

マツ材線虫病にどう対処するか — 防除対策の考え方と実践 —



国立研究開発法人森林研究・整備機構

森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute

目次

はじめに	2
マツ材線虫病防除の基本原則	3
マツ材線虫病とは？	4
マツ材線虫病の感染環	6
<コラム>持ち出される線虫の数はカビで決まる？	6
<コラム>直接採集が明らかにしたマツノマダラカミキリの“夜の生態”	7
マツ材線虫病への対策をどのようにすすめるか？	8
<コラム>予防伐採・樹種転換のすすめ	11
マツ材線虫病の防除	12
探査と診断	12
<コラム>マツ材線虫病防除における「早期検出」とは？	12
<コラム>形態観察でマツノザイセンチュウを見つけ出す難しさ	15
個別防除手法	16
<コラム>甘くない、マツ材線虫病の「生物的防除」	17
<コラム>農薬不使用の選択肢　—成虫逸出抑制法—	18
<コラム>被害拡大は温暖化のせい？	23
マツ材線虫病防除の成功事例	24
<コラム>吹上浜の過去と現在	26
参考文献・資料	27

はじめに

「松くい虫被害」として知られている松類の枯死被害は、我が国の松林を激しく蝕み、荒廃をもたらしました。古くからの被害地である西南日本では、集中的な防除が行われている一部の海岸松林等を除き、成熟した松林が見られなくなってしまった地域も存在し、松くい虫問題はすでに「過去のこと」のように思われているかも知れません。しかし、そのような場所でも景観上あるいは防災上重要な松林は必ず残っているはずです。また、被害拡大の前線にあたる高緯度、高標高地域には今なお広大な松林が維持されています。松くい虫問題は決して「過去のこと」などではなく、今後とも防除対策の必要性・重要性が失われることはありません。

樹皮下穿孔性昆虫（外樹皮と材の間の“内樹皮”と呼ばれる軟らかい組織を食い荒らす昆虫の一群）による食害が原因とされていた松くい虫被害が、そのような昆虫の一種であるマツノマダラカミキリによって媒介される病原体マツノザイセンチュウによる伝染病であると判明したのは1970年代のことでした。かつての名残で「松くい虫」と呼ばれてきた

松の枯死被害ですが、正式には「マツ材線虫病」と命名されており、本冊子での呼称もこれにしたがうことにします。なお、行政用語ではマツノマダラカミキリを指して「松くい虫」と呼んでいることがあり、注意が必要です。

病原体の発見以降、マツ材線虫病についての研究は国内外の研究者により精力的にすすめられ、防除についても2000年頃までには体系化された技術が示されるようになっていました。その後も新たな知見の蓄積がすすむ一方、社会情勢も大きく変化し、防除対策もそれに応じた見直しが必要になっています。この小冊子は、近年の科学的な知見や社会情勢の動向にも目を配りつつ、マツ材線虫病被害対策の基本的な考え方や技術を解説したものです。マツ材線虫病対策に取り組む行政や森林組合職員の皆さまに加え、ひろく松くい虫問題に興味をお持ちの方々のご参考になれば幸いです。

2022年3月

国立研究開発法人森林研究・整備機構

森林総合研究所東北支所

産学官民連携推進調整監 中村克典

● マツ材線虫病防除の基本原則

マツ材線虫病防除に取り組もうとする皆さんに、まず、最初に理解し、心得ておいていただきたいことを、以下にあげます。敵を知り、現実的で効果的な対応を考えることは、防除成功への第一歩です。

▶ マツ材線虫病防除は伝染病対策である

マツ材線虫病は病原体マツノザイセンチュウがマツノマダラカミキリ等の媒介者によって運ばれて広がる伝染病です。「普通の害虫」の防除と同じように対応しても、防除はうまくいきません。

▶ マツ材線虫病防除は難事業である

マツノザイセンチュウは日本の松にとっては外来の侵入病原体で、その感染力や致死率は驚異的です。この強力な病原体が、高い増殖力や移動能力を有するマツノマダラカミキリによって媒介されるマツ材線虫病は、征圧することが極めて困難な伝染病です。また、所かまわず発生する被害木を漏れなく探し出したり、大きな松の枯れ木を処理したりするのは大変な作業で、そのための予算や労力を確保することも、今の日本では極めて困難です。

▶ 被害を抑制できないのは防除の不徹底による

上述の通りマツ材線虫病防除は難事業であり、簡単には成功しません。防除をしたつもりなのに成果が出ないと、気象要因や大気汚染など、なにか別の要因のせいにしたくなりますが、まずは自分たちが行っている防除を見直してみる必要があります。防除がうまくいかないときには、計画に無理があったり、手法に不備があったりして、防除自体が不徹底となっていないか、十分に検証し改善を図ることが大切です。

▶ 防除の推進に向け、協力と連携を

松林には所有者がいます。防除の実施には所有者の承諾が必要です。また松林は人里近くに分布していることが多く、スムーズな防除作業の実施には地元の理解が不可欠です。マツ材線虫病への対策は被害分布に応じて適切に計画される必要がありますが、被害分布は人の作った行政区画には従いません。現実の被害状況に対応できるよう、関係者間での連携を図ることが重要です。

▶ エリアを絞って、確実に守りきる

難事業であるマツ材線虫病防除を実施するには相応の予算と労力が必要です。逆に言えば、投入できる予算と労力によって実施できる防除対策は制限されます。限られた予算、労力で確実な成果を得るには、守るべき、かつ守ることの可能な松林を選別し、防除努力を集中するしかありません。実現可能な計画に基づき、小さな成功を積み重ねることが、地域の松や松林を守ることにつながります。



鹿児島県吹上浜で見られた激甚なマツ材線虫病の被害（1995年）

● マツ材線虫病とは？

■ マツ材線虫病による松の枯死

- ・典型的には、夏～秋に急激に全身の針葉が赤く変色して枯死に至る症状があらわれます。ただし、気象や木の側の条件等により“春枯れ（年越し枯れ）”や“部分枯れ”を示す場合もあります。
- ・針葉変色が生じた木では、幹の中での水の流れが阻害されています（水分通導障害）。このような特徴から、マツ材線虫病は萎凋病（水が届かず萎れて枯れる病気）の一種とされます。
- ・マツ材線虫病にかかった木では、水分通導障害に先立って樹脂（松ヤニ）の分泌が停止します。穿孔性昆虫に対するバリアである樹脂を失った木は、そのような虫の加害も受けやすくなります。
- ・マツ材線虫病はマツ属樹木（クロマツ、アカマツ、ゴヨウマツなど）の伝染病であり、スギやヒノキはもちろん、分類上マツ属に含まれないカラマツ、エゾマツ、トドマツ等は通常この病気にはかかりません。
- ・マツ属樹種の中でも感受性（かかりやすい）のものと抵抗性（かかりにくい）のものがあります。日本産マツ属樹種はわかっている範囲で全てが感受性であり、特にクロマツはこの病気に弱いことが知られています。
- ・マツ材線虫病の被害は 1900 年代初頭に西南日本で発生し、国内に拡大・まん延しました。1980 年代になると近隣の中国、台湾、韓国にも広まり、1999 年にはポルトガルにも侵入し、まん延するに至っています。マツ材線虫病は世界的に恐れられている森林病害です。



■ 病原体

- ・マツ材線虫病の病原体はマツノザイセンチュウという、微小な生物（線虫*1 の一種）です。
- ・マツノザイセンチュウの原産地は北アメリカ大陸であることが判明しています。明治期以降の国際的な物流に紛れて日本に侵入したと考えられています。
- ・マツノザイセンチュウは成虫の体長が 1 mm 程度で、雌雄が交尾し産卵して増殖します。数日で成虫になり、産卵数も多いため、非常に大きな増殖力をもつ生き物です。
- ・樹体内のマツノザイセンチュウは生きた松の組織や、枯れた木の中で繁殖するカビを食べて育ちます。生息環境が悪化すると耐久性のある幼虫になり（分散型第 3 期幼虫）、その後媒介者となるカミキリムシの近くに移動したものは虫に運ばれる特別な形態になり（分散型第 4 期幼虫）、成虫となったカミキリムシに乗り移ることができます。
- ・日本を含むユーラシア大陸には、もともと近縁種であるニセマツノザイセンチュウが生息していましたが、国内の多くの地域ではマツノザイセンチュウの侵入により種の置き換えが起こって消滅してしまっただけです。なお、ニセマツノザイセンチュウの松に対する病原性は、ほぼありません。



*1 線虫

線形動物門に分類される、細長い体をした動物の一群。カイチュウ、ギョウチュウ、フィラリア、アニサキスなど、寄生虫として有名なものが多いが、モデル生物として有名な *C. elegans* や農業害虫のネグサレセンチュウ、ネコブセンチュウなどもこの仲間である。自然界では土壌や海洋などに広く分布しており、その多様性は昆虫をしのごとも言われている。

■ 媒介者

- ・ マツノザイセンチュウはマツノマダラカミキリを含むヒゲナガカミキリ属のカミキリムシを媒介者（ベクター）としています。日本には松を利用するヒゲナガカミキリ属のカミキリムシが6種いますが、その中でマツノマダラカミキリが圧倒的に有力なマツノザイセンチュウの媒介者となっています。
- ・ マツノマダラカミキリの成虫は生きた松の枝の樹皮を餌としています。一方、幼虫は枯れた松の幹の内樹皮を食べて育ちます。幼虫は樹脂を盛んに分泌する元気な松を食害することはできないので、親の雌成虫は弱った木や伐倒木を選んで産卵します。このため、マツノマダラカミキリ成虫の活動期に松の衰弱木や伐倒木があると、マツノマダラカミキリが誘引されることとなります。
- ・ 卵からかえったマツノマダラカミキリ幼虫は通常1年かけて成長し、翌年の夏に成虫になりますが、寒冷地では発育が遅れて成虫になるまでに2年かかる場合もあります。樹皮下の幼虫は十分に育つと材に坑道を掘ってその中で越冬し、春以降に蛹、さらに成虫へと脱皮します。幼虫が成虫になるまで滞在する坑道内の区画を蛹室ようしつといいます。成虫は蛹室から材の表面へ、直径7~8 mm程度の丸穴だんしゅうつらう（脱出孔）をあけて、枯れ木から脱出します。
- ・ マツノマダラカミキリ成虫は初夏に発生し、その後数ヶ月間が活動時期となります。駆除や予防などのマツ材線虫病防除は、マツノマダラカミキリ成虫の発生時期、活動時期にあわせて、適時に行う必要があります。



