

防風林の防風防雪機能と気象害に関する研究

鳥田 宏行

Effect of shelterbelt structure on wind reduction and meteorological damages

Hiroyuki TORITA*

要 旨

本論文では、防風林の防風防雪効果を定量的に把握し、森林の公益的機能の高度発揮と風害・雪氷害を軽減する森林整備技術の向上に資するため、森林と気象現象（風、雪氷）間の相互作用を解明することを目的とする。森林の公益的機能の高度発揮に関しては、主に防風林の防風防雪効果と林帯構造の関係を解明するため、樹林帯模型を用いたモデル風洞実験や野外観測を実施した。その結果、幹枝葉面積密度 Ad と林帯幅 W の積である $W \cdot Ad$ は、相対最小風速（防風効果による最小風速）、最小風速の風下林縁からの距離、防風範囲と相関があり、 $W \cdot Ad$ は、防風林の防風効果を予測する重要な指標となりうることを示された。また、防雪効果としては、風洞吹雪実験（モデル）と野外観測（プロトタイプ）の結果を既存の相似則を用いて比較検討した結果、風速および吹雪時間に関する適合性の高い相似則が選定された。

強風害の軽減に関する研究では、防風林の気象害（風・雪氷）と森林の構造および樹形との関係を解明するため、2002年台風21号により北海道東部の十勝地方に発生した風害や2004年の北海道日高町に発生した雨水害のデータに基づく被害要因解析（数量化Ⅰ類）や力学モデルを用いたシミュレーションを実施した。風害に関する要因解析結果からは、十勝地方の防風林における耐風性の高い樹種や被害を受けやすい配置などが明らかにされた。耐風性の高い樹種としてはカシワが、逆に耐風性が低い樹種としては、シラカンバ、チョウセンゴヨウマツ、ストローブマツが挙げられる。また、林分単位の被害予測として、数量化Ⅰ類（被害率）および数量化Ⅱ類（被害発生の有無）による被害予測式を構築した。雪氷害に関しては、被害要因の解析（数量化Ⅰ類）を行って、更に軽害林分と激害林分の林況を比較し、樹高成長段階毎に林分の限界形状比（被害が発生するか否かの境界を示す形状比（胸高直径／樹高））が求められた。力学モデルを用いたシミュレーションは、十勝地方において防風林造成面積全体の6割から7割を占めるカラマツ林を対象に実施し、樹高と形状比が耐風性に及ぼす影響が明らかとなった。また、シミュレーションの確度を検証するため、実際の被害データとシミュレーション結果を比較したところ、高い適合性が確かめられた。

結論として、防風効果と耐風性の両方を考慮した防風林の姿を、樹高成長段階毎に整理し、適正な本数密度を表に示した。

キーワード：防風林、防風効果、相似条件、風洞実験、台風、雪氷害、シミュレーション

目次

第1章 序論	
1-1. 研究の背景	4
1-2. 既往の研究	4
1-2-1. 防風林の防風効果と防雪効果に関する既往の研究	4
1-2-2. 防風林の気象害（風、雪氷）に関する既往の研究	5
1-3. 本論文の目的と構成	6
第2章 防風林のモデル風洞実験	
2-1. はじめに	6
2-2. 方法	7
2-2-1. 模型について	7
2-2-2. 風洞実験について	7
2-2-3. 現実との対応と基準風速の設定について	8
2-3. 結果	8
2-4. 考察	10
第3章 構造の異なった防風林の風速分布の観測	
3-1. はじめに	11
3-2. 方法	11
3-2-1. 防風林の概要	11
3-2-2. 観測方法	12
3-2-3. A dの推定	12
3-3. 結果と考察	15
3-3-1. A dと林帯幅が防風効果に及ぼす影響	15
3-3-2. W・A dと防風効果の関係	18
第4章 防雪林の防雪効果に関する観測とモデル風洞実験	
4-1. はじめに	19
4-2. 方法	19
4-2-1. 野外観測	19
4-2-2. 風洞実験	19
4-2-3. 試験林と模型林の構造	20
4-3. 結果と考察	21
4-3-1. 野外観測結果	21
4-3-1-1. 吹きだまり形状	21
4-3-1-2. 吹雪質量フラックスと風速分布	22
4-3-2. モデル実験	23
4-3-2-1. 吹きだまり形状	23
4-3-2-2. 吹きだまりの形成過程	23
4-3-2-3. 風速に関する検討	24
4-3-2-4. 吹雪時間に関する検討	24
第5章 台風による風害の要因解析と予測	
5-1. はじめに	25
5-2. 方法	25
5-2-1. 防風林の概要	25
5-2-2. 調査方法および気象・被害概況	26
5-2-3. 要因解析および被害予測モデル	27

5-3. 結果	27
5-3-1. 数値化I類による要因解析結果	27
5-3-2. 被害予測モデル	29
5-4. 考察	31
第6章 雪氷害（雨氷）の要因解析	
6-1. はじめに	31
6-2. 方法	32
6-3. 結果と考察	33
6-3-1. 気象概況	33
6-3-2. 被害概況	35
6-3-3. 解析結果	35
第7章 雪氷害と森林構造との関係	
7-1. はじめに	35
7-2. 方法	35
7-3. 結果と考察	35
7-3-1. 森林構造と被害の関係	35
7-3-2. 限界形状比曲線の検討	36
第8章 樹形と耐風性に関する力学的検討	
8-1. はじめに	37
8-2. 力学モデル	37
8-2-1. 樹幹の変形と応力	37
8-2-2. 外部荷重WおよびP	38
8-2-3. 回転モーメントT	39
8-2-4. 根系による根返り抵抗モーメントR	39
8-2-5. シミュレーションの内容	39
8-2-6. 風速分布	39
8-2-7. 風害モデルの流れ	40
8-3. 調査地	40
8-4. シミュレーションS1の結果と考察	40
8-4-1. 限界風速と樹形の関係	40
8-4-2. 樹幹に発生する応力の分布	41
8-5. シミュレーションS2の結果と考察	43
第9章 結論	
9-1. 防風効果と耐風性を考慮した防風林の林分条件	43
9-2. 今後の課題	44
9-3. 各章のまとめ	46
謝辞	47
引用文献	47

第1章 序論

1-1. 研究の背景

森林の公益的機能（防風、防雪、防砂、防霧、崩壊防止、水源涵養など）は多岐にわたり、国土保全や生活環境の向上に大きく寄与している。とりわけ広大な農地を擁する北海道では、強風から作物を守る必要性から、防風機能を期待して防風林（防風保安林）、の造成が開拓時代より進められてきた。その造成面積は日本全国の3/4（4万ha）を占め、長大かつ大規模な防風林の存在は、北海道における地域景観の重要な構成要素となっている。また、この防風林は、寒冷多雪な北海道では、本来の機能である「風を防ぎ農作物の収量を増加させる機能」に加え、冬期間には防雪機能を発揮して吹雪時の交通網の確保にも大きく寄与し、年間を通して公益的機能を担っている。しかしながら、防風林は他の防風防雪施設（防風柵、防雪柵、防風ネットなど）に比べて構造が複雑なため、十分に防風あるいは防雪機能が解明されないまま現在に至っており、計画設計やコスト性の検討は依然として経験的な範疇に留まっている。そのため、現在減少傾向が著しい十勝地方の防風林などでは、所有者に防風林の重要性について説得力のある十分な説明が困難であり、新たな造成への意欲を減退させる要因の一つにもなっている。著しい防風林の減少は、農業被害を招く危険性を高めることになるため、防風林の防風防雪効果に関するより定量的な解明が望まれている。一方、近年に顕在化した問題として、気象害（風、雪氷）による大規模な森林被害が相次いで発生するようになった（例えば2002年の台風21号、2003年の台風10号、2004年の台風18号による被害、2004年の日高町の雨水害など）。これらの被害は、山林に留まらず防風林にも発生しており、2002年の台風21号では、北海道十勝地方の防風保安林に甚大な被害（1500ha）が発生した。すでに述べたように、防風林は重要な公益的機能を担っているため、防風林で発生する気象害は、単に防風林自体の被害として認識される問題ではなく、周辺環境を大きく悪化させる原因に直結している。永続的に防風林が公益的な役割を果たすには、気象害に強い防風林を造成する必要がある、被害軽減に向けた森林整備技術の開発に対する期待が高まっている。

1-2. 既往の研究

1-2-1. 防風林の防風効果と防雪効果に関する既往の研究

防風林は、主として風を弱めて気象緩和効果を発揮し、作物の収量を増加させる働きがある。これまで防風林や防風柵に関する防風効果や空気力学的な研究は、風洞実験（e. g., Raine and Stevenson, 1977; Perera, 1981）、野外観測（e. g., Sturrock, 1969, 1972; Wilson, 1987; Nord, 1991）、数値シ

ミュレーション（e. g., Wilson, 1985; Wang and Takle, 1995a, 1995b, 1996）など多岐にわたって行われてきた。その結果、2次元構造の防風施設（防風柵や狭林帯）に関しては、その構造と防風効果の関係が解明された。防風柵や1列もしくは数列程度の植栽列数の幅の狭い防風林においては、光学的な空隙率（防風林の延長方向に直角な方向から見て、透けて見える部分の割合）によって防風効果が左右され、相対最小風速や防風範囲と空隙率の間には相関があることが報告されている（Heisler and Dewalle, 1988; Naegeli, 1946）。つまり、2次元構造の防風施設に対しては、空隙率が防風効果を評価する有効な指標となっている。

一方、幅の広い防風林のように3次元構造の防風施設に関しては、必ずしも空隙率は有効な評価指標とはなっていない。Lindholm（1988）らは、光学的空隙率を幅広の防風林に適用する問題点を以下のように指摘している。(1)光学的空隙率を決定する場合、写真による画像解析が行われるが、写真は前景を大きく写し後景を小さく写すため、空隙率を正確に評価することは困難である。(2)光学的空隙率は、実際の風の透過通路を示しておらず、実際の空隙率よりも常に過小評価になる。更に以上の理由に加え、防風林では林帯幅が防風効果に与える影響が知られているが（Caborn, 1957; Naegeli, 1964; Grunert et al., 1984）、空隙率では林帯幅を正確に表現できないなどの問題がある。そこで、3次元構造を有する防風林に対し、防風効果の評価指標が求められている。

一方、森林の防雪効果に関しては、地吹雪対策に森林を積極的に活用しようとする動きが社会的な傾向となっている。防雪林の効果については、本来の防雪効果に加えて、優れた景観や環境保全（自然の復元によってもたらされる昆虫や小動物への寄与等）など、防雪柵などの人工構造物に見られない副次的効果も期待できる。しかし、防雪林の構造は、防雪柵などに比べると非常に複雑なため、未だに防風効果同様に防雪効果が定量的に理解されるには至っていない。今後、防雪林の防雪効果に関する研究の進展には、様々な林帯構造における多くの野外観測データが必要である。しかし現実問題として、野外において実際に観測を行う方法は、観測機器を多数必要とし、その年の気象状況によっては計画通りに観測が進まないなど、費用と効率の面で大きなマイナス要因が存在する。以上のような問題を解決する手段としては、風洞施設を用いたモデル実験がある。モデル実験は、防雪林の林帯構造を計画的に変化させ、しかも温度条件や風速条件を制御することが可能であり、体系的な理解を深めるには、非常に有効な手段だと考えられる。

吹きだまりに関するモデル実験の方法としては、大きく分けると、水を流体として砂を用いる方法と空气中に何らかの粒子を用いる方法とがあり、それぞれの特徴が検討されている（Kind, 1986）。吹雪過程における質量輸送は、主に粒子の跳躍運動（Saltation）によって行なわれる。したがって、障

害物周辺に形成される吹きだまりをモデル化するには、跳躍粒子の物理過程が再現されているかが、一つの重要な検討事項である。特に跳躍粒子の到達距離が、モデルのスケールと整合性があるのかは重要である。水中の砂をモデル粒子とした場合は、粒子の到達距離は容易に小さくすることが可能であるが、実際の吹雪における跳躍運動の物理過程が類似していない。空気中の粒子の場合は、粒子として雪粒子を用いると跳躍運動の過程そのものは忠実に再現できるが、粒子の到達距離をモデルに合うように小さくする事が困難である。しかしながら、空気中におけるモデル実験は、プロトタイプの吹きだまり形状を高い精度で再現しており (Strom et al., 1962; Kind and Murray, 1982), 非常に有効な方法であると思われる。過去に行われた空気中における吹雪に関するモデル実験は、その多くが防雪柵に関するもので、野外にモデルを設置して自然風を利用した実験 (Tabler, 1980b) や、吹雪粒子として活性白土、ガラスビーズを用いた風洞実験 (Anno, 1984b) が行われている。これらの研究では、それぞれにプロトタイプとモデルの現象の関係を示す相似条件が示されているが、前者はフルード数 (U/\sqrt{gL} : U, g, Lはそれぞれ風速, 重力加速度, 代表長さを示す。) を重要な条件と考え、後者はモデルとプロトタイプの風速比を重要視した点に違いがある。この異なる二つの相似条件は、その後比較検討されて (Iversen, 1984), それぞれの相似条件の特徴が示された。

一方、防雪林に関しては、防雪柵に比べてモデル実験例も少なく、モデルの再現性を比較するための野外データもほとんど見あたらないのが現状である。今後、防雪林の防雪効果を明らかにするためには、モデル実験の信頼性に対する検討が必要である。

1-2-2. 防風林の気象害 (風, 雪氷) に関する既往の研究

暴風, 火災, 火山噴火などに代表される大規模な攪乱 (disturbance) は、物理的かつ生物的環境構造に変化をもたらす。何百年にもわたって生態系に影響を与える (White, 1979; Foster et al., 1998)。また、木材生産を目的とした森林では、攪乱による被害は経済的損失を意味し、経営環境にも大きな影響をもたらす。そのため、このような攪乱現象の特徴をとらえ、どのような構造の森林が被害を受けやすいかを見極めておくことは、被害軽減技術の開発に際して、大きな意義がある。

暴風による森林被害に関するこれまでの研究では、被害と樹種や立木サイズ, 立木の形状比などの関係について検討が行われてきた。樹種については、被害実態の調査や立木の引き倒し試験などによって、それぞれの被害地でもっとも被害を受けやすい樹種が明らかにされている (例えば, Veblen et al., 2001; Peterson et al., 2004)。立木サイズに関しては、森林を構成する立木サイズと被害率にはリニアな関係があり、サ

イズの大きな立木ほど被害を受けやすい場合 (Dunn et al., 1983; Glitzenstein and Harcombe, 1988; Forster and Boose, 1992; 諫本・高宮, 1992) や中間的なサイズの立木が被害を受けやすい場合 (Boe, 1965; Putz and Sharitz, 1991; Peterson and Pickett, 1991) など、被害発生の要因 (風速, 土壌型, 地形, 林分の構造など) によって違いがある。立木の形状に関しては、一般的に形状比 (樹高/胸高直径) が大きいと立木は風害や雪害を受けやすいと考えられており、その限界形状比 (風害が発生する形状比) を100とする場合 (Wang et al., 1998; Lekes and Dandul, 2000) や90とする場合 (Navratil, 1995) など、それぞれ地域の気象条件, 土壌条件, 森林構造によって違いがみられる。

雪氷害に関しては、我が国では38豪雪や56豪雪を契機に冠雪害に関する研究が盛んに行われるようになった。我が国の場合、研究対象となる樹種は木材生産の主流を担っているスギ林が中心で、これまでに冠雪害抵抗性に関して、品種間の比較 (勝田・松田, 1984a, 1984b) や形状比の検討などが行われている。中でも立木の冠雪害抵抗性を示す指標としては形状比 (樹高/胸高直径) が有効であることが示され、日本だけではなく世界各国で広く用いられている (Merkel, 1975; Gill, 1974; Cremer et al., 1983)。スギ林の場合、形状比が70より大きい林木や林分で被害が多く、限界形状比 (冠雪害が発生するときの形状比) は70が目安になるが (杉山・佐伯, 1963; 高橋, 1977; 石井ら, 1983), その後の研究で林齢あるいは平均樹高などによって冠雪害の限界形状比が異なるなど、一定の値を示す指標ではないことが報告されている (佐藤, 1979; 山口ら, 1982; Cremer et al., 1982)。一方、着氷による被害 (雨水害) の研究は、被害実態に関する報告 (古閑ら, 1989; 松岡ら, 1990; 小島, 1990; 栗田ら, 1991; 牛山・宮崎, 1992a; 梶ら, 1994; 間島, 2001など) が中心で、被害と形状比に関しての報告はわずかである (大原ら, 1990)。冠雪害も雨水害も樹体に付着した雪または水の重力方向に作用する外部荷重によって発生するため、力学的なメカニズムは同じであり、雨水害に対しても形状比が抵抗性を示す指標となると考えられる。

以上のように、形状比は風害および雪氷害に対する立木の抵抗性を示す指標となっているが、樹種毎に被害に対する耐性が異なるため、限界形状比は地域特性を考慮して樹種別に検討する必要がある。

近年では、コンピュータの発達により、多変量のデータを統計的に解析する方法が簡単に行えるようになった。これによって被害予測に関するモデルの開発や要因解析も容易に行われるようになり、森林構造 (構成樹種, 林齢, 本数密度など), 気象条件, 土壌条件, 地形条件などと被害との関係が、体系的に表現することが可能となってきた (Jalkanen and Mattila, 2000; Scott and Michell, 2005)。国土防災・森林管理の視点からみても、地域特性を考慮した被害予測モデルの

開発や要因解析は極めて有用な事項であり、必要不可欠なものとなりつつある。

本研究では、防風林の防風防雪効果を定量的に把握し、森林の公益的機能の高度発揮と風害・雪氷害を軽減する森林整備技術の向上に資するため、森林と気象現象（風、雪氷）間の相互作用を解明することを目的とする。本論の内容は、主

1-3. 本論文の目的と構成

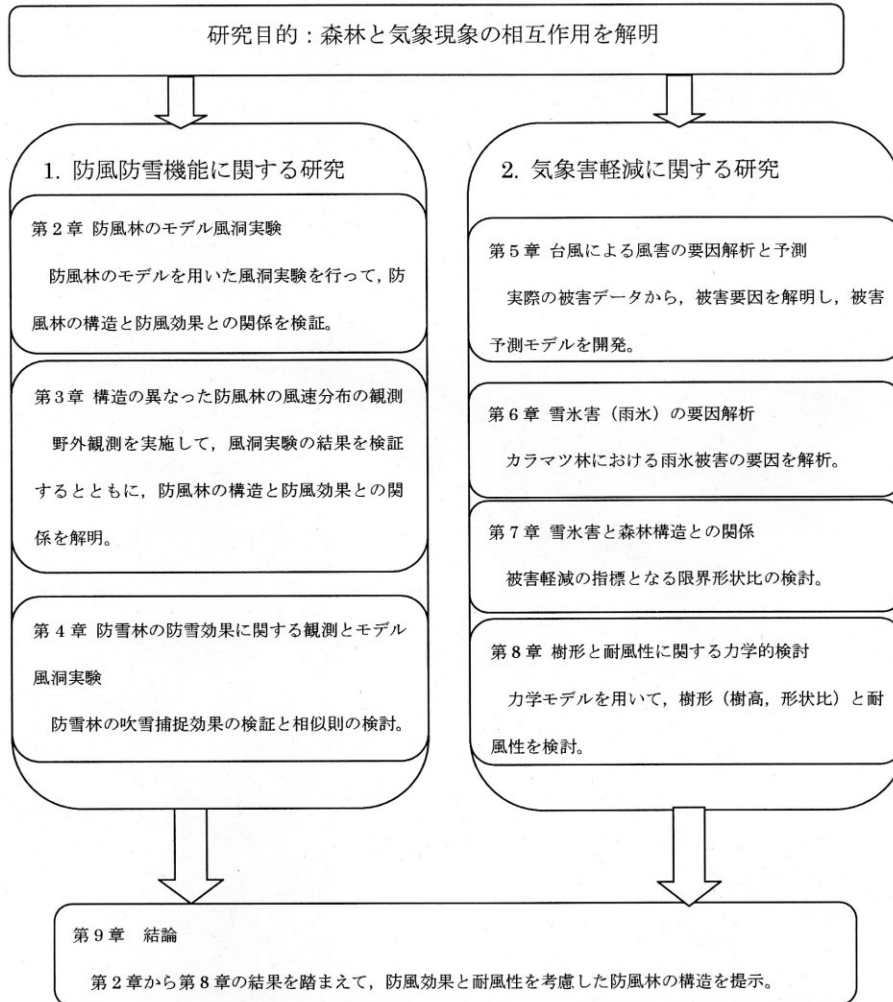


Fig.1-1. Outline of this study.

本研究の概略

に防風林が気象現象（風、雪氷）に及ぼす影響（第2～4章）と気象現象が防風林に及ぼす影響（第5～8章）の2つから構成される（Fig.1-1）。第2章では、モデル風洞実験を行って防風林の防風効果を定量化し、防風効果と評価指標の関係を明らかにした。3章では、更に野外観測を実施し、第2章で得られた結果を検討した。第4章では、防雪林の防雪効果の高度化に必要なモデル実験の有用性を検討し、その再現性を明らかにした。第5章では、台風による森林被害の要因解析を行い、被害予測モデルを開発した。第6章では、雨水による森林被害の要因解析を行い、被害時の気象状況と被害の特徴を明らかにした。第7章では、北海道の主要造林樹種の一つであるカラマツ人工林の雪氷被害の軽減に向けて、林

分構造の検討をおこなった。第8章では、風害に関する力学モデルを構築し、立木の樹形と耐風性の検討をおこなった。第9章では第2章から第8章の結果を踏まえ、防風効果を効果的に発揮し、気象害を受けにくい防風林の姿を示した。

第2章 防風林のモデル風洞実験

2-1. はじめに

2次元構造の防風柵や防風ネットは、空隙率（あるいは密閉率 = 1 - 空隙率）によって、防風効果（相対最小風速、防風範囲など）が定量的に評価できる。しかし、3次元構造で

ある防風林では、空隙率だけでは防風効果を容易に評価できない。それは、3次元構造の防風林では、空隙率あるいは疎密度の他に林帯幅が防風効果に影響する要因として混在しており、それぞれの要因と防風効果との関係が未解明なままであることに起因している。防風林の防風効果の計画的な造成管理を進めるためには、防風林の構造とその防風効果との関係を明らかにし、新たな評価指標が求められている。

そこで、本章では防風林の構造と防風効果の関係を明らかにするとともに、空隙率に代わる防風効果の評価指標を検討した。

2-2. 方法

2-2-1. 模型について

実験に使用した模型は、市販の針葉樹模型（高さ10.5cm、幅4.5cm、枝下高1.5cm）を用いた。この針葉樹模型は、樹冠がブラシ状になっていて、実物と同じように樹冠層も通風性がある。ただし枝が再現されておらず、幹に相当する中心軸に直接葉が着いている構造になっている。1本平均の葉面積は、約135cm²である。この模型から樹冠層全体にわたって平均的に模型の葉を切り取り、1本平均の葉面積が96cm²、70cm²の模型を作製し、葉面積の異なる計3種類の模型を用意した（Fig.2-1）。模型林帯は、これら3種類の模型を別々に用いて、それぞれ列状に1列および3列に並べて、風洞床面に張った合板に固定した。立木間隔は列間、苗間とも4.5cmとし、隣接する模型木の樹冠は接している。したがって、林帯幅は1列の場合は4.5cm、3列の場合は13.5cmである（Table.2-1）。林帯そのものの疎密度は葉面積密度LAD（Leaf Area Density, m²/m³）によって表現した。葉面積指数LAI（Leaf Area Index, m²/m²）は単位林床面積当たり、その上空に存在する葉面積の積算値であるから、その値を樹高で割り算すると、単位空間当たりの葉面積が平均的に表現できる。この値がすなわちLADである。

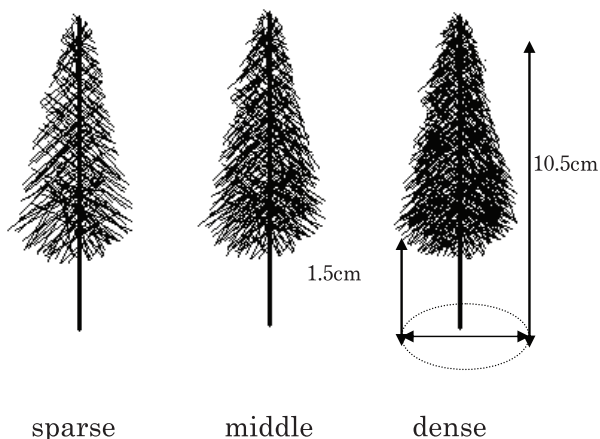


Fig.2-1. The model of conifer.

今回の実験では模型の枝下高を考慮して、LAIを樹冠長（樹高一枝下高）で割った値を用いた。模型林帯のLAIは高い順に6.7, 4.7, 3.4である。参考までに、北海道の空知地方に位置するヨーロッパトウヒ防風林4箇所（樹高11~20m、林齢35~50年、林帯幅30m前後、立木密度1200~1500本/ha）で、実際に測定したLAIは2から4程度であった。一般に葉量は、初期の生育段階から樹冠が閉鎖するまで急激に増加する。その過程においては、初期の植栽密度が高いほどLAIの増加は早い（Long, 1992）。防風林のLAIの実測値も、林齢と植栽密度によって変化し、その変化は閉鎖するまで続くと思われるが、模型のLAIは実測値の次数内にあると考えられる。

しかしLADに換算すると、実際の防風林が1~10⁻¹程度の範囲にあると推測されるのに対し、模型では密・中・疎、それぞれ74.4, 52.2, 37.8（以後、便宜的に葉面積密度の高い順に密、中、疎と呼ぶことにする。）という値になり、実際の林帯よりもかなり葉面積密度は高い値である（Table.2-1）。今回の実験の目的からすれば、LAIの値よりもLADの値を現実の防風林の値に近づけるべきであったかもしれない。しかし、それは模型の構造的な理由から困難であった。模型林帯のLADを実測値のLADに近づけると、模型木の樹冠がすかすかになってしまい、樹木の円錐型の外形を保てない状態になってしまうからである。現実の樹木の葉は、枝の先端に集中しているため、模型木が外形を保てない範囲のLADの値でも外形を保つことができる。外形は風の流れに対し、非常に重要な要素であると考え、今回使用した模型では、LADの値を円錐型の外形が保てる程度の範囲に収めた。

2-2-2. 風洞実験について

風洞は、断面積0.5×0.5m、実効長8mのゲッチンゲン回流型風洞（北海道大学低温科学研究所）を使用している。風速の測定（熱線風速計使用、KANOMAX社）は、水平成分のみを測定した。測定領域は、垂直方向には、風洞床面から

Table.2-1. The structure of model shelterbelts.

