

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。

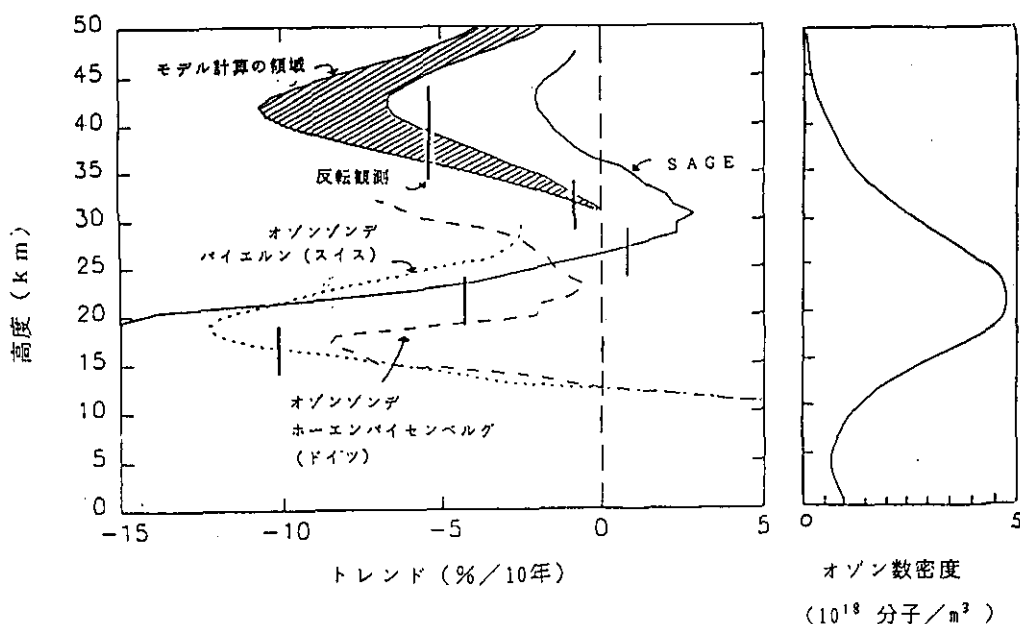


図1 オゾン高度分布のトレンド (1991年科学パネル報告より作成)。

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

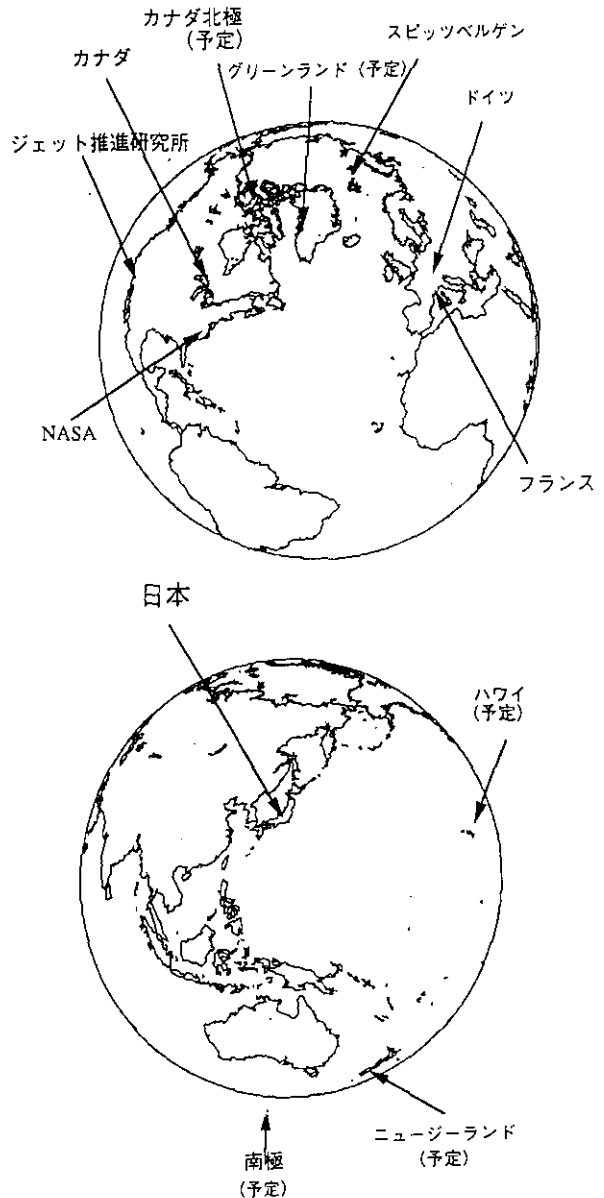


図2 NDSCステーションの位置。北極の3ステーション、ヨーロッパアルプス、ハワイマウナロア、ニュージーランド、南極の各ステーションがNDSCの主要ステーションとして選定されたもの。他は二次（補助）ステーションとなることが予定されている地点。

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; レーザーライダーの別称

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、レーザーライ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ライダー

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、レーザーライダーもそのひとつである。図3にオゾンレーザーライダーの原理を示す。

本研究所のオゾンレーザーライダーは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ライ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、

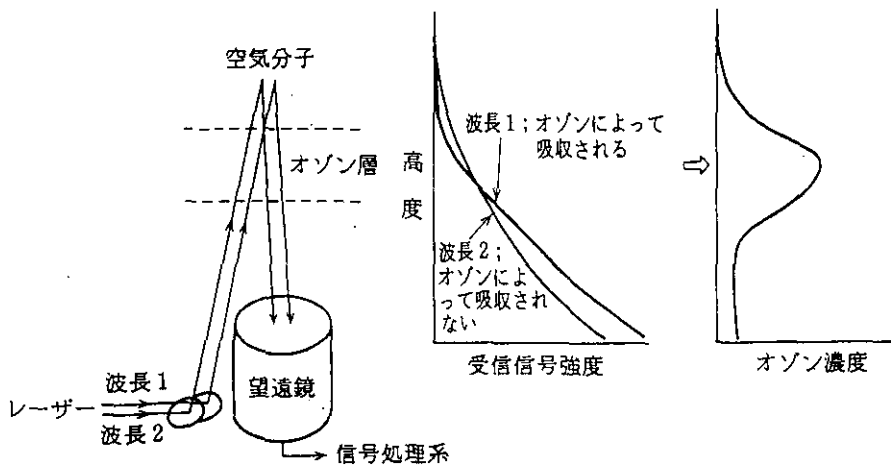


図3 オゾンレーザーレーダーの原理図。

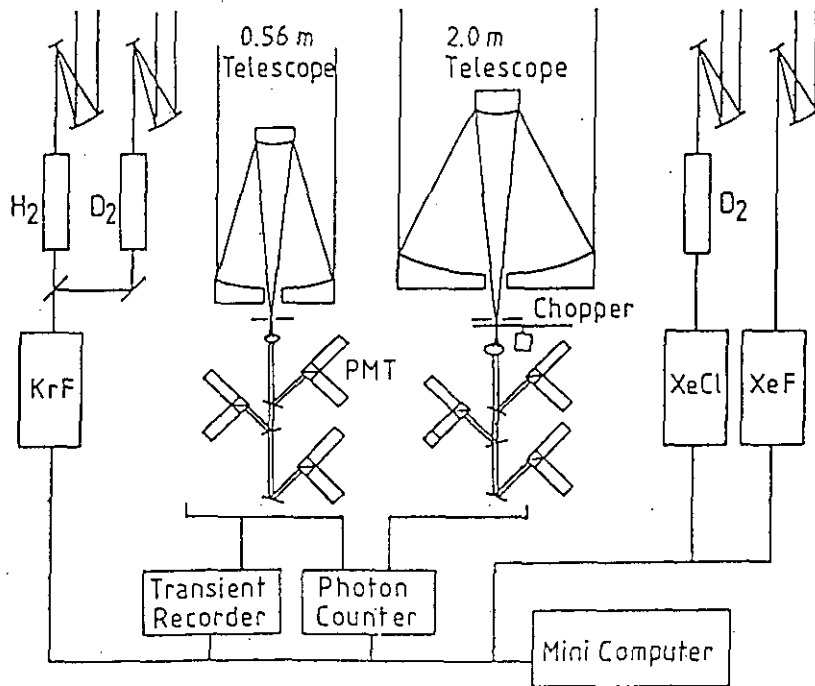


図4 国立環境研究所オゾンレーザーレーダーシステムのブロック図。

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。

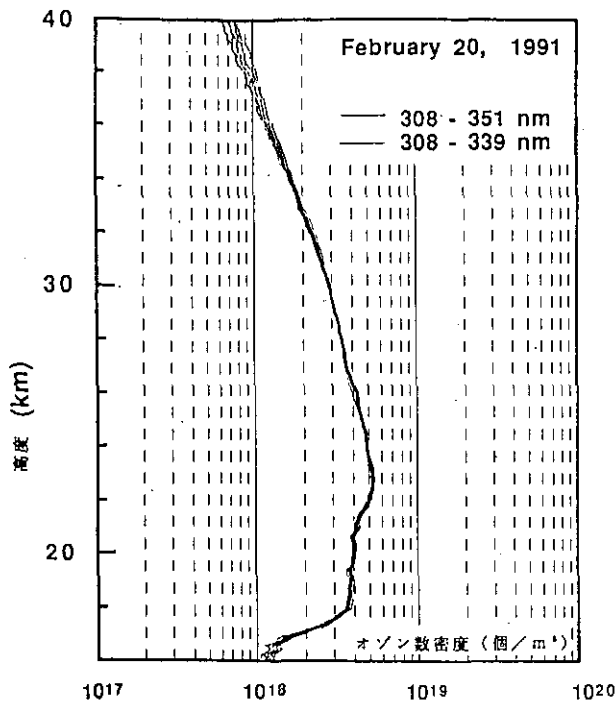


図5 308 nm - 351 nm, 及び 308 nm - 339 nm の2波長組の信号から得られたオゾン高度分布。両側の実線は誤差(標準偏差)を示す。

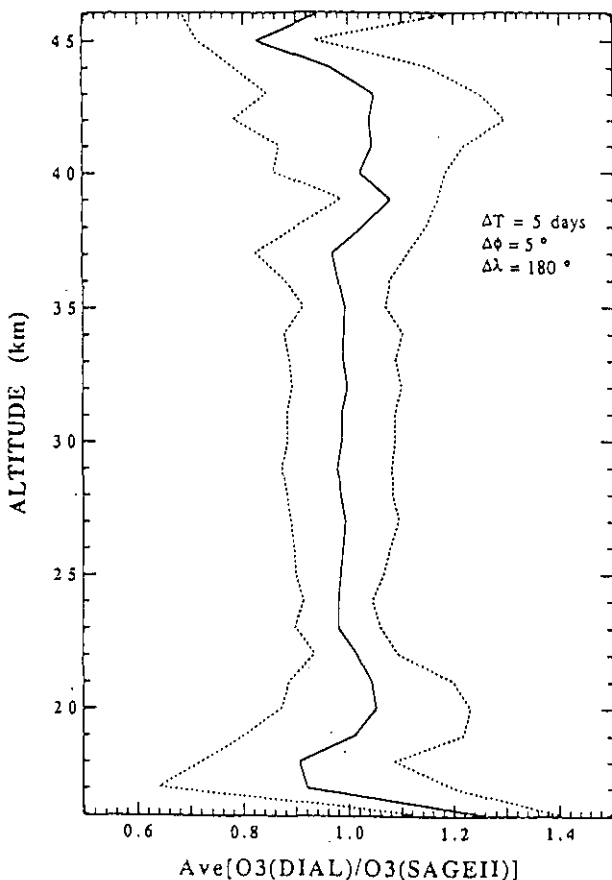


図6 SAGEII とオゾンレーザーレーダーのオゾン高度分布の比較。観測時間差5日以内、観測緯度5度以内の場合について両者の比をとり、平均した。

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、

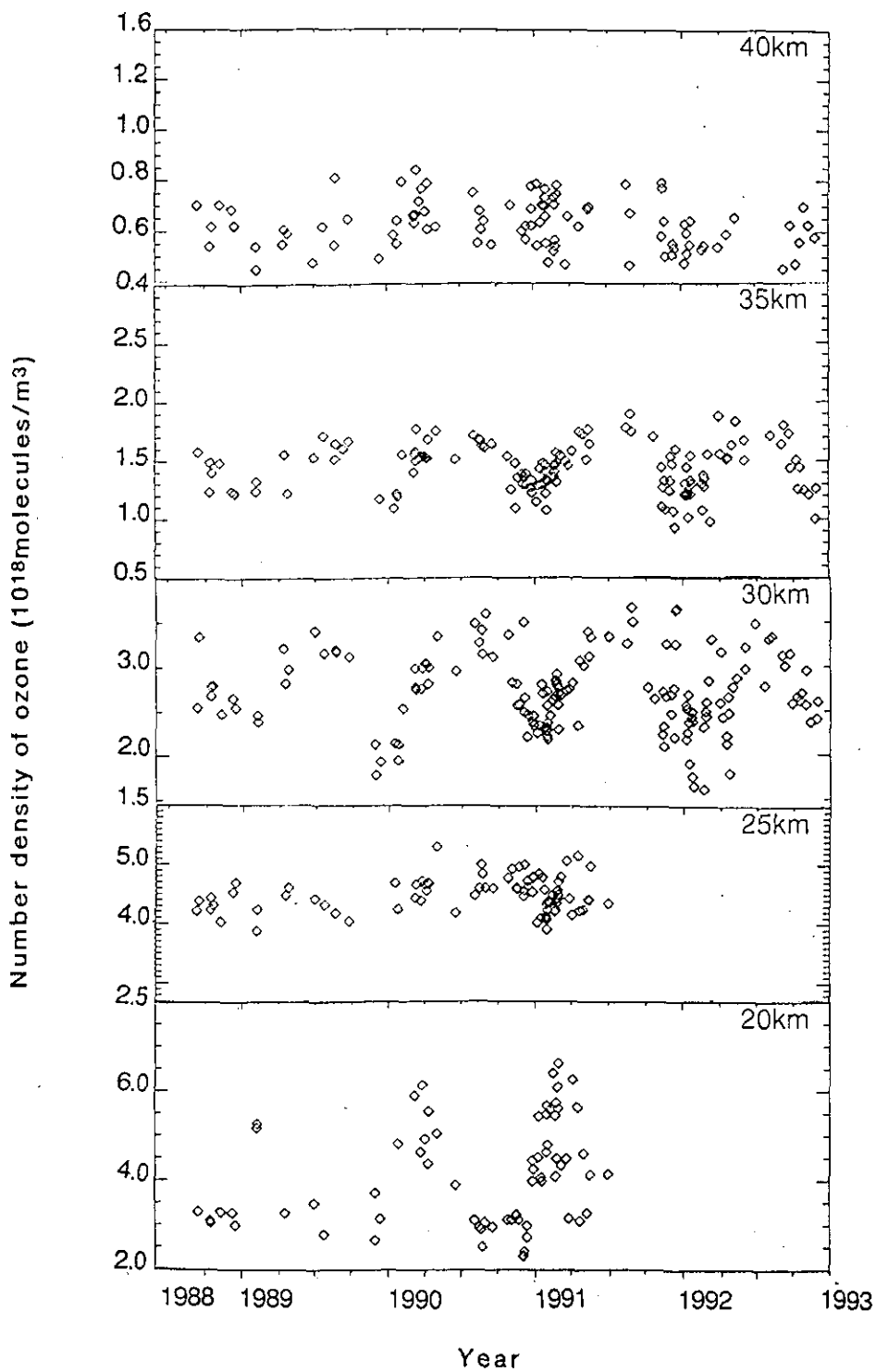


図7 国立環境研究所オゾンレーザーレーダーによって観測された高度別のオゾン変動。高度20 km, 25 kmでは1991年7月以降はピナツボ火山起源成層圏エアロゾルの影響を補正する必要があるため、データを省いた。

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

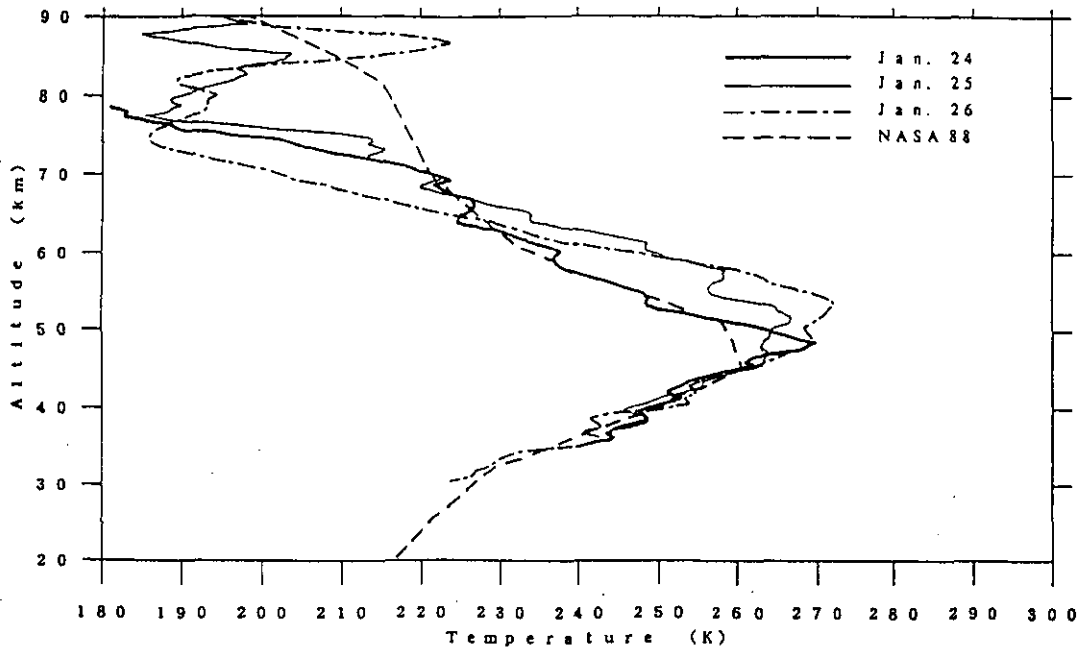


図8 DYANA (中層大気力学ネットワーク) 期間中に現れた気温鉛直分布の変動。

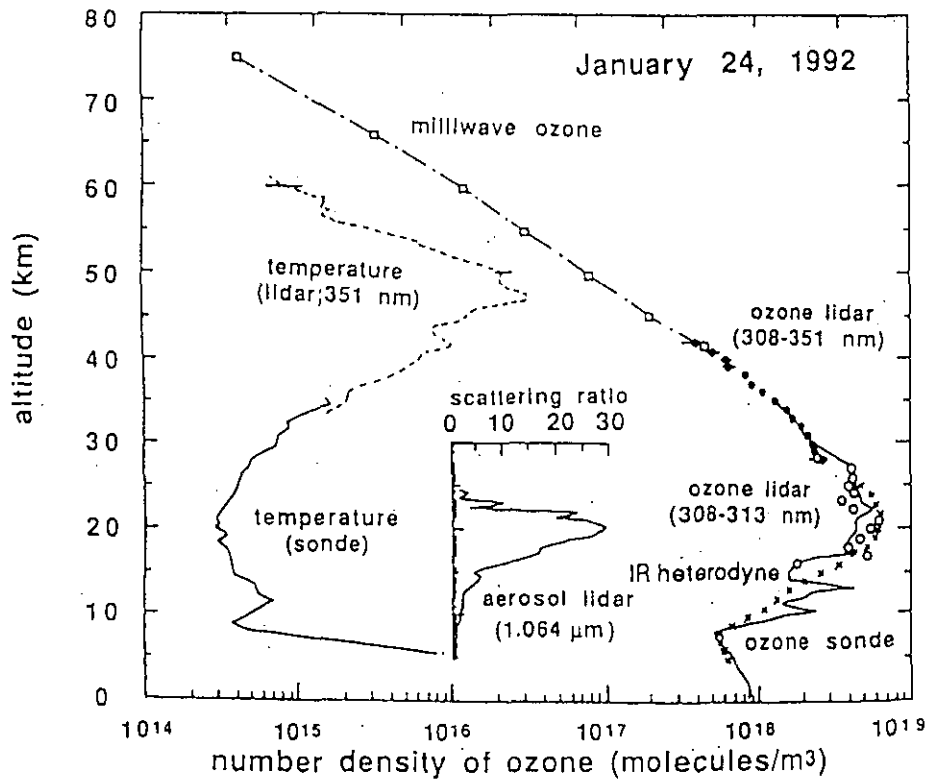


図9 オゾン層集中観測におけるオゾン、気温、エアロゾル高度分布の一例。レーザーレーダー観測は国立環境研究所、赤外ヘテロダイン観測は東北大学理学部、ミリ波分光観測は名古屋大学理学部、オゾンゾンデ観測は国立環境研究所・高層気象台によって行われた。(平成3年度地球環境研究総合推進費報告書より)。

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っ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

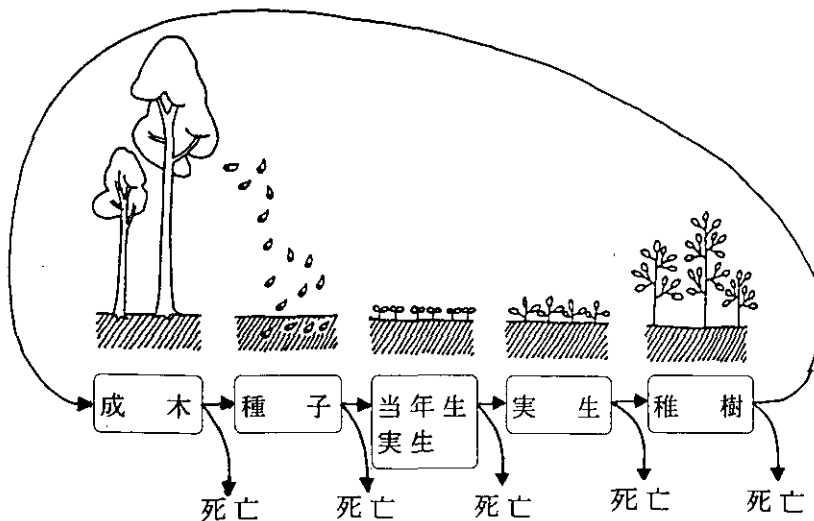


図1 樹木の生活史を示す模式図。

(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

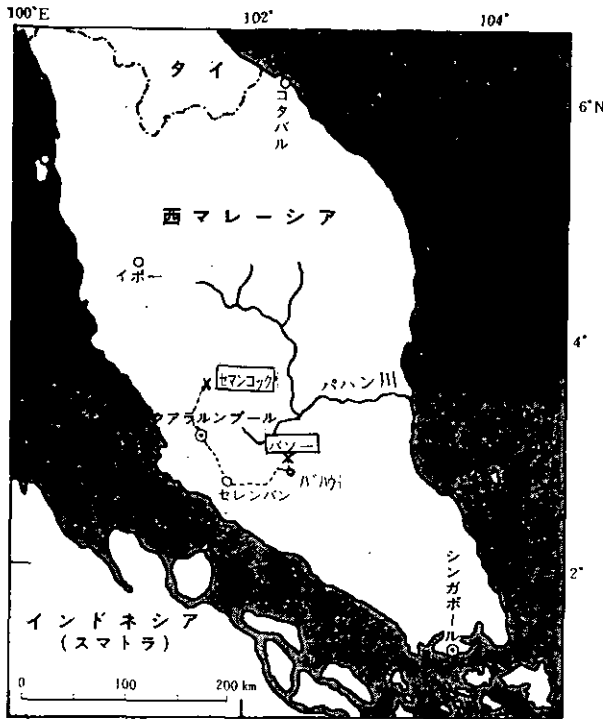


図2 マレーシア半島部の調査地。

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。

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

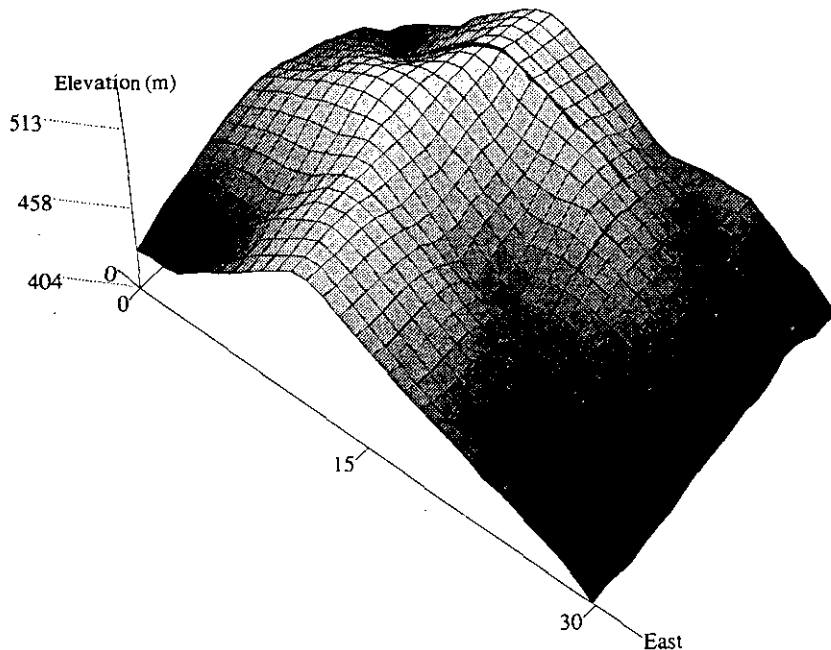


図3 セマンコック6 haプロットの地形。ひとつのグリッドは10 m × 10 m。

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 ベロングの芽生えの定着過程

2.3.2.1 パソー 50 ha プロットでのベロングの分布

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、マレー名でベ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。

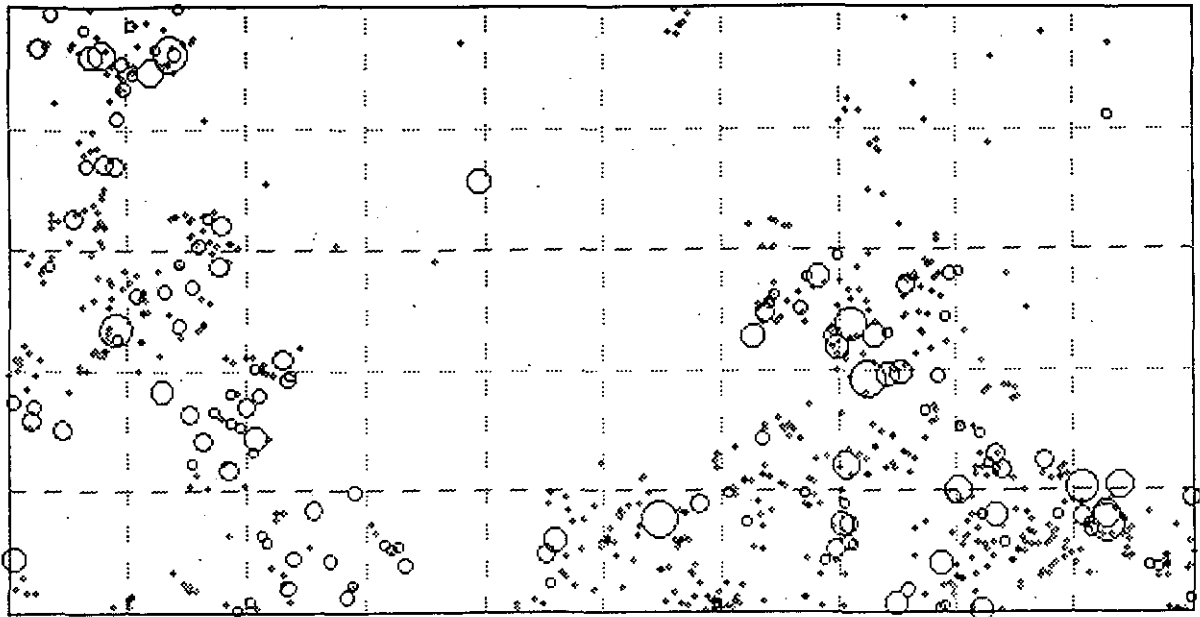


図4 パソー森林保護区 50 ha プロットでの直径 1 cm 以上のペロング (*Pentaspadon motley* Hk.f.) の分布。総個体数は738本。○の大きさは個体サイズに対応する。

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

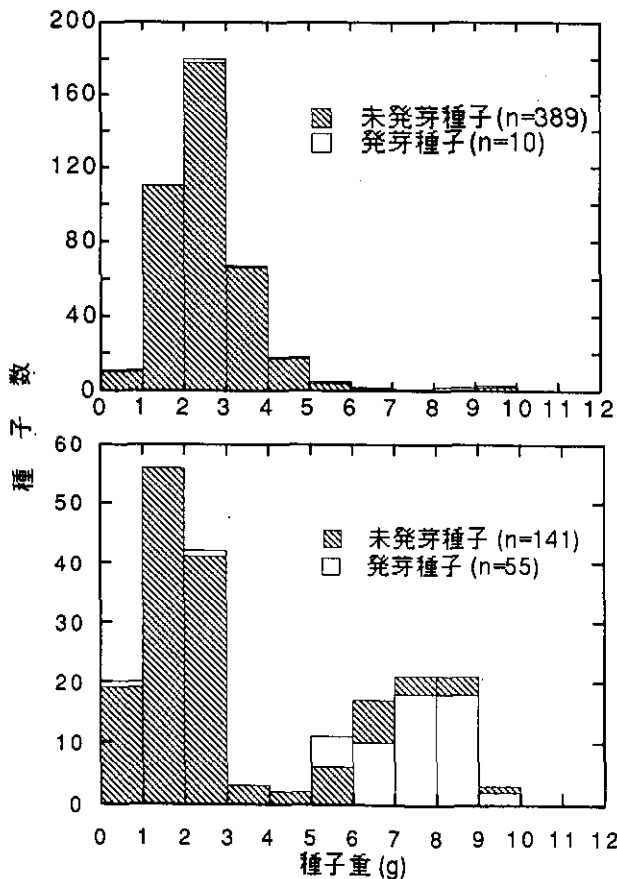


図5 カプル (*Dryobalanops aromatica* Gaertn. f.) 種子の重量の頻度分布。上図は昆虫による被害を受けた種子、下図は見掛け上健全な種子の結果。斜線部分は発芽しなかった種子を示す。

