

酸性降下物による樹木への影響（第1報）

水上 和子 高野 利一

要 旨

酸性雨による樹木への影響を明らかにするため、人工酸性液に樹木葉を浸漬させpHの変化や陽イオンの溶脱状況を検討すると共に、シラカシ、ケヤキ型屋敷林内外の降下量調査も行った。浸漬液のpHは時間の経過に伴い上昇する傾向を示し、pHの上昇に大きく影響するのは Ca^{2+} 、 K^+ であり Na^+ は少なかった。

pHが低いほど陽イオンの溶脱量は多くなる傾向がみられ、落葉樹であるサクラ、ケヤキが多いのに対し常緑樹であるシラカシは少ないなど樹種により違いがみられた。葉面の形状の差違が大きく影響するものと考えられる。

H^+ 降下量及び降水量を除いた各成分降下量は林外に比べ林内の方が多く、特に K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} は林外の数倍以上と多かった。林外雨に比べ林内雨のpHが高く降下量が多かったのは、葉からの溶脱に加え葉表面に付着していた乾性降下物の溶出によるものである。

1 はじめに

欧米においては酸性雨による森林の枯損被害が急速に拡大しつつあり、大きな社会問題となっている。

一方、日本においては酸性雨による湖沼や農林生産系への影響は顕在化していないと言われているが、 H^+ 降下量は欧米の高濃度地域より少ないものの SO_4^{2-} 、 NO_3^- 降下量はほぼ同程度といった雨が観測されている^{1) 2)}現状を考えると酸性雨による生態系への長期的な影響が懸念される。

環境庁調査によれば関東平野における杉枯れ地域は拡大してきている³⁾。この原因は酸性降下物などによる影響ではないかという指摘⁴⁾もあり、土壌、気象要因も含めた因果関係の解明が急がれる。

そして、樹木に対する酸性雨の直接的、間接的な影響としてはクチクラ層の破壊、代謝や成長過程に対する障害、環境ストレスに対する抵抗力の低下など種々のことが考えられるが、筆者らは葉からの成分の溶脱に関して基礎的データを得ることを目的として人工酸性液による塩基溶脱試験を行った。

最近、粉じん等を吸着することによる樹木の大气浄化機能^{5) 6)}が注目されているが、身近な緑という観点から、関東平野の内陸部にみられるケヤキ、シラカシ型屋敷林内外において降下量調査もあわせて行い、樹木が存在することによって受ける質的、量的影響について検討を行ったので、その結果を報告する。

2 実験及び調査方法

2・1 植物葉面からの塩基溶脱試験

数日間雨が降り続いた直後に樹木葉を採取し、硫酸及び硝酸で調整した酸の溶液に樹木葉を浸漬し、pHの変化や塩基の溶脱状況を調べた。

葉柄部で切り取った樹木葉15gを蒸留水で葉面を洗浄後、pH4.0、3.5、3.0、2.4に調整した硫酸、硝酸及び蒸留水500mlに浸漬した。

実験に用いた樹木種はサクラ（広葉落葉樹）、ケヤキ（広葉落葉樹）、シラカシ（広葉常緑樹）、スギ（針葉常緑樹）、タケ（木と草の中間）であり、浸漬は2.5、8、24、48時間とした。一定の浸漬時間後、浸漬

液30mlを分取し、pH, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} の測定を行った。なお測定値はすべて500ml中の濃度に換算して結果の解析に用いた。実験終了後、葉面積計を用い葉面積の測定を行った。但し、スギに関しては葉長を計測した。なお、実験に用いた樹木葉の水分はサクラ65%, ケヤキ55%, シラカシ57%, スギ65%, タケ60%前後であった。

