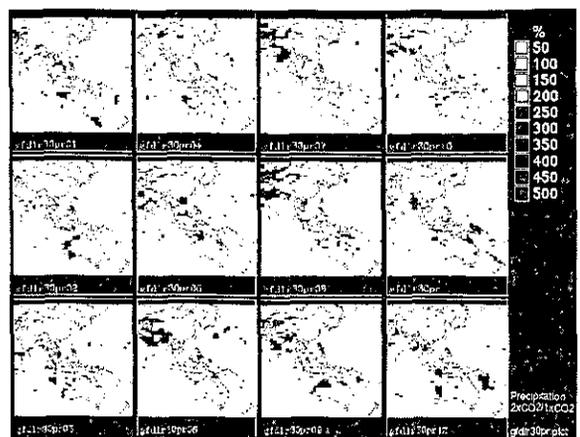


図5 気候変化の地域シナリオ(二酸化炭素濃度2倍時の変化率)

開発を進めるとともに、水資源以外の温暖化影響予測モデルの開発とその経済的評価を進める予定にしている。

表1 温暖化対策技術の一覧

産 鋼	鉄	廃熱利用型連続式焼鈍装置、高温鏡片連続式鑄造装置、 直流式水冷炉壁型アーク炉、熱間圧延ミル加工熱処理設備、 薄銅板形状制御設備、加鉛石直接利用塩基性酸素吹煉炉、 高性能高周波溶鉱炉、高性能高周波誘導加熱装置、高性能板金加工装置、 乾式廃圧力回収装置、電気炉用原料予熱装置、 コークス炉装入用石灰調湿装置、酸素富化燃焼装置、高炉スラグ水砕装置、 高性能制銅脱ガス装置、高効率銅板連続塗装装置、冷延工程連続化装置、 コークス用石灰前処理装置、高温銅片直送装置、直流式電気炉、 スラグ顕熱回収装置、スクラップ予熱装置、転炉ガス回収装置、 コークス乾式消火設備、高炉炉頂圧発電装置、熱片装入、直送圧延、 直接溶融還元製鉄
	セ ン ト	ローラー式堅型粉碎装置、ロールプレス装置、SP/NSPキルン、 予備粉碎ミル、堅型ミル/原料、堅型ミル/仕上げ
業	紙 パ	予備浸透型連続蒸解装置、高性能バルブ洗浄装置、酸素脱リグニン装置、 ディフューザー漂白装置、高性能サイズプレス装置、液膜硫化型蒸発缶、 高性能面圧脱水装置、高性能ドライヤーフード設備、 高性能古紙バルブ製造装置
	石 油 化 学	高性能分解反応装置、高性能脱水素反応装置、高性能相利加工の製造装置 低圧脱メタン装置、塩化ビニル樹脂用高性能重合装置、高効率圧縮装置、 二酸化炭素再利用装置、触媒燃焼式排ガス処理装置、 高性能無水マレイン酸製造装置、高効率脱二酸化炭素装置、 二段抽気蒸気タービン、ガスタービン電力回収
	他	ボイラ低空酸化運転化、排ガスボイラ、VVVF
民	空 調	住宅保温構造化（新設戸建住宅）、住宅保温構造化（新設集合住宅）、 住宅保温構造化（既設戸建住宅）、住宅保温構造化（既設集合住宅）、 ガス冷房装置、パッシブソーラーハウス
	給 湯	太陽熱温水機、ソーラーシステム
	照 明	インバータ照明
	生 家 電	テレビ液晶化、エアコン効率上昇、冷蔵庫効率上昇、省エネ意識向上、
商 業	他	電力多機能ヒートポンプ、エンジンヒートポンプ、屋上緑化、
	断熱材+ペアガラス、ガス冷房装置、コージェネレーションシステム（ガスタービン）、 コージェネレーションシステム（ガスタービン）、コージェネレーションシステム（ディーゼルエンジン）、地域冷暖房、 屋上緑地化	
運 輸	電気自動車（軽乗用車、軽貨物車、小型乗用車、小型貨物車）、 ハイブリッド車（小型乗用車、普通貨物車、バス）、天然ガス車、 メタノール車、高効率電気機関車、船舶用廃熱ボイラー、 船舶用推進軸動力利用発電装置、船舶用ディーゼル機関	
エ ネ ル ギ ー 転 換	太陽光発電、風力発電、ゴミ発電、下水汚泥発電、 産業用コージェネレーション、燃料電池、 自家発電リパワリング（複水発電）自家発電リパワリング（熱併給発電）、 石油火力リパワリング、石油火力複合化、LNG火力リパワリング、 LNG火力複合化、石炭火力リパワリング、石炭火力複合化	



図6 インドシナ半島の集水域の特性

(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）、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）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。

本年度は、前年度に着手した産業連関表による最終需要別の排出構造分析をより詳細に行った。まず1985年度について、産業連関表取引基本表を用いて単位生産額あたり直接排出される二酸化炭素量、および単位最終需要額あたり直接および間接に排出される二酸化炭素量を計

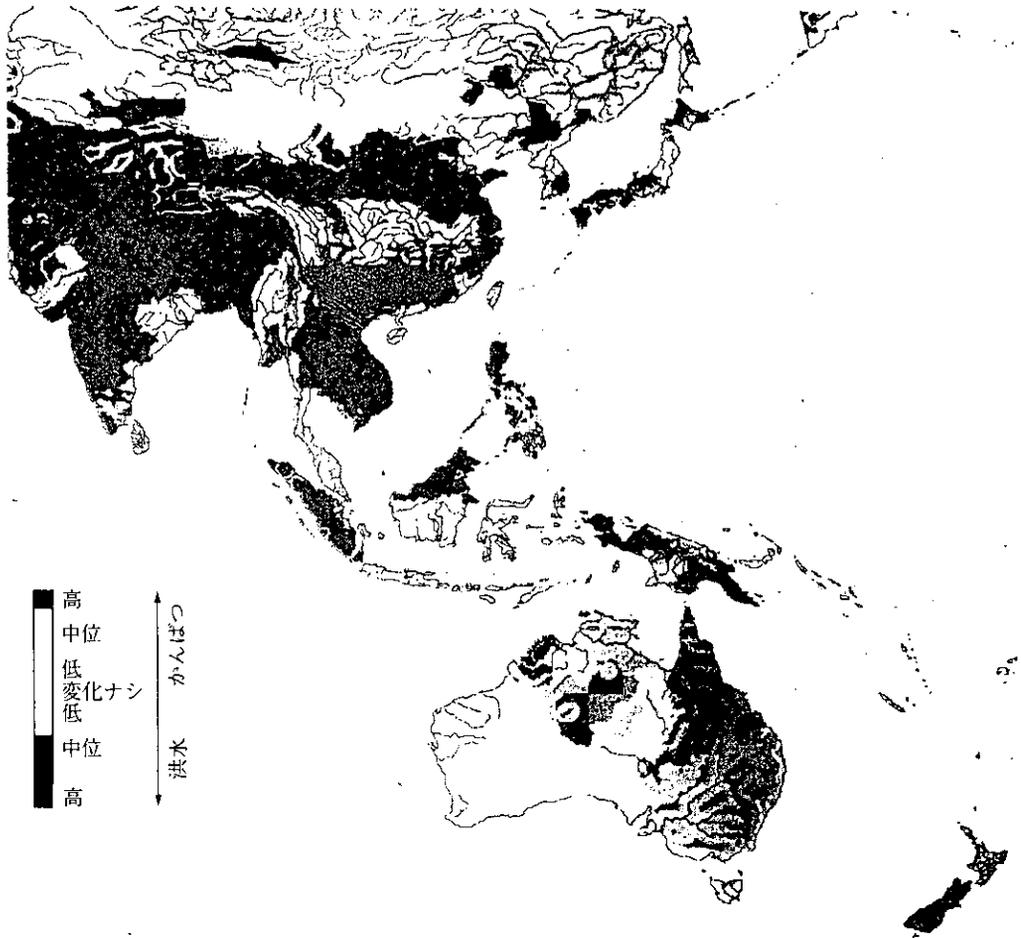


図7 アジア太平洋地域における温暖化の水資源に及ぼす影響の予測

算し、408部門別の原単位表にまとめた。この原単位を用いた最終需要別の排出分析の結果、前年度に行った29統合分類表による分析結果と同様、消費支出によるものの割合が約半分を占めることが示された。408分類という細かな部門分類を用いれば、どのような商品の購入が二酸化炭素排出と結び付いているかをより詳細に分析できるのが利点である。図8は、家計消費支出について、品目別の消費金額（縦軸）と単位金額あたりの排出原単位（横軸）を示したもので、長方形の面積が各品目を通じた排出量を表す。食料品では遠洋漁業による燃料消費等のために魚介類を通じた排出が多いこと、ガソリンや灯油は、金額は小さくても排出量に大きく寄与していることなどが図から読み取れる。なお、統合分類表を用いた排出構造分析には部門統合による誤差が含まれていたことが明らかになり、この点についてさらに詳細に検討した結果、84部門分類以上の部門数を分析に用いることが望ましいことが明らかになった。

一方、同種の分析を産業連関表接続表、延長表に適用し、1975年から1990年までの排出構造の経年変化分析を行った。図9に最終需要別の排出量の変化を示す。この間、民間消費支出による排出量は増加を続けており、民生部門におけるエネルギーの直接消費および商品やサービスの購入を通じたエネルギーの間接消費による二酸化炭素排出の抑制対策の重要性が確認された。また、1990年には、民間資本形成のための排出が大幅に増加しており、ここで蓄積された建物などの資本の使用過程におけるエネルギー消費が今後増加してくることも予想される。さらに、輸出需要のための排出が大幅に減少したことも大きな特徴であり、内需主導型の排出構造への変化が進んだことが読み取れる。

さらに、民間消費支出を通じた二酸化炭素排出の抑制方策を探るため、産業連関表によって求めた排出原単位と、家計消費調査データとを組み合せ、収入、世帯人数、世帯主の年齢といった世帯の属性による排出構造の差異

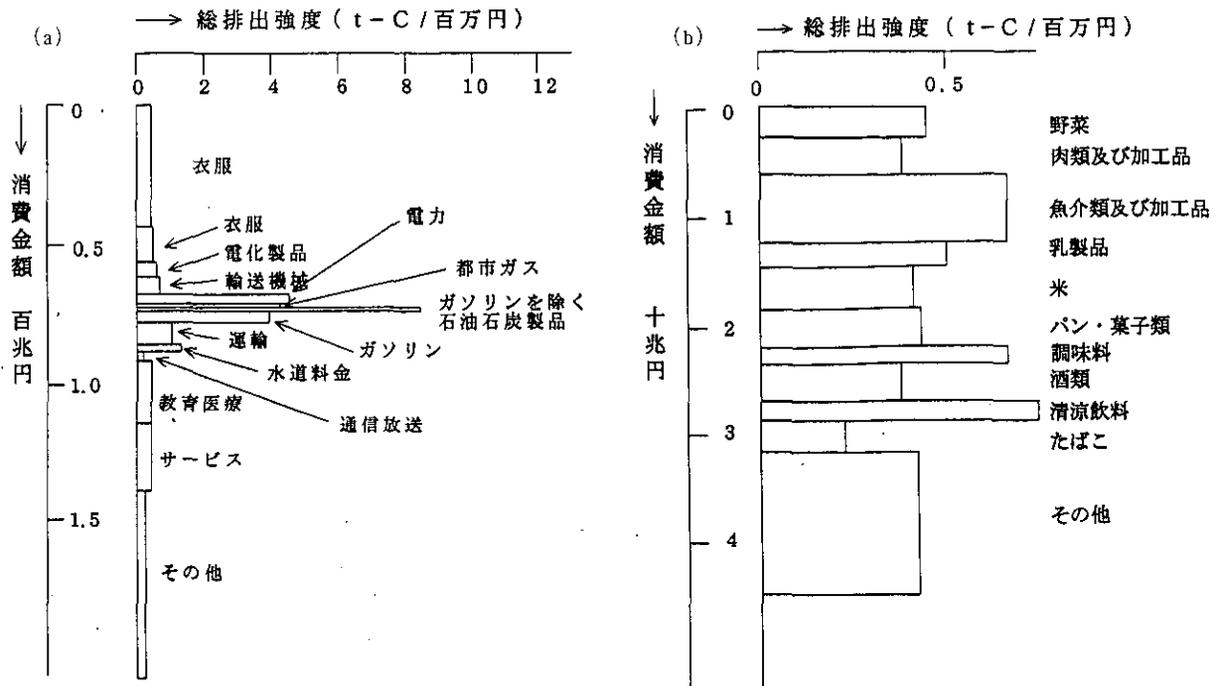


図8 (a) 家計消費支出からのCO₂の排出構造 (購入者価格ベース),
 (b) 食料品部門における消費金額およびCO₂排出量

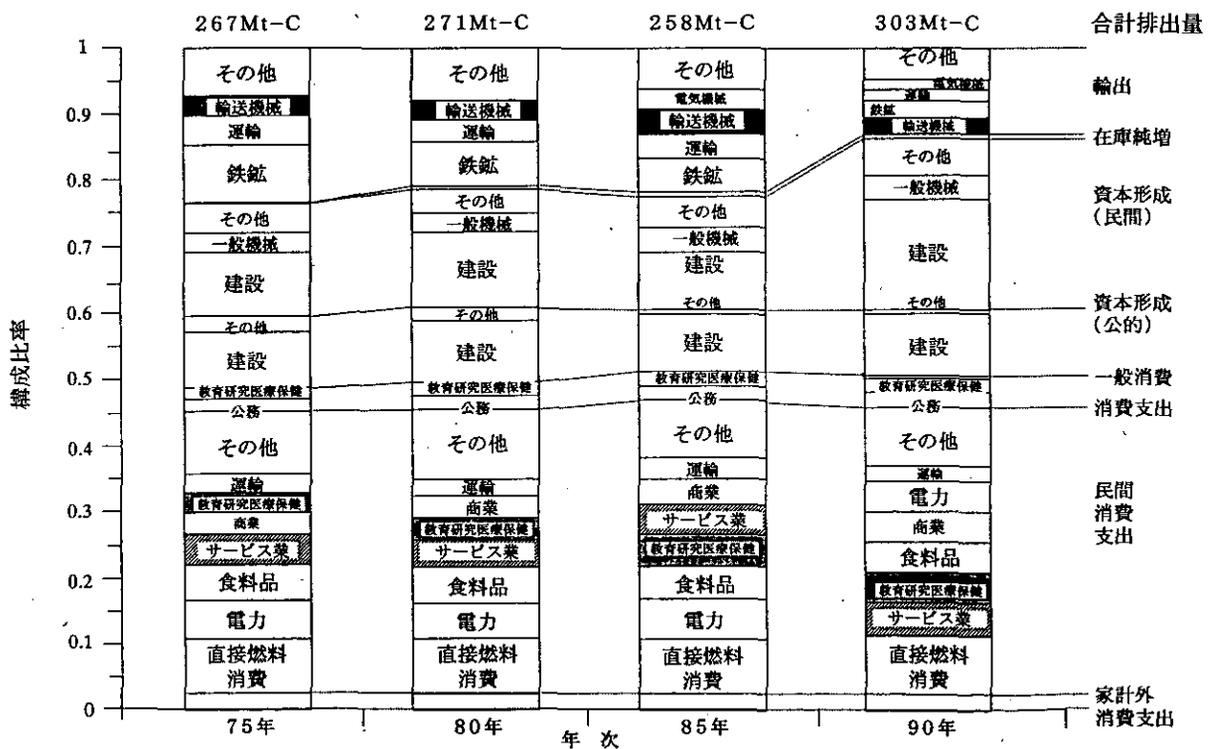


図9 1975~90年の4時点での最終需要におけるCO₂排出構造
 (各年のCO₂排出量は棒グラフの横幅に比例する)

の分析に着手した。結果の一例として、図10に世帯の収入階級と費目別の排出量の関係を示す。今後は、家計調査の原票を用いて、世帯の属性をより詳細に区分して排出構造の分析を行うとともに、消費行動の変化を通じた排出削減法について検討を行う予定である。

(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り出されたが、中でも電気自動車の有効性は特記すべきものである。

わ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、今後も排出量がますます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、普及台数はごくわずかである。

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、性能およ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、および給電・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) 各種の実用段階にある電気自動車の性能を踏まえた導入可能分野についての実験的検討
- 2) 乗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および、物流用の電気自動車の実走行調査
- 3) リサイクルおよび電池性能向上による資源節約量の検討
- 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実験的検討
- 5) モデル地域への導入システムのインフラストラクチャー整備に関する基本設計モデル車両の機能と経済面での解析

本研究の一環として行った地方の中核都市である仙台市をモデルとした場合のトラックの走行実態調査の結果を図11に示す。同図では各事業所の所有トラックの平均の走行距離の頻度分布を求めているが、1回当たりの走行距離が平均60km以下の事業所が全体の65.5%、100km以下81.6%を占めていることが明らかとなった。このことから普通トラックの初期の普及には一充電走行距離を60km程度とすることが一つの目安となることが結論づけられる。

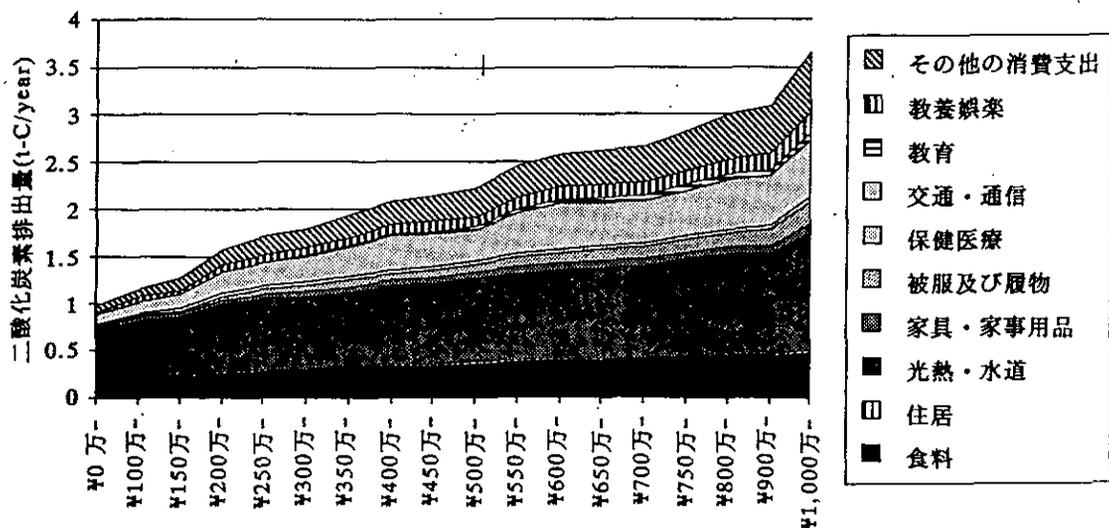
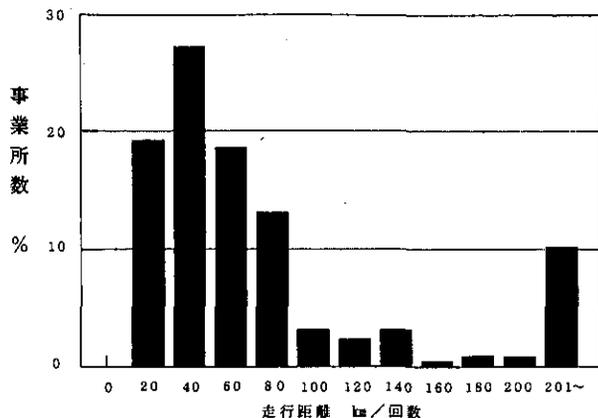


図10 収入階級別二酸化炭素排出量 (一世帯当たり)



	市内1走行回数当たりの距離		
	60km以下	100km以下	150km以下
事業所数	114 (65.5%)	142 (81.6%)	151 (86.8%)

事業所数：174社
※市外のみ走行する事業所を除く

図11 普通車市内1走行回数当たりの距離別事業所数

(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

家庭等からの二酸化炭素排出を抑制するための各種技術の普及促進は、温暖化防止対策上極めて重要である。家庭等から排出される二酸化炭素は増加の傾向にあるが、これは、主に生活スタイルの変化によるものと考えられる。このような生活スタイルの変化は、環境汚染物質の排出構造にも変化をもたらし、ひいては都市の環境にも影響を及ぼしている。一方、都市域における環境変化や、都市構造変化は、民生部門でのエネルギー消費にも影響を及ぼすと考えられるため、両者の相互関係を正しく把握し、家庭等における省エネシステムの最適化、および生活スタイルのあり方を、二酸化炭素排出抑制の観点から検討していくことが必要となっている。

本研究においては、住宅、住まい方、都市環境を相互に関連するものとして把握し、その中で、住宅における高断熱・高气密化技術、太陽エネルギー利用技術、居住環境改善技術、省エネルギー技術の利用促進の検討を行っている。

本年度は特に次の成果があった。

1) 北海道、東北を中心とした地方、およびモデル都市仙台におけるアンケート調査、実測調査をもとに暖房環境に関する居住性能の地域特性についての調査分析を行った。暖房形態について地域的にとらえると①札幌、青森、②八戸、盛岡、秋田、横手、③宮古、山形、酒田、

仙台、福島、会津若松、④いわき、府中の4つのグループに分類できた。この中で①は室温が高く、石油消費量が多く、暖房時間、期間が長い地域であり④は室温が①ほど高くなく、石油消費量が少なく、暖房時間、期間が短い地域で、②、③は中間のタイプでそれぞれ①、④に近い地域である。一方、居住性能全般に対しての解析結果を10年前の結果と比較したところ東北地方の居住性能は10年前と比べて向上しており、全体的に札幌の居住性能に近づきつつあることが分かった。

2) 東北地方におけるエネルギー使用量の季節変化と都市環境の関係の解析およびモデル都市仙台における家庭用エネルギー消費の将来推計を行った。家庭用エネルギー消費によるCO₂排出量はわが国全体の約13%を占めておりCO₂の排出量としては1億3千万トンとなる。東北地方においては全国の約9%、仙台市は約0.8%を占めている。東北地方のエネルギー消費原単位は全国平均の約1.27倍であり、とりわけ灯油の比率が大きい。季節的には12月に全国平均の約1.66倍のエネルギー使用量となっている。仙台市を対象に36の変数を含むエネルギー消費推計モデルを用いて将来推計を行ったところ、エネルギー消費原単位は1991年、10282Mcal/世帯・年(全国平均10067)が2000年で11493(同11189)、2010年で13220(同12735)、となった。エネルギー種別でみると都市ガスが最も増加率が大きいことが示された。これによる仙台市における家庭部門からのCO₂排出量の推計結果は1991年で292千トン(C換算)、2000年で340千トン、2010年で399千トンとなる。2000年、2010年を1991年のレベルに抑えるためにはそれぞれ14%、27%の削減対策を世帯あたりで実施しなければならない。

3) 市街地の粗度係数が都市域の風の垂直分布に与える効果に関する数値シミュレーション、並びに風洞を用いた住宅の通風換気に関する実験的研究を行った。局地気象モデルを用いた解析の結果、粗度係数が1~100cmに増加すると地上風は一般風に対して30%も減少することが示された。また風洞を用いた実験では住宅間隔が小さくなると建物壁面の前後差圧が低下するための建物内の換気回数が大幅に減少することが分かった。しかし風上側屋根面から風が流入するケースでは住宅間隔による換気回数の減少はそれほど大きくなかった。夏季における住宅の換気は省エネルギー対策として有効であると考

えられるため、都市の構造と市街地風の関係、並びに住宅密度と住宅換気技術の関係を今後具体的に検討して行く必要がある。

4) 快適性の向上(アメニティ)を図り、環境負荷の低減を実現する住まい“エコハウス”の検討を行った。具体的には130m²程度の2種類の形状の省エネルギー型住宅を日本の代表的な地点(札幌, 仙台, 東京, 広島など)に建設したときの熱負荷シミュレーションを行い従来型の住宅との比較を行うとともに建設時, 使用時を含めてのCO₂発生量をカタログとしてまとめた。今後は地域の自然環境, 社会環境との調和のとれた住まい方を追求して行くべきと考える。

5) 実スケールのモデル住宅実験を行った。北海道伊達市に建設された木造プレカットパネルシステムにより新在来木造構法で建てられた住宅を用いて省資源, 省エネルギーの検討を行うとともに, 空気循環式ソーラーシステムの実稼動性能評価を行った。実験の結果冬期間でも灯油消費量分の4割の熱量をソーラーシステムによる集熱が補っており, 夏季の給湯はほとんど全部を太陽熱によってまかなうことができた。一方, 仙台地域におけるモデル住宅実験(木造高気密・高断熱+給湯用ソーラーパネル+太陽光発電)のための基礎的な検討を行った。

(5) 地球温暖化抑制のための汚水・廃棄物処理処分システムの確立と評価に関する研究

地球温暖化防止行動計画では「二酸化炭素排出抑制対策」および「メタンその他の温室効果ガス排出抑制対策」として廃棄物・汚泥の資源化・再利用および適正処理, 余熱利用など, エネルギー利用効率が重要視されている。これらの廃棄物や汚水・汚泥処理にかかわる対策は都市構造や社会システム全体にかかわる問題であるがゆえに, その効果は極めて大きいと考えられる。本研究は, 温室効果ガスの発生対策として, 汚水・汚泥および廃棄物処理・処分システムを適正に構築することに加えて, 上流域での製品等の製造から廃棄に至る物質の流れの制御に着目し, その対策手法を開発し, これらの方策を温暖化抑制の観点から評価して, 普及・定着させる上での基礎的知見を得ることを目標としている。

本年度は, 汚水・廃棄物処理処分システムの各分野(要

素)を温室効果ガス排出抑制の観点から評価し適正化する方策を検討し, さらに, これらの適正化システム導入した際の地域全体としての抑制効果を試算・解析し, 地球温暖化防止対策への提言を行うために, 「適正な汚水・廃棄物処理処分システムおよびリサイクル導入による温室効果ガス排出抑制効果の評価に関する研究」の推進を図った。すなわち, 対象とするモデル地域として千葉県千葉市稲毛区の全8棟の660戸のマンションを選定し, 廃棄物の量とその規模とリサイクルの可能性ならびに排水処理施設での水質測定, 発生ガスの回収等の調査により汚水・廃棄物処理処分にかかわる温室効果ガスの発生過程, 発生量および投入エネルギー量等の現況を明らかにし, また, リサイクル法の対象となっている製品の使用・廃棄の現状と対策法についての基礎的知見を得た。

(6) 植物影響に関する研究

1) 温暖化による開花・発芽・紅葉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分析を行った。その結果, 月平均気温が1℃上昇すると, 全国平均でツバキが7.51日で, ウメは6.07日, タンポポは4.71日, ソメイヨシノは3.35日早く開花する。開花に影響する月平均気温が3℃上昇した場合, 関東以西の広い地域でのツバキの1月22日~3月2日までの30日間の開花地域が1月2日~21日の開花日となり, 南部で20日, 北部で30日早くなる。ウメは, 1月20日~2月28日までの30日間の開花地域が1月19日以前に開花日を迎えてしまい約30日開花日が早くなる。タンポポの3月11日~30日までの開花日が2月19日~3月10日と約20日早くなる。ソメイヨシノの3月27日~4月5日までの開花日が3月26日以前と約10日早くなる。月平均気温が高くなるに従って, 1℃上昇に対する早くなる日数は小さくなる。1℃上昇すると暖候期に開花するヤマツツジが2.6日, ノダフジが2.6日, アジサイ, サルスベリ, ススキなどは開花日の2ヶ月間および3ヶ月間の月平均気温との関係が深い。1℃上昇した場合, 春に開花するソメイヨシノ, タンポポより冬・夏に開花日を迎えるウメ, ツバキ, アジサイなどの種のほうがシフトする日数が大きく現れる。紅葉についてみても, 9, 10月の平均気温が1℃上昇した場合, 全国平均で4日前後遅くなる。しかし, 地域的には開花の早まりの程度がかなり異なる。

わが国における温暖化傾向については, 地域的に異なるため, 観測開始以来の関東地方と九州地方を例にとっ

て地域的な気温の上昇率に差を示す(表2)。桜(ソメイヨシノ)の開花日に最も関係の深い3月の経年変動をみると関東地方では平均で100年間に1.21℃上昇しており、東京が最も温暖化傾向を示し、2.55℃上昇し、銚子で最も小さく100年間に0.68℃上昇を示し、この約100年間の3月平均気温の平均値は6.98℃であるのに対して、最も暖冬年は1990年の9.44℃で平年値より2.46℃高く、桜の開花日は12日早く開花した。最も寒冬年だった1984年は4.51℃で平年値より2.47℃低く開花日は11日遅かった。3月平均気温では約100年間に約5℃の変動幅、開花日は平均で24日の変動幅を示した。関東地方では1℃上昇すると開花日の早まりは8地点平均で3.7日早くなることを示した。同様に九州地方の観測開始以来の約100年間についてみると、平均で1.06℃上昇している。最も温暖化傾向を示す地点は、福岡で100年間に2.2℃上昇し、宮崎が低く0.26℃上昇傾向を示し、九州地方は関東地方より温暖化傾向は少ない値である。九州地方におけるこの100年間で最も暖冬年(3月平均値)は、1990年で平年値より2.1℃高く、開花日は10日早く、最も寒冬年は1970年で平年値より2.2℃低く、開花日は7日遅く開花する。関東地方での最も寒冬年の1984年は平年値より1.5℃低い値を示し、1970年の次に寒い年であった。九州地方では1℃上昇すると開花日の早まりは10地点平均で2.9日と関東地方よりは低い値を示す。

2) 植生に及ぼす影響については、日本の植生分布を種レベルで解析するためのデータベースを開発した。このデータベースは以下のような3種類のデータファイルにより構成されている。

