特集・酸性雨の化学と森林枯損解明の科学

日本の樹木に対する酸性雨の影響に関する 実験的研究

伊豆田 猛*

1. はじめに

近年、世界各地において森林衰退が報告されている。欧米の森林衰退の原因には様々な説があるが、酸性雨などの酸性降下物やオゾン (O₃) などのガス状大気汚染物質の関与が懸念されている。一方、我が国においても、樹木の枯損や森林衰退が観察されているが、それらの原因はほとんど特定されていない。

森林衰退の原因を究明するためには、衰退地における現地調査のみならず、衰退している、または、今後衰退する可能性がある樹種に対する環境ストレスの影響を実験的に調べる必要がある。我が国においては、現在までに、東京農工大学¹⁻¹⁹⁾などの大学、電力中央研究所²⁰⁻²⁶⁾および森林総合研究所²⁷⁾などの研究機関で、樹木に対する酸性雨の影響に関する実験的研究が行われてきた。そこで本稿では、我が国でこれまでに得られた、樹木に対する人工酸性雨または、土壤酸性化の影響に関する実験的研究の成果を概説する。

2. 樹木に対する人工酸性雨の直接影響

樹木の葉に、比較的低い pH の酸性雨が直接降りかかると、感受性の高い樹種においては、可視障害が発現する。例えば、伊豆田ら¹⁾は、スギの2年生苗に、pH2.0に調整した人工酸性雨を数回、地上部から処理すると、当年葉の先端部に赤褐色の可視障害が発現したが、pH3.0の人工酸性雨を同様に処理しても可視障害は発現しなかったことを報告している。河野ら²⁰⁾は、46種類の樹木苗に、pH4.0, 3.5, 2.5および2.0に調整した人工酸性雨を処理し、可視障害の発現を観察した。その結果、pH3.0の人工酸性雨の処

理により、常緑広葉樹14種のうち7種、落葉広葉樹21種のうち14種に可視障害が発現した。しかし、供試したすべての樹種において、pH4.0の人工酸性雨を処理しても、可視障害は発現しなかった。これらの結果に基づき、可視障害発現を指標にした場合、落葉広葉樹>常緑広葉樹>針葉樹の順に酸性雨に対する感受性が高いと結論づけている。

欧米で生育している樹木の成長や生理機能に対する人工酸性雨の影響に関する実験的研究は比較的多く報告されているが、我が国や東アジアの森林樹種に及ぼす人工酸性雨の影響に関する実験的研究は限られている^{1,3,8,10,11,12,21,23,26,27)}。伊豆田ら¹⁾は、スギの2年生苗に、60日間にわたって、1週間に2回の割合で、pH2.0と3.0の人工酸性雨を処理した。その結果、スギ苗の成長は、pH3.0の人工酸性雨処理による有意な影響を受けなかったが、pH2.0の人工酸性雨処理によって乾物生産効率と同化産物の根への分配率が低下し、最終的に根の乾重量が有意に減少した。なお、同様な結果が、pH2.5の人工酸性雨を12週間にわたって処理したスギ苗でも得られている⁸⁾。

伊豆田ら³⁾は、モミの3年生苗に、30週間にわたって、pH2.0, 3.0, 4.0に調整した人工酸性雨または、脱イオン水(対照区、pH6.7)を、1週間に2回の割合で、地上部より処理した。その結果、pH2.0区では葉に赤褐色の可視障害が発現したが、他の処理区では可視障害は観察されなかった。図-1に示したように、処理開始12週間後において、いずれの人工酸性雨処理区における個体生重量やpH2.0区およびpH3.0区における個体乾重量が、脱イオン水処理区に比べて有意に減少した。また、30週間後においては、pH2.0区における個体生重量と個体乾重量が対照区のそれらに比べて減少した。この時、pH2.0区のモミ苗の暗条件下における蒸散速度、暗呼吸速度および葉中硫黄含量が、脱イオン水処理区に比べて有

* 東京農工大学農学部
Takeshi IZUTA

図一 1 モミ苗の個体当たりの生重量と乾重量に対する人工酸性雨の影響

異なるアルファベットの付いた値間には有意差がある ($p < 0.05$)