2・2 野外における降下量調査

屋敷林内外において降水の採取を行い、樹木が存在することにより影響を受けると考えられるpH, 各成分濃度及び降下量等の変化を調べた。

2・2・1 調査地点の概況

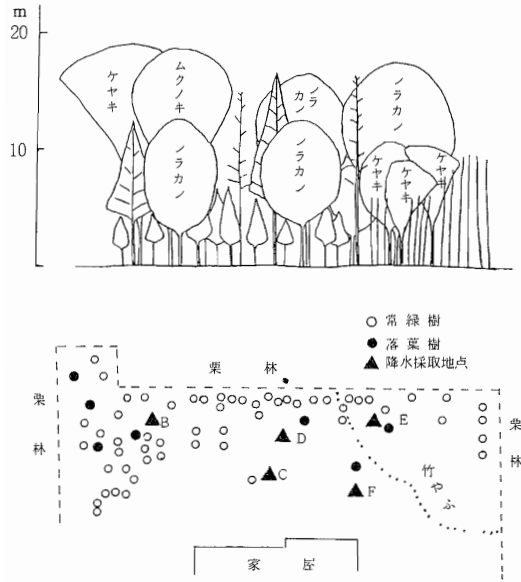


図1 調査地点の概略図

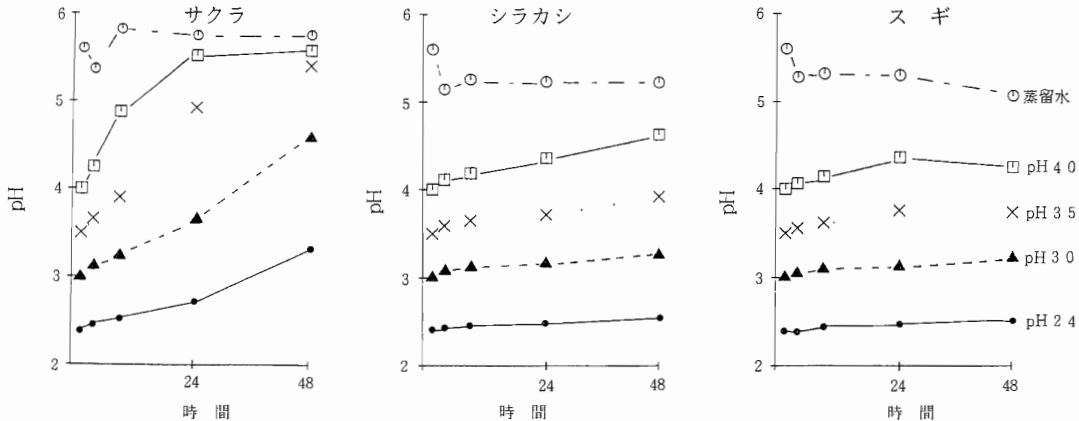


図2 浸漬時間の経過に伴うpHの変化(硫酸溶液)

調査は大宮台地にある屋敷林(大宮市高木)の内外で行った。関東平野独特のケヤキ, シラカシ型屋敷林であり、図1に示すように高木のケヤキ, シラカシに加えて少々スギ, ムクノキ及び低木のタケ, サカキ, ヒノキ, スギ等が混在している状況であった。降水の採取装置を林外に1ヵ所, 林内は樹木の種類及び葉の茂り具合(樹木葉密度)を考慮して5ヵ所に設置した。

2・2・2 調査期間及び採取方法

降雨日数が多く、かつ低pH降雨の出現頻度の高い梅雨期⁷⁾からオキシダント高濃度の出現が多い夏期にかけて調査を行った。調査期間は昭和63年6月16日から9月7日であり、この間に降った降水を15回採取した。

直径24cmのポリエチレン製ロートを用い、非降雨時におけるダスト, ガスの影響を避けるため非降雨時はカバーし、降水のみの採取を行った。降雨採取部の高さは地上1.5mとし、採取後できるだけ早くメンブランフィルター(0.8 μ m)で濾過し、降水量及びpH等各成分の測定を行った。

なお、浸漬液及び降水についてpHはガラス電極法、ECは導電率計による方法、 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- はイオンクロマトグラフ法、 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} は原子吸光法、 NH_4^+ はインドフェノール法で分析した。

