

環境の生物指標としての植物

豊 国 秀 夫
信州大学教養部生物学教室

Plants as Bio-indicators of Environment

Hideo TOYOKUNI

Biol. Inst., Fac. Liberal Arts, Shinshu Univ. Matsumoto

Key words : bio-indicator ; plants ; environment

生物指標;植物;環境

はじめに

生物が、自然環境の評価に使用されるようになったのは、かなり古い時代からであると考えられる。例えば、紀元前のギリシアの哲学者であったテオフラストス (Theophrastos) は、彼の著 "De Historia Plantarum (植物誌)" の中で、さまざまな環境条件下で生育する植物について述べているので、植物が自然環境の指標になりうることを示唆している。日本でも幾つかのことわざの中で示されるように、大昔から生活の知恵として、環境の指標となりうる生物を様々な場合に利用してきたと考えられる。しかし生物学の範囲内で植物が環境評価に使用されたのはそれほどふるい時代とは考えられない。筆者の知るところでは、1936年に、竹内 亮によって、養賢堂発行の「実験生物学集成」の中の1冊として「植物利用環境測定法」という当時としては画期的な表題の本が公刊された。その後、植物生理生態学の立場で、様々な環境がいろいろな植物群に及ぼす影響に関する研究は非常に活発となり、その方面の論文は枚挙に暇がないほど多数出版された。

1960年代に入り、各種工業の高度成長に伴って、日本の各地で公害問題が起こった。最初は、機器を使用して、各種環境汚染の実体が明るみに出てきたが、高価な機器を使用しての環境汚染のモニタリングは、測定する場所も数も限定され、また複合的な汚染の実体を把握することが非常に困難なことが判ってきた。そこで、経費もあまりかからず、誰でも簡単に観察できる、生物を利用した、環境変化の評価が、60年代の後

半に登場してきた。いわゆる生物指標である。特に、1974年に国際植生学会のシンポジウムが日本で開催され、テーマの一つに "Environmental Pollution and Biological Indicators (環境汚染と生物指標)" があり、そこで、5つの発表があった。それを契機として、生物指標の研究が益々活発になった。

生物指標

生物指標を利用した環境の評価は、藤山静雄氏が3つのカテゴリーに分類できることを指摘されている (藤山静雄 1989)。本報では、その中の2番目の指標生物法について、植物に焦点を絞って考察する。

指標生物法は、利点も多いが、欠点も決して少なくはない。松中昭一氏 (1979) によると、次のように、利点が8つ、欠点が6つある。

A. 利点

- (1) 要因を複合的・総合的にとらえうる。
- (2) 広域および長期間にわたり要因の蓄積をも知りうる。
- (3) 特定汚染要因の把握が可能な場合もある。
- (4) 人間への影響として理解・換算しやすい。
- (5) 高価な機器を必要とせず、経費がかからない。
- (6) 簡便で高度の技術は不要。
- (7) 環境美化にも貢献する。
- (8) 調査を秘密裡に実施できる。

環境の生物指標としての植物

B. 欠点

- (1) 結果のばらつきが大きい。
- (2) 結果の数量化がむずかしい。
- (3) 環境汚染以外の要因の影響を受ける場合がある。
- (4) 多くの労力を必要とする。
- (5) 指標生物自身の管理に格別の配慮が必要な場合がある。
- (6) 汚染が極限値をこえれば指標生物は死滅する。

指標植物

まず、指標植物全般について、日本自然保護協会編「指標生物」(1988)における大野正男氏の解説に、一部筆者の見解を加えて、瞥見すると次のようになる。

I. 土壌

(1) 土壌の肥瘦

i) 肥沃地 オニグルミ、サワグルミ、カツラ、カエデ属(Acer)、アオキ、ニワトコなどの木本、ヨモギ属(Artemisia)、アカソ、イラクサ、ツリフネソウ、モミジガサなどの草本、ミゾシダ、リョウメンシダ、カツモウイノデなどのシダ植物が多い。

ii) 痩せ地 アカマツ、スダジイ、ヤマモモ、アセビ、リョウブ、ヤマツツジ、シャシャンポ、ミツバツツジ、ハギ属(Lespedeza)などの木本、ススキ、ウラジロ、コシダ、ワラビなど草本およびシダ植物。

