

参考資料

防風林等の造成・管理技術の確立

(県単課題 平成10～14年度)

小澤創

武井利之

川口知穂(現森林林業領域)

目 次

要 旨	
はじめに	2
方法	2
1 調査地	
2 方法	
結果と考察	4
1 調査地の風の概要	
2 伐採前後の調査地	
3 伐採前後の相対照度	
4 伐採前後の空隙率	
5 伐採前後の風速	
6 伐採率の推定と管理方法	
引用文献	10

要 旨

本研究は内陸防風林を対象として密閉度と林内の相対照度が防風効果や立木密度とどのように関わっているかを明らかにし、立木密度から防風効果を低減させない伐採量を決定することを目的としている。

2回の伐採(本数率で20.5%、38.5%)を行い、伐採前後の風速を測定した。最大風速は林帯からの距離が30～40mの範囲で伐採前と比較して有意に小さくなった。平均風速も30m付近で伐採前と比較して有意に小さくなった。最大風速の最小を示す位置は29.6m付近で変化はなかった。平均風速の最小を示す位置は伐採を経るにしたがって、29.6mから37.4m、45.2mと林帯から離れた。風洞実験では密閉度が小さくなるほど相対風速の最小値を示す位置は林帯から遠い位置に移動することが明らかになっており、防風効果が最適な林分に近づいている可能性が示唆された。

今回の結果から防風効果を低減させない伐採率を推定した。最大の防風効果が得られる密閉度は60%(空隙率40%)であることが知られている。2回の伐採後、空隙率は11.23%になった。最大の防風効果を得るためにはまだ多くの伐採が必要であると考えられる。しかし、強度の伐採は林内に単木が多くなることを意味し、強風に対する支持力は低下する可能性が高い。

ある程度の伐採を行い、上層木の成長をうながしながら、特に枝下がすいた箇所には防風効

受理日：平成15年3月13日

果を維持するために下層植生を導入する必要がある。その後、伐採と植栽を繰り返し、最大の防風効果が得られる密閉度にコントロールする管理方法がよいと思われる。伐採後、林内の相対照度は 30.5 % になった。下層植生の導入ができ、その後の十分な成長が期待できる明るさであることが明らかになった。したがって、20.5 % より 38.5 % が下層植生の導入には適している伐採率であると考えられた。

はじめに

森林の防風効果については古くから良く知られており、海岸防風林や内陸防風林の名で造成されてきている。その多くは植栽間隔が 1.0 m 程度の密植造林方式をとっている¹³⁾。

一方、植栽造成後の管理については、比較的早い時期から間伐を行い枝下高を高くしないことや²²⁾、密閉が過密にならないようにし¹²⁾、枝下がすいた箇所では下層植生の導入によって防風機能の低下を防ぐ⁵⁾という方法が知られている。

しかし、海岸・内陸を問わず、現実の防風林分の本数密度は植栽本数や植栽後の自己間引き等により一定ではない。したがって、従来の定量・定性という間伐方法を防風林に適用し、防風効果を維持させるのは非常に困難である。そのため、管理方法がないまま植栽してから何十年もの間放置された林が多い。海岸のクロマツ林では、同一樹高階でアカマツ林の 3 ~ 4 倍の立木数を保っており、その形状比（樹高/胸高直径）は 70 以上の林分が多いことが明らかになっている¹³⁾。このことは、高密度で細く樹冠が薄い林分が多く存在し、強風による共倒れの危険性をはらんでいることを示している¹³⁾。防風効果を維持しながらある程度間伐を行い、個々の胸高直径を大きくして風に対する支持力を高めたり、林内を明るくし樹冠が薄くなった箇所には下層植生の導入をはかる必要がある。

防風網を用いた風洞実験等から林を正面から見たときの枝葉の割合（以下、密閉度）が 60 % 程度で最も防風効果があることが知られている^{1)、12)、4)}。しかし、実際の林分にこの概念を当てはめた研究例はほとんどなく、明確な結果は得られていない^{10)、23)}。近年、防風林の防風効果を考える上で密閉度の他に葉面積密度や²⁰⁾、林内の開空度や相対照度^{15)、24)}が森林内外の風と有意な関係があることが知られてきている。これは、林内の光環境がその上部にある枝と葉の量を反映しており、いわば密閉度とよく似た概念であることを示している。防風林の防風効果を維持しながら高密度になった林分の間伐を行うにはこの密閉度と林内相対照度（もしくは開空度）という 2 つの因子を考慮しなければならない。しかし、この 2 つの因子のみでは既知の施業方法と結びつかない。立木密度もその因子としてとり上げ、防風効果と結びつける必要があると思われる。