3 結果及び考察

3・1 植物葉面からの塩基溶脱試験

3・1・1 浸漬液のpHの変化

浸漬時間の経過に伴うpHの変化を図2に示す。いずれの酸についても浸漬液のpHは浸漬時間の経過に伴い上昇、すなわち中性側になる傾向が認められ、上

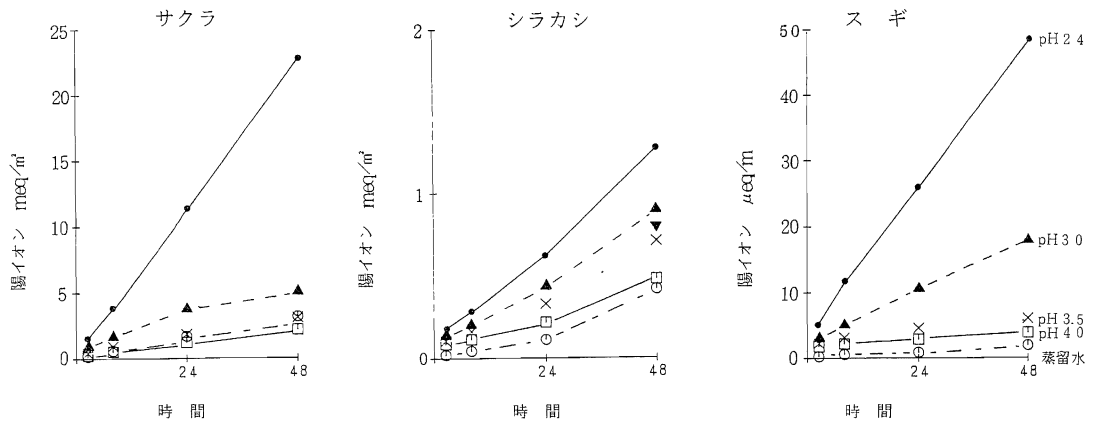


図3 浸漬時間の経過に伴う塩素の溶脱（硫酸溶液）

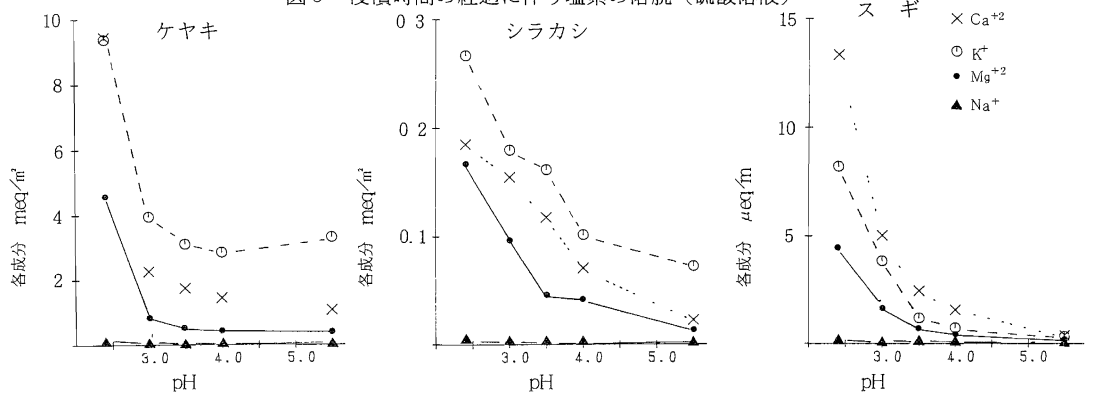


図4 浸漬液のpHと各成分の溶脱量の関係（硫酸溶液・24時間浸漬）

昇の著しいのはサクラ、ケヤキであり、逆に上昇の程度が少ないのはシラカシ、スギと樹木の種類により違いがみられた。しかし、鈴木らはクス、ミカン、カシ等を対象とした塩基溶脱試験の結果、各樹種とも純水区では低下し、pH3、4区では上昇する傾向が認められたと報告している⁹⁾が、今回の実験では蒸留水の場合上昇するもの、低下するものなどその傾向は一様でなかった。

また、酸の種類による違いはほとんどみられなく、ほぼ同じようなpH変化の傾向を示しており、浸漬により著しく葉色の変化が認められたのはpH2.4に浸漬したものであり、特にケヤキの場合pH3.0でも浸漬液が褐色に着色していた。

3・1・2 浸漬液のpHと塩基の溶脱

浸漬時間の経過に伴い浸漬液のpHが上昇したのは葉表面に付着していた粉じんの溶解やH⁺による葉表面クチクラ層におけるイオン交換反応による陽イオン

の溶脱⁹⁾によるものと考えられる。そこで、浸漬時間の経過に伴う塩基の溶脱量について検討した。但し、葉表面に付着していた粉じんは、ほとんど前処理で除かれ、浸漬液中の陽イオンはすべて溶脱したものと仮定した。K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺を溶脱される主な陽イオンとして考え、陽イオンの合計量と浸漬時間との関係を図3に示す。浸漬時間の経過に伴い陽イオンの濃度が増加し、浸漬液のpHが低い程その量が多くなる傾向が認められ、その程度は樹木の種類により違っていた。

