

5.3 吹雪対策施設及び除雪車の性能向上技術の開発

5.3.1 防雪林の安定的な防雪性能確保に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）、

技術開発調整監

（寒地機械技術チーム、寒地技術推進室）

研究担当者：西村敦史、萬直樹、高橋丞二、松澤勝、

金子学、伊東靖彦、遠藤康男、原田裕介、

松島哲郎、吉井昭博、高橋渉、櫻井俊光

（雪氷）、片野浩司、巖博、大槻敏行、

中島淳一、牧野正敏、植野英睦、住田則行、

齋藤勉、幸田勝（機械）、長谷山昇、渡辺淳

（推進室）

【要旨】

積雪寒冷地の北海道では、吹雪による冬期交通障害が多発しており、国道における通行止めの約4割を吹雪が占めるため、吹雪対策が重要な課題である。道路防雪林は吹雪対策として高い効果が期待できるが、間引き遅れによる日照不足等で下枝が枯れ上がることにより、防雪性能の低下が懸念される。そこで本研究は、下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明、防雪性能が低下した道路防雪林への補助対策の提案、枯れ上がりの見られる道路防雪林の管理手法を提案することで、安定的な防雪性能を確保することを目指すものである。

キーワード：防雪、吹雪、道路防雪林、間引き、植栽密度管理、枝下高

1. はじめに

北海道における国道の通行止めの約4割は吹雪に起因し、安全な生活環境や社会・経済活動を維持するためには道路施設による吹雪対策が不可欠である。道路防雪林（以下、防雪林という）は、道路の風上側または両側に樹木を林立した防雪施設で、樹木が風を抑え飛雪を捕捉することにより、吹雪による視程障害や吹きだまりを緩和する役割がある。吹雪対策として最も高い効果が期待される¹⁾。

北海道の道路事業では延長80km以上の防雪林が造成済みで、現在も引き続き造成されている。一方で、防雪林の造成を開始してから30年以上が経過したことで、課題が浮きぼりとなっている。前中期計画では、過湿や土壌堅固等が樹木の初期成長期における成長遅延要因であることを明らかにし、樹木の成長に応じた防雪林の効果的な育成管理の手法を示した²⁾。一方、樹木が十分に成長した防雪林の管理上の課題が散見された。課題の1つに、下枝の枯れ上がりに伴う防雪性能の低下がある³⁾。

外観上十分に成長した防雪林でも、その内部では日照不足により、地表面に近いところで下枝の枯れ上がりが散見される（図-1）³⁾。吹雪は地表面に近いほど雪

粒子の量が多い現象である⁴⁾。そのため、間引き等による下枝の枯れ上がりの対策は、吹雪による吹きだまりや視程障害の緩和に重要であると考えられる。本研究では、防雪林の安定的な防雪性能確保のため、次に挙げる項目を実施する。

- ① 下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明
- ② 防雪性能が低下した防雪林への補助防雪対策の提案
- ③ 枯れ上がりの見られる防雪林の管理手法の提案

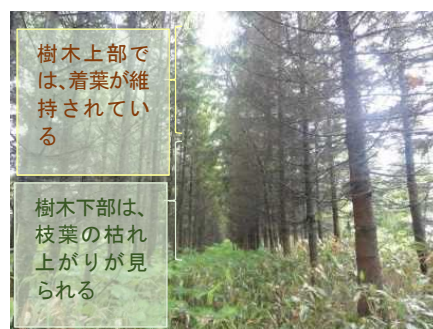


図-1 防雪林内の下枝の枯れ上がり状況

地表面付近における下枝の枯れ上がりによる機能低下については、防風林や海岸防災林等には見逃されやすい防雪林特有の課題である。そのため、吹雪による

視程障害や吹きだまりを緩和する防雪林の防雪性能に関する実測事例は、ほとんどない。ここでは、①に示す下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響を解明するために、現地調査と模擬実験により、以下1)～5)を整理した。模擬実験は、任意の林況設定が可能な風洞実験装置を用いた。

- 1) 葉面積、立木密度等で表現される防雪林の構成要素を現地調査により把握
- 2) 防雪林の防雪性能評価のため、下枝の枯れ上がりによる風雪の吹き抜けに関する気象観測を実施
- 3) 防雪林の構成要素と防雪性能の定量的関係を整理
- 4) ICT 活用による防雪林の防雪性能の評価可能性の検討
- 5) 下枝の枯れ上がりに関する風洞実験

下枝の枯れ上がりがみられる防雪林では、風下や林内に防雪ネット柵や低木が設置されることがある。しかし、補助柵（防雪ネット柵や低木等）の効果や下枝の枯れ上がり高さによる設置基準については明らかになっていない。ここでは、前頁の② 防雪性能が低下した防雪林への補助対策の提案について、効果的な補助対策を検討するため、以下1)から3)の実施結果を3章に整理した。

- 1) 補助対策に関する資料調査
- 2) 補助対策の現地試験と評価検討
- 3) 国道の視界不良軽減効果の確認

現地の状況把握、効果的な補助対策を踏まえて、枯れ上がりの見られる防雪林の管理手法を技術資料としてとりまとめた。

本研究の成果となる、防雪性能を安定的に確保するための防雪林の管理手法は、効果的な道路吹雪対策施設の整備に必要不可欠である。今後、上記手法を北海道開発局など道路管理者が推進する防雪事業や、「道路吹雪対策マニュアル」に反映させることで、吹雪災害が頻発する積雪寒冷地における安全・安心な生活環境や社会・経済活動の維持に貢献することができるものと考えられる。また、植生を利用した吹雪対策（Living Snow Fences）を推進している北米や欧州に本研究の成果が活用されることで、国際的に貢献することも期待される。

2. 下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明

下枝の枯れ上がりによる防雪機能等への影響を明らかにするために、防雪林の構成要素である基本林の樹齢と樹高、下枝の枯れ上がりの進行を把握した。この樹木調査を踏まえて、防雪林内の風雪の吹き抜けや

補助対策の効果等に関する現地観測を実施した。

調査対象の防雪林には標準林と狭帯林が含まれる。それぞれの防雪林の基本設計¹⁾を図-2に示す。標準林とは林帯幅が10m以上、狭帯林とは林帯幅が10m以下の防雪林である。標準林は林帯幅が比較的広いいため、道路に流れ込む吹雪による吹きだまりの緩和効果と、吹雪による視程障害の緩和効果が期待され、狭帯林は林帯幅が比較的狭いため、吹きだまりの緩和効果は薄い¹⁾が、視程障害を緩和する効果が期待される¹⁾。また、狭帯林は林帯幅が狭いので、広い道路用地を必要としない等のメリットがある。

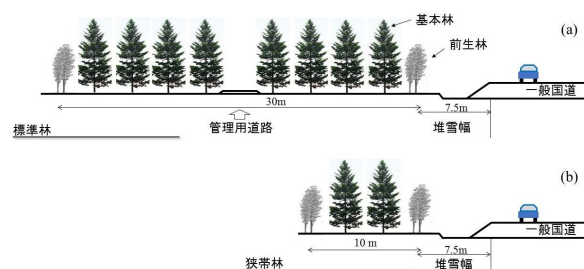


図-2 防雪林の基本設計 a) 林帯幅30mの標準林、b) 林帯幅10mの狭帯林

2. 1 防雪林内における下枝の枯れ上がりの把握

2. 1. 1 調査方法

下枝の枯れ上がりの進行に関する既往研究は少ない。ここでは、表-1に示す20年以上前に造成した防雪林を対象に現況を把握し、過去の調査と対比することで樹木の成長過程や枯れ上がりの進行を示した。

平成6年に24の防雪林について調査された報告書⁵⁾⁶⁾と現況を比較することで、樹木の成長過程や枯れ上がりの進行を調査した。過去2つの報告書には、各防雪林の代表的な樹種について、推定樹高、林齢、樹高、胸高直径、枝張、枝下高、当年伸長量（最大3年分）、枯損率が記載されている。このうち、次の4項目に該当する防雪林、① 現況存在しない防雪林、② 日照や環境条件が特異と考えられる狭帯林、③ 現在の一般的な防雪林と樹種が異なる防雪林、④ 工事等で測定困難な防雪林を除外した。その結果、21防雪林39箇所50地点で再計測を行った。調査箇所は北海道東部および北部に多い（図-3）。これは元々防雪林の分布に偏在があるためである¹⁾。

再測定では表-1に示す防雪林において、樹種ごとに標準木を2～4本選定のうえ、各樹木の樹高、枝下高（4方向および中心）、枝張（4方向）、隣接木との距離を測定した。枝下高は枯枝と生枝をそれぞれ測定した（図

-4)。枝張はそれぞれの方向の最長のものを測定した。
測定は雪氷チームおよび道北・道東支所が分担し、平成26年11月5日～平成27年7月3日の間で行った。



図-3 構成要素と下枝の枯れ上がりを調査した防雪林

表-1 調査対象の防雪林の一覧

	国道番号	防雪林の地名
1	276	京極町北岡
2	40	中川町国府
3	39	大空町湖南
4	238	網走市東浜
5	238	紋別市共和
6	238	紋別市小向
7	239	西興部村奥興部
8	334	斜里町朱円
9	391	小清水町水上
10	40	天塩町雄信内
11	40	稚内市サラキトマナイ
12	238	枝幸町岡島
13	238	枝幸町ヤマウス
14	238	浜頓別町山軽
15	44	浜中町茶内
16	243	弟子屈町仁多
17	272	中標津町俵橋
18	334	羅臼町幌萌
19	241	上士幌町居辺
20	241	上士幌町北居辺
21	241	士幌町東雲



図-4 測定項目の詳細と測定状況（上部写真）

2. 1. 2 樹木調査の結果

測定した樹種は全体の4分の3がアカエゾマツであり、ヨーロッパトウヒ、トドマツをあわせると、現在道路防雪林で用いられる基本林構成種¹⁾が96%を占めた(図-5)。樹齢は約30～40年程であり、樹高は10m前後(平均9.7m、最小約4m、最大約16m)である。

なお、樹木調査の詳細については過年度の報告書⁷⁾を参照されたい。

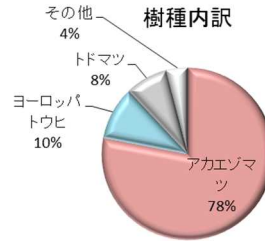


図-5 調査した樹種の内訳

1) 樹齢と樹高との関係

アカエゾマツの樹齢と樹高の関係を、一例として図-6に示す。図中の赤線は回帰直線であるため調査対象年数にのみ限定される直線であるが、成長速度は1年間でおよそ0.29mである。なお、「道路吹雪対策マニュアル」¹⁾には樹齢と樹高の散布図を掲載しているが、10～15年生以下の若年木が中心である。本調査記録は40年を超える樹木も含まれており、順調に育てば40年間で約10mの樹高になることが期待される。ただし、図中の回帰直線は調査した樹木のみ適用される。

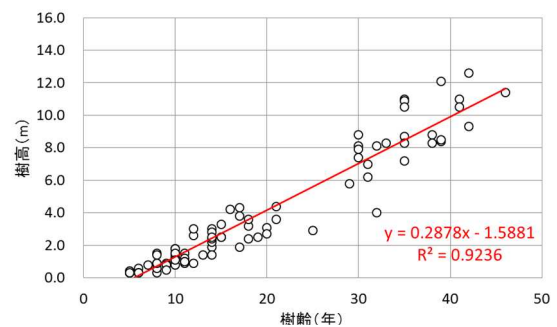


図-6 アカエゾマツの樹齢と樹高. 赤線は回帰直線

2) 下枝の枯れ上がりの進行

平成6年の調査結果と合わせて枯れ上がりの進行状況を把握した。アカエゾマツの樹高と生枝下高(下枝の枯れ上がり高さと同じ)の関係を図-7に示す。

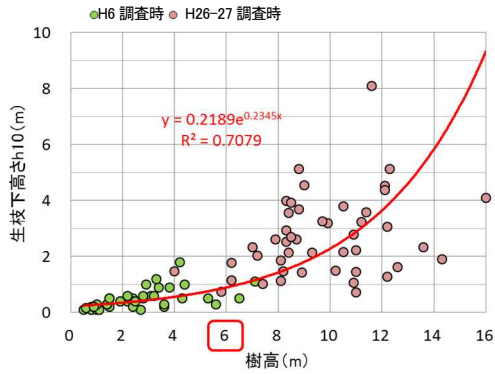


図-7 生枝下高と樹高の関係。赤線は回帰曲線

回帰曲線から、樹高が高いほど下枝の枯れ上がりが進行しやすいことを示している。特に、樹高 6m 前後から下枝の枯れ上がりが増加する傾向にある。ただし、回帰曲線の累乗関数は調査した樹高のみに適用される。

2. 2 防雪林の風雪の吹き抜けに関する気象観測

本中長期計画において下枝の枯れ上がりに着目して調査を行った防雪林は、標準林 3 箇所と狭帯林 1 箇所である。平成 27 年度からは天塩町雄信内（一般国道 40 号、標準林）、平成 29 年度には小清水町水上（一般国道 391 号、狭帯林）、令和元年度からは浜頓別町山軽（一般国道 238 号、標準林）と浜中町茶内（一般国道 44 号、標準林）について、それぞれ気象等の観測を実施した。なお、補助対策工が設置されている箇所においても気象等を観測している。補助対策工が設置されていない気象観測は 2 章、補助対策工が設置されている気象観測は 3 章で扱う。

2. 2. 1 観測箇所概要

1) 雄信内防雪林（標準林）

一般国道 40 号沿いの雄信内防雪林の延長は約 5km、観測した道路南西側における防雪林の林帯幅はおよそ 30m で、風上には 300m 以上の吹走距離（吹雪が発達する距離）がある（図-8）。



図-8 雄信内防雪林の観測箇所

樹高 1m 以下の樹木を除いた観測地 (KP181.76 付近) における林内の樹高は平均 12m であり、林帯内部には平均して高さ 2.4m の枯れ上がりが見られている（図-9）。



図-9 雄信内防雪林

2) 山軽防雪林（標準林・一部補助対策工あり）

一般国道 238 号沿いの山軽防雪林の延長は約 2.8km、観測した道路南西側、道路北東側の両側における防雪林の林帯幅はおよそ 30m である。道路南西側には丘陵があるが障害物はなく吹走距離は 200m 以上で、道路北東側には低木や雑草が点在しているが吹走距離は 100m 以上で、およそ 1.5km 先にオホーツク海がある海岸沿いの防雪林である（図-10）。



図-10 山軽防雪林における観測箇所



図-11 山軽防雪林（南西側）



図-12 山軽防雪林（北東側）

観測地（KP238 付近）の南西側における防雪林内の樹高は平均 5m 程度、北東側は平均 10m 程度である。南西側の防雪林（図-11）には下枝の枯れ上がりはみられないが、北東側の防雪林には 1m 程度の枝打ちが見られる（図-12）。

3) 茶内防雪林（標準林・補助対策工法あり）

一般国道 44 号沿いの茶内防雪林の延長は約 0.8km、観測した道路北西側における防雪林の林帯幅はおよそ 30m である（図-13）。樹高 1m 以下の樹木を除いた観測地（KP66.5 付近）における林内の樹高は平均 12m 程度であり、林帯内部には 2m 以上の枯れ上がりが見られる。また、根室道路事務所により枯れ上がり対策として防雪ネット柵が風上林縁の牧草地側（図-14）と林内中央付近に設置されている（図-15）。



図-13 茶内防雪林の観測箇所



図-14 茶内防雪林（風上林縁の防雪ネット柵）



図-15 茶内防雪林（林内の防雪ネット柵）

4) 水上防雪林（狭帯林）

水上防雪林の延長は約 1km、風上林縁からの吹走距離は 300m 以上あり、観測した道路北側における防雪林の林帯幅はおよそ 10m である（図-16）。



図-16 水上防雪林の観測箇所

観測地（KP110.0 付近）における樹高は平均 10.2m であり、地表面から高さ約 2m ほどまで枝打ちされており枝葉のない状態である（図-17）。



図-17 水上防雪林の外観

2. 2. 2 観測および結果整理方法

1) 観測方法

気象等観測項目は、防雪林の箇所毎に異なるが、風向・風速、気温、視程、飛雪流量、吹きだまり量等である。各項目と単位、計測範囲および解析時に利用した範囲を表-2 に示す。観測機器について、風向・風速の観測には風車型風向風速計（R.M. Young Co.製）、湿度の観測には温度計（Vaisala Co.製）、視程の観測には視程計（明星電気社製）、飛雪流量の観測には吹雪計（新潟電機社製）を主に利用した。

表-2 単位と解析に利用した値

項目	単位	計測範囲	データ処理範囲
風向	16 方位	-	10 分最頻値
風速	m/s	0.1 以上	10 分平均値
気温	°C	-	10 分平均値
視程	m	1000 以下	10 分中央値
飛雪流量	g/m ² /s	0.1 以上	1 分平均値
吹きだまり量	m ³ /m	-	累計値

2) 結果整理方法

ここでは観測結果について、風上基準点の値を分母、風下の観測地点（主に道路側）の値を分子とし、風速比として整理する(式(1))。なお、2.3 では、風速の他、視程、飛雪流量の結果を用いて、それぞれ風速比、視程比、飛雪流量比として表現する。

$$\text{風速比} = \frac{\text{風下（道路側）の風速 (m/s)}}{\text{風上（基準点）の風速 (m/s)}} \quad (1)$$

防雪林を通過し減風された風の場合は、風速比は 1.0 より小さい値となる。

基準点の高さを風下の風速計の高さと合わせるため、風上の高さごとの風速を算出する必要がある。雪面における風速の鉛直分布は対数則の式(2)¹¹⁾で算出される。

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (2)$$

ここで、 $u(z)$ 、 u_* 、 κ 、 z 、 d 、 z_0 はそれぞれ、基準点の高さにおける風速(m/s)、摩擦速度(m/s)、カルマン定数(=0.4)、風速を計測した高さ(m)、積雪深(m)、雪面における地表面粗度(m)である。地表面粗度 z_0 については既往研究¹⁰⁾の値 (1.5×10⁴m) を用いる。積雪深 d を北海道開発局が管理する近隣の道路テレメータ等の値を入力し、観測した高さにおける風速から摩擦速度 u_* を計算する。観測した地点における摩擦風速 u_* が算出できれば、基準点におけるそれぞれの高さの風速 u が算出される。このように、基準点 1 点に 1 台の風速計があれば各高さの基準風速を算出することができる。

2. 2. 3 観測結果

1) 雄信内防雪林（標準林）

平成 29 年度に、雄信内防雪林における風雪の吹き抜けについて観測するため、風上林縁から道路側風下にかけて風向・風速の連続観測を実施した。風上林縁から 50m 程度離れた風上に基準点 (No.0) を、風上林縁に No.2、林内 No.21、No.22、道路側風下林縁に No.3、No.4 を設けて風向風速計を設置し観測した (図-18)。



図-18 雄信内防雪林における観測地点

図-19 に、風上の基準点 No.0 と林縁 No.2 地点における風速の比較結果 (高さ:3m) の一例を示す。図に示したデータは基準点 No.0 の風向が 270° (西) の時のもので、データ数は 1,254 データ (10 分平均値) である。図中の直線は、原点を通る回帰直線であり、傾きから風速比は 0.89 (相関係数: 0.99) である。

同様の算出方法で、地点 No.2 (高さ:1, 3, 7m)、No.21 (高さ:1, 3m)、No.22 (高さ:1, 3m)、No.3 (高さ:1, 3, 7m)、No.4 (高さ:3m) について風向別 (225.0~292.5°) に解析した。林内および林風下林縁では、風向によって風が防雪林を通過する距離が変わる。防雪林に直交するほど、風が通過する距離が短く、平行風に近づくほど、風が林内を通過する距離が長くなる (図-20)。

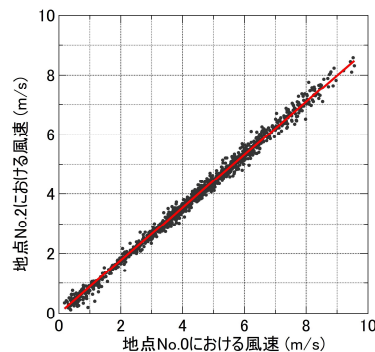


図-19 林風上の基準点 No. 0 と林縁 No. 2 地点における風速の比較 (高さ:3m)

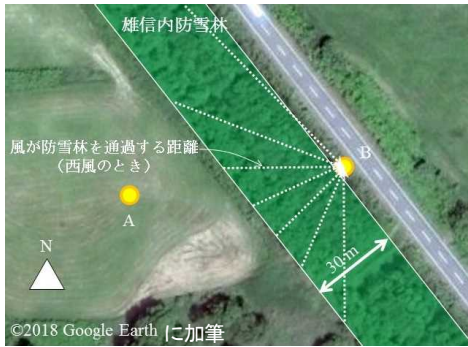


図-20 風が防雪林を通過するときの距離 (イメージ)

風が林内を通過する距離と風速比との関係を図-21に示す。ここで、防雪林の風上林縁を0mとしているので、基準点(風速比:1.0)における距離(横軸)はマイナスとなり、風向によってその距離も変わる。図-21の横軸は、防雪林の風上林縁からの距離 x を平均樹高 h (12m)で除した値(高倍距離)である。

図-21に示す防雪林の風上林縁からの距離と風速比との関係から、次の高さ毎に特徴が見られる。

- ・7m: 風向によらず風下(No.3)の風速比が0.6~0.2の範囲で低下している。
- ・3m: 直交風(225~247.5°)では、風下(No.3, No.4)の風速比が1.0~0.8程度と、風上とほぼ同等である。斜風では、風下の風速比が0.6~0.4程度まで低下している。
- ・1m: 直交風(225~247.5°)では、風下(No.3, No.4)の風速比が1.1~0.8程度と、風上とほぼ同等である。斜風(270~292.5°)では、風下の風速比が0.6~0.4程度まで低下している。

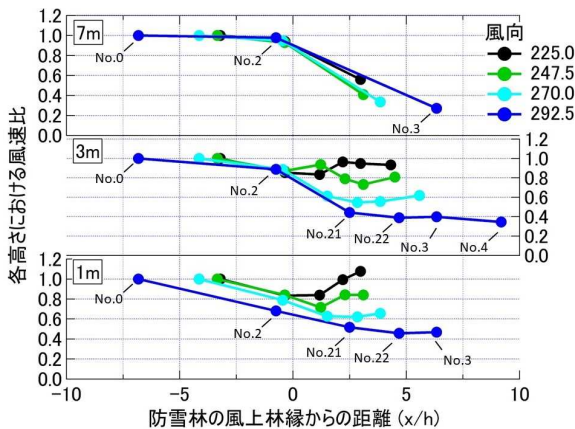


図-21 防雪林の風上林縁からの距離と風速比
風向 225.0°: 防雪林に対して直交風。
図中の地点 No.0~No.4: 風向 292.5° のとき

直交風では、下枝の枯れ上がりがみられる高さ1mと3mで、風速比が風上とほぼ同等で減風効果がないことから、明らかに下枝の枯れ上がりによる風雪の吹き抜けが生じていることを示す。一方、斜風では、高さ1m~7mのすべての高さで減風効果があることから、下枝の枯れ上がりによる風雪の吹き抜けの影響は認められない。

2) 水上防雪林(狭帯林)

平成29年度に、水上防雪林における風雪の吹き抜けについても調査を実施した。風上D点を基準点とし、風下A点に風向風速計を設置し(図-22)、風速比を算出した。



図-22 水上防雪林における観測地点

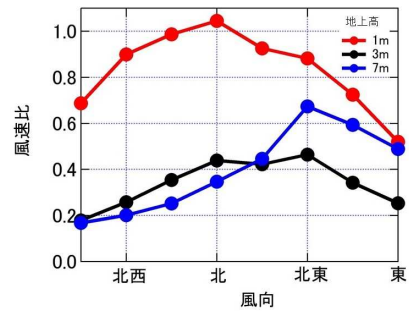


図-23 風向別の地点Aにおける風速比

図-23に、風下で計測した狭帯林における風速比を示す。高さは1m、3m、7mである。雄信内防雪林の標準林と同様に、各高さで風速比が異なる。直交風の北から斜風の西北西の風では、高さが高いほど風速比が低く、3mと7mで十分な減風効果がみられる傾向にある。

一方、北東の風では高さ7mの方が3mよりも風速比が高い。これは、現地の写真(図-24)から林冠の疎密によるものと考えられる。また、高さ1mで

は全方位（西北西～東）において風速比が 0.5 以上と高い値を示し、直交風の北風のときは 1.0 を超える風速比であった。これは、枝打ちによるものと考えられ、風雪の吹き抜けによる影響である。



図-24 一般国道 391 号から撮影した水上防雪林。赤枠の部分に疎の林冠がみられる

吹雪が発生した平成 31 年 1 月 24 日に、水上防雪林を車両で走行し動画を撮影し、防雪林の開口部を通過したときに視認性の悪化が確認された（図-25）。

一方、観測地 A 点を通過したとき、枝打ちされた防雪林の低い位置から飛雪粒子が飛散している状況が確認された。風雪の吹き抜けによる影響であったが、この時はドライバーの視認性においては防雪林が視程障害を緩和し、且つ視線誘導効果を発揮し、走行に支障のない状況であった（図-26）。



図-25 吹雪発生時における水上防雪林の開口部



図-26 吹雪発生時における水上防雪林の観測地点

水上防雪林では、地表面付近における枝打ち、あるいは枯れ上がりにより飛雪粒子の飛散による視程悪化の懸念はあるが、ドライバーの目線高さで飛雪を抑え

ていれば、狭帯林の主目的である視程障害の緩和効果が発揮されるものと考えられる。なお、風下 A 点で観測した高さ 3m は、盛土構造である一般国道 391 号上ではドライバーの目線高さに相当する。

2. 3 防雪林の構成要素と防雪性能の定量的関係

ここでは、雄信内防雪林（標準林）のデータを用いて、防雪林の空隙率で構成要素を表現し、気象等観測結果から防雪性能と空隙率の関係について示した。

2. 3. 1 防雪林の空隙率

防雪林を通過する風の空力特性を説明しうる防雪林の構成要素には、樹高、林帯幅、延長、樹種に加えて空隙率、葉面積指数 LAI または植物面積指数 PAI¹²⁾ が該当する。ここで、LAI は単位地表面積あたりの葉の投影面積の総和、PAI は単位地表面積あたりの葉の他、枯れた葉、枝、幹の投影面積比として定義され、双方とも 3 次元構造を捉えた無次元の指数である¹²⁾。

防雪林の構成要素と防雪性能を正確に把握するためには、植生の空隙率や LAI 等のパラメータを調査することが必要となる。しかし、LAI 等のパラメータを明らかにするためには現地踏査が必要とされ、長大な防雪林の調査で用いるには財源制約のある中では負担が大きく、計測から解析まで時間を要する。道路の付属施設とした防雪林の道路管理手法という技術的な側面において、PAI 等を網羅的に正確に把握することよりも、道路側から如何に防雪林の構成要素を迅速に捉えるかが鍵となる。

空隙率は防雪林の投影面積で表現される 2 次元構造ではあるが、道路側から迅速に計測を可能にするものである。そこで、防雪林の空隙率を比較的簡易に算出可能な写真撮影による手法¹³⁾を採用し、本研究は簡易的に防雪林の構成要素と防雪性能の定量的関係を明らかにするため、防雪林風上と風下で風向・風速と飛雪流量を計測し、風速や飛雪流量と空隙率の関係を整理し、防雪性能の定量的関係を示す。なお、ここでいう空隙率とは光学的な空隙率 (Optical porosity) である。

解析手順は次の通りである。以下の手順 a) ～ d) は、図-27 の a) ～ d) の画像と一致させている。画像は積雪が融解した直後の平成 30 年 5 月 8 日に撮影し、撮影環境は晴天、無風であった。

- a) 道路側 B 点 (図-27) から魚眼レンズで防雪林全体を撮影した。このとき、中心線は防雪林と直交する方位 (230°) とした。すなわち、魚眼レンズで撮影される範囲は方位 230°±90°である。撮影した高さは 1, 3, 5, 7, 9m である。

- b) 撮影された魚眼画像における上下の極点を結ぶ線を方位ごとに描き、方位ごとに等分した。
- b') 水平部（白枠）をトリミングして撮影した各高さとする。地表面や防雪林以外の樹木が映り込まないようにした。
- c) トリミングされた画像を風向毎に切り取った。
- d) 切り取った画像を 8bit から 1bit まで bit 数を減らし、白黒の閾値を 50%（白と黒の二値化）で表現した。

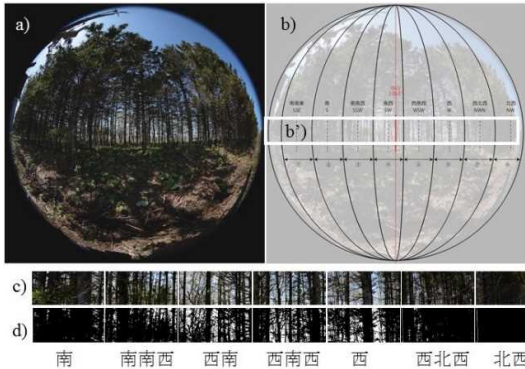


図-27 防雪林における空隙率の算出手順の一例（高さ 1m の場合）

同様の方法で、風速と同じ高さ 3m、5m、7m、9m で撮影して解析した。画像を図-28 に示す。なお、撮影した方位 $230^\circ \pm 90^\circ$ の画像から、北西方位の画像解析については防雪林の縁までとし、南南東の方位には取り付け道路があるため、解析結果では除外した。高さ 1m と 3m においては風上側に見える樹林帯のピクセルを除外した。このように、風向毎に切り取り二値化された画像について、次式の関係から防雪林の空隙率を算出した。

$$\text{空隙率} = \frac{\text{背景の面積 (二値化された白の領域)}}{\text{切り取った画像の面積}} \quad (3)$$

下枝の枯れ上がりについて定量的に評価するため、南～北西の方位における防雪林の空隙率を解析した結果を図-29 に示す。図-29 より、高さが高いほど防雪林の空隙率が低く、南風あるいは北西になるほど空隙率が低くなる傾向にある。高さが高いほど防雪林の空隙率が低くなることは、すなわち高さが低い部分に空隙があることを意味している。よってこの結果は下枝の枯れ上がりによる空隙率への影響である。また、南あるいは北西の方位では防雪林の距離が長くなり、樹木等が重なり合うため、空隙率が徐々に低くなるものと考えられる。

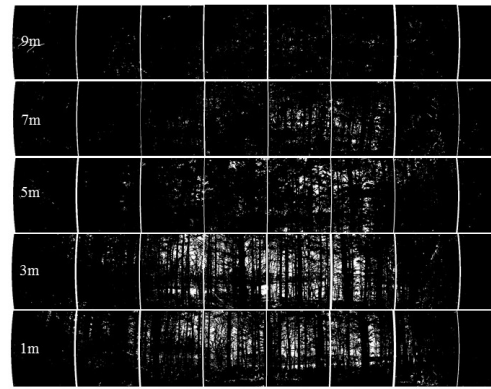


図-28 地点 B の各高さ (1, 3, 5, 7, 9m) で取得した防雪林の二値化画像

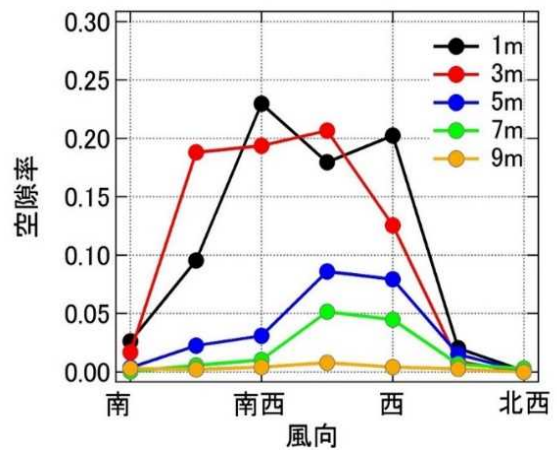


図-29 地点 B で撮影された画像から解析した防雪林の空隙率

2. 3. 2 防雪林を通過する風と飛雪流量の特徴

防雪林の標準林に求められている防雪性能は、吹きだまりと視程障害の緩和である¹⁾。吹きだまりは、風速の低下等により飛雪粒子の移動が停止して堆積することで発生する。視程(*Vis*)は風向に直角な単位断面積を単位時間に移動する雪粒子の質量（飛雪流量：*Mf*）の関数（式(4)）で表される⁸⁾。

$$\log Vis = -0.773 \log(Mf) + 2.845 \quad (4)$$

飛雪流量 (*Mf*) は、風速 (*V*) と単位体積当たりの雪粒子の質量（飛雪空間密度：*Nt*）の積（式(5)）⁸⁾で表される（ただし、雪面近傍を除く）。

$$Mf = Nt \cdot V \quad (5)$$

吹きだまりと視程障害の緩和効果を評価するためには、防雪林が風と飛雪を減じさせる効果を明らかにする必要があります。言い換えれば、防雪林の風上と風下における風速と飛雪流量を観測することで防雪性能を評価できる。

1) 風の特徴

図-30に、雄信内防雪林(図-18)における地点Aと地点B(高さ3m)における風速の相関図を示す。なお、基準点Aの風向が西のときのデータである。図中の直線は原点を通る回帰直線であり、傾きから風速比は0.68である。

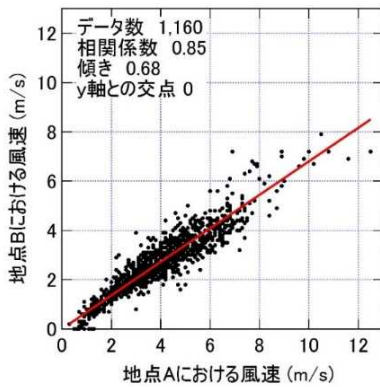


図-30 地点 A と地点 B (高さ 3m) における風速

同様の方法で、風向別に高さ 1~9m の風速比を求めた。図-31 に風向別に解析した風速比を示す。地点 B における高さ 3~9m のデータは、平成 30 年 2 月 3 日~5 月 8 日に得たものである。高さ 1m のデータは、平成 28 年 12 月 22 日~平成 29 年 3 月 18 日に得たものである。南西の風のときに風速比が最も高く、南風・北西の風になるほど風速比が低下する。また、高さが高くなるにつれて風速比が低下する傾向にある。南西の方位が 225°であり、防雪林と直交する方位が 230°であるため、南西の風のときに防雪林とはほぼ直交する風である(以下、直交風とする)。他方、南風や西の風のときは防雪林に対して斜風である。すなわち高さ 9m を除くと、高さに関係なく防雪林に対して直交風から斜風になるほど風速比が低下する。