■ マツノマダラカミキリによるマツノザイセンチュウの伝播

- ・ マツノマダラカミキリの蛹の近くで分散型第4期幼虫となったマツノザイセンチュウは、カミキリムシが成虫になるとその体に移り移って枯れ木から運び出されます。そして、カミキリムシが松の枝を食べる際、あるいは弱った松に産卵する際に松の木に侵入・感染します。
- ・ マツノマダラカミキリ成虫に運ばれている間、マツノザイセンチュウはカミキリムシの気管*2などにとどまっていますが、カミキリムシから栄養を摂取することはありません。このため、マツノザイセンチュウとマツノマダラカミキリの関係は“寄生”ではなく“便乗”であるとされます。
- ・ マツノマダラカミキリ成虫は1回の飛翔で3 km程度を移動する能力がありますが、通常は10 m程度の小規模な移動を繰り返していることが知られています。したがって、マツノマダラカミキリ成虫の発生源からの距離が遠くなるほど、マツノザイセンチュウが伝播される可能性は低くなります。とは言え、中には遠距離移動する成虫もいるため、被害地から離れた松林にマツノザイセンチュウが伝播される危険性は常に考えておく必要があります。

*2 気管

昆虫をはじめとする陸生の節足動物の呼吸器官。体表に数カ所開口する気門から始まる管が枝分かれして体内の隅々に至り、組織のガス交換を担っている。ヒトの体の気管とは構造や機能は異なるが、空気の通り道である鼻や喉に異物が入り込んだ状態を想像すると、マツノザイセンチュウを運ぶマツノマダラカミキリがおかれた状況を理解できるかも知れない。

● マツ材線虫病の感染環 (丸数字は次ページ図と対応)

- ①前年に枯れた松から、マツノマダラカミキリ成虫が脱出します。このとき、一部の成虫には枯れ木からマツノザイセンチュウが乗り移って、その数は多いときには数万～数十万頭に達します。成虫の脱出時期は初夏から夏にかけてですが、その具体的な時期は地域により異なります。
- ②枯れ木から脱出したマツノマダラカミキリ成虫は生きた松に飛来し、枝の樹皮を摂食します(“後食”と呼ばれることがあります)。このときに、マツノマダラカミキリ成虫の体から離脱したマツノザイセンチュウは成虫の摂食でできた傷口から樹体内に侵入し、感染が成立します。マツノザイセンチュウに感染した松の樹体内では異常な反応が生じて、数週間以内に樹脂を出すことができなくなり、やがて水分通導障害を起こします。ただし、この時点ではまだ針葉の変色ははっきりしません。
- ③マツノマダラカミキリ成虫は羽化脱出後、数週間摂食することで成熟し、交尾、産卵が可能になります。雌成虫は弱った松の出す“匂い”をたよりに、幼虫を育てるのに都合のよい樹脂の出なくなった松を探します。マツノザイセンチュウに感染して衰弱した松は、格好の産卵場所になります。
- ④水分通導障害を起こした松では晩夏～秋にかけて針葉変色がすすみます。枯れ木の中ではマツノザイセンチュウが増殖し、また内樹皮を食べてマツノマダラカミキリ幼虫が成長します。十分育った幼虫は、材内に坑道を掘り、入口側に木くずを詰めて蛹室を作り、そのまま越冬します。この頃になると、マツノザイセンチュウは耐久型の分散型第3期幼虫が多くを占めるようになります。分散型第3期幼虫はやがて、マツノマダラカミキリ幼虫の排泄物に含まれる不飽和脂肪酸に誘引されて蛹室付近に集合・定着するようになります。
- ⑤蛹室内で越冬したマツノマダラカミキリ幼虫は、初夏が近づくと脱皮して蛹になり(蛹化)、2週間ほどでさらに脱皮して成虫になります(羽化)。このタイミングに合わせて、蛹室付近に集まっていたマツノザイセンチュウ分散型第3期幼虫は分散型第4期幼虫となり、マツノマダラカミキリの体へと乗り移っていきます。成虫は体が硬化すると、枯れ木に孔をあけて外界へと脱出します。

☑ 持ち出される線虫の数はカビで決まる？

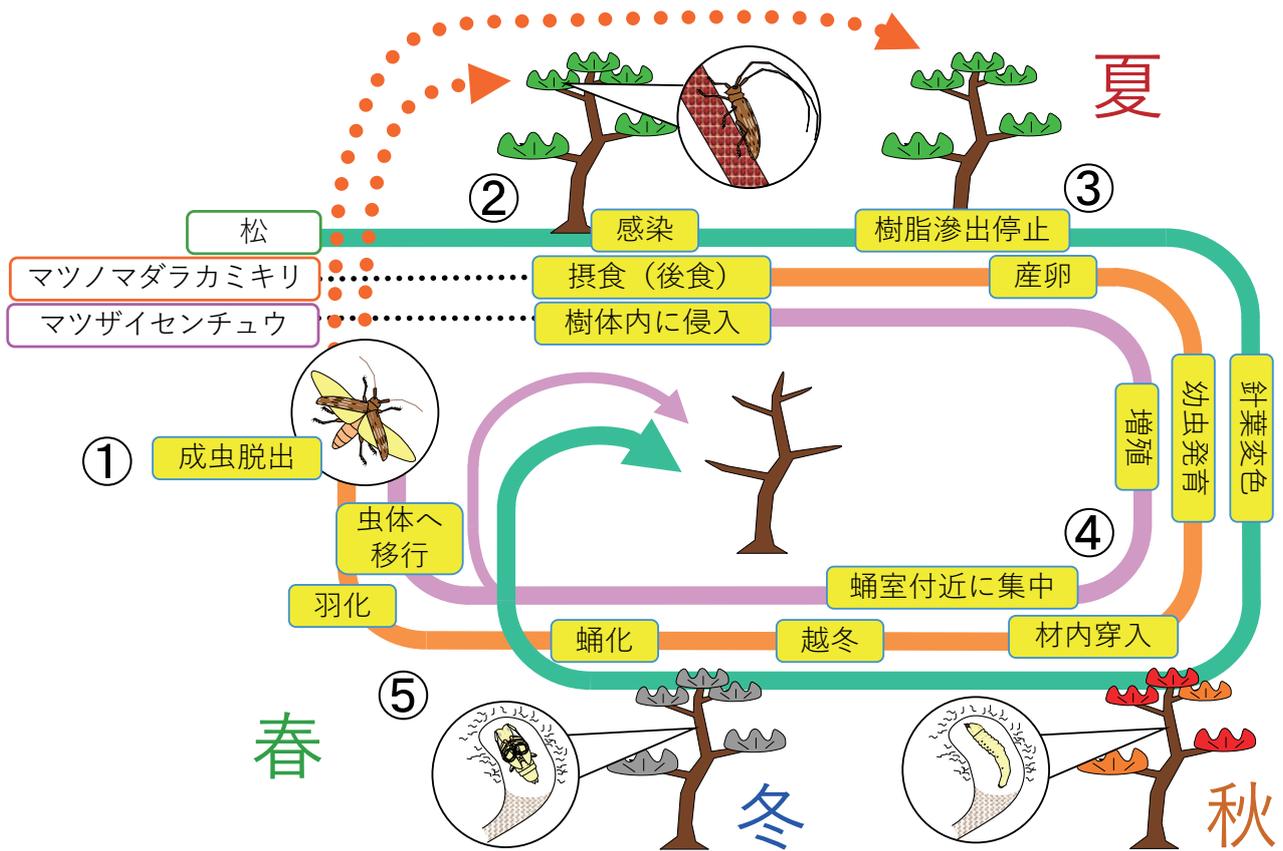
マツノマダラカミキリが枯れた松から持ち出すマツノザイセンチュウの数は、上述の通り数万～数十万頭といった膨大な数からゼロまでと大きくばらつきます。多数の線虫を持ったカミキリムシは、後食する際に健全な松にうつす線虫数も多くなり、その木は枯れてしまいます。一方、保持する線虫の数がゼロか、とても少ない場合には、松は枯死せずにすみません。理論的には、カミキリムシの保持線虫数が1,000頭未満なら松は枯れにくいと考えられています。つまり、カミキリムシが運ぶ線虫の数が、マツ材線虫病の被害の広がりや決定することになります。

枯れた松の中で、線虫がカミキリムシに乗り移る場所が蛹室です。線虫がカミキリムシに多く乗り移るためには、蛹室に多く集合・定着しなければなりません。そのためには、蛹室周辺を含む材内で線虫がよく増殖する必要があります。線虫の餌はカビですが、餌になるカビとまらないカビがあります。青変菌(材を青黒く変色させるカビの総称)は線虫の餌になるカビの代表です。カミキリムシの蛹室周辺の材に青変菌が繁茂している場合、蛹室の線虫数が多くなり、そこから羽化脱出したカミキリムシが持ち出す線虫の数も多くなります。逆に、線虫の餌にならないトリコデルマなどのカビが蛹室周辺の材に繁茂した場合には、線虫が増殖できず、カミキリムシの保持線虫数は少なくなります。

この知見を基に、枯れた松にトリコデルマを種駒で接種して青変菌の繁殖を抑制することで、材内の線虫密度を低下させ、そこからカミキリムシが持ち出す線虫の数を減少させることを試みました。線虫を直接殺すのではなく、餌をなくすことによって増殖を抑える「兵糧攻め」という発想です。防除素材としての実用化には至っていませんが、松が枯れにくい1,000頭未満のレベルまで保持線虫数を減少させる効果が見られました。(前原紀敏)



青変菌が繁茂したアカマツ丸太



マツ材線虫病の感染環

☑ 直接採集が明らかにしたマツノマダラカミキリの“夜の生態”

マツ材線虫病がまん延した被害地でさえ、マツノマダラカミキリ成虫が大量に発見されることはないので、松枯れの要因は別にあるのではないかと、という疑問の声が上がる場合があります。しかし、高い枝先でゆっくり後食をしているマツノマダラカミキリ成虫の姿は松の若い球果に、触覚は枯れた針葉にそっくりで、目の前にいても気づかず、しかも夜行性で林内の高所を飛翔し高い枝にとまる性質があるため、日中にその姿を観察することはとても難しいのです。

近年、一部の除草剤の主成分であるパラコートを少量、6~7月に被害林分の松の樹幹に注入すると、夜間、注入木に大量のマツノマダラカミキリ成虫が集まってくることを発見しました。パラコートを注入したクロマツ約20本を使った誘引捕獲試験では、3年間で2,000頭以上の成虫を効率良く捕獲することができました。雌を待ち受ける雄、交尾する雌雄、産卵する雌が樹幹上で捕獲されることから、パラコート注入木は成虫にとって衰弱木と同じ役割を果たしているようです。自然枯死木が目立つようになってくる8月になると、誘引される成虫が減って捕獲効率は著しく低下します。

直接採集では、背丈の高さまでにいる成虫は手づかみで捕獲しますが、それ以上では筆者の開発したマダラスイープを使うと比較的簡単に捕獲できます。(江崎功二郎)

参考：「マダラスイープによるマツノマダラカミキリ成虫の捕獲法」
石川県林業試験場研究報告 50：24-25 (2018)



パラコート注入木に誘引されたマツノマダラカミキリ成虫
(左：雄、右：交尾体勢の雌雄)

