



Title	防風林の構造が気象改良効果に及ぼす影響に関する研究
Author(s)	佐藤, 隆光; SATO, Takamitsu
Citation	北海道大学大学院農学研究科邦文紀要, 24(2), 113-164
Issue Date	2002-02-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/12200
Type	departmental bulletin paper
File Information	24(2)_p113-164.pdf



防風林の構造が気象改良効果に及ぼす影響に関する研究*

佐藤 隆 光**

(北海道大学大学院農学研究科環境資源学専攻 地域環境学講座農業物理学分野)

Studies on the Effects of Shelterbelt Structures on Climatic Improvements*

Takamitsu SATO**

(Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8559, Japan)

目 次

記号の説明	114	2) 天気による相違	124
I. 序論	116	D. 考察	125
A. はじめに	116	a. 防風林の構造と減風効果	125
B. 防風施設の気象改良効果に関する既往の研究	116	b. 防風林の構造および外部気象環境が昇温効果に与える影響	127
a. 防風施設の機能と派生効果	116	1) 地表面熱収支モデル	127
b. 防風施設の構造と気象改良効果の関係	117	2) 昇温効果に影響を及ぼす因子	128
c. 数値モデルによる研究	117	3) 最小風速が昇温効果に及ぼす影響	128
C. 防風林の計画設計における問題点	118	4) 放射環境が昇温効果に及ぼす影響	129
D. 本研究の目的	118	5) 最大効果を生み出す防風林構造の気象環境依存性	130
II. 構造の異なった防風林における風速と気温分布の観測	118	E. まとめ	130
A. 防風林の概要	119	III. 防風林の構造が減風効果に及ぼす影響に関する数値実験	130
B. 方法	119	A. 数値実験モデルの構築	130
a. 風速分布の観測方法	119	a. 基礎方程式	130
b. 気温分布の観測方法	119	b. 境界条件と初期条件	132
c. 林内全天日射量の観測方法	120	c. 数値解法, 計算手順および計算領域	132
d. 葉面積密度の推定方法	120	B. モデルの検証	133
C. 結果	120	a. モデル定数の設定	133
a. 葉面積密度	120	b. 観測結果との比較	133
b. 風速分布	121	C. 実験条件	135
c. 気温分布	123	D. 結果	135
1) 昼夜による相違	123	a. 異なる葉面積密度における風速の水平分布	135
		b. 異なる幅における風速の水平分布	136
		c. 樹木の鉛直構造による風速分布の相違	138
		E. 考察	139
		a. HPAI が等しい場合における風速の水平分布	139
		b. HPAI と最小風速の関係	140
		c. HPAI と減風効果範囲の関係	141
		d. 減風効果を対象にした最適な防風林の構造について	142
		F. まとめ	143
		IV. 防風林の構造が昇温効果に及ぼす影響に関する数値実験	143
		A. 数値実験モデルの構築	143

*北海道大学博士論文 (2000)

Doctoral thesis submitted to the Graduate School of Agriculture, Hokkaido University (2000)

**現住所: 財団法人日本気象協会北海道支社

〒064-8555 札幌市中央区北4条西23丁目

Present address: Japan Weather Association, Kita-4, Nishi-23, Chuo-Ku, Sapporo, 064-8555 Japan

a. 基礎方程式	143
b. 葉面熱収支	145
c. 地表面熱収支	146
d. 側面・上端・下面の境界条件と初期条件	147
e. 数値解法, 計算手順および計算領域	147
B. モデルの検証	147
a. 計算条件	147
b. 観測結果との比較	147
C. 実験条件	147
D. 結果	148
a. 異なる葉面積密度における気温の水平分布	148
b. 異なる幅における気温の水平分布	149
c. 樹木の鉛直構造における気温の水平分布の相違	149
E. 考察	150
a. 防風林が及ぼす気流の変化と最大昇温の関係	150
1) 最大昇温の出現位置	150
2) 最大昇温量	152
b. 防風林が及ぼす気流の変化と昇温効果範囲の関係	153
c. 昇温効果を対象にした最適な防風林の構造について	153
F. まとめ	155
V. 結論	156
謝辞	158
引用文献	158

記号の説明

A	葉面積密度 [m^2m^{-3}]
C_{ϵ}	k- ϵ モデルにおける定数 (=1.44)
$C_{2\epsilon}$	k- ϵ モデルにおける定数 (=1.92)
C_d	植物体の抵抗係数
C_{ex}	顕熱と潜熱輸送のバルク輸送係数
C_g	土壌の体積熱容量 [$\text{JK}^{-1}\text{m}^{-3}$]
C_p	空気の定圧比熱 (=1005) [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
C_{pe}	風の流れのシミュレーションモデルにおける定数 (III-5式)
C_H	風の流れのシミュレーションモデルにおける定数 (III-7式)
C_L	植生内渦スケール L に対する防風林の風上側における渦のスケール L_H の寄与率 (III-6式)
C_μ	k- ϵ モデルにおける定数 (=0.09)
D_C	樹冠層の厚さ [m]
DL_{U_r80}	防風林の風下側における $U_r \leq 80\%$ の範囲 [m]
DL_{U_r80}/H	樹高の倍数で表した防風林の風下側における $U_r \leq 80\%$ の範囲
$DL_{\Delta T0.2}$	防風林の風下側における $\Delta T \geq 0.2^\circ\text{C}$ の範囲 [m]
$DL_{\Delta T0.2}/H$	樹高の倍数で表した防風林の風下側における $\Delta T \geq 0.2^\circ\text{C}$ の範囲
E	地表面における蒸発量 [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
E_c	葉面における蒸散量 [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
F_c	放射に対する葉面の傾きを表すファクター
G	地中伝熱量 [Wm^{-2}]
h_p	地表直上の計算点の高さ [m]
H	樹高 [m]; 地表面における顕熱輸送量 [Wm^{-2}]
Ht	樹幹層の高さ [m]
Ht/H	樹高の倍数で表した樹幹層の高さ
H_c	葉面における顕熱輸送量 [Wm^{-2}]
HP	HPAI [m^2m^{-2}]
HPAI	葉面積密度を防風林と直角に水平方向に積分した値 (horizontal plant area index) [m^2m^{-2}]
k	林における全天日射量の消散係数; 乱

	流エネルギー [m^2s^{-2}]		[Wm^{-2}]
K_h	熱拡散係数 [m^2s^{-1}]	$Sc \downarrow$	林内における日射量の下向き成分
l	水の気化潜熱 ($=2.5 \times 10^6$) [Jkg^{-1}]		[Wm^{-2}]
l_c	葉のスケール [m]	$Sc \uparrow$	林内における日射量の上向き成分
lE	地表面における潜熱輸送量 [Wm^{-2}]		[Wm^{-2}]
lE_c	葉面における潜熱輸送量 [Wm^{-2}]	SR	林内の地上高 1 m における全天日射量
L	植生内における渦のスケール [m]		[Wm^{-2}]
$L \downarrow$	大気放射量 [Wm^{-2}]	SR_0	林上端(露場)での全天日射量($=S \downarrow$)
$L_c \downarrow$	林内における長波放射量の下向き成分		[Wm^{-2}]
	[Wm^{-2}]	SR/SR_0	林内における全天日射量の透過率
$L_c \uparrow$	林内における長波放射量の上向き成分	t	時間 [s]
	[Wm^{-2}]	T	気温 [K]
L_H	防風林の風上側における渦のスケール	T_g	地温 [K]
	[m]	T_c	葉温 [K]
L_V	水平一様な植生内での渦のスケール	T_s	地表面温度 [K]
	[m]	u	風速 [ms^{-1}]
Nu	ヌッセル数	u/u_0	相対風速 ($=Ur$)
p	気圧 [$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$]	u_i	平均風速ベクトル (u_1 : 防風林に直角方向風速, u_2 : 鉛直方向風速) [ms^{-1}]
PAD	葉面積密度 (plant area density)		摩擦速度 [ms^{-1}]
	[m^2m^{-3}]	U_r	防風林の風上-10 H の同一高度を基準にした相対風速 [%]
PAD_c	樹冠層における葉面積密度 [m^2m^{-3}]		Ur_{min} Ur の最小値 (最小風速) [%]
$\overline{PAD_c}$	PAD_c の平均値 [m^2m^{-3}]	Ur_v	防風林の風上-10 H の高度 1 H を基準にした相対風速 [%]
PAI	葉面積指数 (plant area index)		W 防風林の幅 [m]
	[m^2m^{-2}]		W/H 樹高の倍数で表した防風林の幅
PI	葉面積指数 (plant area index)		x_i 空間座標 (x_1 : 防風林に直角方向, x_2 : 鉛直方向) [m]
	[m^2m^{-2}]		$X_{Ur_{min}}$ 最小風速の出現位置 [m]
Q	有効エネルギー [Wm^{-2}]		$X_{Ur_{min}}/H$ 樹高の倍数で表した最小風速の出現位置
q	比湿 [kgkg^{-1}]		XVW 相対風速 0 % の等値線が地表と交わる風上側の位置
q_s	地表面温度 T_s における飽和比湿		XVL 相対風速 0 % の等値線が地表と交わる風下側の位置
	[kgkg^{-1}]		$X_{\Delta T_{max}}$ 最大昇温の出現位置 [m]
q_{SAT}	気温 T における飽和比湿 [kgkg^{-1}]		$X_{\Delta T_{max}}/H$ 樹高の倍数で表した最大昇温の出現位置
$q_{SAT}(T_c)$	温度 T_c における飽和比湿 [kgkg^{-1}]		z_0 地表面粗度 [m]
$q_{SAT}(T_s)$	温度 T_s における飽和比湿 [kgkg^{-1}]		α 空気の熱伝導率 ($=21 \times 10^{-6}$) [m^2s^{-1}]
r_A	葉面境界層抵抗 [sm^{-1}]		α_g 地表のアルベド
r_s	気孔抵抗 [sm^{-1}]		
r_{smin}	最小気孔抵抗 [sm^{-1}]		
rh	相対湿度 (0 ~ 1)		
Re	レイノルズ数		
R_c	葉面に吸収される放射エネルギー		
	[Wm^{-2}]		
S	スカラー風速 [ms^{-1}]		
$S \downarrow$	林上端の日射量 (林外の日射量)		

α_c	葉面のアルベド
β	地表面の蒸発効率
ΔT	防風林の風上-10 H の同一高度を基準にした気温差 [°C]
ΔT_{3H}	防風林の風下 3 H 地点と風上-10 H 地点との気温差 [°C]
ΔT_{max}	最大昇温量 (ΔT の最大値) [°C]
ΔT_s	防風林の風上基準点との地表面温度差 [°C]
ΔT_{smax}	ΔT_s の最大値 [°C]
ε	乱流エネルギーの消散率 [m^2s^{-3}]
κ	カルマン定数 (=0.4)
λ_g	土壌の熱伝導率 [$Wm^{-1}K^{-1}$]
ν	空気の動粘性係数 ($=14.6 \times 10^{-6}$) [m^2s^{-1}]
ν_t	渦粘性係数 [m^2s^{-1}]
ρ	空気密度 (=1.29) [kgm^{-3}]
σ	ステファン・ボルツマン定数 ($=5.67 \times 10^{-8}$) [$Wm^{-2}K^{-4}$]
σ_k	乱流プラントル数 (=1.0)
σ_ε	ε のプラントル数 (=1.3)
ψ	気温と比湿の積分普遍関数
\square_0	防風林の風上側基準点における値を示す

I. 序 論

A. はじめに

防風施設は先人の知恵というべきもので、古くから我々の生産・生活の中で利用されてきた。我が国は、冬は季節風、夏は台風の進路に当たるため、耕地等においては古くから防風施設が設置されてきている。農林水産省構造改善局が全国 615 カ所の農業改良普及所を対象に実施した防風施設に関する実態調査¹⁾によれば、防風施設は全国平均で 90%もの普及率であった。このうち防風林の割合は、全国平均で 26%であり、特に北海道では 43%にもものぼっている。近年の農業作業機械の大型化に伴い、防風林は農作業を妨げる存在と見られることが多い。しかし北海道十勝地方では、農地保全のみならず景観の観点から防風林を植栽することが見直されつつある²⁾。

防風林は「防風」以外にも様々な気象改良機能

を有している。農業生産においては、その機能を利用して生産を向上させたり、農地を保全している。交通機関では、吹雪などの交通障害を防ぐために防風(防雪)林が用いられている。また環境調節の観点から、大規模土地改変による気象変化を軽減させる目的で防風林が利用される例も見受けられる。このように防風林は、広く社会的な役割を担っている。

防風林の気象改良効果に最も強く影響を及ぼすものは、防風林の構造である。したがって、防風林の植栽や維持管理を行う場合、最小のコストで最大の気象改良効果が得られるように、防風林の構造を計画設計することが要請される。ところが、防風林の計画設計にあたっては極めて経験的な要素が強く、定量的な解明が十分なされないまま今日に至っている。

本章では最初に、防風施設の気象改良効果に関する既往の研究について概観する。その中で、防風施設の機能と派生効果、および防風施設の構造と気象改良効果の関係についてまとめる。さらに、新しい研究方法である数値モデルによる研究についても触れる。次に、これまでの研究成果を踏まえて、防風林の計画設計における問題点について明らかにする。最後に、この問題を解決し、防風林構造の定量的な計画設計を可能にするための本研究の目的について述べる。

B. 防風施設の気象改良効果に関する既往の研究

a. 防風施設の機能と派生効果

防風施設の機能に関する研究は古くから数多く行われてきた。この研究成果は、いくつかの報告によって総合的にまとめられている^{3),4),5)}。防風施設が持つ基本機能は、減風、粒子捕捉、日射遮蔽に大別できる。これらの機能が原動力となって派生的な効果が生み出され、最終的に気象災害の軽減・防止へとつながる。また農業生産では、これらの機能・効果によって作物の生育を促進し、収量の増加と品質向上をもたらす。

減風機能は防風施設が持つ最も基本的な機能で、古くから数多く研究されている。防風施設は風の流れに対する障害物となることで風の流れの向きを変化させて、その風下となる領域で風を弱めるものである。粒子捕捉機能は、防風施設がフィ

ルターの役割を果たして霧粒、塩分、砂、雪粒子などを捕捉する機能である。霧の場合、防風（防霧）林が霧粒を捕捉することにより、日射・日照が改善され、また視程も良好になる⁶⁾。防雪林では、粒子捕捉機能のみならず減風機能も利用して吹きだまりを抑制している。

昇温効果は減風機能から派生する効果であり、晴天日中の防風施設風下において気温および地温が上昇することが報告されている^{7),8),9)}。この温度上昇効果は、寒冷地において見逃すことのできない防風施設の効果といえる。北海道長沼町での収量調査結果によれば、冷害年であっても防風区では平年並みの収量であった¹⁰⁾。これは、減風機能のみならず、昇温効果も影響していると考えられる。このように防風施設には様々な機能と派生効果が確認されているが、減風機能以外の機能や派生効果については、系統的な研究がなされておらず、未解明な部分が多い。

b. 防風施設の構造と気象改良効果の関係

前述したような防風施設の機能や効果を最大限利用するために、防風施設の構造と気象改良効果の関係について古くから研究が行われ、その成果がまとめられている^{3),4),11)}。

防風施設は気流に対する障害物となることで減風機能を生じさせるものであることから、減風効果に最も強く影響を与えるものは空隙率（水平方向からみた防風施設の全面積に対する空隙の割合；密閉度（%）＝100－空隙率）である。そのため、これまでの数多くの研究では、防風施設の構造として空隙率が用いられてきた。空隙率が大きいと、減風は小さく、効果範囲も狭い。逆に空隙率が小さすぎると、風下直後で風は弱いですが、渦が発生し、効果範囲が狭くなる。そのため、減風効果に対して最適な空隙率は40～50%との報告がある⁴⁾。また、横田ほか(1972)¹²⁾も、空隙率40%前後のものが大きな昇温効果を期待できるとしている。ただし、これらは幅が狭い防風柵や防風ネットが対象である。

従来の防風林を対象にした研究でも、防風林の構造として空隙率が多く用いられてきた。防風林における空隙率の測定には確定的な方法はないが、投影的に評価する方法、すなわち防風林を水

平方方向に写真撮影して林と背景の濃度差を光学的に測定する方法¹³⁾がよく用いられる。Naegeli (1946)¹⁴⁾は、空隙率を“dense”, “medium”, “loose”という定性的な分類をして、防風林前後の風速分布パターンを比較している。その結果、“medium”の空隙率で最も大きな減風効果が得られると報告している。この成果は、空隙率を定性的に分類しているために防風林の計画設計に役立つとは言い難い。

防風林では、葉を含む植物体が気流に対する抵抗物になる。このため、同じ防風林でも落葉期と繁茂期で減風効果が異なる¹⁵⁾ように、防風林の密度が気象改良効果に大きく影響する。また密度が同じでも、防風林の幅が大きくなると気流が受ける抵抗が大きくなる。田中ほか(1956)¹⁶⁾は、野外観測結果から最も大きな減風効果が得られる幅は5列程度と報告している。しかし彼らは、空隙率と幅のそれぞれが減風効果に及ぼす影響を議論していない。そこで、Takahashi (1978)¹⁷⁾およびWang and Takle (1996)¹⁸⁾は、防風林の幅の影響を空隙率の影響から切り離して検討し、幅が広いほど最小風速位置が林に近づくことを報告している。

このように防風林では、空隙率のみならず密度や幅が気象改良効果に影響を及ぼす。そのため、これらの構造因子と気象改良効果の関係は単純ではなく、明らかになっていない。さらに、最大の気象改良効果を得るための最適な防風林の構造も明らかになっていない。

c. 数値モデルによる研究

近年におけるコンピュータの発達および流れの解析アルゴリズムの開発に伴い、流体に関する数値モデル実験が盛んに行われるようになってきており、その利用範囲も広範にわたっている¹⁹⁾。これに対応して、防風施設の気象改良効果を数値シミュレーションモデルによって検討しようという試みがなされている。早川・元田(1985)²⁰⁾は2次元水平壁を対象にしてレイノルズ数および空隙率と流れの構造について考察している。ただし、層流を対象にしたモデルを用いたため、非現実的な結果になっている。Wang and Takle (1995)^{21),22)}は、防風柵前後における流れを表現する数値モデ

ルを開発し、空隙率が流れのパターンに及ぼす影響を検討している。

これまでの数値モデルを用いた研究では、防風柵等の幅が狭い施設を対象にしたものが多い。また、対象とする現象も減風効果がほとんどで、その他の気象改良効果を対象にした研究はごくわずかである。しかし数値モデル実験は、後で述べるように野外観測や模型実験の欠点を克服できる可能性を持っており、防風林の気象改良効果を検討できる有効な方法と考えられる。

C. 防風林の計画設計における問題点

前述のように、防風施設の構造と気象改良効果に関する研究は数多く存在する。この成果を生かして、防風ネット・防風柵に関する計画設計指針が作成されている²³⁾。この理由として、防風ネット・防風柵の空隙率と気象改良効果に強い相関があり、さらに、これらの空隙率が容易に求められることがあげられる¹¹⁾。また人工的な施設であるため、気象改良効果の実験が容易であることも一因として考えられる。

