

「環境低負荷型の社会システム」

平成7年度採択研究代表者

佐久川 弘

(広島大学総合科学部 助教授)

「森林衰退に係わる大気汚染物質の計測、動態、制御」

1. 研究実施の概要

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ている。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した。過去4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・酸性霧の調査、気象要素との関連性に関する調査(野外観測)に関しては、観測した4地点とも格段の進歩があった。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、森林衰退と明確な関連性があると判断された。しかし、樹木の衰退に直接関与する汚染物質は必ずしもすべての地域において共通ではなく、気象条件、人為汚染の程度、樹種により異なることがわかった。一方、人工環境下における汚染物質の樹木への曝露実験(温室実験あるいはオープントップチェンバー実験)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。これらの汚染物質の曝露により、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2-3ヶ月程度の曝露実験により発現することが示された。以上の野外観測および曝露実験より、多くの大気汚染物質のうち、特定の物質が直接的に樹木の衰退に関与することが明らかとなった。また、衰退の過程もおおよそ推定できた。特に窒素酸化物から二次的に発生するいくつかの有害物質が樹木の衰退に関与することを明らかにした点は重要である。一方、大気汚染による衰退と、マツノザイセンチュウなどの病害虫や林床管理の有無との相互作用に関する研究も実施し、相乗効果を評価しつつある。2000年度は、これらの研究および樹木の衰退に直接関与する汚染物質の制御に関する研究も実施する予定である。

2. 研究実施内容

1) 大気汚染物質の測定

これまでアカマツの大気汚染による衰退原因解明のモデルケースとして、広島県廿日市市極楽寺山およびその周辺を主な調査地として研究を行ってきたが、生

育環境の異なった地域における衰退原因を探るために、広島県東広島市において衰退区（八本松町、高速道路沿い）および非衰退区（福富町）において大気汚染物質の測定を行った。その結果、高速道路周辺の衰退区において極めて高い窒素酸化物濃度が見られ、アカマツの衰退を助長している可能性が示唆された。東アジア圏からの長距離移送による汚染物質の生態系への影響が指摘されている屋久島において、パッシブサンプラーによる二酸化窒素および二酸化硫黄の測定、ヤクタネゴヨウの立ち枯れが見られる西部林道周辺において、オゾン及び窒素酸化物濃度の連続測定を行った。さらに、産業活動あるいは人為活動により放出される揮発性有機化合物の測定を行った。その結果、窒素酸化物はいずれにおいても低濃度で推移していた。一方、オゾン濃度は、日中、50ppb程度存在し、国内のバックグラウンド濃度とほぼ同じレベルの濃度であることが示唆された。フロン化合物濃度は標高による違いが見られず、広範囲にかつ均一に大気中に分布していることが認められた。一方、ベンゼンおよびその誘導体およびハロゲン化炭化水素類濃度は、秋季に高い値を示し、標高の高い島中央部で高い傾向であった。こうした標高差による存在パターンの違いは丹沢・大山での測定結果においても確認され、化合物の物性による大気中での挙動の違い、大気の混合・希釈の影響、あるいは汚染物質の起源に差異があることなどが考えられる。首都圏からの大気汚染物質によるモミの衰退が指摘されている神奈川県丹沢山系大山においては、パッシブサンプラーによる大気汚染物質の測定および都市域との比較を行い、現在解析を進めている。

2) 植物の生育状態の測定・診断

神奈川県丹沢山系におけるモミ林衰退地（大山）と非衰退地（札掛）において、成木の枝を高さ約25-33mの林冠部から採取し、葉-茎の相対成長関係および葉内の元素含有量を調べた。葉面積あたりの窒素・マグネシウム・クロロフィル含有量はいずれも衰退地で小さく、葉の光合成の制限を引き起こしている可能性を示唆する。林内外の雨水成分などとの関係から、酸性物質が葉内の有用元素を葉から流出していると考えられる。葉内の活性酸素消去系酵素（スーパーオキシドディスムターゼ、SOD）活性は衰退地で低く、酸性物質を介して生じるストレスを十分に処理できない状態にまで葉の活力が低下していることを示唆する。さらに、同齢の枝の乾物量は衰退地で小さく、光合成産物の減少が枝先の発育を不十分にしていると思われる。モミの細根の発達は衰退地で減少しており、この点からも光合成産物量の低下が根の発達を抑制している可能性が支持される。土壌中のバクテリアおよび糸状菌起源の有機分子の解析は、酸性物質による土壌化学性の変化が微生物の活動に何らかの影響を及ぼしており、土壌劣化の指標「バイオマーカー」として微生物の定量が有効であることを示唆した。次年度はマーカーの特