そこで、塩基の溶脱に及ぼす酸性度(pH)の影響を成分別に検討した。

実験に用いた浸漬液のpHと各成分の溶脱量との関係の一例(24時間浸漬後)を図4に示す。pHの低下に伴い各成分の溶脱量は増加しており、その溶脱量はCa²⁺、K⁺が最も多く、次いでMg²⁺でありNa⁺は非常に少ないなど成分により違いがみられた。Woodらはいんげん豆やサトウカエデの葉に硫酸ミストを散布

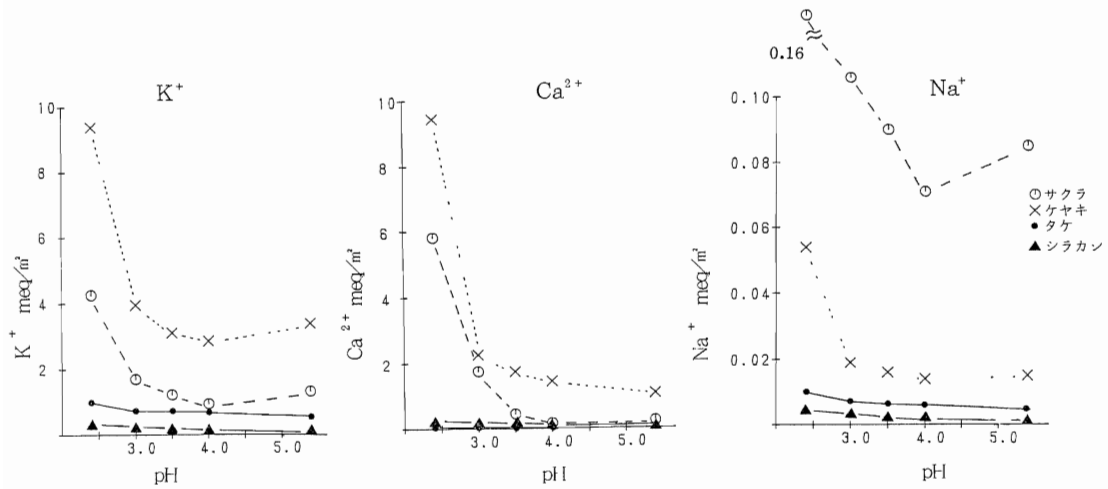


図5 樹木の種類による比較（硫酸溶液・24時間浸漬）

し、葉からしたり落ちた水の分析結果から陽イオンの溶脱に及ぼす酸性度の影響を報告している⁹⁾が、これらの結果と今回の調査結果とはほぼ一致した。

3・1・3 樹木の種類による差違

前述したように浸漬時間の経過に伴うpHの変化は樹木の種類により違いがみられた。そこで、樹木の種類によって溶脱される成分及びその程度の差違について検討した。

単位葉面積当りの溶脱量を各成分について樹木の種類別に比較した結果の一例を図5に示す。なおスギは表示単位が異なるので省いたが、同重量での比較ではシラカシと同レベルであった。

K⁺はいずれのpHにおいてもケヤキからの溶脱量が最も多く、次いでサクラでありシラカシは非常に少なかった。Ca²⁺、Mg²⁺もK⁺と同様にケヤキ、サクラの順であった。Na⁺についてはサクラが最も多く、次いでケヤキ、タケ、シラカシの順であるが、前述したようにその量は非常に少なかった。

48時間浸漬後の濃度に対する各浸漬時間後の濃度の比率から溶脱の速さの推測を試みた。その結果の一例を表1に示す。浸漬液のpH、樹木の種類により若干異なっているが、K⁺に比べCa²⁺の方が短い時間で溶脱している傾向がみられた。そしてK⁺については、シラカシは他の樹木に比べて24時間後の比率が低いなど溶脱速度が遅い傾向がうかがえた。

雨水の葉中への侵入は葉の濡れ度合で決まり、主としてクチクラ層を通して侵入する¹⁰⁾と考えられており、一般に葉の表面がなめらかでろう物質の多い葉を持った植物（例えばエンドウ、カリフラワー、テンサイなど）では物質が溶脱されにくい傾向があり、他方、