一方、防風林の場合は、古くから研究されてきているにもかかわらず、防風林の計画設計にあたっては極めて経験的に行われてきた²³⁾。これは、防風林の構造と気象改良効果に関して定量的な解明がなされていないことが原因として考えられる。この理由として、次の2つが考えられる。

これまで幅が狭い防風施設と同様に、幅が広い防風林でも、その構造として空隙率が多く用いられてきた。防風林の場合、枝葉間の空隙の形が複雑で、さらに奥行きがあることから、単に2次元の空隙率が得られたとしても、その値と気象改良効果に関連付けることは難しい。例えば、空隙率ゼロであっても、樹木では通風があるが、板材等では風を通さない。さらに防風林では、幅と葉の密度それぞれが気象改良効果に影響を及ぼす。例えば、同じ防風林(すなわち幅が等しい)でも、落葉期と繁茂期では葉の密度が異なるので、気象改良効果の大きさが異なる。また、葉の密度が等しく幅が異なる場合も同様である。さらに、空隙率は幅と密度が複合したものと考えられるが、空隙率と幅および密度の関係が明らかとなっていない。したがって、目的とする空隙率になるように

幅や密度を決めることは困難である。すなわち、植栽完了時または樹木の成長後に、はじめて空隙率の測定が可能となり、空隙率を計画設計の時点で利用できない。このように、防風林の計画設計において利用しやすい防風林の構造因子が見出されていないといえる。

防風施設の構造と気象改良効果に関する従来の研究は、野外観測や模型実験によって行われてきた。野外観測は環境条件が多様に変動するために、同一条件下で解明しようとする特性を単純化して抽出することが難しい。また防風林の場合、目的とする構造の防風林を探し出すことができないこともある。一方、模型実験では熱や水移動現象を考慮することが難しく、コストがかかる欠点がある。さらに、模型と実物における葉の密度の相似関係が明らかになっていない問題点もある。そのため、防風施設に関する研究が数多くなされているものの、実物と対応した防風林の構造と気象改良効果の関係が定量的に解明されなかったと考えられる。

D. 本研究の目的

これまで述べてきた背景から、本研究の目的を次のように定めた。まず最初に、空隙率、幅、密度に代わる気象改良効果と強い相関を持ち数量化しやすい防風林の構造因子を見出す。次いでこの構造因子を用いて、防風林の構造と気象改良効果の関係を定量的に把握する。このとき、従来の研究方法の欠点を克服するために、気象改良効果に関する数値モデルを構築し、このモデルを用いて数値実験を行う。最後に、防風林の計画設計に利用しやすいように、得られた関係を利用して最大の気象改良効果を得るための最適な防風林の構造を明らかにする。なお、本研究では、気象改良効果として、防風林の最も基本的な機能である減風効果と、派生効果として寒冷地で期待される昇温効果を対象にした。

II. 構造の異なった防風林における風速と気温分布の観測

本章では、防風林の幅と密度が減風効果と昇温効果に与える影響を検討するために、樹木の密度と幅が異なる防風林を対象に気象観測を実施し

Table 1. Summary of the shelterbelt structures used in this study.

Field site	A	B	C	D1	D2	D3
Location	Chitose	Hayakita	Tomakomai		Toubetsu	
Width, W (m)	49	42	15	2.2(1 row)	3.9(2 rows)	6.3(3 rows)
Length(m)	>1000	200	100		35	
Height, H (m)	8.2	8.1	4.9		4.0	
Number of stands per unit area(ha^{-1})	3100	2100	1800		2600	
Species	<i>Abies sachalinensis</i> Masters	<i>Betula platyphylla</i> var. <i>japonica</i> Hara	<i>Quercus dentata</i> Thunb., <i>Quercus serrata</i> Thunb., <i>Acer mono</i> Maxim., <i>Larix leptolepis</i> Gordon		<i>Abies sachalinensis</i> Masters	
Stem diameter at breast height(cm)	21	11	12		5.0*	
Depth of canopy layer, D_c (m)	4.9	4.7	3.9		3.5	
Undergrowth and its height(m)	not exist	<i>Solidago altissima</i>	<i>Sasa nipponica</i>		not exist	
		1.5	1.0			

*measured at 0.25 m above ground surface.

た。また観測結果を基に、防風林の減風効果と昇温効果に対して強い関係を持つ新たな構造因子についても検討した。さらに簡単な理論的解析を行って、気象環境が昇温効果に及ぼす影響について考察した。なお本章の気象観測は、気象改良効果に関する数値シミュレーションモデル構築（第III、IV章）のための基礎データを得ることも目的としている。

A. 防風林の概要

本研究では、北海道勇払平野および石狩平野に位置する6カ所の防風林を対象にした。対象防風林の概要をTable 1に示す。地点Aは幅が大きく樹冠が密で、写真判読による空隙率はゼロであった。また、下部には枯れ上がりによる樹幹層がみられた。地点Bも幅は広いが、樹冠はAより疎であった。樹冠の下に樹幹層がみられ、さらにその下は下草が繁茂していた。地点Cは落葉広葉樹が優占する混合林であった。樹幹層は無かったが、下草が繁茂していた。地点D1、D2、D3はいずれも間伐材を用いた試験防風林で、同一の樹高・形状の樹木が、D1は1列、D2は2列、D3は3列に植栽されていた。また、どれも下部が下開きになっていた。

B. 方法

a. 風速分布の観測方法

風速分布は、測器を順次移動させながら観測する移動観測と定点連続観測の2つの方法で行った。移動観測は三杯式の多点同時観測風速計（牧野応用測器社製）を用い、全ての地点で防風林と

直角風向時に実施した。観測は1993年から1998年にかけて行い、地点A、Bは夏期、D1、D2、D3は冬期に実施した。地点Cでは落葉樹を考慮して繁茂期（夏期）と落葉期（冬期）に観測を行った。防風林1カ所の観測に2～3時間要するため、時間変化を補正するための観測点として、防風林の風上-10H（Hは樹高、マイナスは防風林の風下側、プラスは風上側）の高さ2mに光電式三杯風速計を設置した。

連続観測は地点A、Cで風車型風向風速計（ヤング社製）および光電式三杯風速計（牧野応用測器社製）を用いて行った。観測期間は、地点Aでは1994年、1995年の6月～10月、Cでは1996年2月～9月である。センサーからの信号は、10分間の平均値を1時間毎にデータロガー（白山工業社製およびコーナシステム社製）に記録した。

b. 気温分布の観測方法

地点A、Cにおいて気温分布の連続観測を行った。直径約2mmの白金抵抗温度計（千野製作所製）を白色塗装した放射除け（直径約10cm長さ約35cmの塩ビ管の一重管）に入れて自然通風させて観測した。自然通風であるため、放射除けの直径を大きくし、通風口を防風林と直角方向に向けることによって風の流入を妨げないようにした。観測期間は、地点Cでは1996年6月～9月で、Aでは1994年、1995年の6月～10月である。センサーからの信号は、瞬間値を1時間毎にデータロガー（白山工業社製）に記録した。本研究では、得られた1時間毎のデータを風向、昼夜、天気

よって分類し平均したものについて検討した。なお、自然通風で観測しているので、気温の測定精度を高めるに、地点Aで $-10H$ の風速が 2.5 ms^{-1} 以上の場合、地点Cで $-10H$ の風速が 1.3 ms^{-1} の場合のみの気温を対象にした。これらの風速は、あとで示すように、防風林と直角風向時に最も減風する $1H$ 地点において約 0.5 ms^{-1} の風速に相当し、細野ほか(1988)²⁴⁾による実験を参考にすると、気温の測定誤差は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以下と推定される。

c. 林内全天日射量の観測方法

防風林内の日射量の透過率から葉面積密度PADの季節変化を把握する目的で、地点A, Cにおいて全天日射量の連続観測を実施した。観測は林内中心部地上高 1 m において熱電堆式全天日射計(ブリード社製)を使って行った。センサーからの信号は、1時間積算値をデータロガー(白山工業社製)に記録した。観測期間は、風速分布の連続観測と同一である。透過率を正確に求めるためには基準値として防風林上端の日射量が必要であるが、本研究では各防風林から約 1 km 離れた露場観測地点における日射量を基準値として使用した。

d. 葉面積密度の推定方法

高樹木の葉面積密度PADを直接的に測定するには、樹木を破壊するとともに大がかりな装置が必要である。そこで本研究では、まずPADを鉛直方向に積分した葉面積指数PAI(plant area index)を求め、PAIからPADを推定するという方法を採用した。PAIの観測は、間接的・非破壊的にPAIを測定できるプラントキャノピーアナライザー(LAI-2000, LI-COR社製)²⁵⁾を使用した。測定は、1998年夏期に地点A, B, Cにおいて防風林に直角方向にほぼ等間隔な5点で行った。地点B, Cでは、下草層の上端で計測した。

さらに落葉期の地点Cでは、林内における全天日射量の透過率を使った次のBeerの法則を利用してPAIを推定した。

$$PI = -\frac{1}{k} \ln \left[\frac{SR}{SR_0} \right] \quad (\text{II}-1)$$

ここで、 PI : 葉面積指数 $\text{PAI} (\text{m}^2\text{m}^{-2})$, SR :

林内での全天日射量 (Wm^{-2}), SR_0 : 林上端(露場)での全天日射量 (Wm^{-2}), k : 消散係数である。 SR , SR_0 は1998年2月~3月の10時~14時の積算値を用いた。また消散係数 k は、落葉期のカシワ林での実測値、 $1.12^{26)}$ を使った。

PADはPAIを使って以下の方法で推定した。対象防風林では植物体が鉛直構造を成しているが、観測されたPAIには樹冠層における植物体が大部分を占めると考えられる。そこで、本研究では防風林の代表的なPADとして樹冠層におけるPAD(以下 PAD_c と表す)を用いた。 PAD_c の平均値(以下 $\overline{PAD_c}$ と表す)は次のように求められる。

$$\overline{PAD_c} = \frac{PI}{D_c} \quad (\text{II}-2)$$

ここで、 D_c : 樹冠層厚 (m) である。なお地点Cでは樹幹層がみられないため、樹冠層厚 D_c は樹高から下草層の高さを除いた厚さとし、これを落葉期にも適用した。

試験防風林である地点D1, D2, D3では、移動観測後に防風林が撤去されてPAIの測定ができなかった。これらの防風林は地点Aと樹種が同一であることから、 $\overline{PAD_c}$ は植栽密度に比例すると仮定して地点D1, D2, D3のPAIを推定し、それから $\overline{PAD_c}$ を求めた。また、D1, D2, D3ともに $\overline{PAD_c}$ は等しいと仮定した。

C. 結 果

a. 葉面積密度

地点Aにおける全天日射量の透過率 SR/SR_0 は、6月から10月にかけて3~5%のほぼ一定値で推移していた。したがって地点Aでは、この時期の葉面積指数PAIと葉面積密度PADの季節変化は小さいと考えられる。一方、地点Cでは6月の1カ月間に透過率が約75%から20%へと大きく変化し、その前後の期間はほぼ一定の値で推移していた。そのため、6月は落葉期から繁茂期への移行期と考え、6月のPAI, $\overline{PAD_c}$ は直線的に変化すると仮定して、上旬・中旬・下旬に分けて $\overline{PAD_c}$ を推定した。

PAIおよび $\overline{PAD_c}$ の測定結果と推定結果をTable 2に示す。地点Bの $\overline{PAD_c}$ は地点Aの

Table 2. Data of PAI (plant area index) and \overline{PADc} (averaged plant area density in the canopy layer) observed in the shelterbelts.

Field site	PAI(m ² m ⁻²)	\overline{PADc} (m ² m ⁻³)
A	5.74	1.17
B	1.94	0.41
D1, D2, D3	3.36	0.96
C (leafless period)		
March	0.28	0.07
(transition period)		
1st decade of June	0.74	0.19
2nd	1.65	0.42
3rd	2.56	0.66
(fully-leaved period)		
July-September	3.01	0.77

1/3であった。また地点Cでは落葉期は繁茂期の1/10以下であった。なお、地点B、Cにおける下草層のPAIはそれぞれ、5.96 m²m⁻²、4.05 m²m⁻²であった。

b. 風速分布

Fig. 1~Fig. 3は、防風林の風上端から風上-10H(地点D1、D2、D3は-7.5H)を基準にした相対風速 U_r の水平分布である。横軸は防風林からの樹高倍距離で、マイナスは風上側、プラス

は風下側である。また、風上-10H、高さ $z = 1H$ を基準にした相対風速 U_{rv} の鉛直分布も示した。Fig. 1が地点A、B、Fig. 2が地点C、Fig. 3が地点D1、D2、D3の結果である。なお、Fig. 1(地点A、B)、Fig. 2(地点C)の(b)、(c)、およびFig. 3(地点D1、D2、D3)は移動観測の結果である。

地点A、Bの風速水平分布(Fig. 1(a))を見ると、防風林風下において地点AのほうがBより風速が小さく、この傾向は特に防風林風下側の1Hで顕著である。この原因は、防風林の幅がほぼ同程度であることから、地点AとBで \overline{PADc} が異なるためと考えられる。このことは、次の地点Cの結果でより鮮明になる。地点A、Bには樹幹層があるので、地点D3のように高さ0.25Hは0.5Hよりも強風になること(Fig. 3(d))が考えられる。しかし、鉛直分布(Fig. 1(b)、(c))を見る限り、そのような現象はみられない。これを検討するには詳細な風速分布が必要なため、次章の数値実験で明らかにする。

Fig. 2は地点Cの結果である。(a)の水平分布は、

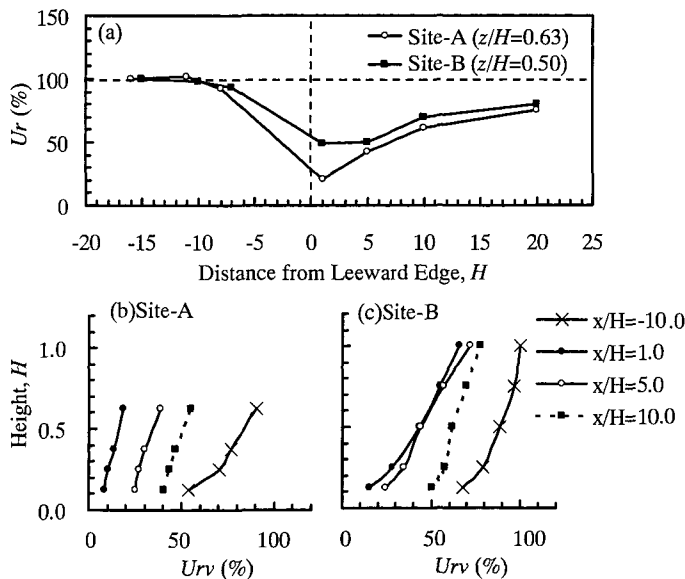


Fig. 1 Wind speed distributions at sites A and B when the wind direction is nearly normal to the shelterbelts. (a): Horizontal distributions of relative wind speed (U_r) at a height of 0.63 H (site A) and 0.50 H (site B). The reference is wind speed at the same height and at -10 H from the windward edge. (b): Vertical profiles of relative wind speed (U_{rv}) around site A. The reference is wind speed at 1.0 H in height and at -10 H from the windward edge. (c): Same as (b) but at site B.

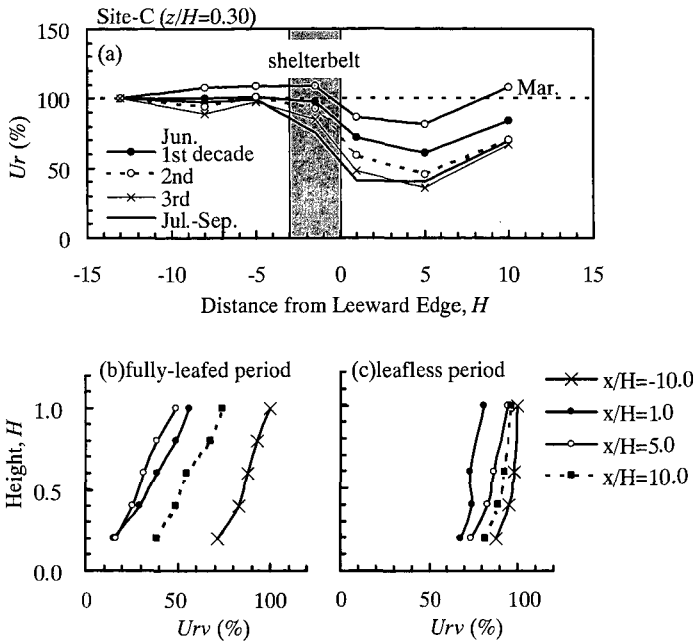


Fig. 2 Same as Fig. 1 but at site C. (a): Horizontal distributions of U_r at a height of $0.30 H$ over various periods. (b): Vertical profiles of U_{rv} over the fully-leaved period. (c): Same as (b) but over the leafless period.

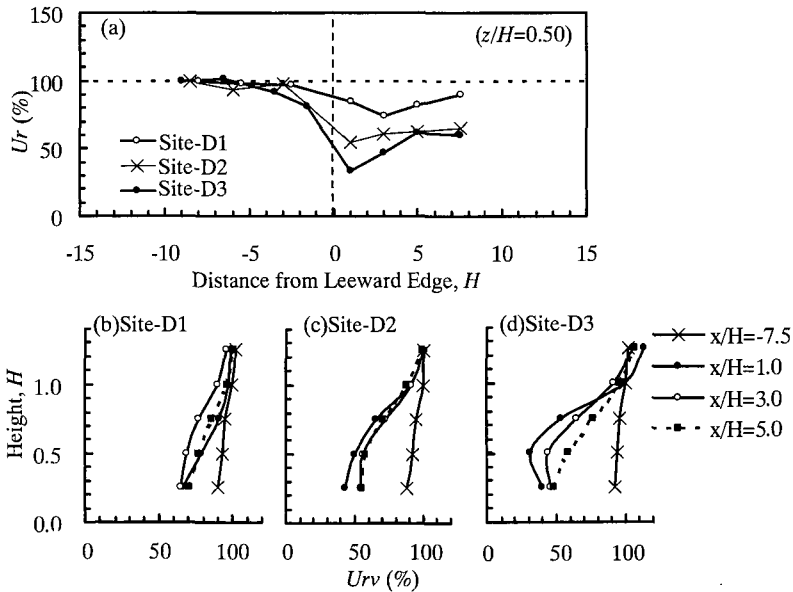


Fig. 3 Same as Fig. 1 but at sites D1, D2 and D3. (a): Horizontal distributions of U_r at a height of $0.50 H$. The reference is wind speed at the same height and at $-7.5 H$ from the windward edge. (b): Vertical profiles of U_{rv} around site D1. The reference is wind speed at $1.0 H$ in height and at $-7.5 H$ from the windward edge. (c): Same as (b) but at site D2. (d): Same as (b) but at site D3.

