

序 文

「交付金プロジェクト研究」は、平成13年度に森林総合研究所が独立行政法人となるにあたり、これまで推進してきた農林水産技術会議によるプロジェクト研究（特別研究など）の一部および森林総合研究所の経費による特別研究調査費（特定研究）を統合し、研究所の運営費交付金を活用して競争的環境の下に運営するものである。研究規模の大きさ等により、交付金プロジェクト研究Ⅰ、及びⅡに区分している。交付金プロジェクト研究Ⅱにおいては、比較的小規模の研究あるいは緊急性の高い調査・研究が実施されてきている。

この「交付金プロジェクト研究成果集15」は、平成17年度までに終了した交付金プロジェクト研究Ⅱの課題について、研究の成果を、研究開発や行政等の関係者に報告することを目的としている。

各研究課題については、さらに研究の進展を図ることが多く残されているが、貴重な成果を得ることが出来たので、ここに刊行し、広く関係者の参考に供する次第である。

研究を推進するにあたっては、多くの皆様にご協力をいただいた。心から感謝の意を表する。また、研究担当者の労に対し、深く感謝する。

平成19年3月

独立行政法人森林総合研究所
理事長 大熊 幹章

目 次

壮齡トドマツ人工林枯損被害の緊急実態調査と原因の解明	1
ヒバ根圏の不完全菌類を利用した健苗短期育成技術の開発	9
スギ花粉暴露回避技術の開発	19
多摩森林科学園環境教育林における森林の生態的機能の観測研究	53
木材焼却時におけるダイオキシン類生成実態の把握	91
ポストゲノムとしてのポプラ完全長 cDNA ライブラリーコレクションの整備	105
多様な森林整備と生産効率の向上のための低コスト高密路網等の配置技術の開発	121
スギ集団葉枯症状に関する判定手法の開発	141
熱帯林保全ツールとしての性フェロモン候補化合物の機能解明	161
木材の耐久化及び機能化のための超臨界二酸化炭素処理の最適化手法の探索	173

壮齡トドマツ人工林枯損被害 の緊急実態調査と原因の解明

壮齡トドマツ人工林枯損被害の緊急実態調査と原因の解明

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

研究年次：平成15～16年（2か年）

予算区分：運営交付金（交付金プロジェクトⅡ）

II 主任研究者

北海道支所 丸山 温

III 研究場所

森林総合研究所北海道支所

IV 研究目的

1999年から2002年にかけて、道東地方において樹齢60年以上のトドマツ人工林で大規模な枯損被害が発生した。植栽後十数年程度までの若いトドマツ林では冬季の凍害や乾燥害でこのような被害が発生する場合があるが、壮齡林で今回のような枯損被害が発生したことは記録にない。本研究では、被害のメカニズムを明らかにし、被害林分の取り扱いなど対応策を提案することを目的とした。

V 研究方法

帯広分局（当時）管内の壮齡トドマツ人工林について、枯損被害発生の有無を調べ、被害マップを作成した。主要被害林分に調査地を設定し、個体別被害状況を調べるとともに、被害の推移を継続調査して枯損被害からの回復の可能性を検討した。被害林分の個体について過去の成長経過を調べ、枯損被害との関連を検討した。枯損被害木について樹幹内部情報を調べ、腐朽など樹幹内の状態と枯損被害の関連を検討した。被害発生林分から最寄りの地点での過去の気象要因（積雪深、気温、飽差、日照時間など）を調べ、被害発生の引き金になった気象要因を抽出した。

VI 研究結果

1999年に被害が発生した阿寒町仁仁志別では、枯損が急速に進んだ結果およそ8割がすでに枯死しており、生存している個体も全て着葉率40%以下であった。2001年以降に被害が顕在化した他の3林分では枯死は1割～2割程度だが、この1年間で枯損が急速に進んでおり、今後仁仁志別同様に枯死個体が増加するおそれがある。いずれの林分でも成長は極度に低下しており、被害発生前にすでに樹勢が著しく衰退していたことがわかった。しかし、土壌断面の形態的な特徴からは、トドマツ造林木の生育を衰退させるような要因は認められなかった。部分的に枯れが発生した個体では幹内部の水分分布に異常が見られ、さらに幹や枝の水分通導機能が極度に低下していた。いずれの林分も、被害発生前の冬季に土壌が平年と比べて著しく深くまで凍結しており、土壌凍結条件下での乾燥による水分通導機能の低下が被害発生の主要因と推定された。以上の結果、枯損の回復や今後の成長は期待できないため、被害林分は伐採して更新を図る必要がある。

VII 今後の問題点

更新を図る場合、立地環境条件に応じた適切な方法の適用と樹種の選定が必要となる。

Ⅶ 研究発表

丸山温・石橋聡・尾崎研一・中井裕一郎・山口岳広・飛田博順・黒田慶子（2003）トドマツ人工林が枯れる？－阿寒町に発生した大規模枯損被害－，北方林業，55，8-12

丸山温・石橋聡・山口岳広・北尾光俊・飛田博順・松井崇史・高橋邦秀（2004）壮齡トドマツ人工林に発生した枯損被害（Ⅰ）被害発生林分と被害の特徴，日林北支論，52，205-106.

松井崇史・丸山温・石橋聡・山口岳広・北尾光俊・飛田博順・高橋邦秀（2004）壮齡トドマツ人工林に発生した枯損被害（Ⅱ）過去の成長経過，日林北支論，52，107-108.

丸山温・石橋聡・山口岳広・中井裕一郎・北尾光俊・飛田博順・松井崇史・高橋邦秀（2005）壮齡トドマツ人工林に発生した枯損被害（Ⅲ）被害要因と林分の取扱，日林北支論，53，36-37.

丸山温・北尾光俊・飛田順博・中井裕一郎・石橋聡・山口岳広（2005）少雪でトドマツが枯れる，平成16年度研究成果選集，40-41，森林総合研究所

山口岳広・丸山温（2006）道東のトドマツ枯損衰退林分におけるレーダー波非破壊測定装置を用いた水分通導阻害と腐朽被害の探査，日林北支論，54，

Ⅸ 研究担当者

丸山温、石橋聡、山口岳広、中井裕一郎、北尾光俊、飛田博順、高橋邦秀（北海道大学）

壮齡トドマツ人工林枯損被害の緊急実態調査と原因の解明

ア 研究目的

1999年初夏に帯広分局（当時）管内阿寒町仁仁志別のトドマツ人工林約200haで針葉が大量に褐色変するという被害が報告された。激害地では90%以上の個体に何らかの被害が認められ、枯死のおそれがあるものは50%近くにも達した。当該人工林は植栽後70年以上を経過しているが、このような壮齡林の大量枯死は北海道でも例がなかった。

1999年秋に帯広分局（当時）が管内トドマツ人工林の状況を調べた結果では、枯損被害は仁仁志別周辺に限られており、地域的・特異的な現象と判断された。ところが、2001年ごろから同様の枯損被害が釧路周辺の壮齡トドマツ人工林に発生しはじめた。当初は軽微な被害であったが、2002年には枯損が急速に進行し、大量の被害木が発生した。また、2002年には十勝西部森林管理署管内のやはり壮齡トドマツ人工林にも枯損被害が発生し、広域的な衰退枯損被害の様相を呈しはじめた。帯広分局（当時）から要請を受けて2002年9月に現地を調査したところ、着葉率の著しい低下から枝枯れ、枯死に至る特徴がいずれの林分でも共通していることがわかった。今回の広域枯損被害には、2000、2001年と夏季の気温が高かったことによる蒸散の増大が影響していると考えられ、今後温暖化による蒸散の増大が進むと更に被害が拡大するおそれがある。仁仁志別における調査から、冬季の水ストレスによる通導機能阻害が要因の一つと推定されたが、原因の詳細な解明には至っていない。帯広分局森林整備課（当時）担当者から、早急に被害要因を解明し対応策を策定することを求められている。

本研究は、壮齡トドマツ枯損被害のメカニズムを明らかにし、今後の推移を予測するとともに、被害林分の取り扱いなど具体的対応を策定することを目的とする。そのために、被害地を含む周辺の枯損実態、被害地の微気象や過去の気象データ、被害木の過去の成長経過などを調べる。

イ 研究方法

調査は根釧西部森林管理署2152林班い小班（阿寒町仁仁志別、昭和3年植栽、以下仁仁志別）、同61林班い小班（厚岸町上尾幌、大正8年植栽、以下上尾幌）、同293林班い小班（標茶町雷別、昭和6年植栽、以下雷別）、十勝西部森林管理署381林班い、ろ小班（中札内村元更別、昭和12年植栽、以下元更別）、計4林分で行った（図1）。仁仁志別については、被害が軽微だった2152林班つ小班（昭和3年植栽、以下仁仁志別下）においても調査を行った。

20m×50mの方形プロットを、平坦な上尾幌では1箇所（31個体）、尾根状の元更別では傾斜15度の東南東斜面1箇所と平坦な尾根筋3箇所の計4箇所（計183個体）、それぞれ設定した。仁仁志別で



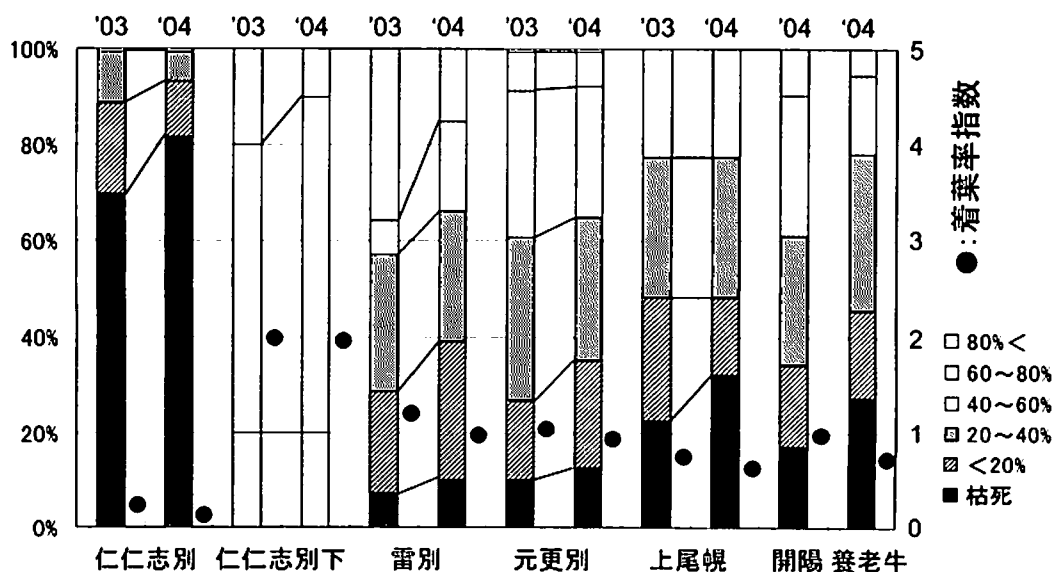
図ー1 調査地の位置と被害発生年

はトドマツ人工林収獲試験地（傾斜15度の南西斜面）(3)内の標準地（40m×50m、134個体）をそのまま調査プロットとした。雷別、仁仁志別下では枯損被害木の伐採が予定されており調査地が設定できなかったため、無作為に前者では20個体、後者では10個体を選んで調査の対象とした。なお、元更別では2002年調査前にhaあたり162本、雷別では2002年調査後にhaあたり108本、それぞれ枯損被害木の伐採が行われた。対象とした個体全てについて、樹冠部の着葉率を20%刻みの5段階（1：20%未満、2：20～40%、3：40～60%、4：60～80%、5：80%以上）で評価した。枯死個体には0をあて、枯死個体を含む平均値を林分の着葉率指数とした。調査は2003年10月と2004年10月に行った。2004年10月には、根釧東部森林管理署601林班ほ小班（中標津町開陽、昭和6年植栽、以下開陽）、同621林班り小班（中標津町養老牛、昭和7年植栽、以下養老牛）の2箇所でも同様の調査を行った。また仁仁志別、仁仁志別下、上尾幌、元更別では、2004年10月に土壌断面調査も合わせて行った。

各被害林分から無作為に20個体（仁仁志別下は10個体）を選び、2003年10月に成長錐を用いて幹からコアを抜き、過去の成長経過を調べた。2003年9月と2004年10月に一部の個体を伐倒し、幹から高さ別に円盤試料を採集して樹幹解析を行った。また、レーダー波による非破壊測定装置を用い枯損被害発生の有無および衰退程度と水分通導阻害、腐朽病害との関連を調べた。この調査に用いた非破壊測定用の機器はImRa System（ポータブルイムパルスラダー：フィンランド TOIKKA社製）で、1GHzのアンテナを装備し、レーダーと同じ原理により非破壊で物体内の状態を画像表示する機器である。電磁波をアンテナから発射し、反射波の強弱を画像で示すもので、不均質あるいは密度の違う部分や含まれる水分の違う部分が捉えられる（6,7）。調査本数は阿寒町仁々志別で24本、仁仁志別下で10本、標茶町雷別で19本、厚岸町上尾幌で30本、中札内村元更別で15本、合計97本である。対照として被害が全く見られない弟子屈町の林分についても同様に、過去の成長経過と樹幹内部情報の調査を行った。

枯損の原因の一つと推定される土壌凍結深については、元更別最寄りの上札内、雷別最寄りの標茶、上尾幌最寄りの太田の各アメダス気象データの日平均気温と積雪深から既報の推定方法(5)に従って求めた。

ウ 結果と考察



図－2 着葉率別個体割合と着葉率指数

各林分の着葉率別個体割合と着葉率指数を図2に示す。仁仁志別では、枯死個体の占める割合は2003年の7割強から2004年は8割以上と増加した。着葉率指数も同じく2003年の0.42から2004年は0.26と低下しており、全体的に枯損の進行が続いていた。生存している個体も着葉率は全て40%以下で、林分としては壊滅状態と言える。一方、被害が軽微だった仁仁志別下では全ての個体が着葉率40%以上で、着葉率指数にも変化は見られなかった。雷別でも着葉率に大きな変化は見られなかったが、元更別、上尾幌では仁仁志別と同様に、2003年と比べて2004年は枯損がさらに進行していた。2004年に調査した開陽と養老牛の枯損被害状況を他の林分と比較すると、開陽は雷別および元更別と、養老牛は上尾幌と、それぞれ同程度であった。仁仁志別下を除く林分の2004年の着葉率指数は2未満であったが、これは平均着葉率30%未満に相当し、枯損被害がかなり進行していることを示している。

各林分における成長特性を図3に示す。定期的に間伐が入っているにも関わらず、全ての被害林分において樹幹肥大成長は長期的な減少傾向にあることが明らかになった。しかし、土壌断面の形態的な特徴からは、トドマツ造林木の生育を衰退させるような要因は認められなかった。なお仁仁志別は収穫試験地であることから、十分な間伐が行われていたことが明らかになっている(3)。一方、被害の見られなかった弟子屈では同様の減少傾向は見られなかった。これらのことから、被害林分の成長量の減少が枯損被害に対して副次的な要因として関与している可能性が示された。

図4にトドマツ枯損木・衰退木の非破壊測定プロファイル例を示す。樹幹内部の情報との関連では、着葉量が減少している個体では、非破壊レーダー波測定装置による画像でも通導部位に異常が見られるものが多かった(図5)。

また、着葉量がそれほど減少していない個体でも、通導部位に異常が生じていると判定できる個体も散見され、これらの個体が次年度以降衰退していく可能性が予見された。

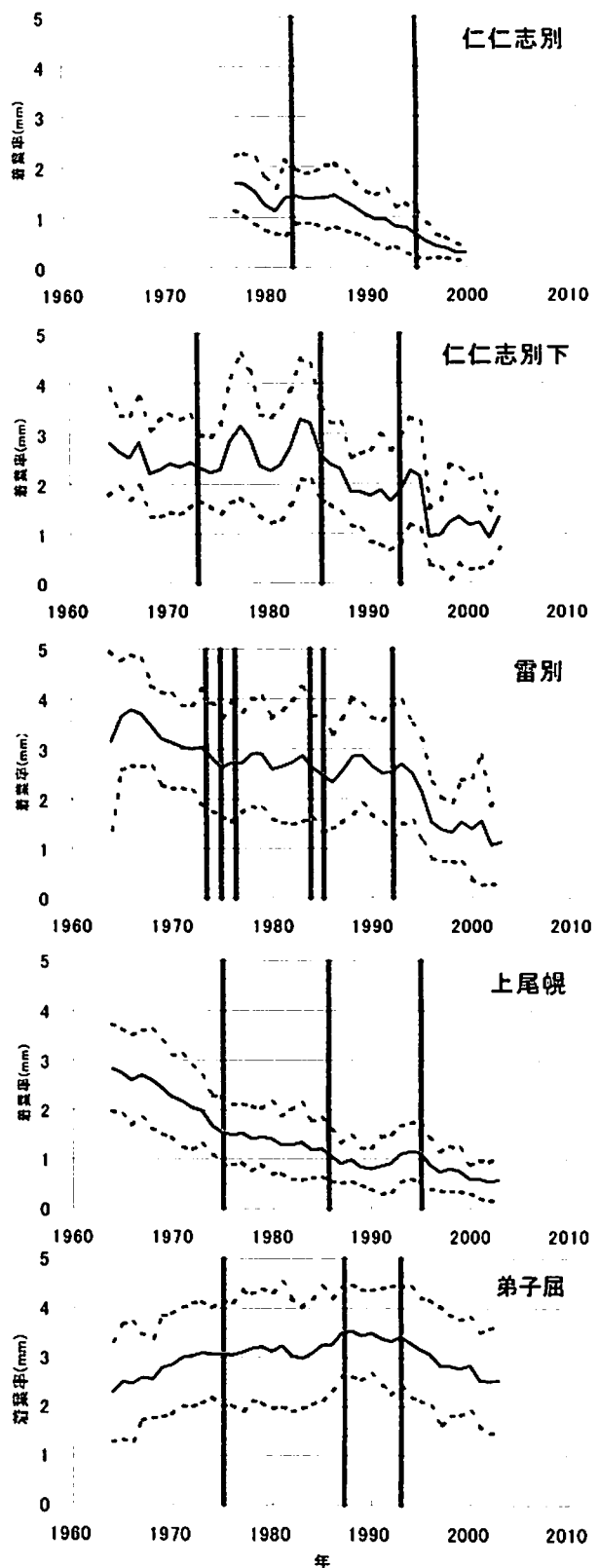
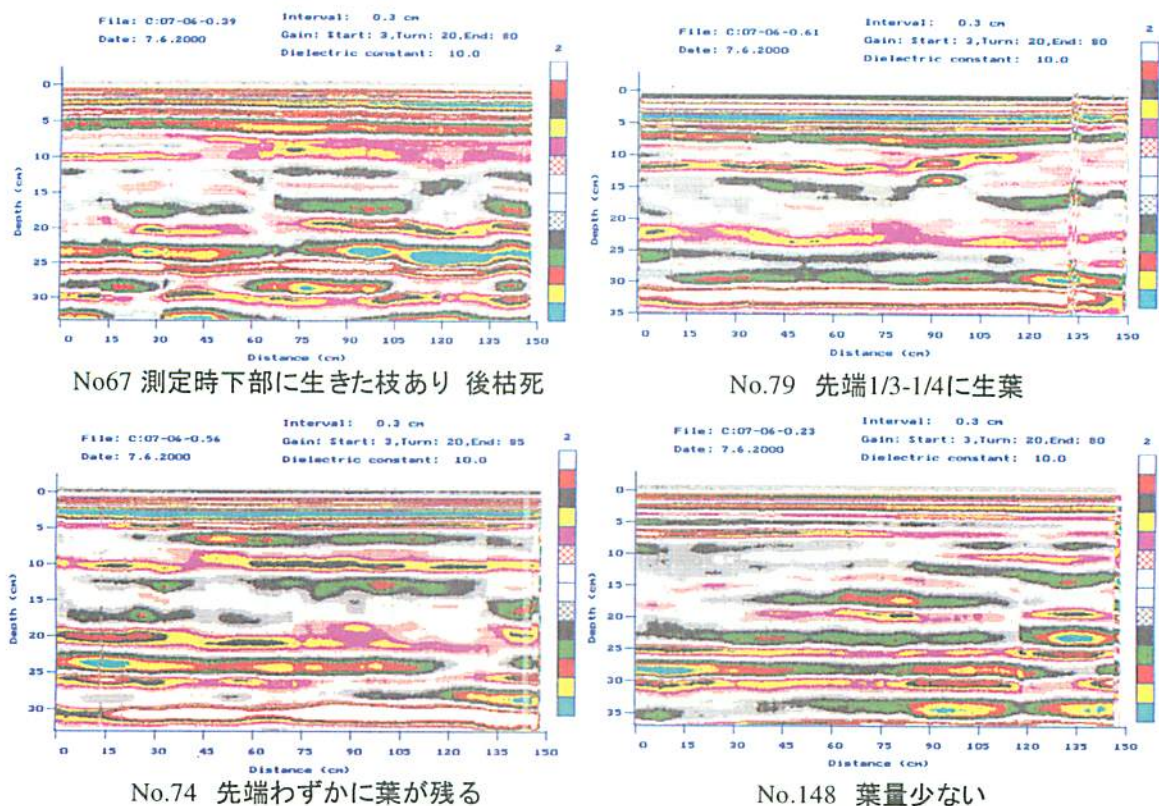


図-3 各林分の成長特性
実線は平均値、破線は標準偏差、
縦線は間伐の入った年を示す

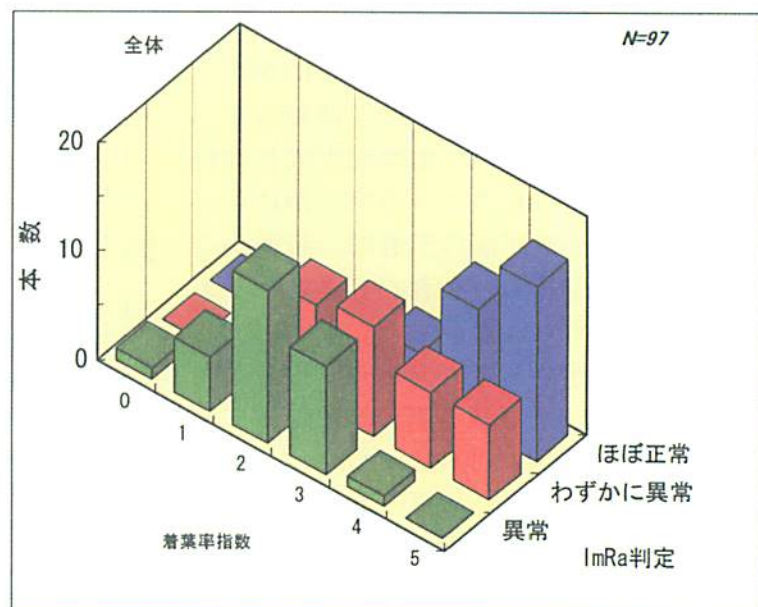


図－4 トドマツ枯損木・衰退木の非破壊測定プロファイル（仁々志別）

対照林分である弟子屈のトドマツ人工林は着葉量も多く、外見上異常な個体は見あたらなかったが、非破壊レーダー波測定装置による画像でも通導部位に異常が見られる個体はほとんどなかった。調査した地域ではモミサルノコシカケによるトドマツ溝腐病（トドマツ辺材腐朽）がわずかに数例見られたのみで、非破壊レーダー波測定装置では他の腐朽病害の徴候はなかったことから、このトドマツ衰退枯損と腐朽被害には直接の関連はないと考えられた。

雷別、上尾幌、元更別それぞれ

最寄りの標茶、太田、上札内とも、2000-2001年、2001-2002年の冬は過去14年の中で土壌凍結が著しく深くまで進行していたことが推定された（図6）。仁々志別最寄りの中徹別



図－5 着葉率、ImRa判定ごとの個体数

でも、被害発生直前の冬季の土壤凍結が著しく深かったことがわかっている(4)。帯広分局

(当時)管内における枯損被害は雪の少ない地域に限られており、弟子屈など積雪が深い地域で被害が見られないこと(5)を考慮に入れると、これまでの報告(1、4)にあるとおり、土壤凍結が深い条件下での蒸散による樹冠部の乾燥が原因で水分通導機能が著しく低下したことが、枯損被害発生要因の一つである可能性が高い。仁仁志別下で被害が軽微だったのは、谷地形で雪が溜まりやすく、土壤凍結が深くまで進まなかったためと考えられる。

今回の大規模枯損被害は数十年に一度の異常気象が原因の可能性はあるが、温暖化などの環境変動により根雪が遅れるなど降雪のパターンが変化すれば、深い土壤凍結がより頻繁に起こるおそれがある。道東太平洋側地域一帯は根雪になるのが遅く、気温も低いことから土壤凍結が起こりやすい。昭和40年代にも造林地や苗畑で大規模な被害が発生しており、今回の被害を考慮すると、潜在的にトドマツの冬季乾燥害が発生しやすい危険地域として改めて認識する必要がある。

これら被害林分では直径成長が極度に低下しており、将来的な成長は期待できない。仁仁志別では2000年時点で3割程度だった枯死個体が2004年には8割以上まで増加しており、他の林分でも今後枯損が進行し続けるおそれがある。被害林分については継続して着葉率を調査し、枯損が進行するようであれば伐採して更新を図る必要があろう。2002年に被害木を伐採した雷別293林班の一部では、根釧西部森林管理署によってササ除去などの地表処理が試みられており、広葉樹の侵入による更新が期待される。植栽する場合、トドマツでは将来的に同じ枯損被害が発生するおそれがあり、回避するには他の針葉樹か落葉性の樹種が望ましい。しかしエゾマツ、アカエゾマツは成長が遅く、成林に長期を要するという短所がある。カラマツは野ネズミの食害が懸念されるが、グイマツとの雑種F1は野ネズミの食害を受けにくく、初期成長も早いという優れた造林特性を持ち、さし木による大量増殖も可能なことから(黒丸 2001)、候補樹種として期待される。

エ 今後の問題点

更新を図る場合、立地環境条件に応じた適切な方法の適用と樹種の選定が必要となる。

オ 要約

本研究は、1999年から2002年にかけて道東で発生した壮齢トドマツ枯損被害のメカニズ

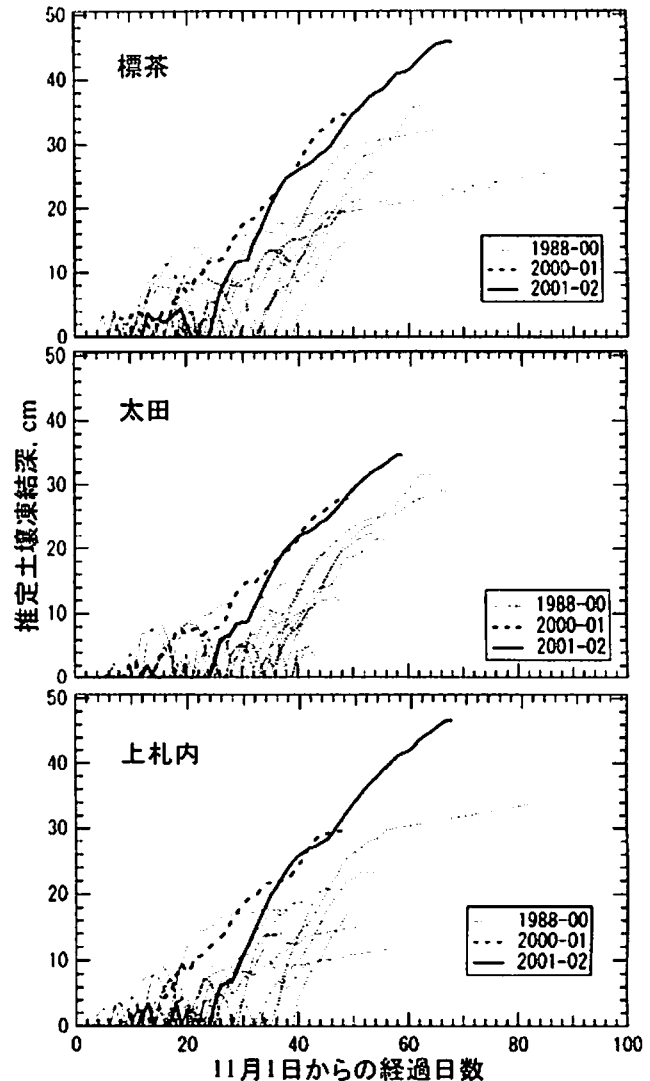


図-6 アメダスの積雪深と日平均気温から推定した土壌凍結深の推移

ムを明らかにし、今後の推移を予測するとともに、被害林分の取り扱いなど具体的対応を策定することを目的とした。

帯広分局（当時）管内のすべての壮齢トドマツ人工林について、枯損被害発生の有無を調べた。また、主要被害林分に試験地を設定して土壌調査を行うとともに、個体別被害状況、樹幹内部情報、過去の成長経過を調べた。被害発生林分から最寄りの地点での過去の気象要因（積雪深、気温、飽差、日照時間など）を調べ、土壌凍結深を推定した。枯損被害は積雪の少ない太平洋寄りの地域に集中しており、積雪の多い地域では被害は見られなかった。1999年に被害が発生した阿寒町仁仁志別では、枯損が急速に進んだ結果およそ8割がすでに枯死しており、生存している個体も全て着葉率40%以下であった。いずれの林分でも成長は極度に低下しており、被害発生前にすでに樹勢が著しく衰退していたことがわかった。しかし、土壌断面の形態的な特徴からは、トドマツ造林木の生育を衰退させるような要因は認められなかった。部分的に枯れが発生した個体では幹内部の水分分布に異常が見られ、さらに幹や枝の水分通導性が極度に低下していた。被害発生前の冬季に土壌が平年と比べて著しく深くまで凍結していたことから、土壌凍結条件下での冬季の乾燥により樹体の水分状態が極度に悪化して水分通導機能が低下したことが、被害発生の主要因と推定された。2001年以降に被害が顕在化した他の3林分では枯死は1割～2割程度だが、この1年間で枯損が急速に進んでおり、今後仁仁志別同様に枯死個体が増加するおそれがある。以上の結果、枯損の回復や今後の成長は期待できないため、被害林分は伐採して更新を図る必要がある。

カ 引用文献

- (1) 黒田慶子(2000)道東トドマツ壮齢人工林に発生した集団枯損－水分通導阻害がなぜ起こったのか－, 森林保護276, 12-14
- (2) 黒丸 亮(2001)グイマツ雑種F1の幼苗からのさし木増殖法, 光珠内季報122, 1-6
- (3) 森林総合研究所北海道支所・道内5営林(支)局(1995)収穫試験地報告第19号「森林の構造と成長の関係解析に関する研究」, 90-91
- (4) 丸山 温他(2003)トドマツ人工林が枯れる?－阿寒町に発生した大規模枯損被害, 北方林業55(2), 8-12
- (5) 竹内典之(1980)東北海道における火山灰土の凍結と融解. I. 畑地土壌の凍結状況の季節変化, 京大農演報52, 112-129
- (6) 山口岳広(2000)レーダー波による立木腐朽等の非破壊検知の試み, 第112回日本林学会大会学術講演集, 291
- (7) 山口岳広(2002)レーダー波探査装置による生立木腐朽等の樹幹内情報把握の試み, 樹木医学研究6(1), 57

ヒバ根圏の不完全菌類を利用
した健苗短期育成技術の開発

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

平成15～17年（3カ年）

予算区分 運営交付金（交付金プロジェクトⅡ）

II 主任研究者

主査 森茂太

取りまとめ責任者 森茂太

III 研究場所

森林総合研究所東北支所、山形大学農学部、青森県農林総合研究センター・林業試験場

IV 研究目的

ヒバの二次代謝産物とヒバ根圏微生物の関係、及びヒバ根圏微生物とヒバ苗の成長、栄養生理、生存との関係を明らかにする。ヒバ二次代謝産物とヒバ根圏微生物との関係を応用したヒバ健苗短期育成技術を開発する。

V 研究方法

ヒバ実生の二次代謝産物の定性、定量の分析条件に関する検討を行い、その結果を基に二次代謝産物の分析を行う。二次代謝産物、根圏微生物の有無とヒバ苗の成長・生存の関係を明らかにする。これらのとりまとめ結果に基づくヒバ健苗短期育成技術の提案を行う。

VI 研究結果

（1）ヒバの二次代謝産物と根圏微生物の関係、及びヒバ根圏微生物とヒバ苗の成長、栄養生理、生存との関係

1. 土壌の違いと実生成長、根圏微生物

林地でヒバ実生が更新する場所は鉾質土壌が多いことから、森林総研東北支所では通常の苗畑土である黒ボク土ではなく、鉾質土壌のモデルとしてカヌマ土を播種床に利用している。種子を両土壌に播種し、苗成長を比較調査したところ、黒ボク土の実生で成長量が有意に増加した。ヒバの根に共生するArbuscular 菌の感染率は黒ボク土の実生で顕著に高く、カヌマ土ではArbuscular 菌の感染はなく *Phomopsis* 属糸状菌の感染頻度が高かった。青森県中里町の鉾質土壌で実生を生育させた場合にも *Phomopsis* 属糸状菌の感染が顕著であることから、本糸状菌は鉾質土壌でヒバ実生を生育させた場合に根内に主に感染する種子菌であることが明らかとなった。

2. 実生成長に関与する無機化学成分（C, N, Mg, P, Fe, Ca）

ヒバ実生の地上部、地下部において、Nの量は黒ボク土の実生で顕著に多かった。Cは全ての時期で差がなかった。また、地上部では播種年秋以降に、地下部では播種翌年夏以降に、MgとPの量は黒ボク土の実生で顕著に多かった。黒ボク土はカヌマ土に比べ無機栄養成分に恵まれているた

め、この差が実生の吸収する無機成分に影響を与えた。土壌の栄養塩類は実生成長とリンクしており、実生成長は苗畑の黒ボク土の方が良かった。一方で、共生菌であるArbuscular菌は植物体内への無機成分の取り込みを助長することが知られており、黒ボク土で生育させた実生にはArbuscular菌が高感染しており、この菌との共生も実生成長促進の一要因であろう。

3. 実生の生体防御に関与する二次代謝成分

地上部と地下部の二次代謝成分の分析を行った。地上部で、トータルフェノール量がカヌマ土の実生で多かった。地下部では全ての時期で両土壌生育の苗で差がなかった。地上部ではcatechinとその誘導体が主要成分であり、カヌマ土生育の実生でこれらの量が顕著に多かった。地下部ではcatechin、catechin誘導体やtotalolが主要成分であり、カヌマ土の実生でtotalolの量が多い傾向にあった。カヌマ土の実生の方が二次代謝産物を多く産生する傾向があり、要因として貧栄養ストレスとPhomopsis 属糸状菌感染ストレスが考えられる。他の実験において、5種類の栄養状態の異なる土壌で実生を生育させた場合、二次代謝産物量に差がないという結果を得て、貧栄養塩類ストレスは否定された。また、これらの実生からはPhomopsis 属糸状菌感染が顕著に確認された。よって、Phomopsis 属糸状菌感染ストレスが要因でこうした物質が増加したと結論づけた。さらに、コッホの原則を満たすため本菌の接種試験を行った。その結果、接種により上記二次代謝産物の誘導が確認され、接種部位から本菌が再度分離された。

(2) ヒバ健苗短期育成技術の提案

1. 小型穂木による挿し木苗の短期育苗技術

民間林業研究グループの協力の元、従来の5～6年かかっていた実生によるヒバ苗作りに対して、鉾質土壌の挿し床に小型穂木を挿す方法を用いて3年で山出しする方法を提案した。発根後、通常の土壌に戻した。本方法は天然林の更新サイトの土壌条件をモデルに考案された。本方法は青森県の指導林家で試験され、同グループの成果として平成17年度林業改良普及協会会長賞を受賞して、現場で利用が開始された。しかし、ヒバの系統による発根能力の違いもあるので更に検討を重ねる必要がある。新潟県などで行われていた挿し木苗に比べて、小型の穂木と鉾質土壌を使用する点が異なる。また、小型穂木を用いることで効率よく多数の穂木を作ることができた。

2. 播種床の工夫による発芽率の増加

従来の種子の播種方法では覆土が必要とされたが覆土の問題点を根圏微生物の側面から明らかにして新たな播種方法を提案した。本方法はJournal of Forest Research に論文として掲載され、実用的方法として徐々に現場に普及している。種子への接種試験の結果、分離菌のうち *Cylindrocarpon tenue*、*C. tonkinense*、*Cylindrocarpon sp.*、*Fusarium oxysporum*、*F. lateritium*、*Botrytis sp.* が種子に病気を引き起こすことがわかった。したがって、ヒバ種子を黒ボク土へ播種する場合には覆土を避ける必要があることを明らかにした。

VII 今後の問題点

本課題では、適切な土壌選択と小型穂木による挿し木の利用によって、これまで5～6年かかっていた育苗期間を概ね3年で山出しができるように短縮するに至った。しかし、実生苗に比べて小型穂木による苗作りは手間がかかる問題点がある。さらに、今後は現場で多様な苗の使い分けについて検討を重ねる必要がある。さらに、植栽後の成長や活着率、病虫害など様々な側面から更に検討を重ねて結果を慎重に評価する必要がある。上記方法を実用的方法として提案したが、

本研究期間では提案した方法の利点に関するメカニズムを十分に解明するまでは至っていない。このため、交付金プロジェクト「北方天然林における持続可能性・活力向上のための森林管理技術の開発」（平成18～22年）において多様な環境におけるヒバ成長等を検討する予定である。また、詳細なヒバ根圏の微生物群集とヒバ抗菌物質の関係は現在も検討を進めており、国際誌に投稿中である。

VIII 研究発表

- 1) 森茂太、山路恵子、石本洋、下田直義、樫間岳、窪野高德、糸屋吉彦 (2003). ヒバ実生根面の不完全菌類。東北森林科学会誌8. 111-114.
- 2) 森茂太、山路恵子、石本洋、下田直義、樫間岳、工藤俊美、糸屋吉彦、成田俊之、日影正明、高木望 (2003). 2つの異なる土壌でのヒバ種子の発芽率と実生成長 東北森林科学会誌8. 108-110.
- 3) 樫間岳・太田敬之・金指達郎・正木隆 (2004). 被陰解除7年後のヒバ稚樹の樹型の変化. 研究情報4.
- 4) K. Yamaji, H. Ishimoto, N. Usui and S. Mori (2004). Organic acids and water-soluble phenolics produced by *Paxillus* sp. 60/92 together show antifungal activity against *Pythium vexans* under acidic cultural condition. *Mycorrhiza* 15:17-23.
- 5) 佐藤隆士・山路恵子・下田直義・森茂太 (2005). 当年生ヒバ実生に対するウリハムシモドキと各種昆虫類による食害被害の影響. 森林防疫54: 11-17.
- 6) 山路恵子・森茂太 (2005). ヒバ実生の根圏微生物. *Forest winds* 21.
- 7) Gaku Hituma, Takayuki Ota, Tatu Kanazashi, Takashi Masaki (2006). Seven-years changes in growth and crown shape of *Thujaopsis dolabrata* var. *hondai* saplings after release from suppression. *J. For. Res.* 11:281-287.
- 8) Keiko Yamaji and Shigeta Mori (2006). Soil covering influences germination of *Thujaopsis* var. *hodai*. *J. For. Res.* 11:146-170.
- 9) 森茂太・兼平文憲 (2006) テーマ別セッション「ヒバの基礎研究とその応用」. 東北森林科学会誌11: 66-69.
- 10) 森茂太 (2006). 東北で民有林と国有林が共同で試みる新たな施業の試み ―自然力を生かした省力化植栽―. 山林 1446: 35-43.

IX 研究担当者

森茂太・樫間岳（森林総研東北支所）・山路恵子・佐藤隆士（日本学術振興会特別研究員）・高橋孝悦（山形大学農学部）・兼平文憲・田中功二（青森県林業試験場）

ヒバ根圏の不完全菌類を利用した健苗短期育成技術の開発

ア 研究目的

資源量の8割が青森県にあるヒバ林業は、これまで天然更新施業中心で行われてきたが、大径木の減少からその資源は質的にも低下し、かつて50万m³あった国有林からの生産量は平成14年度には5万m³にまで低下した。

しかし、ヒバ材の価格は他の林業樹種に比べて上昇傾向にある。国有林で過去試験的に植栽した高齢ヒバ人工林の材はアテが小さいなど品質面で市場の評価を受けており、これまで天然更新施業中心であった東北森林管理局青森分局でも、育林技術研究グループとの共同研究契約の下に人工林実証プロジェクトを開始した⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾。さらに、ヒバはヒノキが持たない抗菌物質であるヒノキチオールなどの二次代謝産物を持つなど機能的側面も注目を集め、今後の多面的な利用での模索は続いており、長期的視点に立った資源充実には民有林、国有林を通じた青森ヒバの緊急課題である。

このような事態に対応するためには、大量の苗木を安定して供給することが不可欠であるが、現在の育苗方法では、安定的に健苗を確保するのは困難な状況にある。育苗期間も5～6年かかり、価格も非常に高い^{(17),(9)}。このため、健苗の短期育成技術を早急に確立する必要がある。

本課題では、現在明らかにしつつある根圏の微生物によるヒバの成長制御・生存要因研究を生態化学、植物生理学、菌学の知見や技術を活用して、ヒバ健苗の短期育苗技術を開発する。

イ 研究方法

1) 二次代謝産物、根圏微生物とヒバ苗の成長・生存の関係の生理学的解明。

ヒバ種子をモデル鉱物質土壌のカヌマ土および苗畑黒土に播種し、次年度以降成長を測定しつつ順次実生を採取し、以下の実験に供した。(a) 根内糸状菌の調査：表面殺菌した根片から根内糸状菌を分離した。Gridline-intersect法を用いてArbuscular菌根菌の感染率も調査した。(b) 無機成分などの分析：乾燥させた地上部および地下部を硝酸-過塩素酸で湿式灰化後ICP-AESに供し、P、Mg、CaおよびFeを定量した。乾燥サンプルの一部はC/N分析に供し、CとNを定量した。(c) フェノール性化合物の分析：実生を採取後、地上部および地下部に分けメタノール中で磨砕し、一晚浸漬した。抽出液は濃縮後50%メタノールに溶解し、トータルフェノール分析を行った。さらにHPLC-DAD分析も行い、抽出液に含まれる主要なフェノール性化合物の定量と同定を行った。(f) 土壌から菌類を分離した。(g) 青森県北津軽郡のヒバ林の鉱物質土壌および林床土からも菌を分離した。(h) 上記ヒバ苗の成長・生存を分析した。(i) 分離した種子菌を苗に接種し、苗の二次代謝産物の定量・定性を行った。(j) 接種苗に接種した菌の再分離を試みた。

2) 二次代謝産物の定性、定量の分析条件に関する検討

ヒバに含まれる多様な化学成分の分析方法について検討した。ヒバの葉や材などに含まれる代表的な化学成分には、トロポロン類である β -thujaplicin(ヒノキチオール)、 γ -thujaplicin、thjopdadiene、widdrol、asunolなど、ジテルペン類であるtrans-communic acid、rimuene、rosadiene、hibaene、pimaradiene、sclarene、sandaracopimaradiene、dolabradiene、13-epi-dolabradiene、abietatrieneなどがある。これらの化合物を中心にガスクロマトグラフィー分析条件及び高速液体クロマトグラフィーを用いた分析条件を検討した。

3) 健苗短期育成技術の提案

1. 小型穂木による挿し木苗の短期育苗技術

平内町産のヒバから枝を採取して、小型穂木を作成した。穂木の全長は約19cmであり、アテなどの従来の大型の穂木に比べて多数の穂木を作成することが可能である。これを秋にプランターの鉋物質土壌に挿し、翌年の春に苗畑に移植して成長、枝性、T/R（地上部/地下部の重量比率）を山出まで追跡した。穂木の採取は11月頃、次年以降の5月に苗を掘り起こして採取し形態成長等を測定観察した。

2. 播種床の工夫による発芽率の増加

(a) ヒバ種子を播種する際に、覆土をする方がよいかどうか検討した。播種床に、①黒ボク土で覆土なし、②カヌマ土で覆土なし、③黒ボク土で覆土あり、④黒ボク土で滅菌砂を覆土とする、の4区設定し種子発芽率を比較した。(b) ヒバ育苗の際の土壌と苗の成長を現場の協力を得て検討した（青森県東津軽郡平内町松野木の青森県指導林家の工藤俊美氏苗畑で試験した。）。また、育苗した山出し苗は東北森林管理局計画課森林技術センターの技術開発課題の植栽試験で使用し、成長、活着率、病虫害の発生などをモニタリングして検討する（同プロジェクト終了後もモニタリング継続、同植栽苗の成長測定に関わる東北森林管理局森林技術センター技術開発課題は林野庁重点課題へ採用された。）。

ウ 結果と考察

(1) ヒバ苗-根圏微生物間相互作用、および二次代謝産物との関係の総合的解析

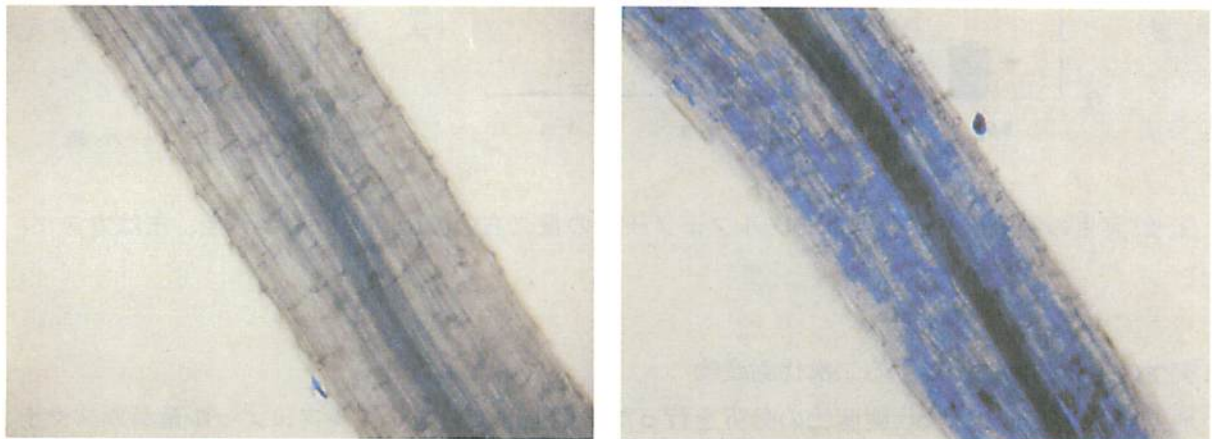


図-1. ヒバ実生（芽後4ヶ月）の根（右は黒ボク土の根、左は鹿沼土の根）

濃く染色された部分（写真右）にアーバスキュラー菌根菌（共生菌）が感染している。

1. 土壌の違いと実生成長、根圏微生物

林地でヒバ実生が更新する場所は鉋質土壌が多いことから、本研究所では通常の黒ボク土ではなく、鉋質土壌のモデルとしてカヌマ土を苗床に利用している⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。種子を両土壌に播種し、苗成長を比較調査したところ、黒ボク土の実生で成長量が有意に増加した。ヒバの根に共生するArbuscular菌の感染率は黒ボク土の実生で顕著に高く、カヌマ土ではArbuscular菌の感染はなくPhomopsis属糸状菌の感染頻度が高かった（図-1）。Arbuscular菌根菌の感染に差が生じたのは、本菌の胞子が黒ボク土では顕著に確認されるが、鹿沼土では確認されなかったことによる。

*Phomopsis*属糸状菌は種子由来であるが、青森県中里町の鉾質土壌で実生を生育させた場合にも *Phomopsis* 属糸状菌の感染が顕著にみられたことから、本糸状菌は鉾質土壌でヒバ実生を生育させた場合に根内に感染する菌であった。

2. 実生成長に関与する無機化学成分 (C, N, Mg, P, Fe, Ca)

地上部、地下部において、Nの量が黒ボク土の実生で顕著に多かった。C は全ての時期で差がなかった。また、地上部では播種年秋以降に、地下部では播種翌年夏以降に、MgとPの量が黒ボク土の実生で有意に多かった(図-2)。黒ボク土はカヌマ土に比べ無機栄養成分に恵まれているため、栄養条件の差が実生の吸収する無機成分に影響を与えたのであろう。これら無機成分は実生成長ともリンクしており、成長には黒ボク土の方が良い。一方で、共生菌であるArbuscular菌は植物体内への無機成分の取り込みを助長することが知られている。黒ボク土で生育させた実生にはArbuscular菌が高感染しており、本菌と共生することで生育が良好になっていると考えられた。

しかし、小谷(2005)は野外の繰り返しのある2種のヒバクロンを用いた施肥試験で、施肥が植栽苗の成長に有効と無効なクロンがあることを示しており¹⁴⁾、こうした点を踏まえてさらに検討を重ねて行く必要があろう。

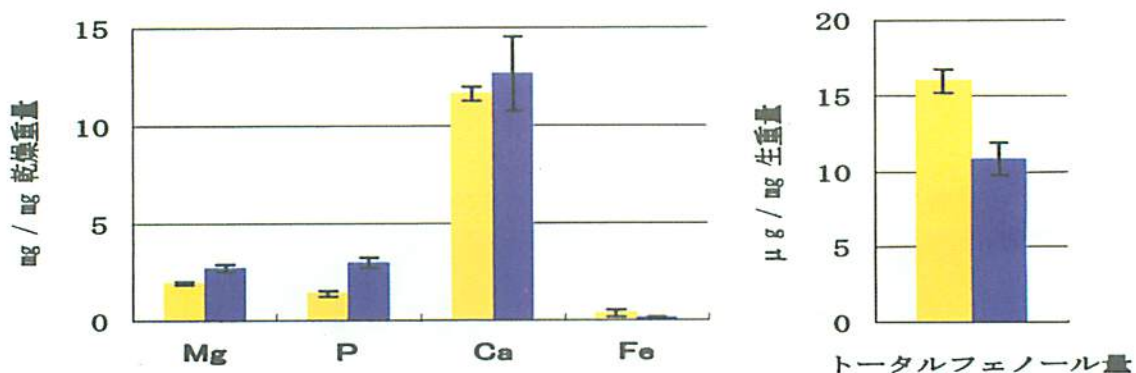


図-2. 実生の無機化学成分とトータルフェノールの量 (右の濃いバーは黒ボク土、左はカヌマ土)

3. 実生の生体防御に関与する二次代謝産物

地上部と地下部の二次代謝産物の分析を行った。地上部で、トータルフェノール量がカヌマ土の実生で有意に多かった(図-2)。地下部では全ての時期で差がなかった。HPLC分析の結果、地上部ではcatechinとその誘導体が主要成分であり、カヌマ土生育の実生でこれらの量が顕著に多かった。地下部ではcatechin、catechin誘導体やtatarolが主要成分であり、カヌマ土の実生でtatarolの量が多い傾向にあった。カヌマ土の実生の方が二次代謝産物を多く産生する傾向にあると言えるが、その要因として貧栄養ストレスと*Phomopsis*属糸状菌感染ストレスが考えられる。他の実験において、5種類の栄養状態の異なる土壌で実生を生育させた場合、二次代謝産物量に差がないという結果を得ることで、貧栄養塩類による誘導は否定された。また、これらの実生からは*Phomopsis*属糸状菌感染が顕著に確認された。よって、*Phomopsis*属糸状菌感染ストレスが要因であると結論づけた。さらに、コッホの原則を満たすため本菌の接種試験を行った。その結果、接種により上記二次代謝産物の誘導が確認され、接種部位から本菌が再度分離された。

Catechinやtatarolのような抗菌活性や昆虫の摂食に影響を与える化学物質は、実生のストレス

耐性を増加させる可能性がある。本実験苗畑での実生1000本の病害、虫害調査(03年7-11月)では両土壌の実生で差がなかったが、病害や虫害が顕著な環境においては利点になると考えられた⁽¹⁵⁾。

(2) これらのとりまとめ結果に基づく健苗短期育成技術の提案

1. 小型穂木による挿し木苗の短期育苗技術

挿し木苗は挿した翌春から高い成長をした(図-3)。また、枝性は3年目にはほぼ無くなり挿し木苗地際の断面はほぼ円形になった(図-4)。実生に比べて挿し木が高い成長を示したことはヒバの伏条更新する生態学的性質を表すものでヒバの旺盛な発根能力を示すのであろう。しかし、青森のヒバは系統間により発根能力に差があることが近年明らかになっており結論を急ぐのは危険であろう。

小型穂木の挿し床の土壌には鉾質土壌が使用された。但し、3年間の研究期間では出口となる技術のメカニズムの十分な検証には至っていない。播種した実生の苗だけでなくこうした挿し木の根の微生物と挿し木苗の生長生理学的な研究も重ねて行く必要がある。しかし、下記の

(3)の成果の利活用に示したように、本研究結果は現場での土壌選択の参考になっており本プロジェクトは現場での一定の評価を得たものと考えている。

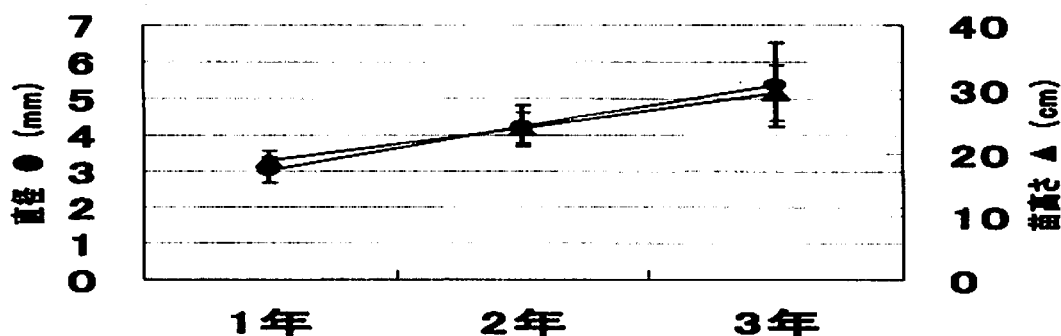


図-3. 小型穂木の挿し木後の地際直径と高さの成長

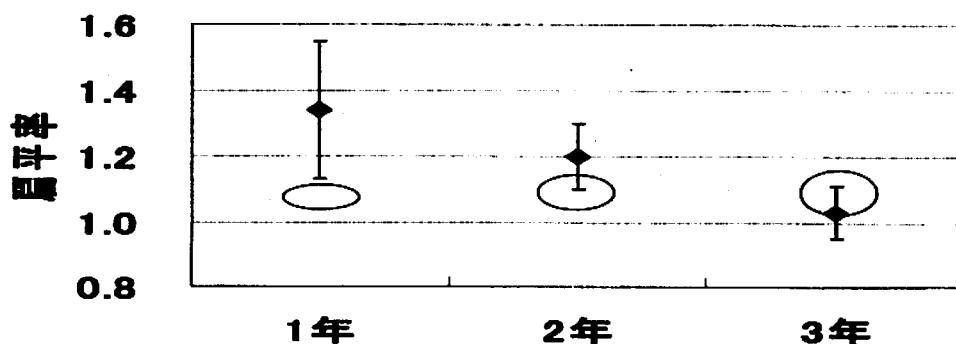


図-4. 小型穂木の挿し木後の地際の扁平率(横径/縦径)

枝性が3年でほぼ消滅して円形になったことを示す。

2. 播種床の工夫による発芽率の増加

播種床に、①黒ボク土で覆土なし、②カヌマ土で覆土なし、③黒ボク土で覆土あり、④黒ボク土で滅菌砂を覆土とする、の4区設定し種子発芽率を比較した。その結果、播種後10週目の発芽率

が、①、②、④区に比べ（56.8、52、47.2%）③区で顕著に低下した（8.8%）（図-5）。③区の未発芽種子は腐敗しており、数種類の糸状菌が分離された。種子への接種試験の結果、分離菌のうち *Cylindrocarpon tenue*、*C. tonkinense*、*Cylindrocarpon* sp.、*Fusarium oxysporum*、*F. lateritium*、*Botrytis* sp. が種子に病気を引き起こすことがわかった。したがって、ヒバ種子を黒ボク土へ播種する場合には覆土を避けた方がよいと考えられた。

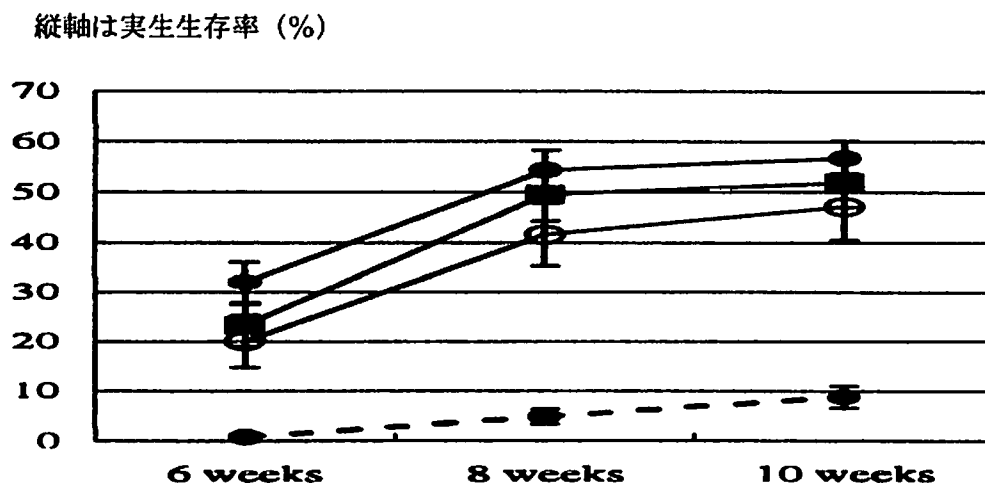


図-5. ①黒ボク土で覆土なし（●実線）、②カヌマ土で覆土なし（■実線）、③黒ボク土で覆土あり（●点線）、④黒ボク土で滅菌砂を覆土（○実線）の各処理区の生存率推移（Yamaji & Mori, 1996） ③は全ての期間で他の処理よりも有意に低かった。

（3）成果の利・活用

青森県におけるヒバの苗木植栽本数はスギに迫りつつあり、こうした状況の元、本研究の成果は以下のように民間の苗畑事業に利活用された。

青森県指導林家工藤俊美氏が所属する、平内町ヒバ研究会および同町の滝沢林業研究グループに対して青森県林業試験場を通じ、本課題で検討を加えた成長段階に応じた土壌選択による播種、育苗方法をテストした。その成果が滝の沢林研グループの創意工夫として全国的林業研究グループ発表会で公表され、平成17年度林業改良普及協会会長賞を受賞するに至った。また、当課題で試験的に育苗されたヒバ苗が東北森林管理局森林技術センターの技術開発課題で使用され高い活着率が認められた⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾。これにより、これまで殆ど顧みられること無かったヒバポット苗が青森県東津軽郡平内町で作られるようになり、植栽に利用される苗の一つとして普及し始めている点は特筆に値する。特に根が乾燥に弱いヒバ苗が季節や天候を選ばずに植栽可能である点が現場から評価された。この方法で、従来春だけ行われていたヒバ植栽が通年おこなえる様になったことで、労働力の年間を通じた効率的配分も可能となった。

エ 今後の問題点

本課題では、民間林業研究グループの協力を得て、適切な土壌選択と小型穂木による挿し木の利用においては、これまで5～6年かかっていた実生によるヒバ育苗期間を概ね3年で山出しができる小型穂木による挿し木育苗方法を提案した。しかし、実生苗に比べて挿し木で苗を作るに

は手間はかかる問題点がある。このため、従来の育苗方法に一つの選択肢を増やすことが出来たと考えるが、それぞれの苗の生態学的な特性を考慮しつつ、現場で多様な苗の使い分けについて検討を重ねる必要がある。さらに、植栽後の成長や活着率、病虫害など様々側面から更に検討を重ねて結果を慎重に評価する必要がある。

今後の問題として重要な点は、ヒバは様々な点で多様性が高いことである。例えば、発根性や栄養塩類要求性、さらには漏脂病耐性も系統によって違いがあることが近年漸く報告されている^{(14) (15)}。つまり、1つの育苗方法が提案されてもそれが常に他の地域や、他の地域の異なる系統のヒバで十分に利用できる完全な予測が難しいということである。この点を踏まえて、本研究成果を一つの事例としてさらに検討を加えて、地域地域の材料、環境条件、経営目的に応じた方法を選択することは重要と考えている。現在、平内町の民間研究グループは森林総研東北支所の指導の元、新潟など他府県の民間林業研究グループと地域間差を考慮した育苗技術に取り組んでいる^{(10) (13)}。このように、成果を実用的方法として提案したが、本研究期間では提案した方法の利点に関するメカニズムを十分に解明するまでは至っておらずさらに検討を重ねている。このため、これまで東北森林管理局森林技術センターと共同研究に関する確認書「ヒバ林の資源充実に関する研究」（平成14年～平成18年3月31日）が終了後、新たな共同研究契約確認書「ヒバ林の生理、生態学的解明とその適用技術開発に関する総合研究」（平成18年4月1日から平成23年3月31日まで）を交わした。また、詳細なヒバ根圏の微生物群集とヒバ抗菌物質の関係は現在も検討を重ねており、国際誌に投稿中である。

オ 要約

ヒバ根圏から微生物を分離同定した結果、野外の鈹質土壌、およびそのモデルであるカヌマ土ではArbuscular 菌の感染はなく *Phomopsis* 属糸状菌の感染頻度が高かった。一方、黒ボク土ではArbuscular 菌が優占した。*Phomopsis* 属糸状菌はヒバ実生の抗菌性の高い二次代謝産物を増加させおり、宿主の生存に関係があると考えられた。また、種子を播種する際に覆土があると発芽率が低下することを明らかにした。また、これらの成果を利用して、小型穂木の利用による挿し木の挿し床土壌に応用して育苗期間を5～6年を3年に短縮し、民間（青森県平内町、青森ヒバ研究会、滝の沢林業研究グループ）の苗木生産事業に利用された。また、播種床にも結果が応用された。

カ 引用文献

- 1) 小林義雄・浅川澄彦（1981）アスナロ属。（日本の樹木種子 針葉樹編. 浅川澄彦・勝田証・横山敏孝編, 150 pp, 林木育種協会, 東京）. 118-121.
- 2) 桜井尚武・森麻須夫（1985a）ヒバ種子の発芽と芽生えの発生. 日林東北支誌37 : 180-182.
- 3) 桜井尚武・森麻須夫（1985b）ヒバのメバエの底陰下での消長. 日林東北支誌37 : 183-185.
- 4) 糸屋吉彦・下田直義（1995）ヒバ種子の播種床および相対照度の変化と発芽率の違い. 林木の育種175 : 12-14.
- 5) 伊藤信治（1997）ヒバ種苗生産技術（I）ヒバ種子の発芽特性. 新潟林試研報39 : 1-9.
- 6) 伊藤信治（2000）ヒバ種苗生産技術（II）実生苗の育成事例. 新潟林試研報42 : 1-5.
- 7) 青森県林業試験場（2001）ヒバの苗木生産技術の手引き -種子生産から山出し苗生産まで-. 3

3 pp, 青森県林業試験場, 青森.

- 8) 森茂太・山路恵子・石本洋・下田直義・樫間岳・工藤俊美・糸屋吉彦・成田俊之・日影正明・高木望 (2003) 2つの異なる土壌でのヒバ種子の発芽率と実生成長. 東北森林科学会誌8: 108-110.
- 9) 青森県農林総合研究センター林業試験場 (2004) ヒバの苗木生産技術の手引き -種子生産から山出し苗生産まで-. 青森県農林総合研究センター林業試験場, 青森. 34 pp.
- 10) 東北木材新報. (2004) 高品質材生産と省力化にヒバの単植え実証試験. 729
- 11) 東北木材新報. (2005) 平内青森ヒバ研究会ヒバ人工林を視察. 767.
- 12) 林野時報 (2005) 津軽半島青森ヒバの国をあるいて. 612:2-5.
- 13) 現代林業 (2005) ヒバに夢を. 452:2-7.
- 14) 小谷二郎 (2005) 取り木苗由来のアテ幼齢林での肥培効果. 石川県林業試験場報告37: 16-21.
- 15) 佐藤隆士・山路恵子・下田直義・森茂太 (2005). 当年生ヒバ実生に対するウリハムシモドキと各種昆虫類による食害被害の影響. 森林防疫54: 11-17.
- 16) 森茂太・兼平文憲 (2006) テーマ別セッション「ヒバの基礎研究とその応用」. 東北森林科学会誌11:66-69.

