

## 総 説

# 桜島におけるマツ材線虫病の変遷とそれにかかる要因

鹿児島大学農学部生物環境学科森林保護学研究室編

曾根 晃一 監修

## Changes in the incidence of pine wilt disease and their related factors in Sakurajima, Kagoshima Prefecture

Forest protection laboratory, Faculty of Agriculture, Kagoshima University

K. Sone supervised

Received Nov 2, 2017 / Accepted Jan 11, 2018

### はじめに

1997年以降、桜島でマツ枯れが目立ちはじめ、2000年から被害は激しくなり、マスコミでよく報道されるようになった。しかし、桜島では、1987年から1993年までの期間、なぜかマツの集団枯損は発生しなかった。周知の通り、マツ材線虫病（以下、材線虫病）はマツノザイセンチュウ（以下、センチュウ）により引き起こされるマツの萎凋病で、ほとんどの場合、センチュウはマツノマダラカミキリ（以下、カミキリ）等の運び屋の助けを借りて初めて、新しい寄主（健全なマツ）に侵入できる。従って、桜島における1994年以降の被害の新たな発生は、島外からのセンチュウの持ち込みまたは侵入の結果であると容易に判断される。

では、なぜ1970年代垂水市で被害が出ていたにもかかわらず桜島では枯損がほとんど発生しなかったのか？そして、なぜ1994年以降被害が爆発的に増加したのか？巷間では、「最近桜島の活動が弱まり、火山灰の降下が少なくなってしまったからだ……」などと、まことしやかに囁かれているが、本当にそうなのか？まだ被害レベルは低く、被害地も一部に限定されていたが、次第に拡大する様相を呈し始めた1997年に、鹿児島県林業試験場（現鹿児島県森林技術総合センター）、森林総合研究所九州支所、鹿児島大学農学部森林保護学研究室で共同研究をスタートさせ、これらの問題に対してカミキリ、センチュウ、マツ、菌根菌の面から取り組んできた。桜島でのマツ材線虫病の侵入・定着、蔓延から終息に至るほぼすべての過程を追跡できたことで、多くの知見を得ることが出来た。今回は、桜島とその周辺での被害の状況と実施された防除について紹

介し、これらを吹上浜や沖永良部での事例と比較することで、桜島での防除の問題点を明らかにし、マツ材線虫病の蔓延に対する国、自治体および地域住民が連携した初期防除の重要性について考えてみたい。

吹上浜では1994~1995年をピークに材線虫病が大発生したが、1999年にはほぼ終息した。その後、被害ゼロが続いていたが、2005年以降、再び材線虫病が発生し、被害量は増加傾向にある。このことは、現在（2012年）桜島では材線虫病がほぼ終息しているが、何年か経過すると、再生したクロマツ林で材線虫病が再び大発生する可能性が高いことを示唆している。材線虫病が再発した時、被害の拡大を最小限にとどめるためには、行政はどのような対応をとればいいのか？その問いに対して、今回の大発生における侵入・定着、蔓延、そして終息に至るメカニズムや講じられた防除手段の効果について調査した結果は、大変重要な情報を提供し、効果的な防除のヒントを与えてくれるに違いない。無いことに越したことはないが、次の材線虫病の大発生時に、今回の轍を踏まないためにも、鹿児島大学農学部森林保護学研究室（以下、単に森林保護学研究室）、鹿児島県林業試験場（現鹿児島県森林技術総合センター）、（独）森林総合研究所九州支所の3者が桜島で実施した調査結果が役に立つことを願ってやまない。

今回の桜島の材線虫病に関する調査は、1997年に鹿児島県林業試験場の田實秀信、佐藤嘉一、森林総合研究所九州支所の中村克典、森林保護学研究室（当時は森林育種・保護学研究室）の曾根晃一によりスタートした。その後、鹿児島大学農学部森林保護学研究室の畑邦彦と以下の森林保護学研究室（森林育種・保護学研究室）に所属していた学

生・大学院生が参加した。

学生と院生は以下の通り（卒業年次順）

大隈浩美、福山周作、安田奈津子、榊原あおい、田中幸記、中渡瀬美和子、北田義幸、高尾悦子、益山直子、丸田恭平、永野真一郎、富元雅史、徳楽貴洋、中野寛之、松山健太郎、岩永 裕、林崎 泰、大久保恵介、富吉啓太、松尾俊幸、宮田晃志、梶島大介、朝田清子

これまで得られた成果は、彼らの卒業論文や修士論文としてまとめられただけでなく、以下の学術論文として公表されている。

曾根晃一・泉晶子・林重佐（1996）吹上浜周辺のマツの集団枯損。鹿大農学術報 46：1-8.

川口エリ子・岡裕紀・曾根晃一（1998）接触させたクロマツ個体間におけるマツノザイセンチュウの移動。鹿大演研報 26：33-36.

久保蘭恵・曾根晃一・川内博文・辻稔（1998）マツノザイセンチュウ抵抗性と材線虫の初期侵入個体数。鹿大演研報 26：37-41.

Ookuma, H., Sone, K., Nakamura, K., Tajitsu, H., Sato, Y. (1999) Pine wilt disease on Sakurajima Island—Why not epidemic? Proc. Intern. Symp. Sustainability of Pine Forests in relation to Pine wilt disease. 242-246.

中村克典・曾根晃一・大隈浩美（1999）サンケイ式昆虫誘引器を改良したマダラカミキリ生け捕りトラップ。応動昆 43：55-59.

曾根晃一・大隈浩美・福山周作・安田奈津子（1999）桜島のマツはなぜ枯れにくいのか？自然愛護 25：3-6.

曾根晃一・畑邦彦・佐藤嘉一・中村克典（2002）桜島におけるマツ材線虫病の侵入、拡大とその蔓延。森林防疫 51：141-146.

曾根晃一・北田義幸・榊原あおい・田中幸記・畑邦彦・佐藤嘉一（2002）桜島で捕獲されたマツノマダラカミキリから抽出されたマツノザイセンチュウの病原性。鹿大演研報 30：1-7.

曾根晃一・畑邦彦・益山直子・中渡瀬美代子（2003）*Beauveria bassiana* 培養シート型不織布製剤によるマツノマダラカミキリの成虫防除試験。九州森林研究 56：117-121.

中村克典・曾根晃一（2003）火山灰の付着したクロマツ枝へのマツノマダラカミキリ成虫の嗜好性と接触：桜島におけるマツ材線虫病被害激化要因の検討。114回日林講：766.

中村克典・曾根晃一（2004）捕獲虫の逃亡を抑制するため

のマツノマダラカミキリ生け捕り用トラップの捕虫容器の改良。九州森林研究 57：110-112.

富元雅史・曾根晃一・畑邦彦・樋口俊男・岡部武治（2007）南九州における *Beauveria bassiana* 不織布製剤のマツノマダラカミキリ成虫駆除適用試験。日林誌 89：79-84.

曾根晃一・富元雅史・徳楽貴洋・松山健太郎・畑邦彦・樋口俊男・岡部武治（2007）マツノマダラカミキリ成虫駆除のためのボーヴェリア培養型不織布製剤の効果的な施用方法の検討。日林誌 89：262-268.

曾根晃一・岩永裕・畑邦彦（2009）マツノマダラカミキリ成虫の昆虫病原性糸状菌 *Beauveria bassiana* 感染によるクロマツ枯損防止効果。日林誌 91：313-317.

曾根晃一・畑邦彦・永野真一郎・中野寛之・林崎泰・森田茂（2009）MEP-MC の空中散布によるマツノマダラカミキリ成虫の枯死率の推定。日林誌 91：377-381.

曾根晃一・安田奈津子・大隈浩美・福山周作・永野武志（2010）桜島の溶岩台地に生育するクロマツのマツ材線虫病に対する抵抗性。鹿大演研報 37：29-36.

大久保恵介・林崎泰・畑邦彦・曾根晃一（2010）クロマツ若齢林におけるマツノマダラカミキリ成虫の活動状況。九州森林研究 63：85-88.

Sone, K., Nagano, S., Hata, K. (2011) Abundance-depended transmission of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae), to the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) adult in its pupal chamber. J. For. Res. 16: 82-86.

杉本博之・薦田邦晃・岡部武治・曾根晃一（2012）農薬を使用しないマツノマダラカミキリ成虫駆除の可能性。—現場における駆除効果の検証—。樹木医学研究 16：186-187.

Sone, K., Ohkubo, K., Matsuo, T., Hata, K. (2013) Spatial distribution pattern of pine trees killed by pine wilt disease in a sparsely growing, young pine stand. J. Plant Studies 2: 36-41.

曾根晃一・松尾俊幸・畑邦彦（2015）桜島におけるマツ材線虫病—火山活動は被害量変遷の決定要因か？—。森林防疫 64：204-213.

曾根晃一・宮田晃志・朝田清子・畑邦彦（2015）桜島におけるマツ材線虫病終息期におけるマツノザイセンチュウの病原性と誘導抵抗性。九州森林研究 68: 51-56.

曾根晃一・畑邦彦（2016）桜島におけるマツ材線虫病—被害状況とマツノマダラカミキリの生息状況やセンチュウ保有状況との関係。森林防疫 65：40-51.

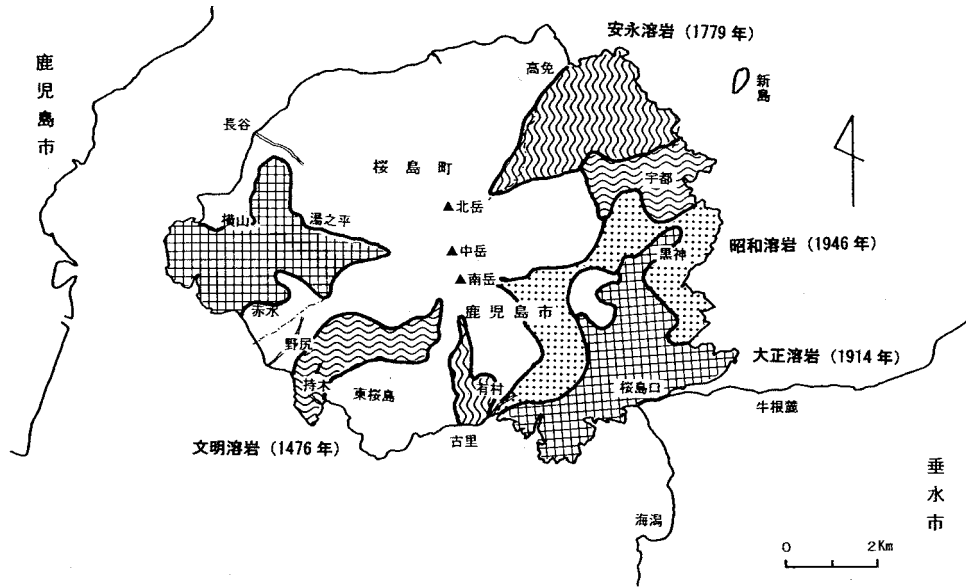


図-1 桜島における溶岩の分布



図-2 桜島における1994年以前のクロマツの分布

### 桜島の概要

錦江湾内に位置する桜島は、周囲約40km、面積約73km<sup>2</sup>の火山島で、有史以来、文明8年（1446年）、安永8年（1779年）、大正3年（1914年）、昭和21年（1946年）に大噴火し、その際火口から流れ出した溶岩が広い地域を覆っている（図-1）。大正14年の大噴火の際に山腹から流れ出した溶岩で、桜島と大隅半島がつながってしまったことはよく知られている。

クロマツは、1994年時点では、標高約870m付近まで分布していたが、林分としての分布は標高420m以下の地域に限られていた（図-2）。文明溶岩や安永溶岩の古い溶岩に覆われている場所や、火山灰が何層にも厚く堆積している場所に成立しているクロマツ林分では、植生の遷移が進

み、土壌が発達している。林冠を形成している樹高の高いクロマツ大径木の下には、タブ、シロダモ、ヤブニッケイ、クロキなどの常緑広葉樹が多くみられた。一方、大正溶岩や昭和溶岩に覆われた場所では、溶岩に至る所に露出し、土壌の発達は極めて悪く、植生の遷移は初期段階にとどまり、材線虫病が蔓延する以前は、大正溶岩台地上では樹齢35～40年生のクロマツに交じり、樹高10m以下の若いクロマツが多く生育していた。また、昭和溶岩台地では樹齢20年前後の樹高10m以下の若いクロマツが生育していた。

### 桜島におけるマツ材線虫病の変遷

#### 被害量の変化

1970年代の終わりから1980年代の初めには、桜島に接し

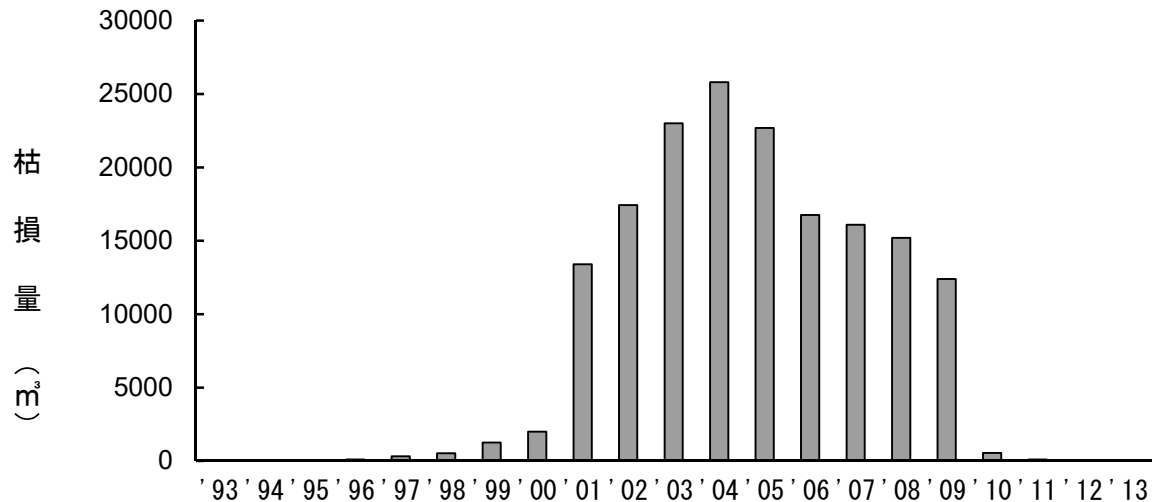


図-3 桜島におけるマツ材線虫病によるクロマツ枯損量の変動（鹿児島県調べ）

ている垂水市では2,500~3,000 m<sup>3</sup>が枯損していたのではないかと推測されているのに対し、桜島での毎年の被害量は10 m<sup>3</sup>以下にすぎなかった。その後も1986年までは枯損量は低レベルで推移し、1987年から1993年までは全く被害は発生しなかった。1994年に桜島東部の赤水、野尻、持木の3カ所で35 m<sup>3</sup>のクロマツの枯損が発生した。鹿児島県の統計によると、1995年の被害量は18 m<sup>3</sup>とやや減少したが、1996年以降増加に転じ、1996年は101 m<sup>3</sup>、1997年は317 m<sup>3</sup>、1998年は527 m<sup>3</sup>、1999年は1,260 m<sup>3</sup>、2000年は2,000 m<sup>3</sup>と増加し続け、2001年は13,400 m<sup>3</sup>と1万 m<sup>3</sup>を超えた。こうしてみると、被害量は2001年に急激に増加したように見えるが、少なくとも1998年から2000年までの被害量は、県が実施した枯損木の処理量で、全枯損量の約1/3にしか相当しない。そうすると、1998年、1999年、2000年の被害量は、それぞれ1,500~1,800 m<sup>3</sup>、3,500~4,000 m<sup>3</sup>、約6,000 m<sup>3</sup>となり、毎年指数関数的な増加を示したことがわかる。被害量はその後も増加し続け、2004年には最大となった（25,800 m<sup>3</sup>）。この枯死したマツの材積量は、胸高直径30cm、樹高約20mのマツ約7万本に相当する。被害量はその後緩やかに減少し、2009年には12,400 m<sup>3</sup>まで低下した。ところが、2010年に被害量は550 m<sup>3</sup>まで激減し、その後2011年は100 m<sup>3</sup>、2012年は22 m<sup>3</sup>、2013年は11 m<sup>3</sup>となっている（図-3）。その後の被害量は、2014年が5 m<sup>3</sup>、2015年が2 m<sup>3</sup>、2016年が4 m<sup>3</sup>で、極めて少ない状態が続いている（鹿児島県）。

これまで、全国各地のマツ林で報告されているように、桜島でも枯損は大径木から始まり、大径木がほとんど枯死してしまった場所では、その後小径木へ被害が移行した。桜島全体でみると、2006年ころまでに島内で多数生育していた胸高直径が30cm、樹高20m 近くないしはそれ以上のクロマツ大径木の多くが材線虫病により枯死し、その後は

徐々にサイズの小さいクロマツに被害が移行した。したがって、2005年以降の被害量の減少は、センチュウとカミキリの加害の対象となるクロマツ大径木が少なくなった、またはほとんど無くなってしまったことと大いに関係がある。枯損木本数のデータがないので、2004年から2009年までの被害の減少が、枯損木数の減少によるものなのか、被害木のサイズの減少によるものなのかは断言できない。しかし、大径木がほとんどなくなった2010年以降の被害量の急激な減少は、明らかに枯損木数の減少による。

これらの結果をもとに、1994年以降の桜島のマツ材線虫病被害は、すなわち、1994~1998年の侵入・定着期、1999~2002年の拡大期、2003~2006年のピーク期、2007~2009年の減退期、2010年以降の終息期の5つのステージに区分できる。

#### 桜島における被害の侵入と拡大・定着

1994年に赤水、野尻、持木の3カ所でまとまった枯損が発生した。1995年と1996年は、枯損木は桜島西部に点在していたが、まとまった被害発生場所はみられなかった。しかし、1997年に、1994年にまとまった枯損がみられた持木と薩摩半島に最も接近している長谷で、かなり激しい枯損が発生した。桜島東部の被害発生は、西部や北部に比べやや遅く、1996年に確認された。桜島口周辺の大隅半島での被害は、一方は福山町の方面から錦江湾に沿って南下し、他方は鹿屋市方面から北上してきたといわれている。牛根麓では、尾根や斜面に1997年以降目立った枯れが生じ始め、一帯のクロマツ林分の被害は1998年、1999年と徐々に拡大し、2000年と2001年で壊滅的な打撃を蒙った。他方、南からの被害の拡大、進行は北からのものよりも早い時期からみられ、1996年には海潟付近で被害が目立つように

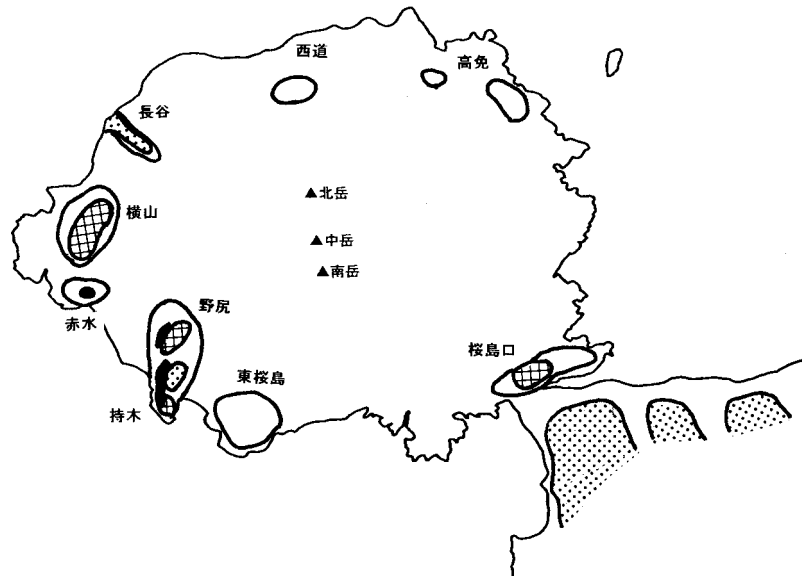


図-4 桜島における材線虫病侵入初期の激害発生場所

黒塗り部：1994年度、点刻部：1997年度、井桁部：1998年度、白抜き部：1999年度

なっていた。この時点では、垂水市海潟や牛根麓では目立った被害がみられたにもかかわらず、桜島口付近では4、5本のクロマツが枯損しただけであった。

1998年には、前年に激しい被害がみられた地域の周辺だけでなく、大正溶岩台地上の横山や桜島口に、1999年には赤水、高免、東桜島に拡大し、2000年には、目立った枯損が島内のいたる所でみられるようになった(図-4)。さらに、桜島の沖約1.5kmに位置する新島にも、被害は飛び火した。2001年の夏は、7、8月の平均気温が平年より1℃高く、7月と8月の降水量は、それぞれ平年の1/2と1/4と高温小雨で、さらに被害が拡大、激化した。特に激しい被害は、持木の半島部、東桜島から古里にかけての一带、桜島口から宇都にいたる桜島東部でみられた。

これまでの被害の拡大状況から、2000年までに桜島全域に拡大したマツ材線虫病は1994年の赤水、野尻、持木、1997年の長谷、1997から1998年にかけての桜島口への侵入・定着から拡まったと考えている。1994年の赤水、野尻、持木での被害発生は、被害丸太の持ち込みが原因で、工事現場の杭に被害丸太が利用されていたことが確認されている。

ここに持ち込まれた被害材に起因する被害は、北の大正溶岩や南の東桜島の方へ拡大したと考えられる。長谷への侵入は当時枯損木があちこちに点在していた薩摩半島の吉野方面から、桜島口から桜島東部への侵入は大隅半島の垂水の被害林分からのセンチウを保有したカミキリの飛来によると考えられる。長谷と吉野の距離は約3km、桜島口と大隅半島は接しているため、これまで報告されているカ

ミキリの飛翔距離の記録(岸1988)を勘案すると、カミキリが飛来する可能性は十分にある。長谷で発生した被害は、西側の横山地区と桜島北部のマツ林に拡がり、大隅半島から入ってきた被害は、桜島の東側を北上、さらには南側を有村から東桜島へと拡大していったのではないかと考えている(図-5)。これらの被害の拡大を考える上で、今回被害が発生する前に、センチウを保有したカミキリが捕獲された林分(1998年の黒神、表-16と17参照)があったことは興味深い。

#### 桜島の各地域での被害量の推移

森林保護学研究室では、桜島島内の8か所(鹿児島大学農学部附属演習林桜島溶岩実験場(以下、溶岩実験場)、碩原、古里、黒神地区溶岩採石場前(以下、黒神溶岩)、黒神、長谷、赤生原、湯之平)のクロマツ林分(図-6)において、誘引トラップによるカミキリの捕獲調査とトラップを設置した周辺のクロマツの枯損状況を調査した。これらの8か所の調査地の他に、高免でも、1998年から2004年まで調査を行っていたが、調査地周辺のクロマツがすべて枯死したため、2005年度以降は実施しなかった。実験場、古里、黒神、長谷、湯之平での調査は1997年度から、碩原、黒神溶岩及び赤生原での調査は、被害が発生した2000年度から継続して実施された(2013年で一応終了)。枯損木本数調査の対象地域は、設置したトラップから100mの範囲で、調査地域の面積は5~8haである。毎年11月から12月にかけて、調査地内の枯死木を計数した。

各調査地の概要とそこでの被害の概要を表-1に示す。

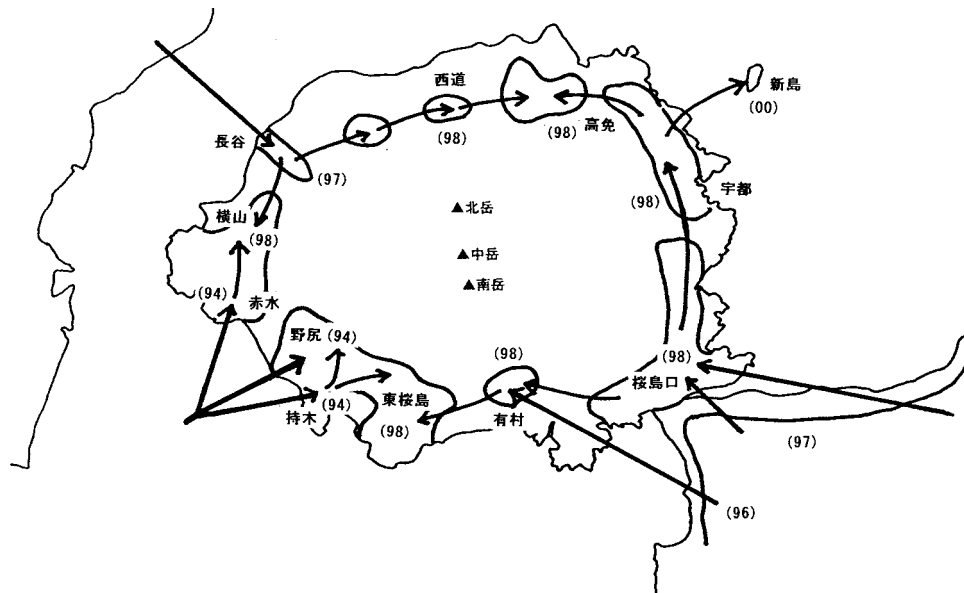


図-5 桜島における材線虫病の侵入拡大経路

カッコ内の数字は被害発生が初めて確認された年

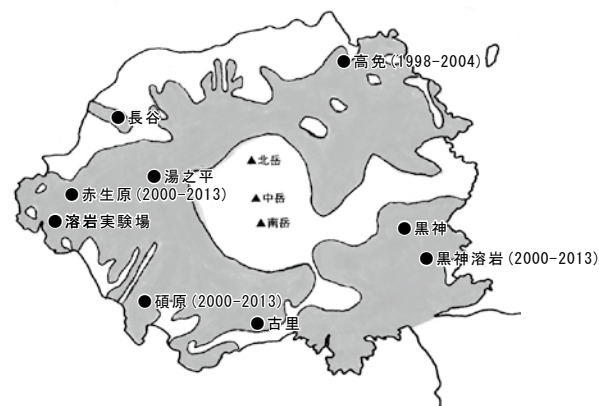


図-6 調査地

網の部分材線虫病発生以前のクロマツの分布。調査地のカッコ内の数字は調査実施年。  
カッコの付いていない調査地では1997年～2013年まで調査を実施。

### 溶岩実験場

桜島町横山地区の大正溶岩台地上にあり、鹿児島大学農学部附属演習林桜島溶岩実験場内の鳥島展望台付近に位置するクロマツ林分である。溶岩が地表を覆っており、林冠は疎開している。植生の遷移は初期状態にあり、調査を開始した1997年には最高樹齢約40年生のクロマツの他に、アコウ、ヒサカキ、ノリウツギ、ススキ、タマシダなどが生育していた。

胸高直径20cm以上、樹高10m以上の大径木の枯損木数は1997年から2003年まで1～13本の間で増減し、2004年に64本に増加し、2005年にピークに達した(317本)。その後2006年から2008年にかけて減少し、大径木の枯損は2009年

以降見られなくなった。2006年以降は大径木の多くが枯死したため、胸高直径7cm未満、樹高5m未満の小径木に被害が移行した。2006年に180本であった小径木の枯損木数は、2007年に急激に増加した(501本)。その後、2008年には264本、2009年には193本に減少し、2010年には34本、2011年には11本まで減少した。2012年はさらに減少し、2本の枯死が確認できただけであった。2013年には枯死木は見られなかった。

