

論文

森林衰退の原因解明に関する研究

Ⅲ. 東京の山間部における降雨の実態と林内外における 主要イオンの年間降下量

新井一司¹・久野春子¹・鈴木創²・遠竹行俊¹

摘要：東京の山間部において林外雨、林内雨、樹幹流下雨水の採取を4年間行い、pH、EC、硫酸イオンや硝酸イオンなどの各種イオン濃度を測定し、年間降下量を求めた。その結果、pH 5.6以下の酸性雨は、海拔高度1,000 m以上の地点を含む全域で降っていることが明らかとなったが、pHとモミヤスギの衰退との関連性は、見いだせなかった。一方、林内雨のECやnss硫酸イオンなどは、地域で一様ではなかった。モミヤスギの衰退がほとんどみられない川乗では、nss硫酸イオン、硝酸イオン、塩素イオン、アンモニウムイオンの樹木への沈着がほとんどなかったのに対し、森林衰退がみられた標高の低い上恩方では、それらの沈着量が大きいことが明らかとなった。また、一般に清浄であると思われていた海拔高度1,000 m以上の風張峠は、毎年、硫酸アンモニウムや硝酸アンモニウムなどのエアロゾルなどの大気汚染物質が非降雨時に移流してくることが推測された。

キーワード：酸性雨、年間降下量、nss硫酸イオン、硝酸イオン、森林衰退

1. 緒言

東京の都心から西方に約45 km以上離れた山間部では、モミヤスギの衰退現象が報告されており、樹木の葉量が低下して樹勢が衰えている(新井ら, 2002a, 2002b)。この東京のモミについて新井ら(2002a)は、山間部でも特に南東の地域で衰退が激しく、北西の地域で衰退が弱まるという広域的で面的な広がりとの関連性が強く、谷密度、傾斜区分、起伏量のような生育地の地形的要因との関連性はなかったとしている。海拔高については、250 m未満で明らかな被害が全地域でみられ、低い高度で衰退が激しい傾向がみられたとしている。しかし、ところによっては、海拔高750 m以上でも明らかな衰退がみられ、標高の高い山間部奥地まで何らかの悪影響が及んでいると報告している。東京におけるスギの衰退分布についても、新井ら(2002b)は、山間部東部や河川の下流部で衰退が激しいことを報告しており、被害度の大きい地点は海拔高度200 m近くまで

達しているとしている。

このような森林衰退の原因については、世界的にもまだ十分に解明されていない。これまでに、①酸性雨が直接葉面に当たり、細胞を破壊する、②酸性雨によって土壌が酸性化して樹木が衰退する、③大気中の光化学オキシダントなどの大気汚染物質による、など様々な要因が考えられている(河野 2004)。このうち、降雨のpHやEC、および降雨中に含まれている各種イオン成分の降下量については、森林衰退がみられる地域とみられない地域において長期間、比較を行った例は少ない。特に、東京の山間部においては、林内雨や樹幹流下雨水を含めた詳細な年間降下量を測定したデータはほとんどみられない。このため、森林衰退と降雨のpHや森林内に降下している酸性降下物の量などの実態、および、森林衰退との因果関係については、不明である。

そこで、東京の山間部において林外雨、林内雨、樹幹流下雨水の採取を4年間行い、pHやEC、硫酸イオンや硝酸イオンなどの各種イオン濃

¹東京都林業試験場, 〒190-0182 東京都西多摩郡日の出町平井 2753-1 ²元 東京都林業試験場
本研究の一部は、大気汚染学会講演要旨集(36:366 1995)に発表した。

表 1 採水地点の概要

地点名	海拔高度 (m)	周辺のコメの衰退状況	周辺のスギの被害度
川乗	850	微害	健全
風張峠	1,150	軽害～中害	健全～小
上恩方	230	中害～激害	中～大