スギ花粉暴露回避技術の開発

目 次

研究の要約	19
1. スギ雄花開花モニタリングによる予測モデルの精度向上とモニタリング手法の省力化の検討	23
(1) スギ雄花開花モニタリング調査	23
(2) スギ雄花開花予測モデルの精度の向上	27
(3) 自動花粉モニターによるスギ雄花開花観測の省力化の検討	33
2. 花粉生産を抑制する林分密度管理技術の開発	38

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

平成 15～17 年（3 か年）

運営費交付金（交付金プロジェクト）

II 主任研究者

主査：森林植生研究領域長 清野嘉之（平成 15 年 4 月 1 日～平成 17 年 3 月 31 日）

植物生態研究領域長 清野嘉之（平成 17 年 4 月 1 日～平成 18 年 3 月 31 日）

取りまとめ責任者：温暖化対応推進拠点長 清野嘉之

III 研究場所

森林総合研究所・本所

森林総合研究所・東北支所

森林総合研究所・関西支所

森林総合研究所・九州支所

群馬県林業試験場林木育種場

千葉県森林研究センター上総試験地

IV 研究目的

「スギ花粉飛散予報システム」によるスギ花粉予報の精度を向上させるため、試験林におけるスギ雄花開花モニタリングを継続し、このデータを用いてスギ雄花開花予測モデルの推定精度の向上を図る。予測精度の検証作業がリアルタイム花粉飛散モニターの活用により開花モニタリングの省力化が可能かどうか検討する。

間伐が雄花生産に及ぼす影響を経年的に調べ、花粉抑制に効果的な林分密度管理法を示す。

V 研究方法

1 スギ雄花開花モニタリングによる予測モデルの精度向上とモニタリング手法の省力化の検討
文部科学省プロジェクト「スギ花粉症克服に向けた総合研究」で実施していたスギ雄花開花モニタリングを継続して実施した。この結果を用いてすでに開発されているスギ雄花開花予測モデルの精度を検証し、その一部である発育モデルを他のモデル(有効積算温度モデル→アレニウスモデル、ロジスティックモデル)に変更した場合に予測精度の向上がはかれるかどうかを検討した。また、リアルタイム花粉飛散モニター(KH-3000)を試験地内およびその近辺に設置し、その観測結果と開花モニタリング結果を比較することにより、機器による観測で開花状況の推移を精度よく把握できるか検討した。

2 花粉生産を抑制する林分密度管理技術の開発

文部科学省プロジェクト「スギ花粉症克服に向けた総合研究」で茨城県と京都府、熊本県に設定したスギ間伐試験地の雄花生産の調査を継続した。雄花量の要因を分析し、間伐影響の推定精度の向上を図った。

VI 研究結果

1 スギ雄花開花モニタリングによる予測モデルの精度向上とモニタリング手法の省力化の検討

(1) 群馬試験地、千葉試験地における雄花開花時期の年変動については、開花日に年間最大約20日の大きな変異が認められた。このことは、花粉飛散予報の精度を向上させるためには開花時期の予測が不可欠であることをあらためて示している。

(2) 有効積算温度モデルでは、群馬試験地における予測誤差が千葉試験地より大幅に大きかった。他の2つのモデルでは、いずれも有効積算温度モデルより精度良く開花時期を推定したが、とくに群馬試験地での予測誤差が有効積算温度モデルに比べて半減した。これらの2つのモデルでは両試験地でパラメータの推定値が異なったが、このことは温度に対する成長反応が試験地間で異なることを示している可能性がある。

(3) 機器を林内に設置した場合には、全体の開花動向を反映せず機器周辺に個体に大きく左右されてしまうこと、離れた場所に設置した場合には、遠方から飛来した花粉等を区別できなくなることが明らかになった。これらの傾向は雄花生産量の少ない年において顕著であった。したがって、いずれの場所に機器を設置しても、開花状態の推移、特に開花初期の状況を正確に把握することは不作年には難しいと考えられた。

2 花粉生産を抑制する林分密度管理技術の開発

スギ人工林の期首条件や保育計画、夏の気象条件などをパラメータに雄花量の年次変化を推定する手法を開発した。この手法を用い、間伐を行いながら長伐期林に移行する場合と、間伐を行わず通常伐期で主伐して再造林する場合の伐期通算の雄花生産量を推定し、比較したところ、後者の方が花粉生産は少なくなることが分かった。

VII 今後の問題点

スギ雄花開花予測モデルの予測精度をある程度改善することができたが、現段階では関東地方のみが対象である。今後、他の地域においても同程度の予測が必要になるため、モデルのパラメータ

設定用に他地域での開花調査が必要である。

現存するスギ人工林の扱いには長伐期林への移行や放置のほかに、樹種転換、再造林などさまざまなものがある。林業施策に沿って想定される主要な森林管理について花粉生産を推定し、より効果的な管理法を明らかにする必要がある。また、モデルを立地環境や着花履歴など雄花量に関係するその他の要因も考慮したものに改良する必要がある。

VIII 研究発表

1

Kanazashi, T. and Yokoyama, T. (2005) The effect of alternating temperature on the rest break process of male flowers of *Cryptomeria japonica* D. Don., Journal of Forest Research, 10, 493-496.

2

清野嘉之・九島宏道・細田和男・家原敏郎（2004）森林の蓄積変化に及ぼす気温と密度管理の影響のファクタリングアウト，日林関東支論，55，127-128.

清野嘉之・長尾精文・佐藤保・奥田史郎・田内裕之・伊藤武治・五十嵐哲也・九島宏道（2006）着花したスギの重量成長と翌年の着花，日林関東支論，57，155-156.

清野嘉之・奥田史郎・竹内郁雄・石田清・野田巖・近藤洋史（2003）強い間伐はスギ人工林の雄花生産を増加させる，日林誌，85(3)，237-240.

清野嘉之・篠原健司（2004）SYJ-140 液剤・スギ雄花の着花抑制試験，林業薬剤等試験成績報告書（平成 15 年度），89-94.

清野嘉之・篠原健司（2005）SYJ-140 液剤の撒布がスギの栄養生長に及ぼす影響，平成 16 年度林業薬剤等試験成績報告集，165-169.

長尾精文・清野嘉之・九島宏道・奥田史郎（2004）スギの雌花形成と成長量におよぼす夜温の影響，日林関東支論，55，109-112.

長尾精文・清野嘉之・篠原健司・九島宏道・渡辺邦寿（2005）TNE 処理によるスギの花芽形成の抑制試験，日林関東支論，56，119-111.

野田巖・齋藤英樹・鹿又秀聡・清野嘉之・林雅秀（2006）荒強当国有林スギ花粉間伐試験地の調査結果，平成 17 年度森林総合研究所九州支所年報，18，34-35.

篠原健司・伊ヶ崎知弘・二村典宏・毛利武・清野嘉之・長尾精文・横山敏孝（2004）林学におけるスギ、ヒノキ花粉症への対応，アレルギー科，17(1)，95-102.

高橋和規・長尾精文・清野嘉之・篠原健司・九島宏道（2006）トリネキサパックエチルの撒布による着花抑制とスギ栄養成長への影響，日林関東支論，57，103-104.

講演：清野嘉之，森林管理によるスギ林対策（第 44 回日本花粉学会公開シンポジウム「花粉症予防のための環境対策」），2003 年 10 月 11 日富山

IX 研究担当者

1（1） 金指達郎

1（2） 金指達郎

1 (3) 金指達郎

2 清野嘉之、佐藤 保、石田 清、野田 巖

1. スギ雄花開花モニタリングによる予測モデルの精度向上とモニタリング手法の省力化の検討

(1) スギ雄花開花モニタリング調査

ア 研究目的

スギ花粉症が「国民病」と言われ大きな社会問題になって久しい。スギ花粉症に対する重要な対策の一つとして、花粉飛散予報が各地で開始されたが、実施当初の予報は多分に経験的な根拠に基づいたものであったことは否めない。そのため、平成9年から開始された科学技術庁（文部科学省）プロジェクト研究「花粉症克服に向けた総合研究」の中で、科学的根拠に基づいた「スギ花粉飛散予報モデル」の構築を目指した研究が実施された。

「飛散予報モデル」を構築し運用するためには、花粉発生源分布の把握、発生源における当該年の雄花生産量の推定、発生源における雄花開花時期の推定、花粉放出過程・拡散過程のモデル化等のパーツを解明・開発することが不可欠である。このうち、開花時期の推定については、各地の発生源で直接観測することは不可能である。そのため、文科省プロジェクトでは、実験的にスギ雄花の開花特性を調べ（金指 2000、金指・横山 2002、Kanazashi and Yokoyama 2005）、これに基づいた「開花予測モデル」を構築した（金指 2003）。この予測モデルは限られた実験条件に基づいたものであるため、野外での検証データが必要であり、モデル構築作業と平行して2カ所の試験地で5カ年の開花モニタリングも実施してきた（金指 2003）。

しかしながら、開花モデルの予測精度を検証しさらにモデルの改変等により精度向上を目指す（次節参照）ためには、5カ年の結果ではデータ不足であることから、さらなるデータの蓄積が必要と考えられた（金指 2003）。そこで、この節では、それまでデータを取得してきた試験地においてさらに観測を継続し、計8カ年の観測結果を総括した。そして開花日の年変動を温度変化のパターンからどのくらい説明できるかを検討した。

イ 研究方法

開花調査は、群馬県林業試験場林木育種場構内のスギ採種園（以下、群馬試験地）と千葉県森林研究センター上総試験地構内のスギ採種園（千葉試験地）に設置した試験区で実施した。調査対象木は、群馬試験地では72個体、千葉試験地では78個体である（いずれも2試験区）。調査対象木のクローン数は、30（群馬試験地）、26（千葉試験地）であるが、クローンあたりラメート数は不定である。各調査木を4方位に分けそれぞれの方位ごとに開花状況を調査した。すなわち、調査対象のデータ数（以下、「観測単位」とする）は、それぞれ288（群馬試験地）、312（千葉試験地）となるが、着花のない観測単位があるので実際のデータサイズはより小さく、各年の着花状態により大きく異なった。

雄花の開花状態は、手または棒で枝先を叩いたときの雄花からの花粉の飛散を目視で判定した。判定基準は、1：叩いても花粉の飛散が全く認められない、2：花粉の飛散がわずかに認められる、あるいはごく一部の枝先で花粉が飛散する、3：軽く叩いただけで多量の花粉が飛散する（満開）、4：やや強く叩くと多量あるいは少量の花が飛散する、4：強めに叩いても花粉の飛散はほとんど認められない、の5段階とした。このうち、データとして評価したのは2（満開）に到達した日（満開初日）とした。

観測は、原則として休日および降雨・降雪日を除いて毎日実施したが、未観測日については天候状況などを勘案して補完した。また、試験地内あるいは付近の百葉箱内に温度データロガー（おんどとり Jr., TR52）を設置し、気温を1時間単位で測定した。なお、千葉試験地では機器の不調により1999年のデータは取得できなかった。

ウ 結 果

両試験地における8年間の雄花開花時期の観測結果を表1-1-1に示した。

表1-1-1. 群馬試験地・千葉試験地におけるスギ雄花の開花日（満開到達日）

	群馬試験地			千葉試験地		
	10%開花	50%開花	90%開花	10%開花	50%開花	90%開花
1998	3.04	3.16	3.22	3.01	3.09	3.15
1999	3.09	3.16	3.18	2.27	3.03	3.07
2000	3.22	3.29	4.02	3.06	3.15	3.21
2001	3.18	3.22	3.24	3.02	3.09	3.17
2002	3.05	3.11	3.14	2.22	2.27	3.06
2003	3.21	3.27	3.31	2.27	3.03	3.07
2004	3.11	3.16	3.21	2.27	2.29	3.04
2005	3.23	3.27	3.31	3.07	3.12	3.14
Avg (date)	3.14	3.21	3.24	3.01	3.06	3.11
SD (day)	7.8	6.7	6.8	4.3	5.8	6.2
Range (day)	19	18	19	13	16	17

表中で10%開花と表記したのは、着果している全観測単位のうち10%が満開に至った日を示しており、林分全体の開花初期の指標となる。同様に50%開花日は平均的な雄花が満開に至る日の指標となる。各観測単位が満開と判定されてから数日から2週間以上その状態は継続するので、90%開花日はほぼ林分全体が満開になる日に相当する。

50%開花日を試験地間で比較すると、8年の平均では千葉試験地の方が15日早かったが、年ごとに比較すると7～25日と年により大きく異なった。一方、年間差は、群馬試験地では10%、50%、90%開花日とも19日程度であったが、千葉試験地ではそれより多少小さかった。また、両試験地とも10%開花日と90%開花日の差は平均10日、年ごとにみると6～18日の幅があった。

休眠解除過程を経て発育再開から開花に至る時期に相当する、11月から開花までの日平均気温の期間平均値（千葉試験地では11月15日から）と50%開花日との関係を図1-1-1に示した。気温の期間平均値は、群馬試験地では年によって1.5℃強、千葉試験地では1.8℃の差があった。両試験地とも、期間平均気温と50%開花日の間には明瞭な関係は認められなかった。また、両試験地における期間平均気温は、8カ年の平均で1.6℃（0.9～2.3℃）千葉試験地の方が高かった。

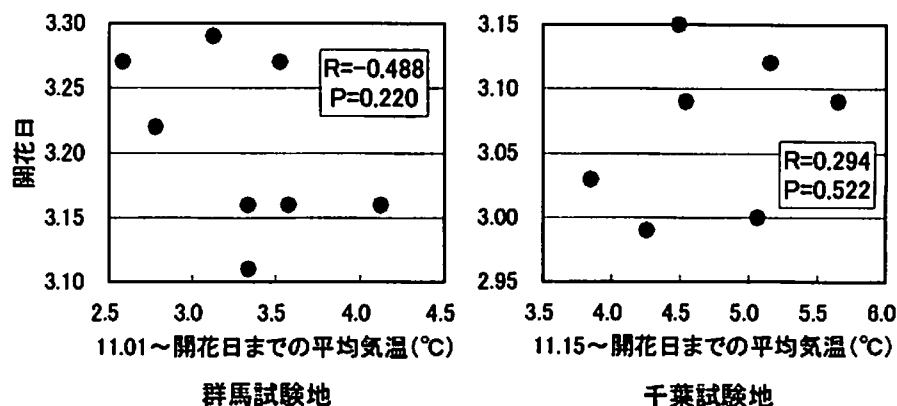


図1-1-1. 11月から開花までの平均気温と50%開花日との関係

注: 千葉試験地の開花日表記が2.99は2月27日(2002)年、3.00は2月29日(2004年)

エ 考 察

両試験地とも、開花日の年間差は最大約 15～20 日と大きかった。このことは、花粉飛散予報の精度を向上させるためには花粉発生源における開花時期の予測が不可欠であることをあらためて示している。

スギ花粉の飛散およびスギ雄花の開花は、一般に寒冷な地域ほど遅い。今回調査した 2 試験地でもより寒冷な群馬試験地の方が平均 15 日遅かった(表 1-1-1)。このことは、ある花粉発生源におけるある年のスギ雄花の開花日は、休眠解除過程から開花に至る期間の平均気温に大まかには規定される(簡単に言えば暖冬の年では早い)可能性があることを連想させる。しかし、今回の調査結果では、図 1-1-1 で明らかなように、両試験地とも期間平均気温と開花日の間には明瞭な傾向は認められなかった。すなわち、雄花の開花時期は、単に休眠解除から開花までの平均的な気温の高低で決まるのではなく、その期間内の様々なプロセスに対応した温度変化のパターンが大きく影響することを示唆していると考えられる。

両試験地の開花日の差は年により大きく異なり(表 2-1-1)、また休眠解除過程から開花までの期間平均気温の試験地間の差にも年変異(0.9～2.3℃)が認められた。仮に期間平均気温の高低が開花日の年変動に関与しているとすれば、この両者間には一定の相関関係が認められるはずである(例えばより温暖で開花の早い千葉試験地で、さらに期間平均気温の差が大きい年には群馬試験地との開花日の差が大きくなるなど)。しかし、今回得られた対応可能な 7 年分のデータでは、両者間の相関係数は、むしろ有意ではないものの負値($R=-0.528$ 、 $P=0.223$ 、図は省略)を示し、少なくとも上記のような関係は認められなかった。このことも、休眠解除からの開花までの期間平均気温が開花日に影響するのではないことを示している。

では、休眠解除過程から開花に至る期間における、温度変化パターンが開花日の年変動にどのように影響するのだろうか? このことを検討するための参考として、群馬試験地における特徴的な 3 カ年、すなわち最も開花日の早かった 2002 年と開花日の遅かった 2 年(2000 年と 2005 年)の気温の推移を図 2-1-2 に示した(大きな日変動の影響を除外して傾向を見やすくするため 7 日間移動平均値を示した)。

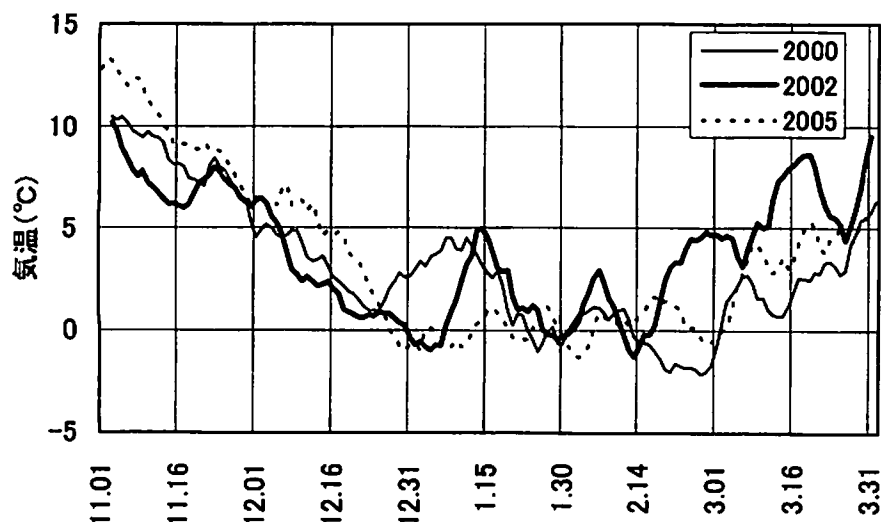


図1-1-2. 群馬試験地における日平均気温(7日間移動平均)の推移

まず、最も開花の早かった 2002 年の温度変化の特徴をみてみよう。12 月中旬までは開花の最も遅かった 2000 年とほぼ同様に推移し、その後 2 月上旬までに 2 度ほど高温期が認められたが、最も特徴的なのは 2 月下旬から継続して高温が続き、3 月 11 日の開花に至った(50%開花日)。すなわち、開花前約 2 週の高温は開花日を早めるのに大きく寄与することが推測されるが、この事例だけではそれ以前の温度推移パターンの影響については判然としない。

一方、開花の遅かった 2 年のうち、2000 年の温度推移については、12 月中旬までは 2002 年とほぼ同じで推移したが、1 月上旬中に平年を上回った後低下し、2 月中下旬がもっとも寒冷的な期間となった点が特徴的であった(平年では 1 月下旬が最寒期にあたる)。2005 年には、12 月中旬までは平年より高温で推移したこと、1 月の平年並みの低温が 2 月いっぱい継続したことが特徴であった。このように、例年より遅くほぼ同じ時期に開花した両年の温度推移パターンは異なり、共通点はかならずしも多くない。

以上の 3 カ年は、いずれも休眠解除期から開花に至る期間の平均気温が中庸の年であった(2000 年: 3.13℃、2002 年: 3.34℃、2005 年: 3.54℃、8 年間のレンジ: 2.58–4.13℃)。このことは開花の遅速はこの期間の平均気温よりもその推移パターンに影響される可能性を示しているが、その特徴を検出するには至らなかった。他の年の推移パターンも考慮すると各年の特徴と開花日との関係はより多様であり、こうした手法だけから開花の年変動に与える気温推移の影響を推定することは難しいと考えられた。

オ 今後の問題点

今後、関東地域以外でも開花予測が求められると思われるが、その比較対象としてのデータとして今後も群馬試験地、千葉試験地における観測を継続する必要がある。そのため、平成 18 年度から開始された農水省高度化事業(全国領域)課題の中で調査を継続する予定である。

カ 要 約

スギ雄花開花予測モデルの予測精度の検証とその向上を図る目的で、群馬県、千葉県の2カ所の試験地で雄花開花（満開到達）日の観測を8カ年継続して実施した。50%の雄花が満開に至る日は、より温暖な千葉試験地で平均15日早かった（年により7～24日）。開花日の年間差は最大20日弱に及んだ。休眠解除過程から開花までの期間平均気温の年変動は開花日の年変動を規定しておらず、開花日は気温推移のパターンに影響されると考えられた。

キ 引用文献

- 金指達郎・横山敏孝（2000）スギ雄花の休眠およびその覚醒と花粉放出開始の予測に関する研究，スギ花粉症克服に向けた総合研究成果報告書（第Ⅰ期），313-326.
- 金指達郎・横山敏孝（2002）スギ雄花の休眠打破と開花に要する温度条件，日本花粉学会誌，48，95-102.
- 金指達郎（2003）都市への花粉飛散をおこすスギ林の同定に関する研究，スギ花粉症克服に向けた総合研究成果報告書（第Ⅱ期）
- Kanazashi, T. and Yokoyama, T. (2005) The effect of alternating temperature on the rest break process of male flowers of *Cryptomeria japonica* D. Don., Journal of Forest Research, 10, 493-496.

（金指達郎）

（2）スギ雄花開花予測モデルの精度の向上

ア 研究目的

スギ花粉飛散予報を行う上で、各地の花粉発生源におけるスギ雄花の開花時期を推定することは不可欠である。前節でも示されたように雄花の開花時期は地域によって異なるだけでなく、その年の温度推移のパターンによっても大きく変化する。そのため、文科省プロジェクト研究において、実験的に明らかにされたスギ雄花の開花特性に基づいた「スギ雄花開花予測モデル」を開発した（金指 2003）。

この節では、前節で示された群馬試験地、千葉試験地におけるスギ雄花開花時期のモニタリング結果を用いて、開花予測モデルの推定精度を検証した。さらに開花予測モデルの一部である発育状態サブモデル（イ. 研究方法の項を参照）を改変することによりモデルの推定精度の向上を試みた。

イ 研究方法

1) 開花予測モデルの概要とその予測精度の検証：まず、文科省プロジェクトで開発された開花予測モデルの概要を示す（金指・横山 2003）。このモデルは、室内実験から推定された雄花の開花特性（金指・横山 2002、Kanazashi and Yokoyama 2005）に基づいて、雄花の休眠解除過程から開花に至る過程を3つのサブモデルで記述したものである。3つのサブモデルの内容は以下のとおりである；

①休眠状態サブモデル (Sr)：低温が経過することによって雄花の休眠が徐々に弱まっていく過程を

モデル化した。まず、1日の温度が休眠を浅くさせる効果を MrT とする。これまでの実験結果から、日平均気温が 0～10℃、かつ日中高温時 6 時間の気温が 13℃未満の日は MrT=1.0CU (Chill unit、最高値)とし、その他の条件の日は MrT=0.0CU とした。ただし、日中高温時 6 時間の気温が 15℃以上の日では MrT=-1.0CU とした(文科省プロジェクトでは MrT=-0.5CU としていたが、Kanazashi and Yokoyama (2005) の結果からこのように改変した)。ある時点の休眠状態はそれまでの MrT の累積値で表される。休眠が完全に打破されるとき MrT の累積値(実験から 35.0CU、)で基準化したものを Sr とした。すなわち、Sr=1.0 に達した時点で休眠は完全に打破されることになる。

②成長能力サブモデル (Cg) : ある休眠状態にある雄花の成長能力 (Cg) は、実験結果から判断すると(金指・横山 2002)、 $0 \leq Sr < 0.4$ では $Cg(t)=0.0$ 、それ以上になるとその値は Sr に比例して上昇し、休眠が完全に解除された時点以降は最大値、 $Cg=1.0$ となる。

③発育状態サブモデル (So) : Cg とその日の温度条件に応じて雄花は少しずつ発育すると仮定する。温度の発育への影響のしかた (Mo) は、最も単純に「発育限界温度以上の温度」に比例すると仮定した (HU、heat unit)。実験結果から発育限界温度は 0℃とした。ただし、平均気温が -2～2℃では有効温度を考慮した調整を行った ($Mo=0.5 \cdot (T+2)$ 、T : 日平均気温)。そして $Cg \cdot Mo$ の積算値を基準化した値 (So) が 1.0 に達したときに開花するとした。実験結果からの推定では、So=1.0 になるときの $Cg \cdot Mo$ の累積値は 170～260HU の範囲であった。

この開花予測モデルの構造は、各サブモデルに対応する新たな知見が得られた場合には、その部分だけを改変することで、他のサブモデルに影響することなく改良できることが特徴である。なお、以上の表記法は、おおむね Hanninen (1990、1995) に従った。

この開花予測モデルの精度を確認するために、群馬試験地、千葉試験地の温度測定データを用いて開花予測を行い、現地の開花調査データと比較した。

2) 発育状態サブモデルの改良 : 前項の開花予測モデルのうち、発育状態サブモデルで用いた有効積算温度に基づく方法は、基本的には暫定的な手法である。この部分のモデルとしてはこれまでもいくつかのより科学的根拠に基づいた発育モデルが提唱されている。それらのうち、比較的現実的と思われる下記の 2 つのモデルの妥当性について、2 試験地における実測データを当てはめることにより検証した。

有効積算温度モデル (一部改変) に加えて検討したモデルは以下の 2 つである。

アレニウスモデル : 酵素等の反応速度と温度との関係を表したいわゆるアレニウスの式に基づいたモデル (杉浦ほか 1991 など)。果樹やサクラ等の開葉 (開花) の予測に用いられている「温度変換日数法」の基礎として用いられている (青野・守屋 2003)。このモデルでは発育速度 (Mo、日単位) は、

$$Mo = \exp(a - b \cdot (T + 273) - 1)$$

T : 日平均気温 (℃)、a、b はパラメータ

として与えられる。

ロジスティックモデル : 1. では発育速度は温度とともに指数関数的に上昇するが、現実には温度がある程度以上上昇すると頭打ちになることを想定して、Logistic curve を適用するモデル

(Sarvas, 1974)。このモデルでは発育速度 (Mo) は、

$$Mo = a / (1 + \exp(-b \cdot (T - c)))$$

T: 日平均気温 (°C)、a、b、c はパラメータ

として与えられる。

各モデルの実測開花データへの当てはめは、それぞれのパラメータを少しずつ変化させ、50%開花日における So (発育速度の積算値) の残差平方和を最小にするパラメータセットを推定した。ただし、有効積算温度モデルの場合にはパラメータは実験結果から推定した前節のものを用いた。それぞれの最小残差平方和の大小から各モデルの優劣を判定した。この検討は、両試験地込みでの場合と、試験地ごとの場合について行った。

ウ 結 果

1) 文科省プロジェクトで開発した開花予測モデルの精度の検証: 文科省プロジェクトで開発したオリジナルの開花予測モデルを用いた予測結果の一例 (子持試験地 2001 年シーズン) を図 1-2-1 に示した。

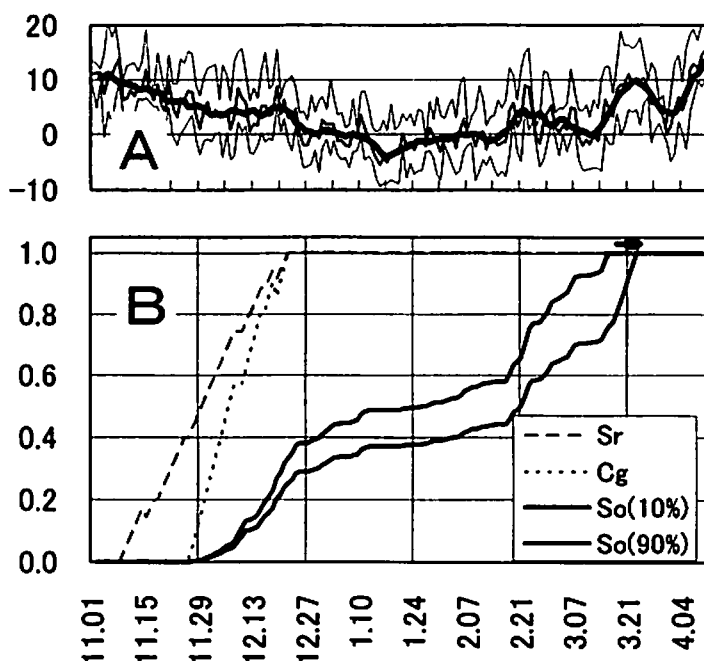


図1-2-1. 子持村試験地における気温(A)と雄花発育状況の予測結果(B)
(2000-2001シーズンの事例)

A: 平均、最高、最低気温。太線は日平均気温の7日間移動平均

B: 右上部のバーは開花が始まった日の範囲

Sr, Cg, Soは、それぞれ雄花の休眠打破状態、成長能力、発育段階の指標の指標、So=1に達したときに満開に達する(詳細は本文参照)。

So (10%): 雄花の成長が早い個体のSoの推定値

So (90%): 雄花の成長が遅い個体のSoの推定値

雄花の発育の早い個体を想定して So=1.0 に到達するときの $Cg \cdot Mo = 190HU$ 、平均的な個体に対して $Cg \cdot Mo = 220CU$ 、遅い個体に対して $Cg \cdot Mo = 250HU$ として推定した。野外データは、各観測単位の開花 (満

開) 到達日の 10、90 パーセンタイルの範囲を図中に示した。この事例では、平年より低温の冬だったが 3 月中旬に急に暖くなり、多くの観測単位が短いタイムラグ (7 日程度) で一斉に開花 (満開) に至った。モデルによる予測結果はこの状況を良く表現しており、ほぼ正確に開花日を予測できたとみなせる。

観測期間中すべての年における開花予測日と開花観測日を表 1-2-1 に示した。平均的には両試験地とも 1-2 日予測が遅れたが問題となるレベルではないと見なせる。しかし、年ごとばらつき (SD、標準偏差) は群馬試験地でやや大きく、とくに平均的な雄花の満開到達の指標となる 50%開花日の誤差が 2005 年で大きかった。表には示していないが、開花日における発育速度の積算値 S_o の 1.0 からのズレは、多くの場合で 0.1 前後以下であったが、群馬試験地の 2005 年 (50%、90%開花日) では 0.2 に達した。

表1-2-1. 子持村試験地・上総試験地におけるスギ雄花開花予測日と開花観測日

	開花予測日			開花観測日			予測のズレ(日)		
	10%	50%	90%	10%	50%	90%	10%	50%	90%
群馬試験地									
1998	3.12	3.20	3.26	3.04	3.16	3.22	8	4	4
1999	3.05	3.14	3.18	3.09	3.16	3.18	-4	-2	0
2000	3.24	3.30	4.04	3.22	3.29	4.02	2	1	2
2001	3.16	3.20	3.23	3.18	3.22	3.24	-2	-2	-1
2002	3.10	3.15	3.18	3.05	3.11	3.14	5	4	4
2003	3.18	3.25	3.29	3.21	3.27	3.31	-3	-2	-2
2004	3.04	3.12	3.17	3.11	3.16	3.21	-7	-4	-4
2005	3.30	4.05	4.07	3.23	3.27	3.31	7	9	7
Avg.	3.15	3.22	3.26	3.14	3.21	3.24	0.8	1.0	1.2
SD							5.5	4.4	3.7
千葉試験地									
1998	3.01	3.07	3.12	3.01	3.09	3.15	0	-2	-3
1999	-	-	-	2.27	3.03	3.07	-	-	-
2000	3.14	3.20	3.23	3.06	3.15	3.21	8	5	2
2001	3.07	3.15	3.18	3.02	3.09	3.17	5	6	1
2002	2.21	2.26	3.01	2.22	2.27	3.06	-1	-1	-5
2003	2.26	3.04	3.10	2.27	3.03	3.07	-1	1	3
2004	2.26	3.02	3.10	2.26	2.28	3.04	0	3	6
2005	3.10	3.13	3.18	3.07	3.12	3.14	3	1	4
Avg.	3.02	3.08	3.13	3.01	3.06	3.11	2.0	1.9	1.1
SD							3.5	3.0	3.9

10%, 50%, 90%は、それぞれ10%, 50%, 90%の観測単位が満開に到達した日を示す。

2) 発育状態サブモデルの改良：図 1-2-2 に 50%開花日をもっとも良く予測したと推定されたパラメータセットを与えたときの、各モデルの残差平方和を示した。

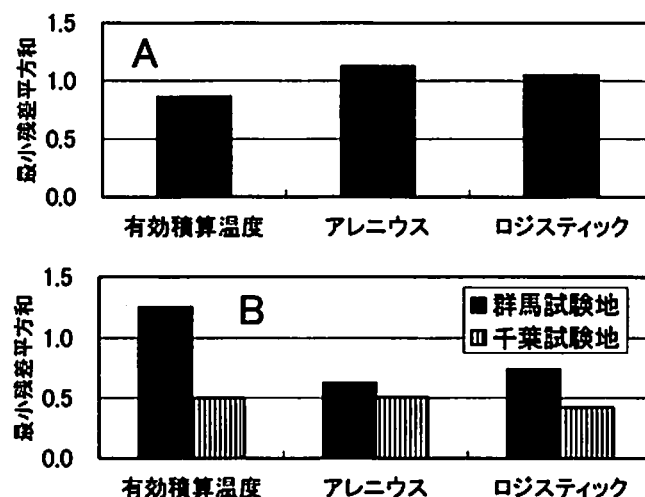


図1-2-2. 各モデルの最小残差平方和

A: 両試験地を混みにした場合

B: 試験地ごと独立に当てはめを行った場合

2 試験地を混みにした場合には (A)、有効積算温度モデルで最小残差平方和が最も小さく、差は小さいがアレニウスモデルで最も大きかった。しかし、試験地ごとに当てはめた場合には (B)、有効積算温度モデルでは群馬試験地の最小残差平方和が千葉試験地に比べて 2 倍以上大きく、予測精度が低いことが判る。それに比べて、他のモデルでは千葉試験地における値は有効積算温度モデルとほぼ同程度 (ロジスティックモデルが最小) であったのに対し、群馬試験地では値が半分ほどに低下した。群馬試験地での最小残差平方和は、アレニウスモデルで最も低かった。

エ 考 察

スギ雄花開花予測モデルの一部である発育状態サブモデルとして、これまで採用してきた有効積算温度モデル (一部改変) に換えてアレニウスモデルあるいはロジスティックモデルを適用することによって、とくに群馬試験地における開花実態の予測精度が向上した。したがって、今後はこれらのサブモデルを採用することにより関東地方における開花時期予測の精度を向上させることが可能になると考えられる。

では、これら 2 つのサブモデルの採用で群馬試験地における予測精度が向上したのは、どのような理由によるのであろうか？

まず指摘できるのは、当初採用した有効積算温度サブモデルは室内開花実験の結果に基づいてパラメータ設定しているのに対し、他の 2 モデルでは実測データへの当てはめから統計的にパラメータを設定していることである。有効積算温度モデルでは両試験地で同じパラメータを用いているが、他の 2 つのモデルではそれぞれの試験地に独立して推定している。すなわち、後 2 者では観測データによくフィットするようにパラメータを設定しているわけで、それを行っていない有効積算温度モデルより精度良く開花時期を説明するのは当然とも言える。しかしながら、有効積算温度モデルと他のサブモデルとの基本的な違いについて検討しておくことは、その精度向上を目指す上で有用

であると考える。

図 1-2-3 に 3 つの発育状態モデルの模式図を示した。有効積算温度モデルと他のサブモデルとの大きな違いは 0℃近辺における発育速度の予測値の違いである。この図から明らかなように、当初採用した有効積算モデルでも 0℃前後における補正を行っているが、それでも他の 2 つのモデルの方が 0℃近辺における発育速度が高いことが分かる。日平均気温が 2℃以下の日は千葉試験地では少なく、群馬試験地では比較的多い。例えば、2005 年の事例では、千葉試験地では 24 日であるのに対し、群馬試験地では 71 日であった。このことから、新たに検討したサブモデルで群馬試験地での予測精度が向上したのは、0℃近辺（以下）の日の発育速度の評価が改善されたことによるものと考えられる。

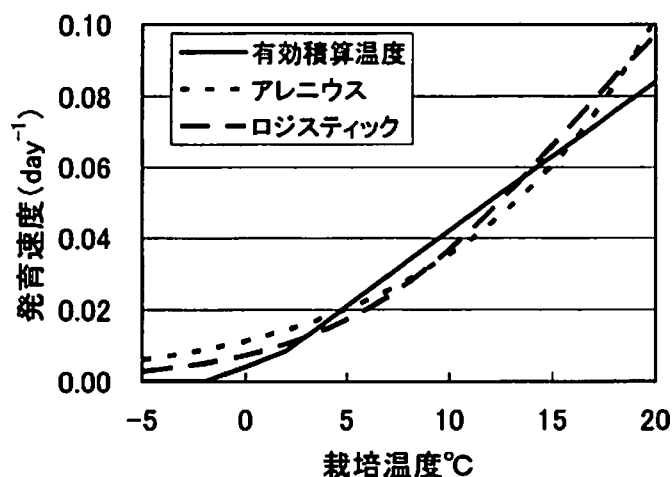


図 1-2-3. 各発育サブモデル式の模式図

なお、アレニウスモデル、ロジスティックモデルのパラメータは両試験地で異なった値を用いたときに実測値との誤差が最も小さくなった。また、両試験地のデータを込みにした場合の実測値との残差平方和は試験地ごとの場合よりもかなり大きかった。このことは、両試験地の開花特性に差があることを示唆している。今後、より寒冷または温暖な地域のパラメータ設定を行う際にこの点に注意する必要がある、それぞれの地域でパラメータを設定するためには野外での開花データが不可欠である。

オ 今後の問題点

今後、スギ花粉飛散予報の全国展開を目指すにあたって、スギ雄花開花予測の広域化が求められる。この研究で、発育過程を記述するモデルの改変を通して、ある程度の予測精度の向上が可能となったが、他の地域ではスギ雄花の開花特性が異なる可能性がある。そのため、パラメータ調整が不可欠になるが、その基礎データとしてより寒冷・温暖な地域での開花調査データが必要である。

カ 要 約

スギ雄花開花予測モデルの発育状態サブモデルとして採用可能な 3 つの発育モデル（有効積算温

度モデル、アレニウスモデル、ロジスティックモデル)を対象に、野外開花データへの適合性を残差平方和の大小により検討した。試験地ごとにパラメータ設定をした場合には、千葉試験地ではいずれのモデルも残差平方和はほぼ同程度であった。群馬試験地では有効積算温度モデルの残差平方和が千葉試験地より大幅に大きかったが、他の2モデルでは群馬試験地の残差平方和が有効積算温度モデルに比べて半減した。なお、後2者では両試験地でパラメータの推定値が異なったが、このことは温度に対する成長反応が試験地間で異なることを反映している可能性があると考えられた。

キ 引用文献

青野靖之・守屋千晶(2003)休眠解除を考慮したソメイヨシノの開花日推定モデルの一般化, 農業気象, 59, 165-177.

Hanninen, H. (1990) Modeling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. Acta Forest. Fennica, 213, 1-47.

Hanninen, H. (1995) Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: an ecophysiological approach to modeling of bud burst phenology. Canadian Journal of Botany, 73, 183-199.

金指達郎(2003)都市への花粉飛散をおこすスギ林の同定に関する研究, スギ花粉症克服に向けた総合研究成果報告書(第Ⅱ期)

金指達郎・横山敏孝(2002)スギ雄花の休眠打破と開花に要する温度条件, 日本花粉学会誌, 48, 95-102.

Kanazashi, T. and Yokoyama, T. (2005) The effect of alternating temperature on the rest break process of male flowers of *Cryptomeria japonica* D. Don., Journal of Forest Research, 10, 493-496.

Sarvas, R. (1974) Investigations on the annual cycle of development of forest trees. II. Autumn dormancy and winter dormancy, Commun. Inst. For. Fenn., 84, 1-101.

杉浦俊彦・小野博幸・鴨田福也・朝倉利員・奥野隆・浅野聖子(1991)ニホンナシの自発休眠書き正規から開花期までの発育速度モデルについて, 農業気象, 46, 197-203.

(金指達郎)

(3) 自動花粉モニターによるスギ雄花開花観測の省力化の検討

ア 研究目的

前2節で述べてきたように、雄花開花予測手法は、関東地方の材料を用いた実験結果を基礎として構築したモデルであり、その精度の検証も関東地方の試験林での開花観測結果によった。スギ花粉飛散予報の全国展開を考える場合、今回改良された開花予測モデルが他の各地でも関東地方と同程度の精度で雄花の開花状態を予測できるか、が大きな問題となる。そのためには、精度の検証と改良のために、本章第1節のような開花モニタリングデータが各地で実施されることが不可欠になる。しかし、本研究の開花モニタリングには多大な労力を要している。そのため、機械化などにより多少精度を犠牲にしてもモニタリングが省力化できれば、各地でのデータ取得に大きな効果が

あると予想される。

この節では、リアルタイム自動花粉モニター(KH-3000)を試験地内に設置して花粉飛散を観測し、第1節の観測データと照合し、この機器のデータで、現地での開花状態、とくに開花初期をよく捉えられるかを検討した。

なお、このプロジェクト研究予算ではKH-3000の購入は困難だったため、群馬試験地では日本気象協会、千葉試験地ではNPO花粉情報協会所有の機器を使用させていただいた。機器の使用を快諾していただいた両組織に謝意を表する。

イ 研究方法

KH-3000は、大和製作所製で、毎分4.1lの大気を吸引し、半導体レーザによる前方および側方散乱光を検知することによって $28\text{--}35\mu\text{m}$ の粒径(スギ花粉の粒径に対応する)の粒子だけをカウントして体積あたりの花粉濃度を計測する装置である。

群馬試験地ではKH-3000を試験地に隣接するスギ採種園内に設置した(吸引口の地上高:1.3m)。林内に設置することで林外から飛来する花粉の影響を排除できるほど林内の花粉濃度が高くなることによって、開花初期を明瞭に捉えられる可能性を検討することを目的とした。KH-3000による観測は2004、2005年に実施した。

一方、千葉試験地では、試験地(スギ採種園)から約50m離れた庁舎(2階建て)の屋上にKH-3000を設置した(吸引口の地上高:7.5m)。林内に設置するとその近傍の個体の影響が非常に強くなり、その数個体の開花時期だけを鋭敏に検知してしまう可能性がある。多少離れた場所で観測することによって、この可能性を排除して試験地全体の傾向を把握することを目的とした。KH-3000による観測は2004、2005年に実施した。

両試験地とも、本章第1節の雄花開花モニタリングのデータと比較対照した。林内に機器を設置した群馬試験地では、機器周辺の個体の開花調査も実施した。

ウ 結果

群馬試験地におけるKH-3000による測定結果(平均花粉濃度)と開花調査結果(累積開花曲線)の関係を図1-3-1に示した。雄花の着生が少なかった2004年では、約10%の個体(観測単位)が満開に達した3月12、13日に、KH-3000観測値は顕著なピークを示した。しかし、その後これらに匹敵するピークは3回だけしか現れなかった。また、図には示していないが、雄花が開花していない2月中にも数回これらと匹敵するピークが現れた。一方、豊作だった2005年には満開になった観測単位が3%未満のうちに花粉モニターではやや小さなピークを観測した。その後は、KH-3000観測値は概ね開花調査結果に対応して推移した。なお、2005年の花粉濃度の最高値は2004年の20倍以上に達した。

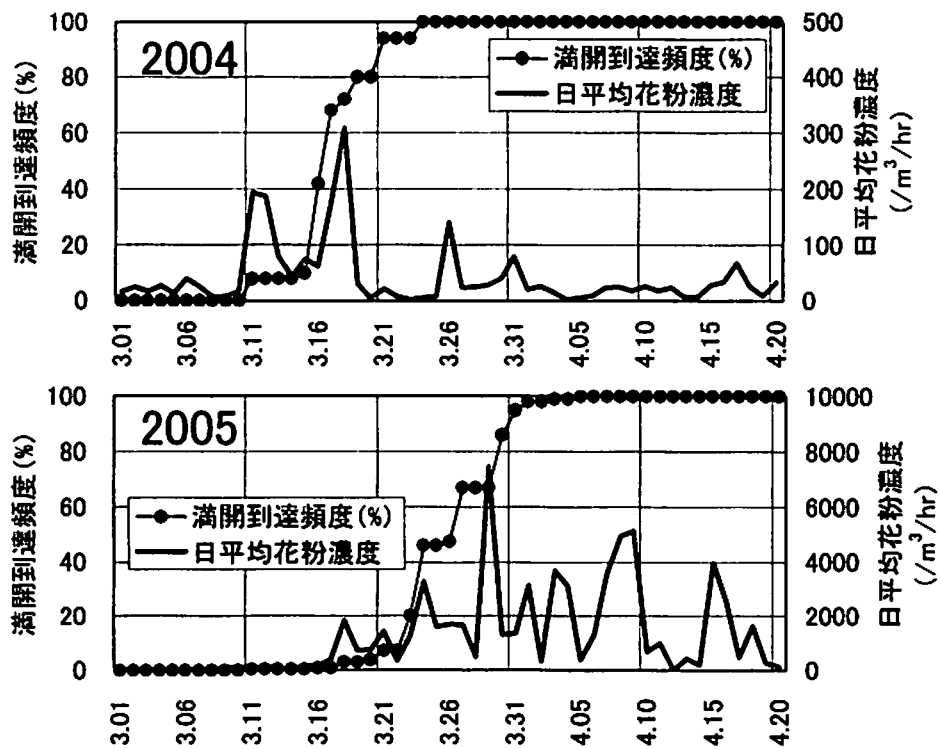


図 1-3-1. 群馬試験地における開花調査結果と KH-3000 による測定結果

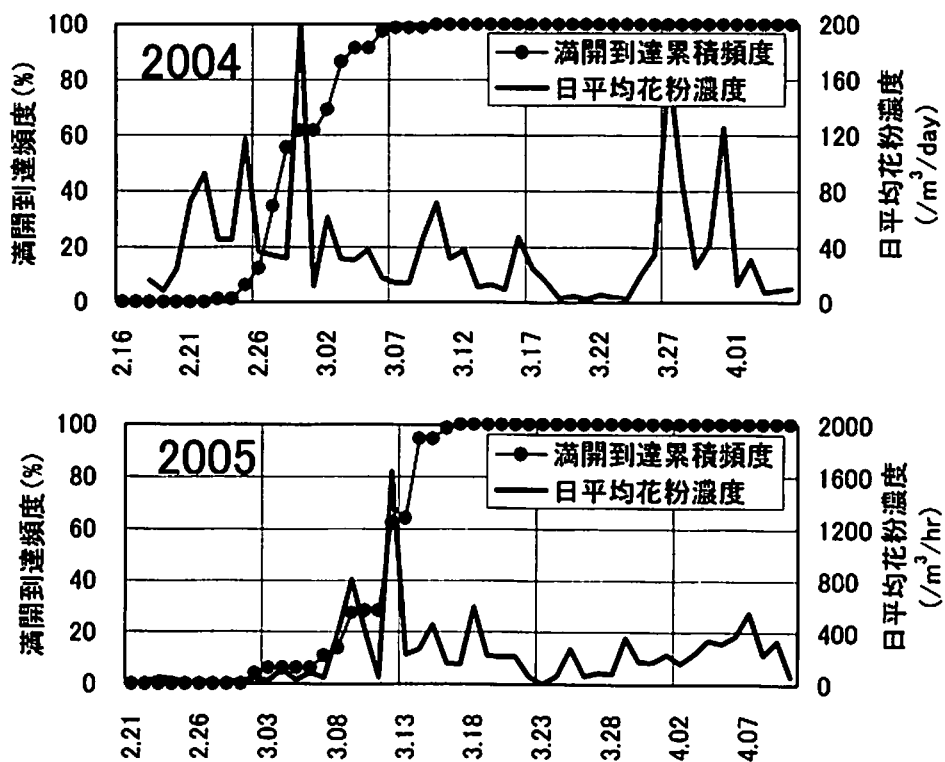


図 1-3-2. 千葉試験地における開花調査結果と KH-3000 による測定結果

千葉試験地における KH-3000 による測定結果と開花調査結果の関係を図 1-3-2 に示した。2004 年には雄花が開花に至る数日前から KH-3000 観測値は数回の小ピークを記録したが、2005 年には開花調査結果に概ね対応して推移した。

エ 考 察

群馬試験地では、2004 年には KH-3000 は開花初期を鋭敏なピークとして捉えることができたが、これに匹敵するピークは以後 3 回しか現れなかった。KH-3000 設置場所のすぐ隣にはこの試験地で例年開花の早いクローン（勢多 2 号）が植栽されているが、この年は試験地全体の雄花着生量が非常に少なかったため、この時期にはほとんどこの個体の花粉のみを捉えた可能性が高い。同様に以後のピークも近隣の開花個体の花粉をモニターした可能性がある。このように、雄花量が少ない年には、近隣の個体の影響が顕著となり、全体の開花状況を反映した推移を得ることは困難と考えられる。さらに、この機器は粒径のみで花粉を識別するので、強風時等には花粉以外の微粒子を計測することが指摘されている。2 月中のピークはこうしたものであると考えられる。

2005 年には開花初期のピークは、2004 年と同じ理由で、試験地全体の動向に比べて過大であると考えられるものの、開花期全体の推移は概ね開花調査結果と合致した。また、KH-3000 の観測値は 2004 年に比べて格段に高く、花粉以外の微粒子によると思われる異常値の影響もおおむね無視できると見なせる。このように、豊作年においては、近隣の個体の影響は残るものの、その林分の開花状況はある程度の精度で把握することは可能であると考えられる。

千葉試験地では、2004 年には雄花が開花する前にピークが観測された。しかしピークの値そのものが低く、これが花粉以外の微粒子による異常値なのか試験地外からの花粉を捉えたのかは不明である。一方、豊作年の 2005 年には KH-3000 の観測値は開花調査結果と良く対応した。少し試験地から離れた場所に機器を設置したことによって群馬試験地のように近隣の個体の影響を受けなかったためであると考えられる。しかし、豊作年であっても林内に機器を設置した群馬試験地に比べて花粉濃度が低いため、開花初期のデータ（3 月 5 日前後）については、花粉以外の微粒子による異常値が群馬試験地と同程度であると仮定すると、その信頼性は高いとはいえない。また、対象林分と機器設置場所との位置関係によっては、風向の影響でほとんど遠方からの花粉を捉えてしまう可能性もあるので、設置場所には注意が必要だろう。

いずれにせよ、花粉モニターを林内に設置しても離れた場所に設置しても、開花調査と同程度の精度で開花時期を花粉モニターで把握することは不作年には困難であると考えざるを得ない。

オ 今後の問題点

1 林分内に複数台の機器を用いれば開花状況の推移を正確にモニターできる可能性があるが、費用対効果の面で問題が残る。

カ 要 約

開花調査の自動計測の可能性を検討するために、試験地内、またはその近辺にリアルタイム花粉モニター（KH-3000）を設置し、その観測結果を上記の開花調査結果と比較した。雄花量の少ない年

には、モニターを林内に設置した場合には、全体の開花動向を反映せず機器周辺に開花の早い個体があるとそれに大きく左右されてしまうこと、離れた場所に設置した場合には、花粉以外の微粒子や遠方から飛来した花粉を区別できないことが明らかになった。

キ 引用文献

な し

(金指達郎)

2. 花粉生産を抑制する林分密度管理技術の開発

ア 研究目的

スギ花粉症患者の増加の一因はスギ、ヒノキ花粉の大気中の飛散量の増加にある。花粉増加の理由はいくつかあるが、花粉を生産する成熟したスギ、ヒノキ林の面積が増えたことはその一つである。林業の不況でスギ、ヒノキの皆伐（一定範囲の大半の木を一度に伐採すること）量は以前に比べて減っており、第二次世界大戦後に植えられた林が成熟するにしたがい、花粉を生産する林の面積は増える一方となっている。関東の場合、皆伐が行われないと花粉発生源となるスギ人工林の面積は20年後までに約25%増加すると試算されている（家原 2000）。

スギ、ヒノキ林は現在、国土面積の約2割をおおう。スギもヒノキも個体は100年以上生きるもので、伐らなければ花粉を長く生産し続ける。花粉症対策には、発症予防や症状軽減の医療とともに、現存するスギ、ヒノキ林の花粉生産を抑制する適切な管理が必要である。現存するスギ、ヒノキ林の花粉量を減らす手段として、薬剤を用いる方法（例えば、長尾ら 2005）、間伐（林木の一部を間引きし、残された木の成長を助ける林業の作業）や枝打ち（枯枝や成長の悪い下枝を切り落として節や節穴の少ない木を育てる林業の作業）による方法、そして、樹種転換による方法（例えば、<http://www.sangyo-rodo.metro.tokyo.jp/norin/kafun/seibi/seibi.html>

）がある（清野ら 2002）。林野庁はスギ、ヒノキ林に対する花粉生産抑制の方策ともなる間伐や雄花の着生量の多い個体を狙い伐りする抜き伐り（林木の一部を伐採すること）や枝おろし（下枝を切り落とすこと）を行っている。しかし、スギ、ヒノキは遺伝的な性質が多様である可能性があり、森林の環境も場所によってさまざまである。また、間伐や枝打ちはもともと木材生産のための手段であり、これを花粉抑制目的に行ったときにどれくらいの効果を期待できるのか必ずしも分かっていたなかったので、間伐や枝打ちの効果をj知るためのモデルによる予測（清野 2000）や間伐試験（林野庁 2000；清野ら 2003）を行ってきた。しかし、間伐がその翌年以降の雄花量に及ぼす影響について明確な結論は得られていない。

このため、文部科学省プロジェクトで開始した間伐試験の継続を主眼に、本交付金プロジェクト課題に取り組んでデータを集積した。得られたデータをもとに雄花量の要因を分析し、間伐影響の推定精度の向上を図るとともに、花粉抑制のための間伐の留意点を示した。

試験林の設定、維持管理にご協力を頂いた京都大阪森林管理事務所、熊本森林管理署、東京分局（現前橋森林管理局）茨城森林管理署、森林技術センターの関係各位、ならびに野外調査と試料調整にご助力を頂いた各位に厚くお礼申し上げる。

イ 研究方法

1) 林分構造と雄花量の計測

2000年9～11月に間伐試験地を茨城県笠間市（茨城森林管理署 224 林班と小班）、京都府宇治市（京都大阪森林管理事務所 30 林班は小班）、熊本県玉東町（熊本森林管理署 155 林班い1小班）の26～29年生スギ人工林（表-1、清野ら 2003 改変）に設定した。茨城では超強度間伐（本数間伐率69%、以下同じ）、強度間伐（52%）、通常間伐（13%）、無間伐（0%）の4つの処理区を設けた。京都でも同様の4処理区（68、50、26、0%）を設けた。熊本では間伐は強度間伐（39%）と無間伐（0%）の2処理区とした。茨城の林は実生苗の植栽林である。京都の林は挿し木苗の植栽林で、品種は分からないが針葉形態の異なる複数の系統が混生している。熊本の林も挿し木林（品種不明）である。

表 2-1. 間伐試験林の位置と立地環境条件（清野ら、2003 を改変）

試験林	標高 m	気候帯	土壌母材	土壌型	年平均気温* ℃	年降水量* mm
茨城	240-260	暖帯	古生層	B _D	12.2	1326.0
京都	260-280	暖帯	古生層	B _D	14.3	1545.4
熊本	500-510	暖帯	安山岩	B _D	13.9	1992.7

*1971～2000年の平年値(気象庁2002)。気温は遞減率を0.55℃/100mとし最寄りの気象台の値で推定。降水量は気象台の値をそのまま用いた。



図 2-1. 28 年生スギ人工林間伐試験地 (茨城県) (上：無間伐区、下：強度間伐区)
 無間伐区：Ry0.92、立木本数 2871 本 ha⁻¹、平均胸高直径 16.6cm、平均樹高 14.4m
 強度間伐区：Ry0.74、1358 本 ha⁻¹、平均胸高直径 17.5cm、平均樹高 14.8m



図 2-2. 28 年生スギ人工林間伐試験地 (京都府) (左：無間伐区の林内、右：同、林冠)

Ry0.79、立木本数 2123 本 ha^{-1} 、平均胸高直径 19.0cm、平均樹高 14.1m



図 2-3. 32 年生スギ人工林間伐試験地（熊本県）（左：無間伐区、右：間伐区）
無間伐区：Ry0.92、立木本数 2270 本 ha^{-1} 、平均胸高直径 20.5cm、平均樹高 18.1m
間伐区：Ry0.71、立木本数 1140 本 ha^{-1} 、平均胸高直径 20.6cm、平均樹高 15.3m

間伐前に処理区内の個体の胸高直径を直径巻尺で毎木調査した。間伐は下層間伐とし、処理区ごとに胸高直径の頻度分布にあわせ、また、立木位置がなるべく片寄らないように間伐木を選び、2000 年 11 月～2001 年 2 月の間に実行した。胸高直径の頻度分布に合わせて処理区ごとに 10 個体のサンプル木を選び、雄花の有無を双眼鏡で確かめた。また、樹高をレーザー距離計（Impulse 200）で測った。林分の相対的な混み具合を表す収量比数 Ry（日本林業技術協会 1999）を間伐前、後について算出した。

間伐後は年 1 回（2001 年 11 月～2002 年 2 月、2002 年 12 月～2003 年 3 月、2003 年 11 月～2004 年 2 月、2004 年 12 月～2005 年 2 月）の割合で胸高直径と着生する雄花の有無を毎木調査した（ただし、熊本の 2001 年 12 月の観察は各測定区 10 個体のみとした）。雄花の着生が認められた個体については、2002 年 12 月～2003 年 3 月までは横山ら（2001）の方法に準じ、陽樹冠を構成する全ての一次枝に雄花が密に着生するか、陽樹冠を構成する全ての一次枝に雄花が着生するが疎らであるか、陽樹冠を構成する一部の一次枝に雄花が着生するかのいずれかに判別した。2003 年 11 月～2004 年 2 月以降は雄花の有無のみを判別した。また、各測定区 10 個体の樹高を計測した。ただし、京都の樹高は 2003 年 11 月～2004 年 2 月以降は欠測したため、それ以前の樹高成長経過を外挿して推定

した。

2002 年 1～3 月に受口面積 0.1288 m²の雄花トラップを各処理区に 20 個設置し、落下してくる雄花を夏までに 2、3 回に分けて収集した。この調査を 2005 年夏まで 4 シーズン継続した。収集した雄花は実験室で調整したのち、熱風乾燥機を用いて 85℃で数日間乾燥させ、重量を測った（これを絶乾重とした）。花粉が飛散した後の雄花重は飛散した花粉重にほぼ等しい（齋藤、1987）と見られるので、落下雄花重を 2 倍した値を雄花量とした。

2) 林分雄花量の要因分析と予測

林分雄花量の要因の中には、気象条件のように条件を人為的に制御するのが殆ど不可能なものがある。また、スギの遺伝的性質や樹齢は改植などで制御できるが時間がかかる。これに対して、本数密度は植栽本数の選択や計画的な除間伐により調節できるので、花粉抑制の短期的対策の一つになる可能性がある。

間伐試験林のデータにもとづいて林分雄花量の要因を分析し、気象と遺伝的性質、密度管理の影響を比較した。また、3 者を説明変数に林分雄花量を推定する重回帰式を作成した。

スギ人工林の施業体系の例や全国スギ人工林の林分構造データを文献等により収集した。林分雄花量の推定式を予測式として用い、植栽本数や間伐計画、気象の年次変化などをパラメータに花粉生産を予測するモデルを作成するとともに、同モデルを用い、主要な施業体系について雄花量の年次変化と伐期平均雄花量を予測した。

ウ 結果

1) 林分構造と雄花量の経年変化

下層間伐で主として劣勢木が間伐された結果、いずれの間伐区も間伐前と比べて間伐後は平均胸高直径が大きくなり、平均樹高もやや高くなった（表 2-2）。茨城の 4 処理区は、Ry では間伐前は 0.90～0.77 の狭い範囲にあったが、間伐直後は無間伐区の 0.89 から超強度間伐区の 0.42 まで差が広がった。間伐直後の Ry は京都の 4 処理区でも 0.80～0.39 の差がある。熊本は 0.92 と 0.71 である。本数密度は Ry にほぼ正比例して減少した（図 2-4）。間伐後 4 年間に多くの区で枯死木が発生し、Ry は微増した。しかし、超強度間伐区などでは枯死木がまだ現れていない。

表 2-2. 間伐試験林の諸数値（清野ら 2003 に加筆）

試験林 林齢	間伐 処理	測定区 面積 m ²	間伐直前2000				間伐直後2000			
			Ry	個体数 密度 trees ha ⁻¹	平均 直径 cm	平均 樹高 m	Ry	個体数 密度 trees ha ⁻¹	平均 直径 cm	平均 樹高 m
茨城 26年	無間伐	213	0.91	2965	16.0	14.0	0.91	2965	16.0	14.0
	通常間伐	321	0.83	2552	15.6	12.0	0.79	2210	15.7	12.1
	強度間伐	221	0.92	2897	16.3	14.3	0.74	1403	16.7	14.4
	超強度間伐	202	0.82	1933	17.3	14.0	0.50	595	18.6	14.5
京都 27年	無間伐	297	0.80	2123	18.8	14.3	0.80	2123	18.8	14.3
	通常間伐	406	0.75	1725	20.4	15.0	0.68	1281	22.6	15.9
	強度間伐	452	0.77	1857	20.0	14.8	0.57	928	22.5	16.0
	超強度間伐	381	0.77	1917	19.5	14.3	0.39	604	21.2	14.5
熊本 29年	無間伐	273	0.92	2307	19.3	15.8	0.92	2307	19.3	15.8
	強度間伐	237	0.84	1943	18.3	13.9	0.71	1183	18.4	14.0

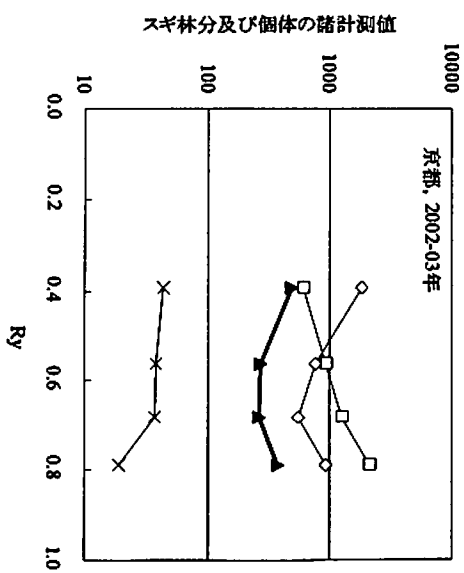
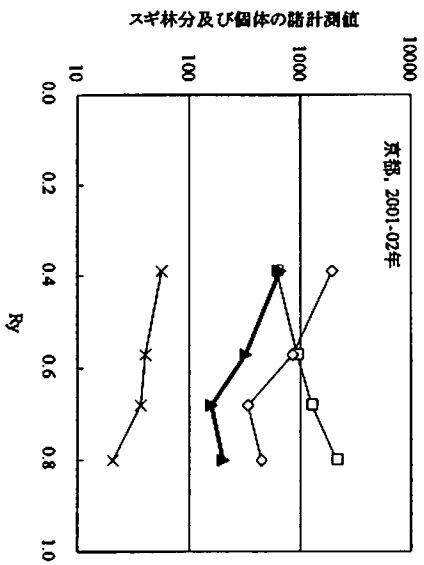
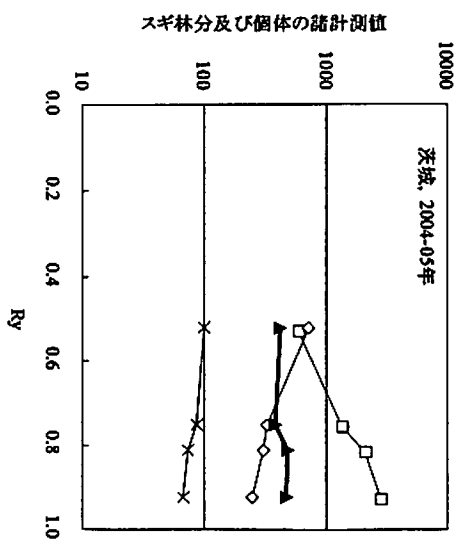
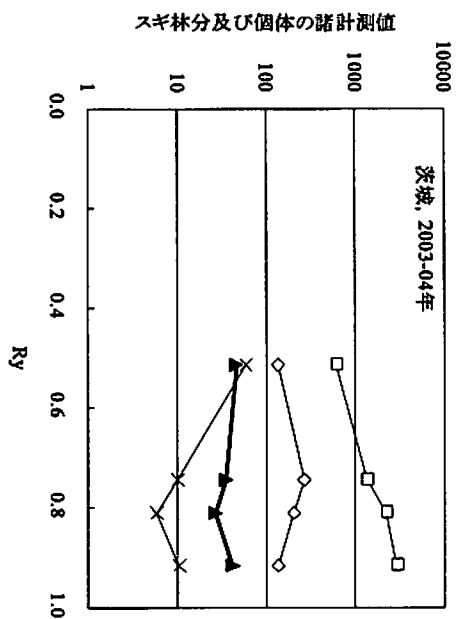
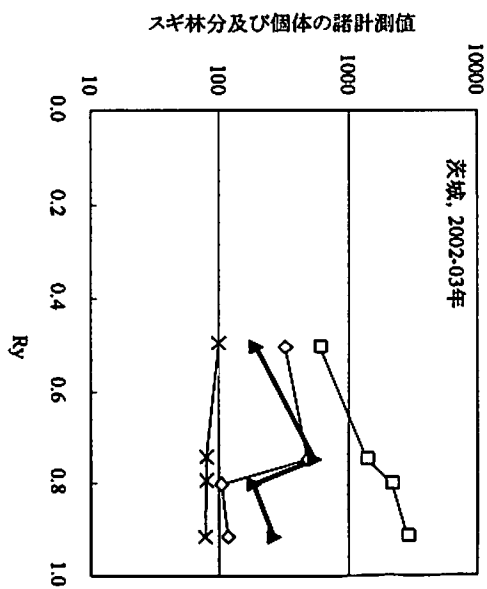
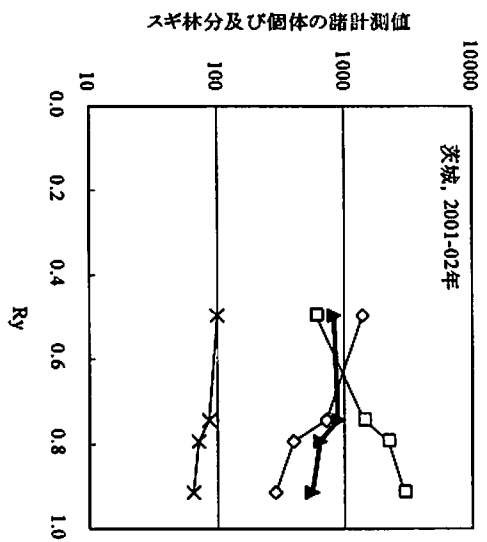
間伐1年後2001-02				間伐2年後2002-03				間伐3年後2003-04				間伐4年後2004-05			
Ry	個体数 密度	平均 直径	平均 樹高	Ry	個体数 密度	平均 直径	平均 樹高	Ry	個体数 密度	平均 直径	平均 樹高	Ry	個体数 密度	平均 直径	平均 樹高
	trees ha ⁻¹	cm	m		trees ha ⁻¹	cm	m		trees ha ⁻¹	cm	m		trees ha ⁻¹	cm	m
0.92	2918	16.2	14.2	0.92	2871	16.6	14.4	0.92	2871	16.9	14.7	0.93	2871	17.0	14.9
0.80	2210	15.9	12.3	0.81	2210	16.2	12.6	0.81	2147	16.5	12.9	0.82	2116	16.9	13.2
0.75	1403	17.0	14.6	0.74	1358	17.5	14.8	0.75	1358	17.8	15.0	0.76	1358	18.1	15.2
0.51	595	18.9	14.8	0.51	595	19.3	15.1	0.52	595	19.7	15.4	0.53	595	20.0	15.7
0.79	2123	19.0	14.1	0.76	1954	20.0	14.0	0.76	1954	20.5	14.1	0.75	1888	20.8	14.1
0.68	1281	23.0	16.1	0.69	1281	24.0	16.2	0.68	1281	24.5	16.1	0.68	1281	24.9	16.1
0.56	928	22.9	15.7	0.56	928	24.1	15.5	0.56	928	24.8	15.7	0.56	928	25.4	15.7
0.39	604	21.7	14.5	0.39	604	22.9	14.5	0.39	604	24.8	14.5	0.39	604	25.7	14.5
0.92	2270	20.0	17.0	0.94	2270	20.3	18.2	0.94	2270	20.5	18.1	0.92	2087	21.3	17.9
0.71	1183	19.4	15.0	0.73	1140	20.1	16.1	0.71	1140	20.6	15.3	0.71	1140	21.1	15.2