①植生調査表データファイル：環境庁の自然環境保全基礎調査の資料をデジタル化したもの、②メッシュコードデータファイル：5万分の1の地形図の図幅名、地図中の位置、および二次メッシュコード、③自然環境データファイル：年平均気温、最寒月平均気温、暖かさの指数、寒さの指数、年降水量、寒候期最大積雪深などが含まれている。

このシステムにより、以下のような解析が可能である。関心をもつ植物種の出現する植生調査表のピックアップ、分布図の作成、分布域の北限・南限の把握、住み分けの分析、分布を規定する環境要因の解析、温暖化が進行した場合のポテンシャルシフトの予測。

このシステムを用いて、温暖化影響の実験対象として

表2 温暖化する関東地方および九州における3月の平均気温と桜(ソメイヨシノ)の開花日との関係

	関東地方			九州地方		
地点数	8			10		
データ年 上段：気温 下段：開花日	1876-1990 1953-1990			1879-1990 1953-1990		
気温上昇率 (℃/100年)	1.21			1.06		
最も暖冬年 3月平均気温(℃) 桜の開花日(月/日)	1990年	9.44 3/22	+2.46 -12days	1990年	11.6 3/17	+2.1 -10days
暖冬年	1989年	8.40 3/24	+1.29 -10days	1966年	11.5 3/19	+2.0 -8days
最も寒冬年	1984年	4.51 4/15	-2.47 +11days	1970年	7.3 4/03	-2.2 +7days
寒冬年	1986年	6.65 4/06	-0.33 +3days	1984年	8.0 4/02	-1.5 +6days
平年並	1985年	6.98 4/03	0 0days	1986年	9.7 3/27	+0.2 0days
3月平均気温 最低値(℃) 最高値(℃)	4.34 9.38			5.6 12.0		
観測開始以降の3月 平均気温の地点平均	6.98℃			9.50℃		
桜の平均開花日 最大値・最小値	4/03 3/18-4/20			3/27 3/17-4/03		
開花の早まり (日/℃)	-3.7			-2.9		

いるオンタデおよびその近縁のイタドリ、オオイタドリを対象に解析を行った。出現地点の年平均気温は、イタドリ：9.5℃(平均値)±4.3℃(標準偏差)、オオイタドリ：7.4±2.8℃、オンタデ：0.9±1.4℃だった。この3種のなかで、オンタデが最も寒冷な地域に生育しており、また標準偏差が小さいことから温度的分布域が狭い範囲に限定されていることが分かった。したがって、オンタデは温暖化の影響を比較的受けやすいと推測される。

3) 前年度までの野外調査と施設実験により、富士山の2600m付近に生育しているオンタデの葉温は、30℃前後まで一時的に上昇すること、および、30℃(昼)/25℃(夜)の温度条件でオンタデを栽培すると成長が低下することが明らかとなった。本年度は、オンタデの生殖生長に及ぼす高温の影響を明らかにするために、温度条件が異なる3つの実験区(30℃(昼)/25℃(夜)、25℃(昼)/20℃(夜)、20℃(昼)/15℃(夜))区でオンタデを栽培し、花芽の形成を調べた。その結果、25℃/20℃区と20℃/15℃区のオンタデは花芽の形成が認められるものの、30℃/25℃区では花芽が認められなかった。したがって、オンタデの分布南限域である富士山の2600m付近に生育しているオンタデは、花芽の形成が抑制される高温に一時的にさらされていることが分かった。

(7) 健康影響に関する研究

IPCCおよびUSEPAの予測によると、温暖化による夏期の温度上昇によって、暑熱の著しい地域やヒートアイランド現象の著しい都市部において熱ストレスに弱い高齢者や成人病既往者の健康影響が危惧される。またWHOの子測にあるようにマラリアやデング等の動物媒介性感染症の発生域が拡大する恐れがある。

このため地球温暖化により増大する夏期の暑熱が高齢者と成人病既往者にどのような健康障害として反映するか、中国における疫学調査研究を日中共同で実施している。同時に夏期の気温上昇の予測に基づき、動物における細胞、組織レベルの暑熱による障害発生機構を解明し、人の健康リスクを予測するモデル実験を行っている。

さらにマラリアおよび媒介蚊の分布と地理的気象条件との関連を、中国南部における現地調査、沖縄における媒介蚊の分布の調査により明らかにし、温暖化によるマラリアの拡大の可能性を予測する研究を実施している。

まず、熱ストレスによる健康影響の研究については、地球温暖化により上昇する夏期の暑熱が人に対するどのような健康リスクとして反映するかについて、疫学的調査研究とモデル実験を行っている。中国の熱波についての調査結果、図12が示すように暑熱による障害が発生した時期は平均気温で30℃を超える日数が18日間連続しており、特に平均気温が数日連続して32℃を超えた時期に、熱中症等の健康障害が多発している。このためモデル実

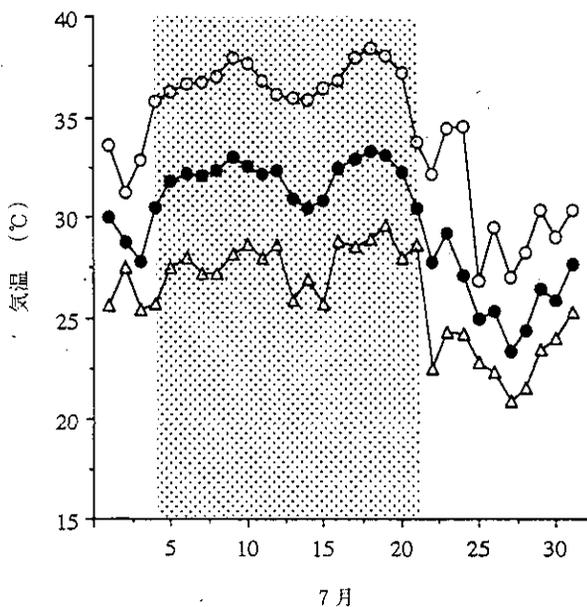


図12 中国南京市における熱波発生状況—1988年7月—
(○：日最高気温、●：日平均気温、△：日最低気温)

験としては30℃に加え、温暖化により上記の夏期の暑熱が3℃上昇した際の健康リスクの検討を行っている。暑熱下では深部体温が顕著に上昇するため、中枢神経系への影響が予測されるが、暑熱下では総睡眠に占める逆説睡眠の割合が、若齢動物に比べ高齢動物では有意に増加し、暑熱が睡眠の質を変えることが判明した。このため、暑熱は自律神経系の調節機能へ影響し、覚睡しやすい不安定な睡眠状態をもたらすことが明らかとなった。

さらに暑熱による臓器障害に関する組織化学的検討の結果、実験動物においては、深部体温上昇に伴い肝静脈周囲にある肝細胞の腫大と膨化変性が観察された。このような病理学的変化に伴い、活性酸素ラジカルによる顕著な細胞障害が引き起こされる。一方細胞障害の発現と並行して、図13に示すように肝細胞において、酸素ラジカル消去系酵素であるグルタチオンペルオキシダーゼ活性の顕著な誘導が引き起こされた。このことから、ある種の動物においては暑熱によるラジカル障害に対する生化学的防御機構が発現することが明らかになった。

IPCCやUNEPの予想では、地球温暖化による夏期の暑熱は増強すると予想されており、今後疫学調査とモデル実験により、暑熱による生体防御系、免疫系、代謝解毒系、中枢神経系への影響について検討し、暑熱による人の健康リスク増大の予測を行う必要がある。

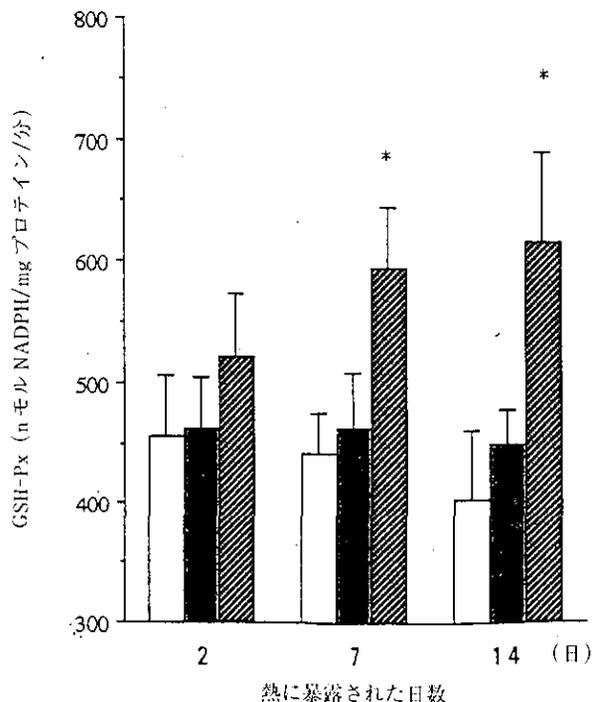


図13 暑熱による酸素ラジカルに対する生体防御系酵素の誘導
(□：25℃、■：30℃、▨：35℃、*：Pが0.05以下の有意差)

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、マラリアおよ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、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、および現在のわが国、特に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）および思茅（シーマオ）地域でマラリアおよび媒介蚊の実態調査を、向東地域において1年間にわたり継続調査し、マラリア流行と媒介蚊並びに季節および気象条件との関連を示すデータを収集した（図14～16）。

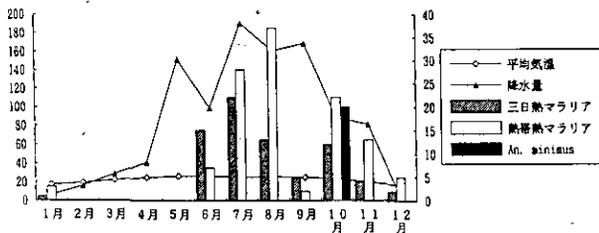


図14 気温、降水量およびマラリア、媒介蚊の季節変化
(マラリアについては6月より、媒介蚊については10月より調査開始)

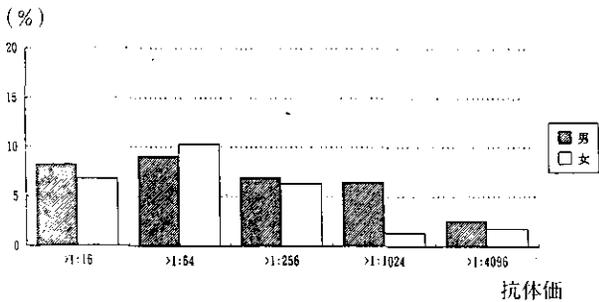


図15 男女別抗体価（熱帯熱マラリア）

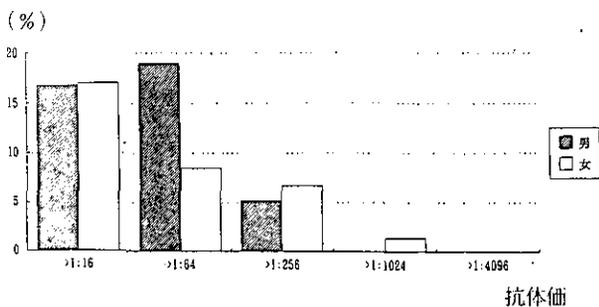


図16 男女別抗体価（三日熱マラリア）

次いで、わが国における媒介蚊の分布の現況に関しては、昨年に引き続き沖縄地区で実態調査を行った。マラリア媒介蚊であるコガタハマダラカ、シナハマダラカは現在、石垣島や宮古島、与那国島、西表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た。

今後、これらの調査データの充実を図るとともに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。

(8) 都市環境への影響に関する研究

昨年に引き続き、温暖化による都市廃棄物処分場への影響についても検討している。廃棄物処分場ガス抜き井戸からのメタン排出量と気象条件との関係を1年間にわたる連続観測結果の解析を行った。月平均値で見ると、冬季から春季にかけてはほぼ一定であったが、夏季から秋季にかけて増加した。仮説検定からも季節によりメタン排出量の平均値が異なることが示された。メタン排出量と気象条件との相互関係は、降水量が最も高く、続いて地温、気温となった。しかし、日射量や風速、気圧との相互関係数は低い値であった。

また、廃棄物処分場の最終覆土表面からのメタン放出量の測定も行った。覆土表面からのメタン放出量に最も強く影響を与えている気象条件は、覆土の含水率で、覆土が水分を多く含んで含水率が高い場合には、メタン放出量は非常に少なく、検知できないときもあった。逆に乾燥して含水率が低い状態のときには、表面にできた亀裂を通してメタンは多く放出された。また、地上気圧もメタン放出量に影響を与えており、ガス抜き井戸でみられたのと同じ現象が認められた。すなわち、メタン放出量は地上気圧が低下傾向にあるとき増加し、地上気圧が上昇傾向にあるときメタン排出量が減少した。また、メタンと二酸化炭素の組成比についてガス抜き井戸と最終覆土表面で、逆転減少がみられた。すなわち、ガス抜き井戸ではメタンが多く、最終覆土では二酸化炭素が多く含まれていた。このことから、覆土中にメタン酸化細菌が存在していることが示唆された。

廃棄物埋立処分場からの温室効果ガスの発生抑制対策として、埋立工法の検討も昨年に引き続き検討を行った。10年間にわたる実験データを整理し、埋立廃棄物中の易分解性有機物量を基準にして、好気性、準好気性および

嫌気性埋立工法における易分解性有機物当たりのガス発生率の経時変化を簡易な実験式で整理した。この式を、実際の廃棄物埋立処分場に適用し、二酸化炭素およびメタンガスの発生量を求め、これに熱吸収相対値をかけ、温暖化への寄与度を求めた。その結果、準好気性埋立工法の処分場は嫌気性埋立工法の処分場に比べ、温暖化への寄与度が約1/2に減少するとが予想された。

一方、温暖化の都市影響に関する個々の研究をとりまとめて、体系的な評価に持ち込む方法論についても、平

成3年度の文献レビューおよび平成2年度のシステム開発をもとに検討を深めた。

(9) 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	○佐竹研一・村野健太郎・畠山史郎・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・清水 明
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
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 淨
客員研究員	35名, 共同研究員 5名

[研究概要]

酸性雨問題の原因は人類による化石燃料の大量使用にある。化石燃料の使用に伴って生成した硫黄酸化物、窒素酸化物などの酸性物質が森林や湖沼などの生態系や文化財等の人工物に被害を与えているのである。歴史をふりかえってみると産業革命を契機として石炭の大量使用の始まった英国でいわゆる酸性雨被害は著しく、人間および自然に多くの犠牲が生じた。その後世界に広がった産業革命の波は酸性雨問題をはじめとするさまざまな公害問題を生みだした。そして、今や問題は地球規模の広がりを見せ、大気を経由し国境を越えて移送される酸性物質が他国に大きな被害を与えるようになってきた。その典型はスカンジナビア半島や中東部ヨーロッパまた北米で1960年代以後問題視されるようになった森林の枯損および湖沼、河川の酸性化による魚介類の死滅などで

ある。

わが国でも酸性雨問題に関する関心の高まりと共に、全国各地で雨水の化学成分等の調査が行われた。その結果全国各地で欧米とあまり変わらない酸性雨が降っていることが確認され、さらに東アジア特に中国における化石燃料の使用量が著しく増加しているところからその影響が懸念されるようになってきた。このような事情を背景とし、本酸性雨研究は平成2年度より開始された。

酸性雨問題は酸性物質の放出(生成)ー降下・沈着ー影響の諸過程、すなわち大気、森林、水、土壌などの自然生態系を構成する諸要素ならびにそこで行われる物質循環に深く関係しているため、本酸性雨研究において設定された研究課題はいずれもこれに関係したものである。

平成4年度はこの研究の3年目に当たり、以下に述べ

る研究計画のもとで大気、植物、水、土壌などに関してそれぞれ研究が行われた。

(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

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。

わ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二酸化硫黄や窒素酸化物が大気中でヒドロキシルラジカル等の過酸化物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) 酸性物質の吸着プロセスの研究

(2) 自然植物系における酸性雨の影響に関する研究

いわゆる“酸性雨”の植物への影響には、硫酸や硝酸等の酸性物質が植物の葉などに直接被害を与える場合と酸性物質が植物の生長に必要な生元素、例えばカリウムやカルシウムやマグネシウム等といった元素を土壌から溶脱させるか、あるいは植物の成長に有害な元素、例えばアルミニウムを土壌から溶出させることによる間接被害に大別できる。また、これらの被害を明確に把握するためには大気-植物-土壌系あるいは植物-水系における生元素および汚染・有害元素に関する生物地球化学的研究や、暴露チャンバー等を用いた実験植物系における

様々な植物生理学的研究が必要である。

したがって、本年度は昨年に引き続きフィールドおよび室内において次下に述べる研究を行った。

- 1) 樹木に含まれる生元素及び汚染元素の分布に関する研究
- 2) 自然植物群落における酸性・酸化性物質の影響に関する研究
- 3) 酸性霧及びガス状汚染物質の植物影響に関する実験的研究及びフィールド調査

(3) 酸性降下物の陸水、土壌への影響機構に関する研究

環境庁の第一次酸性雨調査の結果によるとわ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。わ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

(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、南西諸島(沖縄本島)、日本海(隠岐島)、および国内の適地(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 1992年2~11月までのデータでは、観測されたオゾン

濃度は0~91ppbの範囲で、平均値は29.1ppbである。オゾン濃度の特徴として、図1に示すように秋から冬にかけて比較的高くなる傾向が推察されるとともに、春先の3月頃には、一時わずかながら減少するものの初夏の5月に最大濃度の91ppbが観測され、一般的に海洋性気団が強く張り出す7~8月にかけて最も低くなるという季節変動がみられた。特に7月は0~37ppbの範囲でオゾン濃度が観測されたが、月平均値は11ppbと最も低い値を示していた。また、季節変動とともに各月とも日内変化がみられた。日内変化は夏季と冬季では出現パターンが異なり、夏季の7月は図2にみられるように午後8時頃からオゾン濃度が増加し始め2時頃をピークに20時頃から翌朝の7時頃まではほぼ安定した推移を示す単一峰パターンであるが、冬季の2月の場合は午後7時頃に濃度が最も低くなり、その後徐々に増加する傾向がみられ、14時頃から15時頃をピークに減少し、19時頃から23時頃まで安定した推移を示し、その後再び増加するとともに午前6時頃から減少する双峰パターンの傾向が推察された(図3)。

② 隠岐島における流跡線の解析

隠岐島では季節によりそこに到達している気団が異なることによって、観測される粉じんの組成が変化することが分かっているが、さらに詳しく気流を解析することによってより細かな情報を引き出すことができる。特に、大陸の中でもどの地域による影響が考えられるかや、桜島からの噴煙の輸送がどの程度の頻度で起こるか等を解析した。

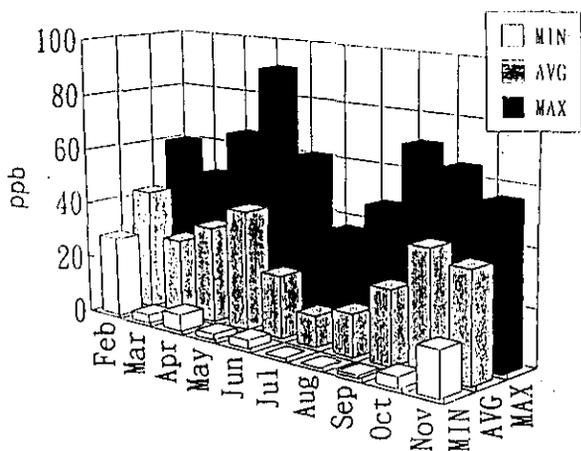


図1 辺戸における各月ごとのオゾン濃度推移(1992年2~11月まで)

流跡線解析は隠岐島について毎日9時スタートとして行い、それをセクターごとに分類しどの地域からの寄与がどの程度の頻度であるかを集計した。データとしては、1988年3月~1991年3月の3年間の気象庁の全球客観解析データを用い、約1000個の流跡線を解析した。流跡線は850hPaの等圧面上で行った。

3年間の集計を行って分類をした結果を図4に示す。分類は①中国北部、②韓国および中国中部、③中国南部、④西日本、⑤東日本、⑥ロシア、⑦分類不能の7個に分類し、月ごとに集計した。これによると季節ごとにその影響されている気流が異なることが細かく分かる。図からロシアを含めて大陸側からは、冬期には80~90%の頻度で春期には50~60%、夏期には30~40%の頻度で気流

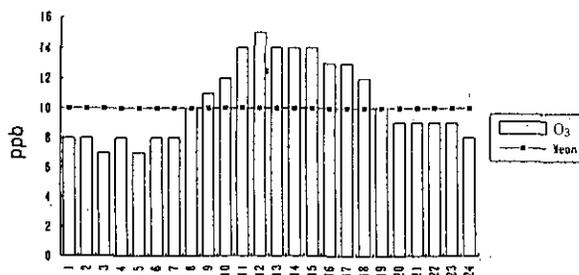


図2 7月のオゾン濃度日変化

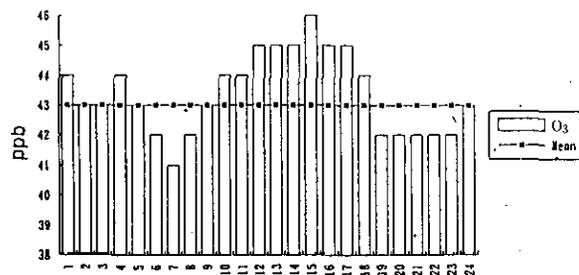


図3 2月のオゾン濃度日変化

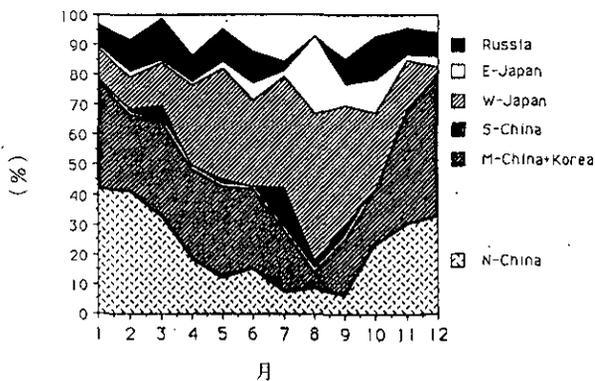


図4 各セクターからの気流の寄与

が影響していることが分かる。中でも北部中国からの気流は冬期に多いことが特徴であり、一方、韓国および中国南部からの気流は冬期以外に春期にも頻度が多いことが特徴となっている。ロシアからの気流の頻度には変化は少なく常に10%前後の値になっている。日本からは西日本からの影響が強く、東日本からの寄与は8月の20%が最大であった。流跡線を細かく検討し、桜島からの寄与が考えられる場合を数え上げて集計してみると、一般に春期や夏期に多く、月に数回数えられる場合もあった。桜島の噴煙が寄与する場合は特に硫酸塩の濃度は10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える場合が多く、月平均値にも影響を与えていることが推定された。したがって、隠岐島の汚染の長期トレンドを解析する際には、こういった状況を踏まえて行う必要がある。

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、台湾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1月下旬に開催した。会議は3日間で、第1、2日は各国の発生源インベントリー研究、モニタリング手法とそのデータが発表された。第3日は総合討論で細部の議論がなされ、今後も情報交換を密にするために「東アジアの酸性降雨ネットワークのためのアドホック作業部会」が設立され、定期的にワークショップを開催することが確認された。

3) IGAC/PEACAMPOT 航空機調査

NO_x 、 SO_2 の世界の三大排出地域といわれる欧州、北米、アジアのうち、アジアは今後も人口増加と工業の発展により大気汚染物質の排出量が増加し続けるものと考えられ、将来はこの地域が最大の排出地域となるものと予想されている。アジアの最東端に位置するわが国には、その結果として大量の酸性物質が降下するものと懸念される。しかし、いたずらに被害者の立場に立って解決を求めるのではなく、明確な科学的データに基づいて対策を検討し、必要に応じて技術的な援助を行うことが事態解決のために重要であるということができよう。

そこで、本研究では平成3年度より、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ている。本年度は国内のみの観測を行い、異なるいくつかの高度を飛行して、汚染質の空間分布を求めることを目的にした。

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、湿度も測定されている。なお使用航空機はMerlinIV（所属 昭和航空（株））である。

表1 観測項目および測定方法

測定項目	測定手法
オゾン	紫外線吸収法
NO_x	オゾン化学発光法
SO_2	パルス蛍光法
PAN	低温カラム濃縮法
硝酸、 HCl 、 NH_3	拡散スクラバー法
無機エアロゾル	ハイボリューム・サンプラー
粉じん (Al, Si, Fe)	ローボリューム・サンプラー
エアロゾルの形態	インパクター法
エアロゾル個数濃度	パーティクルカウンター

航空機調査は長崎空港を基地として済州島沖の東シナ海上空（11月8、10日）および出雲空港を基地として隠岐島西方の日本海上空（11月11、12日）で行った。前者では基本的には北緯32°15′東経127°（以下C点と呼ぶ）と北緯31°05′東経126°20′（以下D点）の間、後者では北緯35°20′東経132°30′（以下B点）と北緯36°40′東経132°30′（以下A点）の間をそれぞれ約10000、7000、4500、1500フィートの4高度で観測を行った。各コースを図5および図6に示す。ただし、雲を避けるため高度および飛行コースは場合に応じて若干の変更がある。

観測結果の一例として、日本海上空における SO_2 と O_3 のデータを図7および図8に示した。本年の観測結果では O_3 の場所および高度による変化は非常に少なかった。一方、 SO_2 の濃度分布は非常に興味深い変化を示した。図7の11月11日の観測ではB点付近で SO_2 の濃度が最も高く、かつ非常に鋭い分布を示している。風向が南寄りであったことも考え合わせると、本州のかなりローカルな汚染の影響を受けたものではないかと考えられる。一方、11月12日には逆に沖合いの海上A点で6 ppbを超える非常に高濃度の SO_2 が観測され、日本に向かって徐々に濃度が低下する幅広い分布を示している。A点での風向が西ないし北西であったので、このデータ

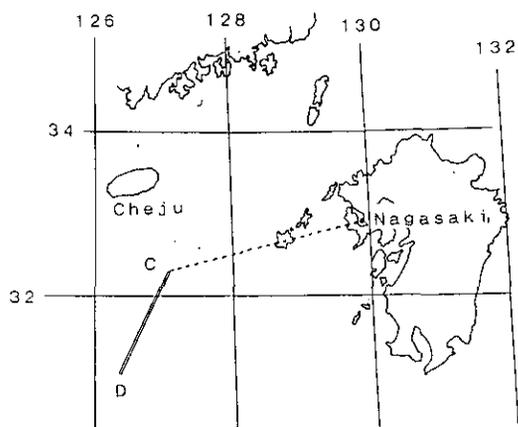


図5 東シナ海上空観測コース

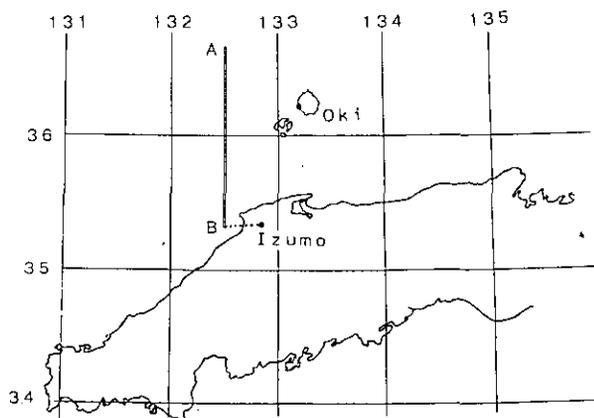


図6 日本海上空観測コース

は大陸からの強い影響を示しているものと解釈される。
 NO_x の分布もこれに近いものであった。
 また地上観測も同時に行われ、島根県隠岐と長野県八方尾根において集中的な観測が行われた。

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大きな影響を及ぼしている可能性がある。こ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きわめて少ない。本研究では平成2年度構築した、高速液体クロマトグラフー化学発光検出器の有機過酸化物分析システムの感度が低く、また安定性も低いことから、より高感度の分析法を使うため、蛍光法を導入した。また気相の過酸化物を捕集するため従来用いられていたバブリング法

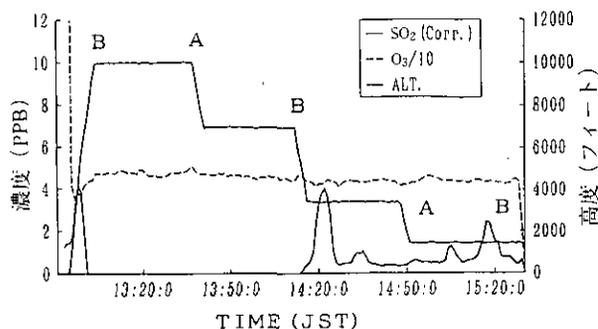


図7 11月11日の日本海上空における O_3 、 SO_2 濃度の高度分布

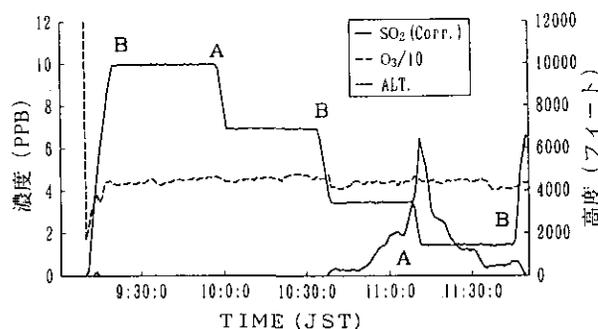
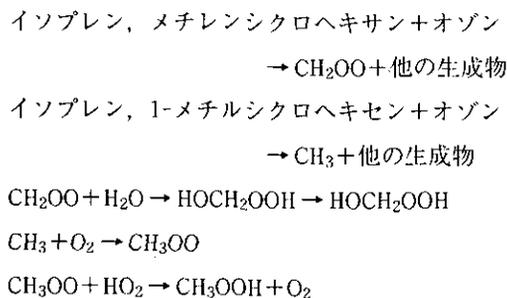