表1 48時間浸漬後の濃度に対する各浸漬時間の濃度比率
pH3.0の場合

浸漬時間	K ⁺			Ca ²⁺		
	2.5	8.0	24	2.5	8.0	24
サクラ	5	20	59	12	24	62
ケヤキ	15	23	56	40	47	55
シラカシ	5	10	36	34	45	74
タケ	5	16	42	42	50	57
スギ	15	23	56	17	31	61

単位 %

葉が比較的大きくて平たく、毛のある葉をもった植物（例えばカボチャ、インゲンマメ、キクなど）では雨により溶脱され易いことが認められている¹¹⁾。

ケヤキは葉肉が薄めで表面がざらざらしており、サクラも葉肉は比較的薄く葉の下面の葉脈に短毛が生えているのに対し、常緑樹であるシラカシは葉肉が厚く表面はなめらかで光沢があるなど形状が大きく異なっており、この葉面の形状の差違が溶脱に大きく影響したものと考えられる。

3・2 野外における降下量調査

3・2・1 屋敷林内外における降水量の比較

降水採取地点の総降水量、林外雨に対する比率及び地点の概況を表2に示す。

樹冠上に降った雨は樹冠に保留されるもの、樹幹流去水として林地に達するもの及び樹間を透過して林地に達するものがあり、林内雨は林外雨に比べてその量

図2 降水採取地点の総降水量及び地点の概況

地点	降水量 mm	林外雨に 対する比率	採取地点の概況 主たる樹種 葉の茂り具合
林外 A	450	1.00	
林内 B	356	0.79	ムクナ, スギ, ケヤキ, ヒノキ 密度 大
林内 C	194	0.43	シカシ, 樹幹流多い 密度 中
林内 D	303	0.67	シカシ, ケヤキ 密度 中
林内 E	301	0.67	クナ, シカシ, ケヤキ 密度 大
林内 F	262	0.58	ケヤキ 密度 小

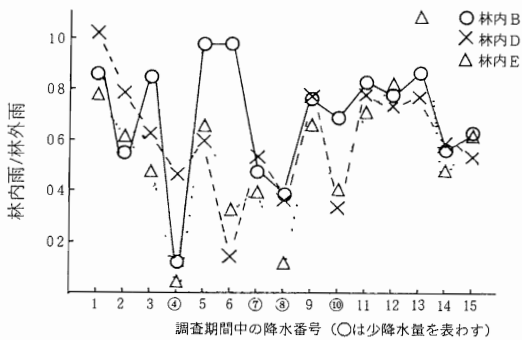


図6 林外降水量に対する林内降水量の比率

がかなり少なく林内5地点の平均では63%であった。

林外降水量に対する林内降水量の比率を各降水毎にプロットしたものを図6に示す。林内における降水量は林外に対して常に一定の比率になるのではなく、雨量強度、風向、風速等の影響を受けかなり変動しており、小量の弱い雨の時、特にその差が大きい傾向がみうけられた。すなわち、大部分が樹冠に保留されたり、蒸発したりしたためと考えられる。

