

国立公害研究所  
研究発表会 予稿集

平成元年6月8日

於：国立公害研究所大山記念ホール

# 目 次

10：00～11：45

- (1) 台所や洗濯排水に含まれる汚濁成分 ..... 1  
技術部 松 重 一 夫
- (2) 殺虫剤と水界生態系  
— その回復過程における生物間相互作用 — ..... 7  
生物環境部 花 里 孝 幸
- (3) 揮発性有機塩素化合物の土壤中における挙動と微生物分解特性 ..... 13  
水質土壌環境部 矢 木 修 身
- (4) 塩化ダイオキシンおよび塩化ジベンゾフランについて ..... 19  
計測技術部 森 田 昌 敏

13：00～15：05

- (5) 長距離輸送中に起こる種々の大気汚染の形態 ..... 25  
大気環境部 植 田 洋 匡
- (6) 大気汚染物質による肺細胞傷害  
— 腫瘍化との関連について — ..... 31  
環境生理部 嵯 峨 井 勝
- (7) 環境科学における植物バイオテクノロジー ..... 37  
生物環境部 田 中 浄
- (8) 都市居住と環境ストレス  
— 騒音苦情からのアプローチ — ..... 43  
環境保健部 兜 真 徳
- (9) 人々は生活の場をどう見ているか  
— 連想法による地域比較 — ..... 49  
環境情報部 大 井 紘

15：25～16：45

- (10) 高度計測手法と環境汚染物質の化学計測 ..... 55  
計測技術部 植 弘 崇 嗣

(11)成層圏オゾンの変動を探る — オゾンレーザーレーダーによる観測 — .....	61
	大気環境部 笹野泰弘
(12)21世紀に向けたわが国の環境問題の長期予測 .....	67
	総合解析部 森田恒幸

# 台所や洗濯排水に含まれる汚濁成分

松 重 一 夫 (技術部)

**要 旨** わが国における河川、湖沼、海の水質は改善されたものの、環境基準(生活環境項目)の達成率は依然として70%程度である。これらの水域に流入する汚濁物質の50~60%程度は、未処理で放流されている生活雑排水に起因している。生活雑排水のほとんどは、調理や洗濯で使用する排水が占めている。ここでは、これらの排水の汚濁成分と汚濁負荷を軽減するための方策を紹介する。

## 1. はじめに

わが国における河川、湖沼、海域の水質は、工場排水等の規制により改善されたものの、環境基準(生活環境項目)の達成率は依然として70%程度である。これらの水域に流入する汚濁物質の50~60%程度は未処理で放流されている生活雑排水に起因しており、水質の改善には、生活雑排水の負荷の低減が不可欠である。生活雑排水とは、し尿を除いた生活排水をいい、日常生活にともなって排出される台所、洗濯、風呂等からの排水で、汚濁負荷の大半は、調理にともなう台所からの排水が占める<sup>1)</sup>。ここでは生活雑排水の汚濁成分と汚濁負荷を軽減するために各家庭で実施可能な方策とそれらの効果について紹介する。

## 2. 生活雑排水の汚濁成分

生活雑排水の負荷原単位、つまり人一人が一日にどれくらい汚濁物質を排出するかについてはこれまでの測定例から、有機物の汚れを示す指標である生物化学的酸素要求量(BOD)が約27g/人/日、富栄養化の原因となる栄養塩類の全窒素と全リンは全窒素が約1.3g/人/日、全リンが約0.3g/人/日であると算定されている<sup>2)</sup>。しかしこの値はあくまで家庭からの炊事、洗濯などによる全ての排水の負荷を足し合わせたもので、家庭で実施可能な汚濁負荷を軽減するための方策を検討するには、個々の排水、つまり炊事、洗濯、入浴のそれぞれによってどれくらい汚濁物質が発生しているのか、また更に進んで、どのようなものをどれくらい捨てると、どれくらいの負荷があるのか、いいかえれば、どのようなものを捨てなければ、どの程度汚濁負荷を軽減することが出来るのかという事を知る必要がある。

### (1) 炊事による汚濁負荷

表1に、台所で使用される可能性のある市販食品、および調味料のBOD、窒素、リンの濃度と負荷量を示す。汚濁負荷量は、調味料10g、嗜好品コップ1杯(180ml)を捨てたときの値を示す。一般に調味料は皿などの容器に付着して残った部分が、また嗜好品については飲み残しが排水として捨てられている。BODは油を使っているドレッシング、マヨネーズが高く、窒素、リンは味噌、醤油が非常に高くなっている。また、台所では米のとぎ汁、うどんのゆで汁あるいは煮物の煮汁など、調理に伴うものが多く捨てられている。表2に調理に伴って捨てられている可能性のあるもののBOD、

表1 食品・調味料の負荷

食品・調味料名	BOD濃度 (mg/l)	窒素濃度 (mg/l)	リン濃度 (mg/l)	捨てる量	BOD (g)	窒素 (mg)	リン (mg)
砂糖*	450000	-	-	10 g	4.5	-	-
味噌*	370000	21000	2700	10 g	3.7	210	27
醤油*	220000	25000	3900	10 g	2.2	250	39
ソース*	240000	1200	190	10 g	2.4	12	1.9
ドレッシング*	660000	1500	100	10 g	6.6	15	1.0
マヨネーズ*	1290000	4400	870	10 g	12.9	44	8.7
ケチャップ*	157000	1900	580	10 g	1.6	19	5.8
お茶	290	15	4	180 ml	0.05	2.7	0.7
コーヒー	5900	350	62	180 ml	1.1	63	11
缶コーヒー	116000	2400	590	180 ml	21	430	106
牛乳	83000	4900	1340	180 ml	14.9	880	240
ジュース	110000	420	110	180 ml	20	76	20
スポーツドリンク	46000	50	20	180 ml	8.3	9	3.6
ウイスキー	160000	130	0	180 ml	29	23	0
ワイン	150000	270	130	180 ml	27	49	23
日本酒	188000	710	103	180 ml	34	128	19
ビール	89000	340	132	180 ml	16	61	24

\* : 濃度の単位は mg/kg  
捨てる量の目安 (10g: 大匙7分目、 180ml: コップ1杯)

表2 調理からの負荷

試料名	BOD濃度 (mg/l)	窒素濃度 (mg/l)	リン濃度 (mg/l)	捨てる量 (ml)	BOD (g)	窒素 (mg)	リン (mg)
米のとぎ汁 (4合)	2400	29	7.8	4,500	10.8	130	35
(1回目のとぎ汁)	11100	111	32	700	7.8	78	22
スパゲティのゆで汁	5400	55	17	1,000	5.4	55	17
うどん・そばのゆで汁	1030	22	6.3	1,000	1.0	22	6.3
魚の下ごしらえ	1300	60	13	2,000	2.6	120	26
ラーメンの汁	26000	1,180	290	180	4.7	210	52
味噌汁	37000	-	-	180	6.7	-	-
コーンクリームスープ	126000	1,300	210	180	22.7	230	38
おでんの煮汁	95000	4,200	970	180	17.1	760	175
だし汁	1730	210	82	180	0.3	38	15
かぼちゃの煮汁	87000	5,200	830	15	1.3	78	12.5
肉じゃが	52000	-	-	15	0.8	-	-
ミートソース	150000	2,400	370	15	2.3	36	5.6
古い食油	1670000	1,400	30	15	25.0	21	0.5
台所用液体洗剤	200000	3200	10	7.5	1.5	24	0.1

ゆで汁: 麺1人前 (スパゲティ 100g、うどん 250g、そば 170g) を1000mlのお湯でゆでる  
魚の下ごしらえ: あじ (中) 1匹を処理  
捨てる量の目安 (180ml: コップ1杯、 15ml: 大匙1杯)

窒素、リンの原単位と各々の条件での汚濁負荷量を示す。米のとぎ汁は米4合を合計4500mlの水で4回に分けてといた場合の全排水と1回目の排水の負荷量を、スパゲティ、うどん・そばのゆで汁はそれぞれ1人前を1000mlのお湯でゆでた場合、ラーメンの汁、おでんの煮汁等はそれぞれコップ1杯(180ml)捨てた場合、古油は鍋の底にどろっと残った程度を大さじ1杯(15ml)と考えた場合で

の負荷量である。例えば、次の2つの献立で1人分でのどのくらいのBOD汚濁負荷があるか表1、2から計算してみる。まず献立Aはご飯、味噌汁、魚の塩焼、肉じゃが、次に献立Bはパン、コーヒー、スパゲティ(ミートソース)、野菜サラダ、コーンクリームスープとする。Aの献立では洗米(1合)から2.7g、味噌汁が18ml碗に残ったとして0.7g、魚の下ごしらえで2.6g、魚にかけた醤油の残った量が2mlとして0.4g、肉じゃがが15ml残ったとして0.8g、Bの献立の場合コーヒーを18ml残したとして0.1g、スパゲティのゆで汁が5.4g、ミートソースが皿に15ml残ったとして2.3g、野菜サラダにかけたドレッシングが5g残ったとして3.3g、コーンクリームスープが18mlカップに残ったとして2.3g、合計するとAの献立で7.2g、Bの献立で13.4gの負荷量となる。我々が普段何気なく台所に捨てているものの汚濁負荷量が以外と大きいことが分かる。また表2の一番下に食器を洗うために中性洗剤を使った場合の負荷量を示してある。ここでは一回の使用量を7.5mlとして算定している。

### (2) 洗濯および入浴による汚濁負荷

洗濯および入浴による汚濁負荷は、洗剤の種類と使用量によって表すことが出来る。表3に洗濯および入浴時に使われる種々の洗剤の原単位と汚濁負荷量を示す。汚濁負荷量を算出するために用いた各洗剤の使用量は洗剤それぞれに示されている標準的な1回の使用量である。BOD負荷量で算定すると、粉石鹼を使用した場合より合成洗剤を使用した方が非常に小さくなっている。また、コンパクト洗剤のBOD負荷量は従来の合成洗剤に比べ約半分となっていることが分かる。かつて合成洗剤の主流であった有リン洗剤は $P_2O_5$ として約10%程度のリンが含まれており、標準的な使用量では1回で約1800mgのリンが排出されることとなる。この量は6人分の1日のリン負荷量に当たり、有リン洗剤から無リン洗剤への切り替えは、大幅なリン削減がなされたことになる。洗剤は可能な限り少なめに使用することももちろんのこと、また、洗濯するものを選び分けて洗濯液を2度使用するなどして、使用量の削減を図る努力も必要である。

表3 洗剤の負荷

洗 淨 剤 名	BOD濃度 (mg/l)	窒素濃度 (mg/l)	リン濃度 (mg/l)	捨てる量	BOD (g)	窒素 (mg)	リン (mg)
合成洗剤*	132000	330	44	40 g	5.3	13	1.8
〃 (コンパクト)*	95000	280	200	25 g	2.4	7	5
粉石鹼*	750000	-	57	50 g	38	-	2.9
シャンプー	150000	2100	160	6 ml	0.9	12	1.0
コンディショナー	71000	600	17	3 ml	0.2	2	0.05
トリートメント	129000	850	20	3 ml	0.4	3	0.06

\* : 濃度の単位は mg/kg  
捨てる量の目安 (洗濯、洗髪1回の標準的な使用量)

### 3. 汚濁負荷の軽減方法

先ほど環境庁によりまとめられた生活雑排水対策推進指導指針では、排出負荷を削減するために各家庭で実施できる台所等対策の主要な事項として以下のようなものを挙げている<sup>3)</sup>。

## (1) 台所での対策

### ①調理屑等の排出抑制

- ・食べ残しの無いように必要量を調理する。
- ・三角コーナー＋濾紙を利用して固形分、いわゆる残飯を回収する。
- ・目の細かいストレーナーを利用して固形分、いわゆる残飯を回収する。
- ・米のとき汁は捨てずに庭や植木などに散布する。
- ・食後の皿や容器に残ったソース、マヨネーズ、ドレッシング等はキッチンペーパー等で拭き取ってから洗う。
- ・味噌汁、煮汁は流さない。
- ・酒、ビール等は流さない。

### ②廃食用油の適正処理

- ・食用油は調理によって使いきる工夫をする。
- ・使い終わった油を捨てる場合は、そのまま流さず、市販の油固化剤を用いるか、新聞紙等に吸い込ませるなどしてごみとして出す。
- ・調理後のフライパン等は付着している油分を良く拭き取ってから洗う。

### ③回収物の適正処理

- ・三角コーナー等で回収された調理屑や食べ残しは、こまめに回収してごみとして出すか、埋めて土に戻す。

## (2) 洗濯時の対策

洗剤の量および種類の適正使用

## (3) 風呂対策

風呂の残り湯の洗濯等の使用

## 4. 期待できる汚濁負荷量の軽減効果

我々日本人の家庭から必ず出でるのが米のとき汁であり、その汚濁負荷量は表2の測定結果からも非常に大きいことが分かる。BODの場合、一人一日1.5合の米を食べるとして、そのとき汁の負荷量は表2から約4g、そのうち1回目の負荷量は約3gである。一人一日の負荷量が平均約27gであるから、米のとき汁を捨てないだけでおおよそ15%、1回目のとき汁を捨てないだけでおおよそ11%の軽減効果がある。窒素、リンについてもほぼ同様なことが言える。また、表2から分かるように麺類のゆで汁、煮物の煮汁、味噌汁も非常に大きな汚濁負荷をもっているのので、これらを流さないことによって、かなりの軽減効果が期待できる。特に今回特筆すべきは、スパゲッティのゆで汁が非常に高い汚濁負荷を示したことである。今後食生活の変化とともに需要が増加すると思われ、注意を喚起する必要がある。

食後の皿や容器、調理に使われた鍋などに付着して残っている、油分、ソース、マヨネーズ、ドレッシングは表1の測定結果から分かるように汚濁負荷の原単位が非常に高い。これらの拭き取り等による軽減効果は大きいと思われる。拭き取りによりどの程度負荷量が削減されるのかを調べた結果を表4に示す。献立は、ハンバーグとトンカツの2種類で各々4人分ずつ作り、それぞれの献立で使用し

た調理器具と食器をゴムベラと紙を使って汚れを拭いて洗った場合と、そのまま洗った場合の、洗浄液の汚れを比べた。BODの負荷量は、拭いた方がハンバーグの献立のときで1.5g、トンカツの献立のときは24.9gも減らすことが出来る。トンカツの場合は油の負荷量が非常に大きいので、この場合では一人一日当りのBOD負荷量を2割程度も削減できることになる。

調理屑や食べのこしを三角コーナーなどのごみ受けで回収することによって、汚濁負荷量の削減効果が上がると考えられるが、調理屑などの入ったごみ受けに水を流すと、汚濁成分が流出してくるという問題がある。表5に実際にごみの入ったごみ受けに水道水を1L流したときに流出してくる汚濁成分の濃度を示す。ごみの種類も表中に示してある。ごみ受けの形態および濾紙の使用にも拘らず、ほぼ同程度の流出がみられた。この場合ごみの中に油分が多く含まれていないので、BODの流出量は少ないように思われるが、ごみ受けにぶりの照り焼きの残り1切れ入れて同様に試験した場合は、70g以上のBODの流出が認められた。この様な問題を解決するためには、ごみ受けに水を流さない、

表4 食器を拭いて洗った場合の負荷

献立	洗った物	拭き方	水量 (l)	汚れの量 (g)			
				SS	BOD	T-N	T-P
ハンバーグ フレンチポテト シーフードサラダ ホワイトシチュー ご飯	大皿(4+1) 中皿(4) スープ皿(4) 茶碗・箸・大スプーン フライパン・ボール 鍋(スープ用)・炊飯器	皿や鍋をゴムベラ で拭いたのち洗う	25	6.3	0.3	0.25	0.048
		そのまま洗う	35	11.2	1.8	0.81	0.158
トンカツ キャベツ ひじきの煮付け 里芋と大根の味噌汁 御飯	皿(4) 茶碗(4) 中華鍋(1) 味噌汁の鍋	中華鍋と皿の 汚れを紙で拭いた あと洗う	30	1.8	13.5	0.27	0.033
		そのまま洗う	30	21.9	38.4	0.42	0.072

4人分の食事の後かたづけをした場合

表5 ごみ受けからの汚濁成分の流出

ごみの種類と量	ごみ受けの種類	汚れの量 (g)			
		SS	BOD	T-N	T-P
パン粉(8g)	ごみ受・大穴	1.1	0.8	0.04	0.010
キャベツ(60g)	ごみ受・小穴	0.9	0.7	0.04	0.009
お茶がら(50g)	ごみ受・プラスティック	1.6	0.7	0.04	0.009
大根下ろし(60g)	ごみ受・ろ紙	0.5	0.6	0.03	0.008
ご飯(30g)					
コーヒーかす(30g)					
ほうじ茶かす(25g)					

水道水500mlをごみ受けのごみの上から2回流す



油分が多く含まれている食べ残しなどはごみ受けに捨てずに、最初からごみ収集に出す方のごみ箱に捨てると言った方法が考えられる。三角コーナーでは上記のような対策が可能であるが、ストレーナーでは水を流さないということは不可能であり、油分の多いものを捨てないことと、たまったごみをこまめに回収することが肝要である。さらに、出来ることなら、流し台にストレーナーが設置されているとしても三角コーナーを使用することが望ましい。

洗濯および入浴時における、洗剤の適正使用については、台所で実施可能な米のとぎ汁などの削減効果が非常に大きいので、全体としての効果は小さいかも知れないが、省資源、節水と言った面からは非常に重要である。

## 5. よりよい水環境を創造するために

生活雑排水の汚濁負荷量の軽減について、家庭で実施可能な方策と、その効果について簡単にまとめた。これらの方策が総て実施されたとすると計算上はBOD負荷量の50%以上を削減できると考えられる。現にこれらの方策は多くの地域で実践活動として行われており、ある程度の効果が上がっている。しかし地域での学習会などの啓発活動直後には、BODを50%も減少させることが出来たのに1年後には元に戻ってしまったという報告もある。また最も削減効果が大きいと考えられる米のとぎ汁を流さないという方策は、最も実施され難いという報告もある。兎小屋といわれるわが国の住宅事情にも一因があると考えられるが、我々水質改善に携わる研究者もさらに住民のニーズにあった方策なり施策を検討していく必要がある。しかし、水域に対する汚濁負荷の50%以上が生活雑排水に起因している現状では、よりよい水環境を創造できる鍵は住民が握っているといっても過言ではないだろう。我々自身が水環境をいかようにでも創造できるということではないだろうか。いままさに我々が台所の流しに流れ出て行こうとする油の一滴に対して危機感を持つことが、よりよい水環境を創造する始まりになるであろう。

この研究に当たっているいろいろなお助言を賜った「暮らしの手帳」社の杉村民子さん、また水質分析とデータ整理に協力いただいた技術部水落元之氏および坂本倫子さんに厚くお礼申し上げる。

## 引用文献

- 1) 須藤隆一 (1987) : 生活排水をめぐって、公衆衛生, 51, 380-386.
- 2) 須藤隆一, 稲森悠平 (1986) : 湖沼水質保全のための生活雑排水対策, 用水と廃水, 825-835.
- 3) 環境庁水質保全局 (1988) : 生活雑排水対策推進指導指針. ぎょうせい,

# 殺虫剤と水界生態系

## — その回復過程における生物間相互作用 —

花 里 孝 幸 (生物環境部)

**概 要** 屋外コンクリート水槽を用い、湖沼生態系の中の動物プランクトン群集に対する殺虫剤の影響を、実験的に解析した。同じ薬剤を投与しても、薬剤の濃度、投与頻度、投与時期、生態系内の捕食者の有無、あるいはその種類が異なると、薬剤によって壊された動物プランクトン群集の回復過程が大きく異なる。この回復には、捕食者—被捕食者の関係や、動物プランクトン同士の餌を介した競争など、生物間相互作用が重要な役割を果たしている。

### 1. はじめに

農薬等の有害化学物質は、河川や湖沼に流入し、その生態系に影響を与えている。その影響を評価するためには単一の生物種を用いた毒性試験だけでははなはだ不十分である。それぞれの水界は多くの生物種を含み、複雑な生態系をつくっている。有害化学物質の流入が引き起こすある種の減少は、それと関係する他の種に大きな変化を及ぼす。

我々は水界生態系に対する殺虫剤や除草剤の影響を調べるために、なるべく自然に近い生態系を実験的に作る試みをしてきた。そして、湖沼のモデル生態系として、隔離水界と屋外コンクリート水槽を用いた実験方法を開発してきた。

ここでは一例として、屋外コンクリート水槽を使った一連の実験を紹介する。この実験では、試験する有害化学物質をカーバメイト系殺虫剤のカルバリルに限り、薬剤の投与方法や投与時期、生態系の構成種等を変えて、動物プランクトン群集を中心にその影響を調べた。

動物プランクトンは湖沼生態系の中の重要な構成員であり、植物プランクトンを主要な餌として摂食し、また自らは魚の良い餌となっている。殺虫剤に対して高い感受性を持つために、湖沼に殺虫剤が流入したときには、真っ先に動物プランクトン群集に変化が現れるものと思われる。

### 2. モデル生態系の作成

実験には大型(容量 27.2 トン)と小型(1.5 トン)の二種類の屋外コンクリート水槽を用いた。前実験の影響をなくすために、実験毎に水槽の内側をポリエチレンフィルムで裏打ちした。実験開始時には、霞ヶ浦から採取した底泥(休眠状態の動植物プランクトンを含む)を、大型水槽には 80 kg、小型水槽には 5 kg 投入し、地下水を満たした。水槽内には底泥由来の動植物プランクトンが増え、霞ヶ浦に似たプランクトン群集が形成された。この方法によるプランクトン群集の再現性はかなり良く、生態系影響試験を行うための実験系としては有効な方法と考えられる。

### 3. 夏期における実験<sup>1)</sup>

水槽に地下水を満し実験を開始すると、決ってすぐに植物プランクトンが急増する(図1)。それに遅れてワムシ類のツボワムシが増え、摂食により植物プランクトン量を減少させる。ツボワムシはその後、競争関係で上位にある枝角類(ミジンコ類)に取って代わられる。

夏に大型の水槽を用いて実験を行ったときには、フサカ(双翅目昆虫: *Chaoborus flavicans*)の幼虫が水槽内に現れた。この幼虫は動物プランクトンとして水中に浮遊し、枝角類を捕食する。その結果枝角類が減少し、枝角類との競争によって抑えられていたワムシ類が増えた(図2; Pond A)。この水槽にカルバリルを1 ppmになるように投与すると、フサカ幼虫を含むほとんど全ての動物プランクトンが死滅した(図2; Pond B)。この薬剤の分解は非常に速く、すぐに枝角類のスカシタマミジンコ(*Moina micrura*)とトガリネコゼミジンコ(*Ceriodaphnia rigaudi*)が現れ、捕食者フサカ幼虫が回復しないうちに急増した。その結果、ワムシ類の現存量は比較的強く抑えられた。すなわち、薬剤投与をしないと、フサカ幼虫が捕食によって枝角類を抑え、ワムシ類優占の水界ができる。カルバリルの投与はこの捕食者の増殖を抑え、枝角類の速やかな回復を許し、枝角類優占の水界を作ることになった。

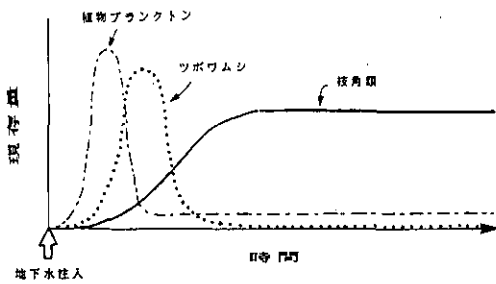


図1 実験開始後のプランクトン群集の変動パターン

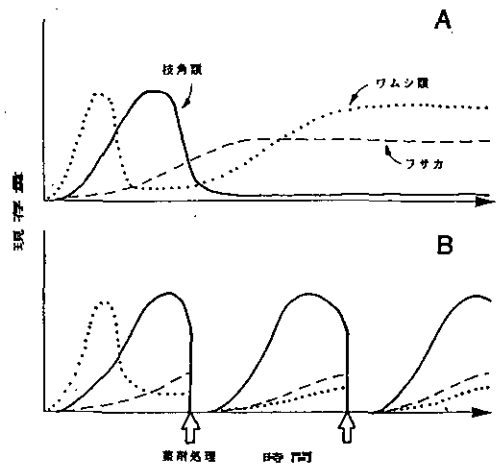


図2 夏期実験(大型水槽)での動物プランクトン群集の変動の模式図 Pond Bにカルバリル1 ppmを2回投与した(矢印)。

### 4. 春期における実験<sup>2)3)</sup>

夏期実験と同じ実験を春に行った。この実験においてもフサカ幼虫が水槽内で増えた。夏と同様に1 ppmのカルバリル投与はほとんど全ての動物プランクトンを死滅させたが、その後の回復過程は大きく異なった。投与後、薬剤は速やかに分解したが、枝角類の顕著な回復が見られなかった(図3)。これは捕食者フサカ幼虫の回復が枝角類に比べて早く、枝角類の回復を抑えたためによる。夏には枝角類の回復速度がフサカ幼虫のそれを上回っていたが、水温が低い春にはその関係が逆転した。

ここで、薬剤投与後の回復過程に捕食者のフサカ幼虫が重要な役割を果たしていることが示されたが、そのことを確認するために、小型水槽を用い、フサカ幼虫の密度をコントロールした実験を春に行った。

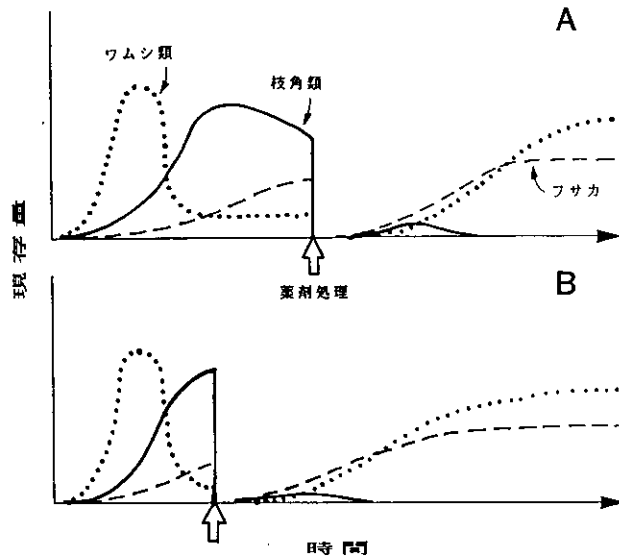


図3 春期実験(大型水槽)での動物プランクトン群集の変動の模式図 Pond AとPond Bで時期をずらしてカルバリル1 ppmを投与し(矢印), 同じ回復過程を観察した。

12基の水槽の半分の6基をネットで覆い、フサカ成虫による水槽内への産卵を妨げ、フサカ幼虫密度の低い水界を作った。残りの6基の水槽はネットで覆わず開放して、フサカの移入を許し、更に週3回フサカの卵塊を投入して、フサカ幼虫密度の高い水界を作った。この実験ではカルバリルを0.5 ppmと0.1 ppmの二段階の濃度で投与した。0.5 ppmのカルバリルは一部のワムシを除いてほとんどの動物プランクトンの現存量を大きく減少させ、開放水槽では、大型水槽を用いた春の実験と同様に、薬剤投与後にフサカが早く回復し、枝角類の回復は見られなかった(図4)。一方、フサカ密度の低いネット遮蔽水槽では、薬剤投与後にニセゾウミジンコ(*Bosmina fatalis*)とスカシタマミジンコの顕著な増殖が観察された。フサカ幼虫がいると枝角類の回復が妨げられることが、この実験で明らかにされた。また、ネット遮蔽で薬剤を投与しない水槽では、大型のマギレミジンコ(*Daphnia ambigua*)が実験期間中優占したのに対し、ネット遮蔽で薬剤投与した水槽ではニセゾウミジンコとスカシタマミジンコが優占した。薬剤投与は枝角類の種組成を変えたことになる。これには枝角類同士の競争関係、増殖速度の違いなどが影響している。またここでは二段階の殺虫剤濃度を使ったことから、これまでの1 ppm投与の実験データも加え、いろいろな動物プランクトン種のカルバリルに対する耐性の違いが分かった(表1)。ワムシ類が最も高い耐性を持つ傾向があり、逆に枝角類の耐性が最も低かった。更に、ワムシ類の間でも耐性に違いのあることが分かった。

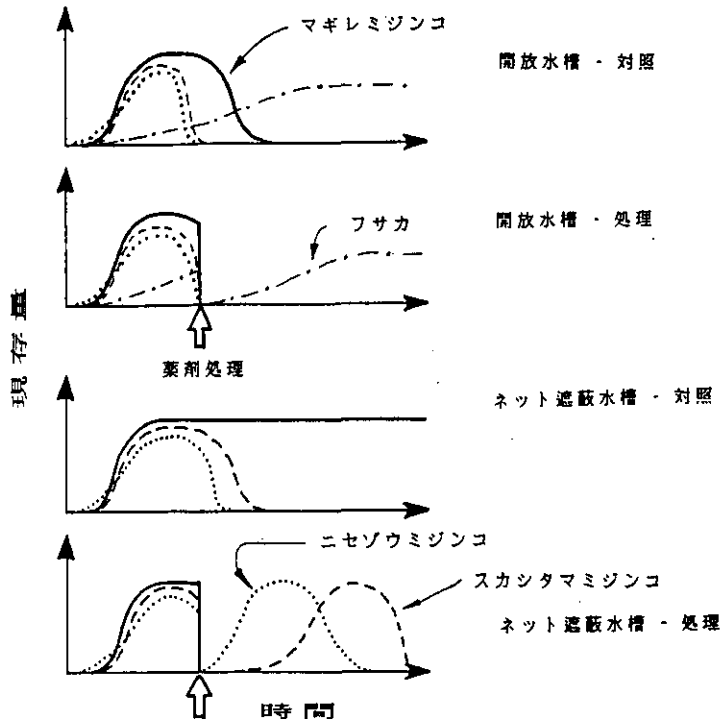


図4 春期実験(小型水槽)での動物プランクトン群集の変動の模式図 開放水槽ではフサカの移入を許し、更にフサカの卵塊を投入してフサカ密度を高くした。遮蔽水槽は水槽をネットで覆い、フサカの移入を妨げた。矢印はカルバリル0.5ppmの投与時を示す。

表1 カルバリル各濃度に対する動物プランクトン種またはグループの耐性  
○-耐性あり; X-耐性なし

カルバリル濃度	0.1ppm	0.5ppm	1.0ppm
コガタツボウムシ	○	○	X
コシボソカメノコウウムシ	○	○	X
カメノコウウムシ	○	X	X
ミジンコウムシ	○	X	X
枝角類	X	X	X
橈脚類	○	X	X
フサカ	○	X	X

## 5. 冬期における実験<sup>4)</sup>

大型と小型の水槽を使って、秋に1ppmと0.5ppmのカルバリルを投与した。水温が10℃を上回っているときに薬剤投与を行うと、それにより壊された動物プランクトン群集は回復した(図5; B)。一方、水温が10℃を下った晩秋から冬に薬剤投与を行うと、投与した薬剤がすぐに分解しても、枝