2) 飛雪流量の特徴

飛雪流量を連続観測するため、飛雪粒子計(新潟電機、SPC-95)による観測を実施した(図-32)。

観測期間は、平成 30 年 3 月 8 日から平成 30 年 3 月 31 日である。観測地点は図-18 に示す基準点 No.0 (高さ 2.5m; 地点 A) と、道路側の風下林縁の観測点 No.3 (高さ 3m; 地点 B) である。

風速比と同じように飛雪流量比を計算した。地点A

の風向が西のときの飛雪流量比の算出方法を、一例として図-33に示す。風上地点Aと風下地点Bで計測された飛雪流量の散布図における回帰直線から、飛雪流量比は0.66である。相関係数は0.3と正の相関関係にあるものの、風速比のそれより低い。また、図-33から、傾き1.0を超える点(9データ)が存在している。すなわち、風上の地点Aよりも風下の地点Bの飛雪流量が多い。以降、この9データについてはSHAと記す。

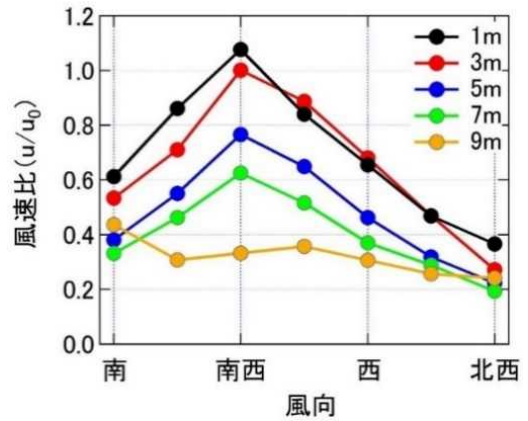


図-31 風向別の地点 B における風速比



図-32 基準点 (No. 0) に設置した飛雪粒子計

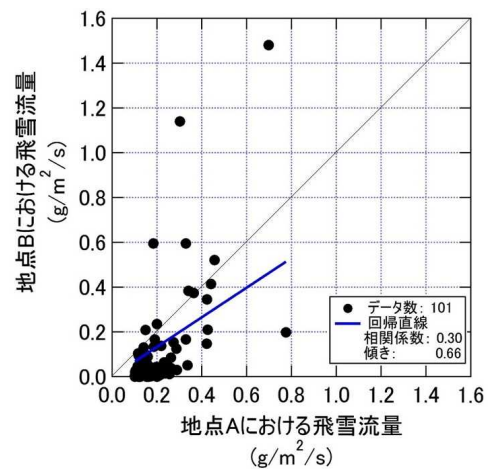


図-33 地点 A と地点 B における飛雪流量の比較
黒色実線は傾き 1.0 の直線を示す

防雪林を通過する風向では、吹雪による飛雪粒子は、防雪林の樹木や枝葉が抵抗体となり風速が低下し、落下して吹きだまりになる。あるいはこれらの抵抗体に着雪する。そのため、防雪林を通過した後の風下では、風上よりも飛雪流量が減少するはずである。また、降雪を伴う吹雪においても、樹冠による降雪遮断があるものと考えれば、風上よりも林風下の飛雪流量が減少するはずである。したがって、**図-33**に示した傾き1.0を超えるSHAは、特異なものと考えられる。この原因として樹木の枝葉に積もった雪が落下して、飛雪を発生させることが挙げられる。実際に、降雪を伴う吹雪時に地点B付近で撮影した写真から、樹木に付着した冠雪からの飛雪（落雪）が認められた（**図-34**）。そこで、**図-33**の傾き1.0を超える9データ（SHA）を除き、**図-35**を得た。

風速比と同様に、風向別の飛雪流量比を算出した結果を**図-36**に示す。SHAを除く飛雪流量比がすべての風向でSHAを含む飛雪流量を下回り、風向によらず飛雪流量比がおよそ0.2~0.4の範囲に収まることわかる。

既往研究⁸⁹⁾によって、飛雪流量と視程の関係が明らかにされており、飛雪流量 (M_f) と視程 V_{is} には式(4)の関係がある。そこで、**図-36** で得られた飛雪流量比から、式(4)を用いて視程比へ換算すると**図-37** が得られる。SHAを除くと、視程比で2.2~3.5倍の視程障害緩和効果がある。このように、飛雪流量を防雪林風上と風下で計測することにより、防雪林の視程障害緩和効果を推定することが可能である。高さ3mにおける風速比と飛雪流量比を**図-38**に示す。なお、風速比は**図-31**、飛雪流量は**図-36**のそれぞれ再掲である。風速比は防雪林に対して斜風より直交風の方が高い一方、SHAを除く飛雪流量比は風向による顕著な違いはみられない。



図-34 降雪を伴う吹雪時に撮影した、(a)樹木に付着した冠雪、(b)冠雪からの飛雪（落雪）

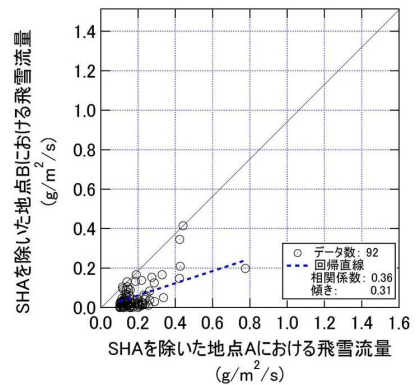


図-35 傾き1.0を超える点（SHA）を除いた地点Aと地点Bにおける飛雪流量の比較。黒色実線は傾き1.0の直線を示す

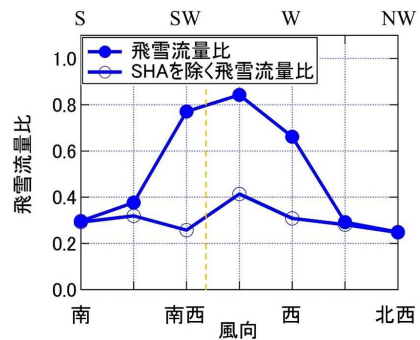


図-36 防雪林を通過する風向別の飛雪流量比。点線は防雪林に直交する風向（230°）を示す

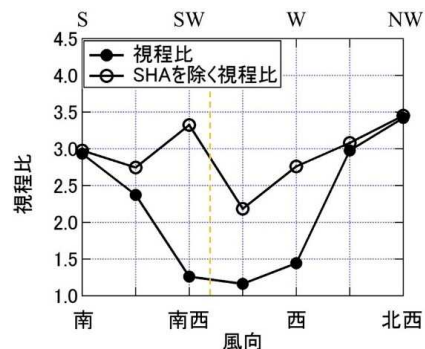


図-37 飛雪流量比から換算した風向別の視程比。点線は防雪林に直交する風向（230°）を示す

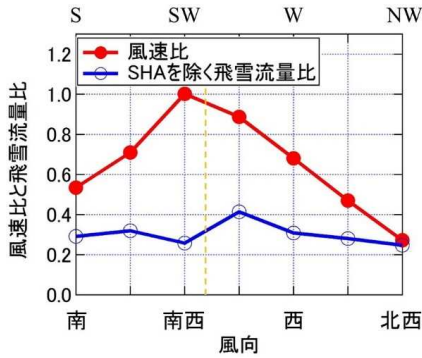


図-38 高さ3mにおける風向別の地点Bにおける風速比と飛雪流量比
点線は防雪林に直交する風向(230°)を示す

2. 3. 3 防雪林を通過する距離と防雪効果

図-20 に示したように、風向が変わると風が防雪林を通過する距離が変わる。雄信内防雪林の林帯幅が30m一律であり、防雪林に直交する風向は230°なので、風向別に防雪林を風が通過する距離を計算できる(図-39)。



図-39 風が防雪林を通過するときの距離

風向別の風速比(図-31)と風向別の飛雪流量比(図-36)の横軸を、風が防雪林を通過する距離に置き換えて図-40を得た。風が防雪林を通過する最も短い距離は南西の風(SW、225°)で35m、最も長い距離は北西の風(NW、315°)で380mである。ただし、風下林縁から地点Bまでの距離を考慮していない。図-40から、防雪林を通過する風の距離が長くなるほど(斜風であるほど)、風速比と飛雪流量比が低く防風・防雪効果が高いと考えられる。より詳しくみると、風速比は防雪林を通過する風の距離が長くなるほど徐々に低下する。

一方、SHAを除く飛雪流量比は最短距離の35m(南西の風)で0.4以下であり、既に風速比のそれより低い値を示している。つまり、直交風では下枝の枯れ上がりが影響して防風効果がほぼ見られないのに対して、防雪効果に関しては、下枝の枯れ上がりは影響しない

結果であった。ただし、下枝の枯れ上がりとは関係ないが、SHAの発生原因を樹木の冠雪からの飛雪とするならば、直交風のときに道路側風下まで強い風が吹き込む結果、樹木の冠雪からの飛雪が道路に流れ込む可能性はあり得ると思慮される。

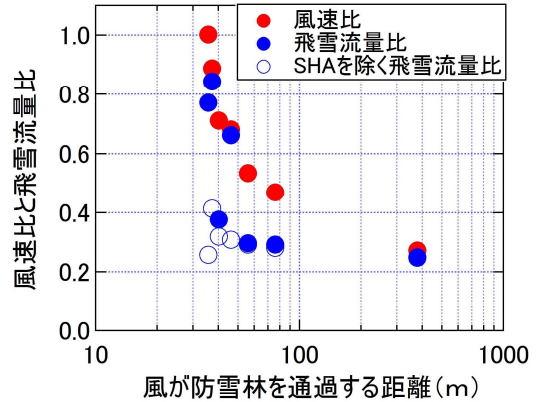


図-40 風速比・飛雪流量比と風が防雪林を通過する距離の関係

2. 3. 4 空隙率と防風・防雪効果

図-31 と図-36 から、斜風になるほど風速比と飛雪流量比が低くなる傾向と、空隙率も低くなる傾向が一致しているように考えられるため、図-41 に風速比、飛雪流量比を空隙率の関数として示す。高さ1~7mにおける風速比を黒丸で示す。ただし、高さ9mには相関が認められないため、高さ9mの風速比を白丸で示し、回帰分析には含めていない。また飛雪流量比は高さ3mのみの値である。

図-41 から、空隙率が高いほど風速比が高くなる傾向にあることがわかり、回帰分析から式(6)を得た。

$$u_B = 1.01 u_A A^{0.18} \tag{6}$$

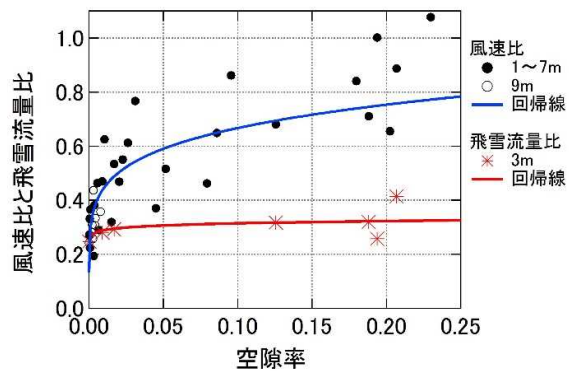


図-41 空隙率と風速比・飛雪流量比の関係

ここで u_A 、 u_B 、 A は、それぞれ風上と風下の風速(m/s)と空隙率である。また、空隙率と飛雪流量比についても累乗関数を用いて回帰分析を行い、式(7)を得た。

$$q_B = 0.34q_A A^{0.04} \quad (7)$$

ここで q_A と q_B は、それぞれ風上および風下における飛雪流量(g/m²/s)である。

次に、風速比と飛雪流量比から得られた結果について物理的な意味を考える。吹雪とは、「雪粒子が風によって空中を舞う現象」として定義される¹⁴⁾。すなわち、抵抗となる防雪林などがなければ雪粒子は風に追従する¹⁵⁾。風が防雪林を通過できるものと考えれば、飛雪粒子も風に追従するので飛雪も通過するものと思われる。しかし、本研究で得られた結果では、風速比より飛雪流量比が低い結果となった(図-38、図-41)。

樹木が障害物となり飛雪粒子は着雪や吹きだまりを形成するなどして、防雪林が飛雪を捕捉したと考えれば、飛雪流量比が風速比のそれより小さくなることは想像できる。

実際に、風速比を示した式(6)では、空隙率が1に近づく時、風速比も1に近づく。一方、飛雪流量比を示した式(7)では、空隙率が1に近づく時に飛雪流量比は風速比のように1には近づかない。少しでも障害物が存在すると吹雪による飛雪が樹木や枝葉に着雪することから、急激に飛雪流量比が減少する可能性があるが、今後の課題としたい。

以上のように、空隙率と風速比および飛雪流量比から導出した関係式は、防雪林の空隙率だけで防風・防雪効果を推定することが可能であると考えられる。

2.3.5 構成要素と防雪性能のまとめ

一般国道40号線沿いに造成されている雄信内防雪林において、道路側から撮影された写真により、防雪林の空隙率を解析し、防雪林風上と風下で風向・風速と飛雪流量を観測した。

国道から撮影した防雪林の写真から方位別の空隙率を解析したところ、地表面に近く直交風になるほど空隙率が高い結果を得た。風速と飛雪流量の解析では、風上を基準とし、風下で観測した風速と飛雪流量を比で表現した。

その結果、防雪林に対して直交する風ほど、また地表面に近いほど風速比が高く、地表面から高いところや斜風になるほど風速比が低くなる傾向にあった。飛雪流量においては風向による顕著な違いはみられず飛雪流量比は、ほぼ0.2~0.4の間に収まった。

また、風向から風が通過する距離の関数として風速比と飛雪流量比を解析したところ、風速比は防雪林を通過する風の距離が長くなるほど徐々に低下したのに対し、飛雪流量比は最短距離の35m(南西の風)であっても低い値を示した。すなわち、防雪林風下の林縁高さ3mでの計測において、防雪効果に下枝の枯れ上がりの影響は小さいものと考えられる。また、空隙率が高いほど風速比と飛雪流量比が高いことから、空隙率と風速比、および空隙率と飛雪流量比を直接比較することにより、防雪林の防雪効果を評価するための関係式を導出した。ただし、飛雪流量の関係式については、風速ほど明確な結果が得られていないため、継続したデータの取得が必要である。なお、詳細については文献^{16),17),18),19),20),21),22),23)}を参照されたい。

2.4 ICT活用による防雪林の防雪性能の評価可能性の検討

前節では、雄信内防雪林を対象に空隙率と防雪効果との関係について整理し、空隙率が防雪林の防雪性能を評価する指標になりうることを示した。本節では、防雪林の延長方向における空隙率を連続的に評価するため、雄信内防雪林において車載カメラで動画を撮影し、画像を切り取り、魚眼レンズから空隙率を算出した手法(図-27)と同様に下枝の枯れ上がりおよび樹木の有無による空隙率を計算した。また、算出された空隙率を用いて、防雪林の移動気象観測車による風速観測の結果を評価した。移動気象観測は平成30年度に、空隙率の計測は令和元年度にそれぞれ実施した。

車載カメラで撮影した動画から正確な撮影地点(KP)を算出するために車速を一定(50km/h)にし、KP標識と道路構造物(橋梁)を基準とし(図-42)、画像は60fpsで取得し、KPは小数点第3位まで換算した。1秒間隔で切り出した画像を2値化して空隙率を算出した。使用したカメラは、ウェアラブルカメラ(HERO8, GoPro Inc.製)で、車両の天板に据え付けて撮影した。図-43に、切り出し画像の一例とKPの位置関係を示す。防雪林の粗密は枯れ上がりだけでなく、取り付け道路や交差点などにより様相が異なる。

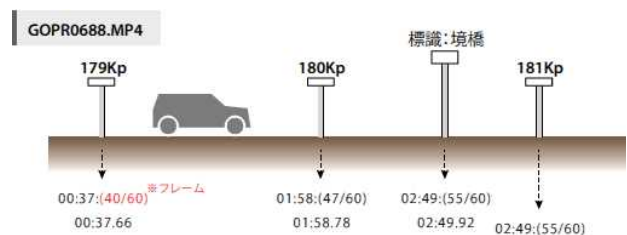


図-42 静止画の位置(KP)と撮影時間の関係



図-43 雄信内防雪林の画像取得位置

図-44 に動画から空隙率に換算した結果の一例を示す。まずは1秒間隔で動画から画像を切り取った。ウェアラブルカメラには広角レンズが取り付けられており、画像の端部では若干の湾曲が見られるため、トリミングした。また、車両の目線高さに合わせるため画像上端・下端をトリミングした。これ以外にも、背面の山岳部や道路標識等、防雪林以外の物体が映り込んでいる場合はトリミングして除いた。最終的に得られた画像を2値化し、空隙率に換算した。

視程障害移動観測車(図-45)は、超音波式風向風速計(PGWS-100-3)、GPS センサー(M12P/10S)等を搭載している。超音波式風向風速計では10Hzの時間間隔で風速を計測し、観測地点(KP)についてはGPSセンサーで取得した情報を基に算出した。

吹雪が発生した平成31年1月17日に、雄信内防雪林の延長約4.1kmを往復11回走行して風速を観測した。観測地点における基準点の風向風速計(図-18)から、卓越風向は西および北西の風、平均風速は8.5m/sであった。

図-46に、移動気象観測で得られた風速と空隙率の換算結果を示す。一般国道40号沿いの風速観測結果は概ね基準点の平均風速よりも低い。ただし、風速8.5m/s以上の箇所もあり、たとえばKP181.319付近など空隙率が高い箇所では、極端に風速が高い場合もみられる。

図-41に掲載した魚眼レンズで撮影した風速比と空隙率の関係と比較するため、平均風速8.5m/sを基準(分母)として図-46に掲載した風速を風速比で表現し、図-47に示す雄信内防雪林延長における風速比と空隙率の関係から、回帰分析により式(8)を得た。

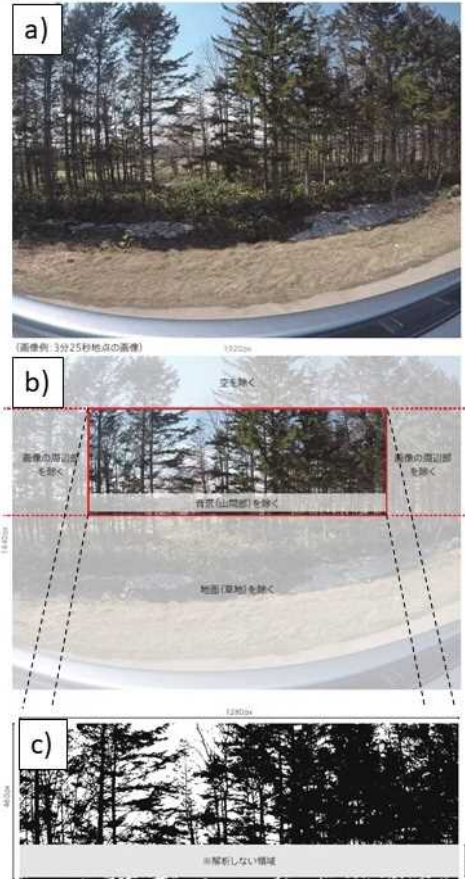


図-44 動画から切り取った画像の空隙率換算方法
a) 動画から切り取った画像
b) 画像のトリミング
c) トリミングされた画像の2値化画像



図-45 移動気象観測車

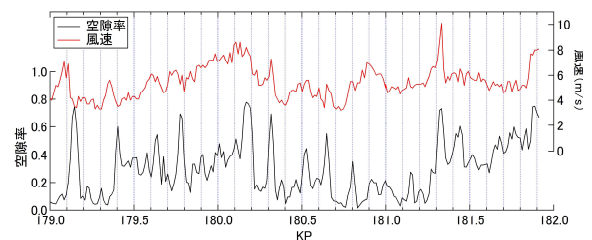


図-46 雄信内防雪林延長(KP)における空隙率と風速

$$u = 0.8u_0A^{0.15} \quad (8)$$

次に、上記式(8)と、図-41の結果を回帰分析した式(6)を比較した(図-47)。移動気象観測と防雪林延長の動画で得られた回帰線(式(8))の方が低い値となった。移動気象観測と防雪林延長の動画で得られた結果は過小評価していることになるが、これは空隙率算出のために撮影した動画の画角(防雪林と直角方向)と風向(防雪林に対して斜風)にズレが生じていることに起因していると考えられる。

令和元年度に実施した結果、過小評価ではあったが移動気象観測と防雪林延長の動画で得られた画像から空隙率に換算することで、防雪林延長における防風効果を評価可能であることを示した。

防風効果に言及する場合、たとえば図-47の回帰線によれば防雪林の空隙率が0.1の場合、風速比は0.5となる。風上の風速が10m/sであれば吹雪により視程不良であると考えられるが、空隙率0.1の場合は風速比0.5程度であることから道路上の風速は5m/sとなる。吹雪の臨界風速(5~6m/s)²⁴⁾を鑑みれば、道路上の視程は比較的良好であったと推察される。

以上のように、防雪林の空隙率を計測しただけで道路上の吹雪の状態を推定可能となるため、防雪林延長の動画で得られた画像解析は新しい評価方法になり得るものと思慮される。ただし、現段階では防雪林の林帯幅や平均樹高を考慮していない点は添えておきたい。

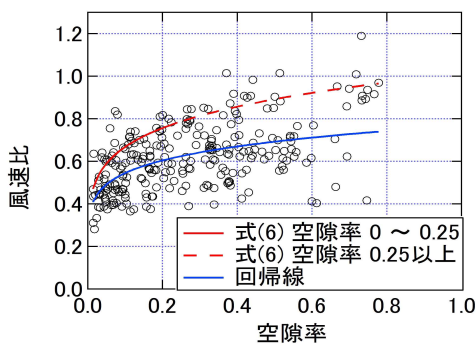


図-47 雄信内防雪林延長の風速と空隙率の関係
青線(回帰線) : $u = 0.8u_0A^{0.15}$

2.5 下枝の枯れ上がりに関する風洞実験

本節では、平成27年度に実施した、一般国道40号線沿いの天塩町雄信内防雪林(標準林)における林帯幅、樹木配置、生枝、枯れ枝の空間分布などの林況調査結果に基づき、平成28年度は、現況の防雪林を再現した模型を製作し風洞実験を行った。

2.5.1 実験装置

実験には、寒地土木研究所所有の風洞実験装置(図-48)を使用する。装置の主要寸法は、全長約29m、測定洞の全長約9m、測定洞の断面1.2m×1.2mである。測定洞には、風向角を可変できるターンテーブルを備えたベース模型を設置している(図-49)。

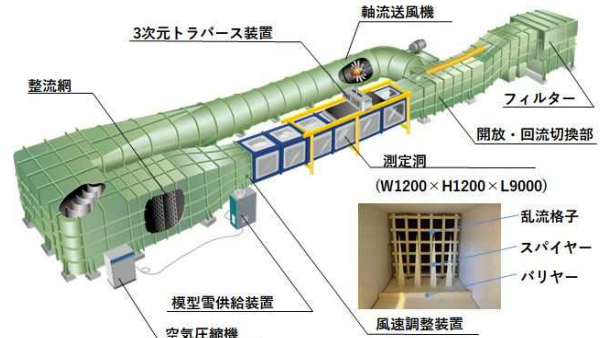


図-48 風洞実験装置



図-49 風洞実験装置のターンテーブルと防雪林模型

2.5.2 防雪林模型の検討と製作

可能な限り現地状況を再現するため、現地調査に基づいて防雪林模型を製作した。模型は、樹木を配置する地形模型と、地形模型上に配置する樹木模型で構成されている。地形模型の形状は、現地測量による代表断面で製作した。模型の縮尺設定については文献²⁴⁾を参考にすると、以下の(1)~(3)を考慮する必要がある。

- (1) 自然風に関する相似則
- (2) 風洞断面の大きさによる制限
- (3) 測定項目からの制限

(1) 自然風に関する相似則：風洞実験では、接地境界層内に収まるよう模型を配置する必要がある²⁴⁾。用いた風洞実験装置の接地境界層は下面から高さ0.4mである²⁶⁾ため、その範囲内で実験を行う必要がある。

(2) 風洞断面の大きさによる制限：一般的に大きな模型を風洞に配置すると、上方や左右の拘束壁の影響によって自然風の再現に影響が出る。閉塞率（模型断面面積の風洞断面面積に対する割合）5%以下が1つの指標とされるが、確定的な回答が見当たらないとされている²⁴⁾。

(3) 測定項目からの制限：大縮尺となるほど高さ方向の測定誤差が大きくなるほか、小さすぎる模型であれば物理的に取扱が困難となる。

本研究では、これらを総合的に考案して縮尺を100分の1とした。ここでは(2)で言及した閉塞率を無視している。このように、道路周辺における防雪施設（防雪柵、防雪林）を対象とした風洞実験において縮尺を100分の1としたものは多数^{26)・29)}ある。

地形模型は円形状のターン部模型と差替部模型で構成されている。差替部模型を入れ替えることで異なるパターンの林帯を実験できる。地形模型のサイズに関して、円形状のターン部はφ1188.5mm×高さ50mmであり、差替部は幅300mm×長さ1150mmである（図-49）。

植栽の配置について、樹木寸法等を計測した現地調査範囲（約25m×約10m）を1パターン（図-50）とし、同パターンを繰り返し配置した。本実験では図-50の青書きで示した樹木は隣接する樹木と大きく接触し、配置が困難であったことから除き、同図朱書きで示した配置で構成した。

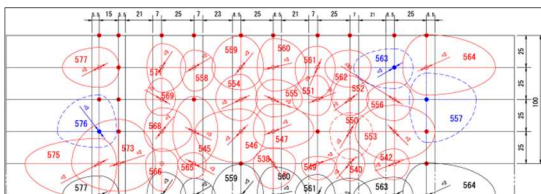


図-50 一般国道40号線沿い雄信内防雪林の調査結果から製作した植栽配置構成図

樹木模型は、自然発生した小木や倒木を除いた31形状とした（図-49、図-51）。各形状は現地調査に基づいて樹高、枝張、枝下高を再現した。材質は造形しやすく、実験中の修整が容易で、風洞実験での実績^{26)・28)}のあるモルトフィルター材（イノアック（株）製）を用いた。フィルター材の厚さ、風速を同一条件下とした場合、単位面積当たりのセル数が増加すると圧力損失も高くなり、フィルター材の通気性が低い。そこで、2種類のフィルター材を用いて枝葉を造形した。常緑針葉樹では下枝の枯れ上がりが見られるが、この枯れ

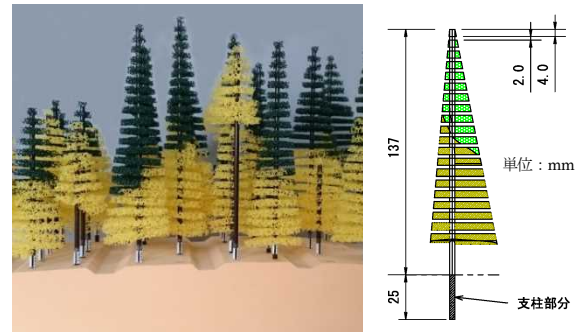


図-51 樹木模型

上がった部分にMF-8（セル数 8 ± 2 個/ 25mm^2 ）を、上部にある緑色の生きた枝葉にMF-13（セル数 13 ± 3 個/ 25mm^2 ）を使用した。落葉広葉樹は枯れ枝部分と同規格とした。なお樹木の幹は、樹木を問わず真鍮の棒（φ3mm）を使用した。

2. 5. 3 現地観測の再現実験

現地観測で得られた風況が模型上で再現されているか確認するため、模型上の防雪林風下および、より風下の道路付近において風速計測を行い、これらと現地観測によって得られた風況との比較を行った。

2. 5. 4 実験条件の設定

測定洞内の鉛直風速分布は、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0.15³⁰⁾）に近似するよう、気流を調整した²⁶⁾。実験風速は、模型雪に活性白土を用いた風洞実験で吹きだまりの再現性が高いとされる風速4.5 m/s前後（地面からの高さ $H=50\text{mm}$ ）³¹⁾を参考に、風速7 m/s（但し $H=400\text{mm}$ での風速）とした。防雪林模型は、2. 2の雄信内防雪林の気象等観測結果において卓越風向であった西からの風を再現するよう、測定洞内のターンテーブル上に模型を配置した（図-49）。

2. 5. 5 計測方法

風速計測には日本カノマックス（株）製の熱線流速計IHW-100を用いた。計測は、I型プローブを使用し1計測の計測間隔を10msとして1箇所当たり3072個計測し、計測データを平均した。計測は、2. 1で記した、雄信内防雪林において固定観測を行った4地点（防雪林の風上側の基準点（No.0に相当）から風下側の道路法尻の地点No.4まで）のほか、道路上の風速分布の把握を目的として、道路上の2地点（2車線道路の各車線上）を追加し、計6地点で行った。計測点の位置を図-52に示す。計測は、現地観測における各固定観測地点+道路上と、この地点を道路縦断方向に25mm毎ずらした5測線で行った（後述のNo.1を除く）。

各地点のデータは、No2は3点、No3～No5は5点

を平均したものを使用した。計測高さは共通で地面から高さ 150mm までは 5mm 間隔、それ以降計測上限である 400mm まで 10mm 間隔で計測した。なお、2. で述べた基準点 (No.0) に相当する風洞の基準点は、風洞壁面や模型による影響が受けにくい風洞中央の風上側計測上限の計測点 No.1 (図-52) に設定した。

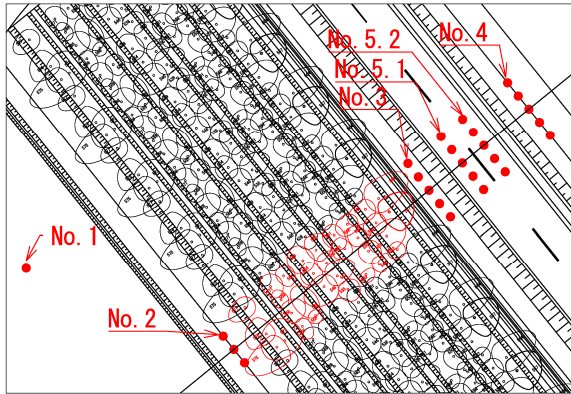


図-52 風速計測点位置図

2. 5. 6 現地観測データの処理

現地観測の風速比の算出には、2. 3 で述べた観測期間 (平成 28 年 12 月 22 日～平成 29 年 3 月 18 日) における風向・風速の観測結果から、西の風向を抽出して平均化したものを用いた。なお、基準点で観測された風向・風速は、高さ 3m である。基準点の高さ 1m と 7m の風速を対数則で計算し、これを基準 (分母) として道路側風下 No.3 の風速 (分子) を風速比として表現した。

2. 5. 7 実験結果と考察

計測点横断方向の風速比 (現地・風洞) を図-53 に示す。図中の横軸は、道路横断方向の計測点を示し、道路の中央を 0 として風上側をマイナス、風下側をプラスとして風洞実験での縮尺で示した。縦軸は、現地観測と風洞実験それぞれの風速比である。

風洞実験における風速比は、防雪林直前風上の地点 No.2 で僅かに低下し、防雪林を通り抜けた直後の地点 No.3 で大きく低下した。さらに、そこから風下の道路風下法尻に至る (No.3～No.5.2) 間、風速比は回復の傾向を示した。この傾向は現地観測と一致が見られた。

道路防雪林の風上近傍の地点 No.2 の風速比は、高さ 1m で風洞実験の値が現地観測に比べて僅かに高いものの、上方に位置する高さ 3m 及び 7m では、ほぼ一致した。

測定点別に着目すると地点 No.2 の防雪林風上側林

縁では防雪林による風速低下や斜風による林縁に沿った風の流れの影響が考えられる状況であったが、現地観測と風洞実験において相関が高い結果が得られていた。一方、道路防雪林の風下側直下の地点 No.3 の風速比は、風洞実験では現地観測に比べ、高さによらず低い値となった。また、現地観測と比較した風速比は、高さ 1m で約 1/2、3m で約 1/11、7m では約 1/2.6 と低く、特に高さ 3m での乖離が大きい。道路風下側法尻近傍の地点 No.4 の風速比は、現地観測が 3m のみであるが、風洞実験では現地観測に比べて低い値を示した。

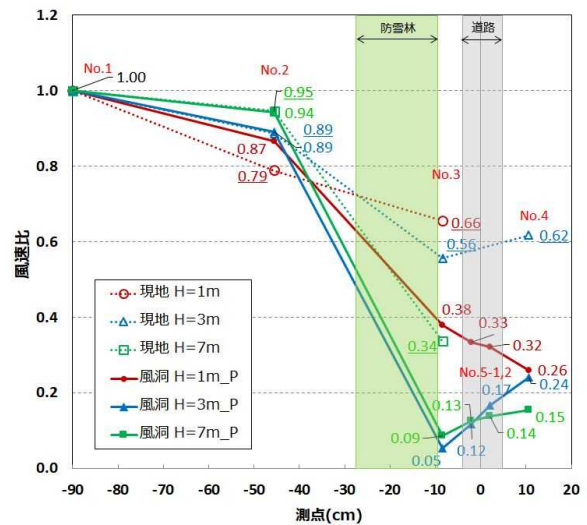


図-53 計測点横断方向の風速比 (風洞・現地)

2. 6 防雪林模型の下枝の枯れ上がりによる影響解析

2. 5. 3 で示したとおり、下枝の枯れ上がりが見られる高さにおいて、道路付近の風速が大きくなることについては、現地観測結果を再現したが、風洞実験の結果は防雪林による減風効果が大きく、現地観測結果と比べると乖離がみられた。そこで、防雪林の模型修整手法を検討するため、平成 29 年度は前中期研究計画期間内に実施した別の防雪林模型の風洞実験結果を再解析した。

2. 6. 1 樹木模型

利用した樹木は、下枝高だけを変えた 3 種である (図-54)。平均樹高は 5m を想定した模型で、模型の高さは 50mm である。樹木配置は、下枝の枯れ上りを表現するため、道路吹雪対策マニュアル (防雪林編) に従い標準林タイプで、樹木列数 5 列、千鳥間引きの林況を表現した。下枝の枯れ上がりによる影響解析のため、林縁と林内における枝下の高さを変えた模型を利用した (図-55)。なお、枝下高 5mm の樹木は下枝の枯れ上がりのないものとする。

