

# 酸性降下物の生態系への影響

## —都市域におけるスギ衰退の潜在的要因—

高松武次郎\*<sup>1</sup>、佐瀬裕之\*<sup>2</sup>、高田実弥\*<sup>3</sup>、松下録治\*<sup>3</sup>

衰退の著しい埼玉県のスギについて、エピクチクラワックスの量と元素組成を分析し、埼玉県以外の関東平野部や山間部のスギの結果と比較した。ワックス量は当年葉の成長が完了する7-8月以降には自然・人為環境因子の影響を受けて加齢とともに徐々に減少するが、埼玉県では、その速度が他の地域に比べて明らかに速かった。埼玉県のスギでは、ワックスのC/O比の低下も起こっており、葉面は疎水性が低下して濡れ易くなっていると考えられた。この様なワックスの減量と変質は、クチクラ蒸散と葉面からの栄養元素の溶脱を促進させる原因にもなっていた。また、埼玉県のスギでは、葉面に多量のエアロゾルが付着していて、その一部は気孔内部にも侵入していたので、侵入した汚染物質が気孔の閉鎖を阻害し、蒸散や栄養塩の溶脱をさらに促進されていると推測された。葉面に付着したエアロゾルは太陽光の透過も阻害するため、光量不足を引き起こしている可能性もあった。スギは水ストレスに敏感であるので、水分が不足すると葉面のワックス量を増やしてクチクラ蒸散を制御する。従って、埼玉県などで見られるスギの衰退は、ワックスの量的・質的变化や気孔の閉鎖阻害などの植物側の障害に、都市化の影響などが加わって起こる水ストレスが主要因となり、これに栄養塩の欠乏、光量不足、大気汚染物質の直接影響などのストレスが補足的に影響した結果と考えられる。

### 1. はじめに

近年日本の各地で植生の衰退が報告され、大気汚染や酸性降下物との関係が示唆されている。全国のマツ、丹沢山系大山や福岡県宝満山のモミ、赤城山と日光周辺のダケカンバやオオシラビソ、及び都市域、特に関東周辺のスギなどに見られる枯損はその代表的なものである。この内スギでは、枯損は都市域の社寺林などに集中していて、樹木の先端部から始まり次第に下部に及ぶ。このスギ衰退の要因として、これまでにオキシダントなどの大気汚染

物質の直接影響（高橋ら, 1987; 梨本, 1988; 梨本・河野, 1989）、酸性降下物に起因すると思われる土壤の酸性化（梨本ら, 1993）、および都市化による水分条件の悪化（松本ら, 1992）などが挙げられてきた。しかし、これらの因果関係には間接的な情報で裏付けられたものが多く、水分ストレスの証拠として最近報告された葉試料の炭素同位体組成の変化（坂田, 1995）が唯一直接的な情報と言える。今後スギ衰退の要因を特定するためには、衰退地域のスギに起こっている潜在的な生理的・化学

\*<sup>1</sup> 国立環境研究所土壌環境研究室、〒305 茨城県つくば市小野川 16-2

\*<sup>2</sup> 千葉大学自然科学研究科、〒271 千葉県松戸市松戸 648

\*<sup>3</sup> 京都大学原子炉実験所、〒590-04 大阪府泉南郡熊取町野田

的变化を様々な角度から調査・研究する必要がある。

この研究では、衰退地域のスギの葉面クチクラワックスを分析して、その流亡や変質の程度を調べ、その変化がクチクラ層を通しての水分や栄養塩の損失にどのような影響を及ぼしているかを検討した。クチクラワックス層は水分と栄養塩の損失ばかりでなく、紫外線や有害物質の侵入、及び病原菌や病害虫の侵入などを防ぐ重要な働きをしているが、常に環境に曝されているため、その影響を受け易い。事実、風雨などの自然現象による物理的作用や大気汚染物質による化学的作用がワックスを流亡・変質させ、結果として蒸散を促進させることなどが知られている (Turunen & Huttunen, 1990; Percy et al., 1994)。

また、予備的な観察で、スギの葉面には多量のエアロゾルが付着していて、その一部は気孔内部にも侵入していることが分かった。付着粒子は気孔の閉鎖障害を引き起こし、引いては水分や栄養塩の損失を促進させる可能性がある。そのため、この現象についても合わせて検討した。水分や栄養塩は、クチクラ層だけではなく、気孔を通して盛んに失われるが、植物は気孔の開閉を調節して物質の損失を防いでいる。しかし、一部の針葉樹では、気孔周辺に付着した粒子状物質によって気孔を通しての物質の出入りが阻害されているとの報告もある (Grill & Golob, 1983; Crossley & Fowler, 1986)。日本の都市域のスギにも、葉面に多量のエアロゾルが付着していることが知られているの

で (Takamatsu et al., 1992)、同様の可能性がうかがえる。

## 2. 実験

### 2.1. スギ葉試料

スギ (*Cryptomeria japonica*) の葉は、樹齢30年以上で、外気に曝されている樹木 (群落では外縁の木) の高さ約5mの枝から採取した。採取は、当年葉の展開がほぼ完了した1983年と1984年の8月以降に、埼玉県 (衰退地域) の6地点 (11試料)、茨城県と福島県平野部の8地点 (11試料)、及び茨城県山間部の8地点 (8試料) で行った。試料はワックスの磨滅や融解を防ぐために保湿、冷却 (5℃) して持ち帰り、できるだけ早く分析した。

