

図 3-2-3-1 酸性雨の土壌への影響予察図（環境庁水質保全局・日本土壌肥料学会，1983）

上記、強・中・弱の3段階は、1994年（平成6年）に本予察図を基に再分類した、酸性沈着に対する耐性を示したもの。

## (2) 沈着量の分布

酸性沈着の生態系への影響は、酸に対する感受性が高く、かつ沈着量の多い地域で今後顕在化するものと考えられる。土壌化学性変化には、長い時間がかかることから、高度成長期等の過去における沈着量や積算量等についても、検討する必要がある。過去の沈着量の分布に関するデータは十分でないが、大都市や工業地帯の周辺地域については留意すべきであると考えられる。

全国の湿性  $H^+$  沈着量の分布を図 3-2-3-2 に示した。これは、3.3 節で詳述する広域的な集水域酸性化の可能性について検討するために、環境省による酸性雨調査（平成 10～16 年度）と全国環境研協議会による全国調査（平成 11～16 年度）における全 120 地点のデータを解析したものである。本来的には、

乾性沈着も考慮した総沈着量での議論が必要であるが、現時点では全国的な分布については、湿性沈着の方が充実しているため、ここでは暫定的に湿性沈着量の分布で議論する。ここに示した分布は比較的近年の結果を示しているが、伊自良湖及び静岡の 2 地点を含む中部地方、本州中部日本海側沿岸、四国や九州南部、屋久島などで、湿性の  $H^+$  沈着量が多い。3.3 節で詳述するように、これらの地点の沈着特性は若干異なっており、四国や九州南部、屋久島等の地点においては、比較的濃度は低いものの、降水量が著しく多いため、結果として沈着量が多くなっている。一方、伊自良湖や中部日本海側沿岸地域の地点では、濃度、降水量とも比較的高いため、沈着量が多い。沈着量を論ずる場合に、これらの特性についても考慮すべきであると考えられる。

## (3) 今後着目すべき地域

上述したように、感受性の高い生態系としては、ケイ酸質に富む花崗岩等酸性岩が多く分布する地域で、未熟土、赤黄色土、乾性褐色森林土等に覆われた森林地域が考えられ、新潟県北部、中部地方、紀伊半島、中国地方南部から九州までの西南日本に広く分布していた。湿性沈着量を考慮すると、伊自良湖周辺の中中部地方南部、新潟県を含む中部日本海側沿岸、鹿児島南部、及び屋久島等が、感受性が高く、湿性沈着量が多い地域として抽出

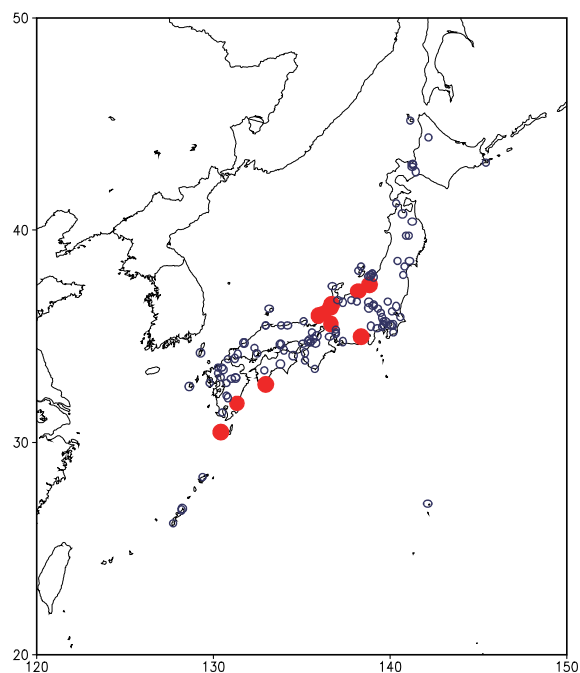


図 3-2-3-2 全国 120 地点における湿性  $H^+$  沈着量の分布 注) 地図中の丸は、環境省及び全国環境研協議会における調査地点を示し、赤丸は上位 10% の地点を示す。

される。3.3 節で詳述するように、岐阜県や新潟県北部では河川 pH の長期的酸性化傾向がみられており、特に新潟県北部では地質との関連性も明確であった。これらの地域では、土壌や河川を含む集水域酸性化に留意する必要がある、過去にデータが取得された地点の再調査も含め、今後土壌の長期的酸性化の可能性について検討が必要である。なお、屋久島においては、土壌層が比較的薄く、地形的特質から表面流出が多いと考えられるため、十分に中和されない水が多量に溪流・河川に流れ込む可能性もあり、土壌よりも溪流・河川及び水生生物により着目すべきと考えられた。

