日林誌（2022）104: 154–161

論　　文

若齢グイマツ海岸林に対する初回列状間伐の効果の検証

真坂一彦[*,1]・齋藤健人[1,2]・鳥田宏行[3]・岩崎健太[4]・脇田陽一[4]

高密度植栽された海岸林の密度管理では列状間伐が提案されているが，海岸林に対する列状間伐の効果を検証した研究はない。列状間伐の効果を検証するため，2014年5月，北海道浜中町のグイマツ海岸林において1伐2残（33%）の列状間伐ならびに比較のための千鳥状間伐を実施した。併せて無間伐区を設定した。間伐直前と2017年10月，2020年8月に調査木の生存確認と胸高直径，樹高の測定を行った。間伐後の林冠閉鎖は2015年6月と2020年8月に全天空写真を撮影して評価した。また，両間伐区の林冠ギャップ内に風速計を設置して風速を測定した。直径成長の促進という意味での間伐効果は認められたが，列状間伐と千鳥状間伐で違いは認められなかった。列状間伐区では間伐後6年で林冠閉鎖しなかったが，間伐効果は3年以上は認められなかった。また，列状間伐区と千鳥状間伐区の林冠上では最大風速が10 m/sを超える日もあったが林冠ギャップ内で強風は観測されなかった。これらの結果から，長期の間伐効果を期待する場合は約3割以上に間伐率を上げる必要があることが示唆された。また，強風被害はほとんど心配ないことが示唆された。
キーワード：密度管理，林冠ギャップ，死亡率，間伐効果，強風被害

Kazuhiko Masaka,[*,1] Kento Saito,[1,2] Hiroyuki Torita,[3] Kenta Iwasaki,[4] Yoichi Wakita[4] (2022) Examination for the Effect of the First Line-thinning on a Young Coastal *Larix gmelinii* var. *japonica* Pilger Stand. J Jpn For Soc 104: 154–161 Although line-thinning is recommended for coastal forest, no study has examined the effects of line-thinning on a densely planted coastal forest. To examine the effect of the first line-thinning, we established line- and zigzag-thinning plots and un-thinned plots in a coastal *Larix gmelinii* var. *japonica* stand in Hokkaido, in 2014. During line-thinning, one line was thinned and two lines were preserved. We measured the diameter at breast height and tree height of living trees in the plots in 2014 just before thinning, and in 2017 and 2020. Hemispherical photographs were taken in 2015 and 2020 to evaluate canopy gap closure. Wind speed was measured in the gap in two thinned plots and under the canopy in the control plot. The thinning effects of line- and zigzag-thinning were the same for improved diameter growth. Although the canopy remained open in the line-thinning plots after 6 years, a thinning effect was observed only for the first 3 years. No strong winds were observed in the gaps in either line- or zigzag-thinning plots. These results imply that more trees should be removed if we expect a persistent thinning effect. However, there is no concern about wind damage when thinning a young coastal stand.
Key words: density control, canopy gap, mortality, thinning effect, wind damage

I. はじめに

海岸林では，林冠を早くから鬱閉させ飛砂防備等の機能を発揮させるために，一般に10,000本/haの密植が行われる（坂本 2012，2018）。最近では5,000本/ha植栽も見られるようになったが，経済林と比べて高密度であることに変わりない。過密化した林分は雪害等の気象害の影響を受けやすく（金子ら 2000），海岸林を維持していく上での問題として指摘されている（梅津 2016）。そのため適切な本数調整が必要とされる。

海岸林の間伐方法として列状間伐などが提案されている（林野庁治山課 2019；新潟県農林水産部治山課 2020；坂本 2007，2012，2021；森林総合研究所 2011；静岡県交通基盤部森林局森林保全課 2013）。列状間伐のメリットとして，経済林の場合は選木の省力化や，かかり木になりにくい，残存木の損傷を軽減する，集材・造材が容易である等が挙げられている（林野庁整備課 2019）。また，直径成長の促進などの効果も検証されている（三村ら 2019；澤田 2021）。しかし，海岸林の列状間伐については森林総合研究所（2011）が間伐時の作業効率が高いことをあげているくらいで，上記資料中に残存木の成長促進など間伐効果についての具体的な記述はない。

一方，列状間伐のデメリットとしては，経済林の場合，間伐後に形質不良木・劣勢木が残ることや，伐採列に面しない部分での効果が薄い，伐採列が広い場合に地表侵食が起こる，伐採列方向への樹冠の偏りが生じることで風害や冠雪害の影響を受けやすくなる等が挙げられている（林野庁整備課 2019；島崎 1986）。近藤（2006）は，列状間伐によって連続したギャップが発生することで強風が林内を通過する上，林内に劣勢木が残ることで気象害が増加したと報告している。鈴木（2017）による風洞実験では，列状間伐において伐採列に対する風の入射角が斜めになることで風害のリスクが高まることや，伐採列を増やすと風害リスクが高まることが示唆されている。しかし海岸林については，森林総合研究所（2011）は，伐採列を風向と直交させることで，伐採に伴う残存木への風当たりの増加を他の

*連絡先著者（Corresponding author）E-mail: masaka@iwate-u.ac.jp https://orcid.org/0000-0003-0513-6292
[1] 岩手大学農学部　〒020–8550　岩手県盛岡市上田3–18–8（Faculty of Agriculture, Iwate University, 3–18–8 Ueda, Morioka, Iwate 020–8550, Japan）
[2] 東京農工大学大学院農学研究院　〒183–8538　東京都府中市晴見町3–8–1（Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3–8–1 Harumi, Fuchu, Tokyo 183–8538, Japan）
[3] 北海道立総合研究機構林業試験場　〒079–0198　北海道美唄市光珠内町東山（Hokkaido Research Organization, Forestry Research Institute, Higashiyama, Higashiyama, Koshunai, Bibai, Hokkaido 079–0198, Japan）
[4] 北海道立総合研究機構林業試験場道東支場　〒081–0038　北海道上川郡新得町西5線39–1（Doto Station, Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, 39–1 Nishi 5, Shintoku, Kamikawa, Hokkaido 081–0038, Japan）
（2021年9月3日受付；2022年3月24日受理）

©2022 一般社団法人日本森林学会：この著作はクリエイティブ・コモンズのライセンス CC BY-NC-ND（引用を表示し，改変せず，非営利目的に限定）の条件の元で再配布・二次利用が可能なオープンアクセスです。https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja