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

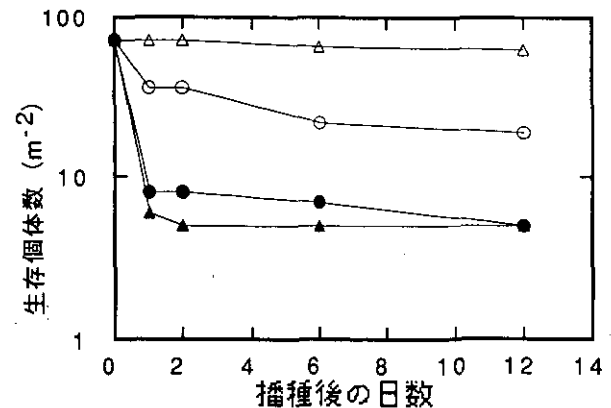


図6 カプル (*Dryobalanops aromatica* Gaertn. f.) 種子の生存曲線。●と▲：カプル林；○と△：非カプル林。

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)。

特 別 研 究

高度な浄化槽による水環境の改善

稲 森 悠 平

(地域環境研究グループ水改善手法研究チーム)

1. はじめに

生活雑排水とは、各家庭の生活活動に伴って排出されるし尿や厨房、風呂、洗濯等の生活排水のうち、し尿にかかる排水を除いたものをいう。し尿は法的な規制により処理の義務づけがなされているが、生活雑排水は下水道及び合併処理浄化槽の設置されていないところでは、未処理のまま公共用水域に垂れ流され水質汚濁の大きな原因となっている。東京湾に対する汚濁負荷を見ると60%程度が生活排水に起因しているとされており、他の水域においても概ね同様な傾向にある。この生活排水対策を考える上では、BODやCODの主成分である有機物質やSSなどの一次汚濁物質に加え、二次汚濁を引き起こす窒素、リンなどの栄養塩類の削減を前向きに取り込んでいくことを考慮に入れる必要がある。現在普及している市販の合併処理浄化槽は、有機物除去能はあっても窒素、リンの除去能がほとんどないものが多い。それ故、湖沼、内湾、上水源等の水質保全・改善対策を図るためには、生活雑排水とし尿を併せて処理する高度な合併処理浄化槽の開発・普及が必須である。

本研究は特別研究「有用微生物を活用した小規模排水処理技術の開発と高度化に関する研究」と題し、上記の点に鑑み、水域の富栄養化を防止し水辺環境を保全・改善するために、生活排水中の栄養塩類の中でも窒素を効率的に除去可能な高度な合併処理浄化槽の開発研究を主として行い、いくつかの成果を得た。ここでは高度な合併処理浄化槽の普及の必要性を述べた上で、高度な性能を得るに必要な操作条件と処理特性との関係について得られた知見を述べることにする。

2. 高度浄化槽の普及の必要性

生活排水対策の基本は下水道整備であるが、わが国における下水道普及率は低く平成3年度末で45%で、毎年の伸びも1%前後である。また、合併処理浄化槽の普及率も平成3年度末で浄化槽全体の4%前後でしかない。それ故、生活雑排水を垂れ流している人口は全人口の50%近くあると推算され、またトイレの水洗化を必要としている人口は概ね30%程度である。この50%と30%の差の約20%は、し尿のみを処理し生活雑排水を垂れ流す、現在大きな問題となっている既設の単独処理浄化槽の割

合である。なお、トイレの水洗化はその快適性からして国民全体が強く要望していることであるから、下水道の普及を待たずに人口規模の小さい市町村ではますます浄化槽への志向は強まると思われる。そこで図1に示す各種生活排水対策の中で合併処理浄化槽の位置づけは極めて大きい。このような背景から合併処理浄化槽の普及は今後ますます広がっていく方向にあるといえる。しかし、これからの水辺環境の保全・改善を推進する上では、少なくとも窒素までは効率的に除去可能な技術を導入した高度な小規模合併処理浄化槽の開発・普及が必須になるものと考えられる。また、この場合、同時に既設の単独処理浄化槽についても高度な合併処理浄化槽への改善を行うことが重要である。それは、現在、水洗化する前のし尿はし尿処理場で効率的に窒素、リンが除去されているのに対して、水洗化と同時にBOD除去機能のみを有する合併処理浄化槽が設置されると窒素等の垂れ流しがスタートするというゆゆしき状況が発生すること、水域の窒素濃度が確実に増加傾向にあること、窒素とリンのバランスが崩れて生態系に異常が生じる方向にあること、窒素等を効果的に削減すれば、処理水の放流先の湖沼、内湾等で藻類の異常増殖による有機化合物の内部生産を抑制できるだけでなく、有毒成分を含有する藍藻類等の増殖を防止し水界生態系の安定維持が可能となること、また浄水場におけるろ過障害、水産被害、景観の悪化、悪臭などの発生抑制につながることになるからである。なお、行政的なフォローとしても平成2年9月水質汚濁防止法の改正による生活排水対策重点地域による生活排水対策推進計画、平成4年4月から実施された湖沼法第2次計画による湖沼流域における窒素、リン規制の

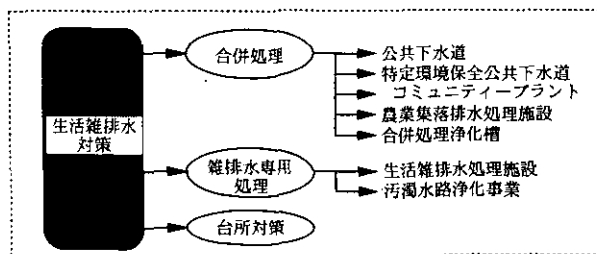


図1 生活雑排水対策の種類

強化，平成4年9月中公審に諮問されている海域への窒素，リン対策の強化，また建設省での浄化槽の構造基準の改正での小規模まで窒素除去性能を満足する方式を組み込む審議を行っていること等があげられ，公共用水域に対する規制は従来のBOD，CODに加えて，窒素，リンに大きな比重がかかるようになってきている。このような観点から，これからは中・大規模にとどまらず，小規模の排水処理施設においても窒素等の除去可能な高度な合併処理浄化槽の普及促進の義務づけが必要である。特に小規模の個別家庭に設置する合併処理浄化槽は，下水道のように多くの家庭の生活排水を管路で収集して1ヶ所で処理するのではなく，面整備の中で点的に設置されいったん設置されると改造は困難であることから，最初から高度な合併処理浄化槽を設置する必要がある。

3. 窒素の除去能の効率化

窒素の除去技術としての生物学的硝化・脱窒法は，従来大規模な処理施設に適用されてきた。本法は物理化学的方法に比べて省エネ的であり，有用微生物としての硝化細菌と脱窒細菌の代謝反応を利用することを特徴としている。このような原理は従来小規模の合併処理浄化槽には効率的に適用されていなかったことから，効率化を目指した検討を進めた。その結果，合併処理浄化槽の代表的な処理法である嫌気ろ床接触ばっ気法に循環を組み込むことで，高度な水質が得られるという新たな技術を確立した。このような処理の効率化に関する結果は図2及び図3に示すとおりである。すなわち，循環により一度硝化した硝酸性窒素が嫌気槽で脱窒され，その脱窒が進み硝化で消費されたアルカリ度が好気槽に補給されることで好気槽のpHが中性化し，より硝化細菌の活性が高まることと，循環水の希釈効果と循環水量の増加分による生物膜と基質の接触頻度の増大によって硝化率が向上し，生物学的硝化・脱窒が円滑に進行することを明らかにすることができた。また，生物学的な硝化・脱窒の効率化を図る上では流量が一定していることが重要と考えられることから，嫌気ろ床・セラミック付着生物膜の定期逆洗をタイマーで自動制御する方式についての検討も加え，処理の安定化を図る上で流量の均一化と自動化が重要であることを明らかにすることができた。

4. 微生物の凝集能の効率化

生物処理の大きな目標であるSSが少なく透明度の高い処理水を得るには，生物膜の凝集性を高める必要がある。生物膜中の処理に携わる生物量を大量に確保，保持するためにも生物膜の凝集性は極めて重要である。生物

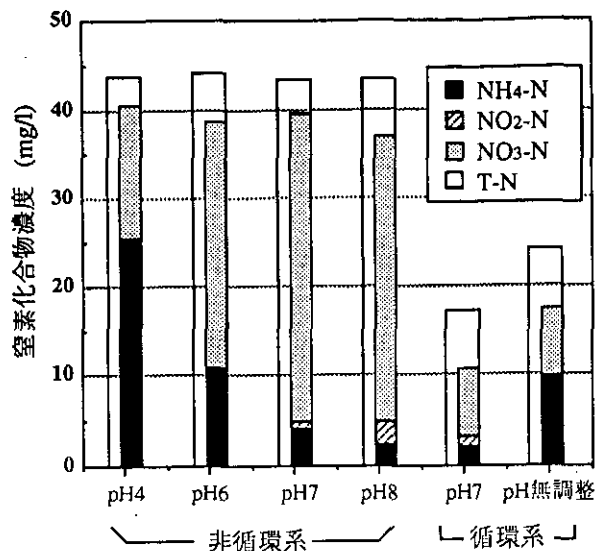


図2 処理水中の形態別窒素化合物濃度と循環およびpHとの関係

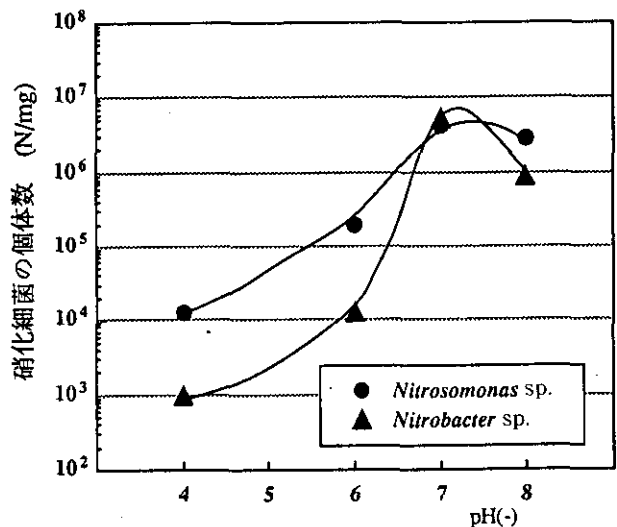


図3 生物膜中の硝化細菌の個体数とpHとの関係

膜の凝集性については嫌気・好気法で処理水を循環する場合，しない場合でpHをコントロールして生物凝集性を見た結果，pHが中性付近に維持されていた場合の方が硝化細菌等が凝集した状態で増殖し，大きなフロックが形成されること，更に循環を組み込んだ場合において，より大きなフロックが形成されることが明らかとなった。特に循環系においては，中性付近に保たれた系で硝化効率が高く維持される結果が得られていることから，循環を設置することはpHを中性化し微生物の活性を高めると同時に，微生物の凝集性を高めるための有効な手法であるといえる。低いpHでは処理性能は低下し，pH4ではフロックとして捉えきれない浮遊物質により懸濁，透視度の悪化があった。すなわち，図4に示すよ

うに pH を中性付近に維持することが微生物の凝集能を高める上で効率的なこと、そのためには循環が極めて有効であることを明らかにすることができた。

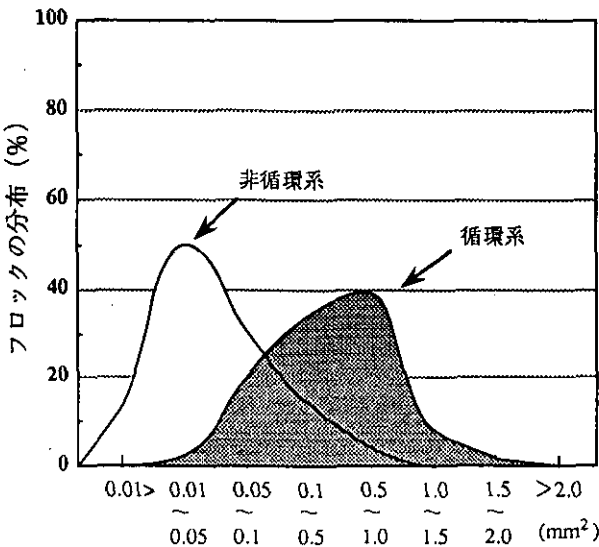


図4 接触ばっ気槽内のフロクの大きさの分布

5. 障害生物の異常増殖の抑制化

小規模合併処理浄化槽で重要な位置付けにある生物膜法は、細菌をはじめ糸状微生物、原生動物、微小後生動物などの多種の生物群から構成されている。これらの生物の中でも汚泥発生量の減量化には微小動物が大きく関与しており、微小動物の存在により高次の食物連鎖が形成され、呼吸によるエネルギー消費量が増大するので汚泥発生量の減少につながる事が明らかにされている。しかし、生物膜法において甲殻類（ミズムシ）、巻貝類、

枝角類（ミジンコ）などの無脊椎動物が異常増殖して、発生汚泥量は減少するが水質浄化能が低下する 경우가多く観察され、その対策が重要と考えられてきた。無脊椎動物が異常増殖するとその現存量は60・70%以上にも達し、被食者と捕食者の現存量は逆転して逆ピラミッド型となり、BOD 源を除去する細菌類は捕食され減少するために処理水質の低下が起こる。このような現象はたとえ汚泥の減量化が行われたとしても望ましくない。そうした中で、嫌気好気生物膜法を用いた処理法では循環を組み込むことで、無脊椎動物は常時嫌気ろ床に返送され、その個体数を抑制することができると同時に、pH の中性化で微生物の凝集能が高まるため無脊椎動物の存在化でも処理障害が起こらなくなる事、すなわち循環を組み込んだ条件下であるならば、無脊椎動物が存在してもバイオマスを系内に安定保持し、有機物除去及び硝化・脱窒を効率的に図れることを明らかにすることができた（図5）。

6. 有用微生物の大量定着化

小規模合併処理浄化槽で処理の高度化を図る上では有用微生物を定着化させることが必須である。有用微生物としては硝化菌、脱窒菌等の細菌類も重要であるが、それと同時に汚泥の減量化、圧密化、透明化を図る上では、原生動物や袋形動物（輪虫類 *Philodina erythrophthalma* など）、環形動物（貧毛類 *Aeolosoma hemprichi* など）などの微小動物を生物処理反応槽中に、安定かつ大量定着化させることが必要である。生物膜処理施設に輪虫類等の過摂食者と、貧毛類等の凝集体摂食者を共存させることで浄化効率が高まり有機物を完全酸化に近づけられ

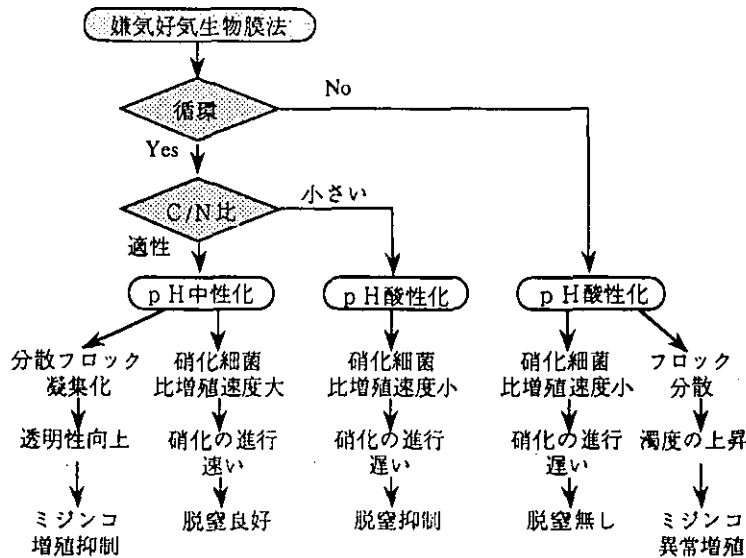


図5 嫌気好気生物膜循環法における浄化能に及ぼす循環およびC/N比との関係

ること、すなわち汚泥の減量化が可能となることを明らかにすることができた。すなわち、食物連鎖高次レベルの生物が数多く出現し、生態系の中での食物環が複雑になればなるほど系内の生物相互の関係が安定化することから考えると、*P.erythrophthalma* 及び *A.hemprichi* といった有用な微小後生動物を積極的に接種し定着化させることは、生態系をより高い食物連鎖に安定化させ生物処理の効率を高める上で極めて重要であることが明らかとなった。また大量に定着化させる上で洗米排液中の油脂分画部に存在する成分が増殖因子として効果的であることが明らかとなった(図6, 図7)。

なお、以上本研究で得られた成果をまとめると表1に示すとおりである。

7. 研究開発の課題と展望

水環境の改善を目指した技術開発を行う場合のあり方は図8に示すとおりである。今後は小規模合併処理浄化

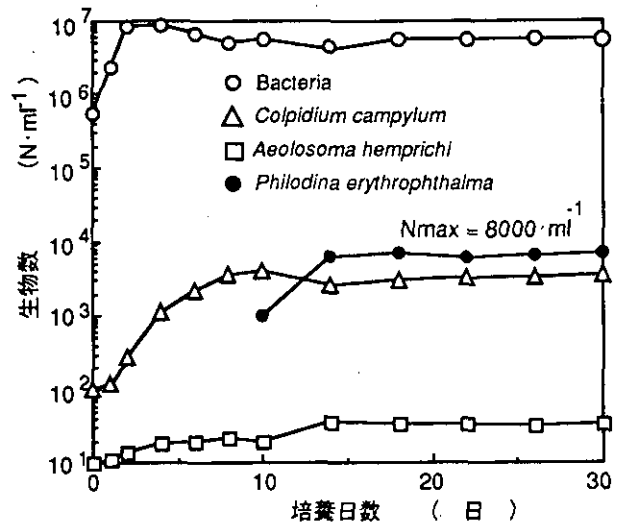


図6 混合微生物生態系に *P. erythrophthalma* (1,000 N · ml⁻¹) を接種した場合の挙動

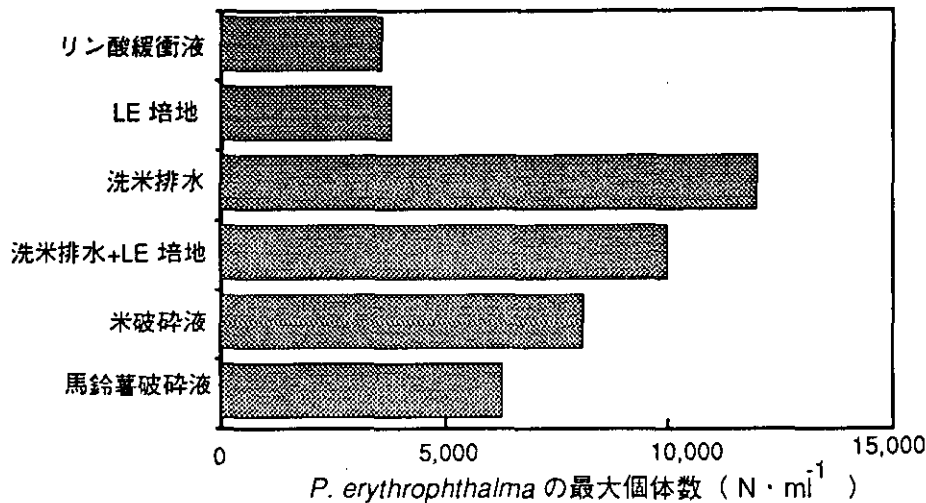


図7 培養基質による *P. erythrophthalma* の最大個体数への影響

表1 生物処理プロセスにおける嫌気好気条件を組み込んだ循環およびサイクリック運転の重要性とその効果

- 富栄養化原因成分の窒素を高度、効率的に除去できる。
- 脱窒反応におけるアルカリ度の補給で、硝化反応における pH の酸性化を抑制し pH の中性化を図ることで、微生物の凝集能力の向上、維持により固液分離が適切に行われ、処理水の透明化が可能となる。
- 接触ばっ気槽における剥離汚泥を嫌気ろ床に常時循環することにより反応槽内の透明化が促進され、ピーク時においても汚泥流出を抑制できるので、処理水の透明化と安定した効率的な処理性能を維持することができる。
- ミジンコ、ミズムシ、巻貝類の大型無脊椎動物、バルキング形成糸状微生物等の障害微生物の異常増殖の抑制が可能で、良好な水質を得ることができる。
- 嫌気・好気循環法においては、循環による流入原水の希釈効果、脱窒効果、微生物群との接触頻度の向上効果等により硝化活性、硝化効率が高まり、生物学的硝化脱窒の高度化が可能となる。

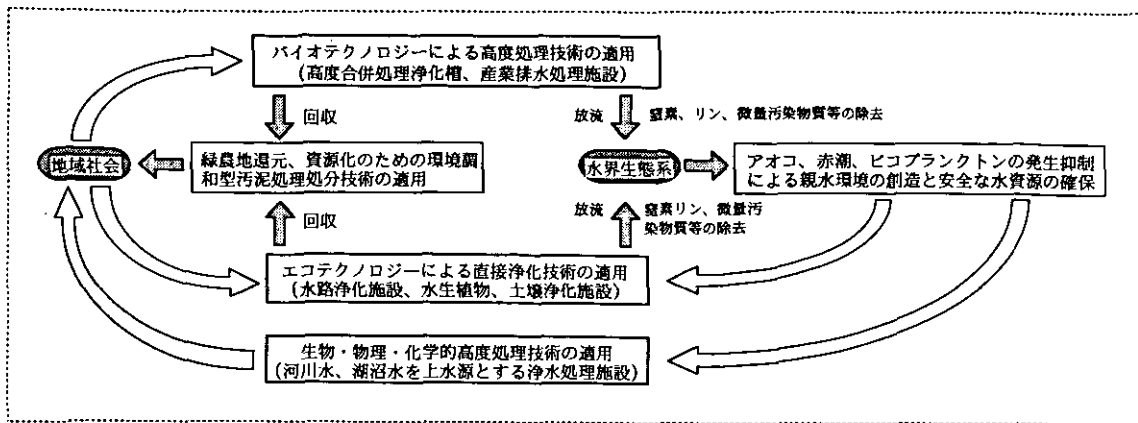


図8 水環境の改善を目指した処理技術開発のあり方

槽の開発研究を行うに当たっては、地球規模で環境をとらえ地球環境の保全・改善を目的とした環境に優しい技術開発を行うべきである。地球環境サミットにおいて地球温暖化防止計画が策定されたことから21世紀を考えた場合、汚水・廃棄物処理処分システムの各過程において高度な処理水質を得ることはもちろんのこと、温室効果ガス排出抑制とエネルギー資源の回収の観点から処理プロセスの構築を考えるべきであると思われる。このような対応を図る上で極めて重要なことは基準が有るか無いかであり、環境保全を考えた厳しい基準は必須であり、例えば個別にとりつける浄化槽であっても窒素等の除去できる高度な合併処理浄化槽の設置は国民一人一人の義務であると、法的に規制するなどの措置は早急に移行していく必要があると考えられる。また、これからの技術開発を行う上では維持管理の容易性は極めて重要であり、可能な限り自動化することが必要である。個別の家庭にとりつける合併処理浄化槽規模においても流量調整が可能で栄養塩類が除去でき、全自動でメンテナンスフリーであり、消費電力量も著しく小さくなることを目指した技術開発と普及が極めて重要になると考えられる。なお、大分県直川村、茨城県生活排水対策重点地域指定の土浦市及びつくば市では、流量調整機能を有していること、嫌気槽と好気槽が組み合わせてあり、かつ循環装置が付加されていること、好気槽から嫌気槽への循環水量を設定できる構造になっている高度合併処理浄化槽を原則とした、当研究所で得られた成果に基づいた考え方を取り入れた対策が実行され始め、かつ他の市町村へも

ますます拡大しつつある。このような方式が全国的に普及することにより水環境の改善は飛躍的に推進するものと考えられる。

8. おわりに

水環境の改善を目指す上では、限られた水資源を最大限に有効利用して豊かな親水空間を創出して、多重利用が可能な水の利用及び再生のシステムを確立していく必要があるが、その中で浄化槽のような発生源に近接した小規模処理システムが果たす役割をもっと重視する必要があると考えられる。その際、生活排水中から窒素、リンの削減を図る場合、いかなる対策を推進させるのが最も効率的であるのかについて地域、流域ごとに把握、検討し、社会システムの中で適切に対策が機能できるように評価手法の確立を早急に行うことが重要である。

水域の水辺環境の改善を押し進めていく上では、現状のBOD除去のみを対象とした処理方式だけではなく、窒素・リンまでも除去できる高度処理プロセスを普及させることが重要である。従来の好気性処理のみでは栄養塩類とBODを同時に安定して除去することについて期待することはできないので、今後普及させる生物処理プロセスについては、嫌気条件と好気条件がサイクリックに繰り返される場が組み込まれていること、処理水の循環が行われること等これまでに得られた知見が十分活用されたシステムが用いられた高度浄化槽であることを必須条件にしなければならない。

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

若松伸司・上原清

(地域環境研究グループ都市大気保全研究チーム)

鶴野伊津志 (大気圏環境部大気物理研究室)

1. はじめに

都市域における窒素酸化物、光化学オキシダント、粒子状物質等による大気汚染は依然として大きな問題である。たとえば光化学大気汚染の注意報発令は1981年度を底に再び増加傾向を示し、窒素酸化物に関しても1983年度頃から全国的に濃度が上昇している。特に東京、神奈川、大阪三地域の1991年度における二酸化窒素(NO_2)濃度は史上最悪を記録した。季節的には11月から12月にかけての冬期に高濃度が出現しているが、関西地域においては春期においても高濃度の出現がみられる。また環境基準が達成できなかった地域は広域化の傾向にある。このように環境悪化が進んでおり、環境基準達成はかなり困難な状況にあるため、環境庁は1994年にこの三地域における NO_2 汚染を改善するために「自動車から排出される窒素酸化物の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法(自動車窒素酸化物削減法)」を制定し、今後の対策を強化しているところである。

大都市地域における高濃度大気汚染の主要な原因は自動車からの排出ガスであると考えられるが、自動車の種類や走行状態等については近年大きな変化が見られ、また地域による差も大きい。一方、気象、拡散、反応等の諸条件によって大気汚染物質が変化するメカニズムについても未知の点が多く、発生源、気象、反応等を含めた総合的な理解が必要である。

このような背景を踏まえて、本特別研究「都市域における冬季を中心とした高濃度大気汚染の予測と制御に関する研究」を実施したが、この研究の目的は都市スケールの窒素酸化物、炭化水素、硫黄酸化物、光化学オキシダント、粒子状物質等による大気汚染を、物質間の反応も含めた一連の現象として取扱い、発生源と環境濃度との因果関係を明らかにし、もって、その制御・保全の方法を明らかにすることにある。

2. 都市大気汚染の特徴と研究の概要

都市大気汚染現象は沿道大気汚染スケールから広域大気汚染スケールまで広い範囲の広がりを持っており、多くの場合、より小さなスケールの現象はより大きなス

ケールの現象の初期条件となり、より大きなスケールの現象はより小さなスケールの現象に対して境界条件を与えるといった関係にある。

例えば窒素酸化物の多くは一酸化窒素の形で大気中に放出されるが、大気中において二酸化窒素となる。この時に重要な役割を果たすのが RO_2 ラジカルと O_3 である。 RO_2 ラジカルは主に炭化水素と窒素酸化物が光化学反応を起こす事により生成する。一方 O_3 は光化学反応によるものと成層圏から対流圏に輸送されたバックグラウンド O_3 との両方が考えられる。特に冬期から春期にかけてはバックグラウンド O_3 の寄与が大きい。冬期にも光化学大気汚染は存在する。

光化学大気汚染は言うまでもなく窒素酸化物と炭化水素成分が、複雑な光化学反応を起こす事により光化学オキシダントとなる現象である。光化学オキシダントは、沿道大気汚染や、街区スケールの大気汚染のような局所大気汚染においては最も重要な境界条件となる。また都市域から郊外へと輸送される過程で、二次エアロゾルを生成し広域大気汚染を引き起こす。

これ迄の大気汚染対策は、法律で定められた個々の大気汚染物質(二酸化硫黄、二酸化窒素、一酸化炭素、浮遊粒子状物質等)に対して、それぞれ個別に実施されて来た。しかし大気汚染物質は相互に密接に関係し合っている。それはある場合には正のフィールドバック効果をもたらし、又ある場合には負のフィールドバック効果をもたらし、その現れ方も発生源からの距離や、発生源から放出された後の時間によって異なる。互いに関連するものとして大気汚染物質相互の関係を理解し、各種の大気汚染現象の一部として対象とするスケールの現象を評価することが極めて重要である。

このような観点から本研究においては、主に市街地における大気汚染研究のための風洞を用いた室内実験、都市域における広域大気汚染機構解明のためのフィールド観測、大気汚染予測のための計算機シミュレーション等の研究を元に都市域における種々の形態の大気汚染の予測を行い大気汚染対策のための検討を行った。

3. 市街地における大気汚染に関する研究

3.1 研究の目的と実験の方法

都市大気汚染問題を解決するための基礎情報として、自動車排ガスが市街地内部の複雑な気流によってどのように拡散するかについての予測資料が必要である。市街地の空間的構造から、大まかな濃度分布を予測するための風洞実験を行った。実験は風洞の測定部に市街地模型をおき、模型の道路から自動車の排ガスの代わりにトレーサーガスを流した。市街地内部の、高濃度が予想される交差点を中心とした位置のトレーサー濃度を測定

し、道路や市街地の形状によって沿道の汚染濃度分布がどのように変わってくるのかを調べた。模型の設置状況を図1に示す。模型の風上側には縦横10 cm 高さ5 cm のブロックを敷き詰め、市街地の風速分布を再現している。模型を設置した場所はターンテーブルになっており、模型を回転させることによって風向を変えることができる。トレーサーガスを発生させるために小さな穴をあけたパイプを道路上に、市街地模型の中央で交差するように設置した。

