

トドマツ枝枯病の発病誘因と被害予測

浅井 達 弘 *

Evaluation of promoting factors of *Scleroderris* canker, and the prediction of its damage on todo-fir (*Abies sachalinensis* Masters) in Hokkaido

Tatsuhiko ASAI*

要 旨

本論文は、北海道のトドマツ造林地の広い部分に蔓延して深刻な被害をもたらしているトドマツ枝枯病の防除方法の確立に資することを目的として、本病の発病誘因と被害予測の方法を追求・解明したものである。接地枝の発病率（19.7%）に比べて、非接地枝の発病率（82.2%）が著しく高かったことや、感染苗木を地面から 50 cm 持ち上げて越冬さした処理、接地する枝に副木をあてて人工的に接地を妨げた処理の発病率が有意に高かったことから、積雪が枝葉を強く引っ張ることがストレスとなって本病の発病を促進すると考えた。激害区分図を用いた被害林分の解析から、初めて被害を受けた時の樹高（初発病樹高）とその個体の将来の被害度に密接な関係があることをみいだした。初発病樹高階とその樹高階に属する部分個体群の激害本数率の経年変化のモデル化（被害推移モデル）や個体の被害進行過程のシミュレーションにより、個々の林分の初発病樹高の分布から将来の激害木の本数を予測する方法を提案した。さらに、激害区分図の交点樹高から道有林の立地区分を行い、各立地の積雪深や特徴的な被害、施業についてまとめた。

目 次

第1章 序 論	3
1 トドマツ枝枯病の被害の概要とこれまでの研究	3
2 研究の目的と方向	4
第2章 調査林分の概況	5
1 中川（なかがわ）	5
2 咲来（さっくる）	6
3 恩根内（おんねない）	6
4 仁宇布（にうぶ）	6
5 赤平（あかびら）	7
第3章 発病誘因	7
1 発病枝の特徴	7

*北海道立林業試験場 Hokkaido Forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-01

[北海道林業試験場研究報告 第27号 平成元年11月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No.27. November 1989]

(1) はじめに	7
(2) 調査方法	7
(3) 接地する枝としない枝の発病比較	8
2 越冬処理による発病の違い	9
(1) はじめに	9
(2) 試験方法	9
(3) 試験結果	11
(4) 考察	14
3 上木効果	15
(1) はじめに	15
(2) 試験方法	15
(3) 試験結果	16
(4) 考察	20
第4章 被害林分の解析方法（激害の区分図）の確立	21
1 はじめに	21
2 これまでの被害表示方法と新しい調査方法	21
3 被害輪生枝率	23
4 激害区分図	24
5 いろいろな林分の激害区分図と交点樹高	26
6 激害区分図上の個体の軌跡	28
7 考察	29
第5章 被害予測	30
1 はじめに	30
2 調査林分と方法	30
3 初発病樹高と激害本数率の関係	31
4 林分被害の経年変化モデル	33
5 被害予測	34
6 考察	34
第6章 個体の被害進行過程のシュミレーション	35
1 はじめに	35
2 シュミレーションの方法	35
3 シュミレーションの結果	37
4 考察	39
第7章 総合討論	41
1 発病誘因としての気象要因	41
2 積雪と発病誘因	42
3 交点樹高に基づく立地区分と防除の考え方	43
要約	44
文献	45

第1章序 論

1 トドマツ枝枯病の被害の概要とこれまでの研究

トドマツ枝枯病は、子のう菌類の一種である *Scleroderris lagerbergii* によってひきおこされる病害である。この病原菌によってひきおこされる枝枯病は、ヨーロッパや北アメリカでは各種針葉樹（特にマツ属：*Rinus Linn.*）の造林地や苗畑における重要病害として知られている（OHMAN, 1966 ; DONAU-BAUER, 1972）。この病原菌は、世界で3系統が確認されており、北海道でモミ属 (*Abies Mill.*) に寄主するのはアジア系とされている（DORWORTH and KRYWIENCZYK, 1975 ; 松崎, 1982）。北海道において、トドマツ (*Abies sachalinensis* Masters) の造林地に本病による被害が初めて確認されたのは1970年の大発生である（横田, 1970）。1970年以前にも局所的にはトドマツ枝枯病が発生していたが、それらは枝枯性の気象害（凍害）とみなされていたようである（北海道林務部, 1966 ; 森田, 1967）。大発生当初の発病地域は天塩山地や羊蹄山麓などの比較的高標高の寒冷・多雪地、それも一斉皆伐造林地に限られていた（YOKOTA et al., 1974 a）。その後、本病は小康状態と小規模な発生を繰り返しながら、徐々に蔓延・拡大した。新たな発病地の中には、苗畑（秋本, 1983 ; 田中, 1984）や標高5mの海岸近くの造林地（秋本, 1987）など多雪といえない積雪環境での発病が確認されている。表-1に、1986年末現在の道有林の経営区別トドマツ造林地面積（北海道林務部, 1987b）と被害地面積（北海道森林保護事業推進協議会, 1987）を示した。被害がみられないのは太平洋に面して比較的寡雪な道南・道東地域の経営区であり、道央・道北地域ではすべての経営区で本病の発生がみられる。国有林、民有林を含めた北海道全体の1986年末現在の被害面積は19,535 haに達しており（北海道森林保護事業推進協議会, 1987）、被害が未確認の支庁は14支庁中、渡島、十勝、釧路の3支庁にすぎない。このように、本病は北海道のトドマツ造林地の広い部分に蔓延していて造林を推進する上での大きな支障になっている。

表-1 道有林の経営区別トドマツ造林地面積と被害地面積（1986年末現在）

経営区	造林地 面積(ha)	被害地 面積(ha)	被害率 (%)	経営区	造林地 面積(ha)	被害地 面積(ha)	被害率 (%)
函 館	6,415	—	—	旭 川	6,562	105	1.6
松 前	1,286	—	—	名 寄	5,738	1,725	30.1
俱知安	4,354	501	11.5	美 深	7,493	2,874	38.3
苫小牧	3,174	—	—	雄 武	6,524	2,050	31.4
浦 河	3,818	—	—	興 部	5,979	211	3.5
当 別	3,194	624	19.5	北 見	6,850	—	—
岩見沢	5,325	54	1.0	池 田	6,038	—	—
滝 川	6,721	439	6.5	浦 幌	3,165	—	—
留 萌	3,129	111	3.5	厚 岸	3,411	—	—

トドマツの造林木が本病の被害を受け始めるのは通常、II 齢級以後ほぼIV 齢級までの時期である。*Scleroderris* 菌は、子のう胞子と柄胞子の両者とも、通常6～7月に被害枝から飛散して伸長中の新条につくが、発病するのは翌年の埋雪期から融雪期である（したがって、新条は1年生枝になっている）。主として1年生枝と1年生幹が発病し、発病した枝（幹）では葉が緑色のまま大量に落葉するという際立った特徴を示す。落葉した枝は皮層部が褐変しており、この枝の芽からは新条は展開しない。また、積雪面から上に抜け出た枝は被害を受けないことと地面近くの枝は発病しにくいことも本病の被害の特

徴の一つである。この結果、個体の中央部の枝だけが枯死する「中抜け」症状を示す造林木が多く観察される。さらに、保残木の多い造林地や保残木下では被害が少なく、被害程度が軽微なこと（上木効果と呼ばれている）も知られている（YOKOTA et al., 1975 ; 北海道林務部, 1980 ; 小林・今野, 1984 ; 浅井ほか, 1985）。本病の被害が枝だけにとどまる限りは、数年のうちに積雪面から抜け出す枝が増えるので、実質的な被害は小さい。しかし、梢端部（1年生幹）が被害を受けた場合には、その被害個体の大部分が枯死するので、被害は大きくなる。

トドマツ枝枯病に関する調査研究は、1970年の大発生以降、数多くなされてきた。こうした調査研究の担い手と方向は大きく二つに分けられる。一つは、樹病研究者らによる病原菌の生理生態的性質や生活史の解明の方向である（横田, 1970, 1983 ; YOKOTA et al., 1974b; YOKOTA, 1975a; 小林, 1972; 佐保・高橋, 1972 ; 高橋, 1975, 1979 ; 高橋・鈴木, 1976 ; 秋本, 1981, 1984, 1985 ; 松崎, 1983, 1985）。もう一つは、主として現場の技術者らによる経験的な被害防除方法の体系化の方向である（北海道林務部, 1977, 1980, 1986 ; 広田, 1978; 青柳・妹尾, 1984）。これらの研究成果をもとに被害防除のための具体的な施業方法として、保残木や侵入広葉樹の活用（渋谷, 1985）、融雪剤の散布（水井ほか, 1986）、防除薬剤の散布（田中ほか, 1984）、被害枝の除去（水井・浅井, 1988）などが提案され試行されている。しかしながら、いずれの方法も被害軽減効果が顕著でなかったり、事業的に採用するのが難しいなどの問題点があり、現在のところ決定的といえる防除方法はない。

2 研究の目的と方向

YOKOTA (1975b) は、気象データの解析から 1970年のトドマツ枝枯病被害の主要な誘因として、1969年9月にもたらされた異常低温、1969～1970年の冬期間の積雪量、積雪期間の長さをあげている。北アメリカにおいても、本病の誘因として積雪深が重要なことが指摘されている（OHMAN, 1966 ; FRENCH and SILVERBORG, 1967 ; DORWORTH 1972）。また、被害を受ける枝が埋雪木に限られることも、本病の発病に積雪が重要な役割を果たしていることを強く示唆する。このように、誘因としての積雪の重要性が広く認識されているにもかかわらず、被害造林地で積雪の密度や雪質あるいは越冬中のトドマツ造林木と本病被害との関係を論じた報告（増田ほか, 1976 ; 北海道林務部, 1980; 斎藤・水井, 1979）は少ない。同様に、上木効果や地面近くの枝が発病しにくいという現象は経験的によく知られているがこれらの原因を追求した報告はない。

一つの被害林分で何らかの被害防除方法を実施したり、将来の施業方法を策定する場合に、現在の病勢がどのように推移し最終的にどれくらいの枯死木がでるのかという見通しは極めて重要である。なぜならば、正確な見通しが立たなければ、防除しなくても大きい被害に至らない林分や防除しても成林の見込みのない林分に無駄な投資をすることになるからである。個々の林分の、このような枯死木の見通しに関する情報、いわば、被害予測についての研究は全くなされていない。

このような発病誘因や被害予測に関する研究の立ち後れは、これまでの研究が病原菌とこれを取り巻く環境との関係といった分野の研究に重点が置かれてきたことに一因があろう。トドマツ枝枯病の防除方法を確立するには、そうした研究と同様に、被害木あるいは被害林分と環境との関係などに関する分野の研究が重要である。すなわち、トドマツ枝枯病の被害を生態学的あるいは造林的な面から研究する必要がある。

この研究は、トドマツ枝枯病の発病誘因と被害予測を生態学的側面から追究・解明し、これを通して本病の防除方法の確立に資することを目的とする。そのため以下の方向で調査や試験を進めた。

発病誘因に関連して、

(1) 地面に接した枝（接地枝）と接しない枝（非接地枝）の発病率の違いを調べ、地面に接して越冬することが発病の抑制につながるという発病誘因の重要な鍵をとらえ、

②それらを基礎に、感染苗木に対する越冬処理試験を行い、発病誘因としての積雪から受ける枝葉のストレスと発病の関係を整理し、

③冬期間における上木効果の原因を解明し、冬期以外の時期における上木効果を検討する。

被害予測に関連して、

①一時点の調査で、過去の被害経過を再現できる調査・解析方法を考案し、

②それから得た知見をもとに林分被害の経年変化モデル（被害推移モデル）を作成して、最終的な枯死本数（激害本数）を予測する方法を確立するとともに、

③この予測方法をより普遍的に活用できるように、個体の被害進行過程をシミュレートする方法を開発する。

これらの結果にもとづいて、本病の被害を防除するためのトドマツの育林や保育のあり方について提言する。

本研究を取りまとめるに際し、京都大学農学部堤利夫教授には終始、懇切な御指導と御助言をいただいた。また、京都大学農学部獅山慈孝教授には病理面からの御教示を、川那辺三郎教授には全般的な御教示をいただいた。慎んで感謝の意を表する。

北海道立林業試験場薄井五郎氏、水井憲雄氏には本研究の開始時点から今日に至るまで常に問題点の討論を通して御批判と御示唆をいただくと同時に、野外調査の御協力をいただいた。また、秋本正信氏には本研究の開始時点から今日に至るまで病理面での御指導をいただいた。そして、菊沢喜八郎博士には終始、研究全般にかかわる御教示とはげまし、さらには本論文の御校閲をいただいた。さらに、支場勤務時も含めて北海道立林業試験場の多くの上司・同僚には、本研究遂行の御便宜と野外調査の御協力をいただいた。これらの方々に対して心から御礼申し上げる。

終わりに、試験地の設定・管理および被害調査に御便宜を図っていただいた道有林管理室ならびに現地林務署、特に美深林務署と滝川林務署の関係各位に厚く御礼申し上げます。

第2章 調査林分の概況

この研究の調査や試験は、道有林の調査資料を用いた激害区分図の作成（第4章）を除くと、すべて図-1の5箇所で行った。表-2に、これら5箇所の調査林分の概要を示した。これらの地域と調査林分の概況は次のとおりである。

1 中川（なかがわ）

中川（中川町）は、天塩川の河岸段丘上に位置する北海道立林業試験場道北支場構内のトドマツ産地別見本林と苗畑である。平坦地で標高は約20mである。トドマツ産地別見本林は、1971年に植栽された。トドマツ枝枯病の被害は1976年頃から出始め、1980年の調査時点では全立木（約500本）の大部分が被害を受けていた。しかし、被害程度の軽微なものが大半を占め、本病による生長への影響はほとんど認められなかった。産地別見本林のほかに、中川では苗畑にトドマツ苗木を植栽し、いくつかの越冬処理試験や感染試験などを行った。

2 咲来（さっくる）

咲来（音威子府村）は、次に述べる恩根内、仁宇布（ともに美深町）と同じ道有林美深経営区内の被害造林地である。これらの地域は、中川をも含めて、北海道でも屈指の厳寒・多雪地帯といえる。咲来地域では1964年頃から、林齢8～15年生のトドマツの造林木に「胴枯型の凍害」がみられるようになり、この被害木の中には融雪時に緑葉の落ちる被害が認められるようになった。被害の大半がトドマツ枝枯病によるものと確認される（1970年）までは、道有林関係者はこれらの被害を「咲来型凍害」と呼んでいた（北海道林務部、1966）。咲来地域はいわばトドマツ枝枯病の発祥の地の一つといえる。



図-1 調査地の位置

この研究の調査林分は、この地域の一面の273林班55小班の1971年植栽のトドマツ造林地である。地形は大斜面の山脚部にあたり、方位は北西向きである。斜面の傾斜は0～3度の緩料地で標高は約250mである。皆伐跡地に植栽された造林地が大部分であるが、ごく一部（約0.4ha）は広葉樹二次林下に植栽された造林地である。1980年の調査時点の広葉樹二次林は上層樹高8m、平均胸高直径8.4cm、林齢約30年であり、生立本数はhaあたりおよそ2,000本で林冠はほぼ閉鎖していた。主な樹種はダケカンバ(*Betula ermanii* Cham.), ミズナラ(*Quercus mongolica* Turcz var. *grosseserrata* Rehd.), イタヤカエデ(*Acer mono* Maxim.)である。また、同時点のトドマツ枝枯病の被害状況は、皆伐跡地ではほとんどすべての造林木が被害を受けていた。これに対して、広葉樹二次林下では被害木は少なく被害程度も皆伐跡地より軽微であり、明らかにトドマツ枝枯病に対する上木（による保護）効果が認められた。

3 恩根内（おんねない）

調査林分は、232林班51小班の1974年植栽のトドマツ造林地である。やや凹地形の山腹上にあり、方位は北西向きである。斜面の傾斜は3～5度の緩料地で標高は約220mである。皆伐跡地に植栽された造林地である。1983年の調査時点の本病の被害状況は、後述の3段階の被害表示方式でいう激害木（大半が枯死する）が約75%を占めていた。しかし、激害になっていない造林木の大半はすでに積雪面を抜け出ており、（新たな激害木は発生しないという意味で）被害はほぼ終息したとみられる林分である。

4 仁宇布（にうぶ）

調査林分は、136林班51小班の1976年植栽のトドマツ造林地である。山腹の平衡斜面にあり、標高

は約 420 m で北向きの緩斜地である。皆伐跡地に植栽された造林地であるが、部分的にシナノキ(*Tilia japonica* Simonkai), ハリギリ(*Kalopanax pictus* Nakai), キハダ(*Phellodendron amurense* Rupr.), イタヤカエデ, オビヨウ(*Ulmus laciniata* Mayr)などの広葉樹が保残されている。これらの胸高直径は 18~60 cm, 樹高 10~20m, 枝下高 2.5m~6.0mである。1984 年の調査時点の本病の被害状況は, 広葉樹の保残木下やその近辺では被害木は少なく被害程度も軽微であり, やはり明らかに上木効果が認められた。一方, 保残木から最も離れた集団では激害木が約 40%を占めていた。

5 赤平 (あかびら)

赤平は道央の道有林滝川経営区内の被害造林地である。前述の美深経営区とは異なり, この地域は最近 (1980 年頃) になって被害が出始め, 今後の被害拡大が心配されている。被害林分の林齢や被害程度はさまざまであるが, 現在のところ標高 400 m 以上に被害林分が集中している。これらの林分の中から, 28 林班の 56 小班 (赤平 1, 1977 年植栽) と 59 小班 (赤平 2, 1978 年植栽) のトドマツ造林地を調査林分を選定した。赤平 1 は平衡斜面の上部に位置し, 標高は約 520 m で南西向きの緩斜地である。1984 年の調査時点では, 激害木が約 15%を占めていた。また, 赤平 2 は平衡斜面の中部に位置し, 標高は約 600 m, 南西向きで傾斜は約 20 度である。1986 年の調査時点では, 激害木が約 19%を占めていた。

表-2 調査林分の概要

調査地	植栽年度	標高	傾斜	方位	調査年度	積雪期間	最深積雪深	備考
中川	1971	20m	平坦	—	1980			4 章
					1981-1982	11.15~4.24*	120cm*	3 章
						11.6~4.23	185cm	3 章
	1981			1982	11.6~4.23	185cm	3 章	
咲来	1971	250m	0-3 度	NW	1981	11.15~5.5*	180cm*	3 章
					1982	11.7~5.1	170cm	3 章
恩根内	1974	220m	3-5 度	NW	1983			4 章
仁宇布	1976	420m	5-10 度	N	1984-1986			4,5,6 章
赤平	1977	520m	3-5 度	SW	1984-1986			4,5,6 章
	1978	600m	20 度	SW	1986-1987			4 章

積雪期間は調査年度の前年の積雪開始月日から調査年の消雪月日までを示し, 最深積雪深はこの期間に記録した最大値を示す。*印は実測値であり, 他は「北海道の気象」の 25, 26 号によった。咲来の値は最寄りの音威子府の値を代用した。積雪期間と最深積雪深は, 積雪が重要な関連をもつ発病誘因に関する第 3 章についてのみ記載した。

第 3 章 発 病 誘 因

1 発病枝の特徴

(1) はじめに

トドマツ枝枯病の被害の特徴の一つに, 被害部位がある高さの範囲に限られていることがあげられる。すなわち, 積雪面の上に抜け出た枝や地面近くの枝の発病が少ないという現象である。このうち, 発病の高さの上限は埋雪する高さとの関係が深いようである。一方, 発病の高さの下限がどのような要因と関係しているのかは不明である。そこで, 著者は, 「地面に接して越冬する枝が発病しにくい」という作業仮説を設定し, 実際に被害造林木を調査することによりこの仮説の可否を検証した。

(2) 調査方法

調査地は, 咲来の 1971 年植栽のトドマツ造林地である。調査木は, 皆伐跡地で埋雪することなく, ほ

ば直立したまま越冬したとみられる樹高3～4mの造林木の中から無作為に21本を選んだ。調査は、造林地の雪が消え残っていて越冬中の枝の埋雪状態を原形に近い形で観察できる、1982年5月中旬に行った。調査木の輪生枝を地面の方向に押し下げた時に、輪生枝の先端が地面に接する（接地）か否（非接地）かの区別と、その枝の先端にある3本の1年生枝の発病枝数を記録した。また、同時にその輪生枝の枝階と地上高を記録した。調査の対象にした枝は、接地、非接地を境界にして、その上下1～2階の輪生枝である。

(3) 接地する枝としない枝の発病比較

調査した枝を接地枝と非接地枝に区分して発病率を比較した（表-3）。接地枝では、調査した299本の1年生枝のうち、59本が発病していて、発病枝率は19.7%であった。一方、非接地枝では353本中、290本が発病していて、発病枝率は82.2%であった。このように、接地枝と非接地枝の発病枝率に大きな差があり、この発病枝率の差は統計的に有意（ $\chi^2=253.4$, $P<0.001$ ）であった。表-3で比較したのは、調査した枝全体の発病枝率であり、個体レベルの発病枝率はわからない。そこで、接地枝と非接地枝を21本の調査個体ごとに集計して、その発病枝率の頻度分布を比較した（図-2）。接地枝の発病枝率は、20%以下を示す個体が最も多く、発病枝率が高くなるに従ってその個体数は減り、60%以上の発病枝率を示す個体はなかった。一方、非接地枝の発病枝率は、80%以上を示す個体が最も多く、発病枝率が低くなるに従ってその個体数は漸減した。このように、個体レベルの発病枝率で比較しても、接地枝と非接地枝では、際立った違いを示した。

しかしながら、表-3に明らかなように、非接地枝か接地枝より約1枝階、27cm高い位置にある。接地・非接地に関係なく、単に高い位置にあることが枝の発病率に影響している可能性がある。このような枝の位置の問題を取り除くために、今回調査した枝の中から、同一個体の同一枝階で接地枝と非接地枝の両者がみられる枝階（17枝階）を選び出した。表-4はこのような枝全体の発病を比較したものである。接地枝では、95本中、21本が発病していて、発病枝率は22.1%であった。一方、非接地枝で

表-3 接地枝と非接地枝の発病比較

	接地	非接地
枝の位置 平均枝階	8.1	7.0
平均地上高(c m)	51	78
調査した1年生枝数	299	353
発病枝数	59	290
発病枝率 (%)	19.7	82.2

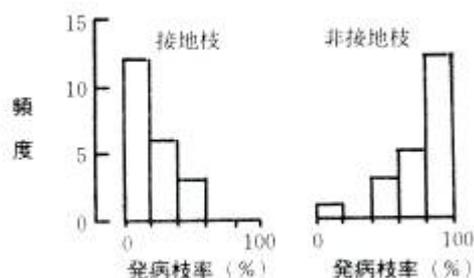


図-2 接地枝と非接地枝の発病枝数の頻度分布

表-4 接地枝と非接地枝の発病比較
(同一個体で同一枝階)