	LAD	Width (cm)	The number of rows
密 3 列 (dense 3 rows)	74.4	13.5	3
密 1 列 (dense 1 row)	74.4	4.5	1
中 3 列 (middle 3 rows)	52.2	13.5	3
中 1 列 (middle 1 row)	52.2	4.5	1
疎 3 列 (sparse 3 rows)	37.8	13.5	3
疎 1 列 (sparse 1 row)	37.8	4.5	1

1, 3, 5, 12cmの高さで、水平方向には林帯を基点に風上に8h (h:模型の高さ) 離れた地点から風下20hまでの範囲で測定した。各測定点の平均風速は、100Hzで10秒間測定したものを平均した。実験に用いた風洞の代表風速 (高度1cm) は3m/sである。

2-2-3. 現実との対応と基準風速の設定について

模型実験の目的は、現地の現象を風洞内で縮尺した形で再現することであり、一般にプロトタイプ (原型) とモデル (模型) との対応は、レイノルズ数の一致をもって相似とみなされる。

$$Re = (UL/\nu)_p = (UL/\nu)_m \quad \dots\dots (2-1)$$

(P:プロトタイプ, m:モデル, U:平均風速, L:代表長さ, ν :分子動粘性係数)

しかし、本実験のようにプロトタイプとモデルの分子動粘性係数が等しい場合、仮に縮尺を1/50 (L_m/L_p) とし、プロトタイプの風速 (U_p) を6m/sとすると、モデルの風速 (U_m) は300m/sとなってしまう。したがって、模型実験においてはレイノルズ数の一致を望むのは困難である。一方、良好な流線を示すことのない防風林では、レイノルズ数の影響は極めて少ないという報告もあり (飯塚, 1952), レイノルズ数の一致による相似則を緩和する方法が望まれる。

レイノルズ数を緩和した相似則として、乱子レイノルズ数が提案されている (谷, 1958)。

$$R = 14.4 \log(h/Z_0) \quad \dots\dots (2-2)$$

この式によれば、乱子レイノルズ数の一致は、代表長さh (樹高) と粗度 Z_0 の比をプロトタイプとモデル間で合わせれば、相似現象が期待出来るとしている。すなわち、次式を満たせば、完全に乱子レイノルズ数が一致する。

$$(h/Z_0)_p = (h/Z_0)_m \quad \dots\dots (2-3)$$

この実験では、風洞床面の粗度 Z_{0m} は 5.0×10^{-5} m, 模型の高さ h_m は0.105m, 現地の樹高 h_p は15mである。現地では作物の草丈によって Z_0 は変化する。想定する作物を稲とすると、 Z_0 は0.007~0.02m (Stull, 1999) で、これらの値を (2-2) 式に代入すると、それぞれ乱子レイノルズ数は風洞内では約47.8, 野外では41.4~48という結果になった。草丈は生育段階に応じて変化するため、丈の短い初期の生育段階では野外の乱子レイノルズ数は実験値に近く、最終的な生育段階ではやや小さい値となるが、実験値は想定した現地の乱子レイノルズ数の範囲にある。

厳密に乱子レイノルズ数を一致させようとするれば、想定した野外の作物の生育段階に応じて、その都度実験をおこなわなければならない。しかしながら、本実験では想定した野外の乱子レイノルズ数の範囲内に実験値があることから、相似則はほぼ満たしていると考えられる。

実験と野外の風速の対応関係は、次式によって求めた (Nemoto, 1961)。

$$U_m/U_p = (L_m/L_p)^{1/3} \quad \dots\dots (2-4)$$

$L_m/L_p=0.105/15=0.007$ であり、風洞の代表風速3m/sを代入すると現地の風速は15.7m/sである。これは想定した現地の風が十分強風であることを意味しており、また実環境での風速値としても妥当性のあるものだと考えられる。

このように本実験は、(2-2) 式の相似側をほぼ満たし、(2-4) 式から得られた現地の風速が妥当な値であることから、現地の現象を定性的に風洞内で再現しているものとする。

2-3. 結果

防風林の防風効果は、相対最小風速 (U_m/U_0), 相対最小風速の林帯からの距離 (X_m), 防風範囲 (d) に着目して議論をすすめる。防風範囲については、相対風速が70%以下にならないパターンがあったので、ここでは80%以下の範囲を防風範囲d80と定義する。本論文では、以上の3つの点に注目して結果を述べる。樹冠層高に相当する高度3cmと5cmにおける結果には、大差がみられなかったため、Fig.2-2, 3, 4では高度1cm (枝下) と高度5cm (樹冠層高) における結果のみを示す。また、高度12cmは、樹高よりも高いため、顕著な防風効果がみられなかったため省略する。Fig.2-2は各測定高における水平方向の風速分布図で、縦軸には一番風上の風速を基準にして相対風速をとり、横軸には林帯からの距離 (樹高 (h) の倍数) をとってある。防風林の風上 (横軸のマイナス側) では、林帯周辺でわずかに風速が遅くなり、風下 (横軸のプラス側) では広い範囲にわたって顕著な減風効果がみられた。両測定高とも U_m/U_0 の最小値は密3列 (疎密度が密で3列の意味) の林帯に、 U_m/U_0 の最大値は疎1列の林帯にみられた。測定高1cm, 5cmの順に、 U_m の最小値はそれぞれ37.6%, 12.4%で、 U_m/U_0 の最大値は81.4%, 72.5%となった。枝下付近は、樹冠層高に比べて風を遮る障害物が少ないために、減風率は小さくなっていることがわかる。

LADと U_m/U_0 の関係は、LADが高くなると U_m/U_0 は全体的に小さくなる傾向があるが、同じLADでも林帯幅が広いほうが U_m/U_0 は小さい値となった。一方、林帯幅と U_m/U_0 の関係は、林帯幅が広くなると U_m/U_0 は全体的に小さくなる傾向があるが、同じ林帯幅でもLADによって U_m/U_0 に差があった (Fig.2-3 a)。

X_m は、本実験では測定高1cmでは3.5~8hの範囲で差違がみられ、LADが中のときに大きくなる傾向があるが、同じLADでも林帯幅によって、その値に差違があった。測定高5cmでは、 X_m は0~1.5hの範囲内の差違に止まり、ほぼ一定の値となった。全体的に、 X_m とLADおよび林帯幅の間には、明瞭な関係性がみられなかった (Fig.2-3 b)。

d80は、中3列 (幅:13.5cm, LAD:52.2) の場合に各測定高度とも最大になり、その値は高度が低い順に19h, 20h以上 (風速の回復が遅く、風下20hの測定領域内では、依然として相対風速は80%以下) であった (Fig.2-3 c)。d80の最小値は、

各高度とも疎1列(幅:4.5cm, LAD:37.7)の場合にみられ、その値は高度1cmでは相対最小風速が80%以下にならなかったため0で、高度5cmでは3hとなった。

d80は、LADが中の時に最大になるが、同じLADでも林帯幅によって差異があった。d80は、林帯幅が広がると大きくなる傾向にあるが、LADによって差異があった。d80とLAD

および林帯幅の間には、明瞭な関係性がみられなかった(Fig.2-3c)。

全体的に、防風林の構造因子として林帯幅やLADは、防風効果に影響を及ぼす因子であると言えるが、どちらがどの程度防風効果に寄与しているのかは明確ではない。

葉面積密度と幅を組み合わせた指標としては、林帯幅(W)

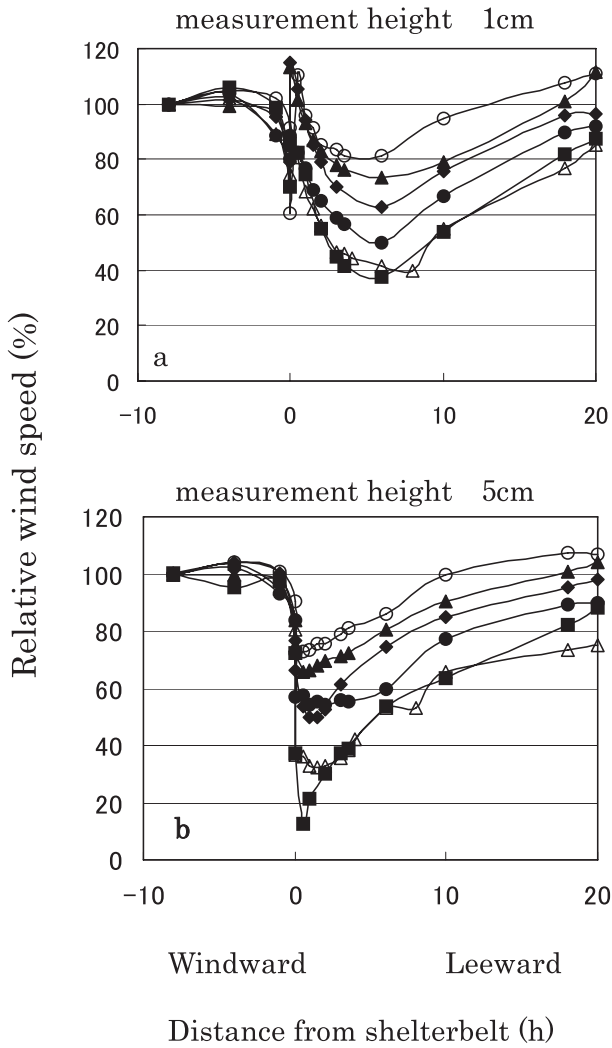


Fig.2-2a,b. The horizontal relative wind speed distribution.

- ◆—, dense 1 row; —■—, dense 3 rows;
- ▲—, middle 1 row; —△—, middle 3 rows

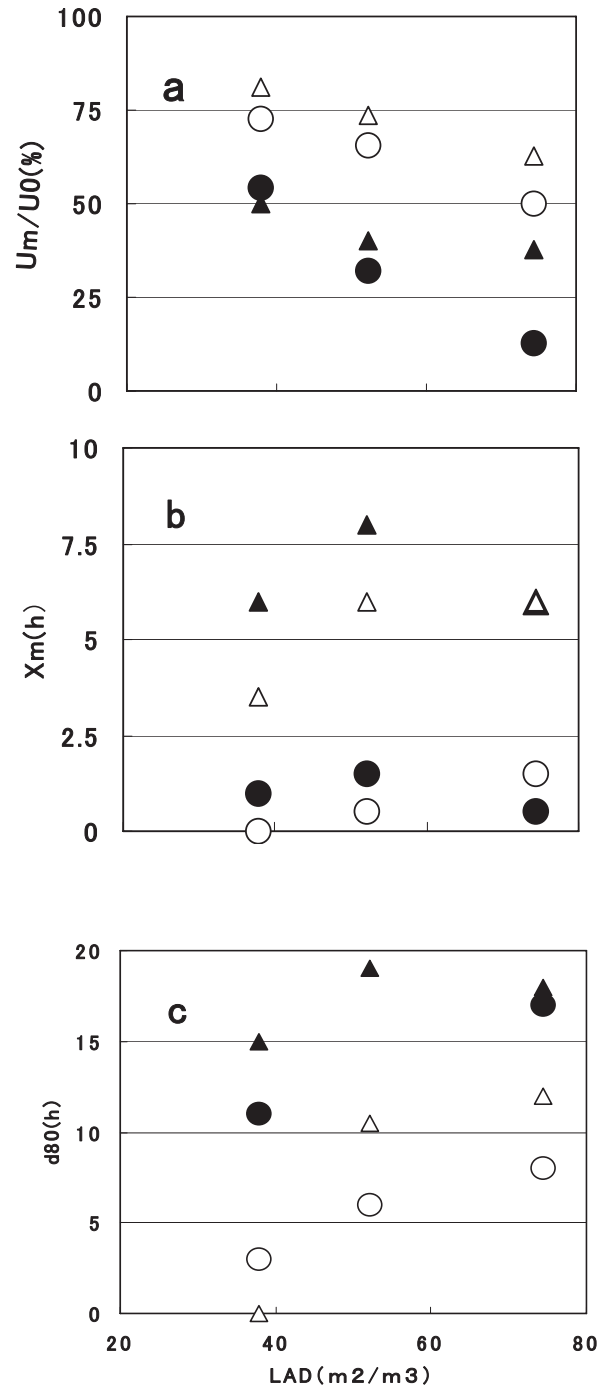


Fig.2-3a,b,c. The relationship between shelter effect and LAD.

- Height 1cm: △, Width 4.5cm; ▲, Width 13.5cm
- Height 5cm: ○, Width 4.5cm; ●, Width 13.5cm

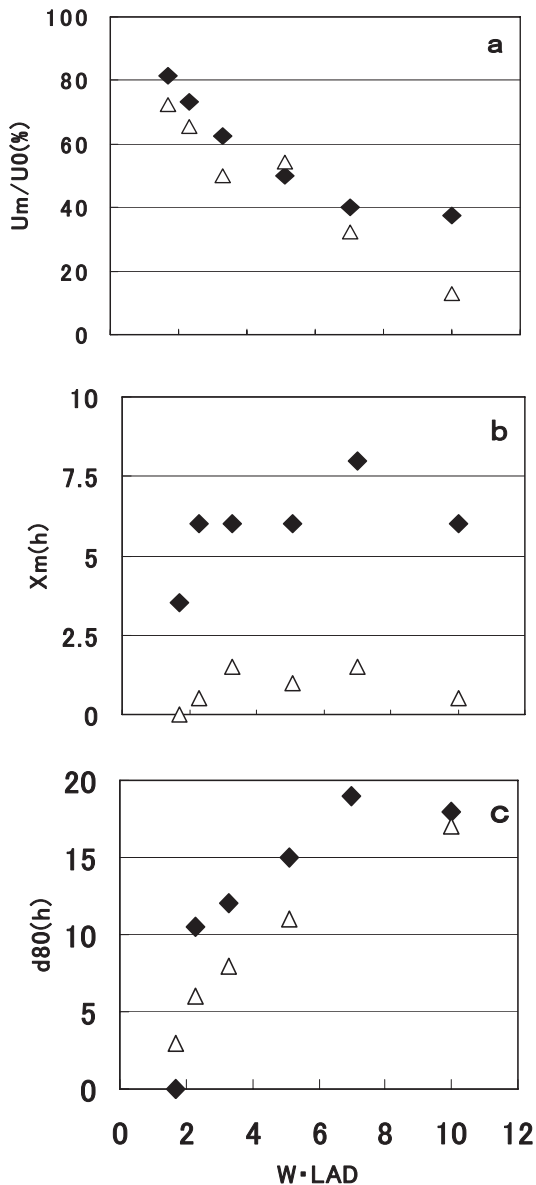


Fig.2-4a,b,c. The relationship between shelter effect and W · LAD.
◆, Height 1cm; △, Height 5cm

と葉面積密度 (LAD) を掛合わせた W·LAD (m³/m³) が考えられる。本実験における W·LAD と U_m/U₀ の関係を Fig.2-4 a に示す。W·LAD の値が高くなると、U_m/U₀ は減少し強い関係性がみられた。

次に W·LAD と X_m の関係を示す (Fig.2-4 b)。枝下高以下に一致する測定高度 1 cm を除いて、X_m は W·LAD にかかわらずほぼ一定の値を示した。測定高度 1 cm における X_m は、測定高度 3 cm, 5 cm に比べて全体的に高い値を示した。この高さにおいては、W·LAD が 1.7 のとき X_m は最小値 3 h を示し、W·LAD が 2.3 以上では X_m は 6 ~ 7.7 h の範囲で、ほぼ横ばいの値を示した。

d80 は、W·LAD の増加とともに大きくなり、d80 と W·LAD の間には、強い関係性がみられた (Fig.2-4 c)。

2-4. 考察

林帯幅や LAD は、防風林の重要な構造因子であり、防風特性 (U_m/U₀, X_m, d80) と関係する事が以上の結果から推測される。しかし、同じ幅 (同じ葉面積密度) でも葉面積密度 (幅) によって U_m/U₀ や d80 は変化することから、葉面積密度 (LAD) や林帯幅 (W) を風速分布の特徴を示す指標として、別々に用いたのでは不完全であると考えられる。一方、W·LAD を指標とした場合、U_m/U₀ や d80 について強い関係が得られた。

ところで、以上に述べた通り W·LAD は防風林の防風特性と強く関係している事がわかったが、W·LAD は空気力学的には一体何を意味しているのであろうか。

林帯に侵入した風は、林帯を通過する際に、枝葉や幹などに運動エネルギーを奪われて減速する。LAD が小さければ風は通過しやすいし、大きければ通過しにくい。W は風にとっては、運動エネルギーを奪われる径路の長さに対応すると考えられる。したがって、W·LAD は、空気力学的な解釈をするならば林帯の通風率と関係した指標だと言えるかもしれない。

そこで、各模型林帯における通風率 φ を次式にしたがって求めてみた。

$$\phi = \int_0^h U_a(z) dz / \int_0^h U_b(z) dz \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

高さを Z とし、U_a(z), U_b(z) はそれぞれ風下および風上林縁近くの垂直方向の風速分布を示す。Fig.2-5 によれば、φ は W·LAD の増加にともなって減少し、強い相関関係が成り立っていることが理解される (Fig.2-5)。したがって W·LAD は、葉面積密度と幅を掛合わせた値であるが、空気力学的には通風率に関係した指標とも解釈が可能である。

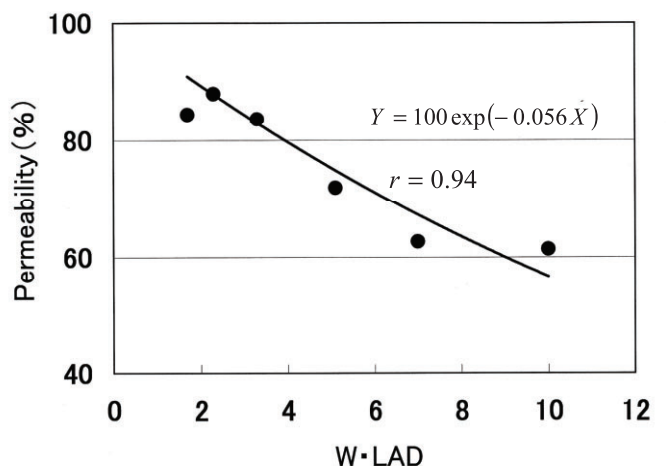


Fig.2-5. The relationship between permeability (φ) and W · LAD.

第3章 構造の異なった防風林の風速分布の観測

3-1. はじめに

本章では、第2章で行った風洞モデル実験の結果を検証し、防風林の構造と防風効果の関係を明らかにするため、石狩低地帯に位置する防風林において風速分布を測定した。

3-2. 方法

3-2-1. 防風林の概要

観測場所は観測対象の防風林以外に障害物（高い建築物や樹木など）がない場所を選定した。研究対象の防風林の平均樹高は5～12m、林帯幅は5～50mである。研究対象の防風林は、石狩低地帯に位置し、周辺の地形は平坦である。詳細はTable.3-1, 2に示した。

(1) サイトE1, D1, ED1（美瑛市）およびD2（新篠津村）は、石狩平野の北部に位置し、水田に囲まれている。サイトE1（Fig.3-1）とD1（Fig.3-2）は、複数列のヨーロッパトウヒ（*Picea abies*）とヤチダモ（*Fraxinus mandshurica*

var. japonica）からそれぞれ構成されている。サイトED1（Fig.3-3）は、複数列のシラカンバ（*Betula platyphylla var. japonica* Hara）、ストロブマツ（*Pinus strobus*）、ヨーロッパトウヒから構成され、それぞれの樹種は1/3の林帯幅の面積を占めている。植栽配置は、風上側からシラカンバ、ストロブマツ、ヨーロッパトウヒの順である。サイトD2（Fig.3-4）は、本観測防風林の中でもっとも林帯幅が狭く、2列のシラカンバから構成されている。

(2) サイトED2（江別市）とサイトD3（南幌町）は、石狩平野の中央部に位置し、牧草地と水田に囲まれている。サイトED2（Fig.3-5）は、複数列のシラカンバとヨーロッパトウヒから構成され、それぞれの樹種は林帯幅の半分の面積を占めている。植栽配置は、風上側からシラカンバ、ヨーロッパトウヒの順である。サイトD3（Fig.3-6）は、複数列のシラカンバのみで構成されている。

(3) サイトE2（千歳市）は、石狩平野の南部に位置し牧草地に囲まれ、複数列のストロブマツのみで構成されている（Fig.3-7）。林帯幅は、もっとも広く50mである。



Fig.3-1. View from the SSW of the multiple rows of spruces at field site E1.



Fig.3-2. View from the SSW of the multiple rows of ashes at field site D1.



Fig.3-3. View from the SSW of the multiple rows of spruces, pines and birches at field site ED1.



Fig.3-4. View from the SSW of the double rows of birches at field site D2.



Fig.3-5. View from the S of the multiple rows of spruces and birches at field site ED2.



Fig.3-6. View from the SSE of the multiple rows of birches at field site D3.



Fig.3-7. View from the S of the multiple rows of pines at field site E2.

3-2-2. 観測方法

防風林の延長方向に垂直な方向に観測ラインを設け、移動観測による風速分布の測定を行った。観測ラインは風上-21~-8h (hは樹高, マイナスは風上を表す) から、風下10~15hまでの範囲に設定した。風向風速の測定には3杯風速計(Makino AC750)と風向計(Yokogawa A-802)を用い、高さ5.5mの2本の観測ポールに固定した(Fig.3-8)。各測定点では、10分毎に平均値を記録した。

3-2-3. Adの推定

防風林の疎密度を定量化するために、光学的空隙率に代わってAdを用いた。Ad (Total Area Density, m^2/m^3) は単位体積空間あたりの幹枝葉面積密度を表し(第2章では、模型には枝に相当する部分がないため葉の面積密度LADを用いた。), 幹枝葉面積指数 A_i (Total Area Index, m^2/m^2) を樹冠長(樹冠高-枝下高)で除することで求められる。 A_i は、各サイトで5枚ずつ撮影した全天写真を、Steege(1993)が開発した画像解析ソフトを利用して求めた。各サイトのAdをTable.3-2に示す。

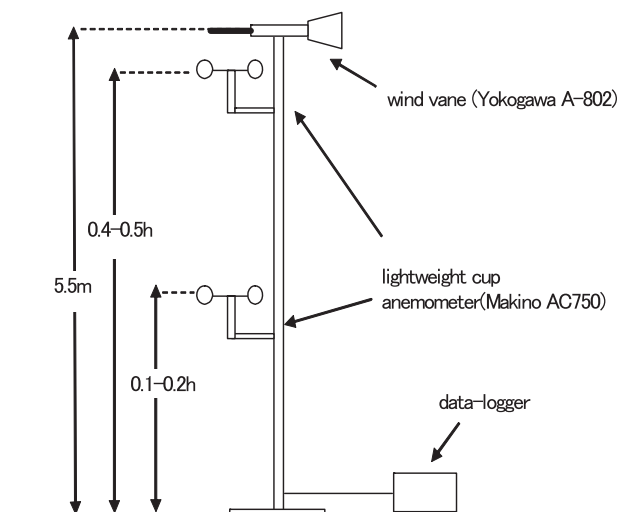


Fig.3-8. The arrangement of the instrument.

Table.3-1. Summary of the shelterbelt structures and their surroundings.

Field site	Location	Species	Height (m)	Height to base of crown (m)	Length (m)	Mean breast height diameter (cm)	Stand Density (trees/ha)	Orientation	Ground conditions	Height of crops (cm)
E1	Bibai lat.43° 2'N; long.141° 48'E	<i>Picea abies</i> Karst.	11	2	≈200	19.1	1500	ESE-WNW	Paddy	<10
D1	Bibai lat.43° 2'N; long.141° 47'E	<i>Fraxinus mandshurica</i> var: <i>japonica</i> Maxim	13	7	≈500	13.3	1900	ESE-WNW	Paddy Winter rape	<10
ED1	Bibai lat.43° 17'N; long.141° 48'E	<i>Betula platyphylla</i> var: <i>japonica</i> Hara <i>Pinus strobus</i> Linn <i>Picea abies</i> Karst.	10.7	3.7	≈300	13.8	1500	ESE-WNW	Paddy	20~30
D2	Shinshimotsu lat.43° 13'N; long.141° 33'E	<i>Betula platyphylla</i> var: <i>japonica</i> Hara	6	2	≈500	11.4	2200	ENE-WSW	Paddy	20~30
ED2	Ebetsu lat.43° 4'N; long.141° 33'E	<i>Betula platyphylla</i> var: <i>japonica</i> Hara <i>Picea abies</i> Karst.	12	2	≈500	10.8	2000	E-W	Paddy Pasture	20~30
D3	Nanpporo lat.43° 6'N; long.141° 39'E	<i>Betula platyphylla</i> var: <i>japonica</i> Hara	12	5.5	≈200	16	1500	ENE-WSW	Paddy Pasture	10~20
E2	Chitose lat.42° 52'N; long.141° 41'E	<i>Pinus strobus</i> Linn	11	2	>1000	20.9	1800	E-W	Pasture	20~30

E and D refer to evergreen and deciduous forest respectively

Table.3-2. Summary of the shelterbelt structures and their surroundings.

Field site	Width (m)	Ad(m ² /m ³)	W·Ad	U _m /U ₀ (%)	X _m (h)	d70(h)	Range of mean wind speed and prevailing direction at a reference position(Z=0.1 ~ 0.2h) during the measurement.(m/s)
E1	37	0.33	12.2	35.4 ⁺	4.1 ⁺	9.2 ⁺	4.5~6.2, SSW
D1	37	0.35	13.0	30.1 ⁻	4.1 ⁻	9.2 ⁻	2.8~3.5, SSW
(leafless)		0.09	3.3	30.4 ⁺	2.7 ⁺	8.3 ⁺	2.8~3.4, (leafless) , NNE
				25.4 ⁻	2.7 ⁻	8.3 ⁻	
				66.2 ⁺	5.2 ⁺	2.6 ⁺	
ED1	30	0.38	11.5	68.1 ⁻	5.2 ⁻	2.7 ⁻	2.1~2.7,SW
				26.7 ⁺	4.2 ⁺	13.6 ⁺ <	
				33.3 ⁻	4.2 ⁻	10.5 ⁻	
D2	5	0.58	2.9	64.4 ⁺	4.5 ⁺	3.6 ⁺	4.9~6.2,SSE
				66.9 ⁻	4.5 ⁻	4.5 ⁻	
ED2	40	0.32	12.8	24.2 ⁺	0.42 ⁺	7.8 ⁺	4.9~5.6,S
				17.6 ⁻	1.25 ⁻	8.0 ⁻	
D3	30	0.29	8.8	48.8 ⁺	3.7 ⁺	10.9 ⁺	4.8~5.5, S
				42.2 ⁻	3.7 ⁻	14.0 ⁻	
E2	50	0.49	24.4	20.8 ⁺	2.7 ⁺	10.0 ⁺	2.9~4.8,S
				14.0 ⁻	0.72 ⁻	10.0 ⁻	

Subscripts + and - refer to the upper and lower measurement positions respectively.

3-3. 結果と考察

防風効果についての評価は、相対最小風速 U_m/U_0 、相対最小風速の風下林縁からの距離 X_m 、防風範囲 d の3点に注目して議論を進める。ここで U_0 は、もっとも風上の風速を表し、 U_m は最小風速を表す。防風範囲 d は、各測定点の風速が U_0 の70%まで回復した時の範囲と定義する。この時の防風範囲を特に d_{70} と記す。各測定高度 (lower:0.1-0.2h, upper:0.4-0.5h) における水平風速分布は、風上側では林帯に接近するにつれて、緩やかに減風し、風下側では大きく減風する傾向が、すべてのサイトでみられた (Fig.3-9 a,b)。

3-3-1. Adと林帯幅が防風効果に及ぼす影響

測定高度0.1-0.2hおよび0.4-0.5hにおける相対最小風速 U_m/U_0 は、それぞれ14~68.1, 20.8~66.2%となった (Fig.3-10a,b)。 U_m/U_0 はAdの増加とともに減少する傾向を示すが、サイトD2は、その傾向からはずれた。サイトD2は、相対的にAd (0.58) は高いにも関わらず U_m/U_0 の値は大きく、減風効果は小さくなっている。これは、サイトD2の林帯幅が非常に狭いため、Adが高くととも、風の通過経路が短いため、空気力学的な抵抗が小さいためであると考えられる。

林帯幅 W と相対最小風速 U_m/U_0 の関係では、 W が増加する

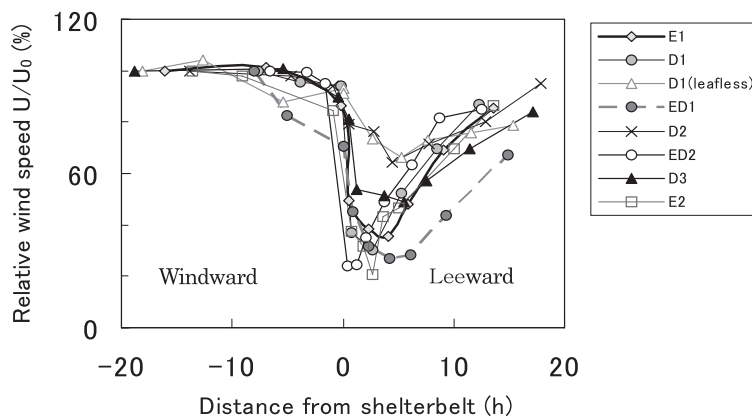


Fig.3-9a. Horizontal profiles of wind speed for different structures of shelterbelt at $Z=0.1\sim 0.2h$. Z is vertical coordinate axis upward.

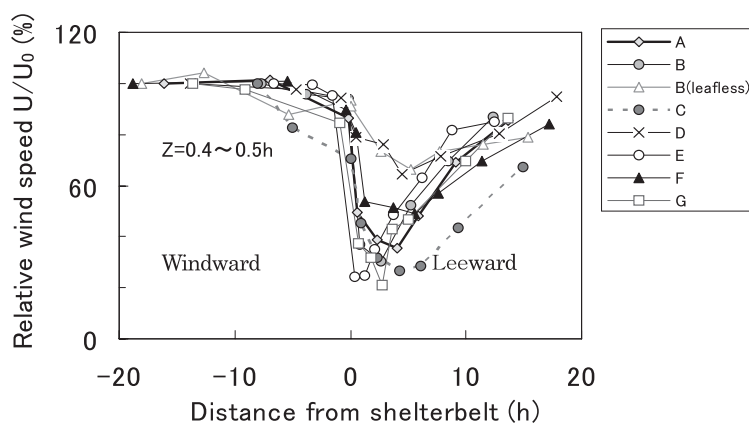


Fig.3-9b. Horizontal profiles of wind speed for different structures of shelterbelt at $Z=0.4\sim 0.5h$. Z is vertical coordinate axis upward.