意に増加した。これらの結果より、モミはスギなどに比べて、酸性雨の直接影響を受けやすい樹種であると考えられた。

我が国に生育している樹木の成長を指標とした酸性雨に対する感受性における樹種間差異に関する研究例は、現在のところ極めて少ない^{21,23,26}。松村²⁶は、スギ、ウラジロモミおよびシラカンバの苗に人工酸性雨を処理した結果、スギとシラカンバでは pH2.0 の人工酸性雨処理によって成長が低下したが、ウラジロモミでは pH3.0 の人工酸性雨処理でも成長低下が発現したため、ウラジロモミの酸性雨感受性はスギやシラカンバに比べて高いことを報告した(図一2)。また、河野²¹は、サワラ>ヒノキ>スギの順で、pH2.0 の人工酸性雨に対する感受性が高いことを報告している。

以上のように、pH4.0以上の人工酸性雨を数か月間、樹木に処理しても、著しい成長低下は発現しな

図一 2 スギ、ウラジロモミおよびシラカンバ苗の個体当たりの乾重量に対する人工酸性雨の影響

異なるアルファベットの付いた値間には有意差がある ($p < 0.05$)

い。しかしながら、今後、降雨や霧の pH が4.0以下に低下した場合、酸性雨に対する感受性が高いモミ属などの樹種では、その成長や生理機能が低下する可能性は否定できない。

3. 樹木に対する土壤酸性化の影響

酸性雨による土壤酸性化の初期段階では、植物必須元素が土壌から溶脱するが、その後は土壌溶液中に Al や Mn などの植物有害金属が溶出すると考えられている²⁸。したがって、酸性雨による酸性化が進行しつつある土壌で生育している樹木は、養分欠乏と Al などの有害金属の影響を同時に受ける可能性がある。しかしながら、樹木の成長、生理機能および栄養状態に対する土壤酸性化の影響に関する実験的研究は、現在のところ、極めて限られている^{2,6,7,9,13,15,16,17,18,24}。また、根圏における低 pH や過剰な Al や Mn が、我が国の樹木に及ぼす影響に関する研究も少ない^{4,5,14,19,22,25}。そこで、今回は、スギとアカマツの苗を人工的に酸性化させた土壌で育成し、それらの成長を調べた研究を紹介する。

4. スギ苗の成長に対する土壤酸性化の影響⁷⁾

我が国の代表的な針葉樹であるスギの苗に対する土壤酸性化の影響を調べるために、以下のような実験を行った。まず、塩基溶脱を伴う土壤酸性化処理区(溶脱あり)を設定するために、褐色森林土(花崗岩母材)を底に穴をあけた500mlポットに詰め、土壌表面から pH2.0 に調整した硫酸溶液を1ポット当たり、1.0(20meqH⁺/ℓ 風乾土)、1.5(30meqH⁺/ℓ)、3.0(60meqH⁺/ℓ)、5.0ℓ(100meqH⁺/ℓ)ずつ添加した。一方、塩基溶脱を伴わない土壤酸性化処理区(溶脱なし)を設定するために、乾土で9.51kgに相当する風乾土に、0.19N(20meqH⁺/ℓ)または、0.27N(30meqH⁺/ℓ)の硫酸溶液を1ℓ添加し、十分に混合した。なお、硫酸溶液を添加しない土壌を対照土壌とした。各土壌を詰めた500mlのポットに、スギの2年生苗を移植し、100日間にわたって温室内で育成した。

土壤酸性化処理区で、100日間育成したスギ苗の個体乾重量の相対値〔(土壤酸性化処理区の個体乾重量/対照区の個体乾重量)×100〕と土壌 pH (H₂O)との関係を調べた結果(図一3)、全体的には両者の間に正の相関が認められたが、土壌 pH が約3.7付近においては、土壌からの塩基溶脱を伴う土壤酸性化

