ライフサイクルに応じた防雪林の効果的な育成・管理手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 23～平 26
担当チーム：雪氷チーム、寒地機械技術チーム、寒地技術推進室
研究担当者：松澤勝、伊東靖彦、上田真代、渡邊崇史(雪氷)
住田則行、山﨑貴志、中村隆一(寒地機械技術)
高玉波夫、下道純、佐藤圭洋、渡辺淳、鈴木哲
(寒地技術推進室)

【要旨】
積雪寒冷地の北海道では、国道における通行止め原因の４割を吹雪が占めるなど、吹雪による冬期交通障害が多く発生しており、吹雪対策が重要課題となっている。
吹雪対策として高い効果が期待できる防雪林は、苗木で植栽するため、早期成長と健全な育成管理が必要であるが、現在、生育基盤の造成方法や密度管理（間引き）などの管理手法が確立されていない。本研究では、望ましい造成時における望ましい規格・仕様、間引きと防雪効果の維持等、育成管理手法の確立に向けた検討により、防雪林の生長促進、防雪機能の早期発現・長期的な維持による吹雪災害の防止・軽減を目指すものである。

キーワード：道路防雪林、植生、樹木の生長過程、維持管理、風洞実験、道路防雪林、植栽基盤、生育不良要因、防雪機能

1. はじめに

北海道における国道の通行止めの約４割は吹雪に起因するものであり､吹雪対策が必要とされている。
道路防雪林は、吹きだまりや視程障害を緩和し、視線誘導効果も併せ持つなど吹雪対策として有効である。現在、道路事業において最初の造成から約 30 年が経過し、樹木の成長に伴い育成や管理上の課題が顕在化している。防雪林は強風、多雪地帯において人工的な生育基盤上に造成されるため、過酷な生育環境におかれ、更に永続的な防雪効果の維持が必要とされる。しかし、それに適した生育基盤の造成方法や間引きなどの管理手法は確立されていない現状にある。
そこで本研究は、樹木の生育不良判定手法の開発、造成時の生育基盤等の望ましい規格を提示し、防雪林の初期成長期における生育障害の減少に寄与すること、また樹木の成長過程に応じた防雪林の育成・管理手法の提案により、防雪林の効果的な機能発現に寄与することを目的に、既存防雪林の現地調査や防雪機能に関する風洞実験を実施した。
本文は５章で構成している。2 では初期生長不良の課題が顕在している保育期における生育不良に着目し、その生育不良要因と判定手法を記載した。3 では植栽基盤調査の結果から、造成時における生育基盤等の望ましい規格について記した。さらに 4 では樹木の生長実積について調査するとともに、風洞試験と間引きによる風況の現地試験を実施し、長期的視点に立った防雪林の育成管理手法について記述した。5 は今後に向けての課題と謝辞である。

2. 樹木の生育不良原因判定手法の開発

道路防雪林では活着性に優れていることから、樹木は高さ 30cm 程度の苗木で植栽され [1]、育成される。このため防雪効果は樹木の生長によって成木となって初めて出現する。つまり植栽後の生長促進は道路防雪林にとって重要である。
一方、初期生長が思わしく無い防雪林はいくつか存在している。樹木の生長阻害となるものには、植え痛み、被食害、吹きだまり、強風、寒風害、寒乾害、植栽基盤化学性の異常、植栽基盤の物理性の異常が考えられているが [1]、定性的な異常の所見が記されているに過ぎず、道路防雪林としてその頻度や典型例は明確になっていない。
そこで、本研究では、まだ防雪効果を発揮し得ていない、おおよそ樹高 5m 未満の段階にある保育期

の育成管理に焦点を当てて、既存防雪林を対象に現地調査を行い、その生育不良要因を明らかにした。

2.1 既存防雪林を対象とした現地調査

道路防雪林の生育状況を把握するため、道路防雪林において利用頻度が高い、アカエゾマツの生育および植栽基盤について調査を実施した。調査対象地は道北の４箇所の道路防雪林である。図 1 に位置図、表 1 に各防雪林の概要および調査項目を示す。ただし、本章の生育不良要因調査に利用したのは表 1 に示すＡとＢの２防雪林である。

図 1 調査地位置図

表 1 調査対象防雪林の概要と調査項目

防雪林		A	B	C	D	E
林帯幅（m）		22.0	17.6 - 21.6	30.0	28.0	25.3
全体延長（m）		1870	942	1781	472	8355
植栽樹種		アカエゾマツ ヤナギ類	アカエゾマツ プンゲンストウヒ ヤナギ類	アカエゾマツ トドマツ ヤナギ	アカエゾマツ ヤチダモ	ヨーロッパトウヒ
植栽配置（m）		列間 2.4 苗間 1.2 方形植栽	列間 3.0 苗間 2.0 条間 1.0 1 列 2 条 千鳥植栽	列間 1.5 - 2.0 苗間 1.5 千鳥植栽	列間 1.75 苗間 1.5 千鳥植栽	列間 2.4 苗間 2.4 方形植栽
植栽時樹高（m）		0.5	0.9	0.3 - 1.2	0.3 - 1.3	0.35-1.8
植栽年度		2005	1992	1998	1989	1982-2003
調査項目	生育調査	○	○	○	○	○
	植栽基盤調査	○	○			○
	年輪解析		○	○	○	

2.1.1 樹木の計測

各防雪林において、生育良好区と不良区に林帯幅×20m 程度の方形区を設定し、方形区内の枯死木や植栽跡を含む全ての樹木 20 本程度を対象に、樹木寸法等を計測した。計測項目は、樹高、胸高幹周または根元径、最近３ヶ年の枝階間の伸長量、４方向の枝の長さ、下枝の高さ（枯枝高、生枝高）、隣接木との距離である。図 2 に計測箇所、表２に計測データを示す。

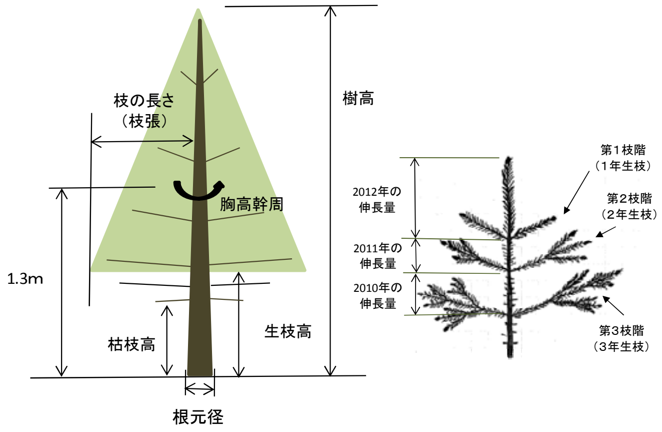


図 2 樹木の計測箇所

表 2 各防雪林の樹木寸法等(平均値)

防雪林		A		B		C		D	
各区の生育		良好	不良	良好	不良	良好	不良	良好	不良
樹高（m）		1.68	1.08	4.64	2.97	8.53	8.25	8.15	5.88
伸長量（m）	2012	0.28	0.14	0.22	0.18	0.40	0.38	0.38	0.29
	2011	0.28	0.12	0.36	0.33	0.37	0.34	0.34	0.43
	2010	0.19	0.11	0.32	0.32	0.34	0.38	0.38	0.45
枝の高さ（m）	枯枝	0.28	0.20	-	-	1.78	2.20	2.02	1.96
	生枝	0.28	0.22	1.09	0.73	0.52	3.07	3.38	1.60
枝張 4 方向平均（m）		0.55	0.38	0.98	0.69	1.32	1.34	1.20	1.29
調査本数(本)		30	24	20	20	21	22	20	21

2.1.2 土壌断面調査

生育不良要因の推定を行うため、A 防雪林と B 防雪林において生育良好および不良区画の平均的な樹木の側に、深さ 60cm 程度の試孔を掘り、土壌断面の観察を行った（図 3）。また、土質室内試験の試料となる土壌を採取し、三相比や pH 等を求め、試孔の近辺で現場透水試験を実施した。断面観察時には斑鉄（酸化の痕跡）やグライ斑（還元の痕跡）に留意した。

土壌中の鉄は十分空気が供給される酸化状態では、大部分が赤褐色の酸化鉄として存在する。地下水位が高いなど常時排水不良となっている土壌は、酸素が不足して還元状態となり、酸化鉄は亜酸化鉄（第一鉄）に還元されて青灰色や緑灰色の塊状となる。このような作用をグライ化と呼び、斑紋状に現れるものをグライ斑、層状をなすものをグライ層という[2)]。

図 3 土質の目視調査状況

2.2 A 防雪林の生育不良要因推定

A 防雪林は樹高 1~2m 程度、B 防雪林は樹高 3~5m 程度(表 2)と生育ステージなどが異なることから、それぞれの防雪林毎に結果を示す。

2.2.1 樹木の生育状況

図 4、図 5 は A 防雪林の生育良好区と不良区の樹高と年間伸長量の経過を示したものである。生育良好木と不良木の差は、年間伸長量とそれに伴う樹高に現れる。「道路吹雪対策マニュアル(平成 23 年改訂版）」[1)]においては、樹高 1m 程度の保育期初期の樹木の年伸長量が 15cm 以上であれば、健全な生育状態としているが、生育不良区では植栽 7 年を経過した時点で樹高が 1.0 m、年間伸長量が 15cm 未満であるのに対し、生育良好区は植栽後 5 年で年間伸長量が 15 cm 以上となり、植栽後 7 年で樹高約 1.8 m まで成長している。なお、葉の色や針葉の長さには大きな差は見られなかった。

図 4 防雪林の生育不良区の年別平均樹高と年別平均年間伸長量（2005 年植栽）

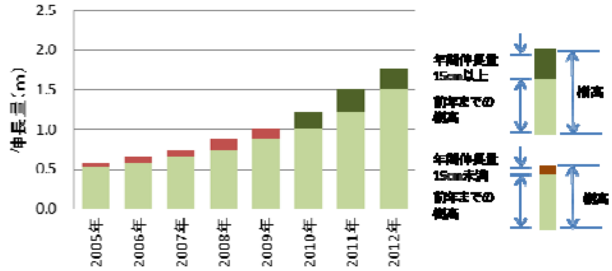


図 5 防雪林の生育良好区の年別平均樹高と年別平均年間伸長量（2005 年植栽）

2.2.2 植栽基盤

図 6 は A 防雪林の生育不良区の土壌断面である。2 層目では赤斑、グライ斑に富み、地下水位の上昇と下降が頻繁に生じている可能性がある。最下層はグライ層であることから、常時地下水位が存在すると考えられる。

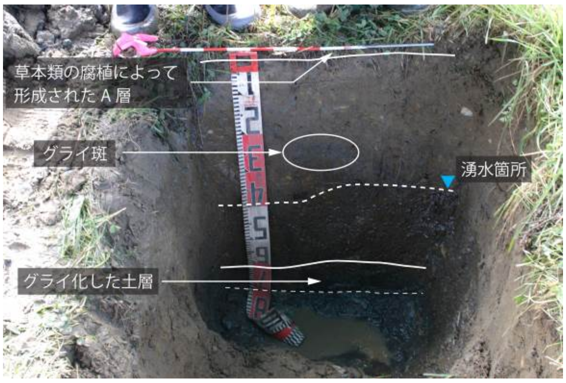


図 6 防雪林の生育不良区の土壌断面

図 7 は、生育不良区と良好区の土層断面の違いを模式的に図化したものである。土壌の乾湿については、両試孔とも上層部が半湿(手のひらをつけると濡れる)、下層部は湿（土塊を握ると水が滴り落ちる）状態であった。地下水位は生育良好区の方が高いが、グライ斑の含有状態から勘案すると、降雨後の調査による一時的なものと考えられる。

一方、生育不良区においては、表層近くまでグライ斑が「すこぶる富む」状態であり、常時還元状態にあることが窺えた。透水試験においても両区共に注水後の水位が上昇しており（図 8）、浸透しにくいのに加え、試孔の周辺から表面張力によって土壌の間隙に保持されている毛管水が流入し、水位が上昇したものと考えられる。

また、生育不良区は、良好区に比べ固相の割合が高く、植栽基盤が硬く締まっており、2 層目に硬盤層が確認された。

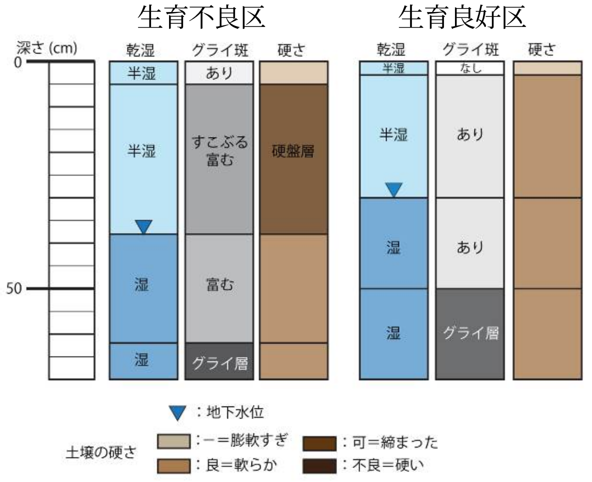


図 7 防雪林の生育不良区と良好区の土層断面の模式図

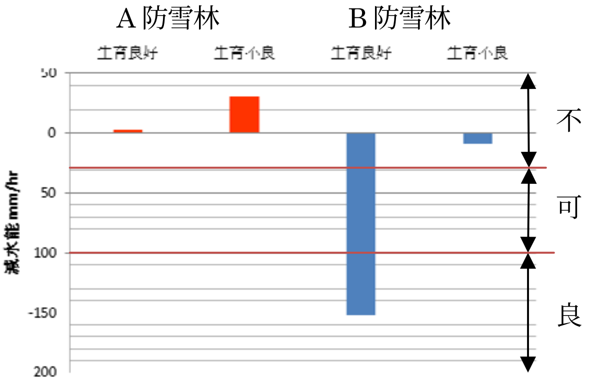


図 8 A 防雪林と B 防雪林の現場透水試験の結果

2.2.3 A 防雪林の生育不良要因の推定

既存の調査では植栽基盤の過湿に対するアカエゾマツの反応として、針葉が短くなる可能性が高い[3)]。しかし本調査では、針葉の短葉化や葉色の淡色化は顕著に確認されなかった。

一方、植栽基盤の硬さに対するアカエゾマツの反応は、年間伸長量が小さい期間が長く続き、「ずんぐりむっくり」の樹形になると考えられている。本調査地の生育不良区の年間伸長量は、植栽後調査時点まで 15cm 未満であり、年間伸長量が小さいことが確認された。

これらの結果から、植栽基盤の過湿と硬さが A 防雪林の生育不良の要因として考えられる。

2.3 B 防雪林の生育不良要因の推定

2.3.1 樹木の生育状況

図 9、図 10 は B 防雪林の生育良好区と不良区の樹高と年間伸長量の経過を示したものである。生育良好木と不良木の差は、樹高に現れているが、2008 年以降の年間伸長量に差は確認されていない。