本研究は内陸防風林を対象として密閉度と林内の相対照度が防風効果や立木密度とどのように関わっているかを明らかにすることを目的としている。そして、立木密度から防風効果を低減させない伐採量を決定することを目的としている。

方法

1 調査地

福島県西白河郡西郷村内の内陸防風林を調査対象林分とした。福島県県南農林事務所の治山台帳によると、この林分は主に冬期の北西からの季節風に対する防風効果を目的として、1983年に造成された。林帯幅は16mで風上から縦に1m間隔で前2列がカラマツ、その後は交互にヒノキとモミが合計で14列植栽された。各列の植栽間隔はカラマツが1.0m、その他が1.5mであり、植栽密度はカラマツが1250本/ha、ヒノキとモミが3062.5本/haで合計7375本/haであった。

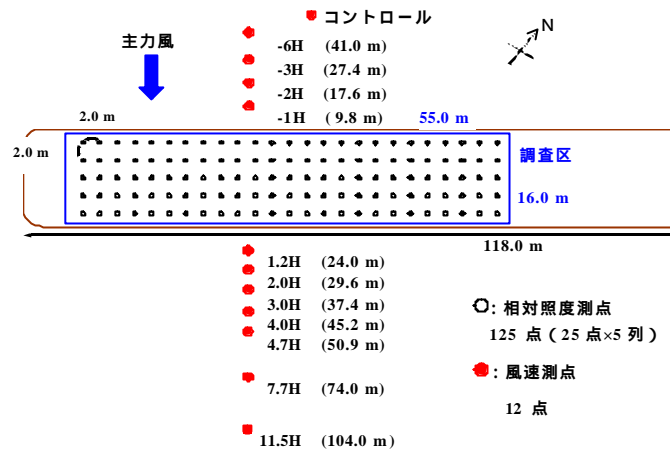


図1 相対照度と風速の測定位置の概略

2 方法

平成13年10月にこの防風林の中に16m×55mの調査区を設置し、毎木調査を行った。北西からの季節風が強くなる平成13年度および平成14年度の冬期間に施業前後の平均風速、最小・最大風速、および気温を風上側5点、風下側7点で測定した(図1)。風速計および温度計(WIND MESSE, エンペックス社)は1.5m高に設置した。

