

国立環境研究所
研究発表会 予稿集

平成3年6月5日

於：国立環境研究所大山記念ホール

目 次

【6月5日 (水)】

10:00~12:05

- (1)湖の底にひそむ合成洗剤—分解されなかったLASはどこへ行くのか— 1
社会環境システム部 天野耕二
- (2)海の中の有機スズ 7
地域環境研究グループ 相馬悠子
- (3)富栄養化による内湾生態系への影響評価に関する研究 13
地域環境研究グループ 竹下俊二
- (4)水辺環境づくりのための浄化槽 19
地域環境研究グループ 稲森悠平
- (5)佐賀白石平野の地盤沈下性状と新観測システム 25
水圏環境部 陶野郁雄

13:10~14:50

- (6)有害廃棄物によるリスクとその管理 31
地域環境研究グループ 中杉修身
- (7)ディーゼル排気粒子による喘息誘発物質遊離の新しいメカニズムに関する一考察 37
地域環境研究グループ 嵯峨井 勝
- (8)核磁気共鳴を用いる生体機能診断法 43
環境健康部 三森文行
- (9)遺伝子組換えによる植物のストレス耐性の改変 49
地域環境研究グループ 近藤矩朗

15:10~16:50

- (10)地球環境研究のひろばを目指して
—地球環境研究センターの活動— 55
地球環境研究センター 西岡秀三
- (11)熱帯林の破壊と野生生物の多様性 61
地球環境研究グループ 椿 宜高

- (12)レーザーレーダーによって観測された成層圏オゾンの変動 67
地球環境研究グループ 中根英昭
- (13)地球温暖化の影響と防止対策に関する研究の現状 73
地球環境研究グループ 森田恒幸

【特別講演 6月6日 (木)】

10:30~11:30

In Our Nature (我々の自然)

C. W. ニコル

湖の底にひそむ合成洗剤

—分解されなかったLASはどこへ行くのか—

天野 耕 二 (社会環境システム部)

要 旨 合成洗剤の主成分である界面活性剤(LASなど)は、水中で速やかに分解するという理由から大量に環境中に放出されている。しかし、界面活性剤による底質の汚染が国内のいくつかの湖沼で確認され、水中から消えた界面活性剤の一部が分解されないまま底質に移行していることが予想された。手賀沼における詳しい現地調査、室内実験および数値モデル解析を行った結果、分解のおそい冬場では水中からの消失量の半分程度が分解されないまま底質に移行していることが解った。

1. はじめに

都市河川の有機汚濁、閉鎖性水域の富栄養化に引き続いて、重金属や合成有機化合物による微量汚染が新たな水環境問題として注目されている。中でも、誰もが身近に大量に使用・排出しているという点では、合成洗剤の主成分である界面活性剤は最も重要な物質のひとつといえる。界面活性剤として日本国内で現在最も多く使用されているのは、直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩(以下LASと略す)である。LASの問題点を整理すると、1) 発生負荷が広域的かつ大量であること、2) 水中からの消失がすべて分解であるという保証がないこと、3) 影響が多様かつ複合的であること、などが考えられる。

近年の成分分析法の進展により、水棲生物を対象とした毒性実験、生分解実験、懸濁物や底質粒子への吸着実験など、LASの各種特性を明らかにする多くの研究が各地で行われている。当研究所においても発足以来、界面活性剤の環境影響に関して様々な研究を続けてきているが、今回は特に上記の問題点2)をターゲットとして、LASが湖沼の底質に蓄積して行く過程を追跡した研究の成果について報告する。



図1 底質中にLASの検出された湖沼

2. 水および底質中の LAS 濃度

日本国内のいくつかの湖沼において、水および底質中の LAS 濃度の分布特性を調査した(1986年～1988年)。水質環境基準(COD)を守ることが困難な状況にある湖沼をおもに調査したが、図1に示す15の湖沼で底質中に LAS が検出された。水中で検出されなかったにもかかわらず底質中に LAS が検出された地点も数多くみられた。図2に示すように、多くの湖沼で底質中の LAS 濃度と河口からの流下時間の関係が確認され、LAS が流下方向に濃度を減少させながらも確実に底質に蓄積していることが解った。

次に、LAS による汚染の程度が非常に高い手賀沼(図3)を対象とした詳しい現地調査を行った。図4に手賀沼の調査地点における水中の LAS 濃度の1年間(1987年度)の季節変動を示す。流入河川(大堀

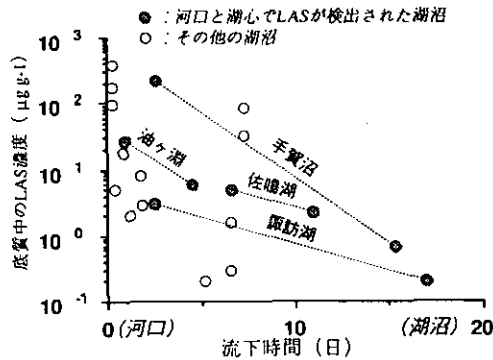


図2 底質中のLAS濃度と河口からの流下時間の関係

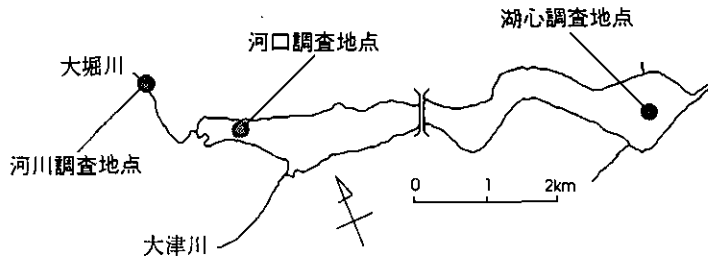


図3 手賀沼における調査地点

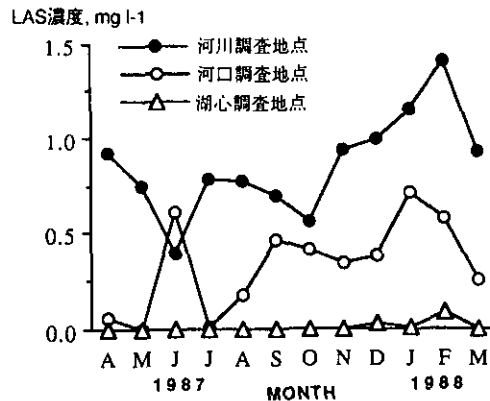


図4 手賀沼における水中のLAS濃度の1年間の季節変動

川)から湖沼にかけて、LAS濃度が夏に低く冬に高いという傾向を持ちながら流下方向に減少している。一般に、物質が水相から底質相などに移って行く現象を「移行」と表現するが、流下方向のLASの減少を分解による消失と底質への移行に分けるために、数値モデル解析を試みた。

3. 水から底質へのLASの移行過程のモデル化

河川から湖沼にかけてのLASのおもな挙動を図式化すると、図5のようになる。本研究では、図5に示した現象を組み合わせた微分方程式型の数値モデルを用いて、水中LAS濃度の流下方向の減少を分解による消失と底質への移行に分けた。水から底質へのLASの移行過程には、吸着態(水中の懸濁物に吸着したLAS)の沈降と溶存態(水に溶けているLAS)の底質間隙水への拡散がある。懸濁物の挙動としては、河川から入ってきた外来性懸濁物の流入、植物プランクトンなどの内部生産懸濁物の生成、そして相方の懸濁物の沈降という現象を考える必要がある。懸濁物の沈降量は底質から舞い上がるものを差し引いた見かけ上の沈降量として考えた。各々の現象の数式化については、以下のよう

1) 吸脱着による溶存・吸着両態間の分配：水中のLASを溶存態と二種類(外来性・内部生産)の懸濁物への吸着態に分けて、その濃度関係(両態間の分配)を懸濁物の種類ごとに Freundlich 型の等温吸着式にあてはめた(図6)。現場のサンプルを用いた吸着実験を行うことによって、LASの水中懸濁物への吸着が Freundlich の等温吸着式にしたがい、吸着係数の値が水中の懸濁物濃度と懸濁物中の有機炭素含量の影響を受けることを確認した。実験結果から、現場における外来性・内部生産性それぞれの懸濁物ごとの吸着係数を水中の懸濁物濃度と懸濁物の有機炭素含量の関数として表した。

2) 生分解：LASの分解には、無機化(究極分解)に到るまでに何段階もの分解過程が考えられるが、本研究では界面活性を失う一次分解までを扱った。現場の河川水をそのまま無処理で用いた分解実験から水中のLASの生分解速度を推定した。

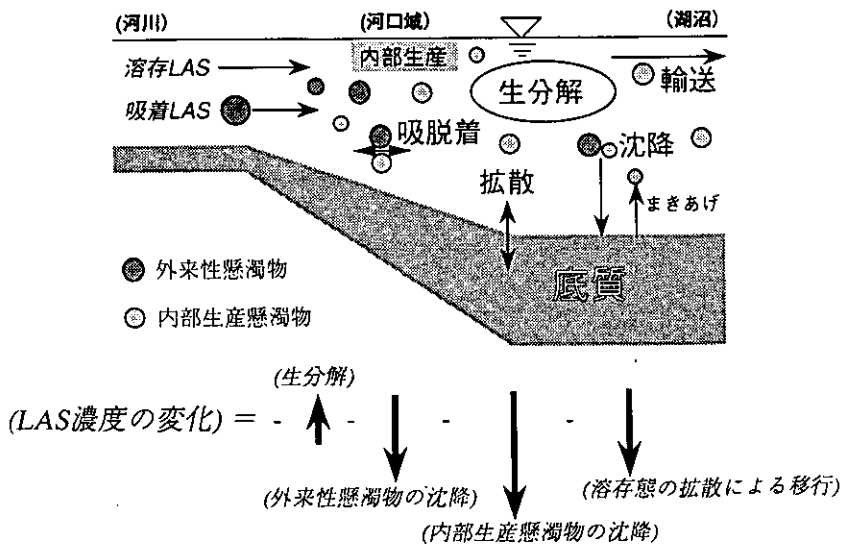


図5 河川から湖沼にかけてのLASの挙動

3) 懸濁物の沈降と内部生産：外来性懸濁物濃度は沈降のみによって減少し，内部生産懸濁物濃度は沈降による減少と内部生産による増加の差し引きで変化すると仮定した(図7)。内部生産懸濁物の増加は，主に植物プランクトンの増殖によるものと考えられ，その増殖モデルに関しては数多くの研究成果が既に報告されているが，本研究では増殖過程を密度依存型のロジスティック関数にあてはめた。

4) 溶存態の水/底質界面を通した拡散による交換：底質の間隙水中の溶存LAS濃度は表流水と較べると季節差が小さいために，冬は表流水よりも濃度は低いが，逆に夏は高い傾向がみられた。水/底質界面を通した，表流水から底質への拡散による溶存LASの移行量は，水/底質界面における濃度勾配と拡散速度から計算できる(図8)。濃度勾配は現場で実測を行い，拡散速度は現場の底質コアサンプルを用いた拡散実験から平均的な値を推定した。

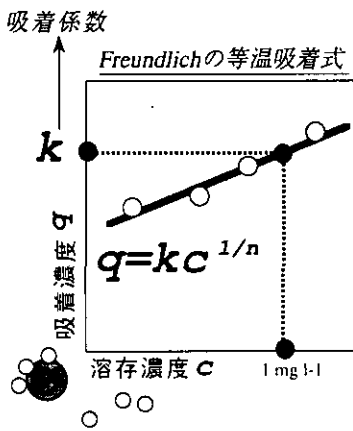


図6 溶存LAS濃度と吸着LAS濃度の関係

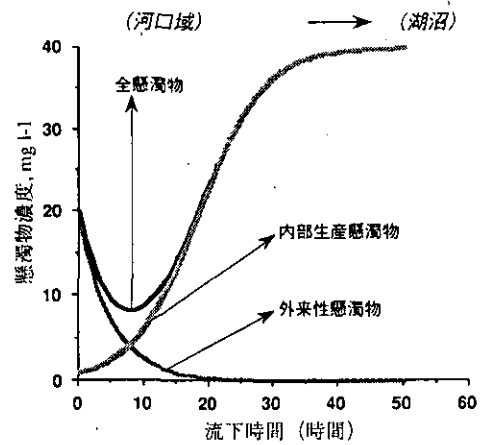


図7 沈降と内部生産による水中懸濁物濃度の変化

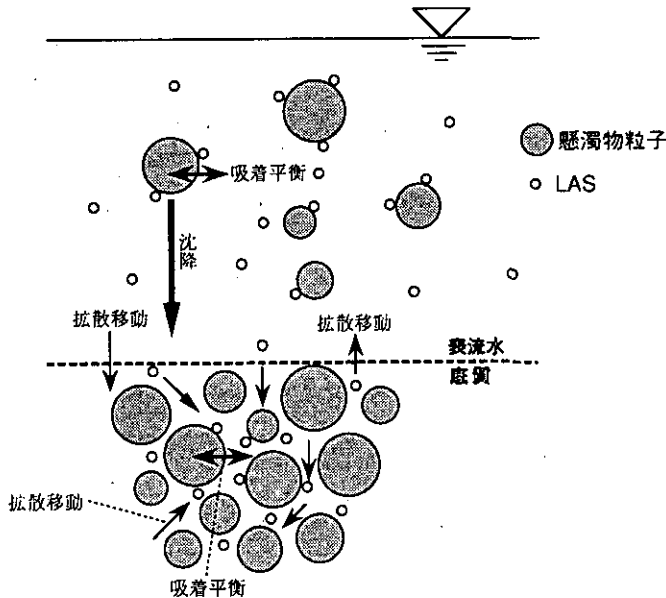


図8 水/底質界面を通した溶存LASの移行過程

4. LASの総括収支と重要な環境因子

数値モデルによるシミュレーション結果の一例として、手賀沼の河口域におけるLASの総括収支を夏期と冬期に分けて図9に示す。現場の水および底質中のLASの濃度と同族体・異性体組成(LASは分子数や置換基の位置によりいくつかの同族体・異性体をもっている)をほぼ再現できたことから、モデルの信頼性については十分に検証されている。図9の中の数字は1日あたりのLAS負荷量(Kg)を示しており、値のばらつきはいくつかのパラメータに幅をもたせた結果を示している。流量の条件は平水時の日平均流量とし、降雨時の流出負荷量は年間の総流出負荷量に占める割合が小さかったため無視した。計算結果によると、夏冬ともに流入LAS量の1割前後が底質へ移行している。移行過程はおもに懸濁態の沈降によるものであり、移行量は夏期では生分解による消失が大きいため、これよりもひと桁程度小さいが、冬期では同じ位の量となっている。

このモデルでは、主にLASの物理化学的な性質(吸着特性や生分解速度など)を表すパラメータと懸濁物の挙動(沈降や内部生産など)を表すパラメータが重要な意味を持つことが予想された。そこで、モデルの出力におけるこれらのパラメータの影響の大きさを比較してみた。まず、湖沼に流入するLASの初期濃度を一定として、生分解速度、吸着係数、内部生産懸濁物の生産速度という3つのパラメータについて標準状態を設定した。そして、これらの3つのパラメータをそれぞれ単独で10倍から10分の1まで変化させた場合のシミュレーション結果を「生分解」、「沈降」、「残り」というLAS収支の内訳の違いで表した(図10)。モデルの出力が主に生分解速度と吸着係数に影響され、特に沈降による底質への移行量には吸着係数、すなわち対象物質の疎水性が強く影響していることが解る。

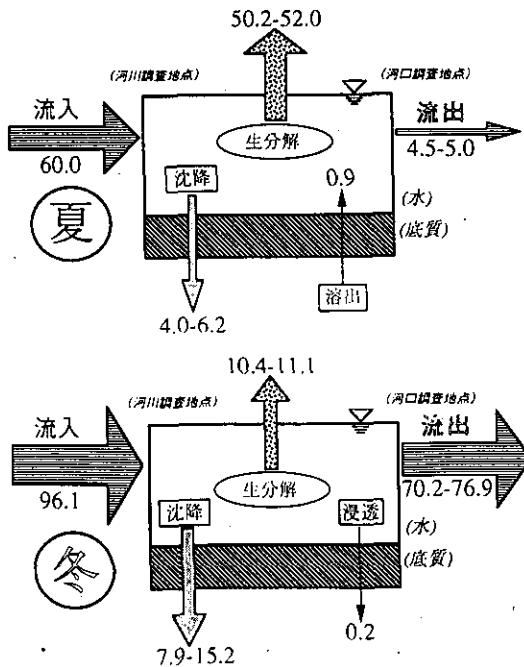


図9 手賀沼の河口域におけるLASの総括収支

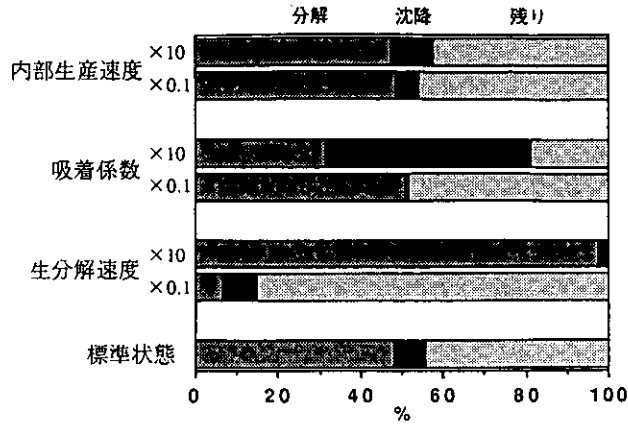


図10 LAS収支の内訳における生分解速度・吸着係数・内部生産速度の影響の大きさ

5. おわりに

使用後の合成洗剤は複雑な経路を経て環境(特に水界生態系)に影響を与えていると考えられるが、合成洗剤をはじめとする有用な化学物質に関して現在ちまたに溢れている情報の多くは「便利で清潔な暮らし」への賛歌であり、使った後で環境中に放出された化学物質の運命と生態系へのリスクに関する情報は華やかなテレビコマーシャルには縁のない存在である。環境へのリスクをどの程度まで受け入れながら清潔さや便利さを追求するかという意志決定を消費者がはっきりできるような研究成果は決して十分上がってきているとは言い難い。

化学物質の挙動については、これまでは実験室的な厳密な議論が比較的重んじられてきており、実験室で得られた貴重な知見を現場のデータの解釈に活用する試みはあまりなされていなかった。現場のデータの再現性の問題も大きいですが、本研究では常に「どんな現象が現場では最も重要な因子となっているか」という問いに答えることを念頭においた上で厳密な議論を積み上げた。今後は、本研究で検討された数値モデルの考え方を合成洗剤のみならず環境中に残留している各種の化学物質の現場データの解釈、さらにはこれらの物質の環境中の挙動の中でも重要な要素である底質への蓄積状況の推定などを行う際に応用することが重要な課題である。

参考文献

- 1) Amano K. and Fukushima T. (1988) On the Longitudinal and Vertical Changes in Lake Estuarine Sediments, *Water Science and Technology*, **20**, 143-153.
- 2) 天野耕二, 福島武彦, 中杉修身(1989)全国湖沼底質中の直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩(LAS)の分布特性, 土木学会衛生工学研究論文集, **25**, 59-68.
- 3) Amano K., Fukushima T. and Nakasugi O. (1990) Fate of Linear Alkylbenzenesulfonates in a Lake Estuary, *Water Science and Technology*, **23**, 497-506.
- 4) 天野耕二, 福島武彦, 中杉修身(1990)湖沼河口域における直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩(LAS)の収支モデル, 水質汚濁研究, **13**, 577-585.

海の中の有機スズ

相馬 悠子 (地域環境研究グループ)

要旨 船底塗料等に使用されるトリブチルスズ, トリフェニルスズ化合物が沿岸海域の生物を汚染している事が近年指摘されている。我々の特別研究では1) これらの化合物を高感度高精度に分析する方法の開発, 2) この分析法を使って東京湾の魚介類の有機スズ化合物の濃度分布と挙動に関する研究, 3) これらの化合物が生態系や人の健康に及ぼす影響評価の研究, が進められており, その結果を紹介する。

1. はじめに

有機スズ化合物のうち, トリブチルスズ, トリフェニルスズ化合物は, フジツボ, 貝, 海草などの付着を防ぐ塗料として船底や養殖用漁網等に使用されてきた。塗料から有機スズ化合物が少しずつ溶け出してフジツボ等の付着を防いでいるのだが, トリブチルスズの船底塗料からの溶出速度と船底面積, 航行する船舶数から, 東京湾では1日に85 kgのトリブチルスズが船底塗料から海水中に溶出しているという計算がある。近年これらの有機スズ化合物が海環境, 特に魚介類や底質を汚染していることが世界各地で観測されてきた。特に魚類では養殖魚ばかりでなく天然魚でもかなりの有機スズを濃縮しているものも見られる。このため日本では化審法(化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律)で, 平成2年にTBTO(トリブチルスズオキシド)が第1種特定化学物質に, トリフェニルスズ化合物7種類, トリブチルスズ化合物13種類が第2種特定化学物質に指定され規制が始まっている。

特別研究「先端技術における化学環境の解明に関する研究」では, 課題の一つに有機スズ化合物を取り上げ, 分析法の開発, 海の中の有機スズ化合物の挙動, 毒性影響について研究を進めてきた。ここでは, これらの研究結果のあらましについて紹介する。

2. ブチルスズ, フェニルスズ化合物の分析法の開発

ブチルスズ, フェニルスズ化合物の水への溶解度は, 室温でトリブチルスズ化合物で1-60 ppm, トリフェニルスズ化合物で1-5 ppm程度である。非常に水に溶けにくい物質であり, プラスチックや金属面などに吸着しやすくもあり, 正確な分析が難しい物質である。海水中でこれらの化合物は塩化物(R_xSnCl_{4-x}), ヒドロキシド($R_xSn(OH)_{4-x}$), アコ錯体($R_xSn(HO)_{4-x}$)といった形で溶けている。また海水, 底質中での分解, 生物体内での代謝の結果, ブチル基やフェニル基が一部とれた形も存在する。そのため分解物, 代謝物まで分離して分析でき, かつ Cl^- や OH^- をそろえて分析しやすい安定な誘導体に変えて分析する必要がある。

そこで化学形態に関する情報が得られる高感度高精度な分析法の検討を行なった。魚介類の試料は抽出脱水した後, 表1に示すような5つの方法の検討を行なった。分離法としてGC(ガスクロマトグラフ)とHPLC(高速液体クロマトグラフ)の検討を行なったが, 現在のところGCのほうが代謝物や分解物まで完全に分離でき, また検出器としてはMS(質量分析計), FPD(炎光光度検出器)が

有効であることがわかった。図1にはムラサキイガイに含有される有機スズ化合物をFPDで検出したガスクロマトグラムの一例が示してある。Snに特有な発光波長で検出しているので、ここに見られるピークは全部スズ化合物と考えられるが、トリブチルスズ(TBT)、トリフェニルスズ(TPT)の他にも、分解物や代謝物と考えられる数多くのスズ化合物が含まれている事がわかる。

表1 有機スズ化合物の分析法

分析法/検出法	誘導體	検出限界	
ガスクロマトグラフ			
FPD	イソプロピル化物	50pg*	
MS(SIM)	同上	1pg	
MS(SIM)	水素化物	5pg	
高速液体クロマトグラフ			
AA(long tube)	塩化物/トロポロン	5ng**	
ICP-AES	同上	10ng	*:pg=10 ⁻¹² g
ICP-MS	同上	50pg	**ng=10 ⁻⁹ g

3. 東京湾の生物中の有機スズ

ムラサキイガイは海岸の岩や岸壁に付着して生育しているが、東京湾岸の各地で採取したムラサキイガイの中の有機スズを上記の分析法を使って分析した結果が図2に示してある。すべての場所のムラサキイガイからスズ化合物が検出されたが、その濃度は場所によって大きく異なる。例えば富津港内ではブチルスズもフェニルスズ濃度も高いが数キロ離れた富津岬では低いというように、その汚染はかなり局所的なのが見られる。ブチルスズとフェニルスズの図を比較してみると、ブチルスズのほうは、分解、代謝物のジブチルスズやモノブチルスズがトリブチルスズより多く検出されているのに、フェニルスズはほとんどがトリフェニルスズである。これはブチルスズの方がイガイで代謝が速いためと考えられる。またトリブチルスズとトリフェニルスズを比較すると、ムラサキイガイではトリフェニルスズの蓄積が多く、一桁近く多い場合がある。他の貝、アサリやシオフキでも同じ傾向になっているのが見られた。

魚では東京湾でとれたスズキを使って、スズ分析のための魚肉の標準試料を作成した。全スズとして2.4μg/g、塩化トリフェニルスズ6.3μg/g(乾燥重量当り)、塩化トリブチルスズ1.3μg/g(乾燥重量当り)の値が得られている。

ではこのような有機スズの貝類への濃縮はいつごろから始まっているのだろうか? 研究所の試料庫に保存してあった東京湾で採取したアサリの中のトリブチルスズとトリフェニルスズ濃度を調べた。図3に示したのは1980年から1987年に採取したものであるが、1980年ですでにアサリへの有機スズの汚染は始っており、それが横ばいで続いているのがわかる。この傾向は有機スズ化合物に対して規制開始以降はどうなるのだろうか? 図4に示したのは、横浜港で採取されたムラサキイガイの結果であるが、トリフェニルスズ濃度が1990年になり急激に低くなっているのがわかる。まだ短期間の結果なので、今後この傾向が続くのか、しばらくモニタリングが必要であると思われる。

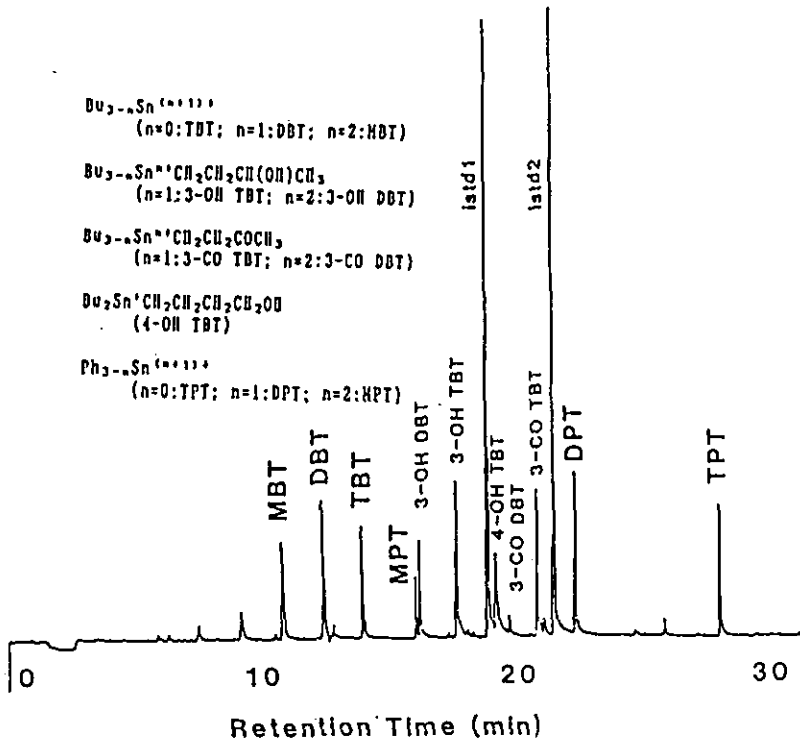


図1 有機スズ化合物をFPDで検出したガスクロマトグラム

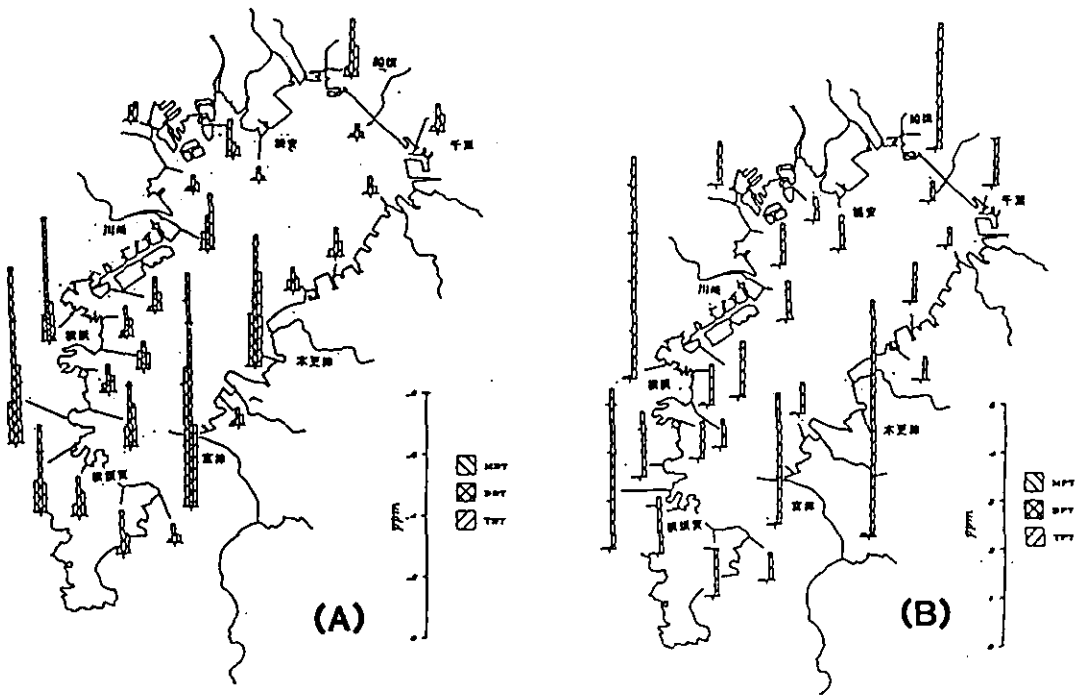


図2 東京湾のムラサキガイに含まれるブチルスズとフェニルスズ化合物

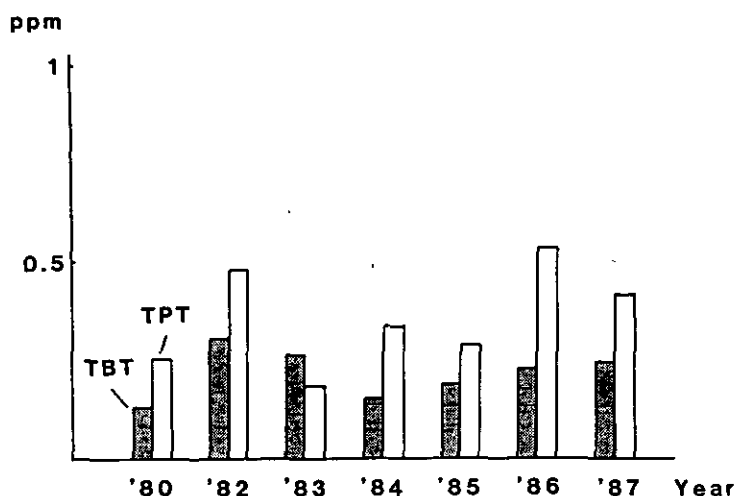


図3 東京湾のアサリ中のトリブチルスズ(TBT)とトリフェニルスズ(TPT)の経年変化

4. 貝の中の有機スズの挙動

図1に示したように、ムラサキイガイにはトリブチルスズ(TBT)、トリフェニルスズ(TPT)以外にも多くのスズ化合物によるピークが観測される。ブチル基やフェニル基がとれた分解物ジブチルスズ(DBT)、モノブチルスズ(MBT)、ジフェニルスズ(DPT)、モノフェニルスズ(MPT)の他に、いくつかのかなり大きなピークが見られる。それら化合物の構造を詳しく調べたところ、トリブチルスズのブチル基の一部が酸化された化合物群であり、ラットの肝細胞で見られる代謝物と同じ化合物であることがわかった。これらの物質のうちムラサキイガイ中で最も高濃度であった3-オキソ体(3-CO TBT)(図1参照)は、海水、底質、アサリ等からほとんど検出されなかったため、この化合物はムラサキイガイの中で代謝され生成したと考えられる。