### 2.2. エピクチクラワックスの抽出と付着エアロゾルの分離 (Cape, 1986)

採取した試料から、当年葉と1年葉を約5cmの細枝を付けたまま分別した。これらは蒸留水で洗浄 (軽く超音波処理) し、50℃以下で表面に付着した水分を乾燥させた。乾燥試料の5gを取り、20mlのクロロホルムを加えて15秒間軽く振とうしてワックスを抽出した。試料と器壁は5mlのクロロホルムで洗浄し、洗液は抽出液に合わせた。抽出液はまず石英ウールで、次に濾紙で濾過して遊離・懸濁したエアロゾルを除去した。抽出液中のワックスはクロロホルムを揮散させて回収し、重量を測定してワックス量を求めた後、元素分析に供した。一方、石英ウール上に捕集されたエアロゾルは、乾燥後ウールごと元素分析に供した。操作は

全て6連で行ったが、重量測定は2連分を合わせた試料について行った。

### 2.3. ワックスのCとOの分析

上で得たワックスをクロロホルムに溶解、濾過（孔径 $0.45\ \mu\text{m}$ ）した後、再び乾固して精製ワックスを調製した。これを元素分析計（Carlo Erba, Model 1106）にかけ測定した。なお、酸素の標準には、ワックスと組成の類似した1-Docosanol ( $\text{C}_{22}\text{H}_{46}\text{O}$ ) を用いた。

### 2.4. エアロゾルの元素分析

石英ウールに捕集したエアロゾルの元素組成は中性子放射化とICP-AESで分析した。中性子放射化分析は非破壊で機器的に行い（Koyama & Matsushita, 1980; 高松・小山, 1990）、ICP-AES分析は、高圧分解ポンプを用いて混酸（ $\text{HClO}_4/\text{HNO}_3=0.5\ \text{ml}/1\ \text{ml}$ ）で溶液化した試料を用いて行った（Nishikawa et al., 1986）。

### 2.5. クチクラ蒸散速度の測定 (Mengel et al., 1989)

葉齢別に採取したスギ葉を水で軽く洗浄して風乾し、切り口にシリコングリースを塗布した。試料は秤量した後シリカゲルデシケーターに入れ、デシケーターは恒温（ $20\pm 3\ ^\circ\text{C}$ ）、暗所に置いた。試料は6-10時間毎に秤量し、減量から水分損失速度を求めた。秤量は葉重が一定になるまで約2週間続けた。実験開始初期には、しばしば気孔蒸散による大きな水分損失が見られたので、減量速度が一定となった期間（通常、10時間から60時間後の範囲）の結果か

ら蒸散速度を算出した。

### 2.6. 葉面からの元素溶脱速度の測定

葉齢別に採取したスギ葉の1gに適量の水を加えて10分間軽く振とうし、葉面に沈着した易溶性の元素を除去した。葉はもう一度水洗いして表面の水分を乾かし、切り口にシリコングリースを塗布した。葉は30mlの希硫酸（ $\text{pH}=3$ ）に浸せきし、恒温（ $20\pm 3\ ^\circ\text{C}$ ）で2時間ゆっくりと攪拌して元素を抽出した。抽出液は濾過（ $0.45\ \mu\text{m}$ ）し、ICP-AESで分析した。

### 2.7. 葉面および気孔周辺の電子顕微鏡観察

葉齢別に採取した葉を水で軽く洗浄し風乾した。これを液体窒素に浸して急速冷凍し、直ちに凍結乾燥した。各試料から針葉の一本をとりAuとPdを蒸着した後、走査型電子顕微鏡（JEOL, JSM-840; EDS: KEVEX 7077QJ）を用いて10-20 kVの加速電圧で観察した。

### 2.8. 気孔閉鎖阻害の検証

1年葉を取り、水で軽く洗浄した。切り口を0.001 M アブスシン酸水溶液に浸すとともに、葉面にも溶液を時々かけ流して30分間放置し、気孔を閉じさせた（近藤・菅原, 1978）。試料はメチレンブルー溶液に30分間浸せきした後、表面に付着した染料を充分洗い流した。針葉の断面（切片）を作成して光学顕微鏡で観察し、染料が気孔の孔辺細胞を通過して呼吸腔内部に侵入しているかどうかを調べた。

## 2.9. 付着エアロゾルによる光透過阻害の測定

5gの1年葉を取り、ワックスを抽出したのと同様の方法で(2.2.項参照)、エアロゾルのクロロホルム懸濁液を調製した。懸濁物は遠心分離で集め、エタノールで充分洗浄した後、少量の水に懸濁させて乳鉢に取り出した。これに10 mlの1% Tween 20溶液を加えて充分粉碎・混和した後、全量を190 mlに希釈した。この懸濁液の約3 mlを、液を超音波で分散させながら取り出し、分光光度計で波長700-200 nmの光透過率を測定した。また同様に取り出した11.3 mlの懸濁液をミリポアフィルター(HAWP、0.45  $\mu$  m、47 mm i.d.)に均一に濾過、乾燥させた後、イマージョンオイルで濾紙を透明化して、太陽光の透過率を照度計(Integrating photometer, Model LI-188B, LI-COR, Inc.)で測定した。なお、上で懸濁液を190 mlに調製したのは、スギの葉面積が5g当たりで平均で190 cm<sup>2</sup>であることによる。

## 3. 結果と考察

### 3.1. エピクチクラワックスの一般的特性

Table 1はスギ葉のワックス特性をまとめたものである。ワックスの量や化学組成は、生育地点の標高、枝の高さ、火山性ガスの暴露など多くの自然環境因子(ストレス)の影響で変化する(Sase et al., submitted)。すなわち、ワックスの量は通常ストレスを受けると増加し、C/O比は減少する(ただし、標高の上昇に対しては例外的に増加するが、これは多分紫外線の影響である)。これらの変化の内、高い枝でワックス量が増加する現象は、多くの針葉樹で見られるが、特にスギで顕著である。スギは湿潤な環境を好む樹木で、水ストレスを非常に受け易いことから(松本ら, 1992)、このワックスの増加は水ストレスに起因する変化であると推測される。Fig. 1は、スギにおける枝の高さの上昇に伴うワックス量の増加率と生育地点

Table 1 Changes in amount and elemental composition of epicuticular wax in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) due to natural environmental factors.

