

AG-4-'94

国立環境研究所 地球環境研究年報

平成 5 年 度

環境庁 国立環境研究所

平成5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

地球環境研究の特徴は長期的展望のもとに継続した観測や研究と問題解決の対策及び技術開発研究にあります。その意味ではまだ研究は緒についたばかりであるといえますが、本年度は地球環境研究総合推進費による研究が始められて4年経過し、一部終了した課題もあります。地球環境研究の重要性の認識はますます高まり、研究者の責任もそれだけ重いわけですが、それぞれある程度のめどが付いてきた段階に達したと考えられます。本報告書にその一端をお読みとりくだされば幸いです。

地球環境研究のかなりの部分がまさに地球レベルでの研究であり、本報告書に見られますように国外における研究の比重が高まっています。国内における研究にしても既に国際的な研究ネットワークの一部として位置づけられ、より信頼性の高い研究を期待されています。本研究所が地球環境研究において国際的にリードするには、さらなる研鑽が必要であることは申すまでもありません。

本研究は地球環境研究グループが主体となって推進していますが、研究所内の他の組織及び研究所外の機関もかなりの部分に関与してしており、その成果も一部ここに納められています。これからの研究のためにできる限り多くの方々のご批判、及びご助力をお願いする次第です。

平成6年8月

国立環境研究所

所長 鈴木 継美

目 次

1 概 況	1
2 地球環境研究総合推進費による研究	
2.1 オゾン層の破壊に関する研究	7
2.2 地球の温暖化現象解明に関する研究	13
2.3 地球の温暖化影響・対策に関する研究	27
2.4 酸性雨に関する研究	45
2.5 海洋汚染に関する研究	55
2.6 熱帯林の減少に関する研究	63
2.7 野生生物種の減少に関する研究	71
2.8 砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する研究	81
2.9 総合化研究	89
2.10 課題検討調査研究	105
2.10.1 オゾン層変動による植物影響の国際的モニタリング手法の確立に関する予備的研究	105
2.10.2 定期航空便を利用したシベリアにおける二酸化炭素、メタンの高度分布の通年測定に 関する予備的研究	105
2.10.3 リモートセンシング及び地上探査によるシベリア凍土地帯における植生調査手法に 関する予備的研究	106
2.10.4 アジア・太平洋地域における気候変動の影響評価ガイドラインの作成に関する研究	106
2.10.5 都市における温暖化防止対策研究の総合化に関する予備的研究	107
2.10.6 北極アイスコア分析による地球環境変動研究の予備調査	107

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よって実施されている。

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42課題にわたっており、地球環境研究グループだけでなく、地域環境研究グループおよび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。総合化研究は、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、レーザーレーダー、ミリ波分光計等による地上からのオゾン層総合的観測手法の開発、成層圏エアゾルがオゾン層に及ぼす影響に関する観測的研究及びラジカル反応等の実験的研究、オゾン層観測データの解析や数値モデルを用いたオゾン層変動の解析に関する研究、紫外線の増加が皮膚ガンの発症及び白内障に及ぼす影響に関する研究、植物における紫外線障害の修復機構に関する研究、フロン及びハロン代替物質の生体毒性や大気環境影響に関する研究、フロン等対策技術の評価に関する研究を行った。

地球の温暖化現象解明研究では、二酸化炭素やメタンなど温室効果気体の地球規模での増加に関する研究と、気候変動モデルの開発研究を中心的な研究課題としている。シベリアにおいて、夏に航空機による大気微量成分の測定と気象の大規模な観測を行い、二酸化炭素やメタンの発生・吸収を中心とした大気の動態の研究を推進するとともに、数値モデル計算との比較検討を行った。通年の観測を、東シベリアでの地上観測と、西シベリアでの航空機観測との二つの方向で開始した。また、シベリア凍土地帯における湿原、湖沼、凍土からのメタンの発生量に関する研究や、環境が森林形成に及ぼす影響などの研究を行った。また、国内では温室効果気体である対流圏オゾンにかかわる研究、土壌中の二酸化炭素の発生プロセスなどの研究を行った。他方、気候変動モデルの

分野では、熱輻射、エネルギーや運動量の輸送などを含んだ大気循環モデル（まだ、海洋大循環との結合や陸域生物圏との相互作用を含まない）を完成させた。また、熱帯域での雲の10年規模での変動に関する研究を行った。

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、日本等の国別エネルギー需要モデルを完成させ、また、世界モデルを改良して気候変化の感度分析を行うとともに、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改良し、また、植生モデルを構築した。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（全国消費実態調査）とともに、電気自動車、断熱材、廃棄物リサイクル、資源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、野外実験及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、IGAC/APARE計画に基づく国際協同研究の一環として航空機による酸性・酸化性物質の空間分布の観測を行った。屋久島の西方の東シナ海上空および済州島に着陸してここをベースに韓国西方の黄海上空における観測を行った。また、酸性物質の沈着量マップ作成のためにガス、エアロゾルの測定を各地で開始した。越境汚染の定量化のため鉛同位体の測定法を確立し、データを得た。さらに、大気汚染物質の移流、変質、沈着モデル作成に着手した。酸性雨対策の技術の評価を行った。また、酸性雨関連化学種の生体系影響を評価するため、屋久島生体系に注目し、樹木、土壌、河川、水などのサンプリングならびに化学分析を行った。また、自然酸性環境の森林ならびに湖沼・河川生態系に分布する動植物に関する調査を開始した。

海洋研究では、新たに沖縄フェリー、瀬戸内海フェリーにより開始されたモニタリングをプラットフォームとして、海水溶存CO₂分圧、DIC、DOC等の計測を行い、

フェリーの無人モニタリング項目や衛星可視域データと比較して、広域の海洋変動の解析を行った。また、CO₂シミュレーターにより、円石藻その他の植物プランクトンを中心とした炭素循環の研究を行い、また、海域メゾコズム（隔離生態系）により植物・動物プランクトンを中心とした物質循環を調べた。また、日本近海の動物プランクトンに含有される重金属等の汚染、生物濃縮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、多様な生物種から成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、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た。パソ森林保護区内に高さ40m 1本、30m 2本のタワーとそれをつなぐ林冠歩道を設置し微気象、光合成特性などの測定を行った。さらに、熱帯林の環境形成作用の研究として、土壌動物による落葉・落枝の分解過程の測定を継続した。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及びその変化を調査し続行した。

野生生物研究ではマレーシア半島部の熱帯林において、森林規模、植生構造、標高などを異にする3つの森林を対象として調査を継続して行った。また、野生動物の遺伝的多様性が適応度に及ぼす影響解明のために、メダカ、オオヨシキリ、トンボ、ユスリカ等を用いてフィールド調査および室内実験を開始した。これらの動物から抽出したDNAの特定部位をPCR法で増幅し、ごく微量のDNAから個体間の差異を検出する方法を開発した。上記の動物について体の部位の左右非対称性のゆらぎ（完全な対称性からの狂い）を測定し、左右非対称な個体は発育速度、生存率、交尾成功率などが劣ることが分かり、適応度の指標として左右対称性のゆらぎを使用できる可能性が高まった。

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他、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係わる研究が続けられた。

平成5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通りである。（これらの内☆印を付した課題は平成5年度からの新規あるいは組みなおし課題、他は平成3年度から発足した継続課題の研究である。・印は主課題、無印は副課題。）

（1）課題別研究

オゾン層の破壊

- ・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）
- ☆衛星搭載レーザーレーダによる地球大気環境の評価に関する研究
- ・紫外線の増加がヒトの健康に及ぼす影響に関する研究
- ☆ 紫外線が皮膚ガン発症の素過程に及ぼす影響に関する研究
- ☆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研究
- ☆（紫外線による白内障発症に関する疫学的研究）
- ☆（紫外線照射による白内障発症機序の解明に関する実験的研究）
- ・紫外線の増加が植物等に及ぼす影響に関する研究
- ☆植物の紫外線に対する防御機構に関する研究
- ☆（植物における紫外線障害の修復機構に関する研究）
- ☆（紫外線増加に対する海藻類の馴化に関する研究）
- ・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フィジビリティに関する研究

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（現象解明）

- ・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
- 閉鎖性水域からの放出量の解明に関する研究
- ☆地球温暖化に係わる対流圏大気化学の研究
- ☆大気中微量成分の消滅・生成に係わるフリーラジカル反応の速度・機構の解明
- ☆対流圏におけるオゾン増加原因の解明に関する研究
- ・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
- ☆シベリア・ツンドラ地帯の凍土融解に伴う大気微量成分の放出に関する研究
- ・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（影響・対策）

- ・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及び予測に関する研究
- ☆植物に及ぼす複合影響に関する実験的研究
- ・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
- ☆暑熱による生体防御系と代謝解毒系の変動と疾病発生に関する研究
- ☆東アジア地域におけるマラリア及び媒介蚊の地理的分布と、その規定要因の解明に関する研究
- ☆地球温暖化防止対策技術の評価及び評価方法の開発に関する研究
- ☆地球温暖化対策技術総合評価システムの開発に関する研究
- 交通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

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

- ・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地球温暖化の影響評価モデルの構築に関する研究
- アジア太平洋地域における社会発展等の基本シナリオの設定に関する研究
- ・家庭等における二酸化炭素排出抑制システムに関する研究
- 家庭等における二酸化炭素排出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排出抑制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排出抑制システムの導入に関する研究
- ・電気自動車の普及促進による二酸化炭素排出抑制交通システムへの転換に関する研究
- 電気自動車の普及阻害要因の分析に関する研究
- ☆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総合的解析
- ・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
- ☆汚水・廃棄物の処理処分に伴う温室効果ガス発生量、有効利用可能エネルギー量、リサイクル可能資源量の評価と解析に関する研究
- ☆適正な汚水・廃棄物処理処分システム及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

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
- 地上観測による酸性・酸化性物質の動態解明に関する研究（同位体比測定による大気汚染物質の大陸からの寄与の推定と酸性物質沈着量マップ作成に関する研究）
- ☆航空機、船舶等を用いる酸性、酸化性物質の動態解明のための国際共同観測（IGAC計画に基づく航空機等を使用した国際共同観測）

- ☆大陸からの大気汚染物質の移流解明のための酸性、酸化性物質の発生、移流、変質、沈着モデルの作成
(東アジアにおける酸性、酸化性物質の発生、移流、変質、沈着モデルの作成)
- ☆酸性物質の生態系に与える影響に関する研究
- ☆酸性物質の植物環境系に与える影響に関する研究
- ☆酸性物質の臨界負荷量に関する研究
- ☆土壌における臨界負荷量に関する研究(土壌-植物系における臨界負荷量の評価に関する実験的研究)
- ・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

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
- ☆海洋生態系の遷移にともなう物質循環フラックスの変動機構に関する研究
- ☆海産藻類による物質循環機能のモデル化に関する研究(海底堆積物の化学組成を用いた長期物質循環変動の推定手法に関する研究)
- ・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
- 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
- イカ類肝臓の蓄積化学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
- 定期航路連続観測と衛星データによる海洋環境指標の時空間変動に関する研究
- ・ペルシャ湾岸の原油汚染等が海洋環境に及ぼす影響の評価に関する研究
- ☆衛星リモートセンシングによる沿岸域生態系のモニタリングに関する研究

熱帯林

- ・熱帯林生態系の環境及び構造解析に関する研究
- ☆熱帯林構成種の成長様式に関する研究
- ☆動物群集の動態に関する研究
- ・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
- ☆樹冠形成過程の生理生態学的多様性に関する研究

- 動植物の相互作用の多様性に関する研究
- ・熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究
- ☆熱帯林の微気候形成作用の解明に関する研究
- 土壌環境形成における動物の役割に関する研究
- ・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-AVNHR (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
- ・熱帯アジア地域における湿地の生物多様性保全に関する研究
- ☆希少野生動物の遺伝的多様性とその保存に関する研究
- ☆希少野生動物の遺伝的多様性に関する研究(希少野生動物の遺伝的多様性の現状把握)(遺伝的多様性減少の影響の解明)
- ☆希少野生動物の生息域外保全及び増殖技術に関する研究(希少野生動物の遺伝情報管理のシステム化)

砂漠化

- ・砂漠化と人間活動の相互影響評価に関する研究
- ☆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
- ☆半乾燥・半湿潤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(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)

(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(地球規模の環境変化を反映した環境資源勘定の手法開発に関する研究)

(3) 課題検討調査研究

- ☆オゾン層変動による植物影響の国際的モニタリング手法の確立に関する予備的研究
- ☆定期航空便を利用したシベリアにおける二酸化炭素、

メタンの高度分布の通年に関する予備的研究

☆シベリア凍土地帯における植生に関する予備的研究

(リモートセンシング及び地上探査によるシベリア

凍土地帯における植生調査手法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の影響評価ガイ

ドラインの作成に関する研究

☆都市における温暖化防止対策研究の総合化に関する予
備的研究

☆北極アイスコア分析による地球環境変動研究の予備調
査

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	安野正之
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	井上 元
衛星観測研究チーム	笹野泰弘
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	
計測管理研究室	安原昭夫
化学毒性研究室	彼谷邦光・白石不二雄
環境健康部	
部長	三浦 卓
病態機構研究室	遠山千春・藤巻秀和・青木康展
環境疫学研究室	小野雅司・本田 靖
大気圏環境部	
部 長	鷲田申明
大気物理研究室	花崎秀史
大気反応研究室	今村隆史・盛島泰正
高層大気研究室	杉本伸夫・松井一郎・湊 淳
大気動態研究室	泉 克幸
生物圏環境部	
環境植物研究室	大政謙次・清水英幸
地域環境研究グループ	
上席研究官	中杉修身
新生物評価研究チーム	近藤矩朗・佐治 光・中嶋信美
主任研究官	松本幸雄
客員研究員 20名	

〔研究概要〕

フロンガス（クロロフルオロカーボン；CFC）は非常に安定な化合物であり、無臭、不燃などの数々の特長を持っているため、スプレー製品、冷媒、洗浄剤、発泡剤などに幅広く使用されている。安定であるために、対流圏（地上約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動的に

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。

1970年代から警告されていたフロン等によるオゾン層破壊は、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わした。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。西暦1996年までに、成層圏オゾン層の破壊につながる特定フロン等を全廃することは決定しているが、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の評価は不十分である。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、オゾン層変動を総合的に観測する手法の評価、総合的観測に基づくデータ解析に関する研究である。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およぼす影響を定量的に把握することによって初めて、フロン等オゾン層破壊物質の規制の有効性を評価することが可能になる。さらに、オゾン層保護対策の推進とその環境影響評価に関する研究により有効なオゾン層保護対策の実行が可能となる。

本研究では、上に述べた研究に対する要請を踏まえ、国際的な協力と地球環境研究総合推進費による省際的な共同研究の一端を担い、オゾン層の総合的観測及び解析、新型レーザーレーダー計測技術の開発、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 オゾン層の総合的観測及び解析に関する研究

(1) 地上からの総合的観測手法の開発とその評価に関する研究

レーザーレーダー、ミリ波分光計等によって、オゾン及びオゾン層破壊関連物質を地上から総合的に測定する手法の開発と評価を行う。

(2) 成層圏エアロゾルがオゾンに及ぼす影響に関する研究

成層圏エアロゾルとオゾンの動態の把握、エアロゾルがオゾン層破壊に及ぼす影響に関する実験及びモデルを用いた研究を行う。

(3) オゾン変動の解析に関する研究

本課題及びその他の観測によって得られたデータを総

合的に解析する手法、及び解析に必要な数値モデルによる研究手法に関する研究を行う。

課題2 オゾン層保護対策技術の開発と評価に関する研究 (1) ハロン代替物質の環境影響(毒性)評価に関する研究

ハロン代替物質(アミン系パーフロロ化合物)が実際に使用された場合を想定し、ハロン代替物質そのものの生体に対する毒性、及び火災現場におけるハロン代替物質の熱分解二次生成物の組成と毒性の評価を行う。

(2) ハロン及びフロン等代替物質の環境影響(寿命)評価に関する研究

ハロン及びフロン代替物質の寿命の評価に必要なOHラジカルとの反応速度の測定、大気中での分布と輸送・消滅等に関する評価を行う。

課題3 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、地球温暖化等に関係する地球規模大気環境の評価のための衛星搭載レーザーレーダーの開発に係る基礎的研究として、衛星搭載レーザーレーダーによる地球大気環境評価の具体的目標(目的、目標性能)

の設定に係る検開発すべき機器使用の検討のためのシミュレーション、地球大気環境評価のためのデータ利用方法に関する調査を行う。特に、成層圏オゾン層の破壊に係る極成層圏雲、並びに地球温暖化現象と密接に係る雲の広域分布計測に関する調査に重点を置く。

課題4 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、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等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。

〔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。なお、他の成果については、「平成5年度地球環境研究総合推進費研究成果報告集」を参照されたい。

(1) 下部成層圏高精度測定用オゾンレーザーレーダーの開発

レーザーレーダーによるオゾンの観測は高度45km付近までのオゾンの高度分布を精度良く測定できる点に大きな特長がある。国立環境研究所ではオゾンレーザーレーダーを用いて1988年から観測を続けている。この間、1991年のフィリピンのピナツポ火山の噴火により大量の成層圏エアロゾルが成層圏に注入される状況を経験し、大量のエアロゾルがオゾンの測定に影響を及ぼす可能性が明らかにされた。このため、エアロゾルの影響の補正を多波長のレーザーレーダーデータを用いて行う手法を開発し、ピナツポ火山噴火以降のデータについてはこの手法を用いて解析を行っている。その一方、レーザーレーダーシステムの改良によってさらに信頼性の高い観測が行えることが明らかにされ、本文で述べるような改良を実施した。

国立環境研究所オゾンレーザーレーダーは成層圏の測定を目的とする高高度システムと下部成層圏以下を測定する低高度システムから構成され、エキシマーレーザーとラマンシフターを用いて、高高度システムでは308, 339, 351nm, 低高度システムでは277, 292, 313nmのそれぞれ3波長を用いて測定を行っている。高高度システムでは、高度約15km以上の高度で3波長による観測が可能であるのに対して、低高度システムでは、277nmが高度数kmで減衰してしまうため、全測定領域で3波長のデータが得られない欠点があった。また、低高度システムで用いる3波長は、それぞれ波長の差が大きいためエアロゾル濃度の高い下部成層圏および対流圏においてはエアロゾルの影響が大きく、また、精度の高い補正を行うことは困難であった。

以上の問題点を解決するために、低高度システムに新たに、Nd:YAG レーザーの第四高調波 (266nm) で励起した重水素の誘導ラマン散乱を用いた波長289nmを追加した。この改良によって、高度10数kmまでのオゾンの測定を比較的エアロゾルの影響を受けずに行うことが可能な近接した2波長、289、292nmの波長組のレーザー光源が得られるようになった。また、約20kmまでの低高度システムの観測領域の全高度において3波長以上のレーザーレーダー信号が得られるようになり、多波長の組み合わせを利用したエアロゾルの影響の評価も可能となった。

YAG レーザーとラマンシフターは、従来のエキシマーレーザーの光学系の上層に新たに光学定盤を増設して設置された。また、298nmの受信チャンネルは従来の292nmのチャンネルと共通とし、エキシマーレーザーとYAG レーザーの発射のタイミングをずらすことによって信号を分離した。これを行うために受信信号系についても改良を加えた。

(2) 極渦崩壊シミュレーションモデルに関する研究

オゾンホール挙動の多くは、力学的に形成される極渦の時間発展と密接に関係している。したがって、本研究では、極渦の数値シミュレーションモデルを開発し、オゾンホール現象の本質的部分を予測することを目標と

している。また同時に、極渦の安定性の理論的解析を行い、現象の力学的特性を解明するものである。

本年度は、昨年度まで用いてきた、回転球面上の水平2次元流体に対する数値計算プログラムの3次元化を行った。これまでの水平2次元モデルは、鉛直方向には、“一層”のモデルであったため、大気鉛直密度分布、風速の鉛直分布の効果などを陽に調べる事が不可能であったが、この3次元モデルにより、これらの影響の予測が可能となる。

用いた方程式系は、基本的には準地衡風近似を用いており、3次元的な渦位 (potential vorticity) の保存の式である。準地衡風近似では、従属変数の数が少ないため、通常の大気大循環モデルのような複雑な現象の再現はできないが、高い計算精度が得られるというメリットがある。この式は、古くは成層圏の突然昇温の数値予測に用いられた方程式系 (Matsuno, 1971 など) の非線形版とも言えるものである。これにより、極渦の時間発展に伴う大変形など、力学系において非線形効果が顕著となる場合でも、現象の本質を正しく再現できると期待される。計算方法としては、水平方向にはスペクトル法、鉛直方向には差分 (格子点) 法を用いている。

このモデルを用いて、これまで行ってきた、鉛直成層による極渦の3次元安定性の変化に関する理論的解析の結果の具体的な検証も可能となる。今後、この3次元モ

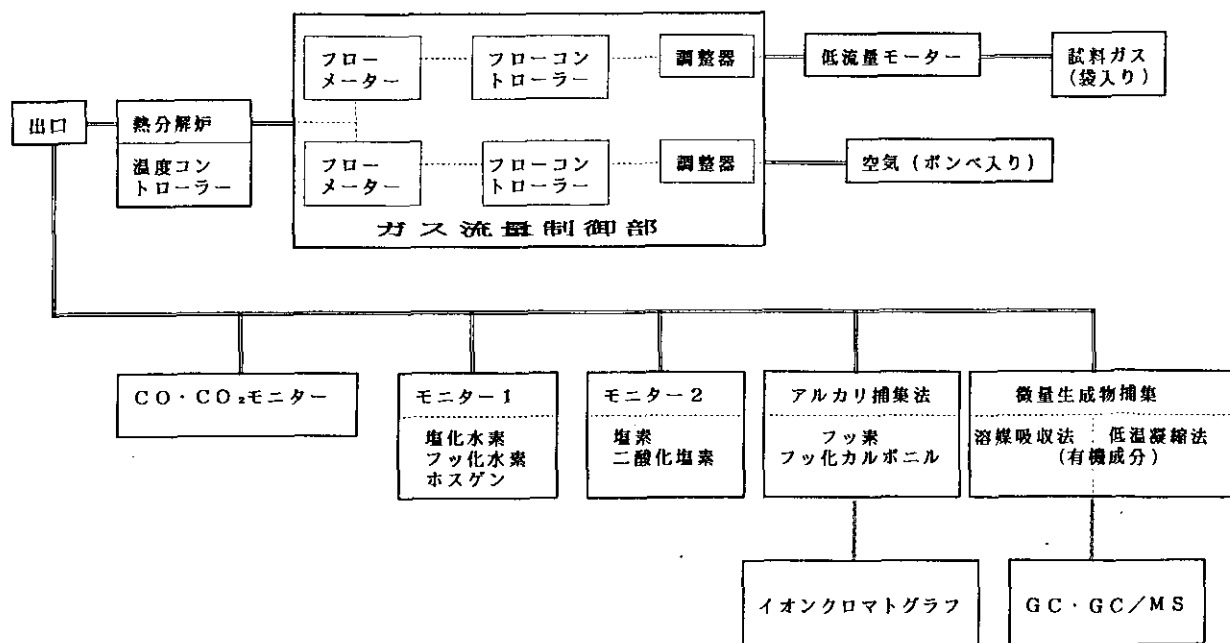


図1 熱分解装置と分析システムのブロック図

デルを用いて、種々の風速、鉛直密度分布に対する極渦の時間発展を具体的に解明していく予定である。

一方、これまで行ってきた孤立した極渦の安定性に関する理論解析の発展として、本年度は、渦が一定の風速のシアーの中に置かれた場合の安定性の変化を調べた。これは、大気中に現れる現実の渦が、実際には孤立した渦ではなく、何らかの基本流（外場）の中に置かれていることを想定したものである。その結果、渦の置かれている外場が、渦と同方向回転の渦の性質を持っている場合には、鉛直成層による3次元的不安定性は弱い、渦と反対方向回転の渦の性質を持っている場合には、鉛直成層による3次元的不安定性が重要となることが分かった。

(3) ハロン代替物質の熱分解二次生成物に関する実験的研究

ハロン代替物質を熱分解するための装置および分析システムを作り、その性能をチェックするために、1,1,1-トリクロロエタンで熱分解を行った。対象物質として1,1,1-トリクロロエタンを選んだのは、これらの塩素系物質については既にいくつかの報告が発表されているので、実験結果の比較ができるためである。フッ素系化合物を対象物質とした場合、熱分解実験の報告がほとんど

ないために実験結果の比較ができず、装置の性能評価が難しくなる。現在、熱分解装置は極めて安定した性能を示している。この熱分解装置ならびに分析システムの概略を図1に示す。熱分解装置の性能として重要なものは、温度制御とガス導入系の安定性である。温度制御はGC装置で用いられている方式を採用し、温度変動を1℃以内に抑えることができた。ガス流量制御についてもGC装置のものを採用して、その安定化を図った。現在、一定濃度のバッグ入りガス試料を低流速で装置に送り込むための部分がまだ安定化していない。熱分解生成物の分析は複数の手段を組み合わせる方法をとった。無機系の主生成物（二酸化炭素、一酸化炭素、塩化水素、塩素、二酸化塩素、ホスゲン）は連続式ガスモニターで測定される。ただし、フッ素化合物ではフッ素、フッ化カルボニルなどの生成物はガスモニターがないので、アルカリの水溶液でフッ素イオンとした後、イオンクロマトグラフィーで測定される。微量有機成分は溶媒吸収法あるいは低温凝縮法で濃縮捕集後、GCおよびGC/MSで分析される。この分析システムでの問題点は、熱分解温度の上昇に伴って、無機系の主生成物の濃度が大きく増加するために、連続式ガスモニターの測定範囲を超えてしまうことである。現在、ガス希釈をして測定が広範囲にできるように改良を検討中である。

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	安野正之
	上席研究官	古川昭雄
	温暖化現象解明研究チーム	○井上 元・野尻幸宏・向井人史・竹中明夫・町田敏暢
	社会環境システム部	
	情報解析研究室	田村正行・安岡善文・山形与志樹
	化学環境部	
	部長	森田昌敏
	計測技術研究室	横内陽子
	動態化学研究室	田中 敦
	大気圏環境部	
	部長	鷺田伸明
	大気物理研究室	鶴野伊津志・光本茂記・高藪 縁・花崎秀史・沼口 敦・菅田誠治
	大気反応研究室	今村隆史・關 金一・盛島泰正
	大気動態研究室	泉 克幸・内山政弘・酒巻史郎
	生物圏環境部	
	環境微生物研究室	広木幹也・渡辺 信
	客員研究員 21名, 共同研究員 8名	

〔研究概要〕

地球温暖化は人間活動の大規模化に伴う対流圏大気中の二酸化炭素, メタン, 亜酸化窒素, フロン類およびオゾンの増加によって引き起こされる。化石燃料の燃焼や森林場伐採に伴うバイオマスの消費に起因する大気環境中の二酸化炭素の増加, 反芻動物である家畜の増加, 化石燃料の採掘, 有機物の処理などに伴うメタン放出量の増加, あるいは, メタンの大気中での消滅速度の低下に起因する大気中メタンの増加, 窒素肥料使用量の増加に伴う亜酸化窒素放出量の増加, フロンや代替フロンの放出, 窒素酸化物の放出量の増大に起因する対流圏オゾン濃度の増加などが, 人為活動による直接的原因として指摘されている。さらには, 気候変動に伴う大気海洋間の二酸化炭素交換の変化, 陸域植生の変動による二酸化炭素の収支の変化, 湿原の拡大や気温上昇によるメタン放出量の増加など, 温暖化と降雨の変化による二次的影響, フィードバック効果も, 温室効果ガスの自然環境による吸収・放出量に変動に大きな影響を及ぼすと考えられて

いる。温室効果気体の変動にかかわる研究が温暖化現象解明の研究の一つの柱である。

それには, 生物地球化学的過程として, ①生物圏・大気圏・海洋圏の大気微量成分のフラックス, ②大気微量成分の大気圏内過程, ③表層・深層水の生物地球化学, ④陸域生態への施肥効果と炭素循環, ⑤陸域から海洋生態系への物質入力などの分野における研究が必要である。国立環境研究所で行っている温暖化現象解明の研究のうち, (1)「シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究」は, ①のプロセスを, 地球上で最も研究が遅れており, しかも, 面積的に大きいフィールドであるシベリアを対象として研究するものである。(2)「地球温暖化にかかわる二酸化炭素・炭素循環に関する研究」においては, ①に関連して土壌中の微生物プロセスおよび③に関連して炭素の深層水への輸送プロセスを研究している。(3)「メタン・亜酸化窒素の放出源およびその放出量の解明に関する研究」においては, ①③に関連して湖沼から大気中へのメタン放出メカニズム

の解明を行っている。(4)「地球温暖化にかかわる対流圏大気化学の研究」では、②の化学反応の研究を行っている。

温暖化のフィードバック効果を見積もるには、生態系とその運動を理解するために、①構造と機能の長期的な観測、②気候とその他のストレスに対する応答、③物理的・生物学的プロセスの相互作用、④相互作用・フィードバック・応答のモデル、⑤生産と資源のモデルなどの研究が必要である。(1)「シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究」では、②に注目して樹木の成長と寒冷ストレスに対する応答の研究を①の視点から開始しているが、③④についてはまだ研究の緒についた段階である。

温暖化現象解明の研究のもう一つの柱は、上記のような温室効果気体の急激な増加に伴い、どのような気候変動が引き起こされるかを、大気・海洋・生物の各圏の相互作用を含むグローバルな気象モデルによって予測することである。これも長期的・総合的に進めるべき課題であり、そのためには、気候と水文学の研究として、①エネルギー収支における雲の役割、②海洋循環と熱フラックス、③陸、大気、海洋の水とエネルギーのフラックス、④気候結合システムと定量的リンク、⑤海洋圏、大気圏、水圏の相互作用などの分野における研究が必要である。

国立環境研究所で行っている温暖化現象解明の研究のうち(5)「気候変動モデルによる気候変動評価に関する研究」は、まず、大気圏におけるエネルギーと運動量の輸送を含んだモデルを開発し、海洋循環と結合したモデルに発展させ、さらには、生物圏や水圏を含む水とエネルギーの循環モデルを含んだ信頼性の高い気候予想モデルの構築を計画している。この目的で、いわゆる大気循環モデルの開発を進めると共に、熱帯域で①の研究、接地境界層での③や⑤のプロセスをモデルに組み込むための基礎的研究などを行っている。

上記のような総合的な研究の推進という視点を持ちつつ、国際的・省際的な研究協力や分担を考慮して、国立環境研としてこの分野に最も寄与できる課題を重点として、以下の研究を行っている。

(1) シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究

シベリアの亜寒帯、寒帯、極域に分布する森林や草原、

湿地の植物生産により固定された炭素は、小動物や微生物の活動期間が短いため腐敗せず、腐植として大量に蓄積されたり泥炭化して永久に固定化される。熱帯域や中緯度では、土壤中の炭素は植物生産による蓄積速度と二酸化炭素として放出される量とが自然の状態ではバランスしているが、シベリアのような寒帯林や湿原では炭素の蓄積が進行しているという説もある。また、大気中の二酸化炭素濃度の増加や大気中に放出される窒素酸化物などが肥料となり、生物の一次生産の増加、温暖化の進行によるバイオマスの増加などをもたらしている可能性が指摘されている。シベリアの森林は夏期に乾燥するので自然森林火災が頻発しており、全体として自然林でも樹齢は比較的若い。そのため環境の変化に対し適応が早く、気候変動に対応して二酸化炭素のシンクとして働き、負のフィードバックとなる可能性がある。

他方、西シベリア大低地には現在世界最大の湿原地帯があり、メタンの大きな発生源であると見られる。同時に、化石燃料として天然ガスの採掘が行われており、人為的なメタン発生源である可能性もある。ここからのメタンの発生量を推定することは、世界全体のメタンの収支を明らかにする上で重要である。さらに、自然湿原からのメタンの発生量を支配する要素を解明することは、将来の気候変動の下でのメタンの発生量の増減を予想する上で必須の研究プロセスである。

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陸域の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。シベリア中央部は近年温暖化により永久凍土の氷解、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、湿地が増加し、大量に蓄積された腐植が嫌気性細菌により分解され、メタンとして大気中に大量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ートの氷解によるメタン発生の可能性も指摘されている。これとは別に過去の嫌気性細菌の活動により生成し、凍土の水や土壌の中に閉じ込められているメタンも膨大な量になることが分かってきた。この氷解によるメタン放出も見積もる必要がある。

以上のように、シベリアの自然が地球環境に及ぼす影響は大きいにもかかわらず、実際の観測や研究はロシア自身ではほとんどなされておらず、生物地球化学的過程を理解する上で柱格となっている。また、温暖化のフィー

ドバック効果は高緯度で最も顕著に現れると予想され、シベリアでのそれを見積もることも重要である。このような観点から、1991年度より本研究課題を開始した。1991年の準備活動、1992年の予備現地調査に引き続き、1993年から本格的な調査・観測研究が展開されている。日本から50名余り、ロシアからも50名をこえる研究者や技術サポートスタッフの参加を得て、国際的にも注目を集める国際研究計画に発展している。

(2) 凍土地帯の湖沼・湿原からのメタンの放出に関する研究

主要な温室効果気体であるメタンについては、天然水域からの放出量が重要な部分を占め、熱帯と並んで寒帯域の湿原の寄与が大きいとされる。本研究では、東シベリア地域のアラスとよばれる小湖沼のメタン放出の測定と解析を行った。アラスは永久凍土が広く分布する東シベリアタイガ地帯に点々と数多く分布する小湖沼で、凍土の融解水によって灌養されている。大きなものは直径数kmの大きさであるが、干上がる寸前のものは数十mの大きさで、周辺の草地が放牧に利用されていることも多い。今年度はヤクーツク市西部のレナ川河岸段丘上の6カ所のアラスで、チャンパー法によるメタン放出量測定、湖底泥から採取したガス試料のガス分析とその同位体分析を行った。チャンパー法による放出量は、湖面、湖岸帯、周囲の草地のそれぞれで測定した。最大の放出量は湖岸の湿地帯でみられ110~1900mgCH₄/m²/dayの範囲であった。湖面からの放出量は130~830mgCH₄/m²/dayであった。周囲の草地からも数10mgCH₄/m²/dayの有為な放出量が見られることが多かったが、放出の認められないところもあった。周辺草地を含む平均値としては200mgCH₄/m²/day程度と推定されるが、大型のアラスでは湖水面からの放出が主体、小型のアラスでは周辺草地からの放出が主体であることが分かった。寒帯の湿原の放出量として従来の報告値よりやや高いものであるが、夏の最大値と考えられる妥当なものであると考えられた。湖水は酸素を十分に含んでいるが、湖底泥は完全に嫌気状態にある。底泥に含まれる気泡を水深の大きい(1m以上)のアラスで採取したところ、60~80%がメタン、数%が二酸化炭素、残りが窒素という組成であった。水深の浅いアラスでは、メタン濃度が減少する分だけ窒素の濃度が高まるが、酸素濃度が窒素とともに高まるわけではない。そのメタンの炭素安定

同位体比の測定を行ったところ-60パーミル前後であり、主として生物起源のメタンであると考えられた。メタンの炭素安定同位体比は、グローバルなメタンの収支を推定する鍵となる因子であるので、今後調査範囲を広げ、シベリア地域から放出されるメタンの炭素安定同位体比を推定することが必要である。

(3) 地球温暖化に係わる対流圏大気化学の研究

地球温暖化現象は大気中の微量成分の増加(蓄積)がその最も基本的問題である。大気中微量成分は自然および人為的起源からの大気への放出がまずあり、その後大気中で太陽光による光解離、OHラジカルなどによる大気中でのラジカル反応を起こし、それによる消滅あるいは新しい二次生成物の生成といった種々の過程のフィルタを通して最終的には安定化学物の蓄積が行われる。これらの過程の解明がいわゆる対流圏化学の中心であり、地球温暖化現象が対流圏の問題である限り、これらの研究なしには温暖化の現象解明は進行しない。本研究は地球温暖化の現象を対流圏化学の立場から解明する試みをなすもので、大気化学反応に係わる基礎データの測定と、温暖化現象と深くかかわり、かつ対流圏化学の中心問題の一つである対流圏オゾンの増加原因解明を二本の柱とした研究である。基礎データの測定は対流圏化学反応モデルの構築を通して、対流圏オゾンの増加の原因解明に寄与し、対流圏オゾン増加にかかわるNO_x、オゾン、BOC、炭化水素の測定とオゾン増加の実態把握、さらにその動態のモデル研究は、逆に対流圏オゾン増加原因解明にはどんな基礎データが必要であるかを示すものである。以上の研究から、対流圏大気反応モデルの充実と、それによる対流圏オゾンの今後の増加予測については温暖化の将来予測の強化がなされ、対流圏化学の立場を柱とした温暖化現象解明が行われるのであり、本研究は温暖化現象解明研究にとって不可欠である。

以上本研究は温暖化の現象解明を対流圏化学の切り口から行う研究であり、大気中のラジカル(特にRO、RO₂を中心とした)反応速度・機構の研究、大気中の放出された微量気体の光解離過程の研究による基礎データの蓄積と、温暖化に重要な対流圏オゾン増加の原因解明をNO_x、炭化水素、オゾンの相関を中心に行い、モデルによる全体の評価を行う。研究内容は以下である。

- 1) 大気中微量成分の消滅・生成に係わるフリーラジカル反応速度・機構の解明

国立環境研究所で開発された通常世界で用いられている装置の100倍の感度を持つ光イオン化質量分析計を中心とした、紫外吸収、レーザー誘起ケイ光法などの物理化学的手法により、大気中の反応において重要なフリーラジカル反応速度・機構を測定する。光化学チャンバーによる機構解明も行う。

2) 対流圏におけるオゾン増加原因の解明に関する研究

今後、温暖化において最も重要な大気二次生成物の一つであると予想される対流圏オゾンの増加の原因を解明するために、窒素酸化物 (NO_x , NO_y) 炭化水素類 (BOC, HC) の大気中での濃度とオゾン濃度の相関を中心に測定を行い、対流圏オゾン増加の実態を把握する。さらに対流圏化学反応と物質輸送モデルにより、現象全体の評価を行い、対流圏オゾン増加の将来予測、温暖化の将来予測に貢献する。

(4) 地球温暖化にかかわる二酸化炭素、炭素循環に関する研究

温室効果気体の濃度変化およびその変動機構を解明するには、二酸化炭素、メタン等の主要な温室効果気体の構成物である炭素の大気、海洋、土壌および生物圏での動態を明らかにする必要がある。このうち、陸上生態系においては土壌有機物および植物体等の形で存在する炭素量は大気中に存在する炭素量の3倍以上になると言われており、植物により固定された大気中の二酸化炭素は、これらの植物体が枯死した後、土壌中で微生物により分解され、炭酸ガスあるいはメタン等の形で大気圏へ戻る。温帯域の安定な生態系では通常、これらの大気中の二酸化炭素の植物による固定量と土壌中の有機物の分解量のバランスが保たれていたと考えられるが、気候変動あるいは人為的なかく乱により二酸化炭素の固定量および土壌有機物の分解量が変動すると、植物による生産量が土壌中での有機物の分解量を上回ると土壌中の有機態炭素の蓄積量は増加し、また、分解量が生産量を上回ると土壌中に蓄積されていた有機態炭素は減少して二酸化炭素あるいはメタンとして大気中に放出され、大気中のこれら温室効果気体の濃度の増加をもたらす。一方、土壌中での有機物分解はこれまで土壌からの炭酸ガスの放出速度などで測られたが、場所的変動が大きく、また、温度や水分条件にも大きく依存することが知られており、こ

れは土壌有機物の分解をになう土壌微生物群の土壌中での存在量と活性の変動が大きく、また偏在しているためであると考えられる。そのため、土壌に供給される植物遺体あるいは土壌に蓄積された有機物の土壌中での分解にかかわっている微生物量およびその分解活性とそれらに影響を及ぼす環境要因との関係を明らかにすることは、土壌圏に蓄積されている有機物量の変動とその機構を明らかにしていく上で重要な課題である。これらの点を背景として、本研究課題では平成5年度より3ヵ年の計画で、主として温帯域の森林土壌において、土壌からの二酸化炭素発生量の変動とその変動要因について土壌微生物群集と環境条件のかかわりにおいて明らかにする事を目的として研究を行っている。

(5) 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め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継続している。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。第1の課題では特に従来の大気大循環モデルでは不十分であった様々な、物理過程の改良(大気放射過程パラメタリゼーションの高精度・効率化、雲水量予報スキームの導入、陸面過程の精密化等)を行い、第2世代の大気大循環モデルの基礎を確立した。

一方、第2の課題では、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。気象衛星による雲のデータを統計的に解析し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。また、この積雲対流活動の研究の成果は、気候システムの持つ複雑で様々なフィードバックプロセスの理解と気候モデルの時間・空間スケールに適合したモデル化の重要性を明らかにした。以上の研究成果をもとに、大気・陸面過程、及び、大気水循環・雲過程を中心とした気候のフィードバック過程の大循環モデルへの適切な導入手法の研究と、全球の大気と海洋を同時に取り扱う大気・海洋結合モデル開発の基礎研究を開始した。

〔研究成果〕

(1) シベリアにおける二酸化炭素の収支に関する研究

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)との共同研究の合意文書に署名し、共同研究の条件を整えた。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、西シベリアのチュメニを基地とした航空機観測、東シベリアのヤクーツクを中心とした調査・観測を行った。1993年度は、ロシア科学アカデミー微生物研究所、生態森林生産研究センターとの協力関係も新たに開始した。日本側からは、国立環境研究所、農水省森林総合研究所、北海道大学、東北大学、東京大学、東京工業大学、東京ガス、地球・人間環境フォーラムからの研究者が現地調査・観測研究に参加した。

1) 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、オゾン、水蒸気など温室効果気体の空間分布測定を連続測定器を用いて行った。また、これに関連する一酸化炭素、二酸化硫黄、水素などを機上で測定すると共に、金属やガラスの容器に採取した大気試料を実験室で分析し、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、二酸化炭素の安定同位体などをの濃度を求めた。

使用した航空機は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13名が搭乗し、上記の観測に当たった。ロシア側は気象観測の他に、メタンとオゾンの測定を独自に行った。

1993年の航空機観測では、1992年に比べ幾つかの改良

が行われた。

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。すでに1992年の測定で測定精度は0.3ppmが達成できているので、あらたにデータ解析が容易になるように標準ガスや試料の分析状況を中央データ収録システムに記録する方式をとった。

メタンはすでに1992年から、FID ガスクロで測定し0.012ppmの測定精度を達成している。しかしながら一回の測定に約4分必要とし、一つの信頼できる値を求めるのに20分も必要とする欠陥があった。このため高度分布を測定している間に混合層の高度など気象条件が変動することもあった。このため連続測定器の開発が必須の条件であったが、東京大学の遠嶋助手の協力を得て機上で触媒燃焼=FID検出方式による測定を成功させた。この方式は酸化触媒の温度を制御して非メタン炭化水素の燃焼メタンの不燃焼の条件で、非メタン炭化水素を除去し、ガスクロを通すことなく直接FID検出器で測定するものである。図1にこの装置の概略図を示す。

2) メタンフラックスの測定

1992年は西シベリア低地の中心にあるハンチマンシスク付近で、7月18日から22日まで、湿地からのメタンの発生量を評価することを目標とした観測を行ったが、1993年はほぼ同時期の7月21日から26日までニジェノバルトフスクを中心に観測を行った。

大気中のメタン濃度は地表からの発生量と、接地境界層から上部対流圏への垂直運動によって決まる。垂直の運動は乱流により、乱流は地上が太陽熱で熱せられて生じるので図2のような日変動を示す。大気が安定になる日没から日の出にかけては、地表面からのフラックスはあるが接地逆転層内にトラップされているので、ある高度でのフラックスはゼロとなる。地表面が太陽光で熱せられ大気の状態が不安定になり上下の混合が始まると、それまでトラップされていた高濃度のメタンを含んでいる大気が上方に輸送され大きなフラックスを示す。混合が盛んになる午後には地表面のフラックスとある高度でのそれは等しくなる。

原理的には、もし、航空機観測でメタン濃度と乱流の強さを測定すればメタンの発生量が計算できることになる。風の垂直成分は、それによって引き起こされる航空機の上下の加速度(加速度センサーとINSで独立に測定)

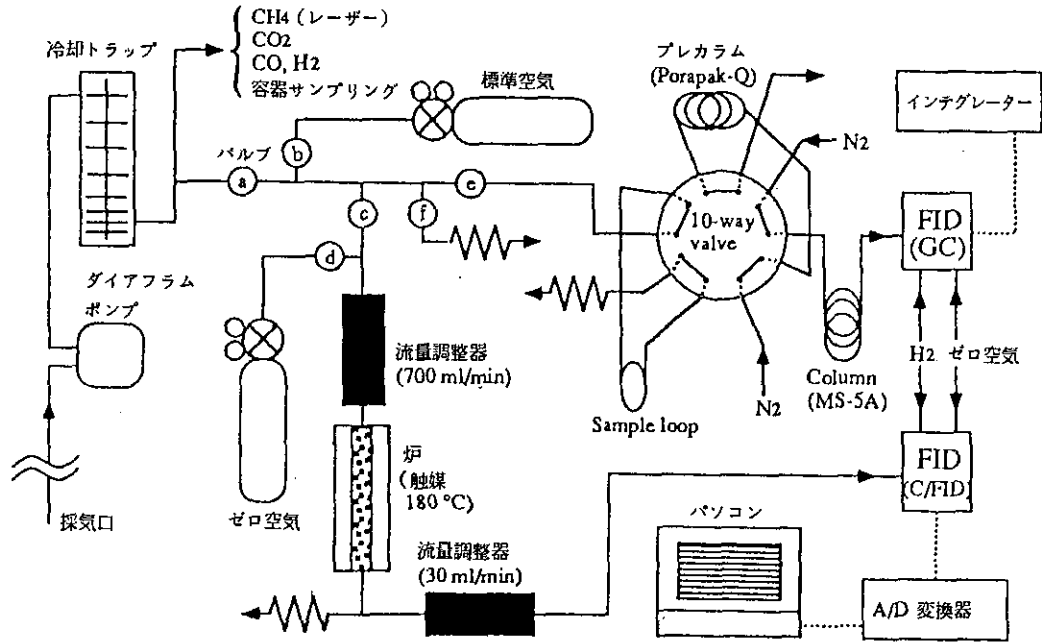


図1 シベリア航空機観測のメタン測定システムの概略図
メタン濃度は触媒変換/FIDとガスクロ/FIDの両方で測定している。

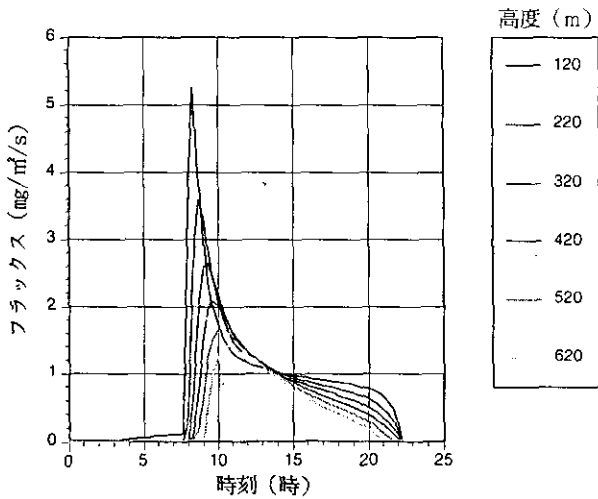


図2 フラックスの日変化の高度による違いを示す概念図

と飛行機のピッチ角の変動（傾斜計とINS）によって測定される。この方法はCAOによって開発されたもので20%の誤差が見込まれる。これは10 Hz 以下の変動に対して十分な感度を有する。メタン濃度は上記のように遠嶋が担当し測定を行ったが、測定器の応答は0.1 Hz 以下である。したがって、いわゆる渦相関法によって直接フラックスを測定することはできない。

