

道路防雪林の成長モデルの作成

Development of a Growth model for living snow fences

原田 裕介¹, 吉井 昭博¹, 松下 拓樹¹

Yusuke Harada¹, Akihiro Yoshii¹, Hiroki Matsushita¹

Corresponding author: harada-y@ceri.go.jp (Y. Harada)

¹ 土木研究所 寒地土木研究所

¹ Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI

Field data were collected from *Picea glehnii* (Sakhalin spruce) living snow fences in Hokkaido, measured in 1994, 2015, and 2024 (planted between 1984–1994). The analysis showed that tree height followed a Gompertz curve relative to tree age, while diameter at breast height (DBH) and height to crown base (HCB) exhibited linear or power-law correlations relative to tree height ($p < 0.001$). Using these results, a growth prediction model considering competition between adjacent trees was developed. Furthermore, we presented distributions of plant area density ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$) at 50 tree age in the cases of without or with thinning at 30 tree age.

1. はじめに

道路防雪林（以下、防雪林）は、道路の風上側または両側に林帯を造成し、風速を減じさせ吹雪による吹きだまりや視程障害を緩和する防雪施設である¹⁾。北海道の国道では、防雪林は1976年より造成され、2022年時点の総延長は約140kmである。現在の道路防雪林の設計では、年間最大の吹きだまり量に応じて標準林の林帯幅が設定されているが、要求される防雪性能は定量化されていない。そのため、性能規定による計画設計や育成管理が困難となっている。その対応策として、樹木の属性（年数に応じた樹高、下枝の枯れ上がり高さ、枝張りの時間変化など）に応じた「①防雪林の成長モデル」と、防雪林の成長と防雪機能の関係を定量的かつ時系列的に推定する「②性能を評価する手法」の構築が必要である。本論文では①、次稿²⁾では②について述べる。

林業における人工林施業では、樹木の成長がモデル化され、林齢（植栽からの年数）と樹高・胸高直径に基づいて、必要な管理作業（主に間伐）が明示されている^{例え3)}。一方で、防雪林は強風や風雪を伴う場所に、土木工事で施工された人工地盤に造成されることから⁴⁾、一般的な林業とは生育環境が異なる。これまで、防雪林を構成する樹木の成長について、年輪解析と枝階解析に基づく分析³⁾、生育状況調査^{5,6)}などが実施されたが、防雪林帯の成長特性の推定には至っていない。

本論文では、寒地土木研究所で過去3回実施した、北海道内のアカエゾマツで構成された道路防

雪林（植栽1984～1994年、列間0.7～3.6m、苗間0.8～6.6m）を対象に、1994年（Ⅰ期）、2014～15（Ⅱ期）、2024年（Ⅲ期）に実施した樹木調査結果^{5,6)}を解析した（図1、表1）。また、解析結果を用いて、隣接木との被圧を考慮した道路防雪林の成長予測モデルを作成し、防雪林の間引き実施の有無による植物面積密度の分布を示した。

2. 解析の概要

2. 1 対象樹木の選定

本論文では、標準的なアカエゾマツ樹木で構成される防雪林の成長予測モデルを作成することを目的とする。解析に際し、Ⅱ期およびⅢ期調査で枯死、または防雪林の長期管理計画モデル¹⁾の保育期と育成期との境界値付近である、林齢（新植年からの年数）15年で樹高5m以下の樹木は、造成における環境ストレスの影響を過剰に受けているものとして除外した。これらの影響は、別途検討するものとする。また、防雪林の縁に位置する樹木（以下、林縁木）と、防雪林の内部に位

