

松くい虫の総合的防除

(県単課題 平成8年～12年度)

在原登志男

目 次

要 旨	73
はじめに	74
第1章 海拔高ごとのマツ枯れの発生状況と枯損木に対するカミキリムシ類の生息状況	75
第1節 マツ枯れの発生状況と海拔高	
第2節 会津地方における低および高海拔地のマツ枯損木に対するカミキリムシ類の 生息状況と線虫保持数	
第2章 各種資材の土壌施用によるマツ幼齢木の枯損防止効果と枯損を免れた個体における 線虫の消長	85
第1節 各種資材の土壌施用によるマツ幼齢木の枯損防止効果	
第2節 線虫を接種したマツ幼齢木の枯損経過と枯損を免れた個体における線虫の消長	

要 旨

1. 本県における材線虫病によるマツ枯損状況は、海拔高ごとに異なる傾向が見られたので、その実態を調査した。マツ枯損は低海拔地ほど著しかったものの、海拔高がおおむね350 mを越えると、通常の枯損木伐倒駆除事業が実施されている地域では、単木枯損が散見される微害状況を呈した。微害状況を呈する地域における気象値の平均は、MB指数でおおむね20以下、真夏日で10日未満および夏期の平均気温でほぼ21℃以下であった。これに対し、弱害以上の被害状況を呈する地域における気象値の平均はこれらを上まわった。
2. 海拔高によるマツ枯損の発生状況の差違をマツノザイセンチュウを媒介するカミキリムシの側面から検討するため、会津地方の低および高低海拔地で夏～秋にかけて発生した枯損木を伐倒し、線虫を保持するカミキリムシ類の生息状況等を調査した。その結果、高海拔地でマツ枯損が微害状況を保つ要因は、一つ目に海拔高の高まりによって気温が低下することによるカミキリムシの産卵期間の激減、二つ目に高海拔地では広範囲に広葉樹林が残っていることが多く、天敵昆虫類が広く分

受理日 平成13年2月28日

布することによるマツ樹体内におけるカミキリ幼虫死亡率の増加にあるものと推定された。

3. 木炭や粉炭などを土壤施用し、施用量とマツ枯損防止効果および菌根菌の繁茂状況を調査した。その結果、木炭を壤土および埴土に $1\text{kg}/\text{m}^2$ 施用して深さ 20～30cm の土層に混入すると、施用 2 年目からマツ細根にかなりの菌根菌が繁茂し、ある程度枯損が抑制された。
4. マツノザイセンチュウを接種し枯損を免れたマツ幼齢樹体内における線虫の消長について調査した。線虫の感染を受け枯損を免れた個体においても、感染年に大なり小なりの通水障害（辺材部の壊死）が発生し、かつ線虫は樹体内で数年間生息し続けた。しかし、感染翌年以降の枯損については、一部の個体で引き起こされたものの大部分は枯損に至ることなく、線虫はその後年数の経過とともに死滅するものと予想された。

はじめに

本県にマツ材線虫病が侵入して約 25 年を経過した。マツ枯損は、海拔高が高まると気温の低下などにより制限要因が働いて発生量そのものが少ないと報告されている (15)。また、木炭は強アルカリ性の素材であるため、土壤施用するとアマタケ、ハツタケ、シモコシ等の担子菌類、いわゆる菌根菌が繁殖しやすい。そのため、マツ類は夏期に水分ストレスが生じにくくなり、材線虫病による枯損に防止効果が働くといわれている (14)。さらに、マツノザイセンチュウをマツ生立木に接種し、発病から枯死に至るまでの線虫の移動や増殖経過については、その全貌がおおむね明らかにされている (13, 15) が、枯損を免れたマツ樹体内における線虫の消長についてはほとんど調査されていない。

本研究では、まず海拔高の違いによるマツ枯損の実態を明らかにし、気象値との関係を検討することとした。次に、海拔高によるマツ枯損の発生状況の差違をマツノザイセンチュウを媒介するカミキリムシの側面から検討した。また、木炭等の資材を土壤施用し、施用量とマツ枯損防止効果および菌根菌の繁殖状況を調査した。さらに、マツノザイセンチュウを接種し枯損を免れたマツ幼齢個体内における線虫の消長を調査した。

第1章 海拔高ごとのマツ枯れの発生状況と枯損木に対する カミキリムシ類の生息状況

第1節 マツ枯れの発生状況と海拔高*

I 目的

福島県にマツ材線虫病が侵入して約25年を経過した。被害は1976年2月に郡山市の海拔高240～250mの地域で初めて確認され、また同年6月にはいわき市および相馬市の海拔高20～120mの地域でも相次いで発見された。そして、6年後の1982年には、中・浜通りの低海拔地帯一円に蔓延した。一方、海拔高がほぼ500mに位置する南会津地方、および400～460mの阿武隈山地で被害の発生を見たのは1983年以降であった(10)。しかし、高海拔地である南会津地方および阿武隈山地のマツ枯損は猛暑の年や翌年に多発し(11)、平年並みの夏の暑さでは沈静化した。

このように福島県におけるマツ枯損の発生状況は海拔高により明らかに異なる傾向にある。そこで、海拔高による被害実態を明らかにし、気象値との関係を検討した。

II 試験方法

マツ枯損の発生状況調査は、1999年10月上旬から11月上旬にかけて行った。調査地は中通りの郡山市を中心とする県中地区および福島市を中心とする県北地区、そして浜通りのいわき市および双葉地区の計4地区とした。

調査は各地区において低海拔地から高海拔地に続く道路を2,3本選定し、連続するマツ林の場合は数百m毎に1か所、孤立林の場合は林毎におおむね0.3～0.5haの林分を対象として行った。マツ枯損の状態は、岸の報告(15)に準じて区分した。すなわち、微害は枯損木が観察されないか、あったとしても単木枯損が散見される程度の枯損状況、また弱害は枯損木が散在する状況、さらに中害は枯損木が目立ち集団枯損の始まった状況とした。そして、激害はマツ枯損が集団化している林分、激甚害はほぼ崩壊状態のマツ林とした。

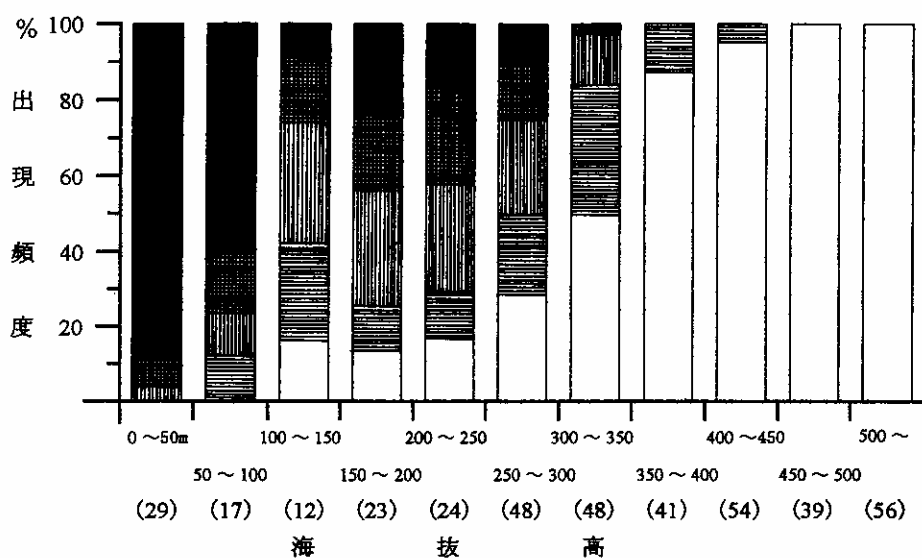
気象値は、海拔高約600m以下に位置する地域気象観測所を18か所選定し、マツ枯損との関連性が高かった因子(6)のうち夏期(6,7,8月の平均)の気温と真夏日(日平均気温が25℃以上)の日数、およびMB指数(15℃を越える月平均気温から15℃を引いた残差の年間合計値)を算出し、分析に供した。なお、気象値はアメダスによる観測が始まった1977年から1998年までの22年間の値を用いた。

III 結果と考察

海拔高ごとのマツ枯損発生状況を図—1に示す。これによると、激甚害の発生は低海拔地ほど頻度が高く、また、海拔高250～300mでも8%の林分で認められた。中害は100～300mの地点ではお

* 本節は東北森林科学会誌(8)に発表したものである。

おむね 30 % の林分で見られた。



図一1 中・浜通りにおける海拔高ごとのマツ枯損発生状況

■：激甚害，■：激害，■：中害，■：弱害，□：微害。

() は海拔高ごとの調査か所数 (か所)。

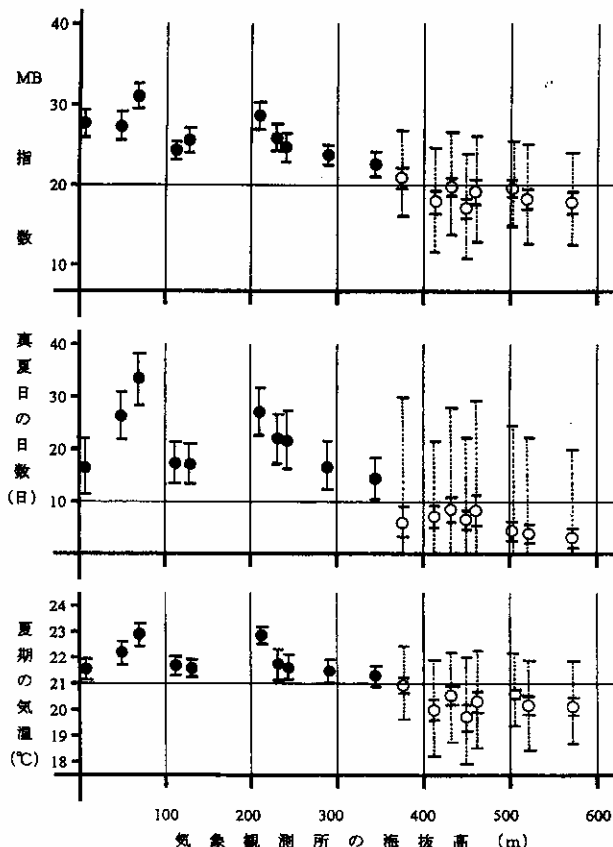
次に、弱害の発生状況を見るとピークは 300 ～ 350 m の林分で 33 % であったが、さらに 350 ～ 400 m、400 ～ 450 m でもそれぞれ 12 % および 4 % の林分で認められた。なお、350 m を越える林分では古い枯損木がかなり認められたことから、防除の遅れが原因でマツ枯損が局所的に発生しているとも考えられた。ちなみに、海拔高が 390 m ほどに位置する福島空港近辺では、造成中の 1980 年後半時はマツ枯れが放置されて局所的に枯損が目立ったが、現在は枯損木の伐倒駆除事業が実施されてマツ枯損の観察されない微害状態となっている。このことから、海拔高が 350 m を越える林分にあっても防除の実施がなければ、マツ枯れが停止せず弱害の様相を呈するものと考えられた。一方、微害林は海拔高の上昇とともに増加し、300 ～ 350 m で 50 %、350 ～ 400 m で 88 %、400 ～ 450 m では 96 % の林分を占め、450 m を越えると 100 % となった。

海拔高が高まると、気温の低下などによりマツ枯れに制限要因が働いて発生量そのものが少ないことが報告されている (15)。また、低海拔地に比べ枯損時期が遅れるためか、枯損木当たりのカミキリムシ類の生息数が少ないことが明らかになっている (第1章第2節)。これらの条件が重なり、海拔高がおおむね 350 m を越える地点では通常のカミキリ木伐倒駆除事業を実施するとかなりの防除効果が得られ、被害の拡大はほとんどないと考えられる。

図一2には微害状況を呈する林分における気象の特徴を明らかにするため、各気象観測所付近のマツ枯れの状況と各種気象値を示した。MB 指数の平均値をみると、弱害以上の発生地は 20 を越えたのに対して、海拔高が 400 m 弱以上の微害地ではおおむね 20 以下であった。また、真夏日の平均日数は前者で 10 日を大幅に越えたが、後者では 10 日に満たなかった。さらに、夏期の平均気温は前者で 21 °C を越えたが、後者ではほぼ 21 °C 以下であった。なお、高海拔地であっても猛暑の年の気象値は低海拔地の平年並みに準じる値を示した。

