

前線帶の成長促進のための
海岸防風工法等の開発

前線帶の成長促進のための海岸防風工法等の開発

I 試験担当者

森林環境部防災科防災林研究室 河合英二・溝口康子・山野井克己

東北支所防災研究室 松岡廣雄

森林環境部 工藤哲也

II 要旨

海岸防災林の最前線では強風・塩風により成長阻害を受け、その影響は後方林帯の樹高生長に及んでいる。そこで最前線の林木の成長を促すために、秋田営林局酒田営林署管内浜中海岸に風洞実験を経て間伐材を部材とした合掌型の従来柵（K-I型）を1987年に設置した。この結果クロマツ海岸林の成長に良好な効果がみられた。しかし、K-I型は柵の密閉度が正面からみて100%に近く改良の余地がみられた。そこで柵の構成、密閉度等を変化させた改良型を設計した。改良柵は効果範囲が拡大することを風洞実験で確かめ、既設のK-I型と平行に林帯最前線に改良柵（K-II型）を設置し、現地の防風・空中塩分減少効果とクロマツ林の成長調査を行った。

風洞実験の結果、減風範囲から判断して、開脚65度改良柵（K-II型）の方が開脚70度従来柵（K-I型）より効果的であると考えられた。現地比較調査の結果従来柵と改良柵を比較したところ、防風効果、空中塩分捕捉作用とも、改良柵が優れていると判断できるが、クロマツの成長にはまだ顕著な差は認められなかった。

一方、最前線に設置されている化繊防風網（高さ：1.0m）は耐久性に問題があるので、これに替わる間伐材を部材とした3つの型の防風柵を設計し、風洞実験によりその防風効果を測定した。その結果、それぞれ防風効果に差はあるが、減風範囲、耐久性から判断して化繊防風網より長期間に渡って効果を期待できるものと考えられた。

III 試験目的

海岸防災林の林帯前線は強風のために植栽木の上長生長が阻害され、その結果、林帯後方まで樹高生長に影響を及ぼしているケースが多い。この対策のために様々な防風垣・防風工が施工されているが、性能、コストや耐久性などに問題がある。この問題を改善し、間伐材の利用拡大するため、間伐材を部材とする防風柵を試作し、その性能を調査してき

た。

本研究は試作した間伐材防風柵（K-I型）の密閉度を変化させた改良型防風柵を新たに開発し、風洞実験、現地観測により実用化することと、最前線に施工された化織防風網が強風による摩擦のため短期間で破壊されることから、これに替わる間伐材を部材とした防風柵を新たに開発することを目的とした。

IV 試験の方法と結果

1. 改良型防風柵の効果

1) 風洞実験

(1) 実験方法

実験施設は森林総合研究所の風洞装置を用いた。測定洞の幅は1.2m、高さ1.6m、長さ10.0mである。模型は現地の防風柵の高さを約3mと考え、その1/20の15cmとし、直径0.5cmの丸棒を使用し組み立てた。従来柵が風上、風下とも傾斜している合掌型（図1）としたのに対し、改良柵は風上傾斜、風下鉛直とし、風上には縦、風下には横に丸棒を設置する縦横型（図2）とした。

風上側柱と地面との角度（開脚度）は従来柵の実験と同様に50, 60, 70度の3種類に、65度を追加して行った。

風速測定は測定洞の中心に沿い、水平方向は柵高倍数（H）単位に柵の風上側-6, -1, -2, -1, -0.5, 0（柵位置）、柵の風上側0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26H、鉛直方向は高さ2, 3.5, 5, 7, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 35, 40cmとして、熱線風速形で測定した。

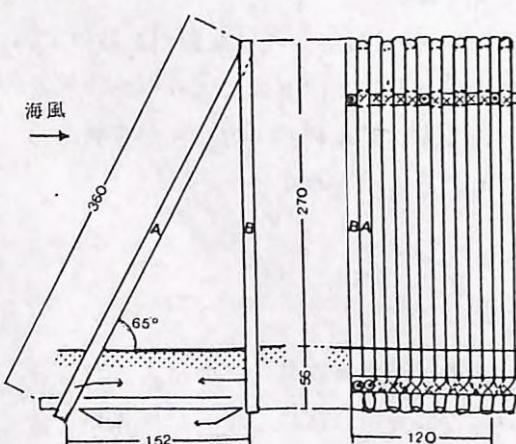


図1. 合掌型従来柵（K-I型）の構造（単位cm）

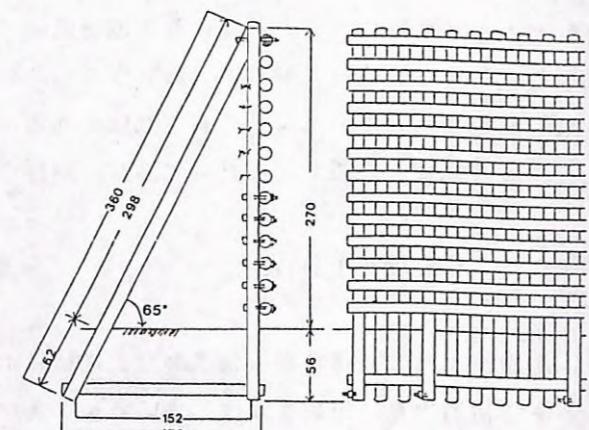


図2. 縦横型改良柵（K-II型）の構造（単位cm）

測定風速は下記の根本による相似則の理論式¹⁾により野外風速の約20.0m/sに相当する7.4m/sとした。

$$U_m / U_n = (L_m / L_n)^{1/3}$$

U_m: 風洞風速 U_n: 野外風速 L_m: 模型の代表長 L_n: 実物の代表長

(2) 実験結果

これまでの合掌型柵の密閉度は前面部50%、後面部50%の組合せで、正面からの密閉度は100%であった。風洞実験に基づいて海岸に設置したこの従来柵は、柵に近いところの減風率が大きい割に、減風率40%以下の領域はほぼ風下22H内であった^{2)～4)}。

今回の縦横型改良柵の密閉度は前面部50%，後面部50%であるが、組み合わせが従来柵と異なり、4種とも正面方向からの密閉度は75%である。

従来柵（旧柵）と改良柵による風速比分布を図3, 4に示した。風速比は規準点の風速を100として、各測点ごとに風速の比を求めた。柵の開脚度50度の場合、改良柵では従来柵に認められる30%域ではなく、40%域が22Hから26Hまで広がった。柵高の上方では、従来柵では110%域が認められる位置で、改良柵では100%程度までとなり、減風域が広がる傾向が認められる。開脚度60度では改良柵は従来柵の30%域が18Hから20Hへ、40%域が23Hから24Hへと広がる傾向が認められる。開脚度70度でも同様に従来柵の30%域が18Hから22Hまで、40%域が22Hから26Hまで広がっている。柵高の上方でも100%域が縮小し、90%域が広がっている。従来柵では密閉度が正面方向からみて、100%に近いため板のように柵の背後に渦領域をつくっているのに対し、改良柵では密閉度を低下したことにより、この欠点が少なくなったものと考えられる。