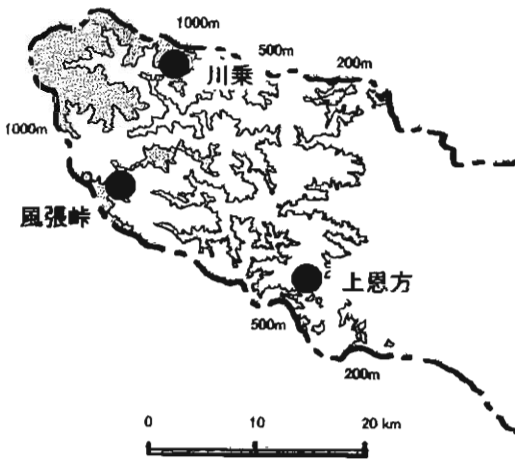


図 1 採水地点

度を測定し、年間降水量を求め、これらの各種成分がどの程度降下しているかを明らかにした。そして、降雨と、モミやスギなどの衰退との関連性について考察した。

2. 方法

雨水の採取は、図 1 に示した東京の山間部における川乗、風張峠、上恩方の 3 地点で行った。表 1 にその概要を示した。山間部奥地の川乗は、海拔高度 850 m の地点であり、周辺におけるモミやスギの衰退は、あまり見られない地点である。風張峠は、海拔高度 1,150 m であり、川乗より高度はやや高いが、この周辺では、モミは、軽害から中害といった目に見える着葉量の低下が観察されている。風張峠周辺のスギについては、比較的健全であるが、一部、被害度・小の地点もみられる。上恩方は、海拔高度 230 m と低く、モミは、中害から激害、スギも被害度、中～大と周囲で森林衰退がみられる地域である。この 3 地点は、スギ人工林であり、林外と林内で降水の採取を行った。

いずれもほぼ同様の生育状態で立木密度もほぼ同様である。

林内外の採水期間は、1991 年 1 月から 1994 年 12 月までの 4 年間、Bulk 法で行った。なお、風張峠のデータは、1991 年から 1993 年は、隣接する月夜見 (海拔高度 1,147 m) で採取を行ったデータであり、1994 年は風張峠におけるデータである。林外雨は、濾過式サンプラー (降水採取の開口部は、直径 12 cm の円形) を各地点、3 台づつ設置し、濾過には、0.8 μm のミリポア製フィルターを使用した。林内雨も、林外雨と同じサンプラーを用い、各地点、3 台づつ設置し、サンプリングした。樹幹流下雨水は、スギの立木の幹にウレタンを螺旋状に巻き付け、ポリ容器に誘導して採取した。採取は 1 ヶ月ごとに回収し、ただちに降水量を測定した後、pH、EC (電気伝導度) を測定した。硫酸イオン (SO_4^{2-})、硝酸イオン (NO_3^-)、塩素イオン (Cl^-)、アンモニウムイオン (NH_4^+)、カリウムイオン (K^+)、マグネシウムイオン (Mg^{2+})、カルシウムイオン (Ca^{2+}) 等のイオン成分は、イオンクロマトグラフ法を用い、分析した。硫酸イオンについては、nss 硫酸イオン濃度 (nss SO_4^{2-}) を算出し、すべての分析結果について加重平均値を求めてから解析を行った。なお、樹幹流下雨水による降水量は各地点 2,000 本 / ha として算出した。得られた結果について、調査地点による違い、および林外雨と、林内に降下した総量である林内雨+樹幹流下雨水の違いについての主効果とこれらの交互作用を明らかにするために統計処理ソフト SPSS 11.0 J を用いて、二元配置分散分析を行った。なお、EC、および各種イオン成分の年間降水量については、等分散性が認められないか、あるいは、極めて低かったため、各年の値を log 変換後、二元配置分散分析の処理を行った。交互作用がみられた項目について