伐採方法に比べて抑えることが期待できると説明しているものの，風害リスクを含め，具体的な根拠を示していない。なお，愛媛県農林水産部林業政策課（1987）では，海岸林の間伐作業において風穴を開けないことを重視し，間伐方法としての列状間伐は明記していない。

以上のように，海岸林に対する列状間伐についてメリットとして挙げられているのは間伐作業の効率だけで，間伐効果に基づいたものではない。上記資料中において，高密度な海岸林の列状間伐では 1 伐 3 残ないし 1 伐 2 残が提案されているが，これを本数伐採率に換算するとそれぞれ 25，33％の間伐である。10,000 本/ha や 5,000/ha という高密度植栽であるにもかかわらず，植栽密度が 3,000 本/ha 以下の経済林と同様な間伐率で間伐効果が期待できるのか疑問がある（真坂 2017；鈴木 1987）。これまで報告されている海岸林での間伐試験では，全層間伐ではあるが，25～40％の本数間伐率では直径成長や形状比に対する間伐効果はきわめて低く，かつ効果の持続期間も短かい一方，50～60％の本数間伐率で明瞭な間伐効果が認められている（Masaka *et al*. 2013；真坂ら 2015，2019；大槻ら 1997）。つまり，提案されている列状間伐の間伐率では間伐効果が期待できない範囲に含まれることになる。そのため，列状間伐による間伐効果や風害リスクについての検証が必要とされる。

日本の海岸林の多くは飛砂防備を目的としてクロマツ *Pinus thunbergii* Parl. が植えられてきたが，北海道東部や北部の海岸には防霧を目的としてグイマツ *Larix gmelinii* var. *japonica* Pilger が植えられてきた（真坂ら 2019）。グイマツ海岸林も列状間伐が行われている。本研究では，このグイマツ海岸林を対象に，列状間伐による直径成長への間伐効果の検証とともに間伐によって生じる林冠ギャップからの林内への風の吹込み状況についても調査を行い，列状間伐の効果と問題点を検討した。

II. 調査地と調査方法

1. 調査地

本研究の調査地は，北海道浜中町散布（鯨浜）の海岸段丘上に防霧を目的として造成された道有林 47 林班 55 小班のグイマツ海岸林である（N42° 59′ 39.8″，E144° 59′ 54.6″，標高 75 m；図–1）。この海岸林は 1997 年に 5,000 本/ha で造成された。造成地は，高さ 1.8 m の防風柵によって囲まれた長辺 13.25 m，短辺 11.50 m の複数の区画によって構成されている。長辺はおおむね東西方向に向いている。グイマツは各区画に列間 2 m，苗間 1 m の 6 列で植栽されている。列は長辺に沿い，一列の植栽本数は 14 本である。調査はこのうちの 26 区画を対象に行った。この 26 区画に隣接する区画にはカシワ *Quercus dentata* Thunb. が植栽されている。

調査地から最寄りの気象観測地点は浜中町榊町で，気象庁ホームページ（https://www.data.jma.go.jp）によると，1981 年から 2010 年までの 30 年間の年平均降水量は 1,010.7 mm，月平均気温の最高値は 8 月の 17.1℃，最低値は 2 月の－5.9℃である。積雪深が観測されている最寄りの気象観測地点は厚岸町太田で，月ごとの最深積雪（1986～2010 年）は 3 月の 47 cm である。また，釧路地方気象台によると，過去 30 年間（1981～2010 年）の月平均霧日数は 7 月の 17 日が最多で，年平均霧日数は 101.4 日となっている。

2. 調査方法

1）間伐処理

調査地は 2014 年 5 月 20～21 日（17 年生時）に設定した。調査区内のすべてのグイマツについて胸高位置にナンバーテープを付けて個体を特定し，地上から 1.3 m の高さの位置で胸高直径（DBH）を測定した。樹高は 2～6 区，14～17 区の植栽列のうち 3 列目と 4 列目を測定した。8 区にトドマツ *Abies sachalinensis*（Fr. Schmidt）Masters が 1 個体，16 区にカシワが 2 個体あったが，少数であることと，本研究の対象がグイマツであることから解析の対象から除外した。調査地設定時の区画当たり平均本数密度±標準偏差 SD は 3,445.4±297.7 本/ha，全調査木の平均 DBH±SD は 9.9±2.5 cm，樹高を測定した調査木の平均樹高±SD は 4.8±0.6 m，平均形状比（＝樹高/DBH×100）±SD は 49.9±10.1 だった。また，全区画において枯死や倒木等による林冠ギャップは見当たらず，林冠は閉鎖している状態だった。今回が初回の本数調整になる間伐は 2014 年 9 月 13 日以降の 9 月中に行い，同時に地上から高さ 2 m の位置まで枝打ちを行った。枝打ちとはいえ，ほとんどが枯れ枝である。間伐処理は区画を反復とし，列状間伐区，千鳥状間伐区，無間伐区を設定した。各調査区の内訳は，列状間伐区が 8 区画，千鳥状間伐区と無間伐区がそれぞれ 9 区画である。1 伐 2 残の列状間伐を行った列状間伐区は，6 列のうち 2 列目と 5 列目を伐採した（図–1）。列状間伐との比較のために行った千鳥状間伐は全層間伐に近い間伐方法といえ，区画内で間伐木の位置が偏ることなく残存木の四方に空間ができるように互い違いに伐採するように心がけた。しかしながら，伐採時には植栽密度から 30％程度減少しており，劣勢木を優先的に伐採したため完全な千鳥状ではない。列状間伐区と千鳥状間伐区の平均本数間伐率±SD はそれぞれ 33.5±2.8，41.8±2.6％だった（表–1）。間伐処理別の直径階別出現頻度分布は図–2 に示したとおりである。

2）直径成長量，樹高成長量，および形状比の変化

間伐効果の検証で対象とすべきは，間伐効果の大きさと持続期間である（真坂ら 2015）。間伐効果の持続期間を検討するため，2017 年 10 月 19 日および 2020 年 8 月 18～19 日に DBH ならびに樹高の再測定を行った。2017 年の調査では，1～12 区および 25，26 区において生死を判別して DBH を再測定し，2014～2017 年を前半，2018～2020 年を後半というように二期に分け，直径成長量と樹高成長量，そして形状比についてそれぞれの期間において処理間で比較した。2020 年の調査では全区画において生死を判別して生立木について DBH と樹高を再測定し，直径成長量と樹高成長量，そして形状比について処理間で比較した。このとき複幹の場合は $2\times(\Sigma[DBH_i/2]^2)^{0.5}$ によって各幹の胸高断面積合計（BA）を合算し（DBH_i: i 番目の幹の DBH），1 本の木の DBH とした。一般に，形状比はサイズ依存的

