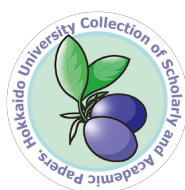




# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                  |                                                                                   |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 大気汚染と森林                                                                           |
| Author(s)        | 松本, 潔; 井川, 学                                                                      |
| Relation         | 大気圏と生物圏の相互利用. 北海道大学低温科学研究所編                                                       |
| Citation         | 低温科学, 68, 61-68                                                                   |
| Issue Date       | 2010-03-31                                                                        |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/45165">https://hdl.handle.net/2115/45165</a> |
| Type             | departmental bulletin paper                                                       |
| File Information | LTS68_011.pdf                                                                     |



# 大気汚染と森林

松本 潔<sup>1)</sup>, 井川 学<sup>2)</sup>

2009 年 12 月 1 日受付, 2010 年 1 月 29 日受理

酸性沈着物の森林への沈着とその樹木への影響に関するこれまでの研究成果を概観し, 続いて著者らが行った丹沢大山における大気化学観測と, この結果をもとにこの地域への酸性沈着物の沈着状況について紹介する. あわせて, 大気圏・生物圏相互作用系の研究における, 酸性沈着物の森林への沈着に関する研究の重要性について考察する.

## Air pollution and forests

Kiyoshi Matsumoto<sup>1</sup>, Manabu Igawa<sup>2</sup>

This paper reviews previous researches concerning acid deposition on forests, and then introduces our recent observations of atmospheric chemical species and their deposition on canopies at forested sites in Mt. Oyama. We also suggest the importance of acid deposition on forests in discussing the atmosphere-biosphere interaction system.

### 1. 森林大気化学と大気圏・生物圏相互作用

大気圏と生物圏との相互作用は, 大気の化学過程に大きな影響を与えている. その中でもとりわけ重要な生態系として, 森林を挙げることができる. 森林は, 現存量においても生産量においても他の生態系を凌駕しており, 地球表層での物質循環において大きな役割を果たしているからである.

大気と森林との間で展開される大気化学的な相互作用には多くの経路があるが, 最も知られているものとしては, 光合成/呼吸・分解による二酸化炭素/酸素のやり取りを挙げることができる. 酸素約 21%, 二酸化炭素約 0.04% という今日の大気組成は, 生物圏の発展の中でつくられてきたものであり, その中で果たしてきた森林の役割は大きい. もちろん長期的な時間スケールで考えれば岩石圏との相互作用も重要になってくるが, 今日の酸素や二酸化炭素濃度の分布や変動は, 森林を中心とした生物圏の代謝によって大きく支配されている.

その一方で, 森林は様々な微量化学物質を大気圏に放

出しており, これらの化学種も大気の化学過程において重要な役割を演じている. その中でも代表的な成分として, 樹木から放出されるイソプレンとテルペン類を挙げることができる. イソプレンやテルペン類は, 大気中で光化学反応を通して対流圏オゾンや二次有機エアロゾルの生成に関わっている. いずれも, 気候変動などの地球規模での大気環境変動において大きな役割を果たしている大気化学種である. その他にも, アンモニアや亜酸化窒素といった窒素化合物など, 土壌を含めた森林における収支が重要な大気化学種は多く, それらの大気化学過程や大気環境への影響を議論する上で, 放出源としての森林の役割に関する知見は不可欠である.

このように, 森林は様々な微量化学成分の放出源として大気化学において重要だが, 一方で大気から様々な成分の沈着も受ける. 森林は粗度が大きいことや濡れの効果などから, 他の地表面に比して沈着速度が大きい. 森林への大気化学種の沈着は, 大気からの化学物質の除去機構として重要であると同時に, 森林にとっても大気由来物質の入力経路として重要である.

森林へ沈着した大気化学種は森林生態系の物質循環に組み込まれるが, 近年沈着量が増加傾向にある大気化学種については, その変動が森林生態系にどのような影響を与えるかが注目されている. 森林は土壌の保持, 水蒸気の蒸発散, 水源の涵養, 或いは生物多様性の維持において大きな役割を果たしており, 大気化学種の過剰な沈着がこれらの森林機能を損ねることによって引き起こさ

1) 山梨大学教育人間科学部

2) 神奈川大学工学部

<sup>1</sup> Faculty of Education and Human Sciences, University of Yamanashi, Kofu, Japan

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Kanagawa University, Yokohama, Japan

れるダメージは、国土保全や水資源確保、生物種保護などの面で大きな問題となる。一方、上述したように森林は大気化学組成や大気圏を介した物質循環に大きな影響を及ぼしていることから、大気化学種の放出源或いは除去源としての森林の機能が変質し、地球表層における物質循環や気候システムに影響が及ぶ可能性も考えられる。大気化学種の森林への沈着とこれに起因する森林生態系の変質は、大気圏・生物圏相互作用という大気化学・地球化学的な視点からも興味深い問題といえる。

## 2. 酸性沈着物が森林に与える影響

森林へ沈着する大気化学種の沈着プロセスと沈着後の森林生態系への影響に関しては、酸性沈着物を対象とした研究が広く行われてきた。これは、先進国において大気汚染による公害問題が大きな社会問題となった頃から酸性沈着物の環境影響が広く問題視されてきたことに加え、1970年代から80年代にかけて欧米諸国で広く確認された森林衰退の原因として酸性沈着物が注目されてきたことによる。

欧米諸国では現在においても、森林衰退とよばれる現象は確認されている。表1には、欧州の広範な地域において10万本以上の樹木を対象に行なった落葉率の調査結果を示す(Lorenz et al., 2008)。この調査から、21.9%の樹木が、衰退のステージとしては“moderate”、“severe”、或いは“dead”に分類される落葉率25%以上の状態にあることが確認されている。更に、47.2%の樹木はステージ“slight”に分類される落葉率10-25%の「要監視状態」にあり、これらをあわせると69.1%の樹木に異変が認められているということになる。我が国においても、都市周辺の山間部を中心に森林衰退が確認されており、これまでも多くの調査結果が報告されてきた。

