

C-2 酸性物質の生態系に与える影響に関する研究

(2) 環境酸性化の指標生物に関する研究

①環境酸性化の指標となる蘚苔類・地衣類に関する研究

研究代表者 森林総合研究所森林環境部 埜田宏

農林水産省 林野庁 森林総合研究所

森林環境部 植物生態科 埜田宏
関西支所 造林研究室 井鷲裕司

平成5-7年度合計予算額 12,898千円
(平成7年度予算額 4,349千円)

[要旨] 大気汚染の指標として用いられる蘚苔類・地衣類について、人工酸性雨による酸性環境下での生育障害の違いと野外における分布特性との関係を調査した。高濃度(pH 2.4以下)の酸で処理した蘚苔類の細胞は原形質分離を生じ、約1日後にはクロロシスが観察される。生存した組織があれば、新しいシュートの伸長が見られる。細胞が枯死せず、かつ、有害な濃度であれば、シュートの伸長が抑制される。致死性であった最低濃度、生存してシュートの伸長が見られた最高濃度を絶対的な酸性雨耐性の指標とすると、大気汚染地域に深く侵入する種類は郊外のみで生育する種類より、針葉樹を好む種類は広葉樹だけに生育する種類より耐性がやや大である。しかし、耐性が低い種でも致死濃度はpHで3.0未満であり、実際に工業地帯の着生砂漠地域で採取された酸性の雨水(pH 4前後, EC 60~80 μ S/cm)で生育が阻害されることはなかった。

酸性耐性とスーパーオキシドデスミューターゼ活性の相関を数種の蘚苔類、地衣類を用いて調査した。ハイゴケでは致死濃度の 10^{-2} m eq/lの硫酸処理区ではSOD活性は全く上昇しなかったのに対して、 10^{-3} m eq/lの硫酸処理区ではSOD活性がほぼ倍増した。コモチイトゴケでは 10^{-2} m eq/lの硫酸処理区、 10^{-3} m eq/lの硫酸処理区ともにSOD活性に差はなく、また、特に目立った経時変化も認められなかった。

1970年以降、大気汚染濃度が著しく減少した東京都内、比較的低濃度で推移してきた宇都宮市周辺において、着生蘚苔類植生の変化を調査した。かつて、東京都の山の手線内部と以東には、着生蘚苔類が全く見られない地域(着生砂漠)が広範囲に存在していたが、現在では数種類の蘚苔類が普通に見られるようになった。1975年の調査では、宇都宮市の中心部、東部の内陸工業団地の一部に着生植生が貧弱な地域が存在していたが、再調査の結果、多数の蘚苔類や葉状地衣類の生育が認められた。

[キーワード] 蘚苔類, 人工酸性雨, 汚染耐性, 環境ストレス, SOD活性

1. 序

樹皮上に生育する蘚苔類や地衣類が大気汚染に弱く、生物指標として優れていることはよく知られている。その大きな理由は、クチクラ層を持たない細胞が裸出し、夜露・霧・雨滴などに依存した生活をしているためとされている¹⁾。このような植物体の構造と生態的特徴は多くの蘚苔類、地衣類に共通であるが、大気汚染感受性は種類によって大きく異なる。二酸化硫黄等の有害ガスを用いた耐性の比較実験では、汚染地での分布に対応した耐性が確かめられている¹⁸⁾¹⁹⁾。また、蘚苔類に有害な大気汚染物質の環境濃度が減少した地域では、着生蘚苔類植生の回復が観察され⁵⁾¹⁶⁾²¹⁾、都市のヒートアイランド現象を根拠とする乾燥説は否定された。近年では、いわゆる「酸性雨」による植物被害の存在が問題とされているが、高等植物の葉に比べて、酸性物質の浸入に対する防御組織を持たない蘚苔類の反応はより敏感であるはずである。すでに、いくつかの蘚苔類や地衣類に対する人工酸雨の負荷試験が行われている⁴⁾⁶⁾⁷⁾¹³⁾が、着生蘚苔類の分布の違いとして観察されている耐性の差を実証するには至っていない。

2. 研究目的

(1) 蘚苔類に及ぼす人工酸性雨の影響

大気汚染の指標植物として、その有用性が認められている樹皮着生蘚苔類、地衣類について、酸性雨・霧に対する指標性を再検討し、広域的な地図化を可能にする種類を探索するため、市街地、工業地域の周辺に生育する着生蘚苔類の人工酸性雨耐性を急性害の発生により求め、非汚染地帯に分布する種類等と比較することによって、野外で観察される分布と一致するか否かを検討する。

(2) 蘚苔類のSOD活性に及ぼす酸性物質の影響

生体内の酸素は普通の基底状態にある $^3\text{O}_2$ 以外に様々な酸素種があり、細胞構成成分を酸化して酸素傷害を引き起こしている。これらの活性酸素の種類には $^3\text{O}_2$ の1電子還元種である、スーパーオキシド(O_2^-)、2電子還元種である過酸化水素(H_2O_2)、電子励起状態の酸素分子である1重項酸素($^1\text{O}_2$)、ヒドロキシルラジカル($\cdot\text{OH}$)、金属-酸素錯体、そしてこれらの酸素種と生態の不飽和脂肪酸(L)との反応に由来する、ペルオキシラジカル($\text{LOO}\cdot$)、アルコキシラジカル($\text{LO}\cdot$)、ヒドロペルオキシド(LOOH)などがある。活性酸素は一般に寿命は短い、生体内の様々な分子を酸化し障害を与える。そのため、生体内には活性酸素を迅速に消去するための様々な機構がある。また、生体内で生成された活性酸素は生体防御や生化学反応、生体防御等にも関与しているため、生体内での活性酸素の量は厳密にコントロールされていると考えられている。活性酸素の濃度測定については、その寿命がきわめて短いため、直接的測定は H_2O_2 以外は不可能である。そこで、活性酸素が標的分子に与えた影響を測定することで間接的に濃度を測定することが一般に行われている。FridovichやMcCordらが生体反応で酸素が1電子で還元されてスーパーオキシド(O_2^-)が生じることを明らかにすると共に、これを消去する酵素があることも見だし、この酵素をスーパーオキシドジスムターゼ(superoxide dismutase, SOD)と名付けたのは1960年代の初期である。この酵素は O_2^- の生体内濃度を低下させるとともに、 O_2^- から生ずる $^1\text{O}_2$ や OH ラジカルの生成も防ぐ。従って、多くの反応性の高い酸素種の生物体内での濃

度上昇を防ぎ、活性酸素から生態を防御する役割を担っていると考えられている。植物は酸素呼吸とともに、光合成を行っており、活性酸素の害を最も受けやすい生活様式をとっている生物である。従って、活性酸素に対する嚴重な保護機構を進化的に発達させてきているし、そのような機構がなければ活性酸素の害により生存できない。事実、パラコートやメチルピオローゲンなどの除草剤は葉緑体内の光化学系で電子を受けラジカルとなり、それが O_2 と反応することで $O_2^{\cdot-}$ を生じ、 $O_2^{\cdot-}$ が植物体を枯死に至らしめることが知られている¹⁰⁾。これらの除草剤は強光下で特に効果が現れやすいのも、いわば光合成に由来する酸素害がいかに生物体に重大な影響を与えるものかを示すものである。

大気汚染に影響を受けた植物は光合成速度等、生理レベルの障害を受け、葉のクロロシス、ネクロシスや落葉、枯死という損傷を受ける。初期の研究では大気汚染物質が直接植物体に損傷を与えると考えられてきたが、活性酸素による直接的な影響が明らかになってきた¹⁷⁾。例えば SO_2 の場合、植物の細胞に侵入した SO_2 は H^+ 、 SO_3^{2-} 、 HSO_3^- を生じさせるが、暗中では傷害は起こらず、光照射を行うことで初めて植物体に傷害が起こる。 HSO_3^- の存在下で葉緑体に光を照射すると、多くの活性酸素が連鎖反的に生成されることも知られており、また、活性酸素除去剤を与えた植物体は光照射下でも、傷害が起こらないか、あるいは軽減される事も知られている。このような事実は、植物体の SO_2 傷害を引き起こすのは活性酸素であることを示唆している。同様の実験結果は、オゾンや二酸化窒素の場合についても知られている。

