



「松くい虫」の防除戦略

マツ材線虫病の機構と防除

独立行政法人 森林総合研究所

はじめに

梅雨のころまで元気で青々としていたマツが、盛夏を越すころ真っ赤になって枯れる現象を「松くい虫」による枯損とか「松枯れ」といいます。しかし、「松くい虫」という昆虫がマツを枯らしているわけではありません。この枯損は昆虫ではなく線虫という微小な生物がもたらす病気によるものであり、「マツ材線虫病」というのが正式の名前です。ただし、行政用語としては、運び屋のマツノマダラカミキリのことを「松くい虫」と称しています。

マツの集団枯損現象は1905（明治38年）から知られていましたが、その原因は長く謎でした。初めのうちは、マツの樹幹に寄生する数十種類の昆虫が枯損の原因として疑われ、それらの虫が「松くい虫」として一括されていたため、その名残として「松くい虫」がこの病気の名前としていまだに使われているのです。

マツノザイセンチュウという線虫の感染でマツが枯れることが解明されたのは1970年のことです。その後、この線虫をマツノマダラカミキリというカミキリムシが運ぶこと、そしてこの線虫はも

ともと日本にはおらず、北アメリカから持ち込まれた侵入生物であることも分かってきました。この線虫がもたらす病気、マツ材線虫病によって、日本のマツ林は崩壊の危機にあります。人間が積極的に保全しなければマツ林の維持はきわめて難しいのです。

マツ林を守るため、マツノザイセンチュウ、マツノマダラカミキリの生態、防除法、枯れのメカニズム等の研究に、数多くの国、県、大学の研究者が携わってきました。現在の防除体系はそうした研究の成果としてできあがったものです。

この小冊子はマツ材線虫病からマツ林を保全するにあたって、その基本的な考え方を、これまでの研究成果をもとに体系化し、解説したものです。もちろん、寒冷地における被害拡大など今後解明すべきことも多く、この小冊子だけで松枯れがすべて解決するわけではありませんが、松枯れ問題に取り組むにあたって、参考としていただければ幸いです。