Factors	Amount	C/O ratio	Remarks
Increasing leaf age	Increase	Decrease	During growing phase
	Slight decrease	Slight increase	After growing phase
Increasing elevation	Increase	Increase	
Increasing branch height	Increase	Decrease	
Exposure to volcanic gas	Increase	Decrease	H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub>

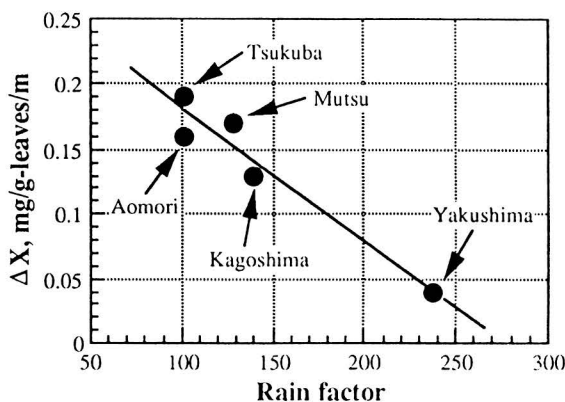


Fig.1 Relationship between average increments ( $\Delta X$ ) of epicuticular wax with increasing branch height in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and rain factors of the growing sites.

の雨量係数との関係を示したものである。両者の間に見られる良い相関はやはりワックスの増加に対する水ストレスの関与を裏付けている。また、スギのワックスは、火山性酸性ガス ( $H_2S$  や  $SO_2$ ) の暴露によっても著しく増加する。例えば、青森県恐山の硫気口近くで、ガス ( $2.3-8.5 \mu g-S/cm^2/d$ ) に曝されて生育しているスギの葉は同一地域の対照に比べて30%ほど多くのワックスを含有している。しかしいずれの場合も、生育は外見上だけでなく生育速

度から判断しても健全であるので (坂口, 1983)、スギはC/O比の比較的小さな成分を盛んに合成し、ワックス量を増やすことで水ストレスやガス暴露に対抗し、健全な生育を保っていると考えられる。この様に、エピクチクラワックスはスギにとって非常に重要な保護物質であるので、自然環境ストレスにさらに人為的なストレスが加わり、ワックスの流亡や変質が促進されれば、スギが致命的な影響を受けることは容易に推測できる。

### 3.2. 関東地域のスギにおけるワックスの減少と変質

スギのワックス量とその当年葉と1年葉での差 (ワックスの年間減少量に相当する) を、スギの衰退が著しい埼玉県を含む関東平野と衰退が全く見られない関東の山間部と比較し、Table 2 に示した。ワックス量は当年葉では埼玉県を含む平野部で多く、1年葉では逆に対照の山間部が多い。平野部の当年葉では、大気汚染物質などのストレスに対抗するためにより多くのワック

Table 2 Reduction of amount of epicuticular wax in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in the Kanto District.

Site	Leaf age	n	Amount mg/g-fresh leaves	$\Delta X$	Reduction rate %
Plain area	0	14	$5.91 \pm 0.84$	$1.38 \pm 0.63$	$22.8 \pm 8.7$
	1	14	$4.52 \pm 0.52$		
Mountainous area	0	8	$5.62 \pm 0.83$	$0.76 \pm 0.47$	$13.1 \pm 7.6$
	1	8	$4.86 \pm 0.66$		

Number of repeated analysis: 3. n: number of samples.  $\Delta X$ : difference between current and 1-year leaves

Table 3 C/O ratio of epicuticular wax in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) collected from plain areas in the Kanto District.

Site	Leaf age	n	C/O ratio	C/O/weight*
Saitama Pref. (Declining area)	0	4	13.3 ± 1.8	2.2 ± 0.5
	1	11	13.4 ± 1.1	2.9 ± 0.7
Areas other than Saitama Pref.	0	9	14.1 ± 1.0	2.5 ± 0.5
	1	9	14.0 ± 1.0	3.3 ± 0.7

Number of repeated analysis: 3. n: number of samples. \*: C/O ratio standardized by wax weight.

スが生成されるが、その流亡も著しいと考えられる。平野部では山間部に比べて、年間に葉重 1 g 当たり約 0.62 mg (減少率では 9.7%) のワックスが余計に流亡している勘定になる。ワックスは風雨などの自然現象によって加齢と共に徐々に減少するが (Wilson, 1984; Baker & Hunt, 1986; Cape et al., 1989; Percy et al., 1993)、大気汚染物質はその速度を促進させる (Cape, 1986; Mengel et al., 1989; Barnes & Brown, 1990; Percy & Baker, 1990)。関東平野部におけるワックス減少量 (率) の増大は大気汚染物質の影響による可能性が高い。

また、ワックスの質的な変化を見るため、その C/O 比を衰退の著しい埼玉県と衰退の程度の軽い関東平野部のスギで比較して Table 3 に示した。その結果、C/O 比は当年葉と 1 年葉のいずれにおいても埼玉県で顕著に低く、その傾向は C/O 比をワックス量で割って規格化した値で比較しても同様であった。大気汚染物質がワックスの化学組成に与える影響については不明な点が多いが、酸性雨の暴露でワックス中のアル