	接地	非接地
枝の位置 平均枝階	7.5	
平均地上高(c m)	69	
調査した1年生枝数	95	149
発病枝数	21	131
発病枝率 (%)	22.1	87.9

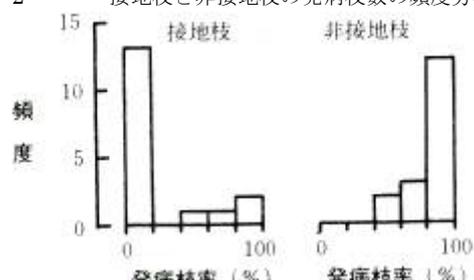


図-3 接地枝と非接地枝の発病枝数の頻度分布
(同一個体で同一枝階)

は 149 本中、131 本が発病していて、発病枝率は 87.9%であった。このことは、枝の位置（高さ）よりも、その枝が接地するか否かが、トドマツ枝枯病の発病に関しては、より重要であることを示すものである。また、図-3に、同一個体の同一枝階ごとに集計した発病枝率の頻度分布を示した。接地枝で 60%以上の高い発病枝率を示す枝階があることを除くと、ほぼ図-2の個体レベルの頻度分布と類似の傾向を示した。

(4) 考 察

トドマツ枝枯病の発病は、地面に接する枝に比べて接しない枝に著しく多いことがわかった。この結果は、「地面に接して越冬する枝が発病しにくい」という仮説が妥当であることをほぼ証明したものと見える。このような枝の接地、非接地と発病の関係は、個体レベルの接地、非接地に拡大してもある程度あてはまると考える。倒伏して越冬したとみられる（接地）個体よりも雪中で斜立して越冬したとみられる（非接地）個体の方が観察上多く発病している傾向がある。しかし、地面に接して越冬することがどうして発病の抑制につながるのかは不明である。この問題を解明することが本病の発病誘因を特定する手がかりになると考えた。第2節、3節では、いくつかの調査や試験を実施してこの発病抑制の内容を検討する。

2 越冬処理による発病の違い

(1) はじめに

トドマツ枝枯病の発病に積雪が重要な役割を果たしていることは明らかである。しかし、積雪がどのような機構を通して本病の発生と関連しているかは全く不明である。第1節の接地枝・非接地枝の発病調査の結果は、積雪そのものよりも積雪中の枝あるいは個体の越冬様式がより重要であることを強く示唆した。すなわち、この結果は接地枝や倒伏した状態で越冬する個体の発病は抑制され、反対に非接地枝や斜立した状態で越冬する造林木の発病は促進されたと読み替えられる。このような知見をもとに枝レベルでは接地状態に相当するような処理と非接地に相当するような処理、個体レベルでは倒伏状態に相当するような処理と斜立（または直立）状態に相当するような処理を考案した（薄井・浅井，1982；浅井・薄井，1982）。ここでは、それらの処理を主体にした何種類かの越冬処理試験を実施することにより、1. 積雪による病原菌の発育保障、2. 雪圧、3. 積雪から受けるストレスの内容について検討した。

(2) 試験方法

1) 感染苗木の越冬処理試験

咲来の被害枝の多い造林木の樹冠下に地表面まで埋めた鉢植苗（鉢あたり1本植え）を1980年5月末から8月末まで放置して自然感染させ、中川の苗畑に移した。使用した苗木は、7年生の名寄産同一クローンで平均苗高は56 cmであった。同年11月20日に、図-4のような各処理（1処理8本）を行った。ただし、高位置区のみ12月23日に処理した。

放置区：自然放置した。

高位置区：2本のタルキを地面に打ち込み、鉢の上面が地上50 cmの高さになるように、タルキの間に鉢を挟んで針金で固定した。鉢の凍結を回避するために積雪が70 cmになった12月23日に処理した。12月23日以前は放置区と同じ扱いをした。

雪圧除去区：90 cm×180 cmの合板2枚を組み合わせ、長辺を接地させて屋根型に組んで苗木を覆い、両側も密閉した。処理は放置区の鉢が雪上に出た4月22日まで行った。

除雪区：11月15日から3月31日まで降雪のたびに除雪した。

早出し区：3月23日に除雪して、早く雪から出した（結果的に自然融雪より約1ヵ月早く雪から出

た)。

上木区：植栽間隔 2 m × 3 m，樹高 7 m，胸高直径 10 cm の閉鎖したカラマツ林の樹冠下で越冬させた。

各処理には，非感染苗木を 8 本ずつ同様に鉢植して対照区に用いた。

発病調査は，1981 年 6 月に行った。すべての苗木について，1 年生幹および第 1 枝階から第 3 枝階までの枝階ごとに輪生枝上にある全 1 年生枝数と柄子殻形成枝数を記録した。なお，この冬の中川の積雪期間は，1980 年 11 月

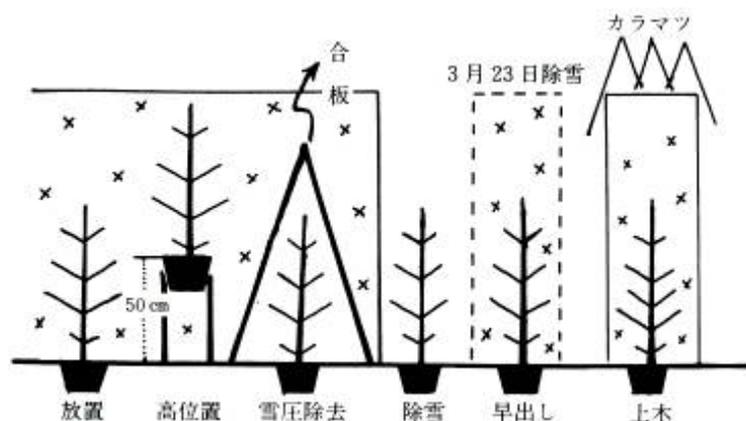


図-4 感染苗木に対する各処理の模式図

15日から1981年4月24日までであり，最深積雪深は 120 cm であった (第 2 章参照)。また，上木 (カラマツ林) 下の積雪期間や最深積雪深は放置区と同じとみなせた。

2) 皆伐跡地と広葉樹二次林下の交互植え替え試験

咲来の被害程度が軽微な造林木を皆伐跡地 (皆伐区) と広葉樹二次林下 (上木区) からそれぞれ 20 本 (平均樹高約 170cm) ずつ選び，互いに他の区へ 1980 年 11 月に植え替えた。そのうち 10 本は幹を支柱に縛って直立状態で越冬させ，他の 10 本はできるだけ地表に接するように寝せ植えした。植え替えた造林木とは別に，被害程度が同じくらいの造林木を上木区と皆伐区から各々 11, 12 本選び，対照木 (無処理) とした (図-5)。この試験は，1. 直立と寝せ植えの両処理間の発病差，2. 処理に及ぼす生育場所の前歴の影響を確認することにある。発病調査は，1981 年 6 月に行った。すべての苗木について，第 1 枝階から第 5 枝階までの枝階ごとに輪生枝上にある全 1 年生枝数と柄子殻形成枝数を記録した。なお，この年の試験地における積雪期間は，おおよそ 1980 年 11 月 15 日から 1981 年 5 月 5 日頃までであり，最深積雪深は 180 cm であった (第 2 章，本章第 3 節参照)。

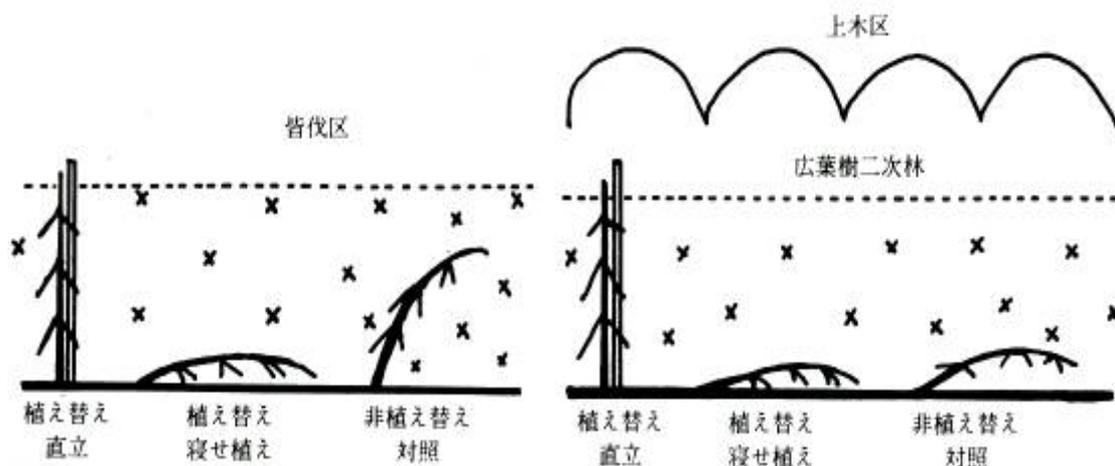


図-5 植え替え処理の模式図

3) 柄孢子接種枝の越冬処理試験

1981年6月に、中川のトドマツ産地別見本林から、病原菌の柄子殻が形成された1年生枝260本を採取した。採取した枝は1600mlの水道水に約1時間浸した後、十分に振とうしてトドマツ枝枯病菌の柄孢子懸濁液を作った。この孢子懸濁液を用いて、直ちに、同じ見本林の被害程度

がごく軽微な5本のトドマツに噴霧接種した。1本の木につき、地上高3m以上の高さにある枝（以下、3m枝と呼ぶ）、地上高1m前後の高さにある枝（1m枝）、地上高0.3m前後の高さにある枝（0.3m枝）を各々5本ずつ計15本の枝を選び、それぞれの枝の新条（シュート）に接種した。

接種した枝は、新条が10本以上展開している枝を選んだ。接種は、新条の表面が十分に濡れるまで、噴霧器で孢子懸濁液を吹きつける方法で行った。

これらの接種枝に対して、1981年12月16、17の両日（積雪深約80cm）に、積雪を除雪後図-6のような各処理を表-5の枝数・新条数について行い、すぐに元の積雪深まで埋めもどした。処理後、数日の降雪により、3m枝の無処理（対照）区を除く全処理区が埋雪した。

対照区：0.3m枝、1m枝、3m枝とも自然状態で放置した（無処理）。

縁台区：90cm×180cmの合板を地上70cmの高さに固定し、この縁台の上に接種木から切り取った枝を並べて、新条が積雪の沈降力による引っ張りを受けないようにした。

懸垂区：地上80cmの高さに針金を水平に張り、この針金から長さ15cmのひもを垂らし、ひもの下端を切り枝の根元に結びつけてぶら下げた。切り枝の新条が積雪の沈降力で引っ張られるようにした。

置床区：3m枝（切り枝）を地表面に置いて接地枝と同じ条件にした。

副木区：0.3m枝と1m枝について、生き枝のまま、枝の主軸の腹（下）面に副木をあてて新条が積雪の沈降力で引っ張られるようにした。副木の高さは、ほぼそれぞれの枝の付け根の高さである。

小縁台区：1m枝の高さに、接種した新条が収まるような小縁台（50cm×60cm）を作り、生き枝のまま台上に固定して新条が積雪の沈降力による引っ張りを受けないようにした。

発病の調査は、切り枝については雪上に出た直後（1982年4月26日（縁台、懸垂区）、5月9日（置床区））に、生き枝については同年6月15日に各処理枝の1本ごとに新条（正確にはすでに越冬したので1年生枝）の発病率を調べた。

(3) 試験結果

感染苗木の越冬処理試験

トドマツ枝枯病菌を接種しなかったグループ（対照区）はすべて健全であった。一方、接種苗木は除

表-5 越冬処理の種類と処理枝数・新条数

処理	0.3m枝		1m枝		3m枝		
	枝数	新条数	枝数	新条数	枝数	新条数	
対照区	10 ^本	106 ^本	5 ^本	66 ^本	10 ^本	126 ^本	
切り枝	縁台区	5	61	5	56	5	57
	懸垂区	5	58	5	61	5	61
	置床区					5	55
副木区	5	54	5	59			
小縁台区			5	59			
計	25	279	25	301	25	299	

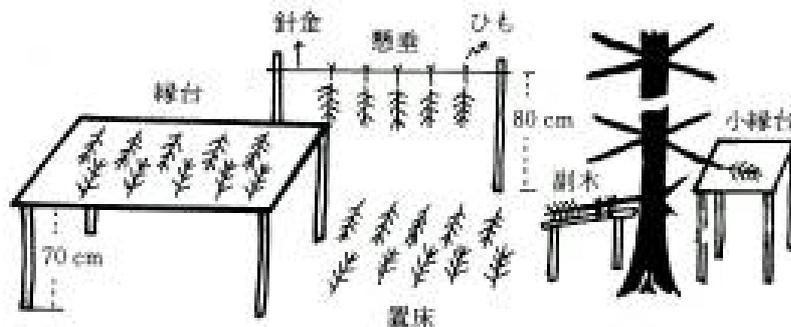


図-6 柄孢子接種枝に対する各処理の模式図

雪区を除く全処理の全個体で緑色のままの脱葉とその後にはトドマツ枝枯病菌の柄子殻形成が認められた。除雪区の各苗木は寒風害にかかり、枯死した枝上に柄子殻を形成したが、緑色のままの脱葉は認められなかった。このように、除雪区の発病は他の処理区の発病とは基本的に異なるものである。

表-6 に、除雪区と対照区を除いた各処理区の 8 本の苗木の枝階別の平均発病率を示した。各枝階の発病率は、その枝階の全 1 年生枝数に対する柄子殻形成枝数の比である。放置区の発病率は第 1 枝階で 66.3% と高いものの、第 2, 3 枝階になると発病率は急激に低下していた。この放置区と比べて明らかに発病が促進されたのは高位置区であった。高位置区の発病率は他の処理区と比べて際立って高く、その違いは下部の枝で特に顕著であった。DUNCAN' S new multiple-range test (STEEL and TORRIE, 1960) を用いた平均発病率相互の比較では、高位置区の第 2, 3 枝階および全枝階の平均発病率は他の全区と 5% 水準の有意差が認められた。また、雪国除去区の第 1 枝階の発病率は他の処理区に比べて有意に低かった。有意差は認められなかったが、雪国除去区の第 3 枝階の発病率は高位置区を除く他区に比べて高く、枝階による発病率の差はそれらの区より小さかった。早出し区、上木区の発病率は、いずれの枝階においても放置区との間に有意な差は認められなかった。

表-6 各処理区の枝階別の平均発病率 (%)

	放置	高位置	雪圧除去	早出し	上木
第 1 枝階	66.3a	99.2a	28.0b	68.4a	79.6a
第 2 枝階	15.4b	100.0a	26.4b	13.7b	53.9b
第 3 枝階	2.2b	83.2a	8.4b	2.0b	2.9b
全 枝 階	12.3b	86.8a	16.3b	15.3b	19.5b

発病率は 1 年生総枝数に対する柄子殻形成枝数の比で示した。1 年生幹は第 1 枝階に含めた。数字の横の記号が同じ処理間には 5% 水準で有意差がないことを示す (DUNCAN' S new multiple-range test)。高位置区の発病が著しく促進された。

皆伐跡地と広葉樹二次林下の交互植え替え試験

表-7 に、交互植え替え処理木と対照木の発病状況 (発病率) を示した。発病率は、第 1~5 枝階の輪生枝上の全 1 年生枝数に対する柄子殻形成枝数の比を枝階別の平均値で示した。なお、有意性の検定は全枝階 (第 1~5 枝階) を込みにした平均発病率に対して、DUNCAN'S new multiple-range test (STEEL and TORRIE, 1960) によって行った。まず、皆伐区で生育した造林木を上木区へ植え替えたグループの発病率は直立処理で 50.1%、寝せ植え処理で 41.6% であり、どちらも皆伐区に放置された対照木の発病率 (47.9%) との間に有意な差は認められなかった。このことは、皆伐地で生育した個体を一時的に上木下で越冬させても発病抑制作用は受けないことを意味しよう。次に、上木区で生育した造林木を皆伐区へ植え替えたグループのうち、直立処理の発病率は 44.4% で、上木区に放置された対照木の発病率 (34.3%) との間に有意な差は認められなかった。これに反し、寝せ植え処理の発病率は 15.6% で明らかに発病抑制作用を受けたと考えられる。

皆伐区、上木区のどちらで生育した造林木も、平均発病率は直立処理で最も高く、次に対照木、寝せ植え処理の順であった。上木区で生育した造林木の寝せ植え処理を除くと有意差はないものの、直立処理で発病促進、寝せ植え処理で発病抑制が認められた。しかし、寝せ植え処理の発病抑制効果は、両グループの間で著しい違いが認められた。この違いは、皆伐区と上木区との感染菌量の違いや後述する冬期以外の時期の上木による保護効果の有無に関係するものと考えられる (第 3 節考察参照)。また、上木区から皆伐区への寝せ植え処理の第 1 枝階から第 5 枝階までの枝階ごとの発病率の変動係数 0.128 は他の処理の変動係数 (0.426~0.579) と比較して著しく小さかった。

枝階	処 理					
	直立		寝せ植え		対照	
	上木→皆伐	皆伐→上木	上木→皆伐	皆伐→上木	上木	皆伐
第1枝階	15.0	14.3	13.5	9.3	25.0	10.7
第2枝階	69.2	20.8	16.7	37.5	49.7	54.5
第3枝階	45.6	57.6	18.1	21.4	44.2	51.5
第4枝階	49.9	74.4	16.3	44.3	32.6	60.6
第5枝階	27.5	57.3	13.7	53.8	14.7	42.7
全枝階	44.4a	50.1a	15.6b	41.6a	34.3a	47.9a
変動係数*	0.505	0.579	0.128	0.534	0.426	0.448

*各処理の第1枝階から第5枝階までの枝階ごとの発病率の変動係数を示す。発病率は1年生総枝数に対する柄子殻形成枝数の比で示した。1年生幹は第1枝階に含めた。全枝階の数字の横の記号が同じ処理間には5%水準で有意差がないことを示す(DUNCAN' S new multiple-range test)。上木区から皆伐区へ植え替えたグループのうち、寝せ植えた造林木の発病が抑制された。

柄孢子接種枝の越冬処理試験

図-7に、枝の高さ別に各処理区の発病率を示した。1枝も発病しなかったのは、冬期間中、埋雪することのなかった3m枝の対照区だけであった。それ以外の処理区では、何本かの枝が発病した。このことから、たとえ感染していてもその枝が埋雪しなければ、発病しないといえよう。次に、0.3m枝と1m枝の対照区の発病を比較してみる。発病率のバラツキが両枝とも(特に1m枝)大きかったので有意差には至らなかったが、1m枝の平均発病率(34.4%)の方が0.3m枝のそれ(8.1%)より高かった。このように、1m枝の発病率が0.3m枝より高いのは、第1節で述べた枝の接地(0.3m枝)、非接地(1m枝)が関与しているものと考えられる。

この越冬処理試験で、最も発病が激しかったのは0.3m枝の副木区であり、対照区に比べて平均発病率が有意に高かった(t=5.974, P<0.001)。この処理区で発病率が著しく高かった理由の一つとして、枝の主軸部分に副木をあてることによって、接地が妨げられ、積雪が枝葉を強く引っ張ったことがあげられる。しかし、1m枝の副木区では0.3m枝のような発病促進は認められなかった。これは、1m枝がもともと非接地枝であるために、積雪が枝葉を引っ張ることに関して、副木と放置の処理間にほとんど差が生じなかったことによるものと考えられる。0.3m枝に対する副木区のような発病促進を切り枝の懸垂区に、0.3m枝の対照区のような発病抑制を縁台、置床の各処理区に期待したが、うまくいかなかった。特に、置床処理では予想に反して発病がやや促進された。この理由は不明である。ただし、これらの各処理には切り枝を使用した。切り枝を使用した理由は、3m枝を埋雪させるには切り枝以外の方法を考えられなかったことと、生き枝の副木や小縁台処理に比べて処理が簡単でしかもその新条は積雪の沈降力を確実に受ける(あるいは受けない)と考えたからである。枝を切り取ったことの

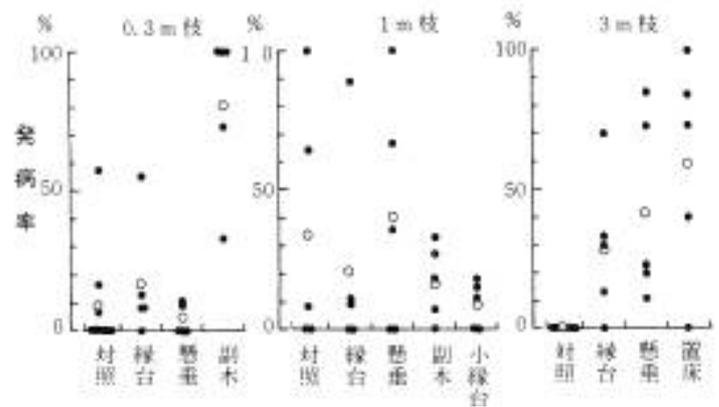


図-7 枝の高さ別の各処理枝の発病率
●：処理枝，○：各処理の平均値

影響については再検討が必要である。しかし、1 m枝の小縁台区では生き枝のまま処理したがやや発病が抑制されたようにみえること、0.3m枝の副木区で発病が多かったことは、積雪の下で枝にかかる何らかの物理的な作用が発病に重要なかわりがあることを暗示している。

(4) 考 察

ここで行った3種類の試験は、積雪と発病の関係について、いくつかの興味ある結果を提示した。その一つは、感染苗木の越冬処理試験の雪圧除去区で放置区と同じ程度の発病が認められた(表-6)ことである。秋本(1982)は、被害造林地での同様の雪圧回避試験において、雪圧回避木にトドマツ枝枯病の発病を確認している。また、最近、佐々木(1988)もいくつかの越冬処理試験の中で、雪圧除去区を設定し、やはり同じ結果を得ている。これらの結果は、トドマツ枝枯病が積雪と直接接触しなくても発病することを、少なくとも雪圧が本病発生の必須要因ではないことを示している。積雪との接触がなく、雪圧がかからないという意味では雪上枝もこれに該当しよう。しかし、雪上枝は、柄孢子接種枝の越冬処理試験の3 m枝の対照区で明らかのように、また被害造林地でしばしば観察されるように、発病しない(図-7)。秋本(1985)は、シャーレ内の寒天培地に病原菌を植菌し、0℃の恒温器内と積雪下、無雪条件下(すきま風と散光が入る物置)で越冬させて菌糸の生長を調べた。その結果、無雪条件下の菌は全く発育しないのに対し、積雪下の菌は0℃の恒温器内のものとほぼ等しい発育を示したことから、積雪の果たす役割の一つは、外気の低温を遮断し、菌の発育温度を保障することにあると考えた(秋本, 1985)。積雪下のもつ物理的条件は、雪圧以外に0℃、暗黒、高湿度などが考えられる。このような物理的環境を雪を用いずに作りだし、その中で感染苗木を越冬させることができれば、トドマツ枝枯病の発病が認められるのかもしれない。

