

国立環境研究所
研究発表会 予稿集

平成5年6月18日

於：国立環境研究所大山記念ホール

目 次

6月18日（金）午前 地球環境研究 地球環境研究グループ

オゾン層の総合的観測に向けて	1
中 根 英 昭（オゾン層研究チーム）	
熱帯林の生物学的多様性とその保全	8
可 知 直 毅（森林減少・砂漠化研究チーム）	

6月18日（金）午後 特別研究 地域環境研究グループ

高度な浄化槽による水環境の改善	17
稲 森 悠 平（水改善手法研究チーム）	
都市域における高濃度大気汚染の予測と制御に関する研究	22
若 松 伸 司（都市大気保全研究チーム）	
ディーゼル排気微粒子による喘息様病態発症に関する実験的研究	32
嵯峨井 勝（大気影響評価研究チーム）	
揮発性有機塩素化合物による地下水汚染浄化技術の現状と課題	37
平 田 健 正（有害廃棄物対策研究チーム）	
廃棄物処理に伴うリスクとその評価手法	46
中 杉 修 身（有害廃棄物対策研究チーム）	

6月18日 昼 ポスターセッション

アオコの毒	55
彼 谷 邦 光（化学環境部）	
幹線道路沿いに住む人々の交通公害についての意識調査	56
近 藤 美 則（社会環境システム部）	
湖沼におけるピコプランクトンの生態	57
渡辺 信・高村 典子（生物圏環境部）	
彼谷 邦光・佐野 友春（化学環境部）	
安野 正之（地球環境研究グループ）	
コンピュータグラフィックスによる海洋気候データの画像表示	58
須 賀 伸 介（社会環境システム部）	
湿原生態系の調査手法	59
岩熊 敏夫・野原 精一（生物圏環境部）	
平田 健正（地域環境研究グループ）	
重金属の土壌微生物活性への影響	60
服 部 浩 之（水圏環境部）	

脳の細胞骨格蛋白質と神経毒	61
国本学 (環境健康部)	
飛行機観測による西太平洋地域の大气微量成分の分布調査	63
酒巻史郎 (大気圏環境部)	
マクロファージは肺の中で何している?	64
持立克身 (環境健康部)	
摩周湖の水と底質	65
相馬光之 (化学環境部)	
レーザーを用いた大気の遠隔計測	66
杉本伸夫 (大気圏環境部)	
割れ目性岩盤の透水特性 —単一割れ目について—	67
木村強 (水圏環境部)	

6月19日 (土) 午後1時~2時半

特別講演 宇宙からの地球環境計測

毛利衛 (宇宙開発事業団)

地 球 環 境 研 究

オゾン層の総合的観測に向けて

中根 英昭 (地球環境研究グループ オゾン層研究チーム)

1. はじめに

オゾン層破壊は典型的な地球環境問題と言える。それは、①人間が知覚することが困難で、しかも影響が地球全体に及ぶ、②被害が目に見える形で現れる段階まで進行すると取り返しがつかない、従って、③科学的な研究や観測が決定的に重要である、という特徴を持っているからである。

オゾン層の観測と研究に基づき、1996年にフロンを全廃するという内容の新しいオゾン層保護対策が昨年11月の「モントリオール議定書締約国会合」において決定した。このようなオゾン層保護対策の前進に伴って、研究の面においても、「対策の効果の確認」という課題がクローズアップされてきた。また、オゾン層破壊が気候に及ぼす影響や気候変動（とくに温暖化）がオゾン層に及ぼす影響の研究の進展、臭素化合物の役割の強調、成層圏を飛行する航空機排ガスの影響に関する研究計画の進行などの特徴が研究の流れの中に見られるようになってきた。

国立環境研究所では昭和63年度に開始された特別研究、平成2年からの地球環境研究総合推進費による研究において、オゾン層の変動、その影響及び対策に関する

研究を行ってきた。これらの研究の中から主にオゾン層変動の観測に関する研究について、国際的な動きの中でどのような意味を持ち、今後どのような役割を果たそうとしているのかという点について紹介する。

2. 最近のオゾン層変動の特徴

1991年の「オゾン減少に関する科学的アセスメント」によると、オゾン全量の減少の程度は1970年代と比較すると1980年代になって顕著に増大しており、北半球中高緯度では冬から春にかけての季節にオゾン全量の低下が特に大きい。

また、南極オゾンホールは、1992年には過去最大になると共に、オゾン全量もその時期の過去最低値付近で推移した。

オゾン高度分布のトレンド評価は、信頼性の高いデータが十分得られていないために困難であるが、1991年の科学アセスメントにはトレンド評価の一例が示されている（図1）。測器によって若干の相違はあるが、高度20 km付近と40 km付近でのオゾンに減少傾向のあることは明瞭である。

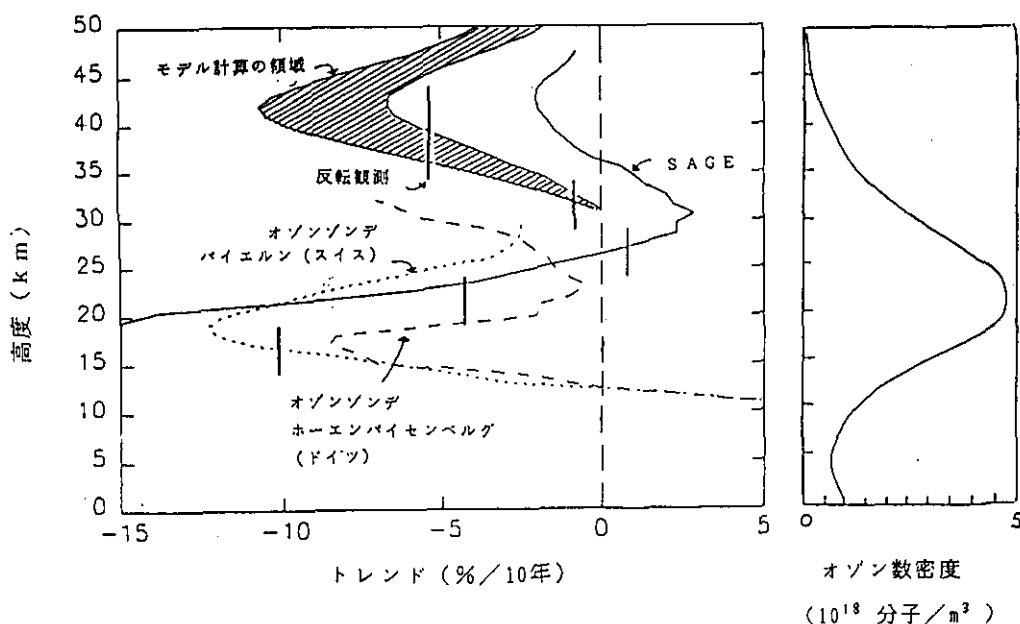


図1 オゾン高度分布のトレンド (1991年科学パネル報告より作成)。

3. 国際的なオゾン層観測ネットワークの動向

オゾントレンドの把握に使用されているデータは、世界気象機関（WMO）のネットワーク観測及び衛星観測によって得られてきたが、最近、地上設置型のハイテク遠隔計測器を組み合わせることでオゾン層の総合的な観測を行うネットワーク観測計画、「成層圏変化検出のためのネットワーク（NDSC; Network for the Detection of Stratospheric Change）」が進められている。

3.1. 世界気象機関によるオゾン観測

オゾン層の組織的な観測は、1957年～1958年の国際地球観測年をきっかけに充実されてきたが、1981年にはWMOによって全球オゾン観測組織（GO₃OS）として組織化された。GO₃OSでは、ドブソン分光光度計によるオゾン全球の観測を中心として、反転法（ウンケル法）やオゾンゾンデを用いたオゾン鉛直分布、地上オゾン濃度の観測を行なっている。GO₃OSによるオゾン全量観測は長期間実施されているという特徴をもっている。

3.2. 衛星観測

地球全体をカバーする観測という点では人工衛星による観測が重要である。オゾン全量の観測には、1978年に打ち上げられた人工衛星 NIMBUS 7 に搭載された TOMS（Total Ozone Mapping Spectrometer）が用いられている。また、高度分布の観測には、NIMBUS 7 に搭載された SBUV（Solar Backscatter Ultra-Violet）、1984年に打ち上げられた衛星 ERBS に搭載された SAGE II（Stratospheric Aerosol and Gas Experiment）が用いられている。これらの観測データは、オゾン全量、オゾン高度分布の評価に用いられている。1991年9月には米国の UARS（Upper Atmosphere Research Satellite）が打ち上げられたが、この衛星は4種類のセンサーによって多くのオゾン層破壊関連物質の高度分布をグローバルに測定している。