は、一元配置分散分析を行い、Tukey の HSD によって 5 %レベルでの有意差を求めた。

3. 結果

pH の経年変化を図 2 に示した。林外雨、林内雨とも、すべての年で pH の平均値は、5.6 以下の値であり、東京では、山間部奥地まで、毎年、酸性雨が降っていることが明らかとなった。1994 年は、やや高い値であったが、年の経過とともに高くなる傾向はみられなかった。EC について、その経年変化を図 3 に示した。上恩方の林内雨は、1993 年に高い値だったが、この他は、年の違いによる大きな変動は、みられなかった。

1991 年から 1994 年までに調査した pH と EC の年平均値について、地点の違い、林外、林内の違いの二元配置分散分析を行い、その結果を表 2 に示した。pH と EC、いずれも地点と林外雨、林内雨との 2 因子間に交互作用があることが明らかとなった。そこで、pH について図 4 にその年加重平均値の比較を示した。一元配置分散分析の結果、林外雨については、3 地点で比較すると有意差は、みられなかったが、林内雨では、風張峠が他の地点より有意に低い値であり、酸性度が高いことが明らかとなった。また、川乗と風張峠は、林内雨と林外雨との間で有意差はみられなかったが、上恩方では、林外雨の方が有意に高かった。交互作用がみられた EC について図 5 に示した。林外雨については、上恩方が川乗、風張峠より有意に高い値を示した。林内雨は、川乗、風張峠、上恩方の順に有意に大きい値だった。

年間降水量、および nss 硫酸イオン、硝酸イオン、塩素イオン、アンモニウムイオン、カリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオンの年間降水量の平均値について地点の違い、林外、林内+樹幹流下雨水の違いの二元配置分散分析を行った。表 3 にその結果を示した。年間降水量については、地点による違い、林外雨と林内雨+樹幹流下雨水との違い、およびこれらの交互作用もみられなかった。一方、nss 硫酸イオン、硝酸イ

オン、塩素イオン、アンモニウムイオンについては、交互作用がみられた。カリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオンについては、交互作用はみられず、カリウムイオンとマグネシウムイオンは、地点および林外雨と林内雨+樹幹流下雨水との両因子、各々において差異があることが明らかとなった。カルシウムイオンについては、林外雨、林内雨+樹幹流下雨水の間に有意差があることが明らかとなった。

年間降水量について、林外雨および林内雨+樹幹流下雨水の 1991 年から 1994 年の平均値を図 6 に示した。すべてにおいて有意差はみられなかった。

図 7 に nss 硫酸イオン、硝酸イオン、塩素イオン、アンモニウムイオンの年間降水量の平均値を示した。nss 硫酸イオンの林外雨の平均値は、川乗、風張峠で低く、上恩方で高い値であったが、有意差はみられなかった。nss 硫酸イオンの林内雨+樹幹流下雨水は、川乗では低く、風張峠、上恩方は有意に高い値だった。また、林外雨と林内雨+樹幹流下雨水との間で比較すると、川乗では、有意差がみられなかったのに対して、風張峠では、林内雨+樹幹流下雨水で有意な増加がみられた。上恩方は、統計的には、有意な違いはみられなかったものの、その傾向は、風張峠と同様、林内雨+樹幹流下雨水で増加し、全体の傾向は、図 5 で示した EC の傾向と類似していた。硝酸イオンについては、林外雨が nss 硫酸イオンの場合とほとんど同様、風張峠、川乗で低く、上恩方はやや高い値だった。林内雨+樹幹流下雨水については、風張峠と上恩方で高く、川乗では有意に低い値だった。林外雨と林内雨+樹幹流下雨水を地点ごとに比べると、nss 硫酸イオン同様、硝酸イオンも、川乗で有意な差はみられなかったのに対して、風張峠と上恩方では、林内雨+樹幹流下雨水において有意な増加が認められた。このような傾向は、塩素イオンやアンモニウムイオンでも同様にみられた。すなわち、二元配置分散分析の結果、交互作用がみられた nss 硫酸イオン、硝酸イオン、塩素イオン、アンモニウムイオンは、

