

「中国地方アカマツ林の衰退機構の解明および衰退抑制法の検討」

Study of the mechanism and control of red pine tree decline

in the Chugoku district, Japan

代表研究者 広島大学大学院生物圏科学研究科 教授 佐久川 弘

(Hiroshi Sakugawa, Professor, Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University, Hiroshima)

共同研究者：中根 周歩、桜井 直樹、堀越 孝雄、竹田 一彦、土谷 彰男、小林 剛、平川 剛、
中谷 暢丈(Kaneyuki Nakane, Naoki Sakurai, Takao Horikoshi, Kazuhiko Takeda, Akio
Tsuchiya, Tuyoshi Kobayashi, Tsuyoshi Hirakawa and Nobutake Nakatani)

和文アブストラクト

西日本の中国地方では、深刻なアカマツ林の衰退が観察されている。これまでに行った我々の研究から、このアカマツ林の衰退には大気汚染が関与していることが明らかにされつつある。本研究は、中国地方の広島県域におけるアカマツ林の衰退に関して、１）アカマツ衰退を導きうる環境因子の認識、２）環境因子と樹木の活力との因果関係の証明、３）衰退抑制方法の検討を行なうものである。特に、大気汚染物質やその二次生成物質によるアカマツの衰弱について、野外調査の結果に基づいた実験的検証を行なった。また数学的モデルを用いて、物質生産能力の低下がアカマツの個体生長に及ぼす長期的影響を予測した。さらに、森林の林床管理を含めた効果的な衰退抑制方法を検討した。

Abstract

The severe forest decline of Japanese red pine is observed in the Chugoku District, western Japan. On the basis of our previous studies, it has been recognized that the atmospheric pollution causes the pine forest decline. The purpose of this study is 1) to recognize the environmental factors which lead to decline of Japanese red pine, 2) to demonstrate the relationship between the environmental factors and the vigor of pine tree, 3) to examine the method for conservation of healthy pine forest in Hiroshima prefecture, Chugoku district. The investigations of pine tree decline by air pollutants (e.g. nitric acid) and/or secondary pollutants (e.g. OH radical and hydrogen peroxide) have been examined on the basis of findings from field studies. The effects of suppressed CO₂ assimilation on growth of pine trees have been estimated by a mathematical model. The more effective control methods of healthy pine forest including the forest floor management have been also recommended.

1 研究目的

西日本に位置する中国地方では、アカマツ林の深刻な衰退が観察されており、その主な原因としてマツノマダラカミキリが伝播するマツノザイセンチュウの感染による萎凋枯死が強調されてきた。

しかしながら本研究グループによって、健全なアカマツにはマツノザイセンチュウの感染が起こりにくい一方、窒素酸化物（NO_x）ガスに代表される大気汚染の著しい地域において、アカマツ針葉の光合成速度低下や気孔開閉機能不全、異常な早期落葉

が起きていることが明らかにされた。さらに活性酸素の中で、もっとも反応性の高いヒドロキシルラジカル（OH ラジカル）がアカマツ針葉表面の朝露中において光化学的に発生することを突き止めた。この OH ラジカルを生成する擬似露水をアカマツ苗木針葉に噴霧すると、野外の針葉に見られる光合成速度低下や気孔開閉機能不全と同じ現象が起こることを実証した。このような大気汚染物質やその二次生成物質によるアカマツ針葉の物質生産能力の低下は、マツノザイセンチュウの感染に対する脆弱性を高め、

決定的な枯死を誘引すると考えられる。そのため、センチュウ感染までのこれらの物質によるアカマツ衰弱のプロセスを詳細に解明することが現在もっとも重要な課題である。

本研究は、中国地方の広島県域におけるアカマツ林の衰退に関して、1) アカマツ衰退を導きうる環境因子の認識、2) 環境因子と樹木の活力との因果関係の証明を行なうとともに、3) 衰退抑制方法の検討を試みることを目的としている。研究の特徴として、大気汚染物質の二次生成物質である OH ラジカルが植物に影響を及ぼすとの新たな仮説を立て、野外調査の結果を踏まえた実証実験を行なった。また、物質生産能力の低下がアカマツの個体生長に及ぼす長期的影響を数学モデルにより推測した。また、より効果的な衰退抑制方法の検討を行なうため、林床管理がアカマツ林におよぼす影響についても考察した。