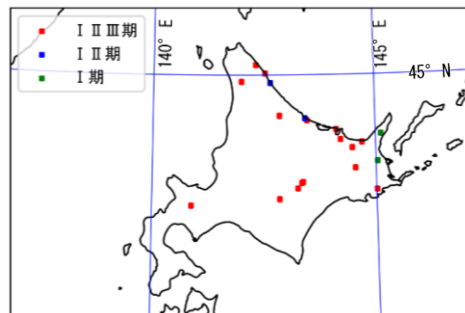


図1 各期における調査対象の防雪林^{5,6)}

表1 各期における調査樹木と計測項目^{5),6)}

計測期	防雪林調査地点・箇所、樹木本数	計測項目
I 期 1994 年	20 地点 39 箇所 195 本 (1 箇所あたり 5 本) ※裾枝打ち：なし	樹高・胸高直径・ 生枝長さ (平均)・生枝高さ (中心)
II 期 2014-15 年	18 地点 35 箇所 132 本 ^{注1), 注2)} (1 箇所あたり 2~4 本) ※裾枝打ち：11 地点 20 箇所 79 本	樹高・胸高直径・生枝および枯枝高さ (4 方向および中心)・生枝および枯枝長さ (4 方向)・隣接木との樹冠閉塞の有無 ^{注4)}
III 期 2024 年	15 地点 26 箇所 96 本 ^{注3)} (1 箇所あたり 2~4 本) ※裾枝打ち：11 地点 21 箇所 74 本	樹高・胸高直径・生枝高さ (4 方向および 中心)・枯枝高さ (中心)・生枝長さ (4 方 向)・隣接木との樹冠閉塞の有無 ^{注4)}

注1) I 期で調査した防雪林のうち、詳細な場所を特定できなかった箇所や工事中の箇所などを除く。

注2) II 期の調査樹木の特定では、図面からI期の計測箇所を推定し、その付近の樹木を抽出。

注3) III 期で調査した防雪林の樹木を特定のうへ、人為的伐採による欠損を除く。

注4) 中心は幹、4 方向は道路に対して縦断起終点および横断 R・L 側方向とし、生枝・枯枝の高さ・長さは各方向の最長とする。

置する樹木 (以下、林内木) に分類し、経年による周辺環境の変化 (人為的伐採や倒木等) によって、林内木または林内木の区別が不明瞭となった樹木は除外した。これらを表1の調査地点・箇所、樹木本数に適用し、II 期は 16 地点 28 箇所 86 本 (林縁木 30 本、林内木 56 本；隣接木との樹冠閉塞有) を、III 期は 13 地点 20 箇所 59 本 (林縁木 23 本、林内木 36 本；隣接木との樹冠閉塞有) を解析の対象とした。また、I 期および新植年は、II 期と同様の 16 地点 28 箇所 86 本 (林縁木 30 本、林内木 56 本；隣接木との樹冠閉塞無) を対象とした。

2. 2 解析方針

本論文では、防雪林の年成長の度合いをモデル化するために、樹木の各種計測データ (樹高・胸高直径・生枝高さ・枝張りおよび生枝長さ・枯枝高さ) と樹齢との関係を、全体・林内木・林縁木に分類のうへ解析した (図2)。ここでは、道路縦断起終点または横断 R・L 側方向の生枝長さに胸高直径を加算した値を、道路縦断または横断方向の枝張りとした。また、新植年の樹木は該当箇所において概ね同様とする。なお、I 期とII 期の調査樹木は異なっていた可能性も示唆されるが⁵⁾、表1の注2) により本解析では①新植年・I 期・II 期、および②新植年・I 期・II 期・III 期のデータには連続性があるものとして扱った。

3. 解析結果

新植年および I・II・III 期調査データを用いて、以下に各要素の解析結果を示す。関係式について、

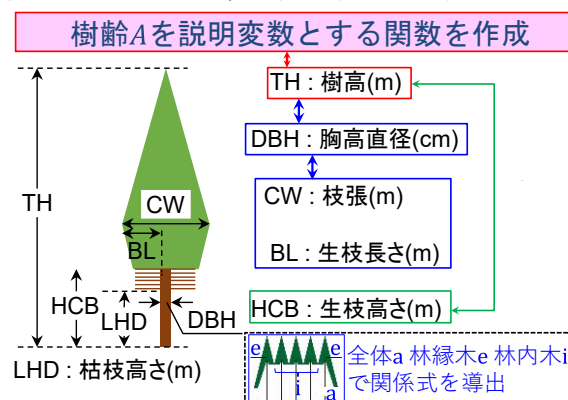


図2 解析方針

添え字のaは全体、eは林縁木、iは林内木、e1は林縁木の縁側、e2は林縁木の内側、beは樹冠閉塞前、afは樹冠閉塞後を示す。また、関係式の当てはまりの度合いを表す決定係数 R^2 、線形の場合は Pearson の積率相関係数、非線形の場合は Spearman の順位相関係数を用いた無相関検定によるp値を付記した。