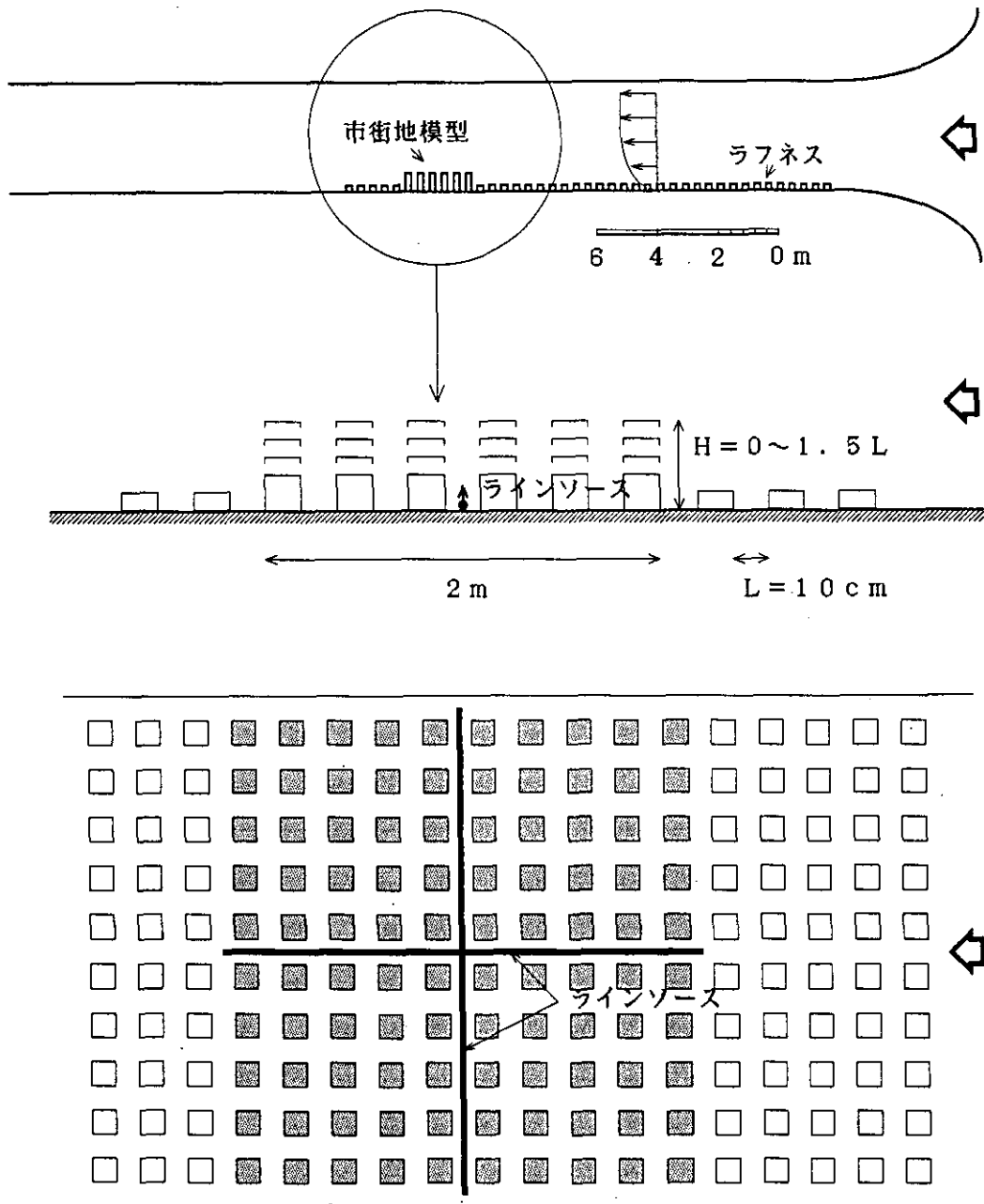


図1 風洞内における模型の設置状況の一例

3.2 交差点近傍の建物の影響

図2～4に交差点周辺市街地の濃度分布を示す。図2はすべての街区の高さが同じ場合、図3は交差点の一角の建物の高さが周辺街区の8倍の高さに変化した場合、図4は交差点の4角の建物全部が8倍になった場合である。図より交差点周辺の建物の存在によって周辺市街地の汚染濃度は増加することがわかる。これには2つの理由が考えられる。第1には、大きな建物の前後に弱風領域ができ、そこへ汚染が排出されることによる濃度増加。第2には建物にせき止められた流れが左右にあふれることによって、交差点付近の高濃度が周辺街区に流れ出すことによる濃度増加である。

3.3 周辺街区の高さによる濃度の変化、風向による濃度の差

市街地全体の高さが増すと交差点周辺の濃度は増加する。図5は街区高さが道路巾の1.5倍のときの分布であ

るが、街区高さが道路巾の0.5倍の図2とくらべると明らかに濃度が高くなっていることがわかる。図6と図7は図5と同じ条件で風向がそれぞれ22.5度、45度と変化した場合である。実験を行ったすべての街区高さと風向について得られた結果をまとめると図8のようになる。図より街区高さが増すにつれて濃度も上昇するがその度合いは風向0度の場合に最も高く、風向角が増すにつれて低下している。

3.4 交差点内部の濃度の分布

交差点内部の汚染の分布を詳しく調べるために0度、22.5度、45度の3種の風向きについて交差点内部での濃度分布を調べた。交差点の中で濃度が高くなるのは、どの風向のときにも交差点の中心部や風上側街区の背後である。そこでそれぞれの風向のときの基準化された濃度 (C_n) の高濃度域 ($C_n > 75$) をすべて重ね合わせて表示すると図9のようになる。図より風向が道路を中心と

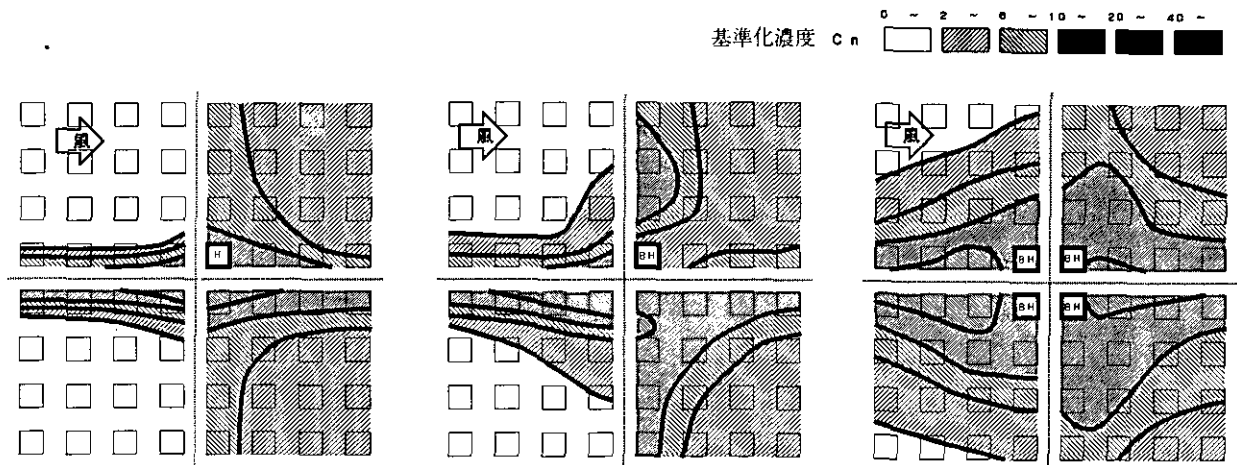


図2 一様な市街地、街区高さ $H = \text{道路巾 } L \times 0.5$

図3 高層建物一棟

図4 高層建物4棟

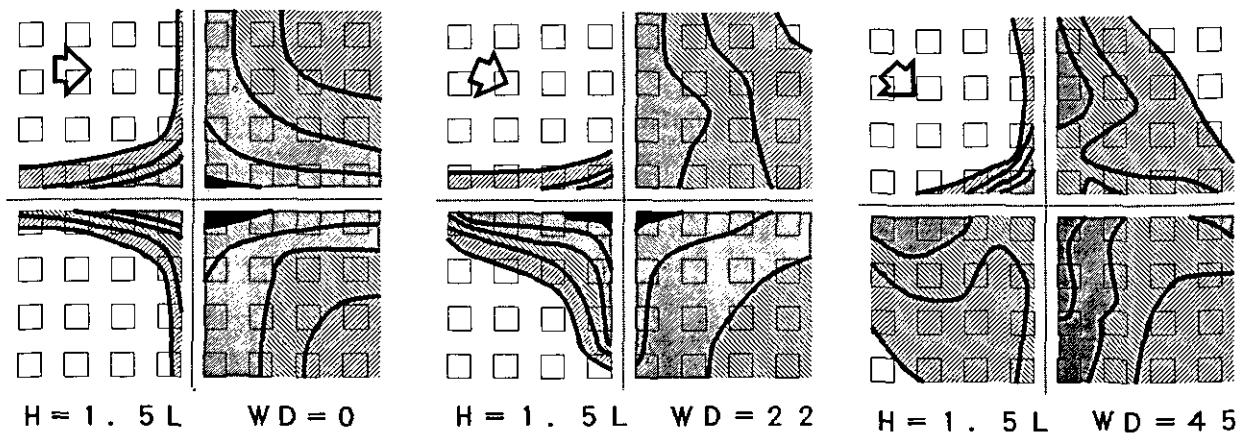


図5 街区高さ $H = \text{道路巾 } L \times 1.5$

図6 $H = 1.5L$, 風向22.5°

図7 $H = 1.5L$, 風向45°

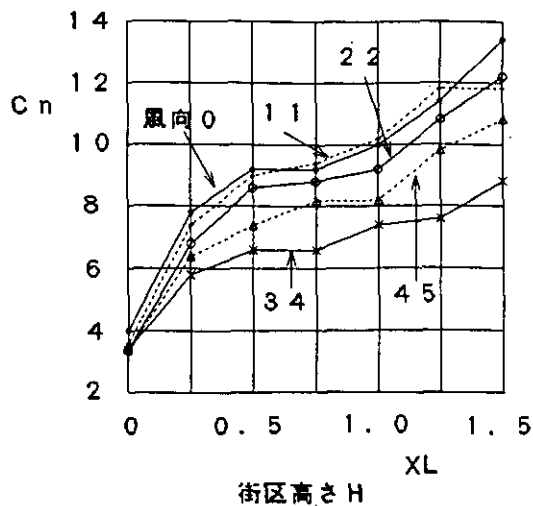


図8 街区高さ H と基準化濃度 C_n の関係

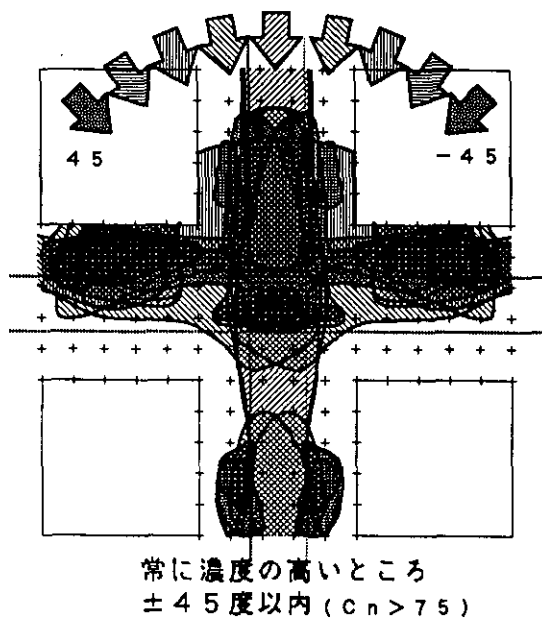


図9 高濃度を示す傾度の高い位置

して±45度と大きくふれても交差点内の高濃度域は比較的狭い範囲に限定されることがわかる。図10は図3と同じ状況のときの交差点内の分布である。前節で述べたのとは逆に高層建物の近傍では濃度が低下している。良く知られるビル風によって汚染が吹き払われるためである。

以上の結果をまとめると、1) 交差点近くに周辺よりも高い建物が存在する場合、一様な市街地のときとくらべて周辺市街地の汚染濃度は上昇する。但し、建物の近傍ではビル風のために濃度は逆に低下する。2) 周辺市街地の高さが増すと濃度も高くなるが、その度合いは一方の道路に風向が一致する0度の場合に最も高く、道路

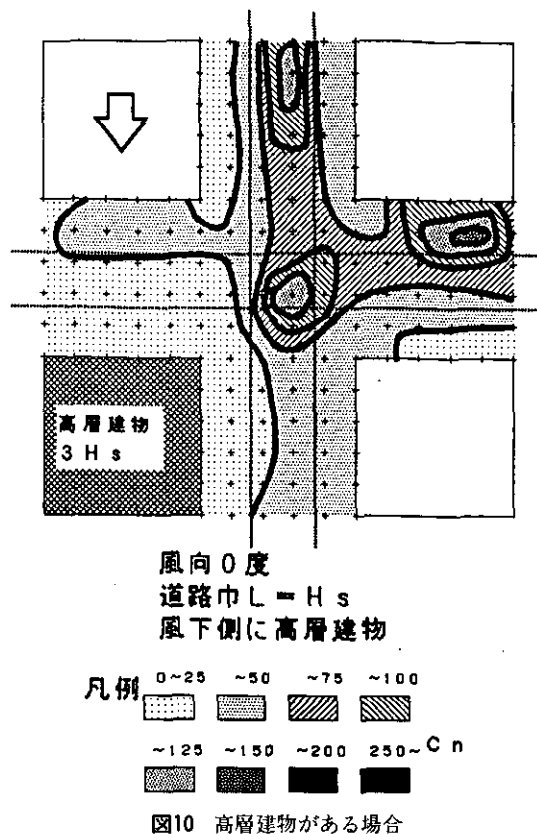


図10 高層建物がある場合

に対する角度が増すと濃度上昇の度合いは小さい。3) 一様な市街地の場合、交差点内部における高濃度域は比較的狭い範囲に限定されるといったことがわかった。

4. フィールド観測結果の解析

4.1 都市域における冬期の高濃度汚染の特徴

高濃度汚染出現日の特徴を明らかにするために1983年から1989年の間に得られた一般環境大気汚染測定局の時間値データを解析した。この中で10月から翌年3月までの半年間のデータを冬期データとして扱い、東京都内、横浜市、川崎市の一般環境測定局で NO_2 の時間値が 60 ppb を越えた測定局が85%以上出現した場合(一時間でも)で、時間平均風速が 2 s/m 以下の場合を高濃度日として抽出し、同日の東京23区内の測定局の時間平均値を求めた。高濃度の発現は NO_2 の時間変化パターンから

パターン1 晴天で NO_2 は二段階変化を示す

(延べ53日の平均値)

パターン2 曇天で NO_2 は一山型の変化を示す

(延べ19日の平均値)

に分類される。図11, 12はそれぞれのパターンの NO , NO_2 , O_3 と全天日射量の時間変化を示すが、この違いは概ね日射量の相違によるものである。 NO_2 の高濃度出現時の各汚染物質の時間変化の特徴は次の通りであ

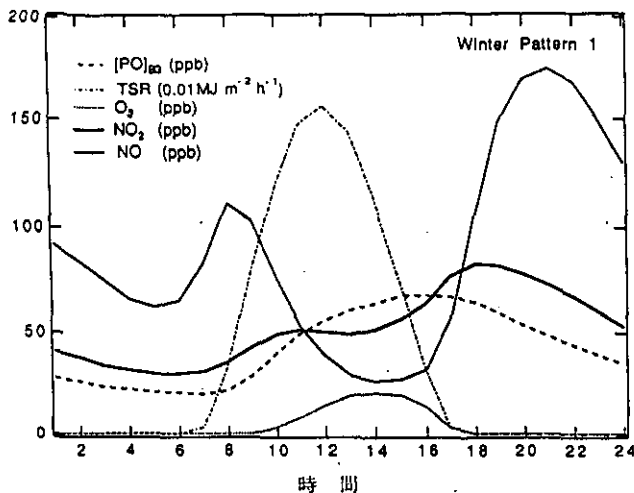


図11 東京都における冬期の平均的な大気汚染物質等の時刻変化パターン（晴天日）

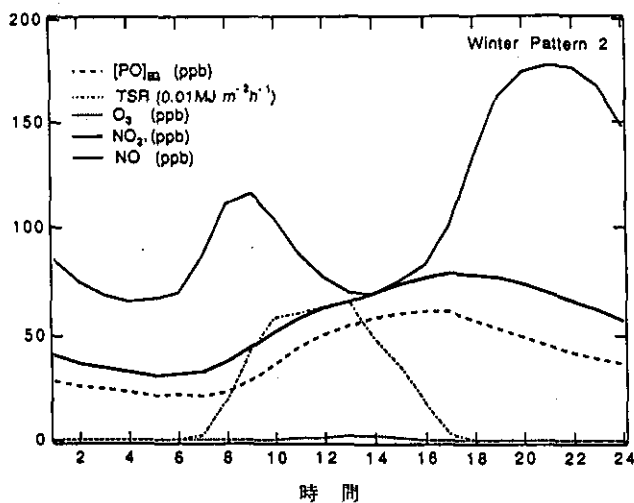


図12 東京都における冬期の平均的な大気汚染物質等の時刻変化パターン（曇天日）

る。

パターン1の場合には、NOは二山型の時間変化を示す。午前7時から8時にかけて110 ppbに達し、午後18時頃から急激に濃度が上昇し20時から22時にかけて175 ppbの高濃度のピークをとる。また、日中には濃度が減少し最低濃度は14時に26 ppbとなる。一方、NO₂はNOに約1時間遅れて、午前8時から10時にかけて濃度が36 ppbから50 ppbに上昇し、15時頃まではその濃度レベルを維持するが、12時から14時にかけて濃度変化に「くぼみ」がみられる。その後、16時から19時にかけて濃度が上昇し19時には82 ppbに達し、以後は漸減する。ここで、特徴的なことはNO₂の午後の濃度の上昇がNOよりも先に始まり、NO₂のピークが18時から19時に現れ、これに約2時間遅れてNOがピークをとる点である。一方、オキシダント濃度は夏期と異なり高

濃度には到らないがNOの濃度変化と逆相関のパターンを取り14時頃に最高濃度20 ppbとなる。しかし、その濃度は一般環境のバックグラウンドレベルとされる40 ppbに比べるとかなり低い。

パターン2では、NOはパターン1と同様に二山型の時間変化となるが、日中でも最低濃度は13時から14時にかけて70 ppbであり、この値は早朝の最低濃度レベルを上回っている。これに対して、NO₂は一山型の変化を示し、17時頃に最高濃度80 ppbをとり、12時から23時までには60 ppb以上となる。オキシダントは1~2 ppbを示すに過ぎず、これはパターン1に較べて日射量が少ないこと（パターン1の40%程度）と、日中のNOの濃度レベルが高いためと考えられる。

O₃濃度とNO₂濃度の和（= [PO]）から発生源の一次寄与の割合を差し引いた[PO]_{BG}、

$$[PO]_{BG} = [NO_2] + [O_3] - \alpha [NO_x]$$

の時間変化も図11, 12に示されている。ここで、発生源からの直接寄与率 α は0.1を利用した。[PO]_{BG}は天然のバックグラウンドO₃と光化学反応によるO₃の寄与を含むものであるが、午前10時頃から濃度が上昇し始め15時前後にピークを示している。その濃度レベルは、午前8時頃までは30から20 ppbで推移し、15時頃に65 ppb程度のピークをとり、深夜まで40 ppb以上の濃度レベルである。また、パターン1とパターン2の[PO]_{BG}の濃度差は最大で5 ppb程度である。

4.2 冬期における大気汚染物質の立体分布

1990年12月1日と3日の2日間にわたり南関東中部地域において航空機にSO₂（UV蛍光法）、NO_x、O₃（化学発光法）、CO（IR相関分光法）、の自動測定器、気象測定装置等を搭載し図13の飛行パターンで飛行し、1日、2回の観測を行った。機上では図13に示した2断面の3高度でフィルターサンプリング、及びカラムランプリングを実施するとともに各コース2サンプルずつのガラスボトルサンプリングも実施した。

12月1日に南側のコースにおいて実施した各汚染物質ごとの高度分布を、図14、図15に示す。図14は13時50分から14時54分の間の、図15は19時37分から20時41分の間のコース上の全データの平均値である。観測は埼玉県南部（朝霞）と茨城県（守谷）を結ぶ約40 kmの直線上で実施した。観測時における浦和での上層風は14時には600 mまでは南~南東、1200 mまでは東風で、20時には1000 mまでは南西~西風となっていた。午後の観測では、CO、NO_x、SO₂ともに垂直方向に傾度があり、O₃は600 mの高度でピークを示していた。これは光化

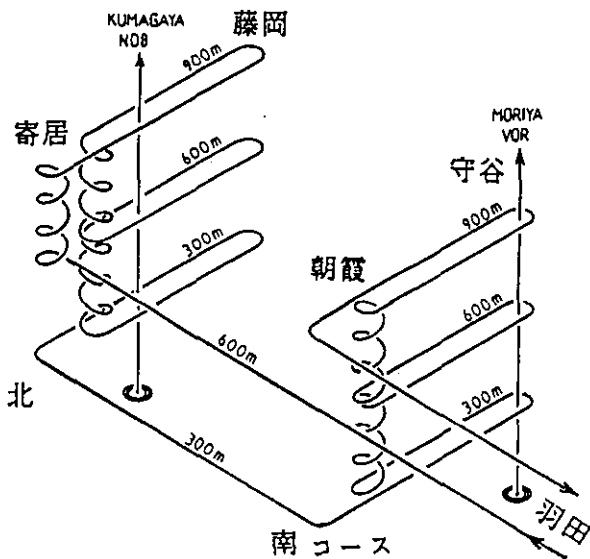


図13 1990年12月1日に実施した航空機観測コースと飛行パターン
北側コースは寄居-藤岡間、南側コースは朝霞-守谷間で実施した。

学反応によるものと考えられる。一方夜の観測では300mの高度においてはCO, NO_x, SO₂ともに午後の観測時よりも濃度が低下していたが、600m, 900mの高濃度においては濃度の減少の割合が小さく垂直方向に均一化していた。O₃に関しては300mの高度で減少しているのに対し、600, 900mではほぼ同レベルの濃度が観測された。この観測結果から冬期においても光化学反応により都市域上空においてO₃が生成されていることが明らかとなった。このため上空においてNO₂の比率が相対的に増加していた。このことを定量的に明らかにするために数値モデルを用いた解析を行った。

5. 数値モデルによる冬期のNO₂汚染の解析

窒素酸化物による高濃度汚染は冬期に多く出現するため、冬期における典型的な気象条件や地域的な局地気象と大気汚染物質濃度の挙動を同時に解析することが重要である。都市域における冬期のNO₂汚染の特徴の一つは、発生源からの一次排出の寄与よりも大気中の反応によるNOからNO₂の酸化の効果が支配的なことである。また、東京新宿御苑での係留気球を用いた汚染物質濃度の鉛直分布観測と地上の大気汚染測定局データから、首都圏では夜間の陸風前線の通過と高濃度大気汚染の発現には相関が高いこと、更に、NO₂濃度の鉛直分布にはNOの分布と異なる特異性のあることがわかった。NO₂濃度の鉛直分布の同様な特異性は札幌市での観測結果にも見られる。一方、局地風循環と大気汚染濃度の関係の研究は、従来、夏期の光化学オキシダントに関し

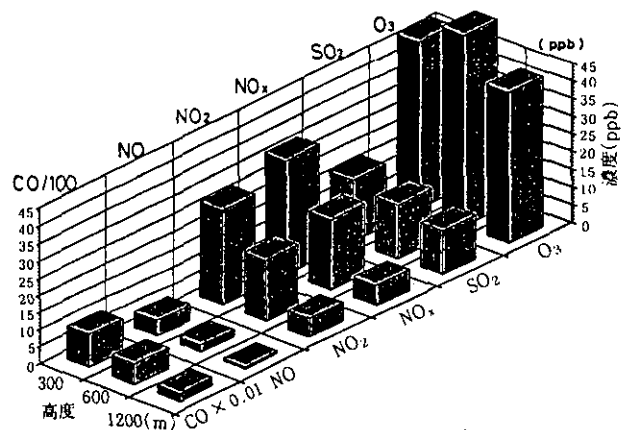


図14 1990年12月1日、13:50-14:54に観測した南側コースにおける大気汚染物質の垂直分布

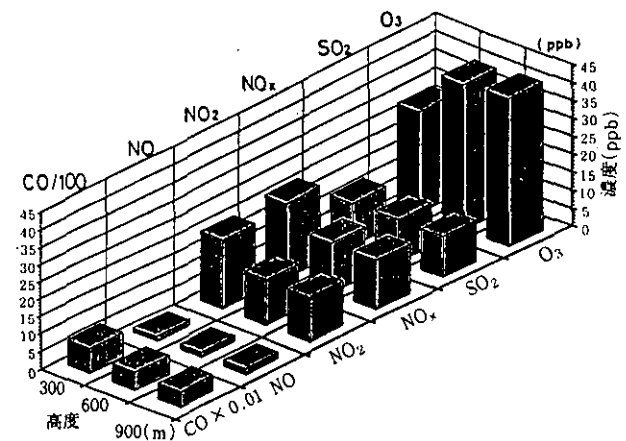


図15 1990年12月1日、19:37-20:41に観測した南側コースにおける大気汚染物質の垂直分布

て主に行われており、数値モデルによる冬期のNO₂汚染に関する研究は十分にはなされていない。

ここでは、第一に光化学ボックスモデルによる冬期のNO₂汚染の特徴を示す。次に、局地気象数値モデルと光化学反応を含む汚染物質の輸送・反応シミュレーションモデルを組み合わせて、冬期の高濃度汚染の基本的な動態解明の結果を示す。

5.1 光化学ボックスモデルによる解析

光化学ボックスモデル(PBM)では混合層以下を一つのボックスとして扱い、その中でボックス内外の水平方向の物質変化を示す移流と上空からの取り込みが考慮されている。発生源変動や、光化学反応を含むモデルであり、混合層高度Z_i以下の平均濃度が求められる。PBMの適用にあたっては、混合層高度の時間変化を適切に設定することが重要である。ここでは、レーザーレーダーによる観測例をもとに冬期に典型的な混合層高度の

時間変化を与えた。

NO_xと炭化水素の発生源の強度と時間変動は東京の中心部15 kmメッシュの1983年度ベースの発生量を用いた。炭化水素は発生源からの排出組成分布を化学反応モデル(CBM-4)に準拠した炭化水素組成に基づいて算出し、時間変動パターンを与えた。NO、NO₂については、固定発生源と移動発生源の時間別排出量をもとに与えた。計算の初期濃度は実測値をもとに設定した。上空から取り込まれるO₃濃度は冬期の航空機による観測結果をもとに60 ppbに設定した。光化学解離定数は実測の日射量と晴天時の理論値との比をもとに与えた。また、気温、湿度、風速は実測値を利用した。PBMによる計算は午前5時から18時間行った。

図16には、冬期の高濃度NO₂汚染発現時の東京都下の測定局の平均濃度の時間変化とPBMによる計算結果(NO、NO₂、O₃濃度の時間変化)を示す。NO、NO₂、O₃の計算値は全般的に実測値とよく一致している。ただし、15時以降はNOについての一致性は良くない。これは用いられている混合層が接地逆転層を考慮していないためと考えられる。計算されたNO₂濃度は数ppb程度低めであるが全体的な時間変化の特徴によく対応しており、12時から14時にかけて濃度変化の「くほみ」も良く再現されている。更に、O₃濃度も極めてよく一致している。

図17には、冬期のNO₂濃度についての感度解析の結果を示す。感度解析は、大気反応の有無、バックグラウンドO₃の寄与、暗反応のみの寄与の合計4ケースにつ

いて行った。また、標準条件の計算結果をコントロールとする。図の結果から、反応なしの場合では、NO₂濃度は20~35 ppb程度にしかならず、図には示していないがNO濃度は実測値を大きく上回る。更に、バックグラウンドO₃をゼロとした場合と比較することにより、おおまかに言って、NO₂濃度の時刻変化には、午前中は混合層の発達に伴って上空から取り込まれるバックグラウンドO₃によるNOの酸化の寄与が大きく、午後からは光化学反応の相対的な寄与が大きくなることが判る。一方、暗反応のみを考えた場合の結果から特徴的なことは、まず、日中のNO₂濃度の「くほみ」(図中の斜線の領域であり)が混合層の発達による希釈のためでなく光化学反応によるNO₂の変質によって生じていることと、16時以降はコントロールが暗反応のみの計算結果を上回っている点である(図中のドットの領域)。これは、日中の光化学反応により生成された二次生成物質が日射の弱くなる夕方以降において、NOからNO₂への酸化を加速させるためと考えられる。

以上のことから、冬期においては、日射量が弱く日照時間が短いこと、気温が低いことなどにより光化学反応による高濃度のO₃の生成はおこらないが、NOからNO₂の酸化には十分の光化学二次生成物質が存在し、これによるNOからNO₂への酸化のメカニズムを解明することが重要であることが判明した。しかし、PBMは現象を単純化しているため、汚染質の鉛直プロファイルや海陸風などの局地循環による汚染物質の輸送を正確に表現することが出来ない。