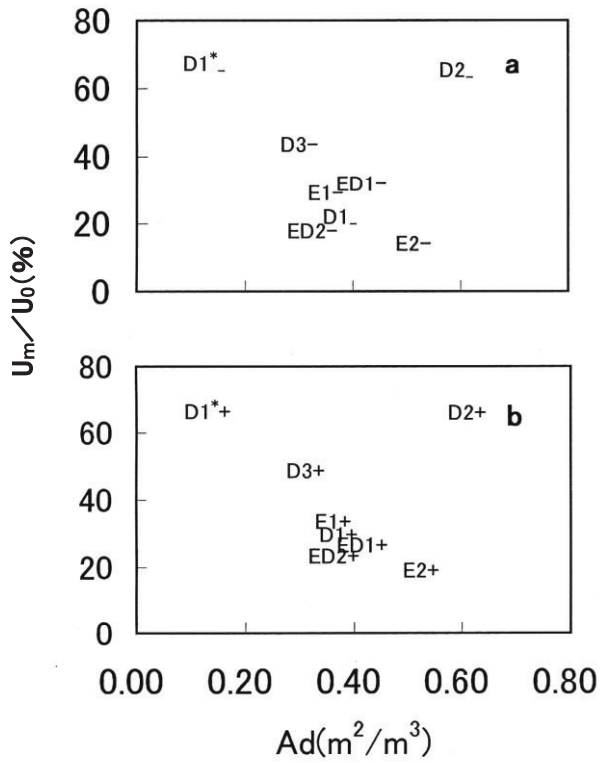


Fig.3-10a,b. Relative wind speed U_m/U_0 for the eight shelterbelts. Plotted in terms of Ad . The site symbols are defined in Table.3-1. Subscripts +, - and * refer to upper, lower measurement positions and leafless period respectively

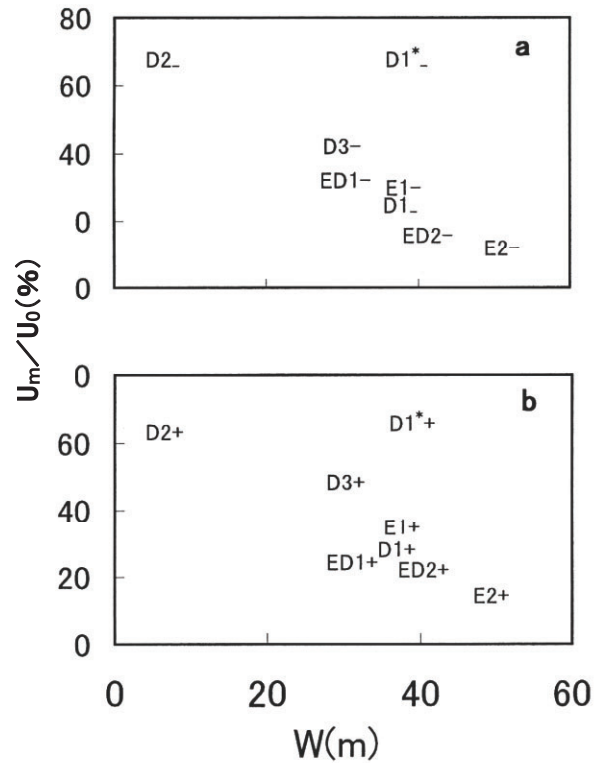


Fig.3-11a,b. Relative wind speed U_m/U_0 for the eight shelterbelts. Plotted in terms of W . The site symbols are defined in Table.3-1. Subscripts +, - and * refer to upper, lower measurement positions and leafless period respectively

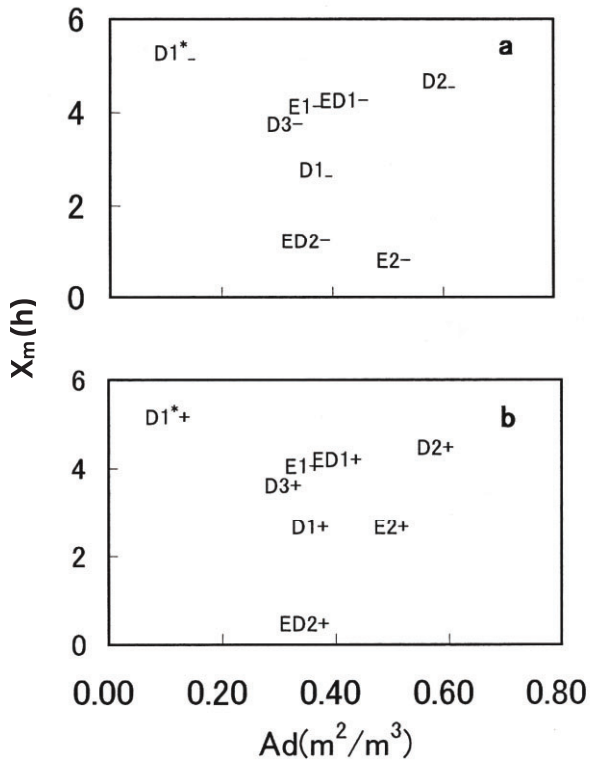


Fig.3-12a,b. The distance of the minimum wind speed X_m for the eight shelterbelts. Plotted in terms of Ad . The site symbols are defined in Table.3-1. Subscripts +, - and * refer to upper, lower measurement positions and leafless period respectively

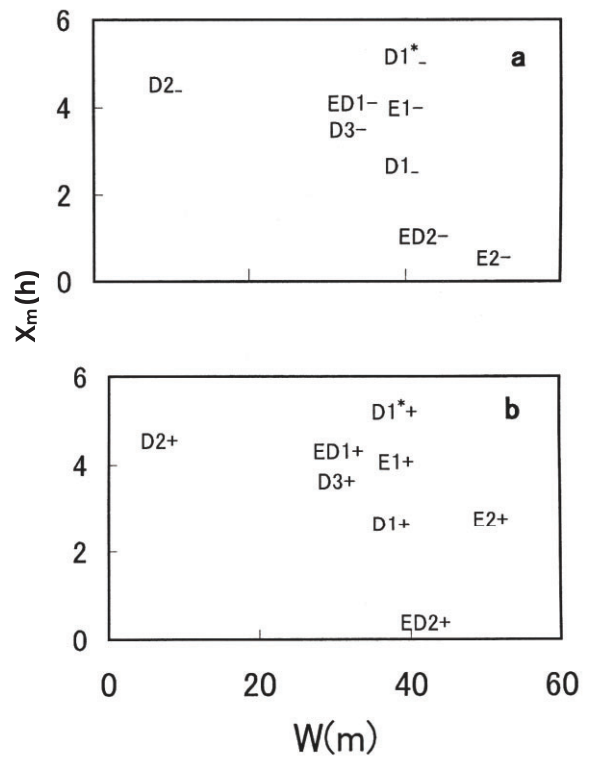


Fig.3-13a,b. The distance of the minimum wind speed X_m for the eight shelterbelts. Plotted in terms of W . The site symbols are defined in Table.3-1. Subscripts +, - and * refer to upper, lower measurement positions and leafless period respectively

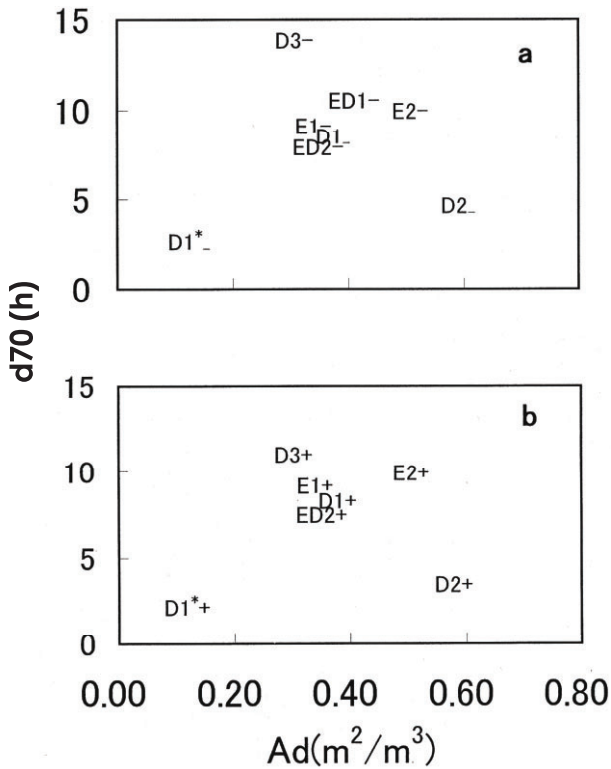


Fig.3-14a,b. The shelter distance $d70$ for the eight shelterbelts. Plotted in terms of Ad . The site symbols are defined in Table.3-1. Subscripts +, - and * refer to upper, lower measurement positions and leafless period respectively.

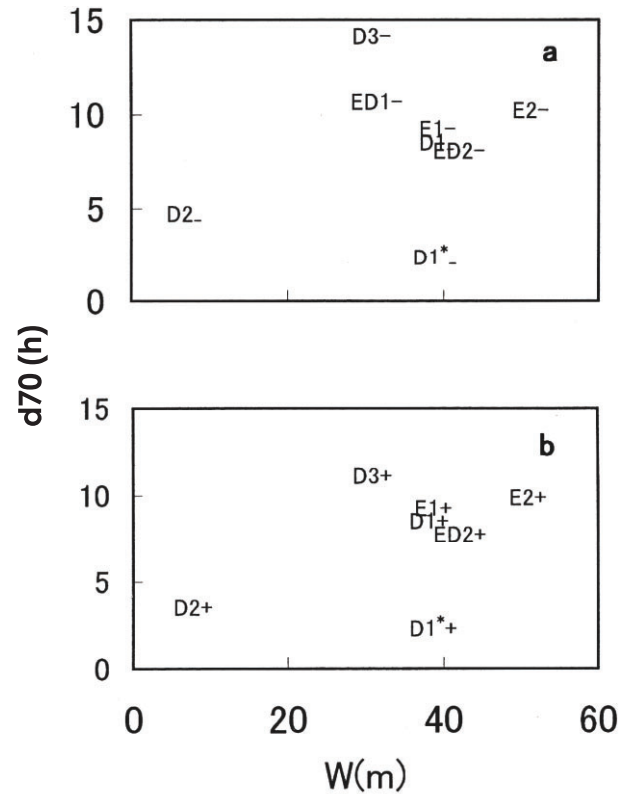


Fig.3-15a,b. The shelter distance $d70$ for the eight shelterbelts. Plotted in terms of W . The site symbols are defined in Table.3-1. Subscripts +, - and * refer to upper, lower measurement positions and leafless period respectively.

と U_m/U_0 は減少する傾向を示したが、落葉期のサイトD1の U_m/U_0 の値はその傾向よりも明らかに高い値を示した (Fig.3-11a,b)。落葉期のサイトD1は、比較的広い林帯幅であるにも関わらず、もっとも Ad (0.09) が低いため U_m/U_0 の値が高くなった (減風率が低い) と考えられる。これらの結果は、 Ad のみ、もしくは W のみで、相対最小風速 U_m/U_0 を正確に予測することが困難であることを示唆している。

相対最小風速の風下林縁からの距離 X_m と Ad の関係を Fig.3-12a,b に示す。 X_m の最小値は、測定高度 0.1-0.2h, 0.4-0.5h の順に、0.72h ($Ad=0.4$), 0.42h (0.32) で、 X_m の最大値は各測定高とも 5.2h (0.09) である。枝葉密度が異なる5つの防風林帯における比較結果 (Naegeli, 1946) では、もっとも密度の高い防風林において、 X_m がもっとも小さくなる結果が示されている。また、防風柵に関する風洞実験では、空隙率の増

加にともなって X_m も増加する傾向が示されている (Raine and Stevenson, 1977)。しかしながら、本結果においては Ad との関係性はみられなかった。 X_m と W の関係については、 W の増加にともなって X_m は減少する傾向があるが (Fig.3-13a,b)、同じ林帯幅 W でも X_m の値に違いがみられるなど、明確な関係性はみられなかった。この結果は、Wangら (1996) による林帯幅と防風効果に関する数値シミュレーションの結果に、定性的には一致をみた。

防風範囲 $d70$ の最小値は、測定高度が低い順に 2.7h, 2.6h, 最大値は 10.9h, 14h となった。 $d70$ と Ad (Fig.3-14a,b) および W (Fig.3-15a,b) の間には、明確な関係性はみられず、 Ad および W だけでは防風範囲の評価指標としては不適であることが示唆された。

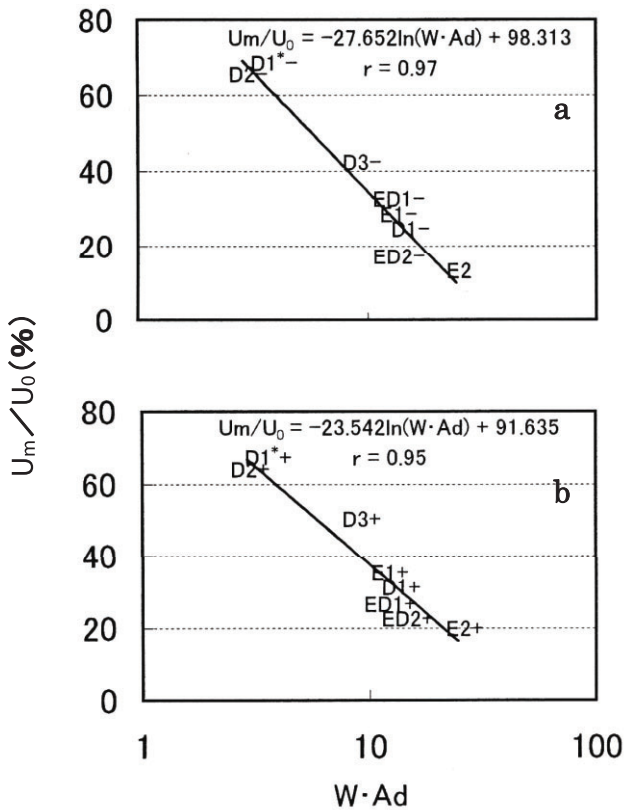


Fig.3-16a,b. Relative wind speed U_m/U_0 for the eight shelterbelts. Plotted in terms of $W \cdot Ad$. The site symbols are defined in Table.3-1. Subscripts +, - and * refer to upper, lower measurement positions and leafless period respectively.

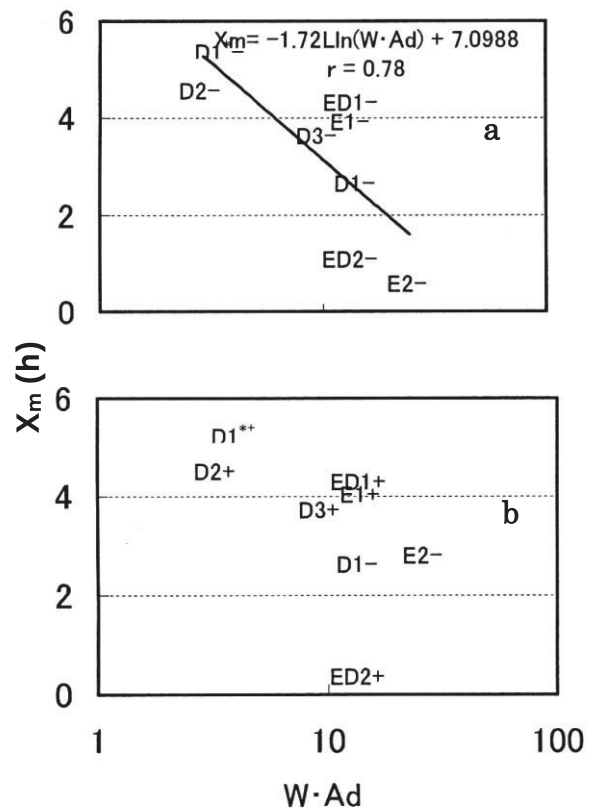


Fig.3-17a,b. The distance of the minimum wind speed X_m for the eight shelterbelts. Plotted in terms of $W \cdot Ad$. The site symbols are defined in Table.3-1. Subscripts +, - and * refer to upper, lower measurement positions and leafless period respectively.

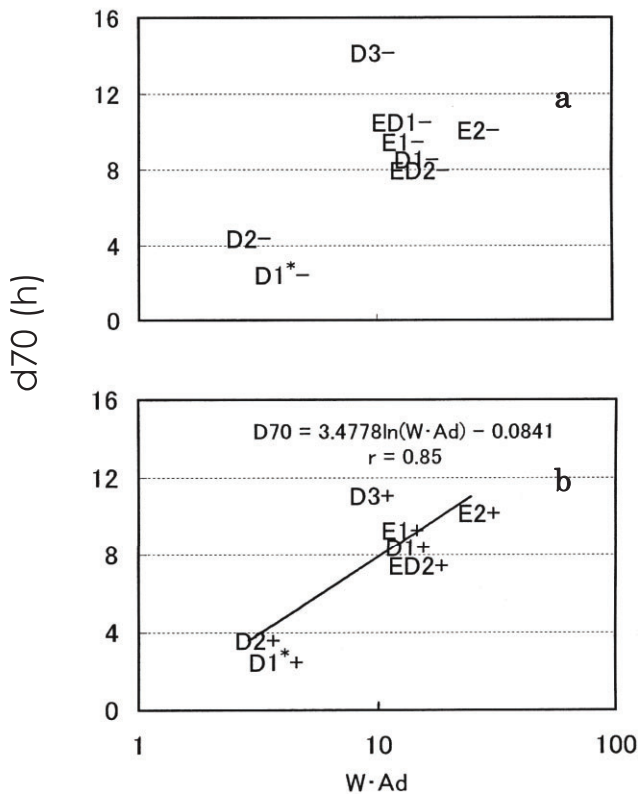


Fig.3-18a,b. The shelter distance $d70$ for the eight shelterbelts. Plotted in terms of $W \cdot Ad$. The site symbols are defined in Table.3-1. Subscripts +, - and * refer to upper, lower measurement.

3-3-2. $W \cdot Ad$ と防風効果の関係

$W \cdot Ad$ を林帯幅 W と幹枝葉面積密度 Ad の積と定義し、以下、防風効果との関係について述べる。各測定高度において U_m/U_0 と $W \cdot Ad$ の間には有意な相関関係 ($P < 0.01$) がみられ、 $W \cdot Ad$ とともに U_m/U_0 は減少する傾向が示された (Fig.3-16a,b)。

$$U_m/U_0(\%) = -27.652 \ln(W \cdot Ad) + 98.313 \quad r = 0.97 \quad (\text{lower}) \quad \dots \dots \dots (3-1)$$

$$U_m/U_0(\%) = -23.542 \ln(W \cdot Ad) + 91.635 \quad r = 0.95 \quad (\text{upper}) \quad \dots \dots \dots (3-2)$$

X_m と $W \cdot Ad$ の間では、 $W \cdot Ad$ が増加すると X_m は減少する傾向が示され、測定高度0.1-0.2hでは有意な相関関係が ($P < 0.05$) 得られた (Fig.3-17a,b)。

$$X_m(h) = -1.72 \ln(W \cdot Ad) + 7.0988 \quad r = 0.78 \quad (\text{lower}) \quad \dots \dots \dots (3-3)$$

過去の研究においては (Rain and Stevenson, 1977; Wang and Takle, 1995b), X_m と光学的空隙率や林帯幅 W の関係性が指摘されているものの、 X_m の予測が可能なレベルでの結果は得られていない。本観測で得られた結果は、 $W \cdot Ad$ が X_m の評価

指標になりうることを示していると考えられる。

d70とW・Adの間では、W・Adの増加にともなうd70も増加する傾向がみられた (Fig.3-18a,b)。測定高度0.4-0.5hでは、d70とW・Adの間には有意な相関関係 ($P<0.05$) がみいだされ、(3-4)式が得られた。

$$d70(h) = 3.4778 \ln(W \cdot Ad) - 0.0841 \quad r = 0.85 \quad (\text{upper}) \\ \dots\dots\dots (3-4)$$

W・Adの増加にともなうd70も増加する傾向を検証するため、林帯幅600m (21.4h)における観測結果 (Wang and Takle, 1996)を参照すると、d70は26hであった。W・AdをTable.3-2から推測すると24~240の範囲に収まると考えられるので、W・Adの増加にともなうd70も増加する傾向は過去のデータとも一致する。

第4章 防雪林の防雪効果に関する観測とモデル風洞実験

4-1. はじめに

防雪林の構造は、防雪柵などに比べると非常に複雑なため、未だに防雪効果が定量的に理解されるには至っていない。防雪林の防雪効果に関する研究の進展には、様々な林帯構造における多くの野外観測データが必要であるが、現実問題として、野外において実際に観測を行う方法は、観測機器を多数必要とし、その年の気象状況によっては計画通りに観測が進まないなど、費用と効率の面で大きなマイナス要因が存在する。以上のような問題を解決する手段としては、風洞施設を用いたモデル実験がある。モデル実験は、防雪林の林帯構造を計画的に変化させ、しかも温度条件や風速条件を制御することが可能であり、体系的な理解を深めるには、非常に有効な手段だと考えられるが、防風効果に関するモデル実験ほど、その手法が確立されていない。また、防雪林に関しては防雪柵に比べてモデル実験例も少なく、モデルの再現性を比較するための野外データもほとんど見あたらないのが現状である。



Fig.4-1. Snow break forest in Nakagawa, Hokkaido.

そこで本章では、防雪林に関するモデル実験の有効性を検討するとともに、造成面積が小さく経済的な幅の狭い防雪林の防雪機能を解明するため、アカエゾマツの試験林で野外観測 (プロトタイプ)を実施し、更に風洞実験 (モデル)をおこなった。モデル実験の有効性の検討については、Tabler (1980b)とAnno (984a,b)によって提案された相似条件を用いて検討を加えた。

4-2. 方法

4-2-1. 野外観測

北海道天塩郡中川町国府に位置する平坦な牧草地で観測は行われた。この付近は道内でも地吹雪頻度が高く、しばしば深刻な交通障害が発生している。試験林は、根株付きのアカエゾマツ87本 (平均樹高2.2m, 平均胸高直径3.5cm)を、雪上に千鳥格子状に3列植栽 (樹間90cm)した (Fig.4-1)。根株付きの樹木は重く運搬には不便であるが、雪面に植栽後は、支柱なしでも強風対して倒伏せず、十分に安定させることが可能である。また、植栽木を生きのまま使用するため、観測終了後は再び土に植栽出来るメリットがある。この付近の冬期間は、西~西北西の風が卓越しているため、試験林は卓越風に垂直な南北方向に沿って配置された。林帯幅は約2.5m, 長さ (南北方向に沿った長さ)は約25mである。試験林の周辺には0.6mの高さに、三杯風速計とSPC (Snow Particle Counter)を設置し、吹きだまりがない状態で風速および吹雪質量フラックスの水平分布を測定した。また、林帯の影響を受けない状態での基本的な気象データを得るため、林帯から36m風上には、高さ1mに三杯風速計を設置した (Fig.4-3)。

4-2-2. 風洞実験

風洞は、断面積0.5×0.5m, 実効長8mのゲッチングン回流型風洞 (北海道大学低温科学研究所)を使用した。試験林のモデルには、市販の針葉樹模型 (Fig.4-2)を使用した。試

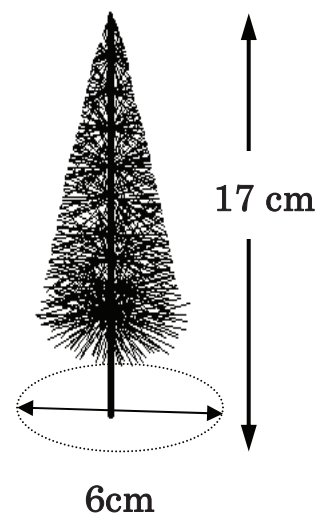


Fig.4-2. Model conifer tree.

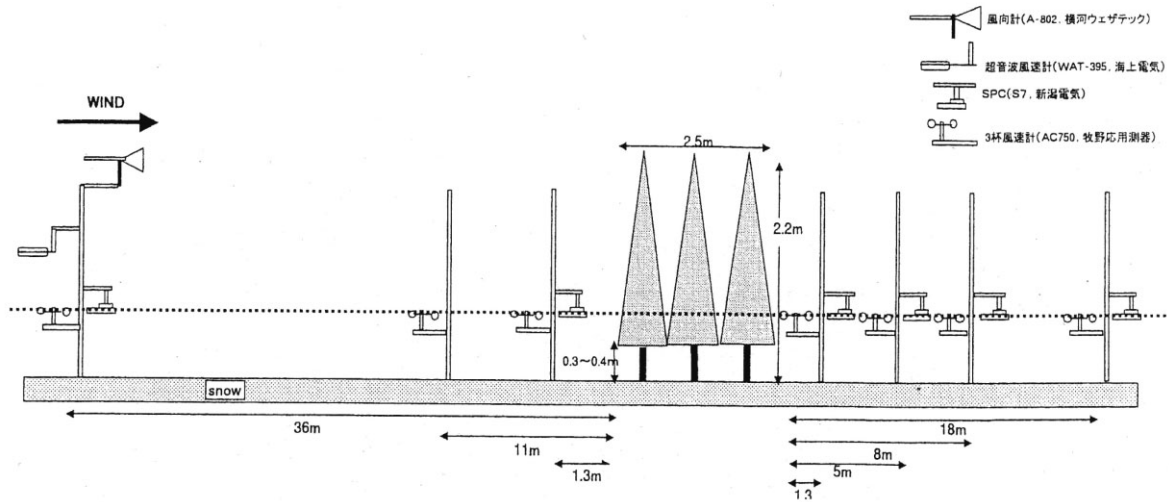


Fig.4-3. Arrangement of weather survey devices.

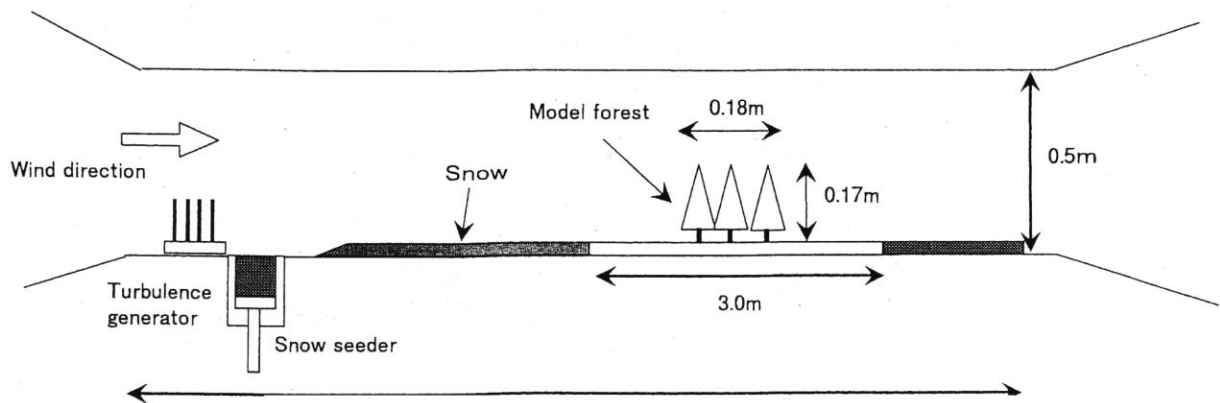


Fig.4-4. Diagram of wind tunnel experiment.

験林のモデルは、この模型樹をプロトタイプの構造を模して、3列千鳥格子状にガーゼを張った合板に固定した (Fig.4-4)。合板表面にガーゼを張ったのは、風上の吹きだまりを再現するためである。室温は -15°C に保ち、実験風速は 4.8m/s (高さ 1cm)に設定した。また、安定した吹雪現象を持続させるために、Snow seederから少量の雪粒子を供給した。風洞床面に敷き詰めた雪は平らに均し、実験中に雪面の剥離が進行した場合は、再び雪を敷き詰めて修正した。また実験は、プロトタイプの再現を目的としているため、モデルの吹きだまりの最大積雪深がプロトタイプの吹きだまりの最大雪深 ($0.36h$, h : 樹高) と等しくなるまで行なった。

4-2-3. 試験林と模型林の構造

防雪林は、主に植栽木の葉などの地上部が遮蔽物となって

風を弱めることで、吹雪粒子を林帯周辺に捕捉する。したがって、林帯の遮蔽物の大小を示す疎密度は、林帯構造と防雪効果の関係を定量化するのに重要な因子である。防風柵や防風ネットなど2次元構造物の場合、空隙率 (porosity) が相対最小風速や相対最小風速の位置など防風特性の指標となっており (真木,1982;Heisler et al.,1988)、3次元構造の防風林・防雪林の場合には、ちょうど疎密度が防風ネット等における空隙率に相当するであろう。

近年の防風林・防雪林に関する研究では、第2～3章で示したように葉面積密度LAD (Leaf area density) あるいは幹枝葉面積密度Ad (Total area density) を林帯の疎密度を表す指標とし、更に林帯幅 W を乗じた値 $W \cdot \text{LAD}$ (あるいは $W \cdot \text{Ad}$) が、林帯風下の相対最小風速と相関があることが報告されている (佐藤ら,2000;鳥田・根本,2002)。そこで本研究では、 $W \cdot \text{LAD}$

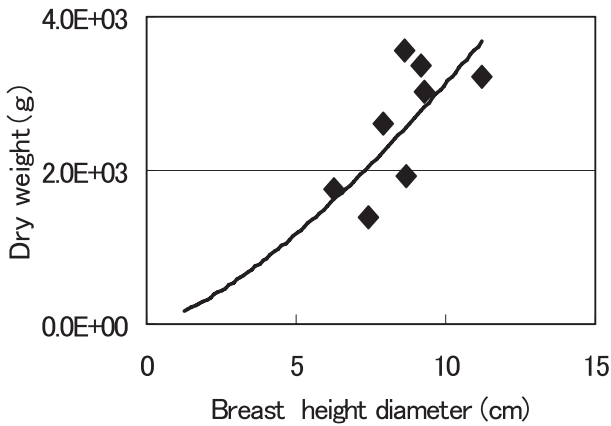


Fig.4-5. The relationship between DBH and dry weight.

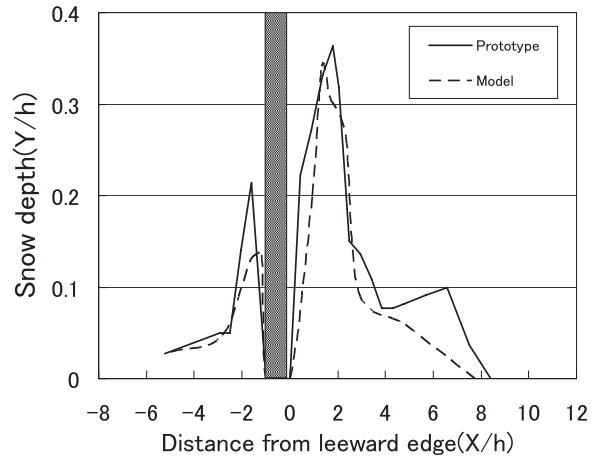


Fig.4-6. Comparison of model to prototype on snow drift distribution.

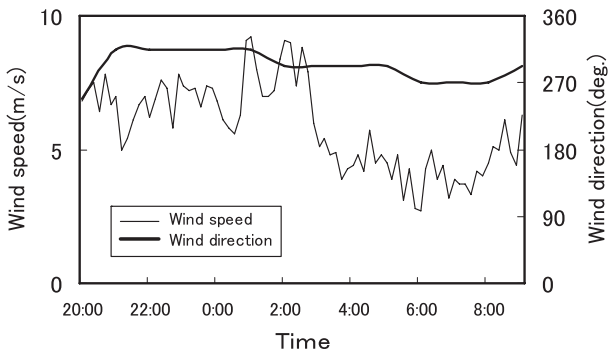


Fig.4-7. Wind direction of Amedas in Nakagawa and wind speed at the field.