3・2・2 屋敷林内外における各成分濃度の比較

樹木が存在することにより受ける質的な変化について検討した。

調査期間内の各成分濃度の加重平均値を表3に示す。屋敷林内外のpHは林外雨の平均値4.52に対し、林内5地点の平均値は5.47と林内雨の方が高い。すなわち

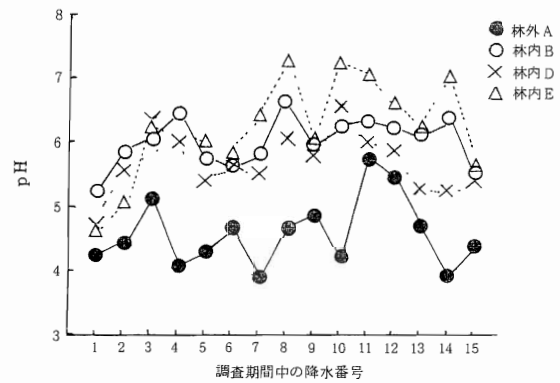


図7 調査期間中のpHの変化

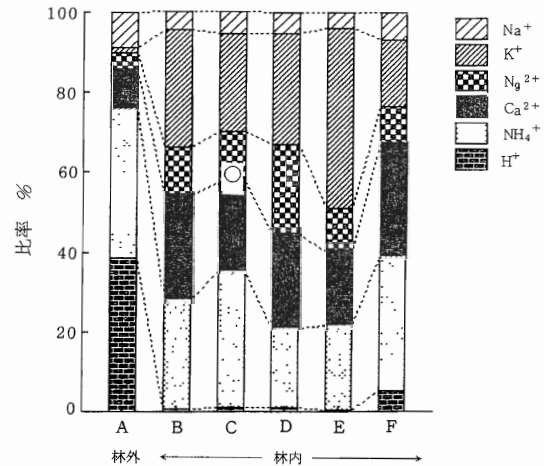


図8 陽イオン構成比の比較

H⁺濃度は低かった。また、各降水毎のpHの変化の例を図7に示したが、いずれの降水においても、林内雨のpHの方が高くなっており、その差は0.3から3.1の範囲にあった。そして、林外雨のpHが低い時その差が大きい傾向を示した。

また、pH以外の各成分濃度を屋敷林内外で比べてみると、各成分濃度はいずれの地点においても林内雨の方が高濃度であった。林外雨との濃度差が特に大きい地点は樹木葉密度大であるEであり、逆に小さいのは密度小のFであった。そして、濃度差の非常に大きい成分はK⁺、次いでCa²⁺、Mg²⁺であった。

次に、各地点の陽イオン構成比を図8に示す。林外雨に対し林内雨ではH⁺比率が大きく減少し、逆にK⁺比率が非常に増大したことが特徴的であった。一方、

表3 調査期間中の各降水成分の加重平均値

N=15

地点	pH	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
林外 A	4.52	1.8	1.1	0.7	0.5	0.04	0.16	0.15	0.04
林内 B	5.90	5.9	2.9	2.3	1.4	3.33	0.31	1.52	0.43
林内 C	5.48	6.2	3.4	2.6	2.0	3.14	0.41	1.47	0.51
林内 D	5.51	4.7	2.4	2.9	1.0	3.06	0.33	1.32	0.77
林内 E	5.69	7.0	4.1	12.1	2.7	12.55	0.65	2.66	0.94
林内 F	5.10	3.2	2.0	1.5	0.9	1.00	0.24	0.87	0.18

単位 μg/ml

表4 調査期間内の湿性降水量

(S63.6/16 ~9/7)

地点	H ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
林外 A	13.77	0.82	0.52	0.33	0.24	0.02	0.07	0.07	0.02
林内 B	0.45	2.08	1.03	0.83	0.51	1.18	0.11	0.54	0.15
林内 C	0.64	1.20	0.66	0.51	0.39	0.61	0.08	0.29	0.10
林内 D	0.93	1.43	0.71	0.87	0.31	0.93	0.10	0.40	0.24
林内 E	0.61	2.12	1.24	3.64	0.81	3.77	0.20	0.80	0.28
林内 F	2.08	0.85	0.53	0.41	0.25	0.26	0.06	0.23	0.05

単位 H⁺ meq/m² ・ 各成分 g/m²

陰イオン構成比は地点EでCl⁻比率が高いことを除くと林内外での違いはほとんどみられなかった。

以上のことから、林外雨に比べ林内雨のpHの高い理由としては、前述したように葉からK⁺等陽イオンの溶脱が行われ、それに加えて葉表面に付着していた乾性降水物が雨により溶出してきたものと考えられる。

3・2・3 屋敷林内外における各成分降水量の比較

樹木が存在することにより受ける量的変化について検討した。

調査期間内の各成分湿性降水量を表4に示す。ほとんどの降水においてH⁺降水量は林外の方が多く、逆にH⁺以外の各成分降水量は林内の方が多かった。

林外降水量と林内5地点の降水量の平均値とを比較したものを図9に示す。林外雨に対する林内雨の比率が数倍以上高いのはK⁺、Mg²⁺、Ca²⁺降水量であり、SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺等は2倍程度であった。