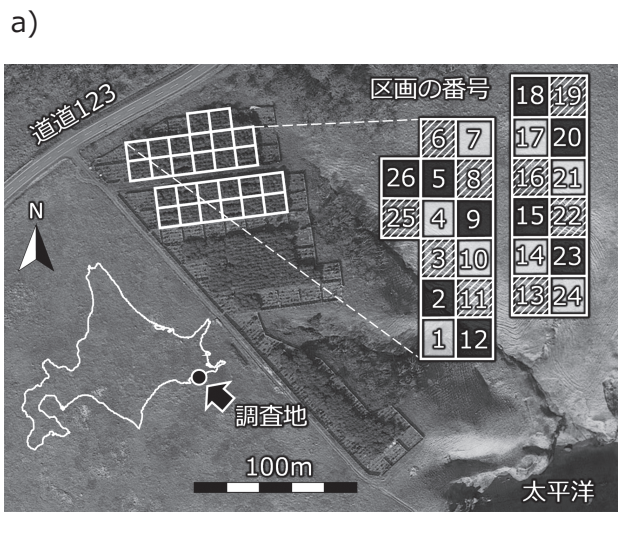


図-1. 調査地の位置と間伐処理方法

a）調査地の位置。無間伐区は黒塗り区画；列状間伐区は白塗り区画；千鳥状間伐区は斜線入り区画。Google Earth より作成。b）間伐処理方法。○は保残木，×は間伐木，●は全天空写真の撮影地点。無間伐区における撮影地点は千鳥状間伐区と同じ。

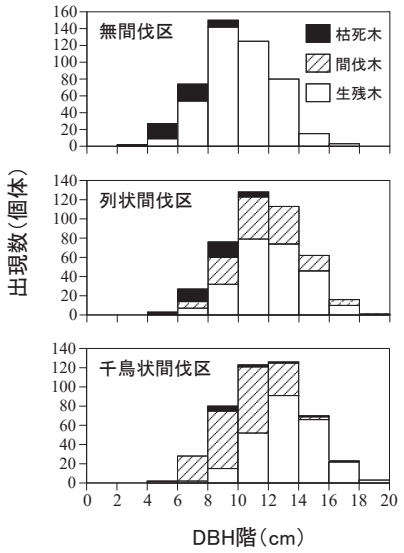


図-2. 処理区別の DBH 階別出現頻度分布

各処理で全データをプールしている。枯死木および生残木は，それぞれ 2020 年 8 月までに枯死した個体および生残していた個体。間伐木は今回の調査での間伐対象木。

表-1. 調査地概況

処理区	本数密度（個体 /ha）[a]			本数間伐率[a]（%）	死亡率[c]（%）	DBH[d]（cm）			樹高[d, e]（m）		形状比[d, e]	
	間伐前[b]	間伐後[b]	2020 年			間伐前[c]	間伐後[c]	2020 年	2014 年	2020 年	2014 年	2020 年
無間伐区	3485.6 ± 428.0	–	3142.8 ± 261.4	–	9.7 ± 4.2	9.9 ± 2.4	–	12.2 ± 3.0	4.9 ± 0.5	6.2 ± 0.5	51.0 ± 8.8	55.4 ± 11.5
列状間伐区	3478.3 ± 178.1	2313.4 ± 178.1	2042.7 ± 208.7	33.5 ± 2.8	10.9 ± 6.2	9.7 ± 2.5	10.0 ± 2.4	12.5 ± 3.2	4.7 ± 0.6	6.0 ± 0.6	48.2 ± 10.4	41.9 ± 9.7
千鳥状間伐区	3376.2 ± 248.0	1961.5 ± 212.7	1910.5 ± 263.5	41.8 ± 2.6	2.7 ± 2.5	10.0 ± 2.6	11.2 ± 2.4	13.9 ± 3.3	4.7 ± 0.6	6.1 ± 0.8	50.2 ± 11.3	49.0 ± 10.6

[a]区画当たりの平均値 ± 標準偏差。[b]2014 年の値。[c]2014 年～2020 年間の死亡率（期間中の死亡個体数/2014 年の個体数×100）。[d]各処理で全測定個体の平均値と標準偏差を算出。[e]2014 年および 2020 年の測定個体数 n はそれぞれ無間伐区では n = 55 と 51，列状間伐区では n = 46 と 39，千鳥状間伐区では n = 53 と 32。

であり，DBH とのあいだに反比例的な関係が認められているため（Masaka *et al*. 2013；竹内ら 1997），調査地設定時ならびに 2020 年 8 月の調査時における形状比-DBH 関係について処理間で比較した。

3）林冠の開空度の推定

処理間で林冠開空度（以下，開空度とする）の違いを評価するため，間伐後の 2015 年 6 月 2 日，および 2020 年 8 月 19 日に全天空写真の撮影を行った。最初の撮影が 2015 年 6 月になったのは，間伐時に枝打ちを予定していたため間伐直前の撮影はできず，また間伐直後については 9 月下旬に撮影を予定したが，ほとんど落葉していて撮影に不適だったためである。ただし，間伐が行われたのが 9 月 13 日以降の 9 月中であることから，それ以降，当年の樹冠の側方成長がないと考えられる。それゆえ本研究では，2015 年 6 月の撮影を間伐直後と想定して扱うことにする。なお，調査地におけるグイマツの開葉時期は 5 月中下旬である（筆者らの観察による）。撮影は 1～6 区，19～24 区の計 12 区画で行った。撮影地点は，列状間伐区については間伐列（2 列目と 5 列目）において，千鳥状間伐区と無間伐区では 2 列目と 3 列目の中間，および 4 列目と 5 列目の中間である（図-1）。各区画の短辺の柵から 3.6 m 離れた地点にプラスチック杭を置いて起点とし，長辺方向に 1.5 m 間隔で 5 地点，各区画 2 列の計 120 地点で撮影した。撮影高は 1.3 m である。カメラは Nikon Coolpix 5400，魚眼レンズは Nikon FC-E9 を使用した。開空度の解析には Gap Light Analyzer（Forest Ecology and Management Group, Simon Fraser University；GLA）を使用した。写真を Working Image によって白黒画像に変更する際は Pixel Value をデフォルト値の 128 としたが，林冠ギャップ縁の枝葉が逆光によって白とびした場合は元の画像を参照しながら適宜 Pixel Value の値を変更した。また，反射光によって白とびした幹等の部分は適宜黒く塗りつぶした。なお，2015 年については 5 区の 3 地点と 20 区の 10 地点で，また 2021 年については 23 区の 5 地点で写真に不具合があったため解析から除外した（いずれも無間伐区）。