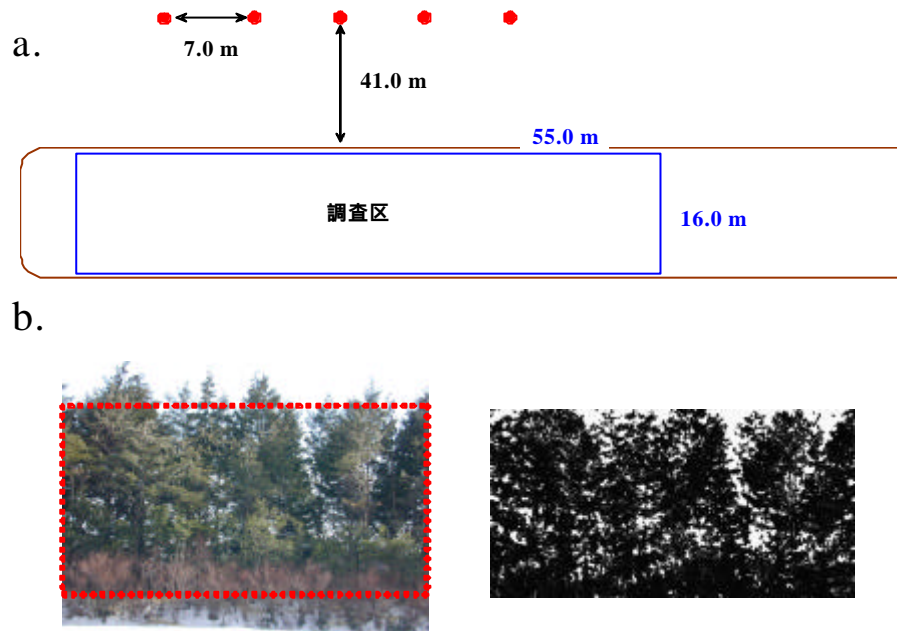


図2 密閉度の解析の概要。a. 密閉度の測定を行った位置、b. 密閉度の解析に用いた部分。赤枠内を壁面全体とし、この箇所を白黒に変換して全体の面積(黒と白の合計)と空隙の面積(白)の計算を行った。

施業前後の相対照度を測定するために、2m間隔で格子状に125点の全天空写真をデジタルカメラ(COOLPIX950, NIKON)を用いて撮影した(図1)。相対照度の測定に用いる全天空写真の撮影方法に関してはKato(2000)を参考にした⁶⁾。相対照度の解析はGap light analyzer (Simon Fraser University)を用いた。

施業前後の密閉度を算出するために防風林の正面の林層写真をデジタルカメラ(COOLPIX950, NIKON)を用いて5枚撮影した(図2a)。密閉度とは防風林をひとつの壁とみなしたときの壁面全体に対する枝葉の面積割合のことである¹²⁾。

密閉度 = 枝葉の面積 / 壁面全体の面積

本研究では、防風林の面のうち、枝葉で完全に覆われた部分を壁面全体とし（図 2b）、枝葉以外の面積を「空隙」としてその割合を「空隙率」として算出した。

空隙率 = 枝葉以外の面積 / 壁面全体の面積 = 1 - 密閉度

撮影は林分から 41 m 風上の位置で 640 × 480 ピクセルで行なった。壁面全体の面積および枝葉とそれ以外（空隙）の面積を Scion Image（Scion 社）を用いて解析した。この際、10 ピクセル以下の空隙は無視した。

第 1 回目の伐採は平成 14 年 2 月に行った。第 2 回目の伐採は平成 15 年 1 月に行った。伐採の際、林縁部の伐採は行わず、林内の胸高直径と樹高が小さいものを選定した。これは過去の研究例を参考にして、できるだけ伐採後の林分の密閉度を均一にするように配慮したものである¹⁹⁾。

風速調査を行った調査区の近隣において、1986 年に防風林を成立させるためにヒノキやモミの植栽を行ったが、その後の生育状況が極めて不良で、1995 年に再度ヒノキの植栽を行った箇所があった。補植をしたヒノキも生育状況が不良なため、その原因を明らかにするために土壌調査を行った。

結果と考察

1 調査地の風の概要

調査地は夏期（5 月から 10 月）は南西方向からの風が吹き、冬期（11 月から 4 月）は北西方向からの風が多くなった（図 4）。また、夏期は最大風速が 9m/秒程度、平均風速が 4 m/秒程度であり、冬期は最大風速が 11 m/秒程度、平均風速が 5.5 m/秒程度であった（図 3）。

