

大気汚染と植物群落



前野道雄

1——はじめに

環境評価の尺度として利用する植物の種類あるいは植物群落を一般に指標植物といている。指標植物の概念を最初に提唱したのは米国の生態学者クレメンツで、植物群落と遷移く植物群落が時間の経過とともに交代し、変化する現象>に関する研究から植物による立地判定を行ない、さらに植物の反応をもとにして環境の測定を試みる植物計器法を案出した。植物の生活に関与する環境要因は気候要因、土壌要因、生物要因に大別できるが、その内容は複雑で、たがいに関連しあいながら総合的に影響をおよぼしているのので、個々の要因の物理化学的測定のみでは実態を把握し得ない場合が多い。ある植物が特定の環境要因に対して特異的に応答する場合には、植物の生育形や生活形の変化がその環境下で作用した環境要因の積算された姿として表現されるので、物理化学的測定結果よりもはるかに適確な情報をもたらすことができる。林業では土地生産力の指標として、ササ、カシワ、土地の乾湿指標としてアカマツ、ヤチダモ、火災指標としてカシワ、クヌギ、カンバ等が知られており、また天然林の上層林冠樹種は極相えの推移指標として、林床植物群落は林地生産力と天然更新の可能性を推定する地位指標および更新指標として造林面に貢献している。

生物社会の調和を破壊するものとして、人間の生産活動に起因する大気汚染、水質汚濁、土壌汚染が重大な社会問題になっている。ここでは主として大気汚染の植物影響の中心として、生物指標としての植物の役割についてふれることにする。

2——大気汚染物質による植物被害

大気汚染物質は地表付近の正常な空気組成を変化させる物質を総称し、自然汚染物と人工汚染物に大別することができる。人間生活に直接のかかわりを持ち、人口の増加や工業の発達に比例して増

加する人工汚染物の内容は多種多様で、煙、工業ダスト、亜硫酸ガス、各種の蒸気等があり、これらはさらに特定の汚染源から発生する第一次汚染物質と、第一次汚染物質が空气中で物理化学的变化を受けて生成される第二次汚染物質に類別される。

植物に影響をおよぼす大気汚染物質としては、亜硫酸ガス、フッ素ガス、塩素、窒素酸化物、オゾン、パンクPAN>、硫化水素、エチレン、粉じんなどが知られている。

亜硫酸ガスは主として燃料の燃焼過程や、各種金属の精錬、硫酸製造等の際に排出される。葉面や葉縁に存在する気孔<孔片細胞>から植物体内に侵入し、生体内で硫酸塩や有機含硫化合物に変化するが、接触による吸収量が多く、吸収速度が速すぎる場合には、植物体内での同化が間に合わず、細胞組織を破壊する。亜硫酸ガスの害作用は直射光線下において著しく、夜間や暗所では比較的少なく、植物の光合成作用と密接な関係が存在している。亜硫酸ガスの被害機構については、植物体内の遊離酸素やアルデヒド類と結合して α -オキシスルホン酸を形成し、植物組織を破壊するという考え方や、光合成過程で生産されるグリコール酸がグリオキシ酸に変化する際に α -ヒドロキシサルホネートができ、これが光合成作用を特異的に阻害するという説が提出されている。亜硫酸ガスによる植物被害には急性害と慢性害があり、症状は必ずしも一様ではない。急性害の場合には葉の周辺部や葉脈間に、白色、鉛色、象牙色、褐色、赤褐色等の煙斑と称するネクロシスが発生する。慢性害の場合には火傷の時に見られる水ぶくれに似た症状や葉面全体の黄化症状を呈する。一般に生育の最も旺盛な葉から被害が発生し、先端葉や下葉には少ない。被害葉の縦断面を顕微鏡で観察すると、表皮下の海綿状組織の崩壊やさく状組織の収縮がみられる。