蘚苔類は大気汚染に敏感に反応するため、汚染の指標としてしばしば用いられてきた³⁾¹¹⁾¹⁸⁾。蘚苔類が大気汚染物質にさらされたときも、多くの植物と同様に植物体内に活性酸素が生成され、これに対してSODなどの消去系が対処しているものと考えられる。従って、大気汚染物質による蘚苔類への影響を評価するためには、外見の変化だけでなく、植物体内におけるSOD活性の変化を捉えることが重要である。すなわち、大気汚染物質が活性酸素という形で蘚苔類に影響を及ぼしていても、体内に存在する活性酸素消去系によって、内的に対処され、外見的にはなんら影響が観察されない場合が考えられるからである。

大気汚染や酸性雨等による影響を生理的活力として評価する方法には、光合成や呼吸速度等の基本的な代謝速度の他、オキダーゼ等の酵素活性の低下を測定する方法がある。汚染ストレスによる活力の低下を測定する場合、乾燥・高温等の要因によって植物体の基本的な生理機能が低下した場合の短期的影響評価が困難である。環境ストレスによってSOD活性が増加することが測定できれば、分布に影響しない程度の低濃度汚染によるストレスを検出し、植物体そのものが活力低下している場合との区別が可能と考え、本方法の適用を試みた。蘚苔類、地衣類を材料とした場合、材料が十分に得られないことに加え、組織を生存年数別に分類することが困難であるため、SOD活性の定量的評価の可能性を探ることが当面の目標となった。

(3) 東京都及び北関東地域における着生植物の分布と大気汚染

樹皮上に生育する蘚苔類や地衣類などの着生植物が大気の汚染に著しく敏感であることは19世紀のヨーロッパですでに知られていた。我が国においては、Taoda¹⁸⁾が着生蘚苔類の分布に基づいて東京都の大気汚染地図を作製して以来、各地で調査が行われた。

ここでは、著者によって過去に調査された東京都（1969-1971年調査）、宇都宮市東部（1975年調査）の着生植生を同一の方法で再調査し、大気汚染濃度の変化と比較した。調査対象樹種の選定方法、再調査時の問題点等は既に論議されているとおりである²¹⁾。

3. 研究方法

(1) 蘚苔類に及ぼす人工酸性雨の影響

実験に用いた材料は、市街地の周辺の樹皮上に生育する着生蘚苔類のほか、山地の岩上、地上に生育しているものを加えた。一般に、森林内に生育する蘚苔類が大気汚染の影響を受けることは少なく、むしろ、岩の種類や土壌の酸性度など、生育基物の影響が大きいとされている。着生蘚苔類については、市街地や工業地域周辺における分布調査や二酸化硫黄等による暴露実験から、大気汚染に対する耐性の違いが認められているので耐汚染性の異なる種類で実験を行うよう努めた。また、供試植物体には、野外で採集した植物体を風乾保存したものと、脱脂綿培地上で成長した新しいシュートを用いたものの二通りを用いた。

人工酸性雨としては、硫酸、硝酸、亜硫酸、硫酸・塩酸・硝酸の混合液（当量比 2:2:1）、及び、それらと栄養塩類の混合液を使用した。その他に、着生蘚苔類の生育が認められない（着生砂漠）工業地域で採取した雨水（pH 4 前後、EC 60~80 μ S/cm）と脱イオン水をコントロールとした。蘚苔類の培地には湿潤脱脂綿とろ紙を用い、人工酸性雨の処理は、定期的な浸漬と培養のくり返し（一定濃度）、定期的な噴霧と乾燥のくり返し（乾燥濃縮）を行った。

(2) 蘚苔類の SOD 活性に及ぼす酸性物質の影響

SOD活性の測定はハイゴケ（*Hypnum plunaeforme*）、コモチイトゴケ（*Pylaisiadelphatenuirostre*）、イトゴケ（*Barbella pendula*）、キヌゴケ（*Pylaisia brotheri*）、シダレヤスデゴケ（*Frullania tamarisci*）等の蘚苔類、地衣類のウメノキゴケ（*Parmelia tinctorum*）、オオマツゲゴケ（*Parmelia reticulata*）で行ったが、環境変化に弱い種では酸処理の有無にかかわらず数値のバラツキが大きく、酸の影響の考察は比較的安定した数値を示した2種に限定した。

実験処理は各種の若いシュートをあらかじめグループに分け、生重を測定した後、酸処理とSOD活性の測定を行った。酸は濃度 10^3 と 10^2 m eq/lの希硫酸を用い、8日間の処理期間中に8、4、2、0日の無処理（脱イオン水）期間を置き、それぞれ、0、2、4、8日の酸処理を行った。処理期間中は20℃で12時間明：12時間暗の条件下で培養した後、植物体を粉碎してSOD活性を測定した。濃度 10^3 m eq/lは長期間の負荷でも枯死に至る被害を与えないことが確かめられており、 10^2 m eq/lは致死的濃度である。

生体試料のSOD活性を測定する場合、簡便で各種混入物の影響の少ない方法を採用することが必要であり、本研究では、このような条件を満たす亜硝酸法²²⁾を採用した。この方法ではキサンチンオキシゲナーゼでキサンチンを尿酸に変化させ、その過程で発生する O_2 と NH_2OH で NO_2 を発生させ、 NO_2 に発色剤を加えアゾ色素を生成させる。この色素は550 nmの吸光ピークを持つ。SOD活性の高いサンプルでは O_2 をSODが消去するため、アゾ色素生成の反応とSODによる O_2 の消去が競合的に進み、このことからSOD活性を測定することができる（図7）。

(3) 東京都及び北関東地域における着生植物の分布と大気汚染

東京都で最初に調査が行われた1969～1971年は、二酸化硫黄濃度が最も高かった時代の着生植生を調査したものである。都心部においては明らかな着生砂漠が認められた。郊外に向かうにつれて着生植物の種類、量ともに増加する傾向は明白である。都市域で着生植生が減少あるいは消滅する原因については、「汚染説」の他に「乾燥説」があった。当時においても都市化によるヒートアイランド現象は存在しており、相対湿度の低下と着生植生の減退は相関が認められる。しかし、同時に大気汚染は水蒸気の凝結を促進し、都市部での霧の発生や小雨日数の増加も報告されている。たとえば大気が乾燥したとしても、数ヶ月に渡る乾燥に耐える蘚苔類の枯死原因になりえないのは明らかである。二酸化硫黄を含む大気汚染の植物毒性については、燻煙実験の他に、浄化空気による栽培試験で、致死的事実であることが明らかにされている。

1990年代における菅・大橋の調査結果¹⁶⁾は、Taoda¹⁸⁾が着生砂漠であると見なした地域に多くの蘚苔類の生育を確認している。著者らも、かつての調査対象木を探索して再調査を行い、着生植生の比較を行った。