図4にはムラサキイガイ中のブチルスズ化合物濃度の季節変化を示しているが、船底塗料等から海水へのトリブチルスズの溶出が多いと考えられる夏にイガイ中のスズ濃度が低い。また代謝物の3-オキソ体やDBTはTBTと比較すると、夏期に多く見られ、これからも代謝が水温の高い夏に速く進むのがわかる。また、同じ地点で採取されたアサリとシオフキでトリブチルスズの濃度は異なり、生物種や成長段階によって代謝能力が違うと考えられる。ブチルスズ化合物は生物による代謝を受けやすいので、生物を用いて環境中のブチルスズの汚染を監視するためには、代謝に関する補正をしなければならない。

5. 有機スズの毒性影響

水生生物に対する影響を見るために、淡水貝サカマキガイを用いて有機スズ化合物6種の毒性を比較したところ、二置換体(ジブチルスズ、ジフェニルスズ)より三置換体(トリブチルスズ、トリフェニルスズ)の有機スズ化合物の毒性が高く、特にトリフェニルスズの影響が大きくLC₅₀(半数致死濃度)値は<8.4 ppb(48 h)、<6.6 ppb(96 h)であった。またトリフェニルスズとジフェニルスズのサカ

マキガイへの慢性影響毒性(成長阻害, 増殖抑制, 殻形成)を調べたところ, 10 ppb 濃度で成長阻害, 親貝の死亡が見られたが, 増殖抑制や殻の変形の兆候は見られなかった。

有機スズの生体影響に関する基礎的知見を得るため, *in vitro* の系を用いて検討を行なった。メチル水銀は神経系障害をおこすことが知られているが, 有機スズの生体影響でも中枢神経への影響が指摘されている。そこで神経細胞 PC 12h (ラット由来)とヒト及びラット由来の非神経細胞を用いてトリフェニルスズ(TPT), トリブチルスズ(TBT)の影響を検討した。図5に示すように, PC 12h に対する LC_{50} は TPT で $0.11 \mu M$ (42 ppb 相当), TBT で $0.47 \mu M$ (150 ppb 相当)であった。非神経細胞の LC_{50} 値も神経細胞に対するものと大きな差は見られず, メチル水銀のような神経細胞に対する特異性は示さなかった。

次に発生過程への影響を見る方法として“ラット胎仔胚芽培養法”を使用した。これはラット胎仔の将来軟骨になる細胞を使って, 分化への影響と細胞増殖への影響を同時に見る方法である。TPT (塩化トリフェニルスズ), TBT (塩化トリブチルスズ), DBT (二塩化ジブチルスズ), TMT (トリ

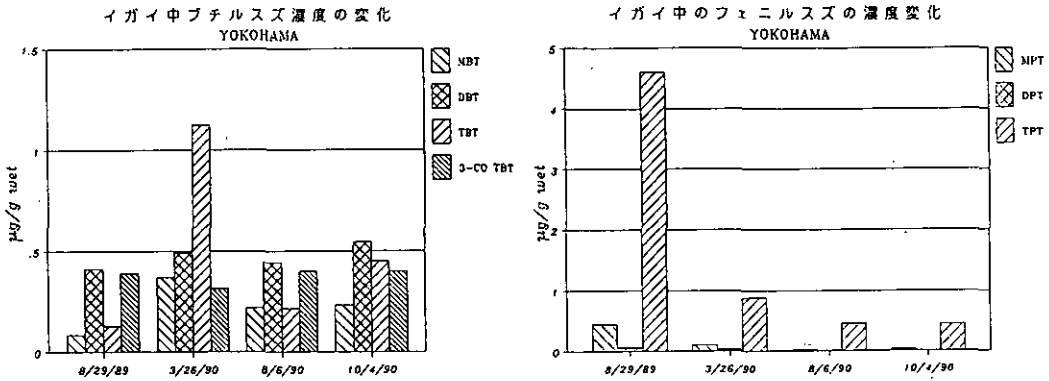


図4 横浜港のムラサキイガイ中のブチルスズとフェニルスズ化合物の濃度変化

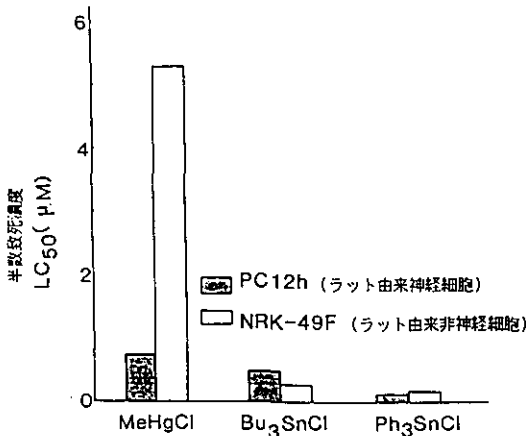


図5 有機スズ, メチル水銀の神経細胞への影響

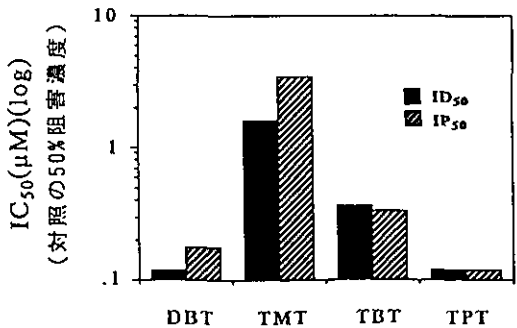


図6 有機スズ化合物の培養胚芽細胞への影響

メチルスズ)の IP_{50} (細胞増殖を対照の50%阻害する濃度), ID_{50} (軟骨細胞への分化を50%阻害する濃度)は, 図6に示してあるが, TPTの毒性が一番強い事がわかった。 ID_{50} が低い事から胎仔への毒性の可能性が示唆される。

富栄養化による内湾生態系への影響評価に関する研究

竹下 俊二 (地域環境研究グループ)

要旨 内湾では陸域から有機物や窒素・リン等の栄養塩が流入し、富栄養化の進行した水域が見られる。その結果、赤潮などの現象に見られる水圏生態系の破壊が発生し、水産資源、水利等への影響が問題化している。ここでは、現場海域での調査と実験、並びに室内実験を通して明らかになった内湾の富栄養化特性とその影響、および赤潮発生メカニズムについて概説する。

1. はじめに

内湾では背後に存在する大都市圏が大きな汚濁源ともなり、流入する汚濁負荷が大きいというのに汚濁物質が蓄積しやすいため、他の水域に比較して環境基準の達成率は依然として低い状況にある。内湾は、構造的に外海水との交換・混合の物理的作用が抑制されるという、いわゆる閉鎖性の特徴をもつ。このため流入した有機物や窒素、リン等が累積し、富栄養化状態を呈している所が多い。富栄養化が進行し、藻類など水生生物が大量に増殖すると赤潮発生など漁業への被害が問題となってくる。一方、内湾海域は生物生産の最も高い水域でもあり、各種の漁業に活発に利用されている。富栄養化が生物生産の増大に寄与していることを評価すると、豊富な栄養塩の存在は魚類の生育にとって不可欠な要素でもある。このため、生物生産の増大と海洋環境の保全が調和して確保されるには、内湾海域はいかにあるべきかを明らかにすることが強く求められている。

内湾の複雑な海洋構造に起因した種々の汚濁物質の質的、量的変化とそれに伴う生態系への影響を明らかにするため、昭和63年度から平成2年度にわたって特別研究「富栄養化による内湾生態系への影響評価に関する研究」が実施された。ここでは、フィールド(現場)と室内における実験的研究について紹介する。

2. 富栄養化と赤潮プランクトン(*Chattonella antiqua*)の増殖速度

1986年から1990年の毎夏、約1カ月にわたり播磨灘家島における海域環境調査を実施した。調査は、栄養塩類(窒素、リン及びケイ素)、色素成分、金属類、溶存酸素、物理的環境因子(水温、塩分、光強度及び透明度)、微生物を中心とした生物相(動・植物プランクトン及びバクテリアの現存量と種組成)の各項目について行った。1987年及び1989年には、調査期間中に同海域にて*Chattonella antiqua*(ラフィド藻)による赤潮が発生し、赤潮の初期発生-発達-消滅を通じての環境変化を詳細にモニターすることができた。一方、室内実験によって、*C. antiqua*はどれ位の栄養塩濃度があれば増殖し得るのかについて、定量的に明らかにされた。図1(a)、(b)に窒素濃度及びリン濃度に対する増殖速度(μ)を示す。さらに、栄養塩濃度を系統的に変化させて実験を積み重ねた結果、*C. antiqua*の潜在増殖力(GP)は、窒素及びリンの濃度(S)によって次のような単純な式で表されることが分かった¹⁾。ここで、Sは濃度を、 μ_{\max}^{obs} は室内実験で得られた最大増殖速度を表す。

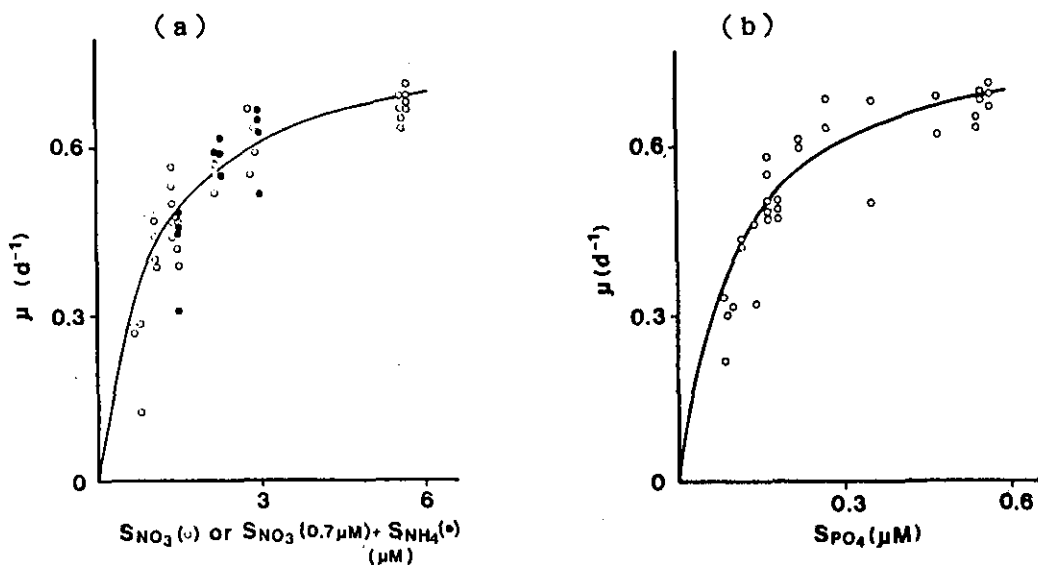


図1 *Chattonella antiqua* 増殖速度(μ)と栄養塩濃度との関係

$$\begin{aligned}
 GP &= \mu / \mu_{\max}^{\text{obs}} \\
 &= 1.4 \cdot \frac{S_{\text{po4}}}{0.11 + S_{\text{po4}}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_3} + S_{\text{NH}_4}}{1.0 + (S_{\text{NO}_3} + S_{\text{NH}_4})}
 \end{aligned}$$

すなわち、海水中のリン酸塩、硝酸塩、アンモニウム塩濃度を測定すれば、他の条件が *C. antiqua* の増殖を妨げていない場合、その海水の *C. antiqua* 増殖力を求めることができる。上述の潜在増殖方式を、実際の現場海域の観測データに適用した結果を図2に示す。この図は窒素、リン濃度から計算した赤潮の増殖力を赤潮の発生年・非発生年で比較したもので、図中の数値は潜在増殖力(GP)を表している。

C. antiqua は、昼間は表層に、夜は下層に移動(日周鉛直移動)しながら増殖をすることが明らかになっているが²⁾、その遊泳速度が毎時数メートル程度と観測されているので、栄養塩成層の深さが増殖力を規定していると考えられる。したがって、成層が深く、栄養塩が海底の方にしか存在しなければ、*C. antiqua* は栄養塩の豊富な層まで到達できない。あるいは、栄養塩を摂取したプランクトンは翌朝に表層まで届かないので、良好な増殖が得られないことになる。一連の観測結果から、赤潮の発生年には浅い層(5~10 m)にまで豊富な栄養塩(GP > 0.4)を含む海水が存在していたが、非発生年には浅い層では栄養塩はGP < 0.2と低かった。しかも、豊富な栄養塩を含む層は、より深い層(15 m以深)に限定されることが分かった³⁾。

3. 内湾における隔離生態系実験

現場海域調査や室内実験と並行して、播磨灘家島にメゾコズムを設置し、その中に現場海域に存在する生態系をそのまま捕獲したうえで人為的な富栄養化が隔離された生態系にどのような影響をもた

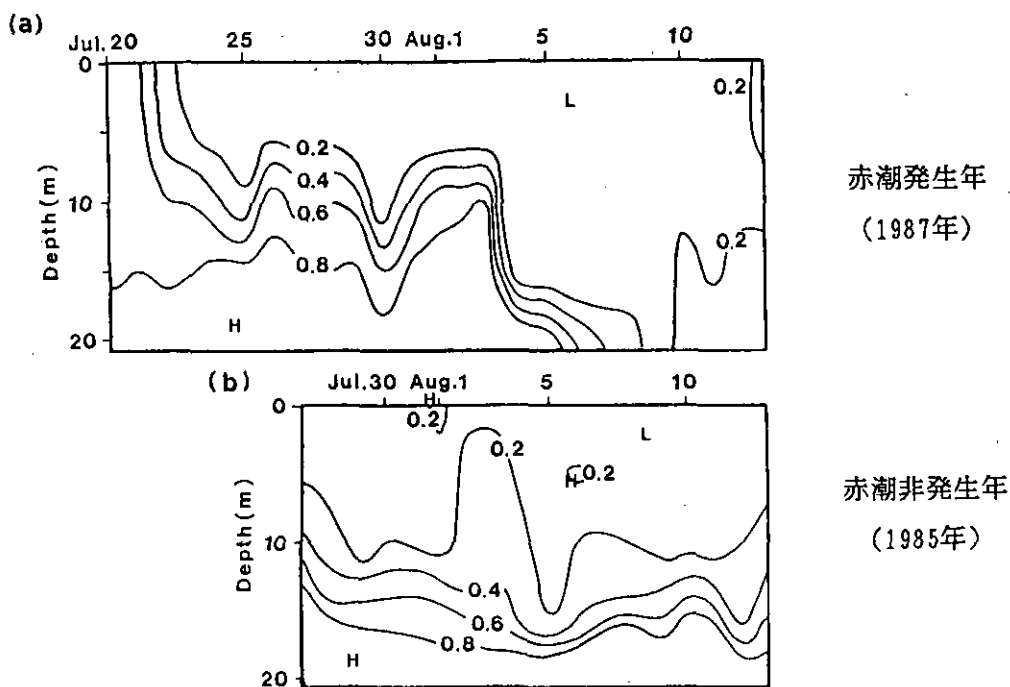


図2 *Chattonella antiqua* の潜在増殖力 (GP) と赤潮発生との関係

らすのかを調べた。

メゾコズム本体は、半透明のビニールシート製で、直径5 m、深さ18 mの円筒形を成しており、底部は海底に完全に埋め込んで固定されている。また、内部に緩やかな鉛直循環流を発生させ、隔離された生態系が長期間にわたって観測できるようになっている。

(1) 栄養塩濃度分布と藻類種の変遷

1989年7月20日～8月13日の25日間にわたって、現場海域調査と同じ項目について、メゾコズム内の計測を行うとともに窒素(NaNO_3)及びリン(NaH_2PO_4)を添加することによって人為的富栄養化実験を行った。実験の初期条件の設定は、1987年に本海域で観測した *C. antiqua* 赤潮発生時の栄養塩濃度分布をメゾコズム内に再現させる方法をとった(図3)。その後、栄養塩の添加及び鉛直循環流の調節を行った結果、安定な成層が形成された。そして、メゾコズム内の植物プランクトン組成は図4に示すように7月21日～25日には珪藻が増加し、優占種となったが、その後表層での栄養塩低下とともに渦鞭毛藻を初めとする種々の鞭毛藻へと遷移した。また、2度目の底層への栄養塩添加後、*C. antiqua* (図4中ラフィド藻)の発生が認められ、8月11日には赤潮状態(157 cells/ml)となった。この人為的富栄養化実験期間を通じてリン(リン酸態)、窒素(硝酸態)ともに水深5 mを境として安定な成層が形成されていた(図3)。

(2) 赤潮プランクトンの日周鉛直移動

図5に1989年8月12日～13日のメゾコズム内での日周鉛直移動のようすを示す。日中には表層に集積していた *C. antiqua* の細胞が夜になると7.5 m層に集まり、翌日の昼には再び表層に移動する

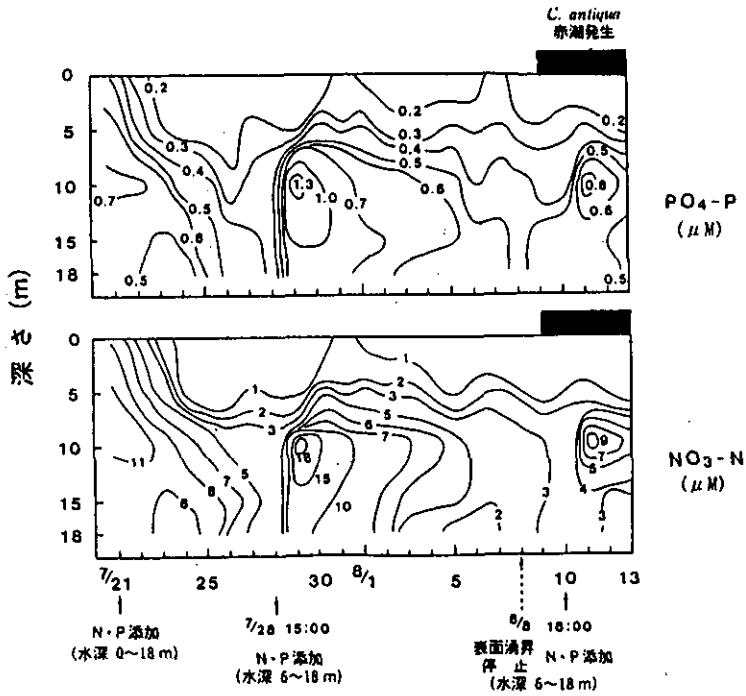


図3 メゾコズム内の窒素、リン濃度鉛直分布の経時変化

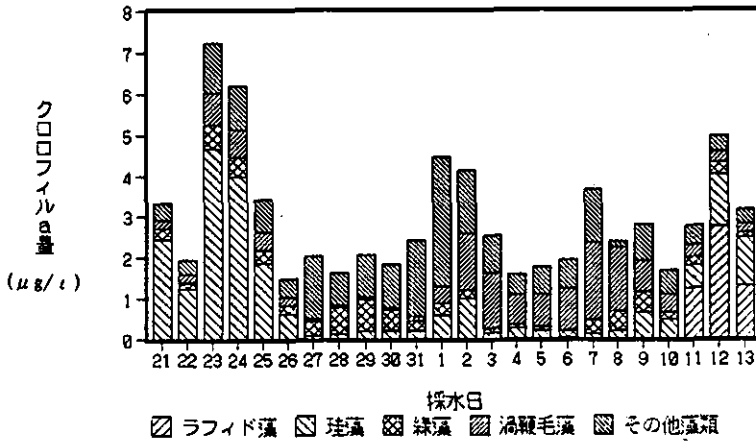


図4 メゾコズム内表層でのクロロフィルaと植物プランクトン組成の遷移(7月21日~8月13日)

ことが認められた。このように、明瞭に層を作って移動するようすは水平移流の全くないメゾコズム内で初めて観測された。実際、夜間に底層で栄養塩を摂取しているのは、室内のマイクロコズム中の *C. antiqua* について ^{31}P -NMR の手法等で確認されている²⁾。

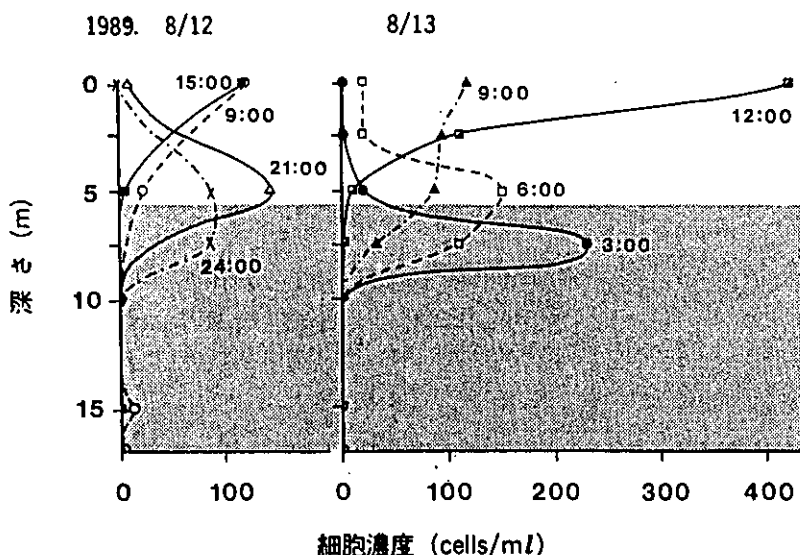


図5 メゾコズム内の *Chattonella antiqua* 日周鉛直分布

4. 室内実験における赤潮プランクトンの挙動

(1) *Chattonella antiqua* の環境変動に対する応答

家島海域調査と並行してフラスコレベルとマイクロコズムによる室内培養実験を行い、現場海域やメゾコズム実験の検証と解析を行った。

瀬戸内海家島海域の赤潮発現場場で見られる水温・塩分及び栄養塩による成層を海水マイクロコズム(高さ1.5 m, 容量1 m³)内で再現し, *C. antiqua* の動態を検討した。*C. antiqua* は日周鉛直移動を繰り返し, 塩分成層を突き抜けて夜間に栄養塩の豊富な底層に移動することが認められた。*C. antiqua* の細胞内窒素・リン含有量の変動を調べると, 夜間底層に移動し, そこで活発に栄養塩(窒素, リン)を摂取するという一連の挙動が明らかになった。また, 細胞分裂後表層に移動した *C. antiqua* は, 表層において栄養塩が皆無にもかかわらず夜間底層で体内に蓄積した窒素, リンを用いて光合成を行っていることが分かった。

(2) 赤潮プランクトンの生活史

赤潮の初期発生は, 一般に底泥からシスト(休眠胞子)が発芽して水中に栄養細胞を供給することによるものと考えられている。しかし, これまでシストはどのような条件, どのような過程で形成されるのかという生活史についてほとんど知られていなかった。そこで, フラスコ内に *C. antiqua* を入れ, 種々の条件下で培養を行った結果, 暗所でリンを枯渇状態におくことによって, 効率よくシストをつくることに成功した。さらに, 5カ月後には胞子を発芽させることも可能となった。図6にシストの形成過程を示す。まず, *C. antiqua* の栄養細胞(長さ約100ミクロン)が微小細胞(約30ミクロン)に分裂し, 微小細胞は二つが融合した後, 三角形細胞に変形しながら直径約30ミクロンの円形シストに変化するようすが見られる。

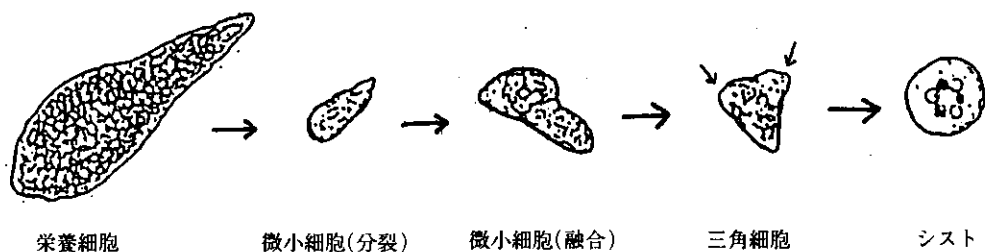


図6 赤潮シストの形成過程

(3) 植物プランクトンの他感作用

播磨灘より単離した珪藻 (*Amphiprore hyalina*, *Chaetoceros sp.* 他) を *C. antiqua* の培養槽に少量接種すると、*C. antiqua* は数日中に死滅した。このような他感作用の原因について、*A. hyalina* を用いて詳細な検討を行った結果、他感作用物質は高度不飽和脂肪酸である *hexadecatrienoic acid* ($C_{16:3}$) と *eicosapentaenoic acid* ($C_{20:5}$) と判明した。これらは 1 ppm 程度の濃度で *C. antiqua* の増殖を阻害した。

5. おわりに

富栄養化が生態系に与える影響という観点に立てば、内湾の有機汚濁には、陸域から流入する汚濁負荷の他に同程度の湾内で生産される汚濁負荷があるとされており、今後はこの内部生産の評価と抑制もまた重要な課題になると考えられる。特に、最近の海洋生態系の研究によって内部生産の大半は微小藻類(ピコプランクトン)に起因することが明らかにされつつあり、その現存量の把握や生産力の動向を明らかにすることが必要と考えられる。さらに、それら微小プランクトンと動物プランクトン間の食物連鎖のしくみも解明されなければならないと考える。

参考文献

- 1) Nakamura, Y. et al.: Chemical environment for red tides due to *Chattonella antiqua*. Part 1. Growth bioassay of the seawater and dependence of growth rate on the nutrient concentrations, J. Oceanogr. Soc. Japan, 44, 113-124 (1988)
- 2) Watanabe, M. et al.: Phosphate accumulation and metabolism by *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae) during diel vertical migration in a stratified microcosm, J. Phycol., 24, 22-28 (1988)
- 3) Nakamura, Y. et al.: Chemical environment for red tides due to *Chattonella antiqua*. Part 2. Daily monitoring of the marine environment throughout the outbreak period, J. Oceanogr. Soc. Japan, 45, 116-128 (1989)

水辺環境づくりのための浄化槽

稲 森 悠 平 （地域環境研究グループ）

要 旨 わが国の水域の水質改善を図る上では、全汚濁源の50%程度を占めている生活雑排水の処理対策を行わなければならない。この対策として、特に最近注目されている家庭用の小型合併処理浄化槽の開発と普及が重要と考えられる。この場合、窒素、リン除去可能で、汚泥発生量が少なく、維持管理が容易で、省エネルギー型で、流量調整可能な浄化槽の開発が重要である。ここでは我々が取り組んでいるいくつかの浄化槽を提案することにする。

1. はじめに

生活排水は人間の生活活動ともなって排出される汚水であり、生活雑排水は生活排水からし尿を除いたものである。すなわち、台所、風呂場、洗濯機から排出される汚水が生活雑排水である。水環境への汚濁負荷の50%程度は生活排水に起因している。水域によっては70~80%を超えているところもある。これは生活雑排水が未処理で放流されているからである。このため、生活雑排水対策が抜本的になされない限り水質改善をそれほど期待することができない。これらの生活排水は本来、し尿と雑排水とを一緒にして下水処理場あるいは合併処理浄化槽で処理すべきものである。便所の水洗化は、その快適性からして国民全体が強く要求していることであるから、下水道の普及を待たずに、ますます浄化槽への志向が高まると考えられる。昭和63年度において、水洗化人口は7,580万人に達しており、そのうち3,329万人(43.9%)を浄化槽が担っている。このように水洗化からみれば、浄化槽は下水と二分するほどである。しかし、昭和63年までに635万基設置されている浄化槽の中のほとんどがし尿だけを処理する単独処理浄化槽であり、合併処理浄化槽は2%足らずを占めるにすぎない。浄化槽の85%はいわゆる20人以下の単独処理浄化槽である。この単独処理浄化槽を合併処理浄化槽に改善することも重要な課題である。今後小型合併処理浄化槽の普及にはずみがつくものと予想されるが、新しく設置するものは5人用の浄化槽まですべて性能の高い合併処理浄化槽で処理するように早急な義務づけがなされなければならないと考えられる。このような合併処理浄化槽が普及できれば身近な水路、小河川の水質が改善され親水機能は増大することになる。上記の点を鑑み、ここでは快適な水辺環境づくりのために開発を進めている合併処理浄化槽について述べることにする。

2. 窒素およびリンの除去

湖沼流域において窒素、リンの排水規制 [N : 120mg/l (日間平均60mg/l), P 16mg/l (日間平均

表1 窒素、リンにかかわる浄化槽における
上乗せ基準

地方自治体	湖 沼	栄養塩類 (mg/l)	
		N	P
茨城県	霞ヶ浦	20(15)	4(2)
滋賀県	琵琶湖	20	5
島根県	中海・宍道湖	20	4
鳥取県	霞ヶ浦	20	4
静岡県*	浜名湖	5	1

*浜松市目標値, ()新設

8mg/l) が水質汚濁防止法で一律基準化されたが、富栄養化した湖沼を有する自治体である滋賀県、茨城県、鳥根県および鳥取県では窒素、リンに関わる上乗せ基準が定められている(表1)。窒素、リンを除去しなければならないのは、これらの栄養塩類が存在すると藻類が増殖すること、この藻類乾重1mgあたりのCODが0.3~0.5mgに相当するので(いわゆるCODの内部生産)湖水のCODが高くなるのが理由である。一般に生活排水中には窒素、リンが藻類の増殖を刺激する濃度の100倍以上含まれている。それ故、汚濁湖沼を有している自治体および総量規制地域等においては水質改善を図るうえで窒素およびリンを除去するシステムを組み込んだ高度処理の技術開発とその普及が重要になる¹⁾。

窒素除去については生物学的硝化脱窒法、リン除去については生物学的リン除去法と物理化学的除去法の組合せが浄化槽でも主流になってくるものと考えられる。表2は窒素およびリン除去のための処理プロセスを示したものである。活性汚泥法における生物学的リン除去は浮遊微生物によるリンの過剰摂取の特性を利用している。この場合、摂取されたリンは嫌気状態になると放出されるのでリンを多量に蓄積した汚泥を処理・処分する過程ではリンが問題をおこさないよう、リンが溶出する前に脱水する方法、溶出した高濃度のリンを薬剤により固定する方法などの技術開発が必要である。また、窒素、リンを除去対象とする場合、いずれのプロセスにおいても適切な運転、維持管理がなされなければならない。なお、小規模の浄化槽において、嫌気・好気をサイクリックに繰り返す方法を組み込めば窒素が極めて効果的に除去できることが明らかになっている^{2),3)}。

表2 窒素およびリン除去のための処理プロセス

処理プロセス		N	P	BOD
生物	嫌気・好気活性汚泥法	●	●	●
〃	嫌気・好気フォストリップ法	●	●	●
〃	循環式嫌気・好気生物膜法	●	●	●
〃	間欠曝気活性汚泥法	●	●	●
〃	オキシデーションディッチ法	●	●	●
生物・化学	凝集剤添加活性汚泥法	●	●	●
生物・物理	土壌トレンチ法		●	●
〃	凝集沈殿法		●	
〃	晶析脱リン法		●	
〃	リン吸着法		●	