積雪の果たす役割が病原菌の発育を保障することにあるとすれば、埋雪期間の長短は本病の被害の度合いと関係をもつと考えられる。高標高や多雪地帯の造林地の被害が激しいことは埋雪期間の長いことが発病を促す傾向のあることを示唆するものとみてよい。ただし、今回の感染苗木の越冬処理試験の早出し区(自然融雪より1ヵ月早く雪から出した)の発病は放置区のものと同様でなかった(表-6)。この原因は不明である。埋雪期間にだけ注目してみると、植え替え試験の寝せ植え処理は埋雪期間は長いにもかかわらず発病は抑制された(表-7)。また、埋雪期間の長い地面近くの枝(接地枝)の発病は少なかった(図-7および第1節)。さらに、感染苗木の越冬処理試験の高位置区では苗木を50 cm持ち上げたので、その分、埋雪期間は短縮したが、発病率は放置区より有意に高かった(表-6)。このような現象は、埋雪期間の長短だけでは全く説明できず、積雪の果たす病原菌の発育保障の役割の他に、積雪と発病枝との間に別の何らかの関係のあることを示唆する。

今回の試験結果の中で、他の処理に比べて苗木の発病を際だって促進した処理が二つみられた。一つ

は、いま述べた高位置処理であり、別の一つは柄孢子接種枝の越冬処理試験において、接地する枝(0.3m枝)に副木をあてて人工的に接地を妨げた処理である(図-7)。このほかに、統計的に有意に発病が促進され

発病促進	抑制処理	備 考
高位置		表-6
副 木	(小縁台)	図-7
直 立	寝せ植え	表-7
1m枝(非接地)	0.3m(接地)	図-7

た処理として、直立処理、非接地などがあげられる(表-8)。病害の発生は、しばしば環境条件の大きい変化によって、寄主・寄生者間の相互関係のバランスがくずれた結果生じたり、寄主側の生理的な乱れによって病気に対する抵抗力が衰えた場合に病気は進行すると考えられている(YOKOTA, 1975b)。このような考え方をトドマツ枝枯病の発病促進処理に適用すると、これらの処理がトドマツ造林木に生理的乱れあるいは何らかのストレスを

ひきおこしたことになるであろう。発病枝が積雪中の枝に限られているので積雪に関連して生じていると考えられる。

積雪中で生じるストレスにはどんなものがあるか考えてみる。まず、積雪のもつ物理的な性質に起因するストレス（温度、湿度、照度）について考える。温度が植物体のストレスになることはよく知られている。しかし、積雪の熱伝導率は小さく、積雪が 50 cm 以上あれば厳寒期でも地面の温度は 0℃であることが知られている（酒井，1982）。このような 0℃程度の温度が越冬中の造林木のストレスになり、発病を促進しているとは考えにくい。次に、湿度についてであるが、積雪下の空洞内の空中湿度が飽和状態である（酒井，1982）ことから埋雪中の枝葉が多湿な状態におかれていることは間違いないであろう。しかし、過湿ともいえる条件下の地表に接して越冬する枝の発病が抑制されることから高湿度が発病を促進しているとは考えにくい。また、積雪 40～50 cm の層には光はほとんど透過せず、ほぼ暗黒であるとみなされる（酒井，1982）。このような光条件についても、より不利な条件下にある接地枝の発病が抑制されることから暗黒（照度不足）が発病を促進しているとは考えにくい。以上に述べてきたように、積雪のもつ物理的な性質に起因するストレスが発病を促進しているのではないようである。

そこで、著者は積雪の物理的的刺激として柄孢子接種枝の越冬処理試験の副木区で試みた積雪が枝葉を強く引っ張ることに注目した。副木処理以外の高位置処理や直立処理、非接地はいずれも結果的に積雪が枝葉を強く引っ張る処理（あるいは状態）になっている。このようなことから、トドマツ造林木に作用し、発病を促進するストレスは積雪が枝葉を強く引っ張ることであると考えた。一般的に、このような積雪の引っ張りストレスは生育段階の初期のうち倒伏して越冬するために小さいままで推移するが生育段階が進むに従って積雪に抗して立ち上がろうとするために急増するものとする。

雪圧は本病発生の必要要因でないことは前述した。しかし、ある生育段階に達した個体に対しては、雪圧（沈降力）は強い引っ張りストレスとなって発病を促進するものとする。上木下で生育していた個体を寝せ植えした場合には、発病の抑制とともに枝階間の発病率のバラツキが小さい（表-7）という特徴がみられた。また、積雪と直接接触しない雪圧除去区においても枝階による発病率の差は小さく、他の処理と著しい違いを示した（表-6）。このように、引っ張りストレスが極めて小さいか、ない場合には枝の位置（枝階）によるストレスの差も小さいために、枝階間の発病率の差も小さくなると考えられる。

3 上木効果

(1) はじめに

トドマツ枝枯病は保残木の多い造林地や上木下では被害が少なく、被害程度も軽微であることが知られている。通常、この現象は、トドマツ枝枯病に対する上木（による保護）効果と呼ばれる（YOKOTA et al., 1975 ; 北海道林務部, 1980 ; 小林・今野, 1984）。しかし、上木がいつ、どのような機構を通して保護効果を発現するのかは全くわかっていない。上木効果の原因が冬期間につくられるのであればそれは第1, 2節で検討してきた「地面に接して越冬する枝が発病しにくい」現象が関連するものと予測される。そこで、まず皆伐跡地と上木下における積雪環境（積雪深、雪質、密度など）およびそこに生育する造林木の越冬状態を比較した。次に、病原木を中央に配置した開地と上木下のモデル林分を作成し、被害木の出現の仕方から冬期以外の時節における上木効果について検討・整理した。

(2) 調査方法

1) 皆伐跡地と広葉樹二次林下の積雪環境、造林木の越冬状態

調査対象木は、咲来の 1971 年植栽のトドマツ造林地の皆伐跡地（皆伐区）と広葉樹二次林下（上木区）

の造林木である。トドマツ枝枯病の被害状況は、皆伐区ではほとんどすべての造林木が被害を受けていた。これに対して、上木区では被害木は少なく被害程度も皆伐区より軽微であり、明らかにトドマツ枝枯病に対する上木効果が認められた。

1980年11月に積雪期間中の調査に備えて、調査木の日印付けと位置図を作成した。調査木には皆伐区・上木区ともにこの造林地で最も樹高の低いグループに属する140～210 cmの個体を選び、樹高と根元径を測定した。積雪期間中の調査を、1980年12月26日、1981年1月27日、2月26日、3月16日、4月8日、4月22日、5月9日（積雪0 cm）の計7回行った。一回の調査ごとに、皆伐区と上木区の調査木をそれぞれ3本ずつ掘り出し、越冬状態を観察した。積雪断面の調査では、掘り出した調査木のそばで、雪質と密度の観察・測定を行った。雪質の分類は、清水（1965）の積雪観測法に従って行った。密度測定のための採雪は各雪質層の中央部から容積100cm³の角型サンプラーを用いて行った。また、最大積雪深を知るために皆伐区と上木区に一箇所ずつ簡易積雪深計（高橋、1968）を設置した。

2) 開地と土木下での柄孢子接種試験

1981年5月に、中川の上木のない畑地とドロノキ（*Populus maximowiczii* Henry）林（植栽間隔2 m×3 m、樹高8 m）下に、健全な大苗（平均樹高105 cm）と小苗（同45 cm）を各々50本ずつ、植栽間隔1 m×1 mで交互に植栽した。5月下旬に咲来の被害造林地から被害程度のほぼ等しい造林木2本（樹高170 cm）を根を付けた状態で中川へ移し、接種源としてそれぞれの中央に植栽した（図-14参照）。なお、この2個体の病原性をできるだけ等しくするために、両個体とも柄子殻形成枝を同数（70枝）だけ残し、それ以外の柄子殻形成枝を切り取った。また、もう一つの伝染源である子のう盤を形成した2年生枝もすべて切り取った。発病調査は、1982年7月に行った。すべての苗木について、1年生幹と第1枝階および第2枝階の輪生枝の先端にある全1年生枝数と柄子殻形成枝数を記録した。輪生枝上に発病が認められない苗木については、さらに、側生枝上の1年生枝の発病の有無を記録した。

(3) 調査結果

皆伐跡地と広葉樹二次林下の積雪環境

1) 積雪深

図-8に調査地の積雪深の推移を示した。実線は皆伐跡地（皆伐区）、破線は広葉樹二次林下（上木区）の積雪計設置箇所での積雪深である。積雪計設置箇所での皆伐区と上木区の積雪深の差は小さく、2、3月の多雪期に約10 cmの差がみられる程度である。しかし、調査木を掘り出した箇所ごとの積雪深で比較すると、ほぼ全期間を通して皆伐区の方が深かった。皆伐区と上木区の積雪深の差は2月26日で最も大きく、3箇所ずつの平均で約35 cmの差がみられた。簡易積雪計による調査地のこの冬の最深積雪深は皆伐区で180 cmであり、3月16日の調査日の積雪深に偶然に一致した。この最深積雪深の起日は、調査地の最も近くにある音威子府の気象観測所での起日とほぼ一致した。

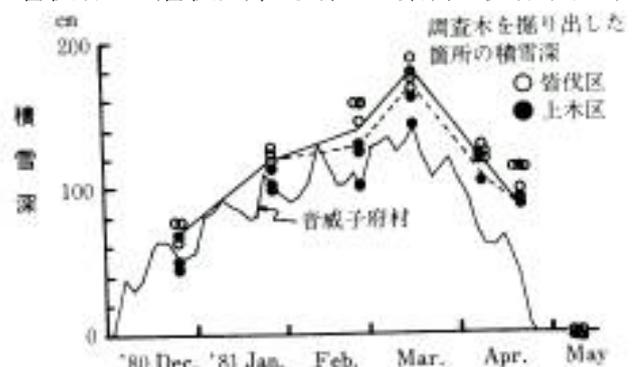


図-8 調査地の積雪深の推移
実線は皆伐区、破線は上木区のそれぞれ積雪深を表わす。
皆伐区と上木区の積雪深の差は小さい。

2) 雪質と密度

図-9に調査地の雪質と密度の推移の一例を示した。雪質には、積雪深が増えていく増雪期（12月26

日、1月27日、2月26日、3月16日)と溶けていく融雪期(4月8日、22日)とで明らかな違いが認められた。すなわち、増雪期には、新雪層やこしまり雪層がそれぞれ20 cmほどの厚さで積雪の上層に認められたが、融雪期には両層ともほぼ消滅した。また、しまり雪層は、増雪期には積雪深の増加につれて厚さを増し、最深積雪深の観測された3月16日には120~140 cmに達したが、融雪期にはその大部分が消滅した。さらに、ざらめ雪層は、増雪期には地表近くでわずかに認められたにすぎないが、融雪期にはほぼ全層にわたって認められた。

図-10に調査日別の採雪位置と密度の関係を示した。採雪位置は雪面からの深さで表わした。雪の密度(1月27日から測定)にも、雪質と同様に増雪期と融雪期とで顕著な違いが認められた。増雪期の1月27日と3月16日とには50日間の経過があるにもかかわらず、採雪位置と密度との関係は類似していた。この時期の雪の密度は、雪面近くで小さく下層ほど大きい傾向を示した。その結果、大半が図中の右上がりの2本の曲線の間に位置した。一方、融雪期には採雪位置に関係なく、破線のように0.36~0.48 g/cm³の比較的大きい値を示した。これは雪質が全層ざらめ雪化したことに対応するものである。

このような層ごとの雪質や密度の特徴は皆伐区・上木区の両区にほぼ共通しており、両区に間に明らかな違いは認められなかった。造林木の越冬状態12月26日(積雪深70 cm)時点では、皆伐区・上木区とも調査木の大部分は直立して、埋雪しているものはみられなかった。

1月27日~4月22日の期間には、両区ともすべての調査木が埋雪していた。埋雪の仕方は大きく二つの型に区分できた(図-11)。一つは、幹の下部から屈曲して弓なりになる倒伏型(図-11のA)である。もう一つは、梢端が最も雪面に近い位置にあるか、または

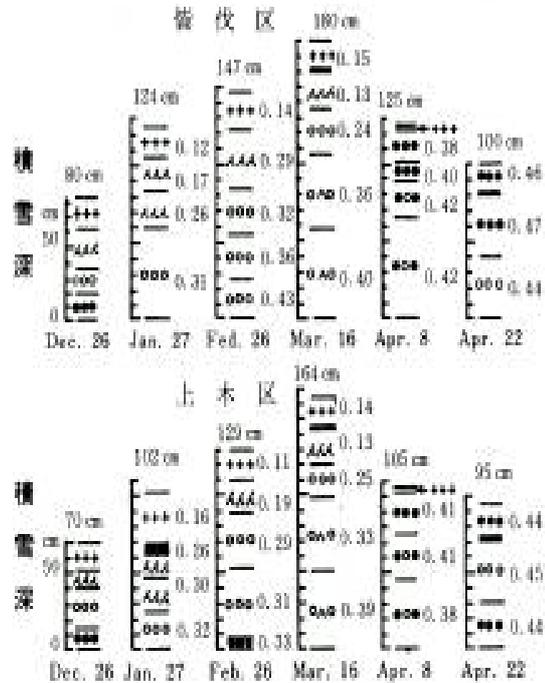


図-9 雪質と密度の推移例

雪質の表示法(同一層内に2種類の雪質が観察される場合には、この表示を組み合わせて用いた。)

+++ 新雪 ooo しまり雪 ■■■ ざらめ雪
 AAA こしまり雪 ▲▲▲ しもざらめ雪 ■■■ 氷板

雪質の上側の数字は、各調査日の積雪深を表わす。
 各層の右側の数字は、層の中央部の密度(g/cm³)を表わす。

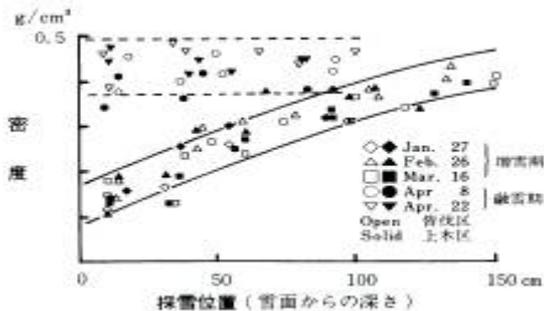


図-10 採雪位置と密度の関係



図-11 造林木の埋雪状態の模式図

梢端近くのみ屈曲する斜立型（図-11のB）である。これらの中間的な型、例えば幹の下部は斜立するが中間から著しく地表に向かって屈曲するものなどがいくらかみられた。埋雪木の雪面に最も近い位置にある幹の高さ（図-11のh）が90 cm以上の調査木は斜立型を、60 cm未満のものは倒伏型を示した。hが60~90 cmのものには倒伏型と中間型の両者がみられた。

図-12に、調査日別のhを示した。上木区では、1月時点ですでに2個体が倒伏型を、1個体が中間型を示した。一方、皆伐区では、1月時点で倒伏型を示す個体はなかったが、2月になると倒伏型の個体が現われた。4月には際立って小さいh（15~20 cm）を示す個体が現われた。4月測定 of これら5個体はいずれも樹高150 cm以下の小さい個体であった（図-13参照）ことから、4月のhの低下は経時的变化とは別のものと考えた方がよいと思われる。4月のhがほぼ20 cmの5個体を除外すると、上木区では1月以後の、皆伐区では2月以後のhの経時的变化は、バラツキはあるものの比較的小さいといえよう。このことは、上木区の造林木の越冬状態（埋雪型）が積雪初期の時期に決定されることを意味する。なお、今回の造林木の越冬状態の調査中、トドマツ枝枯病による脱葉を最初に確認したのは2月26日であった。YOKOTA（1975a）は自然感染トドマツの各部位からの病原菌の分離を経時的に行い、節間枝（輪生枝と輪生枝の間に着生する枝）では2月に病原菌の分離率が急速に高まることを報告している。今回の調査で2月26日に雪中で発病がみられたことは、このYOKOTA（1975a）の報告と対応するものとみられる。

一般的に、植栽後数年の造林木は倒伏して越冬するが、その後樹体の生長に伴って徐々に雪中で斜立するようになり、ついには主幹が積雪面を脱して埋雪しなくなるものと考えられる。このことは、造林木の大きさと埋雪型（したがって図-11のh）との間に密接な関係があることを示唆する。図-13に、調査木の樹高（H）とhの関係を示した。ここでは、図-12で認められたいくらかのhの経時的变化は無視して全測定値を込みにして示した。調査木のhは皆伐区、上木区とも、確かに樹高が高い木で大きいという傾向がみられた。上木区の樹高に対するhの回帰式は、次式で与えられた（H、hの両者とも単位はcm）。

$$h = 1.387H - 176.2 \quad (r = 0.814) \dots\dots\dots (3-1)$$

相関係数の値は0.1%水準で有意であり、上木区の樹高とhの関係は皆伐区より密接であった。上木区の樹高の範囲内（≤180 cm）で両区の埋雪状態を比較すると、皆伐区では斜立型と倒伏型の個体数がほぼ同数なのに対して、上木区では大半が倒伏型であり斜立型は皆無であった。

このように、上木区の造林木が倒伏しやすいのは、閉鎖林冠下で生育するために樹高に比べて根元径（D）が小さく、したがって形状比（H/D）が高いことによるものと考えられる。例えば、樹高のほぼ等しい調査木（150~180 cm）の形状比は、皆伐区の48.1に対し上木区では57.2であり、両区間に有意差（t=3.958, P<0.001）が認められる。ただし、皆伐区の調査木でも、多くの個体が上木区のものと同じように（3-1）式の直線の回りに分布しているのが認められる。これは、前述したように、調査木を造林地の中の最も樹高の低いグループから選定したことに関係すると考える。すなわち、皆伐区

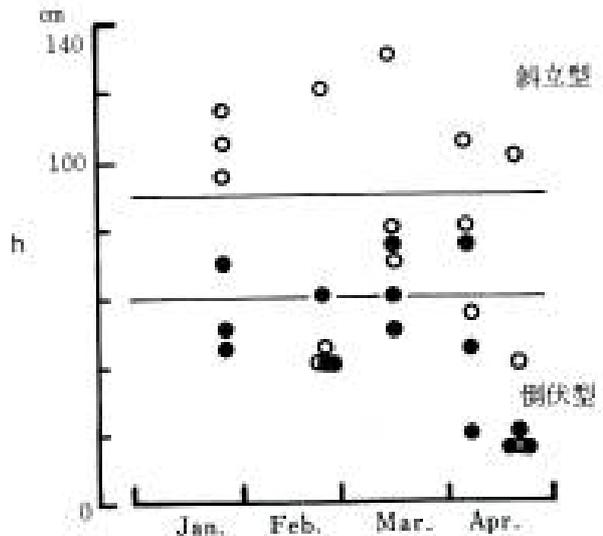


図-12 調査日とhの関係
○皆伐区 ●上木区
上木区の埋雪型は積雪初期に決定される。

でも微地形や隣接木の影響を受けた被圧木が多く含まれている。これらの個体の生育環境は上木下と比較的似ていて、このため樹高と h の関係も上木区のそれと類似するものになったと考える。しかしながら図-13 の破線で囲まれた斜立型の4個体に代表されるように、皆伐区では同じ樹高の範囲内 (≤ 180 cm) でも上木区に比べてかなり h の大きい個体が存在する。これらの個体は、林分中の最も樹高の低いグループから選定されてはいるが、より良好な光条件下で生育してきたために根元径が太く、より早期に斜立するようになったものと考えられる。皆伐区の樹高と h の関係が上木区のそれよりもバラツキが大きいのは、皆伐区のより多様な生育環境を反映したものと考えられる。

ここで、個体の生長と h の関係を考えてみる。 h は造林木の生長に伴って大きくなり、この値が最深積雪深と等しくなった時点で埋雪を免れる。積雪面から抜け出した枝はほとんど発病しないことから、造林木が埋雪を免れる高さにまで早く生長することが、本病の危険期脱出の必須条件であるといえる。そこで、(3-1) 式の関係が樹高のもっと高い側でも成立すると仮定することにより、造林木が埋雪を免れる樹高をおおよそ推定できる。すなわち、この地域の最深積雪深 200cm を (3-1) 式の h に代入することにより、 $H=271$ cm が得られる。樹高 271cm は、この地域の本病の危険期脱出の一つの目安になる。石坂 (1985) はこの地域の積雪深と被害造林地の実態調査から危険期脱出樹高を 300 cm と決定している。樹高 271cm はこの危険期脱出樹高 300 cm と比較しうる値である。危険期脱出樹高はトドマツを保育する場合の実用上の目標としてだけでなく、第4~6章で展開するように、被害造林地の将来の枯死本数(激害本数)を予測する基準値(交点樹高)として重要な役割を果たす。

開地と上木下での柄孢子接種試験

図-14 に、上木のない畑地(開地区)とドロノキ林下(上木区)の発病苗木の位置を被害度別に示した。開地区、上木区のどちらの区にも発病苗木がみられた。しかし、発病苗木数は、開地区が46本で上木区の20本より有意に多かった

($\chi^2=15.29$, $P<0.001$)。また被害度についても、上木区では発病木の大半が側生枝だけの発病にとどまっていたのに対し、開地区では発病木の半数が輪生枝の発病にまで及んでいた。なお、開地区と上木区の積雪深や積雪期間の差はほとんど認められなかった。

次に大苗と小苗の発病数を比較すると、開地区では大苗31本に対し、小苗15本、上木区では大苗18本に対し、小苗2本であった。

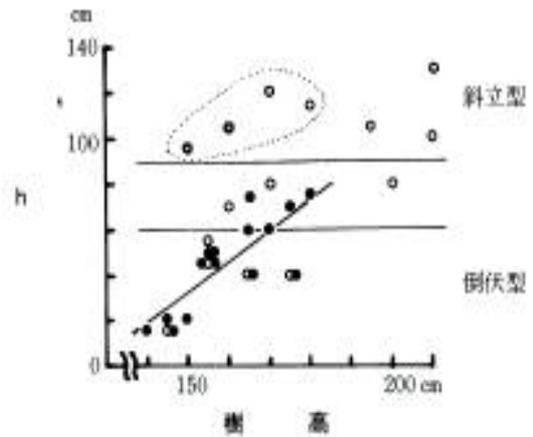


図-13 調査木の樹高と h の関係

○皆伐区 ●上木区

h は樹高が高い木で大きい。皆伐区の h の方が上木区よりも大きい。

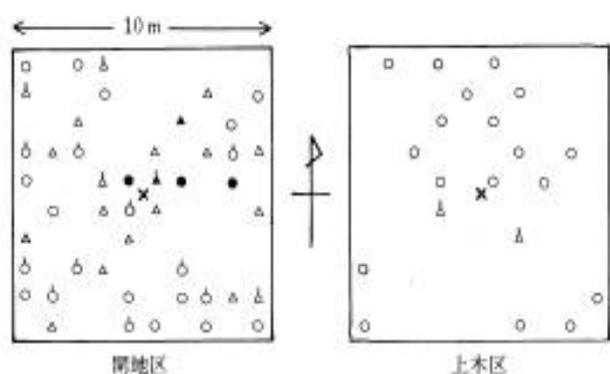


図-14 開地区と上木区の発病苗木の位置図

○: 側生枝のみの発病 △: (輪生枝上の1年生枝の) 発病率<25%
●: 25% ≤ 発病率 < 50%, ▲: 50% ≤ 発病率, ×: 接種源の造林木
記号の上の印は小苗を示す。