4. 実験結果

(1) 蘚苔類に及ぼす人工酸性雨の影響

高濃度の酸で処理した蘚苔類の細胞は原形質分離を生じ、約1日後にはクロロシスが観察される。生存した組織があれば、新しいシュートの伸長が見られる。細胞が枯死せず、かつ、有害な濃度であれば、シュートの伸長が抑制される。これは、比較的大気汚染に弱い種であるヒロハツヤゴケ (*Entodon challengerii*) の新シュートの成長で確かめられた。同様の傾向は市街地のアルカリ土壌を好むホソウリゴケ (*Brachymerium exile*) の仮根の伸長量にも見られた(表1; 図1, 2)。これらの種類にとっては酸性環境が成長阻害の原因となっていると考えられる。いくつかの種類ではpH3を下回ると致死的な被害が生じるものの、それよりアルカリ側では成長量の減退がほとんど認められなかった。大気汚染に最も強いとされているサヤゴケ (*Glyphomitrium humillimum*) やコモチイトゴケ (*Pylaisiadelphina tenuirostre*) ではpHの低下にともなう成長量の減少は少なく、硝酸イオンを含むpH4前後の酸ではクロロフィルの増加(緑色が濃くなる)や成長の促進も見られた(表2; 図3, 4)。市街地には生育しないコバノイトゴケ (*Haplomitrium pseudotriste*)、イトゴケ (*Barbella pendula*) の例では、前者が高濃度の酸で顕著な被害を受けたのに対し、後者は高い耐性を示した(表2; 図5, 6)。くり返し行った実験の結果から、致死的事実であった最低濃度、生存してシュートの伸長が見られた最高濃度を絶対的な酸性雨耐性とする、大気汚染地域に深く侵入する種類、針葉樹を好む種類は広葉樹だけに生育する種類に比べて耐性がやや大である(表3)。しかし、致死的事実濃度はpHで3.0未満であり、実際に工業地帯の着生砂漠地域で採取された酸性の雨水で生育が阻害されることはなかった。山地に生育する種類の耐酸性は生育基物の化学的性質との関係が深く、亜高山針葉樹林に生育する種類は耐酸性が大きい傾向があった。

定が可能であった。

10^{-2} m eq/l の硫酸、硝酸及び擬似酸性雨ではほとんどの種類が枯死した。 5×10^{-3} m eq/l では種類により、枯死率に差が生じた。同一の等量濃度では、硫酸と硝酸の枯死率に違いは少ない。低濃度では、一部の種類について、硝酸処理の個体の緑色が濃くなる傾向が認められた。pH 3

~4 の亜硫酸では枯死に至る被害が生じ、同じ酸性度の硫酸との差は大きい。人工酸性雨を噴霧し培地を乾燥させた場合の枯死は、一定濃度の処理に比べて、顕著であったが、枯死に至る条件が不明であるので、評価は種類間の耐性比較の参考に留めた。

表 1. 人工酸性雨がシュートと仮根の成長に及ぼす影響

酸の等量濃度 (pH)	ヒロハツヤゴケの新シュートの乾重t*	ホソウリゴケの仮根の平均長**
コントロール(5.8)	1.6	9.0
0.1 meq/l (3.6)	1.5	6.0
0.5 meq/l (3.2)	1.0	4.0
1.0 meq/l (2.6)	0.7	4.0
5.0 meq/l (2.2)	0.1	1.0
10.0 meq/l (1.8)	0.0	0.1

*古いシュートに対する新しく成長したシュートの重量比

**培地上に広がった仮根の平均半径。

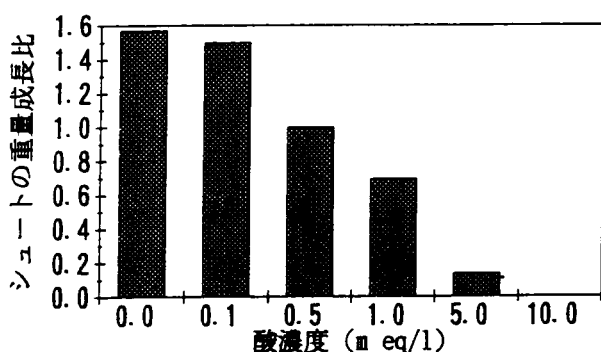


図 1. ヒロハツヤゴケの重量成長

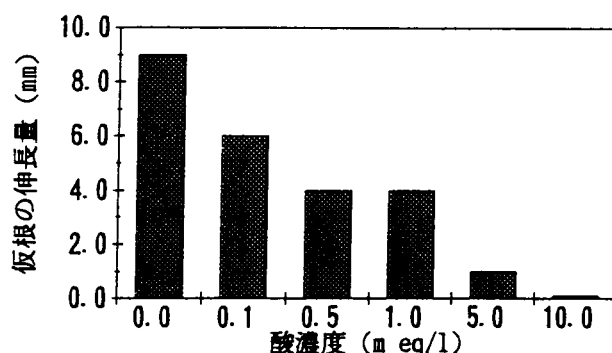


図 2. ホソウリゴケの仮根の伸び

表2. 酸性環境下で新しく伸びたシュートの長さ

酸の等量濃度	ハイゴケ	コモチイトゴケ	コバノイトゴケ	イトゴケ
コントロール	20.0±0.6	6.8±0.7	4.2±0.5	7.8±0.4
0.1 m eq/l	17.0±1.9	7.4±0.9	4.2±0.2	12.4±1.5
0.5 m eq/l	13.0±0.3	3.2±0.2	2.0±0.4	12.0±2.1
1.0 m eq/l	9.0±0.0	2.8±0.2	0.1±0.0	9.8±1.2
5.0 m eq/l	5.8±0.7	2.1±0.2	0.0±0.0	4.8±2.5
10.0 m eq/l	2.3±0.4	1.0±0.0	0.0±0.0	1.3±0.3

数値は平均値と標準誤差を示す(単位 mm)

表 3. 主要な蘚苔類の致死的酸性度

種類	生育地	最大枯死pH*	最小生育pH
グループ 1. 市街地の中心部まで生育する種類**			
サヤゴケ(<i>Glyphomitrium humillimum</i>)	広葉樹の樹皮	1.8	2.6, 2.8
コモチイトゴケ(<i>Pylaisiadelpha tenuirostris</i>)	広葉樹の樹皮	1.8, 2.2	2.6, 2.8
グループ 2. 市街地の周辺地域まで生育する種類			
ヒロハツヤゴケ(<i>Entodon challengeri</i>)	広葉樹の樹皮	1.8	2.6, 2.8
ハイゴケ(<i>Hypnum plumaforme</i>)	広葉樹の樹皮	2.2, 2.6	(1.8), 2.8
グループ 3. 市街地の外縁部に生育する種類			
ヒナノハイゴケ(<i>Venturiella sinensis</i>)	広葉樹の樹皮	1.8, 2.2	2.6, 2.8
グループ 4. 農村地域に生育する種類			
カラヤステゴケ(<i>Frullania muscicola</i>)	広葉樹の樹皮	2.2	2.6
コダマゴケ(<i>Orthtrichum consobrinum</i>)	広葉樹の樹皮	2.2	2.6
エダウロコゴケ(<i>Fauriella tenuis</i>)	広葉樹の樹皮	2.2	2.6
コバノイチゴケ(<i>Haplohymenium pseudotriste</i>)	広葉樹の樹皮		(1.8), 2.8
イワイトゴケ(<i>Haplohymenium triste</i>)	広葉樹の樹皮		2.9
山地に生育する種類など			
チャボスズゴケ(<i>Boulaya mittenii</i>)	広葉樹の樹皮	2.9	(2.9)
ミヤマチリメンゴケ(<i>Hypnum plicatulum</i>)	針葉樹の樹皮		2.9
Species found on rock or soil			
ウカミカマゴケ(<i>Drepanocladus fluitans</i>)	酸性の渓流水中	(1.8)	(1.8), 2.8
オオバチヨウチンゴケ(<i>Plagiomnium vesicatum</i>)	湿岩上	1.8	2.6, 2.8
ムラサキミゾゴケ(<i>Marsupella sphacelata</i>)	高層湿原		2.9
コアナミズゴケ(<i>Sphagnum girgensohnii</i>)	高層湿原		2.9
トサハネゴケ(<i>Plagiochilla fruticosa</i>)	湿岩上	1.8	(1.8), 2.8
ホソウリゴケ(<i>Brachymenium exile</i>)	街路樹の根元土上	1.8, 2.2	2.6
ホンモンジゴケ(<i>Scopelophila cataractae</i>)	銅屋根の下の土上	1.8	2.6, 2.8
ネズミノオゴケ(<i>Myuroclada maximowiczii</i>)	草地の湿土上	2.2	2.6