4）林冠ギャップ内の風速

間伐によって出現した林冠ギャップへの風の吹きこみを把握するため，列状間伐区（4 区）および千鳥状間伐区（3 区）のギャップ内に高さ 6 m の単管を直立させてワイヤーによって 3 方向から牽引固定し，単管の高さ 3 m と 6 m の位置に三杯式風速計（S-WSA-M003；Onset Computer Corporation）を設置し，2014 年 11 月 20 日から観測を開始した。観測値はロガーによって記録した（HOBO Micro Station Data Logger [H21-002]；Onset Computer Corporation）。3 m の高さは林冠層にあり，6 m の高さは林冠の上に出ている（風速計設置時の平均樹高は 4.7～4.9 m；表-1）。無間伐区（5 区）には 2015 年 4 月 20 日，林冠下に高さ 3 m の単管を建てて，高さ 3 m 位置に三杯式風速計を設置し，ロガーによって観測値を記録した（同上機種）。いずれの処理区も観測間隔は 10 分であり，1 日ごとの最大風速を評価の対

象とした。観測は2016年5月11日まで行った。なお，千鳥状間伐区のギャップ内において2015年3月12日15:50に53.13 m/s，同年12月26日1:40と2016年1月6日10:10に63.17 m/sを観測したが，林冠上空で同程度の値が観測されていないことに加え，その前後の数時間に観測値が常に同じ値を示すなど不自然な状況であった（2015年3月12日7:50～15:40に0.25 m/s，12月25日20:00～26日1:30に2.01 m/s，26日8:50 ～ 31日23:50に1.51 m/s，31日23:50～2016年1月6日10:00に0.25 m/s）。それゆえ電気的な異常と考えられたためこれらの異常区間を図から除外した。

3. 解析方法

処理間の直径成長量と樹高成長量，そして形状比を比較するため，一般化線形混合モデル（Generalized Linear Mixed Model；GLMM）を用いて分析を行った。直径成長量と樹高成長量については，それぞれ二時点間のDBHの差および樹高の差をそれぞれ幹の直径成長量および樹高成長量とし，形状比についてはそれぞれ調査地設定時と2020年8月の調査時の形状比を目的変数とした。調査期間中の死亡個体については解析から除外した。説明変数には固定効果としてサイズ（DBHまたは樹高），処理方法，およびそれらの交互作用の7通りの組み合わせを設定した。固定効果にサイズを含めたのは，成長量の個体サイズ依存性を考慮したためである。このとき，固定効果のDBHは，直径成長量を評価するモデルについては期首DBHとし，形状比についてはそれぞれの調査時点でのDBHとした。また，形状比−DBH関係の比較にあたっては，形状比とDBHを対数変換した後に解析に供した。反復は，切片および傾きに対するランダム効果とした。

GLAによって推定される開空度は百分率で示されるため，比率に換算した後，ベータ回帰モデルによって解析を行った（cf. Cribari-Neto and Zeileis 2021）。ベータ回帰モデルでは，間伐直後の2015年，および2020年開空度を目的変数とし，説明変数に処理方法を想定した。切片は除外した。

処理による直径成長量，形状比および開空度の違いについては，3種類の処理方法から次のように4通りの組み合わせを作って比較した。すなわち，「無間伐区」，「列状間伐区」，「千鳥状間伐区」をそれぞれC，L，Zとすると，「C|L|Z」，「C＝L|Z」，「C＝Z|L」，「C|Z＝L」の4通りである。ここで，“|”は処理区の間に違いがある状態とし，“＝”は同等であることを表す。このとき，C＝L＝Zの組み合わせは，固定効果に処理方法項と交互作用項がないサイズ項のみのモデルになる。処理方法項のみのモデルについてはランダム傾き項を除外した。また，nullモデルは切片のみのモデルになるため，一般化線形モデル（Generalized Linear Model；GLM）を適用した。モデルの説明能力の評価は赤池の情報量基準（Akaike's Information Criteria；AIC）によって行い，AICが最小のモデルを説明能力が高いベスト・モデルとして選択した（Burnham 2002）。

使用したソフトはR ver. 4.0.3（R Core Team 2020）で，GLMMの解析には*lme4*パッケージの*lmer*関数を，またGLMの解析では*glm*関数を用いた。ベータ回帰モデルによる解析では，*betareg*パッケージの*betareg*関数を用いた。リンク関数はlogitとした。

III. 結　　果

1. 林分概況の変化

間伐後2020年までの平均死亡率は，列状間伐区と無間伐区では10％前後となり，千鳥状間伐区の約4倍になった（表-1）。間伐直前の平均DBHは3処理区ともに10 cm前後と大きな差がなかったが，2020年の調査時には，千鳥状間伐区が他の2処理区より1 cm以上大きくなった（表-1）。ただし，千鳥状間伐区では小径木も多く伐採したことが平均値の増大に貢献している可能性は注意が必要である。樹高を測定した全個体の平均樹高±SDは6.1±0.6 mとなり，調査地設定から平均で約1.3 m増加した。

2. 直径成長量，樹高成長量，および形状比の変化

間伐処理方法の違いによる直径成長量の違いを評価するためにGLMMで解析を行った結果，2014～2020年の全期間では，処理方法項が「C|Z＝L」の組み合わせで，交互作用項を除いたモデルのAICが最小となった（J-Stage電子付録付表-1）。これはすなわち，無間伐区と間伐処理を施した区画との間に切片の違いがあるものの列状間伐と千鳥状間伐のあいだに差は無いとする場合である。しかし全期間を前半と後半に分けて解析を行った結果，前半では処理方法項が「C|Z＝L」の組み合わせで交互作用項がない場合が（J-Stage電子付録付表-2），後半では期首DBHのみのモデルのAICが最小となった（J-Stage電子付録付表-3）。なお，それぞれのベスト・モデルの係数推定値を表-2

表-2. GLMMによる調査期間中のグイマツ個体の直径成長量を説明するベストモデル

固定効果	*Coeff.*	SE	*t*値
2014～2020年			
切片	−1.393	0.157	−8.880
期首DBH[a]	0.320	0.014	22.462
処理方法（L, Z）[b]	0.415	0.066	6.328
2014～2017年（前半）			
切片	−0.886	0.146	−6.071
期首DBH[a]	0.195	0.013	15.171
処理方法（L, Z）[b]	0.221	0.062	3.591
2018～2020年（後半）			
切片	−0.590	0.068	−8.681
期首DBH[c]	0.127	0.006	19.934