### 碩原

桜島南西部の山腹から海岸にかけて広がっていたクロマツ林分、野尻川の北側に位置する。材線虫病侵入以前は、

表-1 各調査地における枯死木数の年次変動

大径木								
被害ステージ	年度	溶岩実験場	磧原	黒神溶岩	黒神	湯之平	長谷	赤生原
進入・定着期	1997	1	—	—	0	0	50	—
	1998	2	—	—	0	0	42	—
拡大期	1999	2	—	—	0	0	17	—
	2000	6	0	0	10	1	9	0
	2001	6	14	65	32	3	7	8
	2002	1	38	189	58	1	10	21
ピーク期	2003	13	232	139	40	4	12	139
	2004	64	141	12	157	32	16	45
	2005	317	51	30	167	41	5	262
	2006	60	31	0	43	12	0	122
減退期	2007	51	116	0	3	46	0	175
	2008	10	81	0	0	6	0	25
	2009	0	10	0	0	0	0	1
終息期	2010	0	0	0	0	0	0	0
	2011	0	0	0	0	1	0	0
	2012	0	1	0	0	0	0	0
	2013	0	0	0	0	0	0	0
小径木								
被害ステージ	年度	溶岩実験場	磧原	黒神溶岩	黒神	湯之平	長谷	赤生原
進入・定着期	1997	0	—	—	0	0	0	—
	1998	0	—	—	0	0	0	—
拡大期	1999	0	—	—	0	0	0	—
	2000	0	0	0	0	0	0	0
	2001	0	0	0	0	0	0	0
	2002	0	0	0	0	0	0	0
ピーク期	2003	0	0	0	0	0	0	0
	2004	0	0	0	0	0	0	0
	2005	0	0	22	0	0	11	0
	2006	180	0	27	111	37	22	50
減退期	2007	501	60	14	158	11	0	230
	2008	264	108	21	147	77	0	168
	2009	193	71	106	55	35	1	52
終息期	2010	34	30	17	11	11	0	3
	2011	11	8	1	10	1	0	1
	2012	2	10	2	0	0	0	0
	2013	0	1	2	0	0	0	0

磧原、赤生原、黒神溶岩では、1997年から1999年までは正式な調査は行っていないが、大径木の枯死は確認されなかった

大径木は胸高直径が20cm以上、樹高が10m以上の個体。小径木は胸高直径7cm未満、樹高5m未満の個体。

大径木が繁茂し、林冠はほぼ閉鎖していたが、被害の進行と衛生伐のため、2007年以降は林冠が著しく疎開した。2013年の時点では、クロマツ大径木はほとんど見られなくなった。下層にはヒサカキ、シャリンバイ、ハクサンボク、ナワシログミ、ススキ、クズ、若齢のクロマツなどが密生していた。

大径木の枯損木数は、2001年から2003年にかけて増加し、2003年にピークに達した（232本）。2004年から2006年まで大径木の枯損木数は減少したが、2007年に116本まで

再び増加した。その年に衛生伐が実施され、大径木の本数が少なくなったことも影響し、その後は減少し続け、大径木の枯損は2010年と2011年には見られなくなった。2012年に幼木が成長し、大径木となった1個体が枯死した。小径木の枯損は2007年から見られ、2008年にピークに達した（108本）。2009年から2011年にかけて、小径木の枯損木数は減少し続けた。2012年は10本が枯死した。2013年は、1本が枯死し、1本が部分枯れを生じていた。

## 古里

桜島の南部のクロマツ壮齢林に1997年に設定したが、1998年にサッカー場を建設するために一帯が伐採されたため、壮齢のクロマツが生育する古里公園内に移動した。公園内のクロマツ大径木には、殺線虫剤（グリーンガード）が樹幹注入されている。公園の東と北は、それぞれクロマツ林を切り開いて作ったサッカー場と駐車場が隣接している。

公園とその周辺での大径木の枯損は、1998年に初めて観察された。大径木の枯損木数は1998年の2本から2000年の12本まで増加を続け、2001年に1本まで減少してから、2004年の10本まで再び増加を続けた。2005年に5本まで減少した後、2006年にピークに達した（16本）。2007年に14本まで減少し、2008年以降大径木の枯損は見られなくなった。小径木の枯損木数は、2005年から2007年まで1本から8本の間で推移した後、2008年に17本に増加し、2009年がピークであった（23本）。2010年は2本に減少し、2011年～2013年までの枯死木は0本であった。調査地の北側にあたる桜島南岳の山腹のクロマツ林は、2000年以降被害が増加した。特に2004年以降被害は激化し、2006年までに、ほとんどのクロマツ生立木は枯死してしまった。

## 黒神溶岩

桜島の南東部に位置する鍋山火口から島の東側に流れ出た大正溶岩台地上に位置する。周辺の溶岩台地上のクロマツは若い個体が多いが、調査地は溶岩台地の谷間に位置するため、調査を開始した2000年には、樹高10～15m、胸高15～30cmのクロマツが多く生育していた。中、下層にはシャリンバイ、ヤマハゼ、ヒサカキなどが見られた。2002年以降激害が続き、伐倒処理により立木本数は減少し、林冠は著しく疎開した。クロマツ以外の中、下層木もそれに併せて伐倒され、全体としては開放的な空間となった。

黒神溶岩での大径木の枯損は、2001年に初めて観察された。2002年に65本であった大径木の枯損木数は2003年に急激に増加し、その年に189本が枯死した。2003年も被害は激しく、139本が枯死した。その後、2004年に枯死木数は12本まで減少し、2005年に30本に増加した後、2006年度以降は、大径木の枯死は見られなくなった。林冠の疎開に伴い林床の幼・稚樹の生育が促され、樹高2～3mを超す個体が増加した。2005年以降、これらの小径木の枯死が見られ始め、枯損木数は、2005年から2008年まで14本から27本の間で一年ごとに増減を繰り返した後、2009年にピークに達した（106本）。2010年には17本まで減少し、2011年には1本まで減少した。2012年と2013年には2本が枯死した。

## 黒神

桜島の東部の黒神地区に位置し、1997年の調査開始時には、上層はクロマツのみから成る、閉鎖した林分であった。ヤブニッケイ、ヤブツバキなどの亜高木や、タブノキやシャリンバイなどの小径木がわずかに存在し、下層はススキが優占していた。現在は、クロマツ大径木のほとんどが枯死してしまったため、大径木はほとんど残っておらず、実生から成長した幼樹が多数繁茂し、旺盛な成長を示していた。

大径木の枯損木数は、1997年から1999年までは0本であった。2000年に初めて10本が枯死した。2001年から2003年までは、枯損木数は50本前後で増減し、2004年に157本まで増加した後、2005年にピークに達した（167本）。その後、2006年に43本、2007年には3本まで減少し、大径木の枯損は2008年以降見られなくなった。小径木の枯損は2006年に初めて観察された。2006年から2008年までの小径木の枯損木数は100本以上で、2007年に158本と、ピークに達した。その後、2009年に55本、2010年に11本、2011年には10本まで減少した。2012年と2013年には枯死は見られなかった。

## 長谷

桜島の北西部の長谷川に沿って成立していたクロマツ林で、1997年当時は樹高15～20m、胸高直径15～35cmのクロマツが生育していた。これらのクロマツは、1997年以降の激しい被害により個体数が減少し、2006年までに大径木は全て枯死した。長谷川の土手に生存していた少数の小径木が2009年までに全て枯死し、樹高1.5m以上のクロマツは見られなくなかったが、2010年11月には、成長した幼樹が数本生育していた。かつてのクロマツ林分には、タブノキ、ヤブツバキ、ヤマハゼ、マテバシイ、シロダモ、クスノキなどの広葉樹が生育していた。

大径木の枯損木数は、調査を開始した1997年が50本で最も多く、1998年以降減少し続け、2001年の枯損木数は7本であった。その後、2002年から2004年まで漸増し続けたが、2005年には5本まで減少した。2006年以降は大径木の枯死は発生しなかった。小径木の枯損は2005年に初めて発生した。2005年は11本であった小径木の枯損木数は、2006年には22本に増加した。2007年と2008年には枯損は発生せず、2009年に1本が枯損したが、2010年以降は再び見られなくなった。

## 赤生原

大正3年の大噴火の際に形成された溶岩台地の先端部に位置する林分内にあり、民家や果樹園と隣接している。ク



ロマツが上層を占め、中、下層にはヤマハゼ、イヌビワ、ヒサカキなどが、そして林床はススキが優占した林分であった。2002年以降多くのクロマツが枯れ、それらを伐倒処理したため、林冠は疎開した。

大径木の枯損は2002年に21本が初めて確認された。大径木の枯損本数は、2002年から2004年までは100本未満で増減を繰り返し、2005年にピーク（262本）に達した。2006年と2007年はそれぞれ122本と175本が枯死した。その後、枯損本数は減少に転じ、2008年は25本、2009年は1本のみが枯死した。2010年以降、大径木の枯損は見られなくなった。小径木の枯損は、2006年に初めて確認された。小径木の枯損本数は、2006年は50本、2007年は230本で、その後は2008年から2011年まで毎年減少を続け、2011年には1本のみが枯死した。2012年と2013年には枯死木は発生しなかった。

#### 湯之平

京都大学の火山観測所の前に位置し、桜島島内でも最も標高の高い位置に成立している、林冠のほぼ閉鎖したクロマツ林分の一つであった。2003年までは、ほとんど材線虫病被害は見られなかったが、2004年度から被害が急激に拡大し、林冠の疎開度も大きくなった。2007年には、ほとんどの大径木は枯死または衛生伐により伐倒された。樹高10m以下のタブノキ、ヒサカキ、シャシャンボなどが点在し、下層には、ネズミモチ、ハクサンボク、ススキなどが群生していた。その後、それらに交じって、クロマツ小径木や幼木が成長していた。

大径木の枯損本数は、1997年から1999年までは0本だった。2000年から2003年まで1本から4本の間で増減を繰り返した後、2004年に32本まで増加した。2005年に41本、2006年に12本と変動し、2007年に46本とピークに達した。2007年の衛生伐後、クロマツ大径木が減少したのに伴い、2008年に6本まで減少し、2009年と2010年の大径木の枯損本数は0本だった。2011年には、大径木が1本枯死した。小径木の枯損は2006年に初めて観察された。小径木の枯損本数は、2006年の37本から2007年に11本と減少したが、2008年に増加し、調査期間中最も多い77本が枯死した。その後、小径木の枯損本数は、2009年は35本、2010年は11本、2011年は1本にまで減少した。2012年と2013年には枯死は見られなかった。

#### 高免

桜島を周回する道路の両側にある斜面上に、スギ人工林と混在して大径木が生育していた。1998年には枯死木は見られなかったが、1999年に調査地から離れたところで、集

団枯損が確認された。その後、枯死本数は増加し、調査地周辺で32本の太径木が枯死した。その後、枯死数は減少し、2004年には15本が枯死し、太径木は存在しなくなった。

#### 桜島における被害の特徴

桜島における被害の特徴として、以下のことがあげられる。まず、被害発生時期に標高による差がみられた。最初は、海岸部や標高の低い場所で被害の程度が激しく、湯の平のように標高の高い林分では激しい被害は発生していなかった。その後、徐々に標高の高い林分にも被害が拡大していった。この点については、桜島で最初に材線虫病の侵入・定着したのは標高の低い場所で、そこからセンチウを保持したカミキリの分散とともに、周辺の地域や標高の高い場所に被害が拡大していったことで説明できるであろう。

次に、クロマツ林分内では、最初に樹高の高い大径木が加害され、大径木がなくなった後で、被害は小径木に移行した。林分の発達状況も被害程度に著しく影響していた。土壌の発達した場所、例えば文明、安永両溶岩上や火山灰が厚く堆積している場所に生育し、林冠を形成する大径木が、最初に次々と枯死し、被害発生から2~3年で激害に移行した。それに対して、大正溶岩や昭和溶岩上のクロマツ若齢林分では、被害は比較的軽微で、進行は遅く、被害発生から4、5年を経過した林分でも、被害は中程度で留まっていた。

#### 桜島の幼齢・小径木林におけるカミキリ成虫の活動と枯損木の発生パターン

##### 成虫の活動

大径木が枯死し、小径木のみが残ったクロマツ林分では、カミキリ成虫はどのような活動をしているのであろうか？ これまでは、カミキリ成虫の林分内での動態は、大径木が林冠を占有する成林で実施されていた。そこで、2002年から2005年までにクロマツ大径木のほとんどが枯死した桜島の東部の黒神地区の0.23haの面積に生育していた樹高5m以下の1,576本のクロマツ（平均樹高3.1m、平均胸高直径3.8cm）を対象に、2008年5月12日から10月3日まで、毎週月曜日と木曜日にカミキリの捕獲調査を全部で36回実施した。この地域では、2005年度以降特別防除をはじめ、マツ材線虫病の防除対策は何も行われていない。毎回調査は10時から13時に実施し、最低2人が調査地内に生息しているクロマツ小径木1本1本について、カミキリ成虫を探索した。発見した成虫を捕獲し、初捕獲の場合は、鞘翅上にペンキで個体識別を施した。カミキリの個体番号、性、行

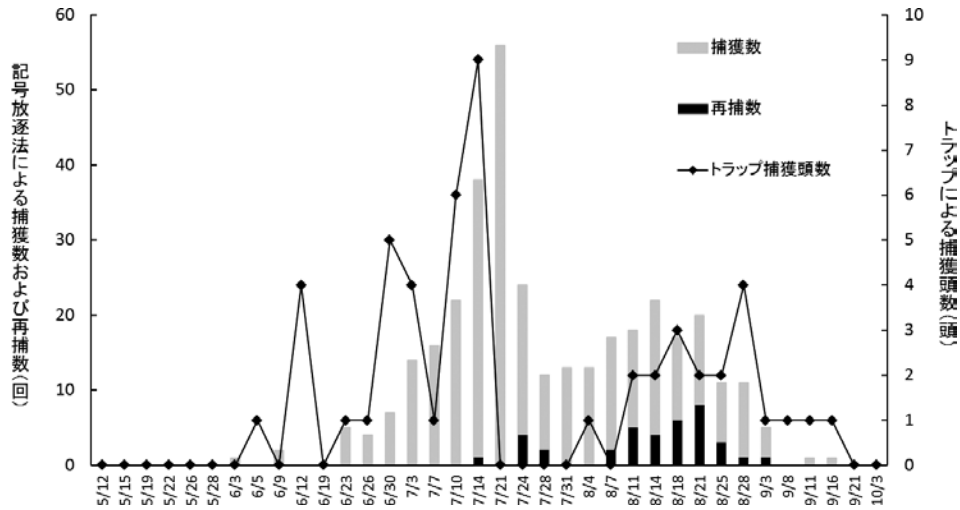


図-7 調査地における捕獲数、再捕獲数、トラップによる捕獲数の経時変動

動、そのカミキリの捕獲が確認されたクロマツの番号及び部位を記録し、カミキリは直ちに元の場所へ放逐した。カミキリを捕獲したクロマツの部位は、「当年生枝」、「当年生枝以外の枝」、「樹幹」の3つに、カミキリの行動は、「後食」、「静止」、「交尾」の3つにそれぞれ区分した。2008年11月1日時点で、調査地内のクロマツ1,576本のうち58本が枯死していた。

産卵が確認されたクロマツ（以下産卵木）の平均樹高は  $339 \pm 102$ cm (193~553cm)、平均胸高直径は  $4.2 \pm 1.8$ cm (1.5~8.3cm)、産卵が確認されなかったクロマツ（以下非産卵木）の平均樹高は  $290 \pm 66$ cm (203~466cm)、平均胸高直径は  $3.5 \pm 1.6$ cm (1.7~9.2cm) であった。樹高3m以上の個体の割合は産卵木の方が有意に高く、産卵木の方が平均樹高が高くなる傾向が見られた (*t*-検定,  $P = 0.0729$ )。また、胸高直径が3cm以上の個体の割合は産卵木の方が有意に高かった。このように、産卵されたクロマツのサイズは比較的大きかった。捕獲個体数の多いマツほど針葉の退色や枯死といった異常を示す個体の割合は高くなり、8頭以上が捕獲された全てのクロマツでは、異常が確認された。さらに、産卵されたクロマツ割合も、カミキリの捕獲個体数が多いクロマツほど高くなった ( $r = 0.670$ ,  $P = 0.0189$ )。産卵率は、5頭以上のカミキリが捕獲されたクロマツで高い値を示した。これらのことから、カミキリが繁殖のためにサイズの大きなクロマツを選択し、そこに集まっていたことがわかる。

6月3日から9月16日までの期間に、313頭の成虫が延べ350回捕獲された。捕獲数は、6月の下旬から増加し、7月中旬にピークに達した。7月下旬に捕獲数は減少したが、8月になると微増し、8月下旬から9月にかけて減少した(図-7)。Jolly-Seber法で推定された調査地とその周辺で活動

していた成虫数は、7月24日の24頭よりも8月(64~172頭)の方が多く、8月25日には最多の172頭が活動していたと推定された(表-2)。

今回の調査結果を、本調査地と同程度のプロットサイズで、サイズの大きなクロマツの激害林分で実施された柴田(1989)と富樫(1989)の標識再捕調査の結果を比較すると、本調査のピーク時の推定生息数は172頭で、柴田(1989)の110~457頭や富樫(1989)の15~130頭との間に大きな差はなかった(表-3)。したがって、8月のカミキリ生息数がピークの時には、本調査地にクロマツの激害林分と同程度のカミキリが生息していたと考えられ、ある程度枯死木が発生する小径木林では、かなり高い密度のカミキリ成虫が、一時的にせよ生息していたことが明らかになった。

表-2 Jolly-Seber法により推定したカミキリ成虫の生息数

月日	推定個体数(頭)
7月24日	24
8月7日	113
8月11日	64
8月14日	167
8月18日	125
8月25日	172

表-3 本調査結果とその他の調査結果の比較

	本調査	奈良県	石川県
平均樹高(m)	3.1	4.2	8
平均DBH(cm)	3.8	7.7	9.2
面積(ha)	0.23	0.04, 0.27	0.1
立木密度(本/ha)	6852	1750, 359	2900
調査年	2008	1978, 1979	1980-1983
捕獲ピーク頭数	56	70, 54	10-35
推定ピーク頭数	172.4	457.0, 109.6	15-130
備考	黒神地区	柴田(1989)	富樫(1989)

黒神では、後述するように被害が小径木へ移行した後も、カミキリの捕獲数は、4年ほどは高いレベルを維持していたが、その後減少した（表-16、17参照）。同様の傾向は、他の調査林分でも認められた。カミキリは、小径木林の中では、比較的サイズの大きい個体を産卵対象として選択していた傾向が見られ、被害が大径木から小径木へ移行し始めた当初は、比較的サイズの大きいクロマツがまだ多く生育していた。カミキリは、多数のクロマツ小径木を枯死させることで、それなりの繁殖のための資源を確保できたのかもしれない。小径木では、樹皮下および材内でのカミキリの死亡率が、大径木で報告されていたものよりも高く（表-19参照）、繁殖のための資源的な価値は大径木より低いと考えられる。そのため、小径木林でも、数年間はカミキリの生息数を高レベルで維持できたかもしれないが、繁殖成功率の低い小径木で繁殖せざるを得ないことによるマイナス効果が徐々に蓄積して、数年後の個体数の減少に繋がったと想像できる。

今回捕獲された成虫313頭のうち27頭は、7月14日から9月3日までの期間で再捕獲された。特に、8月中旬は再捕獲された個体数が多く、8月21日には最多の8頭が再捕獲された。捕獲された成虫は、3.5日から24日間調査地域に滞在していた。多くの個体の滞在時間は7日未満であった（図-8）。月別の平均滞在日数は、6月が $3.5 \pm 0.0$  (SD) 日、7月が $4.1 \pm 2.3$ 日、8月が $5.2 \pm 4.1$ 日で、8月の平均滞在日数は7月よりも有意に長かった ( $t$ 検定  $p < 0.05$ )。カミキリ成虫の定住性は、季節とともに増加し、8月に最も高くなった。

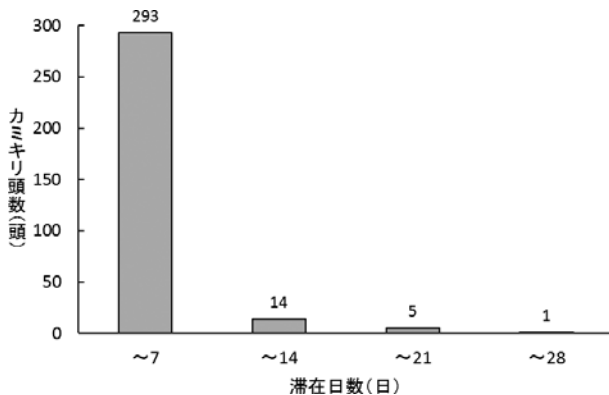


図-8 成虫の調査地での滞在日数の頻度

調査期間を通して、カミキリは85%が当年生枝で捕獲され、そのうち89%の個体が捕獲時には後食していた。当年生枝以外の枝で捕獲されたカミキリは12%、樹幹で捕獲されたカミキリは2%であった。7月21日までは、ほぼ全てのカミキリが当年生枝で捕獲された。ところが、7月24日以降は、当年生枝以外の枝で捕獲されるカミキリが増

加し、8月中、下旬には、約50%の成虫が当年生枝以外で捕獲された。産卵痕が最初に確認されたのは8月4日、木屑が確認されたのは8月18日、針葉の変色と枯死が確認された日は8月21日であった。これらのことから、カミキリの繁殖活動は7月下旬には開始されていたと推察された。これは、当年生枝以外の枝でのカミキリの捕獲が増加した時期と一致する。7月下旬にカミキリの繁殖活動が開始されたことが、カミキリの生息場所を変化させ、定着性を向上させる一因になったのではないかと考えられる。また、再捕獲されたカミキリのうち、58%のカミキリの移動距離が0m、35%のカミキリの移動距離が5m以下であった（図-9）。これは、8月に調査地に生息する個体群に新たに加入した個体は、滞在期間中に大きく移動することはほとんどなかったことを示している。

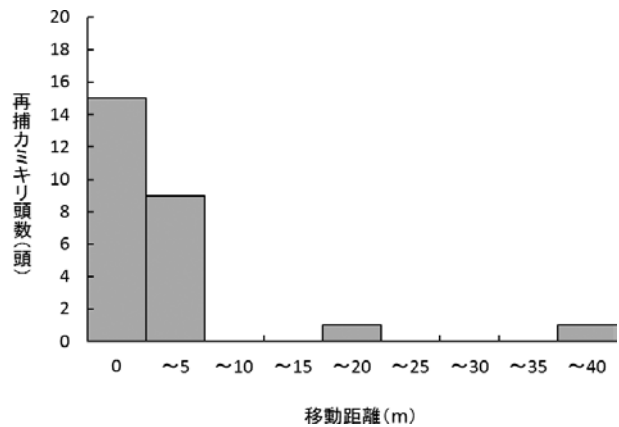


図-9 再捕獲された成虫の移動距離の分布

以上のことから、桜島の小径木林におけるカミキリ成虫の活動は以下のものであったと結論できる。羽化脱出したカミキリ成虫は、6月になると出現し始め、6月下旬からその数は徐々に増加し、7月中旬にピークに達した。この時期、カミキリはより良い産卵場所を求めて移動するため、カミキリの定着性は低く、カミキリは主にクロマツの当年生枝を後食していた。7月下旬になると繁殖活動が開始され、カミキリの定着性は徐々に向上し、当年生枝以外の枝や樹幹にも生息するようになった。8月になると繁殖活動が盛んになり、カミキリの生息数は高レベルで推移した。カミキリの中には移動をほとんどしない個体も出現し、サイズが比較的大きなクロマツに産卵した。9月になるとカミキリの個体数は減少し、中旬を過ぎるとカミキリはいなくなった。これらの結果は、これまでに多くの激害林分や大径木林での報告（岸 1988；富樫 1989）とほぼ一致し、クロマツのサイズによってカミキリ成虫の活動の季節変化の特徴は変わらないものと考えられた。

### 枯損木の発生分布

林内におけるマツの枯損木の発生分布は、前年の被害木(枯損木)が影響し、前年度枯死木周辺で多く発生することが報告されている。さらに、その際前年度の潜在感染木(センチウに感染しているがまだ発病に至っていない、すなわち明らかな病徴が出ていない樹木)の存在の重要性が指摘されている(Futai 2003)。Futai (2003)の調査は、チョウセンゴヨウの大径木林で、被害が侵入し拡大する過程で実施されたもので、桜島の大正溶岩や昭和溶岩の台地上に発達したクロマツ小径木が優占している林分では、枯損木の発生分布と枯損木が次年度の枯損木の発生場所に及ぼす影響は、成熟林とは異なる可能性がある。また、これらの情報は、今後の近未来の桜島での被害の発生動向や防除に対し、重要な情報を提供するかもしれない。そこで、大正溶岩上に成立したクロマツ林分で、クロマツ小径枯損木の空間分布パターンについて考察した。

調査地では、地際直径10~20cm程度のクロマツが至る所に生育していたが、2004年以降にマツ材線虫病で枯死し、現在生育しているクロマツの多くが、樹高5mに満たない小径木である。林冠は疎開し、植生の遷移は初期段階にある。クロマツ以外には、ヤマザクラ、ハゼノキ、ススキ、クズなどが生育している。

2010年10月に、比較的平坦な箇所に20×40mのプロットを設定し、プロット内部の胸高以上の全てのクロマツについて、樹高と胸高直径を測定し、位置を決定した。その時点での、生立木の平均樹高は $330 \pm 167$ cm(最小樹高~最大樹高:119~902cm)で、平均胸高直径は $3.5 \pm 2.5$ cm(最小胸高直径~最大胸高直径:0.5~14.0cm)であった。2010年の調査では、各立木の生死を確認し、枯死木については、針葉の状態や樹幹の分解度に基づいて枯死年度を決定し、脱出孔の有無を調査した。2008年度枯損木のうち、2009年度に脱出孔が確認されたものを、2009年度脱出木とした。2010年度枯損木からは、ベールマン法を用いてセンチウの抽出を試みた。2009年度枯損木については、後食痕の有無を確認し、後食痕が確認された場合は、センチウによる枯損と判断した。2011年11月にも同様の調査を行い、2011年度枯損木、2010年度脱出木の位置を決定し、2011年度枯死木からセンチウの抽出を試みた。その結果、全ての2010年度枯死木と2011年度枯死木からセンチウが抽出され、調査プロット内の枯死は全てセンチウの感染によるものであると考えられた。

プロット内のクロマツ総本数は346本で、2007年以前に42本、2008年度に47本、2009年度に23本、2010年度に5本、2011年度に1本が枯死した。脱出孔は2008年度枯死木8本、2009年度枯死木13本、2010年度枯死木2本で見られた。調

査プロット周辺での枯損木の発生状況調査と合わせて考察した時、この一帯の材線虫病被害は、2007年と2008年をピークに、その後急激に減少していたと考えられる。枯死は様々なサイズのクロマツでみられ、特定のサイズに偏ることはなく、大きいクロマツが枯死しやすいといった傾向も見られなかった(図-10)。

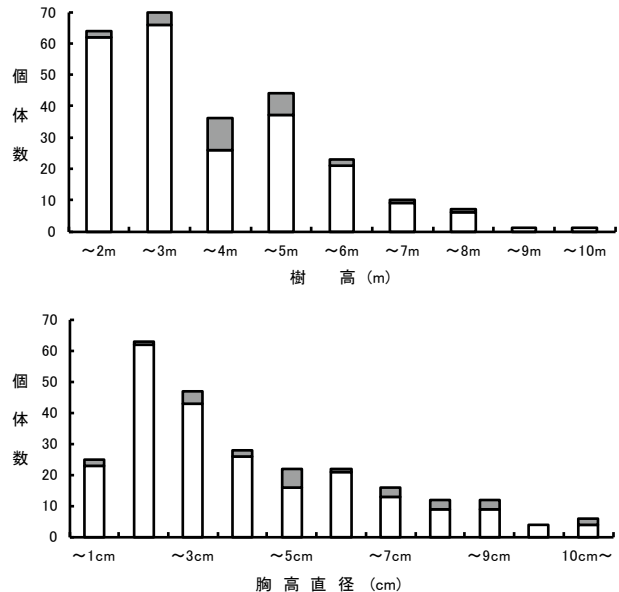


図-10 プロット内のクロマツの樹高と胸高直径の頻度分布  
灰色：枯損木、白色：生立木

個体数が十分得られた2008年度と2009年度のプロット内のクロマツと枯死木の空間分布を、Iwao (1972)が提案した unit-size  $m^*-m$  関係を用いて解析したところ、クロマツは4~5m四方のルーズなコロニーを形成しながら、集中的に分布していることが明らかになった。クロマツのコロニーはランダムに分布し、コロニー内のクロマツはランダム分布していた(図-11)。これは、クロマツが地上に露出している溶岩の周辺に多く生育し、火山灰が厚く堆積した平坦な場所には少ないなど、露出した溶岩や火山灰堆積状況などの溶岩台地の微地形が影響していたためだと考えられた(図-12)。枯損木も4~5m四方のルーズなコロニーを形成しながら集中的に分布していたが、枯損木のコロニーの分布は均一分布傾向を示した(図-13)。したがって、枯損木の分布単位の空間配置は、枯損木数によって変わらなかったことがわかる。