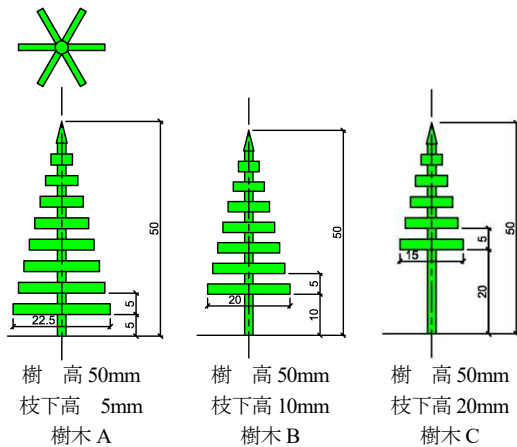


図-54 樹木模型

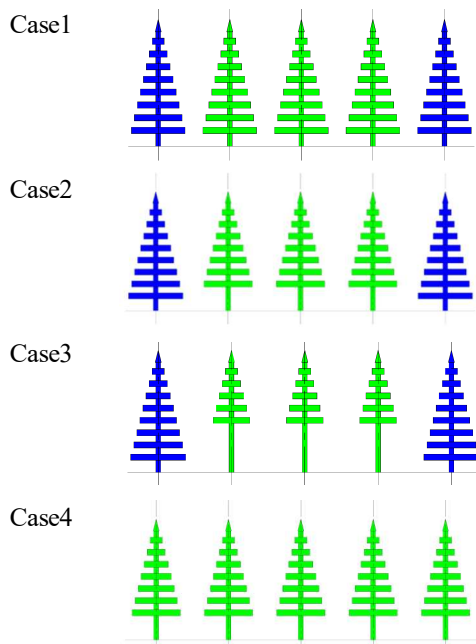


図-55 植栽配置側面図

- Case1 : 林縁・林内に樹木 A、
- Case2 : 林縁に樹木 A、林内に樹木 B、
- Case3 : 林縁に樹木 A、林内に樹木 C、
- Case4 : 林縁・林内に樹木 B

2. 6. 2 計測手法

計測には、PIV (粒子画像流速測定法:Particle Image Velocimetry)を用いた。計測原理は、流れ場に投入した微小なトレーサー粒子 (追跡子) にレーザーをシート状に照射して流れの断面を可視化し、ハイスピードカメラによる連続撮影された画像から、トレーサー粒子の移動量を解析して流速を計測する方法である。よって、側面からみた面的な流れ場を把握することが可能である。トレーサー粒子は、模型雪として使用している活性白土である。PIV で解析可能な供給量は 230g/min である³²⁾。なお、模型雪の動きは空気の流れ

と完全には一致せず、計測結果は風速ではなく、模型雪の移動速度であるため、流速と表現する。

風上 (分母) と風下 (分子) における流速の比から流速比を求め、防雪機能を評価する指標として利用した。画像の撮影は毎秒 2,000 枚で 5 秒間行い、画像 2 枚 1 組から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。計測面は鉛直面及び水平面である。

2. 6. 3 実験装置

実験には寒地土木研究所の風洞実験装置 (図-48) を使用した (2. 5. 1 を参照)。測定洞には、風向角を可変できるターンテーブルを備えたベース模型を設置した (図-56)。

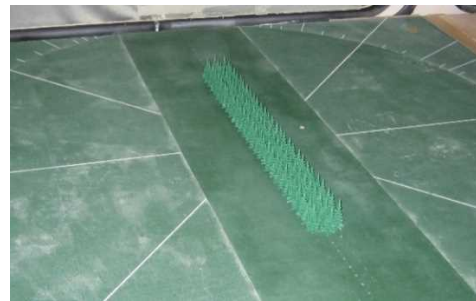


図-56 樹木模型を配置した様子

2. 6. 4 実験結果と考察

防雪林の模型は、標準的な防雪林の縮尺を 100 分の 1 スケールとしている。防雪林模型の高さは 50mm であり、5m 相当の防雪林を想定している。この実験で得られる結果は事例解析として成り立つが、たとえば現地調査を実施している雄信内防雪林など、他の防雪林に適用するためには、一般解として表現した方が合理的である。そこで本稿では、防雪林の現地観測結果 (図-31) と同様に、防雪林の風上林縁からの距離を樹高で除した高倍距離で表現する。なお、水平方向に計測された流速比は、乗用車ドライバーからの目線高さ ($H=1.5\text{m}$) に相当する模型高さを $h=15\text{mm}$ として、データを整理した。

図-57 に、模型の高さ $h=15\text{mm}$ における風下の流速比を示す。林縁の枝下を維持し、林内の枝下高を 5mm、10mm、20mm (Case1~Case3) と変化させると、防雪林模型から風下の水平方向における流速比は上昇する。下枝高 20mm の防雪林 (Case3) では枝下高 5mm (Case1) に比べて平均 1.3 倍流速比が高い結果であった。

林縁における下枝を維持させ、林内の枝下高だけを変化させた結果であるため、防雪林内の下枝の枯れ上がりによる影響と考えられる。

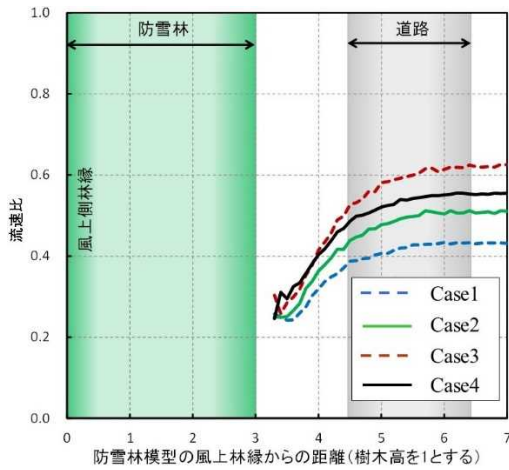


図-57 防雪林模型から風下の水平方向における流速比 (ドライバーの目線高さに相当する $h=15\text{mm}$ の流速比)

図-58 に、林縁・林内全ての枝下高を 10mm としたときの流速比 (図-57 の Case4) と、林内だけ枝下高 10mm としたときの流速比 (図-57 の Case2) の比を示した。(Case2) は (Case4) と比べ、道路を想定した位置では最大 0.9 (全体では最大 0.8) まで低下したことが読み取れる。林縁・林内全ての枝下高の高さを変えた場合 (Case4) は、下枝が枯れ上がった結果と考えられる。一方、林内だけ下枝高を変えた場合 (Case2) は、言い換えれば、林縁の下枝を維持した結果と考えられる。

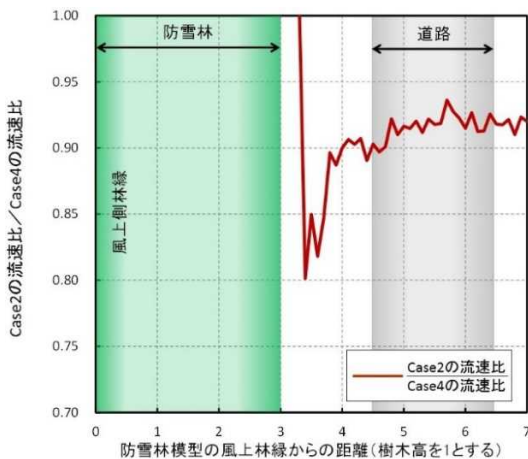


図-58 枝下高 10mm とした防雪林模型における林内／林縁・林内の流速比 (林縁・林内とも枝下高を 10mm とした模型による流速比を基準としたもの。 $h=15\text{mm}$)

実際の防雪林において、道路側風下の風速に与える影響だけに着目すれば、「下枝の枯れ上がり」による防雪効果の低下と「林縁における下枝の維持」による防雪効果の持続の両者が相殺するように、林縁に対策を講じれば、防雪林内の下枝の枯れ上がりによる減風効

果の低下による影響を抑えることができ、防雪林の防雪性能を維持できるものと期待される。

本結果を踏まえて、2.5.3 で製作した防雪林模型の枯れ上がり部分において、特に林縁部の修整を慎重に行うこととした。

2.7 防雪林模型の修整

2.5.3 結果より、模型実験の風速比が低い傾向にある。防雪林模型における現地観測で得られた風況の再現性を高めるため、平成 30 年度は、模型の修整を行った。

2.7.1 模型修整手順

修整は、減風効果に大きく影響がない項目から着手し、間引きから枝葉 (モルトフィルター) の剪定の順で実施した。都度風洞実験にて風況を観測、その結果を踏まえ、次の修整を考察した。以降、修整、実験、考察を繰り返し現地観測に近づけた。

2.7.2 実験装置、実験条件、計測方法

実験には寒地土木研究所の風洞実験装置 (図-48) を使用した (2.5.1 を参照)。実験条件、計測方法は 2.5.3 と同様とした。実験のパターンと防雪林模型の樹木本数を表-3 に示す。パターン P は修整前の模型林である (平成 29 年度実施、実験結果は図-53)。パターン 1~4 は間引きのみで修整した模型林である (平成 30 年度実施)。

表-3 各パターンと防雪林模型の樹木本数

	防雪林模型の樹木本数 (本)										計
	列1	列2	列3	列4	列5	列6	列7	列8	列9	列10	
	H=80	H=117	H=94 H=102 H=96 H=65	H=85 H=86 H=99	H=143 H=137 H=154	H=137 H=142 H=136	H=133 H=82 H=141	H=131 H=129 H=116 H=49	H=149 H=143 H=64	H=147	
パターン P (P)	11	11	44	33	33	44	33	44	33	11	297
パターン1 (P1)	-	-	44	33	33	44	33	44	33	11	275
パターン2 (P2)	-	-	44	33	-	-	33	44	33	-	187
パターン3 (P3)	-	-	44	33	-	-	33	44	11 H=64	-	165
パターン4 (P4)	-	-	22 H=94 H=102	11 H=99	-	-	33	44	11 H=64	-	121



図-59 防雪林模型の樹木配置 (パターン P)

防雪林模型の横断方向の配置を図-59 に示す。防雪林模型の樹木は横断方向に 10 列で、樹木の高さは 49mm~158mm、樹木の本数は全部で 297 本である。樹木の配置は列 1 が風上側、列 10 は風下の道路側である。

2. 7. 3 実験結果と考察

模型の修整については、各項目毎風洞実験にて風況を確認しながら、以下の手順にて実施した。

要なため、風下側落葉樹と、「0」を踏まえ林縁部を残し林内部中心列(列 5, 6)を間引いた。間引き後の樹木の本数は 187 本である(図-62)。

(結果)

大きく本数を間引いたため、パターン 1 より H=1m, H=3m, H=7m とともに風況が現地観測に近づいたが乖離はまだ大きい(図-63)。

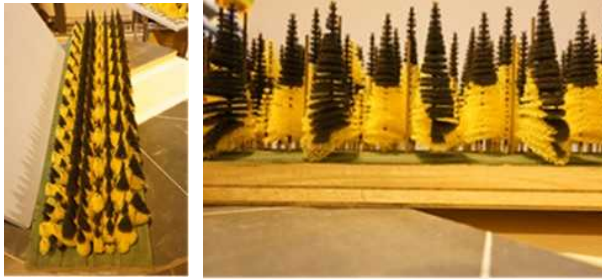


図-60 パターン 1

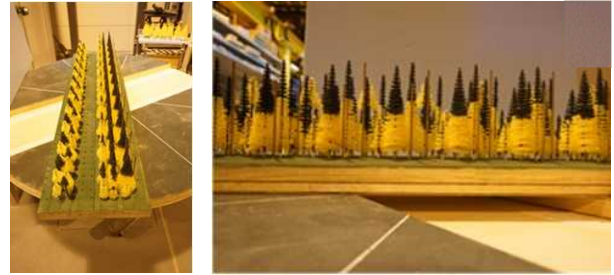


図-62 パターン 2

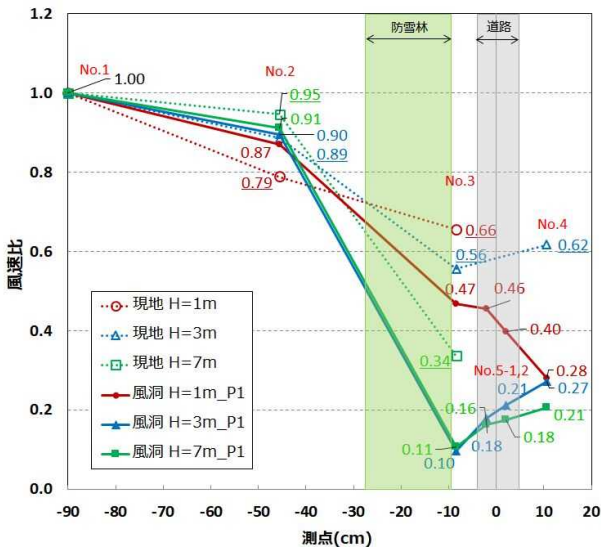


図-61 計測点横断方向の風速比 (パターン 1・現地)

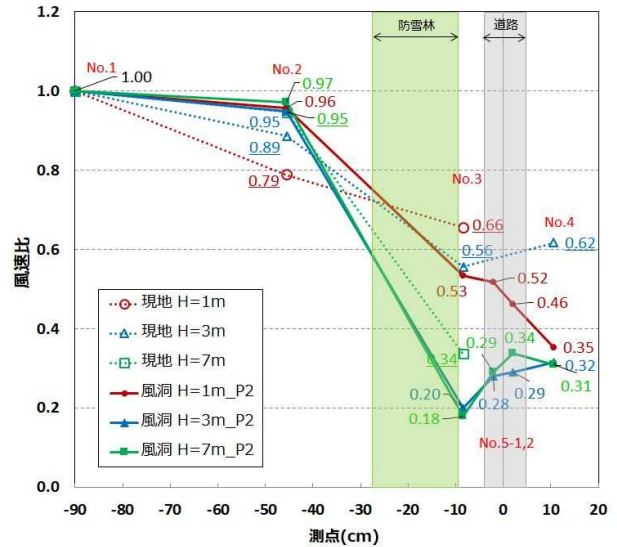


図-63 計測点横断方向の風速比 (パターン 2・現地)

(パターン 1) 落葉樹の間引き

冬期間葉を落とし減風効果がないことから、まず風上側落葉樹(列 1, 2)について間引いた。間引き後の樹木の本数は 275 本である。

(結果)

修整前に比べ現地観測にやや近づいたが、全体的に乖離している(図-61)。

(パターン 2) 林内部の間引き

パターン 1 の結果より全体的に減風効果の低減が必

(パターン 3) 風下側林縁部の間引き

林内部を間引いても乖離が大きいため、林縁部の間引きを行った。風上側に比べ、影響の少ない風下側から実施した。全体的に現地観測と乖離が大きいため、水平方向に枝葉が大きく張り出し、各高さで減風効果が大きい高い樹高のものから間引いた。(列 9, H=149mm, H=143mm)。間引き後の樹木の本数は 165 本である(図-64)。

(結果)

H=7m は現地観測値に近づいた。H=1m, H=3m については乖離が確認された(図-65)。

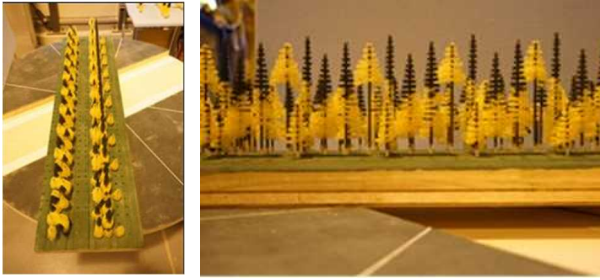


図-64 パターン3

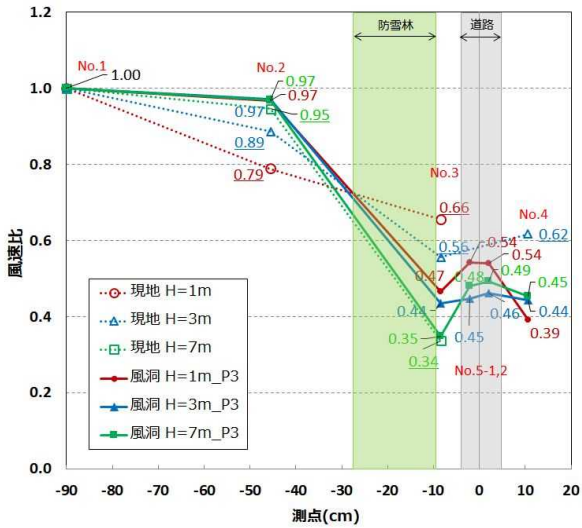


図-65 計測点横断方向の風速比
(パターン3・現地)

(パターン4) 風上側林縁部の間引き

風下側林縁部においてこれ以上の間引きは、防雪林模型の林帯幅が狭くなり、現地との差異が大きくなる。それにより、現地防雪林の防雪性能における林帯幅の要因が確保できなくなるため、風上側の林縁部を間引いた。全体的に枝葉を減らせるよう、列3は4種類ある樹高のなかで2番目と4番目に高い樹高のものを間引き(列3, H=96mm, H=65mm)、列4は3種類の中で2番目と3番目に高い樹高のものを間引いた(列4, H=85mm, H=86mm)。パターン4を図-66に示す。間引き後の樹木の本数は121本である。

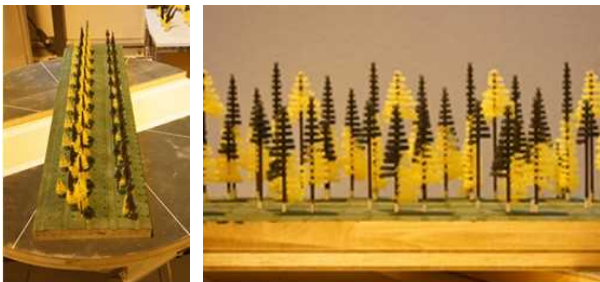


図-66 パターン4

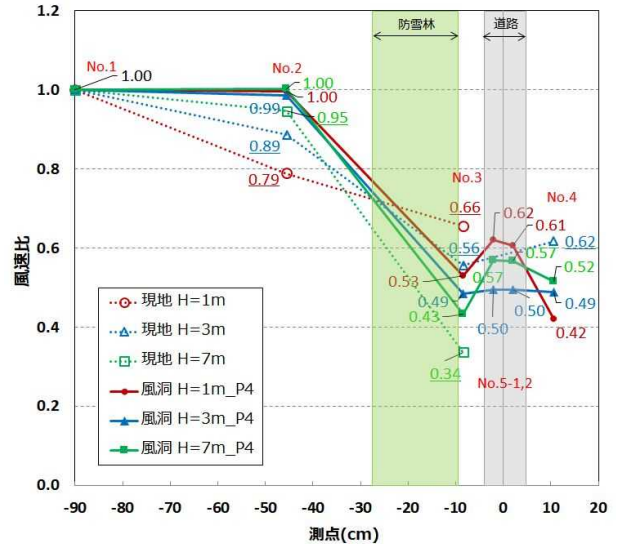


図-67 計測点横断方向の風速比
(パターン4・現地)

(結果)

H=1m, H=3mは近づいたが、H=7mにおいては、風速比が増し乖離が大きくなった(図-67)。

(各パターンの現地風速比の乖離)

現地観測と各パターン1~4の風速比との乖離を表-4に示す。乖離は風洞実験値と現地観測値の風速比の差を、現地観測値を基準とした割合で算出した。

$$\text{乖離} = \frac{\text{風洞実験風速比} - \text{現時観測風速比}}{\text{現地観測風速比}} \quad (9)$$

各パターン1~4の平均値は、全体の乖離度合いを比較するため高さH=1m, H=3m, H=7mの乖離値の絶対値の平均とした。風速比は図-52の地点No3の値とした。

各パターンの乖離の平均値は、模型を修整していないパターンPが69%で、模型を修整したパターン1が60%、パターン2が43%、パターン3が18%と修整する程小さくなった。パターン4は模型林を間引きし過ぎて高さH=7mの乖離が+29%まで上がり、そのため乖離の平均値が20%と、パターン3より大きくなった。

表-4 現地観測とパターン1~4の風速比との乖離

	高さ			乖離の 平均値
	H=1m	H=3m	H=7m	
現地観測	0.66	0.56	0.34	
パターンP (P)	0.38 -42%	0.05 -90%	0.09 -74%	69%
パターン1 (P1)	0.47 -28%	0.10 -82%	0.11 -68%	60%
パターン2 (P2)	0.53 -18%	0.20 -64%	0.18 -47%	43%
パターン3 (P3)	0.47 -29%	0.44 -22%	0.35 +3.6%	18%
パターン4 (P4)	0.53 -19%	0.49 -13%	0.43 +29%	20%

※ 上段:風速比、下段:乖離

(パターン3 剪定) 枝葉の剪定

パターン4は乖離が大きくなったので、以降、パターン3をもとに、枝葉(モルトフィルター)の剪定のみで修整を行うこととした。

剪定は、H=1m, H=3m, H=7mの風洞実験結果をもとに、減風効果の高い階層のモルトフィルターを剥離させ調整した。剪定のための修整のため、風洞実験を進めるための目安として各階層の空隙率を算出した。空隙率は模型を風向方向から撮影し、樹木・枝葉の部分の2次元的な占有率にて算出した。計8回剪定と実験を繰り返し、現地観測値に近づけた。表-5に各パターンS1~S8の枝葉(モルトフィルター)の剪定箇所を示す。

(結果)

現地観測と各パターンS1~S8の風速比との乖離を表-6に示す。最終的にパターンS8で乖離の平均値は4.8%まで現地観測に近づけることができた。パターンS8の測点と風速比の関係を図-68に示す。

表-5 各パターンS1~S8の枝葉の剪定箇所

	防雪林模型P3の枝葉(モルトフィルター)の剪定箇所
パターンS1 (P3S1)	P3樹木の列7 Z=24/H=82, 列8 Z=28/H=116, 列8 Z=15/H=49, 列8 Z=27/H=49, 列9 Z=24/H=64
パターンS2 (P3S2)	S1樹木の列7 Z=29/H=141
パターンS3 (P3S3)	S2樹木の列4 Z=22/H=86, 列4 Z=28/H=86
パターンS4 (P3S4)	S3樹木の列3 Z=30/H=94, 列3 Z=38/H=102
パターンS5 (P3S5)	S4樹木の列3 Z=12/H=94, 列3 Z=18/H=94
パターンS6 (P3S6)	S5樹木の列8 Z=35/H=129, 列9 Z=36/H=64
パターンS7 (P3S7)	S5樹木の列8 Z=9/H=49
パターンS8 (P3S8)	S5樹木の列3 Z=26/H=102

Z:剪定位置(mm) H:模型林の高さ(mm)

表-6 現地観測とパターンS1~S8の風速比との乖離

	高さ			乖離の 平均値
	H=1m	H=3m	H=7m	
現地観測	0.66	0.56	0.34	
パターンS1 (P3S1)	0.57 -14%	0.44 -21%	0.32 -5.5%	13%
パターンS2 (P3S2)	0.57 -14%	0.44 -22%	0.31 -7.7%	14%
パターンS3 (P3S3)	0.58 -11%	0.46 -17%	0.33 -1.2%	10%
パターンS4 (P3S4)	0.59 -11%	0.46 -18%	0.33 -1.1%	10%
パターンS5 (P3S5)	0.62 -5.9%	0.51 -8.8%	0.35 +4.9%	6.5%
パターンS6 (P3S6)	0.60 -8.8%	0.51 -8.8%	0.35 +5.5%	7.7%
パターンS7 (P3S7)	0.64 -2.3%	0.51 -9.0%	0.35 +5.2%	5.5%
パターンS8 (P3S8)	0.65 -0.1%	0.51 -8.4%	0.36 +5.8%	4.8%

※ 上段:風速比、下段:乖離

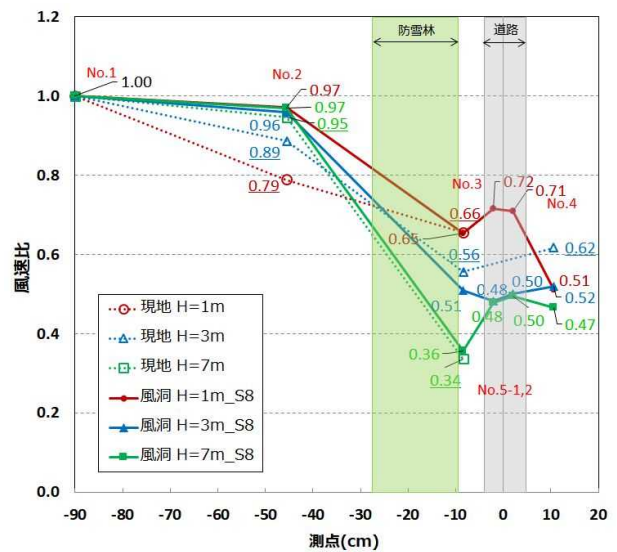


図-68 計測点横断方向の風速比 (パターンS8・現地)

2.8 防雪林模型の再検討

前項までの2.5.3結果と、2.7のモルトフィルターを用いた模型実験では風速の減速が著しく、現地と風速比を合わせるために6割の樹木模型の間引をしたため、防雪林の形体を維持できず、現地と大きく異なる形体となった。このため、令和元年度は、現地観測結果から枯れ上がり分布の解析を行い、模型の材質と形状を再度検討し模型を製作して、枯れ上がりの有無による防雪性能を把握するため実験を行った。

2.8.1 枯れ上がり分布の解析

現地観測では方位4方向(50°、140°、230°、320°)の下枝の枯れ上がりを計測している。枯れ上がり分布の特徴について、枯れ上がりがある樹木と枯れ上がりが無い樹木の種類、枯れ上がりの方角と高さ分布の解析を行った。その結果を表-7に示す。

(1) 枯れ上がりが有る樹木は全て針葉樹で、落葉広葉樹は枯れ上がりが無い。

(2) 生枝下高(地上から生枝までの高さ)は、道路側の樹木ほど高くなる傾向がある。この原因として自動車の排気ガスの影響が考えられる。

(3) 列10の樹木番号564は方角140°と230°、樹木番号557は方角230°と320°の2方位の枯れ上がりが大きい。この原因として図-71と図-72の通り、南西に高い樹木があり日差しを遮り、日射不足となるためと考えられる。列9の樹木番号542は枝葉全て枯れ上がっている。これは道路側に近く、樹高も低いため殆ど日差しが当たらないためと考えられる。

2. 8. 2 枯れ上がりが有り無しを再現した模型の製作

枯れ上がり分布の解析結果より、「枯れ上がり」と「枯れ上がり無し」の防雪林模型を製作した。

1) 樹木模型の材質と寸法

表-7の枯れ上がり分布の解析を元に、a)「枯れ上がり無し模型」、b)下枝に枯れ上がりがある「枯れ上がり模型(下枝)」、c)下枝の枯れ上がりと、防雪林の奥側2方位に枯れ上がりがある「枯れ上がり模型(下枝・奥側)」の3種類の樹木模型を製作した。

図-69に模型寸法、図-70に樹木模型と枝葉パーツを示す。模型寸法は1/100とした。様々な枯枝・生枝が簡易に再現できるように、枝葉と幹をパーツにて製作し脱着できる構造とした。枝葉パーツの高さは2.5mm、枝葉パーツの長さは0.5mm単位、枝葉パーツ間の空間は2.5mm、樹高、生枝下高、枯枝下高、陽樹

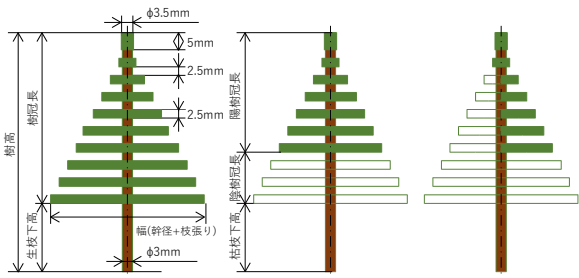


図-69 枯れ上がり無し模型と枯れ上がり模型

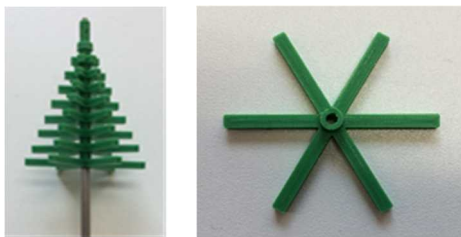


図-70 樹木模型と枝葉パーツ

冠長、陰樹冠長は5mm単位で作製した。枝葉パーツの材質はPLA樹脂を用いた。幹パーツは直径3mmのステンレス棒を使用している。枝葉パーツの層数は表-7のa)欄に記載する。

2) 枯れ上がりの有る樹木模型

枯れ上がり模型の列1から列9の樹木模型は枯れ上がり模型(下枝)とし、現地観測した4方位の生枝下高の平均値まで下層の枝葉パーツを取り除いた。枯れ上がり模型(下枝)の枝葉パーツの層数を表-7のb)欄に記載する。列10の樹木模型は枯れ上がり模型(下枝・奥側)とし、現地樹木の下枝と奥側半分は枯れ上がりがあるため、枯れ上がりが2方位ある箇所は枝葉パーツの枝6本のうち3本を切り取り、枯れ上がりが3方位から4方位ある箇所は枝葉パーツを取り除いた。枯れ上がり模型(下枝・奥側)の枝葉パーツの層数を表-7のc)欄に記載する。

3) 模型の樹木配置

枯れ上がり無し模型1ブロックの配置を図-71に、枯れ上がり模型の配置を図-72に示す。樹木の配置は2.5.2を基本とした。樹木番号575,546,555,556は隣の模型と干渉して設置できなかった。樹木番号576も隣の模型と干渉するため同じ列内で移設した。模型の樹木本数は1ブロック27本、全体で11ブロック297本である。

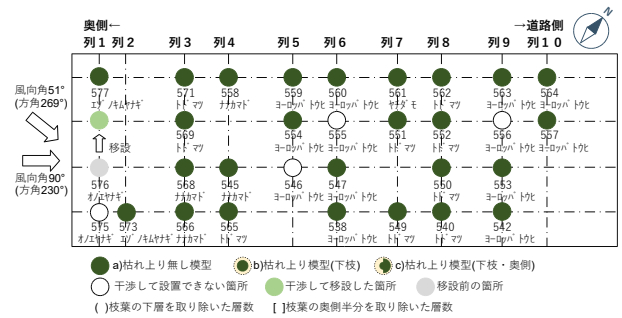


図-71 枯れ上がり無し模型の配置

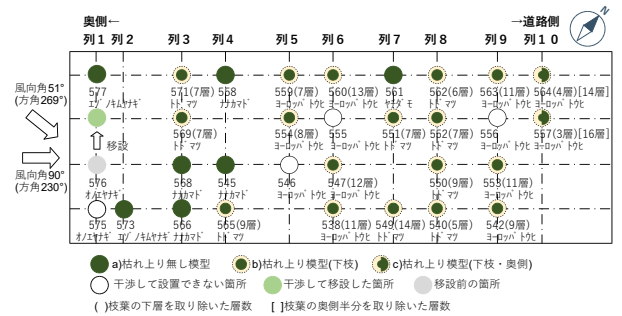


図-72 枯れ上がり模型の配置

2. 8. 3 実験条件

2. 5. 3 の計測方法（計測点）を基本に、風向角は前年度までと同じ斜風 51° と、道路に直角な直交風 90° の 2通り、模型は枯れ上がり無し模型（図-73）と枯れ上がり模型（図-74）の 2通り、風速の計測高さは H=10mm, H=30mm, H=70mm の 3点で実験を行った。



図-73 枯れ上がり無し模型の側面と実験状況



図-74 枯れ上り模型の側面と実験状況

2. 8. 4 実験結果と考察

1) 枯れ上がり模型の風況

枯れ上がり模型の計測点横断方向の風速比を図-75に示す。風況（風速比の変化）は計測高さ H=10mm、

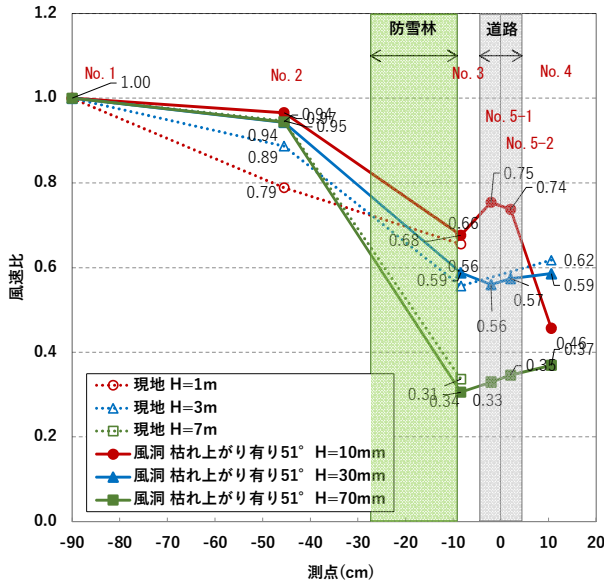


図-75 計測点横断方向の風速比（枯れ上がり模型 風向角 51°）

H=30mm、H=70mm とも風洞実験と現地観測がほぼ一致している。現地観測と風洞実験の風速比の乖離（No3地点）は、表-8に示す 6%程度であった。風洞実験と現地観測の風速比が近く、枯れ上がり模型において現地の風況に近づける事が出来た。

表-8 現地観測と枯れ上がり模型の風速比の乖離

	高さ			乖離の平均値
	H=1m	H=3m	H=7m	
現地観測	0.66	0.56	0.34	
枯れ上がり模型	0.68 +3%	0.59 +6%	0.31 -9%	6%

※ 上段:風速比、下段:乖離

2) 枯れ上がりによる防雪性能の低下

図-76に高さ H=10mm の風向角と枯れ上がり有無の比較を示す。また、枯れ上がり有りとなしとの風速比の差を図-79に示す。風向角 51° の時枯れ上がりが無しは 0.55 で、枯れ上がりが有り 0.68 と 0.13 上昇している。枯れ上がり無しの状態でも枝葉が少ないので、風速比の上昇が小さいと考えられる。風向角 90° は、枯れ上がり無し 0.36 から枯れ上がり有り 0.69 と 0.33 上昇している。高さ H=10mm は斜風の防雪性能低下は小さいが、直交風の防雪性能の低下が大きい。風向角 90° の時、高さ H=30mm の風速が早いので、その風が高さ H=10mm に入り込んでいるためと考えられる。

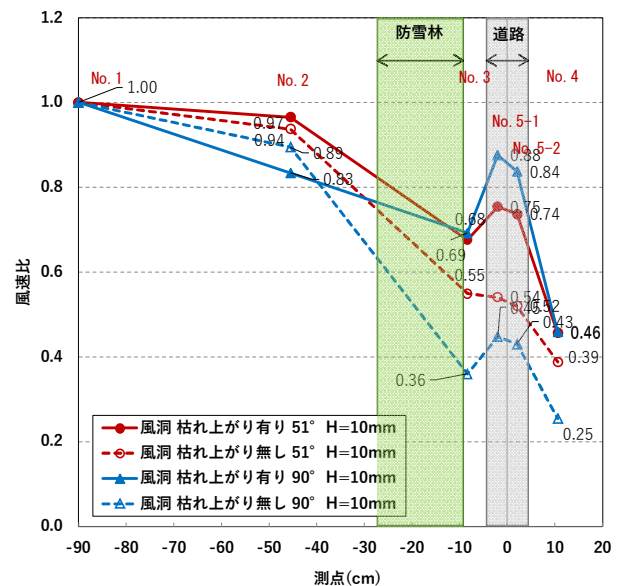


図-76 風向角と枯れ上がり有無の防雪性能（高さ H=10mm）

図-77に高さ H=30mm の風向角と枯れ上がり有無の比較を示す。風向角 51° の風速比は枯れ上がりが無し

-81、図-82 のネット柵模型を縮尺 1/100 で製作した。模型の空隙率は、現地で使っているネット柵と同じ 50%にした。ネット柵は図-83 に示す位置に取り付けた。