間伐1年後2001-02				間伐2年後2002-03				間伐3年後2003-04				間伐4年後2004-05			
雄花着生 個体数比	着生個体 密度	個体 密度	林分	雄花着生 個体数比	着生個体 密度	個体 密度	林分	雄花着生 個体数比	着生個体 密度	個体 密度	林分	雄花着生 個体数比	着生個体 密度	個体 密度	林分
%	g tree ⁻¹	g tree ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	g tree ⁻¹	g tree ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	g tree ⁻¹	g tree ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	g tree ⁻¹	g tree ⁻¹	kg ha ⁻¹
66	285	187	553	78	117	91	265	11	134	14	40	67	490	328	942
73	391	284	627	80	105	84	185	6	201	12	26	74	609	451	968
87	721	625	877	80	486	389	545	10	258	26	35	87	643	560	760
100	1390	1390	827	100	321	321	191	58	132	77	46	100	1412	1412	840
21	447	94	199	19	931	176	375	9	34	3	6	36	677	244	476
37	337	123	158	37	559	204	262	15	13	2	3	69	421	291	372
40	850	344	320	38	769	293	272	38	31	12	11	79	1353	1069	992
57	1928	1090	658	43	1863	810	489	48	50	24	14	83	3030	2515	1519
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

調査地のスギ雄花は年にもよるが 2～3 月頃に花粉を飛散し、大半は春のうちに落下する。2002 年の京都と茨城で、それぞれ 7 月 30 日、8 月 20 日までに落下した雄花のうち、9 割以上は 5 月末までに落下した。花粉を飛散した雄花で夏以降も落下せず樹上にとどまるものの量はわずかと考えられる。なお、熊本は観察期間中ずっと雄花生産が認められなかった。

間伐翌年（2001-02 年）の林分雄花量は無処理区や通常間伐区で少なく、強度や超強度間伐区では多かった（図 2-4）。Ry の範囲全体としては、林分雄花量は Ry とおおむね負の比例関係にあったが、通常間伐による Ry の変化範囲では無処理と比べて茨城の林ではやや増加、京都の林ではやや減少していた。すなわち、Ry の高い範囲（およそ 0.7 以上）では、Ry が変化しても林分雄花量に変化があるとは言えなかった。

間伐翌々年（2002-03 年）の雄花量は、京都は前年と同程度であったが、茨城は前年の半分以下となった。茨城では 2002 年 7 月の月平均気温が前年より 0.8 度低く（図 2-3）、雄花が分化しにくかったのかも知れない。2003 年 7 月は全国的な冷夏となり、2004 年春の雄花着生個体数比は概して小さく、林分雄花量は少なかった。2005 年までの 4 シーズンのデータ全体で検討すると、京都の 2002-03 年と 2003-04 年はあまり明瞭でなかったが、それ以外では間伐翌年とおおむね同じ傾向が間伐後 4 年まで続いた（図 2-4）。しかし、茨城では Ry が低いときに雄花量が減る年もあり、Ry が低いと雄花量が常に多いとは限らなかった。このように茨城では Ry と雄花量の間に明瞭な関係がないため、強い間伐も含めて間伐が雄花量を増やすとも、減らすとも言えない。京都では、通常強度の間伐による Ry 変化では雄花を減らす、それ以上の Ry の減少は雄花を増やす可能性があり、この傾向は間伐後 1 年目（清野ら 2003）から同じであった。



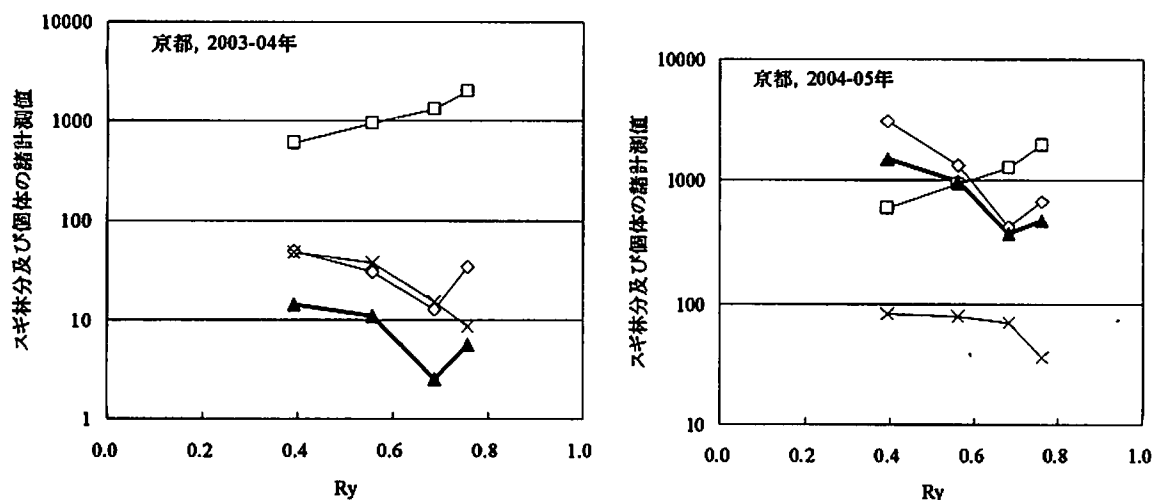


図 2-4. 収量比数 (R_y) とスギ人工林及び個体の諸計測値との関係 (清野ら 2003 にデータを追加)
 □ 個体数密度 (trees ha^{-1})、◇ 雄花着生個体当たり雄花量 (g tree^{-1})、▲ 林分雄花量 (kg ha^{-1})、
 × 雄花着生個体数比 (%)

茨城と京都で傾向が異なる理由を検討するため、林分雄花量を個体数密度と雄花着生個体数比、雄花着生個体当たり雄花量に分解した。まず、雄花着生個体数比が R_y が低いほど高くなる傾向は、茨城の 2003-04 年の 1 例を除いて茨城と京都、また、年次を問わず共通であった (図 2-4)。雄花着生個体数比は茨城では不作年 (2003-04 年) を除いて京都より高かった。

雄花着生個体当たり雄花量 (林分当たり雄花量を雄花着生個体数密度で除した値) は、間伐翌年 (2002 年) は間伐が強度あるいは超強度の区では増加した。すなわち、京都では無間伐区と通常間伐区では比較的小さく、強度間伐区はその約 2 倍、超強度間伐区では約 4 倍であった (図 2-4)。茨城も同様で、強度間伐区は約 2 倍、超強度間伐区では約 5 倍であった。樹冠の全周囲を疎開された個体 (茨城では強度と超強度間伐区の 7 個体、京都では同じく 4 個体) のうち、茨城の 5 個体は間伐 1 年後に最下一次枝 (間伐直前は日当たりが悪く、雄花を着生していなかった枝である) まで雄花を着生した。これは、間伐によって日当たりが良くなった樹冠に雄花が着生したことを示しており、少なくとも茨城では雄花着生個体当たり雄花量の増加に、雄花が着生する樹冠表面積の増加が貢献していると考えられる。

雄花着生個体当たり雄花量の各年の傾向を比較すると、2001-02 年、2004-05 年は R_y とおおむね負の比例関係にあるが、2002-03 年と 2003-04 年はそうした傾向が見られなかった。こうした雄花着生個体当たりの雄花量の年による違いが、林分雄花量の年次変化の傾向に強く反映しているようである。雄花着生個体当たりの雄花量と R_y との関係が年次によって異なることについて、考えられる説明の一つは、雄花の着生履歴の影響が及んでいることである。繁殖成長には栄養条件も関係する (浅川・長尾 1966)。着花個体は対照個体と比べ翌年の重量成長が減り、着花量が減少することが強制着花実験で確かめられている (清野ら 2005)。茨城の林の超強度間伐区は、間伐により全個体が雄花着生し、雄花着生個体当たりの雄花量は間伐翌年に 1390g であったが、2 年目は 321g に激

減した（表 2-2）。そのような顕著な減少は他の区では見られない。このように、京都と異なり、茨城では超強度の間伐によって多量の雄花着生を促された個体が、翌年は着花量を増加できなかった可能性が考えられるが、この推論は個体レベルの栄養成長分析などを通して当否を明らかにする必要がある。

2) 林分雄花量の要因とその指標

・林分密度の影響の指標

本数密度は分かりやすい指標であるが、個体サイズの情報を含まないため、光合成を行う葉や、雄花が着生する日当たりの良い樹冠の林分当たりの量を現すには不十分である。林木の相対的な混み具合を表す指標に相対幹距や R_y などがある。これらは林分当たりの幹の量を用いる指標である。スギ雄花は日当たりの良い樹冠の表面に着生するので、樹冠の相対的な混み具合を表す値（例えば、 a^* （清野 1990））が望ましい。しかし、必要なパラメータが増える難点がある。幹量を変えず樹冠量を変える枝打ちのような取り扱いが行われていない林に限定すれば、幹量にもとづく値でも樹冠量の指標になるので、ここでは R_y を本数密度影響の指標として用いることとする。

・気象影響の指標

スギは開花生理が比較的良好に調べられている樹種で、高温、乾燥、日照時間の増加、過湿、幹の傷などがいずれも引き金になって開花が促進される（浅川 1994）。野外個体の雄花分化は7月の梅雨明け頃の気象に強く影響され、高温、乾燥、日照時間が長いと促進される。3つの試験林のスギに過湿や幹の傷などの原因は該当しないので、気象条件が引き金である可能性が高い。高温、乾燥、日照時間の増加は互いに相関があり、7月に晴れの日が多いと三つの値はいずれもスギの雄花分化を促進する方向に協働すると考えられる。このため、ここでは7月の月平均気温（図 2-5）のみを指標として取り上げる。

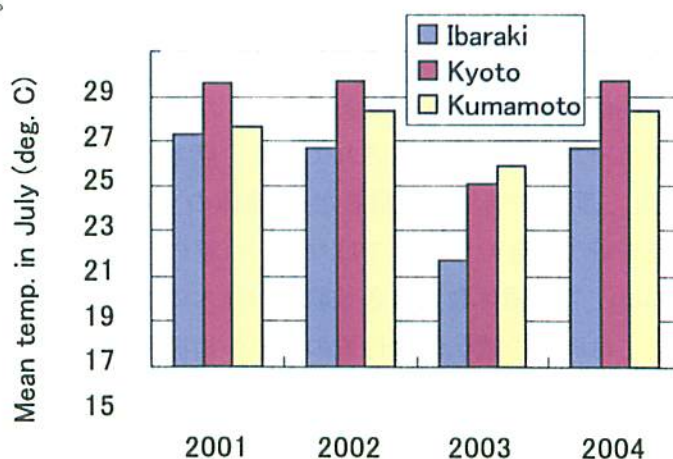


図 2-5. 試験林の7月平均気温

気温逓減率を $0.55^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ とし最寄りの気象観測点（笠間、京都、熊本）の値から推定した。

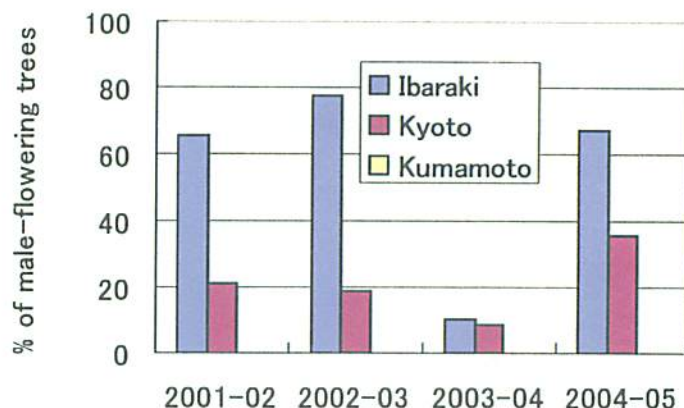


図 2-6. 無間伐区の雄花着生個体数比の経年変化

・ 遺伝的性質の影響の指標

スギの雄花着生には個体の遺伝的性質（植月ら 1997）も関係する。3つの試験林の無間伐区について雄花着生の違いを比較したところ、茨城の林では2003～2004年を除いて過半数の個体が雄花を着生した（図2-6）。京都の試験林では、雄花着生個体数比の年変動のパターンは茨城県と同様であったが、雄花着生個体は半数に満たなかった（図2-6）。熊本の試験林の個体は観察期間中、雄花を着生しなかった（図2-6）。茨城と京都の試験林の無間伐区では雄花着生個体数比の年変化のパターン（図2-6）が、前年7月の平均気温の年変化パターン（図2-5）と対応していた。熊本では、その7月の平均気温が2003年を除いては茨城と京都の値の中間にあり、また、樹齢は、2、3年とは言えより高齢で、 R_y など他の条件にも大差はない（京都は無間伐林でも R_y が0.8と他よりやや低い。他地域と同程度の R_y 0.9の林では雄花着生個体数比がより小さい可能性もある。ただ、茨城では R_y 0.8-0.9の間で雄花着生個体数比は大差なく、熊本も個体数比は0で差はない。このため、無間伐林分の R_y の地域間差の影響は小さいと考えられる）（表2-2）にもかかわらず、雄花を着生する個体はなかった。このように無間伐林分の雄花着生の状態が試験林によって異なるのは、各林分を構成するスギ個体の遺伝的性質が異なるからであろう。すなわち、茨城の試験林は雄花を比較的着生しやすい遺伝的性質を持った個体から構成されており、熊本の試験林は最も着生しにくい性質を持つ林木からなり（ただし、間伐の前年に観察した20個体のうち2個体が雄花を着生したので、熊本の試験林の個体も雄花を着生できないわけではない）、京都の試験林の個体の状態は両者の中間にあると考えられる。この雄花着生個体数比は各試験林の林木の雄花着生の遺伝的難易を表していると考えられるので、以下では同比を遺伝的な性質の違いの指標として用いることとする。

・ 他の要因の影響

林齢の影響について、ごく早熟な系統は別として若いスギは雄花を殆ど着生しないが、近畿地方で林齢の異なるスギ人工林の雄花量を比較した齋藤（1995）は、45年頃まで増加し、その後は600年頃まで変わらないとしている。同様の方法で関東地方の人工林を調べた横山（2002）は20数年の林から70年頃まで変わらないとしている。収量比数と雄花量の関係を示した林野庁（2001）の図7

を見ると、雄花量は林齢 26 年から 61 年以上の範囲では齢級とともに増加する傾向がある。以上のいずれの例も、林齢に沿って序列した林分間で密度管理やスギの遺伝的性質が異なる可能性があるため、これらの傾向は樹齢だけの効果を表したものではないかも知れない。また、雄花量には着花履歴(清野ら 2005)、胸高直径や表層地質(林野庁 2005)なども影響している可能性がある。ただ、本研究の間伐試験林では胸高直径、林齢が試験林間で比較的近い値であること、また、他の条件についてはデータが得られないため、以下ではそれらの影響を無視することとした。

3) ファクタリングアウト

のべ 40 点(茨城と京都各 16、熊本 8)の観測データを用い、林分密度、気象、遺伝的性質の各指標として選んだ R_y 、前年 7 月平均気温、無間伐林の平均雄花着生木比を説明変数とし、林分雄花量を従属変数とする重回帰式を作成した。

$$MFP = -2.326 - 0.425 R_y + 0.104 MTLJ + 0.0120 MFR \quad (R^2 = 0.571) \quad (1)$$

ただし、MFP: 林分雄花量 ($\text{Mg ha}^{-1} \text{y}^{-1}$)、 R_y : 収量比数、MTLJ: 前年 7 月の月平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)、MFR: 無間伐林の雄花着生個体数比 (2001-05 年平均)。

前年 7 月平均気温 ($P < 0.001$)、無間伐林の平均雄花着生個体数比 ($P < 0.001$) の影響はいずれも著しく有意であった。 R_y ($P = 0.109$) は有意でなかったが、 R_y を説明変数から外すと (1) 式の自由度調整済み寄与率が 0.535 から 0.513 に減少したので、 R_y は重回帰式を予測モデルとして使用するときには予測精度の向上に貢献すると考えられる。また、 R_y は人為的にコントロールし易い要因であるので残すこととした。(1) 式は、これを林分雄花量の予測モデルとして用いるとき、 R_y : 0.39-0.92、前年 7 月平均気温: $19.7\text{--}27.6^{\circ}\text{C}$ 、無間伐林の平均雄花着生木比: 0-55% の範囲に適用し、その林分雄花量を 57.1% の精度で予測する。3 者の相関は比較的低い ($-0.423 < r < 0.042$) ので、雄花生産に及ぼす各要因の影響を大よそ比較することができる。気象条件や遺伝的性質はその観測範囲内の変化によって林分雄花量が最大 $0.6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ 程度変化する(図 2-7 上、中)のに対して、 R_y による変化量は最大でも $0.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ 程度と小さかった(図 2-7 下)。

なお、気象条件と遺伝的条件を一定にしたとき、雄花量は R_y と負の比例関係で近似されている。 R_y をより幅広く取ると雄花量は R_y に対して上に凸の関係にあると予想される(清野 2000; 林野庁 2000)が、本研究でのモデルで取り上げた高めの R_y 範囲 (0.39-0.92) では、林分雄花量は R_y と負の比例関係で近似できると考えられる。したがって、この R_y 範囲内では、雄花量を少なめに管理するには R_y を高めに維持するのが良いことになる。

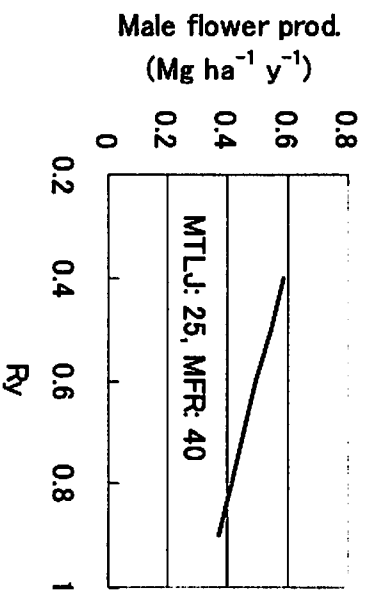
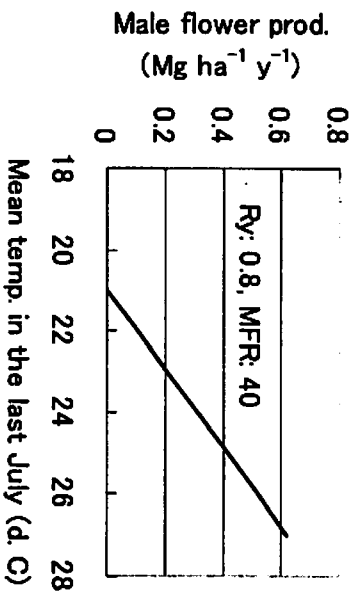
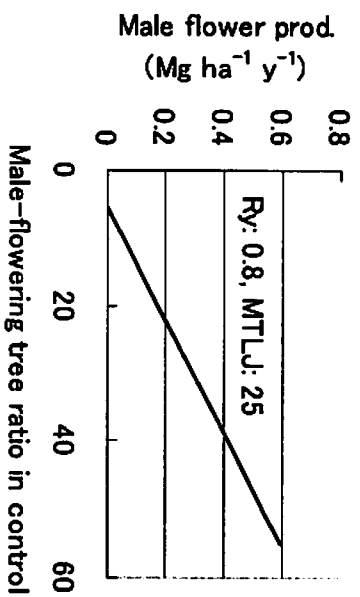


図 2-7. 本数密度 (上) と気象 (中)、遺伝的性質 (下) の各指標と林分雄花量の関係
 Ry、前年の 7 月平均気温、無間伐林の平均雄花着生個体数比 (2001-2005 年平均) を本数密度、気象、遺伝的性質の各指標とした。

4) 林分雄花量の予測

全国スギ人工林の本数密度管理実態は、林野庁の大プロ・長期育成循環施業 (H15 完了)、森林資源モニタリング調査 (H16 完了) のデータなどを通してある程度把握でき、なかでも全国の森林を系統的にサンプリングしている森林資源モニタリング調査のデータが適当と考えられた。そこで同モニタリング調査の全国スギ人工林 297 林分の立木調査データ (暫定データ) について、地域別に林齢と ha 当たりの林分幹材積の関係を求めた。40 年生時の林分幹材積は東北で少なく、中部で多

く、関東、関西、中国、四国、九州は中くらいであった。この地域差は密度管理の違いを表している可能性があるが、立地条件などのデータを入手できなかったため、 R_y を通しての全国スギ人工林の現行の密度管理状況は把握できなかった。このため、花粉生産を抑制する林分密度管理については、文献を含め収集したデータにもとづいて、花粉生産予測モデル（図 2-8）を作成し、伐期平均雄花量の抑制の観点からスギ人工林の施業体系を評価することとした。前述の通り、林齢の影響は明確でないので林齢（樹齢）の影響はないものとした。

スギ人工林の施業体系と全国スギ人工林の林分密度管理実態については、収集した施業体系のうち、一般的な間伐管理を行う例として藤森（1991）の改善版一般林施業（以下、長伐期一般林施業）を選んだ。また、それと植栽本数と主伐材の平均直径が同じで、途中の間伐をより強度にして回数を減らした省力間伐の体系（長伐期省力間伐施業）、さらに植栽本数は同じだが無間伐施業（間伐手遅れ林を想定した体系）を林分密度管理図（日本森林技術協会 1999）上で作成した（図 2-9 上）。長伐期一般林施業は伐期 100 年で、 R_y は 0.54~0.81（平均 0.69）の範囲をとり、一度の間伐で R_y は約 0.1 減少する。長伐期省力間伐施業は伐期 100 年で、 R_y の範囲は 0.48~0.69（平均 0.59）、一度の間伐で R_y は 0.15 減少する。無間伐施業は伐期 50 年で、 R_y の範囲は 0.70~0.99（平均 0.87）である。

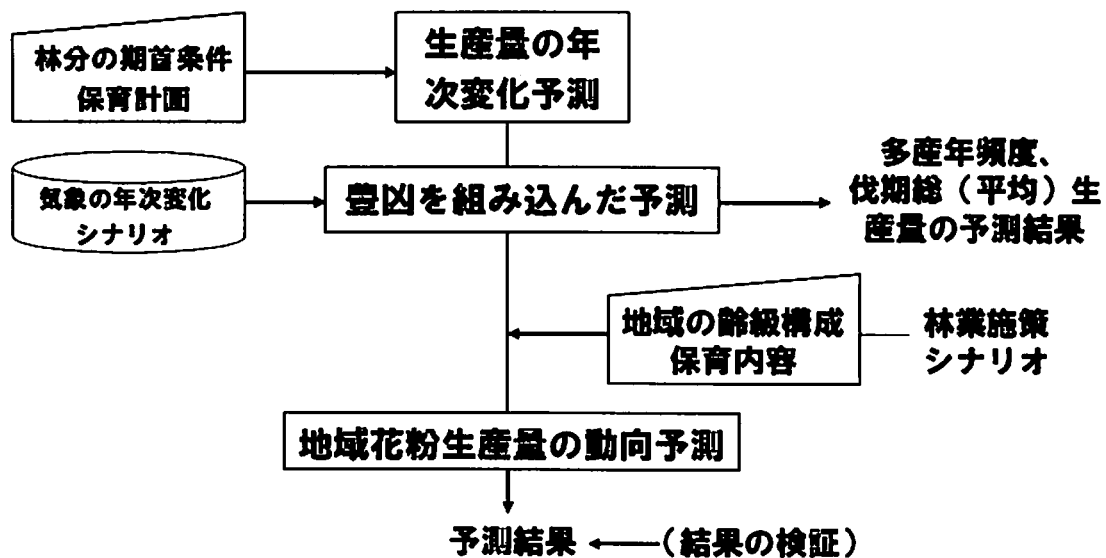


図 2-8. 花粉生産量予測モデルの構造

各施業体系における雄花量を(1)式で予測すると、前年 7 月の気象条件を一定とした場合（図 2-9 左下）は、雄花量は $350 \sim 450 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の間で推移し、成熟齢に達してからは間伐により増加する傾向が明らかであった。また、省力間伐施業では一般林施業より伐期平均雄花量が多くなるようである。気温の年次変化を考慮すると（図 2-9 右下）、雄花量は年によって $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 程度から $800 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 近くまで大きく変動した。伐期平均雄花量は長伐期一般林施業が $326 \pm 230 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、長伐期省力間伐施業が $346 \pm 239 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ で大差はなく、気象条件の年変動に隠れてしまう程度

の差であった。年ごとに比較すると、豊作年は施業間の違いが小さく、不作年は R_y にもよるが、省力間伐施業の方が 2、3 割多かった。これらに比べ、無間伐施業の伐期平均雄花量は $183 \pm 209 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と半分程度しかなかった。

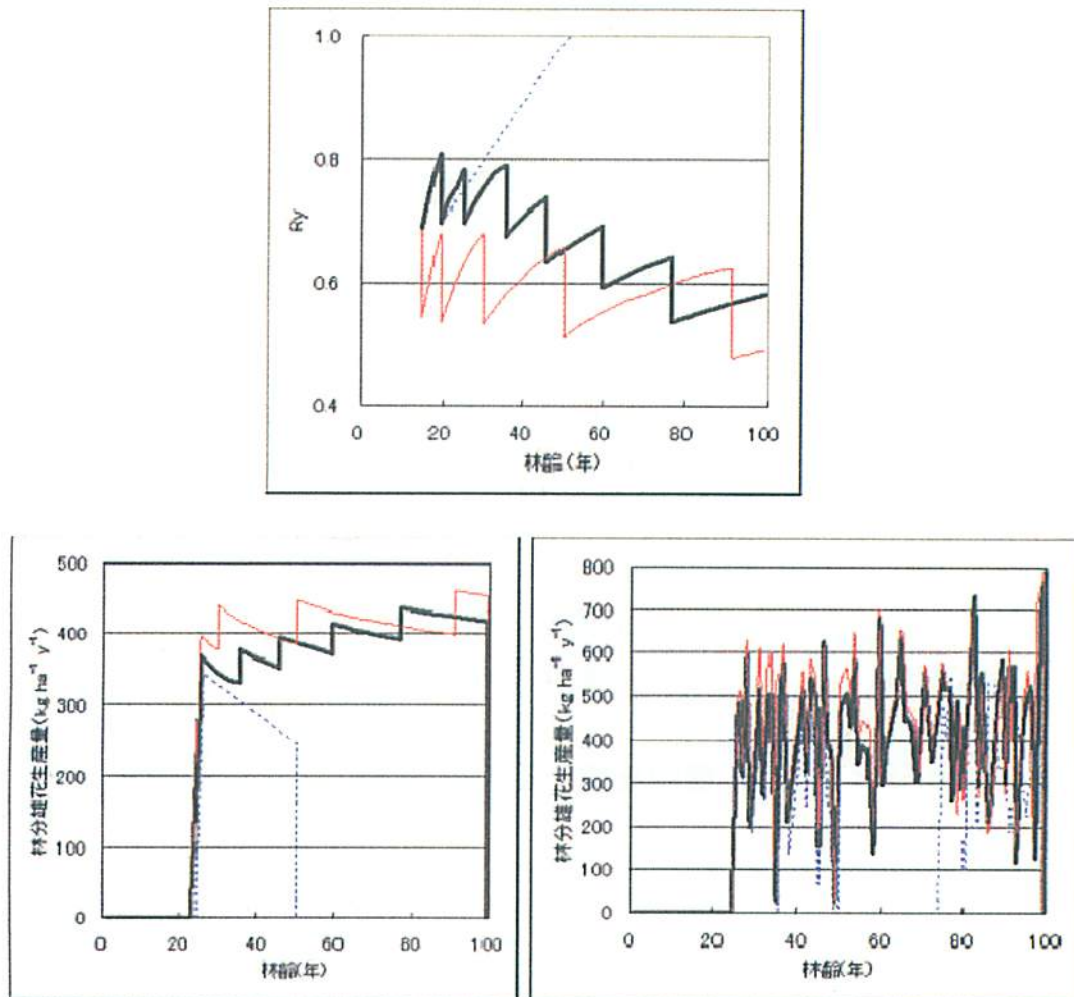


図 2-9. 施業体系ごとの雄花量の年次変化の推定結果

太線は長伐期一般林施業（改善版一般林施業、藤森 1991）、実線は間伐を強度にし、回数を減らした長伐期省力間伐施業、破線は間伐手遅れ林を想定した無間伐施業（上図）。雄花生産は 25 年生から始まり、加齢の影響はないものとし、雄花量を(1)式で推定した。MFR は 50、MTLJ は 23°C 一定（左下図）、あるいは水戸気象台の年ごとの値（1989～1995 年/MTLJ 19.5-26.3）（右下図）、無間伐施業は 50 年伐期で再造林することとした。予測された伐期平均雄花量は一般林施業： $326 \pm 230 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、省力間伐施業： $346 \pm 239 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、無間伐施業： $183 \pm 209 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 。

エ 考察

花粉抑制に配慮して間伐を実施するときの留意点として次のことがあげられる。

1. 間伐により樹冠が疎開された残存木は雄花生産が以前より盛んになる可能性がある（清野ら、

2003)。このため、間伐効果の評価は、間伐による直接の雄花除去と翌年以降の雄花生産への影響を合算して行う。また、単木でなく、林分当たり（土地面積当たり）で行う。

2. 長伐期一般林施業に比べて、強度の間伐をとともなう長伐期省力間伐施業では、一度の間伐による直接の雄花除去量は多いが、残存木の翌年以降の雄花量が大きく増える可能性がある。しかし、伐期平均量で比べると、増量は数%程度にとどまる。主伐までの長い期間で考えると、間伐方法による雄花量の違いはそれほど大きなものではないかも知れない。

3. スギの遺伝的性質や気象条件は間伐以上に大きな影響力を持つ可能性がある。雄花量を抑制する Ry 管理を行っても 7 月が高温、乾燥であると、Ry 管理の効果は気温の影響に隠されてしまう。逆に強い間伐を行っても翌年が不作年なら雄花は減る。また、遺伝的性質により雄花を殆ど着生しない林がある。

4. 「間伐しないことがスギ花粉の過剰発生の原因」という見方があるが、それに符合するデータは得られなかった。

5. 現行の密度管理状況の情報は得られなかったが、間伐を行えない林分も多いと推定される。積極的な間伐管理が行われないので花粉発生が少なく済んでいるというのがスギ人工林の現状であろう。無間伐林に間伐を行って長伐期林に移行させることは、スギ花粉の発生量を増やす恐れがあるが、このことから間伐を行わないことが花粉生産抑制に効果的であると短絡すべきでない。無間伐林への間伐は人工林の健康や京都議定書の約束達成にとって効果があり、別の利益をもたらす。間伐の実施に当たっては得失の比較にもとづいた総合判断が必要である。現存するスギ人工林は広大であり、どう取り扱っていくのが好ましいのか、長期的方針をたて、慎重に実施する必要がある。

オ 今後の問題点

現存するスギ人工林の扱いには長伐期林への移行や放置のほかに、樹種転換、再造林などさまざまなものがあり、本モデル（図 2-8）を用いてそれぞれの場合のスギ花粉発生量を予測することができる。林業施策に沿って想定される主要な森林管理について花粉生産を推定し、より効果的な管理法を明らかにする必要がある。また、雄花量には着花履歴（清野ら 2006）や立地環境など養分の影響も及んでいるので、それらの加味はモデルの実用性を高めるであろう。これらについては、後継課題（先端技術を活用した農林水産研究高度化事業（農林水産省）「スギ雄花形成の機構解明と抑制技術の高度化に関する研究」（H18-20））で取り組む予定である。

カ 要約

スギ人工林の期首条件や保育計画、夏の気象条件などをパラメータに雄花量の年次変化を推定する手法を開発した。この手法を用い、間伐を行いながら長伐期林に移行する場合と、間伐を行わず通常伐期で主伐して再造林する場合の伐期通算の雄花生産量を推定し、比較したところ、後者の方が花粉生産は少なくなることが分かった。

キ 引用文献

浅川澄彦（1994）種子，（造林学 基礎の理論と実践技術），川島書店，p. 66-85.

- 浅川澄彦・長尾精文（1966）球果・タネによってつかわれる肥料3要素量の試算例，日林誌，48，84-87.
- 藤森隆郎（1991）多様な森林施業（林業改良普及双書），全国林業改良普及協会，191p.
- 家原敏郎（2000）森林資源調査による花粉発生源分布の把握とその推移予想，スギ花粉症克服に向けた総合研究（第Ⅰ期平成9年度～11年度）成果報告書，科技庁研究開発局編，科技庁研究開発局，p. 279-292.
- 気象庁（2002）気象庁年報（平成13年）2001年，（財）気象業務支援センター
- 清野嘉之（1990）ヒノキ人工林における下層植物群落の動態と制御に関する研究，森林総研研報，359，1-122.
- 清野嘉之（2000）樹冠量制御モデルによる花粉生産量の抑制技術の開発，スギ花粉症克服に向けた総合研究（第Ⅰ期平成9年度～11年度）成果報告書，科技庁研究開発局編，科技庁研究開発局，p. 472-484.
- 清野嘉之・長尾精文・佐藤保・奥田史郎・田内裕之・伊藤武治・五十嵐哲也・九島宏道（2006）着花したスギの重量成長と翌年の着花，日林関東支論，57，155-156.
- 清野嘉之・長尾精文・篠原健司（2002）林学から見たスギ花粉症問題，医学のあゆみ，200（5），447-451.
- 清野嘉之・奥田史郎・竹内郁雄・石田 清・野田 巖・近藤洋史（2003）強い間伐はスギ人工林の雄花生産を増加させる，日林誌，85（3），237-240.
- 日本林業技術協会（1999）人工林林分密度管理図 全22図（復刻）解説書付き，日本林業技術協会
- 林野庁（2000）平成11年度花粉抑制調査報告書，林野庁，58p.
- 林野庁（2001）平成12年度花粉抑制調査報告書，林野庁，77p.
- 林野庁（2005）平成16年度花粉生産予測情報調査事業報告書，林野庁，108p.
- 齋藤秀樹（1987）裏日本系スギ林の生殖器官生産量および花粉と種子生産の関係，日生態誌，37，183-195.
- 齋藤秀樹（1995）林学からみたスギ花粉症－森林の花粉生産を中心に－，耳鼻咽喉科臨床，76，6-19.
- 植月充孝・植木忠二・小田切理恵（1997）日本海東部・西部育種区のスギ精英樹の着花性（Ⅲ）－雄花の着花量が少ない精英樹－，森林応用研究，6，189-190.
- 横山敏孝・金指達郎（2001）花粉飛散予測のためのスギ林の雄花生産量推定法，日林関東支論，53，137-138.

（清野嘉之、佐藤 保、石田 清、野田 巖）

多摩森林科学園環境教育林に おける森林の生態的機能の観 測研究

研究課題： 多摩森林科学園環境教育林における森林の生態的機能の観測研究

目 次

研究の要約	54
-------	----

第1章 植物群集の多様性および林内環境に関わる森林タイプ別比較試験

1. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と 放置区の林床植物群集	60
2. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と 放置区の林内環境	66

第2章 動物群集の多様性に関わる森林タイプ別比較試験

1. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と 放置区のカミキリ類群集	69
2. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と 放置区のカミキリ類群集	74
3. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と 放置区の借孔性ハチ類群集	78

第3章 変化しつつある多摩森林科学園の動物群集のモニタリング

1. 多摩森林科学園の森林環境とチョウ類群集	81
2. 侵入種による多摩森林科学園の鳥類群集構造の変化	86

研究の要約

I 研究年次及び予算区分

研究年次：平成15～17年度（3か年）

予算区分：運営交付金（交付金プロジェクト）

II 主任研究者

主 査：環境教育機能担当チーム長 松本和馬

副主査：教育的資源研究グループ長 田淵隆一

取りまとめ責任者：松本和馬

III 研究場所

森林総合研究所 本所、多摩森林科学園

IV 研究目的

森林の持つ多面的機能、中でも生物的多様性の保全、水源涵養、土壌保全、炭素固定などの生態的機能に関する普及教育は森林総合研究所が取り組んでいる重要な課題の一つである。我が国の林業はほぼ針葉樹のみを対象にしてきた時代が長く続いたが、近年針葉樹材生産一辺倒への反省、社会構造と経済の変化などの理由から、今後針広混合林化や広葉樹林への更新が盛んになると予測されている。また木材生産機能のみでなく、都市近郊林など身近な森林に対する環境保全機能発揮も強く求められている。各地の里山保全活動などに見られるように、健全な林床植生維持などを目的とした広葉樹林の取り扱いに対する関心は特に高い。

多摩森林科学園の57haの園内には、広葉樹を含む多種の高齢人工林、および長期間の遷移の結果常緑樹が多くなっている天然林があつて、動植物も多い。同時に東京都八王子市という大都市近郊に位置し、都市住民の森林への理解を深める場としても適した位置にある。このため森林総合研究所ではこの森林を環境教育に活用すべく「環境教育林」として整備することとした。そこで本研究では、多摩森林科学園の森林の持つ生態的機能を観測研究を通じてデータ化し、教育的素材として提供することを目的とした。

このためにまず、多摩森林科学園に多い広葉樹の高齢人工林の中でも比較的面積の広い落葉広葉樹林としてケヤキ林を、常緑広葉樹林としてシラカシ林を選んで、長期観測を行う固定調査区とし、調査開始時における樹種および林分構造、さらに林内植生の取り扱い方が、その後の植生や林内に形成されている環境にどのような違いを生じさせるか、昆虫相にどのような違いを生じさせるかを調査した。さらに多摩森林科学園では人工林における植栽木の高齢化や下層の発達、天然林における常緑樹の優占のような森林の質的变化、近年の侵入種の増加などにより、生息する動物群集の構造が変化しつつあるので、園内全体のチョウ（蝶）類と鳥類の群集構造に現在起こりつつある変化を調査した。

V 研究方法

第1章 植物群集の多様性および林内環境に関わる森林タイプ別比較試験

1. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区の林床植物群集

長期間放置されて亜高木層以下の下層植生が発達した約90年生ケヤキ林および約80年生シラカシ人工林を主な調査林分とした。2002年晩秋にケヤキ林の林小班1区域において亜高木層以下のケヤキ以外の植物を伐倒あるいは刈取りして除去区とし、他の1区域を放置のままの放置区として設定した。除去区では2m×20m、放置区では2m×10mの下層植生調査区を設け、いずれも2m四方のコドラート毎に調査した。それら植生調査区を含むように林内植生除去林分に30m×20m、対照林分で20m×10mの立木調査区を設定した。下層植生調査ではコドラート内における群落全体および出現種ごとの被度(%)と種ごとの最大高(cm)を記載した。立木調査では胸高直径5cm以上の全個体に番号を与え、樹種同定のうえ幹直径を測定した。

シラカシ林については、2006年早春に同様に除去区を設定し、今後の調査を継続することとしているが、今回の研究期間中は処理前の状況把握を行った。立木用の調査区は放置区、除去(予定)区いずれも20m×20m、林内植生調査は除去予定区の2m×20mの区(2m四方コドラート10個)で調べた。

2. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区の林内環境

ケヤキ林の植生除去区、放置区ならびにシラカシ林において、地上高約30cmの位置に温度測定用のデータロガーを設置し、2003年秋から1時間間隔で温度測定を行った。

第2章 動物群集の多様性に関わる森林タイプ別比較試験

1. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区のカミキリ類群集

ケヤキ林の除去区と放置区では2003年から2005年までの3年間、シラカシ林の除去予定区と放置区では2004年と2005年の2年間、毎年4月から10月までの期間、吊り下げ式トラップ(サンケイ化学社製)を設置し、カミキリムシ科昆虫を捕獲調査した。各区に設置した誘引器の色と用いた誘引剤は、黒色-αピネン+エタノール、黒色-ホドロン(保土ヶ谷製薬製)、黄色-ベンジルアセテート、白色-ベンジルアセテートの4種で、各1器ずつ設置した。設置期間中は毎月2回捕獲された昆虫類を回収した。

2. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区のコミムシ類群集

ケヤキ林の除去区と放置区では2003年から2005年までの3年間、シラカシ林の除去予定区と放置区では2004年と2005年の2年間、毎年4月から11月までの期間、毎月2回、1回につき2昼夜ピットフォールトラップによる地上徘徊性コミムシ類の採集を行なった。350mlの清涼飲料用スチール缶の上面を缶切りで切り取ったのを、1調査区当り9地点(10m間隔の3×3の格子点上)に2個ずつ埋めてラップとした。

3. ケヤキ林における亜高木・低木層除去区と放置区の借孔性ハチ類群集

ケヤキ林の除去区と放置区では2003年に竹筒を用いた営巣トラップによる管住性ハチ類の採集を行った。内径約16mm、10mm、6mm、および4mmの竹筒5本ずつ合計20本をすだれ状に編んで営巣トラップとし、2003年4月、下層植生除去区と放置区とに、それぞれ9個(3列×3列;間隔約10m)ずつ、地上約2mの位置でケヤキの幹に縛り付けて設置した。これらのトラップを同年12月に回収し、借孔性ハチが利用していた竹筒については、内部の前蛹やマユを個別に管ビンに入れて成虫を羽化させて標本とした。難同定種が含まれているため、属まで同定して調査区ごとの群集構造を解析し、比較した。

第3章 変化しつつある多摩森林科学園の動物群集のモニタリング

1. 多摩森林科学園の森林環境とチョウ類群集

多摩森林科学園の苗畑、庁舎周辺、樹木園、サクラ保存林、試験林を通る4.7kmの固定ルートを

設定し、2003年から2005年まで3年間、毎年4月から11月まで毎月2回のトランセクト法によるチョウ類群集の調査を行った。観察された各種の個体数を集計し、種数、密度（個体数/1km）、構成種を環境の異なる区間ごとに比較した。また全体の密度と多様度指数を計算して、他地域の調査結果と比較した。

2. 侵入種による多摩森林科学園の鳥類群集構造の変化

2003年1月から2004年12月まで毎月4日間、17～20枚のカスミ網による捕獲調査を実施し、鳥類の種名と個体数を記録した。

VI. 研究結果

研 究 計 画 表

課 題 名	担 当	期 間
・植物群集の多様性および林内環境に関わる森林タイプ別比較試験	多摩森林科学園教育的資源研究G、森林植生研究領域、植物生態研究領域	15～17
・動物群集の多様性に関わる森林タイプ別比較試験	多摩森林科学園環境教育機能担当T、多摩森林科学園教育的資源研究G、森林昆虫研究領域	15～17

第1章 植物群集の多様性および林内環境に関わる森林タイプ別比較試験

1. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区の林床植物群集

林内植生の種組成をケヤキ林とシラカシ林で比較した。ケヤキ林では2002年の下層植生一旦除去（除去区）後に再生したものも調べた。出現総種数はケヤキ林の除去区で47種、ケヤキ林の放置区で23種、シラカシ林で26種であった。種数の多かったケヤキ林の除去区では放置区に比べて草本や灌木の種数がとくに多く、林床近くの光環境が改善されたことの影響が考えられた。シラカシ林の草本類の種数はケヤキ林の放置区に比べてもさらに少なく、常緑樹林であるシラカシ林では長期間被陰されて草本類の生育が困難なことが示唆された。

2. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区の林内環境

夏から秋の林内気温は、ケヤキ林の除去区と放置区の間で明らかな差は認められなかった。しかし、冬期には除去区の方が暖かい時間の頻度が高い。温度が低い時間には除去区と放置区の間で顕著な差はなく、下層の植生の除去が低温時間を増加させるような効果は認められなかった。春はケヤキ林内の方がシラカシ林内より暖かい時間が長かった。林冠や下層植生の葉がないと林床まで日光が届くため温度が上昇すると考えられた。

第2章 動物群集の多様性に関わる森林タイプ別比較試験

1. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区のカミキリ類群集

ケヤキ林で採集されたカミキリムシ類は除去区が21種64個体、放置区が26種131個体（ともに2年分合計）で、放置区が種数、個体数とも上回った。乾燥に弱いオオヒメハナカミキリが放置区で多く、除去区で全く採集されなかったのは、放置区が湿った環境を維持しているためと考えられた。シラカシ林ではケヤキ林より種数、個体数とも少なく、とくにハナカミキリ亜科が少なかった。稀少種とし

て、アカジマトラカミキリがケヤキ林の両区で採集されたことは、多摩森林科学園の自然度の高さを示すものである。

2. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区のゴミムシ類群集

ケヤキ林のゴミムシ類の種数と個体数は、除去区と対象区で大差なかったが、ケヤキ除去区では他の調査区で最も多いエサキオサムシが少なく、かつ他の調査区では見られない開放的な環境に生息するアオオサムシが毎年少数得られ、下層植生除去の影響が考えられた。ケヤキ林、シラカシ林とも類似したゴミムシ相で、上木樹種による差異は小さいことが判明したが、ムサシナガゴミムシはケヤキ林に多く、シラカシ林では少なかった。またシラカシ林で山地性の稀少種ニッコウオオズナガゴミムシが得られたことは注目される。

3. ケヤキ林における亜高木・低木層除去区と放置区の借孔性ハチ類群集

出現した属数は除去区、放置区とも 4 属と等しかったが、除去区ではすべての竹筒のうち 42% が営巣に利用されたのに対し、放置区では 11% が利用されたにすぎなかった。竹筒数に基づく営巣した属の構成は、除去区ではアナバチ科のジガバチモドキ属が 60%、その他はベッコウバチ科のヒメベッコウ属とヒゲベッコウ属がほとんどであった。放置区では、ヒメベッコウ属が 80%、ジガバチモドキ属が 10% だった。他に、コクロアナバチ属の営巣例が両区で 1 例ずつ、またヒメギングバチ属の営巣例が放置区で 1 例のみ見られた。シンブソンの多様度は除去区(0.54)のほうが放置区(0.35)より大きかった。明るい環境を好むドロバチ科やミツバチ科による営巣例は全く見られなかったが、除去区は放置区に比べて営巣率も多様性も高くなったので、光条件が改善し、地上近くの植物体が少なくなったことの影響が考えられる。

第3章 変化しつつある多摩森林科学園の動物群集のモニタリング

以下の2つの研究は、当初より「動物群集の多様性に関わる森林タイプ別比較試験」の一環として行われていたが、多摩森林科学園全体を対象としているのでここでは章を分けた。

1. 多摩森林科学園の森林環境とチョウ類群集

3年間の調査で53種のチョウ類が記録された。最優占種は草原性種のヤマトシジミであったが、苗畑、庁舎周辺、サクラ保存林などの開放的な環境でのみ多かった。以下ムラサキシジミ、キタキチョウ、スジグロシロチョウ、コジャノメの順であり、森林環境ではムラサキシジミ、コジャノメが多く、キタキチョウ、スジグロシロチョウは開放的な環境でも森林環境でも多かった。草原性種や里山環境を代表する森林性種の個体数は少なかった。多様度指数は比較的高い値を示したが、生息密度は低く、林齢の高い暗い森林が多いこと、とくに天然林は照葉樹林化が進行していることを反映していると考えられた。

2. 侵入種による多摩森林科学園の鳥類群集構造の変化

総数 38 種 929 個体の鳥類が捕獲された。ソウシチョウが最も多く 250 個体、次いで、メジロ、ヒヨドリ、シジュウカラ、ヤマガラ、ガビチョウの順であり、ソウシチョウとガビチョウの捕獲個体数の合計は、全体の 3 割以上を占めていた。特にソウシチョウは非繁殖期には最優占種となり、全捕獲個体数に占める割合は 4 割を越えていた。これらの 2 種の侵入により、この地域の鳥類相は大きく変化していると言える。ソウシチョウは非繁殖期の 11 月から 4 月までの間のみ捕獲され、多摩森林科学園へは、越冬のために飛来しているものと考えられる。ガビチョウは通年捕獲された。ソウシチョウは大きな群を作ることから、越冬期の食物を狭い地域で大量消費することで在来種に必要な資源を枯渇させたり、捕食者を誘引したりしている可能性がある。また、ソウシチョウもガ

ビチョウも、糞中に植物の種子を多数含んでいることが確認されており、鳥散布植物の主要な果期である秋冬に多数の個体が加入することから、在来の種子散布の様相を変化させ、森林の更新にも影響を与えていると考えられる。

Ⅶ 今後の問題点

第1章および第2章で扱った下層植生の除去の影響に関しては、ケヤキ林では下層植生に対する処理を行う以前の調査を行っていないため、厳密に言えば除去区と放置区に見られた違いが、植生管理法の違いによるのか、地形、土壌など別の要因によるのか、明らかではない。シラカシ林では処理前の状態で調査を行った上で、2006年早春に下層植生を除去／刈払い処理した区域を設定して、継続調査を行っている。この調査をさらに継続することで下層植生を除去することの林内気象、植物相、昆虫相への影響を明らかにする必要がある。

林内気象、樹木の直径生長、昆虫相、鳥類相などの成果の多くはすでに「多摩森林科学園環境教育林の手引き」（第2版まで発行）に収録し、同林における普及事業に活用しており、多摩森林科学園の環境教育林における観測研究の成果を環境教育的に活用するという当初の目標を達成した。今後はこれまでの研究成果を加えてこの手引書の充実や、パネル作成等への活用を期待したい。

本研究は森林環境と生物の長期動態の観測を目的としているので、継続観測が必要である。そこで次期中期計画の実行課題「多摩森林科学園の環境教育林における実験・観測的研究とその教育的活用」に引き継ぐ予定である。

本研究を通じて、科学園の試験林には環境教育的素材が多いことが明らかになった。例えば園内の動植物には希少種、絶滅危惧種が生息／生育している一方、既に園からも周辺地域からも絶滅した種もあり、東京近郊の里山的生物の種数は多いが個体数が少なくなっていたり、侵入種が個体数を増していたりするなど群集構造の変化の様子が実際に見られる。また人工林は低木層、亜高木層に常緑樹が多く、天然林は二次遷移が進んで高木層まで常緑樹が多い。さらに過去の植生調査の記録も残っている。今後はこれまで主対象としてきたケヤキ、シラカシ林以外にも視野を広げ、教育的資源として活用することが望ましい。

細部については以下のような問題点、変更点があった。コナラを植林して新たに観測林分を増設する予定であったが、苗の準備が遅れており、実施できていない。マレーストラップによる昆虫の採集調査を試みたが、枝の落下によるトラップの破損が頻発したため中止した。採集されたハチ類の一部には難同定種が含まれ、専門家に同定を依頼中である。

Ⅷ 研究発表

槇原 寛・高麗泰行・池田 伸・後藤忠男(2004) 里山における環境指標カミキリムシの探索研究(II) 茨城県七会村スギ林-. 55回日林関東支論, 217-220.

槇原 寛・岡部宏秋・松本和馬(2005) 黄色吊り下げ式トラップで捕獲された三宅島のトサヤドリキバチ. 月刊むし, (416): 38-39.

松本和馬(2006) 森林総合研究所多摩森林科学園のチョウ相. 森林総合研究所研究報告 5(1):69-84

松本和馬(2005) 東京都低地におけるニッコウオオズナガゴミムシの採集例. 月刊むし, (415): 44-45.

田淵隆一、酒井武、倉本恵生、酒井敦、大黒正、奥田史郎、竹内郁雄(2003) ヒノキ・ツガ天然生林における下層植生の葉面積推定 森林応用研究、12(2):117-121.

田淵隆一、酒井武、倉本恵生、酒井敦(2003) 林縁除去後の林内下層木の成長反応 日本林学会関西支部
第54回大会研究発表要旨集、34p.

IX 研究担当者

第1章 田淵隆一、清野嘉之、九島宏道、石塚森吉

第2章 松本和馬、槇原寛、牧野俊一

第3章 松本和馬、川上和人

第1章 植物群集の多様性および林内環境に関わる森林タイプ別比較試験

1. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区の林床植物群集

ア 研究目的

森林の持つ環境保全や文化的機能など公益的な機能発揮のため、針葉樹人工林造成一辺倒から広葉樹造林を交えた多様な森林整備へと社会的要請が推移してきたことを受け、広葉樹人工林造成は今後拡大していくと予測されている。しかし広葉樹が造林樹種としてみなされるようになってからの歴史は浅く、林分としての保育に関する知見はまだ乏しい。さらに針葉樹一斉林の短期育成により生じた弊害や社会経済的条件の変化を反映し、広葉樹人工林にも高度な公益的機能発揮が求められる。このため針葉樹人工林とともに長伐期化が要求されてくるが広葉樹の高齢人工林は少なく、高齢林の保育方法や高度な環境保全機能発揮のための林分取り扱い手法に関する知見はほとんどない。

本研究は科学園内にある林齢80年を超える広葉樹林を用い、高齢人工林における植栽樹種の違いや、下層植生の人為的な除去作業の有無が林内植生の多様度と植物量に及ぼす影響の把握を目的とした。植物種のみでなく、昆虫などの動物種の多様性形成にとっての基礎資料とした。

イ 研究方法

①調査地

対象とした広葉樹人工林は、ケヤキ（8林班い小班およびに小班）とシラカシ（10林班ろ小班）の2種類である（図1）。ケヤキ林では2002年早春に小さい班で植栽されたケヤキ以外の亜高木を含む林内植生を地表付近で刈り取り除去した。シラカシ林は、調査期間中は下層植生を放置し、2006年1月に以後の調査に備えて植生を除去した。

②調査法

その後2003年11月に刈り取りを施した小班と無処理小班のそれぞれに林内植生調査区（それぞれ除去区、放置区とする）を設けた。調査区サイズは除去区では2m×20m、放置区では2m×10mである。いずれも2m四方のコドラート毎に調査し取りまとめた。

立木の林分構造と動態の評価用に、それら植生調査区を含むように林内植生除去林分に30m×20m、放置林分で20m×10mの調査区を設定し、胸高直径5cm以上の全個体に番号を与え、樹種同定のうえ幹直径を測定、その測定位置をペイントで記録した。

シラカシ林についても同時期に林内植生及び立木調査を行った。シラカシ林での林床植生除去は2006年1月であったため、除去前の植生のみを調べた。立木用の調査区は放置区、除去（予定）区いずれも20m×20m、林内植生調査は除去予定区の2m×20mの区（2m四方コドラート10個）で調べた。

植生調査はコドラート内における群落全体および出現種ごとの被度（％）と種ごとの最大高（cm）を記載した。

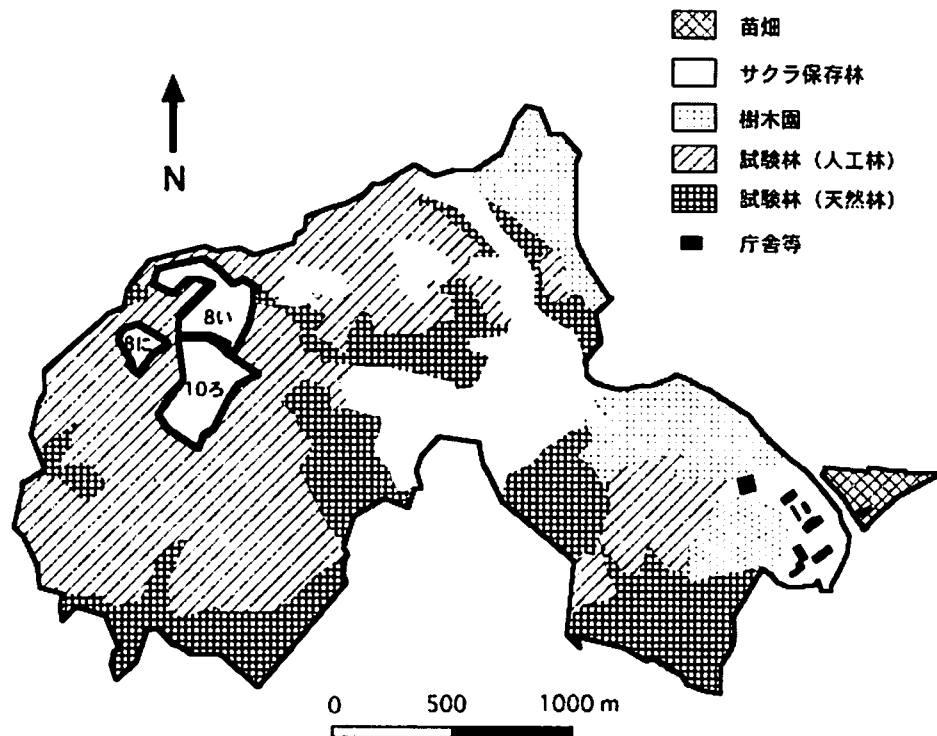


図 1. 多摩森林科学園の概況図および調査対象とした 8 林班い小班（ケヤキ林放置区）、8 林班に小班（ケヤキ林下層植生除去区）および 10 林班ろ小班（シラカシ林）



図 1-1-2 ケヤキ林除去区（左上）、同放置区（右上）、シラカシ林（左下）の林内景観

ウ 結果

表1-1-1 に調査林分上木の2003年11月、2005年1月の毎木調査結果をまとめた。次に表1-1-2 に林分ごとの林内出現種数をシダ、草本、灌木、中高木およびツル性植物（木本、草本）に区分して示した。表1-1-3には各区での出現種リストを示した。

出現樹種数はケヤキ林の除去区で47種、放置区で23種、このうち17種が両区で重複して出現した。シラカシ林では26種が確認され、15種類はケヤキ林と共通していた。またケヤキ林での出現種のうち常緑種は除去区、放置区とも13種、このうち9種が両区に共通してみられた。

種数においてはケヤキでは除去区が放置区より多く、特に草本や灌木種の差が顕著であった。また林分間では、放置区同士の比較でもケヤキ林＞シラカシ林の傾向がみとめられた。

表1-1-1. 調査林分のパラメーター

		ケ ヤ キ 林			シラカシ林	
		除去区	放置区 ケヤキのみ	放置区 全樹種	シラカシのみ	全樹種
2003.11 測定						
DBH (cm)	平均	21.3	26.7	12.8	31.1	23.9
	最大	38.9	43.4	43.4	65.0	65.0
	最小	8.8	13.2	5.0	5.4	5.2
立木密度(本/ha)		650	450	1700	375	525
断面積合計(m ² /ha)		26	28	34.4	33.5	34
		除去区	放置区 ケヤキのみ	放置区 全樹種	シラカシのみ	全樹種
2004.1 測定						
DBH (cm)	平均	21.9	27.3	13.1	32.0	24.3
	最大	39.4	44.5	44.5	66.1	66.1
	最小	8.8	13.4	5.0	5.7	5.4
立木密度(本/ha)		617	450	1700	350	500
断面積合計(m ² /ha)		26.2	29.2	36.0	33.1	33.6

表1-1-2. 林分ごとの下層出現植物種数（コケを除く）

生活型	ケヤキ林			シラカシ林／ ケヤキ林重複	
	除去区	放置区	(両区重複)	シラカシ林	
シダ	3	3	(2)	0	0
草本	11	5	(4)	5	4
灌木	12	3	(3)	12	5
中高木	9	5	(3)	3	1
ツル	12	7	(5)	6	5
木本ツル	6	6	(0)	4	0
合計	47	23	(17)	26	15

エ 考察

ケヤキ林の処理区間の種数差は林内植生除去により林内ではあっても特に林床近くの光環境が改善されたことが新しい種の侵入、あるいは従来から存在したが被圧されていた個体の成長好転をゆるしたものと考えられた。林内植生除去は少なくとも一時的には間伐と同様に林内光環境を好転させ、下層植生の種数増加を促進する^{1), 4)} であろう。しかしながら出現種にまじる中高木性の常緑木本の成長に伴い再び林床の明るさは低下していくため、ヒノキ人工林で間伐により林内照度が高められた場合¹⁾ や、下層群落の下刈後の経過例と同様^{2), 3)} に長期的には放置区に類似した植生に戻るのであろう。

林相（ケヤキ、シラカシ）間の出現種数差は、常緑林であるシラカシ林内で植栽前に分布していた種の生存が、より暗い環境下に長期被陰され制限されていった^{2), 3)} ことをうかがわせる。

表 1-1-3 ケヤキ林、シラカシ林下層の出現植物種

SPP.		ケヤキ林 除去区	ケヤキ林 放置区	シラカシ林
シダ	イタチシダ		○	
	フユノハナワラビ	○	○	
	ベニシダ	○	○	
	ヤマソテツ	○		
草本	アキノキリンソウ	○		
	アズマネザサ			○
	オオバジャノヒゲ	○	○	○
	サイハイラン	○		
	ジャノヒゲ	○	○	○
	セリ科 sp.	○	○	
	タチツボスミレ	○		
	チジミザサ	○		○
	ナキリスゲ	○		
	ハエドクソウ	○		
	ヒヨドリバナ	○		
	ミヤマフユイチゴ		○	
	ヤブラン	○	○	
	ミヤマカンスゲ			○
灌木	アオキ	○	○	○
	イヌツゲ			○
	イボタノキ	○		
	ウスノキ			○
	ウリノキ	○		
	ガマズミ	○		
	キブシ	○		
	クサギ			○
	クロモジ	○		
	コマユミ	○		
	チャノキ			○
	ツクバネウツギ			○
	ツルグミ	○		○
	ノイバラ	○		
	バイカウツギ	○	○	○
	ハナйкаダ	○		
	マルバウツギ			○
	ミヤマシキミ			○
	ムラサキシキブ	○		
	ヤブコウジ	○	○	○
	ヤブムラサキ	○		○

表1-1-3 (続き) ケヤキ林、シラカシ林下層の出現植物種

SPP.		ケヤキ林 除去区	ケヤキ林 放置区	シラカシ 林
中高木	アカメガシワ	○		
	アラカシ	○	○	○
	イヌガヤ	○	○	
	イヌツゲ	○		
	ウワミズザクラ	○		
	カヤ		○	
	コナラ	○		
	シラカシ	○	○	
	シロダモ	○		
	ヒイラギ			○
	ヒサカキ		○	
	モミ			○
ツル 木本	アケビ		○	
	イタビカズラ		○	
	キツタ	○	○	○
	スイカズラ	○		
	ツタウルシ	○	○	
	テイカカズラ	○	○	○
	フジ			○
	ヘクソカズラ	○		
	ミツバアケビ	○	○	○
	アマチャヅル	○		○
草本	オニドコロ	○		○
	センニンソウ	○	○	
	ノササゲ	○		
	ボタンヅル	○		
	ヤマノイモ	○		

オ 今後の問題点

シラカシ林での林内植生除去が種数やその組成にどのような影響を及ぼすのかは現時点では不明であるが、側方光が進入する可能性しだいでは種数の短期的増加もありうる。シラカシ林の一部は2006年1月に下層植生を除去したので、今後植生の植生変化を継続調査する予定である。また、ケヤキ林においても下層植生の除去が、その後の林内植生の多様性を高めるのか、抑制するのか、短期的な効果を求めるのか、長期的な改変を加えたいのかなど、目的に応じた森林作業のあり方を明らかにするためには数年後の再調査による比較をすることが望ましい。

カ 要約

林内植生の種組成をケヤキ林とシラカシ林で比較した。ケヤキ林では2002年の下層植生一旦除去後に再生したものも調べた。出現総種数はケヤキ林の除去区で47種、ケヤキ林の放置区で23種、シラカシ林で26種であった。種数の多かったケヤキ林の除去区では放置区に比べて草本や灌木の種数がとくに多く、林床近くの光環境が改善されたことの影響が考えられた。シラカシ林の草本類の種数はケヤキ林の放置区に比べてもさらに少なく、常緑樹林であるシラカシ林では長期間被陰されて草本類の生育が困難なことが示唆された。

キ 引用文献

- 1) 探索河原輝彦(1991) 立地条件別育成技術の開発, 研究成果 244 (低位生産地帯のマツ枯損跡地におけるヒノキ人工林育成技術の確立), 農林水産技術会議, p. 47-59.
- 2) 清野嘉之(1988) ヒノキ人工林の下層植物群落の被度・種数の動態に影響を及ぼす要因の解析, 日林誌, 70, 455-460
- 3) 清野嘉之(1990) ヒノキ人工林における下層植物群落の動態と制御に関する研究, 森林総研研報 59, 1-122.
- 4) 鈴木和次郎・浅野透・谷本丈夫(1989) 間伐による林内植生の変化, グリーンエナジー計画成果シリーズⅢ系, 農林水産技術会議, No. 5, 89-103.