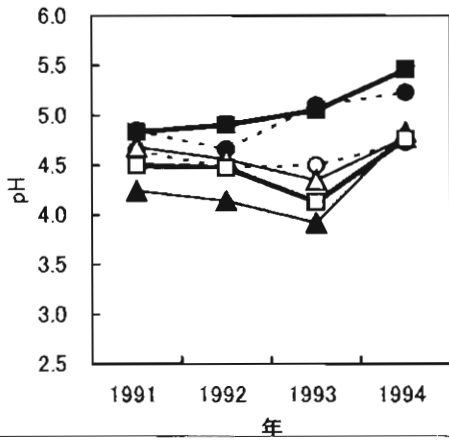


図 2 pH (年加重平均値) の経年変化

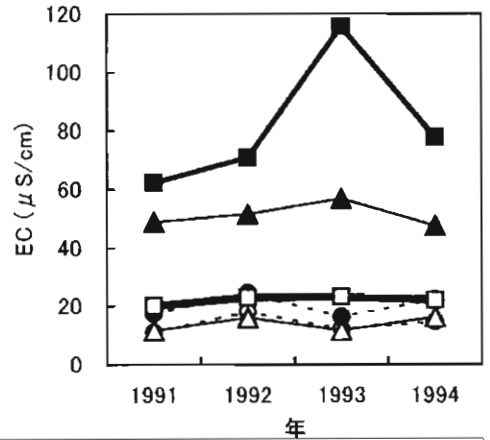


図 3 EC (年加重平均値) の経年変化

表 2 pH と EC に対する地点と林外雨、林内雨の二元配置分散分析の結果

因子	pH	EC
地点の違い	0.604	0.253
林外雨、林内雨の違い	0.510	0.086
地点と林外雨、林内雨との交互作用	0.008	0.000

表中の値は、有意確率 (p 値) であり、5%未満で有意差があったものを太字とした。
ECは、log変換後、分散分析を行った。

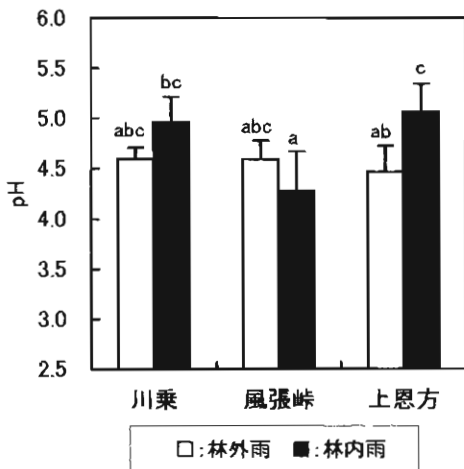


図 4 pH の年加重平均値の比較 (1991年～1994年)
エラーバーは、標準偏差
a, b, c は、5%で有意差あり

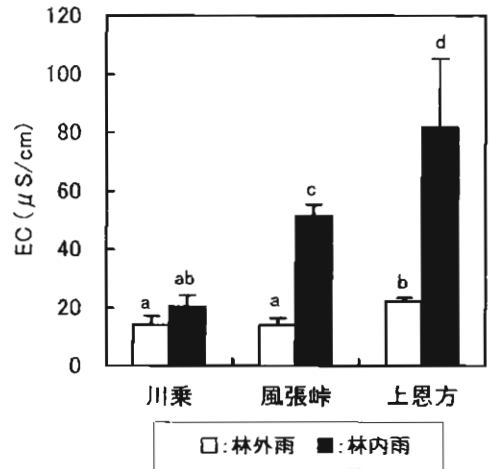


図 5 EC の年加重平均値の比較 (1991年～1994年)
エラーバーは、標準偏差
a, b, c, d は、5%で有意差あり (log 変換後の分散分析結果)

表 3 年降水量と各種イオンの年間降下量に対する二元配置分散分析の結果

因子	年降水量	イオン						
		nss硫酸	硝酸	塩素	アンモニウム	カリウム	マグネシウム	カルシウム
地点の違い	0.800	0.225	0.380	0.174	0.280	0.020	0.005	0.135
林外雨、林内雨+樹幹流下雨水	0.204	0.155	0.120	0.073	0.474	0.001	0.001	0.024
交互作用	0.165	0.025	0.000	0.003	0.004	0.808	0.949	0.111