3.3. 地上ベース遠隔計測ネットワーク、NDSC

オゾン層の変化を総合的に長期間観測すると共に、衛星観測データの検証を行なうことを目的とした長期的なネットワーク観測計画、「成層圏変化検出のためのネットワーク」（NDSC）が1993年から1994年にかけて本格的に始動する予定で進行している（図2）。この計画では、表1に示された測器を備えた観測ステーションを主として緯度方向に展開することを基本的な方針として、7ヶ所のステーション（北極圏2ヶ所、ヨーロッパ、アルプ

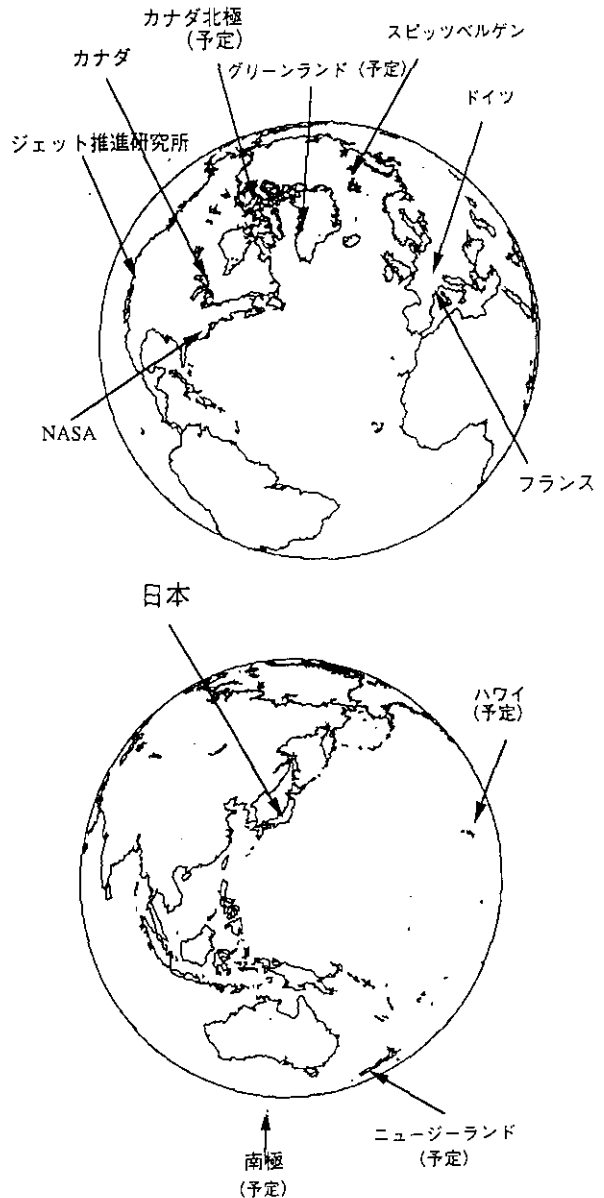


図2 NDSCステーションの位置。北極の3ステーション、ヨーロッパアルプス、ハワイマウナロア、ニュージーランド、南極の各ステーションがNDSCの主要ステーションとして選定されたもの。他は二次（補助）ステーションとなることが予定されている地点。

ス、ハワイ、ニュージーランド、南極）が選定されている。しかし、北半球では経緯度方向にもオゾントレンドの差があり、同様の観測を行うステーションの展開が呼びかけられている。従って、空白域であるアジア・西太平洋域に位置する日本の役割は重要である。

4. 国立環境研究所及び地球環境研究総合推進費における研究

4.1. オゾン層破壊に関連した光化学反応と測定すべき物質・物理量

オゾン層破壊によるオゾン変動の解明のために地上か

表1 成層圏変化検出のためのネットワーク (NDSC) において測定する物質と使用される測器

微量成分(高度)	測器
オゾン気柱全量	ドブソン分光光度計
オゾン(0~20 km)	ライダー(YAG レーザー)
オゾン(15~45 km)	ライダー(XeCl エキシマレーザー)
オゾン(25~75 km)	マイクロ波
気温(30~80 km)	ライダー
ClO (25~45 km)	マイクロ波
水蒸気(0~30 km)	気球搭載湿度計
水蒸気(>20 km)	マイクロ波
エアロゾル(0~30 km)	ライダー
二酸化窒素(成層圏全量)	可視/紫外分光計
塩化水素(成層圏全量)	赤外分光計
メタン(成層圏全量)	赤外分光計
一酸化二窒素(20~50 km)	マイクロ波
硝酸(成層圏全量)	赤外分光計
ClONO ₂ (成層圏全量)	赤外分光計
OH(40~60 km)	紫外蛍光, ライダー
HO ₂	マイクロ波

ライダー; レーザーレーダーの別称

ら測定すべき物質・物理量は表1の通りであるが、それらはオゾンの鉛直分布、気温の鉛直分布といった基本量、オゾン生成反応、オゾン消滅連鎖反応及びその終結反応に関わる物質、オゾン消滅に寄与する物質、南極オゾンホールに関連する物質、中緯度の成層圏に存在する硫酸エアロゾル表面での不均一反応に関わる物質である。オゾンホールでは極成層圏雲と呼ばれる硝酸エアロゾルや氷粒子の表面における不均一反応が大きな役割を果たしている。これら、オゾン層破壊に関連して重要な反応及び物質を表2にまとめた。

4.2. 国立環境研究所における研究

国立環境研究所ではオゾン層変動の観測・解析、変動機構の解明に関する研究を行ってきた。具体的には、レーザーレーダーを用いたオゾン、エアロゾル高度分布の観測、観測結果を用いたオゾン層変動機構の物理的側面の解析、成層圏チャンバーや物理化学的手法を用いたオゾン層変動の化学的側面に関する実験的研究、さらに数値モデルを用いた研究などである。ここでは主として、観測的研究について紹介する。

4.2.1. 国立環境研究所オゾンレーザーレーダー

地上に到達する紫外線量は300 nm付近で急激に変化する。この波長領域におけるオゾンによる紫外線の吸収

表2 オゾン層の化学と計測すべき物質

オゾン層生成反応	オゾン破壊連鎖反応系
$O_2+h\nu \rightarrow 2O$	$X + O_3 \rightarrow XO + O_2$
$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	$XO + O \rightarrow X + O_2$
$O_3+h\nu \rightarrow O_2+O$	正味: $O + O_3 \rightarrow 2O_2$
$O_3+O \rightarrow 2O_2$	($X=H, OH, NO, Cl$)
Xの供給源	連鎖反応の終結反応
$X=H, OH; CH_4, H_2O, H_2$	$ClO + NO_2 + M \rightarrow ClONO_2 + M$
$X=NO; N_2O, SST$ 排ガス	$Cl + CH_4 \rightarrow HCl + CH_3 + M$
$X=Cl; CFC$ (フロン)	$OH + HO_2 \rightarrow H_2O + O_2$
オゾンホールに特有の反応、不均一反応	
$ClONO_2 + HCl \rightarrow Cl_2 + HNO_3$ (PSC上)	
$ClONO_2 + H_2O \rightarrow HOCl + HNO_3$ (PSC上)	
$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$	
(PSC、硫酸I70V ^W 上)	
$(ClO)_2 + h\nu \rightarrow Cl + ClO_2$	
$BrO + ClO \rightarrow Br + Cl + O_2$	

量の変化の大きいことを利用して、様々なオゾン測定法が開発されているが、レーザーレーダーもそのひとつである。図3にオゾンレーザーレーダーの原理を示す。

本研究所のオゾンレーザーレーダーは1988年3月に導入され、8月に観測が開始された。図4に国立環境研究所のオゾンレーザーレーダーのブロック図を示す。現在は、308 nm、339 nm、351 nm、及び313 nmの4波長を使って観測を行っている。3波長以上を使用するのは、空気だけではなくエアロゾルによるレーザー光の散乱があるのでその影響を検出したり補正するためである。現在はピナツボ火山エアロゾルの影響が非常に大きいので4波長を用いている。エアロゾルの影響の無視できる30 km以上の高度では308 nmと351 nmの2波長の信号からオゾン高度分布を計算している。