定を確立する予定である。

広島県廿日市市極楽寺山周辺地域におけるアカマツ林衰退地の地理的分布をランドサットデータを基に数十年単位の時系列に沿ってコンピュータにおける画像解析を駆使して行った。衰退は都市部や高速道路に面した地域でこの10～20年の間に顕著になったことが明示された。これまで、極楽寺山衰退地におけるアカマツ針葉の気孔開度の低下による光合成の制限が極楽寺山のアカマツ衰退に関わっていることが判明していたが、葉内の元素分析からは化学成分に衰退木と健全木で相違は見いだされず、葉内からの栄養塩類の溶脱よりは気孔不全が光合成の制限要因として重要であることを示唆した。葉内の炭素同位体識別からは、葉内への¹³C取り込み量の減少が衰退地の気孔開度低下の状況を裏付けている。極楽寺山のアカマツ林にアクリル製パイプを数十本埋設し、携帯用根系解析装置（ミニライゾトロン）によってパイプ側面の土壌中の根系・菌根を画像として記録した。記録した画像をコンピュータ上で解析し根の発生速度を概算すると、衰退地におけるアカマツ細根の出現頻度は非衰退地よりも低い傾向が見いだされた。携帯用根系解析装置の有効性が認められたと同時に、衰退が地上部だけでなく地下部に及んでいることが判明しつつある。アカマツの衰退が見られる東広島市西条周辺の数か所において、大気汚染物質の濃度とアカマツの光合成活性・気孔開度を測定した。高速道路や市街に面したアカマツ林の針葉の光合成・気孔開度は郊外の健全なアカマツより幼木と成木とともに低下しており、汚染地での衰退は極楽寺山と類似した過程で様々な地域にわたって進行していることを示唆する。

鹿児島県屋久島における絶滅危惧植物ヤクタネゴヨウの葉内成分は、この離島の極端に多い降水による流出が顕著であることを示唆した。次年度は葉内成分と光合成生産との関係を追求する。

3) 衰退メカニズムの解析

a. 原因物質による障害発生機構の解析

i. 曝露実験

酸性霧がモミの生理応答に与える影響を検討するため、名古屋大学農学部 の圃場において、神奈川県丹沢山系の大気汚染物質から二次的に発生すると考えられる酸性霧（pH3）をモミ苗に噴霧した。酸性霧の噴霧処理のほか、土壌の乾燥といった自然条件下で起こり得るストレスを処理し、それらの相互作用を検討した。その結果、活性酸素消去系酵素（カタラーゼ）の活性が乾燥ストレス下で有意に低下することが見出された。また、酸性霧の曝露は、乾燥ストレス状態において気孔開閉のメカニズムに影響を与えることが明らかになった。モミ枯損地域の自然条件下におけるモミの生理活性の変化を検討するために、モミ林衰退地（大山）と非衰退地（札掛）にモミ苗木を植栽

し、葉内の活性酸素消去系酵素の活性を経時的に測定した。また、現地に生育する成木の活性酸素消去系酵素の活性も測定した。その結果、大山地区のSOD活性は、苗木、成木とも札掛地区のそれより低下していることが明らかになった。このことから、過剰なストレスが大山地区のモミに対して、生理活性の変化を引き起こしていることが考えられた。