表中の値は、有意確率 (p 値) であり、5%未満で有意差があったものを太字とした。
年降水量以外の全イオン成分は、log変換後、分散分析を行った。

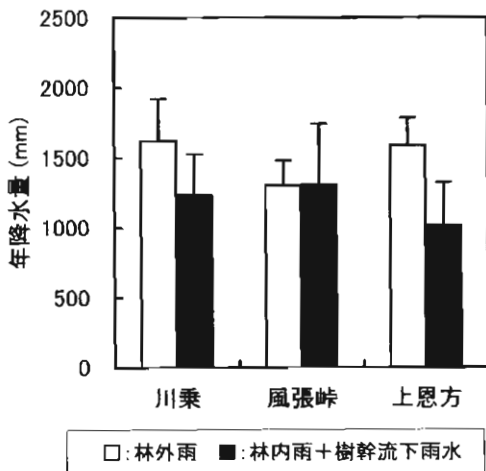


図 6 年降水量の平均値の比較 (1991年~1994年)
エラーバーは、標準偏差
すべてにおいて有意差なし

すべて EC と類似の傾向を示していた。

二元配置分散分析を行い、交互作用がみられなかったカリウムイオンについて、図 8 に示した。3 地点とも林外雨と林内雨+樹幹流下雨水との間に有意差がみられた。林外雨においては、川乗、風張峠で低く、上恩方で高かった。林内雨+樹幹流下雨水においてもこの序列は同様であった。この傾向は、マグネシウムイオンやカルシウムイオンでも同様であった。

4. 考察

モミやスギの衰退は、上恩方で最も激しいと報告されている (新井ら 2002a, 2002b) が、林外雨の pH において 3 地点の間に有意差はみられなかった。さらに、上恩方の林内雨の pH は、3 地点中、最も中性に近い値であった。よって、pH が低い程、すなわち、酸性の度合いが高まる程、森林が衰退するとはいえない。酸性雨に対する 47 種の樹木の感受性について、河野 (2001) は、人工暴露試験を行った結果から、pH が常時 4.0 以下でなければ、直接的な影響はみられないとしている。このうち、モミとスギに関しては、いずれも pH 2.0 で可視害がでており、針葉樹は、広葉樹より低い pH で被害が生じる傾向があるとしている。Hains *et al.* (1980) も可視害は、針葉樹で 3.0 - 2.0、広葉樹で 4.0 - 3.0 で発現するとしており、同様の傾向だった。本研究の 3 地点の林外雨の pH は、図 2 に示したように 4.0 よりも、高い値だった。したがって、現在の林外雨が直接、スギやモミの葉面に可視傷害を及ぼすことは、考えにくい。加えて、新井ら (2002a, 2002b) が行ったモミやスギの衰退調査では、河野ら (1994) が報告している酸性雨によって生じた当年葉から被害が生じるタイプの可視傷害は、確認されていない。したがって、上恩方の森林被害は、林外雨が直接、葉面に当たって、細胞が破壊されたとは、考えにくい。