2 研究経過

平成 13 年度からの研究開始にあたり、広島県廿日市市極楽寺山周辺を調査地として、アカマツ林衰退地域における大気汚染物質の動態調査を行なった。このとき、アカマツ針葉表面に凝結した露水の化学成分、OH ラジカル生成能とその生成過程の解明を行なった。広島大学園場では、生成源の異なる OH ラジカルがアカマツに及ぼす影響を評価するため、亜硝酸と光フェントン（過酸化水素、鉄、シュウ酸の混合溶液）を混合した溶液のアカマツ苗木への噴霧実験を行なった。

平成 14 年度では、調査地における大気中の硝酸ガス、亜硝酸ガスなど酸性ガスの測定を行ない、OH ラジカルを生成する硝酸と亜硝酸の起源推定について検討と考察を行なった。同地域では、酸性沈着物による土壌酸性化やアルミニウム溶出、およびアカマツ細根の実態調査を行なった。大気汚染物質の排出源のひとつと考えられた自動車排気ガスについて、OH ラジカル生成能の評価についても検討した。噴霧実験では、OH ラジカルを消去する物質であるマンニトールを噴霧液に混合することで、アカマツに及ぼす影響回避実験を行なった。

研究最終年度に当たる平成 15 年度では、前年度に引き続き酸性ガスの調査を行なった。また、OH ラジカル生成が認められたディーゼル排気ガスの捕集液を用いたアカマツ苗木への噴霧実験を行なった。さらに、これまでに行なった OH ラジカル生成水の噴霧実験におけるアカマツ個体生長データをもとに数学モデルを構築し、針葉の物質生産能力低下による個体生長への長期的な影響を解析した。アカマツ林の林床管理の影響についても考察を行ない、これまでの研究の結果ととりまとめ、アカマツ林衰退抑制方法の検討を試みた。

年度末毎に、本研究課題に取り組んでいる研究者によって討論会を開催することで、研究結果のとりまとめと評価を行うとともに、次年度の研究課題について議論を行った。

3 研究成果

本研究において、主に三つの重要な成果が得られた。まず、OH ラジカルに関して、自動車排気ガスに由来する物質からの生成と植物影響を確認した点である。次に、短期間の実験結果から数学モデルを用いて、個体生長への長期的な影響を推測した点がある。最後は、林床管理による二次遷移の抑制を行なうことで、より健全なアカマツ林が形成されている点を明らかにした点である。

3-1. 衰退を導きうる環境因子の認識

3-1-1. OH ラジカルについて

かつて酸性降下物による森林衰退が問題視された欧米諸国では、現在光化学オキシダントによる植物被害が顕在化し、これらによる衰退機構の解明が研究の焦点になりつつある。日本国内でも、関東平野周辺の山林においても顕在化しているが、光化学オキシダントがどのように樹木の衰退に関与しているかはほとんど得られていない。特に、本研究において注目した OH ラジカルは、これまで動態を含めた植物影響は明らかにされていなかった。

大気汚染物質の発生源の一つである自動車排気ガス、特にディーゼル排気ガスには OH ラジカルを生成する硝酸や亜硝酸が含まれており、実際にガソリ

ン車に比べてもその生成量が多いことを確認した。これによって、主にディーゼル車に由来した自動車排気ガスが OH ラジカル生成の生成に関与していることが明らかとなった。野外の酸性ガスやエアロゾルの調査でも、OH ラジカルを生成する硝酸ガスの存在を確認した。また、アカマツ林衰退地域において、健全地に比べて高いことが示された。エアロゾルの調査では、一部硝酸から OH ラジカルが生成することが認められた。しかしながら、一部は未同定物質から生成することが認められた。これについては、現在生成源を確認中であるが、鉄やシュウ酸、過酸化水素といった光フェントン反応を介した OH ラジカル生成と推測している。先ほどの自動車排気ガスの粒子状物質を含め、大気粒子状物質についても OH ラジカル生成の由来成分を明らかにする必要があると考えられる。