カンの鎖長が短くなったり (Kerfourn & Garrec, 1991)、エステル成分が加水分解を受けたりすることが知られているので (Percy et al., 1994)、酸性や酸化性の汚染物質が関与した可能性が示唆される。

いずれにしても、関東の平野部、特に埼玉県のスギでは、ワックスの流亡が促進されると共に、その疎水性を低下させる変質 (C/O 比の低下) が起こっていることが明らかとなった。これらの変化はいずれも環境ストレスに対するスギの感受性を高めていると考えられる。

### 3.3. ワックスの流亡と変質による蒸散と栄養塩溶脱の促進

葉の水分や栄養塩はクチクラ層、とりわけ疎水性のエピクチクラワックスによって守られているので、ワックスの流亡や変質はそれらの損失を促進させると考えられる。Fig. 2 はワックス量と葉からの水分損失 (クチクラ蒸散) 速度との関係を示したものである。ワックス量と水分損失速度は概ね反比

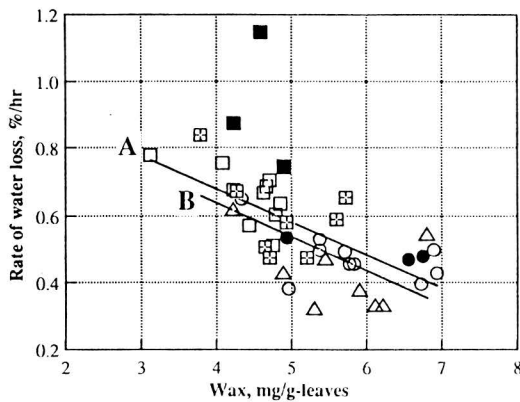


Fig.2 Relationship between cuticular transpiration rate of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and the amount of epicuticular wax. (○, □) current and 1-year leaves from plain areas in the Kanto District (except Saitama Pref.), respectively from mountainous area in the Kanto District, respectively, regression line B; (●, ■) current and 1-year leaves from Saitama Pref., respectively.

例して、ワックス量が減少すると、水分損失が著しく盛んになることが分かる。また、埼玉県を除く関東の平野部と山間部のスギを比べると（回帰直線AとBの比較）、ワックス量が同じでも水分損失速度は明らかに平野部のスギで大きい。これには、上で述べた様なワックスの変質（C/O比の減少による疎水性の低下）が関与していると思われる。さらに、埼玉県の1年葉では水分損失速度が極端に大きい、これにはワックスの変質に加えて、後述する気孔の開鎖阻害が関与した可能性が高い。

Fig. 3は、ワックス量と葉から溶出した栄養塩（塩基性陽イオン）量との関係を示したものである。栄養塩の溶脱速度も水分損失速度の場合と同様にワックス量と反比例して、ワック

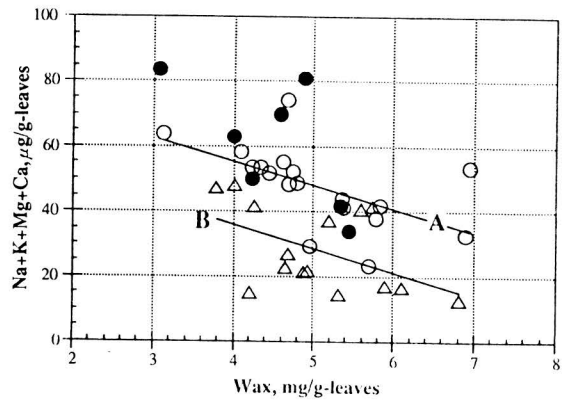


Fig.3 Relationship between total amount of basic cations extracted with acid from leaves of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and the amount of epicuticular wax. (○) plain areas in the Kanto District (except Saitama Pref.) regression line A, current and 1-year leaves ; (△) mountainous area in the Kanto District, regression line B, current and 1-year leaves ; (●) Saitama Pref., 1-year leaves.

ス量が減少すれば溶脱は著しく盛んになる。埼玉県を除く関東の平野部と山間部のスギの比較でも、溶脱速度は明らかに平野部で大きい。また埼玉県では、気孔閉鎖阻害に起因すると推測される極端に大きい栄養塩の溶脱も観察されている。

これらの結果から、関東の平野部、とりわけ埼玉県のスギでは、ワックスの流亡と変質が水分損失（クチクラ蒸散）と栄養塩溶脱を促進し、スギに重大なストレスを与えている可能性が示唆される。

### 3.4. 葉面付着エアロゾルによる気孔閉鎖阻害

エピクチクラワックスは疎水性の有機物であるので、炭素を主成分とする人為起源のエアロゾルを容易に付着す

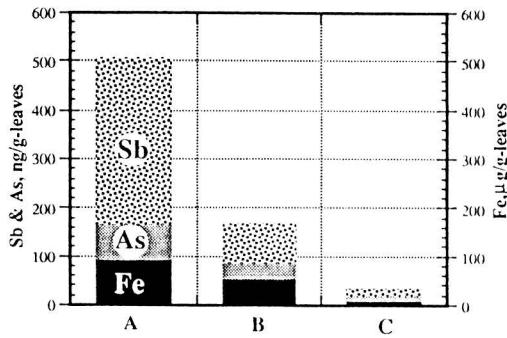


Fig.4 Concentration of some elements deposited as aerosol components on leaves of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in the Kanto District. A, B and C : representative results obtained in Saitama (A), plain area except Saitama (B) and mountainous area (C), respectively.