一方で、九州北部から瀬戸内地方では、現時点では湿性沈着量の多い地点として抽出されてはいないが、日本有数の工業地帯であることから、過去の沈着量は相当多かったと見積もられるので、これらの地域についても着目すべきであると考えられる。

また、上記の議論は、主に、土壌や河川を含む集水域酸性化について考慮した場合であったが、土壌を介さない樹木への直接影響を考慮した地域の抽出も重要である。近年のオゾン濃度の漸増傾向や光化学オキシダント注意報発令地域の広域化を考慮すると、オゾン暴露による植物影響について、今後検討する必要がある。各地のオゾン自動測定データを用いた AOT40（コラム参照）の算出や、パッシブサンプラーを活用した森林地域の濃度測定等を通じて、オゾン濃度が樹木に影響する閾値を越えて高濃度となるような地域を特定し、その上で、可視障害観察等オゾン影響に特化した生態系モニタリングの取組を検討する必要があると考えられる。

## オゾンの生態系影響とその評価基準について

オゾンには強い酸化作用があり、樹木の生長や光合成などの生理機能に悪影響を及ぼす。欧米の森林衰退や樹木枯損の原因のひとつとして、酸性沈着や過剰な窒素沈着とともにオゾンが挙げられているが、日本においても、オゾン濃度の上昇傾向や、樹木に悪影響を発生させる可能性がある濃度レベルのオゾンが森林地帯で観測されていることなどから、オゾンは森林衰退や樹木の枯損の原因物質となりうるということが指摘されている。例えば、ダケカンバ、シラビソ、オオシラビソなどの衰退が観察されている奥日光やブナが衰退している神奈川県丹沢山地の檜洞丸では、100 ppb 以上の比較的高濃度のオゾンが観測されている。

農作物や樹木に対するオゾンの影響評価においては、欧州を中心にドース<sup>8</sup>の考えを取り入れたクリティカルレベルの概念が導入されている。クリティカルレベルとは、「現時点での知見に基づいて、生態系や材料などの受容体に対して直接的に悪影響を及ぼす可能性のある大気中の汚染物質の濃度」と定義されており、欧州では、40 ppb を超えるオゾン濃度を対象に 40ppb 以下の部分を除外して、

一定期間の積分値として求める AOT40 が採用されている (図)<sup>4)</sup>。ブナに対するオゾン暴露実験の結果を基に、その成長が 10% 低下する 6 ヶ月間の AOT40 である 10 ppm・h がオゾンのクリティカルレベルとして提案されている。一方、米国・カナダにおいては、1 時間値が 60 ppb を超える濃度の積分値である SUM60 (sum of hourly average ozone concentrations > or

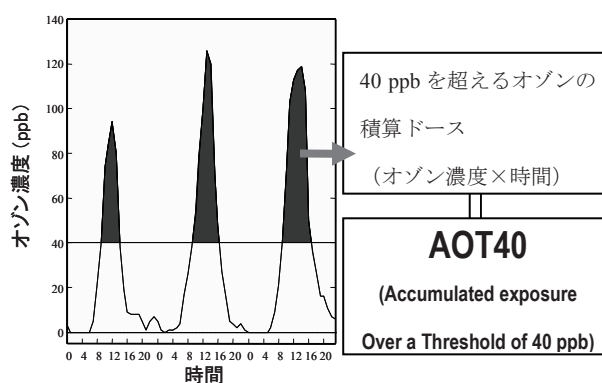


図 AOT40 の算出方法

=60 ppb) を指標としてオゾンの植物影響を評価している。

AOT40 及び SUM60 は、いずれも、オゾン濃度と曝露時間から算出したドースであるが、オゾンは気孔から葉内に吸収され、害作用を発生するため、近年、欧州では気孔を介したオゾンの葉内への取り込みを考慮した沈着フラックスをベースにしたクリティカルレベルが検討されている。例えば、葉からのオゾン吸収速度の閾値を  $1.6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  とした一成長期のフラックス積算値である  $2 - 6 \text{ mmol m}^{-2}$  が、オゾン感受性が比較的高い樹木のクリティカルレベルとして提案されている<sup>5)</sup>。現在、オゾンの植物影響に関する研究は、沈着フラックスによる評価が中心となってきており、森林地域における沈着フラックスの直接測定や沈着過程のモデル化によるフラックス推定の精緻化と樹木の応答に関する研究が進められ、より現実的なオゾンのクリティカルレベルの設定が議論されている。