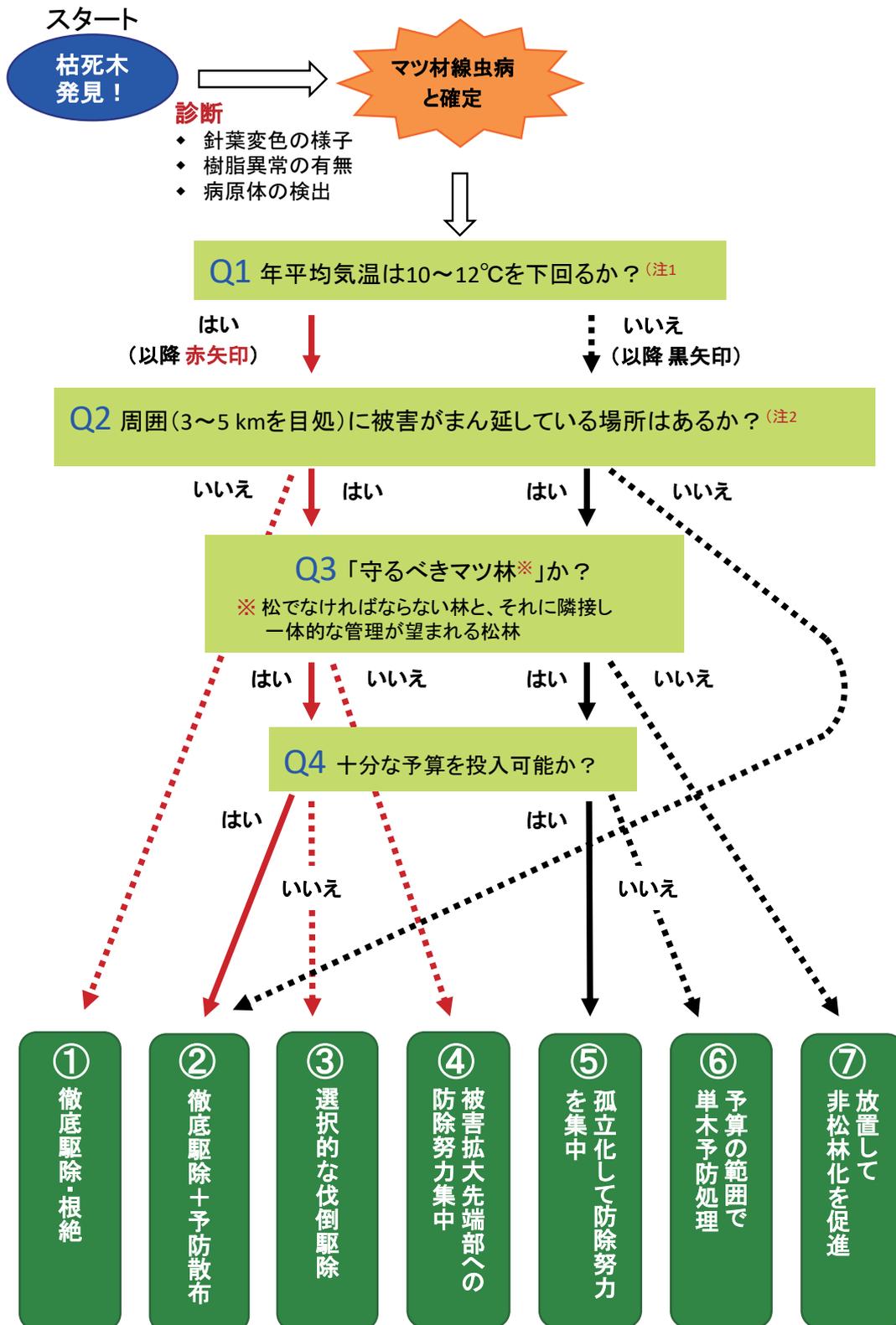


マダラスイープによる成虫(矢印)の捕獲

● マツ材線虫病への対策をどのようにすすめるか？

▶ このチャートや示されている対応方針はあくまで「目安」です。実際の対応は現場の状況に合わせて調整して下さい。

▶ 個別の防除手法に関する解説は 16 ページ以降をご参照下さい。



図中「注」についての補足説明は 11 ページ

マツ材線虫病被害への対策は、いつでも、どこでも同じものが通用するわけではありません。状況に合わせて対応方針を定め、それに合わせて具体的な手法を検討することで、より現実的で効果的な対策をすすめることができます。前ページに、状況に応じたマツ材線虫病対応方針を検討するためのフローチャートを示しました。下部緑地部分に示した推奨される対応方針の詳細は以下の通りです。

なお、個々の防除手法の詳細については16ページ以降で解説しています。

① 徹底駆除・根絶

被害拡大が起こりにくい条件下で被害量がまだ十分に少ない場合にのみ適応可能な方法です。

駆除により根絶を目指すには、枯れ木1本見逃さない高精度な被害木探査を実施することが前提となります。その上で、発見した被害木を全量駆除します。この際、マツ材線虫病によると疑われる枯死木は全て駆除することが重要です(マツノザイセンチュウの検出効率は100%ではないことに留意)。

寒冷地では感染から発症までに時間がかかる木(潜在感染木)が発生しやすく、このような木も可能な限り適期に駆除するために、樹脂滲出調査の導入が推奨されます(13ページ)。

② 徹底駆除+予防散布

被害量が少なくてもまだ周辺に被害がまん延していない場合、あるいは寒冷地等被害拡大が起こりにくい条件下であるにも関わらず近くに被害まん延地が生じてしまった場合などが相当します。

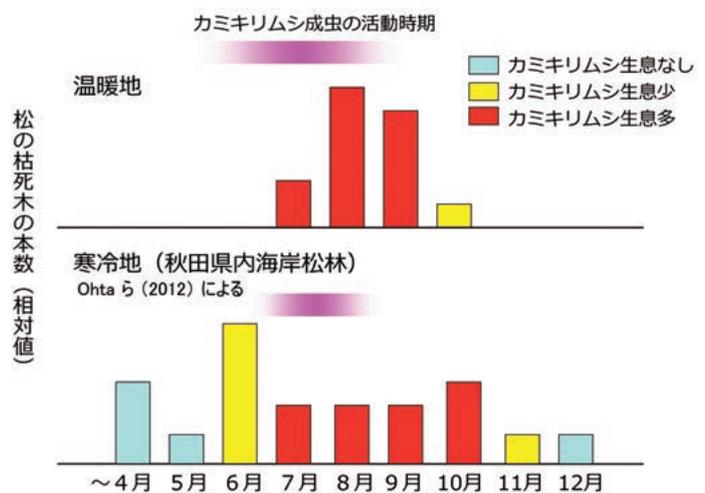
対応は①に準じますが、周辺被害地からのマツノマダラカミキリの飛来が想定されるので、予防散布の導入を検討する必要があります。また、相当量の被害発生、あるいは周辺からの感染拡大が想定される分、高コストな対策になることを覚悟しなければなりません。

③ 選択的な伐倒駆除

マツノマダラカミキリやマツノザイセンチュウの活動が抑制される寒冷地のみが対象となる方法です。(提案者である秋田県立大学名誉教授小林一三氏により“秋田方式”と命名されています。)

寒冷地では、松の発病時期がばらついてマツノマダラカミキリ成虫の活動時期とのズレが生じるため、マツノマダラカミキリに産卵されず幼虫が生息しない枯死木が相当量発生します(右図)。これらの木を駆除対象から外すことで、作業を効率化することができます。具体的には、マツノマダラカミキリ成虫の活動時期に針葉変色が見られるようになった枯れ木、すなわち夏-秋枯死木を選別して駆除を実施します。予防散布を併用することが望ましいでしょう。

ただし、変色時期を目安にした選別では、少ないながらもマツノマダラカミキリに産卵された枯れ木が駆除対象から外れる可能性があり、この方法はそのような「少ない駆除漏れ」を許容することを前提としています。被害先端地等の全量駆除が望まれる地域への適用は推奨できません。



松枯死木の針葉変色時期とマツノマダラカミキリ生息との関係 (模式図)

カミキリムシは成虫活動期に衰弱した松に産卵する。温暖地では夏～秋に一斉に発生する衰弱木の大半が産卵対象となるが、寒冷地では松の発症がばらつき、成虫活動期をはずして発症した木は産卵対象とならない。産卵されなかった木にはカミキリムシが生息していないので防除の対象から外すことができる。
参考：Ohtaら(2012) Journal of Forest Research 17: 360-368.

④ 被害拡大先端部への防除努力集中

寒冷地等の被害拡大がある程度抑制されている条件下で、全量駆除が困難なレベルの被害まん延地域が生じてしまっているような場面では、当該松林自体は「守るべき松林」とはなっていないとしても、そこでの被害を放置すると周辺への被害拡大を抑えられなくなる危険があります。このような場合には、防除の目標を「守るべき松林（あるいは地域）への被害拡大の抑制」とし、守るべき松林（地域）に面した区域で集中的に防除事業を展開し、被害の「空白地帯」を作り出していくことが有効です。

具体的な手法は②や③に準拠することになりますが、場合によっては⑤にある樹種転換の促進が考えられてもよいでしょう。大切なことは、防除の目標を見定め、限られた地域で確実に防除効果をあげられるようにすることです。

⑤ 孤立化して防除努力を集中

マツノマダラカミキリやマツノザイセンチュウの活動が活発で被害が拡大しやすい温暖地等で、被害まん延地域に近接する松や松林を守り切ることが通常困難です。それでも守らなければならない松林があるならば、その周辺数キロの範囲の松や松林の伐採除去・樹種転換をすすめる、あるいは予防散布を行ってバッファエリアとするなどして（孤立化）、感染源となる被害まん延松林からの影響を受けにくくした上で、域内での防除を徹底することを推奨します。

バッファエリアの幅は通常2～3 kmとされることが多く、これによって一定程度は被害の侵入を抑制することができますが、完全に抑えることはできません。被害の侵入に備え、高精度な監視体制を維持することが求められます。

⑥ 予算の範囲で単木予防処理

温暖地等のマツ材線虫病被害の抑制が困難な地域にあって被害まん延地域またはこれに隣接するような場所で、予算はないが松林をまるごと守りたい、というのは実現不可能な願望です。しかし、特に重要な松を単木的に守ることは技術的に可能です。具体的には、対象木に対し樹幹注入や単木的な予防散布等を施すことで感染を防止します。ただし、守ることができる木の数は予算により制約されます。

⑦ 放置して非松林化を促進

マツ材線虫病被害の抑制が困難な地域の松林で一旦被害がまん延してしまえば、これを抑制するには莫大な予算と労力が必要になります。そこがどうしても守らなければならない松林というわけではなく、防除にかかる予算もないのであれば、あえて手出しせずマツノザイセンチュウに松を枯らしてもらうことで、松林がなくなり、結果としてマツ材線虫病被害もなくなります。枯れ残った松林があったとしても孤立状態になるので、その後の防除はやりやすくなります。また、枯れる前に皆伐してバイオマス利用するのも選択肢です。