得られたデータからデータ診断により信頼性の高いものを選択し、オゾン高度分布の形で蓄積している。特に、308 nm - 351 nmの波長組の信号から得られたオゾン高度分布と308 nm - 339 nmの波長組の信号から得られたオゾン高度分布の比較は、エアロゾルの影響の診断、光学系のアライメントの良否の診断を行う上で有効である。図5に2波長組から得られたオゾン高度分布を重ねて示したが、両者がほとんど重なっており、良好なデータであることを示している。また、取得されたデータは、

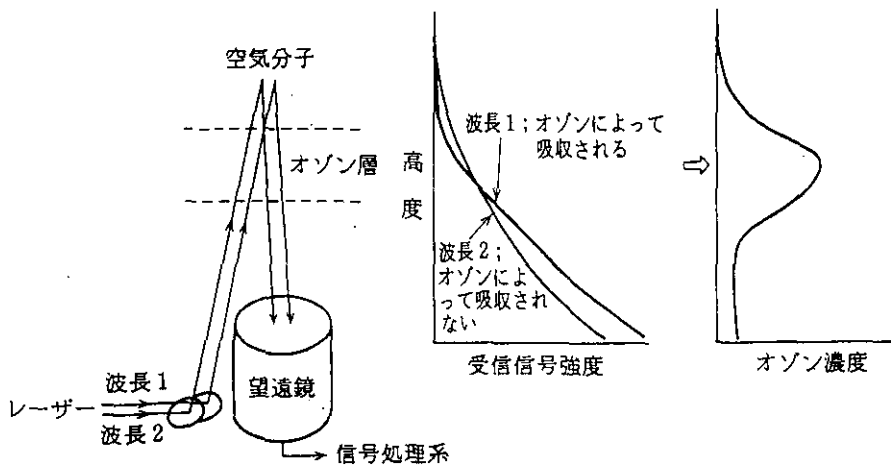


図3 オゾンレーザーレーダーの原理図。

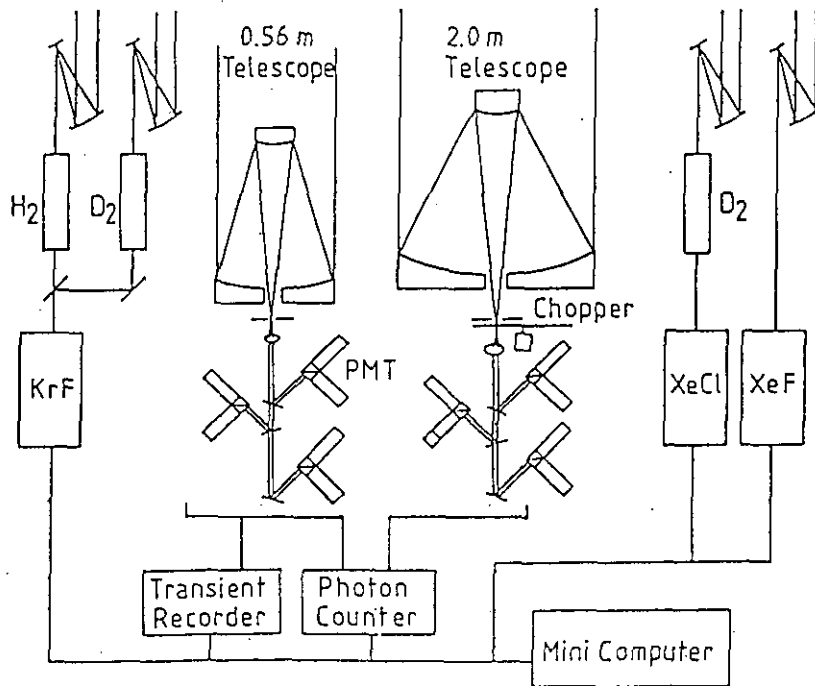


図4 国立環境研究所オゾンレーザーレーダーシステムのブロック図。

衛星センサー SAGE II の観測結果と比較されたが良好な一致が得られている。

4.2.2. オゾン高度分布の変動

オゾンの変動で最も大きなものは季節変動であるが、季節変動の様子は高度によって大きく異なる。図6は観測開始以来の約4年間のオゾン変動を高度毎に示したものである。高度 20 km では春の極大と夏の極小、高度

30 km と 35 km では夏の極大と冬の極小が明瞭に示されている。

オゾンの吸収を受けない波長 351 nm では、エアロゾルからの散乱を無視することのできる高度領域 (30 km 以上) では空気からのレーリー散乱によって信号強度が決定されるため空気密度の高度分布が得られ、これから気温の高度分布を計算することができる。観測例を図8に示す。気温高度分布には波動構造がしばしば見られる。

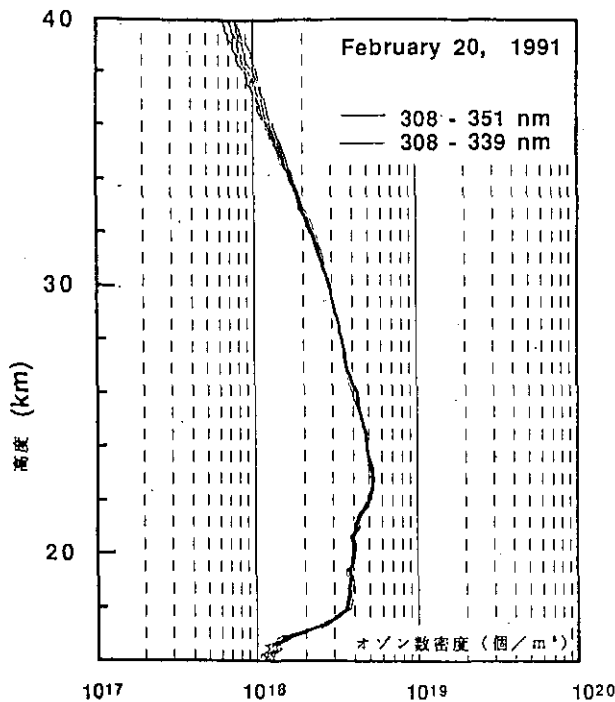


図5 308 nm - 351 nm, 及び 308 nm - 339 nm の2波長組の信号から得られたオゾン高度分布。両側の実線は誤差(標準偏差)を示す。

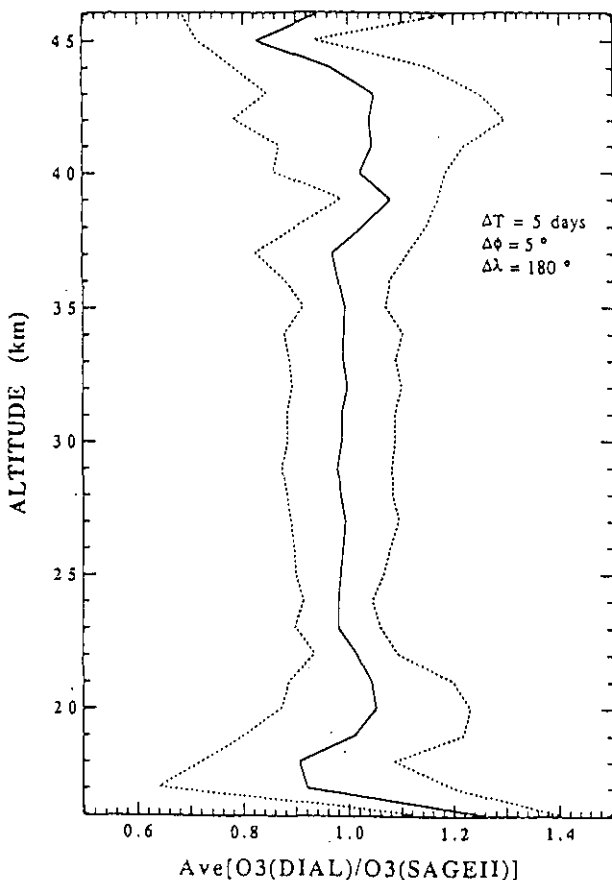


図6 SAGEII とオゾンレーザーレーダーのオゾン高度分布の比較。観測時間差5日以内、観測緯度5度以内の場合について両者の比をとり、平均した。

このような大気波動は大気中の輸送において大きな役割を果たしており、オゾン変動との関連についてレーザーレーダーのデータをもとに解明することが期待されている。

4.2.3. 成層圏エアロゾルに関する観測研究

本研究所では、1982年以来大型レーザーレーダーを用いて成層圏エアロゾルの長期観測を行っている。日本のような中緯度上空では、成層圏エアロゾルは主に硫酸でできているが、その表面における反応(不均一反応)によってオゾン層破壊が加速されると考えられている。とくに最近では、1991年6月中旬に噴火したフィリピンのピナツボ火山による硫酸エアロゾルが漂っているため、エアロゾルの表面積及びその高度分布の測定は重要である。このため、サンフォトメータ、オーリオルメータと呼ばれる太陽光のエアロゾルによる減衰や前方散乱の強度を分光測定する装置をレーザーレーダーと併用して、エアロゾル表面積の高度分布の評価を行っている。太陽光分光観測は東北大学等の協力を得て行っている。