広島大学総合科学部の圃場において、広島県極楽寺山の大气汚染物質（硝酸・過酸化水素）から二次的に発生すると考えられる活性酸素の一種ヒドロキシルラジカル(OHラジカル)を鉢植えにしたアカマツ苗に曝露した。圃場には樹脂製の囲い(オープントップチェンバーおよび簡易ハウス)を建設し、ハウス内の微気象や大気成分をモニターした。曝露処理は亜硝酸や過酸化水素を含んだ衰退地の朝露を模した溶液を週3回の頻度で早朝に葉面に噴霧することによって行った。噴霧処理を受けたアカマツの葉の光合成活性・気孔開度を携帯用光合成蒸散測定装置やクロロフィル蛍光分析器で測定した。OHラジカル発生溶液を処理したアカマツ苗では葉の気孔の開閉が不完全になることにより、光合成活性が低下することが実験的に確かめられた。この光合成活性の低下は極楽寺山衰退地で観察できるものと対応している。また、ラジカル処理葉からはエチレンが発生しており、衰退地と同様に葉の寿命の短縮などが生じうる。

ii . 樹木衰退モデルの構築

広島県極楽寺山でのアカマツ樹上の先端部を採集し、葉や茎の器官乾重比を求めた。これらの値を基にパイプモデル理論を応用した年間の光合成生産量を概算した。衰退モデルによる成長の予測値と衰退地の実測値は非常に良く対応し、衰退地における光合成生産の低下が樹木の成長の抑制を招くことを野外のデータを基に理論的に説明できた。成長の抑制は急速な枯死を招くほど劇的なものでは無かったが、必ずしも可視的ではない微弱な衰退を長期間にわたって継続させることを示唆する。この衰退がどの程度の期間で個体の枯死を招くかどうかについて、モデルをさらに発展させて検討していく。

b . 原因物質の生成・動態の解析

i . 葉上での有害物質（特にOHラジカル、亜硝酸）の生成量の測定

オープントップチェンバーを用いたアカマツの曝露実験から、活性酸素種が葉の生理機構に障害を与えることが明らかとなった。そこで、広島県廿日市市極楽寺山のアカマツ林衰退地（南側）と非衰退地（北側）においてアカマツ葉上に発生した露を採取し、OHラジカルの生成速度を測定することで、現地と曝露実験との整合性を評価した。また、同時に露中の亜硝酸および硝酸を測定し、OHラジカル発生機構の解明を行った。アカマツ葉上露中OHラ

ジカルの発生速度は、曝露実験に用いた噴霧液中のOHラジカル発生速度とほぼ同程度であった。また、亜硝酸と硝酸以外のOHラジカルの発生寄与も高いことが示された。現在、OHラジカル発生に関与していると考えられる溶存有機化合物や過酸化水素からの発生寄与について解析を行っている。

ii . 汚染物質の測定

アカマツ

広島県廿日市市極楽寺山のアカマツ林衰退地(南側)と非衰退地(北側)において、乾性降水物の沈着挙動ならびに乾性降水物とアカマツ針葉間の相互作用(溶脱、吸着、中和)の解明を試みた。その結果、アカマツ林衰退地での乾性降水物(硝酸態窒素、硫酸など)の量は非衰退地よりも多く、これを反映してアカマツ葉上の露成分においても乾性降水物の構成物質の濃度は衰退地で高い値を示した。また、露成分の測定結果から、アカマツ林衰退地のアカマツ葉表面ではカリウムイオンが葉から溶脱し、これにより露のpHが中和されていることが明らかとなった。

モミ

神奈川県丹沢山系大山において、霧、雨、エアロゾルに加え、林内雨を採取し、モミとこれらの降水物との相互作用について検討した。また、大山に比べモミの立ち枯れが顕著でない札掛においても降雨や酸性霧の採取と化学分析、酸性降水物の種類と負荷量の測定を行なった。その結果、カルシウムやマグネシウムの葉内成分の溶脱がモミ枯れに関与する可能性が明らかとなった。これは、酸性霧の曝露実験からも証明された。札掛では、汚染物質の負荷量は大山と同程度であることが明らかとなった。

iii . 大気汚染物質拡散予測モデルの構築

瀬戸内沿岸に見られる海陸風及び接地逆転層の形成などによる大気汚染物質の滞留が森林衰退に及ぼす作用を評価した。広島県を中心とする大気汚染物質拡散輸送・光化学オキシダント発生予測モデルを開発し、都市周辺山林への汚染物質の分布・負荷量を推定した。このモデルにおいては、過去20年間の広島県の汚染物質発生量、大気中濃度、気象条件を考慮している。その結果、近年、自動車排ガスに由来すると考えられる窒素酸化物の周辺山林への負荷量が増大していることが明らかとなった。汚染物質の局地的輸送過程を流跡線解析により明らかにする試みを検討している。