4-3. 結果と考察

4-3-1. 野外观測結果

4-3-1-1. 吹きだまり形状

1999年27日夜から28日にかけては、低気圧がオホーツク海で非常に発達し、冬型の気圧配置が強まり、各地で強風が観測された。Fig.4-6は、2月27日の夜半(20時頃)から翌日28日(9時)の一晚で試験林の周辺に形成された吹きだまりの分布である。吹きだまりが形成されたのは夜間であったため、Fig.4-3の基準観測点の三杯風速計以外は電源を切っていた状態にあった。そのため当時の風向は試験林周辺で測定していないが、中川町のアメダスデータによれば、風向は西～北西方向でほぼ一定しており、試験林の延長方向に対してほぼ垂直に吹いていたと推定される。Fig.4-7に中川町アメダスによる風向と、基準観測点における風速を時系列で示した。27日以前の気象状況については、25日からは比較的暖かく、平均気温-0.9℃で25日、26日の両日も日中最高気温は3.5、3.2℃とプラスの気温を記録した(中川町アメダスデータ)。この間、降雪もほとんど無く雪面は締まっていた。吹きだまりの雪は非常に軽く、主に夜半に降った雪が吹き飛ばされて形成されたものであると思われる。試験林風上側には、-2.5h(h:樹高)付近から風上林縁にかけて徐々に吹きだまり量が増してゆく傾向がみられる。このような形状の吹きだまりは、吹きだめ柵でも観測されている。吹きだめ柵では、風上側で柵に近づくにつれて風速が減少し、同時に雪面に働くせん断応力が小さくなり、跳躍粒子が運動を停止して風上に鯨の背状の吹きだまりが形成される事が知られている(竹内,2000)。本試験林でも同様に風上から林帯に近づくにつれて風速の減少がみられることから(Fig.4-11)、同様のメカニズムで跳躍粒子が堆積して吹きだまりが形成されたと思われる。風下の吹きだまりのピークは、風下林縁から約1.8h離れた距離にみられ、積雪深は0.36hであった。ピークから更に

を防風ネット等の空隙率に相当する指標と考え、試験林と模型林の構造を定量化するため、W・LADを求めた。

最も確実にLAIを測定する方法は、植栽木の葉を枝から分離して、その葉面積を計測する方法である。樹種は多少異なるが、同じトウヒ属で全体の形状も葉の形状も似ている、ヨーロッパトウヒの破壊試験から得たデータを利用して推測した。(4-1)式に、ヨーロッパトウヒの胸高直径D(cm)と葉の乾燥重量W(g)の関係を示す(Fig.4-5)。

$$W = 120.24 * D^{1.42} \quad \dots\dots (4-1)$$

この式から得られた葉の乾燥重量に、比葉面積85(cm²/g)を乗じて林帯のLAIを求めると、その値は約8.4となった。

一方、模型林のLAIは、模型から取り出した葉の面積を測定した結果、8.9となった。

以上より求めたLAIの値から、試験林、模型林のW・LADを求めると、それぞれ約11.1、10.3と近似した値を示した。

風下は、約4hの距離まで急激に積雪深が減少し、全体としては雪庇形状の吹きだまりとなった (Fig.4-8, 9)。これは、林帯を乗り越えてきた浮遊粒子によって形成された可能性もあるが、当時の風速は最大でも9.2m/sであり (Fig.4-7)、この程度の風速では浮遊粒子量は跳躍粒子量に比べて少ないと推察される (竹内, 1995)。したがって林帯風下の雪庇状の吹きだまりは、主に樹冠下部の大きな空隙を通り抜けてきた跳躍粒子が、乱流によって浮遊粒子に変化し、沈降堆積した結果このような形になったと思われる。粒子の運動形態については、以下のSPCによる観測結果で検討する。

4-3-1-2. 吹雪質量フラックスと風速分布

本試験林では、SPC (測定間隔1秒) による雪面から高さ約0.6mにおける吹雪質量フラックス ($g/(cm^2 \cdot s)$) の水平分布の測定も行った。吹雪質量フラックスの観測は、2月28日に形成された吹きだまりを除雪して、3月12日に風上風下を含めて平坦な雪面上でおこなわれた。雪面状況は数センチの新雪が積もった状態で、気温は-5.2℃である。Fig.4-10に同日に行なわれた降雪がない状態での、超音波風速計 (測定間隔10Hz)

による基準観測点 (雪面上1.6m) における吹雪質量フラックスおよび風向風速の時間変化を示す。風速が6 m/s以上で吹雪の発生が確認できたb (13:52:43-13:55:43) およびc (13:57:00-14:00:00) 区間と、それらを含むa (13:50:00-14:00:00) の3区間において、平均処理した結果をFig.4-11に示す。また、Fig.4-11の林帯周辺の相対風速 (基準観測点の風速を100とした) は、三杯風速計による時刻13:50~14:00の10分間のデータを用いた。全体的な傾向として、質量フラックスは、風上から風下にかけて減少する。基準点から風上林縁近くの領域では、bのフラックスは減少傾向がみられるが、aおよびcのフラックスは、増加傾向にある。これは、基準観測点から林縁までの間で、更に吹雪が発達したためではないかと考えられる。林帯風下では、風下約0.6hにかけて一旦フラックスは風上林縁部よりも減少するが、風下2.3hでは再び増加する傾向にある。一般的に跳躍粒子の高さは、雪面から十数センチ程度であるから、観測した高さ (0.6m) での吹雪粒子の運動形態は、主に浮遊粒子である。また、風下の林帯付近は、風速は非常に小さくなっているが乱れが大きくなっていると推察される。したがって、この風下領域でのフラックスの増加は、林帯の樹冠下部 (枝下部) の大きな空隙を通り抜けてきた跳躍粒子が、風下での乱流によって浮遊に運動形態を変化させることによると考えられる。このような現象は、吹きだめ柵においてもみられる現象である (竹内, 2000)。

以上の結果をまとめると、幅の狭い防雪林では、基本的に吹きだめ柵とほとんど同じ過程で吹雪を捕捉して防雪効果を発揮していると考えられる。これは、柵の下端部に開口部がある吹きだめ柵と、枝下部に開口部が存在する防雪林の構造が類似していたためだと推察される。



Fig.4-8. Snow drift in leeward of snow break forest.



Fig.4-9. Snow pit wall around snow break forest.

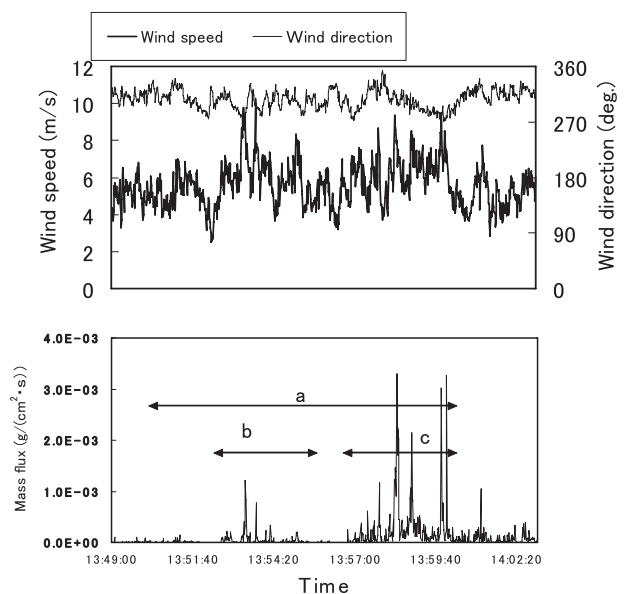


Fig.4-10. Fluctuation of mass flux, wind speed and direction with time.

4-3-2. モデル実験

4-3-2-1. 吹きだまり形状

高さ3cmにおけるモデルの風速分布 (Fig.4-11) は、相対最小風速がプロトタイプよりも15%程小さくなっている。これは、プロトタイプにおけるLAIの推定値が実際よりも、いくぶん大きかった事によると考えられる。しかし、最小風速の位置や風下で大きく減風し風速が回復してゆく過程は似ている (Fig.4-11)。モデルの吹きだまり分布も (Fig.4-6)、-3h付近から風上林縁近くまで徐々に吹きだまり量が多くなる。プロトタイプと全体的な形状は似ているが、勾配は緩い。風下では、プロトタイプ同様に顕著な吹きだまりが形成され、風下林縁から1.35hの距離にピークがある。風洞実験は、モデルとプロトタイプのピーク (最大積雪深) が同程度になるのを目安に行われたため、ピークの高さはほとんど同じ値になっている。更に風下では、プロトタイプにみられたように、吹きだまり量は急激に減少した。また、4hよりも風下で

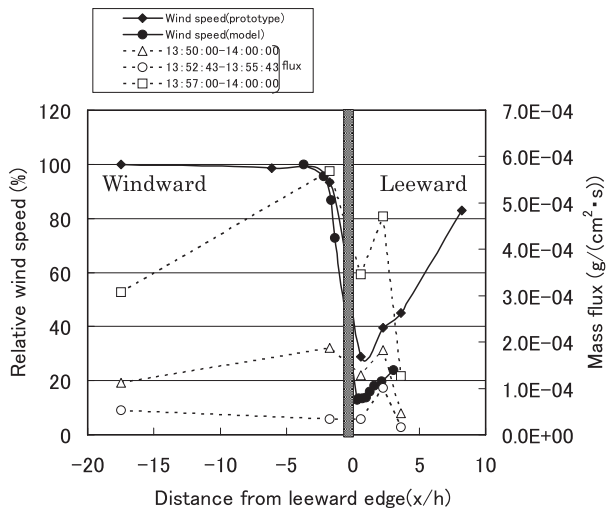


Fig.4-11. Wind speed and mass flux distribution around snow break forest.

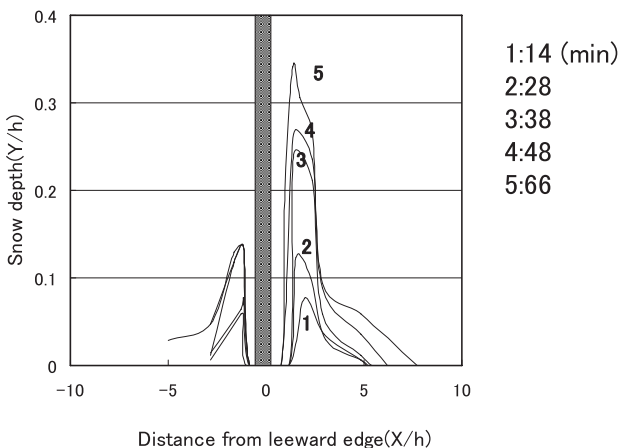


Fig.4-12. Variation of snow drift with time in wind tunnel experiment.

はプロトタイプおよびモデルとも顕著な吹きだまりはみられない。林内は、プロトタイプおよびモデルともほとんど吹きだまりがみられなかった。モデルの平均的な粒子跳躍層の厚さHを次式によって求めてみると (Owen, 1964:Kind, 1976)、約0.8cmとなった。

$$H = \frac{u_*^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

(風速の対数分布より求めた摩擦速度 u_* は、0.385m/s、 g は重力加速度)

模型林帯の枝下高は1.5cmであるから、多くの跳躍粒子は、樹冠に捕捉されることなく枝下を通って林内に入り込むと考えられる。しかし、防風林の枝下高以下では、風が通り抜けやすく、一時的にこの高さでの風速が強まる (Nord, 1991)。このため、林内に進入した跳躍粒子は運動を停止することなく、風下林外へ運び去られる。これは、プロトタイプにおいても同様で、林内での風速の増大が吹きだまりを形成させなかった原因と考えられる。

全体的にモデルとプロトタイプの吹きだまりの形状は、類似した結果を示したとすることができる。

4-3-2-2. 吹きだまりの形成過程

風洞実験では、その形成過程を調べた。10~14分間隔で吹きだまり分布を測定した (Fig.4-12)。実験開始から28分までは、風上と風下の吹きだまりの大きさには顕著な差は見られないが、28分以後、風下の吹きだまりが急激に成長した。モデル林帯周辺の吹きだまりの断面から、吹きだまり量の時間的な変化を求めると、28分以後の増加は、ほとんど風下での増加に対応していることがわかる (Fig.4-13)。これは風上雪丘が平衡状態に達したためであろう。プロトタイプの吹きだまりは、夜間に形成されたため、その過程に関するデータが得られなかった。しかし、野外の防雪柵の観測でも、今回のモデル実験で得られた結果と同様な傾向が示されており (Tabler, 1980a)、本実験がプロトタイプの吹きだまりの形成

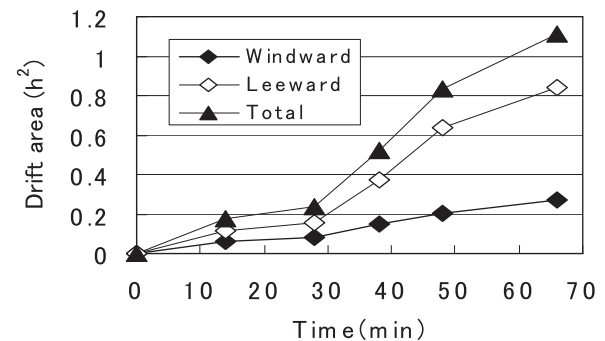


Fig.4-13. Variation of drift area with time.

過程を再現していると考えても、矛盾はないであろう。

4-3-2-3. 風速に関する検討

Tabler (1980b) は、モデルとプロトタイプとの相似条件として以下のような関係式を示した。

$$L_m/L_p = U_m^2/U_p^2 = u_{*m}^2/u_{*p}^2 = z_{0m}/z_{0p} \quad \dots\dots (4-3)$$

(U: 風速, u_* : 摩擦速度, L: 代表長さ, z_0 : 粗度長, m: モデル, P: プロトタイプ)

風速と粗度長変化については、 $z_0 = a u_*^2/g$ という関係が成立する事が知られているが (Chamberlain, 1983; Wieringa, 1993), 風洞内においても同様の関係が成立することが示されている (Nemoto and Nishimura, 2001)。したがって、(4-3) 式を今回の風洞実験に適用できうと思われる。あるモデルの縮尺 ($L_m/L_p = 17/220 \approx 1/13$) に対し、モデルの風速をこれに対応するプロトタイプの風速に換算する方法は、以下のようである。 Z_{0m} (風速の垂直分布より求めた Z_{0m} は 8.4×10^{-3} cm) が既知の場合は (4-3) 式から粗度長 Z_{0p} を求め、(4-4), (4-5) 式を利用して高さ 10m における風速 U_{10p} (添え字は高さを示し、以後この例に従う。) を算出する。 u_{*m} (実験の摩擦速度 $u_{*m} = 38.5$ cm/s) が既知の場合は、(4-3) 式から u_{*p} を求めて、(4-5) 式より U_{10p} を算出する。今回は以上 2 通りの方法で計算した結果、それぞれ U_{10p} は 22, 31 m/s となった。

$$z_{0p} = 1.3509 \times 10^{-5} u_{*p}^2 \quad \dots\dots (4-4)$$

(単位: Z_{0p} (cm), u_{*p} (cm/s))

$$u_{*p} = 0.0240 U_{10p}^{1.18} \quad \dots\dots (4-5)$$

(単位: U_{10p} (m/s), u_{*p} (m/s))

((4-4), (4-5) 式は 75% 以上の積雪で覆われた氷上で成り立つ関係式である。)

いずれの結果もモデル実験は強風状態に対応することを示す (Table.4-1)。

Table.4-1. Computed U_{10p} and T_p with different similarity law.

	U_{10p} (m/s)	T_p (h)
Tabler	22,31	3~5
Anno	7	86~172
Measurement	9	8.3

次に Anno (1984a) により提案された風速に関する相似条件を示す。

$$\frac{U_p}{U_m} = \frac{A_m \cdot U_{*p}}{A_p \cdot U_{*m}} \quad \dots\dots (4-6)$$

A は定数, U_{*t} (m/s) は臨界摩擦速度を表す。本実験では $U_{*m} = 0.078 U_{0.01m}$ という関係が成立しており、目視により求めた高さ 1 cm での臨界風速 (fluid threshold) 4.1 m/s を代入すると、

U_{*m} は 0.3 m/s となった。プロトタイプにおいては、北海道の厳冬期におこなわれた観測結果 (西尾・石田, 1973) を参考にすると $U_{*p} = 0.035 U_{10p}$ ($Z_0 = 10^{-4}$ m, $Z = 10$ m) という関係が求められ、高さ 1 m での臨界風速が約 5 m/s であるとする、臨界摩擦速度 U_{*p} は 0.2 m/s である。これらの値を (4-6) 式に代入すると、以下の関係式が得られる。

$$\frac{U_{10p}}{U_{0.01m}} = 1.5 \quad \dots\dots (4-7)$$

$U_{0.01m} = 4.8$ m/s を (4-7) 式に代入すると、 U_{10p} は約 7 m/s となった。

一方、Fig.4-6 のプロトタイプの吹きだまりが形成されるまでの平均風速 (測定間隔は 10 分) が、基準観測点の三杯風速計で実測された (Fig.4-7)。27 日 20 時から 28 日 9 時までの 13 時間で、吹雪現象が発生すると思われる 5 m/s 以上の風速の平均値を求めると 6.9 m/s となった。これを先の相似条件によって求めた U_{10p} と比較するため、対数分布と仮定して高さ 10 m の風速に換算すると、およそ 9 m/s である。したがって、Tabler による相似条件より推定したプロトタイプの風速は野外観測値よりもかなり大きく、Anno の相似条件によって求めた風速の方が観測値に近い値となった (Table.4-1)。

4-3-2-4. 吹雪時間に関する検討

プロトタイプとモデルの吹きだまりの形成時間に関する相似条件を以下に示す。

$$\text{Tabler} \quad \frac{T_m}{T_p} = \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \left(\frac{L_m/u_{*m}}{L_p/u_{*p}} \right) \quad \dots\dots (4-8)$$

$$\text{Anno} \quad \frac{T_p \cdot Q_p \cdot \eta_p}{\gamma_p \cdot F_{wp}^2} = \frac{T_m \cdot Q_m \cdot \eta_m}{\gamma_m \cdot F_{wm}^2} \quad \dots\dots (4-9)$$

(T(h): 吹きだまりが形成されるまでの時間, F_w (m): 障害物の幅, γ (kg/cm³): 吹きだまりの体積密度, Q (kg/(m·s)): 吹雪量, η (%): 障害物の吹雪粒子捕捉率)

モデルの吹きだまりの体積密度 γ_m は 0.36, T_m は 1.1 時間である。プロトタイプの γ_p については測定しなかったが、一晚という短い時間で形成された軽い雪であり、初冬から融雪期前の長期間でも 0.3~0.45 程度という報告 (Tabler, 1980a) があるため、およそ 0.15~0.30 と考えた。吹雪量については、Sugiura ら (1998) によれば、風洞基準風速 4.0~10.0 m/s の範囲において、 Q_m は風速の約 4 乗に比例している。この実験での風洞基準風速は、約 7.7 m/s であるから、Sugiura ら (1998) の結果を用いて、 Q_m は、 1.1×10^{-2} kg/(m·s) とした。また、野外での吹雪量 Q_p は、風速の 3 乗に比例するとして求めた結果、 9.9×10^{-3} kg/(m·s) となった (小林ら, 1970)。

これらの値を用いて (4-8), (4-9) 式より、本実験結果に対応する T_p をそれぞれ求めると、(4-8) 式からは、およそ 3~5 時間、(4-9) 式からは 86~172 時間 (F_{wp}/F_{wm} は実質的に L_p/L_m に相当するので 13, $\eta_m = \eta_p$ と仮定。) という結果が得られた (Table.4-1)。 T_p の値に幅があるのは、 γ_p を

0.15~0.30と推定したことによる。

試験林（プロトタイプ）の観測では、風速5m/s以上の強さの吹雪時間は、8.3時間である。この値と、相似条件から求めた T_p を比較すると、(4-8)式より求めた値はやや小さいが、比較的良好に適合していると思われる。一方、(4-9)式から求められた値は、実際の値よりもかなり大きな値となった。

第5章 台風による風害の要因解析と予測

5-1. はじめに

近年、北海道には台風による災害が相次ぎ、大規模な森林被害が続発している。天然林などでは、台風による風害は、天然更新の要因として重要な働きがある一方、木材生産を目的とした人工林では経済的に大きなダメージを、また、保安林では国土保全機能や生活環境の低下など、深刻な問題をもたらす。特に防風保安林（防風林）への被害は、広大な耕地を維持している北海道にとって、農業生産の観点からも、非常に大きな問題である。

2002年台風21号は、10月1日夕方から風雨を強め、2日5時6分には広尾町で最大瞬間風速35.5m/sを記録する暴風雨となった（Fig.5-1 a,b）。総被害面積は約8400haに達し、十勝支庁管内の10町村（音更町、中札内村、更別村、忠類村、大樹町、幕別町、池田町、豊頃町、本別町、浦幌町）は、激甚災害地域に指定された。この森林被害のうち、防風保安林の被害面積は約1500haに達した（Fig.5-2, 3, 4）。この地域の防風林は、春先に日高大雪山系から吹き下りる「十勝風」、あるいは「日高おろし」と呼ばれる強風から移植まもない幼苗を守り、畑の表土の風食を防ぐなど重要な公益的機能を担

っている。現在、被害を受けた防風林周辺の耕地では強風による農業被害の発生が懸念されており、復旧に向けた防風林の再造成が急務となっている。十勝地方は、過去にも1981年の台風15号による大規模な被害を受けており（水井・畠山, 1984；山根ら, 1982）、たびたび発生する風害を軽減するための防風林の森林整備技術が求められている。

そこで本章では、気象現象として風が森林に及ぼす影響を解明し風害を軽減するため、2002年台風21号による被害データを基に、数量化I類を用いた要因の解析を行った。更に、耐風性を考慮した防風林の造成管理を推進するため、被害予測モデル（被害程度については数量化I類を、被害の有無については数量化II類を用いた）を開発した。

5-2. 方法

5-2-1. 防風林の概要

北海道十勝地方の防風林は、幹線をなす幅の広い防風保安林（幅は60~80m前後）と幅の狭い支線防風林（1列~3列程度）からなり、縦横に伸びた防風保安林が大きな基盤目を形づくり、更にその升目を細かく区切るように支線防風林が配置されている。

防風保安林の歴史は開拓期に遡り、耕地区画の設定時に天然林を残して保安林にしたことから始まった（小関, 1971）。当時の防風林は台地での優占林、カシワ林を主としていたが、多くは一度伐採されて現在は二次林である（孫田, 2001）。一方、支線防風林は昭和初期から本格的に造成された。支線防風林は、防風保安林が耕地区画に沿って配置された経緯があるのに対し、耕地区画後に本格的に造成され、多くは農家が独自に植栽したものである。これは、防風保安林の間隔が非常に広く数kmもあり、防風保安林だけでは防風効果が十分に

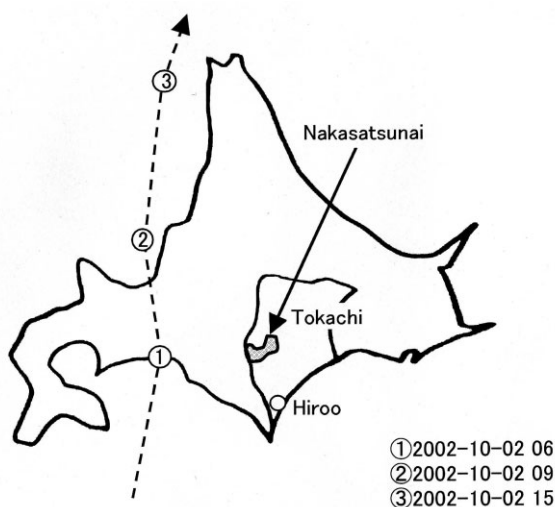


Fig.5-1a. Track of typhoon 200221.

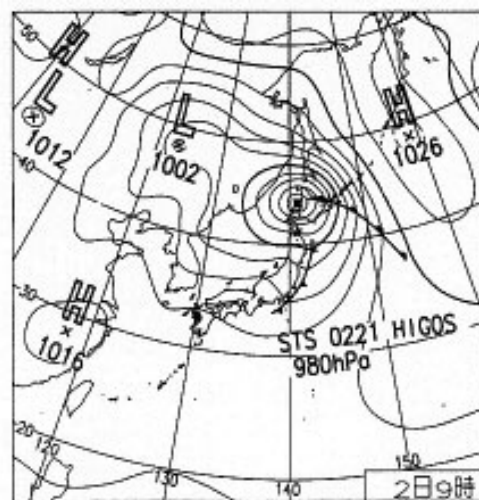


Fig.5-1b. Weather map at 9:00AM, October 2nd.



Fig.5-2. Shelterbelt damaged by Typhoon.



Fig.5-4. Shelterbelt damaged by Typhoon.



Fig.5-3. Shelterbelt damaged by Typhoon.

発揮できない事に起因している。2002年台風21号による被害は、防風保安林に集中し、支線防風林の被害はほとんどみられなかった。防風保安林の構造は、林相（樹種、林齢）の異なる森林区画（林小班）がモザイク状に配置され、十勝地方の全体の総面積は約7300haである。主な構成樹種は、植栽面積が大きい順にカラマツ (*Larix leptolepis*)、カシワ (*Quercus dentata*)、シラカンバ (*Betula platyphylla* var. *japonica*)、アカエゾマツ (*Picea glehnii*)、ヤチダモ (*Fraxinus mandshurica* var. *japonica*)、ストロブマツ (*Pinus strobus*)、トドマツ (*Abies sachalinensis*)、ミズナラ (*Quercus crispula*) などで構成されている。各樹種の占有率は、カラマツが保安林全体の面積の62%、カシワが14%を占め、他の樹種は10%以下である。

5-2-2. 調査方法および気象・被害概況

被害の大きかった十勝支庁管内中札内村の防風保安林（以後は、特に強調する場合を除いて防風林と記す）を対象に、被害要因の解析を行うため、林内の森林区画（林小班）毎に0.04haの調査区を設置（359カ所）して本数被害率（本/ha）を調べた。被害木は、そのほとんどが根返りであったため（Fig.5-5）、被害形態（根返り、幹折れ、幹曲り）についての調査は省略した。

台風による被害は主に十勝支庁南部の更別村、中札内村、大樹町に集中しており、3町村の被害面積を合計すると約1000haに達し、全被害面積の64%を占めた（Fig.5-6）。十勝における被害面積全体に対する樹種別占有率は、カラマツが85%、ストロブマツが4.3%、シラカンバが3.1%、チョウセンゴヨウマツが2.4%、その他が5.2%であった。

台風21号は、2002年10月1日の夜半から翌2日にかけて北海道を縦断し、北海道帯広市では2日6時に最大瞬間風速35.5m/sを記録し（Fig.5-1 a,b）、2日の0～24時までの総降水量は112.5mmに達した。調査対象地域である中札内村の観測（アメダス上札内観測所）では、風速は2日4時から強くなり、6時には最大平均風速12m/sを記録した。強風は6時から13時までの8時間にわたり継続し、平均風速7～12m/sの間で推移した。風向は4時に西南西を記録していたが、次第に東よりの方向に推移し、最大平均風速を記録した6時には南東となった。立木の風倒方向は、ほとんどが北西に集中していた。降水量は、2日の0時～8時までに102mmに達し、1時間あたりの最大時間降水量は34mm（2日5時）である（Fig.5-7）。



Fig.5-5. Uprooted trees in Japanese larch forest.

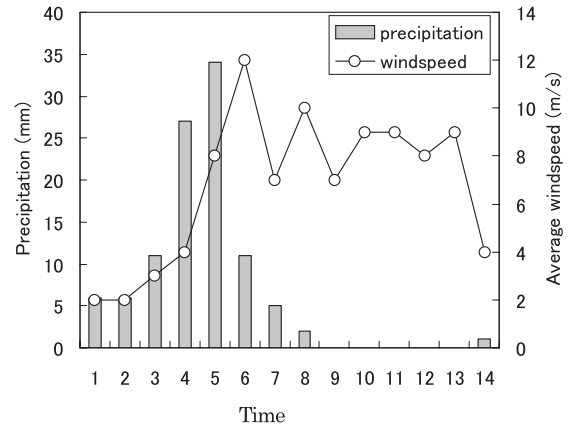


Fig.5-7. Hourly amount of precipitation and average wind speed at Nakasatunai.

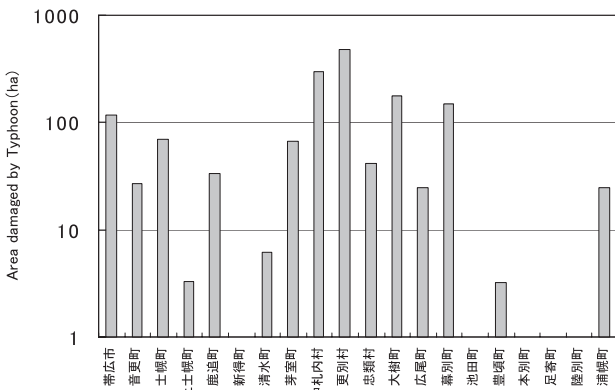


Fig.5-6. Distribution of area damaged by Typhoon 200221.

5-2-3. 要因解析および被害予測モデル

被害要因の解析には、数量化理論 (Hayashi,1952) の中の数量化Ⅰ類を用いて、全樹種とカラマツ林に対して2通りの解析を行った。目的変数は本数被害率とし、説明変数として樹種、風上樹種 (調査区の風上側の区画の樹種)、防風林の延長方向 (防風林の幅に対して直角方向)、調査区を設定した区画の幅 (防風林の延長方向に対して直角方向、以後は区画幅と記す)、標高、風上150m以内の支線防風林の有無 (以後、防風林の有無と記す)、被害時林齢、土壌型を用いた。土壌型については、土壌分類図01 (北海道Ⅱ, 国土庁土地局, 1979) を参考に区分を行った (Table.5-1, 2)。説明変数間の内部相関係数は全体的に低く、もっとも高い場合でも全樹種を対象にした解析では標高と延長方向の0.28、カラマツ林を対象とした解析では、風上防風林の有無と標高の0.28であった。

予測モデルには、被害発生の有無については数量化Ⅱ類によるモデル式を、被害の度合い (本数被害率) については数量化Ⅰ類によるモデル式を用いた。モデル式は、要因解析と同様に全樹種とカラマツ林に対して算出した。

m個のアイテムについてカテゴリーがそれぞれC1, C2, …,

Cm個ある時、数量化Ⅰ類によるモデル式は次のようになる。

$$y = a_{11}x_{11} + \dots + a_{1c}x_{1c} + a_{21}x_{21} + \dots + a_{2c}x_{2c} + \dots + a_{m1}x_{m1} + \dots + a_{mc_m}x_{mc_m} + C \dots \dots \dots (5-1)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{アイテムが} i \text{でカテゴリーが} j \text{のとき} \\ 0 & \text{その他のとき} \end{cases} \quad (i=1, \dots, m; j=1, \dots, C_i)$$

aijはカテゴリー数量、Cは定数項を表す。

同様に数量化Ⅱ類によるモデル式も (5-2) 式に示される線形式に表現される。

$$y = a_{11}x_{11} + \dots + a_{1c}x_{1c} + a_{21}x_{21} + \dots + a_{2c}x_{2c} + \dots + a_{m1}x_{m1} + \dots + a_{mc_m}x_{mc_m} \dots \dots \dots (5-2)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{アイテムが} i \text{でカテゴリーが} j \text{のとき} \\ 0 & \text{その他のとき} \end{cases} \quad (i=1, \dots, m; j=1, \dots, C_i)$$

aijはカテゴリー数量を表す。

5-3. 結果

5-3-1. 数量化Ⅰ類による要因解析結果

中札内地区の全樹種を対象に解析した結果、重相関係数は0.78で高い値を示した (Table.5-1)。偏相関係数は、樹種がもっとも高く0.62で、次いで防風林の延長方向、林齢、風上樹種、土壌型、防風林の有無、区画幅、標高の順であった。そのうち区画幅と標高を除いたアイテムは、すべて偏相関係数が有意 (1%水準) となった。レンジについては樹種がもっとも大きく、次いで林齢、防風林の延長方向となった他は、偏相関係数の場合と同じ順序となった。

以下では、偏相関係数上位3つのアイテムについて示す。樹種のカテゴリースコアは、高い順にシラカンバ、チョウセンゴヨウマツ・ストロブマツ、カラマツ、その他針葉樹 (トドマツ、アカエゾマツ、ヨーロッパトウヒ)、カシワとなった。防風林の延長方向は、北北東、北東、東南東、南東のみで、そのスコアは北北東がもっとも高く、南東がもっとも低い値を示した。林齢のスコアは、21~30年がもっとも高く、41~50年がもっとも低くなった。

Table.5 – 1. Quantification analysis Quant · 1 (359 subcompartments).

