

論文

## クロマツ枯損木にみられる生物劣化様式とその形態的特徴

堤 祐治\*・古川 郁夫\*\*

### Mode of Biodeterioration and Anatomical Features Observed in Wilt-Diseased Trees of Kuromatsu (*Pinus thunbergii* Parlature)

Yuji TSUTSUMI \* and Ikuo FURUKAWA \*\*

#### 要 旨

わが国におけるマツ枯れ現象は昭和54年をピークに減少傾向にあるが、依然として多くのマツが枯損している。これらの枯損木にはマツノザイセンチュウ、穿孔虫、青変菌などが侵入するため価値が低下し、そのほとんどが利用されていない。有効に利用するためには材の劣化様式を調べ、材質的劣化の有無を明らかにする必要がある。

本研究では、クロマツ枯損木にみられる劣化様式と劣化による形態的变化を明らかにすることを目的として、クロマツの組織を各種の顕微鏡で詳細に調べた。その結果、マツノザイセンチュウは枯損木、衰弱木の垂直樹脂道、水平樹脂道に認められた。また、キクイムシなどの穿孔虫は青変菌と共に侵入し枯損木の形成層、二次師部付近を激しく食害していた。そして、青変菌は二次師部から二次木部の放射組織に侵入しており、放射柔細胞などでは劣化がみられた。しかし仮道管ではほとんど劣化していなかった。マツノザイセンチュウ、穿孔虫、青変菌は相互共生的に材を劣化していることが分かった。

キーワード：クロマツ、マツノザイセンチュウ、穿孔虫、青変菌、樹脂道、放射柔細胞

#### Summary

Large numbers of wilted pine trees (*Pinus thunbergii* Parlature and *P. densiflora* Sieb. et Zucc.) can be found annually in many places in Japan. These pine trees are left unused since nematodes, bark beetles and blue-stain fungi which cause a decline in commercial value infest these pinewoods. To be able to use these trees effectively, it is necessary to clarify the presence of biodeterioration in these pinewoods.

In this study, wilt-diseased trees of Kuromatsu were observed using several types of microscope to clarify the mode of biodeterioration and the effect on the trees' anatomical features. Results showed that nematode, which causes pine wilt disease, existed in the axial resin canal and ray. Bark beetles caused severe degradation in the cambium and secondary phloem. Blue-stain fungi associated with bark beetles

\*鳥取大学大学院農学研究科農林環境科学専攻

\*\*鳥取大学農学部生物資源環境学科森林科学講座 (〒680-8553 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: furukawa@muses.tottori-u.ac.jp

Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori, 680-8553, Japan

infested the resin canal, ray and tracheid. Ray parenchyma cells and epithelial cells were decayed by the fungi but not the tracheid. Nematodes, bark beetles, and blue-stain fungi deteriorated the pinewoods symbiotically.

**Key words :** *Pinus thunbergii* Parlatore, nematode, bark beetles, blue-stain fungi, resin canal, ray parenchyma.

## I. 緒 言

わが国におけるマツ枯れ現象は1979（昭和54）年をピークに減少しつつあるが、現在でも毎年100万 $\text{m}^3$ 前後のマツが枯損している。枯損木における材の劣化にはマツノマダラカミキリと共に侵入するマツノザイセンチュウの他、キクイムシなどの穿孔虫、材を青黒く変色させる青変菌などが複雑に関与している。

これらの生物が侵入した枯損木の特徴として、強度的にはほとんど問題がないが衝撃強度、すなわち靱性が低下する(1,5)、青変菌によって材が青黒く変色するために商品価値が著しく低下する(1,6)、といった欠点が挙げられる。しかし他方では防腐薬剤などの浸透性が良くなる(3,5)、といった利点も報告されている。これらの枯損木は一部がチップなどに利用されているが、そのほとんどは未利用のまま放置されているのが現状である。今後、これらの枯損木を有効に利用するためには枯損による劣化様式を調べ、材質的劣化の有無を明らかにしておく必要がある。

そこで本研究では、マツノザイセンチュウや穿孔虫、青変菌が侵入したクロマツ枯損木の組織を顕微鏡的手法で詳細に調べ、マツノザイセンチュウ、穿孔虫、青変菌による材の劣化様式と劣化に伴う形態的变化について明らかにすることを目的とした。

