特集・酸性雨による森林生態系等への影響

丹沢大山における酸性降下物とその森林生態系への影響

井 川 学*

1. はじめに

酸性雨はオゾン層破壊、二酸化炭素による温暖化とともにグローバルな環境問題となっている。酸性雨が原因と見なされる環境破壊は、単に雨だけによるのではなく、霧、露をも含んだ全ての降水、さらには大気中のエアロゾルやガス成分の影響を含んだ総合的なものである。わが国における大気汚染の状況は、排出規制が功を奏して二酸化硫黄濃度については1960年代からすると急激に減少したが、窒素酸化物やオキシダント濃度はほとんど変化せず、最近ではかえってわずかに上昇する傾向にある。このために雨の酸性度は大気汚染の激しかった時期からほとんど変化はなく、わが国の平均値としてはおよそpH4.7の値を示している。この値は欧米よりもわずかに高い(英国ではpH4.35)が、わが国は降水量が多いために酸性物質が地表に降り注ぐ単位面積当たりの量は欧米とほとんど変わらない。従って、これまで長期間にわたって降り注いできた酸性雨による被害がわが国にも現れておかしくない状況にある。

2. 丹沢大山における酸性降下物

近年、わが国において都市近郊山間部における原生林の立ち枯れが大きな問題となっている。この原因究明のために様々な角度からの検討が行われているが、山間部に頻繁に発生している酸性度の高い霧の影響がその一因として考えられる。表1に示すように霧は雨に比べて水分量が小さく、また液滴径が小さいために単位体積当たりの表面積が大きく大気汚染物質を吸収し易いため、高い酸性度を有している。さらに地表近くに発生し長時間滞留することから、生態系への影響が危惧される。霧水は採取が困

表1 雨と霧の特性の比較

	液滴直径 (mm)	水分量 (g/m ³)	pH 範囲	イオン強度
雨	0.4~4	0.1~1	4~5	10 ⁻⁴
霧	0.01~0.05	0.02~0.2	2~6	10 ⁻³ ~10 ⁻²

難であるために酸性霧の研究報告例は少なく、その酸性化機構など不明な点が多い。そこでわれわれは、丹沢大山をフィールドとして酸性降下物の研究を行っている。

丹沢山塊の東南の端に位置する大山は関東平野に面する標高1252mの山であり、標高700mの地点に阿夫利神社があるため昔から参拝する人々が絶えない。また交通の便が良く眺めも良いためにハイキングコースとしてもよく知られている。この山は雨降り山とも呼ばれ、霧の発生する頻度も高い。われわれは1988年より標高700mの地点に自動霧水採取機、エアロゾル採取器、ガス(酸性ガスおよびアンモニアガス)採取器、ろ過式雨水(林内雨、林外雨)採取器を設置し、観測を続けている。その後さらに、1989年には大山の頂上から標高650mの地点までの南東斜面に沿って40m毎に表層土壌の採取、分析を行い、1992年からは大山の全山で標高差約100m毎の林内降下物、林外降下物と沢水の採取、分析を開始した。さらにその後、受動のガス採取器および受動の霧採取器を用いた酸性降下物の標高分布の測定を始め、総合的な調査へと発展させている¹⁻⁵⁾。また比較のために雨水、エアロゾル、ガスを横浜市のほぼ中心に位置する神奈川大学研究棟屋上にて採取、分析している。なお、エアロゾルの採取にはローボリュームエアサンプラーを用い、ガスの採取は薬液含浸フィルター法によっている。

図-1に1993年~1994年に大山で採取した霧、雨、エアロゾル、ガスの経月変化を示す。霧の濃度は大

* 神奈川大学工学部
Manabu IGAWA

図-1 丹沢大山における霧, 雨, エアロゾルの組成とガス濃度

気負荷量として表しているが、この値は霧水内濃度と大気中の霧水量との積である。NH₃ガス濃度は夏期に高く、SO₂ガス濃度は冬期に高い傾向が見られた。一方エアロゾルのSO₄²⁻濃度は夏期に、NH₄⁺、NO₃⁻濃度は冬期に高い。これらの傾向は、同時に採取している横浜も同様であるが、大山は汚染源から離れていること、樹木により粒子状物質が捕集されること等により、横浜にくらべるといずれも低濃度である。ただし硝酸ガス濃度は横浜とほとんど変わらない。また、酸性ガス濃度の総和はアンモニアガス濃度とほぼ等しく、霧水は酸性化しやすい条件にある。雨水においては夏期に降水量が多くそれに伴って各イオンの降下量の総和も高い値を示した。霧は春から秋にかけて発生頻度は高くなり、総濃度もそれに伴って高い値を示した。また、雨、霧組成は、エアロゾルとガス成分の濃度により規定されるが、霧はガス成分の吸収に基づく硝酸イオンやアンモニウムイオンの割合が雨よりも高い。

