

森林衰退に係わる大気汚染物質の計測、動態、制御に関する研究

研究代表者 広島大学総合科学部 佐久川 弘

The Study of Forest Decline Caused by Atmospheric Pollutants – their Measurements,
Behaviors and Control

Hiroshi Sakugawa, *Research Director of CREST*

Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

1. 研究の概要

本研究では、全国各地で、森林衰退と大気汚染との関連性を調査している気象学、大気化学、分析化学、植物生態学、植物生理学、微生物学の各分野の研究者を組織化し、共通の視点・手法でその原因解明を試みる。具体的には、樹木の衰退が見られる全国4地点（丹沢・大山、乗鞍岳、瀬戸内海沿岸山林、九州山岳地域）で調査をそれぞれ実施する。過去3年間の研究結果をまとめると次のようになる。大気汚染・酸性雨・酸性霧の状況、気象要素との関連性に関する研究（野外観測）に関しては、観測した4地点とも大きな進歩があった。すなわち全ての地点で、酸性降水物および（あるいは）光化学オキシダントが、森林衰退と何らかの関連性があると推察された。一方、人工環境下における汚染物質の樹木への暴露実験（温室実験あるいはオープントップチャンバー実験）を行い、単独もしくは複数（酸性降水物、オゾン、有機酸、活性酸素種など）の汚染物質の直接影響を評価した。現時点（平成11年1月）では、暴露実験を長期間（数ヶ月から2-3年）継続して実施する必要があるため、最終的な結果および評価を得るまでに至っていないが、これらの汚染物質の暴露により、新芽の抑制、気孔の開閉度や光合成能力の変化などの影響が現れることがわかっている。

2. 現在までの中間成果報告

2.1 成果内容の要約

4研究グループの研究成果をそれぞれ述べる。

瀬戸内海沿岸山林研究グループ

1. 広島県廿日市市極楽寺山およびその周辺における大気汚染物質の計測、降水、雪、露、霧、エアロゾルの採取、各種無機及び有機物、重金属濃度の分析、鉛の安定同位体比の測定を行い、汚染物質の種類及び濃度、そして酸性降水物の負荷量を解明するとともに、これらの汚染因子の起源および発生量を明らかにすることを試みた。これらの項目については、特段の成果を挙げる事ができた。すなわち、酸性降水物（特に乾性沈着による硫酸や硝酸の負荷）、光化学オキシダントの一種であるOHラジカル、あるいは亜硝酸による直接影響がアカマツの衰退と関連があると示唆された。
2. 極楽寺山を中心調査地として、樹木（マツ、ヤマサクラ、ヒサカキなど）の活力度、光合成活性、蒸発散能力、樹木のストレス指標としてエチレンの測定、葉上酸性降水物の計測、葉

の気孔の顕微鏡観察を行った。その結果、森林被害地と健全地では、これらの活力度あるいは生理活性が明確に異なることが明らかになった。

3. 人工衛星（ランドサット）データおよび航空写真を用いて、瀬戸内海沿岸部の森林衰退の地理的分布、時系列的变化を巨視的に解明すると同時に、いくつかの地点で現地調査を行い、森林衰退の肉眼、カメラ、熱画像による観察、そして年輪解析による枯死年の同定、木材構造変化の分析を行い、森林衰退の状況を正確に把握することを試みた。その結果、衛星画像の解析から、森林衰退が市街地周辺あるいは道路沿いに集中していることがわかった。さらに、広島市を中心とする森林衰退が過去十数年前から進行していることが明らかになった。また、熱画像撮影装置（サーモグラフィー）による観測から、個々の樹木の衰退度評価あるいは、接地逆転層形成過程の解明が可能であることが示唆された。
4. 極楽寺山の森林衰退地域およびその周辺において、気象要素（温度、湿度、風向、風速、接地逆転層の形成高度、降雨量、霧の発生状況等）の長期連続モニタリングを行うことにより、汚染物質の移動、拡散、局在化の状況を把握することを試みた。一方、数学モデルを構築し、極楽寺山周辺大気における汚染物質の輸送状況の解明を試みた。その結果、海陸風による汚染物質の輸送の重要性、そして接地逆転層形成による汚染物質の低標高地域における蓄積が森林衰退と関連性があることが示唆された。3次元数学モデルを用いた解析から、広島市周辺の工場および自動車から発生した汚染物質が周辺山林に輸送、拡散される過程を詳細に説明することができた。
5. 野外長期暴露実験装置（オープントップチャンバー）を試作し、この装置を用いてアカマツの長期暴露実験（数ヶ月から2年程度）を実施している。これにより、特定の大気汚染物質が樹木に与える影響を直接評価することが可能になる。この実験では特に、活性酸素種や亜硝酸の樹木に与える影響（樹木の生理生化学的変化）を解析評価する予定である。