(「増えつづける対流圏オゾンの脅威」より抜粋、一部改編。)

<sup>8</sup> 濃度に時間を乗じて得られる積算値。濃度だけでなく、その曝露時間との関係が重要であることから、植物への影響指標として、算出されることが多い。

(引用文献)

- 1) Ulrich, B 1991. An ecosystem approach to soil acidification. *In*: Ulrich, B and Sumner, M.E. (Eds.) Soil Acidity. Springer-Verlag.
- 2) 吉永ら, 1994.国土数値情報を用いた酸性雨に対する感受性分布図の作成. 日本土壤肥料学雑誌, 65, 565-568.
- 3) Hettelingh et al., 1991. Mapping critical loads for Europe, CCE Technical Report, No.1, p.86, Coordinate Center for Effects, National Institute of Public Health and Environment Protection, Bilthoven, Netherland.
- 4) Ashmore, M. R. and R. B. Wilson, 1992. Critical levels of air pollutants for Europe, background papers for UNECE workshop on critical levels.
- 5) Karlsson, P.-E., G. Sellden and H. Pleijel (eds.), 2003. Establishing ozone critical levels II-UNECE Workshop Report. IVL Report B 1523.

### 3.3 伊自良湖重点調査の結果

#### 3.3.1 伊自良湖集水域における酸性化徴候

平成 16 年に公表された酸性雨対策調査総合とりまとめ報告書におけるデータ解析では、調査地点中、我が国で最も湿性沈着量の多い伊自良湖（岐阜県山県市）の集水域において、その流入河川や土壌に相互に関連した特徴的なイオン濃度の変化が確認された。本節では、とりまとめ報告書で指摘された酸性化徴候とメカニズムに関する議論について概説し、重点調査における論点を明確化する。

##### （1）全国最大級の湿性沈着量

伊自良湖集水域は、調査地点中我が国で最も湿性沈着量の多い地点であることが指摘された。伊自良湖は、第 2 次、第 3 次酸性雨対策調査で重点的な調査が行われた総合（パイロット）モニタリングの 5 地点や、それ以外の酸性雨対策調査地点と比較しても、全国最大レベルにあり、特に  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  及び  $\text{H}^+$  の湿性沈着量は全国で最も多かった。また、N の年間総沈着量は約  $19\text{kg-N ha}^{-1} \text{y}^{-1}$  と推定され、欧米において、渓流水への  $\text{NO}_3^-$  流出を引き起こす沈着量の目安である  $10\text{kg-N ha}^{-1} \text{y}^{-1}$  を超えていることも指摘された。

##### （2）酸性沈着の中和能が低い地質・土壌条件と河川水質

伊自良湖集水域内にはチャートが分布しており、地質的に中和能が低い集水域と考えられる。実際に、3.2 節でも述べたように、伊自良湖集水域内の土壌は調査を開始して以来酸性化しており、植物吸収等による酸の生成や森林管理条件等についても考慮する必要があるが、上述した湿性沈着量の影響が土壌化学性に発現した可能性が考えられた。

集水域酸性化には、地質・土壌条件が大きく関連すると考えられる。ケイ酸質で塩基の含量が少ない花崗岩、流紋岩などの酸性岩やチャート、及びこれらの岩石由来の土壌は、酸の中和能が低いことが指摘されている。

河川水質は、集水域内の地質・土壌条件や土壌・植生系における物質循環の結果として、捉えることが可能である。陸水の中和能の指標であるアルカリ度は、 $200\mu\text{mol}_c \text{L}^{-1}$  以下であると酸感受性が高いといわれている。日本の多くの河川のアルカリ度は比較的高く、国内 225 の河川の平均は  $550\mu\text{mol}_c \text{L}^{-1}$  と報告されており、酸感受性が高いと判断される  $200\mu\text{mol}_c \text{L}^{-1}$  以下を示す河川は少ないとされてきた<sup>1)</sup>。一方、伊自良湖集水域は、域内の釜ヶ谷川（伊自良湖への流入河川）のアルカリ度が、約  $120\mu\text{mol}_c \text{L}^{-1}$  と低く、河川水質からも酸感受性が高いと考えられる。