2006年3月
森林総合研究所



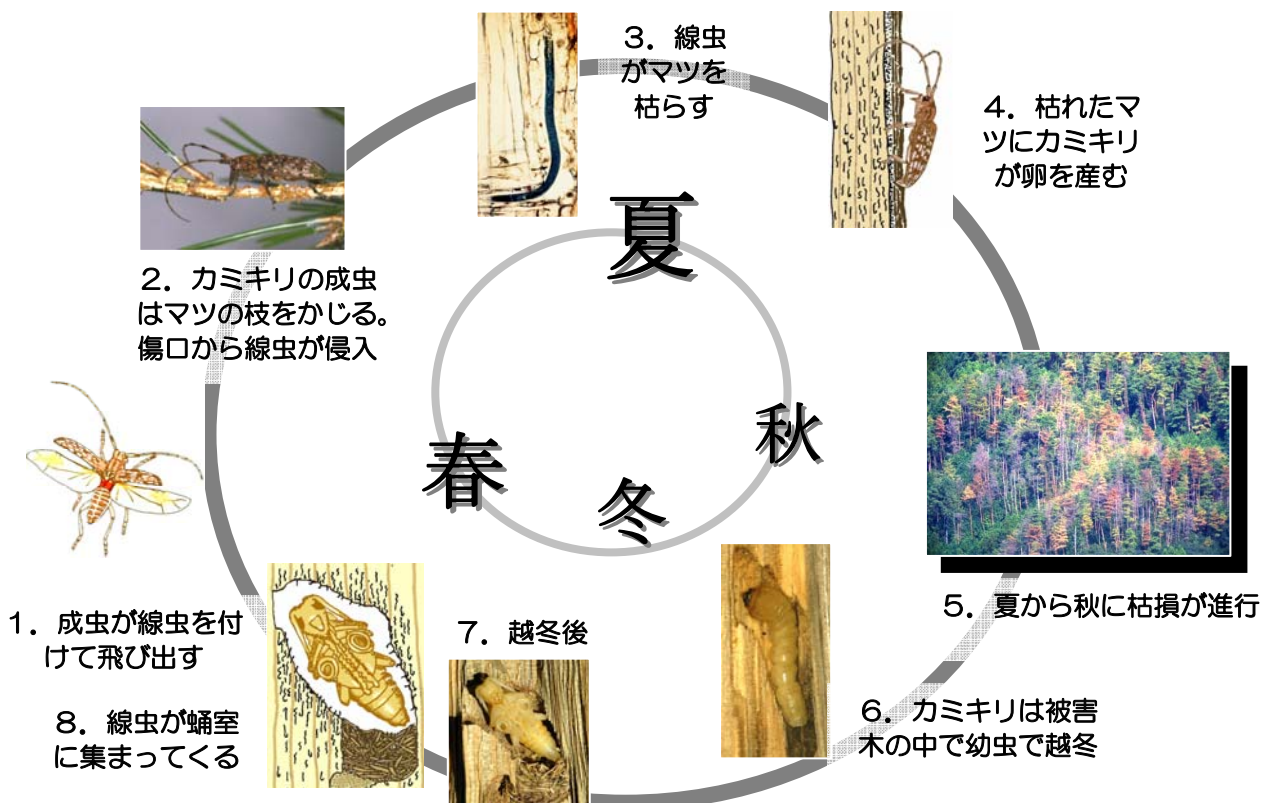
松枯れのしくみ

松枯れは線虫と昆虫が共同して引き起こす病気です。その仕組みは以下の通りです（各文の冒頭の番号は下図と対応しています）。

- 1) 5～7月にマツノマダラカミキリ成虫がマツノザイセンチュウ（線虫）を体内に入れて（主に気管の中）前年に枯れたマツから脱出。
- 2) カミキリ成虫は生きたマツの枝をかじって栄養摂取。この傷から線虫が樹体内に侵入。
- 3) 侵入後、線虫はマツの樹脂道（ヤニの通り道）を通して樹体全体に広がり、マツの細胞から栄養を摂取。線虫の活動にともなって、水（木部樹液）の通路である仮道管から水分が抜けて無くなり、樹液が上昇できなくなる。感染後

1～2ヶ月で、水不足のため葉が変色し、樹幹内で線虫が増殖。

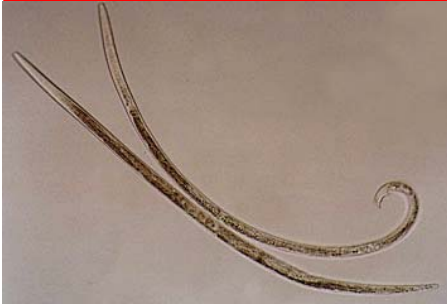
- 4) カミキリ成虫は枯死したマツが放つ匂いに引かれ、枯損マツの樹幹に産卵。10日ほどで孵化して幼虫になる。
- 5) 夏から秋にかけてマツ林で枯損が目立つようになる。
- 6) カミキリ幼虫は枯死したマツの樹皮下を食害して成長。
- 7) 十分に食べた幼虫は材内にもぐり、蛹室を作り、翌年春に蛹になる。
- 8) 材内にいた線虫は蛹室に集まり、カミキリ成虫の気門（空気を取り入れるために体表にある穴）に入り込み、カミキリとともに材の外へと旅立つ。



松枯れはなぜ恐ろしいのか

マツノザイセンチュウは北アメリカから侵入した病原体
日本のマツは致命的に弱い。原産地アメリカのマツは強い。

マツノザイセンチュウ



共生関係
の成立



マツノマダラカミキリ

マツノマダラカミキリは日本在来の昆虫。
マツの枯れ木・枝がないと生存できない。マツノザイセンチュウが侵入する以前は枯木や枯れ枝が少なかったため、マツノマダラカミキリの繁殖できる資源が少なく、虫の密度は低かった。



マツノザイセンチュウは侵入生物
マツノザイセンチュウが侵入後、マツノマダラカミキリがマツノザイセンチュウと結びつき、枯れ木が増えたため、繁殖を妨げるものがなくなり、爆発的に増える条件が整った。放置すれば被害は広がるのみ。