フッ素系ガスにはフッ化水素と珪フッ化水素があり、主としてアルミニウム精錬、磷酸肥料工業、ソーダ工業、硝子工業などから排出されている。気孔から植物体内に侵入したフッ素ガスは柔細胞間隙を通して導管に達し、導管内でフッ化水素酸になり、葉の先端や葉縁に集まり、珪酸や石灰と結合して難溶性化合物となって蓄積されるとともに、原形質や葉緑素を分解し、光合成作用や各種の酵素作用を阻害し、細胞を枯死せしめる。フッ素系ガスによる植物の被害状況は亜硫酸ガスの場合と異なり、若葉の先端や葉縁に煙斑<ネクロシス>がみられる。植物影響の程度は極めて激しく亜硫酸ガスの10~100分の1以下の濃度で被害が発生する。一般に被害葉の変色部と未変色部の境界が明瞭で、海綿状組織、さく状組織はともに崩壊か収縮を起している。塩素系の汚染物質は遊離の塩素ガス、塩化水素、その他に分類される。塩素ガスは化学工業分野において、金属の製錬、繊維や薬品の製造、ソーダ工業、染料の合成等の工程から発生するが、回収技術の改善により大量に放出拡散することは少なく、植物被害は突然的な事故に起因する局所的な事例が多い。塩素系ガスは植物の同化作用や蒸散作用を阻害するものと考えられ、高湿度下では水に溶解して塩化水素となり、その強い酸性反応により激しい被害症状を呈する。一般に葉の先端や周辺部にネクロシスを生じ、次第に全面にひろがる。煙斑は下葉または中位葉に出やすく、裏面より表面に顕著である。窒素酸化物には酸化窒素と二酸化窒素があり、燃焼排ガスとともに放出され、最近では交通量の増大にともなって急速に濃度が増加しつつある。大気中の窒素酸化物濃度は未だ植物の生育に単独で影響をおよぼす程高まっではないが、オゾンや炭化水素類と反応して第二次汚染質を生成することが知られている。葉面に水浸状、白灰、褐色、青銅色等の煙斑を生じ、中下位葉の葉脈間に多発

する傾向がある。オゾンおよびパン<PAN>はともに光化学反応によって生成されるオキシダントの主成分で、自動車排気ガスによる大気汚染と密接な関係を有している。オゾンによる被害は植物の種類による異なるが、葉の表面に灰白色や褐色の斑点状煙斑が発生し、新葉よりも古葉に対して敏感であり、その程度は、気孔の開度、蒸散作用の大小、光線の強度等に関係がある。オゾンの被害機構はその強力な酸化作用によるもので、葉緑素の破壊、酵素作用の阻害を起し、主として細胞のさく状組織に崩壊や収縮がみられる。パン<PAN>はパーオキシアセチルニトロートを主とする物質で、オゾン、二酸化窒素、炭化水素が反応した時に生成される。オゾンと同様に強烈な酸化作用を呈し、細胞組織を破壊するが、生育途中の若葉に対する影

響が大きい。表皮の下面が銀色あるいは青銅色を呈し、次第に全面にひろがり、葉の上面にも白変部や斑点が発生する。

その他のガスでは、硫化水素の毒性は比較的弱く、アンモニアの毒性は塩化水素とほぼ同程度で、塩素ガスや亜硫酸ガスよりは弱い。エチレンには一種のホルモンの作用があり、新梢の伸長阻害、生長抑制、葉緑素の破壊等を起す。以上のような各種有害ガス以外に粉じんによる植物被害が各地で話題になっている。粉じん中にはタール状物質のほか鉄、マンガン、銅、鉛、亜鉛、砒素等が含まれている。粉じんは植物の気孔を閉鎖し、呼吸、蒸散、同化等の生理機能を阻害する。酸性ガスと共存する場合には金属成分が可溶化して植物体内に侵入蓄積される。

大気汚染物質による植物の被害症状は表1のように要約され、ある程度特徴がみとめられるので、

表1——汚染質と植物被害の特徴

汚染質	被害症状	被害の出やすい葉位	被害を生じる部位	被害の閾値<限界濃度>			植物体の化学分析による汚染質の検出
				ppm	μg/m ³	持続時間	
オゾン	斑点、点刻、漂白、漂白された斑点、着色、生育抑制、早期枯損、針葉樹の葉針の先端部は褐変、枯死	古葉、次第に若葉におよぶ	さく状組織	0.03	70	4時間	不可
パン<PAN>	葉の下面が光沢を帯び、銀色、青銅色を呈する。	若葉	海綿状組織	0.01	250	6時間	不可
二酸化窒素	中肋<主脈>間組織や葉縁附近に不規則な白色褐色の崩潰<ネクロシス>	中葉	葉肉	2.5	4,700	4時間	不可
亜硫酸ガス	漂白された斑点、葉脈間や葉縁の漂白、黄化、生育抑制、葉の早期枯損、生産量低下	中葉	葉肉	0.3	800	8時間	
フッ化水素	葉の先端や葉縁の焼け、黄化、葉の枯損、生産量低下	成熟葉	表皮、葉肉	0.1ppb	0.2	5週間	可
塩素	葉脈間の漂白、葉の先端や葉縁の焼け、葉の枯損	成熟葉	表皮、葉肉	0.1	300	2時間	
エチレン	莖のいぼ、葉の奇形化、落花、開花不良	<花>	全部分	0.05	60	6時間	不可