3. 1 樹高と樹齢との関係

新植年および I・II・III 期調査データを用いて、樹高 $TH(m)$ と樹齢 $A(年)$ との関係を示す。ここでは、北海道の主要造林樹種であるトドマツは Gompertz 曲線近似が適合しやすい⁷⁾ことを参考に、寒冷地でみられる初期の成長抑制があることを鑑み、 TH_a と A_a との関係を式(1)で表した。

$$TH_a = 16.379 \exp(-4.663 \exp(-0.060 A_a)) \quad (8)$$

$$R^2 = 0.918 (p < 0.001)$$

Gompertz 曲線近似による TH_e と A_e との関係では $R^2 = 0.913 (p < 0.001)$ 、 TH_i と A_i との関係では $R^2 = 0.922 (p < 0.001)$ が得られ、概ね同様であることが示された。

3. 2 樹高と胸高直径との関係

樹高 TH (m) と胸高直径 DBH (cm) には, Chapman-Richards 式^{例え 8)}, 対数近似曲線による関係が報告されている^{例え 9)}. これらは, 胸高直径 60cm を超過する大径木を含む. 本計測データによる胸高直径 DBH は 1.3~31.2cm であることから, 樹高 TH の増加率が減少して一定値に収束に向かう前の段階と判断される. よって, 線形近似を採用し, TH_a と DBH_a との関係を表した.

$$TH_a = 0.534 DBH_a + 0.869, R^2 = 0.824 (p < 0.001) \quad (2)$$

線形近似による TH_e と DBH_e との関係では $R^2 = 0.822 (p < 0.001)$, TH_i と DBH_i との関係では $R^2 = 0.825 (p < 0.001)$ が得られ, 概ね同様であることが示された.

3. 3 枝張・生枝長さと胸高直径との関係

常緑針葉樹の枝張 CW (m) と胸高直径 DBH (cm) には, 線形近似による関係が報告されている^{e.g. 10)}. ここでは, 樹冠閉塞が確認された II・III 期を対象として, 全体データの縦断と横断方向における CW_{aaf} と DBH_{aaf} との線形近似関係を求め, 概ね同様の傾向が得られた ($R^2 = 0.35, 0.34 (p < 0.001)$). つぎに, 横断かつ II・III 期調査データを用いて, 樹冠閉塞後の林内木 CW_{iaf} と DBH_{iaf} との関係を求めた (式(3)). 加えて, 横断データの林縁木 CW_e を対象に, I・II・III 期調査データを用いて, 縁側の生枝長さ BL_{e1} (閉塞無), および内側の生枝長さ BL_{e2} (II・III 期は閉塞有) と DBH_e との関係を求めた (式(4)).

ここでは, DBH_{iaf} と DBH_a を同値とみなす. そのうえで, 式(1),(2),(3)より説明変数を樹齢 A (年) とした閉塞後の枝張 CW_{af} を式(5)に示す. 同じく, 式(1),(2),(4)より説明変数を樹齢 A (年) とした閉塞無しの枝張 CW_{be} を式(6)に, 林縁木縁側の生枝長さ BL_{e1} を式(7)にそれぞれ示す.

$$CW_{iaf} = 0.103 DBH_{iaf} + 1.104, R^2 = 0.343 (p < 0.001) \quad (3)$$

$$BL_{e1} = 0.092 DBH_{e1} + 0.357, R^2 = 0.705 (p < 0.001) \quad (4)$$

$$CW_{af} = 3.161 \exp(-4.663 \exp(-0.060A_a)) + 0.936 \quad (5)$$

$$CW_{be} = 5.651 \exp(-4.663 \exp(-0.060A_a)) + 0.415 \quad (6)$$

$$BL_{e1} = 2.817 \exp(-4.663 \exp(-0.060A_a)) + 0.207 \quad (7)$$

3. 4 生枝高さと樹高との関係

生枝高さ (枯れ上がり高さ) HCB (m) と樹高 TH (cm) との関係について, ここでは横断かつ I・II・III 期調査データを用いて, 林内木と林縁木に分類のうえ, 累乗⁵⁾および線形近似における決定係数を比較した. その結果, 樹冠が閉塞している林内木 HCB_i と林縁木の内側 HCB_{e2} は累乗近似,

樹冠が閉塞していない林縁木の外側 HCB_{e1} は線形近似の決定係数が高かった (式(8)~(10)).