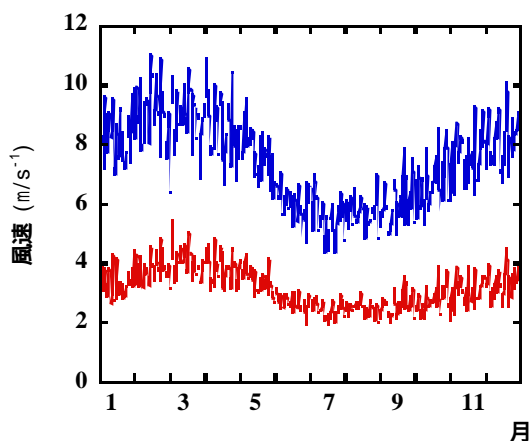


図3 調査地の年間の風速の変化。
白河気象観測点のデータ（1990～1999年の平均値）。平均風速；赤、最大風速；青

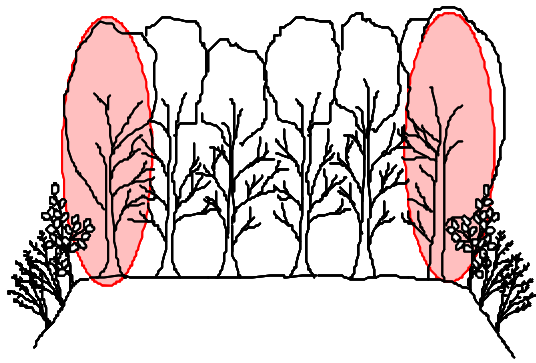


図5 選木の基準。林縁部の木は伐採を行わなかった。

2 伐採前後の調査地

間伐前の調査区のDBHの平均値は 11.7cmであり、平均樹高は 6.8 m、平均枯上高は 3.5 mであった(表 1)。立木密度は 2215 本/haであり、植栽後 18 年を経過して当初の植栽密度のうち、30%(2215 ÷ 7375)が残存していることが明らかになった(表 2)。

2 回の伐採の際、伐採木の選木は林縁部を残すように行い、枯れたもの以外は林縁部から選木しなかった(図 5)。第 1 回目の伐採は 40 本行った(表 1)。伐採木のDBHの平均値は 8.5cmであり、平均樹高は 5.2 m、平均枯上高は 3.2 mであった。

この伐採で立木密度は 1761 本/haになり、本数割合で 20.5 %の伐採を行った(表 2)。第 2 回目の伐採は 35 本行った(表 1)。伐採木のDBHの平均値は 10.7cmであり、平均樹高は 7.0 m、平均枯上高は 4.0 mであった。

この伐採で立木密度は 1363 本/haになり、本数割合で当初から 38.5 %の伐採を行った(表 2)。

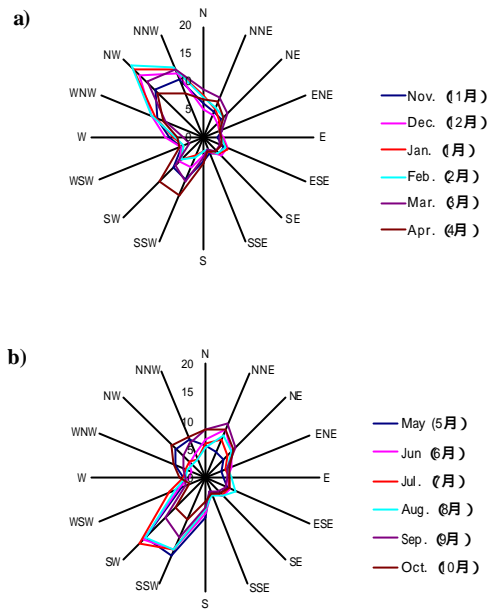


図4 調査地の年間の風向の変化。a) 11~4月、b) 5~10月 白河気象観測点のデータ(1990~1999年の平均値)。

表 1 伐採木の平均DBH、平均枯上高、平均樹高、DBH合計、材積合計

	伐採前	第1回伐採	第2回伐採
本数 (本)	195	40	35
平均DBH (cm)	11.7 ± 3.2	8.5 ± 2.2	10.7 ± 2.8
平均枯上高 (cm)	347.6 ± 158.4	320.0 ± 165.5	403.0 ± 137.6
平均樹高 (cm)	682.3 ± 157.6	515.7 ± 138.1	703.3 ± 145.6
DBH合計 (cm)	2272.5	340.5	373.5
材積合計 (m ³)	9.0	0.8	1.3

平均は平均値±標準偏差で示した。

表2 伐採後の調査区の立木密度、平均DBH、平均枯上高、平均樹高、DBH合計、材積合計

	伐採前 a	第1回伐採後 b	割合 b/a(%)	第2回伐採後 c	割合 c/a(%)
本数	195	155	79.5	120	61.5
立木密度 本/ha	2215.9	1761.4		1363.6	
平均DBH cm	11.7 ± 3.2	12.5 ± 2.8		13.0 ± 2.6	
平均枯上高 cm	347.6 ± 158.4	354.7 ± 156.3		340.6 ± 159.2	
平均樹高 cm	682.3 ± 157.6	725.5 ± 131.6		732.1 ± 127.1	
DBH合計 cm	2272.5	1932.0	85.0	1558.5	68.6
材積合計 m ³	9.0	8.1	90.7	6.8	75.8