柵の設置を予定している現地の最前線のクロマツ林の樹高は約2.0mから柵高の3.0mの範囲内にあり、クロマツ梢頭部は強い塩風による成長阻害を頻繁に受けている。この2.0～3.0mの領域の風速分布を従来柵と改良柵でさらに詳しく比較するため模型の高さ10cm（現地：2.0m），15cm（同：3.0m）における風速比を図5, 6に示した。

柵高15cmの位置の場合、従来柵は4種とも柵後急に減少し、0.5Hの位置で最低風速を記録したのち6Hから徐々に増加していく。改良柵は柵後4Hで最低風速を記録したのち徐々に増加していく。両柵とも柵後4Hからの風速増加傾向は似ているが、改良柵の方が全体に減少している。

柵高10cmの位置の場合、従来柵の最低風速は開脚50度で4H, 60度で6H, 70度で10Hであった。改良柵の最低風速は開脚50度で10Hに、60度、70度では8～12Hに存在した。

従来柵と改良柵の26H付近での風速の数値をみると、改良柵の方が後方へ減風範囲を広げている傾向が認められた。柵の開脚度と減風範囲の関係を4種のなかでみると、前脚と地面のなす角度が50度から70度と大きくなるほど減風率・範囲は広くなることが分かった。

従来柵の場合もこの傾向は同じであったが、現地における柵の設置時の作業効率や耐風

性上、前脚と後脚にある程度の角度を保たせる必要性から、現地に設置した従来柵の開脚度は65度とした。改良柵においても浜中の環境条件から柵の耐風性、作業効率等を考えて、開脚65度が現地に適当と考えられたので、65度の改良柵の風洞実験を追加した。その結果、高さ15、10cmの風速比を図7に示した。改良柵70度と比較すると、高さ15cmの場合、10Hまでは1~7%多いが、その後方ではほとんど同じ値である。高さ10cmの場合、70度の方がわずかに風速比が大きい所もあるが全体的に同じような分布傾向であった。

以上の風洞実験の結果、開脚70度の改良柵が最も減風効果が高いことが分かった。しかし、柵の耐風性、作業効率から考えると70度は狭すぎるので、70度に近い減風効果を示した開脚65度を現地に設置することにした。開脚65度改良柵模型（K-II型）は70度従来柵や65度従来柵模型より減風効果が大きいことが確かめられた⁵⁾。