マツ林を守るには人間による制御が必要

防除の基本戦略

長期的な防除を実現するには、いまのところ以下の4つの方法が可能性として考えられます。

I. マツノマダラカミキリまたはマツノザイセンチュウを絶滅させる

松枯れは二つの生物が共同して初めて脅威となります。ですから、どちらかの生物を、ある地域から根絶すれば、そこで防除をストップすることが可能となります。ただしこれが可能なのは、島嶼など、周囲から隔離された場所だけです。鹿児島県沖永良部島で実証例があります。周辺に被害マツ林がある場合やマツ枯損木の移動（持ち込み）が考えられる場所では、不可能です。

II. マツ林を抵抗性の強い品種に変換する

アメリカには抵抗性の高いマツがありますが、環境に適應しないなどの問題から日本では植えられません。そこで、激害を受けた林で生き残ったクロマツ・アカマツから抵抗性の家系が選抜されています。抵抗性家系でも感染して枯れることはあるものの、苗木を積極的に植栽すると将来の被害を減らすことができます。

III. マツノマダラカミキリの増殖率を抑える

天敵として、菌類、センチュウ、クモ、ダニ、昆虫、鳥類など多くが知られていますが、マツノマダラカミキリの数をコンスタントに制御できる有効な天敵は見つかっていません。

高標高地ではマツ材線虫病が侵入したあともマツ林があまり枯れない場合があります。温度との関係があると考えられますが、メカニズムは完全にはわかっていません。

IV. 予防散布や伐倒駆除を継続することにより微害を維持する

被害量が少ない場合、微害に維持するための費用はそれほど多くかかりません。狭い地域ならば予算的にも、防除労力、枯損木探査の確実性等からみても可能です。

現状ではIVの方法、また条件の整った場所ではIが実現可能です。IIは長期的な防除費用や薬剤の使用を減らせる点で今後はより重要になると考えられます。IIIについてはいまのところ有効な方法がありません。このパンフレットでは、こうした現状を踏まえ、IVについて詳しく述べることにします。

防除手順の実際

予防散布や伐倒駆除によって被害を低い状態で維持するには、以下の3つの手順に従うことが重要です。

手順1：「保全するマツ林」の決定

継続的に毎年予算を投入して防除するわけですから、その投資に見合うかどうかについて関係者の合意が重要です。激害の場合、一時的に大きな予算を投入できたとしても、長期にわたって経常予算内で執行できるものでなければ、防除が継続できず、予算が切れると同時にマツ林を枯損させてしまうことになり、せっかくの投資が無に帰してしまいます。

保全したいマツ林をすべて維持できるわけではありません。保全するマツ林の面積は、目標とする総被害量を駆除するための予算が継続して投入できる広さ以下であることが重要です。最終的には、予防散布に頼らず枯損木の焼却等の駆除によって維持することになると予想されるので、そうした作業が容易にできるマツ林環境でなければなりません。

手順2：現在の被害量を微害に誘導

微害（林野庁では枯損率が1%以下の場合を指します）を維持するには次の3つを満たす必要があります。

①周辺マツ林の樹種転換

周辺にマツ林があると、保全するマツ林でいくら枯損木を処理しても、マツノザイセンチュウを持ったマツノマダラカミキリが周囲から飛び込んできます。それを防ぐため、周辺のマツ林は生立木を含めて伐倒し、樹種転換をはからなければなりません。

②保全するマツ林における徹底的な駆除

徹底的な駆除をするためには、以下をチェックすることが重要です。

- すべての枯損木を見つけたか？
- 見つけた枯損木は、すべて駆除対象としたか？
- 駆除対象の枯損木からマツノマダラカミキリをすべて殺虫したか？

これらのすべてを100%満たすことは、いろいろな制約から不可能ですが、いかにして100%に近づけられるかが、防除の成否を決めるカギとなります。枯損木の見落としと、枯損木内のマツノマダラカミキリの駆除し残しは、もっとも注意すべき点です。