(田淵隆一、清野嘉之、九島宏道、石塚森吉)

2. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区の林内環境

ア 研究目的

環境教育材料としての生息昆虫相に林分の手入れが及ぼす影響を明らかにするため、1-1 で下層植生の違いを述べたケヤキ林及びシラカシ林での、植栽樹種や植生除去の有無による昆虫のハビタットとしての環境にどのような差が生じるのかを求めた。

イ 研究方法

ケヤキ林の除去区、対照区ならびにシラカシ林において、地上高約 30cm の位置に温度ロガー（温度とり）を2点ずつ吊るし、2003 年秋から1 時間間隔で温度測定を行った。

ウ 結果

図 1-2-1 に 2003 年 11 月中旬から 2004 年 10 月下旬にかけての気温変化を例示した。2003 年の例では最低温は 3 月上旬の -5.2°C 、最高温は 7 月下旬の 35°C であった。

図 1-2-2 にケヤキ林の植生除去区および放置区における夏（2004 年 8 月）と早春（2004 年 2 月）の、それぞれ 1 ヶ月間における温度の頻度分布を比較して示した。横軸は気温、縦軸は頻度（時間）である。図 1-2-3 には同様に 2004 年 4 月における両林分放置区での温度の頻度分布を示した。

エ 考察

気温変化で特徴的な点として、2 月末から 4 月上旬のまだ樹冠の葉が開いていない時期に時々 25°C を上回るような高い温度が記録されていることが指摘できる。一日の中での温度の幅は 11 月頃から春先まで大きく、特に 3 月頃に顕著で、日によっては一日の較差が 20°C 以上にもなることがあった。

一方、初夏から盛夏にかけては幅が狭くなった。真夏 7、8 月頃では一日の較差は 5°C 程度の比較的溫度条件が安定した日が続いた。このような気温の日格差の年変化は落葉している晩秋から初春にかけては陽射しが直接林内に差し込むのに対し、4 月半ばからは展開した葉が直射光を遮ってしまうからだと考えられる。葉層の持つ環境緩和効果は林内を暑い夏の日でも乾かずに湿った状態に保ち、昆虫や土壌動物、微生物などが落葉や枝を分解して土に帰していくのに望ましい環境を作り出すことにあると考えられる。

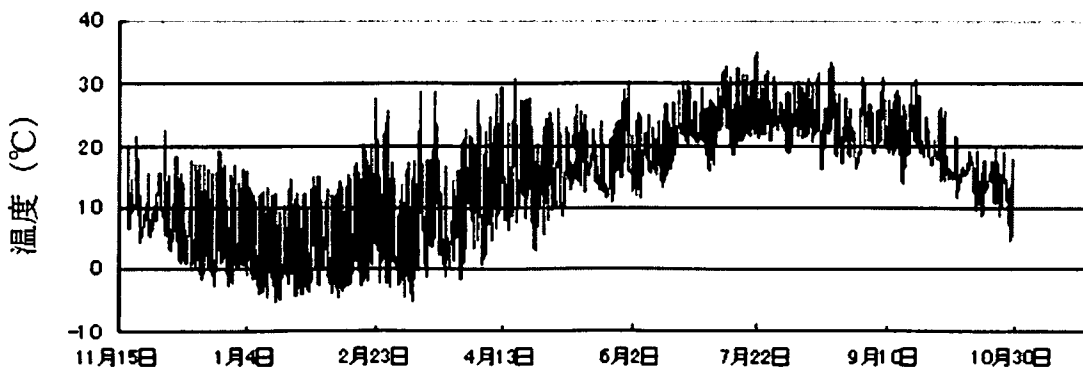


図 1-2-1. ケヤキ林内における気温（高さ 30 cm）の季節変化の 2003 年 11 月～2004 年 10 月の例（測定は 1 時間間隔）

8月の気温の頻度分布パターンでは、処理区間差は顕著ではない。除去区で30℃以上の高温時間の頻度がわずかに放置区を上回っていた。2月における区間差はこれよりやや顕著に現れ、除去区ではおよそ13℃以上の気温の出現頻度が放置区よりも高かった。これは植生除去により直射光の林床付近への到達頻度が増したこと、落葉広葉樹であるケヤキの場合、2月のような林冠に葉のない季節では葉層による遮りがなく林床への直射光到達頻度がさらに上昇した¹⁾ことを反映したものであろう。

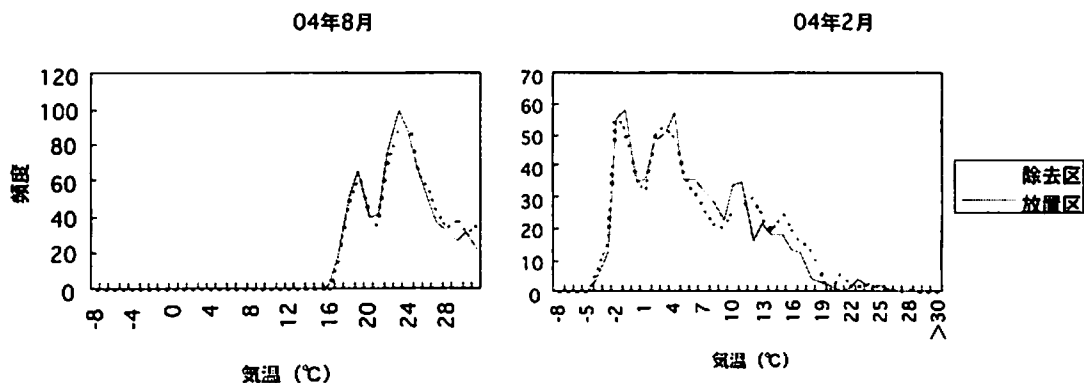


図 1-2-2. ケヤキ林における植生除去区と放置区の気温の頻度分布
左図：2004 年 8 月（盛夏）、右図：2004 年 2 月（早春）

次にケヤキ林とシラカシ林とを比較する。ケヤキ林で16℃付近より高い温度を経験する時間が長いことが明らかである。この時期はケヤキ林ではようやく展葉が始まる頃であり、高度が上昇しつつある太陽からの直射光がシラカシ林内よりも豊富に到達することが暖かさの差として現れたものであろう。この傾向は寒期に顕著であった。また5月以降の温暖な季節では、ここでみられたケヤキ林とシラカシ林間の違いは明らかではなかった。

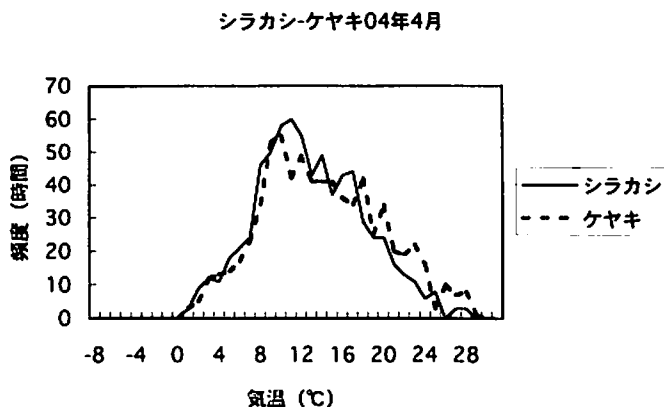


図 1-2-3. ケヤキ林放置区とシラカシ林放置区の温度頻度分布

ここに示したように林内下層植生の除去は低温時間の増加として現れることはなかった。昆虫の生息環境へ与える影響として、植生除去はより寒さを経験させる方向には働かないのではないだろうか。

オ 今後の問題点

今回落葉樹林であるケヤキ林で、下層植生除去が林内の温度に対してどのように影響するかのデータ

が得られたが、常緑樹林であるシラカシ林での同様のデータは得られてない。シラカシ林には 2006 年初めに除去区を設定したので同様の調査を行うべきである。

カ 要約

7 月から 11 月中旬までの林内気温は、除去区と放置区間で明らかな差は認められていない。しかし冬期には除去区の方が暖かい時間の頻度が高い。また春先はケヤキ林内の方がシラカシ林内より暖かい時間が長い。林冠や下層植生の葉がないと林床まで日光が届くためであろう。

キ 引用文献

- 1) 田淵隆一・高橋邦秀・小池孝良・斉藤武史 (1991) 落葉広葉樹林内の稚幼樹の葉群動態と光合成能, 102 回日林論, 485-486.

(田淵隆一)

第2章 動物群集の多様性に関わる森林タイプ別比較試験

1. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区のカミキリ類群集

ア 研究目的

カミキリムシ科は所属種のほとんどが幼虫期に樹木に穿孔する食材性昆虫であり、森林との結びつきが強く、森林環境をよく反映する。多摩森林科学園には、高齢人工林が多く存在し、最近まで除間伐を行っていないため亜高木層、低木層が発達した林分が多い。本研究以下の第2章では、第1章で対象とした亜高木層、低木層を除去したケヤキ林とこれらを放置したケヤキ林においてカミキリムシ相を調査し、下層植生の除去がカミキリムシ群集に及ぼす影響を明らかにすること、およびシラカシ林のカミキリムシ相を調査し、ケヤキ林と比較することを目的とする。

イ 研究方法

第1章で対象としたケヤキ林の除去区と放置区、およびシラカシ林に設定した2調査区（A区とB区）の4調査区でカミキリムシ科昆虫のトラップ採集を行った。シラカシ林の下層植生は調査期間中放置された状態にあったが、2006年1月に、A区のみ除去し、以後除去区として調査が継続されている。ケヤキ林では2003年と2004年、シラカシ林では2004年の毎年4月から10月までの期間、各調査区に白色1器、黄色1器、黒色2器のサンケイ式吊り下げ式トラップ（図2-1-1）を設置し、カミキリムシ科昆虫を捕獲調査した。白色、黄色トラップには誘引剤としてベンジルアセテート（訪花性昆虫用）を、黒色1器には α ピネンとエタノール（穿孔性昆虫用；それぞれ別容器）、別の黒色1器にはホドロンとエタノール（穿孔性昆虫用；それぞれ別容器）を使用した。設置期間中は毎月2回、ほぼ半月置きに捕獲された昆虫類を回収し、同定して環境解析に用いた。

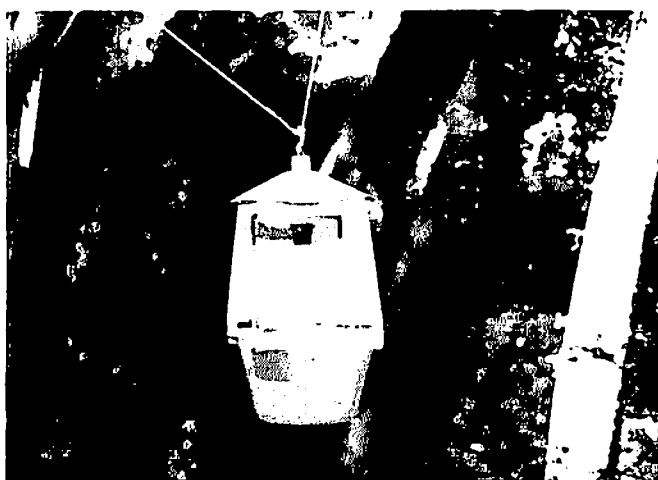


図 2-1-1. サンケイ式吊り下げ式トラップ（黄色）



図 2-1-2. アカジマトラカミキリ

ウ 結果

得られたカミキリムシ類は全調査地で 35 種であった（表 2-1-1）。

ケヤキ林でみると放置区で2年間の調査合計で 26 種 131 個体、除去区では 21 種 64 個体で、放置区方が種数も個体数も多かった。この傾向は単年度でも同じであった。

シラカシ林では、種数、個体数ともケヤキ林より少なかつただけでなく、亜科の構成がケヤキ林とはかなり異なり、ハナカミキリ亜科の種が少なかった。シラカシ林では、A 区が 9 種 18 個体で

あるのに対して、B 区が 11 種 33 個体であり、B 区の方が A 区よりも種数、個体数とも多かった。

表 2-1-1 多摩森林科学園ケヤキ林、シラカシ林における吊り下げ式トラップによるカミキリムシ各種の捕獲個体数

	ケヤキ林						シラカシ林	
	除去区			放置区			(2004)	
	2003	2004	合計	2003	2004	合計	A 区	B 区
ノコギリカミキリ亜科								
1 ウスバカミキリ	0	0	0	1	0	1	0	0
2 コバネカミキリ	4	3	7	0	0	0	0	2
3 ノコギリカミキリ	0	0	0	0	1	1	0	0
クロカミキリ亜科								
4 クロカミキリ	2	3	5	1	8	9	0	0
ハナカミキリ亜科								
5 オオヒメハナカミキリ	0	0	0	9	5	14	0	0
6 ツヤケシハナカミキリ	1	1	2	1	1	2	0	0
7 ツマグロハナカミキリ	0	0	0	1	2	3	0	0
8 ヨツスジハナカミキリ	5	4	9	9	4	13	0	0
9 アカハナカミキリ	1	5	6	2	1	3	0	1
10 ミヤマホソハナカミキリ	1	1	2	0	0	0	1	0
カミキリ亜科								
11 キマダラカミキリ	0	1	1	1	2	3	1	0
12 ウスイロトラカミキリ	1	2	3	3	4	7	1	4
13 ニイジマトラカミキリ	1	5	6	10	4	14	4	6
14 ブドウトラカミキリ	0	0	0	0	1	1	0	0
15 クビアカトラカミキリ	0	1	1	0	0	0	0	0
16 エグリトラカミキリ	0	0	0	0	4	4	0	0
17 キイロトラカミキリ	0	1	1	0	1	1	0	0
18 トゲヒゲトラカミキリ	1	0	1	7	4	11	1	2
19 トガリバアカナトラカミキリ	0	2	2	10	17	27	6	7
20 アカジマトラカミキリ	0	5	5	0	1	1	0	0
フトカミキリ亜科								
21 ヨツボシシロオビゴマフカミキリ	0	0	0	0	1	1	0	0
22 ナガゴマフカミキリ	1	2	3	0	1	1	0	0
23 シナノクロフカミキリ	1	0	1	0	0	0	0	0
24 アトジロサビカミキリ	0	0	0	1	3	4	2	4
25 ビロウドカミキリ	1	0	1	0	1	1	0	0
26 ニセビロウドカミキリ	0	1	1	0	0	0	1	0
27 ヤハズカミキリ	1	2	3	1	2	3	0	0
28 マツノマダラカミキリ	1	0	1	0	0	0	0	1
29 チャボヒゲナガカミキリ	0	0	0	0	0	0	0	4
30 セミスジコブヒゲカミキリ	0	0	0	0	2	2	1	0
31 ヒゲナガヒメルリカミキリ	0	0	0	0	0	0	0	1
32 ラミーカミキリ	0	3	3	0	0	0	0	0
33 ムネモンヤツボシカミキリ	0	0	0	0	1	1	0	0
34 フチグロヤツボシカミキリ	0	0	0	0	1	1	0	0
35 シラホシカミキリ	0	0	0	0	2	2	0	1
個体数	22	42	64	57	74	131	18	33
種数	14	17	21	14	25	26	9	11

エ 考察

ケヤキ林で捕獲されたカミキリムシのうち、オオヒメハナカミキリは乾燥に弱い、湿度が高い場所でないとい生存できないヒメハナカミキリ群の1種である。誘引器を使っている、設置した位置によりかなり遠くからの飛び込みも考えられるが、除去区が0個体であったのに対して放置区が14個体であったのは、放置区の方が湿った環境を維持していたためと考えた方がよい。

2004年に6個体捕獲されたアカジマトラカミキリ(図2-1-2)はケヤキを食樹とし¹⁾、ケヤキ林を代表するカミキリムシであるが、日本全体でも稀な種であり、このような種が多摩森林科学園に生息することは、当園の自然度の豊かさを証明するといえる。しかし、他の種類は大半が放置区で多いのに対して、本種は除去区の方が多く捕獲された。この種が風で落ちてきた枝からよく羽化することを確認しているが、地上部の枯れ枝に産卵するためでなく、生木についている比較的大きな枯れ枝に産卵し、幼虫の入った枝が落下した結果と考えられる。除去区で多く得られたのは、このことに原因がありそうである。

ケヤキ林で捕獲されたカミキリムシ26種のうち、マツ類を食樹とする¹⁾クロカミキリ、ツヤケシハナカミキリ、アカハナカミキリ、マツノマダラカミキリ、稀な種で食樹の記録が乏しいが科学園でダイオウショウが食樹として記録されている²⁾ヨツボシシロオビゴマフカミキリ、およびカラムシを食草とするラミーカミキリの6種は、調査林分での発生が考えられないので、これらを除いた20種で、カミキリムシ類各亜科の捕獲個体数、種類数比率を除去区と放置区を比較した(図2-1-3)。種類数比率および個体数比率共、カミキリ亜科が多く、種類数比率では除去区と放置区の傾向はよく似ていた。しかし、個体数比率では圧倒的にカミキリ亜科の比率が高かった。これは使用した白、黄色トラップがカミキリ亜科のトラカミキリ類を特に誘引する³⁾ことに起因するからである。また、ノコギリカミキリ亜科の個体数比率が除去区の方が高いのはコバネカミキリが除去区で7個体捕獲されているからであるが、この種は腐朽の進んだ木に依存している、トラップを設置した場所の近くに偶然、穿孔していた木があったためと推定される。

シラカシ林でハナカミキリ亜科の種が少なかったのは、トラップの設置位置が暗く、ハナカミキリから見えにくかったことに起因する可能性がある。

オ 今後の問題点

今回の結果から、ケヤキ林においては、亜高木・低木層除去区と放置区での比較では放置区の方がトラップでの捕獲個体数、種類数が多い、シラカシ林においては、ケヤキ林よりハナカミキリ亜科の種が少ないという結果であった。シラカシ林で下層植生を除去した場合どのような影響があるかについては今後の課題として残されている。シラカシ林では、2006年以降A区を除去区、B区を放置区として調査を継続するが、今回の調査結果ではB区の方がA区よりも種数、個体数とも多かった。今後の調査では、この差が下層植生の状態によるわけではない点に留意する必要がある。

カ 要約

多摩森林科学園内のケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区の穿孔性甲虫群集の違いを調べるために、サンケイ式吊り下げ式トラップを利用して調査を行った。調査年はケヤキ林は2003年、2004年、シラカシ林は2004年である。調査対象昆虫は森林昆虫の代表であるカミキリムシ類とした。捕獲種数はケヤキ、シラカシ林併せて35種であった。そして、ケヤ

キ林では放置区の方が捕獲種数、個体数とも多かった。シラカシ林ではケヤキ林より種数、個体数とも少なく、とくにハナカミキリ亜科が少なかった。トラップの性質を反映して、カミキリ亜科の種が特に多く捕獲されていた。その中でも、ケヤキ林では良好なケヤキ林の指標とも考えられるアカジマトラカミキリが捕獲され、多摩森林科学園の自然の豊かさを証明する結果も認められた。

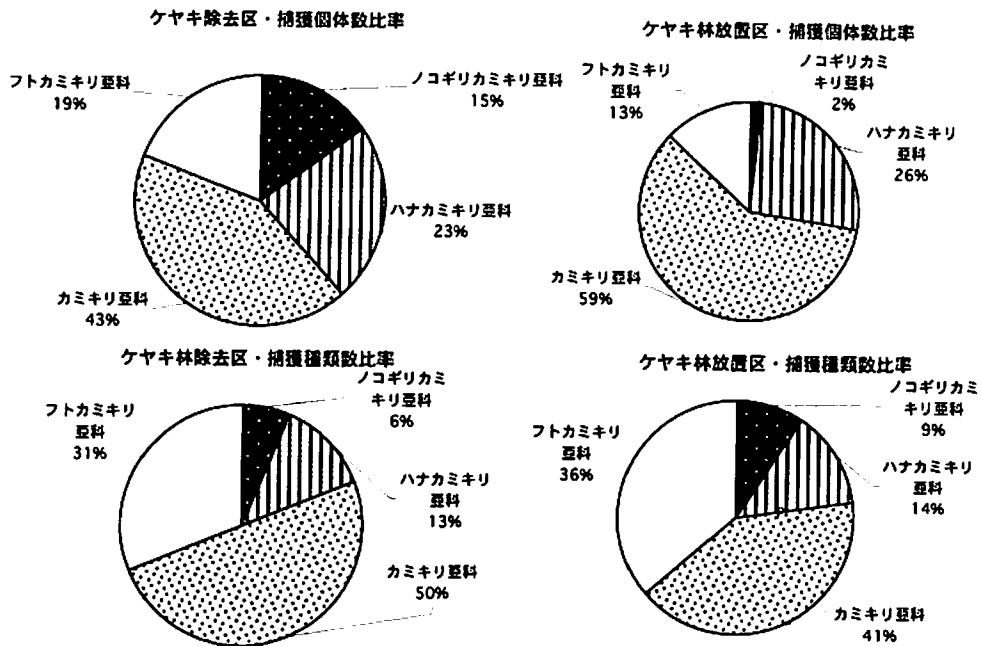


図 2-1-3 亜科レベルで見たケヤキ林のカミキリムシ類群集の構成

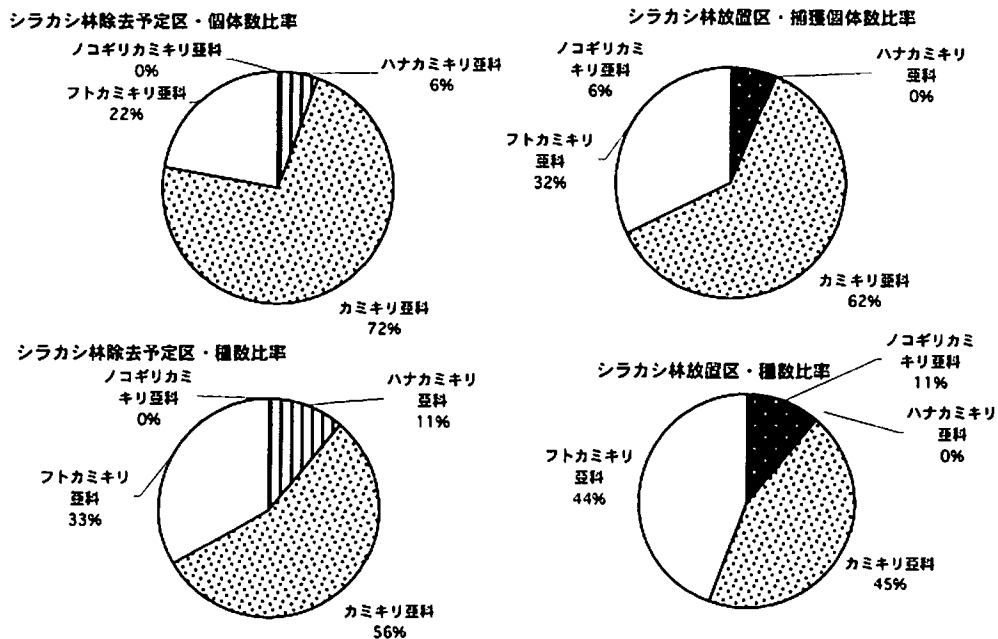


図 2-1-4 亜科レベルで見たシラカシ林のカミキリムシ類群集の構成

キ 参考文献

- 1) 小島圭三・中村慎吾 (1986) 日本産カミキリムシ食樹総目録, 比婆科学教育振興会, 336pp.
- 2) 槇原 寛 (1987) 各種材より羽化してきたカミキリムシ, 昆虫と自然, 22(13), 32-33.
- 3) 槇原 寛・後藤秀章・前藤 薫・北島 博 (2001) 里山における環境指標カミキリムシの探索研究(1) —低山地天然林に生息するカミキリムシ類と調査に有効なトラップの種類—, ホシザキグリーン財団研報, (5), 1-16.

(槇原寛、松本和馬)

2. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区のゴミムシ類群集

ア 研究目的

ゴミムシ類（甲虫目オサムシ科およびホソクビゴミムシ科）は種数が多く、環境の違いをよく反映して種構成が変化するため環境指標性が高い^{1), 6)}。森林における伐採や植林後の林齢によっても種構成が変化し、概して施業による人為的攪乱は、特定の環境に依存する specialist を消滅させたり群集の多様度を低下させたりしやすいことが明らかにされている^{3), 5), 7), 9)}。一方では現在、雑木林の下層植生を除去するような植生管理が里山の生物的多様性の保全を目的の一つに掲げて推奨され、さらには各地で実践されているという現実があるが²⁾、雑木林の下層のササを刈って管理した場所ではゴミムシ類の種多様度が低くなることが報告されている⁴⁾。

多摩森林科学園には、高齢人工林が多く存在し、最近まで除間伐を行っていないため亜高木層、低木層が発達した林分が多い。本研究では、そのような落葉広葉樹林であるケヤキ林および常緑広葉樹林であるシラカシ林において、下層植生の除去がゴミムシ類群集に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

イ 研究方法

ケヤキ林の下層植生除去区と放置区、シラカシ林の A 区と B 区で調査を行った。それぞれの区に 9 地点（20 m×20 m の区域に 3 列×3 列）の採集地点を定め、1 地点に 2 個（間隔 1 m）の 350 ml スチール製清涼飲料缶の上面をくりぬいたものを埋めてピットフォールとした（図 2-2-1）。ケヤキ林では 203 年～2005 年の 3 年間、シラカシ林では 2004 年と 2005 年の 2 年間、ほぼ半月の間隔を置いて 4 月から 11 月までの毎月 2 回、1 回に付き 2 昼夜ピットフォールを設けてゴミムシ類を採集した。ベイトは用いなかった。



図 2-2-1 ピットフォールトラップ設置状態



図 2-2-2 エサキオサムシ



図 2-2-3 アオオサムシ

ウ 結果

ケヤキ林では 3 年間で 15 種 237 個体、シラカシ林では 2 年間で 13 種 242 個体のゴミムシ類が捕獲された（表 2-2-1 および表 2-2-2）。得られた種のほとんどは森林性種を多く含むオサムシ科のオサムシ亜科とナガゴミムシ亜科（独立の亜科とされることもあるヒラタゴミムシ族を含む）であ

った。その他の分類群は、草原性種を多く含むゴモクムシ亜科がケヤキ林放置区で 1 種 1 個体とシラカシ林 B 区で 1 種 1 個体、アオゴミムシ亜科がシラカシ林 A 区で 1 種 2 個体採集されたにすぎない。ケヤキ林除去区以外では、もっとも個体数が多かった種はエサキオサムシ（図 2-2-2）である。ケヤキ林除去区ではエサキオサムシが少ない一方、他の調査区では見られないアオオサムシ（図

表 2-2-1. ケヤキ林の下層植生除去区と放置区において採集されたゴミムシ類の種別個体数.

	除去区			放置区		
	2003	2004	2005	2003	2004	2005
オサムシ亜科						
アオオサムシ	1	2	2			
エサキオサムシ	2	5	3	12	13	31
ナガゴミムシ亜科						
オオゴミムシ					1	
キバナガゴミムシ		1		1		
ヨリトモナガゴミムシ	4	8	17			9
ニッコウヒメナガゴミムシ	7	4	8	1	1	4
タカオヒメナガゴミムシ	1		3	1	1	2
ムサシナガゴミムシ	14	6	19	5	3	7
フトクチヒゲヒラタゴミムシ	2			3		
オオクロツヤヒラタゴミムシ	4		1		1	1
クロツヤヒラタゴミムシ	4		4	2	2	6
コクロツヤヒラタゴミムシ						1
タンザワツヤヒラタゴミムシ	1				1	
シロウマホソヒラタゴミムシ			2			2
ゴモクムシ亜科						
ツヤアオゴモクムシ						1

表 2-2-2. シラカシ林の下層植生除去予定区と放置区において採集されたゴミムシ類の種別個体数.

	A 区		B 区	
	2004	2005	2004	2005
オサムシ亜科				
エサキオサムシ	15	35	37	28
ナガゴミムシ亜科				
アカガネオオゴミムシ	1			
ヨリトモナガゴミムシ	11	16	13	7
ニッコウヒメナガゴミムシ	3	2	1	9
タカオヒメナガゴミムシ	3	7	2	2
ニッコウオオズナガゴミムシ			1	
ムサシナガゴミムシ			4	1
オオクロツヤヒラタゴミムシ	1			1
クロツヤヒラタゴミムシ	7	20	2	2
マルガタツヤヒラタゴミムシ	1		1	1
シロウマホソヒラタ	2	2		1
ゴモクムシ亜科				
クビナガゴモクムシ				1
アオゴミムシ亜科				
アトボシアオゴミムシ	1	1		

2-2-3) が、毎年少数ずつではあるが採集された。ケヤキ林の除去区と放置区の比較では、このほかヨリトモナガゴミムシ、ニッコウヒメナガゴミムシ、ムサシナガゴミムシ（図 2-2-4）が除去区でより多い傾向があった。

シラカシ林で得られたゴミムシ類は、種構成においてケヤキ林と似ていたが、ムサシナガゴミムシがケヤキ林に比べて少なく、放置区で少数採集されたにすぎない。このほか、シラカシ林の除去予定区と放置区の比較ではクロツヤヒラタゴミムシが除去予定区でやや多かった。

エ 考察

ケヤキ林の除去区と放置区の比較では、除去区に少ないながらアオオサムシが毎年出現したこと、近縁のエサキオサムシが除去区では少ないが放置区およびシラカシ林 A、B 両区では多いことが対照的であった。一般に、エサキオサムシは暗い林内に多いが、アオオサムシは立木密度が低く明るい疎林的环境ないし草地的環境で多い種である。したがって、除去区でアオオサムシが見られたこと、およびエサキオサムシが少なかったことは、亜高木層以下が除去され、林床が明るくなった事によると思われる。



図 2-2-4 ムサシナガゴミムシ

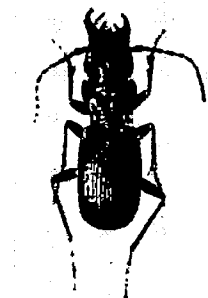


図 2-2-5 ニッコウオオズナガゴミムシ

ムサシナガゴミムシがシラカシ林よりもケヤキ林に多かったこと、およびケヤキ林では放置区よりも除去区で多かったことの理由は現状では明らかではないが、現象だけを見れば、林床がより明るい環境で同種の個体数が多いという傾向になっている。今後、シラカシ林の下層植生を除去した場合にムサシナガゴミムシが増えるかどうかは注目すべき点である。この点に加え、シラカシ林の除去予定区と放置区の比較ではクロツヤヒラタゴミムシが除去予定区でやや多かったが、これは下層植生に対する処理を行っていない段階での傾向であることを、今後のシラカシ林での調査では注意しておく必要がある。

なおシラカシ林で採集されたニッコウオオズナガゴミムシ（図 2-2-5）は、通常高地の沢沿いの礫地に生息する比較的稀な種であり、今回の調査では既知の生息環境とは著しく異なる環境で得られたことは特筆できる。また、ムサシナガゴミムシは関東地方南西部の丘陵～低山地に局限される種であり、ケヤキ林における本種の多産はこの点からも注目される。

オ 今後の問題点

ケヤキ林では下層植生に対する処理を行う以前の調査を行っていないため、厳密に言えば除去区と対象区のゴミムシ類群集に見られた違いが、植生管理法の違いによるのか、地形、土壌など別の要因によるのか、明らかではない。シラカシ林では 2 年間にわたって処理前の状態で調査を行った

が、2006 年早春に下層植生を除伐／刈払い処理した区域を設定して、継続調査を行っている。この調査をさらに継続することで下層植生を除去することのゴミムシ類相への影響を明らかにする必要がある。

カ 要約

多摩森林科学園のケヤキ林において 2003 年早春に亜高木層以下の下層植生を除伐／刈払い処理した区と下層植生を放置した区のゴミムシ類群集の違いを明らかにするため、2003 年から 2005 年の間、4 月～11 月の毎月 2 回、ピットフォールトラップによる捕獲調査を行った。また、亜高木層以下の生育が旺盛なシラカシ林において、2 調査区を設定し、2004 年と 2005 年に同様のゴミムシ類群集の調査を行った。ケヤキ林の放置区とシラカシ林の 2 調査区ではエサキオサムシが多かったが、ケヤキ林の除去区でエサキオサムシが少なかった。また、疎林や草地等比較的明るい環境に生息するアオオサムシが除去区にのみ出現した。ケヤキ林とシラカシ林のゴミムシ類の種構成は似ていたが、ムサシナガゴミムシはケヤキ林に多くシラカシ林には少なかった。関東地方西南部の低山に局地的に分布する同種のケヤキ林における多産、および一般に高地の稀種と考えられているニッコウオオズナガゴミムシのシラカシ林での出現は注目される。

キ 引用文献

- 1) 石谷正字 (1996) 環境指標としてのゴミムシ類 (甲虫目：オサムシ科, ホソクビゴミムシ科) に関する生態学的研究, 比和科学博物館研究報告, 34, 1-110.
- 2) 亀山章 (編) (1996) 雑木林の植生管理—その生態と共生の技術, ソフトサイエンス社, 東京.
- 3) Lenski, R.E. (1982) The impact of forest cutting on the diversity of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in the southern Appalachians. *Ecological Monographs* 7, 385-390.
- 4) 松本和馬 (2005) 森林総合研究所多摩試験地および東京都立桜ヶ丘公園のゴミムシ類群集と林床植生の管理, 環動昆, 16, 31-38.
- 5) Michaels, K.F. & McQuillan P.B. (1995) Impact of commercial forest management on geophilous carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) in tall wet Eucalyptus oblique forest in southern Tasmania, *Australian Journal of Ecology*, 20, 316-323.
- 6) Niemelä, J., Spence, J.R. & Spence, D.H. (1992) Habitat associations and seasonal activity of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) in central Alberta, *Canadian Entomologists* 124, 521-540.
- 7) Niemelä, J., Langor, D. & Spence, J.R. (1993) Effects of clear-cut harvesting on boreal ground beetles (Coleoptera, Carabidae) in western Canada. *Conservation Biology* 7, 551-556.
- 8) Simpson E.H. (1949) Measurement of diversity, *Nature*, 163, 688.
- 9) Werner, S & Raffa, K.F. (2000) Effects of forest management practices on the diversity of ground-occurring beetles in mixed northern hardwood forests of the Great Lakes Region. *Forest Ecology and management*, 139, 135-155.

(松本和馬)

3. ケヤキ林およびシラカシ林における亜高木・低木層除去区と放置区の借孔性ハチ類群集

ア 研究目的

借孔性ハチ類は、岩などのくぼみや穿孔性昆虫の羽化孔など、自然界にある既存孔に営巣するハチ類の総称である。これらのハチ類は、筒状の構造物を野外に設置することによって営巣を誘導することができ、これを営巣トラップという。日本では営巣トラップによって34種の営巣が報告されているが、実際には50～60種が営巣可能と考えられる³⁾。借孔性ハチ類は昆虫などを狩って蓄えたり（カリバチ類）、花蜜や花粉を蓄えたり（ハナバチ類）するため、捕食性天敵や送粉者として機能している昆虫ととらえることができる。

営巣トラップは設置と回収が容易であり、捕獲技量による違いもないことから近年では多様性や生態系機能の評価を目的として国内外で用いられている^{2), 5), 6)}。ここでは亜高木・低木層の除去がハチ類に与える影響を評価する目的で営巣トラップによる試験を行った。

イ 研究方法

ケヤキ林の除去区と放置区で 2003 年に調査を行った。使用した営巣トラップは、内径約 16mm、10mm、6mm、および 4mm の竹筒を 5 本ずつ（合計 20 本）をすだれ状に編んだものを用いた（図 2-3-1）。このトラップを 2003 年 4 月、亜高木・低木層除去区（除去区）と放置区とに、それぞれ 9 個（3 列×3 列）ずつ設置した（図 2-3-2）。すなわち、各区には合計 180 本の竹筒が設置された。トラップは地上約 2m の位置でケヤキの幹に縛り付けた。これらのトラップを同年 12 月に回収し、借孔性ハチが利用していた竹筒については、内部の前蛹やマユを個別に管ビンに入れて、2004 年の春～夏に羽化した成虫を標本とし、属まで同定した。



図 2-3-1 竹筒トラップ

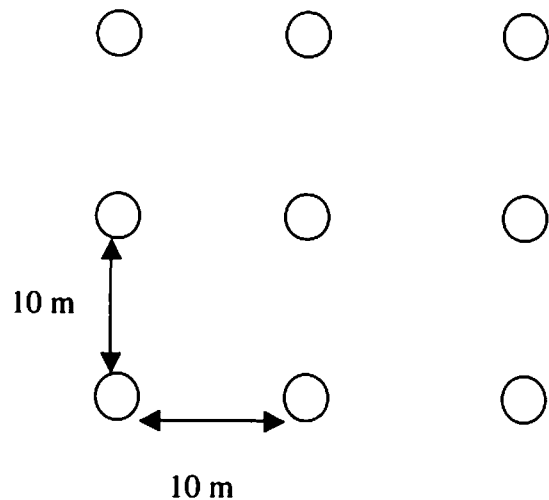


図 2-3-2 トラップ（丸印）の配置

ウ 結果

営巣トラップによる結果を表 2-3-1 に示す。除去区ではすべての竹筒のうち 42% (75/180) が営巣に利用された一方、放置区では 11% (20/180) が利用されたにすぎず、営巣率には両者間で有意な差が見られた ($P < 0.01$; χ^2 -検定)。出現した種数は除去区、放置区とも 4 属と等しかった。すべての営巣された竹筒に占める、営巣した属の構成は、除去区ではギングチバチ科のジガバチモ

ドキ属が過半数（60%）を占め、その他のほとんどをベッコウバチ科のヒメベッコウ属とヒゲベッコウ属が占めた。一方放置区では、80%をヒメベッコウ属が占め、ジガバチモドキ属は10%だった。これらの他に、コクロアナバチ属の営巣例が両区で1例ずつ、またヒメギングチバチ属の営巣例が放置区で1例のみ見られた。

出現属数は両区で同じだったが、放置区では1属が突出して多かったため、均衡度を加味した属レベルの多様度（シンプソンの多様度⁴⁾：1-D）で評価した結果、除去区(0.54)のほうが放置区(0.35)より大きかった。

表 2-3-1 借孔性ハチ類が営巣に利用した竹筒数

属	除去区	放置区
ベッコウバチ科		
ヒメベッコウ属	22	16
ヒゲベッコウ属	7	0
アナバチ科		
コクロアナバチ属	1	1
ギングチバチ科		
ジガバチモドキ属	45	2
ヒメギングチバチ属	0	1
合計	75	20

エ 考察

除去区でも放置区でも、従来の営巣トラップ研究でよく報告されるドロバチ科やミツバチ科による営巣例が全く見られなかったことが注目される。こうしたハチ類は明るい環境を好むので、林内環境では営巣しにくいと考えられる。しかし除去区は放置区に比べて営巣率も多様性も高くなり、放置区では少なかったジガバチモドキ属の営巣が増えたことは、亜高木と低木層の除去によってやや光条件が改善されたこと、地表近くの植物体が少なくなったことでハチが入りやすくなったことなどが考えられる。

今回の調査で多く営巣が見られたヒメベッコウ属、ヒゲベッコウ属、ジガバチモドキ属はいずれもクモ類を狩るグループである。

除去区で得られたコクロアナバチ属はキバネアナバチであり、東日本ではかなり珍しい種である。神奈川県では報告があるが、茨城、栃木、千葉、埼玉では報告がない。今回の記録は本種の東北限記録となる。またやはり放置区で1例のみ得られたヒメギングチバチ属（ハクサンギングチと思われる）も、従来の営巣トラップの報告にはほとんど見られない。本属は種によって材などに孔を掘る（掘孔性）こともあれば、材にあげられた甲虫などの脱出口を利用する（借孔性）を示すこともある¹⁾が、今回この属の借孔性の種は営巣トラップで実際に得られることがわかった。

オ 今後の問題点

営巣トラップは借孔性ハチ類相を解明するのに有効であるが、トラップの準備、設置、回収、保管、標本作製、同定という一連の作業にかなりの時間と労力を要するため、多くの場所で同時に調

査することは困難である。今回のケヤキ林での調査では、ハナバチ類が全く見つからない等、調査地の借孔性ハチ類相の顕著な特徴が認められた。今後は未調査のシラカシ林やスギ林のようなとくに暗い環境やサクラ保存林のような明るい環境等、科学園の中にある様々な環境におけるハチ相の解明が望まれる。

カ 要約

ケヤキ林の除去区と放置区で竹筒性の営巣トラップを設置して借孔性ハチ類を採集し、両区の群集構造を比較した。難同定種が含まれているため、同定は属までとした。出現した属数は除去区、放置区とも4属と等しかったが、営巣に利用された竹筒の割合は除去区では42%、放置区では11%であった。営巣した属の構成は、除去区ではジガバチモドキ属が60%を占め、放置区では、80%をヒメベッコウ属が占めた。属レベルのシンプソンの多様度 ($1-D$) は除去区(0.54)のほうが放置区(0.35)より大きかった。両区とも明るい環境を好むドロバチ科やミツバチ科による営巣が全く見られなかったが、下層植生の除去により営巣率も多様性も高くなること、およびジガバチモドキ属が増えることが示唆された。

キ 引用文献

- 1) Bohart, R.M. and Menke, A.S. (1976) Sphecoid Wasps of the World. Univ. California Press, 695pp.
- 2) 橋本佳明・遠藤知二(2001) ニュータウンに住む管住性ハチ類. 昆虫と自然, 36(1), 18-21
- 3) 牧野俊一・佐山勝彦・岡部貴美子(2002) 竹筒トラップによるハチ類の調査, 昆虫と自然, 36, 16-19.
- 4) Simpson, E. H. (1949) Measurement of diversity. Nature 163, 688.
- 5) 須賀丈・遠藤知二・坂田宏志・橋本佳明(2001) 竹筒トラップをもちいた管住性ハチ類の調査による生態影響評価手法の開発, 長野県自然保護研究所紀要, 4, 23-33.
- 6) Tscharnkte, T., Gathmann, A., and Steffan-Dewenter, I. (1998) Bioindication using trap-nesting bees and wasps and their natural enemies: community structure and interactions, J. Appl. Ecol., 35, 708-719.

(牧野俊一、松本和馬)

第3章 変化しつつある多摩森林科学園の動物群集のモニタリング

1. 多摩森林科学園の森林環境とチョウ類群集

ア 研究目的

チョウ類は、寄主植物、生活史、生息場所選好性、分布などの情報がきわめて豊富で、日本産に限ればほぼ全種にこのような情報がそろっている。また昼行性でよく目立ち、野外でも目視同定が容易であるなど多くの利点があるため、環境指標生物としての有用性が認められている^{2), 6)}。一定ルートを巡回して遭遇したチョウ類の種ごとの個体数を記録するトランセクト法は、さまざまな環境で実行例が多い^{10), 3), 4), 7), 8), 11), 14)}。

多摩森林科学園のチョウ相については、東京都の里山で衰退しつつある種の多くが生息し、山地性種も加わって豊かな自然を反映するチョウ相となっていること、最近西日本の温暖地から関東地方に侵入したナガサキアゲハ、ムラサキツバメ、ツマグロヒョウモン、クロコノマチョウの4種が記録されていることなどが報告されているが⁵⁾、定量的な解析結果は公表されていない。多摩森林科学園の森林は人工林の多くが高林齢であり、また天然林も長期間にわたって遷移に任されて来たため、周辺に多い薪炭林由来のコナラを主とする雑木林（狭義の里山）とは異なり、モミ、アラカシ、スダジイなどの常緑樹の多い林になっている。暖温帯の雑木林は1960年代の燃料革命以降薪炭林としての利用が停止し、管理放棄されて高林化と林内植生の遷移が進行しており、このような状況が里山的生物の衰退をもたらすと危惧されている。多摩森林科学園の森林ではこれに先行する形で高林化と林内植生の遷移が進んでいるので、そのチョウ類群集の研究は里山の昆虫相の将来に対する危惧の妥当性を検証する機会ともなろう。本研究では多摩森林科学園のチョウ類群集をトランセクト法によって定量的に調査し、その結果を現在の森林環境と関連づけて考察する。

イ 研究方法

全長4.2kmの固定ルートを設定し、環境に応じて全体を8区間に細分した。すなわち、高木がほとんどない「苗畑」(0.24km)、芝、庭園樹、建造物が混在する「庁舎周辺」(0.22km)、主に天然林部分の暗い林内を通る小径沿いの「廿里試験林」(0.77km)、多様な樹種が植栽展示された「樹木園」(0.57km)、サクラが比較的粗に植えられていて疎林的な「サクラ保存林」(0.44km)、および白山地区試験林の主に人工林部分を通り作業車両が通る林道沿いでやや明るい「白山試験林A区」(0.89km)、小径が暗い林内を縫って通っている「白山試験林B区」(0.78km)、雪害により立木数が少なく高茎草原状のドイツトウヒ不成績林地とクヌギ林とコナラ林を通る「白山試験林C区」(0.33km)に細分した。

2003年～2005年の4月～11月に毎月2回（各月の前半と後半）なるべく半月程度の間隔を置き、晴天または薄曇りで風の強くない日を選び、9:00～15:00の間に調査を行った。ルートを約2時間かけて歩いて前方および左右約5m以内に出現したチョウ類を目視同定して記録したが、必要に応じて捕獲して種名を確認した。得られたデータを全ルート分および区間ごとに集計し、種数、種別個体数、総個体数をそれぞれ計算した。種別個体数と総個体数を1kmあたりセンサス1回あたりに換算して生息密度とした。記録された種を生息場所選好性別に集計した。海野・青山¹²⁾は日本産チョウ類を森林性種とオープンランド性種に、田中¹⁰⁾は森林性種と草原性種に分類しているが、分類結果には一部に不一致があるので、両者が一致して森林性とした種を森林性種、両者がオープンランド性ないし草原性とした種を草原性種とし、両者の見解不一致の種は生息場所選好性不明

種として判定を保留した。

表 2-4-1 トランセクト区間ごとの森林性チョウ類の記録個体数（3 年分合計値）

種名	サクラ保				白山試験				合計
	苗畑	存林	庁舎周辺	樹木園	林 C	林 A	林 B	林	
アゲハチョウ科	ジャコウアゲハ	0	0	0	0	1	0	0	1
	アオスジアゲハ	0	4	2	6	0	4	1	18
	アゲハ	3	0	3	1	1	0	0	8
	カラスアゲハ	0	4	4	1	2	3	1	16
	ミヤマカラスアゲハ	0	0	1	0	0	0	0	1
	クロアゲハ	1	0	5	3	3	1	3	17
	オナガアゲハ	0	3	5	3	0	4	0	15
	モンキアゲハ	0	1	4	3	2	5	0	16
シロチョウ科	スジグロシロチョウ	18	39	14	11	4	43	0	131
	キタキチョウ	31	54	10	7	6	34	2	144
シジミチョウ科	ウラギンシジミ	2	9	0	1	2	8	1	23
	ムラサキシジミ	3	5	1	3	43	45	43	210
	アカシジミ	0	0	0	2	0	0	0	2
	ミズイロオナガシジミ	0	0	0	0	2	3	0	5
	コツバメ	0	0	0	0	0	2	1	3
	トラフシジミ	0	0	1	0	0	1	0	2
	ルリシジミ	3	5	1	0	2	5	2	19
	スギタニルリシジミ	0	0	0	1	0	7	0	8
テングチョウ科	テングチョウ	3	8	3	3	3	17	2	42
マダラチョウ科	アサギマダラ	0	2	0	0	1	12	2	17
タテハチョウ科	ゴマダラチョウ	0	1	0	0	0	0	0	1
	オオムラサキ	0	0	0	0	6	0	0	6
	スミナガシ	0	0	0	0	2	0	0	2
	クモガタヒョウモン	0	1	0	0	0	1	0	2
	ミドリヒョウモン	1	5	1	7	0	2	0	16
	メスグロヒョウモン	0	6	0	1	1	0	0	8
	イチモンジチョウ	0	3	0	2	2	3	0	10
	ミスジチョウ	0	3	0	1	0	1	1	6
	コミスジ	1	4	1	3	3	13	1	28
	サカハチチョウ	0	2	0	1	0	2	1	6
	ルリタテハ	0	0	1	0	6	0	3	10
	ヒメウラナミジャノメ	2	19	3	5	1	11	0	41
	コジャノメ	0	7	3	26	10	13	5	101
	クロヒカゲ	0	3	0	16	3	3	9	44
	ヒカゲチョウ	0	1	0	8	4	6	0	25
	サトキマダラヒカゲ	2	0	0	6	24	2	1	35
セセリチョウ科	クロコノマチョウ	0	0	0	1	1	0	0	4
	ミヤマセセリ	0	1	0	0	6	4	4	15
	ダイミョウセセリ	0	3	2	4	0	2	2	20
	コチャバナセセリ	0	2	1	0	0	0	0	3
	ヒメキマダラセセリ	1	12	6	8	0	22	0	49
合計個体数		71	207	72	134	141	279	85	1130
生息密度		3.9	10.8	5.6	4.0	15.5	4.4	2.7	5.0
合計種数		23	36	29	31	26	35	22	53

表 2-4-2 トランセクト区間ごとの草原性チョウ類の目視個体数（3 年分合計値）

科名	種名	サクラ				白山試験				合計
		苗畑	保存林	庁舎周辺	樹木園	林 C	林 A	林 B	林	
シロチョウ科	モンシロチョウ	26	3	2	0	0	0	0	0	31
	モンキチョウ	5	1	1	0	0	0	0	0	7
シジミチョウ科	ベニシジミ	16	2	1	0	0	0	0	0	19
	ウラナミシジミ	1	0	1	0	0	0	0	0	2
	ヤマトシジミ	278	151	98	11	2	15	1	0	556
タテハチョウ科	ツマグロヒョウモン	0	0	2	0	0	0	0	0	2
	キタテハ	9	1	0	0	0	0	0	0	10
合計個体数		335	158	105	11	2	15	1	0	627
生息密度		18.4	8.2	8.1	0.3	0.2	0.2	0.03	0.0	2.8
合計種数		6	5	6	1	1	1	1	0	53

表 2-4-3 トランセクト区間ごとの生息場所特性不明のチョウ類の目視個体数（3 年分合計値）

科名	種名	サクラ保				白山試験				合計
		苗畑	存林	庁舎周辺	樹木園	林 C	林 A	林 B	林	
アゲハチョウ科	ウスバシロチョウ	2	1	2	2	0	9	0	0	16
シロチョウ科	ツマキチョウ	3	4	0	1	0	3	0	0	11
タテハチョウ科	アカタテハ	0	0	0	0	0	3	0	0	3
セセリチョウ科	チャバネセセリ	1	2	0	0	0	0	0	0	3
	イチモンジセセリ	12	19	4	9	0	2	1	0	47
合計個体数		18	26	6	12	0	17	1	0	80
生息密度		1.0	1.4	0.5	0.4	0.0	0.3	0.03	0.0	0.4
合計種数		5	4	2	3	0	4	1	0	5

ウ 結果

3 年間で合計 53 種 1837 個体のチョウ類が記録された（表 2-4-1、2-4-2、2-4-3）。最も個体数が多かったのはヤマトシジミで全体の 30.3%を占め、以下ムラサキシジミ（11.4%）、キタキチョウ（7.8%）、スジグロシロチョウ（7.1%）、コジャノメ（5.5%）の順で上位 5 種を占めた。シンブソンの多様度指数⁹⁾（1-D）は 0.876、生息密度は 8.14 であった。

最近の侵入種ではツマグロヒョウモンとクロコノマチョウがいずれも複数個体記録されたが、ナガサキアゲハとムラサキツバメはこの調査では発見されなかった。

3 年間に記録された種を生息場所で分類すると、森林性種が 41 種、草原性種が 7 種、所属不明が 5 種であった。区間ごとの生息密度や種構成は、開放的な環境の区間と閉鎖的な森林環境の区間とで顕著な対比が見られた（表 2-4-1、2-4-2、2-4-3）。草原性種の生息密度は開放的な環境の苗畑、サクラ保存林、庁舎周辺で高く、森林環境であるその他の区間では低かった。森林性種が森林環境に常に高密度で生息するとは限らず、樹木園、白山試験林 A 区および B 区等ではサクラ保存林よりも低く、鬱閉度の高い廿里試験林と、白山試験林 B 区では種数もやや少なかった。廿里試験林は常緑樹の多い天然林が大部分を占め、最も暗い環境が多い区間であるが、ここで高い頻度で見られた種はムラサキシジミとコジャノメであり、次いでヒカゲチョウ、クロヒカゲ、ダイミョウセセリ、などが比較的高い頻度で見られた。

苗畑、サクラ保存林、庁舎周辺では第 1 位の優占種は草原性種のヤマトシジミで、同種の全個体の 95%がこの 3 つの区間で記録された。ヤマトシジミ以外の草原性種は、モンキチョウ、モンシロチョウ、ベニシジミ、ウラナミシジミ、ツマグロヒョウモン、キタテハが記録されたが、これら 6 種はいずれもこの 3 区間に限ってみられ、個体数は少なかった。

スジグロシロチョウとキタキチョウは森林性とされる種であるが、廿里試験林と白山試験林 B 区を除く全ての区間で多く、特定の環境に限定されていなかった。

廿里試験林と白山試験林 A 区、B 区、C 区ではムラサキシジミが第 1 位であった。コジャノメは樹木園で第 1 位であり、廿里試験林と白山試験林 A 区、B 区、C 区でも比較的多かった。

エ 考察

本研究で最優占種となったヤマトシジミは草原性種であるが、多摩森林科学園では他の草原性種はいずれも苗畑等開放的な環境に限定されていて個体数も少ない。ヤマトシジミは里山、住宅地、都市公園、河川敷等さまざまな環境でもしばしば個体数上位種であり¹³⁾、ある程度開放的な環境でさえあれば多産する種であって、多摩森林科学園における本種の多産は特に草原的な環境の卓越を意味しているとはいえない。

ヤマトシジミに次いで個体数の多かった 4 種の内、キタキチョウとスジグロシロチョウは、森林性とされているが、多摩森林科学園ではとくに暗い林内以外の全ての環境で多く、様々な環境を利用できることで繁栄している種のようなのである。これに対し、ムラサキシジミとコジャノメはともに暗い林に生息可能な森林性種で、ムラサキシジミが常緑のカシ類を寄主とし、コジャノメも林床に生活する種である。この 2 種が森林環境を中心に個体数上位種として記録されたのは、多摩森林科学園に多い暗い森林が生息に好適であることを示唆している。

しかし、このような暗い森林内に生息できる種は日本産のチョウ類には少なく、多摩森林科学園においても他の森林性種の多くは低密度であり、その最も大きな理由も科学園の森林に暗い箇所が多いことであろう。とくに里山林を主な生息の場とする種の多くは比較的明るい林に生息する種であり、林縁や林床に幼虫の寄主植物や成虫の吸蜜源となる非耐陰性の植物が少ない暗い林内では生息困難になると考えられている⁴⁾。試験林の人工林部分は樹木が高齢で大きいことに加え、亜高木層、低木相に耐陰性の常緑樹が生長していることにより暗い。天然林部分は戦前から放置されて遷移に任され、現在では常緑樹が優占して暗くなっている。この状況は、いずれも管理されなくなった里山林において高林化と林内植生の遷移が進んでいる近年の状況と共通するが、多摩森林科学園の天然林は、燃料革命に伴う薪炭林の管理放棄が一般化するよりだいぶ以前から遷移に任されてきたため、周辺の里山林に先駆けてすでに照葉樹林に移行しつつあるとみなせ、これに伴って里山のチョウをはじめとする多くの森林性種も衰退しつつあると考えられる。

白山地区試験林の C 区は里山林の主要樹種であるクヌギとコナラの林分があり、クヌギ林は 2002 年晩秋に低木層の除伐が行われた上、隣には草原状の不成績林分があるため多摩森林科学園の森林としては例外的に明るい。また、クヌギ林では毎年 2~4 本の木から樹液が出る。この区間で森林性種の生息密度が比較的高く、オオムラサキ、サトキマダラヒカゲなど里山的な種がこの区間で集中的に見られるのは、この区間に小規模ながらこのような里山的な条件が揃っているからであろう。

表 2-4-4 近畿地方の里山林および照葉樹林におけるチョウ類群集のシンブソン多様度指数 (1-D) と生息密度 (トランセクト 1 km・センサス 1 回あたり)。地名の肩番号は引用文献を示す。

	里山林			照葉樹林		
	能勢町 三草山 ⁴⁾	神戸市 ¹¹⁾ しあわせの村	和泉市 若槻 ¹⁾	箕面市 箕面公園 ³⁾	神戸市 甲山 ⁷⁾	神戸市 太山寺 ⁸⁾
多様度指数	0.916	0.924	0.932	0.918	0.927	0.948
生息密度	27.4	20.1	28.4	9.5	8.0	4.5

関東地方の暖温帯の森林で本研究と比較できるデータが取られたことはないが、近畿地方では里山の雑木林（里山林）や照葉樹林でチョウ類群集のトランセクト調査が行われている。それらの公表されたデータのうち、シンプソンの多様度指数と生息密度を表 2-4-4 に示した。多様度指数は 0.9 程度で里山林も照葉樹林も大差なく、多摩森林科学園もこれにほぼ近い値である。しかし、生息密度は里山林が 20 以上であるのに対して照葉樹林と多摩森林科学園は 10 以下と低く、多摩森林科学園はチョウ類群集の構造の面からも里山林的ではなく、照葉樹林的であるといえる。

オ 今後の問題点

これまで 3 年間同じ方法で調査した多摩森林科学園のチョウ類群集の定量データが蓄積されている。同様の調査を今後数年継続すれば、チョウ類各種の個体数の年次変動の解析が可能になる。伐採や下層植生の除去のような施業の影響を考察したり、温暖年と寒冷年の比較により現在注目を集めている温暖化の影響を考察したりするなどの目的にも有用な資料が得られる可能性がある。最近関東地方に進出した温暖地のチョウ 4 種の内、ツマグロヒョウモンとクロコノマチョウは複数個体が記録されていることから、定着していると考えられるが、この 2 種およびこれまでトランセクトでは発見されていないナガサキアゲハとムラサキツバメが今後増加するか否か、現在個体数が少なくなっている里山的な種や山地性種が今後どうなるか、などに注目した調査が行われることも望ましい。既存の人工林の一部を伐採して薪炭林的な低林施業でコナラあるいはクヌギの林を造成してみ、里山的な種が増加するかどうかを調べる等の試みも、環境教育林における教育素材としての利用をかねた実験として有意義であろう。

カ 要約

多摩森林科学園の代表的な環境を通る 4.2km のルートを設定し、2003 年から 2005 年までの 3 年間 4 月から 11 月まで毎月 2 回のトランセクト調査を行って、チョウ類群集を調査した。合計 53 種 1837 個体のチョウ類が記録された。最優占種は草原性種のヤマトシジミであったが、ヤマトシジミ以外の草原性種は少なく、苗畑、庁舎周辺、サクラ保存林などの開放的な環境でのみ見られた。森林環境ではムラサキシジミ、コジャノメが優占種であった。キタキチョウ、スジグロシロチョウは鬱閉した暗い森林以外のどの環境でも多かった。里山環境を代表する森林性種の個体数は少なかった。多摩森林科学園のチョウ類群集の多様度指数は近畿地方の里山や照葉樹林で観測されているのと同程度の比較的高い値を示したが、生息密度は低く、里山環境よりは照葉樹林のチョウ類群集に似ていて、林齢の高い暗い森林が多いこと、とくに天然林は照葉樹林化が進行していることを反映していると考えられた。

キ 引用文献

- 1) 本田悦義(1997)大阪府和泉地方の自然環境の異なる 3 地域のチョウ類群集, 環動昆, 8, 129-138.
- 2) 石井 実 (1993) チョウ類のトランセクト調査, 「日本産蝶類の衰亡と保護」第 2 集 (矢田脩・上田恭一郎編), 日本鱗翅学会・日本自然保護協会, 91-101.
- 3) 石井 実・山田 恵・広渡俊哉・保田淑郎 (1991) 大阪府内の都市公園における蝶類群集の多様性, 環動昆, 3, 183-195.

- 4) 石井 実・広渡俊哉・藤原新也 (1995) 「三草山ゼフィルス」のチョウ類群集の多様性, 環動昆, 7, 134-146.
- 5) 松本和馬 (2006) 森林総合研究所多摩森林科学園のチョウ類相. 森林総合研究所研究報告, 5, 69-84.
- 6) 中村寛志 (2003) 指標種による環境評価, 野生生物保全技術 (佐藤正孝・新里達也, 編), 海游舎, p. 214-230.
- 7) 関谷善行 (1999) 調査コースの日陰の割合から見た神戸市周辺のチョウ類群集の季節消長, 環動昆, 10, 30-41.
- 8) 関谷善行 (2003) 神戸市太山寺照葉樹林地域周辺におけるチョウ類群集の季節消長の再調査, 環動昆, 14, 75-85.
- 9) Simpson, E. H. (1949) Measurement of diversity, Nature, 163, 688.
- 10) 田中 蕃 (1988) 蝶による環境評価の一方法, 日本鱗翅学会特別報告, (6), 527-566.
- 11) 竹中 健・野津晃司・吉田宗弘 (2004) チョウ類群集を用いた神戸市内保養地の里山環境の評価, 環動昆, 15, 119-130.
- 12) 海野和男・青山潤三 (1981) 日本のチョウ, 190pp, 小学館.
- 13) 吉田宗弘 (2004) チョウ類群集による都市環境評価のころみ, 環動昆, 15, 179-187.
- 14) 吉田宗弘・平野裕也・高波雄介 (2004) 東京都武蔵野地域の都市公園のチョウ類群集, 環動昆, 15, 1-12.