Coeff.，推定回帰係数；SE，標準誤差；L，列状間伐区；Z，千鳥状間伐区。ランダム効果の分散±標準偏差は2014～2020年が切片＝0.136±0.369，傾き＝0.001±0.033，残差＝0.742±0.862，2014～2017年（前期）が切片＝0.096±0.310，傾き＝0.0006±0.025，残差＝0.316±0.562。[a]期首DBHは2014年のDBH，[b]無間伐区はリファレンス・カテゴリ（＝0），[c]期首DBHは2017年のDBH。

表-3. GLMMによる調査期間中のグイマツ個体の樹高成長量を説明するベスト・モデル

固定効果	*Coeff.*	SE	*t*値
切片	1.271	0.060	21.232
処理方法（L）[a]	−0.765	−0.103	−7.408

Coeff.，推定回帰係数；SE，標準誤差；L，列状間伐区。ランダム効果の分散±標準偏差は切片＝0.0013±0.036，残差＝0.279±0.5281。[a]無間伐区と千鳥状間伐区はリファレンス・カテゴリ（＝0）。

に示す。

樹高成長量については，処理方法項が「C＝Z|L」の組み合わせで期首樹高項および交互作用項を除いたモデルのAICが最小となった（J-Stage電子付録付表-4）。ベスト・モデルの係数推定値は列状間伐区がマイナスの値となったことから（表-3），列状間伐区の樹高成長は他の二つの処理区での樹高成長より期首樹高に関わらず全体的に低い傾向があることが示唆される。

調査地設定時の形状比-DBH関係は処理方法による違いは認められなかった（J-Stage電子付録付表-5，図-3）。2020年8月時の形状比-DBH関係は，処理方法項が「C＝Z|L」の組み合わせにおいて交互作用項がないモデルのAICが最小となった（J-Stage電子付録付表-6）。ベスト・モデルに交互作用項がないため，列状間伐区における形状比は無間伐区および千鳥状間伐区の形状比より一律に低い傾向があることが示唆される（表-4，図-3）。

3. 開空度

2015年および2020年の処理方法ごとの開空度を図-4に示す。間伐翌年の2015年の平均開空度は，列状間伐区では16.6～29.8%，千鳥状間伐区では14.3～15.8%，無間伐区では13.8～14.6%だった。間伐5年後の2020年には，無間伐区では12.4～13.9%と大きな変化は見られず，列状間伐区では無間伐区より大きいものの特に1区と24区で大きく減少した（それぞれ24.1%が14.8%，29.8%が18.2%）。千鳥状間伐区では13.1～14.3%となり，無間伐区とほぼ同程度になった。間伐処理方法の違いが開空度に及ぼす影響についてベータ回帰モデルを用いて解析した結果，2015年の開空度は「C＝Z|L」の組み合わせのモデルのAICが最小となった（J-Stage電子付録付表-7）。同様に，2020年の開空度についても「C＝Z|L」の組み合わせのモデルのAICが最小となった（J-Stage電子付録付表-7）。なお，ベスト・モデルの係数推定値を表-5に示す。この結果から，千鳥状間伐区の林冠の開空度が，林冠が閉鎖している無間伐区と同等になった一方，列状間伐区では他の2

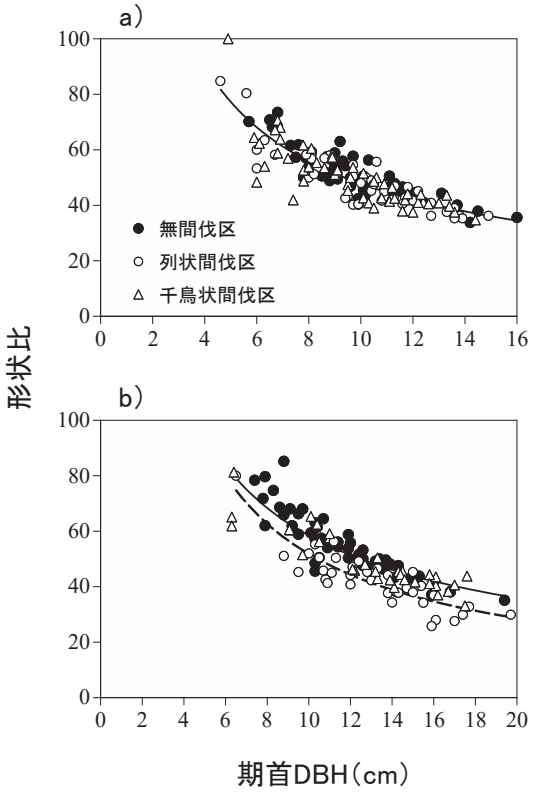


図-3. 形状比-DBH関係の推移。

a）調査地設定時。回帰式：ln 形状比＝5.435 – 0.681 ln DBH，b）2020年8月時。回帰式：列状間伐区の回帰式（破線），ln 形状比＝5.716 – 0.779 ln DBH; 無間伐区・千鳥状間伐区の回帰式（実線），ln 形状比＝5.869 – 0.779 ln DBH。回帰式の詳細については表-4参照。

表-4. GLMMによる調査地設定時および2020年8月時における形状比-DBH関係を説明するベスト・モデル

固定効果	*Coeff.*	*SE*	*t*値
調査地設定時			
切片	5.435	0.079	69.120
ln DBH	−0.681	0.033	−20.930
2020年8月			
切片	5.869	0.139	42.158
ln DBH	−0.779	0.054	−14.550
処理方法（L）[a]	−0.152	0.021	−7.345

Coeff.，推定回帰係数；SE，標準誤差；L，列状間伐区。ランダム効果の分散±標準偏差は調査地設定時が切片＝0.014±0.117，傾き0.001±0.038，残差0.008±0.090，2020年8月時が切片＝0.093±0.306，傾き＝0.013±0.114，残差＝0.009±0.095。[a]無間伐区と千鳥状間伐区はリファレンス・カテゴリ（＝0）。