## II. 試料と方法

### 1. 供試材料

試料は1997年6月、1998年4月、1998年10月の3回、それぞれ鳥取砂丘、鳥取大学湖山演習林、鳥取大学構内においてクロマツ枯損木を1本ずつ伐採し、採取した円板を用いた。1997年6月に伐採した試料はすでに玉切りされたものであったため、円板採取部位は特定できなかったが、1998年4月、10月に伐採した試料は胸高部位、3 m、5 m、7 m付近から円板を採取した。なお1998年4月には対照試料としてクロマツ健全木1本からも円板を採取した。また1999年10月にはマツノザイセンチュウの侵入場所とマツノザイセンチュウによる組織の劣化の有無を確認するため、鳥取大学構内に生育していたクロマツ衰弱木1本から枯損枝、健全枝と樹幹部のコアサンプルを採取した。

### 2. 実験方法

採取した円板は、形成層付近を剥皮して穿孔虫、青変菌の侵入を実体顕微鏡で観察・写真撮影した後、50%エタノールまたはFAA液で固定した。また枯損枝、健全枝、樹幹部のコアサンプルを用いてマツノザイセンチュウの有無を確認するために、小片を蒸留水に浸漬することによってマツノザイセンチュウを遊出させた。これらの試料は、実体顕微鏡、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて観察し、一部の試料はX線分析装置付き走査型電子顕微鏡（SEM-EDX）で分析した。光学顕微鏡観察には、厚さ50 $\mu\text{m}$ のマイクローム切片を用いた。またSEM観察には、マイクロームで5 mm角の小片にトリミングした後、常法どおり金を蒸着したものを

観察用試料とした。なお、SEM-EDX分析には小片をカーボン蒸着したものを分析用試料とした。

### Ⅲ. 結果と考察

#### 1. マツノザイセンチュウによる劣化様式

マツの枯損は毎年8月から9月にかけて多く発生する。マツノザイセンチュウは枯損の主因とされており、マツノマダラカミキリが樹冠部を後食する際に伝播される(7,13)。10月に採取した衰弱木からマツノザイセンチュウを遊出させた結果、枯損枝や樹幹部から大量のマツノザイセンチュウが検出された(写真1)。また健全枝からもわずかではあるがマツノザイセンチュウを検出した。樹体内に侵入したマツノザイセンチュウは樹脂道を中心に侵入すると言われているが(11,14)、今回の試料でも垂直樹脂道や水平樹脂道に侵入したマツノザイセンチュウが認められた。二次木部内での垂直樹脂道と水平樹脂道の組織学的な関連性については報告例がないため、詳しく調べた結果、垂直樹脂道と水平樹脂道は分岐したトンネル状に直接つながっていることが分かった(写真2A)。これは、マツノザイセンチュウがクロマツの樹幹内を広汎に移動するのに有利であろう(写真2B)。清原、真宮らはクロマツ枯損木ではマツノザイセンチュウによってエピセリウム細胞が劣化すると報告しているが(7,12)、現在までのところそのような観察例はない。しかし、この点はさらに検討中である。