直接渦相関法でフラックスが測定できない場合は、濃度勾配法によって求める。それは次式

$$P = -K (\partial c / \partial z) = -(K1 + K2)(C1 - C2) / 2(z2 - z1)$$

で求まる。但し、Pはメタンの渦フラックス (mg/m²h), Cはメタン濃度 (mg/m³), Kは渦拡散係数 (m²/h) である。航空機で二高度を飛行し、それぞれの高度での渦拡散係数とメタン濃度を求める。メタン濃度は触媒燃焼=FID方式により、連続的に求めた値を使用する。風の垂直成分を数分間測定し渦拡散係数を求める。高度を変えて測定する間隔は15分程度であるので、この間に大気の状態は大きく変わらないとして、上の式でフラックスを計算したものを図3に一例として示す。左端は樹木のほ

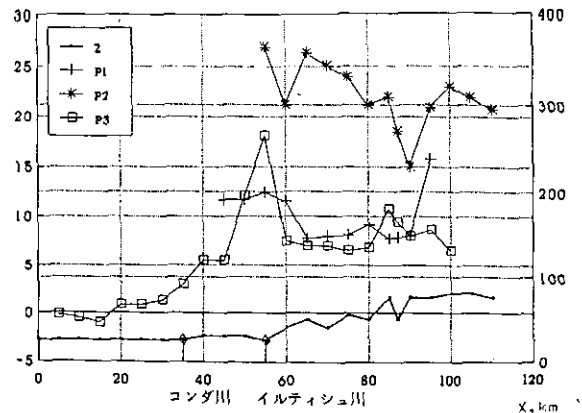


図3 西シベリアにおけるメタンフラックスの空間分布とその時刻変化
Zは地表面の海拔高度、P1は9～10時、P2は10～11時、P3は11～12時の測定値。

とんどない湖沼の多い湿原であり、55km地点でオビ河支流をわたり、樹木と湿原の混在した地帯に続いている(図の最も下の線が地表面高度を示す)。これに対応し、メタンのフラックスは湖沼地帯で小さく、河の上で極値を示し、森林のある湿原で大きな値となっている。夜間や早朝には河は一般に周辺より温度が高いため、周辺の空気を集めて上昇気流を作るので、このような大きなフラックスとなったものと考えられる。湖沼では湖水中での酸化プロセスがあるので、水位がゼロに近い湿原よりメタンの発生量は少ないことが知られている。また、熱容量が大きいいためこの時刻では混合が弱いためとも考えられる。午前9時台は8 mg/m²hで、10時台になると22 mg/m²hと3倍に増え、11時から12時台にかけては再び7 mg/m²hに戻っている。これは図2に対応した現象と考えられる。

このオビ河流域は、オビ河のそそぐ北極海から約3000 km離れているが、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。上記のような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。さらにフラックスの日変化全体、場所によるフラックスの違い、その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。

将来の課題としては、次の3点が残されている。

- ①航空機によるフラックスを渦相関法で直接測定すること。
- ②航空機による測定を高頻度で測定するためのシステムを開発すること。
- ③長期に連続測定を行うために地上での渦相関法測定を開始すること。

①の航空機による直接測定は、メタン濃度の変動を高速かつ高感度で測定する必要がある。応答を早めるためには触媒を用いないで炭化水素全量をFIDで検出するほかない。非メタン炭化水素の割合はこの辺りでは10%以下と予想され、フラックスの測定精度の範囲内である。また、大きな炭化水素を吸着除去できればほぼ無視できる。将来的には中赤外のレーザーによる測定を計画しているが、10Hzの応答を実現するには機外に光学系を取

りつけることが必要と考えられる。もう一つの方法は、渦相関法を変形したコンディショナルサンプリングという方法である。これは垂直の風の成分が上向きの場合と下向きの場合とに分けてサンプリングを行い、その差を後で高精度で測定してフラックスを求めるものである。さらに、渦拡散を担っているのは、比較的大きな風速の渦であることが分かっているので、サンプリング時にある大きさ以上の風の時のみサンプリングをするようにすれば、上向きと下向きのメタンの濃度差が大きくなるので測定精度は向上する。

航空機による測定は大きな長所があるが、高頻度で大型航空機を使うことは費用が膨大になり不可能である。そこでメタンの測定と加速度、傾斜角の測定に特化した小型の装置を開発し、小型の飛行機で高頻度で測定することを考える必要がある。

さらに、長期に連続的に測定を継続するには、地面に箱をかぶせてその中のメタン濃度の増加を測定するチャンバー法や、地上での渦相関法による測定を継続する必要がある。

3) 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でき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、維持費も少なくして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年度事前調査を行い、1992年度に測定に必要なガスを現地で生産する装置を含んだ自立的に観測が可能なシステムを開発、設置した。

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。

1993年の夏からデータが出始め、現在その解析方法を検討している。

(2) 凍土地帯の湖沼・湿原からのメタンの放出に関する研究

主要な温室効果気体であるメタンについては、天然水域からの放出量が重要な部分を占め、熱帯と並んで寒帯域の湿原の寄与が大きいとされる。本研究では、東シベリア地域のアラスとよばれる小湖沼のメタン放出の測定と解析を行った。アラスは永久凍土が広く分布する東シベリアタイガ地帯に点々と数多く分布する小湖沼で、凍土の融解水によって灌養されている。大きなものは直径数kmの大きさであるが、干上がる寸前のものは数十mの大きさで、周辺の草地在り放牧に利用されていることも多い。今年度はヤクーツク市西部のレナ川河岸段丘上の6カ所のアラスで、チャンパー法によるメタン放出量測定、湖底泥から採取したガス試料のガス分析とその同位体分析を行った。チャンパー法による放出量は、湖面、湖岸帯、周囲の草地のそれぞれで測定した。最大の放出量は湖岸の湿地帯でみられ110~1900mgCH₄/m²/dayの範囲であった。湖面からの放出量は130~830mgCH₄/m²/dayであった。周囲の草地からも数10mgCH₄/m²/dayの有為な放出量が見られることが多かったが、放出の認められないところもあった。周辺草地在りを含む平均値としては200mgCH₄/m²/day程度と推定されるが、大型のアラスでは湖水面からの放出が主体、小型のアラスでは周辺草地在りからの放出が主体であることが分かった。寒帯の湿原の放出量として従来の報告値よりやや高いものであるが、夏の最大値と考えられる妥当なものであると考えられた。湖水は酸素を十分に含んでいるが、湖底泥は完全に嫌気状態にある。底泥に含まれる気泡を水深の大きい(1m以上)のアラスで採取したところ、60~80%がメタン、数%が二酸化炭素、残りが窒素という組成であった。水深の浅いアラスでは、メタン濃度が減少する分だけ窒素の濃度が高まるが、酸素濃度が窒素とともに高まるわけではない。そのメタンの炭素安定同位体比の測定を行ったところ-60パーミル前後であり、

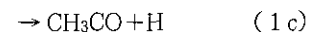
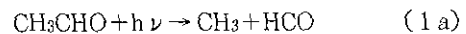
主として生物起源のメタンであると考えられた。メタンの炭素安定同位体比は、グローバルなメタンの収支を推定する鍵となる因子であるので、今後調査範囲を広げ、シベリア地域から放出されるメタンの炭素安定同位体比を推定することが必要である。

(3) 地球温暖化にかかわる対流圏大気化学の研究

平成5年度は本研究課題の初年度であり、各テーマにおいては主に研究の立ち上げが行われた。

1) 大気中微量成分の消滅・生成に係わるフリーラジカル反応の速度・機構解明

本研究においては大気中で重要なフリーラジカル反応の速度・機構を決定していくことを目的として、フリーラジカルの直接検出に優れた方法の開発とそれを用いた反応研究が行われている。具体的方法としては①高感度光イオン化質量分析計、②レーザー分光法、③紫外吸収法、④6-m²光化学チャンパーと長光路赤外吸収法などである。①については従来の装置の100倍の感度を有する装置が完成し、それを用いてHO₂やCH₃O₂ラジカルの検出とそれらのラジカルとNOの反応速度が決定され、特にCH₃O₂ラジカルにおいては従来報告されている反応速度が50%修正された。平成5年度は特に、アセトアルデヒド(CH₃CHO)の紫外光解離過程の決定が行われた。アセトアルデヒドは紫外線を吸収して以下の三つの過程で光解離する。



この中で(1a)のHCO生成の収率は大気化学において特に重要である。それはHCOがO₂と反応してHO₂ラジカル源となるためである。本研究では紫外線としては波長可変の色素レーザーを用い280~350nmの光でCH₃CHOを光解離させ、生成したCH₃、HCOラジカルを光イオン化質量分析計で直接検出し、過程(1a)の量子収率を決定した。その結果280~310nmでは過程(1a)が支配的であるが、320nmより長波長では量子収率が急激に低下する事が明らかになった。

今後は大気中で重要でありながら、ほとんど反応が分かっていないCH₂O₂ラジカルの大気中での反応について、①~④の各方法を組み合わせて総合的に研究する予定である。

2) 対流圏におけるオゾン増加の解明に関する研究
対流圏オゾン増加の解明に関していくつかの研究が始められた。

NO_x計の検出感度の向上

温暖化の原因物質の一つとして近年その濃度増加が問題となってきた対流圏オゾンの大気中濃度を支配している物質として、窒素酸化物 (NO_x) は最も重要な物質である。そのバックグラウンド対流圏大気における濃度は100pptv～数ppbv程度と極めて低く、その構成成分である一酸化窒素 (NO) や PAN 等の濃度はさらに桁程度低い。これらの低濃度 NO_xを測定するには、現有的高感度 NO_x計では十分な測定感度を持ってはいない (検出下限: ca. 50pptv)。この検出感度の向上を目的として各種測定パラメータ (化学発光を行わせる反応槽体積, 反応槽圧力, 試料空気流量, オゾン分圧) の検出感度に対する影響を詳細に検討した。使用した測定装置において実用上採用可能な変更を加えたパラメータ条件下で得られる最適条件において、約5倍程度の検出感度の向上が得られた。しかし今後野外測定で用いるには NO と O₃ の混合を速やかにする工夫が必要である。

シベリア上空での航空機によるオゾン観測

対流圏のバックグラウンドオゾンの起源の一つは、中高緯度での成層圏から対流圏への大気の降下である。我が国でも低気圧の通過に伴う高濃度オゾンがバックグラウンドの地上オゾン測定局でしばしば測定されている。しかしながら、その定量的評価は現在の大気循環モデルでは精度が粗すぎて困難であり、フィールド測定との比較検討も不十分である。温室効果ガスの増加による気候変動の結果、成層圏大気の循環が変化し、成層圏から対流圏へのオゾンの輸送強度も変化すると考えられており、温暖化のフィードバックとしても重要である。このような視点から、成層圏から対流圏へのオゾンの輸送メカニズムを明らかにする航空機観測 (1993年7月18日, ヤクーツクとチクシの間, 東経130度に沿って北緯70度と63度の間を高度7,000mで飛行) が行われた (図4)。その結果の一部を簡単に紹介すると、北緯67.5度付近で気温が6度以上上昇し、これに伴い相対湿度が30%から10%に下がり、冷たい湿ったエアマスから暖かい乾燥したエアマスに移った際にオゾンの濃度が80~200ppbに急上昇し、メタンは85ppbから50ppbに急激に減少した。高温域では再び通常の濃度レベルに戻った。対流圏と下部成層圏の大気微量成分の濃度を比較してみると、下部成層

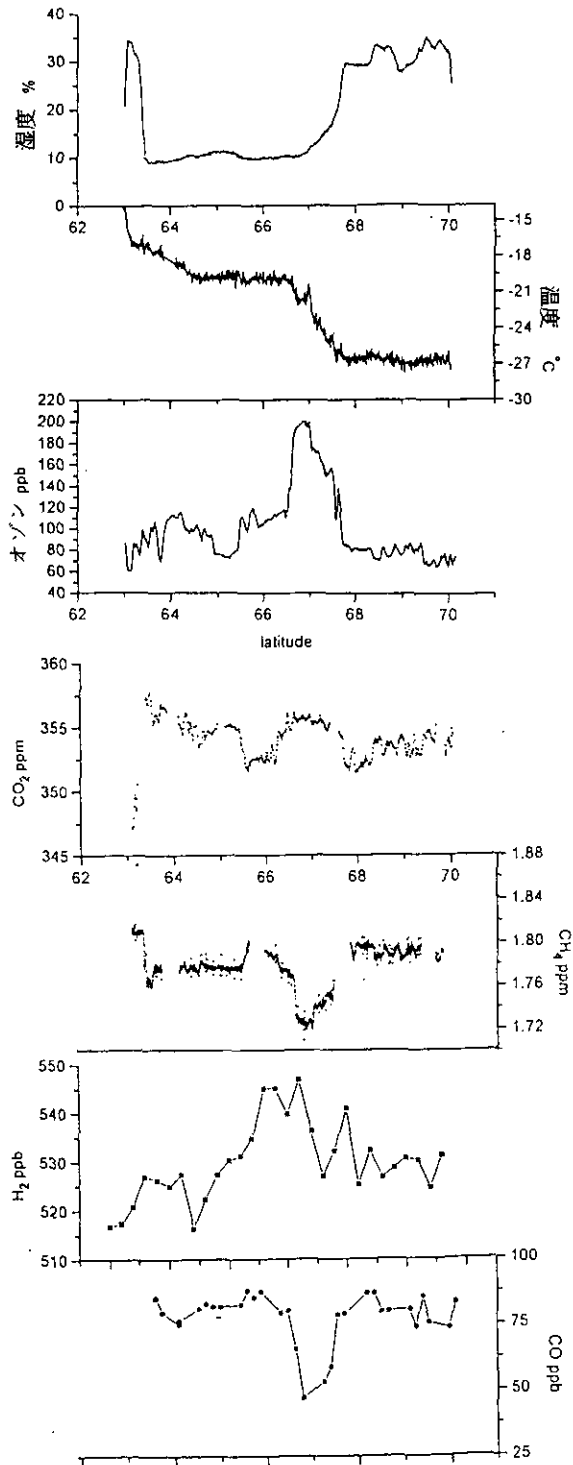


図4 1993年7月18日のチクシ=ヤクーツク間の7,000mの高度で観測された大気微量成分
aは相対湿度, bは気温, cはオゾン, dは二酸化炭素, eはメタン, fは水素, gは一酸化炭素濃度をそれぞれ示している。水平軸は緯度で目盛ってあるが、この間、経度はほとんど変化していない。

圏は、オゾン濃度は高く、メタンは低く、一酸化炭素は低いことが知られている。二酸化炭素は季節と緯度によりどちらが高いともいえない。したがってこの濃度変化

は下部成層圏の大気が対流圏に流入したことによると判断された。気象予報に使用されている客観解析データベースを用いたバックトラジェクトリーを計算と成層圏から流入するオゾンの評価したモデル計算を行ってみると、この領域にオゾンの高濃度ベルトができる。観測されたオゾンのピークの幅は70kmに過ぎず、GCMによるオゾン濃度の計算メッシュ500kmは現実の規模よりはるかに大きい、定性的にこの現象を説明している。この種の観測を繰り返し、GCM計算と実際の下部成層圏からの輸送量との関係を実験的に明らかにすれば、世界規模でその量が推定できるようになる。この方法は、対流圏のバックグラウンドオゾン濃度が気候変動によってどのように変化するか予測に役立つ。

日本周辺海洋上大気中の窒素酸化物および炭化水素濃度の測定

前年度までに行った航空機による調査の結果から、日本周辺海洋上大気中の窒素酸化物 (NO_x) 濃度の高度分布を求めた。高度約5000フィート (1.5km) を境に、高高度側では0.15~0.8ppbv、低高度側では1.5~3 ppbvの値が得られた。この結果は、日本周辺海洋上では周辺の陸地から放出された窒素酸化物が接地境界層の影響で1.5km程度の高度内に閉じこめられて移流していることを示していると考えられる。このように、日本周辺の海洋上、特に大陸側の海洋上では太平洋上における窒素酸化物の高度分布 (0.1~0.5ppbvで一様、近藤らによる) と明らかに異なる分布となっていることを示している。

また、前年度に引き続き東アジア大気調査 (PEACA MPOT 観測キャンペーン) に参加し、1994年3月7~15日の間航空機観測により、西日本周辺海洋上における窒素酸化物の空間分布・高度分布測定を行った。これらの結果は、現在解析中である。軽質炭化水素についても同時に測定が行われた。

対流圏オゾン増加とその解析

近年北半球における対流圏オゾンの増加が報告され、その温室効果が地球温暖化に及ぼす影響が懸念されているが、オゾンは他の温室効果気体と異なりその主要発生源が大気中における光化学反応過程であるため、IPCCでもまだその評価がなされておらず、今後の大きな研究課題となっている。鹿児島、筑波 (館野)、札幌におけるオゾンゾンデデータのトレンド解析を行ったところ、これら3地点のすべてにおいて対流圏でのオゾンの増加が確認された。過去22年間の3地点平均でのオゾンの増

加トレンドは地上から0~2, 2~5, 5~10kmでそれぞれ約2, 1, 0.5%/yrであり、地表付近ほど増加率が大きいことが分かった。このことは対流圏オゾンの増加が地上起源物質に起因していることを強く示唆している。そこで対流圏でのオゾン増加と地表からの窒素酸化物の人為排出量の増加との間の関係を定量化するため、対流圏光化学反応を組み込んだ次元化学拡散モデルによる解析を行った。予備的解析の結果では窒素酸化物の放出量の増加とオゾン濃度の増加との間の関係は非線型であること、窒素酸化物の放出量の増加に伴うオゾン濃度の増加は地表付近のみならず、温室効果の大きい対流圏上部にまで及ぶことが分かった。

海洋起源ハロゲン化合物と対流圏オゾンに関する研究

最近の極域における日の出直後の観測研究から海洋起源ハロゲン化合物 (無機あるいは有機の臭素および塩素化合物) に由来するハロゲン原子が対流圏オゾンの消失に関与していることが明らかになっている。本研究においては、地球表面の7割を占める海洋上でのハロゲン反応が対流圏オゾンの分布にどのように影響するかを見積もることを目的として、海洋性大気中臭素化合物の動態について観測研究を行うものである。千葉県沿岸および日本-インド洋航海 (東京水産大学) において大気中臭素化合物の日変動測定を実施した。ガス状有機化合物はテナックスGCトラップに捕集後、キャピラリー GC/MSにより測定して、プロモホルム、ジプロモメタン、ジプロモクロロメタン濃度を求めた。ガス状無機臭素化合物および粒子状無機臭素化合物はそれぞれアルカリ含浸フィルターとテフロンフィルター上に捕集してイオンクロマトグラフによって測定した。その結果、ガス状無機臭素化合物として捕集したサンプル中の臭素イオン濃度は明らかな日変動を示し、日中濃度は夜間濃度の約2倍であった。このことは、臭素化合物の光化学反応によって最終的に臭化水素が生成されている可能性を示唆する。この過程で臭素原子が放出され、オゾン消失する触媒的な反応が引き起こされている可能性があり、今後より系統的な研究を行う必要がある。その他の結果については現在解析中である。

(4) 地球温暖化にかかわる二酸化炭素、炭素循環に関する研究

土壌からの二酸化炭素発生量は、これまで、いくつかの方法で測定されてきたが、これらは大きく2つの方法

に分けられる。一つは土壌から発生する二酸化炭素をチャンパー内でアルカリに吸収させる方法であり、もう一つはチャンパーに一定量の通気を行いながら、その導入空気とチャンパー内の空気との二酸化炭素濃度の差からチャンパー内への土壌からの二酸化炭素発生量を算出する方法である。前者は簡便に測定できる反面、吸収剤への二酸化炭素の吸収が不十分な場合は低めに、また、吸収が十分行われた場合にはチャンパー内の二酸化炭素濃度が通常の大気中濃度よりも低くなるため土壌からの二酸化炭素の発散を促進し、高めに算出する可能性が指摘されている。一方、後者は通常の大気濃度に近い濃度で測定が行われるため実際の値に近い値が得られると考えられているが、測定原理および装置が複雑であることから野外での測定には制約が多く、特に森林や草地での実測例はアルカリ吸収法によるものが多い。そのため、野外における研究を遂行するに当たっては、調査地点の立地条件に制約を受けることなく、より広範に任意の地点において通気法により簡便に測定できるシステムが望ましい。すなわち、電源等の制約を受けることがないのはもちろん、山中に持込むために軽量であり、又、短時間で測定できる簡便なシステムであることが必要である。

このような理由から平成5年度は携帯型二酸化炭素濃度測定装置を用いて土壌からの炭酸ガス発生量を通気法により簡便に測定するシステムを整えた。また、通気法による測定では一般にチャンパー内のガス濃度が平衡に達した状態で測定が行われるが、測定時間を短縮するために、測定開始時からのチャンパー中の二酸化炭素濃度の増加速度から二酸化炭素発生量の算出が可能かどうかを検討した。すなわち、赤外線式炭酸ガス濃度測定器、マスフローメーター、ポンプ、データロガーなどを本体内部に内蔵した携帯型光合成測定装置（島津製作所SPB3型、総重量約6kg）をベースとして、土壌表面に被せたチャンパーに一定量の通気を行いチャンパー内の二酸化炭素濃度の変化を経時的に測定し、これを理論式 $y = A(1 - e^{-Bt})$ (y , 外気とチャンパー内の二酸化炭素濃度の差; A , 通気量と二酸化炭素発生速度で決まる定数; B , 通気量とチャンパーの容量で決まる定数; t , 時間) で近似し、得られた近似式の係数より土壌表面からの二酸化炭素発生速度を求めることとした。このようにして求めた例として松林の林床および芝生における測定結果を図5に示した。また、単位体積(重量)当たりの土壌中の微生物バイオマスと有機物分解活性の関係に

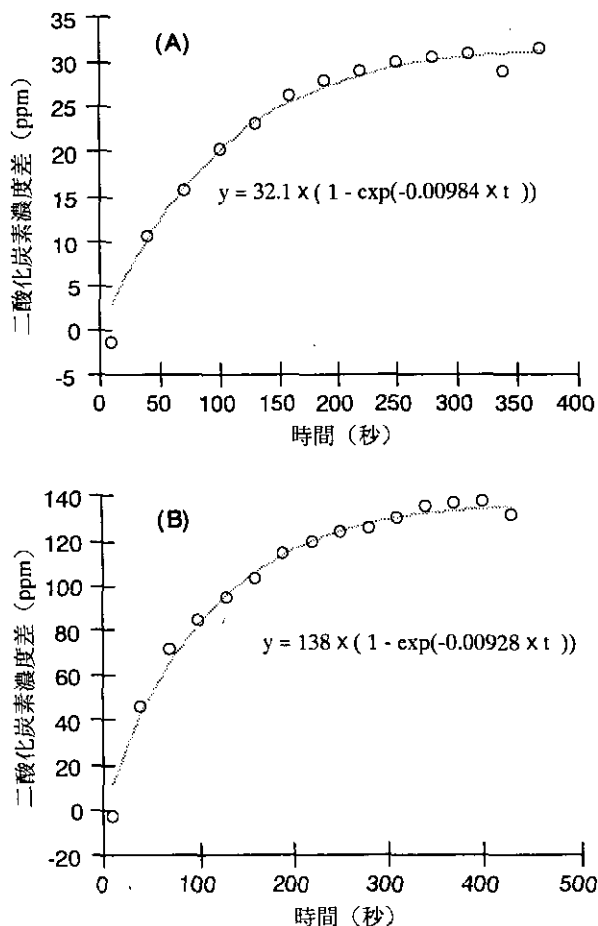


図5 携帯型二酸化炭素濃度測定器による土壌からの二酸化炭素発生量の測定例
(A) 芝生, (B) 松林林床。二酸化炭素発生速度; (A) 21.2mg C/m²/hr, (B) 90.7mg C/m²/hr

ついて検討するために、方形のチャンパーに入れた土壌コアからの二酸化炭素発生量を同様に測定することとした。これらの測定システムにより土壌からの二酸化炭素発生量をフィールドにおいて簡便に測定することが可能となった。

(5) 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

本研究課題では、温暖化等の気候変動を定量的に評価するための道具である精密な気候モデルの開発を行うとともに、気候変動の不確定性をもたらしている主要な原因の一つである大規模な雲活動分布の理解不足の克服を目指して、観測データおよびモデルに基づいた基礎的な研究を行った。本研究課題は、サブテーマとして、①気候モデルの開発・改良に関する研究 ②気候変化にかかわる雲の大気物理過程の解明に関する研究を設定している。以下に、これらの2つのサブテーマについて得られた結果を統合して述べる。

1) 高精度大気大循環モデルの作成とテスト

平成3年度より開発・改良が始められた3次元大気大循環モデルに、雲の効果を含めた高精度の放射計算スキーム、物理的機構に基づいた積雲計算スキーム、雲微物理を考慮した層雲計算スキーム、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導入・改良し、気候モデルの大気部分として高精密な大気モデルを完成させた。

このモデルの10年間程度の積分を行い、現実の気候値がほぼ再現されることを確認した。観測データとの比較を行うことにより、いくつかのモデル・パラメータの調整を行ったが、定量的な問題点はいくつか残され、今後の改良の必要性が示された。その主なものとしては、極の圏界面付近の低温傾向、熱帯対流圏の乾燥傾向、成層圏の循環の歪みなどがあげられる。図6には大気大循環モデルによる冬期の平均温度と観測値からの偏差を示す。

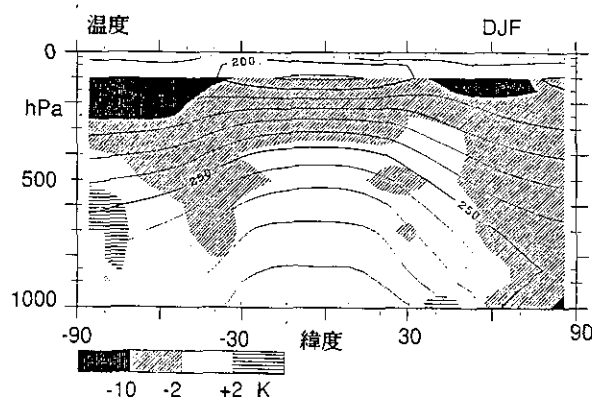


図6 大気大循環モデルによる結果：冬期の平均温度と観測値からの偏差の分布

2) 1次元モデルによる陸面過程の評価

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一次元モデルにより詳しく調べた。陸地過程については、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」（土壌と地下水との境界）の深さについての感度解析を行った。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。

3) 大気大循環モデルにおける雲と放射の相互作用

大気大循環における重要なフィードバック過程である雲と放射の相互作用について、雲水量の見積もりの方法を検討した。雲の放射強制力などの量を衛星観測のデータと比較することにより、定性的にはほぼ分布が再現されるものの、定量的には不一致があり、雲水量の鉛直分布など、解決すべき問題点が多いことが示された。

4) 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。

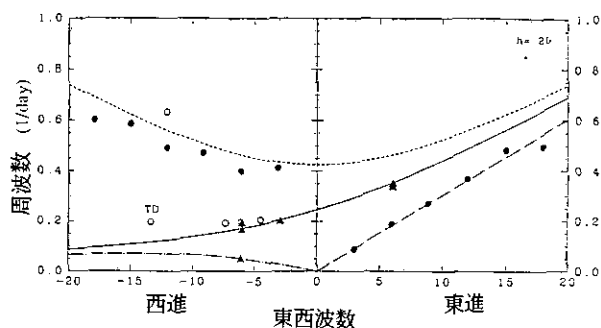


図7 スペクトル解析から得られた雲活動の統計的な特性と赤道波の分散関係との対応

5) 熱帯の大規模雲活動の統計的性質と赤道波理論との比較

気象衛星「ひまわり」の10年間の赤外データを用いて、大規模な雲活動の統計的性質をスペクトル解析を用いて調査した。その結果、熱帯域での雲活動は、等価深度が20m程度の赤道波動（ケルビン波、ロスビー波、重力波等）によく対応して組織化されていることが明確に示された（図7）。また、特に2日程度の短い周期で西進する波動を抽出し、西向き慣性重力波に対応するものであること、下層が西風の活発な対流活動域にはほぼ普遍的に存在することを示した。

6) 熱帯西太平洋域の大規模波動の特別観測の解析

TOGA-COARE（熱帯海洋全球大気結合応答観測計画）の特別観測のデータを用いて、熱帯東太平洋域のかく乱の振舞いを調査した。混合ロスビー重力波から台風

等の渦モードへの変質が見られること、また、混合ロスピー重力波の南北風に伴って亜熱帯の非常に乾燥した空気塊が赤道域に侵入し、大気海洋に大きな影響をもたらしていることが示された。

地球温暖化をはじめとする気候変動を定量的に評価するためには、気候システムの力学とエネルギー・物質循環を表現する良質の数値モデルが必要であるのは言うまでもない。以上で示した「気候モデルによる気候変動評価に関する研究（平成3～5年度）」においては、従来の大気大循環モデルでは不十分であった様々な物理過程の改良（大気放射過程パラメタリゼーションの高精度・効率化、雲水量予報スキームの導入、陸面過程の精密化

等）を行い、第2世代の大気大循環モデルの基礎が確立したといえる。また、同時に積雲対流や陸面過程など気候システムにおける重要なフィードバックプロセスにかかわる観測データ解析ならびに感度解析を行い、その時間・空間スケールに適合したモデル化の必要性を明示した。

本研究は、気候モデルの開発・改良の継続（特に大気海洋結合モデルの確立）と、積雲対流・陸面過程の精密なパラメタリゼーション、大気大循環モデルを用いた温暖化ガス増加時の気候変動特性の評価を3本柱として平成6年度からのさらなる発展を目指すものである。

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	安野正之
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
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	後藤則行・日引 聡・青柳みどり・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	
水環境工学研究室	今井章雄
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・藤沼康実・清水英幸・名取俊樹
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の方が多い。

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、全部で9つのプロジェクトがスタートしており、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：施設実験やフィールド調査等による人の健康や生存環境への影響の解明

③都市影響研究：都市のエネルギー利用、水利用、大気汚染、防災等への影響と適応策の解明

以下に、各研究プロジェクトの活動状況と成果を紹介する。

〔研究成果〕

(1) 予測モデルの開発に関する研究

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

AIMの全体構造は、図1に示すとおり温室効果ガス排出モデル(AIM/emissions)と温室効果ガス影響モデル(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、

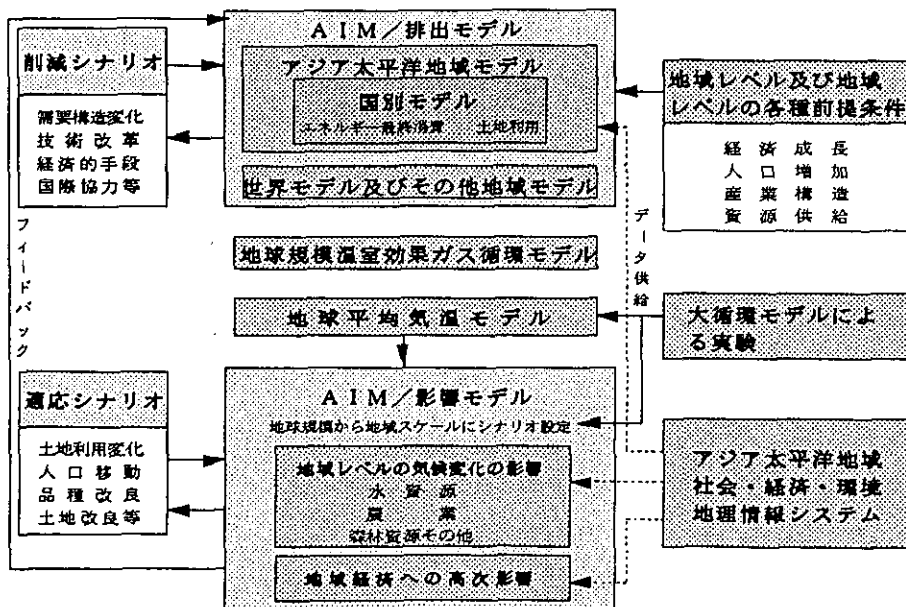


図1 AIMの全体構成

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、この地域の国々について国別モデルを作成する計画である。昨年度までに世界モデルとともにインドネシア及び中国のプロトタイプ・モデルを作成し、また韓国モデルと日本モデルの開発のための調査を実施した。今年度の研究活動は、日本モデルの完成とその途上国への適用の検討に集中した。

温室効果ガス排出日本モデル（AIM/Japan）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及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。日本モデルでは、エネルギーサービス量は産業、家庭、業務、運輸の4つのセクターごとに推定され、表1に示す100種類以上の省エネ技術の選択を通じてエネルギー効率が決定されて、各期のエネルギー需要量が決定されることになる。この際、各々の省エネ技術が選択されるか否かは、技術のコストとエネルギー節約の便益との比較によって決まる。このため、

炭素税の導入によってエネルギー価格を上げたり、補助金の導入により技術コストを下げることににより、省エネ技術の導入が促進されることになる。したがって、このモデルを用いれば、炭素税や補助金と省エネ技術の普及との関係、さらにはエネルギー効率改善による二酸化炭素排出の削減効果との関係がシミュレートできる。

日本モデルを用いて我が国の二酸化炭素排出削減をシミュレートした結果、図3に示すとおり、二酸化炭素排出量を安定化するためには、炭素トン当たり2万円から3万円程度の炭素税が必要であり、併せて主観的な投資回収期間の延長等の省エネ投資に対する国民の理解が進むことが必要であることが分かった。また、炭素トン当たり3000円程度の薄い税率を課した場合でも、その税収を補助金として積極的に活用すると、一定の条件の下ではトン2～3万円の炭素税に匹敵する効果が得られる可能性があることも明らかとなった。そして、我が国において二酸化炭素排出量を安定化するためには、炭素税等の新たな対策を単独ではなく他の諸施策と組み合わせて用いるのが効果的との結果を得た。

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、昨年度までに既存の文献レビューやデータベースの整備を進め、また、温暖化に伴う水資源変化の予測モデルを開発した。今年度は水資源変化の予測モデルをさらに改良するとともに、アジア太平洋地域にお

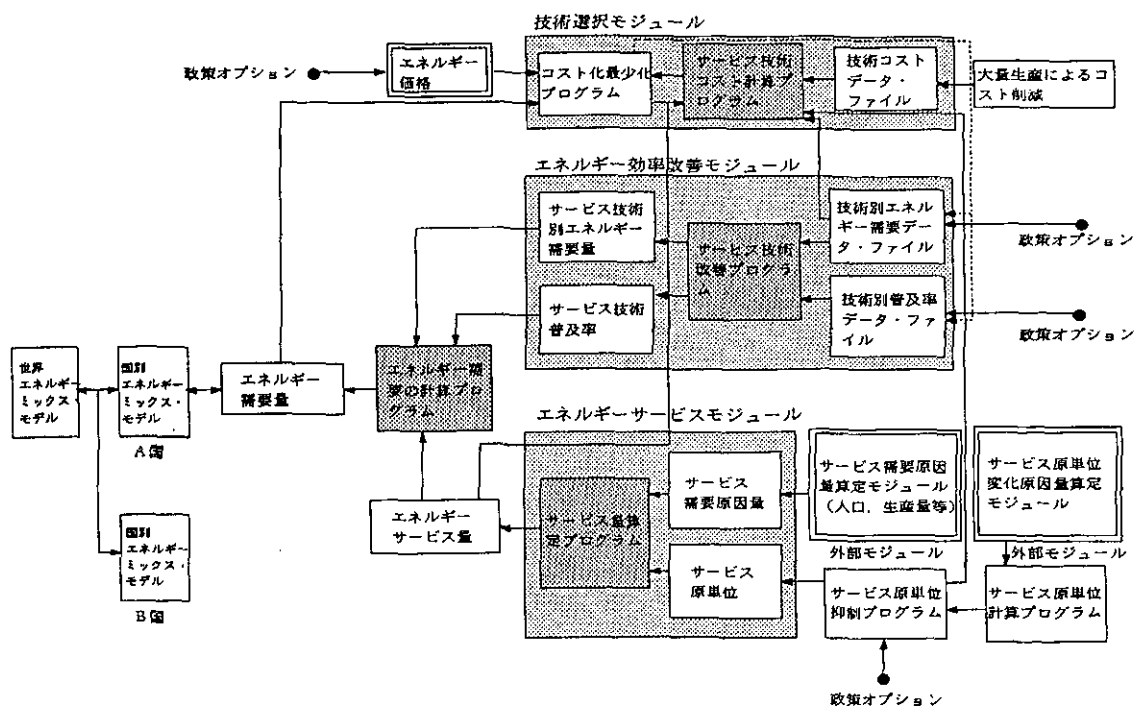


図2 エネルギー需要モデルの構成

表1 我が国の検討対象とした省エネ技術の一覧

部門	分野	サービス技術
産業	鉄鋼	コークス炉潤滑装置 スクラップ予熱装置 交流式電気炉 直流式電気炉 鋳造装置 連続鋳造装置 従来型加熱装置 直送圧延/熱片装入 焼鈍装置 連続焼鈍装置 コークス乾式消火設備 コークス湿式消火設備 湿式高炉炉頂圧発電設備 乾式高炉炉頂圧発電設備
	セメント	チューブミル 予備粉砕機 NSP/SP以外 NSP/SP 高効率クリンカクーラ 豎型ミル ディーゼル発電 廃熱発電
	石油化学	分解反応装置 高性能分解反応装置 ポリエチレン製造装置 高性能ポリエチレン製造装置 ポリプロピレン製造装置 高性能ポリプロピレン製造装置 重油ボイラー 低空気比重油ボイラー
	紙パルプ	従来型蒸解装置 予備浸透型連続蒸解装置 従来型洗浄装置 高性能パルプ洗浄装 置 従来型脱リグニン装置 酸素脱リグニン装置 ディフューザー漂白装置 従来 型蒸発缶 液膜流下型蒸発缶 従来型サイズプレス装置 高性能サイズプレス装置 従来型脱水装置 高性能面圧脱水装置 石炭ボイラー 重油ボイラー 低空気比重油ボイラー バークボイラー 黒液ボイラー
家庭	冷房	ルームクーラ
	冷房・暖房	冷暖房兼用ルームクーラ(電気) 冷暖房兼用ルームクーラ(ガス) 冷暖房兼用ルームクーラ(石油)
	暖房	石油ストーブ 石油ファンヒーター 石油温風暖房機 ガスファンヒーター ガス温風暖房機 電気ストーブ 電気セラミックファンヒーター 断熱材(新設戸建住宅) 断熱材(新設集合住宅) 断熱材(既存戸建住宅) 断熱材(既存集合住宅)
	給湯	ガス給湯機 石油給湯機 電気温水機 ソーラーシステム 太陽熱温水器
	冷房・暖房 ・給湯	電力多機能ヒートポンプ ガスヒートポンプ 石油ヒートポンプ
	照明	白熱灯 蛍光灯 インバーク照明
	動力他	テレビ 冷凍冷蔵庫 洗濯機 掃除機 電子レンジ その他
業務	冷房	電気冷房空調
	冷房・暖房	ガスヒートポンプ
	暖房	電気暖房 石油暖房 ガス暖房 保温構造化
	給湯	石油ボイラー給湯 ガスボイラー給湯 太陽熱温水器
	電力・冷房 暖房・給湯	コージェネガスエンジン コージェネガスタービン コージェネディーゼルエンジン
	照明	蛍光灯 インバーク照明
	動力他	複写機 計算機 昇降機 その他動力
運輸	旅客輸送	ガソリン新型車(軽/小型/普通/営業/自家バス) ガソリン低燃費車(軽/小型/普通/営業) ディーゼル新型車(小型/普通/営業/自家バス/営業バス) LPG新型車(営業) CNG車(小型/営業) 電気自動車(軽/小型/営業) HIRM車(自家用バス/営業バス) 鉄道 旅客船 航空
	貨物輸送	ガソリン新型車(軽/小型/普通) ガソリン低燃費車(軽/小型/普通) ディーゼル新型車(小型/普通) 電気自動車(軽/小型) CNG車(小型) 鉄道 貨物船 航空

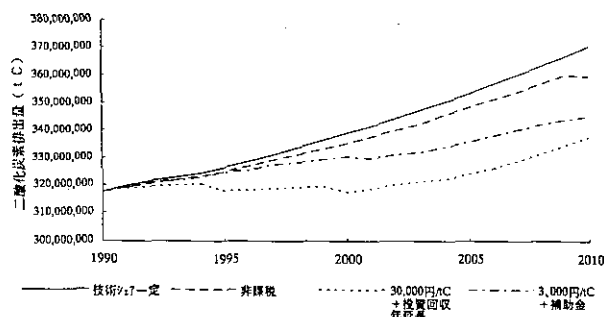


図3 日本における二酸化炭素排出量の予測

ける植生変化の予測モデルおよび全世界規模におけるマ
ラリア感染の予測モデルを開発した。

水資源変化の予測モデルにおいては、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、この集水域モデルに大循環モデル

に基づいたアジア太平洋地域の気候変化シナリオを入力
して、各流域の水資源の変化を予測した。図4には、こ
のモデルを用いて10年確率の渇水時における河川流量の
変化を予測したものである。黒く塗られた地域は、渇水
時の河川流量が2分の1程度に減少する地域で、中国北
部、東南アジア、オーストラリア東部、パキスタン等の
地域で渇水の高まるリスクが高まること示されている。

また、植生影響の予測モデルについては、第一段階と
して構造の単純なエコ・マッチング・モデルを作成した。
これは、細かく分類された植生ごとに、現在分布してい
る地域の各種の気候パラメータの値の範囲をまず求めて
おき、気候変化によって各地域の気候パラメータのい
ずれかが現状の植生生息の限界値を越えた場合に、当
該地域の植生が変化することを仮定している。図5には、

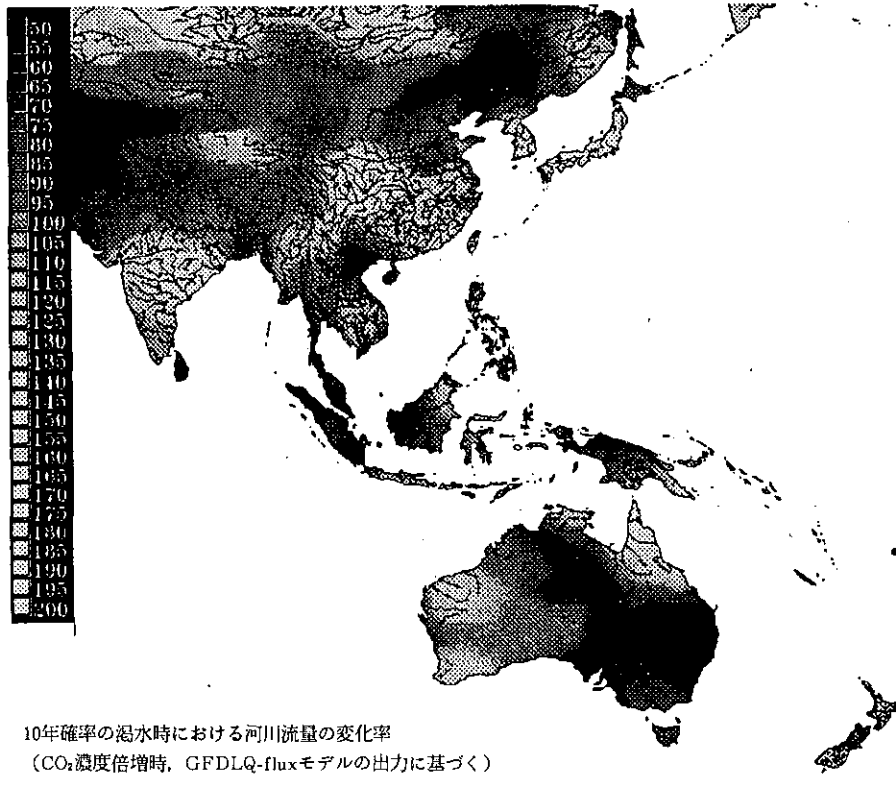


図4 アジア太平洋地域における渇水リスク推定(二酸化炭素濃度二倍時)

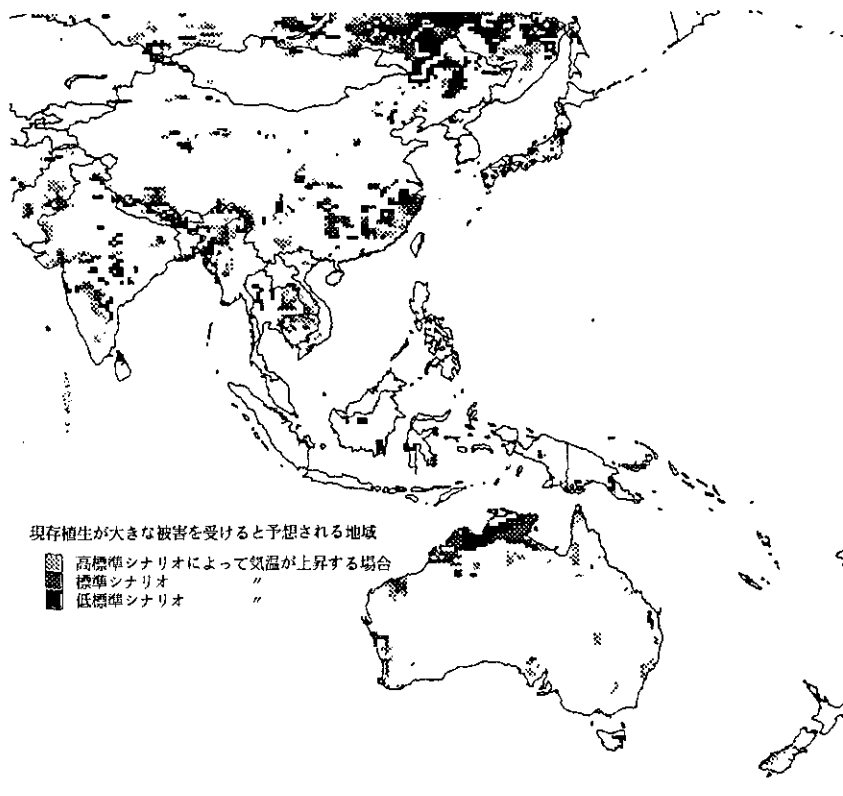


図5 アジア太平洋地域における植生変化のリスク推定(二酸化炭素濃度二倍時)