* 一定濃度での実験。()内の数値は一部が生存している場合
 ** グループの分類はTaoda(1972)による

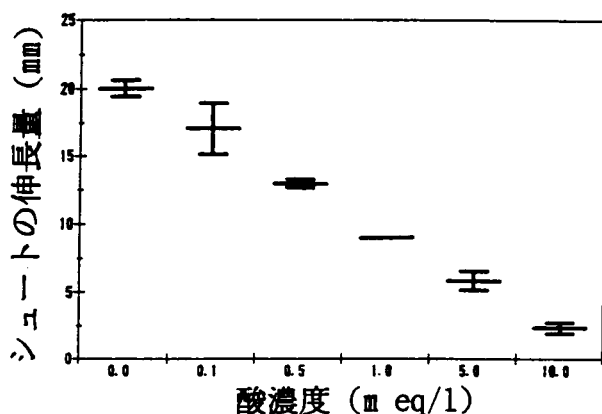


図 3. ハイゴケのシュート伸長量

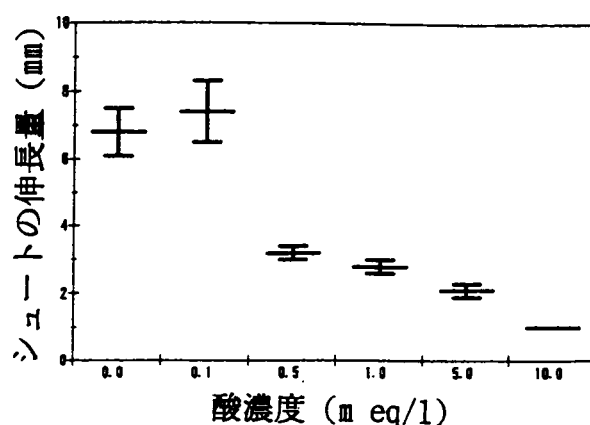


図 4. コモチイトゴケのシュート伸長量

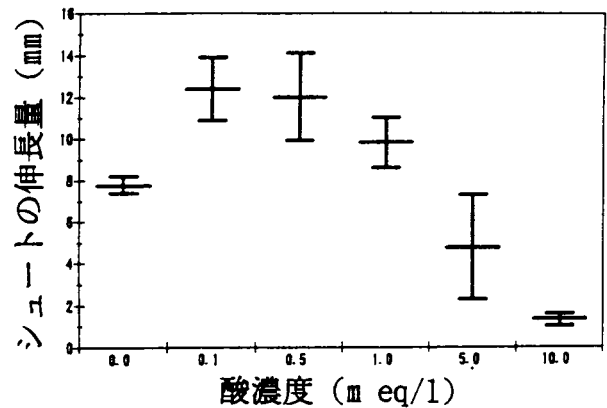
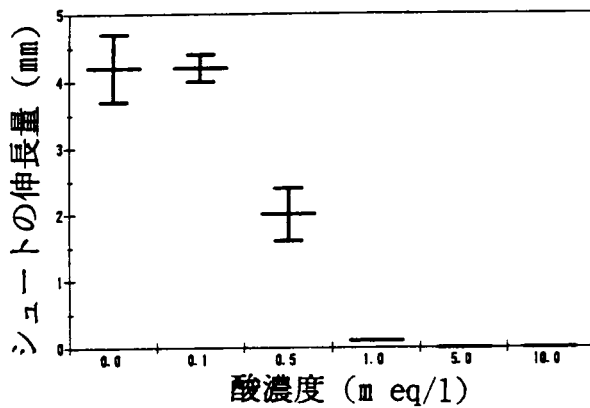


図 5. コバノイトゴケのシュート伸長量 図 6. イトゴケのシュート伸長量

(2) 蘚苔類のSOD活性に及ぼす酸性物質の影響

アゾ色素合成の阻害率 y (%)と標準SOD濃度 x ($\mu\text{g/ml}$)の間には

$$y = 14.14 \ln(x) + 84.3, r^2 = 0.9703$$

の関係が認められた(図8)。この関係をもとに図7で示したアゾ色素の合成がどの程度阻害されたかを各サンプルで求め、SOD活性を推定した。

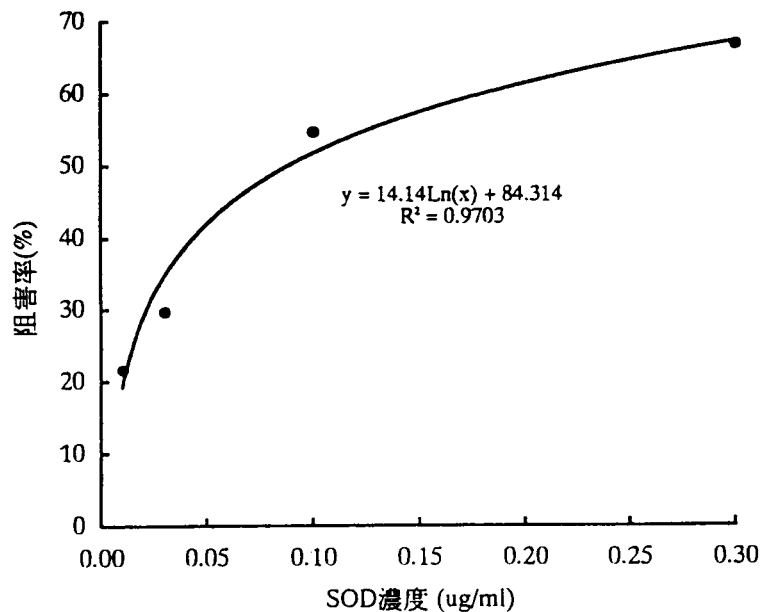
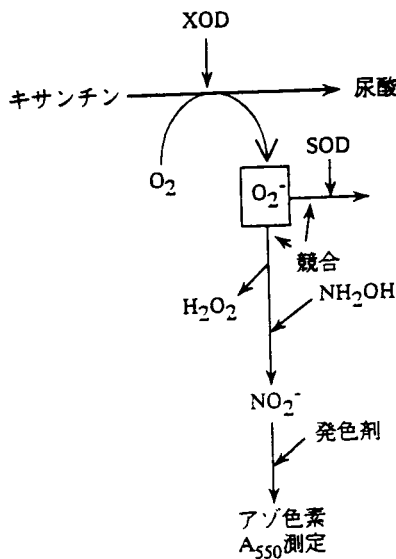


図 7. 亜硝酸法のプロセス 図 8. SOD濃度とアゾ色素生成阻害率の関係

ハイゴケでは 10^{-2} m eq/lの硫酸処理区ではSOD活性は全く上昇しなかったのに対して、 10^{-3} m eq/lの硫酸処理区ではSOD活性がほぼ倍増した(図9)。処理終了後、 10^{-2} m eq/lの硫酸処理区

のサンプルは処理終了2週間後には、いずれも著しいクロロシスを生じた。植物体内の活性酸素消去系がこの濃度の硫酸を処理することができなかったものと思われる。一方、 10^{-3} m eq/l の硫酸処理区のサンプルはいずれも処理前と外見上の変化は認められず、植物体内の活性酸素消去系が硫酸散布のストレスを解決したものと思われる。