(松本和馬)

2. 侵入種による多摩森林科学園の鳥類群集構造の変化

ア 研究目的

侵入種が生態系に与える影響に関しては、国内でも多くの分類群において問題となってきた。その対策の一環として、2005 年に環境省により「特定外来生物による生態系に係る被害の防止に関する法律」が施行され、鳥類に関しては、ガビチョウ、ソウシチョウ、カオグロガビチョウ、カオジロガビチョウの4種が特定外来種に指定されている。

これまでに、国内では100種以上の外来鳥類が野外で観察されてきている^{7) 3)}。しかし、外来鳥類は一般的に農耕地や居住区域など、人間により攪乱された環境に定着する傾向が強く¹⁾、国内での外来鳥類の定着場所に関しても、ほとんどが人為的攪乱環境であった³⁾。このため、外来鳥類が森林生態系に及ぼす影響は、これまではあまり大きな問題になっていなかった。しかし、特定外来種に指定されたガビチョウ、ソウシチョウは、自然林内に定着しているため、在来生態系への影響が心配されている⁸⁾。両種は、ハワイにも移入され野生化しており、在来種を圧迫し個体群密度を低下させる一因となっていると考えられている⁶⁾。

ガビチョウ、ソウシチョウはともにチメドリ科に属する中国南部を原産とする飼養鳥で⁵⁾、20世紀後半に個体数を増加させてきた⁸⁾。ガビチョウは、1980年代から関東西部、九州北部、福島県東部を中心に分布を広げており、現在も分布を拡大中と考えられている^{4) 9)}。本種は、標高1000m以下の低山を生息地としており、基本的に留鳥と考えられている。ソウシチョウは、ガビチョウよりも以前から、九州、兵庫県、筑波山、秩父など日本各地で野生化が確認されている²⁾。標高700m以上のブナ・スズケ林を好み、非常に高密度で繁殖することが知られている。

これら2種のチメドリ類については、在来生態系への影響が懸念されているものの、生息地の鳥類相においてどのような地位を占めているかについては、十分に調べられていない。特に、ソウシチョウは非繁殖期には繁殖地から低山へ移動することが知られているが、その動態は知られていない。そこで本研究では、ガビチョウの繁殖地であり、またソウシチョウの越冬地となっている多摩森林科学園における両種の個体数推移および鳥類層に占める地位を明らかにすることを目的とする。

イ 研究方法

多摩森林科学園の鳥類相を把握するため、原則として毎月4日間、かすみ網を用いた捕獲調査を行った。調査は、かすみ網17~20枚を使用し、夜明け直後から日没までの間に行った。捕獲した鳥は、形態計測の後、脚環を装着し、速やかに放鳥した。調査は、2003年1月から、2004年12月までおこなった。

ウ 結果

全期間を通じて、38種929個体の鳥類が捕獲された。そのうち、もっとも個体数が多かったのはソウシチョウで250個体だった。次いで、メジロ132羽、ヒヨドリ101羽、シジュウカラ99羽、ヤマガラ70羽が捕獲され、ガビチョウの捕獲個体数は47個体で、6番目だった(図2-5-1)。ソウシチョウとガビチョウの捕獲個体数の合計は、全体の3割以上を占めていた。10個体以上が捕獲されたのは、全部で14種だった。これら14種のうち、調査地において繁殖期のみ観察された種はキビタキ1種、非繁殖期のみ観察された種はソウシチョウ、ルリビタキ、アオジ、クロジ、ヒガラの5種で、それ以外の種は通年調査地に生息していた。ルリビタキ、アオジ、クロジについては、

前年以前のシーズンに捕獲された個体が、シーズンをまたいで再捕獲される例があった。

ソウシチョウは11月から4月までの間にのみ捕獲された（図 2-5-2）。この期間のみで考えると、ソウシチョウが捕獲個体数全体に占める割合は、4 割を越えていた。ソウシチョウは、各シーズンに多数の個体が捕獲されているにもかかわらず、以前のシーズンに脚環を装着された個体が異なるシーズンに捕獲されることはなく、すべて新規個体だった。また、調査地内では、ソウシチョウは30 羽から 50 羽程度の群で観察されることが多かった。ガビチョウは通年捕獲されており、特に季節による偏りはなかった（図 2-5-3）。

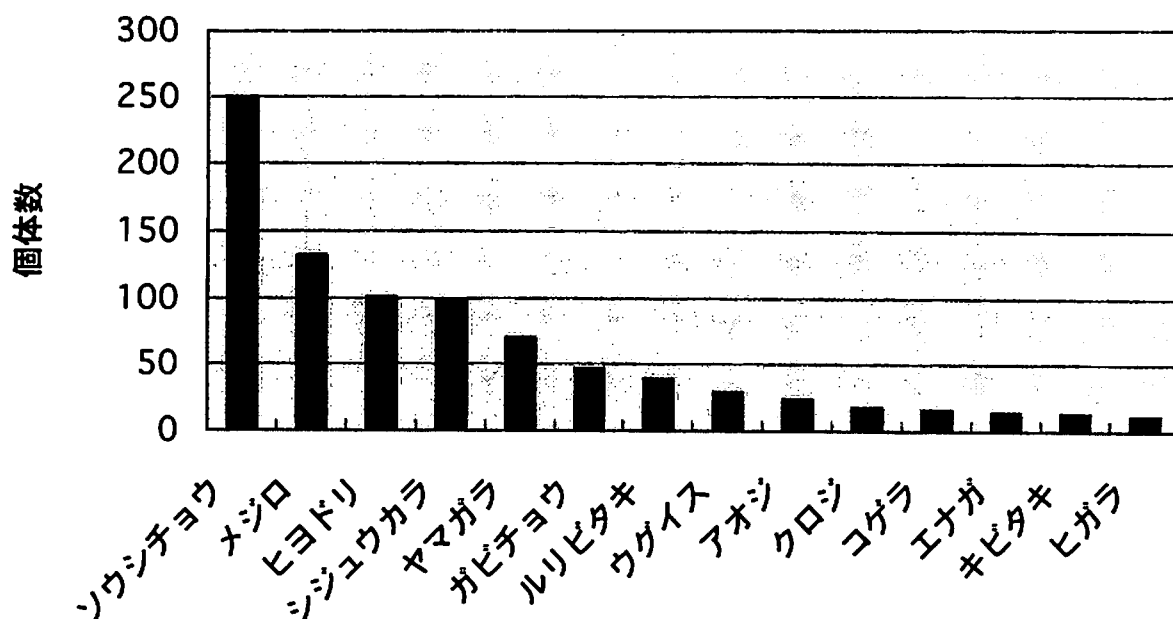


図 2-5-1 合計捕獲個体数

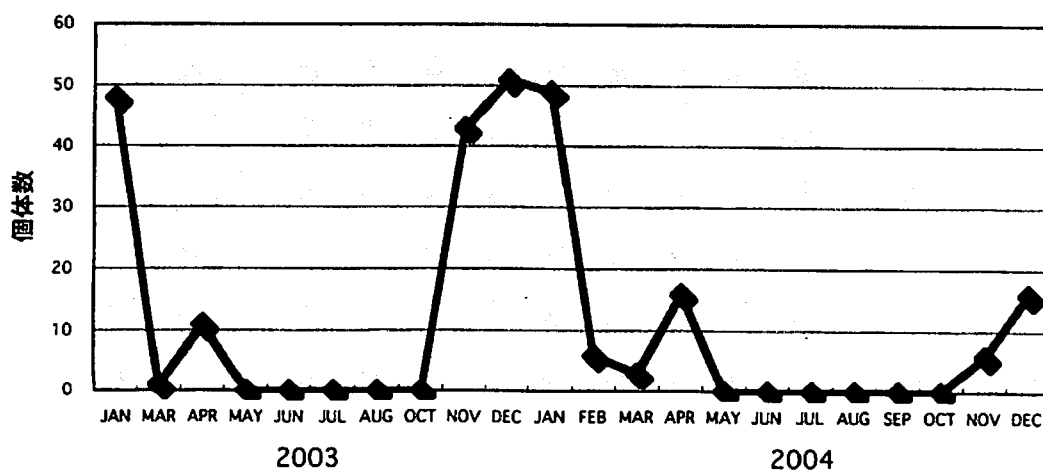


図 2-5-2 ソウシチョウの捕獲個体数

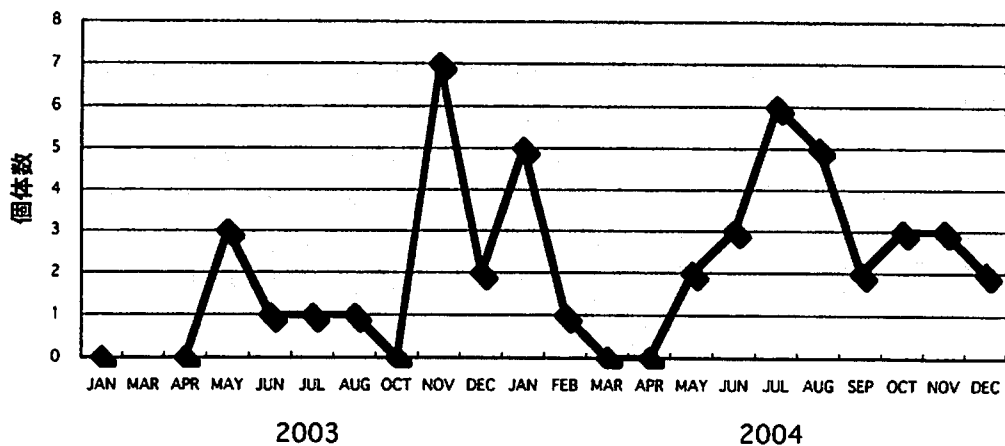


図 2-5-3 ガビチョウの捕獲個体数

エ 考察

ソウシチョウは、多摩森林科学園においては、非繁殖期に多数の個体が生息していることが明らかになった。ソウシチョウは標高 700m以上の自然林を繁殖地として利用しており、多摩森林科学園のある八王子市での繁殖記録はない。関東西部では、丹沢や奥多摩、秩父などにおいて繁殖記録があることから、これらの地域で繁殖した個体が越冬のため低標高地に飛来しているものと考えられる。

ソウシチョウは各シーズンに多数が飛来しているにもかかわらず、同一個体のシーズンをまたいだ再捕獲はなかった。このことから、本種は毎年異なる越冬場所を利用していると考えられる。ルリビタキやアオジ等ではシーズンをまたいだ再捕獲があったので、これらの種に比べて、ソウシチョウの越冬地に対する執着性は低いものと考えられる。ソウシチョウは、非繁殖期に多数の個体が群を作って移動しているため、食物の消費量が非常に多くなると考えられる。このため、食物の多い場所を探して移動する必要がある、越冬地が一定しない可能性がある。

ソウシチョウおよびガビチョウは、全捕獲個体数の 3 割以上を越えていた。特にソウシチョウは非繁殖期には調査対象地の最優占種となり、全捕獲個体数に占める割合は 4 割を越えていた。これらのことから、上記 2 種により、この地域の鳥類相は大きく変化させられていると言える。ソウシチョウが越冬地において他の鳥類に与える影響はこれまでにわかっていない。しかし、大きな群を作ることから、越冬期の食物を狭い地域で大量消費することで在来種に必要な資源を枯渇させたり、捕食者を誘引している可能性がある。また、ソウシチョウもガビチョウも、糞中に植物の種子を多数含んでいることが確認されており、種子散布者となっていると考えられる。鳥散布植物の主要な果期である秋冬に多数の個体が加入することから、これらの種は在来の種子散布の様相を変化させ、森林の更新にも影響を与えていると考えられる。

本州において、ソウシチョウおよびガビチョウほど高密度で野生化した森林性移入鳥類の例はこれまでになく、今後これらの種により生態系にどのような影響が生じるかはまだ不明である。資源消費型の競争や種子散布を介した影響は、短期的には検出されづらいため、これらの種の動態を長期的にモニタリングしていく必要がある。

オ 今後の問題点

これらの 2 種の生態はまだ不明点が多く、在来種との相互作用に関しても十分な調査が行われていない。今後、採食内容等についても調査を行い、生態系内でどのような位置を占めているかを明らかにしていく必要がある。

カ 要約

特定外来種に指定されているソウシチョウとガビチョウの多摩森林科学園における地位を明らかにするため、2003 年から 2004 年のあいだ、毎月捕獲調査を行った。この調査により、ガビチョウは通年調査地に生息するものの、ソウシチョウは 11 月から 4 月の間だけ越冬のために調査地を利用していることがわかった。また、これら 2 種が全捕獲個体数に占める割合は 3 割を越えており、在来鳥類相を大きく変化させていることが明らかとなった。特に越冬期におけるソウシチョウの個体数は非常に多く、食物資源の消費や種子散布などを介して、在来生態系に大きな影響を与えている可能性がある。

キ 引用文献

- 1) Case, T. J. (1996) Invasion resistance, species build-up and community collapse in metapopulation models with interspecies competition, Biol. J. Linne Soc., 42, 239-266.
- 2) 江口和洋・増田智久 (1994) 九州におけるソウシチョウ *Leiothrix lutea* の生息環境, 日本鳥学会誌, 43, 91-100.
- 3) 川上和人 (2003) 私たち、中国から来ました -森林性移入鳥類の現状-, 自然科学のとびら, 9, 12-13.
- 4) Kawakami, K. and Yamaguchi, Y. (2004) The spread of the introduced Melodious Laughing Thrush *Garrulax canorus* in Japan, Ornithl. Sci., 3, 13-21.
- 5) Long, J. (1981) The introduced birds of the world. Reed, Wellington.
- 6) Mountainspring S & Scott JM (1985) Interspecific competition among Hawaiian (USA) forest birds, Ecol Mono., 55, 219-240.
- 7) 中村一恵 (1990) スズメもモンシロチョウも外国からやってきた, pp.241, PHP 研究所, 東京.
- 8) 日本生態学会 (2002) 外来種ハンドブック, 地人書館, 東京.
- 9) 佐藤重穂 (2000) 九州北部におけるガビチョウ *Garrulax canorus* の野生化, 日本鳥学会誌, 48, 233-235.

(川上和人)

木材焼却時におけるダイオキシン類生成実態の把握

目 次

研究の要約	92
第 1 章 無機塩素化合物が木材の焼却時におけるダイオキシン類生成に与える 影響の解明	95
第 2 章 木材保存剤・接着剤等の有機化学物質が含まれる木材の焼却時における ダイオキシン類生成実態解明	100

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

研究年次：平成 15 年～17 年（3 か年）

予算区分：運営交付金

II 主任研究者

主 査：領域長 細谷修二（平成 15 年 4 月 1 日～平成 17 年 3 月 31 日）

：主任研究員 池田 努（平成 17 年 4 月 1 日～平成 18 年 3 月 31 日）

副主査：主任研究員 河村文郎

取りまとめ責任者： 池田 努

III 研究場所

森林総合研究所・本所

IV 研究目的

木材の循環利用は炭素の長期固定、地球温暖化防止の観点からもますます重要となっており、今後、その使用量が増加するものと予想される。木材及び木質材料を長期に渡り使用するためには、木材保存処理薬剤の加圧注入処理が有効である。また、木質材料の製造には、接着剤の使用は不可欠である。廃材利用型木質材料にはこれらの薬剤が含まれることが多く、さらに、その木材保存薬剤や接着剤の硬化剤には、塩素が含まれることが多い。天然木にも、微量ではあるが、塩化ナトリウム等の無機塩素や燃焼時にダイオキシンの生成を触媒されている金属イオン類が含まれていることが知られている。

一方、近年廃棄物の焼却によって生成するダイオキシシン類「ポリ塩化ジベンゾ-*p*-ダイオキシシン（PCDD）、ポリ塩化ジベンゾフラン（PCDF）およびコプラナーポリ塩化ビフェニル（Co-PCB）」の環境排出が社会問題となっている。最近、たき火などで枯れ枝や落ち葉を燃やした時に、ダイオキシシンが生成するかどうかといった、森林総研に対する問い合わせが後を絶たない。本研究は、木材の焼却時におけるダイオキシシン類生成実態の把握を目的とする。木材を焼却処理する際のダイオキシシン類生成量の把握を行い、安全性を評価することは、緊急にその対応が求められている社会ニーズである。

V 研究方法

第 1 章 無機塩素化合物が木材の焼却時におけるダイオキシシン類生成に与える影響の解明

スギチップに塩化アンモニウムを加えた木材サンプルを作成し、実証試験炉を用いて燃焼試験を行い、生成したダイオキシシン類の分析を行った。

第 2 章 木材保存剤・接着剤等の有機化学物質が含まれる木材の焼却時におけるダイオキシシン類生成実態解明

市販の木材保存剤、木材塗装剤および木材接着剤が含まれる試験木片を作成し、小型燃焼装置を用いて焼却を行い、生成したダイオキシン類の分析を行った。

VI 研究結果

研 究 計 画 表

課 題 名	担 当	期 間
・無機塩素化合物が木材の焼却時におけるダイオキシン類生成に与える影響の解明	木材化学研 樹木抽出成分研	15～16
・木材保存剤・接着剤等の有機化学物質が含まれる木材の焼却時におけるダイオキシン類生成実態解明	木材化学研 樹木抽出成分研	15～17

第1章 無機塩素化合物が木材の焼却時におけるダイオキシン類生成に与える影響の解明

スギチップに塩化アンモニウムを0.1% (Cl換算) 添加して焼却した場合、一次燃焼室出口（一次燃焼温度 600-650℃）におけるダイオキシン類排出量は、環境規制値以下であったものの、やや大きな値を示した。しかし、二次燃焼室以降（二次燃焼温度 800-850℃）における排ガス中のダイオキシン類排出量は極めて低い値であり、自然環境に大きなダメージを与える値ではなかった。木材は、プラスチック等と比べると、水分を多く含みさらに熱伝導性も低いために完全燃焼させることが難しい素材であるが、800℃以上の高温で焼却を行い、かつ二次燃焼室を設置して二段焼却を行うことにより、木材の完全燃焼が進み、ある程度無機塩素化合物含有量が高い木材であってもダイオキシン類の排出量を環境規制値以下に抑えられると考えられた。

第2章 木材保存剤、接着剤等の有機化学物質が含まれる木材の焼却時におけるダイオキシン類生成実態解明

市販の木材保存剤の焼却試験の結果、排出されたダイオキシン類およびコプラナーPCB類の毒性を示す毒性等量 (TEQ) は、0.003、0.7、1.9 (pg-TEQ/g) と大変小さい値であった。また市販の木材塗装剤においても、コプラナーPCBの排出量はやや多かったものの毒性等量は、1.6、5.5 (pg-TEQ/g) と小さい値であり、自然環境にほとんど影響を与えないと考えられるレベルであった。

一方、接着剤が含まれる合板の燃焼試験では、水溶性フェノール樹脂接着剤の0.17 (pg-TEQ/g) に対し、ユリア樹脂接着剤では22 (pg-TEQ/g)、メラミンユリア樹脂接着剤では200 (pg-TEQ/g) とやや高い値を示した。ユリア樹脂接着剤およびメラミンユリア樹脂接着剤では硬化剤として塩化アンモニウムが使用されるが、この塩化アンモニウム中に含まれる塩素がダイオキシン類生成の増加に寄与したと考えられた。しかし、最も高い値を示したメラミンユリア樹脂接着剤であっても環境規制値を超える値ではなく、また石油系プラスチック材料であるポリ塩化ビニルの47,000 (pg-TEQ/g) と比較してもはるかに小さい値であった。したがって、800℃以上の高温で、木材の完全燃焼が進む状態で焼却されるのであれば、現在市販されている木材保存剤、木材塗装剤、木材用接着剤等の化学物質が含まれる木材を焼却しても、環境基準値を超えるダイオキシン

類は発生しないと考えられた。

VII 今後の問題点

第1章 無機塩素化合物が木材の焼却時におけるダイオキシン類生成に与える影響の解明

木材は、プラスチック等に比べると、水分を多く含みさらに熱伝導性も低いために完全燃焼させることが難しい素材である。このために、焼却する木材の状態（形、大きさ、含水率）や焼却炉の構造および性能が、ダイオキシン類の生成に影響を与える可能性がある。今後はこの点に関して、より詳細に検討する必要がある。

第2章 接着剤・木材保存剤等の有機化学物質が含まれる木材の焼却時におけるダイオキシン類生成実態解明

木材保存剤、木材塗装剤および接着剤には非常に多くの種類が存在するために、今回は各々における代表的な製品を選び出し焼却試験を行った。本来は全ての製品に対して分析を行うことが好ましいが、ダイオキシン分析は大変複雑であり、高額な費用と長期の分析日数を要するために、分析数を増やすことが難しい。このために、もう少し簡易的な手法で、ダイオキシン類生成への関与を明らかにできる手法を開発する必要がある。

VIII 研究発表

なし

IX 研究担当者

第1章

河村文郎、池田努、細谷修二

第2章

池田努、河村文郎

第1章 無機塩素化合物が木材の焼却時におけるダイオキシン類

生成に与える影響の解明

ア 研究目的

木材には塩化ナトリウム等の無機塩素化合物が含まれるために、焼却によりダイオキシン類が生成する可能性がある。しかし、通常の天然木に含まれる無機塩素化合物量は極めて微量であるために、焼却によりダイオキシン類が生成したとしても、その量は自然環境に影響を与えない程度の極めて少ない量であると考えられる。一方、木材の流通過程で海水貯木が行われる場合があるが、このような海水貯木された木材の中には、海水中の塩化ナトリウムが取り込まれることにより、天然木を大きく上回る量の無機塩素化合物が含まれるものも存在する。このような無機塩素化合物含有量の高い木材の焼却が行われた場合には、多量のダイオキシン類が生成する可能性がある。木材の焼却過程でダイオキシン類が生成することを報告した例はあるが¹⁾、極めて少なくさらに、ダイオキシン類が発生する場合の焼却温度や塩素濃度等はほとんど明らかにされていない。

そこで本研究では、無機塩素化合物がダイオキシン類の生成に与える影響を明らかにするために、高濃度の無機塩素化合物を含む木材を人工的に作り出して焼却を行い、生成したダイオキシン類の分析を行った。

イ 研究方法

1 試験材料

海水貯木材に相当する高濃度の無機塩素が含まれる木材は、スギチップ（約30×30×5 mm）に塩化アンモニウム水溶液を加えた後、室温下で風乾させることにより調製した。塩化アンモニウム添加量は、0.1%（Cl換算）であり、このスギ材20kgを焼却用試験材料とした。天然材に含まれる塩素濃度には、樹種や樹木の生育環境により差があると考えられる。スギの場合では、25～450 ppmであることが報告されており、今回用いた材は0.1%（1000 ppm）であるために、通常の天然材の2～40倍程度の塩素が含まれたと考えられた。

2 焼却試験

焼却には、森林総合研究所所有の実証試験炉を用いた（表1-1）。焼却炉内の温度条件は表1-2に示したとおりであり、焼却炉中の4カ所において、焼却中に発生した排ガスのサンプリングを行い（図1-1）、回収した排ガスに含まれるダイオキシン類およびコプラナーPCBの分析を行った。排ガスの分析は、総理府令第67号で定められた方法（平成11年12月27日）、JIS K 0311：1999「排ガス中のダイオキシン類及びコプラナーPCBの測定方法」に基づいて行った。

ウ 結果

焼却により生じた排ガス中のダイオキシン類濃度は、一次燃焼室出口は他の場所を大きく上回る数値を示したが、それ以外の場所では極めて低い値であった（表1-3）。一般的には、焼却時の

燃焼温度は 800℃以上が好ましいとされているが、今回の実験における一次燃焼室の焼却温度は 600～650℃であり、800℃を大きく下回る温度であった。このために、一次燃焼室出口におけるダイオキシン類の生成量がやや多かったと考えられた。しかし、二次燃焼室の焼却温度は 800～850℃と十分に高い温度であったために、一次燃焼室で生成したダイオキシン類のほとんどは二次燃焼室で分解され、二次燃焼室以降のサイクロン集塵機出口、冷却装置出口、バグフィルタ出口では、ダイオキシン類濃度は極めて低かったと考えられた。自然環境に放出される直前であるバグフィルタ出口におけるダイオキシン類濃度は、ダイオキシン類毒性等量 (TEQ) で表すと 0.031 という極めて低い値であり、自然環境に影響を与えるレベルではなかった。

産業廃棄物焼却施設には、排ガス中のダイオキシン類濃度に一定の規制値が定められている (表 1-4)。規制値は、焼却炉の規模や建設された時期により異なるが、今回の実験で用いた焼却炉は、焼却室の処理能力が 2t/h 未満の新設炉の基準に該当する。したがって、本焼却炉の環境規制値は、5ng-TEQ/m³N である。

エ 考察

焼却温度が 600～650℃であった一次燃焼室では、ダイオキシン類の生成がやや多かった一方で、800℃以上で焼却が行われた二次燃焼室以降では、ダイオキシン類の検出量はごくわずかであった。これは、一次燃焼の過程でいくらかダイオキシン類が生成したものの、二次燃焼によりこのほとんどが分解されたためと考えられた。ダイオキシン類の生成を抑制することのできる焼却温度は、一般には 800℃以上であると考えられているが、今回の実験より、1000ppm という非常に高い濃度で無機塩素化合物が含まれる木材の場合でも、800℃以上で焼却を行えば、ダイオキシン類の生成量を問題のないレベルにまで抑えられることが確認された。

今回の実験で用いた焼却炉の環境規制値は 5ng-TEQ/m³N であるために、一次燃焼室出口で測定された 1.4ng-TEQ/m³N の値は、環境規制値を上回る数値ではない。しかし木材は、プラスチック等に比べ熱伝導性が低く水分もある程度含まれるために、焼却される木材の状態によっては、もう少し多量のダイオキシン類が生成する可能性がある。このために安全性の点から、焼却は 800℃以上で行うことが望ましいと言える。また本焼却炉のように、二段の燃焼室を備えた焼却炉では、初段の焼却が十分に進まなかった場合でも、後段の焼却がその点を補うことができるために、安全性が大幅に増す。

以上の点より、二段の燃焼室を備えた焼却炉を使用し、800℃以上の高温で焼却を行えば、高濃度の無機塩素化合物が含まれる木材の焼却を行っても、規制値を超えるダイオキシン類が生成することはほとんどないと考えられた。

オ 今後の問題点

木材は、プラスチック等に比べると、水分を多く含みさらに熱伝導性も低いために完全燃焼させることが難しい素材である。このために、焼却される木材の状態 (形、大きさ、含水率) により、ダイオキシン類の生成量が変化する可能性がある。今後は、木材の状態の違いが、ダイオキシン類の生成にどの程度影響を与えるかを詳細に検討する必要がある。

カ 要約

海水貯木等により、高濃度の無機塩素化合物が含まれる木材を焼却した場合には、多量のダイオキシン類が生成する可能性がある。本研究では、無機塩素化合物がダイオキシン類の生成に与える影響を明らかにするために、高濃度の無機塩素化合物が含まれる木材を人工的に作り焼却を行い、生成したダイオキシン類の分析を行った。

この結果、焼却により生じた排ガス中のダイオキシン濃度は、焼却温度がやや低い 600～650℃であった一次燃焼室出口ではやや高い値を示したが、焼却温度が十分な高さの 800～850℃であった二次燃焼室以降では、極めて低い値しか示さなかった。したがって、1000ppm 程度の高い濃度で無機塩素化合物が含まれる木材であっても、800℃以上で焼却を行えば、ダイオキシン類の生成量を問題のないレベルにまで抑えられることが確認された。

二段の燃焼室を備えた焼却炉を使用し、800℃以上の高温で焼却を行えば、高濃度の無機塩素化合物が含まれる木材の焼却を行っても、規制値を超えるダイオキシン類が生成することはほとんどないと考えられた。

キ 引用文献

- 1) 安原昭夫、形見武男、橋本俊次、中宮邦近（2002. 12）産業廃棄物の焼却処理に伴うダイオキシン類の発生挙動解明と抑制技術の開発に関する研究，第二回廃棄物処理科学研究発表会要旨，テーマ番号 16

（河村文郎、池田努、細谷修二）

表 1-1. 焼却炉データ

形式	連続投入式
火床面積	0.48 m ²
一次燃焼室容積	0.90 m ³
二次燃焼室容積	0.93 m ³
焼却能力	20 kg/hour

表 1-2. 焼却炉内温度条件

	温度 (°C)
一次燃焼室	600 ～ 650
二次燃焼室	800 ～ 850
サイクロン集塵機出口排ガス	742
冷却装置出口排ガス	128
バグフィルタ出口排ガス	88

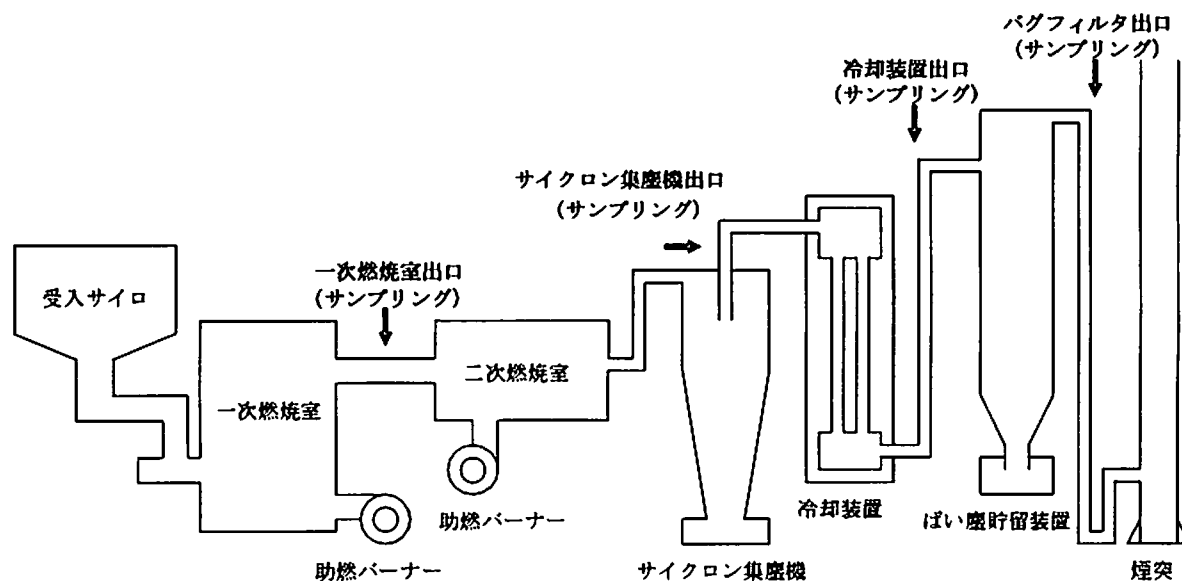


図 1-1. 実証試験炉フロー図および排ガスサンプリング箇所

表 1-3. 排ガス中のダイオキシン類濃度

ダイオキシン類毒性等量 (TEQ)	
(ng-TEQ/m ³ N)	
一次燃焼室出口	1.4
サイクロン集塵機出口	0.008
冷却装置出口	0.038
バグフィルタ出口	0.031

表 1-4. 産業廃棄物焼却施設規制値

焼却室の処理能力	新設炉の基準 (H9.12.1施行)	既設炉の基準	
		(H10.12.1～H14.11.30)	(H14.12.1以降)
4t/h 以上	0.1ng-TEQ/m ³ N	80ng-TEQ/m ³ N	1ng-TEQ/m ³ N
2t/h 以上 4t/h 未満	1ng-TEQ/m ³ N	80ng-TEQ/m ³ N	5ng-TEQ/m ³ N
2t/h 未満	5ng-TEQ/m ³ N	80ng-TEQ/m ³ N	10ng-TEQ/m ³ N

第2章 木材保存剤・接着剤等の有機化学物質が含まれる木材の

焼却時におけるダイオキシン類生成実態解明

ア 研究目的

焼却によりダイオキシン類が生成するためには、ダイオキシン骨格の供給源となる有機化合物の他に、塩素源が必要である。天然木の場合には、塩素源となり得る無機・有機塩素化合物の含有量が少ないために、ダイオキシン類が生成したとしても極めて微量であり、自然環境に対するダメージを心配する必要はほとんどない。しかし木材保存剤や接着剤等の化学物質が含まれる建築解体材の場合には、ダイオキシン類生成のために十分な量の塩素源が存在すると推定される場合がある。建築解体材の焼却によりダイオキシン類が生成したことを報告した例はあるものの¹⁾、非常に数が少なく、またどのような種類の化学物質がどの程度ダイオキシン類の生成に寄与するかについては、これまでほとんど明らかにされていない。

本研究では、保存剤や接着剤等の木材産業で使用される化学物質が、どの程度ダイオキシン類の生成に関与するかを明らかにすることを目的とし、それぞれの化学物質が含まれる試験片を作成し800℃で焼却を行った後、排ガス中に含まれるダイオキシン類の分析を行った。

イ 研究方法

1 試験材料

1-1 木材保存剤

市販の木材保存剤を使用した。ラワン板(310×310×2.5 mm)の両面に薬剤を塗布し、室温下で乾燥させた。この処理を二度行った。板を小片(50×10×2.5 mm)に切断した後、約10gを焼却試験に用いた(表2-1)。

1-2 木材塗装剤

市販の木材塗装剤を使用した。ラワン板(310×310×2.5 mm)の両面に薬剤を塗布し、室温下で乾燥させた。この処理を三度行った。板を小片(50×10×2.5 mm)に切断した後、約10gを焼却試験に用いた。

1-3 木材接着剤

市販の木材接着剤を使用した。ラワン板(310×310×2.5 mm)を用いて三層合板を作成し、合板を小片(50×10×2.5 mm)に切断した後、約10gを焼却試験に用いた。

1-4 比較用試験体

上記試験材料との比較のために、薬剤および接着剤を加えないラワン板と、ポリ塩化ビニルそれぞれについて、同様の焼却試験を行った。

2 焼却試験

小型燃焼試験装置を用いて800℃で焼却を行い、焼却過程で発生した全ての排ガスを回収し、この中に含まれたダイオキシン類(PCDFs、PCDDs)およびコプラナーPCB類(Co-PCBs)(図2-1)を、総理府例第67号で定められた方法に基づき測定した。

ウ 結果

ダイオキシン類およびコプラナーPCB 類の毒性を示す毒性等量 (TEQ) の単位として通常 (ng-TEQ) が用いられるが、本研究では小さい値に対応するために (pg-TEQ、1ng=1,000pg) を用いた (表 2-2)。

木材保存剤の焼却試験の結果、毒性等量は、0.003、0.7、1.9 (pg-TEQ/g) と大変小さい値であった。また木材塗装剤においても、コプラナーPCB 類の排出量はやや多かったものの毒性等量は、1.6、5.5 (pg-TEQ/g) と小さい値であり、自然環境にほとんど影響を与えないと考えられるレベルであった。

一方、接着剤が含まれる合板の焼却試験では、水溶性フェノール樹脂接着剤の 0.17 (pg-TEQ/g) に対し、ユリア樹脂接着剤では 22 (pg-TEQ/g)、メラミンユリア樹脂接着剤では 200 (pg-TEQ/g) とやや高い値を示した。ユリア樹脂接着剤およびメラミンユリア樹脂接着剤では硬化剤として塩化アンモニウムが使用されるが、この塩化アンモニウム中に含まれる塩素がダイオキシン類生成の増加に寄与したと考えられた。しかし、最も高い値を示したメラミンユリア樹脂接着剤であっても、石油系プラスチック材料であるポリ塩化ビニルの 47,000 (pg-TEQ/g) と比較してはるかに小さい値であった。

エ 考察

建築解体材の焼却により高濃度のダイオキシン類が検出された例では、木材保存剤に含まれるペンタクロロフェノール (PCP) やクロルデン等の有機塩素化合物が、ダイオキシン類の生成に深く関与したことが推定される。有機塩素化合物は、ダイオキシン類の生成過程における塩素源として働くことが十分に考えられる。今回の焼却試験では、試験を行った木材保存剤三検体全てにおいて、排出されたダイオキシン類およびコプラナーPCB 類は少なく毒性等量も大変低い値であったが、この原因は、現在市販されている木材保存剤は、以前の物と比べて、ダイオキシン類の生成に深く関与する有機塩素化合物の含有量が大幅に低下しているためであると考えられた。法の改正により、PCP やクロルデン等多くの有機塩素化合物の使用および販売が禁止されたが、この影響が大きいと推定された。

木材塗装剤では、コプラナーPCB 類の生成量がやや多かったが、ほとんどが毒性値の低い異性体であったために毒性等量は低い値であった。塗装剤中のどの成分がコプラナーPCB 類の生成に関与したかについては不明であった。

木材用接着剤では、接着剤の種類により結果に差が生じた。水溶性フェノール接着剤では、ダイオキシン類の生成量は大変低い値であったが、ユリアおよびメラミンユリア接着剤では、それよりもやや高い値を示した。これは、硬化剤として使用された塩化アンモニウムが原因であると考えられた。塩化アンモニウムや塩化ナトリウム等の無機塩素化合物がダイオキシン類の生成における塩素源として深く関与することが知られている。しかし、最も高い値を示したメラミンユリア樹脂接着剤であっても、石油系プラスチック材料であるポリ塩化ビニルの 47,000 (pg-TEQ/g) と比較してはるかに小さい値であり、環境規制値を超える値ではないと考えられた。

以上の結果より、800℃以上の高温で、木材の完全燃焼が進む状態で焼却されるのであれば、現在市販されている木材保存剤、木材塗装剤、木材用接着剤等の化学物質が含まれる木材を焼却しても、環境基準値を超えるダイオキシン類は発生しないと考えられた。

オ 今後の問題点

木材保存剤、木材塗装剤および接着剤には非常に多くの種類が存在するために、今回は各々における代表的な製品を選び出し焼却試験を行った。本来は全ての製品に対して分析を行うことが好ましいが、ダイオキシン分析は大変複雑であり、高額な費用と長期の分析日数を要するために、分析数を増やすことが難しい。このために、もう少し簡易的な手法で、ダイオキシン類生成への関与を明らかにできる手法を開発する必要がある。

カ 要約

木材保存剤や接着剤等の化学物質が含まれる建築解体材の場合には、ダイオキシン類生成のために十分な量の塩素源が存在すると推定される場合があり、実際に建築解体材の焼却によりダイオキシン類が生成したことを報告した例もある。しかし報告例は非常に少なく、またどのような種類の化学物質がどの程度ダイオキシン類の生成に寄与するかについては、これまでほとんど明らかにされていない。本研究では、保存剤や接着剤等の木材産業で使用される化学物質が、どの程度ダイオキシン類の生成に関与するかを明らかにすることを目的とした。

今回の焼却試験では、試験を行った木材保存剤三検体全てにおいて、排出されたダイオキシン類およびコプラナーPCB類は少なく毒性等量も大変低い値であったが、この原因は、現在市販されている木材保存剤は、以前の物と比べて、ダイオキシン類の生成に深く関与する有機塩素化合物の含有量が大幅に低下しているためであると考えられた。

木材塗装剤では、コプラナーPCB類の生成量がやや多かったが、ほとんどが毒性値の低い異性体であったために毒性等量は低い値であった。塗装剤中のどの成分がコプラナーPCB類の生成に関与したかについては不明であった。

木材用接着剤では、接着剤の種類により結果に差が生じ、水溶性フェノール接着剤では、ダイオキシン類の生成量は大変低い値であったが、ユリアおよびメラミンユリア接着剤では、それよりもやや高い値を示した。これは、硬化剤として使用された塩化アンモニウムが原因であると考えられた。しかし、最も高い値を示したメラミンユリア樹脂接着剤であっても、石油系プラスチック材料であるポリ塩化ビニルの47,000 (pg-TEQ/g)と比較してはるかに小さい値であり、環境規制値を超える値ではないと考えられた。

以上の結果より、800℃以上の高温で、木材の完全燃焼が進む状態で焼却されるのであれば、現在市販されている木材保存剤、木材塗装剤、木材用接着剤等の化学物質が含まれる木材を焼却しても、環境基準値を超えるダイオキシン類は発生しないと考えられた。

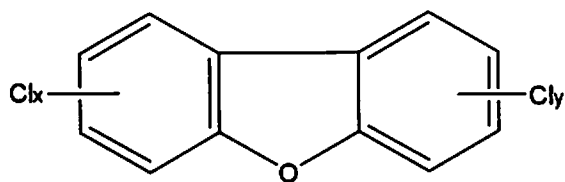
キ 引用文献

- 1) 安原昭夫、形見武男、橋本俊次、中宮邦近 (2002. 12) 産業廃棄物の焼却処理に伴うダイオキシン類の発生挙動解明と抑制技術の開発に関する研究, 第二回廃棄物処理科学研究発表会要旨, テーマ番号 16

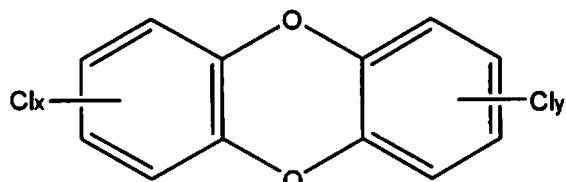
(池田努、河村文郎)

表 2-1. 焼却試験に用いた試験材料

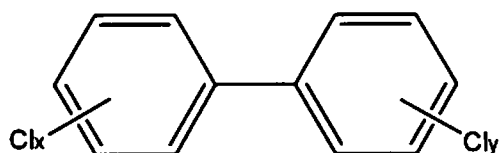
	燃焼試験サンプル総重量 (g)	薬剤・接着剤量 (g)
保存剤① (防腐剤・防虫剤・防かび剤混合タイプ)	11.8	1.8
保存剤② (防腐剤・防虫剤・防かび剤混合タイプ)	11.5	1.5
保存剤③ (防腐剤のみ)	12.3	2.3
塗装剤① (ウレタン樹脂系)	11.3	1.3
塗装剤② (アルキド樹脂系)	11.4	1.4
接着剤① (水溶性フェノール、特類F☆☆☆☆合板用)	10.3	1.3
接着剤② (メラミンユリア、一類F☆☆☆☆合板用)	10.0	1.3
接着剤③ (ユリア、二類F☆☆☆☆合板用)	10.3	1.4
ラワン板	10.0	-
ポリ塩化ビニル (試薬として市販されている物)	10.0	10.0



ポリクロロジベンゾフラン
(PCDFs)



ポリクロロジベンゾ-*p*-ダイオキシン
(PCDDs)



ポリクロロビフェニル
(PCBs)

図 2-1. ダイオキシン類およびコプラナーPCB 類の化学構造

表 2-2. 燃焼排ガス中に含まれたダイオキシン類およびコプラナーPCB 類量

	PCDFs	PCDDs (pg/g)	Co-PCBs	毒性等量 (TEQ) (pg-TEQ/g) ¹
保存剤①	17.1	8.8	39.7	0.70
保存剤②	21.7	8.9	46.2	1.9
保存剤③	2.6	5.0	29.1	0.003
塗装剤①	13.2	55.6	4,461	5.5
塗装剤②	9.9	1.6	820	1.6
接着剤①	8.4	5.5	24.6	0.17
接着剤②	78.0	144	62.6	22
接着剤③	2,143	324	24.6	200
ラワン材 (ブランク)	13.0	24.7	23.1	3.8
ポリ塩化ビニル	448,600	76,400	63,100	47,000

¹ 燃焼試験サンプルあたりの毒性等量

ポストゲノムとしてのポプラ
完全長 cDNA ライブラリ
ーコレクションの整備

研究課題：ポストゲノムとしてのポプラ完全長cDNAライブラリーコレクションの整備

目

次

研究の要約 ----- 106

ポストゲノムとしてのポプラ完全長 cDNA ライブラリーコレクションの整備 ----- 111

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

平成 15～17 年（3 か年）

予算区分：運営交付金（交付金プロジェクトⅡ）

II 主任研究者

主査：生物工学研究領域長 篠原健司

取りまとめ責任者： 篠原健司

III 研究場所

森林総合研究所・本所

IV 研究目的

生物のゲノム情報は、基礎生物学の分野にとどまらず、産業や地球環境問題といった応用分野においても革命的な効果をもたらすと予想されている。しかし、遺伝子構造や機能の確定にはゲノム DNA 配列の情報だけでは不完全であり、ゲノム上の各遺伝子から発現する mRNA（cDNA）との比較が必要である。日本では、世界に先駆けて、ヒト、マウス、シロイヌナズナ等の完全長 cDNA ライブラリーの作製と解析が行われている。一方、樹木に関しては、米国を中心とする国際コンソーシアムにより、2003 年末にポプラゲノム DNA の概要解読が終了すると言われている。同計画に関する森林総合研究所への問い合わせや国際貢献への要望も多数寄せられている。本研究課題は、ポプラゲノム解読後に到来する「ポストゲノム時代」を見据えた緊急的なバイオリソースの整備と、本研究所による当該分野への国際貢献を目的とする。具体的には、ポプラの完全長 cDNA 及びその配列情報を世界へ提供するため、完全長 cDNA ライブラリーの作製と多数の cDNA の構造解析を実施する。

V 研究方法

（1）ポプラ RNA の調製

ポプラ（セイヨウハコヤナギ、*Populus nigra* L. var. *italica* Koehne）の本葉に環境ストレス処理を行い、全 RNA を調製する。

（2）ポプラ完全長 cDNA ライブラリーの作製

mRNA を精製し、完全長鎖に富む cDNA ライブラリーを作製する。

（3）ポプラ完全長 cDNA の末端塩基配列の解析と機能分類

ポプラ完全長 cDNA クローンの末端塩基配列を解析し、各種遺伝子を機能分類する。

（4）環境ストレス応答性関連遺伝子の解析

ポプラ完全長 cDNA リソースに含まれる環境ストレス応答性関連遺伝子の発現特性を解析する。

（5）ポプラ完全長 cDNA の末端塩基配列情報のデータベース化と完全長 cDNA クローンの公的配布システムの構築

ポプラ完全長 cDNA の末端塩基配列情報を公的データベースへ登録する。また、ポプラ完

全長cDNAライブラリーに含まれるcDNAクローンの公的配布システムを構築する。さらに、インターフェイスに優れたデータベースの構築を目指す。

VI 研究結果

(研究計画表)

研 究 課 題	研究期間	研究分担
ポストゲノムとしてのポプラ完全長cDNAライブラリーコレクションの整備	15～17	生物学 形質転換研、樹木分子生物研

ポプラ完全長 cDNA クローンの末端塩基配列情報に基づき、各種遺伝子を機能分類した。最終的に、様々な機能を持つタンパク質をコードする 4,522 種の遺伝子を同定した。また、これらポプラ完全長 cDNA に含まれる環境ストレス応答性関連遺伝子の発現特性を解析した。さらに、ポプラ完全長 cDNA の塩基配列情報を公的データベースに公開するとともに、国際ポプラゲノムコンソシアムへもそれらの情報を提供し、理化学研究所バイオリソースセンターに寄託して完全長 cDNA クローンの配布を開始した。

VII 今後の問題点

樹木のポストゲノム研究に対応したリソース整備のため、ポプラ完全長cDNAクローンの末端塩基配列解析を更に推進する必要がある。平成18年度開始の交付金プロジェクト「ポプラ等樹木の完全長cDNA塩基配列情報の充実」では、均一化したポプラ完全長cDNAライブラリーを用い、完全長cDNAを10,000種以上単離する予定である。一方、ポプラ完全長cDNAの末端塩基配列情報を公的データベースへ登録し公表したものの、利便性の高いデータベースを構築できなかった。今後、国内外の専門家と協力して、インターフェイスに優れたデータベース構築を目指す予定である。

VII 研究発表

(1) 論文・総説

- 1) Urano K., Yoshida Y., Nanjo T., Ito T., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. (2003) *Arabidopsis* stress-inducible gene for arginine decarboxylase AtADC2 is required for accumulation of putrescine in salt tolerance. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 313: 369-375.
- 2) Urano K., Yoshida Y., Nanjo T., Igarashi Y., Seki M., Sekiguchi F., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. (2003) Characterization of *Arabidopsis* genes involved in biosynthesis of polyamines in abiotic stress responses and developmental stages. *Plant Cell Environ.* 26: 1917-1926.
- 3) 楠城時彦 (2003)第114回日本林学会大会短説：生理部門。林業技術 No.734: 15.
- 4) 楠城時彦 (2003)加速し始めた樹木ゲノム研究。STAFF newsletter 14: 7.
- 5) Nanjo T., Fujita M., Seki M., Kato T., Tabata S., Shinozaki K. (2003) Toxicity of free proline revealed in an *Arabidopsis* T-DNA-tagged mutant deficient in proline dehydrogenase. *Plant Cell Physiol.* 44: 541-548.

- 6) Oono Y., Seki M., Nanjo T., Narusaka M., Fujita M., Satoh R., Satou M., Sakurai T., Ishida J., Akiyama K., Iida K., Maruyama K., Satoh S., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. (2003) Monitoring expression profiles of *Arabidopsis* gene expression during rehydration process after dehydration using ca.7000 full-length cDNA microarray. *Plant J.* 34: 868-887.
 - 7) 楠城時彦・篠崎一雄・篠原健司 (2004)ゲノム科学的手法を用いた樹木の環境ストレス応答機構の解明. 日本林学会誌 86: 69-73.
 - 8) 楠城時彦 (2004) ポストゲノム時代の樹木研究. 林木の育種 211: 35-37.
 - 9) Nanjo, T., Futamura, N., Nishiguchi, M., Igasaki, T., Shinozaki, K., Shinohara, K. (2004) Characterization of full-length enriched expressed sequence tags of stress-treated poplar leaves. *Plant Cell Physiol.* 45: 1738-1748.
- (2) 学会発表
- 1) 楠城時彦・二村典宏・西口 満・伊ヶ崎知弘・篠崎一雄・篠原健司 (2004) ポプラの環境ストレス関連遺伝子群の解析. 第115回日本林学会大会学術講演集 p.204.
 - 2) 楠城時彦・二村典宏・西口 満・伊ヶ崎知弘・篠崎一雄・篠原健司 (2004) ポプラの環境ストレス関連ESTsの解析. 第45回日本植物生理学会年会講演要旨集 p. 278.
 - 3) 浦野 薫・吉羽洋周・楠城時彦・伊藤卓也・篠崎和子・篠崎一雄 (2004) 乾燥, 塩ストレス応答におけるプトレスシンとその合成に関わるAtADC2遺伝子の解析. 第45回日本植物生理学会年会講演要旨集 p. 194.
 - 4) 藤原すみれ・小田 篤・田島武臣・Martin Calvino・大越友里・黒森 崇・平山隆志・楠城時彦・篠崎一雄・鎌田 博・溝口 剛 (2004) シロイヌナズナの概日リズム制御と光周性花成. 第45回日本植物生理学会年会講演要旨集 p. 91.
 - 5) 森永紗也佳・佐々木慎弥・楠城時彦・篠原健司・堤 祐司・近藤隆一郎 (2004) ポプラペルオキシダーゼ遺伝子の単離とそれらのストレス誘導発現解析. 第49回リグニン討論会講演集 p. 25-28.
 - 6) 森永紗也佳・楠城時彦・篠原健司・堤 祐司・近藤隆一郎 (2005) ポプラペルオキシダーゼ遺伝子のストレス誘導性および部位特異性について. 第55回日本木材学会年会講演要旨集 p.122.
 - 7) 楠城時彦・二村典宏・西口 満・春日美江・篠崎和子・篠崎一雄・篠原健司 (2005) ポプラにおけるERF/AP2ドメイン転写因子の解析と環境耐性樹木作出への応用. 第116回日本林学会大会学術講演集 p.3 A21
 - 8) 堤 祐司・森永紗也佳・楠城時彦・篠原健司・近藤隆一郎 (2005) ストレス応答におけるポプラペルオキシダーゼ遺伝子の発現誘導および部位特異性. 第46回日本植物生理学会講演要旨集 p.133
 - 9) Shinohara K. (2005) Growth control of woody plants through genetic engineering. *The International Forestry Review* 7: 49
 - 10) Tsutsumi, Y., Morinaga, S., Sasaki, S., Etho, Y., Nanjo, T., Shinohara, K., Kondo, R. (2005) The peroxidase multigene family in poplar: lignification, stress-induction, and organspecific expression. IAWPS2005 International Symposium on Wood Science and Technology 1: 321-322.
 - 11) 西口 満・楠城時彦 (2006) ポプラのDNA修復遺伝子の発現様式. 第47回日本植物生理学会年会 日本植物生理学会年会要旨集 p.155
 - 12) 櫻井哲也・楠城時彦・十時 泰・秋山顕治・湯口雅大・豊田 敦・篠原健司・斉藤和季・篠崎一雄 (2006) ポプラ完全長cDNAデータベースの構築. 第47回日本植物生理学会年会要旨集 p.163
 - 13) 楠城時彦・櫻井哲也・十時 泰・豊田 敦・西口 満・二村典宏・伊ヶ崎知弘・角 友

- 6) Oono Y., Seki M., Nanjo T., Narusaka M., Fujita M., Satoh R., Satou M., Sakurai T., Ishida J., Akiyama K., Iida K., Maruyama K., Satoh S., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K. (2003) Monitoring expression profiles of *Arabidopsis* gene expression during rehydration process after dehydration using ca.7000 full-length cDNA microarray. *Plant J.* 34: 868-887.
- 7) 楠城時彦・篠崎一雄・篠原健司 (2004)ゲノム科学的手法を用いた樹木の環境ストレス応答機構の解明. 日本林学会誌 86: 69-73.
- 8) 楠城時彦 (2004) ポストゲノム時代の樹木研究. 林木の育種 211: 35-37.
- 9) Nanjo, T., Futamura, N., Nishiguchi, M., Igasaki, T., Shinozaki, K., Shinohara, K. (2004) Characterization of full-length enriched expressed sequence tags of stress-treated poplar leaves. *Plant Cell Physiol.* 45: 1738-1748.

(2) 学会発表

- 1) 楠城時彦・二村典宏・西口 満・伊ヶ崎知弘・篠崎一雄・篠原健司 (2004) ポプラの環境ストレス関連遺伝子群の解析. 第115回日本林学会大会学術講演集 p.204.
- 2) 楠城時彦・二村典宏・西口 満・伊ヶ崎知弘・篠崎一雄・篠原健司 (2004) ポプラの環境ストレス関連ESTsの解析. 第45回日本植物生理学会年会講演要旨集 p. 278.
- 3) 浦野 薫・吉羽洋周・楠城時彦・伊藤卓也・篠崎和子・篠崎一雄 (2004) 乾燥, 塩ストレス応答におけるプトレスシンとその合成に関わるAtADC2遺伝子の解析. 第45回日本植物生理学会年会講演要旨集 p. 194.
- 4) 藤原すみれ・小田 篤・田島武臣・Martin Calvino・大越友里・黒森 崇・平山隆志・楠城時彦・篠崎一雄・鎌田 博・溝口 剛 (2004) シロイヌナズナの概日リズム制御と光周性花成. 第45回日本植物生理学会年会講演要旨集 p. 91.
- 5) 森永紗也佳・佐々木慎弥・楠城時彦・篠原健司・堤 祐司・近藤隆一郎 (2004) ポプラペルオキシダーゼ遺伝子の単離とそれらのストレス誘導発現解析. 第49回リグニン討論会講演集 p. 25-28.
- 6) 森永紗也佳・楠城時彦・篠原健司・堤 祐司・近藤隆一郎 (2005) ポプラペルオキシダーゼ遺伝子のストレス誘導性および部位特異性について. 第55回日本木材学会年会講演要旨集 p.122.
- 7) 楠城時彦・二村典宏・西口 満・春日美江・篠崎和子・篠崎一雄・篠原健司 (2005) ポプラにおけるERF/AP2ドメイン転写因子の解析と環境耐性樹木作出への応用. 第116回日本林学会大会学術講演集 p.3 A21
- 8) 堤 祐司・森永紗也佳・楠城時彦・篠原健司・近藤隆一郎 (2005) ストレス応答におけるポプラペルオキシダーゼ遺伝子の発現誘導および部位特異性. 第46回日本植物生理学会講演要旨集 p.133
- 9) Shinohara K. (2005) Growth control of woody plants through genetic engineering. *The International Forestry Review* 7: 49
- 10) Tsutsumi, Y., Morinaga, S., Sasaki, S., Etho, Y., Nanjo, T., Shinohara, K., Kondo, R. (2005) The peroxidase multigene family in poplar: lignification, stress-induction, and organspecific expression. IAWPS2005 International Symposium on Wood Science and Technology 1: 321-322.
- 11) 西口 満・楠城時彦 (2006) ポプラのDNA修復遺伝子の発現様式. 第47回日本植物生理学会年会 日本植物生理学会年会要旨集 p.155
- 12) 櫻井哲也・楠城時彦・十時 泰・秋山顕治・湯口雅大・豊田 敦・篠原健司・斉藤和季・篠崎一雄 (2006) ポプラ完全長cDNAデータベースの構築. 第47回日本植物生理学会年会要旨集 p.163
- 13) 楠城時彦・櫻井哲也・十時 泰・豊田 敦・西口 満・二村典宏・伊ヶ崎知弘・角 友

之・関原明・榊 佳之・篠崎一雄・篠原健司（2006）ポプラ完全長cDNAの大規模収集.
第47回日本植物生理学会年会要旨 p.325

（3）その他

- 1）ポプラの完全長cDNA -森林総研が大規模収集- 日刊工業新聞 2004年12月21日付
- 2）ポプラの完全長cDNAライブラリー作製 -森林総研約4500種を同定- 化学工業日報
2004年12月21日付
- 3）森林総合研究所, ポプラ完全長cDNAの大規模収集に成功 NIKKEI NET（日経新聞オンライン
配信） 2004年12月20日付

IX 研究担当者

課題担当者：楠城時彦（形質転換研究室）

研究協力者：西口 満・二村典宏・伊ヶ崎知弘（樹木分子生物研究室）

共同研究者：篠崎一雄（理研・植物科学研究センター）

ポストゲノムとしてのポプラ完全長 cDNA ライブラリー

コレクションの整備

ア 研究目的

ヒト、シロイヌナズナ、イネなど様々な生物のゲノム（全遺伝子）研究プロジェクトが活発に推進されている。これらゲノム情報がもたらす効果は、基礎生物学の分野にとどまらず、産業や地球環境問題といった応用分野においても革命的な影響を及ぼすと予想されている。しかし、遺伝子構造や機能の確定にはゲノム DNA 配列の情報だけでは不完全であり、ゲノム上の各遺伝子から発現する mRNA（cDNA）との比較が必要である。日本では、世界に先駆けて、ヒト、マウス、シロイヌナズナなどの完全長 cDNA ライブラリーの作製と解析が行われている（図 1）。一方、樹木に関しては、米国を中心とする国際コンソーシアムにより、2003 年末にポプラゲノム DNA の概要解読が終了すると言われている。同計画に関する森林総合研究所への問い合わせや国際貢献への要望も多数寄せられている。本研究課題は、ポプラゲノム解読後に到来する「ポストゲノム時代」を見据えた緊急的なバイオリソースの整備と、本研究所による当該分野への国際貢献を目的とする。具体的には、ポプラの完全長 cDNA 及びその配列情報を世界へ提供するため、理化学研究所との共同研究により、完全長 cDNA ライブラリーの作製と多数の cDNA の構造解析を実施する。

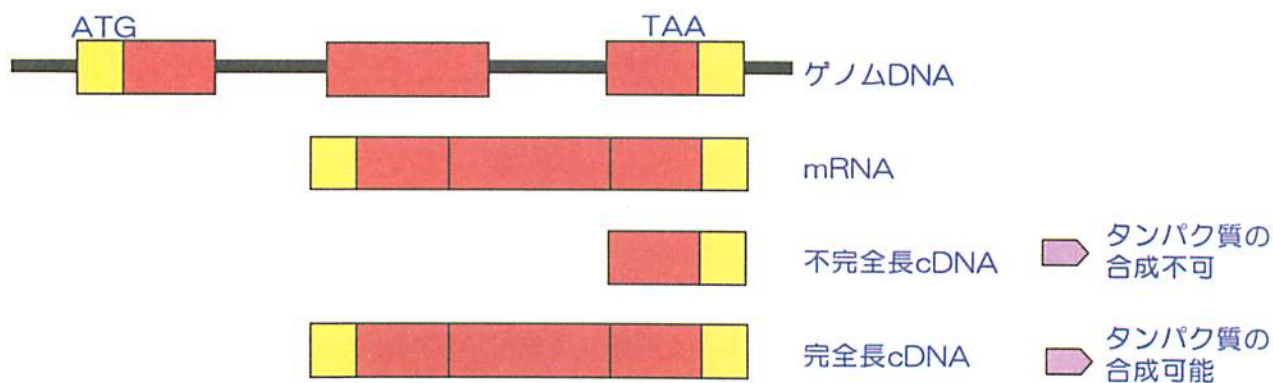


図 1. 完全長 cDNA の利点

完全長 cDNA は、完全長のタンパク質の合成、遺伝子のプロモーター領域の探索、ゲノムのアノテーションに有効利用できる。

イ 研究方法

(1) ポプラ全RNAの調製

ポプラ（セイヨウハコヤナギ、*Populus nigra* L. var. *italica* Koehne）の雌性個体由来の組織培養体本葉に環境ストレス処理（乾燥・高塩濃度・低温・高温・ABA・H₂O₂）を行った後、

Trizol試薬を用いて全RNAを調製する。また、RNA調製法を改良し、野外で生育したポプラの様々な器官・組織から高品質のRNAを調整する。

(2) ポプラ完全長cDNAライブラリーの作製

ポプラ全RNAからmRNAを精製し、オリゴキャップ法により完全長鎖に富むcDNAライブラリーを作製する。また、ビオチン化キャップトラッパー法を用い、重複の少ない均一化した完全長cDNAライブラリーを作製する。

(3) ポプラ完全長cDNAの末端塩基配列の解析と機能分類

完全長鎖に富む完全長cDNAライブラリーに含まれるcDNAクローンの末端塩基配列を解析する。それらの末端塩基配列情報とシロイヌナズナやイネ等植物のDNAデータベースの情報を比較して、ポプラ遺伝子を分類・同定する。

(4) 環境ストレス応答性関連遺伝子の解析

ポプラ完全長cDNAリソースに含まれる環境ストレス応答性関連遺伝子を用い、環境ストレス処理（乾燥・高塩濃度・低温・高温・ABA・ H_2O_2 ）後の遺伝子発現の変化を解析する。

(5) ポプラ完全長cDNAの末端塩基配列情報のデータベース化と完全長cDNAクローンの公的配布システムの構築

ポプラ完全長cDNAの末端塩基配列情報を公的データベースへ登録する。また、ポプラ完全長cDNAライブラリーに含まれるcDNAクローンの公的配布システムを構築する。さらに、インターフェイスに優れたデータベースの構築を目指す。

ウ 結果

(1) ポプラ全RNAの調製

環境ストレス処理したポプラ組織培養体本葉から、Trizol（グアニジンチオシアネート系試薬）を用いて高品質の全RNAを調製した。調製した全RNAは A_{260}/A_{280} 、 A_{260}/A_{230} の吸光度の比も約2前後であり、電気泳動の結果も高品質であることを示している（図2）。また、RNA調製法を改良し、野外で生育したポプラの様々な葉芽、花芽、茎、根等様々な器官や組織から高品質のRNAを調製することにも成功した。

(2) ポプラ完全長cDNAライブラリーの作製

環境ストレス処理を施した葉から調製した全RNAを混合し、mRNAを精製し、オリゴキャップ法により完全長鎖に富むcDNAライブラリーを作製した。無作為に選抜した96種類の完全長cDNAの末端塩基配列を解析したところ、cDNAのインサート率は約80以上、平均インサート長は1.8kb、完全長率は約62%であった。そこで、この完全長cDNAライブラリーを用い、ポプラ完全長cDNAの末端塩基配列の解析と機能分類に用いた。後述するが、完全長cDNAライブラリーにはクローンの重複が多数見られた。そこで、環境ストレス処理をした葉から調

製した全RNAと野外のポプラの様々な葉芽、花芽、茎、根等様々な器官や組織から調製したRNAを混合し、mRNAを精製し、均一化工程を経た後、ビオチン化キャップトラッパー法を用い、重複の少ない均一化した完全長cDNAライブラリーも作製した。

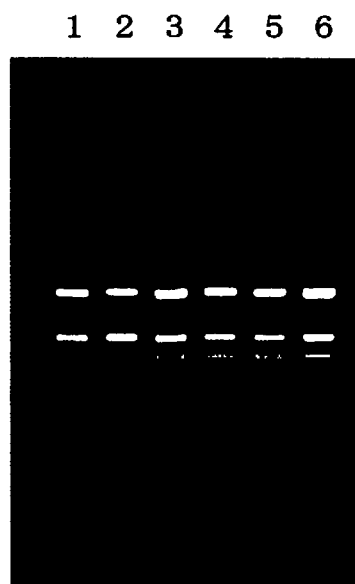


図1. ポプラ全RNAの品質

乾燥（レーン1）、高塩濃度（レーン2）、低温（レーン3）、高温（レーン4）、ABA（レーン5）、 H_2O_2 （レーン6）の環境ストレス処理を施したポプラの葉から全RNAを調製し、変性アガロースゲルの電気泳動を行い、その品質を調べた。

（3）ポプラ完全長cDNAの末端塩基配列の解析と機能分類

ポプラcDNAクローン約30,000個について、5'末端の塩基配列情報を得た。その結果、完全長cDNAライブラリーにはcDNAクローンの重複が多数見られた（表1）。選抜した約7,800個のクローンについて、3'末端の塩基配列情報を得た。それらの末端塩基配列情報とシロイヌナズナやイネ等植物のDNAデータベースの情報を比較して、最終的に4522種類の遺伝子を分類・同定した（図3）。

（4）環境ストレス応答性関連遺伝子の解析

ポプラ完全長cDNAリソースには、多数の環境ストレス応答性遺伝子の相同遺伝子が含まれていた（表2）。代表的な遺伝子を10種類選抜し（表2にリストした10番目までの遺伝子）、環境ストレス処理後1時間、2時間、5時間の遺伝子発現の変化を解析した（図4）。多くの遺伝子は環境ストレス処理後に発現誘導がみられるものの、ある遺伝子(98-i07)の発現は抑制された。また、同一の遺伝子でも環境ストレス処理毎に発現パターンの変化は異なっていた。マスタースイッチとして働くストレス応答性の転写制御因子やペルオキシダーゼをコードする遺伝子群についても、各種環境ストレス処理毎の発現誘導の差異を詳細に解明した。