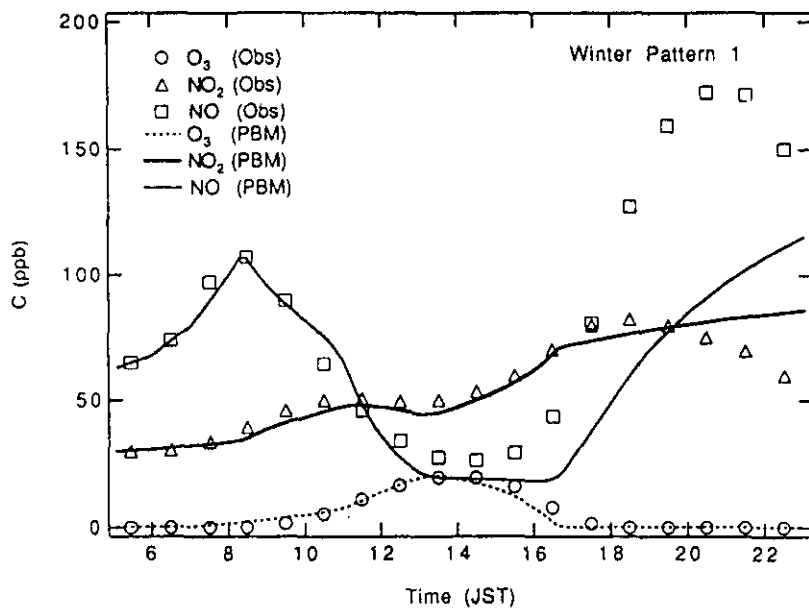


図16 冬期高濃度発現時のNO、NO₂、O₃の平均的な濃度変化と光化学ボックスモデルによる計算結果

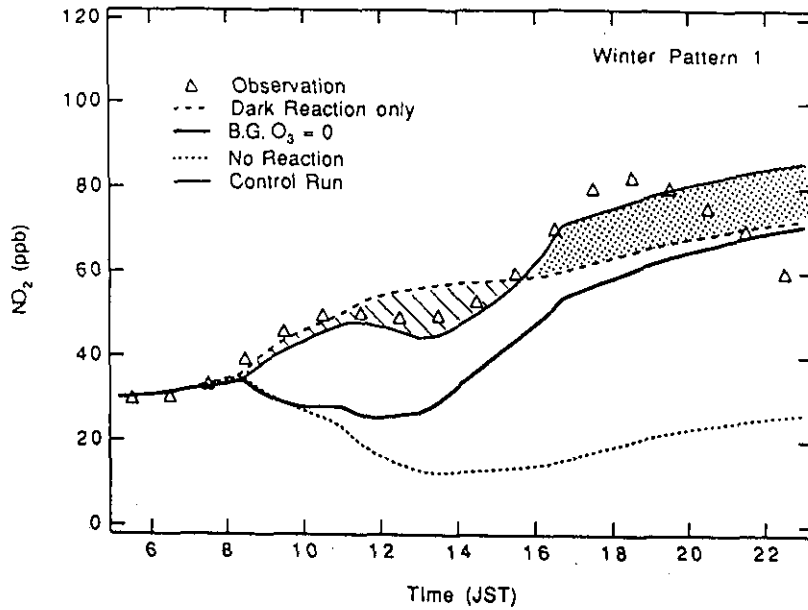


図17 光化学ボックスモデルによる NO_2 濃度の感度解析。
 Δ は観測値、破線は日射なし、太い実線はバックグラウンド $\text{O}_3=0$ 、点線は反応なし、
 細い実線は標準条件の計算結果。

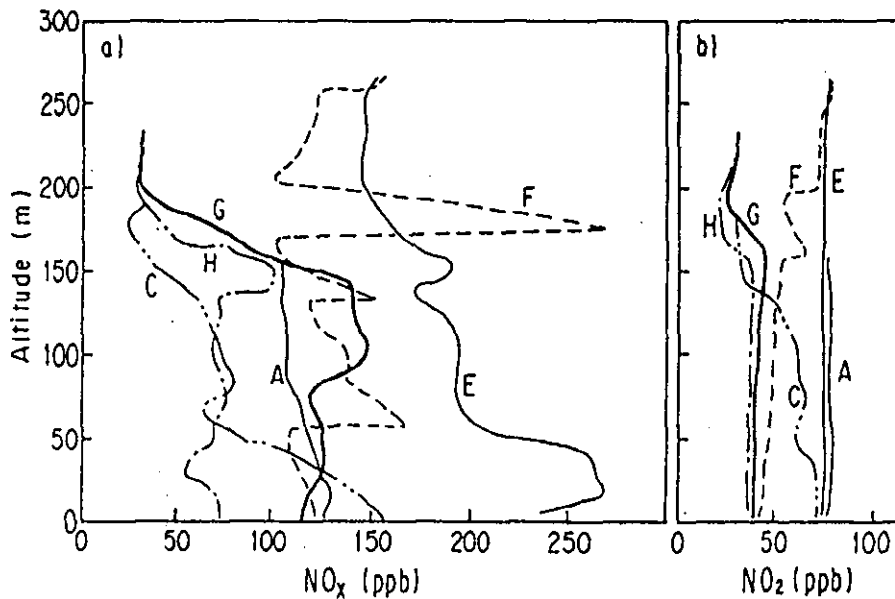


図18 東京新宿御苑での NO_x 、 NO_2 の鉛直分布の観測結果 (1983年1月23日の結果)。
 図中の A から H にかけて夕刻から深夜に向かう。

5.2 グリッドモデルによる解析

図18には、東京新宿御苑で測定された、 NO_x と NO_2 の夕方から夜間にかけての高さ分布を示す。この図から明らかなように、 NO_2 は NO_x と異なり明確な鉛直勾配がみられない。これは、PBM での議論で指摘されたように大気反応とともに、乱流混合による鉛直拡散による。この点をモデル化するには2次元 (または3次元) のグリッドモデルを用いた輸送反応シミュレーションを行う

ことが必要となる。本研究では局地気象数値モデルと汚染物質の輸送反応モデルを組み合わせて冬期の気象要素と汚染質の挙動をシミュレートした。局地気象数値モデルとしては、コロラド州立大学メソスケールモデル (CSUMM) を用いて気流の計算を行った。CSUMM によって計算された結果をもとに、次に、汚染物質の輸送反応の計算を行う。反応モデルとしては PBM と同一のものを利用した。

モデル計算は、東京周辺のスケールを想定した2次元の簡略地形を用い、PBMの条件に合わせた気象条件を初期値として用いた。海岸部に水平スケール30kmの都市をおき、都市域での発生源の排出組成と強度はPBMのそれと同一、初期濃度は O_3 以外はゼロとした。また、PBMでは考慮されなかった乾性沈着は最新の知見をもとに沈着速度を設定した。計算は96時間行い、3、4日目の計算結果を議論の対象とした。

図19には、海陸(都市)、山地の配置と、計算開始3日目の16時の気流分布とそこでの NO 、 NO_2 、 O_3 の濃度変化を示す。数値モデルによる計算からは、冬期でも海陸風、山谷風による局地循環が形成されること、海水面温度が陸上の気温より高いことにより、陸風時には海上には混合層が発達すること、陸上の日中の混合層高度は概ね800-1000m程度であること、などが再現されている。

図20には、都市域での NO 、 NO_2 、 O_3 濃度の時間空間変化(3日目と4日目)を示す。これらの図から明ら

かなように、都市域での日中の O_3 濃度は20ppb程度であり、夜間は上空700-800mまで濃度ゼロの分布となる。日中の O_3 濃度は夏期の光化学オキシダントのレベルと比較して極めて低い。 NO_2 は O_3 と対照的に夜間上空700-800m程度まで50ppb程度の均一な分布となる。これは図18の NO_2 の鉛直分布によく対応している。また、汚染物質が夜間の陸風で海上に輸送されるため、海上に NO_2 の高濃度域が形成される。 NO 濃度は地上付近で午前中に高濃度となるが、日中の混合層の発達と発生源強度の変化のために濃度は減少する。

図21には、 NO_x の排出強度を10、30、40、50%削減した場合と大気中の反応がない場合の都市域での地上付近の NO_2 と O_3 濃度の感度解析(時間変化)の一例を示す。この結果は図17で指摘した NO_2 環境濃度にしめる大気反応の寄与の重要性を示すとともに、大気中での反応を伴う拡散現象の非線型性のために、 NO_x の排出削減量と環境中の NO_2 濃度には直線的な関係がないことを示している。これは、 NO_x 排出量を削減すること

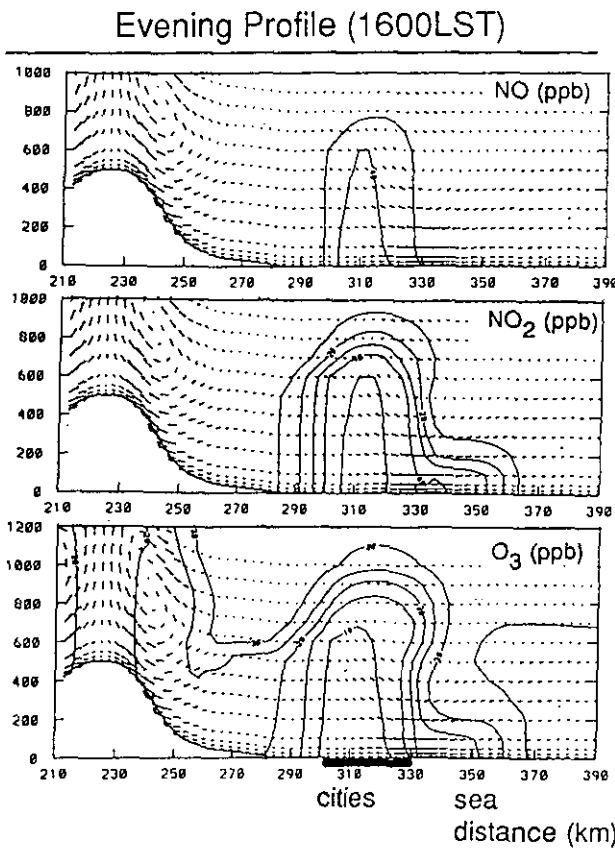


図19 局地気象モデルで計算された気流分布と NO 、 NO_2 、 O_3 の濃度(計算開始3日目の16時の結果)。都市域は図中の $x=300$ kmから330km。 $x=330$ kmより右は海水面。

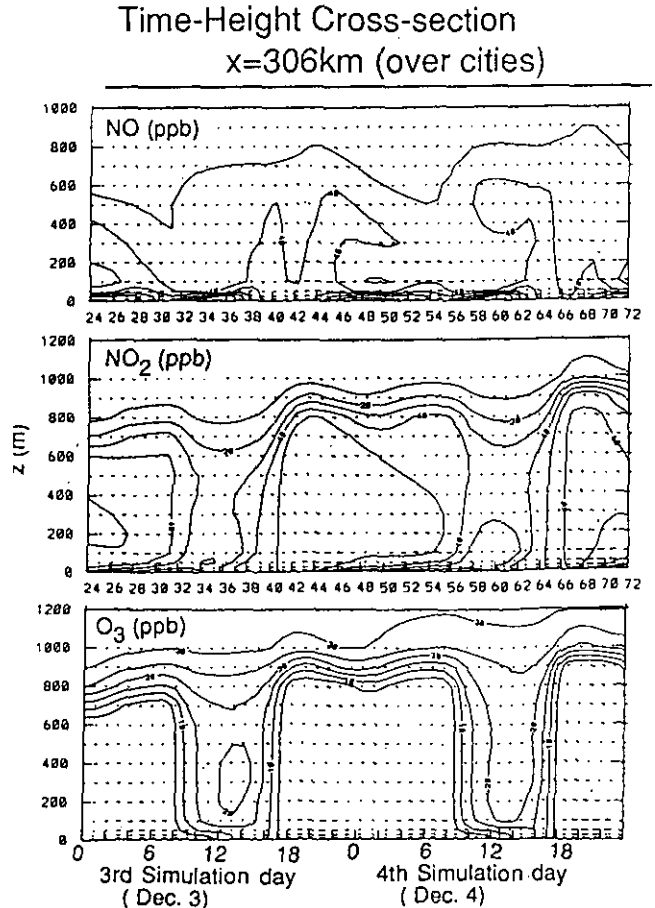
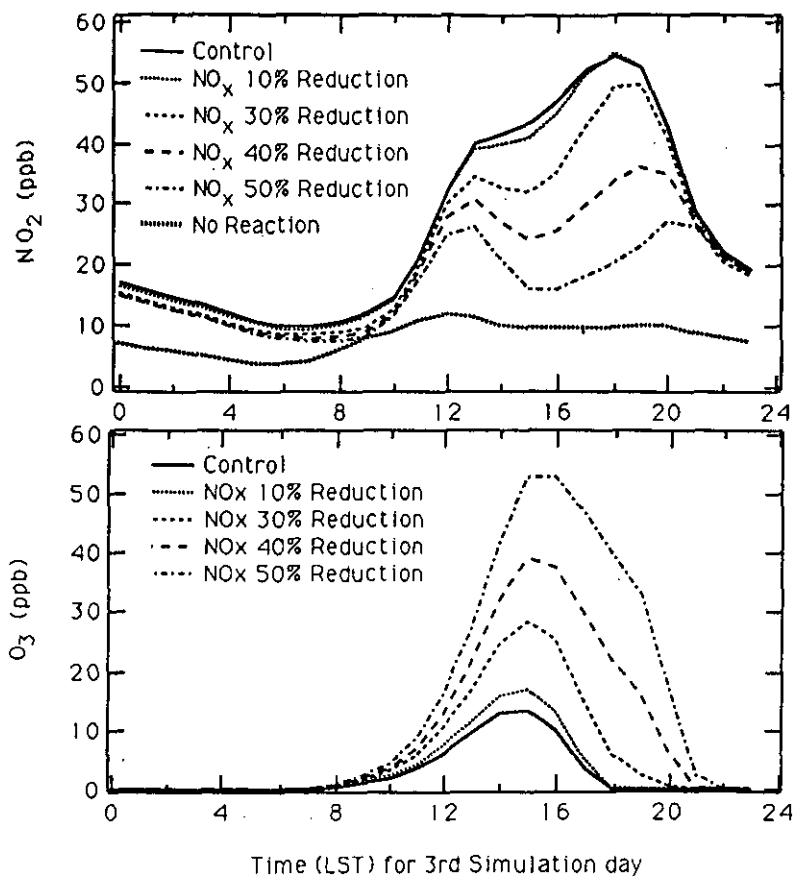


図20 都市域での NO 、 NO_2 、 O_3 濃度の時間空間変化(3日目と4日目)

で O_3 濃度が上昇することからも理解される。

ここで示した局地気象数値モデルと汚染物質の輸送反応モデルを組み合わせた冬期の NO_2 高濃度汚染のシミュレーション結果は観測値の特徴をよく再現しているが、

詳細に比較検討するには鉛直分布を含めて観測データが極めて限定されているため今後は、このような観測データの蓄積を図るとともに、数値モデルの計算をより現実にそった条件で行うことが必要である。



3rd day at X=306 km (over the cities)

図21 NO_x の発生源強度を削減した場合の都市域の地上付近の NO_2 、 O_3 濃度の感度解析 (時間変化)

ディーゼル排気微粒子 (DEP) による

喘息様病態発症に関する実験的研究

— 活性酸素生成を介したメカニズムについて —

嵯峨井 勝, 市瀬 孝道 (地域環境研究グループ・大気影響評価研究チーム)

1. はじめに

近年, 大都市部の大気環境は悪化傾向をたどっており, これは主に自動車の排気ガスによると考えられており, 東京都内では NO_x 総排出量の約 7 割は自動車に由来すると言う。また, 最近ではディーゼル車が増加し, 大気汚染の大きな比重を占めている。ディーゼル車は NO_x 排出量がガソリン車の 2~20 倍も高く, また真っ黒い排気微粒子の排出量はガソリン車の 30~100 倍にも相当し, 東京都内の浮遊粒子状物質の 3~4 割はディーゼル車に由来するといわれている。このようなことから大都市大気の主な汚染源はディーゼル車であると言っても過言ではない。

一方, ディーゼル排気 (DE) あるいはディーゼル排気微粒子 (DEP) が肺がんを発生させる可能性が強いことやアレルギー性鼻炎を引き起こすこと等はよく知られており, その発症は実験的にも証明されている。しかし, ディーゼル排気が気管支喘息の発症と関係があると疫学的研究から言われながら, その実験的証明はいまだなされていず, その因果関係に疑問が残されている。

我々は最近, DEP が酸素の一電子還元体であるスーパーオキシド (O_2^-) を生成し, この O_2^- が肺毒性を発現し, ひいては喘息様の病態を引き起こすことを見いだしたので報告する。

2. 最近の大気環境について

2.1. NO_2 と児童の喘息発症率の増加傾向

一昨年, 環境庁は 8 つの小学校の児童 5,000 人を対象に 5 年間 (1986-1990 年) に渡って健康影響調査を行った結果を報告した。調査者全体の 5 年間平均した喘息様症状有症率と過去 9 年間の平均 NO_2 濃度との間に有為な相関は認められなかったが, 新規発症者についてみると, NO_2 汚染の高い地域では喘息様症状の発症率も高く, NO_2 濃度との間に有為な相関が認められている。この結果は発症率の一番低い地域と高い地域の間には 6 倍の差があることを示している。

このようなことから, 大都市圏の大気汚染, 特にディー

ゼル車による大気汚染が深刻な状況にあつては, その因果関係が注目されるところである。

2.2. 大都市大気中の NO_2 と浮遊粒子状物質との相関

大都市部の大気汚染物質は主に NO_2 とディーゼル排気微粒子 (DEP) であるが, 我々のチームの田村らがこの両汚染物質間の相関を調べた結果を図 1 に示す。

調査は東京都板橋区と世田谷区で調べたものであるが, 屋外の浮遊粒子状物質 (SPM; DEP も含まれる) の濃度と屋外の NO_2 濃度との間には非常に高い有意な直線相関があることが見いだされた。このことは, NO_2 汚染の激しい所では粒子状物質 (SPM) の汚染, 言い換えれば DEP 汚染も激しいことを示している。

3. 大気汚染と気管支喘息との間の因果関係について

これまで, 気管支喘息の発症は IgE 産生を介する I 型アレルギー反応によって説明されてきた。また, 大気汚染と気管支喘息等の因果関係を考えると, その発症

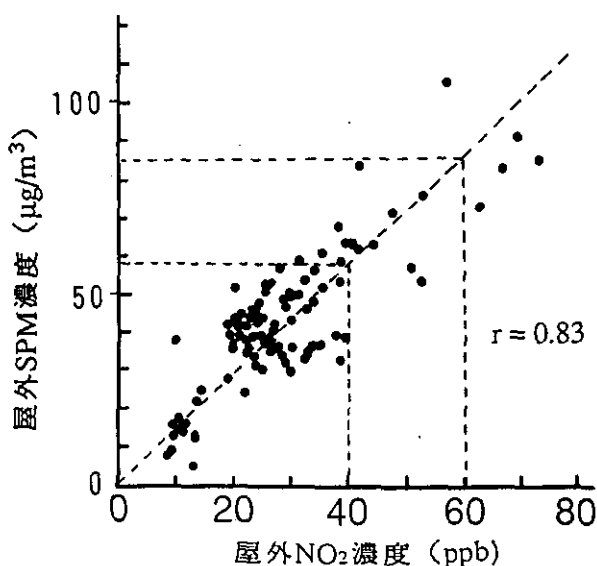


図 1. 東京都内の各地域における屋外の NO_2 濃度と SPM 濃度との相関

表1. 気管支喘息の基本病態

1. 血管透過性の亢進
2. 炎症細胞の遊走
3. 粘液質過剰分泌
4. 気道平滑筋収縮

メカニズムがI型アレルギー反応によるものとするならば、喘息患者のIgE値は高くなければいけない。言い換えれば、IgE抗体を沢山作る素因のある人が喘息になりやすいのであり、喘息と大気汚染とは関係ないという意見もある。しかし、大気汚染地域に住んでいる喘息患者のIgE値が調べられたが、その値は健常者と比較して決して高くはないことが知られている。この知見から、少なくとも大気汚染地域に居住している喘息の患者はアレルギー素因が高いから喘息になると言うことは言えず、その因果関係に疑問が残されていた。そうした中で、「IgE抗体産生の増加を伴わない喘息の発症機序があるのではないか」と考えられていた。しかし、その発症機序については全く不明のままであった。

一方、気管支喘息は複雑な疾病であるが、その病態を要約すると表1に示す4つが上げられる。ところがこれまで、NO₂は4つの基本病態のうち高濃度では血管透過性を亢進させることや粘液分泌細胞が増えることなどが知られているが、最も重要な炎症等の病態が持続的に起こることを示す報告は見あたらない。

そこで私どもは両者間の因果関係の有無を実験的に証明できないものかと考え、以下のようなディーゼル排気微粒子(DEP)による喘息様病態の研究に進んだ。

4. ディーゼル排気微粒子 (DEP) の活性酸素産生を介した肺毒性について

4.1. DEP 気管内投与マウスの死亡率と SOD の死亡率抑制効果について:

DEPの肺に及ぼす毒性を調べる為に、DEPを0.05%のTween 80を含むリン酸緩衝液(pH 7.4)に懸濁し、6週令のICR系雄マウスに気管内投与し、その24時間以内の死亡率を調べた。その結果は、図2に示すように、LD₅₀が0.6 mgで、0.9 mg投与では100%のマウスが死亡した。なお、このマウスの死因は血管内皮細胞傷害による肺水腫であった。

一方、DEPを気管内投与する1時間前に、O₂⁻を代謝する酵素のスーパーオキシドジスムターゼ(ポリエチレングリコール結合型-SOD, PEG-SOD)を尾静脈から投与しておく、100%のマウスが死亡する量のDEP

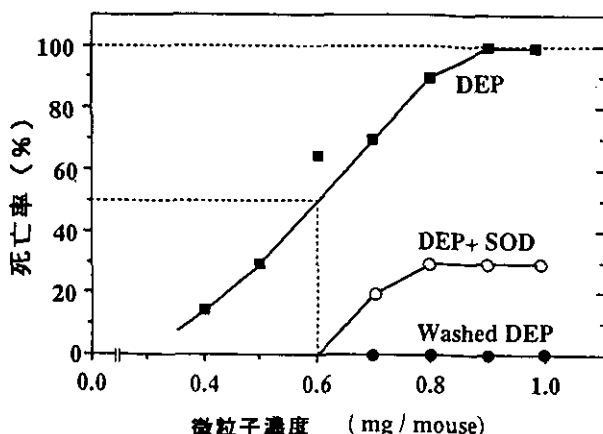


図2. ディーゼル排気微粒子(DEP)の気管内投与によるICR系マウスの死亡率曲線
DEP, ディーゼル排気微粒子;
SOD, スーパーオキシドジスムターゼ(O₂⁻を消去する酵素, 尻尾の静脈から投与);
Washed DEP, DEPをメタノールで洗った残りの煤

投与でも、死亡率は30%に低下した。この結果はDEP毒性の本体はO₂⁻であることを示唆している。

また、DEPをメタノールで充分洗浄して有機画分を除いた残渣のDEPを1.0 mg以上投与した場合、DEPを貧食した多数のマクロファージの遊走が認められたがマウスの死亡例は1例も認められなかった。このことより、肺水腫の原因になる血管内皮細胞傷害はDEP自身が産生するO₂⁻による可能性が示唆された。

4.2. DEPのO₂⁻等活性酸素産生について

4.2.1. DEPからのO₂⁻産生について:

DEPがそれ自身で化学反応によってO₂⁻を産生しているかどうかをチトクロームC還元法で確認した。反応系は0.05% Tween 80を含む50 mMリン酸緩衝液(pH 7.4)に各量のDEPを懸濁し、ここに50 μMのチトクロームCを添加し、O₂⁻によるチトクロームC還元を550 nmの吸光度の増加で調べた。図3には250 μgのDEPによるチトクロームC還元、すなわちO₂⁻産生のタイムコースを示した。O₂⁻産生はインキュベーション時間につれて増加し、in vitro系での増加は1週間も続く。さらに、この反応系にSODを加えるとO₂⁻の発生は認められなくなった。

また、このメタノール画分に、DMSOに溶かしたスピントラップ剤DMPOを添加した時のESR測定ではO₂⁻そのもののESRシグナルが得られ、SOD添加でこれらシグナルはすべて消失したことから定性的にもO₂⁻が産生されていることが確認された。

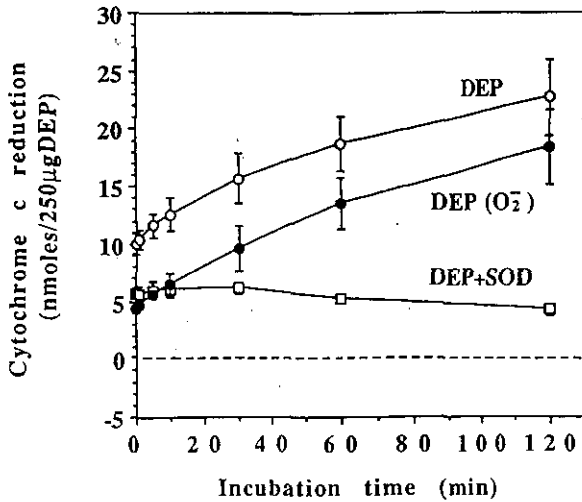


図3. ディーゼル排気微粒子 (DEP) の試験管でのスーパーオキシド (O₂⁻) 生成のタイムコース
 ○, DEP (0.25 mg) での O₂⁻ 産生;
 □, DEP (0.25 mg) + SOD 投与群の O₂⁻ 産生;
 ●, ○と□の差, すなわち真の O₂⁻ 産生量

4.2.2. DEP からの・OH 産生について:

DEP はそれ自身で化学的に O₂⁻ を生成し, これが H₂O₂ に変化した後に, DEP 中に含まれている鉄, 銅等の遷移金属の触媒によって・OH を産生する可能性が考えられる。事実, この DEP の中には鉄が 126 ppm, 銅が 12 ppm, クロームが 6 ppm, マンガンが 2 ppm, その他の微量金属が含まれていた (西川雅高氏測定)。そのため, 前記 ESR 測定 of O₂⁻ 生成系から・OH スカベンジャー (消去剤) である DMSO を除いて ESR シグナルを測定したところ, 1 : 2 : 2 : 1 の明瞭な・OH のシグナルが得られた。また, ・OH 産生を α-KMB によるエチレン生成系を用いて測定したところ, インキュベーション時間及び DEP 添加量に依存してエチレンが生成し, ・OH スカベンジャーの DMSO や安息香酸ナトリウム塩の添加によってエチレン生成は阻害された。このことから, DEP からは・OH も生成していることが定量的にも確認された。これらの結果より, DEP から O₂⁻ および・OH が生成する可能なメカニズムを推測した (図 4)。

5. DEP の血管内皮細胞傷害による血管透過性の亢進について

血管内皮細胞傷害による血管透過性の亢進は肺水腫の原因であると共に気管支喘息発症の基本病態の一つである。前節では DEP による肺水腫の原因が肺の血管内皮細胞傷害によることを述べた。これを確認するために, 微小循環傷害の検索手段としてモノスタラルブルー色素 (MoB) を用いて病理学的に血管内皮細胞傷害を調べた。

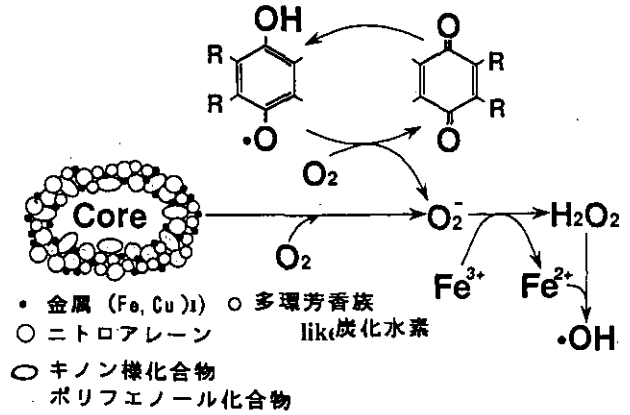


図4. ディーゼル排気微粒子 (DEP) からの O₂⁻, ・OH 等活性酸素の産生機序

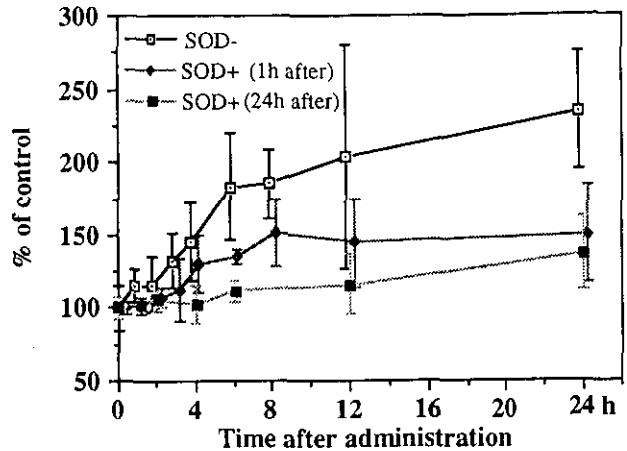


図5. DEP (0.8 mg) 気管内投与 1時間前と24時間前に PEG-SOD を投与したマウスの肺水分量の経時変化

この方法は, 300~400 Å の粒径を持つ MoB が血管内皮細胞の損傷部位で, 内壁から露出して血管基底膜上に沈着するので, その沈着した色素量を光学顕微鏡下で観察するものである。

マウスに 0.8 mg DEP を投与後, 屠殺する30分前に MoB 溶液を尾静脈より 150 µl 投与した。屠殺後, マウスの肺を 10%ホルマリン液で固定し, ヘマトキシリン-エオジン染色してから顕微鏡下でモノスタラルブルー色素の沈着強度を調べた。

対照群には MoB 色素の沈着は全く認められなかったが, DEP 投与群では肺胞壁毛細血管の基底膜に顕著な色素沈着が認められた。この沈着色素量は DEP 投与30分後から増加し, 2~4時間後に最高レベルに達した。この色素沈着の増加に伴い肺の水分含量及び肺湿重量当りの水分含量比も増加した。また, DEP 投与 1時間前あるいは24時間前に PEG-SOD を気管から投与しておいたマウスでは PEG-SOD を投与していないマウスに

比べて肺胞壁毛細血管への色素沈着量は低く、肺水分含量も明らかに低い値を示した(図5)。なお、この肺水腫による死亡はおおむね24時間以内に観察され、2日目以降に死亡する例は希であった。