平均は平均値±標準偏差で示した。

3 伐採前後の相対照度

測定した 125 箇所の相対照度のうち、撮影環境に出来るだけ左右されない林分の中央部（風上から 9 m）の 25 箇所の相対照度をこの林分の平均相対照度として取り扱った。伐採前の相対照度は 16.5 %であった（表 3）。第 1 回目の伐採後、相対照度は有意に 5.2 %明るくなり、21.7 %になった。第 2 回目の伐採後、相対照度はさらに有意に 8.8 %明るくなり、30.5 %になった。

4 伐採前後の空隙率

伐採前の空隙率は 0.75 %であった（表 4）。第 1 回目の伐採後、空隙率は有意に 2.61 %大きくなり、3.36 %になった。第 2 回目の伐採後、さらに有意に 7.87 %大きくなり、11.23 %になった。

5 伐採前後の風速

伐採前の林帯の風下の風速は最大風速、平均風速とも林帯から 40 m 前後まで減少し約 100 m で風上側とほぼ同値になった（図 6）。伐採前の防風林の平均樹高が 6.8 m であることから、この防風林の防風の影響は樹高の 14 倍以上に及ぶことが明らかになった。防風効果の及ぶ範囲は最適な密度で樹高の 30 倍以上であることが知られている^{5),1)}。そして、防風効果の及ぶ範囲は高密な林分から最適な林分になるほど大きくなる⁵⁾。このことから、伐採前の防風林は高密な状態であることが示唆された。

気温は風上よりも風下の方が最大で 2 高くなった。一般的に防風林は風を弱め、地面から奪われる熱を少なくすることで風下の地温を高めることが知られている⁵⁾。この昇温効果は測定する環境で差があるものの最大で 4 程度であることが明らかになっている^{12), 16), 17)}。

表3 伐採前後の相対照度

区分	相対照度		n
	平均 (%)	標準偏差	
伐採前	16.5 ± 1.8	a	25
第1回伐採後	21.7 ± 2.8	b	25
第2回伐採後	30.5 ± 3.0	c	25

異なるアルファベットは有意差があることを示している。
(P<0.01, ANOVA)

表4 伐採前後の空隙率

区分	空隙率		n
	平均 (%)	標準偏差	
伐採前	0.75 ± 0.43	a	5
第1回伐採後	3.36 ± 1.46	b	5
第2回伐採後	11.23 ± 3.74	c	5

異なるアルファベットは有意差があることを示している。
(P<0.05, Mann-WhitneyのU検定)