る。そのため、葉面にはしばしば多量のエアロゾルが蓄積する。この現象は広葉樹よりも針葉樹において顕著で、スギは最も多量のエアロゾルを付着・蓄積する樹木の一つである (Takamatsu et al., 1992)。エアロゾルの付着は無論樹種だけではなく、環境の汚染度 (エアロゾルの浮遊量) に大きく依存する現象であるため、都市域、たとえば埼玉県などでは付着量が著しく多い。Fig. 4は、スギ葉に付着したエアロゾル量を、その特徴的な元素であるSb、As及びFeを指標として、埼玉県、関東平野部、及び関東山間部の代表的試料と比較したものである。埼玉県のスギに

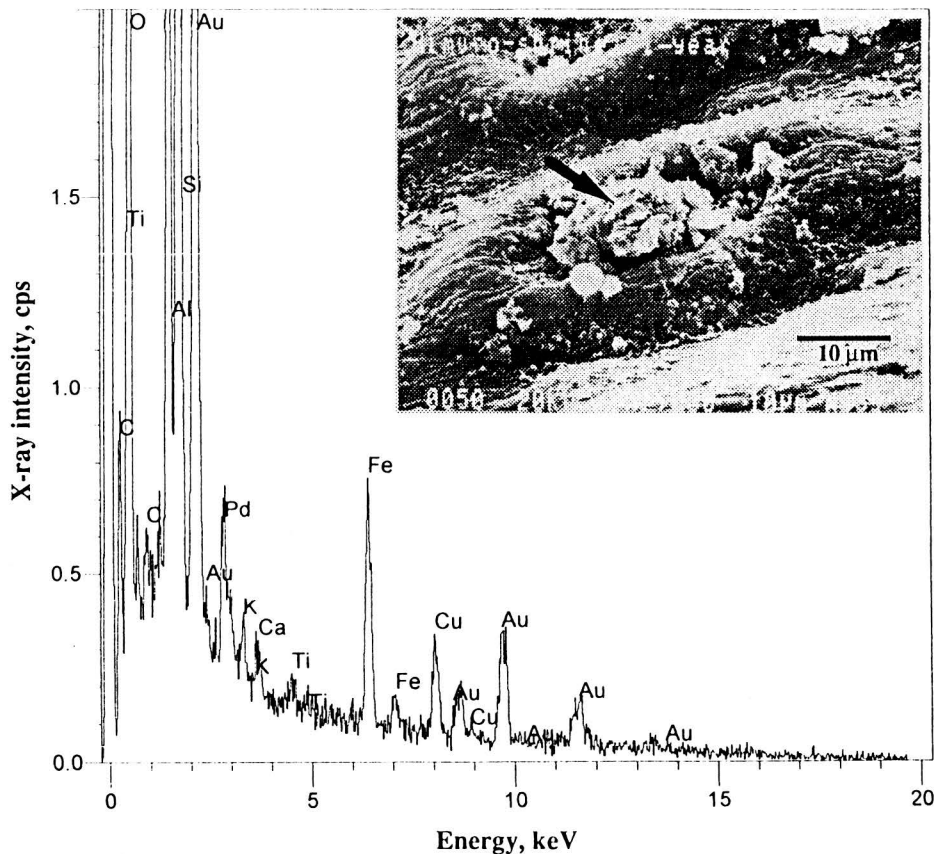


Fig.5 SEM micrograph and EDX spectrum of aerosols deposited in a stoma of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) from Saitama Pref.



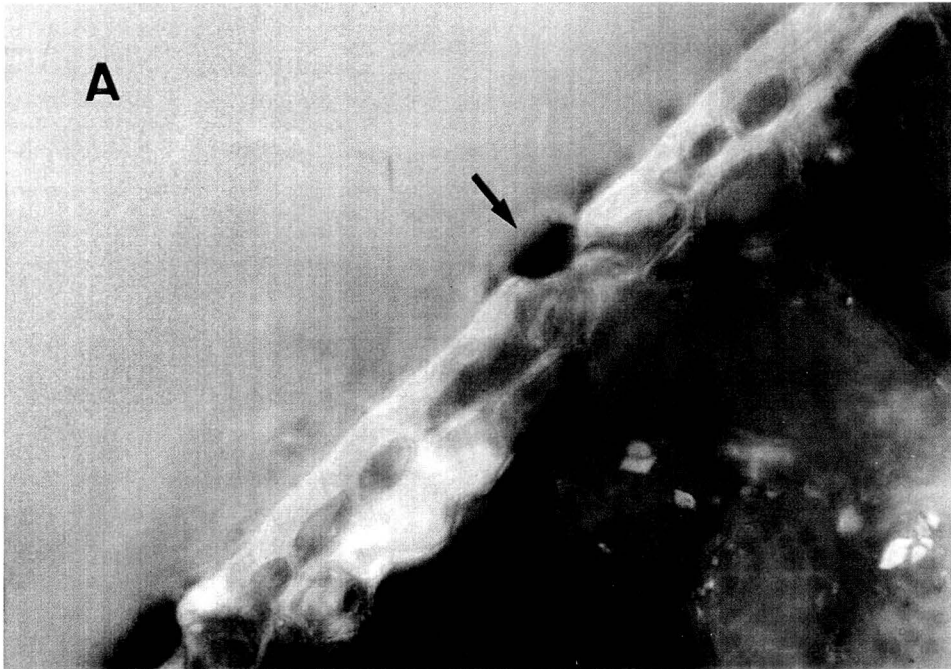


Fig. 6 Penetration of dye through guard cells of a stoma of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) from Saitama Pref.  
A: mountainous area in the Kanto District.  
B: Saitama Pref.



