特集・環境の簡易測定の実状と将来

指標植物を用いた大気汚染評価

—観察手法によるモニタリングの実状—

相原敬次*

はじめに

一般的に植物は、環境の変化に敏感に反応し、そのサインをいろいろな形で表している。植物のこのような特徴を利用して環境の状態を評価することを植物指標という。理化学機器によって環境を評価する技術も、一方では格段に進歩しているが、植物を通して大気汚染や自然環境を評価することの重要性も一段と増している。植物指標の歴史は古く、その必要性、長所、短所等の内容は、いくつかの成書^{1),2),3)}に詳しくまとめられている。

大気汚染評価のための植物指標も古くから様々な種類や手法が提案されている。植物指標には、単に植物そのものを観察、調査する方法から、植物を対象あるいは材料にして、理化学的な計器や装置により、化学成分や形態を分析、測定する方法等まで広くある。今回は、指標植物を簡易に観察、調査する方法のうち、とりわけ实际的に、かつ長期的に大気汚染評価のためのモニタリングを試みている国内の事例と現状について述べる。

1. 植物の葉の可視被害の観察による方法

植物の葉は、気孔を通じて呼吸や蒸散、光合成をしている。そのため大気中の汚染物質によって、葉の細胞組織は、異常を起こし、その表面に白色や褐色の斑点を生じ、目に見える特徴的な被害症状を呈する。かつては、発生源の近傍に生育する植物の葉に、典型的な可視被害症状を呈する事例がよく見られた。いおう酸化物、フッ素化合物、塩素化合物などの大気汚染物質による影響や被害症状に関して写真集^{4),5)}もまとめられている。可視被害の症状の状況から、汚染質の種類や被害発生のいき値濃度の推定

などを大まかに知ることが出来、農作物の被害の原因の特定や発生源対策に利用されてきた(表1)。このようなフッ素化合物、塩素化合物など局地的な汚染質による可視被害症状は、工場などの発生源対策が進んできており、現在では、偶発的な事故や特別な場合を除いてはほとんど確認されることが少なくなっている。しかし、今日でもなお、夏になると慢性的に関東地方などを中心に観察されるものに、広域的な2次汚染物質である光化学オキシダントによる植物葉の可視被害がある。

国内における光化学スモッグ汚染の発端となった立正高校事件(1970年;昭和45年)のおこる年の以前から、国内のタバコの葉に原因不明の生理的斑点病とよばれる症状が認められていた。そして、関東地方一円に広がったホウレンソウやコマツナなどの多くの農作物に現れた原因不明の被害症状も、光化学オキシダントによるものであることが確かめられた。この光化学オキシダントによる可視被害は、一方では、光化学オキシダントによる大気汚染の評価の良い植物指標となり、アサガオ、サトイモ、ペチュニアに代表される植物が使われている。1974年(昭和49年)～1976年(昭和51年)には全国的な調査も実施され、汚染による被害の全国的な広がりを確認したり、東京都の立川市のように早い頃から市民、行政機関、試験研究機関が協力した調査なども実施されてきた。現在でもなお、モニタリング調査がなされたり、近年の環境教育・学習のための、わかりやすい教材としても利用されている。

国内で、既に、20年以上にもわたって組織的に行われているモニタリング調査に、「光化学スモッグによる植物影響調査」がある⁶⁾。1974年(昭和49年)から関東地方の埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、南関東の自治体で始めた調査は、現在では、茨城県、栃木県、群馬県、長野県、山梨県、静岡県を加え11