6. 低濃度 DEP の気管内への繰り返し投与による喘息様病態の発症について

6.1. DEP 気管内投与による粘液質の過剰分泌について

DEP を繰り返し気管内に投与するとマウスの気道は極めて過敏になり、粘液質を多量に分泌するようになる。実験は ICR 系雄マウスに 0.1 mg あるいは 0.2 mg の DEP を毎週 1 回づつ、連続10週間投与した。また、0.2 mg DEP と共に PEG-SOD を 1 時間前に投与した。各群の 4, 7, 10 週目に肺の病理標本を作製し、さらに肺胞洗浄液中の粘液質の指標として結合型シアル酸濃度を調べた(図6)。

図から分かるように、5 週目では 0.2 mg の DEP 投与群の結合型シアル酸は対照群より3.5倍に増加しており、SOD 投与群では粘液質の合成・分泌は抑制されていた。このことは、気道の粘液質の合成・分泌は O_2^- によって促進されていることを示唆し、Alder らの *in vitro* の結果を *in vivo* でも支持する結果を得た。7~10 週目では 0.2 mg の DEP 投与群の粘液質合成・分泌はさらに促進されていた。しかし、SOD 同時投与群では抑制効果は認められなかった。また、DEP の10回投与マウスの気管支の PAS 染色病理像では大~中等大気管支上皮の線毛細胞が減少し、PAS 染色で赤く染まる粘液質を多量に含んだ杯細胞の著しい増生が認められ

た。

6.2. 気管支粘膜下組織における炎症の発生

0.1 mg あるいは 0.2 mg の DEP を繰り返し気管内に投与すると、気道の粘膜下組織に炎症性細胞の好中球、好酸球、リンパ球あるいは単球などが浸潤しているのが認められた。これは気管支喘息の重要な病態の一つであり、特に、好酸球の浸潤は重要である。この病理標本の気管支粘膜下組織の炎症細胞をディフクイック染色液で染め分け、好酸球と好中球の数を数え、その結果を図7に示した。DEP 投与初期には、まず好中球が増え、7 回投与の頃にピークとなり、その後好中球は減り、逆に好酸球数が増加してきて、典型的な慢性的炎症が認められます。また、これら炎症性細胞は、染色だけでなく、電子顕微鏡で形態的にも確認し、確かに、好中球、好酸球、リンパ球等が認められ、さらに肥満細胞や単球、線維芽細胞等も多数認められた(古山昭子氏撮映)。

6.3. 喘息様病態の発現について考慮すべきこと

このように、DEP をマウスに気管内投与すると、喘息で見られる病態の幾つかが認められた。すなわち、①血管透過性の亢進、②粘液質の過剰分泌、③気管支粘膜下組織に炎症が起こること(炎症性細胞の浸潤)等がある。しかし、喘息と言うときには、これらに加えて、④気道の過敏性が認められなければならない。これも非常に重要な要件であるが、我々はこれについてはまだ測定を行っていない。ただ最近、気管支喘息の定義は大きく変わってきており、喘息とは「気道過敏性の亢進であり、可逆的な気道狭窄である」としてきたこれまでの定義は

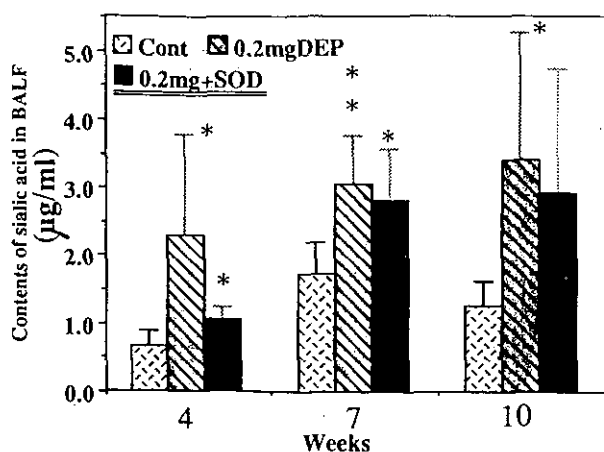


図6. ディーゼル排気微粒子 (DEP, 0.2 mg) の繰り返し気管内投与による肺内粘液質の増加と SOD による抑制

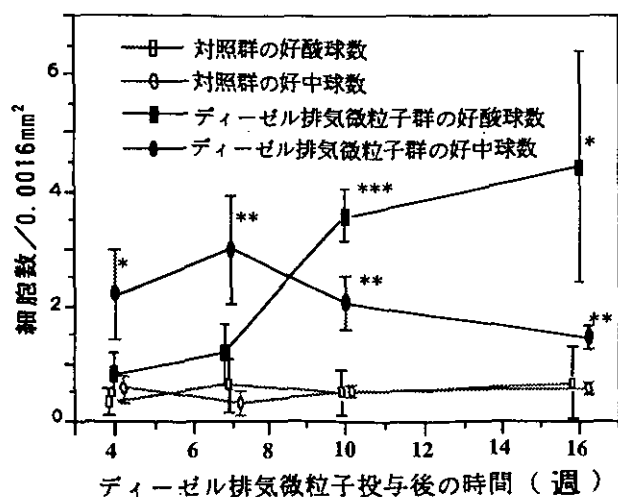


図7. ディーゼル排気微粒子の繰り返し投与による気管支粘膜下組織の好中球と好酸球数の推移

根本的に覆されようとしている。

気管支喘息の新しい定義によると、気道の過敏性とか気道の可逆的狭窄というのは、あくまでも結果であり、喘息の本態は「好酸球の浸潤を伴う炎症、すなわち慢性剥落性好酸球性気管支炎（炎症）である」と言う。そして、気管支の粘膜に炎症が起こった際に集まってくる好酸球や好中球のような炎症細胞が気管支炎をさらに悪化させると考えられるようになっている。

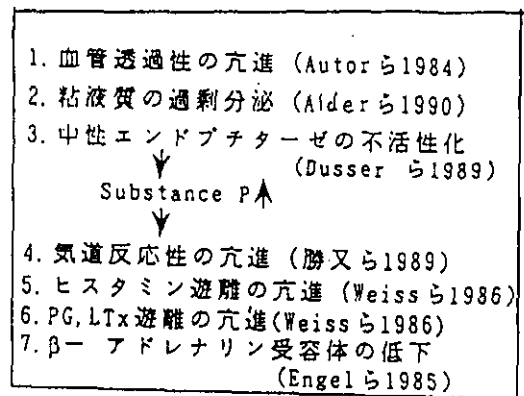
このような考えから、今回はまだ④の気道過敏性を証明できていないが、③の好酸球のような炎症細胞の持続的遊走が起こるのは炎症そのものであり、これによって気管支炎をさらに悪化させ、喘息につながるのではないかと考えられる。

以上のように、マウスを用いて、「喘息様病態の発症」と言うために必要な幾つかの基本病態、特に持続的炎症の発現を証明することができた事から、DEPは喘息を引き起こす可能性があるのではないかと考えられる。しかし最終的には、今回のような人工的な投与方法による実験ではなく、ディーゼル排気（DE）そのものを吸わせる、いわゆる吸入実験で上記の4つの基本病態が起こることを証明する必要がある。これを検討するために、平成5年度から5カ年計画で新たな「特別研究」を推進することになっている。

7. 活性酸素による喘息様病態の発生に関する既知の研究報告

これまでの基礎医学分野の研究では、主にキサンチン

表2. O_2^- が様々な喘息様病態を起こすという報告



/キサンチンオキシダーゼから発生させた O_2^- を用いて、 O_2^- が血管透過性を亢進させ、様々な化学走化性因子の遊走による炎症を起こさせる他に、痰の原因になる粘液質の過剰分泌を起こしたり、気管支喘息を引き起こすヒスタミンやプロスタグランジン、ロイコトリエン等の化学伝達物質を遊離し、あるいは気道反応性を亢進させたり、気管支の β -アドレナリン受容体数を低下させて、気道を過敏化させるなど、活性酸素が喘息の様々な病態を引き起こすことが報告されている（表2）。

一方、我々は今回、DEPから様々な活性酸素が生成することを見いだした。それ故、これら活性酸素を生成するDEPが上記のような喘息様病態を引き起こしうることは可能と考えられる。

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

平 田 健 正 (地域環境研究グループ有害廃棄物対策研究チーム)

1. 研究の背景と概要

トリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物が大規模に地下水から見出されたのは、1982年に実施された環境庁地下水汚染調査である。その後の調査でも、各地の地下水から基準を上回る汚染が発見され、水質汚濁防止法や化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律の改正、さらには水道水に係る水質基準(水道水質基準値)や水質環境基準を見直すきっかけとなった。地下水汚染調査の始まった当初は、毎年2~5%の割合で水道水に係る水質基準値を上回る地下水汚染が見つかったが、最近ではその不適合率は1%前後にまで減少している。一見、地下水汚染が改善しているようにも思えるが、汚染される可能性の高い都市域や工業地域での地下水調査が一段落し、汚染物質の使用量の少ない地域にまで調査が進んできたからであろう。

地下水は遅いながらも流れているから、流れる間に拡散や混合希釈されて自然状態でも地下水質は回復するように考えられがちである。ところが、汚染された地域では帯のように伸びた地下水汚染が観測されるが(図1)、汚染のブルームには季節的な変動はあっても数年程度ではほとんど変化しない。高濃度でしかも継続性のある地下水汚染では、地下のどこかに原液状の汚染物質が溜まっており、そこから少しずつ溶け出し、地下水汚染を招いているからである。トリクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物は水には溶けにくく、難分解性物質であるため、これらの特性を持つ化学物質に地下水が汚染されると、その汚染は長く続くことになるし、地上からの汚染物質の侵入を防ぐだけではなかなかきれいにならない。こうした状況の中で、汚染を未然に防止するための法制度が一応整ったことから、地下水汚染問題は次第に浄化対策に関心が移りつつある。

わが国でも、ここ1~2年の間に一斉に浄化対策事業が始まったように思われる。ただ、浄化事業には多額の経費がかかるため、新しい技術を導入するにしても汚染の規模や汚染物質の存在状況に合った効率よい技術を用いる必要があり、何より地域の特性に合ったものでなければならない。こうした背景から、地下水汚染浄化対策を効率よく実施するための手順を明らかにすることを目

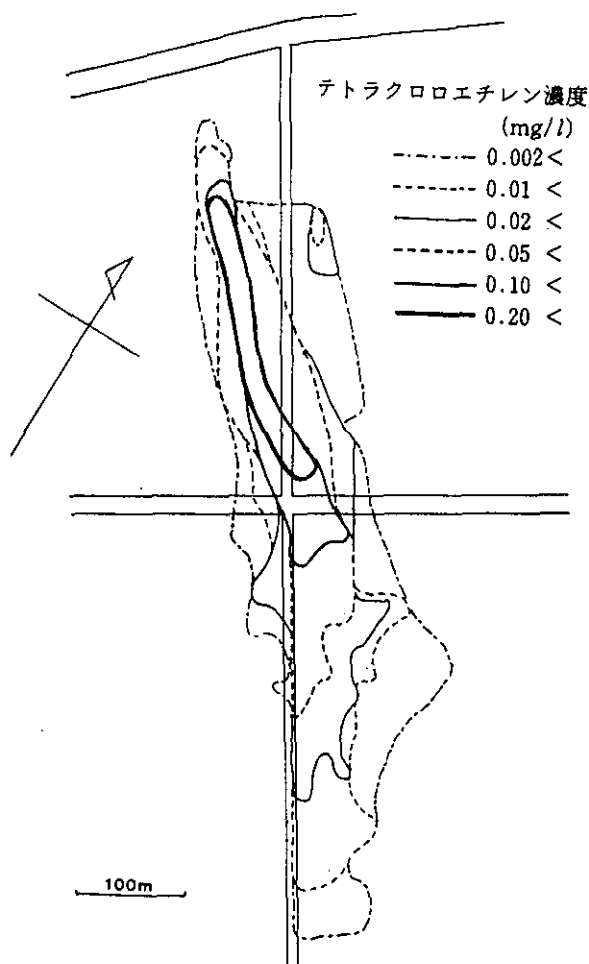


図1 地下水中で観測されたテトラクロロエチレンの汚染ブルーム

的に、特別研究「トリクロロエチレン等の地下水汚染の防止に関する研究」が平成2年度より4年度までの3年間実施された。本特別研究は①土壌・地下水圏における汚染物質の挙動に関する研究、②汚染物質の存在状況把握手法の確立、③地下水浄化対策技術の評価、④地下水浄化対策手順の確立、の4つのサブテーマで構成されている。ここでは、特別研究で得られた成果を中心に、適切な地下水汚染調査法を含めて、これまでにわが国で用いられた浄化対策技術の現状と問題点について紹介する。

2. 適切な調査・対策手順

地下水汚染が見つかる、①汚染の程度や汚染源を特

定するための調査を行い、②調査資料を基に浄化対策実施の必要性を判断し、浄化対策を実施する場合には、③地下での汚染物質の存在状況に最も即した浄化技術の選定と、④浄化目標を設定し、⑤浄化対策効果を確認して、一連の地下水汚染対策を終えることになる。いずれの段階でもかなりの経費がかかるから、適切な調査法と浄化対策技術を選定することが重要である。強引に浄化対策を実施しても、汚染物質の除去が進まないばかりか、かえって地下水汚染を助長することにもなりかねない。

2.1 地下での汚染物質の存在状況

地下水汚染を問題とする時、それは汚染物質が地下水に溶解している状態を指している。水が汚染物質原液と接すると、水溶液濃度はトリクロロエチレンで最高1100 mg/l、テトラクロロエチレンで150 mg/lとなる。一見して揮発性有機塩素化合物は水に溶けにくい物質であることが分かる。ところが、水道水質基準値はトリクロロエチレンで0.03 mg/l以下、テトラクロロエチレンで0.01 mg/l以下に設定されているから、見方を変えればトリクロロエチレンは水道水質基準値の36700倍、テトラクロロエチレンは15000倍も水に溶け得ることになる。原液が空気と接した場合には、空気中の最高濃度はトリクロロエチレンで76300 ppmv、テトラクロロエチレンで18400 ppmvとなる。トリクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物が土壌や地下水中に侵入した場合も、汚染物質は①土壌粒子と粒子の間隙に原液状で存在する、②水に溶解する、③土壌に吸着する、④土壌ガス（土壌間隙中の空気）に気化する、の4つの形で存在し、それぞれの濃度は気体・液体・固体の間の

分配特性で決まる。

汚染源近くの地下水濃度についてはトリクロロエチレンで最高360 g/lを始めとして水溶解度に近い値が検出されており（表1）、地下水中に原液状の汚染物質の存在することを示している。汚染源から離れるにしたがって、地下水濃度は低下する。ただ、図1に見るように地下水中では横方向にあまり広がらず、帯のように伸びた汚染のプルームが観測される。

土壌濃度について、汚染源で百 g/kg を超える汚染土壌の見つかることもあるが、こうした極端に高濃度な汚染はごく狭い範囲に限られ、その周辺では2～3桁濃度が低下している。また、未固結の火砕流堆積地域などでは50 mも浸透することがあるが（図2）、それでもトリクロロエチレンの土壌濃度で80 mg/kg を超える高濃度汚染は20 m程度の範囲に収まっていることから、トリクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物は水平方向にあまり広がらず、土壌中を浸透することが分かる。

これまでに汚染原因の判明した事例の多くは、装置や容器からの溶剤の漏れ、廃棄物の埋立や高濃度排水の地下浸透などであった。こうした事例では原液、あるいは原液に近い汚染物質が地下浸透しているおそれがあり、高濃度でしかも継続性のある地下水汚染では原液状の汚染物質が地下のどこかに潜んでいると考えて間違いない。原液としての揮発性有機塩素化合物は水より重く、粘性や表面張力は水より小さいサラサラした液体である。そのため、不飽和土壌中では水よりむしろ浸透しやすい性質があり、ガラスビーズや砂などを模擬土壌に見立てたカラム実験では土壌中を簡単に浸透落下し、地下

表1 地下水汚染事例での土壌・地下水最高濃度

汚染地区	汚染物質	土 壌 (mg/kg)	深 度 (m)	土 質	地下 水 (mg/l)
TK-A	トリクロロエチレン	64	7	粘 土	11
	C-1,2-ジクロロエチレン	39	7		19.2
TK-B	トリクロロエチレン	0.2	11.5	シルト	1.9
	C-1,2-ジクロロエチレン	3.43	6.3		5.5
T1	トリクロロエチレン	6,600	2	粘土礫玉石	42
	トリクロロエチレン	5.4	37		103
KT-U	トリクロロエチレン	40	25~27	シルト	360,000
KT-K	トリクロロエチレン	10	0.7	表 土	>10
KM-K	テトラクロロエチレン	360	5.5	シルト	80
KM-T	トリクロロエチレン	138	46	砂質シルト	294
SZ-A	テトラクロロエチレン	8,100 湿	2.1	砂 礫	8.6
SZ-B	テトラクロロエチレン	25,000 湿	0.8	粘 土	22
IT-S	トリクロロエチレン	232	3	砂 礫	1,390
IT-M	トリクロロエチレン	210,000	7~8	砂質シルト	40

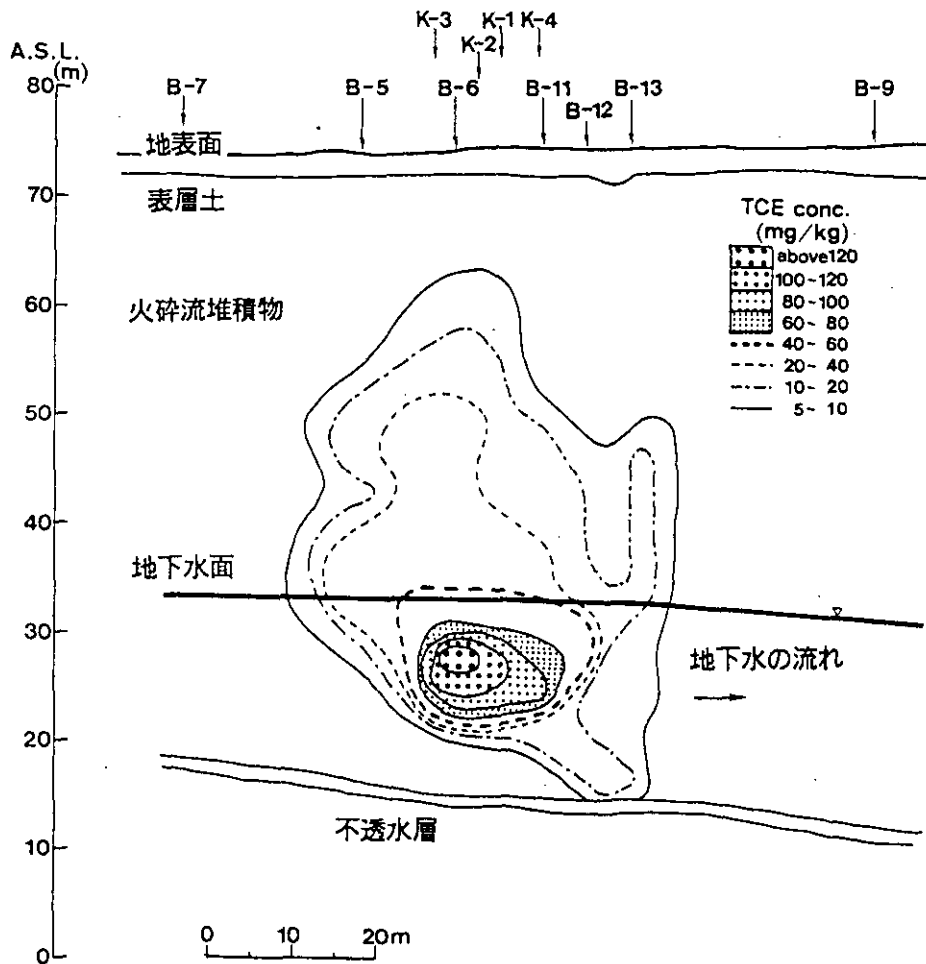


図2 深い土壌中のトリクロロエチレン濃度の分布

水面上に溜まったり、帯水層の底にまで落ち込むことが明らかにされている。表1には、実際の汚染現場で得られた地下水や土壌濃度の最大値とその土質特性を整理しているが、最高濃度を示す深さはまちまちであっても、帯水層の底に相当する礫層と粘土層の間に高濃度で溜まっており、室内実験でみられた現象が実際の現場でも生じていることが実証された。

2.2 土壌ガス調査とボーリング調査

浄化対策を実施する場合、できるだけ高濃度な汚染物質を除去する方が効率的である。同じ量の地下水を汲み上げるにしても、10 mg/l の濃度より 100 mg/l の地下水揚水の方が10倍効果が上がる。つまり、表1に整理したような地下で高濃度に汚染物質の溜まっている場所を知る必要がある。

汚染物質の存在状況を調べるには、ボーリングを行い、汚染土壌や地下水の採取・分析をする必要がある。ただ、ボーリング調査にはかなりの経費がかかるから、効率よく実施し、ボーリング本数を減らすことが経費軽減につ

ながる。その意味で、最近ではボーリング地点選定のための予備的な調査として表層土壌ガスモニタリングが一連の調査手順に組み込まれつつある。土壌ガス調査法としてさまざまな手法が考案され、組み合わせも提案されている。検出感度は高いが経費がかかる手法としてフィンガープリント法やモービルラボ法、検出感度は低いが経費がかからない手法として検知管法がある。さらに、これらの中間的な手法として土壌ガスを採取し、n-ヘキサンやテナックスに固定したり、バッグに保管して持ち帰り、分析する手法などがある。いずれの手法にも特長があり、調査の目的や段階に応じて使用すれば効果的な調査ができる。

汚染が見つかった当初は、ある方向性はあっても汚染源を特定するにはかなりの広い範囲で土壌ガス濃度を調べる必要がある。この概況調査では高濃度地点に当たる確率は低いから、検出感度が高く、物質の同定できる手法が望ましい。図3はテトラクロロエチレンで汚染された浅層地下水域で表層土壌ガスをバッグに採取し、ガスクロマトグラフ-ECDで分析した結果である。図示のよ

うに、汚染源と見られるドライクリーニング事業所を中心に同心円状に土壤ガス濃度が分布しており、土壤ガス調査法は汚染源の絞り込みに役立つことが理解できる。

こうした調査でだいたいの汚染源位置が特定されると、ボーリング地点を決めるための土壤ガス調査に入る。汚染源付近では土壤ガス濃度も高く、調査地点数も1m×1mメッシュで実施することも希ではない。そのため、現地で濃度の読み取れる簡便な調査が要求される。検知管法は、土壤ガス濃度が数ppmv以上でないとき

度が得られず、トリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどの物質の判別はできないが、取扱いが極めて簡便であり、高濃度地点の絞り込みの段階に至れば役立つ。

現場ガスクロ、n-ヘキサン固定や検知管法など、調査手法間のガス濃度値にはかなり高い相関が認められている。ところが、濃度の絶対値になると、例えば図4のドライクリーニング機周辺でn-ヘキサン固定法では14000、13000ppmvの濃度が検出されているが、検知管法では4000、5000ppmvにしかならず、高濃度地点

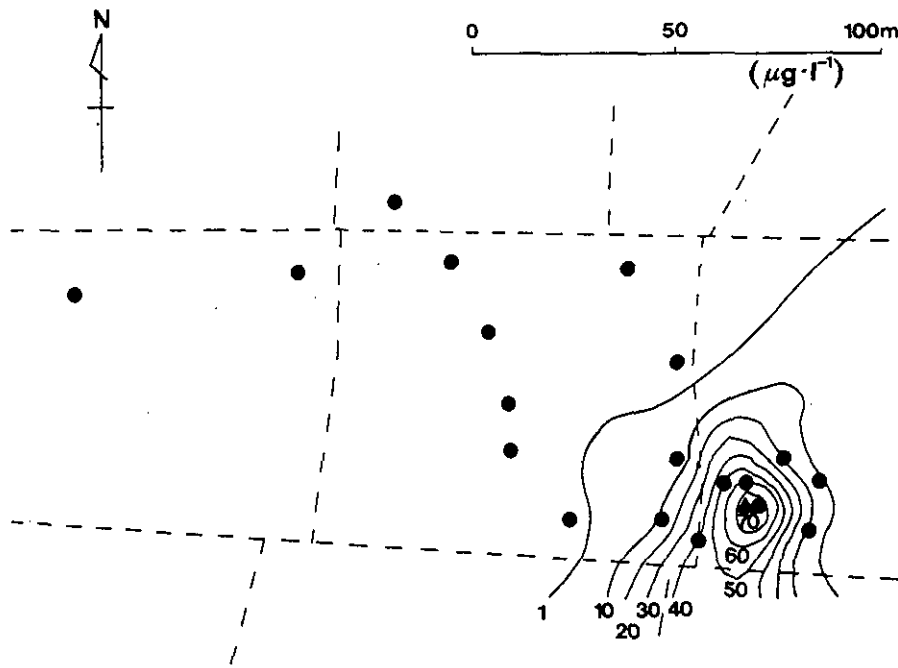


図3 表層土壤ガス中のテトラクロロエチレン濃度分布 (●:土壤ガス採取地点, ▲:ドライクリーニング事業所)

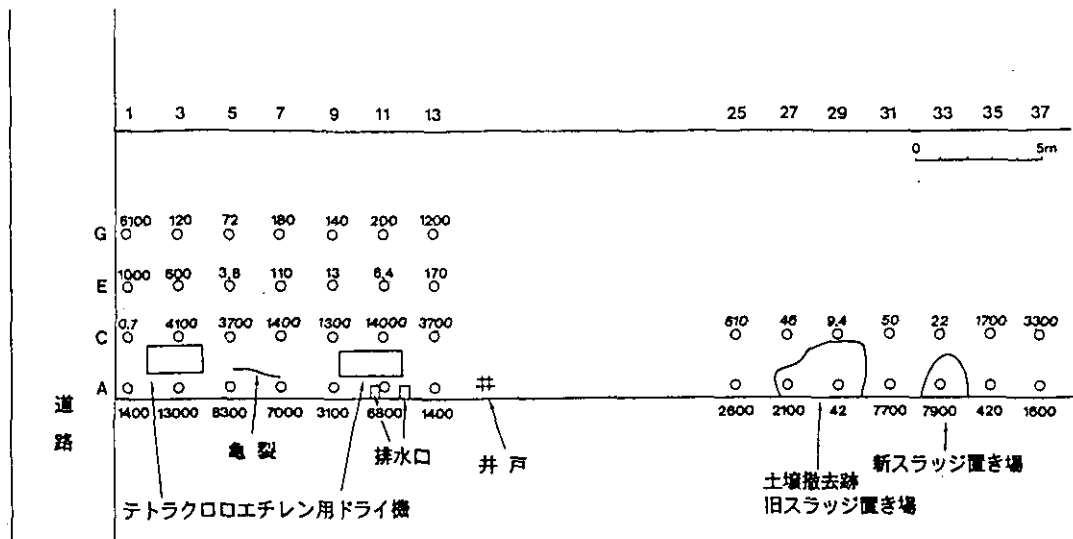


図4 表層土壤ガス中のテトラクロロエチレン濃度分布 (n-ヘキサン固定法)

では検知管法は低めに出る傾向がある。もちろん、高濃度地点の絞り込みには必ずしも濃度の絶対値は必要でなく、相対的な濃度分布の違いが分かればよい。ただ、土壌ガス吸引など浄化対策実施には濃度の絶対値が必要とされる場合もあるから、注意しなければならない。

つぎに、土壌ガスの最高濃度地点、あるいはその近くでオールコアボーリングを実施し、地下での汚染物質の存在状況を調べることになる。もちろん汚染源中心を探し当てたい、これはだれしもが願うことであるが、そのためには次から次へとボーリング地点を増やすことになる。経費が許せばボーリング本数の多いほど地質や地下での汚染物質の存在状況がより明らかになり、存在量の見積精度も上がる。ところが、汚染の大部分は過去の行為によるものであり、汚染物質の侵入地点や侵入量などについてはほとんど情報が無い。こうした状況では、いたずらにボーリングの本数を増やすことは得策でない。限られたボーリング資料で汚染物質の存在状況や汚染の程度を判断し、対策実施の必要性や浄化技術の選定など、実施可能な範囲で地下水浄化の方法を検討することが重要である。

3. 浄化対策技術

浄化対策技術についてもさまざまな手法が開発されており、大きくは①拡散防止技術、②無害化処理技術と③物理的な回収技術、がある。鋼矢板やシートによる囲い込み、セメントミルクや水ガラスを利用した固化技術、バリアー井を用いた地下水の揚水などは、汚染物質の土壌からの溶出や地下水中で拡散を防止する技術である。また、固化技術には必ずしも揮発性有機塩素化合物を対象としたものでないが、汚染土壌のガラス固化法もある。

酸化・還元、紫外線を利用した化学処理、微生物分解による生物処理など、無害化処理技術の開発も進められている。ただ、これらの技術は将来に期待される手法ではあっても、研究段階にあるか、実用化に向けての現地評価実験のレベルにある。

実際に、わが国の汚染現場に適用されているのは、物理的に地下から汚染物質を除去する技術であり、これには汚染土壌の除去、汚染地下水の汲み上げと不飽和土壌中の空気（土壌ガス）に気化した汚染物質を除去する土壌ガスの吸引がある。ここでは将来に期待される技術も含めて、浄化技術の現状と浄化効果を中心に紹介する。

3.1 適切な浄化技術の選定

地下水面が地表面のごく近くにある場合、地表面直下

に極めて高濃度な汚染の見つかることがある。図4に描いた汚染は、ドライクリーニング事業所の跡地で見つかった浅い土壌・地下水汚染の典型例であり、地表面近くの土壌から8ℓのテトラクロロエチレン原液が回収されている。こうした浅い土壌・地下水汚染では、浄化技術として汚染土壌の除去はおそらく最初に検討される技術であろう。2.1で述べた地下で存在する4つの形態の汚染物質を同時に除去する技術でもある。ところが、地下数十mと言った深い土壌や地下水水面下の土壌までは除去できない。汚染土壌掘削時に高濃度ガスを放出するおそれもあり、大気汚染を防ぎ、適切な作業環境を維持するためにも十分な監視が必要となる。