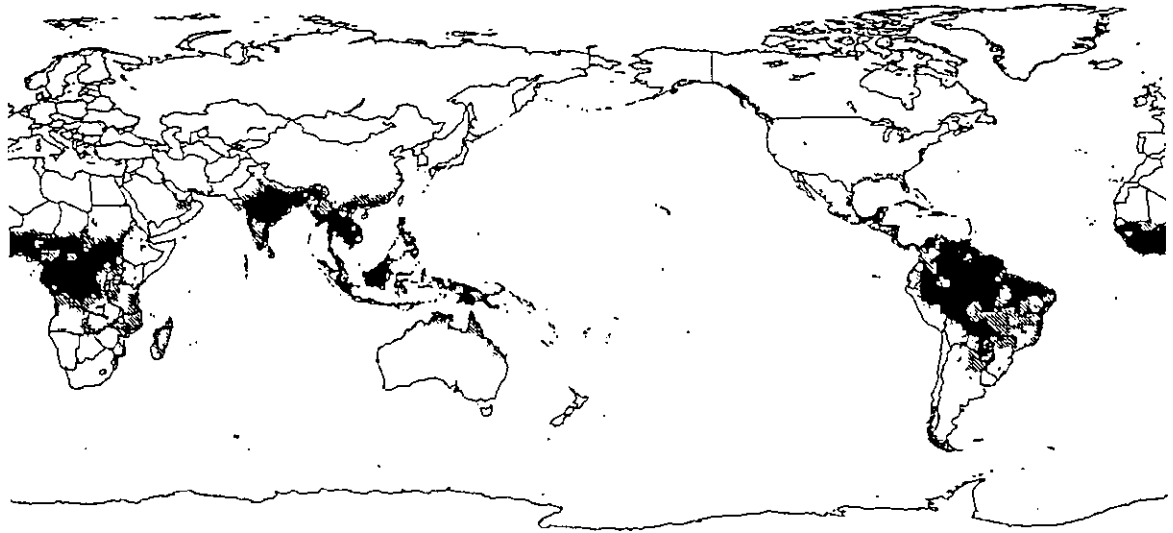


図6 温暖化によるマラリアの安定常在地域の拡大

このモデルによる一つの出力を示しており、温暖化により中国北部やモンゴル、チベットやヒマラヤ、オーストラリア北部の植生が大きく変わる可能性が示されている。ただし、このモデルは第一段階のものであり、現在、植生遷移モデルをベースとした影響モデルを開発中である。

さらに、マラリア感染の予測モデルについては、温暖化によるマラリアの媒介動物であるハマダラ蚊の繁殖条件の変化と、マラリア原虫の孢子形成期間の短縮効果をモデル化し、世界のマラリア疾病負担の増加を定量的に推定した。図6は大気中の二酸化炭素濃度が二倍になった時点で、マラリアが安定的に常在する地域がどの程度拡大するかを示しており、黒の地域は現状で、またハッチされた地域が温暖化後に組み込まれる地域である。中国南部の他に、インド、タンザニア、ブラジル等の安定常在地域が拡大する可能性が示された。

平成6年度以降は、新たに途上国等共同研究の枠組みに基づいて、アジア太平洋地域の各国の研究機関との協力により、さらに AIM モデルを発展していく予定にしている。

(2) 対策技術の評価に関する研究

次に、温暖化対策技術の評価に関しては、温暖化がどんな技術によってどこまで防げるかを明らかにするため、①社会のどの分野からどれだけの量の温室効果ガスが発生しているか（温室効果ガスアナリシス）、②どのよう

な技術的対策がありうるか（技術の探索）、③コストや社会的受容性など、多くの視点からの技術評価（個別技術の評価）、④どの技術をどのように開発し、普及させればどの程度の効果があるか（対策技術の総合的評価）の手順で研究を進めてきた。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および対策技術評価の基礎となる部門別CO₂排出構造の分析を分担している。

今年度はまず、産業連関表による分析を拡張し、輸出入の影響を考慮したCO₂排出構造分析を行った。これまで、国内の排出量を最終需要別にみる目的で、国内への生産波及のみを考慮した分析を行ってきたが、日本に輸入される財が、日本国内と同じエネルギー効率・生産構造で生産されたと仮定するモデルを用いて、日本への輸入財の生産に伴う海外での排出分を算出した。一方、国内で排出される量のうち、海外への輸出需要に伴う排出量を算出した。1975年から1990年までの5年おき4時点について分析した結果、図7に示すとおり1985年までは、日本から輸出される財の生産のための国内排出が、日本に輸入される財の生産のための国外における排出を上回っていたが、1990年にはこれが逆転している。これは、鉄鋼など生産時のエネルギー消費の多い財の輸出が減る一方、輸入が拡大したことによる。国内と国外での製造業におけるエネルギー効率の差異を考慮すれば、日本への輸入品のための国外での排出はこの分析結果をかなり上回ると推定される。エネルギー多消費産業が国外に移転すれば、国内のCO₂排出は減っても、地球全体の総排出

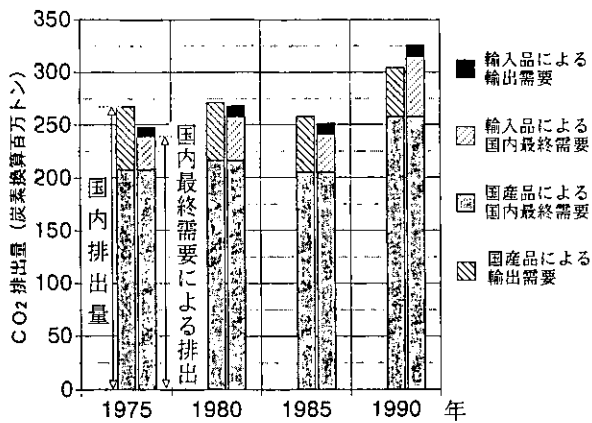


図7 最終需要の観測からみたCO₂の排出量への輸出入品の寄与の大きさ

量はむしろ増加する懸念(いわゆる“Carbon Leakage”)が指摘されているが、この分析結果も対策の実施に当たってこうした視点を考慮にいれるべきことを示唆している。

また、民生部門での対策については、全国消費実態調査による家計の消費支出データを世帯の属性別に詳細に分析し、一般家庭におけるエネルギーの消費要因をライフスタイルの関係という視点を交えながら解析した。所

得階層ごとの電化製品の保有をもとに機器ごとの消費電力量を推定した結果を図8に示す。大型冷蔵庫や大型テレビの保有率の増加がエネルギー消費量の増加に大きく影響することが明らかである。世帯のエネルギー消費量を、世帯の属性と居住する地域の気候を説明変数とする重回帰モデルで分析した結果、所得、家族人数、日照時間などの変数が、戸建て住宅でも集合住宅でも共通して有意な説明変数としてあげられた。戸建て住宅ではさらに、太陽熱温水器の有無も有意な要因となり、偏回帰係数からその省エネ効果は、102Mcal/月と推計された。この値は、太陽熱温水器の性能の公称値の70%程度に相当し、妥当な値といえる。

さらに、資源リサイクルによるCO₂排出削減効果を推定する目的で、我が国の鉄のマテリアルフローの分析を行った。図9に示すように、1985年に流通した約1.3億トン(粗鋼換算)のうち、0.5億トン強は鉄鋼製品あるいは加工製品として輸出され、ほぼ同量が国内に資本として蓄積される。そして、消費財として流通するのは全体の10%強と推定された。消費財には自動車等の耐久消

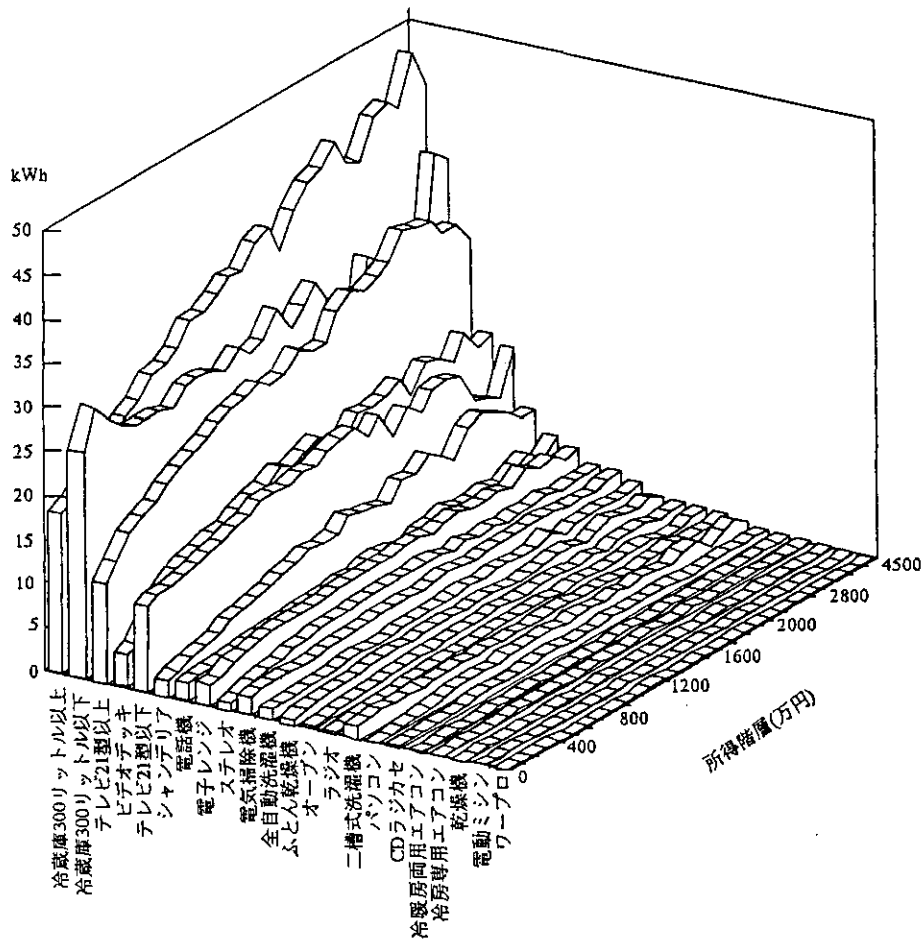


図8 電化製品によるエネルギー消費量(一世帯あたり、秋の1ヶ月)

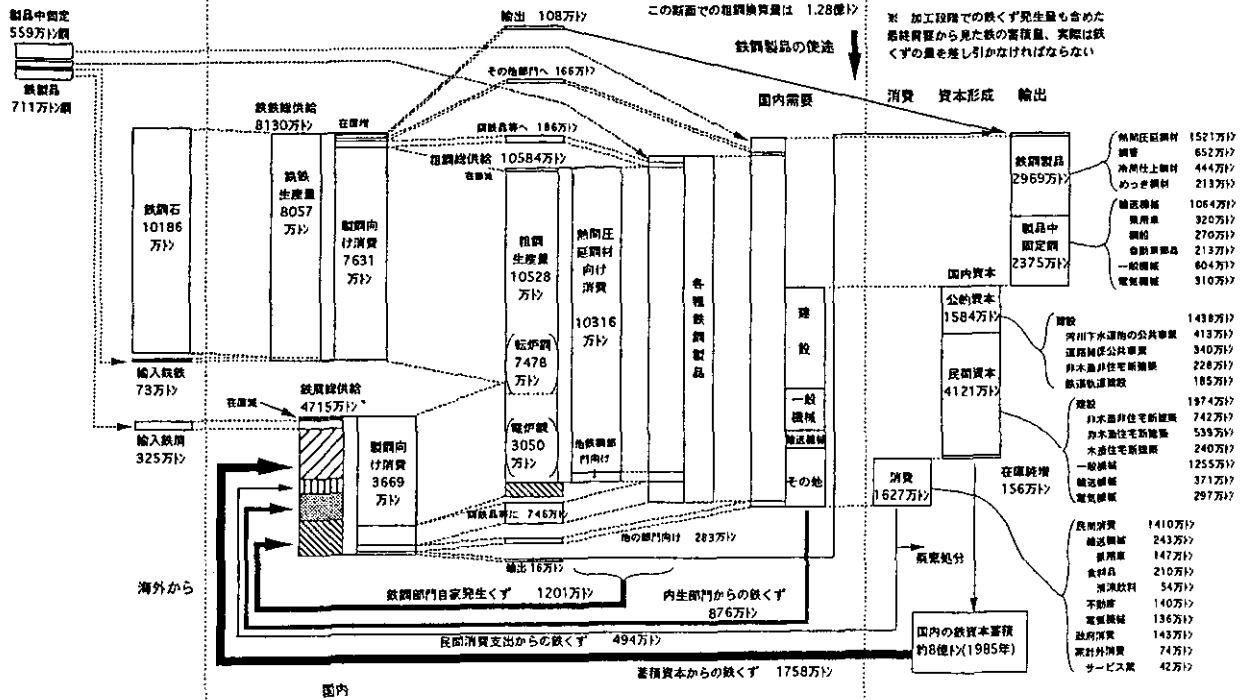


図9 産業関連表による鉄のマテリアルフロー (1985年)

費財も含まれるため、飲料容器など、日常生活に関連するリサイクル可能な流通量はこれよりさらに少ない。回収率の向上には余地が大きいものの、消費財に含まれる鉄は全生産量からみれば少なく、CO₂排出削減という観点からは、建築物や生産設備など資本財への鉄の利用に着目することが重要といえる。

(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、導入分野別の車輛の走行実体を踏まえて、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) 乗用および物流用の電気自動車の普及阻害要因の使用実績に基づいた実態調査および、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と電池供給の社会システムの概念設計
- 4) 電気自動車の適正な車輛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輛の機能と経

済面での分析

本研究の一環として行った軽自動車及びこれと同型車を改造した電気自動車による東京、大阪間の実走行テストによるエネルギー消費量の比較結果を表2に示す。同走行テストでは往路は国道1号線、復路は東名、名神の高速道路を利用している。同表の結果より、往復に用いた全エネルギーは原油換算で電気自動車では41リットル、ガソリン車では90リットルとなっており、発電や送電等の効率を計算に入れても電気自動車で消費したエネルギーは約半分であるという結論が得られた。

(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

民生部門（家庭、事務所ビル等）におけるCO₂の排出量は我が国における部門別排出量の23%を占めており年率3.5%の割合で増加しつつある。この中で家庭からのものは約半分の12%程度であり今後住生活スタイルの変化に伴ってさらに増加の傾向にある。このため家庭等におけるCO₂排出抑制のための具体的な方策を検討することは温暖化防止対策上極めて重要である。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・高気密化技術、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。

快適性の向上（アメニティー）をはかり、環境負荷の低減を実現する住まい「エコハウス」の構築にあたっては、住宅の高気密・高断熱化が極めて有用である。このため木造一戸建て住宅を中心に、モデル住宅におけるエネルギー消費を計算し、二酸化炭素排出削減効果の検討を行った。これとともに住宅のリサイクルを考慮した工

表2 同一サイズの電気自動車とエンジン自動車が東海道往復で消費したエネルギー

	電気自動車	ガソリン車
電力消費量	164kWh	-----
ガソリン消費量	-----	68l
燃料コスト	4,100円	8,160円
エネルギー消費量 (重油換算)	41l	90l

法に関する検討、住宅における居住性能評価に関する検討、モデル住宅における実測調査等を実施した。以下住宅におけるCO₂排出量に関する研究成果を中心に示す。

(1)モデル住宅の居住時における用途別熱及び電力負荷計算結果をもとに、各用途の使用エネルギー、使用機器を設定し、CO₂排出量を試算した。この計算に当たっては熱源として暖房は灯油、冷房は電気、給湯は灯油、厨房はLPG、照明動力は電気を想定した。計算予測結果によれば高断熱・高気密レベルと新設住宅の現状レベルとを比較すると部分間欠暖房時で20~25%程度、全室連続暖房で35~40%程度、高断熱・高気密住宅の方がCO₂排出量が少なくなることが分かった。

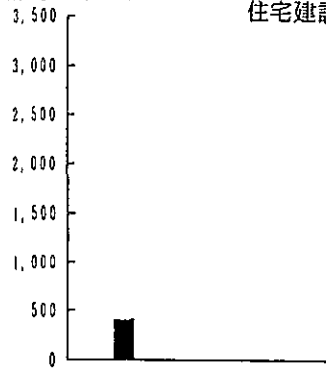
(2)高断熱・高気密住宅の建設時におけるCO₂排出量を推定したところ延床面積150㎡の住宅で炭素換算で約12.2トンの排出があることが分かった。この住宅の耐用年数を30年とした時の1年当たりの排出量は約407kgとなる。この値と居住時におけるCO₂排出量を全国7都市（札幌、仙台、新潟、東京、米子、広島、鹿児島）について全室連続運転、部分間欠運転ごとに比較した。比較に当たっては新設住宅の現状レベル、高断熱・高気密レベル、高断熱・高気密に太陽熱温水器を利用した場合、同じく多機能ヒートポンプを利用した場合、同じく太陽熱温水器と多機能ヒートポンプを併用した場合、同じくこれに太陽光発電を追加利用した場合の6ケースについてモデルシミュレーションによりCO₂の発生量を求めた。計算結果の一例を図10に示す。全室連続暖房運転では札幌、東京両地域においてともに4割近くの差が、新設住宅の現状レベルと高断熱・高気密レベルの住宅との間に見られ、この値は住宅建設に伴うCO₂排出量よりも大きいことが分かる。高断熱・高気密住宅の利用は家庭等におけるCO₂排出抑制のために極めて効果的であることが示された。

(5) 植物生態系への影響予測に関する研究

温暖化が防ぎきれなかったときにどのような影響が出てくるかについて、植物生態系への影響の研究を紹介する。この研究では、気温上昇や二酸化炭素濃度の増加などによって植物個体や植生にどのような影響を及ぼすかを分析している。植物個体や植生に及ぼす影響については、平成3~5年度までの研究は我が国を中心に行ってきたが、平成6年度からは、我が国を含めたアジア太平洋地域に調査地域を拡大して以下の研究を行っている。

(単位:炭素kg/世帯・年)

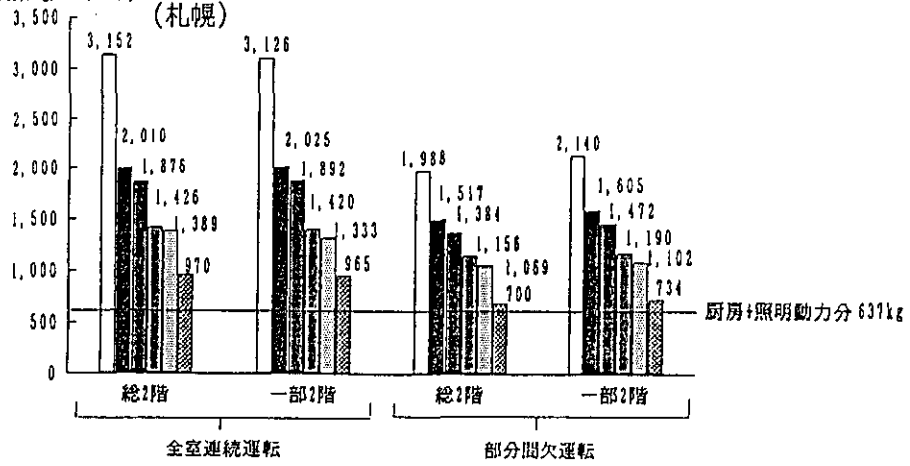
住宅建設に伴う二酸化炭素排出量



居住時の年間CO₂排出量

(単位:炭素kg/世帯・年)

(札幌)



(単位:炭素kg/世帯・年)

(東京)

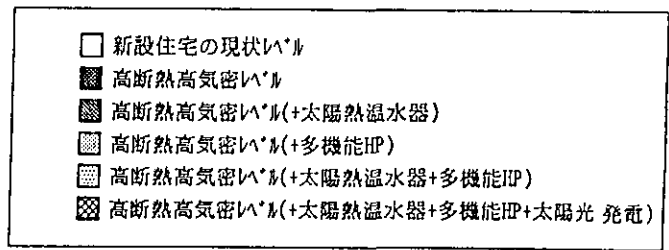
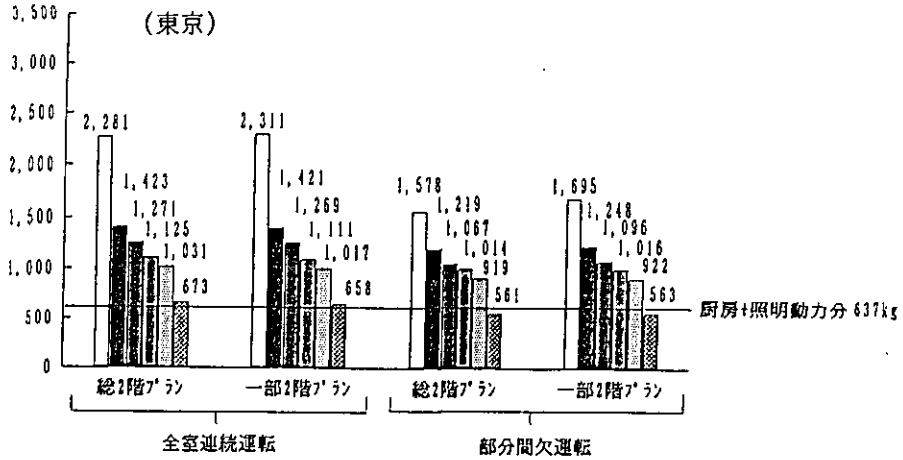


図10 住宅建設に伴うCO₂発生と居住時におけるCO₂発生の比較

1) 植生に及ぼす影響については、平成6年2月19日から2月28日までの間、中国科学院植物研究所より研究員1名を当研究所に招へいし、温暖化による植生シフトのモデリング、純一次生産力(NPP)のモデリング、今後の国際協力のあり方などについて協議した。

また、植物研究所から中国全土をカバーする年降水量データ(1951~80年の平均値)、年平均気温データ(同上)、植生分類データ、標高データが提供された。このデータは、北緯18~52度、東経73~135度の範囲をカバーし、セル間隔は緯度方向に24分の1度、経度方向に16分の1度、セルの大きさは中国中央部でおおよそ5km四方となっている(ただし標高データについては、それぞれ12分の1度、8分の1度、10km四方である)。

中国の自然植生は、①寒温帯針葉樹林、②温帯針広混交樹林、③暖温帯夏緑広葉樹林、④亜熱帯常緑広葉樹林、⑤熱帯降雨林・モンスーン林、⑥温帯ステップ、⑦温帯砂漠、⑧チベット高山・寒帯植生に大分類される。そこで、植生モデルの基礎となる、これらの植生型と気温、降水量、土壌、標高との対応関係を明らかにした。

さらに、東アジアモンスーン域については、植生の分布と生産力の変化も考えられるため、大気大循環モデルからのシナリオと筑後モデルとを用いて、CO₂倍増による気候温暖化の自然植生の生産力への影響を評価した。

研究対象地域：北緯50度-南緯10度、

東経70度-東経15度

使用シナリオ：NORMAL, GISS, GFDL, UKMO

筑後モデル：NPP = 0.29[exp(-0.216RDI²)]Rn
 NPP = 自然植生の純一次生産力 (t 乾物/(ha・yr))、
 RDI(=Rn/lr) = 放射乾燥度、Rn = 純放射、
 r = 年間降水量

まず、GISS, GFDL, UKMO-モデルからの1倍と2.倍のCO₂濃度でのシナリオを用いて気象要素の変化値を

決定した。これらの分布図をNORMAL気候分布図に重ね、各シナリオごとのCO₂倍増時の気候シナリオを求めた。気候分布図は1度×1度メッシュ図として表し、各図素ごとに計算した。

年平均気温は、対象地域平均は、GFDLとGISSとでの約4℃からUKMOでの約6℃まで、年間降水量は10~15%、年間全天日射量は1~6%の増加が期待される。温暖化による気候変化は大循環モデルの間でかなり違うことが分かった。自然植生の純一次生産力の変化は、NORMAL及び各シナリオについて、気候学的方法を用いて、各画素ごとに純放射量と放射乾燥度を計算した。各画素内の陸地が自然植生に覆われていると仮定して、この地域の潜在的な純一次生産量を推定した。その結果を表3に示す。潜在生産量は、NORMALの154.46億トンからUKMOでの177億トンまで増加することが予想される。温暖化気候での潜在生産量の増加率は9~15%になり、現在までの研究結果と良く一致している。

また、温暖化における開花・発芽・紅葉や落葉時期の生物季節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うために、アジア太平洋地域の生物季節データを収集し始めた。まず中国・韓国のデータから収集している。これらのデータが、これまで解析してきたわが国における生物季節への影響予測に用いた予測式がアジア地域にどの程度適用するか検証中である。我が国における温暖化傾向は、観測開始以来約100年間を調査してみると、全国的に温暖化傾向を示すが、地域的には上昇率が大きく異なり、一般には、都市、内陸で上昇率が高く、海岸域では上昇率が低い傾向がある。都市域の東京で100年に2.15℃、次いで福岡の1.93℃、大阪の1.69℃、札幌の1.64℃が高いほか、内陸部でも、松本の1.56℃、前橋の1.43℃、熊谷の1.49℃と上昇率は高く現れた。海岸域の銚子で0.49℃や相川で0.40℃とわずかな上昇を示し、大島や宇和島ではわずかながら低温化傾向を示す。

表3 東アジアモンスーン地域の自然諸区性の潜在生産力(億トン/yr)

	area×10 ⁸ ha	NORMAL	GISS	GFDL	UKMO
I	4.33	4.74	6.62	6.89	7.21
II	5.00	37.50	43.60	41.40	45.10
III	7.33	112.22	119.00	126.00	124.00
whole	16.67	154.46	169.00	174.00	177.00

このような温暖化現象に伴い、各々の地域の平均気温の変動と生物季節（開花・発芽・紅葉・落葉時期）の変化との相関が高いことから、中国における生物季節データを用いて温暖化した場合の影響予測を行う。中国全土に61地点の観測所で、様々な木本植物・草本植物の発芽・展開・開花・果熟・紅葉・落葉期日のデータを現在データベースとして入力中である。希少植物種への影響については、種の分布域の現地調査を中心に行った。その結果、分布の広いキグザキイチゲが全体に小型化すること、また、この他、クサアジサイでも小型化することが、箱根地方の調査で分かった。

2) 温暖化が貯水池や湖沼などの水界生態系に及ぼす影響について、水温、動植物プランクトン、栄養塩の循環速度、溶存酸素濃度を予測するシステムの開発するために、目指すモデルは、気候変化（気象条件とそれに基づく流入水量）と対象水域の特性データ（形状、容積など）を入力して、まず、水域の水理学的構造特性（水温の上昇、水温躍層の形成、混合の程度など）の変化を予測する。その結果に基づいて、生物の種構成とその現存量、さらには栄養塩の循環速度、溶存酸素濃度の変化も予測するモデルで、汎用性の高い総合モデルという点に特色がある。複雑なモデルにしても利用可能なデータが得られない水域の場合があるので、入手可能なデータに基づいて、状態変数を選択でき、かつ各パラメータのデータベースを組み込んだモデルとする。ユーザーフレンドリーに対話形式でパーソナルコンピュータでモデルの計算ができる。水温予測では、結氷や融解も再現できるものとする。

本研究では、汎用性の高い生態系モデルの構築が目標である。このためには、従来からの生態系モデルを幅広くレビューして、パーソナルコンピュータで計算できる

システムを検討する。こうしたモデルをできるだけ多くの水域で検証していく必要がある。そのためのデータの収集および整理も重要な研究の位置づけである。

平成5年度では、様々な貯水池や湖沼に適用するシステムの汎用性を考え、パーソナルコンピュータを用いて、気象観測データ（アメダスなど）と様々な貯水池や湖沼の形状を入力して水温予測を行うモデルを開発する。これを用いて、代表的な貯水池や湖沼の水温予測に適用し、検証する。

一般に、成層化した貯水池や湖沼の水温分布は水平方向には一様であるとし、鉛直方向にのみ変化を持つとみなせる場合が多く、水温分布を鉛直次元モデルとして解析可能である。本水温予測モデルでは、この考えに基づき、水温成層が形成される湖沼や貯水池における季節変化をシミュレートすることを目的とする。本モデルは、MITモデルを基本としているが、冬季における湖沼や貯水池の結氷現象もシミュレートできるように、EBM（エネルギー収支）モデルと連結して、年間を通じて計算できるように開発した。

開発した水温予測モデルを、気象、流入水量および水温分布データが入手できた湯の湖（栃木県）およびA貯水池（千葉県）に適用して、モデルの検証を行った。

湯の湖においては、各水深における水温変動がほぼ気温の変動に応じて変化している（図11）。冬季に第12層（最表層に相当）が大きく変動しているのは、5 cm分（結氷する氷の厚さ）の凝固熱の変動を受け入れるためである。観測された結氷期間とおおむね一致していたが、氷の温度の実測値が得られていないので、これ以上の議論ができない。図11に示した水温の鉛直分布も実測値の分布をほぼ再現して、水温の絶対値もほぼ一致していた。A貯水池における結果の一例を図12に示す。ここでも水温の季節変動をおおむね再現できていると考えられる。

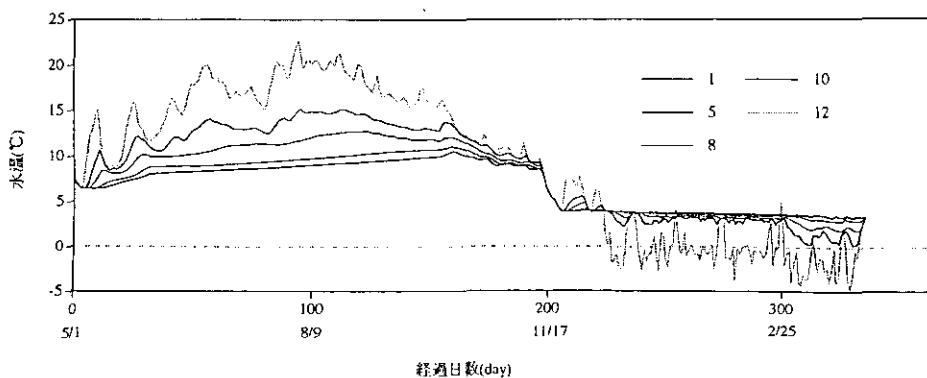


図11 水温モデルによる湯の湖の各水深における水温の季節変化

3) 植物に及ぼす複合影響に関する実験的研究については、気温上昇やCO₂濃度の増加などの地球温暖化の主因とともに、それらの変動に伴って生じる乾燥化や大気汚染等の環境要因の変動が陸上植物に及ぼす複合影響については未解明なことが多く、実証実験による定量的な解析が急がれている。そのために、本研究は、それらの環境要因を植物実験用環境調節装置を用いて制御し、陸上植物の栄養生長や生理生態的機能に及ぼす複合影響を実験的に定量解析することを目的としている(図13)。

温暖化に伴い植物を取り巻く環境の水分条件も変化し、それが植物のガス交換の場である気孔の開閉機能に影響し、さらに水収支、栄養生長にも影響を及ぼす。一方で、CO₂濃度の上昇は気孔の開閉を誘導し、気孔の開閉機能が植物の温暖化影響の重要なポイントとなる。

本年度には、新設された高性能の人工光型グローブボックスを用いて、CO₂濃度・気温・湿度を制御し、陸上植物に及ぼす複合影響を、気孔開閉機能の観点から栄養生長や水収支への影響を検討解析した。

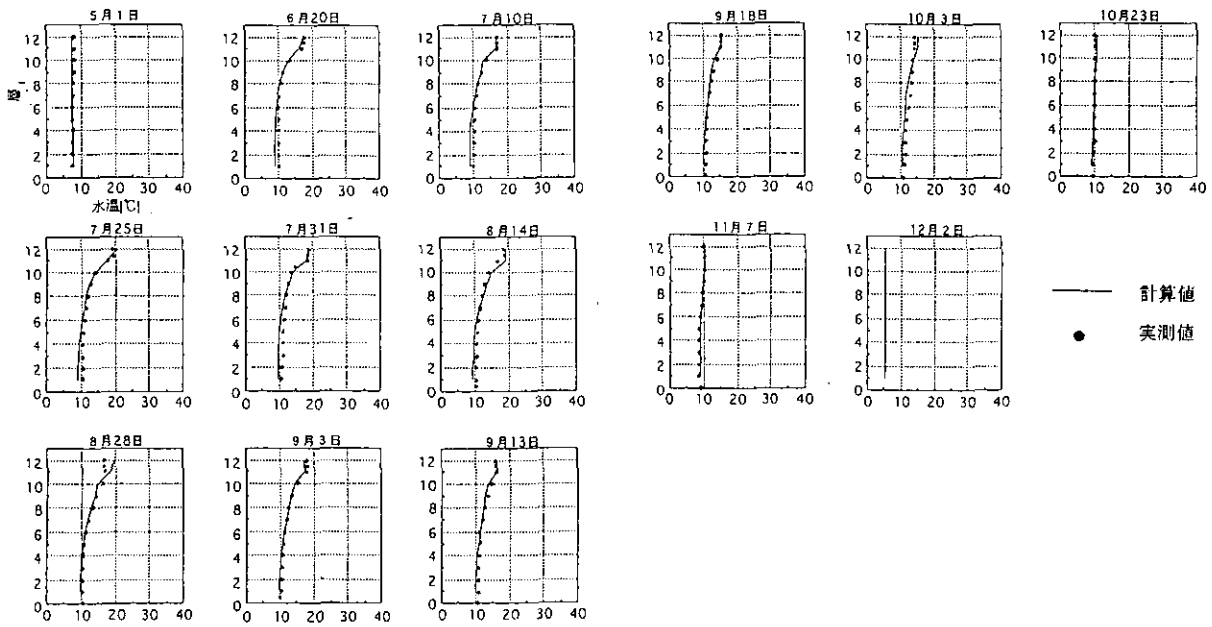


図12 水温モデルの計算結果と実測値との比較(湯の湖)

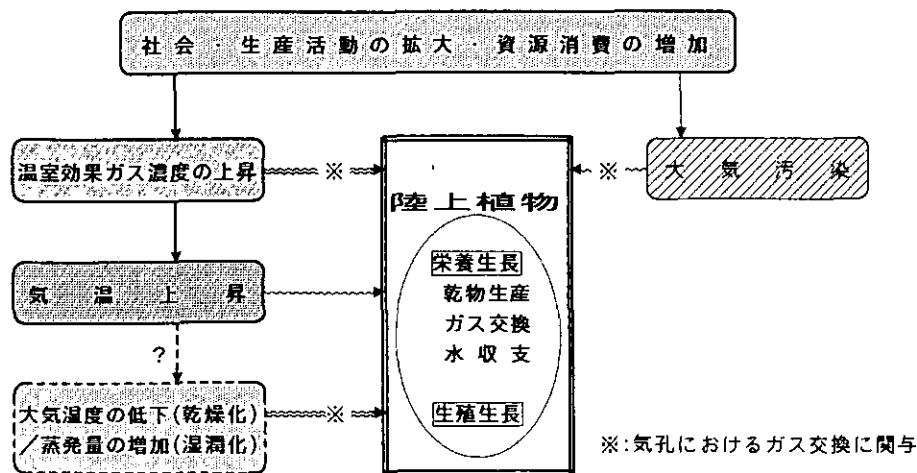


図13 地球温暖化が植物に及ぼす複合影響の概念図

実験はグロースキャビネットの環境条件を25°C, 500 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 14時間日長に制御し, 加えてCO₂濃度と湿度(飽差)を, それぞれ500, 1000ppm, 及び5, 15 mmHgに設定して行った。実験植物は, 気孔開閉能力が異なる2系統のポプラ(I-214; *Populus euroamericana*, *Peace*; *P. koreana* × *P. trichoarpa*)の挿木苗を用いて, 水耕栽培した。また, 同時に重量法によって植物の蒸発散量を連続計測し, 気孔開閉の指標とした。なお, I-214の気孔は, 水ストレスや光強度に応じて開閉するが, *Peace*はその反応性が鈍く, 常時開きぎみである。

CO₂濃度と飽差の異なる条件下で2週間育成した時の器官別乾物生長量を図14に示した。両系統ともにCO₂濃度が高い条件下で生長量が増加し, また, 湿潤条件(飽差が小さい)の方が乾燥条件より生長量が増加した。いずれの場合でも, その程度はI-214より*Peace*の方が大きく, 非同化器官の構成比も大きくなった。このことは, 気孔開閉が鈍い*Peace*の方が, CO₂濃度の増加や大気の乾燥化により影響されることを示唆した。

気孔開閉の指標である蒸散速度は, I-214・*Peace*ともに, 明暗の光周期に同調して変動した。蒸散速度の暗/明比は気孔が開きぎみである*Peace*が大きく, 暗期中も常に気孔が開いていた。したがって, *Peace*の乾物生長が乾燥条件で強く抑制されたことは(図15), 暗期中の蒸散量が大きいことによって絶えず軽い水ストレス状態に晒されていることに起因しているものと考えられた。

また, 両系統の単位乾物重当たりの水の消費量(蒸散量)を図16に示し, 乾物生長に対する水利用効率を検討した。両系統間には有意な差異が認められなかったが, 乾燥条件の方が両系統ともに水利用効率が悪く, その関係はCO₂濃度が低い方がより顕著であった。

これらのことから, 乾燥状態下でもCO₂濃度の増加は, 乾物生長に対しては“+”の効果があり, さらに, 気孔が閉鎖傾向になることにより, 水利用効率に対しても“+”の効果が認められた。加えて, 常時気孔が開きぎみである植物では, その効果が顕著に生じることが明らかになった。

(6) 健康影響に関する研究

1) 地球温暖化に伴う健康リスクの評価の際, 大陸内陸部やヒートアイランド現象の著しい大都市における夏季の暑熱負荷の増大に起因する健康影響の解明が重要で

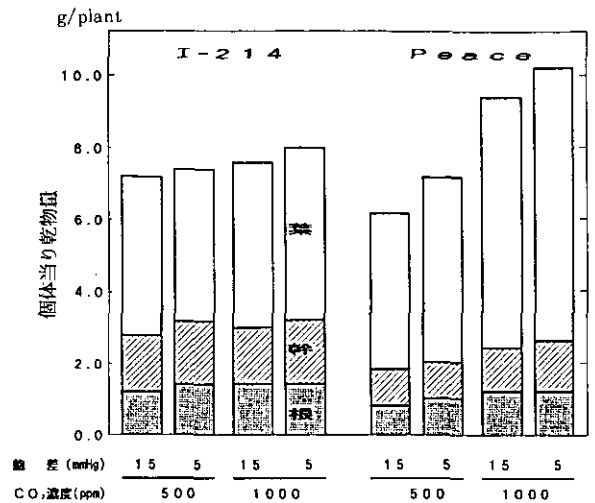


図14 ポプラの乾物生長に及ぼす飽差, CO₂濃度の影響

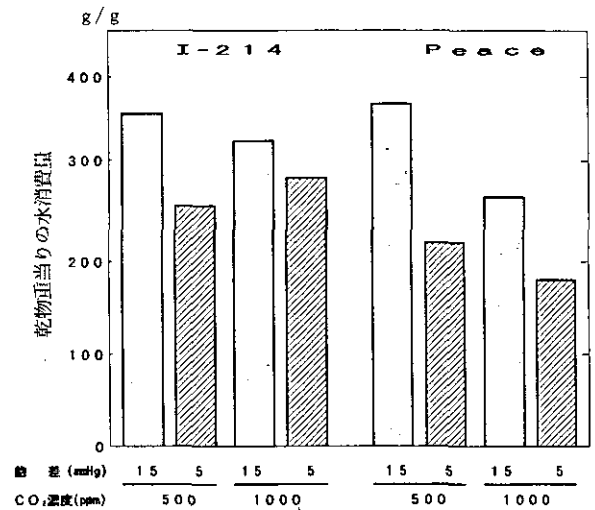


図15 ポプラの水消費に及ぼす飽差, CO₂濃度の影響

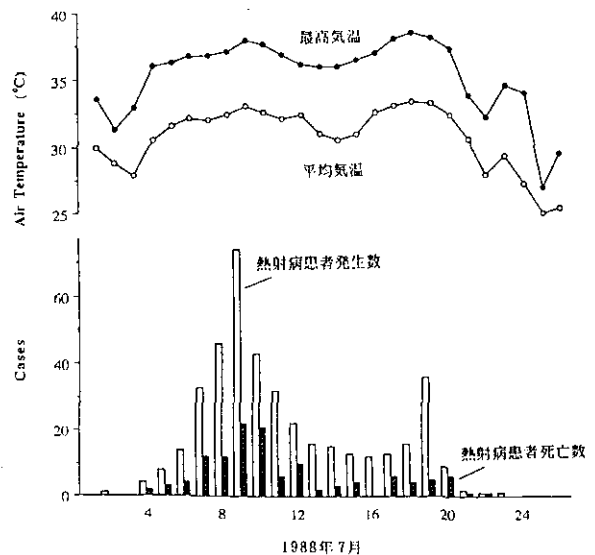


図16 熱波の経過に伴う熱射病患者の発生数の推移(中国南京市: 1988年7月)

ある。さらに熱帯病のマラリア等の動物性媒介性感染症の発生域の拡大に関する予測を必要としている。

温暖化による暑熱増大に伴う健康リスクの解明のため、昨年に引き続き中国大陸内部の熱波発生地域において日中共同で健康影響調査を継続した。同時に熱波の健康影響の解析とIPCCの夏期の気温上昇予測に基づきモデル実験を行い、暑熱による健康障害発生と生体防御機構について解析した。疫学調査結果と実験的研究を総合的に評価し、地球温暖化に伴う暑熱負荷の増大による健康リスクについて検討した。

また亜熱帯域における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について検討した。

夏期の著しい暑熱による健康障害は適応能力の低下した高齢者に集中することが判明しており、高齢化社会の進展と地球温暖化の進行による健康リスクに関して詳細な研究が必要とされている。特に社会基盤の整備が充分でない開発途上国においては、夏期の暑熱の影響が直接人体の負荷に結びつきやすく、暑熱負荷の増大により深刻な健康影響が発生すると予想されている。このため昨年に引き続き、猛暑が頻発する中国中南部を対象に国際共同調査を実施し、暑熱と熱射病患者発生数や患者死亡数との関連について解析した。同時に地球環境シミュレーターを用い人工環境制御下のモデル実験によって高体温症を再現し、熱ストレスによる健康障害の発生機構を検討し、暑熱と核心温変動機構の関連、高体温症による免疫系や生体防御系の機能に対する検討、肝細胞の代謝機能に対する影響等について、生理学的手法、組織化学的手法、生化学的手法を用いて解明した。

1) 熱波時の熱射病患者発生に関する国際共同調査

昨年に引き続き中国南京市を対象に、1988年の大規模な熱波時の平均気温・最高気温と熱射病患者発生数、熱射病患者の死亡数との関連性について日中共同で解析した。その結果人の生理生化学的適応機構の発現との関連で注目されることではあるが、図16に示すように平均気温が数日連続して32℃を超えた最初の猛暑の時期に、熱射病患者が多発していることが判明した。7日間経過後、再度平均気温が32℃を超える猛暑が数日連続して襲来しているが、この時期の熱射病患者の発生は最初の襲来から予想されるほど著しくない。熱射病患者の死亡動向と気温との関係も類似した傾向を示しているが、患者発生

動向の方が気温依存性がより明確であった。中国現地ではこのような著しい熱波の際は、屋外での労働の制限、労働時間の短縮や休暇等の社会的行動により、熱中症等の発生予防に努めている。さらに熱波襲来時は、昏睡等の中枢神経障害や肝障害を伴う熱射病の発生に備え、中国医療機関は救急医療体制を整備している。

2) 地球環境シミュレーターによる健康障害発生機構に関する実験

熱波による健康障害が観察された時期の気温に、IPCCの2030年の上位昇温予測値(BaU)を加味し、恒温恒湿の人工環境下で昨年に引き続き熱ストレスによる影響に関するモデル実験を行った。実験には人の健康影響へと外挿するために、反応の異なる数種の実験動物を用い、暑熱による細胞、組織、臓器の病理組織化学的検索と生理生化学的検討を行った。同時に免疫系に対する暑熱の影響について免疫病理学的検討を加え、人に対する広範な健康障害の発生機構を解析した。

暑熱下では動物の核心温が上昇し、軽度の高体温の症状を示すが、それによって免疫機能がどのように影響されるか検討した。免疫担当臓器である胸腺と脾臓においては、臓器重量と免疫細胞の数が顕著に減少していた。細胞性免疫と体液性免疫全体に關するT細胞依存性の抗体産生能を抗ヒツジ赤血球(SRBC)抗体産生能により検討したところ、抗体産生能は脾臓器・脾細胞当たりいずれにおいても暑熱負荷により低下していた。さらにマイトジェン反応(リンパ球幼若化反応)によっても、熱ストレスに対してT細胞・B細胞を介した免疫能の侵襲は大きいことが判明した。

軽度の高体温の症状に伴う生体の障害作用とその修復や適応に関しては、生化学的機構の解明が必須となる。軽度の高体温症を伴う動物においては、肝静脈と小葉下静脈の周囲の細胞における膨化や萎縮が観察され、細胞小器官の変化としては、脂肪顆粒の増生とマイクロ小体の変形分布が目立ち、ミトコンドリアの変形、小胞体の増生が伴っていたが、このような組織化学的变化は暑熱負荷の継続に伴い増大した。その一方肝の小葉構造や門脈系には特異的所見は観察されなかった。肝以外の臓器としては、腎、心、肺、内分泌系およびリンパ系に所見が観察された。

暑熱負荷による肝静脈と小葉下静脈の周囲の細胞における膨化や萎縮、細胞小器官の変形に伴う生化学的变化

として、ラジカル障害が引き起こされ、過酸化脂質の生成が増大する。それに伴い細胞内エネルギー産生を担うミトコンドリアの電子伝達系酵素活性が変化し、チトクロームCリダクターゼ系とチトクロームCオキシダーゼの活性の低下が観察された。このような代謝機能の低下はラジカルに対する防御系酵素グルタチオンペルオキシダーゼ活性の誘導能と関連し、著しい動物種差が観察された。このことから熱ショック蛋白の誘導を含むラジカル障害に対する生化学的防御機構の発現に関する種差の検討が重要であることが予想された。

九州南部に相当する中緯度にあるなかで熱波が頻発する中国南京市における健康障害の解析より、高体温症発生には閾値が存在し、少なくとも数日連続して平均30°Cを超える猛暑が続くと、熱射病が発生することが予想された。さらに熱射病の多発する事態は、平均32°Cを超える猛暑が少なくとも数日連続して継続する必要があることが判明した。また熱波襲来の時期により熱射病患者の発生には顕著な差が観察され、生理生化学的適応と社会的適応の違いが重要と考えられた。この結果は実験的にも再現され、暑熱負荷による軽度の高体温の症状下では、免疫担当臓器である胸腺と脾臓においては、臓器重量と免疫細胞の数が顕著に減少し、T細胞依存性の抗体産生能の低下がみられ、熱ストレスに対してT細胞・B細胞を介した免疫能の侵襲は大きいことが判明した。さらに暑熱負荷により肝静脈周囲の細胞に特異的な腫大と膨化変性、細胞のラジカル障害と脂質過酸化障害、細胞内小器官の構造変化が引き起こされる。それに伴い細胞内エネルギー産生を担うミトコンドリアの電子伝達系酵素活性の低下が観察された。このような代謝機能の低下はラジカルに対する防御系酵素活性の誘導能と関連し、著しい動物種差が観察された。

疫学調査と実験的研究を総合すると、高体温症と熱射病患者の多発の閾値温度が、32°C以上の連続した外気温の継続にあることが判明し、予防医学上の対応策への示唆が与えられた。このような暑熱により誘発される高体温症は、図17に示すような広範な生体反応を引き起こすため、高体温症による種々の生体障害と生体防御機構の関連について詳細な検討を行う必要がある。熱射病患者の発生は初期の猛暑の際著しく、猛暑の再来には初期の猛暑ほど著しい発生は観察されない事実は、高体温症による熱射病発生の機構と生体防御機能による適応の関係を明らかにする必要があることを示している。今後人の

健康維持に深くかかわる免疫系や生体防御系の機能に対する検討をさらに進め、暑熱の影響を総合的に評価する必要があることが判明した。

2) 東アジア地域におけるマラリア及び媒介蚊の地理的分布とその規定要因の解明に関する研究については、温暖化による影響を予測するための基礎資料となる、マラリアおよび媒介蚊の地理的分布と気象条件との関連を明らかにするために、前年度に引き続き、①中国雲南省における現地調査と②現在の沖縄における媒介蚊の分布調査を実施するとともに、新たに、③中国国内各地のマラリア流行及び媒介蚊分布に関する統計資料の収集を開始した。