表一 高海拔地における年度ごとのマツ枯損材積 (m³)

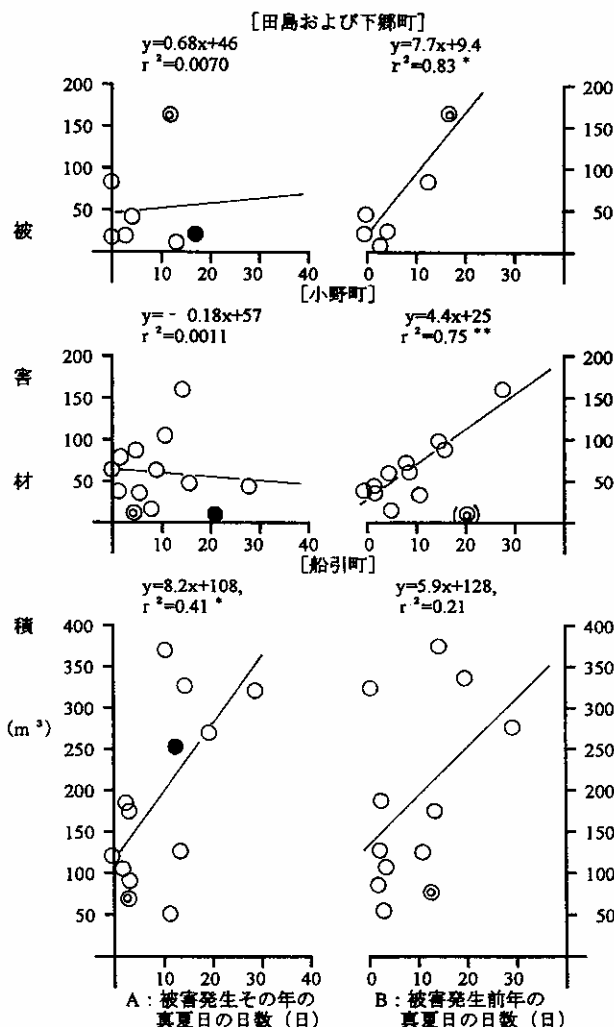
町名 \ 年	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
田島および下郷町	22	165	81	40	20	20	9	—	—	—	—	—	—	—
小野町	—	1	7	14	77	36	47	86	60	60	40	162	100	30
船引町	—	225	67	188	104	85	124	172	51	120	320	275	334	375



図二 各気象観測所の気象値とその周辺におけるマツ枯れの状況

○: 平均値。白抜きは微害地, 黒塗りは弱害以上地。

実線は 95% 信頼区間, 点線は最大・最小範囲。



図三 高海拔地におけるマツ枯損材積と夏の暑さ

●: 被害初発年, ◎: 被害発生2年目, ○: 被害発生3年目以降

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

表一には、高海拔地における年度ごとのマツ枯損材積 (県森林保全課および森林整備課調べ)

) を示した。田島および下郷町においては、1981

年から 1982 年にかけて両町の境界近くに多量の被害材が持ち込まれたが、被害の発現は線虫感染 2, 3 年後の猛暑の年の 1984 年 (II) であった。被害量は 1985 年に最大の 165 m³ を記録し局所的に弱害の様相を呈したが、その後は漸減をたどった。なお、被害マツ林は海拔高がほぼ 480 m 前後に存在したが、隣接する会津若松市の被害林から 20km 以上も離れており、線虫を保持したカミキリの飛び込みが考えられない位置にあった。

小野町における被害の初発は 1985 年で 1 m³ であり、3 年後の 1988 年には 77 m³ を記録し局所的

に弱害の様相を呈した。その後、被害は年度ごとに増減を繰り返す、現在は微害状態を保っている。被害マツ林は海拔高 420 m から 460 m 前後に存在したが、隣接する町村の被害林から 4km 以上離れており、線虫を保持したカミキリの飛び込みは少ない位置にあった。

一方、船引町では 1985 年に 225 m³ の被害が発生した。その後、被害は年度ごとに増減を繰り返して 1997 年には最大の 375 m³ に達し、現在は微害および局所的な弱害状態にある。被害マツ林は海拔高 400 m から 450 m 前後に存在したが、前二者とは異なり隣接する低海拔地の三春町の被害林から容易にカミキリの飛び込みが考えられる位置にあった。

図—3には、被害林分の最寄りの気象観測所における真夏日の日数を夏の暑さの指標とし、高海拔地における枯損発生量との関係を示した。なお、田島および下郷町の被害林の最寄りの気象観測所は田島町にあったものの、海拔高が 570 m に位置し被害林とはほぼ 100 m の高低差があった。そこで、高度 100 m 上昇に伴う気温減率 0.6 °C を用いて被害林の真夏日の日数を算出した。ただし、小野町および船引町では被害林と観測所の高低差が 10m 強であったので、気温の補正は行わなかった。

田島および下郷町における被害量とその年の真夏日の日数間（図—3, A 上）には、有意な直線関係は認められなかった ($r^2 = 0.0070$, $p > 0.05$)。しかし、被害発生 2 年目の 1985 年以降の被害量とそれぞれの年の前年の真夏日との間（図—3, B 上）には、有意な直線関係が成立した ($r^2 = 0.83$, $p < 0.05$)。すなわち、前年の真夏日の日数が多いほど、当年の枯損量は増加した。田島および下郷町では 1981 年、1982 年の真夏日は各々 0, 1 日で、被害木が持ち込まれ羽化脱出したカミキリによって付近のマツが線虫の感染を受けたが、軽度な部分枯れ (22) 等で推移し目立った枯損の発現はなかったと判断される。しかし、線虫の感染 2, 3 年後に真夏日が 17 日という記録的な猛暑が訪れると一気に全身枯れが出現した。マツ枯損のピークを翌年に迎えたが、期間内に新たな被害材の持ち込みがなくかつ防除効果もあって、被害発生翌年以降の被害量は前年の真夏日の減少に比例してマツ枯れが漸減し、ついには発生しなくなったものと理解される。

さらに、小野町における被害量とその年の真夏日の日数間（図—3, A 中）にも有意な直線関係は認められなかった ($r^2 = 0.0011$, $p > 0.05$)。しかし、発生 3 年目の 1987 年以降の被害量とそれぞれの年の前年の真夏日との間（図—3, B 中）には、有意な直線関係が認められた ($r^2 = 0.75$, $p < 0.01$)。すなわち、小野町も田島町と同様で、被害発生 3 年目からは前年の真夏日の増減に対応してマツ枯れが発生する傾向が認められた。なお、マツ枯れの増加をみた年度の前年の真夏日の日数は 15 日以上であった。

一方、船引町における被害量とその年の真夏日の日数間（図—3, A 下）の関係は、直線回帰に適合し ($r^2 = 0.41$, $p < 0.05$)、夏が暑いほどマツ枯れが多発する傾向を示した。ちなみに、田島および下郷町や小野町でみられたような被害量と前年の真夏日の日数間（図—3, B 下）の直線関係は明らかではなかった ($r^2 = 0.21$, $p > 0.05$)。線虫の感染から枯損発現までの期間は、感染年の夏の暑さや感染木の太さ (4) およびマツの立地環境によって変化することが予想されるが、当地においてはこれらの現象と低海拔地からのカミキリの飛び込みなどによって、複雑なマツ枯損の経過をたどったものと推察される。

以上の結果から、福島県においては海拔高が 350 m を越えると、マツ枯損と関連性の高い気象値の

低下が著しく、マツ枯れの発生量が少なくなると考えられる。そのため、低海拔地からカミキリの飛び込みが少なくかつ新たに感染源の人為的な移入がない場合、高海拔地におけるマツ枯れは通常の防除事業により微害状態を保つものと推定される。

第2節 会津地方における低および高海拔地のマツ枯損木に対するカミキリムシ類の生息状況と線虫保持数

I 目的

福島県における材線虫病によるマツ枯損状況は、海拔高がおおむね350 mを越える高海拔地で通常の枯損木伐倒駆除が実施されている林分にあつては、枯損木が観察されないか、あつたとしても単木枯損が散見される微害状況を呈した。これに対して、350 m未満の低海拔地では駆除の実施にもかかわらず弱害以上を呈することが多く、マツ枯損が散在または集団的に発生している(第1章第1節)。

海拔高によるこれらマツ枯損の発生状況の差違をマツノザイセンチュウ(以下、線虫)を媒介するカミキリムシの側面から検討するため、会津地方の低および高低海拔地で夏～秋にかけて発生した枯損木を伐倒し、線虫を保持するカミキリムシ類の生息状況等を調査した。

II 試験方法

1996年から1999年の4か年間、会津地方において夏から秋にかけて枯れたものと推定されるマツ枯損木(樹冠部に過半以上の褐変葉が着生)を選定し、10月末から11月にかけて伐倒した。ただし、1998年に選定した海拔高400 mに位置する高郷村地割の調査木1本は、樹冠全体が褐変せず部分枯れ状態にあつたため枯損部

(枯れ枝)のみを切断した。

調査木の選定年、場所および本数などは表-2に示す。本数は300 m以下の低海拔地で13本、360 m以上の高海拔地で9本であつた。調査木は胸高直径を測定後、枝条下部の枝が着生する幹の上、下1 m部の片面を剥皮し材表面積1 m²あたりのカミキリムシ類(ヒゲナ

表-2 調査木の選定年、場所および伐倒本数など

調査木の選定年	調査木の所在地	海拔高(m)	調査本数(本) (胸高直径,cm)	林況(被害区分)
1996年	西会津町新郷	200	3 (23,24,30)	広葉樹林内に散在するアカマツ(弱害)
	高郷村池の原	260	1 (60)	広葉樹林内に散在するアカマツ(弱害)
	山都町舟引	300	1 (46)	広葉樹林内に散在するアカマツ(弱害)
1997年	高郷村川井	240	2 (32,46)	周囲に広葉樹林の残るアカマツ林(中害)
	高郷村川井	260	1 (24)	周囲に広葉樹林の残るアカマツ林(弱害)
1998年	高郷村川井	240	3 (27,30,32)	周囲に広葉樹林の残るアカマツ林(中害)
	高郷村川井	260	1 (35)	周囲に広葉樹林の残るアカマツ林(弱害)
1999年	高郷村川井	240	1 (40)	周囲に広葉樹林の残るアカマツ林(中害)
計	低海拔地	200~300	13	弱害~中害
1997年	熱塩加納村宮川沢	360	3 (31,40,46)	周囲に広葉樹林の残るアカマツ林(微害)
	高郷村磐見	400	3 (38,41,46)	周囲に広葉樹林の残るアカマツ林(微害)
1998年	高郷村地割	400	3 (35,39,43)	周囲に広葉樹林の残るアカマツ(微害)
計	高海拔地	360~400	9	微害

微害: 枯損木が観察されないか、あつたとしても単木枯損が散見される程度の状況。
弱害: 枯損木が散在する状況。
中害: 枯損木が目立ち集団化の始まった状況。

ガモモフトカミキリ, 以下モモフト, を除く)の穿入孔数を求めて、全体の数を推定した(4)。なお、幹部でカミキリムシ類の穿入孔が認められない場合は、枝条部全体を調査し穿入孔数を求めた。次に、穿入孔が多量に認められる部位を1 mほどに玉切つて丸太を採取し、網目が2mm弱の針金芯入り防虫網で作成した筒状物におさめて現地の樹木に立て掛け一冬放置した。

そして翌年、筒状の網内に後食枝を挿入し、5月から8月にかけてマツ丸太から羽化脱出する成虫をおおむね週に一度捕獲した。捕獲した成虫は鋏で細かく切断し、ベルマン法で保持線虫を分離、計数した。なお、1996 および 1997 年に採取したマツ丸太については、翌年度の成虫捕獲後もそのまま現地に放置して、翌々年度に羽化脱出する成虫の線虫保持数を調査した。しかし、1998 年に採取し現地で翌年度羽化脱出をみたマツ丸太、および 1999 年に採取したマツ丸太については 1999 年 11 月に海拔高 260 m の郡山市安積町に運び、2000 年に羽化脱出する成虫を捕獲、線虫保持数を調査した。