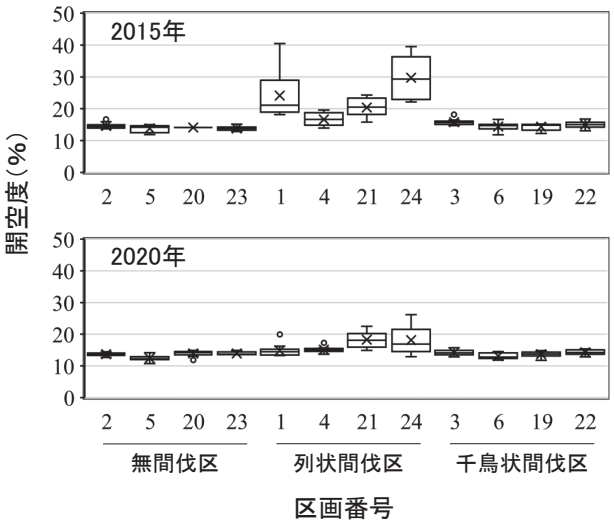


図-4. 各処理区における開空度の箱ひげ図。

箱の下端は第1四分位数，上端は第3四分位数，真ん中の線は中央値，ひげより外側にある点は特異ポイント，×記号は平均値を表す。ひげは四分位範囲の1.5倍の範囲を表す。

表-5. ベータ回帰モデルによる処理区間の開空度を比較したベストモデル

説明変数	*Coeff.*	SE	*z*値
2015年			
C，Z	−1.742	0.035	−49.64
L	−1.254	0.038	−32.77
ϕ係数[a]	99.82	13.95	7.158
2020年			
C，Z	−1.840	0.018	−103.85
L	−1.623	0.022	−72.18
ϕ係数[a]	357.3	47.1	7.586

Coeff.，推定回帰係数；SE，標準誤差；C，無間伐区；L，列状間伐区；Z，千鳥状間伐区。[a]適合度モデル。

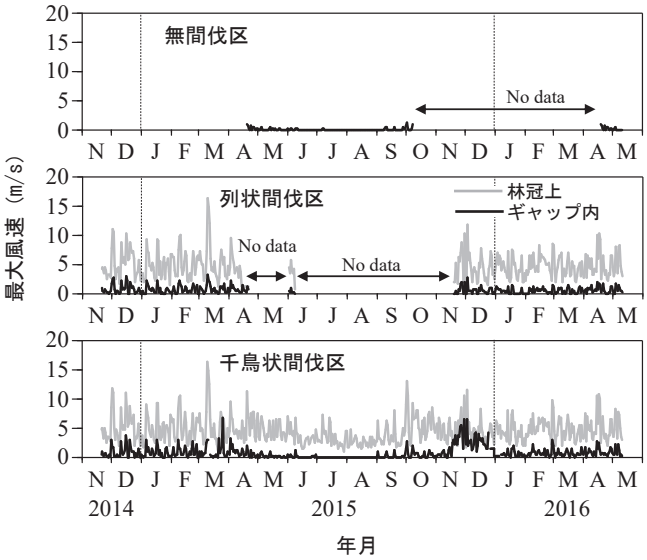


図-5.　林冠上とギャップ内における1日当たりの最大風速の観測値（m/s；2014年11月20日～2016年5月11日）

No dataは観測できなかった期間。

処理と異なる結果になったことから，十分に閉鎖していないと考えられた。

4. 林冠ギャップへの風の吹き込み状況

列状間伐区のギャップ内での風速の観測は，ロガー内の結露などによって長期間欠測が生じたものの，観測できた期間を千鳥状間伐区と比較すると1 m/s以内の差しかなく，林冠上空では風速10 m/sを超える機会が多かったが，ギャップ内では5 m/sを超えることはほとんどなかった（図-5）。つまり，ギャップ内への風の吹き込みはほとんど認められなかった。なお，欠測の期間は季節風が弱い夏季であり（図-5中の千鳥状間伐区を参照），また観測期間中に根釧地域において風害をもたらした気象災害の報告はない（J-Stage電子付録付表-8参照）。無間伐区の林冠下はロガー内の結露などによって2015年10月18日までの観測になったが，ほとんど無風といえる状況だった。

IV. 考　　察

北海道浜中町に造成されたグイマツ海岸林において，16年生時に初回間伐として1伐2残の列状間伐，そして比較のための千鳥状間伐を施し，間伐後6年間の直径成長量を無間伐区の個体の直径成長量と比較したところ，どちらの間伐処理も同等な成長促進効果が認められた（表-2）。ただし，全調査期間を前半と後半に分けて直径成長量を解析した結果，前半は間伐処理が直径成長量に寄与していたものの，後半では間伐処理が寄与していないという結果になった（表-2）。この結果は，列状間伐であれ千鳥状間伐であれ，今回の間伐方法では，間伐効果の持続期間が3年を超えることはないことを意味している。より長期の間伐効果の持続のためには1伐2残以上の強度の間伐が必要だったといえる。列状間伐の効果に関する研究事例がないため，定性間伐等，他の間伐方法と比較するため間伐率を指標とすると，計算上，1伐2残の本数・材積伐採率は33.3%になる。たとえば，羽幌町天売のグイマツ林（10,000本/ha植栽，間伐時15年生）に対する初回間伐として，本数間伐率で25%間伐区（間伐前5,275本/ha，間伐後3,950本/ha）と50%間伐区（間伐前4,750本/ha，間伐後2,500本/ha）を設定した試験では，25%間伐区においては3年程度しか間伐効果は持続せず，50%間伐区で間伐効果が9年間持続した（真坂ら 2019；cf. 眞坂ら 2009）。釧路市音別のカシワ林（10,000本/ha植栽，間伐時16年生）に30%間伐区（間伐前5,200 本/ha，間伐後3,631本/ha）と60%間伐区（間伐前5,077本/ha，間伐後2,267本/ha）を設定した試験でも同様な結果が得られている（真坂ら 2015）。4年間の調査ではあるが，いわき市にある12年生のクロマツ林に対する間伐試験を行った宗方ら（1991）は，残存密度が低いほど肥大成長量が高くなるが，胸高断面積合計の増加量と併せて考えると5,000本/ha（50%の間伐強度に相当）が適切な密度と報告している。なお，小田（1984）は，あまり強度な間伐（本数間伐率41～59%；25年生のクロマツ林）をすると残存木の枯死率が高くなるという報告（畠山・加賀谷 1974）をもとに注意を喚起しているが，畠山・加賀谷（1974）に示されているサイズ分布の推移を見ると，上層高が10 m程度の林内において主に樹高6 m以下の下層木が枯れたようである。しかも本数間伐率が1.6%の試験区でも多くの枯死木が発生しており，枯死木の発生を強度間伐の影響に帰する議論には無理がある。いずれにせよ，もし強度の間伐が躊躇されて弱度間伐を行うのであれば間伐周期を1～2年程度と短くするほかない（cf. 小谷 2009）。しかし，間伐周期を短く出来なかったために海岸林が全国的に過密化した（鈴木 1987）ことは念頭に置いて間伐強度を検討する必要がある。