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）及び思茅（シーマオ）周辺の3地域で、住民検診（マラリア診断及び血清疫学的調査）と媒介蚊の分布調査および気象モニタリ

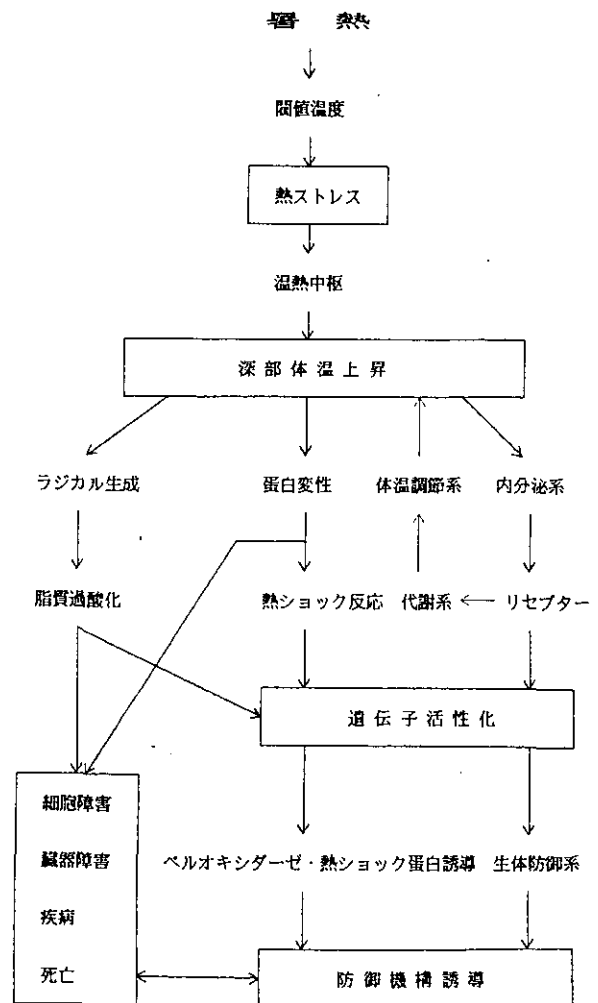


図17 暑熱による健康障害発生と生体防御機構の発現

ングを1年間にわたって実施している。マラリアの有病地から無病地まで、流行の程度の異なる地域での調査により、マラリア分布と気象条件との関連を示すデータの入手が期待される。

沖縄における媒介蚊の分布の現況調査については、石垣島、宮古島、西表島、等でマラリア媒介蚊であるコガタハマダラカ、シナハマダラカの生息分布調査を実施した。現在、これらの島々では、市街地を離れた溪流等にコガタハマダラカ、シナハマダラカが生息していることが確認された。今後、沖縄本島さらには奄美諸島についてもマラリア媒介蚊の生息調査を行い、我が国におけるマラリア媒介蚊の分布の北限を決定し、気象条件との関連を明らかにする予定である。

今後、現地調査から得られるマラリア流行と気象条件との関連データやわが国におけるマラリア媒介蚊の分布現況データを用い、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となろう。

(7) 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

温室効果ガスの発生抑制対策として、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、これらの対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昨年度に引き続き検討を行った。CH₄、N₂Oなどの温室効果ガスは生活排水および産業排水の処理施設からも大量に発生していると考えられているが、地球温暖化を抑制する上で具体的にいかなる手法を用いたらよいのか、現在のところほとんど明確にされていない。しかし、温室効果ガスの中でCH₄は有機性排水の嫌気処理過程で、N₂Oは硝化・脱窒工程で発生することから、処理プロセスの工夫を図れば排出量を削減することも可能になると考えられる。以上のことから、排水処理施設から発生する温暖化ガスの発生抑制対策を講じることは極めて重要である。

本年度は、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、その排水処理施設である生物処理プロセスから発生する地球温暖化ガスの実態調査を行った。処理プロセスとして窒素除去が可能とされている間欠ばっ気活性汚泥法と、連続

ばっ気活性汚泥法から発生するN₂Oに着目し、温室効果ガスとしてのN₂Oの発生抑制のための操作条件の解明、特に硝化・脱窒工程における嫌気条件の影響を明らかにすることを目的として実験的検討を行った。なお、本排水処理施設は1000人槽が4基設置されており、各処理装置を各種条件下で運転することが可能となっている。本装置の概要とサンプリングポイントは図18に、ガス回収装置の概要は図19に示すとおりである。

実規模施設での試験を行った結果の一例は図20に示すとおりであるが、排水処理施設から地球温暖化ガスであるN₂Oの発生が認められ、連続ばっ気法は間欠ばっ気法と比較して極めて多くのN₂Oを発生していることが確認された。また、反応槽中の水質に着目すると、連続ばっ気槽は硝化の過剰の進行により硝酸性窒素濃度が高濃度に残留しているのに対し、間欠ばっ気槽は硝化・脱窒を繰返すため槽内の硝酸性窒素濃度は低濃度に維持されると同時に生物学的リン除去も効果的に行われT-Pも低い値を示すことが分かった。この結果は昨年に行った室内実験の結果を裏付けるものであり、反応槽中の硝酸性窒素を低濃度に維持することはN₂Oの発生を抑制するこ

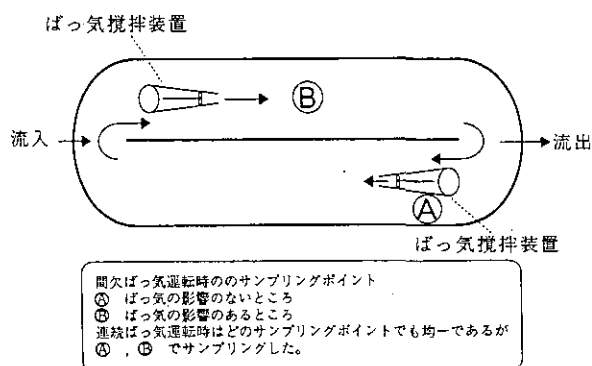


図18 活性汚泥方式ばっ気槽とサンプリングポイント

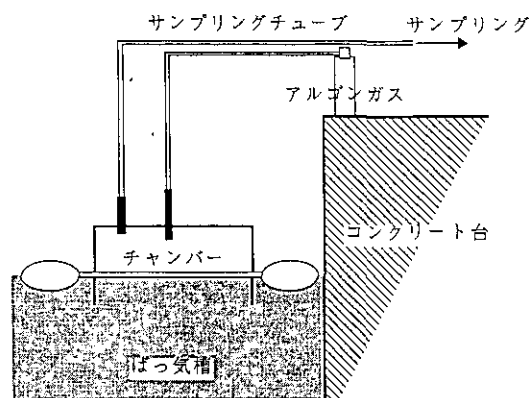


図19 ばっ気槽におけるガス回収法とガス捕集用チャンバー

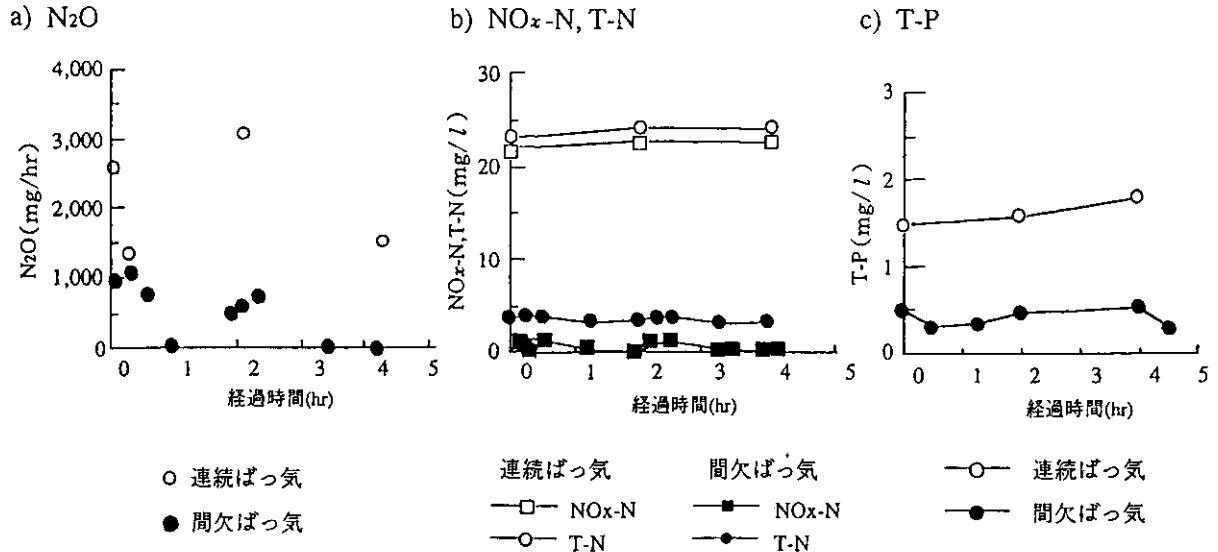


図20 連続ばっ気、間欠ばっ気運転時におけるN₂O、NO_x-NおよびT-Pの経時変化

とにおいて重要であることが実証された。これらのことから、間欠ばっ気等の嫌気条件を組み込むことは、表4に示すように窒素・リンを高度に除去すると同時にN₂O発生を抑制し地球温暖化抑制のための汚水処理手法となることが明らかになった。

また、ごみ最終埋立処分場の十分な確保が困難な状況にある今日、ごみの減容を主目的とする焼却は重要なごみの中間処理である。一方、その焼却熱の利用によるエネルギー回収の重要性も指摘されている。そこで、発電施設を有するごみ処理場の建設、運用、維持にかかわるエネルギー収支と二酸化炭素の排出削減効果について解析した。

その結果、ごみ発電によるエネルギー回収量および二

酸化炭素排出削減量は発電施設はもとよりごみ処理場全体の建設、運用、維持さらにはごみ収集を考慮しても十分評価できることが明らかになった。発電が可能ながごみ焼却施設は全国に1,000前後あると推定され、その活用による効果の大きさが示された。

(8) おわりに

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

表4 間欠ばっ気法の温暖化ガス抑制効果

- 連続ばっ気法は間欠ばっ気法と比較して約10倍程度のN₂Oの放出が確認された。
- N₂Oの発生はばっ気に伴うものが大部分である。連続ばっ気は常にN₂Oが放出されており気体中の濃度も高い。
- 間欠ばっ気を行ない水中の硝酸性窒素濃度を低く抑えることでN₂Oの発生を抑制することができる。

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	安野正之
	酸性雨研究チーム	○佐竹研一・村野健太郎・畠山史郎
	温暖化現象解明研究チーム	向井人史
	地域環境研究グループ	
	有害廃棄物対策研究チーム	西川雅高
	化学物質生態影響評価研究チーム	笠井文絵
	社会環境システム部	
	情報解析研究室	清水 明・須賀伸介
	化学環境部	
	上席研究官	相馬光之
	動態化学研究室	瀬山春彦・田中 敦
	計測技術研究室	横内陽子
	大気圏環境部	
	大気反応研究室	福山 力
	大気物理研究室	鶴野伊津志
	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	
	部 長	岩熊敏夫
	分子生物学研究室	田中 浄
	生態機構研究室	上野隆平
	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イオウ酸化物、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。

我が国でも酸性雨問題に関する関心の高まりとともに、全国各地で雨水の化学成分等の調査が行われた。その結果地域によって差はあるものの全国各地で酸性雨が降っていることが確認され、さらに東アジア、特に中国で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。

酸性雨問題は酸性物質の放出（生成）－降下・沈着－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。このため、酸性雨問題を理解

し、その対策を考えるためには、これらの諸過程について研究を進め、理解を深めることが大切である。したがって、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5年度は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次のような研究が行われた。

(1) 東アジアにおける酸性雨の動態解明に関する研究
ヨーロッパ大陸、北米大陸では前述したように酸性雨の被害が古くから顕在化していることもあって、酸性雨の大気中での反応、生成機構、その輸送プロセスなどもかなり解明されている。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。東アジア地域において地上の発生源から大気中へ放出されたSO₂やNO_xが大気中でOH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、次の研究を行った。

- 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酸性物質の沈着量マップ作成、硫黄、鉛同位体比測定による長距離越境汚染の解明
- 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、酸化性物質の物理的、化学的過程の研究
- 5) 東アジア酸性雨モニタリングネットワークの構築
- 6) 長距離越境汚染解明のためのシミュレーションモデルの開発

(2) 酸性物質の生態系に与える影響に関する研究

(酸性物質の植物環境系に与える影響に関する研究)

自然生態系は大気圏と岩石圏の境界に広がる生物圏の生態系、森林や湖沼や河川などの生態系の総称である。各々の生態系では生物を中心として土壌、水、大気の間で物質代謝が行われており、酸性物質の影響は生物の生存を支える環境要因に直接間接に及ぶ。酸性雨とその被害の関係を明確にとらえるためには、このような生態系構成要素ならびにその相互関係に関する基本的な理解が

不可欠である。本研究では、このような点を考慮し、生物とその環境について特に酸性物質の影響という観点からその影響機構を解析する。また、酸性化に伴って変化する生態系の特色を知るために自然酸性環境にも注目し、研究を進める。さらに、本研究では、生態系に必要な生物地球化学的研究手法の検討開発を基礎にして、酸性雨被害の懸念される生態系及び典型的な酸性環境に分布する生物種ならびにこれらの生態系における物質代謝(イオウ代謝、窒素代謝、金属元素の代謝等)について研究し、酸性物質が与える生態系への影響を明らかにする。

本年度は以下に述べる課題を具体的にに取り上げ研究を行った。

- 1) 植物環境系変化の指標となる生物地球化学的分析手法の開発検討に関する研究
- 2) 生態系における酸性雨関連化学種の挙動と影響に関する研究
- 3) 自然酸性環境の生態系に関する研究

(3) 東アジアにおける酸性雨原因物質の制御対策とその評価に関する研究

東アジア地域はヨーロッパ大陸、北米大陸に次いでSO₂、NO_xなど酸性雨前駆体物質の発生量の多い地域である。この地域には中国、インドなど多くの人口を抱え、エネルギー消費の潜在能力を持つ途上国が存在する。したがって、これらの地域から排出されるSO₂、NO_xなどを効率的に制御するための技術を評価するために次の研究を行う。

- 1) 排煙脱硫および脱硝装置の評価に関する研究
- 2) 流動層燃焼プロセス技術の評価に関する研究
- 3) 開発途上国における脱硫および脱硝の最適プロセスに関する研究

〔研究成果〕

(1) 東アジアにおける酸性、酸化性物質の動態解明に関する研究

1) 地上観測に関する研究

東アジアにおける酸性、酸化性物質の動態解明のために、南西諸島(沖縄本島)、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。さらに、酸性物質沈着量を求めるための大気汚染物質の連続観測を国内7地点で開始した。S、Pb同位体比の

測定を開始した。

①沖繩辺戸岬大気化学研究ステーションにおける観測
平成5年4月から平成6年3月までの一年間のオゾン濃度の変動を調べた(図1)。平均値の最低は7月にあり、6月から9月の4カ月間が30ppbv以下であった。平均値の高いものは、3、4、5月で40ppbv以上であった。最高濃度も7月に36ppbvと最も低く、高いほうの3つは4、5、6月に観測され、67ppbv以上であった。その他の月はほぼ50ppbv台の値であった。これらの観測結果から海洋性の清浄空気が入る7、8月を中心とする月に平均濃度が極端に低くなり、成層圏からの注入、あるいは光化学反応による大量生成の可能性のある4、5、6月にオゾン濃度は高くなった。

②酸性物質沈着量マップ作成

湿性降下物のサンプリングは広範に行われている。乾性降下物の測定は国内ではほとんど行われていない。このため、大気汚染物質の測定を開始した。青森市、八甲田、新津市、奈良市、松江市、太宰府市、紫尾山の7地点で測定を開始した。47mmのフィルターホルダーにフロロポアフィルター、 K_2CO_3 含浸フィルター、磷酸含浸フィルターをそれぞれエアロゾル、 SO_2 、 NH_3 捕集用としてセットした。一部地点ではナイロンフィルターをセットした系で全 NO_3^- 濃度を測定した。1~2週間の連続吸引で平均濃度を求めた。このデータから乾性沈着速度を乗じて乾性降下物量を明らかにする。

③鉛同位体比を用いた大気汚染の長距離輸送に関する研究

・鉛同位体比の測定手法の検討

大気中の鉛同位体比を迅速に測定するために、今まで用いられてきた表面電離型質量分析法に変えて誘導結合プラズマ質量分析法を用いることにした。この方法は試料が液体のまま導入できる点が従来法より簡便である。最大の感度を得るようにレンズ系を調整し、さらに質量分析装置のスキャン回数、チャンネル数、Dwell timeなどのパラメータを決定すべく検討した結果表1のような標準的な仕様が決定されるに至った。

表1の条件で、次に鉛濃度に対する影響を検討した。鉛濃度の減少に対して測定精度は悪くなるが、 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 、 $^{206}Pb/^{208}Pb$ の比の精度は50ppbまで0.6%を切っていた。 $^{206}Pb/^{204}Pb$ は ^{204}Pb の存在量が小さいことから100ppb以下では1%精度を越えた。従ってここでは、濃度として50~500ppbの範囲に合わせるように想定した。比の値の濃度依存性を調べた結果、図2にあるような応答がみられ、存在比に近い ^{206}Pb と ^{207}Pb の比の値は濃度依存性を受けにくいことが分かった。一方 $^{206}Pb/^{208}Pb$ 比は濃度依存性が見られたので、測定時は濃度依存性を調べた上測定するか、濃度を標準と合わせるようサンプルを希釈または濃縮するかしなければならないことが分かった。

・実サンプルでの測定

実際のサンプルでの測定を国立環境研究所で調整した

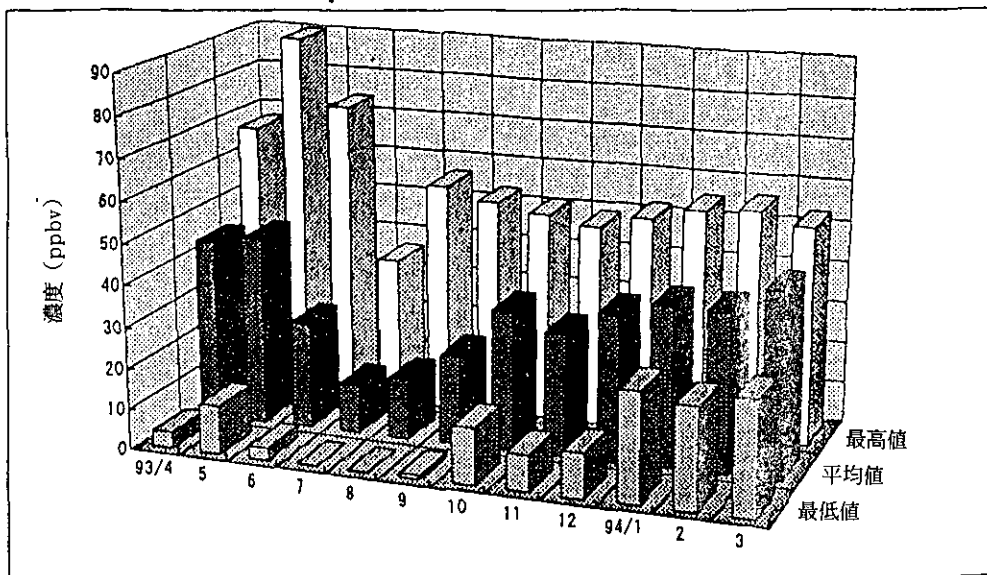


図1 沖繩辺戸岬における月平均 O_3 濃度の変動

表1 鉛同位体比測定のための標準的条件

ICPの条件	
R. F. パワー	1.3 kW
クーラントガス	1.3 l/min
補助ガス	0.6 l/min
ネブライザーガス	0.78 l/min
溶液サンプル流量	0.4 ml/min
質量分析計の条件	
質量数スキャン範囲	201 ~ 211
チャンネル数	512
Dwell Time	80 ~ 160 μ sec
スキャン回数	800

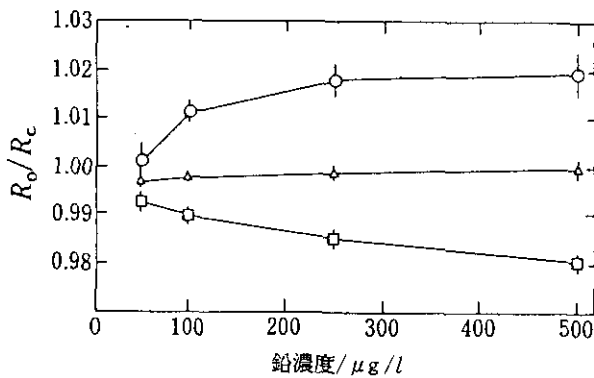


図2 同位体比に与える鉛濃度の影響
縦軸は真値 (R_c) に対する測定値 (R_0) の比

環境標準試料である自動車排出粒子 (NIES No.8) 及び米国のNational Institute of Standard and Technology 作製の都市粉じん (SRM 1648) を用いた。測定は分解試料をそのまま測定した場合と鉛だけ精製して取りだした試料の両方を行い、比較した。その結果表2に見られるように両者に差はなく、実際のサンプルでも鉛だけ取り出す前処理は必要はないことが明らかになった。

鉛の同位体比を日本のサンプルとアメリカのものと比べると、明らかにアメリカの方は日本より新しい年代の鉛を用いていることが分かる。これは、アメリカではペルーなどの鉛を多く輸入していることとうまく対応している。

④硫黄同位体比測定

硫黄同位体比の測定法はほぼ確立されているので、韓国、中国各地の石炭、石油を購入して、石炭燃焼炉で燃焼させ、硫黄同位体比の測定を行った。

測定結果を表3に示した。石炭中燃焼性硫黄の $\delta^{34}S$ 値は一種のロシア炭を除き正の値を示し、標準物質に比べ重い硫黄 (^{34}S) を多く含んでいるといえる。また同一産地内、例えばNo1とNo4, No7とNo11でも異なる値を示し、これは鉱床の違いが原因しているとも考えられる。石炭中全硫黄と燃焼性硫黄の $\delta^{34}S$ 値の相関 ($r=0.962$) から、今回の燃焼条件では燃焼性硫黄の $\delta^{34}S$ 値は全硫黄の $\delta^{34}S$ 値を強く反映しているといえる。今回の測定において、測定値の分布から見て中国炭、ロシア炭はともにその燃焼ガスは、ほとんどが石油を燃料としている新潟県内の工場排ガス中硫黄 ($\delta^{34}S$ 値: $-2.7 \pm 4.1\%$, $n=17$) に比べ、明らかに重い硫黄 ^{34}S を多く含んでいるといえる。

(新潟県衛生公害研究所担当)

2) 酸性雨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、東アジア地域の酸性雨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日はモニタリング手法とそのデータ、2日は各国の発生源インベントリー研究が発表された。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、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

東アジア地域は今後、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、我

表2 粉じんサンプルでの鉛同位体比-精製の有無による比較

同位体比	精製なし	鉛精製あり
自動車排出粒子 (NIES No.8)		
(206/204)	17.6 ± 0.26	17.5 ± 0.24
(206/207)	1.127 ± 0.010	1.125 ± 0.009
(206/208)	0.471 ± 0.004	0.469 ± 0.004
都市粉じん (SRM 1648)		
(206/204)	19.3 ± 0.20	19.4 ± 0.23
(206/207)	1.233 ± 0.004	1.228 ± 0.006
(206/208)	0.500 ± 0.004	0.501 ± 0.004

表3 硫黄同位体比の測定結果

試料 No.	国名	産地または 使用地 ¹⁾	種類	燃焼性硫黄		全硫黄	
				$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	S分(%)	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	S分(%)
1	ロシア	KUZNETSKY	石炭	2.6	0.2	2.7	0.2
2	ロシア	NERYUNGRINSKY	石炭	4.1	0.1		0.1
3	ロシア	DENISOWSKOJE	石炭	9.4	0.2	7.9	0.3
4	ロシア	KUZNETSKY	石炭	-2.5	0.4	-2.1	0.4
5	ロシア	TUGNUY D	石炭	未測定			
6	中国	LINFEN(臨汾)	石炭	0.5	0.5	1.3	0.5
7	中国	DATONG(大同)	石炭	3.2	0.7	2.8	0.7
8	中国	HEBI(鶴壁)	石炭	5.4	0.2	4.5	0.3
9	中国	FUSHUN(撫順)	石炭	7.6	0.5	8.0	0.4
10	中国	YANZHOU	石炭	10.5	0.3	11.9	0.3
11	中国	DATONG(大同)	石炭	8.6	0.7	9.7	1.3
12	中国	(神木)	石炭	3.3	0.2	3.3	0.3
13	中国	HEGAN(鶴崗)	石炭	12.6	0.1	9.6	0.2

が国にも、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。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きた。本年度は、東シナ海及び黄海上空において、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。また韓国 KIST（韓国科学技術研究院）の研究者の協力を受け、同国済州島における地上観測を加えて隠岐島、及び八方尾根における集中地上観測と合わせ、地上と航空機両面からの観測を行った。

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4の通りである。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Cessna404（所属 昭和航空（株））である。

航空機調査は①長崎空港を基地として屋久島西方沖までの東シナ海上空を往復。途中、北緯31°40′、東経129°30′と北緯30°0′、東経129°30′の2地点の間で8,500, 7,500, 3,000, 1,500フィートの各高度約40分ずつの観測（平成6年3月13日）、②長崎から東シナ海北部上空を飛行して韓国済州島に着陸。途中、北緯31°40′、東経129°14′と北緯31°40′、東経127°15′の2地点の間で8,500, 3,000, 1,500フィートの各高度を約40分ずつの観測（3月14日）、③済州空港から韓国西方の黄海上空への往復観測。途中、北緯34°0′、東経124°30′（A点）と北緯

35°15′、東経124°30′（B点）の2地点の間で8,500, 5,500, 3,000, 1,500フィートの各高度を約40分ずつの観測（3月15日）の三回の観測を行った。各コースを図3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、韓国西方黄海上空におけるSO₂、NO_x、O₃のデータを図4に示した。上空ではSO₂、NO_xともに低いが高空ではB点を鏡面として対称な分布をしている。南のA点側でSO₂、NO_xの濃度が高いことは興味深い。今後流跡線解析等を含め詳細に検討する予定である。

表4 観測項目及び測定方法

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	バルス蛍光法
PAN	低温カラム濃縮法
炭化水素	真空容器捕集法
アルデヒド、有機酸	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
COS, DMS	低温カラム濃縮法
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

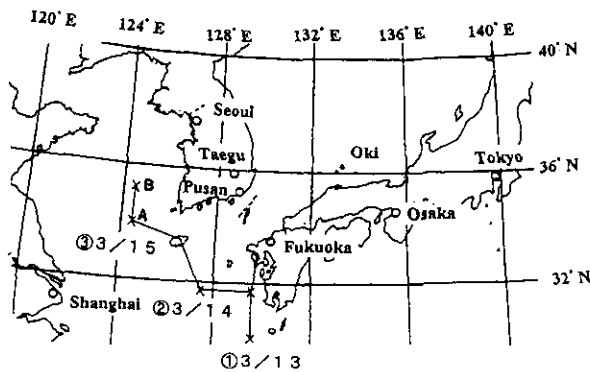


図3 平成5年度航空機調査観測コース
(×は折り返し点を表す)

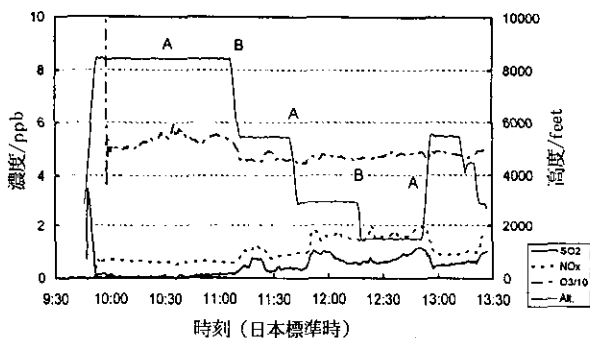


図4 1994年3月15日の黄海上空におけるオゾン, NO_x, SO₂

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所きわめて少ない。本研究では平成3年度に構築した、蛍光法を用いた高感度の分析法と、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、オゾンと8種類の炭化水素(イソプレン, α -ピネン, β -ピネン, 1-メチルシクロヘキセン, メチレンシクロヘキサン, エチレン, プロペン, 2-ブテン)の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 m³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。昨年度報告したイソプレン-オゾン反応と同様に過酸化水素, ヒドロキシメチルヒドロペロキシド(HMHP, HOCH₂OOH), およびメチルヒドロペロキシド(MHP, CH₃OOH)が検出された。各炭化水素から得られた過酸化物の収率を表5に示す。いずれの場合にも加

湿系では過酸化水素の収率の増加が見られた。

一方、オゾンとエチレンの反応から生成する過酸化物で、従来の報告ではMHPと考えられていた生成物が2-ヒドロキシエチルヒドロペロキシド(HOCH₂CH₂OOH)であることを明らかにした。

表5 8種類の炭化水素とオゾンの反応による過酸化物の収率

alkene	[alkene] ₀	[Ozone] ₀	RH/%	平均収率/%		
				H ₂ O ₂	HMHP	MHP
イソプレン	2.4-3.7	0.6-1.0	0	0.9	1.6	1.9
	3.9-6.1	0.7-0.9	13-45	2.9	1.6	1.8
α -ピネン	1.3-1.8	0.8	0	0.9	<0.1	0.3
	1.9	0.9	14	2.4	0.1	0.3
β -ピネン	1.8-1.9	0.6-0.8	0	0.4	0.3	nd
	1.3	0.8	10	5.5	0.4	nd
1-メチルシクロ	2.0-3.7	0.5-1.0	0	0.7	nd	1.2
ヘキセン	2.1-3.5	0.8-1.0	10-15	0.8	0.1	1.3
メチレンシクロ	2.2-3.6	0.5-1.0	0	0.5	0.4	nd
ヘキサ	3.6	0.7-0.8	11-17	1.4	0.9	nd
エチレン	5.5-10	0.5-1.3	0	1.1	2.8	nd
	5.2-6.5	0.7-0.9	6-8	3.7	3.1	nd
プロペン	3.0-7.1	0.7-1.0	0	0.6	1	3.7
	1.9-2.8	0.4-0.8	9-30	3.3	0.9	3.7
2-ブテン	1.4-2.4	0.7-1.0	0	0.6	0.1	3.8
	2.5	0.8	11	6.2	0.4	3.3

5) 大陸からの大気汚染物質の飛来のシミュレーションモデル開発

酸性雨・酸性降下物の輸送・変質過程を追跡するための、中国-韓国-日本スケールの対流圏下部での化学反応を含む物質輸送モデルの研究を開始した。数値モデルとしては、米国アイオワ大学で開発・応用されているSTEM (Sulfate Transport Eulerian Model) モデルを導入し、同大学と共同研究を展開した。同モデルは精密な化学反応モデルを用いており、SO₂ → SO₄への変換過程を陽に表現しており、従来の単純な変換率を仮定するモデルと比較して多くの情報をもたらすことが期待される。平成5年度は、STEMの入力条件を確立することを中心として、1) 同上の空間スケールの3次元気流ファイルの時空間内挿法、2) 緯度経度メッシュ情報ファイルを用いたVOCデータ推定、3) 乾性沈着モジュール等の改良を行い、これらを用いたテスト計算を開始した。

(2) 酸性物質の生態系に与える影響に関する研究

—酸性物質の植物環境系に与える影響に関する研究—

1) 植物環境系変化の指標となる生物地球化学的分析手法の開発検討に関する研究

植物環境系の中で変化する化学種の中で、特に酸性雨問題においては硫酸イオン、硝酸イオン、塩化物イオン、有機酸などの陰イオンならびにカリウムイオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン等の陽イオンの挙動が問題となることが多い。これらのイオンの定量には現在イオンクロマトグラフ法、原子吸光法、ICP 発光分光分析法などの各種の分析方法が併用して用いられる。しかし、特に酸性雨の生態系影響を把握しようとする場合には酸性雨が降下している現場でただちに分析を行い、データを解析し、その影響を評価することが望ましく、既存の分析手法でこれを可能にするには様々な困難がある。検討の結果、このような可能性を持っている分析手法として、多イオン微量試料の分析法として近年急速に進歩している“キャピラリー電気泳動法”が有望であると考えられた。そこで、本年度はこの分析手法について定量分析を行うため必要な様々な検討を行った。キャピラリー電気泳動法とは、石英製の細いチューブ（キャピラリー）に泳動緩衝液を注入し、その両端に電場をかけてサンプル中のイオン成分をキャピラリー中で分離し定量を行う分析方法で一台の測定装置で微量試料（100nl）中の多イオン（硫酸イオン、硝酸イオン、塩化物イオン、アンモニウムイオン、ナトリウムイオン、カリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオン、そして、有機酸を分析できることに特色がある。酸性雨研究にこの新しい分析法“キャピラリー電気泳動法”を用いる場合、第一に検討すべき点は、各種イオンを分析定量する際の再現性や検出定量限界とともに、酸性雨や酸性霧あるいは酸性環境でしばしば登場する強酸性条件下で定量分析ができるかどうかという点である。検討の結果、試水がpH2以下の場合にはフェログラム上のベースラインの乱れなどが生じ、定量が困難であったが、pH2.5以上の条件ではこのような問題もなく、各種陰イオンおよび陽イオンについて極めて再現性の良い分析結果が得られることが明らかになった。また、pH2前後あるいはそれ以下のpHを持つ強酸性試水の場合についてもこれを希釈してpH3以上にし、分析に供すれば問題がないことが明らかとなった。なお、この他“キャピラリー電気泳動法”が微量試料中の存在状態の異なる様々なイオン種の分析

に極めて優れているという長所の反面、微量試料を用いることから、試水中の各種イオンの濃度が極めて薄い場合の定量が問題であることが明らかとなった。これについては試料に含まれるイオンの濃縮が前もって必要とされ、様々な濃縮法とキャピラリー電気泳動法を組み合わせる方法、あるいは、キャピラリー電気泳動法によって分離されたイオン種を高感度で検出定量する分析手法との組み合わせ等の検討が重要であることが明らかとなった。

2) 生態系における酸性雨関連化学種の挙動と影響に関する研究

我が国ではpH4.7前後の酸性雨は全国各地で観測され、窒素酸化物や中国大陸での酸性物質の排出等は年々増加し、最近では大陸起源の酸性物質の長距離輸送が日本海上空で確認されるなどその影響が懸念されている。日本での酸性雨被害について酸性雨関連化学種の挙動と影響という視点でとらえる場合検討すべき気候的、地理的、地質的、生物的諸条件には気温や降水量等欧米と異なる点が多く、例えば基本的なものとして、①氷河侵食の有無、②火山からの酸性物質の供給、③中国大陸からのアルカリ性物質を含む黄砂の飛来、④地質条件、⑤分布する植物種、動物種の差異等がある。これらの点は次のような背景を持っている。(a) 我が国にも各地に石英含量の高い花崗岩地帯が分布している。しかし、スカンジナビア半島等の場合と異なり、氷河による侵食がほとんどなかったことに注目する必要がある。風化土壤に覆われたわが国の花崗岩地帯では河川は酸の中和能力を持っている。ところが、その中で屋久島の場合は中和能力が低い。急峻な花崗岩の山岳地帯に多量の酸性雨が降り、岩盤が露出し表層土壤が薄くなってしまっているからである。(b) 亜硫酸ガス等多量の酸性ガスを噴出する火山等の影響である。その影響は噴煙の流れる方向と高度によって異なる。例えば屋久島に近い桜島の噴煙は年間を通じてみると東西南北ほぼ全方向に流れている。一方、屋久島では年間を通じ酸性雨が観測されており、屋久島酸性雨の原因を桜島の噴煙のみに帰することには無理がある。(c) カルシウム等を含む黄砂は、中和機能を持つものとして注目される。観測の結果、その中和量は日本の酸性雨のほぼ20%と推定されている。(d) 我が国の地質は北欧や北米に比較して大変複雑である。多くの支流を持つ河川が地質条件の異なる地域を流れて海に注ぐ

ことも少なくない。多くの場合、地下に浸透した酸性雨水は土壤中で中和され、アルカリ度を増して河川に流出する。(e) 北欧や北米に比較して日本に分布する植物の種類は格段に多い。また、日本には火山性の酸性地域(水域)が多く、耐酸性或いは好酸性の動植物が数多く生存している。また、石灰岩地帯には酸に感受性の高い生物が数多く分布すると推測される。酸性雨の影響を評価する上で種によって異なる酸に対する感受性等の研究が必要となっている。その中で、少なくとも杉に関しては、これまでの様々な室内実験の結果から、あるいは火山性酸性地域周辺にも杉が育つことなどから、pH4.7前後程度の雨で直接の影響が出ることは考えにくい。

これらの基本的背景および予備調査の結果を考慮し、本年度より本調査に入った屋久島の概要は次のようである。屋久島の年間降水量は海岸地帯で約3000mm、山岳地帯では約8000mmに達する。その量は年間1700mm前後の我が国の平均降水量の数倍である。また、屋久島の雨はpH4.6前後のことが多い。つまり屋久島に降る酸性雨の総量はわが国の平均の数倍に達すると推定される。

一方、屋久島の基盤岩石は島の周辺部を除いて大部分が花崗岩で表層はその風化土壌で覆われている。また、場所によっては約6300年前に噴出した鬼界カルデラの火山噴出物が表層を覆っている。しかし、急峻な山岳地帯の表層土壌は多量の降雨による侵食を受け薄くなっている。島を流れる河川は清澄である。屋久島の渓流水を分析してみると含まれる各種イオンの量は大変少なく、雨水に近いものが多い。花崗岩の山岳地帯を流れる渓流水の場合、総イオン量の一つの目安である導電率がわずか $15\mu\text{S}/\text{cm}$ (マイクロジーメンス/cm) 前後のものが少なくない(日本の渓流水の多くは通常50を超え、河川下流部では200前後の値を示す)。pH4.3を基準にしたアルカリ度も 0.05mg 等量/l以下と大変小さく、すでに微酸性を呈しているものが少なくない。これは渓流水が酸性雨で容易に酸性化されうる状態にあることを示している。島内の河川(溪流)を大別すると、微酸性の河川、微酸性から中性領域で水質の変化する河川、ほぼ中性の河川の三つに分けられる。したがって、特に微酸性を示す河川については注意が必要である。また、屋久島の森林については、次のようなことがいえる。屋久島では確かに豊かな原生林が存在している。しかし、その一方で、特に雨量の多い海拔1500m以上の山岳地帯には土地の人々によって“白骨樹”と呼ばれる杉がおびただしく分布し

ている。この杉の多くは半死半生の杉である。白骨樹の原因や過去から現在に至る分布の変化等についてはまだはっきりしていないが、少なくとも、ナラタケ等の菌類被害ではなく、昆虫類による被害でもなく、鹿の食害、塩害、落雷、乾燥害でもなく、オゾン被害等も考えにくい。この他、低温被害、強風害、大気汚染被害など、考えられる被害原因の一つ一つについて、またその複合影響について検証を重ねなければならないが、これまでの調査の結果では、白骨樹分布地域の土壌中には交換性カリウムの量が著しく少ないことが明らかとなってきている。このため、多量に降る酸性雨が花崗岩地帯から、杉の成長に必要な生元素(例えばカリウム)を溶脱させ、その溶脱が成長の阻害要因となっている可能性は否定できない。いずれにせよ、屋久島における酸性雨の影響をこれから注意深く見守る必要がある。われわれは、屋久島酸性雨に含まれる酸性物質の起源の解明を目指すとともに、森林生態系や河川生態系等への影響について次のような研究を進めている。屋久島の降水及び河川水の継続的な観測、硫黄やストロンチウム等の安定同位体を用いた酸性物質の起源を探る研究、土壌・岩石の化学組成に関する研究、樹木の植物栄養学的研究、森林や河川に分布する生物の種類とその耐酸性に関する研究、杉を対象とした環境汚染の経年変化に関する研究等がその主なものである。

3) 自然酸性環境の生態系に関する研究

環太平洋の島々、特に日本列島には、火山地帯にたくさん火山湖が分布している。その中には火山起源の硫酸や塩酸が流入し酸性化した火山性酸性湖が少なくない。その酸性度は、強酸性から弱酸性、微酸性に至る広い領域にわたっている。火山性酸性湖の生態系は、酸性環境に生きる生物の特色、生態系の特色を知る上で大変興味深い。一方、北欧・北米に分布する多数の湖の大部分は氷河湖である。これらの氷河湖が今酸性雨の影響を受け、湖の生物が減少・死滅し大きな問題となっている。北欧や北米に分布する広大な花崗岩地帯は、およそ一万五千年前、千メートルを越す厚い氷に覆われ、今の南極のような状態であった。その厚い氷が衰退する過程で、氷河が表層土を奪い硬い花崗岩を削った後に、数多くの氷河湖が生まれた。花崗岩はおよそ70%の石英を含み、アルカリ性物質の量が少なく、もともと酸を中和する能力に乏しい。出現した無数の氷河湖の水質は酸の中和能力の

極めて乏しいものであった。一方、石炭や石油の燃焼で発生する亜硫酸ガスなどの酸性物質は、発生源の周辺地域だけでなく、気流に乗って100km~1000kmと長距離輸送され、遠く離れた国々の森林や湖沼にも降下する。近年増加したその酸性物質の直撃を受けたのが北欧や北米の氷河湖である。湖が酸性化すると、巻き貝や二枚貝、エビやカニ、サケやマス等が減少・死滅し、肉眼ではほとんど見えない藻類やバクテリア等の微生物にまでその影響が及ぶ。これらの生物はそれぞれ食物連鎖や食物網で結ばれ、生態系の中で物質代謝を担っている。そのため、酸に感受性の強い生物の受ける被害は連鎖的に広がっていく。魚類の餌として重要な巻き貝や二枚貝、甲殻類等の受ける被害が魚の生存を困難にするなどはその典型的な例である。しかし、それでは酸性化された湖はいずれも死の世界に近く、どのような生物も生存できないかというところではなく、生物圏には限られているとは言え多くの耐酸性あるいは好酸性の生物が存在し、これらの生物の生存が可能である。このため、酸性化した湖にも序々にではあるが耐酸性や好酸性の生物が移入し、それなりの生態系が形成されてゆく。例えば、酸性化した氷河湖には耐(好)酸性のミズゴケや藻類が徐々に分布を広げている。湖の水質が中性から酸性へと変化する中で新たな役者が登場しているのである。北欧・北米の氷河湖、中性湖は今酸性湖への生態系の遷移のまっただ中にあるといってもよいであろう。今後数十年あるいはそれ以上の歳月が経過したとき、それがどのような生態系にたどり着くのか、それは酸性雨の生態系影響を考える上で重要な課題の一つとなっている。このような課題を考える上で自然酸性環境の生態系は氷河湖が酸性湖に変化したときの生態系を知る上でも貴重な情報を与えてくれる。火山性酸性湖の内、例えば、pH 2.0の鳴子の“濁沼”にはその強酸性にもかかわらず緑藻やケイ藻などの藻類やユスリカ等の水生昆虫が分布し、そこには単純な食物連鎖が構成されている。さらに、本研究で特に注目している pH 3.4~3.8の青森県恐山の宇曽利湖(別名恐山湖、宇曽利山湖)には、藻類、蘚苔類、コウホネなどの水生維管束植物、ユスリカやトンボなどの水生昆虫、そしてウグイ等の魚類まで分布している。

北欧や北米の例では貝類やミズムシ等の甲殻類は酸性化で真っ先に減少・死滅してゆく生物種であったのに、日本の典型的酸性湖沼の一つ宇曽利湖では、酸性に強いマメシジミ(貝類)やミズムシの仲間が生きているので

ある。宇曽利湖の場合、この湖は少なくとも2万年の歴史を持っていることが最近の研究で明らかとなっている。火山性酸性湖に分布する生物種はいずれも耐酸性あるいは好酸性の生物種で、長い時間をかけ強酸性条件に適応していったものと思われる。たかだか数十年の歴史しか持たない北欧や北米の酸性湖と比較すると桁違いに長い年月がそこに経過しているのである。石炭や石油の埋蔵量を考えると人為起源の酸性物質の排出は今後数十年、数百年、あるいはそれ以上の期間継続する可能性も否定できない。現在、北欧や北米では酸性化を防止するため、石灰等の中和剤散布を行っている。しかしこの対策はあくまで対象療法であり、pHをもとに戻すだけで失われた生態系を回復させることは難しい。もし何も対策を行わないとすれば、自然界の一つの必然として、生物圏に分布する耐酸性あるいは好酸性の生物種が酸性氷河湖に少しずつ移入し、それなりの生態系を形成してゆくだろう。わが国の陸水酸性化問題を考える上で自然酸性環境研究が重要であるゆえんである。同様に森林への酸性雨の影響を考える上で硫気口地域などの自然酸性環境研究の重要性も明らかである。本年度のフィールド調査の結果、硫気口地域周辺にも杉やブナなどの針葉樹や広葉樹が分布する場所があり、これらの重要樹種についてその耐酸性についての評価を開始した。

(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技術—

東アジア、特に中国向けの実用的な脱硫、脱硝技術を提案するのが本研究の目的である。

東アジア地域において硫黄酸化物排出量が最も多く、全体の80%を超える中国で実用可能な技術を提案することが最も効果的であり、そのための基本条件は、①システムが複雑でないこと、②運転費がかからないこと、③使用原料、副産品等が供給あるいは地域で利用できること、以上の条件を満足し、さらに前年度の実験結果などから総合的に判断して、次の3つの技術を中国向けの脱硫、脱硝システムとして選定した。

- 1) 流動層燃焼式脱硫、脱硝システム
- 2) 石灰吹き込み微粉炭燃焼式脱硫、脱硝システム
- 3) ブリケット燃料の使用

以上の技術はいずれも燃焼過程で脱硫、脱硝を行うもので、従来の排ガス脱硫、脱硝システムと異なり、燃焼

システム以外の装置を必要としない。また、運転費も特に必要としない。これらの技術の実用化の可能性を検討するために、中国産石炭および中国産石灰を用いてテストプラントによって試験を行いそれぞれの実用性を確認した。石炭および石灰の粒度、混合比等の最適化条件を見いだせば70%以上の脱硫効果、同程度の脱硝効果が期

待できる。中国で最も工業化が進んでおり、ばい煙発生施設の規模の大きい上海市および重慶市の地域の特殊性を生かした排ガス脱硫システムとして、上海市では炭酸マグネシウムを脱硫剤とした排ガス脱硫システムを、重慶市では、廃アンモニア水および河川水による脱硫システムを提案した。

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	安野正之
	海洋研究チーム	○原島 省・切刀正行・原田茂樹
	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	
	海域保全研究チーム	木幡邦男
	化学環境部	
	動態化学研究室	柴田康行
	水圏環境部	
	部長	渡辺正孝
	土壌環境研究室	高松武次郎・恒川篤史
	社会環境システム部	
	情報解析研究室	安岡善文・須賀伸介

〔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いる。こ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、環境の空間分布や時間変動が顕著である。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・生物学的な輸送速度（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、それらの素過程間の連環を明らかにする必要がある。さらに、親生物元素・化学物質等負荷の増加に対して最初に影響を受ける海産藻類は海洋生態系の土台となっているため、藻類での物質循環モデル精度はシステム全体の精度に影響する。このため制御実験生態系を用いて海産藻類の純粋培養を行い、物質循環機能のモデル化を行う。また、これらの基礎研究に

基づき、広域海洋の環境変動を評価するためには、海産藻類のクロロフィル量を指標とし、これを、衛星可視域センサー、定期航路船舶による広域、高頻度・長期モニタリングに基づいて評価する。