防風林と直角風向時における風速を抽出して求めた平均的な水平分布である。期間は葉面積密度 PAD の変化に着目して落葉期・移行期・繁茂期に分け、移行期である 6 月の 1 カ月間は上旬・中旬・下旬に分けた。ここでは、繁茂期の移動観測における $z=0.40H$ 、 $z=0.60H$ の水平分布と連続観測での $z=0.30H$ の水平分布はパターンがほとんど同じであったため、 $z=0.30H$ における連続観測結果だけを示した。水平分布の季節変化

(Fig. 2 (a)) をみると、防風林の風下側において、落葉期 (3 月) は風速が大きく、移行期である 6 月上旬から下旬へ経過するにつれて風速が小さくなり、6 月下旬には繁茂期 (7~9 月) とほぼ同じになることがわかる。この変化は、Table 2 で示した \overline{PADc} の季節変化と良く対応している。つまり、同一幅の防風林では PAD が大きいほど減風効果が強まる結果になっている。また鉛直分布 (Fig. 2 (b), (c)) を見ても、繁茂期と落葉期で防風林風下における風速の差が大きく、減風効果の差が明瞭に現れている。このことから、防風林では PAD が減風効果に強く影響していることがわかる。

Fig. 3 は地点 D 1, D 2, D 3 における移動観測の結果である。鉛直分布 (Fig. 3 (b), (c), (d)) をみると、地点 D 3 では風下側の高さ $z=0.25H$ の風速が $z=0.50H$ よりも大きく、下開きの影響が現れている。防風林 D 2 は、D 3 ほど顕著ではないものの同様の現象がみられる。このような現象は、下開きを持った防風ネットの風洞実験においても認められている²⁷⁾。このように下層 $z=0.25H$ で下開きの影響がみられることから、Fig. 3 (a) では下開きの影響が小さいと考えられる $z=0.50H$ における水平分布を示した。防風林の風下側に着目すると、1 列幅の D 1 は風速が大きく、D 2, D 3 と幅が大きくなるにつれて風速が小さくなっている。すなわち幅が大きいほど減風効果が大きく、防風林の幅が減風効果に強く影響を与えていることがわかる。

c. 気温分布

1) 昼夜による相違

防風林の風上端から風上 $-10H$ を基準にした気温差 ΔT の水平分布を Fig. 4 に示す。測定高さは地上 1 m である。ここでは、防風林と直角風向

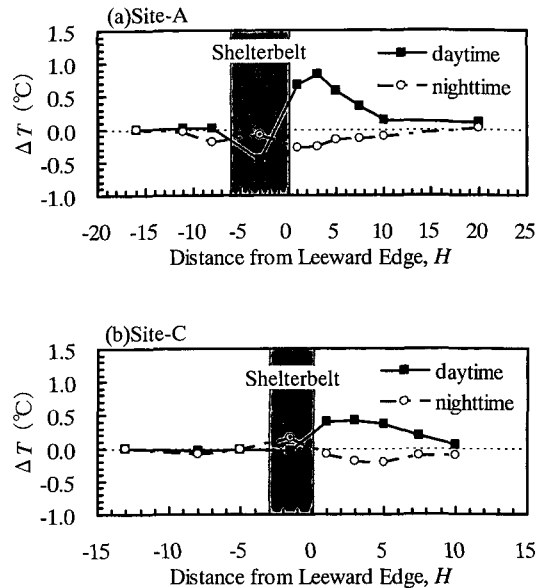


Fig. 4 Horizontal distributions of air temperature difference (ΔT) at sites A and C in the daytime (squares) and at nighttime (circles). The reference is air temperature at 1 m in height and at $-10H$ from the windward edge. ΔT was obtained by averaging hourly air temperature in the daytime or at nighttime when wind direction is nearly normal to the shelterbelt and the wind speed is over 2.5 ms^{-1} (site A) and 1.3 ms^{-1} (site C) at the reference point. The hatched area indicates the shelterbelt.

(風向 SSE~SSW)時のデータを抽出し、日中と夜間に分けた。なお、日中は現地の日出から日没までとし、夜間はそれ以外とした。

Fig. 4によれば、地点Aでは、防風林の風下側において日中は $1H$ から $5H$ にかけて $0.6\sim 0.8^\circ\text{C}$ 昇温し、おおむね $10H$ まで昇温効果が及んでいる。一方、夜間は同じ地点において $-0.1\sim -0.2^\circ\text{C}$ 低温化している。この特徴は、地点Cでも明瞭にみられる。このような現象は真木(1985)²⁸⁾による防風網を対象にした観測でも認められており、表面地温について日中(900~1200)で約 3°C の昇温、夜間(1800~0500)は約 -0.5°C と低温化が確認されている。また横田ほか(1968)⁸⁾は、防風ネットを用いた四方囲いの水田内における長期観測結果で同様な結果を得ている。なお、今回観測を行っ

たような単独の防風林や防風垣（ネット）の場合には、真木(1985)²⁶⁾の研究を含め従来は短期間の調査で、最高気温や最低気温が出現するような時間帯を中心に解析されてきたが、本調査のように長期データに対して一日を日中と夜間に2分類しても防風林の温度改良効果を確認することができた。

地点Aにおける全天日射量の透過率は、朝夕は大きいものの、日中は平均で約3~5%と小さく時間変化も小さかった。したがって、林内における日中の低温の出現は樹冠による日陰の影響といえる。一方、夜間は防風林前後で低温化するものの林内は基準点とほぼ等温であり、これは、林内では樹冠の影響で放射冷却が抑制されることが原因と考えられる。また防風林前後の低温域の出現は、風速の減少に伴う上方からの顕熱輸送の減少によるものと考えられる。地点Cでは7~9月日中の林内における透過率は約20%で、地点Aよりも大きい。そのため、林内における日中の低温は地点Aよりも顕著ではない。

2) 天気による相違

防風林風上端から風上-10Hを基準にした、防風林と直角風向時における天気別の気温差 ΔT の水平分布をFig. 5に示す。ここで天気の違いには、近傍露場観測点の雨量データを基に降水のあるなしを判定し、さらに千歳航空測候所（気象庁所管）で観測されている8分雲量から、雲量6以下を晴天、7以上を曇天とした（8分雲量の7以上が10分雲量の9以上に対応する²⁹⁾）。

図によれば地点A、Cともに、日中は晴天の場合に最も昇温効果が大きく、次いで曇天であり、雨天では最も小さい。晴天日中で最も気温が高くなる風下3Hの昇温量は、地点Aで約1.1°C、地点Cで0.6°Cであった。このような天気による昇温効果の違いは、真木(1979)⁹⁾による防風ネットでの野外観測でも認められている。夜間の場合は、防風林の風下側において、晴天の場合に最も低温化し、曇天と雨天も低温化の傾向は見られるが顕著ではない。

天気によって防風林風下の日中の昇温量が異なるということは、日射量が昇温量に影響を及ぼしていると考えられる。Fig. 6は、防風林と直角風向

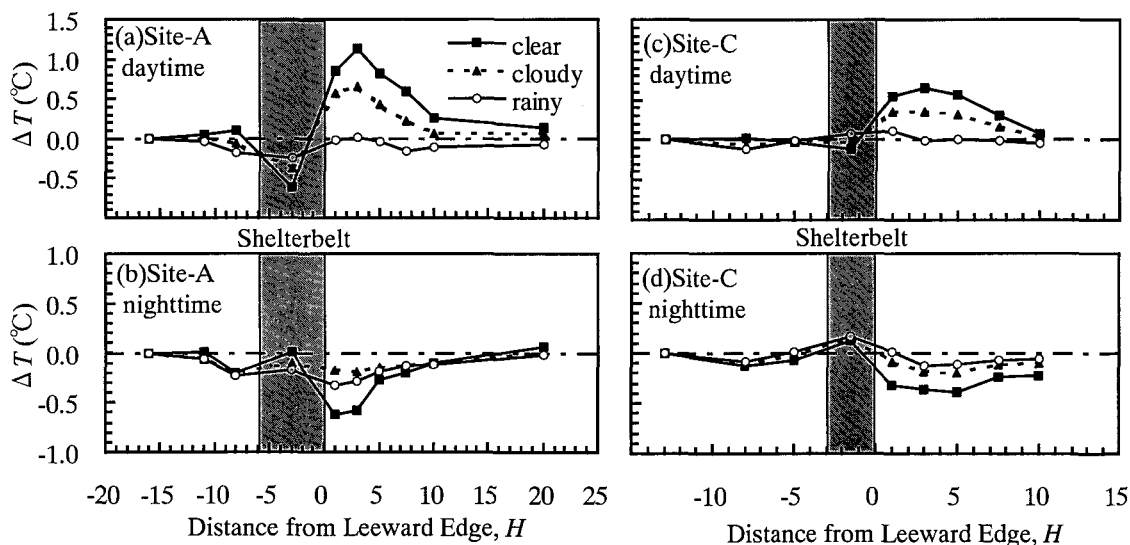


Fig. 5 Horizontal distributions of air temperature difference (ΔT) at sites A and C in clear (squares), cloudy (triangles) and rainy (circles) weather. (a): Site A in the daytime. (b): Site A at nighttime. (c): Site C in the daytime. (d): Site C at nighttime. The reference is the same as that in Fig. 4. ΔT was obtained by averaging hourly air temperature in clear, cloudy or rainy weather in the daytime or at nighttime when wind direction is nearly normal to the shelterbelt and the wind speed is over 2.5 ms^{-1} (site A) and 1.3 ms^{-1} (site C) at the reference point. The hatched area indicates the shelterbelt.

時における、林外（露場）の全天日射量 SR_0 と防風林の風下 $3H$ における基準点 ($-10H$) との気温差 ΔT_{3H} の関係である。図から、全天日射量 SR_0 が大きくなるにつれて昇温量 ΔT_{3H} が大きくなる傾向が認められる。この傾向を原点を通る直線で表すと地点Aのほうが傾きが大きく、同じ日射量でも地点CよりもAのほうが昇温量が大きいことがわかる。

D. 考察

a. 防風林の構造と減風効果

前節の観測結果から、防風林の構造因子の中で、防風林の幅と葉面積密度 PAD が減風効果に影響していることがわかった。ここでは、幅と PAD で示される防風林の構造因子と防風林風下側での最小風速 U_{rmin} の関係について、もう少し詳しくを検討してみた。 U_{rmin} は、Fig. 1 (a), Fig. 2 (a), Fig. 3 (a) で示した U_r の水平分布から求めた。

Fig. 7 は、幅 W と \overline{PADc} をそれぞれ横軸にとって U_{rmin} との関係を見たものである。図では、樹幹層がない地点C, D 1, D 2, D 3 と、樹幹層がある地点A, B に分けて示した。図によれば、ばらつきが大きく、幅および \overline{PADc} と U_{rmin} に明瞭な関係は認められない。これは、地点Cのように幅が等しくても \overline{PADc} が異なること、また地点D 1, D 2, D 3 のように \overline{PADc} が同じでも幅が異なることが原因で、 U_{rmin} が変化するためである。つまり、 U_{rmin} は幅と \overline{PADc} の双方の影響を受けているため、幅あるいは \overline{PADc} を単

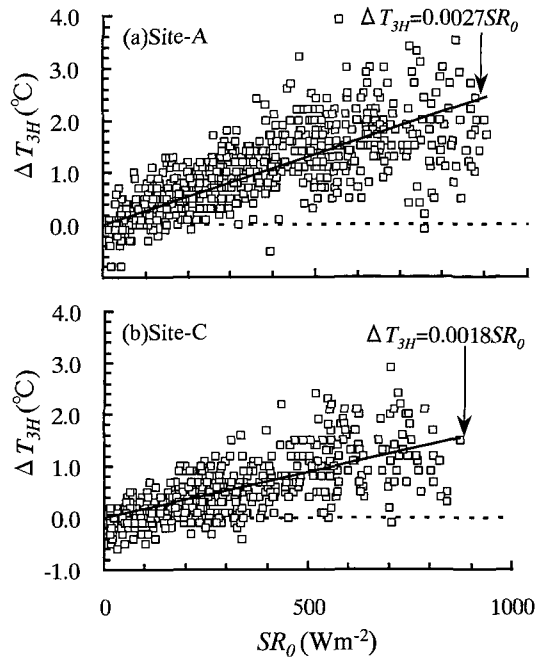


Fig. 6 Relationships between air temperature difference at $3H$ in distance (ΔT_{3H}) and global solar radiation outside the shelterbelts (SR_0) during the day when the wind direction is nearly normal to the shelterbelts. (a): Site A. (b): Site C. The lines are the regression equations.

独に用いて U_{rmin} を評価することは困難である。
 PAD が大きくなるほど気流に対する抵抗が大きくなり、また同じ PAD でも防風林の幅が大き

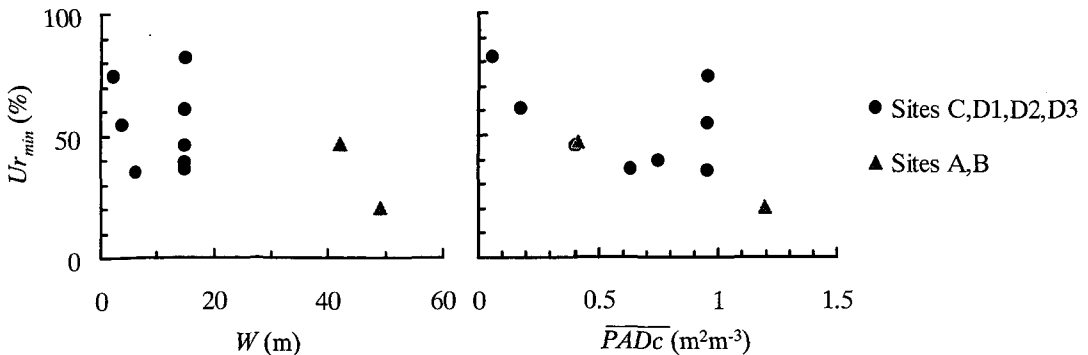


Fig. 7 Relationships of minimum wind speed (U_{rmin}) to width (W) and averaged plant area density in the canopy layer (\overline{PADc}) of the shelterbelt. Sites A and B have trunk space, but sites C, D1, D2 and D3 have no trunk space.

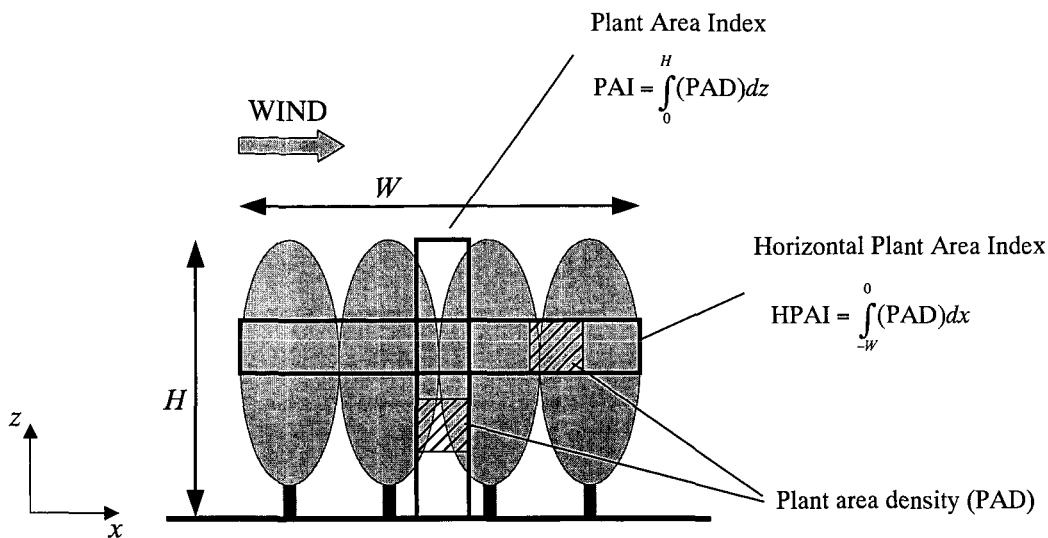


Fig. 8 Schematic aspect of plant area density (PAD), plant area index (PAI) and horizontal plant area index (HPAI).

くなるほど抵抗は大きくなる。このことを考慮すると、植物体の表面積を気流方向に積算した値、すなわち PAD を防風林と直角に水平方向に積算した値 (以下 HPAI (horizontal plant area index) と表す) が $U_{r_{min}}$ に強く影響を与えるものと考えられる。Fig. 8 に PAD, PAI, HPAI の概念図を示す。本章では、HPAI を次のように近似して検討した。

$$HP = \int_{-w}^0 (PADc) dx \approx \overline{PADc} \cdot W \quad (II-3)$$

ここで、 HP : HPAI (m^2m^{-2})、 x は防風林と直角方向の座標で、防風林の風下端を原点とし風上側をマイナスとした。

Fig. 9 は、HPAI と $U_{r_{min}}$ の関係である。同図では、樹幹層がない地点 C, D 1, D 2, D 3 と、樹幹層がある地点 A, B に分けて示した。まず、樹幹層がない場合についてみる。Fig. 9 は Fig. 7 と比較してばらつきが小さく、HPAI の増加に対して $U_{r_{min}}$ の減少が明瞭である。すなわち、HPAI と $U_{r_{min}}$ に強い関係がみられる。したがって、防風林の構造と $U_{r_{min}}$ を関係づける場合は、HPAI が有効な構造因子になることがわかる。また Fig. 9 によれば、HPAI が増加するにつ

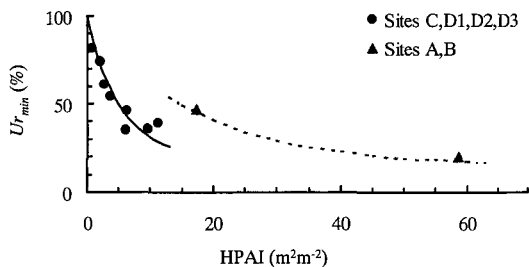


Fig. 9 Relationship between $U_{r_{min}}$ and HPAI, determined as the total surface area of plants (one side only) within a horizontal cylinder of unit cross-section. The circles and triangles represent the observed data. The curves are averages of visual estimations.