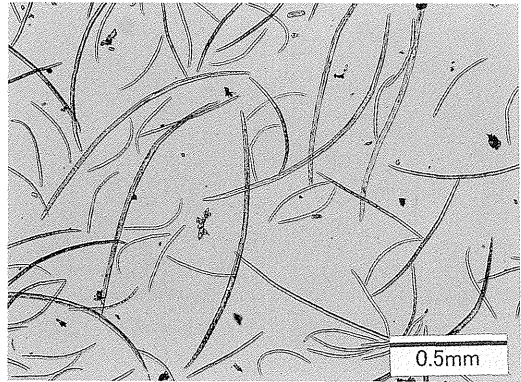
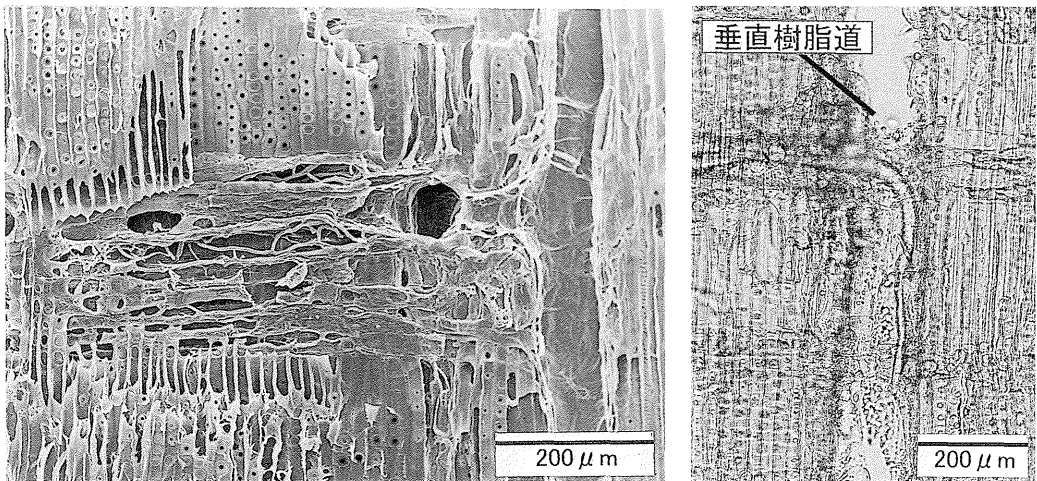


写真1 遊出させたマツノザイセンチュウ



2A 樹脂道の交差部分

2B 樹脂道のザイセンチュウ

写真2 垂直、水平樹脂道の交差部分とマツノザイセンチュウ

マツノザイセンチュウが侵入すると樹液中に揮発性テルペン類が増加し、仮道管中の水柱が切れやすくなる結果、水分通道が阻害され、通水機能が低下し、急速に枯死すると言われている

る(11)。さらにマツノサイセンチュウは樹体内の樹脂や糸状菌を捕食していると言われているが(7)、材質に影響を及ぼすほどの著しい劣化はないと考えられる。

## 2. 穿孔虫による劣化様式

採取した枯損木の形成層や二次師部にはキクイムシ、マツノマダラカミキリなど多くの穿孔虫が侵入しており、これらの部位は穿孔虫によって激しく食害されていた(写真3)。穿孔虫は衰弱木の形成層付近にも侵入していた。食害は枯損後、時間が経過するほど、また樹幹の上部ほど激しかった。しかし、二次木部中の食害は少なかった。また食害部位には青変菌も認め

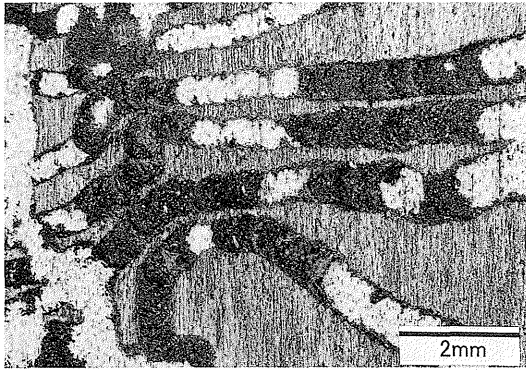


写真3 穿孔虫による二次師部の食害

られた。青変菌は穿孔内部に繁殖すると共に周辺の二次師部中にも侵入していた。さらにキクイムシが蛹となるための蛹室の内壁には青変菌の子のう果が密生していた(写真4)。