霧の組成を決める要因としては、大気中の酸性ガス成分濃度、アンモニア濃度、霧水量があるが、この他に霧底の位置が重要である。図-2に山岳部の霧の状況およびイオン負荷量の総和と霧底の標高との関係を霧底の計算式⁹⁾と合わせて示している。霧の最下点(霧底)の標高が低くなるほど採取地点で得られる霧による大気負荷量は減少する。これは次のような理由による。霧底では霧と平衡になる大気中汚染物質濃度が高いため霧水内汚染物質濃度は高くなる。しかし、霧を含んだ大気が山の斜面に沿って上昇する過程で森林の樹冠に衝突して霧水が捕捉され、一方で気塊の温度低下により新たに霧水が生成する。新たに生じた霧水と平衡にある大気は霧底近くで霧水によって洗浄されているため汚染度は低く、このために生じた霧水は汚染度が低くなる。従って、霧採取地点と霧底とが離れれば離れるほど、得られる霧による大気負荷量は減少する。ただし、図-2で霧底の最下点が霧の採取点に接近すると逆に負荷量が低下しているが、これは霧底が高くなると霧が薄くなって霧が間欠的に発生し、実際よりも長く霧発生時間を評価しているためである。

霧は時として非常に低いpHを示すが、どのような化学種により酸性化するのかが重要な問題である。霧水中の水素イオン濃度と非海塩起源のCl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺濃度との相関を取ると、相関の直線の傾きおよび相関係数はNO₃⁻で最も高く、霧水の酸性化にはNO₃⁻が主に関わっている。陽イオ

図-2 全イオン大気負荷量と霧底の位置
霧底の標高 (m) : $h = 125 \times (T_0 - t_0) + h_0$
 T_0 : ふもとの気象観測所の温度
 t_0 : ふもとの気象観測所の温度

ンではpHが低いときに NH_4^+ が高濃度であり NH_3 ガスによる中和作用が働いているが、pH3以下の時には NH_3 の供給が追いついていない。大山ではpH1.95にも及ぶ酸性の霧が観測されたが、このような霧の強酸性化にはHClの寄与が大きい。また、霧がこのような強酸性となるのは2～3時間の現象であり、前後には急激な濃度変化がみられたことから、採取地点付近において含塩素高分子物質の燃焼等を原因とする局地的かつ一時的な大気汚染があったものと考えられる。このような高い塩酸濃度によるpH値の低下は、局地的な汚染とはいえ重要であろう。

このような霧水の降水量は様々な要因に影響されるが、森林樹冠への霧水降水量を 0.14mm/h^7 とすると、この値に霧の発生総時間を掛け合わせることでより1993年の標高700mの地点の降水量が計算され、 58mm/年 となった。この値は同時期の大山の降雨量である 2217mm/年 に比して小さいが、霧水の濃度は雨よりも10～20倍高く（1993年の大山の雨の全イオン濃度は 0.108meq/L 、pH4.94であるのに対し、霧の全イオン濃度は 1.96meq/L 、pH3.86）、霧の発生頻度は標高が高くなるにつれて増加することを考慮すると、大山全体としては霧による酸性降下物の影響は大きいと言える。

このような酸性降下物は長い間には土壌の特性にも大きな影響を及ぼしていく。大山の表層土壌のpHの測定結果によると、pHは6に近く低下は認められなかった。しかしながら、標高700mから1000m付近の土壌で硝酸イオンの蓄積が見られ、カルシウムイオンとマグネシウムイオンが土壌から溶出していることが示された。このような土壌中の硝酸イオン濃度の増加は衰退した森林地帯の土壌でよく見られる現象であり⁸⁾、原因の解明を図らねばならない。

3. 丹沢大山における森林衰退の現状とその原因

われわれが酸性降下物の調査を行っている丹沢大山では、モミの立ち枯れが顕著に見られる（写真1）。杉本らの1988年11月から1989年5月の調査によると大山のモミの32.1%が枯死あるいは枯死寸前であり、健全なものは37.0%に過ぎない⁹⁾。神奈川県も酸性雨調査の一環として県内全域の森林衰退の調査を行い詳細な報告書をまとめているが¹⁰⁾、その中で大山のモミの立ち枯れの原因について「二酸化硫黄、