また、重金属や有害化学物質による海洋汚染が深刻な問題となっている。とくに、海水の汚染のみならず、植物プランクトン→動物プランクトン→高次捕食者という物質フラックスに伴う生体濃縮機構の解明が重要な課題であり、本研究組織では、動物プランクトンとイカの肝臓における汚染機構の研究を担当した。

また近年、原油汚染の事例が報告されており、本組織においては、ペルシャ湾岸の原油汚染について、衛星によるリモートセンシングデータを中心とした解析を行った。

（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。親生物元素・化学物質等負荷の増加に対して最初に影響を受ける海産藻類は海洋生態系の土台となっているため、藻類に関する物質循環モデルの精度はシステム全体の精度に直接影響をもたらす。制御実験生態系を用いて海産藻類の純粋培養を行い、物質循環機能のモデル化を行う。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。

海洋における硫黄循環上特に近年注目されている硫化ジメチル (DMS) 及びその前駆体物質であるジメチルサルフォニオプロピオネイト (DMSP) の海水中での動態と微細藻類などの生態系とかかわりを隔離生態実験系において検討を行った。

(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る汚染物質 (重金属や有害化学物質など) は、まず一次生産者に摂取され、捕食を通して次第に高次捕食者へと取り込まれていく。動物プランクトンは、食物連鎖の底辺近くに位置する生物で、海洋での物質循環に重要な役割を果たすとともに、そこに含まれる汚染物質濃度は局所的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。

また、イカ肝臓の蓄積化学物質による全海洋環境監視計画に関する研究の一環として、外洋汚染の指標生物として注目されるイカの肝臓中に蓄積されている重金属類、有機汚染物質類を高感度な手法によって分析し、イカを用いた外洋モニタリング (スクイッドウオッチ) の対象にしうる環境化学物質の範囲を探ることを目的として、研究を行っている。

(3) 定期航路連続計測と衛星データによる海洋環境指標の時空間変動に関する研究

植物プランクトンバイオマス量は、クロロフィル量に代表され、栄養塩などの海洋環境要素に依存している。化学量は通常リモートセンシングの対象になりにくい。クロロフィル量は、可視光域データ (海水色) という形で、衛星によるマッピングが可能である。したがって、クロロフィル量に基づいて、リン、窒素循環への人為介入や自然起源による海洋環境変動を指標化することが有力である。ただし、衛星取得量は、海洋の比較的上層の間接的な光学的情報であるから、海洋環境のパラメータと衛星取得量の関連を明らかにしてゆく必要がある。このような経緯から、地球環境推進費の課題 D-3 「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 5 研究所 3 大学で分担し、国立環境研究所では、本サブテーマ名のもとに、地球環境研究センターのフェリーモニタリングデータおよび、乗船調査による海洋実測データ、衛星データおよび環境要素間の関連を明らかにする部分を受け持った。

(4) 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た。

平成 5 年度は、高空間分解能画像データである LANDSAT TM 画像データからの海面流出油の検出手法を開発し、サウジアラビア ジェベユ地域において原油流出時に観測された TM 画像に適用することにより油汚染域の評価及びその拡散域の評価を行った。また、昨年度に引き続き、地上で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) 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

自然海域に存在する海洋生態系をそのまま捕獲した海洋メゾコズム (直径 5 m、深さ 18 m の円柱状の隔離水塊) を用い、主に生物化学過程に起因する海洋物質循環の機構について検討した。

海洋メゾコズムを形成した後、直ちに栄養塩 (N, P, Si) を添加し、生物活性を高めた。その後、約 2 週間にわたり、栄養塩濃度、植物プランクトン種・固体数、動物プランクトン種・固体数、全菌数、炭素現存量 (DIC, DOC, POC)、色素量、微量元素などの鉛直分布と種々の物理化学的パラメーターをほぼ毎日計測した。

海洋生態系を通しての炭素循環経路・速度を明らかにするため、炭素安定同位体を直接添加したトレーサー実験を行った。実験開始日の翌朝、海洋メゾコズムの表層 (0~5 m 間) に、 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ を DIC 濃度の約 1% となるよう添加した。毎朝 9 時に水深 0.5 m と 10 m からサンプリングした試水を粒径画分し、DIC 態、POC 態 ($>200\mu\text{m}$, $100\sim200\mu\text{m}$, $20\sim100\mu\text{m}$, GF/F $\sim20\mu\text{m}$, $0.2\mu\text{m}\sim$ GF/F), DOC 態として存在する ^{13}C の濃度と滞留量を求めた。また鉛直 3 点 (5 m, 10 m, 15 m) に設置したセディメントトラップ中に POC 態として存在する ^{13}C の濃度と総量を求めた。 ^{13}C 濃度の計測には、封管燃焼・低温精製法を用いた。炭素循環の経路・速度について明らかとなったことは以下のとおりである。

①自然状態に対する DIC 態の過剰 ^{13}C 滞留量は、0.5 m 層で急激に減少、10 m 層では緩やかに増加し、実験開始 7 日目に両深度でほぼ等しい値となった。物理過程あるいは生物化学過程により、両層の間で均一化が進んだと考えられる。

②0.5 m 層における POC 態の過剰 ^{13}C 滞留量は生態系の変遷に伴って変動するが、主に植物プランクトンが存在する GF/F $\sim20\mu\text{m}$ 画分、主に動物プランクトンが存在する $100\sim200\mu\text{m}$ 画分、あるいは $>200\mu\text{m}$ 画分のいずれにおいても横ばいであった (図 1)。これらの結果は、海洋炭素循環において、炭素は植物プランクトン態あるいは動物プランクトン態としては長くは留まらず、1 日程度の短い時間間隔で他のコンポーネントへと移動している事を示唆している。また、主に動物プランクトンが存在する画分には、植物プランクトンが存在する画分の 3~8% 程度の過剰 ^{13}C が常に存在していた。

③10 m 層において、GF/F $\sim20\mu\text{m}$ 画分、および $20\sim100\mu\text{m}$ 画分の過剰 ^{13}C 滞留量の変動は、0.5 m 層のものとはほぼ等しい傾向にあり、この層での POC が 0.5 m 層で形成された POC の速やかな (1 日以内) 沈降に由来する割合の高さを示している (図 2)。一方、主に細菌が存在すると思われる $0.2\mu\text{m}\sim$ GF/F 画分では、過剰 ^{13}C 量が実験開始後 5 日目から急激に増加しており、

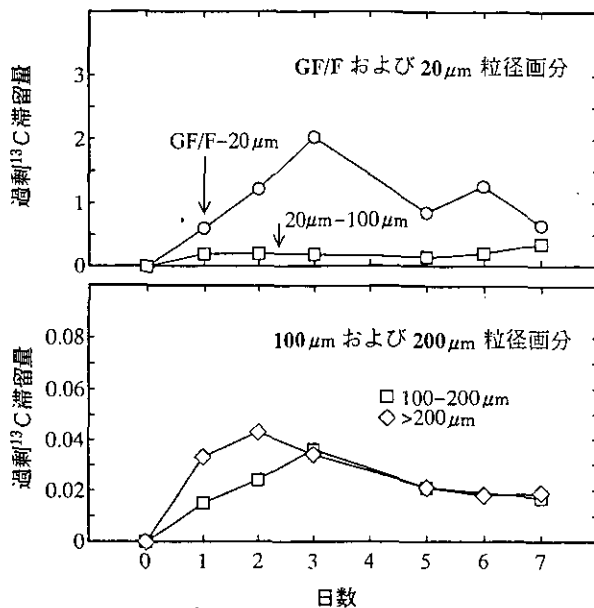


図 1 0.5m 層の粒径画分における POC 態の過剰 ^{13}C 滞留量

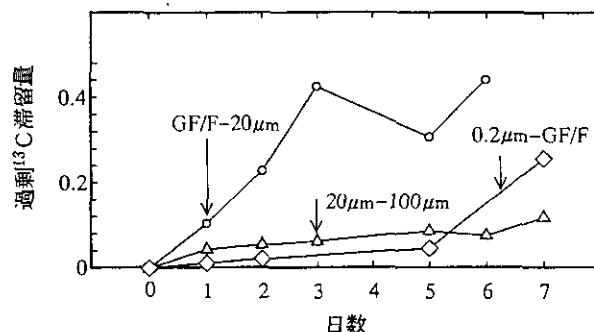


図 2 10m 層の粒径画分における POC 態の過剰 ^{13}C 滞留量

沈降過程の POC 態 ^{13}C が一部分解されて DOC 態 ^{13}C となり、細菌の同化によって再び POC 態 ^{13}C となった可能性を示唆している。

硫黄循環に関する調査は、メゾコズム内表層、2 m, 5 m の各層の海水をバンドン採水器を用いて採取し、直ちに静かに採水瓶に移し、現場に設置した分析室にて海水中の DMS, 溶存態 DMSP および粒子状 (生体内) DMSP をその日の内にガスクロマトグラフにて毎日分析した。

分析結果では、海水中の DMS は低く表層で $10\sim70\text{ng(S)/L}$, 2 m 以深では 10ng(S)/L 前後で大きな変動は見られなかった。溶存態の DMSP は、同様に表層で $10\sim14\text{ng(S)/L}$ で最大値は実験開始後 8 日目及び 11 日目であった。また、2 m では、小さなピークが 3 日目、8 日目及

び11日目に観測され、5 mでは8日目から9日目にかけ100ng(S)/Lのピークが観測され、各深度間の相関は低かった。粒子状(生体内)DMSPは、大きな変化を示し、7日目から9日目まで最大1500ng/Lを超える量が検出された。しかもピークは急激に立ち上がり、また急激に消滅するという劇的な変化を示していた。

この粒子状DMSPのピークと、同時に計測した色素の内クロロフィル α とペリジニンのピークとには、強い相関が見出された。クロロフィル α は植物プランクトン一般の、ペリジニンは渦ベン毛藻に特異な色素であることから、この粒子状DMSPは、渦ベン毛藻が体内に蓄積したものであると考えられる。また、両色素の減少と粒子状DMSPの減少とが一致していることから、何らかの形で渦ベン毛藻が系から排除されたと考えられる。この減少の時期と動物プランクトンの増加の時期が一致することから、大量に発生した渦ベン毛藻が、動物プランクトンに捕食されたことが推察される。これは溶存態DMSP及び海水中のDMSがこの粒子状DMSPの減少の直後増加していることから裏付けされる。

2) 海産藻類による物質循環機能のモデル化に関する研究

*Emiliania huxleyi*をはじめとする円石藻は熱帯から寒帯地域にわたって広く分布しており、海洋における炭素循環の重要な担い手の一つである。円石藻は光合成により二酸化炭素を固定すると同時に細胞中に炭酸カルシウムを形成する。形成された炭酸カルシウムは種により特徴のある形状の鱗片として細胞外隔に蓄積され、海洋中の主要な炭酸塩鉱物となっている。本研究では海洋マイクロゾム(大量培養装置;容量1 m³,高さ1.5 m)を用いて、*E. huxleyi*の増殖に伴う栄養塩および全炭酸の動態を計測した。

E. huxleyi (CCMP374, Bigelow Laboratory for Ocean Sciences)の無菌培養をf/50培地、12:12時間の明暗周期、水温18°Cにて行った。実験開始後20日目にはf/50培地を添加し、さらに26日目にはf/2培地を添加した。培養9日目までは対数増殖(細胞数 9.7×10^6 cells/ml)を示し、この期間は緑色を呈した。その後細胞数は減少し培養19日目には 4.3×10^6 cells/mlとなり、炭酸カルシウムにより白色を呈した。増殖停止後細胞平均径は直線的に増加し、この期間に多量の炭酸カルシウム形成が行われた。栄養塩は培養10日目にはN・Pとも

に完全に欠乏状態となった。全炭酸は増殖停止後も減少を続け、pHは8.9であることからHCO₃⁻が炭酸カルシウム形成のために使用されたことが示唆された。

3) 海底堆積物を用いた長期海洋物質循環変動の推定手法に関する研究

南極海エンダビー沖海域より採取した海底堆積物のGC1002の年代測定を再度行い、その精度向上を行った。GC1002より分画した浮遊性有孔虫試料は、表面を希塩酸で処理し試料の約10%を溶解した後、MilliQ水で洗浄して乾燥した。この試料に同位体比測定用ピロリン酸で真空中で分解して二酸化炭素ガスを発生させる。二酸化炭素ガスは真空ライン中で精製した後、鉄を触媒として水素還元を行いグラファイトにする。得られたグラファイトをターゲットとし、名古屋大学のタンデム加速装置質量分析計に導入して¹⁴C濃度を測定した。試料の¹⁴C濃度はNBS標準(シュウ酸, NBS SRM-4990C)を標準として年代を算出した(Kitagawa *et al.*, 1993)。この結果10~13cmが23810±240 year B.P., 20~23cmが30570±250 year B.P., 30~33cmが36460±400 year B.P.を得た。これは平均堆積速度が1.7cm/1000年であり、それら3点のデータには良い直線関係が見られる。ケイ藻より推定される62cm以深(19.5万年~66万年)での平均堆積速度0.32cm/1000年より約5倍もの堆積速度が得られており、2万~3万年代での生物生産が多かったことを示唆している。

(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同時に、そこに含まれる汚染物質濃度は局所的な海域の汚染状況を良く反映する。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、1986~1993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150m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°C) 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圧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 及びUである。

図3は, これまでに種別に分画できた動物プランクトン33試料 (19属) の元素分析結果に基づいて, 元素濃度 (Zn, Fe及びPについて) を動物プランクトン1個体当たりの重量との関係で示したものである。動物プランクトンの個体重量は, 0.002mg (*Acartia omorii*) から

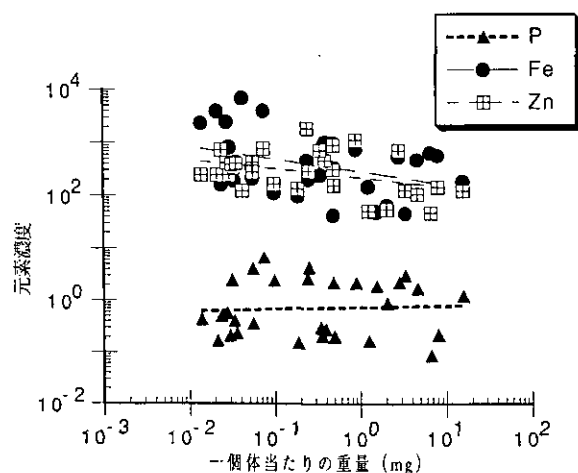


図3 海洋動物プランクトンの元素濃度と個体重量との関係 (Fe, Znの単位はppm, Pの単位は%)

16.0mg (*Portunus trituberculatus*) まで変動したが, Pなどの多量元素の濃度はほぼ一定していた。一方, 重金属などの微量元素の濃度は, 個体重量の減少に伴って増加する傾向を示し, 微小な動物プランクトンほどより高濃度の重金属を含むことが示された。しかし, 微小な動物プランクトンでは, 体表面積が相対的に大きいため, 洗浄過程でのコンタミを完全に除去できなかった可能性もあり, 今後の詳しい検討が必要である。

また, MKT-プロット ($\tau_r \times CF_{sw}$ と CF_{sw} との関係; τ_r : 海洋での元素の滞留時間, CF_{sw} : 元素の海水中溶存濃度を基準にした動物プランクトンへの濃縮係数) が動物プランクトンの重金属汚染や重金属蓄積性を評価するのに適した方法であることはすでに報告した。このプロットの勾配は, 汚染や蓄積性のない動物プランクトンでは, ほぼ0の値を示し, 汚染の程度に比例して暫増して, 最大で約0.33 (地殻や底質の場合: 約0.37) に達する。今回, 動物プランクトンの捕食者で, 食物連鎖においてその直上位に位置する稚魚 (ボラ, *Mugil cephalus*; サンマ, *Cololabis saira*; カワハギ, *Stephanolepis cirrhifer*) を採取・分析し, 同様の手法で解析した (図4)。その結果, プロットの切片 (7.36 ± 0.19) は動物プランクトン (7.38 ± 0.32) とほぼ同等であったが, 勾配は0.12~0.30の比較的高い値を示した。

稚魚は, 洗浄が容易で, コンタミの影響は少ないと考えられるので (ただし, 消化管内容物は除去していない), 動物プランクトンに比べて重金属を濃縮しているといえる。また, 魚類の浮遊卵 (カタクチイワシ, *Engraulis japonicus* と魚種不明の卵) では, いずれの試料でも低い切片 (平均で6.59) と高い勾配 (平均で0.39) を示し (図5), 魚類に蓄積された重金属などが卵を通して排せつされていることが示唆された。

外洋汚染の指標生物として注目されるイカの肝臓中に蓄積されている重金属類, 有機汚染物質類を高感度な手法によって分析し, イカを用いた外洋モニタリング (スクイッドウオッチ) の対象にする環境化学物質の範囲を探ることを目的として, 研究を行った。重金属の蓄積濃度は試料により大きな違いが認められたが, 体長等有意な相関を示す因子は見つからなかった。ただし, 元素間で相関を示す組がいくつか見つかかり (Cu-Zn; Mn-Mo; Co-V; Mo-V; Mo-Co; Co-Cd), それらの体内での存在状態との関連が注目される。一方, 有機汚染物質については石油起源である脂肪族・芳香族炭化水

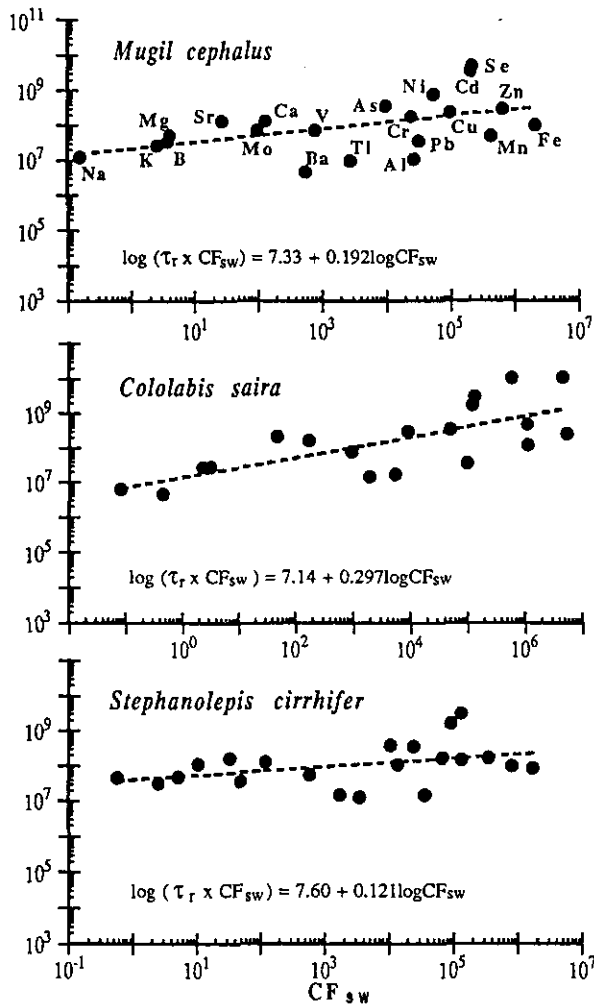


図4 ボラ (*Mugil cephalus*), サンマ (*Cololabis saira*), 及びカワハギ (*Stephanolepis cirrhifer*) におけるMKT-プロット

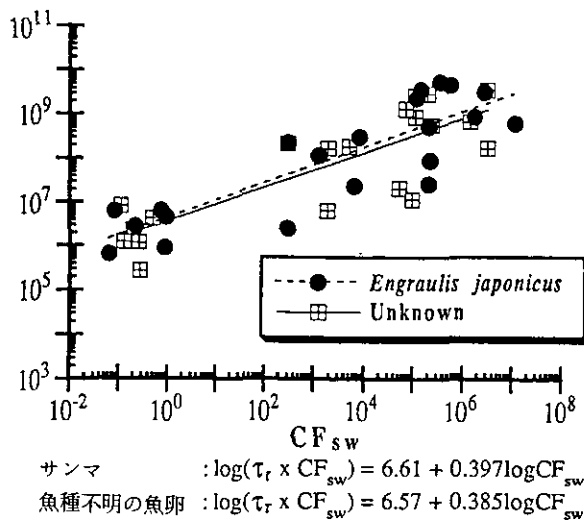


図5 浮遊魚卵(サンマ, *Engraulis japonicus* と魚種不明の卵) におけるMKT-プロット

素について、分析前処理法の検討並びに検出範囲の探索を行った。B(a)Pはすべての試料で検出され、海域によって蓄積濃度に大きな差が認められた。一方、種差による濃縮倍率の違いなど、結果の相互比較のために考慮すべきいくつかの問題も浮かび上がってきた。

(3) 定期航路連続計測と衛星データによる海洋環境指標の時空間変動化に関する研究

本テーマの前年度までの経緯は、次のようである。1990年度に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、神戸と釜山間を結ぶ日韓フェリー「檀皇」に設置された。自動計測によるモニタリングと平行して、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CO₂分圧の計測等を行った。1992年度末に、神戸-釜山航路が廃止になったため、1993年に、新規航路決定と計測手法の改良に関する検討を行い、大阪-沖縄航路(沖縄フェリー)と、大阪-別府航路(瀬戸内海フェリー)により、モニタリングを再開した。

2路線の目的、および期待される知見はそれぞれ以下のものである。沖縄フェリーでは、大阪湾-紀伊水道-陸棚斜面-黒潮-亜熱帯海域というゾーネーション(带状構造)を横切りながら1週間2回の頻度で時系列を取得する。この結果、人為影響の外洋への広がりを長期にわたってモニターできることが期待される。

図6, 7に、沖縄フェリーの航路図と、3月29日の黒潮域→紀伊水道→大阪湾にまたがる海域の、水温、塩分、植物プランクトンの蛍光光度の分布を示す。黒潮を横切る際に、水温の前線が見られることと、紀伊水道において、高温高塩分の準外洋性水塊と、低温低塩分の内湾性水塊の間に、熱塩前線が見られる。クロロフィル蛍光は、基本的に、内湾側が多いが、前線付近で極大値を示す観測例が得られた。このようなことから、植物プランクトンクロロフィル濃度等の海洋環境指標量が、基本的に栄養塩量に依存しているが、大気物質の分布に比較して、非常に不均質であり、海洋構造に依存していること、および、衛星や定期航路船舶で時空間変動をモニターする必要性が示された。

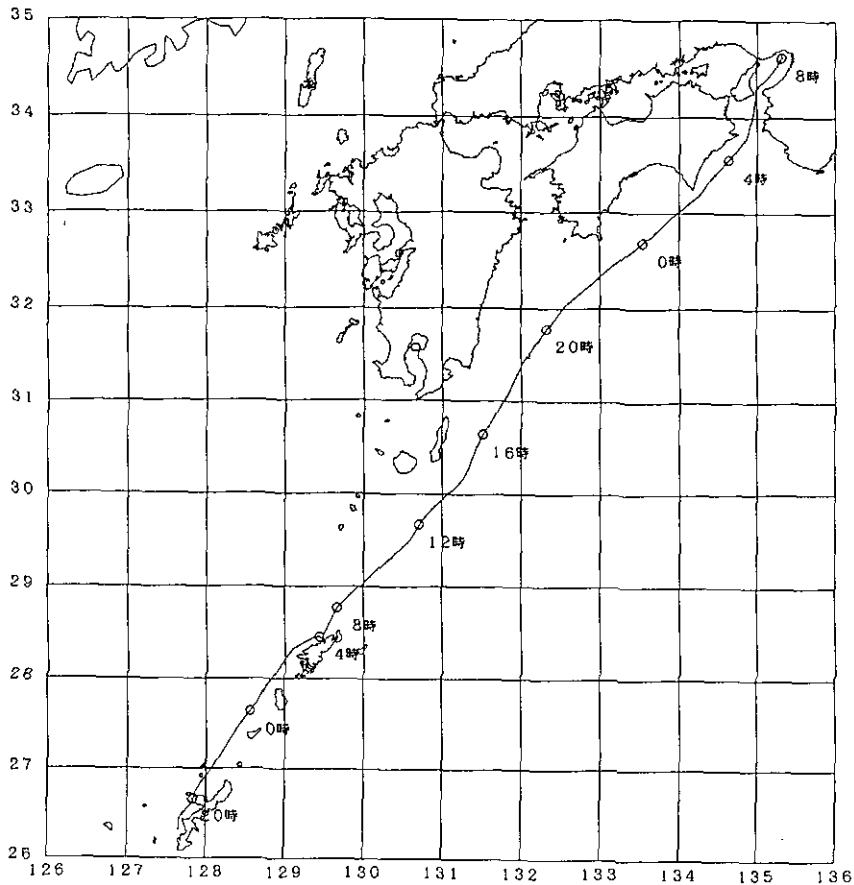


図6 フェリーくろしお(大阪-沖縄)の航路図

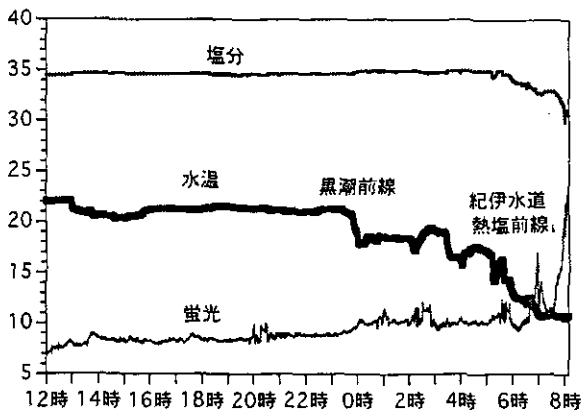


図7 同航路における水温、塩分、植物プランクトン蛍光の連続計測結果

(4) 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。

まず平成4年度(初年度)には、油田火災発生時における、人工衛星NOAAからのAVHRR画像データ(地上分解能1km)を用いて火災煙の影響範囲を調べた。

平成5年度には、流出油による沿岸域への影響を評価するために、高空間分解能センサーであるLANDSAT TMからの画像データ(地上分解能30m)を用いて、海面上の流出油の分布計測及びその拡散状況の把握を試みた。まず、流出油による影響の大きかったサウジアラビアアブアリ地区において、流出原油漂着時に撮影されたTM画像(1991年2月16日及び3月20日)から海面上の油を検出する手法を開発し、その分布を調べた。まず、TM画像において、現地データとの参照の結果、海面の油成分がTM画像のバンドの正規化比演算により強調されることが判明したため、油の検出は、清浄な海水と油の違いを最も強調する比演算(BAND5-BAND4)/(BAND5+BAND4)により行った。図8には、両日の流出油分布図を示す。本研究の課題の一つ

であった海岸に漂着、残留した油の検出については、地上分解能30mのTM画像では必ずしも十分とはいえず、必ずしも良好な結果は得られなかった。

また、本研究では、衛星データ解析の基礎データとなる地上でのスペクトルデータの解析を行った。スペクトルデータは1991年12月に本研究のカウンターパートであるキングファハッド大学（KFUPM）と共同で、サウジアラビアダーラン地区、アブアリ地区において、植物、土壌、流出油等を対象として収集したものである。データ収集は、LANDSAT TM の観測に同期して行われたが、衛星データは相手国の事情により提供されておらず、ここでは、地上スペクトルデータのみを解析を行った。収集された沿岸域でのスペクトルデータからは、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が明瞭に異なっており、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。植生についても、正常な緑の植生、枯れた状態の植生等によりスペクトル特性が明らかに異なることが示されたが、これが火災煙の影響によるものかどうかは分からなかった。

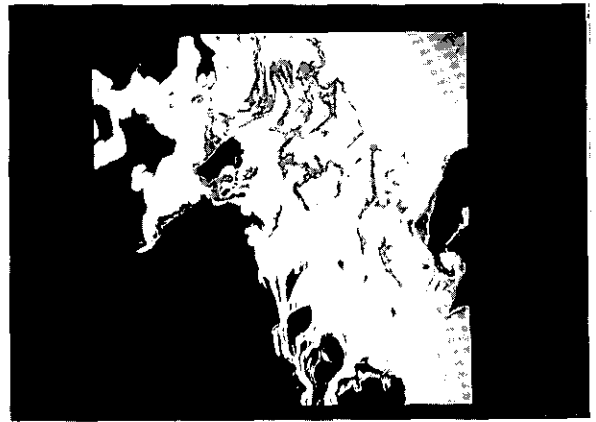


図8 ベルジャ湾岸域の流出油の分布画像（アブアリ島近海、1991年2月16日及び3月20日）

2.6 熱帯林の減少に関する研究

〔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・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
	社会環境システム部	
	情報解析研究室	安岡善文
	資源管理研究室	乙間末廣
	客員研究員 2名、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各研究課題よりなり、国立環境研究所、森林総合研究所、国際農林水産業研究センターが中心となって推進している。また、一部の研究は北海道大学附属低温研究所、名古屋大学農学部、京都大学農学部、九州大学理学部、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動物と昆虫の群集動態に関する基礎調査、および熱帯林構成樹種の落葉や種子落下の季節変化の調査を行う。

(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。一度滅びた種は、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。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。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と期待される。

(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。

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

本研究は、人工衛星 NOAA 搭載のセンサ AVHRR (地上分解能 1 km) からの画像データを用いて、東南アジア地域の植生分布の現況及びその変化を調査することを目的としている。平成 5 年度は、1986 年及び 1993 年の AVHRR 画像から作成された対象地域 (東経 66~110 度、北緯 0~35 度) のモザイク画像及び植生指数分布図の比較を行い、7 年間における植生指数の変化を調べた。さらに、衛星画像から地表面の変化状況をより詳細に調べるためのスペクトル抽出手法を開発し、インド西部地域において収集された 1986 年、1992 年の多時期 AVHRR 画像に適用し、土地被覆改変図を作成した。

【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) マレー半島パソール林における小型ほ乳類の動態
マレー半島の熱帯雨林には齧歯目 55 種、食虫目 7 種、ツパイ目 3 種、計 65 種の小型ほ乳類が生息し、ほ乳類相全体の 31% を占めている。これまで、東南アジアの熱帯林における小型ほ乳類の研究は、主に垂直的な空間利用と食性の大まかな記載や生息環境の解析について行われてきた。しかし、大面積の調査地で長期にわたって調査した例はほとんどなく、森林のどの階層にも遍在する小型ほ乳類について、その生態に関する基礎的な情報は十

分でない。植物の開花や結実の季節的变化は、動物にとっての利用可能な餌量の変化を引き起こし、動物の移入、移出、繁殖や死亡に大きく関係すると考えられる。本研究では東南アジア低地熱帯雨林の林床で活動する小型ほ乳類の基本的な生態、特に種組成、個体数の変動、行動圏、環境との関係などを明らかにし、小型ほ乳類による果実・種子の利用と種子散布の実態を把握することを目的とする。調査はマレーシア国のネグリ・センビラン州(マレー半島南部西部)にあるパソ保護林で行った。パソ保護林は総面積 2,450ha の低地熱帯雨林である主に低地フタバガキ林(Symington, 1943)の Keruing (Dipterocarpaceae) - Red Meranti (Shorea) type からなっている。パソ保護林は、かつて伐採が行われたことがない一次林よりなる中心部 (core area) と、1954~1963 年に択伐が行われ、その後植生遷移が進んだ二次林よりなる緩衝帯 (buffer zone) とから構成されている。パソ保護林の中心部の一次林と緩衝帯の二次林の境界に位置する既存の 2 ha (東西 100m × 南北 200m。通称プロット 1) のプロットを 10 ha (東西 200m × 南北 500m) に拡張し、小型ほ乳類の定期トラッピングと植物種子-小型ほ乳類間の相互作用の調査区とした。調査を容易に行うために、調査地全域を 20m × 20m の方形区に分割し、各格子点に標識として塩化ビニルパイプ (直径 2.5cm, 長さ 75cm) を立てた。1992 年 2~11 月に、連続 4 日間の小型ほ乳類のトラッピングを毎月 1 回行った。トラッピングには金網製カゴワナを用いた。カゴワナは前述の塩化ビニルパイプの標識のそばに 1 箇所当たり 1 個、計 250 個を設置し、調査地全域 10 ha をカバーした。ワナ間隔は 20m とし、餌としてバナナまたはアブラヤシ果実を用いた。1992 年 2 月から 11 月までの定期トラッピングでは 5 目 7 科 14 属 18 種の中・小型ほ乳類が捕獲された。これは、Kemper (1988) が報告したパソ保護林のほ乳類相 11 目 25 科 64 属 89 種の約 20% に当たる。ほ乳類齧歯目はリス科 7 種、ネズミ科 5 種と最も優占する目であった。捕獲個体数での上位 9 種は、*Leopoldamys sabanus* (ネズミ科; 総捕獲個体数 70), *Tupaia glis* (ツパイ目ツパイ科; 46), *Lariscus insignis* (リス科; 34), *Callosciurus notatus* (リス科; 19), *Maxomys surifer* (ネズミ科; 15), *M. rajah* (ネズミ科; 15), *M. whiteheadi* (ネズミ科; 12), *Rhinosciurus laticaudatus* (リス科; 9), *Echinosorex gymnurus* (食虫目ジムヌラ科; 8) であった。優占 9 種の捕獲個体数の季節的変動をみると、*L. sabanus*,

M. surifer, *M. rajah*, *M. whiteheadi*, *L. insignis*, *R. laticaudatus*(ネズミ科3種, リスコ2種)で, 7月に最大値, 9月に最低値をもち, その後やや回復するという類似したパターンが認められた。このパターンは植物のフェノロジーの果実・種子の落下量の推移とよく一致していた。また, ネズミ類だけでなく, 生活の場が林床に限定されている*L. insignis*と*R. laticaudatus*, および*E. gymnurus*も同じパターンを示した。Medway (1972)は, 森林性のネズミ類の繁殖活動が果実のピークと一致していると述べている。本研究では, 捕獲個体数の増減が, 移入移出によるものか, 出生死亡によるものかは明らかでない。しかし, 捕獲個体数の増減の同調や非同調は, 林冠と林床の餌の現存量の季節的な推移の違いに関係がありそうである。各々の動物種の食性と食物の現存量をより詳しく把握する必要がある。

(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) ペロング(*Pentaspadon motleyi* Hk.f.)の芽生えの定着過程

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, ヘクタール当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木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, 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1993年度の研究成果の概要について報告する。

ペロング (Pelong) はウルシ科に属し, マレー半島低地林に広く分布する。調査地であるパソの森でも胸高直径30から40cmの成熟木を頻繁に見かけることができる。そのパソの保護林の中心部にはアメリカのスミソニアン研究所とマレーシア森林研究所が共同で設置した大規模面積 (50ha) の調査区があり, その調査区内で出現した胸高直径1 cm以上のすべての植物個体の胸高直径と位置が記載されている (図1)。我々は予備的調査として, この中で出現した稚樹個体 (直径1~2.5cm) の密度が近隣域にある同種の個体の大きさ (胸高直径) によってどのような影響をうけるかという解析を試みた。それによると胸高直径が40cm以上の大径木の周囲半径6 m以内には稚樹個体が全く存在しないことが分かった (図2)。果たして, これはJanzenらのいう稚樹の親個体からの逃避の結果であろうか。このことを明らかにする目的で, 親木の周囲に生育する実生個体 (約10~15cmの高さ) 生存過程のモニタリングを1991年8月より開始した。調査は最近隣域の親木から0~20mの範囲内に調査プロットを22個設置しその中で出現したすべての実生個体を識別し, 1カ月ごとに個体の生死, 高さを記録した。親木の隣近隣域 (0~2 m) における実生個体の生存率は他の

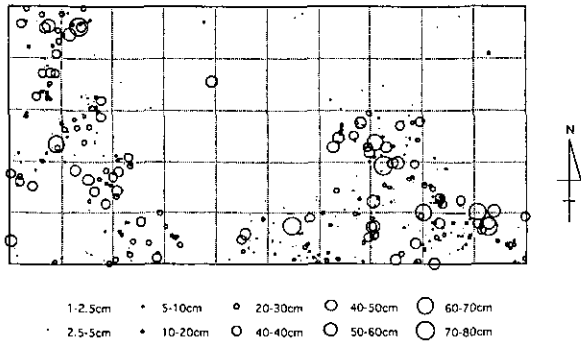


図1 マレー半島パソ森林保護区の50haプロットにおける、胸高直径1cm以上の*Pentaspadon molleyi* (Pelong) の分布

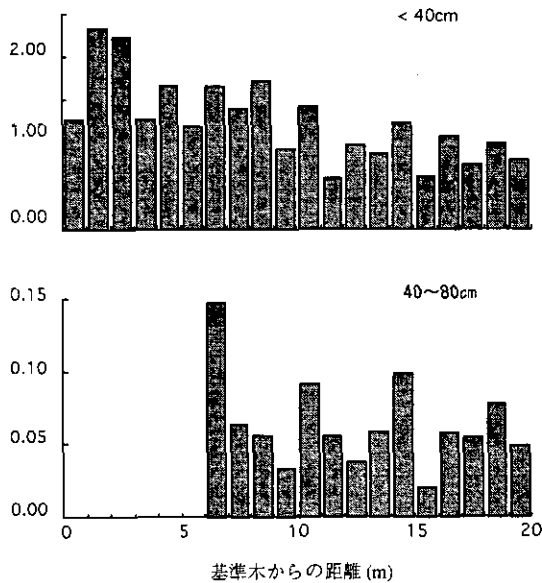


図1 マレー半島パソ森林保護区の50haプロットにおける、*Pentaspadon molleyi* (胸高直径1~2.5cm) の密度と同種の基準木からの距離との関係
上: 基準木の直径が40cm以下の場合; 下: 基準木の直径が40cm以上の場合

どの域(2m>)におき実生個体の生存率よりも有意に低い値を示した。また、親木からの距離2~4mにおける生存率も4~6mのそれと比較すると有意に低い値となった。親木の周囲には50haのデータ解析結果で示されたような「一定範囲内での稚樹不在現象」は確認できなかったが実生の生存率は親木からの距離によって影響を何らかの受けることが示唆された。また、ペロングの実生を日陰と林冠ギャップ直下に移植したところ、前者の生存率は後者のそれに比して遥かに低い値となり、鬱閉林下に設けた一部のプロットでは移植個体が移植後550日後に全滅してしまった。一方、50haのデータを用いてペロングの稚樹が他の大径木(40cm<)の近隣

域に存在するかどうかという点について解析を行ったところ、ペロングの親木の近隣域で見られたような「稚樹不在現象」は確認できず他種の親木の直下ではペロングの稚樹は存在していることが分かった。以上のことから次の事が推察された。①ペロングの実生の生存率には親木からの距離依存型の天敵(捕食者, 病原菌)が関与している。②これらの天敵の作用に加えて樹冠下の光条件が生存率に強く影響を与える。③または、上記の要因が(親木からの距離と光要因)が複合して作用する。その結果、実生個体はそのサイズが胸高直径が1cm程度になるまでに死亡し、親木の直下で稚樹が不在となる。

(3) 熱帯林の環境形成作用の解明に関する研究

1) 木材の分解に果たすシロアリの役割

①はじめに

熱帯林樹木の光合成による一次生産産物は、木材・葉・花などの植物体となるが、やがてそれが枯死・落葉・倒木などの過程を通じて林床に供給される。林床に堆積した植物体は主として微生物活動によって分解され土壌有機物となり土壌環境を形成する。この微生物活動は熱帯林では極めて活性が高く、したがって分解の進み具合は速い。その結果土壌有機物層は極めて薄く、その回転も速くなる。熱帯域に生息するシロアリはその生息量が極めて高く、土壌に生息する小動物の中ではアリと1, 2位を争う生息量を誇っている。そのシロアリが植物体分解に果たす役割は大きいと報告されてきた。とくに落葉・木材の分解においてシロアリが関わりと植物体の体積が顕著に減少していくことは自然状態での分解過程において明瞭に観察される点である。しかしながらシロアリの作用の評価を客観的に行うには、シロアリが存在する条件とそれを除去した条件とを人為的に設定して両条件間で分解の進行速度を比較してみる必要がある。そこで、表面積当たりの容積が大きくシロアリによる物理的分解作用の効果が大きいと考えられる木材について実験的手法を用いて研究を進めている。その中間経過について報告する。

②調査場所・手法

クアラランブル郊外ケポンにあるマレーシア森林研究所構内植林地と、パソ森林保護区との2カ所において実験・調査を行った。2カ所ともに低地熱帯雨林にあたり樹相は東南アジア熱帯雨林に特有のフタバガキ科樹木が優占している。気温は年間20~30度の範囲にあり、湿

度は高く年間降雨は2000mm前後である。森林から切り出した直径6cmほどの木を長さ20cmの丸太に切り分けて分解実験に用いた。丸太は2種類の容器に一本ずつ入れて調査地の林床上に置いた。容器は上面のないステンレス製の箱であるが、そのうち1種類は底面と側面の下部のステンレス板に穴が開けてありシロアリが入りやすくなっている（開き箱）。もう1種類の容器はその穴がステンレス製の1mm目網で覆ってありシロアリが入れないようになっている（閉じ箱）。一方どちらの容器も上面は開放されているので、キクイムシのように飛来してくる昆虫は容易に丸太にとりつけるようになっている。分解の進行具合の観察は年2～3回行い、約1年ごとに一部の丸太を回収し重量測定や成分分析を行っている。

③調査結果

1991年10月に実験を開始してから11カ月後に2地点の各種箱ごとに3本の丸太を回収した。その乾燥重量の減少率を図3に示した。減少率は実験開始時の重量から回収時点の重量への減少を指数曲線で近似してその指数として表したものである。

$$W_t = W_0 \cdot e^{-kt}$$

式中で W_t は回収時の重量、 W_0 は開始時の重量、 t は経過年数で、 k が減少率である。減少率はケボンよりもパソの方がバラツキの範囲が大きい、範囲は重なっており処理間の差は認められない。ただ、すべての点をまとめてみると初期重に対して右下がり、つまり初期重が大きいほど減少率が小さい傾向が認められる。これは初期重が大きいほど丸太の表面積当たりの重量が大きいので、微生物による分解作用が及びにくいためであると考えら

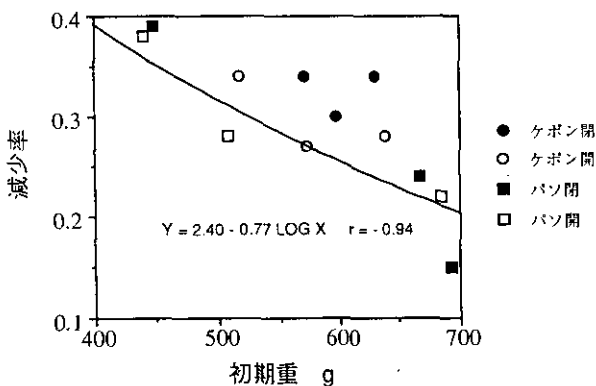


図3 丸太の乾燥重量減少率

れる。そこで初期重の違いを考慮して表面積当たりの重量で減少率を補正してみた。そうすると初期重に対して右下がりの傾向は無くなった。開き箱ではすべての丸太にシロアリがついているのに図3では閉じ箱との間で減少率に差がないので、この段階ではシロアリの有無は決定的な影響を与えていないことになる。

木材の中に含まれる重要な栄養素の一つとしてリンが挙げられる。丸太中のリン含量の減少率を乾燥重量と同様に補正した結果を図4に示した。この補正減少率はかなりばらつくが、いずれの処理間でも有意な差は認められない。ただしパソからの値は閉じ箱の方が開き箱よりも高く位置している。シロアリの影響の兆しが認められるのはこの例だけであるが、今後この傾向が強まるようであるとシロアリがリンの放出を促進するよりもむしろ抑える作用があることになり、これからの実験結果が注目される。

2) 落葉の分解過程

①はじめに

落葉は木材とは対照的に体積に対して表面積が大きいことから、微生物による分解作用を速やかに受けるものと考えられる。しかしながら一方では落葉を好んで採食するシロアリもいることからその影響も大きいと考えられる。また樹種によって葉の厚み・堅さに変化があるので落葉の分解過程はこれらの要素を考慮して調べる必要があるかもしれない。ここではシロアリの影響を評価するために行っている実験のうちシロアリに食われる状態での分解について報告する。

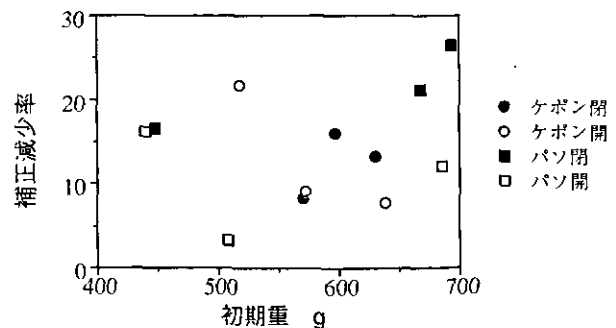


図4 丸太のリン含量補正減少率

②調査場所・手法

調査地は木材の研究と同じ場所で行った。林床で集めた落葉を樹種別に分けてリターバッグに詰めて林床に放置した。リターバッグは2mm目のサランネットと0.1mm目のステンレス網でつくられた2種類を用意した。後者にはシロアリが入れないようになっている。毎月一回いくつかのバッグを回収して中の落葉重量を測定した。ここでは半年間の調査結果を述べる。

③調査結果

実験に使用した落葉は *Baccaurea reticulata*, *Blumeodendron calophyllum*, *Endospermum malaccense*, *Heritiera javanica*, *Shorea cristina*, *Shorea macroptera*, *Shorea multiflora*, *Xerospermum noronhianum* の8種である。このうち *Shorea macroptera* の重量減少を図5に示した。この重量減少を木材と同様に指数曲線で近似して減少率を求めた。その結果8種の減少率は0.78~2.63の範囲に納まり平均は1.31であった。文献調査で熱帯域全般の減少率をまとめたところ、平均1.85、範囲0.24~8.74であった。一方温帯域では平均0.93、範囲0.03~7.75であった。今回の結果は中間的な平均値を示したが1以上の値が半分あり、ほとんどの値が1未満である温帯域の数値よりも明らかに高かった。今回の報告では同じ場所でも樹種によって減少率がかなり変化したので、今後葉の特徴と関連づけて分解過程を明らかにする必要性が認められた。

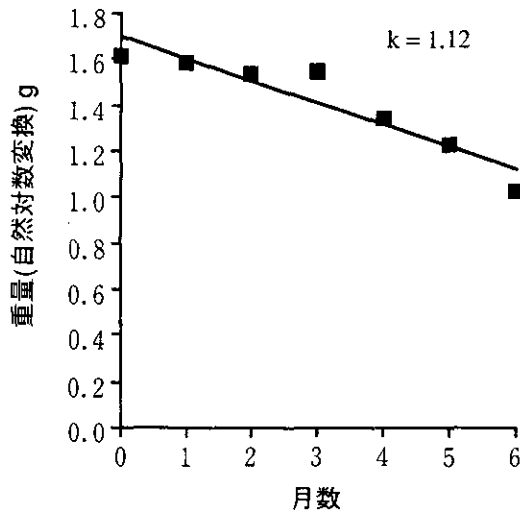


図5 *Shorea macroptera* 落葉の重量減少

(4) 熱帯林生態系の修復に関する研究

1) はじめに

熱帯林生態系を修復していく上で、熱帯林樹木の開花・結実過程に関する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、生命経済表を用いて解析し、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知見を得る試みを行った。

2) 材料と方法

クアラランプール市郊外に位置するマレーシア農科大学の実験圃場に植栽されている *Durio zibethinus* を材料として用いた。調査は1992年4月から10月にかけて行った。この期間に供試木は2度にわたって開花・結実した。

種子の相対生長速度を求めるために、種々のサイズの果実を合計202個体収集した。収集した果実の長径、短径および容積と乾重、果軸の直径と長さを測定した。果実の容積は果実を水中に沈め、増加した水量から求めた。