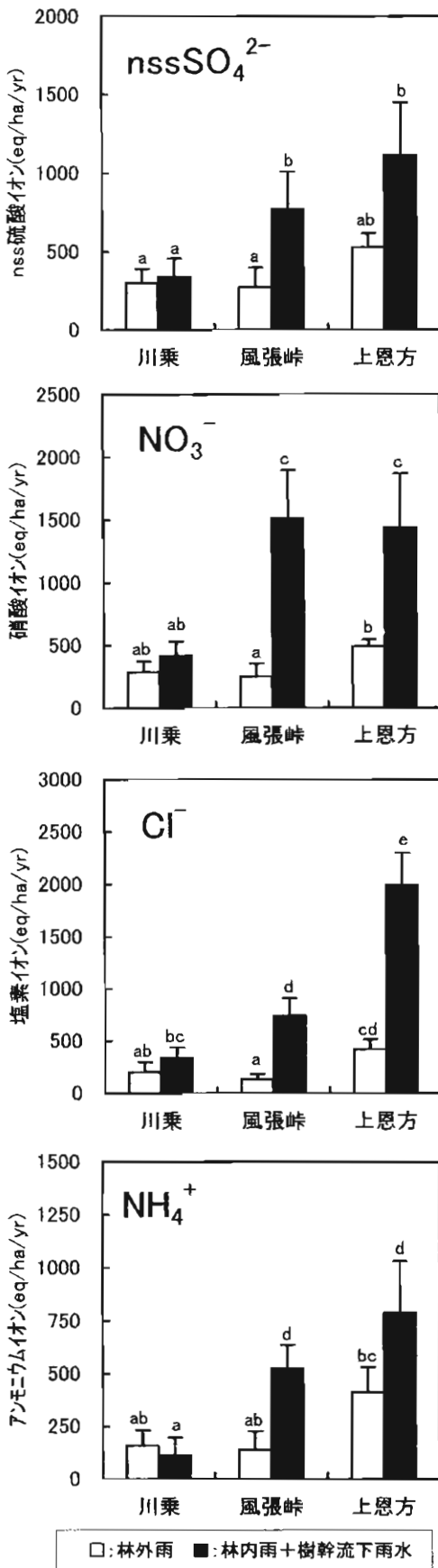


図7 nss硫酸イオン、硝酸イオン、塩素イオン、アンモニウムイオンの年加重平均値の比較 (1991年～1994年)
 エラーバーは、標準偏差
 a, b, c, d, e は、5%で有意差あり (log 変換後の分散分析結果)

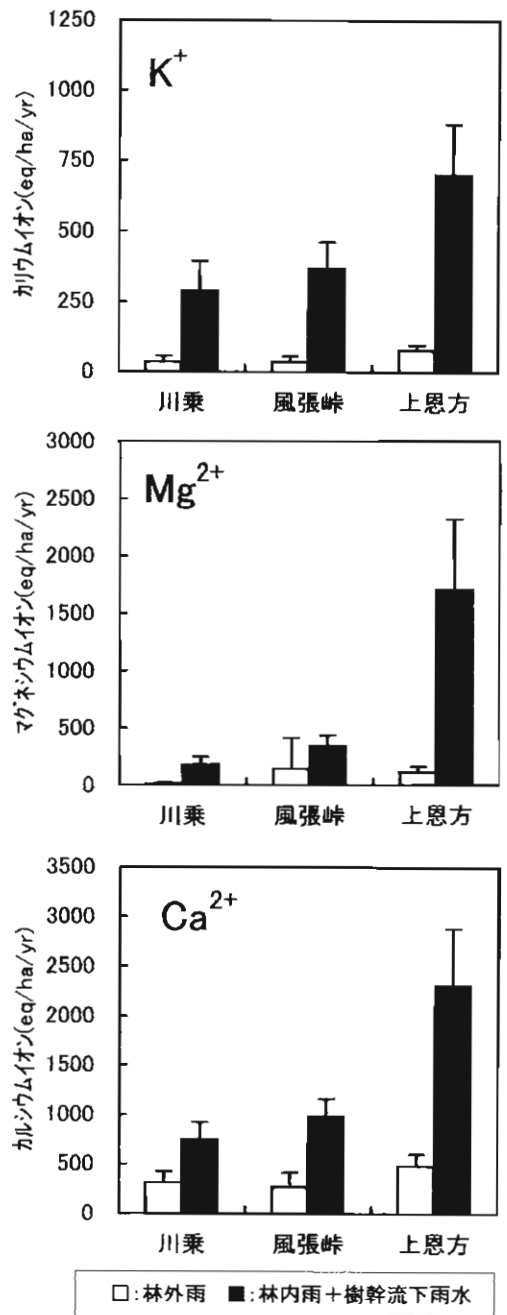


図8 カリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオンの年加重平均値の比較 (1991年～1994年)
 エラーバーは、標準偏差
 log 変換後の分散分析で、林外雨と林内雨+樹幹流下雨水 間で有意差あり