生物：生物学的プロセス、生物・化学：生物化学的プロセス、物理・化学：物理化学的プロセス

3. 排水量の調整

生活排水の排水量は生活の活動時間と密接に関係しているので著しく変動する。午前中のピークはトイレ、浴槽の洗い流し、洗濯、午後のピークは厨房および風呂からの排水が主である。このため特に排水量を調整できない浄化槽で影響を及ぼす場合が多い。特に10人以下の個別家庭規模においては流量変動の影響が著しいので、その対策を早急に図ることが極めて重要と考えられる。このような観点から、実際の生活排水を用いて個別家庭規模の合併処理浄化槽の高度化を目標として、「流量調整機能を有する嫌気ろ床・生物ろ過法」「嫌気・好気循環ろ床法」の実証試験を行なった。前者は^{4),5),6)}定量ポンプで排水量を調整できるようにしたことを特徴としており嫌気性微生物の生息する嫌気ろ床と球状セラミックの充填された生物ろ過槽からなる(図1)。生物ろ過槽のセラミック上に付着増殖した微生物は過剰になり目づまりしないように1日1回逆洗という操作ではなく離すようになっている。流量調整がなされ、適切な生物膜が逆洗により常に保持されるためBOD容積負荷2kg/m³・日以上、水温10℃以下でも極めて良好な水質が確保されることが実証された。

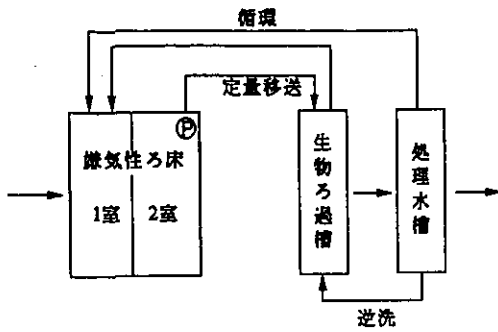


図1 流量調整方式嫌気ろ床・生物ろ過法の処理プロセス

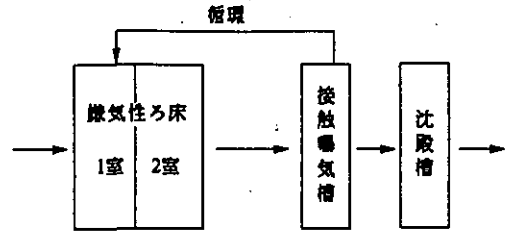


図2 循環式嫌気ろ床・接触曝気法の処理プロセス

後者は^{7),8)} 接触曝気槽の好気性微生物により処理した水を嫌気ろ床に循環させる(図2)ことを特徴としたものである。この場合、午前と午後の各1時間に1日平均排水量の6倍の水量ピークを与えて循環させないものを対照槽として比較を行った。対照槽と比較した場合の効果は窒素の除去能が高まるだけでなく、透明度の高い安定した水質が得られることにある。すなわち、循環処理システムを組み込むことにより、接触曝気槽の剥離浮遊生物膜が常時嫌気ろ床に循環返送されることによって接触曝気槽の活性汚泥化が抑制され、ピーク時に剥離汚泥が流出するという危険性が著しく軽減され良好な水質が得られる。小規模合併処理浄化槽について処理の安定化を図るうえでは、流量調整機能を組み込むことが基本であるが、少なくとも循環システムを、新設浄化槽はもちろんのこと、既設浄化槽についても早急に組み込むことが重要と考えられる。

4. 発生する汚泥の減量化

排水の生物処理過程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いる。微小動物が存在すれば、食物連鎖が長くなり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。

なお、食物連鎖における汚泥の減量化は、捕食・被食関係によって主として成立しているため、微小動物による汚泥処理を考える場合、微小動物の現存量と捕食能を高く維持することが重要である。なお、汚泥の減量化は、生物処理過程において水質浄化と同時に進行させることが望ましい⁹⁾。その場合に重要なことは、生物処理反応槽内の細菌濃度を可能な限り高めて自己分解での汚泥の減量化の促進と、微小動物のバイオマス量を高めて捕

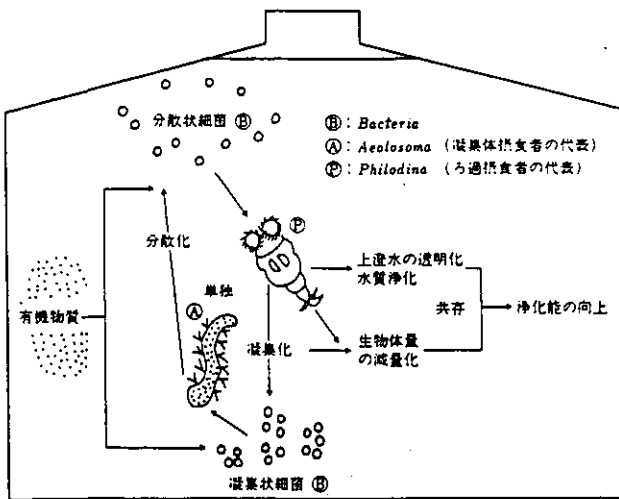


図3 水質浄化および汚泥の減量化における微小動物の役割

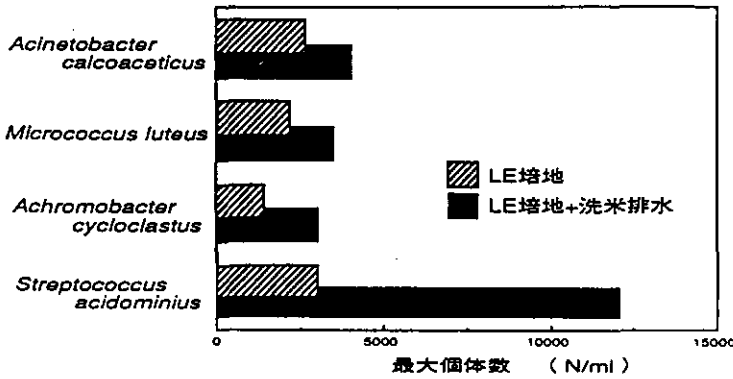


図4 有用微小動物輪虫類の高密度化に及ぼす各種細菌を植物源とした場合の洗米排水中の増殖促進因子の効果 (L:レタス, E:卵黄)

erythlophthalma については洗米排水中に含有される生育因子を添加することにより大量に増殖させることの可能なことが明らかになった(図4)¹⁰⁾。

5. 処理障害をひきおこす生物の増殖防止

生物処理施設において枝角類(ミジンコ)などの微小後生動物が異常増殖した場合、発生汚泥量は減少するが水質浄化能が低下することがある。このような場合、全バイオマス当たりの微小後生動物の現存量は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とが多い。このような現象は、たとえ汚泥の減量化が行なわれたとしても望ましくない。微小動物に水質浄化と汚泥減量化の両者を同時に期待する場合、捕食者の現存量は被食者の現存量よりも小さいこと、すなわち微生物群が逆ピラミッド型にならないように構成されるか、捕食者が多くても被食者としての細菌の活性が高く保持されるように制御されなければならない。なお、接触曝気槽等の好気性生物処理槽に出現する微小後生動物の酸素要求量が高いために、酸素量の制御操作を行なうことにより、逆ピラミッド型をピラミッド型にして処理機能を改善させる方法も効果的である。すなわち、嫌気・好気循環および間欠曝気などを生物処理工程内に組み込めば窒素等の栄養塩類の除去だけでなく障害生物の異常増殖制御も可能になる¹¹⁾。このような方法について開発し成功している。

6. 維持管理の重要性

浄化槽の処理性能を確保するうえで構造が適正であっても維持管理が適切に行なわれない限り良好な水質を確保することはできない。水質確保を図るうえでは、汚泥の引き抜き、接触曝気槽であれば逆洗、消毒剤の補充、空気量の調整、生物処理反応槽の汚泥濃度の調整などの管理を行なう必要がある。維持管理を適切に行ない良好な水質を得るためには維持管理担当者の定期的な保守・点検が基本である。その場合に専門の維持管理者が管理するうえで困難な構造の浄化槽は改善が必要と考えられる。また、特に小規模合併処理浄化槽の維持管理においてはチェックリストを作成し、ユーザーによ

食に伴う汚泥の減量化を効率的に進めることにある。このため微小動物が優占してなおかつ、微生物濃度が高められる生物処理プロセスの開発が必要である。汚泥の減量化と水質浄化に貢献する微小動物の役割は図3のようにまとめることができる。これらの有用な微小動物を浄化槽に大量に定着化させることが重要であるが、輪虫類 *Philodina*

る作業の確認を義務づけると同時に、行政機関がマニュアルを配布し、ユーザーに対して水質浄化に対する啓蒙普及を図ることを義務づける必要がある。

7. これからの浄化槽を旨として

わが国の水環境の水質保全を図るうえで、下水道の普及を早急に行えない地域での浄化槽の果たす役割は今後さらに重要性を増すものと考えられる。このような水質保全を目的とした場合の浄化槽の開発技術のあり方をまとめるとつぎに列記するとおりである。

- 1) 合併処理浄化槽において BOD のみではなく栄養塩類除去を目的とする必要があるので必ず処理工程内に嫌気条件を組み込み、かつ嫌気と好気がサイクリックに繰り返されるシステムにしなければならない。個別規模の小規模合併処理浄化槽については、現在普及している嫌気ろ床・接触曝気方式に比べて循環方式にする方が窒素の除去だけではなく BOD の除去性能も著しく向上し安定することから、本方式の導入を検討する必要がある。
- 2) 合併処理浄化槽では工程内に流量調整槽を設置した方式で対応されるようになっているが、小規模においては流量調整方式の検討が十分でないので午前と午後の 2 回の大きな水量変動があり、それにより著しく水質の悪化する現象が生じる場合がある。そこで流量変動を吸収できる処理プロセスの研究開発に力を注ぐ必要がある。
- 3) 生物膜法を採用している合併処理浄化槽において低負荷運転施設にミジンコ、水生ミミズ、巻貝類の無脊椎動物が異常増殖し処理機能を低下させる場合が多いので、異常増殖防止技術の開発を行なう必要がある。
- 4) 富栄養化対策から窒素、リンを除去しようとする場合、従来の維持管理体制では対応困難であることから窒素、リン除去技術に精通した維持管理者の育成が必要である。維持管理がおざなりであれば、窒素、リンはいうまでもなく BOD の除去も達成できないことに注意する必要がある。
- 5) 合併処理浄化槽の生物処理反応槽の微小動物相の調査によると、ヒルガタワムシ等の有用生物が優占化すると高い安定した浄化能力が得られることが明かであるので、これらの微小動物の定着化を図る技術開発はきわめて重要である。
- 6) 生活排水の処理システムとして土壤トレンチを活用する方法があるが、本法はリンの除去能力は極めて高いにもかかわらず窒素除去能が低く、地域によっては地下水の硝酸汚染にもつながる可能性があることから、土壤トレンチを活用する場合、脱窒機能を有するプロセスとの組合せ技術の開発が必要と考えられる。
- 7) レストラン、食品製造業等に設置される合併処理浄化槽では流入排水中に BOD の高い油分が多量に含有され、過負荷となり処理障害が引き起こされる場合があるので、効果的油分分解除去プロセスの開発が必要である。
- 8) 合併処理浄化槽において、有機物除去を目的とした嫌気性ろ床・接触曝気方式および窒素、リン除去を目的とした嫌気・好気活性汚泥方式が普及しつつあるが、これらの水処理システムからは地球温暖化を促進する温室効果ガスとしてのメタンガス(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)が発生していると考えられる。CO₂ に比べて CH₄ は 10 倍、N₂O は 100 倍の温室効果を引き起こすことから、CH₄ につ

いては有効利用するか発生しないプロセスへの変更、 N_2O については硝化・脱窒が効率的に進めば発生が抑制されるといわれているので、効率的硝化・脱窒プロセスへの改善を図るための技術開発を行なうことが必要である。

8. おわりに

現在の合併処理浄化槽の性能を向上させ安定した処理水質を得て環境保全を図っていくためには、まだ開発すべき課題が多々残されている。今後合併処理浄化槽を普及させ快適水辺環境づくりを行う上では窒素、リン除去、省エネルギー、汚泥の有効利用まで考慮して水と汚泥を同時に処理処分できるような体制を確立するとともに、土壌処理、酸化池法など地域、流域特性に応じた技術開発を行い、社会システムのなかに位置づけ適正に機能するようにすることが重要である。このためにも官民一体となった研究開発が要望される。

参考文献

- 1) 稲森悠平, 竹下俊二, 須藤隆一: 湖沼水質保全対策の技術諸法と今後の方向性, 公害と対策, **23** (8) 26-34, 1987
- 2) 稲森悠平, 松重一夫, 須藤隆一: 嫌気性条件を組み込んだ小規模合併処理浄化槽における脱窒, 脱リン, 用水と廃水, **30** (4) 54-60, 1988
- 3) Inamori Y., Matsushige K., Sudo R., Chiba K., Kikuchi H. and Ebisuno T.: Advanced wastewater treatment using an immobilized Micro-organism/Biofilm Two-Step process, *Water Science and Technology* **21** (12)1755-1758, 1989
- 4) 稲森悠平, 須藤隆一: 小規模合併処理浄化槽における流量調整の重要性について, 月刊生活排水 **11** (1) 1-7, 1981
- 5) 尾西正浩, 寒川博, 長尾利郎, 山本泰弘, 稲森悠平: 流調機能の小型合併処理浄化槽への活用と高度化, 第24回日本水質汚濁学会, 1990
- 6) 建設省建築研究所編: 平成元年度バイオテクノロジーを活用した新排水処理システムの開発報告書(平成2年)
- 7) 稲森悠平: 嫌気・好気処理方式浄化槽, 空気調和・衛生工学 **65** (1) 31-35, 1991
- 8) 宮本涼一, 笹川猛, 北井良人, 稲森悠平: 循環式嫌気・好気ろ床法による生活排水処理の高度化, 第24回日本水質汚濁学会, 1990
- 9) Inamori Y., Kuniyasu Y., Hayashi N., Ohtake H. and Sudo R.: Monoxenic and mixed cultures of the small metazoa *Philodina erythrophthalma* and *Aeolosoma hemprichi* isolated from a waste-water treatment process, *Applied Microbiology and Biotechnology* **34** 404-407, 1990.
- 10) 林紀男, 稲森悠平, 須藤隆一: 有用微小動物輪虫類 *Philodina erythrophthalma* の大量培養, 環境科学会, 環境シンポジウム, 1990
- 11) 稲森悠平, 菊池寿一, 松重一夫, 菅谷芳雄, 須藤隆一: 合併処理浄化槽におけるミジンコの異常発生防止に関する研究, 浄化槽研究, **1** (1) 3-18, 1989

佐賀白石平野の地盤沈下性状と新観測システム

陶野 郁雄 (水圏環境部)

要旨 佐賀県の白石平野は、最も地盤沈下の著しい地域の1つである。この地域は、農業用に地下水を多量に揚水しており、夏期の地下水位の低下が著しく、このため広域に地盤沈下が生じている。この地域の地盤沈下性状を把握するため、有明町において調査ボーリングを行った。採取試料を用いて地質学的な分析・土質工学的な試験と解析を行った。また、このボーリング孔を利用して、新たに開発した安価で簡便な地盤沈下観測システムを用いて、観測を開始したが、その観測結果は妥当であり、実用可能と考える。

1. はじめに

佐賀県の白石平野は、関東平野北部地域と並んで、最も地盤沈下の著しい地域の1つである。有明町の沈下量は、昭和63年度5.6 cm、平成元年度4.6 cmであり、全国1、3番目の年間沈下量を記録している。この地域は、農業用に地下水を多量に揚水しており、夏期の地下水位の低下が著しく、このため広域に地盤沈下が生じている。そこで、有明町において深度200 mの調査ボーリングを行った。採取試料による標準圧密試験とその結果を基とした地盤沈下解析、採取試料の地質学的な分析を行った。また、このボーリング孔を利用して、新たに開発した安価で簡便な地盤沈下観測システムを用い、平成元年10月から観測を開始した。そこで、観測システム概要と現在までの観測結果、および地盤沈下性状の地質学的・土質工学的検討結果について報告する。

2. 地盤沈下の歴史と現状

日本の地盤沈下がいつ頃から始まったかは正確には分からないが、大正の初期に東京都で、昭和の初期には大阪市で地盤沈下が注目されはじめ、社会的問題となってきた。大正年代に入って近代的なさく井技術が発達してきたことにより、深井戸が掘られるようになり、地下水を多量に揚水できるようになった。このため、地下水位が低下しはじめ、地盤沈下が生じるようになった。

佐賀平野では昭和の初期から農業用水を確保するため、深井戸が掘られるようになった。おそらく、この頃から公害としての地盤沈下が始まったものと思われる。佐賀平野のうち、六角川右岸の地域を特に白石平野と呼んでいる。戦後の復興とともに地下水の揚水量が急増したため、昭和29年に白石平野の杵島山麓で湧泉が枯渇するようになった。昭和33年には山麓に沿った水田で亀裂が発生しはじめ、昭和35年には5 kmに及んで陥没を伴った亀裂が生じた。ついに、昭和45年には約3千戸の家屋、約20 km²の農地、延長約40 kmの鉄道をはじめとする被害が生じる大災害となった。その後も、地盤沈下は進行し続け、昭和53年度にも年間10 cm以上の沈下を記録した。昭和53年度以降も年間5~15 mの地下水位変動を伴いながら毎年数cmの地盤沈下が継続して生じている。観測記録をよく見ると、佐賀平野では地盤沈下の最も著しい地区が時間の経過とともに東から西へと移動している。昭和30年頃

は六角川左岸の江北町・牛津町が中心であったが、昭和45年頃には右岸の白石町・福富町が、最近はさらに西側の有明町・白石町が中心となってきた。

3. 地下水位の季節的変動

図-1は白石平野(白石町)における最近の地下水位と地盤高の変動記録である。主として水田を冠水させるために地下水を揚水している白石平野では、6月になると急激に地下水位が低下し、10月から徐々に回復しはじめ、4月に深度5mまで回復するという、1年1周期の繰返し変動を生じている。これに対し、昭和57年までの地盤高(標高)は地下水位の低下・回復にかかわらず、不可逆的に低下し続けていた。その後、しだいに地下水位の低下時に沈下が生じ、地下水位の回復時に地盤が膨張するようになってきた。累積沈下量が大きくなるほど、地下水位の変動に伴って、地盤高も変動する傾向が強くなり、地盤の圧密が進行していく状況が読み取れる。しかしながら、地下水位の回復に伴う地盤高の上昇は僅かであり、地下水位の低下が著しいほど、地盤沈下も著しくなる傾向には変わりない。昭和62年に地盤沈下があまり生じなかったのは、降雨量が多かったため、地下水の揚水が少なく、地下水位の低下が顕著でなかったためである。これらのことは、地下水を過剰に揚水し、地下水位が低下することがなければ地盤沈下は防げることを明確に示している。

このように、季節的に地下水位が大きく変動する地域では、地下水位の変動による地盤に加わる応力の繰返し効果で、一年中地下水を揚水し続ける場合よりも大きな累積沈下量を示す。このような地盤沈下現象は未だあまり解明されておらず、現在最も重要な課題となっている。なお、筆者は地下水位が変動する場合の沈下予測は圧密の式にせん断の項を加えるのがよいと考えている。

4. 地盤と地質

沖積平野は、完新世に形成された最も新しい地形面であり、有明粘土層が厚く堆積している白石平

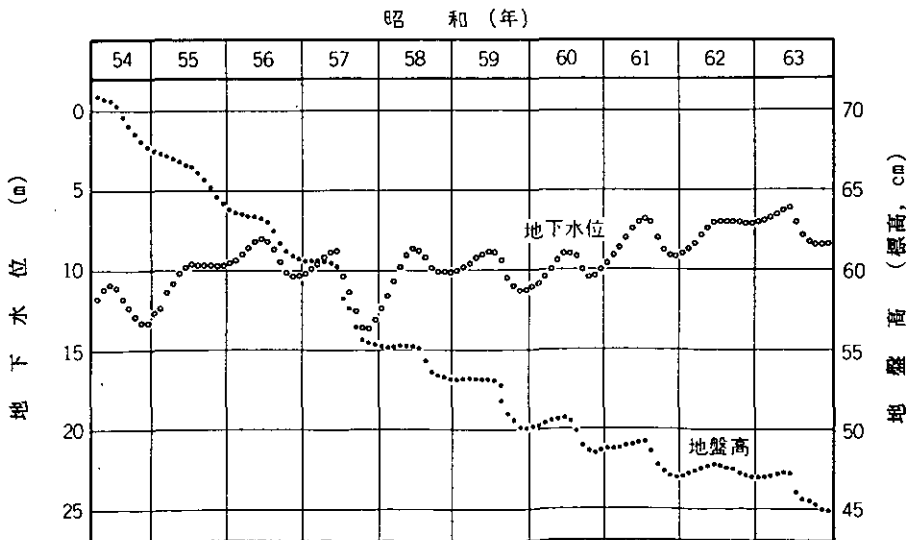


図-1 白石町に設置されている観測井の地下水位と地盤高変動記録(佐賀県資料に基づく)

野がそれに相当する。有明粘土層は非常に軟弱な粘性土層であり、その層厚は15~25 mにも達している。白石平野の北縁には、リスウルム間氷期といわれている最終間氷期の海底面、あるいはウルム氷期と言われている最終氷期の扇状地や河床面が段丘として存在する。白石平野は遠浅の有明海に面していることもあり、古くから干拓が盛んに行われており、平野の2/3が干拓地からなっている。

火山活動を見ると、白石平野の西南には更新世に噴火活動を行った多良岳があり、太良町から嬉野町にかけて広範囲に安山岩質の溶岩と同質の凝灰岩類がおおっている。

白石平野の西部に位置する杵島郡有明町牛屋の有明東小学校内でボーリング調査を深度 202 m まで昭和63年度に実施した。その調査地点を図-2に示す。調査地点は、明治以降に干拓された地域に隣接した鍋島藩時代の干拓地に当たる。ボーリング試料の分析結果から得られた地質層序の概略を図-3に示す。ボーリングにより得られた連続試料の分析・試験・観察結果をまとめると、地層は次のように分けることができる。

深度23.6 m までは有明粘土層といわれている粘性土層であり、その基底に当たる深度24.1 m までは、関東平野で有楽町層の基底層 (HBG) といわれているものに相当する河成堆積物が存在している。深度29.6 m までは、細砂と有機質シルトの互層からなり、淡水の河川環境で堆積したものと推定され、島原海湾層あるいは関東平野の七号地層に相当するものと思われるが、海成環境は認められなかった。したがって、深度29.6 m までが沖積層、これ以深が洪積層ということになる。深度37.7 m までの地層は主として内湾性のシルト層であるが、この層の最上部には火山ガラス質のテフラ層 (Aso-IV 噴出物と推定される) が約 3 m 堆積している。Aso-IV 噴出物は、今から 7 万年前に阿蘇火山から噴出したものである。深度40.9 m までの上部層は火山灰 (Aso-III 噴出物の可能性が高い) を多量に含む細砂層、下部層はシルト層からなっている。深度125.0 m までは、主として 100 万年前から活動している多良岳起源の砂礫層、それ以深は、細砂と粘土の互層となっているが、基盤(第三紀層)には達しなかった。

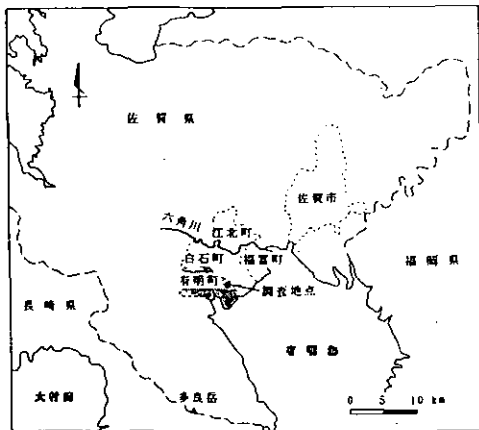


図-2 ボーリング調査地点位置図

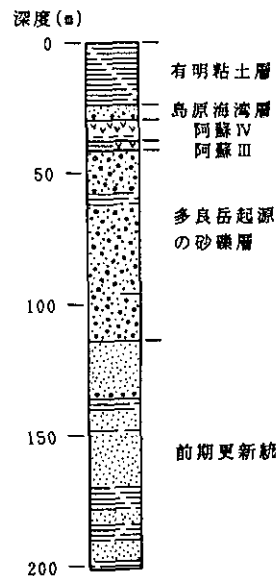


図-3 有明町の地質層序

5. 新しい地盤沈下観測システム

地盤の沈下状況を把握するためには、地表面の高さ、地盤沈下を生じさせる外力、および外力の影響を受ける種々の地層収縮量を継続して観測し、これらの時間的経緯を知る必要がある。地表面の高さは面的に広く把握する必要があるため、ある水準点を不動点とし、各水準点の標高を一定期間ごと（少なくとも1年1回）に水準測量を行う方法がとられている。地盤沈下はたいていの場合、地下水を揚水したことによって地盤内の水圧が減少するために生じる。そこで、観測井を設けて、地下水を採取している地層の地下水位または間隙水圧と、地表面から井戸の底までの距離を継続して観測し、地盤の変動量を把握する方法がとられている。

観測井による調査はおおがかりとなり、莫大な経費がかかる。そこで、昭和61年より手軽で簡便な観測システムの開発にとりかかり、昭和63年に故岩田敏研究員と共に試作品を完成させた。この地盤沈下観測システムは、単に経費が安く、ボーリング孔のような小さな径でも観測を行うことができるだけでなく、手軽で簡単に着脱でき、運搬が可能のため、既存の井戸にも適宜取り付け、地盤の間隙水圧と収縮量を同時に観測することができるという特色を有している。

有明東小学校で行ったボーリングの孔を利用しての地盤沈下観測が佐賀県の協力により行えるようになり、試作品を改良し、平成元年10月に設置した。この観測・データ処理システムの概略を図-4に設置状況を写真に示す。地盤の収縮量は長さ50 cmのステンレス製重りを直径0.8 mmの合成繊維製ワイヤーでプリーを介して、最大100 cm、読み取り精度0.3 mmの磁歪式沈下計で計測し、地下水位は最大20 m、読み取り精度2 cmの小型間隙水圧計で計測を行っている。そのほか、鉄製ケーシングの管頭抜け上がり量、外気温・室温も同時に測定している。測定したデータは現在5分間に1回の割合でデータ・ロガーを介して収集・処理するように設定している。さらに、4時間に1回の割合でハード・ディスクに記録し、保存している。これらのデータは本研究所だけでなく、佐賀県など複数の機関にも電話通信回線を使って転送している。図-5は平成3年2月末までの観測記録を示した

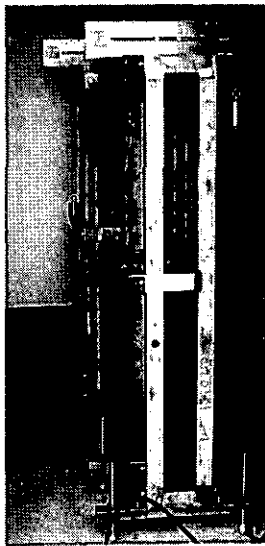


写真 観測井設置状況

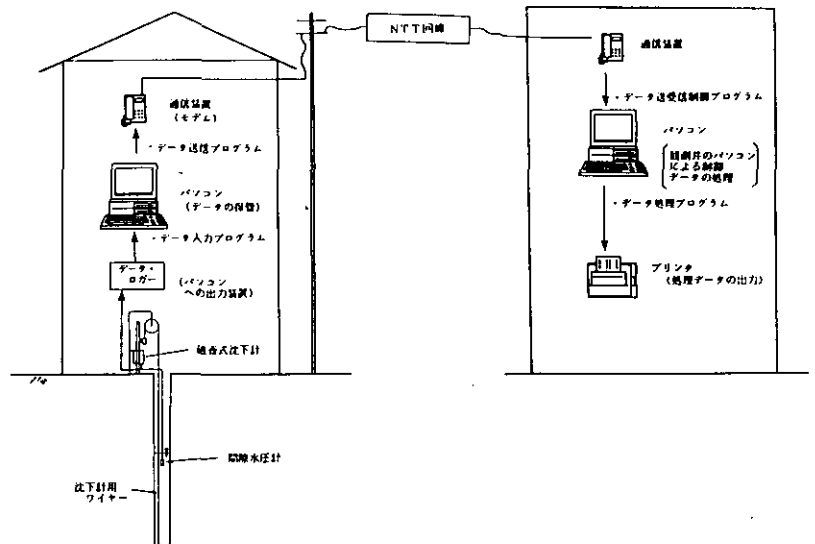


図-4 新しい地盤沈下観測システムの模式図

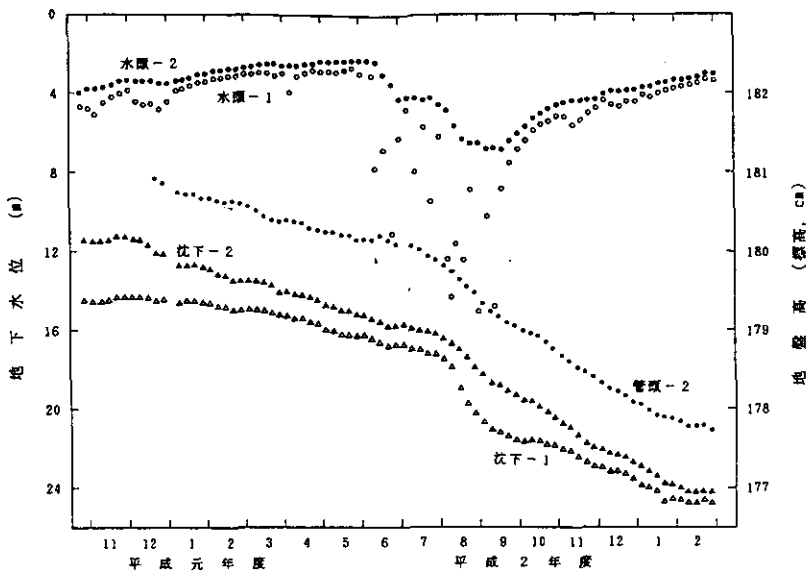


図-5 新有明観測井の地下水位と地盤高変動記録

ものである。観測は2つの深さで行っており、観測-1は、更新世中期に堆積した多良岳起源の礫層の地下水位(水頭-1, ストレーナー深度 GL. -96.5~106.0 m)とこの層の基底部までの地盤収縮量(沈下-1, 測定管深度 GL. -126.0 m)を測定している。観測-2は、島原海湾層相当層の地下水位(水頭-2, ストレーナー深度 GL. -26.3~29.3 m)と有明粘土層を主体とする沖積層の地盤収縮量(沈下-2, 測定管深度 GL. -31.0 m)を測定している。主に農業用に揚水している帯水層の水頭-1は、夏期に大幅に低下し、9月初めには GL. -15.2 m まで低下したが、ほとんど揚水していない帯水層の水頭-2は、水頭-1に引きずられるように徐々に低下している。地盤の収縮量は、有明粘土層の下に厚い粘土層がないためか、沈下-1, 沈下-2ともほぼ同じような沈下傾向を示し、しかも管頭の抜け上がり量(管頭-2)とも同じような値を示していることが分かる。水田を冠水させるため、地下水を多量に揚水するので、地下水位は夏に低下するが、冬には元の高さまで回復する。しかし、地盤の沈下は時間遅れを伴うため、地下水位が回復しても継続して生じる。このようにして地盤の沈下量は累積していく。