4.3. 地球環境研究総合推進費による共同研究の進展

平成2年度から3年間実施された地球環境研究総合推進費による研究課題「オゾン層の時間的・空間的変動の動態解明に関する研究」では、本研究所のレーザーレーダーによるオゾン、エアロゾル、気温高度分布の観測と共に、東北大学の赤外ヘテロダイン分光計によるオゾン、メタン、 N_2O 高度分布の観測、名古屋大学のミリ波分光計による上部成層圏オゾン高度分布の観測、宇宙科学研究所のロケットゾンデ観測、名古屋大学太陽地球環境研究所のアラスカにおけるレーザーレーダーによる成層圏エアロゾル高度分布の観測等を合わせて研究を進めている。共同観測の一例を図9に示す。さらに、気象研究所からは航空機搭載型赤外分光計による観測、通信総合研究所からはレーザーレーダーによる稚内の成層圏エアロゾル高度分布の観測により上記課題に参加して頂いている。

5. オゾン層の総合的観測に向けて

1992年11月には本研究所において、「NDSC 日本ワークショップ」を開催した。このワークショップにはNDSC 運営委員会の委員長、副委員長、及び日本の国立研究機関、大学に関連した観測を実施しているグループを招待し、日本上空におけるオゾン層の総合的観測と海外ステーションへの貢献について活発に討論した。日本上空に関しては、高山からの観測の必要なものを除けば、

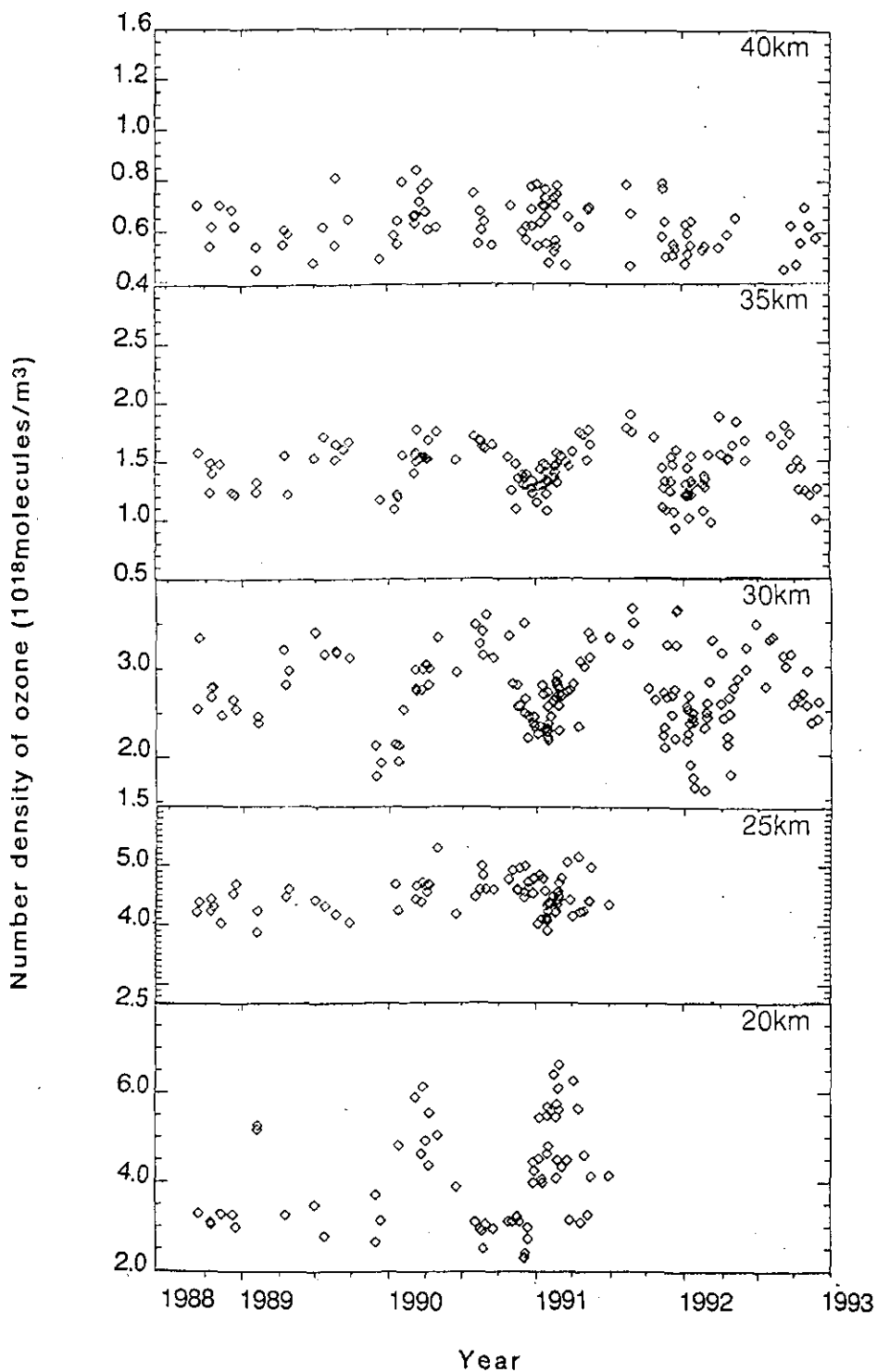


図7 国立環境研究所オゾンレーザーレーダーによって観測された高度別のオゾン変動。高度 20 km, 25 km では1991年7月以降はピナツボ火山起源成層圏エアロゾルの影響を補正する必要があるため、データを省いた。

日本の研究機関のポテンシャルを合わせれば NDSC 型の地上観測の多くのものが可能であり、さらにより進んだ観測もなされていることが示された。

今後、このポテンシャルを現実の長期観測へと発展させることが重要であるが、地球環境研究総合推進費によ

る研究と地球環境研究センターのモニタリングによる長期観測の両者を良い形で発展させることにより、日本における地上からのオゾン層の総合的観測の第一歩を大きく進めることができるのではないかと考えている。