（河合英二）

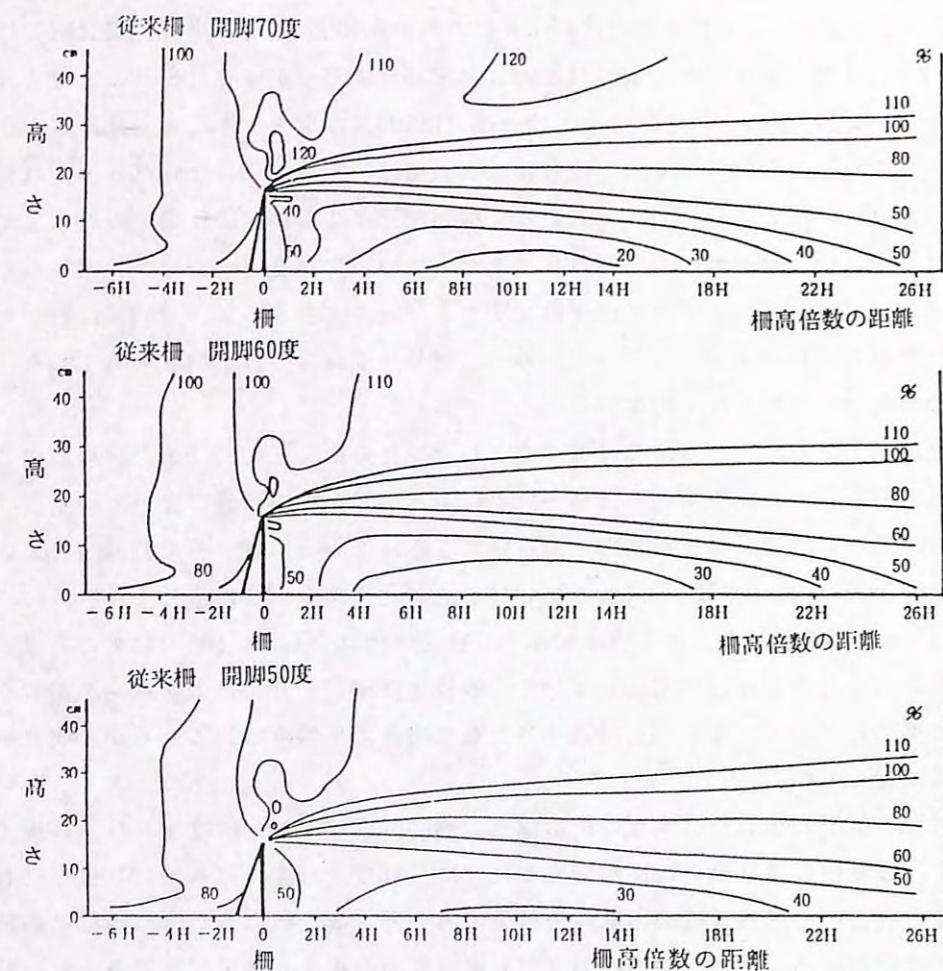


図3. 従来柵の風速比の分布

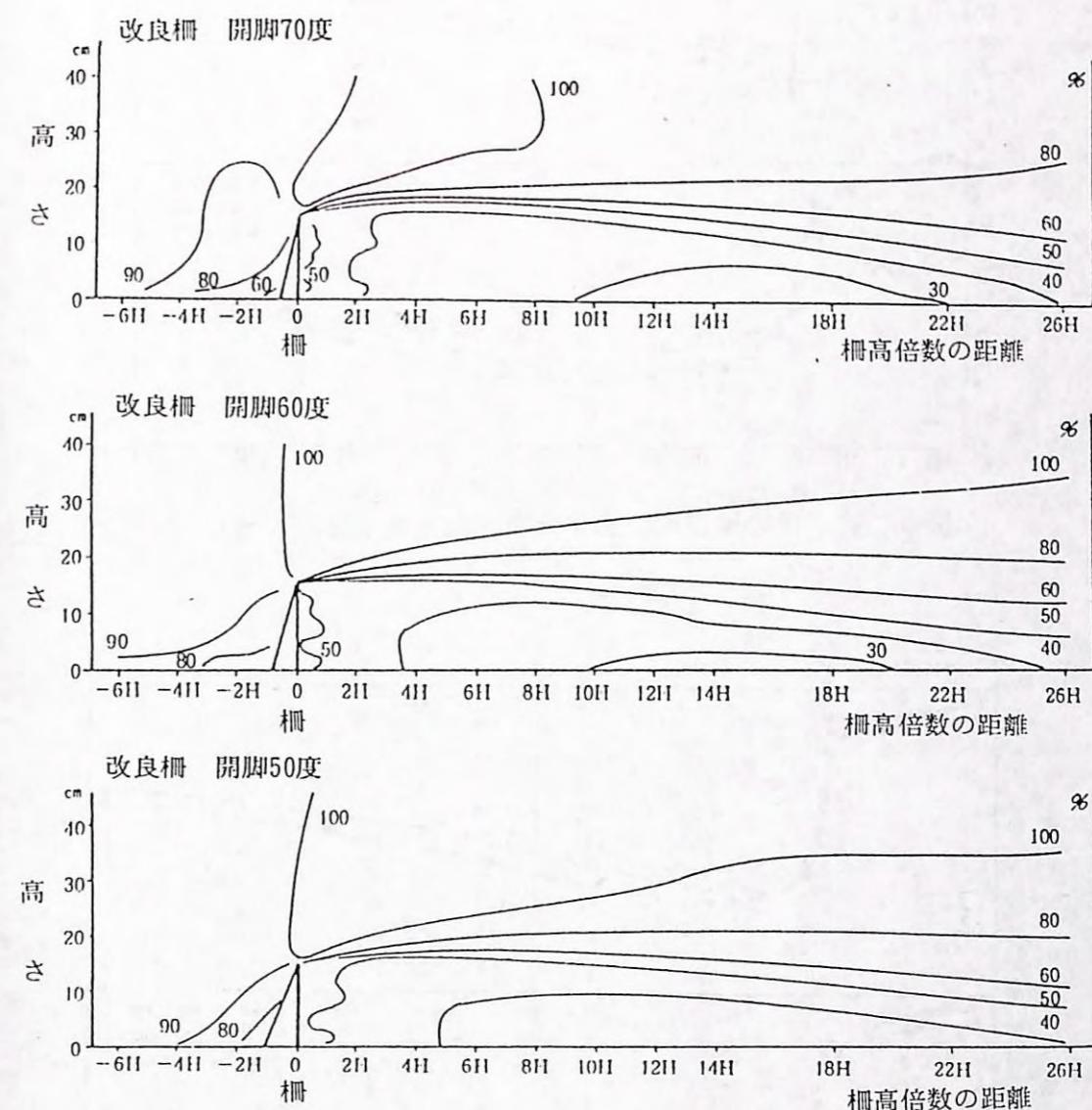


図4. 改良柵の風速比の分布

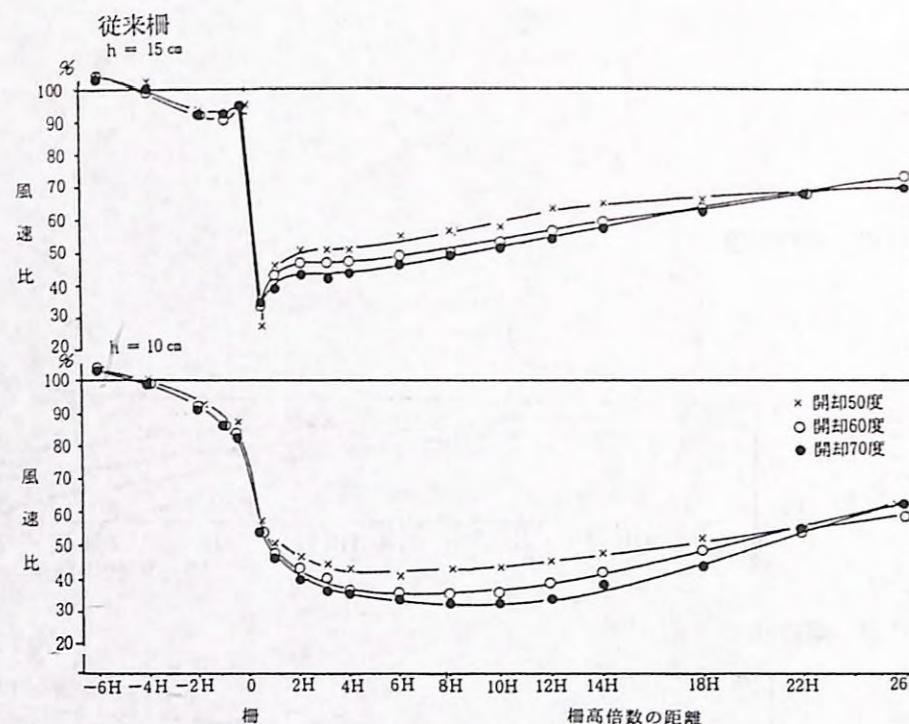


図 5. 従来柵の風速比の水平分布（測定高：15, 10cm）

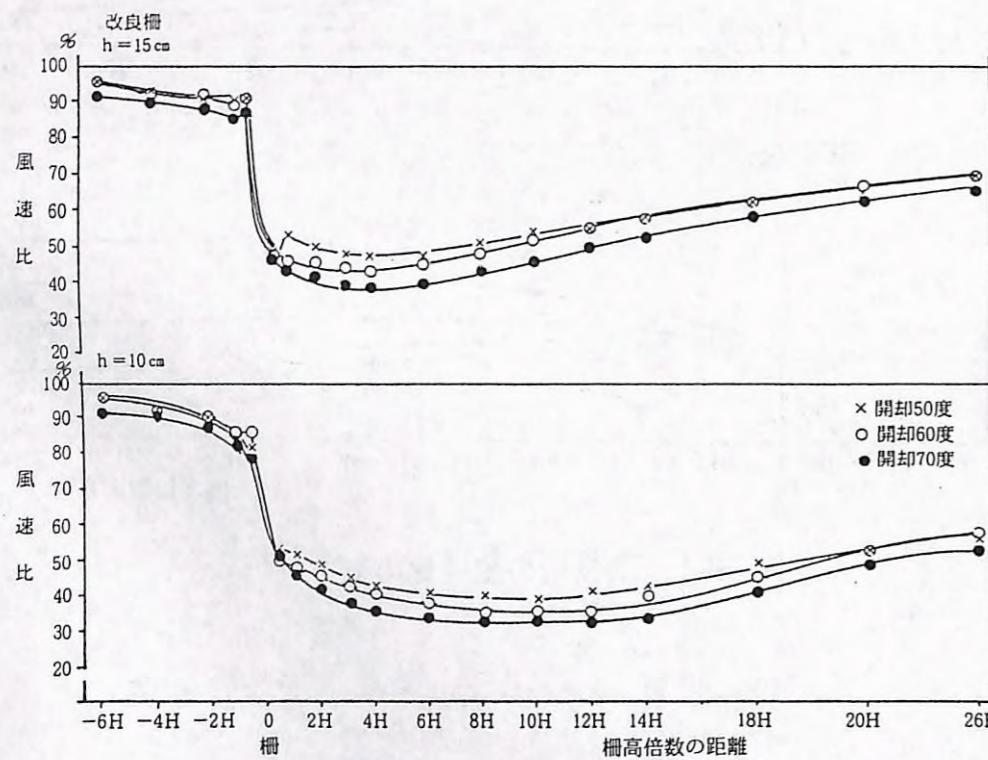


図 6. 改良柵の風速比の水平分布（測定高：15, 10cm）

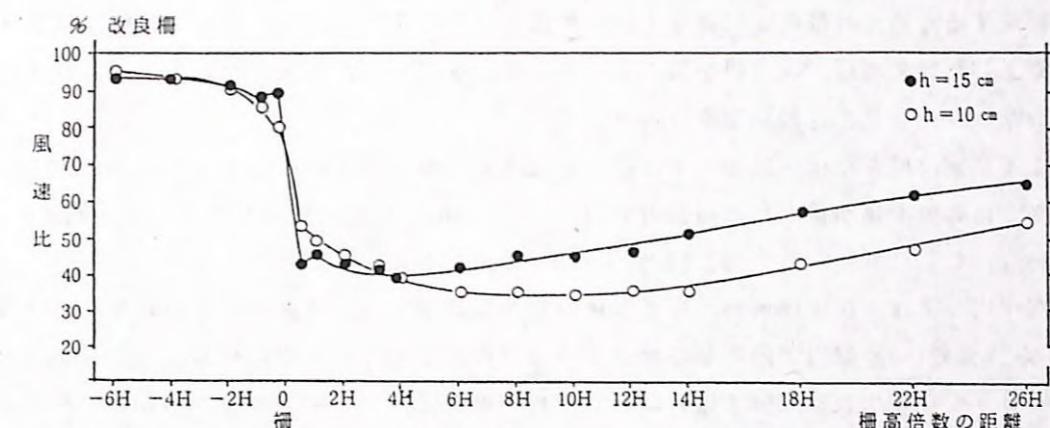


図 7. 開脚65度の改良柵（K-II型）風速比の水平分布

（測定高：15, 10cm）

2) 現地試験

(1) 柵の施工地の環境

改良柵はすでに従来柵が設置されている秋田営林局酒田営林署管内浜中 133林班の海岸林の前線に設置した。管内の海岸林は山形県飽海郡湯佐町から鶴岡市湯之浜にいたる延長32km、幅 200~800m のクロマツ林である。クロマツ林は10~30年生、平均樹高約4.5mで林帶の海側最前線には化繊防風網（高さ1.0m、密閉度 30%）が施工されているが、前線のクロマツ梢頭部は冬の季節風による成長阻害がみられる。冬季の日本海沿岸は西よりの季節風が卓越し、強風とともに多量の塩分が内陸側に運ばれる。1989年と1991年の1, 2月の気温及び風速データを比較すると、1991年の方が気温も低く季節風も強い年であった。このように年度によって季節風にかなり変動があることが分かる（表1^{6), 7)}。

表 1 調査地に近い酒田の気象

年 月	平均風速 m/s	平均風速 >10m/s	最大風速 >10m/s	平均気温	最低気温
1988. 12.	5.8	1日	16日	4.2	1.8
1989. 1.	5.0	1	10	3.0	0.2
2.	4.3	0	7	3.1	0.6
1990. 12.	5.7	2	16	7.0	4.3
1991. 1.	5.7	0	19	2.5	-0.4