丹沢山系・大山における酸性霧の発生過程および首都圏からの汚染物質の輸送過程、負荷量を汚染物質拡散モデルを用いて解析した。ケーススタディとして、1998年8月下旬の気象条件下での汚染物質の輸送過程や負荷量を計算し、モミ衰退との関連性を検討した。

4) 森林衰退の制御に関する提言

近年の大気汚染による樹木衰退は、70年代頃の硫黄酸化物による急激で可視的な衰退とは異なり、窒素酸化物からの二次的な生成物による外部からは判断しにくいゆるやかな過程を含んでいる。本プロジェクトで対象としている樹種以外の針葉樹および広葉樹の衰退に関する調査は不十分であり、早急に調査を開始する必要がある。

ここで、大気汚染以外の諸要因も含めた森林の衰退機構を解明することが重要である。すなわち、大気汚染によって生理機能が低下した樹木に対し、病害虫の発生、人為管理の有無や植生遷移の進行の影響などを総合的に評価していかなければならない。本プロジェクトでは、化学・生物学の中のあらゆる分野からの協調と共同作業が可能な研究体制の確立・維持と社会政策との対応を目指している。

大気汚染が他の衰退要因と相補的に森林の衰退に作用する場合、土砂崩れなどの災害発生、生態系の機能の安定性（水源涵養機能など）と生物多様性の減少、風致の低下などの諸問題が助長される可能性が高い。したがって、衰退の抑制には、林床管理や病虫害の制御はもちろん、窒素酸化ガスなどの汚染物質の制御があらためて重要になるだろう。

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

発表者・著者 Takemitsu Arakaki, Takayuki Miyake, Tsuyoshi Hirakawa and Hiroshi Sakugawa

発表論文名 pH Dependent Photoformation of Hydroxyl Radical and Absorbance of Aqueous- Phase N (III) (HNO_2 and NO_2^-)

掲載誌 Environmental Science & Technology, Vol. 33, No.15, pp. 2561-2565 (1999)

発表者・著者 Koichi Watanabe, Yutaka Ishizaka and Chisato Takenaka

発表論文名 Chemical Composition of Fog Water near the Summit of Mt. Norikura in Japan

掲載誌 Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 77, No. 5, pp. 997-1006 (1999)

発表者・著者 岡馬 裕人

発表論文名 松枯れに関する社会科学的側面からの考察

掲載誌 社会文化論集 No. 6, pp. 187-229 (1999)

発表者・著者 井川 学・中田典秀・大河内 博

発表論文名 降水中の揮発性有機化合物濃度とその支配要因

掲載誌 大気環境学会誌 Vol. 34, No. 3, pp. 211-218 (1999)

発表者・著者 井川 学

発表論文名 (解説) 丹沢・大山における森林衰退と酸性霧

掲載誌 環境科学会誌 Vol. 12, No. 2, pp. 233-240 (1999)

発表者・著者 永淵 修

発表論文名 酸性雨研究と樹氷の分析

掲載誌 酸性雨研究と環境試料分析 pp.51-69 (1999)

発表者・著者 Hiroto Okaba, Kaneyuki Nakane, Toshiyasu Tomii and Kouji Ebisu

発表論文名 Effect of feeding by *Monochumus alternatus* on pine tree vitality(2) A case of natural young Japanese red pine stands under different air pollution levels

掲載誌 広島大学総合科学部 紀要Ⅳ 理系編 Vol. 25, pp. 61-73 (1999)