「放置」とはいつでも、全く何もしなくてよい、ということではありません。人家や道路の付近の枯れ松は、放置すると折れたり倒れたりする危険があるので、事前に対処する必要があります。また、土壌や気候の条件によって、松が枯れるとササ藪になってしまったり、松林が再生して再びマツ材線虫病の温床になることがあります。植栽による樹種転換が必要な場面もあるかもしれません。

☑ 予防伐採・樹種転換のすすめ

「守るべき松林を守るために周辺松林を伐採する」というのは極論に思われるかも知れませんが、しかし、海外に目を向けるとそのような対策は必ずしも例外的なものではありません。例えば、韓国では一時期、被害木の周辺10～50 mにわたって松を伐採・除去するという防除手法を導入することで、被害拡大を抑制できたという事例が報告されています。1999年にマツ材線虫病が侵入したポルトガルに隣接するスペインでは、国境付近で単木的な被害が発生するとその周囲10 m～数 kmの生立木を伐採し、被害の拡大を抑え込んでいます。

実は日本においても、林野庁が推奨するマツ材線虫病防除方針の中で、「保全すべき松林」のバッファゾーンとなる「周辺マツ林」において実施されるべき対策は「主として計画的な樹種転換」とされているのです。このような方針が示されているにもかかわらず、マツ材線虫病対策としての予防伐採、樹種転換はすすんでいません。「伐るには忍びない」という心情に加え、松林には所有者が存在し、伐採しても所有者に直接の利益がないことなどを考えると、無理からぬ話なのかも知れません。

そんな中、2006年に秋田～青森県境日本海沿岸部で総延長4 kmにわたって実施された松の予防伐採（「県境防除帯」と呼ばれています）は画期的な事例でした。この予防伐採エリアで隔離された青森県側の松林では今なおマツ材線虫病の定着が阻止されています。また、青森県南東部に位置する南部町で2018年に発生した単木被害に対しては、一部の被害木について周辺の松林を含めた皆伐が実施されました。岩手県内でも、内陸の被害拡大北限地域で国有林が先導する松林の利用伐採・樹種転換事業が2016年からすすめられており、また県の施策に沿う形での被害松林の皆伐、樹種転換が各地で見られるようになっていきます。伐採した松は一部が用材利用されている他、被害拡大につながらないように定められたガイドラインに従ってバイオマス発電の燃料にも利用されています。伐採跡地にはカラマツが植栽される例が多く見られますが、天然更新による広葉樹林化も試みられています。

これらの事例は、仕組みを整えることで予防伐採・樹種転換は実行可能であることを示しています。一方、伐採跡地は必ずしも植栽したい樹木の適地であるとは限りません。かつて西日本で、松枯れ跡地にヒノキを植栽して上手くいかなかった例もあります。現地に即した植栽樹種の選定、あるいは天然更新の選択が望まれます。（中村克典）



被害拡大が予想される地域ですすめられるアカマツ林の樹種転換（岩手県雫石町）

<フローチャート（8ページ）の設問の補足説明>

⇒注1 「Q1：年平均気温は10～12℃を下回るか？」について

寒冷地等、もともとマツ材線虫病被害が広がりにくい場所かどうかを判定するための設問です。

マツ材線虫病を引き起こすマツノザイセンチュウやマツノマダラカミキリは「変温動物」で、気温が高くなると活動が活発になり、このためマツ材線虫病の症状の進行は早く、被害拡大も起こりやすくなります。ここでは、被害が広がりにくくなる気温の上限の目安として「年平均気温10～12℃」という値を提示しました。

ただし、マツ材線虫病の被害拡大に影響するのは夏の気温であって、年平均気温は直接的な指標ではありません。また、気温は毎年変動するので、平年値だけを見ていると判断を誤ることになりかねません。そもそも、被害が「広がりやすいか広がりにくい」という連続的な変化に明確な区分点を設定することはできません。ですから、提示されている値はあくまで目安とし、実情に合わせて方針を選択して下さい。

離島、あるいは周辺に松林がなく完全に孤立した状態にある松林（Q2での想定の究極的な状態）などは、寒冷地でなくても「マツ材線虫病被害が広がりにくい場所」に含めてよいかも知れません。

⇒注2 「Q2：周囲（3～5 kmを目処）に被害がまん延している場所はあるか？」について

マツノマダラカミキリ成虫の発生源となる被害松林からの距離が遠くなるほど、マツノザイセンチュウが伝播される可能性は低くなることが知られています（4ページ）。ある程度安心できる距離として、2～3 kmという値がよく用いられますが、これはもちろん絶対的に安全を確保できる距離ということではありません。マツノマダラカミキリ成虫の移動しやすさに関わる諸条件、例えば成虫発生時期の風の向きなどにより、この距離は変動するものと考えべきです。ここでは、3～5 kmという幅のある値を提示していますが、現地の状況に従って適宜判断して下さい。

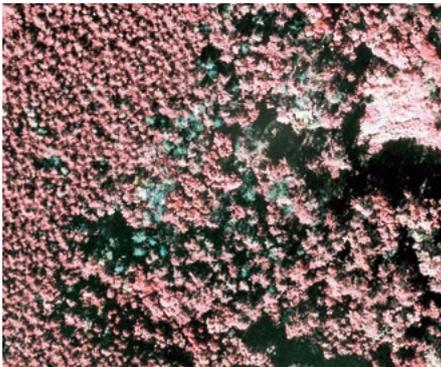
● マツ材線虫病の防除

■ 探査と診断

1. 探査

ここで言う「探査」とは、防除対象となる枯れ木を見つけることです。通常は林外からの観察や林内踏査で枯れ木を探しますが（地上探査）、広域的な調査が必要な場合にはヘリコプター等を利用した空からの観察や空中写真、衛星画像等を利用した探査（空中探査）の実施が望まれます。近年発展の著しいドローンの利用により、被害木の空中探査は身近な技術になりつつあります。

マツ材線虫病では、少ない枯れ木が大きな被害につながることもあるので、見落としなく被害木を探し出して確実に駆除することが重要です。しっかりした探査が行われなければ、防除の成功はありません。



赤外線空中写真による被害木探査
赤外線写真では枯れ木は青白く見えます。



被害木探査へのドローンの活用
(撮影：青森県林政課)

どちらも大事：地上探査では道のないところ、歩けないところの木を調べることが難しく、また遠すぎたり、逆光になったりした場合には針葉の変色を確認できません。空中探査を導入すれば、これらの問題を大幅に改善することができます。しかし、空中探査では他の木の樹冠に隠れた枯れ木は見つけられず、また谷地形等の陰になった場所の枯れ木は発見が困難です。それぞれに得手、不得手があることを理解し、2つの手法を併用するのが理想的です。

スケールを変えて：マツ材線虫病の侵入・拡大を防ぐには、守りたいエリアとその周囲を広く探査すべきですが、広いエリアで高い精度を保ったまま探査するのは労力的に困難です。空中探査を併用できる場合であれば、例えば、ヘリコプターを使った探査で重点となるエリアを絞り込み、必要な箇所については空中写真やドローンを使った詳細な探査を実施し、見つかった被害木の近傍で林内の踏査や樹脂滲出調査（後述）のような綿密な調査を導入する、といったように、スケールを切り替えながら探査努力にメリハリがつけられるとよいでしょう。

☑ マツ材線虫病防除における「早期検出」とは？

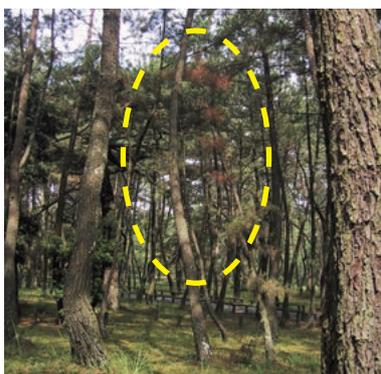
マツ材線虫病防除に関する技術開発で「早期検出」を求められることがよくあります。これから枯れる可能性のある木を事前に察知し駆除することで防除を効率化したい、という発想は理解できます。ところが、マツ材線虫病では「夏に脱出したマツノマダラカミキリ成虫から線虫を伝播された木は秋までに枯れる」のが普通で、成虫の羽化脱出期より前にどの木が枯れるかを予測することはできません。寒冷地で多発する潜在感染の場合、樹体内に侵入して潜伏状態となったマツノザイセンチュウにより感染の翌年以降に枯死が起こることがあり、この場合には早い段階から針葉の部分変色や新芽の伸長不良が確認される例もあります。しかし、そのような外観的な症状は必ずしも全ての木で見られるものではなく、前触れもなく夏以降急速に枯死する木もあります。この病気に関する限り、「早期検出」で対策が飛躍的に効率化するという事は、なかなか期待できません。

ただし、潜在感染木の発症を早期に検知することはマツノマダラカミキリの誘引源となる衰弱木を除去するために重要です。このための方法として、樹脂滲出調査（次ページ）は非常に有効です。（中村克典）

2. 診断

(1) 外部病徴

針葉の変色は、マツ材線虫病のもっともわかりやすい病徴です。通常は、夏季の短い期間に一斉に変色が進行します。しかし、マツ材線虫病で枯れる木でも、変色の進行に時間がかかったり、枝枯れや部分枯れのような症状を示したりする場合があります。逆に、マツ材線虫病の他にも針葉変色を伴う松の衰弱・枯死の原因はたくさんあります（下写真）。ですから、針葉変色だけを手がかりにマツ材線虫病と判断するのは危険です。ただし、周囲にマツ材線虫病の感染源があるような場合には、針葉変色した木はマツ材線虫病によるものと見なし、直ちに処分するのがよいでしょう。



マツ材線虫病によらない松の針葉変色の例

(上段左から) 秋季の旧葉変色、被圧による衰弱枯死、
除草剤によると思われる枯死
(下段) 海岸前線部で見られる潮害

(2) 樹脂滲出調査

樹脂分泌の停止は、針葉変色に先立って現れるマツ材線虫病に特徴的な症状です。針葉のしおれや変色が見られた木で、樹脂分泌が停止していれば、マツ材線虫病を発症しているとほぼ断定できます。また、寒冷地等で周囲にマツ材線虫病の感染源が存在する場合、外観的には無症状の木でも樹脂分泌が止まっていることがあり、そのような木は衰弱が進行しつつある潜在感染木と推定することができます。一定範囲のすべての松に対し樹脂滲出調査を実施することで、このような「隠れた衰弱木」を探し出すことができます。

樹脂分泌の有無を調べるには、松の樹幹に材に達する傷をつけ、時間をおいてそこからの樹脂滲出を確認する方法がとられます。傷をつける道具としては、直径1 cm内外の穴あけポンチがよく用いられています。松が健全であれば、数分から数時間のうちにポンチ穴から樹脂（松ヤニ）が流れ出てきます。樹脂の流出が確認できない場合は穴の中を確認し、露出した材表面に樹脂の滲出が見られない場合には「異常」と判断し、マツ材線虫病の感染を疑います。