2.	5.9	0	21	1.6	-1.1

(2) 改良柵の現地効果調査

風洞実験の結果にもとづき設計した改良柵の構造は図2に示すとおりである。使用部材は末口径10cm、長さ 360cm のスギの間伐材で、施工前に防腐処理を行った。できあがり柵高は2.7m、延長100mにわたって施工した。改良柵がクロマツ林に及ぼす影響

を判定するため、林帯前面に高さ1mの化繊ネット（密閉度30%）をもつ対照区、従来柵を施工した従来柵区、改良柵を施工した改良柵区を設定し、各区において風速、空中塩分、クロマツ林伸長量の比較測定を行った。

風速測定は柵または化繊ネットと直交測線上で、柵より汀線に向かって20mの地点の地上高3mの値を規準値とし、柵後方5, 15, 30, 50mの地点に鉄塔を建て、地上高0.5, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5, 9.0, 10.0, 12.0mの風速を測定した。

空中塩分量は、防風柵前5m高さ2mの値を規準値とし、風速測線上の鉄塔に地上高3.0から12まで1.5m間隔で設置した塩分トラップに装着したガーゼに付着した量を測定した。

クロマツ林の生長に及ぼす影響はそれぞれの調査区においてクロマツ梢頭部の伸長量を経年測定し、比較した。

(3) 結果と考察

風速測定及び、空中塩分の観測時には、風向きはWNW-Wで柵にはほぼ直角であった。ただし、改良柵区と対照区の測定時には、平均風速は約10m/sであったのが、その後行った従来柵区の測定の際は約8m/sと低下したが、規準値に対する各地点の相対値の比較なので差し支えないものと判断した。各区の地形と樹高は図8のようになっている。

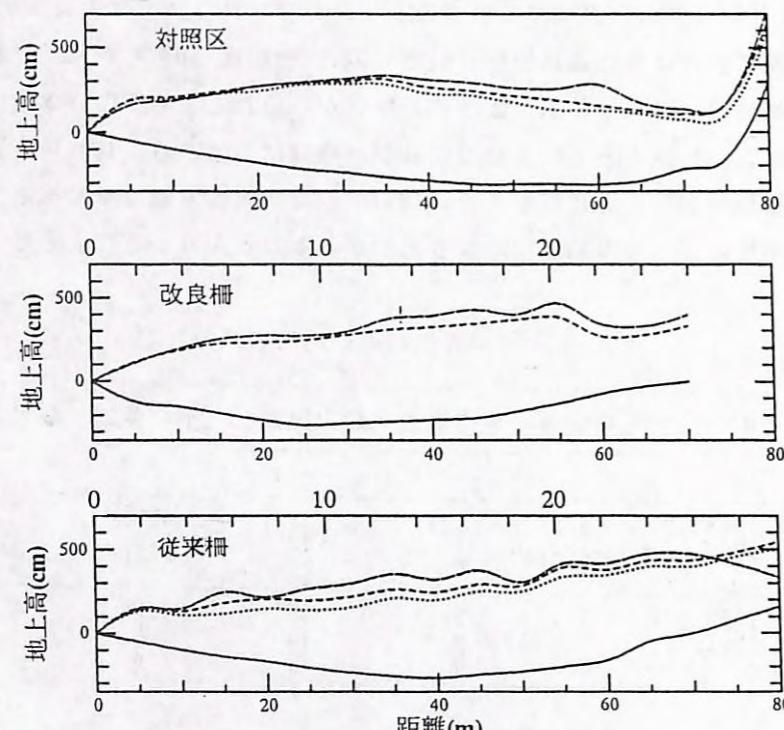


図8. 柵位置を0cmとしたときの地形と樹高
(— : 地形) 平均樹高 : 1987年
----- 1989年
——— 1992年

現地での風速は風洞実験と異なり、柵後の地形やクロマツ林の樹高等に影響される。風速を図8の平均樹高の樹冠直上と樹冠上2m付近の地点で比較したものが図9, 10である。