このように、開地区 ($\chi^2=10.31$, $P<0.01$), 上木区 ($\chi^2=16$, $P<0.001$) のいずれにおいても大苗の方が小苗より有意に多く発病した。小苗で発病数が少なかったのは、 h が小さくて接地型であると考えることで説明できよう。

開地区では発病木の位置的な偏りはほとんど認められなかった。しかし、発病率 $\geq 25\%$ の比較的被害度の高い苗木は、接種源の近辺からやや北東に多いようにみえる。感染後発病までの環境条件が、狭い植栽面 (100 m²) の中の方位によって異なることは考えられず、むしろ柄孢子飛散期 (6~7月) の常風 (南西風) と関係する可能性がある。

(4) 考 察

トドマツ造林地の積雪や造林木の越冬状態の実態調査は、雪害との関連でいくらかなされている (藤原ほか, 1971 ; 藤原・岩淵, 1975 ; 藤原・小野寺, 1976) が、トドマツ枝枯病と関連して調査された例 (増田ほか, 1976 ; 斎藤・水井, 1979 ; 北海道林務部, 1980) は少ない。今回の調査から、造林木の埋雪状態については全般的に上木区の方が皆伐区よりも倒伏しやすく、しかも上木区では積雪初期に倒伏するために倒伏期間が長いことがわかった。皆伐区の造林木に斜立型が多く、上木区に倒伏型が多いという結果は斎藤・水井 (1979) の報告と一致する。

皆伐区と上木区の積雪を比較すると、積雪深は皆伐区でやや深い、雪質や密度には明瞭な差は認められなかった。これは、閉鎖していても落葉広葉樹ばかりでしかも径級の小さい二次林では、雪質や密度に対しての影響は極めて小さいからであろう。しかし、広葉樹の大径木が保残されている樹冠下の積雪深は樹冠外よりも 40%浅いという報告 (増田ほか, 1976) にみられるように、保残木の樹種や大きさ、密度により積雪深は大きく変化するものとみられる。いずれにしても、今回調査した皆伐跡地と広葉樹二次林下の積雪環境はかなり類似していたにもかかわらず、トドマツ枝枯病の被害状況は大きく異なっていた。すなわち、前述したように皆伐跡地ではほとんどすべての造林木が被害を受けていたのに対して、広葉樹二次林下では被害木は少なく被害程度も皆伐区より軽微であった。このようなトドマツ枝枯病に対する上木効果の原因が冬期間につくられるものであるとするならば、それは上木下の造林木の多くが倒伏して越冬することと関係する可能性が高い。

開地と上木下での柄孢子接種試験では、開地で生育した個体を病原菌の飛散期前にドロノキの上木下に植栽して越冬させた処理での発病が開地に植栽して越冬させたものに比べて著しく少なく、また被害程度も軽微であった (図-14)。ここでは、明らかに上木効果が作用したものとみられる。前述したように、開地で生育した個体を上木下で一時的に越冬させても (冬期間の) 上木効果は発現しなかった (第2節)。したがって、ここで認められた上木効果は、冬期以外の時期の上木効果であるといえる。例えば、6~7月の病原菌の飛散時期であれば林内では飛散距離が短かったり、飛散量が少なかったりする作用や、早霜 (霜による枝の部分的な壊死が病原菌の侵入を容易にする (YOKOTA, 1975b)) の時期では上木による低温緩和作用などが考えられる。このような冬期以外の時期の上木効果に関する報告は皆無であり、今後の研究課題である。

上木効果に関して、これまで述べてきたことを整理してみる。上木効果は、その原因が冬期間 (造林木の埋雪期間) につくられるものと冬期間以外の時季につくられるものの複合した効果であるといえる。

冬期間以外の時季につくられるものとしては孢子の飛散抑制効果が最も重要であると考えられる。冬期間の効果は、上木下の造林木の多くが倒伏して越冬することによって受ける発病抑制効果であると考えられる。これは基本的には「地面に接して越冬する枝が発病しにくい」現象 (第1節) と同じである。しかし、開地で生育していた個体を上木下へ植え替えた処理では上木効果が認められなかった (表-7 参照) ことやカラマツの上木下で越冬させた感染苗木の発病は放置区のそれと変らなかった (表-6 参照) こ

となどから、冬期間の上木効果はそれほど大きいものではないと考える。

第3章では、発病枝や発病個体の越冬状態に焦点を合わせて発病誘因解明の試験研究を進めてきた。その結果、積雪から受ける造林木のストレス、特に積雪が枝葉を強く引っ張ることがトドマツ枝枯病の発病誘因（発病促進要因）の一つとして作用しているであろうことが推察された。この発病誘因によって、「地面に接して越冬する枝が発病しにくい」現象をはじめ今回行った多くの試験結果を説明することができた。しかし、本病の全体像を把握するには発病誘因の一つを特定しただけでは不十分である。本病の病勢は、通常、個体内で数年間、林分内ではおおよそ10年間にわたって拡大・進行する。発病誘因だけでこのような被害の経年変化を説明することは不可能である。経年的な被害観察に基礎をおいた被害の経年変化のモデル化、シミュレーションなどが研究手法として要求される。そして、このような経年的な被害観察を行う場合に、個体や林分の被害度合いをどのように表示するかが重要な問題となる。積雪面から上に抜け出た枝は発病せず、さらに後述するように林分あるいは小地域ごとに危険期脱出樹高が決定できることは、個体の被害の度合いが樹高や埋雪の程度によって著しく異なることを示唆しよう。ここまでの研究で得られたこのような知見に立脚して、第4章以降では、本病の発病から終息までの全過程を、モデル化やシミュレーションを通しての予測について考えてみる。

第4章被害林分の解析方法（激害区分図）の確立

1 はじめに

トドマツ枝枯病の被害林分に関する調査研究はこれまでに数多く報告されている。しかし、これらの報告では、過去の被害経過や将来の被害予測の面についての解析はほとんどなされていない。この原因の大半は、被害林分の調査が一時点だけのものであったり、経時的調査が行われた場合でもその調査・解析方法に不備があったりしたことによるものと考えられる。著者は、トドマツが明瞭な輪生枝階を形成すること、トドマツ枝枯病にかかった枝・幹から新条が展開しないこと、被害枝が長期間脱落しないので幹に付着していることなどの特徴を利用することにより、一時点だけの調査でも過去の被害経過を再現できると考えた。第4章では、従来行われてきた被害林分の調査方法（3段階の被害表示方式）に検討を加えるとともに、被害林分の新しい調査方法（被害輪生枝率）と解析方法（激害区分図）を提案する。

2 これまでの被害表示方法と新しい調査方法

1) 3段階の被害表示方式の特徴

トドマツ枝枯病の被害表示方法は、調査対象によって異なる方法が選択される。調査対象が接種した苗木や枝などの場合は、より細かな被害の差を問題にすることが多く、第3章で述べてきたような発病（枝）率がよく用いられる（横田，1983）。この方法は、全数調査になるので枝数が多い場合には多大の労力を必要とする。一方、被害林分で数多くの個体の被害を調査するような場合には、被害木の外観から微害、中害、激害に区分する3段階の被害表示方式がよく用いられる。最初に3段階の被害表示方式を用いた横田・松崎（1971）

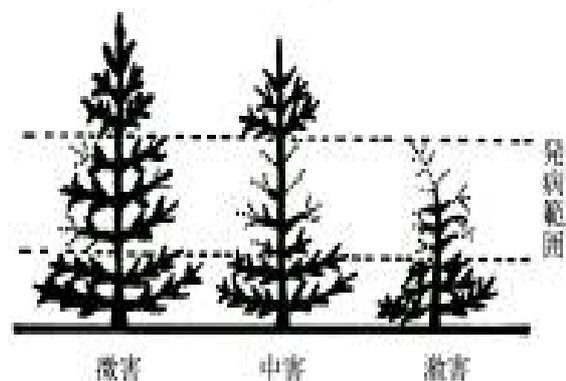


図-15 トドマツ枝枯病の3段階の被害表示

点線は被害を受けた枝を示す。

枝の一部枯れが微害、中間部の枝枯れが中害、主幹枯れが激害である。

は微，中，激の区分の基準を示していない。その後，道有林関係者の中で3段階の被害表示方式が使われ始め（北海道林務部，1977），今日では国有林でも使われている（袴田，1984）。微，中，激の区分は使用者によっていくらか差がみられるようであるが，現在では主要な区分の基準は次のように整理することができる。図-15に示したように，枝の一部が枯れる状態が微害，中間部の枝がことごとく枯れる状態が中害，主幹（梢端）が枯れる状態が激害である。微害と中害は被害枝数の多少による区分といえるが激害は基本的には被害枝の数とは無関係である。前述したように，積雪面から上に抜け出た枝は発病しないので，個体の被害の度合いには樹高が大きく影響する。すなわち，梢端が埋雪しなくなる高さにまで生長すると激害にはならなくなる。一方，激害木では梢端が発病して，樹高生長が停止するので，近い将来に大半の個体は枯死する。

3段階の被害表示方式の最大の長所は，調査が非常に簡単なことである。さらに，実質的被害の小さい微・中害と枯死にいたる激害を正しく区分できる点で極めて実用的である。一方，3段階の被害表示方式の短所の一つに，細かい被害の差が見逃されてしまうことがあげられる。例えば，後述する被害輪生枝率を用いると中川の産地別見本林の産地による発病の差を明らかにできる（浅井，1985）が，3段階の被害表示方式ではいずれの個体も微害と中害に判定されて産地による発病の差を検出できない。また，調査時点以前の被害状況を表示できないので過去の被害経過を知ることができないことや経年的に調査された場合でも将来の被害予測に結びつく手がかりを得られないこともこの調査方法の欠点といえるであろう。

2) 新しい調査方法

モミ属 (*Abies* Mill.) やトウヒ属 (*Picea* A. Dietr.)，マツ属 (*Pinus* Linn.)などは枝階や年軸が明瞭であり，Architectural analysis (HALLE et al., 1978) に好都合な樹種である。しかも，トドマツ枝枯病の被害枝からは新条が展開しないので，最近の4～5年間ならば各枝の発生年度と被害年度を正確に知ることができる。

図-16に，トドマツ枝枯病の被害木の模式図を示した。この図では，みやすくするために，輪生枝についてその主軸のみを示した。また，各枝階枝は伸長年度ごとに空白で区切り，被害を受けた枝は点線で示した。いま，発病範囲を地上高0.5～2.5mであると仮定して，この範囲にある枝の被害枝率を求めてみる。現在の輪生枝の総数は，第1枝階の3本から第5枝階の4本ま

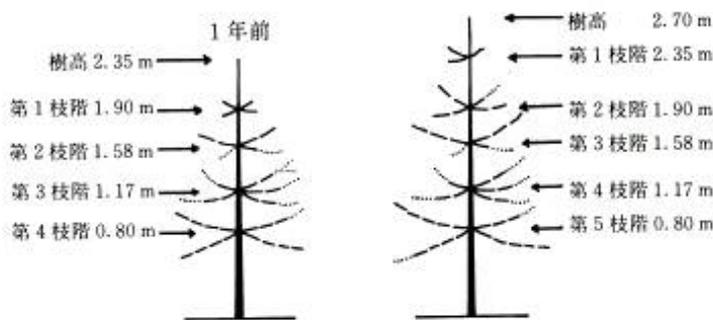


図-16 被害木の模式図

点線は被害を受けた枝を示す。左の図は1年前の状態を示す。

で加えた，20本であり，被害枝数は10である。したがって，被害枝率は10/20の50%である。これを1年前の状態にもどしてみる。現在の第1枝階はなく，第2枝階が1年前の第1枝階となる。現在の第2枝階の枝のうち1本は1年生軸に被害があるが，1年前の枝はすべて健全である。したがって1年前の第1枝階は4本とも健全であった。次いで現在の第3枝階では，2年生軸と3年生軸でそれぞれ1本ずつ被害を受けている。1年生軸に被害がないので1年前の被害状態は現在のそれと同じである。したがって1年前の第2枝階は4本のうち2本が健全であった。以下このようにして1年前の各枝階の被害状態が推定できる。1年前の被害の状況は図-16（左図）のとおりで，この図から被害

枝率は 8/17 の 47.1%と求められる。同様に 2 年前と 3 年前の被害枝率は、それぞれ 15.4% (2/13) と 0% (0/9) である。輪生枝階上の主軸以外の枝や、輪生枝と輪生枝の間に着生する側生枝（節間枝）等についても、複雑にはなるものの基本的には同じ方法で各枝の発生年度と被害年度を知ることができる。

このような方法で、1980 年 11 月に中川の産地別見本林（1971 年植栽）の中の被害木 1 個体（樹高 3.5m）の年度別の被害枝率を求めた。また、1983 年 9 月に恩根内の被害木 2 個体（樹高 3.3m と 3.0m）について同じ調査を行った。

1983 年 8 月には、被害がほぼ終息した（新たな激害木の発生がみられなくなった）恩根内の造林地（1974 年植栽）の 19 個体について輪生枝の主軸を対象に年度別の被害枝率および樹高、枝階高を調査した。同時に、各個体の被害度が激害（3 段階の被害表示方式）であるかどうかを記録した。

1984 年 8 月には、赤平 1 の被害林分（1977 年植栽）に 20m×20m の固定調査地を設定し、調査地内の生立木 80 個体の立木位置図を作成した。さらに、80 個体について恩根内で実施したのと同じ調査を行った。翌 1985 年 6 月に、被害の進行を同じ方法で再測した。また、1986 年と 1987 年初夏には、赤平 2 の被害林分（1978 年植栽）を全く同じ方法で調査した（59 個体）。

1984 年 6 月には、仁宇布の被害林分（1976 年植栽）に 40m × 33m の固定調査地を設定し、調査地内の生立木 387 個体について赤平と同じ調査を行った。その後、1985 年と 1986 年の初夏に追跡調査を行った。ただし、仁宇布の固定調査地では保残木下やその近辺では明らかに上木効果が認められた（浅井ほか、1985；浅井、1986）ので、ここでは保残木から最も遠くにあり、上木効果の影響がほとんどないとみられる集団（122 個体）のみを解析した。1986 年夏～秋には、著者が恩根内や赤平で行ったのと同じ方法で、道有林の 8 経営区 23 林分の被害調査が行われた（北海道林務部、1987a）。表-9 に、23 林分のうち上木のない 7 林務署 13 林分の概況を示した。これらの林分の年度別の被害輪生枝率や樹高等のデータをパーソナルコンピュータに入力した。調査時点の林齢は 7～12 年生であり、標高はおおよそ 200～500 m の緩斜面が多い。最深積雪深は興部を除くと、おおよそ 200 cm 以上の多雪地の林分が多く選定された。調査本数は各林分とも 100 本を基準にしている。

表-9 道有林の調査林分の概況一覧（北海道林務部、1987a から抜粋）

経営区	林小班	植栽年	樹高	傾斜	方位	積雪深	調査本数
雄武	29-55	1979 ^年	400 ^m	2°	N	170 ^{cm}	100 ^本
雄武	91-56	1977	380	10	S	190	100
興部	112-51	1974	380	25	SE	100	100
美深	17-53	1978	290	10	NE	200	100
美深	218-53	1975	260	13	NW	200	100
美深	136-53	1977	430	10	NE	250	101
名寄	15-58	1975	210	8	NE	200	100
滝川	33-51	1977	530	10	SE	230	100
滝川	31-63	1976	480	10	W	230	100
当別	42-55	1977	160	8	N	300	100
当別	38-54	1978	260	15	NW	300	100
倶知安	56-55	1979	380	10	NW	200	100
倶知安	77-58	1975	380	10	N	200	96

3 被害輪生枝率

図-17 に、中川と恩根内の 3 個体の被害枝率の経年変化を示した。被害枝率は全ての枝を対象にした場合と輪生枝の主軸を対象にした場合を示した。3 個体とも、被害はまず輪生枝の主軸以外の枝（節間

枝や輪生枝上の側生枝)に現われ、1～2年遅れて輪生枝主軸に被害が現われた。これは、輪生枝の主軸が他の枝に比べて発病しにくい(浅井ほか, 1984a)ことを示している。また、輪生枝の主軸を対象にした場合の被害枝率(以後、被害輪生枝率と呼ぶ)は、すべての枝を対象にした被害枝率に比べて、その値はいくらか低いものの類似の経年変化を示した。すなわち、被害発生当初の被害枝率は低いのが以後、急速に被害枝率が增大し、その後頭打ちになるシグモイド型の曲線を描いている。被害が小枝から進行し次第に枝全体に及ぶので、被害輪生枝率と全枝を対象にした被害枝率の差は、被害の進行に伴い小さくなる。輪生枝24～33本に対し小枝を全部含めると560～1,231本になり、調査労力が著しく大きくなる。これらの点を考慮すれば、主軸枝の被害調査をもって全枝調査に代えることができると考えられる。

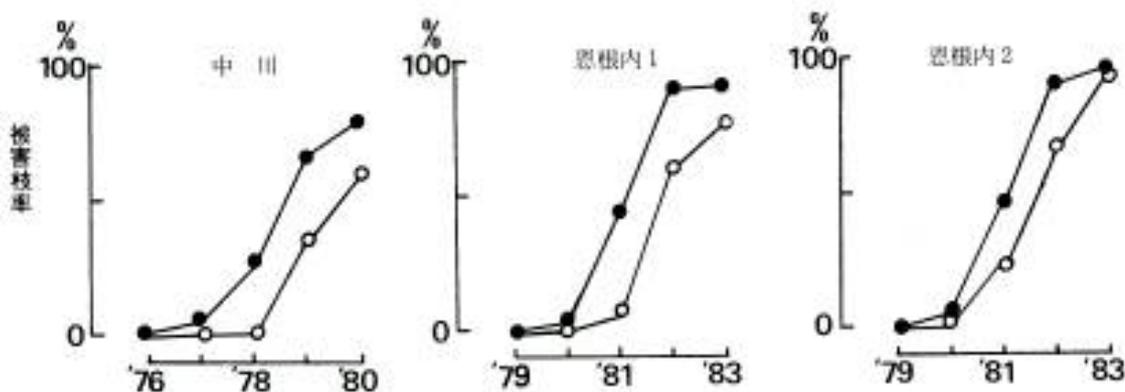


図-17 中川と恩根内の3個体の被害枝率の経年変化

○: 輪生枝を対象にした被害枝率(被害輪生枝率)

●: 全枝を対象にした被害枝率

被害輪生枝率は、全枝を対象にした被害枝率と類似の経年変化を示した。

4 激害区分図

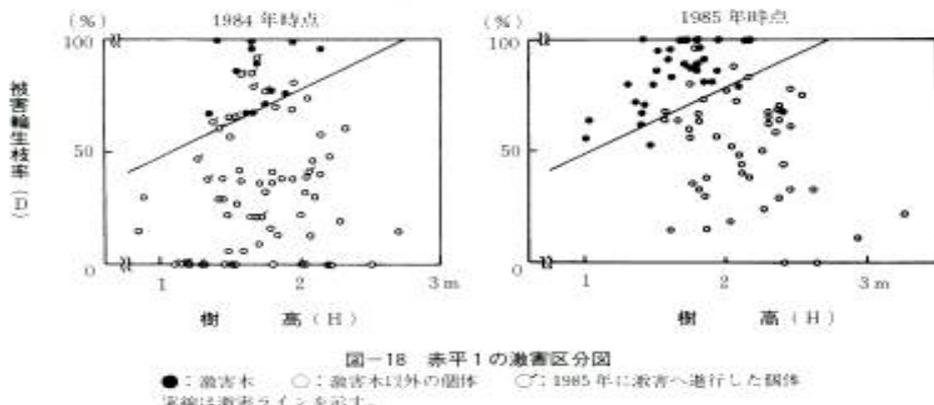
被害輪生枝率は、一時点の調査で過去から現在までの各時点の被害状態を知ることができるほかに、3段階の被害表示方式では明らかにできなかった細かい被害の差を表示できた(浅井, 1985)。しかし、樹高が極端に違う場合、例えば樹高3mと1mの2個体がともに被害輪生枝率50%であった場合、両者の被害程度は果たして同じなのであろうか。また、被害木が枯死するかどうか、いいかえれば被害木が3段階の被害表示方式の激害であるかどうかは、当該林分の防除や今後の施業を考える場合に、最も重要な情報の一つになろう。被害輪生枝率が大きくなるのが激害となって造林木の枯死につながるのには、樹高が重要な要因として関係している。したがって、激害の発生は樹高との関係で検討することが必要である。このような問題を解決するために考案したのが激害区分図である。

激害区分図は、縦軸に被害輪生枝率を、横軸に樹高をとった図中に、3段階の被害表示方式の激害木と激害以外の木の境界線を設定した図と定義される。図-18右に、赤平1の被害林分(1977年植栽)の1985年時点の激害区分図を示した。激害木(黒丸)は、樹高が高い個体では被害輪生枝率の高いところに、樹高が低い個体では被害輪生枝率の低いところに位置する。激害木と激害木以外の木(白丸)の境界線(以下、激害ラインと呼ぶ)を両者の出入りができるだけ少なくなるように設定した。赤平1の1985年時点の激害ラインは樹高をH(m)、被害輪生枝率をD(%)とすると次式で表わせる。

$$D = 30H + 17 \dots \dots \dots (4-1)$$

ただし、 $0 < H$ (m), $0 \leq D$ (%) ≤ 100 である。

この激害ラインと被害輪生枝率 100%との交点の樹高（以下、交点樹高と呼ぶ）は重要な情報を提供する。これは、たとえ発病範囲にある輪生枝のすべてが被害を受けたとしても、その個体が交点樹高以上の樹高に達していれば激害木にならないことを意味する。すなわち、交点樹高は林分の危険期脱出樹高（第3章参照）の理論的な近似値といえる。赤平1の交点樹高は、(4-1)式から 2.77mである。図-18 左は、赤平1の1年前（1984年）の樹高と被害輪生枝率の関係に(4-1)式の激害ラインをあてはめたものである。激害ラインより上側に激害でない個体がいくらかあるために、1984年の林分に対しては、一見、あてはまらなさそうにみえる。しかし、激害ラインより上側のこれらの個体の大半（右肩に印のある白丸）は翌1985年に激害へと進行した。このことは、激害ラインより上側に位置する個体は、たとえその時点では激害でなかったとしても、近い将来その大半が激害へ進行することを示唆する。このように、激害木への進行分を見込んでいると解釈すれば、(4-1)式の激害ラインは1984年の状態にもよく適合しているといえる。