(2) 土壌の水分

i) 多湿地 ヤチダモ、ハンノキなどの木本、ヨシ、ヌマガヤなどの草本、ヒメシダなどのシダ植物。

ii) 微湿地 ノカラマツ、ハハコグサ、オギなどの草本。

iii) 普通地 多数あり、枚挙の必要なし。

(3) 酸性度

i) 酸性 ギシギシ、ヒメスイバ、コシカギク、コメススキ、スズメノヒエ、スズランなど。

ii) アルカリ性 ハチジョウナなど。

(4) 特殊土壌

i) 超塩基性岩土壌 超塩基性岩植物
(ultrabasicosaxicolous plants)

ii) 石灰岩土壌 石灰岩植物
(calcicolous plants)

iii) N含有量の多い土壌 ハコベ、メヒシバ、ミゾソバなど。

IV) NaClの多い土壌 塩生植物(halophilous plants; halophytes) アッケシソウなど。

II. 水

(1) 水深

i) 浅い ヨシ、ガマなど。
ii) やや深い ヒツジグサ、オヒルムシロ、ヒシなど。

(2) 酸性度

i) pH 5.0-7.5 ジュンサイ、ヒツジグサなど。

ii) pH 6.0-10.0 ガガブタ、ヒシなど。

(3) 無機 N-P 濃度

i) 低い ヒツジグサ、ジュンサイ、ホソバミズヒキモなど。

ii) 高い ガガブタ、ヒシなど。

III. 大気

(1) 常風の風向 アカマツ(新芽 春)、イチョウ、カキなど(樹形 初夏)、ヨシ(葉の向 冬)。

(2) 空中湿度の高さ 地衣植物、コケ植物、着生ラン類、葉面着生藻類など。

IV. 気候帯

(1) 熱帯

ヤシ類、バショウ類、タコノキ属(Pandanus)など。

(2) 亜熱帯

モクダチバナ、ソテツ、アダン、オヒルギ、ピロウ、ヘゴ、オオタニワタリなど。

(3) 暖帯(低地帯)

カシ類、シイ類、ツバキ、ヒサカキ、タブ、クスノキ、ヤブムラサキなど。

(4) 温帯(山地帯)

ブナ、ミズナラ、コナラ、カシワ、クリなど。

(5) 亜寒帯(亜高山帯)

シラビソ、オオシラビソ、コメツガ、ダケカンバなど。

(6) 寒帯(高山帯)

ハイマツおよび高山・寒地植物。

V. 環境変化

(1) 大気汚染 葉状地衣(ウメノキゴケ)、着生コケ、植栽樹(スギ、マツ、ケヤキなど)、その他(アサガオ、ペチュニア、ソバ、タバコ、アオウキクサ、コケ類)。

(2) 放射能汚染 ムラサキツユクサ、マツヨイグサ。

(3) 水汚染 着生藻類、水草。

(4) 土壌汚染 ダイズ、コムギ、コンニャク、エンバク、イネ、エンドウ、トマト、ミカンなど。

(5) 都市化・人里化 各種帰化植物の侵入、植物相の組成変化。

(6) 集落の跡 イチョウ、キリ、ウメ、シュウカイドウなどの植栽植物の存在。

VI. 産業

(1) 植林適地

i) スギ(イノデ、ジュウモンジシダなどの生

えている所)。

ii) ヒノキ (ベニシダなどの生えている所)。

(2) 作物の豊凶

i) 豊作 ヤマザクラの花期が早い。コブシの花つきがよい。

ii) 凶作 マンサクの花がつかない。ヤマザクラの花期が遅い。

(3) 草地の放牧利用度

i) ワラビ、ナワシロイチゴなど家畜の食わない植物の増加。

ii) シロツメクサ、オオバコなど踏みつけに強い植物の増加。

iii) スズメのカタバヒラなど1年生草本の増加。

(4) 鉢床の存在 ヘビノネゴザ (重金属を細胞内に蓄積)、イワマセンボンゴケ (銅を好む)。

指標植物の実例

ここでは指標植物の実例として、大気汚染全般に対しては、樹木、特にスギとケヤキに的を絞って、個別大気汚染に対しては、光科学オキシダントを感知するアサガオと PAN を感知するペチュニアをあげることにする。