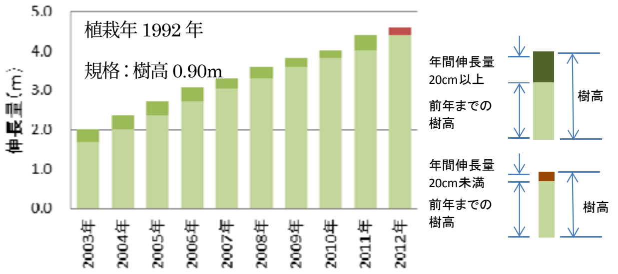


図 9 B 防雪林の生育良好区の年別平均樹高と年別平均年間伸長量（1992 年植栽）

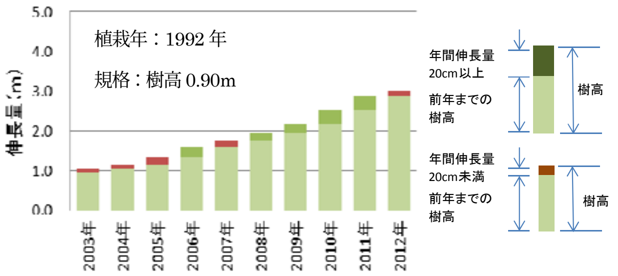


図 10 B 防雪林の生育不良区の年別平均樹高と年別平均年間伸長量（1992 年植栽）

図 11 に生育良好木の枝階の判別可能な年からの年別平均樹高と平均年間伸長量を示す。調査時に生育良好と判断した樹木であっても、植栽後 10 年程度は成長が停滞していたことを示している。一方、生育不良木は、2008 年以降から年間伸長量が連続的に 20cm 以上となっており、成長停滞期間は生育良好木よりも長く、15～16 年程度であった。

生育不良区および良好区共に、年伸長量から見ると健全な生育をしていると判断されるが、葉の黄変や褐変の割合が高かった。図 12、図 13 に計測木の変色状況を示す。生育良好木と不良木においては、葉の変色の割合に大きな差は確認されなかったが、葉の大きさが異なり、不良木は葉が小さい傾向が見られた（図 14）。

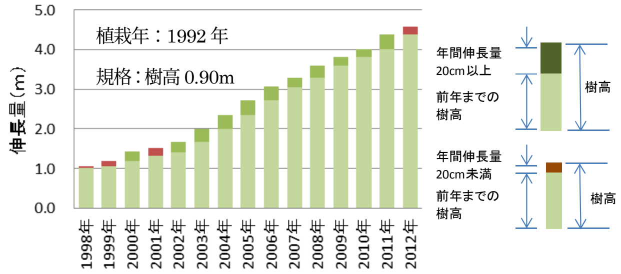


図 11　B 防雪林の生育良好区の 1998 年以降の年別平均樹高と年別平均年間伸長量

図 12 防雪林の生育良好区の計測木全体と針葉の褐変事例

図 13 防雪林の生育不良区の計測木全体と針葉の褐変事例

図 14 生育良好木と不良木の針葉の長さの比較

2.3.2 植栽基盤

図 15 は、B 防雪林の生育不良区と良好区の土層断面の違いを模式的に図化したものである。

土壌の乾湿については、両者とも半湿の状態であった。生育良好区では地下水は確認されていないが、不良区では深さ 40cm 付近にあり、調査後には周辺からの毛管水の流入により試孔が満水となった。不良区は良好区に比べ一段低い盛土で、近辺から水が流入しやすいため、地下水位が常時高い状態にある可能性がある。但し、石礫が多いため明瞭なグライ斑は確認できなかった。

現場透水試験の結果からは、不良区と良好区に明瞭な差が生じていた。不良区は非常に浸透能が低いのに対し、良好区は高い浸透能を示した（図 8）。

土壌の硬さについては、石礫が多く明確な差は確認されなかったが、三相比から不良区では良好区よりも固相率(3.1.6 参照)が高く、締め固まっていると考えられる。

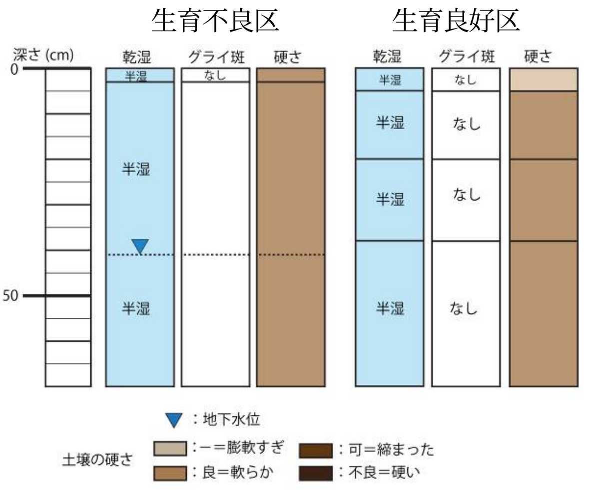


図 15 B 防雪林の生育不良区と良好区の土層断面の模式図

2.3.3 B 防雪林の生育不良要因の推定

生育調査や植栽基盤の調査の結果から、B 防雪林の生育不良の要因として土壌の水分環境が推測される。

先に述べたように、植栽基盤の過湿に対するアカエゾマツの反応は、針葉が短くなることに現れる可能性が高く [3)]、植栽基盤の水環境による差が針葉の大きさに影響を及ぼしていると考えられる。

また、B 防雪林は、不良区と良好区共に土壌の pH がアルカリを示していた(3.1.2 参照)。アカエゾマツは比較的中性に近い値を示す土壌（pH 6.7）でも生育することが報告されており [4)]、葉の黄変や褐変に影響を及ぼしているかは現時点で不明である。

2.4 生育不良の判定とその要因の推定方法

2.4.1 保育期における生育不良要因

2.2、2.3 に示した調査から防雪林の生育不良の主

な要因として、土壌の硬さ、および土壌水分環境が考えられる。

植栽初期の段階においては、土壌の硬さが樹木の生育状態に影響し、その後土壌水分環境により生育状態を左右すると考えられる。

また、生育不良要因に対するアカエゾマツの反応として、土壌の硬さに対しては年間伸長量が小さい期間が長く続き、「ずんぐりむっくり」の樹形となり、過湿に対しては針葉が短くなると考えられる。

2.4.2 保育期初期における生育不良の判定時期

樹木の植栽時には、根の切断や乾燥等により一時的に生育が停滞する植え傷みが生じる場合がある。そこで、生育良好木の年間伸長量のデータを用い、植え傷みが継続する期間の推定を行った。

図 16 に、植栽翌年からの平均樹高と平均年間伸長量の 6 ヶ年の推移を示す。但し、全ての個体が樹高 0.5m で植栽されたと仮定している。

生育良好木であっても、植栽後 3 ヶ年は「道路吹雪対策マニュアル（平成 23 年改訂版）」[1]における健全木の指標である年間伸長量 15cm 以上を満たしていない。しかし、４年目以降は 15cm 以上の年間伸長量が見られる。

この結果から類推し、植栽後 4 年目以降に追跡調査を実施し、年間伸長量が 15cm 程度に達しない場合には、植え傷みだけでなく、他の生育阻害要因がないか調査する必要があるものと考えられる。

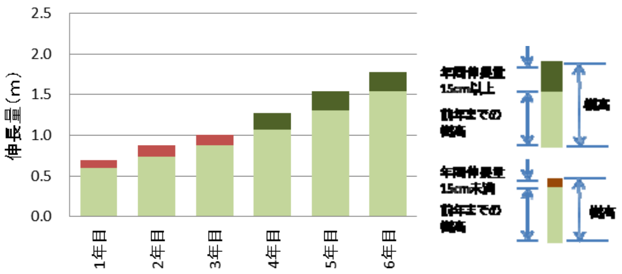


図 16 生育良好木に基づく保育期初期の平均樹高と平均年間伸長量

2.4.3 保育期初期における生育不良要因の推定方法

生育不良要因の推定方法については、「道路吹雪対策マニュアル（平成 23 年改訂版）」に、保育期の生育不良要因推定フローの記載があり、これによることが適当であると考えられる。

一方、今回の調査を通じて現場での適用が困難なものや、定量的に示されていないものがあり、現場で簡易に判断できる指標を補足していく必要がある。そこで、ここでは保育期初期の生育不良の要因である土壌の硬さと過湿状態の判断方法について補足的に述べる。

2.4.3.1 土壌の硬さ

植栽基盤の硬さについては、長谷川式土壌貫入計または山中式土壌硬度計で計測する。しかし、これまでの調査結果から礫質の植栽基盤の場合、石礫のために必ずしも得られた数値が土壌の硬さを表していないことが示唆されている。そのため、これらの測器が活用で計測が難しい場合には、植栽木から 50 cm 程度離れた箇所（植栽時の植穴よりも外側）に深さ 30 cm 程度の試孔を掘り、表 3 の方法により簡易的に基盤の硬さを判断することも可能である。

表 3 指の貫入による硬さ

指の貫入	山中式土壌硬度計	硬さの表現	評価
ほとんど抵抗なく指が貫入する	<=10mm	11mm以下で「膨軟すぎ」	—
やや抵抗はあるが貫入する（11～15mm）。またはかなり抵抗はあるが第一関節以上は貫入する（15～18mm）。	11～18mm	11～20mmで「柔らか」	良
第一関節まで貫入する（19～20mm）。貫入せずへこむ程度（20～24mm）。	19～24mm	20～24mmで「締まった」	可
指あとはつくが貫入しない。	25～28mm	24mm以上「硬い」	不良
指あともつかない。	>=29mm		

※ 指の貫入状態と山中式土壌硬度計の関係は「土壌調査ハンドブック」[8]による
※ 硬さの表現と評価は「植栽基盤整備技術マニュアル」[9]による

2.4.3.2 土壌の過湿状態

深さ 50cm 程度の孔を掘り、その断面を観察することで、土壌水分状態を類推することが可能である。

地下水位は季節変動や降雨後の上昇などがあり、調査時の情報が土壌水分状態を代表するわけではない。地下水位の変動の痕跡はグライ斑や斑鉄などに現れることから、これらを指標にできる。

グライ層は常時水に浸かっている状態を示し、グライ斑は時折酸化された斑鉄とともに出現し、地下水位の変動があることを示す。グライ層が形成されていない状態でも、グライ斑に富む状態の断面であれば、樹木にとって過湿状態であると推定される。

3. 造成時における望ましい生育基盤の検討

2.4.1 で示したように、防雪林の生育不良の主な要因として、土壌の硬さ、および土壌水分環境が考えられた。

特に初期の生育不良要因となる土壌堅固に対応するには、防雪林の基盤造成時において柔らかい土層を確保することが肝要といえる。

そこで、既存防雪林の植栽基盤を調査して、望ましい生育基盤の諸元について検討を行った。

3.1 土質試験

調査は道北の２箇所の防雪林で行った。調査を行った防雪林は2.1.1の図 1あるいは表 1に示したA、B防雪林の防雪林である。これらの防雪林に樹木の測定(2.1.1)、土壌断面調査(2.1.2)のほか、土質試験を行った。

生育良好および不良区画の平均的な樹木の側に、深さ 60cm 程度の試孔を掘り、その断面の４層（表層、深さ 10cm、20cm、40cm）から土壌を採取し、土質試験を行った。

実施した試験項目は､化学試験として､pH(H2O)､腐植含有量、全窒素含有量、物理試験として、三相分布と土性（土の粒度試験）である。

3.1.1 土質試験の結果

土質試験の結果一覧を表 4に示す。

表 4 土質室内試験結果一覧

調査地		地表からの深さ cm	pH (H2O)	腐植含有量 %	全窒素含有量 %	三相 % 固相	液相	気相	粒度試験 土性	
A防雪林	良好	10	6.1			55	35	10	LS	壌質砂土
		20	6.1	1.12	0.072	53	38	9	LS	壌質砂土
		40	6.0			55	40	5	LS	壌質砂土
	不良	10	6.2			57	33	9	LS	壌質砂土
		20	6.0	0.61	0.045	58	31	13	LS	壌質砂土
		40	6.1			55	40	5	LS	壌質砂土
B防雪林	良好	10	6.0			65	22	13	SCL	砂質埴壌土
		20	6.1	0.79	0.042	43	53	4	SCL	砂質埴壌土
		40	7.6			42	45	13	SL	砂壌土
	不良	10	8.2			68	23	9	SCL	砂質埴壌土
		20	8.3	0.73	0.051	64	22	14	SCL	砂質埴壌土
		40	8.3			67	26	7	SCL	砂質埴壌土

3.1.2 pH（H_2O）

表 5は、各調査区の pH とその評価である。樹木は土壌酸度の変化に鈍感なことが多く、一部の品種を除き、神経質になる必要は少ないが、ストレス要因を少なくするためにも pH が適当な範囲にあることが望ましいと言われている[5]。「植栽基盤整備技術マニュアル」[5]に基づくと、A防雪林は pH が微酸性で通常の植物の生育適性範囲内（pH(H_2O)5.6～6.8）であるが、B防雪林の土壌はアルカリ性で樹木の生育には不適と判断された。

B防雪林の生育良好区では、アカエゾマツだけではなく、隣接するプンゲンストウヒでも葉の褐変が生じており（図 17）、何らかの影響が生じている可能性がある。

表 5 pH（H20）の評価

深さ	A防雪林 生育良好	A防雪林 生育不良	B防雪林 生育良好	B防雪林 生育不良
-10cm	6.1	6.2	8.0	8.2
-20cm	6.1	6.0	8.1	8.3
-40cm	6.0	6.1	7.6	8.3

※ pH(H_2O)の評価（植栽基盤整備技術マニュアルに基づく）

不良 ：4.5以下、8.1以上

可 ：4.5～5.5、6.9～8.0

良 ：5.6～6.8

図 17 B防雪林（生育良好区）の褐変事例
（左/アカエゾマツ、右/プンゲンストウヒ）

3.1.3 腐植含有量

動植物の死骸等が土壌中で微生物や化学的な作用で分解合成されて作られた暗色無定型な有機高分子化合物を腐植といい、植物の栄養となりうるものである[1]。表 4に示すとおり、本調査区のいずれの地点も 0.61～1.12％と、「植栽基盤整備技術マニュアル」[5]に定める目標値２％に比べ小さい値となっている。腐植含有量は植物に必須のものではないが、防雪林の防雪機能を早期に発現させるためには、造成時に対処することが望ましいものと考えられる。

3.1.4 窒素含有量

窒素は植物にとって最も重要な元素であり、窒素が欠乏すると葉緑素が生成されず生育は止まり、葉の黄変や葉枯れを生じる[6]。樹林地の場合は収穫物を得るわけではないので、窒素含有量の目標値は設定されていない。参考として、「北海道施肥ガイド2010」[7]の「作物栄養診断基準・乾物中基準値 リン

ゴ」の値、2.2～2.8%と比較すると、本実験で得られた値（表 4）は 0.042～0.072%であり、かなり低い値である。

3.1.5 土性

土性とは、土壌を粒径組成（土壌粒子の大きさ別（粘土、シルト、砂）の重量割合）に基づき分類したものであり（表 6）、植栽基盤としては、砂壌土または壌土が望ましいとされる[5]。図 19 に各調査区の土性の三角図表を、図 19 に「土壌地理学特論」[8]による生育基盤の土性と樹木植栽の評価を示す。A防雪林は 2 調査区ともに壌質砂土であり、本来ならば土壌改良が必要と判断される。一方、B防雪林は砂質埴土壌、砂壌土で樹木には環境ストレスとして作用することはない。なお、各防雪林の生育良好区と不良区の土性に差異は確認されなかった。

表 6 国際土壌学会法による土性区分[5]