January 24-26, 1990

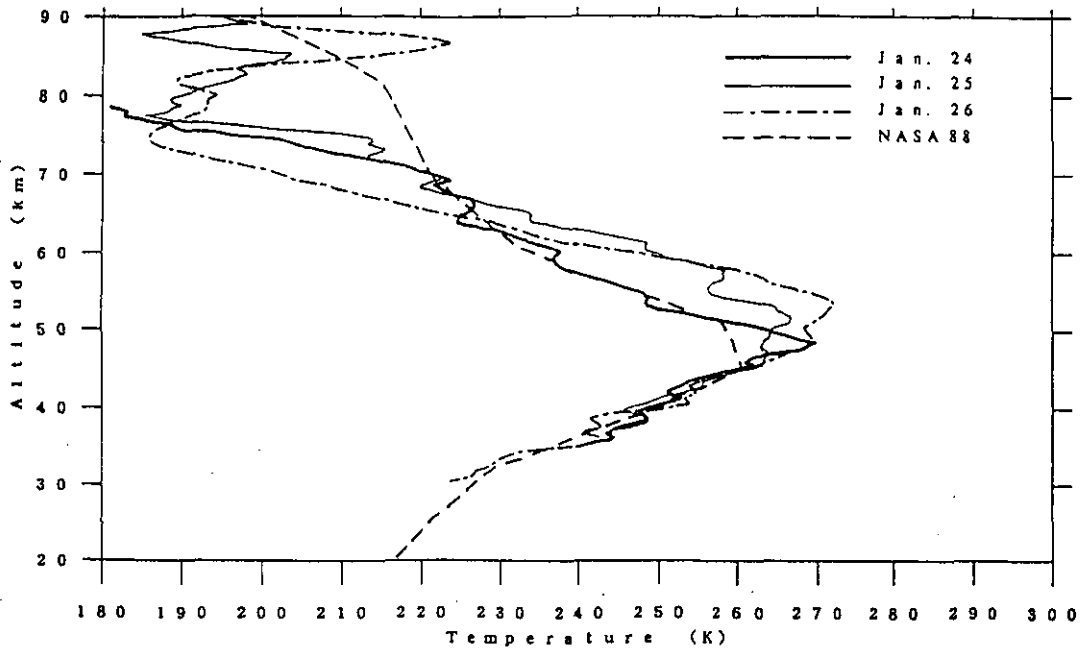


図8 DYANA (中層大気力学ネットワーク) 期間中に現れた気温鉛直分布の変動。

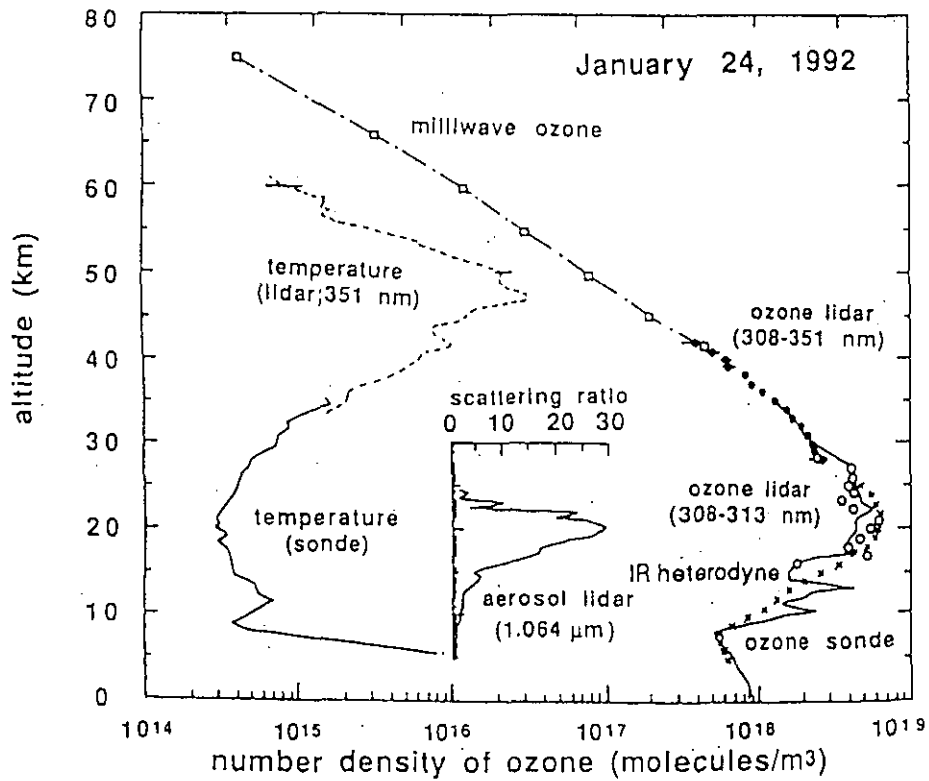


図9 オゾン層集中観測におけるオゾン、気温、エアロゾル高度分布の一例。レーザーレーダー観測は国立環境研究所、赤外ヘテロダイン観測は東北大学理学部、ミリ波分光観測は名古屋大学理学部、オゾンゾンデ観測は国立環境研究所・高層気象台によって行われた。(平成3年度地球環境研究総合推進費報告書より)。

熱帯林の生物学的多様性とその保全

可 知 直 毅 (地球環境研究グループ森林減少・砂漠化研究チーム)

1. 生態学からみた熱帯雨林の減少

1.1 世界の熱帯雨林

熱帯雨林は、地球上で最大のスケールをもつ、最も複雑でかつ最も生物の多様性が高い巨大な生態系である。世界の熱帯の多雨地域の森林に対して、「熱帯雨林 (tropical rain forest, ドイツ語では tropische Regenwald)」という呼び名を与えたのは、19世紀に活躍したドイツの植物地理学者 A.F.W. シンパー (Schimper, 1898) であった。地球上には熱帯雨林がまとまって存在する地域が3つある。すなわち、赤道アフリカ西部、南米アマゾンと中米東部、そして東南アジアである。これらはおおむね南北の回帰線にはさまれた地域に対応し、1年のうち少なくともある期間赤道気団におおわれる。赤道気団とは、赤道付近で地球を取り巻いている西風帯で、湿度が高く雨を降らせやすい。

熱帯地域には、様々な景観の森林がある。マングローブ林や熱帯ヒース林が成立する特殊な立地条件の場所を除けば、熱帯林は気候の乾燥の程度に応じていくつかのタイプ(森林型)に区分される。森林型の分化に関係する要因は、1年間の総降水量ではなくむしろ乾季の長さである(吉良, 1979)。月降水量が100 mm以下の乾季が4~6ヶ月も続く場所では、落葉季節林(雨緑林)がみられるが、赤道に近づくにつれて乾季が短くなり、半常緑季節林や常緑季節林となる。さらに、月降水量が100 mm以下の月が2ヶ月より短くなると熱帯多雨林が出現する。特に、東南アジアのボルネオ、スマトラ、ニューギニアなどの島やマレーシア半島中部以南には、樹木の大きさと生物種の多様性に関して世界で最もよく発達した熱帯多雨林が存在する。

1.2 熱帯林面積の減少傾向

1991年9月にFAOが発表した暫定中間報告によると、世界の熱帯地域87ヶ国の森林面積(閉鎖林と疎林を含む)の合計は、1990年現在1715万 km^2 であり、1981年~1990年の10年間に170万 km^2 減少したと推定されている。これは、毎年九州の約4倍の面積の森林が、あるいは毎秒東京ドームに匹敵する面積の森林が消失してきたことを意味する。この減少率は、FAO/UNEPが1981年に発表した1981~1985年の5年間の推計値の1.5

倍になる。予想をはるかに上回る速度で熱帯林が減少しているのである。

こうした近年の熱帯林の減少は、薪炭材の過剰伐採、過度な焼畑耕作や過放牧、あるいは不適切な商業伐採、大規模な山火事などによっている。これらの直接的な森林減少の原因は、熱帯諸国の急激な人口増加や貧困の問題など社会経済的な要因が複雑に関わっている。

1.3 森林減少と熱帯雨林生態系の細分化

アマゾン地域のランドサットの衛星画像は、1980年代の開発に伴う森林減少の過程をよく表している。これらの画像を見ると、森林面積の減少に伴って広大な面積にわたって一面に広がっていた森林がいくつもの小さな区画に分断されていくことがわかる。この森林生態系の細分化の過程は、森林面積全体の減少量だけから把握できないが、多くの生物が生存している場としての熱帯雨林の生態系の構造と機能に大きな影響を与える。例えば生態系が細分化されると、空間的に不均一に分布している種個体群どうしの交流がとどえてしまい、個々の独立した種個体群が減びてしまう可能性が高まるからである。

1.4 生態学の大難問—熱帯雨林の種多様性

熱帯雨林のスケールの巨大さは、単に高さ方向だけではない。極端なまでに多様な種が生存する生物群集としての熱帯雨林の横の広がり、地球上の他の生態系に比べて桁違いに大きい。例えば、パナマのバロ・コロラド島の熱帯林で得られた幹の直径が20 cm以上の樹木についての種数-面積曲線(調査面積とその面積の中に存在する種数との関係)を調べてみたところ、調査面積を広げれば広げるほど新しい種が出現することがわかった(Hubbell & Foster, 1983)。この調査では最大50 haまで調査面積を広げたがそれでもまだ、生態系を構成するメンバーが全て出つくすことはなかった。温帯林ではせいぜい1 haの面積で出現種数が飽和してしまうことを考えると驚異的な種多様度である。どのようにして熱帯雨林ではこれだけ多種多様な生物が共存しているであろうか。実はその明確な答はまだ得られていない。

2. 地球環境研究推進費による熱帯林研究

上記のような世界的状況を踏まえ、我々は1990年度からマレーシア半島部において熱帯林の生態学的な総合研究を開始した。この研究は、環境庁の地球環境研究総合推進費による研究の一環である。このプロジェクト研究では、(1)熱帯林生態系の環境およ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の3課題が取り上げられ、1991年度から具体的な研究が進行中である。以下、各研究課題の中から演者の専門である植物生態学に関係する研究テーマについてその概略を具体的に紹介する。なお、ここで述べる研究成果のほとんどは学術論文として取りまとめ中であり、未発表データである。

2.1 熱帯林生態系の環境と構造

この課題は農林水産省の森林総合研究所が中心となっ
て行なっているもので、熱帯林に生息する植物、昆虫、
動物の種組成を調査するだけでなく、さらにこれらの生
物群集や生物個体群の時間変動を明らかにすることを目
的にしている。これまでの熱帯における多くの調査研究
は、ある時ある場所において調査対象となる森林生態系
がどのような種類によって構成されているかといういわ
ば静的な記載が中心であった。しかし、熱帯林の保全の
ためにはこれだけでは不十分である。特に、森林生態系
がどのようなプロセスで維持されているのかといった動
的な視点が重要である。