これら観察されている森林衰退の原因については、これまでも様々な角度からの検討がなされてきた。しかし、この問題が注目された当初指摘された酸性沈着物による影響に関しても、例えば欧州においては、大気汚染の直接的影響を受ける地域では認められるが広範な地域でみられる衰退との因果関係についてはデータによる裏付けがないとの指摘もある(Kandler, 1995)。これまでの研究から、酸性沈着物やオゾンといった大気汚染物質の影響に加え、乾燥や多湿、強風などの気象因子、病虫害や食害、天然更新など様々な可能性が報告されており、これらの複合影響の可能性も高い。原因は地域や年代によって異なることが予想され、それぞれの衰退地域ごとに様々な可能性を考慮した丁寧な原因究明が必要であるといえる。

大気汚染物質の影響については、酸性物質の乾性または湿性沈着による樹木への直接的な影響、これらが引き起こす土壤酸性化や窒素飽和などによる間接的な影響、またオゾンによる影響などが考えられている。例えばチェコ国境地帯での森林衰退の原因としては、30分間値で150 ppbを超えるような高濃度二酸化硫黄の直接的影響が指摘された(Cerny and Paces, 1995)。酸性雨の影響については、成長期1期間中の酸性雨の継続的暴露実験より、針葉樹の多くの樹種においてpH2、広葉樹ではpH3程度で可視障害が現れるとの報告がある(表2)(河野, 2001)。実際に観測される降水がこれほど酸性化されていることはほとんどないが、一方で都市近郊の山間部ではpH3程度の酸性の強い霧が頻発することが報告されており(Igawa et al., 1998)、このような地域では樹木の枯損や生長障害に大きな影響を及ぼしている可能性がある。実際、pH3の霧の長期暴露により樹木の生長に著しい影響が認められることも確認されている(Shigihara et al., 2008)。この他にも、これら酸性沈着

表1：欧州における森林衰退の調査結果 (Lorenz et al., 2008)

|             | Number<br>of trees | Percentage of trees in defoliation class(%) |      |      |     |     | mean of<br>needle/leafloss |
|-------------|--------------------|---------------------------------------------|------|------|-----|-----|----------------------------|
|             |                    | 0                                           | 1    | 2    | 3   | 4   |                            |
| Broadleaves | 45258              | 26.7                                        | 47.4 | 22.4 | 2.6 | 0.9 | 22.5                       |
| Conifers    | 59141              | 34.2                                        | 47.0 | 16.8 | 1.3 | 0.7 | 19.0                       |
| All         | 104399             | 31.0                                        | 47.2 | 19.2 | 1.9 | 0.8 | 20.5                       |

Defoliation class 0: needle/leaf loss=up to 10%, degree of defoliation: none  
 1: needle/leaf loss=>10-25%, degree of defoliation: slight  
 2: needle/leaf loss=>25-60%, degree of defoliation: moderate  
 3: needle/leaf loss=>60-<100%, degree of defoliation: severe  
 4: needle/leaf loss=100%, degree of defoliation: dead

表2：酸性雨暴露に対する葉の可視障害出現確率(%) (河野, 2001)

|                              | n  | Rain pH |     |     |      |     |
|------------------------------|----|---------|-----|-----|------|-----|
|                              |    | 5.6     | 4.0 | 3.0 | 2.5  | 2.0 |
| Coniferous trees             | 12 | 0       | 0   | 0   | 12.5 | 91  |
| Evergreen broad-leaved trees | 14 | 0       | 0   | 50  |      | 100 |
| Deciduous broad-leaved trees | 22 | 0       | 0   | 68  | 100  | 100 |

物が樹木に及ぼす影響の一つとして、土壌の酸性化により溶出する Al イオンの影響や、Ca や Mg の溶脱による欠乏も考えられている。

一方、オゾンの影響についても多くの研究者によって検証されており、比較的高濃度のオゾンの暴露による可視障害の他、光合成速度の低下、根の生長阻害などが報告されている(伊豆田他, 2001)。樹木に対するオゾン暴露の影響を評価する指標として、40 ppb を超えるオゾン濃度の積算ドースが注目されており、AOT40 とよばれる(伊豆田・松村, 1997)。16 種の樹木を用いたオゾンの暴露実験では、4～9 月の日中のオゾン濃度から求めた AOT40 が 20～40 ppm・h に達すると多くの樹種で乾物生長量が 90% 以下になることや、針葉樹よりも広葉樹において影響が顕著であることなどが確認されている(図 1)(伊豆田・松村, 1997)。オゾンが生長抑制に影響を及ぼすことは、屋外での苗木を用いた研究からも報告されている(武田・相原, 2007)。

オゾンと酸性沈着物の複合影響についても調査が行われている。スギやヒノキを対象とした暴露実験では、酸性の強い雨にさらされた樹木において高濃度オゾンの暴露の影響が強く表れ、地上部に対する根の乾燥重量の減少が認められた(河野・松村, 1999)。これは硝酸沈着量の増加と高濃度オゾンが光合成産物の植物体内における分配のアンバランスを引き起こしたものと考えられている(河野, 2001)。

### 3. 酸性沈着物の森林への沈着量の測定

このように樹木の生長や生理活性に様々な影響を及ぼすことが確認されている酸性沈着物だが、その森林への沈着量を求めることは難しい。大気からの沈着は、降水として沈着する湿性沈着と、ガスやエアロゾルとして沈着する乾性沈着とに分けることができるが、湿性沈着量が降水試料の観測から比較的容易に得られるのに比べ、乾性沈着量の実測は技術的に難しいためである。