土壌ガスの吸引は、井戸を用いて土壌ガスを抜き取り、土壌ガスに気化した汚染物質を回収する技術である。わが国でもいくつかの汚染現地に適用され、その有効性が実証されつつある。原位置で汚染物質の回収できる点でも優れている。また、土壌ガスを吸引するからと言って、特別な井戸構造に仕上げる必要はなく、ガス吸引のためのスクリーンを不飽和部分に設ければよい。ただ、ブローワーや真空ポンプを用いて井戸内を減圧し、土壌ガスを吸引するため、大気圧との差圧に見合った地下水位の上昇が生じる。特に、トリクロロエチレンなどは地下水水面付近に溜まりやすいことが分かっており、この部分が地下水で覆われることは土壌ガスの流れる範囲が狭まるばかりか浄化効果も損なう。その結果、土壌ガス吸引に伴う地下水位の上昇を相殺するため、地下水の汲み上げも必要となる。このように、土壌ガス吸引と言っても土壌ガスも地下水も汲み上げる二重抽出法を採用することとなり、十分な土壌ガスの流動範囲を確保するにはかなりの地下水の汲み上げと水処理が必要となる。この地下水位の制御は、土壌ガス吸引の浄化効果を左右すると言つて過言でない。

汚染土壌の除去や土壌ガスの吸引は不飽和土壌中の汚染物質を除去できても、地下水まではきれいにできない。そのため、汚染された地下水の浄化は地下水の汲み上げに頼らざるを得ないのが現状である。トリクロロエチレンなどは水には溶けにくいことから、地下水の揚水によって地下水中の汚染物質の寿命を1/10にまで縮めるには、揚水量を百倍にまで高める必要のあることも指摘されている。このように時間はかかっても地下水の揚水は確実に汚染物質を除去できるし、長年の揚水で汚染土壌の除去や土壌ガスの吸引より多量の汚染物質を回収できる可能性もある。何より地下水汚染が問題にされており、現状では地下水の揚水は欠くことのできない浄化技術である。

このように見ると、ただ単に浄化対策を実施しても効果は挙がらない。効率よく汚染物質を除去するには、個々の浄化技術を十分に吟味し、汚染の程度や汚染物質の存在状況に合った適切な技術を選定することが重要である。

3.2 物理的な除去技術と浄化効果

これまでに実施された汚染土壌の除去事例を見ると、対策直後に地下水質は急激に回復する。図5は汚染土壌除去の前・後の地下水濃度を比較しているが、汚染土壌の除去によって地下水中のテトラクロロエチレン濃度は1桁減少している。これは土壌から90%のテトラクロロエチレンが回収できたことを表している。また、トリクロロエチレンの汚染現場で汚染土壌を除去し、浅い地下水については2桁近く濃度を下げた浄化事例もある(図6)。ところが、その後の地下水質の回復状況を見ると、浅い地下水濃度は低下の傾向にあっても容易にはきれいにならないし、深層の土壌までは除去できていないことから、深い地下水については除去効果は全く現れていない。この汚染現場では、汚染土壌除去後も継続して地下水の揚水を行い、十数トンのトリクロロエチレンを回収して、最近ようやく水道水質基準値近くまで回復する兆しが見え始めたところである。

汲み上げた地下水はばっ気処理し、送風した空気に含まれる汚染物質は大気放出前に活性炭で回収されている。除去した汚染土壌も、廃棄物として適切に処理しなければならない。天日乾燥、熱をかけ汚染物質を気化させる、積み上げ土壌ガスを抜き取る、などであるが、この場合も大気汚染を防ぐために気化した汚染物質は活性炭などで回収する必要がある。

土壌ガスの吸引技術は、米国のスーパーファンドサイトなどで実績のある浄化手法であり、わが国でもいくつかの汚染現場に適用されている。地下30~40mから土壌ガスを抜き取った対策事例では、1本の井戸で土壌ガ

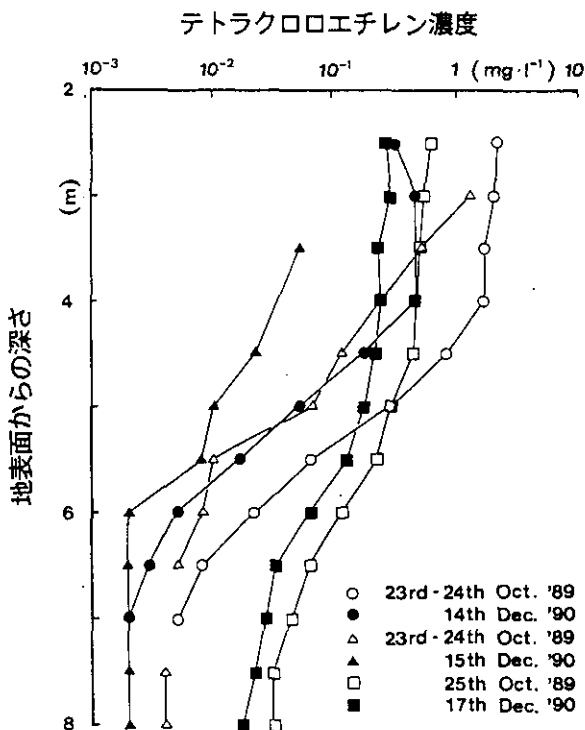


図5 汚染土壌除去に伴う地下水中のテトラクロロエチレン濃度分布の変化 (汚染土壌の除去は1990年5月)

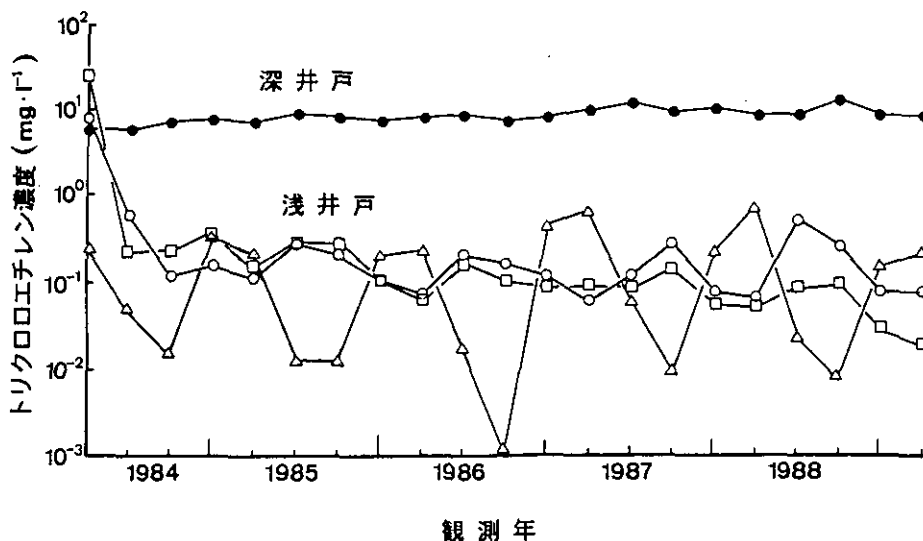


図6 汚染土壌除去と地下水揚水による地下水質の回復状況 (汚染土壌除去は1984年5月)

スの吸引できる有効影響半径として 10 m 程度の値が得られており、深層汚染土壌の浄化範囲の目安となろう。

吸引された土壌ガス濃度は数千 ppmv であることが多く、時には 1 万 ppmv の高濃度ガスが観測されることもある。この土壌ガスに含まれる汚染物質は、大気放出前に活性炭で回収される。また、図 2 に示したトリクロロエチレン汚染現場で実施した浄化対策結果から、土壌ガス吸引と地下水揚水によるトリクロロエチレン除去率を図 7 に比較している。浄化対策の始まった初期には、土壌ガス吸引法では毎時 1 kg のトリクロロエチレンが回収されており、確かに効率的な除去技術であることが分かる。地下水揚水の除去率を 1 桁上回っている。また、図に見るように、いずれの技術も対策が進むにつれて指数関数的に除去率が低下している。図中に示した時間に対するべき数を比較すると、土壌ガス吸引法の除去率低下は地下水揚水の 2 倍も早い。つまり、浄化対策の進捗に伴い、両者の除去率は逆転することを表しており、2 本の直線の交差した時間以降では地下水揚水の方が効率的な汚染物質除去技術となる。このように、浄化対策の進展とともに、地下での汚染物質濃度や存在状況が変わるから、こうした変化に応じて、より効率的・低コストな技術に切り替えるなどの柔軟な対応も浄化対策には必要となる。

一方、浅い土壌汚染に土壌ガス吸引法を適用する場合、地表面から空気が流入し、有効な浄化範囲は狭くなる。地下 1.5～3 m から土壌ガスを抜き取った対策事例では、有効影響範囲として 1.7 m の値が得られている。吸引風量を稼ぎ、有効影響範囲を広く取るため、土壌ガス吸引圧と大気圧との差を大きくすれば、その分地下水位が上昇し、不飽和土壌層が地下水で満たされ、土壌ガス吸引のできない事態も生じる。こうした時、浅い土壌であるから 1 m 程度の深さなら簡単に鉄パイプなどが打

ち込み、このパイプを利用して空気を地表から流入させることも一つの改善策である。鉄パイプを用いて土壌ガスの抜き取れることも確認されており、簡単な工夫が浄化対策経費の軽減につながる。

3.3 微生物分解

土壌ガス吸引法や地下水揚水などの物理的な浄化技術は、地下から汚染物質を除去し、最終的には気化させ、活性炭で汚染物質を回収している。低沸点化合物の処理技術として理にかなっていても、活性炭から着脱した溶液や活性炭そのものを焼却処分することになる。つまり、地下から大気に汚染物質を移すメリー・ゴー・ラウンド現象と見られないこともない。さらに、活性炭処理は浄化対策維持経費としてかなりの負担となっていることも事実であり、排ガスの処理は今後に残された重要な課題である。これに対して、微生物分解技術は汚染物質を二酸化炭素にまで完全分解できる可能性があり、実用化が期待されている。

微生物分解は、もともとガソリンなど比較的分解されやすい炭化水素の浄化に利用されてきた。空気を吹き込み、栄養物質を注入して、土壌中に生息する微生物の活性を上げる方法である。一方、トリクロロエチレンなどは分解されにくい物質であるが、嫌気的な条件で効率よく分解する微生物がいくつかの土壌から発見されている。ところが、極めて年齢の古い深い地下水は別にして、トリクロロエチレンなどに汚染されやすい浅い地下水は好気的な雰囲気にある。そのため、米国では汚染された土壌や地下水から好気的な微生物分解菌を検索し、栄養物質や酸素とともに地下水中に投入する微生物分解実験が実施されている。最近では水溶解度のテトラクロロエチレン (150 mg/l) を分解する微生物も見つかっており、わが国でも微生物浄化実験を始める気運にある。

微生物分解を利用する場合、いくつか留意しなければならないことがある。投入した微生物が定着するかどうかの問題に加えて、分解に伴いさまざまな分解副産物が生成されるからである。テトラクロロエチレンからトリクロロエチレンを経てジクロロエチレン類の生成されることはよく知られているし、水道水質基準値の見直しに伴い 1,1-ジクロロエチレンと cis-1,2-ジクロロエチレンは基準項目の対象となる。実際の汚染現場でも、トリクロロエチレン濃度と同じレベルの cis-1,2-ジクロロエチレンの検出されることもある (図 8)。トリクロロエチレンやテトラクロロエチレンで基準をクリアしても、分解生成物で超過しては浄化対策の在り方そのものが問われることになる。微生物分解を実際の汚染現場に

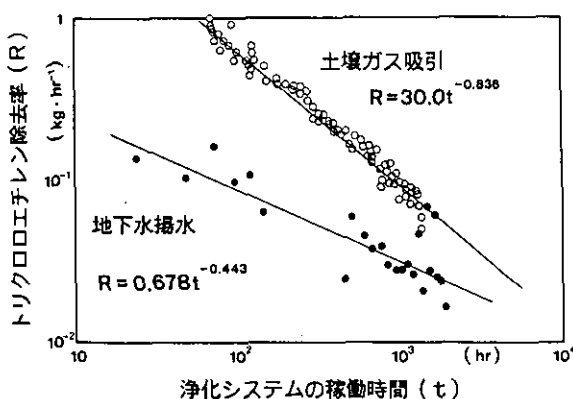


図 7 土壌ガス吸引と地下水の揚水によるトリクロロエチレン除去率の比較

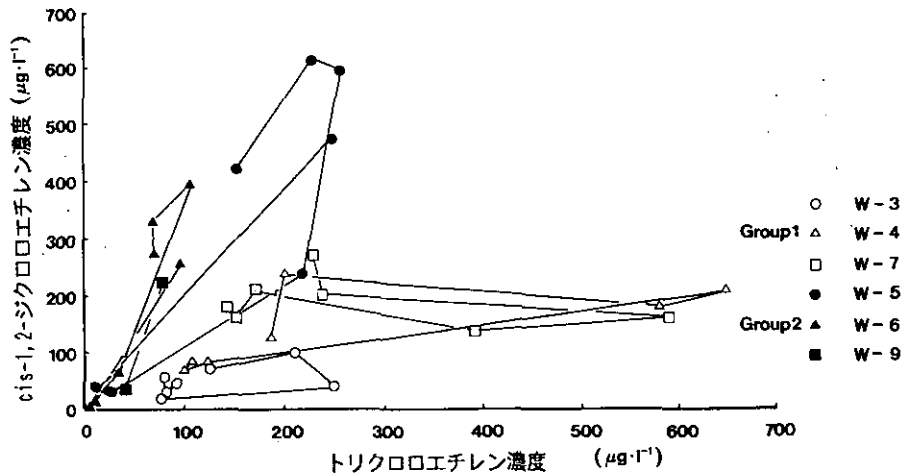


図8 地下水中のトリクロロエチレン濃度と cis-1,2-ジクロロエチレン濃度の比較

応用するには、投入する微生物の特性はもちろん、分解生成物など物質収支を明確にする必要がある。

3.4 浄化目標

浄化対策が進むにつれて、土壌や地下水中の汚染物質濃度は低下し、経費がかかる割には汚染物質の回収は捗らなくなる。そのため、経費のかからない技術への切り替えやいつかは浄化対策の終了時期を検討しなければならない。これは一連の浄化対策手順の中で、最も難しい判断となる。

トリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどは、水道水質基準値や排出管理目標が設定されており、水質環境基準の対象物質にもなる。これらの基準値は浄化対策の一応の目安とはなるが、問題は極めて高濃度な物質が地下に溜まっていることである。表1に示したように、地下水からトリクロロエチレンで数百 mg/l、テトラクロロエチレンで飽和溶解度 150 mg/l を超える汚染の見つかることもある。地下水濃度が数 mg/l 程度の汚染でも、汚染に継続性のある事例では地下のどこかに原液状の物質が溜まっていると見て間違いない。つまり、水道水質基準値の1万倍の汚染を浄化することになり、これは99.99%の汚染物質を地下水から除去することを意味している。汚染土壌の除去で90%、土壌ガス吸引法でも吸引井の近くで90%の汚染物質の除去されることが分かっているが、これら90%の除去技術で99.99%の浄化目標をクリアするには気の遠くなるほどの時間がかかり、かなりの経費負担になることは確実である。確かに、長年の地下水揚水によって十数トンのトリクロロエチレンを回収して水道水質基準値近くまで浄化した事例はあるが、全ての汚染地でこうした浄化対策を実施することは不可能であろう。土壌汚染についても同じような

状況にある。

地下から回収した汚染物質質量や浄化対策前後の土壌ガス濃度などを用いた浄化率で対策の効果を評価することも一つの方法である。しかし、もともと地下に存在する汚染物質質量がよく分からないことから、どのくらい汚染物質を除去すれば、どのレベルにまで修復できるのか、推定することは難しい。水道水質基準値をクリアすることは浄化目標の重要な選択肢の一つであることに違いないが、一律にこうした基準値を当てはめてみても、達成は困難であるばかりか、経費負担に問題があっても浄化対策促進の妨げにもなりかねない。汚染の規模、地下水の利用形態や費用負担能力などを考慮しながら浄化目標を設定し、浄化対策の進展によっては経費負担の少ない技術に切り替えるなど、実施可能な範囲で柔軟に対応することも必要であろう。

4. 浄化対策の積極的な展開に向けて

揮発性有機塩素化合物による土壌・地下水汚染の浄化対策は、ここ1~2年の間に一斉に始まったように思われる。新しい技術の開発や浄化対策の進んでいる欧米からの技術も導入され、汚染物質除去技術として有効性が実証されたものもある。ただ、技術として確立することと浄化対策を展開することの間には大きな隔りがある。これまでに実施された浄化対策の多くは、かなり規模の大きい事業場が汚染源であったことを見ても、浄化事業を進めるに際して経費負担が最大の問題となるからである。

先端的な技術の導入は、浄化対策を効率的に進められるし、新たな技術革新にもつながる。多額の経費と時間をかければ、確かに地下水浄化はできようが、多くの汚染事例は経費負担能力の低い小規模事業所である。浄化

事業を積極的に進めるには、新しい技術の開発はもちろんであるが、既存の技術であっても、より効率的、低コストな技術に改良する必要がある。土壌ガス吸引法は、粘土やシルトなど通気性の悪い土壌を除けば、通常の土壌では比較的簡単に土壌ガスを抜き取ることができる。浅い土壌汚染に対しては、鉄パイプの打ち込みで対処できる可能性があるし、汚染物質を回収する活性炭は地下水処理と兼用すれば経費の節約になる。対策が進むにつれて浄化効率は落ちるが、低コストな技術に切り替えたり、あるいは濃度の高い土壌ガスや地下水を除去するために浄化システムの稼働や停止操作を繰り返す浄化システム最適稼働方法の開発も必要となる。このように、地下水汚染調査に始まる一連の浄化対策システムの確立が緊急の課題であり、浄化事業を積極的に展開するには国、自治体、民間の間で、それぞれの能力に応じた役割分担

を明確にすることが求められている。

環境庁水質保全局では土壌・地下水汚染に対する新しい浄化技術を確立するため、平成5年度から新たに地下水汚染対策調査と土壌汚染浄化新技術確立・実証調査の2つの調査事業を始めた。また、平成4年12月には土壌・地下水汚染浄化に関心を持つ多数の民間企業により、土壌汚染等への対策の進展を図ることを目的に土壌環境浄化フォーラムが設立された。

今後、この2つの動き等が中心になって、浄化対策技術や浄化対策システムの確立、浄化事業の進展に取り組んでいくことになろう。

浄化対策技術の開発や評価は技術を現場に適用して始めて可能となる。本特別研究遂行に際し、現地実験や資料収集に協力戴いた環境庁、地方自治体など、関係各方面の方々から謝意を表す次第です。

廃棄物処理に伴うリスクとその評価手法

中 杉 修 身 (地域環境研究グループ有害廃棄物対策研究チーム)

1. はじめに

廃棄物処理は排ガスや排水処理と並んで、人間活動から発生する不要物による環境汚染を防止するための環境保全対策であるが、適正に行われないと逆に環境汚染の源となる。この環境汚染の懸念が、処理施設用地の確保を困難にする大きな理由となっているが、廃棄物の質的な変化が適正処理を難しくし、量の増大も不適正な処理を引き起こす要因となっている。質の変化によって適正に処理できない有害物質が増え、また処理によって新たな有害物質が生成するようになってきている。一方、量が増えたため、処理施設的能力が不足するとともに、質の変化に対応した高度処理が可能な施設への更新を遅らせる要因となっている。廃棄物の適正処理を進めるためには、廃棄物処理に伴うリスクを適正に評価し、問題となるリスクに対し適切な対策を実施していくことが必要となる。

本研究所では、1990年度から1992年度までの3年間にわたり、特別研究「有害廃棄物のモニタリングに関する研究」を実施し、①有害廃棄物に係るリスク評価の考え方を明らかにするとともに、②焼却処理における有害物質の挙動、③埋立処分に伴う有害物質汚染の状況、④有害廃棄物のモニタリング手法について検討を行ってきた。本報告では、この特別研究の成果を踏まえて、廃棄物処理に伴うリスクとその評価手法について述べる。

2. 廃棄物処理に伴うリスク

廃棄物処理に伴うリスクには、①事故等によって生ずる直接的な人や物の被害と、②漏出した有害物質による環境汚染を通して人や生態系が受ける被害が考えられる。改正された廃棄物処理法では、直接的な被害を生ずる爆発性、引火性、感染性等の有害性を、特別な管理を必要とする廃棄物の特性の中を含むこととしたが、本報告では環境汚染に伴うリスクについて考えることにする。

廃棄物の中には、何らかの目的で意図的に製造・使用したものと廃棄物の処理過程等で非意図的に生成してくるものの2種類の有害物質が含まれる。工業的に製造・使用されている化学物質の数は十万を超えと言われていたが、その中には人の健康や生態系に対して悪影響を

及ぼすおそれを有する有害物質も数多く含まれている。それらは、製造・使用の過程で分解されなければ、いずれは排ガス、排水や廃棄物に含まれることになる。このため、排ガス、排水及び廃棄物は、処理によって有害物質を分解・無害化するか除いてから、環境中に排出される。この時、排ガスから除かれたものは排水か廃棄物に、排水から除かれたものは排ガスか廃棄物に、廃棄物から除かれたものは排ガスか排水に含まれることになる。しかし、排ガスや排水が一旦排出されると、有害物質が拡散してしまい、回収することができないのに対し、廃棄物は適正に処分されれば、有害物質の拡散を防ぐことができる。このため、最終的には廃棄物の中に有害物質が集積されることになる。排水や廃棄物処理の過程で非意図的に生成する有害物質も、同様に排ガスや排水処理を徹底すればするほど、廃棄物に集積してくることになる。それゆえ、廃棄物処理が適正に行われないと、集積した有害物質が深刻な環境汚染を引き起こすおそれがあり、有害物質による環境汚染を防ぐためには、廃棄物の適正処理が特に重要な役割を果たすことになる。

排出から保管、収集・輸送、中間処理を経て最終処分に至る廃棄物処理過程のそれぞれで、不適正な処理が多様なリスクを引き起こす要因となる(表1)。

排出段階で、廃棄物が不法投棄されると、それに含まれる有害物質が周辺環境を汚染するおそれが高い。保管や輸送段階では、輸送・保管容器の破損や交通事故等が起こると、廃棄物に含まれる有害物質が周辺環境へ漏出し、汚染を引き起こすおそれがある。また事故の際に火災や化学反応が起こると、新たな有害物質が生成することも考えられる。中間処理の段階では、非意図的に生成したのもも含めて、排ガスや排水に含まれて有害物質が周辺環境に排出されるおそれがある。また事故が発生すると、保管・輸送段階と同様なリスクを生ずることになる。

最終処分は海洋投入と埋立処分によって行われているが、有害物質を含む廃棄物が海洋投入されると、有害物質が溶け出し、海水を汚染するおそれがある。一方、埋立処分においては、不適切な方法で埋め立てられたり、外部へ有害物質が漏出するのを防ぐ遮水機能が十分でなかったり、破壊されると、浸出水が漏出し、周辺の水域

表1 廃棄物の流れ別のリスク要因

廃棄物の流れ	リ ス ク 要 因	
排 出	不 法 投 棄	投棄廃棄物からの有害物質の流出
収集・輸送・保管	事 故	交通事故による内容物の流出、混合輸送による異常反応輸送・保管容器の腐食による内容物流出、火災等による非意図的有害物質の生成
中 間 処 理	排ガス・排水の排出	不完全な排ガス・排水処理による漏出、未規制有害物質の流出、廃棄物処理に伴う非意図的物質の生成
	事 故	混合処理による異常反応、装置・機器の腐食破損による内容物の流出、非意図的有害物質の大量生成
最 終 処 分 (埋立処分)	浸出水の排出・漏出	不適切な遮水・排水処理による有害物質の流出、安定型廃棄物付着有害物質の漏出、未規制有害物質の漏出
	埋立表面からの揮散	揮発性有害物質の漏出
	事 故	遮水機能の破壊による有害物質の流出、火災による非意図的有害物質の生成
	跡地からの流出	閉鎖埋立地からの流出、跡地利用に伴う有害物質の攪乱

や地下水を汚染するおそれがある。また、埋め立てられた廃棄物が揮発性の有害物質を含んでいると、それらが埋立地表面から揮発し、大気汚染を引き起こすおそれがある。さらに、リスクのないことが十分に確認されないまま埋立処分地を閉鎖すると、跡地から有害物質が周辺に漏出するおそれがあり、跡地利用に伴って有害物質を含む廃棄物を掘り出すと、周辺環境に有害物質が撒き散らされるおそれがある。

米国等では、廃棄物の不適正な処理に伴う環境汚染が数多く明らかとなっており、それに伴うリスクを防ぐために多額の費用をかけて環境修復が行われているが、わが国では、廃棄物処理に伴う環境汚染の実態は十分に調査されておらず、それに伴うリスクも明らかでない。過去に米国等で行われていたような、環境を汚染しやすい液状廃棄物の投棄が以前から禁止されているなど、米国等と同様なレベルで環境汚染が生じているとは限らないが、リスクを的確に把握・評価し、適切に管理していくことが求められる。

3. 焼却処理における有害物質の挙動

最終処分量を減らすことと有機成分を分解することを目的として廃棄物の焼却処理が行われるが、これによって、元から廃棄物に含まれている有害物質が分解される一方で、非意図的に新たな有害物質が生成するおそれがある。このような焼却処理における有害物質の挙動を的確に把握することが、焼却処理に伴うリスクを防ぐ上で不可欠となる。

3.1 焼却に伴う重金属の挙動

重金属は、焼却処理によっても分解されず、排ガスと

焼却残渣に分配される。さらに、排ガス中の重金属は洗浄によって排水に移行したり、飛灰として集塵装置で捕集される。焼却処理における重金属の分配を一般廃棄物焼却施設で調べた結果が報告されているが、分配比率は重金属の物性と焼却方式や排ガス処理方式によって異なる。沸点の低い水銀は、洗煙されないと大部分が排ガスとともに大気中に排出され、洗煙されると大部分が排水に移行する。鉛、クロム、銅や亜鉛などの高沸点のものはほとんどが焼却灰に残り、カドミウムは相対的に排ガスや排水に分配される比率が高い。

都市大気中の重金属に占める廃棄物の焼却排ガスの寄与が高いとの報告もあり、排ガスに移行しやすい水銀やカドミウム等は適切な排ガス処理が行われないと、大気汚染の主要な源となるおそれがある。本特別研究の中で地公研の協力を得て調査した産業廃棄物焼却施設周辺の大気中の水銀濃度は、焼却施設の風下に位置する時に高くなる傾向が認められたが、当該施設の稼働状況が明らかでないため、大気中の水銀濃度に対する廃棄物焼却施設の寄与率は明らかにできていない。

3.2 塩素系溶剤の焼却に伴う有害物質の分解・生成

トリクロロエチレン等の不燃性かつ揮発性の塩素系溶剤は十分な温度と時間をかけて焼却しないと、分解されずに排ガスとともに環境中に放出されるおそれがある。また、廃プラスチックの焼却では非意図的に有害物質が生成することが懸念されている。そこで、本特別研究の中では、室内実験と地公研の協力を得て実際の施設で、塩素系廃溶剤と廃プラスチックの焼却・熱分解実験を行った。

一定の温度に加熱した石英管に通して行った室内実験

では、トリクロロエチレンは600℃でほぼ完全に分解し、テトラクロロエチレンは600℃以上で急激に分解し、800℃ではほぼ完全に分解した(図1)。また、廃溶剤、廃スラッジや廃フィルター等のクリーニング廃棄物の実施設での焼却実験では、二次燃焼温度が750℃の場合には排ガス中にテトラクロロエチレンが1.3 ppm 残っていたが、915℃にあげると0.046 ppm にまで減少した。一方、別の施設での焼却実験では、廃溶剤中の塩化メチレンとトリクロロエチレンは850℃以上で完全に分解したが、廃液中の揮発性有機塩素化合物は950℃以上でも完全には分解しなかった。

室内実験の結果では、トリクロロエチレンとテトラクロロエチレンで非意図的な有害物質の生成に大きな違いが見られた。トリクロロエチレンからは、多量の四塩化炭素やテトラクロロエチレンが副生し、四塩化炭素は800℃でも塩素換算で7.7%も生成した(図2)。この他にも400℃で塩素換算で3.8%も生成するヘキサクロロエ

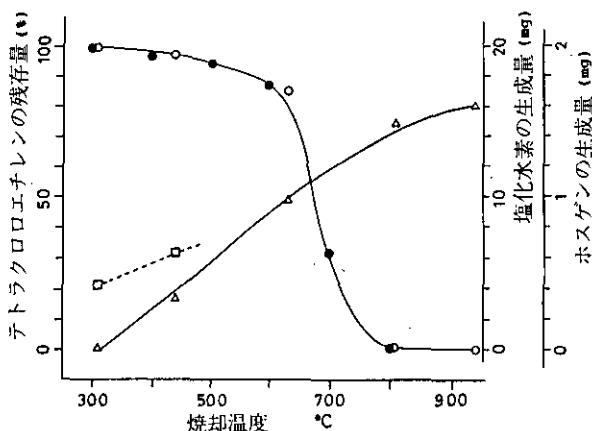


図1 (●) 予備実験データ、テトラクロロエチレンの残存；(○) 本実験データと333 mgのテトラクロロエチレンから生成した塩化水素(△)とホスゲン(□)の量

タンを始め、多様な高塩素化炭化水素類が生成したが、高い温度では減少し、800℃では検出されなかった。一方、テトラクロロエチレンの熱分解では少量の高塩素化炭化水素が生成するが、最高でも塩素換算で0.02%程度と生成率は低かった。