3) 結果

果実の長軸径 (DL, cm) と短軸径 (DS, cm) との間には、下式で示される関係が見られた。

$$DL = 0.719DS^{1.042}$$

相対成長係数の標準誤差は0.01で、短軸径は長軸径に比例することを意味し、

$$DL/DS = 0.773 \pm 0.006 (\pm S.E., n=202) \text{ となり、}$$

果実のサイズに関係なく一定であった。

DLとDSの積と果実の容積 (v, cm³) との間には、

$$v = 0.468(DS \cdot DL)^{3/2}$$

の関係が見られ、相対成長係数の標準誤差は

±0.011で、

$$v/(DS \cdot DL) = 0.388 \pm 0.007 (\pm S.E., n=202)$$

となった。

果実の容積と乾燥重量 (w, g) との間には

$$w = 0.233 v^{1.010}$$

の関係が見られ、相対成長係数の標準誤差は0.008で、果実の比重は果実のサイズに関係なく一定であることを示している。

比重は $0.248 \pm 0.005 (\pm S.E.) \text{ g cm}^{-3}$ であった。

果軸の断面積 (s, cm²) とwとの間には

$$w = (s - s_{\min})^{1.839}$$

の関係が見られた。ただし、 s_{min} は $w=0$ の時の果軸の断面積である。

4) 考察

①相対成長速度

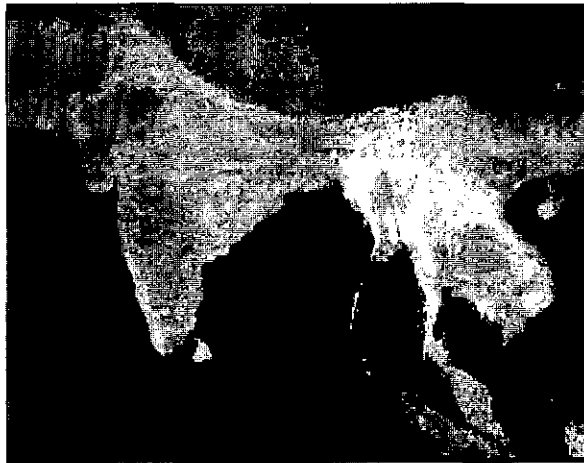
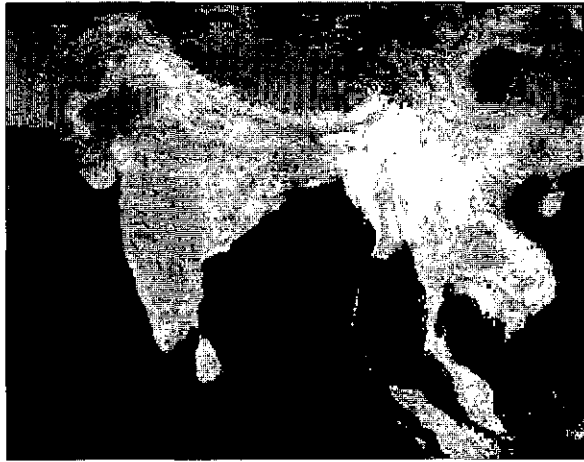
果実の形は、果実の成長期間を通して一定の性質を有していた。すなわち、果実の長径と単径との間には、全成長期間を通して同一の関係が見られたばかりではなく、果実の比重も一定であった。この結果は、果実の長径と単径を測定すれば果実の容積、重量を求めることができ、非破壊的に果実の重量を簡単な計測で極めて正確に求められることを意味している。すなわち、果実が何時成熟し、成熟した種子が採取できるかの予測が極めて容易に行なえる。

②果軸の役割

果軸の役割には、①葉で作られた光合成産物の果実への転流、②果実への水分の供給、③果実の支持器官が考えられる。Shinozakiら(1964a,b)は樹木の形に関してパイプモデル理論を提唱し、幹や枝は葉からの光合成産物を輸送するパイプとしてとらえた。すなわち、ある枝に着いている葉の乾燥重量は枝の断面積に比例するとした。我々のサクラの木を用いた測定でも枝の断面積と葉面積との間には両対数で直線関係があり、Shinozakiら(1964a,b)が提唱した理論に一致する結果が得られている。しかし、葉面積と枝の断面積との間に相関関係が見られたとしても、枝を光合成産物の輸送器官としての役割のみを考えるには無理があると思われる。葉から他の器官へ転流される光合成産物の単位時間当たりの量と、根から葉へ供給される水分の単位時間当たりの量とを考えると、水分量は光合成産物量の約10倍にもなる。すなわち、枝は光合成産物の輸送の場と考えるよりも水分の供給の場として考えた方が妥当と思われる。一方、果軸の断面積と果実の重量との関係は、果実の肥大のわりには果軸が肥大しない。果実の形成初期に急激に果実重量が増加しているにもかかわらず果軸の肥大は少なく、また、果実の重量増加率が減少している時に果軸の肥大が起こっている。さらに、果軸の肥大速度は極めて遅く、葉からの光合成産物の輸送の場として果軸の役割をとらえるよりも果実の支持器官としてとらえるべきと思われる。この考えは、果軸の長さが極めて短いことから、光合成産物の輸送にかかわる輸送抵抗は極めて低いと考えられることにもよる。

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

本研究は、人工衛星 NOAA に掲載された可視近赤外線センサ AVHRR (地上分解能 1 km) からの画像データを用いて東南アジア地域の植生分布の現況及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している。本年度は、対象地域の衛星モザイク画像の作成及び植生指数分布図の作成(平成3年度からの継続)、及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、対象地域である東南アジア地域(東経66~110度、北緯0~35度)全域について、一昨年度に本研究の一環として作成した1990年の対象地域のモザイク画像及び植生指数図と、昨年度に地球環境研究センターのモニタリング事業の一環として作成した同地域の1986年、1993年のモザイク画像及び植生指数図の比較を行い、7年間の植生指数の変化を調べた。各年次のモザイク画像は、それぞれ対象となる時期の良好な画像を収集し、これを地図と重ね合わせが可能ないように幾何補正、さらに、隣接する画像間のムラがなくなるよう放射量補正を行い、合成したものである。また、雲のない画像を作成するために、同一地域の複数の画像を重ね合わせ、各点での雲除去を行っている。植生指数には、最も一般的な正規化植生指数を用いた。図6には一例として、1990年、1993年の植生指数画像を示す。さらに、対象地域内の土地被覆変化を詳細に調べるために、インド西部地域、マレー半島地域については、1986年、1990年、1992年それぞれ4時期(1月、4月、7月、10月頃)の AVHRR データを収集し、地表面の改変状況を調査する手法について検討を行った。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スペクトル変化から地表面の変化を調べた。地表面変化の抽出については、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。なお、本研究の成果として得られたモザイク画像及び植生指数図データは、UNEP/GRID-TSUKUBA を通し世界に公開されている。



Legend







	NODATA
	1~50
	51~100
	101~150
	151~200
	201~255

図6 1990年、1993年の東南アジア地域における植生指数図
上：1990年，下：1993年。

2.7 野生生物種の減少に関する研究

〔研究組織〕	地球環境研究グループ	
	上席研究官	古川昭雄
	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
	地域環境研究グループ	
	都市環境影響評価研究チーム	高橋慎司
	社会環境システム部	
	情報解析研究室	安岡善文・田村正行・山形与志樹・清水 明
	生物圏環境部	
	環境微生物研究室	渡辺 信

〔研究概要〕

(1) 森林破壊が野生生物種の減少に及ぼす影響に関する研究

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年度から7年度までの5ヵ年である。

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。

(2) 希少野生動物の遺伝的多様性とその保存に関する研究

野生動物が絶滅に至る主要な原因は生息地の破壊・消

失にあるが、野生動物がある程度の個体数まで減少してしまうと、遺伝的多様性の低下により繁殖障害や生存率の低下がおり、それが絶滅を加速している可能性が指摘されている。野生動物種の絶滅を防ぐために、希少野生動物の遺伝的多様性の実体を把握し、監視する手法を開発するとともに、遺伝的多様性低下のメカニズムとその繁殖や生存に及ぼす影響を解明する。

危機に瀕した種の絶滅を防止するには、生息域内における保全施策に加え、生息域外で保存し増殖させることも必要となる。そのために家畜繁殖技術として発達した系統保存、人工受精、胚操作などの技術を野生動物に適用する技術を確認する。また、絶滅に瀕した野生動物は生殖組織や遺伝子を施設下でも保存し、それらを人工増殖などに活用する手法を開発する。種の絶滅とともに遺伝情報は失われてしまうが、生殖組織や遺伝子を施設下で保存することによって、遺伝子資源として将来利用できる可能性を残す。

この研究は環境庁自然保護局、農林水産省森林総合研究所、農林水産省畜産試験場、農林水産省農業生物資源研究所、自然環境研究センター、早稲田大学との共同で行っており、研究期間は平成5年度から7年度までの3ヵ年である。研究のフローを図1に示す。

〔研究成果〕

(1) パソー林における糞虫群集

糞虫は世界中のほとんどの森林に生息しており、明確な季節性を示すことが多い。温帯地域ではその個体数

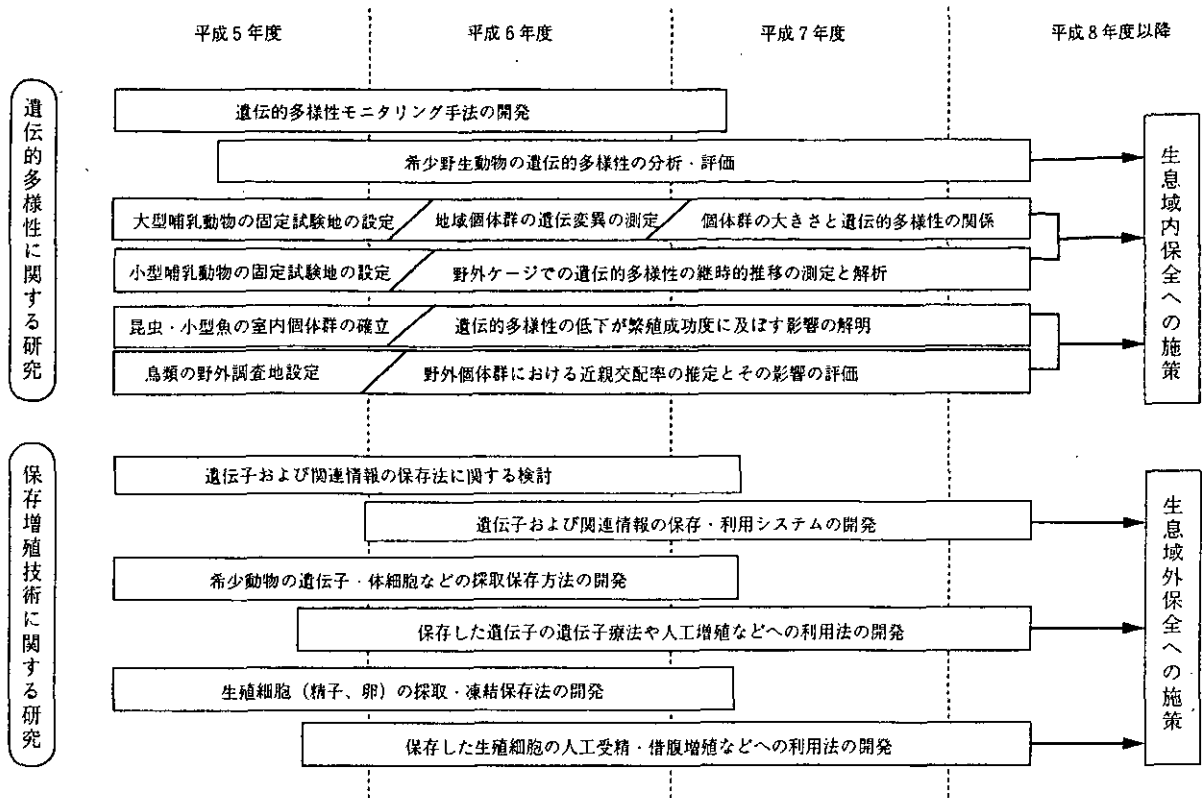


図1. 希少野生動物の遺伝的多様性とその保存に関する研究

や種類数は主として温度変化に対応して変化し（夏に個体数と種類数が増加する）、気温変化の小さい熱帯地域では雨量に対応して変化する（雨期に増加する）ことが知られている。しかし、東南アジアにおいてはこれまで長期にわたる調査が行われたことがほとんどないため、季節性についての知見はなかった。また、東南アジアは雨量に関する季節性に場所による違いが大きいという特徴がある。つまり、乾期と雨期がはっきり分かれる地域があるかと思えば、乾期と雨期が明瞭でないという地域も存在し、むしろ後者のような地域が大部分である。我々が調査を行っているパソー林も季節性が明瞭でなく、雨の少ない時期がやや不規則にある程度で、雨の全く降らない月はほとんどない。ここでは、そのような季節性の特徴をもつマレーシア半島部のパソー林における糞虫の種類数や個体数と雨量との関係を分析した。

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する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地点にと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月から1992年8月の糞虫群集について報告する。気象データはパソー気象観測ステーションの資料を用いた。

1992年8月までに1353頭の糞虫が採集され、少なくとも31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と個体数のリストは付表に示した。糞虫は3つの亜科(Scarabeinae, Coprinae, Aphodiinae)で構成され、それぞれ、3、27、2種で構成されていた。

図2にトラップ当たりの採集個体数と種類数の季節変化を示した。降水量との関係を見るためにトラップ設置前の積算雨量と糞虫の種類数との相関関係を調べてみた。雨量の積算期間はトラップ設置前1週間、2週間...と12週間まで変化させて、最も相関の高い期間を探した。その結果、トラップ設置前3週間の雨量が最も相関係数が

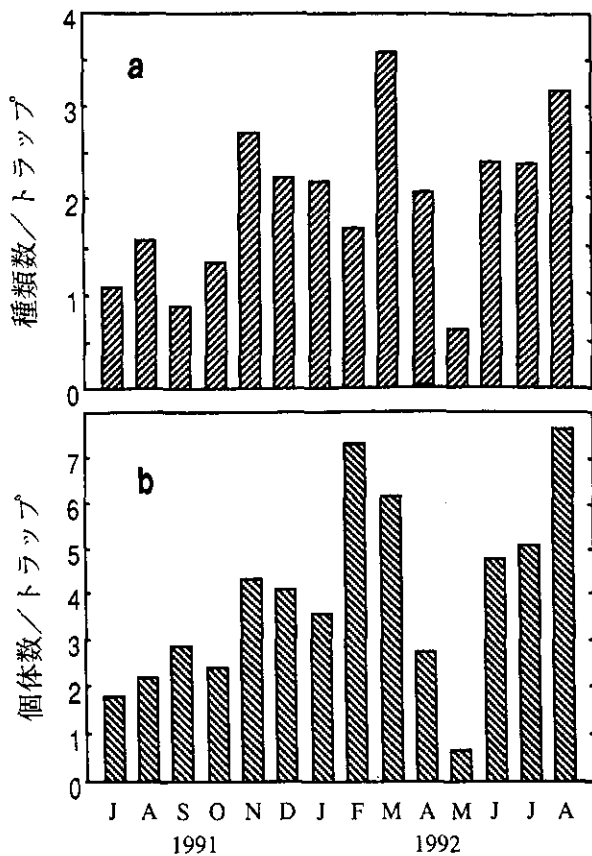


図2. マレーシア半島パソ森林においてピットファール型ベイトトラップで採集された糞虫の季節変化
aはトラップあたり種類数、bは個体数。

大きくなることが分かった。

つぎに、各調査地点での種類数と個体数を調べたところ、森林周辺部では捕獲される個体数も種類数も少なく、季節変化も小さいことが分かった。一方、森林中心部では個体数も種類数も周辺部より多いが、季節変化が大きいことが分かった。また、各調査地点で雨量と種類数、雨量と個体数の関係を調べたところ、森林の周辺部では相関がなく、中心部では雨量との相関が高いことが分かった。種類ごとに雨量との関係を見ると、雨量と正の相関を示す種類と負の相関を示す種類がいることも分かった。このことは、森林中央部では雨量に敏感な種類が多く分布し、雨量に影響されない種類が森林周辺部に分布することを示唆している(図2)。

(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、いろ

んなタイプのフタバガキ熱帯林で適応放散し種分化してきたと考えられている。特に、低地熱帯林はマレー半島部においてもあまり残っていない、低山地熱帯林も減少の一途をたどっている。かく乱を余り受けていないが隔離されている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し、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。研究調査地点として、あまりかく乱されていない隔離された低地熱帯林としてクアラルンプールの南東約70kmに位置するパソ森林保護区とかく乱された低地熱帯林としてクアラルンプールの北約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(以降ゴンバックと略す)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カシミ網による標識再捕調査と花蜜・昆虫食鳥類の採食行動の調査を毎月平行して行った。パソにおいても林床棲鳥類の標識再捕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。各調査地の捕獲個体数および種類数を表1に示してある。記録された種類数は、調査の進んでいるゴンバックの方が多かったが、群集多様度はかく乱されていないパソ森林保護区が高かった。ゴンバックの推定式より求めた両地域の推定種類数は、パソ森林保護区では81.7種、ゴンバックでは78.2種となり大きな差は認められなかった(図3)。群集を構成しているギルドに注目してみると、両調査地とも林床棲昆虫採食ギルドの個体数が大きな割合を占めていたが、かく乱されたウルゴンバックで

表1 調査地間の群集多様性および群集内構造の比較

	パソ森林保護区	ウルゴンバック
森林タイプ	低地熱帯林	低山地熱帯林
攪乱の程度	小さい	大きい
調査日数・網数	401日・網	817日・網
総捕獲個体数	195個体	620個体
捕獲種数	49種	77種
相対密度	0.48個体/網/日	0.75個体/網/日
群集多様度		
シンプソンのλ指数	19.4	15.2
シャノン・ウィーバー関数H'	4.87	4.94
ピエーの均衡性指数J'	0.64	0.53
群集内構造		
チメドリ類		
種数	20	8
ニッチ幅	2.22	1.03
ニッチ種密度	9.01	7.77
ヒヨドリ類		
種数	9	20
ニッチ幅	1.58	2.02
ニッチ種密度	5.70	9.90

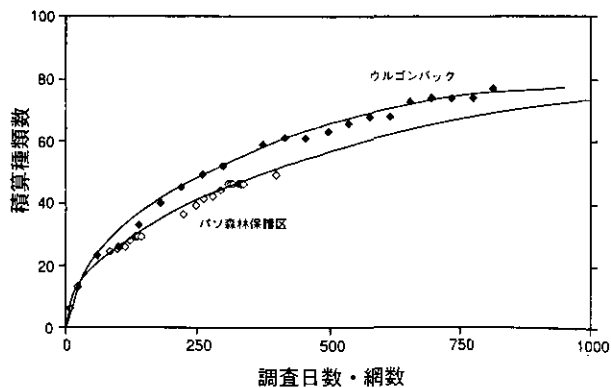


図3. 調査努力と積算種類数の関係

はこのギルドの占める割合がやや低かった。林床棲昆虫採食ギルドは大部分はチメドリ科で占められ、かく乱を受けていないパンにおいては20種類のチメドリ類が林床鳥類群集中の40%以上の個体を占めていたのに対し、ゴンバックではチメドリ科は8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。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、各調査地での群集中の比率はほぼ等しかったが、かく乱されていないパンでは8種類が記録されたのみであったのに対して、ゴンバックでは20種類が記録された。チメドリ類は、かく乱されていない低地林において広いニッチ幅を持ち、多くの種類数が生息していたが、かく乱された熱帯林においては種類数が減少しニッチ種密度も減少している(表1)。したがってチメドリ類は、熱帯林のかく乱に敏感なグループであると結論できる。ヒヨドリ類は、チメドリ類とは逆にかく乱を受けているゴンバックにおいて、多くの種類が記録されニッチの種密度も高かった。ヒヨドリ科は、もともとギャップや林縁など比較的不安定な遷移途中の環境に適応しているといえる。次に、かく乱されている地域でどのように多種類のヒヨドリが同所的に生息しているかを見るためにヒヨドリ類のギルド内の解析を行った。パンとゴンバックに生息しているヒヨドリ類は、いずれの種も日本に生息するヒヨドリ *Hypsipetes amaurotis* よりも小型で形態的な特殊化は進んでいない。ヒヨドリ類の餌メニューの大部分は果実であり、昆虫への依存度は種類によって多少違っていたが、大きな差は認められなかった。エリゲヒヨドリ *H. criniger* が単独種群で採食する傾向が強かったが、他の種類は混群を形成していた。ヒヨドリ類がどのよう

に同所的にハビタットまたは資源を使い分けているかを調べるために、採食部位・採食方法を主成分分析により解析した。採食位置は3つの主成分で表され、この3つの軸上にヒヨドリ類ギルドをグルーピングできた(図4)。採食部位(主成分1)・採食場所(主成分2)ではグルーピングできない塊が残るが、採食高(主成分3)により細分化された。例えば、採食部位・採食行動の解析から特異な位置を占めていたのはズグロヒヨドリ *Pycnonotus atriceps* で、空中停飛・ぶら下がりにより他種の利用できない細い部位を利用して。2種のアカメチャイロヒヨは、混群中では他種との競争を避けて、他種が存在するときには採食場所を変更していた。主成分3に沿って他の種類は分布しているように見えるが、ギルド内のニッチの細分化は不明瞭である。

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。いずれにせよ、この2つのグループはマレー半島の熱帯林のかく乱に敏感に反応するので、森林のかく乱の程度を知るよい指標となる可能性がある。かく乱された林には、漿果や液果をつける低木が多く餌資源は豊富にあるためヒヨドリ類のニッチが細分化していないと考えられるが、検証するためには資源を定量化し比較する必要はある。

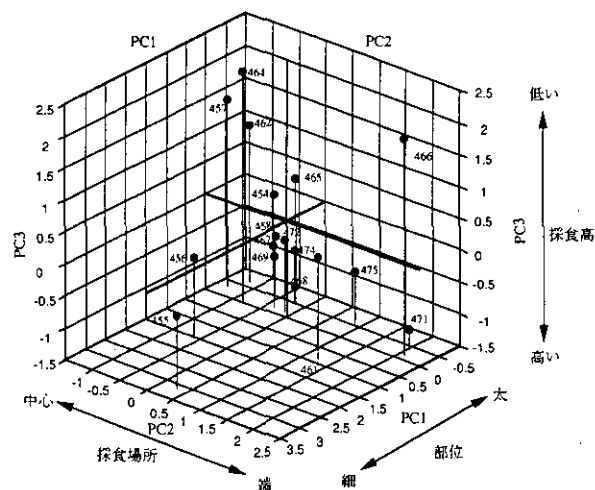


図4. 主成分分析を用いた採食部位によるヒヨドリ類のグルーピング

(3) マレーシア熱帯林における陸産貝類の種多様性

マレーシア半島部の熱帯林で陸産貝類を指標生物とした種多様性と群集構造を調査を行った。熱帯雨林地域では土壤中のK, Ca, Mg等の溶脱が激しく陸貝の殻形成に必須のCaが恒常的に不足している。マレーシア半島部の地質の大半はCaの少ない花崗岩で形成されており、局所的に石灰岩地域が分布している。前年度は、花崗岩地域のパソー保護林とウル・ゴンバック保護林で調査を行った結果、花崗岩地域の平地熱帯林での陸貝生息密度は極端に低いことが分かった。本年度は、Bukit Takun地区とBukit Batu Cave地区で調査を行った。両地域共に、花崗岩を母岩とする地域に孤立した石灰岩の丘で、比較的自然林が残っている。

調査は、両地域の陸産貝類の生息状況を記録することにより、種ごとのマイクロハビタット選好性の解明をめざした。また、生息環境中のCa量が陸産貝類の種多様性を決定している重要な要因ではないかと予測し、石灰岩の岩体から10mおきに調査区をもうけ、石灰岩から離れるにしたがって、種多様性がどのように変化するかを調査した。また、生息環境の人為的かく乱の程度も重要な要因と考え、林縁部を基点として、林内と林外の両方向にベルト状に1mおきに方形区を設けて、各種の生息密度の違いを比較した。

貝類相調査の結果、石灰岩地帯には、花崗岩地に比較して、多種多様な陸貝が生息しており、種数・個体数ともに非常に豊富であることが分かった。特に、前鰓類に属する種が多いことが特徴である。陸貝の生息種数は石灰岩地から離れるに従い激減する(図5)。特定種の個体数でも同じ傾向があった。すなわち、熱帯林においては、陸産貝類の種多様性には生息環境のCa量が重要な因子であることが示唆された。今後、生息地の土壤中のCa量を実測し、陸産貝類群種の種多様性と関連性を解明したい。

林縁部におけるベルト調査の結果、種数は、林縁部から森林の奥にかけて増える傾向にあった。*Diplommatina* sp.の個体数も同様の傾向が認められた。原生林では、周辺部から中心地域にかけて種数が増加する現象が種々の生物群でみられ、これはコア地域ほど"自然度"が保たれている結果と解釈されている。動物によっては数百m間隔の比較をしないとこの傾向が検出できない例も多いが、今回の調査結果から、陸産貝類では20m程度のベルト調査でも微環境の変化の評価ができる可能性が示唆さ

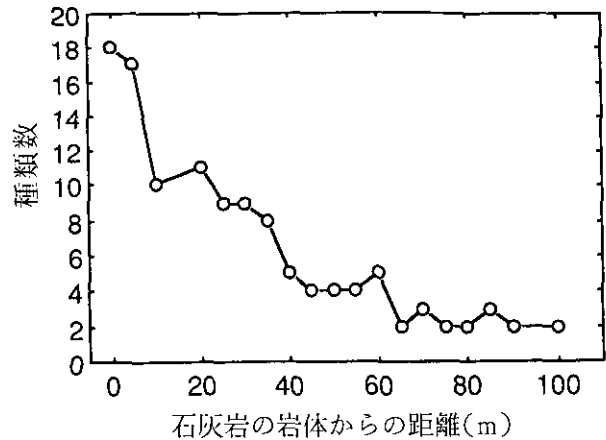


図5. 石灰岩の岩体からの距離に伴う陸産貝類の種類数変化

れた。*Subulina octoma*のように林縁部び外側で生息密度が高く、林内では生息密度の低い種もいた。本種は、畑地やプランテーションといった人為かく乱地を好む種であり、このようなかく乱地嗜好種を標徴種として用い、かく乱の程度を推定できることも示唆された。

今回の調査から、熱帯地域で陸産貝類群集の種多様性を決定している第一要因は生息環境に存在するCa量であり、森林の人為かく乱も影響していることが示唆された。

(4) 遺伝的多様性の解析法に関する研究

本年度は、メダカ、陸産貝類、鳥類からDNAを取り出し、保存する実験ルーチンを作った。DNAの抽出法には種々の手法があるが、野生動物では、血液・筋肉・内蔵・毛等の他種多様な組織からDNAを抽出する必要があるが、適用範囲の広いSDS-フェノール法が適していることが分かった。さらに、PCR法でDNAの特定遺伝子部位を増幅し、ごく微量のDNAから個体間多型を検出できる方法を開発した。これには、1990年に発表されたRAPDマーカー法を応用してみた。RAPDマーカー法とは、数十個のDNA塩基からなるプローブDNAを用いて遺伝子の特定塩基配列部位を数百万倍に増幅する手法である。このため、野生動物のような十分な資料が得られず、微量のDNAを分析しなければならない場合に適用している。どのプローブが分析に適しているかは種によって異なるため、種々のプローブを用いて、分析に適したプローブを選定する実験を行った。その結果、メダカの場合では、RAPDマーカー法のプローブとして、OPA-01, OPA-02, OPA-05を用いた時に、個体間の多型が

検出できDNAフィンガープリンティングのプロープとして適していることが分かった。陸産貝類のオナジマイマイでは、OPA-02, OPA-04, OPA-05で多型が検出できることが判明した。また、メダカを用いた飼育実験の結果、RAPDマーカー法は、親子判定や個体識別に有効であることが分かった。今後は、この手法を使って、動物の絶滅に関する遺伝的メカニズムの解明をめざす。

絶滅危惧動物のアマミノクロウサギの毛を野外で採集し、野外に落ちている動物の毛から、DNAが抽出できるかどうか検討した。その結果、毛の塊から、分析に十分な量のDNAが抽出できることが分かった。RAPDマーカー法を併用することにより、野外に落ちている毛で、個体識別が可能になる。本研究で開発した手法をさらに発展させることにより、個体数が著しく少なく捕獲の困難な哺乳類の遺伝的多様性の解析が可能になると考えられる。

(5) メダカの遺伝的多様性と生存力に関する研究

絶滅に瀕した野生動物の遺伝的多様性（ヘテロ接合対率が低下していることはいくつかの種で知られている。一方、動物には本来左右対称であると考えられる部位をたくさん持っているが、正確に測定するとわずかではあるが左右の長さが異なっていることが多い。これを左右対称性のゆらぎ（Fluctuating Asymmetry: 略してFA）という。この左右対称性のゆらぎは遺伝的な現象で、ゆらぎの大きさはヘテロ接合対率と関係があることが最近分かってきた。また、左右対称性のゆらぎは生存力や繁殖力とも関連していて、非対称な個体は繁殖成功率が低いと考えられている。

そこで、近交劣化の生存力への影響を見るために、野生メダカと室内飼育系統メダカ（ヒメダカ）のFAの比較を行った。室内で同系交配を繰り返しているヒメダカよりも野生系統の方が遺伝的多様性は高いと考えられる。また、年齢の異なる野生メダカのFAを比較することによってFAへの自然淘汰の影響を検討した。

FAを測定した形質はムナビレの長さである。室内飼育系統のヒメダカは国立環境研究所水生生物実験棟の飼育水槽からランダムに約60匹採集した。一方、野生系統のメダカはつくば市内を流れる小野川で採集したものである。採集したメダカのムナビレを解剖バサミを用いて切除し、万能投影機で20倍に拡大して第2条の長さを測定した。

図6は室内飼育系統と野生系統における左右の差のヒストグラムである。ムナビレの長さのFAにほとんど性差がなかったため、オスメスのデータをこみにしている。室内飼育系統の方が広がり大きな正規分布をすることから、一見してFAが大きいことが分かる。また、年齢の異なる野生メダカ（0歳魚と1歳魚）を比較すると1歳魚の方がFAが小さく、FAの小さい個体の生存率が高いことを示している。これらのことから、メダカのヒ

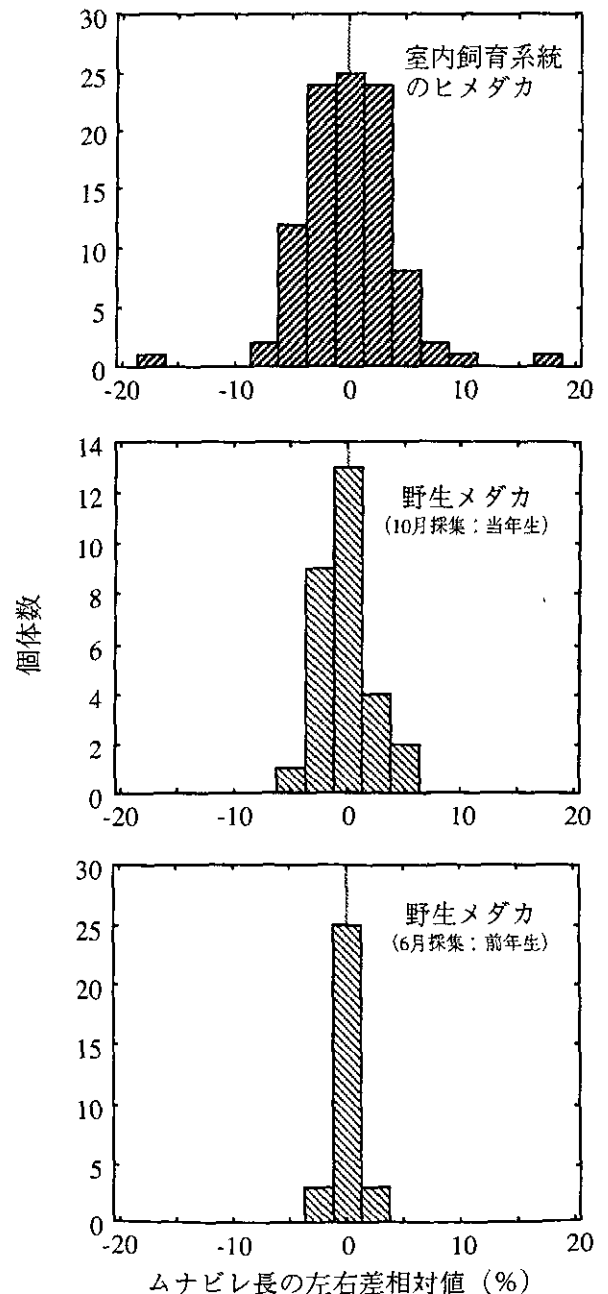


図6. 室内飼育系統および野生メダカの左右対称性のゆらぎの頻度分布
野生メダカは2つの年齢グループ（0歳と1歳）別に示した。

レ長に関するFAは生存力の指標として利用できることを示唆している。

(6) ウグイス亜科における個体群サイズと左右対称性のゆらぎ

生息地の減少および分断化により野生生物の個体数は急速に減少している。このような個体群サイズの減少は、個体群の持つ遺伝的多様性にも影響を与えていることが予測される。近年、個体群の遺伝的劣化を測定する指標として、左右対称性のゆらぎが注目されてきている。異なった個体群サイズを持つウグイス亜科を材料として、個体群サイズの減少に伴い左右対称性のゆらぎがどのように変化するかについて注目し、これを遺伝的劣化の指標として利用できるかどうかを調べた。環境庁のレッドデータブックで希急種に指定されているオオセッカ、同じく希少種に指定されているウチャマシマセンニュウ、また広く分布し今のところ絶滅の心配のないコヨシキリを材料として用いた。オオセッカ・コヨシキリは茨城県鹿島郡神栖町の利根川河川敷のスゲ・ヨシ原において、ウチャマシマセンニュウは博多湾入口の大机島において捕獲調査を行った。捕獲した個体は、足環装着後に各部位を計測したのちに採血を行い放鳥した。個体群サイズは、博多湾に生息するウチャマシマセンニュウが最も小さいメタ個体群を形成していて個体数は200羽以下、有効個体群サイズは60羽であった。オオセッカは利根川下流域に局所的に分布していたが、繁殖個体数はおよそ80羽程度と推定される。コヨシキリは広く分布する夏鳥で、個体数は推定できないが個体群サイズとしては数千羽であると推定される。それぞれの種の翼長にみられる左右対称性のゆらぎを図7に示してある。個体群サイズと左右対称性のゆらぎには関連が認められ、ウチャマシマセンニュウでは最も左右対称性のゆらぎは大きかった(標準偏差0.95)。左右対称性のゆらぎの標準偏差は繁殖個体群サイズが大きくなるにつれてオオセッカ(標準偏差0.80)、コヨシキリ(標準偏差0.66)の順に小さくなっている。オオセッカとコヨシキリについては個体群生態学的なデータが欠如しているため、有効個体群サイズや実際に交配可能な個体群サイズについての情報が不足している。実際に、左右対称性のゆらぎが個体群の遺伝的劣化の指標にどの程度使えるかは、個体群生態学的パラメータおよび今回は未解析の血液サンプルを用いたDNA解析の結果と比較してみる必要がある。

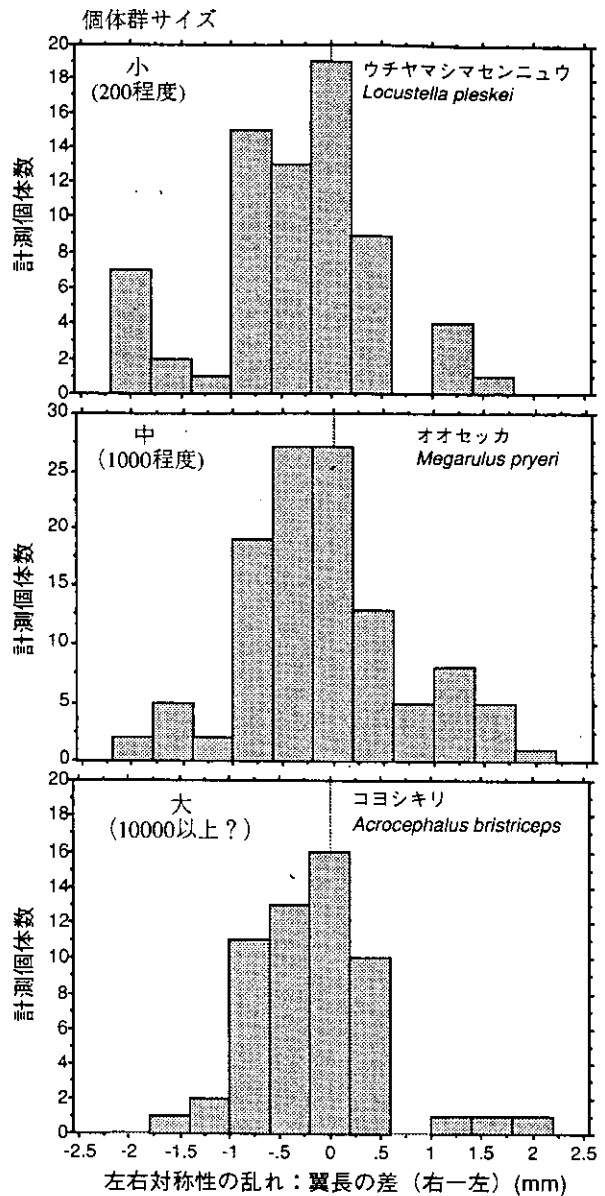


図7. 個体群サイズと左右対称性のゆらぎ

(7) 希少野生動物の生息域外保存および増殖技術に関する研究

絶滅の危機に瀕した野生動物の生息域内外において、先端技術による保存技術の確立が重要となっている。今回は、鳥類の始原生殖細胞(Primordial Germ Cells, PGCs)に注目し、その保存を試みた。

国立環境研究所動物実験施設で継代維持されている実験ウズラ系統は、数十世代にわたる継代繁殖により、近交退化現象が出現している。これらの近交系ウズラは、絶滅の危機に瀕した野生鳥類のモデルとして有用と考えられるので、選抜基礎集団から現在に至るまでの繁殖能力を分析した。また、近交系ウズラの PGCs の分離お

よび培養を行った。まず、ニワトリ PGCs の採取培養法に従い、近交系ウズラ胚における PGCs の採取時期の同期化を行った。すなわち、近交系ウズラ発育胚からの PGCs 採取を行い、特定時間で孵卵したウズラ胚の卵黄動脈等からマイクロピペット法により PGCs を採取できることが分かった。

次に、採取した血液を培養液と混合し、200Gで5分間遠心後上清を除去し、血液から PGCs の単離を行い、その上清を除去した培養液を高濃度フィコール溶液を含む培養液を混合することにより、その混合液に高頻度で PGCs を回収した。また、低濃度フィコール溶液を含む培養液を重層し 800Gで30分間遠心を行い、PGCs を含むフラクションを培養液に分散させ、これを200Gで5分間遠心することで近交系ウズラの PGCs の精製を行うことができた。なお、近交系ウズラ PGCs の保存法はニワトリ PGCs と同様に既存の凍結保存法を用いて行えることも確認できた。

近交系ウズラにおける血統、体重、卵重、羽装、受精率、発生率、血液性状及び病原抵抗性などの各系統における世代ごとの詳細なデータの入力を行いこれらのデータベース化を図った。

(8) 人工衛星データ等利用による湿地植生分布の調査に関する研究

沼沢地やマングローブ林などの湿地は、野鳥など多様な生物種の生息域として、またさらには地球温暖化ガスであるメタンの発生源として、地球環境を考える上で重要な地表面被覆形態の一つであり、近年その実態を調査する必要性が指摘されるようになってきた。しかしながら、湿地は対象となる地域が広いうえ、その分布が全球レベルにわたっていること、また通常その中に入ることが難しく地上調査が容易でないことから、地域レベルにおいても地球レベルにおいても、得られている情報は極めて少ない。本研究は、人工衛星からのリモートセンシングデータを利用して、個別湿地の植生、水、土壤環境を調査するとともに湿地の分布を全球レベルで調査することを目的とするものである。

平成5年度(初年度)は、まず国内における実験フィールドを北海道釧路湿原に設定し、衛星データの収集、現地調査による地上観測データの収集を行った。また、世界の代表的湿地の衛星画像データの収集を開始するとともに、オーストラリアにおいて現地調査等による地上データの収集を行った(図8)。一方、衛星画像から湿原環境を調査するためのデータ解析手法の開発を行い、衛星

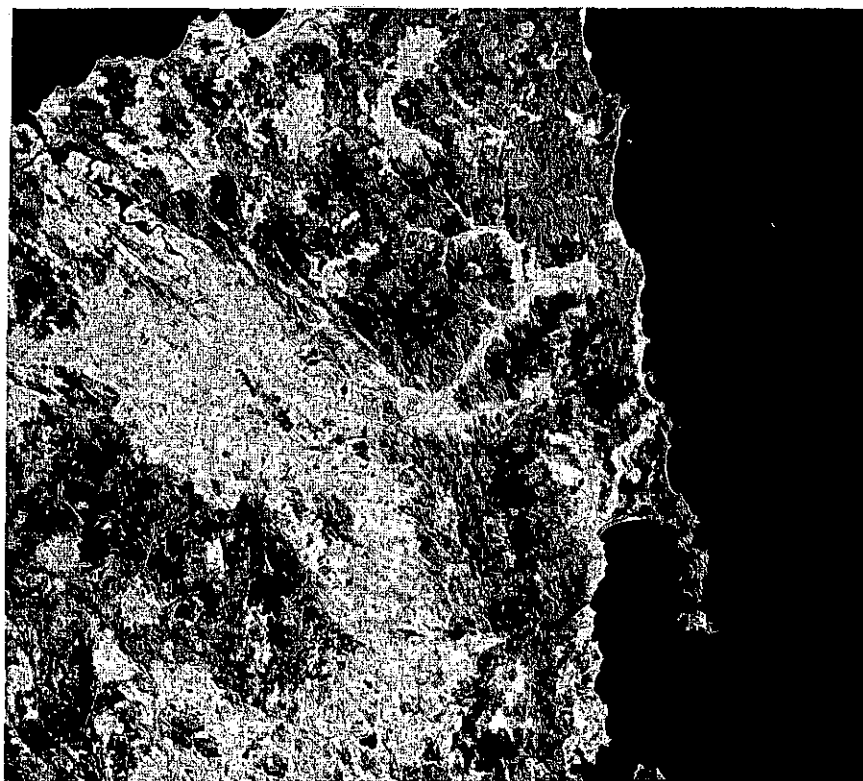


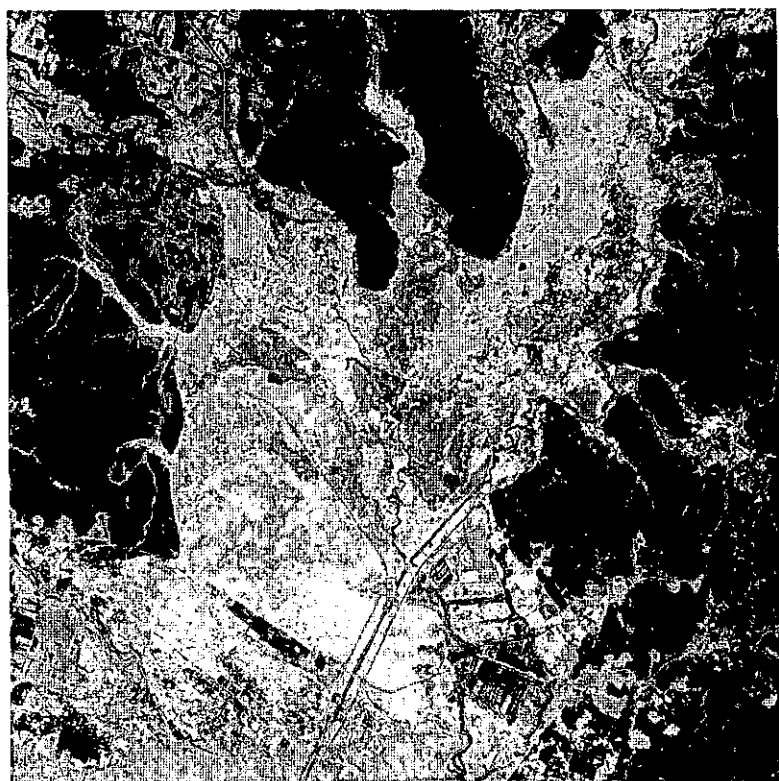
図8 オーストラリアにおける湿地の衛星画像(タスマニア島東部の LANDSAT TM画像1989年1月)

データ、地上データに蓄積のある釧路湿原を対象として、多時期の LANDSAT TM 画像データからの植生分布図の作成、火災による植生焼失分布図の作成を行った。また、衛星画像からの植生、土壌、水環境の評価手法について検討を行い、特に、マイクロ波帯域のセンサーである合成開口レーダー（SAR）画像データから植生分類を行うためのテクスチャ解析手法を開発した。

図9には、一例として、LANDSAT TM 画像から分類された釧路湿原の植生分布図を示す。本分布図は、








1991年6月、8月及び11月に得られた3時期のTM画像を重ね合わせ、その季節変化特性の違いから、対象地域を bog, fen など7つのクラスに分類したもので、分解能は30mと高い。分類は、地上調査データ等に基づいて選択した約90地点の参照地点データ（トレーニングデータ）を用いて最尤法により分類した。

なお、本研究は一部、宇宙開発事業団との共同研究として実施されており、使用する衛星画像は一部事業団からの提供によるものである。



ランドサットTM画像による
釧路湿原植生分類図

Vegetation Classification
Map of the Kushiro Mire
Using LANDSAT TM Image

- | | | |
|---|------|------------|
|  | ミズゴケ | (Sphagnum) |
|  | スゲ | (Sedge) |
|  | ヨシ | (Reed) |
|  | ハンノキ | (Alder) |
|  | 水域 | (Water) |
|  | 森林 | (Forest) |
|  | その他 | (Others) |

国立環境研究所（NIES）
宇宙開発事業団（NASDA）

©1993.NIES

図9 北海道釧路湿原の植生分布図（6月、8月、11月3時期の LANDSAT TM 画像より分類、作成）

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	
	統括研究官	安野正之
	上席研究官	古川昭雄
	森林減少・砂漠化研究チーム	○宮崎忠国
	生物圏環境部	
	社会環境システム部	
	情報解析研究室	安岡善文
	水土壤圏環境部	
	土壤環境研究室	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 5名	

〔研究概要〕

砂漠化は、乾燥、半乾燥、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、砂漠化は全乾燥地域の70%に当たる3600万km²で生じており、世界人口の約1/6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（全体の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、土壤構造の劣化、乾燥地域の灌漑農地の内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壤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であると考えられている。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、土壤、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、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に極乾燥地、乾燥地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を、特に、植生、水環境、土壤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壤荒廃地域（ケニア、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、砂漠化研究を実施した。

- (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
 - 2) 乾燥・半乾燥および土壤荒廃地域における人間活動と水循環に関する研究
 - 3) 砂漠化進行の広域的モニタリングに関する研究
 - 4) 砂漠化の人為的要因に関する研究
- (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

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では、平成4年度はインドの共同研究機関、中央乾燥地研究所 (Central Arid Zone Research Institute) と共同研究に関する研究協定書の調印を行い、極乾燥地と半乾燥地に試験地を設定し、植生に関する基礎的な調査を開始した。本年度は、昨年度に設定した極乾燥地および半乾燥地の試験地において昨年度と同様な植生調査を行うとともに、乾燥地にも試験地を設営した。また、乾燥地の試験地では土壌調査、スペクトル調査、社会調査等を実施した。さらに、平成4年度に構築した砂漠化地理情報システム (GIS) の更新を行った。平成6年度はこれまでの調査を継続するとともに、極乾燥地と半乾燥地において社会調査を行い、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の解明を行う。