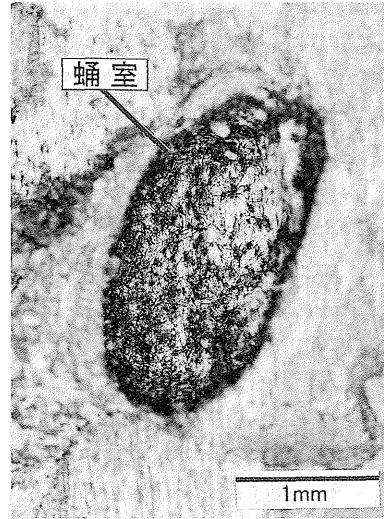


写真4 蛹室内壁の青変菌

二次師部は栄養分の通路であり、穿孔虫の繁殖にはこれらの細胞内の栄養分が大きく影響していると思われる。また樹幹内部含水率を計測したところ樹幹の上部ほど低かったことから、枯損によって含水率が急激に低下すると共に樹脂の滲出も減少すると思われる。これらのことは穿孔虫の侵入を助長していると考えられる。穿孔虫の中でも特にキクイムシは青変菌の生態と深く関わっていることが報告されている(2,8,9,10)。蛹室に形成された子のう果からは孢子を含んだ粘液が分泌され、穿孔虫の体に付着して拡散すると考えられている。このような関係はマツノマダラカミキリと青変菌の間でも確認されている(8)。また一部のキクイムシは養菌穿孔虫と言われており、アンブロシア菌と総称される菌を育てて餌としている(6)。アンブロシア菌の中には青変菌も含まれており、キクイムシと青変菌とは密接な関係にあることが分かる。

## 3. 青変菌による劣化様式

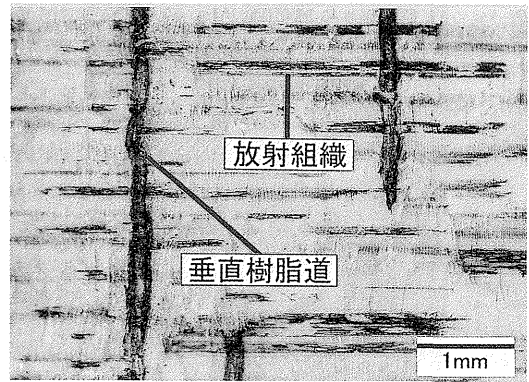
### (1) 侵入経路

クロマツ、アカマツなどに青変をもたらす菌は子のう菌(*Ceratocystis*属)である。材の青変は10月に採取した枯損木や衰弱木では枝条材のみであったが、4月と6月に採取した枯損木では樹幹の至るところでみられた。前述のように、青変菌はキクイムシなどの穿孔虫の生態と

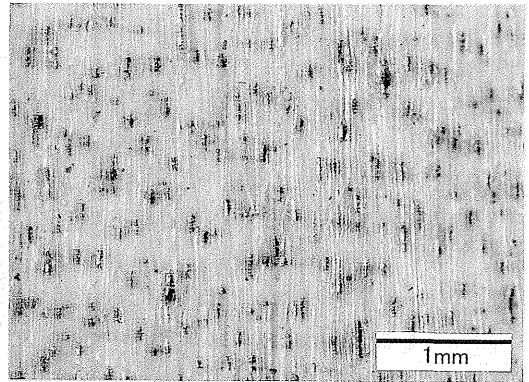
深く関わっており、穿孔内部や蛹室、二次師部に蔓延するだけでなく二次木部にも侵入する。

二次木部では、木口面を肉眼で観察すると青変の特徴であるくさび状の変色がみられた。また板目面、柾目面を実体顕微鏡で観察すると、板目面では点状の、柾目面では帯状の変色がみられ、青変菌が放射組織を中心に侵入していることが認められた。また垂直樹脂道にも侵入していた(写真5 A, B)。これらの部分をSEMでさらに詳しく観察すると、青変菌菌糸は放射柔細胞の内腔中に侵入しており(写真6 A)、分野壁孔を通して仮道管にも侵入していた。また水平樹脂道、垂直樹脂道を構成するエピセリウム細胞の間隙にも侵入していた(写真6 B)。

したがって青変菌は穿孔虫の体に付着して樹体内に侵入した後、穿孔内部で繁殖して周辺の二次師部に蔓延し、二次木部へ侵入すると思われる。二次木部内では放射柔細胞、水平樹脂道を通して幹の内部に伸長し、その後、一部の菌糸は垂直樹脂道、あるいは分野壁孔から仮道管を通して軸方向へと伸長するものと考えられる。