生物が生まれてから死ぬまでの過程を生活史という。
生活史は普通いくつかの段階に分けて記述する。図1は、
樹木の生活史を模式的に表したものである。この生活史

の各段階でどれだけの個体が生き残り、次の段階に進む
のが個々の樹種についてわかれば森林全体の動態を記
述することができる。そのためには、長期間永続的に調
査が可能なある程度の面積の調査区を設定し、各樹種ご
とに個体群統計（各生活史段階の個体数の時間変動）の
データを蓄積しなければならない。

近年、こうした研究の必要性が強く認識されて、アメ
リカ合衆国のスミソニアン研究所が中心となってパナマ
運河にあるバロ・コロラド島、マレーシア半島のパソー
森林保護区に50 haという大面積長期観察プロットが
設置された。さらに、ボルネオ島マレーシアサラワク州
のランビル国立公園、タイ西部のウエイ・カー・ケン野
生生物保護区などでも現在50 haプロットの設置と関
連の調査研究が進行中である。これらの50 haプロ
ットでは直径1 cm以上の樹木を全て標識し、その成長と
生存過程を5年ごとに継続調査することになっている。
しかし、直径が1 cm以下の段階、すなわち種子が散布
されて発芽し芽生えが定着する過程の調査研究は組織的
には行われていない。そこで、森林総合研究所を中心と
する我々の研究グループは、樹木の生活史を全段階を含
んだ樹木の一生を通しての生存と成長の過程を詳しく知
るための調査を開始した。調査対象として、マレーシア
半島部の丘陵地の天然フタバガキ林を選定した。現在マ
レーシア半島部には熱帯雨林を代表する天然の低地フタ
バガキ林はほとんど残されていないが、丘陵地にはまだ
かなりの面積の森林が存在しており、その保全と利用は
現在最も急を要するからである。

さて、森林総合研究所のチームは、クアラルンプルの
北約55 km（北緯3度40分、東経101度50分）に位置す
るセマンコック森林保護区に6 haの調査区を設定した

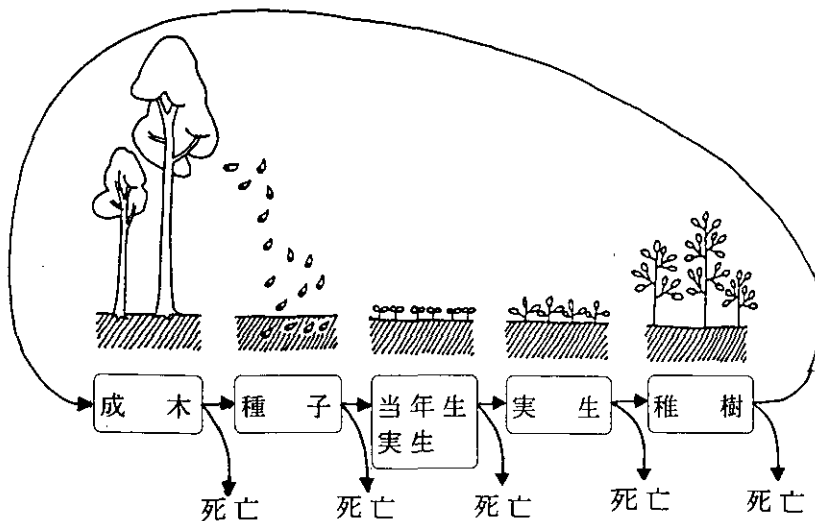


図1 樹木の生活史を示す模式図。

(図2)。標高は400~500 m程度である。まず正確な地形測量を行い、そこに生育する幹直径5 cm以上の全ての木を同定しそれらの胸高直径を測定した。さらに、実生と稚樹の成長と生存過程を追跡するために1 m × 4 mのサブ調査区を設け、高さ2 m以上の個体の胸高直径と2 m以下の個体の樹高を測定した。また調査区

の中心部2 haのコアエリアに100個の種子トラップを設置した。

調査地の地形はかなり急峻で(図3)、尾根、斜面、下部緩斜面にわけられる。優占種はセラヤ(*Shorea curticii*)で、特に尾根部に多かった。林床には大型のヤシ(*Eugeissonia tristis*)が多く、樹冠木の更新を妨げている可能性がある。ヤシを除いた全樹種をまとめた胸高直径の頻度分布は逆J字型で、胸高直径が150 cmを越える個体も出現した。小さいサイズのクラスほど個体数が多いことは、森林の更新が順調に行われる可能性を示している。コアエリア2 ha内には胸高直径5 cm以上の木が1930本、種類数は約300であった。この種類数は同じくマレーシア半島部のパソ-の低地フタバガキ林の2 haプロットで確認された種数(胸高直径10 cm以上で約280種)にはほぼ匹敵する。

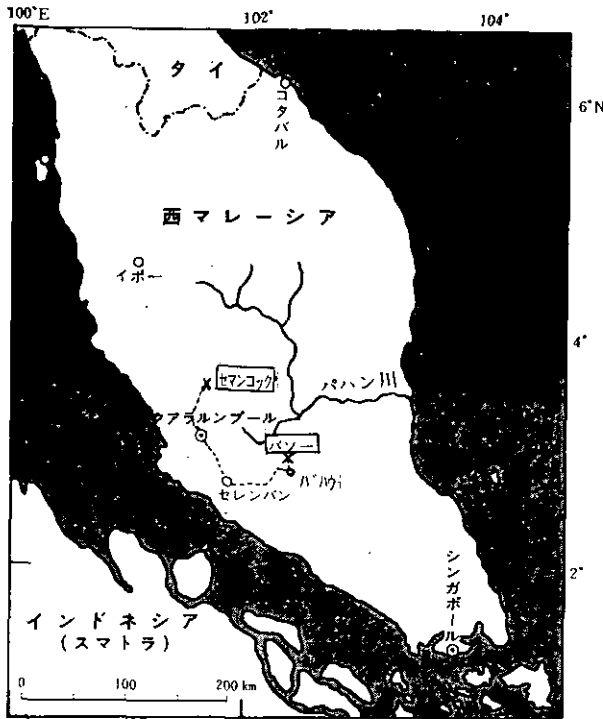


図2 マレーシア半島部の調査地。

2.2 熱帯林生態系の生物学的多様性

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。種多様性の問題は、対象とする生物が多岐にわたり、しかもそれら多岐にわたる生物種間の相互作用を扱わなければならないため、専門分野の異なる研究者が共同するこ

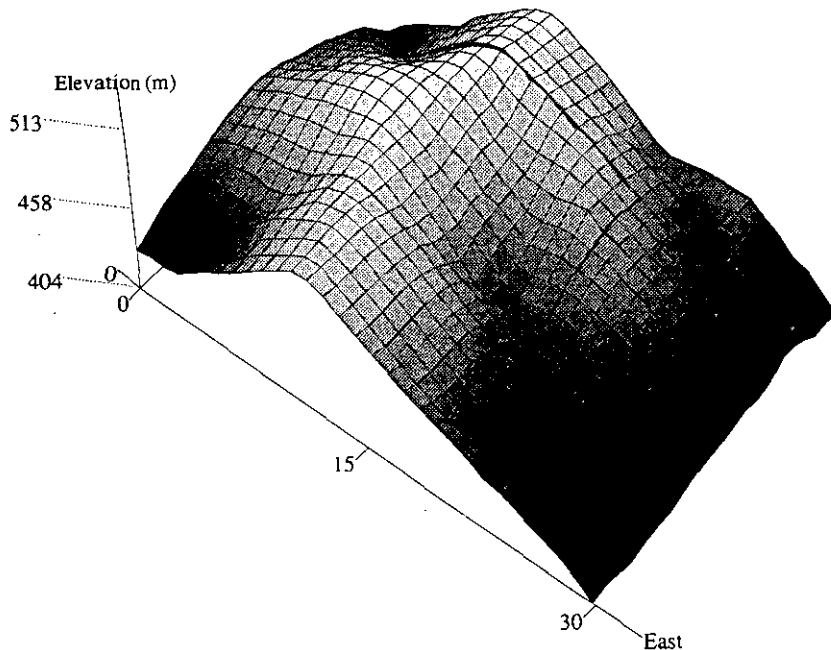


図3 セマンコック6 haプロットの地形。ひとつのグリッドは10 m × 10 m。

とが重要である。そこで、我々は熱帯林の生物学的多様性を様々なアプローチから解析することを目指して、動物生態学、昆虫生態学、植物生態学、生理生態学、微気象生態学などさまざまな専門分野の研究者による共同プロジェクトを推進している。特に、植物を主な研究対象にしたものとして、(a)植物と植食性の脊椎動物や昆虫との相互作用、(b)環境ストレスに対する熱帯林樹種の生理生態的適応、(c)熱帯林生態系におけるフタバガキ科植物の遺伝的多様性をテーマにした研究が行われている。