土性	略号	粘土(%)	シルト(%)	砂(%)
重埴土	HC	45～100	0～55	0～55
砂質埴土	SC	25～45	0～25	55～75
軽埴土	LiC	25～45	0～45	10～55
シルト質埴土	SiC	25～45	45～75	0～30
砂質埴壌土	SCL	15～25	0～20	50～85
埴壌土	CL	15～25	20～45	30～65
シルト質埴壌土	SiCL	15～25	45～85	0～40
壌質砂土	LS	0～15	0～15	85～95
砂壌土	SL	0～15	0～35	65～85
壌土	L	0～15	20～45	40～65
シルト質壌土	SiL	0～15	45～100	0～55
砂土	S	0～5	0～15	85～100

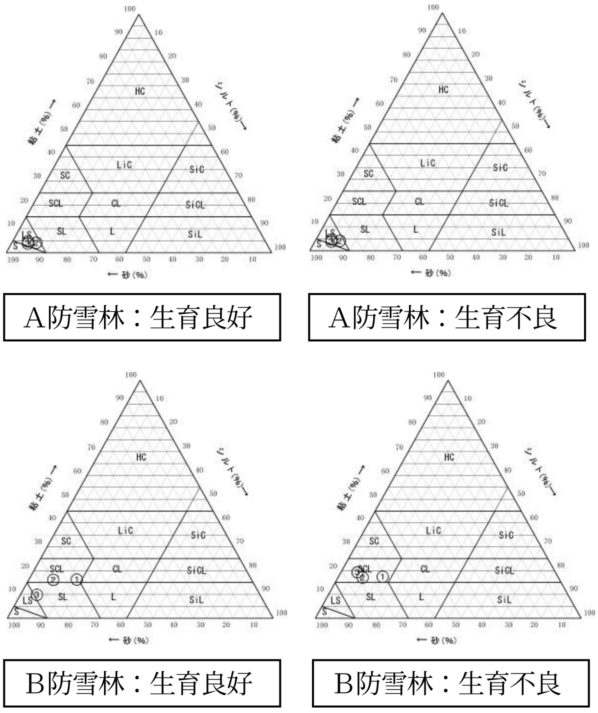


図 18 調査区の土性三角表分布図

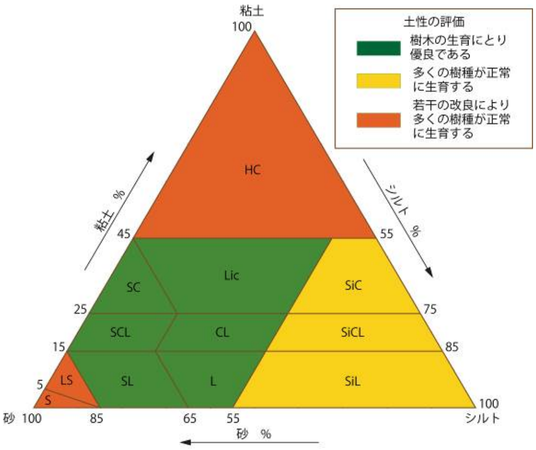


図 19 生育基盤の土性と樹木植栽の評価
（「土壌地理学特論」[8]による）

3.1.6 三相分布

土の個体、水、空気を固相、液相、気相といい、体積比で土壌の占有割合を示したものを三相分布という[6]。図 20 は各調査区の深さごとの三相分布である。

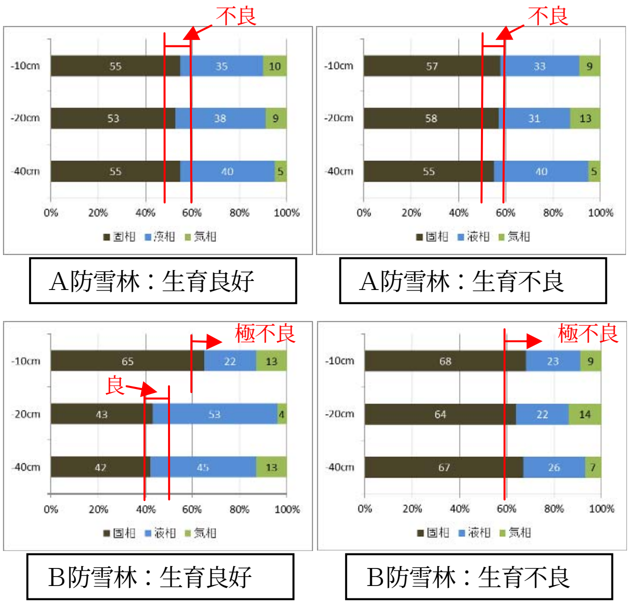


図 20 調査区の三相分布

日本造園学会の報告[9]によると、植栽基盤として、鉱質土壌（火山性土壌以外）の場合には、固相 40%以下を「優」、40~50%を「良」、50~60%を「不良」、そして 60%以上を「極不良」と評価している。

これを評価の指標として用いると、A防雪林は両区とも「不良」と判断され、B防雪林においては、生育良好区は深さ 10cm の表層は「極不良」であるが、その他の深さでは「良」、生育不良区は全層で「極不良」と判断された。固相の割合が高いほど土

壌は緻密であり、硬いことを示している。このことから、B防雪林では、土壌の硬さが一つの要因となり、生育の差に現れたものと推測される。

3.1.7 まとめ

以上、既往の防雪林の植栽基盤において行った土質試験の結果から、次のことがまとめられる。

pH については、アルカリにある土壌の存在が認められる。原因は現在のところ不明ではあるが、造成時における pH のチェックを確実に行う方法が求められる。

腐食含有量、窒素含有量は全体に不足気味である。防雪林において多くは人工的に造成された基盤の上に植栽されている。またこのとき使用される土は、多くの場合土木工事による現場発生土を流用するため、有機質が少ないことに起因すると考えられる。

有機物の蓄積に従って、時間の経過とともに改善するとは思われるが、極端に低い場合は造成時に施肥等の手当が必要と考えられる。

3.2 土壌の透水性等

3.2.1 透水性試験の方法

過湿の程度を把握するため、掘削した植穴（径 15 ㎝、深さ 30～40 ㎝程度）に水を注入し、水位の変化を読み取って減水速度を計測する簡易的な透水性試験を実施した（図 21）。

試験は長谷川式現場透水試験器を使用し、試孔による土壌断面調査地点の近傍でA防雪林 12 地点、E 防雪林 8 地点、B 防雪林 12 地点の合計 32 地点の地表部で 2011 年 10 月に実施した。A,B の各防雪林は、2.1 で示した A,B の各防雪林と同一である。E 防雪林の調査地点の樹種はヨーロッパトウヒで、1982 年から 2003 年に植樹され、樹高は約 2.0～12.5m に達しており、生育状況は概ね良好である。

なお、透水性の評価として「植栽基盤整備技術マニュアル」[5)]に示されている減水速度による判断基準（表 7）を用いた。

さらに E 防雪林では現地土壌を採取の上、三相比と土壌密度も求めた。

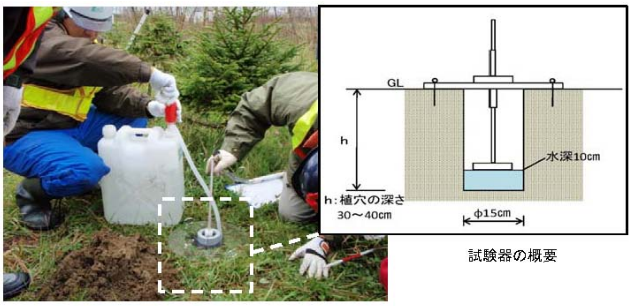


図 21 簡易透水性試験の状況と試験器の概要

表 7 原水速度による透水性の判断基準

評価	不良	可	良
減水速度 (mm/h)	~30	30~100	100~

3.2.2 透水性調査の結果

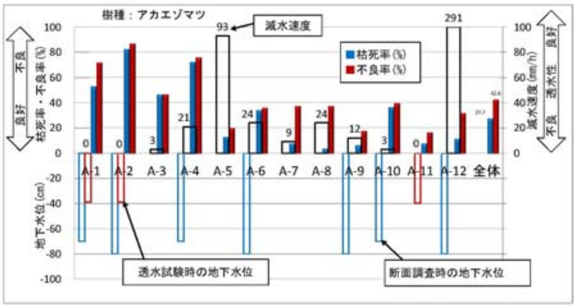
3.2.2.1 A 防雪林

図 22 にA防雪林 12 地点（A-1～A-12）の樹木の生育状況と土壌断面調査時に試孔内に滞水が見られた地点の地下水位及び今回実施した透水性試験の結果を示す。図中左軸上に樹木の枯死率・不良率、右横軸上に透水性試験による減水速度、左軸下に地下水位を示す。地下水位は断面調査時に滞水が見られた地点の水位と透水試験時に滞水が見られた地点の水位を示している。

透水性試験の結果、12 地点中 3 地点で地下水位が高く、減水速度は 0mm/h または水が上昇した。また、12 地点中 10 地点で減水速度は 30mm/h 以下となり、透水性の判断基準（表 7）によると透水性不良と判断される。降雨による地下水位の上昇も考えられるが、土壌断面調査時にも滞水が確認されており、全体に透水性不良の傾向を示していると言える。林帯には明渠排水が設置されているが、降雨後にも滞水が確認されていることから排水機能が十分に働いていない可能性も示された。

図 23 は減水速度が 30mm/h 以下の場合を透水性不良、30mm/h を超える場合を透水性可・良とした場合の生育状況（枯死率・不良率の平均値）の違いを示している。透水性不良の場合、透水性可・良の場合と比較して、枯死率・不良率とも 20%程度高くなっている。

図 22 透水性と生育状況（A 防雪林）



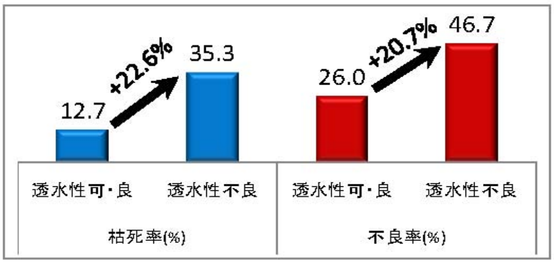


図 23 透水性による生育状況の違い（A 防雪林）

3.2.2.2 B 防雪林

図-6 に B 防雪林 12 地点（B-1～B-12）の樹木の生育状況と試孔内に滞水が見られた地点の地下水位及び今回実施した透水性試験の結果を示す。図中左軸上に樹木の当年伸長量・年平均成長量、右軸上に透水性試験による減水速度、左軸下に地下水位を示す。

透水性試験の結果、12 地点中 5 地点で植穴内に滞水が見られ減水速度は 0mm/h または水が上昇した。また、12 地点中 10 地点で減水速度は 30mm/h 以下となり透水性不良と判断される。降雨による地下水位の上昇も考えられるが、地表面で滞水している箇所が確認されていることや土壌断面調査時点でも 12 地点中 8 地点で滞水が確認されており、通常でも排水不良が生じている可能性が高いと考えられる。

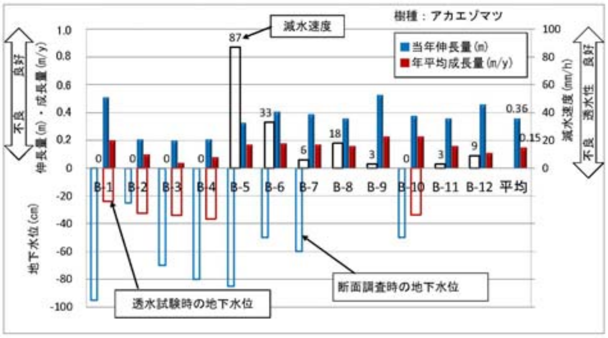


図 24 透水性と生育状況（B 防雪林）

図 25 に B・E 防雪林における透水性と生育状況の関係を示す。透水性と当年伸長量の間に特に相関は見られない。年平均成長量との関係では、相関は強くはないが透水性が良くなるほど年平均成長量は大きくなる傾向が見られ、透水性が成長量に影響を与えていることが窺える。

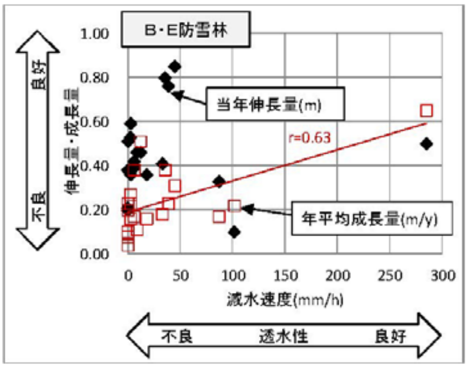


図 25 透水性と生育状況の関係（B・E 防雪林）

3.2.2.3 E 防雪林

図 26 に E 防雪林 8 地点（E-1～E-8）の樹木の生育状況と試孔内に滞水が見られた地点の地下水位及び透水性試験の結果を示す。図中左軸上に樹木の当年伸長量・年平均成長量、右軸上に透水性試験による減水速度、左軸下に地下水位を示す。なお、（ ）内は植栽年を示している。

透水性試験の結果、植穴内に滞水は確認されず、8 地点中 5 地点で減水速度 30mm/h 以上で透水性は可または良好と判断される。土壌断面調査時に E-1 のみ僅かに滞水が確認されているが、生育は概ね良好であり、生育基盤の透水性としては問題無いと言える。

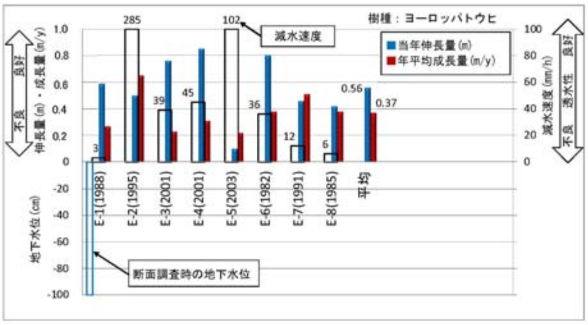


図 26 透水性と生育状況（E 防雪林）

3.2.3 土壌密度と生育状況

土壌硬度については、調査地点の礫分が多いケースが見られたことから、土壌硬度計による計測では礫障害により過小な値を示したものと考え、土壌密度に着目し分析を行った。

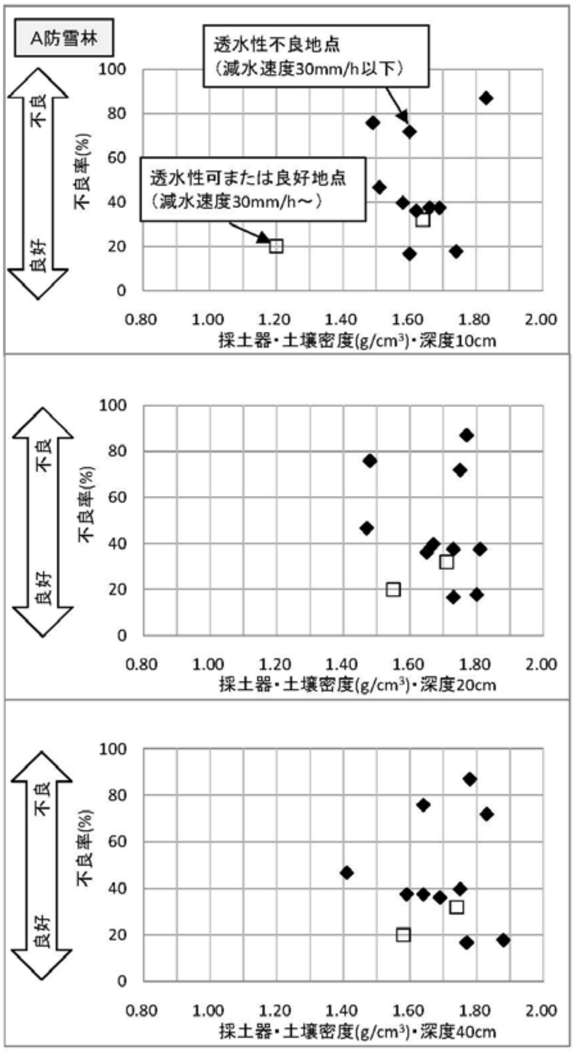


図 27 土壌密度と生育の関係（A 防雪林）

図 27 にＡ防雪林、図 28 にＢ･Ｅ防雪林における深度 10 ㎝、20 ㎝、40 ㎝の土壌密度と生育状況の関係を示す。全体に透水性・排水性不良の傾向が見られたＡ防雪林の各深度とも土壌密度と生育状況の関連性は特に見受けられない。