なお、冬季は松の樹脂分泌活動が低下するので、この調査を行うのに適していません。また、健全な木でも部分的な枯死により樹脂が出なくなっている場合がありますが、そのような木では穴をあける場所を変えれば樹脂滲出が確認できます。木の状態を見ながら、適正な診断を行って下さい。

(3) マツノザイセンチュウの検出

松の衰弱・枯死の原因がマツ材線虫病によるものと確定するには、枯死木からマツノザイセンチュウが検出される必要があります。ただし、マツノザイセンチュウの検出や同定にはそのための手順や技術があり、いい加減な方法で行っても正しい結果は得られません。また、適正な方法にしたがったとしても、マツノザイセンチュウの検出率が100%になるとは限りません。マツ材線虫病対策をすすめる上で、松の枯死原因を特定することは必須ですが、検出結果にこだわって対策が遅れるとマツ材線虫病の拡大を許すことになりかねません。被害拡大状況等を勘案し、検出を前提とせずに防除を推進することも重要です。

マツノザイセンチュウを検出するための試料を採取するには、枯死木の幹や枝からドリル（刃径15mmを推奨）を用いて、辺材から材片を10g程度（茶碗一杯程度）採取します。外樹皮や腐朽部からは検出できないので採取しないで下さい。採取した試料は密閉できるビニール袋に入れて材の乾燥を防ぎ、冷暗所で保管します。複数の木から試料を採取する場合には、木を変えるごとにドリルを洗浄し、別のビニール袋に試料を収容して交互の混入を防ぎます。



マツノザイセンチュウは枯れ木の中に一様に分布しているわけではないので、検出効率を上げるには樹体の何力所かから試料採取するのが望ましいです。立木のままであれば、1ヶ所ではなく高さや方向を変えて数力所、理想的には伐倒して胸高部と樹幹上部（大枝の分岐部より上部の幹や枝）からの採取ができれば、検出効率が高くなります。

採取した材片を用いてマツノザイセンチュウを検出するには、以下の2つの方法があります。

▶ ベールマン法

試料を水に浸して線虫を遊出させる方法です。よく使われる方法としては、ロートの下部にチューブを取り付けて栓をし、上部にティッシュペーパー等の濾過材で包んだ試料を置いてロート内を水で満たし、一定時間後にチューブに集められた線虫を回収します。回収した線虫を直接観察してマツノザイセンチュウかどうかを同定しますが、線虫の観察には高性能な顕微鏡が必要で、また同定には相応の知識と経験が必要です（15ページ：コラム）。



▶ 診断キット*3

材片試料からマツノザイセンチュウのDNAを溶かし出して検出する方法です。ベールマン法では検出できないような低密度のマツノザイセンチュウでも検出することができます。判定は試薬の変色の確認により行います。キット一式が市販されており、またインターネットを通じた検出代行サービスも有料で提供されています。検出操作を自分で行うには、マイクロピペットや恒温器など最低限の実験器具と生物実験の基礎的な技術が必要です。



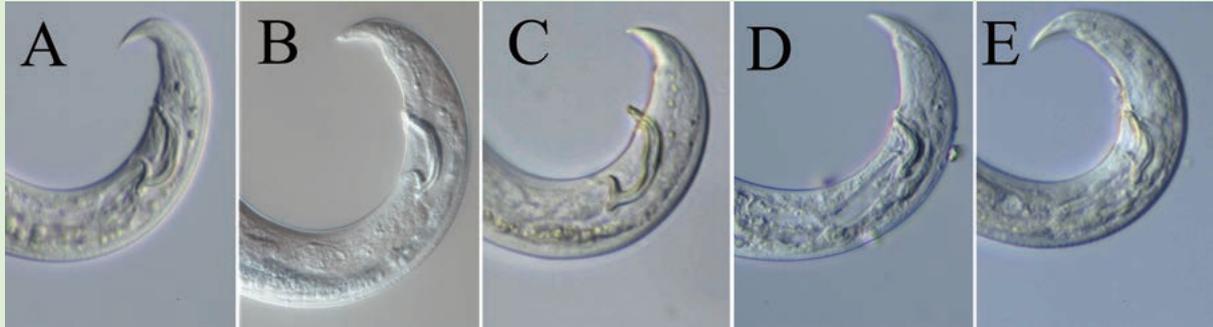
*3 マツ材線虫病診断キット（製品の紹介）

<https://www.nippongene.com/kensa/products/lamp-kit/pine/pine.html>



☑ 形態観察でマツノザイセンチュウを見つけ出す難しさ

上述されているように、マツ材線虫病によって松が枯れたことを証明するためには、枯れ木の中にあるマツノザイセンチュウを見つけ出す必要があります。一般的には「パールマン法」と呼ばれる方法を使って、枯死木から採取した材片の中にあるマツノザイセンチュウを水中に分離します。枯れた木の中には、マツノザイセンチュウだけでなく、カビを食べる線虫や細菌を食べる線虫など、様々な線虫が混在しており、それらの中から目的のマツノザイセンチュウを探し出さなくてはなりません。しかし、多くの線虫は、細長い形をしてニョロニョロと水中を泳ぐので、体全体を眺めただけではどれがマツノザイセンチュウなのかわかりません。よって、高倍率の顕微鏡を使って、各線虫種の特徴が現れる形態の一部（雄雌の生殖器や尾端など）を観察します。下に示した写真は、マツノザイセンチュウを含む近縁線虫種5種の雄成虫の交尾器を拡大したものです。この中の1つがマツノザイセンチュウです。みなさんどれがマツノザイセンチュウかわかるでしょうか？



マツノザイセンチュウを含む同属線虫5種の雄成虫の交尾器

正解は“B”です。これらの写真を見てどこがどう違うのかわかりますか？実はマツノザイセンチュウの近縁種の間では、雄成虫の形態は互いに酷似しているため、形態観察だけでマツノザイセンチュウを同定することは不可能だと言われています。マツノザイセンチュウを正確に同定するためには、雌成虫の生殖器と尾端の形状を確認する必要があります。しかし、パールマン法で線虫を分離すると、雄成虫あるいは生殖器官の発達していない幼虫しか検出されないこともしばしばあり、そのような場合、形態観察では答えは出せません。ちなみに、写真の線虫種はそれぞれ A：ニセマツノザイセンチュウ (*Bursaphelenchus mucronatus*)、B：マツノザイセンチュウ (*Bursaphelenchus xylophilus*)、C：*Bursaphelenchus doui*、D：*Bursaphelenchus poligraphi*、E：*Bursaphelenchus* sp. となります。

これらの問題を一気に解消してくれるのが、DNAを利用してマツノザイセンチュウの存在を検出できる「マツ材線虫病診断キット」による診断法です（前ページ）。この診断キットはマツノザイセンチュウのDNAに反応するように作られているので、材片の中にあるマツノザイセンチュウが雄成虫であっても、雌成虫であっても、あるいは幼虫であっても、発育ステージに関わらず陽性反応を示します。また、形態観察のように、様々な線虫種が混在する線虫群の中から、顕微鏡を使ってマツノザイセンチュウを探し出すという苦境にさらされることもありません。これからマツ材線虫病の診断技術を身につけたいと考えている方には、まずはこの診断キットによる手法を試してみることをお勧めします。（相川拓也）

■ 個別防除手法

1. 伐倒駆除

被害木を伐倒して、その中に生息するマツノマダラカミキリを木ごと処理して死滅させる方法です。また、被害木に適切な処理を施して、発生したマツノマダラカミキリ成虫を死亡させる、あるいは周辺に飛び出さないようにするような方法もここに含みます。

要点1：防除対象の松林に発生するマツノマダラカミキリ成虫の“ほぼすべてを殺虫する”くらいの強度で実施しないと、防除効果は期待できません。

要点2：被害木中のマツノマダラカミキリは木の中～上部に多く、直径 1.5～2 cm 程度の枝にも生息することがあります。このような枝までしっかり集めて処理することが大切です。

要点3：作業はマツノマダラカミキリ成虫脱出時期までに終了することが絶対条件です。

具体的な方法には、以下のようなものがあります。

▶くん蒸処理

集積した被害材の上面全体にガス化する殺虫剤（カーバム剤）を施用し、ガスバリア性のシートで密閉して一定期間放置します。この方法では、施用後数日間のガス濃度が高い時期に、シートに破損があったり、密閉が不十分になったりすると殺虫効果が低下するので、十分な注意が必要です。また、殺虫に必要なガス濃度を確保するため、連日最高気温が 5℃ を下回るような厳冬期の使用は避けること、また、薬液を一点に流し込むような施用を行わないことを推奨します。

シート被覆には下の 2 種類の方法があります。状況に応じて使い分けるとよいでしょう。

なお、薬剤の施用量や被覆期間、シートの取り扱い等については、製品の仕様に従って下さい。



上面被覆（かぶせ式）

- ・集積した被害材の周りに溝を掘っておき、シートを上からかぶせて被害材の上面に薬剤を散布した後、シートの裾を溝に埋めて密閉します。
- ・標準的な 4 m x 4 m のシートで約 1 m³ の被害材を処理できます。
- ・地面の状態により溝掘り作業に労力を要することがあり、また岩場等の溝を掘れない場所では施工できません。



全面被覆（あめ玉式）

- ・地面に広げたシートの上に被害材を集積・薬剤施用し、2 辺を持ち上げ、端を合わせて 3 回程度折り込んでから大型ホチキスで留め、両端をヒモ等で縛って密閉します。形状が、包装紙でくるんだあめ玉に似ているので、通称「あめ玉式」と呼ばれています。
- ・処理できる被害材の量がかぶせ式の 70% 程度まで少なくなります。
- ・地面の状態によらず施工することが可能です。強風等の条件下でもシートがめくることがありません。

▶焼却

林内、林外で野焼きにする他、搬出してごみ焼却場等で処分する、あるいは、バイオマス発電施設、炭焼き窯、焼き物窯などで燃料として利用するといった方法もあります。搬出して焼却する場合には、マツノマダラカミキリ成虫発生期までに確実に処理されるよう、責任を持って監視する必要があります。

伝統的に行われてきた駆除方法ですが、林内での焼却は山火事の危険があることや、つちくらげ病発生の原因になりかねないことから、現在ではあまり行われません。



▶破碎

機械（チップパー）を用いて被害材をチップにする方法です。搬出してチップ工場で処理する方法の他に、可搬式のチップパーを使い林内で被害材を処理することも可能です。材内のマツノマダラカミキリを確実に露出・殺虫するために必要なチップの厚さは6 mm以下とされていますが、チップ工場の大型チップパーであれば15 mmまでの粗大なチップでも蛹室が破壊されるので有効です。