れて $U_{r_{min}}$ の減少が緩やかになる傾向がうかがえる。このことと (II-6) 式から次のことが推察される。すなわち、 \overline{PADc} を一定とした場合、Fig. 9 の横軸は幅 W だけの関数と考えられるから、防風林の幅 W が小さければ W のわずかな変化で $U_{r_{min}}$ は大きく変化するが、 W がある程度以上になると $U_{r_{min}}$ の変化は小さくなる。つまり \overline{PADc} を一定とした場合、防風林の減風効果が頭打ちになる幅 W が存在することが推察される。

また、幅 W が一定の場合の \overline{PADc} と U_{rmin} の関係も同様と考えられる。すなわち、前節の地点 C の観測結果では、落葉樹が葉をつけ始める移行期初期には U_{rmin} の変化が大きく、後期から繁茂期にかけては変化が小さいという結果が得られた。これは、 W を一定にした場合、 \overline{PADc} がある程度以上になると減風効果が頭打ちになることを示唆していると考えられる。ただし、先に述べたように移行期の \overline{PADc} は直線的に変化すると仮定していることから、さらに詳しい検討が必要である。

樹幹層がある場合は、樹幹層がない場合と比較して同じ HPAI でも U_{rmin} は大きい傾向がありそうである。しかし、樹幹層ありの場合は、地点 A, B のわずかに 2 データしかないので、詳細は後章の数値実験で検討することにする。

本章で提案した HPAI は、 U_{rmin} と強い関係があることが明らかとなった。そのため、防風林の減風効果を評価するうえで有効な構造因子と考えられる。また、幅と密度 (PADc) から算出できるのも大きな特徴であり、防風林の計画設計に使いやすい構造因子と思われる。

b. 防風林の構造および外部気象環境が昇温効果に与える影響

前節の観測結果から明らかのように、防風林の昇温効果は防風林の構造のみならず、外部からの気象環境に強く影響を受けることがわかった。そこで本節では、簡単な熱収支解析によって、防風林の構造および外部気象環境が昇温効果に与える影響について検討する。

1) 地表面熱収支モデル

真木 (1979)⁹⁾ による観測結果から示されるように、防風施設の昇温効果は気温よりも地表面温度で顕著であることから、ここでは地表面温度を対象にする。

本研究では、近藤 (1994)³⁰⁾ を参考にして地表面における熱収支式を基に、次式から地表面温度を算出する。

$$T_s - T = \frac{Q - \sigma T^4 - \rho l C_{ex} u \beta q_{SAT} (1 - rh)}{4 \sigma T^3 + \rho C_p C_{ex} u + \rho l C_{ex} u \beta \left[\frac{dq_{SAT}}{dT} \right]} \quad (\text{II-4})$$

ただし、

$$Q = (1 - \alpha_g) S \downarrow + L \downarrow - G \quad (\text{II-5})$$

ここで、 $S \downarrow$: 日射量 (Wm^{-2}), $L \downarrow$: 大気放射量 (Wm^{-2}), T_s : 地表面温度 (K), G : 地中伝熱量 (Wm^{-2}), Q : 有効エネルギー (Wm^{-2}), α_g : 地表のアルベド, σ : ステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), l : 水の気化潜熱 ($= 2.5 \times 10^6 \text{Jkg}^{-1}$), E : 蒸発量 ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$), ρ : 空気密度 ($= 1.29 \text{kgm}^{-3}$), C_p : 空気の定圧比熱 ($= 1005 \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), β : 地表面の蒸発効率, q_s : 地表面温度 T_s における飽和比湿 (kgkg^{-1}), u : 風速 (ms^{-1}), T : 気温 (K), q : 比湿 (kgkg^{-1}), q_{SAT} : 気温 T における飽和比湿 (kgkg^{-1}), rh : 相対湿度 ($0 \sim 1$) である。顕熱と潜熱輸送のバルク輸送係数 C_{ex} は、簡単化するために対数鉛直分布を仮定して、次の式を用いた。

$$C_{ex} = \frac{\kappa^2}{\left[\ln \frac{h}{z_0} \right]^2} \quad (\text{II-6})$$

ここで、 κ : カルマン定数, z_0 : 地表面粗度 (m), h : 風速 u , 気温 T , 比湿 q の測定地上高 (m) で高さ $0.1 H$ 程度を想定する。

(II-4) 式を防風林風下側の地点に適用する。防風林の風上側基準点では、地表状態が風下側と同じであれば、同様な式が導かれる。そこで、防風林の風上側基準点における地表面温度と気温の差は、(II-4) 式に添字 0 を付けて表す。この 2 つの式の両辺の差をとり、次の近似を行う。まず、真木 (1979)⁹⁾ による観測結果から示されるように、防風施設の昇温効果は、気温よりも地表面温度で顕著である。そのため防風林の風上側基準点と風下側の気温差を無視して、 $T \approx T_0$ と近似する。その結果、 $q_{SAT} \approx q_{SAT0}$, $(dq_{SAT}/dT) \approx (dq_{SAT}/dT)_0$ と近似できる。また、厳密には $G \neq G_0$ であるが、昇温効果が顕著に現れる晴天時は G が Q に占める割合は小さいと考えられる。そこで、 $Q \approx Q_0$ と近似する。防風林周辺における湿度の観測例は少ないが、 $rh \approx rh_0$ と近似する。これらの近似を行って整理すると、次式となる。

$$T_s - T_{s0} = \frac{\left[1 - \frac{u}{u_0}\right] [\tilde{A}(Q_0 - \sigma T_0^4) + \tilde{B} \cdot \tilde{C}]}{\left[\frac{\tilde{B}}{u_0} + \tilde{A} \frac{u}{u_0}\right] (\tilde{B} + \tilde{A} u_0)} \quad (\text{II-7})$$

ここで、 \tilde{A} 、 \tilde{B} 、 \tilde{C} は次のように定義する。

$$\begin{aligned} \tilde{A} &\equiv \rho C_{ex} \left[C_p + l\beta \left(\frac{dq_{SAT}}{dT} \right)_0 \right], \quad \tilde{B} \equiv 4 \sigma T_0^3, \\ \tilde{C} &\equiv \rho l C_{ex} \beta q_{SAT_0} (1 - r_{h_0}) \end{aligned} \quad (\text{II-8})$$

(II-7)式を用いて、防風林風上基準点と風下地点における地表面温度差 $\Delta T_s (= T_s - T_{s0})$ を求めることができる。この式は簡単であるものの、前に述べた近似を行っているために算出される値の精度には問題があると思われる。しかし、気象環境(II-7式右辺の各パラメータ)に対する地表面温度差(II-7式左辺値 $T_s - T_{s0}$)の振る舞いを調べることは可能と考えられる。

(II-7)式の u/u_0 は、防風林風上を基準にした相対風速 Ur と同等である。(II-7)を u/u_0 で微分すればわかるように、 $Q_0 - \sigma T_0^4 > 0$ の場合は、 u/u_0 の減少に対して $(T_s - T_{s0})$ は単調増加する。一方、 $Q_0 - \sigma T_0^4 < 0$ の場合は、 u/u_0 の減少に対して $T_s - T_{s0}$ は単調減少する。前者は日中の場合、後者は夜間の場合に相当する。したがって、最小風速 Ur_{min} の出現地点で日中は最大昇温し、夜間は最も低温になる。このことから、昇温効果の最大量として最大の地表面温度差 ΔT_{smax} を求めるために、(II-7)式を変形して次式を用いた。

$$\Delta T_{smax} = \frac{(1 - Ur_{min}) [\tilde{A}(Q_0 - \sigma T_0^4) + \tilde{B} \cdot \tilde{C}]}{\left[\frac{\tilde{B}}{u_0} + \tilde{A} \cdot Ur_{min}\right] (\tilde{B} + \tilde{A} u_0)} \quad (\text{II-9})$$

2) 昇温効果に影響を及ぼす因子

(II-9)式から最大の地表面温度差 ΔT_{smax} に影響を及ぼす因子を検討してみる。前節で検討したように、 Ur_{min} は防風林の構造に強く影響を受ける。したがって、 Ur_{min} は防風林の構造を表すパラメータと考えることができる。基準点における風速 u_0 、気温 T_0 、湿度 r_{h_0} 、有効エネルギー Q_0 は防風林外部の気象環境である。 u_0 、 T_0 、 r_{h_0} は防風林

へ流入する気塊の性質、 Q_0 は放射環境といえる。 β 、 C_{ex} (すなわち z_0)は防風林前後の地表状態(地形環境)を示している。

以下では、これらの因子を変化させて、昇温効果の最大量 ΔT_{smax} がどのように変化するか検討してみた。気象環境として夏期晴天日中を想定した。すなわち、 $u_0 = 2 \text{ ms}^{-1}$ 、 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 、 $r_{h_0} = 75\%$ 、 $Q_0 = 630 \text{ Wm}^{-2}$ である。また、地表状態は草地を想定して $\beta = 0.2$ 、 $C_{ex} = 0.0064$ ($z_0 = 0.01 \text{ m}$ 、 $h = 1.5 \text{ m}$)とした。

3) 最小風速が昇温効果に及ぼす影響

Fig. 10は、(II-9)式を用いて最小風速 Ur_{min} と最大地表面温度差 ΔT_{smax} の関係を計算したものである。放射環境は $Q_0 = 630, 430, 380 \text{ Wm}^{-2}$ で、それぞれ夏期における晴天日中、曇天日中、晴天夜間の典型的な値である。晴天日中の場合($Q_0 = 630 \text{ Wm}^{-2}$)、 Ur_{min} の減少に対して ΔT_{smax} が増加し、特に Ur_{min} が小さくなるにつれて ΔT_{smax} は急激に増加している。曇天日中の場合($Q_0 = 430 \text{ Wm}^{-2}$)も同様であるが、 ΔT_{smax} の値は小さい。晴天夜間の場合($Q_0 = 380 \text{ Wm}^{-2}$)、 Ur_{min} の減少に対して ΔT_{smax} が減少し、特に

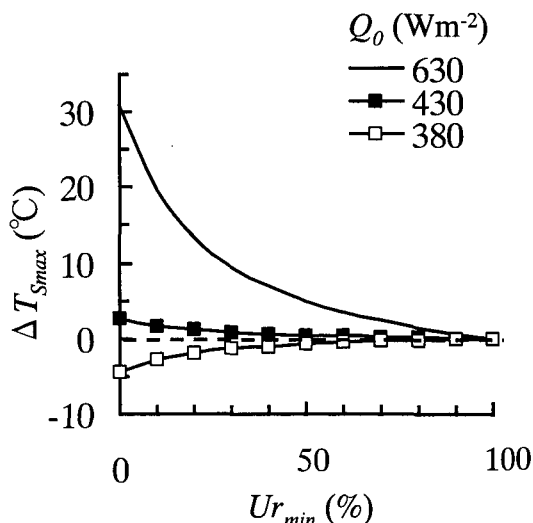


Fig. 10 Relationships between maximum rise in ground surface temperature (ΔT_{smax}) and Ur_{min} . The curves were calculated using eq. (II-9) with various effective energies at the standard point (Q_0).

$U_{r_{min}}$ が小さくなるにつれて $\Delta T_{s_{max}}$ は急激に減少している。ただし、 $\Delta T_{s_{max}}$ の絶対値は晴天日中の場合と比較して小さな値である。晴天日中の場合、 $U_{r_{min}}$ が 0 から 100% に変化すると、 $\Delta T_{s_{max}}$ は約 30°C 変化しており、最小風速 $U_{r_{min}}$ が $\Delta T_{s_{max}}$ に及ぼす影響が大きいといえる。

次いで、前節の観測結果を用いて、 $U_{r_{min}}$ と晴天日中における風上基準点との最大気温差 ΔT_{max} に着目して検討してみた。Fig. 11 は、 $U_{r_{min}}$ と ΔT_{max} の関係である。 ΔT_{max} は、晴天日の条件として林外の日射量が 400 Wm^{-2} 以上の場合に限定し、 ΔT の分布から最大値を求めた。図によれば、 $U_{r_{min}}$ の減少に対して ΔT_{max} が増加しており、特に $U_{r_{min}}$ が小さくなるにつれて ΔT_{max} は急激に増加している。これは、(II-9) 式による解析結果 (Fig. 10) と同じ特徴である。ただし、Fig. 10 では地表面温度を対象にしているため、縦軸の値が異なることに注意が必要である。

4) 放射環境が昇温効果に及ぼす影響

Fig. 12 は (II-9) 式を用いて基準点の有効エネルギー Q_0 と最大地表面温度差 $\Delta T_{s_{max}}$ の関係を計算したものである。最小風速は $U_{r_{min}}=10, 30, 50\%$ である。同図によれば、 Q_0 の増加につれて $\Delta T_{s_{max}}$ は直線的に増加している。つまり、晴天夜間 (例えば $Q_0=380 \text{ Wm}^{-2}$) では負値すなわち低温

となっているが、曇天日中 (例えば $Q_0=430 \text{ Wm}^{-2}$) から晴天日中 (例えば $Q_0=630 \text{ Wm}^{-2}$) になるにつれて $\Delta T_{s_{max}}$ が大きくなっている。また直線の傾きは、 $U_{r_{min}}$ が小さいほど大きい。これらのことは、前節の観測結果から得られた 3 H 地点における気温差と日射量の関係 (Fig. 6) と同じ特徴である。最も昇温量が大きい $U_{r_{min}}=10\%$ の場合、 Q_0 が 400 から 800 Wm^{-2} に変化すると、 $\Delta T_{s_{max}}$ は約 35°C 変化しており、放射環境 Q_0 が $\Delta T_{s_{max}}$ に及ぼす影響が大きいといえる。また、その他の気象環境、流入風速 u_0 、流入気温 T_0 、流入湿度 rho_0 に対して昇温効果に与える影響を調べたところ、最小風速や放射環境が及ぼす影響よりも小さい結果となった。

この検討結果から、構造の異なった複数の防風林における昇温効果を野外観測によって比較する場合、次のことに注意しなければならない。放射環境が同一になっていないと、得られた結果には、防風林の構造による影響のみならず、放射環境の違いも大きく影響している。特に、異なる地域における防風林を比較する場合、放射環境を同一にすることは困難であるので、注意する必要があると考えられる。

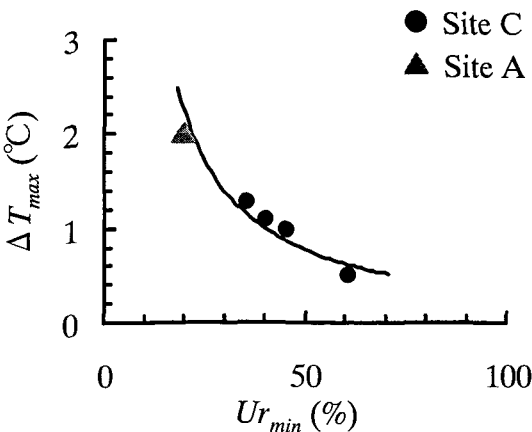


Fig. 11 Relationships between maximum rise in air temperature (ΔT_{max}) and $U_{r_{min}}$. The circles and triangles represent the observed data. The curve is an average of visual estimations.

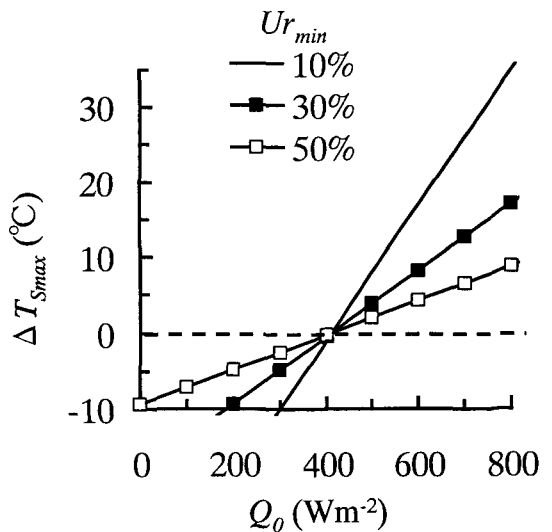


Fig. 12 Relationships between $\Delta T_{s_{max}}$ and Q_0 . The curves were calculated using eq. (II-9) with various values of $U_{r_{min}}$.

5) 最大効果を生み出す防風林の構造の気象環境依存性

これまで検討してきたように、昇温効果は気象環境に影響を受ける。そのため、昇温効果を最大にする防風林の構造を検討する場合、「ある気象環境で最大効果を生み出す防風林の構造は、別の気象環境でも最大効果を生み出すか？」という疑問が生まれる。これは、次のように考えることができる。

先に述べたように、Fig. 10 で $U_{r_{min}}$ は防風林の構造を表している。また、 Q_0 の違いは気象環境の違いを示している。このような視点で Fig. 10 をみると、 $Q_0=630 \text{ Wm}^{-2}$ の気象環境で最大の昇温効果を生み出しているのは、 $U_{r_{min}}=0\%$ となる防風林の構造である。別の気象環境で $Q_0=430 \text{ Wm}^{-2}$ でも、 $U_{r_{min}}=0\%$ となる防風林の構造で最大の昇温効果となっている。したがって、ある気象環境で最大の昇温効果を生み出す防風林の構造は、別の気象環境でも最大効果を生み出すといえる。すなわち、最大の昇温効果を生み出す防風林の構造を検討する場合、ある1つの気象環境のみで検討すれば十分といえる。

E. まとめ

本章では、樹木の密度と幅が異なる防風林を対象に気象観測を実施した。そして、観測結果を基に防風林の幅と密度が減風効果と昇温効果に与える影響について検討した。また、防風林の減風効果と昇温効果に対して強い関係を持つ新たな構造因子についても検討した。さらに、簡単な熱収支解析を行って、気象環境が昇温効果に及ぼす影響について考察した。得られた結果を、以下にまとめる。

(1)防風林風下の風速を比較すると、同一幅の防風林では、葉面積密度が大きくなるにつれて風速が減少した。一方、葉面積密度が等しい場合は、幅が大きくなるにつれて風速が減少した。このことから、防風林の構造因子の中で、幅と葉面積密度が減風効果に影響していることがわかった。

(2)防風林の風下側において、日中では晴天の場合が最も昇温効果が大きく、次いで曇天であり、雨天では最も小さかった。また、日中の昇温量は日射量が大きいほど大きく、昇温現象は日射量に

影響されることがわかった。夜間では、防風林風下側において、晴天の場合に最も低温化し、曇天と雨天でも低温化の傾向がみられたがわずかであった。幅が同一の防風林でも、葉面積密度が大きくなるにつれて日中の昇温量が大きくなるということが認められ、葉面積密度が昇温効果に影響していることが明らかになった。

(3)新たな構造因子 HPAI (葉面積密度を防風林と直角に水平方向に積分した値) を提案し、防風林風下における最小風速との関係を求めた。その結果、幅や葉面積密度を単独に用いた場合よりも強い相関関係が認められた。これにより、HPAI は防風林を計画設計するうえで、有効な構造因子になることが明らかになった。

(4)防風林風下における最小風速と昇温効果に強い関係が認められた。これは、熱収支解析からも支持された。

III. 防風林の構造が減風効果に及ぼす影響に関する数値実験

第II章の観測では、6カ所の防風林を対象にただけであり、防風林の構造と気象改良効果の定量的な関係を解明するには不十分であった。そこで本章では、減風効果からみた防風林の最適な構造を把握するために、その構造と減風効果の関係を数値実験によって検討した。まず最初に、防風林における風の流れの数値シミュレーションモデルを構築した。そして第II章で得られた観測結果と比較して、構築したモデルの妥当性について検証した。次いで、幅、葉面積密度、樹木の鉛直構造が異なる、様々な構造の防風林を対象にして、防風林前後の気流の変化に関する数値実験を行い、防風林の構造と減風効果の関係を詳細に検討した。さらに両者の関係を HPAI を用いて定量化し、減風効果を対象にした最適な防風林の構造を考察した。

A. 数値実験モデルの構築

a. 基礎方程式

Fig. 13 に、防風林前後における風の流れ構造と乱流渦の変化について模式的に示す。風が防風林に接近すると、一部の風は防風林の上を通り抜ける。また樹木が抵抗体として働くので、樹木を通

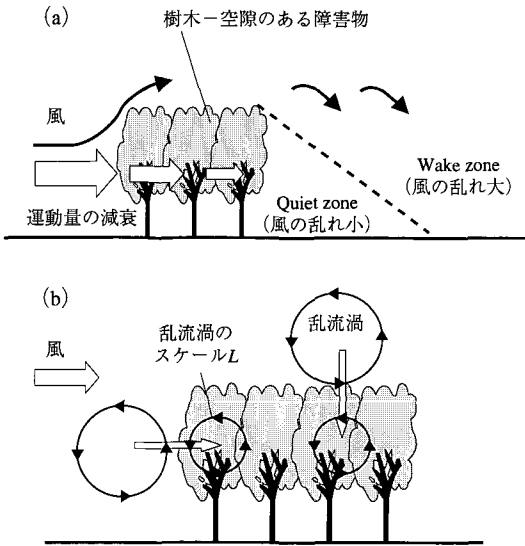


Fig. 13 Schematic aspect of flow structure (a) and change in turbulent length scale (b) around a shelterbelt.