対照区と改良柵区を比較すると(図9)、柵後方20m付近まで減風効果が顕著にみられ、樹冠直上で30m、樹冠上2m付近で40mまで対照区の減風率を上まわっている。また、従来柵区と改良柵区で比較すると(図10)、風洞実験では密閉度の低い改良柵の方が減風域が広がるという結果が出ていたが、実際の測定では樹冠直上は減風域は風洞実験ほど広がってはいない。しかし、樹冠上2mでは相対風速は従来柵型のものより2割ほど低く、その効果は柵後方40mまでみられる。

空中塩分量はガーゼに捕捉された塩分を一定量の純水に一定時間浸水し、水の電導度を計測することによってNaClの濃度を求め、その値を比較した。

防風柵前5m、高さ2mの値を規準値100とすると、改良柵区の樹冠直上では、柵後方30m付近まではほぼ0に近く、樹冠上2mでも50前後で推移しており、柵後方30m付近までは、その減少率は対照区よりも大きい(図11)。

次に従来柵と改良柵の2種類の柵施工区で対照区の値を100として比較してみた(図12)。

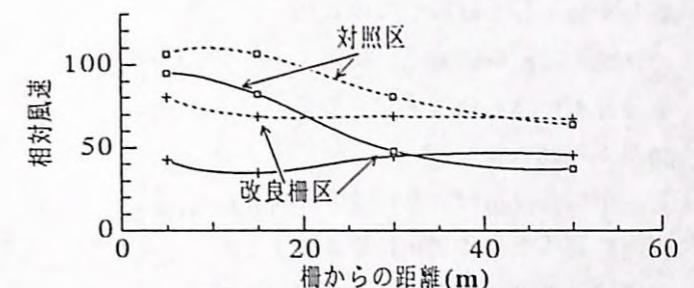


図9. 対照区と改良柵区の風速分布
柵より汀線側で測定した風速を100としたときの値
(実線:樹冠直上, 破線:樹冠上2m)

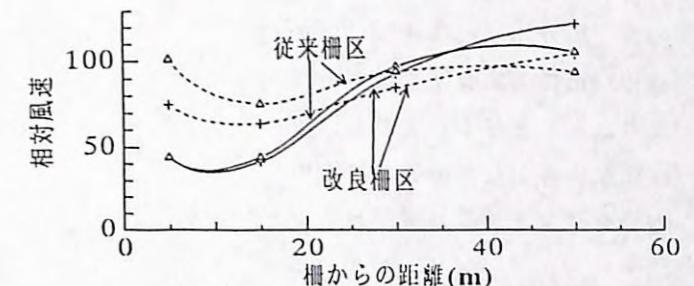


図10. 従来柵区と改良柵区の風速分布
対照区で測定した風速を100としたときの値
(実線:樹冠直上, 破線:樹冠上2m)

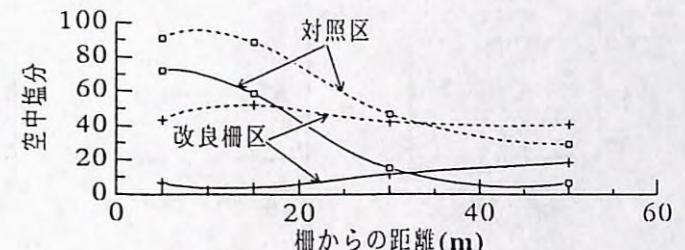


図11. 対照区と改良柵区の塩分分布
柵より汀線側で捕捉した塩分量を100としたときの値
(実線:樹冠直上, 破線:樹冠上2m)

従来柵では、空中塩分の減少効果が20m付近までなのに対して、新しく施工した縦横型の改良柵の区域では、樹冠直上、樹冠上2mともに35m付近までその効果がみられる。

空中塩分の相対値も、改良柵区の樹冠直上では15m付近までほぼ0に近い(図11)。樹冠上2mでも柵直後で40で、その後方も従来柵区より約3割少ない。また、空中塩分の垂直分布(図13)をみると、改良柵区の空中塩分比は、高さ3.0mから12.0mの測定範囲で他の2区よりほとんど減少しており、改良柵が柵後かなりの範囲で空中塩分を減少させる効果があることが分かる。

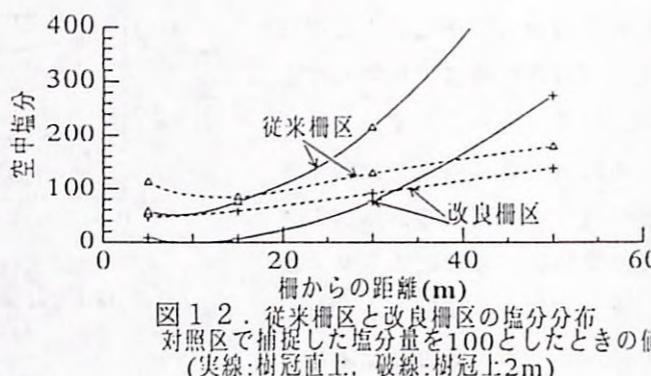


図12 従来柵区と改良柵区の塩分分布
対照区で捕捉した塩分量を100としたときの値
(実線:樹冠直上, 破線:樹冠上2m)