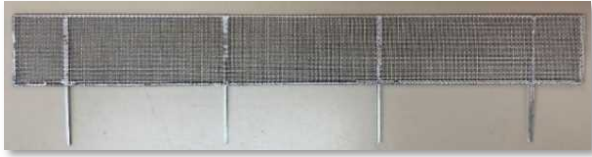


図-81 ネット柵模型

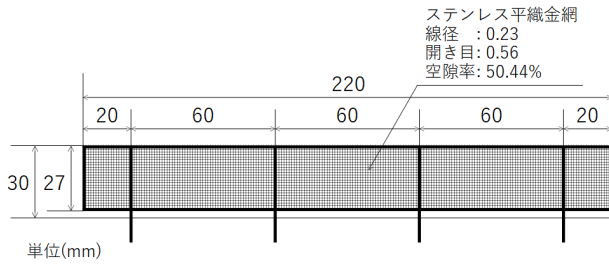


図-82 ネット柵模型寸法

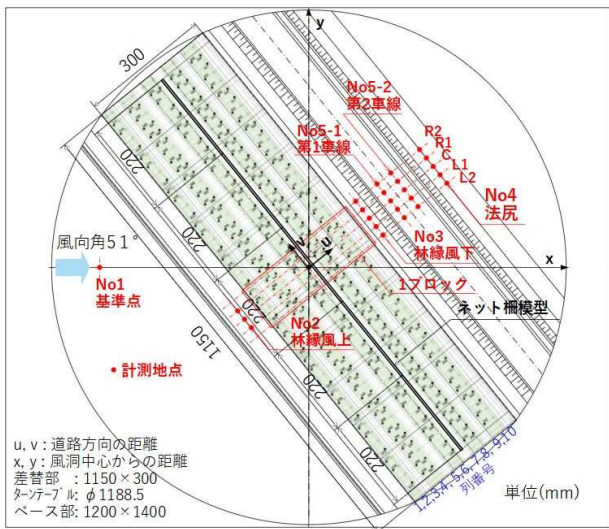


図-83 風速計測と模擬雪の吹き溜まり計測箇所図

2. 9. 3 風洞実験の設定

測定洞内の垂直風速分布は自然の風を模擬するため、過年度と同様、自然の風を模擬する風速 7m/s (高さ H=400mm) の条件とした。

2. 9. 4 計測方法

風速計測は、ゲルマニウム半導体を熱伝導率が良いニッケル管 (直径 1mm×長さ 3mm) で包んだプローブを使った、トーニック (株) 製の多点熱式風速計 (支持棒型風速風温プローブ MT-100-300Q 3 本と出力ユニット GeY-40DA 1 台) を用いた。

吹き溜まり高さの計測地点は図-83 に示す通り過年

度同様、防雪林の風上側の No.1 基準点、No.2 林縁風上、No.3 林縁風下、No.4 道路法面の法尻、No.5-1 道路上の第 1 車線中央、No.5-2 道路上の第 2 車線中央の計 6 箇所とした。

各箇所毎の風速値は、No.2 は 3 地点、No.3~No.5 は 5 地点を平均したものを使用した。計測地点間の距離は 25mm である。風速の計測高さは地面から H=10mm, H=30mm, H=70mm の 3 点で実験を行った。

2. 9. 5 実験条件

ネット柵の効果を確認するため、風速比を求める「風速計測」と、吹き溜まり分布を求める「模擬雪の吹き溜まり計測」を行った。また、「風速計測」と「模擬雪の吹き溜まり計測」も、ネット柵の有り無しを比較するため、樹木模型は「ネット柵無し」と、「ネット柵有り」の 2 パターンの実験を行った。風向角は「風速計測」、「模擬雪の吹き溜まり計測」とも 51° である。図-84 に樹木模型 (ネット柵無し)、図-85 に樹木模型 (ネット柵有り) を示す。

実験は防雪柵の風洞実験による吹き溜まりも含めた防雪性能の調査を行った山崎らの実験²⁹⁾により、模擬雪の供給量は 230g/min、供給時間は 2 時間とした。



図-84 樹木模型 (ネット柵無し)

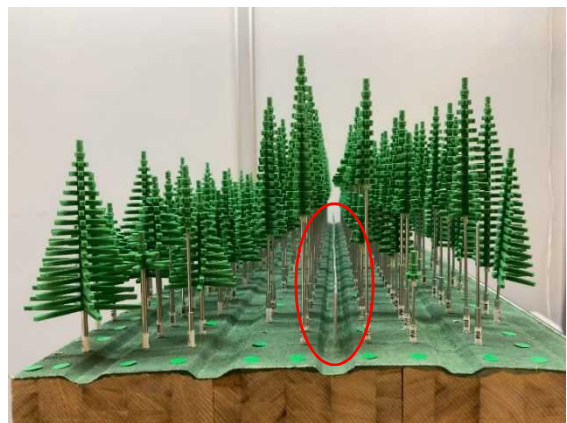


図-85 樹木模型 (ネット柵有り)

2. 9. 6 実験結果と考察

1) 風速比について

風速計測状況を図-86 に示す。風向角は 51° である。

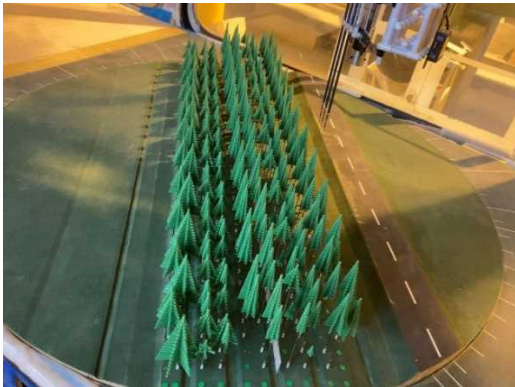


図-86 風速計測の実験状況

風向角 51° のネット柵無しの風速比を図-87 に、ネット柵有りの風速比を図-88 に示す。また、ネット柵無しとネット柵有りの風速比の差を図-89 に示す。

図-89 から、ネット柵を取り付けることで、高さ H=10mm の風速比の差は、No.3 林縁風下で 0.22、No.5-1 第 1 車線で 0.23、No.5-2 第 2 車線で 0.2、No.4 法尻で 0.10 と、顕著に風速比が下がっている。高さ H=30mm の風速比の差は、No.3 林縁風下は 0.19、No.5-1 第 1 車線は 0.16、No.5-2 第 2 車線は 0.13、No.4 法尻は 0.13 と顕著に下がっている。高さ H=30mm 以下は、No.3 林縁風下から No.4 法尻まで、全体的に風速比の低下を確認した。高さ H=70mm はネット柵の高さ H=30mm を越えるため風速比の低下はほとんどない。

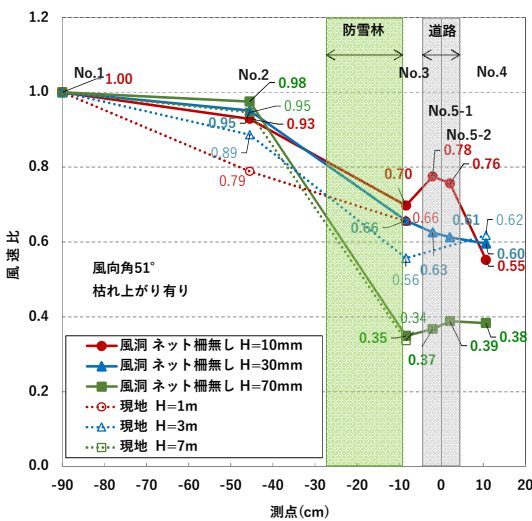


図-87 計測点横断方向の風速比 (枯れ上がり模型 ネット柵無し 風向角 51°)

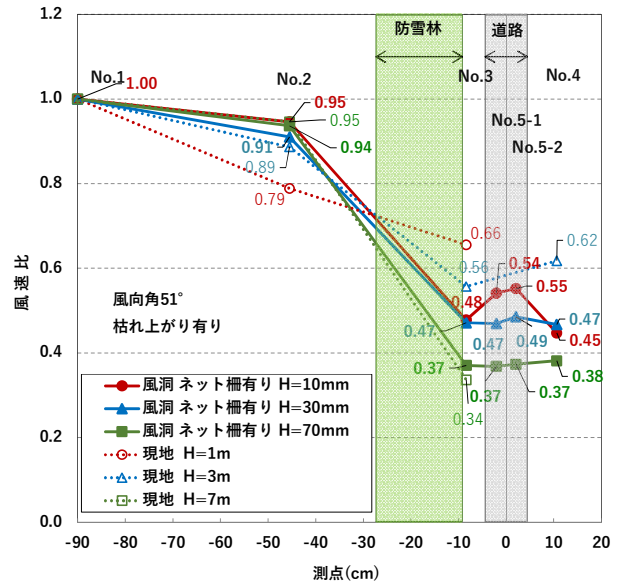


図-88 計測点横断方向の風速比 (枯れ上がり模型 ネット柵有り 風向角 51°)

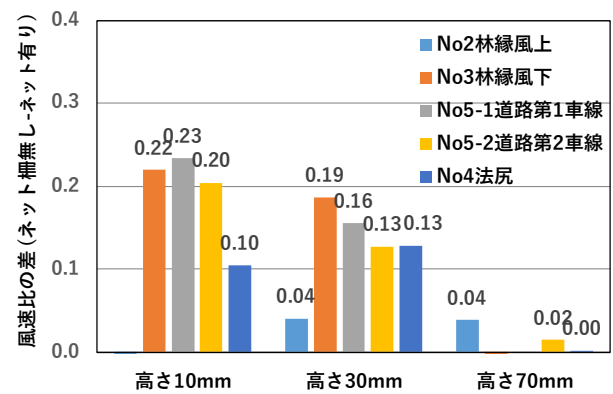


図-89 ネット柵有無による風速比の差

2) 模擬雪の吹き溜まり分布

実際の吹き溜まり現象は、雪の圧密や融解といった不確定な要素が多く含まれる現象で、吹雪風洞実験による現実象の再現は、雪の挙動が現実象と実験とは異なるものとなるため、完全に再現することは達成されていないが、吹き溜まりが生じる範囲やピークの位置は現実象に近似するため、風洞実験により防雪対策の検討が多数行われている。

ネット柵無しの吹き溜まり状況を図-90 と図-91 に示す。図-91 で防雪林を通過した模擬雪の吹き溜まりは小さな起伏が見られる。

ネット柵有りの吹き溜まり状況を図-92 と図-93 に示す。図-93 で模擬雪の吹き溜まりがなく平坦である。

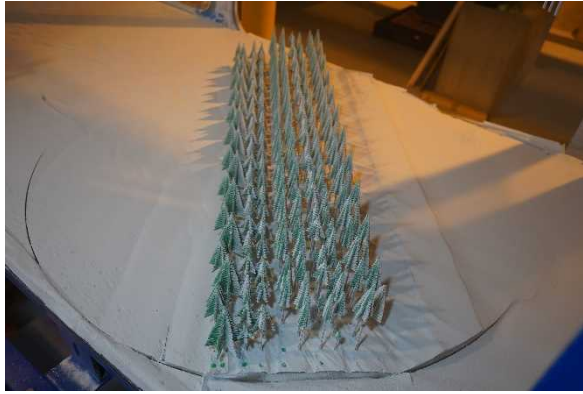


図-90 吹き溜まり状況（ネット柵無し）林帯前後



図-93 吹き溜まり状況（ネット柵有り）道路側

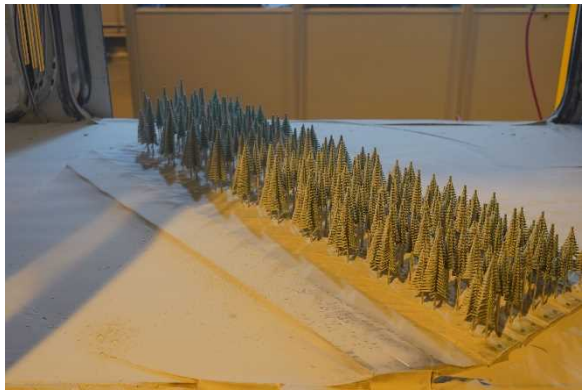


図-91 吹き溜まり状況（ネット柵無し）道路側



図-94 樹木模型に付着した模擬雪



図-92 吹き溜まり状況（ネット柵有り）林帯前後



図-95 ネット柵に付着した模擬雪

樹木模型に付着した模擬雪の状況を図-94 に示す。模擬雪の樹木への付着が確認された。

ネット柵に付着した模擬雪の状況を図-95 に示す。ネットのステンレス線とステンレス線の間は0.56mm と狭いため、模擬雪がネットに付着し空隙がほとんどなくなっていることが確認された。

模擬雪の吹き溜まり高さの計測地点は、風速計測と同じ位置（図-83）とし、No.1 基準点は1地点、No.2 林縁風上は3地点、No.3 林縁風下と No.4 道路法尻と No.5-1 第1車線、No.5-2 第2車線は5地点の平均値とした。

枯れ上がり模型を使った模擬雪の吹き溜まり高さを、図-96 に示す。ネット柵の下部に3mmの隙間があり模擬雪が吹き飛ばされるため、吹き止め柵を設置した時に見られるような、ネット柵周辺にピークがある大きな吹き溜まりは発生していない。

No.2 林帯風上はネット柵無し1.7mm、ネット柵有り2.0mm とほぼ同じである。

No.3 林帯風下のネット柵無しは、吹き溜まりが1.8mm と No.2 林帯風上とほぼ同じで変化がない。

No.3 林帯風下のネット柵有りは、吹き溜まりが1.0mmとネット柵を設置することで模擬雪がネットに付着するため、吹き溜まり高さはネット柵無しより低くなっている。

No.5-1 道路上第1車線とNo.5-2 第2車線では、ネット柵無しが吹き溜まり1.0mmとNo.3 林縁風下より低くなっている。道路部は盛土で風速がNo.3 林縁風下より高いため吹き溜まりが低くなっている。

No.5-1 道路上第1車線とNo.5-2 第2車線のネット柵有りは吹き溜まり1.6mmとネット柵無しより高くなっている。模擬雪は、ネット柵を設置すること波形の起伏が道路上にないことから吹き溜まりの影響が小さく、風速が緩和されたことにより降雪の影響が大きくなったと考えられる。

以上の実験結果からネット柵の設置により、風速の緩和効果による視程障害の緩和効果は期待できるが、吹き溜まりの緩和効果は未知数である。

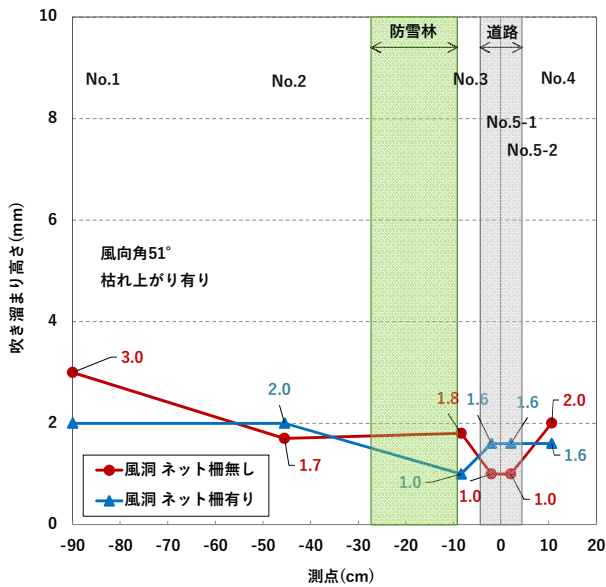


図-96 計測点横断方向の吹き溜まり高さ (枯れ上がり模型 風向角 51°)

2. 10 補助対策の設置位置と風況の変化

令和3年度は「2. 5. 3 現地観測の再現実験」の樹木模型と、「2. 9 下枝の枯れ上がり補助対策の風洞実験」のネット柵模型を使って、ネット柵模型の設置位置を変えた場合と、樹木模型の林帯を間引きした場合の風況を把握する実験を行った。

2. 10. 1 実験装置

実験には2. 5. 1と同様の風実験装置(図-48)を使用した。

測定洞(図-97)には、計測地点の風速計測用として多点熱式風速計4本と、高さH=400mmの風速計測用として超音波風速計を設置した。

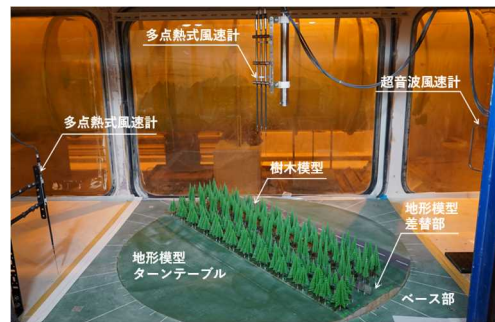


図-97 測定洞

2. 10. 2 補助対策模型

実験には2. 9の実験で使用した、ネット柵模型(図-81、図-82)を防雪林模型に設置して実験を行った。ネット柵模型の下部は空気が流れるよう3mmの隙間を空けてある。

2. 10. 3 風洞実験の設定

測定洞内の垂直風速分布は2. 5. 4と同様に、上空ほど風速が増す自然の風を模擬するため、べき法則は、田園地帯を想定した0.15に近似するよう気流を調整した。実験風速は、過年度までの実験と同じ、高さH=400mmで風速7m/s、高さH=50mmで風速4.5m/s前後である。

2. 10. 4 計測方法

風速計測は2. 9. 4と同様に、プローブにゲルマニウム半導体を使い、熱伝導率が良いニッケル管(直径1mm×長さ3mm)で包んだ、トーニック(株)製の多点熱式風速計MT-100-400Q3本(図-98)と、出力ユニットGeY-40DA(図-99)を用いた。計測間隔は出力ユニットGeY-40DAで温度補正等の処理をした風速データと気温データを、シリアル通信で2秒間隔に受信し(図-100)、風速値は30個(計測時間は60秒)のデータの平均値とした。



図-98 多点熱式風速計



図-99 出カユニット

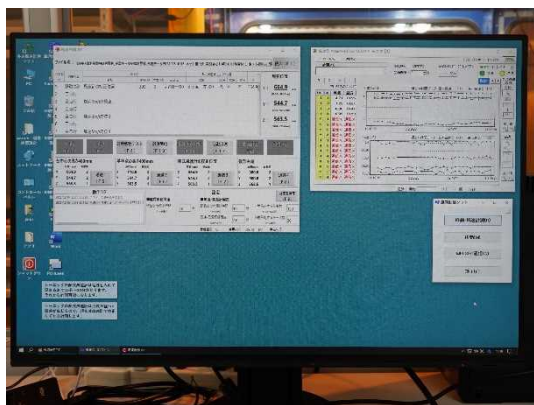


図-100 風洞制御ソフト画面



図-101 ネット柵無し



図-102 ネット柵林帯中央設置



図-103 ネット柵林帯風上設置



図-104 ネット柵林帯風下設置

2. 10. 5 実験条件

ネット柵の設置位置と風況の変化を把握するため、実験条件は、ネット柵無し(図-101)、ネット柵林帯中央設置(図-102)、ネット柵林帯風上設置(図-103)、ネット柵林帯風下設置(図-104)の4種類とした。林帯は全て「間引き無し」で行った。

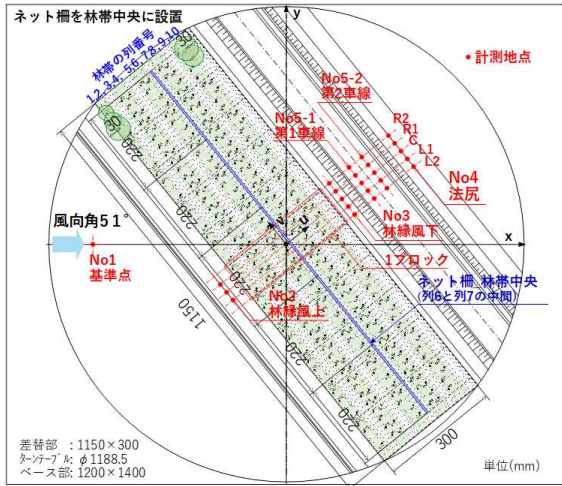


図-105 ネット柵林帯中央設置図

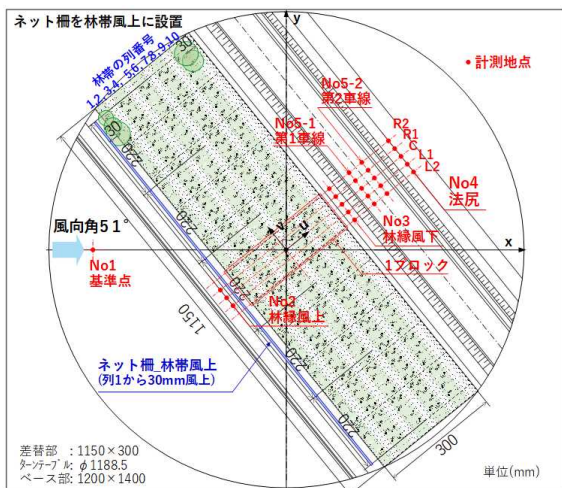


図-106 ネット柵林帯風上設置図

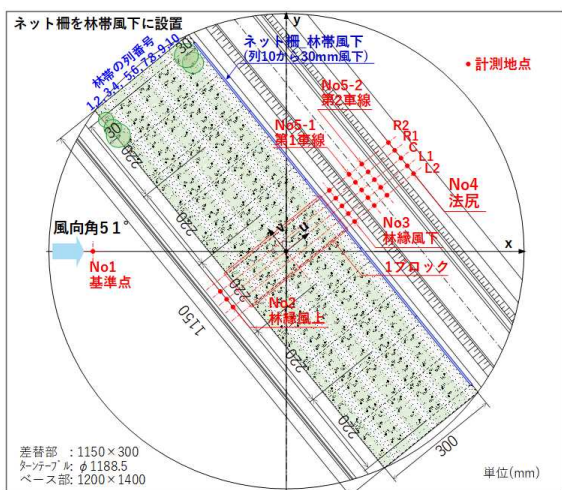


図-107 ネット柵林帯風下設置図

ネット柵中央設置 (図-105) は林帯の列6と列7の中間にネット柵を設置した。ネット柵林帯風上設置 (図-106) は奥側の林帯 (列1) から風上30mmの位置に設置した。ネット柵林帯風下設置 (図-107) は道路側の林帯 (列10) から風下30mmの位置に設置した。

2. 10. 6 実験結果

ネット柵林帯中央設置の風速比分布図を図-108、ネット柵林帯風上設置の風速比分布図を図-109、ネット柵林帯風下設置の風速比分布図を図-110に示す。ネット柵の位置と風速緩和効果を比較するため、各図のデータ系列に「ネット柵無し、間引き無し」の風速比を追加し、計測地点の高さ $H=10\text{mm}$ 、 $H=30\text{mm}$ 、 $H=70\text{mm}$ をデータ要素として整理した。

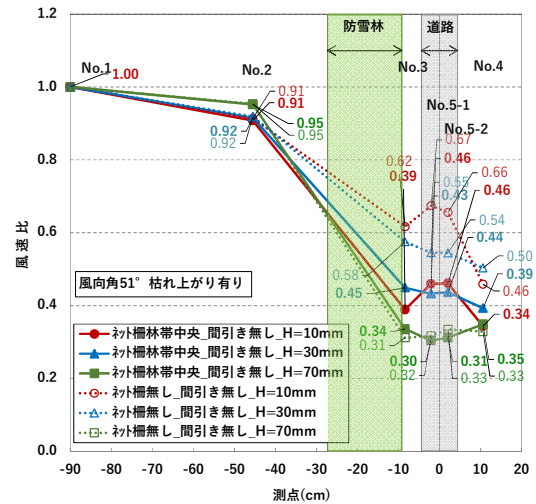


図-108 ネット柵林帯中央設置の風速比分布図

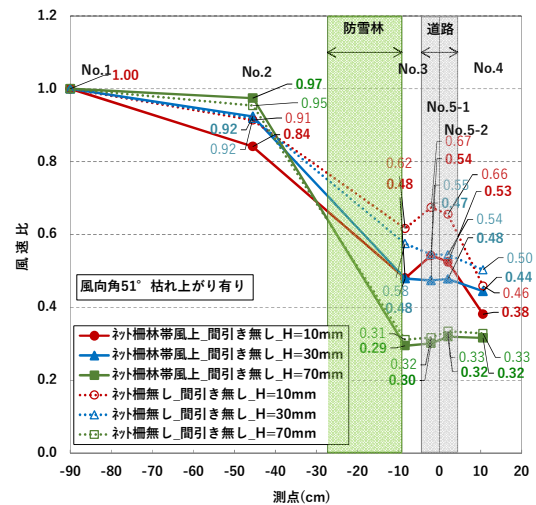


図-109 ネット柵林帯風上設置の風速比分布図

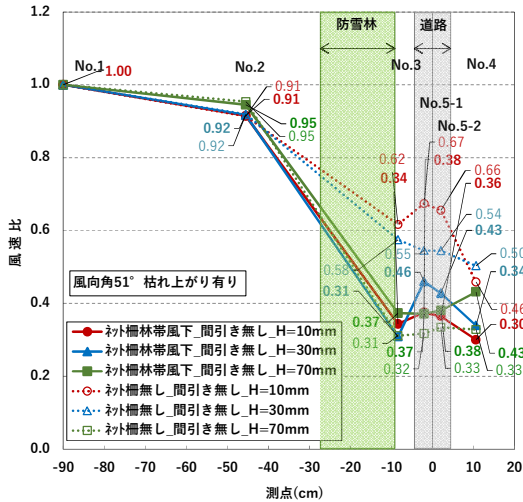


図-110 ネット柵林帯風下設置の風速比分布図

ネット柵の位置による風速緩和効果を数値化し比較するため、ネット柵有りの風速比と、ネット柵無し
の風速比の差を、風速比変化量(A)とした。また、車両
が通過する道路上の風況把握のため、第1車線の風速
比変化量(Ad1)と、第2車線の風速比変化量(Ad2)の平
均値を、道路上の風速比変化量(Ad)として比較した。

風速比変化量(A) =

$$\text{ネット柵有り風速比} - \text{ネット柵無し風速比} \quad (10)$$

道路上の風速比変化量(Ad) =

$$(\text{風速比変化量(Ad1)} + \text{風速比変化量(Ad2)}) / 2 \quad (11)$$

高さ H=10mm の風速比変化量を図-111、高さ
H=30mm の風速比変化量を図-112、高さ H=70mm の
風速比変化量を図-113 に示す。

1) 高さ H=10mm の風速比変化量

高さ H=10mm (図-111) において、ネット柵林帯風
下設置は、計測地点の全てで、風速比変化量はネット
柵無しより大きく下がっている。道路上の風速比変化
量は-0.29 である。

ネット柵林帯中央設置もネット柵無しより大きく
下がっている。道路上の風速比変化量は-0.20 で、ネッ
ト柵林帯風下設置より下がり方は小さい。

ネット柵林帯風上設置の風速比変化量は、ネット柵
無しより下がっているが、道路上の風速比変化量は
-0.13 で、ネット柵林帯風下設置やネット柵林帯中央設
置より下がり方が小さい。高さ H=10mm はネット柵を
林帯風下に設置した時が風速比が一番緩和される。

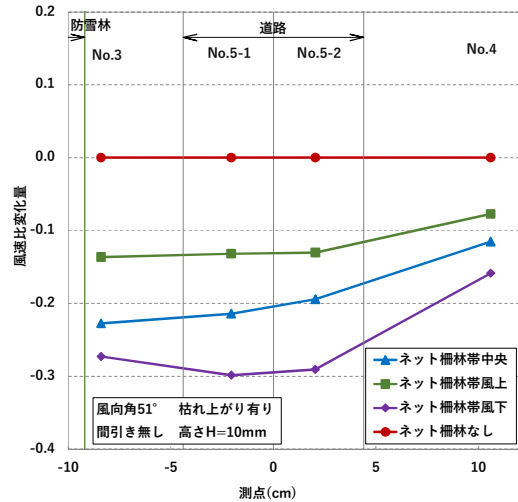


図-111 ネット柵位置と風速比変化量 (高さ H=10mm)

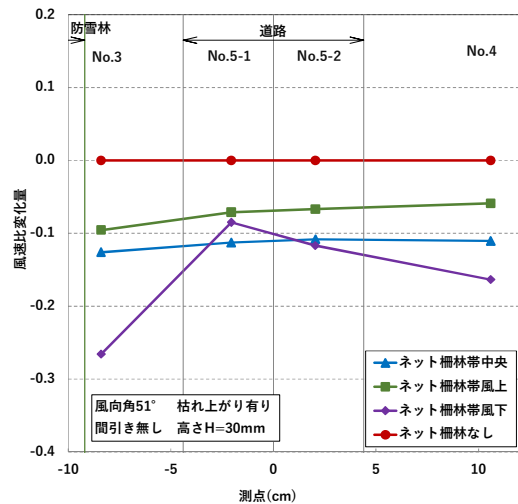


図-112 ネット柵位置と風速比変化量 (高さ H=30mm)

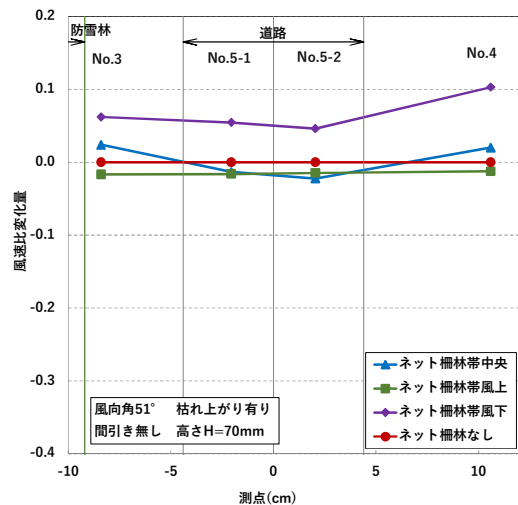


図-113 ネット柵位置と風速比変化量 (高さ H=70mm)

2) 高さ H=30mm の風速比変化量

高さ H=30mm (図-112) において、ネット柵林帯風下設置は、計測地点 No.3、No.5-2、No.4 で、風速比変化量は一番下がっている。道路上の風速比変化量は -0.10 である。

ネット柵林帯中央設置は、計測地点 No.3、No.5-2、No.4 で風速比変化量は二番めに下がっている。道路上の風速比変化量は -0.11 と、ネット柵林帯風下設置の -0.10 とほぼ同じである。

ネット柵林帯風上設置は、全ての計測地点でネット柵無しより風速比変化量は下がっているが、道路上の風速比変化量は -0.07 と下がり方は小さい。

高さ H=30mm は、ネット柵を林帯中央から林帯風下の方に設置した時が、道路上の風速は大きく緩和されることが確認できた。

3) 高さ H=70mm の風速比変化量

高さ H=70mm (図-113) において、ネット柵林帯風下設置は、全ての計測地点でネット柵無しより風速比変化量は上がっている。道路上の風速比変化量は +0.05 である。ネット柵を越えた風が上方に流れるため、高さ H=70mm の風速比変化量は上昇したと考えられる。

ネット柵林帯中央設置は、計測地点 No.3 と No.4 でネット柵無しより若干高くなって、No.5-1 と No.5-2 で若干下がっている。道路上の風速比変化量は -0.02 と、ネット柵無しとほぼ同じである。ネット柵を越えた風は高さ H=70mm 付近の上方に流れるが、防雪林の枝葉により緩和されると考えられる。

ネット柵林帯風上設置は、道路上の風速比変化量が -0.02 とネット柵無しとほぼ同じである。全ての計測地点で風速比変化量はネット柵無しより下がっていると考えられる。

4) ネット柵の設置位置と風速の緩和効果

本実験より、高さ H=10mm から H=30mm までは、ネット柵を林帯風下に設置すると風速の緩和効果が大きく、高さ H=30mm から H=70mm はネット柵を林帯中央に設置すると風速は緩和される。ネット柵を林帯風上に設置すると高さ H=30mm から H=70mm で、風速が上昇している。ネット柵の設置位置は林帯風下から林帯中央が良い結果となった。

2. 11 林帯 1 列間引きと風況の変化

2. 11. 1 実験条件 (林帯 1 列間引き)

枯れ上がった林帯の間引き箇所と風況の変化を確認するため、ネット柵を林帯中央(列 6 と列 7 の中間)に設置し、林帯 10 列のうち 1 列を間引いて、各計測地

点の風況を把握する実験を行った。林帯の列番号は図-105 で示す通り、最も風上側の林帯を列 1、最も道路側の林帯を列 10 とした。枯上がり模型の配置は 2. 8. 2 (図-72) と同じである。

実験条件は列 1 間引き (図-114)、列 2 間引き (図-115)、列 3 間引き (図-116)、列 4 間引き (図-117)、列 5 間引き (図-118)、列 6 間引き (図-119)、列 7 間引き (図-120)、列 8 間引き (図-121)、列 9 間引き (図-122) 列 10 間引き (図-123) の 1 列を間引く 10 種類とした。

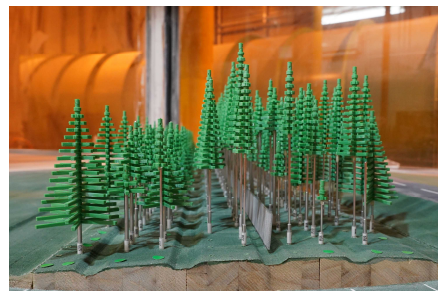


図-114 列 1 間引き

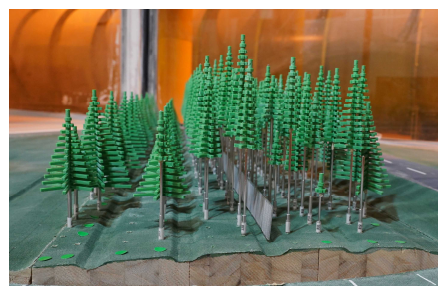


図-115 列 2 間引き



図-116 列 3 間引き



図-117 列 4 間引き



図-118 列5間引き



図-123 列10間引き

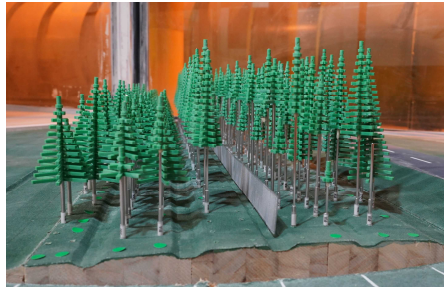


図-119 列6間引き



図-120 列7間引き



図-121 列8間引き



図-122 列9間引き

2. 11. 2 実験結果（林帯1列間引き）

林帯1列間引きの風速比分布図を、図-124 から図-133 に示す。林帯の間引きによる影響を比較するため、各図のデータ系列に「ネット柵林帯中央、間引き無し」の風速比を追加し、計測地点の高さ H=10mm、H=30mm、H=70mm をデータ要素として整理した。