2 か年間にわたり成虫を捕獲したマツ丸太（1999 年に採取したマツ丸太を除く）は、その都度回収し、剥皮してモモフトを除くカミキリムシ類の穿入孔および脱出孔を数えるとともに、割材して幼虫の材入時（穿入孔を穿ち始める時期）以降における死亡状況を調査した。なお、死亡要因は次の 4 項目に区分した。穿入孔カラ：穿入孔付近および蛹室内で幼虫が見あたらないもので、蛹室入口に木屑の詰められた形跡のないもの。ただし、枯損から 2 年後の割材であるため、死体が消失した場合も含まれる。天敵昆虫：蛹室入口に詰められた木屑が崩され、幼虫の存在しないもの。鳥類：穿入孔または蛹室の存在する材表面に鳥のつつき跡があり、幼虫の存在しないもの。その他：以上 3 種の要因に属さないもの。

III 結果と考察

低および高海拔地で伐倒した全てのマツ枯損木におけるカミキリムシ類の推定全穿入孔数、そして羽化脱出をみたマツ丸太における穿入孔数および脱出孔数を表—3 に示す。なお、伐倒した枯損木は大径木がほとんどであり、当地における大径木は発病から枯損までに長期間を要するものが多い (4) が、いずれからもカミキリムシの脱出孔は認められなかった。

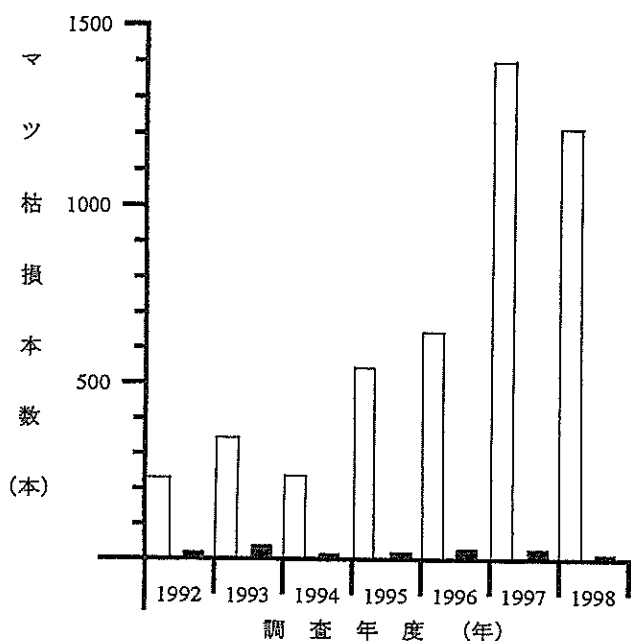
表—3 低および高海拔地で夏から秋にかけて発生したマツ枯損木に対するカミキリムシ類*) の生息状況と採取したマツ丸太からの羽化脱出状況

区分	マツ枯損木			マツ丸太		
	本数(本) ^a	推定全穿入孔数(箇) ^b	b/a(箇/本)	穿入孔数(箇) ^c	脱出孔数(箇) ^d	d/c(%)
低海拔地 (300m以下)	13	1237	95.2	784	200	25.5
高海拔地 (360m以上)	9	358	39.8	325	73	22.5

*) ヒゲナガモモフトカミキリを除く

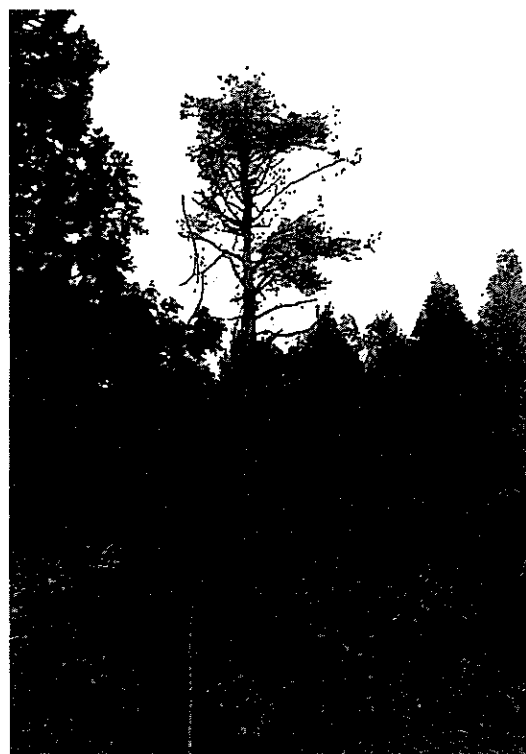
低および高海拔地における枯損木 1 本あたりの推定穿入孔数をみると、前者で約 95 箇所そして後者で 40 箇所となって低海拔地で多かった。しかし、マツ丸太における穿入孔数に対する脱出孔数の比率をみると、前者で 26 % 後者で 23 % となり、低海拔地で若干高かったものの大差は認められなかった。なお、参考までに当該地付近（旧喜多方林業事務所管内）における 1992 年から 1998 年間の、低（海拔高 350 m 未満）および高海拔（同、350 m 以上）地ごとのマツ枯損発生本数を図—4 に示す。高海拔地におけるマツ枯損は低海拔地に比べ明らかに少なく、また調査木を選定した 1996 年から 1998 年の 3 か年の発生数は低海拔地を 100 とすると、2.1 すなわち 1 / 50 ほどにすぎなかった。さらに、高海拔地のマツ枯損発生数は、低海拔地の発生数に正比例して増加する傾向は認められなかつ

た ($r^2 = 0.086, p > 0.05$)。



図—4 旧喜多方林業事務所管内における低 (海拔高350m未満) および高 (同, 350m以上) 地におけるマツ枯損本数

低海拔地におけるマツ枯損: □
高海拔地におけるマツ枯損: ■



図—5 高郷村地割 (海拔高400m) のマツ枯れ
1998 年秋に二股ぎみの幹の片方が枯損, 切断する (樹幹中央部より下方右側に切り口)。1999 年秋は枝条下部の枝が褐変し, 2000 年秋に全体に及ぶ。

表—4 マツ丸太から翌年度羽化脱出したカミキリムシ類の線虫保持状況

カミキリ種	低海拔地			高海拔地		
	マダラ	ヒゲナガ	カラフト	マダラ	ヒゲナガ	カラフト
線虫保持数 (頭)	0	57	1	4	8	7
1-100		20	1	1	8	1
101-1,000		25	1	1	6	2
1,001-5,000		26	3	5	1	1
5,001-10,000		14		3		
10,001<		3		1		
計	145		6	27	3	11
平均保持数 (頭)	1,714		1,089	2,439	1,274	182
最高保持数 (頭)	41,400		2,580	19,970	3,300	1,470
保持率 (%)	61		83	85	100	36
総保持数 (頭)	248,530 (97)		6,534 (3)	65,853 (92)	3,822 (5)	2,002 (3)

総保持数: 羽化脱出総数×平均保持数
()は羽化脱出したカミキリムシの総保持数に対する比率, %
マダラ: マツノマダラカミキリ
ヒゲナガ: ヒゲナガカミキリ
カラフト: カラフトヒゲナガカミキリ

表—5 マツ丸太から翌々年度羽化脱出したカミキリムシ類の線虫保持状況

カミキリ種	低海拔地			高海拔地		
	マダラ	ヒゲナガ	カラフト	マダラ	ヒゲナガ	カラフト
線虫保持数 (頭)	0	11	1	4	4	
1-100		1		2		
101-1,000		1	6	2	1	
1,001-5,000						
5,001-10,000						
10,001<						
計	13	6	1	8	5	
平均保持数 (頭)	14	294	0	95	24	
最高保持数 (頭)	179	485	0	599	120	
保持率 (%)	15	100	0	50	20	

採取したマツ丸太から翌年度および翌々年度、線虫を保持して羽化脱出したカミキリムシ類の保持

状況を表—4, 5 に示した (マツ丸太に付けられた脱出孔数と捕獲頭数が一致しなかったが, 捕獲に失敗したためである。捕獲率は 82 %であった)。なお, この他にモモブトが計 71 頭およびサビカミキリが 1 頭羽化脱出したが, 線虫を保持しなかったので割愛した。また, 筒状の網内に挿入したマ

ツ枝からは後食痕があっても線虫の検出がなかった。

低海拔地において翌年度羽化脱出したカミキリムシ（表—4）は2種で、マツノマダラカミキリ（以下、マダラ）が145頭（総羽化脱出成虫の96%）、カラフトヒゲナガカミキリ（以下、カラフト）が6頭（同、4%）であった。一方、高海拔地は3種で、マダラが27頭（同、66%）、カラフトが11頭（同、27%）およびヒゲナガカミキリ（以下、ヒゲナガ）が3頭（同、7%）であった。ところで、ヒゲナガは通常2年1世代といわれている。ヒゲナガの羽化脱出した丸太は、1998年秋に海拔高400mに位置する高郷村地割で採取したものであったが、既に1997年夏には産卵対象になっていたと考えられる。ちなみに、当該木は2000年11月に全体が褐変した（図—5）。1997年に線虫の感染を受け枝枯れが引き起こされ、ヒゲナガの産卵対象になったと考え、全体の褐変までに丸3年を要したことになる。

羽化脱出したカミキリムシの線虫総保持数（表—4）をみると、低および高海拔地ともマダラの脱出割合が高くかつ平均保持数も多かったため、マダラは前者で全体の97%、後方で92%の線虫を運び出したことになる。なお、マダラの平均保持数は低海拔地で約1,700頭、高海拔地で2,400頭となり、供試虫数が少ないものの高海拔地で保持数が低下するという現象は認められなかった。高海拔地のマツは特に大径木が多く、線虫の感染から発病そして枯死までに低海拔地より長期間を要すると推定される（4）が、樹体の一部でも感染以降の発病、線虫の増殖および枯死経過が、低海拔地のマツ枯損に類似すれば、カミキリムシ類が産卵し、かつ脱出した成虫はかなりの線虫を保持するものと考えられる。

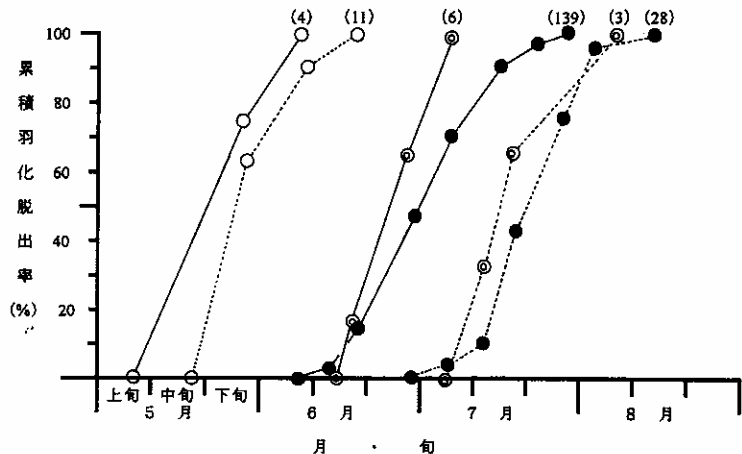
また、マツ丸太から翌々年度羽化脱出したカミキリムシ（表—5）は、低海拔地でマダラ、ヒゲナガおよびカラフトであり、一方高海拔地ではマダラとヒゲナガであった。しかし、羽化脱出した成虫は前年度のものと比較してかなり少なかった。さらに、マダラの平均線虫保持数は両者とも100頭以下、ヒゲナガでは数100頭以下であり、これも前年度羽化脱出した成虫と比較してかなり少なかった。ここで、2か年間にわたり丸太から羽化脱出したカミキリムシの頭数をみると、低海拔地はマダラが158頭（全羽化脱出成虫の92%）、カラフトが7頭（同、4%）およびヒゲナガが6頭（同、4%）となった。一方、高海拔地ではマダラが35頭（同、65%）、カラフトが11頭（同、20%）およびヒゲナガが8頭（同、15%）となって、高海拔地でマダラの割合が減少し、その他のカミキリムシ類の割合が高まった。

1997年から1999年までの3か年間に現地で捕獲したカミキリムシ3種の羽化脱出経過を図—6に示す。カラフトは3種のうち1番早く羽化脱出し、低海拔地での開始期が5月上旬、最盛期が中・下旬で、終了期が6月上旬であった。これに対して、高海拔地ではそれぞれの時期が10日ほど遅れた。一方、低海拔地のマダラは6月上・中旬に脱出を開始して6月下旬から7月上旬に最盛期を迎え、そして7月下旬に終了した。これに対して、高海拔地ではそれぞれの時期が20日ほど遅れた。なお、ヒゲナガの羽化脱出経過はおおむねマダラに準じた。