り抜ける風の運動量が減衰する。防風林の風下側直後では、Quiet zone と呼ばれる風の乱れが小さな領域が存在する。さらに風下では、上層からの下降流によって上層の大きな運動量が下層へ輸送される。この領域は Wake zone と呼ばれ、減風した風速が回復する領域でもある。また水平一様な植生（例えば森林）の上端で発生した乱流渦は、下方へ移動するにつれて、植物体と地表面の影響を受けて変化する^{33),34)}。同様に、林端から水平方向に進出した乱流渦も植物体の影響を受ける³⁵⁾。

本研究における風の流れのモデルの基礎方程式は、2次元、中立、非圧縮の Reynolds 方程式である。防風施設は気流に対して一種の障害物となるが、防風林や防風ネットの場合は空隙を持った障害物とみなすことができる。そのような障害物による効果を考慮するには、次に示すように Reynolds 方程式に障害物による抵抗項を付加することでモデル化される。以下ではアインシュタインの総和規約を用いてテンソル表示で示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (III-1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \right\} - C_d A |u_i| u_i \quad (III-2)$$

ここで、 x_i ：空間座標 (x_1 ：防風林に直角方向、 x_2 ：鉛直方向) (m)、 t ：時間 (s)、 u_i ：平均風速ベクトル (u_1 ：防風林に直角方向風速、 u_2 ：鉛直方向風速) (ms^{-1})、 p ：気圧 ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)、 ρ ：空気密度 ($=1.29 \text{ kgm}^{-3}$)、 ν_t ：渦粘性係数 (m^2s^{-1})、 C_d ：抵抗係数、 A ：葉面積密度 PAD (m^2m^{-3}) である。

(III-1) 式は連続の式、(III-2) 式の左辺と右辺第2項までは一般的な Reynolds 方程式で、右辺最終項は植生による空気力学的抵抗によって生じる運動量の減衰を表し、植生外は $C_d A = 0$ 、植生内は $C_d A \neq 0$ である。本研究では、防風林の風下端を $x_1 = 0$ とし、風上側をマイナス、風下側をプラスとした。防風林の幅を W (m) とすれば、防風林の風上端は $x_1 = -W$ となる。

渦粘性係数（運動量の拡散係数） ν_t の算出には標準的な k- ϵ モデル³¹⁾ を基本にし、植生の影響を考慮した。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (III-3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon + C_d A S^3 \quad (III-4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + C_{pe} \frac{k^{1/2}}{L} \epsilon \quad (III-5)$$

ここで、 k ：乱流エネルギー (m^2s^{-2})、 ϵ ：乱流エネルギーの消散率 (m^2s^{-3})、 S ：スカラー風速 (ms^{-1})、 L ：植生内における渦のスケール (m)、 C_{pe} ：モデル定数である。(III-3)、(III-4)、(III-5)式において、 $C_\mu = 0.09$ 、 $C_{1\epsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\epsilon} = 1.92$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ ³¹⁾ とした。

Fig. 13 に示したように、防風林前後における風の流れを再現するには、乱流に及ぼす樹木の影響を考慮する必要がある。そのため、(III-4)、(III-5)式の右辺最終項は植生の影響を表わす項で、植

生外では無視した。(III-4), (III-5)式の右辺最終項には平岡ほか(1989)³²⁾のモデルを用い, さらに乱流渦の変化を考慮して本研究では L を次のようにモデル化した。

$$L = C_L L_H + (1 - C_L) L_V \quad (\text{III-6})$$

ここで, L_H : 防風林の風上端における渦のスケール(m), L_V : 水平一様な植生内での渦のスケール(m), C_L : 植生内渦スケール L に対する防風林の風上における渦スケール L_H の寄与率である。 C_L の設定は, 防風林の風上端において $L = L_H$ で, 渦が林内を移動するにつれて植物体の影響で $L = L_V$ となるようにする。PAD が大きいほど短い距離で $L = L_V$ となると考えられるため, C_L は PAD を風上端から水平方向に積分した関数とし, C_H をモデル定数として次式で表した。

$$C_L = \exp\left[-C_H \int_{-w}^{x_1} C_d A dx_1\right] \quad (\text{III-7})$$

L_V には前に述べた乱流渦の鉛直方向の変化を考慮した Watanabe and Kondo (1990)³⁶⁾ によるモデルを用いた。

$$L_V = \kappa \int_0^{x_2} \left[r \exp\left\{-\int_0^r \mu(x_2-s) ds\right\} \mu(x_2-r) \right] dr + \kappa x_2 \exp\left\{-\int_0^{x_2} \mu(x_2-s) ds\right\} \quad (\text{III-8})$$

$$\left| \frac{dL_V}{dx_2} \right| \leq \kappa \quad (\text{III-9})$$

ただし,

$$\mu(x_2) \equiv \frac{C_d A(x_2)}{2 \kappa^2} \quad (\text{III-10})$$

で, κ はカルマン定数(=0.4)である。また, L_H は次式で代表させた。

$$L_H = \kappa x_2 \quad (\text{III-11})$$

本モデルの最大の特徴は, 前述のように, 防風林における乱流渦のスケール変化に着目したことであり, このようなモデル構築の試みは本研究が

はじめてである。

b. 境界条件と初期条件

地表面における境界条件は, 地表から地表直上の計算点まで風速の対数則を仮定し, さらに鉛直風速 u_2 をゼロとした。

$$\left[\nu_t \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right]_{x_2=0} = u_*^2 = (C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2} \frac{\kappa u_{1p}}{\ln(h_p/z_0)} \quad (\text{III-12})$$

$$(u_2)_{x_2=0} = 0 \quad (\text{III-13})$$

$$\left[\frac{\partial k}{\partial x_2} \right]_{x_2=0} = 0, \quad \varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{\kappa h_p} \quad (\text{III-14})$$

$$\left[\frac{\partial p}{\partial x_2} \right]_{x_2=0} = 0 \quad (\text{III-15})$$

ここで, u_* : 摩擦速度(ms^{-1}), h_p : 地表直上の計算点の高さ(m), z_0 : 地表面粗度(m)で, u_{1p} , k_p , ε_p はそれぞれ地表直上の計算点における u_1 , k , ε を表す。

流入側の境界条件は初期条件で固定し, 流出側に関しては u_1 は放射境界条件(Orlanski, 1976)³⁷⁾, u_2 , p , k , ε は法線方向勾配ゼロとした。また, 上端の境界条件は初期値で固定した。なお, 初期条件は対数則を用いて水平方向に一様な鉛直分布を与えた。

c. 数値解法, 計算手順および計算領域

(III-1), (III-2), (III-4), (III-5) 式は, staggered 格子系上でコントロールボリューム法(Patankar, 1980)³⁸⁾を用いて離散化した。そのため格子毎の葉面積密度の設定が可能で, 幅と葉面積密度が異なる構造の防風林を扱うことが容易である。防風林の幅は, 相当する格子に葉面積密度 A を与えることによって表現し, 防風林以外では葉面積密度 $A=0$ となる。また, 樹木の疎密は葉面積密度 A の大小で表現する。さらに樹木の鉛直構造を表現することも可能で, 樹幹層がある場合, 樹冠層に相当する格子の葉面積密度 A を大きくし, 樹幹層に相当する格子では小さくすればよい。

本研究では, (III-2), (III-4), (III-5) 式の時間変化項(左辺第1項)をゼロとおいて定常解

を求めた。解法にはSIMPLERアルゴリズム (Patankar, 1980)³⁸⁾を用いて繰り返し計算をし、 u_i の変化量が絶対値の0.1%以下になった場合を収束とみなして、このときの解を定常解とした。

計算領域および格子間隔は次のようにした。鉛直方向は地表から $25H$ (H は樹高)までを、水平方向は防風林風上側 $20H$ から風下側 $60H$ までを計算領域にした。鉛直方向の格子間隔は $0.05H \sim 1H$ で地表付近を細かくした。水平方向の格子間隔は $0.2H \sim 2H$ で防風林付近を細かくした。

B. モデルの検証

a. モデル定数の設定

本モデルには、未知のモデル定数 C_{pe} と C_H が存在する。 C_{pe} の決定には、(III-2)、(III-4)、(III-5)式を変形した鉛直1次元の方程式を用い、3種類の森林における風速の実測値³⁹⁾と計算値が一致するようにして求めた。葉面積密度PADの鉛直分布と抵抗係数 C_d は実測値を用いた。森林は幅 W が非常に大きい場合と考えることができるので、(III-7)式において $C_L=0$ となり、(III-6)式より $L=L_v$ となる。Fig. 14は、森林

上の摩擦速度 u_* を基準にした相対風速で、実測値と計算値を比較した結果である。 $C_{pe}=0.5$ とすると3種類の森林において実測値と一致する。そこで、本研究では C_{pe} に0.5を用いることにした。

C_H は次のように決定した。Irvine et al. (1997)³⁵⁾は、樹高 $H=6.1$ m、葉面積密度 $0.38 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ の森林端周辺で乱れのスケールを観測した。観測結果によれば、森林外から林内へ気流が進入するにつれて、乱れのスケールは林端付近では急激に減少するが、林内 $3.6H$ と $14.5H$ 地点では変化が小さかった。すなわち、 $3.6H$ で C_L はゼロに近い値になることを意味している。そこで、 $3.6H$ で $C_L=0.08$ となるように C_H を(III-7)式から求め、本研究では $C_H=1.5$ を用いた ($C_d=0.2$ とした)。

b. 観測結果との比較

モデルの検証で対象にした防風林は、第II章で観測を実施した幅と密度が異なる防風林である。Fig. 15は、モデルの検証のために用いた葉面積密度PADの鉛直分布である。樹冠層におけるPADは、樹木の形状およびPADの測定値 (Table 2) から設定した。樹幹層のPADは、幹を円柱と考え、胸高直径、植栽密度より設定した。

本研究では、抵抗係数 C_d を実測していないので、計算結果が観測結果と一致するように C_d を決めた。決定した C_d を Table 3 に示す。樹冠層、樹幹層、下草層に分けて C_d を決定したが、それぞれ既往の研究結果に近い値となった。

Fig. 16~Fig. 18は、計算結果と観測結果を比較したものである。Fig. 16は地点A、Bにおける比較である。両地点の幅はほぼ等しいが、樹冠層のPADが異なる。また、両地点とも樹幹層が存在する。防風林の風上 $x_1/H = -10 - W/H$ を基準にした相対風速 U_r の水平分布 (Fig. 16(a)) をみると、計算による分布パターンおよび絶対値が観測値と一致しており、防風林風下の最小風速やその後の風速回復の早さの違いが良く再現されている。鉛直分布 (Fig. 16(b), (c)) も計算値と観測値の分布パターンが一致している。

Fig. 17は地点Cにおけるもので、PADが異なる繁茂期と落葉期について比較した。 U_r の水平分布 (Fig. 17(a)) によれば、計算による分布パター

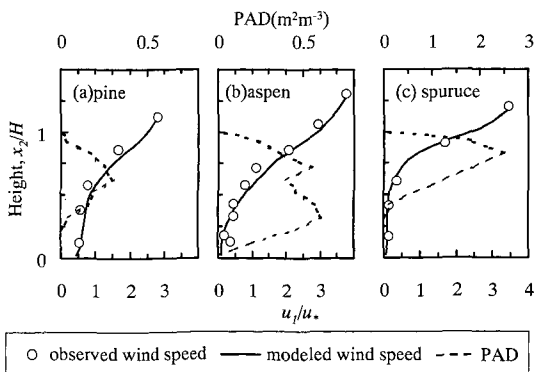


Fig. 14 Comparison of calculated (solid lines) and measured (circles) wind speed distributions within and above the forest canopies. (a): pine. (b): aspen. (c): spruce. $C_{pe}=0.5$ was used in the calculation. The wind speed (u_i) was normalized by the friction velocity (u_*) above the canopy. The vertical distributions of plant area density (PAD) are also shown (dashed lines).

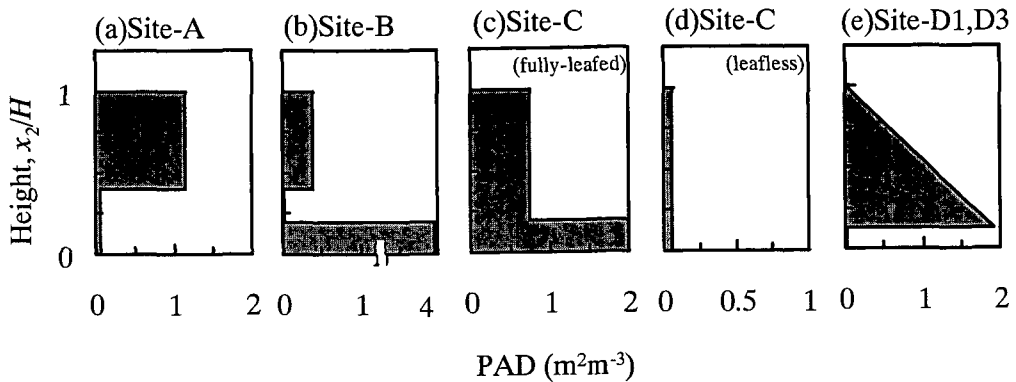


Fig. 15 Vertical distributions of PAD in shelterbelts used for verification of the numerical model. (a): Site A. (b): Site B. (c): Site C in the fully-leaved period. (d): Site C in the leafless period. (e): Sites D1 and D3.

Table 3. Comparison of drag coefficients (C_d) obtained in this study and those measured in other studies.

Layer	Present study	Other studies	References
Canopy(coniferous)	0.25(Site A, D1, D3)	0.10~0.25	Amiro(1990) ³⁹⁾
		0.05~0.40	Grant(1983) ⁴⁰⁾
(deciduous)	0.13(Site B) 0.20(Site C*)	0.15	Lee et al.(1994) ⁴¹⁾
		0.02~0.20	Amiro(1990) ³⁹⁾
Trunk space	0.50(Site B, C**, D1, D3) 0.20(Site A)	0.50~0.60(single cylinder)	Moritani et al.(1983) ⁴²⁾
		0.10~0.20(2 cylinders)	
Under growth	0.10(Site B, C*)	0.10~0.14(Soybeans) 0.07(Bean)	Meyers and Paw U(1987) ⁴³⁾ Thom(1971) ⁴⁴⁾

*Fully-leaved period.

**Leafless period.

ンおよび絶対値が観測値と一致し、防風林風下の最小風速やその後の風速回復が良く再現されている。鉛直分布 (Fig. 17 (b), (c)) も計算値と観測値の分布パターンが一致している。

Fig. 18 は地点D 1, D 3 における比較である。両地点の PAD は等しいが、幅が異なる。Ur の水平分布 (Fig. 18 (a)) をみると、防風林風下における最小風速は地点D 3 で約10%の差があるものの分布パターンは一致している。鉛直分布 (Fig. 18 (b), (c)) は、地点D 3 の $x_1/H=1.0$ で計算結果が上層で小さく中層で大きく評価されているが、下開きによる下層の強風が再現されており、全体的な特徴は一致している。また、地点D 1 では水平分布、鉛直分布ともに良く一致している。

Fig. 19 に、計算で得られた地点Aにおける風の

流れをベクトルで示した。下層をみると、防風林の風上端ではベクトルに下向き成分が見られ、防風林の樹幹層部へ気流が収束している様子がわかる。また防風林の風下側直後では、ベクトルの上向き成分がみられ、樹幹層を通過した風が発散していることがわかる。一方、上層部では風上端付近および林内で吹上風が、風下側で吹下風が見られる。真木・川島 (1983)⁴⁵⁾ によると、防風網前後の鉛直風は、防風網の直前で吹上風となり $x_1/H=1\sim2$ で付近で最大値となり、 $x_1/H=8$ 付近で最小の吹下風となると報告している。本研究は幅を持った防風林を対象にしているが、防風網の位置を防風林風上端に対応させると良く類似している。

以上より、防風林の構造が風速分布に及ぼす影

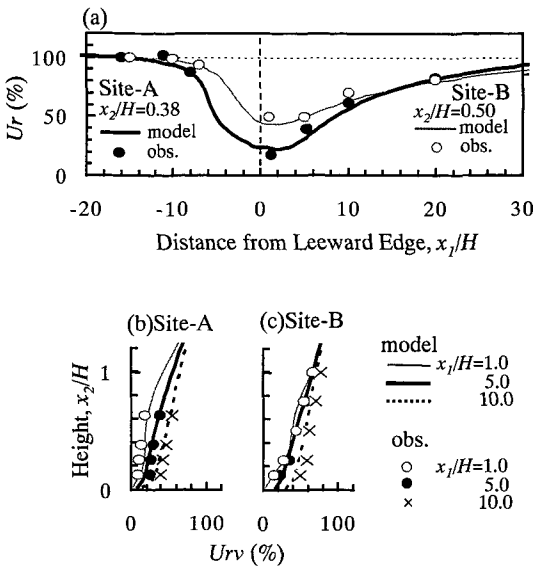


Fig. 16 Comparison of calculated (lines) and measured (circles and crosses) wind speed distributions at sites A and B. (a): Horizontal distributions of relative wind speed (U_r) at heights of $x_2/H=0.38$ (site A) and $x_2/H=0.50$ (site B). The reference is wind speed at the same height and at $x_1/H=-10-W/H$. (b): Vertical profiles of relative wind speed (U_{rv}) at site A. The reference is wind speed at $x_1/H=-10-W/H$ and at $x_2/H=1.0$. (c): Same as (b) but at site B.

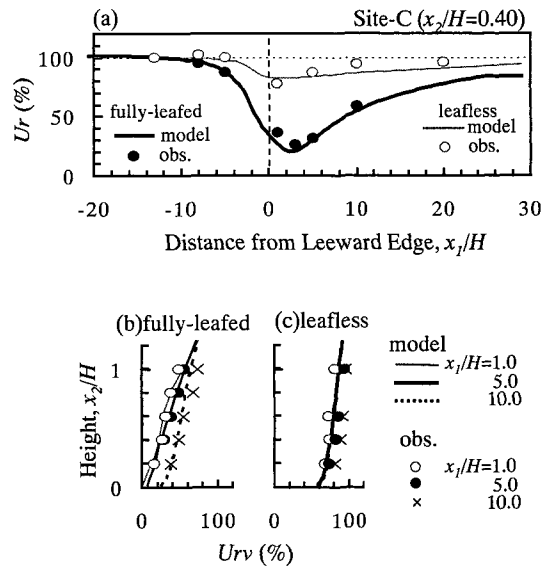


Fig. 17 Same as Fig. 16 but at site C in fully-leaved and leafless periods. (a): Same as Fig. 16(a) but at site C at a height of $x_2/H=0.40$. (b): Same as Fig. 16(b) but around site C in the fully-leaved period. (c): Same as (b) but in the leafless period.