ここでは, 式(8)と式(9)は概ね同様の推移を示すと扱う. そのうえで, 式(1),(8)より説明変数を樹齢 A (年) とした林内木・林縁木内側の生枝高さ $HCB_{i \text{ or } e2}$ を式(11)に示す. 同じく, 式(1),(10)より説明変数を樹齢 A (年) とした林縁木縁側の生枝長さ HCB_{e1} を式(12)にそれぞれ示す.

$$HCB_i = 0.139 TH_i^{1.527}, R^2 = 0.755 (p < 0.001) \quad (8)$$

$$HCB_{e2} = 0.169 TH_{e2}^{1.445}, R^2 = 0.810 (p < 0.001) \quad (9)$$

$$HCB_{e1} = 0.137 TH_{e1} + 0.318, R^2 = 0.450 (p < 0.001) \quad (10)$$

$$HCB_{i \text{ or } e2} = 9.936 \exp(-7.120 \exp(-0.060A_a)) \quad (11)$$

$$HCB_{e1} = 2.244 \exp(-4.663 \exp(-0.060A_a)) + 0.318 \quad (12)$$

3. 5 枯枝高さと樹齢との関係

II・III 期調査データ (樹齢 29 年以上) を用いて, 枯枝高さ LHD (m) と樹齢 A (年) との関係について調べた. その結果, 年数によらず裾枝打ち無では, 林縁木 LHD_e が 1.01m, 林内木 LHD_i が 0.99m であった. 同じく裾枝打ち有では, 林縁木 LHD_e が 1.99m, 林内木 LHD_i が 2.03m であった¹⁾.

4. 防雪林の成長モデル

3 章で得られた防雪林の樹齢を説明変数とした樹木の属性 (樹高・枝張り・枯れ上がり高さなど) との関係 (式(1)・(5)・(6)・(7)・(11)・(12)), および樹木の特性を踏まえた全体およびモデルの条件 (下記参照) を設定のうえ, 防雪林の成長モデル (標準的なアカエゾマツを対象, 道路横断方向, 樹齢 55 年まで) の概要を図 3 に示す.

【全体条件】

- ①樹冠が閉塞しない場合は, 紡錘型 (長卵状円錐形) の樹形となる¹¹⁾.
- ②樹冠が閉塞 (隣接木の枝が接触) した場合は, 日照不足や被圧により落葉する.
- ③樹冠の内部は, 日照不足により落葉する.

【モデルの条件 (仮説)】

- ・樹冠内部の落葉は, 中心から左右方向の生枝長さの 1/2 と, 生枝高さ $HCB_{i \text{ or } e2}$ と結ぶ三角形の範囲とする.
- ・樹齢 $A > 16$ (年) で生枝高さ $HCB_{i \text{ or } e2} > HCB_{e1}$ となり, 樹冠内部の落葉が発生する. また, 紡錘型の樹形を呈する (樹冠に変曲点が発生する).
- ・林縁木の縁側の生枝高さは, 図 3 に示す条件とする.
- ・林縁木の内側および林内における生枝高さは, 樹木形状より幾何学的に算出する. 閉塞前は林

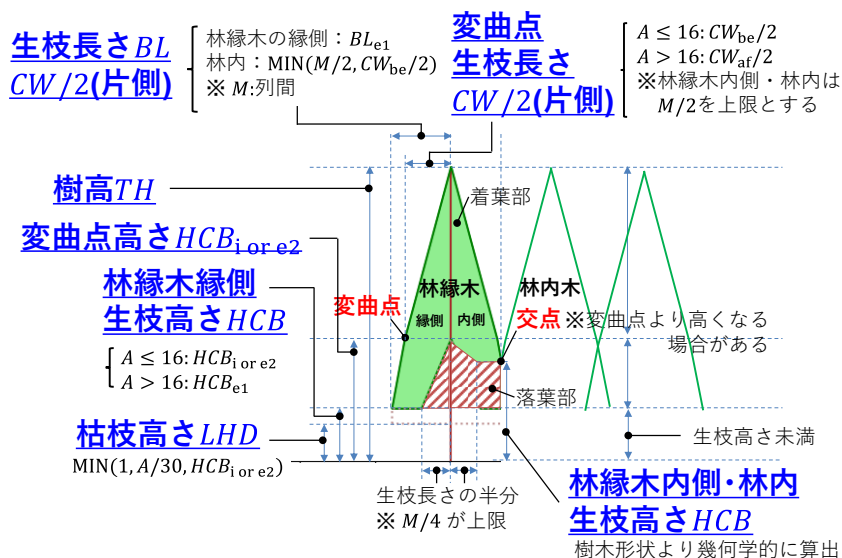


図3 防雪林の成長モデルの概要

縁木の縁側と同一とし、閉塞後は隣接木との交点とする。林縁木の縁側の生枝高さと交点との間の高さは落葉する。また、生枝長さは列間 $M/2$ を上限とする。

- ・枯枝高さ $LHD(m)$ は、樹齢 30 年で 1m に達する (線形補間: $A/30$)。ただし、 $A < 15$ の場合は生枝高さ $HCB_{i \text{ or } e2}$ より小さいので、枯枝は発生しない。