資料: Air Pollution Injury to Vegetation<U S Dept Health Edu. & Welfare 1970>

汚染指標として活用することができる。しかしながら環境条件や生育時期による変動もかなり大きいので注意しなければならない。抵抗性の順位に関しては、汚染質の種類により差があり、亜硫酸ガスに対するアルハルハ、フッ化水素に対するグラジオラス、オゾン、オキシダントに対するホウレンソウ、タバコ等は指標植物として有効と考えられる。

3 植物の外部形態による大気汚染の評価

大気汚染による植物被害には急性害と慢性害があり、汚染質は単一ではなく、他の環境要因による障害や病害虫による被害との区別が実際にはかなりむづかしい。一般に葉に対する影響としては、ネクロシス<煙斑>やクロロシス<黄化症状>の

発現にともなう葉色の変化、葉形の微小化と奇形化、落葉、着葉数の減少と密度不斉、萌芽不良等がある。葉における生理活動の低下は次第に枝梢や樹形に影響をおよぼし、枝梢では先端部の枯損、伸長阻害、肥大抑制などが見られ、樹形は奇形を呈し、甚だしい場合には顕著な指向性がみとめられるようになる。このような植物の変化は明らかに環境悪化の所産であるが、漠然とした観察だけでは評価の尺度とはなり得ず、何等かの方法で数量化する必要がある。科学技術庁資源調査所内にもうけられた都市における自然保護調査研究会においては、主として大気汚染との関連において樹木被害に関する地上調査を進めており、その一部を担当してきたので、概要を紹介し参考に供する。調査対象樹種としてケヤキ、イチョウ、サクラ、プラタナス等の落葉樹と、シイ、マテバシイ、ヒマラヤシダ、アカマツ、クロマツ等の常緑樹を

表 2 — 樹木被害の評価基準

評価基準	1	2	3	4
調査項目	良好, 正常	普通影響はあるが, 正常に近い	悪化がかなり進んでいる	悪化が顕著である
樹勢	非汚染地区において旺盛な生産状態にあるものと同様	多少影響があるが, あまり目立たない程度	悪化がかなり進んでいる	悪化が顕著である
樹形	自然樹形を保つもの	1部に幾分の乱れはあるが, 本来の樹形に近い	自然樹形の崩壊がかなり進んでいるもの	自然樹形が全く崩壊し, 奇形化している
枝の伸長量	正常	幾分少ないが, 都市部の樹木としては良い	枝は短小で細い	枝は極端に短小
梢端の枯損	全くない	少しあるが, あまり目立たない	かなり多くみられる	著しく多い
枝葉の密度	正常	都市部の樹木としては良い状態	やや疎	枯枝が多く, 葉の密度が著しく疎
葉の形状	正常	少し歪みがある	中度の変形	変形が著しい
葉の大きさ	正常	わずかに小さい	かなり小さい	著しく小さい
葉色	良<正常>	普通	やや悪い	悪い
ネクロシス	全くない	わずかに認められる	かなり認められる	著しく多い
落葉状況	春または秋における正常な落葉<1回>	正常なものに比して幾分早い<1回>	不時落葉<2回>	不時落葉<3回以上>
紅葉状況	正常な紅葉または黄葉となる	発色が幾分悪い	葉の一部から紅<黄>葉となるが, 発色が劣悪	紅<黄>葉せず, 汚れた状態で落葉する