響を検討するうえで、本章で構築した数値シミュレーションモデルを用いることは妥当と判断される。

C. 実験条件

数値実験の条件を Table 4 にまとめた。本研究では防風林の構造因子のうち、減風効果に最も強く影響を与え、防風林の計画・設計でも重要な、防風林の幅 W と葉面積密度 PAD に着目した。また、樹木の鉛直構造として、樹幹層の有無にも着目した。

樹高 H は成木を想定して 10 m とした。幅 W は防風林の造成によっていくらでも広くできるが、ここでは $W/H=0.2\sim 10$ の範囲とした。PAD が大きくなると受光できない葉が多くなるので、PAD の値には上限があり、その値は環境条

件によって変化するものと考えられる。本研究では第 II 章の防風林における測定値および森林での測定値^{46),47)}を参考に、樹冠層の PAD は $0.2\sim 3\text{ m}^2\text{m}^{-3}$ の範囲とし、その分布は単純化して樹冠層内で水平方向・鉛直方向に一定とした。また樹木の鉛直構造として、樹幹層の高さが $H_t/H=0.5$ 、 $H_t/H=0.2$ と樹幹層なしの場合 ($H_t/H=0.0$) も検討した。なお樹幹層の PAD は、Rauner (1976)⁴⁷⁾の測定値を参考にして樹冠層の PAD の 5% とした。抵抗係数 C_d は Table 3 を参考に樹冠層で 0.2、樹幹層で 0.5 を与えた。防風林周辺の地表状態は、草地を想定して地表面粗度 z_0 を設定した。流入風速は、地上高 $x_2/H=1.0$ において 5.0 ms^{-1} とした。

D. 結果

a. 異なる葉面積密度における風速の水平分布

Fig. 20 は、幅 W/H が等しく葉面積密度 PAD が異なる場合の、地上高 5 m ($x_2/H=0.5$) における相対風速 U_r の水平分布である。図は $W/H=1$ で、樹木の鉛直構造は $H_t/H=0$ の条件である。

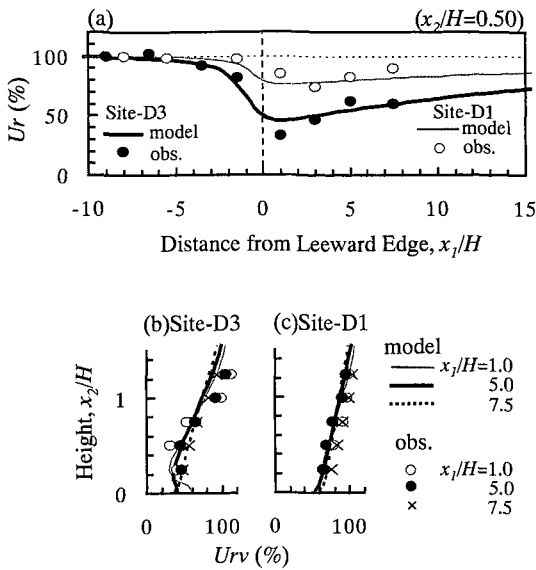


Fig. 18 Same as Fig. 16 but at sites D1 and D3. (a): Same as Fig. 16(a) but at sites D1 and D3 at a height of $x_2/H=0.50$. The reference is wind speed at the same height and at $x_1/H=-7.5-W/H$. (b): Same as Fig. 16(b) but at site D3. (c): Same as (b) but at site D1.

また、基準点は防風林風上端から風上 100 m ($x_1/H = -10 - W/H$) 地点の同一高度である。

最小風速 U_{rmin} に着目すると、PADが $0.5 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ で 63%、 $0.75 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ で 47%、 $2 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ で 11%であり、PADの増加につれて U_{rmin} が減少している。また、PADの増加に伴い最小風速出現後の風速回復が早くなり、PADが $0.75 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ と $2 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ における風速差は $x_1/H=20$ 地点で 9%にまで減少している。さらに最小風速の出現位置 $X_{U_{rmin}}/H$ は、PADの増加につれて防風林から離れている。減風効果範囲として防風林の風下側における $U_r \leq 80\%$ の範囲 $DL_{U,80}/H$ に着目すると、PADが $0.5 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ で 16.8、 $0.75 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ で 25.6、 $2 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ で 29.3 であり、PADの増加とともに $DL_{U,80}/H$ も増加している。

b. 異なる幅における風速の水平分布

Fig. 21 は、葉面積密度が等しく幅 W/H が異なる場合における U_r の水平分布である。図は PADが $0.75 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ 、 $Ht/H=0$ におけるもので、地上高と基準点は Fig. 20 と同じである。

最小風速 U_{rmin} に着目すると、 $W/H=1$ で 47%、 $W/H=2$ で 21%、 $W/H=10$ では逆風が発

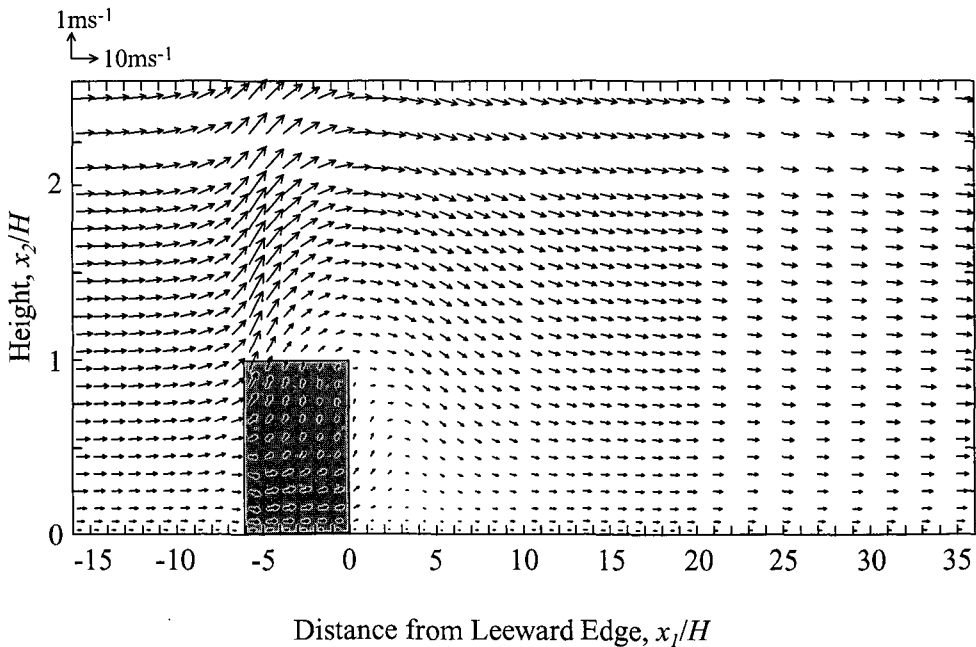


Fig. 19 Calculated wind vector at site A. The hatched area indicates the shelterbelt.

Table 4. Shelterbelt structures used in the numerical experiments.

Height, H (m)	10
Width, W/H	0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10
Height of trunk space, Ht/H	0, 0.2, 0.5
Plant area density (PAD), A (m^2m^{-3})	0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0(canopy layer) 0.01, 0.025, 0.038, 0.05, 0.1, 0.15(trunk space layer)
Drag coefficient, C_d	0.2(canopy layer) 0.5(trunk space layer)
Inflow wind speed at a height of $x_2/H=1.0$ (ms^{-1})	5.0
Roughness length, z_0 (m)	1×10^{-2}

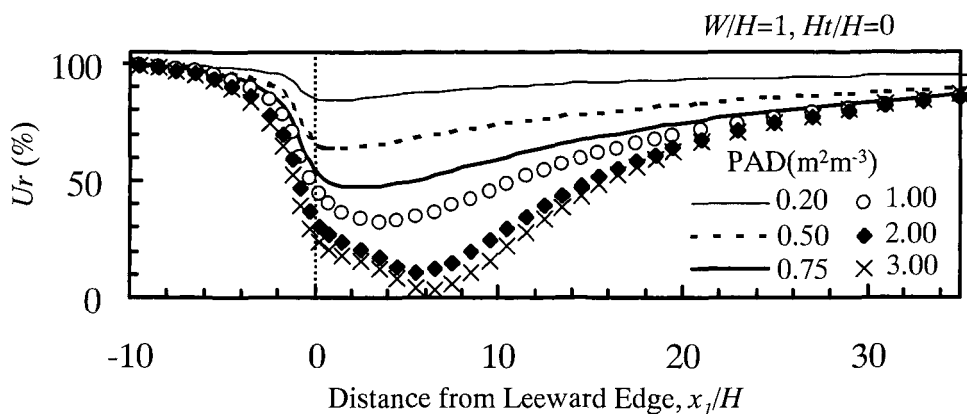


Fig. 20 Horizontal distributions of U_r at a height of $x_2/H=0.5$ with various PADs and with $W/H=1$ and $Ht/H=0$. The reference is wind speed at the same height and at $x_1/H=-10-W/H$.

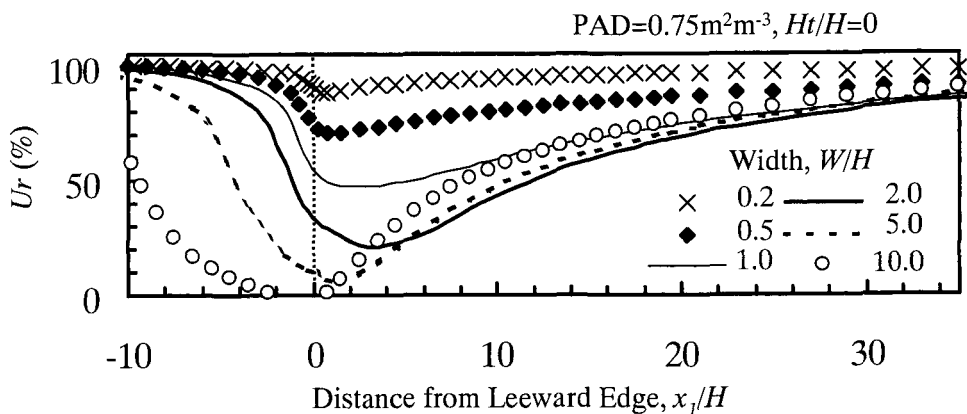


Fig. 21 Horizontal distributions of U_r at a height of $x_2/H=0.5$ with various widths (W/H) and with $PAD=0.75m^2m^{-3}$ and $Ht/H=0$. The reference is the same as that in Fig. 20.

生して-1%であり、 W/H の増加とともに $U_{r_{min}}$ が減少している。最小風速出現後の風速の回復は、 W/H が大きくなるほど早くなってい

る。例えば、 $W/H=10$ における水平分布は $x_1/H=4$ 地点で $W/H=2$ のそれを追いつき、 $x_1/H=12$ 以降は $W/H=1$ の水平分布と等しく

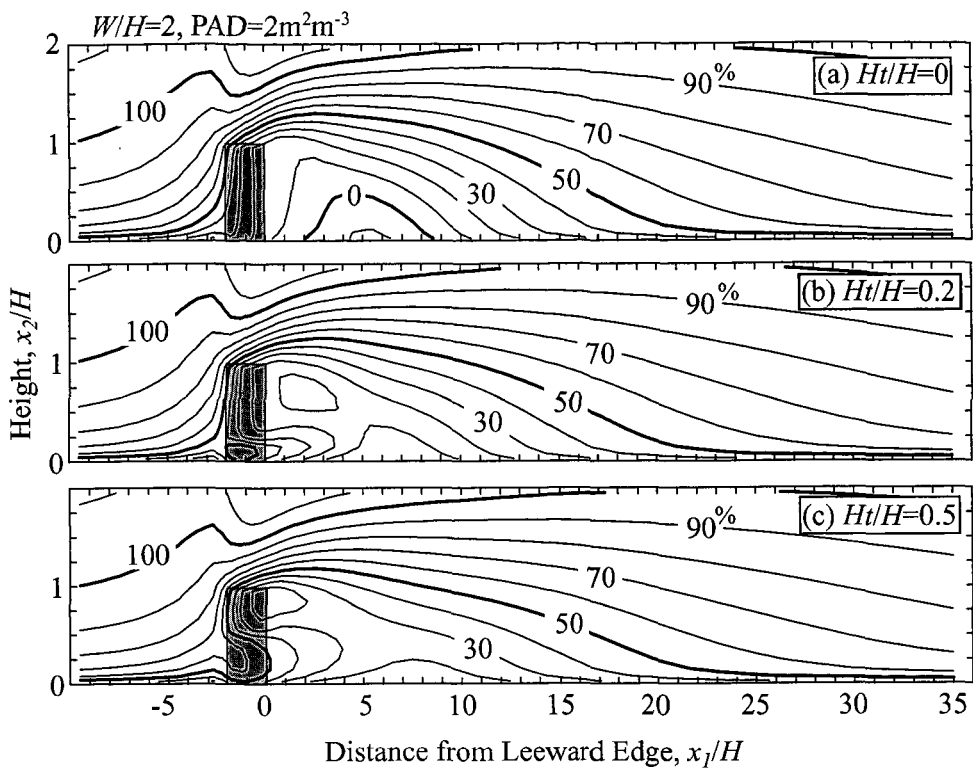


Fig. 22 Isopleths of relative wind speed at various values of Ht/H in $PAD=2\text{m}^2\text{m}^{-3}$ and $W/H=2$. (a): $Ht/H=0$. (b): $Ht/H=0.2$. (c): $Ht/H=0.5$. The reference is wind speed at $x_1/H=-10-W/H$ and at $x_2/H=1.0$. The hatched areas indicate the shelterbelt.

なっている。最小風速の出現位置 $X_{U_{rmin}}/H$ は、 W/H の増加とともに $W/H=2$ までは防風林から離れるが、その後は近づいている。減風効果範囲 $DL_{U_{r80}}/H$ に着目すると、 $W/H=0.5$ で 9.4、 $W/H=2$ で 28.7 であり、 W/H の増加とともに $DL_{U_{r80}}/H$ も増加するが、その後 $W/H=5$ で 26.7、 $W/H=10$ で 23.1 となり、頭打ちになっている。

c. 樹木の鉛直構造による風速分布の相違

Fig. 22 に樹幹層の高さ $Ht/H=0, 0.2, 0.5$ における相対風速のイソプレット（等値線図）を示す。図は幅 $W/H=2$ 、葉面積密度 PAD が $2\text{m}^2\text{m}^{-3}$ の条件である。また、基準点は $x_1/H=-10-W/H$ 地点の地上高 $x_2/H=1$ である。

$Ht/H=0.2, 0.5$ の場合、防風林の風下側直後で上層よりも下層で風速が大きく、樹幹層による強風が明瞭である。 Ht/H が大きくなるにつれ

て、下層の強風の範囲が高くなっている。最小風速域に着目すると、 $Ht/H=0$ の場合は $x_1/H=5.5$ の下層に存在し逆風（ -10% 以下）になっている。 $Ht/H=0.2$ の場合は上層（ $x_1/H=2.0, x_2/H=0.7$ ）と下層（ $x_1/H=6.0$ ）の2カ所にみられ、上層のものは防風林の風下直後に位置している。 $Ht/H=0.5$ の場合も同様に、上層（ $x_1/H=0.5, x_2/H=0.8$ ）および下層（ $x_1/H=7.5$ ）にみられる。また最小風速域の風速は、 $Ht/H=0$ の場合で約 -10% 、 $Ht/H=0.2$ で約 10% 、 $Ht/H=0.5$ で約 20% である。防風林の風下側で 70% の等値線に着目すると、地上高 $x_2/H=0.5$ において $Ht/H=0$ の場合で $x_1/H=27.1$ 、 $Ht/H=0.2$ で 28.1 、 $Ht/H=0.5$ で 29.3 まで達している。すなわち、樹幹層の存在によって最小風速域での風速は増加し、減風範囲は拡大する傾向がみられる。また、幅と樹冠層の PAD が等しくても樹幹層の存在によつ

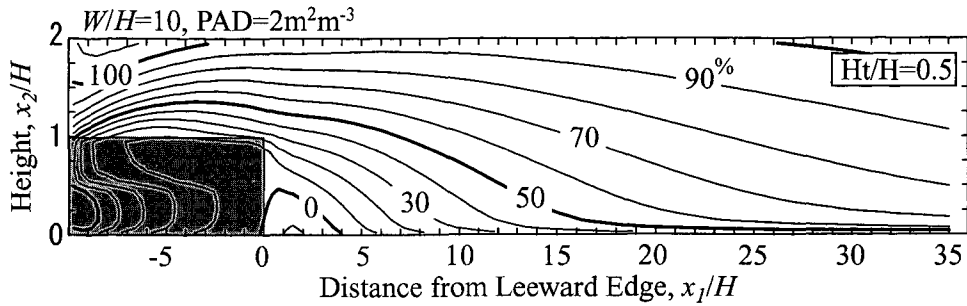


Fig. 23 Isoleth of relative wind speed at $Ht/H=0.5$, $PAD=2m^2m^{-3}$ and $W/H=10$. The reference is the same as that in Fig. 22.