ある年の枯損木の空間分布と前年度の枯損木または脱出木の空間分布との関係を Iwao (1977)の  $\kappa$ -指数を用いて検討したところ、2009年度枯損木と2008年度枯損木の場合、枯損木の分布単位であるコロニーのサイズが4~5m四方の  $\kappa$ の値は1以下となり両者の関係には排他的傾向が見

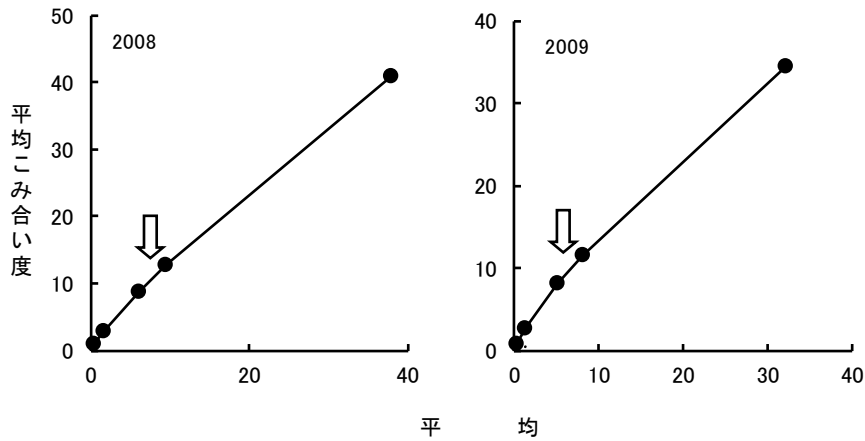


図-11 2008年度と2009年度のクロマツの平均と平均こみ合い度の関係  
 点線はランダム分布における期待値を、矢印はコロニーのサイズを示す。

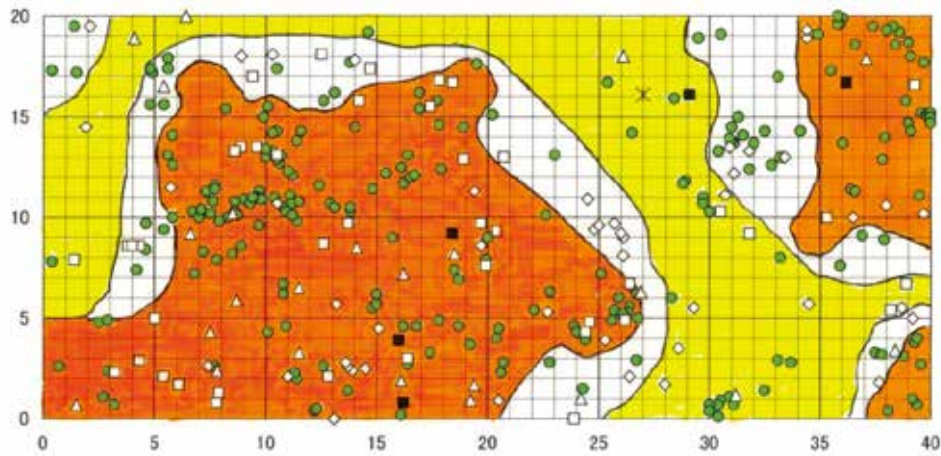


図-12 調査プロット内におけるクロマツの分布

2011年11月時点での生存木 (●)、2008年以前の枯死木 (□)、2008年の枯死木 (◇)、2009年の枯死木 (△)、2010年の枯死木 (■)、2011年の枯死木 (\*)  
 オレンジの部分には溶岩が露出している場所、白い部分は火山灰が厚く堆積している場所、黄色の部分には両者の移行帯

られ、2009年度枯損木と2009年度脱出木との場合も、同様に  $\kappa$  の値は1以下となり、両者の関係には排他的傾向が見られた (表-4)。このことから、2009年度は、2008年度に枯損したクロマツや、2008年度に枯死し2009年春にカミキリが脱出したクロマツが存在したコロニー以外のクロマツのコロニーで、枯損が発生する傾向があったことがうかがわれる。

今回の枯損木の発生パターンは、チョウセンゴヨウ成木林での報告 (Futai 2003) とは異なった。カミキリ成虫の脱出後の分散は、林分の疎開度に影響を受けることが知られている (富樫 1990)。調査地では、クロマツはルーズなコロニーを形成して集中的に分布しているので、林冠はかなり疎開している。したがって、調査地ではカミキリ成虫の分散は、林冠が閉鎖している大径木林よりも活発であったと推測される。再捕獲された成虫は、繁殖活動が開始す

る7月下旬以降増加し始めた (P10参照)。それまでは、多くの成虫は活発に分散していたと推察される。鹿児島大学森林保護学研究室が室温条件下でセンチウのカミキリからの離脱経過を調べたところ、枯死木から脱出後1週間以内に保有したセンチウの50%以上が脱出する成虫の割合が3~4割に達した。これらのことから、成虫が枯死木から脱出後枯死木のあったコロニーからほかのコロニーに素早く分散し、後食を開始するとともに、センチウが離脱し、健全なマツに侵入することで、前年度の枯死木がなかったコロニーで新たな枯死が発生するのではないかと考えられる。シーズンが進むとともに、異常が見られたマツの周辺に多くのカミキリが飛来し、それにより異常木が発生したコロニーで複数のマツが枯死する (枯死木がコロニーを形成することになるのではないかと推察している。多くの再捕個体の移動距離が5m以下であったことも (図-9)、



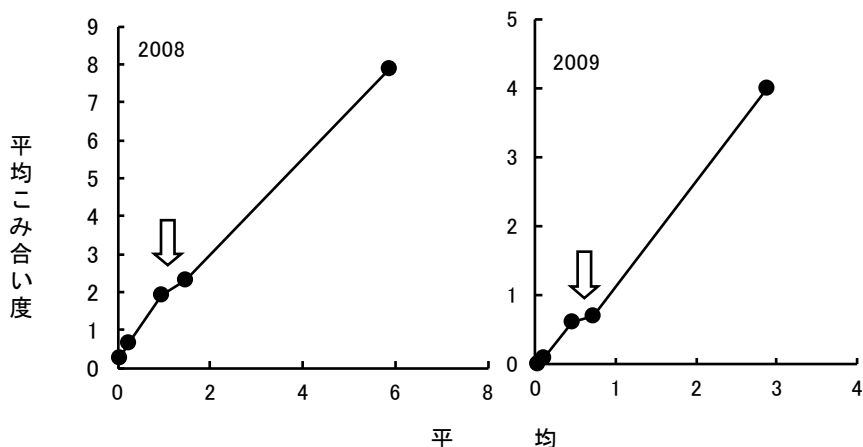


図-13 2008年度枯損木と2009年度枯損木の平均と平均こみ合い度の関係  
点線はランダム分布における期待値を、矢印はコロニーのサイズを示す。

表-4 2008年度枯損木と2009年度枯損木、2009年度脱出木間の $\kappa$ 指数

	コードラートサイズ (m×m)				
	1×1	2×2	4×4	5×5	10×10
2008年度枯損木-2009年度枯損木	1.47	0.74	0.56	0.83	1.04
2009年度枯損木-2009年度脱出木	0.00	0.00	0.27	0.87	0.91

枯死木のコロニー形成にかかわっていると思われる。

Futai (2003) は、チョウセンゴヨウマツ林分での被害拡大に潜在感染木の存在の重要性を指摘しているが、溶岩台地上に生育するクロマツは、発芽後実生として定着する過程で菌根菌との相利共生的な関係を築くことで、センチュウに対する抵抗性を獲得しており、生立木でも複数年にわたりカミキリに後食されているものが多い。このような後形的な材線虫病に対する抵抗性の獲得が、溶岩台地上での被害木の発生と拡大に対する潜在感染木の重要性をあいまいなものにしたのかもしれない。調査林分では、調査時には被害は減少期に入っていた。これは、Futai (2003) の調査が被害の拡大期に行われたことと大いに異なる。被害が拡大期かピーク期か、または減退期かということも、潜在感染木の重要性に影響している可能性がある。

### 桜島における松くい虫防除

マツ材線虫病の防除対策は、予防と駆除に区分できる。また、予防対策と駆除対策それぞれが、センチュウ、カミキリ、マツ自体の対象としたものを含んでいる。そして、それぞれに物理的、化学的、生物学的、さらに施業的な方法がある。例えば、予防対策では、カミキリ成虫を対象とした殺虫剤の空中散布（特別防除）や地上散布、樹体内のセンチュウを対象とした殺線虫剤の樹幹注入があり、駆除対策としては、カミキリを対象とした被害木の伐倒・玉切

り、燻蒸処理を施す伐倒駆除、伐倒・玉切りした被害木を破碎、焼却する特別伐倒駆除があげられる。これらの駆除手段は、結果的にカミキリのみならずセンチュウも駆除することにつながる。そのほかに、マツ林をマツ以外の樹木の森林に更新する樹種転換があり、ここでは、感染源となるマツ生立木を伐倒、除去し、マツ以外の樹種を植栽する。また、マツ材線虫病に強い品種（抵抗性品種）を開発し（鹿児島県のクロマツでスーパーグリーンさつまが開発されている）、マツしかうまく育たない海岸林のような場所に植栽されている。

1997年に松くい虫対策に関する法律が森林病虫害等防除法に一元化された。鹿児島県でも、松くい虫被害対策事業推進計画を策定し、それに基づき、松くい虫被害防除対策を実施している。松くい虫被害対策事業推進計画の策定にあたっては、被害の発生状況、松林の有する公益的機能の必要性に応じて、防除対策を実施する必要がある区域を決め防除対策を県の計画において実施する高度公益的機能森林、被害拡大防止森林と市町村の計画において実施する地区保全森林、地区被害拡大防止森林に区分する。

高度公益的機能森林は、保安林その他公益的機能が高い森林であって、マツ以外ではその機能が発揮できないことから、将来にわたり保全すべき松林であり、予防対策と駆除対策を組み合わせ、総合的な対策を実施する。被害拡大防止森林は、高度公益機能松林から概ね2km以内にある樹種転換を推進する森林であり、被害対策を実施しなけれ

表-5 桜島におけるマツ材線虫病の防除対策費（鹿児島県調べ）

	平成6年度	平成7年度	平成8年度	平成9年度	平成10年度	平成11年度	平成12年度
枯損量 (m <sup>3</sup> )	35	18	101	317	410	1025	2000
伐倒駆除 (m <sup>3</sup> )	30	17	101	314	392	725	2070
同燻蒸 (m <sup>3</sup> )	30	17	101	314	392	725	2070
同油剤散布 (m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0	0	0
空中散布 (ha)							
スポット散布							
事業費 (千円)	733*	415*	2468*	7671*	9577*	17712*	50572*

	平成13年度	平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度
枯損量 (m <sup>3</sup> )	13400	17435	23000	25800	22690	16758	16087
伐倒駆除 (m <sup>3</sup> )	6021	20325	21956	24211	8528	7502	8682
同燻蒸 (m <sup>3</sup> )	5521	17935	21956	24211	1004	1010	727
同油剤散布 (m <sup>3</sup> )	500	2390	0	0	7524	6992	7955
空中散布 (ha)	200	332	964	835	689	570	201
スポット散布	72m <sup>2</sup>	265m <sup>2</sup>	55ha	55ha			200本
事業費 (千円)	176771	634918	626078	601875	136039	122036	

	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度
枯損量 (m <sup>3</sup> )	15200	12400	550	100	22
伐倒駆除 (m <sup>3</sup> )	9228	6500	100	84	15
同燻蒸 (m <sup>3</sup> )	649	380	0	0	0
同油剤散布 (m <sup>3</sup> )	8579	6120	100	84	15
空中散布 (ha)	459	459	459	459	421
スポット散布	200本	150本	200本	208本	34ha
事業費 (千円)	135070	103044	27434	26262	23112

平成6年度から12年度の事業費は、平成13年度以降の燻蒸処理の平均単価からの推定値

ば、高度公益機能松林に被害が著しく拡大する恐れがあることから、樹種転換が完了するまでの間、駆除対策を実施する。地区保全森林、地区被害拡大防止森林は、市町村が自主的に防除対策を実施するものであり、それぞれ高度公益的機能森林と被害拡大防止森林に準じた対策を実施する。

桜島では、1994年（平成6年）に被害が再発生して以降、古里公園などに植栽されている大径木への殺線虫剤の樹幹注入、被害発生地への殺虫剤の空中散布、そして被害木の伐倒・薬剤散布処理、燻蒸処理が実施されてきた。表-5に、平成6年度から平成24年度までの桜島における被害量と防除実績を示す。海岸に養魚場を控えていることから、地元との調整が困難だったことや、桜島の中心部が国立公園法に基づく特別保護地域に指定されており、国の同意が必要だったことなどから、薬剤散布が実施できなかった平成6年から平成12年までは、秋から翌年の3月にかけて被害木を伐倒し、燻蒸処理を行った。被害発生地域が拡大し、被害発生量が13,400m<sup>3</sup>まで記録上は爆発的に増加した平成13年からは、地元住民からの了解が得られた地域について、平成15年度からは、国の同意が得られた特別保護区域についても殺虫剤の空中散布を実施している。

以下に、駆除と予防に分けて、処理の詳細を述べる。駆除作業では、平成6年から12年までは、全て伐倒木は燻蒸

処理され、処理された被害木の材積は、島内の被害木量と等しかった。被害が激増した平成13年からは、被害木の処理に新たに油剤散布処理が加わった。平成13年度の駆除量は被害量の約45%にとどまったが、平成14年度から16年度にかけてはほぼすべての枯死木を処理していた。しかし、平成17年度以降は、全ての被害木が処理されているわけではなく、駆除は全被害木の4割から6割にとどまっている。被害木の処理方法も、燻蒸処理から秋の油剤散布処理に重点が移り、平成21年度までは86%以上の被害木が油剤散布処理された。その後、被害量が激減した平成22年度以降は、伐倒されたすべての被害木は油剤散布処理を施されている。被害の激しかった平成15年度、16年度、20年度には、海岸近くの溶岩台地上に発生した枯損木を伐倒し、それらを現地で燻蒸処理や薬剤散布処理ができないので、海から回収し、運び出した。

予防に関しては、平成13年度以降は被害量が激増し、枯損木の伐倒処理に加えて、国庫補助事業で特別防除を開始した。特に被害の激しかった平成15年と平成16年は、県単独事業で、防除強化として、国庫補助の対象とならない区域に、それぞれ230haと128haの薬剤散布を実施した。殺虫剤の散布は、平成13年から15年までの3年間は、MEP乳剤をhaあたり30リットルの割合で、カミキリ成虫の脱出前の5月下旬と発生ピーク直前の6月中旬の2回散布した。



図-14 桜島における殺虫剤の散布域

散布地域 A: 平成15年以降散布継続、散布地域 B: 平成13年から平成16年まで散布、散布地域 C: 平成13年から平成17年まで散布、散布地域 D: 平成13年以降散布継続  
 図中のスケールは2kmを示す

平成16年からは、より薬効期間が長く、散布のコストが低い MEP-MC 剤の散布に切り替え、ha あたり60リットルを5月下旬に散布している。散布面積は、平成13年は200ha、平成14年は322ha、平成15年は946ha と、被害量とともに増加した(図-14)。マツ材線虫病の進展とともに、大径木が次々と枯死し、マツ成林の高度公益機能森林の指定解除などにより、散布面積は徐々に減少した。特に、平成18年以降は、黒神や高免をはじめとする桜島東部のマツ林の多くが消滅したことにより、これらの地域では特別防除は実施されていない。

特別防除の実施には、散布地周辺の環境への配慮等、様々な条件や制限が加わるので、実施できない場所が生じる。桜島では、溶岩原の急峻な斜面や溪流横の崖地にある被害木の伐倒駆除が実施できず、翌春のカミキリの発生源になっていることから、MEP 乳剤をカミキリの発生ピーク時にスポット的に散布している。

桜島におけるマツ材線虫病の防除にかかる費用は、被害量とともに変化し、多い年には6億円超に膨らんだ。現在は2千万円ほどが毎年支出されている。

(鹿児島県環境林務部森づくり推進課)

### 被害量に関係すると考えられる要因とその働き

材線虫病による被害量には、そこに生育するマツの本数と抵抗性、センチウの病原性、カミキリの活動状況とセ

ンチュウの保有状況(センチウを保有したカミキリの個体数とカミキリ1個体あたりのセンチウ保有頭数)、各種防除手段の効果、夏の気候、さらに桜島特有の条件として桜島の火山活動などが影響すると考えられる。以下に、森林保護学研究室が行った調査で明らかになったこれらの要因とクロマツ枯損量との関係について、その概要を述べる。

### 桜島のクロマツのマツ材線虫病に対する抵抗性

桜島の溶岩台地上に生育するクロマツの材線虫病に対する抵抗性を明らかにするために、1997年と1998年の7月17日に溶岩実験場に生育するクロマツ幼樹120本、そして1998年8月6日に、溶岩実験場で採取した種子から発芽し鹿児島大学農学部附属演習林本部実験苗畑(鹿児島市郡元)(以下、演習林本部苗畑)に生育するクロマツ4年生実生苗80本に対し、強病原性マツノザイセンチュウ(島原系統)1万頭と1千頭を剥皮接種法により接種し、半年間にわたり針葉や樹脂滲出の異常と生存を追跡した。センチウ接種後2週間目には樹脂滲出異常が、4~6週間目には針葉の萎凋が、そして8~10週間目から枯死が認められた。1千頭接種個体の死亡率は、接種年やクロマツの生育場所にかかわらず、8~12%と低かった。そして、70~80%の個体には部分枯れなどの異常も見られなかった。1万頭接種個体の死亡率は、溶岩実験場に生育する個体では、1997年は14%、1998年は18%と、1千頭区と大差なく、50%近くの個体が正常であった。ところが、苗畑に植栽した実生苗では、接種木の75%が枯死し、正常な個体は5%にすぎなかった(表-6)。

今回の苗畑に生育するクロマツの枯死率は、テーダマツなどの材線虫病抵抗性樹種や抵抗性クローンでの枯死率より著しく高く、桜島の溶岩台地上に生育するクロマツは、遺伝的抵抗性を持ってはいないことが明らかになった。しかし、溶岩台地上では、何らかの要因が働いて、抵抗性を持つようになったと考えられた。

夜明け前の木部圧ポテンシャルの平均値は、苗畑では8月27日は $-0.35 \pm 0.12$ MPa、9月3日は $-0.52 \pm 0.05$ MPa、9月17日は $-0.39 \pm 0.07$ MPa、10月26日は $-0.23 \pm 0.05$ MPaであった。溶岩実験場では、8月27日は $-0.29 \pm 0.11$ MPa、9月3日は $-0.56 \pm 0.09$ MPa、9月17日は $-0.70 \pm 0.21$ MPa、10月26日は $-0.23 \pm 0.05$ MPaであった(表-7)。両調査地での木部圧ポテンシャルは、9月17日は溶岩実験場の方が有意に低かったが( $F$ 検定、 $P=0.026$ )、その他の測定日では有意差はなかった(同、 $P>0.05$ )。あわせて、溶岩実験場と苗畑に生育する供試木の水分ストレスを評価するために、8月20日から10月26日までの期間に、4回夜明け前と日



表-6 センチュウの接種試験の結果

接種年	調査地	処理区	供試木数	内 訳 (%)		
				健全	部分枯れ	枯死
1997	溶岩実験場	対照区	20	100	0	0
		1千頭区	50	50	42	8
		1万頭区	50	62	24	14
1998	溶岩実験場	対照区	20	100	0	0
		1千頭区	50	70	18	12
		1万頭区	50	48	34	18
1998	苗畑	対照区	10	100	0	0
		1千頭区	50	84	4	12
		1万頭区	20	5	20	75

1997年接種木は1998年1月7日、1998年接種木は1999年1月11日時点での状態

表-7 明け方の木部圧ポテンシャル (MPa)

測定日	苗畑		溶岩実験場	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
8月27日	-0.35	0.12	-0.29	0.11
9月3日	-0.52	0.05	-0.56	0.09
9月17日	-0.39	0.07	-0.70	0.21
10月26日	-0.23	0.05	-0.23	0.05

表-8 木部圧ポテンシャル測定用試料採取時と日中の各採取場所での気温と湿度

(A)明け方の木部圧ポテンシャル測定用試料採取時

測定日	苗畑			溶岩実験場		
	測定時刻	気温(°C)	湿度(%)	測定時刻	気温(°C)	湿度(%)
8月27日	5:00	22	82	5:30	22	82
9月3日	5:05	21	91	5:50	23	87
9月17日	5:00	17	79	6:10	19	46
10月26日	6:30	18	85	6:30	18	91

(B)日中の木部圧ポテンシャル測定用試料採取時

測定日	苗畑			溶岩実験場		
	測定時刻	気温(°C)	湿度(%)	測定時刻	気温(°C)	湿度(%)
8月20日	12:30	35	52	11:30	37	33
9月3日	12:30	30	59	11:40	33	47
9月17日	12:30	27	43	11:30	29	71
10月26日	12:30	22	74	12:30	22	82

表-9 日中の木部圧ポテンシャル (MPa)

測定日	苗畑		溶岩実験場	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
8月20日	-1.38	0.15	-1.30	0.13
9月3日	-1.16	0.14	-1.40	0.06
9月17日	-1.06	0.13	-1.11	0.12
10月26日	-0.64	0.06	-0.54	0.14

中の気温と湿度、ならびに木部圧ポテンシャルを測定したところ、夜明け前の気温と湿度には差が見られなかった(表-8)。このことは、土壤水分条件は、9月17日は溶岩実験場の方が厳しかったが、それ以外の測定日では両調査地でほとんど差がなかったことを示している。また、今回測定された木部圧ポテンシャルは、いずれも樹体内にキャビテーションが生じるとされている値(-0.9 MPa ~ -1.0MPa) (Ikeda and Ohtsu 1992) より高く(表-6)、夜明け前のクロマツにかかる水分ストレスは、大きくはなかつ

たと推察される。

日中は、両調査地とも、8月20日、9月3日、9月17日の木部圧ポテンシャルは、樹体内にキャビテーションが生じる-0.9 MPa ~ -1.0MPa (Ikeda and Ohtsu 1992) より低く(表-9)、かなりの水分ストレスを受けていたと考えられる。気温は常に溶岩実験場の方が2~3℃高く、相対湿度は9月上旬までは溶岩実験場の方が10~30%近く低かった(表-8)。このことから、8月中・下旬から9月上旬にかけては、溶岩実験場の方が苗畑に比べ、クロマツ幼樹にかかる水分

ストレスはより厳しかったと推察される。

これらの結果から、苗畑に比べ溶岩台地に生育していたクロマツ実生苗のほうが、日中に水分ストレスを強く受けると考えられるが、何らかの要因が働いて樹勢が増し、見かけ上抵抗性を有しているように見られると考えられた。マツ属の多くは、ブナ科樹木と同様菌根菌と共生し、菌根菌はマツから炭水化物を受け取る代わりに、水分や様々なミネラルをマツに供給する(二井 2003)ので、菌根形成は乾燥地に生育するマツの水分吸収能力を高め(Duddridge *et al.* 1980)、樹勢の強化に役立つ。桜島の溶岩台地上では、土壤が成熟した場所に比べ、クロマツの稚樹や幼樹は、より多様な菌根菌と共生関係を構築している。したがって、桜島のクロマツは遺伝的にはマツ材線虫病に対する抵抗性を持っていないが、夏の日中樹体内でキャビテーションが生じるだけの水分ストレス(Ikeda and Ohtsu 1992)を受けているにも関わらず、菌根菌と共生することで水分ストレスを緩和し、毎年1m近くまたはそれ以上伸長成長するくらい樹勢が増し、その結果枯死率は低く抑えられたのではないかと考えられる。溶岩実験場で部分枯れが生じた個体のほとんどは、部分枯れの程度の如何に関わらず、接種の翌年も生存した。菊地ら(1991)も、アカマツ当年生実生苗を用いた試験で、菌根形成がマツ材線虫病に対する抵抗性を高めている可能性を認めている。

接種試験を実施した1997年と1998年の時点では、桜島ではほとんどマツ材線虫病による稚樹や幼樹の枯死はみられなかったが、2001年以降は枯死が目立ち始め、2009年の時点では、至るところで枯死木が発生している。したがって、菌根菌との共生関係により獲得した抵抗性は、線虫の繰り返しのアタックに耐えられるほど強いものではなく、クロマツの活力を維持・増強させることで、感染から発病までの進行を遅らせ、枯死を何年か遅らせる程度のものではないかと考えられる。

#### 桜島に生息するセンチュウの病原性

センチュウの病原性は系統間で著しく異なり、病原性の強い系統から弱い系統まで見られる。また、センチュウの病原力は、枯死木間やカミキリの間でも著しく異なる(Kiyohara and Bolla 1990)。強病原性の系統のセンチュウは、樹体内での繁殖力や移動力に優れ、多くの個体がかみキリに乗り移り、健全マツに移動(侵入)する。一方、弱病原性系統のセンチュウは、健全マツへの侵入力、健全マツ内での繁殖力、移動力は劣り(Kiyohara and Bolla 1990; Ichihara *et al.* 2000; Asai and Futai 2006)、かみキリへの乗り移り率も低い(Aikawa *et al.* 2003)。Takemoto(2007)は、数理モデルによるシミュレーション解析により、被害拡大

期には、病原力の高い個体の割合が増加するが、被害の減退期には病原力の弱い個体の割合が高くなると予測している。そこで、桜島でのセンチュウの病原性の変化が、被害発生程度にどのように影響するのか明らかにするために、材線虫病の拡大期と終息期のセンチュウの病原性を、接種試験と増殖試験を通して確かめた。

被害拡大期の2000年に桜島南東部のクロマツ林で捕獲したかみキリから抽出したセンチュウ(桜島個体群)1万頭を、演習林本部苗畑(鹿児島市郡元)に植栽されている5年生の非抵抗性選抜クロマツ稚樹の地上50cm~80cmの高さの樹幹に剥皮接種法で接種し、枯死率と樹脂滲出能の変化を、強病原性とされているKa-4系統(接種頭数1万頭)と比較した。

2000年8月25日に行った接種試験では、桜島個体群接種木のうち2001年1月までに17%、2001年9月までに47%の個体が枯死した。2000年の枯死率は、Ka-4(30%)に比べ有意に低かったが、総枯死率(59%)では有意差がなかった。いずれのセンチュウ接種木でも、樹脂滲出能が接種4日後から低下する個体が見られ、2週間後には滲出を停止した個体が見られた。