乾性沈着に関する直接的な測定方法としては、渦相関

法や濃度勾配法、林内雨・樹幹流測定法、代理表面法など、幾つかの方法がこれまでに報告されている。それぞれに長所と短所があるが、観測対象とする地域や物質、目的に応じた適切な方法を選択することにより、有効な手法となる。また、気象データ等から推定される沈着速度と大気中濃度から対象成分の乾性沈着量を推定するインフュレンシャル法も、適切な沈着速度が得られれば有効な方法であり、広く用いられている。

森林は、大きな表面粗度や濡れの効果などにより沈着速度が大きいと考えられるが、その表面形状の複雑さや表面の濡れの影響、気孔からの取り込みの評価など、沈着に関わる素過程が複雑であり定量的な評価が難しい。それでもこれまで、様々な方法で森林への乾性沈着量、特に酸性沈着物の沈着量に関する評価が行われてきた。乾性沈着量は、対象成分の大気中濃度は勿論、気象因子、地形、樹冠構造などの樹木学的特徴、樹冠の濡れの程度、さらには用いる測定方法或いは推定方法によって大きく左右されるため、報告値には大きなばらつきがある。しかしこれまでに報告された日本国内の森林を対象に求めた乾性沈着量を概観すると、湿性沈着量に比して有意な、特に降水量が少ない期間においては湿性沈着を大きく上回る乾性沈着量が認められる(例えば、高橋他, 2002)。次章では、筆者らが観測を行なった丹沢大山における森林への酸性沈着物の沈着に関する観測研究の結果を紹介する。

### 4. 丹沢大山における観測

標高 1252 m の丹沢大山は、横浜から西へおよそ 40 km、神奈川県西部に広がる丹沢山塊の東南縁に位置し、その東～南側山腹は関東平野に面することになる。このため、関東平野からの気塊の移流の影響を強く受ける。相模湾から約 10 km の位置にあるため海風を受け降水量が多く、また霧の発生頻度も高い。その山頂は、平均で年間の 46% が霧で覆われている(井川・大河内, 2009)。図 2 に丹沢大山の位置を示す。

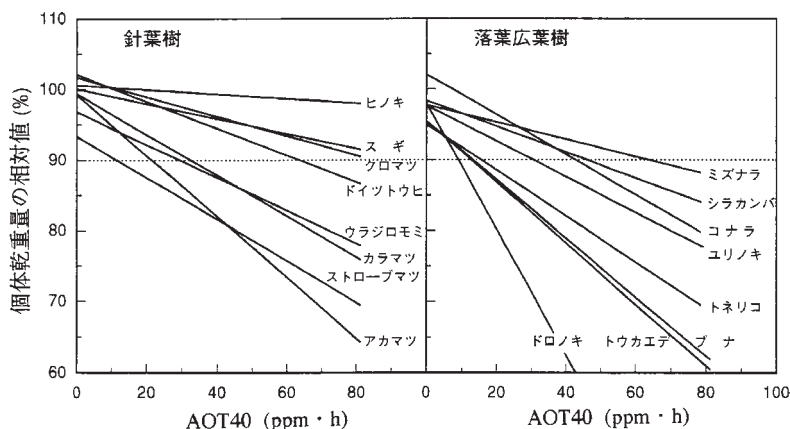


図 1：16 樹種の乾物成長とオゾンの AOT40 との関係(伊豆田・松村, 1997)

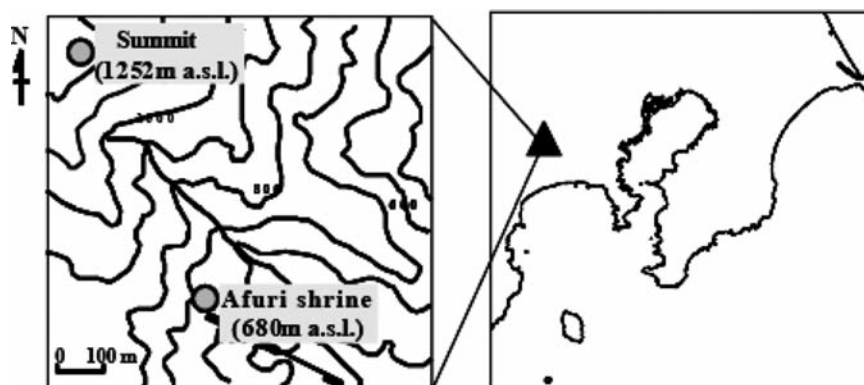


図2：丹沢大山の位置

丹沢山塊では1960年代からモミやブナの衰退が確認されており、70年代以降拡大してきた（神奈川県, 1994）。当初は大山周辺におけるモミの衰退が顕著であったが、80年代以降は丹沢山塊の広範囲においてブナの衰退も確認されている。その原因については、初期の大山周辺での衰退は当時高濃度で存在していた二酸化硫黄などの大気汚染物質の影響によるものが大きいと報告されている（鈴木, 1992）。しかし近年も進行する衰退の原因については、頻発する酸性霧の影響、高濃度で観測されるオゾンの影響、他にも病虫害や食害、水分ストレスなどが提案されてきた（相原他, 2004）。

著者らはこれまでに、大山中腹に位置する阿夫利神社下社（標高 680 m）をはじめとして大山南東斜面の標高 400 m 地点から山頂までの複数点において、霧、降水、エアロゾル及びその前駆ガスなどに関する大気観測を継続的に行なってきた。その結果について、森林への酸性沈着物の沈着という視点から以下に紹介したい。