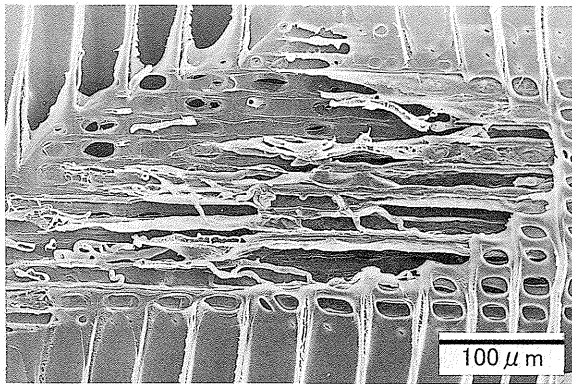


A 柾目面

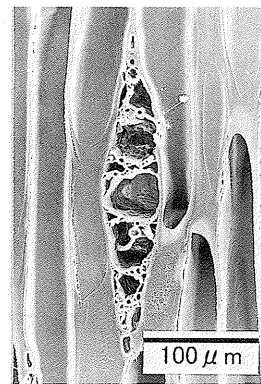


B 板目面

写真5 二次木部に侵入した青変菌



A 柾目面



B 板目面

写真6 放射組織に侵入した青変菌

## (2) 組織の劣化様式

青変菌が侵入した師部細胞では劣化による明瞭な形態的变化は確認できなかった。また二次

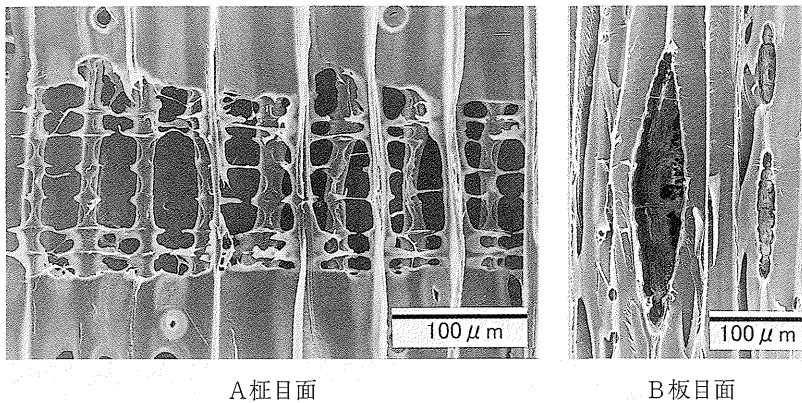


写真7 放射組織の劣化

木部においても10月、4月に採取した枯損木では、青変菌が侵入した試料でも組織の形態的变化はみられなかった。しかし6月に採取した枯損木では細胞の劣化がみられ、放射柔細胞や水平樹脂道、垂直樹脂道を構成するエビセリウム細胞では細胞壁が消失していた。また分野壁孔や有縁壁孔でも壁孔膜が消失し、孔口が拡大していた(写真7 A, B)。一方、仮道管はいずれの試料でもほとんど劣化は認められなかったが、6月に採取した枯損木において菌糸が細胞壁に微小な穴をあけて貫通しているのが確認できた(写真8)。

青変菌による劣化は柔細胞壁を中心としたものであり、仮道管ではほとんど発生しないのは、壁中のリグニン分布が影響しているように思われる。柔細胞壁は薄壁でリグニンが少ないことが知られているのに対して、仮道管にはリグニンが多く存在し、特に仮道管どうしの間にはリグニン濃度の高い細胞間層が存在する。このことが青変菌による二次木部の劣化様式に大きく影響していると考えられる。枯損木は強度が低下しないが靱性が低下する、一方で浸透性が良くなる、といった特徴は、以上のような青変菌による柔細胞の劣化が関与していると考えられる。