* 神奈川県環境科学センター
Keiji AIHARA

表1 おもな大気汚染物質による植物可視被害症状と急性症状発生濃度いき値¹⁾

大気汚染物質	植物への急性症状発生いき値	おもな可視症状
二酸化硫黄 (SO ₂)	0.1—1.5ppm	葉脈間不定形斑点, 葉縁部黄褐色斑点 (広葉), 先端・中央部の褐変 (針葉), 一般に大形斑点
二酸化窒素 (NO ₂)	10—50ppm	二酸化硫黄に類似
オゾン (O ₃)	0.05—0.2ppm	葉の表面に均一な白色～褐色斑点, ネクホシス, 早期落葉, 葉の漫曲
PAN	0.05ppm	葉の裏側に銀色～青銅色の光った大形斑点 (全体として横バンド状)
エチレン (CH ₂ =CH ₂)	0.05—1.0ppm	葉の上偏生長, 開花異常 (めしべ退化, 雄花の雌花化など), 落果, 早期葉落, 黄化促進
フッ化水素 (HF)	5—10ppb	葉先端, 周縁クロロシス, ネクソシス
塩素 (Cl ₂)	0.1—0.3ppm	葉脈間漂白斑点, 葉先端黄変

の自治体での共同調査になっており, 調査地点も1995年 (平成7年) は, 74地点になっている。

この調査は, 光化学スモッグによって発生する植物被害の程度が関東地方の中でどのような広がりをもち, 年によってどのような変化をするかといったことを経年的にモニタリングし, 植物の側から大気環境を評価しようとする目的をもっている。そのため調査の方法や項目は, あらかじめ決めておき, 途中で変更しないように一貫性をもたせている。(表2, 表3) 指標植物としてアサガオ, サトイモ, ペチュニアを選んでいるが, これまでには, ポプラ, 水稻, アルファルファなどの指標植物を用いたモニタリング手法の検討もおこなっている。

光化学スモッグによる植物被害のモニタリングを広い範囲にわたり, しかも組織的に長期間継続しているこのような調査は, わが国では他に例がない。最近の結果をみても, アサガオの光化学オキシダントによる可視被害は, 相変わらず関東地方の中央部で大きく, 長野県側や山梨県方面にも広範囲に生じていることが確認されており, 植物からみた光化学スモッグ汚染は, 未だ改善されていないことがわかる。

2. 藓苔植物 (類) や地衣植物 (類) 等の着生植物による方法

この方法は, 一般的に「コケ」と呼ばれている着生植物である藓苔植物や地衣植物を指標植物にして生育相や生育確認を調査することによって大気汚染

の評価をする方法である。「コケ」は, 藓苔植物, 地衣植物, 気生の藻植物, 高等植物の一部までを含み, 樹皮, 岩石に着生したり, 地上に生育する微小な植物の総称である。

図鑑⁷⁾によれば, 「藓苔植物は配偶体が緑色で, 造卵器と造精器を生じ, 多くの場合に茎と葉に分化し, 孢子体は退化して, 配偶体の上についている陸上植物群を指す。地衣植物は, 葉, 茎の分化がなく, 黄緑色または灰緑色で, 菌糸がその体をつくり, 藻植物をその中に取り込んでいる。」と記されている。このように, 両者の区別は, 分かりにくい, 一般的に着生藓苔植物は, 日陰や湿潤な場所に生育するのに対して, 地衣植物は, 日当たりや風通しの良い場所に生育する傾向にある。いずれも樹木や岩石に着生する植物で, その性質や構造から大気汚染による影響を受け易いことからよい指標植物とされている。

埴田⁸⁾は, 1969年 (昭和44年) から1971年 (昭和46年) にかけて東京都内における着生藓苔植物の調査を実施し, その種類の構成と多さによって, 「正常地帯」, 「移行地帯」, 「着生砂漠」に分類した大気汚染度図を作成している。これによれば, 山の手線以東から東側にかけては, 全く藓苔植物の生育を認めない地域, すなわち「着生砂漠」地域が確認されていた。当時の大気汚染の状況は, いおう酸化物や降下ばいじんなどの工場から排出される汚染物質の濃度が高く, これらの影響が直接に反映されていたものと見ることができる。最近, 菅, 大橋⁹⁾は, この約20年前

の調査結果をふまえて、都内において同様の着生蘚苔植物の調査を実施している。その結果によれば、都心部を含む東部の「着生砂漠」とされた地域で、蘚苔植物の生育と種の増加を確認しており、それは、二酸化硫黄濃度などによる大気汚染の状況が改善されてきていることを反映しているものと評価している(図-2)。しかし、郊外の地域では種類数の増加傾向が顕著ではなく乾燥化などの都市化による影響のあることも示唆している。