また、地点別にみると樹木葉密度大であるB、Eにおいて特にその比率が高く、逆に密度小のFではその比率がやや低い傾向がみられた。

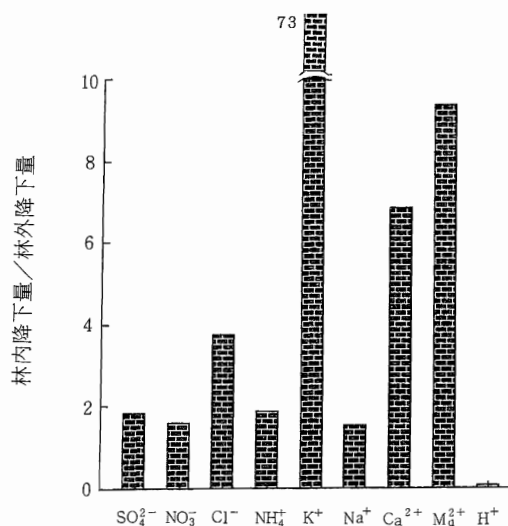


図9 林内外における各成分降水量の比較

村野らはスギ林はコナラ林に比較してH⁺降下量は12.3倍と大きくK⁺を除いた各成分降下量もやや多いことや、通常の雨に比較してスギ林ではH⁺降下量が多く、コナラ林では逆に小さくなっていると報告している¹²⁾。

また、酸性雨による被害が大きいとされているアデロンダック山脈の森林内での調査によると、針葉樹林の方が裸地や広葉樹林に比べるとSO₄²⁻、NO₃⁻、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺の降下量が多く、pHは針葉樹林は裸地と同程度、広葉樹林ではやや高いという結果が得られている¹³⁾。

今回調査した屋敷林は各種の樹木が混在しており広葉樹が多く、針葉樹であるスギやヒノキは低木が多いといった状況であった。樹木葉からはK⁺等の陽イオンの溶脱が行われ、それに加えて葉表面に付着した乾性降下物が雨により溶出してきた結果、林外に比べ林内ではK⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、降下量が非常に多く、逆にH⁺降下量は少なくなったものと考えられる。

3・2・4 降水pHと各成分降下量

塩基溶脱試験の結果では、pHの低下に伴い陽イオンの濃度が増加する傾向が認められた。そこで、林外雨のH⁺降下量と各成分の林内降下量との関係を検討した。

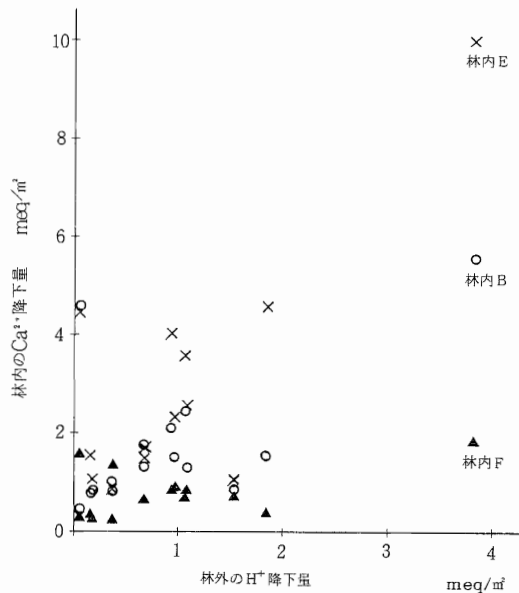


図10 林外H⁺降下量と林内Ca²⁺降下量

調査期間中の林外雨のpHは3.92-5.79の範囲にあり溶脱試験の結果では溶脱の程度の低いpHであった。H⁺降下量としては0.05-3.8meq/m²であるのに対し、林内の陽イオン降下量(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺の合計)は0.5-33meq/m²とその量は非常に多かった。

林内におけるCa²⁺降下量と林外H⁺降下量の関係を図10に示したが、H⁺降下量が増えるにつれてCa²⁺降下量も増加の傾向が少しみられた地点もあったがあまり顕著ではなく、他の陽イオンについても同様であった。

以上のことから林内における各成分降下量の増加には葉に付着している乾性降下物の溶出がかなり大きく寄与しているのではないかと推察される。酸性雨による植物への影響を評価するには塩基の溶脱によるもの、乾性降下物の溶出によるものを定量的に把握する必要がある。また、今回調査を行わなかったが樹間透過雨に比べ量的には少ないとされる樹幹流水¹²⁾についても定量的に把握する必要がある。