また、有明東小学校では、2つの地下水位と3つの地盤沈下量を計測しているが、これらの結果は図-1の観測結果や図-7の解析結果とも類似しており、新しい観測システムは十分実用に耐えられるものと思われる。

6. 圧密試験結果と地盤沈下解析

採取した乱さない粘土試料を用いて標準圧密試験と繰返し圧密試験を行った。一例として、深度 5.00~5.80 m および 15.10~15.95 m の2つの深さで採取した試料による標準圧密試験結果を図-6に示す。圧密試験結果を基に、有限要素法による次元圧密沈下解析を行った。解析に用いたプログラムは、岩田(1986)と同じである。また、地盤の各種パラメーターは、表-1のように与えた。地下水位の変動は実測資料を基に図-7に示すように与え、その解析結果も同図に示した。沈下の傾向は実測記録とよく対応している。ただ、解析から得られた地盤沈下量は、水準測量結果による地盤沈下

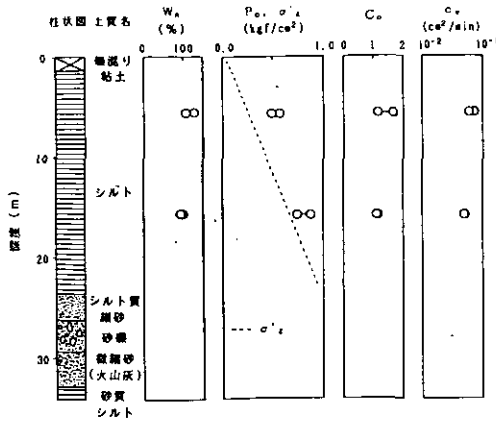


図-6 標準圧密試験結果

表-1 解析条件

層厚	22.15 m
深度	1.4 ~ 23.55 m
圧密係数	0.5 m ² /日 (載荷時) 0.3 m ² /日 (除荷時)
圧縮指数	0.06 (載荷時) 0.04 (除荷時)

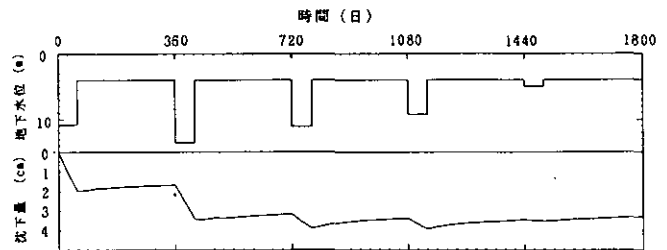


図-7 地盤沈下解析結果

量の30%程度である。この付近の深井戸からの地下水の揚水は、深度80~160mの砂礫層から行っているため、有明粘土層だけでなく、それよりも深い地層の収縮量が大きな比重を占めていることを示している。

7. おわりに

農業用に地下水を多量に揚水する地域では、季節的に地下水位が大きく変動する。このような地域では、地下水位の変動による地盤に加わる応力の繰り返し効果で、一年中地下水を揚水する場合よりも大きな累積沈下量を示すので、需要期の地下水揚水を減らすことが、災害や公害の低減につながる。

新たに開発した安価で簡便な地盤沈下観測システムを用い、1989年10月から観測を開始したが、その観測結果は妥当であり、実用可能と考える。

地盤沈下は海水面からの高さの変動を問題にすることが多い。海水面が上昇すると、地盤が沈下しなくても相対的に地球規模の地盤沈下が生じたことになり、地下水位も上昇する。近い将来世界中の平地部で観測を行うことになるかも知れない。このためにも、さらに手軽で簡便な観測システムの実用化を図っていく必要がある。

参考文献

- 1) 佐賀県：地盤沈下の概況，1990。
- 2) 岩田 敏・陶野 郁雄・桑原 文夫：土と基礎，Vol.34, No.11, pp.19-24, 1986。

有害廃棄物によるリスクとその管理

中 杉 修 身 (地域環境研究グループ)

1. 有害廃棄物によるリスク

交通公害や閉鎖性水域の汚濁等、従来から未解決の問題に加えて、最近、新たな環境問題が社会的に大きな関心を集めている。地球温暖化やオゾン層の破壊等、地球規模で影響を及ぼす環境問題が、国際的に解決すべき最重要課題の1つとなっており、一方で地域的にはトリクロロエチレン等による土壌・地下水汚染やトリブチルスズ化合物等による生物汚染等、環境汚染を通じた有害化学物質の曝露による人の健康や生態系に対するリスクに懸念が示されている。

有害化学物質の中でも難分解性のものはいつまでも環境中に残留し、長期間にわたって曝露されつづけるため、その影響がとくに懸念される。難分解性の物質は排ガス、排水あるいは廃棄物処理によっても分解されにくい。このため、処理しても、物理的に除かれ、それぞれの処理過程から発生する排ガス、排水あるいは廃棄物中に移行するだけである(図1)。排ガスや排水中の有害化学物質は一旦環境中に放出されると、後から汚染が問題となっても回収することは不可能である。このため、排ガスや排水に伴う有害化学物質の排出規制が優先されることになり、難分解性の有害化学物質は廃棄物に集まってくる。

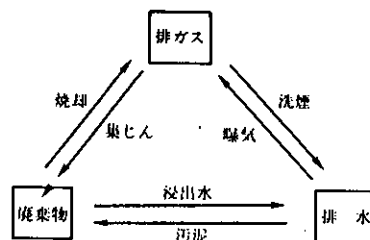


図1 処理過程における有害物質の行方

廃棄物中の有害化学物質は、中間処理では排ガス、排水と残渣に分配され、排ガスと排水処理で除かれなかったものが環境へ侵入する。中間処理残渣や直接埋め立てられた廃棄物中の有害化学物質は浸出水に溶け出したり、表面から揮散して環境へ侵入する。また有害廃棄物の運搬や処理中の事故によっても、廃棄物中に含まれる有害化学物質が環境へ侵入する。これらにより汚染された大気、水や食物を摂取することによって、廃棄物中の有害化学物質が人や生物に曝露される。それゆえ、有害化学物質の曝露によるリスクを防ぐには、有害廃棄物を適正に管理し、二次汚染を起こさないようにすることが最も大切である。

2. 有害廃棄物による環境汚染の可能性

有害廃棄物の処理による大規模な有害化学物質汚染が顕在化した例は、わが国においては今のところほとんどないが、諸外国では廃棄物処理施設周辺における有害化学物質汚染が数多く見出されている。米国では、ラブキャナルやタイムズビーチでダイオキシンを中心とした有害化学物質汚染が見出されたことから、廃棄物処理による有害化学物質汚染が問題となり、全国的に汚染された環境の修復対策が実施されている。これまでに、1千ヶ所を超える汚染が修復対策の検討対象としてリスト・アップされている。これらの事例では、土壌や地下水だけでなく、周辺の表流水、底泥や大気からも、様々

な有害化学物質が検出されている(図2)。埋立処分地周辺の地下水からは、わが国で有害廃棄物の判定対象としている重金属や揮発性有機塩素化合物に加えて、年間200万トン程度生産されているベンゼン等の芳香族炭化水素や塩化ビニル樹脂等に可塑剤として添加されているフタル酸エステルが10%以上のサンプルから検出されている(表1)。

わが国では、廃油の焼却を義務づける等、液状廃棄物の埋立を禁止しており、水質汚濁防止法で有害物質に指定されている物質が基準を超えて溶出する廃棄物

は外部との物質のやりとりを完全に遮断した処分地への埋立を義務づける等、比較的早い時期から有害廃棄物が管理されてきた。しかし、廃棄物は質的にも、量的にも大きく変化しており、その適正処理が難しくなっている。科学技術の進歩は次から次へ新しい化学物質を産み出しており、工業的に製造されているものは現在10万種を超えていると言われる。原材料や中間体として製造・使用過程で反応してしまうものは別として、これらの化学物質はいずれは廃棄物中に含まれることになるが、それらの中には処理されても分解されないものや処理する際に新たな有害物質を生成する可能性のあるものが多く含まれている。

処理が困難な廃棄物の増加に対して高度処理可能な施設への更新が必要となるが、廃棄物量が急増しているため、処理施設の整備は遅れがちで、新たな施設の増設が優先されることになる。このため、廃棄物の性状の変化に対応できない旧式の施設がいつまでも運転され、有害化学物質を十分に分解できなかったり、新たな有害化学物質を発生させやすい状況にある。

実際にも、廃棄物処理による有害化学物質汚染が見出されるようになってきている。トリクロロエチレン等による地下水汚染の主要な原因の1つとして、それらを含む廃棄物の不適正な処分があげられており、工場や試験研究機関の跡地における市街地土壌汚染も廃棄物の不適正な処分や処理施設からの漏出が原因となっているものが多い(図3)。さらに、廃棄物の焼却が発生源の1つであるダイオキシン類が魚介類や底泥から検出されている。

さらに、最近では廃棄物の不法投棄事例が増えている。その多くは建設土砂のように、有害化学物質

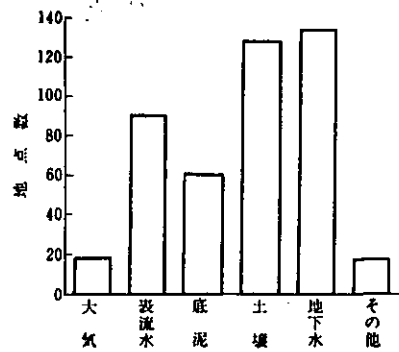


図2 修復対策調査対象地点の汚染媒体

表1 埋立処分地周辺地下水から検出される有害化学物質

物質名	検出率 %	検出数	最大濃度 (ppm)	平均濃度 (ppm)
塩化メチレン	19.2	777	7,800	11.2
クロロホルム	28.4	1,565	220	1.46
四塩化炭素	7.0	378	20	0.54
1,2-ジクロロエタン	14.2	750	440	6.33
1,1,1-トリクロロエタン	18.9	1,007	618	1.25
塩化ビニル	8.7	219	516	0.80
1,1-ジクロロエチレン	25.2	1,346	38.0	0.24
トリクロロエチレン	51.3	3,011	790	3.82
テトラクロロエチレン	36.0	2,296	21,570	9.68
ベンゼン	11.2	464	1,200	5.0
トルエン	11.6	472	1,100	5.18
キシレン	42.6	43	150	4.07
クロロベンゼン	5.5	225	13	0.10
フェノール	33.4	324	380	3.27
フタル酸ジアルキル	11.5	176	5.8	0.13
カドミウム	25.7	653	225	0.85
鉛	32.2	861	31,000	37.0
水銀	14.4	312	50	0.34
クロム	36.3	1,021	188	0.69
シアン	19.8	179	181	1.42

を含む可能性の少ないものであるが、福島県いわき市における塩素系廃溶剤を含む産業廃棄物の不法投棄や埼玉県朝霞市の河川敷で塩素系溶剤やPCB等の入ったドラム缶が埋められているのが見つかった事例等、有害廃棄物の不法投棄も少なくない。また、建設土砂にしても、工場跡地等の再開発から汚染土壌が廃棄物として排出される可能性もある。

有害廃棄物による環境汚染の実態については、わが国ではほとんど把握されていないのが現状であり、有害廃棄物の処理によって有害化学物質の環境汚染が潜在的に広がっている可能性は否定できない。今後、ますます多様な化学物質が用いられ、それらを含んだ有害廃棄物の発生が考えられる中で、それに伴うリスクを適正に管理することが、大量に発生する廃棄物の処理体制を整備することとあわせて、今後の廃棄物処理にとって重要な課題となる。

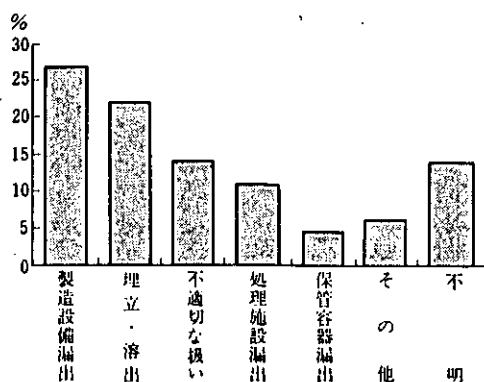


図3 市街地土壌汚染の汚染原因

3. 有害廃棄物によるリスク管理の問題点

しかし、わが国における有害廃棄物によるリスクの管理体制は必ずしも十分ではない。現在廃棄物処理法の改正が検討されているが、その中でこれらの問題点がどのように解決されるかは、具体的には明確でない。そこで、ここでは有害廃棄物の判定と適正処理の確保に係わる現状での問題点をいくつか指摘しておくことにする。

①管理すべき廃棄物が限定されている。

現状では有害廃棄物として特別な管理が必要となる廃棄物が限定されている。有害廃棄物の判定は数多い有害化学物質の一部を対象としているに過ぎない。このため、約450項目を対象に判定しており、全体の1/3が有害廃棄物に該当する米国を始め、諸外国に比べて特別な管理が求められる廃棄物が少ない(図4)。

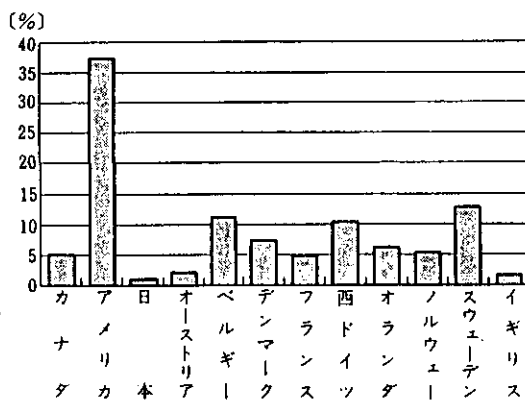


図4 各国における有害廃棄物の比率

その上、わが国では限定された施設から排出される廃棄物だけが判定の対象とされており、同様な性状を有する廃棄物でも排出された施設によって特別な管理が必要となったり、不要となったりする。また、限定された種類の廃棄物だけが判定の対象とされているため、有害化学物質を多量に含んでいても、特別な管理を求められない廃棄物がある。例えば、廃プラスチックやガラス等はどんなに有害化学物質を含んでいても、浸出水処理施設も持たない埋立処分地に処分することができる。さらに、一般廃棄物は有害廃棄物の判定対象とされていないが、その焼却灰の中には判定基準を超えて有害化学物質が溶出するものもある。有害廃棄物の越境移

動を規制するバーゼル条約の批准に合わせて、その中で管理すべきとされている廃棄物と調和させるためにも、わが国でも特別な管理が求められる廃棄物の範囲は広げられると考えられる。

②水系以外の汚染によるリスクが考慮されていない。

アスベストを含む廃棄物の処理にあたっては、わが国でも飛散するアスベストの吸入によるリスクが考慮されているが、それ以外の廃棄物については、わが国に限らず、有害廃棄物の判定は主として埋立処分による地下水汚染を念頭において行われており、方法に若干の違いはあるものの溶出試験を行って判定するケースが多い。しかし、廃棄物に含まれる有害化学物質の中でも揮発性のものは、埋立処分地の表面から大気中に揮発していく。実際に埋立処分地の大気や土壌ガスからは多様な化学物質が検出されている。埋立作業や跡地利用の方法によっては、廃棄物中の揮発性の有害化学物質が人や生物に曝露されると考えられる。今後、多様な有害化学物質が廃棄物に含まれるようになることを考えると、有害廃棄物の判定にあたっては、その中に含まれる有害化学物質の揮発によるリスクを考慮する必要がある。

③適正処理できる体制が整備されていない。

有害廃棄物は質的に変化するとともに、量的にも増えていくものと考えられるが、その一方で有害廃棄物を適正に処理する体制の整備は遅れている。適正処理するためには、処理する廃棄物の性状を十分に把握し、適切な技術を適用することが大切である。しかし、先端技術産業等、競争の激しい業界では、研究や生産活動の内容が分かってしまうとして廃棄物の性状を明らかにしないところもあると言われる。このため、廃棄物の性状等を記載した伝票のつづりを排出事業者から順番に廃棄物の運搬、処理、処分を行う業者に伝えていくマニフェスト制度が設けられた。

しかし、適切に処理する技術がない場合や持たない場合は、いくら廃棄物の性状が分かっても、適正処理することはできない。それゆえ、排出事業者が自ら処理する場合も含めて、処理業者の技術力向上が求められる。処理業者の認可条件を処理の困難性に応じて設定したり、資格制度を設ける等の対応が求められる。

④跡地の管理が十分に行われていない。

現在の規定では、埋立処分地は一旦閉鎖されると、他の土地と何ら変わりのない扱いを受け、跡地利用も何らの制限も受けない。遮断型処分地については、跡地利用における配慮を指導する通達が出されているが、跡地利用の方法によっては、埋められた廃棄物が掘り出され、含まれている有害化学物質が環境中へ拡散する恐れがある。廃棄物処理法が現在の形に改正される以前の埋立処分地については多くの場合、記録が残されておらず、埋立処分跡地とは知らずに、掘り起こして、出てきた廃棄物の処理に苦慮する事例も多い。分解されにくい有害化学物質を保管している埋立処分地を中心に、閉鎖された後の跡地管理と利用の方法を明確にしておくことが求められる。

4. 有害廃棄物のモニタリングに関する研究

廃棄物の管理におけるこのような問題点は、今回の廃棄物処理法の改正によって解決がはかられていくと考えられるが、有害廃棄物のリスクを適正に管理していく上で、有害廃棄物及びそれに伴う環境汚染の状況を的確に把握していくことが不可欠となる。わが国では、有害廃棄物による環境汚染の

状況はほとんど把握されておらず、リスクの管理方法を考えていくには、まず、汚染状況の把握が不可欠となる。

そこで、本研究所では昨年から「有害廃棄物のモニタリングに関する研究」を開始している。この中では、地方公害研究所との共同研究を含めて、①焼却処理における有害化学物質の挙動の解明、②埋立処分に伴う有害化学物質汚染の可能性の検討、③有害廃棄物のリスクを監視していくためのモニタリング手法の開発を行い、これらの結果を総合して、④有害廃棄物のリスク評価手法の確立を行おうとしている。まだ3年間の研究計画の初年度が終了した段階であるが、これまでに得られた成果のいくつかを紹介する。

焼却処理における有害化学物質の挙動解明の中では、室内実験及び実際の産業廃棄物焼却施設を用いて、有機塩素化合物を含む廃棄物の焼却処理において非意図的に生成する有害化学物質の検索を行っている。また、産業廃棄物焼却施設周辺で、そこから排出された有害化学物質による汚染状況を調査している。

室内実験では塩素系樹脂の燃焼生成物をGC/MSを用いて同定した。塩化ビニル樹脂からは、ダイオキシンを始めとして多様な化学物質が検出されているが、一般に毒性の高い塩素系化学物質の生成は塩化ビニリデン樹脂に比べて少なかった。

一方、産業廃棄物焼却施設では、850及び950℃で塩素系溶剤の塩化メチレンとトリクロロエチレンの混合物の燃焼実験を行い、煙道の排ガスと排ガス洗浄廃液中の塩素系化学物質を調べた。この施設の排ガスは廃プラスチック焼却施設の排ガスと一緒に処理されており、採取したサンプルには廃プラスチックの燃焼生成物も含まれている。煙道の排ガスからは、廃プラスチックの焼却に起因すると考えられる多様な塩素系化学物質が検出された(表2)。燃焼生成物の組成は、焼却された廃プラスチックの種類によって大きな差は見られなかった。

一方、焼却施設周辺の汚染調査では、大気中のガス状水銀、ヘキサクロロベンゼン、ベンゼン及びトルエンと、土壌中の水銀を調べた。施設周辺の汚染分布と風向との関連から、大気中のこれら汚染物質と焼却施設が何らかの係わりを持つことが明らかにされた。一方、土壌中の水銀濃度と焼却施設との間に明確な関連は見出せなかった。

埋立処分に伴う有害化学物質汚染の可能性の検討の中では、埋立処分地や不法投棄場所から出てくる浸出水中の有害化学物質をGC/MSを用

表2 産業廃棄物焼却施設の煙道排ガス中の有機塩素化合物($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

焼 却 物	廃プラスチック		廃プラスチック, 廃溶剤	
	950	850	950	850
塩化メチレン	91.8	107	85.2	132
トリクロロエチレン	155	186	146	209
四塩化炭素	373	457	301	528
1,2-ジクロロエタン	4.09	7.46	3.61	4.91
1,1,1-トリクロロエタン	24.2	22.0	18.9	19.3
1,2-ジクロロベンゼン	3.96	3.82	4.98	3.80
1,1-ジクロロエチレン	9.16	11.4	7.51	12.4
cis-1,2-ジクロロエチレン	9.73	33.7	5.54	38.8
trans-1,2-ジクロロエチレン	7.96	28.0	4.71	33.5
トリクロロエチレン	33.8	87.6	20.2	83.1
テトラクロロエチレン	75.4	137	49.7	104

*: 廃溶剤の燃焼温度、廃プラスチック燃焼温度は850℃

ディーゼル排気粒子による喘息誘発物質遊離 の新しいメカニズムに関する一考察

嵯峨井 勝 (地域環境研究グループ)

要 旨 喘息やアレルギー性鼻炎は主に IgE 抗体ができることによって肥満細胞からヒスタミン等が遊離して起こることが知られている。しかし、大気汚染地域に住む喘息患者の IgE 値は必ずしも高くはない。

今回、我々はディーゼル排気粒子 (DEP) により、肺内でフリーラジカル (O_2^- 等) が多量に生成し、この結果肥満細胞からヒスタミン等が遊離してくるという、IgE 抗体が関与しない、新しいメカニズムが存在する可能性を見いだしたので報告する。

1. はじめに

近年、私たちをとり巻く大気環境の変化を反映して、気管支喘息やアレルギー性鼻炎等の患者が増加してきている。特に、スギ花粉症患者の増加は著しい。これら疾患と大気汚染との因果関係は、スギ花粉症の一部を除き、いまだ不明であり、その原因を究明する為には大気汚染による上記疾患の発症メカニズムを解明することが不可欠である。

2. 気管支喘息、アレルギー性鼻炎等呼吸器疾患の発症メカニズム

従来、これら呼吸器疾患の発症メカニズムは免疫的刺激にもとづくアレルギー反応によって説明されている。すなわち、スギ花粉のようなある種のアレルギー (抗原) が経気道的に侵入すると、鼻腔や肺内に常在するマクロファージがこれを取り込み、リンパ球活性化因子のインターロイキン-1 (IL-1) を産生し、この IL-1 を介して T リンパ球に増殖活性化の情報が伝えられ、T リンパ球はインターロイキン-2, 4, 5, 6 等を介してその情報を B リンパ球に伝える。これにより、B リンパ球は活性化され増殖状態に入り、IgE 抗体産生細胞へと分化し、IgE 抗体を大量に作り出す。

こうして作り出された IgE 抗体は、図 1 に示すように、気管支等の粘膜中に存在する肥満細胞の表面に付着する。この IgE が付着した状態 (感作された状態) のところに再びアレルギーが結合することによってアレルギー反応が起こる。この反応の結果、肥満細胞中のヒスタミンをはじめとする化学伝達物質 (chemical mediators) が細胞外へ遊離し、それらが気管支を収縮させたり、毛細血管の透過性を亢進させたりして、いわゆるアレルギー症状を引き起こすのである。

3. 気管支喘息やアレルギー性鼻炎の発症と大気汚染との因果関係

— その矛盾点 —

このようなメカニズムが明らかにされるに及んで、大気汚染地域における喘息患者は IgE 抗体産生能が高い、遺伝的素因によるのであろうと考えられた。しかし、大気汚染地域に住む多くの喘息患者

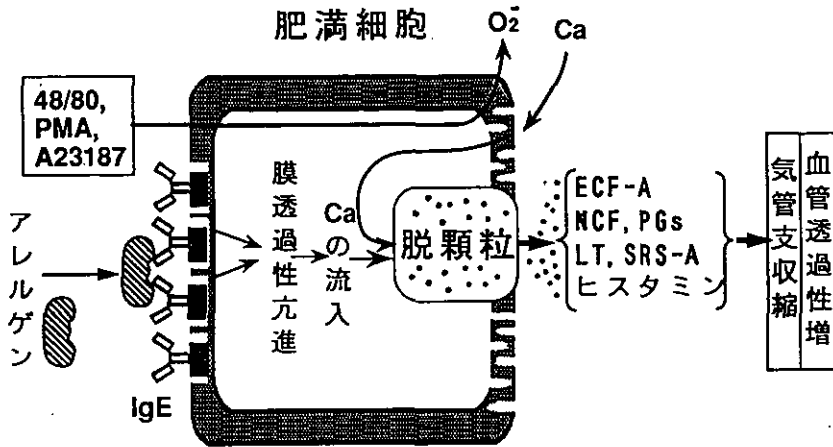


図1 免疫的刺激によるヒスタミン等の化学伝達物質遊離による気管支収縮、血管透過性増加のメカニズム(従来の説)

の血清 IgE 値を測定してみると、その IgE 値は特に高いということにはなかった。このことから、大気汚染地域に住む患者の喘息発症の原因が IgE 抗体産生能がもともと高いという遺伝的素因によるものではないことが示唆され、IgE 抗体産生増加を伴わない、別の喘息発症機構があるのではないかと考えられてきた。しかし今日まで、大気汚染と気管支喘息等との間の因果関係を説明しうるメカニズムは報告されていない。今回、我々はその因果関係を説明しうる新しいメカニズムの存在を示唆する結果を得たので報告する。

4. ディーゼル排気粒子 (DEP) によるマウスの死亡率とスーパーオキシドジスムターゼ (SOD) による抑制

我々は DEP と気管支喘息等との因果関係を説明しうるメカニズムの解明を目的に、DEP の基本的毒性の検討から研究に着手した。まず、DEP の一般的毒性を調べるため、DEP を 50 mM リン酸緩衝液 (pH 7.4, 0.05 % Tween 80 を含む) に超音波懸濁して、マウス (ICR 系) の気管内に投与し、24 時間後の死亡率を調べた (図 2)。図から分かるように、死亡率は DEP 投与量が増えるにつれて増加し、0.9 mg で 100 % に達し、LD₅₀ (50 % のマウスが死亡する濃度) は 0.6 mg であった。なお、この時のマウスの死因は肺水腫であった。また、マウスの系統の違うものの間では DEP に対する感受性は著しく異なっていることも明らかになった。さらに、有機溶媒で十分洗浄した DEP は 1.0 mg あるいはそれ以上の量を投与しても、死亡例は全く認められなかった。

また興味深いことに、マウスに DEP を投与する前に SOD (polyethylene glycol-結合-SOD) を尾静脈から注入しておくこと、0.9 mg あるいは 1.0 mg DEP 投与でもマウスの死亡率は 30 % まで低下した。SOD を気管内に投与した場合にはもっと効率的に死亡が抑制された。このように、SOD によって死亡率が著しく抑制されたこと、ならびに血管内皮細胞は O₂⁻ 等の活性酸素 (フリーラジカル) に非常に弱いこと等により、DEP による死因は、DEP が肺内で O₂⁻ をはじめとする活性酸素を多量に生成し、これらが血管内皮細胞を傷害し、その結果血管の透過性を高め、血液から水分が肺に漏れ出ることによって肺水腫になったことによるものと考えられる。

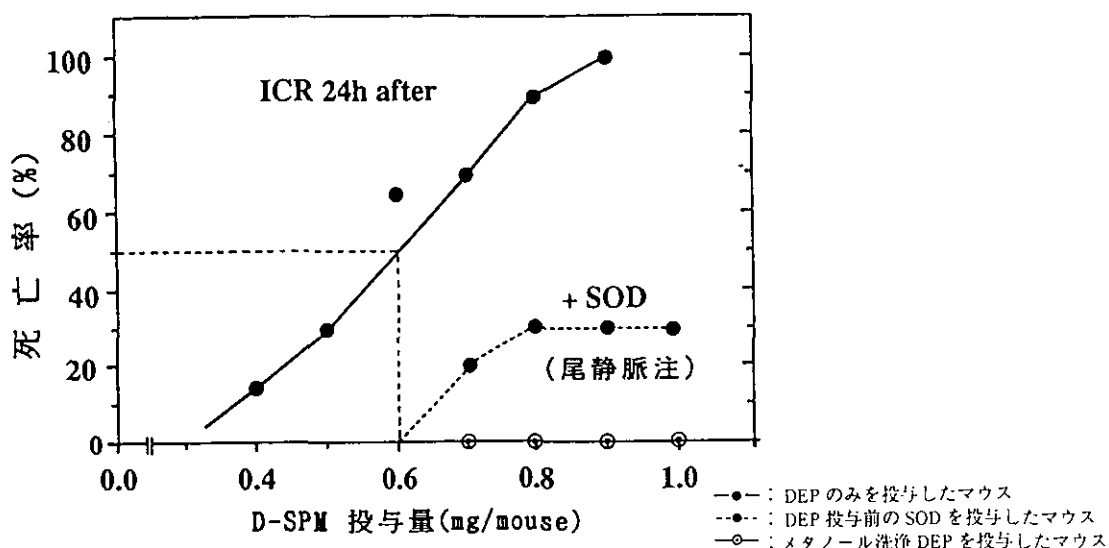


図2 ディーゼル排気粒子 (DEP) の気管内投与による ICR マウスの死亡率とスーパーオキシドジスムターゼ (SOD) 尾静脈投与による死亡率低下

5. 肺水腫や血管内皮細胞傷害に関与する活性酸素種について

肺水腫の生成に O_2^- 以外にどのような活性酸素種が関与しているかを知ることは重要な問題である。尾静脈投与 (iv) SOD と気管内投与 (it) SOD が有効であることはさきに述べた。鉄は酸素と複合体 (フェリルイオン) を作って過酸化脂質や $\cdot OH$ を生成し、細胞傷害を起こすことが知られている。そこで、鉄キレート剤のデスフェラルと EDTA を DEP と同時に投与したところ、若干の死亡抑制効果を示した。一方、鉄のキレート剤の DETAPAC は鉄とキレートして $\cdot OH$ を生成することが知られている。0.5 mg の DEP を投与した場合の死亡率は 20 % であるのに対して、DETAPAC を共存させると死亡率は 50-60 % に増加した。このことより、血管内皮細胞傷害に過酸化脂質や $\cdot OH$ も関与していることが示唆された。また、プロスタグランジンの関与を知るために、非ステロイド系抗炎症剤のインドメタシンとステロイド系抗炎症剤のデキサメサゾンの効果を調べたが顕著な死亡率低下効果は認められず、プロスタグランジンの関与は少ないものと考えられる。一方、食品等の抗酸化剤として用いられ、過酸化脂質の生成を抑制することが知られている BHT (Butylated hydroxytoluene) は著しく死亡率を低下させたことから、血管内皮細胞の傷害には過酸化脂質も関与していることが確認された。

以上のことより、DEPによる肺水腫の原因たる血管内皮細胞傷害には O_2^- 、 $\cdot OH$ および過酸化脂質 ($ROOH$, $RO\cdot$, $ROO\cdot$) 等が関与していることが考えられる。

6. ディーゼル排気粒子による過酸化脂質とヒスタミン遊離との関連

前項に述べた如く、DEPにより過酸化脂質も増加することが示唆された。ほとんどの細胞の膜はリン脂質を中心とする脂質成分から構成されている。この膜の脂質成分が過酸化されると、生体膜は選択的透過性や流動性を失い、さらには膜結合酵素も活性を失い、生体膜としての機能は著しく傷害