##### （3）冷夏及び干ばつ・酷暑と連動した特徴的なイオン流出

伊自良湖に流入する釜ヶ谷川においては、図 3-3-1-1 に示したように、1994 年（平成 6 年）～1996 年（8 年）頃にかけて、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、Al の特異的な高濃度流出やそれに追従した pH

の低下傾向が指摘された。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度はさらにその後も上昇しており、上述した非常に多いN沈着量の影響を示唆していた。

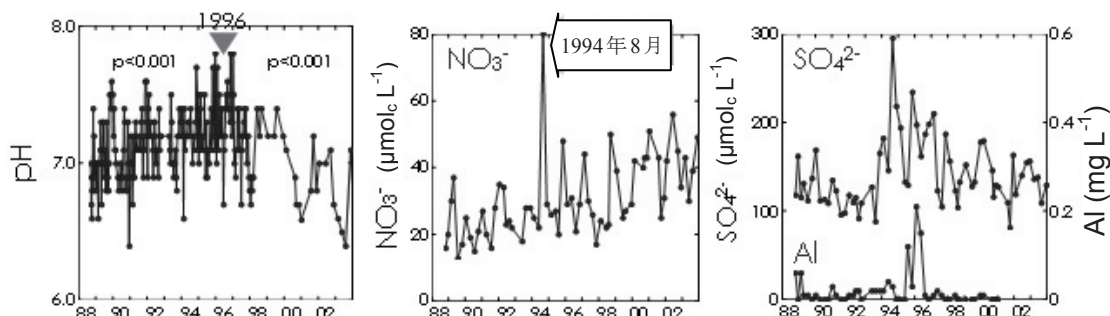


図 3-3-1-1 釜ヶ谷川における pH (左)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度 (中)、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>及び Al 濃度 (右) の経年変化

同時に、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の流出量はその流入量を上回っていると推定されたことから、過去に蓄積された S が、流出していると考えられた。実際、集水域内の土壌の S 抽出分析結果は、上述した総合 (パイロット) モニタリングの他の地点より一桁あるいは二桁高い濃度であり、S を多く含む土壌であることを示していた。

イオンの高濃度流出後の pH の変化のメカニズムについては、1993 年 (平成 5 年) の冷夏、1994 年 (6 年) の干ばつ・酷暑による樹木成長の低下が N の循環過程の変化をもたらし、河川 pH に影響した可能性が示唆されている。図 3-3-1-2 に伊自良湖集水域内で間伐された樹木の年輪解析から算出した胸高断面積増加量の経年変化を示した。スギ、ヒノキとも、1982 年 (昭和 57 年) 以降と 1994 年 (平成 6 年) 以降に胸高断面積増加量の著しい減少がみられた。

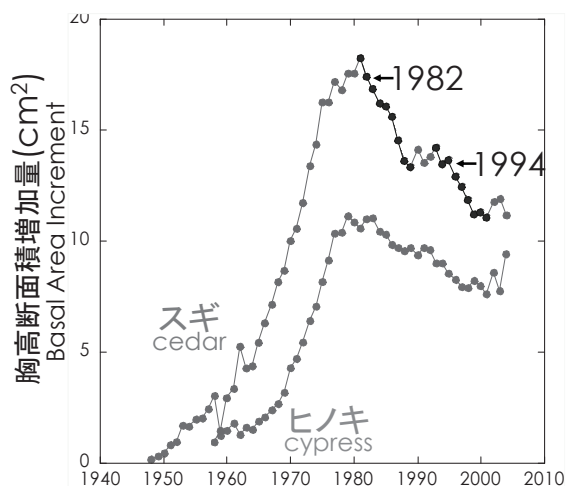


図 3-3-1-2 伊自良湖集水域における胸高断面積増加量の経年変化  
それぞれ間伐木 50 本より平均増加量を算出した。

1982 年 (昭和 57 年) 以降の減少の影響は本調査 (1988 年 (63 年) に調査開始) では明らかではないが、1994

年 (平成 6 年) に胸高断面積増加量が低下に転じたことにより、本集水域内では樹木による N の吸収が減少したことが、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の河川への流出を引き起こし、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の流出過程で生成される H<sup>+</sup>の流出が、河川 pH の低下を生じさせたと考えられた。さらに、この NO<sub>3</sub><sup>-</sup>流出の過程には、干ばつで土壌が乾燥化した後に、降水があると微生物活性が急激に高まり土壌