図8 11月12日の日本海上空における O_3 、 SO_2 濃度の高度分布

より捕集時間を短くすることのできるミストチャンバー法を用い、イソプ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 m^3 のエアロ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に示すようにイソプレンからは過酸化水素、ヒドロキシメチルヒドロペロキシド (HMHP, HOCH_2OOH)、およびメチルヒドロペロキシド (MHP, CH_3OOH) が検出された。また α -ピネン、 β -ピネンのモデル化合物として用いた1-メチルシクロヘキセンおよびメチレンシクロヘキサンからはそれぞれ過酸化水素とMHP、過酸化水素とHMHPが生成した。両者の置換基および二重結合の形状から次式のような反応機構が推定された。



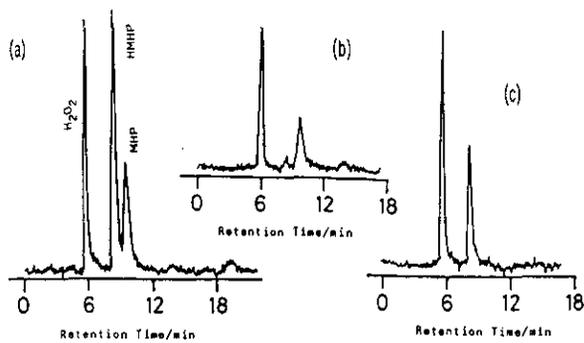


図9 オゾンとイソプレン(a), 1-メチルシクロヘキセン(b), メチレンシクロヘキサン(c) との反応によって生成した過酸化物のクロマトグラム

(2) 自然植物系における酸性雨の影響に関する研究

1) 樹木の外樹皮, 内樹皮, 形成層, 木質部に含まれる生元素及び汚染元素の分布に関する研究

樹木に含まれるカリウム, カルシウム, マグネシウム, リン, マンガン, 鉄, 銅, 亜鉛等の諸元素は樹木の生命を維持する上で必要不可欠なものである(生元素)。特にここに上げた諸元素は土壌の酸性化過程で溶脱を起こしやすい元素であり土壌中で酸性雨の影響を受けることが予想される。したがって, 樹木に含まれるこれらの生元素の量, 生元素間のバランス, その代謝に関する情報は樹木の健康状態を知る上で極めて重要であると考えられる。

本研究では酸性雨問題でしばしば取り上げられるスギに注目し, 日光から採取した樹齢約360年のスギの外樹皮, 内樹皮, 形成層, 木質部のそれぞれに含まれる生元素および汚染元素の分布に関する調査・研究を行った。特に, 樹木の形成層は細胞数層で構成されているにもかかわらずその細胞分裂によって樹皮を造る部分でもありまた木質部を造る部分であるところから, 樹木の健康状態を知る上で最も重要な部分であると考え, その生元素組成に注目した。また, 外樹皮は樹木が外界と接する場所であり, 樹木の汚染状態を知る上で重要と考え, アルミニウムや鉛などの汚染元素に注目して分析を行った。なお, 試料は樹皮の外側から内側に向かって木質部までおよそ0.15~0.3mm間隔でスライスし, それぞれの試料をテフロンポンプ法で硝酸ガスを用いて分解し, ICP-AES法で分析を行った。結果は, 一例を図10に示すように, 外樹皮, 内樹皮, 形成層, 木質部にそれぞれ含まれる生元素の量ならびに汚染元素の量には大きな差があった。マグネシウム, カリウム, リン, 銅, 亜鉛な

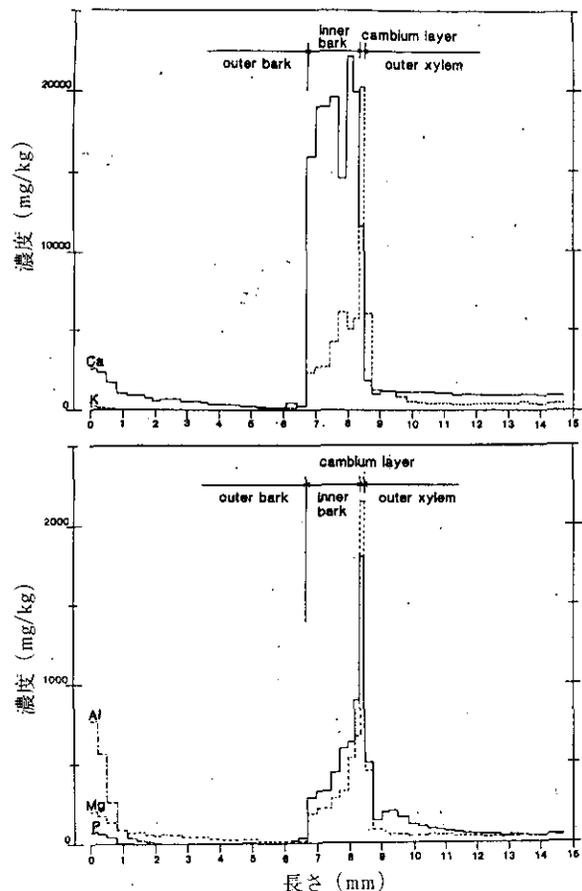


図10 スギの外樹皮(outer bark), 内樹皮(inner bark), 形成層(cambium layer), 木質部(xylem)に含まれるAl, Mg, P, K, Caの濃度(試料採取:日光)

どの生元素の量は外樹皮では少なく, 内樹皮で増加し, 形成層で最大値を示した。例えばその量は, Mg: 2160 $\mu\text{g/g}$, K: 20300 $\mu\text{g/g}$, P: 1800 $\mu\text{g/g}$ などの値であり, 外樹皮から木質部に向かっての各元素の変化には高い相関が認められた(Mg:P, $r=0.984$ $p<0.01$, P:K, $r=0.972$ $p<0.01$)。一方, カルシウムの濃度は内樹皮で最も高く, その量は1.6~2.2%に達した。また外樹皮に含まれるアルミニウムや鉛などの元素は外から内に向かってその濃度は急に減少し, 明らかに大気汚染によることを示していた。

以上の結果は内樹皮と形成層が樹木の健康状態(生元素の欠乏状態)を知る上で特に重要であること, 今後さらに研究を進めてゆく必要があることを示していた。

2) 樹木葉面付着エアロゾルに関する研究

酸性および酸化性物質による植物被害は通常, オキシダントなどの大気汚染物質の生理活性への直接作用, 酸

性・酸性物質によるワックス層脱離とそれによる栄養元素の溶脱、土壤の酸性化のほか、大気乾燥化や地下水レベルの低下による水ストレスなども複合した結果として発現すると考えられている。しかし、これら以外にも植物活性を低下させているいくつかの要因が考えられる。葉面に多量に付着したエアロゾルもその一つである。この観点から、葉面付着エアロゾルを単離し、元素組成を詳細に分析して、その地域特性や大気汚染指標としての有効性を検討すると同時に、植物生理活性への影響を明らかにすることを目的とした。

人間活動の影響の程度が違う全国の地域で、数種の樹種から植物葉を採取した。植物葉は、葉齢で選別し、水で十分洗浄（超音波処理、80 W、1分）した後、乾燥した（40～50℃、30分）。付着エアロゾルは、この乾燥葉試料をクロロホルムで洗浄して（5 g葉/20 ml、15秒）溶離し、クロロホルム層は少量の石英ウールでろ過した。このようにして集めたエアロゾル試料は、石英ウールごと中性子放射化およびICP分析に供して含有元素を定量した。

図11は、環境の異なった3地域のスギ葉から採取したエアロゾルの元素組成を、Sc比を用いて地殻中の元素組成と比較したものである。元素組成は採取地域に関係なく一定のパターンを示し、元素は、地殻組成とほぼ1:1の関係にあるグループと葉面付着エアロゾルに特異的に濃縮されているグループに大別された。前者に属する元素は土壌粒子などに由来するものであり、後者は主に人間活動によってエアロゾルに富化された元素であると考えられる。葉重量当たりの付着エアロゾル量を同一

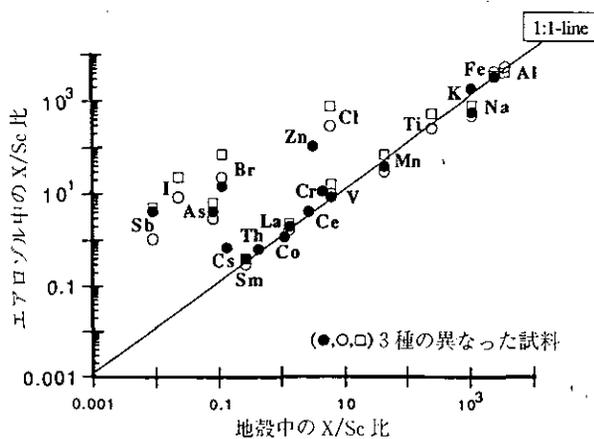


図11 スギ葉付着エアロゾルの元素組成と地殻元素組成との比較

地域の樹種間で比較した結果、針葉樹で明らかに多く、広葉樹のほぼ5倍量に達した。このことから、針葉樹は付着エアロゾルの影響を受けやすいと推測できる。また、針葉樹の付着量は、限られた試料での結果であるが、スギ>ヒノキ>アカマツ>ヒマラヤスギの順であった。さらに、エアロゾルの付着量は樹高が高くなるほど増大する傾向にあることも明らかとなった。スギの当年葉について、エアロゾルの累積付着量を1年間を通して経時的に追跡した結果、春から夏にかけての増加は緩慢であったが、9月以降急激に増加した。秋から冬にかけて、大気が乾燥し、エアロゾルが葉面に静電気力で付着した可能性がうかがわれる（詳細は現在検討中）。葉面付着エアロゾルに富化されていた元素の中、Sbは富化率が高く分析精度も比較的よいので、人間活動の影響を評価するのに最適な元素であると考えられる。図12は、スギの付着エアロゾルについて、Sb/Sc比を屋久島と関東地方で比較したものである。人間活動の影響が関東地方で顕著であることを示すと共に、Sb/Sc比は人間活動のよい指標となることを裏付けている。今後詳細な検討を要するが、付着エアロゾルとそこに蓄積されたSb、As、Znなどの有害元素が植物活性を阻害している可能性もある。

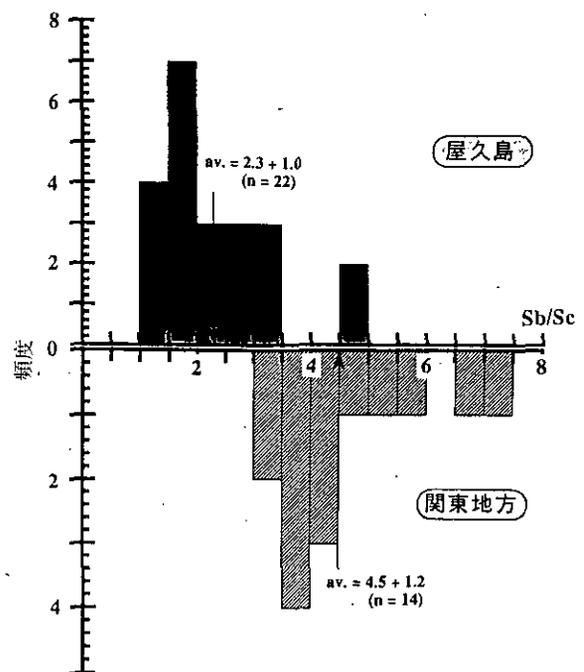


図12 スギ葉付着エアロゾル中Sb/Sc比の屋久島と関東地方での比較

3) 酸性霧及びガス状汚染物質の植物影響に関する実験的研究及びフィールド調査

硫酸や硝酸を含む酸性霧の植物影響を調べるため、硫酸：硝酸をモル比で1：1の割合とした水溶液を作成し、pH5.6, pH3.0, pH2.5, pH2.0の各条件下でスギおよびヒノキについてホオグチャンパーを用いて実験を行った。実験初期および4週間後に調べた生長量、クロロフィル含量、光合成活性等の結果、特にスギよりもヒノキにpHが低いほど影響が顕著に現れた。しかし、スギでは個体差が大きく、一定の傾向がみられなかった。また、酸性雨関連化学種として注目されるオゾンに関して、人工光型環境制御室を用いて実験し、植物中の脂質の組成が影響を受け、正常葉には存在しないトリガラクト脂質等数種の脂質が増加していること等が確認されその生合成経路を調べた。

以上の研究に加えて、野外における森林衰退の状況を把握するため関東地方では土壌の酸性化がスギ苗の生長に及ぼす影響を、関西地方（兵庫県）では樹幹流、林内雨、林外雨の研究や地衣類に含まれる化学成分などの研究を、また、九州地方（福岡県）ではモミ枯れに関連してそれぞれ基盤岩石の異なる宝満山～三郡山、および英彦山の土壌と渓流水について調査を行い、母岩の影響評価を行った。

(3) 酸性降下物の陸水、土壌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・土壌生態系への影響に関する研究

「日本でも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もつ河川、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データロガーを用いた。また、土壌動物への影響に関する文献調査を行った前年末の段階で、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分かった。さらに裾の一部を除きほぼ全島が花崗岩で、酸性物質の総負荷量も多いといわれている屋久島の土壌浸透層の調査を行った。

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。屋久島では風化の進行と豊富な樹林により頂上付近の一部を除けば酸性化の心配は少ないと思われた。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月の終わりから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。

北アルプス北側流域において、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、緩衝能が小さいことが確認された頂上付近では、雪はむしろ塩基性で、酸性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。屋久島の調査結果は、現在考察中である。

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が目安である。母岩の塩基性がより大きい流域では予想どおり河川・湖沼水のアルカリ度は大きく、当面酸性化の心配はない。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にはさらに詳細な研究が望まれるが、北欧・北米の被害顕在化地域に比べ余裕があると思われるので、アジア全体を見渡した迅速かつ適切な発生源対策を重視すべきであろう。

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

日本では河川や湖沼の酸性化が顕著化していない主たる理由は、適度の保水性と浸透能をも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な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、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不かく乱試料を採取し、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土壤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填したポーラスカップの機能試験を行った。南九州に分布するシラスおよび桜島の風化溶岩層については、土壤水との反応、鉱物表面でのイオン交換反応、コロイド粒子との反応などの早い反応だけが進行し、鉱物の風化・変質などの遅い反応は短期的な土壤の緩衝機構にほとんど寄与しない。年間降水量2000mmの地域でpH4の酸性雨が降り続いたとき、厚さ50cmの土壤（シラス）が地下水をpH5以上に保てる期間は、20～45年間と計算された。一方、桜島の火山灰にはpH5以上に保つ緩衝機能はないことが分かった。

（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

—硫黄酸化物および窒素酸化物の排出制御手法—

前年度は現在、世界中で実用化（テスト中のものも含めて）されている①燃料からの硫黄分の除去方法、②排ガスからの脱硫技術、③燃焼方法の改善によるサーマルNO_xの生成抑制技術および④排ガスの脱硫装置を網羅しそれらの特徴、問題点を調査した。本年度はこれらの中から発展途上国とくに中国で実用化しうるシステム技術を選定した。また、中国での状況を見極めるため重慶市、上海市および北京市の工場、発電所等を調査した。

1) 燃料からの硫黄分の除去手法

石油製品からの硫黄分の除去技術はすでに1980年代後半に実用化されており、わが国では重油中の硫黄分は0.1%以下のものが使用されている。中国では高硫黄含有石炭の使用比率が高いため、石炭からの硫黄分の除去技術の開発が要である。微生物による石炭中の硫黄分の除去技術が現在開発されている。またテスト段階であり、種々の問題点が残されているが、実用化されれば中国では有効な方法であると期待できる。

2) 排ガスからの脱硫技術

燃焼排ガスからのSO₂の除去技術は数多くの手法が開発され実用化されているが、中でも湿式法の石灰—石こう法が最も多く用いられている。湿式法であるため排水処理システムが必要であり、そのための設備費、維持費が必要となる。副産品である石こうは純度も高く建築材料として、わが国では用いられている。重慶市の石炭火力発電所でわが国と同種の高性能の湿式法による石灰—石こう法に基づく排ガス脱硫システムが数年前に設置されているが、維持費等の問題からかほとんど使用されていない。重慶市では副産品の石こうも利用されない。中国での実用化を検討する場合、地域の実情を実態調査して効果的な技術を導入することが必要である。重慶市は人口1,400万人を有する中国最大の都市であり、周辺部は農業活動が盛んである。アンモニア水溶液吸収法による脱硫過程では副産品として肥料となる硫酸が回収できる。もし安価なアンモニア供給体制が可能ならば、重慶市では有効な方法であると期待できる。また、市街地を流れる長江、嘉陵江はpHの高い水質であり、そのまま用いてもある程度の脱硫は可能と考えられる。排水処理システムにどの程度の負担が必要かによっては有効な手法となる。北京市等においてもそれぞれ地域の実情に合わせた脱硫技術を検討することが重要である。

3) 燃焼方法等の改善によるサーマルNO_xの制御

窒素酸化物は、硫黄酸化物と異なり燃焼中のN分の酸化だけでなく、高温燃焼によるサーマルNO_xの比率が極めて高い。したがって、サーマルNO_xの生成を抑制する技術が必要である。サーマルNO_x抑制のためにわが国では①低NO_xバーナー、②2段燃焼法、③排ガス循環法が用いられている。中国でも本方法の利用は期待できる。

4) 排ガスからの脱硝技術

燃焼排ガスの脱硝技術も数多くあるが、脱硫装置ほどは用いられていない。酸化法、還元法ともに高価であり、現状では発展途上国へ推薦できる技術は見あたらない。

5) 脱硫、脱硝同時処理技術

石炭の流動層燃焼方法による脱硫、脱硝の同時処理システムはわが国ではあまり用いられていないが、アメリカ合衆国ではかなり以前から実用化されている技術である。流動層内へ石灰あるいはアンモニアを吹き込むこと

によって脱硝の効率を上げ、同時に脱硫も可能にしている。効率もそれほどよくなく、副生品も利用できないが、運転管理を上手にできれば、排水処理等が不用であるこ

となどから発展途上国向きの脱硫、脱硝技術として期待できる。

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・功刀正行
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
土壤環境研究室	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

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。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。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、人為的化学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。

（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される汚染物質（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同時に、そこに含まれる汚染物質濃度は局所的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いく必要がある。このような経緯から、地球環境研究総合推進費の課題「衛星可視域のグローバルマッピングによる広域海洋環境変動に関する研究」を4研究所3大学で分担し、当研究所では、地球環境研究センターの日韓フェリーモニタリングデータ、乗船調査による海洋実測データ、衛星データ及び環境要素間の関連を明らかにする部分を受け持った。

【研究成果】

(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

1) 海洋物質循環の変動機構に関する研究

海洋生態系を通して生物化学過程に起因する海洋物質循環機構を明らかにするため、海洋メゾコズムを用いて自然海域に存在する海洋生態系をそのまま捕獲し、 ^{13}C 安定同位体を用いて無機態炭素及び有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。実験はメゾコズム内の0.5m、10m層からサンプリングした海水を4.5lの透明ボトルに移し、無機態炭素として $^{13}\text{C}\text{-Na}_2\text{CO}_3$ 、有機態炭素として $^{13}\text{C}\text{-Glucose}$ を添加し4時間インキュベーション後粒径分画を行い、その炭素同位体比計測を行った。0.5m層の色素量の変遷から実験期間中にケイ藻から渦ベン毛藻への種の変遷があった。また動物プランクトンに関しては、前期には*Paracalanus parvus*、*Oithona davisae*などの橈脚類、後期には*Doliolletta gegenbauri*が支配的であった。

DIC→植物プランクトン→動物プランクトン経路の炭素移動量は以下のとおりである。

①0.5m層における光合成は活発で期間を通じて100~300 $\mu\text{gC/l/4h}$ と高いC-uptake（一次生産）を示した。Chl.a濃度の径日変動はC-uptakeに対して位相差（1日遅れ）を有して追従しており、光合成活性が活発な日の次の日に植物プランクトンの現存量が増加していたことを示している。一方、10m層では一次生産量は0.2~0.5 $\mu\text{gC/l/4h}$ であった。

②動物プランクトンの存在する画分には0.5m層では0.2~3 $\mu\text{gC/l/4h}$ 、10m層では1~10 ngC/l/4h のC-uptakeが定量された。

③0.5m層において、橈脚類が卓越した実験前半には動物プランクトン画分のC-uptake量と植物プランクトン現存量との間に関連が見られた。また実験後半、*Doliolletta gegenbauri*由来と考えられるPOCが100 μm 以上の画分で大幅に増加し、同時にこの画分のC-uptakeも増加した。一方10m層において、100 μm 以上の画分では*D. gegenbauri*優占期に0.5m層と同様なPOCの増加が見られたが、C-uptakeには増加が見られなかった。

一方、DOC→浮遊性細菌→微小動物プランクトン→動物プランクトン経路の炭素移動量は以下のとおりである。

④0.2 μm （浮遊性細菌類存在）画分に DO^{13}C 起点の炭素がuptakeされた量は0.5m層で1~5 $\mu\text{gC/l/4h}$ 程度、10m層で0.6~2 $\mu\text{gC/l/4h}$ 程度であった。また、その量の径日変動はDIC起点経路（光合成経路）で見られたような大きな変動幅を有するものではなかった。

⑤微小動物プランクトンの存在が推定されるGF/C画分では、0.5m層で2~7 $\mu\text{gC/l/4h}$ 、10m層で0.7~1.2 $\mu\text{gC/l/4h}$ 程度であった。

⑥動物プランクトンの存在する100 μm 以上の画分では、0.5m層で0.02~0.1 $\mu\text{gC/l/4h}$ 、10m層で5~50 ngC/l/4h 程度であった。

本実験結果より、海洋生態系中を移動する炭素量をDIC起点の経路とDOC起点の経路とで比較すると、0.5m層では光合成活性が非常に高くDIC利用経路の方が圧倒的に優勢だが、10m層では両経路において移動する炭素量はDOC利用経路の方が優勢になりうることが判明した。

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

平成元年12月23日に南極海域のエンダビー沖海域ケルゲレン海台にて動力式柱状採泥器により採集した柱状試料GC1002について深さ方向に10cmごとに2cmの厚さで試料を採取した。63 μ mのフルイにかけ、分離された63 μ m以上の粗粒粒子中の有孔虫（浮遊性と底生性を分離、分画）を実体顕微鏡で分画した。また、凍結乾燥した試料の中性子放射化分析を行った。乾燥重量当たりの有孔虫個体数の鉛直分布は中性子放射化分析より得られたCa分布をよく説明していた。中性子放射化分析により得られた核種間の鉛直分布の相関解析を行った。希土類元素の鉛直分布は相互に高い相関をもち、Fe、Al、Cr、Se、Co、Rb、Na、Mnなどは主にclayに含まれると考えられ相関がよい。Caはほとんどすべての元素と負の相関を示し、Caが生物遺骸に由来すると示唆された。

(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された汚染物質（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行く。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、並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することを目的とした。

動物プランクトン試料は、1986~1992年の7~8月に、日本近海に設けられた測線（海流を横断するように設けられた5測線、内湾域測線、及び沿岸主要航路上測線；昭和61年度日本近海海洋汚染実態調査、昭和62年3月参照）上で、ORI ネット（0.328mm目）の水平曳きを行い、海洋表層（水深150以浅）から採取した（なお試料採取は、環境庁水質保全局が新日本気象海洋（株）に委託した「日本近海海洋汚染実態調査」の中で実施した。）。採取した試料は、直ちにXX13ネット（0.095mm目）に移してゴミなどを取り除いた後、0.01Mアジ化ナトリウムを含む0.5Mギ酸アンモニウム溶液で洗浄・滅菌して半凍結状態（-4℃）で実験室に持ち帰った。持ち帰った試料

は、遠心分離またはフルイを用いて0.5Mギ酸アンモニウム溶液で充分洗浄した後、凍結乾燥して分析試料とした。また、試料の一部は実験室に持ち帰った後、実体顕微鏡下で種ごとに分別して、上と同様に乾燥試料を調製した。

乾燥試料は、中性子放射化、ICP及び原子吸光などで分析して、最大32元素の濃度を定量した。中性子放射化はコンパレータ法で行った。ICPと原子吸光分析は、試料をテフロン容器を備えたステンレス製高压分解ポンプを用いて硝酸または硝酸+フッ酸（2:1）で分解して溶液試料を調製して行った。分析した元素は、Na、Mg、Al、P、K、Ca、Sc、Ti、Cr、Mn、Fe、Co、Cu、Zn、As、Se、Br、Cd、Sb、Cs、Ba、La、Ce、Sm、Eu、Tb、Yb、Hf、Ta、Pb、Th、Uである。

図1は1990年に外洋で採取した動物プランクトン（多種混合）6試料について、海水濃度を基準とした元素の濃縮係数（ CF_{sw} ）の平均値を海洋での元素の滞留時間（ τ_R ）との関係で示したものである。プロットの変動は二桁に及ぶが、ほぼ-1の勾配のlog-log直線性が成立する。現在この法則性の意味は明らかになっていないが、元素が海水から除去される過程で動物プランクトンが重要な役割を果たしている証拠であると考えられる。

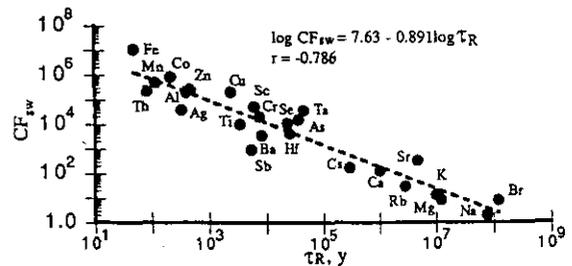


図1 外洋動物プランクトン（多種混合）試料についての CF_{sw} と τ_R の関係

図2aでは、同一の試料について、 CF_{sw} と τ_R の積を CF_{sw} との関係で示した。積は、 CF_{sw} が7桁の変動をするにもかかわらず、ほぼ一定値を示した。 $\tau_R \times CF_{sw}$ は36、 $100 \times CF_{rw}$ （ CF_{rw} は元素の河川水中濃度を基準にした濃縮係数）で与えられるので、動物プランクトンに含まれる元素は河川水中濃度に関してほぼ一定の濃縮度を示すといえる。この新しい規則性は動物プランクトンの汚染度を評価するよい指標となる。図2bは、東京湾で採取したプランクトン（多種混合）についての結果であ

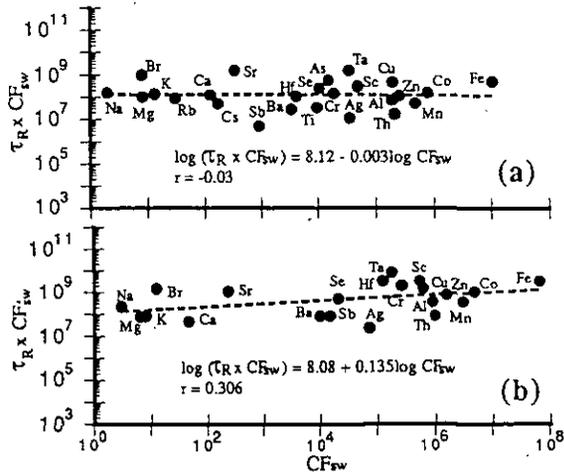


図2 外洋 (a) と東京湾 (b) の動物プランクトン (多種混合) 試料についての $T_R \times CF_{sw}$ と CF_{sw} の関係

る。プロットは、外洋のプランクトンの場合とは異なり、正の勾配 (+0.135) を示している。種別に分けた試料でも、*Euphausia* sp. や *Megalopa* で正の勾配を示すものがしばしば見いだされた。これらの試料では亜鉛などの重金属濃度が顕著に高いことから、明らかに採取海域の汚染を反映したものと推測される。試料はフルイなどを用いて十分に洗浄しているため、汚染元素はプランクトンの生体組織あるいは消化管に取り込まれて存在するものと考えられる。いずれにしても、図2 a, b のプロットは動物プランクトンの汚染度を評価するよい手法であることが示唆された。

(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

1990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、1991年度末に神戸と釜山間を結ぶフェリー「檀皇」に設置された。1991年度、1992年度には同船への乗船調査を行い、植物プランクトン属レベルの同定・計数・代表的なサイズの計測、レーザーによるプランクトンサイズスペクトルの計測 (近畿大学への委託による) 海水溶存 CO_2 分圧の計測を行った。

図3は、1992年3月と7月における釜山-神戸間の pCO_2 、水温、pH、蛍光光度 (FI) を示す。これによれば、3月は、植物プランクトンの春季ブルーミングのため、

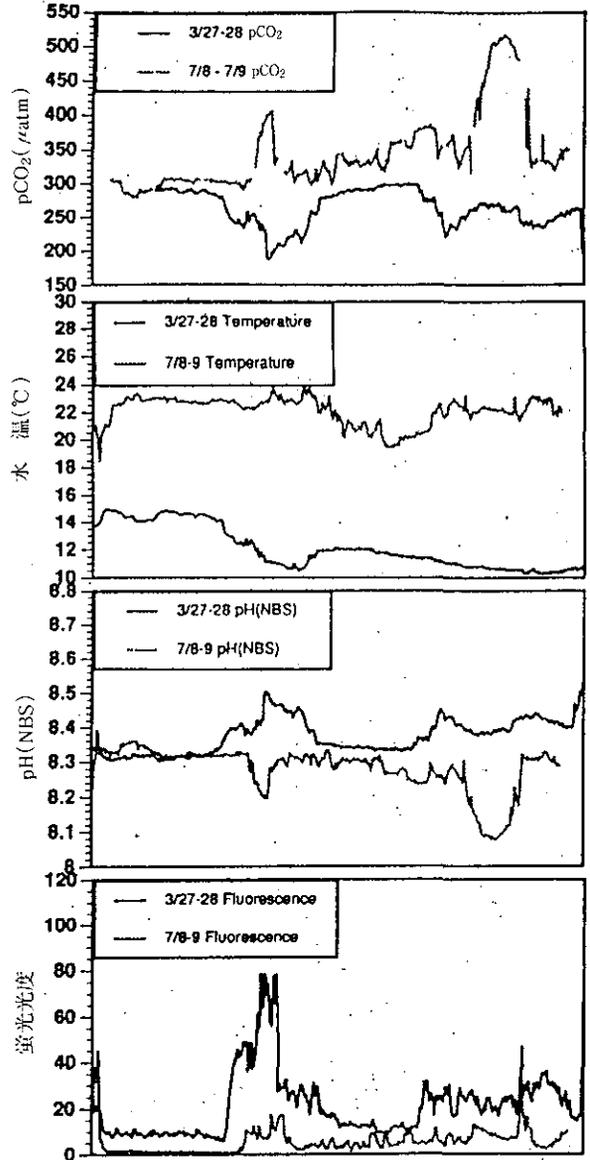


図3 日韓フェリーの乗船調査による pCO_2 、連続無人計測による水温、pH、蛍光光度 (ほぼ植物プランクトンバイオマスに対応) 実線は1992年3月27~28日、点線は7月8~9日の観測データを示す。