③保全するマツ林の成立本数の確保

周辺マツ林の樹種転換が一気にできず、マツ材線虫病によって枯

損していった場合、樹種転換が終わった時点で保全するマツ林も崩壊してしまいかねません。また、②にのべたように、保全するマツ林で完全な駆除をすることは容易ではありません。

そうした場合、保全するマツ林の成立本数を確保するために、予防散布を行うことは極めて有効です。予防散布は効果が高く、経済的にも安いことから、現在行われている防除のかなりの部分がそれに依存しています。ただし、予防散布だけで被害がゼロになった例はありません。予防散布と伐倒駆除(薬剤散布)の組み合わせだけでは被害量を減らせることは難しく、枯損木の焼却やチップ化による特別伐倒駆除との併用が被害を減少させるにあたって効果的です。

防除の目標値(枯損率)をどの程度にするかは、保全するマツ林の目的や取り巻く環境によりますが、被害量を現在の成長量(更新速度)以下に抑制するというのが目安として最も順当でしょう。また、防除予算を将来にわたって確保できるのであれば、1%程度の被害量であってもそれを容認し、第Ⅱ戦略を取り入れ、抵抗性マツを毎年補植していくことによって、100年後に1年生から100年生

のマツからなるマツ林にするという考え方もあります。

手順3：微害の維持

微害の誘導に成功したら、その状態でマツ林を維持していかなければなりません。特に予防散布を何時の時点で中止できるか、という質問は現場からよく問われるところです。

現在のところ、「周辺マツ林でマツの二次林の成立が将来ともに無いことが確認できた時点」とするのが最も確実と考えられます。微害にした後、継続的に被害を監視し、確実な駆除により微害を維持することは簡単ではありません。

被害がゼロに近づくにつれ、防除予算が削減されるのが普通です。当然、松くい虫担当の人員が削減され、これに伴いマツ材線虫病防除に関する知識や経験も継承されないことになり、駆除に必要な地域の労働力も無くなります。防除の継続性が失われると、再度被害が激化することになります。知識や経験が失われていることから、対応が間に合わず、結局はマツ林をなくすという事態が想定されます。

個別防除法 ① 予防散布

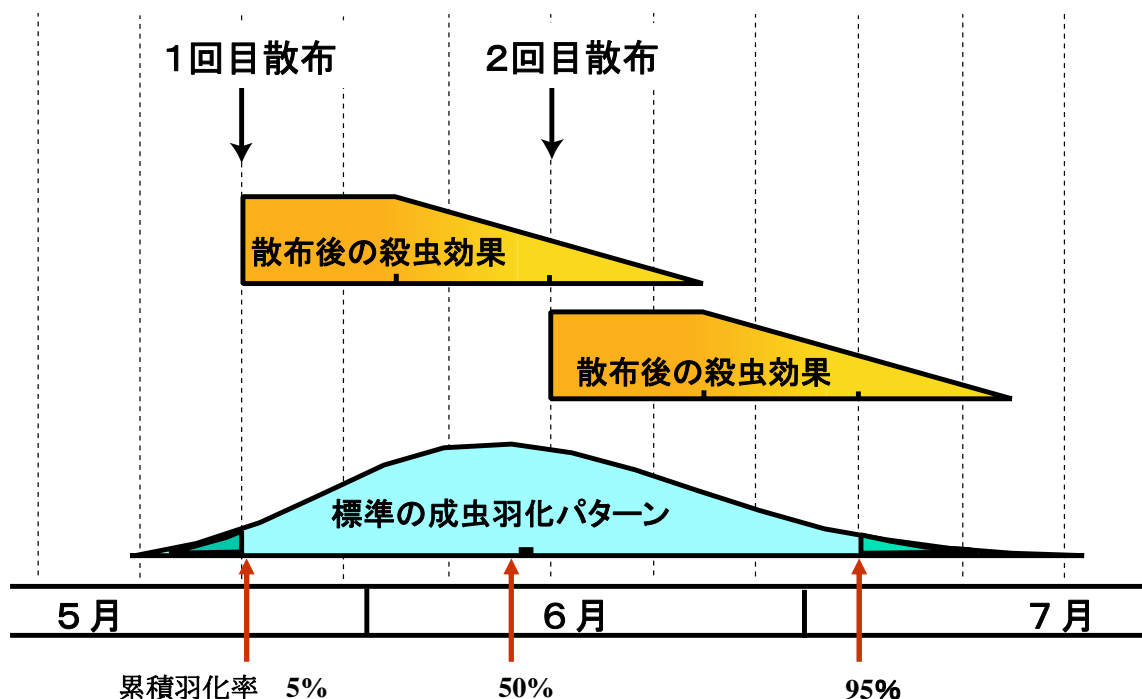
予防散布は、羽化したマツノマダラカミキリ成虫を薬剤で殺虫し、健全木に対する線虫の感染を予防する目的で行います。マツノマダラカミキリが羽化する期間をできるだけカバーするために、