(1) 大気汚染全般

大気汚染全般をモニターする目的のためには、大気汚染に弱い植物を、指標植物として選定する必要がある。第1表は埜田 宏氏 (1974) による、主要樹木の大気汚染耐性を示す表である。

ここでは、耐性の弱い樹木の代表として、常緑高木のスギ、落葉高木のケヤキを例にあげる。農林水産省の森林総合科学研究所 (旧 農林省林業試験場) では、土壌条件の悪化をも含めた環境悪化の指標としてスギとケヤキの衰退の程度を5段階に分けて大気汚染悪化のスケールとして使用している (山家義人 1973、松中昭一 1976・1979、井上敏雄 [只木・吉良] 1982)。但し、実際には、絶対的な比較をすると、スギはケヤキよりも1段階弱く、ケヤキの4はスギの3に相当する。このスケールによって、調査した結果は地図上に示し、第2図のように整理する。通常、とりまとめはスギで行い、スギのない場合は、ケヤキの結果をスギに換算して表示する (山家義人 [松中昭一] 1979)。

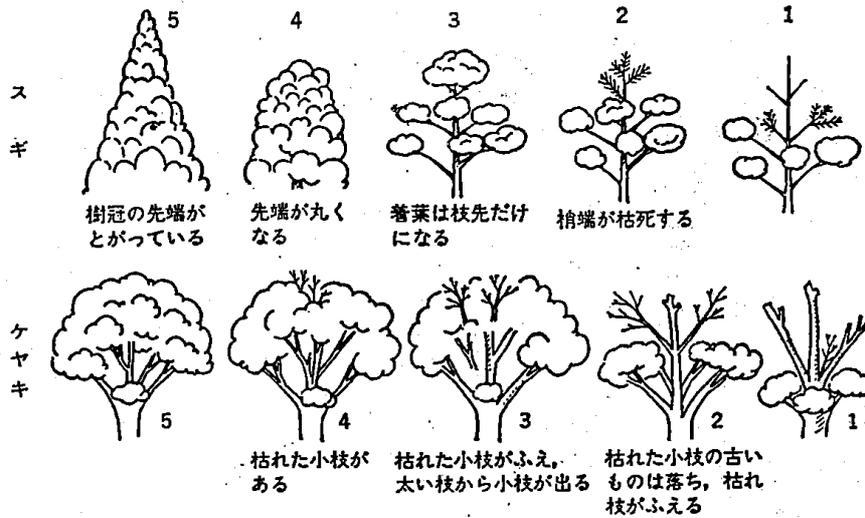
上記の、スギ・ケヤキの5段階評価とは別に、1972年に科学技術庁から出された4段階評価による「樹木活力指標の評価基準」という別のスケールもある (第2表)。この評価では、スギ・ケヤキの場合とは反対に、数が少ないほうが健康となっているので注意を要

する。

第1表. 樹木の大気汚染耐性 (埜田 宏 1974)