Item	Category	No. of subcompartment	Score	Range	Partial cor.coe.
species	Korean nut pine,Eastern white pine	42	17.640	60.523	0.619**
	Japanese larch	187	2.659		
	Todo fir,Sakhalin spruce, Norway spruce	41	-13.392		
	Japanese white birch	31	31.701		
	Oak	58	-28.824		
orientation of shelterbelts	NNE (NNE – SSW)	74	14.763	28.839	0.444**
	NE (NE – SW)	157	3.581		
	ESE (ESE – WNW)	39	-10.302		
	SE (SE – NW)	89	-14.077		
width of subcompartment (m)	≤25	135	2.240	7.052	0.105*
	25<~≤50	179	-0.480		
	50<	45	-4.811		
presence of windward shelterbelt ^{a)}	present	98	-5.521	7.594	0.156**
	not present	261	2.073		
altitude(m)	150<~≤200	178	0.523	1.164	0.025ns
	200<~≤250	141	-0.484		
	250<	40	-0.637		
stand age (yr.)	10≤	13	10.622	32.518	0.438**
	10<~≤20	52	-2.245		
	20<~≤30	36	18.472		
	30<~≤40	115	4.536		
	40<~≤50	92	-14.047		
	50<	51	1.653		
species in windward subcompartment	Conifer(Larch,Todo fir and so on)	93	-5.603	20.605	0.369**
	Japanese white birch	30	-9.810		
	Oak	48	-12.959		
	not present (windward)	188	7.646		
soil type	A-a (Ando soils a)	19	-11.727	17.931	0.283**
	AE (Regosolic ando soils)	181	3.857		
	AE-w (Gleyic Regosolic ando soils)	34	-8.243		
	AO-a (Light colored ando soils a)	44	6.204		
	BL (Brown lowland soils)	54	-3.914		
	BL-c (Brown lowland soils (coarse textured))	27	-9.507		
Multiple cor coe.					0.783

**P < 0.01, *P < 0.05, ns, Not significant

a) presence of windward shelterbelt which is within 150m

Table.5 – 2. Quantification analysis Quant · 1, Japanese larch stands (187 subcompartments).

Item	Category	No. of subcompartment	Score	Range	Partial cor.coe.
orientation of shelterbelts	NNE (NNE – SSW)	40	12.892	24.182	0.364**
	NE (NE – SW)	91	0.940		
	ESE (ESE – WNW)	23	-11.290		
	SE (SE – NW)	33	-10.351		
width of subcompartment (m)	≤25	83	1.005	3.842	0.058ns
	25<~≤50	78	-0.123		
	50<	26	-2.837		
presence of windward shelterbelt ^{a)}	present	50	-7.503	10.242	0.201**
	not present	137	2.738		
altitude (m)	150<~≤200	91	2.554	5.589	0.125ns
	200<~≤250	83	-3.035		
	250<	13	1.497		
stand age (yr.)	7<~≤20	13	0.349	46.552	0.525**
	20<~≤30	14	35.059		
	30<~≤40	76	6.185		
	40<~≤50	84	-11.493		
species in windward subcompartment	conifer (Larch, Todo fir and so on)	42	-1.415	22.772	0.353**
	Japanese white birch	22	-6.779		
	Oak	26	-16.263		
	not present (windward)	97	6.509		
soil type	A-a (Ando soils a)	9	-24.224	31.380	0.340**
	AE (Regosolic ando soils)	93	4.005		
	AE-w (Gleyic Regosolic ando soils)	12	-7.018		
	AO-a (Light colored ando soils a)	28	7.156		
	BL (Brown lowland soils)	31	-4.674		
	BL-c (Brown lowland soils (coarse textured))	14	-8.977		
Multiple cor coe.					0.685

**P < 0.01, *P < 0.05, ns, Not significant

a) presence of windward shelterbelt which is within 150m

中札内地区のカラマツ防風林を対象にした解析では、重相関係数は0.69となり、比較的高い値を示した (Table.5-2)。偏相関係数は、林齢がもっとも高く0.53で、次いで防風林の延長方向、風上樹種、土壌型、防風林の有無、標高、区画幅の順であった。これらのアイテムのうち上位5つは、偏相関係数が1%水準で有意となった。レンジは大きい順に、林齢、土壌型、防風林の延長方向、風上樹種、防風林の有無、標高、区画幅であった。林齢のスコアは、21~30年でもっとも高く

なり、林齢の増加とともに減少して41~50年でもっとも低くなった。防風林の延長方向のスコアは北北東がもっとも高く、東南東がもっとも低い値を示した。風上樹種のカテゴリ-は、針葉樹、シラカンバ、カシワ、風上樹種なし (風上に区画が位置する) の4つに分けられ、スコアは風上樹種ない場合がもっとも高く、風上区画にカシワがある場合がもっとも低くなった。

5-3-2. 被害予測モデル

数量化I類による全樹種およびカラマツ林を対象にしたモデル式を (5-3), (5-4) 式に示す。

$$\begin{aligned}
 Y = & \left(\begin{array}{l} 17.63(\text{チョウセンゴヨウマツなど}) \\ 2.65(\text{カラマツ}) \\ -13.39(\text{トドマツなど}) \\ 31.70(\text{シラカンバ}) \\ -28.82(\text{カシワ}) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} 14.76(\text{NNE}) \\ 3.58(\text{NE}) \\ -10.30(\text{ESE}) \\ -14.07(\text{SE}) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} 2.24(\leq 25) \\ -0.48(\leq 50) \\ -4.81(50 <) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} -5.52(\text{有り}) \\ 2.07(\text{なし}) \end{array} \right) \\
 & + \left(\begin{array}{l} 0.53(\leq 200) \\ -0.48(\leq 250) \\ -0.64(250 <) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} 10.62(\leq 10) \\ -2.25(\leq 20) \\ 18.47(\leq 30) \\ 4.54(\leq 40) \\ -14.03(\leq 50) \\ 1.65(50 <) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} -5.60(\text{カラマツなど}) \\ -9.81(\text{シラカンバ}) \\ -12.96(\text{カシワ}) \\ 7.65(\text{なし}) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} -11.73(\text{A-a}) \\ 3.86(\text{AE}) \\ -8.24(\text{AE-w}) \\ 6.20(\text{AO-a}) \\ -3.91(\text{BL}) \\ -9.51(\text{BL-c}) \end{array} \right) + 25.70
 \end{aligned}$$

(Y: 本数被害率 (%), r=0.783) (5-3)

$$Y = \left(\begin{array}{l} 12.89(\text{NNE}) \\ 0.94(\text{NE}) \\ -11.30(\text{ESE}) \\ -10.35(\text{SE}) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} 1.00(\leq 25) \\ -0.12(\leq 50) \\ -2.84(50 <) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} -7.50(\text{有り}) \\ 2.74(\text{なし}) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} 2.55(\leq 200) \\ -3.03(\leq 250) \\ 1.50(250 <) \end{array} \right)$$

$$+ \left(\begin{array}{l} 0.35(\leq 20) \\ 35.06(\leq 30) \\ 6.19(\leq 40) \\ -11.49(\leq 50) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} -1.41(\text{カラマツなど}) \\ -6.78(\text{シラカンバ}) \\ -16.26(\text{カシワ}) \\ 6.51(\text{なし}) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} -24.22(\text{A-a}) \\ 4.00(\text{AE}) \\ -7.02(\text{AE-w}) \\ 7.16(\text{AO-a}) \\ -4.67(\text{BL}) \\ -8.98(\text{BL-c}) \end{array} \right) + 26.86$$

(Y: 本数被害率 (%), r=0.684) (5-4)

数量化Ⅱ類による全樹種およびカラマツ林を対象にしたモデル式を(5-5),(5-6)式に示す。

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccc}
 \text{樹種} & & \text{防風林の延長方向} & \text{幅} & \text{近接防風林の有無} \\
 \left(\begin{array}{l}
 0.55(\text{チョウセンゴヨウマツなど}) \\
 0.39(\text{カラマツ}) \\
 -0.35(\text{トドマツなど}) \\
 0.79(\text{シラカンバ}) \\
 -1.83(\text{カシワ})
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 0.41(NNE) \\
 0.20(NE) \\
 -0.25(ESE) \\
 -0.60(SE)
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 -0.14(\leq 25) \\
 0.08(\leq 50) \\
 0.10(50 <)
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 -0.11(\text{有り}) \\
 0.04(\text{なし})
 \end{array} \right) \\
 \\
 \begin{array}{cccc}
 \text{標高} & \text{林齢} & \text{風上樹種} & & \text{土壌型} \\
 \left(\begin{array}{l}
 0.01(\leq 200) \\
 -0.07(\leq 250) \\
 0.22(250 <)
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 -0.61(\leq 10) \\
 -0.56(\leq 20) \\
 0.37(\leq 30) \\
 0.26(\leq 40) \\
 -0.20(\leq 50) \\
 0.24(50 <)
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 -0.09(\text{カラマツなど}) \\
 0.13(\text{シラカンバ}) \\
 -0.54(\text{カシワ}) \\
 0.16(\text{なし})
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 0.24(A-a) \\
 0.03(AE) \\
 -0.10(AE-w) \\
 0.14(AO-a) \\
 -0.27(BL) \\
 0.05(BL-c)
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \end{array}$$

(Y:被害の有無, 相関比0.577, 判別の中率87.7%) (5-5)

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc}
 \text{防風林の延長方向} & \text{幅} & \text{近接防風林の有無} \\
 \left(\begin{array}{l}
 0.39(NNE) \\
 0.34(NE) \\
 -0.84(ESE) \\
 -0.83(SE)
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 -0.29(\leq 25) \\
 0.32(\leq 50) \\
 -0.03(50 <)
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 -0.08(\text{有り}) \\
 0.03(\text{なし})
 \end{array} \right) \\
 \\
 \begin{array}{cccc}
 \text{標高} & \text{林齢} & \text{風上樹種} & & \text{土壌型} \\
 \left(\begin{array}{l}
 0.15(\leq 200) \\
 -0.30(\leq 250) \\
 0.90(250 <)
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 -0.87(\leq 20) \\
 0.92(\leq 30) \\
 0.37(\leq 40) \\
 -0.36(\leq 50)
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 0.07(\text{カラマツなど}) \\
 0.60(\text{シラカンバ}) \\
 -1.35(\text{カシワ}) \\
 0.19(\text{なし})
 \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{l}
 -0.02(A-a) \\
 0.10(AE) \\
 -0.21(AE-w) \\
 0.20(AO-a) \\
 -0.58(BL) \\
 0.38(BL-c)
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \end{array}$$

(Y:被害の有無, 相関比0.303, 判別の中率78.6%) (5-6)

5-4. 考察

凹凸の激しい山間部では、風の流れは地形の複雑な影響を受けて、風速分布が複雑になる(荒木, 1979)。そのため、被害程度に影響する因子は、林況(樹種、林齢など)よりも地況因子(斜面形状、斜面方位、標高など)が強く作用する傾向がある(三浦ら, 1984; 諫本・高宮, 1992)。Table.5-1の結果では、樹種がもっとも偏相関係数が高くレンジも大きかった。これは、防風林が平坦な地形上に造成されているため、地況因子の影響を受けず、樹種そのものの耐風特性が被害に大きく作用した結果であると考えられる。アイテムスコアからは、郷土種のカシワのスコアがもっとも低く根返りにくいことが示され、シラカンバ、チョウセンゴヨウマツ・ストロブマツはスコアが高く、根返りしやすいことが示された。これまでの研究では、根の伸長ささと根返り抵抗モーメントの相関が指摘されており(Peltola et al.,2000; Coutts,1986; Ray and Nicol,1998)、深根性か否かについての樹種特性は根返りのしやすさを判断する指標の一つである。一般的には、カシワは深根性でシラカンバは浅根性に分類され(荻住, 1979)、樹種別スコアに関する本解析結果は、根系の樹種による展開形態の差異を反映したものだと思われる。ただし、チョウセンゴヨウマツやストロブマツは深根性樹種(荻住, 1979)であり、根系の一般的な分布形態のみで根返りに対する抵抗性を論じるには限界があるであろう。根系の分布形態については、実生と植栽とは根系展開が異なり、抵抗モーメントに影響する可能性もあるが、本論ではカシワ林を除いてすべて植栽によるものである。Table.5-1 およびTable.5-2の林齢のスコアは、21~30年がもっとも高く、41~50年がもっとも低くなった。カラマツ防風林を対象にした解析結果(Table.5-2)に関しては、全体的な傾向として林齢が高い林分で被害が抑制される傾向にある。林齢とともに立木サイズは大きくなるので、立木サイズを林齢に代わる指標と考えて、以下林齢のスコアについて考察を進める。立木サイズと風害については、これまで立木サイズと被害程度には直線的な関係が見出された報告もあるが(Dunn et al.,1983; Glitzenstein and Harcombe, 1988; Forster and Boose, 1992; 諫本・高宮, 1992)、本結果のように中間的なサイズで被害を受けやすい報告(Boe, 1965; Putz and Sharitz, 1991; Perterson and Pickett,1991)もあり、被害発生の要因(風速、土壌型、地形、林分の構造など)によって違いがある。物理的には風速と土壌条件(緊縛力)が一定ならば、根返りするか否かは対風面積に依存する風圧と風心高の積である根返りモーメントが、立木の根返り抵抗モーメントとどのようなバランス関係にあるかによるであろう。立木の引き倒し試験では、立木の最大根返り抵抗モーメントは、 h (樹高) $\times DBH^2$ あるいは DBH^3 に比例して増大することが知られている(Fredericksen et al,1993; Peltola et al.,2000)。一方、風圧による根返りモーメントは、風心高(荷重点の高さ)および対風面積(樹冠などの風を受ける部分の

面積)に比例する。本論文の被害の場合は、直径の肥大成長による抵抗モーメントの増加が、枯れ上がりや樹冠の発達による根返りモーメントの増加を上回ったため、21~30年生以降の林齢では、林齢が高いほど被害が抑制される結果となったと推測する。20年以下の林分よりも21~30年生の林分で立木のサイズが増しているにも関わらず、スコアが高くなる傾向については、間伐後の経過年数の影響があると推察される。防風林の延長方向のスコアは、Table.5-1, 2ともに北北東がもっとも高く、南東もしくは東南東が低い値を示した。全般的に台風中心へ向かう反時計回りの主風向である南東に対して、ほぼ直角になる延長方向(NNE, NE)で被害が促進され、主風向に平行になる延長方向(SE, EES)で被害が抑制される傾向となった。

風上樹種のスコアは、風上樹種がない(風上に区画が位置する)場合がもっとも高く、風上区画にカシワがある場合がもっとも低くなった(Table.5-1, 2)。これは、カシワなどの根返りに対する抵抗性の高い樹種を風上の森林区画(林小班)に配置すると、風下側の森林区画の被害を軽減する作用があることを意味しており、被害軽減には風上区画に優先的にカシワ林を造成することが有効であることを示唆している。

数量化I類による本数被害率の予測モデルは、(5-3)式および(5-4)式とも比較的高い重相関係数が得られた。林小班の構成条件(樹種、林齢、風上樹種など)から、おおよそその本数被害率がこのモデルから予測できると考えられる。数量化II類による被害発生の有無に関するモデル式では、(5-5)、(5-6)式ともに高い判別率の中率が得られた。特に(5-5)式によるモデル式は、的中率は87.7%に達し、被害を受けやすい林分の抽出や施業の優先度を決定する際に十分に寄与できる。

第6章 雪氷害(雨氷)の要因解析

6-1. はじめに

過冷却状態の雨滴が、樹木などの地物にあたって凍結する雨氷現象は、発生すると森林などに大きな被害をもたらす。松下ら(2004)によると、着氷性の雨は、中部地方から東北地方の内陸山間部と東北地方から北海道地方にかけて太平洋側の平野部で発生率が高く、12月~1月に毎年数回程度で発生する機会が多い。そのうち被害をもたらすような雨氷現象は、発生頻度としては10年に1度程度であると考えられ(牛山・宮崎, 1992)、被害発生地域も九州から北海道までの広い範囲にわたる全国的な現象である。2004年2月22日から23日は、低気圧が北海道の南海上を急速に発達しながら東北東にぬけて全道的に暴風雪となった。22日は湿雪や雨が降り、23日は各地で強風が吹き荒れた(Fig.6-1)。北海道日高町では雨氷によって、山林、防風林、屋敷林、街路樹などの立木に幹折れや幹曲がりなどの被害が発生した(Fig.6-2,3,4)。

同町では、過去にも同様の雨水による森林被害が発生しており（佐藤ら，1970），今回も被害面積は民有林だけで約163haに達した。樹種別では，カラマツが被害面積全体の84%，シラカンバが13%，その他（グイマツ，ミズナラなど）が3%であった。このようにたびたび発生する雨水害に対して，被害を軽減するための対処方法の確立が望まれているが，雨水現象に関しては研究調査そのものが少なく（牛山，1991），被害の面的な特徴や気象状況の特徴については不明な点が多い。そこで本章では，雨水などの気象害（冠雪害を含む）を軽減する防風林の造成管理技術の向上を図るため，被害発生当時の気象状況を明らかにし，被害程度と林況および地況との関係について要因解析を行った。

6-2. 方法

カラマツ林を対象に，144箇小班において20m×20mの方形区を設定し，毎木調査を行なった。樹高は，迅速に被害実態を把握する必要があったため，直径階毎に1～2本ずつ測定した。被害地域は標高約200～400m，林齢は9～61年生，立木密度は250～2525本/haである。要因解析は数量化I類を用い，目的変数として被害率（本数被害率）を説明変数（アイテム）として林況（林齢，平均樹高，平均胸高直径，立木密度，収量比数）とGISから得た地況（標高，斜面方位，斜面勾配）を用いた。解析に用いたアイテムとそのカテゴリー区分については，詳細をTable.6-1に示す。

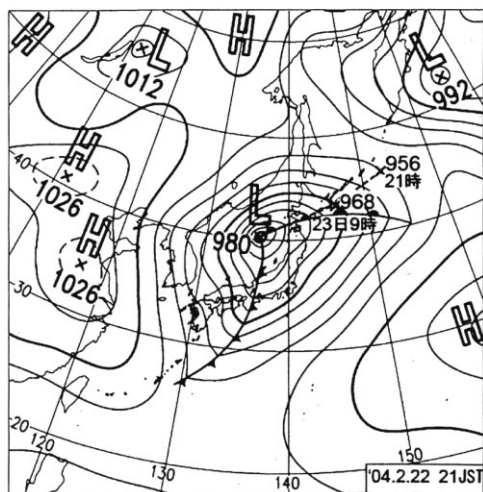


Fig.6-1. Weather map at 21:00, February 22.



Fig.6-2. Street trees damaged by glaze in Hidaka, Hokkaido.



Fig.6-3. Japanese larch (*Larix leptolepis*) forest. damaged



Fig.6-4. Japanese larch (*Larix leptolepis*) forest. damaged.

Table.6-1. Quantification analysis Quant-1 (144subcompartments).

Item	Category	No. of subcompartment	Score	Range	Partial cor.coe.
stand age(yr.)	≤35	66	-0.399	3.128	0.057
	35<~≤40	37	0.029		
	40<~≤45	29	1.531		
	45<	12	-1.597		
average tree height (m)	≤17.5	11	-4.125	4.965	0.094
	17.5<~≤20	37	-0.953		
	<20	96	0.840		
average diameter at breast height (cm)	≤17.5	14	13.393	26.134	0.396**
	17.5<~≤20	41	2.810		
	20<~≤22.5	40	-1.345		
	22.5<~≤25	26	1.697		
	25<	23	-12.741		
tree density (tree/ha)	≤500	15	1.897	5.194	0.132
	500<~≤750	34	-1.258		
	750<~≤1000	36	-0.512		
	1000<~≤1250	35	3.278		
	1250<	24	-1.916		
yield index	≤0.6	18	2.833	6.945	0.182*
	0.6<~≤0.7	34	3.301		
	0.7<~≤0.8	38	0.883		
	0.8<	54	-3.644		
altitude (m)	≤250	21	-16.056	23.536	0.409**
	250<~≤275	24	-1.356		
	275<~≤300	44	3.188		
	300<~≤325	24	7.481		
	325<	31	1.610		
aspect	N	9	10.442	21.859	0.335**
	NE	8	-5.803		
	E	7	-11.416		
	SE	19	1.549		
	S	15	0.558		
	SW	28	-5.460		
	W	13	-2.636		
	NW	30	6.206		
	flat	15	-0.297		
slope	≤10°	91	-1.913	5.197	0.152
	10°<	53	3.284		
Multiple cor coe.					0.615

** $P<0.01$,* $P<0.05$,ns,Not significant

a)presence of windward shelterbelt which is within 150m

6-3. 結果と考察

6-3-1. 気象概況

以下では、被害発生当時の気象概況について、日高町のアメダスデータ（北緯42度52.6分，東経142度26.5分，標高280m）と道内3地点の高層気象データ（札幌管区気象台観測）に基づいて検討を行なった。アメダスデータによる2004年2月22日から23日にかけての気温，降水量と風速の推移をFig.6-5に示す。2月22日の気温は，午前0時から午前11時までは0~-0.8℃の間で推移し，12時から24時にかけては-1.0~-1.7℃の間で推移した。翌23日は，午前1時から6時までが-0.4~-1℃の間で推移し，午前7時から気温が徐々に低下し始め，24時には-13.5℃を記録した。降水量については，22日の午前10時から23日の午前10時まで，1時間あたり1~4mmの降水量が連続的であった（Fig.6-5）。22日の10時から23日の13時までの総降水量は65mmである。雨水時の降水量

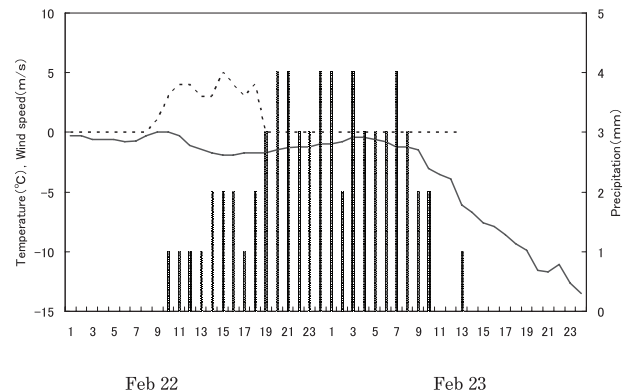
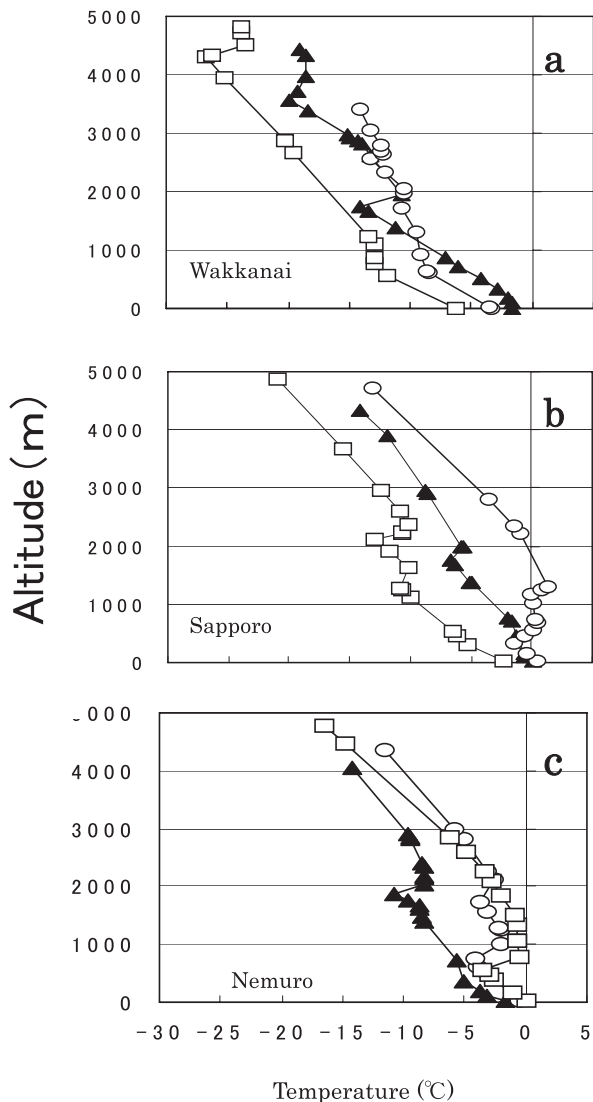


Fig.6-5. Hourly change of precipitation, air temperature and wind speed at Hidaka (from the 22nd to 23rd of February 2004).



▲,9:00 Feb 22 ; ○,21:00 Feb 22 ; □,9:00 Feb 23
 Fig.6-6a,b,c. Vertical distribution of air temperature.

に関しては、複数の日高町民の話から、少なくとも22日18時から19時までは雨氷は発生していないことが判明しているため、この時刻以降の気温、降水量および風速に関するアメダスデータから類推する。風速計（風車型風向風速計）は着氷によって、しばしば作動不良になることがあるが、今回のケースでも作動不良になったとすれば、22日の19時以降に風速0 m/sの状態が続くため、この時刻以降に雨氷が発生していたと考えられる。また、雨氷現象が終わった時刻に関しては、着氷した風速計は、気温0℃以下では融解せず正常な作動状態に戻ることはないと考えられるので、着氷性の雨から雪に変わった正確な時刻は風速に関するデータからは類推できない。仮に22日の19時以降から23日の13時までは、気温が0℃以下で降水量が記録されているので、この間を雨氷の発生時間とすれば、総降水量は49mmに達する。

風については、22日の午前9時から18時までの間に平均風速1～5 m/sの間で推移したが、すでに述べたように、22日の19時以降はほぼアメダスデータでは無風状態であった。23日の14時から24日の24時まで欠損データとなっている。参考のため、日高町の西隣に位置する穂別町の気象データ（北緯42度45.7分、東経142度8.6分、標高56m）を調べてみると、同町では22日の19時から23日の7時までは無風または平均風速1～2 m/s程度の風速を記録しており、23日の8時から17時までは北北東～北北西方向に5～9 m/sの比較的強い風が吹いていた。日高町の南に位置する新冠町親和（北緯42度32.6分、東経142度20分、標高60m）では、22日19時から23日の8時にかけては無風もしくは1～2 m/s程度の弱風で、23日の11時から17時にかけては北～北西方向に4～7 m/sの風速を記録した。これらの事実と各観測地点の経度とを参考にすると、日高町では23日の11時以降から北北東～北北西の範囲の方位で比較的強い風が吹いていたと推測される。

札幌市における2月22日9時から23日の9時までの高層気象データによれば、22日の9時および23日の9時の観測では、気温は高度が高くなると低下して常に0℃以下であった（Fig.6-6b）。しかし、22日の21時の観測では、気温分布は高度2200m以上では0℃以下で、高度1300～570m付近までは0℃以上となり、そしてさらに高度が下がって高度500～160mまでは0℃以下となる逆転層となった。このような状況下においては、上空の雪片は高度が下がるにしたがい融けて高度570m以下で冷やされて過冷却雨となる。このような過程は、melting ice process（気温0℃以上の上空暖気層を落下する雪片が融解して雨滴となり、地表付近の寒気層で冷却されて過冷却の雨滴になる過程）と呼ばれ、ある標高帯の森林に雨氷害に限られる（松岡ら、1990；大原ら、1990；梶ら、1991；牛山・宮崎、1992）要因となっていると考えられる。一方、稚内では22日9時から23日までに地表付近での気温の逆転現象はなく常に気温は0℃以下を示しており、melting ice processの発生はなかったと推測される（Fig.6-6a）。また、根室では22日21時と23日9時の観測では、地表付近で温度の逆転層があるが（Fig.6-6c）、0℃以上にはならずmelting ice processの発生はおこりにくかったと考えられる。尾関(2004)によれば、雨氷は空知地方から日高地方にかけての広い範囲で発生しており、日高町において雨氷が成長したことが報告されている。日高町は、札幌市に地理的に近く（東に約90km）、雨氷害が著しいことから、被害発生当時の気温分布はFig.6-6bに近似していたと考えられる。

6-3-2. 被害概況

雨水害が発生した林分の樹種別内訳は、カラマツが被害面積全体の84%、シラカンバが13%、その他（グイマツ、ミズナラなど）が3%である。カラマツ林の全調査区における被害率別の度数分布によると、被害率51~60%の階級に最頻値があり、壊滅に近い林分（被害率81~100%）は、全体の11.8%を占めた。被害形態は、幹折れと幹曲りがほとんどで、稀に幹折れあるいは幹曲りを伴って根返り木もあった。カラマツ林における全調査立木の幹曲りと幹折れの割合は、それぞれ47.4%、52.6%で、若干幹折れ被害が多くなった。また、今回調査した約5500本の直径階別被害率を調査すると、直径階6~12cmでは被害率は60~100%の高い水準にあり、直径階12~26cmでは50%前後を推移し、直径階32cm以上を境に急激に被害率が低い水準に低下する傾向があった（Fig.6-7）。

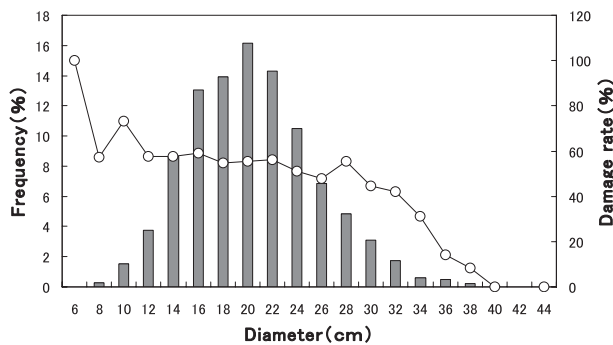


Fig.6-7. Relationship frequency and diameter at breast height.