以下、国立環境研究所が中心になって進めている(a)のテーマについて解説する。なお、(b)のテーマでは、熱帯農業研究センターがフタバガキ科樹種の植物の水分利用に関する生理生態について、また名古屋大学と国立環境研究所はマレーシア農科大学と共同で、果樹を含む様々な生態的特性の樹種の光合成特性やパソー森林保護区内の微環境に関する研究を行っている。(c)のサブテーマは森林総合研究所が分担して行っている研究で、アイソザイム(酵素蛋白)とDNAの分析によって、植物間の系統関係や親子関係などを解析することを目的としたものである。これまでに得られた結果から、フタバガキ科の樹種の種間の遺伝的な差異は、温帯の樹種に比べてずっと小さいことが示唆されている。

2.3 熱帯林における植物と動物との相互作用

2.3.1 熱帯林の種多様性を説明する仮説

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。ひとつは、資源分割説とよばれるもので、住み分け仮説といってもよい。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しているというものである。しかし、これだけ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、多様性が維持されるというものである(Chesson, & Warner, 1981)。これは、前2者の仮説と異なり、森林生態系が非平衡な状態にあることを前提にしている。じつは、これら3つの仮説はどれかひとつが正しいというものではなく、重要なことはどの仮説が熱帯林の種多様性に最も貢献しているかという定量的な見積りである。

さて、上記の仮説のうち、「交互平衡仮説」は、実際のデータによって検証することが可能である。親木の下で子が育たない理由として様々な可能性がある。たとえばその種に特有な病原菌は親木のまわりに多いであろうし、その樹種の実を餌とする動物は親木の周りに集ってくるであろう。そこで、我々はマレーシア森林研究所内の森林保護区とパソー森林保護区において、高木樹種の実生の定着過程の調査を1991年に開始した。ちなみに、パソーは1970年～1974年にかけて国際科学連合(ISCU)の提唱による国際生物学事業計画(IBP)の一環として、大阪市立大学を中心とした日本隊が世界ではじめて熱帯雨林の生物群集の現存量と生産力の精密な測定を行った場所である。

2.3.2 ペロングの芽生えの定着過程

2.3.2.1 パソー 50 ha プロットでのペロングの分布

もし親木の下でその子(稚樹)が育ちにくければ、稚樹の密度は親木の周囲で減少するはずである。マレーシア半島部のパソー森林保護区には、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定した50 haの永久調査区がある。この調査区内の直径1 cm以上の木はすべてその位置と種名が記録されている。そこで、その樹木の戸籍データを利用して解析を試みた。図4は、マレー名でペロングとよばれるウルシ科の高木 *Pentaspadon molleyi* Hk.f. の個体の分布を示したものである。この図から大きな個体の周りには小さな個体が分布していない状態が読み取れる。そこで、直径が40 cm以下の個体と40 cm以上の個体についてその周囲にどれだけの稚樹(直径1～2.5 cm)が存在するかを調べてみた。その結果、直径40 cm以上の個体の周り半径6 m以内には同種の稚樹が存在しないことが分かった。種子は親木の近くほど多量に散布されるであろうから、親木の樹冠の下では発芽後直径が1～2.5 cm程度の稚樹まで成長できずに死亡したものと推定される。

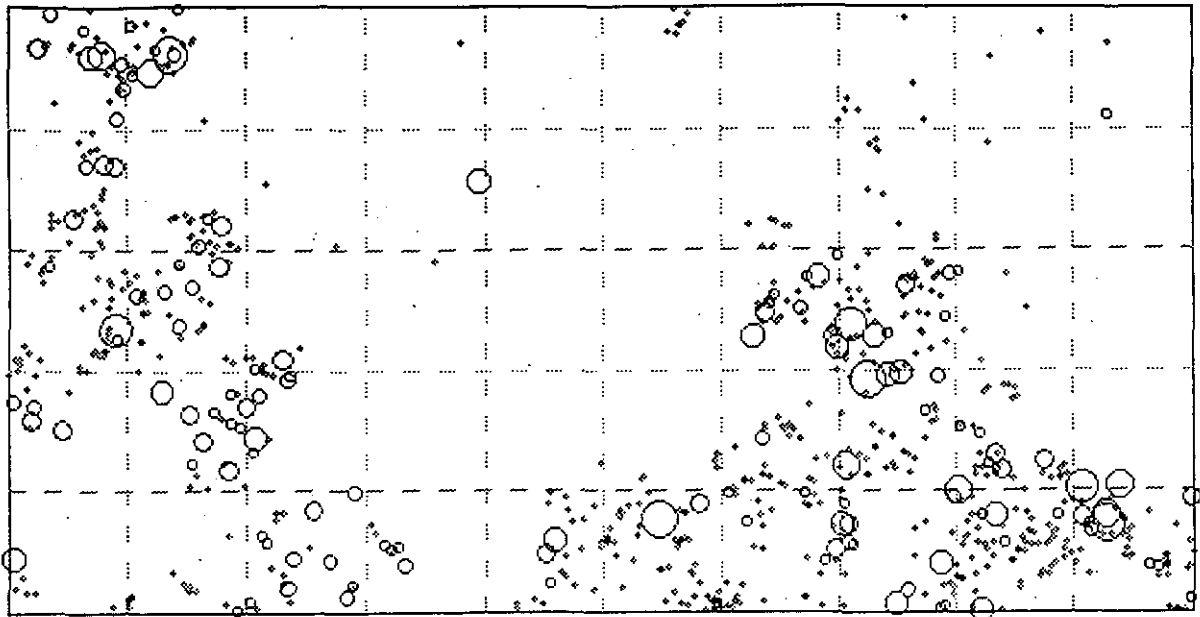


図4 パソー森林保護区 50 ha プロットでの直径 1 cm 以上のペロング (*Pentaspadon motley* Hk.f.) の分布。総個体数は738本。○の大きさは個体サイズに対応する。

2.3.2.2 ペロングの芽生えの生存過程

上記のような状況証拠を得て、我々は同じパソー森林保護区内においてペロングの実生の生存過程の調査を1991年9月から行っている。林内に自生する一年目の実生を鬱閉した林冠下や林冠ギャップ下、被陰ネットをかけた苗床に移植し、その生存と成長過程を1~2ヶ月ごとに測定した。林外に対して積算の受光量が2%弱のプロットでは個体数が10ヶ月の間に半減した。一方、相対受光量が2.3%以上のプロットでは、同期間に死亡した個体数は20%以下であった。主な直接の死亡要因は、菌類などの微生物の感染によるものと推定された。現在、フランスからマレーシア森林研究所へ派遣されている専門家にこの微生物の同定と種特異性の調査を依頼している。

2.3.3 カプールの芽生えの定着過程

2.3.3.1 優占林をつくるフタバガキ科の樹種—カプール

東南アジアの熱帯林を構成する樹種を代表するのはフタバガキ科の植物である。マレー名でカプールとよばれる *Dryobalanops aromatica* Gaertn. f. もフタバガキ科の高木である。カプールは、熱帯低地林の構成樹種としては例外的に優占林を作る。しかし、優占林の自然分布はマレーシア半島部では東海岸の標高の低い所に限られていて、内陸部や西海岸にはないとされている。このように、局所的にカプールが優占する林ができるためには、まず親木の下に稚樹バンク（稚樹の個体群）が形成されるこ

と、さらに親木が枯れて林冠にギャップが形成された時に他の樹種の稚樹よりも早く林冠部に到達できるように早い伸長成長をすることが必要である。したがって、稚樹バンクを構成する個体が、どのように生存し成長するかが、カプール林が維持される上で最も重要なプロセスになる。カプールは、他の大部分のフタバガキ科の樹種とはちがって、なぜ親木が高密度に存在する優占林をつくるのかがわかれば、逆に典型的な熱帯多雨林でなぜ優占種が存在しないかをさぐるためのヒントとなる可能性がある。そこで、我々はカプールの種子が落ちた後の稚樹の定着過程の調査を行った。