現在、屋敷林内外において、乾性、湿性降下物の分別採取をおこなっており、大気浄化に果たす樹木の役割といった観点も含めて調査研究を進める予定である。

4 まとめ

人工酸性液に樹木葉を浸漬させpHの変化や陽イオンの溶脱状況を検討した。あわせて関東平野内陸部にみられるシラカシ、ケヤキ型屋敷林内外において梅雨期を中心に降下量調査を行い、樹木が存在することにより受ける質的、量的影響を検討した結果、次のことが明らかになった。

浸漬液のpHは時間の経過に伴って上昇する傾向が認められ、上昇の程度は樹木の種類により違いがみられた。また浸漬時間の経過に伴い陽イオン濃度は増加し、その量は浸漬液のpHが低いほど多くなる傾向が認められ、成分としてはK⁺、Ca²⁺が最も多く、Na⁺は少なかった。pHの上昇に最も影響するのはCa²⁺、K⁺、次いでMg²⁺でありNa⁺はあまり影響していないと考えられる。

広葉落葉樹であるサクラ、ケヤキは陽イオンの溶脱量が多いのに対し、広葉常緑樹であるシラカシは少ないなど樹木の種類により溶脱される成分及びその程度に差違がみられ、この理由として葉面の形状の差違の影響が大きいものと考えられる。

降水は樹冠を通過することにより質的、量的に変化

しており、林内雨のpH4.52に対して林外雨は5.47と高くなっており、各成分濃度も林内雨の方が高かった。一方、降水量は林内の方がかなり少ないにもかかわらずH⁺以外の各成分降水量は林内の方が多く、特にK⁺、Ca²⁺、Mg²⁺の降水量が林外の数倍以上と多かった。逆にH⁺降水量は林外の方がかなり高かった。

林外雨に比べ林内雨のpHが高く、降水量の多い理由としては、樹木葉からK⁺等陽イオンの溶脱が行われ、それに加えて葉表面に付着した乾性降下物の雨による溶出が考えられる。

林内雨のpHが林外雨より高いと言うことは林内を通過することにより酸が中和されたことになり、ある意味では土壤生態系への影響を緩和しているとも言える。また、酸性の雨は単に植物、土壤への直接的な影響のみではなく、溶脱に伴う過剰のK⁺等が土壤に供給され、土壤のイオンバランスをくずすなど間接的な影響も考えて評価していかなくてはならない。

引用文献

- 1) 環境庁酸性雨対策検討会大気分科会：酸性雨対策調査中間報告書, 1987.
- 2) 水上和子, 高野利一：埼玉県における酸性降下物調査, 埼玉県公害センター年報, [14], 62-69, 1987.
- 3) 環境庁, 農林水産省, 林野庁：昭和60年度関東地域におけるスギ林の衰退と酸性降下物の影響に関する緊急調査報告書, 1986.
- 4) 関口恭一他：関東地方における酸性降下物とスギ枯れについて, 第26回大気汚染学会講演要旨集, 349, 1985.
- 5) 片山幸士, 青木敦：森林生態系における環境汚染物質の挙動, 第1回環境科学シンポジウム, 250-251, 1986.
- 6) 吉田聡, 一國雅巳：大気環境浄化にはたす森林の役割, 第1回環境科学シンポジウム, 252-253, 1986.
- 7) 水上和子：雨水成分調査について, 埼玉県公害センター年報, [8], 60-66, 1981.
- 8) 鈴木正明ら：酸性雨による植物葉面からの塩基等の溶脱－浸漬法による検討－, 第26回大気汚染学会講演要旨集, 617, 1985.
- 9) Wood, T. and F. H. Borman : Increase in Foliar Leaching caused by Acidification of Artificial Mist, *Ambio*, 4, 169-171, 1975.
- 10) 金野隆光：農林省農環研第4回農業環境シンポジウム資料, 1-29, 1987.
- 11) 木村和義：雨と植物－リーチングを中心にして－, *農業気象*, 34, 23-30, 1978.
- 12) 村野健太郎他：森林への大気汚染物の沈着, 第29回大気汚染学会講演要旨集, 336, 1988.
- 13) A. V. Mollitor and D. J. Raynal : Atmospheric Deposition and Ionic Input in Adirondak Forests, *J. Air Pollution Control Assoc.*, 33, 1032-1036, 1984.