アカマツ針葉表面に凝結した露水中には、大量の OH ラジカルが生成することを確認した。また、酸性ガスやエアロゾルの調査結果と同様に、アカマツ林衰退地のものは健全地に比べ生成量が多かった。OH ラジカル生成源としては、硝酸イオンと亜硝酸が全体の約 40 % を占めた。OH ラジカル生成反応の場となるアカマツ針葉表面を形成するクチクラワックスの量は、逆にアカマツ林衰退地域において少ないことを確認した。このことは、アカマツが大気や土壌の水分条件に敏感に反応し、乾燥時には気孔を閉じたとしても葉からの水分損失量が多くなる可能性を示している。

以上をまとめると、自動車排気ガスなどに由来する OH ラジカル生成物質がアカマツ針葉表面に吸着し、これらが朝露に溶け込んだ後に太陽光の照射によって OH ラジカルを生成するという一連の過程が明らかとなった。これにより、OH ラジカルがアカマツ衰退に関与している可能性が考えられた。

3-1-2. アカマツ林床管理について

アカマツ林床の手入れは二次遷移の進行を遅らせ、下層木の進入がアカマツの生長に影響を及ぼすことを防ぐ効果があると考えられている。実際に、林床管理の有無がアカマツ針葉の生理活性に及ぼす影響

を調べた結果、林床管理を行っていない林のアカマツ針葉の光合成速度や気孔コンダクタンスは、隣接する管理を行なっている林よりも低下していることを確認した。しかしながら、これまでの大気汚染物質による光合成速度の低下には植物ホルモンのエチレン放出の増加を伴うのに対して、エチレン放出量の増加は認められず、林床管理の有無による光合成速度の低下のメカニズムは、大気汚染によるものとは異なる可能性が示された。

3-1-3. 他の因子について

上記以外にも、酸性降下物による土壌酸性化（土壌 pH、交換性陽イオン量、水溶性アルミニウム濃度、アカマツ細根量）についても調査を行なったが、調査地間では大きな違いは認められなかった。

3-2. 環境因子と樹木の活力との因果関係の証明

ここでは、OH ラジカル生成源が異なる擬似露水を作成し、アカマツ苗木の針葉表面に噴霧することで OH ラジカルが植物へ及ぼす影響を調べる実験的検証を行なった。ディーゼル車排気ガスを通気した溶液を噴霧した場合、約二ヶ月後のアカマツ針葉の光合成速度や気孔コンダクタンスの低下が認められた。しかしながら、同じ溶液に OH ラジカルを消去するマンニトールを加えた場合、光合成速度の低下や気孔コンダクタンスの低下が抑制された。これらのことは、排気ガスに由来する物質から生成した OH ラジカルによってアカマツ針葉の光合成速度や気孔コンダクタンスの低下を引き起こすものと考えられた。

OH ラジカルや林床管理などによる個体レベルの物質生産能力低下の長期的影響は、アカマツ個体維持を行なう上で同化産物の投資・分配方法が変わってくるのが予想される。実験結果から得られたアカマツの個体生長への長期的な影響を推定するために、これまでに行ってきた OH ラジカル暴露によるアカマツ苗木の乾物生長データから数学モデルを作成した。このアカマツ生長モデルを用いたとき、個体レベルの物質生産能力の低下が数年単位で継続されると、生産と消費の均衡に破綻をきたし、枯死