被害進行中の林分の被害輪生枝率を経時的に測定した例は、赤平1のほかには、仁宇布（図-19）と赤平2（図-20）の2例があるのみである。仁宇布と赤平2の激害ラインはそれぞれ次式で表わせた。

$$\text{仁宇布 } D = 30H + 7.3 \dots\dots\dots (4-2)$$

$$\text{赤平2 } D = 29H + 3.5 \dots\dots\dots (4-3)$$

ただし、 $0 < H \text{ (m)}, 0 \leq D \text{ (\%)} \leq 100$ である。仁宇布の激害区分図（図-19）は、1984年時点では赤平1と同様に、激害ラインより上側に激害以外の個体を多数含む。しかし、やはりこれらの大半は2年後（1986年）には激害へと進行した。このことを考慮すると、仁宇布の激害ラインの適合度はかなり良好といえる。赤平2の激害区分図（図-20）は、1986、1987年の両時点とも激害ラインの上側に激害以外の個体を多数含む。これらの多くは将来、激害へと進行すると思われるが、この時点の赤平2の激害ラインの適合度は、赤平1や仁宇布のそれと比較するとやや悪いといえる。しかし、この場合でも1986年と1987年の両年間で激害ラインを変更する必要はなさそうである。わずか3林分の例しかないが、これらの林分での各年度における激害ラインの適合度から考えて、いまのところ、同じ林分の激害ラインは年度によらずほぼ一定とみなしてよさそうである。

また、激害ラインの勾配は赤平1、赤平2および仁宇布でそれぞれ 30, 29, 30 (%/m)であった。これらのほかに、これまでに報告された激害ラインの勾配の値は 30（浅井ほか, 1984a）と 28（水井

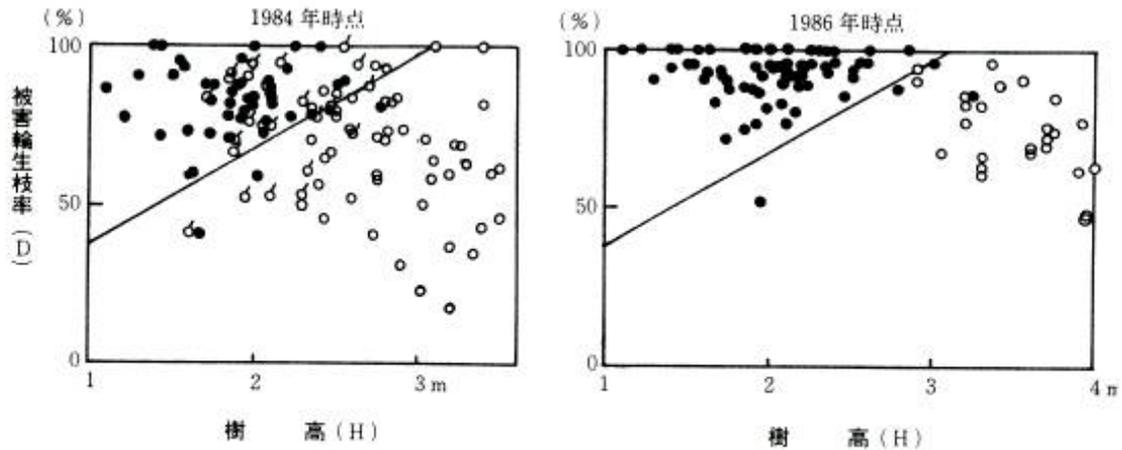


図-19 仁宇布の激害区分図
 ●：激害木 ○：激害木以外の個体
 ◐：1985、1986年の2年間に激害へと進行した個体

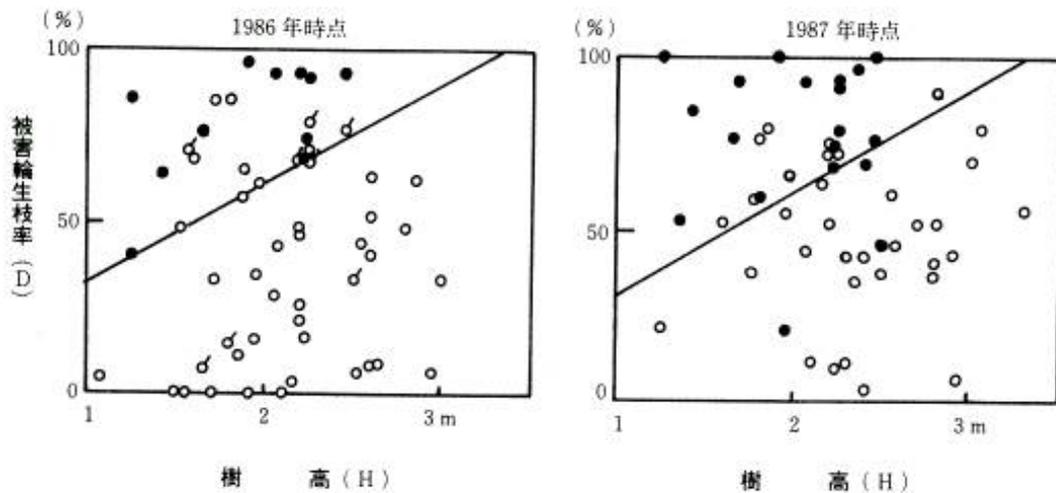


図-20 赤平2の激害区分図
 ●：激害木 ○：激害木以外の個体 ◐：1987年に激害へ進行した個体

(1985)から読み取り)であった。このように、異なる林分で異なる年度に調査されたにもかかわらず、激害ラインの勾配はいずれも 28~30 (%/m) と非常に類似した値を示した。なぜこのような値をとるかは不明であるが、激害ラインの実用上の勾配を端数のつかない 30 (%/m) に固定しても実用的に大きな誤りはないと考える。

5 いろいろな林分の激害区分図と交点樹高

入力した道有林 13 林分のデータから、コンピュータを用いて激害区分図を作成した。林分ごとに、1986年時点の各個体の樹高(H)と被害輪生枝率(D)の座標位置を表示させ、さらにその個体が激害木であるか否かを区別させた。激害ラインは、前節で述べたように勾配を 30 (%/m) に固定し、切片のみを移動させて最適な位置を決定させた。最適な位置とは、激害ラインに基づく被害度と現実の被害

度との差（激害であるか否かを間違えて判定する個体数）が最小になる位置のことを指す。この場合に、激害でないにもかかわらず激害ラインより上側に位置するために激害と判定される個体は、その逆に判定される個体（激害ラインより下側に位置する激害木）の1/3の重みづけとした。これは、激害でないにもかかわらず激害ラインより上側に位置する個体は近い将来に激害へ進行するものが多かった（図-18, 19）ことを考慮したものである。

図-21に、このようにして作成した7林分（1経営区1林分）の激害区分図を例示した。いずれの林分の激害ラインもほぼ妥当な位置に引かれているとみてよいであろう。また、激害ラインの勾配すなわち30（%/m）も特に修正を必要とすることもないようである。次に、激害ラインの位置は林分によって著しく異なることがわかる。おおまかには寡雪な地域に属する興部や雄武の激害ラインが左側に位置し、当別や美深の豪雪地域が右側に位置している。

このような被害林分の積雪深と激害ラインの関係は、およそ次のように説明できる。道有林の13林分の積雪深（表-9）と交点樹高（7林分については図-21参照）の関係を図-22に示した。両者間には密接な関係がみられ、積雪深が大きく（深く）なると交点樹高も直線的に大きくなる。この直線関係は次式で表わされた。

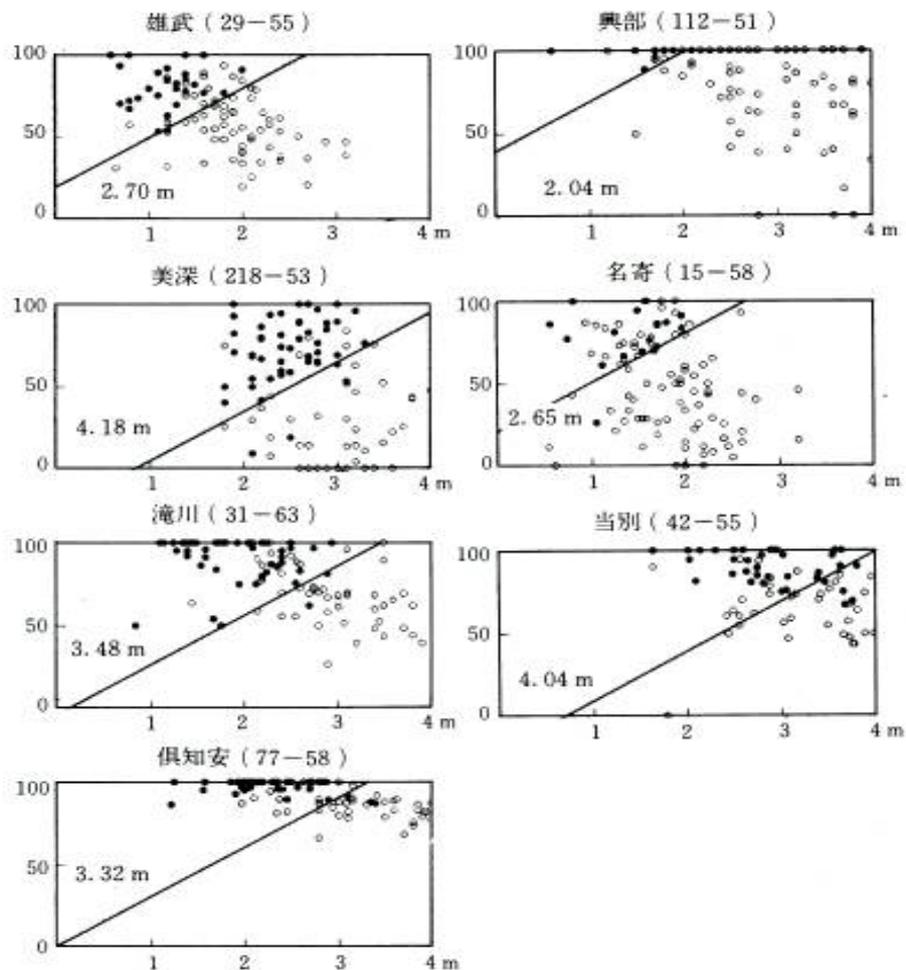


図-21 いろいろな林分の激害区分図

図上に経営区名と林小班を示す。各図とも横軸は樹高（m）、縦軸は被害輪生枝率（%）である。また、図中の数字は各林分の交点樹高（m）を示す。

$$H_c = 1.079 S + 0.989 \quad (r = 0.717) \dots\dots\dots (4-4)$$

ただし、 H_c (m) は交点樹高、 S (m) は積雪深をそれぞれ示す。交点樹高は激害ラインの位置そのものを表わすので、交点樹高が大きくなることはそのまま激害ラインが右方向に移動することを示す。このことに基づき、図-23 に被害林分の積雪深と激害ラインの関係を模式化して示した。激害ラインは多雪地域では右側に、寡雪地域では左側に位置すると考えてよい。また、交点樹高は危険期脱出樹高（第3章参照）の近似値でもあるので、積雪深の深い林分ほど危険期脱出樹高も高いと考えてよい。

さらに、(4-4) 式は、被害調査が未実施であったり被害にかかり始めたばかりでまだ激害木が発生していないような林分において暫定的な激害ラインを決定する場合の簡便法として利用できる。すなわち、その林分の積雪深を(4-4) 式に代入することにより激害ラインを算出することができるのである。第6章で述べる個体の被害進行過程のシミュレーションを用いて将来の林分被害（最終的な激害本数）を予測する場合に、この簡便法による暫定的な激害ラインの予測は実用的な面で非常な効果を発揮する。

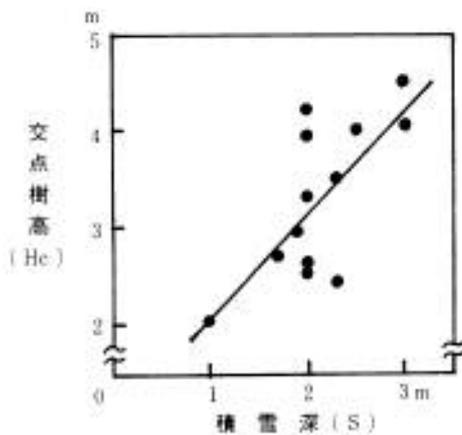


図-22 道有林 13 林分の積雪深と交点樹高の関係

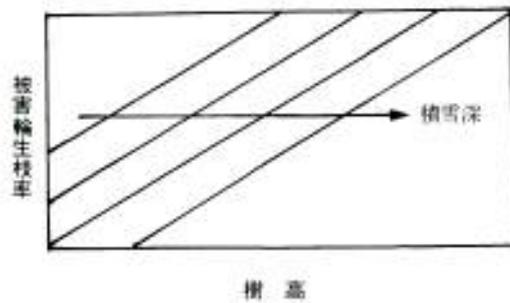


図-23 積雪深と激害ラインの関係の模式図

6 激害区分図上の個体の軌跡

輪生枝の主軸上に被害が現れた後の樹高の生長に伴う被害輪生枝率の変化過程を図-24 のように示すことができる。図-24 の中の a は図-16 に示した個体の被害進行を例示したものである。輪生枝の主軸上に初めて被害が認められた年度の座標（樹高 1.90 m，被害輪生枝率 15.4%）以後、通常は樹高と被害輪生枝率の両者とも経年的に大きくなるので個体の被害の進行は右上方向への動きとなる。また、全く発病がみられない年には、被害輪生枝率が下がるために、図-24 の中の b の（発病後）2年目のように右下方向に動く場合がある。しかし、次に示す図-25 からわかるように実際に被害が進行している林分で個体の被害輪生枝率が低下することは非常にまれである。

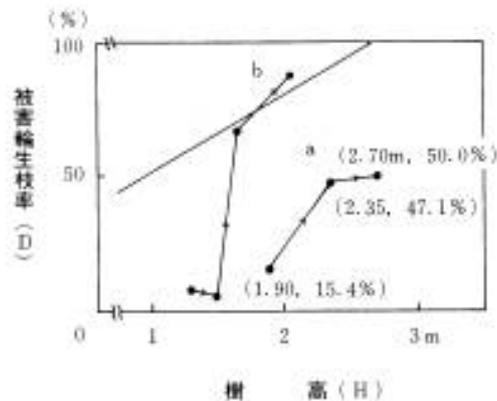


図-24 激害区分図上での個体の被害進行
通常、個体の被害の進行は右上方向への動きとなる。

図-25に、トドマツ枝枯病の被害がほぼ終息した恩根内の19個体の激害区分図上の軌跡を示した。19個体だけで激害ラインを決定するのは問題があるので、図-25では便宜的に(4-1)式で示した赤平1の激害ラインをそのまま用いた。激害木でない個体はすべて交点樹高(2.77m)より大きいかこれに近いので、調査年の樹高生長分を考慮すると、これらの中から新たに激害木が発生することはないとみて差し支えない。

さて、19個体の被害進行の軌跡は、図-24のaと同様に、いずれも右上方向への動きを示した。各

個体が初めて被害を受けた年(以下、初発病年と呼ぶ)とその時の樹高(最も左下の点で、以下、初発病樹高と呼ぶ)に注目したい。19個体の初発病年は、調査の3年前に発病した個体から調査年に発病したものまでの4年間に及んでいる。しかしながら、早く発病した個体が必ずしも激害木になっていない。激害木になるか否かは初発病年よりむしろ初発病樹高が関係しているようである。すなわち、激害になった8個体のうち、7個体までが2m未満の初発病樹高であり、逆に、激害にならなかった11個体のうち、7個体が2m以上の初発病樹高であった。統計的にも、激害に

なった8個体の初発病樹高の平均値(166.1cm)は激害にならなかった11個体の平均値(229.3cm)より有意に低かった($t=2.792, 0.01 < P < 0.05$)。また、発病後の被害進行に関係するとみられる右上方向への軌跡の勾配(各個体の初発病年から調査年までの平均勾配)は、初発病樹高2m未満の11個体の平均値(75.1%/m)と2m以上の7個体(調査年に発病した1個体は除く)の平均値(63.4%/m)との間に有意な差は認められなかった($t=0.470, 0.4 < P < 0.5$)。すなわち、発病後の被害進行は、初発病樹高の大きさに関係なく、ほぼ同様の経過をたどるものと考えられる。これらのことは、トドマツ枝枯病では、初発病樹高がその個体の将来の被害度に重大な影響を与えることを示唆する。

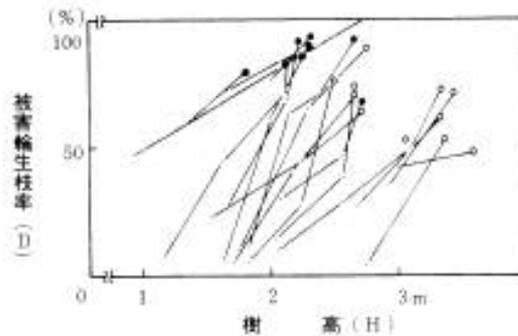


図-25 被害がほぼ終息した林分における激害

区分図上での個体の軌跡

● : 激害木 ○ : 激害木以外の個体

激害ラインは(4-1)式で示した赤平1のものである。

初めて被害を受けた時の樹高(初発病樹高)が2m未満の個体に激害木が多い。

7 考 察

トドマツと同様の樹冠構造をもつ19年生のアカエゾマツ(*Picea glehnii* Masters)では、節間枝(輪生枝と輪生枝の間の節間部にある枝)の葉量と枝量は個体全体のそれぞれ15~20%と8~20%にすぎない(浅井ほか, 1980)。このことは、これらの樹種の生長にとって輪生枝がより重要な役割を果たしていることを示している。したがって、被害輪生枝率は調査枝数は少ないが、より適切に個体の被害程度を表示しているものと考えられる。

3段階の被害表示方式では、被害枝数といういわば量的な被害の差(激害と中害)と、枝と幹(梢端)という質的な被害の差(微・中害と激害)があたかも連続的であるかのように扱われてきた。しかし、現実には枝の被害はわずかでも幹の被害(激害)が認められる場合が存在する。このような現象に対しても激害区分図は次のような統一的な解釈を与える。まず、右上りの激害ラインは、低樹高の激害木では低い被害輪生枝率で激害になり得ること、そして極端な場合には枝の被害が全くないのに幹の被害が生じることもあり得ることを示す。次に、樹高が同じ個体の被害度合いを比較すると被害輪生枝率が高い個体ほどその被害度合いが大きく、さらに枝の被害が進行し、ある被害輪生枝率(ある樹高と激害ラ

インの交点)に達した段階でその個体は激害になることを示す。すなわち、樹高が同じという条件下では、枝の被害(微害と中害)の延長線上に激害(幹の被害)があるので枝の被害と幹の被害は連続的なものと考えてもよいであろう。本病の発生は積雪と密接な関係があり、したがって樹高が被害と関係する。激害区分図は樹高との関係において激害の発生を定量的にとらえたもので、激害ラインはいろいろな樹高階において枝の被害から幹の被害へ移行する点を結んだものであるといえる。

被害がほぼ終息したとみられる林分の各個体の被害進行経過を解析した結果、初発病樹高がその個体の将来の被害度に重大な影響を与えるであろうことがわかった。この推論は、将来の被害を考える際の重要な問題を提起している。例えば、被害林分に存在する低樹高の「健全木」の評価である。これらの個体が健全なのは、生育段階が遅れているので第3章で述べた積雪が枝葉を引っ張る力(引っ張りストレス)が小さいことと周囲の病原菌の密度がまだ低いことによると考える。しかし、積雪が枝葉を引っ張る力の方はたとえ低い状態のままであっても、林分被害の進行に従って病原菌の密度は増加するので、これらの「健全木」が低樹高のまま被害木になる可能性は十分に高い。このような時には、初発病樹高が低いので、「健全木」は一転して激害木または激害木相当のものになると考えるのが妥当である。一方、樹高の高い健全木があるとすれば、その後被害にかかったとしてもすぐに危険脱出樹高に達するので実害は小さいと考える。このようなことから、トドマツ枝枯病の被害林分に関しては、樹高のデータと切り離れた健全本数率は意味をもたないといえる。ここで得られた初発病樹高と将来の被害についての推論は、個々の林分の被害予測という新たな分野の研究推進に大きい手がかりを与えた。以後ここで得た手がかりをもとに、第5章で初発病樹高を軸にした林分被害の経年変化の解析とそのモデル化、さらに第6章で個体の被害進行過程のシミュレーションへと展開する。

第5章被害予測

1 はじめに

これまでのトドマツ枝枯病の被害予測には、最深積雪深のデータや最近ではランドサットからみた残雪データをもとに被害発生の危険地域をおおまかに予測したものが多い(北海道林務部, 1986; 吉武, 1987)。高藤・新井田(1983)は被害予測の考えを一步進めて、美深林務署管内における激害林分の発生を地域や標高などの面から予測した。しかし、個々の林分について、「トドマツ枝枯病が終息した時点でおおそ何本の造林木が残存する」というような具体的な被害予測を行った報告は皆無である。このような予測ができれば、トドマツ枝枯病対策指針(北海道森林保護推進協議会, 1984)にあるような残存本数に応じた施業方法も現実味を帯びてくる。また、こうした予測は被害防除を実施するか否かを決定するのに大いに役立つに違いない。ここでは、激害になる個体は初発病樹高が低いものが多い(第4章)という知見を基礎に、初発病樹高と激害木の関係を経年的に調査し、林分被害の経年変化の構造を解析した。この結果をもとに林分被害の経年変化モデル(被害推移モデル)を組み立てることにより、個々の林分の初発病樹高の分布から将来の激害木の本数を予測する方法を提案する。

2 調査林分と方法

調査林分は赤平1(1977年植栽)と仁宇布(1976年植栽)の造林地である。調査内容は第4章と同じである。すなわち、赤平1では1984年8月に20m×20mの固定調査地を設定し、調査地内の生立木80個体について輪生枝の主軸を対象に年度別の被害枝率および樹高、枝階高を調査した。また同時に、各個体の被害度が激害であるかどうかを記録した。仁宇布では1984年6月に40m×33mの固定調査

地を設定し、調査地内の生立木 387 個体について赤平 1 と同じ調査を行った。その後、1985 年と 1986 年の初夏に両林分の追跡調査を行った。ただし、仁宇布の固定調査地では保残木下やその近辺では明らかに上木効果が認められた（浅井ほか、1984；浅井、1986）ので、ここでは保残木から最も遠くにあり上木効果の影響がほとんどないとみられる集団（122 個体）を主に解析した。