蛍光光度のレベルが全体的に高く、空間的な偏差も大きい。そして、 pCO_2 と蛍光光度がほぼ逆相関を示す。このことから、植物プランクトンの光合成がブルーミング時において海水の pCO_2 を下げていることが示され、しかも、植物プランクトンの空間分布に応じて、 pCO_2 も顕著な空間分布を示すことが分かった。7月には、栄養塩の枯渇によりブルーミングが終了していたため、蛍光光度のレベルは低く、 pCO_2 との逆相関は3月ほど顕著ではなかった。7月には、釜灘東部で pH が相対的に 0.2 低い領域がみられた。また、この領域で海水の pCO_2

pCO₂が高くなり、大気のCO₂分圧を越えていたことが分かった。原因については今後詳細な議論を必要とするが、同海域は陸水の流入による影響が比較的小さいため、海底に堆積した有機物が分解し、低pH、高CO₂の海水が形成され、鉛直混合で表層に上がってきたことが一因と考えられる。

このような観測例から、植物プランクトンバイオマスの時空間変動が海洋環境変動の1つの指標になることが示され、1994年から稼働するSeaWiFS衛星センサーデータの解析が有力な手段となることが考えられる。ただし、pH、塩分、栄養塩などのデータの時空間分布も考慮するべであり、定期航路による海域の連続計測の併用が重

要な要素となることが示唆される。

衛星による植物プランクトンバイオマスの推算は、可視光の輝度スペクトルに準拠しており、フェリーでは蛍光光度を用いている。ともに巨視的な指標であるから、バイオマス内訳の概要を明らかにしておく必要がある。

図4は、植物プランクトンの分類・計数・サイズ計測値から、Strathmann (1967) の経験式により炭素量を算出しサイズ別、網別に示したものである。これによれば、対馬海峡のような大陸棚性外洋では2 μm以下のラン藻類がほとんどであり、これに対し瀬戸内海東部などの内海域では、ケイ藻や渦ベン毛藻などが多く、しかもサイズが10 μm以上のものが多いことが確認された。

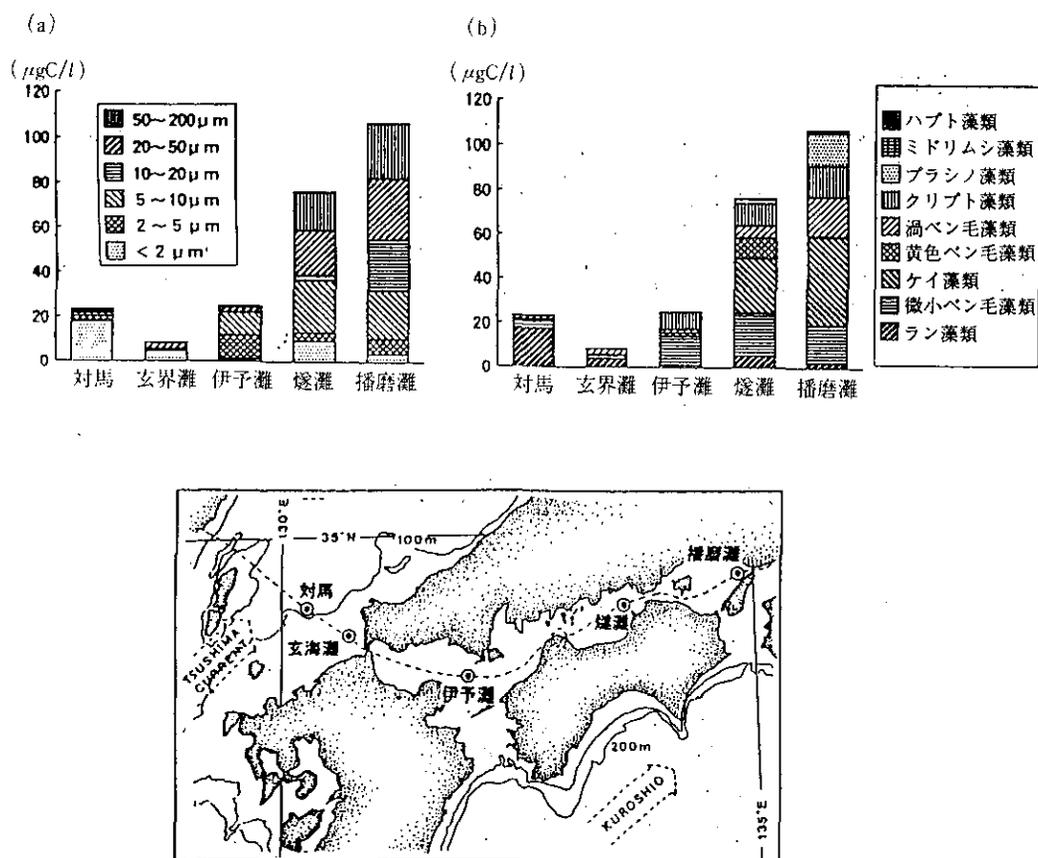


図4 植物プランクトンのバイオマス量のサイズ別 (a)、網別組成 (b) (分類、計数値から、Strathmann (1967) の経験式により算出した) およびサンプリング地点

2.6 熱帯林の減少に関する研究

〔研究組織〕

生物圏環境部	
部長	安野正之
上席研究官	古川昭雄
地球環境研究グループ	
森林減少・砂漠化研究チーム	○可知直毅・宮崎忠国・奥田敏統
野生生物保全研究チーム	○椿 宜高・高村健二・永田尚志
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	乙間末広
科学技術庁特別研究員	木村勝彦・藤間 剛
共同研究員 2名	

〔研究概要〕

我々が推進している熱帯林の研究は、「1. 熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究」、「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」、「3. 熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究」、「4. 熱帯林生態系の修復に関する研究」の研究課題よりなり、国立環境研究所、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が中心となって推進している。一部の研究は、北海道大学附属低温研究所、東京大学農学部、京都大学農学部、九州大学理学部、愛媛大学農学部、大阪市立大学理学部と自然環境研究センターの協力を得て行っている。

（1）熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究

近年における世界各地での森林の急速な減少は、森林資源の枯渇のみではなく、そこに生息する生物種の減少をまねき、回復不可能の段階にあると危惧されている。特に、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しているといわれている。現在のところ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く、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する知識が研究の基盤として必要である。このような観点に立ち、本研究においては、複雑な階層構造で知られている熱帯林構成樹種の群集動態、

そのような樹種の成長様式、構造を決めるのに重要な役割を果たしていると考えられる動物と昆虫の群集動態に関する基礎調査を行う。

（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。一度減びた種は、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。以上の観点に立ち、本研究では熱帯林の階層構造の形成機構を解明することを目的として、樹冠を構成している主要な植物種の環境適応機構を生理生態学的手法を用いて明らかにする。また、熱帯林内に設置されている観測塔を用いて実際に樹冠部の樹木葉の生理生態学的特性を調査する。さらに、生活史から見た動植物もしくは同一生物種間の相互、競争関係、熱帯林を構成する樹種の遺伝要因の遺伝学的解析によって多様性を支配している要因を明らかにする。このようにして得られた知見は、将来、野生生物種の保全をいかにすべきかの指針を与えるものと考えられる。

(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CO₂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、熱帯林およ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

この研究で目指していることは、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、熱帯林生態系のも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。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。

[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) マレーシアの丘陵フタバガキ林の構造

①はじめに

複雑な構造を持つ熱帯林生態系を理解するためには、単なる記載的な研究や特定の現象に注目した研究だけではなく、森林構造を作る森林動態のプロセスとしての相互に関連した、さまざまな過程を対象として総合的な研究を行う必要がある。このために、マレーシア・セランゴール州のセマンコック森林保護区(北緯3°40'東経

101°50', 標高約500m)の丘陵フタバガキ林に長期観察をめぐして6haの面積永久調査区を設定して各種調査を実施した。

②調査方法

調査枠は尾根、谷の地形要素を含む部分を選び、細かい地形を把握するためにトランシット・コンパスを用いて10mメッシュでの測量を行った。

基本的な調査として、調査区内の胸高直径5cm以上の全木本個体についての直径、位置の計測および種の同定を行い、また、6ha内に均等に配置した300個の1×1mおよび1×4mの重ね枠の中でそれぞれ、すべての木本実生、樹高20cm以上の稚樹について種同定、樹高測定を行った。実生、稚樹に関しては、成長、枯死、新規加入の過程を明らかにするために2カ月に1回の割合で繰り返し測定を続けている。

さらに中央の2haの部分に面積0.5m²のリタートラップを100個設置して、毎月1回内容物を回収している。回収されたリターサンプルは、花、果実、葉、枝その他に分けて乾燥重量を測定し、花、果実については種(タイプ)ごとに分けて個数、重量を、葉については量が多くて同定が比較的容易な約30種について種毎に重量を測定している。

③結果

この研究で得られるデータは多岐にわたり、個々の過程を調べるためには多くの人手と時間を要するため、森林動態の全体像をつかむための解析はまだ行われていない。このため、ここでは現在までに得られたデータのうち直径5cm以上の個体のセンサスで得られた森林構造の概要および、リタートラップで得られた個々の種の落葉パターンについて結果を示す。なお、6ha全域の種のデータが出そろっていないため、ここで示したのはリタートラップを設置した2haのコアエリアのデータのみを用いた結果である。

[森林構造]

2haの調査区内に出現した直径5cm以上の個体数は1930、種数は約300種であった。森林の現存量に相関の高い胸高断面積合計(Basal Area)は48.3m²/haに達し、熱帯の低地林や温帯域を含めた広葉樹林としてはかなり大きな値である。優占種は個体数で8%、胸高断面積合計で40%を占めたフタバガキ科の*Shorea curtisii*であった。このように特定の種が強く優占することは低地フタバガキ林では普通みられないことで、標高のやや高い丘

陵林の一つの特徴であらう。

個々の種の更新状態を反映すると考えられる直径分布を見ると、*Shorea curtisii*をはじめ主要な構成種は小径木ほど多いL字型の分布を示すものが多く、調査地域の森林では優占種の後継樹が育っていて、長期的に見て比較的安定した森林であることが示唆された。

[落葉パターン]

図1に主要な構成種の1992年4月～1993年3月までの11カ月間の落葉パターンを示した。全体として4月から6月の落葉量が多いが、種によって異なるパターンを示す。また、図には示していないが同一種でも全く異なるパターンを示す場合がしばしばあった。

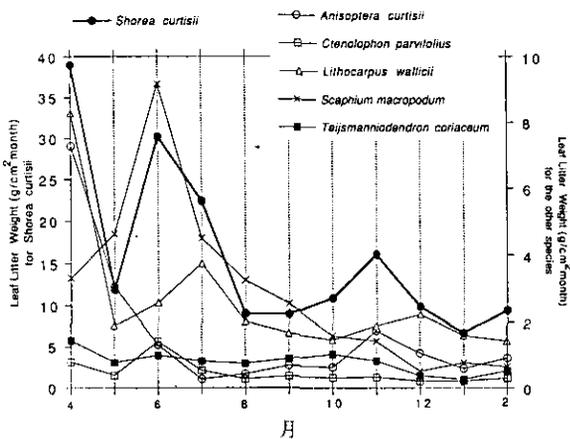


図1 主な出現種についての種ごとの落葉量の月ごとの変化

明瞭な季節性を持たない熱帯多雨林域での開花、結実といった植物季節は主にフタバガキ科の樹種についてよく調べられているものの、数年～10年に1回といった低い開花頻度を持つ種が多いこともあって、どのような環境要因がどのようにかわっているか、まだよく理解されていない。一方で、落葉も離層形成を伴う植物季節現象であり、開花・結実とも強く関連しているはずである。落葉は頻繁に起こる現象であり、リタートラップによって得られる花や果実の落下データと合わせて熱帯多雨林域での植物季節を解明する手がかりになると考えられる。

2) シダ植物の分布

①はじめに

熱帯多雨林の一つの特性に着生植物やつる植物の多い

ことがあげられる。シダ植物やラン科植物は移動世代(胞子・種子)が10～20μmと小さい。サイズの小さい胞子や種子は、直立する樹木の樹幹や枝分かれした部位のくぼみに着地しうる。また自家受精能(同一前葉体での)が伴った場合には定着(胞子体発達)の機会が増す。本研究では着生シダ個体群の構造と発達に着目して、垂直的な種多様性の維持機構を解明することを目的とする。クアラランプール近郊には自然林はわずかしがなく、オイルパームの人工林が広がる。オイルパーム樹幹はシダ植物にとって有効な生育場所といえるかも知れない。

②調査場所と方法

今年の調査ではまず手始めとして、①パソー保護林でのシダ着生率、②林に隣接したオイルパーム人工林での着生様式、③着生個体内の群葉構造と昆虫相の3点について観察を始めた。

熱帯マレーシアのパソー保護林における *Asplenium nidus* の着生率を調べた。低地林は30～40mの高木が優先するが着生シダは多くない。*A. nidus* の着生が見られる林分についてベルト方形区(2×30m)内の胸高直径、推定樹高、林床植物種数分布を求めた。

自然林に近接したオイルパーム林の樹幹に着生したシダの個体群構造を解析した。樹高(1～8.5m)の違う25本のオイルパームの調査で確認されたシダ種数は16であった。着生頻度を求めるために葉痕(葉を切り落とした基部)数を求めた。葉痕と葉痕のすきまにシダは根をおろしている。各種シダの着生している“すきま”の数を葉痕数で割って相対出現頻度を求めた。被度の解析は、オイルパームの樹幹を東西南北から高さごとに撮影し、方形区(直径を10分割できる長さ)での各種の発見頻度で測定した。オイルパームの地上1mに着生したシマタニワタリの6個体を採集し、群葉構造の解析と根茎に棲む昆虫の種組成と個体数を測定した。

③結果

A. nidus の着生は直径12～75cm、樹高8～40m、着生高8～25mで確認された。パソー森林内では6個のベルトで、316本の樹木(2m以上)が確認され、*A. nidus* を着生させた樹木は9本(2.8%)であった。直径10cm以上の樹木は48本であるから、18.8%となる(図2)。着生シダが見られるのは胸高直径12cm以上、樹高8m以上の樹木であった。

表1には樹高の違う25本のオイルパームに出現する種と頻度を示した。樹幹全体での出現頻度は24～67%であ

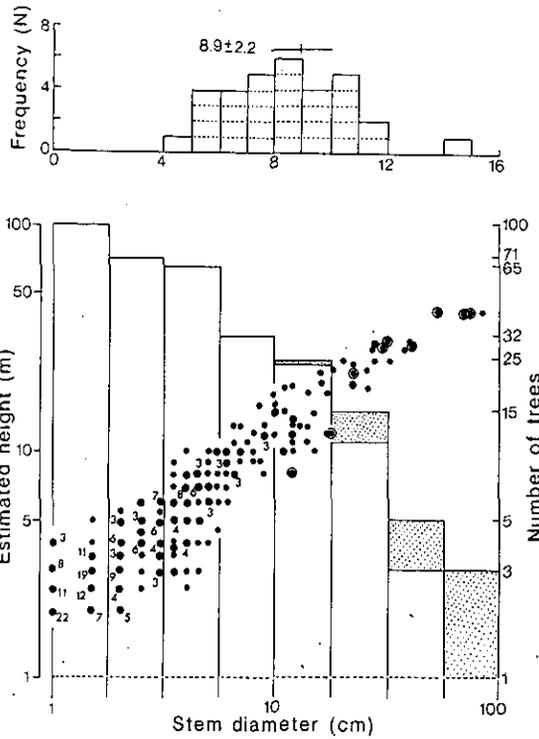


図2 着生シマタニワタリが確認できた森林構造

表1 オイルパームに出現するシダ植物の種とその出現頻度

供試木	高さ (m)	葉痕数	シダのある		出現頻度 %	種数 (N)	方角(%) 南-北
			葉痕数	シダのある			
A	1	35	19	54.29	2	2.79- 2.52	
B	1	40	18	45.00	4	4.87- 2.13	
C	1	80	25	31.25	3	9.88- 5.78	
D	2	70	18	25.71	2	4.61- 2.79	
E	2	80	28	35.00	3	5.66- 3.96	
F	2	84	44	52.38	3	20.08-13.11	
G	4	240	198	82.50	4	3.64-20.61	
H	4.5	217	105	48.39	5	4.30- 3.10	
I	4.5	231	98	42.42	7	5.93- 4.77	
J	4.5	288	107	37.15	4	3.03- 7.27	
K	5	216	94	43.52	6	14.35-10.87	
L	5	232	55	23.71	5	2.76- 2.76	
M	5	272	96	35.29	6	5.52- 3.22	
N	5.5	264	92	34.85	8	12.32- 7.33	
O	5.5	288	148	51.39	8	6.00-32.67	
P	6	200	120	60.00	8	1.55- 1.75	
Q	6	224	147	65.63	7	1.51- 2.83	
R	6	288	108	37.50	4	10.38- 4.25	
S	6	288	144	50.00	6	3.95- 3.95	
T	6.5	259	110	42.47	8	1.94- 1.51	
U	6.5	315	197	62.54	8	7.63- 1.40	
V	6.5	320	95	29.69	7	6.86- 6.12	
W	7	312	107	34.29	4	2.94- 3.18	
X	8	360	197	54.72	9	3.00- 3.38	
Y	8.5	344	175	50.87	11	5.92- 5.53	

り、平均 $45.2 \pm 13.4\%$ となる。相対出現頻度の樹高依存性はない。被度は樹高に応じて増加傾向がありそうである。種数は樹高に伴って2~11種と増加する傾向がある。種組成に着目すると、樹高1~8.5mのオイルパームすべてで確認できた種は、*Nephrolepis biserrata*と*Davalia denticulata*である。5.5m以上の樹幹にのみ見られる種が4種ある(*Vittaria elongata*, *Drynaria sparsisera*, *Polypodium* sp., *Phymatosorus scolopendria*)。

図3に樹高7mのオイルパームに関して、高さごとの種組成と相対出現頻度をまとめた。地上高の増加に伴って頻度が次第に高まる。各々の高さでの種数は2~5/mであった。

各樹幹に見られる各シダ種の出現頻度は、25本のうち11本以上の樹幹に確認でき、低木から高木まで広く生育できる種群は*Nephrolepis bissetata*, *Davalia dentata*, *Vittaria ensiformis*, *Asplenium nidus*, *Asplenium glaucophyllum*と*Asplenium longissimum*の6種であった。これら6種すべてで確認できた樹幹は5本であった。

樹高6~8mのオイルパームに着生した*A. nidus* 6個体の根茎に棲む昆虫相の分布を調査した。同定が完了していないが、いずれの根茎にも、ゴキブリ類・ハサミムシ類がみられた。大まかにはムカデ類・アリ類・クモ類など計約20種であり、各根茎にはダニ類・トビムシ類を含め10種ほど生存していると思われる。サイズの最も大きいものはゴキブリ類1~2cmであり、ハサミムシ類は卵、幼虫、成虫すべての生活史相が6個体すべての根茎で確認された。

④考察

本研究は、熱帯林の多様性を支える1つの着生(シダ)植物の個体群構造を、マクロ(自然林: $2 \times 30 \times 40\text{m}$)からメゾ(個体・オイルパーム樹幹: $0.5 \times 1 \times 5\text{m}$)そしてミクロ(個体内器官・根茎: $10 \times 20 \times 20\text{cm}$)視野へと3段階のスケールダウンを行った。こうしたスケールリング解析では、調査範囲の大きさに応じて調査精度や調査対象を一定化することが難しい。本調査でも、マクロスケールでは*A. nidus*の出現頻度:メゾスケールでは複数シダの共存:ミクロスケールでは群集構造と昆虫相を解析する試みた。しかしマクロスケールの自然林の比較とミクロスケールの昆虫相解析は今後の調査と解析が待たれる。

ここでは、オイルパーム樹幹の垂直方向のシダ相の定量比較の整理ができたにとどまる。定着プロセスは背丈

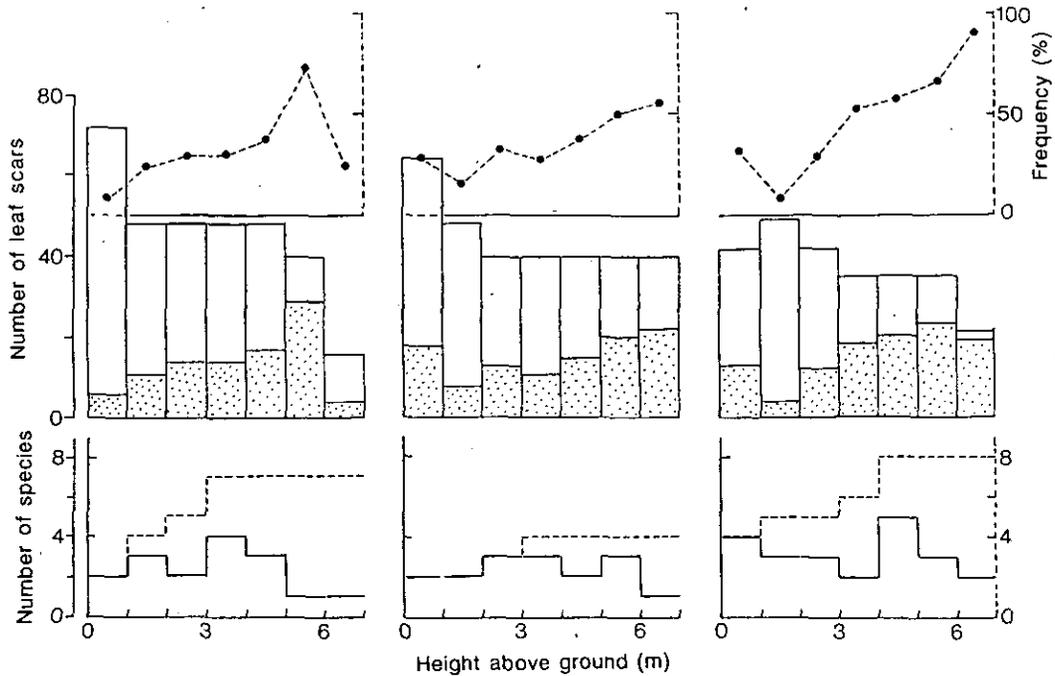


図3 6mのオイルパームの着生シダの相対出現頻度

の低い樹幹に見られる種、*Nephrolepis biserrata* や *Davalia denticulata* から開始するといえよう。地上性の帰化シダといわれる *Adiantum latifolium* や *Thelypteris* sp. も僅かに樹幹下部に見られる。オイルパームは1ヵ月に約2枚の大きな葉を展開するといわれるから、葉痕からも大まかな樹齢推定が可能である。20年を過ぎると葉痕(葉の基部)が下部から脱落する。その頃には実をつける群葉基部も10mを越え、収穫作業も難しいといわれる。

スライドに基づく被度解析は現在進行中であり、若い樹高の1~2mのものでは小型のシダが葉痕のすきまに多くみられ、やがて樹高の高まりとともに上部に移動しシダも大型化することが確認できる。樹幹の中央部に群葉を広げる *A. nidus* を除くと、高木樹幹全体としては逆三角錐の構造を示す。このことは陽地性シダがオイルパームの主構成員であることを示す。

パソー保護林は、マレーシア森林研究所自然林やフレザーズ・ヒルの亜高山地域よりも着生シダが少ない。自然林を異なる場所ごと、標高別に調査する必要がある。

(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

熱帯雨林にみられる驚異的な種多様性がどのようなメカニズムで維持されているのか、また複雑な種間関係が森林生態系の動的平衡とどのように関連しているかを明らかにすることは、熱帯雨林保全のための科学的な指針を与えるために不可欠な情報となる。さらに、生態学の分野で未解決の基本問題を解き明かすことにもなる。

熱帯林樹種の種多様性の維持機構を説明する仮説は、大きく分けて3つある。1つは、資源分割説とよばれるもので、住み分け仮説ともいう。すなわち、個々の種がそれぞれ異なる環境を選んで住み分けているというものである。しかし、ヘクタールあたり数百に及ぶ多数の種類が住み分けられるほど、熱帯林の環境が多様であるとは考えにくい。そこで、交互平衡説という仮説が提唱された。これは、特定の樹種に特異的な天敵が存在するために親木の近くでは子どもの生存率が低い、すなわち親木の下には子が育ちにくいという仮説である (Janzen, 1970; Connell, 1971)。このような状況下では、親木が枯れた後にできたギャップは別の種類の本によって置き換えられる可能性が高くなる。個体数の多い種ほど種子が散布された先でもまた同じ種類の親木と出会う確率が高くなるため、相対的に個体数の少ない種の方が次の世代に残りやすくなる。その結果、より多く種が共存でき

るというものである。この仮説は理論的には正しいが、実際の熱帯林でどの程度「親木の下に子が育ちにくい」かは十分には実証されていない。

3番目の仮説は、「決着が着かない仮説」とよばれるもので、種間の競争力にほとんど差がなく、親木の寿命が長いことと、それぞれの樹種の競争力が時間的に変動することによって、多様性が維持されるというものである (Chesson, & Warner, 1981)。これは、前2者の仮説と異なり、森林生態系が非平衡な状態にあることを前提にしている。これら3つの仮説はどれか1つが正しいというものではなく、重要なことはどの仮説が熱帯林の種多様性に最も貢献しているかという定量的な見積もりである。

上記の仮説のうち、「交互平衡仮説」は、実際のデータによって検証することが可能である。親木の下で子が育たない理由として様々な可能性がある。たとえばその種に特有な病原菌は親木のまわりに多いであろうし、その樹種の実を餌とする動物は親木の周りに集ってくるであろう。そこで、我々はマレーシア森林研究所内の森林保護区とパソー森林保護区において、高木樹種の実生の定着過程の調査を1991年に開始した。以下1992年度の研究成果の概要について報告する。

東南アジアの熱帯林を構成する樹種を代表するのはフタバガキ科の植物である。マレー名でカプールとよばれる *Dryobalanops aromatica* Gaertn.f. もフタバガキ科の高木である。カプールは、熱帯低地林の構成樹種としては例外的に優占林を作る。しかし、優占林の自然分布はマレーシア半島部では東海岸の標高の低い所に限られていて、内陸部や西海岸にはないとされている (図4)。このように、局所的にカプールが優占する林ができるためには、まず親木の下に稚樹バンク (稚樹の個体群) が形成されること、さらに親木が枯れて林冠にギャップが形成されたときに他の樹種の稚樹よりも早く林冠部に到達できるように早い伸長成長をすることが必要である。したがって、稚樹バンクを構成する個体が、どのように生存し成長するかが、カプール林が維持される上で最も重要なプロセスになる。カプールは、他の大部分のフタバガキ科の樹種とは違って、なぜ親木が高密度に存在する優占林を作るのかが分かれば、逆に典型的な熱帯多雨林でなぜ優占種が存在しないかを探るためのヒントとなる可能性がある。そこで、我々はカプールの種子が落ちた後の稚樹の定着過程の調査を行った。本報告では、1992年9-

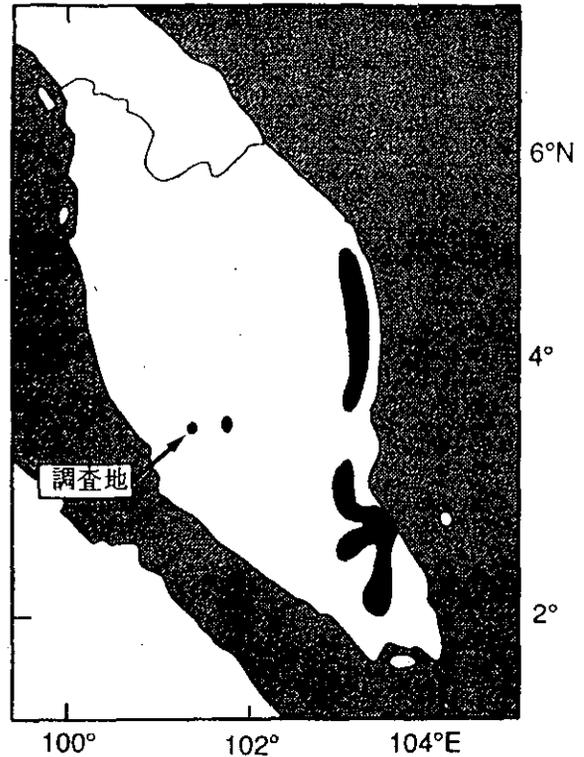


図4 カプール (*Dryobalanops aromatica*) のマレーシア半島部における分布と調査地
Symington (1974) を改図 (奥田敏統, 1993より)

12月の3ヶ月間にこのカプールの植林と、その近くのカプールを全く含まない植林地で行ったカプールの種子と芽生えの生存過程の調査結果について述べる。

また、カプールの芽生えは葉が6枚以上になると死亡率がきわめて低くなる。したがって、林床には稚樹バンクが形成されるが、稚樹バンクの段階にある稚樹の成長や生存過程に関してはこれまで定量的な情報がほとんどない。そこで、6葉期以後の稚樹について、葉の展開や稚樹の伸長成長の調査を1991年12月から約1年間行ったのでその結果も合わせて報告する。