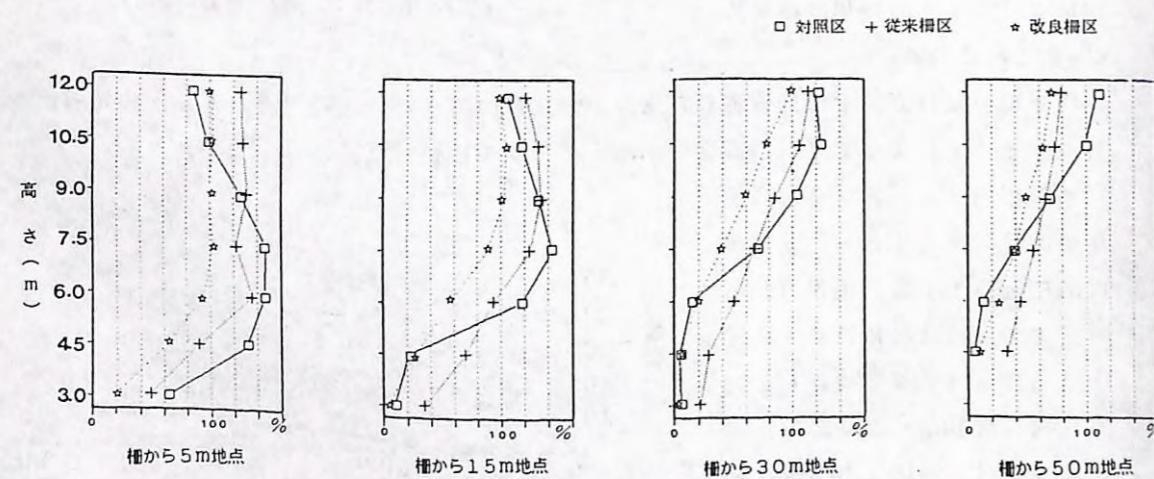


図13 対照区、従来柵区と改良柵区の空中塩分垂直分布

図14に1989年及び1991年の柵の高さを0mとしたときの樹高曲線を、図15に1991年のクロマツ林の梢頭部の伸長量を示した。1989年から1991年の2年間での平均樹高の変化を見ると、柵後方10m付近までは1989年よりも1991年の方が樹高が低く、対照区は顕著である。生长期にかなり伸長しても、毎年、冬の強い季節風によって樹冠上部が枯損してしまうものと考えられ、対照区はその影響を特に受けおり、間伐柵区は柵の防風作用により被害が軽減されているものと考えられる。

1989年と1991年の1、2月の気温及び、風速のデータを比較すると(表1)，1991年の方が気温も低く季節風も強い。このため、かなり樹冠上部が枯損し、林縁部の樹高が逆転したものと考えられる。1991年の夏に調査したクロマツ梢頭部の伸長量は柵後方10m付近までは柵のない対照区の方がむしろ伸長量は大きい。1990～1991年の冬季にかなり枯損した後、別の枝の梢頭部が伸長したものと考えられる。その後方15～45mまでは従来柵が、さらに60m以上後方になると改良柵区の伸長量が大きいことが分かる。対照区はネット後30mまでほとんど樹高は伸びていない。1年間の伸長量も平均で15cm前後である。ネット後30m付近までは、風速・空中塩分量とともに間伐材防風柵区の値を上回っている。規準値の約50% (樹冠直上) の値になる30m以降、伸長量は20cm以上となり、2年間で平均樹高も高くなっている。

従来柵(K-I)区、改良柵(K-II)区ともに柵後10m以降は対照区よりも風速、空中塩分の結果と対応して良い成績をおさめている。改良柵区は30m付近までは1年間に20cm前後、それ以降は30cm前後伸びている。従来柵区は、45m付近までは改良柵のそれよりも良好な伸びを示し、30cm前後であるが、それ以降は20cm前後で、改良柵の方がよく伸びしており、この傾向は、2年間の樹高変化にも現れている。

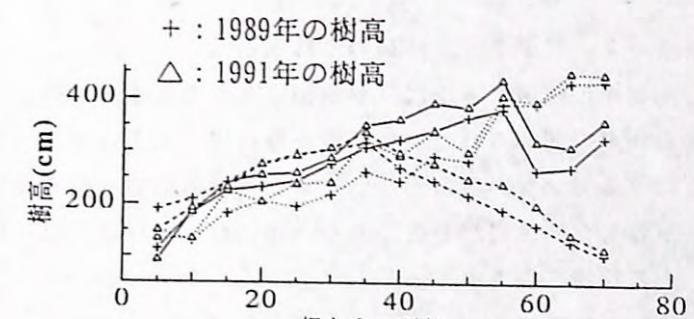


図14 柵の位置を0mとしたときのマツの平均樹高
(実線:改良柵区, 点線:従来柵区, 破線:対照区)

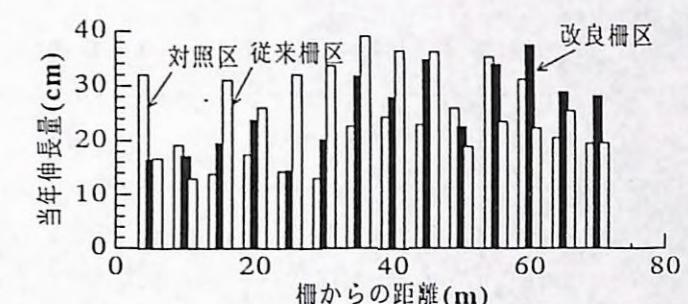


図15 1991年のクロマツの平均伸長量

今回施工した改良柵と従来柵との差は、風洞実験ほど現地では現れていないが、従来型と同様に化繊ネット（対照区）に比べると、かなり防風効果はあることが分かった⁸⁾。

（溝口康子）

2. 化繊ネットに替わる防風柵工

従来の化繊ネットは日本海側東北部の冬季の強風により1年で摩耗して修理が必要な場合が多く認められた。毎年の修理に掛ける人件費等の管理費を容易に確保できる社会情勢に至っていないことから、クロマツ林の前線の健全な管理にはより耐久性に優れ、施工上も容易な防風柵が必要であり、間伐材を部材とした比較的施工が容易な防風柵を設計し、その性能を調査する。

1) 実験方法

森林総合研究所の風洞装置を用いた。模型は3つの型を考案した。Maru-1, Maru-2型は、直径約10cmの半割材、Kaku-1型は10cm×5cm方形の角材を使用することを想定した（表2）。

表2 化繊ネットに替わる防風柵模型の諸元

種類	高さ	主な部材	遮風率
Maru-2	9.7cm & 10.7cm	丸棒、長さ1.1cm	50%
Maru-2	9.7cm & 10.7cm	丸棒、長さ1.8cm	54%
Kaku-1	9.7cm & 10.7cm	角材、長さ2.0cm	49%
ネット	10.2cm	化繊	50%