選び、各地の公園や神社の境内で各々10本以上の試料について、樹勢、樹形、枝の伸長量、梢端の枯損、枝葉の密度、葉形、葉の大きさ、葉色、ネクロシス、落葉状況、紅葉状況の11項目を表2の基準にしたがってそれぞれ4段階に評価し、地域別、樹種別に平均値を求めた。調査樹の選定にあたっては整枝剪定や施肥など管理対策が加えられているものや、病害虫の寄生が著しいもの、他の樹木に覆われているもの、根元を踏み固められているものなどを除き、マツ類は胸高直径10cm以上、その他は15cm以上で、樹冠部に日のあたるものを原則として使用することにした。調査時期は樹木の生育が安定する7月下旬から8月下旬の1ヶ月間で、落葉状況は落葉樹についてのみ10月上旬以降に随時実施した。調査実施地域は川崎市内の大師公園、富士見公園、南河原公園、夢見ヶ崎公園、等々力緑地、生田緑地の6ヶ所で、結果の概要は表3のとおりである。

臨海工業地帯からの距離は大師公園が西2km、富士見公園が西4km、南河原公園が西6km、夢見ヶ崎公園が西北西12km、等々力緑地が北西12km、生田緑地が北西25km、で大気中の亜硫酸ガス濃度は、

大師および富士見で年間平均0.06~0.07ppm、等々力で0.03ppm、生田で0.02ppmであり、汚染の影響程度もほぼここに示した順位に一致するものと考えられる。測定値は1から4までの範囲に分布し、大きいもの程被害度が著しいことを意味するが、全項目の平均値には明らかな地域性が認められている。大師および富士見のケヤキ、大師のイチヨウには衰退の傾向が顕著であり、落葉樹は常緑樹に比して樹種間、地域間の差が大きく、常

図1 工業地帯からの距離と樹木被害度指数の関係

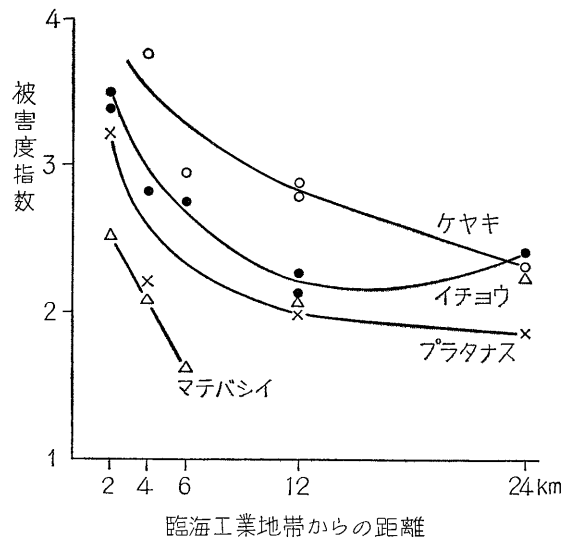


表3 — 樹木被害度指数の樹種別平均値

地域	落葉樹				常緑樹				
	ケヤキ	イチヨウ	プラタナス	サクラ <ソメイヨシノ>	シイ <スダジイ>	マテバシイ	ヒマラヤ シーダ	クロマツ	アカマツ
大師	3.38	3.49	<3.25>	—	2.52	2.56	—	—	—
富士見	3.77	2.81	2.20	—	2.69	2.10	2.44	—	—
南河原	2.93	2.72	—	—	2.42	1.64	—	—	—
夢見ヶ崎	2.83	<2.05>	2.11	2.10	—	2.17	2.16	—	2.17
等々力	2.85	2.24	3.06	<2.43>	—	—	2.18	2.39	—
生田	2.28	2.34	<1.87>	2.05	2.42	2.29	2.18	2.23	—

緑樹ではシイが比較的高い値を示している。図1は工業地帯からの距離と被害度指数の関係を模式化したものである。樹種によりある程度の変動は避けられないが、ケヤキ、イチョウ、プラタナスはそれぞれある種の曲線上に位置づけられ、マテバシイは6kmまでの範囲で直線的関係を示し、興味ある示唆をあたえている。個々の調査項目の評価に関しては表4にイチョウの例を示している。大師では梢端の枯損以外の各項目の値が大きく、富士見では落葉状況と紅葉状況、南河原ではネク

ロシと紅葉状況、等々力では枝葉の密度、生田では樹勢と枝葉の密度などが被害度に強い影響をおよぼしている。

環境汚染の評価にあたりこのような植物指標を利用する試みは将来有望であり、発展の可能性が期待できるが、なお多くの問題点が残されている。観察を主体とする調査であるため調査者の主観に左右されやすく、普遍的な情報を得るためには相