て防風林風下層に強風が発生することから、樹木の鉛直構造は風の流れの構造に大きな影響を及ぼすといえる。

樹幹層によって発生する強風に関して、防風林の幅が与える影響についてを検討してみた。Fig. 23 に $W/H=10$, PAD が $2m^2m^{-3}$, $Ht/H=0.5$ におけるイソプレットを示す。図によれば、防風林内の風上側では上層よりも下層で風速が大きくなっている。しかし、防風林風下側では下層よりも上層が大きいかまたは等速であり、Fig. 22 (c) と比較すると下層の強風が認められない。すなわち、幅が広がると樹幹層による強風現象が現れなくなる。この特徴は、 PAD が $0.5m^2m^{-3}$ の場合でも認められた(図略)。第II章で行った野外観測からも同様な結果が得られている。すなわち、幅の広い地点A, Bには樹幹層があるものの、防風林風下直後で樹幹層による強風はみられなかった。一方、幅の狭い地点D 2, D 3地点では、下開きによる強風が認められた。この原因として、樹幹層の幹や上方の樹冠によって運動量が吸収されるが、幅が広くなるにつれてその吸収量が大きくなることが考えられる。

E. 考 察

本節では、第II章で検討した $HPAI$ (PAD を防風林と直角に水平方向に積分した値) と減風効果の関係について詳しく検討する。なお、本研究では、 PAD は水平方向に一定としているため、 $HPAI$ は次式で求められる。また樹幹層がある場合の $HPAI$ は、樹冠層における PAD ($PADc$ と表す) を用いた。

$$HP = \int_{-w}^0 (PADc) dx_1 = PADc \cdot W \quad (III-16)$$

ここで、 HP : $HPAI$ (m^2m^{-2}) である。

a. $HPAI$ が等しい場合における風速の水平分布

(III-16) 式からわかるように、 $HPAI$ が等しくても葉面積密度 PAD および幅 W/H は異なる。そこで、 $HPAI$ が等しく PAD と W/H が異なる場合の風速水平分布を示したものが Fig. 24 である。図は樹幹層がない場合 ($Ht/H=0$) のもので、地上高と基準点は Fig. 20 と同じである。

まず $HPAI$ が 10 の場合 (Fig. 24 (a)) をみると、 PAD と W/H が異なっても防風林風下側で類似した水平分布となっている。最小風速 Ur_{min} は 32~42%, 減風効果範囲 $DL_{Ur,80}/H$ は 25~29 の範囲である。次に、 $HPAI$ が 40~60 の場合 (Fig. 24 (b)) をみると、 $x_1/H=0\sim20$ において水平分布が異なるが、 $x_1/H \geq 20$ ではほぼ一致する。 Ur_{min} は -4~3%, $DL_{Ur,80}/H$ の 24~28 の範囲である。Fig. 24 (a), (b) によれば $HPAI$ が等しくても W/H が大きくなるにつれて Ur_{min} は大きく、 $DL_{Ur,80}/H$ は小さくなる傾向がみられる。また、 W/H の増加とともに最小風速位置 $X_{Ur_{min}}/H$ は防風林側へ近づいており、既往の研究結果^{(17),(18)} と一致している。

以上のことから、 $HPAI$ が等しい場合、 Ur_{min} および $DL_{Ur,80}/H$ は W/H に影響を受けることがわかった。しかし、Fig. 24 では PAD および W/H を 5~10 倍変化させていることを考慮すると、等しい $HPAI$ における Ur_{min} および $DL_{Ur,80}/H$ の変動範囲は小さいといえる。したがって、

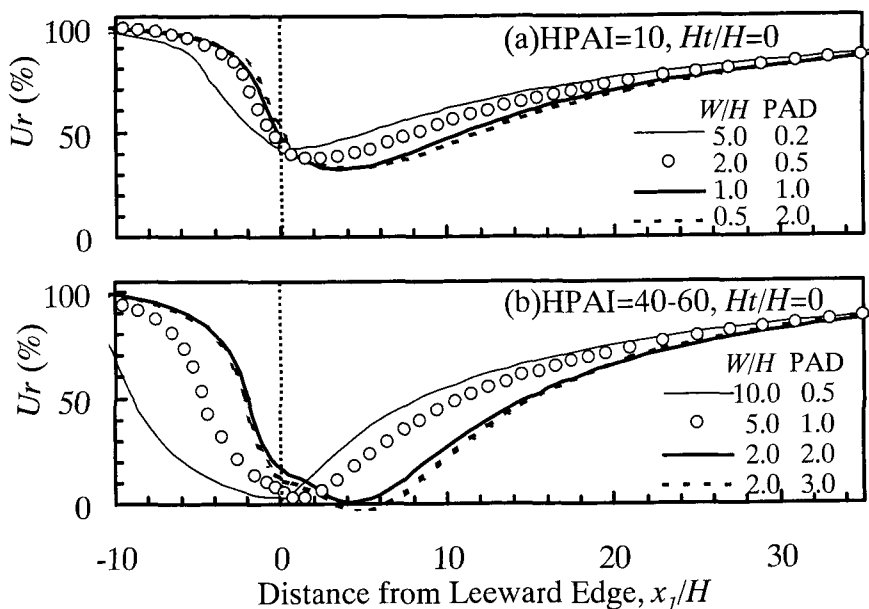


Fig. 24 Horizontal distributions of U_r at a height of $x_2/H = 0.5$ with HPAI=10 (a) and HPAI=40-60 (b). The reference is the same as that in Fig. 20.

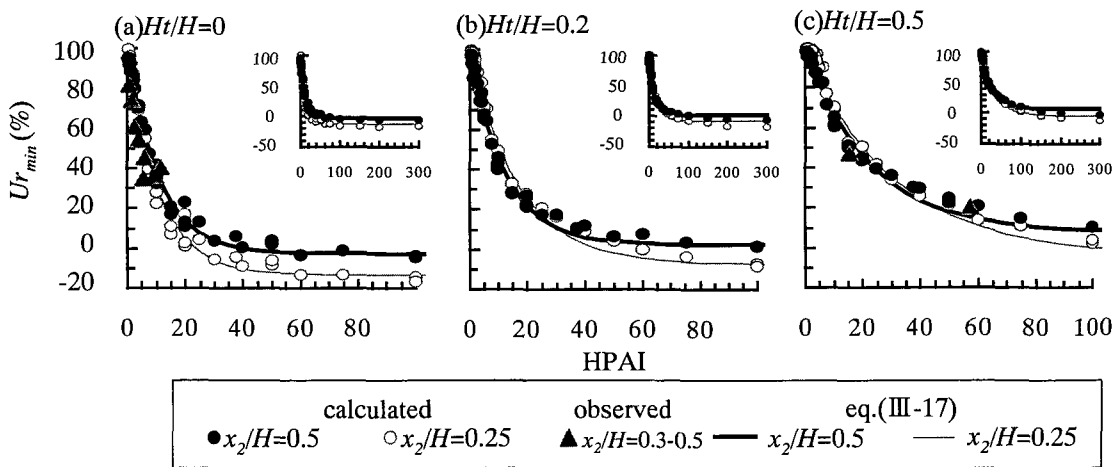


Fig. 25 Relationships between minimum wind speed ($U_{r_{min}}$) and HPAI at various values of Ht/H with heights of $x_2/H = 0.5$ and 0.25 . The circles indicate the results of numerical experiments, and the triangles show the observed data. The curves represent eq. (III-17) with the coefficients shown in Table 5.

$U_{r_{min}}$ で 10%, $DL_{U_{r,80}}/H$ で 5 程度の変動を許容するならば、同一の HPAI おいて葉面積密度 PAD と幅 W/H の影響は無視できると考えられる。

b. HPAI と最小風速の関係

Fig. 25 に、樹幹層の高さ $Ht/H = 0, 0.2, 0.5$ における、HPAI と最小風速 $U_{r_{min}}$ の関係を示す。図では 2 つの地上高 $x_2/H = 0.25, 0.5$ での関係を示した。基準点は、防風林の風上端から風上側 x_1/H

Table 5. Best fit coefficients in eq.(III-17) and standard error.

Ht/H	x_2/H	a_1	a_2	Standard error
0	0.5	102.7	0.0914	3.4%
	0.25	113.6	0.0912	5.0%
0.2	0.5	97.7	0.0811	3.6%
	0.25	107.6	0.0589	5.0%
0.5	0.5	92.7	0.0434	4.0%
	0.25	104.4	0.0323	5.4%

$H = -10 - W/H$ 地点の同一高度である。なお、図での $U_{rmin} < 0$ は逆風を表す。

樹幹層がない場合 ($Ht/H = 0$)、HPAI が増加するにつれて HPAI が 20 までは U_{rmin} は急減するが、その後は頭打ちになっている。樹幹層がある場合 ($Ht/H = 0.2, 0.5$) も、HPAI が増加するにつれて U_{rmin} は減少するが、緩やかな減少になっている。したがって HPAI が等しい場合、 Ht/H が増加するにつれて U_{rmin} は大きくなる。これは、前節における樹木の鉛直構造の検討からもいえることである。地上高 x_2/H の違いで比較すると、 $Ht/H = 0$ の場合に HPAI が 40 以上で大きな差がみられる。これは、HPAI が大きいと防風林風下で渦が発生して、下層は逆風、中層は渦の中心になることが原因と考えられる。

Schwartz et al. (1995)⁴⁸⁾ は、防風垣を対象に

して、HPAI と類似した植物体の表面積と幅から算出されるパラメータと U_{rmin} に相関があると報告している。Fig. 25 によれば、樹幹層の有無や地上高が異なっても HPAI と U_{rmin} に強い相関が認められる。また、同図には第 II 章で実施した野外観測結果もプロットしたが、数値実験の結果は観測結果と良く一致している。

本研究では HPAI と U_{rmin} の関係を (III-17) 式の形で整理した。

$$U_{rmin} (\%) = 100 + a_1 \{ \exp(-a_2 \cdot HP) - 1 \} \tag{III-17}$$

ここで、 a_1, a_2 は Ht/H と地上高 x_2/H によって異なる係数 (Table 5) である。Fig. 25 には (III-17) 式による曲線も示したが、標準誤差は 3.4~5.4% である。

c. HPAI と減風効果範囲の関係

Fig. 26 に樹幹層の高さ $Ht/H = 0, 0.2, 0.5$ における、HPAI と減風効果範囲 (防風林風下側における相対風速が 80% 以下の範囲) $DL_{U_{r80}}/H$ の関係を示す。図では地上高 $x_2/H = 0.25, 0.5$ での関係を示した。基準点は Fig. 25 と同じである。

樹幹層がない場合 ($Ht/H = 0$)、HPAI の増加に伴い HPAI が 15 までは $DL_{U_{r80}}/H$ は急増し、その後は緩やかな減少傾向である。また、地上高 x_2/H

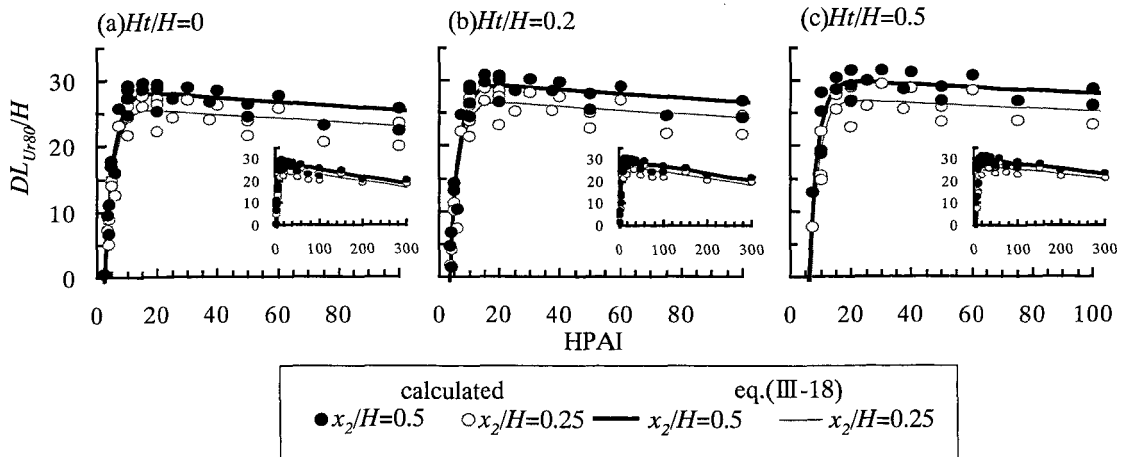


Fig. 26 Relationships between shelter distance ($DL_{U_{r80}}/H$) and HPAI at various values of Ht/H with heights of $x_2/H = 0.5$ and 0.25 . $DL_{U_{r80}}/H$ is the distance over which wind speed is reduced below 80% at the leeward. The circles indicate the results of numerical experiments, and the curves represent eq. (III-18) with the coefficients shown in Table 6.

Table 6. Same as Table III-6-1 but in eq.(III-18).

Ht/H	x_2/H	b_1	b_2	b_3	b_4	Standard error
0	0.5	71.9	0.351	0.0340	28.7	1.9
	0.25	89.9	0.397	0.0302	26.0	2.1
0.2	0.5	98.7	0.346	0.0323	29.9	2.2
	0.25	90.6	0.334	0.0300	27.2	2.3
0.5	0.5	258.5	0.360	0.0241	30.3	2.1
	0.25	343.7	0.381	0.0210	27.3	2.5

H が低くなると $DL_{U_{r80}}/H$ が小さくなっている。樹幹層がある場合 ($Ht/H=0.2, 0.5$) もほぼ同様であるが、HPAI が等しくても Ht/H が大きいほうが $DL_{U_{r80}}/H$ が大きくなっている。この点については、前節の樹木の鉛直構造で検討したとおりである。HPAI が 15 以上で $DL_{U_{r80}}/H$ の変化が小さい原因として、HPAI が大きくなる (PAD, W/H が増加する) につれて $U_{r_{min}}$ は小さくなる (Fig. 25) が、 $U_{r_{min}}$ 出現後の風速回復は早くなる (Fig. 20, Fig. 21) ことが考えられる。風速回復の早さは地表面粗度に影響を受ける (Seginer, 1975)¹⁹⁾ ので、同じ HPAI でも地表面粗度によって $DL_{U_{r80}}/H$ が変化すると考えられる。本研究は防風林の構造に着目しているので、これについては今後の課題としたい。

本研究では HPAI と $DL_{U_{r80}}/H$ の関係を (III-18) 式の形で整理した。

$$DL_{U_{r80}}/H = -b_1 \exp(-b_2 \cdot HP) - b_3 \cdot HP + b_4 \quad (\text{III-18})$$

ここで、 b_1, b_2, b_3, b_4 は Ht/H と x_2/H によって異なる係数 (Table 6) である。Fig. 26 には (III-18) 式による曲線も示したが、標準誤差は 2.9~2.5 である。

Fig. 26 によれば、樹幹層の有無や地上高が異なっても HPAI と $DL_{U_{r80}}/H$ に強い相関が認められる。Schwartz et al. (1995)⁴⁸⁾ は、防風垣における空隙率と $DL_{U_{r80}}/H$ の関係を整理した。その結果、空隙率の減少に伴い $DL_{U_{r80}}/H$ が増加し、空隙率 20% 以下では $DL_{U_{r80}}/H=30$ で頭打ちになったと報告している。Fig. 26 はこれと類似している。第二章での観測結果および前節の検討から、HPAI と最小風速 $U_{r_{min}}$ に強い関係が認められ

たが、本節の検討の結果、HPAI と減風効果範囲 $DL_{U_{r80}}/H$ にも強い関係が認められた。したがって、防風林を計画設計するうえで、HPAI は有効な構造因子といえる。

d. 減風効果を対象にした最適な防風林の構造について

本節では、前節で検討した HPAI と最小風速・減風効果範囲の定量的な関係を用いて、防風林の最適な構造を検討する。最適な防風林の構造は、防風林の利用目的や環境によって様々なものがあると考えられ、一概に定義することはできない。ここでは、最小風速 $U_{r_{min}}$ を小さくし、なおかつ減風効果範囲 $DL_{U_{r80}}/H$ を大きくする防風林の構造について考える。

まず樹幹層の有無で比較すると、樹幹層があると $DL_{U_{r80}}/H$ は大きくなるが、防風林風下直後の下層で強風になる欠点がある。この欠点を除去するには広い幅が必要である。しかし、実際の計画設計では防風林によるつぶれ地を少なくするために、幅を狭くすることが要請される。したがって、樹幹層なしの場合 ($Ht/H=0$) について検討する。

Fig. 25 (a), Fig. 26 (a) によれば、HPAI の増加に伴ない減風効果は大きくなるが HPAI が 15~20 以上では $U_{r_{min}}, DL_{U_{r80}}/H$ の変化は小さく、頭打ちになる。したがって、HPAI が 15~20 の防風林が最適な構造といえる。この HPAI で、第二章で対象にした繁茂期における PAD の測定値 $0.4 \sim 1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ を用いて幅を求めると $W/H=1.5 \sim 5$ である。これは、最適幅は樹高の 5 倍以下という従来の知見^{4),50)} と一致する。防風林を計画設計する場合、維持管理や更新のための余裕幅を見込んでおく必要がある。Fig. 25 (a), Fig. 26 (a) によれば、幅が広がって HPAI が 20 以上となっ

でも減風効果が著しく減少することはない。

F. ま と め

本章では、減風効果からみた防風林の最適構造を把握するために、その構造と減風効果の関係を数値実験によって検討した。最初に、防風林における風の流れの数値シミュレーションモデルを構築した。本モデルの最大の特徴は、乱流渦の変化を防風林内にも適用した点である。モデルの検証として、幅と葉面積密度が異なる防風林において計算結果と観測結果の比較を行った。その結果、分布パターン、絶対値ともに一致し、本モデルが現象を精度良く表現していることが確認された。

次いで、幅、葉面積密度、樹木の鉛直構造が異なる、様々な構造の防風林を対象にして気流の数値実験を行った。その結果から、防風林の構造と減風効果の関係を検討した。さらに減風効果の指標として最小風速と減風効果範囲に着目して、HPAI（葉面積密度を防風林と直角に水平方向に積分した値）との関係を整理し、防風林の最適な構造を提案した。得られた結果を以下にまとめる。

(1)防風林の幅が等しい場合、葉面積密度が増加するにつれて最小風速は減少し、減風効果範囲(防風林風下側における相対風速が80%以下の範囲)は拡大した。

(2)葉面積密度が等しい場合、幅が広くなるにつれて最小風速は減少し、減風効果範囲は拡大した。しかし、ある幅以上になると範囲の拡大は頭打ちになった。

(3)樹幹層の存在によって風の流れの構造が大きく変化した。樹幹層の高さが高くなるにつれて最小風速は増加し、減風効果範囲は拡大する傾向であった。また樹幹層によって発生する強風は、幅が広くなるにつれて弱くなった。

(4)HPAIが等しい場合、幅が広くなるにつれて最小風速は大きく、減風効果範囲は縮小する傾向がみられた。ただし、それらの変化量は小さかった。

(5)HPAIと最小風速に強い相関が認められた。樹幹層がない場合、HPAIが大きくなるにつれて最小風速は急激に減少しHPAIが20を超えると頭打ちになった。またHPAIが等しくても、樹幹層のある場合のほうが最小風速は大きかった。

(6)HPAIと減風効果範囲にも強い相関が認められた。HPAIの増加に伴って減風効果範囲が拡大し、HPAIが15を超えるとわずかな減少傾向に転じた。

以上の結果から、減風効果を対象にした場合、樹幹層がなく、HPAIが15~20の値の防風林が最適な構造であると結論づけられた。

IV. 防風林の構造が昇温効果に及ぼす影響に関する数値実験

第II章では、幅と密度が異なる防風林において昇温効果に関する観測を実施した。ただし、2カ所の防風林を対象にただけなので、十分な検討ができたとは言いがたい。さらに防風林の昇温効果は気象環境、特に放射環境に影響を受けることが認められた。したがって、防風林の構造と昇温効果の関係を検討するには、同一の気象環境下で調査する必要がある、そのためには数値実験が最適である。

本章では、昇温効果からみた防風林の最適な構造を検討するために、その構造と昇温効果の関係を数値実験によって調査した。まず最初に、防風林における温度分布の数値シミュレーションモデルを構築した。そして第II章で得られた観測結果と比較して、構築したモデルの妥当性について検証した。次いで、幅、葉面積密度、樹木の鉛直構造が異なる様々な構造の防風林を対象にして、防風林における昇温効果に関する数値実験を行った。得られた実験結果を用いて、防風林が及ぼす風の流れの変化と昇温効果の関係、および防風林の構造と昇温効果の関係を詳細に検討した。さらにこの関係を踏まえて、昇温効果を対象にした最適な防風林の構造を考察した。

A. 数値実験モデルの構築

a. 基礎方程式

本章では、防風林の構造を直接考慮することができ、防風林前後の温度分布を形成するプロセスを組み込んだ数値シミュレーションモデルを構築する。Fig. 27に、防風林前後の温度分布形成に関するプロセスを模式的に示す。防風林前後の温度分布に影響を与える要因として、防風林が及ぼす気流の変化が考えられる。防風林風上では、地表

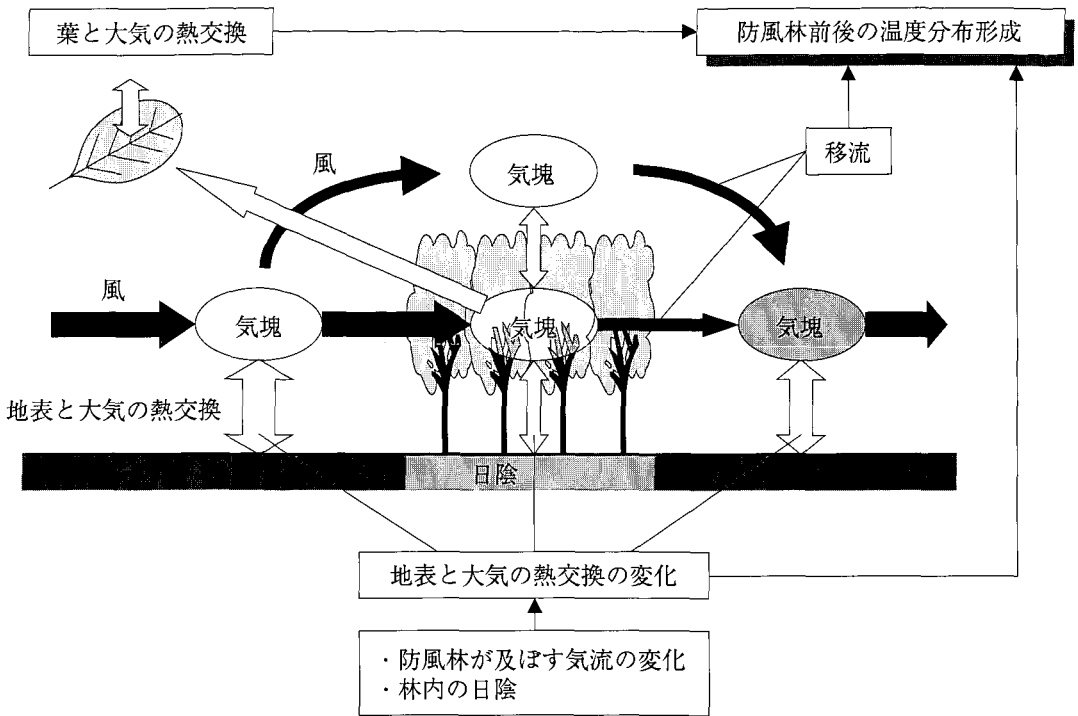


Fig. 27 Schematic aspect of processes to form temperature distribution around a shelterbelt.