表—6, 7には、2か年間にわたり成虫を捕獲したマツ丸太の割材結果を示す。丸太は10月末から11月にかけて採取し防虫網内におさめたので、野外における天敵昆虫や鳥類による影響は、主に蛹室内幼虫ステージの前半に限られたことになる。低および高海拔地のカミキリムシ類の蛹室内幼虫期にお

ける累積生存率を比較すると、前者が 29 %，後者が 26.5% となって高海拔地で若干低かった。また，成虫が脱出するまでの最終の累積生存率をみると，低海拔地で 25.6 %，高海拔地で 22.5 % となって後方で若干低く，かつ両者とも材線虫病被害林としてはかなり低い値を示した。ちなみに，マダラ幼虫が穿入孔を穿ち始めた時期を始点とする最終の生存率は，50～70 % 程度 (19) と報告されている。

両者の要因別累積死亡率をみると，



図—6 マツノザイセンチュウを保持したカミキムシ類の累積羽化脱出経過

○：カラフト，●：マダラ，◎：ヒゲナガ，—：低海拔地，
--：高海拔地，() は羽化脱出総数 (頭)。

表—6 低海拔地で採取したマツ丸太内におけるカミキリムシ類の死亡状況

区分	ステージ		蛹	材内成虫	要因別累積死亡率
	穿入時	蛹室内			
総個体数	784	344	227	228	
死亡個体	穿入孔カラ	360			(45.9)
	天敵昆虫	45	101	1	(18.6)
	鳥類	10	3		(1.7)
	その他	25	13	1	25 (8.2)
	計	440	117	1	28 (74.4)
死亡率%	56.1(56.1)	34.0(14.9)	0.4(0.1)	11.5(3.3)	(74.4)
累積生存率%	43.9	29	28.9	25.6	

累積生存率：穿入孔を穿ち始めた幼虫数を始点とする。
() は累積死亡率。

表—7 高海拔地で採取したマツ丸太内におけるカミキリムシ類の死亡状況

区分	ステージ		蛹	材内成虫	要因別累積死亡率
	穿入時	蛹室内			
総個体数	325	119	86	85	
死亡個体	穿入孔カラ	142			(43.8)
	天敵昆虫	40	9		(15.1)
	鳥類	19	9		(8.6)
	その他	5	15	1	12 (10.0)
	計	206	33	1	12 (77.5)
死亡率%	63.4(63.4)	27.7(10.1)	1.2(0.3)	14.1(3.7)	(77.5)
累積生存率%	36.6	26.5	26.2	22.5	

累積生存率：穿入孔を穿ち始めた幼虫数を始点とする。
() は累積死亡率。

穿入孔カラと天敵昆虫の合計値が低海拔地で 64.5 %，高海拔地で 58.9 % となり，死亡の大部分を占めていた。穿入孔カラの原因は主に幼虫同志のカミ合いと天敵昆虫 (捕食虫) (1) であり，当地域では天敵昆虫による死亡が極端に多かったものと推定される。ちなみに，マツ丸太の割材時には，両者ともかなり頻繁にオオコクヌスト等の捕食虫が観察された。調査木採取地周辺の林況 (表—2) をみると，いずれも広範囲に広葉樹林が残っており，このため天敵昆虫 (オオコクヌスト，コメツキムシ類など) が広く生息し，カミキリ幼虫の死亡率が高まったものと推定される。ただし，この現象が全ての高海拔地で認められるかどうかは，今後とも検討を要する。なお，低海拔地で天敵昆虫類が広く分布した事象は中・浜通りでは認められなかった (1) ことから，会津地方特有の事例と思われる。

低海拔地において，線虫を効率的に媒介するマダラ (21) の羽化脱出開始期は 6 月中旬で，7 月中旬にはおおむね 90 % が脱出した (図—6)。マダラの産卵開始期は，累積羽化脱出率がほぼ 90 % に達した時点から始まることから，産卵は 7 月中旬から始まり，9 月上旬までの 50 日間ほどにわたるものと考えられる。また，孵化した幼虫の数 10 % が翌年度 1 年 1 世代として羽化脱出できる産卵の限界期は，8 月下旬であった (3) ことから，産卵開始期から限界期までの期間は 40 日間ほどと推定さ

れる。これに対して、高海拔地での90%羽化脱出期すなわち産卵開始期は8月上旬(図一6)で、その後産卵は8月下旬までの20日間ほどにわたるものと考えられる。また、1年1世代の成虫が発生できる産卵の限界期は、8月中旬であった(3)ことから、産卵開始期から限界期までの期間は10日間ほどと推定される。すなわち、材線虫病の発生がみられる高海拔地においてマダラが翌年度1年1世代として羽化脱出できる産卵期間は、低海拔地の1/4に過ぎないことになる。そのため、高海拔地における夏から秋の枯損木に対するカミキリムシ類の生息数は、低海拔地と比べかなり少なかった(表一3)。さらに、高海拔地においては、広範囲に広葉樹林が残っているため、天敵昆虫による幼虫の捕食率も無視できない。なお、線虫とマツの側面からは、海拔高が高まり気温が減少すると、マツ枯れに制限要因が働いて発生量そのものが少ない(15)と報告されている。

以上のことから、カミキリムシの側面からみた高海拔地でマツ枯損が微害状況を保つ要因は、一つ目に海拔高の高まりによって気温が低下することによるカミキリムシの産卵期間の激減、二つ目に高海拔地では広範囲に広葉樹林が残っていることが多く、天敵昆虫類が広く分布することによるマツ樹体内における幼虫死亡率の増加にあるものと推定される。

第2章 各種資材の土壌施用によるマツ幼齢木の枯損防止効果と枯損を免れた個体における線虫の消長

第1節 各種資材の土壌施用によるマツ幼齢木の枯損防止効果

I 目的

木炭は強アルカリ性の素材であるため、土壌施用するとアマタケ、ハツタケ、シモコシ等の担子菌類、いわゆる菌根菌が繁殖しやすい。そのため、マツ類は夏期に水分ストレスが生じにくくなり、材線虫病による枯損に防止効果が働くといわれている(14)。また、Ca²⁺は植物代謝生理において重要な役割を果たし(17)、そしてキトサンは幅広い生理活性を有し(18)、マツの健全性を向上させるともいわれている。

そこで、これらの資材を土壌施用し、施用量とマツ枯損防止効果および菌根菌の繁殖状況を調査した。

II 試験方法

郡山市安積町(県林業研究センター構内の苗畑, 壤土, 海拔高 260 m), 保原町赤坂(アカマツ林, 埴土, 同 140 m) およびいわき市平藤間(クロマツ海岸林, 砂土, 同 10 m)において各種資材の土壌施用試験地を 1997 年 2 月に設定し, 根元径 9mm, 高さ 30cm ほどのクロマツ苗を 3 月に植栽した(表-8)。なお, いわきの試験地ではかなりの植え枯れが生じたので, 翌年 3 月に補植を行った。粉炭(木粉炭に木酢液が混入) および長さ 3~4cm に崩した木炭塊の施用量は, 1 m²あたり 1kg および 0.1kg, キトサンは 20 g とし, 耕耘機により土壌を深さ 20~30cm までかき起こして均一に混入した。なお, 有機 Ca 剤の施用は植栽後の 5 月中旬で, 原液を 50 倍に希釈し 5 l (CaO で 10 g) / m² を散布した。

表-8 クロマツ植栽試験地

区分	粉炭		木炭		キトサン 20 g	有機 Ca 剤 (CaO で 10 g)	対 照
	1 kg / m ²	0.1 kg	1 kg	0.1 kg			
郡山	30* ¹⁾	30	30	30	30	30	30
	100* ²⁾	100	100	100	100	100	100
保原	9	9	9	9	9	9	9
	30	30	30	30	30	30	30
いわき	30	30	30	30	30	30	30
	100	100	100	100	100	100	100

* 1) 区の大きさ, m²。 * 2) 植栽本数, 本

表-9 各試験地ごとの接種本数
(本)

区分	郡山	保原	いわき
1997 年	20	5	20
1998 年	20	8	10
1999 年	10	5	10
2000 年	10	5~10	10

線虫の接種時期は 6 月中旬で, 伸長した枝の先端を切断して島原の懸濁液を 1 本あたり 1 万頭 / 0.1ml 接種した。年次, 試験地ごとの供試本数は表-9 に示した。郡山およびいわきの供試本数は各区とも 10 または 20 本を基本としたが, 保原では植栽本数が 30 本と少なかったため 5~10 本とした。接種後の供試木はおおむね 3 か月に一度, 葉部の褐変状況を以下の 5 段階で調査した。①: 接種枝の先端のみが褐変。②: 接種枝とその付近の

枝が褐変。③：全体の1/3が褐変。④：全体の2/3が褐変。⑤：全体が褐変（枯損）。

また、1998年3月には郡山市安積町の苗畑（壤土）において、粉および木炭塊の施用量が1m²あたり10、5、1、0.5、および0.1kgとなるように調整し、深さ25cmの土壌と均一に混入した。調整されたそれぞれの土壌は直径28.5cmの素焼きの鉢に詰め込み、高さ30cmほどのクロマツ苗を植栽した。その後、クロマツを植栽した鉢は苗畑の土壌中に4/5ほど埋め込んだ。各区あての鉢数は10個（クロマツ10本）とし、資材混入のない対照区も設けた。

クロマツの植栽からおおむね3か年が経過した2001年1月、各区あて5本のクロマツについて、鉢から土壌を詰められたままの状態に取り出し、鉢の内壁面にそった土壌の側面における菌糸の繁茂状況を目視により以下の6段階でおおまかに調査した。0：ほとんどなし。1：土壌側面の20%未満で菌糸が繁茂。2：菌糸の繁茂状況が20%以上40%未満（以下、同様）。3：40%以上60%未満。4：60%以上80%未満。5：80%以上。また、根系から土壌を振るい落とし、任意に長さ10cmの細根を10本採取して菌糸の繁茂状況を目視により以下の4段階でおおまかに調査した。0：ほとんどなし。1：一部の部位で繁茂する。2：所々の部位で繁茂する。3：おおむね半分以上の部位で繁茂する。

III 結果と考察

東北地方などの寒冷な地域においては、接種翌年以降にも枯損の発現が認められる（年越し枯れ）。そこで、1997年の接種における3試験地全ての供試木について当年度枯れ（接種翌年の3月までの枯損）、翌年度における累積枯れ（接種翌々年の3月までの枯損、以下同様）そして翌々年度における累積枯れの発生状況を見た。当年度枯れは258本（枯損本数）/315本（供試本数）で81.9%の枯損率となり、翌年度の累積枯損率は83.5%、そして翌々年度の累積枯損率も83.5%に止まった。また、1998年の接種では、当年度枯れが24本/256本で9.4%、翌年度の累積枯れ16.0%、翌々年度の累積枯れ16.8%となり、接種翌年度と翌々年度の累積枯損率には大差が認められなかった。これらのことから、当該試験地の苗木に対する線虫接種の影響はおおむね接種後2年間、すなわち翌年度の累積枯損状況で現せるものと考えられた。