MEP乳剤等従来型の薬剤であれば、最低限2回散布する必要があります。最近では、年1回散布ですむ効力の長い薬剤も実用化されています。



空中散布(島根県農林水産部 1995)

地上散布



予防散布 (MEP乳剤) を2回行う場合の模式図

- 成虫発生期に約20日間隔で散布するのが基本
- 1回目は累積羽化率が約5%のときに

薬剤の散布は、有人ヘリコプター、無人ヘリコプター、スパウダー、スプリンクラー、通常のノズル散布などのなかから、最適なものを選ぶことが重要です。散布に当たっては、薬剤が環境に与える影響や、周辺住民に十分配慮して行う必要があります。

下の写真のように、正しく行えば予防散布の効果は顕著です。た

だし、一時期、予防散布のみでマツ材線虫病をゼロにすることができると思われていたふしがありますが、予防散布のみでゼロにできた事例はありません。

しかし、守ろうとする周囲の林分が激害状態の場合、周辺林分からのマツノマダラカミキリの侵入を防ぐために、予防散布はきわめて有効といえます。



茨城県旭村の例(農林水産航空協会1980)

個別防除法 ②伐倒木の処理

焼却

駆除残しを防ぐには、伐倒した枯損木をすぐに処理することが重要です。焼却が望ましいですが、多くの地域では場所の確保が難しいことや、ツチクラゲという病気が発生しやすくなるために林内焼却ができません。また焼却自体、多くの理由で困難になってきています。材の表面から2cm程度まで炭化すれば、マツノマダラカミキリの幼虫はすべて死亡します。



破碎（チップ化）

チップ化は、材内のマツノマダラカミキリ幼虫を確実に殺す点で、焼却と同様に効果が高い方法です。火を使わないので、焼却が不可能な場合の代替手段として用いることができます。写真の粉碎機は自走式で直径15cm程度までの枯損木の処理が可能です。

燻蒸

薬剤による燻蒸処理を適切に行ううえで最も重要なことは、被覆の密閉を保つことです。



薬剤処理

越冬幼虫を殺虫するために行います。丸太の裏側も丁寧に扱う必要があります。



個別防除法 ③効果を上げるには

枯損木の見落とし対策

多数の目で、探索コースを別にして、何回も枯損木探索を行うことが必要です。これには、地元の住民の参加等が効果的です。各地でマツ林を守るための住民活動がなされています。このような形で住民の協力を得て、理想的には、すべての立木に番号を付け、毎木調査をすれば完全を期すことができます。地上から見たあと、空中からの探査とGPS装置を組み合わせると、かなり完全を期すことができます。ただし多数の枯損木がある場合は、空中からの探査は費用的にも効率的ではありません。

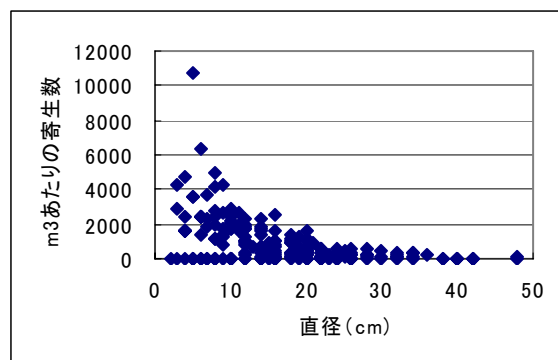
駆除残し対策

駆除の発注を材積単位から、本数単位に変えます。また伐倒から駆除を一貫作業とします。枯損木を倒したとき、飛び散った枝が駆除されないまま放置されること（駆除残し）がよくあります。こ