角類とワムシ類の回復は水温が再び10℃を越える春になるまで見られなかった(図5；C, D)。この実験期間中フサカ幼虫はほとんど出現しなかったので、動物プランクトン群集に対する捕食の影響は無視できる。薬剤処理を行わなかった水槽と薬剤を投与してもすぐに動物プランクトン群集が回復した水槽では、ハリナガミジンコ(*Daphnia longispina*)またはマギレミジンコが冬の間中生存し、春にも競争関係で上位にあるこれらのミジンコが他の枝角類やワムシ類の出現を抑え、この二種が著しく優占する水界を作った(図5；A, B)。薬剤処理の結果冬の間枝角類やワムシ類のいなかった水槽では、春になるといろいろな枝角類やワムシ類が出現して、種数の多い動物プランクトン群集が作られた(図5；C, D)。このことは即ち、水温が10℃を下った晩秋から冬に、水界生態系に薬剤が流入して動物プランクトン群集が壊されると、たとえその薬剤がすぐに分解して毒性がなくなっても、その影響は翌年の春の動物プランクトン群集の種組成にまで及ぶことを示している。

6. 薬剤投与の時期を変えた実験<sup>5)</sup>

水槽に地下水を満たし実験を開始すると、いろいろな動物プランクトン種が順番に増え、ある決まった遷移(Succession)が見られる。この遷移上の異なった時期にカルバリル0.5 ppmを投与し、その影響を調べた。実験では10基の小型水槽を用い、全ての水槽をネットで覆い、フサカの移入を妨げた。2基の水槽は無処理で対照とし(図6；A), 2基は実験開始後13日目にカルバリル0.5 ppmを投与した(図6；B)。更に2基は20日目に(図6；C)、また別の2基は27日目に(図6；D)同様の薬剤

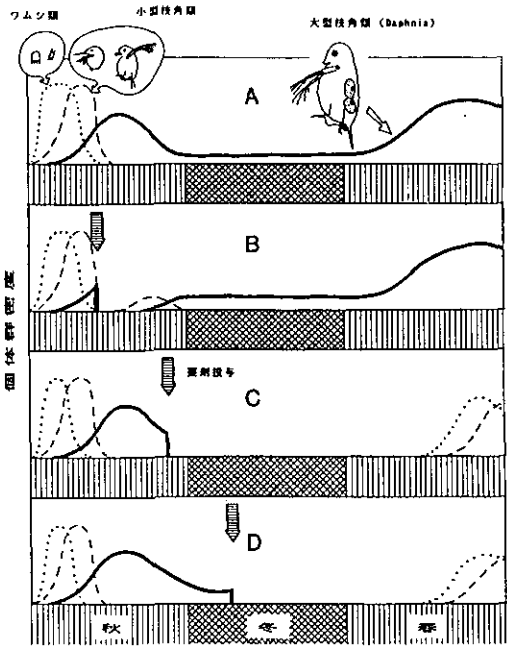


図5 冬期実験(大型水槽と小型水槽)での動物プランクトン群集の変動の模式図 矢印はカルバリル1 ppm または0.5 ppmの投与時を示す。薬剤投与時の水温は、Bで16℃、Cで10℃、Dで4℃であった。

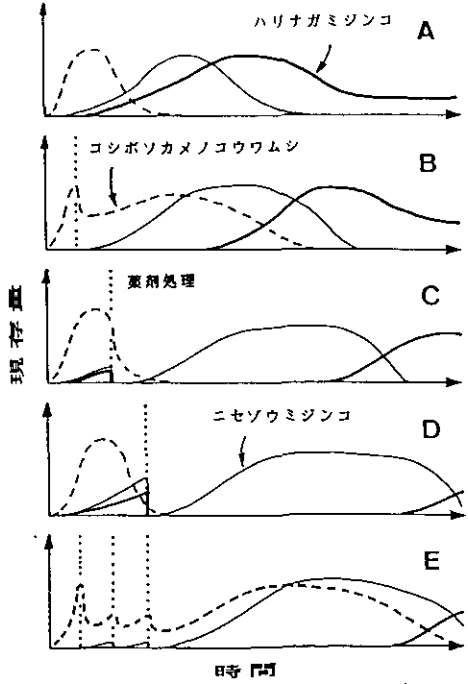


図6 薬剤投与の時期を変えた実験での動物プランクトン群集の変動の模式図縦の点線はカルバリル0.5 ppmの投与時を示す。

処理を行った。残りの2基は13, 20, 27日目にそれぞれ0.5 ppmのカルバリルを投与した。即ち全部で3回の薬剤処理を行った(図6; E)。0.5 ppmのカルバリルは枝角類をほとんど死滅させたが、ワムシ類のコシボソカメノコウワムシ(*Keratella valga*)には個体数の多少の減少を引き起こした程度で、大きなダメージを与えなかった。コシボソカメノコウワムシの増殖時期に薬剤投与を行ったときには(13日目と3回投与した場合: 図6; B, E), 薬剤によってワムシの競争者の枝角類が姿を消したために、このワムシは更に個体数を増した。一方、コシボソカメノコウワムシの減衰時期に薬剤が投入されたときには(20日目と27日目: 図6; C, D), 枝角類がいなくなってもワムシは増えなかった。即ち、同じ薬剤処理を行っても、そのときの動物プランクトン個体群の盛衰の状態が異なると、その後の回復過程が異なることが示された。

## 7. おわりに

水界生態系では、動物プランクトン群集を見て分かるように、いろいろな生物が、喰う一喰われる関係、餌を介した競争関係などの生物間相互作用で、複雑に関係を保っている。これまでの実験で、薬剤投与後の生態系の回復過程において、これらの相互作用が重要な役割を果たしていることが分かってきた。更に、その相互作用が温度に大きく依存しており、季節が変わると同じ薬剤処理を行ってもその後の回復過程が異なることが示された。この様に、有害化学物質の生態系影響を知るには、その生態系の構造やメカニズムが分かっているなければならない。そのためには生態学的な解析が重要な役割を果たすのである。ここでは分解の早いカルバリルを用いたが、分解の遅い殺虫剤を使った場合には、また異なった影響が生態系に現れることを、我々は観察している。生態系における有害化学物質の影響を評価し、予測するためには、さらに多くの知見を蓄積する必要がある。

## 参考文献

- 1) Hanazato, T. and M. Yasuno (1987): Effects of a carbamate insecticide, carbaryl, on the summer phyto- and zooplankton communities in ponds. *Environ. Pollut.* 48, 145-159.
- 2) Hanazato, T. and M. Yasuno (1989): Effects of carbaryl on the spring zooplankton communities in ponds. *Environ. Pollut.* 56, 1-10.
- 3) Hanazato, T. and M. Yasuno (1989): Influence of *Chaoborus* density on the effects of an insecticide on zooplankton communities in ponds. *Hydrobiologia*, (印刷中)
- 4) Hanazato, T. and M. Yasuno (投稿中): Influence of overwintering *Daphnia* on spring zooplankton communities: An experimental study. *Ecol. Res.*
- 5) Hanazato, T. and M. Yasuno (1989): Influence of time of application of an insecticide on recovery patterns of a zooplankton community in experimental ponds. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, (印刷中)

# 揮発性有機塩素化合物の土壌中における挙動と 微生物分解特性

矢木修身・内山裕夫（水質土壌環境部）

**要旨** 地下水汚染で問題となっているトリクロロエチレン、テトラクロロエチレン等の揮発性有機塩素化合物の土壌への吸着量、土壌中での分解速度および分解経路を明らかにした。さらに、これらの化合物の分解に関与する微生物の分離を試み、トリクロロエチレンを分解する新種の土壌細菌を見出した。本細菌の持つトリクロロエチレンの分解特性について報告する。

## 1. はじめに

全国各地の地下水からトリクロロエチレン、テトラクロロエチレン等の揮発性有機塩素化合物が検出され、これらが発癌性を有することから問題となっている。地下水は、かつては安全なものと考えられていたが、これは土壌1g中に約1億匹の微生物が存在し、これらの微生物により、また土壌のもつ物理化学的作用により有害物質が分解、除去されるためである。しかし化学物質の土壌への排出量の増大、また、これまでに自然界に存在しなかつたいわゆる難分解性化合物の排出により、土壌微生物が分解できない量的および質的な問題が生じ、地下水汚染が生じてしまった。とりわけ揮発性有機塩素化合物の代表例であるトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンは、強固な炭素-ハロゲン結合を有し難分解性であること、また発癌性を有することから、水質汚濁防止法の有害物質として指定され、本年10月1日からトリクロロエチレン0.3mg/l、テトラクロロエチレン0.1mg/lの排水基準が適用されることとなった。したがって、今後は環境中への排出量は減少するが、現在年間トリクロロエチレンが6.7万t、テトラクロロエチレンが7.1万tと多量に使用されていること、またこれらの化合物による地下水汚染が広範囲に広がっていることを考えると、すぐに汚染が解消するのは困難と思われる。地下水汚染を防止するためには、これらの化合物の土壌中での挙動を知ると共に、その生分解性を明らかにすることが必要である。そこで、これらの化合物の土壌への吸着量、分解速度、分解経路を明らかにすると共に、トリクロロエチレン分解菌の検索を行い、分解菌の分離に成功したので、本分解菌の性質および分解特性について報告する。

## 2. 土壌への吸着量と土壌中での分解

揮発性有機ハロゲン化合物の土壌中での挙動を明らかにする目的で、これらの化合物の土壌への吸着量と土壌中での生分解速度を調べた。クロロエチレン類は土壌にあまり吸着されないと考えられているが、どの程度吸着するのかは大変興味深い。吸着実験は、図1に示すような68mlのバイアルビンに土壌水溶液を50ml加え(乾土で5g)、これに対象物質を添加し一定時間反応させた。対象物質はヘッドスペースガスクロマト法により分析した。0.5~1日後の対象物質の減少量を土壌への吸着



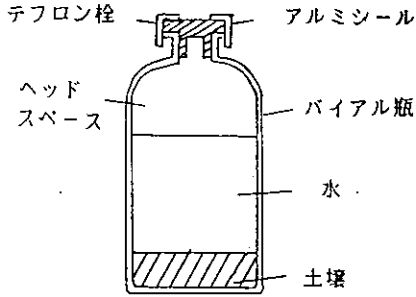


図1 吸着及び生分解試験法

量とし、それ以後の減少量を分解量とした。

土壌への吸着量は希薄水溶液中では、 $X = KC$ なる吸着等温式で表された。Xは土壌への吸着量( $\mu\text{g/g}$ )、Cは水中における対象物質の平衡濃度( $\mu\text{g/l}$ )、Kは吸着分配係数である。水中の平衡濃度が20 ppbの場合、黒ボク土1 gは、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンをそれぞれ $0.06\ \mu\text{g}$ 、 $0.125\ \mu\text{g}$ 吸着した。土壌はクロロエチレン類をかなり保持できるといえよう。

次に各種の土壌を用いて土壌中での生分解速度を調べた。地下5 mの土壌はクロロエチレン類をほとんど分解することができなかったが、図2に示すように、蓮田、水田、畑土壌の表層土を用いた場合には、33日間でテトラクロロエチレンはいずれの土壌でも消失した。特に蓮田土壌で分解が著しく速く、蓮田-1の系では35 ppb濃度のテトラクロロエチレンが12日間で50%分解された。トリクロロエチレンの場合には、テトラクロロエチレンに比べ分解は遅く、畑土壌では40日後でも10%程度しか分解されなかった。しかし蓮田-1の系では18日間で50%が分解された。土壌を滅菌した系では分解が認められなかったことから、分解には微生物が関与しているものと考えられた。

いずれの土壌においても、テトラクロロエチレンの減少に伴い未知のピークが出現した。ガスマス分析の結果トリクロロエチレンであることが判明した。蓮田土壌の場合は生成されたトリクロロエチレンがさらに分解される現象が認められた。

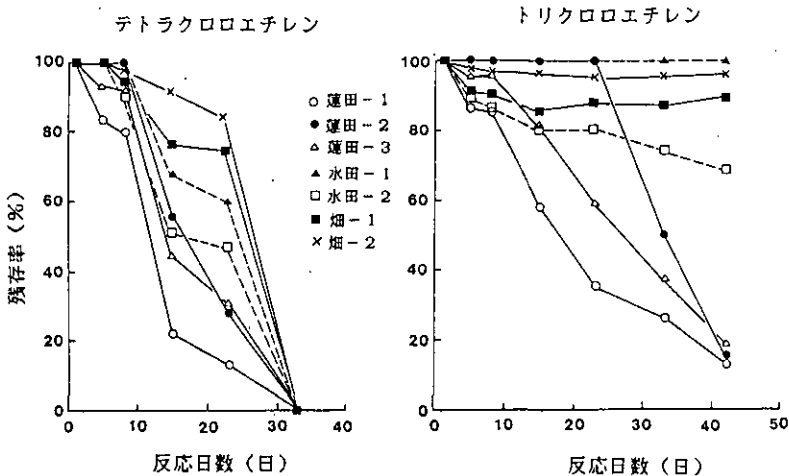


図2 土壌中でのクロロエチレンの分解

蓮田土壌がクロロエチレン類に対し高い分解能を有していることから、分解に及ぼす温度と濃度の影響について調べた。35 ppb のテトラクロロエチレンは 50% 分解するのに 25℃ では 12 日間、10℃ では 38 日間を要した。350 ppb では 25℃ で 50% 分解するのに 17 日間を要した。35 ppm とさらに高濃度のテトラクロロエチレンを用いたところ、分解生産物としてトリクロロエチレンの他に、cis および trans -ジクロロエチレン、それに微量の 1,1-ジクロロエチレンが生成された。テトラクロロエチレンは嫌気条件下では図 3 に示すように、塩素が一つずつ減少する脱ハロゲン化反応によって分解されて行くものと考えられた。

蓮田土壌を分離源として、テトラクロロエチレンを添加して嫌気混合培養系の育成を試みた。その結果、70 ppm のテトラクロロエチレンを 11 日間で 50% 分解する培養系を作り出すことができた。

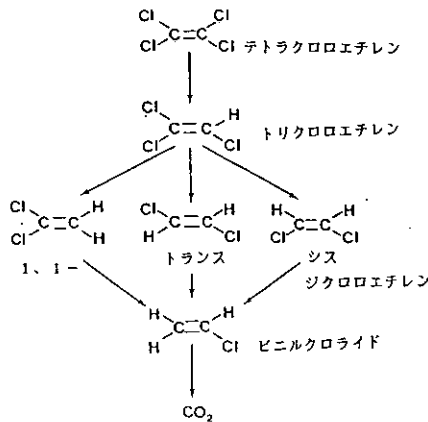


図 3 テトラクロロエチレンの嫌氣的分解経路

### 3. 好氣的生分解

#### 3-1 トリクロロエチレン分解菌の分離

図 1 に示したものと同様の 150 ml 容のバイアルビンに各地より採取した土壌、汚泥 128 サンプルを分離源とし添加し、さらに水層に対し 1 ppm になるようトリクロロエチレンを加え、集積培養を繰り返した。集積培養には完全無機培地を用い、バイアルビン当り 20 ml のメタンを注入した。その結果トリクロロエチレンを良く分解する混合培養系を見出すことができた。混合培養系は、3 日間で 35 ppb のトリクロロエチレンをほとんど完全に分解した。分解と平行して菌の増殖、メタンおよび酸素の減少が認められた。この分解は、嫌気条件下では起こらず、好気で、メタンを添加した場合のみ認められた。そこでこの混合培養系からトリクロロエチレンを分解するメタン資化性菌の純粋化を試みた。メタンを唯一の炭素源として純粋分離を繰り返すことにより、トリクロロエチレン分解能を有する土壌細菌 M 株の分離に成功した。

#### 3-2 トリクロロエチレン分解菌の菌学的性質

M 株の電子顕微鏡写真を図 4 に示す。M 株は運動性を持たないグラム陰性の桿菌で、37℃ では増殖するが 45℃ では増殖できない。メタン及びメタノールを唯一の炭素源として増殖できるが、エタン、

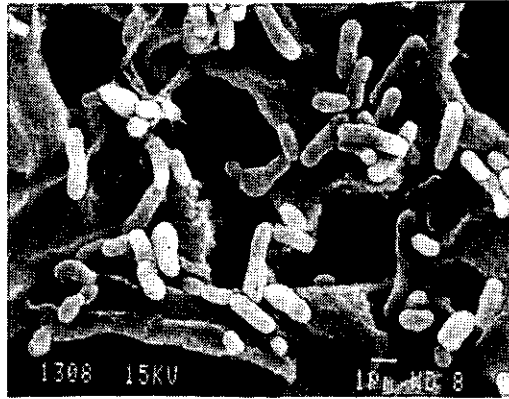


図4 トリクロロエチレン分解細菌(M株)

グルコース等のその他の炭素源では増殖できない。GC含量が64.5%，キノンがQ<sub>8</sub>タイプであること，また脂肪酸組成がほとんどC<sub>18:1</sub>であること，また2-ヒドロキシ酸を有すること，膜構造がタイプIIであることから従来報告されているメタン酸化菌の*Methylosinus trichosporium*に近いものと考えられるが，M株は運動性を有さず，2-ヒドロキシ酸を有するなど種々の点で*Methylosinus trichosporium*とは異なっており，M株は新菌株と考えられる。現在新菌株の命名を検討している。

### 3-3 分解特性

M株のトリクロロエチレンに対する分解経時変化を図5に示す。培養2日目から3日目にかけ，菌の増殖に伴い，トリクロロエチレンの分解，メタン，酸素の減少が認められ，培養3日目には35 ppbのトリクロロエチレンの90%以上が分解された。またM株は10 ppmのトリクロロエチレンを13日間で60%分解でき，世界で最も分解力の高い菌といえる。M株の種々の揮発性有機塩素化合物に対する分解能を図6に示す。M株はトリクロロエチレン，3種の異性体のジクロロエチレン，1,1,2-トリクロロエタン，クロロホルム等の各種の物質を分解できるが，テトラクロロエチレン，1,1,1-トリクロロエタン，四塩化炭素のように炭素原子の持つC-H結合がすべてハロゲンで置換されると分解できない。

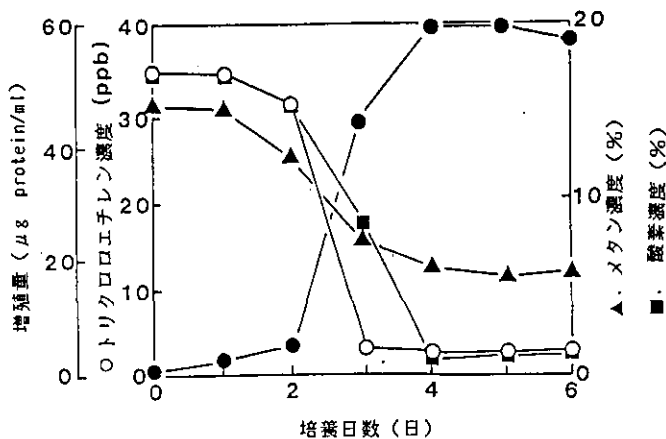


図5 M株によるトリクロロエチレンの分解

<sup>14</sup>Cでラベルしたトリクロロエチレンを用いて、M株および混合培養系におけるトリクロロエチレンの完全分解について検討を加えた。M株では、トリクロロエチレンの11%が炭酸ガスに、混合培養系では39%が炭酸ガスに分解された。M株の分解生産物としてジクロロ酢酸、グリオキシル酸が生成されたが、混合培養系ではこれらの酸の生成は認められなかった。M株のトリクロロエチレンの分解経路を図7に示す。M株はメタンをメタノール、ギ酸に酸化しエネルギーを獲得する一方、メタンをメタノールに酸化するメタンモノオキシゲナーゼの酸化活性によりトリクロロエチレンをエポキシ化し、次いで生成されたトリクロロエチレンオキシドは非生物的にジクロロ酢酸、グリオキシル酸、ギ酸、一酸化炭素に分解されるものと考えられた。

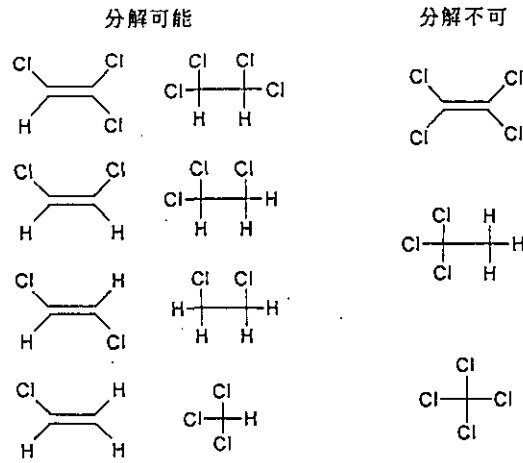


図6 構造と分解性

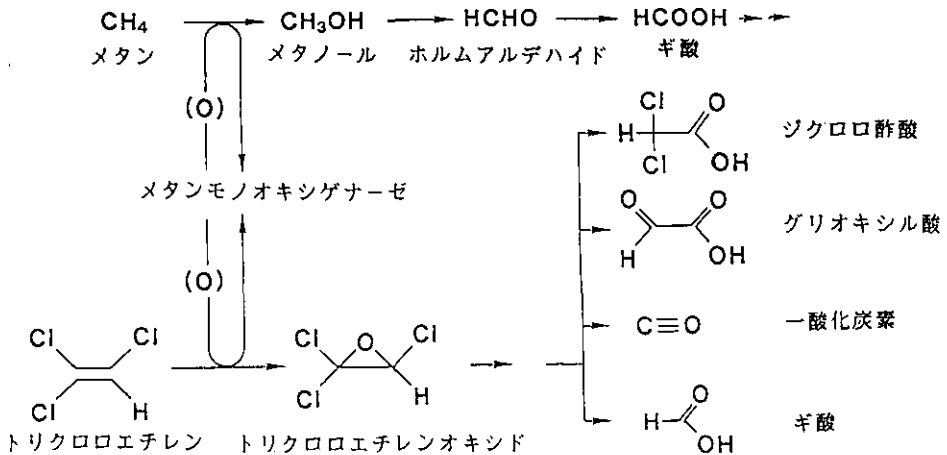


図7 トリクロロエチレンの好氣的分解経路

#### 4. おわりに

トリクロロエチレンおよびテトラクロロエチレンは地下水中ではほとんど分解されないと考えられているが、水田、畑、蓮田等の表層土壌は、これらの物質を分解できる能力を有していること、また、M株のように土壌中には好氣的にトリクロロエチレンを分解する菌が存在していることが明らかになった。今後は、地下水汚染を解消すべく、これらの微生物機能の活用方法を開発していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 矢木修身・松重一夫・内山裕夫・須藤隆一(1987)：揮発性有機ハロゲン化合物の生分解性について，国立公害研究所第2回土壌・地下水汚染シンポジウム報告，69-79.
- 2) 内山裕夫・矢木修身(1988)：揮発性有機ハロゲン化合物の好気分解，国立公害研究所第3回土壌・地下水汚染シンポジウム報告，83-89.
- 3) Uchiyama, H., T. Nakajima, O. Yagi, and T. Tabuchi (1989) : Aerobic degradation of trichloroethylene in high concentration by a methane-utilizing mixed culture, *Agric. Biol. Chem.*, 53, 1019-1024.
- 4) Yagi, O. (1989) : Biodegradation of chloroethene in soil, *Researches Related to the UNESCO's MAB Programme in Japan*, 123-126.
- 5) Uchiyama, H., T. Nakajima, O. Yagi, and T. Tabuchi (1989) : Aerobic degradation of trichloroethylene by a new methane-utilizing bacterium strain M, type II, *Agric. Biol. Chem.* 投稿中。

# 塩化ダイオキシンと塩化ジベンゾフランについて

森田 昌敏 (計測技術部)

**要 旨** 塩化ダイオキシンおよび塩化ジベンゾフランは強毒性物質として知られているが、農業や工業薬品中の不純物として、あるいはゴミの焼却過程、およびパルプ等の塩素処理過程で生ずる。毒性が強いために、超低濃度で測定可能な分析手法が必要であり、高い濃縮効率、分離技術、高分解能質量分析法の組合せにより、絶対量として50 fg ( $10^{-15}$  g)の検出、水中濃度として ppq ( $10^{-15}$ )レベルの検出が可能となった。これを用いて、従来検出が不可能であった、大気中の2,3,7,8-四塩化ダイオキシンの検出が可能となった。また、ゴミ焼却と関連した試料中の塩化ダイオキシン、塩化ジベンゾフランの異性体パターン、ヒト母乳中やハト脂肪中の塩化ダイオキシンの検出が可能となった。

## 1. 塩化ダイオキシンと塩化ジベンゾフラン — その化学構造と毒性

ダイオキシンは人間が生産した史上最強の毒物であるといわれる。その急性毒性はモルモットにおいて  $1 \mu\text{g}/\text{kg}$  の半数致死量であり、代表的毒物である苛性炭酸の約1,000倍ほど強いからであろう。ダイオキシンは、図1に示すように2つのベンゼン環を2つの酸素原子で結びつけたジベンゾ-p-ジオキシンの塩素置換体である。2, 3, 7, 8-位に塩素が置換した四塩素化物(以下 TCDD と略す)が最も毒性が強く、通称ダイオキシンはこの物質をさすことが多い。

ダイオキシンの毒性は、その構造と密接な関係がある(表1)。塩素置換のない、あるいは全部塩素で置換したジベンゾ-p-ジオキシンの毒性は極めて弱く、また同じ四塩素化物でも、1, 3, 6, 8-に置換したものは毒性が弱い。2, 3, 7, 8-の位置に塩素をもつものが極めて毒性が高い。また、ジベンゾ-p-ジオキシン以外でも、図1に示すように2, 3, 7, 8-四塩化ジベンゾフラン、2, 3, 7, 8-

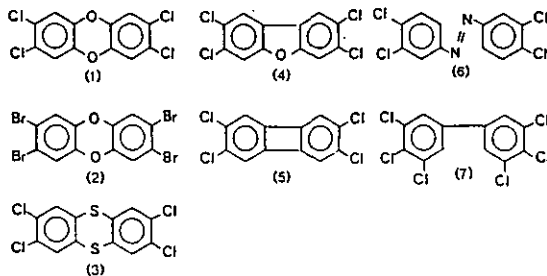


図1 ダイオキシンとその類縁化合物

- (1) 2, 3, 7, 8-四塩化ジベンゾ-p-ジオキシン(ダイオキシン)
- (2) 2, 3, 7, 8-四臭化ジベンゾ-p-ジオキシン
- (3) 2, 3, 7, 8-四塩化ジベンゾチアントレン
- (4) 2, 3, 7, 8-四塩化ジベンゾフラン
- (5) 2, 3, 7, 8-四塩化ビフェニレン
- (6) 3, 4, 3', 4'-四塩化アゾベンゼン
- (7) 3, 4, 5, 3', 4', 5'-六塩化ビフェニル

表1 ダイオキシン異性体

置換位置	半数致死量 ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	
	モルモット	マウス
None		$>50 \times 10^3$ (ip)*
2,8	$>3 \times 10^4$	
2,3,7	29,444	$>3 \times 10^3$
2,3,7,8	0.6-2.0	283.7
1,2,3,7,8	3.1	337.5
1,2,4,7,8	1125	$>5 \times 10^3$
1,2,3,4,7,8	72.5	825
1,2,3,6,7,8	70-100	1250
1,2,3,7,8,9	60-100	$>1440$
1,2,3,4,6,7,8	$>600$	
1,2,3,4,6,7,8,9		$>4 \times 10^4$

四塩化ジベンゾピフェニレン、2, 3, 7, 8-四塩化アゾベンゼン、3, 4, 3', 4'-四塩化ビフェニルなどが同様な毒性を示す。このことからダイオキシンの毒性は、ある一定位置にハロゲン置換基をもつ一定サイズの平面型分子に特有のものと考えられ、それとぴったりのカギとカギ穴の関係にある生体分子と関連して発現するのではないかと考えられている。ダイオキシンと特異的に結合するタンパクの存在は確からしいが、リセプターとしての単離の試みは成功していない。微量のダイオキシンを実験動物に投与したときの主症候は、塩素座瘡(吹出物)、胸腺の萎縮と免疫の低下、肝における薬物代謝酵素(AHH)の誘導である。また致死レベルの投与において、動物は消耗症候群(Wasting Syndrome)という状態になり、1週間ないしは1か月以上かかって死亡していく。

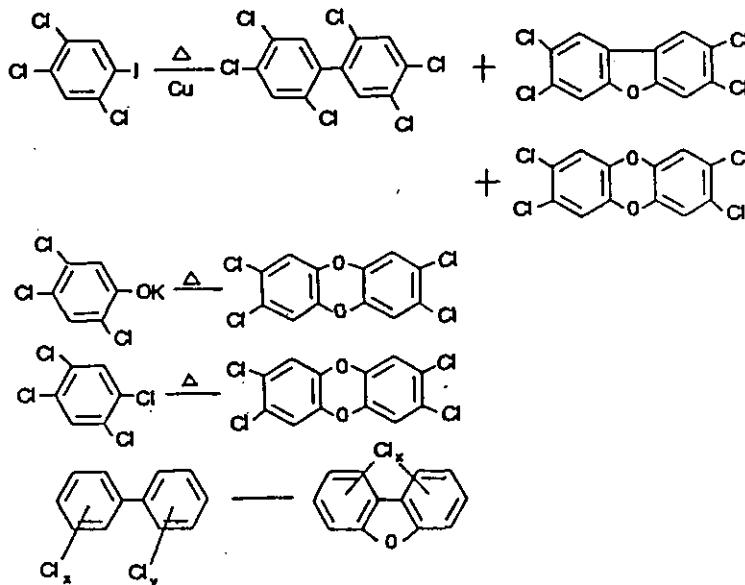
## 2. 塩化ダイオキシンと塩化ジベンゾフランの汚染源

塩化ダイオキシンの汚染源としては ①2, 4, 5-Trichlorophenolの合成過程での生成 ②不純物として生成した2, 3, 7, 8-TCDDの除草剤2, 4, 5-Tへの混入 ③クロロフェノール類合成過程での副生、特にPentachlorophenol(七塩化及び八塩化ダイオキシン) ④塩素化反応により合成する各種工業薬品 ⑤クロロフェノール類を中間体とする各種薬品(例えばCNP) ⑥クロロフェノール、クロルベンゼンの加熱により生成 ⑦ゴミ焼却等の焼却過程 ⑧塩素漂白等が知られている。塩化ジベンゾフランの汚染源として ①PCB合成過程での生成と、②PCBの熱処理過程での生成の他上記の③~⑧の過程が報告されている。

これらの可能な汚染源を正確に把握し、そこからの発生を最小にすることは重要な課題であるが、我が国においては、今までに十分な知見を蓄積したとは言いがたい。その理由としては、塩化ダイオキシンの分析は高度な技術を要すること、安全面に十分な注意を要することなどがあげられる。