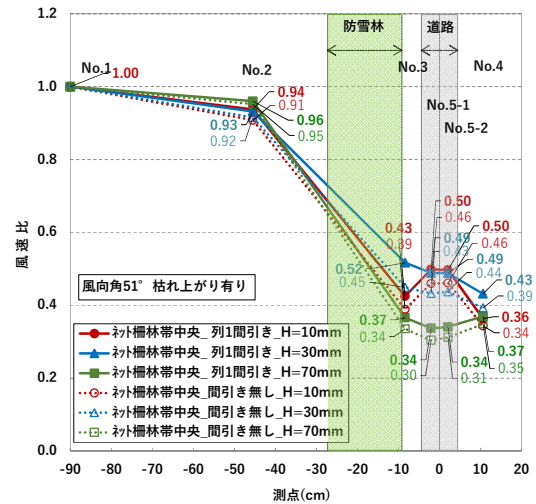


図-124 列1間引きの風速比分布図

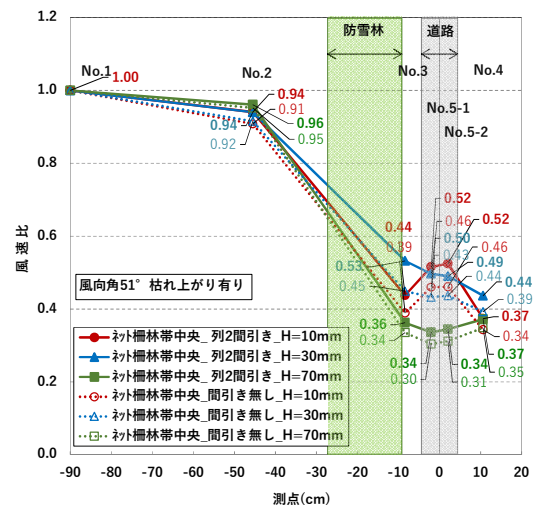


図-125 列2間引きの風速比分布図

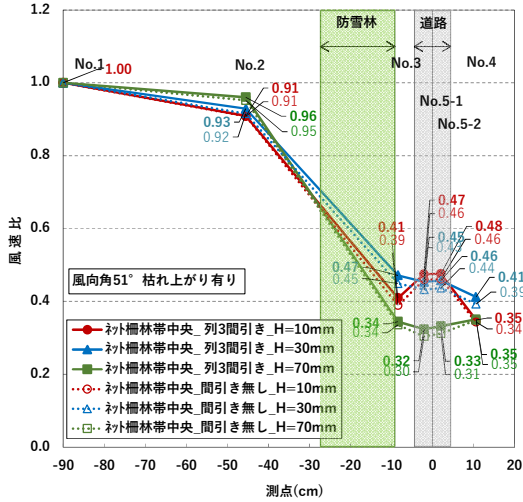


図-126 列3間引きの風速比分布図

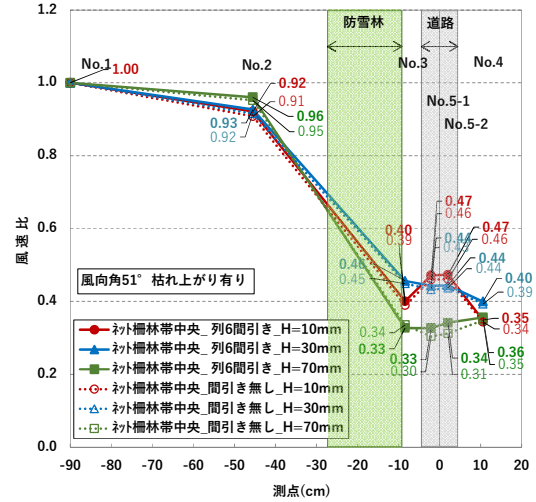


図-129 列6間引きの風速比分布図

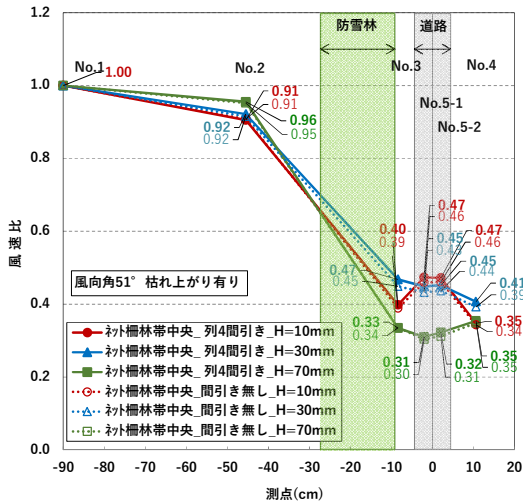


図-127 列4間引きの風速比分布図

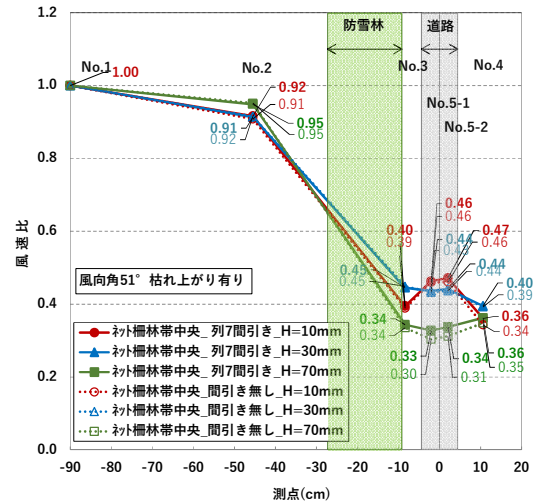


図-130 列7間引きの風速比分布図

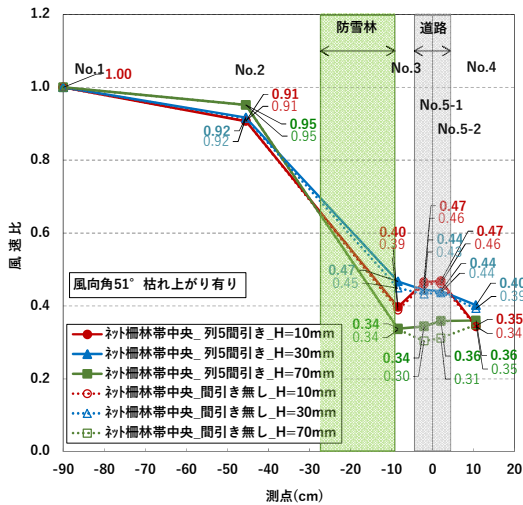


図-128 列5間引きの風速比分布図

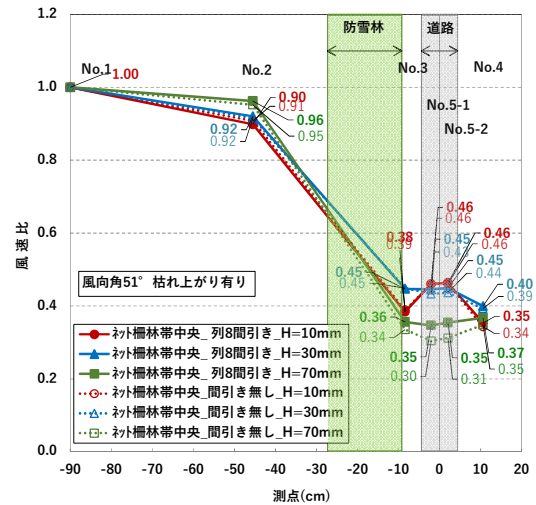


図-131 列8間引きの風速比分布図

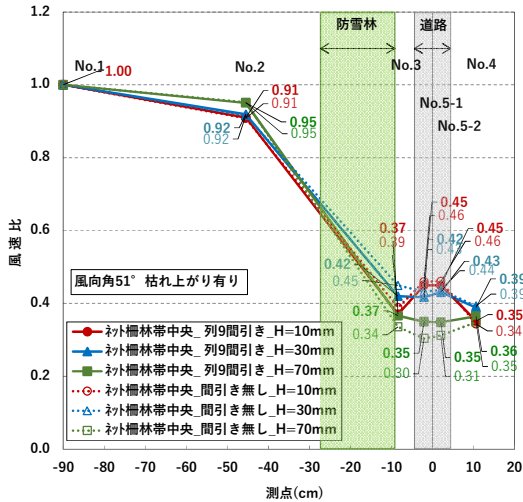


図-132 列9間引きの風速比分布図

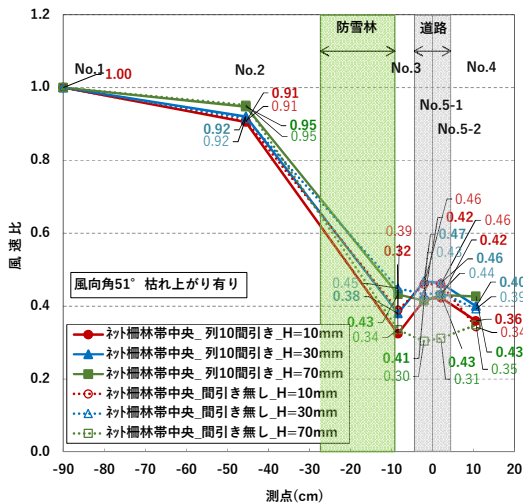


図-133 列10間引きの風速比分布図

1 列間引きによる風速の影響を数値化するため、1 列間引きの風速比と、「ネット柵林帯中央、間引き無し」の風速比の差を、風速比変化量(B)とした。また、第1車線の風速比変化量(Bd1)と、第2車線の風速比変化量(Bd2)の平均値を、道路上の風速比変化量(Bd)とする。

$$1 \text{ 列間引き風速比変化量 (B)} = \frac{1 \text{ 列間引き風速比} - \text{間引き無し風速比}}{2} \quad (12)$$

(※ネット柵林帯中央)

$$\text{道路上の風速比変化量(Bd)} = \frac{(\text{風速比変化量(Bd1)} + \text{風速比変化量(Bd2)})}{2} \quad (13)$$

高さ H=10mm の風速比変化量を図-134、高さ H=30mm の風速比変化量を図-135、高さ H=70mm の風速比変化量を図-136 に示す。

1) 高さ H=10mm の風速比変化量

高さ H=10mm (図-134) において、列 10 間引きは、計測地点 No.3、No.5-1、No.5-2 で風速比変化量は、「間引き無し」より下がっている。道路上の風速比変化量は-0.05 である。列 10 間引きは高さ H=70mm (図-136) において、風速比変化量は上昇している。

列 10 は林帯を通過する高い地点 H=70mm 付近の風を下 (高さ H=10mm) に流しているが、列 10 を間引くことで風が下に流れなくなるためと考えられる。

列 9 間引きも、計測地点 No.3、No.5-1、No.5-2 で風速比変化量は、「間引き無し」より下がっている。道路上の風速比変化量は-0.01 で、列 10 間引きより下がり方は小さい。

列 8 間引きは道路上の風速比変化量は 0.00 で、「間引き無し」と同じである。

列 3 間引きから列 7 間引きは、道路上の風速比変化量は+0.01 で「間引き無し」より若干上がっている。

枯れ上がりのある列 3 から列 10 は、林帯の風上側を間引くと風速比変化量が増加している。

列 2 は枯れ上がりがない林帯で、間引くことで全ての計測地点で、風速比変化量は「間引き無し」より大きく増加している。列 2 間引きは道路上の風速比変化量が+0.06 で一番大きい。

列 1 も枯れ上がりがない林帯で、間引くことで全ての計測地点で、風速比変化量は「間引き無し」より大きく増加している。道路上の風速比変化量は+0.05 で大きい。

列 1 と列 2 は広葉樹でもともと枯れ上がりがないため、間引きをすると高さ H=10mm の風速比変化量は大きく増加した。

2) 高さ H=30mm の風速比変化量

高さ H=30mm (図-135) において、列 10 間引きは、風速比変化量が計測地点 No.3 で「間引き無し」より大きく下がっているが、No.5-1 から風下で「間引き無し」より少し上がっている。

原因として、列 10 を間引くことで、高い地点 H=70mm の風速は大きく上がり、H=10mm では下がっており、その中間である H=30mm ではネット柵から距離が大きくなるにつれ緩和効果が徐々に減少する傾向が見られ、計測地点 No.5-1、No.5-2、No.4 も風速が上がった。

列 9 間引きは、全ての計測地点で風速比変化量は、「間引き無し」より下がっている。道路上の風速比変化量は-0.01 で、列間引きの中で一番低い。

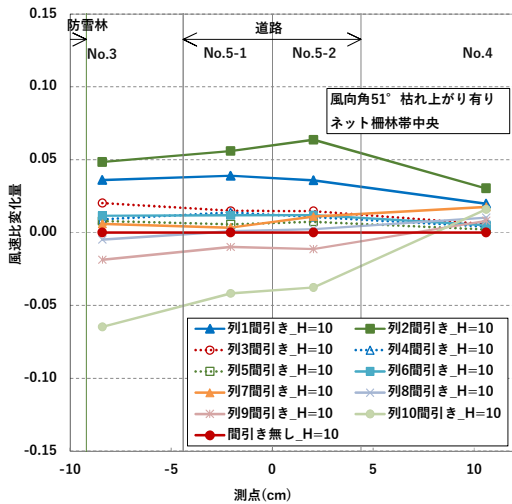


図-134 林帯1列間引きと風速比変化量（高さH=10mm）

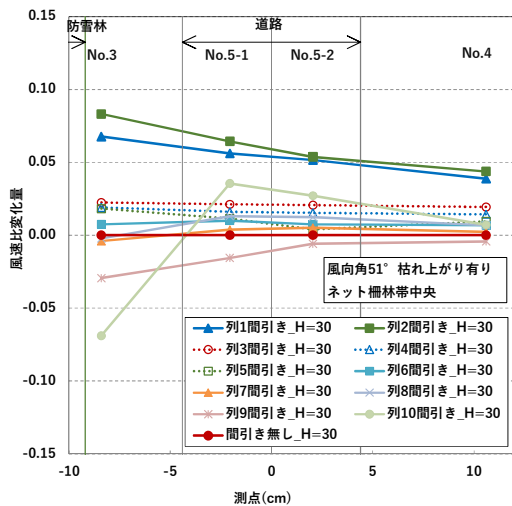


図-135 林帯1列間引きと風速比変化量（高さH=30mm）

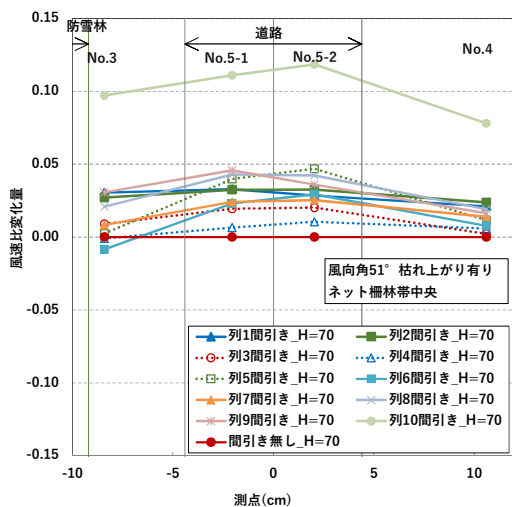


図-136 林帯1列間引きと風速比変化量（高さH=70mm）

列4間引きから列8間引きも、道路上の風速比変化量は+0.01で、「間引き無し」とほとんど変わらない。

列3間引きの道路上の風速比変化量は+0.02で、若干、「間引き無し」より上がっている。

列2は枯れ上がりが無い林帯で、列2間引きの道路上の風速比変化量は+0.06で、風速比変化量は大きくなっている。

列1も枯れ上がりが無い林帯で、列1間引きの道路上の風速比変化量は+0.05と、列2間引きとほとんど変わらない。枯れ上がりが無い列1間引きと列2間引きは、風速の上昇が他の箇所の間引きより大きい。

3) 高さH=70mmの風速比変化量

高さH=70mm（図-136）において、列10間引きは風を遮っていた林帯がなくなったため、すべての計測地点で風速比変化量が一番大きく上がっている。道路上の風速比変化量の+0.11であった。

列1間引きから列9間引きは風速比変化量が+0.05以内で、間引きによる影響が小さい。

列5間引き、列8間引き、列9間引きにおいても、道路上の風速比変化量は+0.04で、道路側の林帯を間引くと、高い地点H=70mm付近の風速比変化量が上がるとの傾向が見えた。

列7間引きの風速比変化量は+0.02、列6間引きの風速比変化量は+0.03、列4間引きの風速比変化量は+0.01、列3間引きの風速比変化量は+0.02で、列3から列7を間引いても高い地点H=70mm付近の風速比変化量はあまり変化がない。

4) 防雪林の性能を確保した1列間引き

列3から列8と、列10間引きは、高さH=10mmからH=30mmで、間引きをしても大きな風速比の上昇がなく、防雪林の性能は確保されている。

列9間引きは高さH=10mmからH=30mmの風速比が下がるため、防雪林の性能は向上している。

2. 12 林帯2列間引きと風況の変化

2. 12. 1 実験条件（林帯2列間引き）

2. 11と同様に林帯の2列間引きと風況の変化を確認するため、林帯10列のうち2列を間引いて、各計測地点の風速を計測する実験を行った。

実験条件は、列1,列2間引き（図-137）、列3,列4間引き（図-138）、列5,列6間引き（図-139）、列7,列8間引き（図-140）、列9,列10間引き（図-141）、5種類とした。ネット柵を林帯中央（列6,列7の中間）に設置して行った。



図-137 列1,列2間引き



図-141 列9,列10間引き



図-138 列3,列4間引



図-139 列5,列6間引き



図-140 列7,列8間引き

2. 12. 2 実験結果 (林帯2列間引き)

2列間引きの風速比分布図を図-142から図-146に示す。間引きによる風速の影響を比較するため、各図に「ネット柵林帯中央、間引き無し」を追加した。

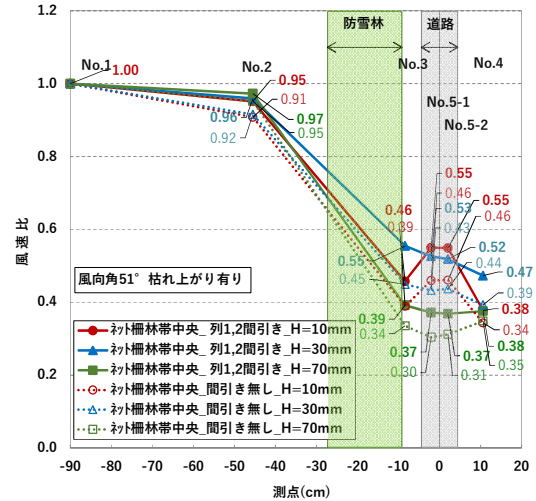


図-142 列1,列2間引きの風速比分布図

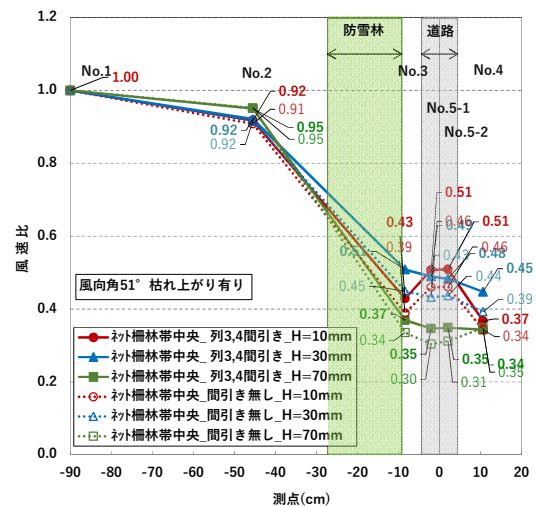


図-143 列3,列4間引きの風速比分布図

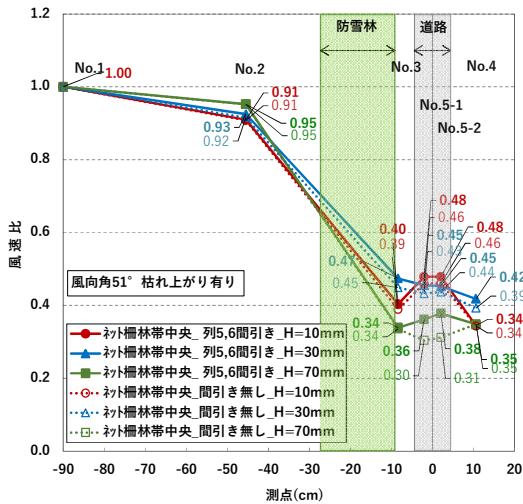


図-144 列5,列6間引きの風速比分布図

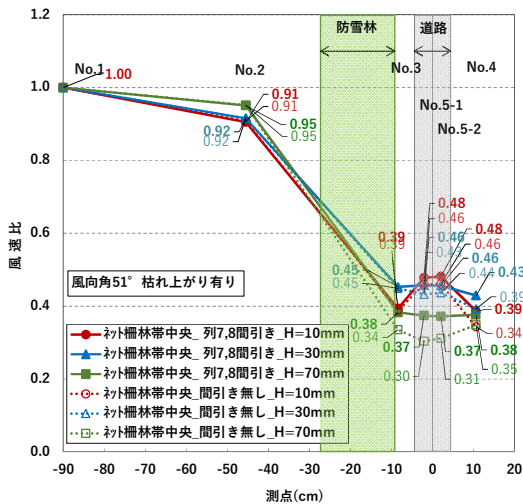


図-145 列7,列8間引きの風速比分布図

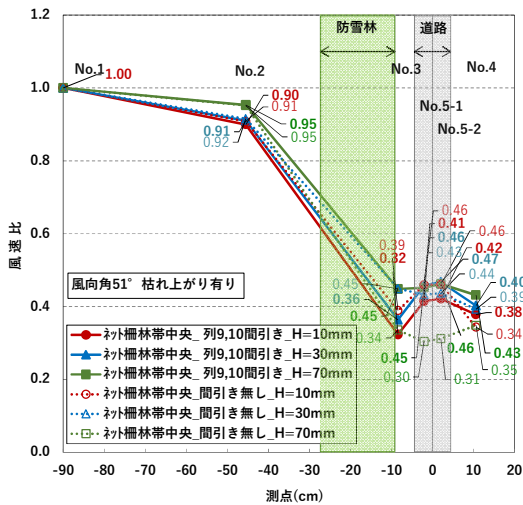


図-146 列9,列10間引きの風速比分布図

2列間引きによる風速の影響を数値化するため、2列間引きの風速比と、「ネット柵林帯中央、間引き無し」の風速比の差を、風速比変化量(C)とした。また、第1車線の風速比変化量(Cd1)と、第2車線の風速比変化量(Cd2)の平均値を、道路上の風速比変化量(Cd)とする。

$$2 \text{ 列間引きの風速比変化量 (C)} = 2 \text{ 列間引き風速比} - \text{間引き無し風速比} \quad (14)$$

(※ネット柵林帯中央)

$$\text{道路上の風速比変化量(Cd)} = (\text{風速比変化量(Cd1)} + \text{風速比変化量(Cd2)}) / 2 \quad (15)$$

高さ H=10mm の風速比変化量を図-147、高さ H=30mm の風速比変化量を図-148、高さ H=70mm の風速比変化量を図-149 に示す。

2列間引きによる防雪林の性能低下がどの程度かを把握するため、図-147 から図-149 に「ネット柵無し、間引き無し」を追加した。

1) 高さ H=10mm の風速比変化量

列9,列10間引きは、高さ H=10mm (図-147) において、計測地点 No.3、No5-1、No5-2 で風速比変化量は、「ネット柵林帯中央、間引き無し」より風速比変化量は下がっている。道路上の風速比変化量は-0.04 である。原因として、列9,列10間引きは、高い地点 H=70mm (図-149) において、風速比が大きく上がっていることから、林帯の列9と列10は風を下に流している、間引きをすることで風が下に流れなくなったと考えられる。

列5,列6間引きと、列7,列8間引きは、道路上の風速比変化量が+0.02 と、「ネット柵林帯中央、間引き無し」とほぼ同じで、間引きによる大きな風速比の上昇はなかった。

列3,列4間引きは、道路上の風速比変化量が+0.05 で、「ネット柵林帯中央、間引き無し」より少し上がっている。

列1,列2間引きは、枯れ上がりががないため、道路上の風速比変化量が+0.09 と大きく上がっている。

高さ 10mm は、どの箇所を2列間引きしても、「ネット柵無し、間引き無し」の道路上の風速比変化量+0.20 より低い。

2) 高さ H=30mm の風速比変化量

列9,列10間引きは、高さ H=30mm (図-148) において、計測地点 No.3 で風速比変化量は、「ネット柵林帯

中央、間引き無し」より下がっているが、No5-1、No5-2、No4 では、道路上の風速比変化量は+0.03であった。高い地点 H=70mm 付近の速い風が降下するため上がったと考えられる。

列 5,列 6 間引きと、列 7,列 8 間引きは、道路上の風速比変化量が+0.02 と、「ネット柵林帯中央、間引き無し」とほぼ同じである。

列 3,列 4 間引きは、道路上の風速比変化量が+0.06 で、「ネット柵林帯中央、間引き無し」より少し大きい。

列 1,列 2 間引きは、道路上の風速比変化量が+0.11 と大きく上がっている。

高さ 30mm の風速比変化量は、高さ 10mm より若干高く、間引きによる影響は高さ 10mm と概ね同じ傾向であった。

3) 高さ H=70mm の風速比変化量

列 9,列 10 間引きは、高さ H=70mm (図-149) において、風速比変化量は「ネット柵林帯中央、間引き無し」より大きく上がっている。道路上の風速比変化量は+0.15 である。林帯によって下に流れた高さ H=70mm 付近の風が、間引きをすることで下に流れなくなったためと考えられる。

列 7,列 8 間引きの風速比変化量は+0.07、列 5,列 6 間引きの風速比変化量は+0.06、列 3,列 4 間引きの風速比は+0.05 で、「ネット柵無し、間引き無し」より上がっている。また、道路側の林帯を間引くと高さ H=70mm の風速比変化量の上昇は顕著で、高さ H=10mm や高さ H=30mm と比べ反対の傾向であった。

列 1,列 2 間引きは、道路上の風速比変化量が+0.06 と大きく上がっている。

4) 防雪林の性能を確保した 2 列間引き

列 1 と列 2 は枯れ上がりが無い樹木のため、列 1,列 2 間引きは、高さ H=10mm、H=30mm、H=70mm すべての高さで風速比変化量は上がっている。高さ H=30mm の道路上の風速比変化量は+0.11 で、「ネット柵無し、間引き無し」の道路上の風速比変化量+0.13 に近く、ネット柵としての効果が認められなかった。

列 9,列 10 間引きは、高さ H=10mm で「ネット柵林帯中央、間引き無し」より道路上の風速比変化量が下がっており、高さ H=30mm では、「ネット柵林帯中央、間引き無し」と道路上の風速比変化量はほぼ同じのため、防雪林の性能は確保されていた。

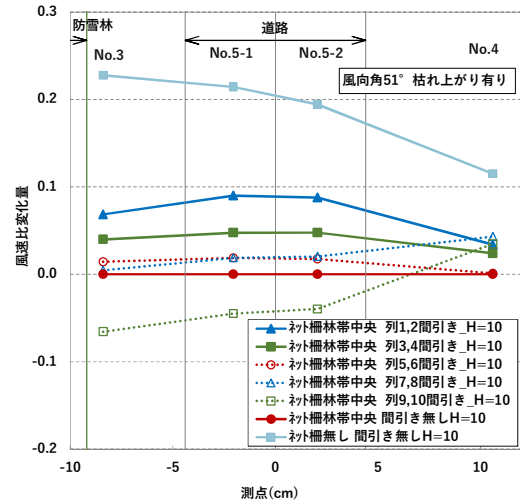


図-147 林帯 2 列間引きと風速比変化量 (高さ H=10mm)

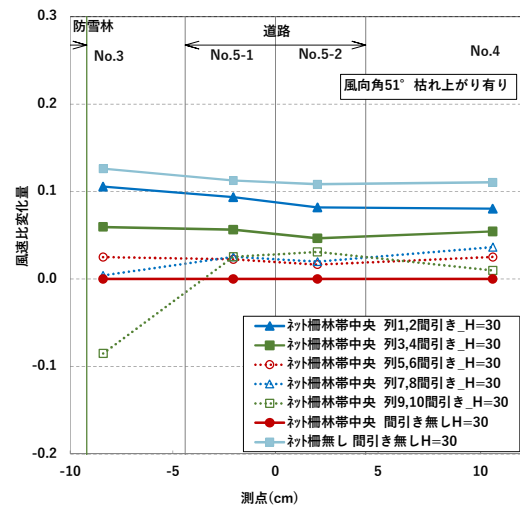


図-148 林帯 2 列間引きと風速比変化量 (高さ H=30mm)

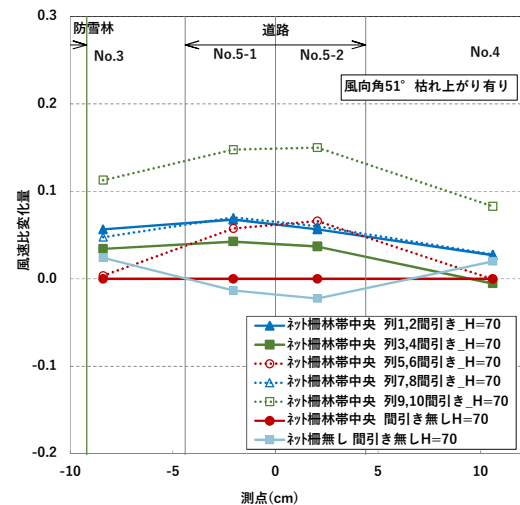


図-149 林帯 2 列間引きと風速比変化量 (高さ H=70mm)

2. 13 防雪林の構成要素と防雪性能における今後の展望

現在、防雪林（標準林）の整備においては、最大吹きだまり量に応じて林帯幅（11~32m）が決定される。仮に、空隙率に基づく防雪林の性能評価が可能になれば、空隙率に基づく防雪林の整備によるコスト縮減に貢献できる可能性があると考えられる。以下に、3点例示する。

- ① 防雪林内部で下枝の枯れ上がりが見られたとしても、林縁で枝葉が繁茂し空隙率が十分に低ければ（すなわち、十分な防雪性能が確保されていれば）更なる対策を講じる必要がない。
- ② 現在の防雪林では初期生長期に生育不良を伴いやすいマツ科が利用されているが、初期の生育不良を回避するためにマツ科以外の樹種を利用し、性能を確保可能な空隙率となる配置を検討する。
- ③ 性能を確保可能な空隙率から最小の林帯幅（狭林幅）を導出することで、効率的な防雪林整備につなげる。

3. 防雪性能が低下した防雪林への補助対策の提案

3. 1 補助対策に関する資料調査

防雪性能が低下した防雪林の補助対策工法として、①低木等の植生、②ネット柵などが挙げられる。低木等の場合は、日照時間が重要となるため林縁に植栽する必要がある。ネット柵の場合は、配置箇所には限らない。ただし、防雪林が植物である以上、人工的な柵を防雪林内外に配置することへの違和感は否めない。まずは、双方のメリットとデメリットを把握することを目的に資料調査等を実施した。

3. 1. 1 多様な植生を活用した補助対策

防雪林の基本林は、アカエゾマツをはじめとするヨーロッパトウヒやトドマツなどマツ科の樹種で構成される（図-2、図-5）³¹。また、防雪林の林縁には、基本林の初期成長を保護するため前生林が配置され、初期成長の早いヤナギ属などが主に採用される（図-2）³¹。施工現場では、基本林のマツ科よりも主に初期段階でヤナギ属の樹高が高くなり、被圧に伴い基本林の成長を妨げるケースがみられる。そこで、本項では基本林の被圧の影響が極力発生しない低木の他、ヤナギ属の単一林、農作物による補助対策について調査した。なお、調査対象は我が国の防雪林ではなく、先駆的に防雪林を活用している米国の文献が主体である。米国では植生を活用した吹雪対策を Living Snow Fence

(LSF)³³としており、我が国の防雪林も LSF に含まれる。ここでは、米国で LSF に利用される植物の種類と吹雪捕捉量について整理し、日本での LSF の適用性について考察した。

1) 米国で LSF に利用される植物の種類と吹雪捕捉量

米国で利用されている LSF の樹種は様々である。我が国でも利用されている 1)常緑針葉樹だけでなく、2)ヤナギ、3)トウモロコシも LSF として研究されている³⁴。

イ) 常緑針葉樹

針葉樹の多くは常緑樹であるが、カラマツやヌマスギなどの落葉樹もある。LSF には主に針葉樹のうち、分類学的にはマツ科が用いられ、米国ではマツ科トウヒ属(*Picea*)が主である。たとえば、オウシュウトウヒ(*Picea abies*)、コロラドモミ(*Abies concolor*)などがある³⁴。

ロ) ヤナギ属

前章で述べたようにヤナギは、バイオマス、野生動物の生息環境、二酸化炭素の固定だけでなく LSF に利用することで複数の利点が期待されている。そのため、ヤナギに関する先行研究の件数も群を抜いて多い(Heavey & Volk (2014)³⁴など)。

ハ) トウモロコシ

トウモロコシ(*Zea mays*)は、バイオ燃料として着目されている植物である³⁶。米国農務省によると、トウモロコシの生産量は食用を含めて年間4億トンにもなり、世界の輸出量の40%を占めている³⁷。ここで、LSF としてのトウモロコシに関する過去の研究事例を示す。

1984年頃、ミネソタ州を含む2つの州では、収穫し終えたトウモロコシの茎と葉に着目し吹雪対策効果を検証した。トウモロコシの茎の高さは約2mで、空隙率は50%の金属製の防雪柵と同等と考えるがよい。方法は、トウモロコシ6~8列を2組、その間隔は50~60mで、冬季間刈り取らずに残して防雪効果を検証し、春に刈り取るものである。

吹雪捕捉量は1mあたり7.6トンで、およそ2.7mの防雪柵と同等である。また、セットバック(LSFから道路までの距離)は30mでは近すぎるため、最低46mは必要としている³³。

二) LSF の吹雪捕捉量

LSF における樹種別の吹雪捕捉量について、樹高、空隙率、吹走距離、セットバックの条件を考慮した調査結果を以下に示す。

Heavey & Volk (2014)³⁴はニューヨーク州に造成され

ている LSF の吹雪捕捉量について、造成してからの年数、樹高、空隙率、吹走距離、セットバックの条件を調査し（表-9）、トウヒ、ヤナギ、トウモロコシの吹雪捕捉量を調べた（表-10）。