強弱	種名	科名	生活形	栽培できる地	繁殖法
耐性の弱いもの	アカマツ	マツ	常緑針葉高木	暖帯～温帯	実生
	モミ	マツ	常緑針葉高木	暖～温	実生
	ヒマラヤスギ	マツ	常緑針葉高木	暖～温	実生・さし木
	スギ	スギ	常緑高木	暖～温	実生・さし木
	シラカシ	ブナ	常緑高木	暖～(温)	実生
	ケヤキ	ニレ	落葉高木	暖～温	実生
	ムクノキ	ニレ	落葉高木	暖～温	実生
	エノキ	ニレ	落葉高木	暖～温	実生
	ハルニレ	ニレ	落葉高木	(暖)～温	実生
	フサザクラ	フサザクラ	落葉高木	暖～温	実生・さし木
ヒュウガミズキ	マンサク	落葉低木	暖～温	さし木・実生	
キンシバイ	オトギリソウ	半常緑低木	暖～温	さし木・実生	
耐性中程度のもの	クロマツ	マツ	常緑針葉高木	暖～温	実生
	イスマキ	マツ	常緑針葉高木	暖～(温)	さし木・実生
	ヒノキ	ヒノキ	常緑高木	暖～温	実生・さし木
	カヤ	イチイ	常緑高木	暖～温	実生
	アカガシ	ブナ	常緑高木	暖～温	実生
	シイノキ	ブナ	常緑高木	暖～温	実生
	タブノキ	クスノキ	常緑高木	暖～温	実生
	シロダモ	クスノキ	常緑高木	暖～温	実生
	サンゴジュ	スイカズラ	常緑低木～小高木	暖	さし木・実生
	トウネズミモチ	モクセイ	常緑小高木	暖	実生・さし木
	スズカケノキ	スズカケノキ	落葉高木	暖～温	さし木・実生
	シダレヤナギ	ヤナギ	落葉高木	暖～温	さし木
	ソメイヨシノ	バラ	落葉高木	暖～温	つぎ木
	トチノキ	トチノキ	落葉高木	(暖)～温	実生
	チョウセンソノ	モクセイ	常緑高木	暖～温	さし木
耐性のやや強いもの	クスノキ	クスノキ	常緑高木	暖	実生
	モチノキ	モチノキ	常緑高木	暖	実生
	クロガネモチ	モチノキ	常緑高木	暖	実生
	カクレミノ	ウコギ	常緑高木	暖	実生
	ツバキ	ツバキ	常緑高木	暖～(温)	さし木・つぎ木
	イヌツゲ	モチノキ	常緑低木～小高木	暖～温	実生・さし木
	ヒイラギ	モクセイ	常緑小高木	暖～温	実生・さし木
	ヒサカキ	ツバキ	常緑低木	暖～温	実生・さし木
	ハマヒサカキ	ツバキ	常緑低木	暖	実生・さし木
	アオキ	ミズキ	常緑高木	暖～温	さし木・実生
	ジンチョウゲ	ジンチョウゲ	常緑高木	暖	さし木
	ナワシログミ	グミ	常緑高木	暖～(温)	さし木・実生
	ヒイラギナンテン	ギ	常緑高木	暖	さし木・実生
	ハナノツク	スイカズラ	半常緑低木	暖～温	さし木
	オオムラサキ	ツツジ	常緑低木	暖	さし木
トウカエデ	カエデ	落葉高木	暖	実生	
アキニレ	ニレ	落葉高木	暖	実生	
ハゼノキ	ウルシ	落葉高木	暖	実生	
耐性の強いもの	ソテツ	ソテツ	常緑低木～小高木	暖～熱	実生・さし木
	シユロ	ヤシ	常緑小高木	暖	実生
	カイヅカイブキ	ヒノキ	常緑針葉高木	暖～温	さし木
	マテバシイ	ブナ	常緑高木	暖	実生
	モッコク	ツバキ	常緑高木	暖	実生・さし木
	キョウチクトウ	キョウチクトウ	常緑低木	暖～熱	さし木
	トベラ	トベラ	常緑小高木	暖	実生
	マルバシヤ	バラ	常緑低木～小高木	暖	実生
	ウバメガシ	ブナ	常緑小高木	暖	実生・さし木
	マサキ	ニシキギ	常緑低木	暖～(温)	さし木・実生
	ヤツデ	ウコギ	常緑高木	暖	実生・さし木
	ユツカ	ユツカ	常緑高木	暖	実生
	イチヨウ	イチヨウ	落葉高木	暖～温	実生
	コナラ	ブナ	常緑高木	暖～温	実生
	アオギリ	アオギリ	常緑高木	暖～温	実生

第1図. スギ・ケヤキの衰退程度を示す基準の模式図 (文献2 1974を 松中昭一 1976より引用)