図一三 スギ苗の個体乾重量の相対値と土壌 pH との関係

図一四 スギ苗の個体乾重量の相対値と土壌の水溶性 Al 濃度との関係

図一五 スギ苗の個体乾重量の相対値と土壌の水溶性元素濃度から算出した (Ca+Mg+K)/Al モル比との関係

処理区における個体乾重量の相対値は、溶脱を伴わない土壌酸性化処理区のそれに比べて低かった。一方、土壌の水溶性 Al 濃度の増加に伴い、個体乾重量の相対値は低下する傾向を示したが、Al 濃度が約 30 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (ppm) 以下の場合、溶脱を伴う土壌酸性化

処理区における相対値は、溶脱を伴わない土壌酸性化処理区に比べて低い傾向が認められた (図一四)。これに対して、図一五に示したように、土壌酸性化処理の方法にかかわらず、水溶性元素濃度から算出した土壌の (Ca+Mg+K)/Al モル比の低下に伴って、スギ苗の個体乾重量の相対値が低下した。さらに、土壌の Ca/Al モル比、Mg/Al モル比または、K/Al モル比の低下に伴って、スギ苗の根における Ca、Mg または、K 濃度が、それぞれ低下する傾向が認められた。

以上の実験結果より、酸性雨による土壌酸性化が樹木の成長や栄養状態に及ぼす影響を評価する場合、土壌における Al などの植物有害金属の濃度のみならず、Ca、Mg、K のような植物必須元素の濃度も考慮する必要があると考えられた。

5. アカマツ苗の成長に対する土壌酸性化の影響¹⁸⁾

我が国のみならず、韓国などの東アジア諸国においても主要な針葉樹であるアカマツの苗の成長に対する土壌酸性化の影響を調べるために、以下のような実験を行った。塩基溶脱を伴わない土壌酸性化処理では、土壌 1 ℓ 当たり、10、30、60または、90meq の H^+ を硫酸溶液で添加した。なお、硫酸溶液を添加しなかった土壌を対照土壌とした。一方、塩基溶脱を伴う土壌酸性化処理においては、上記の方法で硫酸添加処理を行った10日後に、酸性化させた土壌または、対照土壌をコンテナに入れ、土壌体積の3倍量の脱イオン水を入れた後、3日間静置し、コンテナの底から徐々に水を抜き、土壌の塩基を溶脱した。酸性化させた土壌または、対照土壌を詰めた1/10000 a ポットに、アカマツの2年生苗を移植し、120日間にわたって温室内で育成した。

アカマツ苗の育成開始時における土壌溶液の分析を行った結果、土壌への硫酸添加量の増加に伴って、土壌 pH は低下した。土壌溶液の Al および Mn 濃度は、土壌 pH の低下に伴って増加した。なお、Al 濃度は、土壌 pH が4.0以下に低下すると急激に増加したが、Mn 濃度は土壌 pH の低下に伴う変化が比較的小さかった。一方、土壌への硫酸添加量の増加に伴って、土壌溶液の Ca、Mg および K 濃度が増加した。土壌への硫酸添加量の増加に伴って、120日間の育成期間終了時におけるアカマツ苗の個体乾重量が低下した。また、酸性化させた土壌で育成したア

図-6 アカマツ苗の個体乾重量の相対値と土壌溶液のpH, Mn 濃度, Al 濃度との関係

図-7 アカマツ苗の個体乾重量の相対値と土壌溶液の(Ca+Mg+K)/Al モル比との関係

アカマツ苗においては、地下部 Al 濃度が増加したが、逆に Ca および Mg 濃度は低下した。

土壌酸性化処理区で、120日間育成したアカマツ苗

の個体乾重量の相対値〔(土壌酸性化処理区の個体乾重量/対照区の個体乾重量)×100〕と、土壌溶液の pH (H₂O), Al 濃度および Mn 濃度との関係を調べた結果 (図-6), 土壌溶液の pH (H₂O) と個体乾重量の相対値との間には正の相関が認められたが、土壌溶液の Al および Mn 濃度が比較的低い場合、個体乾重量の相対値がかなりばらつく傾向が認められた。