また、2001年7月25日に、桜島個体群および2000年の接種試験で発生した枯死木から抽出・培養したKa-4を0.1ccあたり5千頭に調整したセンチュウ懸濁液0.1ccをそれぞれ6年生クロマツ稚樹12本、コントロールとして蒸留水0.1ccを4本の稚樹に対し、地上20cmの部位の樹幹に剥皮接種法で接種した。地際から20cm、50cm、80cm、110cm、140cmの部位から、上下10cmずつ計20cmの樹幹を採取した。水分通導阻害の発生状況を調査するために、採取した材片の中央10cm分を切り出し、材片の下端を1%の酸性フクシン溶液に48時間浸漬し、材の染色状態をチェックした。水分通導が正常に行われている部分の材は赤紫色に染まり、阻害されている部分の材は染色されない。桜島個体群接種木での通水阻害は、接種6週間後に3本の供試木のうち1本の140cm部でのみ見られた。Ka-4接種木では、接種4週間後に1本の50cm部で、6週間後に1本の80cm部と110cm部の2カ所で通水阻害が確認された(図-15)。このように、接種木の通水阻害はKa-4で接種後4週間目に、桜島個体群では接種後6週間目に生じたが、通水阻害の発生頻度に差はなかった。

また採取した材片の残りの部分は、両端の直径と長さを測定後細かく切り刻み、ベールマン法により室温下24時間で、センチュウを抽出した。そして、顕微鏡下でセンチュウ頭数を計数した。接種後のセンチュウの樹体内での分布状況は、桜島個体群とKa-4で同じ様な経時変化を示した。すなわち、接種1週間後では、センチュウは限られた部位

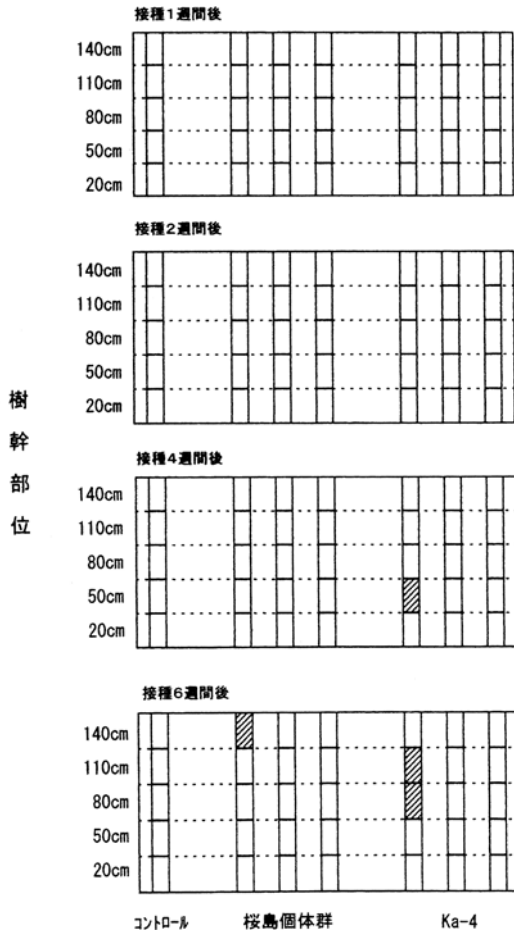


図-15 センチュウ接種後の樹幹における通水阻害の発生状況

斜線部は通水阻害が生じたことを示す。

からのみ検出されたが、2週間目以降では、ほとんど全ての部位から検出されるようになった(図-16)。

桜島個体群とKa-4のいずれも、サンプル材1cm<sup>3</sup>あたりの平均センチウ抽出数は、接種1週間目から2週間目にかけてわずかに減少した後、次の2週間で著しく増加するという傾向を示した。しかし、桜島個体群では4週間目から6週間目にかけてセンチウ数はほとんど増加しなかったのに対し、Ka-4では約5倍に増加した(図-17)。いずれの調査日においても、センチウ数はサンプル間の変動が大きく、系統間で有意な差は見られなかった。

これらの結果から、桜島に生育するセンチウの病原力は、強病原性とされているKa-4ほどは強くないが、その差は樹木にストレスがかかった状態で初めて生じる程度であると考えられた。したがって、桜島に生息するセンチウの病原力の低さが、桜島南東部での被害発生が大隅半島の激害発生と比較して2~3年遅れた主な原因であったとは考えられなかった。

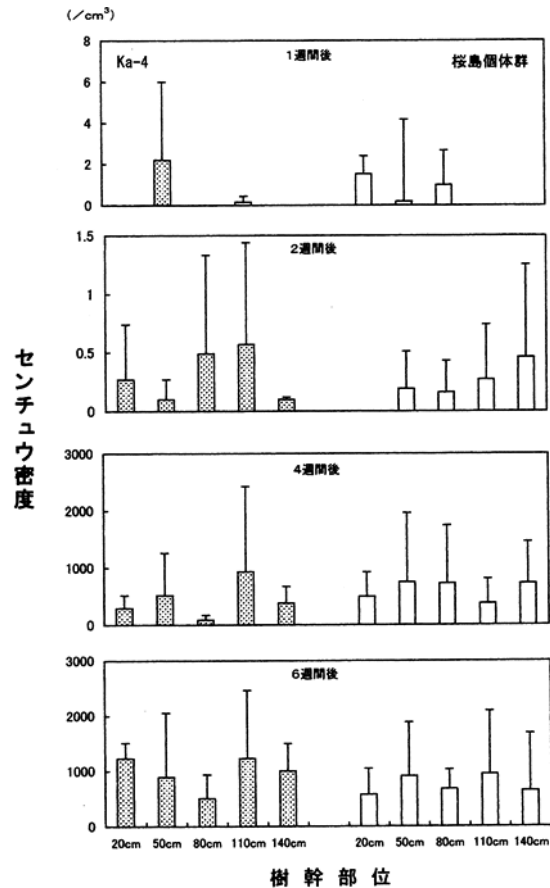


図-16 センチュウ接種後のセンチウの樹体内での分布状況

センチウ密度は、材1cm<sup>3</sup>あたりのセンチウ個体数。縦線は標準偏差を示す。

被害終息期の2012年4月6日に前年度桜島で枯死した10本のクロマツからセンチウを抽出し(以下、それぞれの枯死木から抽出したセンチウのグループを系統と表記する)、*Botrytis cinerea*を繁殖させたPDA培地あたり10個体ずつセンチウを放し、全暗、25℃の温度条件化で4週間にわたり、1週間おきに培地上のセンチウ数を計数した。枯死木から抽出したセンチウに加え、(独)森林総合研究所で継代培養されている強病原性系統のKa-4についても、同様の試験を行った。

その結果、枯死木10本のうち8本の枯死木から抽出したセンチウは、増殖しなかった。残り2本から抽出したセンチウ(No.9とNo.10)は、Ka-4と同等、またはそれ以上の個体数の増加を示した(表-10)。

2012年8月8日に、増殖試験で個体数が明らかに増加したNo.9、No.10、Ka-4の3系統のセンチウを使用して、鹿児島県森林技術総合センター(始良市蒲生町)内の苗畑に植栽された3年生の非抵抗性選抜クロマツ実生苗に対する接

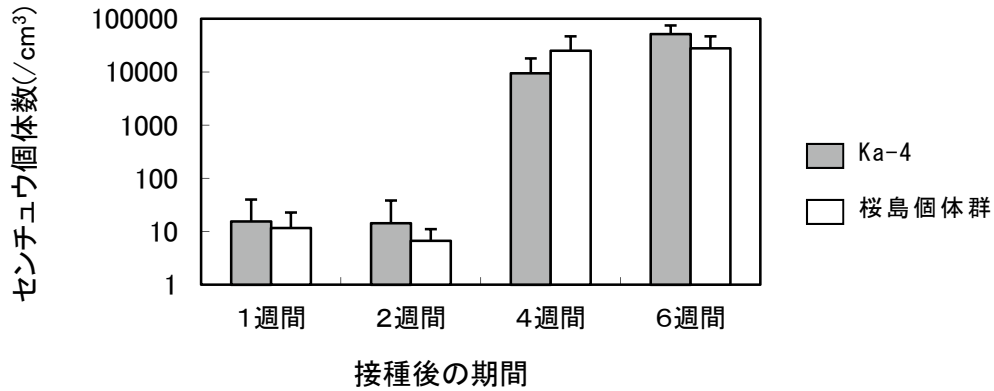


図-17 接種後の樹体内でのセンチウの密度の経時変化

縦線は標準偏差を示す。

表-10 培地上でのセンチウの個体数の変化

系統	1週間後			2週間後		
	平均	SD	範囲	平均	SD	範囲
No.9	1,250	514	700-2,000	6800	7454	600-19,400
No.10	30	35	1-71	13220 (16,525)	16032 (16,428)	0-38,450 (7,350-114,300)
Ka-4	377	489	6-1,050	8580	14020	750-33,600
系統	3週間後			4週間後		
	平均	SD	範囲	平均	SD	範囲
No.9	25,360	3,767	1,850-89,750	6,970 (11,617)	12,745 (15,618)	1-29,650 (2,400-29,658)
No.10	28,230	19,865	12,250-54,500	49,570	27,389	7,350-114,300
Ka-4	8322 (20,800)	18021 (27,931)	0-40,550 (1,050-40,550)	2862 (7,050)	3986 (2,263)	6-5,450 (5,450-8,650)

カッコ内の数字はセンチウが生存していた培地のみ値

種試験を行った。接種頭数は苗木あたり5千頭とし、0.1ccの蒸留水とともに、地上10~20cmの樹幹部に、剥皮接種法で接種した。コントロールとして蒸留水を接種した。供試木数は、No.9が39個体、No.10が49個体、Ka-4が31個体、そしてコントロールが20個体であった。

さらに、2013年5月に2012年に桜島で材線虫病により枯死したクロマツ小径木13本から材を採取し、センチウを抽出した。2012年度同様の方法で培養した結果、十分な個体数まで増殖した2系統 (No.15と No.22) と Ka-4を、鹿児島県森林技術総合センター (始良市蒲生町) 内の苗畑に植栽された4年生の非抵抗性選抜クロマツ実生苗に接種した。接種頭数は苗木の成長を考慮して、苗木あたり1万頭とし、0.2ccの蒸留水とともに、地上40~50cmの樹幹部に、剥皮接種法で接種した。コントロールとして蒸留水0.2ccを接種した。供試木数は、No.15が10個体、No.22が13個体、Ka-4が15個体、そしてコントロールが10個体であった。

蒸留水のみを接種したコントロールでは、2012年と2013年のいずれの年でも、針葉の退色、部分枯れ、枯死といっ

た異常は全く見られなかった。2012年の接種試験では、Ka-4接種木の64%が、No.9接種木の31%が枯死したが、No.10接種木では枯死やその他の異常は全く観察されなかった。2013年の接種試験では、Ka-4接種木の73%が枯死したが、No.15接種木と No.22接種木では、全く異常は見られなかった (表-11)。

2012年の接種試験に用いた供試木の接種前の樹高は65cm~69cmで、処理間 (接種した系統間) で有意差が見られなかった。マツの樹高成長量は、前年の光合成量により決定される。したがって、接種により供試木がストレスを受けたならば、その程度により次年度の樹高成長量は少なくなる。接種翌年の樹高成長量は、処理間で有意差が見られ、No.9接種木の成長量は No.10接種木やコントロールに比べ、有意に少なかった。コントロールと No.10接種木の間には、2013年の樹高成長量に有意差は見られなかった (表-12)。このことは、No.10接種木はセンチウ接種によるストレスを受けていなかったが、No.9接種木は、かなりのストレスを受けていたことを示している。これらの結

表-11 センチュウ接種木の枯死率

接種年	供試木の樹齢	接種頭数	センチュウ個体群(系統)					
			Ka-4	桜島個体群	No.9	No.10	No.15	No.22
2000	5年生	10,000	59%	47%				
2012	3年生	5,000	64%		31%	0%		
2013	4年生	10,000	73%				0%	0%

2012年と2013年の接種木の枯死率は2013年11月29日現在のもの。

表-12 2012年の接種試験の供試木の樹高と翌年の樹高成長量

	接種時の樹高(cm)		接種翌年の樹高成長量(cm)	
	平均	SD	平均	SD
コントロール	65.1 <sup>a</sup>	9.2	82.4 <sup>a</sup>	11.2
No.9接種木	68.6 <sup>a</sup>	5.3	57.3 <sup>b</sup>	21.1
No.10接種木	66.7 <sup>a</sup>	7.6	83.3 <sup>a</sup>	10.4

コントロールには蒸留水を接種。各列で異なったアルファベットの付いた値の間にはP=0.01レベルで有意差があったことを示す。

果から、No.9は樹体内に侵入すると寄主植物にある程度のストレスを与え、Ka-4に比べ低いものの、ある程度の病原力を持っていたことがわかる。しかし、No.10の接種は寄主植物に対してほとんどストレスを与えておらず、No.15、No.22とともに、全く病原力を持っていなかったか、持っていたとしても、それは極めて低いものであったと結論づけることができる。

被害の拡大期の2000年と被害の終息期の2012年と2013年のセンチュウ接種木の枯死率を比較すると、2000年の枯死率はKa-4接種木が59%、桜島個体群接種木が47%と、枯死率の差は比較的小さかったのに対し、2012年のKa-4接種木とNo.9接種木の枯死率は、それぞれ64%と31%と、2000年度に比べ桜島由来のセンチュウを接種したクロマツの枯死率とKa-4接種木の枯死率の差は大きくなった。このことから、2012年と2013年に接種試験のために桜島から持ち帰った23本の枯死木から抽出したセンチュウのうち、唯一病原性があることが明らかになったNo.9でも、2000年に接種試験に用いた桜島個体群より病原力は一段低かったことがわかる。

2012年と2013年に桜島で枯死木から採取したセンチュウの病原力は、23系統中19系統で増殖力が極めて低く、強病原性系統のKa-4と同等かそれ以上の増殖を示した2012年に抽出したNo.10も、接種試験では全く異常を引き起こすことはなかった。また、2013年の13系統中11系統でもセンチュウの十分な増殖は見られなかった(原因の一つに、原生動物のツグチミズケムシ?の繁殖の可能性が否定できないが)。これらの結果は、今回調査した23系統中22系統は病原力が極めて低いことを示している。No.9は、高い増殖力を示し、接種木を枯死させたが、病原力は2000年の桜島個体群より低いと考えられた。2000年と2012年、2013年の調査結果は、桜島では、病原力の高い系統と低い系統が

混在しており、Takemoto (2007) の指摘したとおり、被害の終息期には病原力の低い系統の割合が高くなり、桜島のセンチュウの病原力が低下している可能性を示している。センチュウの病原力の低下が、直接、またはカミキリのセンチュウ保有状況や誘導抵抗性を通して、間接的に被害の終息に貢献した可能性が指摘される。

#### 誘導抵抗性

弱病原力センチュウを前接種したマツに、後から強病原力センチュウを接種しても、マツが枯れない、いわゆる誘導抵抗性が生じることが報告されている(清原 1990)。桜島に生息しているセンチュウは、感染しているマツごとに病原力に差があり、被害の終息期には、病原力が低下しているセンチュウの割合が高いことが明らかになった。そうだとすると、桜島でのマツ材線虫病の終息の要因には、弱病原性センチュウの感染による誘導抵抗性が働いている可能性が考えられる。誘導抵抗性の持続期間に関しては弱病原力センチュウの接種5日後から発現しはじめ、30日後には効果的に発現し120日まで持続することが明らかになっている(清原 1989)。現在、ほとんどの研究が120日以内で行われている。1年以上誘導抵抗性の持続を調べた例は、リュウキュウマツの成木を用いた研究のみで、接種1年後にも誘導抵抗性が認められたことが報告されている。(酒井ら 2007)。今回は、前述の2012年に桜島の枯死木から抽出したセンチュウを接種したクロマツに、再び強病原力センチュウを接種し、接種1年後に誘導抵抗性が発現するかどうかを調査した。

桜島で2011年にセンチュウによって枯死したクロマツ10個体から抽出したセンチュウのうち、接種試験に使用できるまで個体数が増加したNo.9とNo.10を、2012年8月8日に、0.1ccあたり5千頭に頭数調整したセンチュウ懸濁液0.1cc



を、非抵抗性選抜3年生のクロマツ苗の樹幹10~20cmの高さに剥皮接種法で接種した。また、コントロールとして蒸留水0.1ccを接種した。接種した個体数はNo.9で39本、No.10で49本、コントロールが20本であった。

2013年8月7日、前年センチウ (No.9, No.10) を接種したクロマツのうち生き残った個体と、コントロールとして蒸留水を接種した個体に、1万頭のKa-4を剥皮接種法で、地上から40~50cmの高さの樹幹部に接種した。2013年は供試木の成長を考慮して、接種頭数を2012年の2倍にした。接種木の本数はNo.9接種木を12本、No.10接種木を13本、コントロールを15本に対して行った。

2012年の接種試験の結果、No.9は、Ka-4ほどは強くないまでも、接種木の約3割のマツをからすことができる程度の病原力を持っているが、No.10の病原力はゼロか極めて低いことが明らかになった(表-10)。また、No.9接種木のうち生き残った個体も、センチウ接種により明確な成長減退が明らかになら(表-11)、かなりストレスを受けていたと考えられた。

2013年の接種から約1か月後の9月9日には、枯死した個体はなく、部分枯れが3本(23%)のNo.10接種木と1本(7%)のコントロールで、針葉の退色は2本(16%)のNo.9接種木で確認された。10月21日は、どの系統でも枯死、部分枯れ、退色の傾向が見られた。枯死した個体は、No.9接種木、No.10接種木、コントロールで、それぞれ2本(16%)、5本(38%)、5本(33%)であった。部分枯れを起こした個体はそれぞれ3本(25%)、5本(38%)、2本(14%)で、退色を起こした個体は1本(8%)、1本(8%)、3本(20%)であった。また、健全な個体は6本(50%)、2本(15%)、5本(33%)であった。

11月29日には、No.9接種木、No.10接種木、コントロールで、枯死した個体5本(42%)、7本(54%)、10本(67%)、部分枯れをおこした個体はそれぞれ1本(8%)、5本(38%)、1本(7%)、健全な個体はそれぞれ6本(50%)、1本(8%)、3本(27%)で、退色を起こした個体はなかった。11月29日時点で枯死や部分枯れといった異常の見られた個体は、No.9接種木では50%、No.10接種木では92%、コントロールでは73%であった(表-13)。枯死と判断したすべての接種木で、センチウの存在が確認できた。

2013年11月29日時点での枯死率は、コントロールとNo.10接種木の間で有意差はなかった(Fisherの正確確率検定、 $P=0.700$ )。また、コントロールとNo.9接種木の間(同、 $P=0.258$ )、No.10接種木とNo.9接種木の間にも有意差はなかった(同、 $P=0.695$ )。また、異常(枯死と部分枯れ)が見られた個体の割合は、No.9接種木の方がコントロールより24%ほど低かったが、両者の差は有意ではな

かった(同、 $P=0.107$ )。また、コントロールとNo.10接種木の間で有意差は見られなかった(同、 $P=0.153$ )。さらに、No.9接種木とNo.10接種木の間でも有意差は見られなかった(同、 $P=0.509$ )。

表-13 2013年のセンチウ接種(後接種)試験の結果

調査日	接種木	状態			
		枯死	部分枯れ	退色	健全
9月9日	No.9 接種木	0%	0%	16%	83%
	No.10 接種木	0%	23%	0%	76%
	コントロール	0%	7%	0%	93%
10月21日	No.9 接種木	16%	25%	8%	50%
	No.10 接種木	38%	38%	8%	15%
	コントロール	33%	14%	20%	33%
11月29日	No.9 接種木	42%	8%	0%	50%
	No.10 接種木	54%	38%	0%	8%
	コントロール	67%	7%	0%	27%

このように、1年前のある程度の病原力を持っていたNo.9と、ほとんど病原力のないと判断されたNo.10の前接種で生き残ったクロマツ実生苗の生存率は、コントロールと有意差がなく、これら2系統のセンチウの前接種により接種木に誘導抵抗性が誘発されたという明確な証拠は今回得られなかった。したがって、センチウの病原性の低下により桜島のクロマツに誘導抵抗性が誘発され、それが桜島の被害の終息に大きく貢献したとは考えられなかった。

今回は、No.10は病原力が低すぎて、誘導抵抗性を引き起こせなかったのかもしれない。No.9は前接種でかなりの病原力を示したので、誘導抵抗性を誘発するのではないかと期待した。コントロールと比較して、有意差は見られなかったが、枯死や部分枯れなどの異常を示した個体の割合は低かった。今回は、供試木本数が少なかったため、明確な傾向が見られなかった可能性も残る。また、2012年に比べ2013年の夏は気温が高く、降水量が少なかった。これは、供試木にかかるストレスが2013年の夏のほうが大きかったことを意味する。同じ苗畑で実施した2012年の接種試験では、Ka-4接種木の2012年12月7日時点の枯死率は23%と、2013年の接種試験の2013年11月29日の枯死率67%に比べ44%も低かった。2013年の夏の厳しい気候が、誘導抵抗性発現を妨げた可能性も否定できない。

#### カミキリの生息状況とセンチウ保有状況

各調査地に、1977年から2013年まで、毎年5月初旬に生け捕り型に改良したサンケイ化学株式会社の昆虫誘引器(以下、トラップ)を設置し、カミキリが2週間連続して捕獲されなくなる9月中旬から10月上旬まで捕獲調査を行った。トラップの容器の部分には、捕獲したカミキリが逃亡

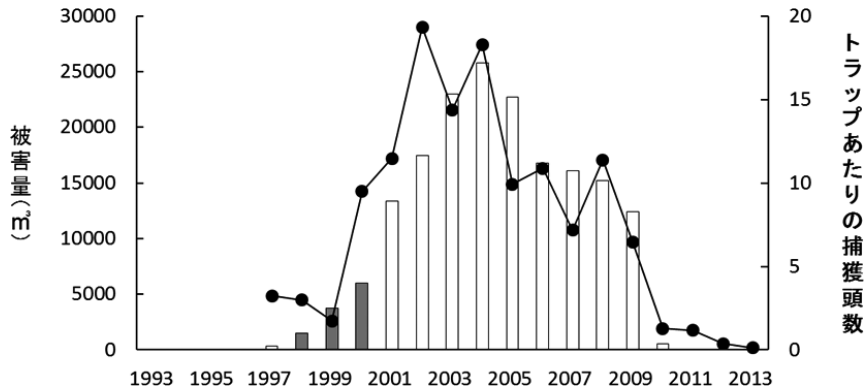


図-18 桜島における被害量（棒グラフ）とトラップあたりのカミキリ成虫捕獲頭数（折れ線グラフ）の関係  
1998年、1999年、2000年の被害量（灰色）は鹿児島県の調査結果（処理量）を処理率（約33%）で補正した値

表-14 マツノマダラカミキリの捕獲状況

ステージ	年度	捕獲期間	捕獲数(/トラップ)		50%捕獲日
			平均	SD	
侵入・定着期	1997	5/17~9/11	7.3	3.5	7月2-3週
	1998	5/12~9/10	6.4	4.1	7月1-2週
	1999	6/3~9/9	2.5	2.7	7月2-3週
拡大期	2000	5/29~9/18	10.2	11.7	7月2-3週
	2001	5/24~9/13	13.3	12.9	7月1週
	2002	5/16~9/17	23.8	21.8	6月3-4週
ピーク期	2003	5/12~9/22	17.2	19.4	6月4週
	2004	5/24~9/24	25.0	23.1	6月3週
	2005	5/23~9/22	10.2	7.9	6月4週-7月1週
減退期	2006	5/31~9/25	13.7	10.5	6月3週
	2007	5/17~10/9	11.0	10.7	6月4週-7月1週
	2008	5/26~9/25	12.9	11.4	7月1-2週
終息期	2009	5/25~8/17	5.2	6.9	7月2-3週
	2010	5/31~9/1	1.5	1.4	7月3-4週
	2011	6/13~8/18	1.3	2.2	7月3-4週
	2012	7/12~9/6	0.3	0.5	8月2週
	2013	7/15~7/29	0.1	0.5	7月3週

しないように透明のアクリル板で返しをつけた。捕獲したカミキリを生きのまま研究室に持ち帰るため、餌木として当年生から3年生までのクロマツの生枝を1~3本入れた。このトラップを、各調査地で、10~30m 間隔でクロマツ、適当なクロマツが生育していない場合には、広葉樹の枝の高さ2~10m の位置に3基ずつ吊り下げ、基本的に各週2回捕獲されたカミキリ個体数を調査した。カミキリ成虫の誘引剤（ $\alpha$ -ピネンとエタノール）を2週間おきに交換した。

各調査日で、カミキリが捕獲されなかったトラップで餌木上に後食痕や産卵痕が確認された場合は、前者の場合は、性別は不明であるがカミキリが1頭以上、後者の場合は、雌のカミキリが1頭以上トラップ内に侵入し、逃亡したことになる。また、雄のみが捕獲され、餌木上に産卵痕が確認された場合は、雌のカミキリが1頭以上トラップ内に侵入し、逃亡したことになる。そのため、今回は実際に捕獲されたカミキリの個体数に、これらの痕跡の見られたトラップ数を加えた値を捕獲数とした。

カミキリのトラップあたりの捕獲頭数と被害量の年変動パターンは、捕獲数の増加が若干早く始まったように見られたが、両者はほぼ同じパターンを示した（図-18）。このことは、カミキリの生息数の変動が被害量の変動に深く関わっていたことを示唆する。

表-14に、1997年から2013年にかけてのカミキリの捕獲状況を示す。カミキリの活動期間は、被害拡大期とピーク期には5月第2週から9月末まで及び、捕獲のピークは6月下旬から7月初旬であった。それに対し、終息期では活動期間は5月下旬から8月末、6月中旬から8月下旬、7月下旬から9月上旬まで、そして7月中旬から下旬までと、被害拡大期やピーク期に比べ短かった。また、捕獲のピークも7月下旬や8月中旬と遅くなった。減退期の3年間のカミキリの捕獲期間は、それぞれ5月下旬から10月初旬、5月下旬から9月下旬、5月下旬から8月中旬と徐々に短くなる傾向が見られ、捕獲のピークは、ピーク期と終息期の中間の傾向を示した。材線虫病の進展に伴うカミキリの活動期間や活動

表-15 マツ材線虫病の推移に伴うマツノマダラカミキリの線虫保有状況の年次変動

ステージ	年度	調査数	保有センチチュウ数別頻度(%)						保有数(年度別)		センチチュウ保有個体数(/トラップ)	
			0	~9	~99	~999	~9,999	10,000~	平均	SD	A	B
侵入・定着期	1997	77	80.5	0.0	0.0	7.8	11.7	0.0	1,740	1,156	1.42	0.85
	1998	74	81.1	1.4	1.4	5.2	6.9	0.0	876	889	1.21	0.44
拡大期	1999	50	82.0	2.0	6.0	8.0	2.0	0.0	602	791	0.45	0.05
	2000	235	65.5	0.9	4.7	17.4	11.5	0.0	1,373	2,080	3.52	1.17
	2001	292	81.8	2.1	8.9	3.8	3.4	0.0	693	1,617	2.42	0.45
	2002	477	39.8	14.5	19.7	19.9	6.1	0.0	399	910	14.33	1.45
ピーク期	2003	372	64.0	4.6	11.3	17.2	2.9	0.0	364	614	6.19	0.50
	2004	484	59.1	4.6	10.5	12.0	13.0	0.8	1,205	2,431	10.03	3.45
	2005	221	58.8	5.9	13.1	14.0	8.2	0.0	613	1,098	4.20	0.84
	2006	260	37.3	9.2	9.2	14.3	25.0	5.0	2,754	5,517	8.59	4.11
減退期	2007	172	53.5	13.4	7.0	9.3	14.5	2.3	2,358	4,634	5.12	1.85
	2008	276	62.3	3.6	8.4	15.2	9.4	1.1	1,176	2,159	4.86	1.35
	2009	155	58.7	3.9	16.1	5.8	12.9	2.6	3,958	13,663	2.15	0.81
終息期	2010	31	58.1	12.9	19.4	3.2	6.4	0.0	556	1,169	0.63	0.10
	2011	28	78.6	7.1	7.1	0.0	7.1	0.0	416	615	0.28	0.09
	2012	8	75.0	0.0	12.5	12.5	0.0	0.0	162	202	0.08	0
	2013	3	66.7	0.0	0.0	33.3	0.0	0.0	243	-	0.03	0