丹沢・大山研究グループ

1. 降雨や酸性霧の採取と化学分析、酸性降下物質の種類と負荷量の測定を行い、あるいは渓流水の採取や分析を行い、これらのデータに基づいて酸性化機構を解明し、あわせてさまざまな発生源の寄与率を検討した。過去数年の調査より、酸性霧による降下物質の負荷量が降雨のそれと同等か、あるいは上回る量であることが明らかになり、酸性霧がモミ枯れに関与する可能性を示唆した。また、霧組成に重要な影響を与える霧底標高の観測のために大山の麓に暗視カメラを設置して観測を行った。その結果、滑昇霧として生成する大山の霧においては、麓の大気汚染度、霧底の位置、霧水量が重要であり、これらの要因を把握するなら霧組成を予測できることを明らかにした。
2. 室内実験によるモミの酸性霧への応答機構を解明することを数年来実施した。その結果、pHが3以下の酸性霧をモミ苗木に暴露した場合、新芽の成長抑制等が起こることが明らかになった。丹沢・大山においてはpHが最低1.9、平均すれば3から4程度の酸性霧が観測されており、したがってその直接影響による衰退を考慮する必要があると考えられる。
3. 平成10年8月に4研究グループ合同の野外観測を丹沢・大山で約3週間実施し、モミ枯れと大気汚染との因果関係を総合的に調査した。測定結果は現在解析中であり、3月中に報告

書を作成する予定である。

乗鞍岳研究グループ

1. 森林衰退が観測される場所周辺において、大気汚染物質や酸性降下物の計測、それらの生成と輸送過程、さらに森林の植生、樹木活力度と樹木の生理・生化学的変化、土壌劣化の状態に関する調査を行った。現時点において、樹木活力度および土壌化学成分で衰退地域と非衰退地域では明瞭な違いが見られることが明らかになったが、生理生化学的変化については解析中である。乗鞍岳においては、酸性霧あるいはオゾンによる影響が高いと考えられる。
2. 室内実験（暴露実験）により、汚染物質の樹木への影響に関する生理・生化学的診断や、汚染物質の土壌劣化に関する有機化学的診断などを行った。その結果、オゾンや有機酸を暴露した場合に、葉内の酵素活性が変化することが明らかになり、大気汚染や酸性霧によるストレスが生理活性変化をもたらしていることが考えられた。
3. 乗鞍岳周辺の航空写真の解析、倒木円板の年輪解析による樹木成長の推移や環境影響時期の推定、土壌の酸性化による溶脱アルミニウムの樹木の生理活性への影響などを現在解析中である。

九州山岳地域研究グループ

1. 樹氷、雪、降水中溶解成分について pH、電気伝導度の測定、イオン成分の分析を行い、不溶解性成分中粒子状物質については電子顕微鏡による粒子の形状観察、粒径分布、構成元素の分析を行った。その結果、大陸起源の汚染物質を同定・定量し、山岳地域への負荷量を見積もることができた。
2. 屋久島・投石平（標高：1,700 m）および北西部（標高：250 m）において大気試料を採取した。塩素化炭化水素 26 種、ベンゼンおよびその誘導体 11 種、フロン化合物 4 種、その他 1 種、合計 40 化合物について GC/MS により同定・定量した。フロン化合物は 4 種とも検出され、その濃度は北九州地域の平均値および丹沢・大山での測定レベルとほぼ同じであった。屋久島北西部で検出されたトルエン等は人為活動によるものと考えられる。
3. ランドサット画像から正規化植生指標により植生の変化を解析した結果、植生に変化が認められた屋久島北西部について詳しく調査した。さらに、広島大学との共同で屋久島北西部において赤外線熱画像を用いた地上観測を行ない、森林環境状況の評価を試みた。
4. 長距離輸送大気汚染の森林に対する影響を評価するため、屋久島において土壌の酸性化と渓流水の水質を継続的にモニタリングした。また、屋久島内 10 ヶ所において堆積土壌を採取し、土壌 pH、含水率、全有機炭素量、全窒素および全リン量を測定した。
5. 福岡県宝満山におけるモミ枯れの植生調査を実施し、大気汚染との因果関係を調査した。平成 10 年時点でのモミ枯れの分布および進行度は約 10 年前の調査した際とほぼ同様であることがわかった。大気汚染状況については、現在調査を実施している。

2.2 発表論文等の記載：主な発表論文

平成 8 年度

提出先：Japanese Journal of Biometeorology 33

論文名：Climatic Inversion Layer and Atmospheric NO_x Concentration on the Slope of Forest Decline Area in the Seto Inland Sea District, Japan

アブストラクト：瀬戸内海沿岸部の山間域 150 m 前後では NO₂ 濃度が相対的に高く、この影響により森林衰退が引き起こされている因子とされている。広島県西部の極楽寺山の南側斜面 140 m に位置する宮島 SA において、係留気球による気温勾配の観測および NO_x 濃度測定を行い、森林地域の逆転層と大気汚染の関係について調査した。結果、夜間から早朝にかけて高度 20 m (海拔 160 m) に接地逆転層が形成されていることがわかった。NO₂ 濃度測定の結果から、逆転層内では大気汚染物質が拡散されにくく、夜間滞留しやすくなると考察された。従って、標高 150 m 付近では夜間 NO₂ を起因とした複合連鎖反応が進むと推測された。