は、山間部の10倍以上に達する多量のエアロゾルが蓄積していることが分かる。この様に多量に付着したエアロゾルは、ワックス流亡の原因となるばかりでなく (Grill & Golob, 1983; Cape et al., 1989)、気孔に侵入してその閉鎖阻害を引き起こす可能性もある (Grill & Golob, 1983; Crossley & Fowler, 1986)。

Fig. 5は、スギ衰退の著しい埼玉県で採取した試料(1年葉)の気孔周辺を走査型電子顕微鏡で観察したものである。気孔に粒子状物質が詰まっているのが認められる。またX線スペクトルの結果から、粒子状物質はFeとCuに富んだ人為起源の汚染物質(エアロゾル)と考えられる。埼玉県のスギでは、いずれの試料でも殆どの気孔にこの様な粒子状物質が詰まっており、その形状と元素組成から、エアロゾル以外にも、土壌粒子、溶融したワックス、藻類や菌類などが含まれると推定された。

Fig. 6は、アブシン酸処理で気孔を閉じさせたスギ葉を染料溶液に浸し、染料の侵入の有無を光学顕微鏡で観察

して、気孔の閉鎖阻害を検証した結果である。スギの衰退が著しい埼玉県の試料(1年葉)では、染料が気孔の孔辺細胞を通過して呼吸腔内部にまで侵入しているのが分かる。埼玉県の試料では、調べた気孔の20-30%でこの様な現象が観察された。一方、山間部の試料では、この様な現象は全く認められなかった。

この様に、衰退の著しい埼玉県のスギには、葉面に多量のエアロゾルが付着していて、一部は気孔に侵入し、その閉鎖を阻害していることが分かった。埼玉県の試料(1年葉)で見られた異常に大きい水分と栄養塩の損失(3.3項参照)は、付着物質の影響で気孔の閉鎖が不完全であったことに起因すると推測される。

### 3.5. 葉面付着エアロゾルによる光透過阻害

葉面に付着したエアロゾルは、気孔障害を通して水分や栄養塩損失の原因となるばかりでなく、多量になれば、

Table 4 Reduction of light intensity due to aerosols deposited on leaves of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*).

Site	Transmittance at specific absorption maximum of chlorophyll, %*				Transmittance of solar light, %**
	a		b		
	663 nm	432 nm	653 nm	467 nm	
Saitama (No. 1)	69	60	69	62	78
Saitama (No. 2)	72	65	72	67	80
Tsukuba	79	74	79	75	85
Yakushima	93	88	93	89	96

\*: Aerosol suspended in aqueous solution was measured by a spectrophotometer.

\*\* : Aerosol collected on a Millipore filter (HAWP, 0.45  $\mu$  m) was measured by an illuminometer after clarifying the filter paper.

光透過を阻害して日照不足を招く恐れもある。Table 4は、エピクチクラワックスを溶解して付着していたエアロゾルを一度分離・回収し、再び溶液中または透明濾紙上に実際の付着密度を再現して、その光透過阻害の程度を測定した結果である。透過率は波長や測定法によって多少変動するが、埼玉県では、葉面のエアロゾルに遮断されて植物体に届く光量が70%程度に低下していると推測される。スギの成長は日照に余り影響されないとされているが(坂口, 1983)、気象変化による日照不足と重なれば影響が出る可能性も否定できない。また、光量の低下を補償す

るためにはクロロフィル含量を高める必要があり、それに伴ってMg要求量も増大する。事実、エアロゾルが多量に付着した埼玉県の1年葉ではクロロフィル含量が増える傾向にあり(1.12 ± 0.27 mg/g-新鮮葉、n = 4; 埼玉県以外の関東平野部: 1.06 ± 0.19 mg/g-新鮮葉、n = 10)、葉のMg含量も明らかに高い(1980 ± 840 ppm、n = 5; 埼玉県以外の関東平野部: 1100 ± 220 ppm、n = 9)。ワックスの流亡・変質や気孔閉鎖阻害に起因するMgの溶脱促進現象と複合すれば、Mg欠乏の発現が早められる可能性もある。