EC については、林内雨における 3 地点の増減の傾向がモミヤスギの衰退状況とほぼ一致する。つまり、モミヤスギの衰退が激しい上恩方の林内雨の EC は、著しく高い値であった。また、衰退がみられない川乗では、林外雨と林内雨とで有意

な違いがみられなかったのに対して、風張峠と上恩方では、林内雨が有意に増加していた。EC は、電気伝導性のあるイオン量の多少を表すため、イオンの種類の特定はできないものの、降水の汚れ具合の目安とすることができる。林内雨には、降水以外にスギの葉などに付着した大気中の汚染物質や、樹木の葉や幹などから溶脱した物質が含まれていると考えられる。したがって、林内雨と林外雨とで EC の差がみられなかった川乗では、この影響が少なく、林内雨の値が有意に高かった風張峠と上恩方では、より大きな影響がみられたと考えられる。

主要イオンについては、川乗の林内雨+樹幹流下雨水において nss 硫酸イオン、硝酸イオン、塩素イオン、アンモニウムイオンの増加がみられなかったことから、nss 硫酸イオンや硝酸イオンなどが樹木から大量に溶け出す物質とは考えにくい。風張峠と上恩方におけるこれらのイオンが林内雨+樹幹流下雨水で林外雨より増加した原因は、非降雨時に人為発生源と考えられる大気汚染物質、つまり、硫酸アンモニウム $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ や硝酸アンモニウム (NH_4NO_3) などがエアロゾルの形で山間部まで移流し、樹木の葉や枝、幹などに沈着し、降水によってそれらが洗い流されて降下した結果と考えられた。地点ごとにみると、増加がみられなかった川乗は、地形的に入りこんでおり、これらの大気汚染物質が移流しにくかったと推察される。一方、風張峠は、海拔高度 1,000 m 以上の山間部奥地であるが、林内雨+樹幹流下雨水中のイオン降下量は、多かったため、多くの大気汚染物質が移流していると推測される。川乗周辺のモミは、微害、スギは健全な地域であり、風張峠の周辺のモミやスギは、いずれも川乗よりやや衰退がみられる地域であったことから、森林衰退の傾向と林内雨+樹幹流下雨水中のこれらのイオンの降下量の傾向は、よく一致する。さらに、硝酸イオンにおいては、海拔高度の高い風張峠でも、上恩方と同程度、降下していることが明らかとなった。

nss 硫酸イオンの結果から、川乗は、エアロゾルのような大気汚染が移流していない地域と推測

されたが、カリウムイオンなどは、川乗の林内雨+樹幹流下雨水で、林外雨より多量に降下していた。このことから、これらカリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオンは、主に樹木からの溶脱した結果と考えられ、前出の nss 硫酸イオンなどのようにエアロゾルの形で非降雨時に移流しているのではなく、あるいは、移流したとしてもその量は、かなり少ないと考えられる。なお、交互作用がみられないものの、林外雨の降下量に対する林内雨+樹幹流下雨水の増加量を比較すると、図 8 のカルシウムイオンで川乗と風張峠が 3 倍程度であったのに対して、上恩方では、約 5 倍に達していた。このように樹木からの溶脱と考えられるイオンで、上恩方の増加割合が高いのは、何らかのストレスにより、樹木自身が過分にカルシウムイオンを放出しているとも考えられる。同地点が、モミやスギが衰退している地域であることから、このような過剰な溶脱が、樹木の衰退に関与しているかもしれない。