大山南東斜面の観測点では、霧水、林外雨、林内雨、樹幹流、エアロゾル、酸性ガス（塩化水素（HCl）、亜硝酸（HNO<sub>2</sub>）、硝酸（HNO<sub>3</sub>）、二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>））及びアンモニア（NH<sub>3</sub>）ガスなど、様々な大気化学成分について観測を行なってきた。観測点の周辺には酸性沈着物に直接影響を及ぼす大規模な発生源はないが、上述したように関東平野からの気塊の移流の影響を強く受けるため、これまでの著者らの報告からも二次大気汚染物質の影響が認められる（Takeuchi et al., 2004; Matsumoto et al., 2005）。図3には、標高 680 m 地点において2006年12月～2007年11月の期間に1週間ごとに採取されたエアロゾル中主要イオン成分及び炭素成分濃度の季節ごとの平均値を示す。比較のため横浜市神奈川区に位置する神奈川大学横浜キャンパスで同様に採取されたエアロゾルの分析結果も示す。神奈川大学横浜キャンパスは京浜工業地帯からおよそ3 km、市中心部に位置する横浜駅からおおよそ2 kmの位置にあり、周囲を住宅地に囲まれている。エアロゾル中の元素状炭素（EC）は、横浜での濃度と比べ大山はその1/3～1/4程度であり、自動車などの排出源の影響を強く受ける横浜に比して、大山

では濃度が低い傾向が認められる。一方、有機炭素（OC）濃度では、ECに比して横浜と大山との濃度差が小さくなっている。特にOCの中でも水溶性の画分を測定した水溶性有機炭素（WSOC）濃度は、年間を通して横浜と大山との濃度差がほとんどない。ECが自動車排ガスなどの一次起源の影響を強く受けるのに比べ、OCは光化学反応などの二次起源の影響が大きい。特にWSOCは、OCの光化学的変質により生成された多官能性で極性の高い親水性成分を多く含む（Saxena and Hildemann, 1996）。一方エアロゾル中の主要イオン成分をみると、Na<sup>+</sup>などの海塩成分では海に近い横浜でやや濃度が高いが、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>やNO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>といった二次生成成分では、やはり横浜と大山の間に濃度差がほとんどない。これらエアロゾル成分の2地点における分析結果の比較から、大山が二次大気汚染物質の影響を強く受けている地域であることがわかる。

図4には、標高 680 m 地点で採取された林外雨及び林内雨中の主要イオン成分について1992年から2003年までの年間沈着量の経年変化を示す（井川・大河内, 2009）。林内雨は、降水が樹冠を洗浄後樹冠下へ落下したものである。勿論樹冠への降水の一部は樹幹流などの経路により失われ全てが林内雨として回収されるわけではないが、林内雨としての沈着量は樹冠への大気成分の沈着量を評価する上で有用である。図4より林外雨としての沈着量に比して林内雨沈着量が大きいことがわかる。これは、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>などについてはエアロゾルやガスとしての乾性沈着の影響と、後述するように霧の沈着の影響が考えられる。一方K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>については酸性沈着物によって引き起こされた樹木からの溶脱に起因すると考えられる。

図4より、林外雨中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>及びNH<sub>4</sub><sup>+</sup>の年間沈着量は、それぞれおよそ23～68 meq/m<sup>2</sup>、21～84 meq/m<sup>2</sup>の範囲にある。一方、林内雨の年間沈着量は、それぞれおよそ94～188 meq/m<sup>2</sup>、38～89 meq/m<sup>2</sup>の範囲にあり、林外雨に比して大きい。特にNO<sub>3</sub><sup>-</sup>に関しては4倍近く林内雨としての沈着量が大きく、樹冠は降雨以外の経路から多くの大気成分の沈着を受けていることを