Ｂ・Ｅ防雪林では、透水性不良地点（減水速度 30mm/h 以下）を除いた場合、各深度において土壌密度が大きくなるほど年平均成長量は小さくなる傾向が見られ、深度 20 ㎝で相関係数-0.89 と強い負の相関にある。生育が良好で透水性としてほぼ問題の無いと思われるＥ防雪林のみでは更にその傾向は強い。

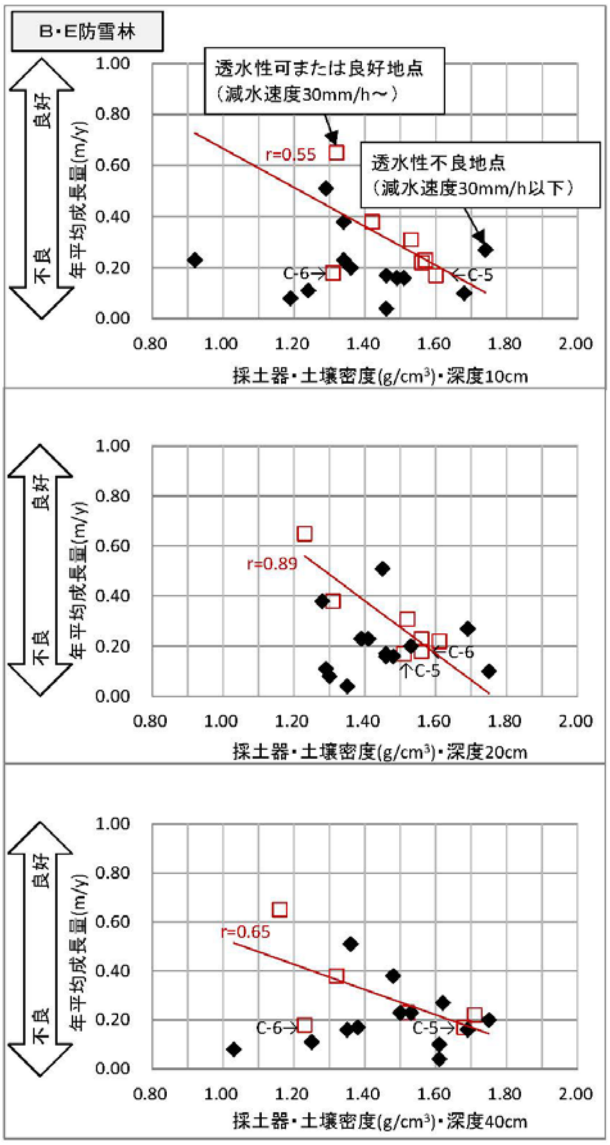


図 28 土壌密度と生育の関係（B・E 防雪林）

3.2.4 土壌の三相比と生育状況

土壌の三相比（固体、液体、気体の体積割合）と生育状況の関係については、固相率が高く気相率が低くなるほど生育不良となる傾向がある [12)]。

固相率は土壌中の空隙の割合を表す逆数として捉えることが出来、この数値が大きくなると液相率、気相率が小さくなり樹木の生育に支障きたすことになる。また、液相率と気相率は天候や時間とともに変動するものであるから三相比では固相率に着目した。

図 29 に各防雪林全層における採土器による土壌密度と固相率の関係を示す。各防雪林とも土壌密度が大きくなるほど固相率が高くなる傾向が見られた。

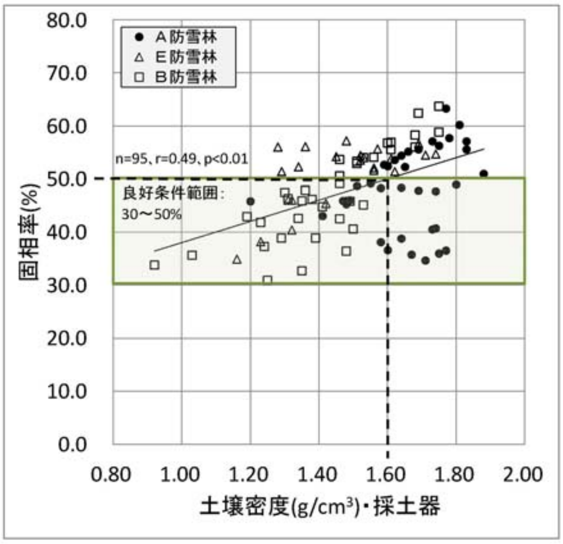


図 29 土壌密度と固相率の関係

「道路緑化技術基準・同解説」[13)]によると、植栽土壌として根群伸長の良好条件範囲として固相率は30～50%、液相率は18～45%、気相率は16%以上とされている。図 29 より固相率 50%に相当する土壌密度は約 1.6g/cm^{3}ということになる。したがって、採土器により測定した土壌密度は三相比のうち固相率を反映することになり、これにより現場で簡易的に防雪林としての生育基盤の健全度を判定する際の一つの指標になるものと考えられる。

3.2.5 まとめ

透水性試験の結果、透水性不良と判断された地点の生育は不良となる傾向が見られた。また、土壌断面調査時および透水試験時の滞水状況や周辺の排水状況からも生育基盤の過湿が生育不良の一つの要因として影響を及ぼしている可能性が示唆された。

土壌の透水性に問題がなければ、土壌密度により生育に差が生じ、土壌密度が大きいほど生育が不良となる傾向が概ね認められた。

三相比と生育状況の関係では、固相率が高く気相率が低下するほど生育不良となる傾向が見られた。また、採土器により測定した土壌密度は固相率を反映しており、これにより現場で簡易的に生育基盤の健全度を判定する際の一つの指標になるものと考えられた。

これまでの調査により、生育不良の一つの要因として生育基盤の過湿が影響を及ぼしている可能性は確認が出来た。また、採土器による土壌密度や三相比のうち固相率と一定の関係があることも認められたが、生育基盤由来以外の要因も一部見受けられ、複数の要因が複合的に作用して生育不良を引き起こしている可能性がある。

3.3 生育基盤造成に関する提案

本調査の結果、植栽初期の段階（保育期初期）には土壌の硬さが樹木の生育状態を規定し、初期の段階で枯死に至らなかった個体は、保育期中期（樹高1～3m 程度）には土壌水分環境により生育状態が規定されると推測される。

そのため、基盤造成においては、表層の「膨軟さ」を確保できる盛土方法を検討することが重要となる。

また、地下水位に関しては、道路吹雪対策マニュアル（平成 23 年改訂版）における有効土層厚（上層 60cm、下層 20～40cm）を確保し、それが水位以上の高さであれば問題は生じないが、必要最低限の盛土厚（たとえば上層 40cm）とならざるを得ない場合には、地下水位を盛土厚以下にすることが重要である。アカエゾマツの根系の深さについては明らかではないが、同属のトウヒでは地表 40cm 以内に殆どの根系があることが報告されており[10)]、排水溝の確保などにより深さ 40cm 以上に滞水しない方法を採る必要がある。

また基盤造成にあたっては、簡易には土壌密度に関連し、土壌密度が大きい、すなわち締固めが大きい土壌ほど生育が悪い傾向が現れた。このため、締固めない造成方法を採ることが肝要と考えられる。

4. 長期的視点に立った防雪林の生育･管理手法の提案

防雪林の機能を長期にわたって維持するためには、育成管理が重要である。

所期の効果が得られるまでは早期に成長させる必要があるし、一方機能が発揮する段階に至った防雪林では樹木の生長に伴う密度の問題、すなわち混みすぎると下枝が枯れ上がり、葉の量が減る事態に対応する必要が生じる。

そこで本研究では、下枝の枯れ上がりを生じにくくするため、間引きのタイミングを把握し、また間引きによる防雪機能への影響を調査するため、成長履歴調査、風洞試験、防雪柵の撤去や間引きを伴った視程等の計測を行った。

4.1 道路防雪林の成長履歴調査

4.1.1 研究方法

4.1.1.1 調査地、方法

道路防雪林の生育状況を把握するため、アカエゾマツの生育および植栽基盤について調査を実施した。

調査対象地は道北の４箇所の道路防雪林である(詳細は 2.1.1 参照)。

樹木の時間経過に伴う変化を調査するため、各防雪林から、それぞれ生育良好木２本、生育不良木２本（合計 16 本）を選定して伐採し、図 30 のように現地で全長と各枝階間の長さを計測した。さらに高さ 1m（高さ 3m 未満の樹木では 0.5 m ）ごとに幹に垂直で平面となる円盤を切り取り、室内で各円盤の年輪を４方向に読み取り、年輪解析 [11] を行った。

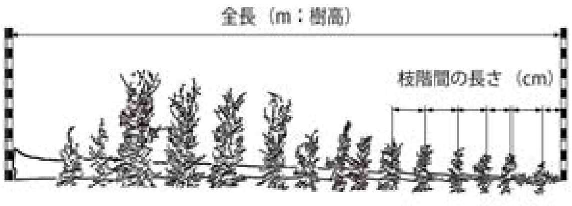


図 30 伐採木の計測項目

4.1.1.2 年輪解析

図 31 に年輪解析に供した円盤の例を示す。年輪のほぼ中心である髄から４方向に出現する年輪の距離を計測し、４方向の平均値を年間の肥大成長量とした。平均の年肥大成長量を算出したのち、成長の様子を分かり易くするため、縦軸に各円盤を採取した地上高さ、横軸にその円盤に現れた年輪の平均半径をプロットし、同齢の年輪の点を順次結んで樹木を縦に半割したような年輪解析図を作成した。

図 32 は B 防雪林の生育良好木の年輪解析図である。両側の年輪と縦軸の交点は、その年輪が形成されたときの樹高を表す。これらの結果から成長曲線を作成した（図 33）。なお、樹木が採取した円盤の地上高まで成長するには年数を要する。そのため、アカエゾマツは２年生で樹高 10cm 程度 [14]、６年生の出荷時に樹高 30cm [15] であることから、樹高成長曲線の作成にあたり、最下部の円盤の伐採高に応じて 1～4 年程度を年輪数に加えて樹齢とした。

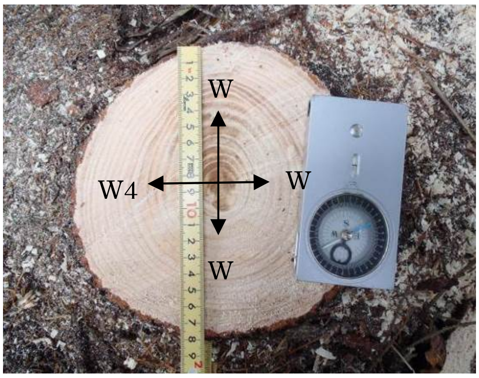


図 31 年輪解析に用いた円盤の例

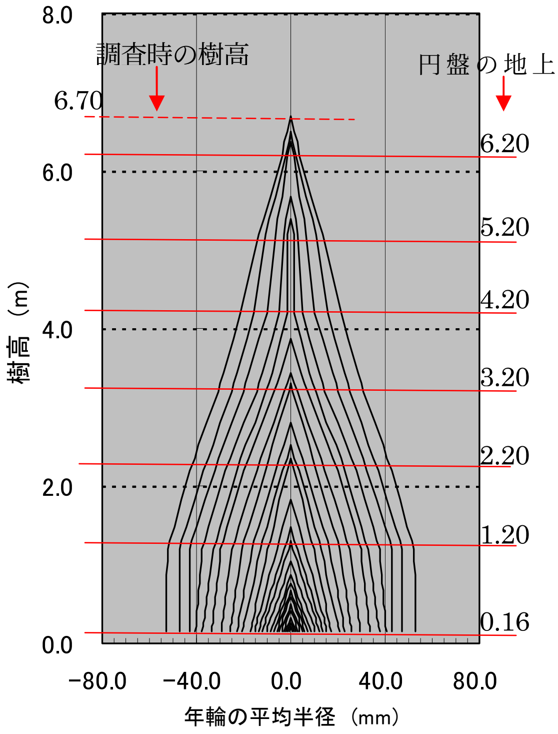


図 32 B 防雪林の生育良好木の年輪解析図

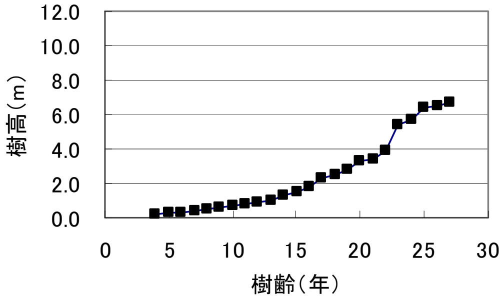


図 33 防雪林の生育良好木の樹高成長曲線

4.1.1.3 枝の成長解析

年輪解析に用いた試料木の枝階間の成長量、および枝階ごとに枝の年間成長量を計測した。図 34 に枝の年間成長量の計測方法を模式的に示す。計測対象は道路と平行な W1 とそれに直交する W2 である。図 35 は、計測結果を枝階ごとに年成長量を整理し、模式的に示したものである。枝は樹幹に直交しないため、必ずしも正確な樹形を表すものではないが、おおよその樹形の成長過程を追うことができる。

図 36 は試料木の枯れ上がり形状を模式的に示したものである。樹高 8m 程度まで成長した樹木の内側の枝は、高さ 5m 付近を頂点に円錐状に枯れていることが確認できる