図2 イチョウの硫黄含量とフッ素含量の地域性

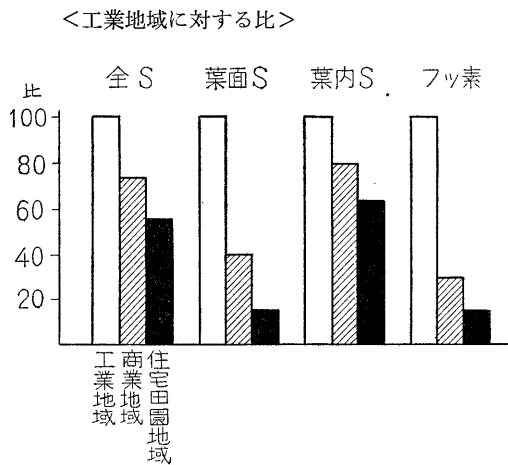


図3 空気中のいおう酸化物濃度とイチョウの葉のSO₃含量との関係

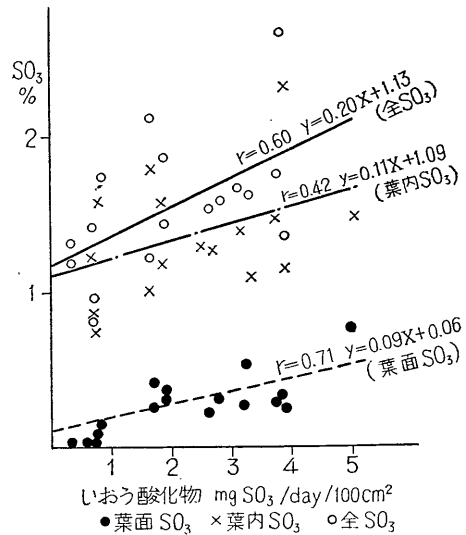
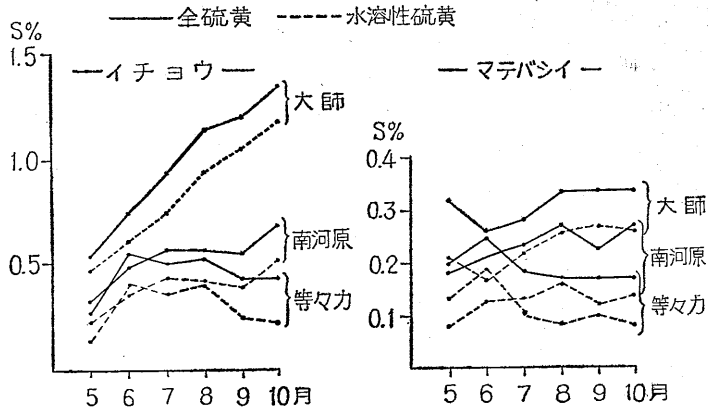


表4 樹木被害度指数の内容<イチョウ>

地域	樹種	樹勢	樹形	枝の伸長量	梢端の枯損	枝葉の密度	葉の形状	葉の大きさ	葉色	ネクロシス	落葉状況	紅葉状況	平均
大師		3.9	3.9	3.9	2.2	3.3	3.8	3.7	4.0	3.7	2.3	3.7	3.49
富士見		2.9	2.5	2.4	2.0	2.7	2.9	2.9	2.8	2.8	3.2	3.8	2.81
南河原		2.8	2.9	2.1	1.0	2.3	2.7	2.6	2.4	3.0	2.0	3.4	2.72
夢見ヶ崎		2.0	2.0	1.7	1.3	2.0	2.3	2.3	2.0	2.3	2.3	2.3	2.05
等々力		2.6	2.3	2.6	1.0	2.8	2.1	2.2	2.1	2.0	2.3	2.7	2.24
生田		3.0	2.1	2.2	1.8	2.9	2.2	2.8	2.8	1.9	2.0	2.0	2.34