### (3) 菌糸周囲の結晶

6月に採取した枯損木では仮道管や垂直樹脂道に伸長した菌糸に結晶が付着していた(写真9)。結晶をSEM-EDX

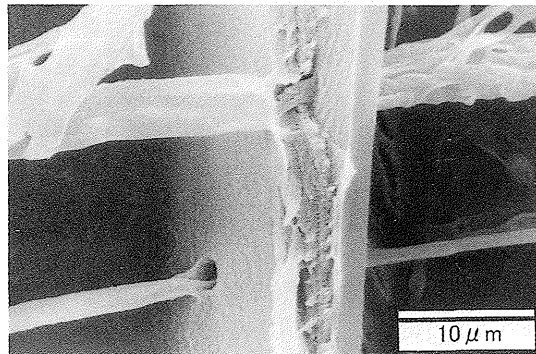


写真8 仮道管の劣化

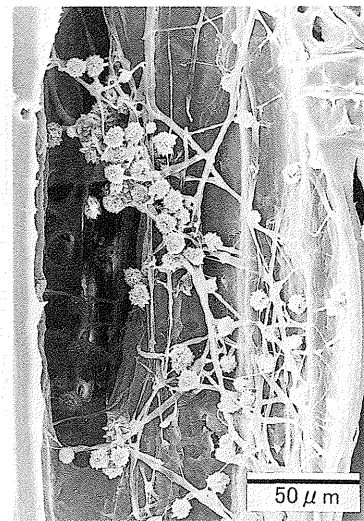


写真9 垂直樹脂道の内部にみられた結晶

で分析した結果、カルシウムが検出された。カルシウムは必須多量元素でありクロマツ師部中にも比較的多く含まれる(4)。青変菌は形成層、二次師部、放射組織など栄養分の多い場所に伸長しており、菌糸の繁殖に利用されたカルシウムがこのような形で集積したものであるが、その原因は不明である。

#### IV. 結言

クロマツ枯損木におけるマツノザイセンチュウ、穿孔虫、青変菌の劣化様式を検討した結果、これら3者は相互共生的に関与して材を劣化させていることが分かった。

1. マツノザイセンチュウはマツノマダラカミキリと共に健全なマツに侵入して、これを枯損させる。マツノザイセンチュウは垂直樹脂道や水平樹脂道に存在していた。水平樹脂道への移動は、垂直および水平樹脂道交差部の空隙を通過して行われていた。

2. 穿孔虫はマツノザイセンチュウによって衰弱、枯損したマツに青変菌を保持して侵入していた。栄養分の多い二次師部付近に集中的に侵入し、穿孔を形成して激しい食害を引き起こしていた。

3. 青変菌はキクイムシやマツノマダラカミキリなどの穿孔虫に付着して侵入し、穿孔内部から二次師部、さらに二次木部中に侵入していた。二次木部中では主に放射組織に侵入し、これに隣接する仮道管や垂直樹脂道にも侵入していた。青変菌によって柔細胞壁は劣化していたが、仮道管ではほとんど劣化は認められなかった。これには壁中のリグニン分布や濃度が影響していると考えられる。

4. このように、まずマツノザイセンチュウがクロマツを枯損させ、続いて穿孔虫が青変菌と共に侵入し、最後に青変菌が材を変色・劣化させる、という関係のあることが分かった。

#### 引用文献

- (1) 青島清雄 (1975) 木材の変色と汚染. 木材工業 30 : 504-507.
- (2) 青島清雄・林 康夫 (1964) 松くい虫とマツの青変について. 森林防疫 13 : 103-105.
- (3) Eaton, R. A and Hale, M. D. C. (1993) Wood. 130-145, Chapman&Hall.
- (4) 古野 毅・上原 徹・城代 進 (1993) アカマツ健全木およびマツクイムシ枯死木の樹幹内における無機元素の分布. 木材学会誌 39 (1) : 48-57.
- (5) 浜野義昭・西尾 茂 (1982) マツクイムシ被害材の材質試験. 鳥取県工業試験場研究報告 5 : 33-40.
- (6) 林 康夫 (1982) 甲虫が利用する菌類. 遺伝 36 (12) : 4-7.
- (7) 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.
- (8) 小林享夫 (1975) 線虫とかびとカミキリと. 森林防疫 24 : 199-202.
- (9) 小林享夫・佐々木克彦・真宮靖治 (1974) マツノザイセンチュウの生活環に関連する糸状菌 (I). 日本林学会誌 56 : 136-145.
- (10) 小林享夫・佐々木克彦・真宮靖治 (1975) マツノザイセンチュウの生活環に関連する糸状菌 (II). 日本林学会誌 57 : 184-193.
- (11) 黒田慶子 (1996) 樹病: 病原微生物の感染戦略と樹木の反応. 木材保存 22 : 205-214.
- (12) Mamiya, Y. and Kiyohara, T. (1972) Description of *Bursaphelenchus lignicolus* n. sp. from pine wood and histopathology of nematode-infested tree. Nematologica 18 : 120-124.

- (13) 森本 桂・岩崎 厚 (1972) マツノザイセンチュウ伝播者としてのマツノマダラカミキリの役割. 日本林学会誌 54 : 177-183.
- (14) 徳重陽山・清原友也 (1969) マツ枯死木中に存在する線虫 *Bursaphelenchus* sp. 日本林学会誌 51 : 193-195.

(2000年2月18日受理)