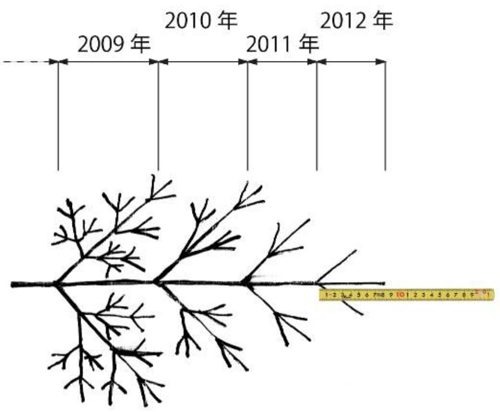


図 34 枝の年間成長量計測の模式図

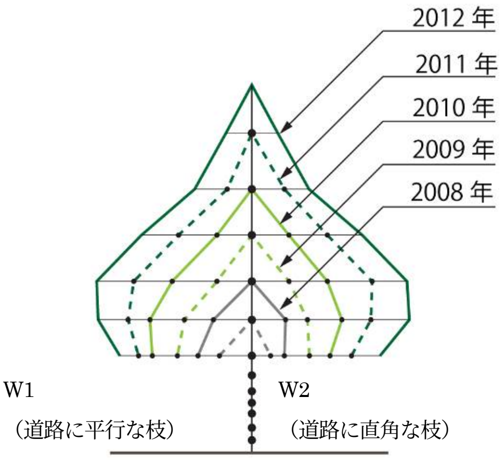


図 35 樹形成長の模式図

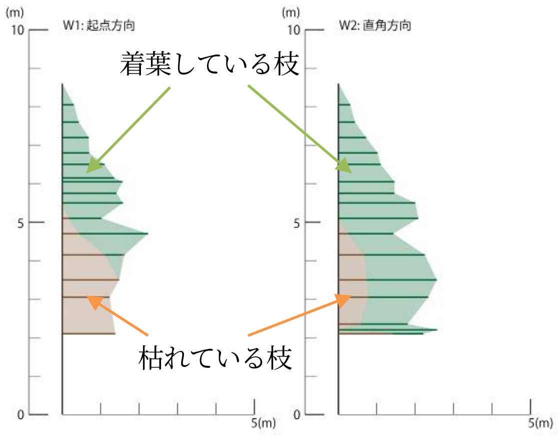


図 36 防雪林の生育良好木の枯れ上がりの形状

4.1.2 道路防雪林の標準的な成長

道路防雪林の主な植栽木であるアカエゾマツを対象に、成長過程を再現するため、樹高成長および枝の成長解析を行った。

4.1.2.1 樹高成長の解析

年輪解析を行った樹木のデータを用いて、アカエゾマツの平均的な樹高成長の算出を行った。

各試料木の植栽時の樹高が統一されていないため、比較できるようにそれぞれ樹高 0.5 m で植栽されたと仮定して補正を行い、樹高成長曲線を作成した。長期的に見ると樹高成長は本来 S 字曲線（ロジスティック曲線）を示す[16]が、北海道の原生林におけるアカエゾマツの最終的な平均樹齢が 255 年程度である[17]ことを考慮すると、今回の試料木が成長初期の段階であることから 3 次曲線で近似させた。樹高成長曲線を図 37 に示す。成長式は次の通りである。

$$H=-0.0006Y^3+0.0253Y^2+0.012Y+0.6906 \quad (1)$$

ここで、H: 樹高(m)、Y: 林齢(植栽後の年数・年)

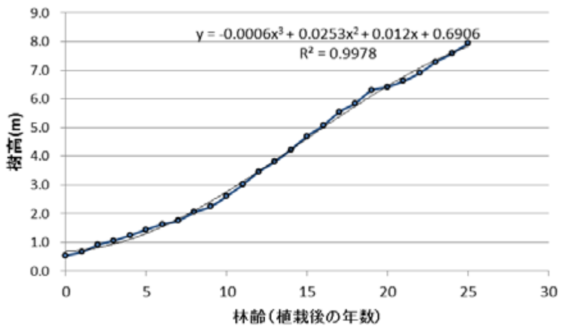


図 37 年輪解析の平均値から算出した樹高成長曲線

4.1.2.2 枝の成長の解析

林齢と枝張りの関係を知るため解析を行った。

図 38 に胸高直径と枝張りの関係を示す。胸高直径は計測データ、枝張りは調査時の 4 方向の平均値を使用した。次式は胸高直径と枝張りの関係の近似式である。

$$Wo=8.1123D+0.4476 \quad \cdots (2)$$

ここで、Wo: 枝張り(片側)(m)、D: 胸高直径（m）

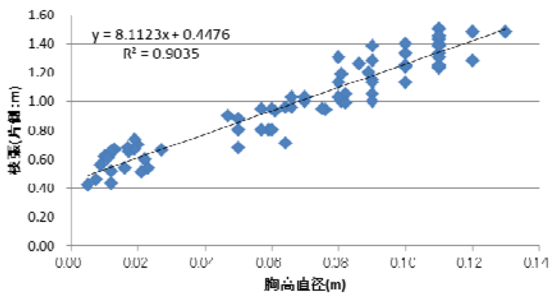


図 38 胸高直径と枝張りの関係

また、図 39 は樹高と胸高直径の関係を図示したものである。この図より、樹高と胸高直径の関係の近似式(3)を算出した。

$$D=-0.0003H^2+0.023H-0.0293 \quad \cdots (3)$$

ここで、D：胸高直径（m）、H：樹高（m）

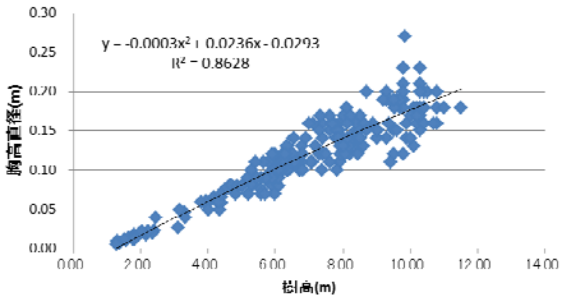


図 39 樹高と胸高直径の関係

式(2)、式(3)、および林齢と樹高の関係式(1)から林齢別に枝張り（片側）を算出した。

なお､代入式をそのまま林齢の関数として表すと 6 次式となり複雑であるため、計算結果から樹齢と枝張り（片側）の値をプロットし（図 40）、3 次式で近似させた（式(6)）。

$$Wo=-0.0001Y^3+0.0038Y^2+0.0144Y+0.3062 \quad \cdots (4)$$

ここで、Wo：枝張り(片側)(m)、Y：林齢(植栽後の年数)(年)

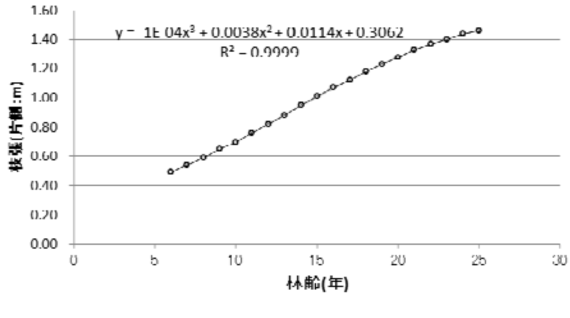


図 40 林齢と枝張り（片側）の関係

4.1.3 下枝の枯れ上がり開始時期の推定

樹冠閉鎖林分では、あるところから年輪成長が抑制され、樹冠閉鎖時期と重なると考えられる。樹冠が閉鎖すると肥大成長が抑制され、年輪幅は狭くなる[17]ことから、樹冠閉鎖が生じている防雪林を対象とした年輪解析および枝の成長解析結果を用いて、密度(植栽間隔)の異なる防雪林の樹冠閉鎖(下枝の枯れ上がり)時期を比較した。

4.1.3.1 樹冠閉鎖開始時期と解放時期の推定

年輪の読み値から、樹冠閉鎖開始時期と解放(間引き)時期の推定を試みた。

年輪の成長幅はその年代の気候などに影響を受け、温暖な場合には成長量は大きく、寒冷な場合には小さいことが知られている[16)17)]。また、短期的に見ると、年輪幅の増加傾向や減少傾向は光条件の変化による生産量の増減を示している。今回の年輪判読は、樹木の寿命からすると短期的であることから、年輪幅の増加傾向は樹冠の競合が発生せずに成長している状況を示し、年輪幅の減少は樹冠閉鎖が始まり樹冠の競合が生じた結果、生産量も減少している状況であると判断した。

図 41 は、C 防雪林の植栽後の年別年輪成長量（mm/年）の例である。林齢 10 年で年間年輪成長量がピークを迎え、翌年から減少傾向が続き、林齢 18 年で年間年輪成長量が最小値となり、その後増加傾向に転じている。そして、林齢 22 年を再ピークとして再び減少傾向が窺える。これは、林齢 10 年から樹冠閉鎖が始まり、樹齢 18 年で間引きが行われ樹冠が解放されたと考えられる。また、その後 4 年程度で再び樹冠閉鎖が生じたと推測される。

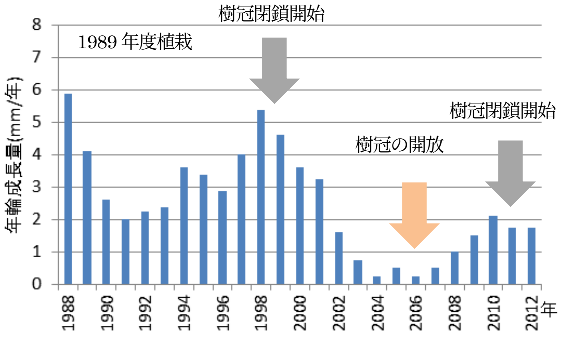


図 41 C 防雪林の年別年輪成長量と樹冠閉鎖・開放時期の推定図

図 42 は D 防雪林、図 43 は B 防雪林の年別年輪成長量と樹冠閉鎖および解放時期の推定図の代表例である。

D 防雪林は、林齢 9 年で樹冠閉鎖が始まり、18 年で間引きを実施、21 年で樹冠が再閉鎖したと推測される。また、B 防雪林では、1 列 2 条植栽で列間が 3m 以上あるため、現地での視認からは樹冠閉鎖状態に無いと判断したが、年輪の読み取りからは列内の 2 条間ですでに樹冠の競合が生じていることが示

された。

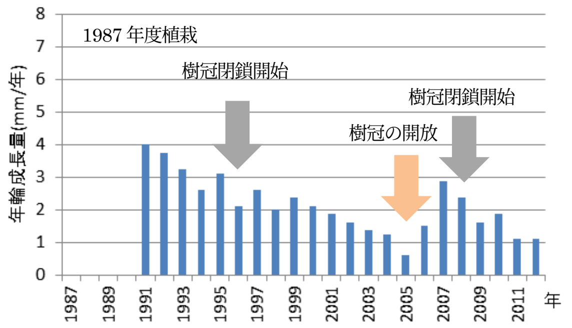


図 42 D 防雪林の年別年輪成長量と樹冠閉鎖・開放時期の推定図

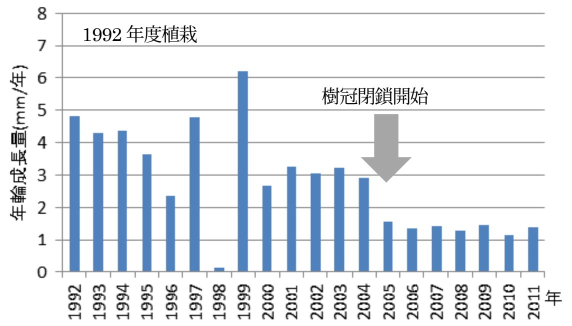


図 43 B 防雪林の年別年輪成長量と樹冠閉鎖・開放時期の推定図

4.1.3.2 下枝の枯れ上がりと隣接木との距離の関係

調査した枝のうち、全て枯れ上がり成長が止まっている枝のデータを用いて、植栽密度と隣接木の関係を解析した。

その結果、植栽密度と生存していた時までの枝の長さ、および枝の生存年数に相関は見られなかった。

また、隣接木の距離と生存していた時までの枝の長さの関係に相関は見られなかったが、隣接木との距離が離れるほど、枝の生存年数が長くなる傾向が見られた(図 44)。

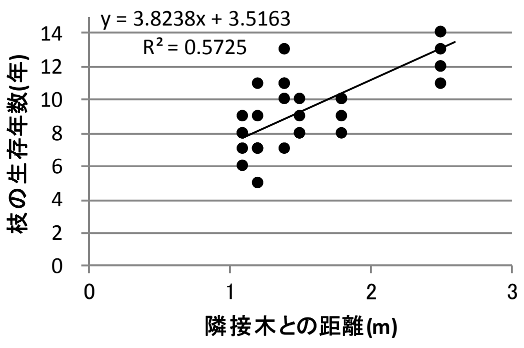


図 44 隣接木との距離と枝の生存年数の関係

4.1.3.3 樹冠閉鎖開始と下枝の枯れ上がり、間引きに関する考察

年輪解析から推定した樹冠閉鎖時期は、林齢で見ると 6～13 年と幅があった。試料木のデータから算出した林齢と枝張りの関係（図 40）によると、枝張りが 0.5 m～0.9 m の状態で樹冠閉鎖が開始したことになる。

C 防雪林は、列間 1.0m、苗間 1.5m の千鳥植栽、D 防雪林では列間 0.75m、苗間 1.5m の千鳥植栽と狭い間隔で植栽したために樹冠閉鎖が若齢のうちに生じたものと考えられる。

現在、道路吹雪対策マニュアル（平成 23 年改訂版）で列間 3.0 m 、苗間 2.0 m を標準としていることから、試料木の場合よりも樹冠閉鎖時期は遅いと考えられる。樹齢 15 年での枝張りは 1 m 程度となることが予想されることから、その時期を一つの目安として間引き管理計画を立案する必要がある。

4.1.4 まとめ

既存防雪林を対象とした現地調査および解析結果から、以下のことが明らかとなった。

道路防雪林の標準配置 [1]（列間 3.0m、苗間 2.0m）においては、林齢 15 年で枝張りが約 1.0m となることが予想されることから、間引き管理の一つの目安として、植栽後 15 年頃が適当と考えられる。

今後は調査事例を増やし解析精度の向上を図ると共に、防雪効果を考慮した間引き時期について検討する必要がある。

4.2 風洞実験による防雪林の防雪機能調査

道路防雪林では樹木の生長に応じて間引きが必要であるが、間引きにより一時的に防風機能は低下する。道路交通環境を維持する上で防風機能の低下をできるだけ抑えて間引を行うことが重要であり、そのためには間引きと防風機能の関係を把握することが必要である。しかし、その関係は未だ定量的には明らかになっていない。

防雪林の防風機能を把握するためには、実際の林帯で計測することが望ましいが､計測条件を設定し、比較を行うことは困難である。そこで、計測条件の設定が容易な風洞を用いて、防風機能の調査を行った。本調査では、間引きの有無、樹高・枝下高の違い、間引きパターンの違い（千鳥間引きと列間引き）および風向が防風機能に与える影響を把握することを目的に、模型防雪林を用いた風洞実験において流速の計測を行った。

4.2.1 実験条件

4.2.1.1 実験装置

本実験では、寒地土木研究所が所有する全長約 29 m、測定洞全長約 9m、測定洞断面 1.2m×1.2mの風洞実験装置を用いた。全体図を図 45 に示す。

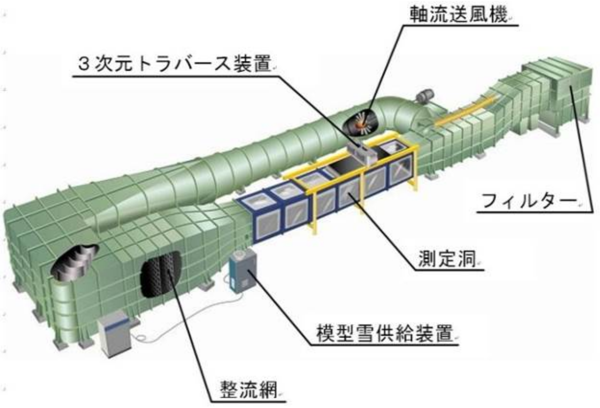


図 45 風洞実験装置

まず実験に先立ち、測定洞内風速分布の調整を行った。測定洞内の鉛直方向風速分布は、上空ほど風速が増す自然の風を模擬するため、べき法則（べき指数は田園地帯を想定した 0.15[18]）に近似するよう調整した。調整は、乱流格子、スパイヤー、バリヤーを組み合わせた風速調整装置(図 46)を測定洞の上流に設置することにより行った。調整前後の風速分布を図 47、図 48 に示す。