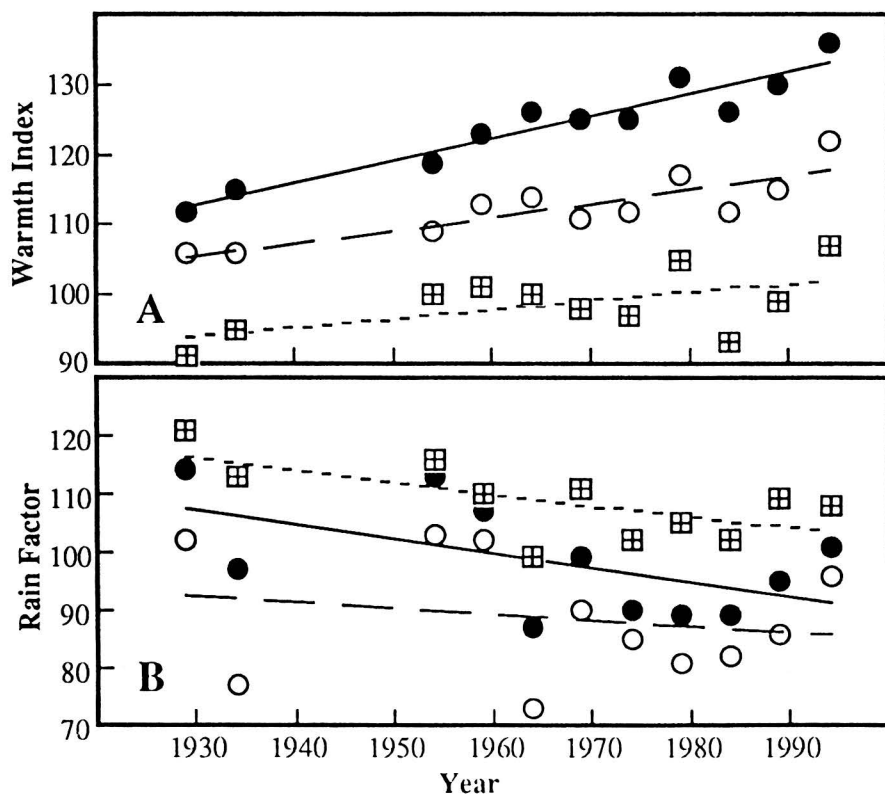


Fig.7 Changes in warmth index (A) and rain factor (B) in urban (Tokyo and Saitama) and rural (Iwaki) areas during past 70 years. (●)Tokyo; (○) Saitama; (□)Iwaki.

#### 4. まとめ

以上の結果から、都市域のスギ枯れに対して次の様なシナリオを想定することができる。すなわち都市域では、自動車や工場の排ガスとして放出された酸性・酸化性物質や多様な疎水性有機化合物が直接あるいは雨に溶けて葉に作用し、エピクチクラワックスの流亡と変質を促進する。そのため、ワックスの減少と疎水性の低下が起り、水分と栄養塩の損失が促進される。この現象は経時的に進行するため、多年葉で特に著しい。また、同じ発生源に由来する粒子状汚染物質（エアロゾルなど）は気孔に侵入してその閉鎖障害を引き起こし、水分や栄養塩の損失をさらに加速する。これらの影響で、都市域のスギは慢性的な水分や栄養塩の欠乏に見舞われる。都市化による近年の高温・乾燥化（Fig. 7）はこの状況に追い打ちをかける（気象庁，1927-1995）。全国284ヶ所のスギ林の調査から、スギは主に雨量係数が100-230の範囲に分布していて、雨量係数が140未満の所では明らかに生育が悪いと言われている（坂口，1983）。樹木の先端部では、風、日照などの自然環境条件が厳しく、かつ汚染物質の暴露量も通常多い。また、先端部は本来的に水分ストレスを受け易い部位でもある。そのため、枯損は樹木の先端部から始まり次第に下部に及ぶことになる。スギ衰退の主要因は水欠乏であると考えられるが、栄養塩の損失や光量低下に関連したストレス、ガス状大気汚染物質と葉面付着エアロゾルに含まれる有害物質の毒性などが複雑に影響している

と推測される。

#### 謝辞

本研究を実施するに当たり、千葉大学園芸学部の吉田富男教授と国立環境研究所地球環境研究グループの佐竹研一博士には有益なご意見を頂いた。また、ICP-AESの測定では国立環境研究所地域環境研究グループの西川雅高博士と熊田玲子氏に、C/O分析では篠原憂子氏に、そして電子顕微鏡観察では中村みなみ氏にそれぞれ協力して頂いた。ここに深く感謝致します。なお本研究は、環境庁の地球環境研究総合研究推進費によって実施した。

#### 引用文献

- Baker, E.A. & Hunt, G.M. : Erosion of waxes from leaf surfaces by simulated rain. *New Phytol.*, 102, 161-173 (1986) .
- Barnes, J.D. & Brown, K.A. : The influence of ozone and acid mist on the amount and wettability of the surface waxes in Norway spruce [*Picea abies* L. Karst.] . *New Phytol.*, 114, 531-535 (1990) .
- Cape, J.N. : Effects of air pollution on the chemistry of surface waxes of Scots pine. *Water Air Soil Pollut.*, 31, 393-399 (1986) .
- Cape, J.N., Paterson, I.S. & Wolfenden, J. : Regional variation in surface properties of Norway spruce and Scots pine needles in relation to forest decline. *Environ. Pollut.*, 58, 325-342 (1989) .
- Crossley, A. & Fowler, D. : The weathering of Scots pine epicuticular wax in polluted and clean air. *New Phytol.*, 103, 207-218 (1986)
- Grill, D. & Golob, P. : SEM-investigations of different dust depositions on the surface of coniferous needles and the effect on the