有機合成実験の過程で、副生物として生成してしまうことがあり、要注意である。次のような反応が知られている。

一般にクロロフェノール、クロロベンゼン及びその誘導体を用いる合成反応は、条件によってはダイオキシンやフランが生成するので要注意である。



### 3. 塩化ダイオキシンと塩化ジベンゾフランの分析法

塩化ダイオキシンと塩化ジベンゾフランの毒性は極めて高いため、極めて低濃度まで測定することが要求される。例えばEPAは2,3,7,8-TCDDの飲料水基準として10 ppq (ppqはparts per quadrillionの略、ppm  $10^{-6}$ , ppb  $10^{-9}$ , ppt  $10^{-12}$ , ppq  $10^{-15}$ )を提案しており、この分析値を測定するためには、1 ppqの検出下限をもつ分析法が必要である。1 ppqは1 pg/lに相当するので、試水を多量に用いるか、測定機の感度をfgの検出下限をもつまで上げる必要がある。

多量の水から抽出する場合の一法として白石式液液抽出器は便利である(図2)。50-60 ml/minの流速で水を通し、約3日間で200lの水から150 mlのヘキサンに連続的に抽出することが可能である。ヘキサン量を最終的に100  $\mu$ lに濃縮することにより200万倍の濃縮倍率を得る。本法はモノクロロジベンゾフランに対して78  $\pm$  2%の回収率を示しているが、塩素数の多い塩化ダイオキシン、フランに対してはヘキサンよりトルエンのような芳香族系の溶媒がより回収率が良いかもしれない。

検出感度の向上は最近のGC/MSの発展に負うところが多い。GC/MSが普及し始めた1970年半ばと比較して、検出感度は概ね1,000倍向上している。また高分解能質量分析が高感度で可能となったため、選択性の高い検出が可能となった。国立公害研究所で使用している装置の成績について記述する。分析計はHP 5890 J/Jeol SX 102のキャピラリカラムガスクロマトグラフ/高性能質量分析計である。キャピラリカラムとして低極性のDB-1 (30 m  $\times$  0.32 mm  $\times$  0.1  $\mu$ )及び極性のSP-2331 (30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.2  $\mu$ )のカラムを用い、スプリットレス導入を行なっている。分解能10,000でのSIM検出によるクロマトグラム及び検量線を図3、図4に示す。

検出下限は2,3,7,8-TCDDについて、DB-1のカラムで50 fg、SP-2331のカラムで100 fg程度であった。

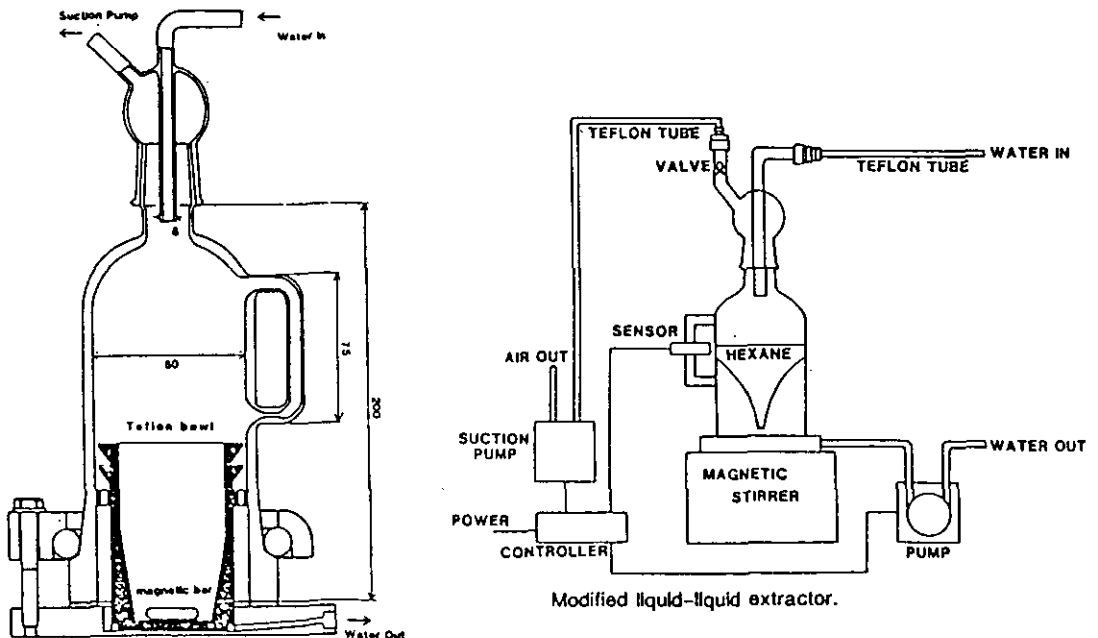


図2



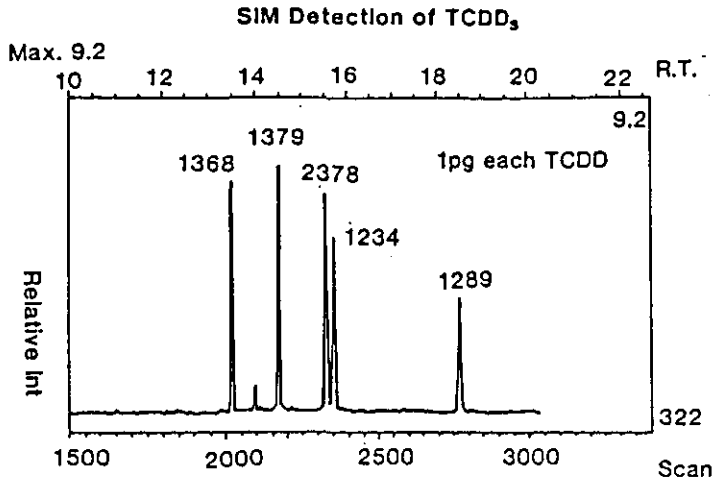


図 3

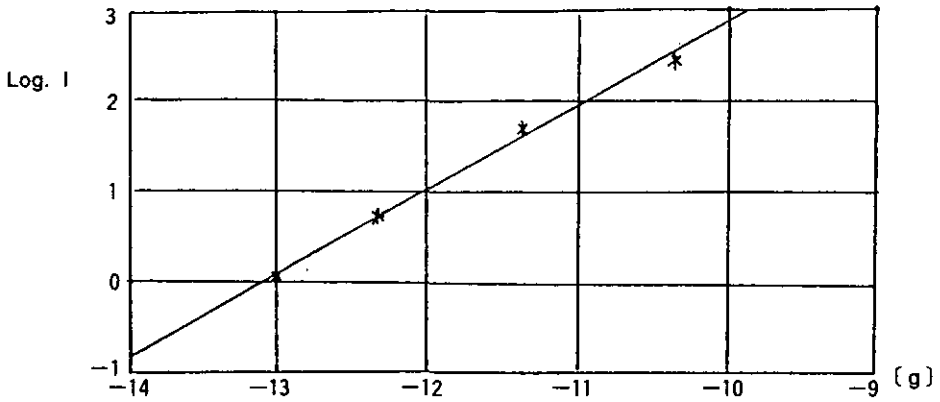


図 4

実試料からの塩化ダイオキシンの検出には抽出-濃縮と GC/MS による検出の間にクリーンアップの操作が必要である。クリーンアップ操作は経験による部分が多い。一般的に用いられる方法は、抽出後内部標準(<sup>13</sup>C ラベルした 2,3,7,8- TCDD, TCDF, OCDD, OCDF 等)を一定量加えた後、硫酸分配法、アルミナカラムクロマトグラフ、ODS-HPLC を組合せたものである。ODS-HPLC よりもシリカゲルカラム(順相系)の方が良いとか、活性炭カラムが生物試料には良いとか、カラムやピペットの材質は安価なガラスでは良くないとかいろいろの情報がある。精度管理の点からは、内部標準の回収率が一定の範囲である場合(例えば 50~120%)の値のみを採用することが提案されている。

精度管理は特に重要である。国立公害研究所では参考試料としてゴミ焼却場フライアッシュ及びフライアッシュ抽出液各 200 本を作製し、精度管理のための試料としている。例えばフライアッシュ試料中の塩化ダイオキシン類の濃度は共同分析に参加した 5 機関での測定値としてとりまとめられている。ちなみに 2,3,7,8- TCDD の測定値は  $0.06 \pm 0.02$  ng/g であった。この参考試料は要望があれば配布している。

高分解能質量分析計が利用できるようになったために、分析法の高感度化と高選択性が進み、従来

検出が不可能であった超微量の分析が可能となった。その一例を大気粉塵について示す。大気中のダイオキシンの大部分は大気粉塵中にあるとされ、サンプリングの簡便さから、ハイボリュウムサンプラーを用いて採取した。国立公衆衛生院の屋上において24時間毎にフィルターをかえて採取したサンプルについて定法により抽出/クリーンアップを行ない、キャピラリカラムGC/高分解能質量分析法により測定した。クロマトグラムは図5に示すように、典型的な焼却由来型の異性体パターンを持つ。従来検出できなかった2,3,7,8-TCDDも検出可能となり、全塩化ダイオキシン量の1/2,000程度であることが明らかとなった。尚、図6に示すように、大気中の塩化ダイオキシン及び塩化ジベンゾフランは季節変動を示し、夏期に低く冬期に高い。モニタリングの実施計画を考える上でサンプリング時間を選ぶ必要がある。

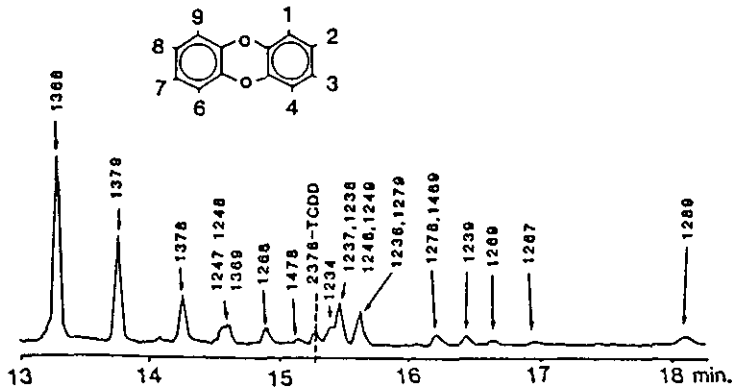
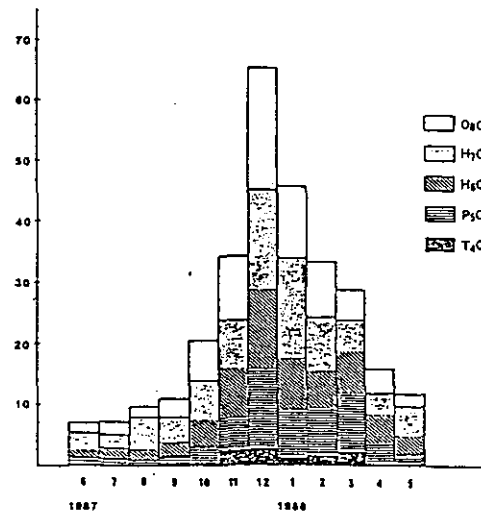


図5

(pg/m<sup>3</sup>) Chlorodibenzofurans in atmospheric particulate matter (pg/m<sup>3</sup>)



pg/m<sup>3</sup> Chlorodioxins in atmospheric particulate matter: (pg/m<sup>3</sup>)

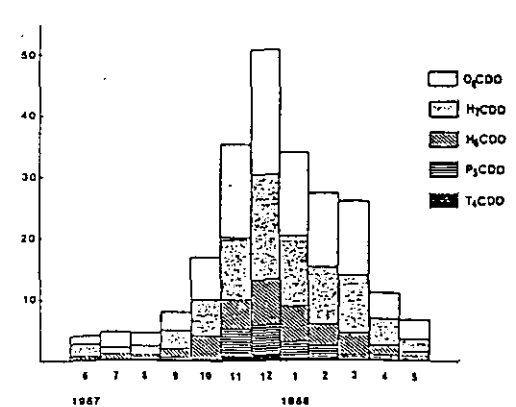


図6

#### 4. 塩化ダイオキシンと塩化ジベンゾフランの環境汚染の現状

前述のように、日本にはこれらの物質を分析し、報告する研究機関の数が少ないために、汚染状況の把握は進んでいない。得られている知識をとりまとめると次のようになる。

塩化ダイオキシン類の汚染が、ゴミ焼却等の燃焼起源によるものであり、大気汚染が主要な汚染ルートであるとすれば、ドバトのような生物種にその残留が高く観察されても不思議ではない。ドバトの単位体重あたりの呼吸量はヒトの数倍あるからである。このためドバトの分析を行なった。その結果はドバトの脂肪組織や肝に残留する2,3,7,8-TCDDの濃度は0.4 pg/g fatのかなり低いことが見い出された。

一方、ダイオキシン類は残留性の高い物質であり、人体への蓄積が懸念される。表2には人体残留レベルについて各国の分析値をとりまとめた。日本における分析値は他の先進工業国とほぼ同じ水準に2,3,7,8-TCDDがあること、また一方、全CDD(主としてOCDD)が他の国に比較してやや高いことを示している。

表2 塩化ダイオキシン及び塩化ジベンゾフランの人体残留 (pg/g 脂肪)

		2, 3, 7, 8-TCDD	2, 3, 7, 8-TCDF	全 CDD	全 CDF
日本	1) 脂肪組織	7	—	2, 300	140
	2) 脂肪組織 N=13	9	—	413	71
	3) 母乳 N=9	5.6	—	1, 700	—
	4) 母乳 プール	13	—	—	—
スウェーデン	5) 母乳 (1972)	—	3	620	90
	5) 母乳 (1985)	—	2	370	40
	6) 脂肪組織 N=31	3	—	—	—
西ドイツ	7) 母乳 N=5	1.9	—	—	—
	8) 母乳 N=92	5	—	—	—
	9) 母乳 N=30	3.4	—	—	—
	10) 脂肪組織	150	—	—	—
南ベトナム	11) 母乳 (1973) N=9	131	—	571	—
	11) 母乳 (1985) N=11	12	—	—	—
	12) 脂肪組織 N=15	28*	—	1, 569*	108*
北ベトナム	13) 脂肪組織 N=9	< 2*	—	143*	33*
ニューヨーク	14) 母乳 N=2	7.3	—	—	—
	14) 脂肪組織 N=8	7.2*	—	—	—
カナダ	14) 脂肪組織 N=46	6.4*	—	1, 062*	61*
1) Kashimoto (1989)	2) Ono et. al. (1986)	3) Morita et. al. (1986)	4) Kashimoto et. al. (1987)		
5) Noren et. al. (in press)	6) Nygren et. al. (1988)	7) Rappe et. al. (1984)	8) Furst et. al. (1987)		
9) Back et. al. (1987)	10) IPCS draft	11) Scbecter et. al. (1987)	12) Rappe et. al. (1987)		
13) Scbecter et. al. (1987)	14) Scbecter et. al. (1987)				

\* 湿重量あたり

# 長距離輸送中に起こる種々の大気汚染の形態

植田 洋 匡 (大気環境部)

**概 要** 夏期晴天日、大気中に放出された汚染物質が陸上を長距離、長時間輸送されるとき、大気反応の種々の段階で起る大気汚染、すなわち、都市型二酸化窒素、光化学オキシダント、硫酸塩・硝酸塩エアロゾル汚染について、その動態を明らかにし、数値モデルを用いて硫酸系、窒素系汚染物質の収支と乾性沈着量(地面への負荷)を検討した。

## 1. はじめに

一次汚染物質である  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、炭化水素類 HC は、輸送中に反応して種々の形態の大気汚染を引き起こす。まず、発生源地域で都市型  $\text{NO}_2$  汚染を、ついで光化学オキシダントや PAN などガス状二次汚染、更に、硫酸塩、硝酸塩、有機酸エアロゾルによる二次粒子汚染、これらが霧雨に取り込まれて液相でさらに反応の進行した湿性大気汚染、酸性雨を引き起こす。これが長距離に及ぶと、越境大気汚染、多国間大気汚染授受問題を引き起こす。本特別研究「雲物理過程を伴う列島規模大気汚染に関する研究」では、これらの大気汚染が同一汚染物質の種々の大気反応段階で現れる形態であるとして、大規模観測と数値モデルによってこれらの統一的な解釈と予測を試みている。本報告では、陸上を渡る大気汚染長距離輸送について、その経路に沿って起きる種々の形態の大気汚染に関する研究結果を概説する。

## 2. 大気汚染長距離輸送

広域大気汚染の輸送のメカニズムとしては、従来、気圧傾度風(季節風など)による長距離輸送が考えられてきた。北欧、北米でみられるもの(たとえば Cox et al.<sup>1)</sup>)はそれである。本研究では、局地風あるいは種々の局地風が合体して形成される大規模風によって担われる長距離輸送が見出された<sup>2,3)</sup>。この種の長距離輸送は、暖候期、高気圧に覆われた晴天日に発生するもので、気圧傾度風がむしろ弱い場合に起こる。実際、本州中央部においては、日本海側を覆う大規模風系と関東から甲信地方までを覆うような太平洋側の大規模風系が形成される。

大気汚染物質はこの大規模風系のなかを長距離輸送される。関東甲信地域の場合、まず、東京湾沿岸の大規模発源地域で排出された汚染物質は、前日の陸風時、湾上に集積されて汚染気塊を形成する。この汚染気塊は翌朝再び上陸して大規模発生源の上空を通過する際に新たな汚染物質のフィードを受けながら、日中関東平野を北上し、関東北部で進路を西に変え、夕刻関東山地を越えて中部山岳地域内部に侵入する。その経路はほぼ JR 信越線に沿ったもので、大規模風系の中を 200 km 以上をわたって輸送される。関東甲信地方ではこれが暖候期の最も典型的な輸送パターンである。このことは、図 1 の高濃度オキシダント発生時間数の分布からもわかる。中、低緯度地域では局地風が日常的な風であることから、この種の長距離輸送は同地域の最も重要な輸送機構であると考えられる。

また、この種の長距離輸送は深刻な大気汚染をもたらす機構として重要である。それは、局地風が

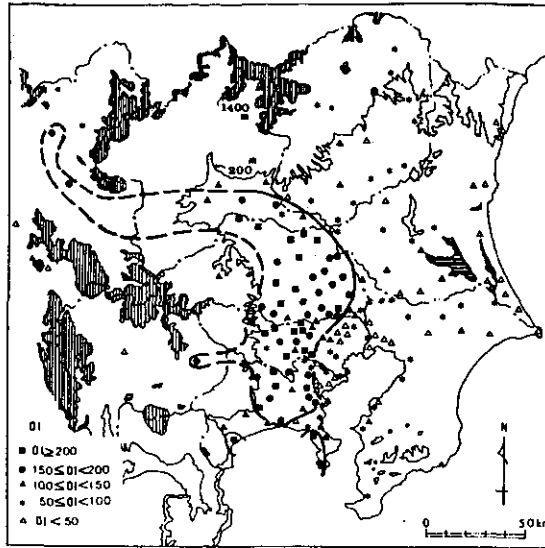


図1 オキシダント指数(OI ;  $O_3 > 60$  ppb)の分布.

地形に固有のものであるために、大気汚染の輸送経路が必然的に固定化するためである。さらに、これが晴天時に発生するため光化学反応が急速に進行するためである。その結果、輸送経路にあたる地域は深刻な二次汚染に恒常的にさらされることになる。

大規模観測では、汚染気塊の輸送経路に沿って起る種々の形態の大気汚染の測定を実施した。一方、数値モデルを用いて、この広域大気汚染のシミュレーションを行なった。数値モデルは、素過程として輸送、拡散の他に、反応、粒子化、沈着を含んだオイラー型のモデルである。このなかで種々の形態の大気汚染を総合的に予測するためには、高度な反応モデルが必要であり、ここで用いたのは Atkinson ら<sup>5)</sup>のもので53の反応種、112の素反応を含む。ガスからエアロゾルへの変換率(粒子化)の予測では  $HNO_3 - NH_3 - NH_4NO_3$  系などの気液固平衡が成立していると仮定した。また、沈着量の予測では各々の汚染物質について一定の沈着速度を仮定した。

### 3. $NO_2$ 、光化学 $O_3$ 、PAN 問題

輸送経路に沿っての各地点での光化学  $O_3$  濃度の変化の様子を図2に、 $NO_2$  と  $NO_3^-$  濃度を図3に示した。自動車、工場から排出される  $NO_x$  は主に  $NO$  (90 vol%) であるが、この  $NO$  は日中光化学反応によって生成される  $O_3$  や過酸化ラジカル  $RO_2$  との反応で急速に  $NO_2$  に転換される(図3)。大気中の  $NO_2$  の総量は、反応生成される  $NO_2$  と直接排出される  $NO_2$  ( $NO_x$  の10%)の和であり、全  $NO_2$  濃度は大規模発生源地域で高く、その下流域でピークに達する。その後、 $NO_2$  濃度は急激に減少して、代って PAN、ガス状硝酸、硝酸塩エアロゾルが生成される。夜間でも、残存する  $O_3$  や  $RO_2$  と  $NO$  との反応により  $NO_2$  は生成される。このときには  $NO$  が過剰状態にあるため、 $NO_2$  の反応生成は  $O_3$  や  $RO_2$  の供給量によって決り、反応生成される  $NO_2$  濃度は30-40 ppb(冬期では20-30 ppb)と推定される。通常、 $NO_x$  ( $NO_2 + NO$ )濃度は車走行量と拡散能に強く依存し、8-10時と21-24時の二つのピークを持つ。したがって、直接排出の  $NO_2$  濃度も同じ時間帯にピークを持つが、反応生成の  $NO_2$  の寄

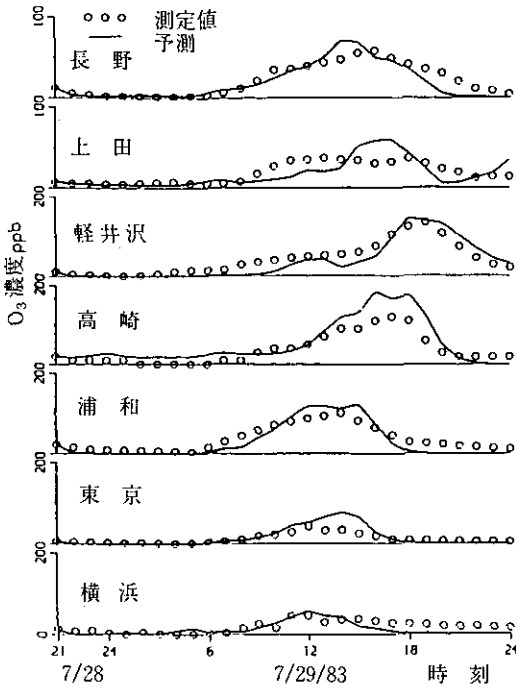


図2 各地点でのO<sub>3</sub>濃度の時間変化.

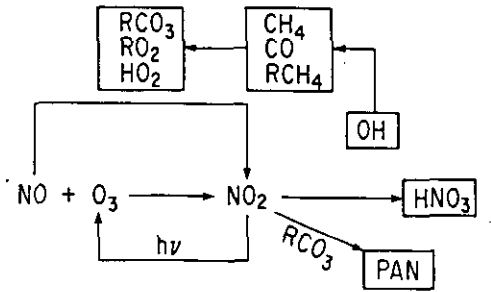


図3 窒素系汚染物質の反応.

与のために、NO<sub>2</sub>濃度のピークは夜間はNO<sub>x</sub>のピーク時間の2-3時間程度前に現われ、朝のピークは2時間程度遅れる。

光化学O<sub>3</sub>は、NO<sub>2</sub>が光解離でNOに還るときに生成する酸素原子と、酸素分子との反応によって生成される。上記のNOからNO<sub>2</sub>への酸化過程とこの光解離過程とで一つのサイクルをなしており、この反応サイクルを1回通る毎にO<sub>3</sub>は1分子ずつ生成される(図4)。一方、NO<sub>2</sub>はOHラジカル、RCO<sub>3</sub>と反応して硝酸、PANをそれぞれ生成する。図2に示したように、大都市域ではO<sub>3</sub>濃度は正午頃ピークに達する。しかし、この汚染気塊が内陸地域に輸送される際には反応がさらに進んで、O<sub>3</sub>濃度は浦和、高崎で100 ppbを越え、碓氷峠(軽井沢)を越える頃には150 ppbにも達する。

PANもO<sub>3</sub>とほぼ同一の速度で生成され、その濃度はO<sub>3</sub>濃度の1/10程度に達する。図2、4には数値予測の結果も合わせて示した。都市型NO<sub>2</sub>、光化学O<sub>3</sub>の挙動はほぼ忠実に再現されている。また、一次汚染物質であるNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>および各種炭化水素(パラフィン、オレフィン、芳香属、図省略)の挙動も再現できている。

#### 4. 硫酸塩、硝酸塩エアロゾル

NO<sub>2</sub>はOHラジカルと反応して硝酸を生成する(図3)。SO<sub>2</sub>も主にOHラジカルとの酸化反応でH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>になる。生成したH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、HNO<sub>3</sub>はNH<sub>3</sub>ガスやNaCl粒子等と反応して硫酸塩、硝酸塩エアロゾルになる。第一次近似として、汚染気塊の輸送中に汚染物質の新たな供給がなく、SO<sub>2</sub>→SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>およびNO<sub>2</sub>→NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の変換過程はOHラジカルとの擬一次反応で近似できるとすると、観測結果から変換速度が求められる。NO<sub>2</sub>の変換はO<sub>3</sub>の生成とほぼ平行して進行し、平均変換速度は14.7% h<sup>-1</sup>

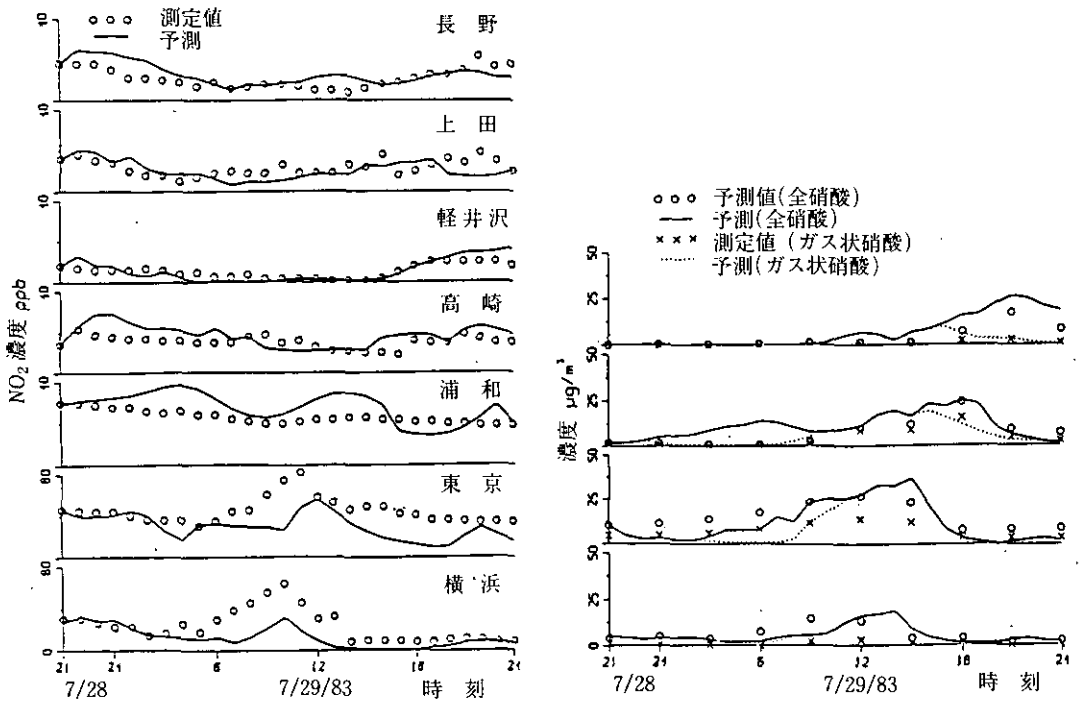


図4 各地点でのNO<sub>2</sub>、硝酸濃度の時間変化。

になる。これは浦和付近ではほぼ完了する。それに反してSO<sub>2</sub>の酸化は緩やかで、変換速度は3.7%h<sup>-1</sup>となり、NO<sub>2</sub>の1/4程度にすぎない。これらの値は米国西岸地域での観測値とほぼ一致する。また、炭化水素成分の濃度減衰から推定されるOHラジカル濃度(2 ± 0.5 × 10<sup>-7</sup> ppm)と、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>とOHとの反応速度定数を用いて計算した変換速度も上記の値とほぼ一致する。

浦和、高崎では汚染気塊の流入により顕著な濃度上昇を示す物質はHNO<sub>3</sub>であり、軽井沢ではNO<sub>3</sub><sup>-</sup>であった<sup>6)</sup>。全硝酸性化合物(HNO<sub>3</sub> + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、図3)の濃度変化をみると更に顕著な濃度上昇を示す。このような内陸地域での硝酸性化合物の増加は光化学汚染気塊の輸送時の大きな特徴である。HNO<sub>3</sub>は単体としてはガス状であるが、NH<sub>3</sub>があると次の平衡関係が成立する。



いま、NH<sub>3</sub>、HNO<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>濃度をそれぞれx、y、zとすれば、粒子化したNH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>濃度zは解離定数Kを用いて次式で表される。

$$[\text{NH}_3][\text{HNO}_3] = (x - z)(y - z) = K \dots (2)$$

解離定数Kは気温に強く依存し、気温10℃の減少(相対湿度一定条件)でおおよそ1桁減少する。また、相対湿度RHの変化に対しても非常に敏感で、RHが潮解限界の相対湿度RH<sub>deliq</sub>以下のときにはNH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>は固体粒子として存在する。RHがそれを越えると潮解して液滴になる。このときの解離定数KはRH > RH<sub>deliq</sub>で急減しRH=94%で1桁、RH=98%でさらに1桁減少する。それに伴って式(2)中のNH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>エアロゾル濃度zは増大する。したがって、汚染気塊の流入時山岳地域では、気温が低下し、相対湿度が上昇するため平衡関係がエアロゾル側に片寄って粒子化が進み、二次粒子汚染、視程障害が起きる。図3では、この粒子化過程が数値モデルでよく再現されていることがわかる。

## 5. 窒素系汚染物質、硫黄系汚染物質の収支と沈着量

輸送、反応、粒子化、沈着など汚染物質の一連のライフサイクルの詳細な検討は数値計算を用いて行った。窒素系汚染物質の場合には、硝酸生成について気相反応のほか、気液固平衡が存在すること、ガス状硝酸の沈着速度(2 cm/s)が他の汚染物質よりはるかに大きいこと( $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ の5倍、硫酸塩、硝酸塩の10倍)が特徴である。さらに、沈着機構として、地表に直接沈着するものほかに硝酸が大粒子に沈着し、これが地面に沈着するという除去機構を付加して考える必要がある。長距離輸送発生日の24時間を通じての窒素系汚染物質の収支を図5に示す。種々の反応経路を経て、 $\text{NO}_x$ は硝酸、硝酸塩に転換され、1日でその過半が地面に沈着する。その沈着機構としては、硝酸が大粒子に沈着し、それが地面に沈着する機構が支配的である。

硫黄系汚染物質の計算は2つのケースについて行なった。一つは $\text{SO}_2$ の気相の均相反応だけを考えた場合で、他は不均一反応も考慮に入れた場合である。前者の予測計算では、硫酸塩濃度の日変化やピーク位置の移動をとらえることができるが、全体的に濃度は過小評価になる。後者のように浮遊粒子表面での $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$ 変換過程も考慮に入れると観測結果との一致は改善される。24時間を通じての硫黄系汚染物質の収支を図5に示した。排出された $\text{SO}_2$ の約20%は $\text{SO}_2$ の形のまま地表へ沈着し、残りの $\text{SO}_2$ は主に不均一反応により硫酸塩に変換される。しかし、硫酸塩の形で地表沈着するのは $\text{SO}_2$ のそれのわずか1/100で、硫黄系汚染物質の大半は硫酸塩の形で大気中に残留する。これが窒素系汚染物質と大きく異なるところである。即ち、最終生成物である硝酸塩、硫酸塩エアロゾルはともに粒子としての乾性沈着速度が極端に小さく、これの除去は主に雨、霧などの湿性沈着によるしかない。しかし、硝酸塩の場合、これが平衡関係でガス状硝酸に戻って大量に沈着除去されるため、1日のサイクル中で過半が地表へ沈着除去されてしまう。このため、 $\text{SO}_x$ の排出量は $\text{NO}_x$ 排出量の1/4程度であるにもかかわらず、硫酸塩は硝酸塩と同じ濃度レベルを保持する。

これらの二次汚染物質は地面に沈着して植物、土壌、湖沼などにインパクトを与える。これらに対する負荷量の目安として、広域大気汚染の発生した日の24時間にわたっての乾性沈着量を図6に示す。二次汚染物質の沈着量の最大になる位置は汚染物質の反応性によって異なるが、いずれも大規模発生源地域ではなく、大気反応で濃度が増した下流地域である。

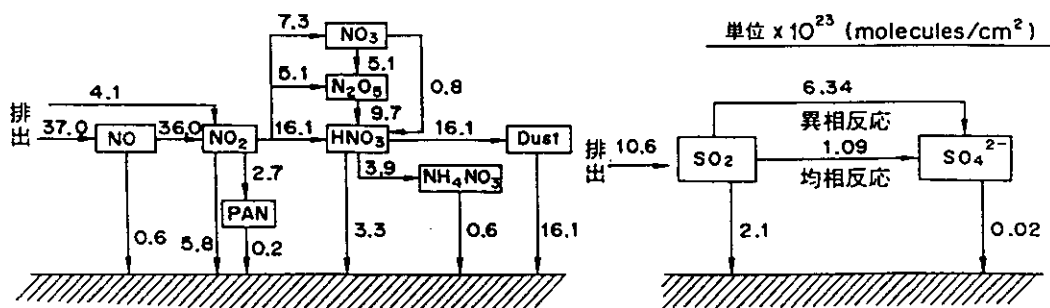


図5 一日を通しての窒素系、硫黄系汚染物質の収支。



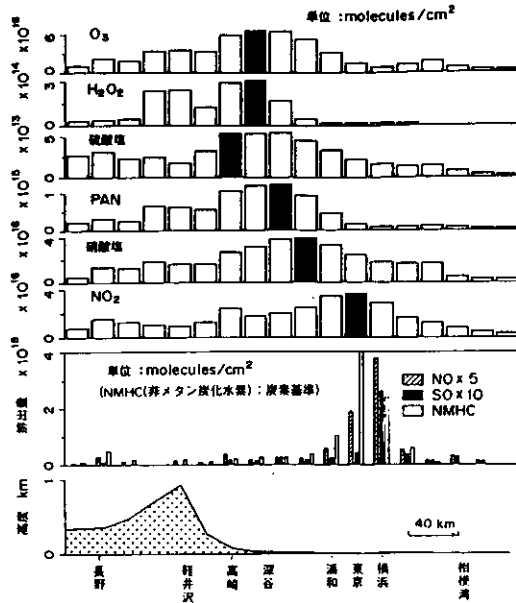


図6 一日当りの乾性沈着量の分布.