写真1 丹沢大山のモミの立ち枯れ

オゾン、酸性霧によって衰退したモミにハラアカマイマイが大発生し、高齢木の自然枯損に加え、モミの枯損木の増加に拍車をかけた可能性が考えられる」としている。さらに最近では、大山の北側裏手にあたりこれまでモミ枯れが認められなかった札掛のモミ林でも衰退しつつあることと丹沢山塊の主峰の山々の山頂でブナが立ち枯れしていることが神奈川県により報告されている。札掛のモミは大山のように枯死木の数は少ないので目立たないが、正常なものの比率は1980年には95.0%であったのに1990年には37.5%へと激減している。ブナについては最も衰退の顕著な蛭ヶ岳の経年変化で見ると、正常なものの比率は1969年には90.9%であったのに1980年には55.5%、1990年には32.2%へとこれも大きく減少している。

これらの森林衰退の原因として、気象要因、害虫、酸性降下物およびオゾンの樹冠への直接影響、酸性降下物による栄養物質供給のアンバランスと土壌酸性化、あるいはこれらの複合的な要因が指摘されているが、人為起源と見るか自然起源と見るかによりその対策は大きく異なる。われわれが研究のフィールドとしている丹沢のモミあるいはブナの立ち枯れの原因についても次のような様々な議論がある。「大山の植生は変遷しており、モミから他の種に置き換わっている過程に過ぎない」、「自然現象（水位の低下、冷害、風害）によるものであり、その証拠に公害が激しくなる前から立ち枯れが見られた」、「害虫によるものである」、「シカの食害によるものである」、等々である。類似した議論は他の立ち枯れの箇所でも言われている。しかし自然現象にしては激しい衰退が汚染源に面した地域のみならずに起こっ

ており、さらに札掛のモミ林、丹沢主峰のブナ林に見られるように污染源からより離れた地域にまで衰退地域は次第に広がっている。われわれは酸性霧、オキシダントを含む大気汚染が森林衰退の第一の要因になっていると考えている。大山のモミについては大気汚染の激しかった時期に年輪の成長が減少し、強度の大気汚染が衰退の原因となることは明らかとなっている¹¹⁾。問題は現在のレベルの大気汚染が森林衰退の原因になるのかどうかである。また、1940～1960年の記録でも枯死したモミが大山で多く見られていることも疑問として残る。後者については、大山が関東平野の南に接するために京浜工業地帯からの排煙が以前からも影響していた可能性が考えられる。

われわれは酸性霧がモミの衰退の原因となることを解明するためにモミの苗木を育て、酸性霧と同様な組成のpH3の酸溶液を霧状にして曝露する実験を行った。実験を開始して数カ月は酸溶液内に硝酸塩やアンモニウム塩が入っているため、これが栄養源となり成長はかえって促進され、青々となっていた。しかしその後枯れ始め、特に、新芽の枯れが

顕著に見られ、成長が停止した(写真2)。この主因はまだ明らかではないが、①葉の表面が酸で破壊され、蒸散速度が制御できなくなり乾燥に弱くなること¹²⁾、②酸溶液により栄養成分が葉から溶出すること¹³⁾、は確かめられている。モミは森林地帯の中でも他の樹種より樹高がかなり高いため、風で移動する霧液滴との衝突により樹冠に付着する量は多く、酸性霧の影響を受けやすいと考えられる。

5. 酸性降下物による自然破壊

このような酸性降下物の森林への影響として、樹冠への直接影響からさらに進んで、長い間の酸性雨による土壌の酸性化が重要な問題である。雨は弱酸性であるが、湖沼、河川はほぼ中性であり、雨と同じpHになると魚類等は生息できない。この酸性化を防いでいるのは、雨水中の水素イオンが土壌中のカルシウム等の金属イオンとイオン交換されるためである。土壌は母岩の風化により供給されるが、酸性降下物の降下量が增大すると土壌の持つイオン交換容量は使い尽くされて雨が中和されないまま河川、湖沼に流れ込む。このような現象は酸性雨被害の最終段階と言えるが、欧米では既に現れており、酸性化して魚が棲めなくなった湖沼は多い。わが国では足尾銅山周辺の土壌が酸性化して樹木が育たなくなっているが、湖沼の酸性化は火山周辺の酸性湖を除いて未だ報告例はない。しかしながら、長野県において土壌の母岩の酸中和能の低い地域を流れる河川のpHが長期低落傾向にあること¹⁴⁾、モミ林の立ち枯れが見られる宝満山の土壌のpHが非常に低く(およそpH4)、交換性 Al^{3+} 濃度が高いこと¹⁵⁾は注目される。酸を中和する土壌の能力には限りがあり、限度を越えると土壌は急激に酸性化する。このような土壌の酸性化の影響を受けるのは植物のみではない。最近のオランダの調査結果によると、カタツムリは成長時に多量のカルシウムを必要とするため、酸性雨により土壌が酸性化した森では生息数が激減した。このためカタツムリの殻をカルシウム源としていたシジュウカラやスズメの卵の殻が弱くなり、孵化できないものが増加したという¹⁶⁾。