②調査地と方法

調査地は、クアラルンプールの西に位置するケボン (Kepong) にあるマレーシア森林研究所内の保護林である (図4)。この林は、1920年代後半に植林された人工林であるが、カプールが優占する林はその第一世代が樹高40m以上にまで成長している。

カプールは平均すると数年に1回開花結実するが、多くの個体が一斉に開花する年とそうでない不作の年がある。1992年はマレーシア森林研究所の植林地では開花した木はほとんど見られず不作の年であった。そこで、不

作年に実った種子の生存過程を調査するための野外実験を行った。調査地から約10km離れたカプル林で隣接した2個体が結実したので、これらから成熟種子を採取し、ただちにマレーシア森林研究所内のカプル林とそれに隣接したカプルを含まない植林地(非カプル林)に移植し、その後の生存を調べた。

また、発芽して子葉段階に達した芽生えの生存率を調べるため、子葉段階までポットで栽培した個体をカプル林と非カプル林に移植し、その後の生存過程を調査した。さらに、本葉が4枚出た以後の生存過程を追跡するために、4葉期までポットで育てた苗をそれぞれの林に移植して生存過程を追跡した。

6葉期以後稚樹バンクを形成する過程での稚樹の生存と成長については、1991年7月に結実した種子を6葉段階までポットで育てた後、カプルと非カプル林にそれぞれ2つのプロットを設定して移植し、1ヶ月ごとに調査を行った。また、サンステーションによって積算受光量の測定も行った。

③結果および考察

図5に林床に置いた種子の生存曲線を示した。実線がカプル林、破線が非カプル林での結果である。平均すると非カプル林の方が初期の死亡率が高い結果となったが、どちらの場合も3週間以内にすべての個体が死亡した。1991年の生り年に行った野外実験では、地上に落ちた成熟種子の大部分が齧歯類によって食われて死亡したと推定したが、今回の実験でも齧歯類によるものが主な死亡原因と考えられた。ただし、今回はそれに加えてシロアリの食害による死亡が確認され、テングシロアリの一種 (*Longipeditermis longipes*) と同定された。

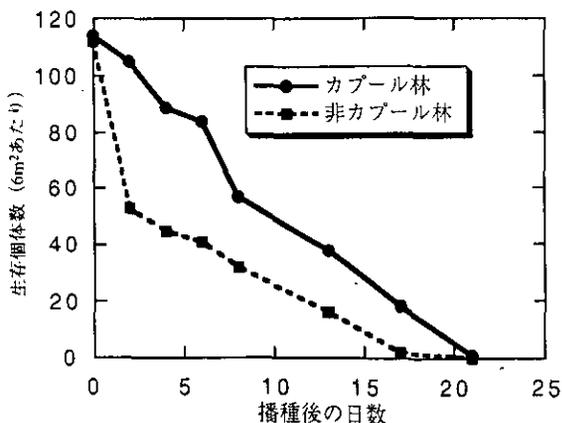


図5 カプル (*Dryobalanops aromatica*) 種子の生存曲線

シロアリが生きた在来種を食害することはほとんど報告されていないが、今回の調査ではカプル林でも非カプル林でも、ともに25%の種子がシロアリによって死亡した。こうした現象が植林地でのみ見られるものか、あるいは自然林でもあるのかについては不明である。

子葉段階の芽生えの生存曲線は、片対数グラフでほぼ直線となった(図6)。1日当たりの死亡率は、カプル林で2.7%、非カプル林で3.8%であったが、プロット間の変動を考慮するとこの平均値の差は有意でなかった。1991年の生り年に行った実験ではどちらの林でも死亡率は約6%であったので、今回の実験ではその半分程度の死亡率になった。また、子葉段階の主な死亡原因も種子と同様に齧歯類など動物による食害であった。さらに、シロアリによる子葉やシュートの被食も観察された。

4葉期の芽生えの生存曲線を図7に示す。図ではそれぞれ6個の調査区合計したものを示したが、カプルと

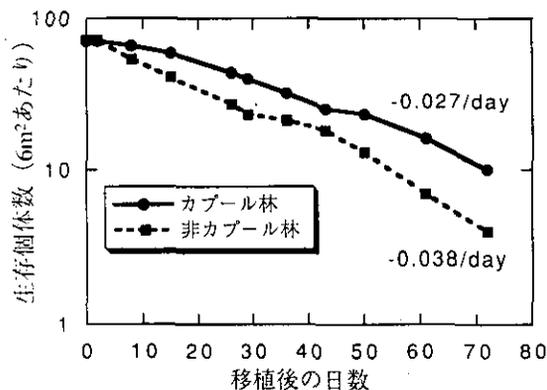


図6 カプル (*Dryobalanops aromatica*) の芽生え(子葉段階)の生存曲線

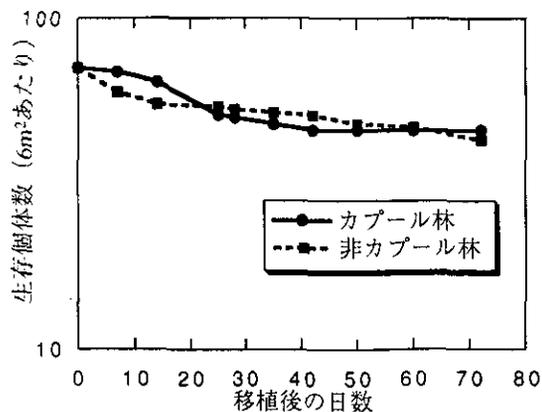


図7 カプル (*Dryobalanops aromatica*) の芽生え(4葉段階)の生存曲線

非カプル林との差は統計的に有意でなかった。平均すると1日当たり0.6%の減少率となり、子葉段階の死亡率のおよそ1/5~1/6程度であった。1991年の生り年のときに行った同様な野外実験での死亡率は、1.6%であったので、今回の実験の方が1/3程度低下した。今回の実験で生存率が比較的高かったのは、カプル種子という魅力的な餌がないために齧歯類などの植食者が集ってこなかった可能性がある。

6葉期以後の死亡率は、4葉期以前に比べて極端に小さくなり、移植後1年間の間にカプル林で20個体中13個体が生存し、非カプル林では20個体すべてが生存した。サンステーションによる積算受光量の測定では、カプル林のプロットの相対受光量は、非カプル林の約1/2であったので、カプル林で死亡率が高かったのは、その光環境の悪さが影響したことも考えられる。

図8に6葉期以後の稚樹高の成長を示す。黒丸と白丸がカプル林で比較的暗いプロット、黒四角と白四角が非カプル林で比較的明るいプロットである。その場所の相対的な明るさを示す指標として、サンステーションで測定した相対積算相対受光量を括弧中に示した。どのプロットも初めの5ヶ月間に5~8cm程度成長した後顕著な成長を示さず、明るいプロットで特に高さの成長がよいということにはなかった。したがって、ギャップ形成などによって光環境が極端に改善しない限り、カプルの稚樹の樹高成長は遅いといえる。

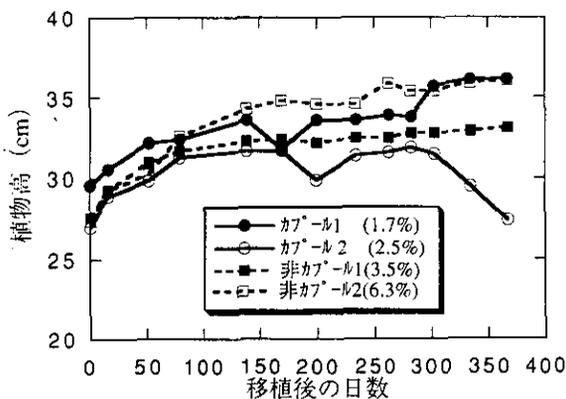


図8 カプル (*Dryobalanops aromatica*) の稚樹 (6葉期以後) の高さの成長
●と○:カプル林, ■と□:非カプル林, 括弧内は各プロットにおける林外に対する相対積算受光量

調査期間中に枯れたり、あるいは動物の食害によって消失した葉はほとんどなかったため、着葉枚数の変化は

展開葉の積算枚数にはほぼ対応する。6葉期以後の葉の展開速度は、相対受光量6.3%の非カプル林のプロットで最も高く、1年当たり約14枚となった(図9)。一方、他の3つのプロットでは年間3.5~5.7枚の展開速度を示した。Ng (1992)によると、カプルの展葉速度は、相対光量子密度4%の条件で個体当たり年間6枚であるので、比較的鬱閉した林床の光条件では、カプルの稚樹は年間3~6枚程度の新葉を展開するといえよう。

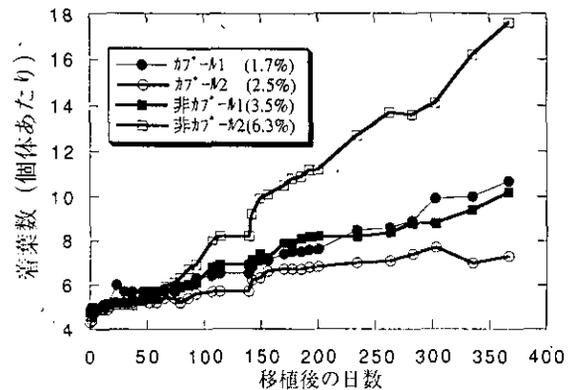


図9 カプル (*Dryobalanops aromatica*) の稚樹 (6葉期以後) の個体あたりの着葉数の変化
●と○:カプル林, ■と□:非カプル林, 括弧内は各プロットにおける林外に対する相対積算受光量

(3) 熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究

1) 材の分解による土壌形成

①はじめに

シロアリは熱帯雨林の土壌動物相の主要な構成員の一つである。彼らは枯葉・枯木を摂食し結果的にそれを分解することで土壌形成に貢献している。特に、低地熱帯雨林ではその生息量は大きく、種組成や分解量について重点的に研究がなされている。しかしながら、他の種類の枯葉・枯木分解者とのように競争し、その過程から分解がどのような影響を受けているかについての研究は、分解の動態を理解する上で必要であるにもかかわらず、そのような研究は少ない。ここでは、なかでも報告の少ない材の分解について実験的な研究を行ったのでその経過について報告する。

②調査手法

マレーシア森林研究所試験地のうちパソーとケボンの2地点の低地熱帯雨林で、生えているものを切り出した木を小片に分けた後地面上に設置しその分解速度を測定した。これらの木材は総数36個になり、これを2つに分

けてそれぞれ異なる処理を施した。1つはステンレスの蓋のない角箱に底と側面に大きな穴を開けて、その中に木材を入れたものである。この木材にはシロアリは訪れて摂食することができる。また、他の昆虫類も来訪できる。もう1つは同じ構造の箱の底と側面にステンレスの細かい網を張り、その中に木材を入れたものである。この網は木材にシロアリを近づけないためである。しかし、空中を飛来する他の昆虫、例えばキクイムシは近づける状態である。この両処理でシロアリやキクイムシの来訪程度も記録した。

③調査結果

木材の内、穴あき箱に入れた木材には半分以上の確率でシロアリが入った。入らなかった木材には、その下にアリが活動しており、これがシロアリの活動に影響していると考えられた。また、網で穴をふさいだ箱に入れた木材は18例中1例を除いてシロアリは入らなかった。キクイムシの潜入孔は多い木材では数十個に上ったが、シロアリが入っているかないかとはっきりした対応関係がなかった。その他の分解にかかわる生物としては菌類が重要であるが、表面的な観察では処理による違いは認められなかった。その他の興味深い点は、実験を行った2地点の内1地点では樹木の生きた根が木材に侵入してきたことで、これは生木の根も木材分解にかかわりうることを示唆している。

木材重量の減少は、実験開始後およそ1年で各地点各処理3本ずつ計12本を回収して乾燥重量で測定した。その結果、減少率は20%前後であった。いずれの地点でも両処理間で顕著な差がなく(図10)、重量減少の面からは初期の木材分解にシロアリによる摂食の有無の影響は認められなかった。

2) 落葉の分解過程と土壤動物群集

①はじめに

熱帯多雨林生態系における落葉の分解過程の解明は、土壤推積腐植や土壤に生活する土壤動物群集の多様性や樹木への養分の供給様式を明らかにする上で重要である。これまで、熱帯多雨林での土壤動物の研究は、主にシロアリを中心とした研究が多く、土壤動物群集についての研究は少ない。土壤における分解過程を明らかにしていく上で、土壤動物群集の構造を記述し、さらに個々の動物群の分解への寄与を明らかにしていくことが重要である。

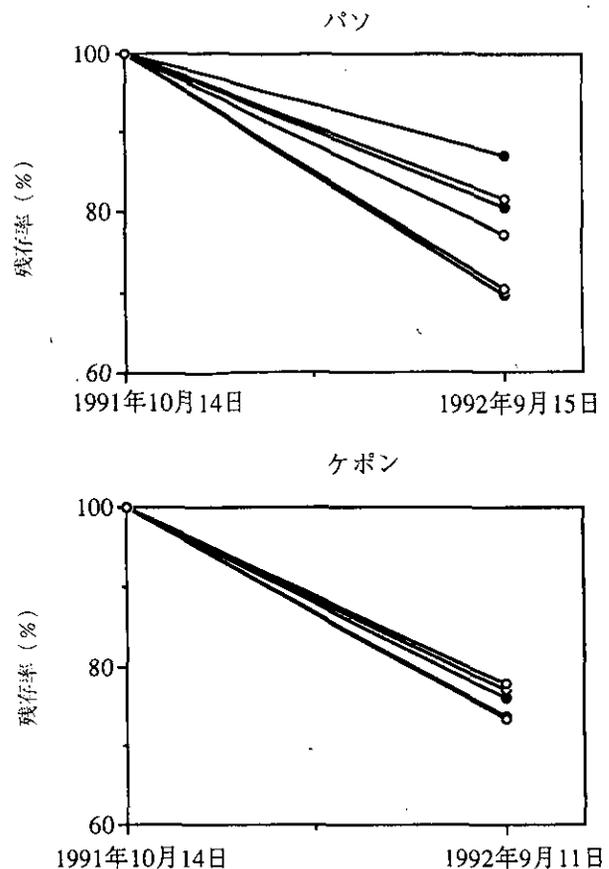


図10 分解実験に供した木材の乾燥重量の残存率
○は穴の開いた箱に入れた木材、●は穴を網で覆った箱に入れた木材

本研究では、マレーシア半島部のクアラルンプール近郊のマレーシア森林研究所構内のフタバガキ人工林とパソの保護林において、土壤動物群集ならびに落葉の分解過程についての調査を行った。

②調査方法

森林に供給される落葉や落枝などのリターは、土壤生物が棲息する場所と食物の供給源となっている。土壤に供給されたリターは、土壤動物や微生物の働きにより分解され無機化されて植物に供給される。本調査では、マレーシア森林研究所のフタバガキ科の *Dipterocarpus baudi* の人工林と、パソの熱帯林において、年間に供給されるリター量の測定を行った。

調査林分は、マレーシア森林研究所構内の人工林に400m²の方形区を設定し、それをさらに16個のサブプロットに分けた。平均胸高直径は25.9cm、平均樹高は25m、立木密度は475本/ha、胸高断面面積合計は34.83m²/haである。なお、林分内には、*Dipterocarpus kerii* や *Endospermum mallaccense* などが侵入している。

林内に開口部0.5m²の円形のリタートラップ10個を設置し、毎月1回、回収を行った。回収した試料は風乾状態で保管した。

風乾した試料は、重量測定後粉碎し、全炭素、全窒素量をCNコーダー（ヤナコ社製、MT 600型）で測定した。

③結果と考察

〔リター生産量〕

調査期間内の月別リター生産量は、1992年6月に落葉落枝量が最大となり、約2.3t/haであった（図11）。年間落葉落枝量は約12t/haであった。この値は、温帯林で報告されている値と比較した場合、2～3倍である。

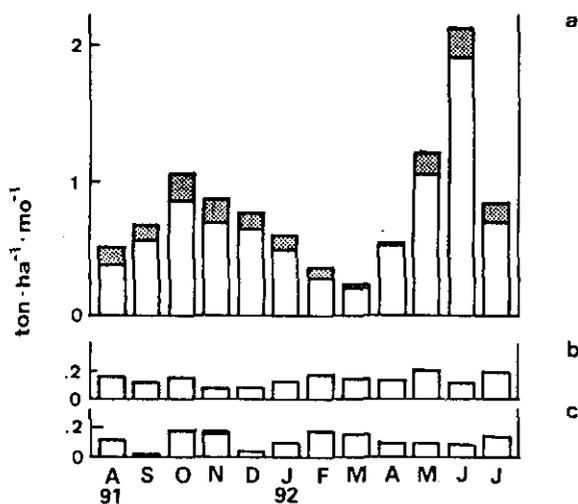


図11 各器官別の月別落葉・落枝量
a: DBの葉および托葉（影付き部）
b: DK・EMおよびその他の葉（一括表示）
c: 枝など木質の落下物

また、熱帯林全体と比較した場合、特に大きい値とはいえないが（3～15t/haと報告されている）、マレー半島で報告されている5～10t/haの値よりも大きい。

落葉の時期は、托葉の落下と同調する傾向が認められ、新葉の展開と古い葉の落下が同時に生じていることが示唆される。しかし托葉の落下は、乾燥時期などと必ずしも一致しておらず、落葉と環境要因の関係は今後さらに検討する必要がある。

図11に器官ごとの重量の百分率を示した。全リター量に占める *Dipterocarpus baudii* の葉の割合は63.5%であった。一方、*Dipterocarpus baudii* の托葉の割合は12.1%であった。このことから、葉にかかるコストの20%強を使って托葉を生産することが分かる。一般に、フタバガキ科のうち *Dipterocarpus* 属の樹木は、同じ科の他の属の樹木

に比べて托葉が発達しているといわれている。今回の調査結果は、このことを裏付けるものと考えられる。リターに含まれる枝や花や種子などの他の器官は少なく、*Dipterocarpus baudii* 以外の種の落葉を合わせた量よりも少ない。このことは、フタバガキ科樹木は結実の間隔が長かったり不定期であったりして、今回の調査期間中に開花結実がほとんど起こらなかったことによるものと考えられる。

[生葉、リターおよび有機物層の炭素、窒素含有量]

表2にリターの各器官別の炭素、窒素の含有率および炭素率（C/N）を示した。炭素は比較的均一な値を示し、46～48%であった。窒素は枝で低く、0.62%、葉でも *Dipterocarpus kerii* の1.05%から *Endospermum mallaccense* の1.65%までばらつきが大きかった。炭素率は窒素含有率のばらつきを反映して、*Endospermum mallaccense* の29.4から枝の80.15まで広いレンジでばらついた。これらの値は温帯で得られている値と大きな差異は認められなかった。熱帯の樹木は比較的高い窒素含有率を示すが、マメ科樹木などを除けば1～2%で妥当な値と思われる。

表2 各器官ごとの炭素・窒素・炭素率

器官	炭素(%)	窒素(%)	炭素率	
葉	<i>Dipterocarpus baudii</i>	48.2	1.23	39.5
	<i>Dipterocarpus kerii</i>	46.5	1.05	44.2
	<i>Endospermum mallaccense</i>	48.2	1.65	29.4
	その他	48.6	1.64	29.9
托葉	46.2	1.17	39.9	
枝	48.0	0.62	80.2	

（4）熱帯林生態系の修復に関する研究

熱帯樹種の種子形成過程

①はじめに

熱帯林生態系を修復していくうえで、熱帯林樹木の開花・結実過程に関する生物季節学および生理生態学的解析は、熱帯林の天然更新とも関係するので極めて重要である。そこで本研究では、熱帯樹木の一つである *Durio zibethinus* Murray 種子の生長パターンを測定し、生命経済表解析を行い、その解析結果を基に他器官から種子に流れる物質の転流に関しても知見を得る試みを行った。

②材料と方法

クアラルンプール市郊外に位置するマレーシア農科大

学の実験は場に植栽されている *Durio zibethinus* を材料として用いた。開花・結実過程における種子の生存曲線を作成するため、花芽が観察された1992年3月下旬に5本の枝に着いた花芽を個体識別するためにマーキングを行い、花芽、花、種子の個体数をカウントした。ただし、本調査においては、開花時期における花数のカウントは行わなかった。

種子の生長を調べるために、落下した種子を定期的に採取し、種子の長径、短径および乾重を測定した。

③結果と考察

[生存曲線]

花芽は2月中旬に始めて観察され、個体識別した3月中旬において全花芽数は504個であった。結実後、落下数の多かった4月の種子乾重の頻度分布より、落下する種子は小個体で多い傾向にあった。

[成長パターン]

6月まで残存した種子5個の平均個体重 w の成長速度 $\Delta w / \Delta t$ と平均果軸断面積 s との間には、下式で示される関係が見られた。

$$\Delta w / \Delta t = a \cdot sb \quad (1)$$

両者の関係は両対数グラフ上で2本の折れ線で近似され、 b の値は1.71と1.24になった。このことから、成長速度と果軸の断面積との間には成長過程によって異なり、ある程度種子が成長すると果軸の肥大成長速度は低下することを示しているものと思われる。

果軸は他器官からの物質が種子に転流するパイプととらえることができ、果軸を通して他器官から種子に流れる物質の移動速度、すなわち転流速度 $\Delta Tr / \Delta t$ が成長速度 $\Delta w / \Delta t$ と下式で示される比例関係があると仮定する。

$$\Delta Tr / \Delta t = \Delta w / \Delta t \quad (2)$$

(1), (2) 式より $\Delta Tr / \Delta t$ は、

$$\Delta Tr / \Delta t = sb \quad (3)$$

となり、転流速度は果軸の断面積と乗関係にあることを示している。ここで係数 b の値より、単位断面積当た

りの転流速度である相対転流速度は s の増加、すなわち時間とともに増加するといえる。しかし、 b の値の変化により、相対転流速度と果軸断面積の関係は種子の成長に伴って変化するものと考えられる。

(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および植生分布図作成に関する研究

本研究は、人工衛星 NOAA に搭載された可視近赤外域センサ AVHRR (地上分解能 1 km) からの画像を用いて東南アジア地域の植生分布の現況およびその変化を調査し、熱帯林の減少を定量化する手法を開発することを目的とする。

本年度は、対象地域の衛星モザイク画像の作成および植生指数分布図の作成(前年度からの継続)、および多年次データからの植生変化抽出手法の開発を行った。まず、モザイク画像の作成、植生指数図の作成について、前年度試作したモザイク画像および植生指数図の改良を行い、全域分布図を完成した。なお、本データは、前年度より本研究所に設立された UNEP/GRID-Tsukuba を通し世界に公開されている。

さらに、対象地域内の2カ所(インド西部およびマレー半島北部)について、1986年、1989年、1992年それぞれ4時期(1, 4, 7, 10月頃)の AVHRR データを収集し、植生の改変状況を調査する手法について検討を行った。図12に一例として、インド西部域における1989年10月および1992年10月の AVHRR 画像を示す。各年次の AVHRR 画像は、データの相互比較が可能となるように幾何補正により重ね合わせ、各対応地点の画像上での変化を調べた。植生改変域抽出方法は、AVHRR バンド1, 2のスペクトル特性、植生指数を用いて変化状況を判定する方およびバンド合成画像の目視による方法等を用いたが、いずれの方法においても、撮影時期の違いによる地表面の違いの影響を受け、長期的変化の抽出については、必ずしも良好な結果は得られなかった。今後、データ収集の時期を増すなどにより季節変化と長期変化を判別する手法の開発が必要と考えられる。



図12 インド西部における多年次のNOAA AVHRR画像
(右：1989年10月、左：1992年10月)

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

古川昭雄

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・永田尚志

森林減少・砂漠化研究チーム

○可知直毅・奥田敏統

〔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。本研究は国立環境研究所、森林総合研究所、自然環境研究センター、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カ年である。

研究はマレーシア国の熱帯雨林で行っている。マレーシア側の共同研究機関は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) である。

研究調査地点はクアラランプールの北方約10kmに位置するウルゴンバック (Hulu Gombak), 東方約15kmに位置するウルランガット (Hulu Langat) および南東約70kmのパソー保護林 (Pasoh) である。この3地点は森林規模、自然植生の残存する程度が異なるので、自然林の縮小が野生生物群集に与える影響を比較評価することができる。

〔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およ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、同じ場所に棲む哺乳類や鳥類などのせきつい動物の種多様性を代弁する指標として有用である。

ピットフォール型ベイト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ための資料を収集した。トラップ設置地点はパソー林の周辺から中心部にかけて200mごとに8地点を設定した。第2地点では1991年7月から10個のトラップを毎月設置している。第2地点を除く第1地点から第6地点までは1991年10月からそれぞれ3個のトラップの設置を開始した。さらに1992年2月から第7地点と第8地点にトラップを設置している。トラップの設置期間はいずれも2日間である。トラップに入った糞虫は70%アルコール中に保存している。今回は種の同定が終了している1991年7月～1992年2月の糞虫群集について報告する。

今日までに576頭の糞虫が採集され、少なくとも27種類の糞虫がパソー林に生息することが分かった。各月のそれぞれの地点において採集された種類のリストを表1に示した。糞虫は3つの亜科 (Scarabeinae, Coprinae, Aphodiinae) で構成され、それぞれの亜科は3, 22, 2種で構成されていた。他の地域における採集記録を併記しているが、8種はマレー半島から初めて採集された種類である。そのほか5種の命名されなかった種があるが、これらは新種である可能性が高い。

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

表1 マレーシア半島バソール林で採集された糞虫の種類

科	亜科	族	種類	マレー半島以外の分布
Scarabaeidae				
Scarabaeinae				
			Gymnopleurini (R)	
			<i>Gymnopleurus maurus</i>	ボルネオ, スマトラ
			Sisyphini (R)	
			<i>Sisyphus thoracicus</i>	シンガポール, ボルネオ, スマトラ, ジャワ
			Canthonini (R)	
			<i>Phacosoma dytiscoides</i>	シンガポール, ボルネオ
Coprinae				
			Coprini (T)	
			<i>Copris spinator</i>	ボルネオ, スマトラ, ニコバル諸島
			<i>Copris agunus</i>	シンガポール, ボルネオ
			<i>Copris doriae</i>	ボルネオ, スマトラ
			Oniticellini (T)	
			<i>Liatongus femoratus</i>	タイ, ジャワ, スマトラ
			<i>Tiniocellus sarawacus</i>	ボルネオ
			Onthophagini (T)	
			<i>Caccobius binodulus</i>	ボルネオ
			<i>Onthophagus rectecornutus</i>	ボルネオ, スマトラ, ジャワ, 中国南部, セイロン, インド, アッサム, ベンガル
			<i>Onthophagus mulleri</i>	ボルネオ, バンカ島, スマトラ, ジャワ
			<i>Onthophagus aphodioides</i>	ボルネオ, ジャワ, セレベス
			<i>Onthophagus cervicapra</i>	ボルネオ, スマトラ, ジャワ, フィリピン
			<i>Onthophagus cribratus</i>	ジャワ
			<i>Onthophagus luridipennis</i>	インド, アッサム, ビルマ, 中国中南部, ボルネオ, スマトラ, ジャワ
			<i>Onthophagus obscurior</i>	ボルネオ
			<i>Onthophagus pacificus</i>	中・南インド, アッサム, ビルマ, スンダ諸島
			<i>Onthophagus rorarius</i>	ボルネオ, スマトラ, セレベス
			<i>Onthophagus rutilans</i>	シンガポール, スマトラ, ボルネオ, ラオス, 中国南部
			<i>Onthophagus vulpes</i>	ボルネオ, スマトラ, ジャワ, セレベス
			<i>Onthophagus</i> sp. 1	ボルネオ
			<i>Onthophagus</i> sp. 2	—
			<i>Onthophagus</i> sp. 3	—
			<i>Onthophagus</i> sp. 4	—
Aphodiinae				
			Aphodiini (D)	
			<i>Aphodius</i> sp.	—
			<i>Aphodius marginellus</i>	中国, 台湾, フィリピン, ボルネオ, スマトラ, ジャワ, インド, ニューギニア, ポリネシア, 熱帯アフリカ

R, D, Tはそれぞれころがし屋, トンネル掘り, 糞内生活者

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。トンネルの奥につ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占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。

糞虫の種類組成に及ぼす地点(林縁からの相対的位置)の影響の分析から次のようなことが分かった。

1) 糞虫の個体数(採集された総数)は森林中央部の方が多(図1)。この傾向は糞虫を「トンネル掘り」と「ころがし屋」に区別しても同じであった。

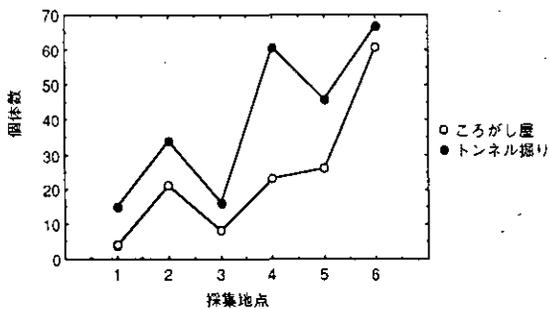


図1 林縁から中心部にかけて設置されたベイト型ピットフォールで採集された糞中の数
採集地点の番号が若いほど林縁部に近い。糞中の個体数は「ころがし屋」と「トンネル掘り」とに区別して示した。

2) 「ころがし屋」の比率は森林の中央部に行くほど高くなった。

3) 種類数も森林中央部の方が多かった。これは「トンネル掘り」の種類が森林中央部で多くなるためである(図2)。

4) 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。

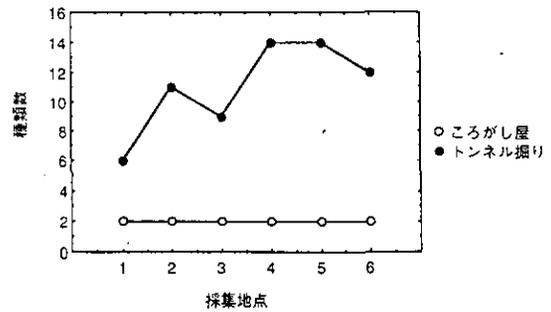


図2 林縁から中心部にかけて設置されたベイト型ピットフォールで採集された糞中の種類数
採集地点の番号が若いほど林縁部に近い。糞中の個体数は「ころがし屋」と「トンネル掘り」とに区別して示した。