表 1. 完全長cDNAライブラリー中に重複するcDNAクローンのランキング (30位以内)

ranking	annotation	number of clones (redundancy)
1	sp P12858 G3PA_PEA Glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase A, chloroplast precursor (NADP-dependent glyceraldehydophosphate dehydrogenase subunit A)	1131
2	gb AAK52084.1 peroxidase [Nicotiana tabacum]	1062
3	gb AAM46780.1 AF467803_1 latex plastidic aldolase-like protein [Hevea brasiliensis]	799
4	sp P47916 METK_POPDE S-adenosylmethionine synthetase (Methionine adenosyltransferase) (AdoMet synthetase)	734
5	gb AAD27590.1 AF121261_1 elongation factor 1-alpha 1; EF-1-alpha1 [Lilium longiflorum]	642
6	ref NP_850759.1 fructose-bisphosphate aldolase, putative [Arabidopsis thaliana]	543
7	gb AAC99310.1 CONSTANS-like protein 2 [Malus x domestica]	535
8	ref NP_188317.1 glycosyl hydrolase family 19 (chitinase) [Arabidopsis thaliana]	436
9	gb AAB40396.1 glycolate oxidase [Mesembryanthemum crystallinum]	417
10	gb AAK51153.1 peroxidase [Manihot esculenta]	369
11	gb AAF42979.1 elongation factor 1 alpha [Zea mays]	247
12	emb CAC10208.1 cytosolic malate dehydrogenase [Cicer arietinum]	243
13	sp Q22342 ADT1_GOSHI ADP,ATP carrier protein 1, mitochondrial precursor (ADP/ATP translocase 1) (Adenine nucleotide translocator 1) (ANT 1)	236
14	gb AAG01382.1 AF194174_1 alcohol dehydrogenase 2 [Vitis vinifera]	229
15	db BAA23657.1 EF-1 alpha [Oryza sativa]	221
16	sp Q41249 PORA_CUCSA Protochlorophyllide reductase, chloroplast precursor (PCR) (NADPH-protochlorophyllide oxidoreductase) (POR)	198
17	emb CAC37356.1 putative membrane protein [Solanum tuberosum]	194
18	sp P93836 HPPD_ARATH 4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase (4HPPD) (HPD) (HPPDase)	185
19	gb AAM65162.1 cysteine proteinase RD19A [Arabidopsis thaliana]	181
20	gb AAG61120.1 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activase 1 [Gossypium hirsutum]	175
21	sp P12859 G3PB_PEA Glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase B, chloroplast precursor (NADP-dependent glyceraldehydophosphate dehydrogenase subunit B)	174
22	ref NP_197875.2 CONSTANS B-box zinc finger family protein [Arabidopsis thaliana]	168
23	pir T04121 (S)-2-hydroxy-acid oxidase (EC 1.1.3.15), peroxisomal [Nicotiana tabacum]	162
24	db BAB40143.1 plasma membrane intrinsic protein 2-2 [Pyrus communis]	139
25	emb CAA66667.1 polyubiquitin [Pinus sylvestris]	136
26	gb AAM64770.1 unknown [Arabidopsis thaliana]	133
27	gb AAL69381.1 AF462218_1 putative DEAD/DEAH box helicase [Narcissus pseudonarcissus]	118
28	gb AAF86906.1 AF223358_1 triose phosphate/phosphate translocator precursor [Mesembryanthemum crystallinum]	116
29	gb AAQ74875.1 actin [Trifolium pratense]	107
30	gb AAP80800.1 class VII chitinase precursor [Gossypium hirsutum]	92

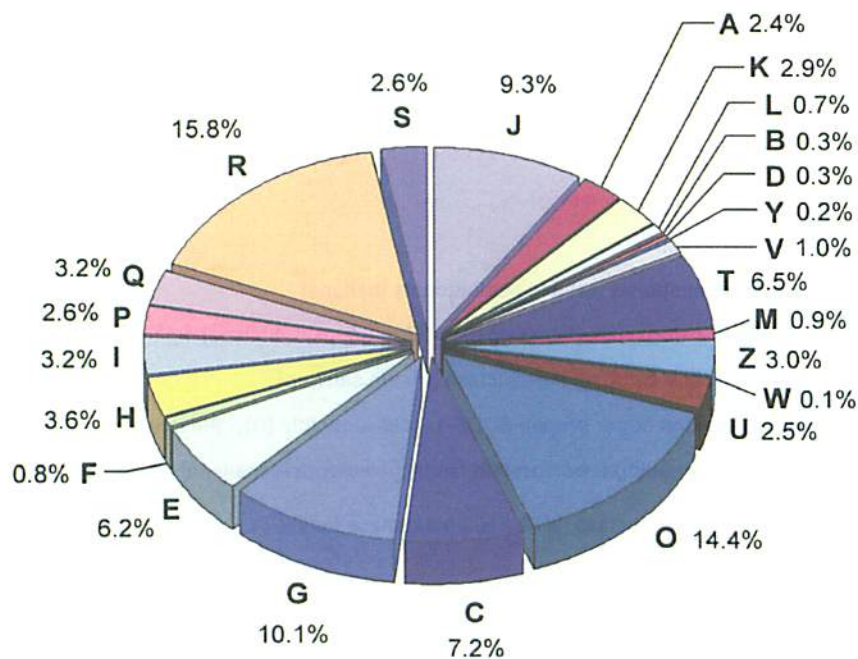


図3. ポプラ完全長 cDNA の機能分類

ポプラ完全長 cDNA をそれぞれの塩基配列がコードするタンパク質の機能によって分類した。
 J: タンパク質の翻訳, A: RNA のプロセッシングと修飾, K: 転写, L: DNA の複製・組換え・修復, B: クロマチンの構造変換, D: 細胞周期・細胞分裂の制御, Y: 核構造, V: 防御機構, T: シグナル伝達, M: 細胞壁・細胞膜の合成, Z: 細胞骨格, W: 細胞外構造, U: 細胞内輸送・分泌, O: タンパク質の翻訳後修飾・代謝, C: エネルギー生産・変換, G: 炭水化物の輸送・代謝, E: アミノ酸の輸送・代謝, F: 核酸の輸送・代謝, H: 補酵素の輸送・代謝, I: 脂質の輸送・代謝, P: 無機イオンの輸送・代謝, Q: 二次代謝産物の合成・輸送, R・S: 不明

表 2. 代表的なポプラの環境ストレス応答性関連遺伝子

annotation	number of clones	clone ID
emb CAB64356.1 alternative oxidase [Populus tremula x Populus tremuloides]	72	10-D11
ref NP_194188.1 mitochondrial carrier protein family [Arabidopsis thaliana]	166	98-i07
gb AAM34773.1 NAM-like protein 10 [Petunia x hybrida]	78	37-E09
No apical meristem (NAM) protein family (RD26) [Arabidopsis thaliana]	5	6-C18
homeobox-leucine zipper protein ATHB-7 [Arabidopsis thaliana]	3	38-K14
gb AAL06547.1 galactinol synthase (AtGolS2) [Arabidopsis thaliana]	6	8-G24
emb CAB90633.1 protein phpsphatase 2C (PP2C) [Fagus sylvatica]	1	68-G16
gb AAK52084.1 peroxidase [Nicotiana tabacum]	1062	54-G19
gi 423821 pir A46295 delta 1-pyrroline-5-carboxylate synthetase - moth bean	1	40-G23
emb CAA66667.1 polyubiquitin [Pinus sylvestris]	136	29-o12
ubiquitin-conjugating enzyme, putative	13	30-G23
ref NP_173670.2 oligopeptide transporter -related [Arabidopsis thaliana]	4	73-K09
gi 15383744 delta-1-pyrroline-5-carboxylate dehydrogenase [Arabidopsis thaliana]	2	75-D03
gi 20851 emb CAA44646.1 pyrroline carboxylatereductase [Pisum sativum]	2	90-J18
gi 7488707 pir T09602 probable zinc finger protein SCOF-1. cold-inducible [Glycine max]	1	67-M24
ref NP_566009.1 Kelch repeat containing F-box protein family [Arabidopsis thaliana]	175	7-D15
gi 15239179 ref NP_196179.1 oxidoreductase, 2OG-Fe(II) oxygenase family [Arabidopsisthaliana]	103	14-L02
gi 2462661 emb CAB16749.1 catalase [Soldanella alpina]	62	58-B22
gi 6646840 emb CAB64599.1 arginine decarboxylase 1 [Datura stramonium]	34	68-D19
gi 2231615 gb AAC49815.1 4-hydroxyphenylpyruvatedioxygenase [Daucus carota]	23	58-M13
gb AAO34703.1 ethylene response factor 1 [Lycopersicon esculentum]	20	33-M08
emb CAD92449.1 amino acid permease 1 [Brassica napus]	12	11-E21
gi 18411686 ref NP_567215.1 cathepsin B-like cysteine protease. putative [Arabidopsisthaliana]	11	7-A12
gi 7488773 pir T10861 phaseolin G-box binding protein PG1 - kidneybean	11	12-E19
gi 11493822 gb AAG35658.1 transcription factor WRKY4 [Petroselinum crispum]	10	14-G13
gb AAO13360.1 dehydration-responsive element binding protein 3 [Lycopersicon esculentum]	5	55-B24
●		
●		
●		

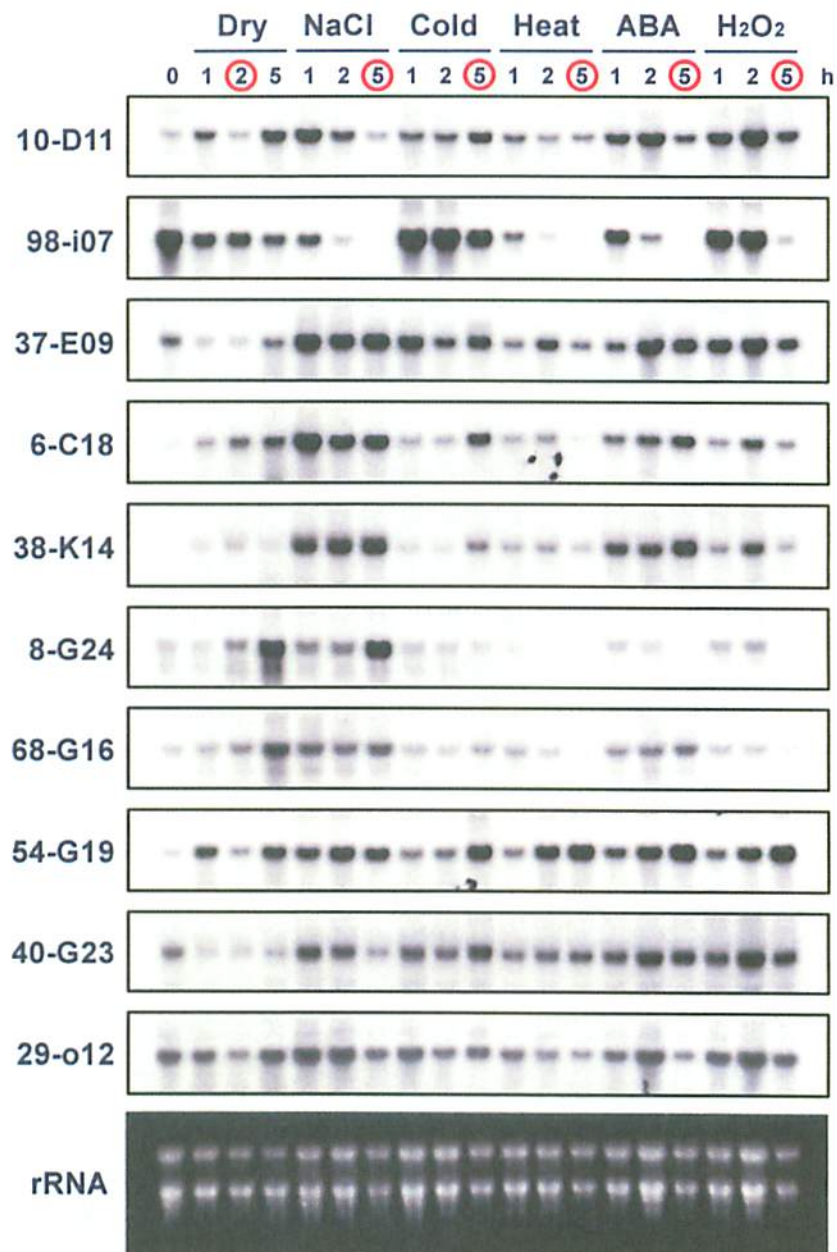


図4. ポプラ環境ストレス応答性関連遺伝子のストレス応答

(5) ポプラ完全長cDNAの末端塩基配列情報のデータベース化と完全長cDNAクローンの公的配布システムの構築

ポプラ完全長cDNAの塩基配列情報を公的データベースに公開するとともに、国際ポプラゲノムコンソシアムへもそれらの情報を提供した。また、理化学研究所バイオリソースセンターに寄託し、ポプラ完全長cDNAクローンの配布を開始した。しかし、インターフェイスに優れたデータベースの構築を目指したが、達成できなかった。

エ 考察

樹木のポストゲノムに対応したリソース整備を目指して、ポプラ完全長cDNAの収集を進めた。最終的に、様々な機能を持つタンパク質をコードする4,522種の遺伝子を同定した。樹木における完全長cDNAの大規模収集は、樹木で世界初の成功例である。また、ポプラ完全長cDNAリソースの中には、多数のストレス関連遺伝子群が含まれていた。

樹木の環境ストレス応答機構や耐性機構の解明は、砂漠緑化、温暖化防止や有害汚染物質の除去などの持続的な地球環境の保全を考える上で極めて重要な課題である。ポプラはモデル樹木であり、分子生物学的手法による樹木の環境応答機構や耐性機構の解析に適している。樹木の環境ストレス応答機構を分子レベルで理解するためには、細胞内で機能する遺伝子群の収集と網羅的発現解析が必要である。とりわけ完全長cDNAには、①完全長のタンパク質が合成できる、②遺伝子の発現を制御するプロモーター領域を正確に同定できる、③ゲノム解析に正確な情報が提供できる、といった利点がある（図1）。本研究プロジェクトにより収集したポプラ完全長cDNAは、ポストゲノム時代における樹木の基礎生物学的知見の集積に役立つだけでなく、遺伝子組換えによる環境ストレス耐性樹木の創出や優良個体を選抜する際のDNAマーカーとしての利用など、今後多方面での活用が期待される。本研究成果は、専門誌や学会に発表されただけでなく、平成16年にプレスリリース後新聞紙上にも報道された。また、国際ポプラゲノムコンソシアムからも完全長cDNAの情報提供を依頼され、国内外から高い評価を受けている。

オ 今後の問題点

樹木のポストゲノム研究に対応したリソース整備のため、ポプラ完全長cDNAクローンの末端塩基配列解析を更に推進する必要がある。平成18年度開始の交付金プロジェクト「ポプラ等樹木の完全長cDNA塩基配列情報の充実」では、均一化したポプラ完全長cDNAライブラリーを用い、完全長cDNAを10,000種以上単離する予定である。一方、ポプラ完全長cDNAの末端塩基配列情報を公的データベースへ登録し公表したものの、利便性の高いデータベースを構築できなかった。今後、国内外の専門家と協力して、インターフェイスに優れたデータベース構築を目指す予定である。

本プロジェクトを推進した結果、想定以上の成果が得られた。しかし、樹木のポストゲノム研究を加速化するため、大型予算や要員の確保が必要である。現在のところ、他のプロジェクト予算の活用や特定の研究職員の努力により推進している。今後は、一層の自助努力により、大型の外部競争資金を獲得する必要がある。

カ 要約

ポプラ完全長 cDNA クローンの末端塩基配列情報に基づき、各種遺伝子を機能分類した。最終的に、様々な機能を持つタンパク質をコードする 4,522 種の遺伝子を同定した。また、これらポプラ完全長 cDNA に含まれる数種類の環境ストレス応答性関連遺伝子の発現特性を解析した。さらに、ポプラ完全長 cDNA の塩基配列情報を公的データベースに公開するとともに、国際ポプラゲノムコンソシアムへもそれらの情報を提供し、理化学研究所バイオリソースセンターに寄託して完全長 cDNA クローンの配布を開始した。

キ 引用文献

- 1) 楠城時彦・篠崎一雄・篠原健司 (2004)ゲノム科学的手法を用いた樹木の環境ストレス応答機構の解明. 日本林学会誌 86: 69-73.
- 2) Nanjo, T., Futamura, N., Nishiguchi, M., Igasaki, T., Shinozaki, K., Shinohara, K. (2004) Characterization of full-length enriched expressed sequence tags of stress-treated poplar leaves. *Plant Cell Physiol.* 45: 1738-1748.
- 3) Tsutsumi, Y., Morinaga, S., Sasaki, S., Etho, Y., Nanjo, T., Shinohara, K., Kondo, R. (2005) The peroxidase multigene family in poplar; Lignification, stress-induction, and organ-specific expression. IAWPS2005 International Symposium on Wood Science and Technology, 1: 321-322.

(篠原健司・楠城時彦)

多様な森林整備と生産効率の
向上のための低コスト高密路
網等の配置技術の開発

目

次

研究の要約	121
第1章 集材方法に応じた路網密度とその集材費用の推定	125
第2章 路網路面流特性の解明	135
1. 林道路面流の定量評価	135
2. 集材路における土砂流出特性の解明	136
3. 低コスト路面流排水法の構築	138

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

研究年次 平成15年～平成17年（3カ年）

予算区分 運営費交付金（交付金プロジェクト）

II 主任研究者

主 査：森林作業研究領域長 大川畑修

副主査：林道研究室長 梅田修史

取りまとめ責任者： 大川畑修

III 研究場所

森林総合研究所、本所、北海道支所

IV 研究目的

第1章 集材方法に応じた路網密度とその集材費用の推定

林地に路網の整備を行えば、集材距離が短くなり、集材費は低減するが、このことについて数量的に明らかにした研究はほとんどない、そこで、幾つかの集材法について、集材距離、木寄せ距離を変数とする費用関数を設定し、費用関数の特性の解明を行う。近年、普及が進んでいるスイングヤードについて、その木寄せ造材費の実態に即した新たな算定法の開発を行う。路網の開設効果の算定法の開発を行う。

第2章 路網路面流特性の解明

1. 林道路面流の定量評価

林道路面流、流出土砂等の測定を行い、定量的に評価する。

2. 集材路における土砂流出特性の解明

集材路は低コストで作設され、通常路網密度は高い。このため、降雨等に伴い土砂が流出することがあるが、このような流出を極力少なくする必要がある。そこで、トラクタ集材路の作設に伴う切土土砂の斜面下方への移動特性を明らかにし、移動防止法の構築を行う。

3. 低コスト路面流排水法の構築

低コスト排水施設を現地に作設し、施設の機能等の調査を行う。また、施設の作設費の経済的評価を行う。

V 研究方法

第1章 集材方法に応じた路網密度とその集材費用の推定

集材機集材、タワーヤード集材、フォワード集材についての費用関数についての伐区モデルを設定し、費用関数を設定する。また、フォワード集材においてはスイングヤード木寄せを行うこととし、木寄せ距離、木寄せ区長に応じた木寄せ造材費の費用関数を設定する。費用関数の設定に当たって、工期等については後述の参考文献のほか、伐出に関する森林総合研究所の独自の資料、国有林の資料を参考にした。適用数値については既往の資料に基づく。路網密度が高くなると、伐倒木が路網に到達する比率が高くなる。このことを考慮したスイングヤード木寄せ造材費の算定法を開発する。路網の開設効果を示す算定式を開発し、開設効果の特性を解明する。

第2章 路網路面流特性の解明

1. 林道路面流の定量評価

常陸太田水文試験地内（茨城森林管理署堂平国有林118林班）の林道田渡線に、路面流下水測定試験区域を設け、路面流等の計測を行う。試験地内には外部から水が流れ込まないようにする。計測は、降雨量、路面流流出量、流出土砂量について行う。

2. 集材路における土砂流出特性の解明

石狩森林管理署管内藤舞国有林1128林班の伐採跡地（2004年1～3月に択伐）に試験地を設定する（空沼試験地）。トラクタ集材路の通過箇所を沢型（沢を横断する箇所）と中腹型（主として中腹斜面に沿って作設した箇所）とに区分する。土砂の斜面下向への移動距離（水平距離）を土砂到達距離とし、この距離等の計測を行う。路面の縦断勾配、切取土工断面積、土砂到達距離、斜面傾斜の計測は路線に沿って10m間隔で行う。

3. 低コスト路面流排水法の構築

川側片勾配（路面の川側が山側より低くなるように設定した勾配）の排水施設の作設を行い、その排水機能状況等の調査を行う。茨城県城里町内の国有林において幅員2.4m、縦断勾配20%程度の作業路に9%程度の川側片勾配を設定する。流水試験を行い、その機能状況を観察する。流水の経路の軌跡線上に50cm間隔で縦断勾配及び横断勾配を測定する。測定値と算定値との対比を行う。

VI 研究結果

研 究 計 画 表

課 題 名	担 当	期 間
・ 集材方法に応じた路網密度とその集材費用の推定	林道研究室、 森林作業研究領域長	15～17
・ 集材費の費用関数の設定と路網配置効果の解明	林道研究室 森林作業研究領域長	16～17
・ 低コスト道における路面流の特性の解明、 低コスト排水法の機能、経済性評価	林道研究室、北海道支所 森林作業研究領域長	15～17

第1章 集材方法に応じた路網密度とその集材費用の推定

フォワード道の路網密度が $250\text{m}/\text{ha}$ のとき、フォワード集材の平均搬出費は $5,323\text{円}/\text{m}^3$ で、集材機集材の $7,617\text{円}/\text{m}^3$ 、タワーヤード集材 $8,073\text{円}/\text{m}^3$ に比べ、かなり安価である。

費用1（新たな算定法による木寄せ造材費）は費用2（従来の算定法による木寄せ造材費）より安価となり、例えば、フォワード道の路網密度が $250\text{m}/\text{ha}$ のとき、費用2は $1,702\text{円}/\text{m}^3$ 、費用1は $1,185\text{円}/\text{m}^3$ で、費用1は費用2の69.6%となる。

路網密度が低いときには開設効果の増加率が高い。例えば、架線集材において林道密度が最適路網密度 $23.2\text{m}/\text{ha}$ の $1/2$ の $11.6\text{m}/\text{ha}$ の時、開設効果は $3,116\text{円}/\text{m}^3$ で、この値は最適路網密度における開設効果値 $3,776\text{円}/\text{m}^3$ の82.5%となる。

第2章 路網路面流特性の解明

1. 林道路面流の定量評価

雨量の多い降雨の場合、降雨量のほとんどは林道外に流下することができる。

路面整備後の路面からの流出に対する要注意期間は、関東地方では雨量の少ない冬季を除いて、ほぼ半年程度とすることができる。

2. 集材路における土砂流出特性の解明

冬季に積雪を利用した集材を行う場合には、尾根上や沢底をうまく利用して切取土工をほとんど行わないようにすれば、ほとんど土砂移動は生じないことになる。路線が沢型となる場合、できるだけ傾斜の小さい箇所を選び、切取土工量を最小にすることが重要である。中腹型では、20m程度の緩衝帯を設定すれば、影響の大きいと思われる初年度の土砂移動を収めうる可能性が高いと考えられる

3. 低コスト路面流排水法の構築

川側片勾配は低コストで確実な排水法であることが確認された。

VII 今後の問題点

第1章 集材方法に応じた路網密度とその集材費用の推定

林道、作業道、作業路等の森林路網においては、最適な路網密度で整備されることが望ましい。林道事業等公共事業の低コスト化が求められ、材価の低迷が続く中で、路網の作設費の低減化に

向けた研究が必要である。森林路網の作設に当たっては、林地の浸食、崩壊等が生じることなく、林地の保全を図りうる道づくりが必要である。

第2章 路網路面流特性の解明

1. 林道路面流の定量評価

今回は路面からの水及び土砂の流出量の調査を行ったが、今後は路面から流出した水及び土砂の流域全体に与える影響を解明する必要がある。

2. 集材路における土砂流出特性の解明

今回の調査で一応の結論は得られたが、今後更に条件の異なる箇所においても調査を行う必要がある。

3. 低コスト路面流排水法の構築

川側片勾配は施工事例が少ないため、今後、施工実績を増やし、その効果の確認、問題点の有無等についての調査を行っていく必要がある。木寄せ作業を安全に行うためには、山側を低くした山側片勾配が望ましい。今後、川側片勾配と山側片勾配とを組み合わせた路網作設法についての研究を行っていく必要がある。

VIII 研究発表

佐々木尚三ら（2004）集材路の開設と土壌流出について、日林学術講、115, p371.

佐々木尚三（2005）集材路からの土壌流出に関する考察—集材路切取土砂の移動について—、日林北支論、53, 147-149.

佐々木尚三（2005）環境への配慮をめぐって、森林利用学会誌、20(2)、106-108.

梅田修史ら（2005）林道路面流の流出量について、日林関東支論、56, 75-76.

山口智ら（2004）タワーヤード集材における路網計画、森林利用学会誌、9(3)、217-220.

IX 研究担当者

第1章 大川畑修、山口 智、鈴木秀典、田中利美

第2章 梅田修史、佐々木尚三、山口 智、大川畑修

第1章 集材方法に応じた路網密度とその集材費用の推定

ア 研究目的

林地に路網の整備を行えば、集材距離が短くなり、集材費は低減するが、このことについて数量的に明らかにした研究はほとんどない。そこで、幾つかの集材法について、集材距離、木寄せ距離を変数とする費用関数を設定し、費用関数の特性の解明を行う。近年、普及が進んでいるスイングヤードについて、その木寄せ造材費の実態に即した新たな算定法の開発を行う。路網の開設効果の算定法の開発を行う。

イ 研究方法

集材機集材、タワーヤード集材、フォワード集材についての費用関数についての伐区モデルを設定し、費用関数を設定する。また、フォワード集材においてはスイングヤード木寄せを行うこととし、木寄せ距離、木寄せ区長に応じた木寄せ造材費の費用関数を設定する。費用関数の設定に当たって、功程等については後述の参考文献のほか、伐出に関する森林総合研究所の独自の資料、国有林の資料を参考にした。適用数値については既往の資料に基づく。路網密度が高くなると、伐倒木が路網に到達する比率が高くなる。このことを考慮したスイングヤード木寄せ造材費の算定法を開発する。路網の開設効果を示す算定式を開発し、開設効果の特性を解明する。

ウ 結果

(1) 集材機集材、タワーヤード集材、フォワード集材における搬出費の費用関数

図1-1は集材機集材、タワーヤード集材、フォワード集材についての伐区モデルである。いずれの伐区も伐区長400m、伐区幅100m、平均集材距離200mである。この図に基づいて、 m^3 当たりの搬出費 Y (円/ m^3)を集材距離 X (m)の関数で表す。関数の設定に当たっての前提条件は以下のとおりである。

○伐採法は皆伐とする。立木本数724本/ha、胸高直径28.5cm、立木材積515.7 m^3 /ha（北関東地方、スギ、地位2等、50年生）とする。利用率を75.1%，伐出材積を387.3 m^3 /haとする。

○立木の高さは20m、地形傾斜は30°とする。この場合伐倒木が路網に到達する距離は17.3mとなる。

○フォワード集材路の路網密度は250m/haとする。地形傾斜は30°，路網の迂回率は0.3，木寄せ方向は両側木寄せとする。この場合、木寄せ区長は26mとなる。伐倒木が路網に到達する比率は66.5%となる。

○集材機集材のセット人員は4名、タワーヤード集材とスイングヤード木寄せ造材のセット人員は3名とする。伐倒手、

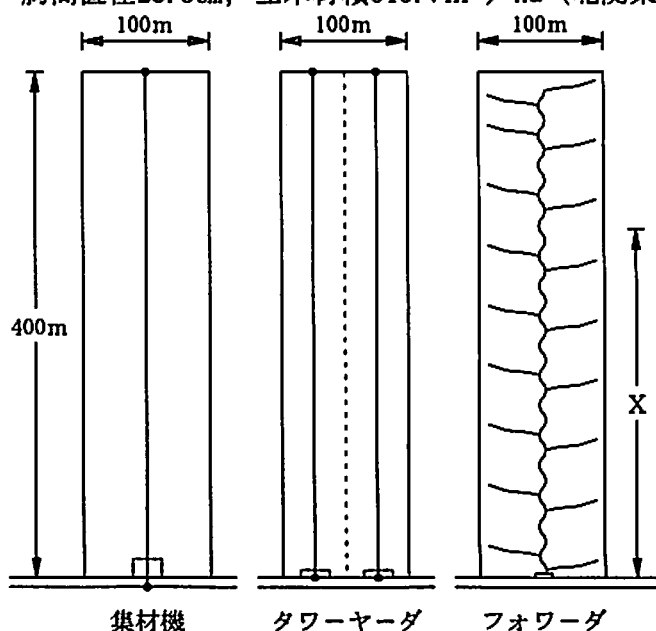


図1-1 伐区の設定

集材手、造材手の賃金は12,500円／人日とする。

○フォワード道の作設単価は1,400円／mとする。

各集材法における搬出費の費用関数は表1-1～1-4のとおりである。フォワード集材の搬出費の費用関数1は路網作設費を考慮しない場合で、費用関数2は考慮する場合である。表1-3，表1-4

表1-1 集材機集材の搬出費の費用関数

区 分	項 目	費用関数 (円／m ³)
直接費	全木伐倒費	Y = 377
	同歩行費	Y = 0.077 X
	集造材作業費	Y = 4.246 X + 2,836
	同歩行費	Y = 0.308 X
	集材機据付撤去費	Y = 128
	架線架設撤去費	Y = 549
	土場作設費	Y = 252
	機械輸送費	Y = 108
	計	Y = 4.631 X + 4,250
間接費		Y = 2.184 X + 2,004
合 計		Y = 6.815 X + 6,254

表1-2 タワーヤード集材の搬出費の費用関数

区 分	項 目	費用関数 (円／m ³)
直接費	全木伐倒費	Y = 377
	同歩行費	Y = 0.077 X
	集造材作業費	Y = 9.605 X + 2,838
	同歩行費	Y = 0.231 X
	架線架設撤去費	Y = 169
	土場作設費	Y = 81
	機械輸送費	Y = 89
	計	Y = 9.913 X + 3,554
間接費		Y = 4.541 X + 1,628
合 計		Y = 14.454 X + 5,182

表1-3 フォワード集材の搬出費の費用関数 1

区 分	項 目	費用関数 (円/m ³)
直接費	全木伐倒費	$Y = 377$
	同歩行費	$Y = 0.077 X$
	木寄せ造材費	$Y = 1,119$
	同歩行費	$Y = 0.231 X$
	集材作業費	$Y = 2.463 X + 730$
	土場作設費	$Y = 26$
	機械輸送費	$Y = 147$
	計	$Y = 2.771 X + 2,399$
間接費		$Y = 1.375 X + 1,191$
合 計		$Y = 4.146 X + 3,590$

表1-4 フォワード集材の搬出費の費用関数 2

区 分	項 目	費用関数 (円/m ³)
直接費	全木伐倒費	$Y = 377$
	同歩行費	$Y = 0.077 X$
	木寄せ造材費	$Y = 1,119$
	同歩行費	$Y = 0.231 X$
	集材作業費	$Y = 2.463 X + 730$
	土場作設費	$Y = 26$
	機械輸送費	$Y = 147$
	計	$Y = 2.771 X + 2,399$
間接費		$Y = 1.375 X + 1,191$
合 計		$Y = 4.146 X + 3,590$
路網作設費		$Y = 904$
総 計		$Y = 4.146 X + 4,494$

表1-5は表1-1～1-4の費用関数の取りまとめと平均搬出費（Xが200mのときの搬出費）を掲げたものである。

表1-5 搬出費の費用関数と平均搬出費

項 目	費 用 関 数 (円/m ³)	平均搬出費 (円/m ³)
集材機	$Y = 6.815 X + 6,254$	7,617
タワーヤード	$Y = 14.454 X + 5,182$	8,073
フォワード 1	$Y = 4.146 X + 3,590$	4,419
フォワード 2	$Y = 4.146 X + 4,494$	5,323

フォワード集材の搬出費は、集材機集材、タワーヤード集材に比べ、かなり安価になっている。これは、フォワード道の路網密度が250m/haとかなり高いことに起因するものである。路網密度が低い場合には搬出費は高くなる。

費用関数のXの係数は1 m³の材を1 m移動するのに必要な費用である。Xの係数はフォワード集材の場合、4.146円/m³・mで、集材機集材の6.815円/m³・mよりも低くなっている。集材速度はフォワード集材よりも集材機集材の方がかなり速いのに対しフォワード集材の方がXの係数が低いのは以下によるものである。

① 1回当たりの集材量は、集材機集材では1 m³程度であるのに対し、フォワード集材では4.64 m³と多い。

② 集材機集材作業では、1日当たりの各作業量は、集材機による集材量により定まるのに対し、スイングヤード木寄せ・フォワード集材では、1日当たりの木寄せ造材作業の作業量と1日当たりのフォワード集材量とは独立している。このため、集材機集材作業では4人の作業員（集材機運転手、荷掛手、荷卸手、プロセッサ運転手）と2台の機械（集材機、プロセッサ）を1セットとして、1日当たりの必要経費を1日当たりの収穫量で除して経費計算を行っている。これに対し、フォワード集材では、木寄せ造材費とフォワード集材費とは別途計算することとし、集材費は1人の作業員（フォワード運転手）と1台の機械（フォワード）の1日当たりの必要経費を1日当たりの集材量で除して経費計算を行っている。

図1-2は表1-5の費用関数を示したものである。

図においてX_sは集材機集材とタワーヤード集材との損益分岐点で、損益分岐距離は140.3mである。損益を分岐する伐区長を損益分岐伐区長とすると、矩形モデルの場合、損益分岐伐区長は損益分岐距離の2倍となる。すなわち280.6mとなる。今回の計算では、伐区長を400mとしているため、平均搬出費は集材機集材の方がタワーヤード集材よりも安価となっている。

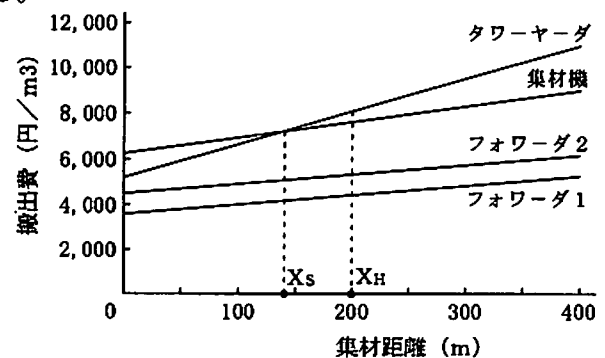


図1-2 集材距離と搬出費

(2) スイングヤード木寄せ

スイングヤードにおける木寄せには索張りする場合と地曳による場合とがあるが、ここでは木寄せは架線による場合に限定することにする。

表1-6は、スイングヤード木寄せの搬出費の費用関数を木寄せ距離K (m) の1次関数として表したものである。Kの係数の54.468は、他の集材法（表1-5）に比べ、かなり大きいですが、木寄せ距離はあまり長くないのが通常である。

表1-6 スイングヤード木寄せの搬出費の費用関数 1

区 分	項 目	費用関数 (円/m ³)
直接費	全木伐倒費	$Y = 377$
	同歩行費	$Y = 16$
	木寄せ造材費	$Y = 36.514K + 1,161$
	同歩行費	$Y = 46$
	土場作設費	$Y = 26$
	フォワード集材費	$Y = 1,223$
	機械輸送費	$Y = 147$
	計	$Y = 36.514K + 3,063$
間接費		$Y = 17.954K + 1,506$
合 計		$Y = 54.468K + 4,569$
路網作設費		$Y = 904$
総 計		$Y = 54.468K + 5,473$

1) 伐倒到達距離、伐倒到達区域

路網に近い立木は伐倒すると路網に到達する。伐倒木が路網に到達しうる最大の距離を伐倒到達距離 K_B (m) とする。路網からの距離が K_B 以下の区域を伐倒到達区域とする。集材機集材等、材を盤台に集める集材法では、伐倒到達区域を考慮する必要性は少ないが、スイングヤード木寄せ等、材を路網に集める集材法では、路網密度が高い場合には伐倒到達区域の面積比率は高くなり、木寄せ費等の算定に当たっては、この区域を考慮して算定を行うことが適切である。本節では伐倒到達距離を考慮しつつ、矩形モデルに基づいて、搬出造材費の算定法及びその計算例等について述べる。

図1-3はフォワード道等の路網と木寄せ区を示したものである。図において L (m) は木寄せ区長、 W (m) は木寄せ区幅である。図の $ABCD$ で囲まれた区域を区域1、 $DCFE$ で囲まれた区域を区域2とする。区域1は伐倒到達区域である。区域2は木寄せを行う区域で木寄せ区域とする。木寄せ造材費の算定においては、まず、区域1の伐倒木を先行してプロセッサで造材、フォワードで搬出し、次に、区域2の伐倒木のスイングヤード木寄せ、プロセッサ造材を並行して行うこと

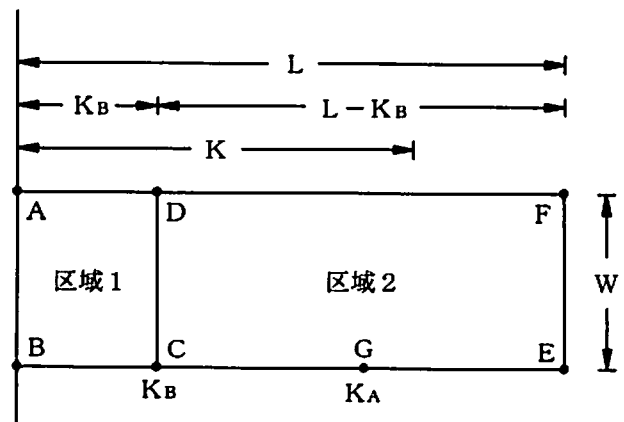


図1-3 路網と木寄せ区

にする。この場合、1日当たりの木寄せ材積

と1日当たりの造材材積は等しくなる。このため、木寄せ費と造材費は一体として計算を行うこととする。

2) 到達距離と木寄せ造材費

路網から木寄せ区内のある地点までの到達距離を K (m) とする。

ア. $0 \leq K \leq K_B$ のとき

m^3 当たりの造材費を C_P (円/ m^3) とし、区域 1 の m^3 当たりの木寄せ造材費を Y_1 (円/ m^3) とすると、以下ようになる。

$$Y_1 = C_P \quad \dots (1)$$

イ. $K_B < K$ のとき

区域 2 の m^3 当たりの木寄せ造材費を Y_2 (円/ m^3) とし、以下のように表す。

$$Y_2 = a_1 \cdot K + b_1 \quad \dots (2)$$

ただし、 a_1 : m^3 当たりの木寄せ造材費の変動費の係数 (円/ $m^3 \cdot m$)、 b_1 : m^3 当たりの木寄せ造材費の固定費 (円/ m^3)

図 1-4 は K と Y_1 、 Y_2 との関係を示したものである。 Y_1 と Y_2 とは不連続となっており

$$b_1 \geq C_P \quad \dots (3)$$

となる。図 1-3 の G は CE の中点で、 BG 間の距離を K_A (m) とする。 K_A は区域 2 の平均木寄せ距離で

$$K_A = \frac{L + K_B}{2} \quad \dots (4)$$

となる。区域 2 の m^3 当たりの平均木寄せ造材費を Y_{2H} (円/ m^3) とすると、(2)、

(4) 式から

$$Y_{2H} = 0.5 a_1 \cdot L + b_1 + 0.5 a_1 \cdot K_B \quad \dots (5)$$

となる。

区域 1 と区域 2 との面積比率は $K_B : (L - K_B)$ で、区域 1、区域 2 の m^3 当たりの平均木寄せ造材費 Y_3 (円/ m^3) は以下ようになる。

$$Y_3 = \frac{Y_1 \cdot K_B + Y_{2H} (L - K_B)}{L} \quad \dots (6)$$

この式に (1)、(5) 式を代入して次式を得る。

$$Y_3 = 0.5 a_1 \cdot L + b_1 + \frac{C_P \cdot K_B - (0.5 a_1 \cdot K_B + b_1) K_B}{L} \quad \dots (7)$$

4) 架線架設撤去費

ha 当たりの収穫材積を V_1 (m^3 /ha) とすると、 m^2 当たりの収穫材積 V_2 (m^3/m^2) は

$$V_2 = \frac{V_1}{10,000} \quad \dots (8)$$

となり、木寄せ区長 L (m)、木寄せ区幅 W (m) の木寄せ区における収穫材積 V_3 (m^3) は

$$V_3 = V_2 \cdot L \cdot W \quad \dots (9)$$

となる。

モデル伐区における m^3 当たりのスイングヤードの架線架設撤去費 Y_4 (円/ m^3) を以下で表す。

$$Y_4 = a_2 \cdot L + b_2 \quad \dots (10)$$

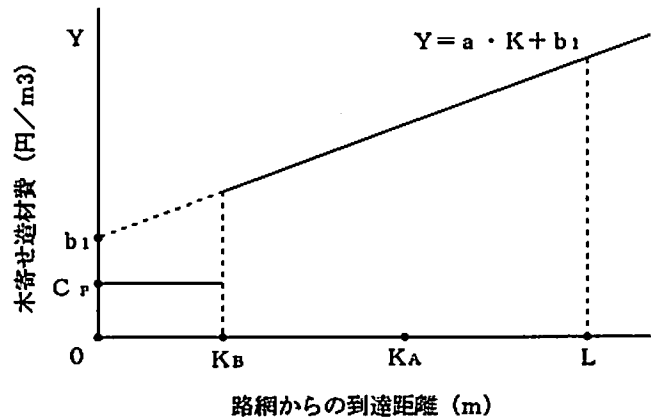


図 1-4 路網からの到達距離と木寄せ造材費

ただし、 a_2 (円/ $m^3 \cdot m$)、 b_2 (円/ m^3) : 定数

この場合、 m^3 当たりの架線架設撤去費 Y_4 (円/ m^3) は(9)、(10)式から以下ようになる。

$$Y_4 = \frac{a_2 \cdot L + b_2}{V_2 \cdot L \cdot W}$$

$$= \frac{a_2}{V_2 \cdot W} + \frac{b_2}{V_2 \cdot W \cdot L} \quad \dots (11)$$

5) 搬出造材費

m^3 当たりの木寄せ造材費と架線架設撤去費の合計額を搬出造材費 Y_5 (円/ m^3) とすると、 Y_5 は(7)、(11)式から以下ようになる。

$$Y_5 = A_1 \cdot L + A_2 + \frac{A_3}{L} \quad \dots (12)$$

ただし、 $A_1 = 0.5 a_1$ (13)

$$A_2 = b_1 + \frac{a_2}{V_2 \cdot W} \quad \dots (14)$$

$$A_3 = \frac{b_2}{V_2 \cdot W} + C_P \cdot K_B - (0.5 a_1 \cdot K_B + b_1) K_B \quad \dots (15)$$

伐倒到達区域を考慮しない場合、すなわち、すべての材を木寄せする場合の搬出造材費を Y_6 (円/ m^3) とすると、(12)～(15)式において K_B をゼロとし、以下ようになる。

$$Y_6 = 0.5 a_1 \cdot L + b_1 + \frac{a_2}{V_2 \cdot W} + \frac{b_2}{V_2 \cdot W \cdot L} \quad \dots (16)$$

ここで、木寄せ区長に応じた搬出造材費の計算例を示すことにする。 計算に当たって適用する数値は表1-7のとおりである。

表1-7 適用数値

記号	内 容	単 位	適用数値
a_1	木寄せ費の変動費の係数	円/ $m^3 \cdot m$	36.514
b_1	木寄せ費の固定費	円/ m^3	1,161
a_2	架線架設撤去費の変動費の係数	円/ $m^3 \cdot m$	10.515
b_2	架線架設撤去費の固定費	円/ m^3	1,067
V_1	ha当たりの収穫材積	m^3/ha	387.3
V_2	m^2 当たりの収穫材積	m^3/m^2	0.03873
W	木寄せ区幅	m	20
C_P	造材費	円/ m^3	700
K_B	伐倒到達距離	m	17.3

計算の結果は図1-5に示すとおりである。図の費用1は(12)式を用いたもので、費用2は(16)式を用いたものである。費用1では木寄せ区長が K_B 以降になると費用が急増している。木寄せ区長が K_B 未満のときには架線の架設は行わず、木寄せ区長が K_B 以上のときには架線の架設を行うこととしたため、架線架設撤去費の費用の増加があったことによるものである。木寄せ区長が

増加していくと費用1は(17)式の直線に漸近していく。

$$Y_0 = 0.5 a_1 \cdot L + b_1 + \frac{a_2}{V_2 \cdot W} \quad \dots (17)$$

この直線は(12)式の第3項を除去したものである。費用2は最小値が存在する。これは、木寄せ区長が大きな値から小さくなると出材材積は少なくなり、 m^3 当たりの架線架設撤去費が大きくなることによるものである。費用2も木寄せ区長が大きくなるにしたがって、(17)式の直線に漸近していく。木寄せ区長が26mのとき、費用2は1,702円/ m^3 、費用1は1,185円/ m^3 で、費用1は費用2の69.6%となる。

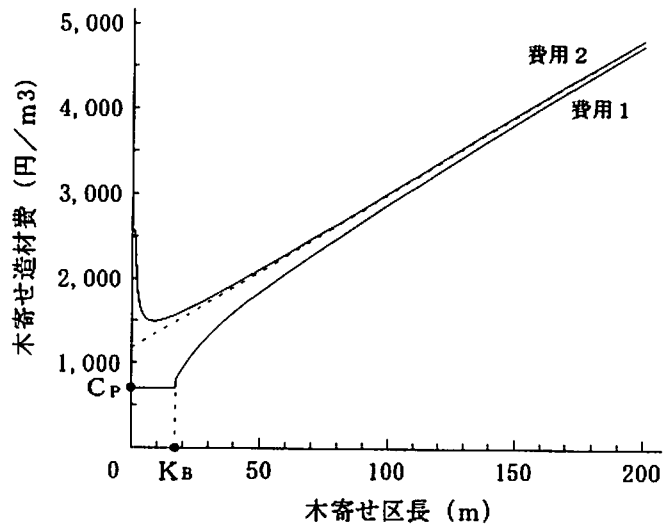


図1-5 木寄せ区長と木寄せ造材費

(3) 路網の開設効果の算定法

路網からの平均到達距離を X (m)、路網密度を d (m/ha)、路網迂回率を η とすると以下の関係がある。

$$X = \frac{2,500 (1 + \eta)}{d} \quad \dots (18)$$

となる。現在の平均到達距離を X_1 (m)、路網整備後の平均到達距離を X_2 (m)、集材迂回率を η' とすると、 m^3 当たりの現在の平均木材搬出費 Y_1 (円/ m^3)、 m^3 当たりの路網整備後の平均木材搬出費 Y_2 (円/ m^3) は以下ようになる。

$$Y_1 = a \cdot X_1 + b \quad \dots (19)$$

$$Y_2 = a \cdot X_2 + b \quad \dots (20)$$

ただし、 a 、 b ：定数

路網の両側に同様な伐区が存在する場合、ha当たりの収穫材積を V (m^3 /ha)、路網密度を d (m/ha)、 m 当たりの路網作設費を r_1 (円/m) とすると、 m^3 当たりの路網作設費 r_2 (円/ m^3) は

$$r_2 = \frac{r_1 \cdot d}{V} \quad \dots (21)$$

となる。現在の路網密度を d_1 (m/ha)、路網整備後の路網密度を d_2 (m/ha) とする。 m^3 当たりの平均木材搬出費と路網作設費の合計費用を収穫路網費とする。現在の収穫路網費を Y_3 (円/ m^3)、路網整備後の収穫路網費を Y_4 (円/ m^3) とすると、(18)～(21)式から Y_3 、 Y_4 は以下ようになる。

$$Y_3 = \frac{2,500 a (1 + \eta) (1 + \eta')}{d_1} + b + \frac{r_1 \cdot d_1}{V} \quad \dots (22)$$

$$Y_4 = \frac{2,500 a (1 + \eta) (1 + \eta')}{d_2} + b + \frac{r_1 \cdot d_2}{V} \quad \dots (23)$$

m^3 当たりの路網の開設効果 Y_5 (円/ m^3) は (24)

$$Y_5 = Y_3 - Y_4$$

となる。 d_2 を最適路網密度とする場合、 d_2 は以下の式から算定される (上飯坂実)。

$$d = 50 \sqrt{\frac{a \cdot V (1 + \eta) (1 + \eta')}{r_1}} \quad \dots (25)$$

ここで、計算例を示す。適用数値には表1-8の値を用いる。数値は集材機集材、作業道作設を念頭に置いたものである。

表1-8 適用数値

記号	内 容	単 位	適用数値
a	集材費の変動費の係数	円/ $m^3 \cdot m$	6.815
b	集材費の固定費	円/ m^3	6,254
V	ha当たりの収穫材積	m^3/ha	387.3
r	路網作設単価	円/m	22,030
η	路網迂回率		0.5
η'	集材迂回率		0.2

最適路網密度は(25)式から23.2m/haとなる。計算例として、現在の路網密度を5m/haとする。この密度を高めた場合の開設効果の計算結果は図1-6のとおりである。開設効果は路網密度が最適路網密度のときに最大となる。図において、路網密度が最適路網密度の時の路網の開設効果は3,776円/ m^3 となる。図からわかるように、路網密度が低いときには開設効果の増加率は高い。例えば、路網密度が最適路網密度23.2m/haの1/2の11.6m/haの時、開設効果は3,116円/ m^3 で、この値は最大の開設効果値3,776円/ m^3 の82.5%となる。

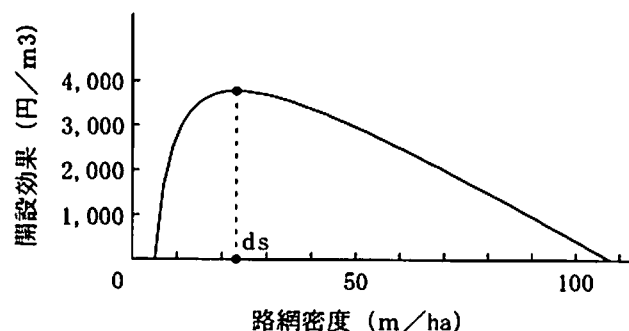


図1-6 路網密度と路網の開設効果

エ 考察

近年、ha当たり250m程度の超高密な路網が作設されるようになってきている。このような超高密路網を利用したフォワード集材の集材費は集材機集材、タワーヤード集材に比べて安価であることが示された (図1-5)。今後、超高密路網に焦点を当て、その特性を更に解明していく必要がある。

オ 今後の問題点

林道、作業道、作業路等の森林路網においては、最適な路網密度で整備されることが望ましい。

林道事業等公共事業の低コスト化が求められ、材価の低迷が続く中で、路網の作設費の低減化に向けた研究が必要である。森林路網の作設に当たっては、林地の浸食、崩壊等が生じることなく、林地の保全を図りうる道づくりが必要である。

カ 要約

フォワーダ道の路網密度が250m/haのとき、フォワーダ集材の平均搬出費は5,323円/m³で、集材機集材の7,617円/m³、タワーヤーダ集材8,073円/m³に比べ、かなり安価である。

費用1（新たな算定法による木寄せ造材費）は費用2（従来の算定法による木寄せ造材費）より安価となり、例えば、フォワーダ道の路網密度が250円/m³のとき、費用2は1,702円/m³、費用1は1,185円/m³で、費用1は費用2の69.6%となる。

路網密度が低いときには開設効果の増加率が高い。例えば、架線集材において林道密度が最適路網密度23.2m/haの1/2の11.6m/haの時、開設効果は3,116円/m³で、この値は最適路網密度における開設効果値3,776円/m³の82.5%となる。

キ 参考文献

上飯坂実（1971）わが国における路網密度の研究，森林利用学序説，地球出版，124.

奈良県林業指導所（1974）伐出作業の手引き，175p.

日本林業調査会（1977.9）素材生産を請負で行う場合の事務取扱いについて，素材生産請負契約の実務，124-158（林野庁長官通達（52 林野業第28号 昭和52年3月1日））.

三品忠夫・有馬孝昌（1966）伐木・運材の経営と技術，215p.

林業科学技術振興所（1983）山地の歩行，北方系大型ササ資源の収集・搬送に関する事前評価，126-134.

林業機械化協会（1991）タワーヤーダとその作業，林業機械化協会，189p.

林業機械化協会（1992）小型林内作業車の実用性に関する調査及び枝払機の改良に係る基礎調査に関する委託調査報告書，48p.

林業機械化協会（1999）林業機械便覧，267p.

林材業労災防止協会（1993）機械利用共同化促進調査報告書，66p.

田畑 実（1976）秋田県において使用している伐出作業経費積算の手引（1），機械化林業，269，40-46.

田畑 実（1976）秋田県において使用している伐出作業経費積算の手引（2），機械化林業，271，6-17.

田畑 実（1976）秋田県において使用している伐出作業経費積算の手引（3），機械化林業，272，6-22.

梅田三樹男ら（1982）標準功程表と立木評価，日本林業調査会，140p.

山口智ら（2004）タワーヤーダ集材における路網計画，森林利用学会誌，9（3），217-220.

山下信夫（1983）国有林における製品生産事業の盤台の改善のために（上）－製品生産事業の盤台の調査結果から，スリーエムマガジン，267，2-7.

山下信夫（1983）国有林における製品生産事業の盤台の改善のために（下）－製品生産事業の盤台の調査結果から，スリーエムマガジン，270，1-5.

第2章 路網路面流特性の解明

木材生産の生産性の向上を図るためには、砂利道、土道等低規格で安価に作設される道のある程度高い密度での整備が必要である。これらの路網の整備に伴う路面流による路面侵食、路面流排出に伴う土砂の流下を防ぐための方策を構築する必要がある。そのためには、路面流の流下特性、土砂排出特性を明らかにする必要がある。これまで、低規格路網における上記に関する研究は十分ではなく、本研究において路面流、流出土砂等の測定を行い、定量的に評価する。また、低コスト路面流排水法の構築を行う。

1. 林道路面流の定量評価

砂利道における路面流、流出土砂等の測定を行い、定量的に評価する。

ア 研究目的

木材生産の生産性の向上を図るためには、砂利道、土道等低規格で安価に作設される道のある程度高い密度での整備が必要である。これらの路網の整備に伴う路面流による路面侵食、路面流排出に伴う土砂の流下を防ぐための方策を構築する必要がある。そのためには、路面流の流下特性、土砂排出特性を明らかにする必要がある。これまで、低規格路網における上記に関する研究は十分ではなく、本研究において路面流、流出土砂等の測定を行い、定量的に評価する。また、低コスト路面流排水法の構築を行う。

イ 研究方法

常陸太田水文試験地内（茨城森林管理署堂平国有林118林班）の林道田渡線に、路面流下水測定試験区域を設け、路面流等の計測を行う。試験地内には外部から水が流れ込まないようにする。計測は、降雨量、路面流流出量、流出土砂量について行う。

ウ 結果

試験地は幅4.5m、長さ33.2m、平均勾配11.4%であった。試験地は粘性土路床の碎石路盤であった。試験は2004年5～11月に行った。土砂の回収は約2週間ごとに行った。降雨量と路面流出量との関係から、流出係数（流出量を降雨量で除した値）は降雨量が20mm以下では、0.578、20mm以上では、0.921となった（図2-1-1。図において、細い実線は45°線、一点鎖線は今回の調査結果全体の線、点線はそのうち一降雨の降雨量20mm以下の線、太い実線は藤枝が示した結果に基づく線で、森林と林道を含んだ流域全体の降雨量と流出量との関係を示すものである。）。このことから、雨量の多い降雨の場合、降雨量のほとんどは林道外に流下すると言うことができる。流出土砂量は、路面整備後の月日の経過とともに減少し、5月の約9kgが最高で、7、8月には約4kg、11月には約1kgとなった（図2-1-2）。

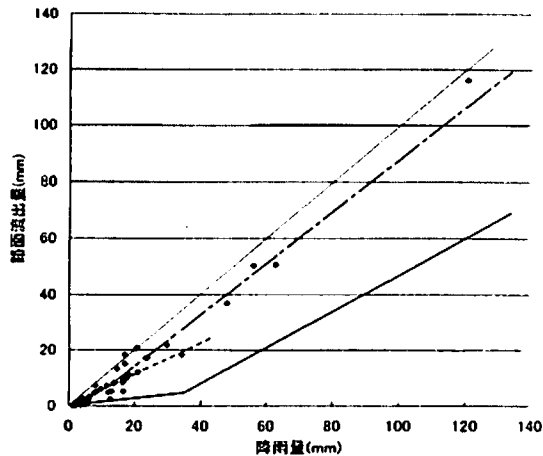


図2-1-1 降雨量と路面流出量

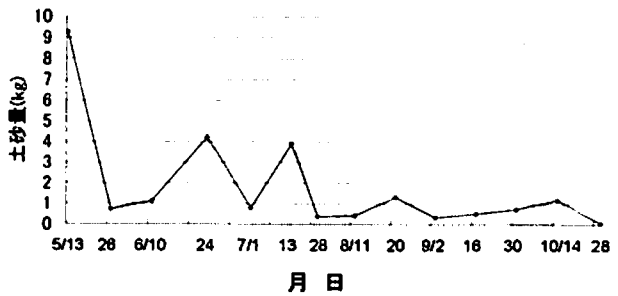


図2-1-2 土砂流出量の変化

エ 考察

調査結果から、路面整備後の路面からの流出に対する要注意期間は、関東地方では雨量の少ない冬季を除いて、ほぼ半年程度とすることができる。

オ 今後の問題点

今回は路面からの水及び土砂の流出量の調査を行ったが、今後は路面から流出した水及び土砂の流域全体に与える影響を解明する必要がある。

カ 要約

雨量の多い降雨の場合、降雨量のほとんどは林道外に流下すると言することができる。
路面整備後の路面からの流出に対する要注意期間は、関東地方では雨量の少ない冬季を除いて、ほぼ半年程度とすることができる。

キ 参考文献

梅田修史ら（2005）林道路面流の流出量について、日林関東支論、56、75-76

2. 集材路における土砂流出特性の解明

ア 研究目的

集材路は低コストで作設され、通常路網密度は高い。このため、降雨等に伴い土砂が流出することがあるが、このような流出を極力少なくする必要がある。そこで、トラクタ集材路の作設に伴う土砂の斜面下方への移動特性を明らかにし、移動防止法の構築を行う。

イ 研究方法

石狩森林管理署管内簾舞国有林1128林班の伐採跡地（2004年1～3月に択伐）に試験地を設定する（空沼試験地）。トラクタ集材路の通過箇所を沢型（沢を横断する箇所）と中腹型（主として中腹斜面に沿って作設した箇所）とに区分する。土砂の斜面下向への移動距離（水平距離）を土

土砂到達距離とし、この距離等の計測を行う。路面の縦断勾配、切取土工断面積、土砂到達距離、斜面傾斜の計測は路線に沿って10m間隔で行う。

ウ 結果

土砂到達距離は、沢型で大きく最大25mであった。中腹型では最大17mであった（図2-2-1）。沢型では、投棄された土砂は日数の経過とともに沢に移動し、停止することはなかった。上部に残っている土砂は20mm/時を超えるような強い降雨があるたびに下方に流れ出し、止まらないことが観察された。一方、中腹型では谷側に堆積された土砂は大きくは移動せず、斜面にとどまることが観察された。中腹型においては、路線下側の斜面傾斜と土砂到達距離とはほぼ比例関係にあり（図2-2-1）、また、集材路切取土工量と土砂到達（水平）距離ともほぼ比例関係にあることが明らかとなった（図2-2-2）。

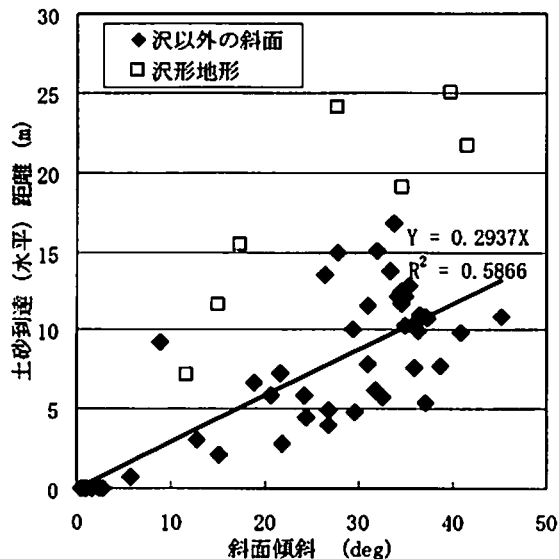


図2-2-1 斜面傾斜と土砂到達距離

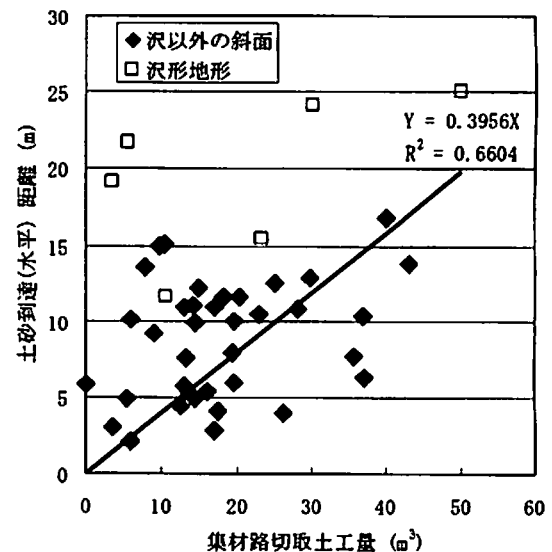


図2-2-2 集材路切取土工量と土砂到達距離

エ 考察

集材路の作設に当たっては、切取土工量をできるだけ少なくするような路線を選択することが望ましい。特に、冬季に積雪を利用した集材を行う場合には、尾根上や沢底をうまく利用して切取土工をほとんど行わないようにすれば、ほとんど土砂移動は生じないことになる。路線が沢型となる場合、できるだけ傾斜の小さい箇所を選び、切取土工量を最小にすることが重要である。中腹型では、20m程度の緩衝帯を設定すれば、影響の大きいと思われる初年度の土砂移動を収めうる可能性が高いと考えられる。

オ 今後の問題点

今回の研究で一応の結論は得られたが、今後更に条件の異なる箇所においても調査を行う必要がある。

カ 要約

冬季に積雪を利用した集材を行う場合には、尾根上や沢底をうまく利用して切取土工をほとんど行わないようにすれば、ほとんど土砂移動は生じないことになる。路線が沢型となる場合、できるだけ傾斜の小さい箇所を選び、切取土工量を最小にすることが重要である。中腹型では、20 m程度の緩衝帯を設定すれば、影響の大きいと思われる初年度の土砂移動を収めうる可能性が高いと考えられる。

キ 参考文献

- 佐々木尚三ら（2004）集材路の開設と土壌流出について，日林学術講，115，p371.
佐々木尚三（2005）集材路からの土壌流出に関する考察—集材路切取土砂の移動について—，日林北支論，53，147-149.
佐々木尚三（2005）、環境への配慮をめぐって、森林利用学会誌，20(2)、106-108.

3. 低コスト路面流排水法の構築

ア 研究目的

低コスト排水施設を現地に作設し、施設の機能等の調査を行う。また、施設の作設費の経済的評価を行う。

イ 研究方法

川側片勾配（路面の川側が山側より低くなるように設定した勾配）の排水施設の作設を行い、その排水機能状況等の調査を行う。茨城県城里町内の国有林において幅員2.4m、縦断勾配20%程度の作業路に9%程度の川側片勾配を設定する。流水試験を行い、その機能状況を観察する。流水の経路の軌跡線上に50cm間隔で縦断勾配及び横断勾配を測定する。測定値と算定値との対比を行う。

ウ 結果

（2）川側片勾配は、流水試験の結果、有効に機能した。川側片勾配の縦断勾配の平均値は20.2%、横断勾配の平均値は8.9%であった。この値に基づいた流水方向の算定値は縦断方向から23.8°であった。実際の流水の方向は縦断方向から28.4°で、誤差率は16.2%であった。

川側片勾配の作設費は、積算の結果、60円/mであった。川側片勾配の設定延長を8 mとすると1個所当たりの経費は480円となる。この経費は通常の横断排水施設に比べ、かなり安価である。ha当たりの作業路の路網密度を250m/ha、設置間隔を50mとする場合、ha当たりの費用は2,400円となる。通常の横断排水施設は溝内に土砂が堆積し、排水機能が失われる場合があるが、川側片勾配はそのおそれはなく、有効な方法と言える。

エ 考察

川側片勾配は路面流の排水には有効であるが、川側が低いため、スイングヤード等は川側にやや傾いた状態となる。このため、木寄せ作業時に転倒する可能性を増加させることになる。この

ため、川側片勾配は木寄せ作業に使用される可能性の低い個所に設定することが望ましい。その候補個所としては内カーブの個所（沢等地形が凹となっている個所）があげられる。

オ 今後の問題点

川側片勾配は施工事例が少ないため、今後、施工実績を増やし、その効果の確認、問題点の有無等についての調査を行っていく必要がある。木寄せ作業を安全に行うためには、山側を低くした山側片勾配が望ましい。今後、川側片勾配と山側片勾配とを組み合わせた路網作設法についての研究を行っていく必要がある。

カ 要約

川側片勾配は低コストで確実な排水法であることが確認された。今後、川側片勾配と山側片勾配とを組み合わせた路網作設法についての研究を行っていく必要がある。

キ 参考文献

日本林道協会（2002）林道規程 一運用と解説一，270p.