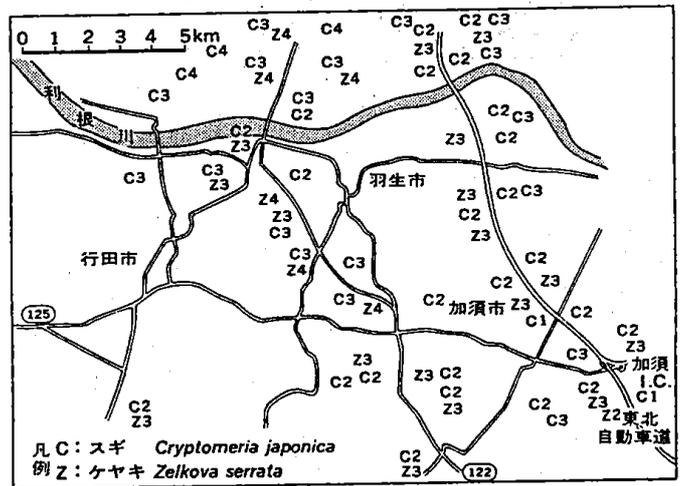
(2) 個別大気汚染

i) 光科学オキシダント

光科学オキシダント (オゾン) による大気汚染状況の指標植物として、アサガオがよく利用されている。日本の小学校では、1年生の理科教材としてアサガオの栽培をさせるので、小学校高学年生徒や中学生に環境汚染の実体を把握させる教材として、再度アサガオを使用するのも教育的効果があがると思われる。また、高等学校の場合には、生物クラブで生徒に自主的に調査させ、いかに大気汚染がはげしいものであるかを体得させるのも環境科学の教育に役立つこと大であると考えられる。

アサガオ葉の光科学オキシダント (オゾン) 被害の症状：被害の程度の低い場合は、その日の夕方または

第2図. スギ・ケヤキの衰退程度分布図の記入例 (山家義人 [松中昭一] 1979)

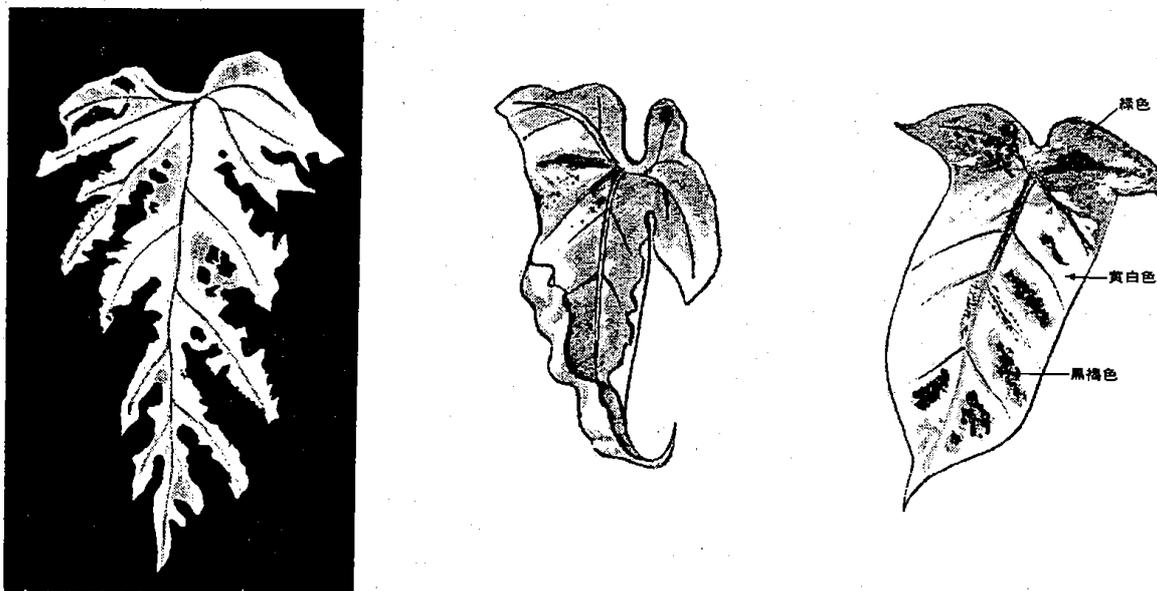


第2表. 樹木活力指標の評価基準 (科学技術庁 1972)