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では、平成4年度に砂漠化比較項目の検討を行い、比較項目の選出を行った。平成5年度はインドの砂漠化と人間活動に関する資料、データ等を収集し、比較項目ごとにまとめを行った。平成6年度にはアフリカ、中国、タイの砂漠化と人間活動に関する資料、データの収集を行い、4地域の砂漠化進行と気象状況、社会経済活動、社会システム等の比較を行い、砂漠化進行に関する地域的な要因の抽出とその比較を行う。さらに、平成4年度に構築した砂漠化研究情報データベースの更新を行った。本年度は特に研究論文の収集に焦点を合わせ情報収集を行った。

〔研究成果〕

(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

本サブテーマではインド西部のタール砂漠 (図1) を研究対象として研究を行った。タール砂漠内の年間降雨量の異なる極乾燥地 (チャンダン)、乾燥地 (ジョドプール)、半乾燥地 (パリ) に設定した3試験地において、インド中央乾燥地研究所 (Central Arid Zone Research Institute) と共同で、植生、水士壌、リモートセンシング、社会・経済調査に関する研究を行った。図2に3試験地の位置と年間降雨量を示す。

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 (チャンダン)、半乾燥地 (パリ) に設定した試験地において、放牧の影響を受けない保護区と放牧の影響を受ける複数個の非保護区を作成し、各区において、①種組成調査、②乾物生産調査、③種子動態調査、④生物季節調査を行った。図3はチャンダンとパリに作成した保護区と非保護区の図である。各保護区の面積は1haで計6区画作成した。各区画にはそれぞれ0, 3, 3, 6, 6, 8頭の羊を入れ牧草の成長速度と羊の頭数の関係を明らかにする。表1にはチャンダンおよびパリで観測された主な植物種を示す。

2) 乾燥・半乾燥およ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

乾燥地 (ジョドプール) の試験地を対象に①雨量、流出水量、地下水量、土壌水分、蒸発散量等の調査データの収集、②気温、湿度、風向、風速、日射量、土壌温度、蒸発量、雨量等の調査データの収集、③リモートセンシ

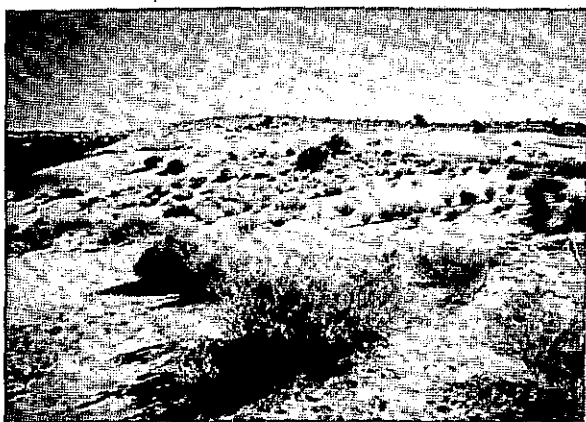


図1 インド西部タール砂漠

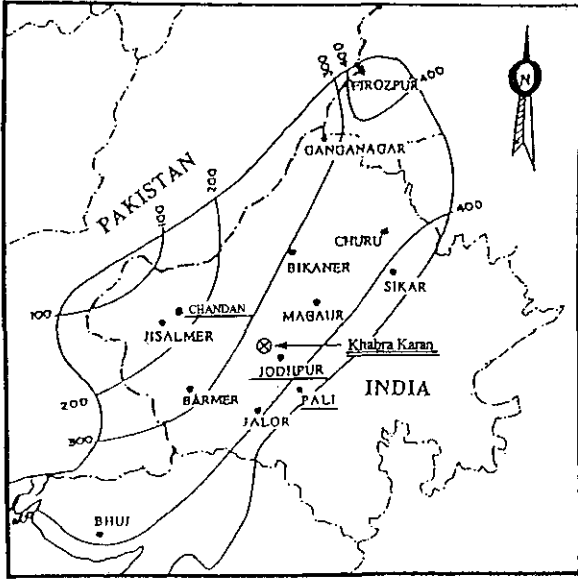


図2 タール砂漠の試験地，チャンダン，ジョドプールおよびバリ

表1 植物の種組成

半乾燥地 (バリ)	極乾燥地 (チャンダン)
<i>Lesiurus indicus</i>	<i>Lesiurus indicus</i>
<i>Cenchrus biflorus</i>	<i>Aristida mutabilis</i>
<i>Cenchrus setigerus</i>	<i>Cenchrus ciliaris</i>
<i>Cenchrus ciliaris</i>	<i>Eleusine compressa</i>
<i>Aristida mutabilis</i>	<i>Dactyloctenium sp.</i>
<i>Aristida feniculata</i>	<i>Cymbopogon</i>
<i>Tribulus sp.</i>	<i>Aerva</i>
<i>Indigofera sp.</i>	<i>Cassia</i>
<i>Eleusine compressa</i>	<i>Corchrus</i>
<i>Eremopogon</i>	<i>Dicoma</i>
<i>Cymbopogon</i>	<i>Clotalaria</i>
<i>Brachiaria ramosa</i>	
<i>Brepheris</i>	
<i>Aerva sp.</i>	
<i>Citrus colocynthis</i>	
<i>Tephrosia subtriflora</i>	
<i>Calotropus procera</i>	

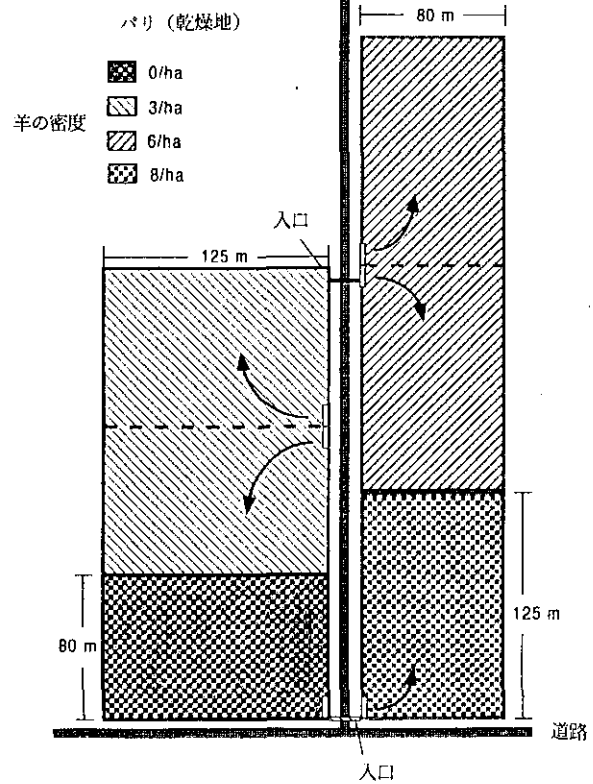
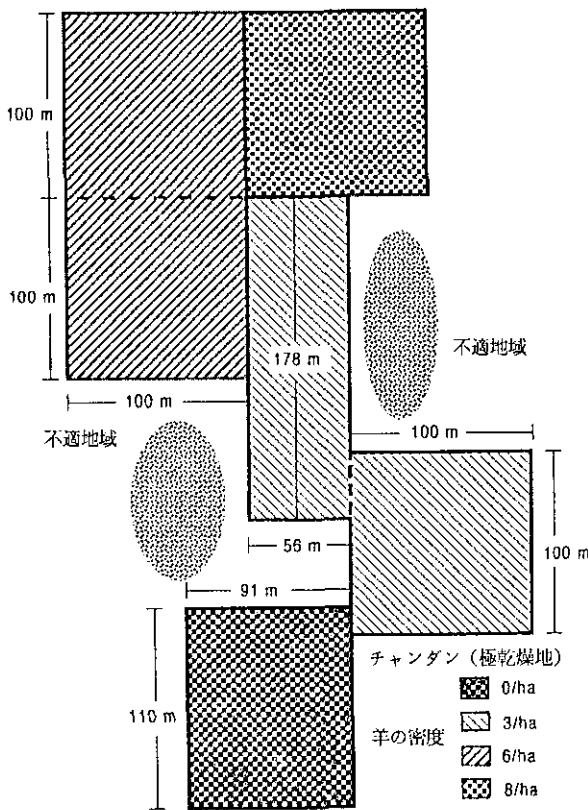


図3 チャンダンおよびバリに作成した保護区

ングを利用した水源地の調査とデータ収集，④かんがい水の入出水量調査と既存データの収集，⑤定期的な地下水量と水質調査等を行い，ジョドプール地域の適切な水資源の利用可能量の算定を行う方式について検討を行った。

3) 砂漠化進行状況の広域的モニタリングに関する研究
乾燥地(ジョドプール)のオンアン郡において，人工衛星リモートセンシングによる植生，土壤，土地利用分類等を行うためのスペクトル調査(グラントルース)

を行った。スペクトル調査では阿部設計製2703型ポータブルフォトメータを使用した。本装置は0.4から1.05ミクロンの波長帯を17バンドに分光して、地表の対象物質の反射スペクトルを測定する装置である。地表の対象物質としては、植生、土壌、水域、人工物等を試験地周辺から選出し、それぞれの反射スペクトルと対象物質の状況、植生の種組成、植被率、土壌の物理性、化学性、土地利用等の調査を行った。表2にスペクトル調査の概要を、表3にグラントルースの調査結果を示す。また、図4はスペクトル調査結果を示す。現在、風食の生じやすい明るい砂と風食の生じにくい暗い砂との判別が可

能かどうか検討をくわえている。このようなスペクトルデータは人工衛星データの植生分類、土壌分類、土地利用分類等に使用される。人工衛星データとしてはわが国のMOS、JERS衛星、米国のLANDSAT、NOAA衛星、インドのIRS衛星、フランスのSPOT衛星のデータを目的に応じて使用する。例えばLANDSAT衛星画像は植生、土壌、土地利用分類に、NOAA画像はインド全域の植生指数図の作成等に使用する。また、過去の衛星データと最近の衛星データの比較から砂漠化地域の増加やその速度を推定する手法の検討を行った。

砂漠化地理情報システム（GIS）については、ラジャ

表2 スペクトル調査の概要

観測日	場所	測定数	対象物質
1993年11月20日	テウリ	55	放牧地、灌漑農地
1993年11月23日	西オシアン	28	放牧地、灌漑農地、砂丘
1993年11月24日	カブラカラン村郊外	35	放牧地、灌漑地、河床
1993年11月25日	バナカバ	12	放牧地、灌漑農地、砂丘
1993年11月26日	カブラカラン	25	灌漑農地、休耕地

表3 グラントルース結果

No.	月日	場所	土地利用	土壌							植生 種数	第1優占種		第2優占種	
				硬度	EC	pH	Na+	K+	NO3-	SDR2-No.1		SDR2-No.2			
1	11月20日	ラマアラとマニフの間	放牧地	13.0	0.06	8.39	7	4	57	5	<i>Tephrosia purpurea</i>	<i>Tephrosia uniflora</i>			
2	11月20日	テカリ	灌漑農地 (マサード)	24.6	2.10	8.30	33	21	110	7	<i>Brassica campestris</i>	<i>Trianthema portulacastrum</i>			
3	11月20日	テカリ	灌漑農地 (チリ)							8	<i>Capsicum anum</i>	<i>Eragrostis cilianensis</i>			
4	11月20日	バラフの南	放牧地	29.8	0.11	8.75	8	5	74	10	<i>Tephrosia purpurea</i>	<i>Eleusine compressa</i>			
5	11月23日	ボツンの西4km砂丘上	放牧地/休耕地 (5年前まで耕作)	6.0	0.10	8.09	8	5	35	10	<i>Crotalaria burhia</i>	<i>Aerva Persica</i>			
6	11月23日	ボツンの西4km砂丘上	(放牧地)							4	<i>Aerva Persica</i>	<i>Crotalaria burhia</i>			
7	11月24日	ボツンの西10km	放牧地	27.0	0.16	8.45	6	8	120	8	<i>Tephrosia purpurea</i>	<i>Fagonia cratica</i>			
8	11月24日	カブラカランの東3km	水路跡	2.2	0.14	8.37	5	5	49						
9	11月24日	カブラカランの西	人工池	27.2	0.24	8.44	20	11	73	17	<i>Cynodon Dactylon</i>	<i>Tephrosia purpurea</i>			
10	11月25日	バナカバ	灌漑農地 (休耕中)	4.0	0.24	7.73	11	8	38		無				
11	11月25日	バナカバ	放牧地	29.4											
12	11月25日	バナカバ	小さな砂丘の 周辺(放牧地)		0.74	7.90	11ppm	9	36						
13	11月25日	バナカバ	小さな砂丘の 周辺、表層 (放牧地)		0.24	8.06	12	10	25						
14	11月25日	バナカバ	小さな砂丘 (放牧地)		0.29	8.19	9	5	21						
15	11月26日	カブラカラン	休耕地	13.6						18	<i>Crotalaria burhia</i>	<i>Lycium barbarum</i>			
16	11月26日	カブラカラン	耕地		0.29	8.32	11	11	44						
17	11月26日	カブラカラン	灌漑農地	4.6	0.18	8.20	10	18	80						
18	11月26日	カブラカラン	灌漑農地 (チリ)		0.36	8.60	34	4	63						

スタン州, オシアン郡, カブラカラン村の三つの空間レベルで, 既存地図をディジタル化し, 地理データセットを開発した。今後, ラジャスタン州データセットはNOAAデータと, オシアン郡データセットはLANDSATデータと, カブラカラン村データセットは社会調査データおよび土地利用調査データと, それぞれリンクして, 砂漠化と関係する自然的・社会経済的要因について解析

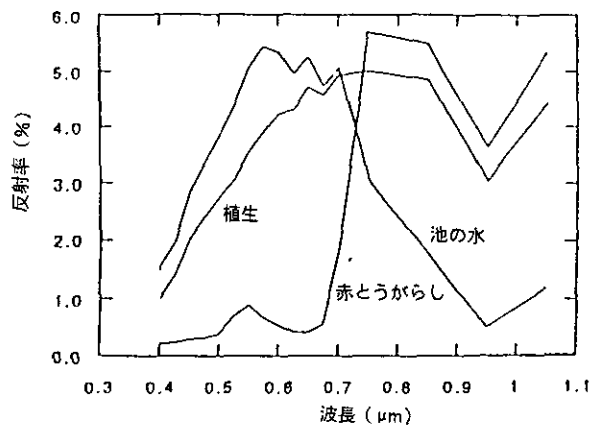
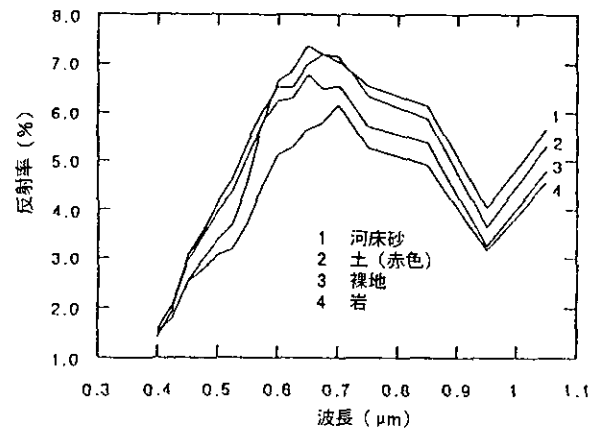
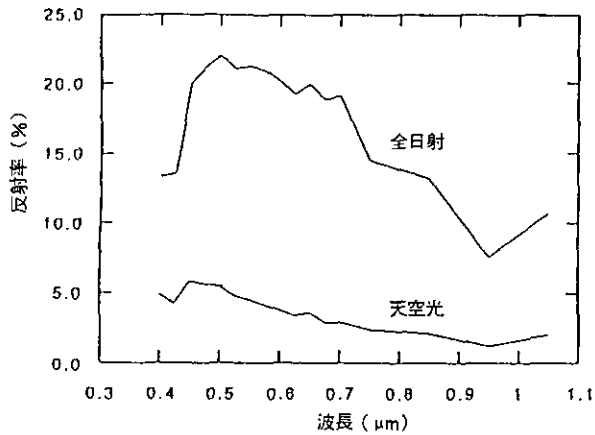


図4 スペクトル調査結果

する。

4) 砂漠化の人為的要因に関する研究

平成5年12月, オシアン郡カブラカラン村(図2)において砂漠化と人間活動に関する社会調査を実施した。この村では天水農業を主体に, 10数頭の家畜を飼うというインド北西部の典型的な農業形態がみられる。またこの一帯は, 夏の強い風による風食の激しい地域としても知られている。表4にカブラカラン村の概要を示す。

調査は, インド人研究者が村人と1対1で面接し, 一人当たり約1時間ほどかけて聞き取りを行った。調査の内容は, 被験者の属性, 水や燃料の使用量, 農業形態, 砂漠化の実態および影響, 砂漠化の防止対策に関する住民の意見などである。得られたサンプル数は64件である。

調査結果の概要は以下のとおりである。

被験者の属性

宗教は全員がヒンズー教。カーストは, ラジプートなどの農業カーストが主。1戸当たりの平均家族数は6.2人。

人口・家族計画

最近10年間の出生と死亡については, 出生が1戸当たり平均男性1.63人, 女性1.53人, 死亡が男性0.37人, 女性0.53人。子どもの数として望ましいのは男児2.19人, 女児1.39人。家族計画の履行について被験者もしくはその家族が避妊していると答えたのは17人(27%)。そのうち男性による避妊は5件, 女性による避妊は17件。避妊の開始は, 子どもが平均3.9人生まれた後に開始する。

土地所有面積の推移

現在, 平均計10.1ha。祖父の所有していた農地は44.0ヘクタール, 父が所有していた農地は17.8ヘクタール。

農業の方法

表4 カブラカラン村の概要

面積	1 6 3 8 h a
人口	9 2 2 人
降水量	3 0 0 ~ 4 0 0 mm / 年
土地利用形態	自然降雨依存型農業 伝統的農業形態
宗教	ヒンズー教
カーストと制度	ラジプット等
砂漠化	風食による砂漠化進行

混合耕作をしている人は52人(84%)、していない人は10人(16%)。輪作をしている人は54人(84%)、していない人は10人(16%)。休耕期間は平均で1.8年。休耕期間中に根株を残している人は47人(77%)、残していない人は14人(23%)。農地の耕し方については、トラクター利用が64人(100%)、木製器具利用が5人(7.8%)、鉄製器具利用が1人(1.6%)。

この調査結果をもとに砂漠化の人為的要因を以下の二つの側面から考える。

第1点は、土地に対して直接的に影響を及ぼす要因である。この地域の伝統的な天水農業は、①ラクダを用いた土地の丁寧な耕起、②十分な休耕期間(通常3年程度)、③いくつかの作物を混ぜて植える混合耕作、④収穫後の根株の保持(畑に根株を残す)を特徴としており、このことによって潜在的には強い風食の脅威にさらされながらも、長いこと持続的な土地利用を可能にしてきた。

しかし、この調査の結果によると、混合耕作および根株保持については、過半数の農家で実践されているものの、最近では畑を耕すのに、ほとんどの農家がラクダのかわりにトラクターを使い始めている。このため土壌が地中深くまで細かく砕かれ、風により吹き飛ばされやすくなっている。また休耕期間については、平均して1.8年に減少している。

第2点は、直接的要因を引き起こす背景として考えられる間接的な要因であり、なかでも人口の増大と集中化が問題である。この背景として、①多産・早婚を好む社会・文化、②均等相続による土地の細分化があげられる。この調査の結果からは、約27%の家庭で家族計画が実践されているに過ぎず、避妊はおもに女性の側で行われている。また1戸当たりの平均土地面積については、祖父の代が所有していた土地は44ha、父の代では18haであり、それが現在では10haとなっていることから、この40~50年間のあいだに、1戸あたりの土地面積は約4分の1に減少している。その分、単位面積当たりの人口圧は増加しているわけで、これが休耕期間の減少にもつながっていると推測される。

(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

砂漠化のメカニズムは地域によって多様であり、地域的な固有性・特殊性を強くもつ。したがって、適切な砂漠化対策を講じるためには、その地域の固有性・特殊性

と世界の砂漠化地域に共通してあらわれる共通性・普遍性を十分ふまえておく必要がある。

このサブテーマでは、このような砂漠化の共通性・普遍性と地域固有性・特殊性を国際比較を通じて明らかにすることを目的としている。比較の対象は主としてアジア地域とし、具体的にはインド(ジョドプール・ジャaisalメール)、中国(新疆・蘭溪)、カザフスタン、タイを考えている。さらにアフリカからいくつかの地域を選び、アジア地域との比較を行う。

平成5年度は、平成4年度に作成された比較指針にしたがって、インド・ジョドプール地区をモデルとして、現地調査および情報収集を行った。収集した情報は、以下のとおりである。

気候・気象

月平均気温、月平均降水量、乾燥度、暴風日数、過去100年間の気候変動、干ばつ年

植生

植生図、植生型ごとの現存量、植被率、優占種、群落構造、植生荒廃の程度(種組成の変化、現存量の変化等)

水・土壌

土壌図、土壌型ごとの粒径組成、透水性、化学性、EC、pH、塩基置換容量、地下水の水位・水質、流域、干ばつ年の水源の状況、砂の移動、塩性化、水食、風食、土壌に加わる人為インパクト

土地利用

伝統的土地利用システム、近年の土地利用形態の変化、土地所有システム、相続形態

社会経済

作物収量、家畜構成、家畜頭数、人口、死亡率、平均寿命、死因、移住者数、平均収入、主要収入源、主食、エネルギーソース

また大学等への委託により、ケニア、中国、タイ、サブサハラアフリカ地域において現地調査およびデータ収集を行った。

平成6年度には、これらの地域での現地調査および情報収集を完了し、地域間の相互比較を行う。

また現在、国連の砂漠化防止策に関する専門家会議では、砂漠化の現状を評価するために、アフリカ諸国を対象としたミニマムデータセットを作成し、その判断材料にしようとしている。われわれの研究成果がこのような国際的な枠組みの中で活用することができないか、その可能性を検討する。

砂漠化情報データベースの更新では、本年度は砂漠化
研究論文の収集に焦点を合わせ収集を行った。収集した

砂漠関係の研究論文数は2347論文である。

2.9 総合化研究

〔研究組織〕

地球環境研究センター	
総括研究管理官	○西岡秀三
研究管理官	大坪国順・原沢英夫
交流係	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
地域環境研究グループ	
交通公害防止研究チーム	森口祐一
社会環境システム部	
環境経済研究室	後藤則行・青柳みどり・日引 聡・川島康子
客員研究員 18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異なり、

第1に、「課題別研究」として分野ごとに研究プロジェクトが推進されている地球環境研究に対し、これら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」。

の3つの役割を有しており、現在までに次の3つの研究に着手している。

総合的な世界モデルの開発を目指した「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、平成2年度～）においては、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の総合化、地球環境研究全体の推進方針及び各分野に共通する経済的前提の明確化等を行うことができる。

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、平成3年度～）においては、各種の地球環境問題の原因と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。

環境と経済を統合する評価体系づくりを目指した「環境資源勘定体系の確立に関する研究」（環境勘定研究、平成4年度～）においては、環境資源や環境汚染物質のフローとストックに着目して、個々の地球環境問題を横断的に解析することを目的としている。この解析の中で、自然の劣化や環境の汚染の収支を毎年集計し、それを経済的価値に換算することにより、従来の国民経済計算体系に環境の大切さを反映した新たな評価方法を開発することをねらっている。

以下では、この3つの研究について平成5年度の研究成果をとりまとめた。

〔研究成果〕

（1）世界モデル研究

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

ドオフを分析して、持続的発展の基本条件を見出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及びIGBPやIPCCなどの国際機関の要請や成果に基づいて、地球環境問題を横断的・総合的に検討するとともに、世界経済との関係を検討することによって、持続的発展のための基本的条件を見いだすことを目的としている。

今年度は、経済モデルの開発に重点を置いて、一般均衡モデルの開発、動学的最適化モデルの開発およびシステム・ダイナミクスモデルの開発を進めた。これらの経済モデルの開発は、地球環境研究センターに設置した「地球環境経済モデル研究会」を中心にして推進している。この研究会は、天野明弘神戸大学教授を座長として、森俊介東京理科大学教授、伴金美大阪大学教授、松岡譲京都大学助教授らの専門家とともに、当研究所の経済及びモデル分野の研究者によって構成されている。また、環境総合モデルについても地球環境フレームワーク・モデルの開発を進めた。以下にこれらの成果の概要を紹介する。

1) 一般均衡モデルの開発

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、30年から100年という地球環境保全の時間スケールに合わせて、炭素税等の価格政策の効果や国際マーケットを通じたダイナミックなエネルギー需給の調整などの長期的な経済シナリオを描くモデルが必要となる。この

ため、長期均衡タイプの2種類のモデルすなわち、一般均衡モデル及び動学的最適化モデルの開発を昨年度から開始している。

一般均衡モデルについては、米国のパテル研究所のエドモンズ博士を中心に開発中の第二世代モデル（SGM）のプロジェクトに参加して、日本モデルの開発を進めている。このSGMモデルは、図1に示すように、3つの生産部門と家計部門及び政府部門からなる計量一般均衡モデルである。エネルギー部門は8つの部門にさらに分割され、温室効果ガス排出量を詳細に推定できるよう配慮されている。また、世界を最終的に20地域に分割する予定になっており、我が国は一つの地域として独立してモデル化される。そして、エネルギー、農産物、その他生産物に関して地域間貿易が考慮されている。

SGMの国別・地域別モデルは、各国の専門家が参加して開発しており、日本モデルについては国立環境研究所が担当している。今年度は、昨年度に引き続いて基礎データを収集するとともに、このデータを用いて主要なパラメータや入力条件を設定した。収集したデータは、各種経済基礎データ、環境データ、農業データ、エネルギーデータ、土地利用データ等である。これらのデータを基にして、土地供給関数、労働供給関数、法人貯蓄関数、家計貯蓄関数、政府移転支出関数、最終需要関数、政府部門効用関数、生産関数のそれぞれのパラメータを決定するとともに、基準年のデータに合わせるためにキャリブレーションを実施した。こうして、プロトタイプの

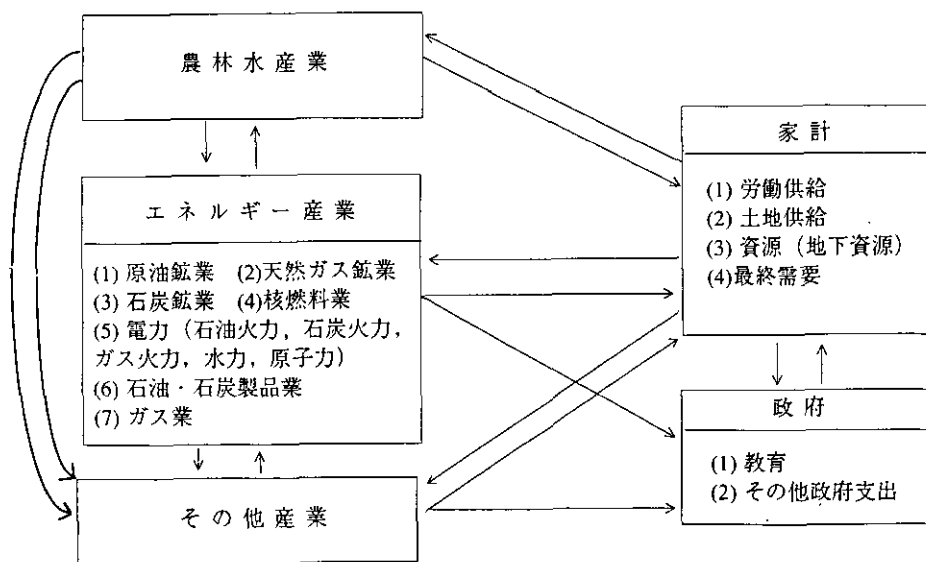


図1 SGMにおける財・サービスの流れ

SGM 日本モデルを開発して標準シナリオにのことでシミュレートできるようになった。

来年度は、このモデルを用いて我が国の炭素税等の経済的手段の効果予測をシミュレートするとともに、SGM 世界モデルとのリンクを試みる予定である。

2) 動学的最適化モデルの開発とそれを用いた分析

次に、もう一つの長期均衡タイプのモデルとして動学的最適化モデルについても、3種類のモデルを開発・改良して、地球温暖化問題の解析に適用した。これらのモデルは、後藤則行環境経済研究室長の開発したGDMEEM、アラン・マン教授の開発したグローバル2100、それ

にノルドハウス教授の開発したDICEモデルである。

まず、GDMEEMモデルについては、マクロ経済及びそれとリンクしたエネルギー市場からなるシステムを対象として、二酸化炭素排出量の抑制と経済活動やエネルギー消費との関係を分析する目的で開発を進めているもので、図2に示すようにエネルギー生産部門とエネルギー消費部門、それに両者を統合する市場均衡と二酸化炭素排出算定モジュールから構成されている。今年度はこのモデルの基本プログラムを開発するとともに、産業部門を詳細に分割して生産関数のパラメータを同定し、併せて省エネ技術選択モジュールを附加するなど、政策分析に活用できるように改良を施した。

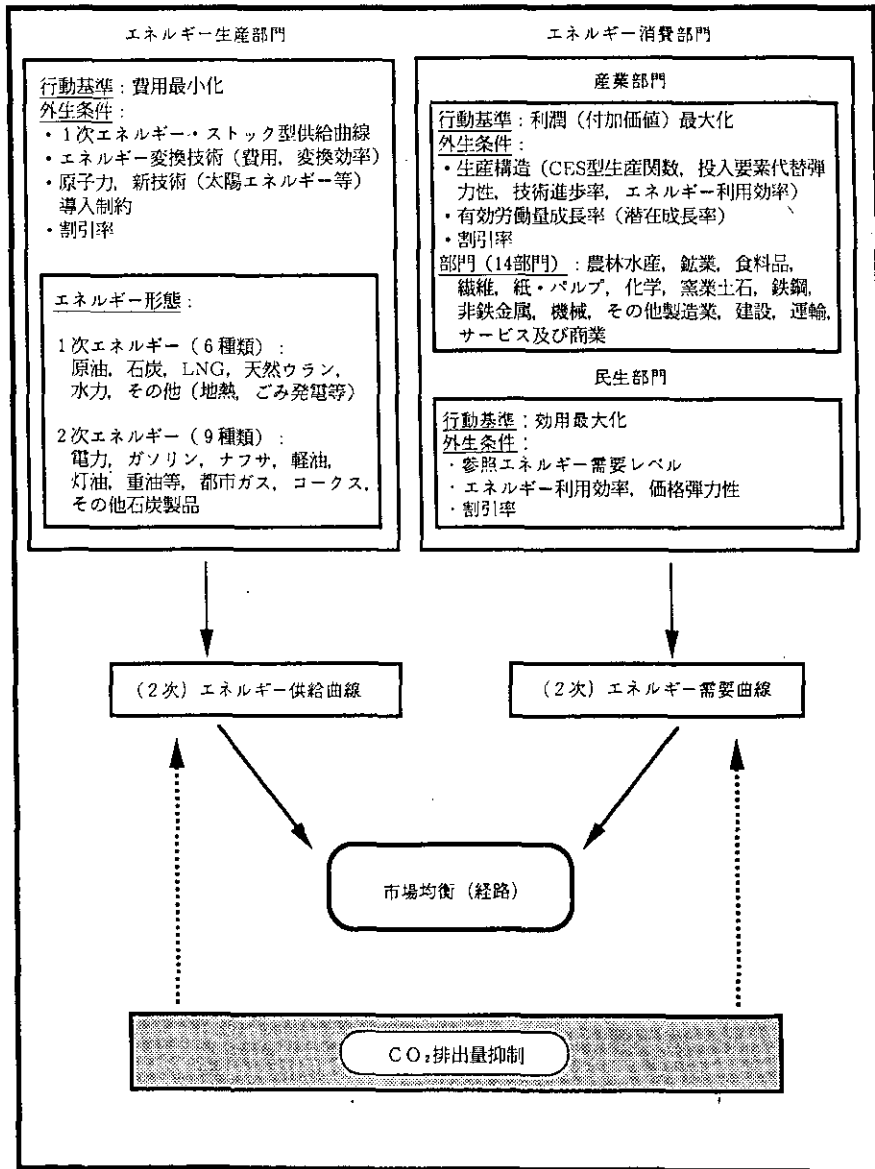


図2 分析モデル(GDMEEM)の基本構造

開発したGDMEEMモデルを用いて、我が国の二酸化炭素の排出抑制とそのマクロ経済影響との関係を分析した。この結果、図3に示すように、二酸化炭素排出量を1990年レベルに安定化する場合（Cケース）には、我が国のマクロ経済的損失が0.11%程度生じ、特に鉄鋼、窯業土石、紙パルプ及び化学の各産業部門が大きな影響を受けることが分かった。一方、新たな省エネ技術を導入する場合（Sケース）の経済的効果はGNPの0.1%程度あり、窯業土石、紙パルプおよび化学の各産業部門が大きなメリットを受けることが予想された。このため、新たな省エネ技術の効果を勘案して二酸化炭素排出量の経済影響を推定してみると（S+Cケース）、マクロ経済的損失は省エネ技術導入のメリットと相殺されて、二

酸化炭素排出抑制はGNPに対して中立的な関係となる可能性が示された。

また、グローバル2100の世界モデルについては、今まで世界を5地域に分割して構成されていたものを、日本、インド及び動態的アジア経済（DAE：韓国、台北、香港、シンガポール、タイ、フィリピンを含む）の3地域を加えて8地域に増やし、それぞれのパラメータを設定した。この改良されたモデルを用いて、アジア太平洋地域における二酸化炭素排出抑制の経済的損失を推定するとともに、二酸化炭素排出抑制に伴って副次的に二酸化硫黄や窒素酸化物等が減少し、地域の環境が改善される効果について推定した。表1には、グローバル2100のシミュレーションによって推定された日本、中国、インド

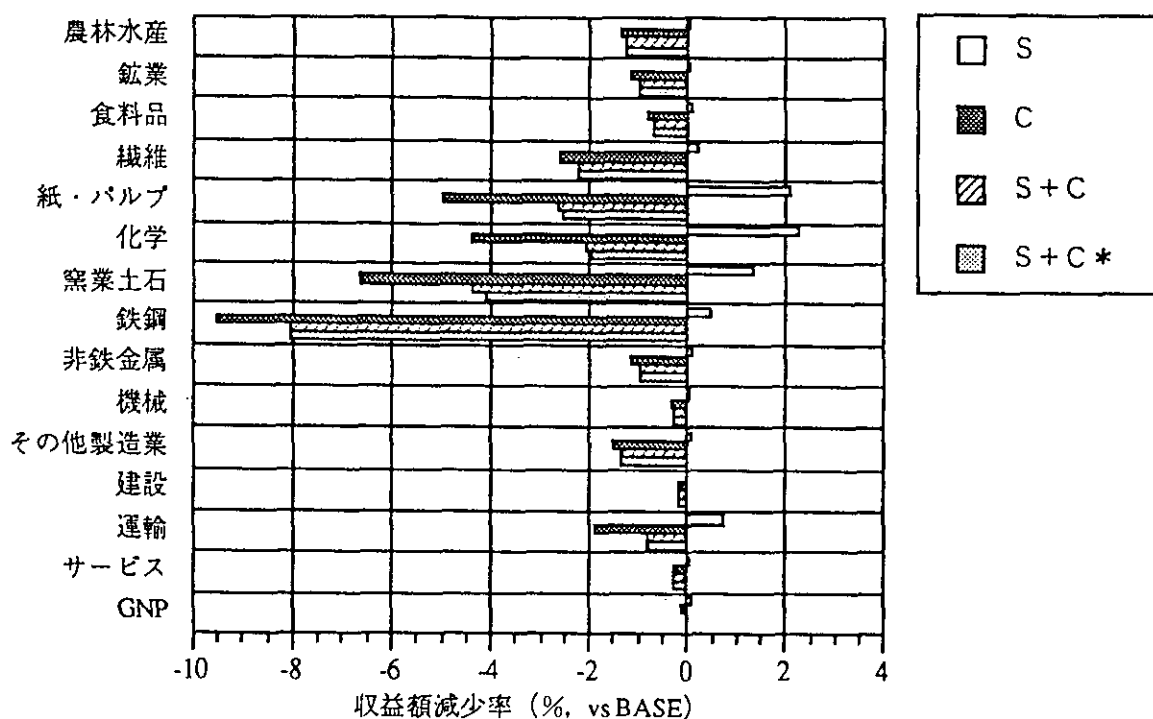


図3 各ケースにおける部門別収益額の変化率

表1 二酸化炭素排出安定化の2次的利益(%)

	日本				中国			
	SO ₂ 削減の利益	NO _x 削減の利益	計	CO ₂ 削減	SO ₂ 削減の利益	NO _x 削減の利益	計	CO ₂ 削減
2000	0.006	0.079	0.220	-0.148	0.010	0.135	0.378	-0.938
2010	0.008	0.114	0.319	-0.200	0.017	0.227	0.633	-2.095
	インド				DAE			
	SO ₂ 削減の利益	NO _x 削減の利益	計	CO ₂ 削減	SO ₂ 削減の利益	NO _x 削減の利益	計	CO ₂ 削減
2000	0.010	0.134	0.373	-0.074	0.047	0.637	1.780	-5.622
2010	0.011	0.154	0.429	-0.389	0.073	0.992	2.769	-9.518

及び DAE における二酸化炭素の排出安定化に伴う経済的損失、副次的に生じる二酸化硫黄及び窒素酸化物の排出削減の利益、これらの利益とともに自然環境劣化の緩和や道路交通による被害減少等の利益を加えた合計の二次的利益のそれぞれを2000年および2010年について対 GDP 比率により示している。これによれば、二酸化炭素の排出安定化による経済的損失は DAE 諸国において最も大きく、中国においても比較的大きな損失が見込まれる。これに比べて我が国やインドの経済的影響は少ない。また、二酸化硫黄や窒素酸化物等の排出量が減ることによる副次的な利益は、DAE や中国において大きい。経済的損失をカバーするまでには至らない。これに対して日本及びインドの副次的な利益は経済的損失よりも大きく、温暖化防止に伴う利益を考慮しなくても二酸化炭素の排出量の安定化は経済的に見合うものであることが示唆された。

一方、DICE モデルは世界全体を一つの閉鎖経済としたモデルであるが、二酸化炭素の排出にとどまらず、温度上昇や温暖化による被害を簡単な関数形を用いて定式化しているため、温暖化の被害も勘案して最適経済成長の経路を推定することができる。このため、このモデルのパラメータを最新の科学的知見に基づいて設定し、各種のシナリオのもとでの二酸化炭素排出の社会的費用を推定した。表2には、DICE モデルによって推定された2030年までの二酸化炭素排出の社会的費用がシナリオごとにまとめている。これによれば、二酸化炭素排出の社会的費用は、将来の消費をどのように現時点で評価するか（割引率）、温室効果ガスによってどの程度地球の温度が上昇するか（気候感度パラメータ）、世界の人口が今後どの程度伸びるか、温暖化がどの程度の経済的損害をもたらすか（被害関数の形状）によって大きく異なることが明らかとなった。

3) その他の持続的発展モデル開発

以上の長期均衡タイプの経済モデルの他に、環境投資の長期的経済効果を評価するために、システム・ダイナミクスモデルの適用を検討した。システム・ダイナミクスモデルは通常の経済モデルに比べて社会現象や自然現象の動学的相互作用を柔軟な構造のもとで表現できるため、超長期の経済と環境との相互関係という今の経済モデルが不得手とする領域を分析するには、現在のところ最も有効な手法である。分析に用いたモデルは、メドウズらが「成長の限界」の分析のために開発してその後改良された WORLD3 であり、工業生産や人口の増加と資源制約や環境制約との関係をダイナミックにモデル化したものである。このモデルに環境投資とその効果推計のモジュールを付加して改良し、環境汚染防止投資に伴う労働力供給の安定化効果や省資源投資に伴う資源供給の安定化効果のシミュレーションを通じて、環境投資が経済発展に及ぼす効果を推定した。

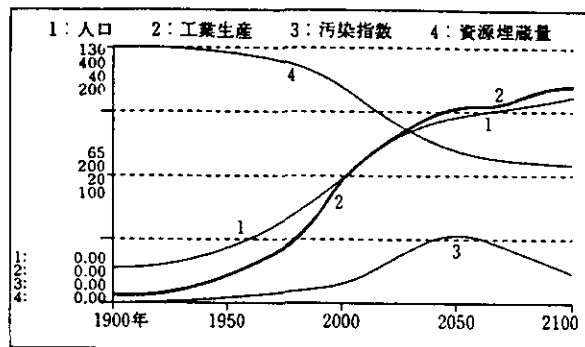
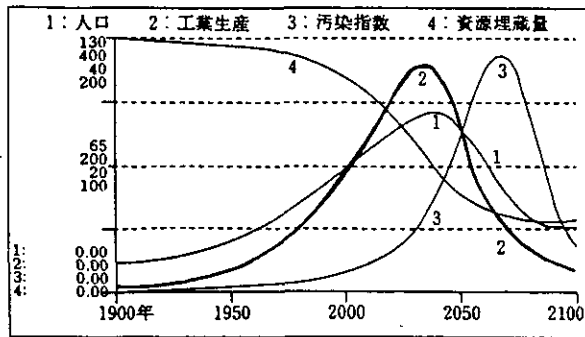
図4はこのシミュレーション結果のうちの2つを示したものである。上の図は特段の環境投資を行わない場合のシミュレーション結果で、これによれば、2040年頃から資源制約と環境制約が厳しくなり経済的発展の基盤が失われていくシナリオが示唆されている。これに対して下の図は、汚染防止及び省資源に工業資本の15%程度を投資すれば、来世紀末まで工業生産を増加させることができるシナリオが描ける。長期的にみれば環境投資は結局のところ経済発展を支えるものであり、環境と経済を対立させた概念として論じるのではなく、統合した概念として論じる必要性が明らかにされた。

4) 地球環境フレームワーク・モデルの開発

一方、環境総合モデルについては、地球環境フレーム

表2 炭素排出の社会的費用（炭素トン当たりドル）

シナリオ	2000	2010	2020	2030
Nordhaus的最適化	5	7	8	10
排出量安定化	48	130	280	375
気温上昇安定化	94	146	219	331
低位気温上昇	41	50	56	62
中位気温上昇	60	76	89	103
(同上、短い時間的視野)	54	69	80	92
高位気温上昇	117	149	174	201
低人口成長等	23	27	30	32
高人口成長等	263	344	415	497
高損害：露数3.5	257	338	409	493
高損害：損害パラメーター 4%	357	461	551	655



- 1: 人口 [億人]
- 2: 工業生産 [百億ドル/年]
- 3: 汚染指数 (1970年の汚染量を1とする)
- 4: 資源埋蔵量 [資源埋蔵単位]

図4 環境投資の超長期的効果

ワークモデルの開発を進めた。このモデルは、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プロセスを体系的に分析することを目的としている。本モデルの特徴は、可能な限り構造を単純化して、政策決定者や環境研究の管理者が容易に理解できることを目指している点で、7つの指標群と8つのマトリクスによって構成される。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」、各指標の状態をわ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」

を開発してきた。特に、コントロール・サブシステムには最適化計算モジュールが用意されており、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すことができる。このモデルは概ね完成し、実際のデータや知識を入力して試験的な分析を開始している。

(2) 社会システム研究

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

本年度は、本研究プロジェクトの最終年度として、昨年の社会経済システムの基本構造と地球環境保全との関係の分析をベースにして、これらの分析を深めるとともに、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、ライフスタイル及び国土利用構造に焦点を当てて、地球環境保全のための社会システムの変革に関する提言を取りまとめた。

1) 社会経済構造と地球環境保全の関係の分析

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・経済システム及び都市構造の三つの分野を取り上げ、昨年度に引き続き地球環境問題とのかかわりについて各種の仮説及びシナリオを分析した。検討対象とした社会経済システムの項目は多様であり、合計で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の分析を進めた。

図5はこれらの分析のうち、食生活と地球環境問題との関係についての結果である。現在の食生活は、所得水準の工場による「食の高級化」と、時間制約とレジャー志向による「外部サービスの利用」という大きく2つの特徴を持つ。食の高級化は輸送や加工に要するエネルギーの消費を急激に増大させ、また外部サービスの利用は食料の自体利用効率が悪くなるだけでなく使い捨て容器等による資源の浪費も加速される。しかしこの一方で、自然食志向等が進んで環境保護意識が高まる現象も考えられる。これらの関係について可能な限りデータを収集し、実証を試みた。

一方、昨年度に西ドイツの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が、この調査結果を詳細に分析した。この調査はEC5か国との共同調査ではあるが、今年度に分析可能なドイツと日本について比較分析を進めた。図6は、その比較分析結果の一つで、自動車利用についての認識と行動についての日独比較である。これによれば、自動車排ガスの影響に関する認識は日独でほとんど差が見られないが、その認識を行動に移すことについては日本の

方が圧倒的に消極的であることが分かる。このような行動の差がどこから生じるかについては今後さらに分析が必要であるが、我が国の環境保全にとってこの消極的な行動パターンを改善していくことが重要になると考えられる。

2) 地球環境保全のための社会システム変革の提言

以上の分析をもとにして、ライフスタイル及び都市構造の分野に焦点を当てた社会的ブレークスルーの提言をとりまとめた。表3には、2つの分野の基本戦略課題、提言の基本方向及び具体的方策が整理してある。

まず、ライフスタイルの分野については、食生活、衣生活、住生活という人間の基本的な生活行為に加えて、現代生活に欠かせない要素である労働と余暇、さらには行動様式や価値観形成に関係の深い情報化や教育についても取り上げた。また、開発途上国において特に問題となる女性の社会進出についても検討した。これらの各項目について、地球環境保全のため変革の基本方向と具体的方策の提言をとりまとめ、併せてその根拠や参考になる各種のデータを整理した。