3 初発病樹高と激害本数率の関係

図-26 に、赤平 1 と仁宇布の被害林分の初発病樹高 (H0) と激害本数率 (RD) の関係の終年変化 (1984 ~1986 年) を示した。横軸 (初発病樹高) は対数で示している。赤平 1 の 1984 年の激害本数率は 1.0 ~1.5m と 1.5~2.0m の初発病樹高階で高く、この前後の樹高階で 0 であり、全体としては正規分布に近い曲線を示した。1985 年になると初発病樹高の低い個体の多くが激害になったので、全体的に初発病樹高階が高いほど激害本数率が低くなる右下がりの曲線を示した。1986 年になるとこの右下がりの傾向はさらに強まった。赤平 1 より林齢が 1 年高く、被害程度も

それだけ進行していた仁宇布では、調査開始時点 (1984 年) ですでに右下がりの曲線を示している。この右下がりの曲線は年の経過とともに勾配を増しながら片対数軸上で直線化する傾向が認められる。1986 年時点で激害になっていない造林木はその大半がすでに積雪から上に抜け出ており、今後激害になる確率は極めて低いといえる。このような観察結果から、この林分の被害が終息した時点 (新たな激害木の発生がみられなくなった) での初発病樹高と激害本数率の関係は、右下がりの 1 本の直線になるものと考えた。第 4 章で激害区分図を作成した道有林の 13 林分の内、被害程度の進行していた林分では仁宇布と同じような右下がりの直線が認められた。林分ごとに得られるこのような直線をその林分の被害推移の収束線と呼ぶことにする。

赤平 1 の激害木の発生は 1983 年であり、その 1 年後に図-26 の 1984 年時点のような正規型の分布を示した。図-27 に、激害木の発生後 1, 2 年を経過したと推測される 4 林分の初発病樹高と激害本数率の関係を示した。4 林分は、それぞれ赤平 2 (第 4 章参照)、美深 17-53 (表-9 参照)、仁宇布の上木樹冠下付近の林分 (Z=1) および上木樹冠下の林分 (Z=0) である。仁宇布の Z=0 (10 年生時点) 以外の林分はいずれも 9 年生時点のデータである。それぞれの林分で曲線のピークの位置や細かな

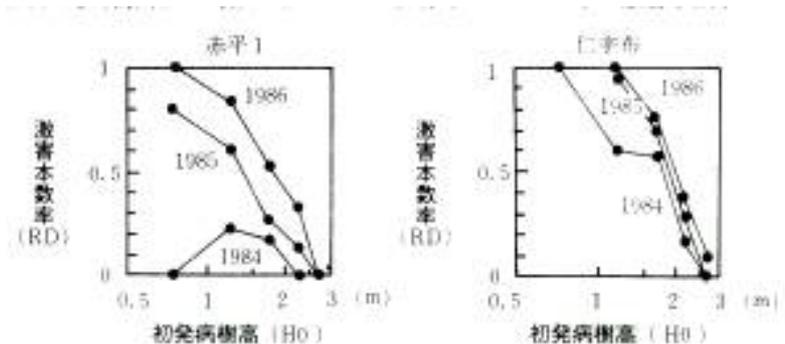


図-26 初発病樹高と激害本数率の関係の経年変化
横軸は対数である。

両者の関係は当初の正規分布型曲線から右下がりの曲線になり、最終的には 1 本の直線 (被害推移の収束線) になりそうである。

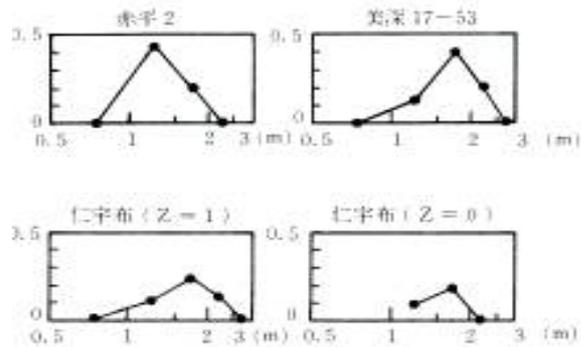


図-27 激害木の発生後 1, 2 年を経過した林分の初発病樹高と激害本数率の関係

各図とも横軸は初発病樹高(H0)、縦軸は激害本数率 (RD) である。それぞれの林分で曲線のピークの位置や細かな形は異なるものの、いずれも正規型の分布を示している。

形は異なるものの、いずれも赤平 1 の 1984 年時点と同じように中間の初発病樹高で激害本数率が高い正規型の分布を示している。このような激害木発生後まもない時点（被害の初期段階）の初発病樹高と激害本数率の関係が正規型の分布を示す理由として、第 3 章で検討した発病誘因（引っ張りストレス）との関係が考えられる。初発病樹高の低いところで激害木が少ないのは、これらの造林木の大半が雪中に倒伏して越冬するために、引っ張りストレスが小さく微害にとどまる（激害にならない）からと考えられる。初発病樹高が少し高いところでは、早期に雪中の倒伏から立ち土がる樹高に達するために、梢端に近いところが被害を受けやすくなる（激害になりやすくなる）と考えられる。また、初発病樹高の高いところで激害木が少ないのは、前述したように早期に主幹（梢端）が雪上に出る樹高に達するからであろう。

正規分布型から右下がりの曲線への経年変化にも引っ張りストレスが関係するのであろうか。この点については次のように考えられる。初発病樹高が低いところでは、雪中に倒伏していた個体が時間の経過とともに立ち上がり、引っ張りストレスが高まる樹高に達するため激害木は急速に増加する。一方、初発病樹高が高いところでは、時間が経過しても雪上木が大多数なので激害木はほとんど増加しない。中間の初発病樹高では雪上木になって危険期を脱出する個体が現われるために、激害木は低初発病樹高のものほど増加しない。このような結果、林分の初発病樹高と激害本数率の関係は図-26 の赤平 1 のように、正規分布的な初期的関係から初発病樹高が高いほど激害本数率が低い関係へと経年的に変化すると考えられる。

図-28 は、図-26 の赤平 1 の初発病樹高と激害本数率および調査年度の三者の関係を、横軸に調査年度をとって書き替えたものである。なお、調査年度は激害木発生年（1983 年）からの経過年数で表わしている。図-28 で明らかなように初発病樹高階（H0）ごとに

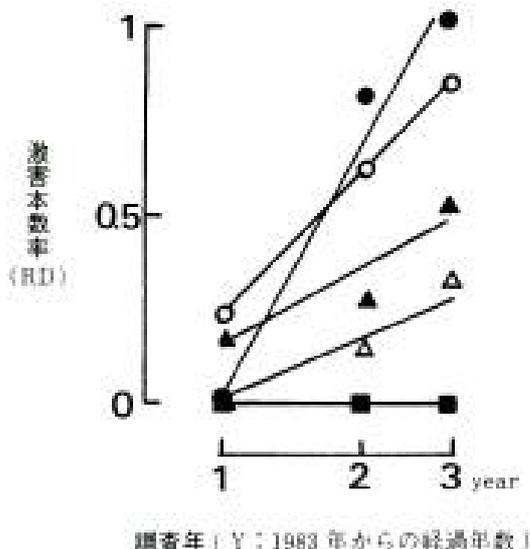


図-28 赤平 1 の調査年と激害本数率の関係
 ● : H0=0.51~1.00m ○ : H0=1.01~1.50m
 ▲ : H0=1.51~2.00m △ : H0=2.01~2.50m
 ■ : H0=2.51~3.00m

初発病樹高階（H0）ごとに、調査年と激害本数率（RD）の間に比較的きれいな直線関係が認められる。

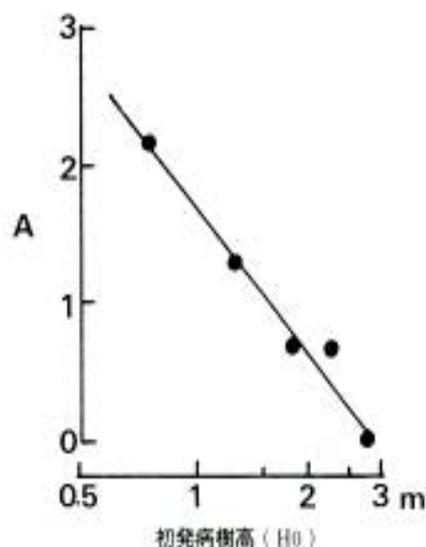


図-29 発病樹高と勾配係数 A の関数
 両者の間にはきれいな直線関係((5-2)式)が認められる。

表-10 (5-1) 式の係数 A, B の値

初発病樹高 (H0)	A	B	r
0.51~1.00m	2.156	0.041	0.983
1.01~1.50m	1.285	0.226	1.000
1.51~2.00m	0.692	0.144	0.909
2.01~2.50m	0.674	-0.016	0.973
2.51~3.00m	0	0	-

r は相関数を示す。

調査年度 (Y) と激害本数率 (RD) の間に比較的きれいな直線関係が認められる。この直線を (5-1) 式で表わし、

$$RD = A \log Y + B \dots\dots\dots (5-1)$$

係数 A, B を最小二乗法により求めた (表-10)。直線の勾配係数 A は激害への進行速度を表わす。この激害への進行速度は初発病樹高によって大きく異なった。例えば、0.5~1.0m の樹高で初めて発病したような個体の激害への進行速度は、2.0~2.5m で発病したような個体のそれよりも約 3 倍速かった。このような初発病樹高による激害への進行速度の違いが、図-26 にみられるような、正規型の曲線から右下がりの曲線への経年的な変化を説明する。

図-29 は、初発病樹高と勾配係数 A の関係を示したものである。両者の間にはきれいな直線関係が認められ、最小二乗法による直線の回帰式は

$$A = -3.562 \log H_0 + 1.678 \quad (r = -0.982) \dots\dots\dots (5-2)$$

(5-2) 式で表わせた。

4 林分被害の経年変化モデル

赤平 1 の林分被害の経年変化モデル (被害推移モデル) は、図-26 の 1984 年時点の初発病樹高 (H₀) と激害本数率 (RD) の関係を林分被害の初期的関係 (初期値: B) として、これに初発病樹高と激害木発生後の経過年数 (Y) によって決まる激害本数率の増分を加えるという簡単なものである。初期値 B を、次のような正規型の分布関数で近似した。

$$B = 0.28 \cdot \exp\{-5.39 \cdot (H_0 - 1.5)^2\} \dots\dots\dots (5-3)$$

激害本数率の増分は、(5-2) 式から求めた初発病樹高別の激害への進行速度 (勾配係数) A と激害木発生後の経過年数 (Y) の対数 log Y との積である。これらをまとめると、林分の被害推移モデルは次のような式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} RD &= A \log Y + B \\ A &= -3.562 \log H_0 + 1.678 \\ B &= 0.28 \cdot \exp\{-5.39 \cdot (H_0 - 1.5)^2\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5-4)$$

ただし、 $0 \leq RD \leq 1$ である。

図-30 に、(5-4) 式による赤平 1 の被害推移モデルを示した。激害木発生後の経過年数が大きくなるに従って、被害が増大していく様子が図-30 によく現われている。図中の激害木発生後の経過年数 (Y) = 1, 2, 3 は、図-26 の赤平 1 の経年的な被害の変化をかなりうまく再現している。また、Y = 5.6 では、仁宇布の 1986 年時点の林分 (図-26) のようにほぼ右下がりの直線になっている。さて、このモデルでは (5-4) 式の内容から激害木発生後の経過年数 Y を無限に大きくした時、初発病樹高が 2.95m より低ければ激害本数率はいずれも 1 になり、初発病樹高による激害本数率の差はなくなることになる。しかし、現実の林分では、被害がほぼ終息した仁宇布の林分 (図-26) や恩根内の林分 (第 4 章参

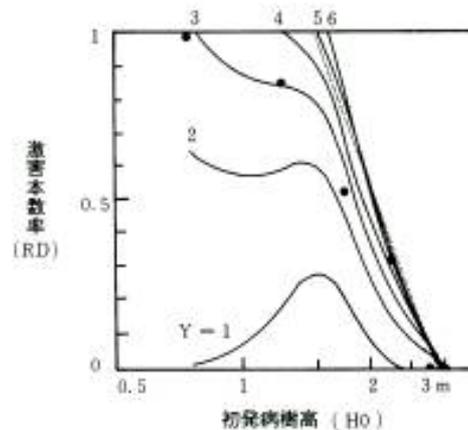


図-30 (5-4) 式による林分の被害推移モデル
 ●: 赤平 1 の 1986 年の値 Y: 1983 年からの経過年数
 図中の点線は (5-5) 式で示した赤平 1 の被害推移の収束線 Y=1, 2, 3 は、図-26 の赤平 1 の経年的な被害推移をかなり再現する。
 Y=5, 6 では、初発病樹高と激害本数率はほぼ直線関係を示す。

照)においても、初発病樹高によって激害本数率に明白な差がみられた。ある造林地に最初の激害木が発生してから最後の激害木の発生までに何年を要するかは今のところ明らかでないが、トドマツ枝枯病の被害の進行は非常に早く、通常、激害木の出現後の数年間でその林分の被害の大勢は決定されるとみてよい。こうしたことから、このモデルは激害木発生後の経過年数が比較的小さい範囲内での被害推移を記述するモデルであるといえることができる。

5 被害予測

これまでの観察から、造林木の90%以上は最初の激害木の発生後5、6年以内に激害になるか否かの決着がつくとみてよい。そこで、図-30のY=5、6(年)で得られる曲線に最も近似した直線を赤平1の被害推移の収束線(図-30の点線)とした。この直線は次式で近似できた。

$$RD = -3.5 \log HO + 1.6 \dots \dots \dots (5-5)$$

ただし、 $0 \leq RD \leq 1$ である。

ある個体*i*の初発病樹高 HO_i に対して、(5-5)式により算出される激害本数率RDとはその個体の激害になりやすさの程度、いいかえればその個体が激害になる確率を意味する。したがって、ある林分の将来の激害本数は各個体のこの確率(激害到達確率)の和として求められる。すなわち、個体*i*の激害到達確率を P_i とすると、ある林分(個体数*n*)の将来の激害本数(ND)は次式で与えられる。

$$ND = \sum P_i \dots \dots \dots (5-6)$$

ただし、 $0 \leq P_i \leq 1$ である。

このようにして、個体ごとの初発病樹高がわかればその林分の将来の激害本数を予測することが可能である。例えば、赤平1の初発病樹高からこの林分の将来の激害本数を予測すると、個体数80本の内、66.1本が激害木になると予測される。実用上は(5-5)式から、0.5m間隔の初発病樹高階に対する激害本数率を求めておくと便利である。初発病樹高階ごとの激害本数率と個体数の積和がその林分の将来の激害本数の予測値である。例として、この方法で同じ赤平1の将来の激害本数を予測してみる(表-11)。

表-11 赤平1の激害木数の予測

表-11のように、64.2本が激害木になると予測され、さきほどの66.1本とほぼ同じ結果が得られる。なお1987年現在の赤平1の激害本数は64本に達しているものの今後激害に進行する個体数はせいぜい数本であると思われる。このようなことから、被害推移の収束線を利用した被害予測の精度はかなり高いものと考えられる。

初発病樹高 (HO)	激害本数率 (RD)	個体数(f)	RD×f
0.51~1.00m	1.0	5	5
1.01~1.50m	1.0	31	31
1.51~2.00m	0.749	34	25.5
2.01~2.50m	0.367	7	2.6
2.51~3.00m	0.062	2	0.1
3.01~3.50m	0	1	0
合計		80	64.2

6 考 察

第5章で提案した将来の激害本数の予測方法は、初発病樹高によりその個体の激害到達確率を決めるというものであった。したがって、この方法では初発病樹高をいかに正確に決定するかが最も重要な課題になる。調査対象木の大半が既発病木の場合は、丁寧に調査すれば初発病樹高の決定はそれほど問題でない。しかし、未発病木が大半で既発病木が散見される程度の林分の場合には、大半の個体に対して初発病樹高そのものを測定できないという問題が生じる。この段階で、将来の激害本数を予測しようとすると、未発病木が近い将来に発病するであろう時の樹高を推定しなければならない。この推定方法の1例として次のような方法が考えられる。林分中に(輪生枝への)発病木が散見される段階では、すで

に大半の個体の側枝は発病しており（浅井ほか，1984b），近い将来に全個体が発病すると考えてよい。したがって，未発病木が近い将来に発病するまでにどれだけの樹高生長をするかを決めればよいことになる。赤平1林分を例にとると1982年の既発病木は約25%であり，丁度，林分中に微害木が散見される被害段階と推測される。その後，1984年には約81%，1985年には約96%の個体が発病木になっている。1982年の林分平均樹高128 cm に対し，1984年で171 cm ， 1985年で193 cm であった。すなわち，林分中に微害木が散見される時点から2～3年後，樹高が43～65 cm 伸長する間に大半の個体は発病木になっている。これらのことから，赤平1林分の未発病木の初発病樹高をおおまかに推定するには現在の樹高に0.5mを加えればよいだろう。この方法で，1982年時点での赤平1の未発病木の初発病樹高を推定し，将来の激害木を予測すると63.1本と算出された。1985年の確定した初発病樹高から算出された66.1本にかなり近い値といえる。

第6章 個体の被害進行過程のシミュレーション

1 はじめに

ある林分の最終的な激害本数を予測するのに被害推移の収束線が役に立つことを第5章で述べた。しかし，被害推移の収束線を前章のような林分の被害推移モデルから求めるには，激害発生後最低でも3年間の観察データを必要とした。これでは，たとえ被害推移の収束線が決定されたとしても，その林分の被害はかなり進行してしまっているため，予測のもつ意義は薄れる。被害にかかり初めのできるだけ早い時期に，被害推移の収束線を決定することができれば非常に便利である。そこで，個体の被害進行過程が激害区分図上の右上方向への動きとして表示できること，また激害ラインが激害木とそうでない木を区別できる（第4章）ことに注目し，初発病樹高階別の激害本数率をシミュレーションにより求める方法を開発した。また，シミュレーションに用いた諸条件の変化に対応する激害本数率の増減のありさまから，林分の被害軽減につながる条件について検討した。

2 シミュレーションの方法

1) シミュレーションの構造

輪生枝の主軸上に被害が発生して（初発病時）以後の個体の被害進行は，激害区分図上の右上方向への移動として表示できた。そして，右上方向へ移動した結果，激害ラインの上方へ達した個体を激害木として判定することがほぼ妥当であることがわかっている（第4章）。今回行ったシミュレーションは，上述した一連の移動や激害であるか否かの判断をコンピュータ内で実行させることにほかならない。具体的には，まず初発病時の樹高や被害輪生枝率，発病後の被害輪生枝率の増加，樹高生長量などの基本的な条件を設定する。次に，当該林分の調査データにもとづいた定数を与え，コンピュータ内で先に設定した条件に従って初発病時の座標 P_0 から n 年後の座標 P_n まで変化させる。この経過を連続座標としてコンピュータに記憶させ，いずれかの座標が当該林分の激害ラインの上方に位置するかどうかで激害になるか否かを判定するというものである（図-31）。

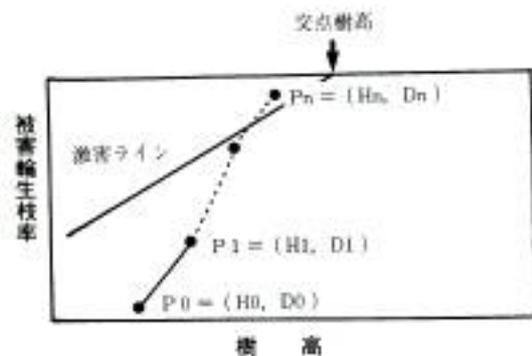


図-31 シミュレーションの構造

2) 基本的条件の設定

シミュレーションに必要な初発病時の樹高 (H0) や被害輪生枝率 (D0), 発病後の被害輪生枝率の増加, 樹高生長量 (ΔH) などの基本的条件を次のように与える。

(条件1) 個体 i の初発病樹高 (H0i) と初発病時の被害輪生枝率 (D0i) の両者は互いに無関係である。

(条件1) から, 個体 i の初発病時の激害区分図上の座標 (P0i) はそれぞれランダムな H0 と D0 の組合せとして表示できる。すなわち

$$P0i = (H0i, D0i) \dots\dots\dots (6-1)$$

である。

(条件2) 発病後 n 年時の個体 i の樹高生長量 (ΔHni) は, その年の樹高 (Hni) や被害輪生枝率 (Dni) と無関係である。ただし, 発病後の林分の平均樹高生長量は毎年一定の割合 (k) で低下する。

初発病年の林分の平均樹高生長量を ΔH0s, 発病後 n 年の林分平均樹高生長量を ΔHns とすると,

(条件2) から

$$\Delta Hns = \Delta H0s \cdot K^n$$

また, 林分の総個体数を N とすると,

$$N \cdot \Delta Hns = \sum \Delta Hni, \quad N \cdot \Delta H0s = \sum \Delta H0i$$

$$\therefore \Delta Hni = \Delta H0i \cdot K^n$$

ただし, $K = 1 - k$ である。したがって, $n' = n - 1$ とすると, 発病後 n 年時の個体 i の樹高 Hni は,

$$Hni = Hn' i + \Delta Hn' i = Hn' i + \Delta H0i \cdot K^{n'} \dots\dots\dots (6-2)$$

である。

(条件3) 発病後は, 健全な輪生枝の占める百分率 (100 - D) が毎年一定の割合 (R) で減少する。

(条件3) から発病後 1 年時の個体 i の被害輪生枝率 (D1i) は,

$$D1i = D0i + R (100 - D0i) = D0i (1 - R) + 100 R$$

発病後 2 年時の被害輪生枝率 (D2i) は,

$$D2i = D1i + R (100 - D1i) = D1i (1 - R) + 100 R \\ = D0i (1 - R)^2 + 100 R \{1 + (1 - R)\}$$

一般に, 発病後 n 年時の被害輪生枝率 (Dni) は,

$$Dni = D0i (1 - R)^n + 100R \{1 + (1 - R) + (1 - R)^2 + \dots + (1 - R)^{n-1}\} \\ = D0i(1 - R)^n + 100\{1 - (1 - R)^n\} \dots\dots\dots (6-3)$$

である。

したがって, 個体 i の発病後 n 年時の激害区分図上の座標 Pni は, (6-2), (6-3) 式から

$$Pni = (Hni, Dni)$$

$$\left. \begin{aligned} Hni &= Hn' i + \Delta H0i \cdot K^{n'} \\ Dni &= D0i (1 - R)^n + 100 \{1 - (1 - R)^n\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6-4)$$

である。

(条件4) 個体 i の発病後 n 年時の激害区分図上の座標 Pni = (Hni, Dni) が激害ラインより上方に位置する個体は激害木である。

ここで, 林分 c の激害ラインを

$$Dc = 30 \cdot H + Bc \dots\dots\dots (6-5)$$

とすると, (条件4) より $Dni \geq Dci$ の時, 個体 i を激害木と判定する。ただし, Dci は Hni に対応した Dc の値である。

3) 演算

図-32に、被害進行シミュレーションのフローチャートを示す。各定数の入力後、個体 i の初発病時の座標 P_{0i} を、(6-1)式に示したようにランダムな初発病樹高と被害輪生枝率の組み合わせ (H_{0i} , D_{0i}) として発生させる。実際には系統の異なる2組の乱数を組み合わせる。激害木か否かは D_{ni} と D_{ci} の大小関係で決定する。激害にならなかった個体は、(6-2)式と(6-3)式に従って座標を移動させる。ただし、(6-2)式の ΔH_{0i} は、(条件2)からその時の樹高や被害輪生枝率と無関係であるので、これも別の乱数により決定する。あらかじめ定数として入力した年数 (y) だけ座標の移動と激害木か否かの判定を繰り返す。そして、繰り返し中に個体 i が激害木になった場合のみカウントして次の個体の演算に移る。