A: センチュウ保有個体数 B: 1,000頭以上のセンチチュウを保有した個体数

のピーク時の変化が、センチチュウの健全木への侵入を通して被害量にも間接的な影響を与えていた可能性が考えられる。

カミキリの捕獲数は、調査地間と調査地内のトラップ間で、ばらつきが大きかった。平均捕獲数は、1997年から1999年にかけて減少した後増加に転じ、2003年には僅かに減少したが、2004年には再び増加し、調査期間中最大の $25.0 \pm 23.1$ 頭/トラップとなった。その後、2005年から2008年にかけては、10~14頭/トラップの間で推移し、2009年に半減した。2010年以降はさらに少なくなり、2010年と2011年はトラップあたり1頭余り、2012年と2013年は1頭に満たなかった。ステージ間の平均捕獲数の変動は有意で(分散分析  $P=0.023$ )、終息期の平均捕獲数の年平均値( $0.8 \pm 0.6$ 頭/トラップ)は、ピーク期( $16.5 \pm 5.5$ 頭/トラップ)に比べ有意に少なかった(Bonferroni法による比較  $P<0.01$ )。

表-15に、トラップで捕獲されたカミキリのセンチチュウ保有状況を示す。センチチュウ保有率は、侵入・定着期の1997年から拡大期の最初の年の1999年まで18.0~19.5%で推移した。その後2010年までは、センチチュウ保有率は、2001年の18.2%を除き30%以上で、2002年と2006年の保有率は、それぞれ60.2%と62.7%と特に高かった。2011年と2012年にはセンチチュウ保有率は再び低くなり、2013年は捕獲された3頭のうち1頭のみがセンチチュウを保有していた。

センチチュウ保有個体数は、1997年から1999年にかけて、1.42頭/トラップから0.45頭/トラップに減少した。その後、2000年から2006年まではそれまでより多くなり、2002年と

2004年、そして2006年に特に多かった。そして、2007年以降は一貫して減少した。センチチュウを保有した捕獲成虫のうち、半数近くまたは半数以上の個体で保有センチチュウ数は1,000頭未満であった。1,000頭以上のセンチチュウを保有していた個体数は、センチチュウ保有個体数と同様の年次変動を示し、2004年と2006年は調査期間を通し特に多かった。10,000頭以上のセンチチュウを保有していたカミキリは、2004年と2006年から2009年にかけて捕獲された。

センチチュウ保有個体数と1,000頭以上のセンチチュウ保有個体数のいずれも、ステージ間で異なる傾向がみられた(分散分析 それぞれ  $P=0.099$ と $P=0.086$ )。終息期のセンチチュウ保有個体数( $0.3 \pm 0.2$ 頭/トラップ)は、ピーク期( $7.3 \pm 2.2$ 頭/トラップ)や減退期( $4.0 \pm 1.3$ 頭/トラップ)に比べ有意に少なかった(Welch検定 それぞれ  $P=0.021$ と $P=0.023$ )。また、終息期の1,000頭以上のセンチチュウ保有個体数( $0.1 \pm 0.1$ 頭/トラップ)も、ピーク期( $2.2 \pm 1.6$ 頭/トラップ)や減退期( $1.3 \pm 0.4$ 頭/トラップ)に比べ有意に少なかった(Welch検定 それぞれ  $P=0.050$ と $P=0.021$ )。

センチチュウ保有個体あたりの平均保有センチチュウ数は、年次変動が大きく、明確な年変動のパターンは認められなかった。減退期はほとんどの年で、平均保有センチチュウ数は1,000頭以下で、終息期の平均センチチュウ保有数はさらに少なくなった。保有センチチュウ個体数も被害ステージ間で異なる傾向が見られ(分散分析  $P=0.056$ )、終息期の値( $344 \pm 153$ 頭)は、減退期( $2,497 \pm 1,140$ 頭)より少ない傾向が認められた(Welch検定  $P=0.059$ )。

以上の結果から、カミキリの生息数、特に多くのセン



表-16 各調査地における枯死木数の年次変動

大径木								
被害ステージ	年度	溶岩実験場	碩原	黒神溶岩	黒神	湯之平	長谷	赤生原
進入・定着期	1997	1	—	—	0	0	50	—
	1998	2	—	—	0	0	42	—
拡大期	1999	2	—	—	0	0	17	—
	2000	6	0	0	10	1	9	0
	2001	6	14	65	32	3	7	8
	2002	1	38	189	58	1	10	21
ピーク期	2003	13	232	139	40	4	12	139
	2004	64	141	12	157	32	16	45
	2005	317	51	30	167	41	5	262
	2006	60	31	0	43	12	0	122
減退期	2007	51	116	0	3	46	0	175
	2008	10	81	0	0	6	0	25
	2009	0	10	0	0	0	0	1
終息期	2010	0	0	0	0	0	0	0
	2011	0	0	0	0	1	0	0
	2012	0	1	0	0	0	0	0
	2013	0	0	0	0	0	0	0
小径木								
被害ステージ	年度	溶岩実験場	碩原	黒神溶岩	黒神	湯之平	長谷	赤生原
進入・定着期	1997	0	—	—	0	0	0	—
	1998	0	—	—	0	0	0	—
拡大期	1999	0	—	—	0	0	0	—
	2000	0	0	0	0	0	0	0
	2001	0	0	0	0	0	0	0
	2002	0	0	0	0	0	11	0
ピーク期	2003	0	0	0	0	0	0	0
	2004	0	0	0	0	0	0	0
	2005	0	0	22	0	0	11	0
	2006	180	0	27	111	37	22	50
減退期	2007	501	60	14	158	11	0	230
	2008	264	108	21	147	77	0	168
	2009	193	71	106	55	35	1	52
終息期	2010	34	30	17	11	11	0	3
	2011	11	8	1	10	1	0	1
	2012	2	10	2	0	0	0	0
	2013	0	1	2	0	0	0	0

碩原、赤生原、黒神溶岩では、1997年から1999年までは正式な調査は行っていないが、大径木の枯死は確認されなかった

チュウを保有したカミキリの生息数は、そこでの被害量の変動に大きな影響を持っていると考えられた。その中でも、センチュウ保有個体数と保有センチュウ数の減少が、被害の減少から終息に至る過程で、極めて重要であったと結論づけることが出来る。

クロマツ林分の立地場所および立地環境など（枯損とセンチュウ保有個体数の変動より）

表-16と17に、高免と調査地内のクロマツに殺線虫剤が樹幹注入された古里を除く7調査地での、1997年から2013年までの枯死木数とカミキリ捕獲個体数およびセンチュウ

保有個体数を示す。カミキリは材線虫病の侵入、拡大期には主にクロマツ大径木を利用し、ピーク期を過ぎて大径木が減少してからは、小径木も利用するようになった。したがって、大径木の枯損木数は、各調査地での被害のピークまでの被害パターンの消長を示していると言える。

調査地間で被害の発生開始時期に数年またはそれ以上の差がみられ、大径木の枯死数の増加時期も異なった。大径木の枯死数のピークは、長谷が最も早く、進入・定着期の1997年に枯死木数は最大となった。続いて、黒神溶岩で2002年から2003年に、碩原で2003年から2004年に大径木の枯死が著しくなった。黒神では2004年から2005年に、溶岩

表-17 各調査地におけるカミキリ捕獲個体数とセンチウ保有個体数の年変化

年度	項目	溶岩実験場	碩原	黒神溶岩	黒神	湯之平	長谷	赤生原
1997	捕獲個体数*	13(5)			8(1)	25(6)	10(7)	
	センチウ保有個体数	2			0	5	6	
1998	捕獲個体数*	12(7)			12(3)	12(7)	16(7)	
	センチウ保有個体数	0			3	2	7	
1999	捕獲個体数*	4(1)			14(3)	10	6(1)	
	センチウ保有個体数	1			0	4	0	
2000	捕獲個体数*	11	20(2)	105	40(2)	15	23	14(1)
	センチウ保有個体数	6	2	39	12	9	3	3
2001	捕獲個体数*	24(2)	34(2)	102(3)	16	29(1)	50(1)	18
	センチウ保有個体数	5	5	22	1	3	12	4
2002	捕獲個体数*	63(4)	77(7)	169(4)	22(3)	55(1)	54(2)	18(4)
	センチウ保有個体数	31	44	123	15	27	32	7
2003	捕獲個体数*	21(4)	37(4)	113(3)	32(1)	15(1)	95(2)	29(1)
	センチウ保有個体数	7	15	50	6	3	30	13
2004	捕獲個体数*	133(2)	57	105(2)	47(5)	11(1)	46(3)	26(2)
	センチウ保有個体数	59	27	37	15	6	22	11
2005	捕獲個体数*	25(5)	10	46(4)	60(2)	12(1)	57(2)	8(2)
	センチウ保有個体数	12	5	22	28	3	21	2
2006	捕獲個体数*	68(1)	24(3)	13	49	52	6(1)	23
	センチウ保有個体数	47	15	8	30	28	5	15
2007	捕獲個体数*	14	18(2)	16	8(1)	36	0	72(2)
	センチウ保有個体数	8	7	5	2	16	0	37
2008	捕獲個体数*	30(1)	77(5)	9(1)	51(2)	47(2)	1	55(2)
	センチウ保有個体数	14	30	0	17	19	1	22
2009	捕獲個体数*	11(1)	34(1)	16	8	37	2	33(1)
	センチウ保有個体数	7	14	4	4	12	2	15
2010	捕獲個体数*	10	3	7	4	3	0	4(2)
	センチウ保有個体数	6	1	1	3	2	0	0
2011	捕獲個体数*	1	3	7	1	3	0	1
	センチウ保有個体数	0	3	1	0	1	0	1
2012	捕獲個体数*	0	0	4	0	0	0	0
	センチウ保有個体数	0	0	2	0	0	0	0
2013	捕獲個体数*	1	0	2	0	0	0	0
	センチウ保有個体数	1	0	0	0	0	0	0

\* 括弧内の数字は痕跡トラップ数で、捕獲個体数に含まず

実験林では2005年に、赤生原では2003年から2007年にかけて、大径木の枯死が激しかった。湯之平はこれらの調査地に比べ大径木の激しい枯死の発生時期が遅く、枯死木数は被害の減退期の2007年が最も多かった。大径木の枯死は、2005年度までに全ての大径木が枯死した黒神溶岩と長谷を除き、2008年度に激減し、それ以降はほとんど見られなくなった。一方、小径木の枯死は、2004年まではまったく見られなかった。2005年に初めて確認された後は、枯死木数は2006年から急激に増加した。2007年から2008年は、長谷を除き、まだ多くの小径木が枯死したが、2009年と2010年に枯死木数は著しく減少し、2011年以降は極めて少なくなった。

大径木の枯死の激しい時期の違いの要因の1つとして、

カミキリの各調査地への侵入時期の違いが挙げられる。桜島へのカミキリの侵入の経路として三つ考えられた(図-5)。一つ目は、1990年代枯損木があちこちに点在していた薩摩半島の吉野方面からの長谷への侵入である。両地点は3kmほどしか離れておらず、カミキリの飛来は可能である。そして、おそらく他の調査地よりも早くカミキリが侵入していたために、早い時期から枯死が多く発生したのではないかと考えられる。

二つ目は、1994年に被害丸太の持ち込みが原因でまとまった被害が発生した赤水、野尻、持木からの分散である。これらの場所に比較的近い実験場と碩原のうち、溶岩実験場では1997年には100頭以上のセンチウを保有したカミキリが捕獲された。碩原でも調査を開始した2000年から

100頭以上のセンチウを保有したカミキリが捕獲された。これらのカミキリは、おそらく野尻、赤水周辺から分散したであろう考えられる。湯之平においても、1997年には100頭以上のセンチウを保有したカミキリが捕獲された。湯之平では、野尻、赤水周辺に加え、被害の激しかった長谷からも侵入したと考えられる。赤生原付近の横山町では、1998年には長谷から侵入したと思われる枯損が拡大しており、赤生原では調査を開始した2000年から100頭以上のセンチウを保有したカミキリが捕獲されていた。

三つ目は、大隅半島の垂水の被害林分からの飛来である。1997年から1998年にかけて、大隅半島に接している桜島口周辺にマツ材線虫病被害が侵入した。黒神では1997年にはカミキリが捕獲されており、100頭以上のセンチウを保有したカミキリも、1998年に捕獲されている。黒神溶岩では調査を開始した2000年には、カミキリが100頭以上捕獲されており、その中で、100頭以上のセンチウを保有していた個体は35頭だった。したがって、侵入された年が枯損のピークとなった長谷とは違い、他の調査地では、カミキリの捕獲されている年に差が無かったにも関わらず、被害のピークに差がみられ、カミキリの侵入時期や侵入経路は、被害ピーク時期の違いの大きな要因ではないと考えられる。

しかし、湯之平では1997年の調査時点でセンチウを保有したカミキリが捕獲されていたにもかかわらず、枯損は2000年まで生じていない。被害の発生が遅れた要因として、他の調査地との標高差が挙げられる。桜島での初期の被害発生は、海岸部の低標高地でみられた。湯之平は標高が390mと高く、捕獲のピークが他の調査地よりも著しく遅れていた。他の調査地での累積捕獲率が20~30%となっている6月の第2週においても、湯之平では10%未満となっており、カミキリの捕獲が遅れていた。侵入初期には被害木が発生していなかったため、湯之平で捕獲された個体は他の場所（低標高地）で脱出後、移動・分散してきた個体であると考えられる。その場合、湯之平に飛来したカミキリからは、すでになんかの割合のセンチウが離脱した後である可能性がある。したがって、高標高であることは枯損の発生年度が遅れに関係していたと思われる。

各調査地において、大径木の枯損のピークと、カミキリ捕獲数のピークにタイムラグがみられる場所が多く、そのような場所は枯損のピークも遅れているように思われた。そこで、平均捕獲数とセンチウ保有率より計算されたセンチウ保有個体数と枯死木数との関係を、被害の発生から終息まで継続して調査できた大正溶岩台地上の土壌の発達が悪い実験場、土壌が比較的発達した黒神、そして調査地のうち最も標高の高い場所にある湯之平での枯死木数と

センチウ保有個体数の年次変動について検討した。結果を図-19に示す。

溶岩実験場では、大径木の枯死は1997年から2002年までは少なかった。枯死木数は、2003年にわずかに増加した後、2004年と2005年に急増し、2005年に最大となった(317本)。2006年以降減少に転じ、2009年以降以降見られなくなった。センチウ保有個体数は、1997年から1999年までは、0~1.1頭/トラップと少なかったが、その後は、2008年まで増減を繰り返した。センチウ保有個体数は、2004年が24.0頭/トラップと最も多く、次いで2006年が19.1頭/トラップ、2002年が11.0頭/トラップであった。2008年以降は毎年減少し、2011年と2012年は0頭であった。このように、大径木の枯死木数の増加は、センチウ保有個体数の増加に比べ1~2年遅かった。一方、2007年に初めて発生した小径木の枯死は、2008年以降の枯死木数の減少とセンチウ保有個体数の減少は同調していた。

黒神での大径木の枯死は、1997年から1999年までは見られなかった。2000年に初めて10本が枯死した。その後、2004年に157本まで増加し、2005年にピークに達した(167本)。そして、大径木の枯死は2006年と2007年に激減し、2008年以降は見られなくなった。センチウ保有個体数は、1997年から2001年までは低いレベルで増減を繰り返した。2002年から2008年にかけては、2003年と2007年を除き、6~10頭/トラップと多かった。2009年以降センチウ保有個体数は少なく、そのうえ毎年減少した。そして、2011年から2013年は0頭であった。このように、2000年以降発生した大径木の枯死数の増加とセンチウ保有個体数の増加はほぼ同調していた。小径木の枯死は、2006年に初めて発生した(111本)。枯死木数は2007年と2009年は約150本であったが、それ以降は減少し、2012年と2013年は0本であった。2008年以降の小径木の枯死木数の減少は、センチウ保有個体数の減少とよく同調していた。

湯之平での大径木の枯死数は、1997年から1999年までは0本で、2000年から2003年までも1~4本と少なかった。2004年から2007年にかけて、12~46本が枯死し、枯死木数は全体的には増加傾向を示した。2007年のピーク後、2008年に著しく減少し、2009年以降は、2011年に1本枯死しただけであった。センチウ保有個体数は、2001年までは少なく、2002年(9.4頭/トラップ)と2006年(11.7頭/トラップ)の2つのピークを示した。2007年以降は一貫して減少し、2010年と2011年はそれぞれ0.7頭/トラップと0.3頭/トラップで、非常に少なかった。また、2012年と2013年にはカミキリは捕獲されなかった。このように、1997年から2002年までは、毎年センチウ保有個体数は比較的多かったにもかかわらず、大径木の枯死木数は少なかった。そし

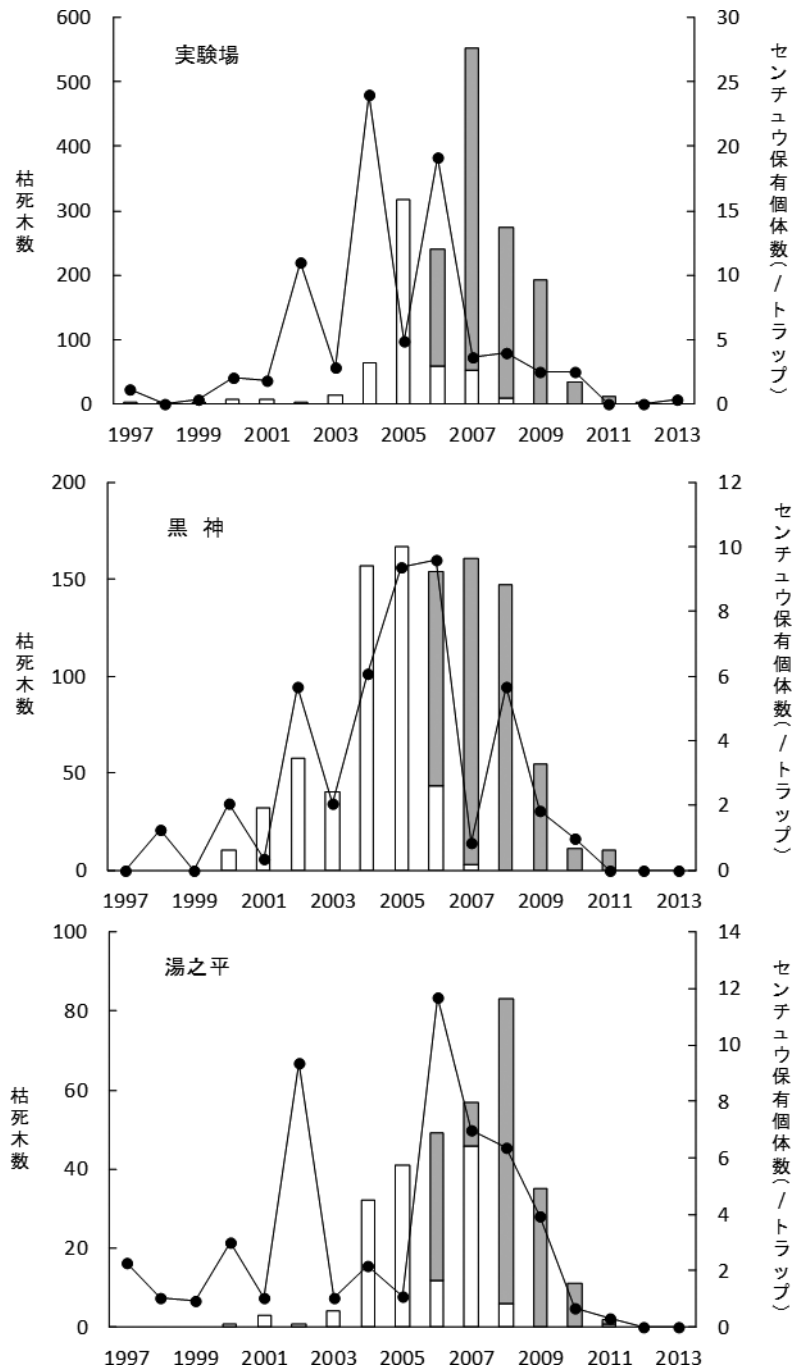


図-19 溶岩実験場、黒神、湯之平調査地でのマツの枯損木数とトラップあたりのセンチウ保有個体数の年次変動

□：大径木、■：小径木、—●：トラップあたりのセンチウ保有個体数

て、センチウ保有個体数と大径木の枯死木数の変動に明らかな同調性は認められなかった。小径木の枯死は2006年に初めて発生した。枯死木数は、2007年に減少したが、2008年に再び増加し、最大となった（77本）。その後は2011年まで減少し続け、2012年と2013年には枯死木は発生しなかった。が、2008年以降の小径木の枯死木数の減少とセンチウ保有個体数の減少はよく一致していた。

以上のように、被害の激化とセンチウ保有個体数の増加の関係に、調査地間で差が見られた。黒神では、大径木の枯死数がセンチウ保有個体数とともに増加していたのに対し、溶岩実験場や湯之平では、センチウ保有個体数に比べ枯死木数の増加は遅れていた。大正溶岩が至る所で露出し、土壌の発達が悪かった実験場では、菌根菌相は豊富であった。溶岩台地のような厳しい環境下では、クロマ

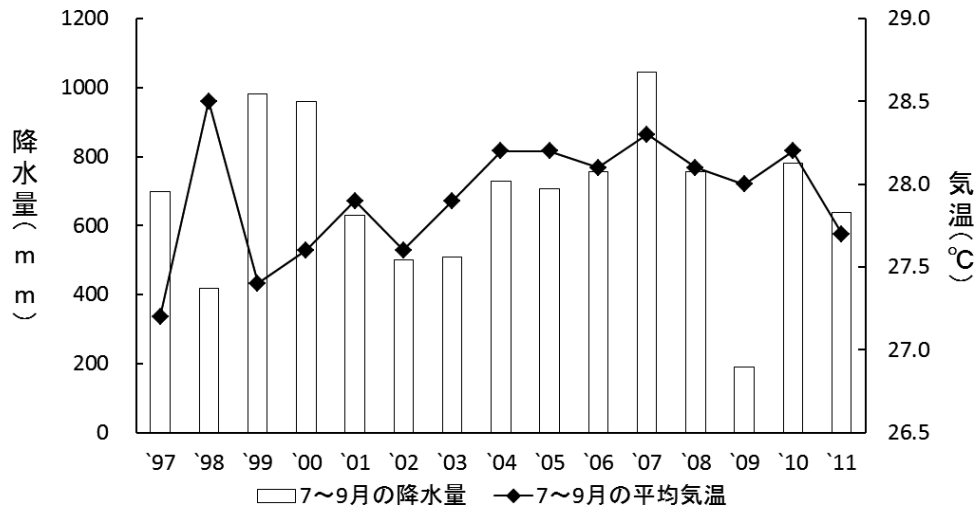


図-20 7月から9月の降水量と平均気温の年次変動

ツ実生の定着には、菌根菌との共生は不可欠である。菊池ら（1991）がアカマツ当年生実生で示したように、菌根形成が、材線虫病に対する抵抗性を高め、溶岩台地上で一度定着した実生や稚樹の生長は良好で、センチュウを接種しても枯れにくかった。しかし、菌根菌との共生で獲得したと考えられる抵抗性も、枯死を数年間ほど遅らせるものにすぎなかった。クロマツが菌根菌との間で相利的な共生関係を構築できていたことが、センチュウ保有個体数に比べ大径木の枯死数の増加が1~2年ほど遅れた原因であろうと思われる。それに対し、有機物が厚く堆積し、土壌が形成されつつあった黒神では、菌根菌相は貧弱で、センチュウを接種したクロマツ稚樹の枯死率は95%以上と高かった。したがって、黒神では、クロマツは菌根菌との共生やそれによる抵抗性の獲得が十分でなく、センチュウ保有個体数の増加がすぐに被害の激化につながったのではないかと推察される。湯之平での土壌の発達には黒神と実験場の中間で、そこに生育しているクロマツの稚樹には、菌根菌と共生しているものが頻りにみられた。菌根菌との共生に加え、標高が高い場所に位置しているといった地理的な条件も、枯死木数とセンチュウ保有個体数の増加の時間的なずれの原因になったかもしれない。

#### 夏期の気候

前述のとおり、材線虫病は萎凋病で、マツが強いストレスを受けると、被害は激化する（岸 1988）。特に、センチュウが樹体内に侵入後材線虫病が発病し始める夏の高温や乾燥によるストレスはとくに重要で（Mamiya 1972；鈴木 1984）、高温少雨の年には、被害量が著しく増加した事例が報告されている（小林 1979）。そこで、1997年から2011年までの鹿児島市で観測された7月から9月までの気温と降

水量の平均を求め、各年の気温や降水量の値と枯損量との関係について検討した。

1997年から2011年までの、7月から9月の月平均気温は27.9℃、7月から9月の平均降水量は686.4mmであった。各年の7月から9月の月平均気温は、1998年が28.5℃、2004年が28.2℃、2005年が28.2℃、2007年が28.3℃、2010年が28.2℃と、1997年から2011年までの7月から9月までの期間の月平均気温よりも0.3℃以上高かった。一方、1997年の月平均気温は27.2℃、1999年は27.4℃、2000年は27.6℃、2002年は27.6℃と、1997年から2011年までの月平均気温の平均値よりも0.3℃以上低かった（図-20）。

各年の7月から9月までの降水量は、1997年が698.0mm、1999年が981.0mm、2000年が958.5mm、2004年が728.5mm、2005年が707.5mm、2006年が756.5mm、2007年が1045.5mm、2008年が755.0mm、2010年が782.0mmと、1997年から2011年までの7月から9月までの期間の平均降水量よりも多かった。一方、1998年、2001年、2002年、2003年、2011年の降水量は、それぞれ418.5mm、630.5mm、499.5mm、510.0mm、637.0mmで、平均降水量よりも少なかった（図-20）。

被害のピーク期にあたる2001年から2005年までの5年間の夏期の降水量は、1997年から2011年までの平均降水量よりも少なかった。さらに2001年と2004年の気温は、それぞれ26.0℃と26.1℃で、1997年から2011年までの平均値よりも高かった。また、1998年の夏も降水量が277.5mm、気温が26.4℃と、高温少雨の年であった。被害の拡大、ピーク期は高温少雨の年が多く、これによって桜島に生育するクロマツにストレスがかかり、病徴の進展が進みやすかったことが、被害の拡大に拍車をかけた可能性がある。

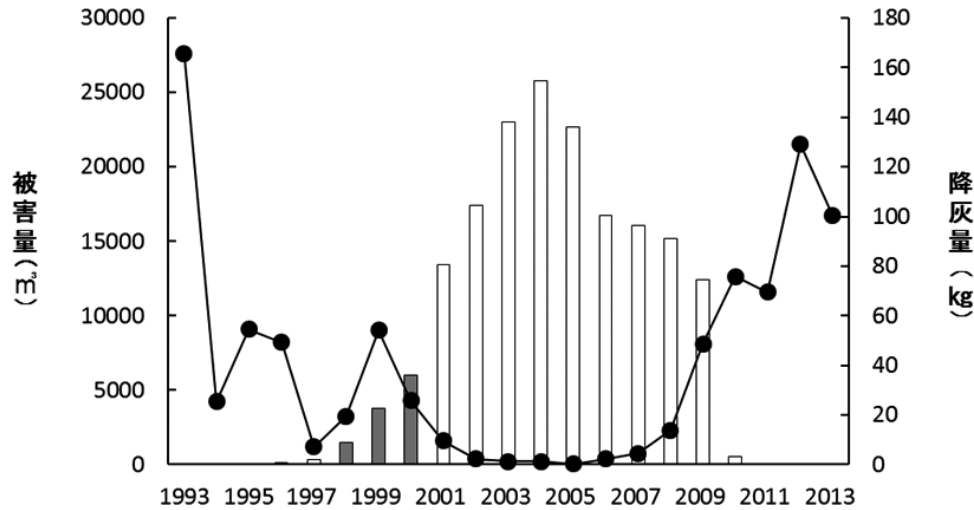


図-21 桜島における被害量（棒グラフ）と降灰量（折れ線グラフ）の経年変動

1998年、1999年、2000年の被害量（灰色）は鹿児島県の調査結果（処理量）を処理率（約33%）で補正した値

### 火山活動

桜島で被害が拡大し始めたころ、火山活動が活発で火山灰が大量に降っていた時にはマツ枯れはなかったが、火山活動が沈静化して、火山灰が降らなくなったので、マツが枯れ始めたという声をよく耳にした。その意見に対しては、多少疑問を感じていたので、火山活動と材線虫病との関係を改めて検討してみた。1997年から2013年までの噴火回数と降灰量についてのデータは、鹿児島県が集めているデータのうち、カミキリの活動期にあたる5月から9月までのデータを使用した。降灰量については、桜島島内の14か所の地点（湯之平、二俣上、二俣、武、西道（2011年に藤野に名称変更）、赤水、小池、高免、園山、黒神、有村、湯之、持木、桜島口）における降灰量の合計値を、各年の値とした。