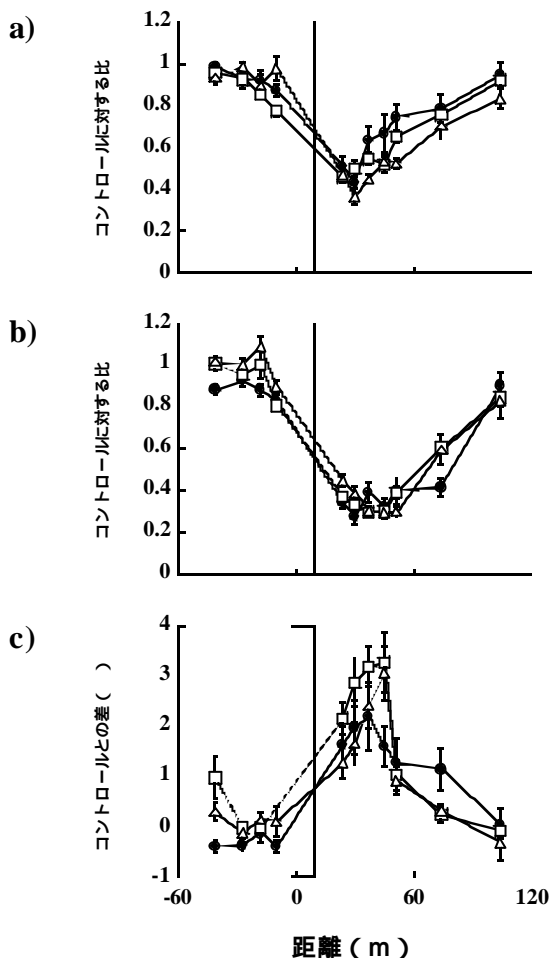


図6 伐採前後のa) 最大風速、b) 平均風速、c) 気温の変化。伐採前；、第1回伐採後；、第2回伐採後；。0mの枠は防風林の位置を示している。

2回の伐採後、最大風速は林帯からの距離が30～40mの範囲で伐採前と比較して有意に小さくなった(表5)。平均風速は30m付近で伐採前と比較して有意に小さくなった。しかし、74mの地点では伐採前より有意に大きくなった。最大風速の最小を示す位置は29.6m付近で変化はなかった。平均風速の最小を示す位置は伐採を経るにしたがって、29.6mから37.4m、45.2mと林帯から離れた。風洞実験では密閉度が小さくなるほど相対風速の最小値を示す位置は防風網から遠い位置に移動することが明らかになっている¹¹⁾。平均風速の最小値も伐採を通して林帯から徐々に離れており、檜山(1967)の最適な林分に近づいているのかもしれない。また、有意差はないものの林帯から一番遠い104mの地点の最大風速、平均風速とも伐採を経るにしたがって徐々に低下している。このことは防風効果の及ぶ範囲が伐採を経るにしたがって大きくなっていることを示しているのかもしれない。

これらの結果から、伐採を通して、防風効果は維持もしくは向上していることが示唆された。

6 伐採率の推定と管理方法

今回の結果から防風効果を低減させない伐採率を推定したい。過去の研究により、密閉度が60%程度で最も防風効果があることが知られている^{1)、12)、4)}。空隙率と伐採率は正の相関関係があり、指数関数で回帰することができる(図7)。伐採後の空隙率は11.23%であるので、密閉度60%(空隙率40%)にコントロールするにはまだ伐採が必要であると考えられる。しかし、強度の伐採は林内に単木が多くなることを意味し、強風に対する支持力は低下する可能性が高い。一度に60%の伐採を行った近隣の防風林では風上側の数本が強風によって倒れる現象が見られた。また、林内が明るすぎると草本種の侵入が多くなり、下層植生の導入後、短期間で下刈りを行う必要もある^{2)、18)}。防風林自体の強度やその後の管理を考えると強度の伐採は適していない。

一度に過度の伐採を行わず、下層植生の導入が行える程度の伐採を行い、下木の植栽と伐採を繰り返しながら最大の防風効果が得られる密閉度にコントロールする管理がよいと思われる。

伐採後の相対照度は30.5%であった。相対照度と伐採率は正の相関関係があり、指数関数で回帰することができた(図7)。下層に導入する樹木が落葉広葉樹である場合、生存と成長に必要な相対照度は8～15%であることが知られている⁹⁾。針葉樹である場合、スギ、ヒノキとも相対照度が10%以下でも伸長を行い^{3)、7)、14)、21)}、15～20%で明るさが成長の制限因子となることが知られている²¹⁾。これらの知見から林内の相対照度は下層植生の導入には十分である

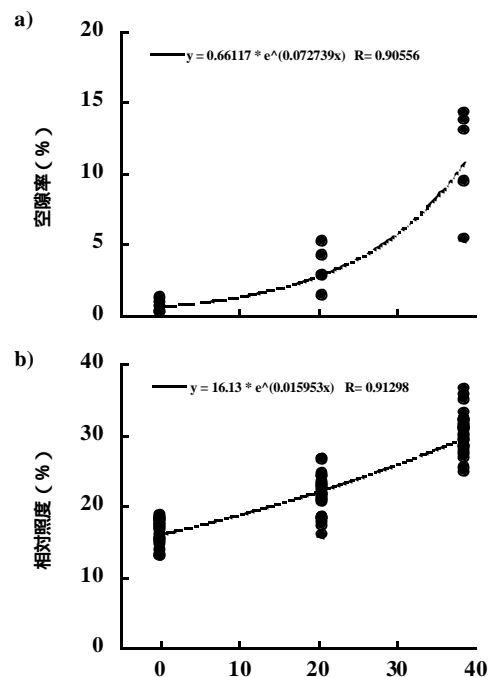


図7 伐採率とa) 空隙率、b) 相対照度の関係。

ことが明らかになった。したがって、最初の一回目の伐採は 38.5 %程度で十分であると考えられる。

今後、上層木の葉量が増加し樹冠が閉鎖して林内が暗くなり再度上層木の伐採を行う時期などを考慮しなければならない。樹冠が閉鎖する速度は林分の樹種や樹齢によってまちまちである⁸⁾。試験を行った防風林は植栽されている樹種が単一でなく、伐採後、樹冠が再度閉鎖するのに何年かかるのか予測できない。また、同様に再度伐採を行うときの伐採率も予測することができず、今後の研究を待たねばならない。