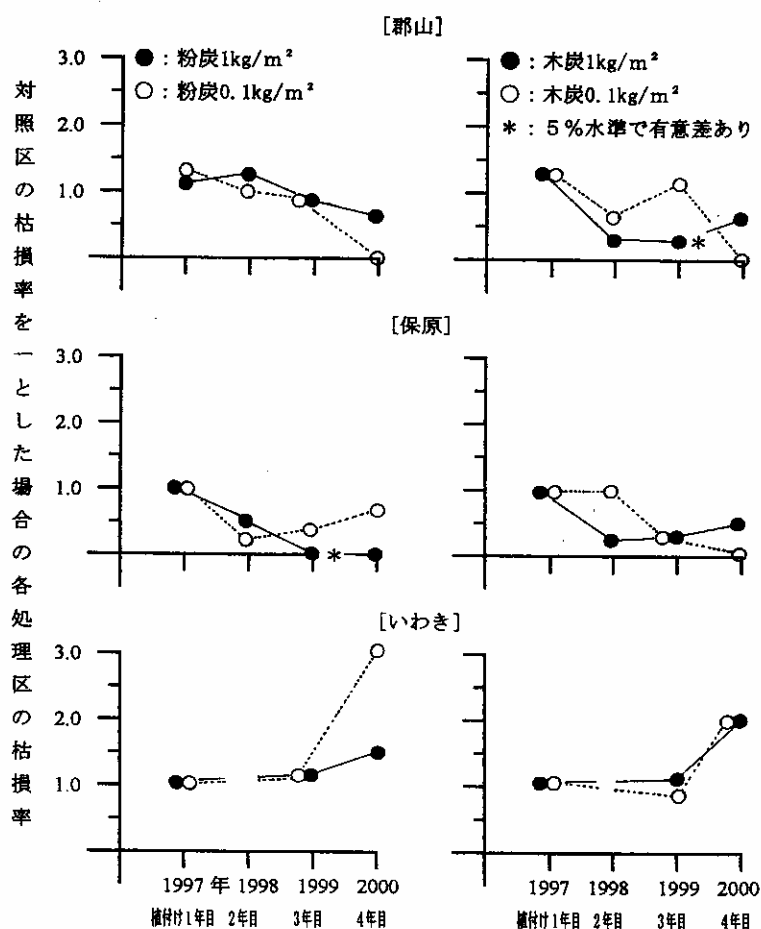
表一10 線虫の接種年度とクロマツ苗の接種翌年度の累積枯損状況

区分	接種年	粉 炭		木 炭		キトサン 20g	有機 Ca 剤 (Ca 10g)	対 照	
		1 kg / m ²	100 g	1 kg / m ²	100 g				
郡山①	1997	12/20(60)	14/20(70)	14/20(70)	14/20(70)	14/20(70)	9/20(45)	11/20(55)	
	②	1998	4/20(20)	3/20(15)	1/20(5)	2/20(10)	3/20(15)	0/20(0)	3/20(15)
	③	1999	6/10(60)	6/10(60)	2/10(20)*	8/10(80)	5/10(50)	4/10(40)	7/10(70)
	④	2000	2/10(20)	0/10(0)	2/10(20)	0/10(0)	2/10(20)	3/10(30)	3/10(30)
保原①	1997	5/5(100)	5/5(100)	5/5(100)	5/5(100)	5/5(100)	5/5(100)	5/5(100)	
	②	1998	2/8(25)	1/8(12.5)	1/8(12.5)	4/8(50)	5/8(62.5)	3/8(37.5)	4/8(50)
	③	1999	0/5(0)*	1/5(20)	1/5(20)	1/5(20)	4/5(80)	1/5(20)	3/5(60)
	④	2000	0/8(0)	1/5(20)	1/7(14.3)	0/5(0)	6/9(66.7)	1/7(14.3)	3/10(30)
いわき①	1997	20/20(100)	20/20(100)	20/20(100)	20/20(100)	20/20(100)	20/20(100)	20/20(100)	
	②	1998	1/10(10)		1/10(10)	0/10(0)	2/10(20)	1/10(10)	0/10(0)
	③③	1999	10/10(100)	10/10(100)	10/10(100)	7/10(70)	8/10(80)	9/10(90)	9/10(90)
	④④	2000	3/10(30)	6/10(60)	4/10(40)	4/10(40)	3/10(30)	3/10(30)	2/10(20)

枯損本数(本) / 供試本数(本), () は枯損率。①：植え付け1年目の接種、②：植え付け2年目の接種、③：植え付け3年目の接種、④：植え付け4年目の接種。*：対照区と比較し、 χ^2 検定により5%の水準で有意差の見られた区。

各試験地の接種翌年度における累積枯損状況を表一10に示す。2000年度の接種については、当然

のことではあるが当年度の枯損率である。植え付け 1 年目接種①の各区の枯損率は郡山（壤土）、保原（埴土）およびいわき（砂土）の 3 試験地とも対照区と比較し統計的な差が認められなかった（ χ^2 検定）。また、植え付け 2 年目接種②も対照区の枯損率が低かったためか、いずれの処理区にも統計的な差が認められなかった。しかし、植え付け 3 年目接種③では、保原の粉炭1kg/m²区と郡山の木炭1kg/m²区で、統計的な差が生じて枯損率の低下が認められた。なお、植え付け 4 年目接種④は対照区の枯損率が低かったためか、いずれの処理区にも統計的な差が認められなかった。ちなみに、これらの検定結果は、期待値が 10 以下となるため信頼性に欠ける嫌いがある。なお、郡山および保原において、1998 年以降の接種木で枯損した個体の主幹部から線虫の分離を行ったが、検出率は 108（検出個体数）／109（枯損個体数）で 99.1%であった。



図一7 対照区の枯損率を1とした場合の粉および木炭処理区における
植え付け経過、接種年ごとの枯損率の変化

(注) 1998 年のいわき市では対照区の枯損率が 0 であった。

信頼性に欠けるものの、 χ^2 検定で有意差の見られた粉炭および木炭施用区について、各試験地における対照区の枯損率を 1 とした場合の枯損率を植え付け経過、接種年ごとに見た (図一7)。ちなみに、値が 1 の場合は枯損率が対照区と同様で、0.5 の場合は半減したことを意味する。これによると、粉炭の 1kg/m² 施用は、保原の植え付け 2, 3, 4 年目で枯損率が低下傾向にあったが、郡山ではこ

の傾向が明らかではなかった。また、粉炭の $0.1\text{kg}/\text{m}^2$ 施用も植え付け 2, 3 年目の保原で枯損率が低下傾向にあったが、これも郡山では明らかではなかった。さらに、木炭の $0.1\text{kg}/\text{m}^2$ 施用では、保原の植え付け 3, 4 で枯損率が低下傾向にあったが、郡山ではこの傾向も明らかでなかった。一方、木炭の $1\text{kg}/\text{m}^2$ 施用については、郡山の植え付け 2, 3 および 4 年目で枯損率が低下傾向にあり、保原においても同様な傾向が見られた。なお、いわきにおいては調査期間中に枯損率の低下は認められなかった。

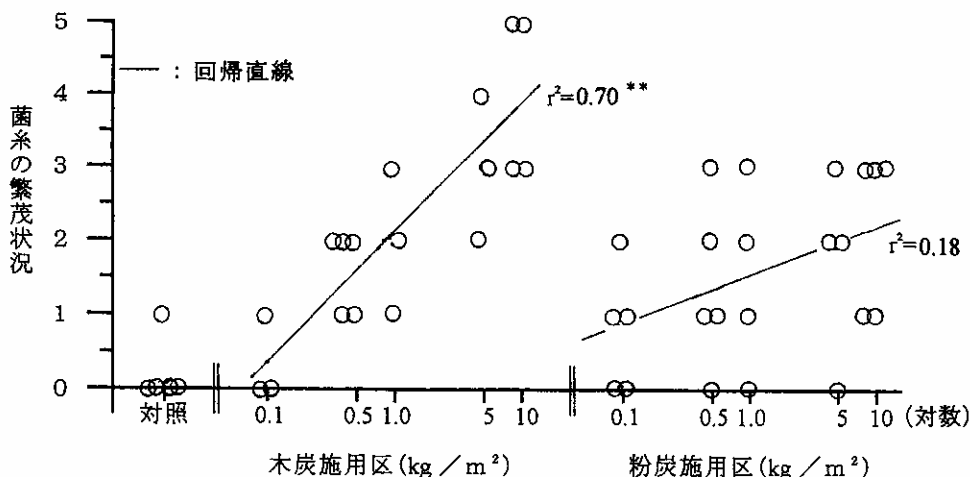
各年度および試験地ごとの χ^2 検定は信頼性に欠けるので、有意差が生じる可能性のある粉炭および木炭施用区について、表—10 の郡山、保原における年度ごとの接種結果を一まとめにして、さらに両試験地の合計値で検定を行った (表—11)。その結果、木炭 $1\text{kg}/\text{m}^2$ 施用区は郡山および保原の両試験地で、施用 2 年目以降のマツ枯損状況に有意差が認められて枯損率が低下した。しかし、粉炭 1kg 施用区では保原のみで有意差が認められるに過ぎなかった。そして、両試験地の合計値では、木炭 $1\text{kg}/\text{m}^2$ 施用区でのみ施用 2 年目以降のマツ枯損状況に有意差が認められ、枯損率が低下した。

これらのことから、 1m^2 あたり CaO で 10g の有機 Ca 単剤および 20g のキトサン単用の土壌混入は、マツ枯損にたいして抑制効果が少ないか、またはないものと考えられた。また、壤土および埴土に対する 1m^2 あたり 1kg の粉炭施用については、効果が不十分と推定された。これに対して、壤土および埴土に対する 1m^2 あたり 1kg の木炭施用は、ある程度マツ枯損に抑制効果が働くもの (14) と考えられた。

表—11 郡山および保原試験地における植栽2年目以降接種のマツ枯損状況

区分	粉炭		木炭		対 照
	$1\text{kg}/\text{m}^2$	100g	$1\text{kg}/\text{m}^2$	100g	
郡山 * 1	12/40 (30)	9/40 (23)	5/40 (13)*	10/40 (25)	13/40 (33)
* 2	8/20 (40)	6/20 (30)	4/20 (20)*	8/20 (40)	10/20 (50)
保原 * 1	2/21 (10)*	3/18 (17)	3/20 (15)*	5/18 (28)	10/23 (44)
* 2	0/13 (0)*	2/10 (20)	2/12 (17)	1/10 (10)	6/15 (40)
合計 * 1	14/61 (23)	12/58 (21)	8/60 (13)**	15/58 (26)	23/63 (37)
* 2	8/33 (24)	8/30 (27)	6/32 (19)*	9/30 (30)	16/35 (46)

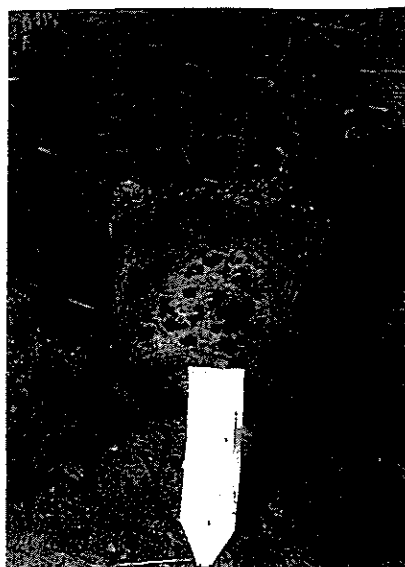
* 1 : 1998年以降接種の合計値, * 2 : 1999年以降接種の合計値。
枯損本数 (本) / 供試本数 (本), () は枯損率。*, ** : 対照区と比較し χ^2 検定により 5%, 1% 水準で有意差の見られた区。



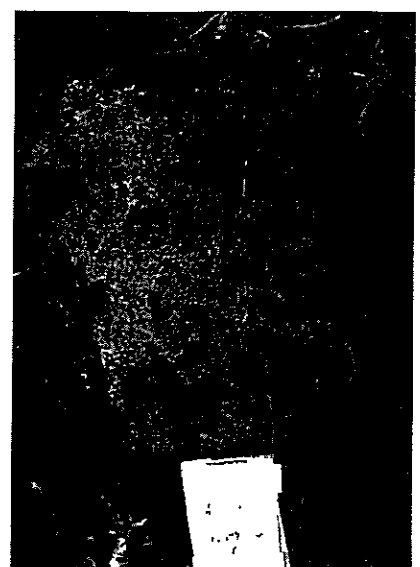
図—8 木炭および粉炭混入マツ植栽鉢における土壌側面の菌糸繁茂状況



図一9 根系の発達が不十分で、土壌側面に細根の少ない個体



図一10 土壌側面における菌糸の繁茂状況5
(側面の80%以上で菌糸が繁茂)



図一11 土壌側面における菌糸の繁茂状況3
(側面の40%以上, 60%未満で菌糸が繁茂)