6-3-3. 解析結果

カラマツ林（144箇小班）において解析を行った結果、重回帰係数は0.615で比較的高い値を示した。偏相関係数は、標高が0.409と最も高く、次いで平均胸高直径、斜面方位、収量比数、斜面勾配、立木密度、平均樹高、林齢の順であった。レンジは、大きい順に平均胸高直径、標高、斜面方位、収量比数、斜面勾配、立木密度、平均樹高、林齢となった（Table.6-1）。以下では、偏相関係数が0.3以上で1%水準の有意なアイテムについて、そのスコアの特徴を述べる。標高は300~325mの階級でスコアがもっとも高く、250m以下ではスコアがもっとも低くなった。これは気象概況で述べたように、鉛直方向の温度分布の影響を反映したためと考えられる。おそらくスコアの高い標高300~325m付近を中心に寒気層（0℃以下）があって、雨水が発達しやすい条件にあり、標高250m以下では暖気層（0℃以上）になっていたと推察される。斜面方位は、北~北西の斜面方位のスコアが高く被害促進に作用する結果となった。日高町におけるアメダスの風向風速計に関するデータは、雨水発生後に欠損となっているが、近隣

の観測点のデータから推測すると、日高町でも23日の朝から夕方までの間に北北東~北北西の比較的強い風が吹いていたと推測され、北~北西のスコアが高いのは、着氷後の風の影響を受けたためと考えられる。平均胸高直径は、17.5cm以下でスコアがもっとも高く被害促進に作用し、直径が25cmよりも大きくなるとスコアが低くなって被害抑制に作用する傾向が示された。このようにある直径を境に被害が抑制される傾向は、直径階別被害率（Fig.6-7）で示したように、直径階32cmを境に急激に被害率が低下することと定性的に一致する。全体的には直径の増大とともに被害は抑制される傾向にあった。中谷ら（1991）および嘉戸（2001）は、座屈モデルを用いた冠雪害の力学的研究において、樹高が同じならば直径の大きな立木ほど耐力も大きくなることを示した。冠雪荷重は主に枝と葉に加わり、今回の雨水害では、幹と枝に荷重が加わる点が異なるが、座屈モデルによる解釈で直径と幹の耐力との基本的な関係が説明できると考えられる。

第7章 雪氷害と森林構造との関係

7-1. はじめに

森林の気象害を軽減するには、適切な保育管理を実施して、被害に対して強い森林を育てておく必要がある。そのためには、どのような森林が被害軽減に対して有効な構造なのかを検討しなければならない。風・雪氷害に関しては、主に形状比（樹高/胸高直径）が被害に対する抵抗性を示す指標とされ、その値が小さい方が抵抗性は高いと考えられてきた。日本におけるスギ林の冠雪害に関する研究では、被害が発生するか否かの目安となる限界形状比は70とされてきたが、その後の研究で林齢あるいは平均樹高などによって冠雪害の限界形状比が異なるなど、一定の値を示す指標ではないことが報告されている（佐藤, 1979; 山口ら, 1981; Cremer et al., 1982）。また、限界形状比は、幹の強さなど樹種の特性によって異なるため、樹種毎に検討を要する。

本章では、北海道の主要造林樹種の一つであるカラマツ林について、雪氷害に対する林分平均限界形状比を検討した。

7-2. 方法

第6章の調査結果を基に、軽害林（本数被害率30%以下）17箇所、激害林（本数被害率70%以上）31箇所の毎木調査データを用いた。

7-3. 結果と考察

7-3-1. 森林構造と被害の関係

雪氷害に関する軽害林および激害林の本数密度平均は、それぞれ757.4 (340.8) 本/ha, 1011.3 (243.9) 本/ha, 材積は351.6 (86.8) m³/ha, 293.6 (83.9) m³/haであった。無被害

林と被害林の間において、これらの平均値の差を検定したところ、本数密度（1%水準）と材積平均（5%水準）はともに有意であった。次に材積と本数密度を変数として判別分析を行い、判別結果（相関比0.34, 誤判別率23.4%, 的中率75%）を得た（Fig.7-1）。

$$\text{判別式 } V = 0.375D - 11.19 \quad \dots\dots (7-1)$$

V: 材積 (m³/ha), D: 本数密度 (本/ha)

これらの結果は、全体として軽害林は、激害林の平均本数密度よりも低く、材積平均は、激害林よりも高いか同等レベルにあったことを示しており、同材積ならば、軽害林を構成する立木の平均直径が激害林よりも大きかったことを示唆している。気象害に対する抵抗性を増大させるには、直径の肥大成長を促進させることが重要であると考えられる。

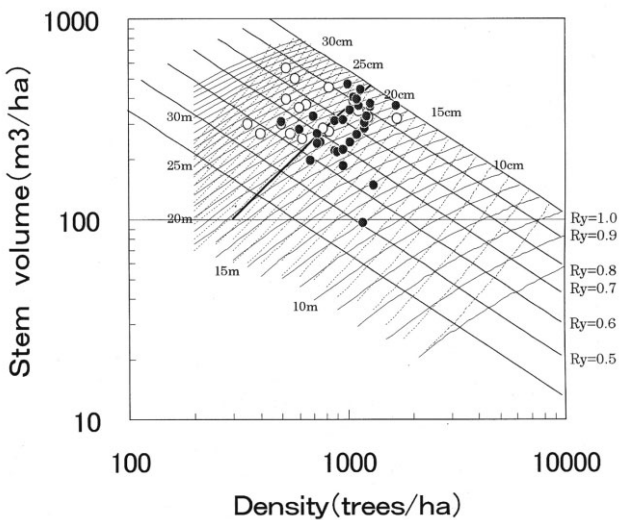


Fig.7-1. Distinction between severely damaged stand and lightly damaged stand on stand density control diagram.

- , Borderline which discriminates severely damaged stands from lightly damaged stands
- - -, Equivalent height curve ; - · - · -, Equivalent diameter curve ; Ry, Relative yield
- , Stand ≤ percentage of damaged trees 30%
- , Stand ≥ percentage of damaged trees 70%

7-3-2. 限界形状比曲線の検討

判別分析によって得られた判別式（7-1）式は、被害の危険性が高い林分と低い林分の境界を示しており、Fig.7-1の実線の左側は被害を受けにくい林分、右側が被害を受けやすい林分である。ただし、境界線の左側には収量比数が高い領域も含まれており、この領域を被害を受けにくい林分側も含んでよいかについては検討が必要である。一般に、収量比数の高い林分は細長い立木が多く、平均形状比が高い林分であり、被害を受けやすい傾向にある（Cremer et al.,1983;嘉戸, 1992）。密度管理図上で境界線を求める際に必要なことは、被害を受けにくい林分の範囲をできる限り限定して、林分管理の指標にすることである。Fig.7-1に示すように、収量比数

0.9以上の林分では、軽害林が少なくなっている。そこで、収量比数0.9以上も危険領域と考え、(7-1)式と収量比数0.9の線によって示される線を境界線とする（Fig.7-1）。この線上の平均胸高直径（D）と上層木の平均樹高（H_t）を読み取り、樹高階ごとの形状比（H_m/D）を、ロジスティック曲線によって近似すると、雪氷害の限界形状比曲線は（7-2）式のように求まる。

$$H_m / D = \frac{95.99}{1 + 19.252 * e^{-0.2644 H_m}} \quad r = 0.96 \quad \dots\dots (7-2)$$

ここで、H_m（平均樹高）は、(7-3)式を用いて算出した（石橋, 2006）。

$$H_m = 0.60971H_t^{1.11805} \quad \dots\dots (7-3)$$

この曲線の上側は危険領域を、下側は安全領域をそれぞれ示す（Fig.7-2）。この図に風害の解析に用いた被害林、無被害林、雪氷害の軽害林と激害林のデータをプロットすると、限界形状比曲線による判別の中率は、林分全体で75%、激害林で94%、軽害林で41%となった。（7-2）式に示したように、樹高の成長に対して形状比は大きくなって頭打ちになる傾向が示されており、立木のサイズによって、気象害の抵抗性が異なることが示唆された。

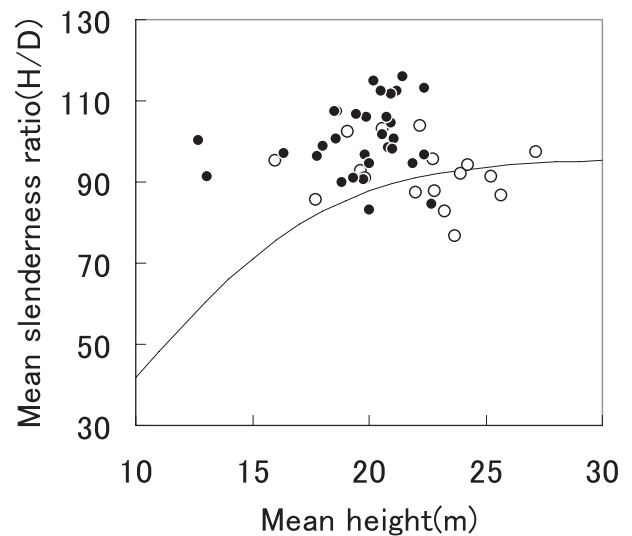


Fig.7-2. Critical mean slenderness ratio.
○, Stand ≤ percentage of damaged trees 30%
●, Stand ≥ percentage of damaged trees 70%

第8章 樹形と耐風性に関する力学的検討

8-1. はじめに

立木に被害が発生する場合、その被害形態は主に幹の破壊によるもの（幹折れ、幹曲り）と根系が浮き上がって立木が倒伏する根返りの二つに分類できる。立木の荷重中心に作用する外部荷重（風荷重、雪氷荷重）は、立木の倒伏を促す回転モーメントTを生じさせるが、この値が根系による根返り抵抗モーメントRより小さければ、立木は倒伏することはない。一方、外部荷重によって幹に生じた曲げ応力 σ_z が、MOR（曲げ強さ：modulus of rupture）以下ならば幹は破壊されない。つまり、倒伏に関してはTとR、幹の破壊（幹曲、幹折れを含み、以後幹折れと呼ぶ）に関しては、 σ_z とMORの関係によって、立木の被害形態は決定される。そこで本章では、主に台風時の暴風による風荷重に対して、これらの物理量を用いてシミュレーションをおこない、力学的な見地から樹形と被害を発生させる限界の風速および被害形態との関係、樹幹に発生する応力の分布について考察した。更に実際の防風林の被害とモデルとの対応を検証するため、2002年台風21号による被害データとの比較をおこなった。

8-2. 力学モデル

8-2-1. 樹幹の変形と応力

樹幹の変形と応力に関する理論式は、澤田（1983）によるモデルを用いた。立木の幹には外部荷重として、風による水平荷重Wと雪氷（冠雪、着氷など）や樹冠重による垂直荷重

Pを想定し、更に外部荷重は、幹軸よりeだけ偏心した重心部位Gに作用するものとする（Fig.8-1）。この時、樹高をH、枝下高をHcとすれば、荷重中心の高さLは、（8-1）式で表される。

$$L = H_c + \frac{H - H_c}{3} \quad \dots\dots\dots (8-1)$$

次に細り係数 τ 、細り比aを以下のように定義する。

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{D - d_m}{m - 1.3} = \frac{1}{2} \frac{d_0 - D}{1.3} = \frac{1}{2} \frac{d_0 - d_L}{L} = \frac{1}{2} \psi \quad \dots (8-2)$$

$$\alpha = \frac{d_L}{d_0} \quad \dots\dots\dots (8-3)$$

ここで ψ はテーパ率である。この細り係数を用いれば、任意の地上高zにおける幹の直径dzは、

$$dz = d_0 - 2z\tau = (1 - \beta z_0)d_0 \quad (\beta = 1 - a, z = z_0L) \quad \dots\dots\dots (8-4)$$

となる。更にZ = 1 - βz_0 とすれば、dzは（8-5）式のようになり、

$$dz = Z d_0 \quad \dots\dots\dots (8-5)$$

Zでの断面積Az、断面係数Bz、断面2次モーメントIzは、以下のように表される。

$$A_z = Z^2 A_0 \quad (A_0 = \pi d_0^2 / 4) \quad \dots\dots\dots (8-6)$$

$$B_z = Z^3 B_0 \quad (B_0 = \pi d_0^3 / 32) \quad \dots\dots\dots (8-7)$$

$$I_z = Z^4 I_0 \quad (I_0 = \pi d_0^4 / 64) \quad \dots\dots\dots (8-8)$$

曲げモーメントMzは、

$$M_z = -(1 - z_0)LW - (\delta + e - y)P \quad \dots\dots\dots (8-9)$$

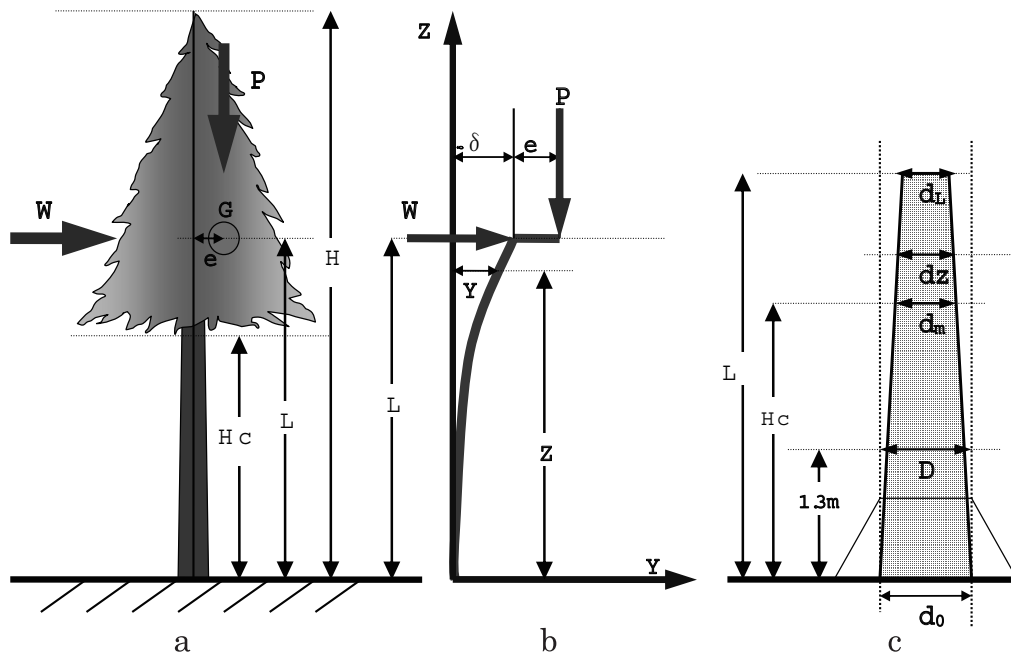


Fig.8-1. Schematic diagram of tree model.(a)Outside forces acting on a tree.(b)Deformation of the trunk.(c)Assumption for the stem form

曲げによる基礎微分方程式は、

$$EI_Z \frac{d^2 y}{dZ^2} = -M_Z \quad \dots\dots (8-10)$$

よって、(8-8)、(8-9) および (8-10) 式から、(8-11) 式が得られる。ここでEは、ヤング係数を示す。

$$Z^4 \frac{d^2 y}{dZ^2} + \phi^2 y = \phi^2 \left(\frac{LW}{\beta P} (Z-\alpha) + \delta + e \right) \quad \dots\dots (8-11)$$

$$\phi = \frac{L}{\beta} \sqrt{\frac{P}{EI_0}} \quad \dots\dots (8-12)$$

(8-11) 式の一般解は、

$$y = Z \left(A \cos \frac{\phi}{Z} + B \sin \frac{\phi}{Z} \right) + \lambda (Z-\alpha) + \delta + e \quad \dots\dots (8-13)$$

ここで、 $\lambda = LW / \beta P$ 、AおよびBは、積分定数である。

端末条件、 $z=0, Z=1, y=0$ を (8-13) 式に代入すると、

$$A \cos \phi + B \sin \phi = -(\delta + e + \beta \lambda) \quad \dots\dots (8-14)$$

もう一つの端末条件、 $z=0, Z=1, dy/dZ=0$ より、

$$A(\cos \phi + \phi \cos \phi) + B(\sin \phi + \phi \cos \phi) = -\lambda \quad \dots\dots (8-15)$$

(8-13)、(8-14)、(8-15) 式より、

$$y = \frac{1}{\phi} Z \left[(\delta + e + \beta \lambda) \left(\sin \frac{Z-1}{Z} \phi - \phi \cos \frac{Z-1}{Z} \phi \right) - \lambda \sin \frac{Z-1}{Z} \phi \right] + \lambda (Z-\alpha) + \delta + e \quad \dots\dots (8-16)$$

(8-16) 式に $Z = a$ を代入して、 $\gamma = \beta \phi / a$ を用いて荷重点でのひずみ δ を求めると、

$$\delta = \frac{(\gamma - \beta \sin \gamma - \alpha \gamma \cos \gamma) e + \alpha \beta (\sin \gamma - \gamma \cos \gamma) \lambda}{\beta \sin \gamma + \alpha \gamma \cos \gamma} \quad \dots\dots (8-17)$$

曲げ変形過程においては樹幹断面に応力 σ_z が発生し、その応力には圧縮応力 σ_{zC} と引張応力 σ_{zT} の2つが存在する。

$$\sigma_{zC} = \frac{P}{A_z} + \frac{M_z}{B_z} \quad \dots\dots (8-18)$$

$$\sigma_{zT} = \frac{P}{A_z} - \frac{M_z}{B_z} \quad \dots\dots (8-19)$$

ヤング係数E(MOE: modulus of elasticity)と曲げ強さ(MOR: modulus of rupture)は、生立木の非破壊試験によって得られた値を参考に、 $E = 10\text{GPa}$ 、 $MOR = 50\text{MPa}$ を用いた(小泉, 1987; 小泉, 1988)。

8-2-2. 外部荷重WおよびP

外力である風による水平荷重W(N)は、一般に抵抗係数Cdを用いると、

$$W = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_d \quad \dots\dots (8-20)$$

ρ は空気密度(1.225kg/m³)、Aはクローネの投影面積(対風面積)、Uは風速を表す。

樹木の抵抗係数Cdは、0.29(Mayhead, 1973)とした。クローネの投影面積Aは、三角形と仮定し、樹冠幅(Wc)および樹冠長(H-Hc)を用いて次式に示した。

$$A = \frac{1}{2} W_c (H - H_c) \quad \dots\dots (8-21)$$

幹に加わる外力である垂直荷重P(N)は、 $P = P_i + P_c = (m_i + m_c) g$ で表すことができる(g :重力加速度(m/s²)、 m_i :雪氷重(kg)、 m_c :樹冠重(kg))。ここでは台風時の暴風を想定しているので、Pは自身の樹冠の重さのみである。樹冠の重さについては、森林の生産力に関する研究第2報(四大

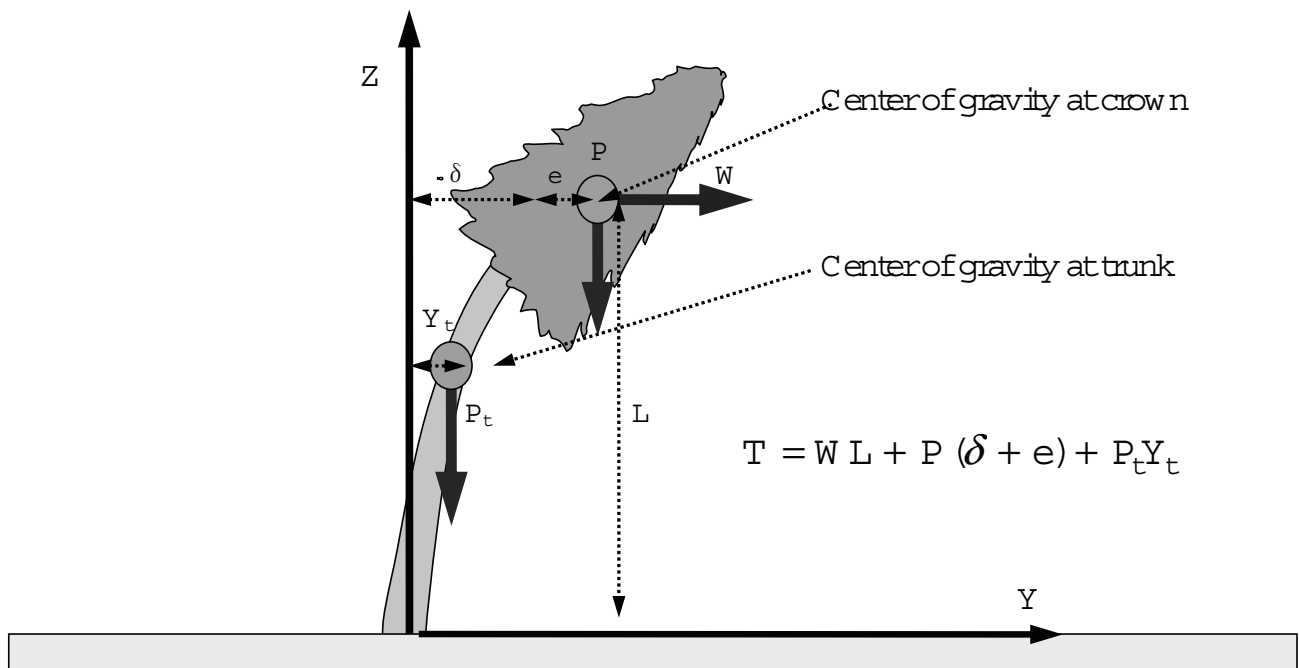


Fig.8-2. Outside forces acting on a tree and turning moment.

学および信大合同調査班, 1964) のデータを用いて解析すると、枝下直径 d_m (cm) と樹冠重 mc (g) との関係は、(8-22) 式のように示される。

$$mc = 242.19d_m^{1.98} \quad r = 0.87 \quad \dots\dots (8-22)$$

本章では、この関係式を用いて樹冠重を推定する。

8-2-3. 回転モーメントT

根元に加わる回転モーメントTは、WとPによるモーメントと幹重 ms (kg) による幹荷重Ptのモーメントの合計とする (Fig.8-2)。Ptは、材積V (DBH² × H, m³) との関係式より推定した (森林の生産力に関する研究第2報 (四大学および信大合同調査班, 1964))。

$$Pt = ms \cdot g = (304.24V) \cdot g \quad \dots\dots (8-23)$$

幹を三角錐と仮定すると、Z=H/3が幹の重心となり、(8-16) 式よりYtが求まる。

$$T = WL + P(\delta + e) + PtY_t \quad \dots\dots (8-24)$$

8-2-4. 根系による根返り抵抗モーメントR

抵抗モーメントRは、野外における引き倒し試験によって求めた (Fig.8-3)。試験地は、第5章の台風による風害の要因解析と予測で対象とした地域の土壌条件に近似するため、同様に火山灰土に覆われた十勝支庁幕別町のカラマツ林で実施した。立木の直径は、約9~18cm、67本の立木について引き倒し試験を行い、根返りを起こした30本について、最大モーメント (抵抗モーメントR (kNm) と胸高直径D (cm) の関係を求めた (Fig.8-4)。

$$R = 0.0117D^{2.58} \quad r = 0.73 \quad \dots\dots (8-25)$$

8-2-5. シミュレーションの内容

シミュレーションは、立木の樹形に関するもの (シミュレーションS1) と、実際の被害データとモデルの検証に関するもの (シミュレーションS2) と2つのパターンで実施した。S1は、樹形による耐風性の違いを明らかにするため、単に単木レベルで立木間の相互作用 (風に対する互いの遮蔽効果など) がない場合を想定している。立木の樹形は、主にサイズ (樹高) と形状比 (樹高/胸高直径) に着目した。計算は、樹高を4区分 (5, 10, 20, 30m)、樹高階毎に形状比を6区分 (60, 70, 80, 90, 100) とし、合計20パターンについておこなった。全計算パターンにおいて、テーパ率 ψ は一定 (3mm/m)、偏心 e は0とした。立木は、閉鎖した環境下 (相対幹距比Srが0.22以下程度) にある樹形を想定しており、樹冠幅は、この時の平均立木間距離を用いた。平均立木間距離は、本数密度Nと平均直径Dとの関係式 ($N=95240D^{-1.5645}$) より求めることができる (石橋, 2006)。枝下高については、樹高と本数密度から平均的な値を求めた (Kanazawa et al., 1985)。S2の場合は、実際の防風林の被害地で調査した林分データを基にシミュレーションをおこなった。

8-2-6. 風速分布

S1の場合の風速分布は、(8-26) 式の対数法則を仮定した。

$$U_z = \frac{U^*}{\kappa} \ln \left(\frac{Z-d}{Z_0} \right) \quad \dots\dots (8-26)$$

ここで、Zは地表面からの高さ、U* (m/s) は摩擦速度、 κ はカルマン定数 (0.4)、Z₀ (m/s) は粗度、dは地面修正量である。

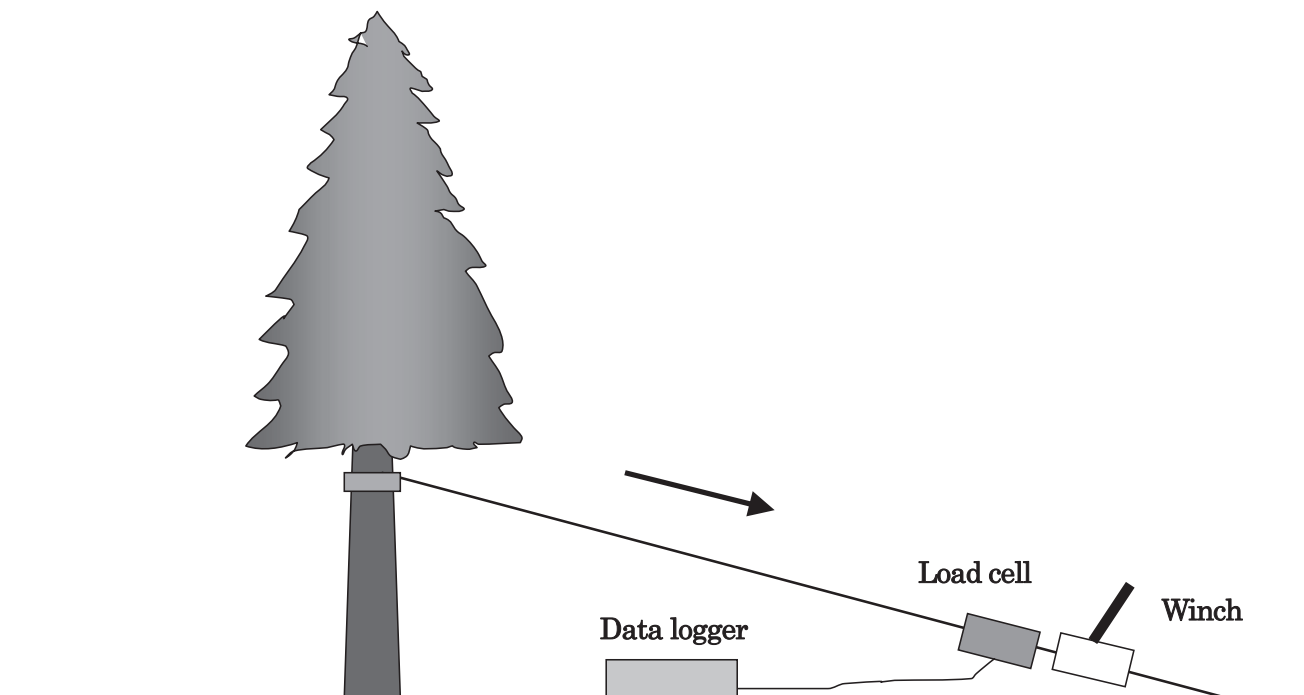


Fig.8-3. Principle of tree pulling.

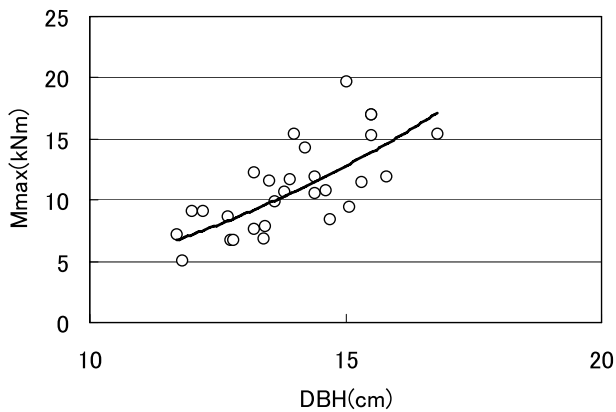


Fig.8-4. Relationship between the maximum resistive moment at the stem base and diameter at breast height.