兵庫県においては、光木¹⁰⁾が、神戸、東播磨および西播磨の3地域における着生蘚苔植物の調査を実施し、1975年(昭和50年)～1976年(昭和51年)、1972年(昭和47年)～1981(昭和58年)年頃の調査結果と比較し、大気環境の評価の推移をみている。その結果、早くから都市化と工業化の進んだ神戸地域と東播磨地域においては、以前に比較して出現種数の増加した地点が多く、一方西播磨地域では出現種数の減少した地点が多いことを認めている。また着生蘚苔植物による数値化、すなわち大気汚染環境評価指数(EIAQ)を自ら検討改良し、このEIAQ指数によって推移をみた結果、3地域とも上昇傾向にあり、特に神戸地域で顕著であることを確認している。しかし、東播磨地域や西播磨地域の一部では、指数値の下がった地点もあり、地点によっては悪化の傾向

にあることも認めている。

中川¹¹⁾らは、着生地衣植物の調査を行い、兵庫県下における1984年(昭和59年)から1994年(平成6年)までの約10年間の変化について、大気清浄度指数(IAP)や種ごとの被度(生育量)、および大気汚染との関係を検討している。その結果、IAP値からみた大気環境は、阪神地域>淡路地域>東播磨地域>西播磨地域>神戸地域>丹波地域の順に良く、このうち工業地域である阪神地域、神戸地域は、若干の被度の回復が認められたのに対して他の地域では前回調査時に比較してやや悪化している傾向であることを認めている。

福岡県においては、1978年(昭和53年)から1994年(平成6年)までに4年から5年間隔で着生地衣、鮮苔植物の生育相調査を継続して実施し、IAP指数値から環境評価の推移をとりまとめている¹²⁾。その結果、従来から大気環境も良好であった福岡、久留米、行橋・苅田、豊前の4地区では、その状態が維持されており、北九州、大牟田地区の工業地域では調査回を重ねるごとに大気環境が良好になってきている状況を確認している。しかし、この2地区は、他の良好な4地区に比較してなお評価値が低い状況で、とりわけ北九州地区は、大牟田地区に比較して回復が遅い状況にあるということである。また、福岡地区や久留米地区においては良好な状況にあるものの、近年の交通量の増加や市の周辺部での宅地化による影響も考えられ、継続調査が必要であるとしている。

このように、着生植物を指標として、公害による大気汚染が顕著であった時期からの経年的なモニタリングの調査結果が最近相次いで報告されている。その結果、過去の劣悪な大気環境が改善された地域では、それとともなう着生植物の生育相が回復していることを確認している。

これまでに実施されてきた着生「コケ」植物の調査手法は、生態学的手法による生育相(フロラ)調査が多かった。これは、種の分布状況など詳細な情報が得られ、またIAP指数などの数値化も可能であり、定量的な評価が可能となる。しかしながら、調査そのものは「観察」という、安価な手法にもかかわらず、その実施には、種の判別、確認という専門的な経験と熟練が不可欠であり、そのために、調査スタッフや調査地域が限定されている。植物指標における野外調査は、専門的な経験と技術を用いて