図7 強度の伐採により強風のため、風倒した木が見られた。

表5 防風林の風上と風下の風速と気温の測定結果

項目	区分	n	風上測定位置 (m)				平均 ± 標準偏差
			-41.0	-27.4	-17.6	-9.8	
最大風速	伐採前	19	0.98 ± 0.11	0.93 ± 0.12	0.92 ± 0.19	0.87 ± 0.12	a
	第1回伐採後	22	0.95 ± 0.10	0.93 ± 0.09	0.86 ± 0.05	0.77 ± 0.05	a
	第2回伐採後	15	0.93 ± 0.10	0.99 ± 0.07	0.90 ± 0.18	0.98 ± 0.16	b
平均風速	伐採前	19	0.88 ± 0.10	0.93 ± 0.13	0.88 ± 0.11	0.83 ± 0.11	a
	第1回伐採後	22	1.01 ± 0.08	0.95 ± 0.05	1.00 ± 0.13	0.81 ± 0.01	ab
	第2回伐採後	15	1.02 ± 0.08	1.00 ± 0.09	1.09 ± 0.16	0.90 ± 0.08	b
気温	伐採前	19	-0.36 ± 0.50	-0.35 ± 0.49	-0.12 ± 0.78	-0.37 ± 0.50	
	第1回伐採後	22	1.00 ± 0.82	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00		
	第2回伐採後	15	0.31 ± 0.70	-0.10 ± 0.57	0.17 ± 0.39	0.13 ± 0.83	

項目	区分	n	風下測定位置 (m)						
			24.0	29.6	37.4	45.2	50.9	74.0	104.0
最大風速	伐採前	19	0.51 ± 0.18	0.43 ± 0.11	0.63 ± 0.23	0.67 ± 0.33	0.74 ± 0.24	0.79 ± 0.25	0.95 ± 0.21
	第1回伐採後	22	0.46 ± 0.12	0.50 ± 0.15	0.54 ± 0.12	0.52 ± 0.14	0.65 ± 0.13	0.75 ± 0.13	0.92 ± 0.16
	第2回伐採後	15	0.47 ± 0.10	0.36 ± 0.15	0.45 ± 0.08	0.53 ± 0.12	0.52 ± 0.09	0.70 ± 0.25	0.83 ± 0.19
平均風速	伐採前	19	0.34 ± 0.09	0.27 ± 0.12	0.39 ± 0.18	0.33 ± 0.13	0.40 ± 0.23	0.42 ± 0.15	0.90 ± 0.22
	第1回伐採後	22	0.37 ± 0.07	0.33 ± 0.07	0.30 ± 0.09	0.30 ± 0.08	0.39 ± 0.13	0.61 ± 0.10	0.85 ± 0.17
	第2回伐採後	15	0.45 ± 0.11	0.39 ± 0.10	0.30 ± 0.08	0.29 ± 0.10	0.30 ± 0.10	0.59 ± 0.27	0.83 ± 0.30
気温	伐採前	19	1.64 ± 1.39	2.00 ± 2.00	2.21 ± 2.52	1.62 ± 1.39	1.31 ± 1.65	1.15 ± 1.52	0.07 ± 1.14
	第1回伐採後	22	2.18 ± 1.47	2.89 ± 2.11	3.20 ± 1.82	3.29 ± 2.44	1.05 ± 1.31	0.27 ± 0.59	-0.07 ± 0.46
	第2回伐採後	15	1.30 ± 1.06	1.67 ± 1.50	2.43 ± 1.65	3.08 ± 1.88	0.93 ± 1.10	0.33 ± 0.49	-0.30 ± 1.16

異なるアルファベットは有意差があることを示している。(P<0.05, ANOVA)

引用文献

- 1) 阿部 学, 千葉 修, 橋本 与良, その他 : 保健保全林 その機能・造成・管理 . 林業試験場研究報告 239: 1-139, (1971) .