されることが知られている。

肥満細胞の膜も50%以上がリン脂質から構成されている。この細胞膜の脂質が過酸化されて、膜の透過性が高くなると、ヒスタミンをはじめとする喘息誘発性化学伝達物質が細胞外へ遊離してくることが容易に想像される。

そこで、マウスにDEPを投与した時に過酸化脂質とヒスタミンの遊離が起こるかどうかを調べた。実験は6週令のICR系マウスに0.2mgのDEPを気管内投与し、24時間後までの血液中の過酸化脂質とヒスタミン濃度の変化を調べた(図3)。図から分かるように、血清中の過酸化脂質は時間の経過につれて増加し、全血液中のヒスタミン量も24時間目では対照群の2倍以上に増加し、両者の変化は相関していることが推測された。

一方、前項に述べたように、DEPによって肺内で O_2^- が生成し、これによって脂質の過酸化が起こり、その結果膜の透過性が亢進し、ヒスタミンが遊離するということが正しいとするならば、SODを投与すると脂質の過酸化やヒスタミンの遊離は抑制されなければならない。このことを調べるために、マウスにあらかじめSODを投与しておき、DEP投与後20時間目に屠殺して血清中の過酸化脂質と全血液中のヒスタミン量を測定したところ、DEPのみを投与したマウスでは前項と同様に過酸化脂質とヒスタミン遊離は亢進していたが、あらかじめSODを投与しておいた群では過酸化脂質もヒスタミン遊離も抑制された。

7. ディーゼル排気粒子による喘息やアレルギー性鼻炎発症のメカニズムに関する考察

以上に述べたことから、現在考えられるディーゼル排気粒子による気管支喘息やアレルギー性鼻炎発症のメカニズムを図4にまとめてみた。有機溶媒洗浄したディーゼル排気粒子は肺水腫を全く起こさなかったことより、DEPに含まれる有機溶媒可溶性成分が肺内で代謝されたり、あるいはミトコ

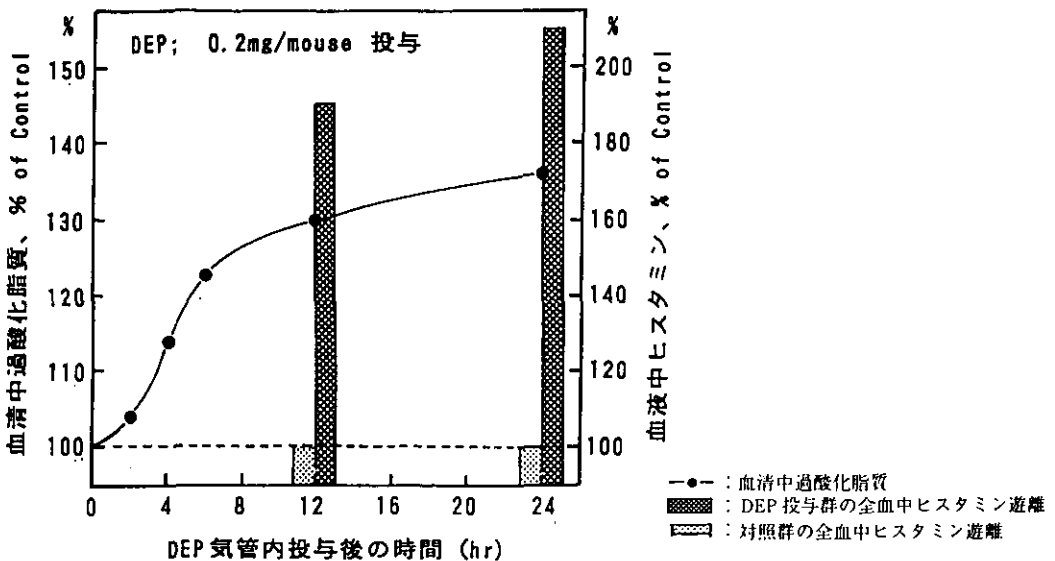


図3 ディーゼル排気粒子(DEP)の気管内投与後の血清中過酸化脂質と全血中ヒスタミン遊離

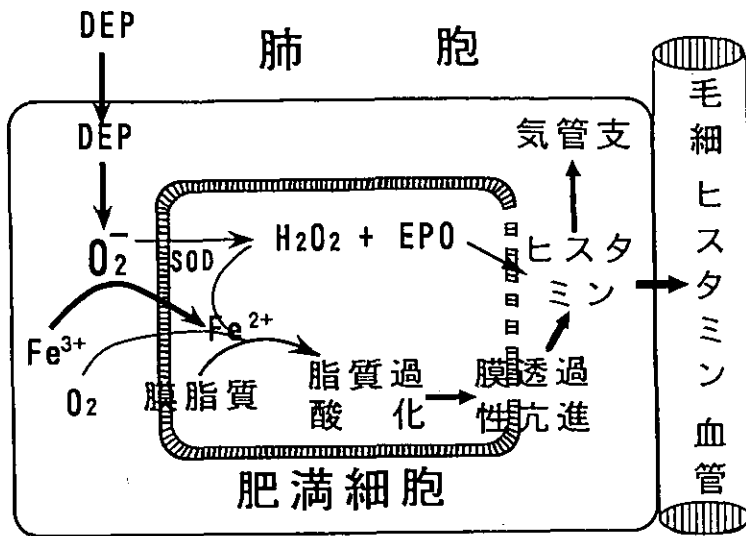


図4 ディーゼル排気粒子 (DEP) によるスーパーオキシド (O_2^-), 過酸化脂質を介するヒスタミン遊離の新しいメカニズム

ンドリアの電子伝達系に傷害を及ぼす等のなんらかの機序によって O_2^- を多量に生成し、これによって肥満細胞の膜脂質が過酸化され膜の透過性が著しく亢進するものと考えられる。これによって、ヒスタミンをはじめとする化学伝達物質を含む肥満細胞中の顆粒が細胞外に飛び出し(脱顆粒現象)、ヒスタミン等の喘息誘発物質を遊離し、これらの化学伝達物質が気管支に行って気管支の収縮を起こせば喘息誘発に結び付き、鼻腔の血管透過性を高めれば鼻みずを生じ、粘液分泌を増やして鼻づまりを引き起こすものと考えられる。

8. ディーゼル排気粒子による O_2^- 産生を介するヒスタミン遊離メカニズムの意義

今回報告したディーゼル排気粒子による O_2^- あるいは過酸化脂質産生を介するヒスタミン遊離のメカニズムは次のような点からその解明の意義は高いと考えられる。

第一に、 O_2^- 産生を介するこのメカニズムは大気汚染と気管支喘息等との間の因果関係の説明を可能にした点にある。大気汚染地域には喘息患者が多いという事実が疫学的に認められながら、彼らの IgE 値は決して高くないことから、「IgE 抗体産生能が高いアレルギー素因にもとづくとする従来の説」では説明がつかず、それに代わるメカニズムが不明なまま今日に至っている。しかし、今回報告した新しいメカニズムは「免疫的刺激によらない喘息発症」のメカニズムの一つになり得るものと考えられる。

第二に、このメカニズムはより広いアレルギー反応の発生を説明しうる点にある。例えば、卵や牛乳のような食事性因子、あるいはダニやカビ等のハウスダストがアレルギーを引き起こすことは、それらが基本的にはタンパク質であり、アレルゲンに成りうることから「免疫的刺激にもとづく従来の説」でその説明に困難は無い。しかし、 NO_2 , O_3 , SO_2 のような無機物あるいは食品添加物(主に有機化合物)等のようにアレルゲンやアジュバントには成り得ない物質によるアレルギー反応は従来のメ

カニズムでは説明し得ない。この点、 O_2^- や過酸化脂質を介する新しいメカニズムは、 NO_2 、 O_3 、 SO_2 、酸性微粒子をはじめとする広範な環境汚染物質や食品添加物等のほとんどが O_2^- や過酸化脂質を生成しうることから、その説明を可能とする。

第三に、 O_2^- 生成を介するこのメカニズムは、 O_2^- が気管支粘膜や肺胞上皮細胞を容易に傷害し、気管支や肺に分布する迷走神経を過敏化することから、神経系を介する喘息誘発の原因の説明をも可能にする。また、これはサブスタンス-Pやニューロキニン-A等のペプチド性知覚ニューロン伝達物質による神経系を介する喘息誘発の説明をも可能にする。これは例えば、 O_2^- がサブスタンス-Pの分解酵素である neutral endopeptidase を不活性化し、サブスタンス-P濃度が増加し、気管支収縮を起こす例が知られている。

以上のように、 O_2^- や過酸化脂質生成を介するアレルギー反応の存在の可能性は、これまで一見バラバラに見えた広範な事実を統一的にとらえることを可能にしえらるゝと考える。

9. おわりに

今回報告した O_2^- や過酸化脂質生成を介する新しいメカニズムは上述した如く、多くの事象を統一的にとらえることを可能にしえらるゝと考える。しかし、このメカニズムもまだ多くの解決されるべき問題点があることを否定するものではない。

例えば、DEPが肺に入るとなぜ O_2^- を生成し、そのときどのような化合物がどのようなメカニズムで O_2^- の生成に関与するのか。肥満細胞以外の好中球や好酸球のような細胞の関与はどうか。それら細胞から遊離される化学伝達物質の濃度で、in vivo系で本当に気管支収縮やアレルギー性鼻炎等が起こるのかどうか。そして、最も大切なことは、気管内投与ではなく、DEPの吸入実験においても上記のような化学伝達物質の遊離や気管支収縮、アレルギー性鼻炎等が起こるのかどうかという問題も今後に残された課題である。

「これらの研究が国民の健康の維持と増進に少しでも役立つことを念願して、今後もさらに研究を推進してゆきたいと考えております。関係各位の今後も変わらぬ御指導と御理解を頂きますことをお願い致しまして報告とさせていただきます。」

核磁気共鳴を用いる生体機能診断法

三 森 文 行 (環境健康部)

要 旨 核磁気共鳴は磁場を利用する分光測定法の一つである。この手法を用いて生体内の解剖学的画像や代謝に関する情報を、生体を全く傷つけることなく手にいれることが可能である。本発表では手法の簡単な紹介に続いて、水銀中毒モデルラットの脳のエネルギー代謝機能の変化や、定常的な運動が筋肉の機能を向上させる様子を³¹P NMR分光法により解析した例を示す。さらに、代謝情報を体内の部位を分けて測定し生化学的な画像診断に到る、最新の手法の開発状況を紹介する。

1. はじめに

核磁気共鳴法(Nuclear Magnetic Resonance, 以下NMRと略する)は、X線からラジオ波までさまざまな電磁波を用いる分光測定法のなかで最もエネルギーの低いラジオ波(可視光の 10^{-7})を観測に用いる方法である。このため、測定が対象にもたらす影響が極めて小さく、生体計測にうってつけである。このためあって、NMR現象を用いる断層撮影装置(MRI)は臨床診断機器として急速に普及しつつある。NMRが生体計測に適するもうひとつの理由は、測定に用いるラジオ波の生体透過性が高く、体表面から見えない体内で生じている生命現象を、体を切り開くことなくとらえることができる点にある。しかも本来NMRのもたらす情報は生体を構成する分子の構造や運動状態にまで及ぶもので、現在イメージングで利用されているよりもはるかに多彩な生化学情報を与え、より高度な生体機能診断法として展開する可能性をもっている。このため、病気の診断や、治療経過の判定に利用することをめざして臨床医学分野での手法の開発が進められている。ここでは、環境科学の分野でこのような非破壊診断法がどのような意味を持つのか簡単に触れておきたい。

これまで環境科学的な観点から人間の生体機能検査を行うことは極めて困難であった。臨床診断の場合のように治療という見返りがないために、血液や尿を採取するのがやっとで、肝や腎、脳といった主要臓器の生化学的情報を手に入れることはほとんど望み得なかった。しかし、NMRによって体を傷つけることなく、何の痛みもなくこれらの臓器機能を診断できるようになれば、事情は一変するであろう。しかもNMRによって得られる情報は従来の生化学的手法によっては得ることのできない、生きて機能している臓器の分子レベルの知見であるということを指摘しておきたい。さらに、NMRを用いれば人間と実験モデル動物を同一の条件で測定することが可能であり、動物実験の有効性を高めることができるであろう。環境に 관련된人間の健康の問題を考える場合、このような非破壊・無侵襲生体計測手法の重要性は論を待たない。

2. NMRで何がわかるか

生体のNMR測定結果はスペクトルとして表現される。スペクトル上では生体内のさまざまな代謝

物の構造に応じて相異なる信号が得られるため(化学シフト), 体内の代謝物の種類と存在量を非分離で知ることが可能である。このほか, 代謝物分子内での核スピン間の相互作用(スピン結合), 磁場との相互作用の速さ(緩和時間)といった情報もスペクトル上には表現される。実際にはこれらの物理的パラメータを駆使して, 代謝物の動態や相互作用, 細胞内 pH といった生理・生化学情報を手にいれることになる。これまでに NMR を用いて得られた生化学情報, およびその解析法を表 1 にまとめた。代謝物の存在状態といった細胞内環境から, 生体内の特定の酵素の反応速度, 熱力学パラメータまでひとつの方法によるとは思えないほどの多彩な情報が得られている。これらを組み合わせて, 生体の機能診断, 病態の解析が実現される^{1,2)}。以下にいくつかの例を示す。

表 1 NMR により得られる生化学情報とその解析法

生 化 学 情 報	解 析 法
代謝物の同定	代謝物に固有の化学シフト値, スピン結合, 緩和を含めたスペクトルパターンを標準物質と比較することにより行われる。
代謝物の定量	スペクトルの共鳴線強度の算定により行う。 同一試料中の同一物質の相対値変化を得ることは比較的容易であるが, 絶対値の定量には, NOE 緩和時間の考慮など注意を要する。 検出限界は核種, 生体の状態, 使用機器により大きく変わるが, ³¹ P 核で条件のよい場合で mM~サブ mM。
細胞内 pH 及び細胞内コンパートメンテーション	細胞内の酸解離物質の化学シフト値, または共鳴線強度が pKa 付近で pH に対応して変化することを利用する。 細胞内に pH の異なるコンパートメントが存在する場合には, 上記の代謝物はコンパートメントごとに個別に観測されるので, 非分離でコンパートメンテーションを観測できる。
細胞内 pCa	カルシウムイオンに選択的なキレート剤を“指示薬”として細胞内に導入し, その共鳴線強度, または化学シフト値がキレーションの度合いによって変化することを利用する。
イオン分布	シフト試薬を用い, 細胞外のナトリウム, カリウム, リチウムなどのイオンを選択的にシフトさせ, 細胞内外の共鳴線を個別に測定する。 細胞内のアルカリ金属イオンは必ずしも 100% 検出可能ではないので注意を要する。
代謝反応速度	代謝反応が定常状態にない場合は, 代謝物の共鳴線強度の時間変化から代謝速度が得られる。 安定同位体標識化合物をトレーサーとして用いる場合にも同様の手法が用いられる。 代謝が定常状態にあり, 共鳴線強度が変化しない場合は, 磁化移動法, 線形解析が用いられる。
代謝経路	安定同位体標識の代謝に伴う移動の追跡。 放射性同位体標識の場合と異なり非分離で標識位置に関する情報が得られる。
代謝反応の熱力学的パラメーター	上記の反応速度定数の温度変化の解析など。
代謝物の存在状態	緩和時間の解析より得られる代謝物の運動状態, 化学シフト値やスピン結合より得られる代謝物相互, 膜, 金属イオンなどとの相互作用など。
代謝物の構造	不安定で分離操作により分解してしまう代謝物の構造に関しては, <i>in vivo</i> で通常の NMR の構造解析法を適用する。 酵素など高分子量物質の高次構造の解析は, 現在のところ実現できていないが, 赤血球中のヘモグロビンのように多量に存在する物質では, 化学シフト値, 緩和情報を用いて例外的に高次構造に関する知見が得られる。

3. 水銀中毒モデルラット脳のエネルギー代謝機能

水俣病は有機水銀が人間に及ぼした中毒の最悪のケースのひとつである。有機水銀が容易に脳に到達し、障害を与えることが明らかにされてきた。しかし、膨大な研究の蓄積にもかかわらず、有機水銀がいかにして脳細胞の壊死、ひいては個体死をひきおこすのかは必ずしも明らかにされていない。現在ではラットにメチル水銀を経口投与することにより、水銀中毒モデル動物を作成することが可能である。ここでは、塩化メチル水銀(5 mgHg/kg 体重)を12日間投与したラットを用いて、麻酔下で脳のプロトンイメージ、 ^{31}P NMR を測定した結果を示す。

中毒ラットの脳のプロトンイメージでは、縦緩和時間または横緩和時間でコントラストをつけたいずれの画像においても異常を認めなかった。図1に中毒および正常動物脳の ^{31}P NMR スペクトルを示す。両者ともに無機リン酸(Pi)、クレアチンリン酸(PCr)、ATPの信号が観測される。これらはいずれも脳のエネルギー代謝に深く関与する代謝物である。各ピークの面積強度からこれらの代謝物の存在量を知ることができる。また無機リン酸の出現位置(化学シフト)からは脳内のpHを推定することが可能である。両者のスペクトルはきわめてよく似ているが、詳細な解析の結果、中毒脳においてクレアチンリン酸が $4.55 \pm 0.34 \mu\text{mol/g}$ と、正常脳($5.45 \pm 0.33 \mu\text{mol/g}$)に比べ約17%減少していることが明らかになった(図2)。これに対して、ATP濃度には変化がみられず、脳内pHも正常であった。この結果は、ATP合成反応系の最大速度(V_{max})の低下、したがって脳細胞内ミトコンドリアの機能不全を強く示唆する。

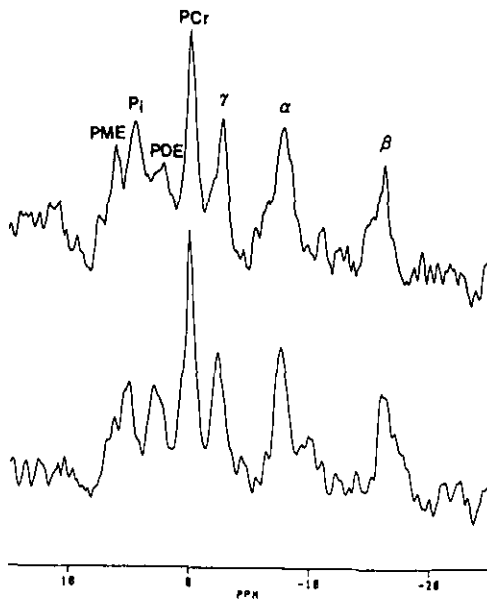


図1 ラット脳の ^{31}P NMR スペクトル(上)水銀中毒ラット, (下)正常ラット
 α, β, γ ; ATPの3つのリン酸基

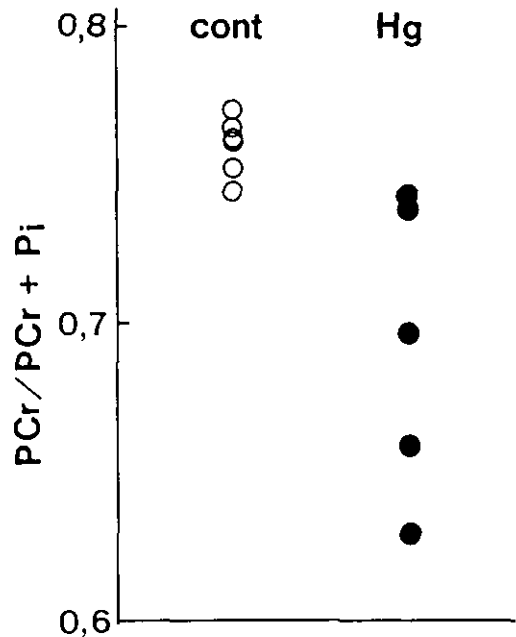


図2 正常、中毒ラット脳のPCr/PCr + Pi

4. 運動と筋機能

日常的な適度の運動が健康を増進するということがよく言われている。ここではより端的に、運動が骨格筋の機能をどのように増進するのか³¹P NMRを用いて解析した例を示す。Wistar ラット16匹を2群に分け、運動群にはトレッドミルを用いて週3回、45分間の走トレーニング(26.8 m / min)を課した。トレーニング群、コントロール群ともに3か月ごとに後肢筋のNMR測定を実施した。測定に際してラット後肢筋には電極を装着し、1 Hzの直流電気パルスにより運動負荷を与えられるようにした。これにより、筋の休息期、運動期、回復期のスペクトルを連続的に観測することが可能である。またストレインゲージを用いて筋張力も同時に測定した。図3にこのようにして測定した筋の休息→運動→回復の³¹P NMRスペクトルを示す。全過程を通じてATPは変化していない。しかし、電気刺激による運動でクレアチンリン酸が低下し、無機リン酸が増大している様子が明確にとらえられている。クレアチンリン酸が、消費されたATPのバッファとして十分機能している。それでは走トレーニングの影響はどうであろうか。図4にトレーニング6か月後の両群のPCr/PCr + Pi、筋pHを休息→運動→回復期にプロットした結果を示す。トレーニング群において運動中のPCr/PCr + Piの低下が劇的に改善されているのが明らかである。すなわちコントロール群ではこの比は0.67まで低下するが、トレーニング群では0.83にとどまっている。両群で電気刺激によって与えられる運動負荷の強度は等しいので、同量のATPが消費されていると考えられる。したがってこの結果は、前項の中毒脳の場合とは逆に、走トレーニングが筋のATP生成系の容量を増大したものと解することができる。実際に、回復期におけるPCrの回復速度もトレーニング群で増大している(図4)。発表においては、12か月までの走トレーニングの効果に言及する予定である。

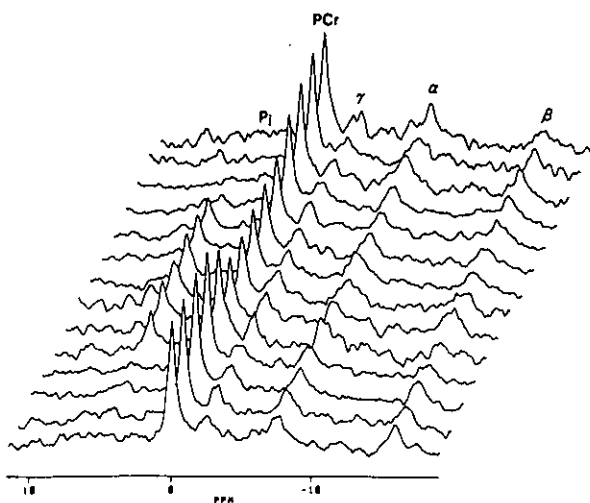


図3 ラット後肢筋の休息→運動→回復期の³¹P NMRスペクトル

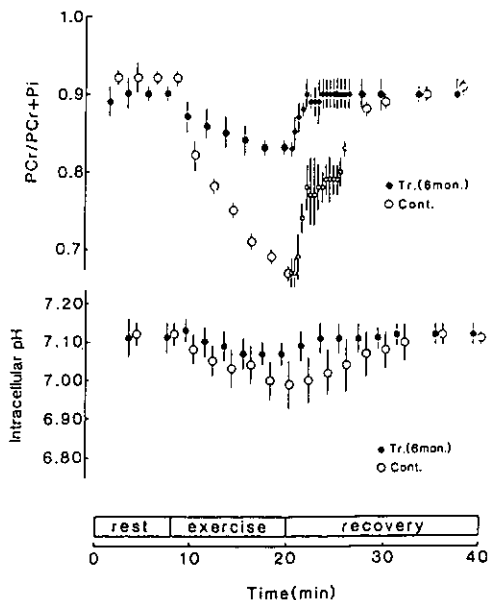


図4 後肢筋 PCr/PCr + Pi 比、pH の運動に伴う変化

5. スペクトルから生化学画像診断へ

これまでNMRスペクトルを利用する生化学的解析と生体内の解剖学的イメージを与えるMRIとは比較的別個の手法として発展してきた。しかしここ数年、両者を合体した新技術の創出が試みられている。すなわち、測定部位を限局した局在化測定法の開発である。さらにこの方法を押し進めれば、代謝物の画像化—生化学イメージング—が実現できよう。

局在化測定手法としてはこれまでにさまざまな方法が提案されている。主に開発が進められているのは、イメージ測定と同様の静磁場勾配を利用する方法である。この方法では、位置ずれ誤差(化学シフトの大きく異なる代謝物は少しずつ異なる部位が選択されてしまう誤差)が問題となる。また、磁場を高速でスイッチングするためNMR測定的前提条件である均一な磁場が乱され、スペクトルに歪みが現われたりする問題があり、部位選択の位置分解能を1 cm以下にすることは困難である。ここでは、静磁場勾配に代えてラジオ波磁場勾配を利用する方法により、 ^1H , ^{13}C NMRで1 mmオーダーでの位置分解を実現する方法の報告を行う。図5にこの方法の概念図を示す。測定対象に強度勾配のあるラジオ波磁場をかけてやると、ラジオ波磁場の強い部位と弱い部位に存在する代謝物(の核スピン)はその応答が異なる。この応答の違いを位置情報に変換して代謝物の存在位置を確定するという方法である。図6にこの方法で測定した結果の一例をあげる。図6 aに示すようなアクリル樹脂製の容器の相異なる位置にエタノール、ベンゼン、水を封入して測定を行うと、図6 bに示すように、3つの成分はそれぞれの存在位置に対応して分離して観測される。しかも、エタノールにみられるように、そのメチル基、メチレン基、水酸基の構造に対応した信号はそのまま保持され、生化学情報の抽出が可能である。この方法をさらに発展させて、現在では ^{13}C 標識の局在化測定が可能となった。

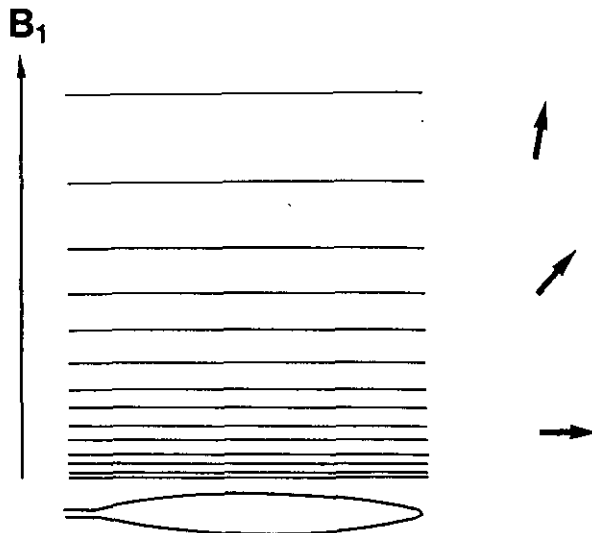


図5 ラジオ波(B_1)磁場勾配を利用する局在化NMR測定法の概念図
励起コイルに近く B_1 磁場の強い(横縞の密な)ところでは核スピンは大きく回転するが、弱い(横縞の粗な)ところではわずかしか回転しない。この部位による核スピンの応答の違いを用いてその存在位置を特定する

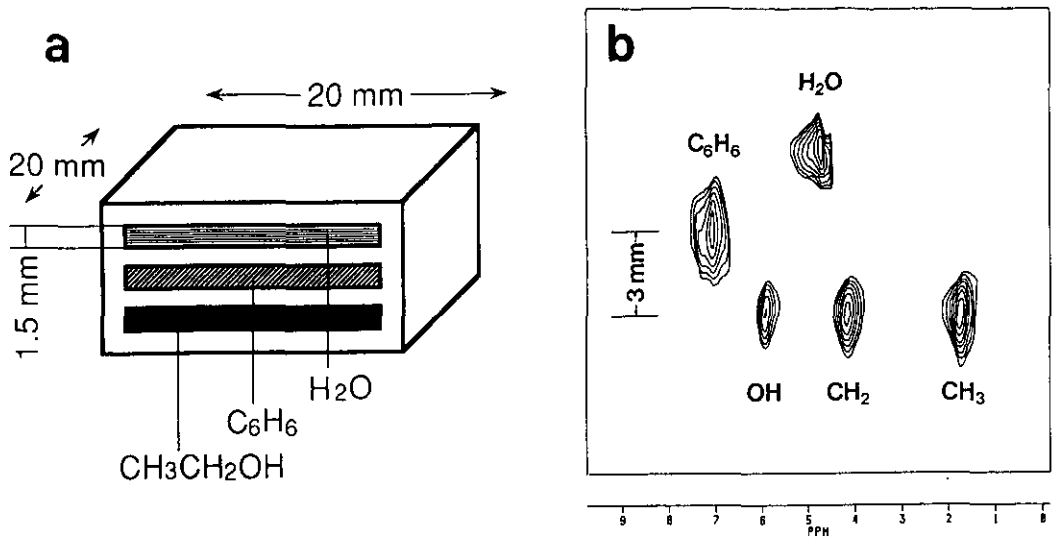


図6 (a) 1.5 mm 厚のエタノール、ベンゼン、水を含むファントム試料、
(b) (a) の ¹H 局在化 NMR スペクトル 横軸；化学シフト、縦軸；検出コ
イルからの距離

6. おわりに

NMR は1945年にはじめて観測された現象で、その生体試料への最初の応用は1973年に報告された³⁾。しかし、この20年足らずでの進展はめざましく、生きている生体での機能診断が実現できるまでになってきた。局在化測定法の例にもみられるように、いまなおその展開の速度は衰えをみせない。今後、本法の環境科学領域への応用をはかるとともに、新しい手法の開発を押し進めることがぜひとも必要である。

参考文献

- 1) Radda, G.K. (1986): The use of NMR spectroscopy for the understanding of disease, *Science* 233, 640-645.
- 2) 三森文行 (1989): 核磁気共鳴法を用いた生体計測, *油化学* 38, 783-790.
- 3) Moon, R.B., Richards J.H.: Determination of intracellular pH by ³¹P magnetic resonance, *J.Biol. Chem.* 248, 7276-7278.