▶加温処理

被害材を木材として利用する場合に用いられている方法です。処理する木材の中心温度56℃、30分以上の熱処理が、針葉樹内の害虫やマツノザイセンチュウを死滅させる方法として、国際標準規格 (ISPM No.15) に規定されています。

▶成虫の移動分散阻止

被害材内のマツノマダラカミキリを死滅させられなくても、羽化した成虫がすぐ死ぬようにしたり、移動分散できないようにしたりすれば、マツ材線虫病被害の拡大を防ぐことができます。例えば、被害材を土中に埋めて、地面との間に10 cmの土層が確保できれば、成虫の脱出をほぼ阻止することができます。最近では、被害材を覆った網に殺虫剤を散布する方法や、成虫が食い破ることのできない厚さのシートで被害材を被覆するなどして移動分散を阻止する方法（駆除効果を高めるためにシート内に粘着資材を併用）が開発され、実用化されています（18ページ：コラム）。

羽化脱出した成虫に昆虫病原菌を感染させ、摂食抑制と短命化を図る方法が開発、実用化されましたが、普及がすすまなかったため、製品は現在製造中止となっています。

☑甘くない、マツ材線虫病の「生物的防除」

「天敵によるマツ材線虫病防除」への期待・要望は強く、研究者も長年にわたってさまざまな取り組みをすすめてきましたが、強力な伝染病であるマツ材線虫病を押さえ込めるほど強力な天敵は、残念ながらほぼ見つかりません。日本にいないなら海外から導入すればよい、というのは昔の考え方で、現在では海外、あるいは国内ですら、その場所に自生しない生き物をむやみに野外に放つことなどできません。

昆虫病原菌ポーベリア・バッシアーナ (*Beauveria bassiana*) の中に、マツノマダラカミキリに強い効果を示す系統が発見され、さまざまな経緯を経て2008年に防除資材として製品化されましたが、主にコストの問題から普及には至りませんでした(上述)。求められていたはずの天敵による防除が、現場には受け入れられなかったという、我々にとっては苦く重い経験となりました。

天敵以外でも、フェロモンや、不妊化虫放飼のように、他の害虫で活用されていてなんとなく「よさそう」な方法によるマツノマダラカミキリの防除を期待されることもあるのですが、手法の有効性や実行可能性は虫の生態や加害形態によりそれぞれ異なります。また、農業害虫等では実用的な高コストな方法をそのまま森林に適用することがコスト的、労力的に困難であることは、想像に難くないでしょう。

とは言いながらも、環境低負荷なマツ材線虫病防除手法のオプションを求めて、新たな天敵利用技術開発に向けた研究は今もすすまられています。(中村克典)

☑ 農薬不使用の選択肢 —成虫逸出抑制法—

開発の背景には、化学農薬の使用が周辺環境に及ぼす影響への関心の高まりや、2006（平成18）年におけるポジティブリスト制度*4の施行がありました。マツノマダラカミキリの脱出成虫を対象とした昆虫病原菌ボーベリア・バッシアーナ（*Beauveria bassiana*）の不織布製剤を用いた駆除法（前ページ）にヒントを得て、伐倒・集積した被害材の上部に粘着資材を置き、被覆シートで覆ってその内側にマツノマダラカミキリを封じ込め駆除する「被覆・粘着資材を利用した穿孔性害虫逸出抑制法」を山口県等で開発しました（特許第5722641号）。

防除効果を確保するために特に配慮した点は、①マツノマダラカミキリ成虫がシートを食い破りにくくするための集積丸太〜シート間の空間の確保、②成虫が食い破りにくく、かつ、成虫を粘着資材へとスムーズに誘導できるシートの選択（材質、色など）、③成虫を効率的に捕獲でき、長期間利用可能な粘着資材の開発、の3点でした。こうして開発された逸出抑制法は、現地試験において高い駆除効果を示し、被覆・粘着資材をセットにした「害虫捕虫資材」が井筒屋化学産業(株)より販売されています。

その後の試験で、この方法を日なたで行った場合には高温になる上部の丸太からはマツノマダラカミキリ成虫が発生せず、集積方法の工夫で防除効果を高められることが分かりました。また、東北地方のような寒冷地で発生する2年1化の成虫に対応するための長期間設置でも、本法が有用であることを確認しました。一方、くん蒸処理による駆除と比べて長期間の設置を要することから、鳥獣によりシートに穴が明けられて駆除効果が低下する可能性があり、この点にいかに対処するかが課題として残りました。そこで、さらなる試験に取り組み、山口県における破損被害の主要原因がカラスとタヌキによるものであることをつきとめ、施工後に被覆シートに防風・防鳥ネットを被せることで鳥獣による破損被害を防げることを明らかにしました。

本法が、周辺環境や生態系保全への配慮、各種森林認証制度への対応等の面から、化学農薬を使用できない場面でも利用可能な駆除法の選択肢として、マツ材線虫病防除の一助となればと考えています。

（杉本博之、千葉のぞみ、渡邊雅治）



シートの一辺を被覆する集積丸太で固定します。



集積丸太上部に粘着資材を置きます。



シートで集積丸太を緩く覆います。



鳥獣被害回避のため防風ネットを施用した例



シートの裾を石や丸太で固定します。くん蒸処理とは異なり、密閉の必要はありません。

*4 ポジティブリスト制度

2006年から施行されている農薬等の残留規制に関する制度。それまでの「特に危険な化学物質について残留基準を示す」方法（ネガティブリスト）を改め、「残留基準が設定された一部の物質以外については一律で0.01 ppmの残留基準を当てはめる」として、化学物質の残留への規制が強化された。

2. 予防散布

守りたい松の樹冠にあらかじめ有機リン系やネオニコチノイド系の殺虫剤を撒き付けておいて、枝をかじったマツノマダラカミキリ成虫を死亡させる方法です。マツノマダラカミキリ成虫の飛来が想定される状況下で、大面積の松林に感染予防策を講じることができる唯一の方法です。適用薬剤の残効期間が長くないため、マツノマダラカミキリ成虫の活動期間をカバーするには通常2回の施用（累積羽化率5%時に1回目、50%時に2回目を推奨）が必要です。ただし、残効期間の長いマイクロカプセル剤であれば、散布回数を1回のみとすることができます。

要点1：すでに活動している成虫を駆除するためではなく、予防のために行う殺虫剤散布です。

要点2：対象地域のマツノマダラカミキリ成虫発生時期に照準を合わせ、最適なタイミングで散布を行うことが重要です。

要点3：予防散布の殺虫効果には限界があります。伐倒駆除等によりマツノマダラカミキリの密度を下げる、あるいは感染源からの隔離により成虫飛来数を抑制することなしに、予防散布のみで防除を成功させることは期待できません。

要点4：実施に当たっては、散布薬剤が周辺の自然環境や生活環境、農業や水産業に影響を及ぼさないよう、細心の注意が必要です。

散布方法には以下のようなものがあります。

▶空中散布

ヘリコプター等を用いて、上空から薬剤を散布する方法です。かつては有人ヘリコプターからの散布が主流でしたが、近年ではより小回りのきくラジコン式の無人ヘリコプターが用いられることが多くなり、今後はドローンの活用もすすむと思われます。広範囲、高所の散布に適し、飛来するマツノマダラカミキリ成虫への対策に有効な樹冠上面への散布を確実に行えるという利点がありますが、機材やオペレーター確保のため散布タイミングを自由に設定できないという問題があります。



▶地上散布

動力噴霧機やスパウター（大型の送風噴霧器機）を使って、地上から薬剤を散布します。前者では10m程度、後者であれば30~40mの高さまで薬剤を到達させることができますが、樹冠上面への散布を確実に行える空中散布よりは防除効果が劣る可能性を考慮しておく必要があります。高所作業車を併用することで、空中散布と同等の散布を実現できている例もあります。

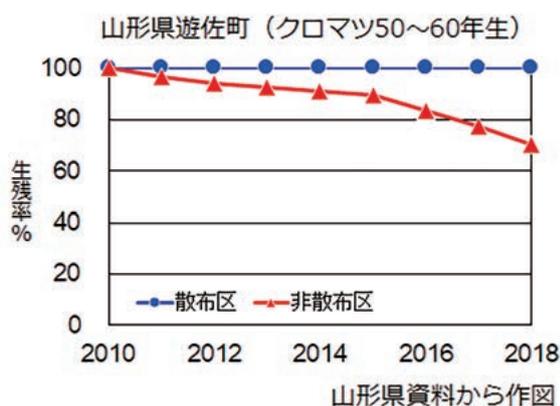


▶スプリンクラー散布

特定の木を保護するために、樹幹に固定したパイプの上部に設置したスプリンクラーから薬剤を散布する方法です。

❖ 予防散布の有効性

予防散布では、誤った理解や運用上の制限などから期待通りの効果が得られないことがあり、このことが効果に対する疑念につながっている場合も見受けられます。しかし、適確に運用されれば予防散布の効果は明確であり、松林維持のための極めて有効な手段であることは間違いありません。松林を保護することのメリットと薬剤を使用することのリスクとを考慮し、地域にとって最善の防除手法を選択して下さい。



予防散布を行った松林(散布区：●)と行わなかった松林(非散布区：▲)における、生き残った木の割合の推移

グラフは、それぞれの調査地での調査開始時の松の本数を100として、その後の調査で生き残っていた松の本数をパーセントで表しています。いずれの調査地でも、散布区では非散布区に比べて本数の減少が小さい（たくさんの松が守られた）ことがわかります。

【出典】

吉本喜久雄（2011）松くい虫空中散布取りやめ後の松林の推移：平戸市生月町の事例．林業と薬剤 197：1-6

江崎功二郎（2003）松くい虫薬剤空中散布（特別防除）の効果．石川県林業試験場研究報告 34：46

山形県庄内総合支庁 森林整備課・山形県森林研究研修センター（2018）平成30年度 産業用無人ヘリコプターによるマツグリーン液剤2散布事業地における生物影響調査報告書 32p. ほか

3. 樹幹注入

あらかじめ松生立木の樹幹下部にドリルで穴をあけて薬剤を注入し、有効成分を樹体内に分散させておくことで、その後侵入してきたマツノザイセンチュウの移動・増殖を抑制、マツ材線虫病の発病を予防する方法です。適切に施用されれば確実な予防効果が得られ、その効果は薬剤により最大7年まで維持されます。単木的な予防に適した方法であり、広範囲の松林に適用するのは経費がかかりすぎて現実的ではありません。また、この方法に治療効果はないので、すでにマツノザイセンチュウに感染した木の発症を抑えることはできません。



要点1：十分な効果を得るには、適切な時期に、適切な技法によって薬剤を施用する必要があります。研修会等の機会を利用して、正しい施用法を習得して下さい。

要点2：樹幹に穴をあけ、薬剤を注入する処理は、木にとってストレスとなります。老木や恒常的にストレスを受けている庭園木、盆栽への施用には十分な注意が必要です。また、五葉松類は薬害が出やすいとされ、施用が推奨されていません。