図-2 東京都における樹木着生蘚苔植物の種数分布の推移⁹⁾

より多くの詳細な情報を得ることも必要であるが、一方簡易な手法によってより多くの調査数や地点を得ることも環境モニタリングにおける重要な要素のひとつである。

神奈川県においては、住民や市民を交えた簡易な地衣植物の生育確認による調査を実施した。すなわち、岸川¹³⁾らは、これまでの調査結果や専門家の意見をもとに、ウメノキゴケ、キウメノキゴケ、マツゲゴケ、オオマツゲゴケ、ヒモウメノキゴケ、ハクテンゴケの仲間、カラクサゴケの仲間をまとめて「ウメノキゴケ類」とし、キイとなる種（指標種）を選定した。これらは、大気汚染に弱いとされており、大型の葉状地衣植物で、個々の種の判定は困難でも初心者による識別が可能であるとの理由から選定された。「ウメノキゴケ類」の写真を添付したパンフレットや簡単な調査票を作成した(表4)。このようにして、調査に関心のある一般県民を募り、専門家による講習会、観察会を経て、共同で「ウメノキゴケ類」の生育確認調査を実施した。1988年(昭和63年)から1990年(平成2年)までに県下で500地点の調査票が得られた。これによれば、横浜、川崎のほとんどの地域、県中央部の一部の地域でウメノキゴケの生育は確認されなかったが、山沿いの地域から山間

図一3
神奈川県におけるウメノ
キゴケ類の生育分布¹³⁾

凡例 ● ウメノキゴケ類
が複数種類生育
○ ウメノキゴケが
生育
空白は生育未確認
(*文献等による。)

地では複数種が生育していることが確認された(図一3)。

また、神奈川県市の大気汚染共同調査体である神奈川県臨海地区大気汚染調査協議会¹⁴⁾や東京都の大橋、菅¹⁵⁾は、「ウメノキゴケ類」のほかさらに比較的大気汚染に強いといわれているコフキジリナリアやレブラゴケを指標種として加えて調査をしている。

表4
ウメノキゴケ類の調査票¹³⁾

ウメノキゴケ類調査票				整理番号
ウメノキゴケ類の着生：有・無				
調査年月日：昭和 年 月 日		調査者氏名：_____		
調査地名： 郡・市 町		番地付近		
(1)調査した付近の状況は(以下、該当するものを□で囲む。)				
① 水田 ② 畑地 ③ 草地 ④ 農家				
⑤ 墓地 ⑥ 山林 ⑦ 住宅地 ⑧ 公園				
⑨ 工場地帯 ⑩ その他( )				
(2)着物は				
① 樹の幹 ② 墓石 ③ 石垣 ④ その他( )				
(3)着生の量は(二種以上の場合は、下の表に記入)				
種名( )				
① かなりたくさん着生していた ② 周りにコケが見られた				
③ 湿気が多くコケも見られた ④ 乾燥していた				
⑤ その他( )				
		(3)着生量		
No	種名	①	②	③
1				
2				
3				
4				
5				
6				
(該当する欄に○印を記入)				
		日 当：陽・中・陰 風 当：強・中・弱		
		標本貼付箇所 (標本を貼付してください(約1cm程度))		

このような、特定の指標種を用いた手法は、着生植物を用いた植物指標をより簡易にし、一般化出来るものとして期待される。

3. 樹木の外見的な観察を用いる方法

樹木は、長期間同じ場所で生育しているため、総合的な環境の状態や、その経年的な変化を反映している。そのため、大気汚染などの人為的な環境悪化の指標植物として利用されている。これは、自然状態に生育している樹木の外見的な状態を目視によって観察し、決められた基準にしたがって点数評価により指標とするものである¹⁶⁾(表5)。指標は、「活性度」、「健康度」、「活力度」、「樹勢度」とも呼ばれたり、あるいは「衰退度」というように逆の評価をする場合もある。「活力度」などの場合は、点数が高いほどよい評価であるが、「衰退度」は、点数が高いほど悪い評価で表している。樹木の外見的な観察を用いる手法は、累積的な影響を評価できる利点があると同時に、さまざまな環境要因が複合的に表現されているため、結果の評価が難しい場合もある。しかし、樹木は、局地的、急性的な枯損が認められた公害、煙害の時代から、身近な指標植物として利用さ

れてきている。

東京都においては、1971年(昭和46年)からほぼ5年間隔で樹木衰退度の調査を実施しており、1992年(平成4年)までの約21年間の推移を大橋らが報告している。これによれば、都心部を中心にしたシイ、シラカン、ケヤキなどの樹木の衰退の回復傾向が確認されている。一方、これに反してスギの衰退は徐々に西部地域へ広がっている状況がわかっている。そして、大気汚染の改善は進んだものの一部で見られるスギの衰退は、都市化や開発等による影響を受けていることが考えられるとしている。