酸性雨による森の生態系の破壊は、様々な問題を引き起こしていく。例えば、丹沢のブナやモミの枯死は山塊の崩落の危険性を高め、ブナは保水効果も大きいだけに丹沢山塊の水ガメとしての機能も低下していくであろう。さらに長い時間のスケールで見

写真2 (a)酸性霧を曝露したモミの苗木
(b)正常なモミの苗木

るなら気候の変化(降水量の減少), 河川の水質の変化等の様々な影響を引き起こしていくことが憂慮される。

引用文献

- 1) 井川 学, 補伽栄一, 細野哲也, 岩瀬光司, 長嶋 律, 日化誌, 698, (1991).
- 2) 大河内 博, 長嶋 律, 補伽栄一, 井川 学, 環境科学会誌, 6, 29 (1993).
- 3) T. Hosono, H. Okochi, M. Igawa, Bull. Chem. Soc. Jpn., 67, 368 (1994).
- 4) 片桐保行, 渡邊真一, 大河内 博, 井川 学, 日化誌, 1007 (1994).
- 5) 大河内 博, 細野哲也, 丸山文隆, 井川 学, 環境科学会誌, 8, 305 (1995).
- 6) 岡上政夫, 大谷義一, 森林立地, 23, 31 (1981).
- 7) C. A. Gordon, R. Herrera, T. C. Hutchinson, Atmos. Environ., 28, 317 (1994).
- 8) W. Durka, E. -D. Schulze, G. Gebauer, S. Voerkelius, Nature, 372, 765 (1994).
- 9) 杉本龍志, 相原敬次, 古川昭雄, 第30回大気汚染学会講演要旨集, 364 (1989).
- 10) 神奈川県, 酸性雨に係る調査研究報告書, 1994年.
- 11) 鈴木 清, 神林試研報, 19, 23 (1992).
- 12) K. Mengel, A. M. R. Hogrebe, A. Esch, Physiol. Plant., 75, 201 (1989).
- 13) K. Mengel, M. TH. Breininger, H. J. Lutz, Environ. Exper. Botany, 30, 165 (1990).
- 14) 須田隆一, 宇都宮 彬, 大石興弘, 濱村研吾, 石橋龍吾, 杉 泰昭, 山崎正敏, 緒方 健, 溝口次夫, 清水英幸, 環境と測定技術, 19 (5), 49 (1992).
- 15) 栗田秀實, 堀 順一, 浜田安雄, 植田洋匡, 大気汚染学会誌, 28, 308 (1993).
- 16) J. Graveland, R. van der Wal, J. H. van Balen, A. J. van Noordwijk, Nature, 368, 446 (1994).

新刊図書

悠久の京の川

理科教育と公害問題

著者 美簀 照子

発行 合同出版

A 5 判 230頁

定価 1,800円(税込・送料別)

産業優先, 人間無視の高度経済成長政策がもたらした, 破壊の爪跡は凄まじかった。人々はあらゆる種類の汚染物質を含んだ空気を吸い, 有害物を含む汚れた水を飲み, 添加物や水銀, カドミウムの入った汚染食品を食べ, そのうえ騒音や振動に苦しめられ続けていた。

こういう状況が公害という姿をとって日本列島全地域に広がり始め, ついには人間の「生活環境の破壊」とどまらず, 動物や微生物さえも棲息することのできない瀬死の列島へと追い込まれていくようになった。

このような状況は, 千古の歴史と文化の中を流れてきた京の鴨川, 近畿一円の「命の水瓶」である琵琶湖にも広がっていた。

本書は, 私立家政学園高校(京都市)の「理化クラブ」の昭和36年より始まった鴨川や琵琶湖などの水質汚濁の実態調査に取り組んだ活動と, その27年間にわたる水質調査データをもとに編纂したものである。「郷土の環境記録史」の一端であると共に, 私個人のささやかな公害教育の実践の報告になればという思いでまとめたものである。

(まえがきより抜粋)

— 主要目次 —

第1章 水質調査の動機

第2章 美しい川とは

第3章 名水の誕生

第4章 水質汚濁の判定法

第5章 水質測定とその分析結果

第6章 生徒たちが綴った測定日

第7章 円山川と琵琶湖の水質を調べて

第8章 水質環境基準への提言

申込先・環境技術研究協会 TEL06(357)7611・FAX06(357)7612