## 6. おわりに

大都市、工業地帯からの大規模汚染ブルームが長距離輸送される場合、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  は日中は数時間の寿命しかなく、数10 km 下流ではほとんど消失してしまう。しかし、実際には反応によってガス状の $\text{HNO}_3$ に、さらには反応最終生成物である硝酸塩、硫酸塩エアロゾルなどの浮遊粒子状物質SPとして大気中に1日～数週間に亘って滞留する。このように広域大気汚染では、短寿命の汚染物質と長寿命のものが混在している。また、この種の長距離輸送では輸送経路がほぼ固定していることから、その経路に沿って大きな負荷を与える。ここでは、酸性雨問題にまで触れることができなかったが、今後は、酸性雨も含めて環境への負荷に対する影響を詳細に調べていく必要がある。また、広域大気汚染では反応機構が非常に複雑で非線形であるため、一次汚染物質である $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、炭化水素の排出削減効果は光化学 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、酸性降下物問題によってそれぞれ異なり、ある汚染対策のための排出削減が、他の汚染問題に逆効果になる場合がある。今後は、広域大気汚染を統一的に捉えながら、個々の汚染問題に対する対策を考えていく必要がある。

## 引用文献

- 1) Cox, R.A., et al. : Nature, 255, 118-121(1975).
- 2) Kurita, H., Sasaki, K., Muroga, H., Ueda, H. and Wakamatsu, S. : J. Clim. Appl. Met., 23, 1153-1172(1985).
- 3) Ueda, H., Mitsumoto, S. and Kurita, H. : J. Clim. Appl. Met., 26, 510-519(1988).
- 4) Ueda, H. : J. Clim. Appl. Met., 22, 312-321(1983).
- 5) Lurmann, F.W., Lloyd, A.C. and Atkinson, R. : J. Geophys. Res., 91, 10905-10936(1986).
- 6) Sasaki, K., Kurita, H., Murano, K. and Ueda H. : Atmos. Environment, 22, 310-320(1988).

# 大気汚染物質による肺細胞傷害

—そのフリーラジカル誘起作用と腫瘍化との関連について—

嗟 峨 井 勝 (環境生理部)

**概要** 二酸化窒素( $\text{NO}_2$ )やオゾン( $\text{O}_3$ )のような大気汚染物質は、主にそのフリーラジカル作用を介して、肺細胞を傷害する。ここでは、 $\text{NO}_2$ や $\text{O}_3$ による肺細胞傷害の指標としての過酸化脂質の生成と $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ の腫瘍誘起能との関連について考察を加えたい。

## 1. はじめに

近年、日本人のがんによる死亡率のうち、肺がんによる死亡率が著しく増加(図1)してきており、この増加の主な原因は喫煙や食品によるものと考えられている。しかし、疫学的研究による肺がんの死亡率に関する都鄙間比較では、大気汚染の高い大都市の死亡率が田園地方の死亡率より高いとか、喫煙では扁平上皮がんが多く生じるはずであるが、現実には喫煙の相対リスクが最も低い腺がんの割合が増加してきているという報告があり、喫煙や食品だけでは肺がん死亡率の増加を説明できない点がある<sup>1)</sup>。このようなことから、大気汚染の影響が検討課題とされている。

ここでは、フリーラジカルを誘起するという反応性の故に細胞や組織に様々な傷害を引き起こすことが知られている $\text{NO}_2$ と $\text{O}_3$ の肺細胞傷害について、特に生体膜傷害としての過酸化脂質の生成と腫瘍誘起作用について考察する。

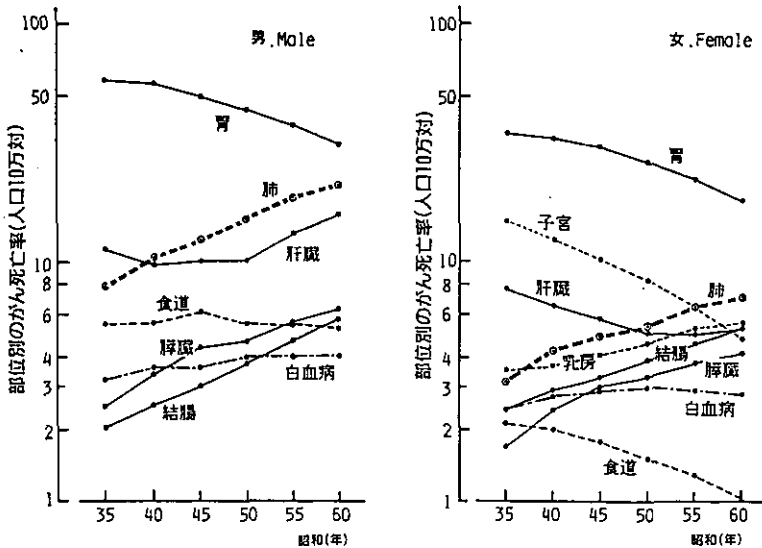


図1 日本人のがん死亡率の年次推移

## 2. 生体内でのフリーラジカルの生成

フリーラジカルは極めて不安定で反応性が高い。水( $\text{H}_2\text{O}$ )に放射線を照射すると、 $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{H}$ の点線の所で開裂し、 $\text{H}$ と $\text{O}$ との間の電子を1個ずつ分けあった $\text{H} \cdot$ と $\cdot \text{O} \cdot \text{H}$ ( $\cdot \text{OH}$ と略す)に分解する。

この不対電子を持ったH・が水素ラジカルであり、・OHはヒドロキシラジカルと呼ばれる。放射線の生物傷害作用は主にこの・OHによる細胞の膜傷害や遺伝子傷害に帰因するものである。なお、フリーラジカルは一旦生じると連鎖反応で次々に新しいラジカルを生じる点が他の化学反応とは異なる。

このようなフリーラジカルは図2に示すように、放射線の他に、酸素、過酸化物質、金属、紫外線、たばこ、ショック、炎症、虚血・再灌流およびNO<sub>2</sub>やO<sub>3</sub>のような大気汚染物質など様々な要因によって生じ、それが生体成分の脂質、タンパク質、酵素、あるいは核酸などを攻撃して、細胞や組織を損傷し、様々な疾病や老化あるいはがん化等を引き起こすと考えられている。

生体反応に関りの深いラジカルには様々な分子種があり、反応性も異なる。最も反応性が高いラジカルは・OHと次式によって過酸化脂質(LOOH)の分解によって生じるアルコキシラジカル(LO・)である。

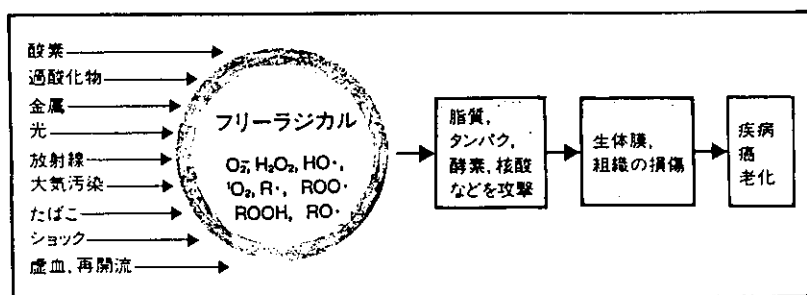
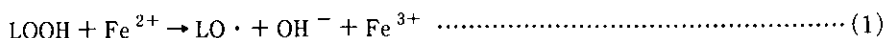


図2 フリーラジカルによる生体の障害

### 3. 二酸化窒素あるいはオゾンによるフリーラジカルの生成

#### 3.1 低濃度二酸化窒素の慢性暴露による過酸化脂質の生成

我々は先に、0.04 ppm, 0.4 ppm および 4 ppm NO<sub>2</sub>をラットに27カ月間連続暴露し、肺の過酸化脂質が暴露期間と暴露濃度に依存して増加することを報告した<sup>2)</sup>。

#### 3.2 低濃度二酸化窒素とオゾンとの複合慢性暴露による過酸化脂質の生成

(i)0.05 ppm O<sub>3</sub>, (ii)0.05 ppm O<sub>3</sub> + 0.04 ppm NO<sub>2</sub> および (iii)0.05 ppm O<sub>3</sub> + 0.4 ppm NO<sub>2</sub>をラットに22カ月間暴露した時の肺の過酸化脂質生成の経時変化を調べた。(i)群は全期間を通じて対照群との間に相意差はなかった。これに対し、(ii)群と(iii)群では9カ月までは暴露期間と暴露濃度に依存して増加し、両群とも対照群との間に有意差を示した。しかし、その後過酸化脂質レベルは低下し、13カ月目では対照群と同レベルとなり、その後18~22カ月目では対照群のレベル以下に低下する傾向が認められた<sup>3)</sup>。図3には、ラットに0.04 ppm NO<sub>2</sub>, 0.4 ppm NO<sub>2</sub> および 4 ppm NO<sub>2</sub>を9カ月連続暴露した時のTBA法による肺の過酸化脂質濃度と、今回のO<sub>3</sub>およびNO<sub>2</sub> + O<sub>3</sub>の9カ月間暴露による肺の過酸化脂質濃度を相対値として示した。この結果より、O<sub>3</sub>の共存により肺の過酸化脂質は相乗的に増加することが示された。さらに、両者の経時変化からNO<sub>2</sub> + O<sub>3</sub>暴露による過酸化脂質のピークレベルに達する時間はNO<sub>2</sub>単独暴露の場合より著しく短縮され、複合暴露の影響の強さが示された<sup>3)</sup>。

一方、生体内にはラジカルや過酸化脂質による傷害から細胞や組織を防御する為の抗酸化性防御系

の酵素や抗酸化剤が存在している。防御系の酵素としては superoxide dismutase (SOD), glutathione peroxidase (GPx) 系の酵素あるいは catalase 等が知られており, 生体内に存在する抗酸化剤としては, 還元型グルタチオン(GSH), ビタミンE(VE), ビタミンC(VC), セレン(Se)などが知られている。

上記 NO<sub>2</sub> + O<sub>3</sub> の慢性実験において, 防御系酵素活性は(i)~(iii)群とも, いずれの時期にも対照群との間に有意差を示さなかった。しかし, 肺の抗酸化剤の GSH と VE 濃度は 9 カ月目でのみ有意に増加し, oxidative stress に対する防御機能が作動していることが示唆されたが, 13 カ月目では対照レベルに低下し, その後 18 カ月目から 22 カ月目にかけては対照群より有意に低下していた<sup>3)</sup>。

VE と GSH は次式によって, 生体内で生じたフリーラジカル(RO・として示す)を消去(scavenge)することによって, 生体を傷害から防御している。それ故, NO<sub>2</sub> + O<sub>3</sub> の長期暴露により, GSH や VE 濃度が低下すると, フリーラジカル消去能が低下し, 脂質の過酸化以外の傷害反応をも引き起こすことになり, その一つとして DNA などに傷害を及ぼす可能性が考えられる。

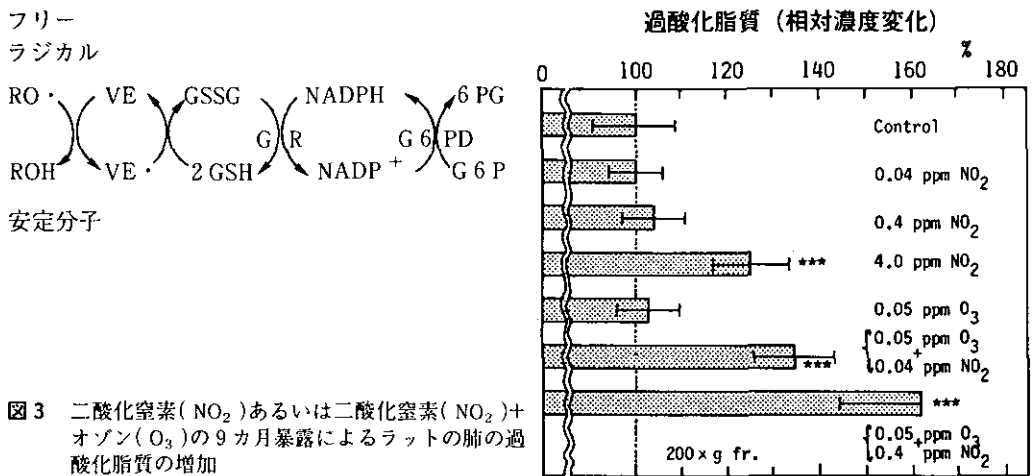


図3 二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)あるいは二酸化窒素(NO<sub>2</sub>) + オゾン(O<sub>3</sub>)の9カ月暴露によるラットの肺の過酸化脂質の増加

#### 4. 二酸化窒素やオゾンと腫瘍化との関連について

##### 4.1 過酸化脂質と腫瘍化との関連を示唆する根拠について

前項で, NO<sub>2</sub> や NO<sub>2</sub> + O<sub>3</sub> の長期間暴露によって肺の過酸化脂質が増加すること, あるいは GSH や VE 濃度が低下すること(このような状態を oxidative stress と言う)を示した。それでは, このような過酸化脂質の増加や抗酸化剤の低下がどうして腫瘍の問題と結び付くのか, その根拠となる知見を表1に個条書きにまとめた<sup>4)</sup>。また, 図4には表1の(1)のデーターとして, 各国別のヒトの乳がん死亡率と脂肪摂取量との間の相関図を示した。両者の間には驚くほどの高い相関が認められ, 脂肪摂取に伴う過酸化脂質の生成がその一因であることが示唆されている。さらに, この報告では, 脂肪摂取量と肺がん死亡率との間にも相関が認められたと述べられている。

##### 4.2 二酸化窒素あるいはオゾンが腫瘍の発生を修飾すると考えられる可能性について

NO<sub>2</sub> や O<sub>3</sub> には, フリーラジカルや過酸化脂質を生成するという事実の他にも, 腫瘍の発生に関与すると考えられるいくつかの可能性が報告されている(表2)<sup>1)</sup>。

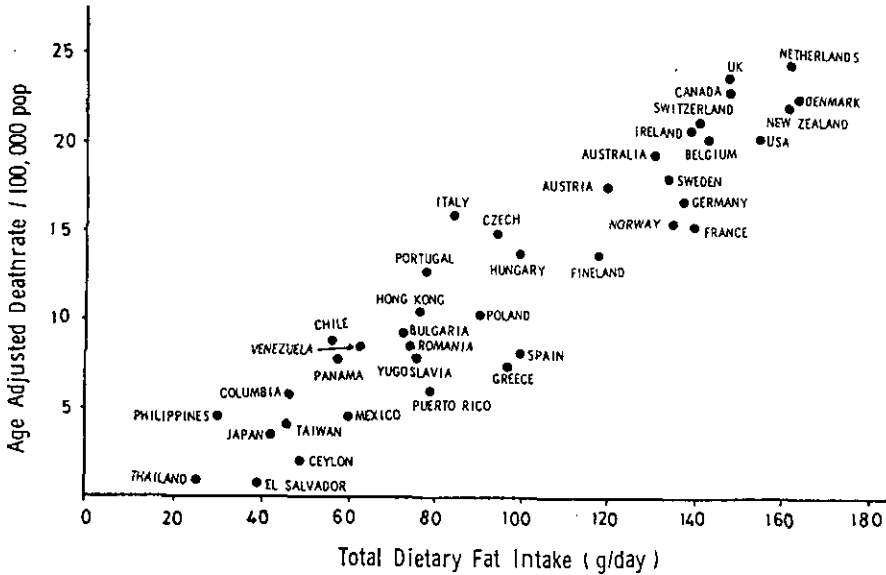


図4 39カ国の乳癌による死亡率の脂肪摂取量との関係

表1 過酸化脂質と発癌性との関連を示す根拠<sup>1)</sup>

- (1) ヒトの乳癌等と脂肪摂取量との間に高い相関がある(肺、大腸、膵臓も)。
- (2) マウスやラットに高脂肪食を与えておいて発癌物質を投与すると発癌率高まる。
- (3) 実験動物にビタミンEやC、セレン等抗酸化剤を与えておくと、発癌率低下。
- (4) 過酸化脂質そのものが発癌性を示すという報告が多い。
- (5) 過酸化脂質の分解物のマロンジアルデヒド(MDA)にも発癌作用あり。
- (6) 過酸化脂質はDNA切断能あり。
- (7) 過酸化脂質は腫瘍促進作用を示す(ODC活性の増加)。
- (8) 過酸化脂質が発ガン物質を活性体にするところがある。

表2 NO<sub>2</sub>やO<sub>3</sub>が肺がんの発生を修飾すると考えられる可能性について<sup>1)</sup>

(1) NO <sub>2</sub> とO <sub>3</sub> は、腫瘍促進効果を示すといわれる prooxidant states (Oxidative stress) を引き起こす	(7) NO <sub>2</sub> は生体内でNO <sub>2</sub> <sup>-</sup> になり、ニトロソアミンを生成する可能性がある(たとえば、硫酸ミストなどとの複合吸入による酸性条件下では)。
(2) NO <sub>2</sub> とO <sub>3</sub> は肺の脂質過酸化レベルを高め、この脂質過酸化物は染色体異常誘起能(Clastogenic action)やプロモーション作用を示すことが知られている	(8) NO <sub>2</sub> は生体内で発がん性ニトロソアミンの生成を抑制しているチオプロリンを消費する
(3) NO <sub>2</sub> とO <sub>3</sub> は肺細胞の増殖を亢進(DNA合成を増加)させる	(9) O <sub>3</sub> は肺に過形成層を生成する
(4) NO <sub>2</sub> とO <sub>3</sub> はプロモーションマーカーのODC活性やポリアミン含量を増加させる	(10) O <sub>3</sub> が実際にマウスの肺に腫瘍を生成するという報告がある
(5) NO、NO <sub>2</sub> は次式により過酸化水素と反応して・OHを生成し、この・OHがDNA障害を起こす $\text{NO} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \cdot\text{OH} + \text{HNO}_2$ $\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \cdot\text{OH} + \text{HNO}_3$	(11) O <sub>3</sub> は呼気中あるいは大気中のエチレンと容易に反応して、次式のように発がん性の知られているホルムアルデヒドと過酸化水素を生じる $\text{O}_3 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCHO} + \text{H}_2\text{O}_2$
(6) O <sub>3</sub> の生物学的効果は放射線作用に似ているといわれている。これはオゾンが水溶液中で・OHを生ずることによる。	(12) O <sub>3</sub> もNO <sub>2</sub> も小細胞性肺がんの前駆細胞である肺の神経分泌細胞の増生を修飾する

しかしながら、これらの事実はいまだ間接的根拠であり、腫瘍の発生と直接結び付けうるものではない。また、NO<sub>2</sub>が肺の過酸化脂質を増加させ、その過酸化脂質が腫瘍を発生させる作用を持つこ

とが知られてはいるが、NO<sub>2</sub>を生涯暴露しても、それだけで、呼吸器に腫瘍を発生させたという実験的研究はこれまで全くない。我々も、ラットを用いて0.04~4 ppm NO<sub>2</sub>の生涯暴露実験を2度行う機会を得たが、呼吸器に腫瘍を発生した動物を見いだしたことはない。一方、O<sub>3</sub>暴露では腫瘍を発生したという報告がある。それら実験的研究報告を表3<sup>1)</sup>にまとめた。それにしても、O<sub>3</sub>の結果もまだ決定的事実とするには問題点が残されている。いわんや、O<sub>3</sub>やNO<sub>2</sub>への慢性暴露とヒトの肺がんを直接結び付けうる証拠はまだ何もない。しかし、ヒトは常に様々な化学物質に取り囲まれて生活しており、その中には微量ながらも発がん物質が含まれている可能性を否定することはできない。そこで我々は、表2<sup>1)</sup>と表3<sup>1)</sup>に示された事実から、NO<sub>2</sub>の腫瘍発生に及ぼす影響がもし有るとしても、イニシエーション段階ではなく、むしろプロモーション段階であろうと考え以下の実験を行った。

#### 4.3 二酸化窒素慢性暴露による肺腫瘍発生促進効果の有無の検討

実験は6週令のWistar系雄ラットにイニシエーターとしてDHPN〔N-bis(2-hydroxypropyl) nitrosamine〕を、それだけでは肺に腫瘍がなるだけ生じない量(0.5g/kg B.W)を腹腔内に1回だけ投与し、翌日からNO<sub>2</sub>に連続17カ月間暴露した。実験群は、(i)対照群、(ii)0.04 ppm NO<sub>2</sub>群、(iii)0.4 ppm NO<sub>2</sub>群、および(iv)4 ppm NO<sub>2</sub>群の4群とし、各群とも60匹づつ用い、このうちの40匹にDHPNを投与し、残り20匹には生理食塩水を投与した。

生理食塩水投与ラットではどの群にも肺腫瘍は認められなかった。DHPN投与ラットの結果は表3の最下段に示した。0.04 ppm群および0.4 ppm群では対照群と同様に、各々40匹中に1匹ずつのAdenoma(良性腫瘍)が生じていただけであったが、4 ppm NO<sub>2</sub>暴露群では5匹にAdenomaが認められ、そのうちの1匹にはAdenocarcinoma(悪性腫瘍)が認められた。しかし、この腫瘍発生率(12.5%)は対照群の腫瘍発生率(2.5%)との間に統計的有意差はなかった。なお先に、この実験と類似の12カ月暴露実験の結果が報告されているが、12カ月間暴露ではどの群にも全く腫瘍の発生は認められていない。

表3 O<sub>3</sub>あるいはNO<sub>2</sub>による肺の腫瘍発生に関する実験的研究報告のまとめ

濃 度	暴露期間	使用動物(種)	暴露群の腫瘍発生率	対照群の腫瘍発生率	平均腫瘍発生数(暴露群/対照群)	発表年
1 ppm O <sub>3</sub>	15カ月	CxAF系マウス	85%	38%	1.9個/1.5個	(1962)
2.5±0.3 ppm O <sub>3</sub>	120日(2h/d)	Swiss-Webster系マウス	クララ細胞由来の不可逆性微小結節性変化を検出			(1974)
4.5 ppm O <sub>3</sub>	75日(2h/d)	Swiss-Webster系マウス	肺臓腫瘍が6~8%の動物に発生(有意差検定なし)			(1970)
0.31±0.01 ppm O <sub>3</sub>	103hr/w×6カ月	A/J系マウス	53%	40%	0.85個/0.60個	(1985)
0.50±0.02 ppm O <sub>3</sub>	102hr/w×6カ月	A系マウス	38%	18%	0.60個/0.20個 <sup>a)</sup>	(1985)
0.4 ppm O <sub>3</sub>	18週(8hr/d, 7d/w)	A/J系マウス	9%	12%	0.09個/0.13個	(1987)
0.8 ppm O <sub>3</sub>	18週(8hr/d, 7d/w)	A/J系マウス	38%	12%	0.55個/0.13個 <sup>a)</sup>	(1987)
0.4 ppm O <sub>3</sub>	18週(8hr/d, 7d/w)	Swiss-Webster系マウス	0%	3%	0個/0.03個	(1987)
0.8 ppm O <sub>3</sub>	18週(8hr/d, 7d/w)	Swiss-Webster系マウス	3%	3%	0.03個/0.03個	(1987)
10 ppm NO <sub>2</sub>	6月(6hr/d, 5d/w)	A/J系マウス			0.45個/0.4個	(1986)
0.04 ppm NO <sub>2</sub>	17カ月(連続)	Wistar系ラット <sup>b)</sup>	2.5%	2.5%	(1匹/40匹)	未発表
0.4 ppm NO <sub>2</sub>	17カ月(連続)	Wistar系ラット <sup>b)</sup>	2.5%	2.5%	(1匹/40匹)	未発表
4 ppm NO <sub>2</sub>	17カ月(連続)	Wistar系ラット <sup>b)</sup>	12.5%	2.5%	(5匹/40匹) <sup>c)</sup>	未発表

a) 対照群に対して有意差あり。

b) すべてのラットはNO<sub>2</sub>暴露開始前日にN-bis(2-hydroxypropyl) nitrosamine (DHPN) (0.5g/kg)を一回腹腔内投与されている。うしろのカッコ内の数字(1/40, 等)は40匹中の腫瘍動物数を示す(本文参)

c) 5匹のうちの1匹は悪性腫瘍(腺がん)であった。

## 5. おわりに

NO<sub>2</sub>の17カ月暴露の今回の腫瘍に関する結果は対照群との間に有意差を示さなかったものの、腫瘍発生率が5倍に増加していたことから、NO<sub>2</sub>は弱いながらも腫瘍の促進(プロモーション)効果を持つ可能性が示唆された。しかし、最終的には、発がん実験に関する各種ガイドラインに述べられている如く、24カ月あるいはそれ以上の暴露期間の実験結果に待つべきであろう。更に、ラット以外の動物種の結果と共に、ラットの雌雄の実験も望まれる。

また今回、NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>暴露により、NO<sub>2</sub>単独暴露の場合より過酸化脂質生成率が高く、かつGSHやVEのような生体内の抗酸化剤濃度が低下するなど腫瘍化が起りやすい方向に傾くこと等が明らかになったことから、O<sub>3</sub>とNO<sub>2</sub>との複合暴露の効果の検討も重要と思われる。また、近年最も注目を集めている粒子状物質との複合効果なども検討する必要がある。

一方、図5に示すように、フリーラジカルや過酸化脂質は発がんのイニシエーションとプロモーションの両過程に重要な役割を役しており、かつこれらは大気汚染物質にかぎらず、放射線、光、タバコ、食物、化学物質など様々なものからも生じることが知られている<sup>4)</sup>。このようなことから、フリーラジカル誘起能を調べることで腫瘍化のリスク評価を行ないうる方法論の研究も進められるべきと考える。

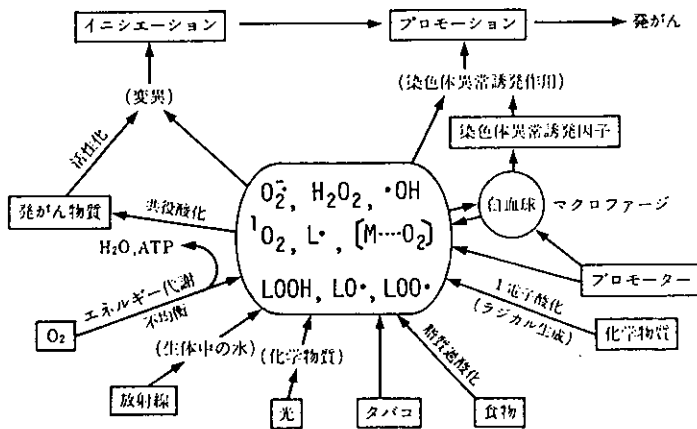


図5 発がんにおけるフリーラジカル、過酸化脂質の作用<sup>4)</sup>

## 参考文献

- 1) H.P.Witschi, 嵯峨井勝: オゾンおよび二酸化窒素と肺がん —— 最近の知見と問題点 ——, 大気汚染学会誌, **24**, 1~20(1989)
- 2) Sagai, M. & Ichinose, T.: Lipid peroxidation and antioxidative protection mechanism in rat lungs upon acute and chronic exposure to nitrogen dioxide. Environ. Health Perspective, **73**, 179~189(1987)
- 3) Sagai, M. & Ichinose, T.: Biochemical effects of combined gases of nitrogen dioxide and ozone. IV. Changes of lipid peroxidation and antioxidative protective systems in rat lungs upon life span exposure. Toxicology (in press).
- 4) 永田親義: 過酸化脂質と病態 1. 変異原および発がん。「過酸化脂質と生体」(内山充, 松尾光芳, 嵯峨井勝 編著) 学会出版センター pp. 255-288(1985)