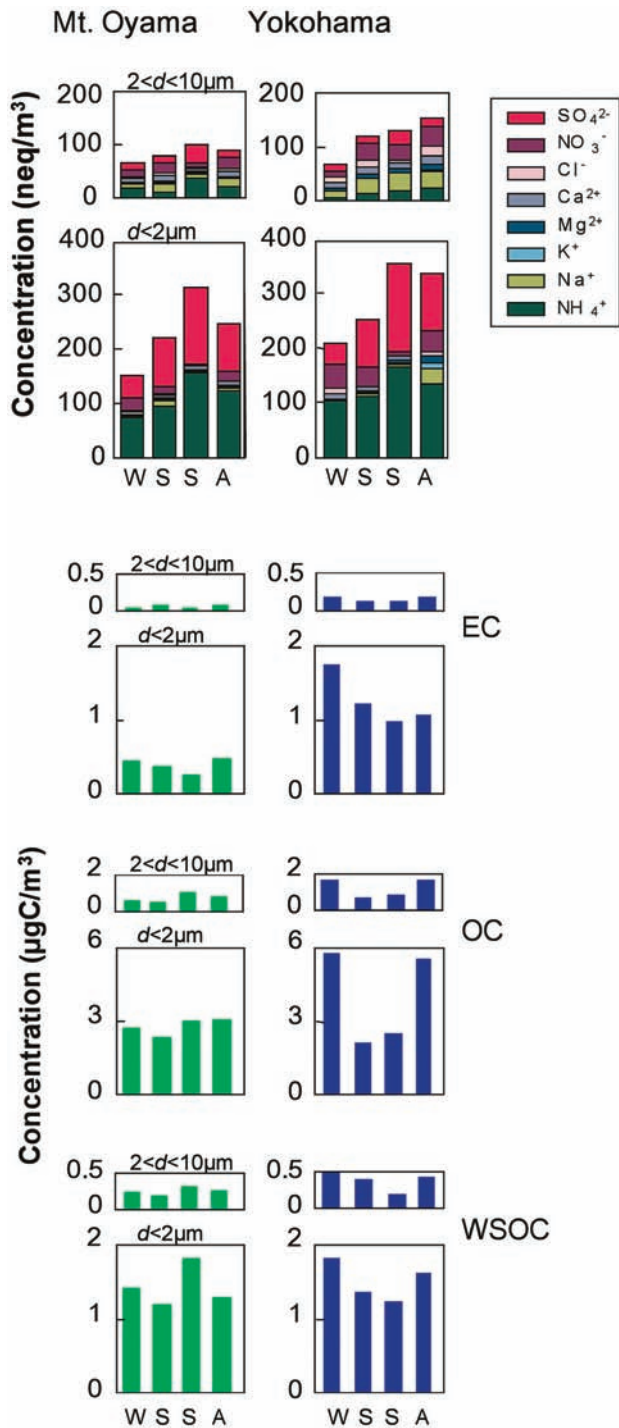


図3：大山中腹（標高 680 m 地点）及び横浜（神奈川大学横浜キャンパス）におけるエアロゾル中主要イオン成分及び炭素成分濃度（W, S, S, A は冬季, 春季, 夏季, 秋季を示し, それぞれ 2006 年 12 月～2007 年 2 月, 2007 年 3～5 月, 2007 年 6～8 月, 2007 年 9～11 月の平均濃度）

意味している。

図5には、標高の異なる4地点において採取された林外雨及び林内雨試料について、1997～1998年の年間降水量とイオン成分沈着量を示す(Igawa et al., 2002)。この図から、林外雨としての降水量、イオン成分沈着量は標高によらずほぼ一定であるのに対して、林内雨では降水量、イオン成分沈着量ともに標高が高くなるに従い増加している。標高の高い地点において林内雨の降水量が

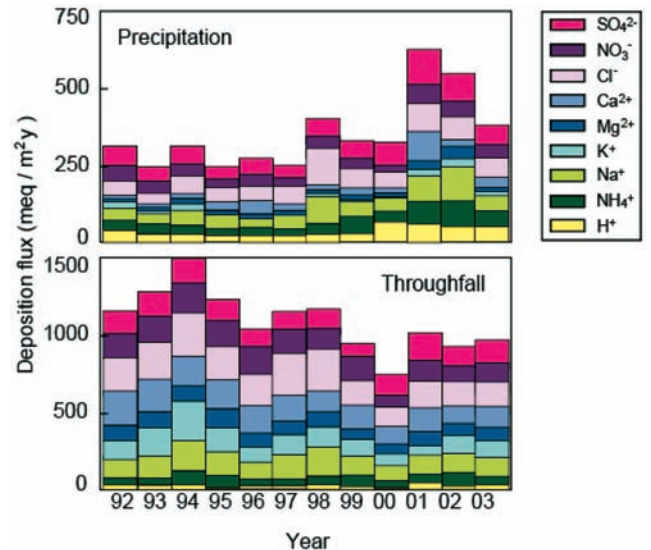


図4：大山中腹（標高 680 m 地点）における林外雨及び林内雨中の主要イオン成分年間沈着量の経年変化（井川・大河内（2009）を修正）

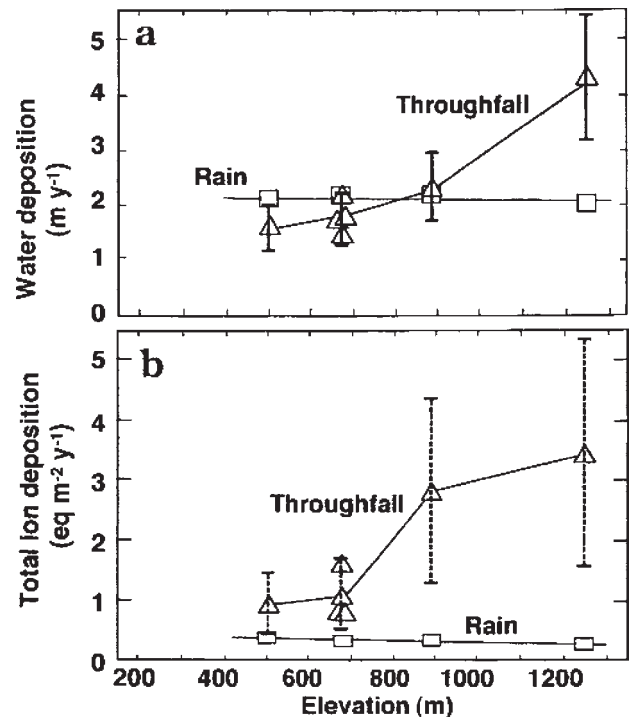


図5：林外雨及び林内雨の年間降水量(a)とイオン成分沈着量(b)の標高依存性 (Igawa et al., 2002)

林外雨のそれを大きく上回る理由として、霧水の沈着が考えられる。上述したように、大山には霧が高い頻度で発生する。図6には図5と同じ期間の大山における標高別霧発生頻度(Igawa et al., 2002)を示すが、標高が高い地点で霧の発生頻度も高くなる。霧粒の樹冠への沈着は風速に大きく支配されるが、標高が高い地点では風速も高く、このことも霧水の沈着を促すことにつながる。著者らの観測から、大山で発生する霧は酸性度が高く、イオン成分を高濃度で含んでいることが確認されている(Igawa et al., 1998)。一例として、2003～2004年に680