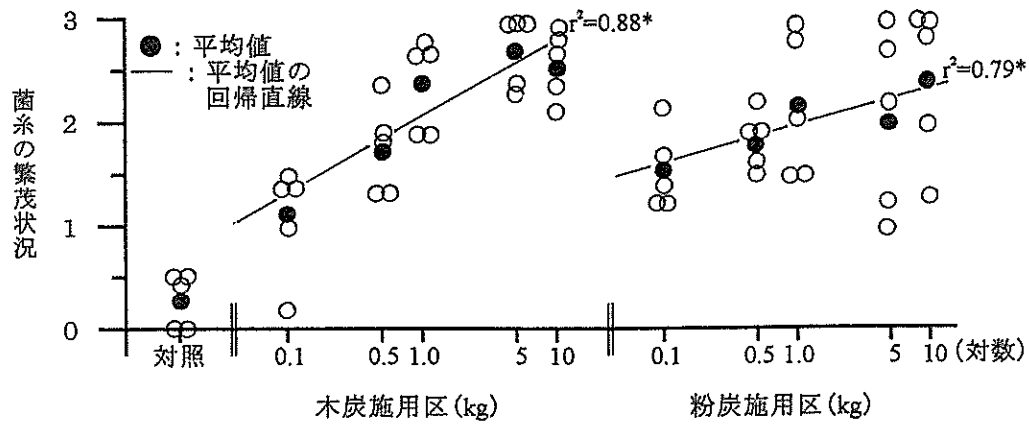


図一12 土壌側面における菌糸の繁茂状況1
(側面の20%未満で菌糸が繁茂)

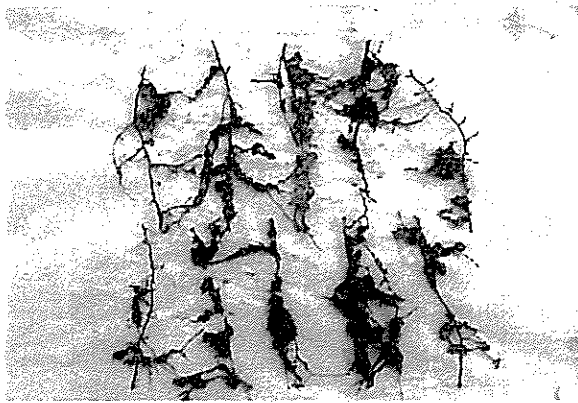


図一13 土壌側面における菌糸の繁茂状況0
(側面にほとんど菌糸が繁茂しない)

図一8には、木炭および粉炭の施用量ごとのマツ植栽鉢における内壁面にそった土壌の側面における菌糸の繁茂状況を示した。なお、マツ根系の発達が不十分で土壌側面に細根が少ないか、あるいは見あたらないもの(図一9)は、調査の対象から外した。これによると、木炭は施用量が増すほど菌糸の繁茂状況がよく、10kg 施用区で3.8, 以下5kgで3.5, 1kgで2.1, 0.5kgで1.5, 0.1kgで0.3となった。これに対して粉炭では、施用量に対して繁茂状況にかなりのバラツキが見られ、かつ木炭とは異なり施用量が増すほど菌糸の繁茂状態がよくなる傾向は認めがたかった。なお、繁茂状況5, 3, 1, 0の状態は図一10, 11, 12, 13に示した。



図一14 木炭および粉炭混入鉢におけるマツ細根に対する菌糸の繁茂状況



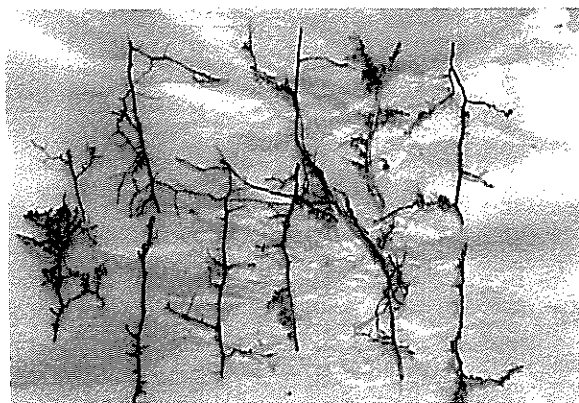
図一15 細根における菌糸の繁茂状況3

(細根のおおむね半分以上の部位で菌糸が繁茂)



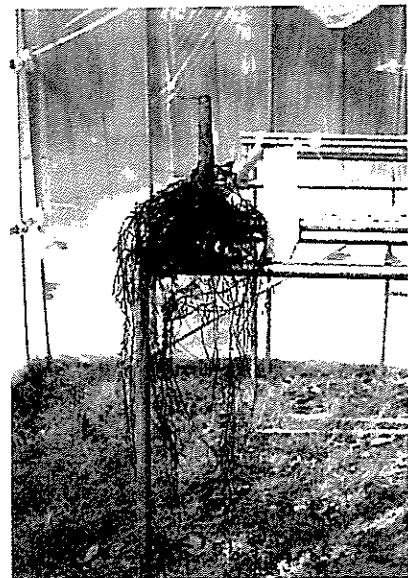
図一16 菌糸繁茂状況3の根系の様相

(根系に団粒状の土壌が菌糸によって多量にからみつく)



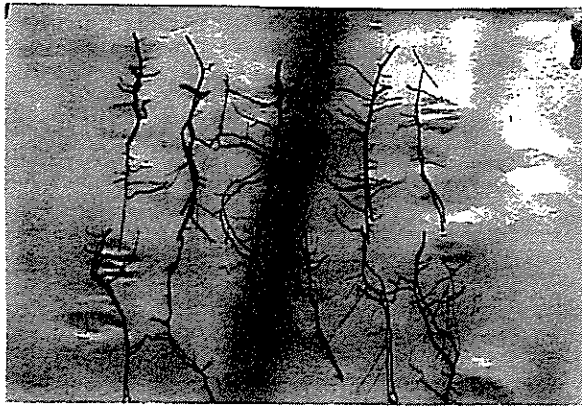
図一17 細根における菌糸の繁茂状況1.5

(繁茂状況3が2本、2 - 所々で繁茂 - が4本、
1 - 一部で繁茂 - が1本、0が3本で、平均1.5)

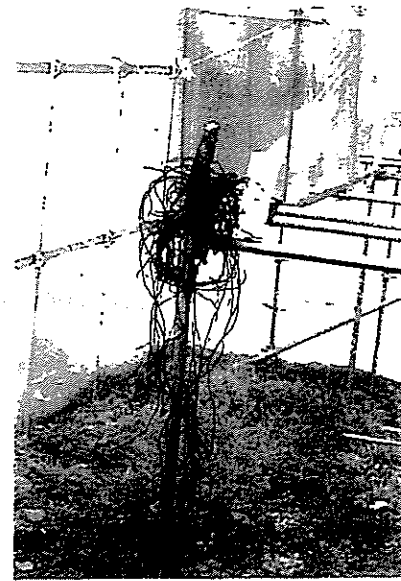


図一18 菌糸繁茂状況1.5の根系の様相

(根系に対する団粒状の土壌のからみ具合は、図一16よりかなり劣る)



図一19 細根における菌糸の繁茂状況0
(細根に菌糸がほとんど繁茂しない)



図一20 菌糸繁茂状況0の根系の様相
(根系に団粒状の土壌が全くからみつかない)

図一14には、木炭および粉炭の施用量ごとの鉢において採取したマツ細根に対する菌糸の繁茂状況を示した。木炭は施用量が増すほど細根における菌糸の繁茂状況がよく、10kg 施用区で2.8，以下5kgで2.6，1 kgで2.0，0.5kgで1.8，0.1kgで1.3となった。しかし、粉炭においては施用量に対して繁茂状況にかなりのバラツキがみられ、かつ施用量が増すほど菌糸の繁茂状況がよくなる傾向は認められなかった。本結果は、鉢内面にそった土壌の側面における菌糸の繁茂状況と傾向が一致した。ちなみに、細根に対する菌糸の繁茂状況および根系の様相は図一15，16，17，18，19，20 に示した。細根に菌糸がよく繁茂するほど、根系に団粒状の土壌がよくからみついていることが分かる。これらのことから、木炭の施用は菌根菌の繁殖を促すものと考えられ、そして木炭をある程度以上施用すると、マツ細根における菌糸はかなりの繁茂状態になるものと予想された。

以上の結果から、木炭を壤土および埴土に1 kg / m²施用して深さ20～30cmの土層に混入することにより、施用2年目からマツ細根にかなりの菌根菌が繁茂し、ある程度枯損が抑制されるものと推定された。なお、本法を実際に野外で活用するためには、マツ枯損を抑制するための適正な木炭の施用量や効果の持続性、また細根に繁茂する菌根菌の同定とその定量的な把握、および大径木への施用法などについても検討する必要がある。

第2節 線虫を接種したマツ幼齢木の枯損経過と枯損を免れた個体における線虫の消長

I 目的

線虫をマツ生立木に接種し、発病から枯死に至るまでの線虫の移動や増殖経過については、その全貌がおおむね明らかにされている(13, 15)。しかし、枯損を免れたマツ樹体内における線虫の動態についてはほとんど調査されておらず、接種後数か月を経過すると樹体内で死滅する(12, 16)と考えられている。

ところで、第2章第1節では、土壤に各種資材を混入後マツ苗を植栽し線虫を接種して枯損調査を行い、各種資材によるマツ枯損の防止効果を検討した。線虫接種後のマツ幼齢木は、土壤混入した資材や接種年の夏の暑さによって枯損状況が異なり、枯死を免れた個体が出現した。本県を含む寒冷な地方においては、線虫の感染から枯死までに長期間を要する個体、また発病と回復を繰り返す個体が観察されている(4)。しかし、これらの個体内における線虫の動態はほとんど不明である。そこで、まず、線虫を接種し枯損を免れた幼齢個体内における線虫の消長を調査した。

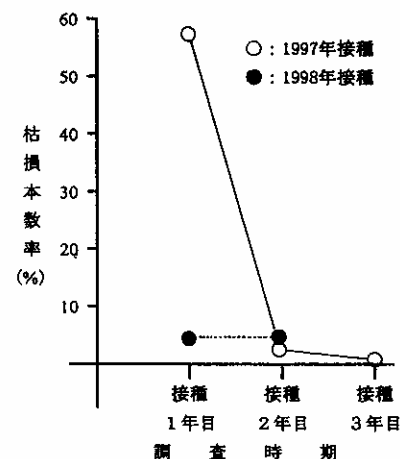
II 調査方法

1997年2月郡山市にある県林業研究センターの苗畑において、木炭・粉炭・キトサン・有機Ca剤などの資材を深さ20～30cmまでの土壤に均一に混入し、それぞれの区に根元径9mm、高さ30cmほどのクロマツ苗木を3月に植栽した。線虫(島原)の接種時期は6月下旬で、伸長した枝の先端を切断して1万頭を接種した。1997年の接種は植栽後間もない苗木、そして1998年は植栽後1年を経過した苗木それぞれ160本(第2章第1節の試験区に新たな資材の混入を加えた8区で、8区×20本)を対象として行った。接種後の苗木はおおむね3か月に一度、葉部の褐変状況を以下の5段階で調査し、全体が褐変した個体にあつては主幹部から線虫の分離を行った。葉部の褐変状況I:接種枝の先端部のみが褐変、II:接種枝とその付近の枝が褐変、III:全体の1/3が褐変、IV:全体の2/3が褐変そしてV:全体が褐変(枯損)。

1997年および1998年の接種から3および2年が経過した2000年3月、前者については26本、後者は24本の生存木を根元から切断して調査木とし、根元径および高さを測定後、幹下部に形成された傷の有無を調査した。そして、過半の調査木については、高さごと数か所の主幹部から円盤を採取して、上面に20%硫酸を塗布後バーナーで加熱し、早期に黒色化する部分を含水率の低い(通水阻害)か所とする簡易検出法(20)により、線虫による通水阻害の発生状況を調査した。さらに、一部の調査木については主幹部から線虫の分離を行い(即日分離)、そして即日分離を行わなかった調査木も含め全ての主幹部をビニール袋におさめて25℃で40日間加温後、線虫の分離を行った(据え置き分離)。

III 調査結果と考察

線虫を接種したマツ苗木の枯損経過を図一21に示す。1997年の接種木は、当年の真夏日(平均気温が25℃以上の日数)が31日と長く比較的暑い夏のためか、接種1年目に92本(線虫検出本数率、100%)が枯れて枯損率は57.5%となった。接種2年目は4本(同率、75%。1本から線虫が検出されなかつ