# 環境科学における植物バイオテクノロジー

田 中 浄 (生物環境部)

**概 要** 近年、植物バイオテクノロジーの進展は目覚ましい。私たちは大気汚染ガスの植物影響を探っている間に幾つかの大気汚染ガス抵抗性に関与する酵素を見出した。ここでは、抵抗性酵素遺伝子を単離調製し、植物細胞に導入して、大気汚染ガス抵抗性植物を開発する研究の現況ならびに植物培養細胞から二酸化硫黄抵抗性植物を作成した結果について紹介する。

## 1. はじめに

新しいバイオテクノロジー技術が科学者ばかりではなく広く一般の人に注目されるきっかけになったのは極めて微量にしか存在しない動物の有用タンパク質成分(インシュリン、インターフェロンら)を微生物で大量に生産できるという画期的な研究が世に発表されたことによると思われる。この技術は医薬品の生産ばかりではなく、植物育種の分野でも新展開をもたらす技術として大いに期待されている。植物バイオテクノロジーの農業利用については耐病性や除草剤抵抗性作物、高タンパク質大豆の育成などが有名である。本研究所では大気環境浄化あるいは指標植物の作成にバイオテクノロジー技術を利用している。

ここでいう植物バイオテクノロジーとは i) 外来遺伝子を植物細胞に導入、ii) 異種細胞を融合させる、iii) 細胞を薬剤処理して有用細胞を選抜し、細胞を培養し、最終的には有用遺伝子を獲得した植物個体を再生する技術をさしている。植物の細胞は動物などのそれと違ってただ一つの細胞から細胞塊を経て完全な植物個体になるという育種に不可欠ないわゆる全能性という重要な性質を備えている。今回は i) の方法で外来遺伝子を導入してオゾン抵抗性植物を作る試みの途中経過と ii) の方法で二酸化硫黄耐性植物作成に成功した例について述べる。

## 2. 遺伝子導入法によるオゾン抵抗性植物作成の試み

遺伝子導入法により有用植物を作成する時は図1のような研究ステップを踏むのが常道である。我々は、長年に渡って大気汚染ガスの植物影響を研究してきた。オゾンや二酸化硫黄に接触した植物葉において活性酸素という極めて強い毒性種が生成蓄積し、これが植物葉の白色化や枯死の原因になっていることを明らかにした。活性酸素は殆ど全ての生物で生命維持に不可欠な代謝を行うために少量ではあるが生成している。しかしながら、生物が正常に生活できているのは自身がこの活性酸素を解毒する多様な物質からなる防御系を備えているからである(図2)。大気汚染ガス接触時の植物被害が生じる原因として植物体が備えている解毒能力を越える活性酸素が蓄積することが考えられる。

タバコ9品種についてオゾン抵抗性と数種の活性酸素防御系酵素の関係について検討した。温室で0.3ppm オゾンに接触したタバコの中で明らかにベルW3という品種がオゾンに弱いという結果がえられた。活性酸素防御系酵素の中でグルタチオン還元酵素(GR)活性が低かった(表1)。この結果は



- 1) 現象の分子レベルでの解析
- 2) 鍵となる酵素 タンパク質の単離、抗体の調製
- 3) 遺伝子の単離と遺伝子組替え
- 4) 遺伝子導入と発現
- 5) 植物体再生

図1 遺伝子導入法による有用植物作成の手順

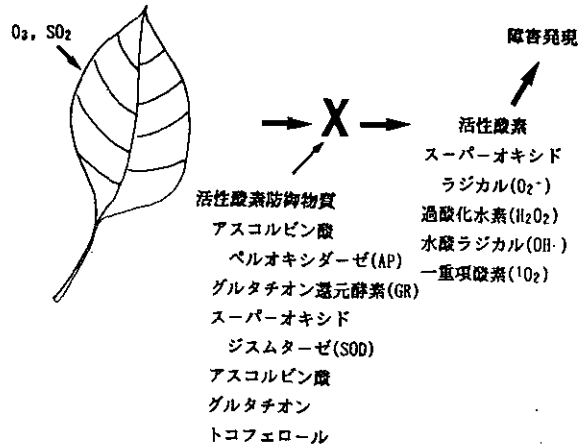


図2 オゾン、二酸化硫黄接触時の植物障害発現における活性酸素と活性酸素解毒物質の関係

表1 9品種タバコの活性酸素防御酵素含量

品種名	アスコルビン酸	グルタチオン	スーパーオキシド
	ペルオキシダーゼ (相対値)	還元酵素 (相対値)	ジスムターゼ (相対値)
N. Tabacum サムスン	0.271	0.067	0.844
キサンチ	0.298	0.072	0.858
キサンチ NC	0.315	0.073	1.733
ブライトイエロー	0.260	0.062	0.867
ホワイトバレー	0.293	0.077	0.870
ベル W3	0.309	0.039	2.092
ベル B	0.330	0.078	2.130
SR1	0.308	0.084	3.614
N. glutinosa L.	0.212	0.083	1.090

GRがオゾン耐性と関係していることを示している。比較的低濃度のオゾン(0.07 ppm)に接触したホウレンソウのGR活性を経時的に測定したところ4日目まで約2倍に増加した(図3)。この結果は植物がオゾンの毒性(実際は活性酸素の毒性)から身を守るためにGRという生体防御酵素活性を高めたと推定される。これらの結果は植物体中のGR活性を人工的に調節することによりオゾンに対して感受性の異なる植物を自由自在に作ることはできないかという考えを誘起した。このようなことを可能にさせる技術がバイオテクノロジーである。ある有用酵素の遺伝子を導入した植物を作るまでには多くの分子生物学的な技術と多大な労力が必要とされる。図4に植物の細胞に導入できる形態に有用遺伝子を改変するまでの研究過程をAに、組み変えた遺伝子を導入された植物細胞から植物個

体を作る過程を B に記した。現在、GR 遺伝子を大腸菌で大量に調製するところまで進行中であり、外来遺伝子を導入した植物細胞から植物個体を再生する技術に関しては我々の研究室ですでに修得済みなのでまもなく GR に富んだ植物が(おそらくオゾンに強い)作られると確信している。

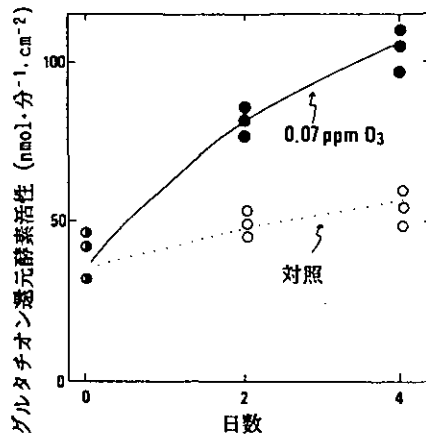


図3 低濃度オゾン接触時のホウレンソウ  
グルタチオン還元酵素の増加

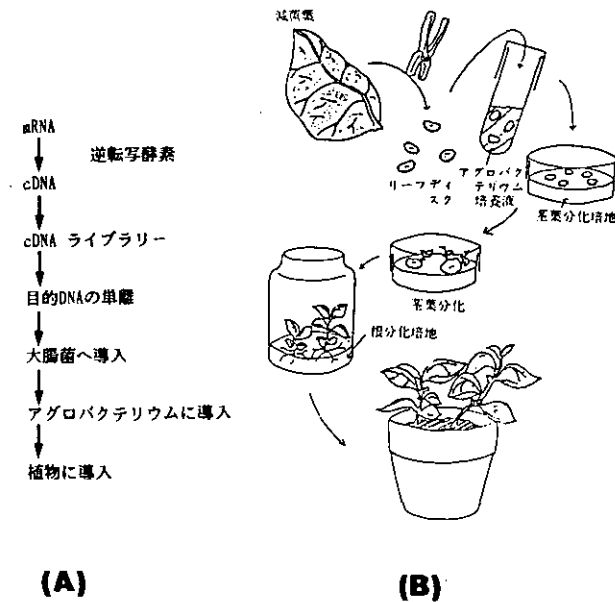


図4 遺伝子組替え植物作成の手順

### 3. 薬剤処理による二酸化硫黄抵抗性植物の作成

植物はいうまでもなく細胞が集合したものである。細胞膜で囲まれた細胞は細胞壁を介して他の細胞と連結している。細胞壁の構成成分であるペクチンをペクチナーゼという酵素で分解すると細胞は一つ一つバラバラになる。植物細胞は先にも述べたようにたった一つの細胞からまた元の植物にまで戻るといふ育種上優れた特徴を持つ。また細胞化することにより、微生物などと同様に原始化し、まわりの環境変化に遺伝子レベルで適応しやすくなる。このような性質を利用して植物細胞から種々の有用植物が作成されている(耐塩性、耐寒性、重金属耐性、農薬耐性、耐乾性、病原菌耐性)。この方法は細胞をシャーレ上で薬剤や放射線などの突然変異処理し、有用細胞を選抜し、試験管内で細胞を培養、幼植物化し、それから温室内で一般の植物と同様に鉢植えで育てるといふ手順で行う(図5)。それ故に実験スペースが狭くて済む、また抵抗性因子が特定されなくても抵抗性植物ができるという大きな長所を有する。

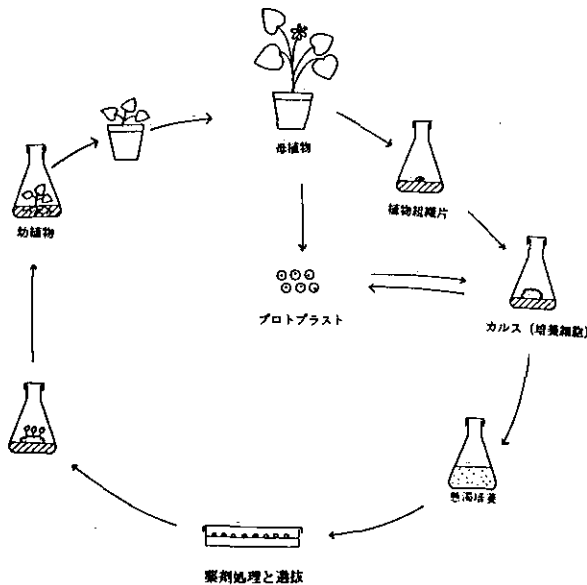


図5 植物培養細胞からの有用植物作成の手順

我々が実際に二酸化硫黄抵抗性植物を作成した手順について述べる。二酸化硫黄に接触した植物は葉の脱色、枯死などの障害を受けるがこの直接の毒性種が活性酸素であることは前項でも述べた。植物の二酸化硫黄抵抗性に活性酸素解毒物質の中のスーパーオキシドジスムターゼ(SOD)という酵素が関わっていることもすでに我々の研究で明らかになっていた。さて、植物培養細胞から二酸化硫黄抵抗性植物を作る時に培養細胞をどの様な薬剤で処理するかが重要な問題となった。除草剤として知られるパラコート(2,4-D)の植物を枯らす機構はよく研究されていてやはり活性酸素の植物体内濃度が上昇することで説明されている。また、微生物が低濃度のパラコートに接触した時に活性酸素毒性から自己防御するために生体内の活性酸素解毒酵素であるSODを新たに合成することも知られていた。タバコ培養細胞をパラコート処理し生き残る細胞を再びパラコート処理するという操作を繰り返した。最後まで生存した細胞は数百倍のSODを含んでいた。この細胞を培養し、タバコ植物を再生した。こ

のタバコは除草剤パラコート(Paraquat)の葉面散布に対して対照タバコよりも明らかに強かった。このパラコート耐性タバコから種子を採取し温室では種後育成した。対照タバコと共に人工光温室で二酸化硫黄に接触させたところ、明らかにパラコート耐性タバコが二酸化硫黄に対しても強いことが判明した(図6)。ここで作成した二酸化硫黄抵抗性タバコ葉内の活性酸素解毒酵素含量を調べたところ、やはりSODが高いことが明らかになった(表2)。興味あることにこの抵抗性タバコは対照タバコよりも二酸化硫黄を多く吸収することが明らかになった(図7)。この二酸化硫黄抵抗性タバコを二酸化硫黄発生源の工場近辺で育成することにより周辺大気(オゾン、二酸化チオソ、光化学オキシダントのパーオキシナイト

表2 パラコート耐性及び対照タバコの活性酸素防御酵素含量

	対照 (葉位)			パラコート耐性 (葉位)		
	5	8	11	5	8	11
アスコルビン酸 ペルオキシダーゼ (単位・mg タンパク質)	0.12	0.16	0.16	0.12	0.12	0.14
グルタチオン還元酵素 (単位・mg タンパク質)	0.019	0.018	0.024	0.022	0.022	0.029
グアヤコール ペルオキシダーゼ (単位・mg タンパク質)	0.012	0.015	0.037	0.017	0.020	0.038
スーパーオキシド ジスムターゼ (単位・mg タンパク質)	0.89	1.28	2.77	2.34	3.53	5.42

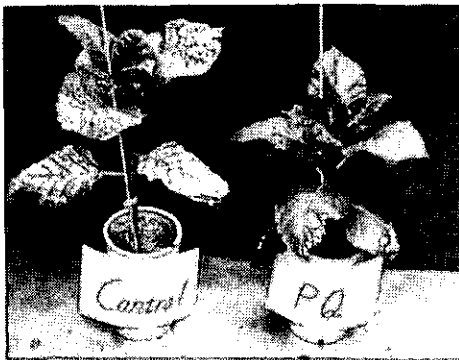


図6 パラコート耐性培養細胞から作成したタバコ植物の二酸化硫黄抵抗性

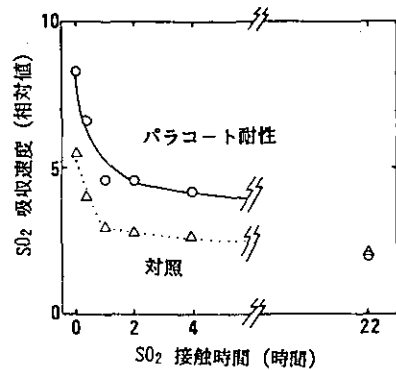


図7 パラコート耐性培養細胞から作成したタバコ植物の二酸化硫黄吸収

レート)抵抗性植物を作成する研究も行なっている。植物細胞をこれら汚染ガス中で培養し、生き残る細胞を選抜し、個体再生して抵抗性植物を作ろうとするものである。

#### 4. おわりに

植物バイオテクノロジーの技術で大気汚染ガス抵抗性植物を作る研究について述べてきた。抵抗性遺伝子を植物細胞に導入して植物個体を再生する方法は次のような点で優れている。i)従来の育種法では考えられないような有用植物作成の可能性がある, ii)目的とする性質だけを改変できる, iii)理想的には必ずその性質を改変できる, iv)導入した遺伝子の産物(酵素やタンパク質)の生理学的意味が明らかになる。現在、遺伝子導入法は数々の技術的な難しさの故に実用的な成果があまり出ていないが、近い将来、人類、社会に多大の恩恵をもたらすであろう画期的な技術であることは間違がないと考えている。培養細胞の薬剤処理は非常に現実的な抵抗性植物作成法であると思われる。しかし、この方法は試行錯誤的な要素を多く含んでおり、研究者のセンスや技術に強く依存している。何れにしろ、古典的育種法と新しいバイオテクノロジー技術を効率よく組合せて、有用植物を作成するのが我々の使命であると考えられる。現在、地球レベルで多くの環境問題が起きつつある。例えばオゾン層破壊による紫外線の生物影響、化石燃料の燃焼による地球温暖化や森林の伐採などの人為的な自然破壊による砂漠面積の増大ら。また、二酸化硫黄や二酸化チッ素などの大気汚染が北極上空にまで広がっているという事実やこれらの汚染ガスが雨に溶けた時に起こる酸性雨の生態影響ら。このような環境浄化、公害緩和に植物が重要な役割を果たすであろうことは論を待たないし、悪環境耐性(浄化)植物を新しいバイオテクノロジー技術で開発して行くことは科学者の大きな使命の一つであると思われる。

#### 参考文献

- 1) 田中 浄(1988):公害ガス,蛋白質 核酸 酵素(別冊, 活性酸素), 33, 2824-2829.
- 2) Tanaka, K., Furusawa, I., Kondo, N., Tanaka, K. (1988): SO<sub>2</sub> - tolerance of tobacco plants regenerated from paraquat - tolerant callus, *Plant Cell Physiol.* **29**, 743-746.
- 3) Tanaka, K., Saji, H. and Kondo, N. (1988): Immunological properties of spinach glutathione reductase and inductive biosynthesis of the enzyme with ozone, *Plant Cell Physiol.*, **29**, 637-642.

# 都市居住と環境ストレス—騒音苦情からのアプローチ

兜 真 徳 (環境保健部環境心理研究室)

**要 旨** 都市生活に伴う騒音・振動, 悪臭, 大気中粒子状物質, 刺激物質, 混み合い(crowding)現象, 食料・水中の汚染物質, 醜い景観あるいは居住状況などによる精神・心理的影響はその重要性の認識にもかかわらず, 評価が非常に困難とされてきた。環境要因による精神・心理的影響を評価し, 対策を考えるためには, 人間の生活レベルにおける“不快感・不満・愁訴( ANNOYANCE )”, すなわち精神・心理的ストレスの人類生態学的研究が重要である。ここでは, 昭和63年度から開始された「環境ストレス」特研の中で行われている一連の研究成果を中心に都市圏における生活環境騒音による精神・心理的ストレスの構造とその数量的把握法について考える。

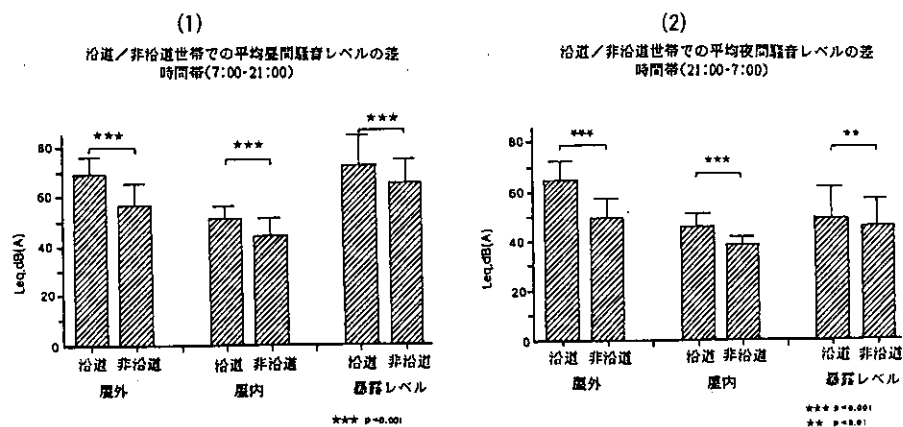
## 1. 都市居住に伴う生活騒音暴露状況について

精神・心理的ストレスの構造あるいは数量的把握にとって, 騒音暴露状況がまず問題となる。個人がどの程度騒音に暴露されているかは, 小型軽量の騒音集積計を用いて等価騒音レベル( Leq, dB ( A ))により測定・表現できる。例えば, 各10分の Leq (10分)を単位とし, これらを組み合わせることにより24時間までの任意の時間帯のエネルギー平均レベルを算出することが可能である。ここで, 今年度の調査対象地域での調査から, 沿道・非沿道地域別に, 計10世帯での昼間( 7 : 00—21 : 00 )と夜間( 21 : 00—7 : 00 )の屋外・屋内の騒音レベルと個人の騒音暴露量を同時に測定した結果を比較検討したのが(図1)である。沿道世帯とは, 大都市圏内の主要幹線道路に面している世帯であるが, 昼夜を問わず, いずれのレベルも沿道側に有意に高い傾向が明かであり, 交通騒音の寄与を示唆している。(図2)では, さらに沿道・非沿道地域別に95名の主婦の生活時間帯毎の Leq (10分)の平均値および Leq (24時間)を比較しているが, 同様に多くの生活時間帯および24時間全体でも暴露レベルが交通騒音により有意に上昇していることが示された。EPAは, 聴力保全の観点から1生涯暴露されてもほぼ影響のない暴露レベルを Leq (24時間)=70としているが, (図2)の分布は非沿道地域でもこれを超える場合が約半数, また, 主要道路沿道ではさらに交通騒音によって増加していることを予想させる。ただし, 暴露レベルが沿道の影響を取り除いても工業地域, 住宅地域で異なっている傾向もあり, さらに居住形態などを含め詳細に検討中である。

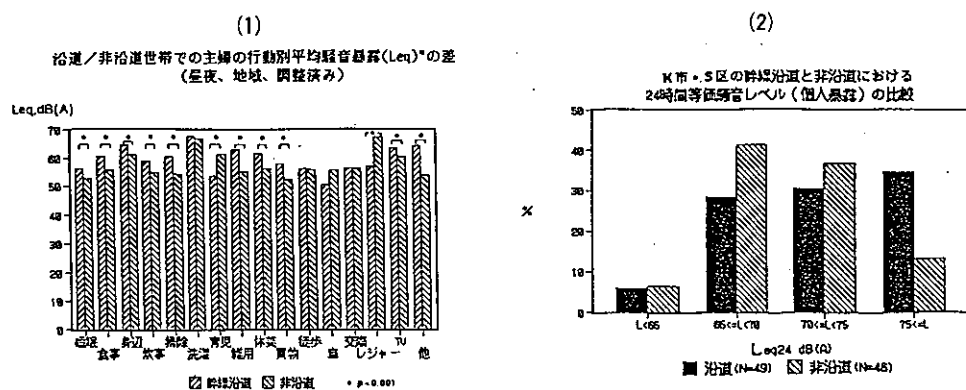
## 2. 生活騒音の直感的なうるささとその特徴

また, 生活騒音による精神・心理的ストレスを考える場合の基本的な心理尺度として, 実験条件下における直接的なうるささが重要である。我々は, その個人内・間変動とその変動をもたらす要因について以下の様な実験心理学的研究も行っている。

実験(1)では, 心理・生理実験用防音室の中で, 種々の生活音を等価騒音レベルで一定( Leq ( A )=90)として再生した時の直感的なうるささの性, 年齢, あるいは性格(矢田部・ギルフォードテスト)



(図1)



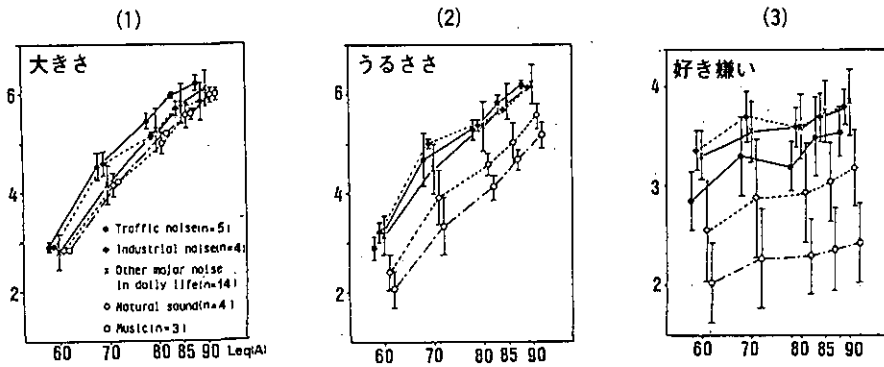
\* ただし、昼夜およびK市・S区の地域差を調整した平均値

(図2)

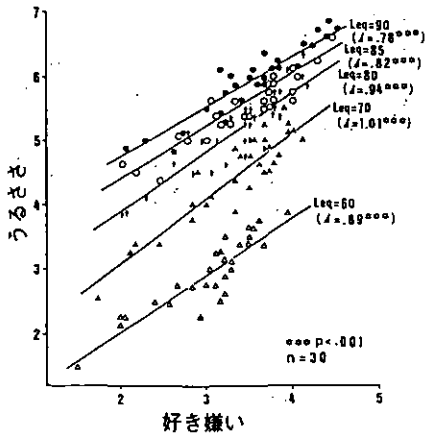
による変動について検討した。対象音は交通騒音、職場騒音、その他の生活行動に伴う騒音、音楽、自然音(雷鳴、川のせせらぎなど)などからなる30の生活音である(ただし、各再生時間は16秒、間隔は44秒)。被験者は若年男女、中年女子、老年男女各20名、計100名とした。結果、うるさは音の種類により大きく変動すること。また、上記カテゴリー別に整理すると、うるさは交通騒音、職場騒音>音楽、自然音の傾向があり、その他の生活行動に伴う騒音ではこれらに重複して幅広く分布する傾向を示した。また、うるさと性、年齢、性格との関連性を各音別に検討してみると、性差は9種の音(うち8種がその他の生活行動に伴う騒音)で有意、いずれも男子>女子の傾向を示した。年齢別の検討では、14種の音で中年女子にうるさい傾向がみられたが、性差にみられるような音の種類のカテゴリーによるまとまりはなかった。性格との関連性については、一定の傾向は見られなかった。一方、各再生音の周波数別Leq、騒音レベルの変動を示す指数(L5、L50、L95)などの物理的特性のうち低帯域あるいは高帯域のLeq(A)なども有意に関連していることが認められた。

また、実験(II)では、上記と同様の30種の音の再生レベルを変えて、これらうるささのレベル-反応関係を求めた。ただし、対象者は聴力正常で健康な男子19名、女子21名(18-23歳)である。また、再生レベルはLeq(A)=60、70、80、85、90の5段階とし、心理量としてはうるささの他、同時に

感じられる大きさと好き嫌いについても調べた。結果、30種の生活音のうるささには、概略上記音のカテゴリーによるまとまりが認められたので、同カテゴリー別に性による影響を調整して大きさ、うるささ、好き嫌いの平均値を求め、Leqとの対応関係を見てみたのが(図3)である。また、同図における各心理量と音のカテゴリーおよびLeqとの関連性について共分散分析により検討した結果、大きさにはLeqのみが、うるささ、好き嫌いではLeqと音のカテゴリーの両者が有意な関連を示し、この順に騒音レベル依存性が弱くなり、音の種類への依存性が大きくなる傾向が統計的にも明らかとなった。ここで、うるささ、好き嫌い、Leq 3者の関係をまとめてみたのが(図4)である。ただし、各心理量の変動に対して、騒音のレベルおよび種類を考慮した場合には、騒音の物理的特性は、Leqの8 kHz成分、L95などが若干の関連を示すもののその説明率は相対的に極めて小さいことが知られた。



(図3)



(図4)

以上の実験は、心理実験とは言え結果がよく安定しており、各種生活騒音の騒音レベル(Leqなど)とうるささに関する trade-off 関係を数的に整理して行ける可能性を強く示唆している。このことは、さらに実際の各種生活騒音暴露状況を想定した心理実験を通して、温度・湿度条件に対する不快指数のような、生活騒音不快指数とも呼べる指数を開発しうる可能性をも意味している。この種の不快指数が開発されれば、以下に述べる様な生活レベルにおけるうるささをより定量的に分析・整理する新しい方法になりうるものと期待される。

### 3. 生活レベルの騒音のうるささとその構造

生活騒音による精神・心理的ストレスとは、生活レベルにおける各種騒音によるうるささ・不快感・不満・愁訴などの複合体(complex)を意味する。したがって、生活レベルにおける騒音のうるささのみを取り上げても、実験心理学的に調べられる様な直感的な心理量という側面のみならず、睡眠の妨害、学習・その他生活妨害などによる2次的な不快感、騒音源に対する不満・愁訴などが含まれ



る。また、同一の騒音であっても、種々の変動要因の影響を受けて実験条件下と実際の活動中とで異なってくる可能性も指摘されている。すなわち、生活レベルでの騒音のうるささには性・年齢、性格・ライフスタイル、時間・空間的行動パターン、世帯・居住条件、その他の環境要因(振動、悪臭、大気汚染等)、優位に問題となる騒音あるいは具体的影響の存在、環境に対する価値意識、など数多くの諸要因と関連した生態学的構造が想定されるのである。

我々は、住民の生活環境全般に対する意識、生活レベルで問題とされている騒音、それら騒音のうるささについて、その生態学的構造をできる限り定量的に明かすことを目的として、自由連想法、自由記述法、選択肢法等を用いたアンケート調査を行っている。以下の団地の主婦の調査の他、東京大都市圏内の代表的工業地のK市、住宅地のS区においても調査を終えているが、後者の結果は解析中である。

自由連想法により得られた現在までの知見から、日常生活環境について住民が不快感・不満・苦情を訴えている項目には、非沿道地域では、建設・解体にともなう振動・騒音・粉塵、事業所の騒音・粉塵・ばい煙・悪臭、交通騒音、機械騒音(エアコン、洗濯機、ポンプ等)、楽器・オーディオ、ペット(鳴き声、糞)、電波障害、ゴミの散乱、コミュニティのルール違反(アパート、ワンルームマンションなど)、不法行為(違法建築、違法営業などで違法性が問題とされる)など、いわゆる“生活型公害”を象徴するようなものがある。幹線道路沿道地域では、さらにいわゆる“交通あるいは沿道公害”に係わる項目が加わる傾向が明らかである。

一方、都内E区超高層団地居住主婦について、以下の調査内容を含むアンケート調査を行った。内容は、(A)生活騒音への“うるささ”など住環境への不快・不満度及びその変動要因に関する項目

(B)“うるささ”と苦情行動との関連性に関する項目

(C)住環境への不快・不満度と飲酒行動との関連性に関する項目

(D)以上の関連が住居棟・居住階によって異なるか否かに関する項目 等である。

23/14/8/4F建集合住宅に居住する主婦全員に上記内容に関する質問用紙を配布し、444名(平均44.7、21-76才；前年も回答した者131名を含む)から回答を得た(回収率54.3%)。444名中有職者は237名(53%)。住居棟・階・間取りについては、4F棟4-5LDK、8/14F棟4LDK、23F棟2-3LDK(上層階)と4LDK(下層階)の4つのカテゴリーに分類された。居住階別の分布は、1-4F：40%、5-8F：24%、9-23F：37%であった。結果、騒音がうるさいと感じている人の割合は屋内騒音96名(22%)、屋外騒音185名(43%)であった。これらうるささの主要騒音源はバイク・高速道路(屋外)、排水・走り回る子供(屋内)などであった。また、騒音のうるささをはじめ住環境全般に対する不快・不満度とこれらに関連の予想された(表1)の項目との関連性について共分散分析により検討した結果、屋内・外騒音のうるささには上記居住条件の他、怒りっぽい、イライラする、消極的などの性格因子との関連が認められた。一方、うるさいと感じてさらに苦情を訴えた人は、屋外騒音の

表1：住環境への不快感・不満に関連が予想された変数

(属性関係)	(健康・ストレス・性格)
年齢・ライフステージ	1年間の既往
職業の有無	不定愁訴
要ケア老人の有無	更年期指数
(住居関係)	一般的健康スコア
住居棟・階・間取り	ライフイベント
幼稚園に面するか?	ストレス関連性格(A/B)
最上階・エレベータの止まる階?	