つぎに、道路吹雪対策マニュアルで示された標準林 20m タイプ (横断方向に列間 3m, 5 列の基本林) を対象に、防雪林の成長モデルと着葉部・落葉部・生枝高さ未満の各部位における代表的な植物面積密度 ($m^2 m^{-3}$, 以下 PAD)¹²⁾ を用いて、間引きの有無における①樹齢 30 年, ②樹齢 50 年: 間引き無, ③樹齢 50 年: 30 年で林内 2 列の間引き有の防雪林の形状と PAD 分布を図 4 に示した。図 4 の結果を樹齢 ($1 \leq A \leq 55$) ごとに示すことで、間引きの有無による防雪林の形状や PAD 分布の変化の度合いが、時系列的に推定可能となる。

【謝辞】

成長モデルの作成に際し、孫田敏氏に助言をいただいた。記して御礼申し上げる。

【参考文献】

- 1) (独) 土木研究所寒地土木研究所 (2011): 道路吹雪対策マニュアル (平成 23 年改訂版) 第 2 編 防雪林編, 2-1-1-2-参考-5.
- 2) 原田裕介他 (2026): 道路防雪林の性能評価に向けた試み, 北海道の雪氷, **45**, 63-66.
- 3) (地独) 北海道立総合研究機構 (2021): アカエゾマツ人工林収穫予測ソフト Ver1.20 使用説明書, 11pp.

- 4) 上田真代他

(2012): 道路防雪林における
植栽樹木

- 5) 伊東靖彦他 (2017): 道路防雪林におけるアカエゾマツの樹高および枝張の推移. 寒地土木研究所月報, **773**, 12-20.
- 6) 大宮哲他 (2024): アカエゾマツ防雪林を対象とした樹木の成長モデル作成検討. 寒地土木研究所月報, **863**, 10-16.
- 7) 林業試験場北海道支場 (1965): 林地土壌生産力研究成果報告書, 32-35.
- 8) 小林勇太他 (2021): 日本の主要樹種 75 種の樹高と胸高直径の関係. 日本森林学会誌, **103**(2), 168-171.
- 9) 瀧誠志郎 (2013): 重量値による収量-密度図の構築, 岩手大学大学院連合農学研究科学位論文, 56-57.
- 10) Sporek, M. et al. (2025): Verification of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Crown Length Model. *Appl. Sci.*, **15**(6), 3124.
- 11) 斎藤新一郎 (1983): エゾマツ・トドマツの樹形と描き方. 北海道立総合研究機構林業試験場光珠内季報, **56**, 10-12.
- 12) 原田裕介他 (2025): 道路防雪林における植物面積密度の設定. 寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集, **41**, I-029, 1-6.

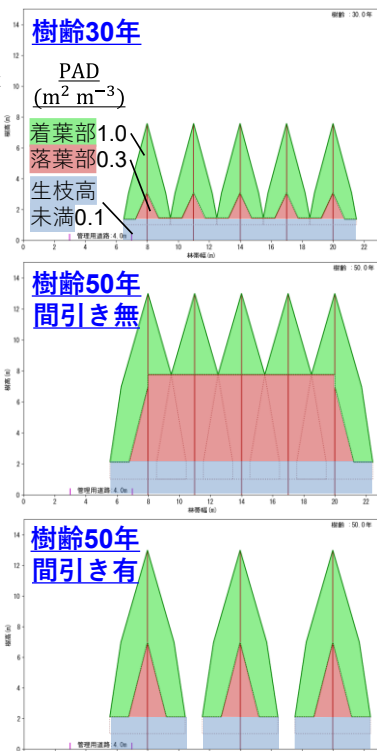


図4 防雪林の成長モデルによる
形状と各部位の PAD 分布