図一21 線虫接種後のマツ枯損経過

接種1年目:接種年の夏から翌年3月までの期間

接種2年目:接種翌年4月から次(2回目)の3月までの期間

枯損本数率:期間内に枯れた本数/全供試本数

たが、原因は不明)が枯れて2.5%の枯損率(2年目の枯損本数/全供試本数、以下同様)、3年目は1本(同率、100%)で0.6%の枯損率であった。これに対して、1998年の接種木は当年の真夏日が23日と短く比較的冷夏傾向にあったためか、接種1年目に7本(同率、100%)しか枯れず枯損率は4.4%に止まった。そして、2年目も7本(同率、100%)で4.4%の枯損率であった。ちなみに、植栽後2年を経過した1999年の接種木(供試本数80本)の1年目の枯損率は、当年の真夏日が29日と1997年同様に長く比較的暑い夏であったためか、51.3%と高い値を示した。

表一12には、線虫接種翌年の3月(接種1年経過時)における生存木の褐変状況を示した。1997年接種での生存木は、50%弱で全体の1/3が褐変(Ⅲ)、30%ほどで接種枝付近の枝が褐変(Ⅱ)の状況を呈した。これに対して、1998年接種では40%強で接種枝の先端のみが褐変(Ⅰ)、40%弱で接種枝付近の枝が褐変(Ⅱ)と前者より軽い褐変状況を示した。これらの差は、接種年の夏の暑さによって生じたものと思われる。

表一12 接種翌年3月(接種1年経過時)に

おける生存木の褐変状況 (本)		
	1997年接種木	1998年接種木
生存本数	68 (100)	153 (100)
Ⅳ	8 (11.8)	9 (5.9)
Ⅲ	33 (48.5)	22 (14.4)
Ⅱ	20 (29.4)	58 (37.9)
Ⅰ	7 (10.3)	64 (41.8)

Ⅳ:全体の2/3が褐変
Ⅲ:全体の1/3が褐変
Ⅱ:接種枝付近の枝が褐変
Ⅰ:接種枝の先端のみが褐変
()は生存数に対する割合、%

表一13 接種翌々年3月(接種2年経過時)に

おける生存木の褐変状況 (本)		
	1997年接種木	1998年接種木
生存本数	64 (100)	146 (100)
Ⅳ(O)*	10 (15.6)	8 (5.5)
Ⅲ(O)	28 (43.7)	27 (18.5)
Ⅱ(O)	22 (34.4)	96 (65.7)
Ⅰ(O)	4 (6.3)	15 (10.3)

*:1年生葉の褐変(当年生葉の褐変)状況
Ⅳ:全体の2/3が褐変
Ⅲ:全体の1/3が褐変
Ⅱ:接種枝付近の枝が褐変
Ⅰ:接種した枝の先端のみが褐変
O:異常なし

表一13には、線虫接種翌々年の3月(接種2年経過時)における生存木の褐変状況を示した。いずれの接種年においても生存木は、新たに発生した当年生葉には異常が無く、一部の1年生葉で褐変が若干進行したに止まった。なお、1997年接種の3年経過時の生存木は、当年生葉および1年生葉にも異常が認められなかった。

線虫接種後、翌年以降に枯損した個体の褐変状況の変化を表一14に示す。接種翌年に枯損した個体のうち新梢の伸長を伴わず枯損したものは3本(No.1, 2, 3)で、3月時点の褐変状況はⅡ, Ⅲ, Ⅳであった。また、新梢の伸長を伴って枯損したものは8本(No.4およびNo.6~12)で、3月時点の褐変状況はⅠが1本、以下Ⅱ4本、Ⅲ1本およびⅣ2本であった。すなわち、接種

表一14 線虫接種後、翌年以降に枯れた個体の褐変状況の変化

	No.	翌年				翌々年	
		3月*1	6月	9月	12月	3月*2	6月
1997年接種木	1	Ⅱ	Ⅲ(-)*3	Ⅳ(-)	枯損		
	2	Ⅲ	Ⅳ(-)	Ⅳ(-)	枯損		
	3	Ⅳ	枯損				
	4	Ⅲ	Ⅲ(O)	Ⅳ(O)	枯損		
	5	Ⅱ	Ⅲ(O)	Ⅲ(O)	Ⅲ(O)	Ⅲ(O)	枯損
1998年接種木	6	Ⅰ	Ⅳ(O)	Ⅳ(O)	枯損		
	7	Ⅱ	Ⅱ(O)	Ⅱ(O)	枯損		
	8	Ⅱ	Ⅱ(O)	Ⅱ(O)	枯損		
	9	Ⅱ	Ⅱ(O)	Ⅱ(O)	枯損		
	10	Ⅱ	Ⅱ(O)	Ⅲ(O)	枯損		
	11	Ⅳ	Ⅳ(O)	Ⅳ(O)	枯損		
	12	Ⅳ	Ⅳ(O)	Ⅳ(O)	枯損		
	枯損本数				11本		1本

*1:接種1年経過時
*2:接種2年経過時
*3:1年生葉の褐変(当年生葉の褐変)状況
-:新梢が伸長せず

年に致命的な傷害（後述する通水障害）を受けて翌年度に枯損が持ち越した個体は30%弱（No. 5を除く11本中3本—No. 1, 2, 3—）で、残りの70%強（同11本中8本—No. 4およびNo. 6~12—）は新梢の伸長をみて、つまり翌年度に新たに発病・枯損したものと推定された。新たに発病、枯損した個体の3月時点の褐変状況はIからIVとまちまちであり、かつ樹脂の浸出異常を調査したとしても、発病と回復を繰り返しながら全く回復して枯損に至らない個体も存在する(5)ことから、3月時点において生存木が枯損に至るかどうかの判断は極めて難しいと思われる。なお、1997年接種の1本（No.5）は接種翌々年（3年目）に枯損したが、新梢の伸長を伴っていないことから、接種翌年に発病し枯損が次年に持ち越したものと推定された。

1997年および1998年の接種から3年および2年を経過した2000年3月における生存木の形状と線虫の即日および据え置き分離結果を表—15, 16に示す。線虫はいずれの接種年においても即日分離で検出されなかったものの、据え置き分離では3年経過時の生存木で34.6%（表—15）、2年で62.5%（表—16）から検出された。なお、筆者は高さ5m、胸高直径8cmほどのアカマツを対象として、7月から9月の間4回にわたって各24本に線虫を1万頭接種した。そして、翌年2月に針葉に褐変のない個体66本を伐倒し、主幹部を11月まで林内に放置し線虫を分離した。その結果、主幹丸太にはカミキリムシの産卵が認められなかったものの、全てから線虫が検出された(2)。以上の結果は、夏に線虫を接種し枯損を免れた個体であっても翌年3月（接種1年経過時）では、全ての個体において即日分離では検出されないほど低密度ながら、樹幹の一部で線虫が生存したことを意味する。さらに、

表—15 接種3年を経過した生存木の形状と線虫の即日および据え置き分離結果

No.	褐変状況の変化			根元径高さ		幹下部の幹内部の通水		線虫の有無	
	*1	*2	*3	mm	cm	傷の有無	阻害の有無	即日分離	据え置き分離
1	III	III(O)*4	O(O)	26	73	有	有	無	無
2	II	II(O)	O(O)	28	79	無	—	—	有
3	III	III(O)	O(O)	32	97	無	—	—	無
4	II	II(O)	O(O)	41	152	無	—	—	無
5	II	II(O)	O(O)	16	52	有	有	—	無
6	II	II(O)	O(O)	37	121	無	—	無	無
7	III	III(O)	O(O)	32	115	無	—	—	有
8	II	II(O)	O(O)	33	162	無	—	—	無
9	III	III(O)	O(O)	27	77	有	有	—	有
10	II	II(O)	O(O)	28	104	有	有	—	無
11	III	III(O)	O(O)	24	72	有	有	無	有
12	IV	IV(O)	O(O)	22	60	有	有	—	無
13	III	III(O)	O(O)	32	135	無	—	—	無
14	I	I(O)	O(O)	41	142	無	有	—	有
15	I	I(O)	O(O)	33	130	無	有	—	無
16	II	II(O)	O(O)	41	114	無	—	無	無
17	II	II(O)	O(O)	34	135	無	—	—	無
18	II	II(O)	O(O)	28	135	無	—	—	無
19	III	III(O)	O(O)	31	108	有	有	—	無
20	II	II(O)	O(O)	28	110	無	—	—	無
21	II	II(O)	O(O)	27	116	無	有	無	有
22	IV	IV(O)	O(O)	25	69	有	—	—	有
23	III	III(O)	O(O)	28	110	無	—	—	無
24	II	II(O)	O(O)	25	94	無	有	—	無
25	III	III(O)	O(O)	30	107	無	—	—	有
26	III	III(O)	O(O)	32	107	有	有	—	有
線虫の検出数、本(率)								0/5(0%)	9/26(34.6%)
対照-1	O(O)	O(O)	O(O)	43	141	無	無	—	無
対照-2	O(O)	O(O)	O(O)	34	162	無	無	—	無
対照-3	O(O)	O(O)	O(O)	39	185	無	無	—	無
対照-4	O(O)	O(O)	O(O)	40	180	無	無	—	無
線虫の検出数、本(率)								—	0/4(0%)

*1:接種1年経過時、*2:接種2年経過時、*3:接種3年経過時

*4:1年生葉の褐変(当年生葉の褐変)状況、—:未調査

翌々年3月（同2年経過時）にあっても生存木の6割ほどで、さらに次の3月（同3年経過時）にあっても3～4割の生存木で線虫が生存したことを示唆する。

表—16 接種2年を経過した生存木の形状と線虫の即日および据え置き分離結果

No.	褐変状況の変化		根元径高さ		幹下部の 傷の有無	幹内部の通水 阻害の有無	線虫の有無	
	*1	*2	mm	cm			即日分離	据え置き分離
1	II	II(O)*3	38	98	有	有	無	無
2	I	II(O)	33	83	無	有	—	無
3	I	II(O)	31	100	有	有	—	有
4	I	II(O)	38	122	無	有	—	無
5	II	II(O)	30	113	無	有	—	有
6	I	II(O)	42	125	有	有	—	有
7	II	II(O)	28	110	無	無	無	無
8	II	II(O)	29	115	無	有	—	有
9	II	II(O)	38	141	有	有	—	無
10	I	II(O)	45	141	有	有	—	有
11	I	II(O)	35	133	無	無	—	無
12	II	II(O)	39	163	有	有	無	有
13	II	III(O)	28	91	無	有	—	有
14	II	II(O)	36	135	無	有	—	有
15	I	II(O)	42	110	無	有	—	無
16	II	II(O)	40	111	無	有	無	有
17	II	II(O)	35	98	無	有	—	無
18	I	II(O)	34	76	無	有	—	無
19	I	I(O)	31	112	無	有	—	有
20	III	III(O)	29	118	有	有	—	有
21	I	I(O)	37	111	無	有	無	有
22	I	I(O)	38	136	無	有	—	有
23	I	I(O)	38	143	無	有	—	有
24	II	II(O)	36	151	無	有	—	有
線虫の検出数(本率)							0/5(0%)	15/24(62.5%)

*1:接種1年経過時, *2:接種2年経過時, *3:1年生葉の褐変(当年生葉の褐変)状況
—:未調査

接種された線虫は、その後3年以上にわたってマツ樹体内で局所的かつ低密度ながら生存することが示された。ところで、福島県でマツ材線虫病が多量かつ継続的に発生している地域における線虫潜在感染木（線虫が樹体内に侵入してから、発病、枯損するまでかなりの年月を要する個体）の枯損は、感染後3～4年間続くものと推定されており、また枯損量は年を経るほど急激に減少した(7)。このことから、1997年および1998年の接種木においても、今後枯損数が増加に転じるとは考えにくい。すなわち、接種され枯損を免れた個体に局所的かつ低密度に生存している線虫は一部が枯損を引き起こすものの、大部分は枯損を引き起こすことなく、その後年数の経過とともに死滅するものと予想される。

ここで、表—15（接種3年経過時では当、1年生葉いずれも異常なし）および16の接種2年経過時の1年生葉における褐変状況ごとに線虫の据え置き分離結果を集計すると、IV（全体の2/3が褐変）で1本/2本（50%）（線虫検出本数/供試本数、線虫検出率。以下、同様）、III（全体の1/3が褐変）で7本/13本（53.8%）、II（接種枝付近の枝が褐変）で11本/30本（36.7%）そしてI（接種した枝の先端のみが褐変）で5本/5本（100%）となり、褐変状況と検出率には関係が認められなかった。