調整後の風速分布は、横断方向分布が計測範囲（800 mm）内でほぼ一定、鉛直方向分布がべき指数 0.15 のべき法則に近似しており、境界層高さは 400 mm 以上で設置予定の模型高さに比べ十分な高さを確保した。

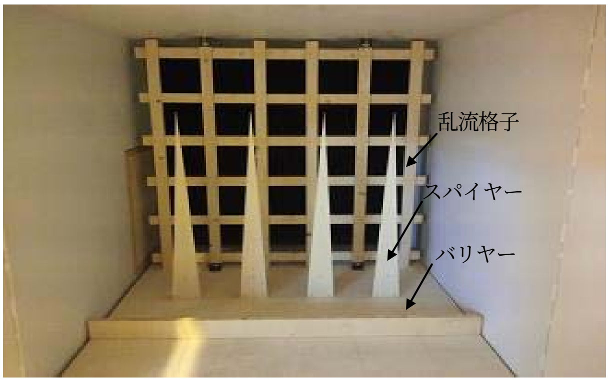


図 46 風速調整装置(風速分布調整後)

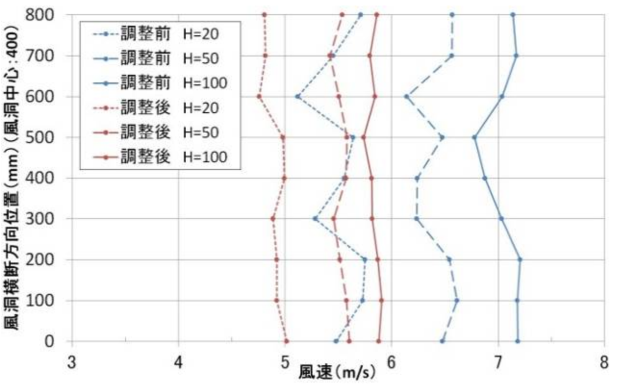


図 47 風速分布(横断方向)

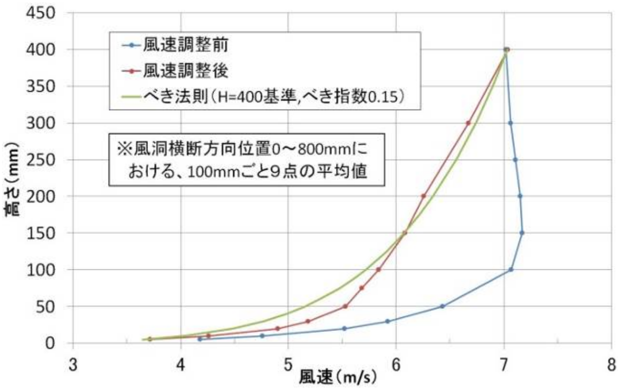


図 48 風速分布(鉛直方向)

4.2.1.2 模型雪

実験では、老川ら[19]が、建物近傍を対象とした吹雪風洞実験において重要としている移動臨界摩擦速度比、安息角、ストークスパラメータについて考慮し、模型雪として活性白土を使用した。

模型雪を測定洞上流のノズルから圧縮空気とともに風洞内に供給することにより、人工的な吹雪を発生させている。模型雪の供給量は、本実験装置で PIV 計測が可能であることを確認している 230 g/min とした。

4.2.1.3 風速

実験風速は、老川らによる実験[19]で吹きだまりの再現性が高いとされる風速 4.5m/s 前後（地面からの高さ H=50mm）を参考に、H = 400 mm での風速を 7 m/s (前述のべき法則において H =50 mm では 5.1 m/s ）とした。

4.2.1.4 樹木模型の形式

実験に使用する樹木模型は、数種類の形式を検討した結果[20]、形式の差による実験結果への影響は少ないことから、製作上の効率を考慮して 3D プリンターにより ABS 樹脂で製作した(図 49)。模型縮尺は、間引きを行う時期とされる樹高 6m 前後[1]の樹

木を想定し、この樹木の縮尺模型を設置した場合における測定洞（高さ 1.2m）の閉塞率を 5%程度以内[18]とするため、1/100 とした。

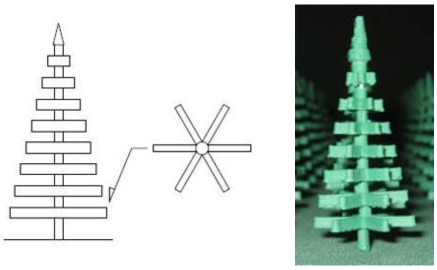


図 49 樹木模型

4.2.1.5 計測方法

流速の計測は PIV を用いた（図 50）。PIV は、流れに沿って移動するトレーサーを連続撮影した画像の解析により流速を計測する方法であり、面的に流れ場を把握することができる。

トレーサーには模型雪の活性白土を利用した。なお、模型雪の動きは空気の流れと完全には一致しないので、計測結果は風速ではなく模型雪の移動速度としての流速となるが、この流速は流速比とすることで防風機能を評価する指標として利用できることから[20]、本実験において流速比を防風機能の評価指標とした。流速比とは、各地点における流速を防雪林がない場合の同一地点における流速で除した値である。

画像の撮影は毎秒 2,000 枚で 5 秒間行い、撮影した 10,000 枚の画像を用いて解析を行った。画像 2 枚の解析から 1 組得られる流速分布を 5,000 組分平均したものを計測結果とした。計測面は 4.2.2 では鉛直面、4.2.3 では水平面（図 50）とした。

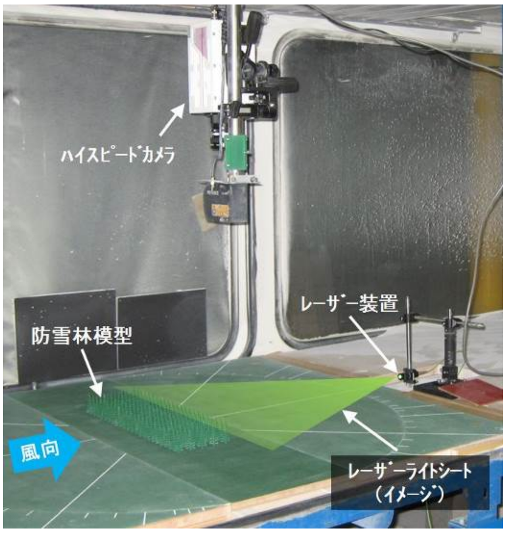


図 50 PIV 計測(水平面計測)

4.2.2 間引きと樹高・枝下高の影響

間引きの有無、樹高の違い、枝下高の違いが防風機能に与える影響についての調査を行った。

4.2.2.1 実験パターン

1) 樹木

防雪林を構成する樹木について、樹高と樹冠直径は道路吹雪対策マニュアル[1]等を参考に、間引きを行う目安とされる隣接する樹木の樹冠が触れあう時期を想定して４サイズ（樹木A、B、C、D）設定した(図 51)

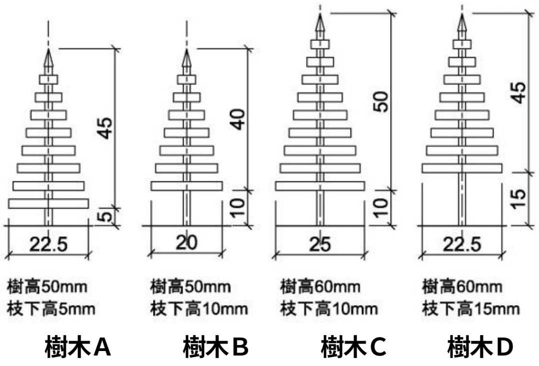


図 51 使用した樹木模型

2) 植栽配置

植栽配置は、樹木列数は道路吹雪対策マニュアル[1]における標準林 20m タイプを想定した５列と、これより列数が少ない場合の影響を把握するための３列とし、それぞれ間引きを行わないものと千鳥間引きを行ったものの計４パターンとした。列間および苗間については同マニュアル[1]における標準林の植栽配置に準じて列間 30 mm､苗間 20 mm とした（図 52）。

樹木サイズ４種についてそれぞれ配置パターン４種の計 16 パターンで試験を行った。計測面は風洞中心線上の鉛直面とした。

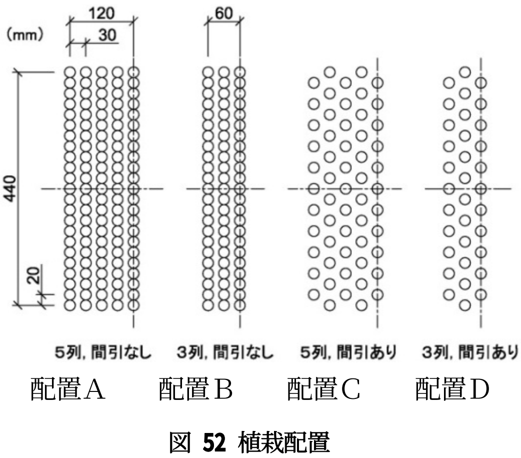


図 52 植栽配置

4.2.2.2 実験結果と評価

風洞実験による模型防雪林下流側の流速計測の結果を以降に述べる。

「樹木A、配置A」および「樹木D、配置A」における流速分布をそれぞれ図 53、図 54 に示す。

これら２つのパターンにおける樹木模型の樹冠の大きさは同じであるが、減風される範囲は枝下高が低い方が広範囲となっている。ここでは図示していないが他のパターンとの比較においても枝下高が高いほど地面付近の流速は速くなっており、枝下部分では気流が吹き抜けやすくなっている。

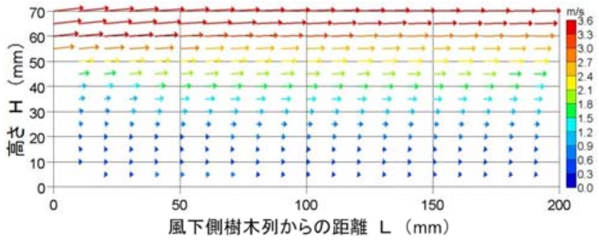


図 53 流速分布（樹木A、配置A）

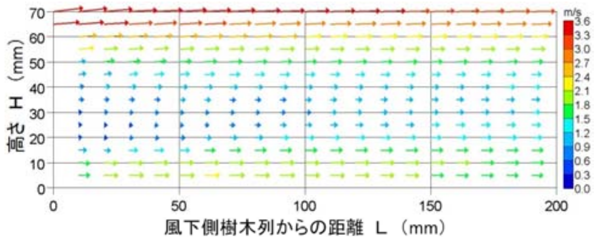


図 54 流速分布（樹木D、配置A）

樹木A、Dについて、地面からの高さ H=15mm における流速比をそれぞれ図 55、図 56 に示す。風下側樹列からの距離 L=100mm 以遠で流速比の値はほぼ一定となっており、この区間での流速比は間引きによりおおむね 0.2～0.3 上昇している。

また、「間引なし」において、枝下高が 5 mm から 15 mm になることで流速比は L = 100 mm 地点で 0.3 程度上昇している。このことは、枝下高が高くなることによる防風機能の低下は、樹木の本数が半分となる間引きによる防風機能の低下に相当する場合があることを示唆している。

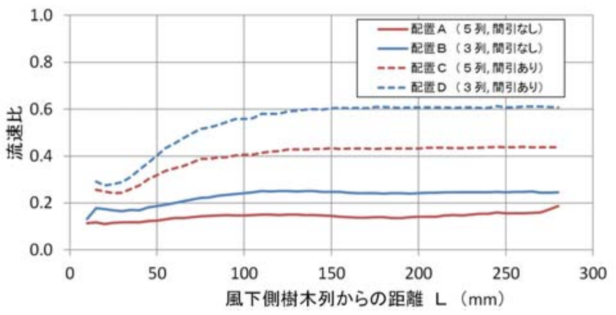


図 55 流速比（H=15㎜、樹木A）

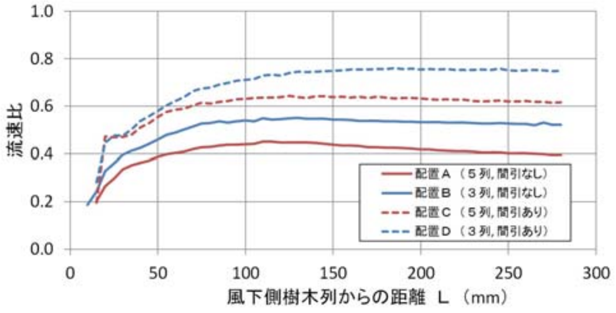


図 56 流速比（H=15㎜、樹木D）

配置Aについて、L=100mm（風上側路肩付近を想定）における流速比の鉛直分布を図 57 に示す。流速比について、H=20mm 程度以下の範囲では地面に近いほど樹高に比べ枝下高の影響を強く受けている。H=40mm 程度以上の範囲では枝下高の違いによる流速比の違いはほとんどなく、樹高の違いによる流速比の違いが大きくなっている。乗用車の目線高さが 1.5m(実験スケールで 15mm）程度であることを考慮すると、道路防雪林として高い機能を発揮させるためには、樹高を高めることよりも、枝下高を低く抑えることが重要と考えられる。

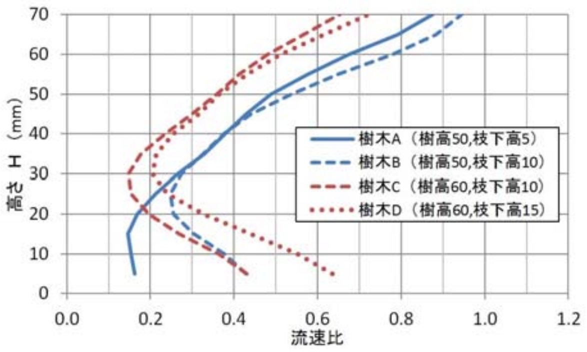


図 57 流速比(L=100㎜、配置A）

4.2.3 間引きと風向の影響

間引きパターンの違い（千鳥間引きと列間引き）および風向が防風機能に与える影響についての調査を行った。

4.2.3.1 実験パターン

1) 樹木

樹木模型は、最も防風機能が高かった(4.2.2)樹木A(樹高 50mm、枝下高 5mm)とした。植栽配置は前項と同様 5 列と 3 列とし、それぞれ間引きを行わないもの、列間引きおよび千鳥間引きを行ったものの計 6 パターンとした(図 58)。