各模型の構造は図16, 17, 18に示す。各柵の遮風率はほとんどが50%前後であった。これらの防風柵に比較するため化繊ネットによる防風網柵模型も作成した。

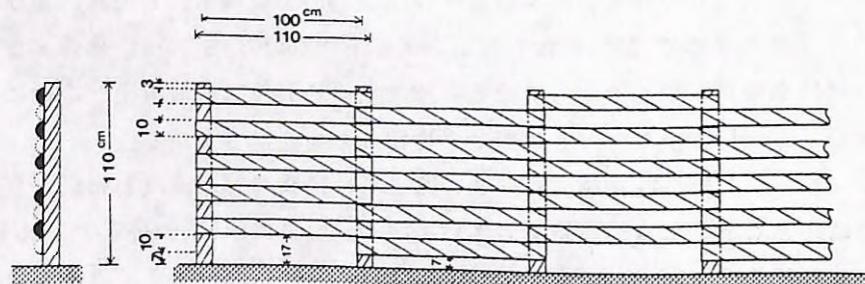


図16. Maru-1型防風柵の構造

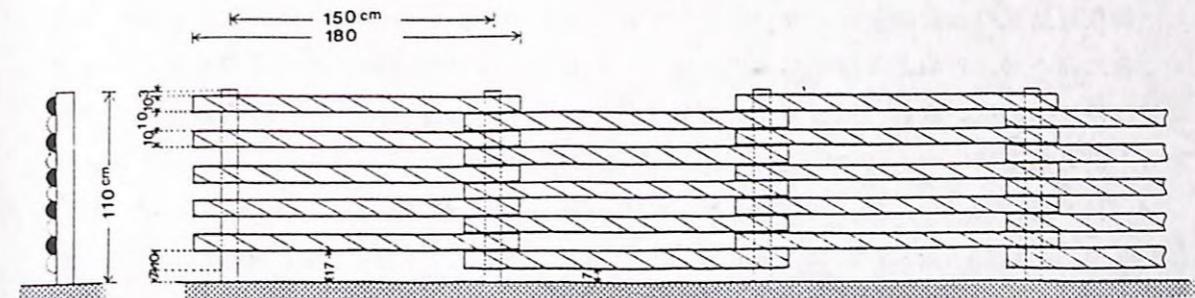


図17. Maru-II型防風柵の構造

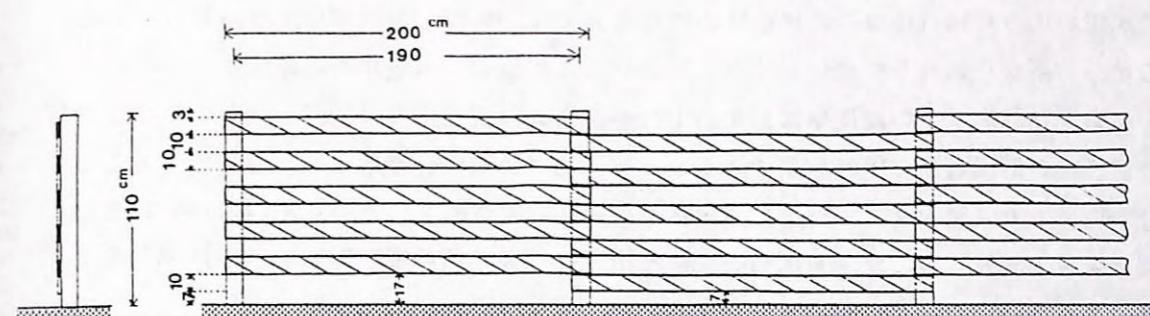


図18. Kaku-I型防風柵の構造

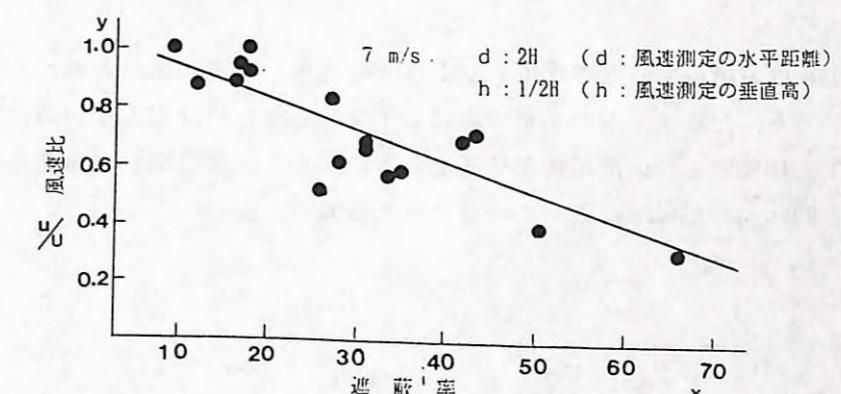


図19. 遮蔽率と風速比との関係 (田中, 1969)

間伐材防風柵は図のように高い所で10.7m、低い所で9.7m、平均10.2mとなり、柱ごとに高さに段差のある柵になるのに対し、化繊ネットは10.2mの一定高である。風速測定は段違いの低い高さ9.7mの柵の部分で行い、水平方向は柵高(H)の倍数に測点を取り、柵の風上側に-4, -2, 0(柵位置)、風上側に0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30Hとし、垂直方向は高さ(cm)0.4, 0.8, 1.2, 2.2, 3.2, 4.2, 5.2, 6.2, 7.2, 8.2, 9.2, 10.2, 11.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0として、風洞内トラバースに装置された熱線風速計で測定した。測定風速は、前述の根本の理論式¹⁾により、野外の風速15m/sに相当する6.9m/sとした。

2) 結果と考察

間伐材防風柵は化繊ネットと異なり、横棒の間が互い違いに空いている構造である。このため、化繊ネットの場合は、ネットの直後で風速がかなり低下するのに対し、間伐材の防風柵のような構造の場合は柵直後の横棒の間では90%以上の風速比になる場合もある。しかし、柵から離れるに従いネットの風速分布に近似した風速比を記録する。

なお、化繊ネットの遮風率は51%のものを使用したが、田中(1969)²⁾らの化学繊維製の防風網の防風効果の実験結果によると、風速比は防風網の遮蔽率によって異なることが分かっており(図19)，浜中の海岸林最前線に設置されている高さ約1.0mの化繊防風網は遮蔽率30%なので、今回風洞実験に使用された網(遮蔽率51%)より、防風効果は少ないものと考えられる。

3つのモデルと化繊ネットの風速比の分布は図20, 21, 22に示した。3つのモデルの内では角材を使用したKaku-1型が柵後の減風範囲が最も大きい。Maru-1, 2型では風速比30%以下の比較ではMaru-1型に柵後20H付近まで認められるが、50%以上の風速比になると、Maru-2型の方が減風範囲が広く表れる。

減風範囲だけを考えるとKaku-1型が有利であるが、材料の経費は丸棒を使用する方が安価になるであろう。

3つのモデルは減風範囲の点で化繊ネットに十分代用しうる防風工と考えられる。また、耐風性においても、化繊ネットが1年で摩耗して交換しなければならないのに対し、防腐処理によって、10年以上の耐用年数が見込まれる。経費、作業効率、減風範囲等を総合的に考慮するとMaru-2型が現地に適していると考えられる。