にいたる結果が得られた。

3-3. 衰退抑制方法の検討

本研究では、広島周辺のアカマツ林では少なくとも二つ以上の環境因子が係わっている可能性を示した。一つは大気汚染物質であり、もう一つは林床管理放棄による二次遷移の進行である。特に、アカマツ林衰退地域におけるアカマツ針葉の光合成速度低下には、エチレン放出の増加が伴うという林床管理とは異なる応答が見られた。そのため、主に大気汚染物質による影響が大きいものと考えられた。これによって、アカマツ林の衰退抑制方法としては、大気汚染物質、特に OH ラジカル生成源となりうる硝酸や亜硝酸の元となる NO_x の排出負荷量の抑制が必要と考えられた。しかしながら、実際には大気汚染物質排出抑制の施行には時間がかかることが予想される。よって、現実的には林床管理がアカマツ林の維持に効果があると期待される。

4 今後の課題と発展

OH ラジカルによる植物影響は、詳細なメカニズムを明らかにする必要がある。特に、暴露直後のアカマツ針葉の生理応答により、明らかにされることが期待されている。物質生産能力の低下の影響については、光合成速度の季節変化や日周変化、糖やデンプンなどの貯蔵物質濃度や分配も含めた詳細な数学モデルの構築により、アカマツ個体衰弱を評価できると考えられる。本研究の成果を生かし、アカマツ林衰退に対する人為活動の影響の存在の指摘や地域生態系の悪化の警告を促すことで、汚染物質の排出抑制やアカマツ林維持管理の重要性の提言を行っていく。

5 発表論文リスト

- [1] D. H. Kim, K. Takeda, H. Sakugawa, J.-S. Lee: Chemical compositions in rainwater at Hiroshima Prefecture, Japan. Anal. Sci. Technol., 15 (4), 321-328, 2002.
- [2] M. Chiwa, N. Oshiro, T. Miyake, N. Nakatani, N. Kimura, T. Yuhara, N. Hashimoto, H. Sakugawa: Dry

deposition washoff and dew on surfaces of pine foliage on the urban- and mountain-facing sides of Mt. Gokurakuji, western Japan. Atmos. Environ., 37, 327-337, 2003.

- [3] M. Chiwa, D. H. Kim, H. Sakugawa: Rainfall, stemflow, and throughfall chemistry at urban- and mountain-facing sites at Mt. Gokurakuji, Hiroshima, western Japan. Water, Air, Soil Pollut., 146, 93-109, 2003.
- [4] D. H. Kim, K. Takeda, H. Sakugawa, J.-S. Lee: The photochemical reactions of iron species in rain and snow in Higashi-Hiroshima, Japan. Anal. Sci. Technol., 16 (6), 466-474, 2003.
- [5] A. Tsuchiya, H. Sakugawa: Effects upon medium and understory tree individuals after the dieback of red pine (*Pinus densiflora*) in Saijo Basin, Hiroshima Prefecture, Japan. Jpn. J. Biometeor., 40 (4), 183-195, 2003.
- [6] N. Nakatani, A. Kume, T. Kobayashi, T. Hirakawa, H. Sakugawa: Needle morphology related to chemical contents in the needles of Japanese fir (*Abies firma*) trees subjected to acidic depositions at Mt. Oyama, eastern Japan. Water, Air, Soil Pollut., 152, 97-110, 2004.
- [7] K. Takeda, H. Takedoi, Y. Yamaji, K. Ohta, H. Sakugawa: Determination of Hydroxyl radical photoproduction rates in natural waters. Anal. Sci., 20 (1), 153-158, 2004.
- [8] A. Nurrohim, H. Sakugawa: A fuel-based inventory of NO_x and SO₂ emissions from manufacturing industries in Hiroshima prefecture, Japan. Applied Energy, 78 (4), 355-369, 2004.
- [9] A. Nurrohim, H. Sakugawa: A fuel-based inventory of NO_x and SO₂ emissions from motor vehicles in Hiroshima prefecture, Japan. Applied Energy, in press.

本研究の関連した内容に関して、大気環境学会などで計 12 回、口頭発表を行なった。また、今年度開催される The 6th International Symposium on Plant (10 月、筑波)においても、発表を予定している。