提出先：環境科学会誌 10

論文名：広島県極楽寺山におけるガス状汚染物質の動態とマツ・広葉樹の樹木活力度との相関関係

アブストラクト：広島県極楽寺山において、大気汚染が進行していると推測される南側斜面と、比較的汚染されていないと思われる北側斜面に分け、標高差別に NO₂、SO₂、O₃ 濃度を分子拡散サンプラーにより測定した。また、マツ・サクラ類・ヒサカキの樹木活力度を調べた。NO₂ 濃度は南側斜面の 100~200 m で最も高く(平均約 20 ppbv)、標高の上昇と共に低下した。また、海陸風の影響を受けて季節変化することがわかった。SO₂ 濃度は数 ppb~15 ppb の範囲で、比較的南側斜面で高かった。O₃ 濃度は山頂で最も高く(平均約 30 ppbv)、標高依存性があった。樹木活力度では南側斜面の低標高地点において、アカマツ、サクラ類の枯死率が高い、ヒサカキの 1, 2 年葉の着葉率が低いなどの傾向がみられた。

平成 10 年度

提出先：日本化学会誌 9

論文名：雨水・露水中に光化学的に生成するヒドロキシルラジカル量の計測

アブストラクト：1997 年 6 月から 9 月に広島県東広島市で雨水・露水を採取し、OH ラジカルの光化学的生成量を測定した。五月一日正午の東広島市の太陽光強度(快晴)で、雨水中で、平均 0.36 $\mu\text{M h}^{-1}$ 、露水中で 0.83 $\mu\text{M h}^{-1}$ であり、ほぼ全ての試料で生成が確認された。試料中の 0.45 μm 以上の粒子は、OH ラジカルの生成速度に影響を及ぼさなかった。OH 生成機構を推定すると、硝酸からの寄与は雨水・露水共に小さく、亜硝酸からの寄与は、露水の試料で、平均 99.3% と高く、雨水では平均 11.2% 以下と低かった。雨水では、有機化合物又は鉄と過酸化水素の“Fenton 反応”等により、OH ラジカルが生成している可能性があった。

提出先：Environmental Science and Technology

論文名：pH Dependent Hydroxyl Radical Formation and Absorbance of Nitrous acid

– Source of OH in Dew –

アブストラクト：亜硝酸水溶液中に光化学生成する OH ラジカル量は、pH の影響を受けた。それは、亜硝酸の HONO と NO_2^- ($pK_a=3.27$) のイオン種の変化に対応していた。北緯 34 度、春分の日、正午の太陽光強度における OH ラジカル生成速度定数は、HONO で、 $3.1 \times 10^{-4} \text{sec}^{-1}$ 、 NO_2^- で、 $3.2 \times 10^{-5} \text{sec}^{-1}$ と求められた。紫外・可視吸光度も亜硝酸のイオン種によって影響を受けた。広島県の露水は pH が高く、高濃度の亜硝酸を含んでいた。露水中の OH ラジカル生成速度は、 $0.18\text{--}2.98 \mu\text{M hour}^{-1}$ で、ほぼ全て亜硝酸の光分解反応によるものであった。亜硝酸は、液相で酸化反応開始剤として重要である。

3. 今後の研究の方向

a) 野外観測（気象要素・大気汚染・酸性雨調査）

調査対象地 4 地点で今後も調査を継続して行う予定であるが、調査対象をこれまでのように全ての項目について実施するのではなく、いくつかの項目、すなわち森林衰退と直接関わり合いがある（あるいは衰退の主要因子と考えられる）項目について実施する。具体的には、丹沢・大山においては酸性降下物およびオゾンについて、乗鞍岳では酸性降下物およびオゾンについて、瀬戸内沿岸山林では酸性降下物、OH ラジカル、亜硝酸について、九州山岳地域においては酸性降下物について、それらの動態、発生源、分解過程、負荷量をそれぞれ解明する。また、上記の 4 地点以外に、大陸からの汚染物質の越境汚染状況を解明するために、山陰地方、隠岐島などの日本海沿岸山林で野外観測を短期的に実施する予定である（秋元プロジェクトと合同で行う予定）。

b) 暴露実験（温室およびオープントップチャンバー実験）

マツおよびモミ苗木への汚染物質の暴露実験を、丹沢・大山、乗鞍岳、瀬戸内沿岸山林研究グループがそれぞれ 1～3 年実施した。その結果、硝酸や硫酸などの酸性降下物、オゾンや OH ラジカルなどの光化学オキシダントが、生理活性変化、光合成能力低下、成長阻害、枯死などの被害をもたらすことが示唆された。したがって、今後これらの汚染物質と樹木被害との明確な因果関係を立証する必要がある。そのためには、世界的に広く用いられているオープントップチャンバーを用いて長期暴露実験を行い、汚染物質の負荷量、光化学反応、植物細胞内での生理生化学的变化、枯死に至るまでの過程の解明などを行いたい。