神奈川県においても樹木による植物指標調査を1973年(昭和48年)に実施した結果、川崎、横浜を中心にした臨海部の工業地域では、いおう酸化物などの公害による汚染の影響を受け、マツ、ケヤキ、イチヨウなどの樹木の衰退が著しい状況であった¹⁷⁾。1985年(昭和60年)に行った調査では、クロマツ、ケヤキともに12年前に比較して県下全域での、「活力度」の上昇傾向は認められているものの、なお横浜、川崎の県東部の臨海部の地域は、県西部の地域に比較して、活力度が低い状況であった¹⁸⁾(図-4)。

表5
樹木の活力度調査票¹⁷⁾ ケヤキ健康調査票

		N O		調 査 日		年 月 日	
調 査 場 所	郡・市 町・区 番地付近						
天 候			病虫害状況				
選 定 木 No.			立 地 条 件				
評 価 点	評 価 基 準						調 査 結 果
調査項目	5	4	3	2	1		
樹 形	自然樹形を保っている	若干の乱れがある自然樹形に近い	やや自然樹形の崩壊が進んでいる	自然樹形の崩壊がかなり進んでいる			
枯 枝 の 有 無	枯枝は見られない	枯枝が少しあるがめわらない	枯枝が見られる	枯枝がかなり見られる	かなり多くの枯枝が見られる		
葉の繁り具合	正常枝と葉の密度のバランスが良くとれている	正常枝と葉の密度のバランスがほぼ取れている	普 通	やや疎であり枯枝も少し見られる	きわめて疎であり枯枝もかなり見られる		
葉 色	正常	やや退色が見られる	退色が目立つ	退色がかなり進んでいる	著しく退色が進んでいる		
現 場 写 真			地 形 概 要		平 均 値		

凡例

図—4

神奈川県における樹木活力度の
分布の推移¹⁸⁾

福岡県では、森林の持つ環境指標性に注目し、環境が良好に保たれている社寺林を中心に設定した県内30カ所の「環境指標の森」でのモニタリング調査を1973年(昭和48年)から継続している¹⁹⁾(図—5)。第1次(1973年：昭和48年～1981年：昭和56年)、第2次(1982年：昭和56年～1993年：平成5年)を通じた経年的な調査の結果では²⁰⁾、台風や虫害、人為的攪乱による変化が、一部で認められるものの、大気汚染物質などの人為起源物質に起因すると判断される変化は、いずれの調査地においても認められなかったとしている。「環境指標の森」が正常な状態で維持されていることを確認しているものの、環境モニタリングを有効に機能させるためには、広域的な調査とともに、このような定点での、長期的、継続的調査によるデータの蓄積が、今後とも必要であるとしている。

樹木の観察による方法によっても、大気汚染の著しかった地域においては、樹木の活力度が回復してきていることがわかったり、従来から良好であった地域では、活力度の良好な状態が維持されていることを確認できている。しかし、樹木に関しては上にのべたような全体的、経年的な活力度の上昇傾向とは裏腹に、20年以上前からの関東地方をはじめとするスギの衰退・枯損の問題や山間地におけるモミヤ

ブナなどの森林衰退・枯損現象が顕在化している。これらについては、様々な面から精力的に調査や研究が進められており、その因果関係についての説もいくつか出されている。しかし、未だにはっきりした結論が得られていない。大気汚染の状況も、工場などの固定発生源による1次的、局地的な汚染から、自動車排気ガス問題や光化学汚染、酸性雨現象などに象徴される2次的、広域的な汚染へと変化している。さらに、都市化、温暖化、乾燥化などに見られるようにいくつかの要因が複合的に関係していることも示唆されている。このような現状から樹木を指標植物とした、より広範で、継続的なモニタリングの実施や調査研究は、今後とも積極的に進められるべきものとする。