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「糞内生活者」である *Aphodius* が2種類、しかも多数採集された。そして、この時期この地点では「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、雨が少なくて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。

(2) マレー半島における林床鳥類群集構造の比較

マレー半島において記録されている621種類の鳥類のうち約370種類は熱帯林およびその林縁を主な生息地としている。多くの種はスダ地域固有の種であり、フタバガキ科の混生する低地熱帯林、丘陵熱帯林、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)。マレー半島部においては低地熱帯林はほとんど残っていない、低山地熱帯林も減少の一途をたどっている。この研究では、隔離された低地熱帯林とかく乱されている低山地熱帯林において鳥類群集の多様性を明らかにすると共に、熱帯林のかく乱に伴う鳥類群集構造やギルドを構成している種類の行動の変化を明らかにすることを目的としている。

本年度は、研究調査地点として、隔離された低地熱帯林としてクアラランプールの南東約70kmに位置するパソ森林保護区とかく乱された低山地熱帯林としてクアラランプールの北約10kmに位置するウルゴンバックのマレーシア大学野外調査ステーションの周辺(以下、ゴンバックと略す)を選んだ。ゴンバックにおいてはマレー

シア研究者との共同研究で毎月カスミ網による標識調査とトランセクト上での花蜜・昆虫食鳥類の採食位置調査を平行して行った。パソにおいても林床棲鳥類の標識調査を毎月行うと共に、タワーを利用した樹冠部の標識調査を数回行った。結果は、前年度行った丘陵熱帯林のパンクスン森林保護区の調査データも加えてある。

林床鳥類群集の多様度は、パソ>パンクスン>ゴンバックの順であったが、かく乱を受けているゴンバックが他よりかなり低かった。群集組成の類似度はゴンバックとパンクスンが最も大きかった。これは、パソが孤立した低地林なのに対して、ゴンバックが丘陵熱帯林に連続しているため丘陵熱帯林のパンクスンとの類似性が高かったと考えられる。

熱帯林鳥類群集は8つのギルドから構成されていた。図3に、3つの調査地で各ギルドの占める割合を示してある。すべての調査地において林床棲昆虫採食ギルドの個体数が最も多く、熱帯林鳥類群集中で大きな割合を占めていたが、かく乱された低地熱帯林のゴンバックではこのギルドの占める割合が他の地域より低かった。林床

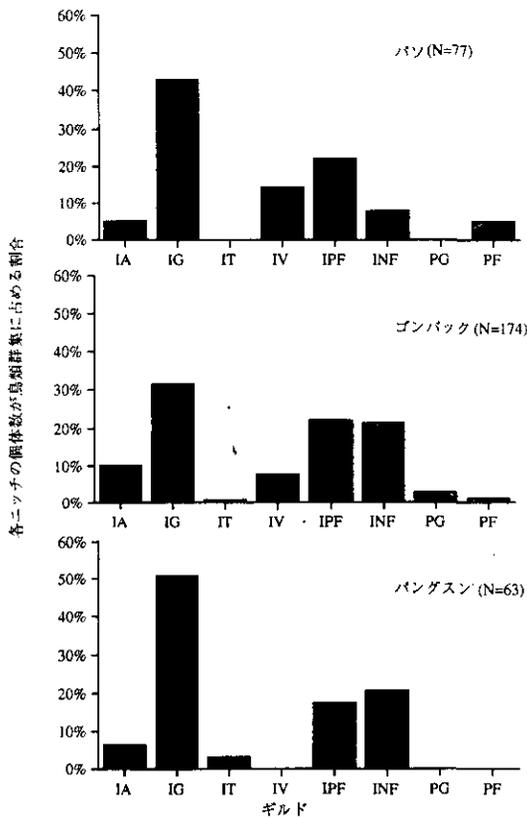


図3 林床鳥類群集において各ギルドの占める割合
 IA：飛翔性昆虫食者、IG：林床棲昆虫食者、IT：樹幹昆虫食者、IV：肉食者、IPF：昆虫-果実食者、INF：昆虫-花蜜食者、PG：林床棲植食者、PF：樹上性植食者

棲昆虫採食ギルドは大部分はチメドリ科であるが、ツグミ科も含まれている。かく乱を受けていないパソとパンクスンにおいては20種類のチメドリ科が記録され、林床鳥類群集中の40%以上の個体がチメドリ科であったが、ゴンバックではチメドリ科は7種類しか記録されず群集中の25%の個体を占めていたにすぎなかった。マレー半島の熱帯林の林床鳥類群集でチメドリ科は最も優占し、熱帯林のかく乱に敏感なグループといえる。

一方、花蜜-昆虫食ギルドの占める割合はパソでは低かったが、パンクスン、ゴンバックでは高かった。このギルドはタイヨウチョウ科およびハナドリ科で構成され、林縁および林内のギャップに多く見られる。パンクスンにおいて、このギルドが優占していたのは調査地内に河辺林を多く含んでいたためである。林床棲昆虫採食ギルドに次いで優占するギルドは、果実-昆虫食ギルドであった。このギルドは主にヒヨドリ科で構成されるが、各調査地での比率はほぼ等しかった。しかしヒヨドリ科は、パソでは8種類が記録されただけであったが、ゴンバックでは17種類が記録された。このグループは、チメドリ科とは逆にかく乱を受けている不安定な環境に適応しているといえる。

次に、環境のかく乱に敏感なチメドリ科について詳しく調べてみた。パソにおけるチメドリ科のハッチンソンのニッチ幅は、2.2であるのに対して、ゴンバックでは1.0であった。また、パソでは1ハッチンソン比の中に

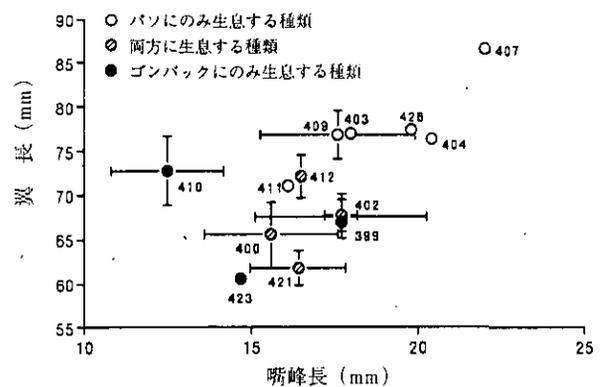


図4 パソとゴンバックに分布するチメドリ科の形態的特徴
 水平および垂直線は各測定値の分散を示している。シンボルの側の数字は種類コードを表す。(399: *Pellorneum ruficeps*, 400: *P. capistratum*, 402: *Trichastoma malaccense*, 403: *T. rostratum*, 404: *T. bicolor*, 407: *Malacopteron magnum*, 409: *M. magnirostre*, 410: *M. affine*, 411: *M. albugulare*, 412: *M. cinereum*, 421: *Macronous ptilosus*, 423: *Stachyris poliocephala*, 426: *S. maculata*)

9.7種類のチメドリ類が詰め込まれているのに対して、ゴンバックでは6.8種類しか詰め込まれていなかった。パソとゴンバックに分布するチメドリ科のうち捕獲できた12種類の形態的特徴について示したのが図4である。かく乱されているゴンバックに生息している種類は、パソに生息している種類の中で小型のグループか小型の別な種類であった。かく乱されている林では、チメドリ科の構成種数が減少するとともに、大型の種類が欠けている。熱帯林のかく乱によってチメドリ科のグループは減少するが、ヒヨドリ科のグループは多様化することが明らかになった。より小さな環境変化の影響を知るためには、小規模のかく乱により果実-昆虫食ギルド内および林床棲昆虫食ギルド内の各構成種の行動上の変化に注目する必要がある。

(3) マレーシア熱帯林における陸産貝類群集

陸産貝類とは、陸上軟体動物の総称で、すべて腹足目(Gastropoda)に属する。

陸上軟体動物(以下、陸貝と略す)は砂漠から極地に至るまで、生態的にも地理的にも多種多様な種に適応放射しており、陸上生態系において重要な生態的地位を占める。また、世界的にみて熱帯林を中心に、陸貝には多くの絶滅危惧種が存在し(日本のレッドデータブックでも数10種)、*Papuina pulcherrima*のようにワシントン条約の規制のかかる種もある。反面、*Bradybaena similaris*、*Achatina fulica*、*Sublina octoma*のように人為的かく乱地に好んで生息し、農業害虫としてはびこっている種もある。陸貝は移動能力が極めて劣るため、地域的な分化が著しく、生息地が特定の地域に限定されている例が多い。熱帯林や海洋島では人間の環境破壊によって絶滅してしまったり、絶滅寸前の種が多数知られている。逆に、人間の活動によって破壊された環境(畑地や市街地)にのみ生息している種も存在する。このような個々の種の生態的特性を知ることは、生態系の保全には必須の事項と考える。しかし、熱帯林における陸貝の群集生態学的研究例はほとんどない。陸上軟体動物の生息状況は、ほとんど移動できないこともあって、その場所の環境状態を明確に反映することが知られており、環境の指標動物として大変有効である。生息地の環境状況を考察する上で陸貝は非常に有益な情報をもたらす。

マレーシアの陸産貝類は、19世紀から1940年代にかけて、主にイギリスの研究者によって調査が行われた。し

かし、そのすべてが、未記載種の記載論文であり、熱帯林の陸産貝類群集を扱ったものではなく、産地ごとの現生種のリストもほとんど存在しない。各分類群ごとのモノグラフも1950年代に Benthem-Jutting によっていくつかの分類群で出版されたが、マレーシアの独立とイギリス人研究者の引き上げで中断し、現在に至っている。

1992年12月にマレーシアの各産地の陸産貝類群集の調査を行った。調査地は、マレーシアのセランゴール州のウル・ゴンバック、ブキット・タクーン、パツァー・ケープ、ヌグリ・スンビラン州のパソの森、の計4カ所に設定した。ブキット・タクーンとパツァー・ケープは、石灰岩質の土壌で、ウル・ゴンバックとパソの森は花崗岩質の土壌であった。調査は、定性的な標本採集を行い、生息地の陸産貝類群集の記載を正確に行うことに努めた。ウル・ゴンバックとパソでは、植生を熱帯林内部の自然林植生と林縁部のかく乱地植生に大きく二通りに分けて両者の比較を行った。調査期間は、ウル・ゴンバックが3日、ブキット・タクーンが2時間、パツァー・ケープが1時間、パソが3日、と非常に短期間であった。ウル・ゴンバックでは一部の種で密度推定も行った。また、土壌サンプルを採集し、土壌中に含まれる微小種の調査も行った。標本は、小型種はその場ですべて70%エタノールに液浸にし、大型種は肉抜きをした後、軟体部を70%エタノールで液浸、殻部を乾燥標本とした。

調査の結果、ウル・ゴンバックで8種、パソで6種、ブキット・タクーンで少なくとも21種、パツァー・ケープで少なくとも25種の陸産貝類が採集された。パツァー・ケープでは、わずか1時間の調査時間しかなかったにもかかわらず、少なくとも25種もの陸産貝類が採集された。これに対して、ウル・ゴンバックとパソでは数日間の調査期間を持てたが、採集できた種はごく数種に限られた。今回の調査は生息密度の調査は一部の種でのみ行ったが、熱帯林の林床部では、陸産貝類の生密度は著しく少なかった。パソで採集された陸産貝類の大半が、林縁部で採集され、林床では、*Allopias* sp.と*Cyclophorus pfeifferi*の2種のみがそれぞれ1個体採集されたに過ぎなかった。

今回の調査地の土壌は、パツァー・ケープとブキット・タクーンが石灰岩風化土壌でウル・ゴンバックとパソは花崗岩風化土壌であった。パツァー・ケープでは土壌サンプルの中から抽出された標本が大半であり、このため微小種が多くを占める。ブキット・タクーンでも土壌サ

ンプルの中から多数の微小種が得られた。土壌サンプルはウル・ゴンバックとパソーでも採取したが、微小陸産貝類はまったく抽出されなかった。また、バツ・ケーブとブキット・タクーンでは、林床生息種や樹上生息種もかなりの密度で生息していることが認められた。*Cyclophorus pfeifferi* は今回の4カ所の調査地のいずれでも生息が確認されたが、生息密度は、石灰岩地と花崗岩地では大きな差がある(表2)。石灰岩地では、特に石灰岩の壁面に多数の中腹足目の陸産貝類が付着生息していたのが観察されたのに対して、花崗岩地では、岩礫表面生息の陸産貝類はまったく採集されなかった。以上のように熱帯林では、陸産貝類の生息密度は極めて低いと推定されたが、石灰岩地においては、生息密度・種数共に非常に多いということが指摘できる。

表2 *Cyclophorus pfeifferi* の生息密度推定

調査地	
ウル・ゴンバック	5.3
ブキット・タクーン	0.125
バツ・ケーブ	0.25
パソー	18.0

1個体を採集するに要した時間で表す。調査時間を採集個体数で割った値(時間/個体数)。

日本においても、石灰岩地には特殊な陸産貝類が生息していることが知られているが、マレーシアで観察されたような土壌環境による陸産貝類群集の著しい相違は観察されていない。

土壌環境の相違による陸産貝類群集の相違を決定している要因として、生息環境のカルシウムイオンの相違が考えられる。熱帯地域では、高温多雨によって土壌中の金属イオンが溶脱し、特に花崗岩地のように、もともと塩基性元素の乏しい地域では、溶脱によってマグネシウムやカルシウムが著しく欠乏していることが知られている。陸生軟体動物にとっては、殻の形成にはカルシウムイオンが必須であり、環境のカルシウムイオンの量が生息密度を決定していることが、各種の研究例からも明らかである。今後、土壌中のカルシウムと陸産貝類群集との関連性について、詳しい分析が必要であろう。

ウル・ゴンバックとパソーにおいては、植生と陸産貝類群集の対応関係の予備的調査も行った。植生としては、

ウル・ゴンバックでは、熱帯林内、林縁部、林外の草地、河川両岸のかく乱地の4タイプで、パソーでは、林内と林外草地の2タイプで調査を行った。両調査地共に、採集された種数・個体数共に著しく僅少であったため、明確な結論は出せないが、植生に伴う陸産貝類群集の相違が認められた(表3)。植生との関連に関して、今回の調査で新しい事実も判明した。*Subulina octoma* と *Indoenna butleri* はマレーシアを原産地とする陸産貝類で、現在は各地の熱帯・亜熱帯地域に侵入して増殖している。特に農業害虫として問題になることもある。両種とも日本でも侵入・繁殖しているが、その生息地は畑地や住宅地等に限られ、自然林には侵入していない。陸産貝類では、ほかに *Achatina fulica* や *Bradybaena similaris* 等の移入陸産貝類が農業害虫として日本では有名である。この両種も人為かく乱地でのみ繁殖している。移入動物が、農地や2次林のようなく乱地で爆発的に増殖することはよく観察される現象であるが、その要因については、天敵や競争種との種間関係で説明されることが多かった。しかし、陸産貝類に関する限り原産地での生息状況は全く分かっていなかったが、今回の調査で少なくとも *Subulina octoma* は、人為的影響のない環境下では、林縁部や河川両岸のかく乱地のように常に生息環境が変動するような植生域に生息することが確認できた。すなわち *Subulina octoma* は、本来の生息地が不安定な植生域であり、この生態的な特性が、日本のような他地域に侵入できた大きな要因であることが分かった。

表3 ウル・ゴンバックにおける *Subulina octoma* の生息密度

調査区	平均値±S.D.	計測コドラート数
林縁部1	4.61±5.39	13
林縁部2	2.38±3.02	13
林縁部3	0.93±1.39	16
林外草地1	11.25±8.22	12
林外草地2	12.08±5.54	12
林外草地3	12.75±7.99	12
河川川岸部1	0.58±0.76	12
河川川岸部2	3.00±2.86	12
林内1	0.00±0.00	15
林内2	0.00±0.00	15
林内3	0.00±0.00	15

30×30cmの生息個体数

2.8 砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する研究

〔研究組織〕

地球環境研究グループ	
上席研究官	古川昭雄
森林減少・砂漠化研究チーム	○可知直毅・宮崎忠国
社会環境システム部	
情報解析研究室	安岡善文
水圏環境部	
土壌環境研究室	恒川篤史
地下環境研究室	木村 強
地球環境研究センター	
研究管理官	大坪国順
客員研究員	12名

〔研究概要〕

砂漠化は、乾燥地帯、半乾燥地帯、乾燥半湿潤地帯において気候変化、人間活動等、様々な要因に起因して起こる土地劣化である、と定義されている。国連環境計画（UNEP）の調査によると、砂漠化は地球人口の約1/6、全乾燥地域の70%にあたる3600万km²、そして全陸地の1/4に影響を与えている。砂漠化の最も顕著な影響は、貧困の拡大に加え3300万km²の放牧地（全放牧地の73%）の劣化、乾燥地域の限界降雨依存農地の内47%の土地生産性、土壌構造の劣化、乾燥地域の灌漑農地内30%の劣化などである。砂漠化の自然的要因としては気候変動による乾性化や土壌荒廃が進行することであり、人為的要因として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などと考えられている。このような砂漠の拡大に対して、人為的な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、水文特性等の環境容量を算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し砂漠化危険地域を予測、抽出することが急務である。また、砂漠の調査、砂漠化危険地域における砂漠化進行の防止技術の開発や持続的発展のための社会システムの提言等においては地域社会的かつ国際的共同研究が不可欠である。

本研究では、インド西部のタール砂漠の乾燥および半

乾燥地域の砂漠化危険地域において、様々な人間活動が砂漠化進行にどのような影響を及ぼしているか、特に、植生、水循環、土壌環境および社会経済システムの面から明らかにする。さらに、世界の代表的な砂漠および土壌荒廃地域（アフリカ、インド、中国、タイ等）を複数箇所選定し、気象状況、地域、社会システム、経済活動等の違いによる砂漠化進行要因の国際比較研究を行う。

以上の目的を達成するために、以下のような研究課題を設定して研究を実施する。なお、研究全体のフローを図1に示す。

（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

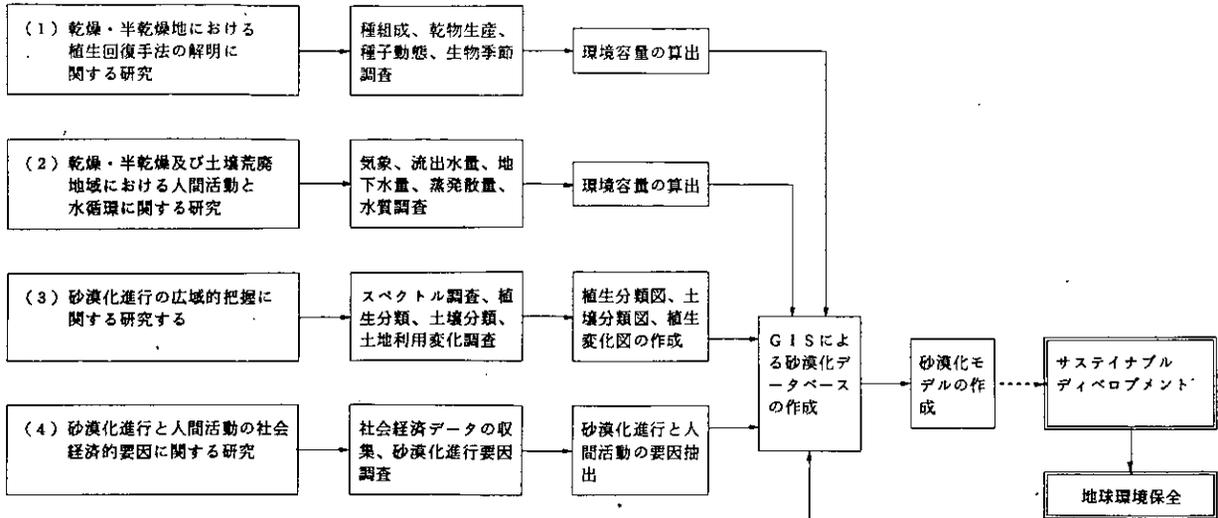
1）乾燥・半乾燥地における植生回復手法の解明に関する研究

乾燥地および半乾燥地の植生を構成する植物の種組成や現存量、およびその変化量を調査し、植生に関する環境容量の算出と植生回復手法を明らかにする。

2）乾燥・半乾燥及び土壌荒廃地域における人間活動と水循環に関する研究

研究対象地域の水循環を流域水収支法およびエネルギー収支法により明らかにし、水資源の適正な利用可能量の推定を行う。

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

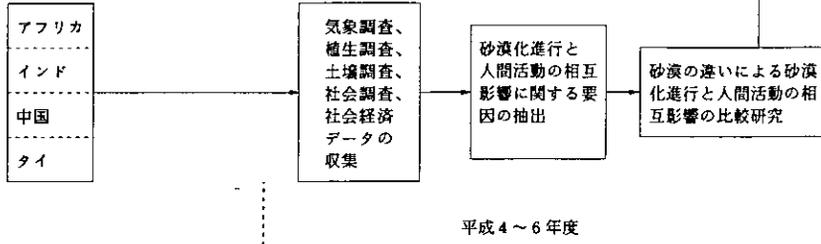


図1 砂漠化研究の全体構成図

3) 砂漠化進行の広域的把握に関する研究

人工衛星リモートセンシングによる乾燥・半乾燥地域の土地利用、植生、土壌分類とその変化状況の抽出を行い、砂漠化進行を面的に把握する手法の開発を行う。また、砂漠化危険地域を予測するモデルの検討を行う。

4) 砂漠化進行と人間活動の社会経済的要因に関する研究

研究対象地域の社会システム及び経済活動を調査し、砂漠化進行における人為的な要因を明らかにする。

(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

世界の代表的な砂漠および土壌荒廃地域を対象として、それぞれの地域において、人間活動が砂漠化進行に及ぼす影響を調査すると共に、砂漠化の進行が人間活動に及ぼす影響を明らかにし、砂漠化進行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。

【研究成果】

初年度は、研究対象砂漠であるインド西部のタール砂漠において(図2)、降雨量の異なる極乾燥地(ジャイサルメール)、乾燥地(ジョドプール、オシアン)、半乾燥地(パリ)の3試験地の選定を行った(図3)。図4は試験地周辺の砂漠化進行地域の写真で、図4(A)は過放牧により耕地が裸地化した場所である。また、図4(B)は移動砂丘により農耕地が失われている例である。タール砂漠の平均気温および降水量をそれぞれ表1、表2に示す。これらの試験地において、インド中央乾燥地研究所(Central Arid Zone Research Institute)および日本側の参加研究機関と共同で以下の調査研究を行った。

(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

1) 乾燥・半乾燥地における植生回復手法の解明に関する研究

極乾燥地、乾燥地、半乾燥地の3試験地(図3)にそれぞれ複数個の保護区と非保護区を作成し、各保護区と

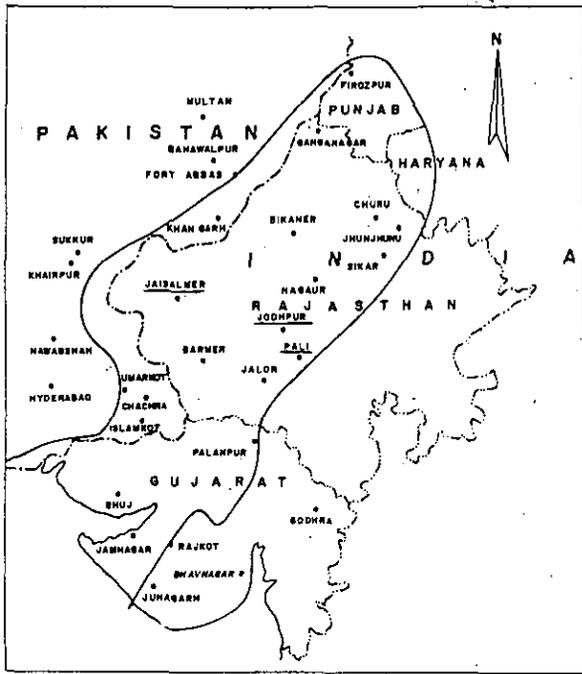


図2 インド西部のタール砂漠と試験地

(A)



(B)



図4 タール砂漠における砂漠化の現状
(A) 過放牧による裸地化, (B) 移動砂丘

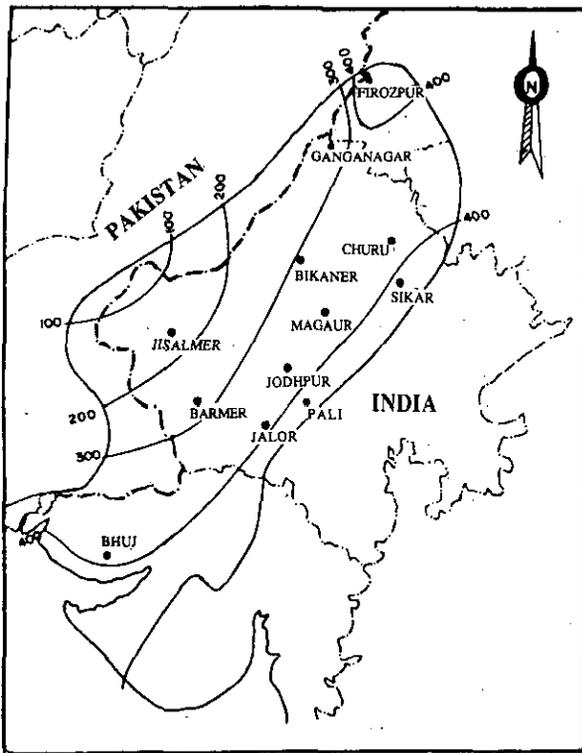


図3 タール砂漠の年間平均降雨量 (単位: mm)

非保護区において、①種組成調査、②乾物生産調査、③種子動態調査、④生物季節調査のための調査手法の検討および試験的な調査を行った。平成5年度からは各試験地において、①および②に関しては年4回の調査を、③および④に関しては種とそのライフサイクルにより不定期に行う予定である。

2) 乾燥・半乾燥及び土壌荒廃地域における人間活動と水循環に関する研究

各試験地およびその周辺地域において、①水収支法により雨量、流出水量、地下水量、土壌水分、蒸発散量等の調査、②エネルギー収支法により気温、湿度、風向、風速、日射量、土壌温度、蒸発量、雨量等の調査、③リモートセンシングを利用した水源地の調査、④灌漑水の入出水量調査、⑤定期的な地下水量および水質調査、⑥アイソトープを利用した地下水源とその流量調査を行うための調査手法の検討を行った。また、使用測定機器の選定と乾燥地域の試験地オシアンで雨水、灌漑水、地下水等の水質調査を行った。

表1 タール砂漠の月別平均気温

場所	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12月	平均
Bikaner	13.7	17.2	23.2	29.2	34.6	35.5	33.5	31.4	30.9	27.0	20.2	15.2	26.0
Barmer	17.5	21.0	26.3	31.5	34.4	33.8	31.2	29.5	29.9	28.9	23.7	19.6	27.3
Jaisalmer	15.8	19.3	24.8	29.6	33.7	34.4	32.1	30.7	30.4	28.1	22.1	17.5	26.6
Jodhpur	17.1	20.0	25.2	30.4	34.5	34.3	31.3	29.2	29.4	27.7	22.7	18.7	26.7
Ganganagar	12.6	15.8	20.4	27.3	32.8	35.1	33.5	32.1	30.4	26.0	19.2	14.4	25.0
Bhuj	18.1	21.0	26.2	30.2	32.2	32.1	29.7	28.5	28.7	28.6	23.9	19.6	26.6
Hisar	13.6	16.6	22.0	28.0	33.1	34.5	32.3	30.8	29.8	26.0	19.7	15.1	25.2

単位：℃

表2 タール砂漠の降水量

場所	年間降水量 (mm)	降雨日数	最大降雨月
Bikaner	310	19	8月
Barmer	310	17	8月
Jaisalmer	180	13	8月
Jodhpur	370	20	8月
Ganganagar	240	16	8月
Bhuj	340	14	7月
Hisar	410	25	7月

3) 砂漠化進行の広域的把握に関する研究

人工衛星データを利用して、各試験地およびその周辺の地域さらにはタール砂漠全域の広域環境調査を行う。ここでは、①地表物質の調査とそれらのスペクトル計測、②人工衛星データによる植生、土壌、土地利用調査、③異なる時期の衛星データによる植生、土壌、土地利用変化調査、④植生、土壌、土地利用分類図とその変化状況図の作成、⑤砂漠化地理情報システム(GIS)の開発、⑥砂漠化予測モデルの開発を行うための手法の検討を行った。特に、②、③ではLANDSATやMOS-1データを使用した試験地周辺の植生分類および土壌分類手法の検討とNOAAデータを利用したタール砂漠全域の植生分類手法の検討を行った。⑤では、本砂漠化研究で取り扱う各種の既存データ、植生、水等の調査データ、地図、リモートセンシング画像データ、社会経済データ等を入力し、GISによる砂漠化データベースの作成を開始した。⑥では、収集されたデータ、算出された環境容量等から砂漠化危険地域を予測するためのモデルの検討を行った。

4) 砂漠化進行と人間活動の社会経済的要因に関する研究

本研究では3試験地周辺の村落を選定し、村民の砂漠化進行による社会活動および経済活動の変化に関する聞き取り調査を行う。この調査では、砂漠化進行による①社会活動の変化、②経済活動の変化等についての聞き取り調査を行い、砂漠の拡大が地域住民にどのような影響を及ぼしているかを調べ、砂漠化進行と人間活動の関係を明らかにする。このため、本年度は、オシアン地域の一村落を選定し、社会経済データを収集すると共に、聞き取り調査のための質問票の作成を行った。