山口 智ら（2004）横断排水溝の機能状況，日本林学会関東支部大会発表論文集，55，287-288

スギ集団葉枯症状に関する判定手法の開発

交付金プロⅡ： スギ集団葉枯症状に関する判定手法の開発

目 次

研究の要約	-----	142
1 スギ針葉成分及び土壌特性とスギ集団葉枯症状との関係解析	-----	146
2 スギ集団葉枯症状に関与する病原菌の検索とその簡易診断法の開発	----	152
3 衛星データを用いたスギ集団葉枯症状の広域的分布調査法の開発	-----	156

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

平成 15～17 年度（3 ヶ年）

交付金プロジェクト

II 主任研究者

主査	前 九州支所長	吉田成章
副主査	前 九州支所研究調整官	阿部恭久
取りまとめ責任者	九州支所長	鶴 助治
	九州支所研究調整監	松本陽介

III 研究場所

森林総合研究所 九州支所

IV 研究目的

宮崎県を中心にスギの衰退・枯損の発生が報告されているが、現在のところその原因は明らかではない。同県では「森林吸収源計測・活用体制整備強化事業」の中で「森林衰退状況調査」として平成 15 年度から調査を開始した。福岡県、大分県、熊本県、鹿児島県でも同様の症状が確認されており、被害が拡大する傾向にあることが懸念されている。今後九州のスギ林業の脅威となる可能性があり、早期に対応する必要がある。

中期計画（ウア 1 a）においては、「被害の拡大が危惧される侵入病虫害や近年顕在化した病虫害について病原体や被害実態を解明する」としており、本症状に関する研究を開始する必要があった。

このため、（1）被害地における養分状態の判定手法及び本症状に関与する病原菌の検索とその簡易診断法を開発し、衰退地における判定精度を向上させること。（2）広域的被害発生状況を把握する手法を開発し、環境条件との関係から被害発生危険地帯を予測する方法を開発すること。（3）各県において分布調査及び危険地判定を行うための手法を提供することを目的とした。

V 研究方法

養分バランスの崩れ、あるいは病原菌の関与が疑われたため、被害地における植物体・土壌の養分的特徴及び病原菌関与の把握を行った。まず、現地調査により、被害地におけるスギの針葉と土壌の養分状態を調査するとともに、各地のスギの針葉の含有成分に関する分析を行い、全国的な視点から、被害地における養分状態の特徴を解析した。また、本症状に対する病原菌の関与の有無、関与する病原菌の検索を行い、簡易診断技術

を開発した。これらにより、被害地における本症状の判定手法を開発するとともに、衛星データを用いて広域における分布を把握できる技術を開発し、過去の拡大パターンを追跡した。

VI 研究結果

1 スギ針葉成分及び土壌特性とスギ集団葉枯症状との関係解析

九州内を踏査し、スギ集団葉枯症の発生地域を把握するとともに、発生林分における土壌と針葉の養分状態と葉枯れ症状との関係を検討した。発生林分の針葉は未発生林分に比べ、1年生葉のK含有率と、当年生葉に対する1年生葉のK(カリウム)の含有率割合が低かった。発生地域の土壌は交換性Kが少ないことに加え、交換性Ca(カルシウム)、Mg(マグネシウム)も少なく、pH(水素イオン濃度)も低い低養分状態であった。このようなことから、葉枯れ症状の発生には、Kの低い栄養状態が関与しているものと考えられた。

2 スギ集団葉枯症状に関与する病原菌の検索とその簡易診断法の開発

スギ集団葉枯症は宮崎県以外に福岡県、大分県、鹿児島県で発生していた。枯死葉に形成された子実体の観察、枯死葉と健全葉からの菌類の分離試験、およびこれらの菌類のスギ苗への接種試験の結果から、スギに対する強い病原性をもつ菌類は認められなかった。

3 衛星データを用いたスギ集団葉枯症状の広域的分布調査法の開発

衛星データによるスギ葉枯症林分の判読可能性を検証した。空間分解能が15mのTerra/ASTERデータの反射スペクトル特性を見ると被害林分では、健全林分と比較して近赤外域のDN値が小さくなり、赤と短波長赤外のDN値が大きくなっていた。この結果、NDVI閾値画像での識別が期待されたが、実際にはヘイズの多いシーンであったため誤判定が多発した。画像分類ではファジー分類による方法を試みたところ、NDVI閾値画像で見られたヘイズの影響による誤分類は、あまり見られなかった。しかし詳細な現地調査を行ったところ、間伐された林分や台風被害地との誤認が多く、またスギ葉枯症が間伐された林分に多い傾向もあり実用的ではなかった。このためより空間分解能が高い赤外カラー空中写真を用いての被害木判読を試みた。判読の結果、被害木は梢端が灰色に表現される形で抽出された。しかし、判読作業は単木単位で行う必要がある。シャドウスポットや写真周辺での光量不足などについては、それぞれについて適正な強調を施すことによって可能となるが、極端に明調あるいは暗調となっている場所では判読が不可能であった。

研究計画（実施年度）

実施課題名：スギ針葉成分及び土壌特性とスギ集団葉枯症状との関係解析（H15～H17）

責任者：今矢明宏（九州支所）

実施課題名：スギ集団葉枯症状に関与する病原菌の検索とその簡易診断法の開発（H15～H17）

責任者：佐橋憲生（九州支所）

実施課題名：衛星データを用いたスギ集団葉枯症状の広域的分布調査法の開発（H15～H17）

責任者：野田巖（九州支所）

Ⅶ 今後の問題点

1 スギ針葉成分及び土壌特性とスギ集団葉枯症状との関係解析

ここでは葉枯れ症状の発生に栄養状態が関与していることを指摘したが、品種や林齢によっても発生状況は異なっており、これらについては今後の課題である。

発生が顕著にみられていた宮崎県でも、2005年度では症状が目立たなくなっていた。発症には気象変化の影響も考えられる。短期間では発生箇所やその拡大傾向を正確に把握することは難しく、長期の定点観測や発生箇所の変遷を追跡する必要がある。

2 スギ集団葉枯症状に関与する病原菌の検索とその簡易診断法の開発

本症の被害発生木に認められる糸状菌に強い病原性は認められなかったが、本症に土壌養分条件が関係している可能性が示唆されていることから、土壌養分欠乏等の強いストレス条件とこれらの糸状菌との相互作用が本症の発生に及ぼす影響について調査する必要がある。

3 衛星データを用いたスギ集団葉枯症状の広域的分布調査法の開発

一部に判読不能地点も認められるが、赤外カラー空中写真の判読手法は症状の判別に有効であった。しかし、衛星データ利用と比較して費用が高いため、この手法を広域で利用する際には経費低減の工夫が必要である。

Ⅷ 研究発表

1 スギ針葉成分及び土壌特性とスギ集団葉枯症状との関係解析

1) 今矢明宏・酒井正治・大貫靖浩・赤間亮夫(2005)スギ集団葉枯症の発生林分とその隣接未発生林分の土壌－宮崎県椎葉村の事例－. 九州森林研究 58:202-205

2) 今矢明宏(2005)土壌シリーズ(9) スギ集団葉枯症状発症林分の土壌. 九州の森と林業 70:4

3) 今矢明宏・重永英年(2006)スギ集団葉枯症の発生地域とその特徴. 九州森林研究59: 247-248

2 スギ集団葉枯症状に関与する病原菌の検索とその簡易診断法の開発

1) 秋庭満輝・石原誠・佐橋憲生(2005)九州地域におけるスギ集団葉枯症の被害木から分離された糸状菌. 九州森林研究58:180-181

3 衛星データを用いたスギ集団葉枯症状の広域的分布調査法の開発

- 1) 齋藤英樹・野田巖(2005)リモートセンシングを用いたスギ集団葉枯症林分の抽出に関する研究. 九州森林研究58:34-37
- 2) 齋藤英樹・野田巖・鹿又秀聡(2006)赤外カラー空中写真を用いたスギ葉枯症林分の識別. 九州森林研究59:209-210

IX 研究担当者

- 1 スギ針葉成分及び土壌特性とスギ集団葉枯症状との関係解析
今矢明宏・重永英年・酒井正治・大貫靖浩・赤間亮夫*（九州支所、*：現在東北支所）、
長倉淳子（立地環境研究領域）、佐々木重行・廣田篤彦・小河誠司（福岡県森林林業技術センター）
- 2 スギ集団葉枯症状に関与する病原菌の検索とその簡易診断法の開発
秋庭満輝・石原誠・佐橋憲生（九州支所）、佐々木重行・小河誠司・津田城栄（福岡県森林林業技術センター）
- 3 衛星データを用いたスギ集団葉枯症状の広域的分布調査法の開発
齋藤英樹・野田巖*（九州支所、*：現在関西支所）

1 スギ針葉成分および土壌特性とスギ集団葉枯症状との関係解析

ア 研究目的

葉枯れ症状は、スギ針葉の黄化にはじまり、早期落葉、樹冠の衰退と続く。このことから養分面でのストレスが関与していることが示唆される。ここでは典型的な発生地に試験地を設定し、針葉および土壌の成分分析を行う。これらの養分状態を未発生林分の針葉および土壌、全国規模で採取されたスギ針葉の分析結果と比較することにより、発生地におけるスギ針葉の成分および土壌養分の特徴を明らかにする。

イ 研究方法

(ア) 踏査

春先から初夏にかけて、遠望して樹冠部が黄色ないしは赤褐色を呈するか、空いて見えること、梢頭部に比して、その下部での葉の変色や葉量の低下が顕著であること、当年葉の伸長は見られるが、2年生以上のシュートに着生している一次枝の先端部から変色が見られることを、この症状の判定基準とし、他の衰退現象との区別を行った。観察は車窓より行い、疑わしい林分において、双眼鏡やフィールドスコープを用いて判定を行った。ハンディ GPS により踏査軌跡と発生箇所の記録を行った。

(イ) 土壌の調査と分析

土壌断面調査は宮崎県で1ヶ所（松木）、熊本県内2ヶ所（水上、湯前）、福岡県内2ヶ所（添田、矢部）のスギ人工林で行った。松木は葉枯れ症状が多く、の地点で観察される椎葉村に位置する。松木の調査地は同一年に植栽された林分のなかで、表層地質がチャートと石灰岩の領域に分かれている。葉枯れ症状はチャートの立地では顕著であるが、石灰岩の立地にはほとんどみられなかった。そのため、各表層地質の立地において試験区を設けた（以下、チャートの立地を発生区、石灰岩の立地を未発生区と記す）。水上、湯前、添田の各調査地は葉枯れ症状が観察される林分であり、矢部は症状が発生していない林分である。土壌断面調査によって形態的特徴を記載するとともに、各層位より化学分析用試料を採取した。これらの試料について pH 及び交換性 Ca、Mg、K の測定を行った。交換性塩基類の抽出には、簡易法であるバッチ法を用いた。

比較対象となる全国値については、酸性雨等森林被害モニタリング事業（林野庁、1997）におけるスギ林の表層土壌データを用いた。

(ウ) 針葉の採取と分析

土壌断面調査を行った林分について、2004 年度は松木の両試験区、2005 年度は熊本県内3ヶ所（水上、湯前、立田山）と福岡県2ヶ所（添田、矢部）のスギ人工林から針葉を採取した。立田山は症状が発生していない林分である。針葉の採取は9～11月に行っ

た。2004 年度については当年生部分について、2005 年度は当年生と 1 年生とに分け、硝酸・過塩素酸による湿式灰化後、ICP 発光分析法により K、Mg、Ca 含有率を調べた。

日本各地の 244 地点のスギ林から採取された当年生葉試料について、K、Mg、Ca 含有率を上記と同様の方法で測定した。本試料は、酸性雨等森林被害モニタリング事業（林野庁、1997）で採取された試料の一部であり、1990～1994 年の 9～11 月に採取された。244 地点の各成分の分析値において、10 パーセントイルならびに 90 パーセントイルの値を求めた。当年生含有率が前者以下または後者以上の場合には、それぞれ、養分が低レベルまたは高レベルにあり、それ以外は中庸であると判定した。

（エ）伐倒調査

添田試験地において、発生木と未発生木を伐倒し、幹、枝、葉の各部の重量測定と年輪解析を行った。

ウ 結果

（ア）発生地域

宮崎県内における発生状況は、宮崎県林業技術センターによる調査によって報告されており、県北西部において発生箇所が多いことが明らかにされている（黒木ほか 2005）。福岡県内（豊前地域を除く）において詳細なスギの衰退状況と分布調査を行った結果、本症状と類似した衰退は少なく、発生は主に添田町や県南部地域に見られた。



図 1-1 踏査ルートと発生箇所

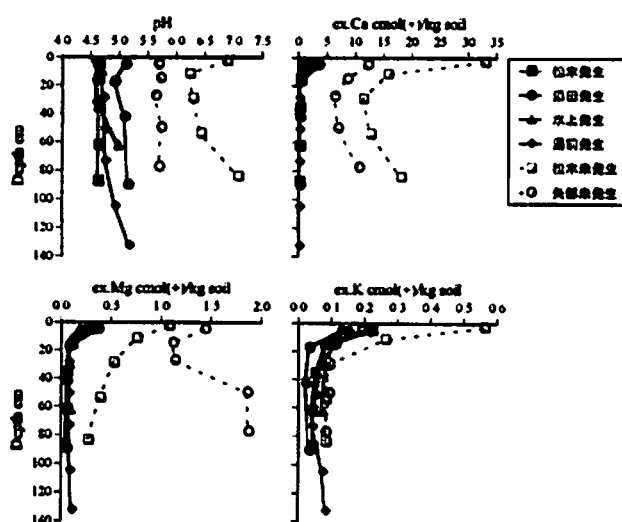


図 1-2 土壌の pH、交換性塩基類

また、翌年度に再調査したところ、回復したと思われる林分も見られた。このほか、大分県山国町、佐伯市、熊本県湯前町、水上村、多良木町、鹿児島県薩摩川内市、金峰町での発生を確認した。一方、背振山地や国東半島、大隅半島などでは発生林分は確認されなかった（図 1-1）。発生箇所の多くは四万十累帯や秩父累帯といった地質構造帯上に分布していた。しかしながら、発生林分の土壌母材は、砂岩や頁岩、片岩、チャート、石灰岩など様々であった。また、これらの地質構造帯以外の発生林分の土壌母材は花崗岩であった。

（イ）土壌断面調査

調査した土壌は、発生、未発生に関わらず、適潤性（偏乾亜型）～適潤性の典型および黄色系の褐色森林土に区分され、九州の森林土壌では普遍的にみられる土壌であった。これらの断面は、極端に礫が多いといったことや堅密であるといったこともなかった。根系分布についても葉枯れ症状の発生状況に応じるような極端な差異は見出されなかった。

松木では、未発生区は石灰岩土壌であることから pH、交換性 Ca が高かったが、交換性 Mg、K についても発生区より高い値を示していた（図 1-2）。発生区的最表層の交換性 Mg、K は全国スギ林表層土壌と比較して低レベルにあった。

水上、湯前、添田の発生林分は、矢部の未発生林分と比べて、pH が低く、交換性 Ca、Mg が少なかった。交換性 K には差異はみられなかったが、最表層の値は全国データに比べ低レベルであった。また、発生林分の交換性 Mg についても低レベルにあった。

表 1-1 松木試験地における当年生葉の養分含有率

	発生区	未発生区
K (mg/g DW)	2.85 (0.56) ^低	4.66 (0.52) ^中
Mg (mg/g DW)	1.30 (0.22) ^低	1.37 (0.28) ^低
Ca (mg/g DW)	11.8 (2.6) ^中	16.0 (1.0) ^中

n=3, 平均(標準偏差)

低、中、高は全国データ百分位の10以下、10～90、90以上

（ウ）針葉成分分析

松木においては、チャートを表層地質とする発生区では、石灰岩立地である未発生区に比べて、葉の K と Ca 含有率が低い傾向にあった。Mg については、発生区と未発生区とで同様の値であった（表 1-1）。全国データと比較した場合、K については、発生区は低レベ

ルにあるが、未発生区は中庸であった。Ca、Mg については、発生区、未発生区ともに、前者は中庸、後者は低レベルにあった。

湯前、水上、添田の発生林分は、矢部、立田山の未発生林分と比べて、K については、1 年生葉の含有率、および当年生葉に対する 1 年生葉の含有率割合が低い傾向にあった(表 1-2)。Mg については、発生林分と未発生林分とで含有率に明らかな違いはみられないが、当年生葉に対する 1 年生葉の含有率割合は、K の場合とは逆に、発生林分で高い傾向にあった。Ca については湯前と水上で低い傾向にあった。当年生葉の含有率を全国データと比較した場合、K については湯前と水上が、Ca については湯前が低レベルにあり、そのほかは中庸であった。Mg については、いずれの林分の値も全国データの中庸に位置した。

表 1-2 葉枯れ症状発生林分と未発生林分における葉の養分含有率の比較

		発生林分			未発生林分	
		湯前	水上	添田	矢部	立田山
K (mg/g DW)	当年	3.36(0.33) ^低	3.14(0.46) ^低	4.57(0.19) ^中	5.98(1.46) ^中	4.08(0.32) ^中
	1 年	2.20(0.26)	2.19(0.39)	3.05(0.14)	4.40(0.27)	3.55(0.50)
	1 年/当年	0.66(0.02)	0.69(0.02)	0.67(0.04)	0.77(0.12)	0.87(0.10)
Mg (mg/g DW)	当年	2.56(0.07) ^中	2.08(0.06) ^中	2.47(0.11) ^中	2.63(0.41) ^中	2.05(0.07) ^中
	1 年	2.18(0.06)	1.75(0.16)	2.07(0.09)	1.97(0.38)	1.57(0.10)
	1 年/当年	0.85(0.01)	0.84(0.08)	0.84(0.06)	0.75(0.06)	0.76(0.02)
Ca (mg/g DW)	当年	6.9(0.4) ^低	8.6(0.4) ^中	16.2(1.4) ^中	12.5(1.7) ^中	14.1(0.4) ^中
	1 年	7.8(0.70)	10.4(1.2)	19.9(2.1)	14.7(3.0)	13.1(0.6)
	1 年/当年	1.12(0.07)	1.21(0.21)	1.24(0.19)	1.16(0.10)	0.93(0.02)

n=3, 平均(標準偏差)

低、中、高は全国データ百分位の 10 以下、10~90、90 以上

(エ) 樹体の特徴

伐倒調査の結果、発生木では未発生木や隣接する林分の他の品種（キウラ）に比べて梢端部から 3m 位までの葉量が少なかった。各部の含水率は未発生個体と差がなかった。

エ 考察

一般的に、K や Mg といった植物体内で移動性の高い要素が欠乏した場合には、葉の変色等の可視障害は旧葉部から始まり、Ca 等の移動性の低い要素の場合には、新芽などで障害が発生することが知られている（西尾、1989）。スギの葉枯れ症状は旧葉部分の変色と早期脱落を特徴としており、養分欠乏という観点からは、移動性の高い要素の関与が予

想される。

同一林分内で表層地質の差異と対応して症状発生の有無が分かれた松木では、発生区では未発生区に比べて葉の K 含有率が低く、その値は野外に生育するスギとしては低いレベルにあった。この結果からは、葉枯れ症状発生の有無には低い K の栄養状態が関与していることが予想される。また、湯前、水上、添田の発生林分では、矢部、立田山の未発生林分に比べて、1 年生葉の K 含有率と、当年生葉に対する 1 年生葉の K の含有率割合が低かったことは、当年葉を展開する際に旧葉部分からの K の回収が大きかったことを示唆している。このような反応は樹体の K の栄養状態が不良であるために生じていることが予想される。松木のみ結果では、発生区、未発生区ともにスギ林としては Mg 含有率が低く、このことが葉枯れ症状発生に関与する潜在要因となっているとも考えられる。しかし、異なる地域での比較では、発生林分、未発生林分ともに葉の Mg 含有率はスギ林としては中庸であることから、葉枯れ症状と Mg の栄養状態との関連は低いと考えられる。

このように針葉の結果からは葉枯れ症状の発生には K の栄養状態が関与していることが予想された。一方、土壤の交換性 K は、松木では、未発生区に比べ発生区で少ない傾向がみられたが、水上、湯前、添田の発生林分と矢部の未発生林分ではスギ林土壤としては低いレベルにあるものの差異はみられない。このように、交換性 K が少ないだけでは葉枯れ症状は発生していない。未発生林分では、pH が高く、交換性 Ca、Mg も多い。K の吸収は、低 pH、低 Ca 条件下で阻害されることも報告されている。このようなことから、葉枯れ症状の発生には、交換性 K が少ないだけでなく、総合的に土壤が低養分状態であることが関係していると予想される。

オ 今後の問題点

ここでは葉枯れ症状の発生に栄養状態が関与していることを指摘したが、品種や林齢によっても発生状況は異なっており、これらについては今後の課題である。

発生が顕著にみられていた宮崎県でも、2005 年度には症状が目立たなくなっていた。短期間では発生箇所やその拡大傾向を正確に把握することは難しく、長期の定点観測や発生箇所の変遷を追跡する必要がある。

カ 要約

九州内を踏査し、スギ集団葉枯症の発生地域を把握するとともに、発生林分における土壤と針葉の養分状態と葉枯れ症状との関係を検討した。発生林分の針葉は未発生林分に比べ、1 年生葉の K 含有率と、当年生葉に対する 1 年生葉の K の含有率割合が低かった。発生地域の土壤は交換性 K が少ないことに加え、交換性 Ca、Mg も少なく、pH も低い低養分状態であった。このようなことから、葉枯れ症状の発生には、K の低い栄養状態が関与しているものと考えられた。

キ 引用文献

黒木逸郎・讃井孝義・福里和朗（2005）原因不明の葉枯れ症状によるスギの衰退．森林防疫 640：133-144．

西尾敏（1989）養分欠乏症の検索とその対策．森林と肥培 140：7-12．

林野庁（1997）酸性雨等森林被害モニタリング事業報告．

（今矢明宏、重永英年、酒井正治、大貫靖浩、赤間亮夫、
長倉淳子、佐々木重行、廣田篤彦、小河誠司）

2 スギ集団葉枯症状に関与する病原菌の検索とその簡易診断法の開発

ア 研究目的

宮崎県を中心に梢頭部の葉枯れを主な症状とするスギの集団的な衰退現象（スギ集団葉枯症と称する）が多発している。近年では宮崎県以外でも本症の発生がみられており、本症が拡大していることが懸念されている。これまでスギに葉枯・枝枯性の被害を起こすものとして約 30 種類の病害が知られており（日本植物病理学会、2000）、本症の発生にも何らかの病原菌が関わっている可能性が考えられるが、現在のところその関与は不明である。そこで、本症に関与する病原菌の検索、その菌の本症への関与の度合いを早急に調査することを目的とした。

イ 研究手法

（１）スギ集団葉枯症の分布と関与する菌類のリストアップ

九州各県の林業試験研究機関の保護担当者への聞き取り調査と、それらの情報に基づく現地調査によって九州における本症の発生状況を調査した。また、本症の被害木の枯死葉に認められる糸状菌を肉眼または顕微鏡で観察し、本症に関与する菌類のリストアップを行った。

（２）スギ集団葉枯症に関与する菌類の特性

本症に関与する菌類の特性を調査するため、衰弱木の枯死葉、健全葉、および無被害地の健全木の健全葉から糸状菌を分離した。高頻度で分離された菌のうち、培地上で孢子等を形成しないため同定できない菌 1 種について、リボソーム RNA 遺伝子の塩基配列情報による同定の検討を行った。これらの分離された糸状菌（フォマ葉枯病菌、ペスタロチア病菌、未同定菌）と関連しそうな既知の病原菌（褐色葉枯病菌、列疣病菌）をスギ挿し木苗（品種タノアカ）に接種し、その病原性を検討した。接種方法は、当年生枝に傷を付けて菌糸片を鋳込む方法、当年生枝の先端を切断してフスマ・オガクズ培地で培養した菌叢を付着させる方法、および菌糸懸濁液を無傷のまたは針で傷を付けた枝葉に噴霧する方法で行った。

ウ 結果

（１）スギ集団葉枯症の分布と関与する菌類のリストアップ

九州地方において聞き取り調査と現地調査を行ったところ、現時点で福岡県、大分県、宮崎県、鹿児島県でスギ集団葉枯症が発生していることを確認した。そのうち、大分県、宮崎県、鹿児島県の被害木から枝を採集し、枯死葉に形成されている菌類の子実体の観察を行った。その結果、褐色葉枯病菌（*Plectosphaerella cryptomeriae*）、ペスタロチ

ア病菌 (*Pestalotiopsis* sp.)、フオマ葉枯病菌 (*Phyllostica cryptomeriae*)、列疣病菌 (*Cercospora cryptomeriaeicola*) などの子実体が観察された。また、福岡県の被害木の枯死葉には、フオマ葉枯病菌などが観察された。

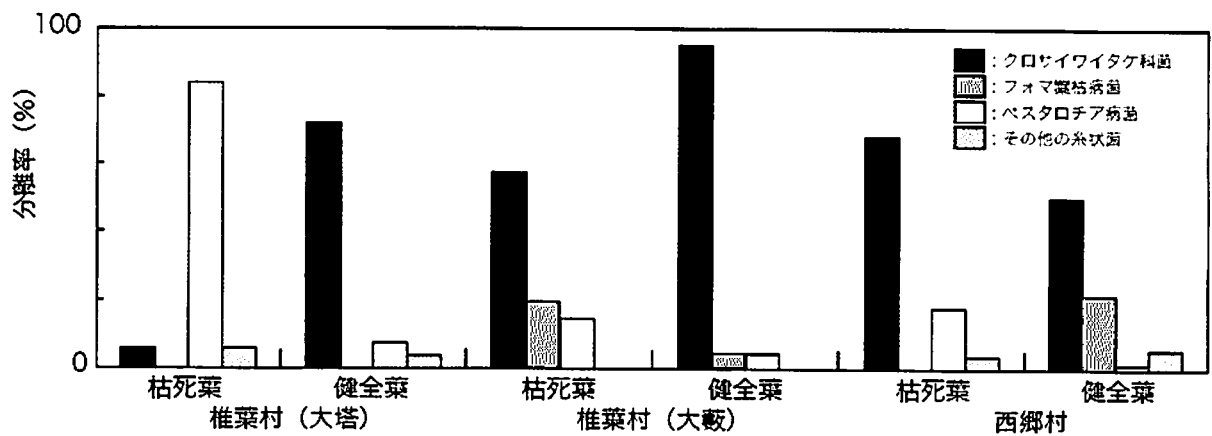


図 2-1 宮崎県の被害木の枯死葉と健全葉から分離された糸状菌の分離率

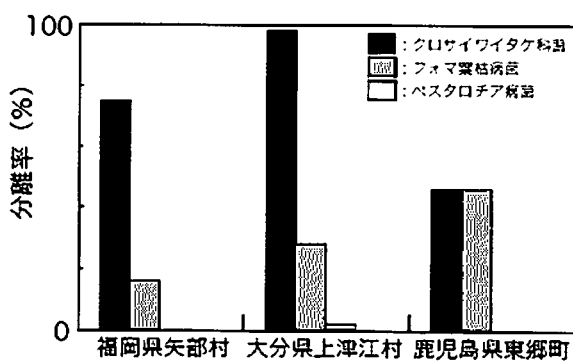


図 2-2 九州 3 県の被害木の健全葉から分離された糸状菌の分離率

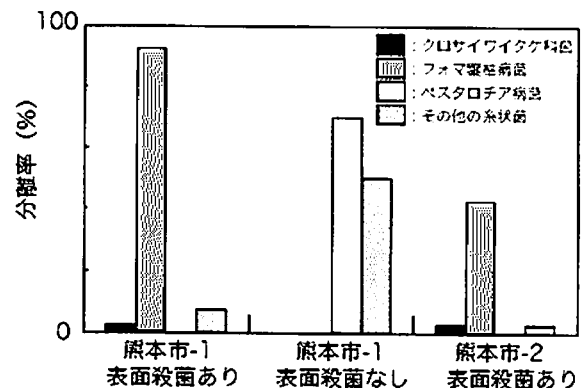


図 2-3 被害未発生地である熊本市のスギ健全木の針葉から分離された糸状菌の分離率

(2) スギ集団葉枯症に關与する菌類の特性

宮崎県椎葉村と諸塚村の被害木の枯死葉および健全葉から糸状菌の組織分離を行った結果、枯死葉からはペスタロチア病菌と未同定菌が、健全葉からはフオマ葉枯病菌と未同定菌が主に分離された (図 2-1)。福岡県矢部村と鹿児島県東郷町の被害木の健全葉からも同様にフオマ葉枯病菌と未同定菌が高率に分離された (図 2-2)。また、本症が発生していない地域である熊本市のスギ健全木の針葉から分離した場合、フオマ葉枯病菌と未同定菌が優占的に分離された (図 2-3)。健全木の針葉から表面殺菌処理を行わずに組織分離した場合、ペスタロチア病菌とその他の菌 (*Cladosporium* 属菌など) が分離され

た（図 2-3）。

分離された未同定菌の核 DNA のリボゾーム RNA 遺伝子（18S リボゾーム遺伝子の一部と ITS1-2、5.8S rRNA 遺伝子）の塩基配列を決定し、DNA データベースに登録されている塩基配列情報との相同性検索を行った結果、クロサイワイタケ科（Xylariaceae）に属する菌である可能性が高いことが判明した。

接種試験の結果、培養菌糸片を枝に差し込む方法では明確な病徴は認められなかった。また、当年生枝の切断面にふすまおが屑培地で培養した菌叢を培地ごと置く方法でも、明確な病徴の伸展は認められなかった。液体培養した菌体を細断して吹きつける方法では、無傷接種では病徴は認められなかったが、有傷接種の場合、いずれの菌でも若干の病原性は認められた。その中で褐色葉枯病菌の病原性が高い傾向があったが、この点は更に検討が必要である。

エ 考察

当初、被害発生状況とこれまでの知見から、本症は褐色葉枯病の被害であると想定していた。しかし、枯死葉に褐色葉枯病菌の子実体が見出されない場合もあり、組織分離でも分離されない。また、接種試験においても強い病原性をもたないものと判断された。褐色葉枯病菌以外に、被害木の枯死葉からはペスタロチア病菌、フオマ葉枯病菌および列疣病菌の子実体は認められたが、列疣病菌を除き、いずれもスギに対する病原性は低い菌であると考えられている（伊藤ほか、1952）。

ペスタロチア病菌は被害木の枯死葉から高頻度に分離され、無被害地の健全葉を表面殺菌処理しなかった場合にも分離されるが、表面殺菌処理をした場合は分離率が大幅に低下することから、健全葉の葉面上に存在している菌であり、スギ針葉が衰弱あるいは枯死した後に針葉内に侵入すると推察された。

一方、フオマ葉枯病菌は被害木と健全木の健全葉から高率に分離されることから、内生菌であると考えられる。本症被害木の枯死葉にフオマ葉枯病菌の子実体の形成が高頻度に認められたことは、針葉が衰弱した後に内生菌として内部に定着していた菌が成長を開始した結果であると考えられた。

列疣病菌はこれまで接種試験例がなく、本研究の接種試験でも明確な病徴を再現することができなかった。また、被害葉上の出現頻度も低いことから、列疣病菌が本症の発生に関与している可能性は少ないと考えられた。これらの既知の病原菌の他に、健全葉からクロサイワイタケ科の菌が高頻度で分離された。本菌は *Muscodora* 属の菌と近縁である新種の内生菌であると考えられるが、本菌がスギに対してどのような影響を及ぼすかについては全く明らかになっていない。

以上のうち、フオマ葉枯病菌とクロサイワイタケ科の菌は九州各地の健全葉から分離されたことから、これらは九州のスギの普遍的な内生菌である可能性がある。しかしこの点に関しては、さらに採集地域を増やして検討する必要がある。

以上のことから、本症の被害発生木に認められる菌類の病原性はそれほど強いものではないと考えられた。特にフオマ葉枯病菌は本来は内生菌であると考えられた。土壌条件の検討結果から考慮すると、土壌の養分欠乏ストレスなどの非生物的要因によって樹木（または上部の針葉）が衰弱した結果、周囲に普遍的に存在する、または内生菌として針葉内部に生息していた糸状菌が見られるようになったものと考えられる。よって、現時点では本症は強力な病原性を持つ病原菌による被害ではないと推定された。

オ 今後の問題点

本症の被害発生木に認められる糸状菌に強い病原性は認められなかったが、本症に土壌養分条件が関係している可能性が示唆されていることから、土壌養分欠乏等の強いストレス条件とこれらの糸状菌との相互作用が本症の発生に及ぼす影響について調査する必要がある。

カ 要約

スギ集団葉枯症は宮崎県以外に福岡県、大分県、鹿児島県で発生していた。枯死葉に形成された子実体の観察、枯死葉と健全葉からの菌類の分離試験、およびこれらの菌類のスギ苗への接種試験の結果から、スギに対する強い病原性をもつ菌類は認められなかった。

キ 引用文献

伊藤一雄・渋川浩三・小林享夫（1952）スギの赤枯病に関する病原性並に病理学的研究

（1）赤枯症状部に認められる菌類の形態及び病原性．林試研報 52：79-152

日本植物病理学会（2000）日本植物病名目録（初版）．日本植物防疫協会．1000p.

（秋庭満輝・石原 誠・佐橋憲生・佐々木重行・小河誠司・津田城栄）

3 衛星データを用いたスギ集団葉枯症状の広域的分布調査法の開発

ア 研究目的

宮崎県において数年前からスギの梢端部が枯れる、いわゆるスギ集団葉枯症が発生している。これらの被害は、椎葉村をはじめとして県北地域、さらに県内全域や鹿児島、大分、福岡などの近県においても確認された(讃井ほか・2001、2003、2004、黒木・2004)。これら衰退の分布と立地環境要因との関係解明のためには、広域における分布を把握する必要があるが、現在の地上からの調査では十分ではない。また、今後の被害予測のために、過去の拡大パターンを追跡する必要がある。本研究の目的は、衛星データによるスギ葉枯症林分の判読可能性を検証することである。

イ 研究方法

研究対象地は大規模な被害が確認されている宮崎県清水岳周辺地域とした。解析には2004年5月14日撮影のTERRA/ASTERデータを用いた。現地調査によって確認された被害地からトレーニングエリアを抽出し、被害地の反射スペクトル特性の把握を行った。またNDVIの閾値画像および画像分類を用いて被害地の抽出を行った。さらに2005年5月に撮影された赤外カラー空中写真をデジタル化した上で強調処理を行い判読に適した画像を作成し、また判読時の問題点を明らかにした。

ウ 結果

空間分解能15mのTerra/ASTERデータの反射スペクトル特性を見ると被害林分では、健全林分と比較して近赤外域のDN値が小さくなり、赤と短波長赤外のDN値が大きくなっていった(図3-1)。この結果、NDVI閾値画像での識別が期待されたが、実際にはヘイズの多いシーンであったため誤判定が多発した。画像分類ではファジー分類による方法を試みたところ、NDVI閾値画像で見られたヘイズの影響による誤分類は、あまり見られなかった(図3-2)。しかし詳細な現地調査を行ったところ、間伐された林分や台風被害地との誤認が多く、またスギ葉枯症が間伐された林分に多い傾向もあり実用的ではなかった。このためより空間分解能が高い赤外カラー空中写真を用いての被害木判読を試みた。

判読の結果、被害木は梢端が灰色に表現される形で抽出された(図3-3、図3-4)。しかし、判読作業は単木単位で行う必要がある。シャドウスポットや写真周辺での光量不足などについては、それぞれについて適正な強調を施すことによって可能となるが、極端に明調あるいは暗調となっている場所では判読が不可能であった。

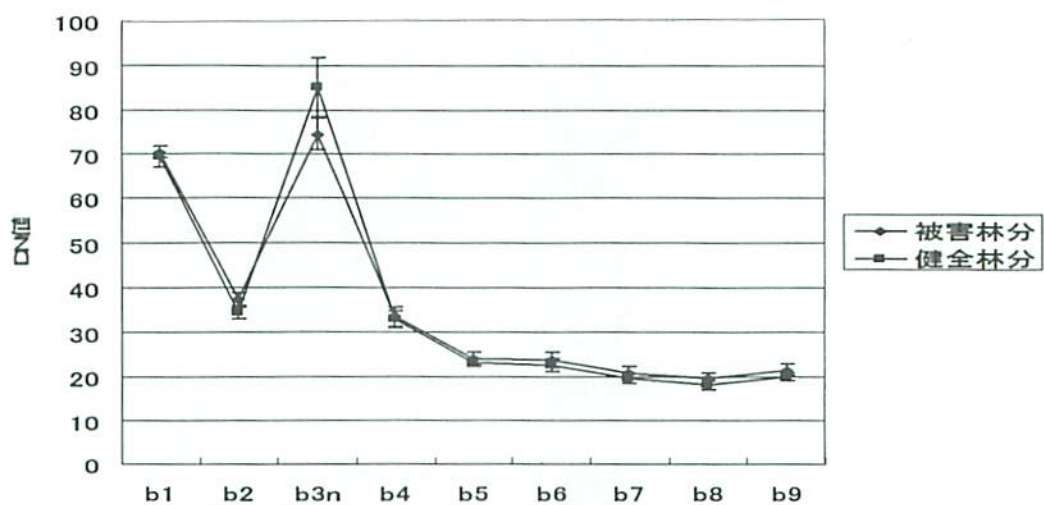


図 3-1 被害林分と健全林分における ASTER データの各バンドの平均値と標準偏差

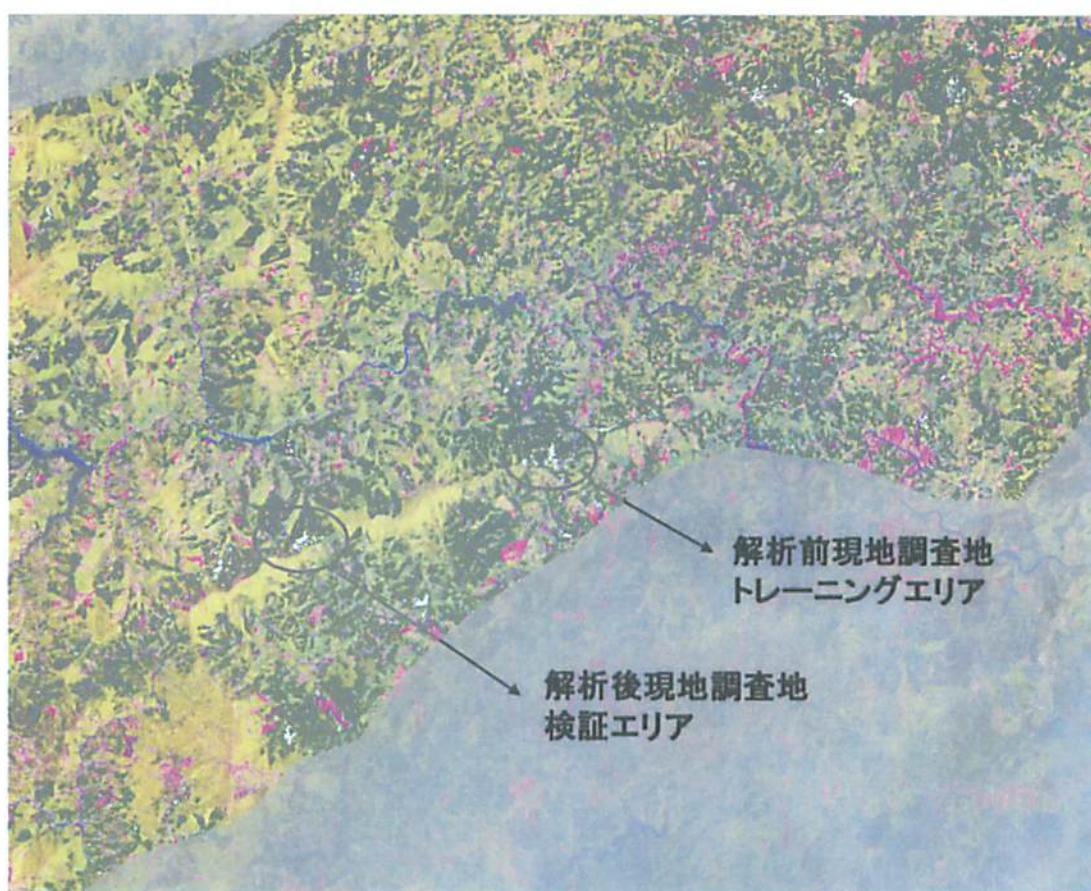


図 3-2 ファジークラスタリング分類によって抽出された被害林分（白が被害地）

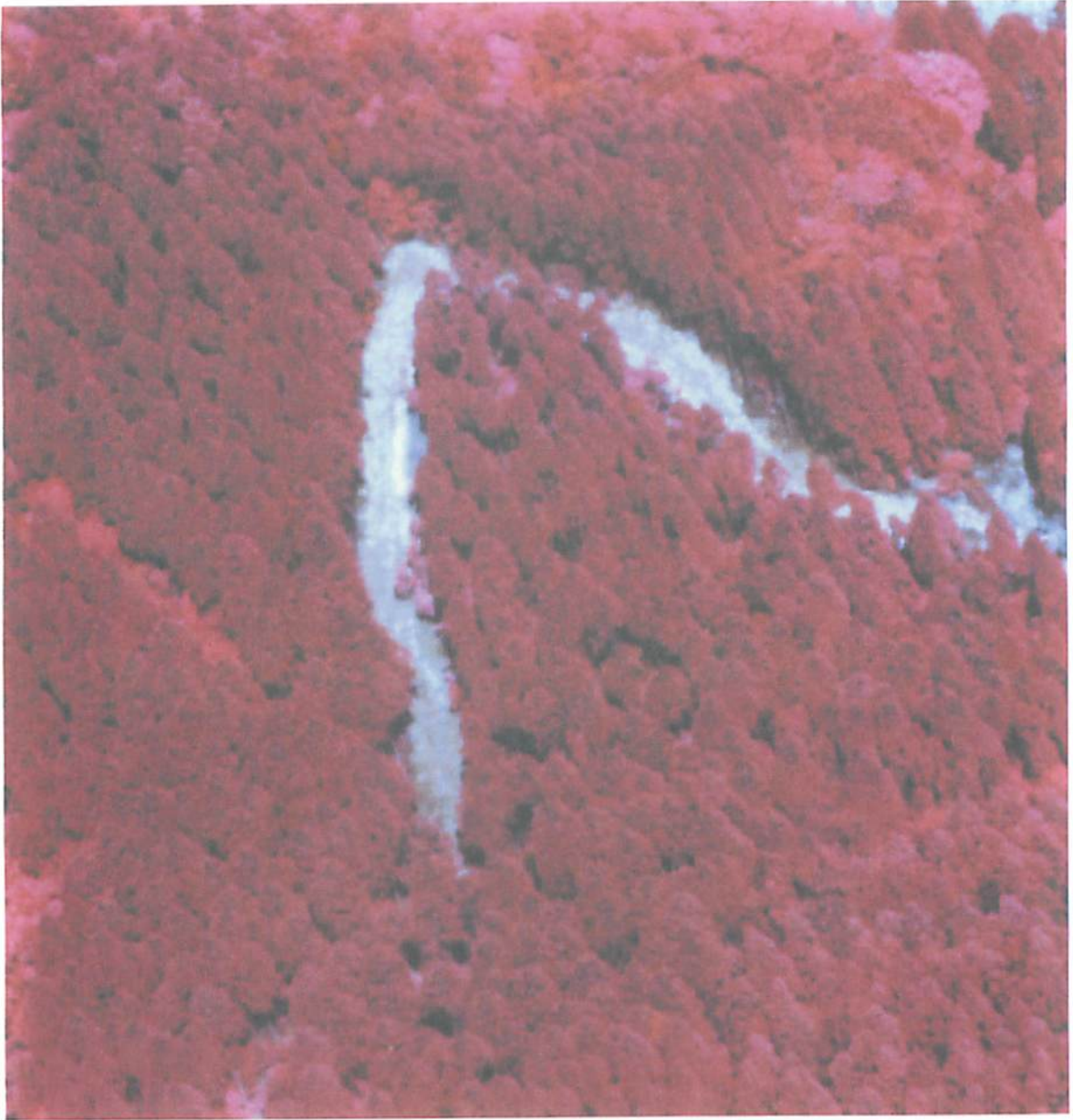


図 3-3 スギ葉枯症被害林分 梢端部が灰色に見える

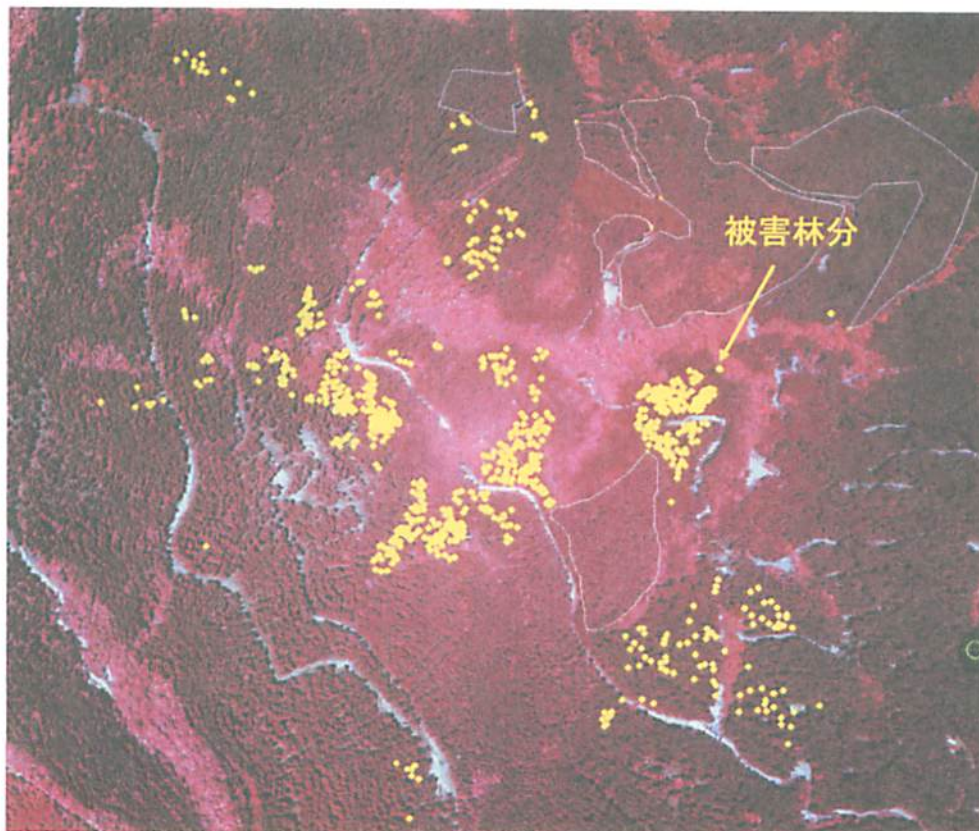


図 3-4 判読結果 黄色の点は被害木

エ 考察

衛星データによるスギ葉枯症林分抽出については、健全林分と被害林分の単純な比較では抽出できる可能性が示されたが、実際には間伐林分や台風被害地との誤認が多く実用的ではないことが明らかとなった。赤外カラー空中写真では、自動抽出は難しいものの単木単位で注意深く観察することにより判読が可能であることが示された。このことからスギ葉枯症が広域にわたって甚大な被害を及ぼす場合には、赤外カラー空中写真による被害林分の把握が期待される。

オ 今後の問題点

一部に判読不能地点も認められるが、赤外カラー空中写真の判読手法は症状の判別に有効であった。しかし、衛星データ利用と比較して費用が嵩むため、この手法を広域で利用するには経費低減の工夫が必要である。

カ 要約

本研究の目的は、衛星データによるスギ葉枯症林分の判読可能性を検証することであ

る。空間分解能が 15m の Terra/ASTER データの反射スペクトル特性を見ると被害林分では、健全林分と比較して近赤外域の DN 値が小さくなり、赤と短波長赤外の DN 値が大きくなっていた。この結果、NDVI 閾値画像での識別が期待されたが、実際にはヘイズの多いシーンであったため誤判定が多発した。画像分類ではファジー分類による方法を試みところ、NDVI 閾値画像で見られたヘイズの影響による誤分類は、あまり見られなかった。しかし詳細な現地調査を行ったところ、間伐された林分や台風被害地との誤認が多く、またスギ葉枯症が間伐された林分に多い傾向もあり実用的ではなかった。このためより空間分解能が高い赤外カラー空中写真を用いての被害木判読を試みた。判読の結果、被害木は梢端が灰色に表現される形で抽出された。しかし、判読作業は単木単位で行う必要がある。シャドウスポットや写真周辺での光量不足などについては、それぞれについて適正な強調を施すことによって可能となるが、極端に明調あるいは暗調となっている場所では判読が不可能であった。

キ 引用文献

黒木逸郎 (2004) スギの葉枯れ症状による衰退. 林業みやざき 2004-7:10

讃井孝義・西村五月 (2001) スギ中・壮齢林の樹勢衰退. 日林九支研論 54:103-104

讃井孝義 (2003) スギ葉枯性病害の大発生. 林業みやざき 2003-7:10-11

讃井孝義・黒木逸郎 (2004) スギ衰退林分の分布と環境要因. 九州森林研究 57:235-238

謝辞

本研究の遂行に当たっては、宮崎県林業技術センターの讃井孝義氏および黒木逸郎氏に宮崎県内のスギ葉枯症に関する情報提供や現地調査遂行に協力いただいた。また赤外カラー空中写真はコダック株式会社および国土撮影株式会社から提供していただいた。ここに記して心より御礼申し上げます。

(齋藤英樹、野田巖)

熱帯林保全ツールとしての性 フェロモン候補化合物の機能 解明

研究課題:熱帯林保全ツールとしての性フェロモン候補化合物の機能解明

目 次

研究の要約	162
第1章 熱帯林保全ツールとしての性フェロモン候補化合物の機能解明	165
1. マホガニーマダラメイガの性フェロモン化合物の機能解明	165
2. チークビーホールボーターの性フェロモン化合物の機能解明	169

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

研究年次:平成 16～17 年(2か年)

予算区分:運営交付金(交付金プロジェクト II)

II 主任研究者

主査:中牟田 潔

副主査:

取りまとめ責任者:中牟田 潔

III 研究場所

森林総合研究所、タイ王室森林局 Phu Toei(プ・トエイ)試験地、Kui Buri(クイ・ブリ)試験地、Me Gar(メ・カー)採種園、Mae Ho Pra(メー・ホ・プラ)試験地、タイ国立公園野生生物植物保全局 Ngao(ンガオ)森林昆虫・微生物研究センター、タイ森林公社 Li(リー)試験地

研究協力機関:国際農林水産業研究センター林業部、タイ王室森林局 森林管理・林産研究所

IV 研究目的

拡大しつつある熱帯荒廃林地を自然資源の持続的利用が可能な土地として修復することは緊急かつ必須の課題であり、既存修復技術の総合化および新技術の開発が求められている。マホガニーとチークは経済的価値が高いため荒廃林地の再生にこれら樹種を植栽したいとの希望が熱帯諸国では非常に強い。しかし、この2樹種には熱帯林の二大害虫といわれるマホガニーマダラメイガ(以下、イブシピラ)とチークビーホールボラーによる激甚被害が存在するため、国によっては政府がマホガニーやチークの植栽を奨励していない場合もある。イブシピラやチークビーホールボラーによる被害の有効な低減技術が開発されれば、いつでもマホガニーやチークを植えたいとの声は熱帯林の昆虫に関する国際的な集まりではつねに話題となるほどである。とくにマホガニーは植栽後6～7年間程度イブシピラの被害を防止することができれば、十分な経済価値をもつ材が得られるため、この期間の防除方法が求められている。なかでもタイ、マレーシア、オーストラリアではそのニーズが非常に高い。

そこで本研究では、荒廃林地の回復など環境保全を経済価値の高いマホガニーやチークの植林により可能とするため、イブシピラとチークビーホールボラーに対して性フェロモン活性を示す候補化合物を野外誘引試験によって探索・同定する。

V 研究方法

雌由来揮発成分をガスクロマトグラフィー触角電位測定装置(GC-EAD)によって分析し、活性ピークを探索・特定する。それら活性ピークの化学構造をガスクロマトグラフィー質量分析装置によって推定する。推定された化学構造を有する化合物を合成し、野外においてトラップを用いた誘引試験を行い、誘引活性を示す化合物を特定する。

VI 研究結果

第1章 熱帯林保全ツールとしての性フェロモン候補化合物の機能解明

1. マホガニーマダラメイガの性フェロモン化合物の機能解明

イブシピラ未交尾雌成虫由来の揮発物質を GC-EAD 分析した結果、GC-EAD 活性を示す6つのピークが存在することが明らかになった。これらの化合物の中で化合物 A、C、D、F について化学構造の推定ができたので、それらの誘引活性を野外試験によって明らかにした。

2004 年の野外誘引試験では、未交尾雌トラップに5匹、化合物 D のトラップに5匹、化合物 A のトラップに2匹の雄成虫が誘殺された。誘殺された個体数は少なかったが、化合物 D に誘引された雄成虫数と未交尾雌成虫に誘引された雄成虫数に差がないことから、少なくとも化合物 D がフェロモン活性を有することはまちがいないと考えられる。2005 年の野外試験ではクイ・ブリ試験地において化合物 F に化合物 D や A よりも強い誘引活性が認められた。

2. チークビーホールボーラーの性フェロモン化合物の機能解明

チークビーホールボーラー未交尾雌成虫由来の揮発物質を GC-EAD 分析した結果、GC-EAD 活性を示す3つのピークが存在することが明らかになった。このうち化合物 P はわれわれのこれまでの研究でフェロモン成分と考えていた化合物と同一であった。また、化合物 T は 2005 年にその化学構造が推定できたので、2006 年の野外試験に供することとした。

2005 年に試験した 4 種の合成化合物は、3カ所の試験地のいずれにおいても野外での誘引活性を示さなかった。2006 年の誘引試験では、メー・ホー・プラ試験地で化合物 P と化合物 T の 1:1 混合物を誘引源としたトラップに 1 頭の雄成虫が誘殺された。それぞれを単独に用いた誘引源には誘殺された雄がいなかった。また、化合物 Q, R, S を誘引源にしたトラップにも雄成虫は誘殺されなかった。

VII 今後の問題点

構造が推定できたが研究期間中に誘引活性を調べられなかった化合物について誘引活性を調べる必要がある。また、誘引活性を示した化合物の混合物を用いた誘引試験が必要である。

VII 研究発表

なし

IX 研究担当者

中牟田潔、松本和馬、中島忠一

第1章 熱帯林保全ツールとしての性フェロモン候補化合物の機能解明

1. マホガニーマダラメイガの性フェロモン化合物の機能解明

ア 研究目的

荒廃林地の回復など環境保全を経済価値の高いマホガニーの植林により可能とするため、マホガニーマダラメイガ(以下、イブシピラ)に対して性フェロモン活性を示す候補化合物を野外誘引試験によって探索・同定する。

イブシピラの性フェロモンに関して、最初に西アフリカ産の *H. robusta* の性フェロモンが Bosson & Gallois (1982) によって Z-9, E-12-テトラデカジエニルアセテート(Z9, E12-14: Ac)、Z-9-テトラデセニルアセテート(Z9-14: Ac)、Z-11-ヘキサデセニルアセテート(Z11-16: Ac)の混合物であることが明らかにされた。しかし、彼らはこれら化合物の野外での誘引性を証明していない。また、上記の3化合物はマレーシア・サバ州における野外試験においてもイブシピラに対して誘引性を示さなかった(Nakamuta et al, 2002)。この結果は、アフリカとアジア・オーストラリアは別の種である可能性が高い(Marianne Horak, オーストラリア CSIRO, 私信)ので、使っている性フェロモンの化学構造が異なるためと推察されている。

本研究では、イブシピラの既知性フェロモン化合物の野外試験を行うとともに、ガスクロマトグラフィー・触角電位測定装置(GC-EAD)により、イブシピラに電気生理的反応を引き起こす化合物を探索・特定する。

なお、本研究は、国際農林水産業研究センターとの共同研究であり、国際農林水産業研究センターとタイ王室森林局との覚え書きの下で実施する課題である。また、化合物の化学構造は特許出願前であるため記載しない。

イ 研究方法

室内において人工飼育により得られた雌成虫由来の揮発成分を固相微量抽出(SPME)法により捕集した。得られた試料を直接 GC-EAD 装置によって分析し、雄成虫触角に電気生理反応を引き起こすピークを特定し、さらにそれらピークの化学構造をガスクロマトグラフィー質量分析装置によって推定した。

推定された化学構造を有するイブシピラの性フェロモン候補化合物を複数合成し、それらを誘引源とする野外誘引試験を 2004 年はタイ王国スパン・ブリ県プ・トエイ試験地内の *Toona ciliata* 林にて、2005 年はプ・トエイ試験地とプラチュアップ・キリ・カン県クイ・ブリ試験地の *Toona ciliata* 林にて実施した。2004 年は化合物 A、または化合物 D 各 1mg を誘引源とするトラップをそれぞれ5個ずつ高さ3~4m、最低12m 間隔で2004年7月15日に設置し(図1-1)、翌16日と9月末まで2週おきに雄成虫の調査を行った。ポジティブコントロールとして未交尾雌成虫あるいは羽化間近の雌蛹を2頭入れた金網容器を誘引源としたトラップ、ネガティブコントロールとして誘引源のないトラップをそれぞれ5反復ずつ設置した。2005年は化合物 A、

D、または F 各 1mg を誘引源とするトラップをそれぞれ 3 個ずつ、プ・トエイ試験地には 6 月 16 日、クイ・ブリ試験地には 6 月 27 日に設置し、9 月末まで 2 週おきに調査した。



図1-1 プ・トエイ試験地における誘引試験の様子。樹上に白く見えるのがフェロモントラップである。

ウ 結果

イブシピラ未交尾雌成虫由来の揮発物質を GC-EAD 分析した結果 (図1-2)、GC-EAD 活性を示す 6 つのピークが存在することが明らかになった。これらの化合物の中で化合物 A、C、D、F について化学構造の推定ができたので、それらの誘引活性を野外試験によって明らかにした。ただし、化合物 C の構造推定は 2005 年のイブシピラ羽化シーズンが終了した後になされたので、研究期間中に野外試験まで行うことはできなかった。

2004 年の野外誘引試験では、未交尾雌トラップに 5 匹、化合物 D のトラップに 5 匹、化合物 A のトラップに 2 匹の雄成虫が誘殺された (表1-1)。誘殺された個体数は少なかったが、化合物 D に誘引された雄成虫数と未交尾雌成虫に誘引された雄成虫数に差がないことから、少なくとも化合物 D がフェロモン活性を有することはまちがいないと考えられる。2005 年の野外試験ではクイ・ブリ試験地において化合物 F に化合物 D や A よりも強い誘引活性が認められた。

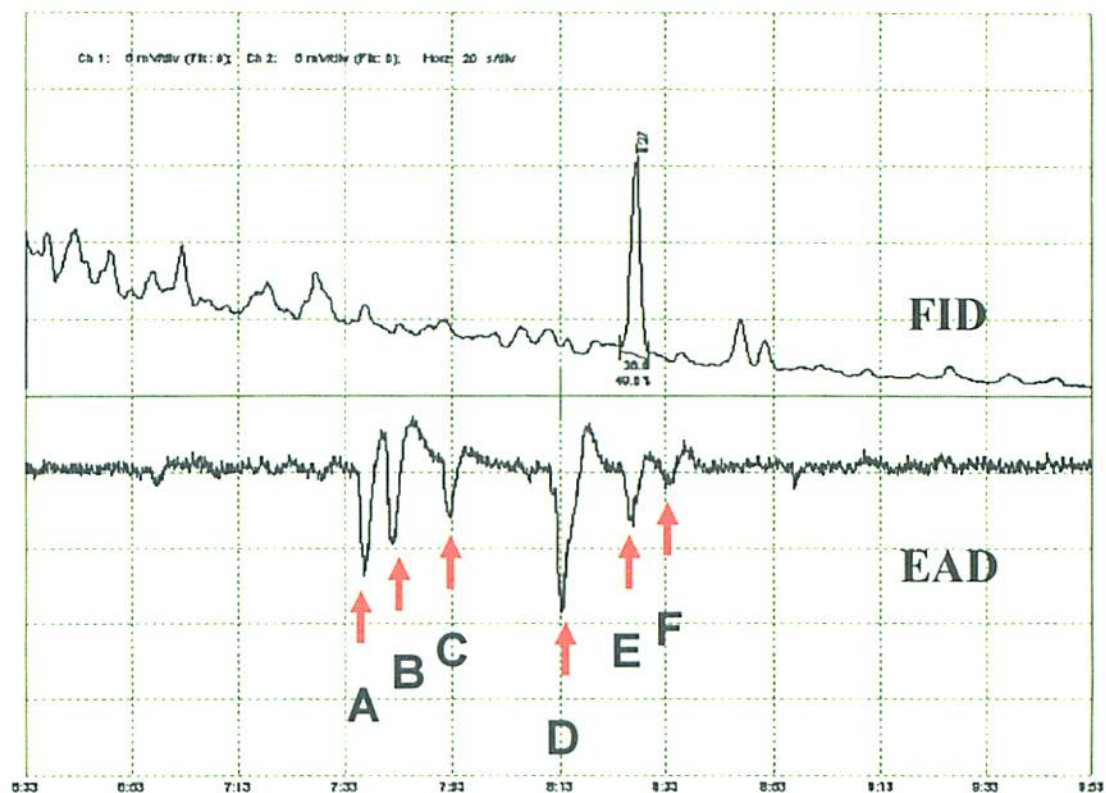


図1-2 イブシピラ雌成虫由来揮発成分のガスクロマトグラム(FID)と雄成虫触角の電気生理応答(EAD)。

表1-1 フェロモン候補化合物のイブシピラに対する誘引活性

誘引源	誘殺された雄成虫数		
	ブ・トエイ(2004)	ブ・トエイ (2005)	クイ・ブリ (2005)
化合物 A	2	0	0
化合物 D	5	2	2
化合物 F	0	1	9
未交尾雌	5	-	-
コントロール	0	0	0

エ 考察

イブシピラの性フェロモンに関してこれまで複数の報告がなされているが(Borek et al, 1991; Bosson & Gallois, 1982; Nakamuta et al, 2002)、野外において未交尾雌あるいは合成フェロモンに雄成虫が誘殺された報告例はなかった。今回初めて未交尾雌成虫を誘引源にしたトラップに雄成虫が捕獲された。さらに、未交尾雌由来の揮発成分中の複数の化合物が雄成虫を誘引することが

明らかとなり、今後の研究に大きな展望が開けたと考える。

オ 今後の問題点

誘引性を示す化合物を3種類特定したが、未交尾雌が放出するこれら3化合物の混合比を明らかにし、その混合比による誘引試験を行う必要がある。また、化合物 C は野外試験にて誘引性の有無を確認する必要がある。

カ 要約

イブシピラの性フェロモンを同定すべく、雌由来揮発成分の GC-EAD および野外誘引試験による活性を解明した。3種類の候補化合物の中で化合物 D と化合物 F に未交尾雌と同等の誘引活性が見られた。

キ 引用文献

- Borek, V., Kalinová, B., Valterová, I., Hochmut, R., and Vrkoc, J. (1991) Sex pheromone gland volatiles from *Hypsipyla grandella* females (Lepidoptera, Pyralidae, Phycitinae). Acta. Entomol. Bohemoslov. 88, pp 181-186.
- Bosson, G. A. & Gallois, M. (1982) Analyse de la sécrétion phéromone émise par les femelles vierges de la Mineuse des pousses de l'Acajou: *Hypsipyla robusta* (Moore) (Lepidoptere, Pyralidae, Phycitinae). C.R. Acad. Sc. Paris, 294, pp 819-821.
- Nakamuta, K., Matsumoto, K. & Kotulai J. R. (2002) Field trapping of the mahogany shoot borer, *Hypsipyla robusta* (Lepidoptera: Pyralidae), with synthetic sex pheromones in Sabah, Malaysia. JIRCAS Journal, 10, pp 9-12.