2.3.3.2 種子の生存過程と動物による被食

調査地は、クアラルンプールの西隣りケポン (Kepong) という町にあるマレーシア森林研究所内の保護林である (図2)。この林は、1920年代後半に植林された人工林であるが、カプールが優占する林はその第一世代が樹高40 m 以上にまで成長しており熱帯地域での造林が見事に成功している例といってよいであろう。

調査地の林では1991年の3月にカプールの開花が見られ、実が7月~8月にかけて落下した。カプールの実にはゾウムシなどの昆虫による食害を受けることが知られているため、林床に落下してくる実について、昆虫による食害の程度を調査した。まず、林から新鮮な実を採取し、重量を測定後プラスチック容器に入れて室温で37日間保存し、その間の発芽率を調べた。さらに実から出現した昆虫を採集し同定を行った。また、昆虫が出現しな

かった種子のうち、種皮に穴があいていた実も昆虫による被害を受けたものと判定した。それ以外の外見上健全な実を昆虫の食害を受けなかった種子とした。

図5は、実の重さの頻度分布を示したものである。暗い部分が発芽しなかった実、明るい部分が発芽した実を示す。また、上図が昆虫による食害を受けた実、下図が受けなかったと判定した実についてまとめたものである。昆虫の食害を受けた実のほとんどは軽く、またそのほとんどが発芽しなかった。また、見かけ上健全な種子の重量の頻度分布は二山型になり、発芽した実のほとんどは重いグループのものであった。実が落下する段階ですでに9割が発芽能力を失っており、そのうち7割強が昆虫による食害を受けていた。見かけ上健全な実の中にゾウムシなどが入り込んでいる可能性を考えると、実の形成から落下するまでの主な死亡要因は昆虫による食害であると結論できる。そこで、どのような昆虫によって食害を受けたかを調査した。すでに指摘されているように鞘翅目のゾウムシの仲間が最も多く観察された。そのほかに蝶の仲間（鱗翅目）、ハチの仲間（膜翅目）、ハエ

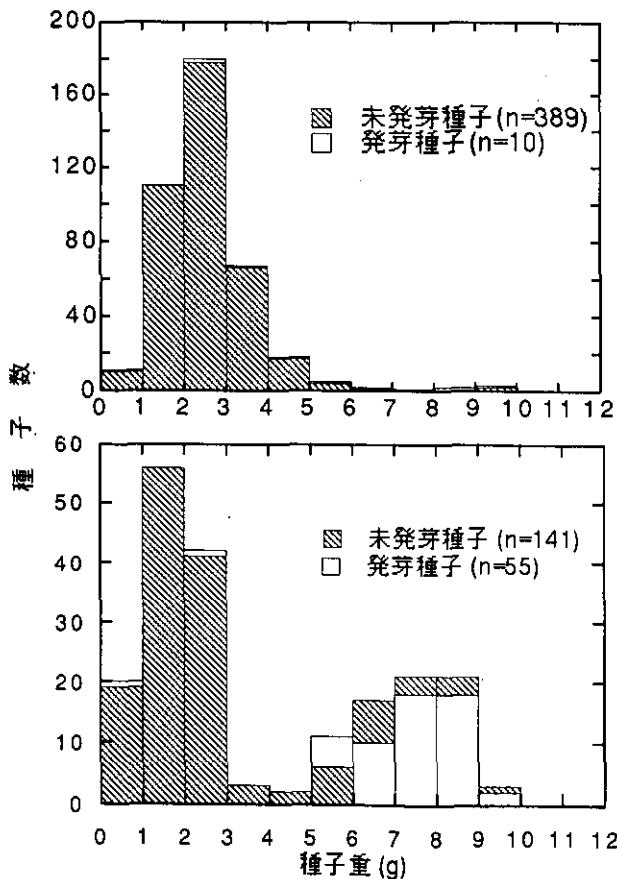


図5 カプル (*Dryobalanops aromatica* Gaertn. f.) 種子の重量の頻度分布。上図は昆虫による被害を受けた種子、下図は見掛け上健全な種子の結果。斜線部分は発芽しなかった種子を示す。

の仲間（双翅目）が採集された。以上は、野生生物研究チームを中心とするグループの研究である。

次に、昆虫の食害をまぬがれ、かつ発芽能力のある実がその後、どのような運命をたどるかを野外の移植実験によって調査した。マレーシア森林研究所内のカプルが優占する林とショレア属 (*Shorea*)、フタバガキ属 (*Dipterocarpus*) などが優占しカプルが存在しない林の両方に1m×1mの調査プロット(方形区)を設けて、発芽可能と思われる大きめの実を播き、その後の生存を追跡した。以後、カプルが優占する林をカプル林、カプルのない林を非カプル林と呼ぶ。

図6に種子の生存曲線を示す。カプル林では2日以内に9割が動物によって食われて消失した。一方、非カプル林のひとつのプロットではほとんど動物に食われることなく発芽した。このように、落ちた実が発芽できるかどうかは、動物による被害の程度に強く依存しており、偶然動物に発見されなければ発芽できる確率が高まる。なお、食痕から判断して主な植食者は齧歯類であると推定した。また、一部は野豚によって食われた可能性もある。

2.3.3.3 子葉～4葉段階の芽生えの生存過程

発芽して子葉段階に達した芽生えの生存過程を調べるため、子葉までポットで栽培した個体をカプルと非カプルの林に移植し、その後の生存を追跡した。得られた生存曲線は片対数グラフでほぼ直線になり、1日あたり約6%ずつ個体数が減少することが示された。この間の主な死亡要因は、種子段階と同様に動物による被害であった。

さらに、本葉が4枚展開した後の生存過程を調査するために、同様な移植実験を試みた。カプルと非カプル

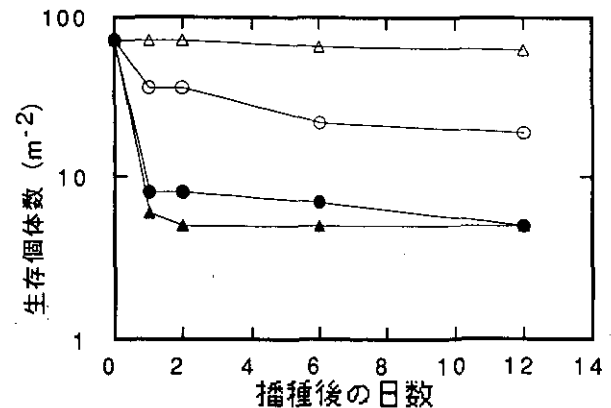


図6 カプル (*Dryobalanops aromatica* Gaertn. f.) 種子の生存曲線。●と▲：カプル林；○と△：非カプル林。

ルの林での結果を平均すると1日当たりの死亡率は1.6%となった。これは、子葉段階の死亡率のおよそ1/4になる。

また、子葉段階では9割が動物による被食によって死亡したが、本葉4枚の段階になるとその割合がしだいに減り、植物体全体がしおれて枯れる割合が増加した具体的な死亡要因としては、光不足や乾燥などのストレスやカビなどの微生物によるものなどが考えられる。

2.3.3.4 6葉段階以後の生存過程

さらに本葉6枚までポットで育てたものを林へ移植して、その生存過程を追跡したところ、動物による被食がほとんど認められず、40個体中3ヶ月間に死んだ個体はわずかに2個体であった。動物の被食がみられなくなった理由として、(1)動物の活動範囲が他の場所に移動した、(2)植物が成長するにつれ、動物にとって魅力的な餌でなくなったという少なくとも二つの可能性がある。今後は特に二番目の可能性を検証していく予定である。

2.4 樹冠生物学とトライアングルタワー

熱帯林研究において最も情報が不足している部分は、実は最も活発な生物活動が営まれている樹冠部である。それは、50 mを越す林冠の高さまでアプローチする方法が限られているためである。授粉生態学、開花、結実、展葉の様式と動物との相互作用、樹冠部の葉層の生理活性など樹冠部を対象にした多くの研究テーマが考えられるが、いずれもある程度の広がりを持った樹冠に恒常的にアクセスすることが要求される。そこで、考案されたのが、3本のタワーを正三角形の形に建てその間を渡り



図7 パソー森林保護区に建った樹冠生物学研究のための樹冠歩道とトライアングルタワー(撮影:藤間 剛)

廊下(樹冠歩道)でつないだ構造のトライアングルタワーである。1992年3月にこのタワーがパソー森林保護区に建てられ、森林内の微気象測定や、林冠木のフェノロジー、動物の行動観察、樹冠の生理生態学的特性の測定などのために活用されている(図7)。