その結果、トウヒとヤナギに関して、造成から3年以内の LSF では吹雪捕捉量を、樹木を通り抜けた積雪量で除した値(Qc/Q)が1以上であることが示された。これは造成後すぐに防雪効果があることを示している。造成後4年から11年のトウヒとヤナギの LSF では Qc/Q が非常に大きいため、十分な吹雪捕捉量が得られている。特にヤナギの吹雪捕捉量が著しいことがわかる。なお、トウモロコシについては Tabler(1994)³³⁾が指摘したセットバックよりも短く Qc/Q が1よりも小さい。設置条件を最適化すれば、トウモロコシも LSF として活用できると思われる。

以上のように、我が国でも利用されているマツ科だけでなく、LSF に利用されているヤナギ、トウモロコシ等も吹雪対策効果が確認されている。

表-9 調査対象の樹高、空隙率、吹走距離、セットバックと造成してからの年数

	樹高(m)	空隙率(%)	吹走距離(m)	セットバック(m)	年数
トウヒ属	2.9	27	855	52	3年以内
	4.0	42	400	37	4年~11年
ヤナギ属	1.9	86	339	27	3年以内
	5.0	47	383	27	4年~9年
トウモロコシ	1.3	0	340	71	1年

※Heavey & Volk (2014)³⁴⁾のデータより作成

表-10 調査対象の吹雪捕捉量

	Qc(tons/m)	Q(tons/m)	Qc/Q	L(m)	D35(m)	D35/L	年数
トウヒ属	40	15	2.7	12	41	3.4	3年以内
	180	9	19.2	11	32	3.0	4年~11年
ヤナギ属	10	10	1.0	28	31	1.1	3年以内
	246	9	41.0	11	31	3.1	4年~9年
トウモロコシ	5	7	0.7	18	29	1.6	1年

Qc: 樹木に堆積した吹雪捕捉量、Q: 樹木を通り抜けた積雪量、Qc/Q: 吹雪捕捉量/樹木を通り抜けた積雪量の比、L: ドリフト（風下側のふきだまり）の長さ、D35: 標準的なセットバック、D35/L: セットバックとドリフトの比。

※Heavey & Volk (2014)³⁴⁾のデータより作成。

2) 日本での LSF の適用性に関する考察

北海道における国道防雪林は、1976年から道北・道東を中心に造成が開始され、現在では210箇所にもなるが、総延長はおよそ80km³⁾と米国に比べればまだ短い。防雪林の一部にはヤナギも植栽されているが、これは防雪効果を意図したものではなく、防雪効果を期

待する基本林としては、アカエゾマツ、ヨーロッパトウヒ、トドマツなどが植栽されている（図-2）。

しかし、これらマツ科は、防雪効果が発揮されるまで成長に時間を要する。さらに、土層の確保や排水などにより、生育不良とならないよう生育基盤の整備も必要となる。最近の研究結果から、防雪林では密に樹木が植栽されているため、日照不足により下枝の枯れ上がりが見られることが指摘されている³⁾。

吹雪の現象は地表面に近いほど飛雪流量が多く、下枝の維持が必要であるが、下枝を維持するための間引きの作業の維持管理費用が負担となっている。

そこで、マツ科だけでなく低木等を組合せて LSF を一つのシステムとして造成することも有意義と考えられる。積雪寒冷地における在来種の生残率と成長速度を調査した結果³⁸⁾によると、低木のエゾヤマハギやアキグミ等は生残率も成長速度も高いとある。生残率が高いこと、成長速度も早いこと、在来種であることを考慮すれば、エゾヤマハギやアキグミ等は LSF として適した低木であると考えられる。また、外来種のマツ科であるが、北海道の道路での導入実績があり、耐寒性、耐風性、耐雪性を有するモンタナマツも、低木の候補として考えられる。

また、造成においては米国を参考に、道路を管理・運営する一機関だけでなく、市区町村の自治体、地権者も含めた組織的な取り組みが、北海道における経済的便益も視野に入れた LSF の造成を促進させるきっかけになると考えられる。

今後、防雪林の造成・管理運営方法について、我が国でも米国での取り組みについて適用の可能性を検討することも有意義と考えられる。適用性の検討にあたっては、環境面で配慮が必要な場合を考慮した。外来種の選定の是非や、その植物が十分な市場性、供給可能性の有無など、社会資本整備に適するものであることの条件を満たすことが今後求められる。

3) 多様な植生を活用した補助対策のまとめ

本節では、米国における LSF に関する歴史から紐解き、最近の研究動向についてレビューを行った。樹種に着目してみれば、我が国でも利用されている常緑針葉樹だけでなく、寒冷地でも成長速度が著しいヤナギやトウモロコシなどが利用されている。また、米国では吹雪対策としての LSF だけでなく、費用対効果、バイオマスや野生動物の生育環境、二酸化炭素の固定、土壌の侵食抑制としても LSF は注目されている。加えて、一機関が LSF の造成・管理運営を実施しているわけではなく、市区町村の自治体や地権者も含めて LSF

の造成を促進させるという視点がある。このように、枯れ上がりの補助対策工法としてだけでなく、多様な植生を活用した吹雪対策には様々な付加価値が期待できるものと考えられる。詳細については文献^{39),40),41)}を参照されたい。

3. 1. 2 防風ネット工による補助対策

1) 資料調査

防風柵・防風ネットの構造と防風効果の関係において、抗力係数 kr は防風効果に最も影響を及ぼす重要な指標である⁴²⁾。ただし、抗力係数 kr を直接的に推定することは容易ではなく、光学的空隙率（空隙率）が防風効果を評価する構造因子として用いられている⁴²⁾。

防風ネットに関するメーカーの資料より、ネットの材質はポリエチレン、ナイロンが用いられており、樹脂でコーティングされている場合もある。防風・防雪・防砂を目的としたネットの空隙率は、約 30~50%であった。

また、資料調査をもとに、これらネットと単管(STK500、φ48.6×t2.4)、クランプを組み合わせた仮設のネット柵工について、構造計算の上の一般図を試作した(図-150)。生枝下高と樹高の関係(図-7)をもとに、柵高さは1.8mと2.7mとした。ただし、現地の地盤条件については、別途考慮する必要がある。今後、防雪林の補助対策として、現地試験等に基づいたネットの適切な材質と空隙率、立木を支柱と見立てネットを設置する応急的な対策案を検討することを考えている。

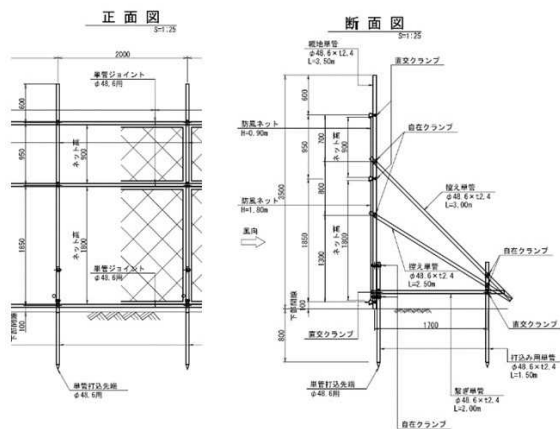


図-150 ネット柵工の一般図の例(高さ 2.7m の場合)

2) ヒアリング調査

北海道東部の一般国道 44 号浜中町に位置する茶内防雪林では、補助対策として防風ネット工が施工されている。そこで、道路管理者と維持管理業者に、補助対策工に関するヒアリング調査を実施した。



図-151 茶内防雪林で施工されているネット柵工

茶内防雪林は、平成元年度にアカエゾマツが植栽された。しかし、樹木の枯れ上がりに伴い、吹雪天候時に、雪粒子が樹木を通過して道路に到達するようになった。そのため、平成 24~28 年度にかけて、防雪林の風上側林縁または林内（道路用地の狭い区間）に防風ネット工（高さ 3.2m）が設置された(図-151)。

当該箇所の防風ネット工は、高さ 1.0m のネットパネルを 3 段とした構造で、最下段のパネルは遮蔽率が 100%となっている。この構造は、現地での試行錯誤を経た結果である。現在の構成で、吹雪時の道路上における視程障害緩和や吹きだまり抑制等の防雪効果は発揮されている。

3. 2 防雪林が捕捉する吹きだまりの観測

下枝の枯れ上がりが見られる防雪林では、風雪の吹き抜けが生じていることが明らかになった。

補助対策工法による風雪の吹き抜けの低減が考慮されるが、補助対策工法の有無で防雪林が捕捉する飛雪量について示す必要がある。そこで、下枝の枯れ上がりが見られる防雪林にて吹雪イベント前後の積雪深を観測することで、吹きだまり量による防雪性能を評価し、防雪林が捕捉した吹きだまり量と最大風速との関係を整理する。

平成 30 年度では基準となるデータを得るため、補助対策工が設置されていない雄信内防雪林における吹きだまりの観測を実施した。

この観測では、3m スノーポールを防雪林横断面に 17 本設置し(図-152)、横断面の積雪深をスノーポールで読み取った。読み取りにはタイムラプスカメラ(BCC100, Brinno Inc.製)を配置し、24 時間に 1 回の頻度で積雪深を解析した。また、吹雪の発生有無を推定するため、風向風速計を風上基準点に設置した。観測期間は平成 30 年 12 月 9 日から平成 31 年 3 月 16 日である。また、平成 31 年 3 月 5 日におよそ 0.5m おき

に積雪深と、融雪後の平成31年4月16日に防雪林横断方向の地盤高を測角儀で測量した(図-153)。

一例として、吹雪が発生した平成31年2月4日から2月5日における気象データを図-154に示す。タイムラプスカメラで取得した画像は平成31年2月4日9時と翌5日9時である(図中矢印)。タイムラプスカメラ画像を取得した翌5日までの気象データを青色ハッチで示した。気象データから、吹雪発生前の気温は、 -5°C 以上、風速は 5m/s 以下であり、吹雪の発生条件に満たないが、雄信内テレメータから 3cm/h 程度の降雪が確認され、積雪深もそれに伴い増加している。また、4日12時頃から 10m/s を超える風速が観測され、気温 -10°C 以下まで低下し、降雪に伴い積雪深も変化している。



図-152 吹きだまり観測の概要図

- a) スノーポールとタイムラプスカメラの配置、
- b) タイムラプスカメラ画像

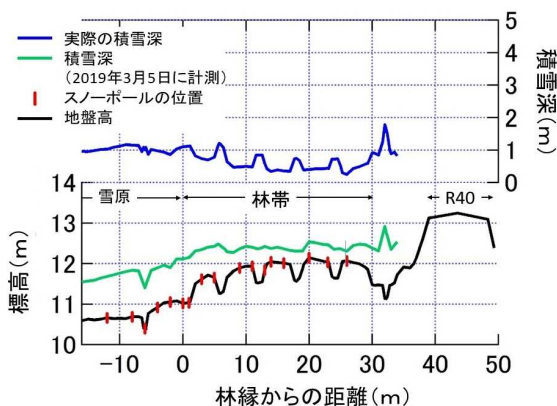


図-153 雄信内防雪林の積雪深(平成31年3月5日)と林縁からの距離

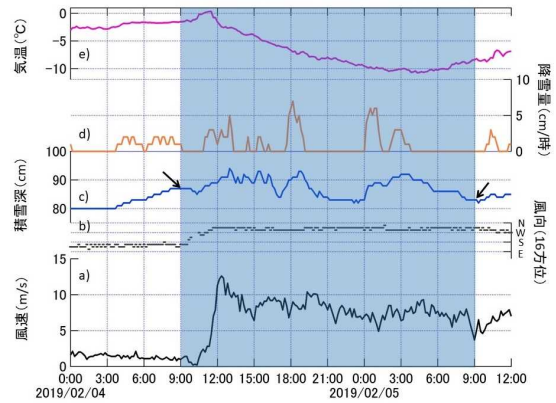


図-154 吹雪発生時の気象データ

- a, b) 基準点の風速・風向(10分平均値)、c, d, e) 雄信内テレメータ(10分平均値)の積雪深、降雪量、気温。図中の矢印はタイムラプスカメラで取得した画像の時刻(平成31年2月4日9時、翌日9時)。

タイムラプスカメラで撮影されたスノーポールの画像から、平成31年2月4日9時から翌5日の積雪深の変化を解析し、その結果を図-155に示す。防雪林の林縁から林内にかけて徐々に積雪深が低下している。風上側でより多くの飛雪を捕捉したと考えられる。

さらに、2月5日の積雪深と2月4日の積雪深との差から24時間で捕捉した積雪量が算出される(図-155赤斜線の領域)。

吹雪が発生した1イベント(24時間)で防雪林が捕捉した積雪量は、防雪林の延長 1m あたり 1.5m^3 である。たとえば、雪密度を 100kg/m^3 とすれば、24時間で防雪林延長 1m あたり約 150kg の飛雪を捕捉し、仮に防雪林延長 10m とすれば 1.5 トンの飛雪を捕捉した計算となる。

ただし、ここでは降雪による積雪量は考慮されていない。そこで、図-156に示すように、防雪林が捕捉した飛雪捕捉量(吹きだまり量)を算出するため、風上の雪原に堆積した積雪量の差を算出した。

観測期間中の平成30年12月9日から平成31年3月16日において12回のイベントを解析し、イベント毎における飛雪捕捉量と最大風速の関係を図-157に示した。

その結果、最大風速が 6m/s 以上のとき、防雪林周辺に吹きだまりが形成され、最大風速が高ければ高いほど防雪林が捕捉した飛雪捕捉量は大きくなるのがわかる。風速 $5\sim 6\text{m/s}$ は吹雪の臨界風速²⁴⁾であることを考えれば整合性があり、それ以下の風速については吹雪によらない量であることも示唆される。

言い換えれば、最大風速が 6 m/s 以下では防雪林周辺に吹きだまりは形成されず（吹きだまり量としてはマイナスである）、風が弱い時は防雪林の樹冠（枝葉や幹）が飛雪あるいは降雪を捕捉するので、防雪林周辺には吹きだまりは形成しないと考えられる。この場合、飛雪の捕捉ではなく一般的には降雪遮断⁴³⁾などと言われる。

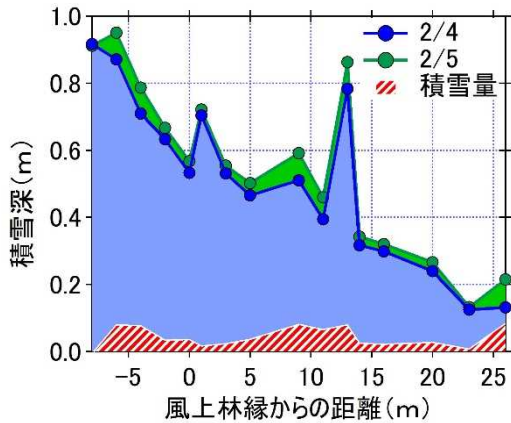


図-155 雄信内防雪林が1イベントで捕捉した飛雪量

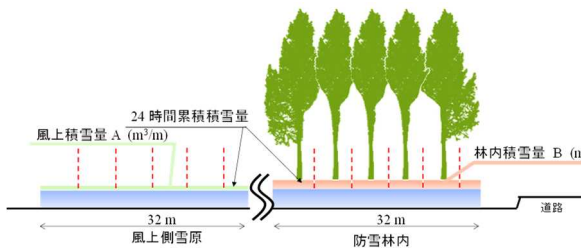


図-156 防雪林だけで捕捉した飛雪量（吹きだまり量）
捕捉した飛雪量＝林内積雪量A－風上積雪量B
（単位： m^3/m ）

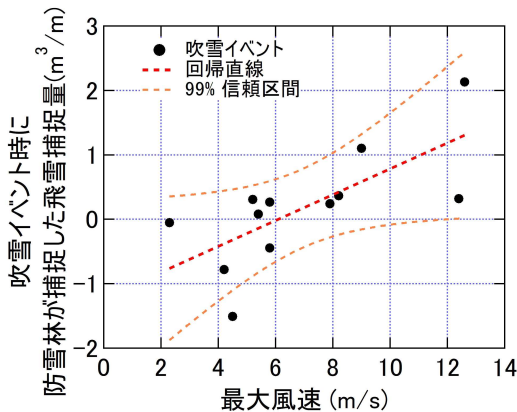


図-157 防雪林が捕捉した飛雪捕捉量と最大風速

以上のように、防雪林周辺における積雪深の経時変化を観測することで、防雪林が捕捉した飛雪捕捉量を定量的に評価することが可能であることを示した。本項の詳細は、文献⁴⁴⁾を参照されたい。

3.3 補助対策実施箇所の現地計測結果・効果検証

前章より、下枝の枯れ上がりがみられる防雪林では、風下や林内に防風ネット柵や低木等の補助工法が施工することが望ましいことが明らかとなってきた。

補助対策が施工されている防雪林は複数箇所あるが、そのなかで、北海道開発局 釧路開発建設部 根室道路事務所管内の一般国道 44 号 浜中町 茶内防雪林に着目し調査、効果検証を行った。

2020年3月5日～6日に主に北海道の東部で通行止め等が発生した暴風雪時に、補助工法が導入されている茶内防雪林において、冬期観測による補助工法の効果と融雪後の樹木調査、および2次元吹雪シミュレーションによる冬期観測の再現について併せて報告する。

3.3.1 現地観測概要

2020年3月4～7日9時の地上天気図を、図-158に示す。4日9時頃に日本海と本州南岸にあった2つの低気圧が、急速に発達しながら日本の東を北上し、6日9時までに根室の南東海上で1つに併合して中心気圧は978hPaとなったが、7日には千島近海に移動し、北海道東部を中心とした暴風雪は収束した。

日本道路交通情報センター(JARTIC)によると、上記期間における北海道内の一般国道および一般国道の自動車専用道路の通行止めは14路線27区間におよんだ⁴⁵⁾。道路以外の交通機関では、JR北海道では5日に特急28本を含む125本が運休したほか、とちり帯広空港では5日に定期便が全便欠航となった。

1) 茶内防雪林の現況

図-159に示す茶内防雪林(延長約730m)は、平成元年度から平成5年度に植栽されたアカエゾマツ7～8列(列間2m、千鳥配置、林帯幅約15m)で構成され、そのうち1列は間引き済となっている。

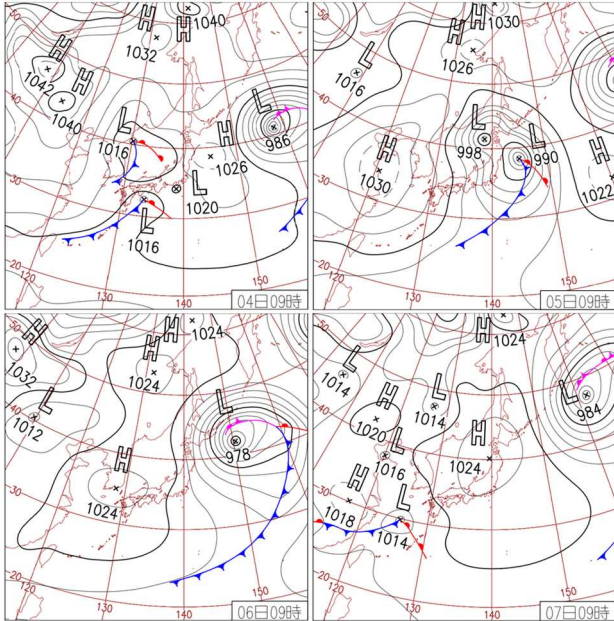


図-158 2020年3月4日～7日の9時の地上天気図

アカエゾマツの下枝の枯れ上がりに伴う防雪対策として、平成 24～28 年度に防風ネット柵(高さ 3.3m)が、防雪林の風上側林縁(図-160)および林内中央部(図-161)に施工された。その際、併せて風上側にモンタナマツ 1 列とアカエゾマツの幼木 2 列が追加植栽された。



図-161 林内中央部の防風ネット柵 (KP66.590～66.700)

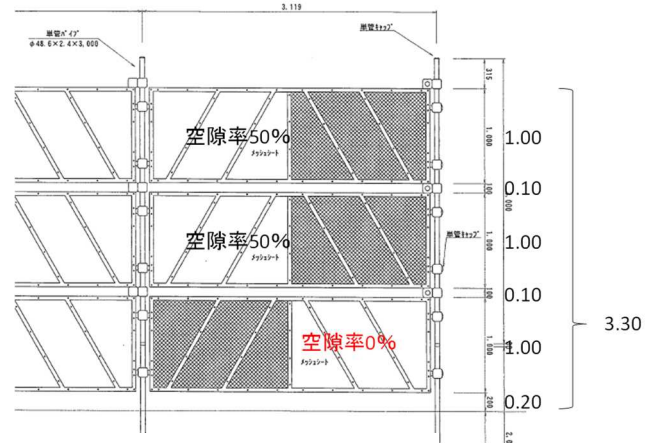


図-162 防風ネット柵図面

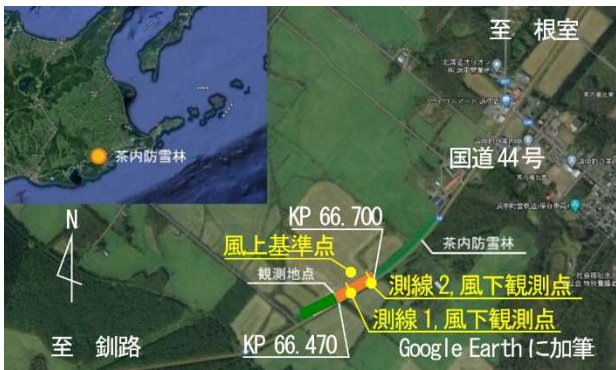


図-159 茶内防雪林および茶内防雪林の観測箇所

防風ネット柵は、高さ 1.0m 幅 3.2m のネットパネルを 3 段組み合わせせた構造で高さ 3m となる。最下段のパネルは空隙率 0% であり、上部 2 段は空隙率 50% である (図-151、図-162)。

道路管理者と維持管理業者へヒアリングしたところ、防風ネット柵の構造は現地で試行錯誤を経た結果であり、吹雪時の道路上における視程障害緩和や吹きだまり抑制等の防雪効果を発揮している。との回答を得たことから、防風ネット柵による防雪効果が期待される。

2) 観測方法

観測箇所は、図-159 に示す道路 L 側の 230m 区間とした。既設の防風ネット柵の位置を参考に、観測の測線を設けた。

1 箇所目は図-163 に示す KP66.548(測線 1)、2 箇所目は、図-164 に示す KP66.631(測線 2)である。以下に、各観測方法を示す。



図-160 風上側林縁の防風ネット柵 (KP66.470～66.590)

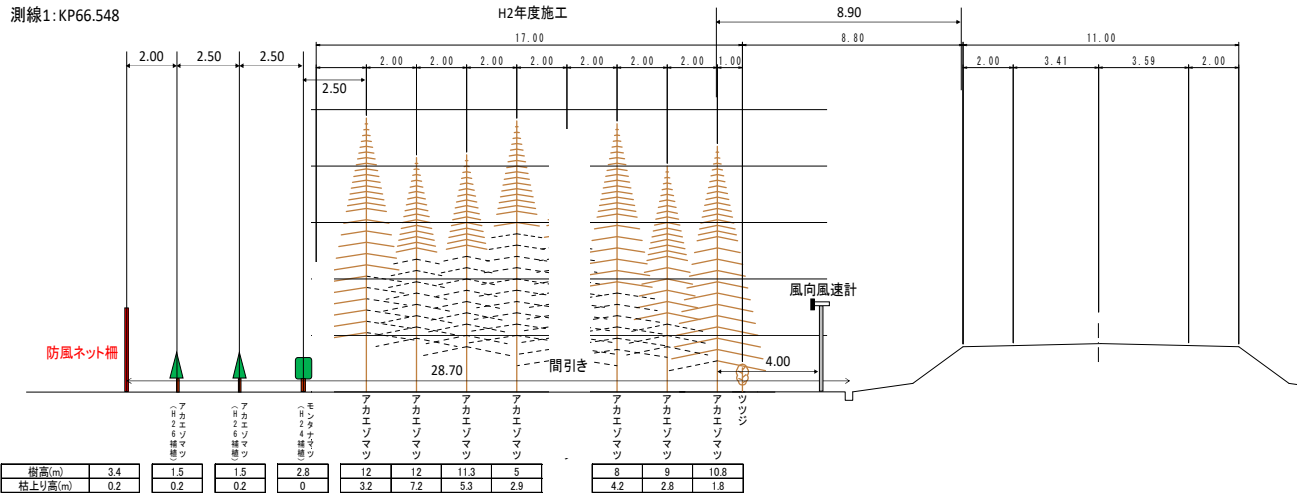


図-163 測線1 (KP66.548) の横断図 (防雪林の風上側林縁に、防風ネット柵が施工)

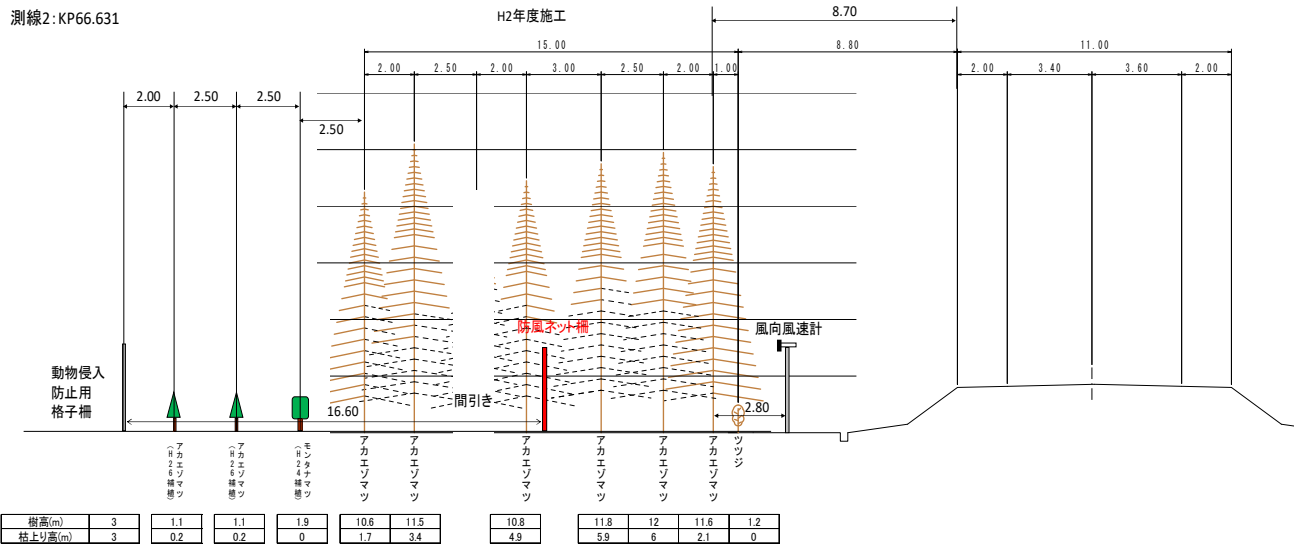


図-164 測線2 (KP66.631) の横断図 (防雪林の林内中央部に、防風ネット柵が施工)

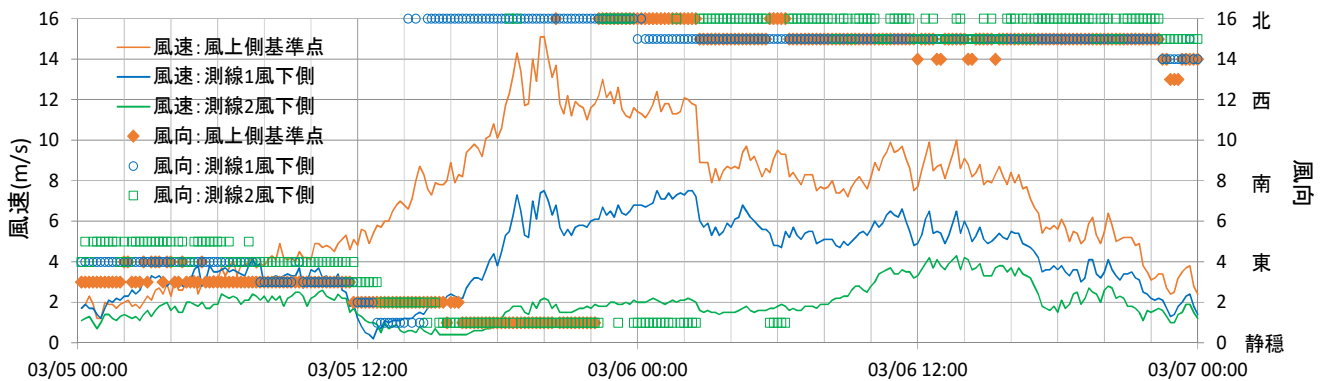


図-165 茶内防雪林の風向風速 10 分平均値 (2020 年 3 月 5 日 0 時から 7 日 0 時)

ア) 定点気象観測

定点気象観測の期間は、2019年12月上旬から2020年3月下旬である。

KP66.590 付近の道路 L 側盛土肩から風上 65m(風上側林縁の防風ネット柵から 30m)を基準点とした。

測線 1 と測線 2 の風下側林縁、すなわち道路 L 側盛土肩の堆雪帯に、風下観測点を設けた。

風向風速の観測には風向風速計(Young Co.製)を用い、10 分平均値で計測した(図-165)。各測線には、紅白ポールを 2~3m 間隔で設置し、測線付近に設置したタイムラプスカメラ(BCC100,brinno Inc.製)で得られた画像から積雪深を読み取った。

得られた風速データのうち、防雪林の風上基準点の風速値を分母、防雪林縁の風下観測点(測線 1 と測線 2)の風速値を分子とし、風速比として整理した(式(16))。たとえば、防雪林を通過し減風された場合は、風速比 1.0 より小さい値となる。

$$\text{風速比} = \frac{\text{風下(観測点)の風速 (m/s)}}{\text{風上(基準点)の風速 (m/s)}} \quad (16)$$

気温は、茶内防雪林(標高 47m)から東に約 8.2km 離れた榎町アメダス(43°07'12", 145°06'36": 標高 2m)の値を入手し、気温減率 0.6°C/100m で茶内防雪林の標高に補正した値を用いた。

降雪時の降水強度は、北北西に約 6.1km 離れた茶内原野アメダス(43°10'24", 144°58'00": 標高 70m)の値を入手し、降雪の捕捉損失⁴²⁾を考慮しないものとして扱った。

イ) 吹雪時の現地概査

吹雪開始時の 2020 年 3 月 5 日 13 時頃、および吹雪最盛期後の 6 日 10 時頃に観測箇所全体を概査し、測線 1 と測線 2 にて測深棒を用いて積雪深を計測した。

さらに、各測線の防風ネット柵とモンタナマツの風上側と風下側、ならびにアカエゾマツ成林内にて、角型密度サンプラー(100cm³)を用いて、新雪層の高さ 10~20 cm ごとに複数回積雪密度を観測した。

測線 1 と測線 2 について、吹雪最盛期後の 2020 年 3 月 6 日 10 時頃に計測した全層の積雪深と、吹雪開始時の 5 日 13 時頃に計測した旧雪層の積雪深または吹雪開始前の 4 日に記録された画像から読み取った積雪深の差分を、新雪層の積雪高さとした。

なお、得られた新雪層の積雪高さから、降雪による積雪深増加を引いた値を、吹きだまり量(m³/m)として整理した。

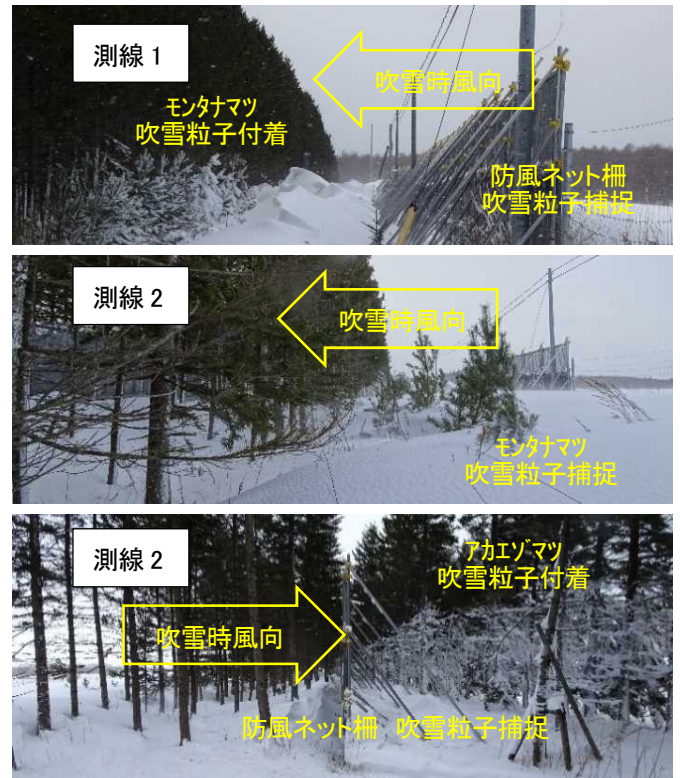


図-166 現地概査結果 (2020年3月6日10-11時頃撮影)

2) 現地概査結果

現地概査の結果、防風ネット柵とモンタナマツ付近で吹雪粒子を捕捉し、防風ネット柵の風下側の樹木(測線 1 はモンタナマツ、測線 2 はアカエゾマツ成木)に、吹雪粒子が付着していた(図-166)。

防風ネット柵の背面に形成された雪丘より風下側では、顕著な吹きだまりは見られなかった。ただし、KP66.590 付近の防風ネット柵の端部では、斜風時(風向が北東~北)の吹雪により、アカエゾマツ成林の最も道路に近い列まで吹きだまりが確認された。

その際、成林内の間引き済の箇所では吹き払われていた(図-163を参照)。

また、角型密度サンプラーでの測定結果をもとに、新雪層の平均積雪密度を求めた(表-11)。

測線 1 と 2 における、3 月 6 日 10 時と旧雪層の積雪深を図-167 に示す。

各測線における積雪深増加量と現地概査の結果から、降雪による積雪深増加想定線を図-167 に付記し、吹きだまり量を求めた結果、測線 1 は防風ネット柵付近で 12.9 m³/m、測線 2 は防風ネット柵付近が 4.4 m³/m、モンタナマツ付近が 2.1 m³/m、計 6.5 m³/m となった。