実際の焼却施設では非意図的な有害物質の生成は多くない。トリクロロエチレンと塩化メチレンを含む廃溶剤の焼却実験では、排ガスや洗煙排水から多様な有機塩素化合物が検出されたが、廃溶剤を焼却しない場合と濃度に差がないことから、これらの有機塩素化合物は煙突を共用している廃プラスチックの燃焼によるもので、廃溶剤の焼却による生成はわずかであると考えられる。この結果は大量の四塩化炭素やテトラクロロエチレンを生成した室内実験と大きく異なり、実際の施設では、廃棄物中に含まれる多様な成分が四塩化炭素やテトラクロロエチレンの生成を抑えているものと考えられる。クリーニング廃棄物の焼却実験では、塩化水素が生成したが、四塩化炭素、クロロホルムなどは検出されなかった。

3.3 廃プラスチックの焼却に伴う有害物質の生成

ダイオキシンの非意図的な生成の1つの源として、塩化ビニル等の塩素系プラスチックの熱分解があげられている。そこで、塩化ビニル樹脂の燃焼実験と実施設を用いた廃プラスチックの焼却実験で有機塩素化合物の生成状況を調べた。

塩化ビニル樹脂の室内燃焼実験では、有機塩素化合物、芳香族化合物や多環芳香族化合物を中心として多様な燃焼生成物が検出されたが、塩化ビニリデン樹脂と比べると有機塩素化合物の生成が少なかった。廃棄物の焼却で生成するダイオキシン類は複雑な異性体パターンを示すことが知られているが、塩化ビニル樹脂の燃焼実験でも、塩化ダイオキシン及び塩化ダイベンゾフランの多様な異

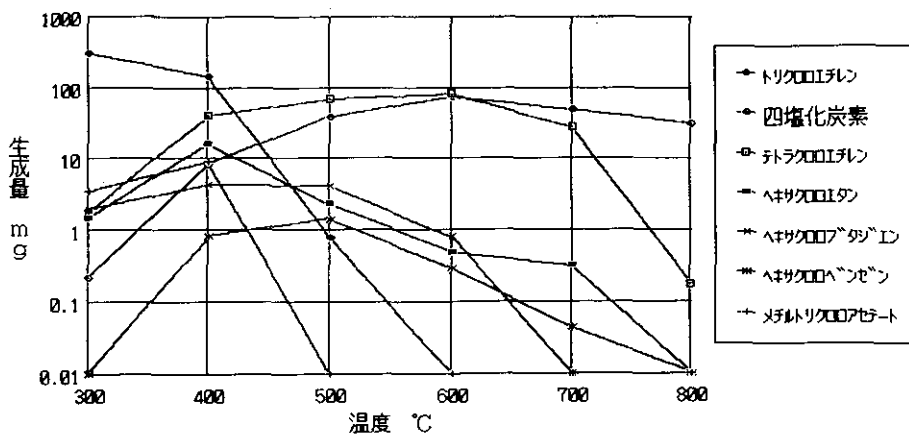


図2 トリクロロエチレンの主な熱分解生成物

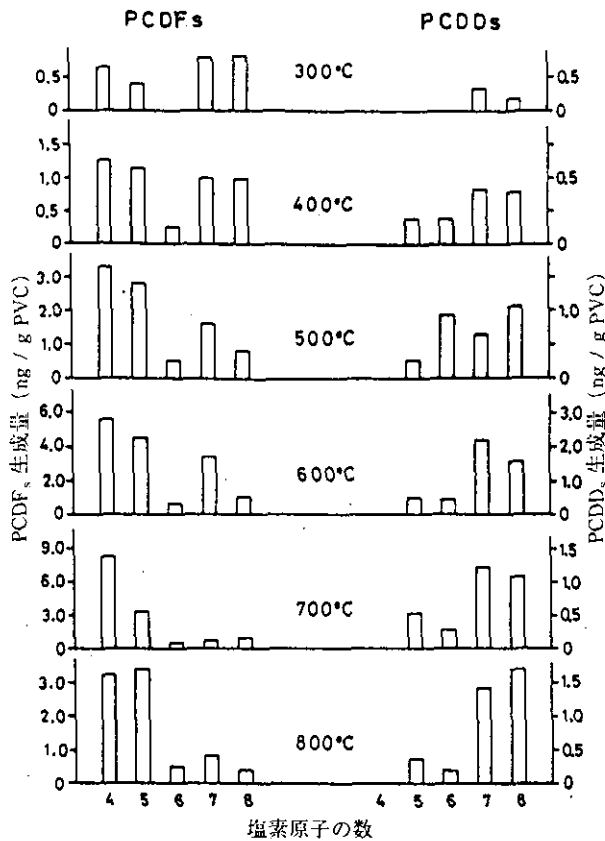


図3 塩化ビニル樹脂の燃焼で生成するダイオキシン(PCDDs)とダイベンゾフラン(PCDFs)の生成パターン

性体が検出された。異性体ごとに温度によって生成量に変化するが(図3)、既存の報告に比べると全体として低濃度である。特に、毒性が高いとされる四塩化ダイオキシンは、廃棄物処理・処分施設周辺の気中や土壌から検出され、塩化ビニルの燃焼実験でも生成するとの報告もあるが、本特別研究で実施した実験では検出されなかった。

実施での焼却実験では、四塩化炭素、テトラクロロエチレン、クロロベンゼン類、クロロフェノール類、クロロナフタレン類などの有機塩素化合物、ブタンやブテンなどの脂肪族炭化水素、ベンゼン、トルエンをはじめとする芳香族炭化水素、さらには可塑剤・難燃剤等のプラスチック添加剤に起因すると考えられるものが検出されており、焼却温度を上げてこれらの生成に顕著な減少は見られない。しかし、濃度は高いものでも数百 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に過ぎず、都市大気汚染に対する寄与は必ずしも高くはないと考えられる(表2)。

4. 埋立処分に伴う有害物質汚染

廃棄物に集積した有害物質は最終的には埋立処分地に入ってくるが、重金属のように分解しないものや難分解

表2 廃プラスチック焼却炉煙道排ガス中の有機化合物濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

化合物	二次燃焼温度(°C)	
	654~682	905~940
脂肪族炭化水素		
エチレン	20	<5
プロピレン	<5	14
i-ブタン	95	<5
i-ブテン	60	28
1-ブテン	360	250
n-ヘキサン	57	8
2-メチルヘプタン	15	<5
メチルドデカン	8	68
メチルウンデカン	<5	21
芳香族炭化水素		
ベンゼン	83	17
トルエン	130	240
エチルベンゼン	38	85
キシレン	42	84
有機塩素化合物		
1,1,1-トリクロロエタン	210	140
トリクロロエチレン	82	47
テトラクロロエチレン	170	22
その他		
2-エチルヘキサノール	11	43
安息香酸ベンチル	28	<5
フタル酸ジブチル	260	120

性の有害物質は長期にわたって残留し、適切な管理がなされないと、周辺環境を汚染することになる。

廃棄物中の水分や雨水に有害物質が溶出して浸出水となるが、この浸出水が適切に管理されないと、有害物質を含んだまま周辺の水域や地下水に侵入し、汚染することになる。現行の廃棄物処理法では、有害物質の溶出試験の結果に基づいて埋立方法を定めており、適正に管理されていれば、規制されている有害物質が周辺環境を汚染するおそれは少ないと考えられる。しかし、必ずしも未規制物質の全てについて有害性がチェックされているわけではない。米国では埋立処分地周辺の地下水から多

様な有害物質が検出されているが、わが国の実態について調査した例はほとんどない。そこで、本特別研究では、埋立処分地の浸出水に含まれる化学物質を調べた。産業廃棄物や一般廃棄物を埋め立てている管理型処分地と浸出水中に有害物質が溶けだすおそれのないものを埋め立てるとして、浸出水の漏出を防ぐための遮水や水処理等を不要としている安定型処分地から採取した浸出水を分析した。

無機成分については、分析した浸出水のいずれからも、多様な金属元素が検出されたが、海外での報告例と比べると濃度レベルは低く、特に有害と判定されるものはなかった。

一方、有機成分はGC/MSを用いて分析した。図4にガスクロマトグラムを示すように、多くの物質が検出されたが、同定できたものはその一部である。埋立処分地ごとに検出された化学物質の種類も濃度も異なったが、複数の浸出水から共通して検出されたものもあった(表3)。同定できたものの中では有機酸やアルコールなどの含酸素化合物が数多く、また高濃度で検出された。特に有機酸は最高で14 ppmを超えて検出された。廃棄物中の紙や厨芥などが埋立処分地で分解されると有機物が生成することが知られており、有機酸の起源は廃棄物中の高分子有機物の可能性が考えられるが、他の化学物質の検出具合から考えると、埋立処分された下水汚泥に起因している可能性もある。

同定できたものも大部分はその起源が明らかでないが、そのような中で、フタル酸エステルやリン酸エステルなどのプラスチック添加剤が広く検出されることが注目される。廃プラスチックは有害物質が溶出することはないとして、遮水機能のない安定型処分地への処分が認められている廃棄物である。水環境基準の要監視項目に指定されたフタル酸ジエチルヘキシルが定量できたのは安定型処分地の浸出水だけであるが、フタル酸ジブチルやリン酸トリス-(2-クロロエチル)は管理型処分地からも安定型処分地からも検出された。フタル酸ジエチルヘキシルの浸出水中の濃度は $2 \mu\text{g}/\ell$ で要監視項目の指針値 $60 \mu\text{g}/\ell$ と比べると十分に低く、既に埋め立てられている廃プラスチックを安定型処分地から直ちに除去する必要はないと考えられるが、安定型処分地についても周辺水域や地下水を監視することが望ましく、将来的には廃プラスチックの安定型処分地への処分を見直すが望ましい。

この他では、指定化学物質である1,4-ジオキサンが複数の浸出水から検出されたことが注目される。検出濃度は高いもので $1 \text{mg}/\ell$ を超えており、米国環境保護庁の毒性評価で 10^{-5} の発がんリスクに対応するとされている $70 \mu\text{g}/\ell$ をかなり上回っている。用途から考えて、製造・使用された1,4-ジオキサンが廃棄物として捨てられ、浸出水中に溶け出したとは考えにくく、浸出水中の起源は明らかでない。1,4-ジオキサンは河川、海域や地下

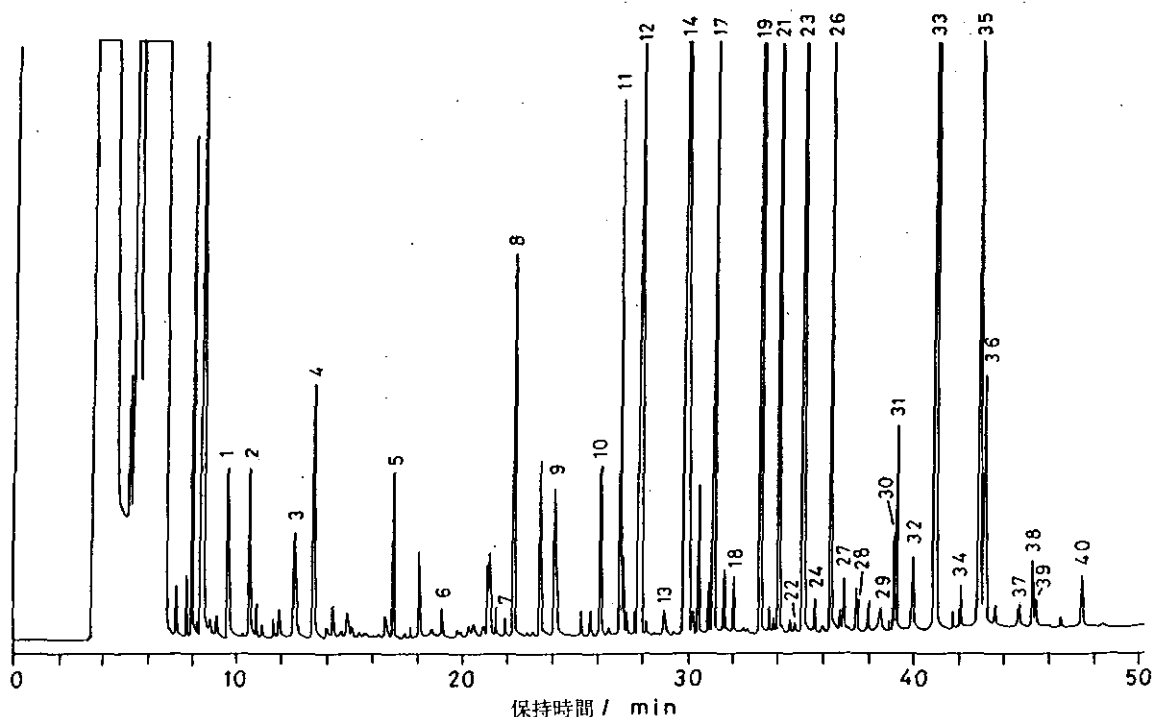


図4 管理型処分地浸出水のガスクロマトグラム(番号のついているピークが同定できた)

表3 浸出水中に検出される主な未規制化学物質

	検出濃度範囲 μg / ℓ	毒性評価 μg / ℓ
2-ヘキサノール	42~625	_____
1-フェニルエタノール	18~52	_____
フェノール	15~1100	_____
2-t-プトキシエタノール	0.8~344	_____
1,4-ジオキサン	20 ~1370	70 (10 ⁻⁶ 発がんリスク)
プロピオン酸	303~6930	_____
酪酸	180~10100	_____
イソ酪酸	180~5280	_____
吉草酸	105~14400	_____
イソ吉草酸	1020~14200	_____
イソカブロン酸	387~5960	_____
フタル酸ジエチルヘキシル	2.0	60 (水環境要監視項目)
フタル酸ジブチル	8.5~20	_____
N,N'-ジメチルアセトアミド	1.2~24	_____
1,3-ジクロロ-2-プロパノール	14~78	_____
リン酸トリス(2-クロロエチル)	0.4~4.1	_____

水からも検出されており、今後それらの汚染に対する埋立処分地の寄与を見積もるとともに、その起源を明らかにしていく必要がある。

5. 廃棄物に係わるリスクの評価

5.1 廃棄物処理に係わるリスクの管理方法

廃棄物処理に係わる環境汚染のリスクは、①廃棄物の持つリスクを評価し、その結果に基づき適切な方法で処理・処分することと、②廃棄物処理・処分施設についてリスクを監視し、その結果を踏まえて適切に施設を運転していくことで、管理されている。

廃棄物そのもののリスク評価は、現在は主に埋立処分地の周辺水域や地下水汚染のリスクを考えた溶出試験で行われている。しかし、揮発性の有害物質は埋立処分地表面から揮散し、局地的な大気汚染を引き起こすおそれがある。このようなリスクの評価は今後の課題であるが、浸出水と同様に高いリスクが懸念される場合には、その面からリスク評価を行い、リスクの高い廃棄物は地表面からの揮散を防止した埋立処分地への処分を義務づける等の対応が求められることになる。また、中間処理では廃棄物の種類によって一律に処理方法を定める場合が多いが、性状の大きく異なる産業廃棄物については含有成分の分析を行い、処理方法を決定しているところもある。廃棄物中の有害物質の分解や非意図的な有害物質の生成可能性を評価する方法が開発されれば、適切な中間処理方法の選択に大きな役割を果たすことが期待される。

一方、廃棄物処理・処分施設のリスク管理は、施設の立地と運転の2つの場面で考えることができる。施設の立地に先立って、埋立処分する廃棄物の性状と立地を予定している地域の自然・社会条件からその施設の運転に

伴うリスク評価を行い、リスクの高い地域への立地を避けることができれば、運転時における処理・処分施設のリスク管理が容易になると期待される。この立地段階では、定量的な評価を行えるだけの情報を得られないため、評点法などの半定量的方法でリスク評価を行うことになると考えられる。施設の運転が開始された後は、有害物質の排出状況をモニタリングし、その結果に基づきリスク評価を行い、適正な運転を維持することによってリスクを管理することとなる。

5.2 バイオアッセイによる評価

廃棄物そのもの、廃棄物処理施設のいずれのリスク評価を行うにしても、現行では溶出あるいは排出される有害物質の濃度の測定に基づいて行われている。しかし、今回の水環境基準の改訂のように規制される有害物質は今後も増えていくと考えられ、また未規制の有害物質をも含めた総合的なリスク評価を行おうとすると、個々の有害物質の濃度を測定する方法では対応できなくなる。そこで、本特別研究では、総合的にリスクを評価する方法としてバイオアッセイ手法を取り上げ、浸出水に適用してみた。急性毒性を評価する方法としてマイクロトックスと哺乳動物培養細胞を用いた試験を行い、慢性毒性を評価する方法としてエームス試験を行った。

マイクロトックス試験は、発光細菌が死ぬと発光しなくなることを利用して、発光量を測定することにより毒性を調べる方法である。2ヵ所の管理型処分地の浸出水をマイクロトックスを用いて調べたところ、1ヵ所の浸出水で希釈程度に対応して発光量が変化した。しかし、影響のみられた浸出水も半数致死量に相当するのは5.5倍に希釈した時であり、高い毒性ではなかった。

表4 廃棄物埋立処分地浸出水のEC₅₀と化学成分濃度 (mg/ℓ)

試料番号	EC ₅₀	TOC	Na	Mg	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Sr	Be	Pb
1	>1	29	460	34	93	ND	ND	0.6	0.1	<0.1	0.6	0.6	0.3	<0.1
2	>1	42	420	150	69	ND	ND	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
3	>1	94	1030	290	72	ND	ND	0.1	0.2	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
4	>1	150	2100	180	30	ND	ND	<0.1	0.3	0.5	0.1	<0.1	0.1	<0.1
5	>1	89	3150	150	17	0.5	ND	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	0.1	<0.1
6	>1	130	3260	75	12	0.9	ND	<0.1	0.4	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
7	>1	160	3300	370	100	0.4	ND	<0.1	0.3	<0.1	<0.1	0.7	0.2	<0.1
8	1/50	5200	7000	<1	8600	0.2	0.03	0.1	0.7	33	5.1	19	2.9	7.1
9	1/50	3800	4600	<1	6800	0.2	0.03	0.4	1.8	7.6	5.7	15	2.7	2.6
10	1/60	6000	7800	<1	10800	0.2	0.03	0.1	0.9	33	6.9	24	3.5	8.0

一方、産業廃棄物の溶出液に適用したところ、重金属を多量に含む溶出液で発光量が明らかに低くなり、廃棄物中の重金属の毒性が検出することができた(表4)。3種類の哺乳動物培養細胞を用いた急性毒性試験でも、管理型処分地の浸出水を15~25%含む試料でいずれの細胞も生存率が50%以下に低下した。一方、慢性毒性を検出する方法の1つとして変異原性を調べるエームス試験を管理型処分地の浸出水に適用したところ、揮発性成分と不揮発性の極性成分で変異原性が確認された。

バイオアッセイによる浸出水の毒性評価の試みは、いずれの方法でも何らかの毒性を検出することができたが、その毒性と有害物質の関係は明らかにできておらず、またこれらの方法でどの程度の毒性が検出されたら、どのようなリスク管理を行えばよいかは明らかにできていない。廃棄物処理に伴うリスク評価にバイオアッセイを活用できるかどうかは、さらに検討が必要である。

6. おわりに

実施地における焼却実験の結果を見ると、十分な温度と滞留時間を確保して適正に焼却すれば、塩素系廃溶剤はほぼ完全に分解され、非意図的な有害物質の生成も抑制することが可能と考えられる。また、廃プラスチックの焼却では多くの非意図的な有害物質の生成が見られるが、この場合も、十分な温度と滞留時間をかけて焼却することと適切な排ガス処理を行えば、有害物質の漏出を

抑制することは可能と考えられる。焼却処理で生成する毒性の高いダイオキシンについても、運転制御による発生抑制とバクフィルターなどを用いる排ガス処理などの検討が進んでいる。非意図的に生成する有害物質の全てが把握できているとは限らず、廃棄物の質がさらに変化すると、新たな有害物質が生成することが考えられるなど、廃棄物の焼却に伴うリスクは必ずしも小さくはないが、環境への漏出経路が限られているため、技術開発が進めば対応は可能と考えられる。

一方、埋立処分地の浸出水には、規制されているものの以外にも多様な化学物質が含まれている。遮水施設を持たない安定型処分地の浸出水から検出されるプラスチック添加剤等の有害物質は周辺環境を汚染する可能性が高い。また、管理型処分地の浸出水には水から除くことが容易でない1,4-ジオキサンが含まれている。浸出水中の化学物質の中で同定できているものは一部に過ぎず、未同定の化学物質の中に毒性の高い有害物質が含まれていると、現行の埋立処分地の管理体制ではリスクを十分に防ぐことができないおそれがある。浸出水中に含まれる有害物質をできるだけ同定したり、バイオアッセイ等の方法を用いて、浸出水の有するリスクを総合的に把握し、必要に応じて適切なリスク管理の方策を検討することが、化学物質汚染のリスク管理を行う上で重要な課題となっている。

ポスターセッション

ア オ コ の 毒

彼 谷 邦 光 (化学環境部化学毒性研究室)

富栄養化の進んだ湖沼では藍藻類が大発生し、水面に水の華を形成する。これが最近よく耳にする“アオコ”である。湖沼の水は水生生物を育てているほかに、上水道、家畜の飲み水、養魚用等にも利用されており、水質の悪化は生態系や健康だけでなく、経済的にも大きな打撃を被る。最近になって、世界各地の湖沼やダム湖に有毒藍藻類が発生していることが明かにされ、大きな社会問題となっている。本発表では、国内で最も良く発生する藍藻 (*Microcystis*) の毒素 (マイクロシスチン) について当研究室の成果を中心に紹介する。

1. 化学構造

マイクロシスチン (microcystin) は 3 個の D 型アミノ酸、2 個の L 型アミノ酸および特殊アミノ酸である N-メチルデヒドロアラニン (Medha) と非極性側鎖をもつ β アミノ酸 (Adda) からなる環状ペプチドである。L 型アミノ酸の部分がロイシン(L)-アラニン(A)、チロシン(Y)-アルギニン(R)、アルギニン(R)-アルギニン(R)、ロイシン(L)-アルギニン(R) になったものなどが単離されている。また、霞ヶ浦のアオコからチロシナーゼ阻害活性を持つ 3 環ペプチドのマイクロビリジン (microviridin) を同定した。

2. 分析法

マイクロシスチンの分析は逆相カラムを用いた高速液体クロマトグラフィーで分離し、紫外分光光度計で検出されてきた。しかし、マイクロシスチンの分子吸光係数が約 4 と小さいことから、高感度な分析は望めなかった。当研究室では、環境中の全マイクロシスチン量を高感度で定

量する方法を開発した。この方法はマイクロシスチンに特有の構造を持つ部分を取りだし、これをエステル化し、ガスクロマトグラフィーで定量するか、またはこれを蛍光標識し、高速液体クロマトグラフィー-蛍光検出器で定量するものである。

3. 環境中のマイクロシスチン

現在、世界各地の湖沼からマイクロシスチン等の藍藻毒が検出されている。我々の調査では、国内でも、霞ヶ浦、津久井湖、諏訪湖では有毒アオコが 6 月から 10 月にかけて発生していた。優先種は *Microcystis aeruginosa* であり、*M. viridis* が混在することもあった。主要毒はマイクロシスチン RR であった。ヨーロッパ、アメリカ、アフリカでの主要毒がマイクロシスチン LR であるのに対して国内ではマイクロシスチン RR であるのが特徴である。

4. 毒性

マイクロシスチン-LR の半数致死量 (LD₅₀) はマウスで約 100 μ g / キログラムであり、かなり強い毒である。急性毒性の発現についてはプロテインホスファターゼの阻害、肝細胞膜の傷害、炎症反応等の諸説がある。最近、我々は急性影響の初期に免疫細胞が関与するらしいという実験結果を得ている。

以上、マイクロシスチンの化学、分析、環境中の動態、毒性についての最近の成果を紹介した。湖沼の水質を一朝一夕に改善することは困難であろう。とすれば、これからも有毒アオコとつき合っていかなければならないであろう。そのための上手なつき合い方も考えねばならない。

幹線道路沿いに住む人々の交通公害についての意識

近藤 美 則 (社会環境システム部環境計画研究室)

1. はじめに

幹線道路沿道では、騒音の環境基準は、年々超過地点が増加している状況にある。このように、今後、沿道住民の居住環境をめぐる状況は一段と厳しくなると予測される。そこで、現在このような幹線道路沿道に居住している住民が生活上受けている迷惑・被害の実態と、それに係わる住民の考え方を調査した。

2. 調査と分析の概要

調査は、生活の場における迷惑・被害についての回答を求める質問票を用いて、1988年11月に東京都世田谷区内の表1にある幹線道路沿道4地域に対して行われた。ここで取り上げた幹線道路は、いずれも自動車の通行量が1日当たり8万~10万台であり、そのうち大型車の占める割合が10数%という大交通量の道路である。質問票は、ほとんどが自由に普通の文章で記述する部分からなっている。分析の方法は、得られた回答を単語に分け単語の頻度を調べたり、共通して多くの人が記述する単語を計算機でひとまとめにして、住民間で共通する迷惑・被害意識を求めた。

表1 調査対象地と幹線道路名称

D 1	首都高速3号線と国道246号が上下に重なって通る地域
D 2	首都高速3号線と東名高速のみまたは国道246号のみが通る地域
D 3	都道環状7号線が通る地域
D 4	都道環状8号線が通る地域

3. アンケート調査の結果

環状7号線沿いD3の住民の回答から得られた単語の集まりのひとつを表2に示す。この集まりは、語数が多く、また頻度の大きな語の割合も多く、D3の住民の主要関心事を表している。この集まりは、更に点線部分で3つ(a, b, c)に分けることができる。このうちbで下波線の付いた5語は、沿道D1からD4のいずれの地域においても、最も多く使われる語の集まりの中で共通して見られ、また、回答文の中で使用される回数も多い。このように、幹線道路沿道住民の迷惑・被害は間近の幹線道路からの自動車公害を記述する語で構成されているわけである。a, cは各地域の個別の迷惑・被害を表す。また、単語の頻度を調べた結果と合わせると、振動の被害が、騒音、排気ガスと同時に、かつ同程度に語られることが特徴である。

表2 沿道D3で最も多く使われた単語の集まり

(下波線の語は各沿道共通)

a	大 型 車 一 日 中
b	真 道 路 騒 音 振 動 道路の固有名詞 排 気 ガ ス 夜
c	多 い 交 通

湖沼におけるピコプランクトンの生態

渡辺 信, 高村 典子, 野崎 久義 (生物圏環境部環境微生物研究室)

彼谷 邦光, 佐野 友春 (化学環境部化学毒性研究室)

安野 正之 (地球環境研究グループ統括研究官)

1. 分布

全国53湖沼でのピコプランクトンの分布調査の結果、全植物プランクトン中に占めるピコプランクトンの割合は、貧-中栄養湖沼で高く、最大では植物プランクトン全現存量の62% (北海道然別湖) をしめていた。ピコプランクトンの Chl 量と全 Chl 量の比は、TP 及び TN と逆相関関係にあること及び貧栄養湖沼、中栄養湖沼、富栄養湖沼の各々で NP 比と相関関係があった。すなわち、現存量 (Chl 量) において、全植物プランクトン中に占めるピコプランクトンの割合は N あるいは P が少ないほど高いこと、及び NP 比が高いほど高いことが判明した。また、ピコプランクトンの現存量が多い野尻湖では、5-11月にかけて、水深 10-15 m で温度躍層が発達するが、ピコプランクトンは躍層に集積しており、最大 10^6 細胞 / ml の濃度で集積しているのが確認された。

2. 分類

これらの湖沼より、ピコプランクトン73株を分離・培養し、すべての株について単藻培養を確立したのち、希釈法及び抗生物質処理法を用いて、緑藻ピコプランクトンの無菌培養を確立した。ピコプランクトン73株について、それらの色素組成及び形態的特徴の解析から、藍藻類7種及び緑藻3種に分類できること、及びそのうち少なくとも藍藻5種、緑藻すべては新種であると考えられる。

3. 毒性

藍藻ピコプランクトン *Synechococcus* sp. -1 の大量培養試料の水抽出液をマウスに腹腔内投与したところ、2-4時間後にすべてのマウスは死亡した。水抽出液の分画では、2つのピークに毒性が確認されたが、毒性が強い方のピークについては、純化の過程で活性を失っていくことから、非常に不安定な物質であると考えられた。もう一つのピークについては、比較的安定で、純化及び構造決定の結果、Thionsulfolipid であることが判明した。この物質には細胞毒性及び魚毒性が確認された。

4. 生物間相互関係

タマミジンコ及びオオミジンコの藍藻ピコプランクトンの摂餌特性を調べたところ、双方とも藍藻ピコプランクトンをよく摂取するが、成長は悪く、産仔もしなかった。このことから、ピコプランクトンは、タマミジンコやオオミジンコのような大型の動物プランクトンでは、摂取はされるものの主食としての役割を果たしていないことが示唆された。混合栄養を行う黄金色藻類、*Poteroiochromonas* sp. の藍藻ピコプランクトンの摂餌特性を調べたところ、極めてよく摂取し、増殖することが判明した。光合成だけでは1日に一回の速度で分裂するが、藍藻ピコプランクトンを摂食すると1日に三回の速度で分裂していくことがわかった。*Poteroiochromonas* sp. をタマミジンコ及びオオミジンコに摂食させたところ、双方のミジンコとも *Poteroiochromonas* sp. を摂食しないことから、*Poteroiochromonas* sp. がどの段階の捕食者によって捕食されるのかは今後の課題として残る。

コンピュータグラフィックスによる海洋気候値データの画像表示

須賀 伸介 (社会環境システム部情報解析研究室)

1. はじめに

海洋大循環等の地球規模海洋循環の解析を行う場合には、スーパーコンピュータによる大規模数値シミュレーションデータ、長期間に渡る観測データ等の膨大なデータの処理が必要になってくる。コンピュータグラフィックスによるデータの可視化はこうしたデータ処理の技術として極めて有効な手段であり、多くの学問分野でデータの可視化が行われている。本報告では、我々が開発してきた海洋気候値データの表示システム、表示手法、表示例を紹介する。