測定項目	評価基準			
	1	2	3	4
樹勢	旺盛な成育状態を示し、被害がまったくみられない	いくぶん被害の影響を受けているが、あまり目立たない	異常が明らかに認められる	成育状態が劣悪で、回復の見込みがない
樹形	自然樹形を保っている	若干の乱れはあるが、自然樹形に近い	自然樹形の崩壊がかなりすすんでいる	自然樹形が完全に崩壊され、奇形化している
枝の伸長量	正常	いくぶん少ないが、それほど目立たない	枝は短くなり細い	枝は極度に短小しょうが状の節間がある
梢端の枯損	なし	少しあるが、あまり目立たない	かなり多い	いちじるしく多い
枝葉の密度	正常、枝および葉の密度のバランスがとれている	普通、1に比べてやや劣る	やや疎	枯枝が多く、葉の発生が少ない 密度がいちじるしく疎
葉の大きさ	正常	少し歪がある	変形が中程度	変形がいちじるしい
葉の色	正常	いくぶん小さい	中程度に小さい	いちじるしく小さい
ネクロシス	なし	やや異常	かなり異常	いちじるしく異常
萌芽期	普通	わずかにある	かなり多い	いちじるしく多い
落葉状況	春または秋に正常な落葉をする (年1回)	やや遅い	いちじるしく遅い	不時落葉する (年3回以上)
紅(黄)葉状況	正常	正常なものに比してやや早い (年1回)	不時落葉する (年2回)	不時落葉する (年3回以上)
開花状況	良好	いくぶん色が悪い	葉が部分的に紅(黄)葉するが、色が悪い	紅(黄)葉せず、枯れた状態で落葉する
		いくぶん少ない	わずかに咲く	咲かない

第3図. 光化学オキシダント (オゾン) によるアサガオの葉の被害

左：大きい被害を受けたあと日数がたち葉脈間が部分的に欠け落ちたもの
 中：強力なオキシダントの被曝を受けた翌日葉の端が表に巻いたもの
 右：ほぼ全体が黄白色で、特にひどい部分が黒褐色になったもの (松中昭一 1979)