噴火回数は、1997年から1999年までの3年間は増加を続け、1997年の25回から、1999年の145回に達した。その後、噴火回数は2000年に62回に減少し、2001年には88回と増加したが、2002年には13回と激減し、2005年まで噴火回数は14、13、11回と少なかった。2006年と2007年は、それぞれ33回と34回噴火した。その後も噴火回数は増加し続け、2008年には61回、2009年には270回、2010年には348回、2011年には581回噴火を記録した。そして、2012年には371回、2013年には514回と、活発な噴火活動を続けた。

降灰量は1997年から1999年までは増加を続け、1999年には54.2Kgに達した。その後2003年まで減少を続け、2000年には約半分の25.7 Kg、2001年にはさらに半分以下の9.5Kgとなった。その後は、2006年まで降灰量は少なく、2005年の降灰量は0.3Kgで最小であった。2006年に降灰量は増加に転じ、2009年には48.6Kg、2010年には75.8Kgに

まで達した。2011年に69.6Kgと僅かに減少したが、2012年は129.1Kg、2013年は100.4Kgと降灰量は多かった（図-21）。1994年に再発した桜島のマツ材線虫病では、降灰の多かった時期には被害量は少なく、降灰が少なかった時期には多かった（図-21）。また、降灰量が多かった年には、カミキリの捕獲が少なかった（図-22）。このことだけを見ると、「桜島の火山活動が沈静化し、火山灰が降らなくなったせいで、マツ枯れが大量に発生した」という、巷間の説も説得力を持っている。

その場合、火山活動の材線虫病への影響のメカニズムとして、いくつかのことが考えられる。まず、火山活動によるクロマツへのストレスの増大である。曾根は火山灰が大量に噴出した2012年7月の噴火の際に、溶岩台地上のクロマツに大量の火山灰が長期間にわたり付着した結果、一部針葉の枯死や枝折れ、さらに樹木全体の枯死が発生したことを観察した。また、桜島のクロマツでは、針葉に付着した火山灰や火山ガスの影響によるものか、多くの個体で針葉に黄斑が生じ、通常3シーズン付着している針葉が、1ないしは2シーズンで落葉している。さらに2015年には、火口の南にある有村地区で、火山ガスが流れたと見られる一帯で、大量のクロマツ針葉の枯れが発生した。これらのことは、火山活動が盛んになれば、クロマツにより多くのストレスがかかり、その結果材線虫病の発病の可能性が高まることを意味している。

次の可能性は、カミキリ成虫の寿命や後食活動への影響を通しての効果である。新梢に大量に付着した火山灰はカミキリの後食を妨げ、その結果、センチュウのマツの健全個体への侵入を妨害するかも知れない。森林保護学研究室で火山灰を付着させたクロマツ新梢をカミキリ成虫に与え

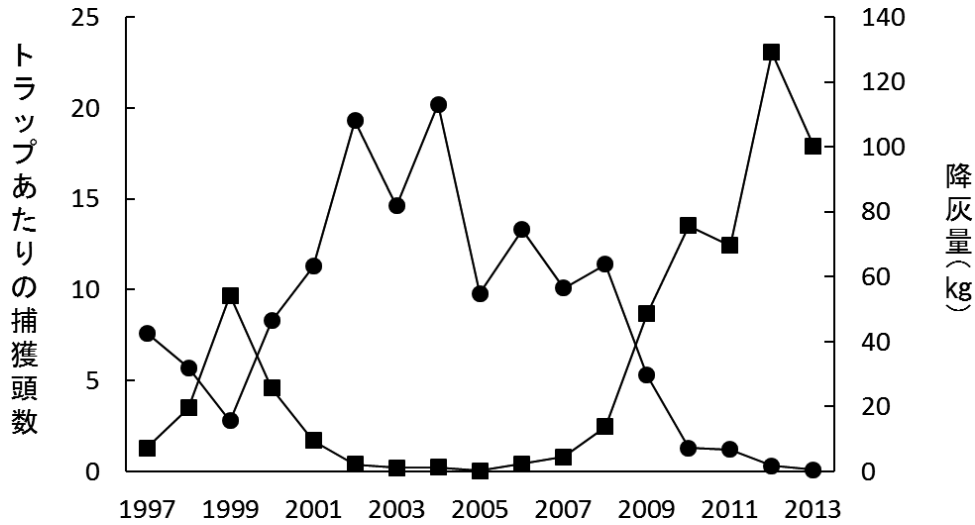


図-22 トラップあたりのカミキリ成虫捕獲数 (●) と降灰量 (■) の経年変動の関係

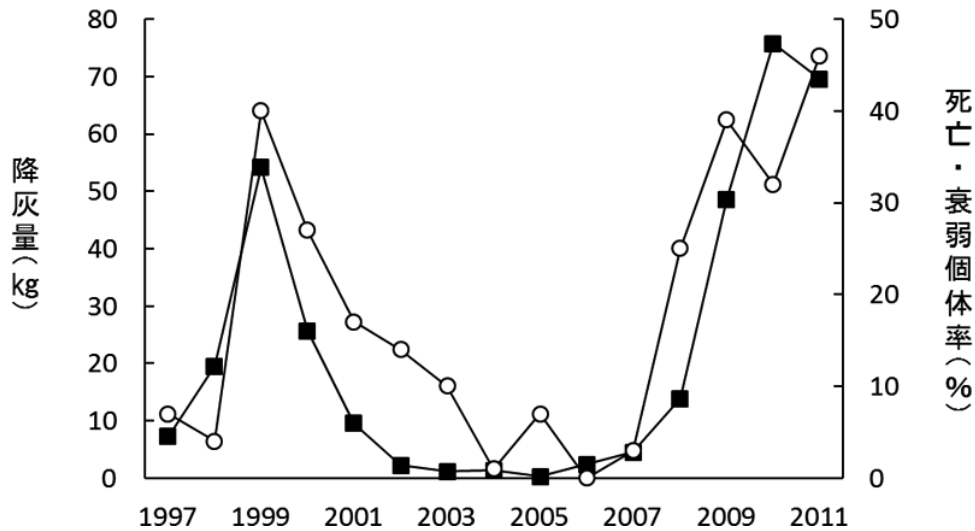


図-23 降灰量 (■) とトラップで捕獲されたカミキリ成虫の死亡・衰弱率 (○) の経年変化の関係

たところ、火山灰が大量に付着したクロマツ新梢を盛んに後食した。中村・曾根 (2003) は、桜島の火山灰を付着させたクロマツ枝と付着させなかった枝で、カミキリの摂食量や枝での滞在頻度に差がなかったことを報告している。したがって、新梢に付着した火山灰がカミキリの成虫の後食活動そのものを阻害する可能性は低いであろう。

今回、トラップで捕獲されたカミキリの中には、回収時に死亡または衰弱していた個体が見られた。トラップで捕獲されたカミキリの死亡・衰弱個体率は、1998年の4%から増加して、翌年の1999年は40%に達した。その後2004年まで減少を続け、2000年には27%、2002年にはその約半分の14%、2004年には1%にまで減少した。2005年に7%に増加したが、2006年には0%に減少した。2007年に3%に増加した後は2009年まで急激に増加を続け、2008年は

25%、2009年は39%であった。2010年に32%に減少した後、2011年には調査期間中で最大の46%となった (図-23)。このように、捕獲個体の死亡・衰弱率は、降灰の多かった年は高く、少なかった年は低かった。

トラップで捕獲された成虫の死亡や衰弱は、降灰だけでなく、夏にトラップ内が高温になることでも生じる。しかし、7月から9月の平均気温と死亡・衰弱率の年次変動パターンは一致しなかった (松尾 2012)。また、死亡または衰弱した個体は、夏だけでなく、トラップ内に大量の火山灰が堆積した場合、6月でもみられた。したがって、降灰量が多かった年の高い死亡・衰弱率は、トラップ内が高温になったことよりも、成虫がトラップ内で餌木を後食したりする際、火山灰を口から取り込み、何らかの生理的異常を引き起こした結果である可能性の方が高い。カミキリ成

虫の平均生存日数は、個体間の変動が大きく有意差は無かったものの、火山灰が付着したクロマツ枝を摂食し続けた個体の方が、火山灰が付着していない枝を与えられた個体より短かった(中村・曾根 2003)。これらのことから、活発化した火山活動(大量の火山灰の降下)は、カミキリの生存期間や後食期間を短縮し、センチウの健全木への侵入が妨げられるかもしれない。ところが、鹿児島では、カミキリの成虫からのセンチウの離脱は、カミキリの成虫が被害材から脱出直後から比較的短期間に生じることが多い(曾根ら 2007, 2009)。そのため、降灰によるセンチウの材内への侵入阻害効果は、あってもかなり小さいだろうと考える。

三つ目は、カミキリ成虫の火山ガスに対する忌避効果、またはガスによる死亡の増加である。霧島温泉郷の火山ガスが噴出する泉源近くにカミキリ成虫を長時間放置しても、成虫は死亡しなかった(鹿児島県林業試験場(現鹿児島県森林技術総合センター)私信)。泉源近くのガスの濃度に比べ、桜島のクロマツ林でのガス濃度はかなり低いと考えられる。したがって、桜島で火山ガスの直接的な影響によりカミキリの成虫が死亡するとは考えにくい。火山ガスがカミキリ成虫の飛翔方向に影響を与える、すなわち火山ガスが飛来する方向から逃避する可能性は否定できない。しかし、火山活動が極めて低調だった2002年から2007年までの時期を経て、再び火山活動が活発化し始めた2008年に、火口から2~2.5kmの場所にある黒神のクロマツ若齢林で、標識再捕法を用いてカミキリ成虫の生息状況を調査したところ、成虫の再捕率は、繁殖活動開始前の7月は3.6%、開始後の8月は22.5%であった(大久保ら 2010)。この再捕率は、火山活動の影響がない石川県での値(6、7月は約10%、8、9月は約20%)(Togashi 1990)と著しい差はなかった。極めて高い濃度の火山ガスが流れてこない限り、成虫による火山ガスの回避はないのではないだろうか。

さらに、桜島での材線虫病の侵入・定着期から拡大期の初めにかけても、火山活動は活発化し続けていた。以上のことから判断すると、火山活動のカミキリやクロマツに対する影響は決して大きいものではなく、1994年から2013年にかけての桜島における材線虫病の被害量の変化と火山活動が同調していたのは、偶然の事象であった可能性が高いと思われる。

#### カミキリにとってのクロマツ小径木の資源的価値

材線虫病の被害の程度は、カミキリ、とくにセンチウを保有したカミキリの生息状況とカミキリのセンチウ保有状況(個体あたりのセンチウ保有数)に左右される。

一方、カミキリの生息状況は、マツの枯損量と資源としての質、すなわちカミキリの枯損木での繁殖状況により決定される。桜島では、大径木が枯損した後は、加害の対象が小径木へ変化した。そこで、2009年10月28日に、溶岩実験場で産卵痕が確認されたクロマツ枯損木10本を地際から伐倒し、樹高と胸高直径を測定した後、鹿児島大学郡元キャンパスに移動させた。供試木の平均樹高は $3.84 \pm 0.74$ m(最小樹高~最大樹高:2.63~4.80m)、平均胸高直径は $5.0 \pm 1.3$ cm(最小胸高直径~最大胸高直径:3.3~7.2cm)であった。各枯損木の産卵痕の位置を全て記録した後、産卵痕の周辺をそれぞれ約 $1 \times 1$ cm剥皮し、カミキリ幼虫の摂食痕が存在した場合を「孵化」、摂食痕が存在せず卵が存在した場合を「未孵化」、摂食痕も卵も存在しなかった場合を「未産卵」として記録した。

2010年9月7日、8日に各枯損木を剥皮し、穿入孔の位置を記録した。その後、各穿入孔周辺の材を割材して、内部状況を調査し、穿入孔の先に蛹室と脱出孔が存在した場合を「脱出」、穿入孔の先に蛹室が形成されているが、脱出孔が存在しなかった場合を「蛹室形成」、蛹室の形成が途中で終わっていた場合を「蛹室途中」、蛹室が存在しなかった場合を「穿入孔のみ」の4つに分類して記録した。剥皮や割材の過程で、坑道や蛹室に死骸が存在した場合はそのステージを記録した。死骸が存在しなかった場合、「蛹室形成」の穿入孔では「不明」、「蛹室途中」と「穿入孔のみ」に分類された穿入孔では「幼虫」での死亡とした。産卵痕と穿入孔の位置を検討するために、各枯損木を樹高で3等分し、梢端から地際に向かって順に、上部、中部、下部とした。

枯損木10本の産卵痕数は602、実産卵数は345、孵化数は328、穿入孔数は168、脱出孔数は14であった。産卵密度は、上部が $0.20/100\text{cm}^2$ (各調査木の値の幅:0.00~1.03)中部が $0.46/100\text{cm}^2$ (0.00~1.18)、下部が $0.92/100\text{cm}^2$ (0.37~1.76)であった。上部と中部では産卵密度に有意差は見られなかったが、下部の産卵密度は中部と下部の産卵密度より有意に高かった。産卵痕、卵の見つかった産卵痕、孵化卵のあった産卵痕のいずれも、その約70%が樹幹下部で、25%が樹幹中部で、4%が樹幹上部で記録された。このことは、産卵は樹皮が比較的厚い樹幹下部に集中していたことを示している。実際、地際近くで多くの産卵痕を確認している。一方、穿入孔は46%が下部に、45%が中部に、8%が上部に形成された。脱出孔は50%が下部に、29%が中部に、21%が上部に形成された(表-18)。これらのことから、カミキリはクロマツ小径木の下部に多く産卵する傾向があるが、下部から上部まで繁殖に利用していたことが明らかになった。



表-18 樹体内における産卵痕、卵、孵化卵、穿入孔、脱出孔の分布 (単位は全て%)

部位	産卵痕	卵	孵化卵	穿入孔	脱出孔
上部	3.5	3.5	3.7	8.3	21.4
中部	29.4	23.5	24.1	45.2	28.6
下部	67.1	73.0	72.2	46.4	50.0

表-19 小径木と大径木での実現産卵率と各ステージでの死亡率の比較

小径木	大久保(2011)	富吉(2010)	林崎(2009)
実産卵率	57.3(28.0~75.8)	54.8	-
孵化率	95.1(91.2~100.0)	91.4	-
樹皮下幼虫死亡率	48.8(9.1~85.7)	16.6	66~82
材内死亡率	86.9(0.0~100.0)	75.3	45~58
総死亡率	95.9(85.7~100.0)	81.6	83~90
材料	平均樹高3.84m、平均胸高直径5.0cmのクロマツ	平均樹高3.29m、平均胸高直径3.9cmのクロマツ	樹高1.5~6.1m、胸高直径0.5~7.6cmのクロマツ
大径木	竹常(1983)	在原(1984)	井上(1985)
実産卵率	40.9~86.1	62.6	33.7~72.4
孵化率	79.1~93.9	95.6	94.6~99.4
樹皮下幼虫死亡率	7.4~29.8	28.0	1.9~21.1
材内死亡率	10.0~71.2	17.1	37.0~61.8
総死亡率	27.2~84.0	42.9	44.4~64.4
材料	20、33年生のクロマツ、アカマツ	中央径6~17cmのアカマツ	樹齢40~50年のアカマツ

小径木の結果は桜島での調査結果で、大久保(2011)と林崎(2009)は鹿児島大学農学研究科修士論文、富吉(2010)は鹿児島大学農学部卒業論文

実産卵率は57.3% (各調査木の値の幅: 28.0~75.8%)、孵化率は95.1% (91.2~100.0%)、樹皮下幼虫死亡率は48.8% (9.1~85.7%)、材内死亡率は86.9% (0.0~100.0%)、総死亡率は95.9% (85.7~100.0%) と推定された (表-19)。材内死亡の発育ステージ別構成比は、幼虫が61.0%、蛹が3.2%、成虫が6.5% で、残りの29.2% は同定できなかった。また、全材内死亡のうち、28.6% が蛹室形成前に、61.7% が蛹室形成後に、9.7% が脱出直前に生じていた。今回の材線虫病で枯死した小径木での実産卵率とふ化率は、クロマツまたはアカマツ大径木での調査結果 (竹常 1983; 在原 1984; 井上 1985) と似た値を示した。一方、小径木での樹皮下幼虫死亡率や材内総死亡率は、大径木の値 (それぞれ、20% 前後と50% 前後) より高く、産卵率や孵化率はマツの大小に関わらず同じであるが、小径木ではカミキリが羽化・脱出するまでに多くの個体が死亡していたことがわかる (表-19)。

これらの結果から、クロマツ小径木は、カミキリの繁殖に利用できる資源であるといえよう。カミキリの脱出孔が、直径2cm 程度のクロマツの枝で見つまっていることを考え合わせると、カミキリはかなり細くて樹高の低いマツでも繁殖できることがわかる。しかし、今回クロマツ小径木での総死亡率はこれまで大径木で報告されていた値よりも高く、カミキリにとっての小径木の繁殖のための資源と

しての価値は、大径木ほどは高くないと結論づけることができる。

小径木での死亡率が大径木より高かった原因としては、以下のことが考えられる。小径木では、カミキリは下部の比較的樹皮の厚い部分に多く産卵するが、大径木に比べ細いので、孵化した幼虫の資源量は絶対的に少ない。樹皮下幼虫の主要な死亡要因は幼虫同士の噛み合いである (富樫 1989)。したがって、小径木では、樹皮下での幼虫の競争が激しく、そこで4齢幼虫まで成長できる個体は限られる。また、蛹室を形成するスペースも大径木と比較して小さいため、成虫として羽化・脱出する個体数も限られてくると推察される。さらに、枝や樹幹が細いため、乾燥、過湿などの樹体内の環境変化が大径木より激しいことも、寄与しているのかもしれない。

殺虫剤の空中散布の成虫防除効果

殺虫剤の空中散布 (以後単に空散) は、松くい虫防除特別措置法が施行された1977年以降現在に至るまで、各地で材線虫病の防除手段の一つとして実施されている。空散開始当初は有機リン剤のフェニトロチオン (MEP)、フェニチオン (MPP) やカーバメート剤のカーバリル (NAC) が散布されていたが、次第に MEP 乳剤の散布が主流となり、さらに近年は多くの場所で、残効期間が長く、散布回

数も少なくすむ、ポリウレタン製の膜で MEP を包み込んだ平均粒径が約 $20\mu$  の MEP マイクロカプセル (MEP-MC) の散布に移行している。

鹿児島県は、桜島においても2001年から MEP、2004年以降 MEP-MC による特別防除を、5月下旬から6月初めにかけて実施している (図-24) (特別防除実施についての詳細は表-4を参照)。

2004年から2006年にかけて MEP-MC の空中散布によるカミキリ成虫の死亡率を推定するために、生け捕り型に改良したサンケイ式昆虫誘引器 (サンケイ化学株式会社、鹿児島) を、5月上旬に地上3~10m の高さに設置し、成虫を捕獲した。2004年は鹿児島市桜島町横山に位置する溶岩実験場、赤生原、碩原、長谷、湯の平、古里、黒神溶岩、黒神、高免のクロマツ9林分、2005年と2006年は MEP-MC の散布地域 A 内のクロマツ林分 (散布地 A) を加えて調査を行った (図-25)。散布地 A には100~300m 間隔で6個、湯の平には20~30m 間隔で13個、その他の8調査地には20~40m 間隔で3個設置した。散布地 A で捕獲された全個体と、その他の調査地で捕獲された個体のうち、回収時に死亡していたものについて、体表に付着していた MEP を検出した。



図-24 桜島における殺虫剤の空中散布

2004年は MEP-MC の飛散が確認された湯の平、赤生原、碩原、溶岩実験場のみならず、飛散が確認されなかった古里、黒神、黒神溶岩で捕獲された成虫から MEP が検出さ

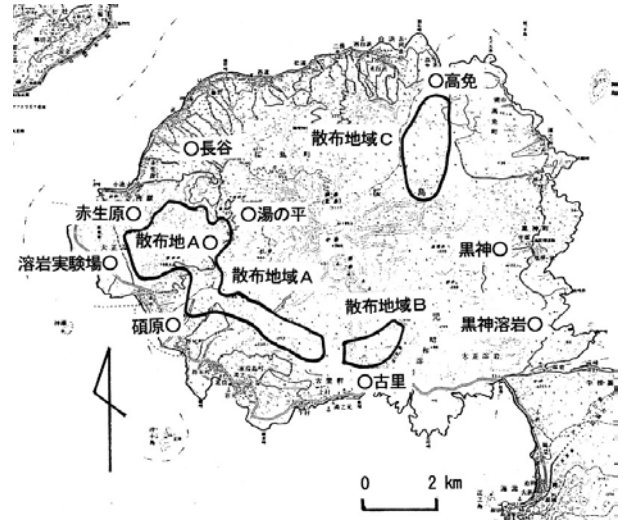


図-25 MEP-MC 散布地域と調査地

れた。2005年は散布地 A、散布地 A と同じくらいの粒径と密度の MEP-MC が調査シートに付着していた湯の平、少量の飛散が見られた赤生原、溶岩実験場、碩原、飛散が確認できなかった長谷、黒神溶岩の7調査地で、2006年は MEP-MC の飛散が確認された散布地 A、湯の平と確認されなかった溶岩実験場、黒神溶岩の4調査地で捕獲された成虫から捕獲個体から MEP が検出された。特に、散布地域とそれに隣接する林分では、2004年は薬剤散布終了後39日目まで、2005年は51日目まで、2006年は33日目まで、連続的に MEP 検出個体が捕獲された。この結果は、MEP-MC の効果は、散布後5~7週間は持続するので、6月初旬に散布すれば、成虫の羽化・脱出時期の大半はカバーできることを示している。散布地と非散布地での成虫の捕獲状況と捕獲成虫からの MEP 検出状況をもとに算出した MEP による成虫の死亡率は、散布地では2005年は62%、2006年は76%、散布地に隣接する林分では2005年は62%、2006年は66%と推定された。

富樫 (1991) は、材線虫病を制御するには、成虫の80%以上を死亡させることが必要だとしている。また、吉田 (2005) は、成虫数を世代間で増加させないためには、93%以上の成虫殺虫率が必要であると主張している。今回推定された死亡率は、富樫 (1991) の値より5~20%近く、吉田 (2005) の値より15~30%近く低かった。

今回は、散布された MEP を直接浴びた成虫、もしくは後食する際マツに付着していた MEP が体表に付着した成虫を、MEP 検出個体とした。成虫は MEP が付着した新梢の後食を通して MEP を体内に取り込む。MEP の経口毒性は接触毒性より幾分低い (岸 1975) が、MEP を体内に取り込んだ個体も、短期間の内に死亡してしまう (岸



図-26 湯の平からみた散布地と非散布地のクロマツ枯損状況 (2005年10月20日撮影)

1988)。したがって、MEPが体表に付着、もしくは体内に取り込まれた成虫数は、いずれの調査地でも今回のMEP検出個体数より多かったと推察される。

さらに、今回の死亡率の推定においては、MEP-MCの効果が消失するまでの期間を、MEP検出個体が捕獲され続けた期間とした(2005年は51日、2006年は33日)。桜島で散布されたものと同濃度、同量のMEP-MCを散布した鹿児島県薩摩半島南部の林分から一定期間経過後に採取したクロマツの枝を後食させた成虫の1週間以内の死亡率は、44日経過後の枝で100%、49日経過後の枝で90%、58日経過後の枝で80%と高かった(スミバイン技術レポート編集委員会2001)。これらの結果は、桜島に散布されたMEP-MCの薬効は、今回死亡率の推定に用いた期間より長く持続した可能性を示唆する。その場合は、推定死亡率も高くなると予想される。これらの結果から、今回の推定死亡率は野外での実際の死亡率よりも低い可能性があるが、単独でカミキリの個体数を制御するほどは高くないのではないかと考えている。しかし、MEP-MCの空中散布は、被害の拡大に対する予防効果は十分に持っていると考えられた。実際、散布地とそれに隣接する無散布地では、その年の秋の枯損状況に著しい差がみられている(図-26)。

今回の調査を通して、MEP検出個体は、2004年は散布終了4日後、2005年は散布終了5日後に、散布地域から4-5km離れた林分でも捕獲された。このことは、林分間を移動する成虫の分散能力はかなり大きいことを示している。したがって、ある高度機能マツ林を守る場合、対象となるマツ林の周辺の広範囲のマツ林の枯死木の徹底的な処理が必要になる。現在県が指針として挙げている2kmの保

護帯については、再考の余地があるであろう。

#### 桜島におけるマツ材線虫病の変遷に最も関与した要因は？

多くのクロマツが生育していた桜島では、隣接する薩摩半島や大隅半島で材線虫病によるマツの大量枯死が発生していたにもかかわらず、1987年から1993年にかけては被害が発生しなかった。この原因について、我々は以下の6つの仮説を立てて、野外調査と試験を通してこれらの仮説の正当性について検討を加えてきた。

仮説1：桜島にはカミキリが生息していなかった。

仮説2：桜島にはセンチウが生息していなかった。

仮説3：桜島ではセンチウを保持したカミキリが生息していなかった、ないしは少なかった。

仮説4：桜島に生息するセンチウの病原性は弱かった。

仮説5：桜島に生育するクロマツは抵抗性を持っていた。

仮説6：桜島の火山活動が材線虫病の発生を妨害していた。

これらの仮説のうち、桜島のクロマツには材線虫病に対する遺伝的な抵抗性はなく、溶岩台地上で生育している若齢個体は菌根菌と共生関係を確立することで、後形的に抵抗性を獲得しているが、それ自体は発病(枯死)を数年遅らせる程度のものであることが明らかになった(仮説5の否定)。また、被害拡大期のセンチウの病原性は、強病原性系統のKa-4ほどは強くないが、決して弱いものではないことも実験的に確かめられた(仮説4の否定)。桜島は、侵入・定着期から拡大期の初めにかけて、桜島は活発な噴火活動を繰り返しており、このことから仮説6は採択できない。



1994年の被害発生は、被害材が人為的に持ち込まれた場所の周辺で生じたことを考えると、1993年までの7年間は、桜島ではカミキリやセンチウは生息していなかった、または極めて個体数が少なかった可能性が極めて高く、センチウを保有したカミキリはほとんど生息していなかったのではないかと考えている(仮説1~3)。薩摩半島からは海で約4km離れていること、さらに大隅半島では、1996年から1997年まで、垂水市の桜島に隣接する桜島口付近での被害はほとんど発生していなかったことが、7年間の被害の空白を生じさせた。そして、桜島に持ち込まれた被害材からのセンチウを保有したカミキリの拡散と1997年以降の垂水市での激害発生林分からのセンチウを保有したカミキリの飛来により、桜島に材線虫病が侵入・定着し、感受性の高いクロマツが多数生育していたため、その後被害は急速に拡大したといえるであろう。