遺伝子組換えによる植物のストレス耐性の改変

近 藤 矩 朗 (地域環境研究グループ)

要 旨 植物は大気汚染、乾燥等のストレス状態に置かれると様々な障害を受けるが、植物の種や品種によりストレスに対する耐性が異なる。ストレス耐性を決めている要因の一つは活性酸素防御系であると考えられている。大気汚染耐性に関与していると思われる遺伝子を単離し、これをタバコに導入して形質転換体を作製した。大気汚染物質の二酸化硫黄、オゾン、あるいは除草剤パラコートに対する形質転換タバコの耐性について検討した結果を報告する。

大気汚染等のストレスに暴露されると、植物は葉面にストレスの種類に特徴的な傷害を示すが、その程度はストレスの種類と植物の種や品種により異なる。ある種のストレスに特に感受性の高い植物を用いることにより環境をモニターすることが可能であり、このような目的で使用される植物を指標植物と呼ぶ。また、ストレスに耐性の植物を用いれば、環境の厳しい場所でも植物を栽培することが可能になる。もし、植物のストレス耐性に関与する遺伝子が明らかになれば、種々の遺伝子組換え技術を用いてこれを植物に導入することにより、植物のストレス耐性を改変することが可能になる。

大気汚染ガスに対する植物の感受性・耐性は、葉の表面にある気孔を通した汚染ガスの吸収速度に依存するほか、植物体内における毒物の生成、毒物の除去の能力などによって決められている。このような毒物の一種である活性酸素が二酸化硫黄やオゾン等の大気汚染ガスによる植物の障害に重要な役割を果たしている可能性がある。したがって、これらの大気汚染ガスに感受性の植物に、活性酸素の解毒・代謝に関与している遺伝子を組換え DNA 技術を用いて導入すれば、大気汚染ガスに対する耐性を増大させることができるものと期待される。そこで、活性酸素の解毒に関与している遺伝子をタバコに導入して二酸化硫黄、オゾンに対する耐性が変化するかどうかを検討した。また、植物体内で活性酸素を大量に生成して毒性を発揮することが知られている除草剤パラコートに対する耐性についても検討した。これらの結果について報告する。

1. 大気汚染による植物の障害と活性酸素

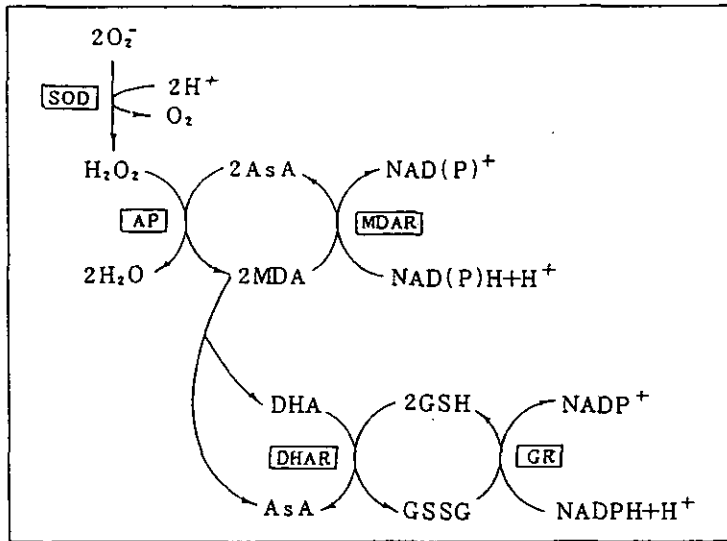
植物は太陽の光を受けることによって光合成を行っているが、この際に葉緑体内に強い還元力が生じ、酸素分子を還元して反応性に富む種々の分子種 (O_2^- , 1O_2 , $\cdot OH$, H_2O_2 等) を生成する。これらは活性酸素と総称され、生物に対して強い毒性を示す。植物の葉緑体にはこれらの活性酸素を代謝・解毒する酵素系が備わっており(図 1 参照)、通常は大きな被害を受けることはない。もし、この解毒系の能力を超えて活性酸素が生成されたり、解毒系の能力が顕著に低下すれば植物は大きな被害を受けることになる。二酸化硫黄は植物に吸収されると水に溶けて亜硫酸あるいは重亜硫酸を生じる。これらは光のもとで葉緑体内に生じた活性酸素と反応して更に大量の活性酸素を生成することが知られて

いる。私たちは、実際に、二酸化硫黄による植物の障害には活性酸素が密接に関与していることを示し、植物の活性酸素代謝系酵素のいくつかの活性が二酸化硫黄暴露により直ちに低下することを見いだした。また、オゾン暴露による植物の障害にも活性酸素が関与していることを示唆する結果を得た。さらに、アスコルビン酸やグルタチオン等の還元物質の含有量が多いものほどオゾンに対する耐性が高いことを明らかにした。そこで、活性酸素代謝系酵素のうちで、この代謝系の律速になっていると考えられるグルタチオンレダクターゼ(GR)と活性酸素解毒の最終段階と思われるアスコルビン酸ペルオキシダーゼ(AP)について検討した。

2. 大腸菌グルタチオンレダクターゼ遺伝子のタバコへの導入

2.1 遺伝子の調製と酵素化学的性質

既に大腸菌の GR 遺伝子がクローニングされているので、このプラスミド(pGR)を入手した。pGR 上の GR 遺伝子は植物導入用のプラスミド・ベクターには直接結合できないため、いったん、大腸菌のベクターに繋ぎ変えた。まず、GR 遺伝子を含む DNA 断片を単離し、これをベクターに組み込み大腸菌に導入した。こうして得られた大腸菌は組換え前のもの比べて極めて高い GR 活性を示した。この大腸菌の GR が植物体内においても有効に活性酸素解毒作用を示すためには、この GR が



- AsA : アスコルビン酸, MDA : モノデヒドロアスコルビン酸
 DHA : デヒドロアスコルビン酸, GSH : 還元型グルタチオン
 GSSG : 酸化型グルタチオン
 SOD : スーパーオキシドジスムターゼ
 AP : アスコルビン酸ペルオキシダーゼ
 MDAR : モノデヒドロアスコルビン酸レダクターゼ
 DHAR : デヒドロアスコルビン酸レダクターゼ
 GR : グルタチオンレダクターゼ

図1 植物の活性酸素解毒代謝過程

葉緑体中で働くような性質でなければならない。大腸菌 GR とホウレンソウの GR の至適 pH，基質との親和性を表す Km 値を表 1 で比較した。葉緑体中の pH は高いため，大腸菌 GR は高 pH で活性をもたねばならないが，大腸菌 GR は中性から高 pH 領域で高い活性を示した。この結果は大腸菌 GR は植物の葉緑体中で十分に機能し得ることを示唆している。

2.2 遺伝子組換えタバコの作成

次に大腸菌 GR 遺伝子を植物導入用ベクターに繋ぎ変え，土壌細菌アグロバクテリウムを用いてタバコの品種 SR1 と Bel W3 の葉片に遺伝子を導入した。感染した葉片からタバコ個体を再生し，遺伝子組換え体(形質転換体)を選別した。大腸菌 GR に対する抗体を作製し，これを用いて組換え体内で実際に大腸菌 GR が合成されていることを確認した。ついで，二酸化硫黄やオゾンのガス暴露を行い，大気汚染ガスに対する感受性が変化したかどうかを調べた(図 2 参照)。また，組換えタバコより葉片

表 1 大腸菌とホウレンソウのグルタチオンレダクターゼの酵素的性質

	至適 pH	Km 値 (mM)	
		GSSG に対する	NADPH に対する
大腸菌	7.5-8.0	0.37	0.081
ホウレンソウ	8.5-9.0	0.20	0.0028

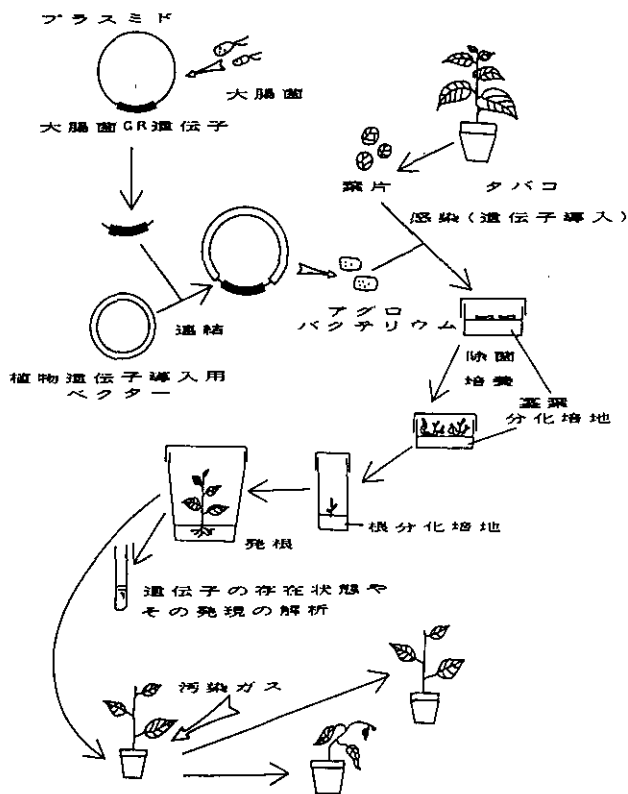


図 2 大腸菌グルタチオンレダクターゼ遺伝子のタバコへの導入

を打ち抜き、これにパラコート処理を行い、パラコートに対する感受性が変化したかどうかを調べた。

植物のGRは核の遺伝子によって生成されるが、緑化した植物葉に含まれるGRは生成されたのちに葉緑体に輸送され葉緑体内で働いていると考えられている。このようなタンパク質は合成直後にはトランジットペプチドとよばれるペプチドをもっており、このペプチドは葉緑体内に移動する際に切断される。したがって、大腸菌GRを葉緑体内に運ぶためには、GR遺伝子にトランジットペプチド遺伝子を連結しなければならない。そこで、ナデシコ科のマンテマのトランジットペプチド遺伝子を合成してGR遺伝子に連結し、タバコに導入した(図3参照)。

2.3 遺伝子を導入したタバコの性質

組換えタバコを栽培し、自家受粉により子孫(第1世代 T_1)の種子を得た。発芽した子孫の形質転換体と非転換体の比は約3:1で、メンデルの遺伝の法則にしたがっていた。形質転換体の葉のGR活性を測定した結果を図4に示す。測定した26個体の中からGR遺伝子を導入していない対照よりも顕著に活性が高い個体5つ(組換え植物番号1405, 1407, 1412, 1415, 1426)を得た。さらに、これらの個体の自家受粉により第2世代(T_2)を得た。 T_1 でGR活性の高かった親から得た子(T_2)においても、GR活性が高いという傾向が認められた。

トランジットペプチド遺伝子を保有するGR遺伝子を導入したタバコとトランジットペプチドをも

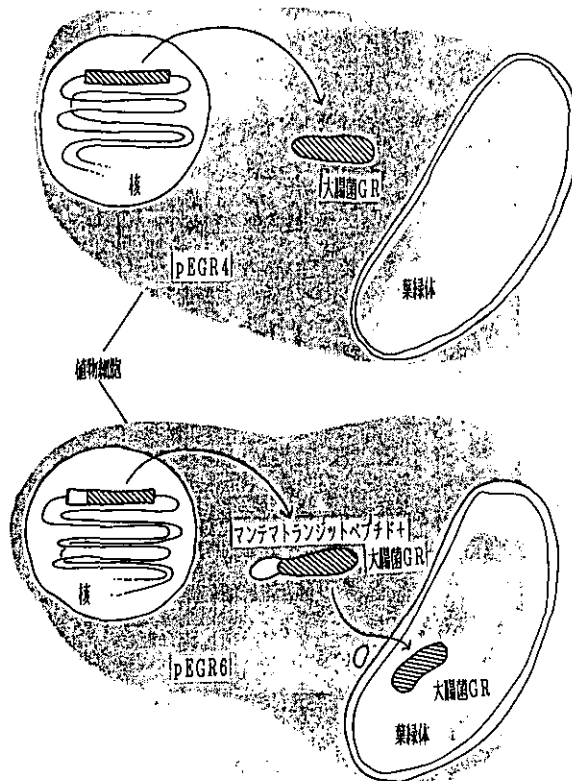


図3 大腸菌グルタチオンレダクターゼのタバコ葉肉細胞における存在場所

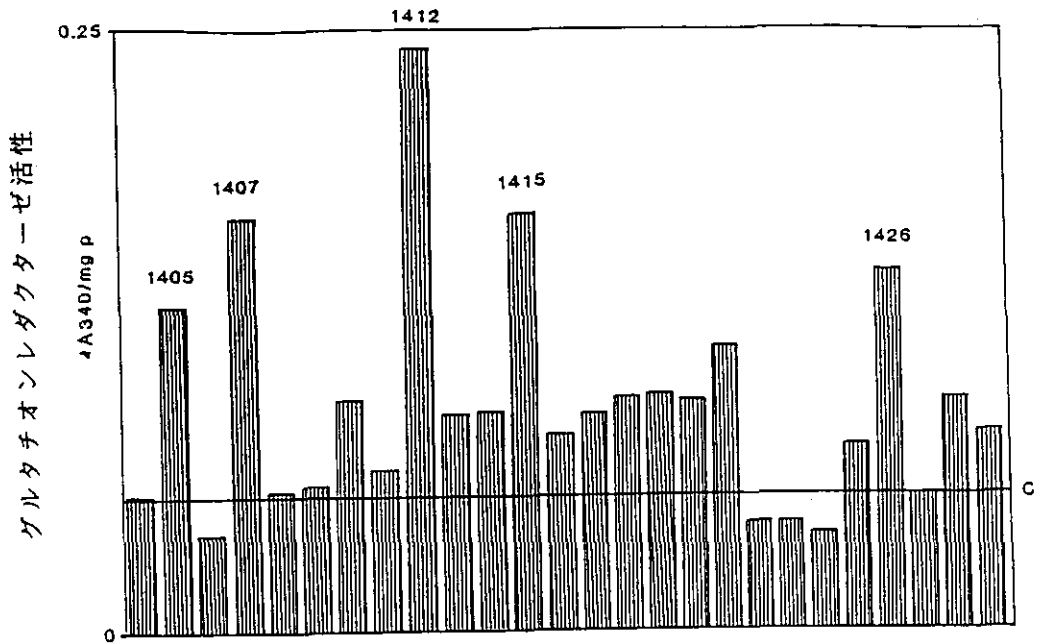


図4 遺伝子組換えタバコ26個体のグルタチオンレダクターゼ活性。図中のCは大腸菌グルタチオンレダクターゼ遺伝子をもたない対照のタバコの活性を示す。

たない遺伝子を導入したタバコの葉から無傷葉緑体を単離し、大腸菌GRに対する抗体を用いて葉緑体にGRタンパク質があるかどうかを調べたところ、予想通り、トランジットペプチドを保有している遺伝子を組み込んだものではGRは葉緑体に存在し、トランジットペプチドをもたない遺伝子を導入したものでは葉緑体に大腸菌GRは検出されなかった。

タバコの成長、外見については大腸菌GR遺伝子を保有するかどうかによる差は見られなかった。大気汚染ガスを暴露して障害の程度を観察したところ、オゾンに対する耐性については差は認められなかったが、二酸化硫黄に対しては、大腸菌GRタンパク質が細胞質に存在すると思われる組換え体において耐性の増加が認められた。除草剤パラコートに対しては、GRタンパク質の存在場所が細胞質、葉緑体いずれの場合にも耐性の増加が認められた。この結果についてはさらに詳細な検討が必要であるが、二酸化硫黄、パラコートの毒性に活性酸素が関与しているという従来の考えを支持している。しかし、オゾンによる障害については、活性酸素が直接関与しているかどうか疑問を投げかける結果になった。しかしながら、二酸化硫黄、パラコートによる活性酸素の生成は葉緑体内で起こると考えられており、細胞質にGRタンパク質があると思われる場合に耐性を示したことは、これらの物質による毒性発現についても今後さらに検討する必要があることを示唆している。

3. アスコルビン酸ペルオキシダーゼ遺伝子のタバコへの導入

ホウレンソウのAPに対するモノクロナル抗体を作製し、これを用いてシロイヌナズナのcDNAライブラリーより抗体に反応するタンパク質を保有するクローンを得た。cDNAを単離して塩基配列

を決定し、その塩基配列から想定されるアミノ酸配列の中に、ホウレンソウの AP で決定されたアミノ酸配列とよく似た領域があることがわかった。この結果より、この cDNA が AP のものであることが確かめられた。

次に、得られた cDNA を、植物への遺伝子導入用ベクターに組み込みタバコに導入した。その際、導入した遺伝子がタバコの細胞内で正しい方向(センス方向)または逆方向(アンチセンス方向)に転写されるように操作し、細胞内の AP を増加または減少させるよう試みた。その結果、遺伝子組換え体の中からセンス方向に遺伝子を導入したタバコで AP 活性が高いものと、アンチセンス方向に遺伝子を導入したタバコで AP 活性が低いものが、各々 1 個体ずつ得られた。これらの植物から自家受粉により種子を得て、子孫の性質について現在解析を行っている。これらの形質転換体と非転換体の比は 3:1 とはならず、ほとんどが形質転換体であった。これらの組換え体の染色体には AP 遺伝子が複数個挿入されたものと思われる。これらの組換えタバコの大気汚染ガスやパラコートに対する耐性の変化については現在検討中である。

地球環境研究のひろばを目指して

— 地球環境研究センターの活動 —

西 岡 秀 三 (地球環境研究センター)

要 旨 昨年10月、地球環境問題の研究に学際的・国際的・省際的に取り組むためのセンターとして、当研究所内に地球環境研究センターが設立され活動を開始した。センターは、(1)地球環境モニタリング、(2)データベースやスーパーコンピュータ等の提供による研究支援、(3)各分野にまたがって研究を総合的に推進すること、を活動の三本柱に、地球環境研究に取り組む研究者の共通の「ひろば」を形成しようとしている。ここでは、センター設立の背景となる地球環境研究の特色と広がり、その中で地球環境研究センターが果たそうとしている役割および活動状況について報告する。

はじめに

平成2年度、国立環境研究所の改組に伴い地球環境研究グループと地球環境研究センターが誕生した。前者は研究そのものを行い、センターは研究だけでなく、国内外の研究者をつなぐ研究体制の構築が使命である。あらゆる分野で地球環境研究が大きく推進して行こうとしている今、センターがその中でどのような役割を果たそうとしているかについて述べる。

1. 地球環境問題は研究に何を要求するか

「地球環境」に係わる「研究」の「センター」が新たに設立されたということは、環境問題の中でクローズアップされてきた「地球環境」問題が、従来の研究体制だけではカバーできない機能を、必要としているからに他ならない。地球環境問題の特色と、それが研究に投げかける課題は以下のようなかものである。

1.1 いかにか全体図を描き、その中での位置付けを知るか

地球環境問題が研究に限らず我々の生き方に問いかけていることの本質は、地球の環境資源は有限であり、人間活動は其中で持続できるものでなくてはならないことを再認識させたところにある。

有限性に関してはこれまでも一部では論じられていたことであるが、一般には環境という資源はまだまだ豊富であるという感覚であったし、公害問題は地域の問題として扱われ、例えば産業が他の地点に移転するような形で解決が図られていた。しかしオゾンホール以来、地球が有限であることの実感が一般市民、企業にも浸透し、これを前提とした行動が世の中の大きなトレンドになりつつある。もう汚染の捨場がなくなった、どこにも「つけまわし」がきかなくなったというのが基本認識である。

技術目標を定めるときも、この認識が基本になってくる。二酸化炭素を固定化するだけでは実際に

役立つ研究とはならない。海中に沈めるのに余分なエネルギーの発生はないか、海中の生態系に影響はないか……すなわちどれだけ「つけまわし」が少ないかが技術の評価基準に入ってくる。

このようにつけまわしがきかなくなった状況では、ひとつの行動が他の地域、領域にどのようなインパクトを与えるのかを全体として知る必要がでてきた。例えば、リサイクルを容易にするための製品の設計にあたっては、原料調達から利用・廃棄・処理・処分の全プロセスを把握しなくてはならない。省エネルギー機器を作るときは、製品製造に必要なエネルギーと節約されるエネルギーをトータルして評価するエネルギーアナリシスの考えを導入しなければならない。

全体図を知るためには、自分の専門分野にだけに閉じこもっているわけには行かず、おのずから異分野との交流を進めて行かねばならなくなった。地球環境研究では、全体図の中での自分の研究の位置付けの確認が重要となり、従来の科学が大切にしていた専門性だけでは役立たなくなっている。

1.2 先端科学と既存知識

全体像を知るといふことの一面として、地球全体のことを知る必要がある。従来、科学の本質の一面として、新たな機構の解明や方法論の開発が評価されるため、研究の範囲は勢い先端的なフィールドを求めて細部に入る傾向があった。しかし、地球全体のことを知るためには、先端科学だけでなく確立された方法論を用いて多くのデータを得ること、例えば、モニタリングやフィールドにおけるデータの取得が重要になってきた。新規性だけでなく、いかに全体をカバーしているかも重要な要因となっているのである。

1.3 予測の重要性

地球温暖化の問題を「我々は地球を対象とした一回きりの大現場実験をやっているのだ」と評した学者がいる。このように、地球環境問題は我々が問題とする時間範囲では不可逆過程とみられるものも多い。また、現象を認識し、対応策を打ち、それが効果を生むまでには長い期間の遅れがある。こうした性格を持つ地球環境問題に対処して行くためには、先を読んで適切な手を打つための指針、すなわち確実な予測が重要な役目を果たすことになる。真実を追求する科学が研究結果に求める一つの評価基準は「その結果を再現できるか」である。その点予測と言う種類の研究はこの評価基準を満たさないけれども、今は、それが求められているのである。

1.4 迅速な対応の必要性

例えば気候変動問題について、科学者に向けて政策決定者からの切迫した問いかけがなされている。今や環境研究には問題解決への期待が強くかけられてきており、個人の好奇心と発想にまかせた古典的科学では対応できなくなってきた。限られた資源と時間の中で答えを見つけ出すことを要求されてきているのである。自由な発想による真実の追求と世の中の要求を両立させるためには、研究全体を研究者の合意のもとで方向付けすることが不可欠であり、そのためには常に研究の状況を把握・評価し、相互に伝え合うための研究者の交流が必要である。

1.5 新たな課題への挑戦

地球環境問題は科学を変質させるいくつかの要因をもっているが、真実の追求としての科学の本質を変えているわけではない。従来の科学の枠で、地球環境問題は新たな研究課題を提供し、科学者に挑戦目標を与えている。例えば、これまで地域の農業は、ある温度と降水量の範囲で一応安定的に営まれてきた。ところが温暖化によってその前提自体が変わりつつある。地域気候の前提が変わったときに、生態系はどのように変わるか、これにどう対処するべきか、これは農業分野の研究者が挑戦すべき新たな課題である。温室効果ガスである種々の微量気体をどのように精度よく、かつ自動化して計測できるか、これは計測技術者に対する新たな挑戦である。

地球環境研究という新たな研究分野が成立したわけではない。要素としてこれまで環境保全を目的として築きあげてきた研究を継続して行くこと以外にはないのであり、ただその方向付けが環境コストがただとみられたときと、大きく変わってきただけである。

2. 地球環境研究者のひろば

このように地球環境問題の特質が、研究の性格を変え、従来型の研究手法とは異なる体制作りを必要としてきたように思われる。

地球自体が気圏、水圏、地圏にわたる巨大なシステムである。分析のための科学的方法論からみると、物理、化学、生物学にわたる解析を要し、対処のためには工学・社会科学・人文科学の全てを動員しなければならない。地理的にみると全世界を覆う各地域が、自然的にも人間活動面でも互いに結びついている。現象面からみると森林減少と温暖化、酸性雨と互いに関連している。

このように対象とする地球自体が巨大なシステムであることだけでなく、地球環境問題の解決に向けてさまざまな分野の人々が協力し、方向性を持って動く必要のある点で、地球環境研究は巨大システム科学であるといえよう。しかし、巨大システム科学の一例としての火星探査のように、目標・成果やそれを実行する機関が一元的に定められたものではないところがまた特徴でもある。地球環境研究のおぼろげな目標は共通であるが、研究者は各国・各分野に分散し、それぞれに自分の位置を同定しながら自律的に研究を進めていかざるを得ない。そしてゆるやかに結合された組織の中で別々に遂行された研究結果がまとめられて意味のあるものになっていく。

当研究所副所長でもある市川惇信センター長に言わせると、地球環境研究は巨大なジグソーパズル(はめ絵)である。個々の研究者はそれぞれ一片れづつのはめ絵(ピース)を持っているが、それが全体の絵のどこに置けば適当なのか一人では分からない。何人かの人のピースと自分のピースとを突き合わせてはじめて、より大きな絵がみえてくきて、自分の研究が全体のどのあたりに位置しているのかがわかる。さらに、そのグループが他のグループとすりあわせを行いながら全体像を浮かび上がらせる。ジグソーパズルには全体図を秘めた大きな台紙があるが、地球環境研究のような自律分散型巨大システム科学にも研究者がピースを持ち寄る台紙が必要である。

こうした地球環境問題が必要とする新たな研究体制作りを目指し、地球環境研究という巨大システム科学を推進する中核として、地球環境研究センターが設立された。

地球環境保全のために山積みされた問題をかたづけるためには、日本のみでなく世界の研究者、それもさまざまな分野の研究者が研究目標を共有し、お互いの分担を明らかにして共同研究を推進せね

ばならない。そのためには何らかの触媒作用を持った研究交流の「ひろば」が必要である。この「ひろば」は、国内研究者同士の交流だけでなく、国外の研究機関との交流、政策決定者と科学者の交流、さらに、できれば専門家と一般市民の交流の場となるべきである。地球環境研究センターは、地球環境研究の特質を踏まえた新たな研究方法の確立を目指して「ひろば」の役目を果たして行きたい。

3. 地球環境研究センターの活動

ひろばには、人々が集うための噴水やベンチがあり、イベントが催される。地球環境研究センターにも、研究者の参集を促す魅力が必要である。地球環境研究センターは当面、地球環境研究の総合化、地球環境研究の支援、地球環境のモニタリングの3つを進めながら、研究者の参加を促進したい。

3.1 地球環境研究の総合化

地球環境研究の総合化は、地球温暖化、オゾン層の破壊、熱帯林減少等の各分野で個別に研究されている研究間相互の情報の流通を図り、これらを有機的に結合して、研究の効率化を図るとともに、政策選択にむけての基本的な解決策の提言へと結びつける仕事である。狭義の自然科学的な手段による研究だけでは、折角の地球環境研究も世界が求める回答には程遠いことがありうる。途上国における人口増加、農用地開発、先進国途上国の都市化や技術進歩、世界経済の動き等、地球環境破壊の根本的な原因である人間活動にまで遡った原因の追求と対応の方法を、さまざまな分野の研究を総合的に把握することによって発見して行かなければならない。

総合化の手段としては、地球環境研究総合推進費を軸にした研究者の交流をもつことがその一つである。環境庁は、1989年11月の地球環境関係閣僚会議で地球環境問題の調整を担当することとなり、研究予算面では平成2年度から地球環境研究総合推進費(以下推進費と記す。平成2年度予算12億円、平成3年度予算17億円)により、省庁間横断の地球環境研究推進を主導することとなった。推進費研究の進行管理のための研究連絡会議は、当センターが主催して行い、その結果を企画調整局長の諮問機関であり、推進費で実施すべき研究内容についての審議を行う地球環境研究等企画委員会に報告することとなっている。このプロセスの中で、推進費を軸とした地球環境研究の方向付けが、研究者間の討議の中からもなされる仕組みである。

推進費は、課題別研究、総合化研究、課題検討調査研究(フィージビリティスタディ)のカテゴリーに分けられており、このうちセンターには総合化研究の遂行が義務付けられている。総合化研究は、温暖化・オゾン層の破壊等、各分野別に行われる研究を総合化し、研究全体をまとめて行くための研究であり、その一つの方法は、資源・エネルギー・人口・経済活動等、地球環境を司る基本的な要素を組み込んだ地球環境総合モデルを構築することである。モデルの構築には、分野別研究から得られる結果が利用できるであろうし、分野相互の要素間関連もモデルの中で検討し理解することができる。研究費の投入によりどの部分の不確かさを減らすのが政策を考えて行くのに最も有効かの検討も総合モデルでのセンシティブティアナリシスから得られよう。

昨年度は、総合化研究として「持続的発展のための世界モデルの構築」を進め、環境保全対策と経済成長の関連を分析する世界経済モデルと地球環境シミュレーターの基本構造を構築した。

また、広く地球環境研究に携わって行こうとする日本および海外の研究者と、今後どのような方向

に研究全体をもって行くべきかを分野をこえて討論することによって、地球環境という巨大な対象への切り込みについての共同認識を得るために、昨年10月に開所記念講演会を開催し、12月には内外の地球環境研究者300名の参集を得て、地球環境研究者交流会議を開催し、地球環境に係わる研究の各分野の方々に地球環境研究の向かうべき方向について講演・討議を頂いた。

さらに、地球環境研究体制についての意見を求め、国際研究計画への参加の実体を把握するために、国内研究者2,000名に対してアンケート調査を行った。

3.2 地球環境研究の支援

第二の業務は、地球環境研究者に対する横断的支援である。例えば、現在気候変動に関して、IPCC 第一ワーキンググループの報告書によれば、大気大循環モデルが世界で9種類試みられており、二酸化炭素倍増の予測が21ケース得られているといわれているが、日本ではスーパーコンピュータがこの方面の研究に充分投入されていない状況にある。このため地球環境研究センターは、本年度にスーパーコンピュータを導入し、これを省庁横断的に研究者に共同で利用できるよう提供することによって、日本の研究を後押しし、世界に貢献できるものにして行こうとしている。

データベースに関しては、モニタリングから総合化研究まで一環して持つセンターの特色を生かして研究者に使い良い地球環境データベースの構築を目指しており、広場の中の情報交換機能を充実して行く方針である。すでに米国二酸化炭素情報センターのフォーカルポイントとなり、国連環境計画(UNEP)の地球資源情報データベースシステムともネットワークを組むべく検討中である。衛星観測から得られたデータをワークステーションで三次元表示するなど地球環境の変遷を直観的に把握できる画像表示システムを構築済みで、地球環境データにはどのようなものがあるのかを示す、いわば地球環境データベースのショールームの役割をさしあたり行いたいと考えている。今後は、センター独自のモニタリングから得られたデータ、自然環境資源勘定データ等を充実し、世界の研究に役立つものになりたいと考えている。昨年7月から国立環境研究所に発足した環境情報センターがこれらの業務に共同してあたる。

3.3 地球環境のモニタリング

第三の業務は、地球環境の長期的モニタリングである。地球にどんな環境問題があるのかを正確に把握するには、広域、かつ長期的な測定が不可欠である。地球環境変動因子の解明のためには、観測を総合的に、かつ体系的に進めて行かねばならない。すでに国立環境研究所では、1988年よりレーザーレーダーによりオゾン層のモニタリングを行っている。また1995年度に宇宙開発事業団が打ち上げる予定のADEOS衛星に搭載するオゾン観測センサーの開発等により地球大気モニタリングを推進している。センターではこれらに加えて、国際的モニタリング網の中で日本を軸としたモニタリングシステムを構築する計画であり、すでに第一番目の基地としてバックグラウンド大気を長期モニタリングする地上観測基地として、本年度には沖縄県波照間島に二酸化炭素・硫黄酸化物・窒素酸化物等大気微量成分のモニタリングステーションの建設を進めている。ここでの長期観測は地球圏・生物圏国際協同研究計画地球大気化学研究プログラム(IGBP/IGAC)の地上モニタリングネットワークの観測地点としても位置付けられており、さらに順次基地の数を増加させて西太平洋・アジア地域を中心と

して国際的観測ネットワークの一員として行動する計画である。

海洋モニタリングに関しては、自動観測用機器を開発中であり、昨年度には試験的に日韓フェリーによる実験航海を行った。さらに、外洋・生態系のモニタリングに関しては各分野の研究者に呼びかけモニタリング体制を如何に構築して行くかの検討会を分野別に数回開催し、計画をかためつつある。

3.4 研究の国際化

地球環境研究は基本的に国際協調が不可欠である。国際研究を拡大して行くには現在の予算では非常に困難であるが、当センターは日本の地球環境研究を国際的ネットワークの中で進めるために努力をして行く所存である。

さしあたり国際協同研究の場作りを目指して、推進費の課題検討調査研究(FS)予算により1991年3月「アジア・太平洋地域における地球温暖化問題に関する研究ワークショップ」を、アジア6ヶ国の参加を得て開催した。ワークショップでは、アジア地域で協同して取り組むべき研究課題が抽出され、協同研究体制のあり方に関する提言がなされた。