シミュレーションでは、 $Z_0 = 0.01$ (草などを想定)、 $d = 0$ とした。

S2の場合、防風林内では風速分布は一様ではなく、風下林内ほど風速は低下し、その水平風速分布は、風上林縁から指数関数的に減少する(飯塚, 1952)。そこで、風上林縁からの距離を Y として、以下のように表現した。

$$U_z = \frac{U^*}{\kappa} \ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) \cdot \exp(-\varepsilon Y) \quad \dots\dots\dots (8-27)$$

ここで、 ε は風速の低減率で、枝葉面積などに依存して変化する。

8-2-7. 風害モデルの流れ

まず、胸高直径 D 、任意の枝下高の直径 d_m 、樹高 H 、枝下高 H_c 、風速 U 、雪氷荷重がある場合にはその荷重 P_i 、根系の抵抗モーメント R 、 MOR 、 MOE 、テーパー率 ψ を入力し、樹冠の荷重 P_c と垂直荷重 P ($P = P_i + P_c$)、水平荷重(風圧) W を計算した後、樹幹変位 Y 、曲げ応力(ここでは圧縮応力 σ_{zc} を用いる。)を求める。次に回転モーメント T および R を求め、両者の比較を行い、同時に MOR と σ_{zc} の比較を行う。被害形態としては、 $T > R$ かつ $\sigma_{zc} < MOR$ の条件下では根返りとなり、 $R > T$ かつ $\sigma_{zc} > MOR$ の条件下では、幹折れと判断する。この時得られた風速が限界風速 U_c となる (Fig.8-5)。

8-3. 調査地

調査は、第5章の中札内村のカラマツ防風保安林の2箇所で行った。両調査区とも林帯の延長方向(NNE-SSW)は、台風時の卓越風(南東から南南東)に対してほぼ直角に配置されている。調査区A(林帯幅75m)は、風上側に37年生の区画(A-1)と風下側に35年生の区画(A-2)に分かれている。調査区B(林帯幅70m)は、風上側に26年生の区画(B-1)が、風下側に43年生の区画(B-2)がある (Fig.8-6)。調査範囲は、調査区Aが50m×75m、調査区Bが30m×70mである。本

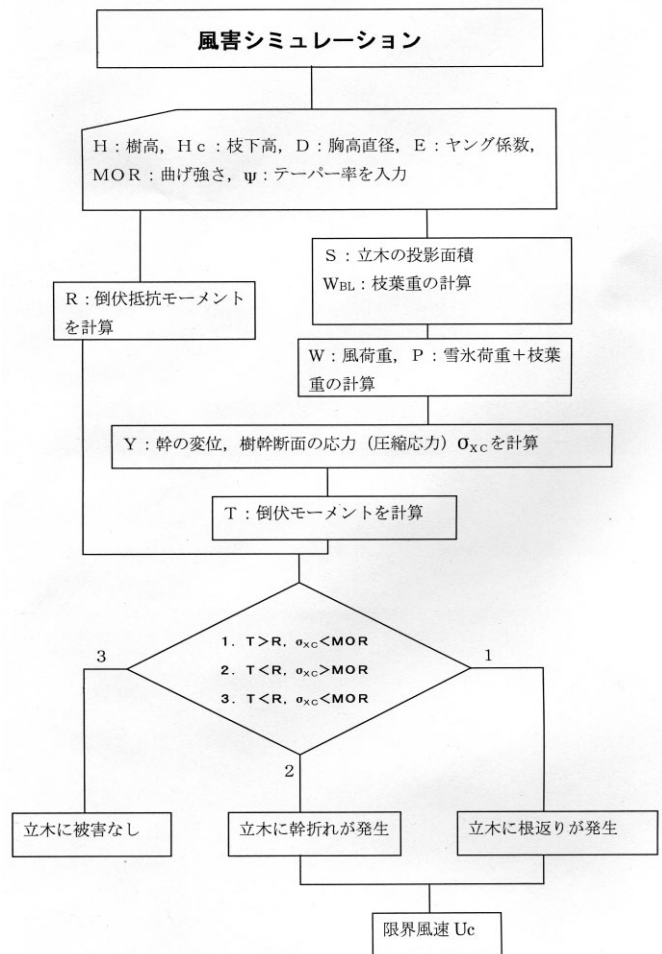


Fig.8-5. Outline of the mechanistic wind and snow damage model.

数密度、平均胸高直径および平均樹高をTable.8-1に示す。被害形態は、根返りがほとんどで、幹曲りや幹折れ木も数本みられたが、いずれも根が浮き上がった状態であったため、根返りとした。

8-4. シミュレーションS1の結果と考察

8-4-1. 限界風速と樹形の関係

今回のシミュレーションの結果では、20パターン中のうち、すべての場合において根返りが発生した。限界風速 U_c は、形状比が小さくなると高くなる傾向があり、同一な形状比においては樹高が低いほど限界風速は高くなる傾向が示された (Fig.8-7)。被害調査の結果では、樹高や直径のサイズと風害の危険性には関係があることがすでに知られてはいるが、サイズが大きくなるほど被害を受けやすくなる場合や (Glitzenstein and Harcombe, 1988; 諫本・高宮, 1992)、中間的なサイズで被害を受けやすい場合 (Boe, 1965; Putz and Sharitz, 1991; Peterson and Pickett, 1991) などがあり、統一的な見解に至ってはいない。このサイズによる風害危険性

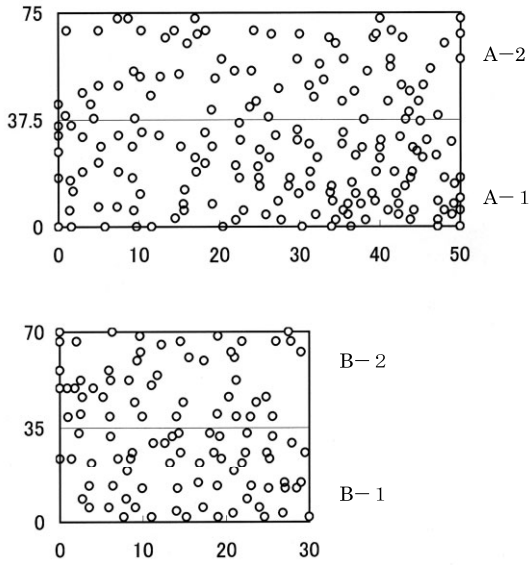


Fig.8-6. Maps of location of trees.

Table.8-1. General descriptions of the observation stands.

Site	Stem density (trees/ha)	Stand age (yr)	Mean breast height diameter (cm)	Mean height (m)	Mean slenderness ratio (H/D)
A-1	670	37	25.4	22.8	89.5
A-2	325	35	30.5	23.5	77.2
B-1	560	26	24.1	19.6	81.4
B-2	450	43	29.0	22.2	76.3

解の不一致は、立木サイズのみに着目し、形状比を考慮していないことが一因にあると考えられる。シミュレーション結果が示すように、形状比が異なる場合を比べれば、風害の危険性は、立木サイズ（樹高）のみで決定されるものではないことは明らかである。

8-4-2. 樹幹に発生する応力の分布

ここでは、形状比がもっとも大きい場合（形状比100）の幹の撓みと圧縮応力分布を、それぞれFig.8-8, 9に示す。圧縮応力は、樹高が高くなると根元付近から幹の上部にかけて徐々に増加して、最大値に到達する傾向が示された。圧縮応力の最大値は0~0.4Lの位置にあり、樹高が高いほど高い位置に最大値があった。最大値は、いずれも樹冠よりも低い位置にある。

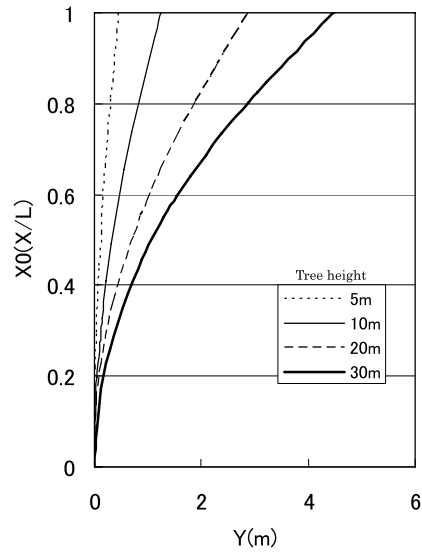


Fig.8-8. Deformation of trunk.

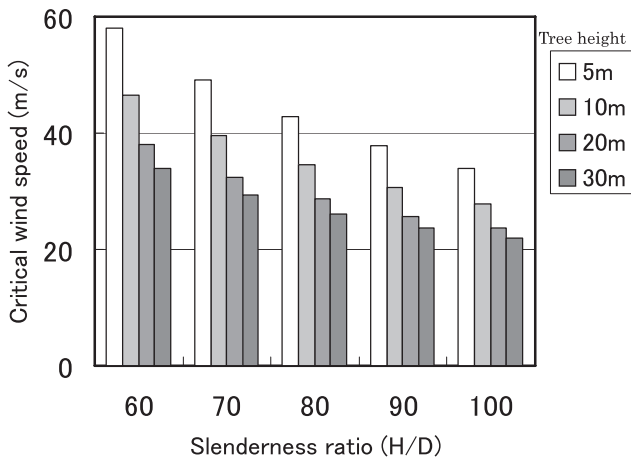


Fig.8-7. Relationship between critical wind speed and slenderness ratio.

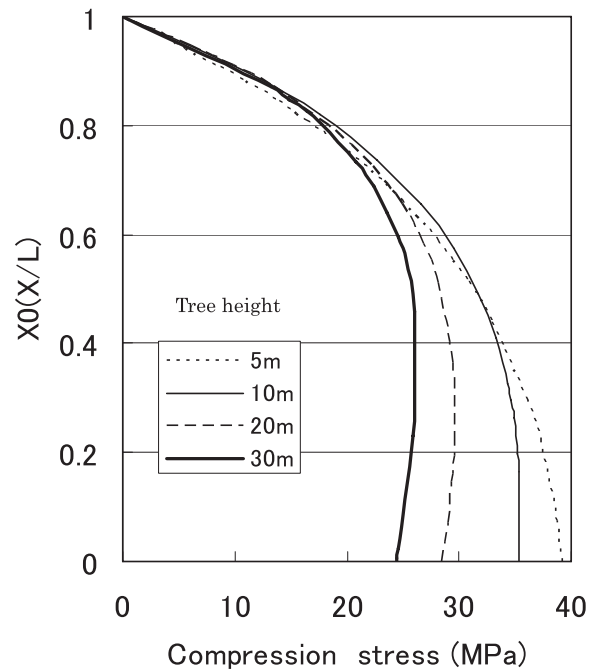


Fig.8-9. Computed compression stress in a trunk caused by wind and crown load.

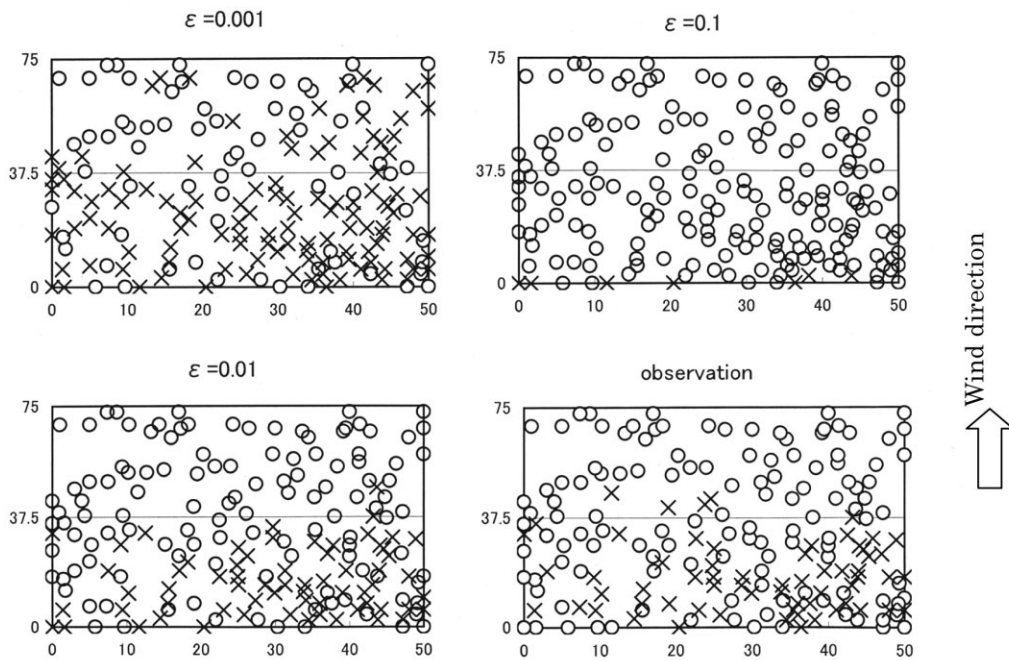


Fig.8-10. Comparison of the computed spatial distribution with the observed spatial distribution for damaged trees in site A .
Wind speed at Z=11m is 32.3m/s. ○,undamaged tree; ×,damaged tree

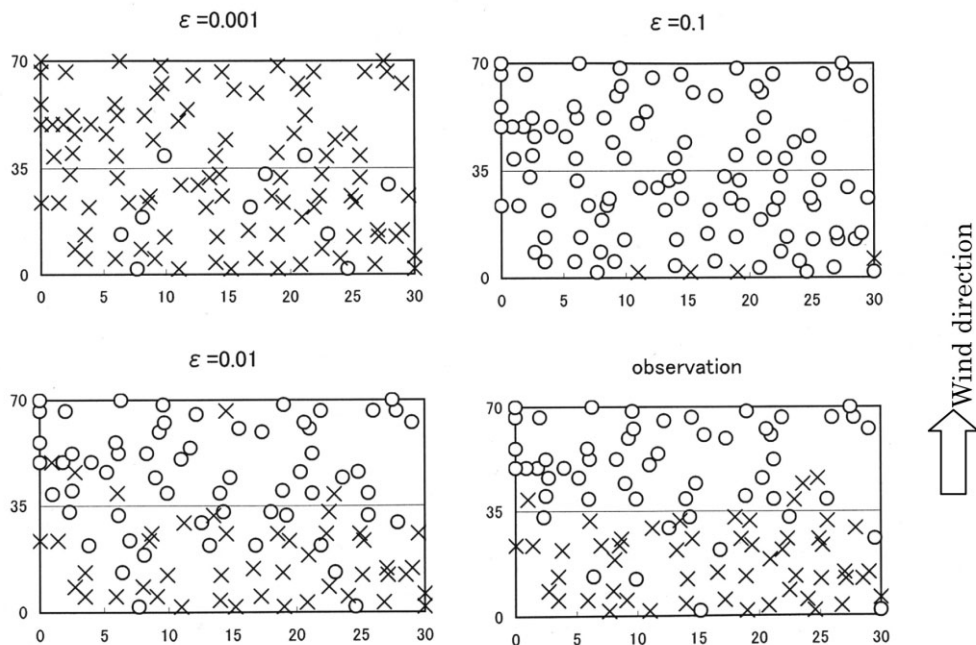


Fig.8-11. Comparison of the computed spatial distribution with the observed spatial distribution for damaged trees in site B.
Wind speed at Z=11m is 32.3m/s. ○,undamaged tree; ×,damaged tree

8-5. シミュレーションS2の結果と考察

2002年台風21号では、最大瞬間風速は、32.3 m/s (帯広市気象観測所、地上高11m) を記録した。調査区A, Bにおける被害データとの比較には、この風速値を適用した。

林内の風速低減率 ϵ は、調査区AおよびBに類似した第3章のサイトE2の防風林データから、類推すると ϵ のオーダーは0.01程度であったが、低減率 ϵ の影響を評価するため低減率 ϵ を0.1~0.001の間で変化させて、現実との適合性を検証した(Fig.8-10,11)。 $\epsilon=0.1$ では、林内に風はほとんど進入せず、風上林縁周辺部に被害がみられる程度である。 $\epsilon=0.001$ では、林内に風は進入しやすく、被害は風上周辺部だけではなく、風下林縁部にまで達している。低減率 $\epsilon=0.01$ の場合は、実際の被害状況をよく再現しており、調査区Aにおける的中率は、全体で80.1%、無被害立木73%、被害木83.7%、調査区Bにおける的中率は、全体で77.4%、無被害立木83%、被害木69.8%である。被害分布の詳細に着目すると、風上林縁にまばらに残った無被害木の分布なども再現されており、被害立木の子測などに応用が期待できる。

第9章 結論

9-1. 防風効果と耐風性を考慮した防風林の林分条件

これまで本論文では、防風林の防風防雪効果(第2~4章)と気象害(第5~8章)について検討してきた。本章では、以上で得られた知見の包括的な結論として、防風林の防風効果と耐風性を考慮した防風林(カラマツ防風林を対象)の管理方法を示す。まず、具体的な管理方法の検討に入る前に、防風林の耐風性と防風効果に関する条件を規定する。耐風性に関しては、第8章で示したように、耐風性は形状比が小さいほど高くなるので、ここでは、平均形状比が70以下であることを条件とする。防風効果に関しては、防風範囲を想定される風速に対して、できる限り広くなるようにする。想定風速は、実際に十勝地方で発生した風食による農業被害(被害面積 約5500ha, 2002年6月9~10日)に基づき、被害発生当時の日平均風速8.6m/s(帯広気象観測所、風速計設置高度11m)を参考にする。土粒子が運動を始める臨界風速は、地上10mの高さで5~7 m/s (Tegen and Fung,1994;Tkamura et al,2000;田中,2005など)であることが知られているが、ここでは6 m/sを臨界風速とする。想定する日平均風速と臨界風速の測定高度は、11mと10mで多少異なるが、風速の対数分布の性質を考慮すると、同高度の測定値として扱っても影響はほとんどないと考えられる。したがって、大まかではあるが、日平均風速8.6m/sを6 m/s以下にすると被害が軽減できると仮定すれば、最低限度必要な減風率は $6 (m/s) / 8.6 (m/s) \times 100 = 70(\%)$ となる。同様に防風林の樹高以下の高度でも、地上高10mで日平均風速8.6m/sの風が吹いたとき、70%以下の減

風率が必要とされるため、防風林が発揮する防風範囲は、第3章で求められた $d70$ と $W \cdot Ad$ の関係式(式3-4)より求めることとする。

平均樹高毎の平均形状比は、北海道カラマツの林分密度管理図より、各等平均樹高曲線上の平均直径曲線との交点から求めることができるが、密度管理図上の樹高曲線は、上層樹高であるため、平均樹高に変換する必要がある。上層樹高 (H_t) と平均樹高 (H_m) の関係は、次式で与えられる(石橋, 2006)。

$$H_m = 0.60971 H_t^{1.11805} \quad (r=0.98) \quad \dots\dots (9-1)$$

各樹高曲線 ($H_t=10m$ と $20m$ の場合) に沿って平均直径曲線との交点を求め、上式を用いて平均形状比と本数密度との関係を求めると Fig.9-1 のようになる。平均形状比曲線は、本数密度が高いほど高くなる傾向がある。

防風効果に関しては、幹枝葉面積密度 Ad が必要であるが、 LAD を Ad の代用とした。 LAD の算出に関して必要な LAI の値は、胸高直径 D (cm) と Wd 乾燥葉重 (g) の調査データ(四大学および信大合同調査班, 1964) から関係式を求めて計算した。

$$Wd = 571.85 \exp(0.0936D) \quad (r=0.85) \quad \dots\dots (9-2)$$

これに乾燥重量と葉面積の比である比葉面積 $40 (cm^2/g)$ を掛け合わせれば、 LAI を求めることができ、樹冠長(平均樹

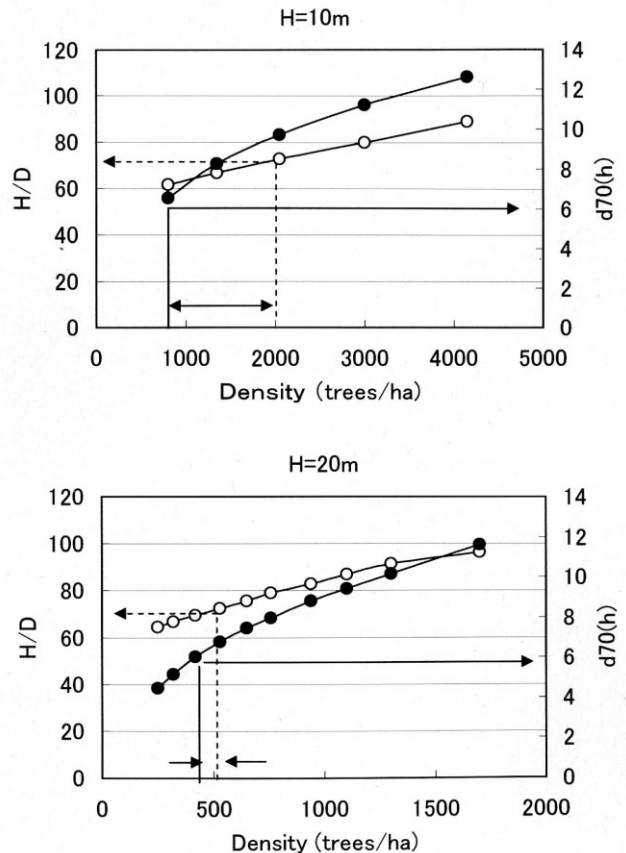


Fig.9-1. Optimum density under the condition $H/D \leq 70$ and $d70 \geq 6h$.
 ○: H/D ; ●: $d70$

高 H_m - 枝下高)で除すればLADを求めることができる。なお、枝下高は、本数密度と平均樹高から求めた (Kanazawa et al,1985)。

樹高成長毎に、本数密度と防風範囲 $d70$ の関係を示す (Fig.9-1)。防風範囲 $d70$ は、本数密度が高くなると範囲も広がる傾向がある。

このようにして求めた樹高階毎の本数密度と形状比および $d70$ の関係から、防風効果と耐風性を考慮した適正な本数密度が求められる。Fig.9-1からは、防風効果を高めるには本数密度を高くする必要があるが、耐風性を高めるには本数密度を低くする必要があることが理解され、数値目標としての形状比と防風範囲 $d70$ に具体的な条件(数値)が与えられれば、防風効果と耐風性を考慮した適正な本数密度が求められる。

例えば、防風林の耐風性と防風効果に関する条件として、林帯幅 $W=80m$ の場合、 $d70 \geq 6h$ 、形状比は冒頭で述べたように 70 以下とすると、上層樹高 $10m$ では本数密度は $750 \sim 2000$ 本

／ha、樹高 $20m$ では $400 \sim 500$ 本／haが適正と考えられる。同様に $W=50m, 80m$ の計算例をTable.9-1に示す。このような手法を用いれば、立木の成長段階毎に防風林の耐風性と防風効果を考慮した適正な本数密度の情報を得ることができ、防風林の造成管理上に大きく寄与することが可能である。まとめとしてFig.9-2に、以上で論じた防風林の防風効果と耐風性を考慮した防風林(カラマツ防風林を対象)の本数密度管理手法の流れを図示する。

9-2. 今後の課題

防風林は、複雑な3次元構造をもつため、従来、防風効果と防風林の構造因子との関係が不明瞭であった。これは、防風林の構造因子を定量化する事自体が困難であったことに原因の一つがある。本研究では、防風林の主な構造因子として、林帯幅(W)と疎密度(幹葉面積密度 Ad)に着目し、それぞれの因子が防風効果に及ぼす影響を、風洞実験や野外観測を

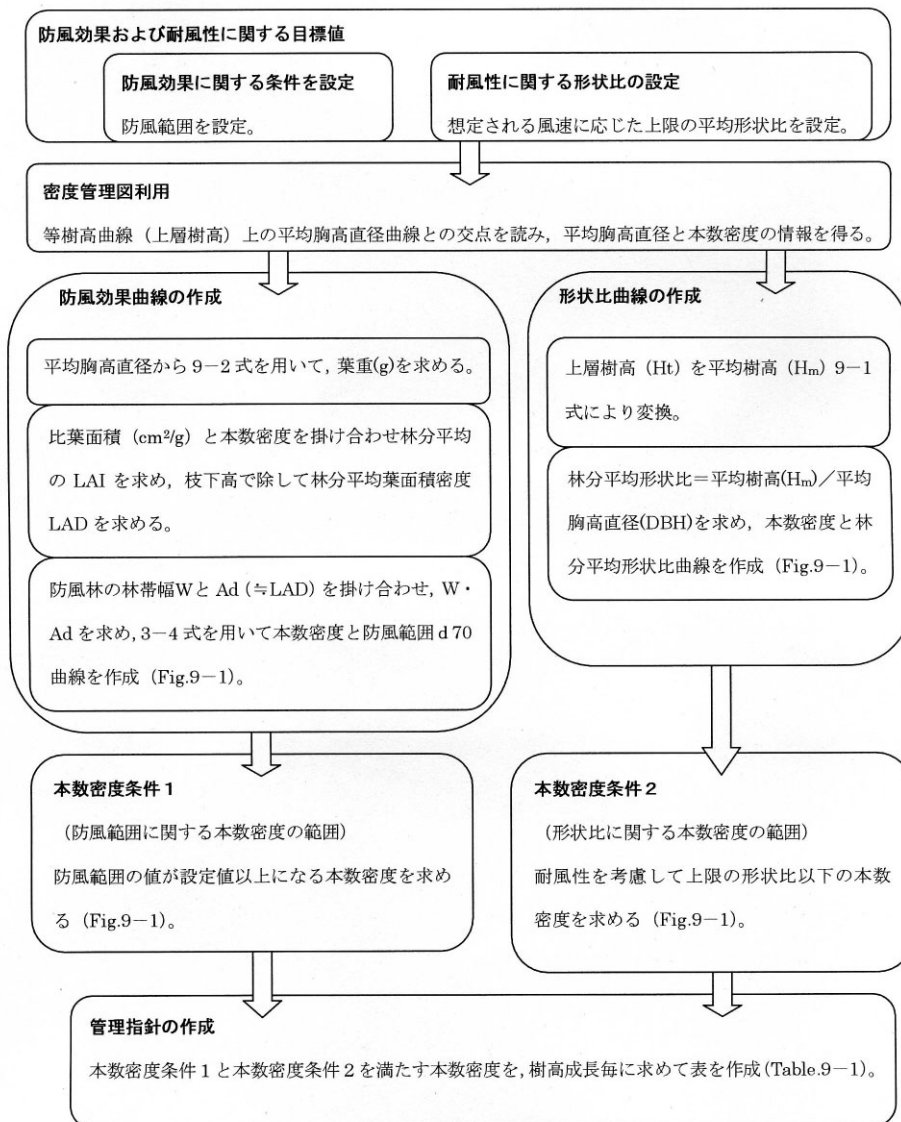


Fig.9-2. Summary of the procedure to provide guideline about shelter effect and wind resistance.

Table.9-1. Density of each growth stage.

Width of shelterbelt	W=50m	W=80m
Dominant tree height(m)	Density (trees/ha)	Density (trees/ha)
8	~2500	~3000
10	700~2000	750~2000
15	500~900	600~800
20	350~500	400~500
25	250~300	250~300
Condition	H/D ≤ 70, d70 ≥ 4h	H/D ≤ 70, d70 ≥ 6h

行って明らかにした。その結果、林帯幅や疎密度を別々に用いたのでは、防風効果との関連が不十分であることが示された。そこで、林帯幅 (W) と疎密度 (Ad) との積 $W \cdot Ad$ を指標に防風効果との関係を調べたところ、防風効果との有意な関係式が得られた。しかし、得られた結果は、 $W \cdot Ad$ の最大値は24.4であり、これより大きな範囲での防風効果の挙動は、今後、詳しく調べてゆく必要がある。特に防風範囲を示す $d70$ は、 $W \cdot Ad$ の増加に伴って頭打ちになる傾向があるが、空隙率の小さい防風柵は風速の回復が早くなると同様に、 $W \cdot Ad$ の値が大きな防風林はではかえって $d70$ が低下することも考えられる。この場合、 $d70$ は、 $W \cdot Ad$ の増加に対して極値を持ち、最大値を示した後に減少するような傾向を示すと考えられる。この点については、林帯幅が1 km以上もある海岸林などを対象に防風効果を予測する場合には、是非とも明らかにしておく必要があるであろう。

防雪効果に関しては、吹雪量はその原動力である風の強さに依存するため、防風効果の解明が先決である。既に述べたとおり、防風効果と構造因子との関係は明瞭になったため、残る問題は吹きだまり位置および吹雪フラックス分布 (視程に關係) と構造因子との関係である。これらの関係性を明らかにするためには、構造因子の異なる様々な防風林での観測データが必要となるが、観測の実施には高価な観測機器を多数必要とし、その年の気象条件によっては計画通りに観測が進まないなど、費用と効率の面で大きなマイナス要因が存在する。以上のような問題を解決する手段としては、風洞施設を用いたモデル実験がある。しかしながら、防風林 (防雪林) を対象にしたモデル実験は少なく、また、野外観測 (プロトタイプ) と実験 (モデル) とを結びつける相似条件は明らかとなっていない。本研究では、まず、モデル実験の有効性を検証するために、Tabler (1980b) と Anno (1984a,b) によって提案された相似条件について検討を加えた。その結果、Tablerの方法から求めた風速は、観測された風速よりも大きい、吹きだまり形成時間に関しては観測値に近似した。一方、Annoの方法から求めた風速は、観測された風速に近似し、吹きだまり形成時間に関しては観測値よりも大きな値となった。これらの結果は、モデルとプロトタイプとの関係を示す相似条件を、更に検討して新たに構築する必要性を示唆してい

る。今後、この点を明確にした上で、吹きだまり位置および吹雪フラックス分布 (視程に關係) と構造因子との関係に関する実験的な検討が必要である。

暴風や雪水荷重が引き起こす気象害に関しては、本研究では実際の被害データを基に多変量解析をおこない、被害要因の解析を明らかにすると共に、風害に関しては被害予測モデルを構築した。しかし、これらのモデルは1回のイベント (2002年台風21号) で発生した被害から得られたものである。したがって、モデルには気象要因 (風速、降水量など) は組み込まれておらず、気象条件が変化した場合には、適合度が低下する場合も想定される。しかし、これらのモデルで被害有りもしくは激害と判断された林分は、被害を受けやすい要因を多く含んでいるため、台風時の気象条件に関わらず危険度は高いと判断される。このような林分では、優先的に間伐施業など何らかの森林施業を実施すべきであると考えられる。今後は、被害予測モデルの普遍性と精度を高めるために、気象要因を組み込んだモデルの開発が必要となる。気象害に関する力学的な検討では、カラマツの力学的なモデルを構築し、限界風速に対する被害形態 (根返り、幹折れ) と樹形が限界風速に及ぼす影響を調べた。その際、回転モーメントに抗する根系の抵抗モーメントは、引き倒し試験の結果から推測した。しかしながら、このような方法では、対象とする地域の土壌が極端に異なるような場合は、その地域で随時引き倒し試験を実施する必要があるであろう。例えば、根系の抵抗モーメントは、根の深さと相関があるが (Peltola et al., 2000; Coutts, 1986; Ray and Nicol, 1998)、泥炭土上に客土をして造成された石狩低地帯に広がる防風林では、根は客土層のみで発達し泥炭層には進入しない。このような地域では、今回対象とした十勝の土壌 (火山灰土) とは大きく根の伸長深さが異なり、結果として根系の抵抗モーメントにも差異が生じると考えられる。したがって、今後の課題としては、引き倒し試験を実施せずに根系の抵抗モーメントを推測するような方法を検討する必要があるであろう。