要点3：年ごとに処理木をローテーションすることで、多数の松を守ることができます。この場合、どの木にいつ施用したかが確実にわかるよう木を特定できるようにし、記録を残すことが、施工管理上極めて重要です。

4. 抵抗性マツの植栽

マツ材線虫病に抵抗性の苗木を植栽することで、松林自体をマツ材線虫病に強くしようとする方法です。国内ではすでに抵抗性のクロマツ、アカマツが数百品種開発され、これらの松からなる採種園で生産された種子から育てた“抵抗性マツ”の苗木が一般に供給されています。



抵抗性クロマツ採種園
(宮城県林業技術総合センター)

抵抗性マツを扱う上で忘れてはならないのが、それらが枯れにくい松であっても、枯れない松ではないということです。枯れにくい松からなる松林では被害が広がりやすく、防除しやすいという大きな利点があります。しかし、マツノマダラカミキリやマツノザイセンチュウの勢いがあまりに大きくなると、抵抗性マツもマツ材線虫病にやられてしまいます。抵抗性マツを植栽したからといって、防除が不要になるというようなことはありません。

抵抗性マツはマツ材線虫病への抵抗性に着目して選抜された品種であって、樹形や成長については特に考慮されていません。しかし、アカマツが用材として利用される東北地方等の地域で植栽される苗木には、抵抗性のみならず、樹形、成長、材質等の特性も優れたものであることが求められます。森林総合研究所林木育種センター東北育種場のホームページには、そのような抵抗性アカマツ品種についての情報がまとめられています*5。

*5 東北育種基本区アカマツ品種選択ツールの紹介

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/touiku/research/kenkyuseika/touhoku-akamatu-sentaku.html>



5. 守りやすくするために

ここまで述べてきたとおり、マツ材線虫病から松林を守るには、被害木を探し出して着実に駆除し、また生きた木に対して適切な予防対策を行うなどの作業が必要です。しかし、広大で道路もない松林では、被害木を探すのも駆除に向かうのも大変ですし、下層植生が繁茂するなど林内が荒れていれば、さらに作業は困難になります。また、そもそもマツノマダラカミキリが大量に飛来するような状況下であれば、防除の成功などあり得ません。直接的な防除以外にも、マツノマダラカミキリが侵入しにくく、松が元気で、林内作業がしやすい環境を整えるという観点から、以下のような活動や規制はマツ材線虫病対策をすすめる上で大変重要です。

(1) 非松林化・樹種転換

伝染病であるマツ材線虫病への対策として、守りたい松林を感染源から“隔離”することは有効です。実際に、海に囲まれた小面積の離島や、周囲が市街や農地で囲まれて孤立した松林で、マツ材線虫病防除が効果的であることは、経験的に知られています。

断続的に松林が連続するような場所において、守るべき松林の周辺感染源からの隔離は、周辺松林で松を伐採し（非松林化）、植栽や天然更新の活用により別の樹種に置き換えること（樹種転換）で達成できます（11 ページ：コラム）。

隔離帯の幅として、2～3 km という距離がよく採用されます。しかし、マツノマダラカミキリ成虫がこの距離を超えて移動をすることは十分にありえます。2～3 km の隔離が鉄壁の防御となるわけではないので、十分な監視と被害発生時に対処できる体制の維持が求められます。



青森－秋田県境でマツ材線虫病侵入対策として実施された大規模な松林伐採（2005～06年）

(2) 松の伐採や移動の制限

マツノマダラカミキリ成虫の活動期に松衰弱木や伐倒木が林内にあると、その周辺に成虫が誘引されてマツ材線虫病が発生する可能性が高まります。このようなことを避けるため、被害拡大が警戒される地域では、夏季の松林での伐採作業を控えることが望ましく、実際に、岩手県や青森県ではそのようなルールが定められています*⁶。

不用意に被害材を移動させて、移動先でマツノマダラカミキリ成虫が発生すると、マツ材線虫病の感染拡大を助けることとなります。また、夏に伐採した松材を被害地から未被害地に移動させると、被害地で誘引されて松材に取り付いたマツノマダラカミキリがいっしょに運ばれる可能性があります。被害木はもちろん、未被害木を伐採した松材であっても、運搬利用にあたっては、被害地から未被害地への移動を禁じるなど、適切なルールの運用が強く望まれます。



松被害材を運搬する大型トレーラー

*6 「松くい虫対策としてのアカマツ伐採施業指針」について（岩手県）。
<https://www.pref.iwate.jp/sangyoukoyou/ringyou/seibi/matsukuumushi/1008329.html>
マツ類及びナラ類の伐採・移動・利用に関する留意事項について（青森県）。
https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/nourin/rinsei/ryuuijikou_matunara.html



（岩手県）



（青森県）

(3) 林内作業道の整備

広い松林で被害木の地上探査や伐倒駆除、あるいは地上散布を行うには、作業道が不可欠です。効率的に作業を行うには、一定の密度でマツ林内に道路が張り巡らされていることが望まれます。

(4) 林内環境の整備

上木が繁茂して暗くなり、林床の土壌が発達した林内では、松の芽生えは育たず広葉樹林化が進行します。林床に発達する他樹種を刈り払い（下刈り）、林床に溜まった落ち葉を除去する（落ち葉掻き）ことで、松林を人為的に維持することができます。このような環境は、松の健康にもよい効果があることが知られています（ただし、健康な松がマツ材線虫病にかからないわけではありません）。人手が入って整理された松林では被害木が発見されやすく、駆除作業も容易になります。



ボランティアによる松林整備（落ち葉掻き）

人の手が入ることで維持されてきた里山の松林は、マツ材線虫病の存在下でも、人が関わることで守られてゆくことでしょう。

☑ 被害拡大は温暖化のせい？

西南日本でまん延していたマツ材線虫病の被害が東北地方等の寒冷地に拡大してきたという経緯を見て、これを地球温暖化の現れと考える人は少なくないようです。

確かに、マツ材線虫病を引き起こすマツノザイセンチュウやマツノマダラカミキリは変温動物で、低温になると活動や増殖が抑制されることから、温暖化がマツ材線虫病の拡大に有利にはたらくのは間違いありません。しかし、国内における被害拡大の推移ということであれば、これはそもそも九州や山陽地方等を起源とする伝染病が周辺地域に拡大してきた過程であり、西南から東北へ広がってきているように見えるのは当たり前のことです。また、現在のマツ材線虫病の被害分布は、温度条件的には被害が激化しうるエリアの内におさまっていて、さらなる拡大を防除で抑え込んでいるのが実情です。つまり、マツ材線虫病被害の分布北限は、拡大しようとする伝染病とそれを抑えようとする防除努力とのせめぎ合いによって定まっているものであり、過去の被害拡大は、人の努力が病気の勢力に押されてきたことを反映しています。マツ材線虫病被害の分布拡大は、温暖化の進展にともなって“不可抗力的”にすすんでいるようなものではありません。

一方で、温暖化の進展により、これまで低温のため発生が抑えられてきた地域においてもマツ材線虫病が発生、まん延する可能性は確実に高まっています。被害先端地域での徹底した監視と防除、被害まん延地域からの被害材等の移入の阻止に加え、温度条件の変化により防除困難となった地域では樹種転換を推進するなどの防除方針の見直しが進められることになるかもしれません。（中村克典）

参考：イラストで適応策がわかるインフォグラフィック（気候変動適応情報プラットフォーム HP）

<https://adaptation-platform.nies.go.jp/local/measures/infographic.html>



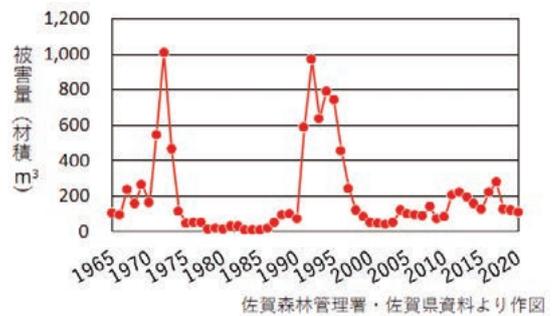
■ マツ材線虫病防除の成功事例

❖ 虹の松原（佐賀県）

唐津湾に沿って広がる面積約 230 ha の海岸松林です。主にクロマツからなりますが、内陸側にはアカマツも見られます。近傍数キロ圏内に感染源となりうる松林がまったくないわけではないのですが、周囲は市街地と農耕地に囲まれて周辺松林からは一定程度隔離された状態になっています。

虹の松原では 1959 年から伐倒駆除と地上散布による防除が実施されていたのですが、1970 年頃から被害量が急増しました。しかし、1973 年に空中散布が導入されると、被害は急速に減少し、その後 10 年以上にわたって微害が維持されました。このような防除体制が継続されていたにもかかわらず、1991 年になると被害は再び急増し、収束しない状態が数年続きました。

そこで 1996 年に、防除方法の改善が図られました。まず、当時の伐倒駆除で主流となっていた油剤処理に代えて効果が確実な焼却を採用し、枝等を残さないよう伐倒木は直ちに集積・処理する手順に変更しました。また、マツノマダラカミキリ成虫の正確な発生時期を調べるため林内に網室を設けて発生活消長調査を行い、予防散布の実施に活用しました。このような防除法の導入により、2000 年頃までに被害量は元の水準にまで抑制されました。2011 年頃から被害量がやや高くなっていますが、これには周辺地域でのマツ材線虫病被害の激化が影響しているものと考えられます。



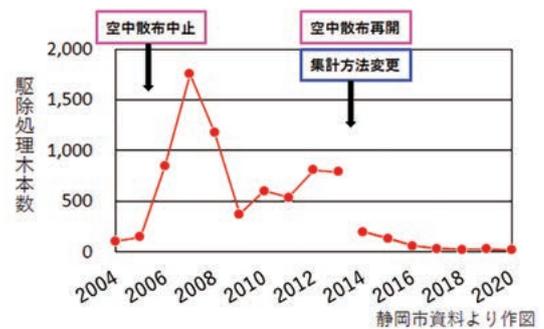
佐賀森林管理署・佐賀県資料より作図

❖ 三保松原（静岡県）

駿河湾に向かって西から東に延びる三保半島に広がるクロマツ林で、世界文化遺産富士山の構成資産の一部にもなっています。34 ha の松林が、半島内の市街地と入り組んだ状態で分布しています。

観光地として松林の維持が重視されてきた三保松原では、1972 年から始まった伐倒駆除と地上散布による防除に加え、1975 年には空中散布を導入し、近隣の松林がマツ材線虫病で荒廃していく中、低い被害量を維持してきました。ところが、2006 年に有人ヘリによる空中散布が停止されると被害量は急増し、伐倒駆除と地上散布では被害量を十分に減少させることができない状況が続きました。ここで、2014 年に無人ヘリを利用した空中散布が導入されると、被害量は減少に転じ、徹底した被害探査や伐倒駆除（搬出～焼却）等の効果もあって、3 年後には被害木本数がヘクタールあたり 1 本以下の微害レベルにまで抑制することに成功しています。