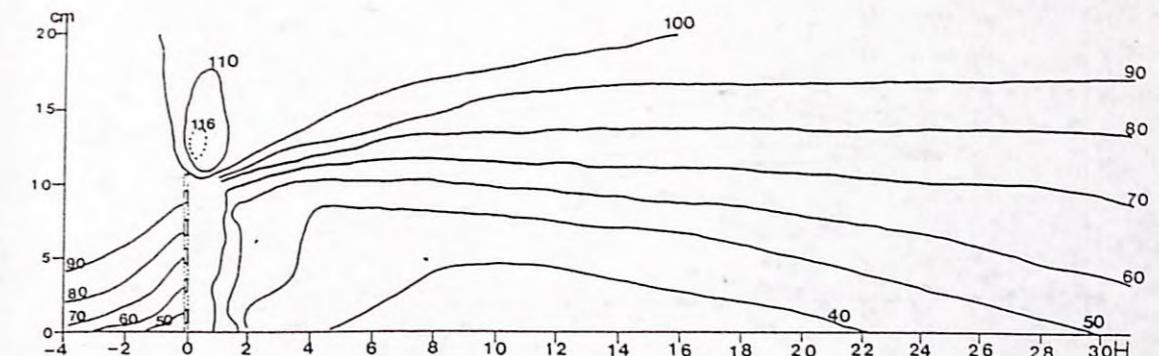


図20. Maru-I型防風柵の風速比の分布

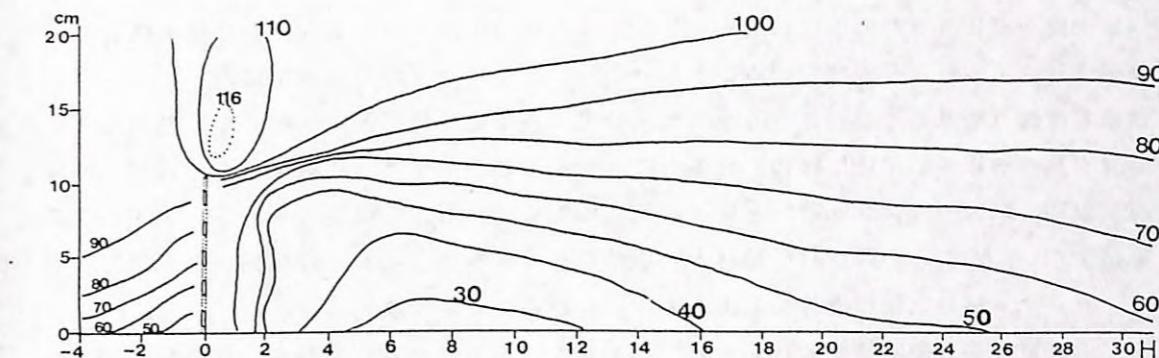


図21. Maru-II型防風柵の風速比の分布

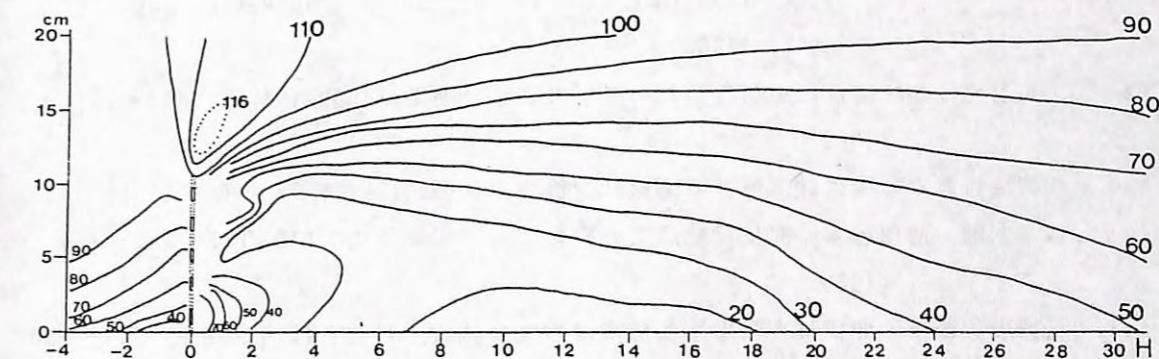


図22. Kaku-I型防風柵の風速比の分布

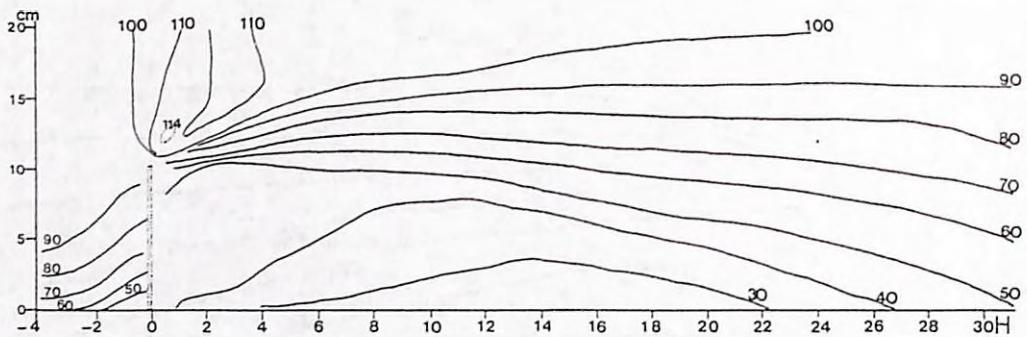


図23. 化繊防風網の風速比の分布

▽ まとめ

密閉度を変化させたの改良柵（K-II型）は、風洞実験、現地調査ともに防風機能が従来柵（K-I型）より優れていることが分かった。クロマツ林の成長量に関しては、今後継続して調査を進める必要はあるが、減風効果、空中塩分捕捉効果はなどから判断してクロマツ林の前線帶の環境は緩和されるものと考えられる。また、化繊ネットの代替え間伐材防風柵（Maru-1, 2, Kaku-1）も施工が比較的簡単で、耐久性は勝っており、実用性に問題は少ない。これらの間伐材を部材とする防風柵は、柵高、経費、作業効率等が異なるので、クロマツ林の立地環境等を考慮して使い分けることが望まれる。

なお、現地調査を実施するにあたり、ご配慮をいただいた秋田営林局、同管内酒田営林署並に同署浜中海岸治山事業所に感謝します。

（河合英二）

引用文献

- (1) NEMOTO, S. : Similarity between Natural Wind in the Atmosphere and Model Wind in a wind Tunnel, Part 1. Pap. Met. Geophys. 12, 30-52 (1961)
- (2) 工藤哲也ほか：間伐材を利用した防風柵の施工と効果, 100回日林論, 693~694, (1989)
- (3) 松岡廣雄ほか：間伐材防風柵の塩風減少機能, 100回日林論, 689~690 (1989)
- (4) 成田七郎, 浦田忠孝：間伐材防風工の開発, 秋田局業研集 昭63年度, 142~149, (1989)
- (5) 松岡廣雄ほか：間伐材を利用する防風柵の改良試験, 41回日林関東支論, 177~180,