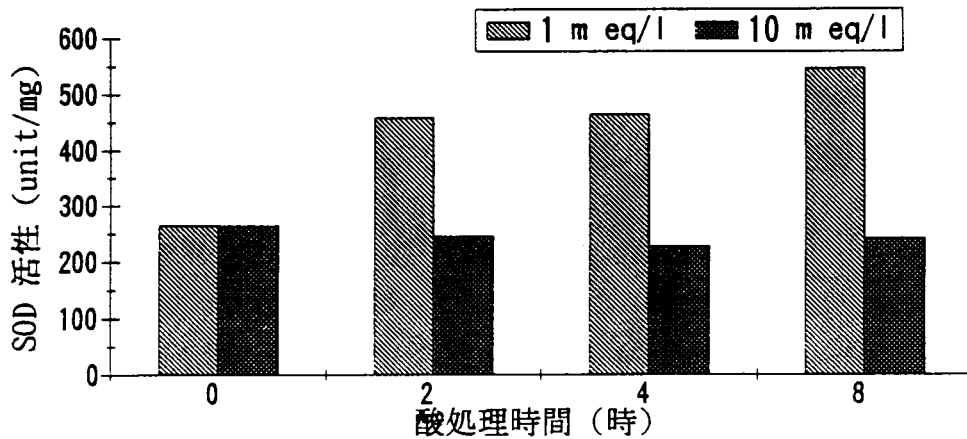


図9. ハイゴケの酸処理とSOD活性

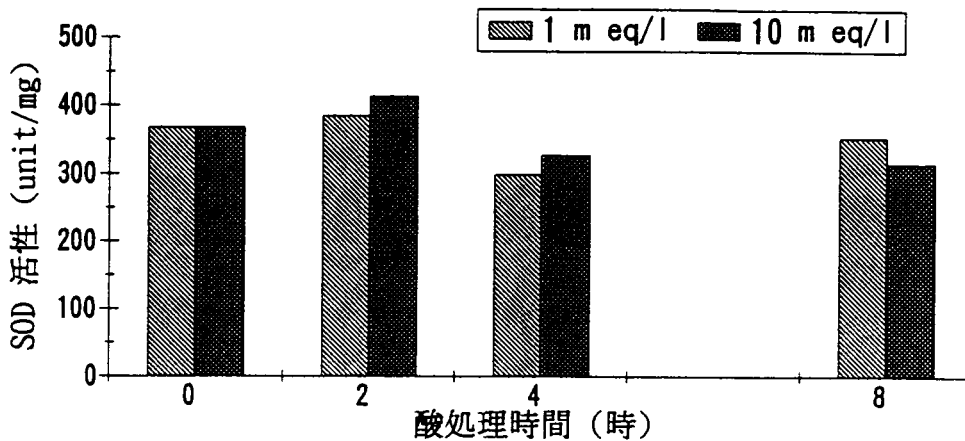


図10. コモチイトゴケの酸処理とSOD活性

コモチイトゴケでは 10^{-2} m eq/l, 10^{-3} m eq/l の処理区ともにSOD活性に差はなく、また、特に目立った経時変化も認められなかった(図10)。 10^{-3} m eq/l の処理区では調査終了後にも外見上の変化はなく、硫酸によるダメージは認められなかった。より濃度の濃い、 10^{-2} m eq/l 区では8日間処理区に著しいクロロシスが認められたが、2日間処理と4日間処理のものは、わずかであった。

(3) 東京都及び北関東地域における着生植物の分布と大気汚染

樹皮上に生育する蘚苔類や地衣類などの着生植物が大気汚染に著しく敏感であることは19世紀のヨーロッパですでに知られていた。我が国においては、Taoda(1972)が着生蘚苔類の分布に基づいて東京都の大気汚染地図を作製して以来、各地で調査が行われた。

ここでは、著者によって過去に調査された東京都(1969-1971年調査)、宇都宮市東部(1975年調査)の着生植生を同一の方法で再調査し、大気汚染濃度の変化と比較した。調査対象樹種の選定方法、再調査時の問題点等は既に論議されているとおりである(埜田, 1992)

東京都の大気汚染は、二酸化硫黄についてみると1969年をピークとして、急激に減少した。これは、1968年の大気汚染防止法の制定によるところが大きい。都市、工業地域では1974, 1979年のオイルショックを引き金とした石油使用量の減少も要因となっている。特に、都心部の減少は顕著であって、結果的に、郊外との濃度差は著しく減少した(図 11)。

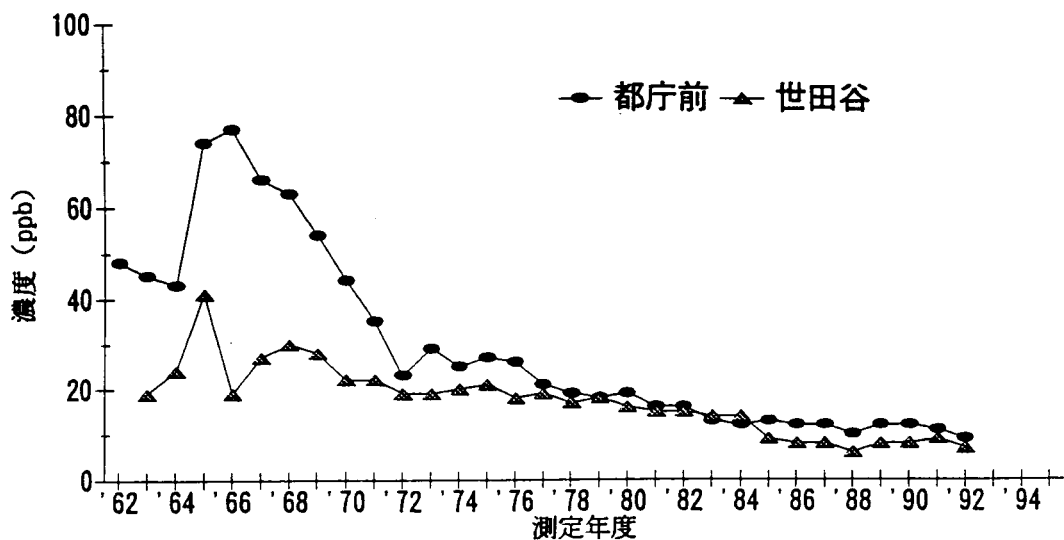


図 11. 東京都内数カ所の二酸化硫黄濃度経年変化

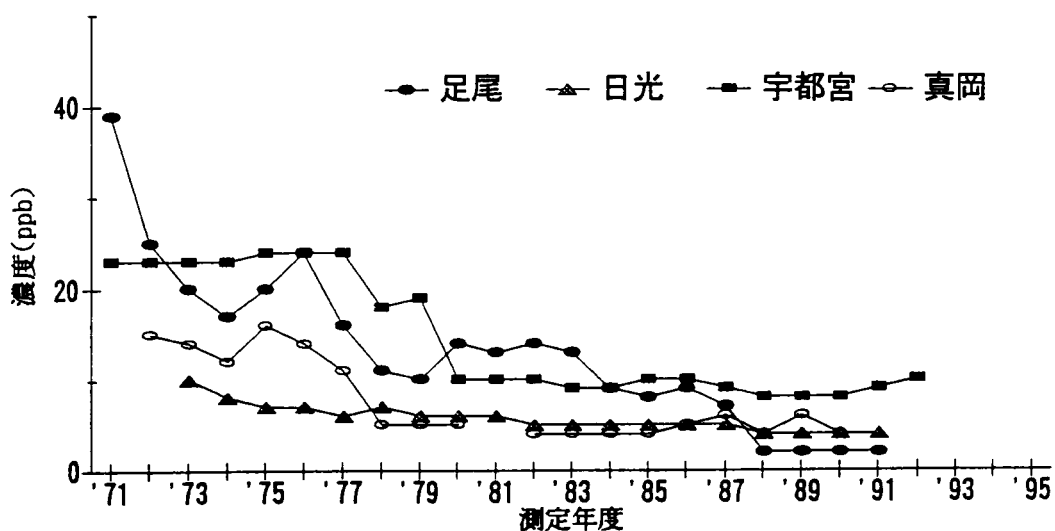


図 12. 栃木県内数カ所の二酸化硫黄濃度経年変化

山間部の精練所から排出される二酸化硫黄は、排出規制と経済的理由による稼動状況を反映している。栃木県足尾精練所付近に於ける大気中の二酸化硫黄濃度は、事業量の縮小によって顕著に減少、輸入鉱石による精練の廃止（1988年）にともなって、ほとんど解消され、宇都宮市より低い値となっている（図 12）。