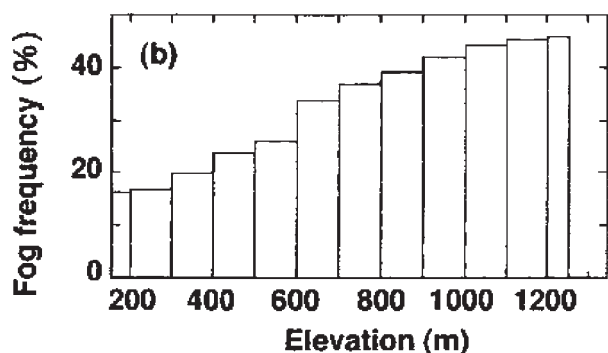


図6：霧発生頻度の標高依存性 (Igawa et al., 2002)

m 地点で発生した霧水の pH ごとの霧発生頻度、霧水量と化学組成を図7に示す (井川・大河内, 2009)．pH4.0 以下の霧が 50% 近くの頻度で発生していることがわかる．また、pH が低下するに従い  $\text{NO}_3^-$  や  $\text{NH}_4^+$  などのイオン成分濃度が増加する一方、霧水量は減少している．

このようなイオン成分を高濃度に含む霧水の樹冠への沈着が、標高の高い地点におけるイオン成分沈着量の増加となってあらわれたと考えられる．また、年間平均で 30～40%、或いはそれ以上の長時間にわたって霧が発生する標高の高い地点では、樹冠の濡れている時間も長く、これが水に溶け易い酸性・アンモニアガス、或いはエアロゾル成分の樹冠への乾性沈着速度を高めたことも考えられる．このように高頻度で発生する霧が、高い標高において特に森林への酸性沈着物の沈着量を増大させたことが考えられる．

森林生態系へ沈着した  $\text{NO}_3^-$  や  $\text{NH}_4^+$  は栄養分として利用可能な窒素分として生態系の物質循環に組み込まれる．元来生態系は窒素が欠乏した状態にあることが多く、これら窒素分の負荷は生態系における生産の活発化

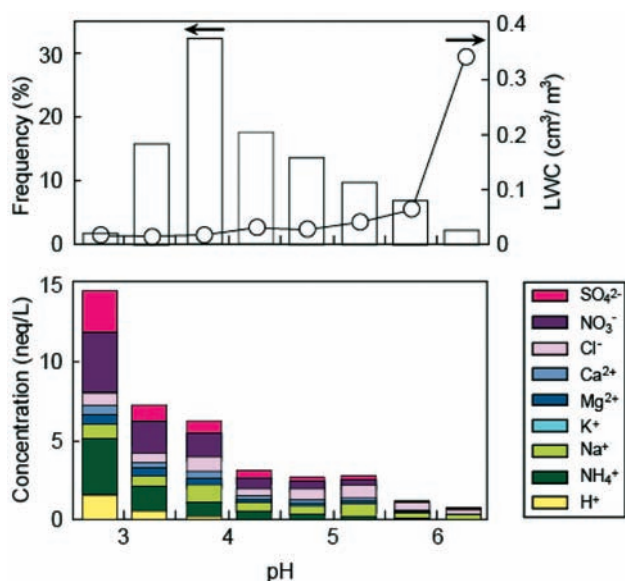


図7：大山中腹（標高 680 m 地点）における霧水の pH ごとの霧発生頻度、霧水量(上)と化学組成(下) (井川・大河内 (2009) を修正)

につながる．しかしその過剰な負荷は、生態系における物質循環に擾乱を引き起こす．例えば、植物体内における栄養分のバランスを崩し、光合成産物の分配に影響を及ぼし、植物の生長をかえって低下させる等の影響が指摘されている．更には過剰な窒素分が土壌の酸性化や渓流水の水質汚濁を促すなど、様々な問題を引き起こすと考えられている．これら一連の問題を窒素飽和とよぶことが多いが、図4に示した林内雨の測定結果から、この地域の年間窒素沈着量は 19～39 kgN/ha に相当する．この値は、欧州での観測から窒素飽和の閾値と考えられることの多い 10 kgN/ha (Wright et al., 1995) を超えている．注目すべきは標高のより高い地点ではその数倍の沈着が予想されることであり、この地域の窒素飽和が進んでいることが懸念される．

上述したように、丹沢山塊ではモミやブナの衰退が確認されている．著者らは大山で発生する頻度、pH、化学組成を再現した霧を1年以上の長期に渡りモミやブナの苗木に暴露することにより、それらの生長が抑制されることを確認してきた．例えば、ブナ苗木への長期暴露実験では、pH3の酸性霧の暴露により葉密度の低下、葉の変形、秋季の落葉の早期化、苗木質量の低下、根部デンプン含有量の低下など、様々な指標において生長の抑制が確認された (Shigihara et al., 2008a)．暴露実験では他にも、葉表面のワックスの流亡や細胞壁の糖鎖構造の変質 (Shigihara et al., 2008b)、膜結合カルシウムイオンの流亡 (Shigihara et al., 2009a) などが確認され、植物生理学的な視点からも酸性霧の暴露による枯損や生長抑制への影響が示された．更に、高濃度オゾン暴露によりこれら酸性霧の被害が拡大する複合影響も、根部デンプン含有量などの生長の指標において確認された (Shigihara et al., 2009b)．これらの結果はいずれも、高頻度で発生する酸性霧が丹沢山塊の森林衰退に大きく関わっていることを示している．表3には著者らが行った暴露実験結果の一例を示す (Shigihara et al., 2009b)．これは3年生ブナ苗木を対象に、上述した霧の暴露に加え、大山で出現する高濃度イベントを模したオゾンの暴露を断続的におよそ1年間行ない、その苗木各部位におけるデンプン含量及び葉数への影響を調査した結果である．暴露したオゾンの濃度は 60 ppb、期間中の AOT40 は 16.6 ppm・h であった．暴露実験の詳細は Shigihara et al. (2009b) を参照されたい．表3に示す結果より、酸性霧の暴露により根、葉、冬芽のいずれの部位においてもデンプン含量の減少が確認できるが、特に根及び葉の部位において有意な減少を示した．一方、オゾン暴露によっても減少が認められ、特に根部においては酸性霧の影響を増幅する効果が有意に確認された．