(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

初年度は、アフリカ、インド、中国、タイの砂漠および土壌荒廃地域を対象として、それぞれの地域において、気象、植生、土壌、社会経済システムの違いが砂漠化進行に及ぼす影響を調査する。また、それぞれの地域において、砂漠の拡大が社会経済等の人間活動に対してどのような影響を与えるかを明らかにし、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。このため、アフリカのケニアの砂漠地域を対象に気象条件と砂漠化進行についての調査を行った。インドではタール砂漠を対象に、社会システムと砂漠化進行の関係、中国では中国東北部の砂漠化地域を対象に植生環境と砂漠化進行の関係、タイでは東北部のコンケン地域を対象に、土壌と砂漠化進行との関連性について調査を行い、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のための砂漠化要因の抽出を行った。平成5年度からは気象、植生、土壌、社会経済システムを4年度と異なった砂漠で調査し、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継続して行う。

2.9 その他の地球環境問題に関する研究

2.9.1 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〕

社会環境システム部

情報解析研究室

安岡善文・須賀伸介

水圏環境部

部長

○渡辺正孝

土壌環境研究室

恒川篤史

〔研究概要〕

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。

湾岸戦争による流出油及び油田火災煙の影響はその範囲が広く、期間も長期的になるものと予想される。このために、地上での調査データのみを基に影響の範囲や程度を評価することは難しい。そこで本研究では、人工衛星からのリモートセンシングデータを基に、湾岸戦争による沿岸生態系への影響を計測、評価することを試みた。

(1) 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次元クロージャーマ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。

(2) 衛星リモートセンシングによる沿岸生態系のモニタリングに関する研究

クウェートからの流出原油や油田からの火災煙がペルシャ湾岸域の生態系にどのような影響を及ぼすかを評価することを目的として、人工衛星からのリモートセンシングデータを用いて、影響の範囲と程度を計測することを試みる。

平成4年度は人工衛星NOAAからの画像データを収集し、火災煙の拡散範囲及び影響地域の評価を行った。また、地上でのグラントルースにより収集した沿岸域の砂、土壌、植生等のスペクトルデータから流出油や火災煙による影響評価の可能性について検討を行った。

〔研究成果〕

(1) ペルシャ湾の海水流動解析に関する研究

潮汐流・吹送流・密厚流を再現できる3次元海域循環モデルをさらに発展させ、流速 (u, v, w) 塩分濃度のみならず海表面での熱収支を含む熱方程式を連立させた。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。潮汐は調和定数をホルムズ海峡よりインド洋へ入った場所で与えた。チグリス・ユーフラテス川からの淡水供給量はUNESCO (1978年) データにより与えた。風速、日射量、湿度、気温、雲量はカフジでの実測値を与えた。シミュレーション50日目において、ペルシャ湾全表面からの水分蒸発量を積分計算し、チグリス・ユーフラテス川淡水供給量と比較した。この結果、水分蒸発量は河川流入量より少なくとも数倍以上となり、不足分はホルムズ海峡の表層を通過してインド洋から海水が流入していることが示唆された。チグリス・

ユーフラテス川からのみならず、イラン側からも河川を通じて淡水が供給されているがその詳細は不明である。

今後はより詳細なデータを入力することにより、インド洋との海水交換量推定を行う必要がある。

(2) 衛星リモートセンシングによる沿岸生態系のモニタリングに関する研究

湾岸戦争による環境への影響は主に流出油によるもの及び油田火災煙によるものと考えられる。いずれもその影響の範囲が広いため、影響の程度と範囲を評価することは難しい。本研究では人工衛星からのリモートセンシングデータ及び地上でのグラントルースデータを基に流出油及び火災煙のペルシャ湾岸域への広域的な影響を評価することを試みた。

まず人工衛星 NOAA に搭載されたセンサ AVHRR のデータを収集し、火災煙の影響範囲を調べた。データは戦前 (1986年, 1989年), 戦中 (1991年) 及び戦後 (1992年) のものを米国 NOAA, UNEP-GRID 等を通じて収集し、全データをデータ相互の比較が可能となるよう幾何補正により重ね合わせた。図 1 には一例として 1991年 3月 1日 (戦時中) の NOAA AVHRR 画像を示した。図 1 に示されるようにクウェートからの南東サウジアラビア沿岸に沿ってカタール南部にまで達している。収集した戦時中の NOAA 画像 17枚はほぼ同様の傾向を示しており、その影響範囲が広いことを示している。

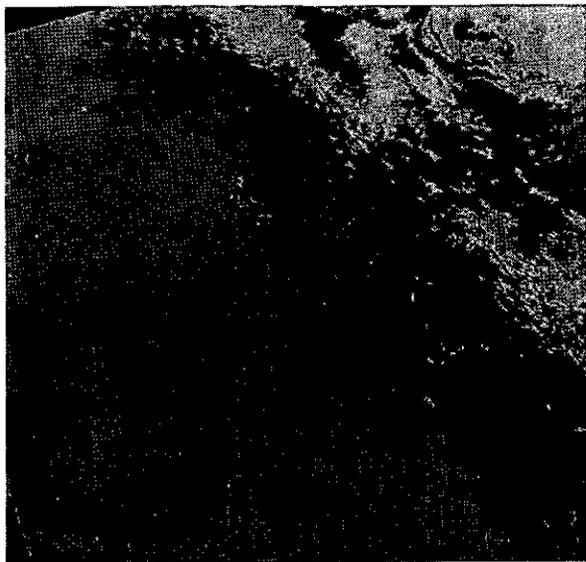
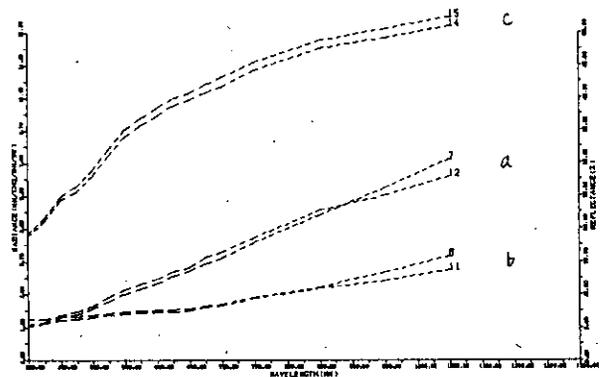


図 1 ペルシャ湾岸域の NOAA AVHRR 画像
(1991年 3月 1日, クウェートからの火災煙がサウジアラビア沿岸に沿って南下している)

本研究では、人工衛星データの収集と同時に、衛星データ解析の基礎データとなるグラントルースデータの収集を行った。1991年 12月にカウンターパートである KFUPM と共同で、火災煙の影響の強いサウジアラビアダーラン地区、ジュベイユ地区 (図 1) において、植物、土壌等の分光反射スペクトル等グラントルースの収集を行った。ジュベイユ地区は流出油がその沿岸域一帯に漂着した地域でもあり、海岸砂の流出油による汚染の影響評価が大きな課題となっている。図 2 には収集されたデータの一例として、油に汚染された海岸砂、海岸に残存しているタール及び正常な砂の分光スペクトルを示した。3つのスペクトルは明らかに異なっており、人工衛星データからの汚染の影響評価が可能であることが示された。



SOLID LINE: CALCULATED REFLECTANCE, DOTTED LINE: REFLECTANCE, DASHED LINE: NORMALIZED REFLECTANCE

図 2 流出油に汚染された海岸砂の分光スペクトル特性
(a: 汚染砂, b: タール, c: 正常砂, いずれもサウジアラビアジュベイユ周辺において収集)

今回収集された NOAA AVHRR データは地上分解能が 1 km と粗いため、全域の大局的汚染状況を把握するには適しているが、海岸線に沿った砂や植物、さらには砂漠中に点在する植物への影響を評価するには適していない。このため LANDSAT TM, MSS, JERS-1 SAR, OPS 等の高分解能データの収集を試みているが、現在までのところ得られていない。高分解能データの収集により、流出油に汚染された海岸域の定量的評価、火災煙による植生への影響評価が可能になるものと期待される。なお、グラントルースを実施した 1991年 12月 は油田火災終了後約 2 カ月であり、火災煙による植生への直接的影響は肉眼では見られなかった。また、ジュベイユ周辺の海岸域も汚染された砂以外、海面での油の浮遊等は見られなかった。

2.10 総合化研究

〔研究組織〕

地球環境研究センター	
統括研究管理官	○西岡秀三
研究管理官	大坪国順・原沢英夫・和田篤也
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
地球環境研究グループ	
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	青柳みどり・日引 聡・川島康子
客員研究員 20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」により分野毎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、現在まで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）、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）、さらに、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研究」（環境勘定研究）、である。

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。

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つを取り上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。

一方、「環境勘定研究」は平成3年度にフィージビリティ研究を実施し、平成4年度から本格的な研究に入っているもので、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体系に環境の大切さを反映することもできる。

以下では、上記3つの研究について、平成4年度の研究成果をとりまとめる。

〔研究成果〕

(1) 世界モデル研究

地球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。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および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いだすことを目的としている。

本年度も前年度に引き続き、環境総合モデルと経済モデルの開発に関する研究を行った。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・モデルの開発およ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、従来より開発を進めていた世界36地域中期予測モデル

ルを用いていくつかのシミュレーションを実施するとともに、長期予測モデルとして動学的最適化モデルおよび一般均衡モデルの開発に着手した。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。

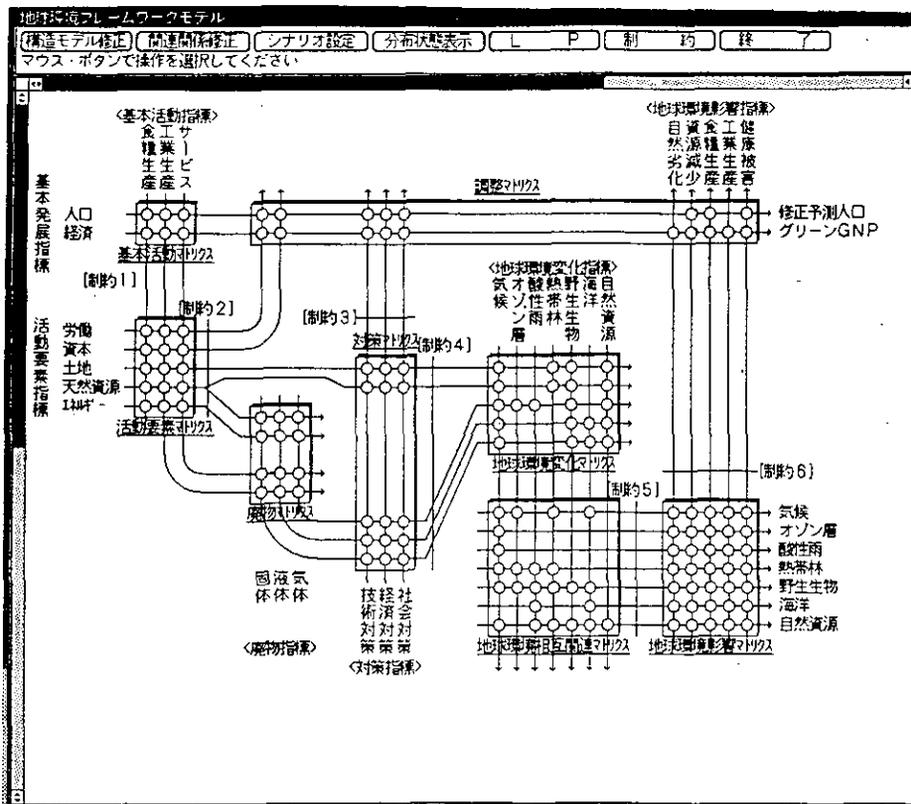


図1 地球環境フレームワーク・モデルの構造

このフレームワークモデルの管理のため、全体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」、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」、構造モデルの項目間の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」、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」、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」を開発中である。平成4年度においては、コントロール・サブシステムに最適化計算モジュールを加えるとともに、その計算結果を表示するモジュールを状態表示サブシステムに追加した。この最適化計算モジュールは、各指標の制約条件を与えて基本発展指標を最大化させ、それぞれの制約条件のシャドープライスの大きさから、対応する指標の相対的重要度を見いだそうとするものである。

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・変換プロセスや水域物質輸送プロセスをシミュレートできる3次元物質循環モデルの開発が必要である。本年度は水域物質輸送プロセスに焦点を当てて、図2に示す枠組みのもとでモデル開発を行った。このうち、海洋循環モデルについては、米国プリン

ストン大学地球物理流体力学研究所(GFDL)のブライアンとコックらが開発した海洋大循環モデルを改良して用いた。また、河川流域モデルについては、エドワーズの世界5分×5分メッシュの標高データを用いて流出モデルを作成した。また、これらのモデルの入出力データを統合的に管理するために、地理情報システムを作成して用いた。

このモデルを用いて、わが国全域の河川から流出した汚染物質が海洋の中でどのように移動するかについてのシミュレーションを行った。図3は、南極上空付近に視点をおき、太平洋付近の汚染物質の水平方向および鉛直方向への移動を図示したものである。日本から排出された汚染物質は10年後に太平洋の約半分の地域に拡がり、

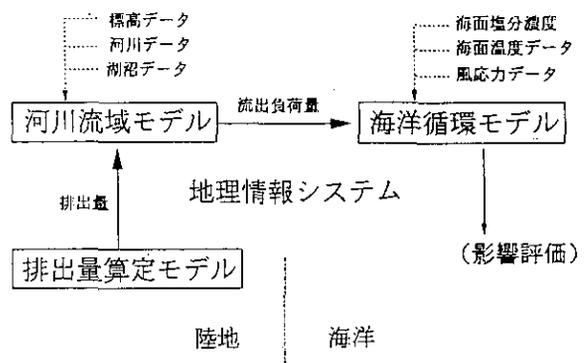


図2 水域物質輸送モデルのの基本フレーム

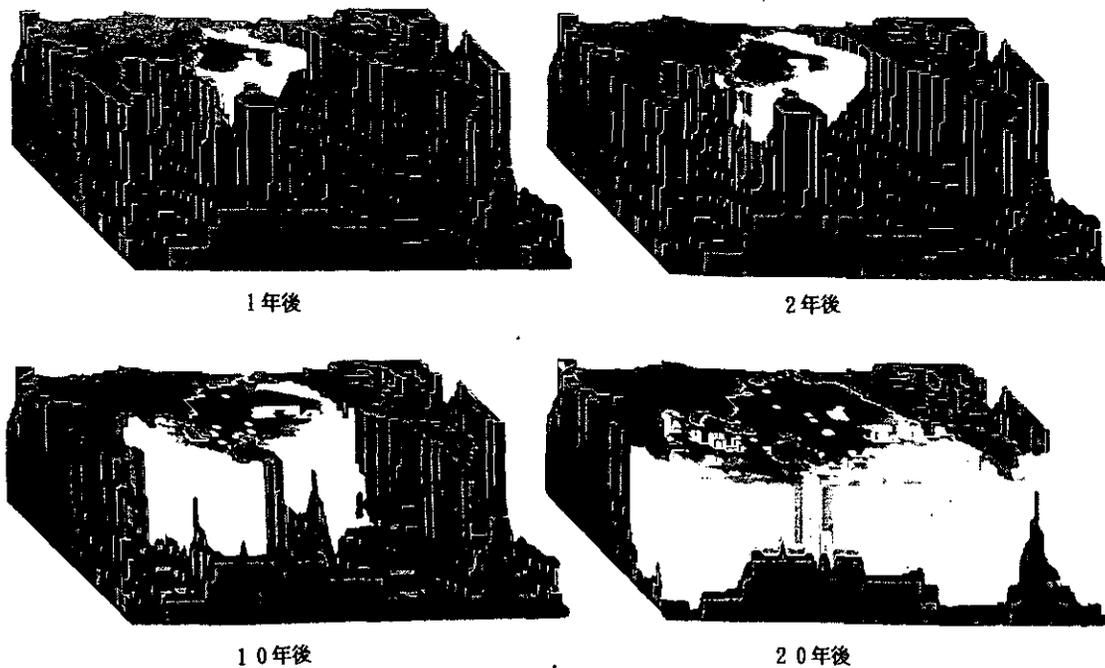


図3 海洋循環モデルを用いた汚染物質分布のシミュレーション

20年後には太平洋全域のみならずインド洋の一部にも拡がってしまうことが読み取れる。

このような水域物質輸送モデルを用いれば、海洋汚染の拡散過程はもとより、水圏、地圏、大気圏、陸上生物圏の間の相互関係をモデル化することも可能となり、今後、さらにモデル改良等の検討を進めたい。

3) 中期経済予測モデルの開発

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きた。このモデルは図4に示すように、29カ国および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、方程式数は一国/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、方程式数は一国/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・貿易およ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、工業品生産モデルおよび食料・粗原料・燃

料生産モデルに環境汚染セクターおよ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。

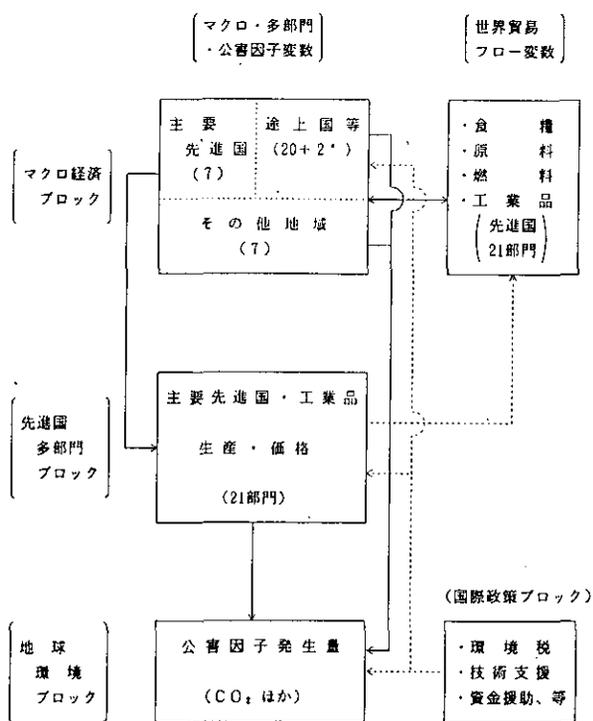
本モデルは、未だ試験的にシミュレーションを行っている段階であるが、いくつかのシミュレーションにより、中間的な分析を試みた。まず、標準シナリオ（特別な政策を導入しないケース）において、主要な地域の国民総生産当たりの二酸化炭素排出量がどのように推移するかを予測した結果が表1である。これによると、先進国グループは省エネ化がますます進み、この比率は着実に低減するが、途上国グループはこの比率が少ししか低減しないか逆に増加する傾向を示しており、省エネ格差も南北間でますます拡大する傾向が明らかとなった。次いで、二酸化炭素を大量に排出している途上国である中国とインドに着目して、二酸化炭素排出削減のシミュレーションを行うと、中国では炭素税の導入とそれに伴う経済ロスを超えんするためのODAが供与されるのが効果があり、また、インドでは技術誘導型の投資支援のためのODAが効果があるなどの結果が得られた。

4) 長期経済予測モデルの開発

前年度に実施した経済モデルの比較分析の結果とともに、本年度まで実施してきた中期予測モデルの開発過程で得られた知見から、地球環境保全と経済発展との相互関係を分析するためには計量経済タイプのモデルでは大きな限界があることが明らかとなった。炭素税等の価格政策の効果や国際市場を通じたダイナミックなエネルギー需給の調整などを実験し、地球環境保全の検討期間である30年から100年先のシナリオを描くためには、長期予測モデルの開発に着手する必要がある。このため、本年度からこの分野の専門家グループによる研究会を設けて、動学的最適化モデルおよび一般均衡モデルの開発に着手した。

まず、動学的最適化モデルについては、アラン・マンの開発したグローバル2100をベースにして、日本を独立させて他部門の日本モデルを開発するとともに、エネルギー以外の貿易を組み込むよう最適化計算の方法を改良することを試みている。これにより、世界経済のメカニズムの中でわが国の地球環境保全対策の費用と効果を明らかにできる。

一方、一般均衡モデルについては、ジェイ・エドモンズが開発中の第二世代モデル(SGM)のプロジェクト



備考：点線は政策、破線はサブモデル（参考）、
*先進2ヶ国（豪州・ニュージーランド）を含む。

図4 中期予測世界経済モデルの構成

表1 主要地域での二酸化炭素/GNP比率および二酸化炭素排出量の推移(標準ケース)

	二酸化炭素/GNP 比率				
	1990	1995	2000	2005	2010
1. アメリカ	0.381	0.352	0.315	0.282	0.254
2. 日本	0.163	0.140	0.122	0.102	0.088
3. E C	0.194	0.165	0.143	0.127	0.119
4. 東欧	0.758	0.720	0.685	0.650	0.614
5. CIS (旧ソ連)	1.075	0.984	0.900	0.824	0.755
6. 産油国	0.217	0.253	0.223	0.259	0.254
7. 中国	1.102	1.040	0.986	0.935	0.885
8. インド	0.652	0.715	0.773	0.836	0.911
9. タイフリアジア	0.305	0.304	0.299	0.291	0.286
10. ブラジル	0.181	0.182	0.182	0.182	0.182
11. 世界平均	0.358	0.344	0.330	0.319	0.313

二酸化炭素排出量

	1990	1995	2000	2005	2010	平均成長率
1. アメリカ (%)	1450.0 .0	1491.1 .6	1532.6 .5	1582.2 .6	1646.4 .8	.6
2. 日本 (%)	260.7 .0	270.9 .8	284.0 1.0	297.8 .9	314.3 1.1	.9
3. E C (%)	653.5 .0	623.6 .9	608.2 .5	609.2 .0	652.3 1.4	.0
4. その他先進国 (%)	78.4 .0	91.0 3.0	110.5 4.0	136.0 4.2	168.3 4.4	3.9
5. 東欧 (%)	419.0 .0	450.4 -1.5	482.7 -1.4	519.2 -1.5	562.0 -1.6	-1.5
6. CIS (旧ソ連) (%)	1066.9 .0	1119.7 1.0	1175.6 1.0	1235.6 1.0	1300.7 1.0	1.0
7. 産油国 (%)	239.9 .0	321.3 6.0	382.0 3.5	422.7 2.0	499.6 3.4	3.7
8. 中国 (%)	788.3 .0	1028.7 5.5	1312.7 5.0	1678.3 5.0	2154.0 5.1	5.2
9. インド (%)	201.0 .0	292.5 7.8	401.9 6.6	554.5 6.6	786.8 7.2	7.1
10. タイフリアジア (%)	135.6 .0	180.6 5.9	220.8 4.1	270.7 4.2	334.7 4.3	4.6
11. ブラジル (%)	76.0 .0	101.1 5.9	122.5 3.9	145.0 3.4	179.4 4.4	4.4
12. その他発展中 (%)	173.5 .0	207.6 3.7	253.7 4.1	317.3 4.6	409.1 5.2	4.4
13. 世界 (%)	5542.9 .0	6178.5 2.2	6887.1 2.2	7768.4 2.4	9007.6 3.0	2.5

に参加し、この米国モデルをベースにして日本モデルを開発中である。米国モデルとの主たる相違点は工業部門の分割を詳細にして、各工業部門ごとに地球環境保全対策と生産活動との関係を分析する点である。これにより、各産業部門ごとの経済的影響とそれを緩和するための中長期的政策が検討できる。

(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など、今後の地球温暖化への対応方針を検討するうえ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。

本年度は、社会経済システムの基本構造と地球環境保全との関係について、種々の仮説やシナリオを描いて、これらを体系的に整理することにより全体の分析フレームを構築するとともに、各仮説やシナリオを検証あるいは検討を深めるために各種のデータを収集・整理した。さらに、社会経済の基本構造のうち、ライフスタイルおよび国土利用構造に焦点を当てて分析を進めた。

1) 社会経済構造と地球環境保全の分析フレームワークの構築

まず、地球環境保全に重大な影響を与えるおそれのあ

る社会経済システムのうち、ライフスタイル、政治・経済システムおよび都市構造の3つの分野を取り上げ、地球環境問題とのかかわりについて各種の仮説およびシナリオを作成した。検討対象とした社会経済システムのキーワードは表2に示すとおり、多様かつ全部で100項目を超える。これらの全項目について、地球環境問題とのかかわりについての仮説もしくはシナリオを作成した。図5および図6はこれらの仮説やシナリオのうち、食生活および国土利用と地球環境問題との関係について作成されたものの概要を示す。

次に、これらの仮説およびシナリオを検証もしくはさらに深く検討するための各種知見やデータを収集した。そして、これらのデータは項目別に整理されて報告書としてとりまとめられ、来年度の分析に備えられた。このデータ集は、地球環境問題と社会経済構造との関係を検討するうえで非常に有用な資料になると考えている。

2) 国際比較調査の実施

また、地球環境負荷と大きなかかわりがあるライフスタイルが、国際間でどの程度の違いがあるかを正確に分

表2 検討対象とした社会経済システムの基本構造のキーワード

ライフスタイル分野のキーワード

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 文明 : 西洋文明・東洋文明、先住民族文化、家父長制社会、
・宗教 宗教と非物質文明、近代工業文明以前の文明、自然法則、
カトリック・イスラム教 2. 価値観 : 支配主義・権力主義、多様な価値観、物質至上主義・技術信仰、
・思想 金銭至上主義 3. 情報 : 情報化の進展、情報社会機会の増加 4. 教育 : 女性の教育、国際交流、学歴偏重、社会教育、家庭教育、環境教育 5. 労働 : 労働時間、フレックスタイム、サマータイム、女性の社会進出 | <ol style="list-style-type: none"> 6. 食生活 : 肉食・高級魚食、地元産食品、グルメ化、食の多様性、
食の美意識、生食習慣、加工食品、食の安全意識、外食化、
米作・麦作文化、菜食・肉食、 7. 衣生活 : 西洋的フォーマリティ、ドレッサー度、天然繊維志向、高級品志向、 8. 住生活 : 住宅ライフサイクル、家族規模、戸建・集合住宅、持家・借家 9. 余暇生活 : 旅行、レジャーの高級化、地域での余暇活動 10. エコ活動 : リサイクル運動、環境保護運動への関心度・参加 11. その他 : 地域に関する認識度、自然環境の状態 |
|--|--|

政治・経済・その他社会一般分野のキーワード

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 政治システム : 地方分権、政治意思決定システム、資金の国家集中、
環境NGO、住民運動 2. 経済体制 : 計画経済と市場経済 3. 価格決定メカニズム : 市場の失敗、税制、補助金 4. 経済の発展段階 : 経済発展の初期段階、成長と環境保全のトレードオフ、
成長速度と環境、所得水準と環境問題 5. エネルギー : 所得とエネルギーの消費効率、産業構造 6. 生産システム : 経営思想・戦略、多品種少量生産・製品のライフサイクル
の短期化 | <ol style="list-style-type: none"> 7. 軍隊・軍事費 : 軍隊・軍事費と環境破壊 8. 所得の分配 : 所得分配 9. 国際関係 : 国際的リーダーシップ 11. 民族問題 : 民族問題と政策決定の迅速さ 12. 社会の高齢化問題 : 高齢化と環境保全努力、高齢化とエネルギー消費 13. 森林 : 森林の所有形態、人口増加、農業、森林利用、私的所有 14. 土地所有形態 : 土地の所有・権利形態、農業システム、土地生産性 |
|---|---|

都市構造分野のキーワード

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 国土構造 : 都市の空間配置、都市化率、一人あたりGNP、
人口分布の偏り、総合交通体系の整備水準、
情報通信基盤 | <ol style="list-style-type: none"> 2. 都市構造 : 人口密度、人口と雇用の配置、複合的土地利用、駐車場の制限、
公共旅客輸送機関、道路基盤整備、都市規模、都市形状、
都市面積、住民の特性、都市公園、工場立地の郊外化、 |
|--|--|