桜島では、1994年に再発した材線虫病の進行過程において、大径木の枯死木数は、被害の侵入・定着期からピーク期に向かって増加し、それ以降減少した(表-1、16)。一方、小径木は、被害により大径木が少なくなったピーク期後半から枯死し始めた。枯死木数は減退期にピークになり、終息期に激減した(表-1、16)。トラップあたりのカミキリの捕獲数、センチウを保有したカミキリの捕獲数、そしてセンチウを保有したカミキリの捕獲数も、侵入・定着期からピーク期にかけて増加し、減退期に減少した後、終息期には激減した。ところが、保有センチウ数は、侵入・定着期からピーク期には一貫した増加傾向は見られず、減退期に最大となり、終息期に激減した(表-17)。材線虫病による島内の全被害量(材積)とカミキリの捕獲数、センチウを保有したカミキリの捕獲数の年変動はほぼ同調していた。これらのことから、カミキリ、とりわけセンチウを保有したカミキリの生息数が、桜島でのマツ材線虫病被害の重要な決定要因の一つで、侵入・定着後の大径木の被害は、センチウを保有したカミキリの増加により激しくなったと推察される。これは、材線虫病がセンチウにより引き起こされ、センチウの新しい寄主への伝播にカミキリが深く関わっている(Mamiya and Enda 1972)ことを考えると当然の結果といえる。

それに対し、小径木の枯死数は、減退期に最も多かった。これは、(1)クロマツ大径木の生育数が著しく減少し、カミキリは繁殖のために小径木を利用せざるを得なくなったこと、(2)カミキリの生息数は、ピーク期ほどは多くなかったが、まだ高レベルで維持されていたこと、そして(3)カミキリの保有センチウ数が最も多く、多数のセンチウを保有していたカミキリが多かったことによるのではないかと考えられる。そして、2010年以降カミキリ、そ

してセンチウを保有したカミキリの生息数や保有センチウ数が激減したことが、終息期での小径木の枯死の激減の要因の一つであろう。枯損した小径木での産卵痕の見られた個体の割合や、成虫の生息を示す木くずが見られる個体の割合は、2009年は約30%だったが、2010年以降は10%以下であった(曾根 私信)。カミキリ生息数の減少には、繁殖に適したマツが減少したことが関与していた可能性が高い。

今回、桜島での材線虫病被害に重要な影響を与えていたと考えられたセンチウ保有個体数は、カミキリの生息数とセンチウの病原力により決定されるであろう。カミキリの個体数は、繁殖の資源となる枯死木や衰弱木の量に左右される。材線虫病の侵入・定着期から拡大期、そしてピーク期にかけては、材線虫病に対し強い抵抗性を持たないクロマツ大径木が多数生育していたので、カミキリはセンチウにより枯死した大径木を利用して繁殖し、個体数を増加させることができた。ピーク期以降は大径木の多くが枯死してしまっていたので、小径木を利用して繁殖せざるを得なくなった。小径木でのカミキリによる産卵は、比較的直径の大きい地際に近い部分に集中していた。カミキリの樹皮下での主要な死亡要因は、幼虫による噛み合い(富樫 1989)、産卵痕が集中した樹幹下部では、幼虫の噛み合いによる密度依存的な死亡が強く働いた可能性がある。小径木の樹幹内でのカミキリの死亡率は高く、繁殖用の資源としての価値は大径木よりも劣ると考えられた。したがって、小径木のみで繁殖せざるを得なくなった減退期以降は、繁殖率は次第に低下し、その効果が蓄積して、個体数は着実に減少していったと推察される。このように、カミキリ生息数は、繁殖の資源となる衰弱木や枯損木の数のみならず、質にも左右されていたことがわかる。一方、夏の気温や降水量や火山ガスはクロマツへのストレスを通して、そして火山灰は、カミキリの寿命や後食期間の短縮を通して、被害量に影響を与える可能性が考えられたが、被害量を著しく左右するほどの影響を持っているとは結論できなかった。

桜島では、材線虫病が再発した1994年以降被害材の伐倒駆除が毎年実施され、2001年以降は殺虫剤の空中散布(特別防除)や被害木周辺のスポット散布が毎年実施されている。殺虫剤の空中散布により、散布地とその周辺では、そこに生息していたカミキリ成虫の60~75%近くが死亡したと推定された。しかし、1994年以降被害地は拡大し、2004年までは被害量も増加した。このことから、講じられた防除手段のカミキリ生息数抑制効果は十分ではなかったことがわかる。また、カミキリの捕獲数が前年の半数以下にまで減少した2009年に捕獲数が激増したオオコクヌスト

表-20 桜島の被害の推移の特徴とそれにかかる要因

ステージ	特徴	要因
侵入・定着 (1994-1998)	・被害の侵入・定着 ←	<ul style="list-style-type: none"> <li>・被害木の持ち込み</li> <li>・大隅半島の激害発生</li> <li>・クロマツ大径木が多数生育</li> <li>・低いセンチュウの病原力</li> </ul>
拡大 (1999-2002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・被害の全島への拡大</li> <li>・大径木を中心とした被害量の増加 ←</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カミキリの個体数の増加</li> <li>・枯損木の増加</li> <li>・カミキリの繁殖のために資源の増加</li> <li>・高温少雨の夏</li> </ul>
ピーク (2003-2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大径木の被害最大 ←</li> <li>・低木への被害移行開始 ←</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カミキリ個体数が最大</li> <li>・センチュウ保有率・保有数が最大</li> <li>・大径木の生育数の減少</li> </ul>
減退 (2007-2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・枯損量の減少開始</li> <li>・大径木の被害減少</li> <li>・低木の枯損が増加</li> <li>・カミキリの繁殖のための資源が減少 →</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大径木の生育数が減少</li> <li>・カミキリの繁殖率の低下</li> <li>・カミキリ個体数の減少</li> <li>・センチュウ保有率の減少</li> </ul>
終息 (2010-2013)	・枯損木数の激減 ←	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カミキリ個体数の激減</li> <li>・センチュウ保有数の低下</li> <li>・センチュウの病原力の低下</li> <li>・火山活動の活発化？</li> </ul>

(曾根 未発表)による捕食は、減退期から終息期にかけてのカミキリ個体数の減少が加速した可能性がある。

一方、保有センチュウ数やセンチュウ保有率は、センチュウの病原性に影響されることが知られており、強病原性系統のセンチュウは、樹体内での繁殖力や移動力に優れ、多くの個体がカミキリに乗り移り、健全なマツに侵入するのに対し、弱病原性系統のセンチュウは、健全なマツへの侵入力、健全マツ内での繁殖力と移動力は劣り、カミキリへの乗り移りも少ないことが報告されている(Kiyohara and Bolla 1990 ; Ichihara *et al.* 2000 ; Aikawa *et al.* 2003)。拡大期には強病原性系統 Ka-4と比べて著しく劣ることがなかった桜島のセンチュウの病原性が、終息期に大きく低下したことは、クロマツの枯死木数の減少を通して直接的に、そしてカミキリのセンチュウ保有率や保有数の減少を通して間接的に、カミキリが繁殖できる資源(枯死木や衰弱木)の減少を引き起こした可能性が高い。

以上の結果から、(1) カミキリ、特にセンチュウを保有したカミキリの生息数は、桜島における被害量の経年変化の重要な決定要因で、(2) カミキリの生息数の変動には、繁殖のための資源であるクロマツの枯死木と衰弱木の量と質の変化が大きく関わっており、(3) 両者は、互いに影響しあいながら変化すると結論づけることができる。そして、センチュウのマツへの侵入が可能となるカミキリ成虫の活動期間やセンチュウの病原力の変化も、センチュウを

保有したカミキリの生息数に影響を与えていたと推察される。

1994年に再発し2013年にはほぼ終息した桜島における材線虫病の変遷とそれに係る要因は、以下のように要約できる(表-20)。桜島での材線虫病の再発生の主な原因は、1994年の島内への被害材の持ち込みと、1997年から1998年にかけての隣接する大隅半島からのカミキリの飛来であった。その当時、桜島ではクロマツの大径木が至る所に大量に生育していたことや、カミキリが保有していたセンチュウの病原性も低くなかったために、材線虫病は桜島に定着してしまった。カミキリが枯死したクロマツ大径木を利用して繁殖を繰り返した結果、カミキリの生息数とセンチュウを保有したカミキリの生息数が増加した。そして、カミキリの高い分散能力により、被害は2000年までに島内全域に拡大した。カミキリの生息数とこれに伴う枯死した大径木数の増加は、大径木の多くが枯死するまで続き、被害は高いレベルで推移した。

大径木の多くが枯死した2006年以降、被害は小径木に移行した。小径木はカミキリの繁殖のために資源としての価値は低く、カミキリ個体群の繁殖成功は低下し、カミキリ生息数も減少し始めた。しかし、保有センチュウ数はマツ材線虫病発生期間を通して最大で、しばらくの間は小径木が多数枯死した。その結果、しばらくの間はカミキリは個体数のある程度維持できた。しかし、小径木での低繁殖率

の影響が毎年蓄積されただけでなく、センチウの病原力が低下し、センチウ保有率と保有センチウ数も著しく低下した。その結果、センチウを保有したカミキリの生息数の減少が枯死の減少を引き起こし、それがさらなるカミキリの生息数の減少を引き起こすことになったと言えるであろう。

さらに、個々のクロマツ林分での被害は、発生時期に差が見られたのみならず、発生からピークにいたる過程で、センチウを保有したカミキリ個体数との関係にも差がみられた。林分間の差には、センチウを保有したカミキリの生息数のみならず、菌根菌との共生関係が関与したクロマツの活力（定着後に獲得した材線虫病に対する抵抗性）が関係していたと考えられた。

### 新しい防除方法の開発

マツノマダラカミキリ成虫駆除のためのボーヴェリア培養型不織布製剤の効果的な施用法の検討

マツ材線虫病の防除では、病原体であるセンチウの直接的に働きかける手段のほかに、病原体であるセンチウの運び手であるカミキリを駆除することで、被害拡大を阻止する試みが行われてきた（岸 1988；由井1993；三浦ら 2003）。カミキリの駆除には、被害木の伐倒・焼却・破砕（特別伐倒駆除）といった物理的手段のほかに、被害林分への薬剤の空中や地上からの散布や被害材に対する伐倒後の薬剤散布やくん蒸処理（伐倒駆除）などの化学的手段が現在も高頻度で用いられている。しかし、物理的防除法には重機の導入が不可欠で、化学的防除は薬剤による土壌や水質の汚染や、防除対象外の生物相への影響などについての懸念があり（Watanabe 1983）、実施が制約されることが多い。

桜島では溶岩台地上にクロマツが多く生育しているので、伐倒するために枯死木まで到達するのに多大な労力が必要であったり、到達できなかったりすることが高頻度で生じる。重機の使用や作業時の安全面から、吹上浜で行ったような多数のボランティアの協力を得て被害材を燻蒸処理しやすい場所まで運搬することが難しい。また、桜島の中心部は国立公園に指定されているので、容易に殺虫剤の散布ができないだけでなく、人家やミカン園、大根畑、ピロ園等がクロマツ林と接しているところでは、散布できないので、殺虫剤を散布しても、散布の効果が高められない状況が生じる。

そこで、環境に対する負荷の小さい天敵昆虫や鳥類などを利用した生物的防除法の適用が考えられるが、これらの天敵により安定して個体群を制御できるだけの十分な死亡

率を得た例は、これまで報告されていない（岸 1988；由井 1993）。これらの天敵に代わり、野外に広く生息している昆虫病原性菌類一つで、材内のカミキリの駆除で高い死亡率が報告されている *Beauveria bassiana*（以後、ボーヴェリア）のカミキリの駆除への応用が、試みられてきた。これまで種駒やキイロコキクイムシに付着させて放飼させるなど、様々な形でのボーヴェリアの施用方法が試みられている（遠田ら 1991；島津 1993など）が、各地で安定した死亡率が得られないことや、実施に多大の労力がかかるなどの問題をかかえていた。そこで、鹿児島大学森林保護学研究室は、農林水産省の先端技術を活用した農林水産研究高度化事業に参画し、カミキリ成虫駆除のためのより簡便で効果的なボーヴェリアの利用法を確立するための試験研究を行ってきた。

この事業では、これまでの室内実験からボーヴェリアに感染したカミキリ成虫の多くが短期間で死亡する（Shimazu 2004a）ことがわかっていたので、ボーヴェリアを成虫に感染させるために、被害材の表面にボーヴェリア F-263系統の分生子を1 cm<sup>2</sup>あたりの分生1.4×10<sup>8</sup>個付着させた不織布（ボーヴェリア培養型不織布製剤、日東電工株式会社製、以下、不織布）を固定後、材全体をブルーシートで被覆し、材から脱出した成虫をセンチウが成虫から離脱する前に駆除する方法が検討された。この方法では、いかにして感染率を高めるかが重要な問題であった。そこで、成虫の不織布への接触確率を高めることとともに、不織布上の生菌密度の低下をくい止める方法について重点的に試験を実施した。

ボーヴェリアの活性や生死は温度条件により左右される（Shimazu 2004a）。それゆえ、シート内の温度上昇を抑制するためには、シートに開口部を設けることが望ましい。また、成虫のシート外への脱出を開口部に制限することで、成虫の不織布への接触率を高めることができる（岡部ら 2001）。しかし、不織布の表面に雨滴があたれば、不織布上の生菌は流亡するので、不織布上の生菌の雨滴による流亡を防ぐには、開口部を設けない方が望ましい。そして、開口部を設けない場合でも生菌数が著しく減少しなければ、成虫が材から脱出後シート内により長い時間滞在することで、ボーヴェリアへの感染率を高めることも期待できる。このように、不織布によるカミキリ成虫の駆除効果を高めるには、不織布施用量の外に、シートによる材の被覆方法についても検討が必要であった。さらに、野外で施用後のシートの回収コストなどを考慮すると、シートの材質も検討する必要があった。

そこで、2004年に被害材を覆うシートとして、通気性があり、安価で入手可能なブルーシート（#1500）と、現在



図-27 不織布施用試験の様子

被害材のくん蒸処理に広く利用され、回収の必要がない生分解性シートの2種類、3通りのシート開口部（山積みした被害材の両木口面と上部中央に開口部を設けたものと開口部を設けなかったもの）の組み合わせで、以下の5通りの実験系を設定した（図-27）。

- (1) 不織布を施用せず、丸太を開口部のないブルーシートで覆った。（2004苗畑無施用区）
- (2) 不織布を施用し、丸太を開口部のないブルーシートで覆った。（2004苗畑無開口区）
- (3) 不織布を施用し、丸太を覆ったブルーシート上部の中央部に直径15cmの円形の開口部を設けた。（2004苗畑上部中央開口区）
- (4) 不織布を施用し、丸太を覆ったブルーシートの両木口面上部に底辺10cm×高さ15cmの逆三角形の開口部を設けた。（2004苗畑両側開口区）
- (5) 不織布を施用し、ブルーシートのかわりに、生分解性シートで丸太を覆った。開口区はない。（2004苗畑生分解性シート区）

2004年の実験は、演習林本部苗畑で実施した。2005年は、2004年の試験の再現性と他の場所への適用性を検証するた

めに、2004年に試験を実施した苗畑と鹿児島市桜島町有村の裸地（以下、桜島）で、同様の試験を行った。試験は2004年に最も成績の良かった無開口区とそのコントロールとして無施用区に限定した（それぞれ、2005苗畑無開口区、2005桜島無開口区、2005桜島無施用区）。

いずれの年も、不織布施用区では、丸太の表面に幅2.5cm、長さ50cmに切断した不織布を、軸方向と直角になるように固定した（図-28）。不織布の施用量は材1m<sup>3</sup>あたり2,500cm<sup>2</sup>とし、開口部付近での不織布の設置枚数を他の部分より多くした。シート内の気温を連続的に記録するとともに、不織布設置2、4、6、8、10、12週間後に、ランダムに不織布の小片を採取し、ボーヴェリアの発芽したコロニー（cfu）数（=生菌数）を計数した。

苗畑では毎日、桜島では週に4または5回、カミキリ成虫を捕獲した。捕獲成虫を、円筒型のプラスチック容器内で、クロマツ2年生枝を餌として個体別に室温下（飼育期間中の日最高気温20～32℃）で飼育し、生死を毎日確認した。餌はほぼ食べ尽くされるか乾燥すれば、新しいものに取り替えた。成虫の死亡後、滅菌プラスチック容器内に滅菌水を含ませた滅菌濾紙を敷き、その上に虫体を置き、25℃の



図-28 被害材に設置した不織布

恒温器内で保管して、ボージェリアの菌叢発達の有無を調べた。

2004年は9月中旬、2005年は10月上旬に、実験に用いた全ての丸太について、カミキリの脱出孔数を調査し、成虫の死骸がみられた脱出孔を除く脱出孔数を、成虫の材からの脱出数とした。

2004年の実験では、シート内の気温はデータが得られた6月上旬までは、上部中央開口区で他より数度低くなったが、成虫捕獲期間中多くの日で、35～41℃に達した。また2005年の桜島では、5月中旬以降シート内の気温は30℃以上に達し、最高気温は約47℃を記録した(図-29、30)。

このように、日中シート内の気温はボージェリアにとって好ましくない気温にまで上昇することがあったが、分生子数はいずれの施用区でも成虫の脱出期間を通して目立った低下は見られず(図-31)、材を被覆するシートはブルーシートであれ生分解性シートであれ、そして開口部の有無に関わらず、菌の著しい流亡は生じなかった。一方、生菌数は設置後時間と共に減少した。ブルーシートで被覆した無開口区、上部中央開口区、両側開口区では、減少パターンに著しい差は見られず、成虫の捕獲がほぼ終了した時には約107cfuにまで減少していた(図-31)。しかし、この密度は成虫が不織布に接触すれば十分にボージェリアに感染する密度(Shimazu 2004b)で、不織布の効果は十分に維持されていたと考えられた。一方、生分解性シート区では、不織布に直射日光が当たるため、紫外線の影響や気密性が高いシート内の湿度が高くなったことなどにより、生菌数は著しく減少し、設置6週間後には他の施用区の1/10以下の $8 \times 10^5$ cfu/cm<sup>2</sup>、10週間後には $2 \times 10^5$ cfu/cm<sup>2</sup>、8週間後と12週間後は0であった(図-31)。

今回の実験では、被害丸太をブルーシートで被覆した

けで、材から脱出した成虫の80～85%が、捕獲後15日までの期間に死亡した。しかし、菌の叢生率は2～4%と低く、ボージェリア以外の要因で、高い死亡率を生じたと考えられた。原因の一つとして、シート内の気温が頻りに40℃以上に上昇したことが考えられる。不織布を施用した場合、材から脱出した成虫の捕獲後15日までの死亡率は、上部中央開口区で85.9%、両側開口区91.5%で、そして無開口区では90.9～100%であった。2004年の材の被覆にブルーシートを用いた4処理区間で、成虫の駆除効果に差が見られ、上部中央開口区で脱出成虫死亡率は、無施用区のそれとほとんど差がなく、不織布施用の効果は認められなかった。両側開口区での死亡率は無施用区より高かったが、無開口区より低かった。開口部を設けた場合、死亡個体の菌の叢生率は低下した(表-21)。これらの結果は、ブルーシートに開口部を設けると、たとえそれが150cm<sup>2</sup>と小さいものでも、成虫は開口部から次々とシート外に脱出し、シート内でのボージェリア感染の感染率を高め、成虫を短期間に殺すという無開口区で見られた不織布の施用効果が失われてしまうことを示している。

無開口区と無施用区では、成虫の死亡率に年次や場所間で差が見られた(表-21)。シート内の温度条件の差や、シートにカミキリが開けた脱出用の穴の数の差などが、差を引き起こした要因として考えられるが、今回の差自体は、生物的要因による防除効果は、常に一定というわけではなく、この程度の差は常に生じる可能性があることを端的に示しているといえよう。

生分解性シート区でも高い死亡率が記録されたが、生菌数は他の区に比べ著しく低く、菌の叢生率も22%と他の施用区よりも低かった(表-21)。したがって、生分解性シート区での高死亡率は、不織布以外の要因により引き起



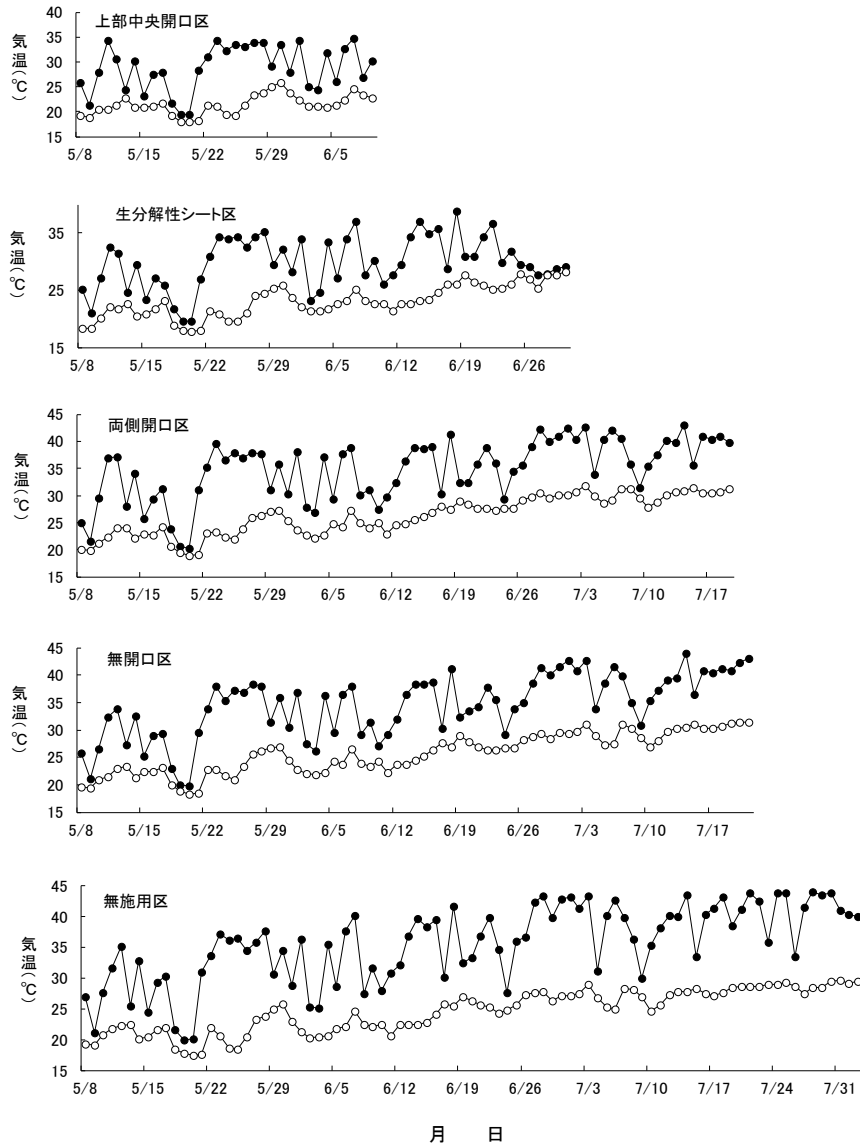


図-29 2004年の各処理区のシート内の最高気温 (●) と最低気温 (○) の変化

こされた可能性が高い。

これらの結果は、被害材をブルーシートで被覆するだけでもかなりの成虫駆除効果が得られるが、不織布を施用することで、成虫をシート内で高率でポーヴェリアに感染させ、シート内やシートから脱出後速やかに死亡させることが出来るようになり、駆除はより完全なものになることを示している。ただし、成虫がシートを食い破って脱出すると、その穴を通して、次々と他の成虫もシート外に脱出する可能性が高くなる。そうした場合、成虫のポーヴェリアへの感染率が低下し、駆除効果は低下する。材から脱出した成虫の駆除をさらに高めるためには、シートの下に防風ネットを敷くなど、シートを食い破られないような工夫も必要であろう。

#### ポーヴェリア感染の被害防除効果の検証

これまでの一連の不織布施用試験で、ポーヴェリアに感染した成虫の寿命（生存期間）は、感染しなかったものより短くなることが明らかになった。しかし、成虫の寿命の短縮が、どの程度マツの枯死の減少に繋がっているのかについては、解明されていなかった。これまで、不織布の効果を、捕獲後15日間の成虫の生存率で評価してきたが、もし多くのセンチウの離脱がカミキリの材からの脱出直後に生じたならば、捕獲後15日までの生存率で評価した不織布の効果は、過大評価したものとなる。そこで、強制的にポーヴェリアに感染させた成虫とさせなかった成虫を用いて、クロマツ稚樹の枯死率を比較し、ポーヴェリア感染の被害防止効果について実験的に確かめた。

2005年に桜島でマツ材線虫病により枯死したクロマツ丸

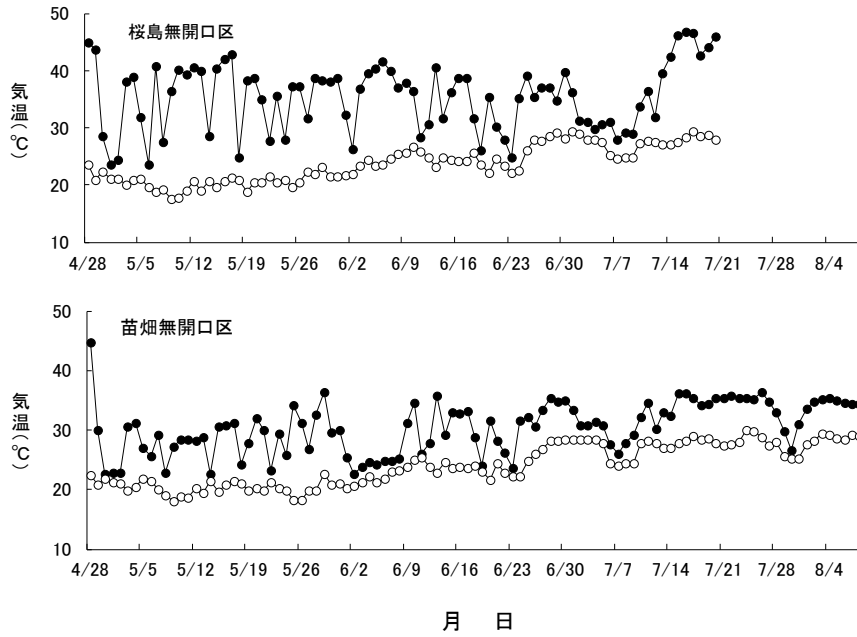


図-30 2005年の各処理区のシート内の最高気温 (●) と最低気温 (○) の変化

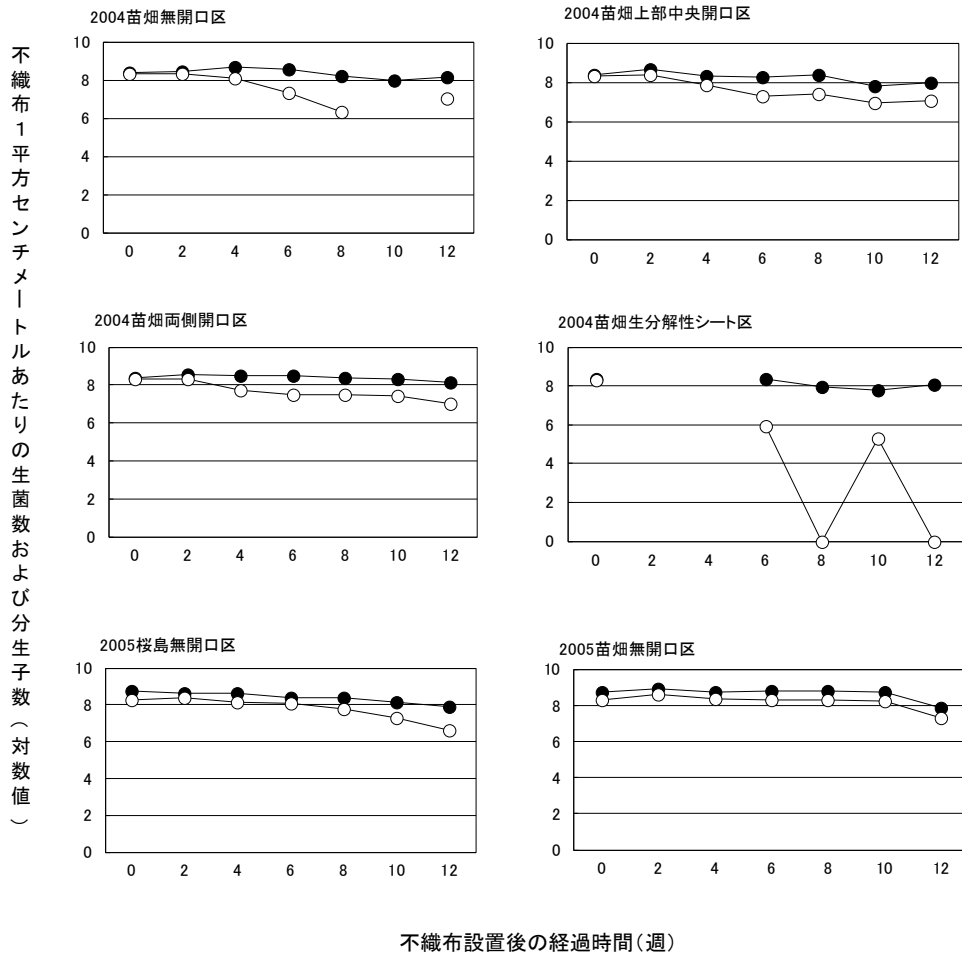


図-31 不織布施用後の不織布上の各処理区における *Beauveria bassiana* 分生子数 (●) と生菌数 (○) の経時変化。  
分生子数と生菌数は log (分生子数または生菌数+1)