4. ま と め

大気汚染の評価のための植物指標として、「植物の葉の可視被害の観察による方法」、「鮮苔植物(類)、地衣植物(類)等の着生植物による方法」、「樹木の外見的な観察による方法」をとりあげた。これら以外にも指標植物を用いた大気汚染評価に関する事例は多く報告され、また提案されてきた。今回話題に取り上げた方法は、直接目で植物を観察するという理解しやすい方法であることもあり、いずれも10年

20年の長期間にわたってモニタリング調査が実際に継続実施され、過去からの大気汚染環境の変化や状況を指標植物を通じて評価している数少ない事例である。今日、化学物質や物理量の測定のための技術や装置は、かつてとは比較にならないほど進歩している。大気汚染も含めた環境状態の把握は、より高精度、かつ高度になってきている。このような時代における植物指標の役割は、簡易な「生物計」としてよりもむしろ「警告」あるいは、生物の立場に立った「環境評価」としての機能がより重要視されてきている。多くの人間の目によって、簡易に、日常的に、継続的に、しかもより多くの目によって環境をモニタリングすることのできる「観察手法による植物指標」は、そのための有効な方法のひとつであると考えられる。このためには、植物指標の限界と機能を明らかにすることはもとより、調査手法の統一、調査の連携、啓発・普及の推進は、不可欠である。

資 料

- 1) 松中昭一編：図説 環境汚染と指標生物，朝倉書店（1980）
- 2) 松中昭一：指標生物，講談社（1975）
- 3) 埴田 宏：環境汚染と指標生物，共立出版（1974）
- 4) 大気汚染研究全国協議会編：大気汚染植物被害写真集，日本公衆衛生協会（1973年）
- 5) 篠崎光夫：神奈川の大気汚染をみる（大気汚染による植物被害写真集），白美堂（1995）
- 6) 関東地方公害対策推進本部大気汚染部会・一都三県公害防止協議会：平成7年度 光化学スモッグによる植物調査報告書（1996）
- 7) 吉村 庸：原色日本地衣植物図鑑，保育社（1974）
- 8) Taoda. H：Mapping of atmospheric pollution in Tokyo based upon epiphytic bryophytes, Jap. J. Ecol., 22, 3, P125-133 (1972)
- 9) 菅 邦子，大橋 毅：樹木着生蘚苔類の生育状況（I），東京都環境研究所年報，273（1933）
- 10) 光木偉勝：着生蘚苔植物に基づく大気環境評価指数の推移，兵庫県公害研究所研究報告，第25号，1（1993）
- 11) 中川吉弘，小林樹：着生地衣植物による大気環境評価—10年前との比較にみられる変化—，兵庫県公害研究所研究報告，第27号，1（1995）
- 12) 福岡県：着生地衣・蘚苔植生による福岡県内の環境評価（昭和53年～平成6年度）報告，（1995）
- 13) 岸川敏朗，藤田和男，生出智哉：ウメノキゴケ類を指標生物とした神奈川の大気汚染，神奈川県大気汚染調査研究報告，V32,90（1991）
- 14) 神奈川県臨海地区大気汚染協議会：大気汚染生物指標調査，平成5年度神奈川県臨海地区大気汚染協議会報告書，P73（1993）
- 15) 大橋 毅，菅 邦子 地衣類（ウメノキゴケ等）の生育状況について，東京都環境科学研究所年報，228（1994）
- 16) 大橋 毅，菅 邦子：都内のスギ，ケヤキ生育調査，東京都環境科学研究所年報，338（1995）
- 17) 神奈川県公害対策事務局・神奈川県農業総合研究所：リモートセンシングによる大気汚染の地域評価，神奈川県大気汚染調査調査研究報告 V17，P88（1980）
- 18) 神奈川県環境部・神奈川県公害センター・神奈川県農業総合研究所：神奈川県における樹木の活力度—生物が教えてくれる大気汚染—，神奈川県大気汚染調査調査研究報告 V29，P119（1988年）
- 19) 福岡県：福岡県環境指標の森 昭和48～56年度調査総合報告書，（1983）
- 20) 福岡県：福岡県環境指標の森 第2次調査（昭和57～平成5年度）報告書，（1995）