なお、グラフに示した被害量について、2013 年以前は被圧枯死木等を含む全駆除処理木を、2014 年以降はマツ材線虫病被害木のみを集計している点にご注意下さい。



静岡市資料より作図

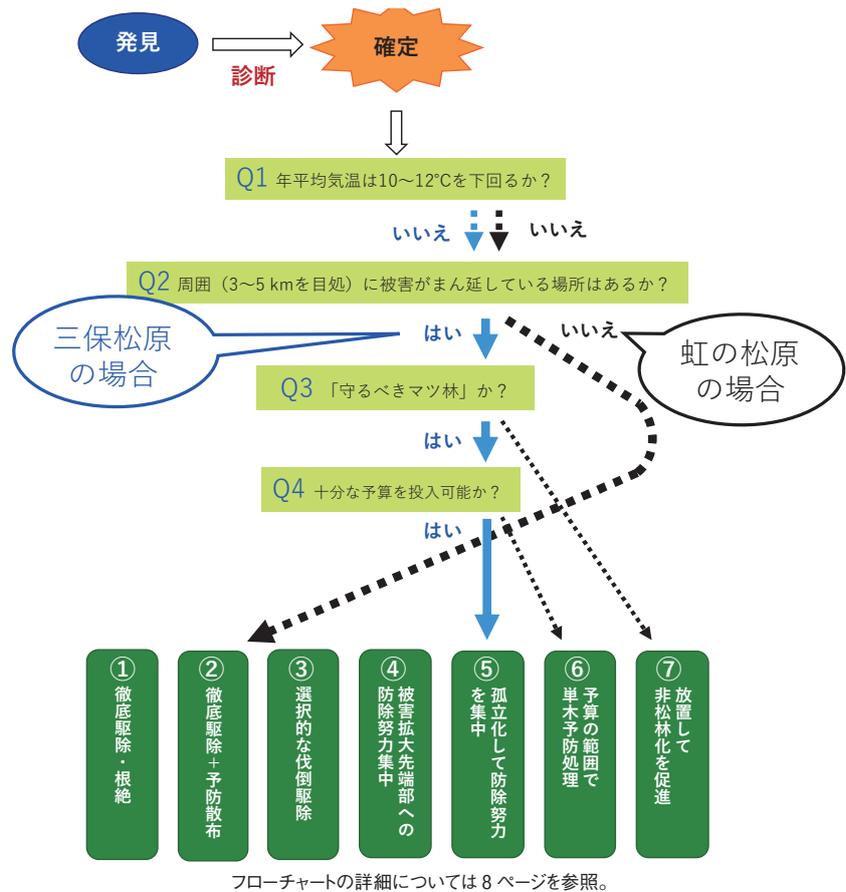
❖ 「被害対策方針フローチャート」からみた防除成功事例

前ページに示した防除成功の事例は、本冊子で示したマツ材線虫病被害への対策方針（8～11ページ）ではどのように位置付けられるでしょうか。

虹の松原、三保松原はともに関東以西の温暖地に位置しますので、フローチャートのQ1では「いいえ」に相当します。周囲が市街地と農耕地で囲まれた虹の松原では、遠くには激害地も存在しますが、近傍には感染源となる松林がほとんどないため、一応隔離が達成できており（Q2＝「いいえ」）、長期にわたってマツ材線虫病の拡大が抑制されてきました。フローチャートに従えば、推奨される対策方針は②徹底駆除＋予防散布となり、実情もそのようになっています。

遠隔の激害地または近傍に残された少ない松林からのマツノマダラカミキリ成虫の飛来によると思われる被害が発生していることから、松林全体を守る上で予防散布は有効に機能していると考えられます。

三保松原では、三保半島内の民有地等でマツ材線虫病被害が散見されることから、いまだ隔離が達成されているとは言えない状況にあると考えられます（Q2＝どちらかと言えば「はい」）。しかし、地元の三保松原保全に関する意識は極めて高く（Q3＝「はい」）、守るべき松林については相応の防除予算をかけられる状況にあります（Q4＝「はい」）。推奨される対応方針は⑤孤立化して防除努力を集中となり、この方針に沿った防除がすすめられています。ただし、周辺に散在する民有地の松林を除去することは困難であることから、被害発生を最小限とするために予防散布が実施され、また⑥単木予防処理も一部で導入されています。



フローチャートの詳細については8ページを参照。

☑ 吹上浜の過去と現在

吹上浜は、日本三大砂丘のひとつとして知られる、鹿児島県薩摩半島の東シナ海に面した総面積 1,550 ha の広大な海岸林です。現在、その大部分はクロマツ林ですが、古くは火災、近年ではマツ材線虫病被害と、松林存続の危機がありました。そのたびに松林の重要性が改めて認識され、白砂青松を取り戻してきた歴史があります。

記録によると、吹上浜のクロマツの集団枯損は、1965 年頃から始まったようです。枯損のメカニズムが解明されて以降、マツ材線虫病対策として予防散布や伐倒駆除などが行われてきましたが、被害は増減を繰り返していました。そこへ、1991 年の台風、1992 年の高温・少雨が追い打ちをかけ、被害が急増しました。

被害拡大を受け、1993 年に国、県、市町、関係機関による「吹上浜松林保全対策連絡協議会」が設立され、関係者が一体となった防除が始まりました。予防散布では散布回数を一時的に増やし、伐倒駆除では枝条を残さないことが徹底されました。被害木の搬出や焼却への、年間 1,000 人を超えるボランティアの参加は、大きな力となりました。また、伐倒できない被害木へのマツノマダラカミキリ成虫脱出前の薬剤散布、樹幹注入や抵抗性マツの植樹、内陸側での樹種転換などもすすめられました。これらの対策により、1992 年には約 16,000 m³ にも達した被害は減少し、1999 年には遂に被害がほぼゼロとなりました。

その後 2005 年までマツ材線虫病の被害はほとんどみられず、それ以降も激化することなく推移して、防除の成功例として知られた吹上浜でしたが、2015 年頃から被害が増加し、2020 年の被害量は 4,000 m³ を超えました。このような状況を受け、被害木探査にドローンを導入して精度を向上させるとともに、現地の被害材を用いてマツノマダラカミキリの羽化脱出調査を行い、散布時期の最適化に努めています。さらに、世代交代によって以前の激害を経験していない関係者も多くなったことから、マツ材線虫病被害発生のメカニズムや伐倒駆除についての研修会を開催し、基本的な知識の周知を図っています。

「災害は忘れた頃にやってくる」と言われるように、被害が沈静化してから約 20 年たった現在、吹上浜には再びマツ材線虫病の脅威が迫りつつあります。荒廃した被害跡地に植栽した松が大きく育ち豊かな松林を取り戻した時、皮肉にもそれは、マツノマダラカミキリにとって好適な環境になった時であり、人々がかつての防除の苦労を忘れつつある時期にあたります。吹上浜のこれまでの経緯は、徹底した防除によってマツ材線虫病被害は沈静化できること、そして松林がある限り防除対策が必要であることを示しています。(川口エリ子)



吹上浜の海岸クロマツ林 (2021 年 11 月撮影)
守られてきた広大な松林の中に点在する枯死木が確認できる。

参考文献・資料

(書籍等)

- ◆「樹木医学入門」 福田健二 編、朝倉書店 (2021)
- ◆「森林病理学 森林保全から公園管理まで」 黒田慶子・太田祐子・佐橋憲生 編、朝倉書店 (2020)
- ◆「森林保護と林業のビジネス化ーマツ枯れが地域をつなぐー」 中村克典・大塚生美 編著、日本林業調査会 (2019)
- ◆「松保護士の手引き 改訂第2版」 日本緑化センター (2015)
- ◆「Pine wilt disease」 Zhao BG, Futai K, Sutherland JR, Takeuchi Y. 編、Springer (2008)
- ◆「樹の中の虫の不思議な生活 穿孔性昆虫研究への招待」 柴田叡一・富樫一巳 編著、東海大学出版会 (2006)
- ◆「マツ枯れは森の感染症 森林微生物相互関係論ノート」 二井一禎 著、文一総合出版 (2003)

(論文)

- ◆「あめ玉式伐倒くん蒸処理法の手順と作業時間」 江崎功二郎、森林防疫 71 (1) : 17-22 (2022)
- ◆「世論のうごきに対応したマツノマダラカミキリ駆除法の開発に向けて」 杉本博之、森林科学 71 : 35-38 (2014)
- ◆「マツノザイセンチュウのDNAを利用した簡易なマツ材線虫病診断ツール“マツ材線虫病診断キット”について」 相川拓也・神崎菜摘・菊地泰生、森林防疫 59(2) : 60-67 (2010)
- ◆「北上するマツ材線虫病」 中村克典、森林科学 59 : 35-38 (2010)

(ウェブページ)

- ◆「航空写真とGISを活用した松くい虫ピンポイント防除法の開発」(国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所ホームページ、<http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/project/matsukuimushi.html>
- ◆「松くい虫被害」 林野庁ホームページ、https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/higai/matukui_R2.html
- ◆「農薬コーナー」 農林水産省ホームページ、<https://www.maff.go.jp/j/nouyaku/>

この小冊子は、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト「変容する松くい虫対策技術を反映した新たな防除マニュアル」（課題番号 201902）によって作成されました。

プロジェクトメンバー

国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所

東北支所

中村克典

相川拓也

小澤壮太

森林昆虫研究領域

前原紀敏

石川県農林総合研究センター林業試験場

江崎功二郎

山口県農林総合技術センター

千葉のぞみ

渡邊雅治

鹿児島県森林技術総合センター

川口エリ子

米森正悟

執筆協力

山口県農林水産部森林企画課

杉本博之

山形大学農学部

齊藤正一

本冊子を作成するにあたり、資料提供等のご協力をいただいた九州森林管理局佐賀森林管理署、一般財団法人三保松原保全研究所、ならびに東北、関東中部、関西、九州の各林業試験研究機関連絡協議会の森林病害担当部会に対し、深く感謝の意を表します。

下記サイトにて PDF 版を公開しております。

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/index5.html>

▶持続可能な開発目標（SDGs）

森林総合研究所は、森林・林業・木材産業などの幅広い研究を通して
国連の持続可能な開発目標（SDGs）の達成に積極的に貢献しています。

SUSTAINABLE
DEVELOPMENT
GOALS



国立研究開発法人森林研究・整備機構
森林総合研究所東北支所
〒020-0123 岩手県盛岡市下厨川字鍋屋敷 92-25

編集・発行 東北支所
発行日 2022(令和4)年3月
お問い合わせ先 地域連携推進室
電話 019-641-2150(代表)
e-mail : www-thk@fpri.affrc.go.jp

※本誌掲載内容の無断転載を禁じます。