表-21 2004年と2005年の各試験区におけるカミキリの脱出状況、ポーヴェリアの叢生状況、ならびに成虫の各死亡率

	2004年					2005年		
	苗畑上部中央開口区	苗畑両側開口区	苗畑生分解シート区	苗畑無開口区	苗畑無施用区	苗畑無開口区	桜島無施用区	桜島無開口区
捕獲期間	5/16-7/17	6/4-7/18	6/8-7/12	6/26, 7/9	6/9-7/14	6/6-8/6	5/18-7/7	5/19-7/18
50%累積捕獲日	6/20	6/19	6/30	7/2	6/20	6/29	6/14	6/14
脱出数	368	588	423	273	434	423	224	241
捕獲数	122	134	34	2	92	99	76	79
シート内での死亡率(%)	66.8 <sup>a</sup>	77.2 <sup>b</sup>	92.0 <sup>c</sup>	99.3 <sup>d</sup>	78.8 <sup>b</sup>	76.4 <sup>a</sup>	66.1 <sup>b</sup>	67.2 <sup>b</sup>
捕獲個体の15日以内の死亡数	70	84	18	2	29	76	30	57
捕獲個体の15日以内の死亡率(%)	57.4 <sup>b</sup>	62.7 <sup>b</sup>	52.9 <sup>a</sup>	100 <sup>c</sup>	31.5 <sup>a</sup>	76.8 <sup>b</sup>	40.4 <sup>a</sup>	72.4 <sup>b</sup>
脱出個体の捕獲後15日以内の死亡率(%)	85.9 <sup>a</sup>	91.5 <sup>b</sup>	96.2 <sup>c</sup>	100 <sup>d</sup>	85.5 <sup>a</sup>	94.6 <sup>c</sup>	79.5 <sup>a</sup>	90.9 <sup>b</sup>
全捕獲個体の叢生率(%)	49.2	35.1	20.6	100	2.2	36.5	3.6	55.7
叢生個体の捕獲後15日以内の死亡率(%)	70.0	74.5	78.5	100	100.0	91.4	100.0	91.1
カミキリ成虫がシートに開けた穴の数			4	2	13	7	21	20

異なったアルファベットの付いた値(割合)は、2004年と2005年のそれぞれの処理区間で、5%レベルで有意に異なったことを示す。



図-32 カミキリを放したクロマツ稚樹の様子



図-33 放飼されたカミキリ成虫

太から2006年6月16日から8月3日にかけて脱出したカミキリ成虫に、材から脱出直後に前述の不織布上を5 cm 以上歩行させ、ポーヴェリアを感染させた。感染させた成虫(処理区)と感染させなかった成虫(対照区)を、鉢植えされた4年生クロマツ苗木(非抵抗性選抜苗)1本が入った野外のケージ内(高さ約180cm、直径約60cmの円筒形で、地面に固定された3本の支柱とその地上約180cm、110 cm、40cmの部位に固定された円形の針金製のフレームから成る。ケージの天井部と側面は、ポリエチレン製の防風ネット(Maikoh, FY250, 青色、5mm メッシュ)で覆われ、下端部のネットは植木鉢に密着している。)に放し、成虫

の生死を毎日確認した(図-32、33)。

供試成虫が生存し続けている場合、放虫から1、2、4、8、12週間後に苗木を交換し、最長16週間まで実験を継続した。実験が終了した苗木や交換した苗木を野外の網室(2.5×3×2m)内で保管し、2006年12月19日まで生死を確認した。成虫の生存期間、後食活動、および苗木の枯死率を毎日調査した。枯死した時点で、枝上に残されたそれぞれの後食痕の面積を算出した。枯死した供試木の樹幹と枝から、パールマン法により一昼夜かけてセンチウを分離した。また、2006年12月19日時点で生存していた供試木の後食痕の面積を測定するとともに、枯死した供試木と同様の

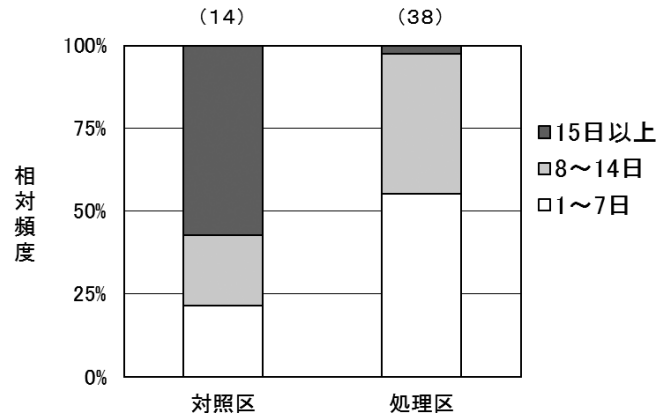


図-34 成虫の寿命の頻度分布

表-22 対照区と処理区間でのマツノマダラカミキリによる後食率の比較

実験期間	対照区		処理区		対照区と処理区の食痕がみられた供試木の割合の差に関するFisherの正確確率(P)
	供試木数	後食木数	供試木数	後食木数	
1週間目	14	12	38	30	0.455
2週間目	11	9	17	5	0.010
3-4週間目	7	7	17	1	
5-8週間目	6	6	17	0	
9-12週間目	4	12			
13-16週間目	1	0			
合計	43	35	57	35	0.025

表-23 対照区と処理区間での供試木の枯死率の比較

実験期間	対照区		処理区		対照区と処理区の枯死率の差に関するFisherの正確確率(P)
	供試木数	枯死木数	供試木数	枯死木数	
1週間目	14	10	38	24	0.417
2週間目	11	9	17	5	0.010
3-4週間目	7	7	1	0	
5-8週間目	6	6	1	0	
9-12週間目	4	1			
13-16週間目	11	0			
合計	43	33	57	29	0.007

方法でセンチウを分離した。

その結果、ポーヴェリア感染により、成虫の1週間以内の死亡率が21%から55%に、2週間以内の死亡率が43%から97%に増加し(図-34)、平均生存期間は36.5日から7.5日に短縮された。実験を通して後食された供試木の割合(後食率)は81%から61%へと減少した(表-22)。さらに、供試成虫の平均総後食面積は、対照区が $9180 \pm 10685 \text{mm}^2$ 、処理区が $805 \pm 1180 \text{mm}^2$ で、ポーヴェリアに感染することで1/10以下に減少した。そして、供試木の枯死率は77%から51%へ低下した(表-23)。枯死したほとんどの供試木

から、センチウが抽出され、枯死はセンチウによるものであると考えられた(表-24)。

このように、実験を通しての後食率や枯死率には、対照区と処理区の間で著しい差が見られたが、実験開始後の時間経過を追ってこれらの値を比較すると、時期により異なった傾向が認められた。すなわち、実験開始後1週目の供試木の後食率や枯死率は、それぞれ対照区が86%、処理区が79%と対照区が71%、処理区が63%で、ポーヴェリア感染による著しい低下はみられなかった。しかし、実験開始2週目の供試木の枯死率や後食率は、それぞれ対照区が

表-24 マツノマダラカミキリによる後食木からのセンチウの分離状況

	対照区		処理区	
	後食木数	分離木数	後食木数	分離木数
枯死木	33	32	29	28
生存木	2	1	6	4
合計	35	33	35	32

79%、処理区が32%と対照区が82%、処理区が29%で、対照区では1週目とほとんど変わらなかったのに対し、処理区では著しく低下した（表-22、23）。

以上のことから、ポーヴェリアの感染は、成虫の生存期間、および後食期間を短縮させるだけでなく、後食活動を抑制し、その結果として、センチウのマツへの侵入を防ぎ、マツの枯死を軽減しうることが明らかになった。しかし、ポーヴェリア感染の効果は、感染直後から発現するのではなく、一定期間（今回の調査では、感染後1週間）を経過した後に現れることも明らかになった。成虫は材から脱出後すぐに後食し始める。鹿児島大学森林保護学研究室で飼育したカミキリでは、成虫が材から脱出した直後からセンチウは離脱し始め、25℃と30℃温度条件下で飼育した29%と36%の個体で、センチウの離脱は成虫の材からの脱出後1週間以内に終了した。このような成虫の脱出直後からのセンチウの離脱が、今回実験開始1週間目の処理区の高い枯死率（63%）を引き起こした原因であると考えられる。

これらのことから、不織布施用は、成虫からのセンチウの離脱が遅い地域では十分に効果的であり得るが、鹿児島のようにセンチウの離脱が成虫の材からの脱出直後からみられる地域では、ポーヴェリア感染の成虫への効果が発現するまでにかなりのセンチウが健全マツに伝播され、十分な防除効果を上げられないこともあると考えられる。したがって、不織布の施用に際しては、ポーヴェリア感染の効果が発現するまで成虫をシート内に留めておく何らかの工夫が必要であろう。

不織布は農薬登録をうけて、バイオリサ・マダラやポーベリアンという商品名で市販されていたが、残念ながらバイオリサ・マダラは2017年春に製造が中止された。

#### 農薬を使用しないカミキリ駆除方法の開発

このように、ポーヴェリアの利用によっても、鹿児島では十分なカミキリ成虫の駆除効果が得られない可能性があることが示唆された。不織布の施用は、気密性の保持が絶対条件とある燻蒸処理に比べると、はるかに制限が少ないが、それでも生菌密度を低下させないよう、通気性の確保

や雨からの保護などに留意する必要がある。ポーヴェリア自体、自然界では普遍的に存在しているので、薬剤散布ほど生態系に影響を及ぼすことはないが、不織布を施用した地点周辺では、一時的にせよポーヴェリアの密度は著しく高まるので、付近の昆虫相や産業（例えば、養蚕業）に影響がないとは限らない。

山口県農林総合技術センター、カモ井加工紙株式会社、井筒屋化学産業株式会社、鹿児島大学農学部森林保護学研究室では、粘着性物質を付着させた約5mmメッシュのネット（以下、粘着ネット）を用いた成虫の駆除方法の開発を行っている。集積した被害材の上に粘着ネットを置き、その上に枝条を乗せ（粘着ネットと全体を覆うシートが引付かないようにするため）、透明な被覆シートで全体を被い、シートが風で飛ばされないように、枝などで下の部分を抑えるという簡単なもので、この方法では、粘着ネットで材から脱出した成虫の45%～78%を捕殺できた。また、シートから脱出した個体はほとんどなく、ほぼすべての材から脱出した成虫が、シート内で死亡したことが明らかになった。2011年に山口県で行った野外での実証試験では、被害木をすべて搬出した区での枯死率が、2010年度から2011年度にかけて7.7%から11.4%に、全く防除を実施しなかった区での枯死率は12.7%から28.2%に増加したのに対し、被害木を伐倒・集積し、粘着シートで覆った区では、32.9%から12.1%へ減少した。この結果は、粘着ネットを使用した防除法は、松くい虫の被害発生地でも十分に効果を発揮することができることを示している。桜島のような燻蒸処理の実施しにくい場所のみならず、現在燻蒸処理を実施している場所でも、環境や作業員に対する影響が少なく、扱いが簡単な粘着ネットの使用について検討してもよいのではないかと考えている。現在、粘着ネットをより扱い易くするよう（ネットを設置する際、紙からはがしやすくするなど）改良を重ねている。

なお、この粘着ネットの穿孔性昆虫の被害防止については、平成27年4月3日に発明名称「穿孔性害虫の防除方法」（特許第5722641号）として登録され、現在商品化に向けた現地試験が行われている。

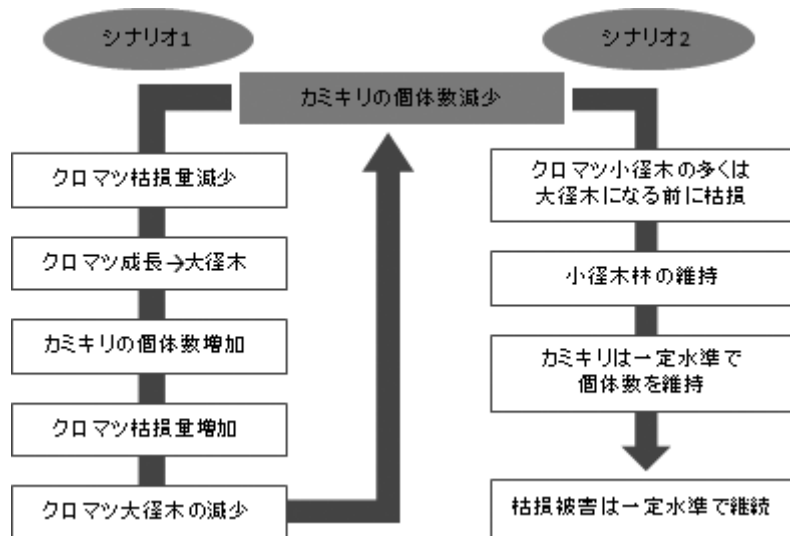


図-35 桜島の材線虫病の推移についてのシナリオ

### 桜島における材線虫病の今後の推移と対応についての私見

1994年に再発した桜島での材線虫病による被害量は、2004年度にピークに達した後は徐々に減少し、2010年度以降激減した。2014年以降の被害量は $10\text{m}^3$ 未満で、ここ5年ほどは、材線虫病はほぼ終息した状態である。今回の調査の最終年である2013年の桜島におけるカミキリの生息数は、ピーク時に比べ著しく減少していた（トラップによるカミキリ捕獲数はピーク時の約 $1/250$ ）（表-14）。それに加え、センチウを保有したカミキリの割合も低下し、センチウを保有したカミキリのセンチウ保有数もきわめて少なかった（表-15）。さらに、桜島ではカミキリの繁殖のための資源的価値が高い大径木の多くが枯死し、大正溶岩と昭和溶岩に覆われた広い面積には、資源的価値が低い小径木のみが多数生育している。小径木では、カミキリの死亡率が高く、樹木あたりの資源量も少ないので、多くのカミキリ成虫が羽化することはない。また、センチウの病原力自体が低下した可能性も明らかになってきた。

これらの情報から、将来の被害の推移には以下の3つのシナリオが考えられる。

シナリオ1： カミキリの捕獲数と、センチウを多く保有するカミキリの割合が減少していることに加えて、クロマツ小径木は大径木に比べて、繁殖する上で効率が良くないため、小径木が多く生育する桜島の現状を考慮した場合、カミキリの個体数は今後も低レベルで推移すると考えられる。その結果、被害はしばらく低水準で継続される。しかし、カミキリやセンチウは桜島で決して絶滅したわけではない。そのため、十数年～数十年後、多くのクロマ

ツ小径木が成長した場合、カミキリはそれらを利用して繁殖し、個体数を増加させる。カミキリの個体数が増加すると、クロマツの枯損量は増加し、大径木が多く枯損する。その結果、大径木の本数が減少すると、カミキリの個体数は再び減少する。その結果、被害の推移は数十年単位で周期変動すると考えられる（図-35）。

シナリオ2： シナリオ1と同様の理由で、カミキリの個体数の減少に伴い、クロマツの枯損量は減少する。小径木林内でカミキリは、比較的大きなクロマツを利用して繁殖することと、被害は枯損木から離れた位置でも均一に発生することを考慮すると、溶岩台地上のクロマツ小径木は、比較的大きなものから枯損し、小径木の多くは大径木に成長する前に枯損するかもしれない。その結果、カミキリは繁殖資源としては価値の低いクロマツ小径木を利用し続け、ある一定の比較的低水準で個体数を維持していき、それに伴って、クロマツ枯損被害も一定の比較的低水準で継続することが予想される（図-35）。

シナリオ3： 桜島の火山活動は2009年から活発になっている（気象庁調べ）。このことから、将来、大規模な噴火が発生することも考えられる。この場合、桜島のクロマツとカミキリは壊滅的な打撃を受け、被害が終息する。

この3つのシナリオの中では、シナリオ1が最も可能性が高いと考えている。2000年以降被害がほとんど出なかった吹上浜でも、2006年以降成長したクロマツに被害が開始、被害量は徐々に増加している。桜島でも、今徹底的な防除を行わなければ、近い将来、1994年から2004年にかけて

での被害の再現になる可能性が、極めて高い。マツ枯れは感染症（流行病）（二井 2003）で、インフルエンザと同様、流行前または流行初期に的確な予防措置を講じることで、蔓延を抑えることができると考えている。1994年以降の急激な被害の拡大を許したのは、残念ながら、被害が侵入し、拡大していく過程で、十分な予防と防除手段が講じられていなかったことが原因であると考えている。防除が奇跡的に（？）うまくいった吹上浜と異なり、桜島のマツの多くは溶岩台地上に生育しているため、被害木を伐倒・処理するために、被害木のもとに行くのは困難であるケースが多々ある。それゆえ、溶岩台地上で多数のクロマツが枯死した場合、全ての被害木を処理することが極めて難しく、未処理木が新たな被害の発生源となり、カミキリの分散力が大きいため、周辺の地域のみならず数キロ離れた場所のマツに被害が発生するであろう。

2013年現在、被害はほぼ終息したとはいえ、カミキリは低密度ながら生息し、センチュウも病原力は低下したとはいえ依然として生息している。今後、生き残った、または新たに発生したクロマツ実生が成長するにつれ、カミキリの繁殖にとっての条件は好転するであろう。現に溶岩台地上に生育するクロマツの中には、年間1m近くの樹高成長を見せている個体もある。その結果、カミキリの個体数は増加し、被害が増すとともに、センチュウの病原力も回復し、これらが更なる被害の増加につながる可能性が高い。このことは、1994年からの被害の蔓延、減退、終息のサイクルが、今後数十年以内に（早ければ10年以内に）繰り返されることを意味している。したがって、被害がほぼ終息した今、少数の被害木を徹底的に伐倒・処理し、カミキリの個体数レベルを極めて低レベルに抑制し続けることが望まれる。桜島特有の地形的な条件として、溶岩台地などの人が容易に近づけない場所が存在する。そのような場所で枯死したクロマツについては、枯死木から羽化・脱出してきた成虫をできるだけ短期間で殺すために、薬剤のスポット散布などの対策を実行することが望ましい。近い将来、被害量が増加する兆しが見られたら、被害量に見合った以上の予算で、あらゆる予防と防除手段を講じる必要があるであろう。被害の拡大する前に適切な対策をとらなければ、すぐに手遅れになるということは、1994年以降の桜島の材線虫病被害への対応から学んだ最大のことで、今回の轍を踏まないために、被害の少ないときに集中的な処置が大切である。そのほうが、結果としては少ない予算で被害対策が可能になる。

これまでの事例の中で、防除がうまくいった沖永良部島は、離島なので、被害材の持ち込みなどの人為的な要因によるセンチュウの持ち込みがなければ、材線虫病の再発の

可能性は極めて低い。それに対し、吹上浜や桜島では、そこで十分な防除対策が講じられていても、周辺のマツ林から材線虫病が拡大してくる可能性は否定できない。現在、吹上浜では、周辺の地域に新たに材線虫病が発生し、そこでの被害の激化、拡大に伴って、吹上浜での被害量が増加している。大隅半島や薩摩半島で被害が再発したときに、桜島でもこのような現象が起きないとは限らない。島内での防除の徹底に加え、周辺に地域での被害のモニタリングも重要となる。

## 引用文献

ここには、前掲した森林保護学研究室の研究論文（卒業論文、修士論文を含む）以外に、本文に引用した文献をリストアップした。なお、森林保護学研究室の論文については、本文中に引用についての記述をしていない。

- Aikawa, T., Togashi, K., and Kosaka, H. (2003) Different developmental responses of virulent and avirulent isolates of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae), to host vector, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Environ. Entomol.* 32: 96–102.
- 在原 登志男 (1984) 松の枯損防止新技術に関する総合研究. 福島県林試研報16: 1–22.
- Asai, E. and Futai, K. (2006) The effects of long-term exposure to simulated acid rain on the development of pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. *For. Path.* 31: 241–253.
- Duddridge, J. A., Malibari, A., and Read, D. J. (1980) Structure and function of mycorrhizal rhizomorphs with special reference to their role in water transport. *Nature* 287: 834–836
- 遠田暢男・五十嵐正俊・福山研二・土屋大二 (1991) 伊豆大島におけるキイロコキクイを媒介者としたマツノマダラカミキリの天敵微生物防除試験. 102回日林論: 281–285.
- 福田健二・鈴木和夫 (1988a) マツ材線虫病の病徴と進展と水分生理特性の変化. 日林誌70: 390–394.
- 福田健二・鈴木和夫 (1988b) クロマツ苗の材線虫病における水分特性の変化と水分欠乏による変化との比較. 東大農演習林報 80: 25–35.
- Futai, K. (2003) Role of asymptomatic carrier trees in epidemic spread of pine wilt disease. *J. For. Res.* 8: 253–260.
- 二井一禎 (2003) マツ枯れは森の感染症. 222pp, 文一総合出版, 東京.



- 二井一禎・古野東洲 (1979) マツノザイセンチュウに対するマツ属の抵抗性. 京大農演報 51: 23-36.
- Ichihara, Y., Fukuda, K., and Suzuki, K. (2000) Early symptom development and histological changes associated with migration of *Bursaphelenchus xylophilus* in seedling tissues of *Pinus thumbergii*. Plant Dis. 84: 675-680.
- Ikeda, T. and Ohtsu, M. (1992) Detection of xylem cavitation in field-grown pine trees questioning using the acoustic emission technique. Ecol. Res. 7: 391-395.
- 井上 悦甫 (1985) マツノマダラカミキリの個体数変動とその要因. 岡山県林試研告6: 46-61.
- Iwahori, H. T., Kanzaki, N., Izui, K., and Futai, K. (1998) PCR-RFLP and ribosomal DNA of *Bursaphelenchus xylophilus* nematodes related to pine wilt disease. Fundam. Appl. Nematolo. 21: 655-666.
- Iwao, S. (1972) Application of the m\*-m method to the analysis of spatial patterns by changing the quadrat size. Res. Popul. Ecol. (1972) 14: 97-128.
- Iwao, S. (1977) Analysis of spatial association between two species based on the interspecies mean crowding. Res. Popul. Ecol. (1977) 18: 243-260.
- 菊地淳一・都野展子・二井一禎 (1991) マツ材線虫病に対するアカマツの抵抗性因子としての菌根の効果. 日林誌 73: 216-218.
- 岸洋一 (1975) マツノマダラカミキリに対する有機リン単剤と有機リン・EDB混合剤の殺虫力の比較. 日林誌 54: 334-338.
- 岸 洋一 (1988) マツ材線虫病—松くい虫—精鋭. 292pp、トーマス・カンパニー、東京.
- 清原友也 (1989) マツ材線虫病の病原学的解明. 林試研報 353: 127-176.
- 清原友也 (1990) マツ材線虫病における誘導抵抗性. 日本農芸化学会誌 64(7): 1251-1253.
- Kiyohara, T. and Bolla, R. I. (1990) Pathogenic variability among populations of the pinewood nematode. *Bursaphelenchus xylophilus*. For. Sci. 36: 1061-1076.
- 小林一三 (1979) 関西地方における2年連続の異常気象と松くい虫被害の激化. 森林防疫28: 80-84.
- Mamiya, Y. (1972) Pine wood nematode, *Bursaphelenchus lignicolus* Mamiya and Enda, as a causal agent of pine wilting disease. Rev. Plant Prot. Res. 5: 46-60.
- 三浦香代子・阿部剛俊・中島嘉彦・浦野忠久 (2003) 野外においてマツノマダラカミキリ穿入丸太に放飼したサビマダラオオホソカタムシの寄生率と移動分散. 日林誌 85: 12-17.
- 中村克典 (2010) 北上するマツ材線虫病. 森林科学59: 35-38.
- 岡部武治・中嶋清明・高井一也・鈴木敏雄・樋口俊男 (2001) *Beauveria bassiana* を培養したシート型不織布帯製剤によるマツノマダラカミキリ成虫駆除. 日林九支研論54: 115-116.
- 酒井康子・小坂肇・秋庭満揮 (2007) 弱病原力マツノザイセンチュウの前接種によるリュウキュウマツのマツ材線虫病に対する誘導抵抗性. 日林誌 89: 102-106.
- 柴田 叡弐 (1989) マツノマダラカミキリとスギカミキリの生態に関する研究比較. 奈良県林試研告19 (別冊): 98pp.
- 島津光明 (1993) 種駒に培養した天敵微生物ボーベリア菌を利用するマツノマダラカミキリ防除法. 森林防疫42: 232-236.
- Shimazu, M. (2004a) Effects of temperature on growth of *Beauveria bassiana* F-263, a strain highly virulent to the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus*, especially tolerance to high temperature. Appl. Entomol. Zool. 39(3): 469-475.
- Shimazu, M. (2004b) A novel technique to inoculate conidia of entomopathogenic fungi and its application for investigation of susceptibility of the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus*, to *Beauveria bassiana*. Appl. Entomol. Zool. 39: 485-490.
- スミパイン技術レポート編集委員会 (2001) スミパイン® 乳剤およびスミパイン® MCに関する技術レポート (普及第3版). 62pp、住友化学工業株式会社、東京.
- 鈴木和夫 (1984) マツの水分生理状態と材線虫病の進展. 林試研報325: 97-126.
- Takemoto, S. (2007) Virulence evolution of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Program and abstracts of international symposium on pine wilt disease in Asia. Kyoto Univ. P. 20.
- 竹常明仁 (1983) マツノマダラカミキリの個体数変動調査と天敵生物による防除試験. 広島県林試研告18: 39-62.
- 富樫一巳 (1989) マツノマダラカミキリの個体群動態とマツ材線虫病の伝播に関する研究. 石川県林試研告 20: 1-142.
- Togashi, K. (1990) A field experiment on dispersal of newly emerged adults of *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae). Res. Popul. Ecol. 32: 1-13.
- 富樫一巳 (1991) シミュレーションによるマツ材線虫病防除技術の評価. 林業と薬剤 116: 1-10.
- 吉田成章 (2005) マツ材線虫病の予防にあたって必要な防



除率の提案. 森林防疫 51 : 111-115.

由井正敏 (1993) マツノマダラカミキリを捕食する鳥類.  
森林防疫42 : 105-109.

Watanabe, H. (1983) Effects of repeated aerial application of insecticides for pine-wilt disease on arboreal arthropods in a pine stand. J. Jap. For. Soc. 65: 282-287.