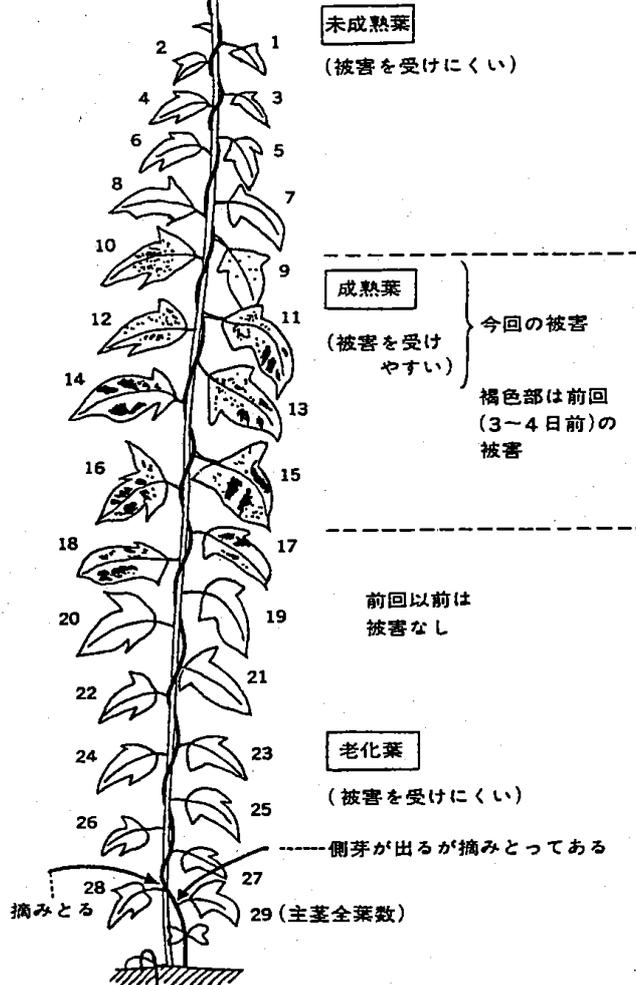


翌朝、葉の表面の葉脈間に軽い水浸症状が現れる。これは、2-3日後白斑に変化し、日がたってもあまり変化しない。被曝の程度がやや強い場合は、葉脈間の広い部分が水浸状となり、灰白色になり、さらに、黒褐色に変化し、一週間位の間、黒褐色斑が合体して、大形の褐色斑となり、黒褐色の部分脱落するようになる(第3図)。さらに、被曝が強力な場合には、葉の全体が水浸状となり、端の方から表面に向かって巻きはじめる。一方、葉全体が黄色になって症状が進行すると、部分的に壊死状態となる場合もある。アサガオを指標植物として使用する際に、1本の茎につく葉でも、光化学オキシダントの影響をすぐ受けるものと、受けないものがあるのに気付く。通常上(頂芽)から数えて10番目位から14番目位の葉が真っ先に影響を受ける(第4図)。

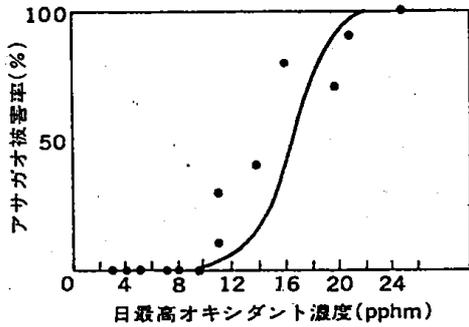
1977年 Nouchi らは東京都調布市で光化学オキシダントとアサガオの被害との関係进行调查し、オキシダントが2時間以上15 pphmになるか、午前9時~午後4時までの1日のオキシダントドースが80 pphmになると、1本のアサガオの3~4枚の葉に被害が出ることに、また被害発現のいき値が10 pphm (日最高濃度) および54 pphm・hr (ドース) であると結論し(第5図)、また、オゾン処理実験の結果をまとめ、被害発現のいき値として8 pphm × 8時間、11 pphm × 3時間、18 pphm × 1時間という値を算出している(第6図)。

第4図. アサガオの被害の発生葉位

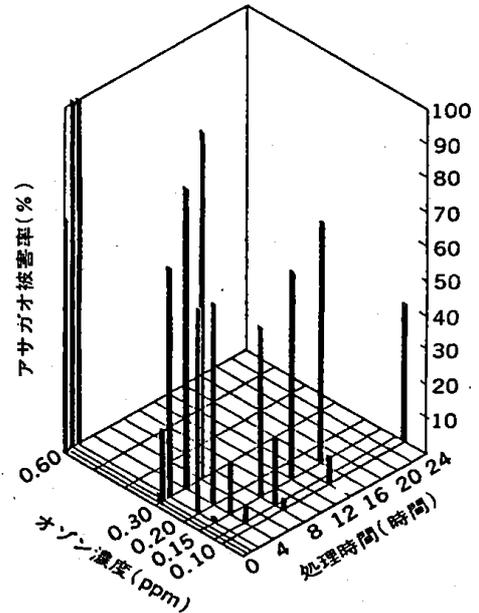
(中村・松中 1974)



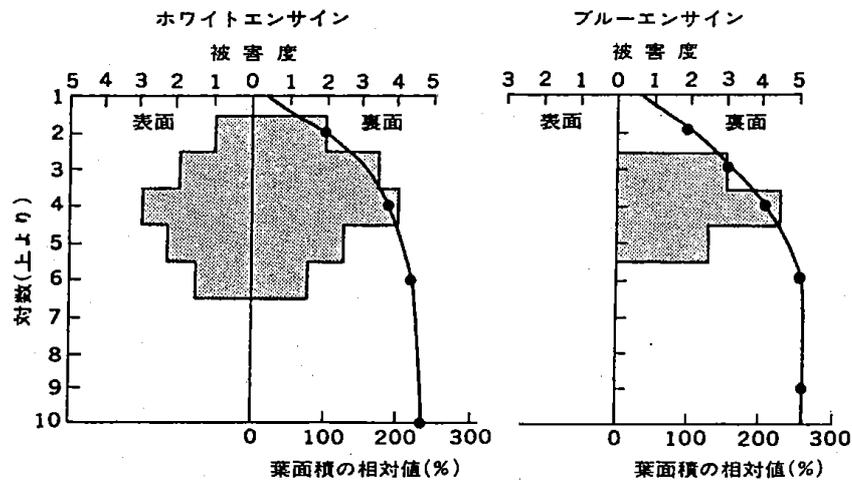
第5図. 東京都調布市における光化学オキシダント(オゾン)濃度とアサガオの葉の被害率 (Nouchi et al. 1979)