(執筆著者名: 中牟田潔、松本和馬)

2. チークビーホールボーラーの性フェロモン化合物の機能解明

ア 研究目的

荒廃林地の回復など環境保全を経済価値の高いチークの植林により可能とするため、チークビーホールボーラー *Xyleutes ceramica* に対して性フェロモン活性を示す候補化合物を野外誘引試験によって探索・同定する。未交尾雌を誘引源にしたトラップに雄成虫が誘殺されることが Eungwijarnpanya et al (1990) によって初めて示され、性フェロモンの存在が示唆された。その後われわれの研究により性フェロモンの主成分が化合物 P とその幾何異性体（化合物 Q, R, S）と推定された (Nakamuta et al, 1995; 2002)。そこで 2005 年の羽化シーズンにこれら 4 種化合物の誘引活性を野外試験にて明らかにした。さらに雌由来揮発成分の GC-EAD 分析により 4 種化合物以外のフェロモン活性成分を探索し、2006 年はこれら活性成分を加えた野外試験を実施した。

イ 研究方法

チーク林にて捕獲した雌成虫由来の揮発成分を SPME 法により捕集した。得られた試料を直接 GC-EAD 装置によって分析し、雄成虫触角に電気生理反応を引き起こすピークを特定した。さらにそれらピークの化学構造をガスクロマトグラフィー質量分析装置によって推定した。

チークビーホールボーラーの野外誘引試験は、表 2-1 に示したように 2005 年は 3 ヶ所、2006 年は 2 ヶ所にて、表に示した期間に行った。

誘引源として、性フェロモン候補化合物 4 種（化合物 P, Q, R, S）の 1mg/100 μ l ヘキサン溶液をゴムセプタムに含浸させたルアーを作製した。SE トラップの粘着板中央にルアーを置き（図 2-1）、このトラップをチーク林内高さ約 5m に設置した（図 2-1）。メ・カー採種園とリー試験地は 5 反復、ンガオ森林昆虫・微生物研究センターは 2 反復の実験区とした。

2006 年の誘引試験では前年に用いた 4 種類（化合物 P, Q, R, S）に加えて、新たに GC-EAD 活性を示すことのわかった化合物 T と化合物 P と T の 1:1 混合物も誘引源として用いた。

表 2-1 チークビーホールボーラーの野外試験を行った場所および期間

実施年	場 所	トラップ設置	トラップ回収
2005 年	パヤオ県メ・カー採種園	2005/2/18	2005/3/8
	ランバン県ンガオ森林昆虫・微生物研究センター	2005/2/25	2005/3/8
	ランブーン県リー試験地	2005/2/20	2005/3/6
2006 年	ランバン県ンガオ森林昆虫・微生物研究センター	2006/3/4	2006/3/11
	チェンマイ県メー・ホ・プラ試験地	2006/3/11	2006/3/31

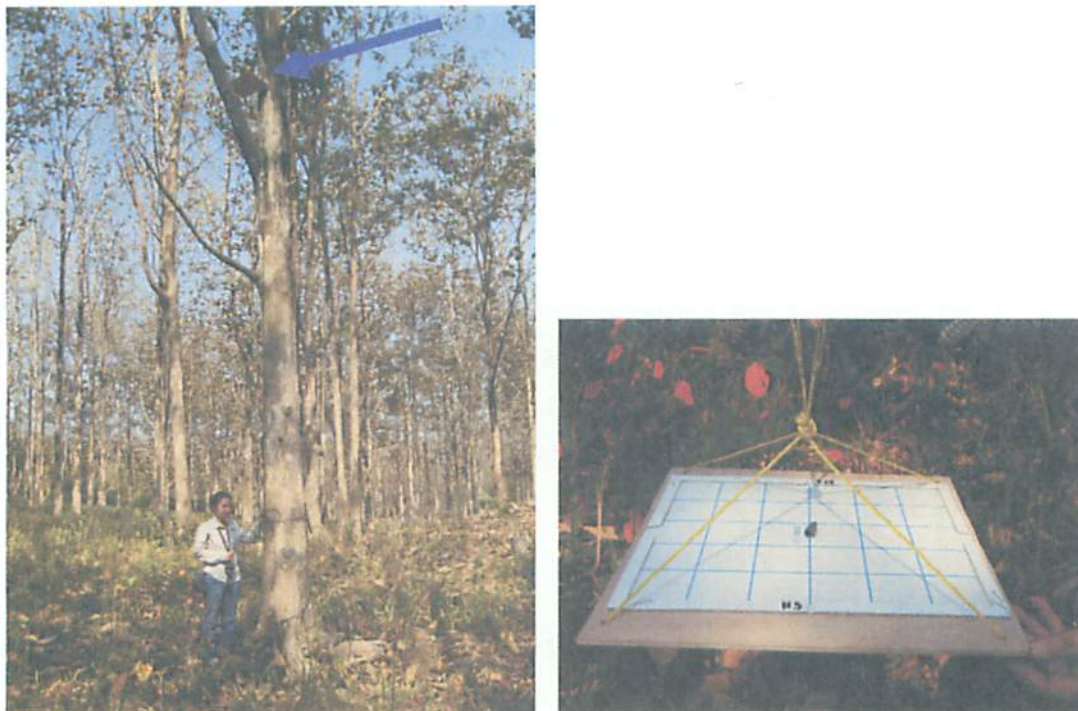


図2-1 メ・カー採種園内のチーク林に設置したトラップ(左、矢印)と粘着板を張り付けて作製したトラップ(右)。

ウ 結果

チークビーホールボーラー未交尾雌成虫由来の揮発物質をGC-EAD分析した結果(図2-2)、GC-EAD活性を示す3つのピークが存在することが明らかになった。このうち化合物Pはわれわれのこれまでの研究でフェロモン成分と考えていた化合物と同一であった。また、化合物Tは2005年にその化学構造が推定できたので、2006年の野外試験に供することとした。化合物Uは研究期間中に構造の推定まで至らなかった。

2005年に試験した4種の合成化合物は、3カ所の試験地のいずれにおいても野外での誘引活性を示さなかった。

2006年の誘引試験では、メー・ホー・プラ試験地で化合物Pと化合物Tの1:1混合物を誘引源としたトラップに1頭の雄成虫が誘殺された。それぞれを単独に用いた誘引源には誘殺された雄がいなかった。また、化合物Q, R, Sを誘引源にしたトラップにも雄成虫は誘殺されなかった。

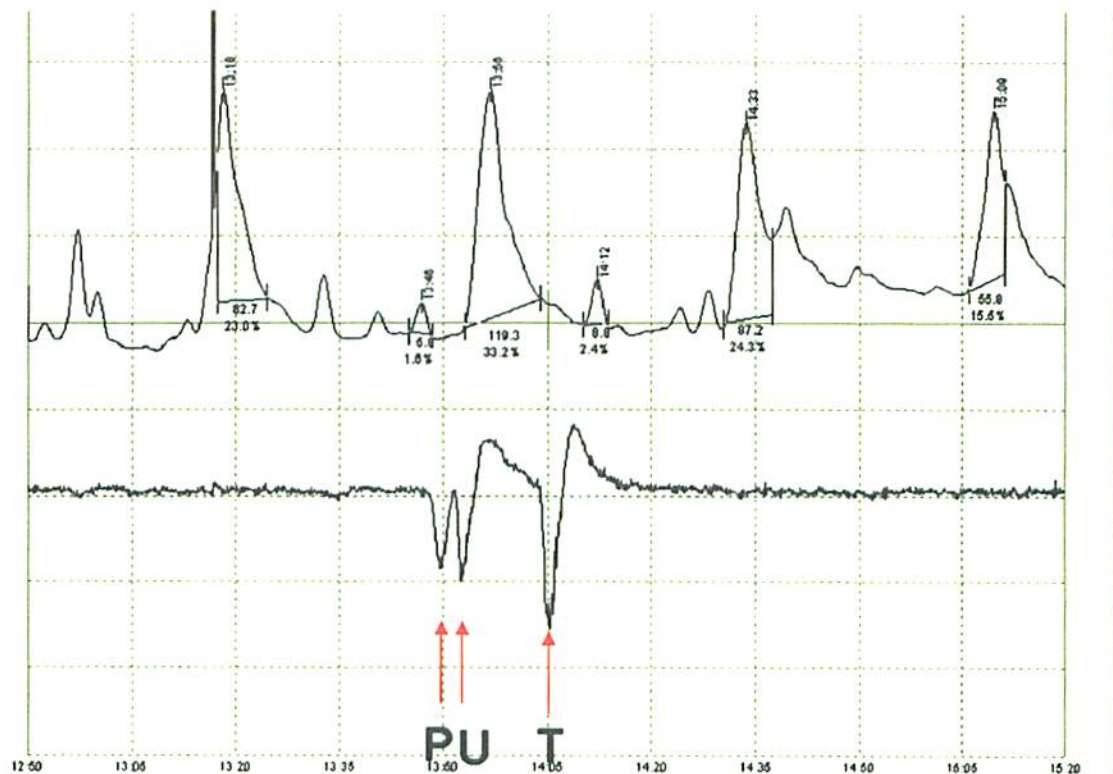


図2-2 チークビーホールボーラー雌成虫由来揮発物質のガスクロマトグラム(FID)と雄成虫触角の電気生理応答(EAD)

エ 考察

化合物PとTの1:1混合物に誘引活性が認められたが、誘殺数がわずか1頭なので再度誘引試験を行ってその誘引活性を確認する必要がある。また、GC-EAD 活性を示したピークUについて化学構造を推定する必要がある。

オ 今後の問題点

誘引性を示した化合物PとTに関して再度誘引試験を行って誘引性を確認するとともに、化合物Tの異性体についても誘引性を解明する必要がある。

カ 要約

チークビーホールボーラーの性フェロモンを同定すべく、雌由来揮発成分の GC-EAD および野外誘引試験による活性を解明した。5種類の候補化合物のなかで化合物Pと化合物Tの1:1混合物のトラップに雄1頭が誘殺された。

キ 引用文献

Kiyoshi Nakamuta, Tadakazu Nakashima, Toshiya Ikeda, Supachote Eungwijarnpanya & Chaweewam Hutacharern (1995) Mating behavior and the female sex pheromone in the teak beehole borer, *Xyleutes ceramicus*. Proceedings of Joint IUFRO Conference on "Behavior, Population Dynamics, and Control of Forest Insects"

Kiyoshi Nakamuta, Tadakazu Nakashima, Tohiya Ikeda, Supachote Eungwijarnpanya, SumridYincharoen and Chaweewan Hutacharern (2002) Sex pheromone of the teak beehole borer, *Xyleutes ceracmicus*. In "Pest Management in Tropical Forest Plantations", FORSPA Publication No. 30: 93-98.

Supachote Eungwijarnpanya, Kiyoshi Nakamuta, Chaweewam Hutacharern & Toshiya Ikeda (1990) Bionomics of the teak beehole borer, *Xyleutes ceramicus*, in northern Thailand: Mating behavior. Thai J. Forestry 9:196-202.

(執筆者名: 中牟田潔、中島忠一)

木材の耐久化及び機能化のための超臨界二酸化炭素処理の最適化手法の探索

研究課題：木材の耐久化及び機能化のための超臨界二酸化炭素処理の最適化手法の探索

目 次

研究の要約	174
第 1 章 超臨界二酸化炭素処理を用いた木材への薬剤注入処理法の探索	179
第 2 章 超臨界二酸化炭素処理による樹木由来高機能性成分の木材への注入と固定化	186

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

研究年次：平成 16～平成 17 年（2 か年）

予算区分：運営交付金（交付金プロジェクトⅡ）

II 主任研究者

主 査：機能化研究室長 松井宏昭（平成 16 年 4 月 1 日～平成 18 年 3 月 31 日）

副主査：機能化研究室 松永正弘（平成 16 年 4 月 1 日～平成 18 年 3 月 31 日）

バイオマス化学研究領域長 大原誠資（平成 16 年 4 月 1 日～平成 18 年 3 月 31 日）

取りまとめ責任者：松井宏昭

III 研究場所

森林総合研究所・本所

IV 研究目的

気体の拡散力を持ち、液体のように高い溶解力を有する「超臨界二酸化炭素」を用いた化学加工技術は、均一反応場の実現、処理時間の大幅な短縮などローコストで高性能化を図るだけでなく、グリーンケミストリー（製造から使用、廃棄するまでの全ての段階で環境に配慮した化学プロセス）の実現に欠かせない環境に優しい技術として化学工学会、工業界を問わず高い注目を集めており、各種原材料の抽出、薬剤の注入、洗浄、高性能化・機能化処理など、実用化を目指した競争的研究が積極的に行われている。

木材の耐久化・機能化についても、この技術は極めて有用である。例えば木材に薬剤を注入する場合、水を溶媒とする従来法では処理前から処理後の養生まで木材の含水率調整に多大な時間とエネルギーを要する。さらに、水溶性の薬剤が水分移動に伴って環境に流出するおそれがある。一方、非水系の注入技術も実用化されているが、ジクロロメタン等の溶媒が木材に残留することから、これが VOC として健康や環境に影響する懸念がある。これらを解決する技術として、環境に優しい超臨界二酸化炭素処理法を早急に木材にも適用し、低エネルギー消費型かつ環境に優しい高機能化・高耐久化技術を確立する必要がある。我々は、これまでに超臨界二酸化炭素処理により、処理後の水の浸透量が未処理木材と比較して約 7 倍に向上することを明らかにしてきた。これは、前処理としての有用性のみならず、超臨界二酸化炭素を直接溶媒とした場合に高浸透の注入が可能であることを示唆している。さらに、樹木有用成分の効率的な抽出法として超臨界二酸化炭素処理法が有効であることを明らかにしてきた。

本研究では、これらの成果を踏まえ、木材の耐久化及び機能化のための超臨界二酸化炭素処理の最適化手法を探索することを目的とする。

V 研究方法

第 1 章 超臨界二酸化炭素処理を用いた木材への薬剤注入処理法の探索

超臨界二酸化炭素やエントレーナ（供溶媒）への溶解性を考慮して数種の木材保存剤を選択し、

各種条件にてスギ心材に注入し、重量増加率や呈色試験、SEM-EDXA 観察、HPLC・GC 分析などから試片内部への浸透状況や注入量を観察・評価した。

第2章 超臨界二酸化炭素処理による樹木由来高機能性成分の木材への注入と固定化

カテキン、アカシアタンニンの低分子量及び高分子量画分を各種条件にて超臨界二酸化炭素処理し、スギ心材への注入試験を行った。木材の重量増加あるいは処理液中のタンニン成分の含有量を定量することにより、木材中への注入量を評価した。また、タンニン成分を注入した木材の VOC 吸着能や抗酸化性を評価した。

VI 研究結果

研究計画表

課題名	担当	期間
超臨界二酸化炭素処理を用いた木材への薬剤注入処理法の探索	機能化研 木材保存研	16～17
超臨界二酸化炭素処理による樹木由来高機能性成分の木材への注入と固定化	樹木化学研究領域	16～17

第1章 超臨界二酸化炭素処理を用いた木材への薬剤注入処理法の探索

容積約 90cc のバッチ容器内にスギ心材試片（50mm(L)×20mm(R)×20mm(T)）1 本と木材保存剤としてアルコールへの溶解度が非常に高いテブコナゾールと IPBC を保存剤として選択し、注入実験を行った。温度は 40～60℃、圧力は 30MPa、処理時間が 0.5～3h で、薬剤 2.5～5.0g とメタノールもしくはエタノール 5～10ml を加えてバッチ処理した。その結果、テブコナゾールでは試片の重量増加率は 2.6～3.3% と高い値を示した。そこで、試片内部への浸透程度を評価するため、試片を両木口面から 15mm のところで切って三分割し、側面 2mm を切り取ってから各部位を粉碎した。そして各ブロックから採取した木粉をメタノールで抽出し、注入薬剤量を HPLC で測定したところ、中央の試片ブロックにおいてもテブコナゾールが 0.3～2.3% 注入されていることがわかり、防腐・防蟻性能の発揮に十分な量の薬剤が注入されていることを確認した。IPBC でも、試片全体の重量増加率は 0.3～4.0%、GC 分析による試片中央部の IPBC 含有率は 0.5～1.8% であり、テブコナゾールと同様に試片内部まで十分量の薬剤が注入されていることが明らかとなった。また、IPBC にはヨウ素が含まれているため、試片中心部を SEM-EDXA で観察し、元素の測定を行ったところ、ヨウ素は仮道管二次壁や細胞間層からは検出されなかったが、細胞内腔からは高い濃度で検出された。このことから、IPBC は主に細胞内腔を経由して試片中心部まで到達しており、細胞内腔から仮道管二次壁や細胞間層に浸透・湿潤することはほとんどないと考えられる。

試片サイズを大きくしても IPBC 注入が問題なく行われるかどうか確認するため、容積約 900cc のバッチ容器を用いて、体積が約 10 倍のスギ心材試片（100mm(L)×50mm(R)×40mm(T)）を IPBC 注入処理した。処理条件は 40℃、26MPa、3h で、IPBC を 25g、エタノールを 50ml 加えてバッチ処理した。その結果、試片の重量増加率は 2.9～3.3% で、試片サイズが小さいときと比較しても十分な量の IPBC が含浸されていることがわかった。GC 分析でも試片中央部において IPBC の含有率は 0.9

～2.9%であることが確認され、サイズの大きい試片でも IPBC 注入が可能であることがわかった。

第2章 超臨界二酸化炭素処理による樹木由来高機能性成分の木材への注入と固定化

バッチ容器内にスギ心材試験片（50mm (L) × 20mm (R) × 20mm (T)）とタンニン系試料（1.0g）を入れ、さらにエントレーナーとしてエタノール、90%エタノール水あるいは 80%メタノール水（5-10mL）を加えた。容器を密閉後、温度 40-60℃、圧力 30MPa の条件で 3 時間、超臨界二酸化炭素処理を行った。カテキンを供試した場合（エントレーナーとしてエタノールを使用）には、60℃、3 時間の条件で 0.8%の重量増加が認められた。しかし、カテキンのエタノールに対する溶解性に限界があり、カテキンの供試量をさらに増大して処理を行うことができなかった。試験片を用いず、カテキンのみを用いて上記と同様の条件で超臨界二酸化炭素処理を行ったところ、いくつかの変性物の生成が確認された。このことは、超臨界二酸化炭素処理においてカテキンが一部変性を受けることを示している。

アカシアタンニンを用いた場合には、試験片へのタンニンの注入がほとんど認められなかった。アカシアタンニンの分子量が大きいこと及びアカシアタンニンがエタノールに完全に溶解しないことが原因と考えられた。そこで、エタノールに対する溶解性を高めるため、アカシアタンニンを酢酸エチル抽出して低分子量画分を分画した。得られたアカシアタンニン低分子量画分を用いて超臨界二酸化炭素処理を行ったところ、40℃、3 時間の条件で 0.4%の重量増加が認められた。次に、アカシアタンニン（低分子量画分）に対する溶解力がエタノールよりも高い 90%エタノール水をエントレーナーとして用いて同様の処理を行ったところ、1.2%の重量増加が認められた。

スギ心材中にはテルペン系の脂溶性抽出成分が存在することが知られている。そこで、予めスギ試験片中の脂溶性成分を除去する前処理を試みた。スギ心材試験片を 80%メタノール水をエントレーナーに用いて超臨界二酸化炭素処理（40℃、3 時間）することにより、試験片重量に対して 1.2%の脂溶性抽出成分を除去することができた。その後、アカシアタンニン（低分子量画分）及びエントレーナーとして 90%エタノールを用いて超臨界二酸化炭素処理を行ったところ、前処理後の試験片に対して 1.7%の重量増加が認められた。

上記で得られたアカシアタンニン（低分子量画分）注入試験片のホルムアルデヒド吸着能を JIS 規定のデシケータ法に準じて測定した。コントロールに比べてホルムアルデヒド濃度が 38%減少したが、タンニンを注入していないスギ試験片でもホルムアルデヒド濃度が 30%減少することから、この効果は注入したタンニンの効果というよりも、試験片自体によるホルムアルデヒド吸着が原因と考えられた。一方、アンモニアガスの吸着は顕著であった。アカシアタンニンは B 環がピロガロール骨格を有する縮合型タンニンであり、アンモニアとの反応性が高いことが知られている。従って、上記アカシアタンニン注入試験片のアンモニアガス捕捉能は、注入したアカシアタンニンの機能によるものと考えられる。

次に、アカシアタンニン注入試験片の抗酸化作用の測定を試みた。密閉容器中にアカシアタンニン注入試験片とカテキン水溶液を入れ、一定時間経過後のカテキンの酸化による消失量を測定することによって試験片の抗酸化能を評価した。上記で得られたアカシアタンニン注入試験片の抗酸化作用の測定では、活性を確認することができなかった。抗酸化性を付与するためには、さらに多量のタンニンを木材中に注入する必要があると考えられた。

VII 今後の問題点

第1章 超臨界二酸化炭素処理を用いた木材への薬剤注入処理法の探索

今回の研究では超臨界二酸化炭素処理の効果を確認するため大過剰のテブコナゾールまたはIPBCを用いて実験を行った。今後はより少ない量の薬剤で処理した場合の注入量について検討していく必要がある。

第2章 超臨界二酸化炭素処理による樹木由来高機能性成分の木材への注入と固定化

タンニンの超臨界二酸化炭素への溶解性に限界があることから、分子内に多量のガロイル基を含む茶葉カテキン類やマングローブ樹皮タンニン等の含水エタノールや含水メタノールに対する溶解性の高いタンニン類を試料とする必要がある。また、超臨界二酸化炭素の処理温度を高くすると、タンニンが一部変性することが確認されたことから、超臨界二酸化炭素処理はタンニンの木材中への注入よりも、タンニンの有用物質への変換の手段として利用する方が有効であると思われる。

VIII 研究発表

第1章 超臨界二酸化炭素処理を用いた木材への薬剤注入処理法の探索.

- 1) 松永浩史(2004)銅系木材保存剤の木材組織における分布特性, 木材工業 59(3), 108-112.
- 2) 松永浩史・武智洋平・松村順司・小田一幸(2004)銅系木材保存剤の固着性に及ぼす木材組織の影響, 木材保存, 30(3), 95-102.
- 3) 松永正弘・松井宏昭(2004)超臨界水及び亜臨界水処理によるスギの高速化学変換, 木材学会誌, 50(5), 325-332.
- 4) H. Matsunaga, J. Matsumura and K. Oda(2004)X-ray Microanalysis Using Thin Sections of Preservative-treated Wood - relationship of wood anatomical features to the distribution of copper - IAWA Journal 25(1), 79-90.
- 5) H. Matsunaga, J. Matsumura and K. Oda(2004)Anatomical Characteristics to the Distribution of Water-borne Copper Wood Preservatives in Wood. The Internat. Res. Group on Wood Preserv. Doc. IRG/WP04-40277 Ljubljana, Slovenia.
- 6) H. Matsunaga, Y. Takechi, J. Matsumura, K. Oda and M. Kiguchi (2004)Wood Anatomical Influence on the Distribution and Fixation of Copper-Based Preservatives. 3rd International Symposium on Surfacing and Finishing of Wood Kyoto, Japan 215-222.
- 7) M. Matsunaga, H. Matsunaga, Y. Kataoka and H. Matsui (2005)Improved water permeability of sugi heartwood by pretreatment with supercritical carbon dioxide J. Wood. Sci., 51(2), 195-197.
- 8) 松永浩史・松村順司・小田一幸(2005)SEM-EDS において特性 X 線の空間分解能を向上させる試み, 医学生物学電子顕微鏡技術学会誌, 19(1), 87.
- 9) 松永正弘・松井宏昭(2004)超臨界二酸化炭素処理による高浸透性木材の創製, 化学工学会第 69 年会講演要旨集.
- 10) 松永正弘・松永浩史・片岡厚・松井宏昭(2004)超臨界二酸化炭素前処理による木材の浸透性改善(III) -スギ材と他樹種との比較-, 第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 284.
- 11) 松永浩史・松永正弘・片岡厚・木口実・松井宏昭(2004)超臨界二酸化炭素前処理による木材の浸透性改善(IV) -壁孔膜に及ぼす影響-, 第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 603.

- 12) 松永正弘・松井宏昭・山本誠一・大塚剛樹・清水孝浩(2004)亜臨界水処理による木材のケミカルリサイクル(II)-半流通式処理装置を用いたラボスケールでの最適処理条件の模索-, 第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 434.
- 13) 松永正弘・松井宏昭・大塚剛樹・山本誠一(2005)亜臨界水処理による木材のケミカルリサイクル(III)-半流通式処理装置による実用化に向けたスケールアップ実験-, 第 55 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 147.
- 14) 松永浩史(2005)薬剤の材内分布及び材中での定着性に関する研究, 第 21 回日本木材保存協会年次大会論文集, 65-70.
- 15) 松永正弘・松井宏昭・山本誠一・大塚剛樹・清水孝浩(2004)超臨界水及び亜臨界水処理による木質資源の高速糖化, 森林総合研究所平成 15 年度研究成果選集 2003, 40-41.
- 16) 松永正弘・松井宏昭(2004)超臨界水及び亜臨界水処理による木質資源の高速糖化, 農林水産主要研究成果(平成 15 年度)農林水産技術会議事務局, 80-81.
- 17) 松永正弘(2005)超臨界水・亜臨界水処理技術を用いた木質資源の高速糖化とバイオエタノール生産への利用, エコマテリアルフォーラムニュース, 43, 2-3.
- 18) 松永正弘(2005)超臨界二酸化炭素を用いた木材改質処理技術の開発, 第 35 回木材の化学加工研究会シンポジウム講演集, 1-6.
- 19) 松永正弘(2005)木材からアルコールを創り出す-超臨界水及び亜臨界水処理を用いた木材の高速糖化-, 農林水産技術研究ジャーナル, 28(12), 25-29.
- 20) 松永正弘・松井宏昭・片岡厚(2006)木材の改質方法, 特願 2006-037401.

IX 研究担当者

第1章 超臨界二酸化炭素処理を用いた木材への薬剤注入処理法の探索

松永正弘, 松永浩史, 桃原郁夫, 大村和香子, 松井宏昭, 片岡厚, 瀬戸山幸一

第2章 超臨界二酸化炭素処理による樹木由来高機能性成分の木材への注入と固定化

大原誠資

第1章 超臨界二酸化炭素処理を用いた木材への薬剤注入処理法の探索

ア. 研究目的

近年、製造から廃棄に至る全プロセスにおいて環境負荷の低いグリーンプロセス技術の開発が求められるようになった。そこで、環境調和型溶媒の一つとして超臨界二酸化炭素の利用が期待されている。二酸化炭素の臨界点は31℃・73気圧と室温付近にあり、非常に扱いやすい上、毒性が低く不燃性であるために安全であること、化学的にも安定であること、安価であることなど、多くの利点を持っている。さらに、処理後の乾燥工程も必要なく、減圧操作によって二酸化炭素と未反応薬剤とを容易に分離・回収し、再利用することが可能であるため、廃液処理の問題もない。以上のような多くの利点を持つ超臨界二酸化炭素は、香料や食品などの分野ではすでに幅広く実用化されている^{1,2)}。

木材保存分野においても、超臨界二酸化炭素を薬剤のキャリア溶媒として利用するための研究が数多く行われている。注入薬剤には、テブコナゾールや3-ヨード-2-プロピニルブチルカーバメート (IPBC)、シラフルオフェンなどが選択され、中比重ファイバーボード (MDF) や配向性ストランドボード (OSB)、パーティクルボード、合板など、木質系複合材料を対象とした研究が多い³⁻⁹⁾。それに対して、木材を対象とした保存処理研究もいくつか報告があるが^{6,9)}、その数は少ない。

一方、筆者らは実大材レベルでの木材を対象とした超臨界二酸化炭素処理技術の開発を最終目標とし、これまで一連の研究を進めてきた¹⁰⁻¹³⁾。超臨界二酸化炭素処理の木材に対する有効性を検討してきた結果、スギ心材部の水浸透量が、未処理材と比較して最大で約7倍に改善されること、また、浸透性の改善は特に壁孔部分に堆積している沈着物質が除去されることに由来する可能性が高いことを明らかにした¹⁴⁾。

そこで、本研究ではスギ心材を対象に、超臨界二酸化炭素を用いた薬剤注入処理を行った。そして試片各部位の薬剤注入量の測定や組織内での分布状態の観察を行うことで、スギ心材に対する超臨界二酸化炭素処理の有効性を評価した。

イ. 方法

1. 供試材料

実験にはスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) を用い、心材部からサイズの異なる2種類の試片を作製した。試片寸法は小試片が50mm(L)×20mm(R)×20mm(T)、大試片が100mm(L)×50mm(R)×40mm(T)である。実験を行う前に試片を60℃で二晩減圧乾燥し、全乾状態での質量と寸法をあらかじめ測定した。

2. 超臨界二酸化炭素処理

実験に用いた処理装置の概略図を図1-1に示す。小試片の実験では内寸が35mm(f)×94mm(L)のバッチ容器を用い、テブコナゾール (純度93%以上、ランクセス (株)) もしくは IPBC (純度97%以上、ランクセス (株)) を容器内に入れた。次に、薬剤と試片とが直接接触しないよう、試片を脚付きの金網カゴに乗せてバッチ容器に入れ、密閉した。真空ポンプで容器内を真空にした後、二酸化炭素 (純度99.9%以上、ニチゴー日興 (株)) を充填させた。最初は炭酸ガスボンベから直接二酸化炭素をバッチ容器に送り、続いて冷却して液化させた二酸化炭素を送液ポンプで注入した。

さらに電気ヒーターでバッチ容器の外側から加熱し、容器内部を所定の温度・圧力まで昇温昇圧した。それからエントレーナ（共溶媒）としてメタノール（純度 99.8%、片山化学工業（株））またはエタノール（純度 99.5%、和光純薬工業（株））を送液ポンプでバッチ容器内に注入した。そして、マグネチックスターラーで攪拌（約 200rpm）させつつバッチ処理を行った。バッチ処理の詳細な処理条件は以下のとおりである。

- ①テブコナゾール注入処理：テブコナゾール 2.5g または 5.0g, メタノール 5ml または 10ml, 温度 40℃, 圧力 30MPa, 処理時間 0.5hrs または 3.0hrs
- ②IPBC 注入処理：IPBC 2.5g または 5.0g, エタノール 5ml または 10ml, 温度 60℃, 圧力 30MPa, 処理時間 0.5hrs または 3.0hrs

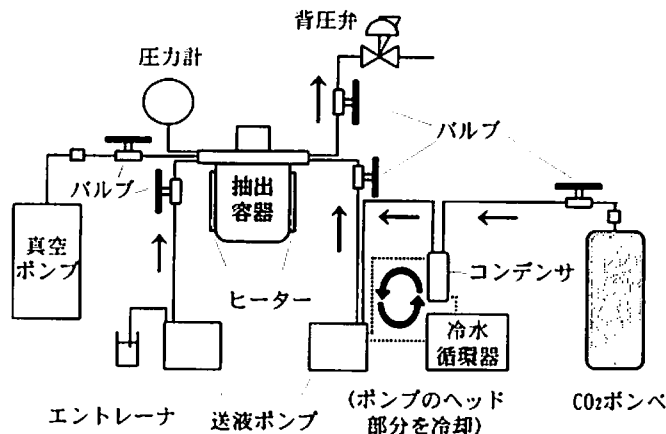


図1-1 超臨界二酸化炭素処理装置概略図

処理後、取り出した試片は 60℃で二晩減圧乾燥し、重量と寸法を測定して重量増加率と寸法変化率を求めた。

大試片の実験では寸が80mm(f)×180mm(L)のバッチ容器を用い、IPBCを25g、エタノールを50ml入れて、40℃・26MPa・3hrsの条件でバッチ処理した。

3. 薬剤注入量測定

3.1 テブコナゾールの注入量分析

小試片を図 1-2 のように木口面から L 方向に 2 分割し、一方を(a), 他方を(b)とした。(b)については試片表層に付着したテブコナゾールの影響を排除するために木口面を除いた側面を 2mm ずつ切り取った。(a)および(b)両木口面から 15mm のところで 3 分割し、端から 1, 2, 3 と番号をつけた。各試験片を粉碎し（粒径：約 1.5mm），60℃で一晩乾燥して重量を測定した後、20ml のメタノールで超音波をかけながら 2 時間抽出処理した。抽出した試料はブフナロートで吸引濾過し、さらに少量のエタノールで木粉を洗浄したのち濾過液をエバポレータで減圧乾固した。

乾固した試料を希釈液（メタノール：イオン交換水：酢酸＝80：20：1.5（v/v））10ml に溶解させ、さらに 100 倍に希釈した後、高速液体クロマトグラフ（HPLC）を用いてテブコナゾール濃度を測

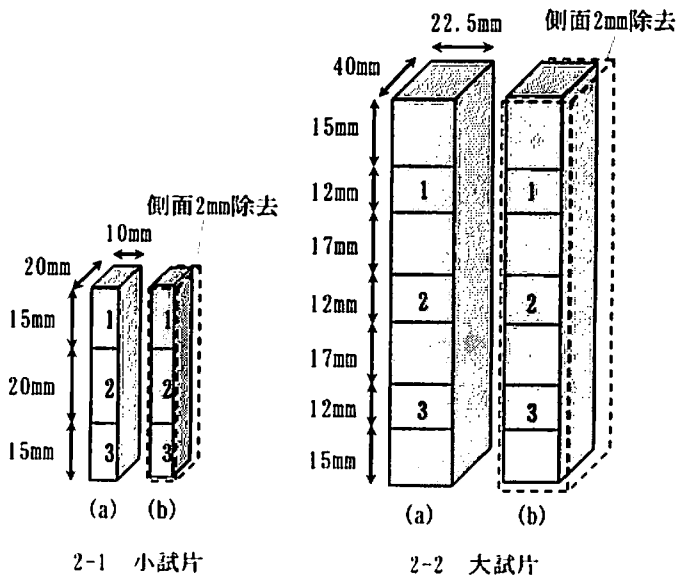


図1-2 薬剤注入量分析での試片分割図

定した。分析条件は、カラム：信和化工（株）社製 STR ODS-II, 溶離液：メタノール：イオン交換水：酢酸 = 80:20:1.5 (v/v), 流速：1 ml/min, カラム温度：70 ℃, 検出器：島津 SPD-10A, 検出波長：220 nm とした。

3.2 IPBC の注入量分析

小試片の分割方法及び木粉の作成方法は 3.1 と同様である。大試片については図 1-2 のように 7 分割したうちの 3 試験片から木粉を作成した。木粉は 60℃で一晩乾燥して重量を測定した後、各試料 2g にギ酸 10ml とトルエン（純度 99.5 %, 和光純薬製）60ml を加え、超音波で 60 秒間浸透（2 回）させ、トルエン 100ml を加え 48 時間浸漬し、抽出した。抽出した試料はプフナロートで吸引濾過し、濾過液に蒸留水 100ml を加え洗浄した。トルエン層を採取した後、無水硫酸ナトリウム（純度 99.0 %, 和光純薬製）を加え乾燥し、エバポレーターで減圧乾固した。乾固した試料に内部標準溶液 1ml を加えて測定試料とした。内部標準物質にはナフタレン（純度 99%, 和光純薬製）を使用し、アセトン 50ml に対してナフタレンを 0.0250g 加え、内部標準溶液とした。そしてガスクロマトグラフ（GC）を用いて IPBC の濃度を測定し、木粉中の注入量を算出した。装置は Shimadzu GC 14B（島津製作所製）を用い、検出器は FID を使用した。分析条件は以下の 2 通りで行った。①小試験体用：カラム：DB-1HT(Agilent 製, 15 m× 0.25 mmf, 膜厚 0.1μm), 120℃(1min, hold), 120 to 165℃(5℃/min), 165℃(0 min, hold), ②大試験片：カラム：DB-5 (Agilent 製, 30m× 0.53 mmf, 膜厚 1.5μm), 80℃(1 min, hold), 80 to 280℃(10℃/min), 280℃(5 min, hold)。

4. IPBC 注入試片の SEM-EDXA 観察・分析

IPBC ($C_8H_{12}IO_2N$) 中にはヨウ素が含まれている。そこで、IPBC 処理材中のヨウ素を SEM（走査電子顕微鏡 日本電子 JSM840）-EDXA（エネルギー分散形 X 線分析装置 日本電子 JED2140）で観察・分析することによって、材内における IPBC の浸透経路および濃度分布を調べた。試片の中心部から、電子顕微鏡用試料を横断面、放射断面について作製し、横断面についてはスライディングミクロトームで面出し、放射断面についてはのみで割裂して、それぞれの断面を割出した。そのあと、試料をカーボンで真空蒸着（盟和商事 TB500）し、カーボン支持台に載せて分析に供した。分析条件は次の通りである。加速電圧：15kV, 照射電流量：1.5nA, 作動距離：39mm, X 線取り出し角：40°, 試料傾斜角：0°, エネルギー幅：3.88-4.00keV (I-La)。なお、点分析は有効時間 100 秒間で行った。

表1-1 テブコナゾール注入処理試片の重量増加率および薬剤含有率

処理条件	重量増加率 (%)	HPLC分析	
		試片No.	薬剤含有率 (%)
処理時間：3.0hrs 薬剤量：2.5g メタノール：5ml	2.6	(a)-1	4.6
		(a)-2	1.6
		(a)-3	5.7
		(b)-1	2.5
		(b)-2	1.4
		(b)-3	3.9
処理時間：0.5hrs 薬剤量：2.5g メタノール：5ml	3.2	(a)-1	2.8
		(a)-2	0.7
		(a)-3	4.2
		(b)-1	3.1
		(b)-2	0.3
		(b)-3	4.9
処理時間：3.0hrs 薬剤量：5.0g メタノール：10ml	3.3	(a)-1	4.1
		(a)-2	1.9
		(a)-3	7.3
		(b)-1	3.9
		(b)-2	2.3
		(b)-3	6.8

ウ. 結果

1. テブコナゾール注入量の評価

テブコナゾール注入処理した小試片の重量増加率および HPLC 分析結果を

表 1-1 に示す。重量増加率は、処理時間が長く、仕込薬剤量が多いときに最も高い値を示し、3.3%であった。しかし、処理時間や仕込薬剤量を減じた他の処理条件でも 3%前後の高い重量増加率が得られた。寸法変化率は 3 方向いずれも $\pm 0.3\%$ 未満で、挫屈や変形など外観上の変化も目視では確認されなかった。

次に、試片内部へのテブコナゾール注入量を評価するため、HPLC 分析により薬剤含有率を測定した。側面を除去しなかった試片(a)と除去した試片(b)とを比較したところ、(b)のテブコナゾール含有率が若干少なくなる傾向にあったものの、両者に顕著な差は見られなかった。また、試片を 3 分割し、各部位のテブコナゾール含有率を測定した結果、含有率は両端で特に高くなったが、中心部においても 0.3~2.3%の含有率が得られた。

2. IPBC 注入量の評価

IPBC 注入処理を行った試片の重量増加率および GC 分析結果を表 1-2 に示す。小試片の場合、重量増加率は 0.3~4.0%で、処理時間が長く、仕込薬剤量が多い試片で高い値となった。また、GC 分析で得られた IPBC 含有率でも、重量増加率ほど極端ではないが、ほぼ同様の傾向が認められた。試片中心部の IPBC 含有率は 0.5~1.8%で、テブコナゾールと同じく、試片内部まで防腐・防蟻性能の発揮に十分量の薬剤が注入されていることが明らかとなった。なお、側面除去の有無による IPBC 含有率の顕著な差異は見られなかった。また、寸法変化率は 3 方向とも $\pm 0.6\%$ 未満で、外観上の大きな変化は確認されなかった。

一方、大試片の場合、重量増加率は 2.9~3.3%で、小試片と比較しても十分な量の IPBC が注入されていることが確認された。さらに GC 分析でも試片中心部において IPBC の含有率は 0.9~2.9%であることが確

表1-2 IPBC注入処理試片の重量増加率および薬剤含有率

1. 小試片 (50mm(L)×20mm(R)×20mm(T))

処理条件	重量増加率(%)	GC分析	
		試片No.	薬剤含有率(%)
処理時間：3.0hrs 薬剤量：2.5g エタノール：5ml	0.9	(a)-1	2.0
		(a)-2	0.9
		(a)-3	2.3
		(b)-1	1.0
		(b)-2	0.7
		(b)-3	2.4
処理時間：0.5hrs 薬剤量：2.5g エタノール：5ml	0.3	(a)-1	1.9
		(a)-2	0.9
		(a)-3	2.5
		(b)-1	1.6
		(b)-2	0.5
		(b)-3	1.2
処理時間：3.0hrs 薬剤量：5.0g エタノール：10ml	4.0	(a)-1	1.8
		(a)-2	2.4
		(a)-3	3.0
		(b)-1	2.3
		(b)-2	1.8
		(b)-3	2.4

2. 大試片 (100mm(L)×50mm(R)×40mm(T))

処理条件)	重量増加率(%)	GC分析	
		試片No.	薬剤含有率(%)
処理時間：3.0hrs 薬剤量：25.0g エタノール：50ml	3.3	(a)-1	4.2
		(a)-2	1.0
		(a)-3	0.8
		(b)-1	2.6
		(b)-2	0.8
		(b)-3	0.9
処理時間：3.0hrs 薬剤量：25.0g エタノール：50ml	3.1	(a)-1	2.9
		(a)-2	0.9
		(a)-3	0.9
		(b)-1	1.7
		(b)-2	0.8
		(b)-3	1.2
処理時間：3.0hrs 薬剤量：25.0g エタノール：50ml	2.9	(a)-1	1.0
		(a)-2	0.5
		(a)-3	1.4
		(b)-1	1.1
		(b)-2	0.7
		(b)-3	2.5

認された。

3. 木材組織内におけるIPBCの分布

IPBCの木材内における分布を確認するため、IPBC注入処理（処理条件：温度40℃、圧力30MPa、時間3hrs、IPBC 5g、エタノール 10ml、重量増加率4.5%）した小試片を別途用意し、SEM-EDXA分析を行った。横断面における分析（図1-3）から、ヨウ素は仮道管二次壁や細胞間層からは検出されなかった。そこで、放射断面用試料を使ってさらに分析を行った。結果を図1-4に示す。図より、仮道管細胞内腔面からヨウ素が高濃度で検出された。また、軸方向柔細胞内容物からはヨウ素は検出されなかった。

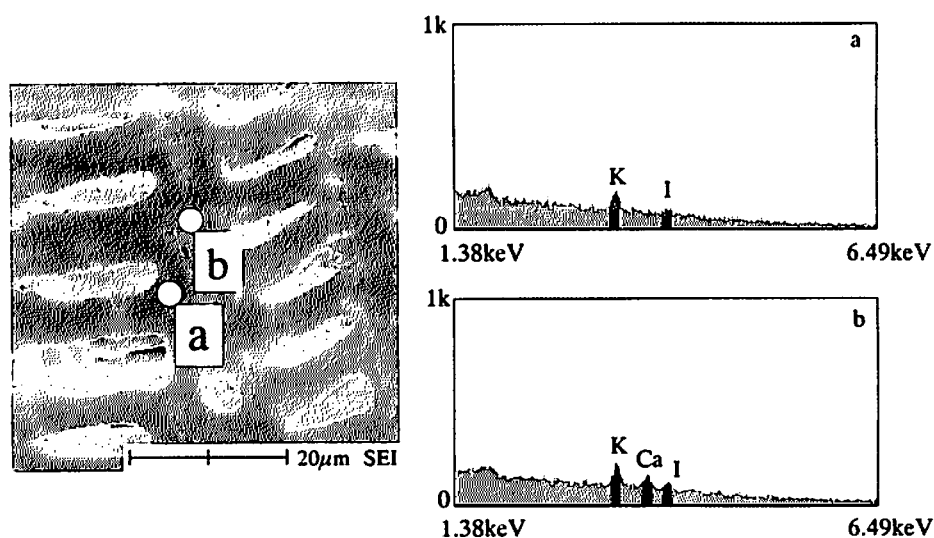


図1-3 IPBC注入試片中心部（横断面）のSEM-EDXA分析
a：仮道管二次壁，b：細胞間層

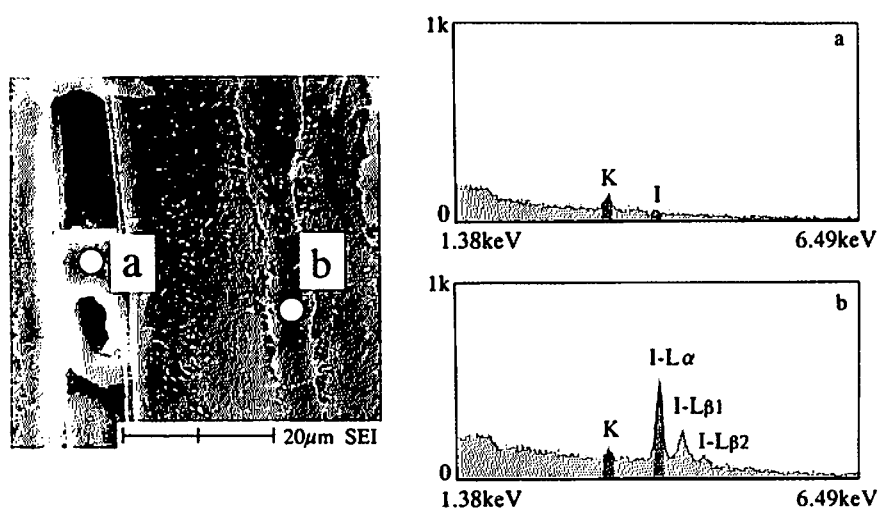


図1-4 IPBC注入試片中心部（放射断面）のSEM-EDXA分析
a：軸方向柔細胞内容物，b：仮道管細胞内腔面

エ 考察

超臨界二酸化炭素を用いたテブコナゾール注入処理においては、Acda ら⁹⁾が、時間処理と薬剤含浸量との間に相関関係が見られなかったことを報告している。このことから、おそらくテブコナゾールは短時間処理でも比較的速やかに材内へ注入される薬剤であると予想される。本研究においても、テブコナゾール注入処理では短時間処理でも約 3%の重量増加率が得られた。さらに、テブコナゾールは試片表面や表層部にのみ分布しているのではなく、内部まで注入されており、防蝕性能の発揮に十分な量のテブコナゾールが、試片中心部まで注入されていることが確認された。中心部までの薬剤注入料に関しては、処理時間が長く仕込薬剤量の多い試片の方が中心部のテブコナゾール含有率が高くなる傾向が認められた。以上の結果より、木質系複合材料だけでなく、木材のスギ心材に対しても、超臨界二酸化炭素処理によってテブコナゾールを試片中心部まで注入させることが可能であることが明らかとなった。

一方、IPBC 注入処理を行った試片の場合も、テブコナゾールと同じく、試片内部まで防蝕・防蟻性能の発揮に十分量の薬剤が注入されていることが明らかとなった。大試片についても、小試片と比較しても十分な量の IPBC が注入されていることが確認され、超臨界二酸化炭素処理はサイズの大きい試片についても IPBC 注入が可能であることが分かった。

スギ心材の場合、超臨界二酸化炭素処理によって有縁壁孔に堆積していた沈着物質が取り除かれ、浸透性が大幅に向上することを以前に報告した¹⁴⁾。従って、今回の SEM-EDXA 分析の結果から、本研究においても、超臨界二酸化炭素処理の間、試片の浸透性を向上させながら IPBC は細胞内腔を経由して試片の中心部まで到達し、結果として細胞内腔面に IPBC が蓄積したと考えられる。また、IPBC は超臨界二酸化炭素よりも主としてエントレーナであるエタノールに溶解している。そして、エタノールが超臨界二酸化炭素中で分散し、試片内へ注入される。従って、仮道管二次壁や細胞間層で IPBC が検出されなかったのは、分散したエタノールが細胞内腔面から木材実質中へ浸透・湿潤することがほとんどなかったためと推測される。これは処理条件によって改善される可能性もあり、今後検討する必要がある。

いずれにしても、超臨界二酸化炭素処理が難浸透部位の心材試片の中心部に、薬剤を浸透させることが可能であることが、SEM-EDXA 分析によって明らかとなり、本処理の有効性が示された。

オ 今後の問題点

今回の研究では超臨界二酸化炭素処理の効果を確認するため大過剰のテブコナゾールまたは IPBC を用いて実験を行った。今後はより少ない量の薬剤で処理した場合の注入量について検討していく必要がある。

カ 要約

本研究では、スギ心材試片を対象に超臨界二酸化炭素を用いたテブコナゾール及び IPBC の注入処理を行い、薬剤含有率の測定や木材組織内での薬剤分布の観察を行った。その結果、薬剤は試片表面や表層部だけでなく、試片中心部まで注入されていることが明らかとなった。また、試片サイズを大きくしても、防蝕・防蟻効果を発揮するのに十分な量の薬剤が試片中心部で検出された。SEM-EDXA を用いて IPBC 注入試片を観察したところ、仮道管細胞内腔から高い濃度でヨウ素が検出された。これは、超臨界二酸化炭素処理で壁孔の沈着物質が除去され、IPBC を含む超臨界二酸化

炭素の移動が容易になり、主に細胞内腔を経由して試片中心部まで IPBC が到達したものと推測される。以上の結果から、木質複合材料だけでなくスギ心材においても超臨界二酸化炭素による薬剤注入処理の有効性が確認された。

キ 引用文献

- 1) 福里隆一(2002) “食品への超臨界流体応用ハンドブック”, (株)サイエンスフォーラム, pp.191-196.
- 2) 三島健司(2004) “超臨界流体の最新応用技術”, (株)テクノシステム, pp.259-286.
- 3) Acda, M.N., Morrell, J.J. and Levien, K.L. (1996) Decay resistance of composites following supercritical fluid impregnation with tebuconazole, *Mater. Org.*, **30** (4), 293-30.
- 4) Acda, M.N., Morrell, J.J. and Levien, K.L. (1997) Effects of supercritical fluid treatments on physical properties of wood-based composites, *Wood Fiber Sci.*, **29** (2), 121-130.
- 5) Acda, M.N., Morrell, J.J. and Levien, K.L. (1997) Effects of process variables on supercritical fluid impregnation of composites with tebuconazole, *Wood Fiber Sci.*, **29** (3), 282-290.
- 6) Muin, M., Adachi, A., Inoue, M., Yoshimura, T. and Tsunoda, K. (2003) Feasibility of supercritical carbon dioxide as a carrier solvent for preservative treatment of wood-based composites, *J. Wood Sci.*, **49** (1), 65-72.
- 7) Muin, M. and Tsunoda, K. (2003) Preservative treatment of wood-based composites with 3-iodo-2-propynyl butylcarbamate using supercritical carbon dioxide impregnation, *J. Wood Sci.*, **49** (5), 430-436.
- 8) Muin, M. and Tsunoda, K., (2003) Termiticidal performance of wood-based composites treated with silafluofen using supercritical carbon dioxide, *Holzforschung*, **57** (6), 585-592.
- 9) Acda, M.N., Morrell, J.J. and Levien, K.L. (2001) Supercritical fluid impregnation of selected wood species with tebuconazole, *Wood Sci. Tech.*, **35**, 127-136.
- 10) 松永正弘・松井宏昭 (2002) 超臨界二酸化炭素前処理による木材の浸透性改善, 第 52 回日本木材学会大会研究発表要旨集, **52**, 296.
- 11) 松永正弘・松井宏昭 (2003) 超臨界二酸化炭素前処理による木材の浸透性改善(II), 第 53 回日本木材学会大会研究発表要旨集, **53**, 303.
- 12) 松永正弘・松永浩史・片岡厚・松井宏昭 (2004) 超臨界二酸化炭素前処理による木材の浸透性改善(III) -スギ材と他樹種との比較-, 第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集, **54**, 284.
- 13) 松永浩史・松永正弘・片岡厚・木口実・松井宏昭 (2004) 超臨界二酸化炭素前処理による木材の浸透性改善(IV) -壁孔膜に及ぼす影響-, 第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集, **54**, 603.
- 14) Matsunaga, M., Matsunaga, H., Kataoka, T. and Matsui, H. (2005) Improved water permeability of sugi heartwood by pretreatment with supercritical carbon dioxide, *J. Wood Sci.*, **51** (2), 195-197.

第 2 章 超臨界二酸化炭素処理による樹木由来高機能性成分の木材への注入と固定化

ア 研究目的

多くの高等植物の木本植物の樹皮にはタンニンと総称される天然ポリフェノール成分が多量に含有されている。最近の研究により、タンニンには抗菌作用、VOC 吸着能、消臭作用、抗酸化能等の様々な機能が報告されている¹⁾。

超臨界二酸化炭素とは、温度が 31℃以上、圧力が 73 気圧以上の二酸化炭素のことで、気体並の高い流動性・浸透性と液体並の高い溶解性を合わせ有している。我々はこれまでに、超臨界二酸化炭素による抽出で木材（ヒバ、ヒノキ、ベイスギ）、針葉（アオモリトドマツ）等から脂溶性のテルペン成分を抽出する条件を見出してきた²⁾。

本研究では、環境低負荷型反応溶媒である超臨界二酸化炭素を用い、樹皮タンニン等の水溶性の高機能性成分を木材へ注入固定化する技術の探索を目的とする。

イ 研究方法

1. 試料

タンニン試料としてカテキン（図 2-1(a)）、アカシアタンニン（図 2-1(b)）の低分子量画分及び高分子量画分を用いた。カテキンは市販品（EXTRASYNTHÈSE 製、フランス）を購入して使用した。アカシアタンニンは、熊本県天草地域に生育している 4-5 年生のモリシマアカシア樹皮の 70%アセトン、または水抽出物を常法に従って低分子量画分と高分子量画分に分画し、以後の実験に供した。木材試料としては、スギ心材試験片（50mm (L) X 20mm (R) X 20mm (T)）を使用した。

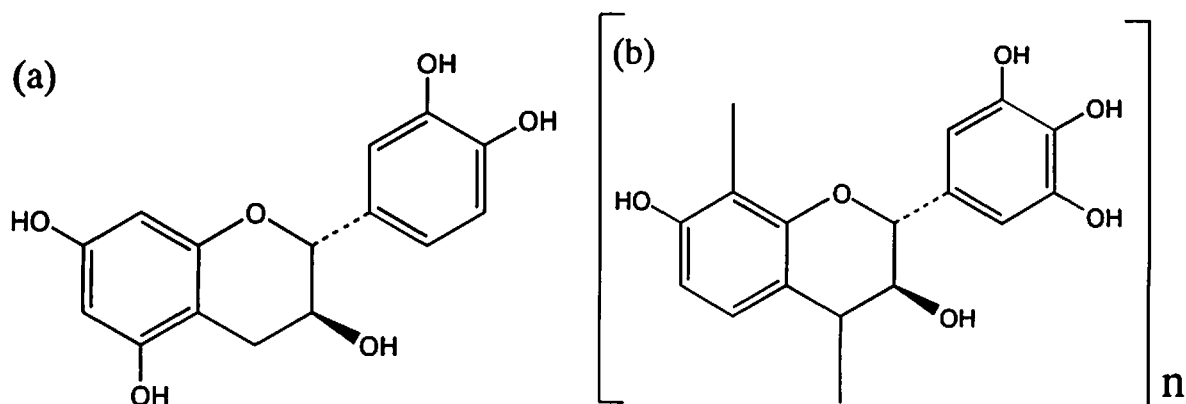


図 2-1 カテキン(a)及びアカシアタンニン(b)の化学構造

2. 注入試験

図 2-2 に示した実験装置を用いて超臨界二酸化炭素処理を行った。バッチ抽出容器内にスギ心材試験片とタンニン試料（1.0g）を入れ、さらにエントレーナー（供溶媒）としてエタノール、90%エタノール水あるいは 80%メタノール水（5-10ml）を送液ポンプによって容器内に加えた。容器を密閉後、温度 40-60℃、圧力 30MPa の条件で 3 時間、超臨界二酸化炭素処理を行った。試験片の重

量増加あるいは処理液中のタンニン成分の残存量を定量することにより、試験片中への注入量を評価した。

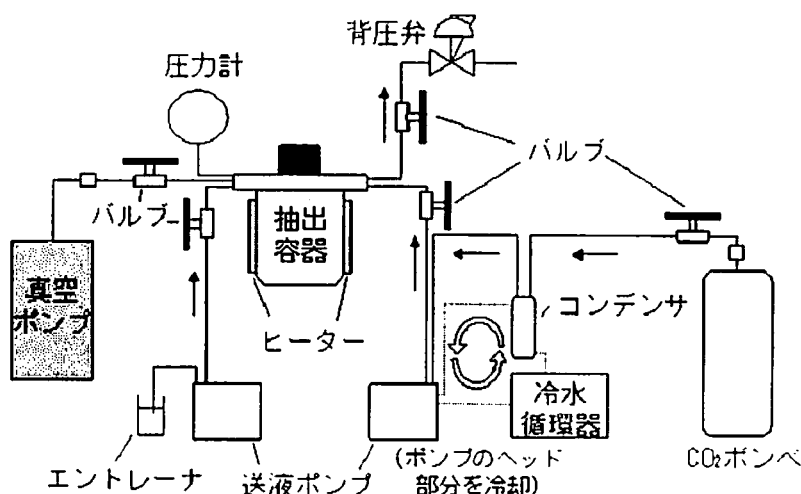


図 2-2 超臨界二酸化炭素処理装置の概略図

3. タンニン注入試験片のホルムアルデヒド吸着試験

アカシアタンニン（低分子量画分）を注入した試験片のホルムアルデヒド吸着能を JIS A 1460 に準じてデシケータ法により評価した³⁾。即ち、タンニン注入スギ心材試験片 4 個及びホルムアルデヒド発生源（0.5%ホルムアルデヒド水溶液 0.5ml）をデシケータ中に入れ、24 時間後にデシケータ底部に置いた 300ml 水中のホルムアルデヒド濃度をアセチルアセトン法で定量した。

4. タンニン注入試験片のアンモニア消臭試験

上記と同様のデシケータ法に準拠して測定した。即ち、アカシアタンニン（低分子量画分）を注入した試験片 4 個をデシケータ中に吊し、0.25%のアンモニア水溶液 1ml を含浸させたろ紙を発生源としてデシケータ底部に置き、密閉して 60 分後のアンモニア濃度を検知管によって測定した。

5. タンニン注入試験片の抗酸化作用の測定

密閉容器中にアカシアタンニン（低分子量画分）注入試験片とカテキン水溶液を入れ、アルミ箔で容器を覆うことによって遮光し、1-7 日経過後のカテキンの酸化による消失量を Folin-Ciocalteu 法⁴⁾によって測定した。また、カテキン水溶液の色の変化を観察するとともに、280nm 及び 380nm における紫外線吸光度の変化を測定した。

6. カテキンの超臨界二酸化炭素処理

バッチ抽出容器内にカテキン（1.0g）を入れ、さらにエントレーナー（供溶媒）としてエタノールを送液ポンプによって容器内に加えた。容器を密閉後、温度 40-60℃、圧力 30MPa の条件で 3 時間、超臨界二酸化炭素処理を行った。処理後の反応生成物を薄層クロマトグラフィで検索するとともに、生成物の一部をセファデックス LH20 カラムクロマトグラフィで単離した。単離物の同定は NMR、FAB-MS の機器分析に拠った。

ウエ 結果及び考察

1. 木材へのタンニン類の注入

カテキンを供試した場合（エントレーナーとしてエタノールを使用）には、60℃、3 時間の条件で、0.8%の重量増加が認められた。しかし、カテキンのエタノールに対する溶解性に限界があり、カテキンの供試量をさらに増大して処理を行うことが出来なかった。

アカシアタンニン（高分子量画分）を用いた場合には、試験片へのタンニンの注入がほとんど認められなかった。アカシアタンニンの分子量が大きいこと及びアカシアタンニンがエタノールに完全に溶解しないことが原因と考えられた。

そこで、エタノールに対する溶解性を高めるため、モリシマアカシア樹皮抽出物を水と酢酸エチルで分配し、低分子量画分である酢酸エチル抽出物を得た。得られたアカシアタンニン低分子量画分を用いて種々のエントレーナーを用いて（40℃、3 時間）超臨界二酸化炭素処理を行った時の結果を表 2-1 に示す。エタノールをエントレーナーに用いて場合、0.4%の重量増加が認められた。次に、アカシアタンニン（低分子量画分）に対する溶解力がエタノールよりも高い 90%エタノール水をエントレーナーとして用いて同様の処理を行ったところ、1.2%の重量増加が得られた。スギ心材中には、セスキテルペン、ジテルペン等のテルペン系の脂溶性抽出成分が存在することが知られている⁵⁾。そこで、予めスギ試験片中の脂溶性成分を除去する前処理を試みた。スギ心材試験片を 80%メタノール水をエントレーナーに用いて超臨界二酸化炭素処理（40℃、3 時間）することにより、試験片重量に対して 1.2%の脂溶性抽出成分を除去することができた。その後、アカシアタンニン（低分子量画分）及びエントレーナーとして 90%エタノール水を用いて超臨界二酸化炭素処理を行ったところ、前処理後の試験片に対して 1.7%の重量増加が認められた。

表2-1 エントレーナーの違いによるタンニン注入量^a

エントレーナー	重量増加率(%)
エタノール	0.4
90%エタノール水	1.2
90%エタノール水*	1.7

超臨界二酸化炭素反応条件:40℃, 3時間

*予め80%メタノールをエントレーナーに用いた超臨界二酸化炭素処理により脂溶性成分を除去した試験片を用いた。

2. タンニン注入試験片の機能性評価

上記で得られたアカシアタンニン（低分子量画分）注入試験片のホルムアルデヒド吸着能を測定した。結果を表 2-2 に示す。コントロール（試験片無し）に比べてデシケータ中のホルムアルデヒド濃度が 38%減少したが、タンニンを注入していないスギ試験片でもホルムアルデヒド濃度が 30%減少したことから、この効果は注入したタンニンの効果によるというよりも、試験体自体によるホルムアルデヒド吸着が原因と考えられた。

アカシアタンニン（低分子量画分）注入試験片のアンモニア消臭能の結果を表 2-3 に示す。注入試験片は顕著なアンモニア消臭能を示した。アカシアタンニンはB環がピロガロール核を有するプロロピネチニジン型の縮合型タンニンであり、アンモニアとの反応性が高いことが知られている。橋田らは、アカシアタンニンのアンモニア水処理で、タンニンのピロガロール核にアミノ基が導入されることを報告している⁶⁾。従って、上記アカシアタンニン注入試験片のアンモニア消臭能は、注入したアカシアタンニンの機能によるものと考えられる。

次に、アカシアタンニン注入試験片の抗酸化作用の測定を試みた。通常の抗酸化能の測定は溶液中で行われており、DPPH 法や過酸化水素と光の作用による DNA の開裂阻害を調べる方法が良く使用されている⁷⁾。本研究では、アカシアタンニン注入木材を用いた固体の抗酸化能の評価を試みた。密閉容器中にカテキン水溶液のみを入れて室温で放置すると、2 日後にはカテキン溶液は淡黄色に着色した。一方、アカシアタンニン注入試験片とカテキン水溶液を共に入れた場合には、1 週間後でもカテキン溶液の着色が起こらなかった。しかし、注入試験片を入れた場合でも、Folin-Ciocalteu 法で測定したカテキン濃度にはほとんど変化が認められなかった。抗酸化能を付与させるためには、さらに多量のタンニンを木材中に注入する必要があると考えられた。

表2-2 タンニン注入スギ試験片のホルムアルデヒド
吸着能

試験片	ホルムアルデヒド 濃度減少率(%)*
コントロール(試験片無し)	100
無処理スギ試験片	30
タンニン注入スギ試験片	38

*コントロール(試験片無し)に対するホルムアルデヒド
濃度の減少率

表2-3 タンニン注入スギ試験片のアンモニア消
臭能

試験片	アンモニア濃度 減少率(%)*
コントロール(試験片無し)	100
無処理スギ試験片	20
タンニン注入スギ試験片	82

*コントロール(試験片無し)に対するアンモニア
濃度の減少率

3. 超臨界二酸化炭素処理におけるカテキンの変性

カテキンを温度 40℃、圧力 30MPa の条件で 3 時間、超臨界二酸化炭素処理を行った時には、カテキンの変性はほとんど認められなかった。一方、処理温度を 60℃に上げて同様の処理を行うといくつかの変性物の生成が確認され、そのうちの一つはエピカテキンであった。このことは、温度を上げて超臨界二酸化炭素処理を行うと、カテキンが一部異性化等の変性を受けることを示している。

オ 今後の問題点

含水エタノールをエントレナーに用いることにより、タンニンのような高極性ポリフェノール成分をある程度までは木材中に注入することができた。しかし、タンニンの溶解性に限界があり、木材の高機能化を実現するのに充分な量のタンニンを注入する技術を確認するまでには至らなかった。今後は、分子内に多量のガロイル基を含む茶葉カテキン類やマングローブ樹皮タンニン等の含水エタノールや含水メタノールに対する溶解性の高いタンニン類を試料とする必要がある。また、超臨界二酸化炭素の処理温度を高くすると、タンニンが一部変性することが確認された。従って、

超臨界二酸化炭素処理はタンニンの木材中への注入よりも、タンニンの有用物質への変換の手段として利用の方が有効であると思われる。

カ 要約

環境低負荷型反応溶媒である超臨界二酸化炭素を用い、水溶性の機能性成分である樹皮タンニンを木材中へ注入固定化する技術の探索を目的とした。アカシアタンニンの低分子量画分を用い、90%エタノール水をエントレーナーとして超臨界二酸化炭素処理を行うことにより、40℃、3時間の処理条件でスギ心材試験片にタンニン成分を注入することができた。また、予め試験片から80%メタノール水をエントレーナーとした超臨界二酸化炭素処理によって脂溶性成分を除去しておく、タンニン成分の注入量をさらに高めることができた。得られたタンニン注入試験片は顕著なアンモニア消臭能を示したが、ホルムアルデヒド吸着能や抗酸化能を発揮するまでには至らなかった。木材の高機能化には、さらに多量のタンニンを木材中に注入する必要があると考えられた。

キ 引用文献

- 1) 大原誠資 (2005) 樹皮タンニンの多彩な機能と有効利用, 八十一出版, 62p.
- 2) Ohira, T., Terauchi, F., Yatagai, M. (1994) Tropolones extracted from the wood of western red cedar by supercritical carbon dioxide, *Holzforschung*, 48, 308-312.
- 3) 日本工業規格 (2001) JIS A 1460, 建築ボードからのホルムアルデヒド放散の定量-デシケータ法.
- 4) Julkunen-Tiitto, R. (1985) Phenolic constituents in the leaves of northern willows: Methods for the analysis of certain phenolics, *J. Agric. Food Chem.*, 33, 213-217.
- 5) Morita, S., Yamada, T., Hidaka, T. (1995) Supercritical fluid extraction of oxygen containing sesquiterpenes from Yakusugi (*Cryptomeria japonica*) wood, *Mokuzai Gakkaishi*, 41, 237-241.
- 6) Hashida, K., Ohara, S., Makino, R. (2006) Improvement of formaldehyde-scavenging ability of condensed tannins by ammonia treatment, *Holzforschung*, 60, 178-183.
- 7) Wang, S.Y., Wu, J.H., Cheng, S.S., Lo, C.P., Chang, H.N., Shyur, L.F., Chang S.T. (2004) Antioxidant activity of extracts from *Calocedrus formosana* leaf, bark and heartwood, *Journal of Wood Science*, 50, 422-426.