2. 階層的方法による海洋気候値データの表示

我々が開発してきたデータ表示システムでは、ある海洋特性量を持つ海域を2次元または3次元的に表示することができる。これまで扱ってきた表示のためのデータは、数値シミュレーションの結果等で得られる形式のデータで、緯度、経度1度毎、水深方向33地点に関する3次元格子点上で水温等の海洋特性量が与えられているものである。我々は、与えられたデータに対して、階層

的な方法によってデータの構造化を行って表示する手法を採用した。図1に我々のシステムによる2次元の表示例を示す。全体は陸域(色の薄い部分)、着目する海域(色の濃い部分、ここでは塩分値34.0~34.1)、その他の海域(白い部分)の3つの領域に分かれる。それぞれの領域は大きさの異なる正方形で示されている。一番小さい正方形は緯度、経度一度毎の格子点に対応している。この表示の特徴は広い部分は大きな正方形で、海岸域のような複雑な領域は小さな正方形で表示するところにある。このような表示を行うためには図2に示すような、4分木の構造で全体のデータを構造化する。これによって表示のスピードの高速化とデータの圧縮が可能となり、非常に効率的にデータ表示の処理を行うことが出来る。

3. おわりに

今回のセッションでは、①3次元直交座標系における着目海域の表示、②2次元直交座標系における2つの海洋特性量の因果関係の表示(例えば等塩分領域での水温の分布)、③3次元球座標系における着目領域の表示を中心に紹介する。



図1 海洋気候値データの2次元表示

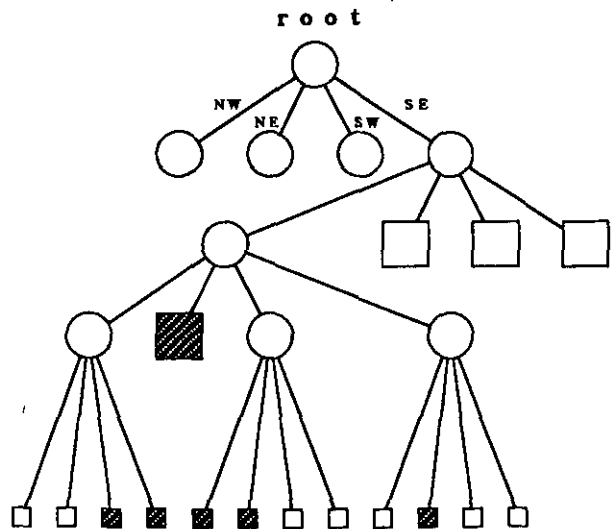


図2 データの階層構造

湿原生態系の調査手法

岩熊 敏夫・野原 精一 (生物圏環境部生態機構研究室)

平田 健正 (地域環境研究グループ有害廃棄物対策研究チーム)

湿原生態系の特性と生物群集の変動特性を把握し、湿原の保全に資する知見を蓄積することを目的とする研究を行っている。ここでは、福島県南会津の伝上山中腹、標高約 850 m に位置する面積 6 ha の高層湿原の宮床湿原で行った湿原の水環境、植生把握のための調査手法の検討結果を紹介する。

1. 連続写真による観測

生物季節の定量的把握手法のために連続撮影の簡易システムを開発し、植物及び景観の季節変化等の記録を行った。このシステムでは最長80日分の定時撮影が可能である。ミツガシワの花期は5月下旬から20日間、実は6～7月の50日間、ヒツジグサの花期は長く6月下旬から40日間であることなどが明らかにされた。またヒツジグサの開花の日周リズムも明らかにされた。このシステムは季節的な被度変化や日周リズムと環境要因の関係等の解析に有効と考えられる。

この装置では水位標、積雪深標を写し込むこともできる。1992年春の最大積雪深は140 cmで、これは標高540 mのアメダス観測点(南郷)における同日の記録、70 cmの2倍であった。地表のミズゴケ層内の自記温度計の記録と比較すると、積雪期間は0℃で雪解け直後の温度は7℃まで急激に上昇していた。その日の最高気温は20℃であった。

2. 湿原の微地形と微環境の測定

高層湿原にはシュレンケと呼ばれる窪地とブルテと呼ばれる盛り上がり为数mのピッチで繰り返す特有の微地形を形成している。この微地形の環境測定と凹凸構造

の解析を行った。宮床湿原の凹地、凸地の地温、土壌の乾燥状態(毛管ポテンシャル、負圧)と日射量を連続に測定した。凸地より凹地の方が地温は高く、ピークの時刻が遅くなった。夏季に毛管ポテンシャルは増加してゆき徐々に乾燥して行くが、降雨後に低下していった。凹地の日変化は大きく日中にピークが見られたのに対して、凸地は日変化が小さく夜中にピークが見られた。凹地は湿潤・乾燥の変化が大きく、雨が少ない時には水が抜けやすい場所であることが分った。このことは土壤硬度の測定からも示された。このことより、凹地のミズゴケが成長して新たな凸地を形成し凸地が交互に形成される、という一般に言われている湿原の微地形形成過程からは説明がつかない。むしろ凹地と凸地ではミズゴケの種に違いが見られており、種の違いが微地形形成に関係しているかを今後調べる必要がある。

3. 地下水位・水質調査

先端が地表面から0.5 m、1.5 m、2.5 m深さになるように観測井戸を数カ所に設置し、地下水位及び水質の測定を行った。一般に浅い地下水ほど地下水位は高く、水は鉛直下向きに動いていたが、高度の低い東南端の観測井戸では、浅い部分では鉛直上向き、すなわち湧き出しになることを示唆していた。異なる深さの井戸を設置することで地下水の流動に関する情報が付加される。また水質、特にアンモニア態窒素濃度とケイ酸塩濃度は地下水と水路・池とで大きく異なり、深層の地下水で最も高い値を示し、地下水と開水面とでの混合の可能性が少なかったことを示唆していた。

重金属の土壤微生物活性への影響

服部 浩之 (水圏環境部土壤環境研究室)

1. 土壤の重金属汚染

人間の産業活動に伴い、土壤もさまざまな有害物質によって汚染されてきた。中でも日本では重金属による被害が大きく、鉱山の下流にある水田地帯が広範囲にわたってカドミウム、亜鉛、銅等で汚染されてきた経緯がある。現在、鉱山の廃鉱などにより、鉱山起源の土壤汚染の可能性は小さくなったが、産業廃棄物処理場、都市廃棄物処理場、あるいは、下水汚泥や都市ゴミの農用地利用など汚染源は多様化しており、重金属による土壤汚染は今後も続くと予想される。

2. 土壤微生物の活性と機能

土壤中にはさまざまな微生物が生息し、その総数は土壤1gあたり約1億に達する。これら土壤微生物は、有機物分解、硝酸化成、脱窒などの活性をもち、地球表層での物質循環において重要な役割りを担っている。土壤が重金属によって汚染されると、微生物の活性が低下し、その機能も低下すると考えられるが、この方面の研究は極めて少ない。本研究では、特に有機物分解活性（呼吸活性）への重金属の影響を明らかにすることを試みた。

3. 各種重金属による土壤微生物活性の阻害

各種重金属の土壤微生物活性への影響を比較し、どのような性質の重金属で阻害が大きいのかを調べた。その結果、土壤中の細菌に対する毒性が強く、かつ土壤中で水溶性の形態になりやすい重金属ほど、土壤の呼吸活性

を大きく阻害する傾向がみられた。すなわち、阻害の大きい順に、カドミウム>銅>ニッケル>亜鉛=クロム>鉛であった。

4. 重金属の濃度と土壤微生物活性

土壤中の重金属の濃度がどのくらいになると、微生物活性が阻害されるのか？ 5種類の土壤でカドミウムの濃度を変えて活性への影響を調べた。その影響は、土壤の種類によって大きく異なり、砂質土で影響を受けやすく、火山灰土では影響を受けにくかった。しかし、土壤中の水溶性カドミウム量をベースにすると明瞭な関係がみられた。すなわち、どの土壤でも水溶性の量が1ppm以下では呼吸活性への影響は殆どないが、1ppm以上になるとその量に比例して呼吸活性は低下した。亜鉛の場合も、水溶性の量が、1ppm以上で呼吸活性は低下したが、低下の度合いは、カドミウムより小さかった。

5. 土壤微生物活性と植物の重金属に対する感受性の比較

土壤が重金属で汚染された場合、土壤微生物活性と植物では、どちらが重金属によって影響を受けやすいのか？ 土壤中のカドミウム濃度を変えて小麦を栽培し、生育への影響を調べ、土壤微生物活性への影響と比較した。小麦の生育は土壤中の水溶性カドミウム量が1ppm以下でも影響を受け、土壤微生物活性に比べてカドミウムに対して感受性が高いことが示された。

脳の細胞骨格蛋白質と神経毒

国 本 学 (環境健康部保健指標研究室)

1. はじめに

脳神経系の構造、機能の理解の一助として、我々は、細胞膜の内表面に存在し、様々の膜受容体蛋白質と細胞骨格系蛋白質との仲介役を果たしている蛋白質アンキリンの、特に神経細胞にのみ発現している分子量44万のイソ型(440 k アンキリン)に注目し、神経細胞の発生分化機構及び神経毒の作用機構の解析を進めている。

2. アンキリンとは何か

アンキリンの名は、ギリシャ語の ankyra (英語の anchor, 日本語で錨)に由来する。脳を始め様々の組織、細胞の細胞膜に存在する蛋白質で、我々はヒト脳アンキリン(分子量44万(440 k)と22万(220 k)の少なくとも2種類のイソ型が存在)の cDNA 配列を明らかにし、現在その存在様式、発現調節、更には生理的意義の解析を進めている。特に440 k アンキリンは、ラット脳の発生段階において生後10-15日目に発現のピークを迎えその後減少、成熟動物ではピーク時の30%となる胎児/

新生児型のアンキリンであることが明らかにされている。この時期は、脳において神経回路の形成(神経繊維の伸展、シナプスの形成、ミエリン膜の形成等)が行われており、440 k アンキリンがこれらの過程に関与している可能性が示唆されている。

3. 神経細胞の分化とアンキリン

神経細胞は、試験管内の適当な培養系では球形の状態から次第に扁平化すると共に、神経突起と呼ばれる構造体を伸ばし始める。そのうちのあるものは神経軸索となり残りのものは樹状突起となる。この時期のアンキリンの発現と存在様式を解析するため、2種類の神経細胞培養系を用いて検討した。その結果、神経細胞の分化、神経突起の伸展にともなって、440 k アンキリンの発現量は、蛋白質、メッセンジャー RNA レベルで著しく増加した。

初期の段階では、440 k アンキリンは伸びていく神経突起の先端部分に濃縮されているが、神経細胞が成熟段階に達し、神経突起が神経軸索と樹状突起に分化してくると440 k アンキリンは神経軸索にのみ存在し、樹状突起からは消失した。

4. 神経毒メチル水銀と440 k アンキリン

水俣病の原因物質であるメチル水銀の毒性に対して、分化発生段階の脳が、また脳の中でも小脳が感受性が高いことが明らかにされている。そこで、上記の2種類の神経細胞培養系を用いて、アンキリンの発現と存在様式に対するメチル水銀の影響について検討した。神経突起を伸ばしつつある NB-1 細胞培養系に、細胞の生存率に影響を及ぼさない濃度のメチル水銀(1 μM)を48時間暴露すると、アンキリンの発現は対照に比べ50%以下(蛋白質、mRNA レベル何れも)に低下し、細胞当りの神経突起の数と長さが著しく減少した。一方、成熟段階に達したラット小脳初代培養系にメチル水銀を0.1 μMで48時間暴露すると、細胞体や樹状突起に存在することが明らかにされている蛋白質、或は神経軸索に存在する他の蛋白質の発現と存在様式は影響されないのに対し、神経軸索のみに存在していたアンキリンは顕著に減少していた。

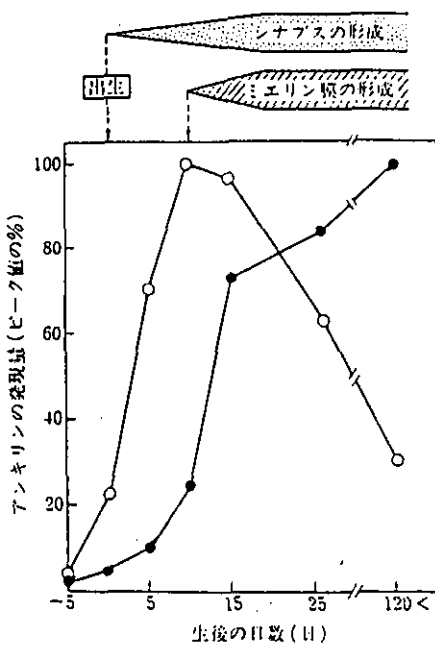


図1 ラットの脳発生段階におけるアンキリンの発現 440 k アンキリン(○), 220 k アンキリン(●)の蛋白質レベルでの発現量の変化。シナプス形成ミエリン形成も図上部に模式的に示した。

5. まとめ

脳の細胞骨格蛋白質の一つであるアンキリンは、神経細胞からの神経突起の伸展，神経軸索の構造，機能の維持，発現に関与し，またメチル水銀の毒性の標的部位で

ある可能性も示唆され，高齢化社会における老人性痴呆症との関連も指摘されている環境因子と脳の変性及び老化の関連を探る上で興味深い対象といえる。

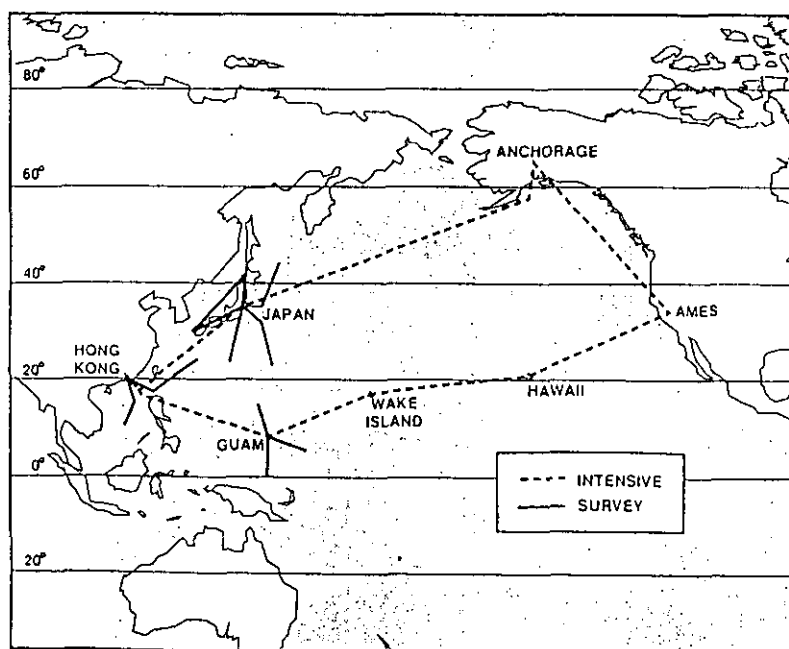
飛行機観測による西太平洋地域の大気微量成分の分布調査

酒 卷 史 郎 （大気圏環境部大気動態研究室）

太平洋は北半球に残された最も人為活動の影響の少ない広大な領域であるが、経済発展の著しい東アジア地域と隣接するために特にその西側の大気は人為的な汚染の影響を受けつつある。このような西太平洋地域を対象としたバックグラウンド対流圏大気の物理及び化学過程とそれに対する人為活動の影響を調査するための飛行機観測（PEM - West）が1991年の秋にアメリカ航空宇宙局（NASA）によって実施された。現在、その観測結果の解析は進行中であるが、これまでに明らかにされたその観測事実の一端を紹介する。

この飛行機観測は NASA の DC - 8 ジェット機を使用して、下図に示した太平洋上の周回コース上と日本、香港及びグアムの周辺で飛行高度を海面約 150 m 上から成層圏下部（約 12 km）まで様々に変えて実施され、オ

ゾンやその生成原因物質である窒素酸化物、炭化水素、一酸化炭素等を測定した。その結果としてバックグラウンド大気としての海洋大気（10日以上、陸上を通らずに海洋上を漂っている大気）成分の組成と分布を明かにできたが、海洋大気の組成に影響する現象として、大陸性空気の移流、成層圏空気の対流圏への進入、東南アジア地域でのバイオマス燃焼の影響が観測された。また、陸上から遠く離れた赤道海洋上ではオゾンの破壊が進んでオゾン濃度が極端に減少している現象（オゾン・トラフ）も観測された。丁度、この飛行機観測は秋期に実施されたために観測期間中に日本に上陸した台風の中での観測も実行された。その結果、台風による上昇流によって地表付近の汚染物質が対流圏上層部まで持ち上げられている現象も捉えられた。



PEM - West 飛行機観測コース

破線：周回観測コース

実線：地域集中観測コース

マクロファージは、肺の中で何している？

持立克身（環境健康部・生体機能研究室）

大気中に含まれる環境汚染物質や微生物は、肺に吸い込まれると毒性を示したり感染を起こしたりする。これを防ぐ仕組みが私達の体には備わっている。その一つに、肺胞マクロファージの働きがある。肺胞マクロファージは、骨髄から血管を通過して肺の最も奥まった場所にある肺胞（半円球の形、直径0.1~0.3 mm）にやって来て、そこに落ち着いた細胞である。肺胞では、肺に吸い込まれた空気（酸素）が血液内に取り込まれ、血液内の二酸化炭素は外へ排出される。また、肺胞表面は扁平な細胞（I型上皮）でほぼ覆われ、そのわずか0.5 μm（1/2000 mm）下を毛細血管が網目状に走っている（図1）。肺胞マクロファージは、肺胞表面を自由に動き回っては、肺胞内に侵入した微生物を捕食・殺菌したり、細かい粒子や細胞の死骸を貪食・分解したりして、それらが肺胞内で繁殖したり蓄積したりしない様に働いている（図2）。それでは、オゾンのような酸化力が強く刺激性のあるガスが、吸入した空気に含まれていたなら、肺胞マクロファージはどうするのだろうか？

0.2 ppm（環境基準の20倍）のオゾンを吸入すると、酸化性のガスに弱いI型上皮は容易に傷ついてしまい、その死骸が肺胞内に溜ってしまう。それを除くために、肺胞マクロファージは、初めは盛んに細胞分裂して不足

分を補うが、長期的には造血組織（骨髄）に応援を頼んで細胞の数を増やす。このマクロファージの働きで、肺胞内に溜った細胞の死骸は速やかに除かれ、見かけは元に戻ることができる。しかし、オゾンがある間はI型上皮は傷ついてしまうので、依然として多くの肺胞マクロファージが必要になって来る。

さて、肺胞マクロファージも、オゾンで傷ついたり働きが弱まったりするのだろうか？ この細胞にも、オゾンで酸化された物質を元に戻したり、修復したりするのに必要な酵素が備わっている。この酵素の働きは、オゾン吸入した後に著しく高まり、肺胞マクロファージがオゾンの毒性から身を守ろうとしているのが分かる。しかし、微生物を殺す働きは、オゾンに曝されても有害でない細菌（大腸菌）に対しては大丈夫であったが、有害な細菌（サルモネラ菌）に対しては低下した。また、不断は問題にならない日和見細菌（緑膿菌）に対しても、老化すると殺菌力が低下した。どうして、細菌の種類によってこんな違いが出て来るか、ネズミを使って実験した結果を紹介する。

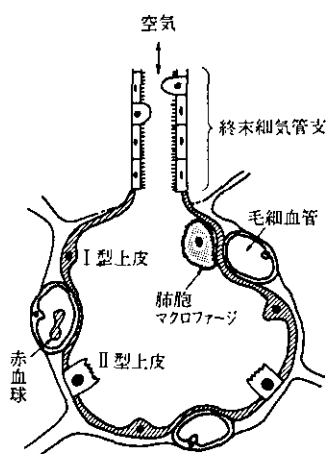


図1 肺胞の模式図

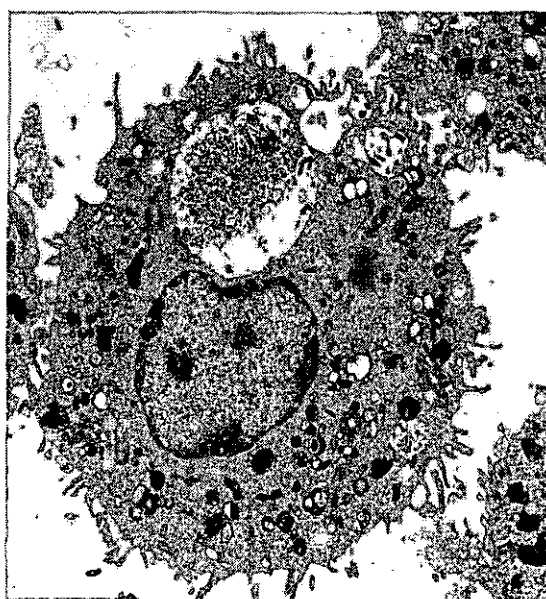


図2 肺胞マクロファージの電子顕微鏡写真

摩周湖の水と底質

相馬 光之 (化学環境部)

人間活動の影響の最も少ない湖沼群における汚染—これをバックグラウンドまたはベースラインレベルの汚染と呼ぶ—の変動を知るために、私達はバックグラウンド地域における環境モニタリングの方法の研究を進める中で、1981年から摩周湖の調査を行ってきた。摩周湖は北海道道東に位置し、かつて(1931年の測定)世界一の透明度(41.6 m)が報告され、現在でも25 m前後の透明度を保つ、世界的にも最も清澄な湖のひとつとして知られている。摩周湖は湖水表面積に対する集水域面積の比が小さく、流入、流出河川がなく、集水域内の人間活動も最少に制限されている。そのため汚染は主に大気経由でもたらされると考えられ、陸水の汚染のベースラインレベルを調べるには国内で最も適した湖である。今回の展示では、調査の様様をビデオでご覧いただきながら、以下の点を中心に紹介したい。

1. 湖水の混合、成層と微量成分の経年変動

摩周湖は表層水と深層水の温度差によって形成される年二回の成層期と、その間の混合期の存在によって、毎年湖内の物質の混合が十分に行われている。そこで調査に適した夏期の成層期に、表層水と深層水それぞれの組成を調べれば、深層水からは湖水の滞留時間(約100年)にわたる物質組成の積算的な変化を、表層水からはその年の成層形成期間の負荷の様子をとらえることができる。摩周湖水中の微量金属元素の濃度は、ほとんど、1 ppb (10^{-9} g/g) 以下であって、外洋の海水中の濃度に比べられる値である。化石燃料の燃焼によって生じる多環芳香族炭化水素のひとつで、環境汚染の指標的な物質としてしばしばとりあげられるベンゾ(a)ピレン(ベ

ンゼン環五つが縮合した化合物のひとつ)の濃度は ppt (10^{-12} g/g) 以下で、湖沼に報告された値では最も低かった。一方、かつて殺虫剤 BHC として使用された HCH (ヘキサクロシクロヘキサン、日本では1972年以降、製造、使用中止)については、他の湖沼と比較しても低くはない値が測定された。10年間の表層水、深層水の継続的な分析結果から、大気経由の汚染の負荷の経年変化が、明確にとらえられた。

2. 湖底堆積物で読む環境汚染の歴史的变化

湖の底質は、成長する堆積層の中に、環境の変動の記録を封じこめている。堆積速度のわかった底質の、柱状試料中の環境汚染物質の分布を調べれば、その物質による汚染の変遷を知ることができる。摩周湖底質の堆積年代、速度は、近接する屈斜路湖の堆積物にも共通して発見された火山灰を時間のマーカーとして利用して決定した。この結果を使った、ベンゾ(a)ピレン、鉛の人為的負荷の変遷を紹介する。

3. 摩周湖底の温泉

1984年6月に行われたNHKの湖底撮影で湖底からの気泡と湧水の存在が観察された。その後の私達の調査で、湧水温は43.4℃、湧水量は毎秒37ℓとわかった。摩周湖への水の全供給量の3%程度であるが、湖水中のNa等のミネラル成分の主な供給源になっている。湧水で供給されたFe、Mnは湖水中で酸化され、沈殿するので、湖底で特徴的な水平分布を示す。柱状試料のFe、Mn層の分布は、火山性の湧水活動の記録と見ることができる。

レーザーを用いた大気の遠隔計測

杉本伸夫（大気圏環境部 高層大気研究室）

大気微量分子や気象要素を立体的に観測することは、大気環境を把握するうえで極めて有効な情報を与える。遠隔計測技術はこのような要求に応えるものである。なかでも、レーザー光を光源とする能動方式の遠隔計測技術は他の方法では得られない高い空間分解能や高い測定感度が得られるという大きな特徴を持つ。国立環境研究所ではこのようなレーザー遠隔計測技術の開発と、これを用いた大気の観測研究を行ってきた。発表ではこれらの研究の成果と今後の計画、さらには将来の展望について述べる。

レーザー遠隔計測技術の代表的なものは、レーザーレーダー（ライダーとも呼ばれる）とレーザー長光路吸収である。レーザーレーダーは大気中に発射したレーザー光の大気による散乱や吸収を利用してエアロゾル濃度や汚染気体濃度、気象パラメータなどを測定するもので、測定に用いるレーザー光と大気の相互作用の違いによりいろいろな方式のものがある。

国立環境研究所では、1979年に、エアロゾルの観測を目的とする大型レーザーレーダーを製作し、大気汚染現象に関する大気境界層構造などの観測研究や、対流圏および成層圏のエアロゾルの観測研究を行ってきた。1988年には、世界最大規模のオゾンレーザーレーダーを

製作し、現在、オゾン層研究チームを中心として観測研究を行っている。この他、都市における大気境界層モニターのための小型のレーザーレーダーなどの開発も行っている。

一方、レーザー長光路吸収法はレーザー光を大気中の長い光路を透過させて大気中の微量分子の吸収スペクトルを測定するもので、光路長を長くすることによって微量な分子でも極めて高感度で計測することが可能である。国立環境研究所では赤外領域の波長可変パルスレーザーを用いた測定システムを開発し、炭酸ガスなどを測定対象とした研究を行ってきた。

これらの研究を背景に、現在、人工衛星に搭載したりトロリフレクターを用いて地上と衛星の間で長光路吸収測定を行う計画を進めている。これは、1996年2月に宇宙開発事業団が打ち上げる ADEOS 衛星に環境庁のセンサーのひとつとして搭載される RIS (Retroreflector In Space) を用いて行われる。RIS 計画では、地上から発射する炭酸ガスレーザーを用いてオゾン、メタンなどの高度分布とフロン12などのカラム量を測定する計画である。この計画によってこれらの大気微量分子のユニークな観測データが期待されるだけでなく、静止軌道衛星などを利用した将来の大気環境観測システムの基礎となる技術的データが得られると期待している。

割れ目性岩盤の透水特性

— 単一割れ目について —

木村 強 (水圏環境部地下研究室)

大深度地下開発, エネルギーの地下貯蔵, 有害廃棄物の地層処分など, 近年の地下は, 宇宙, 海洋に次ぐ第3のフロンティアの対象として期待されている。これは, 地下が隔離性, 耐震性, 三次元性などの利点を有しているためであるが, このような地下の開発, 利用に際して, 地盤環境の観点からは地下水の流動特性が極めて重要となる。地盤は深くなるにつれて土質地盤から岩盤へと移行し, そこでの透水性は土質地盤に比べると無視できるほど小さくなる。しかし, これは岩盤内に割れ目がない場合であり, 外力として地殻応力あるいは地下の開発によって割れ目が生じると, 土質地盤と同程度にまで透水性は高められ, このとき土質地盤と異なって局所的で異方性の強い性質を呈するようになる。岩盤の透水性は, 割れ目の方向性, 連続性, 頻度, 連結性の分布特性と, 単一割れ目の表面粗さ, 開口幅, 充填物に支配されるが, ここでは後者の単一割れ目の形状について述べる。

従来より, 単一割れ目を水理学的に表現するために, ヘレ・ショウの流動モデルが用いられてきた。このモデルでは, 割れ目表面は完全に滑らかで平行であると仮定しており, その結果, 割れ目内の流量は, 割れ目の開口幅の3乗に比例する。しかしながら, 一例として図に示

した割れ目の形状から分かるように, この仮定は明らかに簡略的である。図にみられるように表面粗さは, 長波長の大きなうねりの中に短波長の小さな凹凸が包含されている。表面粗さについてスペクトル解析を行い, パワースペクトル密度と周波数の関係を両対数上にプロットすると, 負の勾配の直線で表すことができる。このことは, 表面粗さにはフラクタル性があることを示唆している。一方, 開口幅については, 割れ目の両面がお互いにかみ合うことにより長波長の成分が消失する。その結果, スペクトル解析では, 低周波数域でパワースペクトル密度の増大が抑えられたかたちとなり, フラクタル性も存在しなくなる。図に示した1次元のプロファイルと違って, 2次元の広がりを持つ割れ目の透水性を考える場合, 割れ目内の水は, その平面上で開口幅の狭い部分を選んで開口幅の広い部分を選択しながら流れることに留意しなければならない。このため, 開口幅の平均値や標準偏差だけでなく, 自己相関関数やジオスタティスティクスを導入して空間的変動を表すパラメータを求めることが必要であり, このパラメータによって初めて単一割れ目の形状と透水性の関係を理解できるようになる。

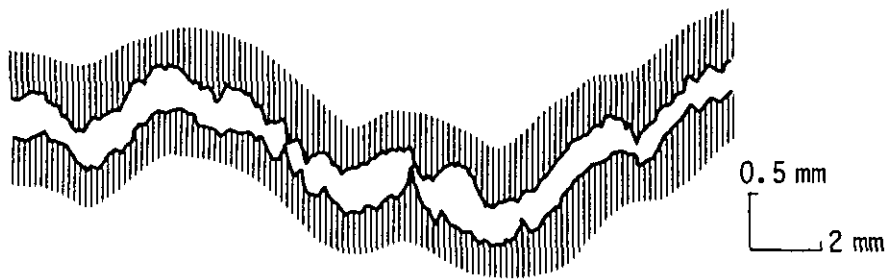


図 割れ目を構成する2つの面の表面形状