うるささの場合でのみ、地震に対する不安が強いあるいは更年期指数が高い傾向が認められた。また、主婦の飲酒行動と職業の有無・性格等には関連がみられたが、騒音に対するうるささあるいはその他住環境への不快・不満度との関連は明らかではなかった。

#### 4. 騒音苦情の発生状況は生活環境騒音による精神・心理的ストレスの指標になりうるか？

以上からも明らかな様に、生活騒音による精神・心理的ストレスを評価する上で、生活レベルにおけるうるささの直接的定量が最も重要ではあるが、アンケート調査によって得られる情報は一定時点・一定地域(比較的小集団)に関するものに限定される。この種の調査はむしろ小集団を対象として暴露とうるささに関する詳細な生態学的構造の解明にとって有用と思われる。一方、地域別公害苦情件数などの情報は、こうした地域住民の精神・心理的ストレスのいわば間接的指標であるが、より広域にまた経時的に利用可能である。その有用性については疑問視する向きもあるが、一般に環境汚染による地域住民への影響指標の1つとして比較的安易に用いられていることも事実である。本研究全体として、後者の間接的指標の妥当性を調査から知られる直接的な精神・心理的ストレスの実態から評価することが目的の1つとされている。しかし、本年度行ったアンケート調査結果の解析は未完了であり、しかも初年度であり大都市圏内の代表的な地域を網羅出来ていない。以下、市町村別の騒音公害苦情発生状況に関する統計学的な特徴あるいは都内S区に持ち込まれた苦情のケース調査結果を基に、こうした間接的指標の有用性について若干の検討・考察を加えることにした。

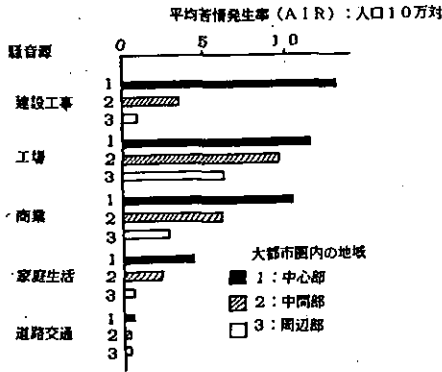
環境庁特殊公害課は独自に昭和61年度における全国市町村別・騒音の種類別の新規騒音公害苦情件数データを収集しており、このデータに基づき1都6県内の176市(23区を含む)の昭和61年度の新規の騒音苦情発生率(人口10万対)を求めた。また、それら市別の35種の社会・経済・人口統計データあるいは道路沿道の交通騒音レベル別推定暴露人口割合(同庁交通公害対策室)とともに統計的検討に供した。まず、35種の地域別データについて主成分分析を行った結果、有意な4因子、すなわち、都市化、人口の安定性、工業化および郊外的性質が抽出された。

(図5)は、このうち都市化と人口の安定性の因子により大都市圏を中心部、中間部および周辺部に3分割した場合の騒音苦情発生状況を示している。同図は、苦情発生が中心部に集中している状況とともに騒音の種類による大きな発生率の差異をも示している。一方、各地域の上記4因子に対する因子得点と各苦情発生率との相関関係を見たのが(表2)である。同表から、建設、商業、近隣騒音に対する苦情では都市化の因子との、また、工場騒音に対するものでは工業化の因子との相関が有意に強い傾向が明かである。ただし、道路交通騒音に対する苦情は、その推定暴露人口に比較して極めて低く、この表でも相関係数が低いのであるが、ロジスチック・モデルなど感度のよい解析法を用いることにより、高レベルの道路交通騒音への暴露人口割合と有意な相関関係を示すことが知られた。

一方、昭和62年度中にS区の公害対策課が取り扱った騒音苦情ケースについて同課の記録を整理・検討してみた。対象は、記録のある計210件のうち有効ケース195件(うち新規181)である。これら記録から騒音苦情のプロフィールとして以下の様な点が要約される。

(1)苦情者の特性：1)苦情者の性別は、男子106件(54%)、女子58件(30%)、不明(記載なし)31件(16%)。2)氏名の明らかなもの154件(79%)、匿名での訴え41件(21%)。3)苦情を訴える前に、苦情者が騒音発生者との交渉、有76件(39%)、無105件(54%)、不明14件(7%)。これらの頻度に

類型化された大都市圏内地域別平均苦情発生率（昭和61年度）



(図5)

表2：騒音の種類別苦情発生率と地域特性を示す4因子との相関

因子	相関係数						
	騒音の種類		商業	近隣	道路	交通	
	特定工場	その他工場	特定建設	その他建設			
第1因子 (都市化)	.042	.373***	.533***	.627***	.583***	.550***	.229**
第2因子 (人口の安定性)	.154	-.125	.228**	.057	-.017	.080	-.049
第3因子 (工業化)	.435***	.401***	.081	.065	.064	-.062	.075
第4因子 (郊外性)	-.068	-.175*	.104	.075	-.060	-.011	-.121

(\*: p < .05; \*\*: p < .01; \*\*\*: p < .001)

性による差は無し。

(2)音源別にみた苦情発生状況とその特徴：1)問題とされた騒音源は、建設作業(これに伴う車両騒音等も含む)62件(32%)、家庭生活61件(31%)、商業活動(営業用拡声器も含む)32件(16%)、工場・作業場26件(13%)、その他14件(7%)。音源と、苦情者の特性との関連は無し。2)発生場所は、第1種住居専用地域86件(44%)、第2種住居専用地域36件(19%)、住居地域21件(11%)、近隣商業地域40件(21%)、商業地域と準工業地域が各6件(3%)。用途地域別の人口比と比較すると、1専では有意に苦情が多かった(p < 0.05)。また、第1種住居専用地域では家庭生活による騒音、商工業地域では商業活動による騒音の苦情が有意に多い。3)騒音の発生時間帯は、全日38件(20%)、日中100件(52%)、深夜・早朝56件(29%)。これを音源別にみると、工場・建設騒音では日中のみ、商業騒音では深夜早朝、家庭生活からの騒音では一日中というものが多い。4)現場での騒音レベルの実測例は、28件(14%)。そのうち21件(75%)は、騒音規制法による基準以内だった。5)苦情の原因になった発生者側の問題点についての記録は、31件(16%)について残されていたが、その半数は、建設工事等において発生者が近隣へ事前に挨拶・断わりがなかったという指摘であった。また、法令違反が明らかなのは、6件であった。

記録からは、以上の他、担当職員の対応の内容、処理結果などについても一定程度の情報が得られることが知られたが、苦情の発生プロセスあるいは苦情者の属性・特性等に関する記載はほとんどなく、より詳細な解析は困難であった。

S区の記録に見られた以上の特徴は、上記統計的検討における東京大都市圏内の中心部における住宅地域の特徴とみなすことが可能である。これだけで地域別騒音苦情発生状況と地域住民の騒音暴露・うるささとの対応関係を整理・検討することはできないが、以上の統計・ケースの検討を通して、住民の騒音暴露・うるささには大都市圏内においても大きな地域差があり、圏内中心に向かって問題が深刻であること、ただし、同傾向は騒音の種類を問わず認められるが、種類によって騒音暴露状況と苦情発生との関連性が異なることが明かである。また、苦情統計には騒音規制法の規制レベル以下の、とくに住宅地における生活騒音が問題とされているケースが多く含まれていることも示唆された。

# 人々は生活の場をどう見ているか

## —連想法による地域比較—

大井 絃 (環境情報部)

**要 旨** 生活環境に対する見方が地域によってどう違うかを、人々に連想をたずねるという調査から報告する。ここでは、「みどり」という言葉から連想することを自由に書いてもらって、得た言葉を計算機で処理して、緑について何を考えているか読み取った事例をとりあげる。そこでは、「生活に取り込まれた緑」と「眺めるだけの緑」、あるいは「山の緑」と「町の緑」の区別があるということが分かる。調査した地域は、山間の農村として茨城県北西端の太子町と、大都市の住宅地としての東京都世田谷区である。

### 1. 調査のあらまし

#### 1.1 何のために？

いわゆる環境も含めて、人々の生活の場についての意識の中で、利便性と快適性にかかわることが、中心的な地位をしめていることが、これまでの我々の研究で分かりました。また、近所づきあいのような人間関係、それとゆとりや充足感にかかわることも、重要なことが分かりました。そこで、生活の場全般にわたる意識だけでなく、今述べたようないくつかの個別の面についての意識を人々に問うてみました。

いままでの調査で、農村地帯の意識が都市と比べて独自なことが分かっています。これをもっとよく調べるため、都会や隣接地から離れたという意味で閉鎖的な農村の人々と大都市内での比較的良質な一戸建て住宅住民の意識を調査し解析して、地域の特性と対応させながら比べてみます。こういうことは都市環境の今後の改善方向を探るためにも必要と思われます。

#### 1.2 連想法とは

回答をお願いした人に連想することを自由に書いてもらう、自由連想法の話をします。この調査では、調査票の上である言葉(これを刺激語と言います)を調査対象者に示し、それから連想することをなるべく沢山書いてもらいます。

ここでお話しする調査では、調査票の初めの刺激語として、「住みよさ」および「住みやすさ」を示して、これから連想することを単語、句、文のいずれを問わず回答してもらい、次に、「交通」、「近所づきあい」、「みどり」という刺激語を順に提示して、それぞれに、同じようにこれから連想することを自由に書いてもらっています。この予稿集では、「みどり」についての結果を紹介します。

#### 1.3 調査対象地と調査の実施法

調査対象地は、次の2地域です。

- ①茨城県久慈郡太子町(今後、「太子」と呼ぶことにします。)
- ②東京都世田谷区深沢及び等々力(「世田谷」と呼ぶことにします。)

①は、茨城県の北西端にある町で、人口2万8千、面積325 km<sup>2</sup>です。町の北西の境界に同県最高1,022 mの八溝山があるほか、隣接の町村と山地で接しており、町内も山地が多い。水戸から同町の中心部ともいべきJR常陸大子駅まで、直線で44 kmであり、JR水郡線で久慈川ぞいに52営業キロ、所要時間約1時間30分～2時間、1日に水戸、大子間上り下り各15本(当時)です。そのように、山に囲まれ、都会から離れているという意味で、この町は閉鎖的の山村といえるかも知れません。しかし、過疎に悩みながらも植生の豊かな山林に囲まれ、都会人にとっては、特に今の季節は山の緑に浸されているのかと思われるところです。

一方、②は、東京急行新玉川線、大井町線、東横線に囲まれた領域の内部にあって、かつて東京オリンピックの行われた駒沢公園の西側、また首都高速3号線の南になります。この地域内でも、ミニ開発風の一角もあれば、堂々たる屋敷林を背負った家もありますが、おしなべて言えば、東京都内でも良質な住宅地のひとつと言え、1986年度にはここでも地価の急騰が見られました。大子とは比べものにならない交通の利便性に恵まれ、そのことは通勤通学の便に始まって、教育、医療、芸術の恩恵を受けやすくしています。そうは言っても、土地のゆとりや植生の豊さでは大子と比較にならないほど貧しいと言わざるをえません。

さて、大子においては、住宅地図から判断して、商業地、観光街化したところ、同地としては住宅の密集した部分、商店や事業所やアパートと見られるものは調査対象から除いています。

世田谷においては、首都高速3号線から180 mまで、幹線道路沿い、大井町線沿いとその南側、更に、住宅地図から判断して、商業地化したところ、同地としては相対的に住宅の密集した部分、商店や事業所や倉庫、アパートやマンションと分かるもの、更には同地に多く見出される外国人宅と分かるものは除きました。

調査は、郵送法で行いました。調査票は、大子は1986年4月中旬に発送し、5月下旬に回収を終っています。世田谷については、同年5月上旬に発送し、6月中旬に回収をおえました。調査票を送った数は両地区とも各500票で有効回収数は、大子214(42.8%)、世田谷209(41.8%)でした。

#### 1.4 どうやって分析するのか

そんなヘンテコな調査をやって、どうやって分析するのかということになります。まず、回答を丁寧に読むだけでも、かなりのことが分かります。また、調査地区ごとに回答のなかに出てくる個々の言葉の回数(頻度と言っています)を比べるだけでも、興味のあることが分かります。

この研究では主に次のような方法を使います。まず、得られた連想の回答のうち句と文は、単語に分解し、分解後は無意味となる言葉(例えば、テニヲハ)を除いて、始めから単語で与えられた回答と併せて連想語の集りを作ります。そうして、或る地域の回答者から得られた単語を、よく似ているもの同士、ひとまとめにしていくつかのグループにします。ここで、「似ている」と言うのは次のように考えます。

「共通した多くの回答者によって連想される単語同士は似ている。」

例えば、4人の回答者について、A、B、C、Dさんが「環境」という言葉と「緑」という言葉を連想し、A、Bさんだけが「騒音」を連想しているなら、「環境」と「緑」のほうが、「環境」と「騒音」より似ているというわけです。決して、言葉の意味が似ているということではありません。

次に、回答者についても似たもの同士をひとまとめにして、いくつかのグループに分けます。ここ

でも、似たものと言うのは、さっきとは人と言葉を入れ替えて、次のようにします。

「共通した多くの単語を連想する回答者同士は似ている。」

出来たグループをクラスターといっています。そして、連想語クラスターと回答者クラスターの対応も調べるのですが(2元クラスタリングという)、これは次の章で実例を見ながら説明します。

## 2.1 「みどり」からの連想

「みどり」という言葉から連想された語を、10位まで表1に示します。10位までの共通語は、「山」、「自然」、「森林」、「木」、「空気」です。これらは、大子の5位までを埋めてしまいます。まず、大子では、6位の「杉」に続いて、11位の「松」(頻度18)、34位の「桧」(7)のように木の種類の名を連想しますが、世田谷では、そのような語は50位までに現れません。このことは、「みどり」と一概に言っても、具体的な植物を見ているか、単に風景として眺めているかの差と言えましょう。また、おそらく、山林の所有、植林の経験、家屋の材料として木を植えることなど、大子では、樹木とのかかわりが生活の一部になっているのでしょう。

逆に、世田谷で目立つのは、「みどりのための人工のみどり」です。世田谷、大子の順で、いくつかの連想語の頻度順位と頻度をみてみます。「公園」3位;27位(頻度は11)。「庭」4位;14位(17)。「芝生」6位;35位(7)。「植木」15位(21);32位(7)。次の四つの語は、大子の50位までには出てきません、「街路樹」12位(26)。「並木」35位(12)。「生垣」40位(10)。「庭園」48位(8)。このように、世田谷では、作られた緑が「みどり」なのです。

表1 連想された語の頻度の順位

順位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
大子	山 108	自然 62	森林 55	木 45	空気 29	杉 21	川 20	草 20	畑 19	芽 19
世田谷	木 81	森林 68	公園 63	庭 47	山 46	芝生 39	自然 36	やすらぎ 33	森林浴 30	空気 30

表2 大子で連想された言葉のクラスター

h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>	h <sub>5</sub>	h <sub>6</sub>	h <sub>7</sub>	h <sub>8</sub>
き空大生 れ人水 い気切活	若 畑草 葉	公森環人 園林境間	植自 庭松杉 林山木春 林然	新 芽 緑	花川夏	信森山 号浴林	す美 がし がし しい

表3 世田谷で連想された言葉のクラスター

h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>	h <sub>5</sub>	h <sub>6</sub>					
公森 山 園林	芝 木 生	街草生並植 庭路春 樹花垣木木 葉緑物	さ森 わ林 や浴 か	小空 風芽し 鳥気	美 葉草水 い	健野 康原	五豊環自都人大 月か境然市間切	や平 心す ら和 ぎ	おち鳥花 つき	気 持

連想語のクラスター h<sub>1</sub>

0 5 10 語

連想語のグループを表2と表3を見ながら調べてみましょう。タテ線で区切られた中が一つのクラスターになり、左から、h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub>…と名前をつけることにします。ここでは10回以上連想された言葉だけをグループ分けしているのので、「宮崎 緑」という連想も1回だけあったのですが、表には含まれません。表2に大子のそれを見ると、左端のh<sub>1</sub>の中に1語も植物やその集まりあるいは部分を表わす語がありません。このクラスターは、緑が象徴するものを表わしているのでしょうか。h<sub>2</sub>は、植物の緑そのものです。h<sub>3</sub>は、緑にかかわるものとみられましょう。h<sub>4</sub>は、「庭」という語があるにしても、「山の緑」と言えます。それに、大子の地では「庭」というのは隣家との間の抑圧されたスペースのことではありません。h<sub>5</sub>は春の緑です。h<sub>8</sub>は、緑に象徴される形容詞ということです。

世田谷については、表3のh<sub>1</sub>は、植物あるいは植物で構成されるもので、個別具体的です。そして、そのうちのかなりのもの、即ち、「公園」、「芝生」、「庭」、「街路樹」、「生垣」、「並木」という語が、都市の植物群であって人為的に作りだされ、維持されるものです。h<sub>3</sub>は、連想がいささか都市の外に向いていると見られ、人為的につくられた緑を含まず、緑で象徴される具体的なものが入っています。h<sub>4</sub>は、緑で象徴される抽象概念と言えるでしょう。これは、大子のh<sub>1</sub>に対応するものですが、その含む範囲はより広く、多様です。h<sub>5</sub>の内容は、h<sub>3</sub>と似ていると言えるでしょうが、郊外のひろがりといったものは感じさせません。

さて、回答者クラスターと連想語クラスターとの対応を図1、図2で観察してみま

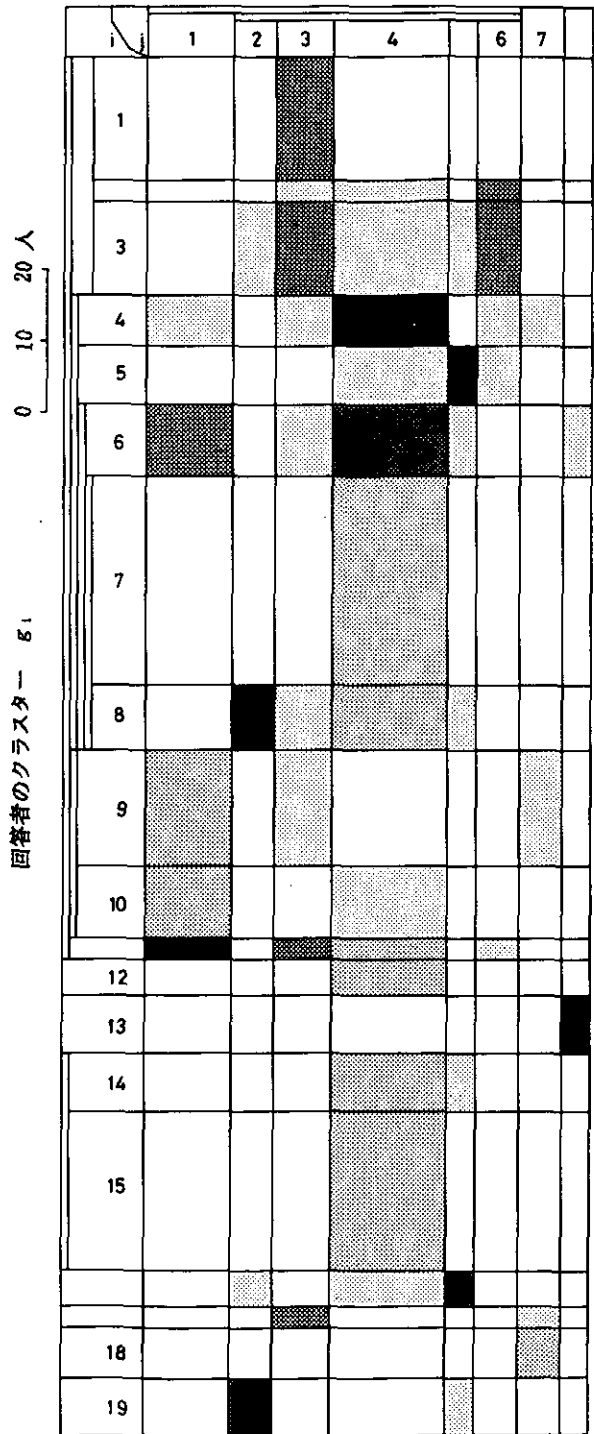


図1 大子で連想された言葉の2元クラスタリング図

しょう。

図1, 図2で, タテの番号は回答者クラスター( $g_1, g_2, \dots$ とします)の番号で, ヨコの番号は連想語のクラスター( $h_1, h_2, \dots$ )の番号を表します。もちろん, ヨコの番号のコマを区切るタテの仕切り線はさっきの表2, 表3での連想語のクラスターの仕切り線と同じものです。そして, タテ, ヨコとも幅の広い欄は回答者の数, 連想語の数がそれだけ多いことを表します。(クラスター番号の間の仕切り線の長短の意味は省略。)図1で, 例えば左のタテの6番のマスの上側にある長方形のブロックを $c_{64}$ と名付け,  $g_6$ の回答者による $h_4$ の連想語の連想回数

の割合  
 「(人数)×(語の数)の割の連想の頻度」  
 が大きかったので, 濃い目に塗って表しています。i番目の回答者クラスター $g_i$ の右側, j番目の連想語のクラスター $h_j$ の下側にある長方形を $c_{ij}$ と呼ぶことにして, 濃く塗られたブロック $c_{ij}$ についていえば回答者のクラスター $g_i$ の人々が, 連想語のクラスター $h_j$ の語を多く連想するということです。白っぽいほど, 連想が希薄ということになります。マス目の濃淡をみていけば, どの回答者グループがどの連想語のグループをよく連想するかを調べることができます。このやり方を「2元クラスタリング」と呼んでいます。

図1によれば, 大子では $h_4$ が主クラスター(多くの人に連想される言葉のグループをこう呼ぶことにしています。)といえます。とまれ,  $h_4$ の言葉を表2で見れば, 大子の緑は「山の緑」なのです。そして, 図1から主クラスターを殆ど連想しない少数派がいるのがわかります。

世田谷について図2を見ると, 頻度10以

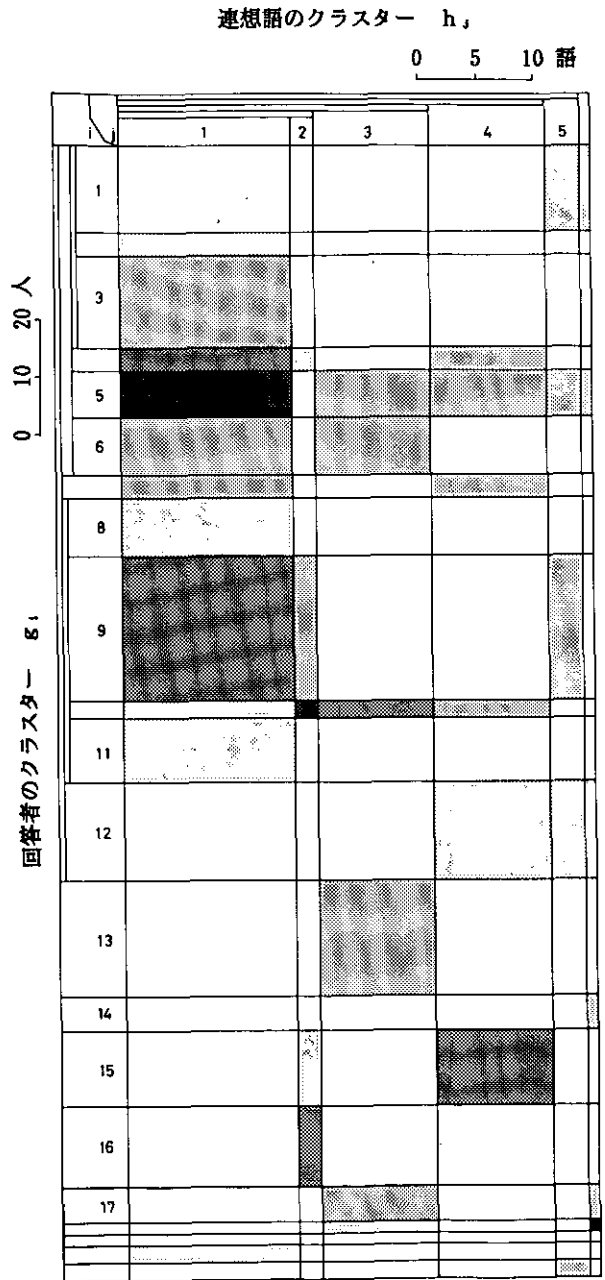


図2 世田谷で連想された言葉の2元クラスタリング図



上の連想語数は大子より多いけれども、濃淡の最も濃いブロックはなく、回答者群ごとの連想の集中が大きくないのが分かります。世田谷では、左はしの $h_1$ が主クラスターとなっています。世田谷の緑の方は、 $h_1$ の中味を表3でみれば、「街の緑」です。

山の緑と街の緑という区別を上で考えました。また、2元クラスタリングという手法を用いることによって、世田谷で人工の緑 $h_1$ と自然の緑 $h_3$ とを分けることができました。一方、生活に取り込まれた緑と、眺めるだけの緑の区別もあることが分かりました。更に、都市の中に緑を確保するといっても、緑の量一どのくらいの土地が緑で覆われているか—や、緑の形—喬木か灌木か草地か—を見るだけでなく、緑の意味を考えなければならないことが分かりました。

世田谷において、 $h_1$ を連想しないで $h_3$ を連想する人々の無視できないことから、都市においても、緑を作りだし、管理するだけでなく、あまり手の入らない出来たなりの緑地をそのまま保存することに大きな意味があります。

### 3. ま と め

「みどり」を刺激語としたときに見出したことで重要なことは、山の緑と都市の緑とがあって、それは、植物の生えている場所や植物の形のことでなく、そこに住む人々とののかかり合いのことで、どうやら私たちは、緑の「意味」を考えなければならないということになります。

連想法<sup>1)</sup>を使って、人々の環境に対する意識の地域比較をしました。この調査での「みどり」以外の刺激語についての結果や、また、制限連想法というもう一つの調査法についての話など、他の報告書<sup>2-3)</sup>をご覧下さい。

### 参 考 文 献

- 1) 大井 紘, 宮本定明, 阿部 治, 勝矢淳雄(1988): 生活環境に関する住民の認知の拡がり構造, 土木学会論文集, (369)/IV-8, 83-92.
- 2) 大井 紘, 須賀伸介, 宮本定明, 阿部 治, 勝矢淳雄(1989): 生活の場を地域の人々はどう見ているか 連想法によるアンケート調査, 国立公害研究所資料 F-5-89/NIES, 41p.
- 3) 大井 紘編(1987): 環境概念構造解明のための連想法による調査とデータ解析, 「環境科学」研究報告集 B295-R40-7, 242p.