最後に包括的な今後の課題としては、Fig.9-2の防風効果と耐風性を考慮した防風林の林分条件で示したような手法を用いて、カラマツ以外の樹種に対しても検討を進める必要性があると考えられる。道東地方では6~7割を占有するカラ

マツ防風林だが、空知管内の防風林の構成をみると、ヨーロッパトウヒの占有面積が一番高く全体の1/3を占め、カラマツの占有面積はそれほど高くない(福地, 1995)。地域の植栽状況に応じて、検討対象の樹種を選択し、活用の幅を広げて行くことが重要である。

9-3. 各章のまとめ

それぞれの章ごとに得られた結果を、以下のようにまとめた。

第2章では、防風林の構造と防風効果の関係を明らかにするため、樹木模型を用いたモデル風洞実験をおこなった。本章での風洞実験の結果は、林帯幅と葉面積密度の積が、防風林の防風効果を示す指標になりうることを示すのもであり、得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 防風林の幅と U_m/U_0 の関係は、幅が広くなると U_m/U_0 は全体的に小さくなる傾向があるが、同じ幅でもLADによって U_m/U_0 の値に差違があった。
- (2) LADと U_m/U_0 の関係は、LADが高くなると U_m/U_0 は全体的に小さくなる傾向があるが、同じLADでも幅によって U_m/U_0 の値に差違があった。
- (3) d80は、林帯幅が広くなると大きくなる傾向にあるが、同じ幅でもLADによって差違があった。
- (4) d80は、LADが増加とともに大きくなる、もしくはLADが中の時に最大になる傾向がみられるが、同じLADでも幅によって異なるため、明確な関係がみられなかった。
- (5) 林帯幅(W)と葉面積密度(LAD)を掛合わせた $W \cdot LAD$ が増加すると、 U_m/U_0 が減少し、両者の間には強い関係性がみられた。
- (6) 測定高度1cmを除いて、 X_m は $W \cdot LAD$ にかかわらずほぼ一定の値を示した。
- (7) d80は、 $W \cdot LAD$ の増加とともに大きくなり、d80と $W \cdot LAD$ の間には、強い関係性がみられた。
- (8) $W \cdot LAD$ は、疎密度や林帯幅が異なる防風林の防風効果を示す指標となることがわかった。

第3章では、第2章の結果を検証するため、石狩低地帯に位置する防風林において風速分布を測定し、防風林の構造と防風効果の関係について検討した。更に、空隙率に代わる防風効果の評価指標を検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 疎密度(幹枝葉面積密度 Ad)が増加すると、相対最小風速 U_m/U_0 は減少する傾向がみられたが、林帯幅 W が極度に他の林帯と異なる林帯では、この傾向から外れた値を示した。
- (2) 林帯幅 W が増加すると、相対最小風速 U_m/U_0 は減少する傾向がみられたが、疎密度 Ad が極度に他の林帯と異なる林帯では、この傾向から外れた値を示した。
- (3) 疎密度 Ad および林帯幅 W と相対最小風速の風下林縁からの距離 X_m の間には、ともに明確な関係性が得られなかった。

- (4) 疎密度 Ad および林帯幅 W と防風範囲 $d70$ の間には、ともに明確な関係性が得られなかった。
- (5) 疎密度や林帯幅の異なる防風林の防風効果(U_m/U_0 , X_m , $d70$)は、疎密度 Ad および林帯幅 W を個別に用いたのでは関係性がみいだせないことがわかった。
- (6) 林帯幅 W と疎密度 Ad の積である $W \cdot Ad$ と相対最小風速 U_m/U_0 の間には、強い負の相関関係が示された。
- (7) $W \cdot Ad$ と相対最小風速の風下林縁からの距離 X_m の間には、測定高度 $0.1-0.2h$ において、負の相関関係が示された。
- (8) $W \cdot Ad$ と防風範囲 $d70$ の間には、測定高度 $0.4-0.5h$ において、正の相関関係が示された。
- (9) $W \cdot Ad$ は、疎密度や林帯幅が異なる防風林の防風効果を示す指標となることが示された。

第4章では、試験林において野外観測(プロトタイプ)を行い、模型樹を用いたモデル実験によって、試験林の吹きだまりを再現した。そして、Tabler(1980b)およびAnno(1984a,b)によって示された相似条件を基に、モデル実験からプロトタイプの風速、および吹雪時間を予測し、現実の値(観測による)と比較した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 本試験林のように比較的林帯幅の狭い防雪林は、柵の前後に吹雪粒子を捕捉する吹きだめ柵に類似した機能を有していることがわかった。
- (2) 針葉樹模型を用いたモデル風洞実験では、吹きだまり形状を現実に近い形で再現できた。これは、モデル実験によって、構造が複雑な防雪林でも吹きだまり分布に関する定量的な理解を得ることが可能であることを示唆しており、モデル実験の有効性を示している。
- (3) モデルとプロトタイプの風速に関する相似則は、Annoによる相似則から求められた値が実測値に近似した。
- (4) モデルとプロトタイプの吹雪時間に関する相似則は、Tablerによる相似則から求められた値が実測値に近似した。

第5章では、気象現象として風が森林に及ぼす影響を解明し、風害を軽減するため2002年台風21号による被害データを基に、数量化I類を用いた要因の解析を行った。更に、耐風性を考慮した造成管理を推進するため、被害予測モデルを開発した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) シラカンバ、チョウセンゴヨウマツ・ストロブマツは、風害を受けやすく根返りしやすい樹種であることが示された。
- (2) カシワは根返りにくい樹種であり、風害を受けにくいことが示された。
- (3) 風上の区画にカシワ林を配置することで、風下区画の被害が抑制されることが示唆された。特に北北東あるいは北東方向に延長された防風林(台風の卓越風にはほぼ直角方向)は被害を受けやすいため、被害軽減のためには優先的に風上区画にカシワ林を造成する必要がある。
- (4) 防風林の風害を軽減させるには、カラマツ主体の樹種構

成からカシワ主体の林に転換する必要がある。

- (5) 被害発生の有無に関するモデル式は、非常的中率が高く、被害を受けやすい林分の抽出や施業の優先度を決定する際に十分に寄与できる。被害発生の有無についての判別予測では、87.7%的中率が得られた。
- (6) 本数被害率に関する予測モデル式では、全樹種を対象にした場合、本数被害率の変動のうち、およそ60% ($R^2 = 0.613$) が説明される結果を得た。また、これらの予測モデルを利用すれば、危険度の高い林分を抽出することが可能で、間伐などの森林施業の優先順位の決定など、効率的かつ計画的な森林の造成管理に寄与できる。

第6章では、雨水などの気象現象（冠雪を含む）が森林に与える影響を解明するため、被害発生当時の気象状況を明らかにし、被害程度と林況および地況との関係について要因解析を行った。数量化I類を用いた解析の結果、被害を受けたカラマツ林では、標高、平均胸高直径、斜面方位、収量比数、斜面勾配、立木密度、平均樹高、林齢の順で偏相関係数が高くなった。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 雨水害と関係する主な要因（偏相関係数が有意）は、標高、平均胸高直径、斜面方位であった。
- (2) 標高のカテゴリースコアは、300～325m付近で高くなる傾向が示された。今回発生した雨水害では、おそらく標高400m付近から下層に寒気層があり、これより標高が高いところでは暖気層となっていたために、雨水害が発生しなかったと推測される。
- (3) 斜面方位のカテゴリースコアは、北～北西で値が高く、着水後の風によって被害が拡大したことが示唆された。
- (4) 胸高直径が25cmよりも大きくなると被害が抑制される傾向が示された。

第7章では、本章では、北海道の主要造林樹種の一つであるカラマツ林について、激害林と軽害林の林分構造を密度管理図上で比較検討するとともに、雪氷害に対する林分平均限界形状比を検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 各林分において、同材積ならば、軽害林を構成する立木の平均直径は、激害林よりも太いことが示された。
- (2) 気象害に対する抵抗性を増大させるには、直径の肥大成長を促進させることが重要である。
- (3) 限界形状比曲線の検討結果からは、樹高の成長に対して限界形状比は大きくなって頭打ちになる傾向が示されており、立木のサイズによって、気象害の抵抗性が異なることが示された。
- (4) 密度管理図上に、気象害を受けやすい危険域と受けにくい安全域を図示した。植栽本数2000本以上では、適切な間伐を行わない限り、常に危険域にある。

第8章では、力学的な見地から樹形と被害を発生させる限界の風速および被害形態との関係、応力分布と幹折れ位置について考察するため、シミュレーションをおこなった。シミュレーションは、樹高、形状比が異なる計20パターンについて、台風時の暴風による風害を想定しておこなった。また、実際の防風林の被害とモデルとの対応を検証した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 限界風速 U_g は、各パターンとも形状比が小さくなるほど高くなる傾向がある。

(2) 同一な形状比ならば、立木サイズ（樹高）が大きくなるほど被害を受けやすい傾向がある。

(3) 樹幹に発生する応力の分布を形状比100の場合を検討した結果、圧縮応力の最大値は0～0.4Lの位置にあり、樹高が高いほど高い位置に最大値がある傾向が示された。

(4) シミュレーション結果と実際の防風林の被害データを比較した結果、シミュレーションによる被害立木の分布は、実際の被害立木の分布に近似し、的中率は7～8割程度の高い値を示した。

- 謝辞
- 本研究をとりまとめるにあたり、名古屋大学教授・西村浩一博士には、終始懇切丁寧な御指導と励ましを賜りました。また、新潟大学教授・和泉 薫博士、新潟大学教授・川邊洋博士、新潟大学准教授・河島克久博士、新潟大学准教授・権田 豊博士には、ご多忙中、お時間を割いていただき、貴重な御助言と御教示を賜りました。ここに謹んで感謝の意を表します。
- 防風林の防風効果に関しては、財団法人日本気象協会・佐藤隆光博士には、防風林の構造因子と防風効果について、多岐にわたり有意義な議論をさせていただき、また、防風林の重要性について、帯広畜産大学准教授・辻 修博士からは、貴重な資料や御教示をいただきました。防雪効果に関しては、独立行政法人防災科学技術研究所・佐藤 威博士、根本征樹博士には、野外観測や風洞実験など、多岐にわたり御協力と御助言をいただきました。また、同研究所・阿部 修博士からは、中国における防風林の写真をたびたびいただき、貴重な情報を得ることができました。防風林の台風被害に関しては、十勝支庁林務課のみなさまから、被害に関する写真資料の提供など貴重な情報を得ることができ、また、山本健二氏（元北海道立林業試験場）には、多くの被害現場で調査に御協力をいただきました。雪氷害（雨水害）に関しては、北海道教育大学准教授・尾関俊浩博士、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所・松下拓樹博士とは、2004年の雨表害発生地域の分布やそのメカニズムについて、有意義な議論をさせていただきました。ここに心より感謝を申し上げます。

引用文献

- Anno, Y., 1984a Requirements for modeling of a snowdrift. Cold Regions Sci. Technol., 8, 241-252.
- Anno, Y., 1984b Applications of Anno's modeling conditions to

- outdoor modering of snowdrifts. Cold Regions Sci. Technol., 9, 179-181.
- 荒木眞之, 1979 地形要因による山地の風速推定法. 林試研報, 33, 47-63.
- Boe, K. N., 1965 Windfall after experimental cuttings in old-growth redwood. Proc. Soc. Am. For, 65, 59-63.
- Caborn, J. M., 1957 Shelterbelt and microclimate. For. Comm. Bull. No.29, Edinburgh, 129pp.
- Chamberlain, A. C., 1983 Roughness length of sea, sand and snow. Boundary-Layer Meteorol., 25, 405-409.
- Chiba, Y., 1994 A mechanistic analysis of devastating by typhoons in sugi plantations in terms of stem breakage. J. Jpn. For. Soc. 76 : 481-491.
- Coutts, M. P., 1986 Components of tree stability in Sitka Spruce on peaty gley soil. Forestry, 59(2), 173-197.
- Cremer, K. W., Borough, C. J. Carter., 1982 Effect of stocking and thinning on wind damage in plantations. New Zealand Journal of Forestry Science. 12(2), 244-268.
- Cremer, K. W., Carter, P. R., and Minko, G., 1983 Snow damage in Australian pine plantations. Aust. For, 46(1), 56-66.
- Dunn, C. P., Guntenspergen, G. R., and Dorney, J. R., 1983 Catastrophic wind disturbance in an old-growth hemlock-hardwood forest, Wisconsin. Can. J. bot. 61, 211-217.
- Forster, D. R., and Boose, E. R., 1992 Patterns of forest damage resulting from catastrophic wind in central New England, USA. J. Ecol. 80, 79-98.
- Forster, D. R., Motzkin, G., and Slater, B., 1998 Land-use history as long-term broad-scale disturbance:regional forest dynamics in central New England. Ecosystems, 1, 96-119.
- Fredericksen, T. S., Hedden, R. L., and Williams, S. A., 1993 Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress. Can. J. For. Res. 23, 1760-1765.
- 福地 稔, 1995 防風林の機能と保育を考える。光珠内季報, 100, 26-29.
- Gill, D., 1974 Snow damage to boreal mixedwood stands in northern Alberta, For. Chron., 50(2), 70-73.
- Glitzenstein, J. and Harcombe, P., 1988 Effects of the December 1983 tornado on forest vegetation of the Big Thicket, south-east Texas, USA. For. Ecol. Manage. 25, 269-290.
- Hayashi, C., 1952 On the prediction of phenomena from qualitative data and quantification of qualitative data from the mathematicosstatistical point of view. Ann. Inst. Statistical Math., 3 : 69-98.
- Heisler, G. M. and DeWalle, D. R., 1988: Effects of windbreak structure on wind flow, Agric. Ecosystems Environ, 22/23, 41-69
- 飯塚 肇, 1952 防風林の幅(厚み)について. 林業試験場報告, 56: 1-218.
- 諫本信義・高宮立身, 1992 1991年9月, 台風19号により発生した大分県における森林被害の要因解析. 森林立地, 34(2), 98-105.
- 石橋 聡, 2006 長伐期化に対応したカラマツ人工林収穫予想表の作成. 北方林業, 58, 1-8.
- 石井 弘・片桐成夫・三宅 登, 1983 冠雪被害を受けたスギ人工林の直径分布, 形状比分布と被害の関係. 日林誌, 65(10), 366-371.
- Iversen, J. D., 1984 Comparison of snowdrift modeling criteria : commentary on "Application of Anno's modeling conditions to outdoor modeling of snowdrifts". Cold Regions Sci. Technol. 9, 259-265.
- Jalkanen, A. and Mattila, U., 2000 Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the national Forest Inventory data. For. Ecol. Manage. 135, 315-330.
- 梶 幹夫・沢田清雄・五十嵐勇治・佐々木潔州, 1994 1990年11月下旬秩父山地甲武信ヶ岳周辺の亜高山針葉樹林で発生した雨氷害. 東大演報, 91, 115-125.
- Kanazawa, Y., Kiyono, Y. and Fujimori, T., 1985 Crown development and stem growth in relation to stand density in Even-aged pure stands (II), Clear-length model of *cryptomeria japonica* Stands as a function of stand density and tree height. J. Jap. For. Soc., 67, 391-397.
- 嘉戸昭夫・中谷 浩・平 英彰, 1992 ボカスギ林の冠雪害と林木および地形要因の関係. 日林誌, 74(4), 114-119.
- 嘉戸昭夫, 2001 スギ人工林における冠雪害抵抗性の推定とその応用に関する研究. 富林技研報, 14, 1-78.
- 勝田 桓・松田 清, 1984a 冠雪害におけるスギ品種・系統間での被害差異(1). 林木の育種, 131, 12-17.
- 勝田 桓・松田 清, 1984b 冠雪害におけるスギ品種・系統間での被害差異(2). 林木の育種, 132, 20-24.
- 菊住 昇, 1979 樹木根系図説. 1121pp, 誠文堂新光社, 東京
- Kind, R. J., 1976 A critical examination of the requirements for model simulation of wind-induced erosion/deposition phenomena such as snow drifting. Atmos. Environment, 10, 219-227.
- Kind, R. J. and Murray, S. B., 1982 Saltation flow measurements relating to modeling of snowdrifting. J. Wind Eng. and Indust. Aero., 10, 89-102.
- Kind, R. J., 1986 Snowdrifting:A review of modeling methods. Cold Regions Sci. Technol. 12, 217-228.
- 小泉章夫, 1987 生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究. 北大演研報, 44, 1329-1415.
- 小泉章夫, 1988 生立木の非破壊材質試験 - 樹幹のヤング係数を測定する -. 北方林業, 40, 2-6.
- 小島耕一郎, 1991 雨氷害1年後のアカマツ林に生じたマツノ

- ムツバクイムシによる生立木被害. 森林防疫, 40(7), 129-132.
- 古関清隆・大野和人・山下裕史, 1989 阿蘇地方に発生した雨水害調査. 熊本県林業研究指導所業務報告, 27, 109-114.
- 小関隆祺, 1971 北海道開拓行政における防風防霧林の設定について. 林野庁監, 北海道の防風・防霧林, 41-57.
- 栗田稔美・大原偉樹・小野寺弘道・糸屋吉彦・神山安生・外館聖八郎・野呂忠幸・佐々木孝昭, 1990 1990年4月に発生した北上山地の雨水害(Ⅱ) - 御大堂山周辺の混生広葉樹林 -. 日林東北支誌, 42, 45-47.
- 桑形恒男, 1993 大型台風にともなった気象官署の突風率の長期変化. 天気, 40, 91-97.
- Lekes, V. and Dandul, I., 2000 Using airflow modelling and spatial for defining wind damage risk classification (WINDARC). For. Ecol. Manage. 135, 331-344.
- Lindholm, G., Kristenson, E. and Nilsson, k., 1988 Växter som vindskydd, (vegetation for shelter), Stad & Land, No.62, Alnarp (in Swedish).
- Long, J. N., 1992: Volume increment in *Pinus contorta* var. *latifolia*: the influence of stand development and crown dynamics. For. Ecol. Manage. 53:53-64.
- 真木太一, 1982 防風網に関する研究(4) 風洞実験による種々の防風網付近の風速特性. 農業気象, 38, 123-133.
- 松岡廣雄・北田正憲・北田健二・大丸裕武, 1990 北上山地におけるダケカンバの霧・雨水害. 日林東北誌, 42, 48-50.
- 松下拓樹・西尾文彦, 2004 着氷性降水の気候学的特徴と地域性について. 雪氷, 66, 541-552.
- 間島達哉, 2001 長野県小県郡長戸町における雨水災害とその復旧について. 治山, 45, 6-8.
- Mayhead, G. J., 1973 Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. Agric. Meteorol. 12:123-130.
- Merkel, O., 1975 Schneebruch im Fichtenbestand bei 40jähriger Auslesedurchforstung. Allg. Forst. 30(3314), 663-665.
- 三浦覚・松本陽介・真下育久, 1984 台風15号(昭和56年)により東京大学北海道演習林に発生した風害の要因解析. 東大演報, 73, 139-160.
- 水井憲雄・畠山末吉, 1984 カラマツ人工林の台風被害と耐風性. 北海道林業試験場研究報告, 22, 1-9.
- Naegeli, W., 1946 Weitere untersuchungen über die windverhältnisse im bereich von windschutzanlagen. (Further investigations of wind conditions in the range of shelterbelts.) Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchswesen. 24, 660-737.
- Naegeli, W., 1964 On the most favorable shelterbelt spacing. Scott. For., 18, 4-15
- 中谷 浩, 1991 材木の冠雪害に関する樹木力学的研究. 富林技研報, 4, 1-51.
- Navratil, S., 1995 Minimizing wind damage in alternative silviculture systems in boreal mixedwoods. For. Can. and For. Lands Wildl. Alta. For. serv. Edmonton, Alta. Canada-Alberta Partnership Agreement in For. rep. No.124.
- Nemoto, S., 1961 Similarity between natural wind in the atmosphere and model wind in a wind tunnel (I). Pap. Met. Geophys., 12, 30-52.
- Nemoto, M. and Nishimura, K., 2001 Direct measurement of shear stress during snow saltation. Boundary-Layer Meteorol, 100, 149-170.
- 西尾文彦, 石田 完, 1973 地吹雪における乱れのエネルギー消散率, 低温科学, A31, 69-85.
- Nord, M., 1991 Shelter effects of vegetation belts-results of field measurements. Boundary-Layer Meteorol. 54, 363-385.
- 大原偉樹・栗田稔美・小野寺弘道・糸屋吉彦・神山安生・外館聖八郎・野呂忠幸・佐々木孝昭, 1990 1990年4月に発生した北上山地の雨水害(Ⅰ) - 御大堂山周辺のダケカンバ二次林 -. 日林東北誌, 42, 42-44.
- Oliver, H. R. and Mayhead, G. J., 1974 wind measurements in a pine forest during a destructive gale. Forestry, 47:185-195.
- Owen, P. R., 1964 Saltation of uniform grains in air. J. Fluid Mech., 20(2), 225-242.
- 尾関俊浩・松下拓樹・西尾文彦, 2006 2004年2月北海道の事例解析による雨水現象の発生域の推定. 雪氷, 68, 409-420.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Hassinen, A., and Granander, M., 2000 Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. For. Ecol. Manage, 135, 143-153.
- Perera, M. D. A. S., 1981 Shelter behind two-dimensional solid and porous fences. J. wind Eng. Ind. Aerodyn, 8, 93-104.
- Perterson, C. J., and Pickett, S. T. A., 1991 Treefall and resprouting following catastrophic windthrow in an old-growth hemlock-hardwoods forest. For. Ecol. Manage, 42, 205-217.
- Perterson, C. J., 2004 Within-stand variation in windthrow in southern boreal forests of Minnesota: Is it predictable? Can. J. For. Res. 34, 365-375.
- Putz, F. E. and Sharitz, R. R., 1991 Hurricane damage to old-growth forest in Congaree National Monument, South Carolina, U. S. A. Can. J. For, 21, 1765-1770.
- Raine, J. K. and Stevenson, D. C., 1977 Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer. J. Ind. Aerodyn, 2, 159-180.
- Ray, D. and Nicol, B. C., 1998 The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. Forestry, 71(2), 171-182.
- 佐藤啓祐, 1979 樹幹の形態と雪害. 林業技術, 452, 10-13.
- 佐藤隆光, 浦野慎一, 武田知己, 2000 幅と密度の異なった防風

- 林における風速分布の観測, 農業気象, 56, 25-30.
- 佐藤 休・中村幸美・松橋正明・中井戸啓, 1970 雨水害を受けたカラマツ林の回復状況について. 日林北支講, 19, 123-126.
- 澤田 稔, 1983 風および冠雪による針葉樹幹の変形. 林試北支場研究資料, 128: 1-18.
- Scott, R. E. and Mitchell, S. J., 2005 Empirical modeling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes. *For. Ecol. Manage.* 218, 193-209.
- 四手井綱英, 1976. 森林保護学. 236pp 朝倉書店, 東京
- 孫田敏, 2001 "林(りん)"からのランドスケープ. 緑の読本 公害対策技術同友会, 57, 117-118.
- Steege, H. ter., 1993 HEMIPHOT, a programme to analyze vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs. The Tropenbos Foundation, Wageningen, The Netherlands.
- Storm, G., Kelly, G. R., Keitz, E. L. and Weiss, R. F., 1962 Scale model studies on snow drifting. Research Report 73, U. S. Army Snow, Ice and Permafrost Establishment.
- Stull, R. B., 1999 An introduction to boundary layer meteorology. 670pp, Kluwer Academic Publishers, 378-380.
- Sturrock, j. W., 1969 Aerodynamics studies of shelterbelts in New Zealand- 1: low to medium height shelterbelts in Mid-Canterbury. *N. Z. J. Sci.*, 12, 754-776.
- Sturrock, j. W., 1972 Aerodynamics studies of shelterbelts in New Zealand- 2: medium height to tall shelterbelts in Mid-Canterbury. *N. Z. J. Sci.*, 15, 113-140.
- Sugiura, K., Nishimura, K., Maeno, N., and Kimura, T., 1998 Measurements of snow mass flux and transport rate at different particle diameters in drifting snow. *Cold Regions Sci. Technol.*, 27, 83-89.
- 杉山利治・佐伯正夫, 1963 昭和35年12月末の大雪による北陸地方の森林の冠雪害調査報告. 林試研報, 154, 73-95.
- Tabler, R. D., 1980a Geometry and density of drifts by snow fences. *J. Glaciol.*, 26, 405-419.
- Tabler, R. D., 1980b Self-similarity of wind profiles in blowing snow allows outdoor modeling. *J. Glaciol.*, 26, 421-434.
- 高橋啓二, 1977 造林地の冠雪害とその対策. わかりやすい林業解説シリーズ61. 日林協, 47pp.
- Takemura, T., Okamoto, H., Murayama, Y., Numaguti, A., Higurashi, A. and Nakajima, T., 2000 Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, 105, D14, 17853-17873.
- 竹内政夫, 1995 吹雪の構造と発生機構, ゆき, 20, 69-74.
- 竹内政夫, 2000 吹雪とその対策 - 吹きだまりの発生機構と形 -, 雪氷, 62, 41-48.
- 田中泰宙・眞木貴史・石水尊久・海老名綾貴・千葉長, 2005 全球鉱物ダスト輸送モデルの開発と黄砂現象予測への応用, *J. Aerosol Res.*, 20, 297-305.
- 谷 信輝, 1958 模型防風垣の風洞実験, 農業技術研究所報告A 第6号: 1-80.
- Tegen, I. and Fung, I., 1994 Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. *J. Geophys. Res.*, 99, D11, 22897-22914.
- Ter Steege, H., 1993 HEMIPHOT, A programme to analyze vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs. The Tropenbos Foundation, Wageningen, The Netherlands.
- 鳥田宏行・根本征樹, 2002 防風林の疎密度と林帯幅に関する風洞実験, 日林誌, 84, 85-90.
- 牛山素行, 1991 雨水現象についての基本的考察 - 長野県の事例を主として -. 長野県地理, 9, 1-10.
- 牛山素行・宮崎敏孝, 1992a 1989年2月26日長野県下で発生した雨水現象 - 森林被害の特徴について -. 日林論, 103, 585-586.
- 牛山素行・宮崎敏孝, 1992b 雨水現象による森林被害に関する2, 3の考察 - 1989年2月26日長野県東信地区で発生した森林被害のデータベース -. 信大農演林報, 29, 25-96.
- Veblen, T. T., Kulakowski, D., Eisenhart, K. S. and Baker, W. L., 2001 Subalpine forest damage from a severe windstorm in northern Colorado. *Can. J. For. Res.*, 31, 2089-2097.
- Wang, H., Takle, E. S., 1995a Boundary-Layer flow and turbulence near porous obstacles. I: derivation a general equation set for a porous medium. *Boundary-Layer Meteorol.*, 74, 73-88.
- Wang, H., Takle, E.S., 1995b A numerical simulation of boundary-Layer flows near shelterbelts. *Boundary-Layer Meteorol.*, 75, 141-173.
- Wang, H., Takle, E. S., 1996 On three-dimensionality of shelterbelt structure and its influences on shelter effects. *Boundary-Layer Meteorol.*, 79, 83-105.
- Wang, Y., Titus, S. J. and Lemay, V. M., 1998 Relationships between tree slenderness coefficients and tree or stand characteristics for major species in boreal mixedwood forests. *Can. J. For. Res.*, 28(8), 1171-1183.
- Wieringa, J., 1993 Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorol.*, 63, 323-363.
- White, P. S., 1979 Pattern process, and natural disturbance in vegetation. *Bot. Rev.*, 45, 229-299.
- Wilson, J. D., 1985 Numerical studies of flow through a windbreak. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, 21, 119-154.
- Wilson, J. D., 1987 On the choice of a windbreak porosity profile. *Boundary-Layer Meteorol.*, 38, 37-39.
- 山岸米二郎, 1996 風速計の変更と突風率の変化, 天気, 43, 623-626.
- 山口 清・中谷和司・戸田清佐・肥垣津登, 1982 56豪雪にお

るスギ造林地の冠雪害実態調査. 岐阜県寒冷地林試研報, 5, 33-71.

山根玄一・菊地健・寺沢和彦, 1982 昭和56年15号台風によるカラマツ林の風害(Ⅱ)－単木の根系－. 日林北支講. 31, 45-47.

四大学および信大合同調査班, 1964 森林の生産力に関する研究. 日本林業技術協会 60pp

The results of this study would help in developing methods for efficient management of shelterbelts.

Summary

The purpose of this study is to clarify the relationship between shelterbelt structure and the functions of wind reduction and snow break, and to determine measures to reduce the meteorological damages caused by wind force, and snow and ice load to natural shelterbelts. The results are summarized as follows:

1. Relationship between shelterbelt structure and the functions of wind reduction and snow break

In order to clarify the effects of the width and density of a shelterbelt on wind reduction, model wind experiments and field observations of wind speed distribution were carried out around shelterbelts with different widths (W) and total area densities (Ad). The values of U_m/U_0 (minimum relative wind speed), X_m (distance of the minimum wind speed from the leeward edge of the shelterbelt), and $d70$ (shelter distance beyond which the wind speed U does not exceed 70% of U_0) could not be accurately estimated using only the values of W or Ad . However, $W \cdot Ad$, which is defined as the product of W and Ad , related to U_m/U_0 , X_m , and $d70$, was found to be a useful index for a natural shelterbelt.

In order to obtain field data on the snow break effect on shelterbelts, field observations were performed. In order to verify the validity of the model experiments on snow break forests, a wind tunnel experiment using an experimental wood model was conducted, and the results were compared with those obtained on the field.

2. Meteorological damages by wind force, and snow and ice load in natural shelterbelts.

By analyzing the wind damage caused by Typhoon 200221 at the shelterbelts and the damage caused by glaze in the Japanese larch forest in Hidaka, Hokkaido, in February 2004, a susceptibility to windthrow and glaze damage was found and multiple regression models to predict the damage rate were obtained. The effect of tree height and slenderness ratio on wind resistance was found using a mechanistic model to assess the risk of wind and snow damage. Wind resistance increased with decreasing slenderness ratio and decreased with increasing tree height with no change in the slenderness ratio. However, the effect of tree height on wind resistance in the case of a higher slenderness ratio is smaller than that in a lower ratio.