- needle-wax. *Aquilo Ser. Bot.*, 19, 255-261 (1983) .
- Kerfourn, C. & Garrec, J.P. : Modification in the alkane composition of cuticular waxes from spruce *Picea abies* and ivy *Hedera helix* exposed to ozone fumigation and acid fog : comparison with needles from declining spruce trees. *Can. J. Bot.*, 70, 861-869 (1991) .
- 気象庁 : 中央気象台年報 ; 気象庁年報, (1927-1995) .
- 近藤矩朗, 菅原淳 : 二酸化イオウに対する植物の抵抗性に関する研究 (2) 二酸化イオウ暴露による植物の蒸散変化とアブサイシン酸量との関連について. 国立公害研究所特別研究成果報告, R-2, 17-23 (1978) .
- Koyama, M. & Matsushita, R. : Use of neutron spectrum sensitive monitors for instrumental neutron activation analysis. *Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto Univ.*, 58, 235-243 (1980) .
- 松本陽介, 丸山温, 森川靖 : スギの水分生理特性と関東平野における近年の気象変動一樹木の衰退現象に関連して一. *森林立地*, 34, 2-13 (1992) .
- Mengel, K., Högberg, A.M.R. & Esch, A. : Effects of acid fog on needle surface and water relations of *Picea abies*. *Physiol. Plant.*, 75, 201-207 (1989) .
- 梨本真 : スギの衰退と被害形態判別法. 電力中央研究所報告, U87091, (1988) .
- 梨本真, 河野吉久 : スギ衰退とオキシダント、降雨量の分布に関する一考察. 電力中央研究所報告, U89017, (1989) .
- 梨本真, 高橋啓二, 芦原昭一 : 関東・甲信地方におけるスギ社寺林の衰退地と健全地の土壌化学性の比較. *環境科学会誌*, 6, 121-130 (1993) .
- Nishikawa, M., Ambe, Y. & Chubachi, S. : Concentrations of trace elements in surface snow in the area near Syowa Station, Antarctica. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 45, 47-55 (1986) .
- Percy, K.E. and Baker, E.A. : Effect of simulated acid rain on epicuticular wax production, morphology, chemical composition and on cuticular membrane thickness in two clones of Sitka spruce [*Picea sitchensis* Bong.Carr.] . *New Phytol.*, 116, 79-87 (1990) .
- Percy, K.E., Jagels, R., Marden, S., McLaughlin, C.K. & Carlisle, J. : Quantity, chemistry, and wettability of epicuticular waxes on needles of red spruce along a fog-acidity gradient. *Can. J. Forest Res.*, 23, 1472-1479 (1993)
- Percy, K.E., Cape, J.N., Jagels, R. & Simpson, C.J. (eds) : "Air Pollutants and the Leaf Cuticles", Springer-Verlag, Berlin, (1994)
- 坂口勝美 (監修) : "スギのすべて", 全国林業改良普及協会 (編), 技秀堂, 東京, (1983) .
- 坂田昌弘 : 関東平野におけるスギの衰退原因一葉の元素組成と炭素同位体による評価一. *環境科学会 1995 年会講演要旨集*, pp.120-121 (1995) .
- Sase, H., Takamatsu, T. & Yoshida, T. : Changes in amount and elemental composition of epicuticular wax in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) leaves due to natural environmental factors. *New Phytol.*, submitted.
- 高橋啓二, 沖津進, 植田洋匡 : 関東地方におけるスギの衰退と酸性降下物による可能性. *森林立地*, 28, 11-17 (1986) .
- 高橋啓二, 沖津進, 植田洋匡 : 関東・甲信地方におけるスギの衰退と大気二次汚染物質の分布. *第 98 回日林論*, 177-180 (1987) .
- 高松武次郎, 小山睦夫 : 放射化分析法、植物栄養実験法 (日本土壌肥科学会監修), 博友社, 東京, 168-173 (1990) .
- Takamatsu, T., Satake, K. & Boratynski, J. : Elemental composition of aerosols deposited

- on indicator plants. *Abst. 15th Inter. Meet. Specilists Air Pollut. Eff. Forest Ecosys.* (Tharandt/Dresden) , 28 (1992) .
- Turunen, M. & Huttunen, S. : A review of the response of epicuticular wax of conifer needles to air pollution. *J. Environ. Qual.*, 19, 35-45 (1990) .
- Wilson, J. : Microscopic features of wind damages to leaves of *Acer pseudoplatanus* L. *Annals Bot.*, 53, 73-82 (1984) .

### 【英文要旨】

## Effect of Acid Deposition on Ecosystem

— Potential Factors Responsible for the Decline of Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica*) in Urban Areas —

T. Takamatsu\*<sup>1</sup>, H. Sase\*<sup>2</sup>, J. Takada\*<sup>3</sup> and R. Matsushita\*<sup>3</sup>

\*<sup>1</sup>*Soil Science Section, National Institute for Environmental Studies,  
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan*

\*<sup>2</sup>*Department of Production Science and Technology, Graduate School  
of Science and Technology, Chiba University, 648 Matsudo, Chiba 271, Japan*

\*<sup>3</sup>*Research Reactor Institute, Kyoto University, Sennan-gun,  
Osaka 590-04, Japan*

Amounts and elemental compositions of epicuticular wax were analyzed in Japanese ceders (*Cryptomeria japonica*) collected from Saitama Prefecture, where the trees are in significant decline, and compared to those in the samples from the plains and mountainous areas of other prefectures in the Kanto District around Tokyo. Although the wax amounts of current leaves in all samples showed a gradual decrease by erosion after the leaf expansion from May to August, the rates of decrease were clearly faster in Saitama Prefecture than the other areas. A decrease in C/O ratios of the wax, which may lower the hydrophobicity and consequently raise the wettability of the leaf surface, was also observed in the ceders from Saitama Prefecture. Such increased erosion and deterioration of the wax accelerates the transpiration and the leaching of nutrients from the leaf surface. In addition, a large quantity of aerosol was found to be deposited on the leaf surface in Saitama Prefecture, a part of which had invaded the stomata. This phenomenon may have further accelerated water and nutrients loss through incomplete closing of the stomata. Since aerosols on the leaf surface also hinder the transmission of solar light, a light-deficiency may have exerted another negative effect on the Saitama ceders. Japanese ceders are very sensitive to water stress, and control cuticular transpiration by increasing the wax under water-deficient conditions. Therefore, accelerated water loss due to wax deterioration and interference with stomatal functioning may have dealt the ceders a fatal blow under the higher temperature and lower rainfall conditions recently experienced in the Kanto Plain, especially in urban areas such as Saitama Prefecture. Deficiency of nutrients and light, and exposure to air pollutants may impart an additional stress to the ceders.