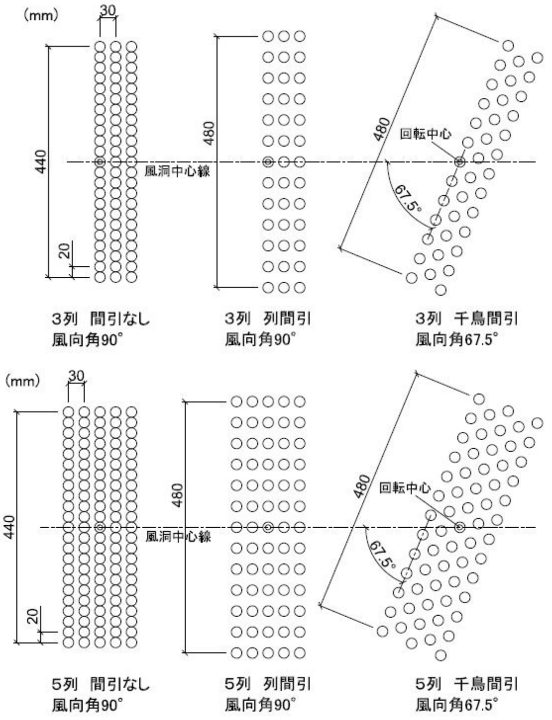


図 58 植栽配置

2) 風向

風向が防雪林帯に対して直角の場合のほか、16 方位で 1 および 2 方位ずれた場合の防風機能を調査するため、これらの模型をそれぞれ風向に対して 90°、67.5°、45°に設置して計測を行った。

また、風向が防風機能へ与える影響をより詳細に調査するため、樹木列数 3 列の列間引きと千鳥間引きについて、図 59 に示す植栽配置の模型（列間、苗間は図 58 と同一)を風向に対して 90°、82.5°、75°、60°、56.3°、45°、36.9°、30°に設置して計測を行った。なお、56.3°は千鳥間引きにおいて 3 本の樹木が風向方向に並ぶ風向角、36.9°は列間引きにおいて 3 本の樹木が風向方向に並ぶ風向角である（図 60）。

実験パターンの一覧を表 8 に示す。計測面は実スケールにおいて乗用車の目線高さに相当する、地面からの高さ H=15mm の水平面とした。

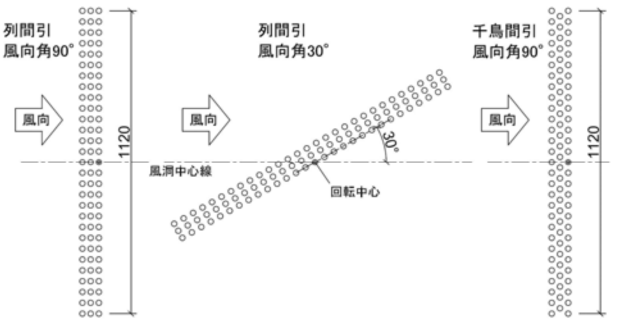


図 59 植栽配置

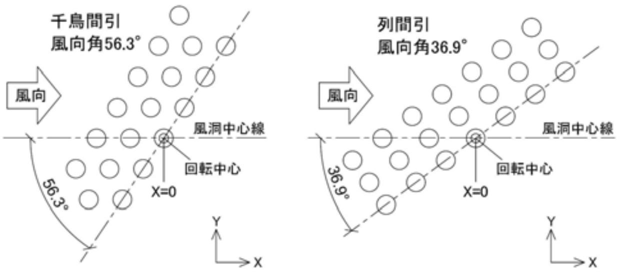


図 60 植栽配置（詳細）

表 8 実験パターン

No.	樹木列数	間引きパターン	風向角	備考
1	3列	間引なし	90°，67.5°，45°	
2		列間引		
3		千鳥間引		
4	5列	間引なし		
5		列間引		
6		千鳥間引		
7	3列	列間引	90°，82.5°，75°，60°，56.3°，45°，36.9°，30°	風向詳細調査
8		千鳥間引		

4.2.3.2 実験結果と評価

実験パターン No.1〜3 (以下「P1〜P3」と記す。）について、風洞中心線に近い樹木背後および樹木間中央の計測ライン（図 61）での流速比分布を図 62〜図 64 に示す。ここで、流速比は各地点における流速と樹木がない場合の同一地点における流速の比としている。流速比が低いほど防雪林により流速が抑えられているということであり防風機能が高い。また、図の横軸は風下側樹木列からの垂直距離 L としている。

図 62（P1）より、風下側樹木列からの垂直距離 L=0〜150mm の範囲において風向変化に対する流速比の変化や、樹木背後と樹木間中央との流速比の差は少なく、流速比が約 0.3 で安定している。L=150mm 以上において風向角 45°で流速比の上昇がみられるが、これは植栽端部から巻き込む風(後

流）が影響した可能性が考えられる。

図 63、図 64（P2、P3）は列間引き、千鳥間引き時の流速比を示したものであるが、P1 と比較して全体的に流速比が高くなっており、間引きにより防風機能が低下していることがわかる。また、樹木背後と樹木間中央の流速比の差は、樹木間からの吹き抜けによるものと考えられるが、この差は下流ほど小さくなっている。列間引き（図 63）では風向の変化による流速比の変動が大きく、風向角が 45°では流速比が低い半面、風向角が 90°では流速比が高くなっている。一方、千鳥間引き（図 64）では、風向の変化に対して流速比は安定しており、列間引きと比較して流速比は高くならない。

ここでは図示していないが、樹木列数５列（P4～P6）の場合は、樹木列数３列の場合よりも全体的に流速比が低くなっており、高い防風機能を発揮しているが、風向変化に対する傾向は樹木列数３列の場合と同様となっている。

P7、P8 における風洞中心線上 L=150 mm での風向角と流速比の関係を図 65 に示す。L=150 mm は、道路吹雪対策マニュアルの標準林における基本林の道路側樹木列から道路中心線（片側１車線道路を想定）までの距離約 15 m を想定している。列間引き、千鳥間引き共に、風向角が小さい方が流速比も小さくなる傾向を示している。流速比は風向角が 90～70°程度の範囲では千鳥間引きの方が低く、風向角が 65～40°程度の範囲では列間引きの方が低くなっている。千鳥間引きでは風向角 56.3°で３本の樹木が風向方向に並び、流速比のピークが現れているが、列間引きでは３本の樹木が風向方向に並ぶ風向角 36.9°においても明確なピークは現れていない。また、風向角が 40°程度以下では列間引きと千鳥間引きにおける流速比に明確な差はみられない。

風向角 90～45°の範囲における流速比の最小値と最大値の差は列間引きで 0.15、千鳥間引きで 0.06 程度となっており、列間引きでは風向変化にともなう流速比の変動が大きく、千鳥間引きでは変動が小さくなっている。

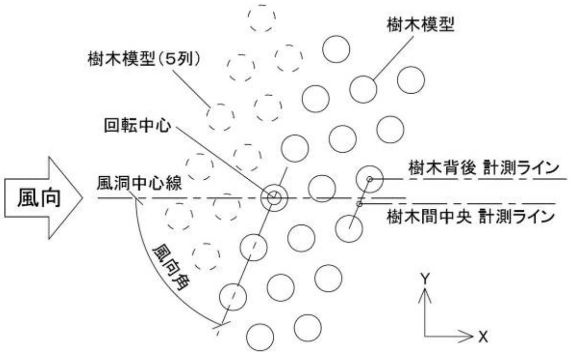


図 61 計測平面図（千鳥間引）

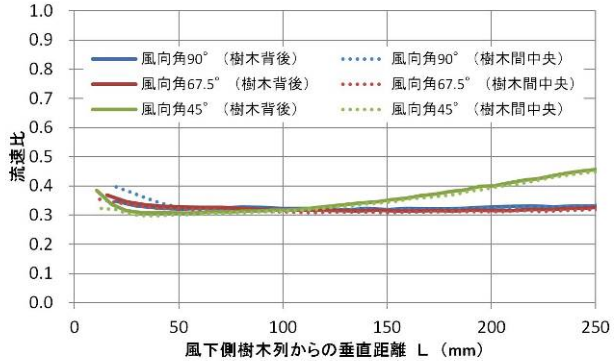


図 62 流速比（樹木列数３列、間引なし、P1）

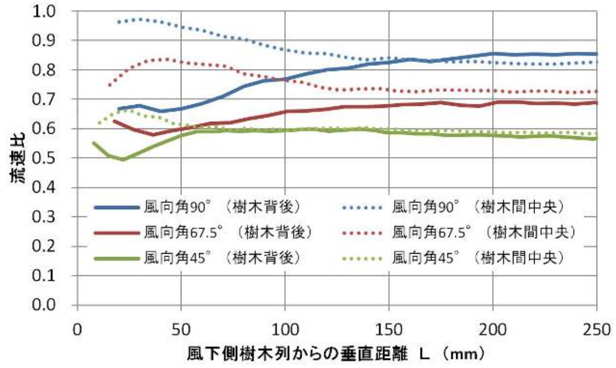


図 63 流速比（樹木列数３列、列間引、P2）

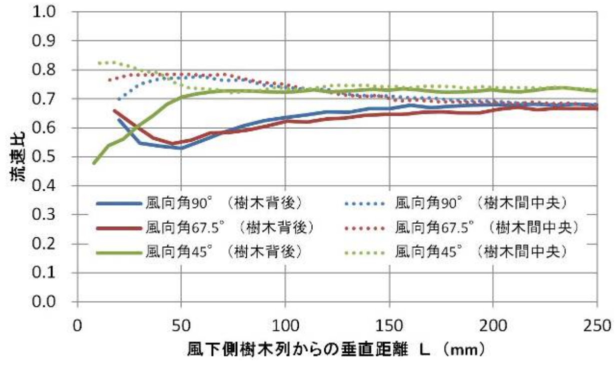


図 64 流速比（樹木列数３列、千鳥間引、P3）

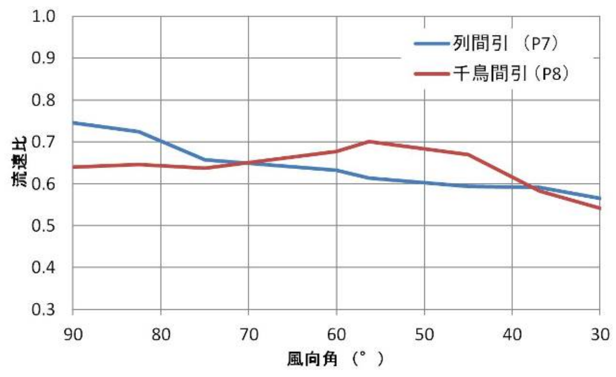


図 65 流速比（P7、P8）（L=150㎜）

4.2.4 まとめ

間引きと樹高・枝下高の影響調査の結果、枝下高が防風機能に与える影響が大きく、枝下高が高くなることによる防風機能の低下が、樹木数が半分となる間引きによる防風機能の低下に相当する場合があることや、樹高や樹冠の大きさに比べて大きく影響することがわかった。このため、安定した防風機能を発揮させるためには、枝下高を高くしないこと、すなわち下枝の枯れ上がりを防ぐことを優先する間引き管理が重要と考えられる。

間引きと風向の影響調査の結果、間引きにより防風機能が低下することや、間引きパターンの違いにより風向変化に対する防風機能の変動の傾向に違いがあることがわかった。列間引きでは風向の変化にともなう防風機能の変動が比較的大きく、風向角90°付近での防風機能は低いが、風向角が減少するに従い防風機能は高くなった。一方、千鳥間引きでは、風向の変化に対して防風機能は比較的安定しており、列間引きのような風向角90°付近での防風機能の低下はないが、風向角65～40°程度の範囲では列間引きよりも防風機能は低くなっている。このことから、実際の間引きを行う際には、現地の冬期主風向を考慮して間引きパターンを変えることにより、間引きによる防風機能の低下をある程度抑えられるものと考えられる。

4.3 防雪柵の撤去や間引きによる防雪効果の測定

4.3.1 調査方法

道路防雪林の防雪効果を把握するため、既存防雪林において、視程計と風向風速計を設置し、定点気象観測を実施した。

測定場所は枝幸町内の防雪林帯(図 1のD防雪林)で、平成6年に造成されている。平成23年現在の優勢木樹高は6.1mである。林帯幅は24mで造成当初は千鳥配置2条植え、苗間1m、列間3mの配置である。

測定期間はⅠ)2013年12月1日～2014年3月11日とⅡ) 2015年2月18日～3月12日である。

計測機器の設置位置を図 66に、各箇所の状況を図 69に示す。

測定機器は各地点とも地面から1.5mの高さに、風速計と反射型視程計を設置した。

Ⅰ期においては、現状の防雪林の防雪効果の把握だけでなく、併用防雪柵を撤去した場合の防雪効果の変化を確認するため、防雪柵の有無による比較測定を実施した。

Ⅱ期においては、間引きに伴う防雪効果の変化を測定するため、図 66に示す調査区Aにおいて間引きを実施した。植栽本数は、間引き後の調査区Aにおいて道路横断方向15mあたり41本(1140本/ha)、間引きされていない調査区Bで道路横断方向15mあたり70本(1950本/ha)である。また、Ⅱ期においてはどちらの調査区も防雪柵を高さ約1mまで再設置している。

測定箇所の道路側からの状況を図 67、図 68に示す。図 68は防雪柵が撤去されている箇所であるが、後方は透けて見えない状態である。

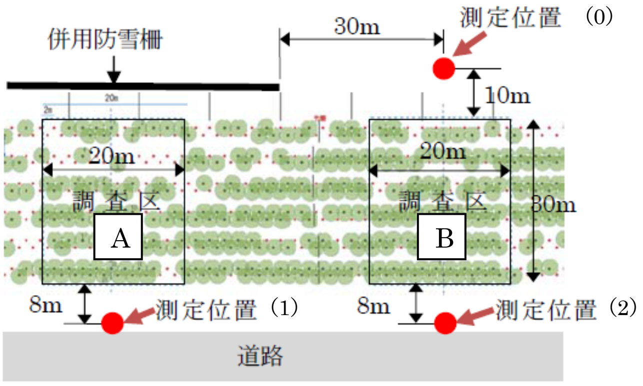


図 66 計測機器設置位置図

図 67 測定地点の道路側からの状況
（調査区A・防雪柵あり）

図 68 測定地点の道路側からの様子
（調査区 B・防雪柵なし）

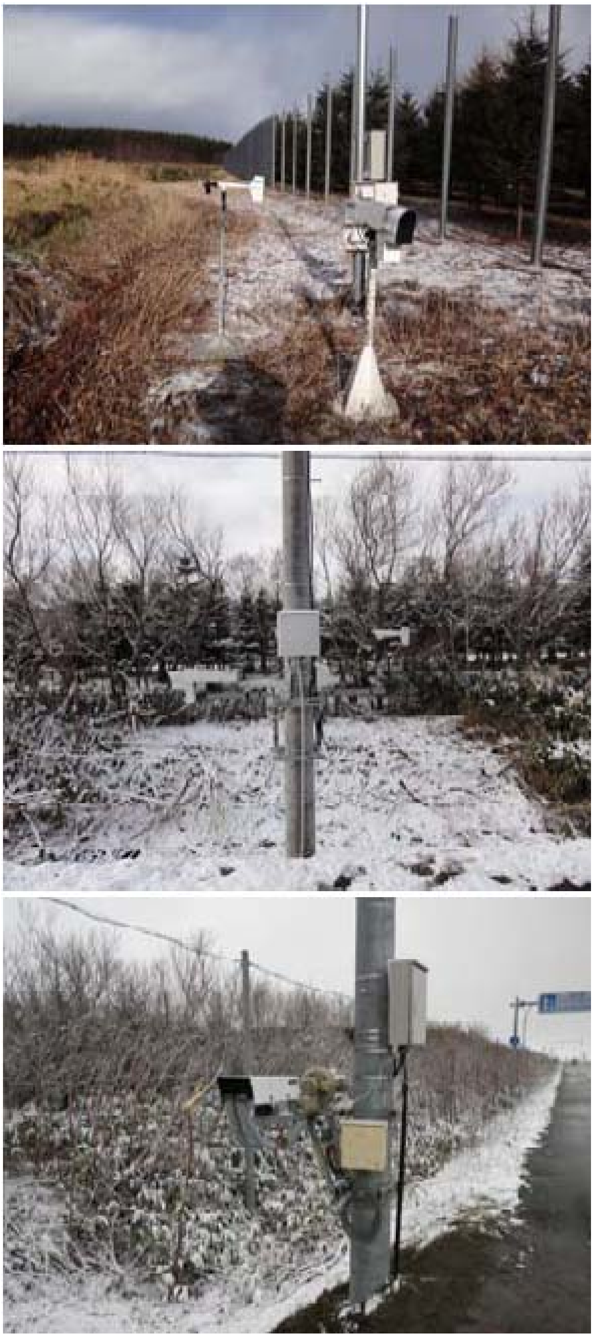


図 69 計測機器設置状況
（上/測定位置 (0)、中/測定位置 (1)、下/測定位置 (2)）

4.3.2 測定結果

4.3.2.1 併用防雪柵を撤去した場合の防雪効果

Ｉ期における視程と風速の測定例を図 70 に示す。図 70 上は防雪林の風上側、図 70 中は併用防雪柵あり、図 70 下は併用防雪柵なしの測定結果である。2013 年 12 月 14～15 日の測定値に着目すると、いずれの測定箇所も視程は 150m 程度と大きく変わらないが、風速に関しては防雪林の風上側の測定位置(0)は 8m/s 程度であるが、併用防雪柵あり（測定位置(1)）では 3m/s 程度、併用防雪柵なし（測定位置(2)）では 2m/s 程度である。この結果を比較すれば、防雪林による防風効果は高く、併用防雪柵の撤去による効果の低減は生じていないことが確認できる。