- 2) 安藤 貴, 桜井 尚武, 谷本 丈夫、その他 : 小田深山林内更新試験地における林床植生の再生量. 林業試験場研究報告 323: 155-162, (1983) .
- 3) 安藤 貴, 宮本 倫仁, 竹内 郁雄、その他 : 林内の光環境と下木の樹高成長. 林業試験場研究報告 323: 108-110, (1983) .
- 4) GM Heisler, DR Dewalle : Effects of windbreak structure on wind flow. Agriculture, Ecosystems and Environment 22/23: 41-69, (1988) .
- 5) 檜山 徳治 : 内陸防風林. 林業技術 309: 23-26, (1967) .
- 6) Shogo Kato, Akira Komiyama : A Calibration Method for Adjusting Hemispherical Photographs to Appropriate Black-and-White Images. Journal of Forest Research 5: 109-111, (2000) .
- 7) 河原 輝彦, 鈴木 健敬, 斎藤 勝郎 : 人工庇陰がスギ、ヒノキの成長に及ぼす影響. 林業試験場研究報告 323: 135-138, (1983) .
- 8) 河原 輝彦 : 複層林誘導のための林内照度のコントロール. 森林立地 30(1): 10-13, (1988) .
- 9) 小池 孝良 : 落葉広葉樹の生存に必要な明るさとその成長に伴う変化. 材木の育種 148: 19-23, (1988) .
- 10) AE Loeffler : Optical porosity and windspeed reduction by coniferous windbreaks in Southern Ontario. Agroforestry Systems 17: 119-133, (1992) .
- 11) 真木 太一 : 防風網に関する研究 (4) 風洞実験による種々の防風網付近の風速分布特性. 農業気象 38(2): 123-133, (1982) .
- 12) 真木 太一 : 風害と防風施設. 文永堂出版、東京、P244, (1987) .
- 13) 村井 宏, 石川 正幸, 遠藤 治郎、その他 : 日本の海岸林 - 多面的な環境機能とその活用. ソフトサイエンス社、東京, (1992) .
- 14) 大場 貞男, 浅沼 晟吾, 早稻田 収 : 人工庇陰下における最小要光量. 林業試験場研究報告 323: 139-142, (1983) .
- 15) 齋藤 武史 : 落葉広葉樹林内における風速の垂直分布と開空度との関係. 日本林学会誌 78(4): 384-389, (1996) .
- 16) 佐藤 隆光, 高橋 英紀 : 防風林周辺の風の流れと温度分布に関する数値シミュレーション. 農業気象 53(4): 275-283, (1997) .
- 17) 佐藤 隆光, 宮畑 信吾, 高橋 英紀 : 北海道千歳市における防風林による農耕地の温度改良効果. 農業気象 53(4): 315-319, (1997) .
- 18) 鈴木 健敬, 山本 久仁雄, 河原 輝彦 : 庇陰下における雑草木の再生量と下刈りの要否. 林業試験場研究報告 323: 163-167, (1983) .
- 19) 鈴木 清 : 湘南海岸砂防林の成長と林形に関する風洞実験. 神奈川県林業試験場研究報告 10: 23-35, (1984) .
- 20) 鳥田 宏行, 根本 征樹 : 防風林の疎密度と林帯幅に関する風洞実験. 日本林学会誌 84(2): 85-90, (2002) .

- 21) 早稲田 収 : 林内光環境とスギ稚樹の成長. 林業試験場研究報告 323: 105-107, (1983).
- 22) 渡邊 次郎, 富樫 誠, 荒井 賛 : 海岸防災林に関する研究. 福島県林試研報 20: 105-122, (1987) .
- 23) H Zhang, JR Brandle, GE Meyer et al : The Relationship between open windspeed and windspeed reduction in shelter. Agroforestry Systems 32: 297-311, (1995) .
- 24) J Zhu, T Mastuzaki, Y Gonda : Wind profiles in a coastal forest of Japanese Black Pine (*Pinus thunbergii* Parl.) with different thinning intensities.. Journal of Forest Reserch 6: 287-296, (2001) .