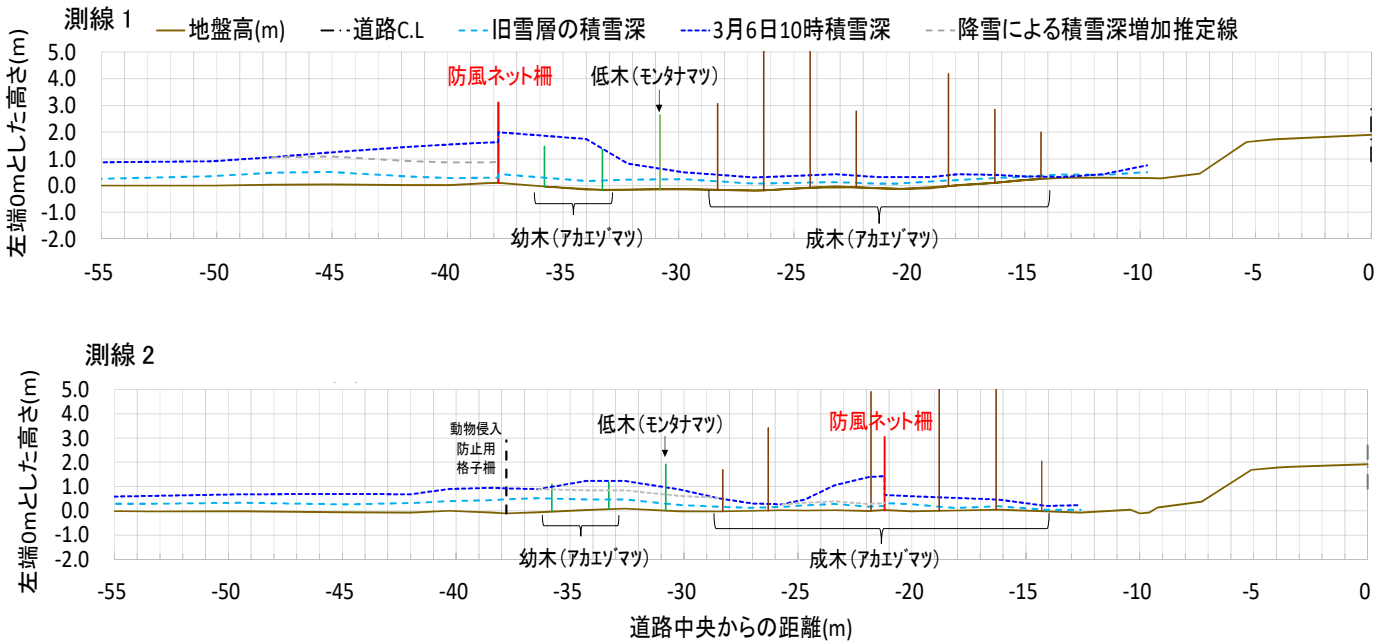


図-167 吹雪最盛期後の2020年3月6日10時と旧雪層の積雪深、降雪による積雪深増加推定線(上図測線1、下図測線2)

表-11 新雪層の平均積雪密度 (kg/m³)

	柵		モンタナマツ		アカエゾマツ
	風上側	風下側	風上側	風下側	成林内
測線 1	205	168	—	—	182
測線 2	181,189	146	245	197	150

3. 3. 3 考察

1) 吹雪量の推定

吹雪の程度を表現する方法として、本稿では簡便な吹雪量を用いる。

吹雪量は、風向に対して直交する単位幅を単位時間に通過する雪粒子の質量(g/m/s)⁴⁷⁾である。

竹内ら⁴⁸⁾による気温と風速による吹雪の発生条件のうち、低い地吹雪の発生条件(曲線I)について、7m高さの風速を V_7 、気温を T として読み取ると、式(17)が得られる。

$$V_7 \geq 11.143 \times (3.0 - T)^{-0.389} \quad [T < 3.0] \quad (17)$$

式(17)の吹雪の発生条件を満たす場合に、大宮ら⁴⁹⁾による式(18)により吹雪量 Q (kg/m/s)を推算した。

$$Q = 1.42PhV_7 + 0.00053V_7^{4.6} \quad (18)$$

ここで、 Ph は降雪時の降水強度(mm/h)である。式(16)に代入する気象データは、式(18)で7mにおける風速 V_7 を計算し、茶内防雪林高さ3mの風上側基準点を対数則の式(19)¹¹⁾によって、高さ7mとしたものである。

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (19)$$

ここで、 $u(z)$ 、 u_* 、 κ 、 z 、 z_0 はそれぞれ、基準点の高さにおける風速(m/s)、摩擦速度(m/s)、カルマン定数(=0.4)、風速を計測した高さ(ここでは3m)、雪面における地表面粗度(1.5×10^{-4} m)⁵⁰⁾である。

前述したように、気温 T は榊町アメダスの補正值、降雪時の降水強度 Ph は茶内原野アメダスの値とした。

式(17)より吹雪の発生は3月5日12時から6日20時までと推定され、式(18)より吹雪量は累計3500kg/mと推算された。3月5日12時から雪況観測を実施した6日10時までの吹雪量は、累計3,085kg/mと推算された。

2) 防風ネット柵とモンタナマツの吹雪捕捉率の試算

現地概査で得られた各測線の防風ネット柵とモンタナマツ付近の吹きだまり量(m³/m)に、各測定地点の新雪層の平均積雪密度(kg/m³)を乗じ、吹雪量(kg/m)に換算した。

つぎに、3月5日12時から6日10時までの累計3085kg/mと比較し、吹雪捕捉率を試算した。その結果を表-12に示す。

なお、測線2の防風ネット柵の風下側は、アカエゾマツ成木の高さ0~5m程度に吹雪粒子が付着していたため、表-12に示した値以上に捕捉しているものと推察される。

表-12 換算吹雪量(kg/m)と吹雪捕捉率(%)の推定

	防風ネット柵	モンタナマツ	防風ネット柵
	風上側林縁	風上側林縁	防雪林内
測線1	2,311kg/m 74.9%	—	—
測線2	—	460kg/m 14.9%	750kg/m 24.3%

3. 3. 4 吹雪シミュレーションの試行

1) 現地観測結果の再現

測線1を対象に、2次元吹雪シミュレーション⁵¹⁾を利用して観測結果を再現した。

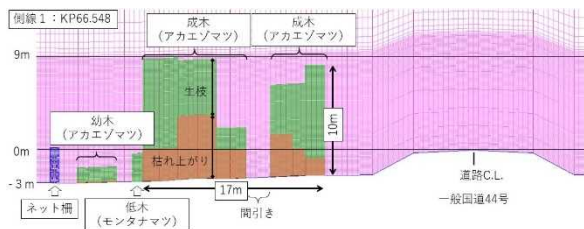


図-168 吹雪シミュレーションのメッシュ画像

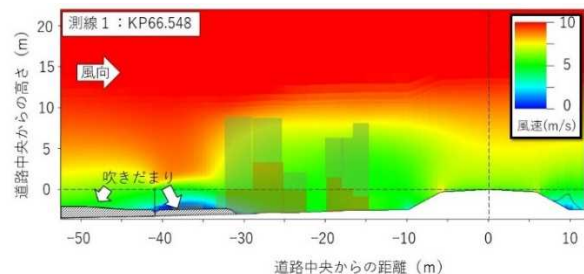


図-169 測線1の現地観測結果を再現した吹雪シミュレーションによる風速と吹きだまりの分布

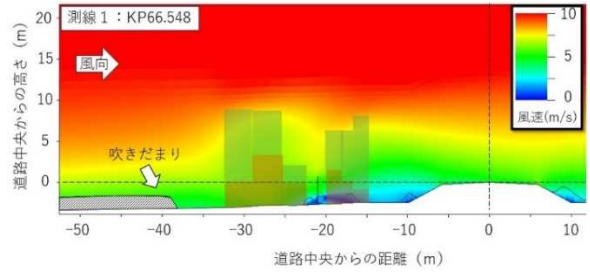


図-170 測線1の補助工法を防雪林の間引き済み箇所に設置したときの吹雪シミュレーションによる風速と吹きだまりの分布

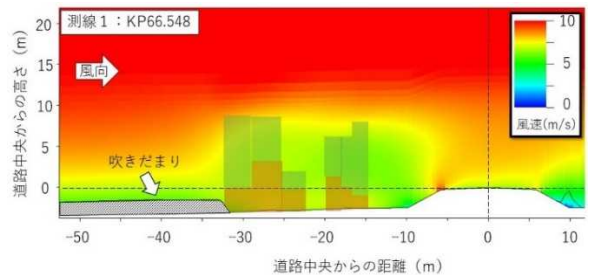


図-171 測線1の補助工法(防風ネット柵・モンタナマツ低木・アカエゾマツ幼木)を除いたときの吹雪シミュレーションによる風速、吹きだまりの分布

図-163を基に、測線1の諸条件(地盤、防風ネット柵、枯れ上がり高さ、樹高)のメッシュ値を作成した(図-168)。気象条件は、風速7.0m/s、降雪強度5.0mm/hとし、演算時間は24時間とした。

吹雪シミュレーションの結果を図-169に示す。風上基準点と風下観測点の風速(共に地面高さ3m)を抽出し、式(17)より風下観測点の風速比は0.74であった。

現地観測結果の風速比は0.66であったことから、概ね現地の観測結果を再現していると考えられる。

一方、吹きだまりはアカエゾマツ成木まで分布しており、現地観測による吹きだまり分布の結果(図-167)と類似した。

ただし、防風ネット柵付近の吹きだまりの捕捉による積雪深の増加の細部までは再現されていないことも分かった。

3) 防風ネット柵の配置変更による効果

上述の測線1風上林縁から、図-167の測線2を参考に成木内における間引き済みの箇所に、防風ネット柵の配置を変えて効果を検証した。

防風ネット柵を移設した場合の計算条件は、現地を再現したときと同じものとした。その結果、風速および吹きだまり形状に差異が見られた（図-170）。

式(17)より風下観測点の風速比を求めたところ、風速比は 0.53 となった。

図-169 の風速比は 0.74 であったことから、防風ネット柵を移設したことにより、約 30%の風速が低減される効果があると見積もられる。

4) 補助工法がない場合の効果

茶内防雪林に施工された補助工法の効果を推定するため、図-163 に示される平成 24 年度以降に設置・植栽された防風ネット柵、幼木(アカエゾマツ)と低木(モンタナマツ)がない場合について計算し、その結果を図-171 に示す。

計算条件は、現地を再現したときと同じものとした。その結果、風速および吹きだまり形状に差異が見られた。式(17)より風速比を求めたところ、風速比は 0.90 となった。

図-169 の風速比は 0.74 であり、補助工法を除外したことにより約 20%の風速が増すこととなった。

以上から、吹雪シミュレーションの結果ではあるが、茶内防雪林の補助工法は適切なものと思われ、とくに測線 2 のように成木内に防風ネット柵を設置する方がより風速の低減効果が高いものと期待される。

なお、現地観測の結果から、測線 2 の風速比も吹雪シミュレーション結果と同程度であった。

3. 3. 5 補助対策実施箇所の現地計測結果・効果検証結果についてのまとめ

2020 年 3 月 5 日～6 日の暴風雪時に、補助柵が導入されている一般国道 44 号浜中町茶内防雪林で現地観測を実施した結果、当該期間における現地の推定吹雪量は約 3,500 kg/m、補助工法により吹雪量の約 40～75% が吹きだまりとして捕捉された。

併せて、吹雪シミュレーションを利用し、現地観測を再現したうえで補助工法がない場合と比較し、風速低減効果を見積もった。

その結果、茶内防雪林における補助工法が適切であることを確認し、加えて現地でも設置されているように成木内に防風ネット柵を設置する方がより効果が高いものと想定された。

3. 4 防風ネット柵による国道の視界不良軽減効果

前述した検討結果を踏まえ、本章では、防雪性能が低下した道路防雪林へ補助対策を施した場合の効果を確認する。

枯れ上がりが生じている防雪林に、ネット柵による補助工法を施すことで、国道上での視界不良の差異、すなわち吹雪による視界不良が軽減している効果を確認した。

吹雪発生時を抽出し、視界不良の差異がわかる、写真による判別を試みた。これは、武知ら⁵²⁾による調査で、道路画像でも、ドライバーの感じている「視程障害度」が評価できるためである。

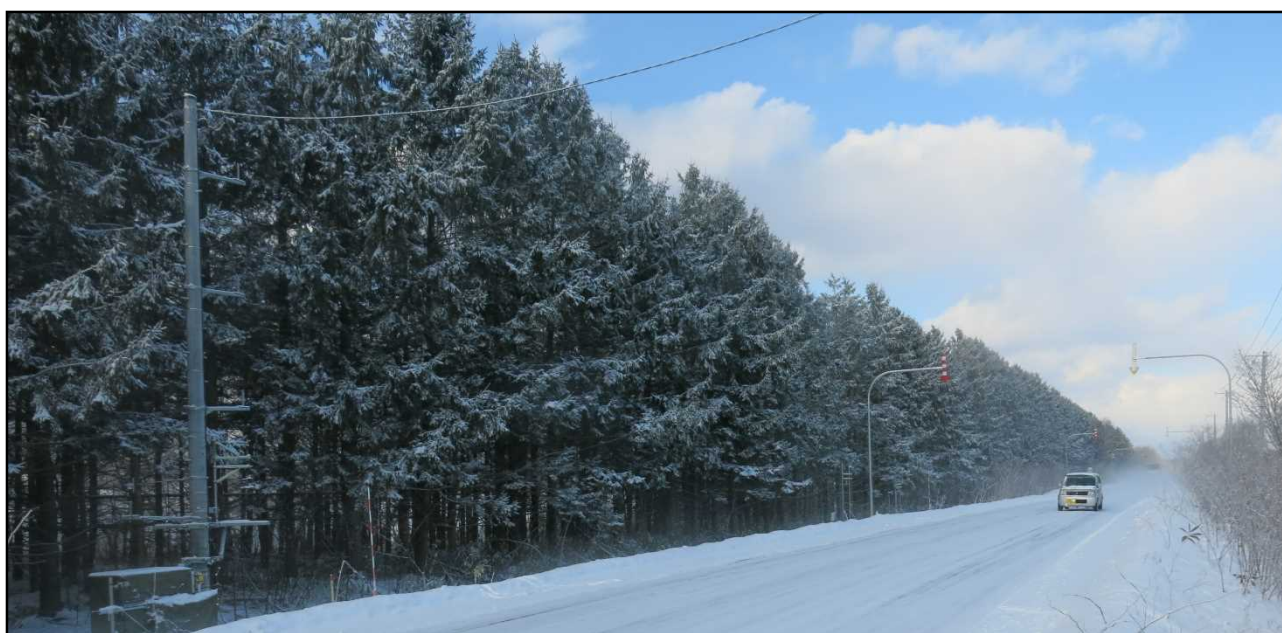


図-172 雄信内防雪林の全景と計測機器設置状況（写真左側電柱に風速計などを設置：令和 3 年 1 月撮影）



図-173 雄信内防雪林の位置

表-13 雄信内防雪林の概要

路線	一般国道40号
起点	BP=178,226
終点	EP=183,529
路線延長	5,303m
左林帯延長	4,440m
右林帯延長	2,291m
防雪林延長	6,731m
林帯幅員	30m
落葉広葉高木	ドロノキ ナナカマド ナカバヤナギ ヤチダモ
常緑針葉高木	アカエゾマツ オウシュウトウヒ トドマツ バンクシャーマツ

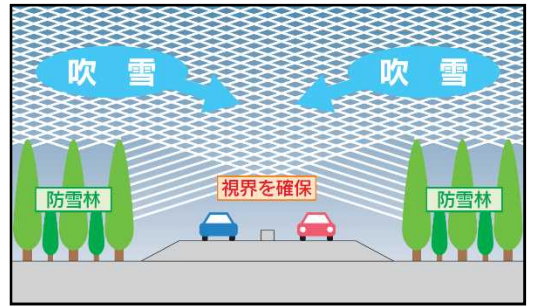


図-174 両側防雪林の視界不良緩和効果⁵⁴⁾

雄信内防雪林は、路線番号 E5「幌富バイパス」の幌延インターチェンジより、南に約 15km の距離にある、一般国道 40 号 天塩町に位置（図-173）している。

3. 4. 2 雄信内防雪林の概況

昭和 56 年度から平成 16 年度にかけて段階的に整備された林帯で、樹種構成などを表-13 に示す。

吹雪による、道路上での吹きだまり防止効果、風速を弱めることによる道路の視界不良軽減効果⁵³⁾、視線誘導効果、良好な地域景観の形成などに寄与することであり、図-174 に示す⁵⁴⁾ように林帯が道路の両側に設置されている箇所もある。平成 21 年度に維持管理手法の検討⁵⁵⁾を行っているが、防雪林内の樹木の成長に伴い、一部の区間では、樹木同士の相互干渉による生育不良が生じている箇所が見受けられる⁵⁶⁾。

これら生育不良による防雪・防風効果の機能低下で、防雪林内で風速が弱まらず、雪が舞い上がり、国道上では、視界不良が生じている可能性がある。

3. 4. 3 雄信内防雪林の防雪効果の一事例

生育不良が発生している防雪林の一部の区間では、防雪・防風効果が低減している箇所が見受けられる

しかし、路線全体としてマクロ的にとらえ、防雪林の機能に着目すると、国道を安全に通行するための視界不良の軽減効果は高いと考えられる。以下に、その事例を示す。

3. 4. 1 調査箇所

本章では、国土交通省 北海道開発局 留萌開発建設部 羽幌道路事務所にご協力いただき、一般国道 40 号 天塩町 雄信内防雪林（図-172）の一部で、林帯下枝の枯れ上がりを原因とした防雪機能の低下が危惧される箇所を試験フィールドとし、補助柵の設置を行った結果、吹雪による視界不良が改善される可能性が示唆されたため、以下のとおり報告する。



図-177 図-175 の視界良好な状況



図-175 防雪林未整備箇所での視界不良発生状況



図-176 図-175 と同時刻の林整備箇所の視界良好な状況

図-175、176 は、令和3年2月3日 午前6時40分頃の雄信内防雪林の状況で、一般国道40号を旭川へ向かい走行した観測車両から撮影したものである。

図-175 は、KP=180.197 付近、路側にテレメーター機器が設置され、防雪林が未整備の箇所である。

強風により雪が舞い上がり、車両のドライバーの視線の高さで視界不良が発生し、走行が危険な状況となっている。なお、同箇所同日で視界不良が発生していない時の状況を、図-177 に示す。

一方、図-176 は、テレメーター機器設置箇所より数百メートル旭川側で、防雪林が設置されている箇所を、同日ほぼ同時刻に、撮影したものである。

防雪林は、風を弱め、雪が舞い上がることを防ぐ²²⁾。よって、図-176 では、視界良好で、路面状況や対向車両も視認可能である。本事例からも、防雪林の防雪・防風効果のポンシャルの高さが伺える。

3. 4. 4 過年度の天塩町雄信内の気象概況

本対策を検討するにあたり、平成27年度から令和2年度までの過去6年間、11月1日から3月31日までの冬期における雄信内防雪林近傍での気象概況を検証した。

本対策を施工する箇所から約700m南東方向に、北海道開発局が管理している、道路テレメーター機器が設置されている。

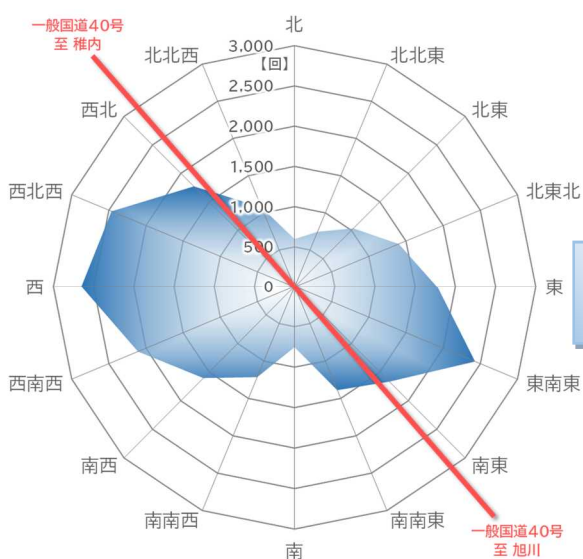


図-178 雄信内テレメーターで計測された冬期の風向

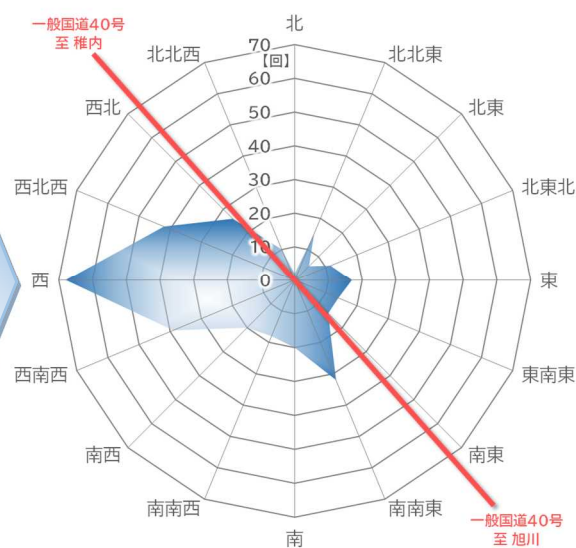


図-181 視界が500m以下に低下した際の風向

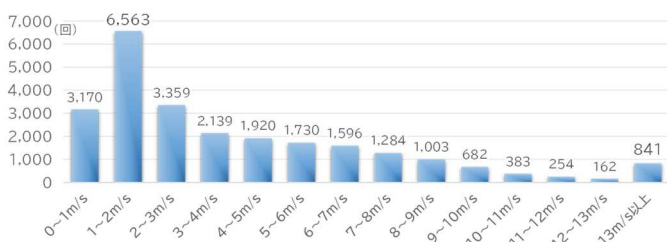


図-179 2015年度から2020年度までの冬期の風速別発生頻度



図-182 視界不良が想定される年度別の回数

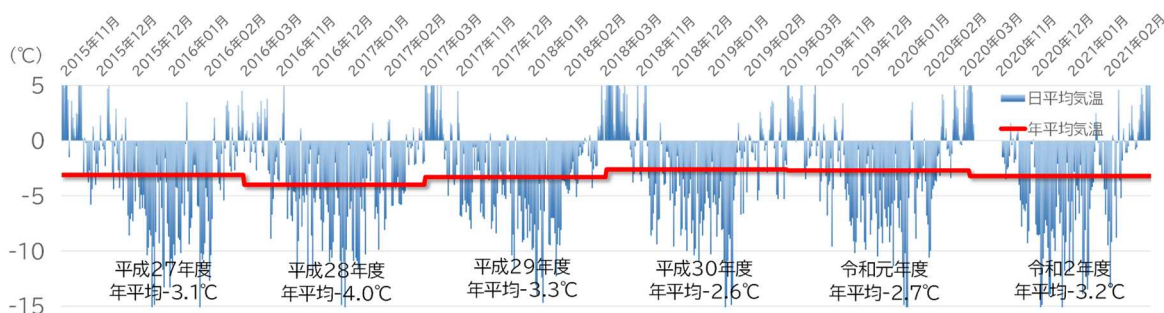


図-180 雄信内テレメーターで計測された冬期の日平均気温

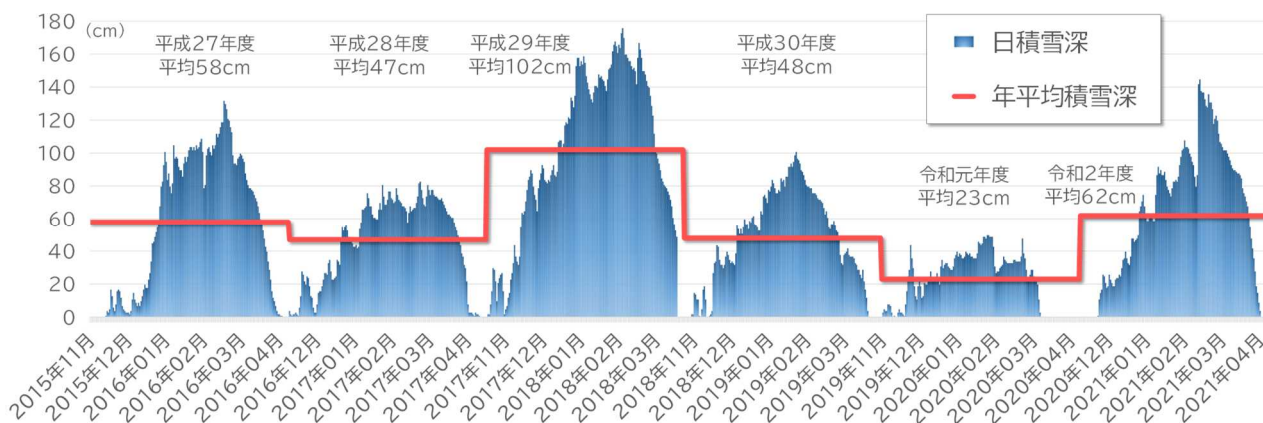


図-183 雄信内テレメーターで計測された冬期の日積雪深と年平均積雪深

道路の現場状況、周辺環境状況には大きな差異はなく、気象条件が大きく乖離することはないと仮定し、道路テレメーター雄信内局の1時間平均値のデータを用いて、雄信内の気象概況を整理した。

風向を図-178、風速の分布を図-179、気温を図-180に示すが、冬期間全体では、西風または東南東の風向、風速は1~2m/sが多く、年平均気温は約-3℃である。

その中から、吹雪などで視界不良が生じた可能性が高い、視界が500m以下に低下した際の風向データを図-181、年度別発生回数を図-182に示す。

視界不良が生じた場合、西風が多いことが明らかとなった。しかし、その際の風速分布は、図-179と同様な傾向で、顕著な特徴は認められなかった。

図-183に日積雪量を示すが、令和2年度が少雪であった他は、平成29年度が最も多く年平均102cm、他の年は約40~60cmの日積雪量であった。

なお、雄信内防雪林では、悪天候時に、図-184、185に示すような視界不良が発生し、路面や、他の車両が視認できず、車両の走行が危険⁵⁸⁾である可能性が窺える。



図-184 視界不良状況1 (令和3年1月20日撮影)



図-185 視界不良状況2 (令和3年2月4日撮影)



図-186 林帯内の枯れ上がり状況(国道と平行方向に撮影)



図-187 林帯の疎な状況(国道から林に向かい撮影)

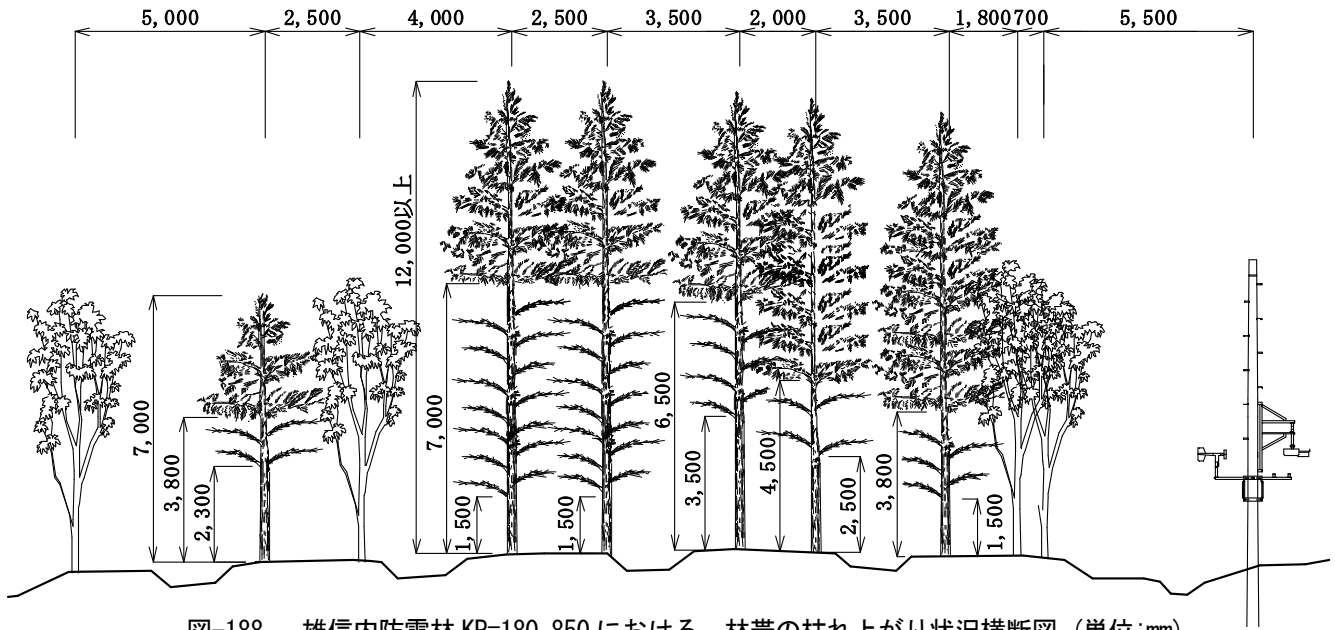


図-188 雄信内防雪林 KP=180.850 における、林帯の枯れ上がり状況横断面図（単位:mm）

3. 4. 5 雄信内防雪林内の枯れ上がり状況

下枝の枯れ上がりが進行している状況を、図-186、187 に、令和 2 年度に樹木調査を行った KP=180.850 の枯れ上がり状況横断面図を図-188 に示す。

林帯中央部分では、高さ 6.5m から 7.0m まで枯れ上がりが進行し、下部は葉がなく枝のみの疎な状態となり、風が吹き抜けていることが想定される。

背後地は、図-189 に示すように、見渡す限り平坦な草原であり、冬期は天候が悪化すると、強風により雪粒子が舞い上がり、図-190、191 に示すホワイトアウトが発生する可能性が高い。

視界 100m 程度では、前を走行する車両のテールライトが見えない場合があると同時に、人によっては「前がまったく見えない」と感じることもある⁵⁹⁾。

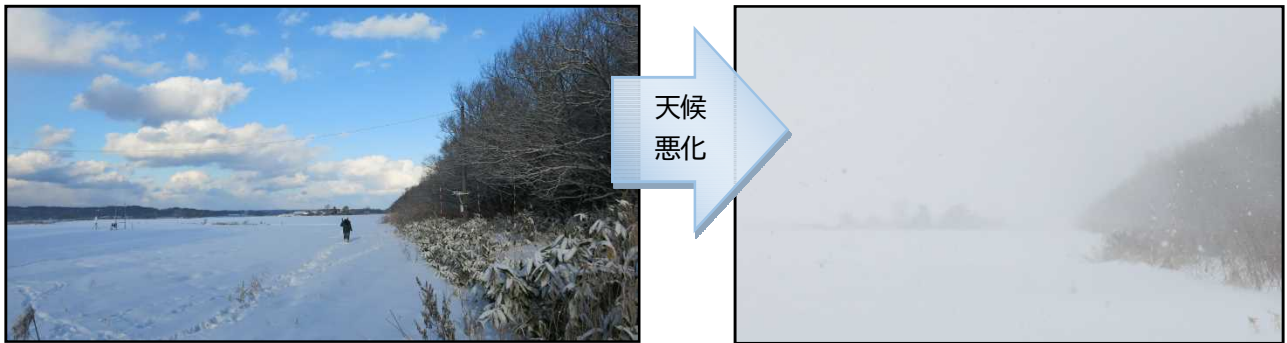


図-189 雄信内防雪林の背後地の状況（左写真：晴天時、右写真：天候が悪化し地吹雪が発生している状況）



図-190 視界不良状況 3（平成 29 年 3 月 5 日撮影）

図-191 視界不良状況 4（平成 30 年 1 月 24 日撮影）

3. 4. 6 補助柵：防風ネット柵の検討・設置

前述したとおり、風上や林内に防風ネット柵などの補助柵の追加設置、あるいは低木樹を植樹することで、防雪・防風効果が改善される可能性が高いことが明らかとなっている。

雄信内防雪林内は、枝が張り出しているため油圧ショベルなどの建設機械による施工は困難である。よって、人力で設置可能である、単管パイプを組み合わせた防風ネット柵を選定した。

防風ネット柵の諸元を表-14、詳細図を図-192 に示すが、設計風速を検討するため、平成 27 年度から令和元年度まで 5 年分のテレメーター雄信内局データを確認したところ、最大風速は、平成 29 年 3 月 28 日 19 時に観測された 19.0m/s であった。

そこで、鋼部材の外力に対する機械的強度の安全率 1.5 を準拠⁶⁰⁾し、設計風速は 30.0m/s と設定した。

ネットは、入手性や価格などを考慮し、一般的に販売、使用されている、充実率 50% の防風ネットとした。

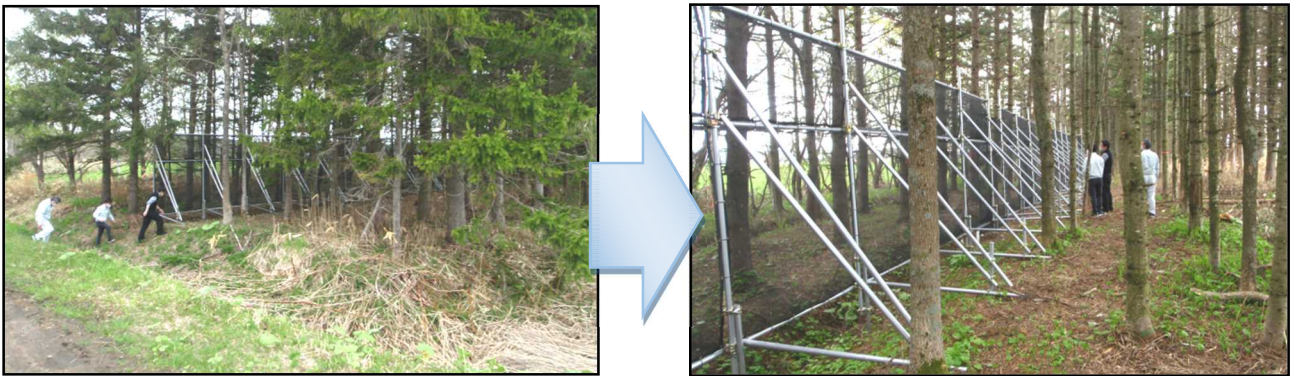


図-194 林内へ設置完了した防風ネット柵（左写真：林帯中央部設置状況、右写真：柵に近接し撮影）

表-14 防風ネット柵の諸元

柵高	3,050mm
スパン	2,000mm
ネットサイズ	1,900* 900mm 1,900*1,800mm
材質	ポリエチレン
規格	ラッセル網
目合	1.8~2.7mm
充実率	50%
ネット色	ブラック
加工	ターボリン補強
縦引張強さ	1,380N
横引張強さ	1,690N
設計風速	30m/s