窒素酸化物、炭化水素については、二酸化硫黄ほどの減少を示していない。しかしながら、1970年代前半に顕著であったオキシダントの植物被害は減少傾向にある。例えば、ケヤキの葉の夏季の異常落葉は、オキシダント（オゾン）による接触実験でも再現されていたが、近年になってほとんど見られなくなった。

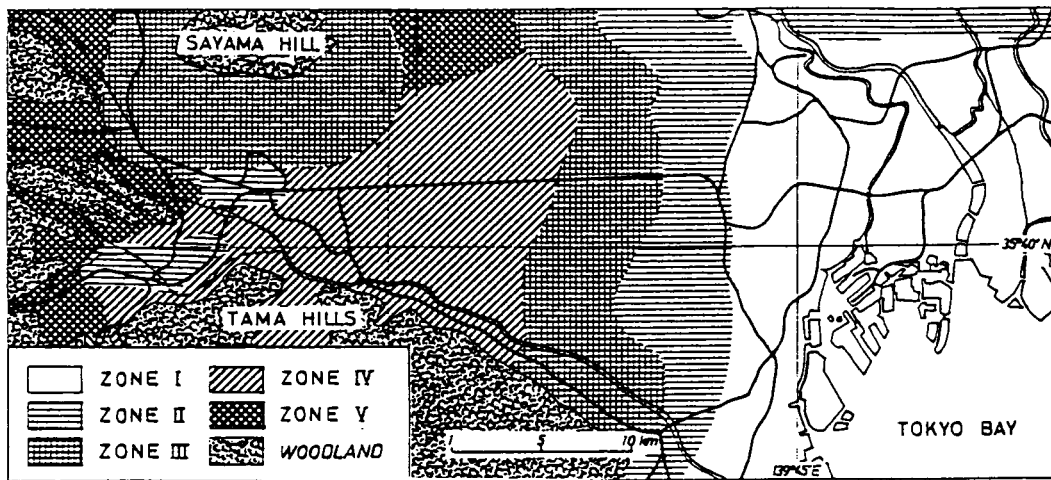


図 13. 着生植生に基づく1970年頃の東京都の大気汚染地図

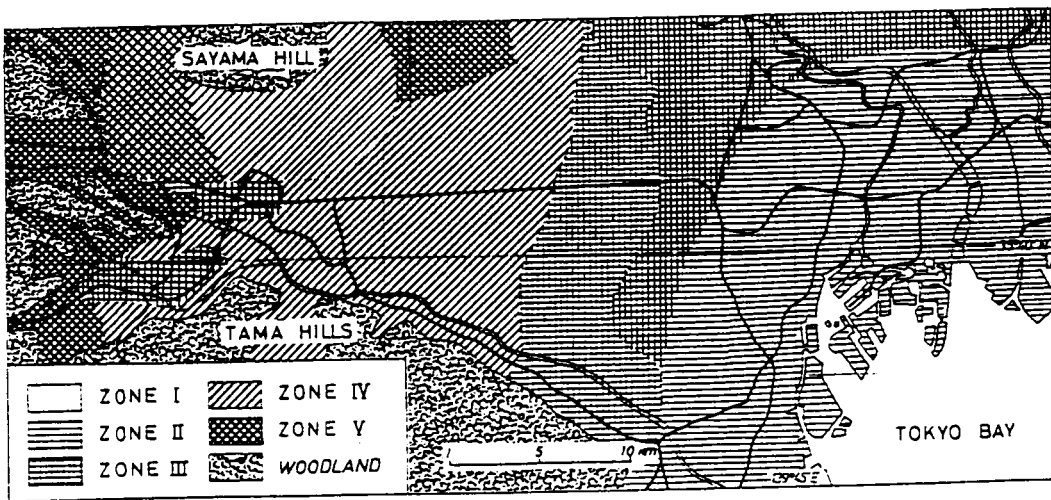


図 14. 着生植生に基づく1995年頃の東京都の大気汚染地図

東京都で調査が行われた1969～1971年は、二酸化硫黄濃度が最も高かった時代の着生植生を調査したものである。都心部においては明らかな着生砂漠が認められた。郊外に向かうにつれて着生植物の種類、量ともに増加する傾向は明白である（図 13）。都市域で着生植生が減少ある

いは消滅する原因については、「汚染説」の他に「乾燥説」があった。当時においても都市化によるヒートアイランド現象は存在しており、相対湿度の低下と着生植生の減退は相関が認められる。しかし、同時に大気汚染は水蒸気の凝結を促進し、都市部での霧の発生や小雨日数の増加も報告されている。たとえ大気が乾燥したとしても、数ヶ月に渡る乾燥に耐える蘚苔類の枯死原因になりえないのは明らかである。二酸化硫黄を含む大気汚染の植物毒性については、燻煙実験の他に、浄化空気による栽培試験で、致死的であることが明らかにされている。

1990年代における菅・大橋の調査結果(1992)は、Taoda(1972)が着生砂漠であると見なした地域に多くの蘚苔類の生育を確認している。著者らは、かつての調査対象木を探索して再調査を行い、着生植生の増加を確認した。図14は、現在の着生植生から、前報告と同一の基準にしたがって地域区分を行ったものである。

1970年代の宇都宮市の中心部、東部の内陸工業団地の大気汚染レベルは東京都や臨海工業地帯に比べて相当に低いものであった。しかし、1975年当時の調査では、宇都宮市東部工業団地に隣接する一部地域に着生植生が貧弱な地域の存在が認められた。この地域の大気汚染観測網は低密度であり、局所的な大気汚染を原因とするものか、他の原因によるものかは明らかにされて