# 高度計測手法と環境汚染物質の化学計測

植 弘 崇 嗣 (計測技術部)

**要 旨** 半導体シリコンウェハー中の極微量不純物の分析・検査に用いられる誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)、ウェハー上の微細なパターンを検査する二次イオン質量分析法(SIMS)など、「高度に発展した物理化学的計測手法」が先端科学技術分野で使われている。環境中の汚染物質の分析、起源の推定、挙動の解明など環境科学研究諸分野と、これら「高度計測手法」との関連につき、国立公害研究所における具体的研究例を示して簡単に説明する。

## 序

今日の世界では、色々な試料や材料中に存在する微量な物質の分析が日常的に行われている。例えば、まだ記憶にも新しい(?)昨年(1988年)のソウルオリンピックでのドーピング問題、この時検査に使われた手法は競走馬の禁止薬物の使用を検査するものと同じで、ガスクロマトグラフ質量分析法(GC-MS)と呼ばれるものである。

また、半導体産業に於いては、素子の集積度の増加とともに、素材中の極微量元素の存在量を制御することの重要性が増してきている。例えば、素子に機能を与えるために積極的に添加される元素。反対に有難くない不純物としては、放射壊変によって情報を破壊するウランやトリウム等の放射性核種(元素)。これら微量物質の濃度は、以前はppm(1トンの材料中に不純物が1グラム含まれる濃度)単位で良かったものが、ppb(ppmの1000分の1)、ppt(ppbの1000分の1)単位で話をしなくてはならなくなりつつある。この極微量不純物の分析法として最近注目されているのが、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)である。シリコンウェハーやモールド材料中のpptレベルのウラン・トリウムの分析が実用化されつつある。

一方、半導体素子として機能する上で更に重要なのは、材料全体として見たときの微量物質濃度ではなく、基板上的濃度分布(マップ、パターン)である。基板上的パターンの細密化も集積度と伴に上がり、1マイクロメートル以下の精密さで描かれるようになった。このような精密な元素の分布を測定する有力な手法の一つとして、二次イオン質量分析法(SIMS)と呼ばれる測定法がある。位置分解能(どこまで細かい所を見分けられるかという尺度)では電子顕微鏡或いはエックス線マイクロアナライザー(XMA、分析電顕)には及ばないが、検出感度ではXMAを凌駕している。良い条件下では、試料表面の濃度でppbレベルの測定が可能な場合もある。

国立公害研究所に於いては、昭和62年度にこれら最新の計測装置(GC-MS、ICP-MS、SIMS等)を導入し、環境科学研究に貢献すべく、測定法の開発・検討、測定データの集積・解析を行っている。GC-MSは、分子とくに有機化合物の分析には現在のところ最強とも言える手法であり、その環境問題に対する有効性については、今回の研究発表会の他の講演(講演番号4)で詳細に述べられるので

ICP-MS及びSIMSはいずれも原則として元素を分析する手法であり、分子を分析するGC-MSとは異なっている。一般に、金属元素或いは無機元素と称される元素群は、環境中で塩(多数の陽イオンと陰イオンが電気的な引力で結合した物質)として存在することが多く、有機化合物のように独立した一個一個の分子としての挙動をとることが少ない。また、水に溶解して水溶液となると、各イオンはバラバラになってしまい、「どのイオンとどのイオンが結合していた」かをはっきりさせられないことが多い。このため、長年に亘って「無機分析=元素分析=(金属元素+ハロゲン元素+硫酸+硝酸+炭酸+……)の分析」の図式が出来上がっていた。

しかし、金属元素を含有する酵素(金属酵素)、有機分子と配位結合をした金属(金属錯体)、或いは、メチル水銀等の有機金属化合物等が見出され、同じ元素でもその化学形態によって生物・環境に対する影響が大きく異なる事が解明されてきた。これに従い、金属元素・無機元素についても、その化学形態別分析が必要であることが認識され始めた。また、元素の物理的な存在状態——例えば、塊の表面に存在するのか、内部に存在するのか? 或いは、比較的決った場所に高濃度で集中して存在するのか、全体に分散して均一に存在するのか?——についても、その差異により生物・環境への影響も異なること、また逆に、その差異から環境がその元素に与えた影響を評価・解析できることも認識され始めた。

国立公害研究所の計測技術部では十年以上前から、金属元素の化学形態別・存在状態別分析手法の開発・検討に関する研究を行ってきた。更に、その研究成果を環境科学に適用し、環境問題の解明に用いるに当たり、単に試料に含まれる元素・分子等の濃度・量を分析するだけではなく、試料の起源や環境中での挙動等に関する情報として再評価する手法を含めた研究を行ってきた。ICP-MS及びSIMSの両装置についても、現在までの研究成果をより発展させる目的で導入が行われた。以下、両装置の特徴並びにその環境科学研究に対する適用例について概観する。

## 元素分析と質量分析法

近年、化学計測手法として質量分析法が隆盛を極めている。今回紹介するICP-MSとSIMSも、共に質量分析法である。化学計測に於いて質量分析法とは、ある物質(原子や分子)に電荷を与え(イオン化)、この物質の持つ固有の質量と電荷の比( $m/z$ )を使って、物質が何かを決める(同定する)手法をいう。 $m/z$ により分別されたイオンは、様々の種類の検出器を用いて、非常に多数から非常に少数まで(例えば、1秒間に検出器に届くイオンの数として1兆個以上から0.1個以下まで)測定することが可能である。質量分析法が広範に採用され始めたのは、この広い量の範囲、特に少量のイオンに対する検出能力の高さと、 $m/z$ による他の物質との分別能力(選択性)が高いためである。また、光の吸収や発光等の相互作用を介した間接的な測定ではなく、イオンという物質そのものを測定するため、感度を高くできる点も利点の一つである。

元素分析における質量分析法の特徴は、元素は原子番号(原子核中の陽子数)が等しい原子の集合であるのに対して、質量分析法では質量数(原子核中の陽子数+中性子数)により分別されて検出される点である。このため、同じ元素で異なる質量数を持つ核(同位核、同位体、例えばU-235とU-238)を容易に分別して測定できるが、逆に、同一の質量数を有する異なった元素に属する核(同重核、例えばRb-87とSr-87)については、その分別は困難である。従って、質量分析法により元素分析を行

う場合には、次のいずれかの手法により測定するのが普通である。(1)同重核の妨害が起こらないように元素を物理・化学的前処理により分離してから測定する。この際には、正確な同位体比の測定も同時に可能である。(2)同重核妨害の無い質量数を選択し、天然同位体比を仮定する。天然に存在する元素については、49番元素インジウムを除いて、少なくとも一つは同重核妨害を受けない同位体がある。

### 誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)

本装置は質量分析計として四重極質量分析器(四重極マスフィルター)を用い、イオン源として誘導結合プラズマ(ICP)を用いた装置である。ICPは高周波により加熱されたアルゴンを媒質とする、5000-8000度の高温の大気圧プラズマである。一方、質量分析計は常温で高真空(1億分の1気圧以下)であるので、プラズマと質量分析計とは、冷却系と差動排気系により構成されるインターフェイス部を介して結合されている。通常は液体(水溶液)試料が用いられるが、気体試料にも適用できる。気体試料はそのまま、液体試料は霧吹き(ネブライザー)を用いてエアロゾルとした後、プラズマ中に導入する。プラズマ中で試料は原子に分解し、更にイオン化される。この生成したイオンを、インターフェイス部を介して質量分析計へ導入し測定する。

測定法の特長としては、同じICPを用いた発光法(ICP-ES)と比較して高感度であり、多くの元素で2-3桁感度が向上する。また、同位体比についての情報が得られるため、(1)同位体希釈分析法を適用できる。(2)ある種の元素では、試料中の同位体比の変動から、その試料の起源に関する情報を得られる。(3)また、高感度であるので、少量の安定同位体を用いて、放射性同位元素と同様なトレーサー実験を行うことも可能である。

一方、ICP-ESと比較して、装置の保守に手間を要し、安定性が劣る。高濃度の試料の分析は困難である。ある種の元素については、プラズマの主成分に起因する分子イオンによる妨害のために、低濃度の測定が困難である等の欠点も残っている。

多元素同時に高感度で測定でき、また、多数の試料を迅速に測定できるというICP-MSの特長を示した例が、図1である。カキやイガイの仲間等、海産の貝の中身を元素分析し、主成分分析を行った結果である。70以上の試料につき、希土類元素を含む50以上の元素の分析ができた。貝の種類の違いによる元素組成の違いが見出され、殊に、試料数の多いオハグログキとムラサキイガイでは傾向がはっきりし、オハグログキでは銅・銀や亜鉛がムラサキイガイより高濃度に存在する事が判る。

図2には、環境試料(主として大気粉塵)中の鉛の同位体比の測定例を示す。試料の性質・起源により同位体比が異なることが判る。日本の大気粉塵中の鉛の同位体比は国内産母岩中のものとは異なっている。これは、大気粉塵中の鉛の供給源が国内の岩石だけではなく、国外から輸入され使用された鉛(化合物)、或いは地球規模鉛汚染の影響があることを示唆している。

高選択性・高感度であるICP-MSを、高速液体クロマトグラフの検出システムとして利用し、ヒ素の化学形態別分析を試みた例を図3に示す。試料は人の尿で、大きなピークは、アルセノベタインと呼ばれる毒性のない化合物である。この化合物は、海産の魚類や甲殻類等にも普遍的に見出されるが、その生理学的機能等については未だ明確ではない。

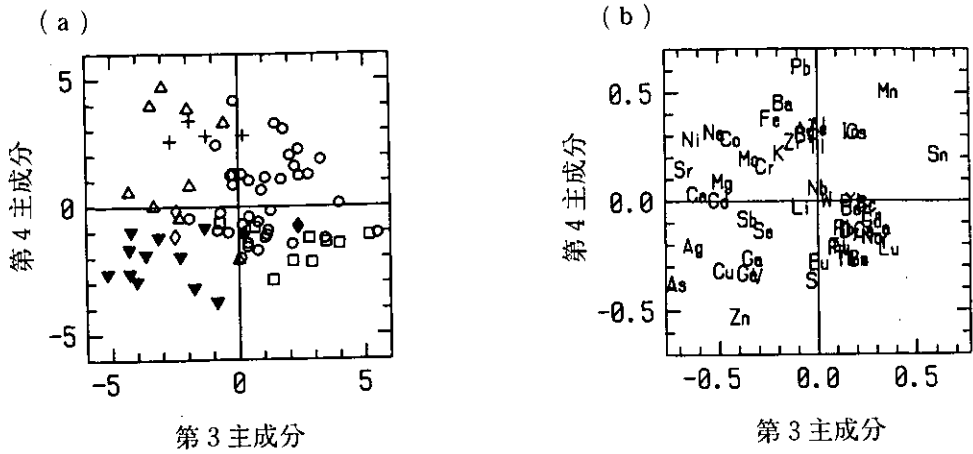


図1 二枚貝中の金属元素濃度の主成分分析

a) 各試料の主成分得点

○: ムラサキイガイ

□: イガイ

△: ムラサキインコ

+ : ミノクジャク

▼: オハグログキ

◆: イワガキ・マガキ

◇: ヒメシャコガイ

b) 各元素の因子負荷量

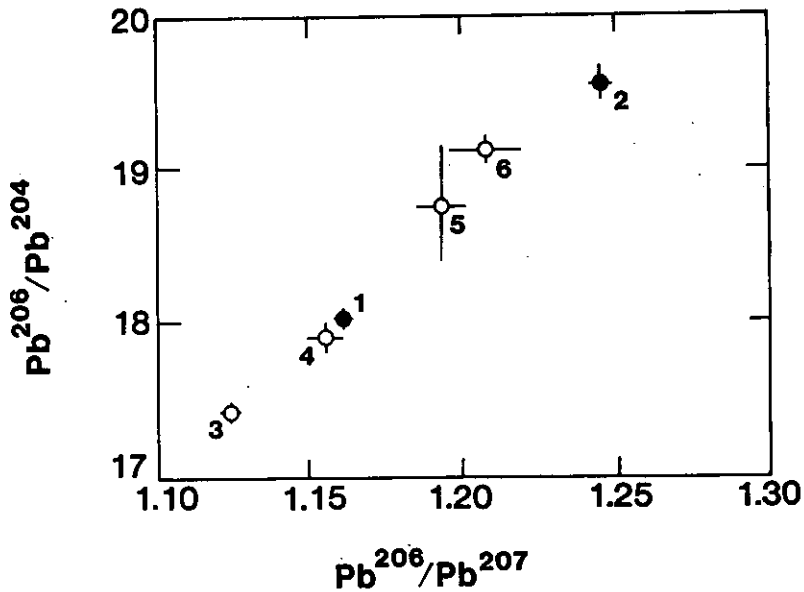


図2 環境試料中の鉛同位体比

1) 大気粉塵(筑波・国立公害研究所)

2) NBS Urban Particulates

3) 自動車排出粒子(NIES CRM-8)

4) ごみ焼却場排出粒子

5) 土壌(隠岐)

6) コールフライアッシュ(石炭火力発電所)

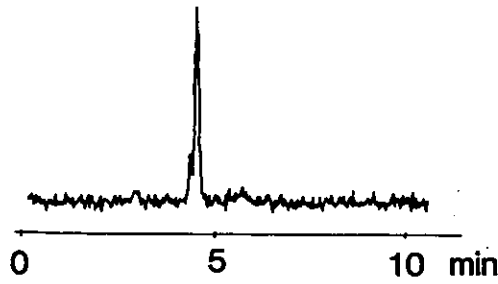


図3 HPLC-ICP-MSによる人尿中のヒ素の分析

### 二次イオン質量分析装置(SIMS)

真空中で高エネルギーの粒子ビーム(一次ビーム)を試料に衝突させると、試料表面から試料中に含有される元素の原子や酸化物分子等のイオンが放出される。このイオンを二次イオンと呼び、これを質量分析計で測定するのがSIMSである。狭義には、入射粒子がイオン(一次イオン)のときSIMSと呼び、入射粒子が中性粒子(原子や分子)のときFABMS或いはFAB-SIMS(Fast Atom Bombardment 質量分析法)と呼ぶことがある。

国立公害研究所に導入されたSIMSの特徴は、二重収束型の質量分析計をイオン顕微鏡として機能させ得る点である。これにより、二次イオンを、生成した位置に関する情報を保持したまま測定することが可能になり、試料表面の元素の分布を画像として捉えること(イオンのイメージング)ができる。位置分解能としては0.5-1マイクロメートル程度が得られる。この機能は、電気的不良導体が多い環境試料を分析する際に有効なFAB-SIMSを使用する際、高い位置分解能を得るのに不可欠である。なぜなら、絶縁体の試料は帯電しやすいため、イオンビームよりも帯電量を減らせる中性粒子ビームの方が一次ビームとして優れているが、中性粒子ビームを絞って位置分解能を得る事は殆ど不可能であるためである。

FAB-SIMSによるイメージングの例として、図4に通産省工業技術院地質調査所で作成された岩石標準試料JG1(花崗閃緑岩)の母岩の薄片試料に $O_2$ 中性分子ビームを照射して得られたFAB-SIMSによるケイ素、鉄、ナトリウム、カリウムのイメージを示す。4種のイメージは同一の領域(直径150マイクロメートル)のもので、左側は黒雲母、右側は長石部分に対応する。鉄が長石より雲母部分に沢山含まれていること、長石領域ではナトリウム長石とカリウム長石の分離が生じていることがよく解る。

次に、人体に対する健康影響が問題になっているアスベストについて、SIMSではどのような情報が得られるかの例を図5に示す。試料は、インジウム箔に乗せたアスベストの1種クリソタイルで、今回は $O_2^+$ 正イオンを一次イオンビームに用いている。図5aは正電荷の二次イオンによる質量スペクトル、図5bはマグネシウムによるイメージである。図から明らかなように、径約1マイクロメートル長さ約20マイクロメートルの繊維が鉱物質の物質であり、その組成からクリソタイルであると推定できる。SIMSの像分解能は電子顕微鏡と比較して悪いので、非常に小さな繊維の検出は不可能であるが、元素特異的なイメージを容易に比較的短時間(1元素当り数分程度)で得られるという利点

もある。従って、アスベストを他の繊維状物質から区別したり、アスベストの種類を調べるのに有効であると考えられ、SIMSのアスベスト分析への応用が期待される。

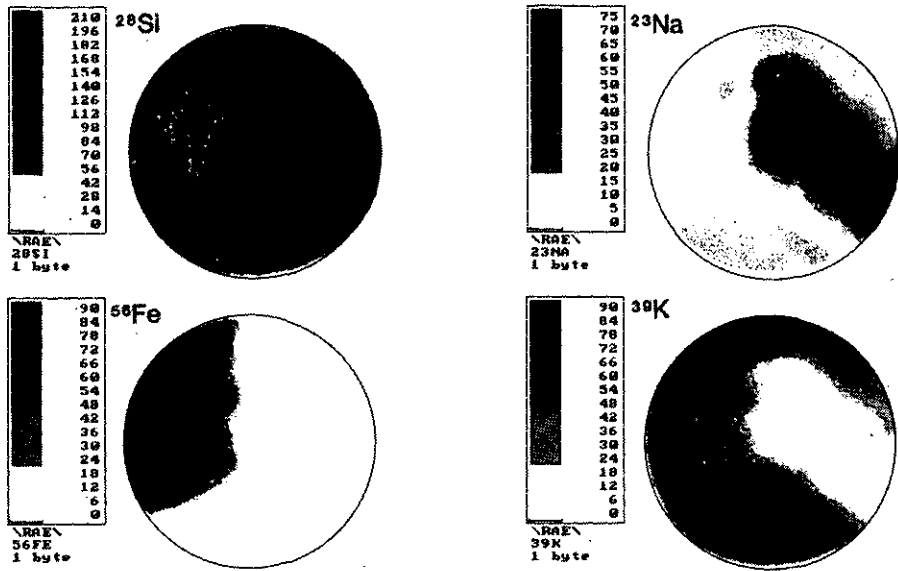


図4 FAB-SIMSによる花崗閃緑岩の分析  
ケイ素、鉄、ナトリウム、カリウムのイオンイメージ

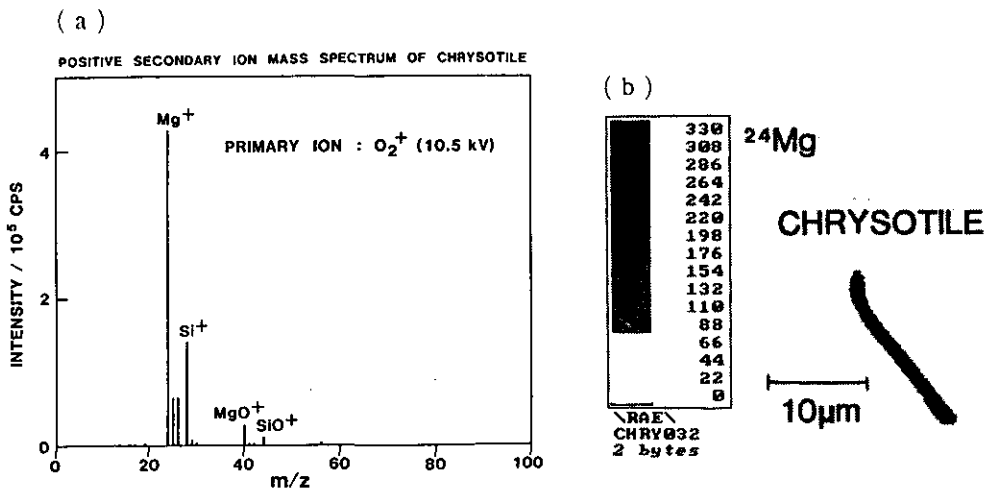


図5 SIMSによるアスベストの分析  
a) 正電荷を持つ二次イオンの質量スペクトル  
b) マグネシウムのイオンイメージ

# 成層圏オゾンの変動を探る

—— オゾンレーザーレーダーによる観測 ——

笹野 泰弘 (大気環境部)

**要旨** フロンガス等による成層圏オゾンの破壊の監視、オゾン濃度変動のメカニズムとその長期的変動の実態解明を目的として、オゾンレーザーレーダーを用いた観測を昭和63年度より開始した。この最新鋭のオゾンレーザーレーダーは下部対流圏から上部成層圏までのオゾン濃度高度分布を高精度で測定できるよう、高高度領域(主として成層圏)測定用と低高度領域(主として対流圏)測定用の2つのサブシステムから成り、それぞれ3波長のレーザー光を利用している。装置の原理、概要とこれまでの測定結果を報告する。

## 1. はじめに

最近では地球規模環境問題のひとつとして、新聞・テレビ等マスコミでも取り上げられることの多いフロンガス等による成層圏オゾンの破壊の問題に関連して、当研究所では昭和63年度より5ヵ年計画で特別研究「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」を開始したところである。この特別研究は成層圏オゾン濃度変動の実態とそのメカニズムを大気物理・大気化学の両面から、オゾン濃度の実測、室内実験、理論モデルの手段を用いて調べていこうとするものである。また、成層圏オゾンの変動がもたらす紫外線環境の変化と、その生体影響についても実験的に調べて行くこととしている(図1)。本報告では、これらの研究のうち成層圏オゾン濃度変動の実態解明を目的として導入したオゾン計測用レーザーレーダーについて少し詳しくご紹介したい。

フロンガスによる成層圏オゾンの破壊は、現在までに知られている知見によれば高度40 kmあたりを中心とする上部成層圏において最も顕著にその影響が現われると考えられている(図2)。成層圏オゾンは高度20~30 km程度の高度領域で高濃度となっているが、この領域でのオゾン濃度の減少はあまり大きくなく、また、対流圏では逆にオゾン濃度は増加するものと見積られている。したがって、フロンガスによる高層大気中のオゾンの破壊を早期に検出しようとするならば、上部成層圏に着目する必要がある。

実際、これまでに実施されてきた人工衛星センサーを用いた観測や、太陽光を光源とした観測(ウンケール法)データから過去数年間のオゾン減少率を評価してみると、図2に示すように上部成層圏(高度35 km以上)の領域でオゾン濃度の減少が見られる。理論的な計算から示される減少傾向が確かに現われており、フロンガスの影響と考えられている。しかしその一方で、図2は重要な示唆を与えている。すなわち、実測データ間、および実測データと理論計算の結果との間の定量的な不一致であり、この種の測定の高難度性を表わしている。オゾン濃度の減少率だけでなく、オゾン濃度の高度分布そのものについても、実測とモデル計算値の間に不一致が見いだされており、理論モデルについても尚、検討の余地が残されていると考えられている。このような事情から、上部成層圏のオゾン濃度を



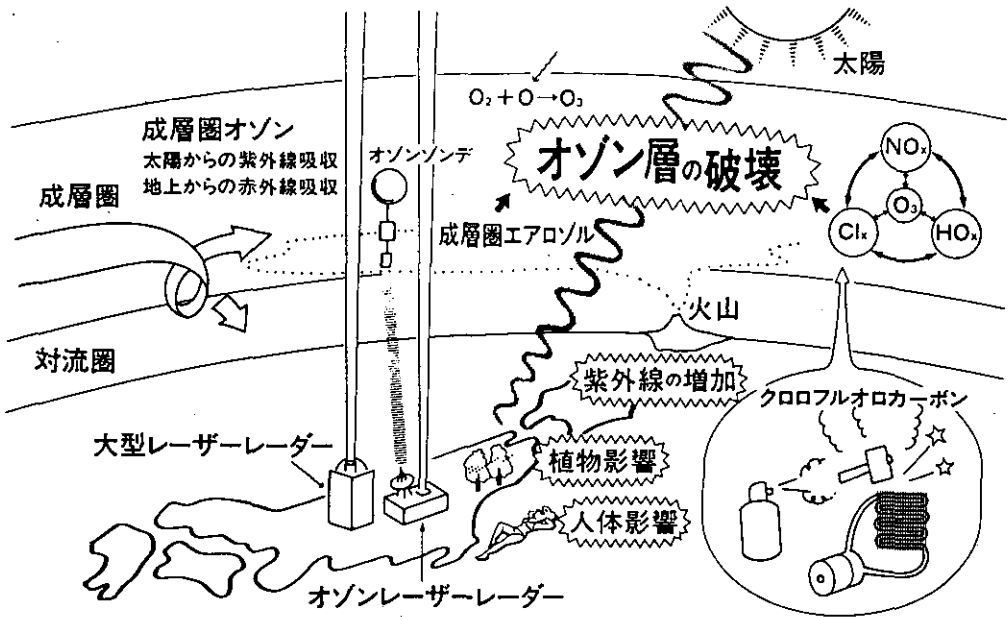


図1 特別研究「成層圏オゾン層の変動とその環境影響に関する基礎的研究」では、オゾンレーザーレーダー、大型レーザーレーダーを用いたオゾンおよびエアロゾル濃度の高度分布測定を行い、オゾン濃度変動の実態把握を行う他、成層圏チャンバーを用いたフロンによるオゾン破壊の室内実験、物理化学モデルによるオゾン変動予測、紫外線環境の変化による生体への影響などを多面的に研究する。

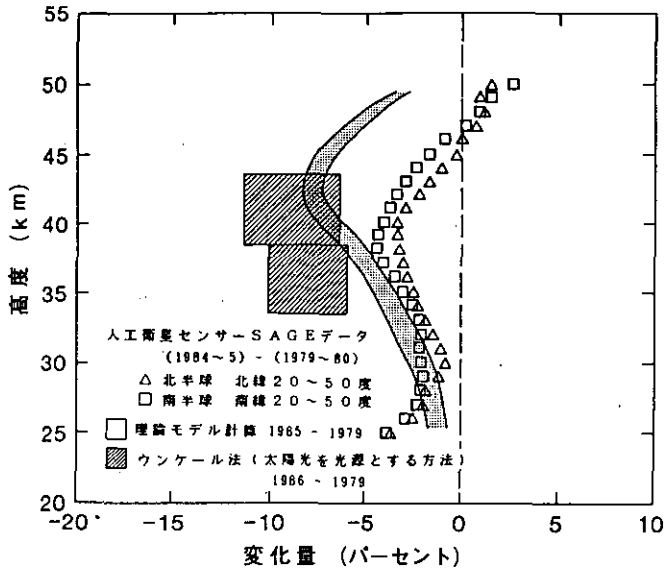


図2 過去数年間に起きたオゾン濃度の減少の割合 (NASA, 1988より)。人工衛星センサー-SAGE、ドブソン分光光度計を用いたウンケル法による実測値、および理論モデルによる計算値。全体的な減少の傾向は一致しているが、定量的には実測値間でも、実測値とモデル計算値の間でも一致しない。

高精度で測定し、種々の時間スケールでの変動現象(日々変動、季節変動、年々変動等)を正確に把握することがきわめて重要であり、多くの努力がなされてきているところである。

レーザーレーダーを用いた高層のオゾン濃度測定は1970年代後半から試みられており、高度分解能を持った測定法として最も有望なものと考えられてきた。国立公害研究所でもかねてよりレーザーレーダーを用い、低層大気汚染に関係する大気構造やエアロゾル・ガス成分の測定法の開発を行ってきたところであった。そこで、これまでに開発・蓄積してきたレーザーレーダー技術に関する知見を活かし、特別研究の一環として、成層圏・対流圏オゾンの計測を行うこととなった次第である。

## 2. オゾンレーザーレーダーの原理

レーザーレーダーによるオゾン濃度測定は差分吸収方式と呼ばれている。差分吸収方式では測定対象のガスによる光の吸収量を求め、これから濃度を算出する。すなわち、吸収の大きな波長のレーザー光と、吸収の小さな波長のレーザー光を用いてレーザーレーダー測定を行う。そして、両者の信号の比から光の吸収量を求め、さらに高度方向に微分することでオゾン濃度の高度分布が得られる(図3)。

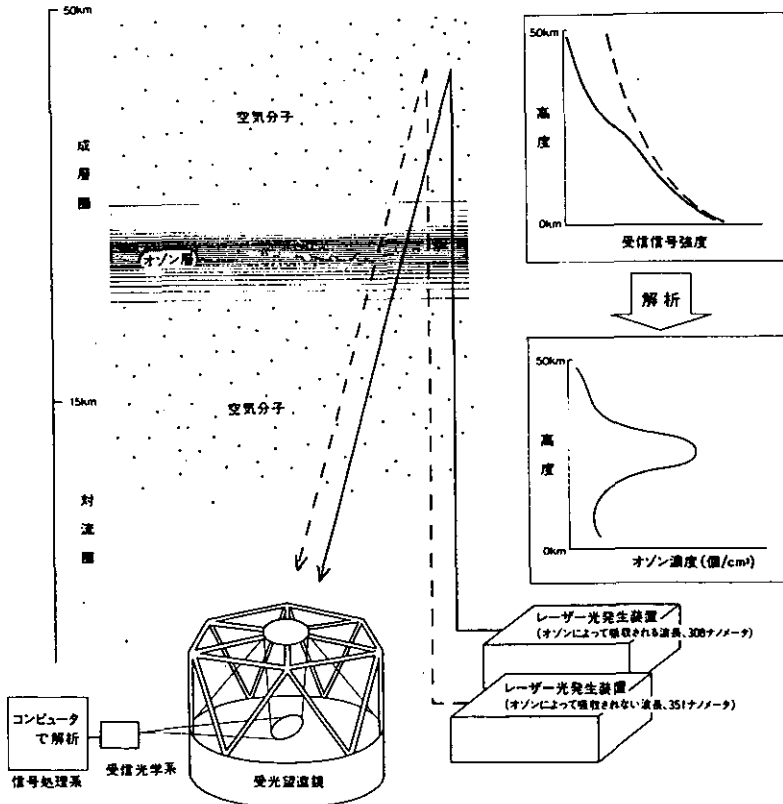


図3 レーザーレーダーによるオゾン濃度高度分布の測定の原理。オゾンで強く吸収される波長のレーザーパルス光とあまり吸収されない波長のレーザーパルス光を大気中に発射し、空気分子で後方散乱される光の強度の時間応答を測定する。両波長の信号の比をとり、さらに高度方向に微分するとオゾン濃度の高度分布が得られる。

成層圏オゾン層は太陽からの有害紫外線を吸収し、地上に生息する生物を守っていることはよく知られているところであり、またそれが故に成層圏オゾンの破壊が問題にされているわけである。レーザーレーダーによるオゾンの測定には、この紫外線が用いられる。つまり、波長が300 nm付近の、オゾンによる吸収のある波長領域の紫外線パルスが大気中に送りだし、空気分子による後方散乱光を受信する。有害紫外線を逆にうまく利用して、オゾン濃度を測定しようというわけである。

### 3. 国立公害研究所オゾンレーザーレーダー装置の概要

本装置の特徴を表1に簡潔に示した。ポイントは対流圏下部から成層圏上部までの測定を可能にするために最適化された2つのサブシステムからなること、エアロゾルの存在による系統的誤差を抑えるためにそれぞれのサブシステムで3つの波長のレーザー光を用いていること、高高度システムに直径2 mの大口径受信望遠鏡を採用していることである。

表1 国公研オゾンレーザーレーダーの特徴

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>・ 高高度、低高度システムの2系列を採用</li><li>・ 各システムで3波長のレーザー光を利用</li><li>・ 大口径（直径2 m）の受信望遠鏡</li></ul> |
|--|

### 4. 受信信号の処理

受信信号はレーザーレーダー方程式に従った差分吸収レーザーレーダーの式に基づいて、オゾン濃度に換算される。当面は、エアロゾル量が少ないと考えられる上部成層圏を対象としているので、3波長を同時に用いた解析は行っていない。むしろ、オゾンによる吸収の無視できる2波長の信号を比較することにより、受信信号における系統的誤差の有無を調べ、装置としての信頼性の確認を行っている。

図4に高高度、低高度両システムの受信信号の例を示した。いずれの波長の信号も、高感度、低感度の検出部を備えており、図に示したのはこれらから合成した信号である。高高度システムでは、近距離の強い信号を避けるためにメカニカルチョッパーと呼ばれる装置を検出部の前に置いており、したがってこの例では高度約20 kmまでは意味のない信号となっている。オゾンによる紫外線の吸収は波長250 nmを付近をピークとして波長が長くなるほど吸収が弱くなる。受信信号の高度に対する減衰の仕方にその特徴が現われているのが読み取れるだろう。

オゾン濃度は図4に示したような受信信号から、適当な波長の組合せで計算される。図5にオゾン濃度分布の例を示した。同図には高高度システムの結果のみが描かれており、波長と、高感度・低感度検出器の区別(H, L)が図中に示されている。また、図中の細かい曲線は測定誤差の幅を示している。測定誤差は、受信信号のショットノイズで決まると仮定して、受信信号の光電子数を基に理論的に計

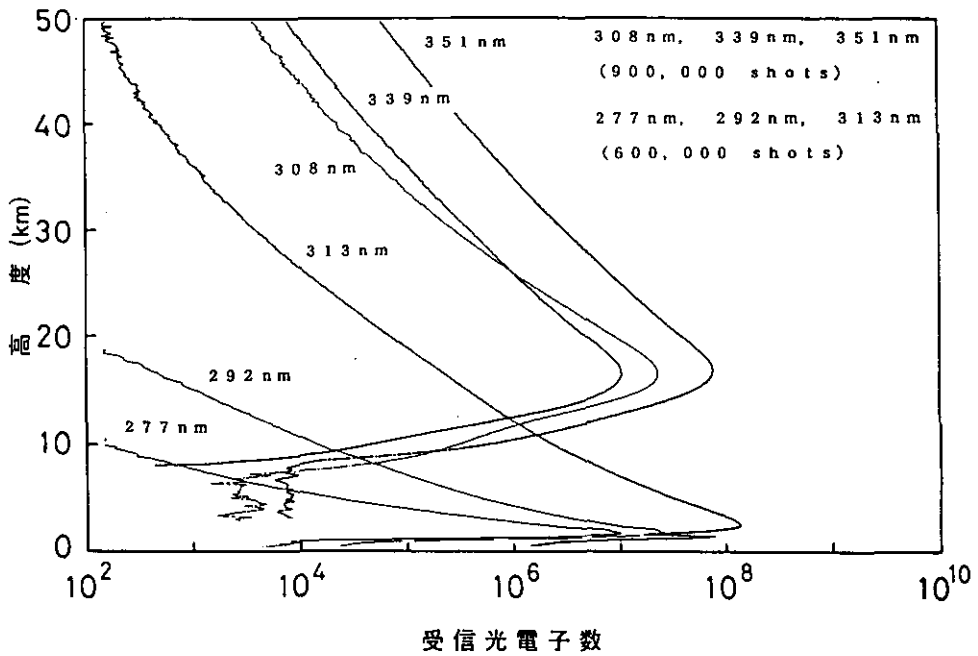


図4 オゾンレーザーレーダーによる受信信号の例。波長を図中に示した。いずれの波長の信号も、高感度検出器と低感度検出器の信号を組み合わせ、一本の曲線として表わした。オゾンによる光の吸収の強さの波長依存性が読み取れる。