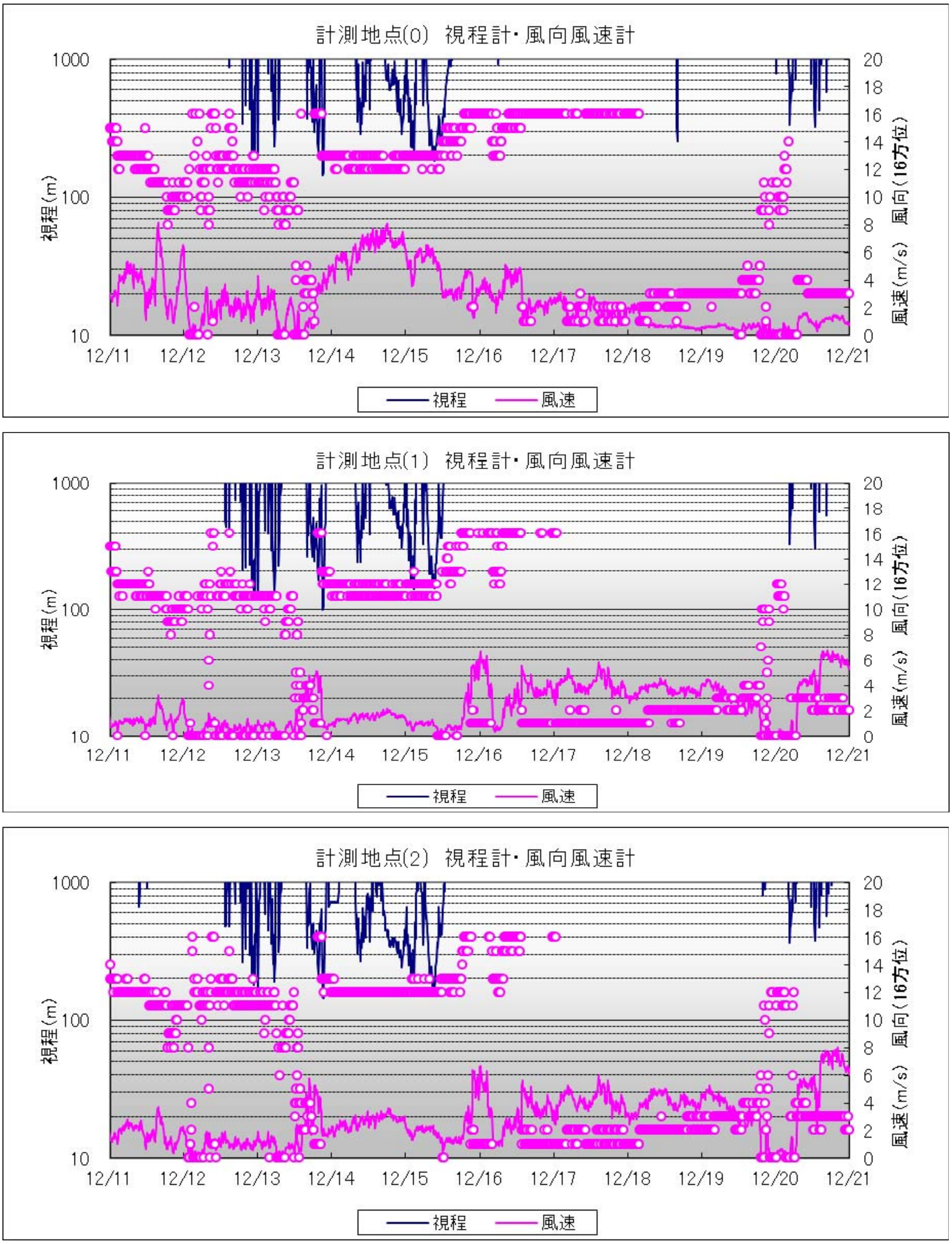


図 70 視程・風速測定例（2013 年 12 月 11～21 日）

4.3.2.2 間引きに伴う防雪効果

Ⅱ期における間引きによる防雪効果の変化を把握するため、測定データの整理を行った。図 71 に風の入射角別に、間引きしていない林、40%間引き林それぞれにおける風速比を、図 72 に同じく視程比を示す。利用したデータⅡ期の測定期間中、風速 5m 以上のもので、かつ視程のデータは 1000m 以下のものを抽出している。用いたデータは 10 分平均風速である。

両防雪林ともに、入射角によらず風速比は 1 より

小さく、視程比は1以上が確保されており、防雪林による視程改善効果を発揮しているといえる(図 71、図 72)。

風速比では間引きをしたことによって、概ね0.3程度と概ね林によって道路周辺の風速が7割低下していたところ、間引きにより風速比は幾分上昇し、風速比0.5程度となった。

間引きにより、一定の風速比上昇は許容する必要があると考えられるが、この値の可否を議論するには過去において同様の計測をした事例は少なく、更なる計測事例の蓄積が必要と考えられる。

また、視程比においては入射角 45 度に大きな視程改善がみられる。入射角 90 度と比べて林内の通過距離が伸長し、防雪林による防風効果や飛雪捕捉効果が上昇する一方、22.5 度に比べて道路上を平行に通過する風の影響が少ないためと定性的には考えられるが、他の角度と比べて差異が大きいため詳細については今後精査する必要があると考えられる。

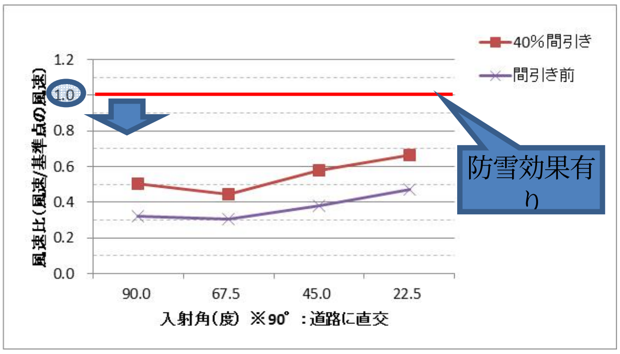


図 71　風の入射角と風速比の関係

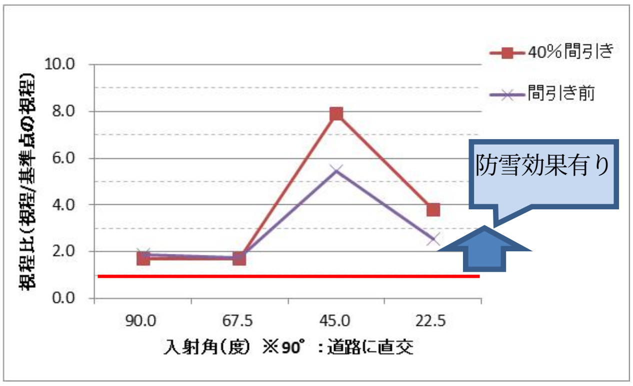


図 72　風の入射角と視程比の関係

4.3.3 まとめ

観測したデータを用いた解析結果からは、林帯幅24m の生育した防雪林において、併用防雪柵の撤去による風速への影響は軽微であり、また40%程度間引きしても防雪機能を発揮すると考えられた。

ただし、観測期間が短く、解析に用いたデータが少なかったため、今後も現地観測を継続したい。

4.4 長期的視点に立った防雪林の生育・管理手法

長期的視点で最も肝要となる、下枝の枯れ上がり防止のための間引きの時期は、道路防雪林の標準配置（列間 3.0m、苗間 2.0m）においては、植栽後 15 年頃が適当と考えられる。

風洞実験からは、枝下高が防風機能に与える影響が大きいこと、また枝下高が樹高や樹冠の大きさに比べて大きく影響することがわかった。さらに間引きにより防風機能が低下することや、間引きパターンの違いにより風向変化に対する防風機能の変動の傾向に違いがあることがわかった。

また 40%の間引きを行った防雪林で視程・風速の計測を行ったところ、防雪機能を発揮すると考えられた。

これらの研究結果は、長期的視点に立った防雪林の管理に有用であり、将来の道路吹雪対策マニュアルの改訂を通じて、現場への適用を図りたい。

5. おわりに

本研究は、造成後一定の年月を経た防雪林を対象に、造成時における望ましい規格・仕様、間引きと防雪効果の維持等、育成管理手法の確立に向けた検討により、防雪林の生長促進、防雪機能の早期発現・長期的な維持を図ろうとしたものである。

しかし、一定の成長を遂げた防雪林においては、既に下枝の枯れ上がりが見られる防雪林も見受けられており、成長に伴う新たな課題も防雪林では顕在化してきている。今後は下枝の枯れ上がりにより生ずる課題を中心に次期テーマとして取り組む所存である。

最後に、本研究の調査で北海道開発局、同留萌・稚内・網走開発建設部の協力を得た。また調査にあたっては北海道立総合研究機構林業試験場からの助言を得た。ここに記して感謝の意に代えたい。

参考文献

1) 独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所：道路吹雪対策マニュアル（平成23年改訂版）第2編 防雪林編、2011
2) 久馬一剛、佐久間敏雄ほか編：土壌の事典、朝倉書店、1993
3) 真坂一彦、山田健四、佐藤弘和：「アカエゾマツの葉サイズに対する微地形の影響ー長寿命の葉を利用した過湿環境の評価ー」、日本森林科学会誌、87,3、pp. 225-232、2005
4) 香山雅純：「トウヒ属樹木の蛇紋岩土壌における適応機構の解明と環境修復に関する研究」、北海道大学演習林報告、63,1、pp. 33-78、2006
5) 国土交通書都市・地域整備局公園緑地・景観課緑地研究室 監修：植栽基盤整備技術マニュアル 改訂第2版、(財)日本緑化センター、2009.
6) （社）日本造園建設業協会：植栽基盤整備ハンドブック、（社）日本造園建設業協会、2005.
7) 北海道農政部：北海道施肥ガイド2010、北海道、2010. http://www.agri.hro.or.jp/chuo/fukyu/sehiguide2010_index.html
8) 松井健：土壌地理学特論、築地書館、203pp、1989.
9) （社）日本造園学会 緑化環境工学研究委員会：緑化事業における植栽基盤整備マニュアル、ランドスケープ研究63(3)、（社）日本造園学会、pp.224-241、2000.
10) 苅住昇：新装版樹木根系図説、p. 1121、誠文堂新光社、1987
11) 森林立地調査法編集委員会：森林立地調査法 森の環境を測る、博友社、pp. 59-60、1999
12) 下道純・高玉波夫・上田真代・伊東靖彦・松澤勝：防雪林における生育基盤の過湿と生育不良について、寒地技術論文・報告集、27、(社)北海道開発技術センター、pp.207-212、2011
13) (社)日本道路協会：道路緑化基準・同解説、(社)日本道路協会、p.310、1988.
14) 広谷巍：苗畑設計 北方林業会編 北方林業叢書36 北海道の育苗ハンドブック 前編、北方林業会、pp. 2-27、1967
15) 北海道山林種苗協同組合：平成23年度 道苗組自主標準価格表、2011
16) ピーター・トーマス：樹木学, 263pp, 築地書館, 2001
17) 堀大才、岩谷美苗：図解 樹木の診断と手当てー木を診る 木を読む 木と語るー、pp. 49-57、（社）農山漁村文化協会、2002
18) 財団法人日本建築センター：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック、2008.
19) 老川進、苫米地司、石原孟：建物近傍の雪吹きだまりの風洞相似則に関する考察、日本雪工学会誌、Vol.23、No.2、pp.13-32、2007
20) 山﨑貴志、住田則行、中村隆一：吹雪風洞実験における防雪林縮尺模型とPIVについて、雪氷研究大会（2014・八戸）講演要旨集、p.240、2014

STUDY ON EVALUATING PERFORMANCE OF SNOW PROTECTION FACILITIES

Budget: Grants for operating expenses General account
Research Period: FY 2006-2010

Research Team: Snow and Ice Research Team,
Machinery Technology Research Team
Authors: MATSUZAWA Masaru
ITO Yasuhiko
UEDA Masayo
WATANABE Takashi
SUMITA Noriyuki
YAMAZAKI Takashi
NAKAMURA Ryuichi
TAKADAMA Namio
SHITAMICHI Jun
SATO Takahiro
WATANABE Jun
SUZUKI Satoshi

Abstract：In Hokkaido's cold snowy environment, snowstorms causing poor visibility are responsible for 40% of all stoppages on national highways, and often cause accidents. The purposes of this research were to consider the quantitative evaluation of visibility-related measures and anti-snowdrift measures, to study appropriate management for the mitigation of snowbreak growth, and to discuss the revision of The Manual for the Control of Blowing Snow.

This research used full-scaled field test and wind tunnel experiment to clarify methods for on-site measurement of the blowing-snow capture capability of snow fences and a quantitative evaluation method for wind tunnel experiments. A method involving the combined use of snow fences and snowdrift support ditches was also developed. In addition, as onsite investigation indicates that the main reason for issues related to the excessive growth of road snowbreaks is water accumulation, proposals were made regarding appropriate growth management methods.

Revision of The Manual for the Control of Blowing Snow to include the results of this investigation as well as content from a draft manual on delineating facilities related to the snowstorm is intended to provide a comprehensive single-volume work on blowing-snow control measures.

Keywords：snow fence, snowbreak forest, performance evaluation, visibility, wind-tunnel experiment, growth issues, The Manual for the Control of Blowing Snow