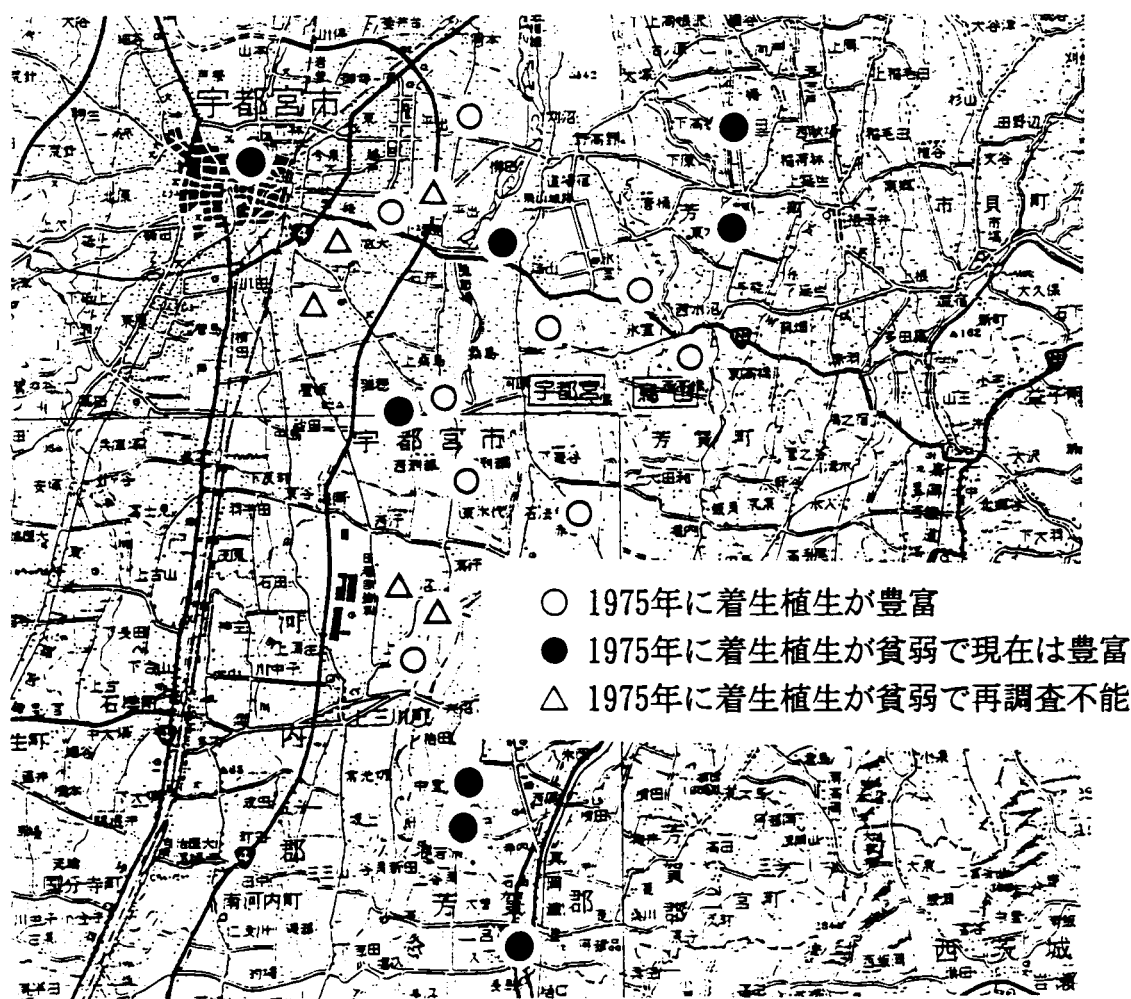


図 15. 宇都宮東部地域の着生植生の変化

いない。同一地域を再調査した結果、かつて着生植生が貧弱であった場所に多数の蘚苔類や葉状地衣類の生育が認められた。大部分の調査対象は小・中学校の校庭のソメイヨシノであり、現在では周囲の環境が著しく変化している場合が少なくない。しかし、1975年当時に相当の大径木が存在していたにもかかわらず、着生蘚苔地衣類が見出せなかった場所で、多くの種類の生育が認められることから、大気環境の改善が示唆される。

5. 考察

(1) 蘚苔類に及ぼす人工酸性雨の影響

樹皮上に生育する種類のうち、針葉樹上にも生育できるコモチイトゴケ、ハイゴケ、サヤゴケの酸性耐性はやや大であり、アルカリ性のホコリを好むヒナノハイゴケの耐性が低いことは予想された結果である。大気汚染の高濃度域に深く侵入して生育するコモチイトゴケ、サヤゴケと汚染に弱いヒロハツヤゴケ、ハイゴケ、コバノイトゴケでは、酸の強さに対する成長反応に違いが見られる。しかし、成長量の差は種間の競争関係で意味を持つが、樹皮上に各種が接することなく生育している状態での種の分布の説明にはなりにくい。生活形が類似したサヤゴケとコダマゴケの致死濃度の差は小さく、野外での分布域の著しい差を雨水の酸性度で説明するのは無理がある。空中湿度が高い山地の渓谷中に生育するイトゴケの耐酸性はコモチイトゴケと比べても大きい。酸性度を環境傾度の一つと見れば、生育適地が種類によって異なるのは当然であり、大気汚染地における有害物質（還元作用のある二酸化硫黄、有害重金属）の影響とは区別すべきであろう。著者は二酸化硫黄を水に溶かした亜硫酸液と硫酸酸性の毒性を比較した実験で、硫酸酸性の毒性は亜硫酸に比べて小さく、陽イオンの添加によって減少することを報告している（埜田宏，1973）

北方針葉樹林の林床に人工酸性雨を散布した実験⁶⁾⁷⁾ではタチハイゴケ (*Pleurozium schreberi*) が pH 3.0 で激しい害を受けた。しかし、pH 3 では被害を受けないという報告¹⁵⁾も少なくない。同じpHの硝酸で、しばしば、成長の促進が認められることから。硫酸による被害は散布された処理液が乾燥によって濃縮された結果とも考えられる。著者らの実験でも、処理後にシュートを乾燥させた場合はクロロシスが増加した。硝酸イオンの肥料効果は存在するようであるが、明確には確かめられなかった。。

大都市や工場周辺で着生蘚苔類の生育が認められない地域は着生砂漠と呼ばれている、この現象の主原因が大気中の有害物質の存在にあることは空気浄化法による栽培試験で証明されている

19)。また、そのような地域で採取された雨水中に植物に有害な物質が含まれていることも明らかにされてきた¹⁴⁾。今回、着生蘚苔類の生育が認められない地域で採取した雨水を用いた培養試験では被害は認められず、むしろ、成長が促進された。これは、溶存成分の毒性より無機成分の肥料効果の方が優っていた結果と考えられる。

(2) 蘚苔類のSOD活性に及ぼす酸性物質の影響

希硫酸による酸処理を行った蘚苔類のSOD活性を測定した結果、コモチイトゴケはハイゴケよりも耐性が認められた。これは野外での分布調査による大気汚染耐性の違いと一致する。ただし、今回は樹皮着生のハイゴケを必要量得ることができず、地上性の種類を用いたため、汚染物質を含んだ樹幹流の影響を同レベルで受けている種類間の比較とは言えない。実験結果が種類の差を反映しているのか、生育条件の差をより多く反映しているのかは、さらに実験を続ける必要がある。また、ハイゴケの例では、外部の状態から判断する限りは全く健全でも、植物体内ではSOD活性が上昇し、ストレスに対処していると推定された。外見は大気汚染物質の影響を受けていなくても、それは、植物が長い時間かけて光合成と酸素呼吸を安全に行うために発達させてきた活性酸素消去系によって植物体内で解決されているだけで、植物体はストレスを受けているということが考えられる。大気汚染防止法によって汚染濃度が著しく低下し、着生蘚苔類の分布が回復してきた現状では、指標植物としての蘚苔類の生育の有無によって大気汚染を評価することが困難となっている。本研究により、致死的でない汚染ストレスの評価のためにSOD活性を使用する可能性が明らかにされた。しかし、同様の実験を行った他の蘚苔類、地衣類では、供試材料として十分な量の植物体を得ることが困難であり、ホコリ等の不純物が多いため、産地間の比較は成功していない。今後、供試材料の調整と分析手順の改善が必要である。

(3) 東京都及び北関東地域における着生植物の分布と大気汚染

大気の汚染度が急激に低下した1970年代後半に、着生植生の回復の兆しは認められていた。この間にもヒートアイランド現象は進行しており、大気の相対的な乾燥化は一方向的に増加している。この事実により、汚染説を批判した乾燥説は根拠を失っている。かつての大都市に於ける着生植生の回復現象はすでに、Hawksworth & McManus⁹⁾によって、ロンドンの事例が報告されている。ヨーロッパにおいては、旧東ドイツ、チェコ、スロバキアなどで近年に至るまで高濃度の汚染が存在し、森林樹木に顕著な被害をもたらしたことが知られているが、この地域における着生植生の回復は報告されていないようだ。

法律的な規制による汚染物質の排出抑制は高濃度汚染地域の濃度低下をもたらした一方、低濃度汚染の広域化をもたらしている。このため、今日の課題は、着生砂漠に至らない程度の低濃度汚染を着生植生の変化により検出することにある。このとき、問題となるのは、対象範囲が広域化することにより、指標種の正常な分布範囲を越えて調査を行う必要性が生じることである。特に、東京都及びその周辺で指標とされた蘚苔類・地衣類の多くは、その分布の中心を西南日本とする暖温帯型の分布特性をもっている。北関東においては、サヤゴケ、コモチイトゴケ、ウメノキゴケ等の普通種の分布がスタジイやタブノキの分布域と重なっている。このため、この境界域においてはこれらの種の分布によって大気の汚染度を判定することができない。3年間の調査結果から群馬県前橋市、栃木県宇都宮市、福島県いわき市までは、これらの蘚苔類、葉状地衣類