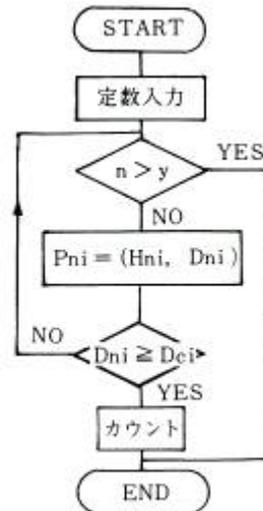


図-32 シミュレーションのフローチャート
 P_{ni} : 個体 i の発病後 n 年時(初発病年は $n=0$)の激害区分上の座標
 y : 繰り返しの年数
 D_{ci} : H_{ni} に対応する激害ライン上の被害輪生枝率

3 シミュレーションの結果

仁宇布と赤平1の激害ラインに基づいてシミュレーションを行った。林分の調査データに基づいて各定数を次のように定めた。仁宇布と赤平1の激害ラインの切片の定数 (B) は、(4-2)式および(4-1)式から、それぞれ7.3と17とした。また、樹高生長量の上限 (H_{max}) は、仁宇布で 0.7 m / year (図-36参照)、赤平1で 0.5 m / year とした。その他の定数は両林分に共通とし、樹高生長量の毎年の低下率 (k) を0.1、健全な輪生枝の占める率の毎年の減少割合 (R) を0.45とした。繰り返しの年数 (y) を5年とし、10 cm 間隔の初発病樹高階ごとに1,000個体分を計算し、その激害本数率 (RD) を求めた。

図-33に、仁宇市と赤平1のシミュレーションの結果を示した。仁宇布では、被害がほぼ終息したとみなせる1986年時点の50 cm 間隔で区切った初発病樹高階 (RD) の激害本数率 (黒丸) と良好な一致をみている(図-26参照)。また、1.5m以下の初発病樹高階を除くと、シミュレーションの結果はほぼ直線とみなせるのでこの線をもとにして容易に被害推移の収束線を決定することができる。一方、赤平1のシミュレーション結果は、この林

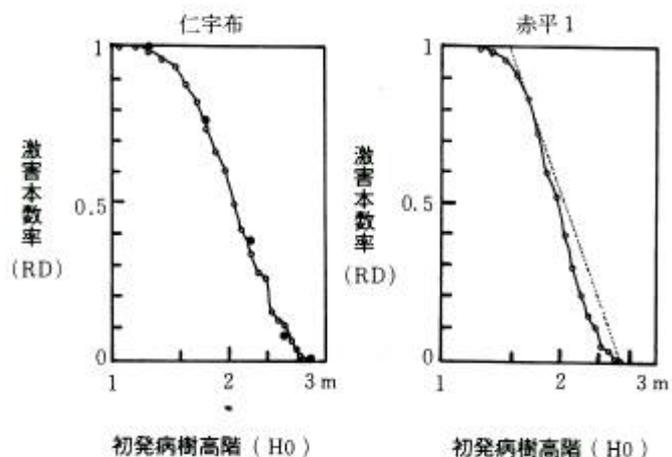


図-33 仁宇市と赤平1のシミュレーションの結果

●: 1986年時点の激害本数率
 点線は被害推移モデルから求めた収束線を示す。

分の被害が 1986 年時点でも進行中なので、そうした時点の激害本数率との比較は意味がない。そこで、第 5 章の被害推移モデルから求めた被害推移の収束線（点線）との比較を行った（図-30 参照）。シミュレーションで得られた曲線は全体的に収束線の下側にあり、この傾向は 2 m 以上の初発病樹高階で特に顕著であった。

図-34 に、各定数の変化に伴う激害本数率曲線の変化を仁宇布の例で示した。樹高生長量の低下率（ k ）を 0 から 0.5 へと増加させるに従って、この曲線は、同じ初発病樹高階における激害本数率を高くする力向へ移動した（図-34a）。ただし、移動の仕方は初発病樹高所により著しく異なっている。激害区分図の交点樹高はその林分の危険期脱出樹高の近似値とみなせる（第 4 章）。仁宇布の激害ラインの交点樹高は 3.09m（図-19）であるので、樹高が 3.09m を越えれば激害にはならない。このため

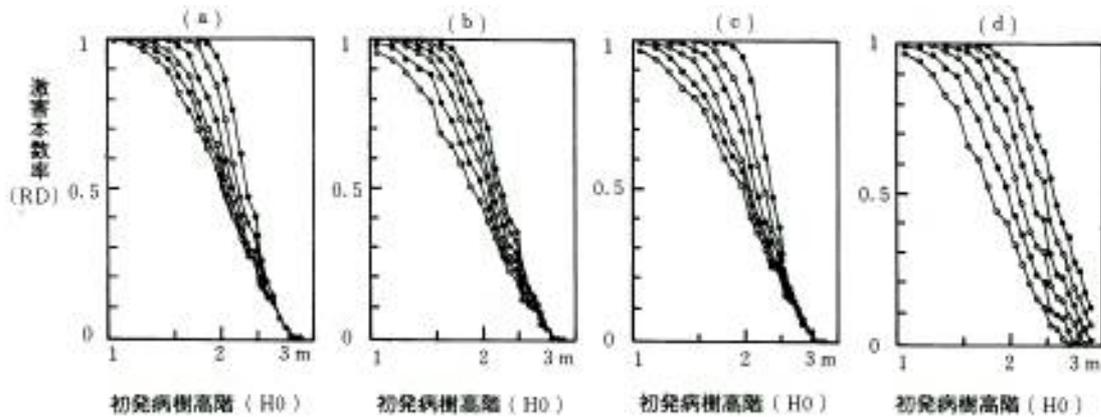


図-34 定数の変化に伴う激害本数率曲線の変化例

下に示す定数の変化に対応して各図の左側の曲線から右側の曲線へと変化した

- (a) 樹高生長量の低下率 (k) 0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5
- (b) 健全輪生枝率の減少割合 (R) 0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6
- (c) 樹高生長量の上限 (H_{max}) 90cm,80cm,70cm,60cm,50cm,40cm
- (d) 激害ラインの切片の定数 (B) 15,10,5,0,-5,-10

に、初発病樹高が 2.5m 以上位になるとよほど初発病時の被害輪生枝率が高いかあるいは樹高生長量が小さくなければ、1, 2 年で交点樹高を越えてしまう。したがって、初発病後 1, 2 年の樹高生長量の低下率の違いは、初発病樹高階が 2.5m 以上あるような個体群の激害本数率にはほとんど影響を与えないのである。逆に初発病樹高階が 1.5m 以下の個体群では、3.09m の交点樹高を上回るには数年を要するので、非常に樹高生長の良好な個体を除くと遅かれ早かれ激害ラインを越えてしまう。したがって、ここでも樹高生長量の低下率の違いは激害本数率にほとんど影響を与えない。結局、中間の 2 m 前後の初発病樹高階に属する個体群が、樹高生長量の低下率の影響を最も強く受けて、激害本数率を著しく高めたのである。これらの結果、樹高生長量の低下率の増加は、各曲線の直線類似部分の勾配を増大させるように作用したといえる。

健全輪生枝率の年間の減少割合 (R) を 0.35 から 0.6 へ（図-34 b）、樹高生長量の上限 (H_{max}) を 90 cm から 40 cm へ（図-34c）それぞれ変化させた場合の激害本数率曲線の移動の仕方は、基本的には樹高生長量の低下率を増加させた場合のそれと同じである。

一方、激害ラインの切片の定数 (B) を 15 から -10 へと減少させた場合、やはり同じ初発病樹高階では激害本数率が高くなる方向へ移動した（図-34d）。しかし、移動の仕方は、前三者の場合と異なり、初発病樹高階による違いは小さかった。激害ラインの定数 (B) を小さくすることは交点樹高を高くすることと同義である。前三者の場合には、交点樹高（=危険期脱出樹高）そのものは変わらなかったの

で初発病樹高が高いことの有利性は絶対的であったが、今回の場合には交点樹高そのものが高くなるので、その有利性は相対的なものになる。例えば、3 m前後の初発病樹高階の激害本数率曲線は、前三者の変化に対しては全く影響を受けなかったにもかかわらず、激害ラインの定数（B）の減少に対してはかなり激害本数率を高めた。このように、激害ラインの切片の定数（B）の減少は、曲線全体を右側へ平行移動させるように作用したといえる。

このような定数の変化に対応する激害本数率の増減のありさまから、林分の被害軽減につながる条件について以下のことが考えられる。樹高生長量を大きくすることや発病後の樹高生長量の低下率を下げること、さらに被害輪生枝率の経年的な増加率を抑えることができればそれぞれ激害になる個体数をいくらか少なくすることができる。また、積雪の少ない地域（激害ラインが相対的に左側に位置）では、多雪地に比べて同じ初発病樹高では激害木になる確率は著しく低くなる。さらに、何らかの方法で初発病樹高を高めることができれば、やはり激害木になる確率を低くすることができる。

4 考 察

今回行ったシミュレーションは、4項目の基本的な条件の成立を前提としている。これらのうち

（条件4）の激害ラインを激害木決定の判断基準にすることに関しては、第4章で詳細に検討しているので、特に問題はないとしてよいであろう。ここでは残りの3条件について検討を加えるとともに、被害がほぼ終息したとみなせる仁宇布のデータをもとにその妥当性を検証する。

まず、初発病樹高と初発病時の被害輪生枝率は互いに無関係であるとした（条件1）についてである。シミュレーションの目的は初発病樹高階ごとの最終的な激害本数率を求めることにある。このため、初発病年ごとには、あるいは経年的には初発病樹高と初発病時の被害輪生枝率との間に一定の傾向が認められたとしてもそれらを込みにした場合に特定の関係が認められなければ、（条件1）は成立するものとみなせる。さらに、前述したように、初発病樹高階が1.5m以下の個体群では、仁宇布の交点樹高（3.09 m）を上回るには数年を要するので、非常に樹高生長の良好な個体を除くと遅かれ早かれ激害ラインを越えてしまう。逆に、初発病樹高が2.5m以上位になるとよほど初発病時の被害輪生枝率が高いあるいは樹高生長量が少さくなければ、1、2年で交点樹高を越えてしまうので激害木にはなりにくい。このような初発病樹高の範囲にある両個体群に関しては、初発病時の被害輪生枝率に関する条件を多少違えたとしても最終的な激害本数率にはそれほど違いは生じないものと考えられる。したがって、シミュレーションの目的からすると、（条件1）は、おおよそ1.5～2.5 mの初発病樹高の範囲にある個体群が具備しなければならぬ条件であって、それ以外の個体群に対しては十分条件に近いものであると考えてよい。図-35に、初発病年の違いを無視して、仁宇布の初発病時の樹高（H0）と被害輪生枝率（D0）の関係を示した。初発病樹高1 m以下で被害輪生枝率が低いことを除けば、初発病樹高と被害輪生枝率との間に特定の

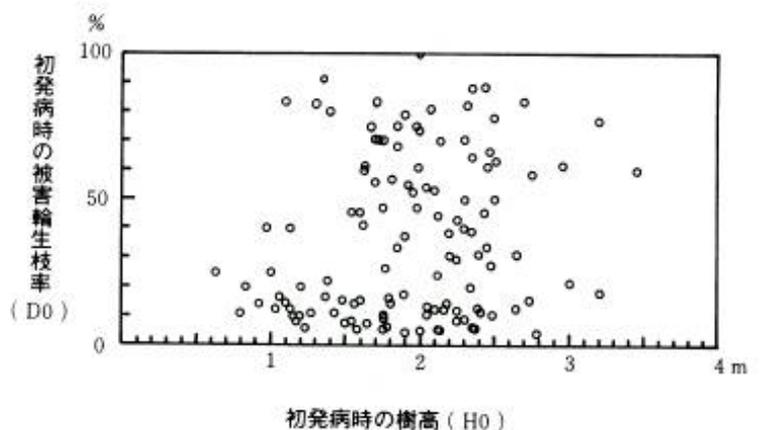


図-35 仁宇布の初発病時の樹高（H0）と被害輪生枝率（D0）の関係

関係は認めがたい。特に、初発病樹高がおおよそ 1.5~2.5m の範囲においては、被害輪生枝率はほぼランダムに分布しているとみてよい。このようなことから、(条件 1) は実質的に成立するものと考えたい。

このシミュレーションでは、被害推移モデルでみたような林分被害の経年的な変化(第 5 章)を表現することはできない。それは、このシミュレーション・プログラムが、初発病樹高別に各個体の被害を 5 年間進行させ、その時点での激害本数(率)だけを出力する構造になっているからである。すなわち、初発病年の違いや被害の経過は問題にしていないのである。したがって、初発病樹高と激害本数率の関係の経年的な変化(図-26 参照)を表現するには、(条件 1) の代わりに発病年の識別や初発病樹高と被害輪生枝率の関係などを規定したより特殊な条件の設定が必要であり、今後の課題である。

次に、初発病年(発病後の年数 $n = 0$) の(条件 2)について考えてみる。条件の一つは、初発病年の被害輪生枝率と樹高生長量

は無関係であるとするものである。図示していないが、仁宇布では両者の間に特定の関係は認められなかった。これは、トドマツの樹高生長の時期(6~7月)からみて、その大半は前年の貯蔵物質に依存すると考えられることから、むしろ当然のことなのかもしれない。条件のもう一つは、

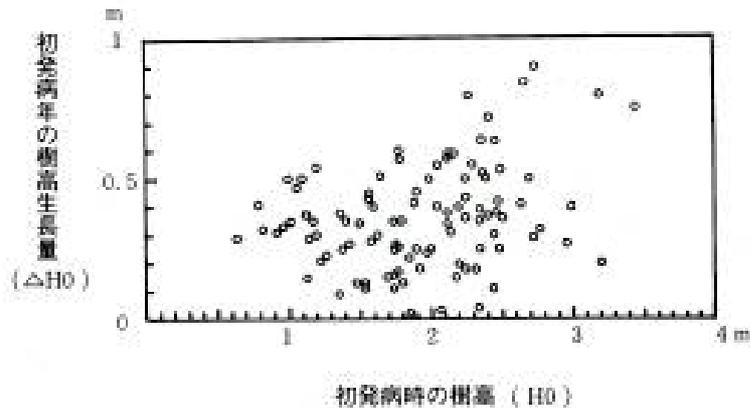


図-36 仁宇布の初発病時の樹高(H0)とその年の樹高生長量(ΔH0)の関係

初発病樹高とその年の樹高生長量(ΔH0)が無関係であるとするものである。図-36に、仁宇布の初発病樹高とその年の樹高生長量(ΔH0)の関係を示した。仁宇布と同じ位の林齢の普通のトドマツ造林地で観察される両者の関係は、一般的にいて、樹高の大きい個体ほど年樹高生長量も大きいというものであろう。

図-36において、初発病樹高の低いところでは明らかでないが、初発病樹高の高いところでは、確かに、樹高生長量がやや良好のように見える。しかし、初発病樹高とその年の樹高生長量が無関係であるとする条件も、(条件 1)の場合と同じ理由から、おおよそ 1.5~2.5m の初発病樹高の範囲にある個体群が具備しなければならない条件であるといえよう。そのような初発病樹高の範囲においては、樹高生長量は 0.7m 以下ではほぼランダムに分布しているとみなせそうである。これらのことから、初発病年(発病後の年数 $n = 0$) の場合には、(条件 2) は成立するものと考えたい。

$n \geq 1$ の場合には、被害が進行して樹高生長が衰える個体と危険期を脱出して樹高生長が旺盛になる個体、さらにその中間的な個体が生じる。このために、樹高生長量と樹高や被害輪生枝率との関係は非常に錯綜し、バラツキが大きくなる。ただし、林分の平均樹高生長量は年ごとにいくぶん低下の傾向がみられる。このように、 $n \geq 1$ の場合の樹高生長量についてはさらに詳細な解析は可能であるが、ここでは、シミュレーションの構造をできるだけ単純化するために $n \geq 1$ についても $n = 0$ と同様に(条件 2) がそのまま成立するものとして扱いたい。

最後に(条件 3)についてである。発病後の個体の被害進行は激害区分図上の右上方向への移動として表示できた(例えば図-25)。このことは、毎年新たな輪生枝が発生し、被害輪生枝率(発病範囲にある輪生枝の総数に対する被害を受けた輪生枝数の比)算出の分母(総輪生枝)が大きくなるにもか

かわらず、その分以上に新たに輪生枝が被害を受けることを意味する。また、大部分の個体は被害輪生枝率が90%以上になるのに数年を費やしていることから、健全な輪生枝の占める率が毎年一定の割合で減少するとした（条件3）もほぼ妥当であると考えられる。

第5章で述べた被害推移モデルは、初発病樹高と激害本数率との初期的関係やその後の激害本数率の増加の仕方を激害木発生後の経過年数の関数として一義的に決めた、いわば決定論的モデルであった。今回のシミュレーションと同様の構造をもつモデルにおいて、いま仮に樹高生長量や被害輪生枝率などを初発病後の経過年数の関数として決定論的に扱えばどうなるであろうか。結果は、ある初発病樹高に属する個体のすべてが激害木になるかあるいはすべてが微・中害木にとどまるかのどちらかである。したがって、その激害本数率は0か1かのどちらかになるのである。初発病樹高の違いに基づく最終的な激害本数率の差を問題にする立場からは極めて不都合な結果であるといえよう。今回行ったシミュレーションは、このような欠点を除くために初発病時の被害輪生枝率や樹高生長量などに確率的な扱いを導入したものである。

今回のシミュレーションでは、初発病年から5年後の激害本数率を求めた。これは、経験から発病後5年で激害になるか否かが決着すると考えたからである。仁宇布のシミュレーションでは、発病後5年を経過しても激害木にならずにしかも交点樹高にも達しなかった個体の比率は全体の0.54%にすぎなかった。このようなことから、シミュレーションにおいても激害になるか否かは発病後5年で決着がつくとみなしても間違いでないであろう。シミュレーションにおける発病後5年での決着と第5章の被害推移モデルにおける激害発生後5～6年での決着は一見矛盾したような印象を与える。これは、シミュレーションと被害推移モデルにおける計算の出発時点が異なるからである。すなわち、シミュレーションの出発時点は林分の全個体の初発病樹高が決定した（全個体が発病した）時点であり、被害推移モデルの出発点は林分に激害木が発生した時点である。赤平1では2個体を除いて全個体が発病したのは1985年であり、激害木が発生したのは1983年である。したがって、シミュレーションでは1985年から5年後の1990年時点が、被害推移モデルでは1983年の6年後の1989年時点が決着時点であり、両者間の相違は小さい。また、赤平1の初発病年は1981年であることから、林分に初めて被害が発生してから激害木が発生するまでに2年、ほぼ全個体が被害を受けるまでに4年、被害が終息するまでに8～9年を要することがわかる。

いずれにしても、激害発生後3年間の観察データがあるような林分では被害推移モデルを用いて、1年分のデータしかない場合にはここに示したシミュレーションを実行することにより、かなり精度の高い被害推移の収束線が得られ、被害終息時点の激害本数が予測できる。

第7章 総合討論

1 発病誘因としての気象要因

トドマツ枝枯病は、*Scleroderris* 菌を主因として、トドマツとこれを取り巻く積雪を中心とする誘因環境の中で発生する。本病の発病が非常に複雑で多様な要因に支配されているために、本病害に対してこれまでいろいろな側面からいろいろな解釈がなされてきた。本病の発見前の凍害との混同（北海道林務部，1966；森田，1967）は別にしても、積雪と根系発達の関係から貧弱な根系をもつ個体が主として発病するとした根系原因説（若林，1977a, b）や本病被害と類似の雪圧害と本病害との複合的被害であるとした脱葉雪害説（吉武ほか，1980；吉武，1983）などは活字となったそれらの一例である。これらの説は、一面では本病の特徴を捉えてはいるものの、それらの説では説明できないあるいは矛盾する

現象がでてきたこともあって、現在ではほぼ否定されている。本病害に対する認識のこのような経緯は本病に関与する要因を絞り込むことの困難性を示すものである。

YOKOTA (1975b) は、1970 年の本病の大発生と 1970 年以前の 6 年間の気象データを解析し、大発生の主要な要因として 1969 年 9 月にもたらされた異常低温、1969～1970 年の冬期間の積雪量および積雪期間の長さをあげている。さらに、1969 年の感染期間中（6 月と 7 月）の降水量が病原菌の飛散に十分であったことも同時に報告している (YOKOTA, 1975b)。しかしながら、1970 年以降の本病の全道への蔓延の過程においては、積雪深の多い年の被害が必ず大きいとは限らなかったようである。また、被害がほぼ終息した恩根内で無作為に選定した 19 個体の初発病年は、調査の 3 年前に発病した個体から調査年に発病したもまでの 4 年間に及んでいた (図-25)。これらのことは、1970 年の大発生時とは異なり、1970 年以後の蔓延、その中でも特に最近の蔓延の過程では気象条件の果たしている役割が相対的に低下していることを示している。最近では、被害林分の近くにある造林地では、通常の気象条件の年であっても被害の拡大・継続が観察される。また、被害発生地域も大発生当初の比較的高標高の寒冷・多雪地から低標高の多雪といえない地域へ拡大してきている (秋本, 1983 ; 田中, 1984)。しかしながら、発病する枝が埋雪中の枝に限られているために積雪深の少ない年の被害高の上限は当然低く、また寡雪地域では比較的早期に本病の危険期を抜け出すことができるので被害の程度は多雪地ほどひどくならないのが普通である。

2 積雪と発病誘因

トドマツ枝枯病の発病に関して積雪が果たしている役割の一つは、外気の低温を遮断し、菌の発育温度を保障すること (秋本, 1985) にあると考えられている。この考えに基づくと、埋雪期間が長くなればそれだけ本病の被害は大きくなる可能性が高い。一般的に、雪融けが遅い高標高や多雪地域の造林地の被害が激しいのも一つには埋雪期間の長いことが関係していると考えてよいであろう。