土壌溶液の Ca/Al モル比または、(Ca+Mg+K)/Mn モル比の低下に伴って個体乾重量の相対値は低下したが、Ca/Al モル比が約3.0の場合、個体乾重量の相対値が大きくばらつく傾向が認められ、(Ca+Mg+K)/Mn モル比と個体乾重量の相対値との間の相関は低かった。これに対して、図-7 に示したように、土壌溶液の (Ca+Mg+K)/Al モル比と個体乾重量の相対値の間には高い相関が得られ、土壌酸性化処理の方法に関わらず、同モル比の低下に伴って個体乾重量の相対値が低下した。

これらの結果より、土壌溶液におけるカチオンと Al のモル比は、酸性雨などの酸性降下物による森林生態系に対する酸性物質の臨界負荷量の評価において重要な指標になり得ると考えられた。

6. 土壌酸性化に対する感受性における樹種間差異

Sverdrup and de Vries²⁹⁾は、ヨーロッパに生育しているトウヒ類などの樹木の成長と、水耕液や土壌溶液の (Ca+Mg+K)/Al モル比との関係を検討し、同モル比=1.0を基準にして PROFILE モデルによって、スウェーデンの森林における酸性降下物の臨界負荷量を評価している。彼らが報告したノルウェースプルース苗で得られた結果と、スギ苗⁷⁾およびアカマツ苗¹⁸⁾で得られた結果を比較すると、土壌溶液の (Ca+Mg+K)/Al モル比の低下に対するスギ苗およびアカマツ苗の乾物成長における感受性は、ノルウェースプルース苗に比べて高かった。すなわち、ノルウェースプルース苗の乾物成長は、(Ca+Mg+K)/Al モル比=1.0の場合、約20%低下した。これに対して、スギ苗の乾物成長は(Ca+Mg+K)/Al モル比が10以下になると明らかに低下し、同モル比=1.0の場合は約50%低下した。また、アカマツ苗の乾物成長は (Ca+Mg+K)/Al モル比が7以下になると低下し、同モル比=1.0の場合は約50%低下した。これらの結果は、我が国の樹木とヨーロッパの

樹木では、土壤酸性化に対する感受性が異なることを示唆している。

7. 今後の課題

我が国においては、酸性雨などの酸性降下物やその沈着による土壤酸性化の生態系影響に関する研究は、始まったばかりであると言っても過言ではない。したがって、森林生態系における酸性降下物の臨界負荷量を評価する際に必要な土壤酸性化の樹木影響などに関する基礎的なデータが明らかに不足している。我が国の樹木や土壤は、諸外国のそれらとは明らかに性質が異なるため、欧米などで報告されている研究結果は、もちろん参考にはなるが、そのまま我が国の状況に当てはめることはできない。

今後、我が国における酸性降下物の臨界負荷量を評価するためには、まず、森林地帯や山岳地帯において、酸性降下物のモニタリングネットワークを構築する必要がある。また、我が国の主要な森林樹種や土壤に対する酸性降下物の影響を、実験的研究により明らかにすると共に、森林衰退地などにおける野外調査を実施する必要がある。さらに、これらの実験や調査から得られた情報に基づいて、酸性降下物の臨界負荷量を評価する我が国独自のモデルを構築していかななくてはならない³⁰⁾。そのためには、植物学者のみならず、すべての環境科学者が協力し合い、総合的な研究や調査を進めていく必要がある。

我が国の公害の原点である足尾銅害地の現状を見てもわかるように、一度破壊された自然は決して復元できない。我が国における樹木に対する酸性雨の影響に関する研究が、みどり豊かな地球の「転ばぬ前の杖」になってくれることを著者は願っている。