図4 樹葉の硫黄含量の時期的変化



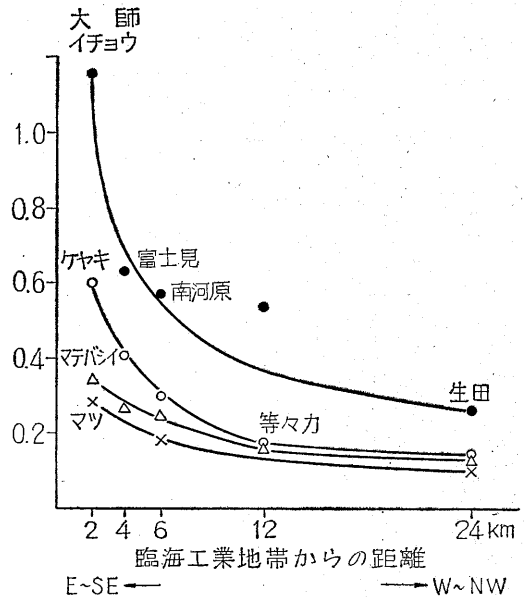
当な熟練が必要となる。個人誤差を最少限度に止めるためには、個々の調査内容を類型化し、計量化をはかるべきである。またそれぞれの調査項目がどの程度の比重をもって総合的な樹木活力に寄与しているかということ解析しなければならない。樹勢、樹形、枝の伸長量、枝葉の密度、梢端の枯損などは比較的長期間の慢性害に対応するものであり、葉の形状と大きさ、葉色、ネクロシス、落葉状況、紅葉状況などは比較的短年月間の蓄積的影響や急性害に支配される頻度が大きく、とくにネフロシスや落葉状況などは高濃度汚染による急性害との関連が強いと考えられる。

4 植物の内容成分による大気汚染の評価

大気汚染の植物影響には長期間にわたって徐々に進行する慢性的な不可視害があり、林木や果樹などの永年作物でしばしば問題となっている。外部形態にほとんど異常が認められない場合であっても、光合成の阻害と呼吸量の増大にともなう物質生産量の低下、蒸散量の増加、汚染質の蓄積などが起り、これらの生体内変化は常に可視害の発現に先行する。図2は京浜地帯の街路に植栽されているイチョウの葉の硫黄含量とフッ素含量を調査し、地域別平均値を求めた結果であるが、明らか

に工業地域で商業地域や住宅団地より多い傾向を示している。二酸化鉛法により測定された空気中の硫黄酸化物濃度とイチョウの葉の硫黄含量の関係は図3に示されており、両者の間にかかなりの密接な相関関係が認められている。すなわち葉面に

図5 工業地帯からの距離と樹葉の硫黄含量の関係



付着または葉に吸収蓄積された硫黄を測定することにより、その地域の亜硫酸ガス汚染の状況を推定することが可能であり、樹木の衰退現象に対する亜硫酸ガスの影響程度と樹葉の硫黄含量の間には、一連の傾向性が存在しているようである。植物の葉面から吸収された亜硫酸ガスは大部分が無機態の硫酸イオンとして蓄積されており、有機硫黄への同化は少ない。図4は川崎市内の大師、南河原、等々力の3公園でイチョウとマテバシイを用い、硫黄含量の時期的消長を調査した結果であり、地域別に明らかな差異がみられるばかりでなく、汚染の著しい大師地区ではイチョウの硫黄含

量が季節をおうごとに上昇し、落葉直前には1.4%にも達している。しかしながら増加している部分は水溶性の硫黄で、水に溶けない有機態硫黄はあまり変化せず、地域間の差もそれ程大きくない。これらの結果から汚染指標としては水溶性硫黄あるいは総硫黄含量に対する水溶性硫黄の割合などをあわせて考慮する必要があるものと思われる。一般に常緑樹は落葉樹に比して被害を受けた組織の再成力が強く、汚染物質に対する耐性が大いので、硫黄含量などの汚染物質取込み量の変動も少ないようである。図5は8月に採取した樹葉の硫黄含量と臨海工業地帯からの距離との関係を示したもので、樹種ごとに一定の傾向性があり、いずれも6km以内の地域で増加している。硫黄は土壌中にかなり多量に存在しており、根を経由する土壌からの供給量と葉面接触による空気からの供給量を分別することがむずかしい。この点に汚染指標としての硫黄含量の問題点があるが、汚染の著しい地域程根吸収の占める割合が低下するので、樹種、樹齢、調査時期などを吟味するならばかなり実用性の高い資料が求められる。

5 ————— むすび

北欧ではある種の蘚苔類を大気汚染の指標として利用しており、すでに実用化の段階にきているようである。植物を環境汚染の評価尺度にしようとする試みは未だ確立されておらず、試行錯誤を繰り返しているような状況であるが、各種の計測機器では表現し得ない知見をもたらしていることもまた事実である。今後の検討にまたなければならぬ問題は多いが、考えかたの一端を記し批判をこう次第である。

<神奈川県農業総合研究所員>