このような生長への影響は、森林生態系の機能にダメージを与えるだけでなく、そこで展開される物質循環や水循環にも影響を及ぼすと考えられる．関東地域は日

表3：酸性霧及びオゾンの暴露によるブナ苗木各部位のデンプン含量及び葉数への影響 (Shigihara et al., 2009b)

| Treatment                       | Amount of starch (mg g <sup>-1</sup> DW) |          |             | Number of leaves |
|---------------------------------|------------------------------------------|----------|-------------|------------------|
|                                 | Roots                                    | Leaves   | Winter buds |                  |
| AF <sub>3</sub>                 | 75.2±5.8                                 | 9.94±0.7 | 6.08±0.7    | 299±28           |
| AF <sub>5</sub>                 | 101±11                                   | 14.1±0.9 | 7.02±0.7    | 402±39           |
| AF <sub>3</sub> -O <sub>3</sub> | 53.3±4.3                                 | 7.58±0.3 | 5.99±0.3    | 205±24           |
| AF <sub>5</sub> -O <sub>3</sub> | 88.4±10                                  | 12.1±0.3 | 6.71±0.6    | 321±32           |

AF<sub>3</sub> ; Exposure to simulated acid fog at pH 3AF<sub>5</sub> ; Exposure to simulated acid fog at pH 5 (control)AF<sub>3</sub>-O<sub>3</sub> ; Exposure to simulated acid fog at pH 3 with ozoneAF<sub>5</sub>-O<sub>3</sub> ; Exposure to simulated acid fog at pH 5 with ozone

本国内の他地域と比較して酸性沈着物の沈着量が多く(環境庁, 1999), また本研究より霧が多発する山間部では更に沈着が上積みされることが示された。酸性沈着物が都市近郊の山間部の樹木や森林生態系にどのような影響をもたらしているか, 様々な視点から検討し, より一層の理解を深める必要があるといえる。

## 5. 大気汚染物質の森林への沈着 —— 大気圏・生物圏相互作用系の研究の中で

近年, 地球表層での物質循環や気候などを, 大気圏と水圏, 生物圏との間の有機的な相互作用の中で捉える「地球システム」とも呼称される概念が, 地球科学の様々な分野で注目されている。大気化学の分野でこのような議論を遡ると, Charlson et al. (1987) で提唱されたCLAW 仮説に辿り着く。海洋プランクトンが生産する硫化ジメチル (DMS) が硫酸 (または硫酸塩) エアロゾルとなり雲をつくり, 雲のアルベド, そして気候を変えるという, 生物圏による気候調整を説いたものである。後の大気化学や気象学の発展に与えた影響は大きく, 雲粒核の起源や硫黄循環などの研究が発展する大きな契機となった。

しかし, このような相互作用系の中で地球環境の成立と維持に関わっている大気化学種はDMS だけではない。生物圏が大気圏に放出する様々な化学物質が複雑な相互作用系の中で今日の地球環境の成立と維持に深く関わっているといえる。この種の相互作用系の中で森林生態系が果たす役割は大きいと予想される。例えば樹木から放出されるテルペン類は, 大気中での光化学反応を経て雲核活性能を有した有機エアロゾルを産生し, 雲形成過程に関わることが考えられる (Tunved et al., 2006)。森林が大気との化学的な相互作用を通してどのように地球環境に関わっているのかは, 大気化学分野における大きな研究課題の一つといえる。

酸性沈着物の森林への沈着とその森林生態系への影響については, 森林衰退や森林生態系へのダメージという視点から, 特に環境科学や森林科学といった分野において精力的に研究が進められ, 本稿でも紹介したようにこれまでに様々な成果が報告されてきた。しかし大気圏・

生物圏相互作用という視点からこの問題を扱った例はほとんどなく, 酸性沈着物の沈着による森林生態系の変質が, 大気圏との相互作用を通して地球表層環境の物質循環にどのような影響を与えるかについての議論は乏しい。酸性沈着物により地球規模で森林の生長が抑えられるようなことが起これば当然炭素循環などの物質循環に影響を及ぼすことになるが, そこまで大きな影響でなくとも, 例えば地域スケールでのテルペン類などの放出特性などに変化が現れ, 対流圏オゾンや二次有機エアロゾルの生成に影響が及ぶことは十分予想される。オゾンや酸性沈着物の影響により樹木からのエチレン放出が増加することなどは古くから報告されている (Mehlhorn and Wellburn, 1987)。また土壌生態系への影響を通して放出特性に変化が現れる成分も考えられる。

窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) やアンモニアなどの窒素化合物の大気圏への放出は今後益々増大することが予想されており, それが気候や窒素循環に与える影響についても様々な視点から議論されている (例えば, Galloway and Cowling, 2002)。しかし, 酸性沈着物として森林へ沈着後, 森林生態系の変質を通して大気圏, そして地球表層環境の物質循環にどのような影響を与えるかについての考察は十分ではない。地球表層環境の物質循環における森林生態系の寄与の大きさを考えれば, このような視点からの研究の進展が必要である。このことは, 酸性沈着物がどれだけ森林へ沈着するか, その沈着量の測定精度を高める必要性も意味している。更にその森林生態系への影響を, 短期的には樹木の生長や代謝への影響, 長期的には森林の更新や生態系の遷移への影響など様々な時間スケールで評価すること, またその結果引き起こされる物質循環への影響を地域スケールから全球スケールまで様々な空間スケールで評価することが, 大気圏・生物圏相互作用系の研究の発展と, 「地球システム」の理解には不可欠である。