が潜在的に分布していることが確かめられた。しかし、分布限界付近には、ヒナノハイゴケ、ヒメシワゴケなどのアルカリ性のホコリを好む群落が多く、気候的な分布限界は不明瞭であった。

6. まとめ

(1) 蘚苔類に及ぼす人工酸性雨の影響

樹皮上に生育する種類のうち、針葉樹上にも生育できるコモチイトゴケ、ハイゴケ、サヤゴケの酸性耐性はやや大であり、アルカリ性のホコリを好むヒナノハイゴケの耐性が低いことが確かめられた。大気汚染の高濃度域に深く侵入して生育するコモチイトゴケ、サヤゴケと汚染に弱いヒロハツヤゴケ、ハイゴケ、コバノイトゴケでは、酸の強さに対する成長反応に違いが見られた。しかし、野外での分布域の著しい差を雨水の酸性度で説明するのは無理がある。やはり、大気汚染地における有害物質（還元作用のある二酸化硫黄、有害重金属）の影響を考慮すべきである。

大都市や工場周辺に見られる着生砂漠の主原因が大気中の有害物質の存在にあることは空気浄化法による栽培試験で証明され、そのような地域で採取された雨水中に植物に有害な物質が含まれていることも明らかにされてきた⁷⁾。今回、着生蘚苔類の生育が認められない地域で採取した雨水を用いた培養試験では被害は認められず、むしろ、成長が促進された。

(2) 蘚苔類のSOD活性に及ぼす酸性物質の影響

希硫酸による酸処理を行った蘚苔類のSOD活性を測定した結果、コモチイトゴケはハイゴケよりも耐性が認められた。これは野外での分布調査による大気汚染耐性の違いと一致する。致死的でない汚染ストレスの評価のためにSOD活性を使用する可能性が明らかにされた。ただし、SOD活性の高まりによる防御反応の発生が、そのまま耐性に結びつくか否かは確かめられていない。

(3) 東京都及び北関東地域における着生植物の分布と大気汚染

大気の汚染度が急激に低下した1970年代後半に、着生植生の回復の兆しは認められていた。この間にもヒートアイランド現象は進行しており、大気の相対的な乾燥化は一方向的に増加しているが、着生植生の回復は明らかである。

比較的汚染のレベルが低かった宇都宮市周辺でも、二酸化硫黄濃度の低下に伴って、着生植生の回復が認められた。

7. 本研究により得られた成果

- (1) 人工酸性雨が蘚苔類に及ぼす影響のうち、成長量の低下や致死被害をもたらす濃度が明らかにされた。
- (2) 多くの蘚苔類が枯死するにはpH 3を大きく下回る酸性度が必要であり、大気汚染地周辺に見られる分布を説明することはできない。
- (3) 二酸化硫黄に対する耐性、野外で観察された汚染耐性と人工酸性雨に対する耐性の種類間差は一部では類似する。

- (4) 希硫酸による酸処理を行った蘚苔類のSOD活性を測定した結果、コモチイトゴケはハイゴケよりもSOD活性の上昇傾向が顕著である。これは野外での分布調査による大気汚染耐性の強弱と一致する。
- (5) 東京都及び北関東地域における着生植物の分布域は二酸化硫黄を主とする大気汚染の改善にともない拡大し、着生砂漠はほとんど認められなくなった。
- (6) 都市のヒートアイランド現象により大気の乾燥化は進行しているにも関わらず、大気汚染の低下によって着生植生の回復が認められたことから、いわゆる乾燥説は否定された。

8. 参考文献

- 1) Barkmann, J.J. (1958) *Phytosociology and Ecology of Cryptogamic Epiphytes*. pp.628, Assen
- 2) Elstner, E. F. & Heupel, A. (1976) Inhibition of nitrite formation from hydroxylammoniumchloride: a simple assay for superoxide dismutase. *Analytical Biochemistry* 70: 616-620.
- 3) Grodzinska, K.R. (1982) Monitoring of air pollutants by mosses and treebark. In *Monitoring of air pollutants by plants*. pp. 33-42, Eds. L. Steubing & H.-J. Jager, Dr W. Junk Publishers, The Hague.
- 4) Gunther, A.J. (1988) Effect of simulated acid rain on nitrogenase activity in the lichen genus *Peltigera* under field and laboratory conditions. *Water, Air and Soil Pollution* 38: 379-386.
- 5) Hawksworth, D. L. and McManus, P. M. (1989) Lichen recolonization in London UK under conditions of rapidly falling sulfur dioxide levels and the concept of zone skipping. *Bot. J. Linn. Soc.* 100: 99-110.
- 6) Hutchinson, T.C., Dixon, M., Scott, M. (1986) The effect of simulated acid rain on feather mosses and lichens of the boreal forest. *Water, Air, and Soil Pollution* 31: 409-416
- 7) Hutchinson, T.C., Scott, M., Soto, C., Dixon, M. (1987) The effect of simulated acid rain on boreal forest floor feather moss and lichen species. *Effects of atmospheric pollutants on forests, wetlands and agricultural ecosystems in Hutchinson, T.C. & Meema, K.M. (eds.) NATO ASI Series G: Ecological Sciences, Vol. 16: 411-426*
- 8) Kobayashi, Y., Okahata, S., Tanabe, K. & Usui, T. (1978) Use of logit paper in determination of superoxide dismutase activity in human blood cells. *Journal of Immunological Methods* 24: 75-78.
- 9) Kono, Y. (1978) Generation of superoxide radical during autoxidation of hydroxylamine and an assay for superoxide dismutase. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 186: 189-195.
- 10) 松中昭一 (1988) パラコート. *蛋白質核酸酵素* 33: 2790-2794.
- 11) Nordhorn-Richter, G. & Dull, R. (1982) Monitoring air pollutants by mapping the bryophyte flora. In *Monitoring of air pollutants by plants*. pp. 29-32, Eds. L. Steubing & H.-J. Jager, Dr W. Junk Publishers, The Hague.
- 12) 大柳善彦 (1988) SOD測定法. *蛋白質核酸酵素* 33: 2906-2913.
- 13) Rochefort, L., Vitt, D.H., Bayley, S.E. (1990) Growth, production, and decomposition dynamics of *Sphagnum* under natural and experimentally acidified conditions. *Ecology* 71: 1986-2000
- 14) 佐藤治雄 (1972) 都会の雨と植物. *バイオテク* 3: 123-130.
- 15) Scott, M.G., Hutchinson, T.C., Feth, M.J. (1989) Contrasting responses of lichens and *Vaccinium angustifolium* to long-term acidification of a boreal forest ecosystem. *Can. Journ. Bot.* 67: 579-588
- 16) 菅邦子・大橋毅 (1992) 東京都における樹木着生蘚苔類の分布状況. (4) *日本蘚苔類学会会報* 5: 173-179.
- 17) Tanaka, K. & Sugahara, K. (1980) Role of superoxide dismutase in defense against SO₂ toxicity and an increase in superoxide dismutase activity with SO₂ fumigation. *Plant & Cell Physiology* 21: 601-611.

- 18) Taoda, H. (1972) Mapping of atmospheric pollution in Tokyo based upon epiphytic bryophytes. *Jap. J. Ecol.* 22: 125-133.
- 19) Taoda, H. (1973) Bryo-meter, an instrument for measuring the phytotoxic pollution. *HIKOBIA* 6:224-228.
- 20) 埜田宏 (1973) 大気汚染物質が蘚苔類に与える影響 I. 亜硫酸ガスに対する耐性. *HIKOBIA* 6:238-250, pl. VII.
- 21) 埜田宏 (1992) 東京都及び周辺地域の着生植生, 20年間の変化と調査法の問題点. *日本蘚苔類学会会報* 5: 193-1196.

国際共同研究等の状況

なし

研究発表の状況

- Hiroshi Taoda: Tolerance of some epiphytic bryophytes to simulated acid rain. *Proc. Bryol. Soc. Jap.* 9 (投稿中)