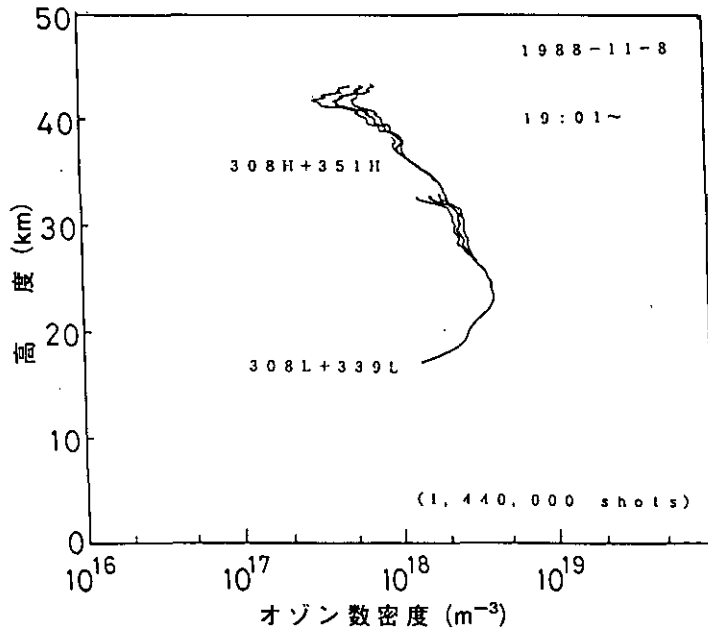


図5 オゾン濃度高度分布(太い実線)。1988年11月8日測定。高度30 km以上は波長308 nm, 351 nmの高感度検出器の受信信号を用いてオゾン濃度を求めた。30 km以下は308 nmと339 nmの低感度検出器の信号を用いた。細かい実線は測定誤差の幅を示す。測定には144万発のレーザーパルスを用い、距離自乗補正を施した信号に2 km幅の移動平均(2次式のあてはめ)をかけ、高度分解能2 kmとして差分をとり濃度を求めた。

算したものである。ただし、この計算では受信信号は距離自乗の補正の後、幅2 kmの移動平均(2次式のあてはめ)を施し、さらに2 kmの高度分解能で差分をとっている。

このようにして計算された測定誤差は、高度35 km、40 kmのそれぞれで2.8%、11.2%である。ショットノイズで決まる測定誤差と、高度分解能、平滑化の幅の理論的關係から、例えば高度40 kmで2%の測定精度を得ようとする測定時間を約8時間とし、平滑化幅・高度分解能ともに5 kmにする必要があることがわかる。

## 5. 最近の観測結果から

図6に昨年8月以来の観測のうちからいくつかを抜きだし、予備解析の結果をならべて表示した。それぞれの濃度分布は2時間から4時間程度の測定時間をかけ、また図5と同様に2 kmの平滑化幅、高度分解能を持たせたものである。これらのオゾン濃度分布は、米国標準大気モデルのオゾン濃度分布やその他の過去の観測結果とも比較的良好に一致しており、現在までのオゾンレーザーレーダー観測から見る限りはつくば上空の成層圏オゾンに大きな変化は見いだされていない。

年率1~2%に満たないと予想される系統的な濃度変化や、季節変化を論じるには多くの測定の積み重ねが必要であることが分かる。

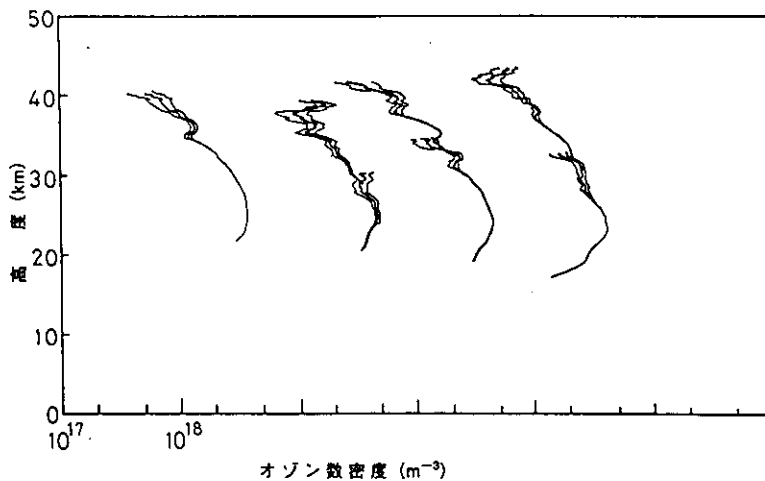


図6 1988年8月から1988年11月までの各月1例毎のオゾン濃度高度分布。左から順に、8月9日、9月14日、10月13日、11月8日。測定時間は2~4時間をかけている。横軸はデータ毎に1桁ずつずらせている。

## 6. 今後の課題など

これまで主として上部成層圏の高度40 km付近の精度の高い測定を目指して、装置の整備と測定手法の検討を進めてきた結果、装置的にはほぼ満足いく状態とする事が出来た。今後は、この領域の測定を継続的に実施していくことが必要である。さらに、下部成層圏を含め、種々の時間スケールでのオゾン濃度の変動現象についてその実態と変動機構の解明を行っていくことが、長期的な成層圏オゾンの変化を捉える上で不可欠である。また、対流圏オゾンについても地球温暖化の問題に関連してそのモニタリングの重要性は高いことから、早急に低高度システムの整備を進める。

# 21世紀に向けたわが国の環境問題の長期予測

森田 恒幸 (総合解析部)

**概要** 産業のソフト化、人口の都市集中、技術革新、高度情報化、国民の価値意識の変化、国際交流の活発化等、21世紀に向けたわが国の社会経済の基本潮流は、環境問題に大きなインパクトを与えようとしている。これらのインパクトを合計100近いシナリオに整理して、専門家に対するデルファイ調査及びコンピュータ・シミュレーションによって、シナリオの確からしさを体系的に検討した。この結果、このまま進めば21世紀初頭に特に交通公害及び廃棄物問題が深刻化し、また有害化学物質問題や自然保護問題も悪化するという見通しを得た。

## 1. 体系的な長期予測の試み

「予測」はそれを行った時点での一つの仮説であり、将来に向けての一つの可能性を示すに過ぎない。しかし、この種の仮説がなければ将来への対応が検討できない。いろいろな可能性を見定めて初めて将来の政策展開の方向が定まってくる。

21世紀初頭に向けてわが国の環境政策をどう展開していったらよいのか？ このような思考に「予測」は不可欠である。21世紀に向けて環境問題の行方を探り、問題の所在を明らかにして、その対応策を考える。こうした予測を体系的に行おうとしたのが本研究である。研究期間は昭和60年度から四か年で、当研究所の特別研究プロジェクトとして実施した。

この研究の全容を、図1に示す。予測対象が広範囲かつ長期に及ぶため、シナリオ分析を主体にして、専門家の知見を積極的に活用することを試みた。その手順は、まず、21世紀に向けてわが国の社会経済の基本的なトレンド(以下「基本潮流」と言う。)を明らかにし、この基本潮流が環境問題に及ぼすかについてのシナリオを作った。次いで、多数の専門家の知見を活

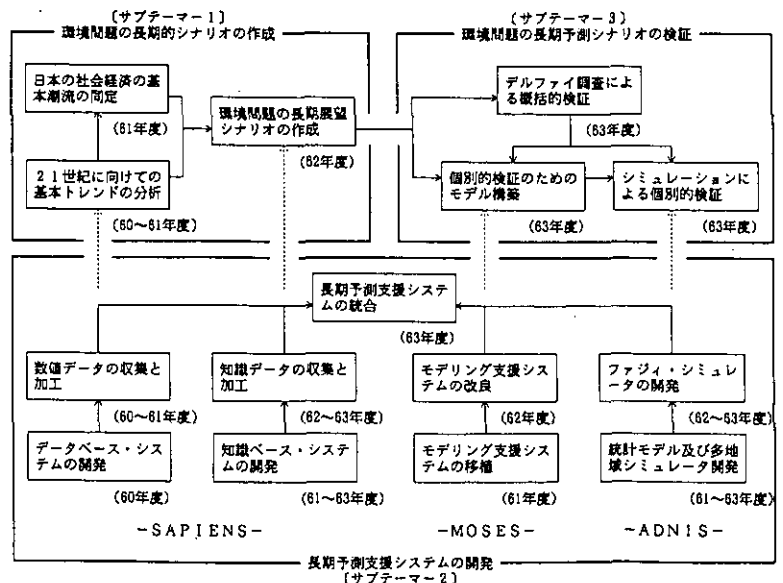


図1 環境長期予測研究の全体構成

用してこれらのシナリオの確からしさを評価するとともに、特に重要なシナリオについてはコンピュータ・シミュレーションによってさらに詳細に検討した。一方、これらの作業を効率的に支援するため、数値データや知識データを体系的に管理する情報システムを開発し、また、予測モデルの構築やシミュレーションを体系的に支援するコンピュータ・システムを開発した。この長期予測支援システムについては、昨年の報告で詳しく紹介したので、今回は予測の中身を中心に報告することにしたい。

## 2. 21世紀に向けたわが国の社会経済の基本潮流

まず、21世紀初頭に向けて日本の社会経済がどのように変わっていくかについて分析した。これには、過去の100件以上の長期予測事例をレビューするとともに、支援システムのデータベースを用いてトレンド分析を行った。この結果、以下に示す13種類の基本潮流が同定できた。

(1) 生活の質の向上：勤労者の実収入は今の5割以上増加し、時間消費型の消費が拡大する。(2) 余暇時間の増大：一週間の実労働時間はさらに5時間程度減り、余暇時間が増える。(3) ライフスタイルの変化：共同住宅に住む都市住民が増え、女性の社会進出が加速する。(4) 高齢化の進行：65歳以上の人口割合は15%を越え、20%近くまで急激に増える。(5) 都市化の進行：都市への機能集中や人口集中が続く。人口の7割以上がDID地区に集まる。(6) 地価の高騰：東京都心部の地価上昇は地方や住宅地にも波及して、高水準で安定してしまう。(7) 産業のソフト化：GNPの2/3は第三次産業で稼ぎ、その半分は知識サービス生産による。(8) 高度情報化の進行：通信、情報、映像の市場規模が2～5倍と急激に拡大する。(9) 技術革新の進展：新素材、マイクロエレクトロニクス、バイオの分野を中心に技術が進む。(10) エネルギー制約の推移：石油価格や環境問題の推移によりエネルギー供給は制約を受ける。(11) 森林経営の弱体化：国有林や民有林で森林経営の収支が悪化し、労働人口の高齢化が進む。(12) 国際化の進展：国際的な情報交流や人の移動が活発化し、企業の海外進出も増える。(13) 湾岸開発の進展：東京湾を中心に、埋立てを含む湾岸部の面的開発と交通網の整備が進む。

## 3. 環境問題の長期展望シナリオ

次いで、この基本潮流が環境問題に与えるインパクトについて、各種のシナリオを作成した。検討対象は、最近各方面から問題が指摘されている環境分野で、図2に示すとおり、都市アメニティ問題(交通公害や自然保護等の下で扱う問題を除く)、交通公害問題(道路交通公害のみを対象)、水質汚濁問題(有害化学物質問題を除く)、廃棄物問題(有害化学物質問題を除く)、有害化学物質問題、自然保護問題(都市近郊の自然の保全を含む)、環境保全への市民参加、の7分野とした。

これらの分野毎にシナリオを作成する際、四つの前提を置いた。第一に、21世紀初頭(2001年～2010

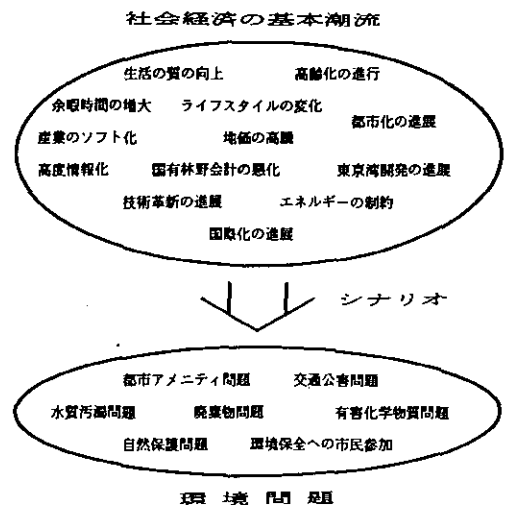


図2 予測シナリオの概念図

年)の状況を展望すること、第二に、展望の前提条件は上述の社会経済の基本潮流だけで、関連する政策の大幅な転換は前提としないこと、第三に、展望は日本全体の視点から行い、特別な場合を除いて特定の地域に限定した展望は行わないこと、第四に、シナリオはインパクトの各側面について必ず楽観的な展望と悲観的な展望の二つを用意すること、である。最後の条件は客観的な予測を行うために特に重要である。恣意的で偏った判断を排除する効果がある。

各シナリオは150字から300字程度の文章の形で表現された。例えば、産業のソフト化が交通公害問題に影響を与えるシナリオのうち、悲観的シナリオは、「産業形態が重厚長大型から軽薄短小型や遊創感美型に変化することにより、物流の小口化が進み、交通頻度は増加する。また、ファッション産業や情報関連製造業等の都市型産業が成長するが、これらの産業は需要地である都市部あるいはその近郊に立地することになり、都市及びその周辺部に新しい工場が増えて新規に交通が発生する。この結果、産業のソフト化は交通公害を悪化させてしまう。」というものである。こうして作成されたシナリオは合計210種類もの数にのぼった。

#### 4. デルファイ調査によるシナリオの概括的検証

以上のシナリオを概括的に検証するため、デルファイ調査を実施した。この方法は、専門家の優れた直観を周到かつ組織的に引き出す方法として広く用いられており、通常、二回のアンケート調査を繰り返して実施し、専門家に情報をフィードバックしながら判断の適正化を図る工夫がされている。ここでは、図3に示すように、従来の方法に二つの改良を加えて適用した。この改良点は、第一に、先に作成したシナリオの評価を中心に調査票を設計したことであり、第二に、ファジイ理論を使って専門家の曖昧な判断を体系的に集計したことである。

調査は、七つの環境分野に加えて、東京湾の開発と保全問題を特別に一つの分野として、合計八つの分野に分けて実施した。そして、各分野の専門家、延べ234名(回収率72%)から回答を得た。この回答は、シナリオの評価、シナリオが実現した場合の影響の度合い等について判断されたものであり、この集計結果から、合計95のシナリオが実現の度合いが高いものとして選ばれた。

この結果の概要を整理して、表1に示す。この表により、環境問題の長期的変化の方向を概括的に把握することができる。主な傾向として、(1)都市化、地価上昇、生活向上、湾岸開発等の潮流は環

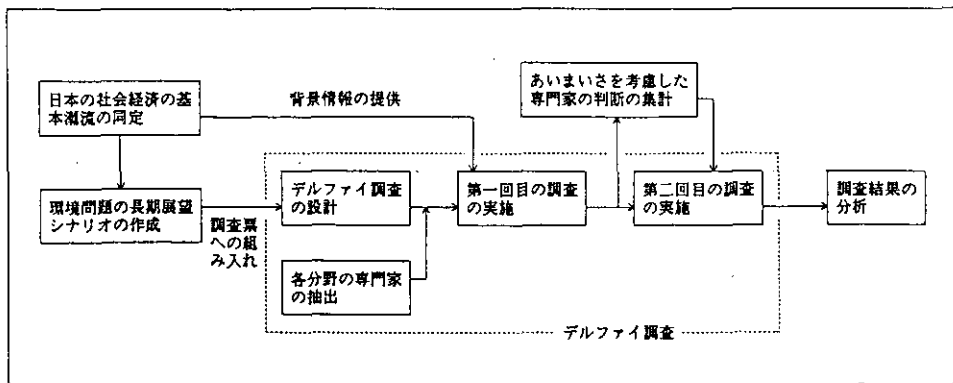


図3 デルファイ調査の全体手順



境問題を悪化させる方向に作用し、(2)国民意識の向上や定住志向の高まり等は問題を改善させる方向に、(3)産業ソフト化、技術革新、国際化の影響は両方向の可能性があるのである、などが読み取れる。

### 5. 詳細な分析と総合的考察

デルファイ調査で絞り込んだ95のシナリオのうち、特に重要なシナリオについてコンピュータ・シミュレーションを行い、さらに詳細な検証を行った。対象としたシナリオは、湾岸開発に伴う交通公害、都市化に伴うアメニティ変化などである。図4には、東京湾開発が進んだ場合の東京圏の二酸化窒素濃度のシミュレーション結果を示している。これらの計算結果は、いずれもシナリオの妥当さを示すものであった。

以上の検討結果を総合して21世紀初頭の環境問題を展望した。その結果をとりまとめて、表2に示す。ここには、各分野毎に予測結果の概要を整理するとともに、十分解明されていない点や本質的に不確定な要因のうち、予測結果に大きく影響すると予想されるものを併せて列挙している。

この一連の予測作業の結論は、次のようにまとめることができる。即ち、21世紀初頭に向けて現在のまま進めば、交通公害問題と廃棄物問題は総じて悪化の方向、有害化学物質問題と自然保護問題はやや悪化の方向、水質汚濁問題は方向が読みにくく、都市アメニティ問題はやや改善、環境保

表1 デルファイ調査によって支持されたシナリオの一覧

環境問題 基本潮流	都市ア メニテ ィ問題	交 通 公 害	通 信 問 題	水 質 問 題	質 量 問 題	廃 棄 物 問 題	有 害 化 学 物 質 問 題	自 然 保 護 問 題	環 境 の 開 発 に 関 連 す る 問 題	そ の 他 の 問 題
生活の質の向上		●●		●●○	●●	●●				
余暇時間の増大				●●○				●●		○○
都市住民の ライフスタイル の変化	○○									○○
高齢化の進行	● ○									○○
都市化の進展	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●	●●		
地価の高騰	●●	●●							●●	
産業のソフト化	●○○	●●	▲ ○	●●	●●○	●●○	● ○			○
高度情報化の 進行		●●					○			○○
技術革新の進展		● ○	●○○	● ○	●●○	●○○	●○○			
エネルギー制約 の推移		● ○			●●					
国際化の進展	○○		● △	●	● ○	●●○	●●○			○○
東京湾開発の 進展		●●	●●○	●●			● ○			●● 災害リ スク等
その他 の環境 問題	○○	○				●●	○	○○	○○	
総合的展望	○	●●	● ○	●●	●●○	●●○	●●○			○○

【記号の説明】  
 ○●○●△：環境改善の方向への影響が大/中/小と判断された楽観的シナリオ  
 ●●●●▲：環境悪化の方向への影響が大/中/小と判断された悲観的シナリオ

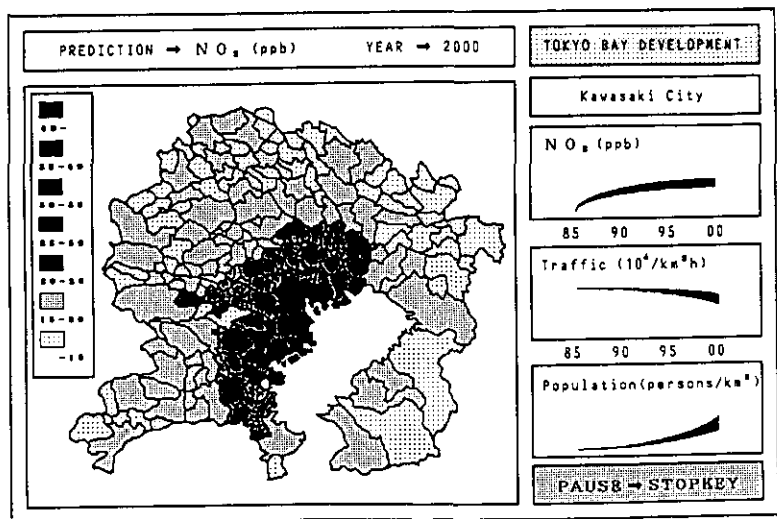


図4 東京湾開発に伴う大気汚染の予測結果

表2 各分野の長期予測結果のまとめ(政策の大幅な変更が無く、現状のまま推移するケースを仮定)

分野名	21世紀初頭に向けた展望	展望を左右する不確定要因
都市 アメニティ 問題	(1)総合的にみて都市アメニティは現状よりかなり向上する。 (2)国際化の進展は都市アメニティに対する国民の欲求水準を高め、都市アメニティの向上に貢献する。 (3)大都市や中核都市では再開発等の集中的な投資が促進されて都心部を中心にアメニティが向上する。 (4)また、地方都市でも住民の自主的な環境づくりや行政による魅力ある街づくり施策の推進によって、改善の方向に進む。 (5)一方で、一般住宅地や都市周辺部では地価の高騰やスプロール化によってアメニティが低下し、地域間の格差が広がる。	(a)地方都市で、アメニティ向上のためどの程度財源が確保できるかについて、見通しが不確定。 (b)高齢化に伴う福祉や医療への支出増がアメニティ関連財源をどの程度圧迫するか、予測が困難。 (c)都市住民の価値観の多様化が都市のアメニティ形成にどう影響するか不確定。 (d)開発途上国からの労働者の流入がアメニティ低下をもたらすが、この流入抑止策が予測困難。
交通公害 問題	(1)大都市での慢性的な交通公害の状況は、今後更に悪化する。 (2)この悪化の主な原因は、大都市への人口・産業の集中と交通の質の変化である。 (3)サービス化や高度情報化などの産業構造の変化は、都市への産業集中傾向を加速させる。 (4)高度情報化は物流の合理化に寄与する以上に集中化を加速。 (5)物流サービスへの欲求の高度化により、宅配やJ1Nのような小口高頻度交通を増加させてしまう。 (6)交通公害解決のための革新的な技術の普及には時間がかかる。	(a)発生源対策における技術革新や、それを誘導するエネルギー価格・省エネルギー等のエネルギー制約の推移が不確定。 (b)エネルギー制約はまた、輸送コストを通じて流通システム合理化の進展を左右する。 (c)道路網の計画の整備と中核業務都市構想による都市機能分散がどの程度進展するか予測困難。 (d)交通公害に対する住民意識の向上が、どの程度政治的力を持ちうるか、見通しが不確定。
水質汚濁 問題	(1)顕著な改善は見込めないものの、全般的に改善傾向は示す。 (2)しかし、都市部への機能の集中や埋立てによって、内湾部等の一部水域では水質が悪化する。また、身近な水辺の消滅は今後も食い止めることは難しい。 (3)一方、都市部以外でもリゾート施設の集中立地によって、局所的に水質汚濁や水辺破壊の問題が生じる。また、水源水域の飲料水の汚染も問題化する可能性がある。 (4)排水処理の新技術が開発されるが、普及には時間がかかる。 (5)海洋汚染問題が国際的な関心のもとに注目を集める。	(a)海外からのエネルギーや原材料の供給制約により汚濁負荷が変化するが、この予測が困難。 (b)異常気象の見通しが難しく、渾水の発生等による水質汚濁や水資源開発への影響は不確定。 (c)水質改善は下水道事業等の水質保全対策事業に大きく依存するが、財政問題や住民の反対等によりこの事業の進展は簡単に見通せない。 (d)沿岸部や湖岸部のいわゆるウォーターフロント開発の進捗の見通しも、不確定な要因が多い。
廃棄物 問題	(1)全般的に、現状より問題が複雑化し、解決の困難さが増す。 (2)特に産業廃棄物については、技術革新の進展や産業構造のソフト化に伴いその質が複雑化して、処理処分が困難になる。 (3)一般廃棄物についても、製品・商品の多様化や産業のソフト化、生活レベルの向上などによって、事業系ごみの量が増大するとともに、事業系及び家庭系ごみの質の悪化が進む。 (4)都市化や再開発の進展、地価の高騰等により最終処分の確保が困難となり、これを是正する技術開発は追いつかない。	(a)最も大きな不確定要因は、廃棄物問題に対して人々の意識がどの程度変化するかである。市民の危機意識が高まれば、廃棄物発生量を抑えて研究開発への投資や制度の整備が進展する。 (b)技術革新の見通しも不確定である。廃棄物処理のための技術革新はある程度期待できるが、生産系の技術革新に比べれば悲観的要素も多い。
有害 化学物質 問題	(1)全般的に、多様な有害化学物質に曝露される可能性は高まる。 (2)技術革新の進展は、多様な化学物質を生み出すことになる。 (3)産業のソフト化は、化学物質の管理を多様化・複雑化させる。 (4)都市化の進展は、工場隣接地や工場跡地での開発を促し、これらの地域で化学物質曝露の危険性が高まる。 (5)貿易の拡大により海外からの有害化学物質のリスクも増える。 (6)化学物質の管理に高度な監視能力と多大の経費が必要となるため、一部の地方公共団体では対応が難しくなる。	(a)有害化学物質のリスクは、管理の方法によって大きく左右されるが、このための国内的・国際的な制度とその適用の見通しが不確定である。 (b)有害化学物質の環境汚染やその影響を評価・監視するための手法開発の見通しが不確定であり、このリスクが正確に把握できるか予測困難。 (c)その他、国民の意識や国際世論の高まり、技術革新による代替化学物質の開発も不確定要因。
自然保護 問題	(1)わが国の自然保護問題は、少なくとも現状より悪化する。 (2)都市周辺部では、都市化の進展により丘陵地や田畑が宅地化され、都市遠隔地や過疎地では、リゾート開発、過疎対策のための土木事業、森林経営の弱体化等により自然破壊が進む。 (3)安価な外材や農産物の輸入や貿易摩擦の外圧といった国際的要素によっても、自然保護の展開に制約が課せられる。 (4)一方で、自然保護に対する国民の関心が高まり、関係する施策の展開を促す。また、産業のソフト化に伴う自然へのプレッシャーの減少や自然保護分野での技術革新も期待できる。	(a)最も大きな不確定要因は、自然保護に関する国民の関心などの程度の高まり、どこまで組織化されて具体的な政策に結びつくかである。 (b)また、国際化の進展、産業のソフト化、技術革新の各潮流が自然保護に及ぼす影響には、プラス・マイナスの両面があり、一つに絞れない。 (c)国有林の経営体制の行方は自然保護行政に影響を与えるが、現状では予測が難しい。
東京湾地域 の開発と 保全問題	(1)東京湾地域の開発は間違いなく進展するが、その規模については見通しが大きく分かれる。また、開発に伴う交通網などの施設整備についても、大きな市の中で見通しが揺れ動く。 (2)しかし、この開発が東京湾地域の環境に及ぼす影響については、水質汚濁、交通公害、廃棄物、災害問題にわたってかなりの悪影響が予測される。 (3)ただし、自然生態の再生や環境対策の充実によって、一部地域の自然が再生され、水質が改善する可能性も残されている。	(a)用地需要が既存埋立地や未利用跡地の転用でまかなえるか、かなりの新規埋立が必要かについて、見通しが大きく異なる。 (b)交通施設整備の進捗予想についても、不確定な要因が多い。 (c)中核業務都市構想や副都心構想による都市機能分散策がどの程度効果を発揮するかによって、予測が大幅に異なるが、この見通しが不確定。
環境保全 への 市民参加	(1)環境保全への市民参加は、現在の水準よりも向上する。 (2)高齢化の進行、余暇時間の増大、女性の社会進出等によって環境問題に市民が自主的に参加する機会が増える。 (3)教育の高度化や国際化の進展は、参加意識を高揚させる。 (4)高度情報化の進展や環境関連産業の台頭は、情報や資金の提供等によって市民参加を支援する可能性が高い。 (5)その一方で、地価の高騰や住宅の高層化などによって、コミュニティ意識が低下し、参加意欲が減る可能性もある。	(a)高齢化の進行や余暇時間の増大により、確かに時間的余裕は増えるが、この時間を果たして環境問題の解決に割くかどうかは、甚だ不確定。 (b)市民参加の活性化は行政側の対応によっても大きく影響を受けるが、行政に市民意識の高揚を受け止める体制づくりができるかも、不確定。 (c)地価の高騰による都市のコミュニティの今後の動向にどの程度、予測が非常に難しい。

全への市民参加は活性化の方向に推移する可能性が高い。

## 6. 政策立案の体系的支援に向けて

以上の予測結果はあくまでも現時点のもので、今後、状況変化が生じたり具体的な政策立案をする時点で予測を修正していかなければならない。しかし、本研究の成果を使えば、その作業は非常に効率的に行うことができる。

まず、得られた95のシナリオは全て知識ベース・システムの中に関連データとともに収録されており、検索や表示のほか、図5に示すようなシナリオどうしの連結、さらには計算機による推論も可能となっている。これを使えば予測の主要なシナリオは全てまにあう。また、具体的な政策立案の際にはさらに詳細な予測シミュレーションが必要と考えられるが、本研究で開発した長期予測支援システムを用いれば、この種のモデルづくりやシミュレーションは容易である。こうして本成果を政策立案の場で活用していくことをめざしている。

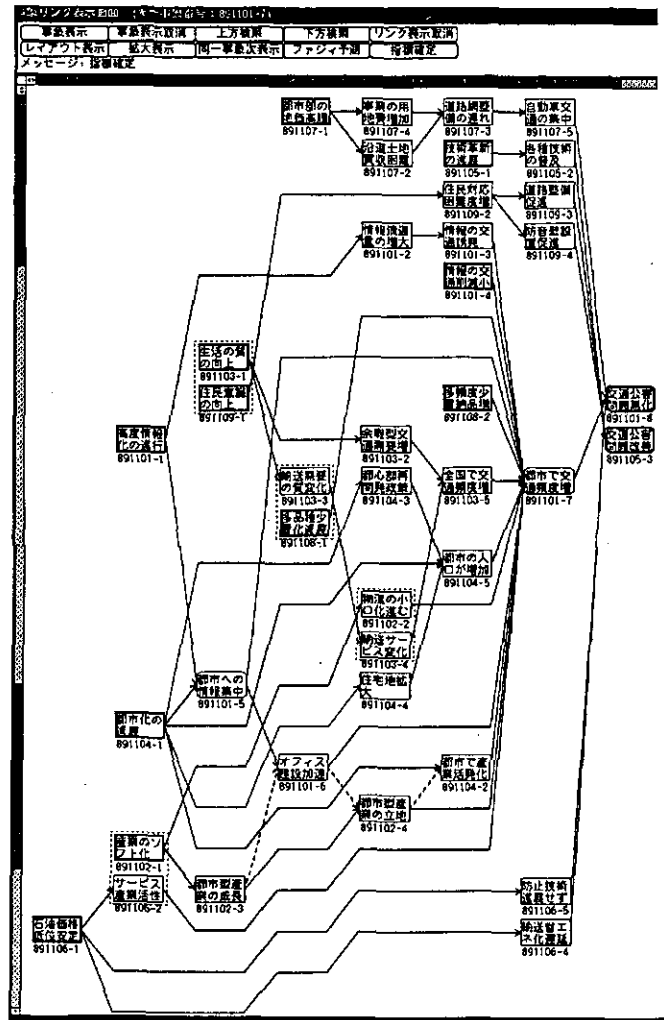


図5 知識ベースで処理した交通公害の予測シナリオ

最後になったが、この研究成果は、甲斐沼美紀子(システム開発・デルファイ調査)、中森義輝(システム開発)、内藤正明(東京湾開発と保全)、西岡秀三(交通公害)、中杉修身(有害化学物質・廃棄物)、後藤典弘(廃棄物)、大井紘(市民参加)、原沢秀夫(水質汚濁)、井村秀文(都市アメニティ)、伊藤訓行(自然保護)の各氏との共同研究によって得られたことを付記する。

【平成元年5月10日編集委員会受理】

[国立公害研究所資料 F-11-'89/NIES]

国立公害研究所研究発表会予稿集 第12号  
(SS/OT-12-89)

問い合わせ先：国立公害研究所セミナー委員会

---

平成元年5月29日発行

発行 環境庁 国立公害研究所  
〒305 茨城県つくば市小野川16-2

---

印刷 株式会社 イセブ  
茨城県つくば市天久保2-11-20