のため、駆除する時まで枯損木を立ったままにしておき、駆除時に伐倒するという方法をとると駆除率は大幅に高くなります。さらに林内道路を密にすると、枯損木や枝の搬出が容易になります。

駆除率を上げる

葉を除いてすべてを駆除対象にします。細い木や枝は、えてして放置されがちですが、実際には地際部の太い部分よりも、幹の上部や枝のほうにマツノマダラカミキリの幼虫の密度が高いことがわかっています。直径5cmの被圧枯損木や、直径2cm程度の枝にもカミキリが潜入しているので駆除の必要があります（下左図）。沖縄の事例（下右図）で見ても、直径30cmの丸太1立方mを駆除すると500頭程度のマツノマダラカミキリを駆除することになりますが、同じ1立方でも5cmの部分では4000頭のカミキリを駆除できることになります。



沖縄県におけるマツクイムシの生態について(1983)より

戦略を実行する手順

以上で説明した防除戦略を、次ページに架空の航空写真を用いて模式的に示しました。なおここで用いている年数はあくまで説明のためであり、実際にはこれよりも長い時間がかかるのが一般的です。

実施前

保全するマツ林と他の樹種に転換してもいいマツ林（周辺マツ林＝黄色の円内）を決定します。

1年目～5年

- 1) 保全するマツ林は予防散布を行い、周囲からの飛び込みによる被害を少なくします。
- 2) 保全するマツ林内は完全に駆除を行います。
- 3) 最も近い周辺マツ林から、生立木を含めマツの伐採を行い樹種の転換を行います。

5年目以降

数年で周辺マツ林からマツをな

くすることを目標とします。

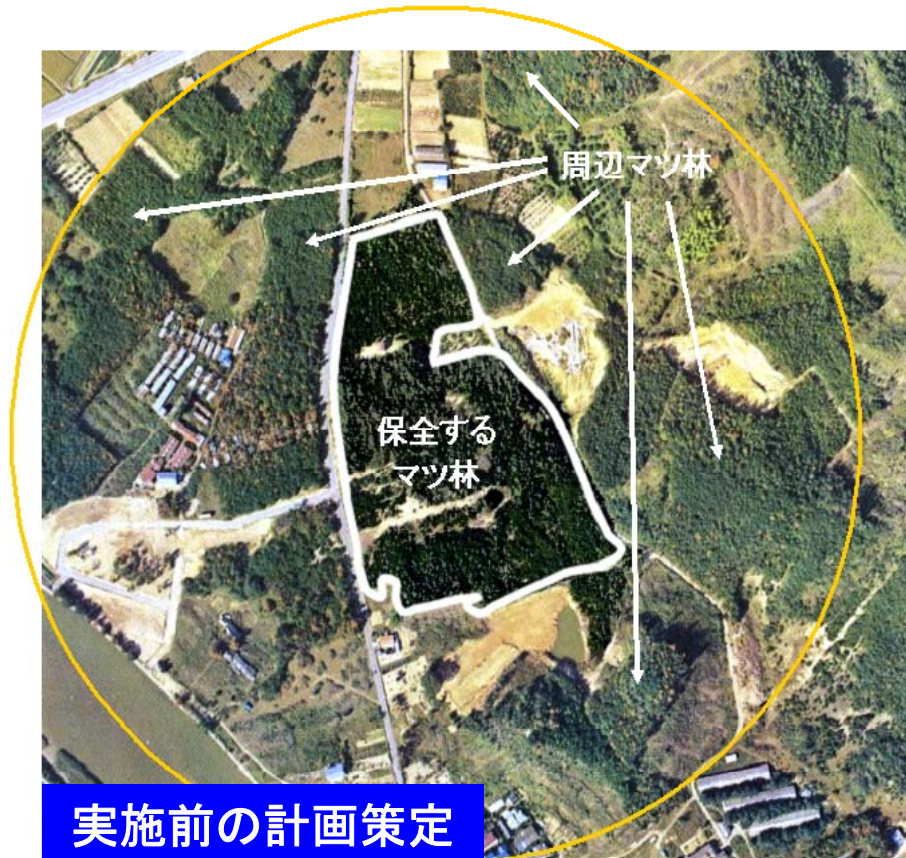
- 1) 予防散布を続けます。
- 2) 保全するマツ林内は完全に駆除を行います。
- 3) より遠方の周辺マツ林は、伐倒しない場合もマツ材線虫病により枯損していくと考えられます。周辺マツ林でマツの二次林の発生がないことを確かめられれば、保全するマツ林の駆除だけにします。