列状間伐と千鳥状間伐で直径成長量に大きな違いが認められなかったとはいえ，調査期間中の死亡率は列状間伐の方が約4倍多いという結果になった（表-1）。死亡率が高かった原因は，列状間伐区の残存列に劣勢木が残り，それらが枯死したためである（図-2）。現在，北海道では道東地方のカラマツ林を中心にカラマツヤツバキクイムシ *Ips subelongatus* Motschulskyによる甚大な被害が発生している（徳田・小野寺 2018）。グイマツ類もこのキクイムシの主要な寄主植物であるため（EPPO Global Database），間伐後の林内に枯死木が多数出現するような列状間伐は推奨できない。それでも列状間伐を行うのであれば，残存列の劣勢木も併せて伐採すべきだろう。

形状比については，列状間伐区では間伐によって他の二つの処理区より一律に小さくなる傾向があることが示唆された（表-4，図-3）。これは，列状間伐区における樹高成長が他の二つの処理区での樹高成長より小さい（表-3）ことも寄与しているものと考えられる。処理間で樹高成長の違いが現れた原因については不明であるが，樹冠の上方成長と側方成長の配分比に対する密度の影響が予想される（Masaka *et al*. 2013）。ただし，もともと本調査地における平均形状比は調査地設定時で50前後を示し（表-1），2020年8月時でも60未満であり（表-1），多くの針葉樹人工林で気象害を受けやすくなるとされる70～80以上より低い値だった（cf. 金子ら 2000；渋谷ら 2011；鳥田 2018）。ま

た，形状比が 70 以上の個体は DBH が 10 cm 未満の劣勢木に限られていたため（図-3），林冠木については処理方法に関わらず気象害を受けるリスクは低いと考えられる。

今回の列状間伐で出現した林冠ギャップは，2015 年と 2020 年，いずれの年においても列状間伐区の開空度は他の二つの処理区よりも大きい傾向が認められた（図-4，表-5）。千鳥状間伐区と無間伐区で開空度に大きな違いが認められなかったのにも関わらず，千鳥状間伐区の方で直径成長量が大きかったのは（表-2），間伐によって樹冠の重なりが解消されたためと考えられる（真坂（2017）の図-3 を参照）。調査期間後半の直径成長量への間伐効果は両間伐区ともに統計学的に認められなかったが（表-2），これは列状間伐区でも林冠閉鎖が進んだ区画があったことに起因すると考えられる（図-4）。直径成長量に対し，開空度を説明変数にするような実験設計であれば，列状間伐区の林冠閉鎖の度合いを考慮した解析ができた可能性がある。

海岸林の間伐においては林冠の疎開に起因する風害発生が懸念されているが（愛媛県農林水産部林業政策課 1987；福地 1994；小田 1984），今回の調査では間伐で生じたギャップ内に強風被害をもたらすような風の吹き込みは観察されなかった（図-5）。傍証ではあるが，本研究の調査期間中に釧路地方気象台による気象速報の発表は 9 件（J-Stage 電子付録付表-8）あったものの，その 9 件のイベントによって本調査地内に風倒被害などは生じなかった。鳥田ら（2010）によると，グイマツと近縁種のカラマツ林では，根返りをもたらす限界風速と林齢の関係において 20～30 年生で風害抵抗性がもっとも低くなるような下に凸の曲線を描くという。また樹高や風心高が低いほど風害リスクが低い（鳥田 2009）。樹高や風心高と風害リスクの関係については，トドマツやエゾマツ *Picea jezoensis*（Siebold et Zucc.）Carrière var. *jesoensis* でも同様な傾向が報告されている（渋谷ら 2011）。本研究で扱ったグイマツ海岸林のように，初回の間伐をするような III～IV 齢級程度の若齢海岸林の上層高は，カラマツ林の特等地や II 等地と比べると半分にも満たない（cf. 真坂ら 2019；カラマツ林の特等地の上層高は 16 年生で 17 m 程度，II 等地では 12 m 程度）。実際，筆者らがこれまで強度間伐試験を行った後に風倒被害を受けた林分はない。風害リスクを心配し過ぎることはないが，樹高が低い若齢海岸林の初回間伐において風害リスクが高まるとは考えにくい。

海岸林に対する間伐効果を検証した事例は少ない。鈴木（1987）は，太平洋戦争後の間もない頃に強度間伐の必要性を訴えて酒田において実践した。しかし現在まで，過密化が心配されているにもかかわらず間伐試験の報告例は北海道を除くと数えるほどしかない（e.g., 蜂屋ら 1970, 1971；畠山・加賀谷 1974；小谷 2009；宗方ら 1991；小田 1984；大槻ら 1997；佐藤ら 1973）（補注：蜂屋ら（1971）と佐藤ら（1973）は蜂屋ら（1970）の後継，大槻ら（1997）は宗像ら（1991）の後継）。本研究では，これまで経験論的に行われてきた海岸林の密度管理に対して，列状間伐に関する定量的なデータを初めて提示することができた。ただし，本研究で対象としたのは北海道の太平洋岸における 5,000 本/ha 植栽の若齢グイマツ林であるため，今回の結果が 10,000 本/ha 植栽の林分や壮齢林，他樹種の林分，他の地域に対してただちに当てはまるものではない。高密度植栽の海岸林の過密化を防ぐため，他樹種，他の地域についても列状間伐の効果検証を実施し，密度管理技術を体系化していくことが望まれる。

謝　辞

調査地の設定および調査では釧路総合振興局森林室に多大な便宜を図って頂いた。北海道立総合研究機構林業試験場の職員の方々には調査の協力を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

開示すべき利益相反はない。

引 用 文 献

Burnham KP（2002）Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach. Springer

Cribari-Neto C, Zeileis A（2021）Beta Regression in R. https://rdrr.io/cran/betareg/

愛媛県農林水産部林業政策課（1987）森林の気象災害防止技術指針. https://www.pref.ehime.jp/h35700/1461/5_guide/5_saigai.html（2020 年 12 月 7 日確認）