4. おわりに

このような任務を遂行して行く中で、地球環境研究センターが常に心がけようとしているのは、学際・省際・国際の広がりである。地球環境問題の解決にあたっては、自然・社会・人文のあらゆる科学を動員しなければならないし、問題の本質と研究資源の制約を考えれば国際ネットワークの中での位置付けなしには成果は得られない。すでに、国際地球圏・生物圏協同研究(IGBP)のような大型国際研究プログラムが走りだしているし、1990年4月のホワイトハウス会合で米国が提案したような国際環境研究所構想も視野に入れねばならない。日本の地理的・経済的位置を考慮すれば、国際的協調の第一歩としてアジア地域に観測・研究・対応戦略の輪を拡げる必要がある。

経済発展と産業技術の頂点にある日本は、あらゆる面で世界から貢献を求められており、また日本もそれに応えようとしている。地球環境問題が人類共通の科学的課題としてクローズアップされた今、日本が世界にできる貢献として環境研究での主導は絶好の課題である。地球環境研究センターは、いささかでもそれに役立つように励みたいと考えている。

熱帯林の破壊と野生生物の多様性

椿 宜 高 (地球環境研究グループ)

要 旨 熱帯林の破壊は、いま急速に進行している。おもな原因は、焼払いによる農地開発と用材の伐採である。特に前者は伝統的に続けられてきた小規模な焼畑農法と違って、徹底的な森林破壊となる。そのため熱帯林の野生生物は隠れ場を失い、餌と水を奪われ、加速度的に消滅しつつある。しかし、我々はまだ熱帯林にどんな生物がいて何をしているのかさえほとんど知らないのである。マレーシアの野生生物を中心に紹介し、彼らにとって森林とは何なのかを考えてみたい。

地球上には500万種以上の生物が生息していると言われるが、これまでに名前が付けられた種はわずかに約140万種である。そのうち75万種が昆虫、25万種が植物、4万種が脊椎動物という内訳になる。そして、記載された生物の約半分以上が熱帯林で見つかっている。熱帯林は地球上の陸地のわずか7%であるにもかかわらず、である。ところが、ペルーの熱帯林で昆虫相を詳しく調べた Erwin (1985) は地球上の生物は3000万種に達するのではないかと推定している。これは、彼がこれまでほとんど研究者の目が届かなかった樹冠部を対象としたためであり、多少過大推定済みであるとしても、いかに多くの生物が熱帯林に生息しているか、そして、いかに我々が熱帯林について無知であるかがよくわかる。

1. 種数はどのように決まるか：種数平衡説

熱帯林になぜ多数の種が存在するのかという問題を一般化すると、ある地域の中に何種類の生物が共存できるのか、そして、その法則は何かという問題になる。この問題を考えるには島の群集理論を借りてくるとわかりやすい。

Simberloff and Wilson (1970) はフロリダ湾に浮ぶ小さなマングローブの島を4つ選び、専門の害虫害獣駆除業者に依頼して各島をビニールシートですっぽりと覆い、臭化メチルを噴射して島内のすべての動物を絶滅させた。そしてその後、種の再移住を注意深く記録していったのである(図1)。この実験ではっきりしたことがいくつかあるが、そのひとつは、6ヵ月以内に動物相の種数だけは回復したが、大部分の種はもとい種とは異なっていたことである。6~9ヵ月後には種数はもう増加しなかったが、新しい種はさらに別な種へとどんどん置き換わった。つまり、島には大陸から生物が次々に移住して来る一方で、島の生物は絶滅を繰り返し、種数に関しては平衡が保たれるということである。平衡点の高さは大陸からの距離、島の大きさなどに依存していた。要約すると、ある地域内の種数はその地域に新しく入ってくる種(加入)と消えてゆく種(消失：絶滅と移出)のバランスで定まるのである(図2)。

この考え方を熱帯林にあてはめると、熱帯林で種多様性が高いのは加入種が多いためか、絶滅種が

処理前の調査結果

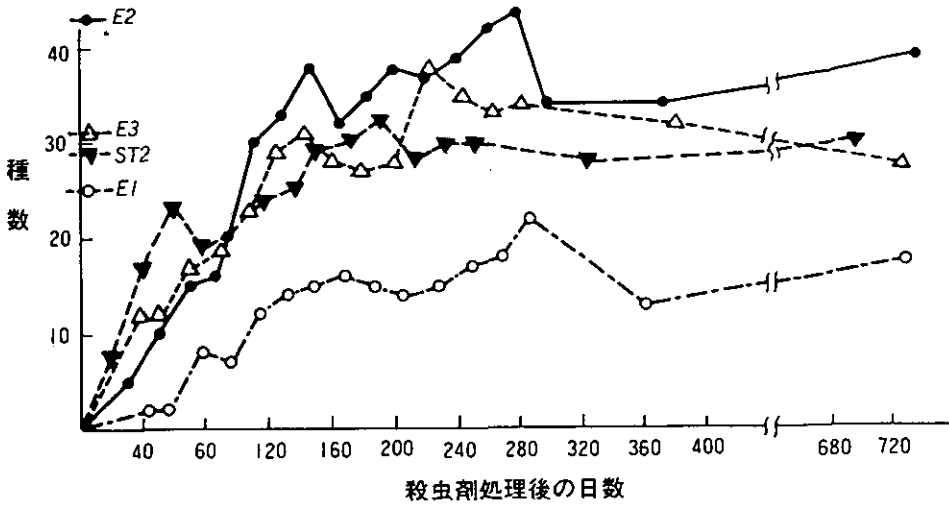


図1 フロリダ半島沖の4つの小さな島で、あらゆる動物が絶滅した後、大陸からの再侵入によって昆虫の種数が回復してくる様子。Simberloff and Wilson (1970)。

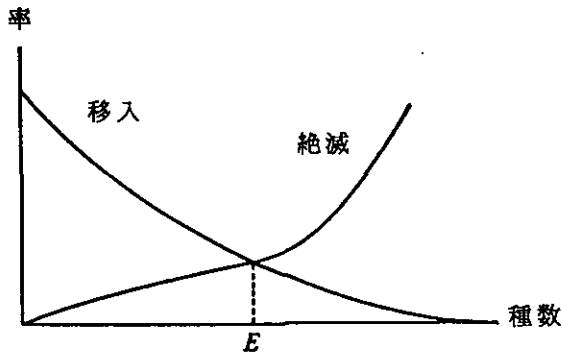


図2 島にいる種数が増加するにつれて、新しく移入してくる種数は減少し、絶滅する種数は増加する。島にいる種数がEのとき、この2つの流れは釣り合い、島は平衡状態になる。

少ない(これまでは少なかった)かのどちらか(あるいは両方)だということになる。ただし、熱帯林生成の歴史的、時間・空間的スケールを考慮すると、'加入'の中身は新種の形成、'消失'は種の絶滅ということになる。

2. なぜ熱帯林で種多様性が高いのか？

仮説1：種分化の舞台としての熱帯林

1つの種が2つに分れる原因は普通、個体群の地理的隔離によると考えられている。現代の生物学

では、種とは自然の状態で遺伝子の交流が自由に起きる個体群あるいは個体群の集りのことをいう。ひとつの個体群が何かの障壁、たとえば川や海、山脈などによって、ふたつに分断され、たがいの交流がなくなってしまうとする。すると、孤立した個体群はそれぞれ異なった環境に適応して変化してゆくことになる。進化的に十分な時間が経過すると、何かの理由で障壁がなくなっても、2つの個体群のメンバーどうしは、もはや遺伝子の交流ができない別の種に変わってしまっている。熱帯林が温帯林よりもはるかに多くの生物種をかかえている理由が、地理的隔離が熱帯で起きやすく、温帯で起きにくかったからだとすればその原因は何だろうか。

我々は一口に熱帯林と言うが、実は熱帯林には様々なタイプがある。世界中どこへ行っても、森林タイプを分化させる最も重要な環境要因は温度と水条件である。

温帯では温度差は季節と緯度と高度によってもたらされるが、熱帯では高度だけが温度差をつくりだす(図3)。このため、温帯と熱帯の生物分布に奇妙な違いがもたらされる。温帯では、高山に見られる垂直方向の生物相の変化と南北方向の変化とがよく対応している。つまり、中部山岳地帯の生物相と東北・北海道地方平地の生物相がよく似ているというような現象が起きるのだが、熱帯ではそうはゆかない。熱帯山地林の生物相は地方により、個々の山によって非常な違いがあるが、平地に住む生物は山地の低温が、高山に住む生物は平地の高温が障壁となって、遺伝子の交流がさまたげられているのかもしれない。熱帯の気温に関するもうひとつの特徴は、季節的な温度変化がほとんどないことである。これは平地でも高山でも同じで、平地では一年を通して30℃、高山では一年中10℃といった気温となる。このことも平地と高地の間の生物の移動をさまたげていると思われる。

熱帯における水条件の地理分布を決めているのは、性質の違う2つの巨大な空気のかたまりである。赤道の付近には、地球をベルト状にとりまく西風帯があって、その中の空気は湿度が高く雨を降らせやすい。これがいわゆる赤道気団である。一方、両半球の亜熱帯にはいつも高気圧帯があって、乾いた空気を貿易風として赤道方向に吹き出している。赤道西風と貿易風がぶつかってできる前線を熱帯収束帯(ITC)とよび、赤道西風帯の南北両側に1本ずつできる。南北どちらのITCも北半球の夏には太陽の動きにともなって北上し、冬には南下する(図4)。図の4本のITCのうち外側の2本にはさまれた地帯が気候学的に見た熱帯で、一年のうち少なくともある期間は赤道気団におおわれる。ス

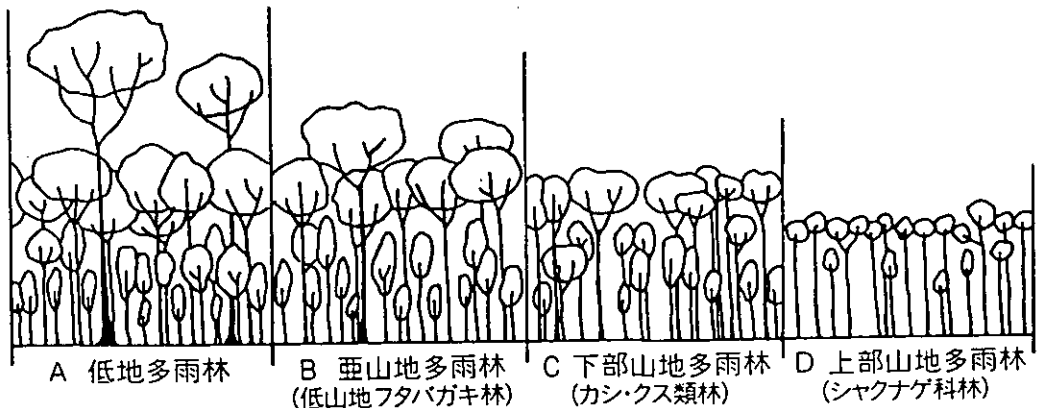


図3 マレー半島の森林の高度による構造変化。Robbins (1968)より。

マトラからニューギニアに至る東南アジアの島々や赤道アフリカの西部は、ほぼ一年中通じて赤道気団のもとにあるが、その他の地域は季節によって乾燥した亜熱帯気団におおわれる。赤道気団が来たときは偏西風が吹いて雨季になり、亜熱帯気団は偏東風と乾期をもたらす。図4から熱帯の中央部に近づくほど雨季が長くつづき、周辺ほど乾期が長くなることがわかる。森林タイプの分化に大きな役割を果たしているのは、年間の総雨量よりはむしろ乾期の長短である(図5)。

その他、地形や土壌条件によっても特異的な森林が形成される。これらの軸を組み合わせると非常に多くの森林タイプに分類されるので、100種近くの森林タイプにわけると主張する研究者もいるが、調査が進んでいないこともあって一般には次のようなタイプ分けが行われる。

- サバナ林,
- 季節林(落葉季節林, 半落葉季節林, 常緑季節林),
- 低地多雨林,
- ヒース林,

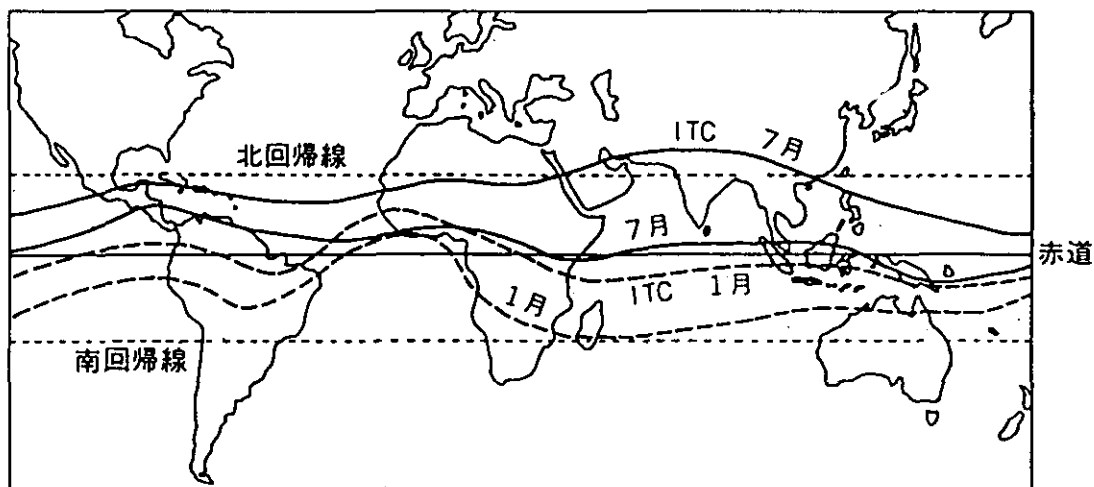


図4 夏(実線)および冬(破線)のITC(熱帯収束帯)の位置。鈴木秀夫(1975)より。

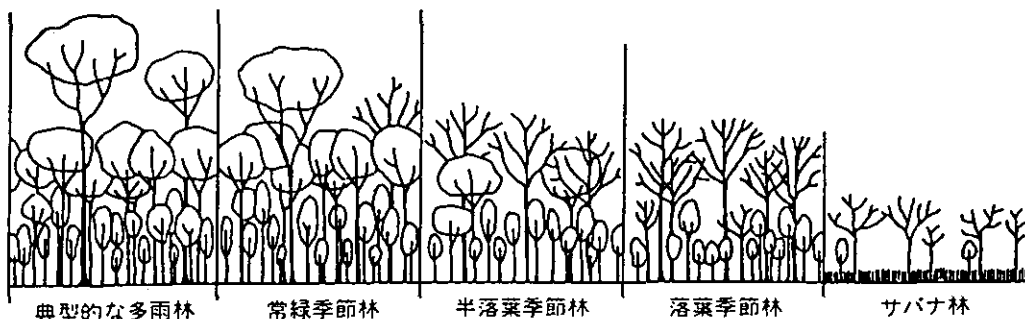


図5 多雨気候(左)から乾燥気候(右)に向っての森林タイプの変化。吉良竜夫(1983)より。

山地多雨林,

湿地林(淡水湿地林, 泥炭地林, マングローブ林)。

野生生物にとって, 生息地である熱帯林はこのように多様であり, しかもモザイク状に分布しているので, それぞれの場所がいわば隔離された生態系となり, その中で独自の進化を遂げた種がたくさん生じたとしても不思議ではない。地理的隔離のほかに, 種分化に関与する特殊なメカニズムとして時間的隔離, 性的隔離などが知られているが, 熱帯林では, 我々がまだよく知らない種分化のメカニズムもまた働いているのかもしれない。

仮説2: 種の共存の場としての熱帯林

生態学の有名な法則のひとつに『競争排除則』がある。ソ連の実験生態学者 Gause (1934) は 2 種類のゾウリムシの混合個体群を同じ培地内で飼うと, 食物の競争の結果, 片方だけが生存増殖し, もう一方は絶滅することを観察した。同じ様な実験がアズキノウムシとヨツモンマメゾウムシ(内田, 1953)やヒラタコクヌストモドキとノコギリヒラタムシ(Park, 1948)などを使って何度も行われ, いずれも同じ結果となった。これらの結果から, 同じ食物を利用する 2 種の生物は共存できないという結論が導かれた。ところが, 自然界では同じ食物を利用している多くの種が共存しているのである。この矛盾はどこから生じたのだろうか?

これまでの生態学者の意見は, ほぼ次の 2 つに要約される。

- (1) 複雑な自然の環境下では場所によって競争の結果が異なるため, 全体としては共存が成立する (MacArthur, 1972)。たとえば, Birch (1953) はコクゾウとナガシクイの競争が環境条件によって勝敗逆転することを見つけた(図 6)。また, Crombie (1946) がヒラタコクヌストモドキとノコギリヒラタムシの 2 種を小麦粉と砕いた小麦粒を混合した環境に入れたところ, 2 種は共存したのである。
- (2) 物理的環境の攪乱あるいは天敵などの生物的要因が個体群の増加を抑制して, 食物を完全に利用できない場合は共存がおきる (Hutchinson, 1948)。内田(1953)はアズキノウムシとヨツモンマメゾウムシの競争する系に両種の共通の寄生蜂ゾウムシコガネコバチを入れて寄生させると, 2 種のマメ

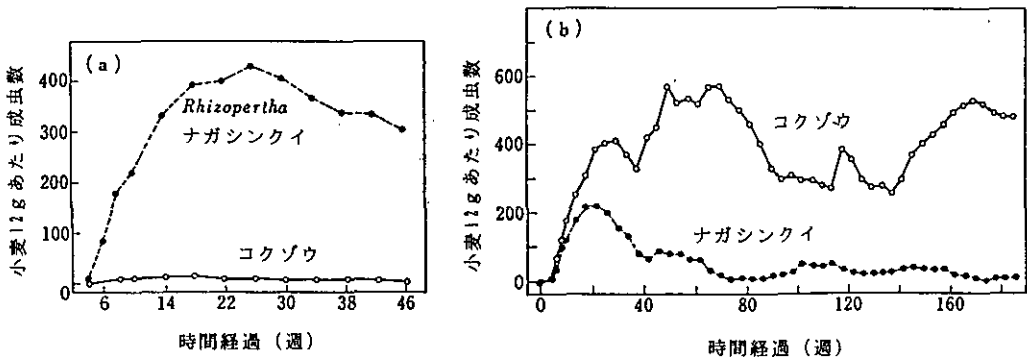


図 6 コクゾウとナガシクイの競争は環境条件によって勝敗が逆転する。
(a)湿度 14% 気温 32.3°C, (b)湿度 14% 温度 29.1°C。Birch (1953)より。

ゾウムシが長期間共存することを観察した。寄生蜂が数の増えたマメゾウムシに好んで寄生する習性があると、3種の系が存続しやすいと考えられる。

単純化すると(1)は種間競争の結果が微小環境によって変るために共存がおきるといふ意見であり、(2)は野外では種間競争はそれほどきびしくないので、競争排除はおきにくいといふ意見である。この2つの考え方のうち、どちらが重要かはいまだに論争中で結論を得ていないが、食物量が重要な制限要因となる脊椎動物の場合は前者、野外ではほとんど餌不足が起きていない植物食の昆虫などの場合は後者の重要性が高くなると考えるのがよさそうである。

3. 熱帯林の破壊によって失われるもの

熱帯林の野生生物(植物・動物を含めて)の多様性を保護する意義は、現在は利用価値がなくても将来、農作物、家畜、工業生産物、薬などに利用できるかもしれないからだとよく言われる。いわゆる遺伝子資源の宝庫として熱帯林をとらえる考え方である。たしかに、そういう面もあるが、これだけでは熱帯林の価値を正しく評価したことにはならない。

経済学者の考える森林の価値は、森林を他から独立したものだと考え、投資と利益の差によって割り出したものである。このやり方で、林業と農業を比較し、どちらが生産性が高いかを計算すれば、農業の方が生産性が高いに決まっている。自然林を切り払って農地に転用すれば、一時的に大きな収益を上げることができるし、生産性の高い農地を手に入れることができる。この論法は発展途上国にとって、非常に魅力的な異となっているが、これは自然の各部分を閉じた系として考えるために生じる誤りである。

森林そのものはたとえ何の有用な産物を産み出さなくても、ただそこにあるだけで大きな意味があることを知るべきである。たとえば、森林は、たいてい、作物の害虫の天敵(鳥やクモなどの捕食者、ハチやハエなどの寄生者)や花粉を媒介する昆虫の隠れ家になっている。そのため、森林の中に作られる伝統的な焼畑のような小さな畑では、広大な単一栽培の畑で作られる作物にくらべて虫害を受けにくい。森林は土壌や陸水、気象にも影響を及ぼす。たとえば、森林は水を吸収し、葉からの蒸散によって大気中にそれを返している。この再循環作用に支障が起ると、地域ごとに乾燥が始まり、ある程度まで森林が伐採されると広い地域に渡ってエネルギーバランスが狂ってしまう。森林を伐採して農地化すると、日中の最高気温が上がり、夏には耐えがたい温度になる原因のひとつはここにある。また、森林の存在によって、流域の水量は安定化する。このことによって、下流域の農業は水の安定供給を得ている。つまり、森林が存在するからこそ、農業が成立しているという面があるのだが、このような森林の間接的な働きは経済的な価値判断にほとんど入ってこない。我々は、森林とそこに住む野生生物のもつ間接的な価値に、もっと注意を払うべきで、それを正当に評価する方法を見つけてゆくべきだろう。これは熱帯林だけの問題ではなく、地球上のあらゆる森林にあてはまることである。

レーザーレーダーによって観測された成層圏オゾンの変動

中 根 英 昭 (地球環境研究グループ)

要 旨 成層圏オゾンが地球規模で減少していることが、1980年代後半に初めて確認された。さらに最近では、中緯度のオゾンの減少傾向が注目されている。成層圏オゾンに何が起きているかを理解するためには、高度別にオゾンの変動を観測する必要がある。本研究所では、1988年よりオゾンレーザーレーダーの測定精度向上に取り組みながら、オゾンの高度分布の変化を観測してきた。観測された成層圏オゾンの変動について報告する。

1. はじめに

フロンガスがオゾン層を破壊する、その結果として地上に到達する紫外線が増加し、人の健康や生態系に影響を与える可能性があるという問題—オゾン層破壊の問題は、1974年に理論的に予測されたものであるが、観測によってこの理論を検証することは長い間困難であった。しかし、この問題は1980年代半ばに、「南極オゾンホール」という予想もしなかった形をとって私達の前に現れ、大きな衝撃を与えた。1988年にはオゾントレンドパネルによって、北半球中緯度の冬には理論予測を上回るオゾン減少傾向の有ることが報告された。さらに1980年代後半に入って、北半球中高緯度の冬のオゾンの減少傾向が大きくなっているという報告が、最近出てきている。

本研究所では、昭和63年度より特別研究「成層圏オゾン層の変動とその環境影響に関する基礎的研究」を実施し、平成2年度には地球環境研究総合推進費による「オゾン層の破壊」分野の研究を開始した。本研究所ではこのプロジェクト研究の中で、オゾン層の動態把握、大気物理及び大気化学的なオゾン層変動機構の解明と将来予測、人体影響の解明、生物影響の解明、代替フロン環境影響評価に関する課題の一部を分担して研究を進めている。ここでは、多くの研究の中からレーザーレーダーによって観測された成層圏オゾンの変動に関する研究を紹介する。

2. レーザーレーダーによるオゾン及び気温高度分布の観測の原理

オゾンのレーザーレーダー観測においては、まずオゾンによって適度に吸収される波長(例えば308 nm)のレーザー光と吸収されない波長(例えば351 nm)の2種類のレーザー光パルスを上空に発射し、成層圏の空気に散乱されて戻ってきたレーザー光を望遠鏡で集め、検出器(光電子増倍管)によって電気信号に変換する(図1)。レーザーパルス光を発射してから受信されるまでの時間からレーザー光が散乱された高度を計算することができる。散乱光の強度は空気の密度に比例するので、散乱光が広がる効果を考慮すると、オゾンによる吸収を受けない波長の信号に高度の自乗をかけたものが空気密度の高度分布に比例したものになる。オゾンによる吸収を受ける波長の信号は、オゾン濃度の高い高度で大きく減衰する。この2波長の信号を比較することによりオゾンの高度分布が得られる。具体的には、2波長の信号の比の対数を取り、それを高度によって微分するのであるが、オゾンを導出するア

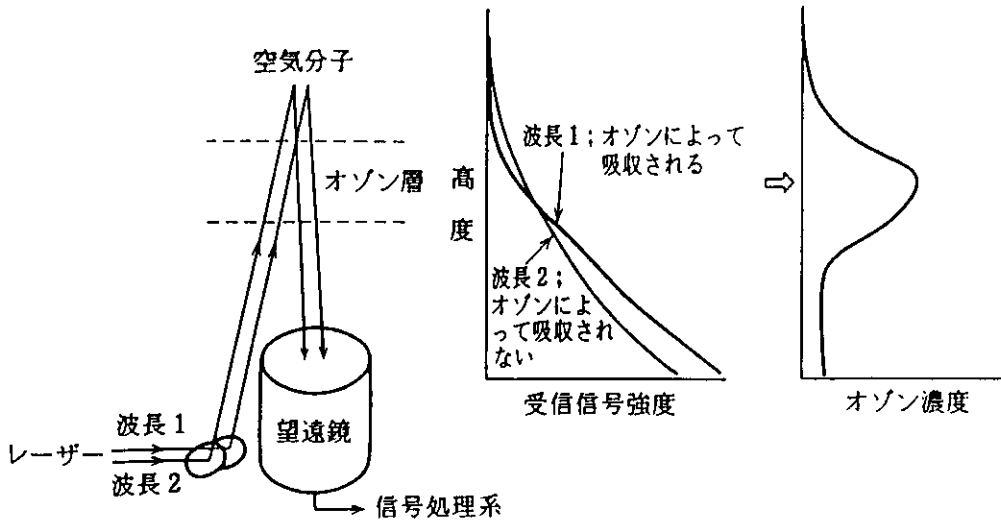


図1 オゾンレーザーレーダーの原理

ルゴリズムの単純さが、データの信頼性が高い一因である。

他方、オゾンの吸収を受けない波長の信号からは空気密度の高度分布が得られるので、これから気温の高度分布を計算することができる。これを利用して本研究所では、オゾンと気温の高度分布を同時に観測している。

3. 3. レーザーレーダーによって観測された成層圏オゾンの変動

1988年から観測を行いながら、データ解析ソフトウェアの整備、測定精度の向上のための装置の改良を行い、信頼性の高いデータが安定して得られるようになった。ここでは、得られた観測結果の中から最近一年間のデータについて、オゾン濃度の季節変化の特徴、及び冬季に見られた大きなオゾン変動について紹介したい。

この1年間には、50回以上の観測を行い、データ診断の結果40以上のデータが良好なものと判断された。観測高度範囲は、最大16 km から45 km の間であるが観測条件により上限及び下限が異なる。25 km から40 km の間については大部分の観測において良好なデータが得られた。

(1) オゾンの季節変動

図2に、1990年4月から1991年3月の間の高度別オゾン濃度を示した。高度30 km と35 km では、オゾン濃度は夏に高く冬に低い。このような季節変動は、光化学反応の効果、すなわち季節によって太陽高度角が変化し、それに伴ってオゾンと酸素の光解離定数が変化することによって、定性的には説明が可能である。高度25 km と40 km では顕著な季節変化は見られない。高度40 km 付近を境にしてオゾン濃度の季節変化の位相が逆転するという報告もあり、複雑な季節変化があると考えられる。また、高度40 km 付近は、理論モデル計算の結果が種々の観測から得られているオゾン濃度より数10% 低いことが知られているが、原因はよく分かっていない。より高精度、高頻度の観測を行い、高度40

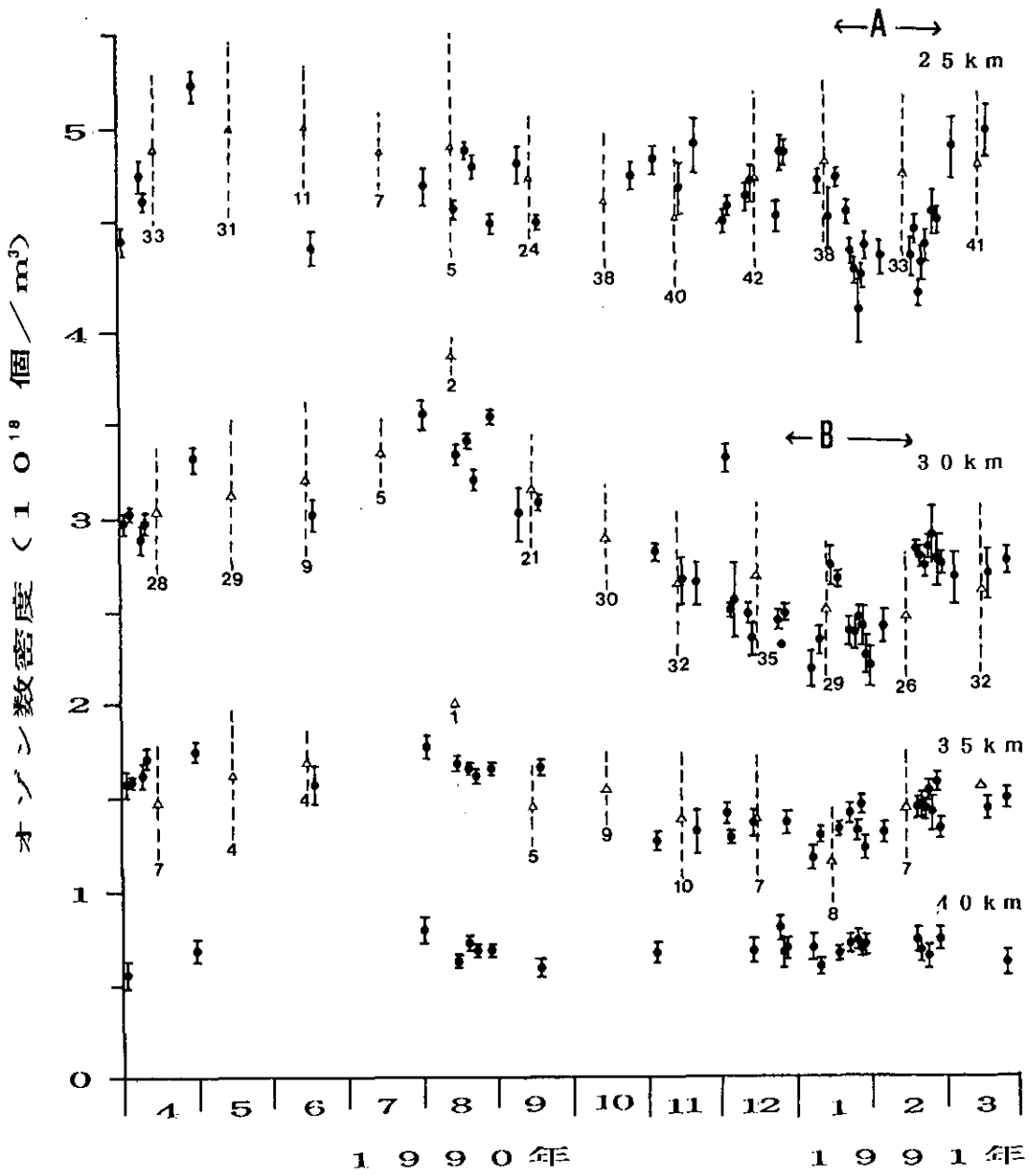


図2 国立環境研究所オゾンレーザーレーダーによって観測された1990年4月～1991年3月の高度別オゾン変動(●)。△及び破線は1968年12月～1990年8月の間の高層気象台によるオゾンゾンデ観測結果の平均値と標準偏差。

km 付近のオゾン変動の詳細を明らかにすることが重要である。

高度25 km では、赤道上空で生成したオゾンが春には最も効果的に中緯度に運ばれて来ること、すなわち輸送の効果の季節変化と、より上空の光化学に起因するオゾン濃度の季節変化とが重なっているものと考えられる。