しかしながら、病原菌の発育保障の役割とは別に、積雪は埋雪枝の枝葉を強く引っ張ることによって発病を促進するという重要な役割をも果たしていると考えた。このような引っ張りストレスの大きさは積雪の沈降力と幹・枝の抗力によって決まるものとする。造林木の生育初期段階では、積雪の沈降力がいくら大きくても幹・枝が細長で柔軟なために積雪に抵抗しないのでストレスは小さい。しかし、造林木が生育するにつれて幹・枝が丈夫になり沈降力をまともに受けるようになる。トドマツ枝枯病の顕著な特徴である接地枝が発病しにくい現象や上木効果の一部、さらには寝せ植えの効果などの諸現象はこの引っ張りストレスの大きさにより説明できるのである。また、積雪の沈降力は、受圧面積が小さい場合には積雪の上部で大きいことが古くから知られている (四手井, 1954)。感染苗木の越冬処理試験で他の処理に比べて発病率が有意に高かった高位置区では、苗木を 50 cm 持ち上げたことが相対的に大きい沈降力を受ける結果を招いたと考える。

引っ張りストレスを小さくすることにより被害を軽減する方法は水井・浅井 (1988) によって試験されている。水井・浅井 (1988) は、トドマツ枝枯病の発病初期林分で根を付けたまま造林木を秋に掘り取ってその場に倒す処理と造林木の幹の中央部をビニールひもで結び、倒れるまで引っ張って固定する処理を行い両処理とも無処理に比べて有意に発病率が低いことを報告している。ただし、掘り返した時に多くの根を切断するために植え直し後の生長が減退することや、ひもの摩擦によって幹が傷付けられることなど致命的な欠点があるために、事業として実施するには不適當である。しかし、埋雪を脱出するまでの幼齢期を密植などにより細長に育て、倒伏状態で越冬させることは被害軽減に有効であると考えられる。

発病誘因に関して論議してきたことをまとめると、①恒常的な被害発生下では、発病誘因としての気象条件が果たしている役割は相対的にみて小さい、②造林木の大きさと積雪の沈降力によって決まる引っ張りストレス（積雪が枝葉を強く引っ張ること）が発病を促進している、ことが明らかになった。このような発病誘因（促進要因）としての引っ張りストレスは本研究で新しくみいだされたものであり、今後の本病の研究や被害防除の方向を定める基礎資料になると考える。また、本病の発病が埋雪中の枝に限られることや個体の枯死につながる激害が梢端部の被害であることなどは、個体の被害の進行、特に激害になるか否かは樹高や積雪状態によって著しい影響を受けるであろうことを示唆する。積雪深は地域ごとにほぼ一定であるとみなせることから、本病の被害予測は常に樹高との関係において検討することが必要であろう。

3 交点樹高に基づく立地区分と防除の考え方

激害区分図は、被害個体の樹高と被害輪生枝率、激害であるか否かの被害度の三者間に明瞭な関係が存在することを示した。激害区

表-12 交点樹高を用いた経営区の立地区分

交点樹高 (m)	経営区
1.50～2.49	興 部 (2.04m)
2.50～3.49	名 寄 (2.65m) < 雄武 (2.83m) < 倶知安 (2.93m) < 滝川 (2.96m)
3.50～4.49	美 深 (4.03m) < 当別 (4.27m)

分図の激害ラインと被害輪生枝率 100%の線の交点の樹高（交点樹高）はその林分の危険期脱出樹高に近似した。危険期脱出樹高は被害林分の施業を考える場合の一つの到達目標になる。そこで各林分の交点樹高のデータを基礎に地域レベルでの施業

() は、各経営区の交点樹高の平均値を示す。
ただし、データが 1 林分しかない経営区はその林分の値を示す。

方法について考えてみたい。被害区分図を作成した道有林の 13 林分（表-9）の交点樹高から経営区ごとの平均値を計算し、この平均値に基づいて表-12のように経営区の立地を区分した。交点樹高は基本的にはその林分の積雪深の関数と考えられることから、各立地では積雪深に応じた施業方法が考えられる

ここで、他の条件（樹高生長量や被害の進行速度など）は同じと仮定して、交点樹高だけが変化する場合に激害本数率がどのように変化するかを考えてみる。この問いに対する基本的な解答は激害ラインの切片定数（B）の変化に伴う激害本数率曲線の変化例としてすでにシミュレートされている（図-34）、まず、交点樹高が低くなる場合には、いずれの初発病樹高階においても交点樹高の低下する分だけ早期に危険期を脱出できるので林分全体の激害本数率も当然低下する。交点樹高が極めて低い、例えば 1.0m未満のような場合には大半の造林木は植栽後 5年以内にこの樹高を越えるであろう。したがって、苗畑での感染あるいは被害造林地の中への植え込みなどのような特殊な場合を除くと激害木の発生は考えにくい。特別の防除策がとられなくても本病の発生によって成林しえないということはおこらない。交点樹高がもう少し高くなる場合（例えば 3.0m）では、その高くなる分だけ危険期の脱出が遅れるので林分の激害本数率は増大する。したがって、場合によっては植栽木だけでは成林しえないことがあるにしても全滅するようなことはおこらないであろう。植栽木の本数減少がおこることを考慮に入れた施業が必要となろう。交点樹高が極めて高い、例えば 5.0m以上のような場合には植栽後 15年を経過しても多くの造林木はこの樹高に達しないであろう。このように危険期の脱出に長い年数を要するので発病がよほど遅れて初発病樹高が高くない限り成林は難しい。現在のところ多雪地ほど初発病年が遅れることを保障する確かなデータはない。したがって、常に（侵入）広葉樹との共存や育成（KIKUZAWA, 1987）を考慮する必要がある。以上に述べたことをもとに、表-12の各立地の積雪深や特徴的な被害、施業についてまとめると、

①交点樹高が 1.50～2.49mの地域：積雪深が浅く、よほど樹高が低いうちに被害にかからない限り激害木の発生は少ないと考えられるので特別の施業を必要としない地域、

②交点樹高が 2.50～3.49mの地域：積雪深が深く、激害木は数多く発生するが、植栽木を主体とした施業を採用できると考えられる地域、

③交点樹高が 3.50～4.49mの地域：積雪深は極めて深く、植栽木の保育だけでなく、常に侵入広葉樹を育成する施業を考慮しなければならない地域、であると言える。

前述したように、激害本数率を低下させるのに最も効果があるのは交点樹高の低下であった。しかし、一つの林分の交点樹高を低下させることは現実的には不可能である。なぜならばそれは何年にもわたって積雪量を制御することによって初めて可能になると考えられるからである。融雪剤散布による被害軽減の試み（水井ほか，1986）は基本的には積雪量を制御することによって単年度の危険期脱出高（交点樹高）の低下を狙ったものと考えられる。激害本数率を低下させるのに、交点樹高の低下に次いで効果があるのは初発病樹高を高めることであると考えられる。耕うん地ごしらえや密植など、初期の樹高生長を促進させるような施業は初発病樹高を高めるのに有効であり、結果的に激害木の発生を減少させる効果があると考えられる。また、未発病木が多く残存するような被害にかかり初めの林分に対しては、欧米のマツ属の *Scleroderris canker* に対して防除効果が高いとされている Chlorothalonil (SKILLING and WADDELL,1974 ; KLINGSTROM and LUNDERBERG, 1978) などの殺菌剤散布の効果に期待できる。それは既発病木の被害の進行を遅らせる効果と同時にこの間に未発病木が大きくなることに期待できるからである。造林木の生育が進み引っ張りストレスが増大して以後の被害林分では手遅れであることが多い。どのような防除手段を採用するにしても、最も重要なことはできるだけ早い時期に被害をみつけて、将来の残存本数を予測することである。このような予測は、本研究で初めて可能になったといえる。

要 約

トドマツ枝枯病は、北海道のトドマツ造林地の広い部分に蔓延していて深刻な被害をもたらしている。本病が子の菌類 *Scleroderris lagerbergii* によってひきおこされることは知られているが、発病誘因や発病後の被害進行に関する実践的な研究はこれまでほとんどなされていなかった。本研究は、トドマツ枝枯病の発病誘因を解明し、将来の激害木を予測する方法の確立を目的にして着手したものであり、ここに一応の結論を得るにいたった。この過程を以下に要約する。

第1章では、序論としてトドマツ枝枯病の被害の特徴と蔓延の経過およびこれまでの研究について概括するとともに本研究の目的と方向を述べた。

第2章では、本研究の試験や調査を実施した林分5箇所（中川，咲来，恩根内，仁宇布，赤平）の林況と本病の被害状況を示した。赤平が道央の多雪地に位置し、最近になって被害が出始めた地域であるのに対し、中川，咲来，恩根内および仁宇布は道北の屈指の厳寒・多雪地帯に位置し古くから被害が確認されている地域である。

第3章の第1節では、地面近くの枝が発病しにくいという本病の特徴的な現象に焦点をあてて被害実態を解析した。同一林分の樹高3～4mの造林木について、地面に接して越冬した枝（接地枝）と接地しないで越冬した枝（非接地枝）の発病率を比較した。接地枝の発病率（19.7%）に比べて、非接地枝の発病率（82.2%）が著しく高かった。この結果は、接地枝で発病が抑制され、非接地枝で促進されることを示唆した。第2節では、地面に接して越冬することがどうして発病の抑制につながるのかを解明するために何種類かの越冬処理試験を実施した。感染苗木を地面から50cm持ち上げて越冬させた処理や接地する枝に副木をあてて人工的に接地を妨げた処理の発病率はそれぞれ無処理のそれよりも有意に

高かった。一方、寝せ植え処理の平均発病率は無処理に比べて低かった。これらの試験結果から積雪が枝葉を強く引っ張ることがストレスとなって本病の発病を促進すると考えた。第3節では、保残木の多い造林地や保残木下では被害が少なく、被害程度も軽微である現象（上木効果）の実態を調べ、その原因を整理した。皆伐跡地と上木効果が認められる広葉樹二次林（上木）下での積雪環境（積雪深、雪質、密度など）は互いに似ているものの、造林木の越冬状態はかなり異なっていた。すなわち、上木下では皆伐跡地に生育する造林木に比べて形状比が大きく倒伏して越冬する個体が多かった。冬期間に上木効果の原因が作られるとするならば、それは上木下の造林木の多くが倒伏して越冬することと関係する可能性が高いことを指摘した。

第4章では、一時点だけの調査から過去の被害経過を再現できる新しい調査方法（被害輪生枝率）と解析方法（激害区分図）を提案するとともにその具体的な利用方法を示した。激害区分図の激害ラインと被害輪生枝率100%の線の交点の樹高（交点樹高）がその林分の危険期脱出樹高に近似することを示した。そして、地域ごとの積雪深と交点樹高の関係から、激害ラインは寡雪地域では左側に多雪地域では右側に位置することを明らかにした。また、被害がほぼ終息した恩根内の19個体の激害区分図上での被害進行の軌跡から、初めて被害を受けた時の樹高（初発病樹高）とその個体の将来の被害度に密接な関係があることをみいだした。

第5章では、赤平1と仁宇布の被害林分について、初発病樹高（横軸）と激害本数率（縦軸）の関係を軸に林分被害の経年変化の構造を解析した。両者の関係は、被害の初期段階の正規型に近い曲線から初発病樹高階が高いほど激害本数率が低くなる右下がりの曲線、さらには右下がりの直線（被害推移の収束線）へと変化することを明らかにした。この結果をもとに被害の推移モデル（経年変化モデル）を組み立て、個々の林分の初発病樹高の分布から将来の激害木の本数を予測する方法を提案した。

第6章では、個体の被害進行過程をシミュレートするプログラムを開発し、これを利用して被害推移の収束線を求める方法を提案した。仁宇布の初発病後5年のシミュレーションの結果は、この林分の被害がほぼ終息したとみなせる1986年時点の初発病樹高階別の激害本数率と良好な一致を示した。シミュレーションに用いた定数と激害本数率の増減のありさまから、樹高生長量を大きくすることや被害輪生枝率の増加速度を抑えることができれば激害になる個体数をいくらか少なくできることを示した。また、激害木の減少に最も効果があるのは初発病樹高を高くすることであることを明らかにした。

第7章では、トドマツ枝枯病の発病誘因に関して、①恒常的な被害発生下では、発病誘因としての気象条件が果たしている役割は相対的にみて小さいこと、②造林木の生育段階と積雪の沈降力との関係によって生じる引っ張りストレスが発病を促進していることを論議した。また、交点樹高から推測される情報を基礎に、道有林の立地区分を行い、各立地の積雪深や特徴的な被害、施業についてまとめた。さらに、本研究で明らかになった知見にもとづき、被害防除の考え方と具体的な方法について論議した。

文 献

- 秋本正信 1981 トドマツ枝枯病菌の子実体形成時期. 日林北支講 29 : 122~124
——— 1982 トドマツ枝枯病の病徴—脱葉雪害説への疑問—. 北方林業 34 : 101-103
——— 1983 苗畑に発生したトドマツ枝枯病. 森林防疫 32 : 102-103
——— 1984 トドマツ枝枯病菌の病原性の菌種間比較. 北林試研報 22 : 77-84
——— 1985 トドマツ枝枯病とトドマツの埋雪期間および埋雪時期との関係. 96回日林論 475-476
——— 1987 海岸に発生したトドマツ枝枯病とファシディウム雪腐病. 森林保護 197 : 7-8

- 青柳正英・妹尾建三 1984 道有林におけるトドマツ枝枯病の現状とその対策. 北方林業 36 : 133-138
- 浅井達弘 1985 トドマツ枝枯病の発病誘因の検討 (IV) - 苗木の産地による罹病性の違い-. 日林北支講 33 : 158-159
- 1986 トドマツ枝枯病の被害予測方法. 北林試研報 24 : 1-12
- ・福地 稔・菊沢喜八郎・水谷栄一 1980 アカエゾマツの枝打ちに関する研究 (I) - 枝階別の枝葉量とその推定方法-. 日林北支講 28 : 39-41
- ・薄井五郎 1982 トドマツ枝枯病の発病誘因の検討 (II) - 冬期間の上木効果, 特に積雪と幼齢木の越冬状態-. 日林北支講 30 : 202-204
- ・阿部信行・新村義昭 1984a トドマツ枝枯病被害林分の取り扱い方法の検討 (II) - 被害度区分図の提案-. 日林北支講 32 : 101-103
- ・—————・1984b トドマツ枝枯病被害林分の取り扱い方法の検討 (III) - 被害度区分図を用いた激害林分の被害解析例-. 日林北支講 32 : 104-106
- ・————— 菊沢喜八郎 1985 トドマツ枝枯病被害林分の取り扱い方法の検討 (IV) - 樹冠からの距離と被害のあらわれ方-. 日林北支講 33 : 160-162
- DORWORTH, C. E. 1972 Epidemiology of *Scleroderris lagerbergii* in Ontario. Can. J. Bot. :50 751_765
- and KRYWIENCZYK 1975 Comparison among isolates of *Gremmeniella abietina* by means of growth rate, conidia measurement, and immunogenic reaction. Can. J. Bot. 53: 2506_2525
- DONAUBAUER, E. 1972 Distribution and host of *Scleroderris lagerbergii* in Europe and north America. Eur. J. For. Path. 2 : 6-11
- FRENCH, W. J. and SILVERBORG, S. B. 1967 *Scleroderris* canker of red pine in New York State plantation. Plant Dis. Repr. 51 : 108-109
- 藤原滉一郎・小野寺弘道・鈴木義弘 1971 中川地方演習林のトドマツ雪害の事例. 日林北支講 19 : 27-129
- ・岩淵正一 1975 北海道大学中川演習林における樹木の雪圧害 II - 平地での稚樹の倒伏方向-. 日林北支講 23 : 91-93
- ・小野寺弘道 1976 北海道大学中川演習林における積雪観測資料 (1969 / 70~1972 / 73). 演習林業務資料 16 : 1-48
- 袴田千代治 1984 国有林におけるトドマツ枝枯病実態調査様式の改正. 森林保護 181 : 23-24
- HALLE, F., OLDEMAN, R. A. A. and TOMLINSON, P. B. 1978 Tropical trees and forest - An architectual analysis-. 441pp Springer-Verlag Berlin
- 広田文憲 1978 道有林におけるトドマツ枝枯病について. 北海道の林木育種 21 : 14-16
- 北海道林務部 1966 多雪地帯におけるトドマツ人工林の気象害-美深第一・第二経営区, 昭和 41 年度調査-. 業務資料 No. 11 51pp
- ・1977 寒冷多雪地帯におけるトドマツ人工林の気象害 一名寄・美深経営区-. 経営試験業務資料 No.31 47pp
- ・1980 積雪環境とトドマツ造林木の雪害および枝枯病 一道有林における調査例-. 経営試験業務資料 No. 33 49pp

- 北海道林務部 1986 トドマツ枝枯病の現状とその対策 一道有林における調査例一. 95pp
————— 1987a トドマツ枝枯病の発生環境解析と防除対策に関する調査報告 一被害度区分図を利用した被害予測一. 109pp
————— 1987b 昭和 61 年度道有林野事業統計書. 240pp
- 北海道森林保護事業推進協議会 1984 トドマツ枝枯病対策指針 (中間報告)
————— 1987 北海道森林病虫害等被害並びに防除状況報告書. 139pp 北海道森林保護協会 札幌
- 石坂久志 1985 トドマツ枝枯病被害木の生長推移 一危険期脱出樹高一. 北方林業 37 : 33-36
- KIKUZAWA, K. 1987 Regeneration and stand-density control in juvenile birch stand in the subalpine zone of Hokkaido. Proc. Human impacts and management of mountain forest. 305-314
- KLINGSTROM, A. and LUNDERBERG, G. 1978 Control of *Lophodermium* and *Phacidium* needle cast and *Scleroderris* canker in *Pinus silvestris*. Eur. J. For. Path. 8: 20-25.
- 小林享夫 1972 トドマツ枝枯病 一マイクロペラ枝枯病からの病名変更とその学名について一. 森林防疫 21 : 2-3
- 小林順二・今野正彰 1984 トドマツ枝枯病に対する上木の保護効果について. 昭和 58 年度北海道林技研論 : 150-151
- 増田久夫・鈴木孝雄・吉武孝 1976 林木の生育障害と局地気象 (I) 一トドマツ枝枯病発生地帯の環境一. 日林北支講 24 : 47-49
- 松崎清一 1982 欧米のスクレロデリス胴・枝枯病と北海道のトドマツ枝枯病. 北方林業, 34 : 96-100
————— 1983 トドマツ枝枯病病木の病態・解剖. 日林北支講 31 : 128-129.
————— 1985 トドマツ枝枯病菌の寄主体侵入経路および侵入時期について. 96 回日林論 473-474
- 水井憲雄 1985 トドマツ枝枯病被害度区分図の適用例. 日林北支講 33 : 155-157
————— ・浅井達弘・菊沢喜八郎・清和研二 1986 トドマツ枝枯病被害に対する融雪促進の効果. 日林北支論 34 : 101-103
————— ・————— 1988 トドマツ枝枯病被害の防除試験. 光珠内季報 70 : 1-6
- 森田健次郎 1967 トドマツ凍害の実態について. 昭和 41 年度北海道林技研論 223-227
- 日本気象協会北海道本部 1981~1982 北海道の気象 25~26
- OHMAN, J. H. 1966 *Scleroderris lagerbergii* Gremmen 一The cause of dieback and mortality of red and jack pines in Upper Michigan plantation. Plant Dis. Repr. 50 : 402-405
- 佐保春芳・高橋郁雄 1972 針葉樹の新病害 3 種. 森林防疫 21 : 209-211
- 斎藤満・水井憲雄 1979 トドマツ幼齢林の雪害と積雪. 日林北支講 27 : 21-24
- 酒井昭 1982 植物の耐凍性と寒冷適応. 学会出版センター 469pp 東京
- 佐々木克彦 1988 各種越冬処理がトドマツ枝枯病の発生に及ぼす影響. 日林北支論 36 : 140-142
- 渋谷克巳 1985 トドマツ枝枯病の造林的な取り扱い. 森林保護 185 : 6-8
- 四手井綱英 1954 雪圧による林木の雪害. 林試研報 73 : 1-89
- 清水弘 1965 積雪観測法. 日本雪氷学会 5-28
- SKILLING, D. D. and WADDELL, C. D. 1974 Fungicides for control *Scleroderris* canker. Plant Dis.Repr. 58: 1097-1100
- STEEL, R. G. D. and TORRIE, J. H. 1960 Principles and procedures of statistic. 481pp McGraw

-Hill New York

- 高橋郁雄 1975 近年道央で発見された主要樹種の病害. 北方林業 27 : 237-241
- 1979 北海道中央部における針葉樹の菌類相と病害に関する研究 -主として子のう菌類, 不完全菌類及びさび菌類について-. 東大演報 69 : 1-143
- ・鈴木咲子 1976 *Scleroderris lagerbergii* によるヨーロッパモミの被害. : 日林北支講 24 61-63
- 高橋喜平 1968 最深積雪指示計について. 雪氷 30 : 11-114
- 高 藤 満・新井田利光 1983 トドマツ枝枯病の実態と施業について. 昭和 56 年度北海道林技研論 : 159 -160
- 田 中 潔 1984 北海道におけるトドマツ枝枯病の最近の被害状況. 森林防疫 33 : 78-83
- ・遠藤克昭・松崎清一・佐々木克彦 1984 トドマツ枝枯病薬剤防除試験 (予報). 日林北支講 32 : 90-93
- 薄井五郎・浅井達弘 1982 トドマツ枝枯病の発病誘因の検討 (I) -いくつかの越冬処理と発病の違い -. 日林北支講 30 : 199-201
- 若林隆三 1977a 根元から見直した多雪地造林 (3). 北方林業 29 : 303-306
- 1977b トドマツ枝枯病激害地の調査結果と基本的対策の提案. 道有林技術情報 No. 4 : 2 -4
- 横田俊一 1970 トドマツ新病害ミクロペラ枝枯病 (仮称) の発生について. 森林防疫 19 : 300-302
- YOKOTA, S. 1975a *Scleroderris* canker of Todo-fir in Hokkaido, northern Japan III. Dormant infection of the causal fungus. Eur. J. For. Path. 5: 7-12
- 1975b Ditto IV. An analysis of climatic data associated with the outbreak. Ibid. 5 : 13 -21
- 横田俊一 1983 北海道におけるスクレロデリス枝枯病, 特に病原菌とその病原性. 林試研報 321 : 89 -116
- ・松崎清一 1971 ミクロペラ (*Micropera*) 枝枯病 (仮称) によるトドマツ造林地の被害実態 について. 82 回日林講 : 256-258
- YOKOTA, S., UOZUMI, T. and MATSUZAKI, S. 1974a *Scleroderris* canker of Todo-fir in Hokkaido, northern Japan I. Present status of damage, and features of infected plantations. Eur. J. For. Path. 4 : 65-74
- , ————and———— 1974 b Ditto II. Physiological and pathological Characteristics of the causal fungus. Ibid. 4 : 155-166
- , ————and———— 1975 Ditto V. Relationship between disease development and forest type. Ibid. 5 : 356-366
- 吉 武 孝・増田久夫・工藤哲也 1980 トドマツ埋雪木の脱葉雪害. 北方林業 32 : 62-66
- 1983 雪圧害とトドマツ枝枯病. 北方林業 35 : 83-86
- 1987 トドマツ枝枯病被害危険地帯区分図. 研究レポート 17 : 1-4