## 謝辞

本稿執筆の機会を与えて頂いた, 北海道大学低温科学研究所・河村公隆教授に感謝いたします。

## 参考文献

- 相原敬次, 阿相敏明, 武田麻由子, 越路正(2004)「森林衰退の現状と取り組み (II) 神奈川県丹沢山地における樹木衰退現象」, 大気環境学会誌, **39**, A29-A39.
- Cerny, J. and Paces, T. (1995) *Acidification in the Black Triangle Region*, Prague.
- Charlson, R. J., Lovelock, J. E., Andreae, M. O. and Warren, S. G. (1987) Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate, *Nature*, **326**, 655-661.
- Galloway, J. N., and Cowling, E. B. (2002) Reactive Nitrogen and the World: 200 years of change, *Ambio*, **31**, 64-71.
- Igawa, M., Matsumura, K. and Okochi, H. (2002) High frequency and large deposition of acid fog on high elevation forest, *Environmental Science and Technology*, **36**, 1-6.
- 井川学, 大河内博(2009)「丹沢大山における大気化学観測と酸性沈着が森林生態系に及ぼす影響」, エアロゾル研究, **24**, 97-104.
- Igawa, M., Tsutsumi, Y., Mori, T. and Okochi, H. (1998) Fogwater chemistry at a mountainside forest and the estimation of the air pollutant deposition via fog droplets based on the atmospheric quality at the mountain base, *Environmental Science and Technology*, **32**, 1566-1572.
- 伊豆田猛, 松村秀幸(1997)「植物保護のための対流圏オゾンのクリティカルレベル」, 大気環境学会誌, **32**, A73-A81.
- 伊豆田猛, 松村秀幸, 河野吉久, 清水英幸(2001)「樹木に対するオゾンの影響に関する実験的研究」, 大気環境学会誌, **36**, 60-77.
- 神奈川県 (1994) 酸性雨に係る調査研究報告書, 神奈川県環境部大気保全課
- Kandler, O. and Innes, J. L. (1995) Air pollution and forest decline in Central Europe, *Environmental Pollution*, **90**, 171-180.
- 環境庁 (1999) 酸性雨対策第三次調査データ集
- 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, 松村秀幸(1999)「スギ, ヒノキ, サワラの生育に及ぼすオゾンと人工酸性雨の複合影響」, 大気環境学会誌, **34**, 74-85.
- Lorenz, M., Fischer, R., Becher, G., Granke, O., Seidling, W., Ferretti, M., Schaub, M., Calatayud, V., Bacaro, G., Gerosa, G., Rocchini, D., and Sanz, M. (2008) *Forest Condition in Europe 2008, Technical Report of ICP Forests*, Johann Heinrich von Thünen-Institute, Hamburg, Germany.
- Matsumoto, K., Kawai, S. and Igawa, M. Dominant factors controlling concentrations of aldehydes in rain, fog, dew water, and in the gas phase, *Atmospheric Environment*, **39**, 7321-7329.
- Mehlhorn, H. and Wellburn, A. R. (1987) Stress ethylene formation determines plant sensitivity to ozone, *Nature*, **327**, 417-418.
- Saxena, P. and Hildemann, L. M. (1996) Water-soluble organics in atmospheric particles: A critical review of the literature and application of thermodynamics to identify candidate compounds, *Journal of Atmospheric Chemistry*, **24**, 57-109.
- Shigihara, A., Matsumoto, K., Sakurai, N., and Igawa, M. (2008a) Growth and physiological responses of beech seedlings to long-term exposure of acid fog, *Science of the Total Environment*, **391**, 124-131.
- Shigihara, A., Matsumoto, K., Sakurai, N. and Igawa, M. (2008b) Leaching of cell wall components caused by acid deposition on fir needles and trees, *Science of the Total Environment*, **398**, 185-195.
- Shigihara, A., Matsumura, Y., Matsumoto, K. and Igawa, M. (2009a) Effect of simulated acid fog on membrane-bound calcium (mCa) in fir (*Abies firma*) and cedar (*Cryptomeria japonica*) mesophyll cells, *Journal of Forest Research*, **14**, 188-192.
- Shigihara, A., Matsumura, Y., Kashiwagi, M., Matsumoto, K. and Igawa, M. (2009b) Effects of acidic fog and ozone on the growth and physiological functions of *Fagus crenata* saplings, *Journal of Forest Research*, **14**, 394-399.
- 鈴木清(1992)「神奈川県大山のモミ林枯損経緯とその周辺地域の年輪幅の変化」, 神奈川県林業試験場研究報告, **19**, 23-42.
- 高橋章, 佐藤一男, 若松孝志, 吉川邦夫(2002)「スギ林における酸の乾性沈着量の時間的変動 — インフュレンシャル法による沈着量の年変化と季節変化の評価 —」, 大気環境学会誌, **37**, 206-215.
- 武田麻由子, 相原敬次(2007)「丹沢山地の大気中オゾンがブナ (*Fagus crenata*) 苗に及ぼす影響」, 大気環境学会誌, **42**, 107-117.
- Takeuchi, M., Okochi, H. and Igawa, M. (2004) Characteristics of water-soluble components of atmospheric aerosols in Yokohama and Mt. Oyama, Japan from 1990 to 2001, *Atmospheric Environment*, **38**, 4701-4708.
- Tunved, P., Hansson, H.-C., Kerminen, V.-M., Ström, J., Dal Maso, M., Lihavainen, H., Viisanen, Y., Aalto, P. P., Komppula, M. and Kulmala, M. (2006) High Natural Aerosol Loading over Boreal Forests, *Science*, **312**, 261-263.
- Wright, R. F., Roelofs, J. G. M., Bredemeier, M., Blanck, K., Boxman, A. W., Emmett, B. A., Gundersen, P., Hultberg, H., Kjönaas, O. J., Moldan, F., Tietema, A., van Breemen, N., and van Dijk, H. F. G. (1995) NITREX: response of coniferous forest ecosystems to experimentally-changed deposition of nitrogen, *Forest Ecology and Management*, **71**, 163-169.