EPPO Global Database. https://gd.eppo.int/taxon/LAXGM（2021 年 7 月 18 日確認）

福地　稔（1994）クロマツ海岸林の密度管理を考える．光珠内季報 94: 11-13

蜂屋欣二・竹内郁雄・只木良也（1970）クロマツ林の保育に関する検討．昭和 45 年度　湘南海岸砂防林調査報告書．神奈川県土木部砂防課湘南海岸整備事務所

蜂屋欣二・竹内郁雄・只木良也（1971）海岸クロマツ林の間伐試験．昭和 46 年度　湘南海岸砂防林調査報告書．神奈川県土木部砂防課湘南海岸整備事務所

畠山宏信・加賀谷繁（1974）飛砂防備クロマツ林の間伐経過について．日林東北支誌 25: 23-26

金子智紀・石田秀雄・金澤正和（2000）秋田県沿岸南部におけるクロマツの冠雪害について．東北森林科学会誌 5: 97-100

近藤道治（2006）列状間伐が森林環境に与える影響．森利学誌 21: 9-14

小谷二郎（2009）海岸クロマツ林の密度管理と間伐効果．石川県林試研報 41: 1-6

眞坂一彦・佐藤　創・鳥田宏行・今　博計・明石信廣（2009）高密度植栽されたエゾイタヤ，グイマツ，カシワの各保安林の密度管理方法に関する基礎的研究．北海道林試研報 46: 85-116

Masaka K, Sato H, Torita H, Kon H, Fukuchi M（2013）Thinning effect on height and radial growth of *Pinus thunbergii* Parlat. trees with special reference to trunk slenderness in a matured coastal forest in Hokkaido, Japan. J For Res 18: 475-481

真坂一彦・佐藤　創・鳥田宏行・阿部友幸・岩崎健太・今　博計・明石信廣（2015）高密度植栽されたカシワ海岸林に対する除伐の効果―釧路市音別町における事例―．海岸林学会誌 14（2）：1-6

真坂一彦・福地　稔・佐藤　創・鳥田宏行・阿部友幸・岩崎健太（2017）除間伐試験に基づいた北海道におけるクロマツ海岸林の密度管理方法．海岸林学会誌 16（1）：1-6

真坂一彦（2017）北海道における海岸林の密度管理についての諸問題．北方林業 68（3）：97-101

真坂一彦・佐藤　創・福地　稔・鳥田宏行・阿部友幸・岩崎健太・佐藤弘和（2019）北海道におけるグイマツ海岸林の密度管理方法．海岸林学会誌 18（2）：29-34

McCarthy MA（2007）Bayesian methods for ecology. Cambridge Univ Press

三村晴彦・堤　隆博・渡邉仁志（2019）列状間伐がヒノキの成長に与える影響について―樹幹解析による成長量の評価―．中森研 67: 23-24

宗方宏幸・鈴木省三・富樫　誠（1991）海岸防災林に関する研究―クロマツ海岸林の立木密度と防災効果に関する研究―．福島県林試研報 24: 66-75

新潟県農林水産部治山課（2020）治山事業における海岸保安林整備技術指針．https://www.pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/259514.pdf（2020 年 12 月 7 日確認）

小田隆則（1984）海岸クロマツ林の間伐について―間伐試験をもとにした一試論―．治山 29（4）：92–103
大槻晃太・宗方宏幸・荒井　賛・柳田範久（1997）海岸防災林に関する研究―クロマツ海岸林の保育管理―．福島県林試研報 29: 1–12
R Core Team（2020）. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/
林野庁治山課（2019）平成 30 年度 海岸防災林の保育管理のためのガイドライン策定調査．報告書（概要版）．https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/seika_H 30 /ippan/attach/pdf/index-50.pdf（2020 年 12 月 7 日確認）
林野庁整備課（2019）列状間伐の手引き―民有林における列状間伐の普及に向けて―．https://www.rinya.maff.go.jp/j/kanbatu/houkokusho/attach/pdf/houkoku-3.pdf（2020 年 12 月 7 日確認）
坂本知己（2007）クロマツ海岸林における本数調整手法の提案．海岸林学会誌 6（2）：1–6
坂本知己（2012）クロマツ海岸林の本数調整．水利科学 325: 2–14
坂本知己（2018）クロマツ海岸林の植栽本数について．海岸林学会誌 17（2）：39–46
坂本知己（2021）健全な海岸林を仕立てるための密度管理（補遺）．グリーン・エージ 569: 24–27.
佐藤　明・蜂屋欣二・只木良也・河原輝彦・竹内郁雄・栩秋一延（1973）海岸クロマツ林における間伐試験について．第 25 回日林関東支講演要旨集：31
澤田智志（2021）スギ人工林の低コスト間伐技術の導入による非皆伐施業体系の確立―列状間伐林分の成長特性と列状間伐後の間伐方法の検討―．秋田県森技研報 21: 1–16
渋谷正人・浦田　格・鳥田宏行・飯島勇人（2011）北海道中央部の針葉樹人工林における風倒被害と樹形．森林立地 53（2）：53–59
島崎洋路（1986）高密カラマツ林の間伐に関する研究．信大農演報 23: 1–177
森林総合研究所（2011）クロマツ海岸林の管理の手引きとその考え方―本数調整と侵入広葉樹の活用―．森林総合研究所　第 2 中期計画成果．24
静岡県交通基盤部森林局森林保全課（2013）静岡県海岸防災林における森林整備方針．https://www.pref.shizuoka.jp/sangyou/sa640/conservation/documents/kaiganbousairinseibihoushin.pdf（2020 年 12 月 7 日確認）
鈴木　覚（2017）間伐にともなう森林風害リスクの風洞実験による評価．日風工誌 42（3）：242–250
鈴木重孝（1987）能代市砂防林の歴史．http://www.shirakami.or.jp/~pinewood/（2001 年 4 月 26 日確認）
竹内郁雄・川崎達郎・森　茂太（1997）ヒノキ若齢人工林における形状比の変化．日林誌 79: 137–142
徳田佐和子・小野寺賢介（2018）道東で大発生しているカラマツヤツバキクイムシ被害とならたけ病について．北森研 66: 15–18
鳥田宏行（2009）カラマツの風害に関する力学的評価．日林誌 91: 120–124
鳥田宏行（2018）雪氷被害を軽減するための森林施業方法．北海道の雪氷 37: 99–102
鳥田宏行・渋谷正人・小泉章夫（2010）カラマツ林の力学的解析による風害予測．日林誌 92: 127–133
梅津勘一（2016）日本の海岸林の成り立ちと推移―庄内海岸林を中心に―．樹木医学研究 20: 104–111