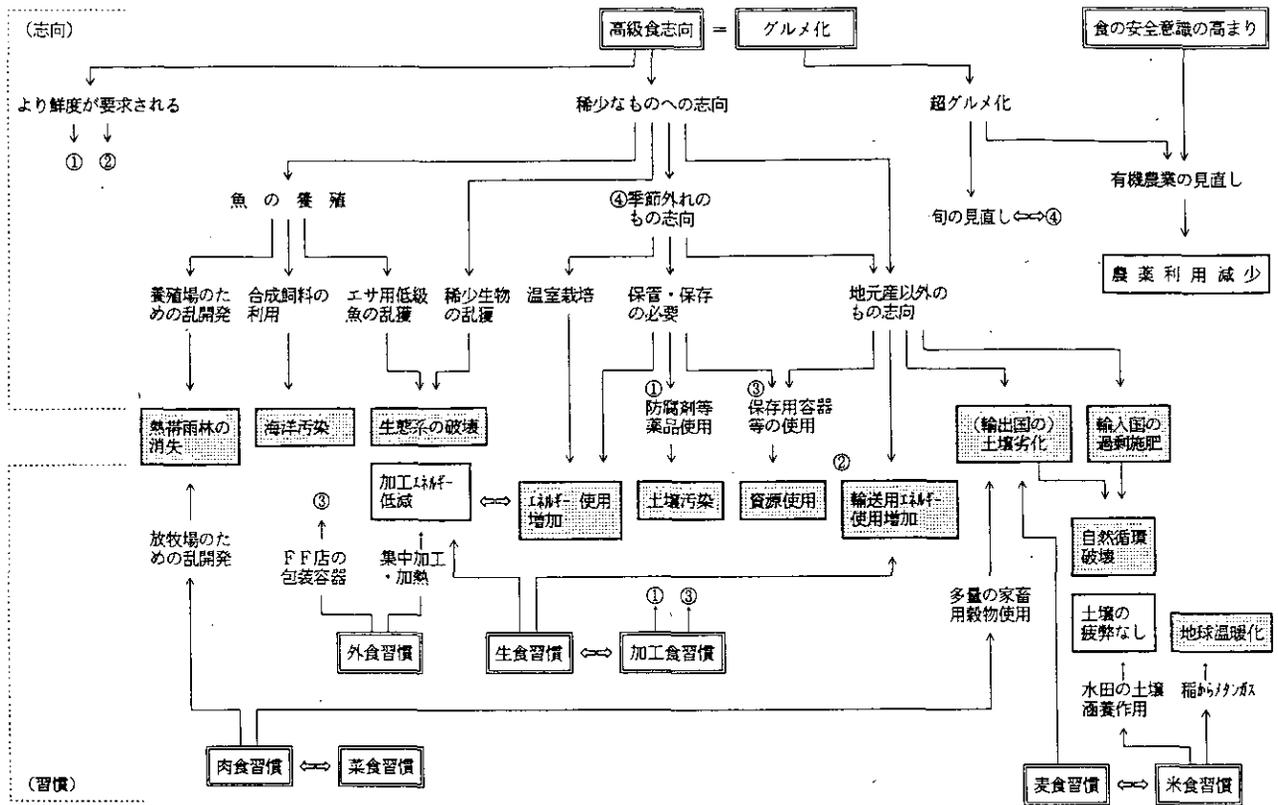


図5 食生活と地球環境問題の連関図

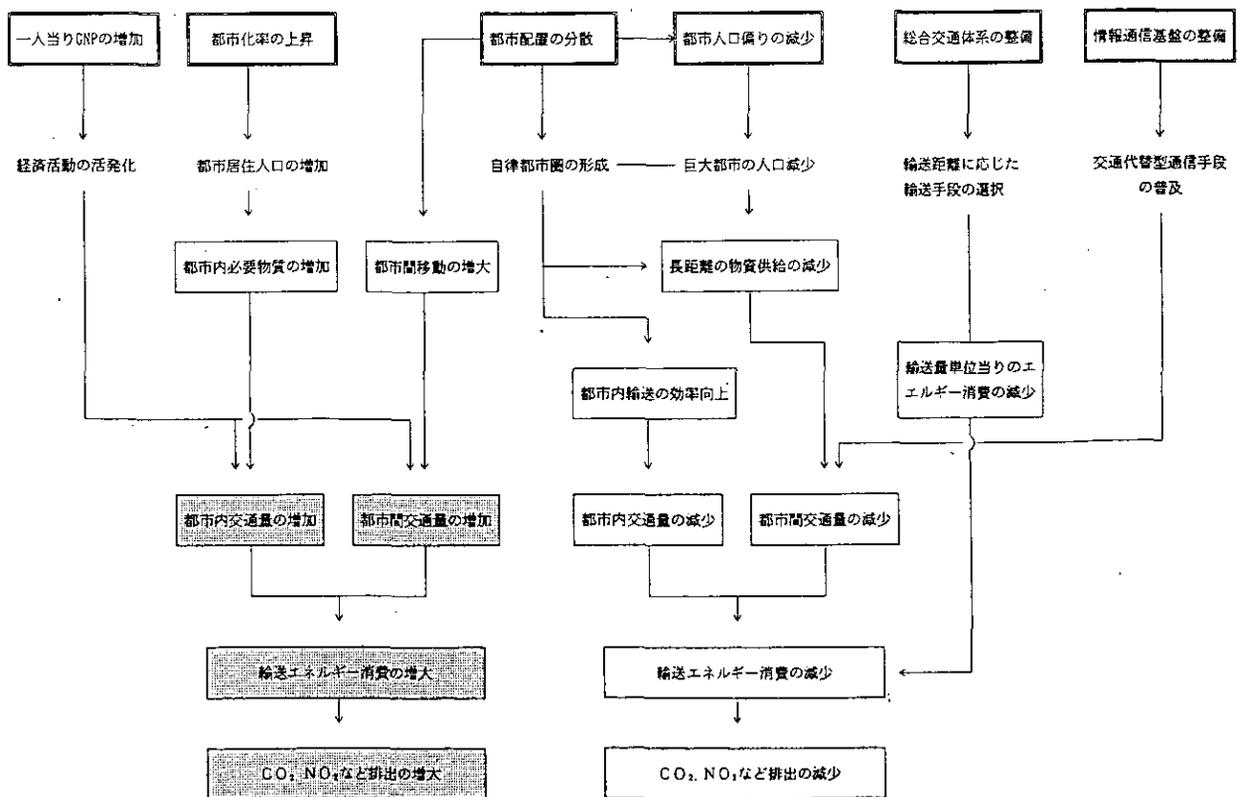


図6 国土利用と地球環境問題の連関図

表3 国際比較調査の概要

表題	環境に対する態度と認識についての調査<日本版> (Research into Environmental Attitude and Perception)
実施主体	国立環境研究所
言語	日本語(ただし、共通版である原版は英語)
母集団	20歳以上の男女個人
標本数	2,000人
抽出法	層化2段無作為抽出法
調査時期	平成5年3月9日~12日
調査内容	1) 家庭におけるエネルギー使用について(支払い、エネルギー問題についての認識、望ましい政策) 2) 通勤・通学・買物時の自家用車やバイクの利用について(運転の頻度、購入時の配慮、通勤・通学にかかる時間と手段、買物へ行くときの利用交通機関、運転削減努力と望ましい政策) 3) ごみ問題について(過剰包装品の購入、ごみ問題についての認識、望ましい政策) 4) 環境マーク(エコマーク)について(認知度、信頼度、人々への行動変化を促すための望ましい政策) 5) 政策について(政策の国際協調のレベル、日本の努力度、他国の政策と日本) 6) 属性(男女、年齢層、所得階層、住居、家族、学歴、職業)

析しておくことは、本研究の基本である。このため、西ドイツのZUMA研究所を中心に推進されている「環境に対する態度と認識についての国際比較調査」に参加し、世界共通の質問票を用いて調査を実施した。その概要を表3に示す。

この調査は、ドイツ、イギリス、イタリア、オランダ、アイルランドの5カ国において同時に実施されており、これらの調査結果を比較すればわが国の国民の態度や意識が西欧諸国とどの程度違うかが明らかとなり、その背景となるライフスタイルの差を分析することができる。詳細な分析は来年度に実施することになっている。

3) 国土の多極分散化による省エネルギーの分析

国土利用については、前年度に世界の都市を統計的に分析して、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ことを見いだした。本年度は、わが国の国土利用を多極分散化したときに、実際にどの程度の省エネが可能かを、シミュレーション・モデルを用いて分析した。使用したモデルはTOPAZをベースに作成した非線形最適化タイプの輸送エネルギーモデルである。

表4には、現状、東京・大阪圏の人口の3割を地方分散したケース、エネルギーを最小化したケースのそれぞれについて、輸送エネルギーの推計結果が示してある。3割分散の場合で輸送エネルギーは15%削減でき、最適

表4 地方分散化に伴う人口分布の変化と輸送エネルギーの消費量

地方707名	現状の人口 (万人)	3割分散の人口 (万人)	最適配置の人口 (万人)
北海道	564	601	774
東北	978	1,201	1,568
関東	3,800	2,862	1,692
北陸	558	707	617
中部	1,711	1,711	1,419
近畿	2,012	1,518	1,096
中国	775	960	1,710
四国	424	572	1,464
九州	1,329	1,589	1,936
輸送エネルギー総計 (兆kcal)	742	632	594

化した場合は20%(長距離輸送エネルギーに限れば40%)削減可能であることを示唆している。このシミュレーションには、地域分割を都道府県単位にしたこと等、まだ多くの問題点が残っているが、わが国において国土の多極分散化が地球環境保全の面からも好ましいことを示した意義は大きい。

(3) 環境勘定研究

「持続可能な発展」の達成に向け、環境保全と経済発展の両立をめざした新しい評価体系の確立が緊急の課題となっている。1989年のアルシュサミット経済宣言は、「経済と環境を両立させる政策決定をするうえで国際的

な尺度となる指標を開発する」よう OECD に検討を依頼し、1992年6月の地球サミット（UNCED）で採択された Agenda21 でも1章を割いて、環境資源勘定開発の必要性を述べるなど、この課題への関心はますます高まりつつある。国連統計機関は、1993年の国民経済計算体系（SNA）改訂に際し、環境経済統合サテライト勘定を新たに加えることとしている。こうした国際的要請に応えるために、わが国でも環境資源勘定を作成する手法を整備することが急務であるが、取り組むべき課題が多岐にわたるため、本研究に先立ち、研究を体系的かつ効率的に進めるための予備的検討を平成3年度に行った。予備的検討の結果、自然資源供給の大半を輸入に依存し、世界第5位のCO₂排出国であるわが国については、貿易を介した問題や全球規模の問題を視野に入れることが重点課題の一つであることが明らかにされたことから、本研究は、地球規模の環境変化を反映したわが国の環境資源勘定の作成手法の開発を目的とするものである。

本年度は、環境資源勘定体系に関する従来の研究をレビューし、また環境資源勘定に関する国際的活動への参加するとともに、環境資源の国際的フローを分析するためのデータベースの作成や環境資源の経済的評価のための基礎的分析を行った。

1) 「持続可能な発展」の概念およびこれを計量する指標についてのレビュー

今まで「持続可能な発展」について論じた主要な40の文献をレビューした。その結果、これらの概念は生物の多様性、環境容量、天然資源の保全といった自然環境の制約、永続的な経済成長や世代間の公平性といった将来世代との分配問題、それに南北問題の解消、生活質の向上、社会的正義や文化的価値の追求といったより高次の観点から論じたもの、の3つに分類できることが分かった。次に、持続可能な発展の度合いを計測する指標についてレビューして、今までの指標のほとんどが、環境や自然資源の制約条件を経済指標に反映させて、経済活動を修正させることを目的としたものであることが分かった。これらの指標は表5に示すように多数提案されているが、大きく4つの流れに分けられる。

第1の流れは、ノルウェーやフランスで取り組まれてきた物的な勘定体系の作成とその指標化である。これは、環境や自然資源のストックとフローを毎年計測し、環境の状態や資源の蓄積量を一定レベルに維持・回復するの

に最も効率的な方策を検討することを目的としている。第2の流れは、環境の汚染や劣化を経済的に評価して、GNPなどの経済指標を修正しようとする一連の試みである。代表的なものに、米国の資源経済学者ベスキンおよびオランダの研究がある。第3の流れは、自然資源の減価償却アプローチである。ベスキンやオランダのフォーティングが主に公害や環境汚染を対象にして検討しているのに対して、このアプローチは森林の減少や土壌の劣化といった自然資源の枯渇や質の低下を国民経済計算の中で適切に考慮することを目的としている。典型的な研究としては、1989年に世界資源研究所が発表したインドネシアでの国内純生産（NDP）の算定がよく知られている。第4の流れは、環境のみでなく労働、医療、余暇等の総合的な福祉水準を貨幣単位で表示しようという一連の試みである。この試みが最も古くから始まっており、米国の経済学者ノルドハウスらの経済福祉指標（MEW）やわが国の国民福祉指標（NNW）が代表的である。これら4つの分野で取り組まれてきた試みを基礎にして、国連統計局は環境経済統合勘定システム（SEEA）を提案している。

以上のレビューの結果、今後、持続可能な発展指標を開発する際には、地球的視点を取り入れた指標、世代間の公平性が検討できる指標、地域と地球の関係を表現できる指標体系、今までの指標論を統一的に説明する理論枠組み、などが必要であることが分かった。

2) 環境資源勘定に関する国際的活動への参加

わが国の環境資源勘定体系を確立していく上では、環境資源勘定開発に取り組んでいる諸外国、国際機関等と共同研究や情報交換を行うことが重要と考えられる。こうした観点から、本年度は世界資源研究所（WRI）が開催した「地球環境指標に関するワークショップ」および経済協力開発機構（OECD）環境政策委員会環境の状況グループ会合ならびに環境指標ワークショップに出席し、わが国の最近の研究への取り組み状況について報告するとともに、諸外国における環境資源勘定および環境指標に関する活動状況について調査した。

OECD 環境の状況グループでは、過去数年、おもに物量的勘定による自然資源勘定を検討課題としてきたが、1989年のアルシュサミットから委嘱された「環境と経済の両立を示す指標の開発」の一環として、より広義の環境資源勘定への取り組みにも着手している。現在取りま

表5 環境と経済の統合指標一覧

出典	手法の特性				指標化の方法				対象となるもの							経済的価値の評価方法					
	物的勘定	費用-効果分析	サテライト勘定	GNP修正	バランス表	I/O表	勘定の確認と再分類	指標の定式の修正	経済モデル	汚染	環境資源	物的資源	地球環境	人工的資本	生活の質	その他	防止支出/還元費	地代	ユーザークスト	CVM	その他
1) Nordhaus and Torbin (1973)				*	*			MEW		*				*	*						*
2) JAPAN(1974), Economic Council of Japan				*	*			NNW		*				*	*						TCM
3) NORWAY (1975)	*	*				*	*			(*)	*	*									
4) NETHERLANDS (1980)		*		*						*	*	*									
5) Peskin (1981)				*	*					*	*	*									*
6) Leipert (1986)				*	*			ENP		*	*	*									
7) Daly and Cobb (1989)				*	*			ISEW	TCM	*	*	*	*	*	*	公平性	*	*	*	*	*
8) Federal Statistical Office of Germany (1989)	(*)		(*)	?				(*) ENP?		*	*	*	(*)	(*)							*
9) FRANCE 'Les Comptes du Patrimoine Naturel'(1989)	*		*	*	*	*	*			*	*	*	(*)	(*)	(*)	(*)					*
10) International Chamber of Commerce (1989)		*											*	*	*						*
11) Pearce (1989)				*				SI		*	(*)	*	*	*	*						*
12) Repetto (1989)	*			*	(*)			NDP		*	*	*									*
13) Australia (1990)	*			*	*	*	*			*	*	*	*	*	*						*
14) China (1990)	*			*	*	*	*			*	*	*	*	*	*						*
15) Daly (1990)				*	*			SSN NP		*	*	*	*	*	(*)						TCM
16) Friend (1992)	(*)			*	*					*	*	*	*	*	*						FDES
17) Lone (1992)	*	*		*	*					*	*	*	*	*	*						*
18) System for Integrated Environmental and Economic Activity(SEEA), UNSO(1992)	*		*	*	*	*	*	EDP		*	*	*	*	*	*						(*)
19) CANADA (1992)	*		*	*	*	*	*	SDI		*	*	*	*	*	*						*

指標

MEW:経済福祉の指標(Measure of Economic Welfare)

ENP:国民エコ生産(Eco National Product)

SI:持続可能な所得(Sustainable Income)

SSN NP:持続可能な社会的国民純生産(Sustainable Social Net National Product)

その他

FDES:(国連)環境統計の開発のための枠組((UN) Framework for the Development of Environmental Statistics)

TCM:旅行費用を用いた環境価値計測手法(travel cost method)

CVM:直接質問による環境価値計測手法(contingent valuation method)

NNW:国民純福祉(Net National Welfare)

ISEW:持続可能な経済福祉の指標(Index of Sustainable Economic Welfare)

NDP:国内純生産(Net Domestic Product)

SDI:持続可能な発展の指標(Sustainable Development Indicators)

とめ中の報告書では、環境資源勘定に関する多様なアプローチの整理を試み、①GNPやSNA自身の修正、②現在のSNAに付加する環境に関するサテライト勘定、③物量的な自然資源勘定、の3種に分類している。現在、多くの加盟国で環境資源勘定への取り組みが開始されているが、経済統計担当当局による環境サテライト勘定と、環境部局による自然資源勘定の大きな2つの流れがあり、わが国のように、これら両面にわたって、省際的な調査研究体制を整えている例は少ない。

わが国での取り組みに対しては、貿易などを視野に入れた国際的な環境資源勘定および、地方自治体レベルで

の環境指標や環境資源勘定への取り組みに関して諸外国の関心が高かった。

3) 環境資源の経済的価値による評価における時間・空間集計の問題点の検討

環境資源勘定体系をマクロ経済指標と対比可能な形で作成するためには、空間的集計の考え方、および、異なる時点の間での比較に際しての基準のとり方について整理することが必要である。

空間的集計については人口の分布が環境評価に与える影響を検討した。地価関数などを用いて環境評価を行う

場合に、多重共線性の問題が避けられないだけでなく、人口の空間的分布が重みとなって評価値に影響するため推計値にバイアスが生じる。この点について地価関数の特性を検討するとともに、内生変数を明示的に扱う構造方程式体系の検討を行った。

さらにこれら集計問題の基礎的検討のため、都道府県あるいは市町村単位の時系列データベースを整備したが、本年度はデータの基本的構造の把握に重点をおいた。データの起源は次の3種類である。①森林資源データベース（都道府県単位）、②地域総合ファイル（都道府県および市区町村単位：日経）、③地域データファイル（都道府県および市区町村単位：東洋経済）。

貿易による環境変化の評価手法として、産業連関分析の拡張による定式化をSEEAの文献調査により検討するとともに、森林資源データベース（相手国別、時系列）の整理を行い、時系列データとしての基本的特性を検討した。さらに空間的集計問題の拡張としての定式化について検討した。

マクロ指標としての異時点間比較のための基準の設定は、地域的集計および資源貿易のどちらからみても環境資源勘定体系にとって避けることのできない問題であり、環境と経済の調和という観点からマクロ経済における基準問題との比較検討を試みた。

以上の検討の結果、市町村単位の環境変数は相対的に不足しておりさらに入手を試みる必要があること、明示的な内生変数を導入した構造方程式体系システムが重要であること、しかし市区町村単位の地域社会経済変数は環境変数に比べ多いものの、データソースが限られているために限界があること、が明らかとなった。また、環境資源勘定がマクロ指標として機能するために満たすべき基準問題の条件が示された。

4) 貿易による国際的環境負荷移転に関する勘定のためのデータベース整備

わが国は、化石燃料や木材などの自然資源の大部分を輸入に頼っている。また近年、工業用原材料についても近隣諸国へ生産拠点を移す動きがある。したがって、こうした資源、原材料の国際的取引によって海外で生じる環境への負荷を環境資源勘定体系に反映させる必要がある。

このため本年度は、こうした国際的環境負荷移転の勘定の基礎データを作成するため、国連統計局による国際

貿易統計データベースの磁気テープを入手し、これを編集して貿易マトリクスを作成するプログラムを整備した。原データとして用いたのは、1988年の国際貿易統計品目分類（SITC）Rev2のデータであり、85カ国から報告された延べ約548万件の貿易ODペアからなる。この原データから抜粋する品目分類を指定することにより、日本の主要貿易相手国35カ国および全世界9地域別の貿易ODマトリクス表が作成され、印字出力またはスプレッドシートへの読み込みのための磁気データファイルへの出力が行える。

当面の解析対象として、自然資源の直接取引として森林資源、野生生物資源関連の品目のデータを抽出・編集した。また、海外での工業生産に伴う環境負荷の解析事例として、内包された（Embodied）エネルギーおよびCO₂排出（これらを内包環境負荷と呼ぶこととする）を取り上げることとし、内包環境負荷原単位の算出に用いた日本の産業連関表の品目分類とSITCの品目分類の照合を行ったうえで、内包環境負荷計算の基礎とする品目グループ別の貿易ODマトリクス表を作成した。図7は、こうして作成したODマトリクスをもとに、製材・合板用丸太（針葉樹、非針葉樹の合計）について、地域間の交流状況を地図として示したものである。

こうした貿易ODデータにより、国・地域間の環境負荷の収支が物量的に勘定される。今後は、貿易量と輸出国の環境の変化量の関係を定量化したうえで、経済的な評価手法の適用についても検討し、国内の勘定体系と国際的な環境負荷収支とをどのように整合させるかの検討が必要である。

(4) まとめ

以上、本年度の成果をまとめれば次のとおりである。

まず、世界モデル研究については、本年度は、環境総合モデルについてはフレームワーク・モデルと水域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中期予測モデルの開発にひとまず区切りをつけるとともに、動学的最適化モデルおよび一般均衡モデルといった長期予測モデルの開発に着手した。来年度は、フレームワークモデルの完成とこれに入力する各種知見の収集、3次元物質循環モデルの改良と統合、長期予測経済モデルの開発などを進める予定である。

また、社会システム研究については、本年度は、社会経済構造と地球環境問題との関係に関して全体の分析フ

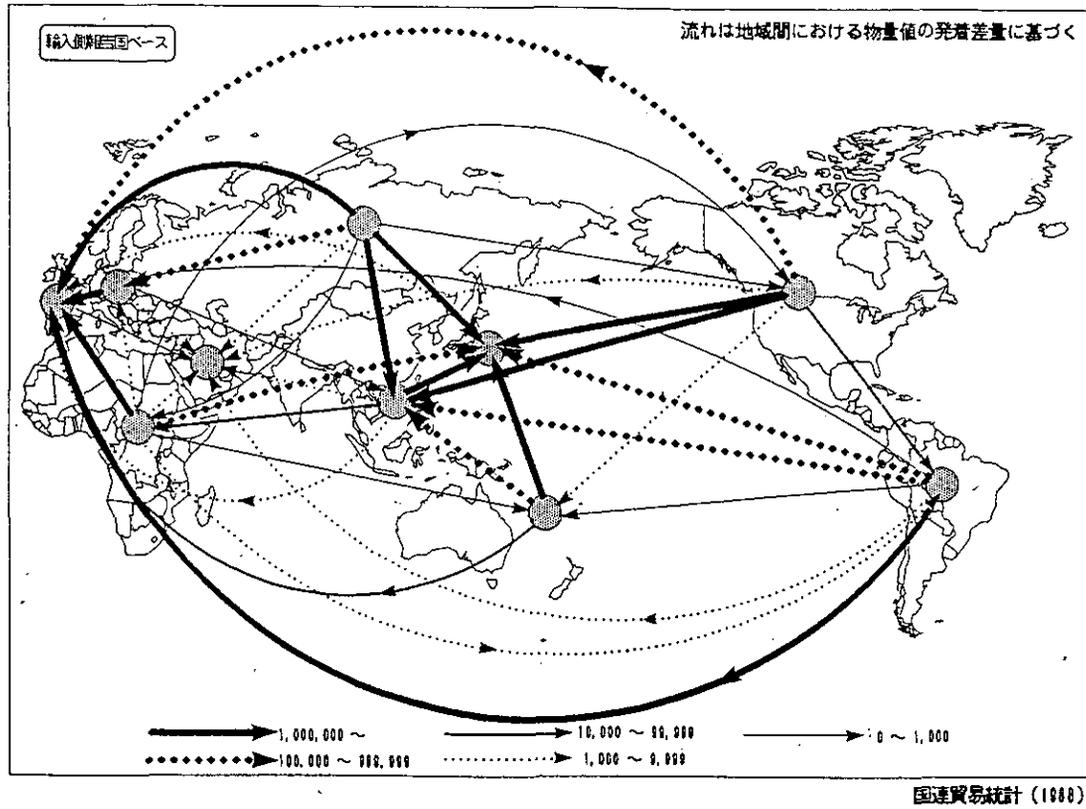


図7 貿易による自然資源の地域間交流状況（製材・合板用丸太）

レームを作成するとともに、100項目を超える仮説やシナリオを作成して、関連する知見やデータを収集・整理した。さらに、ライフスタイルの国際比較のための意識調査を実施するとともに、国土利用と省エネルギーに関して分析を進めた。来年度はこれらの成果を基礎にして、国際比較研究をさらに深める予定である。

さらに、環境勘定研究については、環境資源勘定の検討の基礎となる「持続可能な発展」の概念の定義についてレビューするとともに、これを計測するために提案されてきた指標を整理し、今後の環境資源勘定に関する研

究の重点課題を明らかにした。一方、国際会議への出席等を通して諸外国・国際機関における最近の研究動向を調査した。また、国連貿易統計データベースから主要国・地域間の貿易ODマトリクス表を作成するプログラムを整備し、木材など自然資源関連品目ならびに内包エネルギー・内包CO₂排出量を例に、国際間の環境負荷収支を勘定するための基礎データ作成を行った。来年度はこれらの成果を基礎にして、環境資源勘定体系の構築に向けて検討を進めたい。

2.11 課題検討調査研究

2.11.1 地球大気環境問題の相互相関の解明に関する予備的研究

〔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

オゾン層研究チーム 中根英昭

酸性雨研究チーム 昌山史郎

海洋研究チーム 原島 省

〔研究概要〕

地球環境変動については通常これをオゾン層現象、地球温暖化、酸性雨、森林減少などの「問題」別に整理する見方が一般的になされてきたが、グローバルチェンジの特徴はこれがたった一つの大きな問題であることであって、「問題」別の整理はあるところまでは便利であるが、ある場合には全体の一部を切りとることによって減少についての非常に不確定な予測を与えることになり、適切な対策を立てる上での落とし穴になりかねない。本研究ではこうした落とし穴を避けるための今後の地球環境研究課題抽出の指針を探ることを目的として、次の事項に関する予備的検討を行った。

(1) 地球大気環境問題の相互相関

- 1) オゾン層破壊が地球温暖化に与える影響
- 2) オゾン層破壊が酸性雨（対流圏化学）に与える影響
- 3) 地球温暖化がオゾン層破壊に与える影響
- 4) 地球温暖化が酸性雨（対流圏化学）に与える影響
- 5) 酸性雨が地球温暖化に与える影響

(2) 地球環境物質循環モデル

- 1) 陸域生態系と炭酸循環
- 2) 海洋における炭素循環
- 3) 気候モデルへの炭素循環モデルの取り込み

2.11.2 紫外線の増加がヒトの白内障発症に及ぼす影響に関する予備的研究

〔研究組織〕

環境健康部

病態機構研究室

○遠山千春

環境疫学研究室

小野雅司・本田 靖

〔研究概要〕

本研究は、オゾン層の破壊による紫外線の増加がヒト水晶体に及ぼす影響、特に白内障について、紫外線暴露と白内障発症との関連を疫学的に明らかにすること、ならびに、紫外線照射に伴う白内障混濁の発生メカニズムを実験的に解明する目的で行った予備的研究である。

本年度の疫学的研究は、国内外複数地域において疫学調査（地域住民の紫外線暴露量測定と住民検診）を実施するための諸条件の検討である。まず、これまで報告されているいくつかの簡易測定装置について性能評価を行うとともに、予備的な暴露量調査を実施した。次に、白内障の客観的な病型分類を行うため、前眼部画像解析シ

ステムの開発を行った。第3に、複数の研究機関の研究者による住民検診を行うために不可欠な問診票の統一・標準化のための検討を行った。そして、上記調査方法の妥当性を検討するため、石川県門前町及び沖縄県与那城村において予備調査を実施した。

本年度の実験的研究は、まず、ラットの水晶体を摘出し、この水晶体で混濁のないものを用いての器官培養条件を確立した。次に310nmの紫外線を $5\text{J}/\text{cm}^2$ になるように照射した後、器官培養を72時間にわたって行い、混濁状態の観察、還元型グルタチオンの定量等を行い、さらに2次元電気泳動法によるタンパク質の解析を行った。

2.11.3 有害廃棄物の越境移動に係る社会経済的・技術的評価に関する予備的研究

〔研究組織〕

地域環境研究グループ

有害廃棄物対策研究チーム 中杉修身

社会環境システム部

部長

○後藤典弘

〔研究概要〕

有害廃棄物の管理の実態およびその将来方向について、わが国を含む先進国、アフリカ等の途上国および UNEP、OECD 等の国際機関別に、文献調査、専門家ヒヤリング等により調査を行い必要な情報を収集した。さらに、1989年3月のバーゼル条約採択のきっかけとなった特に先進国から途上国への越境移動について詳細な事例約100件の調査を行った。

これらの調査結果をもとに、越境移動を引き起こす経

済的、法規制等の社会制度的、処理技術に係る技術的要因の抽出を行い、各国における環境規制のレベル ↔ 処理処分技術レベル → 移動国間における処理処分コストの格差、という図式を明確にした。同時に、各国で規制対象となっている廃棄物の定義や上記の越境移動の図式にもとづく今後の検討課題を明らかにした。

今後はこれにより、各国の規制基準、有害廃棄物の管理実態、および処理技術水準等の要因およびその要因間の関連を明確にすることがさらに望まれる。

2.11.4 アジア太平洋地域における気候変動シナリオの作成に関する研究

〔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

原沢英夫

化学環境部

植弘崇嗣

〔研究概要〕

温暖化の影響及びその対策を評価・検討するためには、標準的な気候変動シナリオを設定することが必要である。標準シナリオを用いることにより、地球規模、地域、国レベルでの影響の比較や対応策の順位づけが可能となる。

本研究では、気候変動シナリオの作成手法を広範囲に文献調査を行い、とくにIPCC（気候変動に関する政府間パネル）でも採用されている大気大循環モデル（GCM）を用いた作成手法について、手法・適用上の問題点を整理した。

この成果を踏まえ、GCMの開発を実施している研究機関からGCMモデルの出力で公開されているものについて①CO₂の1倍時、2倍時の条件における平衡実験と

②CO₂が徐々に増加する影響を考慮した漸増実験の出力データを入手した。それらをシナリオ作成に利用しやすい形式に加工し、データベース化した。

併せて、気候変動シナリオ作成に必須の気象データも収集したが、観測地点ごとの月単位の気候変数データに比べて、GCM出力データと直接重ね合わせることができるメッシュデータ（気象の客観解析データ）は限られており、現在のものでは、メッシュがまだ粗いので、気象関連データを早急に整備する必要がある。

GCM、気象関連データを統一的に扱うために地理情報システム（GIS）の適用についても検討した結果、アジア太平洋地域の抽出や結果の表示など、気候変動シナリオ作成・利用上有効であることが分かった。

平成4年度編集小委員会

委員長 近藤 矩朗

委員長代理 松本 幸雄

委員 栗原 崇

〃 山下 洋一

〃 原島 省郎

〃 酒卷 史郎

〃 高橋 慎司

〃 須賀 伸介

〃 瀬山 春彦

〃 鈴木 明夫

〃 杉本 伸夫

〃 海老瀬 潜一

〃 田中 浄紀

〃 古田 直紀

事務局 松井 文子

国立環境研究所地球環境研究年報

平成4年度

平成5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

〒305 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。