第6図. 光化学オキシダント(オゾン)濃度とアサガオの葉の被害率との関係の実験結果 (Nouchi et al. 1977)



第7図. ペチュニアの葉位別被害度と葉面積拡大の推移 (1974年5月24日の調査 東京都 農試) (久野治子 [松中昭一] 1979)



1974年5月23日 Ox 8pphm 以上ドース 126pphm·hr, max 18.6pphm
PAN 2ppb 以上ドース 33ppb·hr, max 6.8ppb

ii) ペチュニアの PAN 指標性

PANというのは peroxyacetyl nitrate, $\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{NO}_2$ であり、オキシダントである。PAN の指標植物の中で、最も感受性が高いペチュニアの利点は、(1)生育可能な期間が長い、(2)被害程度の大小が PAN ドースの高低と比較的一致する、また(3)品種によって感受性が異なることである。

大気中に含まれる PAN による被害は、品種「ホワイトエンサイン」では上から数えて、2対目から6対

目までの若い葉位に現れる。結局、葉面積が増えつつある葉に被害が集中する(第7図)。ペチュニアは開葉してから4日目で第2対目となり葉の先端に被害が生ずる。10日目で4枚目におよび葉全体に広がる、14日になると5・6対目におよぶが、被害は葉の基部だけに見られる。

今回は、指標植物の一部の例をあげただけであるが、適切な指標植物を選定することにより、かなり正確な環境評価が可能と考えられる。

文 献

- 1) 科学技術庁資源調査会 1972「高密度地域における資源利用と環境保全の調和に関する勧告」科技庁資源調査会勧告 26(1):43-52
- 2) 環境庁企画調整局研究調整課(編)1974「昭和48年度環境保全研究成果集」環境庁
- 3) 埜田 宏 1974「環境汚染と指標植物」(科学ブックス 23) 共立出版
- 4) 只木良也 1971「森の生態」(生態学への招待 2) 共立出版
- 5) 只木良也 1988「森と人間の文化史」(NHK ブックス560) 日本放送出版協会
- 6) 只木良也・吉良竜夫(編)1982「ヒトと森林—森林の環境調節作用」共立出版
- 7) 竹内 亮 1936「植物利用環境測定法」(実験生物学集成) 養賢堂
- 8) テオフラストス(大槻真一郎・月川和雄 訳)1988「テオフラストス 植物誌」八坂書房
- 9) 中村 拓・松中昭一 1974「大気汚染に対する指標植物の利用(1) 光科学オキシダントに対するアサガオの感受性とその変動要因」日作紀43(4):517-522.
- 10) Nouchi, I. et al. 1977 "Studies on injury of morning glory leaves by photochemical oxidants" Proc. 4th Intern. Clean Air Congr. 95-98.
- 11) 日本自然保護協会(編)1988「指標生物—自然をみるものさし—」思索社
- 12) 日本生態学会環境問題専門委員会(編)1975「環境と生物指標1—陸上編—」共立出版
- 13) 藤山静雄 1989「自然環境の生物指標, 特に土壌動物による指標について」環境科学年報 11:5-11.
- 14) 松中昭一 1976「指標生物」講談社
- 15) 松中昭一(編)1979「図説 環境汚染と指標生物」朝倉書店
- 16) Miyawaki, A. and R. Tüxen (ed.) 1977 "Vegetation Science and Environmental Protection" Maruzen Co. Ltd.