アメリカの全土において、13 地点の森林内における硫酸イオンの年間降下量を Lindberg *et al.* (1992) は、報告している。最小値は、300 eq/ha/yr、最大値 2,520 eq/ha/yr であり、13 地点中、1,000 eq/ha/yr 以上の地点は、2 地点だった。上恩方の林内雨は、1,111 eq/ha/yr であり、アメリカの中でも降下量が高い方に位置する。一方、川乗は、336 eq/ha/yr であり、最も低い地点の次に位置する。東京の山間部は、アメリカ全土に対して極めて狭い面積ではあるが、このように林内の年間降下量には、大きな開きがあることが明らかとなった。これは、東京の山間部の地形が急峻、かつ、複雑であるためにエアロゾルなどの大気汚染物質の流れ方が一様ではなく、複雑であることを示唆している。

今後、これらの酸性物質が降下した森林土壌が樹木に及ぼす影響の解明が必要である。また、硫酸アンモニウムや硝酸アンモニウムなどのエアロゾルの発生と同時に反応して生成される光化学オキシダントなどの二次汚染物質が樹木へ及ぼす影響の解明も必要であることが明らかとなった。

謝辞

本研究をとりまとめるにあたり桜美林大学の大喜多敏一名誉教授にご指導頂いた。また、現地調査において東京都農林水産部林務課の方々に多大なる協力を頂いた。ここに感謝する。

引用文献

新井一司・久野春子・鈴木創・遠竹行俊・大喜多敏一 (2002a) 東京の山間部におけるモミ林の衰退分布の特徴. 大気環境学会誌 37 : 184 - 191
新井一司・久野春子・鈴木創 (2002b) 森林衰退の原因解明に関する研究 II. スギの衰退分布. 東京都林業試験場研究報告 12 : 19 - 23

Haines, B., Stefani, M., Hendrix, F. (1980) Acid rain : Threshold of leaf damage in eight plant species from a Southern Appalachian forest succession. *Water, Air Soil Pollut.* 14 : 403 - 407.

河野吉久・松村秀幸・小林卓也 (1994) 樹木の可視害発現に及ぼす人工酸性雨の影響. 大気環境学会誌 29 : 206 - 219

河野吉久 (2001) 樹木に及ぼす酸性物質の長期慢性影響評価に関する研究. 大気環境学会誌 36 : 47 - 59

河野吉久 (2004) 森林衰退の現状と取り組み (I) 欧米における樹木衰退の現状と研究の動向. 大気環境学会誌 39 : A1 - A8

Lindberg, S. E., Lovett, G. M. (1992) Atmospheric Environment 26A, 1477 - 1492.

Forest decline on the mountains of western Tokyo

III. Precipitation on the mountains in Tokyo prefecture and annual deposition of major inorganic ions in- and out-side of forest

ARAI Kazushi¹, KUNO Haruko¹, SUZUKI Hajime² and TOTAKE Yukitoshi¹

¹ Tokyo Metro. For. Exp. Sta. ² Formerly, Tokyo Metro. For. Exp. Sta.

Abstract : Precipitation, throughfall and stemflow have been sampled on the mountains of western Tokyo for 4 years. PH, EC and concentrations of various ions such as SO_4^{2-} and NO_3^- were measured and their annual deposition were calculated. It is apparent that acid rain below 5.6 fell throughout the mountain including altitude above 1,000 m. But pH had no relationship to decline of Momi fir and Japanese cedar. On the other hand, the distributions of EC, nss SO_4^{2-} and other ions in throughfall and stemflow were not uniform regionally. In Kawanori where Momi fir and Japanese cedar were little damaged, the deposition of nss SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- and NH_4^+ to the forest was scarce. On the other hand, at Kamionkata where was located at low altitude area and forest decline was observed the deposition of these ions was found to be large. At Kazaharitoge of more than 1,000 m of altitude where air has been considered to be pure, air pollutants of aerosol phase, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and NH_4NO_3 would be transported there on days without rain.

Key words : acid rain, annual deposition, nss SO_4^{2-} , NO_3^- , forest decline , Tokyo