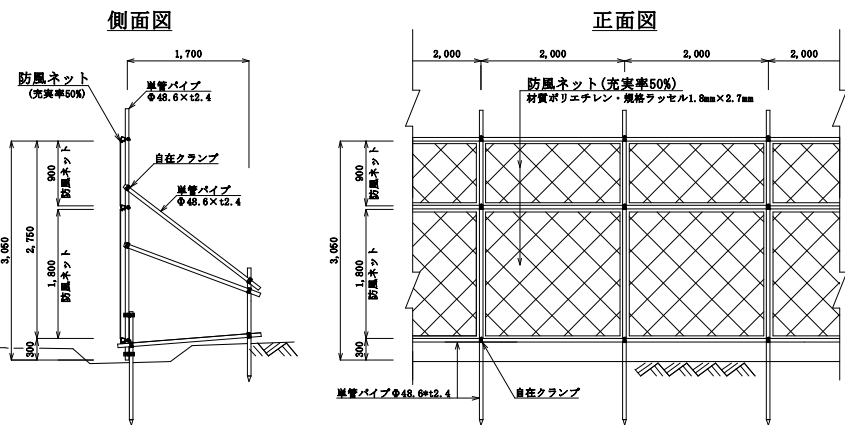


図-192 防風ネット柵の詳細図（単位:mm）

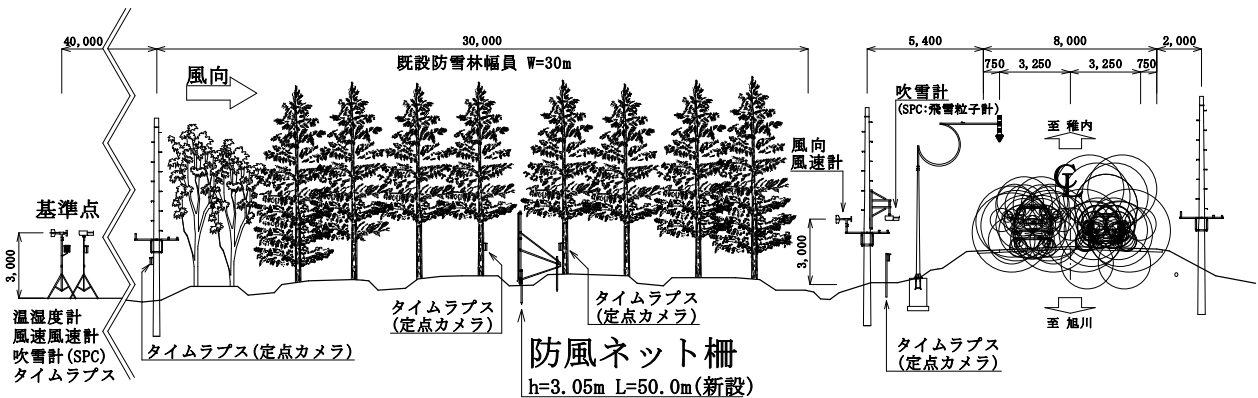


図-193 防風ネット柵の設置位置、および計測機器の設置位置を示した横断面図（単位:mm）

柵の設置位置は、防雪林内の現地調査を行い、樹木の繁茂状況などを確認し、枝払いは必要最小限、かつ既設林に悪影響を及ぼさない箇所を検討した結果、**図-193**の横断図、および**図-194**に示すように、林内中央部に設置した。

設置延長は、柵の有無による視界不良の発生有無や、発生状況の差異の判別が可能となることを期待できる $L=50.0\text{m}$ とした。

3. 4. 7 防雪林内の雪粒子捕捉状況

図-189に示すように、防雪林の背後地は平地である。武知ら⁶¹⁾の調査より、風上に平坦地が存在する場合、強風により雪粒子が舞い上がり、視界不良に至ることが明らかとなっている。

よって、防雪林で風を弱め、雪粒子を林内で捕捉・堆積することで、道路まで到達しなければ、視界不良を軽減することが可能⁶²⁾である。

図-195は、令和3年2月3日の状況であるが、防風ネット柵を設置したことで、風速が弱まり柵の前後に吹きだまりが発生した事例である。柵近傍の積雪深の調査状況を**図-196**に示す。表面から新雪が11cm、ざらめ雪が51cm、合計積雪深は62cmであった。



図-195 防風ネット柵前後に堆積された吹きだまりの状況

図-197に柵全体の状況を示すが、柵のネットにも広範囲にわたり雪粒子が捕捉され、道路まで到達せずに、視界不良を軽減した可能性がある。

さらに、防風ネット柵だけでなく、樹木にも雪粒子が捕捉されていることから、下枝が枯れ上がってしまった場合でも、防風・防雪機能は完全に喪失していないことが鑑みられる。

3. 4. 8 補助柵設置の防雪効果検証

補助柵の防雪効果を検証する手法は多種多様であるが、本章では、吹雪発生などの気象状況把握のため、**図-193**に示す位置に、風向風速計、温湿度計、吹雪計(飛雪粒子計、SPC:Snow Particle Counter)、タイムラプス定点カメラを設置した。

さらに、吹雪発生時に、**図-198、199**に示す寒地土木研究所所有の、視程障害移動観測車を走行させ、気象データを取得した。

調査結果を精査し、特徴的なデータを取得できた箇所を抽出した。その結果、視界不良軽減効果が認められた1事例と、効果がなかった1事例、合計2事例について、以下のとおり報告する。



図-196 積雪深などの調査状況(令和3年2月3日)



図-197 ネットに雪粒子が捕捉された状況



図-198 視程障害移動観測車の計測状況(令和3年2月3日)



図-199 視程障害移動観測車の車載計測機器

3. 4. 9 視界不良(1)令和3年2月17日：効果なし

2月16日から17日にかけて、二つの低気圧が日本海側と太平洋側から発達しながら北海道に接近し、札幌管区气象台より「数年に一度の猛吹雪となる見込み」と発表された。

天気図を図-200に、風向予測概況を図-201に、寒地土木研究所で運営している「吹雪の視界情報」の現況を図-202に示すが、全道的に悪天候に見舞われた状況である。

タイムラプス定点カメラ画像のうち、未対策箇所を図-203、補助柵設置箇所を図-204に示す。両写真には、午前9時00分、同時刻に撮影した、補助柵の有無による視界不良の差異を比較した写真である。

両写真とも、視界不良が発生し、カメラより距離が遠い箇所は、電柱・電線、固定式視線誘導柱の矢羽根などが見えない。しかし、距離を示す基準もなく、定量的に、明確な差異を導くのは困難と言わざるを得ない。

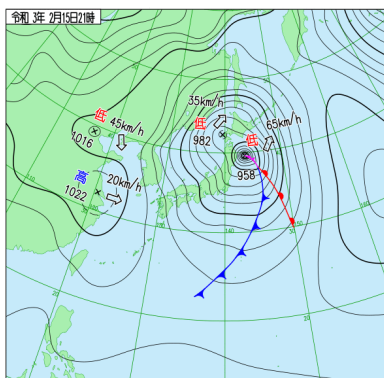


図-200 2月15日の天気図
(気象庁Webサイトより引用)



図-201 2月17日の風向予測概況
(https://www.windy.com/ja/より引用)

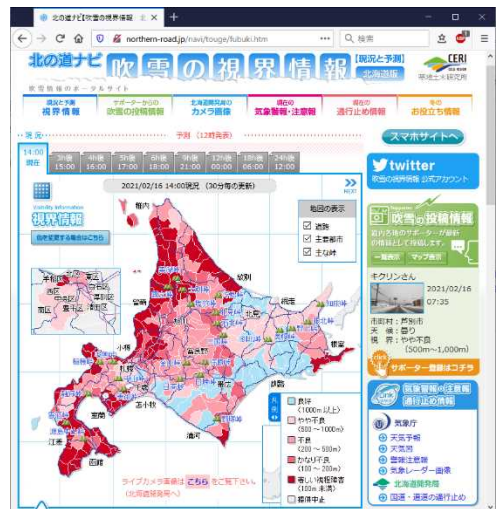


図-202 吹雪の視界情報による
2月16日の視界不良発生予測

本事例から、風向風速や気温、雪粒子の飛散量などにより補助柵設置による防雪・防風効果が表れない場合もある。

3. 4. 10 視界不良(2)令和3年2月3日：効果あり

2月2日から冬型の気圧配置となり、低気圧は北海道を通過したが、気温が低く、西からの強風に見舞われた。

天気図を図-205に、風向予測概況を図-206に、吹雪の視界情報の現況図を図-207に示すが、日本海側全域に視界不良の発生が予測された。

2月3日は、視程障害移動観測車(図-198、199)を走行させ、気象データ、および動画撮影を行った。

図-208、209は、視界不良が発生している状況を、令和3年2月3日午前7時53分頃、一般国道40号を稚内方向へ走行しつつ撮影したものである。

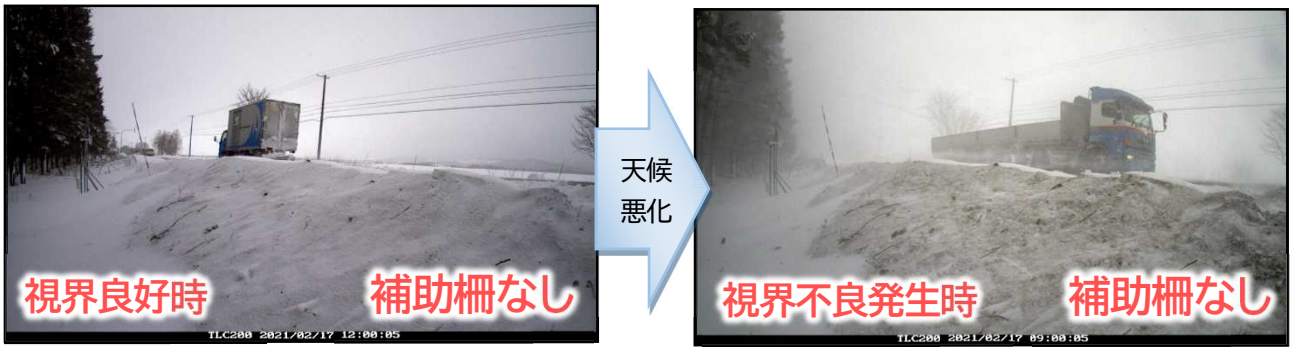


図-203 【補助柵なし】吹雪による視界不良発生状況 (左写真：視界良好時、右写真：吹雪発生時)

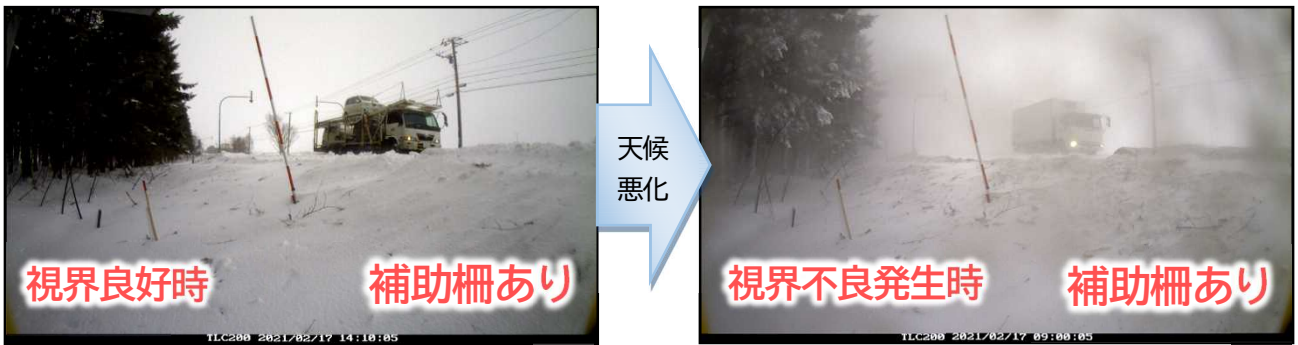


図-204 【補助柵あり】吹雪による視界不良発生状況 (左写真：視界良好時、右写真：吹雪発生時)

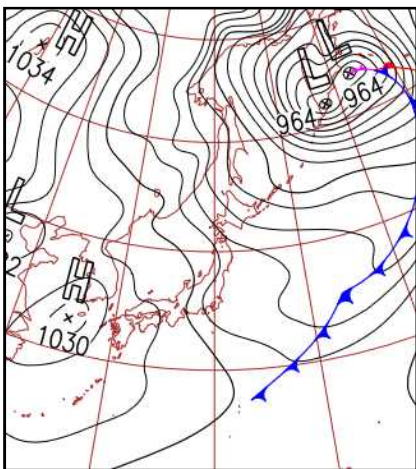


図-205 2月3日の天気図

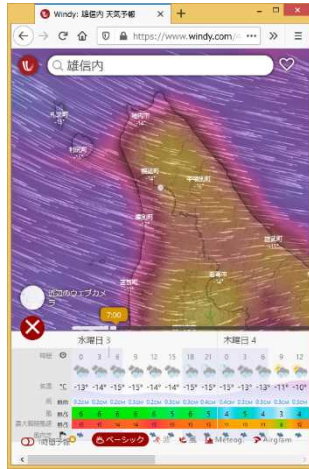


図-206 2月3日の風向予測概況

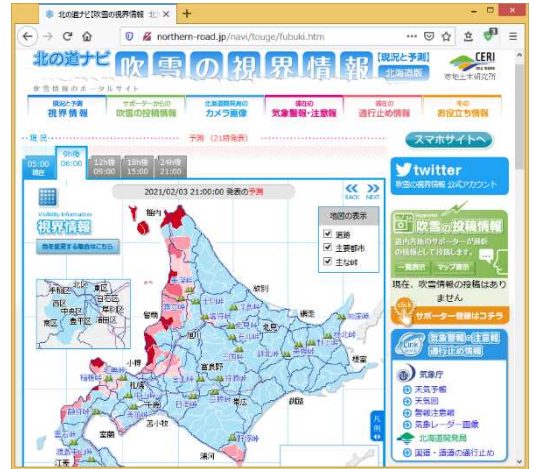


図-207 吹雪の視界情報による
2月3日の視界不良発生予測

未対策箇所を図-208、補助柵設置箇所を図-209に示すが、電柱が50m間隔で設置されているため、これを一定の指標とし、電柱や電線の見え方で視界不良が軽減できたか否かを判断した。

橙色点線で示している場所に、電柱が設置されているが、補助柵を設置していない図-208は、電柱は視認できない。しかし、補助柵が設置されている図-209では、若干ではあるが、電柱の存在が視認できる。

同様に、水色点線で示した電線4本も、図-208、209では見え方が異なっている。

写真判別という、定性的、かつ主観も含まれる判断ではあるが、補助柵設置により、防雪林内で雪粒子を捕捉し、道路上の視界不良を軽減できた可能性が高い。

なお、タイムラプス定点カメラは、図-210に示すとおり、レンズ部分にも雪が付着してしまい、写真による道路画像は取得できなかった。

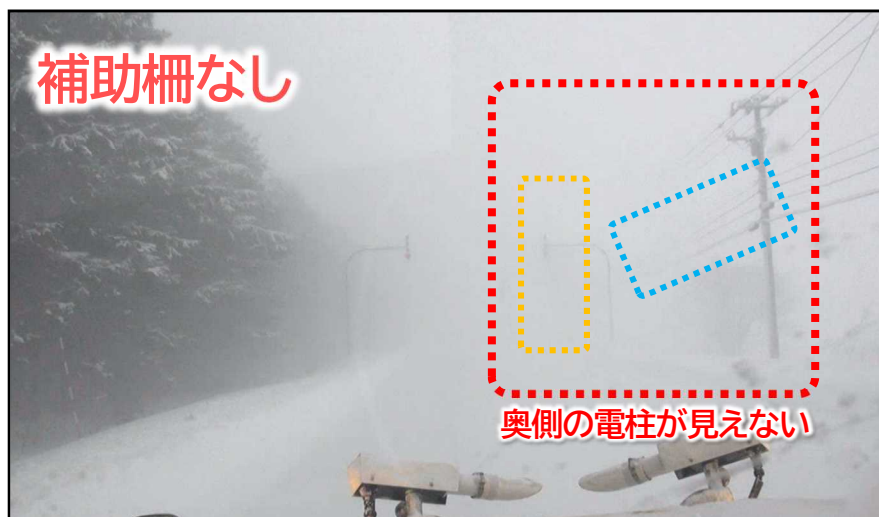


図-208 【補助柵なし】 視界不良が発生し、電柱 2 本が視認できない状況



図-210 雪が付着した定点カメラ

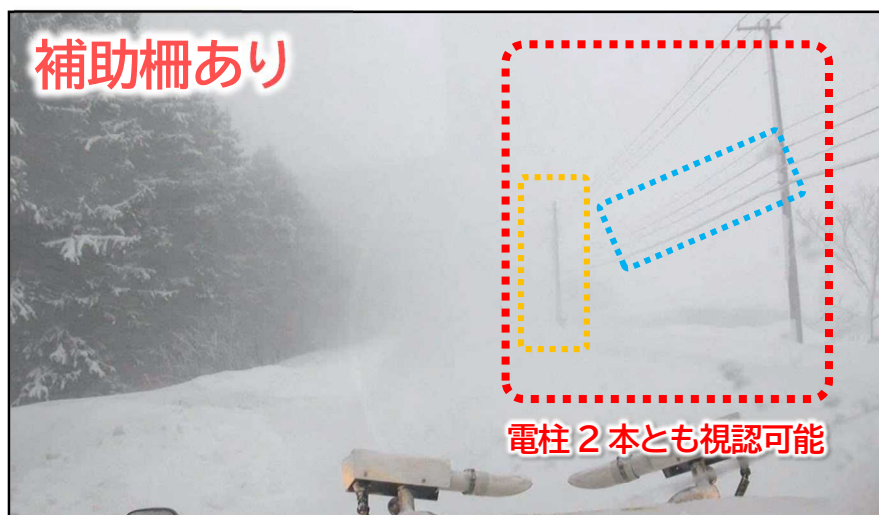


図-209 【補助柵あり】 視界不良発生時、電柱 2 本が視認可能な状況



図-211 VSP 植樹活動の状況



図-212 VSP 活動後の記念撮影

本調査だけではなく、吹雪発生時には、カメラに雪が付着してしまい、映像が取得できない場合がある。これらの着雪対策は、今後の課題としたい。

3. 4. 11 国道上の視界不良軽減効果まとめ

本章では、下枝に枯れ上がりが生じている雄信内防雪林の機能向上対策として、留萌開発建設部羽幌道路事務所にご協力いただき、既設道路防雪林に、新たに補助柵を設置し、以下の知見を得た。

- ✓ 下枝の枯れ上がりは、高さ 6.5m から 7.0m まで進行し、下部は葉がなく枝のみの疎な状態であり、風が吹き抜けていることが考えられる。
- ✓ 防風ネット柵の設置後は、風速が弱まり、防雪林内に雪粒子が補足・堆積されていた。
- ✓ 写真判別の結果、道路上の視界不良を低減できる可能性が高い。

写真判別という定性的な検討結果ではあるが、国道の維持管理実務上のリクワイヤメントは、「視界不良を軽減する効果を発揮し、道路利用者の安全性向上を図ること」であり、国道での視界不良軽減などの防雪性能を把握し、改善することに意義がある。

3. 4. 12 維持管理における創意工夫の好事例

本章で報告した雄信内防雪林では、国土交通省が進める「ボランティア・サポート・プログラム(VSP)⁶³⁾」の実施団体「てしお森遊会⁶⁴⁾」が、平成 16 年度から現在に至るまで、防雪林帯への植樹や、除草などを定期的に行っている⁶⁵⁾ (図-211、212)。

長年にわたる活動が、道路の清掃、美化などに顕著な功績があったと認められ、留萌開発建設部より「平成 28 年度 道路功労者」として表彰⁶⁶⁾されていることから、それら活動の重要性が伺える。

これら、地域の方々の多大なご尽力により、防雪林として適切に育成・成長し続けていられるのである。

本件に限らず、公共事業とは、地域の方々に認知・受容されて、初めて地域貢献に資する付加価値を持ち、本来の機能を発揮できると同時に、地域の魅力度向上にも寄与するものである。

よって、本章で報告した雄信内防雪林は、多くの地域の方々のご尽力により「防雪・防風効果を最大限に発揮させる」という機能面の充実だけではなく、地域の豊かさの醸成に結びついていることが期待される。

今後も、地域の方々と良好な関係性を保ちつつ、官民一体となった活動や、地道な取り組みが、末永く継続し、やがて大きな実を結ぶことを切に願う。

これら多くの方々のご尽力に重ねてお礼申し上げる次第であり、この場を借りて深く感謝の意を表す。

4. 技術資料のとりまとめ

これまでに得られた調査結果や技術的知見をとりまとめ、「下枝の枯れ上がりが見られる防雪林の管理手法に関する技術資料(案)」を作成した。下枝の枯れ上がりが見られる防雪林の管理手法に関して必要な技術的事項についてとりまとめたものである。その章立てを以下に示す。

本テーマで得られた調査結果や技術的知見は、技術資料(案)に提言されているため、詳細は技術資料(案)を参照されたい。

ただし、下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響や、補助工法の効果は、研究途上の事項もある。本技術資料(案)は、今後も新しい技術開発や知見が蓄積された時点で更新・改訂を行い、内容の充実に努めていく所存である。

「下枝の枯れ上がりが見られる防雪林の管理手法に関する技術資料(案)」

第1章 総則

- 第1節 目的
- 第2節 適用範囲
- 第3節 本技術資料案の構成

第2章 防雪林の防雪機能の評価

- 第1節 下枝の枯れ上がりと防雪機能
 - 第1項 防雪林の成長と防雪機能
 - 第2項 下枝の枯れ上がりと機能低下
 - 第3項 機能低下が懸念される防雪林
- 第2節 防雪林の機能評価
 - 第1項 評価の概要
 - 第2項 空隙率の調査

- 第3項 防雪林風上の風速の推定
- 第4項 林縁、林内の現地樹木調査
- 第5項 防雪機能の評価

第3章 管理手法の検討

- 第1節 検討の概要
- 第2節 管理方法の選定
- 第3節 補助柵設置による機能低下対策
- 第4節 間引きによる機能低下抑制

第4章 参考文献一覧

第5章 参考資料

- 第1節 検討の実施例：雄信内防雪林
 - 第1項 防雪林の機能評価
 - 第2項 管理手法の選定
 - 第3項 補助柵併設による機能低下対策
- 第2節 検討の実施例：山軽防雪林(L側)
 - 第1項 防雪林の機能評価
 - 第2項 管理手法の選定
 - 第3項 補助柵併設による機能低下対策
- 第3節 検討の実施例：山軽防雪林(R側)
 - 第1項 防雪林の機能評価
 - 第2項 管理手法の選定
 - 第3項 補助柵併設による機能低下対策
- 第4節 補助柵の併設例
 - 第1項 概要
 - 第2項 設計条件
 - 第3項 設置箇所
 - 第4項 補助柵の高さ
 - 第5項 構造計算条件
- 第5節 雄信内防雪林併設事例

謝辞

本調査、報告を行うにあたり、国土交通省 北海道開発局 釧路開発建設部 根室道路事務所、網走開発建設部 網走道路事務所、留萌開発建設部 羽幌道路事務所、稚内開発建設部 浜頓別道路事務所において、本研究に対してご理解いただき、試験フィールドの提供、技術的指導、資料提供、観測機材設置、補助柵設置、冬期の現場除雪作業など、多大なるご協力をいただいた。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-防雪林編-（平成23年版）、2011
- 2) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：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

5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

- る研究、平成 26 年度研究報告書、2015
- 3) 伊東靖彦：防雪林の課題について－雪氷研究大会（2009・札幌）の企画セッションにおける討議を基に－、日本雪工学会誌、26、pp.9-15、2010
 - 4) 竹内政夫、石本敬志、野原他喜男：吹雪量と飛雪量垂直分布、雪氷、37(3)、pp.114-121、1975
 - 5) 北海道開発局開発土木研究所・(財)北海道森林保全協会：防雪林育成・管理業務報告書、1996
 - 6) 北海道開発局開発土木研究所・(財)北海道森林保全協会：防雪林育成・管理手法検討業務報告書、1995
 - 7) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：防雪林の機能向上に関する研究、平成 27 年度成果報告書、2017
 - 8) 松沢勝、加治屋安彦、竹内政夫：風速と降雪強度から吹雪時の視程を推定する手法について、北海道開発土木研究所月報、593、pp.20-27、2002
 - 9) 武知洋太、松澤勝、中村浩：吹雪時に人間が感じる視程と視程計や吹雪計による計測値との関係、北海道の雪氷、No.28、pp.17-20、2009
 - 10) 大浦浩文、小林大二、小林俊一：地ふぶき時における風速の鉛直分布特性、低温科学（物理篇）、25、pp.73-88、1967
 - 11) 松澤勝：降雪を伴う吹雪時の吹雪量の推定手法に関する研究、雪氷、78(5)、pp.255-268、2016
 - 12) 牧雅康、高橋厚裕、岡野哲郎、小熊宏之：可搬型 3 次元レーザーキャナデータと放射伝達モデルを用いた林床光環境の推定手法の開発、日本リモートセンシング学会誌、32(2)、pp.77-87、2012
 - 13) P.F. Grant & W.G. Nickling: Direct field measurement of wind drag on vegetation for application to windbreak design and modelling, *Land Degradation & Development*, 9, pp.57-66, 1998
 - 14) (公社)日本雪氷学会編：新版雪氷辞典、古今書院、p.307、2014
 - 15) K. Nishimura, C. Yokoyama, Y. Ito, M. Nemoto, F. Naaim-Bouvet, H. Bellot, and K. Fujita: Snow particle speeds in drifting snow, *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 119, pp. 9901-9913, 2014
 - 16) 櫻井俊光、伊東靖彦、渡邊崇史、松澤勝：防雪林における風速の変化に関する研究、寒地技術論文・報告集、32、pp.102-104、2016
 - 17) Sakurai, T., Y. Ito, T. Watanabe, M. Matsuzawa: Preliminary investigations on the effects of branch withering and the thinning of trees for living snow fences in Northern Hokkaido, Japan, *96th Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., pp.1-11, 2017
 - 18) Sakurai T, Y. Ito, T. Watanabe, M. Matsuzawa, Study of wind speed changes with differences in wind direction through the living snow fence, in *The 32nd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans*, A-7, pp.1-4, 2017
 - 19) 櫻井俊光、伊東靖彦、武知洋太、松澤勝：斜風時における道路防雪林の枯れ上がりの影響に関する研究、寒地技術論文・報告集、33、pp.125-130、2017
 - 20) Sakurai, T., Y. Ito, M. Matsuzawa, Effect of branch withering in living snow fences on blowing-snow mitigation in Northern Hokkaido, Japan, in *The 1st International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation*, 44, pp.1-10, 2018
 - 21) Sakurai *et al.*: The wind speed and mass flux of snow on both sides of a LSF to investigate the wind and blowing-snow mitigation effects of a LSF, *98th Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., pp.1-10, 2019.
 - 22) 櫻井俊光、伊東靖彦、高橋渉、武知洋太、松澤勝、高橋丞二：下枝の枯れ上がりが見られる道路防雪林の防風・防雪効果について、寒地土木研究所月報、793、pp.11-20、2019
 - 23) 櫻井俊光、伊東靖彦、武知洋太、高橋渉、松澤勝、高橋丞二：空隙率を指標とした防雪林の防風・防雪効果把握の可能性、雪工学会論文集、技術論文、36(1)、pp.14-22、2020
 - 24) 竹内政夫：大気中の雪粒子と視程、地学雑誌、100(2)、264-272、1991
 - 25) 社団法人日本鋼構造物協会（編）：構造物の耐風工学、東京電機大学出版局、ISBN:4501615702、p.616、1997
 - 26) 松澤勝、上田真代、渡邊崇史、住田則行、山崎貴志、石川真大：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、平成 23 年度成果報告書、2013
 - 27) 山田毅、伊東靖彦、加治屋安彦、小杉健二、根本征樹：風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係について、北海道の雪氷、25、pp.85-88、2006
 - 28) 山田毅、伊東靖彦、加治屋安彦、松澤勝、小杉健二、根本征樹、望月重人：風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係について、北海道の雪氷、26、pp.21-24、2007
 - 29) 山崎貴志、住田則行、幸田勝：新型路側設置型防雪柵の開発について－風洞実験による防雪機能調査－、第 28 回ゆきみらい研究発表会論文集、804B、40、pp.1-4、2016
 - 30) 風洞実験法ガイドライン研究委員会（編）：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック、財団法人日本建築センター、ISBN:978-4-88910-148-5、2008

5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

- 31) 老川進、苫米地司、石原孟：建物近傍の雪吹きだまりの風洞総時速に関する考察、日本雪工学会誌、23、pp.13-32、2007
- 32) 山崎貴志、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
- 33) Tabler, R.D.: *Design guidelines for the control of blowing and drifting snow*, Strategic highway research program, Report SHRP-H-381, 1994
- 34) Heavey, J.P., and T.A. Volk: Living snow fences show potential for large storage capacity and reduced drift length shortly after planting, *Agroforestry Systems*, 88(5), pp.803-814, 2014
- 35) Shaw, D.L., Living snow fences: Protection that just keeps growing, *Colorado Interagency Living Snow Fence Program, Colorado State University, Fort Collins, CO.*, 1991
- 36) Lynd, L.R. et al.: How biotech can transform biofuels, *Nature Biotechnology*, 26(2), pp.169-172, 2008
- 37) United States Department of Agriculture, Economic Research Service, Online URL: <http://www.ers.usda.gov/topics/crops/corn.aspx>, (2018 年 12 月確認) .
- 38) 長坂晶子ら：北海道産木本 17 種を用いた道路法面の植栽試験-樹種特性からみた植栽の確実性-、北海道林業試験場研究報告、第 45 号、pp.9-20、2008
- 39) 櫻井俊光、伊東靖彦、松澤勝：米国における植物を利用した吹雪対策について、寒地技術論文・報告集、32、pp.91-96、2016
- 40) 櫻井俊光、松澤勝、伊東靖彦：道路防雪林の付加価値と将来展望—米国の Living Snow Fence に関する調査研究から—、日本道路会議、p.1092、2017
- 41) 櫻井俊光、伊東靖彦、松澤勝：多様な植生を活用した吹雪対策とその付加価値、北海道開発技術研究論文集、p.61、2018
- 42) 鳥田宏行：防雪林の評価についての最近の研究、日本雪工学会誌、25、pp.3-20、2009
- 43) 中井裕一郎、坂本知己、寺嶋智巳、北村兼三：ドドマツ林における降雪の遮断蒸発量 (II) —熱収支モデルによる推定と水収支的観測との比較—、日林誌、78(1)、pp.15-19、1996
- 44) Sakurai *et al.*: A Case Study of Snowdrift Trapping Efficiency of a Living Snow Fence - Determined From a Transverse Measurement of Snow Depth Profiles, *99th Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., pp.1-11, 2020
- 45) 財団法人日本道路交通情報センター：令和元年度通行止め区間および期間調書(雪害)、2020
- 46) 大宮哲、原田裕介、高橋丞二：降雪強度把握のための雨量計の捕捉損失補正式の改良検討、寒地土木研究所月報、No.810、pp.31-34、2020
- 47) 日本雪氷学会：新版雪氷辞典、古今書院、p.190、2014
- 48) 竹内政夫、石本敬志、野原他喜男、福沢義文：降雪時の高い地吹雪の発生限界風速、昭和 61 年度日本雪氷学会予稿集、日本雪氷学会、p.252、1986
- 49) 大宮哲、武知洋太、高橋丞二、松澤勝：降雪時における吹雪量推定式の提案～降雪強度と風速による吹雪量の算定、雪氷研究大会(2018 札幌)講演要旨集、p.273、2018
- 50) 大浦浩文、小林大二、小林俊一：地ふぶき時における風速の鉛直分布特性、低温科学(物理篇)、25、pp.73-88、1967
- 51) 小中隆範、伊藤靖彦、松澤勝：道路構造の防雪効果を評価する数値シミュレーションモデルの検討、第 59 回(平成 27 年度)北海道開発技術研究発表会、2016
- 52) 武知洋太、松澤勝、中村浩、金子学、川中敏朗：冬期道路の吹雪時における視程障害度の評価に関する研究、寒地土木研究所月報、No.706、pp.20-29、2012.
- 53) 伊東靖彦：道路防雪林の視程障害緩和効果について、寒地土木研究所月報、No.664、pp.34-39、2008.
- 54) 江川倫法：一般国道 40 号 更喜苫内防雪、北の交差点 Vol24 AUTUMN-WINTER、pp.32-33、2009.
- 55) 大地誠、鈴木正行、酒井亮司：地域との協働による道路防雪林の維持管理検討について～一般国道 40 号天塩町雄信内防雪林での取り組み、第 54 回(平成 22 年度)北海道開発技術研究発表会、連 15、2010.
- 56) 阿部正明、檜澤肇、北村有樹士、斎藤新一郎：成林しつつある道路防雪林の維持管理手法について～一般国道 40 号天塩町雄信内防雪林の事例より、北海道の雪氷、No29、2010.
- 57) 伊東靖彦、櫻井俊光、松澤勝：下枝の枯れ上がりが見られる防雪林における吹雪量と風速の変化、雪氷研究大会、2017.
- 58) 武知洋太、松澤勝、中村浩、金子学、川中敏朗：冬期道路の視界と路面状況による走行速度への影響について、寒地土木研究所月報、No.691、pp.2-12、2010.
- 59) 寒地土木研究所：北の道ナビ・冬道運転ガイド「降雪・視界・路面の基礎知識」Web サイト、2007.
http://northern-road.jp/navi/info/guide1_2.html#b(令和 4 年 5 月閲覧)
- 60) 公益社団法人土木学会鋼構造委員会：鋼構造物設計指針 PARTA、第 6 章 荷重の組合せと安全率、p.51、1987.
- 61) 武知洋太、松澤勝、伊東靖彦、國分徹哉：吹雪危険度の

評価手法に関する研究—道路構造や沿道環境が冬期道路の吹雪視程障害発生に及ぼす影響、寒地土木研究所月報、No.767、pp.11-19、2017.

- 62) 鳥田宏行：樹林帯で吹雪を防ぐ(I)、—防雪林の吹雪の捕捉過程とその効果—、北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場、光珠内季報、No.117、1999.
- 63) 北海道開発局建設部：ボランティア・サポート・プログラム Web サイト
https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_iji/ud49g7000000ene2.html (令和4年5月閲覧)
- 64) 渡邊博司：“森林とふれあい・まなび・つくる” てしお森遊会の活動について、林野庁 北海道森林管理局 留萌北部森林管理署 Web サイト
https://www.rinya.maff.go.jp/hokkaido/kikaku/pdf/24happyou_s_26.pdf (令和4年5月閲覧)
- 65) 北海道開発局留萌開発建設部：地域や企業の皆さんによる国道の美化活動を行います Web サイト、2015.
<https://www.hkd.mlit.go.jp/rm/release/f6h4sv0000000x74-att/f6h4sv0000000xnn.pdf> (令和4年5月閲覧)
- 66) 北海道開発局留萌開発建設部：平成28年度「道路功労者表彰」伝達式を開催～てしお森遊会が受賞 Web サイト、2016.
<https://www.hkd.mlit.go.jp/rm/release/f6h4sv0000000go5-att/dfvnau0000000h8u.pdf> (令和4年5月閲覧)