周辺マツ林の取り扱いの重要性

保全マツ林の駆除だけでは、保全マツ林自体が崩壊する可能性が高くなります。

保全マツ林の防除法が駆除だけの場合、周辺マツ林からの飛び込みによって保全マツ林のマツが相当数枯れることを覚悟しなければなりません。このため、周辺マツ林の樹種転換を急ぐ必要があります。周辺マツ林の樹種転換が長引けば、保全マツ林自体が崩壊すると予想されます。





下の3つの図は、保全するマツ林内で枯損木を駆除するとともに、周辺のマツ林を次第に少なくしていく様子を模式的に表している。赤と黄色の点は枯損したマツを示す。

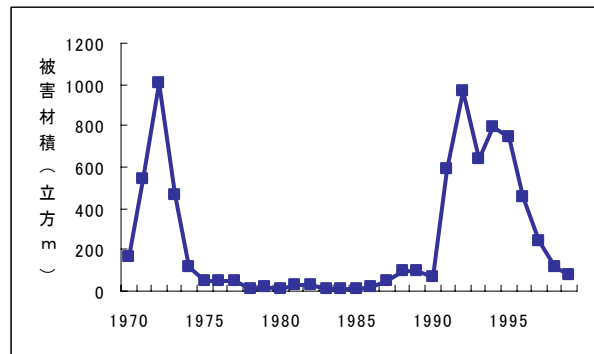
防除の成功例

虹の松原（佐賀県）

以前から予防散布が行われてきましたが、1991年に被害が増大し、その後予防散布を継続したにもかかわらず、95年まで高い被害率で推移しました。

そこで96年、伐倒から駆除の一貫作業を取り入れ、全量焼却とし、一時期は伐倒した場所で焼却を行いました（現在は、一カ所に

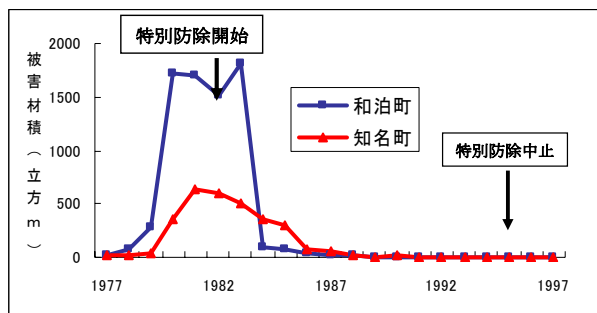
集めて焼却しています）。その結果、被害は以前の低水準に戻りつつありますが、現在まだ被害はゼロにはなっていません。この原因については調査中です。周辺マツ林は南側の鏡山に小面積を残すだけで、半径2km以内からはほぼなくなっています。これが被害を低水準で維持できる大きな要因となっています。



沖永良部島（鹿児島県）

1970年代に被害が拡大しましたが、予防散布と焼却によって90年には被害がほぼゼロになりました。再発が危惧されたため、予防散布が継続されましたが、95年には予防散布が完全に停止されました。その後被害は発生して