また、表—15、16で幹下部に発生した傷（発生原因は後述）の有無ごとに線虫の据え置き分離結果を集計すると、傷ありで9本/16本（56.3%）、傷なしで15本/34本（44.1%）となり、傷の有

無と検出率にも関係が認められなかった。しかし、主幹内部における通水障害の有無と線虫の据え置き分離結果を集計すると、障害ありで20本/34本(58.8%)、障害なしで0本/2本(0%)となり、障害なしの該当件数が少ないものの障害ありでのみ線虫が検出された。

図-22に表-15の No.11 (接種3年経過時の生存木) における幹下部に形成された傷と、円盤面に形成された通水障害の発生状況を示す。

線虫は高さ 20cm ほどに位置する枝に接種したが、傷は枝の直下部と高さ 10 cm ほどの部位に形成されていた。また、線虫接種によって生じた通水障害は、接種年の 1997 年までに成長した年輪幅(材部)のみに発生していた。接種枝直下に位置する高さ 19cm の円盤を見ると、接種年までに成長した材部の大部分で通水障害が発生しており、正面に位置する形成層が壊死した。壊死部は現在でも回復せず傷となって幹表面に表れている。さらに、高さ 10cm の円盤を見ると、接種年までに成長した材部の一部で楔形等の通水障害が発生しており、この上下で傷が生じていた。なお、マツ材線虫病被害林において幹が局所的に壊死し、カミキリが生息した事例を観察した(筆者、未発表)ことがあった。これは、No.11 の円盤 19cm 部位のように、幹部の一部が壊死した状況を示していたのかも知れない。

図-23には、表-15の No.11 (図-22と同調査木、傷発生) および No.14 (傷未発生) と対照-1 (線虫未接種) の幹円盤面に形成された通水障害の様相を示した。No.11 と 14 の線虫接種枝直下に位置する高さ 19cm および 20cm の円盤を比較すると、通水障害面積は No. 11 で著しく大きい。なお、対照木はいずれの部位においても通水障害が生じていなかった。

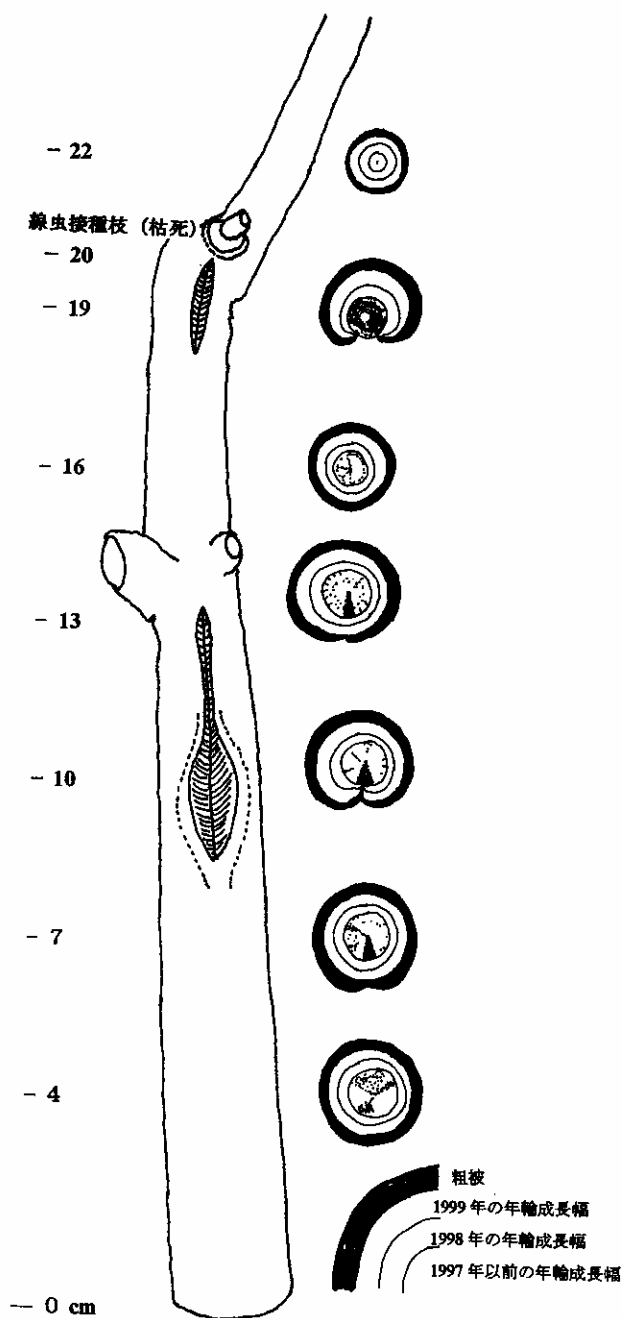
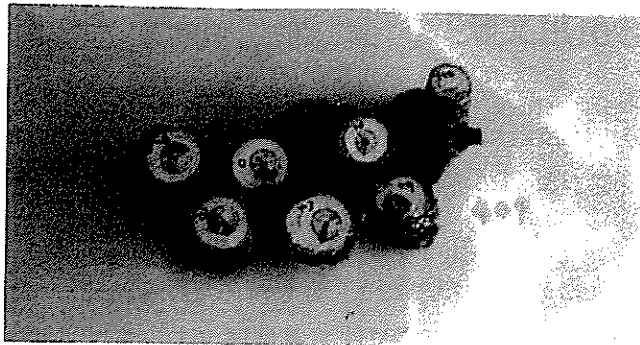


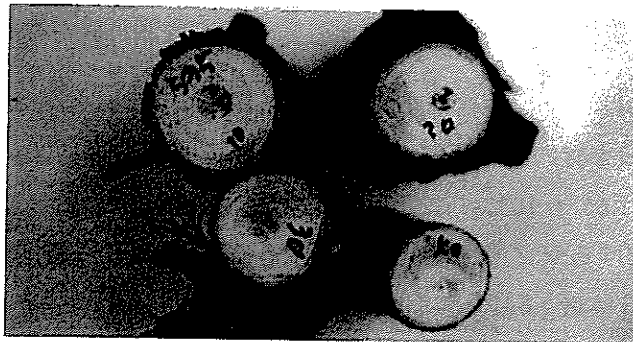
図-22 線虫接種3年経過時のNo. 11における主幹部に形成された傷と円盤面に形成された通水障害の発生状況



幹部に傷あり (No.11)

上段の円盤
高さ 4, 10, 16, 22cm

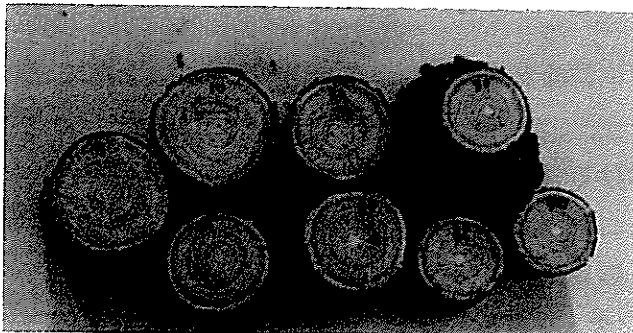
下段の円盤
高さ 7, 13, 19cm



幹部に傷なし (No.14)

上段の円盤
高さ 10, 20cm

下段の円盤
高さ 30, 40cm



線虫未接種 (対照 - 1)

上段の円盤
高さ 5, 10, 20, 30cm

下段の円盤
高さ 12, 25, 35, 40cm

図一23 線虫接種3年経過時の生存木No. 11 (幹部に傷あり)
およびNo. 14 (幹部に傷なし) と対照木 (線虫無接種)
に発生した通水阻害の様相

以上述べたことから、線虫の感染を受けて枯損を免れた幼齢個体にあっても、感染年に大なり小なりの通水阻害 (辺材部の壊死) が発生し、かつ線虫は樹体内で数年間生息し続けるものと推定される。しかし、感染翌年以降の枯損については、一部の個体で引き起こされるものの大部分は枯損に至ることなく、線虫はその後年数の経過とともに死滅するものと予想された。

引用文献

- (1) 在原登志男 (1984) 松の枯損防止新技術に関する総合研究—マツノマダラカミキリの天敵利用技術に関する研究—, 福島県林業試験場研究報告 16 : 1—22.
- (2) 在原登志男 (1986) 福島県におけるマツの枯損動態に関する研究 (I) —マツノザイセンチュウの人工接種に関連した研究—, 福島県林試研報 19 : 43—58.
- (3) 在原登志男 (1986) 福島県における松類材線虫病に関する研究 (I) マツノマダラカミキリなどの生態, 材線虫病感染源としての雪害木の役割および本病の発生予測, 福島県林業試験場研究報告 19 : 59—98.
- (4) 在原登志男 (1987) 福島県におけるマツの枯損動態に関する研究 (III) —枯損動態調査林の設定, 材線虫病の感染源および被害材内におけるマツノザイセンチュウの消長に関連した研究, 福島県林業試験場研究報告 20 : 65—103.
- (5) 在原登志男 (1987) 福島県におけるマツの枯損動態に関する研究 (XVI) —自然感染によるマツの発病と枯損時期—, 98回日林論 : 541—542.
- (6) 在原登志男 (1988) 福島県におけるマツ枯損発生量の推移と気象要因, 日本林学会東北支部会誌 40 : 190—192.
- (7) 在原登志男 (1996) マツ材線虫病防除実証林における感染源駆除効果と防除上の諸問題, 東北森林科学会誌 1 (1) : 53—55.
- (8) 在原登志男 (2001) 福島県におけるマツ枯れの発生状況と海拔高, 東北森林科学会誌 (6) 1 : 17—20.
- (9) 在原登志男・斎藤勝男 (1985) 福島県におけるマツの枯損動態に関する研究 (V) —アカマツ大径木に対するマツノザイセンチュウの初秋接種の影響—, 96回日林論 : 467—469.
- (10) 在原登志男・田久保昌 (1988) 福島県におけるマツノザイセンチュウの年次別分布と地区別の被害発生量の特徴, 日本林学会東北支部会誌 40 : 188—189.
- (11) 在原登志男・田久保昌 (1988) 福島県会津地方の高海拔地におけるマツ枯損と線虫を保持するカラフトヒゲナガカミキリ, 99回日本林学会大会発表論文集, 503—504.
- (12) 橋本平一・清原友也 (1975) マツノザイセンチュウ接種木におけるいわゆる「持ち越し」について, 日林九支研論 28 : 169—170.
- (13) 池田武文・山田利博 (1997) マツの発病機構とマツの反応, 松くい虫 (マツ材線虫病) —沿革と最近の研究—, 65—94, 全国森林病虫獣害防除協会, 東京.
- (14) 伊藤 武 (1996) 木炭によるマツの樹勢回復, 第21回近畿アグリハイテク・シンポジウム講演要旨集 : 35—38.
- (15) 岸 洋一 (1988) マツ材線虫病—松くい虫—精説, 292pp, トーマス・カンパニー, 東京.
- (16) 清原友也・徳重陽山 (1971) マツ生立木に対する線虫 *Bursaphelenchus* sp. の接種試験, 日林誌 53 : 210—218.

- (17) 松原 従(1996) 酸性雨が植物に及ぼす影響とその対策—カルシウム活性剤の役割—. 環境管理 Vol. 32, No. 4 : 95—102.
- (18) 松原 従(1996) 植物用カルシウム活性剤による樹勢の回復. GREEN AGE3 : 41—45.
- (19) 林野庁(1984) 大型プロジェクト研究—松の枯損防止新技術に関する総合研究—. 大型プロジェクト研究成果2, 165pp.
- (20) 涌井 明・金杉春樹(1996) 樹木切断面上の低水分組織の簡易検定法. 林業と薬剤 138 : 10—12.
- (21) 全国森林病虫獣害防除協会編(1997) 松くい虫(マツ材線虫病)—沿革と最近の研究—. 274 pp, 全国森林病虫獣害防除協会, 東京.
- (22) 陳野好之・滝沢幸雄・佐藤平典(1987) 寒冷・高地地方におけるマツ材線虫病の特徴と防除法, わかりやすい林業研究解説シリーズ 86. 75 pp, 林業科学技術振興所, 東京.