一方、都市構造分野については、都市構造の基本要素

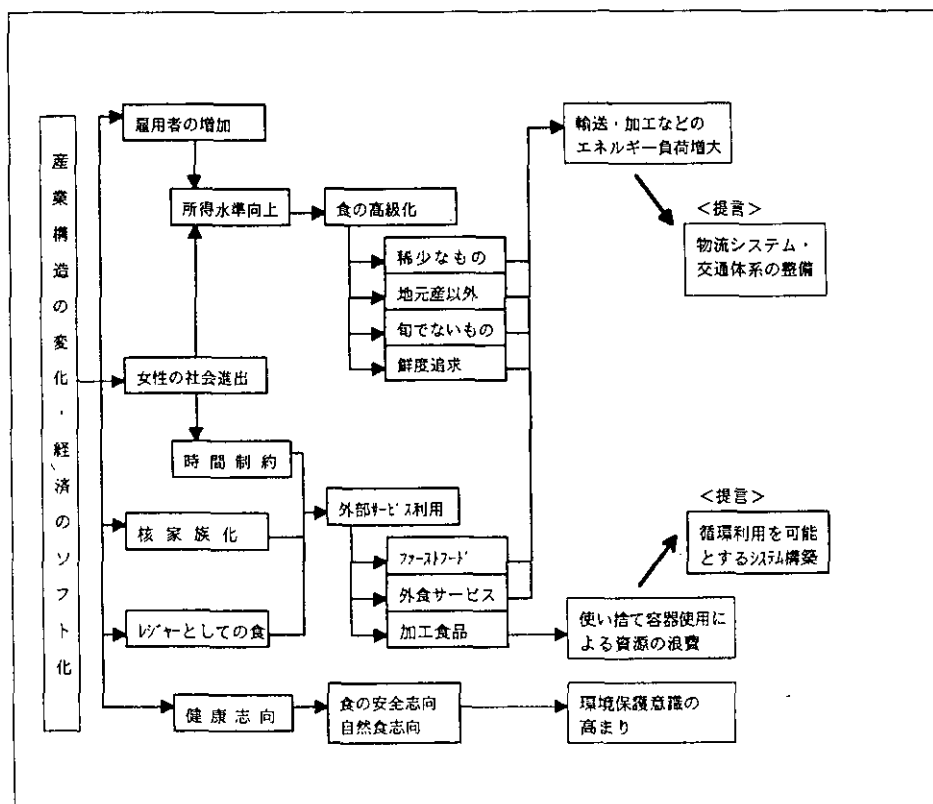


図5 食生活と環境問題の関係

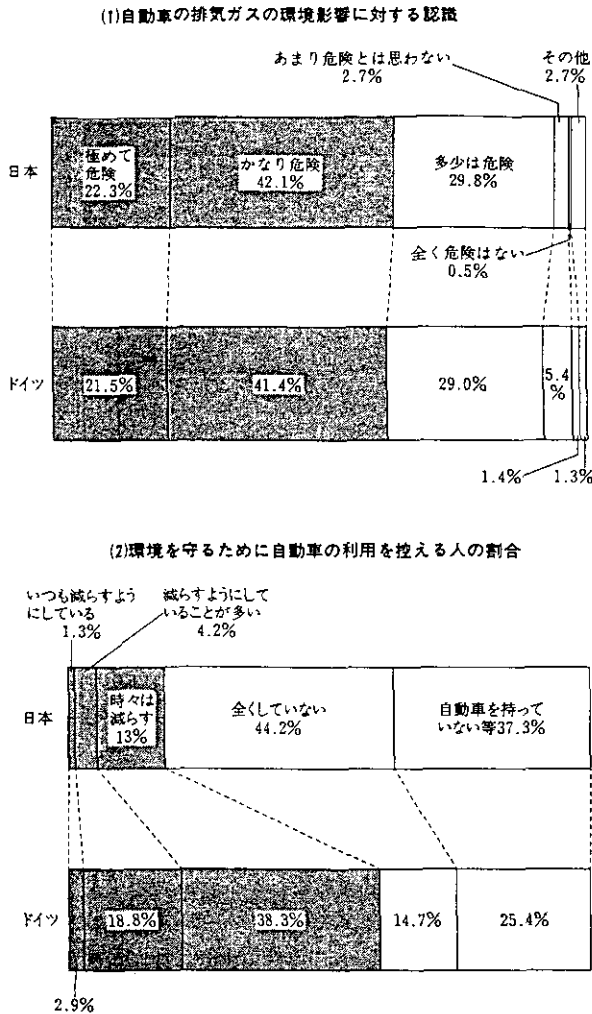


図6 自動車利用に関する認識と行動

である人口密度、居住と雇用の配置、駐車場、土地利用、公共交通機関、自動車走行性についてそれぞれ変革の方向を検討するとともに、総合交通体系や都市の国土配置といった要素の複合した全体の体系のあり方についても検討した。そして、環境負荷抑制型の都市機能配置や国土利用変革、それに都市成長管理の基本方針と具体的方策の提言をとりまとめ、併せてその根拠や参考になる各種のデータを整理した。

(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目指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年のアルジ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ている。さらに、国連は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（SEEA）を新たに導入することを決定した。一方、我が国でも本年度に成立した環境基本法第30条において、「環境が経済から受ける影響及び経済に与える恵沢を総合的に評価するための方法の開発に関する科学技術の振興」を明記するなど、この問題に対する関心は内外で急速に高まりつつある。

こうした国際的要請に応えるために、我が国の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排出国である我が国については、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、国立環境研究所においては、地球規模の環境変化を反映した我が国の環境資源勘定の作成手法の開発を主たる目的として設定した。平成4年度から経済企画庁、農林水産省の研究機関との省際研究プロジェクトを実施中である。

本年度は、前年度に引き続き環境資源勘定に関する国際的活動に参加するとともに、国際的金融フローに伴う環境変化を勘定体系で扱うための理論的枠組みの構築、SEEAを国内の具体的な環境問題へ適用するための検討を行った。また、前年度に作成した貿易データベースを用いて、主要な自然資源の国際間取引の現況を把握するとともに、CO₂排出量を例に、国際間での環境負荷収支の試算を行った。一方、二酸化炭素排出削減を例に、グリーンGDPを経済政策の目標体系として採用することの効果も、世界経済モデルを用いて試算した。

1) 環境資源勘定に関する国際的活動への参加

我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、今年度も前年度に引き続き、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に出席し、環境資源勘定および環境指標に関する加盟各国の調査研究状況について調査するとともに、1994年9月に開催が予定されているOECD環境資源勘

表3 地球環境保全のための社会システム変革の提言

基本戦略課題	提言の基本方向	具体的方策
<p>〔ライフスタイル〕</p> <p>生活の諸局面における環境保全意識の向上と環境負荷低減型の生活様式の定着</p>	<p>〔食生活〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・輸送効率化の高い物流システムの確立 ・循環利用生産システムの構築 <p>〔衣生活〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・効率の高い衣料生産システムの確立 ・素材や生産過程に関する環境教育の推進 <p>〔住生活〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・資源、エネルギー効率のよい住宅の採用推進 <p>〔労働・余暇〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・余暇増大によるエコ活動参加の促進 ・環境NGOによる情報支援システムの構築 <p>〔情報化〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・環境情報のインフラ整備 ・環境情報の供給量増大 <p>〔教育〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・女子教育機会の促進 ・環境教育の明確な位置付け <p>〔女性〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・性差別のない社会づくり 	<ul style="list-style-type: none"> ・環境負荷の見えるエコラベリングの導入 ・旬ベースの食の見直し ・食の環境教育エコクッキングの実施 <ul style="list-style-type: none"> ・エコブランド服の開発 ・衣服の使い回しの制度化 <ul style="list-style-type: none"> ・住宅の耐用年数デポジット制度の導入 ・不在住宅所有者への課徴金制度の導入 ・「グリーンハウス」の公共住宅への採用義務 <ul style="list-style-type: none"> ・エコ休暇制度の新設 ・職場のエココンシャス運動への参加 <ul style="list-style-type: none"> ・環境VR施設の開設 ・エコチャンネルQ2の開設 ・遠距離情報通信料金の大幅値下げ ・環境負荷のエコインデックスの導入 <ul style="list-style-type: none"> ・環境シミュレーションソフトの開発 ・自然観察ツアーの普及 ・父親参加の野外活動促進 <ul style="list-style-type: none"> ・女性による女性のためのNGOの途上国派遣 ・途上国への農業指導 ・途上国へのエコツアー

表3 (つづき)

基本戦略課題	提言の基本方向	具体的方策
<p>(都市構造)</p> <p>環境負荷抑制型の都市機能配置・土地利用の推進</p> <p>環境負荷抑制型の都市成長管理政策の実施</p>	<p>〔人口密度〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・人口密度を用いた都市政策 <p>〔居住と雇用の配置〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・都心の居住促進と雇用集中の抑制 ・居住と雇用の郊外部への配置 <p>〔駐車場〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・都心部の駐車場の制限 ・都心周辺部大規模駐車場の整備 ・都心部における駐車場の一律付置義務の見直し <p>〔土地利用〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・環境負荷抑制型の都市機能配置・土地利用の推進 ・環境アセスメントを総合的環境保全のための基本調査とする <p>〔公共交通機関〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多様で有機的な公共交通機関の整備 ・多様で高密度な公共交通機関の整備 <p>〔自動車走行性〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自動車走行性の向上のため、一人乗り自動車を減らす ・長期休暇における自動車交通の発生の分散 <p>〔総合交通体系〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・輸送距離に応じた軌道系中心のモーダルミックスの整備 <p>〔多極分散型の国土利用〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地方への権限委譲の促進 ・広域行政組織の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・政令指定都市の都心部の人口密度による負荷のコントロール ・都心部オフィスの総量規制 ・周辺核地域における新都市交通の整備促進 ・パークアンドライド ・「駐車場調整地区」導入 ・環境負荷抑制型の新用途地域制度の制定 ・大規模開発に伴う交通量誘発に関する環境アセスメントの強化 ・都心部の車乗り入れ禁止 ・新都市交通システム ・都心部に全天候型サイクル・モール網の建設 ・ライドアンドライド導入 ・タクシー相乗りの緩和 ・都心部の一人乗り自動車への課徴金制度 ・長期休暇分散促進法の制定 ・貨物の一貫集配輸送会社の設立 ・自律都市圏の育成促進 ・地方自治体による環境負荷削減組合の設立

定セミナーのステアリンググループ会合に出席し、同セミナーの企画立案に参画した。

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

環境資源勘定への取り組みにも着手している。最近取りまとめられた「自然資源勘定：OECD諸国における取り組み」と題する報告書では、環境資源勘定に関する多様なアプローチの整理を試み、SNA自身の修正、現在のSNAに付加する環境に関するサテライト勘定、物量的な自然資源勘定の3種に分類している。報告書によれば、加盟24カ国のうち、現在までに我が国を含む13カ国において、環境資源勘定に関する何らかの取り組みが行われていることが紹介されている。

物量的な自然資源勘定の使途としては、自然資源の管理、政策分析、環境指標開発などの基礎情報としての利用があげられており、ノルウェーやフランスにおける先駆的取り組みは一定の成果をあげているものの、政策の立案や評価に直結した利用は未だ不十分との評価がある。今後、環境資源勘定の作成の方法論だけでなく、如何にこの手法を政策に結び付けていくかの議論が活発化すると考えられ、日本でもこうした側面からの検討も視野にいれる必要があろう。

2) 国際的金融フローに伴う環境変化を環境勘定に取り入れるための理論的枠組みの検討

国連から提案されたSEEAは、自然資源や廃棄物など、もっぱら実物的なフローおよびストックを記録の対象とする、実物的統計システムとして設計されている。この枠組みは、生産、消費、資本形成といった経済活動が、地球上の種々の環境資源に対してどのような影響を与えているかを分析する上で有効な統計システムである。しかし、環境と経済とのかかわりは広範かつ複雑であり、こうした実物的統計の枠組みでは十分ではない場合がある。たとえば、近年、先進諸国による環境規制の緩い国や地域へのODAや直接投資といった海外経済協力が、しばしば地球的規模の環境破壊を引き起こす要因となっていることが指摘されている。ODAなどの海外経済協力と受け入れ国における環境破壊との関係を分析するには、金融的な側面をも取り扱うことのできる統計システムが必要である。

そこで、こうした金融的なフロー・ストックを環境勘定体系に取り入れるための枠組みについて検討を行った。その結果、SEEAは、SNAの中核体系から実物面だけを抽出して作成されたものであるため、SNA中核体系との整合性を考慮しながらSEEAに金融面を付加していくことは極めて困難であること、むしろSEEA行列

に多少の修正を加え、SNA中核体系と勘定構造上の整合的關係を持った新たなSEEA体系を導出することが、金融面の付加という目的のみならず汎用性の高い包括的統計システムの設計上望ましいことが明らかとなった。また、実際に勘定行列の変換操作を行い、SNA中核体系と整合のとれた修正されたSEEA体系の勘定行列を導出した。

3) SEEAの具体的問題への適用に関する検討

まず、SEEAについての理解を深めるために、具体的問題への適用について考察し、次のような問題点を見いだした。第1に、物的勘定と貨幣勘定の関連を扱う際に、重点的に扱うべき局面をみきわめる必要がある。例えば、廃物処理に関連する維持費用を算定するには、物的勘定の側では単に廃物処理施設への廃物フローの量を推計するのみでは不十分であり、廃物の質的内容と処理施設の種類を考慮した変換マトリクスが必要である。第2に、国の境界を通り抜けて国外の自然環境に影響を及ぼす、いわゆる廃物の越境フローが扱えない。すなわち、木材貿易による熱帯林破壊のような、経済取引によるものは扱えるが、酸性雨やCO₂のように、経済取引外で領土外、公海上を通過していく廃物は現在のSEEAの枠組みには記載できない。環境勘定において地球規模の環境変化を考慮することは、我が国には重要な課題であり、この点について検討を深める必要がある。第3に、持続可能性基準に基づく維持費用の評価では、自然環境中での廃物の動態をブラックボックスとして扱っており、経済活動が自然環境の追加的悪化をもたらす場合においてのみ、その活動に環境費用を帰属させるとしている。しかし、実際には、過去からの廃物の蓄積的影響や自然環境中での物質の動態のために、ある経済活動とある「追加的」悪化との帰属関係は明確ではない。経済統計としてのSEEAに、自然科学的な物質動態をどのように反映するかが一つの重要な問題となろう。

一方、SEEAの枠組みによる具体的な勘定表の作成の準備として、関連する基礎データの調査を行った。我が国では、こうした基礎データの大半は地方自治体によって収集、保管されているため、2つの地方自治体を例として、環境負荷および原因となる経済活動に関するデータ、環境および自然資源の現状に関するデータ、環境に関する貨幣単位で表記されたデータの整備状況を調査し、主要な項目についてデータを収集整理した。また、自動

車代替によるNO_x削減と下水道整備によるBOD削減を事例として、物的勘定と貨幣的勘定の関係を整理した。

また、こうした地域単位のデータを環境勘定のためのデータとして用いる際に、空間集計に伴って生じる問題を抽出・整理した。空間集計による誤差の例として、ヘドニック法による環境の価値評価における人口移動によるバイアスをとりあげ、事例分析のためのデータを整備した。

4) 貿易に伴う相手国の環境変化に関する情報整備

我が国は、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。

このためまず、前年度に着手した国連統計局の国際貿易統計データベースに基づく品目別、国・地域間貿易マトリクスの整備を継続して行った。解析対象とする自然資源の直接取引として、すでに着手した森林資源、野生生物資源に、鉱物資源、農水産品を加え、品目別のデータを抽出・編集した。

これとともに、貿易マトリクスをもとに、国・地域間の貿易フローを世界地図上に自動作図するシステムをワークステーション上に作成し、これらの自然資源関連の主要品目について、我が国の貿易が世界全体の貿易に占める位置づけを把握した。日本への輸入が世界全体の取引量の大半を占める品目としては、すでに指摘されてきた熱帯産木材のほか、ニッケルなどの鉱物資源があげられた。こうした資源の輸入が最終的にどのような経済活動に帰属するかを明らかにするため、木材資源について産地を区別しながら、供給から最終用途にいたるマテリアルフローを作成した。また、こうした解析を支援するため、行列形式のマテリアルバランス表から、資源フローをワークステーション上に自動作図するシステムを整備した。

さらに、日本の関係する主要貿易品目と相手国における環境変化との関係をリストアップした上で、取引量と環境変化を定量的に結び付ける手法について検討した。例えば、木材について、実際に取引された木材の伐採に伴って、伐採されたり、損傷を受けたりした量を含めた場合の環境変化について情報を収集した。このほか、

エビ養殖によるマングローブ林の消失、畜産物に関連する温室効果ガス発生などの事例について、定量的データを収集した。

5) CO₂を例とした国際環境負荷収支勘定の試算

貿易にともなう相手国の環境負荷発生別の事例として、海外での工業生産に伴う汚染物質発生があり、こうした環境負荷は、製品に「内包」されて貿易相手国へ移動するとの考え方がある。ここでは、エネルギー消費に伴うCO₂排出を取り上げて、先述の貿易マトリクスに基づき、世界各地域間の内包環境負荷の収支を試算した。

ある地域*i*において、生産物*k*を1単位生産するまでに直接・間接に発生する環境負荷を ε_{ik} とすると、地域*j*が生産物*k*を X_{ijk} 単位輸入したとき、地域*j*は地域*i*に対して、 $E_{ijk} = \varepsilon_{ik} \cdot X_{ijk}$ の環境負荷を発生させたとみることができる。これは、内包(embodied)エネルギーの概念を拡張し、「内包環境負荷」が生産物の取引に伴って地域間を移動すると考えるものである。日本の産業連関表から、部門*k'*ごとのCO₂直接排出量と $(I - A)^{-1}$ 型の逆行列を用いて、単位金額当たりの内包CO₂原単位 $\varepsilon_{0k'}$ (以下、添字0は日本)を求め、産業連関表の分類*k'*(84部門表)とSITC(国連貿易統計における品目分類)の分類*k*(117分類を抽出)を対照して、 ε_{ik} を求める。ここではすべての地域について $\varepsilon_{ik} = \varepsilon_{0k}$ とする方法(ケースA)、各地域*i*のGNPあたりCO₂排出量 a_i によって $\varepsilon_{ik} = (a_i/a_0) \varepsilon_{0k}$ のように全部門一律に補正する方法(ケースB)の2種類を用いた。これら2ケースの結果を表4に示す。日本については、ケースAでは、輸入($\sum E_{ijk}$) < 輸出($\sum E_{0jk}$)であるが、ケースBでは大幅に輸入 > 輸出となっている。これは、輸入相手国の ε_{ik} が日本の値 ε_{0k} より全般に大きいため、とくに輸入額の約30%を占める東南アジアからの寄与が大きい。 ε をより厳密に与えるには各国別の産業連関表および多国間産業連関表の適用が考えられる。

さらに、産業連関表と貿易マトリクスによるマクロ分析を補完するための事例分析として、エネルギー多消費産業の典型であり、かつ日本への輸入量が急増しているアルミニウム地金について、より詳細な検討を行った。アルミ製造は電力の多消費で知られるが、地域によって電源が大きく異なる。産地別の電源構成の差異を考慮した上で、日本のアルミ需要に伴う世界各地域でのCO₂排

表4 貿易を介した内包CO₂排出量の国際収支

(a) 日本と同じ排出原単位を全地域に適用した場合

発国\着国	日 本	アフリカ	北 米	中南米	西アジア	東南ア	西 欧	東 欧	旧ソ連	オセアニア	輸出計	輸入計	収 支
日 本	0.0	0.2	12.7	0.8	0.8	12.3	6.9	0.1	1.0	1.2	36.0	27.3	-8.7
アフリカ	1.0	0.1	2.1	0.3	0.3	0.7	6.5	0.1	0.1	0.0	11.2	4.8	-6.4
北 米	6.6	0.4	21.8	5.1	1.1	7.2	13.0	0.1	0.4	1.3	57.1	79.6	22.6
中 南 米	1.7	0.2	8.4	2.4	0.2	1.7	4.5	0.1	0.2	0.1	19.4	13.5	-5.9
西アジア	2.2	0.3	1.9	0.5	0.8	2.4	3.8	0.2	0.1	0.2	12.1	8.9	-3.2
東南アジア	8.7	0.2	12.2	0.3	0.7	13.2	7.3	0.1	0.4	1.0	44.2	50.0	5.8
西 欧	4.5	3.0	18.9	3.7	4.3	8.9	139.4	2.3	3.6	1.8	190.3	192.0	1.7
東 欧	0.3	0.4	0.6	0.2	0.3	1.0	4.7	1.0	1.0	0.0	9.4	5.1	-4.2
旧ソ連	0.5	0.1	0.2	0.1	0.1	0.7	3.1	1.1	0.0	0.0	5.9	6.8	1.0
オセアニア	1.8	0.0	0.9	0.1	0.1	1.3	1.3	0.0	0.1	0.6	6.2	6.2	0.0
不 明	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.7	1.6	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	-2.6
輸 入 計	27.3	4.8	79.6	13.5	8.9	50.0	192.0	5.1	6.8	6.2	394.3	394.3	0.0

(b) 各地域のGNPあたりのCO₂排出量によって補正した場合

発国\着国	日 本	アフリカ	北 米	中南米	西アジア	東南ア	西 欧	東 欧	旧ソ連	オセアニア	輸出計	輸入計	収 支
日 本	0.0	0.2	12.7	0.8	0.8	12.3	6.9	0.1	1.0	1.2	36.0	105.6	69.6
アフリカ	4.6	0.6	9.9	1.2	1.5	3.4	30.1	0.5	0.3	0.2	52.3	11.1	-41.2
北 米	18.0	1.0	59.3	13.9	2.9	19.5	35.4	0.4	1.0	3.7	155.1	214.9	59.7
中 南 米	5.7	0.5	27.8	7.9	0.7	5.5	14.8	0.3	0.6	0.4	64.4	34.7	-29.7
西アジア	7.7	0.9	6.6	1.6	2.8	8.3	13.4	0.6	0.2	0.6	42.6	21.5	-21.1
東南アジア	53.7	1.2	62.4	1.7	3.6	90.5	41.6	1.4	3.4	5.0	264.5	166.0	-98.5
西 欧	7.4	4.8	30.6	6.0	7.0	14.4	226.3	3.7	5.9	2.9	309.0	404.3	95.3
東 欧	1.0	1.3	1.9	0.6	1.1	3.4	16.0	3.4	3.4	0.1	32.3	14.4	-17.9
旧ソ連	1.8	0.3	0.7	0.3	0.5	2.7	11.2	3.8	0.0	0.0	21.3	16.2	-5.1
オセアニア	5.8	0.1	2.8	0.2	0.3	4.2	4.3	0.1	0.3	1.9	20.0	15.9	-4.1
不 明	0.0	0.1	0.1	0.4	0.3	1.8	4.3	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	-7.0
全 世 界	105.6	11.1	214.9	34.7	21.5	166.0	404.3	14.4	16.2	15.9	1004.5	1004.5	0.0

出量を1980年と1990年について比較した結果が図7である。この間に国内生産が激減し、南米や豪州からの輸入が増加している。とくに、豪州では石炭火力発電が主体のため、CO₂発生量が大きい。

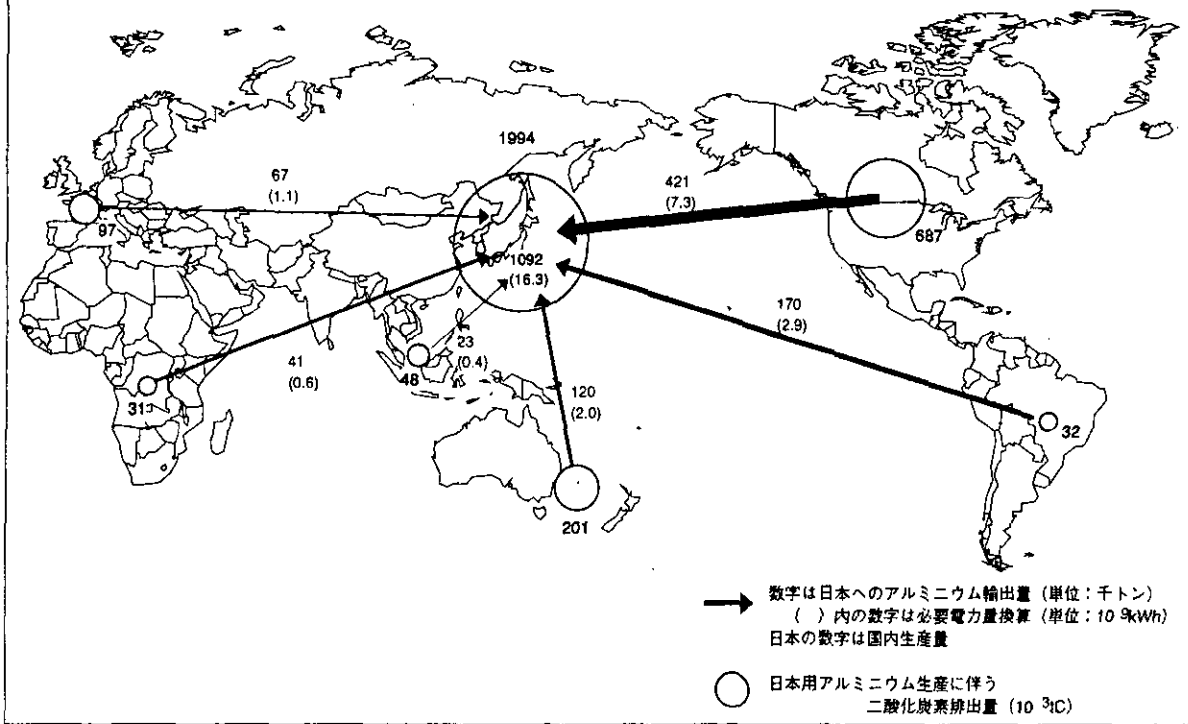
6) 世界経済モデルによる環境資源勘定の導入効果の分析

環境資源勘定を用いて修正したグリーンGDP等の経済指標は、それを国家の経済政策の目標体系として導入した場合、大きな環境保全効果が期待される。この効果を定量的に推定した研究が今までにないために、環境資源勘定の政策上の重要性が十分に理解されなかった。このため、本研究では二酸化炭素の排出削減を例として、世界経済モデルを用いてこの効果を定量的に分析した。

分析に用いたモデルは、アラン・マンらによって開発された動学的最適化モデルを改良したもので、日本を1地域に独立させて世界を6地域に分割している。そして、

このモデルの二酸化炭素排出制約を取り除く代わりに、地球温暖化を考慮した国内総生産（グリーンGDP）の勘定体系を導入し、これによって環境資源勘定の効果をシミュレートした。このグリーンGDPは、国内総生産（国内の消費と投資の和）から二酸化炭素の排出量による環境費用を差し引いたもので、環境費用は二酸化炭素の排出量とその費用換算係数を掛け合わせて求めた。図8には、この費用換算係数を増加させた場合に、二酸化炭素の排出量がどの程度削減され、またGDPがどの程度減少するかについて、シミュレーション結果を地域別に示している。これによれば、グリーンGDPを導入することによって、世界の二酸化炭素排出量は確実に減少することが明らかとなり、この排出量を1990年レベルに安定化して将来さらに減少させるためには、1炭素トン当たり約200ドル以上の環境費用を見込んでおく必要があることが分かった。また、このような手段によって二酸化炭素の排出量を減少する場合、GDPの損失は避け

アルミニウム地金貿易量 (1980)



アルミニウム地金貿易量 (1990)

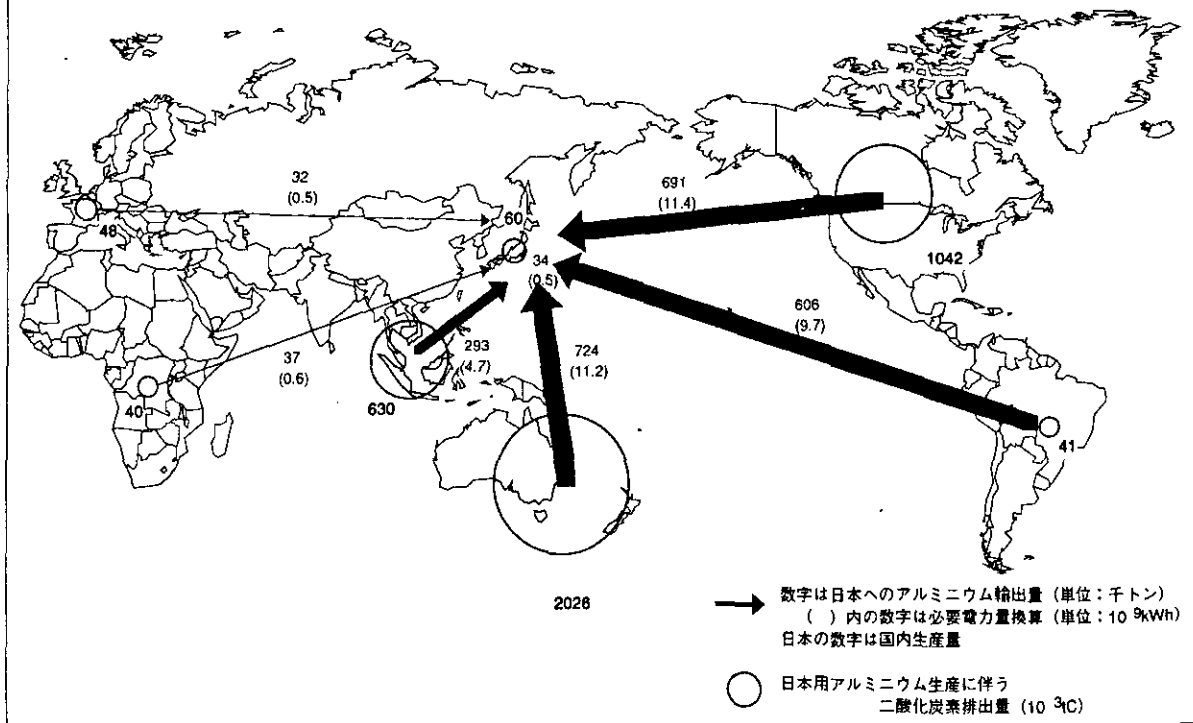


図7 アルミニウム地金貿易に伴う国内外のCO₂排出量

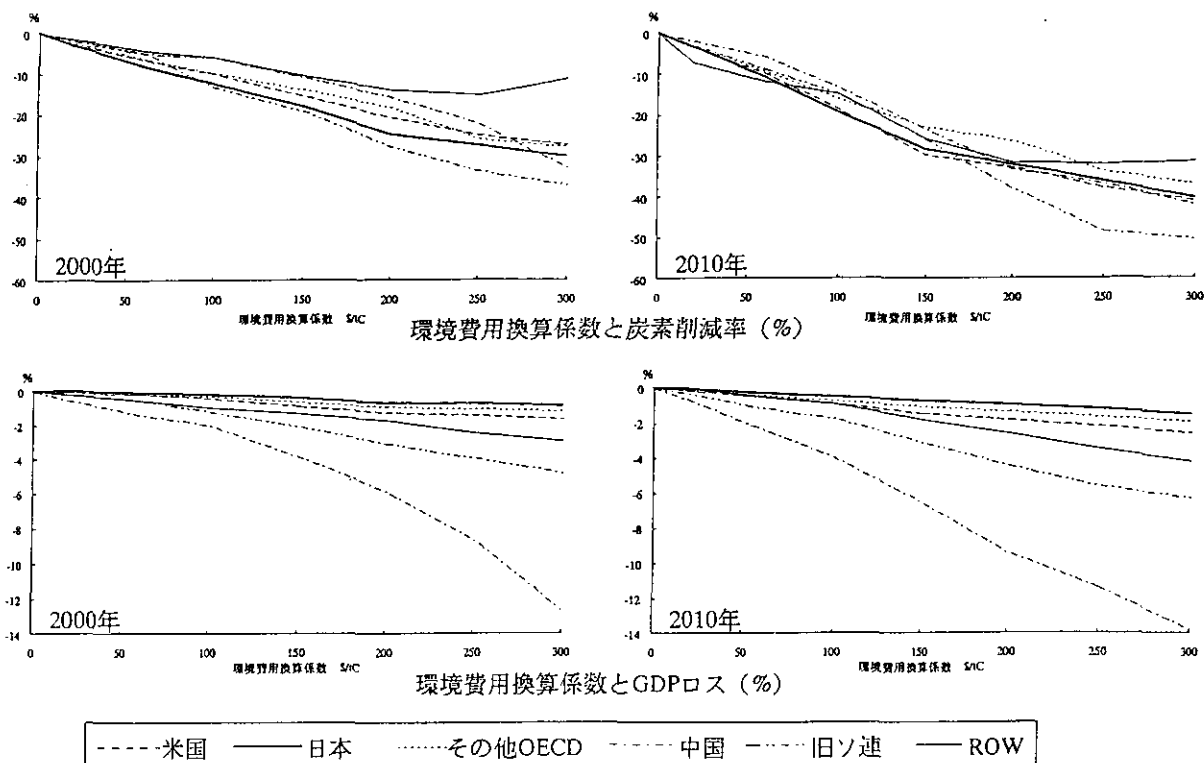


図8 各国における環境費用換算係数とGDP損失率/炭素排出削減率の関係

られないが、同じ現象をグリーンGDPで評価した場合には、かえってグリーンGDPは増加し、環境を勘案した経済的便益の増加を示す指標になりうることを示した。

一方、世界一律の環境費用換算係数を導入することは、経済効率からみて最適とはいえない。事実、図8に示すように換算係数と二酸化炭素削減量やGDPロスとの関係は国や地域によって大きく異なる。このため、図9に示すような環境アカウントによる国際調整メカニズムを提案して、デコンポジションのアルゴリズムによりモデル化した。この調整メカニズムは、国際炭素税や国際排出権取引制度とは異なった調整手段で、環境資源勘定を国際調整の手段として用いる全く新しい提案である。この調整手段を導入した場合の効果を、シミュレーションにより推定したところ、世界一律に環境費用換算係数を課す場合と比べて、1.1～2.6兆ドルの便益が増加することが明らかとなった。これにより、環境資源勘定は国際協調の調整手段としても有効であることが示された。

(4) まとめ

以上、今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、今年度は、長期均

衡タイプの経済モデルの開発に焦点を当てて、動学的最適化モデルおよび一般均衡モデルの開発とそれを用いた分析を進めるとともに、システムダイナミクスモデルを用いた環境投資の経済効果分析も行った。

また、社会システム研究については、研究プロジェクトの最終年度として、今までの社会経済構造と地球環境問題との関係の分析に基づいて、地球環境保全のためにライフスタイル及び都市構造をどのように変革していくべきかについて、提言をとりまとめた。

さらに、環境勘定研究については、環境資源勘定の理論的枠組みの構築、国連の環境・経済統合勘定の我が国への適用の検討、貿易に伴う相手国の環境変化に関する情報整備、国際環境負荷収支勘定の試算、世界経済モデルによる環境資源勘定の導入効果の分析のそれぞれの研究を進めた。

社会システム研究は既に今年度で終了し、世界モデル研究及び環境勘定研究は来年度に最終とりまとめの年度をむかえることから、来年度は総合化研究の全体として進め方を見直す意味からも、個別の研究の推進とともに今までの総括的な検討も行うことを予定している。

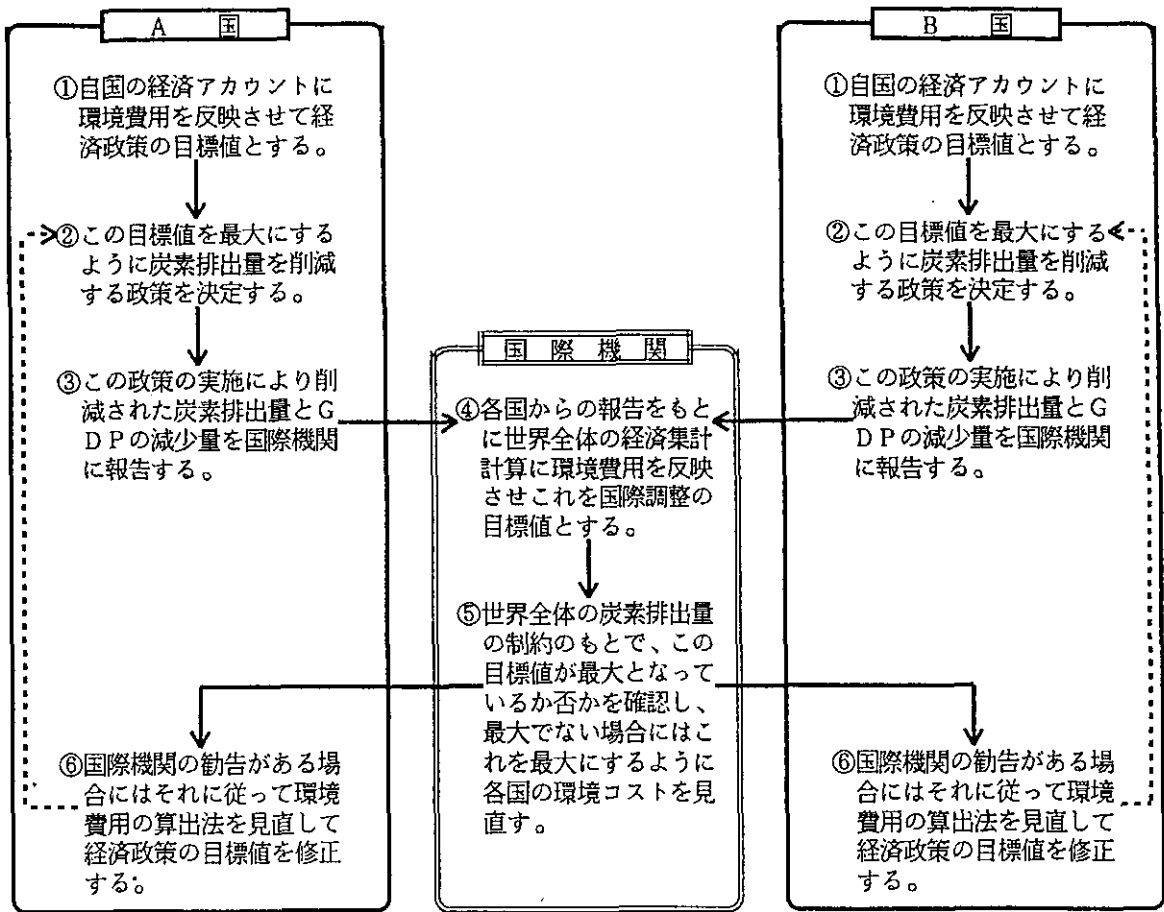


図9 環境アカウントによる炭素排出量の国際調整メカニズム (Green Accounting Adjustment System)

2.10 課題検討調査研究

2.10.1 オゾン層変動による植物影響の国際的モニタリング手法の確立に関する予備的研究

〔研究組織〕

地域環境研究グループ

新生生物評価研究チーム ○近藤矩朗・佐治 光・
中嶋信美

〔研究概要〕

オゾン層破壊により増加すると予測されているUV-Bは生物に遺伝子損傷や様々な生理機能障害をもたらし、生態系に重大な影響を与えると考えられているが、UV-B増加の生態系影響を評価するための指標・手法は明らかでない。UV-Bにより遺伝子損傷産物のピリミジン二量体が増加することが知られており、これを国際的に長期間にわたってモニタリングすることによりUV-B増加の影響を評価することができると考えられる。本研究課題は、UV-Bによる植物のピリミジン二量体生成を測定する方法を検討し、ピリミジン二量体測定がオゾン層変動の生物影響を監視するための手段として利用できるかどうかを明らかにすることを目的に計画された。この目的を達成するためには、わが国だけでなく、国際的に共通に使用できる手法を確立しなければならない。すなわち、植物のピリミジン二量体の簡便で高感度の測定法を確立する必要がある。

本研究により次のことが明らかになった。①野外や室内実験において、植物試料を採取後直ちに液体窒素などで凍結し、凍結乾燥してDNA抽出まで乾燥・暗所に保存することが重要である。②植物のピリミジン二量体は、動物などで確立された単クローン性抗体を用いることにより定量的に測定できる。③自然条件に近い量のUV-Bを室内で植物に照射したところ、ピリミジン二量体が生成し、UV-B照射を停止すると遺伝子損傷が部分的に回復した。

これらの結果は、この研究で確立した方法を用いることにより、太陽光中の紫外線により生成した植物のピリミジン二量体の測定が可能であることを示しており、国際的に使用可能な植物種を選定することにより、紫外線増加の植物影響を国際的にモニタリングするためのシステムを作り出すことが可能であると考えられる。

2.10.2 定期航空便を利用したシベリアにおける二酸化炭素、メタンの高度分布の通年測定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

安野正之

首席研究官

古川昭雄

温暖化現象解明研究チーム ○井上 元・泉 克幸・
町田敏暢

〔研究概要〕

地球温暖化を引き起こす二酸化炭素やメタンなどの大気微量成分の観測は、GCMや発生源に関する研究やデータベースとリンクして、それらの地球規模での循環を理解する上で大きな役割を果たしてきた。既に地上での大気微量成分の連続的な観測は、WMOや各種研究機関が世界各地で実施している。しかしながら特に陸域生態系との相互作用を評価するための長期連続観測は、方法論的にも確立しておらず、各方面で試行錯誤が行われているのが現状である。その一つの試みは、陸域・海上を問わず温室効果ガスの高度分布を求めることであり、すでに先進的な研究グループは組織的な観測を開始しつつある。シベリアは大きな自然湿原や森林を擁しており、大気=陸域生態系の相互作用の観点から極めて重要な場所である。ここで高度分布を継続的に行う方法を検討し、試験的な観測を開始した。当初は旅客機を利用する予定であったが、高度に関する情報が得にくいことと、ジェット機は上昇速度が大きいため大気の取り込みから採取までの間に高度が変化するなどの問題があり、チャーター機で採取を行うこととした。環境研から容器を送り、CAOが大気を採取し環境研に送り返し、環境研や東北大学で分析する体制を整えた。結果はまだ初歩的な段階であるが、夏期には低高度では数十ppmも低かった二酸化炭素は11月から地表面の方が高くなっていくなど、興味あるデータが出つつある。

2.10.3 リモートセンシングおよび地上探査によるシベリア凍土地帯における植生調査手法に関する予備的研究

〔研究組織〕

社会環境システム部

情報解析研究室

○安岡善文・田村正行・

山形与志樹

地球環境研究グループ

温暖化現象解明研究チーム 井上 元・竹中明夫

〔研究概要〕

シベリアは二酸化炭素やメタンなど温室効果ガスの重要な発生・吸収源であると見られているが、定量的な解析を行うには科学的データが不足していた。そこで平成3年度より日露共同の航空機観測が開始され、シベリアにおける温室効果ガスの動態が次第に明らかにされつつある。これら温室効果ガスの発生・吸収は地表面および植生の状態により大きな影響を受けるため、その発生・吸収量を評価するには、地表面と植生の状態を把握する必要がある。シベリアのように広大な領域においてこれらの面的分布データを得るためには、航空機観測と地上探査に加えて、衛星リモートセンシング画像の利用が不可欠である。本研究の目的は、地表面および植生の状態の推定手法として、衛星リモートセンシング技術の有効性を検証すること、およびその推定結果と温室効果ガスの動態との関係を検討することである。

本年度は、シベリアにおける観測フィールド（ハンティマンシスク、チクシ、ヤクーツク）を選定し、これらの地域において衛星画像（SPOT/HRVおよびJERS-1/SAR）を取得した。衛星画像を領域分類し、航空機観測による二酸化炭素とメタンのデータと比較したところ、地表面・植生の状態と温室効果ガス濃度の間に相関関係があることが明らかになった。今後は、この相関関係について詳しく分析するとともに、複数の衛星センサーを組み合わせることにより観測手法の高度化を図る予定である。

2.10.4 アジア・太平洋地域における気候変動の影響評価ガイドライン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

〔研究概要〕

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が1990年に第1次評価報告書、1992年に補足報告書を作成したが、その際、気候変動の影響評価を実施する際のガイドラインづくりの必要性が確認され、日本・英国が中心となって『気候変動の影響評価の予備的ガイドライン』を作成された。その後、IPCCは1995年を目指して第2次影響評価報告書の取りまとめ作業を開始したが、IPCC全体会合において、気候変動の影響評価ガイドラインの重要性が再確認され、引き続き日本・英国を中心に、前回のガイドライン作成メンバー及び各分野の影響評価を担当する研究者を含めて作業チームが組織され、本格的なガイドラインづくりが開始された。本研究は、英国と共同してガイドライン作成作業（必要な資料収集、討議、編集など）を進め、ガイドラインを作成しIPCCへ貢献するものである。

平成5年11月には、カナダのトロントで影響評価ガイドライン作業チームと、別途開発途上国の影響評価（カントリースタディ）を進める米国、UNEPの関係者が一堂に会し、気候変動の影響評価について情報交換と役割分担を明確にした。ガイドラインについては、予備的ガイドラインの充実を図るために、1）統一した気候変動シナリオ、2）適応評価、3）マクロ経済的評価、4）海面上昇の影響評価、5）総合的な影響評価について、章を新たに設けること、またガイドラインは気候変動の影響評価に必要な最新の知見を簡潔にとりまとめる科学的な資料としての位置づけを行い、米国、UNEPが進めるカントリースタディに必要な実用的なハンドブックとの役割分担を明確にした。これを踏まえガイドラインの草稿を作成し、作業チームメンバーによる修正を経た上で、IPCC第二作業部会に提出した。ガイドラインは、IPCCの関連分野の執筆者や各国政府のレビューを経て、1995年の第2次評価報告書に盛り込まれる予定である。

2.10.5 都市における温暖化防止対策研究の総合化に関する予備的研究

〔研究組織〕

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

〔研究概要〕

温暖化ガスの大排出源としての都市において、どのような防止対策がありうるかを総合的に研究するための基本的研究方向とフレーム、その具体的課題設定を行うことを目的とした予備研究である。

そのための作業の第一段階として、内外の諸都市における既存の対策事例を現地調査を行うことによって収集した。特にヨーロッパ諸国で先進的事例が多いことから、「環境科学会」に委託し、都市環境計画、交通計画、エネルギー、水循環などの専門家4名によるドイツ、スイスを中心にした実状調査とデータ収集を実施した。

一方、国内的にもエコロジカルな都市・地域づくりの事例が近年いくつか見られるようになってきたので、これについても並行して調査をし、得られたデータの分析・整理をした。これらは学会からの委託報告書としてまとめられている。

このようなデータ収集と並行して、外部専門家も交えたワークショップを1回、検討会を2回開催し、都市レベルでの温暖化防止策の全体像とその問題点に関して活発な情報交流と討論を行った。これら成果もまた詳細な議事録としてまとめられている。

以上のような内外の最新情報を基に、今後の都市における総合的対策研究の方向性を考察した。その結果、温暖化防止をその主目的に据えつつ、同時に都市環境質全体を評価関数とし、エネルギー・物質循環、交通システムというハードな技術対策と土地利用やライフスタイルという地域計画的手法とを含めた都市環境対策に関する総合化研究を望ましい課題として描いた。

2.10.6 北極アイスコア分析による地球環境変動研究の予備調査

〔研究組織〕

地球環境研究グループ

統括研究官

安野正之

上席研究官

古川昭雄

温暖化現象解明研究チーム ○井上 元・町田敏暢

〔研究概要〕

大気中の二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素などのいわゆる温室効果ガスの濃度増加によってもたらされる気候変動を予測する方法の一つとして、古気候と当時の大気組成を解析する手法がある。南極のいくつかの場所でサンプリングされたアイスコアに含まれる気泡中の二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、さらにはその同位体の分析の結果として、人間活動が活発化する以前の大気組成についてのデータや、さらに古い氷河期の大気組成と当時の気候との関連を明らかにするデータが得られている。南北半球の大気の混合はそれほど速くはないため、南極のデータには、北半球の変動が直接反映されておらず、北極域ではグリーンランドやエレスメア島、デボン島に古い氷が残っており、我が国はグリーンランドでの氷床コアのボーリング計画に参加している。カナダNRCより提案のあったエレスメア、デボン両島で計画されているアイスコア研究に参加するかどうかを検討するために予備調査を行った。その結果バックグラウンドとなるデータの解析・整備状況は良好であるが、大気成分の保存性が悪く（夏期の融解がある）、地球環境の変動を測定するには不向きであるという判断に至った。しかしながら、この分野の研究が温暖化の研究に重要な寄与しており、現在の環境研の人材からこの分野に大きな貢献ができること、新しい分析項目も増やせる見通しがあることから、将来は本格的にこの研究に取り組むことも十分に考えられる。

平成5年度編集小委員会

委員長	高松武次郎
委員長代理	松本幸雄
委員	栗原崇
〃	正木清郎
〃	原島省志
〃	永田尚志
〃	高山慎司
〃	山形与志樹
〃	瀬山春彦
〃	鈴木明
〃	鶴野伊津志
〃	田中浄
〃	大坪国順
事務局	名取美保子

国立環境研究所地球環境研究年報

平成5年度

平成6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 谷田部印刷株式会社

〒305 茨城県つくば市大字谷田部1979-1

本年報は再生紙を使用しております。