引用文献

- 1) 伊豆田 猛, 三輪 誠, 三宅 博, 戸塚 績 (1990) スギ苗の生長に対する人工酸性雨の影響, 人間と環境, 16(2), 44-53.
- 2) 伊豆田 猛, 横田 太, 三宅 博, 戸塚 績 (1990) スギ苗の生長に対する土壤酸性化の影響, 人間と環境, 16(2), 55-61.
- 3) 伊豆田 猛, 大谷知子, 横山政昭, 堀江勝年, 戸塚 績 (1993) モミ苗の成長に対する人工酸性雨の影響, 大気汚染学会誌, 28(1), 29-37.
- 4) Izuta, T., Noguchi, K., Aoki, M. and Totsuka, T. (1995) Effects of excess manganese on growth, water content and nutrient status of Japanese cedar seedlings, Environmental Sciences, 3 (4), 209-220.
- 5) Izuta, T., Yamada, A., Miwa, M., Aoki, M. and Totsuka, T. (1996) Effects of low pH and excess Al on growth, water content and nutrient status of Japanese cedar seedlings, Environmental Sciences, 4 (2), 113-125.
- 6) Izuta, T., Seki, T. and Totsuka, T. (1996) Growth and nutrient status of *Betula platyphylla* seedlings grown in andosol and brown forest soil acidified by H₂SO₄ solution, Environmental Sciences, 4 (4), 233-247.
- 7) Izuta, T., Ohtani, T. and Totsuka, T. (1997) Growth and nutrient status of *Cryptomeria japonica* seedlings grown in brown forest soil acidified with H₂SO₄ solution, Environmental Sciences, 5 (3), 177-189.
- 8) 三輪 誠, 伊豆田 猛, 戸塚 績 (1993) スギ苗の生長に対する人工酸性雨とオゾンの単独および複合影響, 大気汚染学会誌, 28(5), 279-287.
- 9) 三輪 誠, 伊豆田 猛, 戸塚 績 (1994) 母材が異なる3種類の土壌の酸性化がスギ苗の生長に及ぼす影響, 大気汚染学会誌, 29(5), 254-263.
- 10) Shan, Y., Feng, Z., Izuta, T. and Totsuka, T. (1994), Ecophysiological effects of simulated acid rain on saplings of *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei*, Environmental Sciences, 2 (4), 209-215.
- 11) Shan, F., Feng, Z., Izuta, T., Aoki, M. and Totsuka, T. (1995) The individual and combined effects of ozone and simulated acid rain on chlorophyll contents, carbon allocation and biomass accumulation of armand pine seedlings, Water, Air, and Soil Pollution, 85, 1399-1404.
- 12) Shan, F., Feng, Z., Izuta, T., Aoki, M. and Totsuka, T. (1996) The individual and combined effects of ozone and simulated acid rain on growth, gas exchange rate and water use efficiency of *Pinus armandi* Franch, Environmental Pollution, 91(3), 355-361.
- 13) Shan, F., Izuta, T., Aoki, M. and Totsuka, T. (1997) Effects of O₃ and soil acidification, alone and in combination, on growth, gas exchange and chlorophyll content of red pine seedlings, Water, Air and Soil Pollution, 3-4, 355-366.
- 14) 三宅 博, 亀井信一, 伊豆田 猛, 戸塚 績 (1991) 水耕栽培におけるスギ苗の生長に対するアルミニウムの影響, 人間と環境, 16(1), 10-16.
- 15) Sato, K., Uchiyama, A., Izuta, T., Miwa, M., Watanabe, N., Kubo, T. and Fushitani, M. (1994) Effects of soil acidity on acoustic emission properties of sugi (*Cryptomeria japonica*) seedling, Progress in Acoustic Emission VII, The Japanese Society for NDI, 137-142.
- 16) 楊 良, 伊豆田 猛, 青木正敏, 戸塚 績 (1996) タイワンアカマツ苗の成長に対するSO₂と土壤酸性化の単独および複合影響, 大気環境学会誌, 31(1), 1-10.
- 17) 太田垣貴啓, 三輪 誠, 伊豆田 猛, 戸塚 績 (1996) 硫酸添加により酸性化させた褐色森林土で育成したスギ苗の光合成活性, 大気環境学会誌, 31(1), 11-19.
- 18) 李 忠和, 伊豆田 猛, 青木正敏, 戸塚 績 (1997) 硫酸添加により酸性化させた褐色森林土で育成したアカマツ苗の成長および体内元素含有量, 大気環境学会誌, 32(1), 46-57.
- 19) 李 忠和, 伊豆田 猛, 青木正敏, 戸塚 績 (1997) 水耕栽培したアカマツ苗の成長および栄養状態に対するAlとMnの単独および複合影響, 大気環境学会誌, 32(5), 380-391.
- 20) 河野吉久, 松村秀幸, 小林卓也 (1994) 樹木の可視障害発