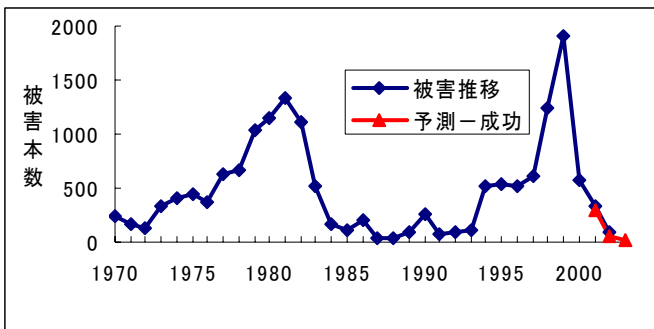
おらず、マツノザイセンチュウも検出されていません。すなわち島内からマツノザイセンチュウ病を根絶した、世界でも希有の例となっています。面積の狭い孤島という条件が有利に働いている例です。



煙樹ヶ浜（和歌山県）

約90haの海岸マツ林で美浜町のシンボルになっており、町民をあげて保全に努めています。ここでは、周辺マツ林の被害の拡大、予防散布を空中散布から地上散布に変更したこと等から、94年から被害が増大しました。99年に防除戦略を立て、周辺マツ林

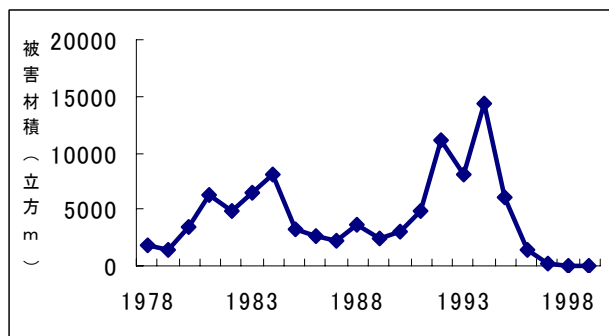
の生立木（青木）の伐採を含めた樹種転換、地上散布の薬量の最適化、散布方法の最適化、駆除作業の一貫化、焼却の導入、枯損木探査の徹底化等を計画し、防除が成功した場合の被害推移予測を行いました。被害は予測通り順調に減少し、現在も防除戦略が実行されています。



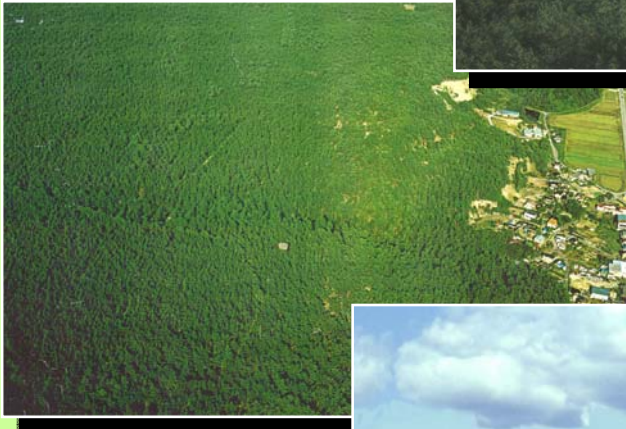
吹上浜（鹿児島県）

1400ヘクタールの広大なマツ林です。予防散布（航空散布）が継続されてきましたが、周辺のマツ林が1994年から95年にほぼなくなり、94年には南側のほぼ1/3が消滅するような枯損に至りました。94年の被害量が多かったことから、機械力が導入さ

れ、1月から3月に枯損木を砂の中に埋設、焼却しました。また一時的に予防散布の回数を増やし、現地でマツノマダラカミキリの羽化時期を調査し、最適期に散布しました。その結果99年からは被害がほぼゼロの水準で保たれています。



保存すべきマツ林を適切に設定し、現地の特性に応じて防除戦略を大胆に適用することが重要ということを示しています。



森林被害対策シリーズ No.1

「松くい虫」の防除戦略 マツ材線虫病の機構と防除

独立行政法人 森林総合研究所

〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 電話029-873-3211

<http://www.ffpri.affrc.go.jp>

2006年3月発行

第1期中期計画成果 1 1