図2の中には、1968年12月から1990年8月の間(23年間)に高層気象台(つくば市)において得られたオゾンゾンデ観測によるオゾン濃度の月毎の平均値と標準偏差(ばらつき)を△と破線で示している。1990年4月から1991年3月の間のオゾンレーザーレーダー観測結果は、ほぼオゾンゾンデ観測の標準偏差の範囲内に入っている。破線の下に示した数字はこの間のゾンデ観測データの個数であるが、高度35 km のデータは極めて少なく、40 km では皆無である。これらの高度領域でのオゾンレーザーレーダー観測の重要性は大きい。

(2) 冬季におけるオゾンと気温の変動

特に変動が激しい冬季のオゾンについて気温変動との関連で検討する。図2中「A」で示すように、高度25 km では1991年1月後半から2月前半にかけて、短期間にオゾン濃度はオゾンゾンデ観測結果の標準偏差の下限付近まで低下し、2月下旬に急上昇している。このようなオゾン変動の原因を理解するために、オゾンと気温の高度分布の変化を図3、図4に示す。図3は、レーザーレーダーによって観測された夏の典型的なオゾン高度分布(8月15日)、オゾン濃度が低い期間のオゾン高度分布(1月29日)、及び25 km 以下でオゾン濃度が急増した日のオゾン高度分布(2月25日)であり、図4は図3のオゾン高度分布と同時にレーザーレーダーによって観測された気温の高度分布である。なお、12月中の典型的な気温の高度分布を示すために、図4には12月27日の観測結果をつけ加えてある。

1月29日の気温の高度分布は、夏の気温の高度分布の形によく似ており、低い方に約10度平行移動させたような形になっている。それに対して2月25日には、高度23 km の極大、28 km の極小、35 km から45 km の範囲の高温に見られるように、気温に顕著な構造が見られる。オゾン濃度は2月20日頃以降20 km から35 km の高度範囲で増加しているが、特に20 km 付近またはそれ以下の高度のオゾン濃度は2月25日に急増している。

高度30 km においては、図2中「B」で示したように、1月初旬の急激なオゾン濃度の低下と中旬の急上昇、1月後半の低下、及び2月下旬の上昇が特徴である。12月27日の気温の高度分布は、1月29日のものを基準にすると、高度20 km ~35 km では約10度高く、35 km ~50 km では10~20度低くなっており、通常気温の鉛直分布から大きくずれている。オゾン濃度の高い場合は、気温の高度分布に顕著な構造が現われる場合や気温が高い場合に多い。

気温の高度分布に見られる特徴的な構造は10数日続く場合もあり、また高度方向の波長も比較的長い。このような気温の鉛直構造に伴ってオゾンの高度分布が変化していることを考慮すると、観測されたオゾン濃度の変動は、大気中の大きな場の水平構造の変化に伴うものであると考えられる。

4. おわりに

ここまで、昨年1年間のレーザーレーダー観測によって得られたオゾン及び気温の変動について検討してきた。そして、オゾン濃度は季節変動するだけでなく、大気構造と運動に伴って変動するこ

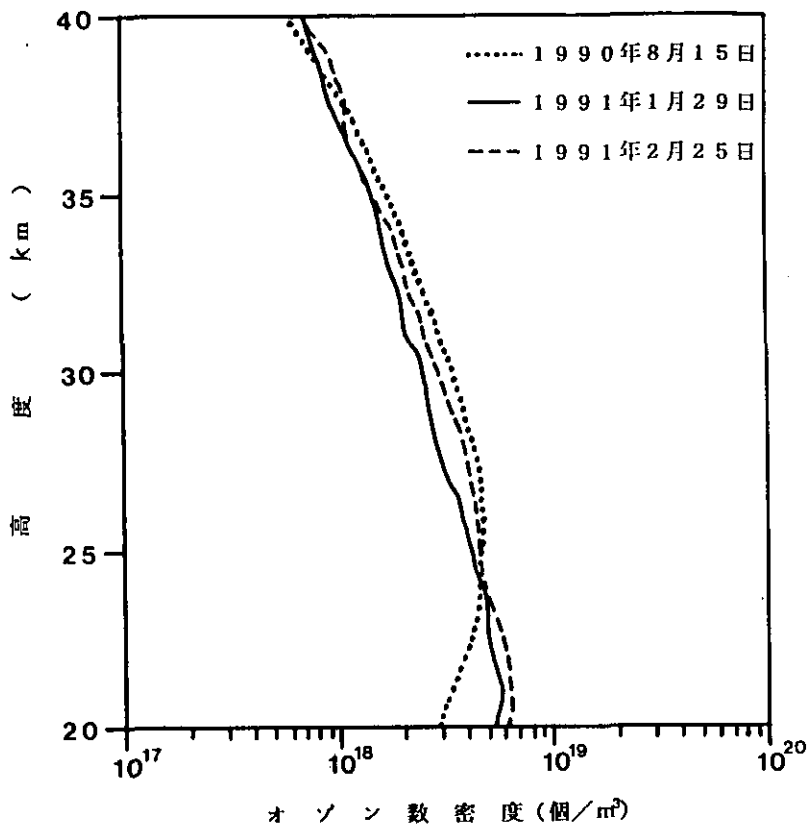


図3 国立環境研究所オゾンレーザーレーダーによって観測されたオゾン高度分布

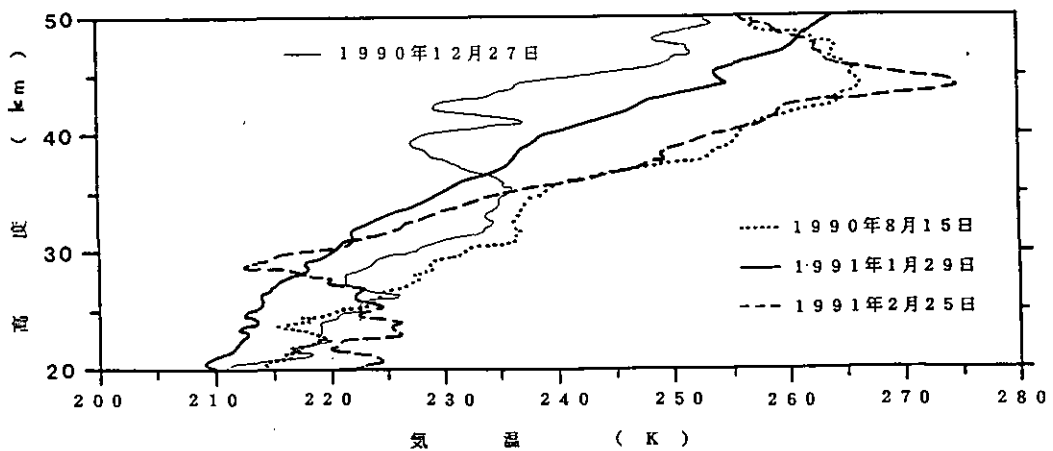


図4 国立環境研究所オゾンレーザーレーダーによって観測された気温高度分布

とを示した。

オゾントレンドの抽出、オゾン破壊の機構の解明にとって、オゾンの自然変動を解明しておくことは極めて重要である。また、オゾンの変動とともにオゾン変動をもたらす場が年々どのように変化するかを明らかにすることは、オゾンのトレンドを理解する上で重要である。

レーザーレーダーによる成層圏オゾンの観測は、昨年発足した地球環境研究センターのモニタリングのひとつとして位置づけられ、長期間の観測体制が確立してきた。同時に今後、国際的なモニタリングネットワークの一環としての観測を継続しつつ、オゾン変動の解明を行って行きたい。

最後になったが、この研究成果は、笹野泰弘、杉本伸夫、林田佐智子(地球環境研究グループ)松井一郎、湊 淳(大気圏環境部)の各氏との共同研究によって得られたものであることを付記する。

地球温暖化の影響と防止対策に関する研究の現状

森 田 恒 幸 (地球環境研究グループ)

要 旨 地球温暖化はどこまで防げるか、また防げないとしたらどの程度の被害が生じるか。いま世界中の研究者が取り組んでいる難問の一つである。われわれの研究チームもこの分野の研究に着手し、最近いくつかの中間的成果を得た。ここではまず、いろいろな防止対策を講じた場合の効果について、地球温暖化の予測シミュレーションとその問題点について述べ、次いで、温暖化が植物や人の健康、さらには社会や経済に及ぼす影響について、いくつかの研究活動を紹介する。

1. はじめに

地球温暖化問題は、いま最も注目を集めている地球規模の環境問題である。

周知のとおり地球温暖化問題とは、大気中の炭酸ガスやメタンガスなどの温室効果ガスの濃度が増加することによって地球上の平均気温が上昇し、海面水位の上昇、降水パターンの変化、農林水産物の生産や自然生態系の変化などの各種の影響が生じる問題をいう。この問題が注目を集める大きな理由は、第一に、深刻な被害が地球規模で予想されており、第二に、その解決のためには長期間にわたって膨大な費用を注ぎ込む必要があり、第三に、このような大きな問題にもかかわらず未だ科学的に解明されていない部分が多々残されていることである。このため、いま世界中の研究者がこの問題の解明に取り組んでいる。

地球温暖化問題の未解明点は大きく三つある。第一は、地球温暖化のメカニズムであり、大気中の温室効果ガス濃度の変化とそれによる地球の気候変化の仕組みについて、多くの不確実な点が残されている。第二は、地球温暖化の影響であり、温暖化やそれに伴う海面上昇により自然環境や社会経済にどのような影響が及ぼされるかについては、解明されていないことの方が多い。第三は、地球温暖化の防止対策についてであり、各種の対策技術や政策の有効性を評価するためには、関係する技術システムや社会経済システムの体系的解明とそのモデル化が必要である。

本報告では、地球温暖化の影響と防止対策、即ち、第二と第三の未解明の点に関して、最近の当研究所の研究活動を紹介する。

2. 研究プロジェクトの全体構成

図1は、地球環境研究総合推進費によって昨年度から開始された地球温暖化の影響と防止対策に関する研究プロジェクトの一覧を示している。全部で7つのプロジェクトが動いており、当研究所ではこのうち、水収支への影響及び海面上昇の影響を除いた次の5つを担当している。

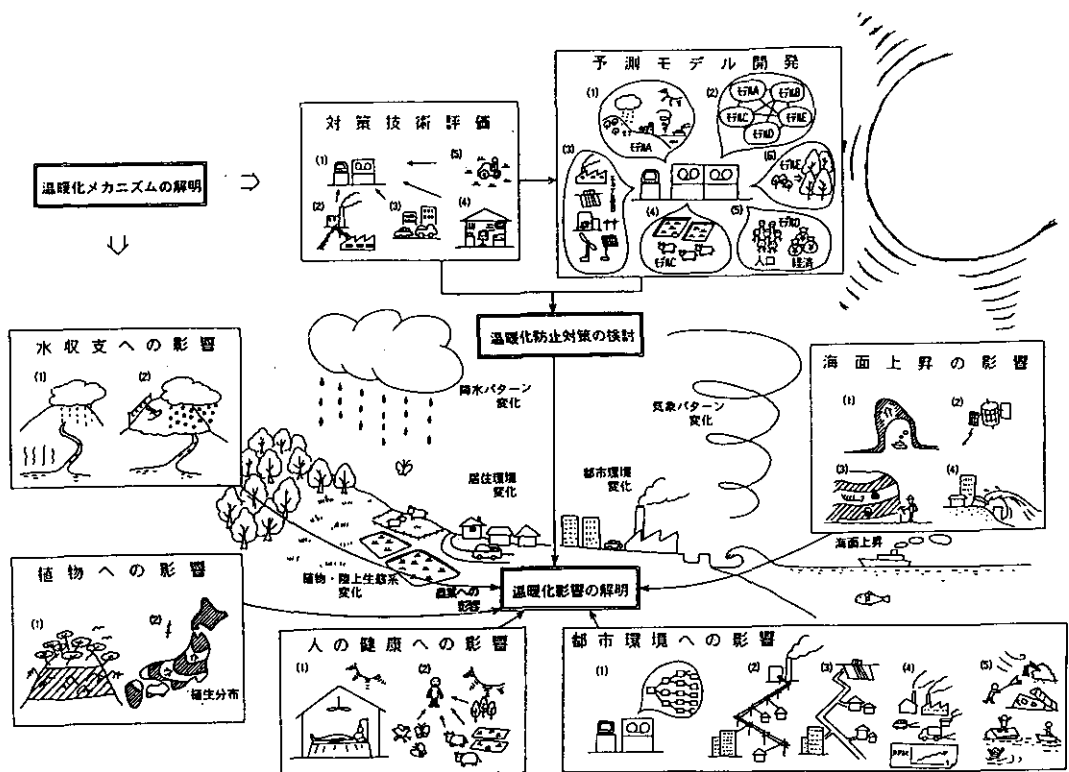


図1 地球環境総合研究推進費に基づく地球温暖化の影響及び防止対策に関する研究の全容

〔地球温暖化の防止対策についての研究〕

- (1)対策技術評価 : 温暖化防止技術の評価手法の開発と民生部門を中心にした各種技術の評価
- (2)予測モデル開発: 防止技術や政策の効果判定のための計算機シミュレーションモデルの開発

〔地球温暖化の影響に関する研究〕

- (3)植物影響研究 : 施設実験及び予測モデルによる植物個体や自然植生への影響の解明
- (4)健康影響研究 : 施設実験やフィールド調査等による人の健康や生存環境への影響の解明
- (5)都市影響研究 : 都市のエネルギー利用, 水利用, 大気汚染, 防災等への影響と適応策の解明

以下に, 各研究プロジェクトの活動状況といくつかの成果を紹介する。

3. 対策技術の評価に関する研究

まず, 温暖化がどこまで防げるかという点に関して, 技術評価の研究を進めている。この研究の特徴は, 斬新な発想のもとに幅広く対策技術を発掘・提案し, これらの技術の有効性を温室効果ガス削減量, コスト, 社会的受容性等の観点から総合的に評価することにある。今までに, 表1に示すような100の技術を発掘・提案し, その技術開発の可能性や温室効果ガス排出量の削減可能性を検討した。そして, これらの技術が社会にどの程度受け入れられるかを明らかにするため, 市民を対象に意識調

表1 温暖化防止に役立つ100の技術 (清水・近藤)

(1) 効果の大きな対策 (10項目)	①電気自動車 ②高効率化鉄道貨物輸送 ③3次元印刷 ④工場の排気熱の利用技術	⑤太陽光発電 ⑥都市内未利用空間の活用 ⑦太陽電池 ⑧太陽熱給湯器	⑨建築物の断熱 ⑩建築物の軽量化、長寿命化
(2) 開発の加速が望まれる要素技術 (20項目)	①スマートビル ②高熱伝導率ヒートパイプ ③3次元印刷、ガス7-ヒン ④新型原動機 ⑤高性能電池 ⑥高電導利用技術	⑦水素利用技術 ⑧地熱利用技術 ⑨リチウムイオン電池 ⑩溶融塩還元法 ⑪高効率モーター ⑫低損失半導体 ⑬高効率発光素子	⑭ペロブスカイト太陽電池 ⑮大型液晶 ⑯分離膜技術 ⑰高機能性高分子材料 ⑱炭素処理技術 ⑲脱700℃技術
(3) システムの変更による対策 (10項目)	①配達者によるリサイクルシステム ②共同配達システム ③時間別・期間別割引 ④農業の粗放化	⑤農機具のレンタルシステム ⑥交通機関の7次元化 ⑦都市のスマート化 ⑧自転車道路の整備	⑩鉄道のカーボン強化 ⑪国際飛行場の再配置
(4) 産業に関連する新しい製品開発による対策 (20項目)	①高圧LED ②高圧LED ③フレキシブルディスプレイ ④リチウムイオン電池 ⑤LED照明器具 ⑥断熱ヒートポンプ ⑦LED照明器具	⑧自動車用LED照明 ⑨省エネLED照明 ⑩電気自動車の高機能化 ⑪熱交換 ⑫ヒートポンプ式暖房装置 ⑬磁界入り陶器 ⑭建築物緑化	⑮フラッシュ式信号機 ⑯断熱材入自動販売機等 ⑰文字形LED照明 ⑱RAM新聞 ⑲表示機能付フラッシュメモリー ⑳宅配用留守確認器 ㉑通信へのカーボンTVの利用
(5) 生活に関連する新しい製品開発による対策 (30項目)	①断熱材入ったカーペット等 ②断熱カーペット ③取付けの簡易な断熱材 ④ガス共通型7ガス窓 ⑤断熱型7ガス窓 ⑥自動消灯器 ⑦省エネ型LED照明器具 ⑧放熱器を分離した冷蔵庫 ⑨外気取入れ機能付LED照明器具 ⑩省電力装置あれこれ	⑪断熱材入り風呂 ⑫風呂湯利用ヒートポンプ ⑬家庭用LED照明器具 ⑭脱脂装置付石油ストーブ等 ⑮家庭用中水道 ⑯物干し用7ガス窓 ⑰燃焼式トイレ ⑱節水型水道栓 ⑲LEDの自動水切り装置等 ⑳簡易食器洗い器	㉑ガストースター ㉒断熱鍋 ㉓分別型LED照明器具 ㉔繊維入り再生紙 ㉕古紙利用フィッシュベーター ㉖太陽電池付自転車 ㉗安全型LED照明器具 ㉘家庭で使う太陽電池 ㉙非環境破壊型LED照明器具 ㉚電力監視、調節器
(6) 発展途上で利用できる製品や技術による対策 (10項目)	①太陽熱ヒーター ②飲料水加熱器 ③太陽熱乾燥機 ④夜間照明器具 ⑤簡易断熱材 ⑥火力発電	⑦水力発電 ⑧太陽熱給湯 ⑨車の排気浄化	⑩鉄道

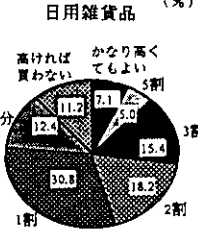
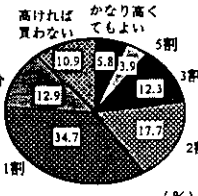


図2 環境対策による価格上昇の際の購買意識 (青柳・森口・清水)

査を実施した。図2はその一部の結果を示しており、環境対策のために1割程度の価格上昇があっても3/4以上の市民は購買意識を持ち続ける傾向がみられる。このような分析に基づいて、導入すべき対策技術のメニューと効果判定を行うことにしている。

4. 予測モデルの開発に関する研究

このような対策技術の導入とともに、省エネ政策やエネルギー転換政策などを導入した場合、温室効果ガスの排出量がどの程度削減され、その結果として地球温暖化をどこまで抑えることができるのかについて、総合的に予測するための計算機シミュレーション・モデルを開発している。この種のモデルは米国とオランダで既に開

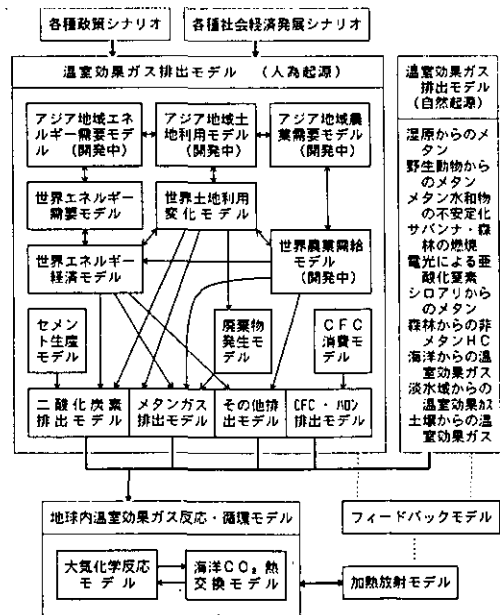


図3 温暖化防止対策評価のためのシミュレーションモデル (森田・松岡・甲斐沼)

発されているが、われわれのグループでは米国環境保護庁のモデルを基本にしてこれを改良するとともに、アジア地域を重点に検討できるようモデル構造を組み直す予定にしている。図3に示すように、既に土地利用変化モデル(森林の減少や農地の拡大を予測)、海洋モデル(二酸化炭素の海洋への吸収量を予測)、フィードバック・モデル(温暖化による温室効果ガスの放出量の変化を予測)等の改良を終えており、これを用いていくつかの予測シミュレーションを行っている。図4はその結果の一つで、温暖化を防止するには省エネと在来エネルギー(天然ガス、水力、原子力等)への転換が最も有効で、次いでバイオマスや太陽エネルギーの導入、植林などの有効性が示されている。今年度からは、わが国を含めてアジア地域の国々の防止対策を重点的に評価するため、アジア地域温暖化対策分析総合モデル(AIM)の構築に着手する予定である。

5. 植物影響に関する研究

一方、温暖化が防ぎきれなかったときにどのような影響が出てくるかという点について

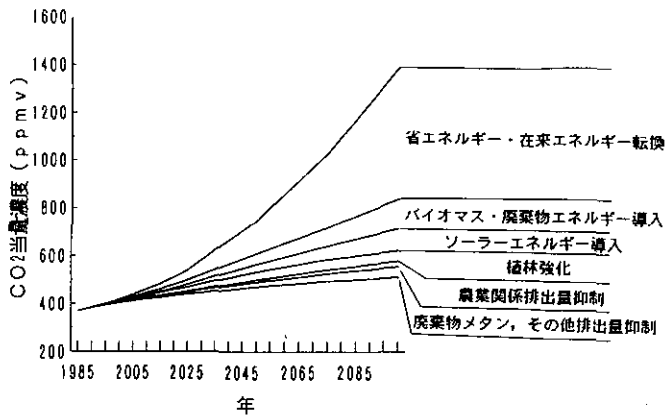


図4 予測シミュレーションの結果：温室効果ガス濃度の安定化に向けた各種対策の効果 (森田・松岡・甲斐沼)

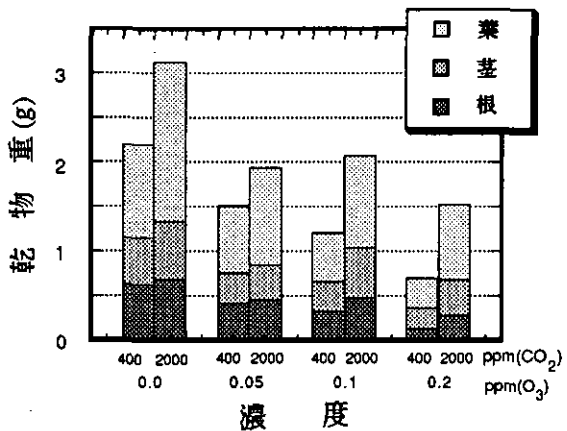


図5 ハキダメギクにおける複合曝露(CO₂+O₃): 2週目の器官別乾物重 (増田・大政)

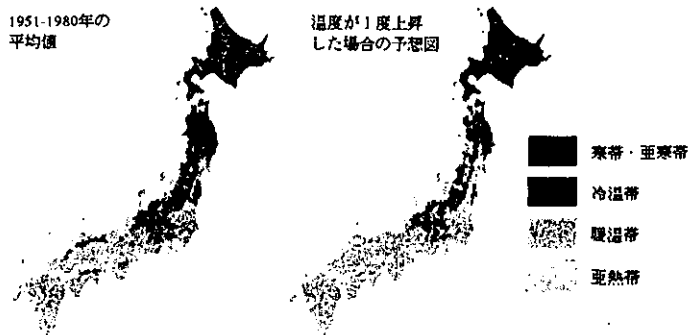


図6 1℃上昇に伴う植生の変化の推定 (甲斐沼・森口・恒川・増田)

て、まず、植物影響の研究を紹介する。この研究では、気温上昇や二酸化炭素濃度の増加などによって植物個体や植生にどのような影響を及ぼすかを分析している。図5は、二酸化炭素濃度の増加とオゾン濃度の増加が複合したときに植物がどのような影響を受けるかについて、得られた実験結果の一部である。気温が上昇すると対流圏のオゾン濃度が増加する可能性があることから、この結果は、温暖化現象により必ずしも植物の生産性は増加しないことを示唆している。その他、分布南限域の野生植物に対する温暖化の影響についても実験を進めている。また、温暖化による植生の分布域の変化を予測するシミュレーションモデルを開発中であり、現在までに開花や落葉時期の変化とともに自然植生の適性生育域の変化についていくつかの分析を行っている。図6はその一つの結果で、1℃の上昇により適性成育域が大きく変化することがよみとれる。今後とも、これらの実験や予測モデルづくりを進めて植物影響に関する基礎的な知見を蓄積していきたい。

6. 健康影響に関する研究

また、地球温暖化は人の健康にも種々の影響を与えるおそれ強い。気温上昇や熱波の増加等によってもたらされる熱ストレスや、病気を媒介する動物の分布域が拡大して熱帯病が北上することなどである。この分野の研究については、現在わが国の研究体制を確立しているところであるが、既に熱ストレスの健康影響を解明する動物実験に着手し、種々の生体影響を観察している。図7に示すように、熱中症が多数発生する境界温度(30数度)で実験動物にさまざまな成長抑制が見られると同時に、体内臓器に脂質過酸化障害が発生することが判明した。今後はこのような健康影響の生化学的機構と人集団を対象としたリスクの研究を行うとともに、媒介動物の分布域拡大による熱帯病への影響についても本格的に取り組むことにしている。

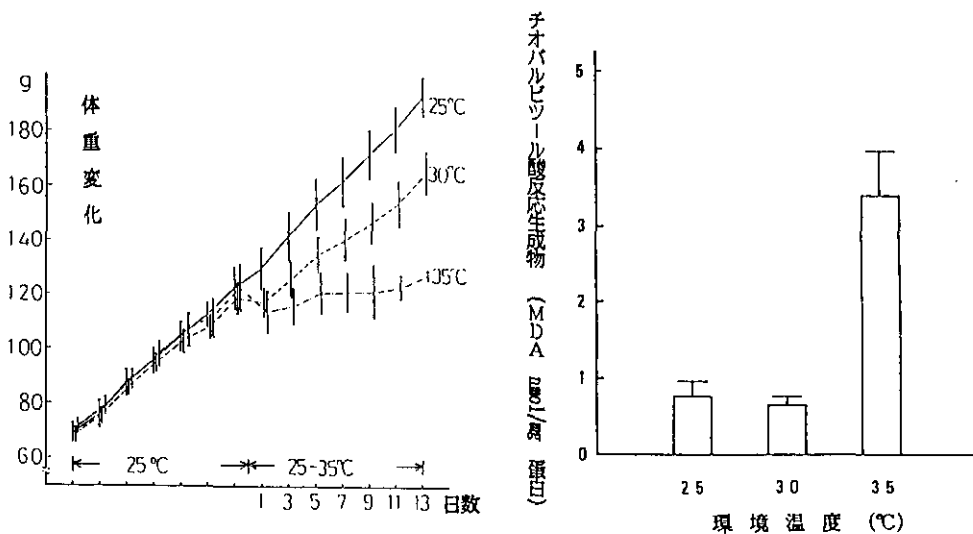


図7 熱ストレス下の Fisher ラットにおける成長抑制と肝臓脂質過酸化物生成 (安藤)

7. 都市環境への影響に関する研究

地球温暖化の影響には多種多様なものがあるが、いろいろな人間活動や財産それに人口が集中する都市においては、これらの色々な影響が総合化されて大きな損害をもたらす可能性が高い。このため、都市エネルギーシステム、大気汚染、都市緑地、近郊農業、水環境、水利用システム、レクリエーション環境、都市災害、土地資産等への影響を総合的に分析し評価する研究も始めている。今までに各種の影響を同定して総合的に評価する手法の開発に着手しており、図8にはその出力の一例を示している。今年度から、具体的な都市データを収集して、影響の大きさを算定する作業に入る予定である。

8. おわりに

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

最後になったが、この研究は以下のスタッフにより実施していることを記す。

〔地球環境研究グループ〕 森田恒幸・甲斐沼美紀子・増田啓子〔地域環境研究グループ〕 清水浩・森口祐一・稲森悠平・安藤満〔社会環境システム部〕 小野宏哉・青柳みどり・日引聡・近藤美則・安岡善文〔環境健康部〕 山元昭二・小野雅司〔水士環境部〕 細見正明・恒川篤史〔生物圏環境部〕 大政謙次・名取俊樹・清水英幸・田中浄・榎剛〔客員研究員〕 松岡譲・浅沼信治・若松國光

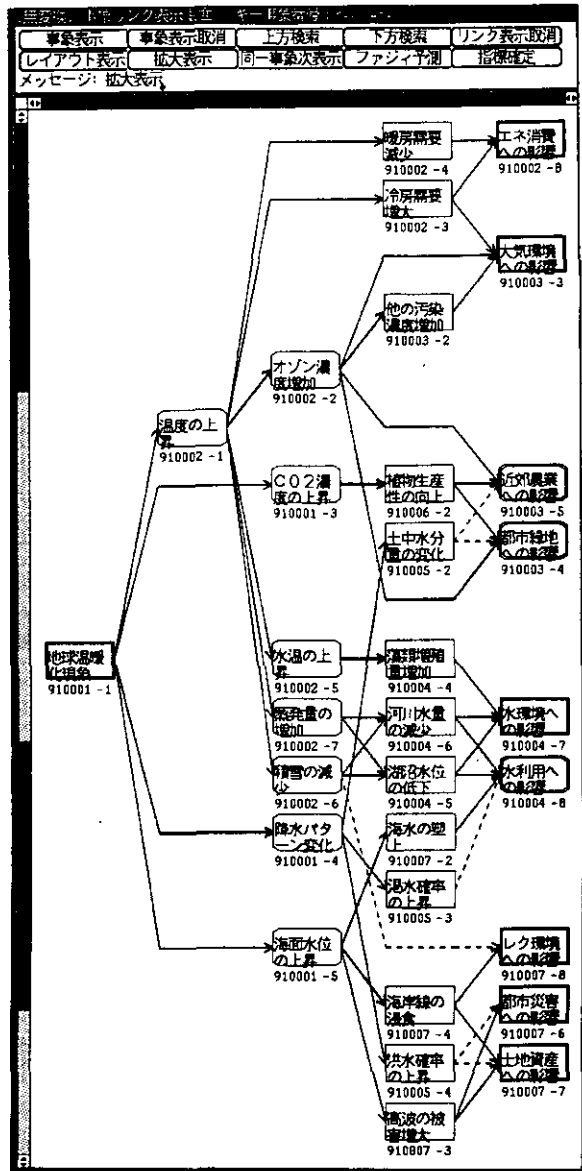


図8 温暖化の都市影響の総合評価：知識ベースの出力結果
(甲斐沼・細見・森田)

【平成3年4月26日編集小委員会受理】

[国立環境研究所資料 F-31-'91/NIES]

国立環境研究所研究発表会予稿集 第14号

平成3年5月30日発行

編集 国立環境研究所セミナー小委員会

発行 環境庁 国立環境研究所

〒305 茨城県つくば市小野川16番2

印刷 株式会社 イセブ
茨城県つくば市天久保2-11-20