と大気との熱交換によって気塊の温度が形成される。防風林風下では気流が変化するのが原因で、風上とは異なった熱交換になり、新たな温度分布が形成される。気塊は防風林の中を通過するだけでなく、防風林の上を乗り越えるものもあり、これも温度分布に影響を及ぼす。さらに気流の変化以外に、防風林の葉も大気と熱交換を行うので、防風林前後の温度分布に影響を及ぼすと考えられる。

本研究における温度分布のモデルの基礎方程式は、気温、比湿の2次元移流拡散方程式である。以下では、基礎方程式をアインシュタインの総和規約を用いてテンソルで表記する。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_h \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + \frac{2A}{r_A} (T_c - T) \tag{IV-1}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial q u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_h \frac{\partial q}{\partial x_i} \right] + \frac{A}{r_A + r_s} (q_{SAT}(T_c) - q) \tag{IV-2}$$

ここで、 x_i ：空間座標 (x_1 ：防風林に直角方向、 x_2 ：鉛直方向) (m)、 t ：時間(s)、 T ：気温(K)、 q ：比湿 (kgkg^{-1})、 u_i ：平均風速ベクトル (u_1 ：防風林に直角方向風速、 u_2 ：鉛直方向風速) (ms^{-1})、 K_h ：熱拡散係数 (m^2s^{-1})、 A ：葉面積密度 PAD (m^2m^{-3})、 T_c ：葉温 (K)、 r_A ：葉面境界層抵抗 (sm^{-1})、 r_s ：気孔抵抗 (sm^{-1})、 $q_{SAT}(T_c)$ ：温度 T_c における飽和比湿 (kgkg^{-1}) である。

(IV-1)、(IV-2) 式は、それぞれ熱と水蒸気の移流拡散方程式である。(IV-1)、(IV-2) 式の右辺最終項は、大気と葉群の間における顕熱と潜熱の輸送量を表す。

平均風速ベクトル u_i は、第III章で構築した風の流れのモデルより算出した。また、熱拡散係数 K_h は渦粘性係数 ν_t に等しいと仮定した。本研究では、気孔は葉の片側のみであると仮定したので、

(IV-2) 式の最終項には定数 2 が入っていない。比湿 q は、あとで示すように、地表および葉面における熱収支式において潜熱輸送量を求める際に必要である。本研究では温度を対象にしているので、(IV-2) 式から得られた比湿 q の分布は検討の対象にしなかった。

b. 葉面熱収支

(IV-1), (IV-2) 式を解くには、右辺最終項の葉群と大気の間における顕熱と潜熱の輸送量を算出しなければならない。これらの算出には、単葉の熱収支式を用いた。

$$R_c - 2 F \sigma T_c^4 = H_c + I E_c \quad (\text{IV-3})$$

ただし、

$$R_c = (1 - \alpha_c) F_c (S_c \downarrow + S_c \uparrow) + F_c (L_c \downarrow + L_c \uparrow) \quad (\text{IV-4})$$

$$H_c = \frac{2 \rho C_p}{r_A} (T_c - T) \quad (\text{IV-5})$$

$$I E_c = \frac{l p}{r_A + r_s} (q_{SAT}(T_c) - q) \quad (\text{IV-6})$$

ここで、 R_c ：葉面に吸収される放射エネルギー (Wm^{-2})、 H_c ：葉面における顕熱輸送量 (Wm^{-2})、 $I E_c$ ：葉面における潜熱輸送量 (Wm^{-2})、 E_c ：葉面における蒸散量 ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 α_c ：葉面のアルベド、 $S_c \downarrow$ ：林内における日射量の下向き成分 (Wm^{-2})、 $S_c \uparrow$ ：林内における日射量の上向き成分 (Wm^{-2})、 $L_c \downarrow$ ：林内における長波放射量の下向き成分 (Wm^{-2})、 $L_c \uparrow$ ：林内における長波放射量の上向き成分 (Wm^{-2})、 F_c ：放射に対する葉面の傾きを表すファクター (Ross, 1975)、 σ ：ステファン・ボルツマン定数 ($=5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 ρ ：空気密度 ($=1.29 \text{kgm}^{-3}$)、 C_p ：空気の定圧比熱 ($=1005 \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)、 l ：水の気化潜熱 ($=2.5 \times 10^6 \text{Jkg}^{-1}$) である。

(IV-3) 式は、葉面に吸収された放射エネルギー R_c が、長波放射 $2 \sigma T_c^4$ 、顕熱 H_c 、潜熱 $I E_c$ に変換されることを表している。(IV-5)、(IV-6) 式は、それぞれ単葉と大気の間における顕熱と潜熱の輸送量を表すが、(IV-1)、(IV-2) 式の右辺最

終項では、(IV-5)、(IV-6) 式の両辺に葉面積密度 A をかけて、葉群と大気の間における顕熱と潜熱の輸送量を表している。

林内の日射と長波放射の伝達には、2-stream モデル⁵¹⁾を用いた。このモデルは、樹冠内のある水平面を横切る日射を鉛直下向き成分と鉛直上向き成分の 2 方向の成分だけで表現するものである。

$$\frac{dS_c \downarrow}{dx_2} = F_c A S_c \downarrow - \alpha_c F_c A S_c \uparrow \quad (\text{IV-7})$$

$$\frac{dS_c \uparrow}{dx_2} = -F_c A S_c \uparrow + \alpha_c F_c A S_c \downarrow$$

$$\frac{dL_c \downarrow}{dx_2} = F_c A L_c \downarrow - F_c A \sigma T_c^4 \quad (\text{IV-8})$$

$$\frac{dL_c \uparrow}{dx_2} = -F_c A L_c \uparrow + F_c A \sigma T_c^4$$

(IV-7)、(IV-8) 式の境界条件は次のとおりである。

<林上端>

$$S_c \downarrow = S \downarrow, L_c \downarrow = L \downarrow \quad (\text{IV-9})$$

<地表面>

$$S_c \uparrow = \alpha_g S_c \downarrow, L_c \uparrow = \sigma T_s^4 \quad (\text{IV-10})$$

ここで、 $S \downarrow$ ：林上端の日射量 (林外の日射量) (Wm^{-2})、 $L \downarrow$ ：大気放射量 (Wm^{-2})、 α_g ：地表のアルベド、 T_s ：地表面温度 (K) である。

放射に対する葉面の傾きを表すファクター F_c は、放射の向きに対して葉がすべて直角ならば $F_c = 1$ 、すべて平行ならば $F_c = 0$ 、等方的ならば $F_c = 0.5$ である⁵²⁾。第 II 章で観測を行った地点 A、C を対象にして、葉面積密度 A に測定値を用い、 $F_c = 0.5$ として (IV-7) 式を解いて、防風林内の日射量の透過率を求めたところ、観測結果と一致した。そのため、本研究では $F_c = 0.5$ を用いた。

葉面境界層抵抗 r_A は次の式で算出した。

$$\frac{1}{r_A} = Nu \frac{\alpha}{l_c} \quad (\text{IV-11})$$

ここで、 Nu ：ヌッセル数、 α ：空気の熱伝導率 ($=21 \times 10^{-6} \text{m}^2\text{s}^{-1}$)、 l_c ：葉のスケール (m) である。

ヌッセル数 Nu は、伝熱工学における経験式⁵³⁾ から算出した。なお、広葉樹では平板の、針葉樹では円柱の経験式を用いた。

<平板 (広葉樹)>

$$Nu = \begin{cases} 0.603 Re^{1/2} (Re \leq 16400) \\ 0.0328 Re^{4/5} (Re > 16400) \end{cases} \quad (IV-12)$$

<円柱 (針葉樹)>

$$Nu = 0.3 + 0.483 Re^{1/2} (1 + 0.000392 Re^{5/8})^{4/5} \quad (IV-13)$$

ここで、 Re はレイノルズ数で、次の式で表せられる。

$$Re = \frac{Slc}{\nu} \quad (IV-14)$$

ここで、 S : スカラー風速 (ms^{-1})、 ν : 空気 of 動粘性係数 ($=14.6 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$) である。

気孔抵抗 r_s は、Jones (1983)⁵⁴⁾ による経験式を参考に単純な日射量の関数とした。

$$r_s = r_{smin} \left[1 + \frac{35}{Fc (Sc \downarrow + Sc \uparrow)} \right] \quad (IV-15)$$

ここで、 r_{smin} : 最小気孔抵抗 (sm^{-1}) である。

c. 地表面熱収支

(IV-1)、(IV-2) 式の地表面境界条件として、地表と大気の間における顕熱と潜熱の輸送量を算出しなければならない。真木 (1979)⁹⁾ は防風ネットを対象にした観測において、気温よりもむしろ地表面温度の昇温効果が大きいことを報告している。したがって、地表面温度は固定するのではなく、地表面における熱収支式を解いて算出した。

<林外>

$$(1 - \alpha_g) S \downarrow + L \downarrow - \sigma T_s^4 = H + IE + G \quad (IV-16)$$

<林内>

$$(1 - \alpha_g) Sc \downarrow + Lc \downarrow - \sigma T_s^4 = H + IE + G \quad (IV-17)$$

ただし、

$$H = \frac{\rho C_p \kappa u_* (T_s - T_p)}{\psi} \quad (IV-18)$$

$$IE = \frac{l \rho \kappa u_* \beta (q_{SAT}(T_s) - q_p)}{\psi} \quad (IV-19)$$

$$G = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x_2} \quad (IV-20)$$

ここで、 H : 地表面における顕熱輸送量 (Wm^{-2})、 IE : 地表面における潜熱輸送量 (Wm^{-2})、 E : 地表面における蒸発量 ($kgm^{-2}s^{-1}$)、 κ : カルマン定数 ($=0.4$)、 u_* : 摩擦速度、 G : 地中伝熱量 (Wm^{-2})、 $q_{SAT}(T_s)$: 温度 T_s における飽和比湿 ($kgkg^{-1}$)、 T_g : 地温 (K)、 β : 地表面の蒸発効率、 λ_g : 土壌の熱伝導率 ($Wm^{-1}K^{-1}$) である。また T_p 、 q_p は、それぞれ地表直上の計算点における気温と比湿である。気温と比湿の積分普遍関数 ψ は次の式を用いた。

$$\psi = \ln \left[\frac{h_p}{z_0} \right] \quad (IV-21)$$

ここで、 z_0 : 地表面粗度、 h_p : 地表直上の計算点の高さ (m) である。また、摩擦速度 u_* は次の式より算出した。

$$u_* = C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} \quad (IV-22)$$

ここで、 k_p : 地表直上の計算点における乱流エネルギー、 $C_\mu = 0.09$ (Laundar and Spalding, 1974) である。乱流エネルギー k は、第三章で構築した風の流れのモデルより算出した。

地温 T_g は水平方向の熱伝導を無視して、鉛直1次元の熱伝導方程式を用いて算出した。

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x_2} \right] \quad (IV-23)$$

ここで、 C_g : 土壌の体積熱容量 ($JK^{-1}m^{-3}$) である。

以上のように、本モデルの特徴は防風林前後の温度分布を形成するプロセスを組み込んだ点であり、このようなモデルは本研究がはじめてである。

d. 側面・上端・下端の境界条件と初期条件

側面 (流入側・流出側) の境界条件は法線方向

の勾配ゼロとした。また、上端および下端の境界条件は初期値で固定した。

$$\left[\frac{\partial T}{\partial x_1} \right]_{\text{inflow}} = \left[\frac{\partial T}{\partial x_1} \right]_{\text{outflow}} = 0 \quad (\text{IV}-24)$$

$$\left[\frac{\partial q}{\partial x_1} \right]_{\text{inflow}} = \left[\frac{\partial q}{\partial x_1} \right]_{\text{outflow}} = 0$$

$$(T)_{\text{top}} = \text{const.}, (q)_{\text{top}} = \text{const.}, (T_g)_{\text{bottom}} = \text{const.} \quad (\text{IV}-25)$$

ここで、添字 inflow, outflow は、それぞれ計算領域の流入側、流出側の境界を表す。また、top, bottom は計算領域の上端、下端の境界を表す。

気温 T 、地温 T_g 、比湿 q の初期条件として、計算領域全体に一定値を与えた。また、葉温 T_c は気温 T と等しいとした。

e. 数値解法、計算手順および計算領域

(IV-1)、(IV-2)式は、staggered 格子系上でコントロールボリューム法 (Patankar, 1980)³⁸⁾ を用いて離散化した。そのため格子毎の葉面積密度の設定が可能で、第三章で述べたように、幅と葉面積密度が異なる構造の防風林を容易に扱うことができる。

(IV-1)、(IV-2)式はタイムステップ 60 秒で時間積分した。日射量 $S \downarrow$ には観測値を用い、大気放射 $L \downarrow$ は近藤 (1994)⁵⁰⁾ による経験式から算出して一定値を与えた。また、防風林における昇温効果は、防風林が及ぼす気流の変化が原動力になっていると考えられる。そこで、(IV-1)、(IV-2)式で必要な風速ベクトル u_i 、渦粘性係数 ν_t 、乱流エネルギー k は、第三章で構築した風の流れのモデルを時間積分することによって算出した。このとき、流入風速には観測値を与えた。

計算領域および格子間隔は第三章と同様とした。なお地下は地表下 1 m までを計算領域とし、格子間隔は 4 cm~50 cm で地表付近を細かくした。

B. モデルの検証

a. 計算条件

モデルの検証として、第II章で観測を実施した地点A、Cのデータと比較を行った。地点A、Cは幅、葉面積密度が異なっている。

構築したモデルが2次元であることから、風向の変化が小さく防風林とほぼ直角な気象条件の日を、検証の対象として選定した。昇温効果が現れる日中を対象とし、6時から15時までを時間積分した。計算条件はTable7のとおりで、現地および近傍露場観測点の観測データより決定した。葉面積密度の鉛直分布は、第三章でモデルの検証で用いた値 (Fig. 15 (a), (c)) を用いた。初期条件には、計算開始時刻における防風林の風上-10 H 地点の気温および近傍露場観測地点における相対湿度の値を用いた。

b. 観測結果との比較

Fig. 28 は、地点A、Cにおける観測結果と計算結果を比較したものである。図では、防風林の風上 $x_i/H = -10 - W/H$ を基準にした気温差 ΔT の水平分布を示した。なお ΔT は、10~15時の平均値である。計算結果をみると、地点A、C共に防風林風下で日中は昇温し、この特徴が晴天時の場合に明瞭で、曇天では不明瞭になっている。これらは、観測結果と一致している。

地点Aで晴天の場合 (Fig. 28 (a))、林内を含めて全体的に観測結果と計算結果が一致している。防風林風下側での気温差 ΔT の最大値とその出現位置は、観測結果ではそれぞれ 1.5°C 、 $x_i/H = 3.0$ 、計算結果によれば 1.4°C 、 $x_i/H = 2.8$ となっており、両者が良く一致している。また、 ΔT の最大値出現後における気温の回復の様子も良く一致している。地点Cで晴天の場合 (Fig. 28 (c)) も、全体的に観測結果と計算結果が一致している。防風林風下側での ΔT の最大値とその出現位置は、観測結果ではそれぞれ 1.7°C 、 $x_i/H = 3.0$ 、計算結果では 1.8°C 、 $x_i/H = 2.8$ であり、両者が良く一致している。

以上の結果から、防風林の構造が気温分布に及ぼす影響を検討するうえで、本研究で構築した数値モデルを用いることは妥当と判断される。

C. 実験条件

本章では、防風林の温度改良効果の中で、昇温効果を対象にする。防風林の昇温効果は気象環境に強く影響を受けるが、本章では昇温効果が大きく現れる夏期の晴天日中に着目した。そのため、実験に用いる気象データとして、モデルの検証で

Table 7. Parameters used for verification of the numerical model.

Condition	Site-A		Site-C	
	Daytime		Daytime	
	Clear	Cloudy	Clear	Cloudy
Date	'95 Sep.13	'95 Jul.14	'96 Jun.27	'96 Jul.17
Initial air temperature(°C)	10.5	19.4	13.3	19.5
Initial ground temperature(°C)	15.9	18.9	14.8	19.1
Initial relative humidity(%)	81	90	87	95
Atmospheric radiation, $L \downarrow$ (Wm^{-2})	301	386	297	394
Albedo at ground surface, α_g		0.2		0.2
Roughness length at ground surface, z_o (m)		0.065		0.013
Ground surface moisture availability, β		0.4		0.4
Heat capacity of ground, C_g ($JK^{-1}m^{-3}$)		2.6×10^6		2.6×10^6
Thermal conductivity of ground, λ_g ($Wm^{-1}K^{-1}$)		1.56		1.56
Albedo at leaves, α_c		0.2		0.2
Extinction coefficient in canopy, F_c		0.5		0.5
Scale of leaf, l_c (m)		0.001		0.05
Minimum stomatal resistance, r_{smin} (sm^{-1})		380		380

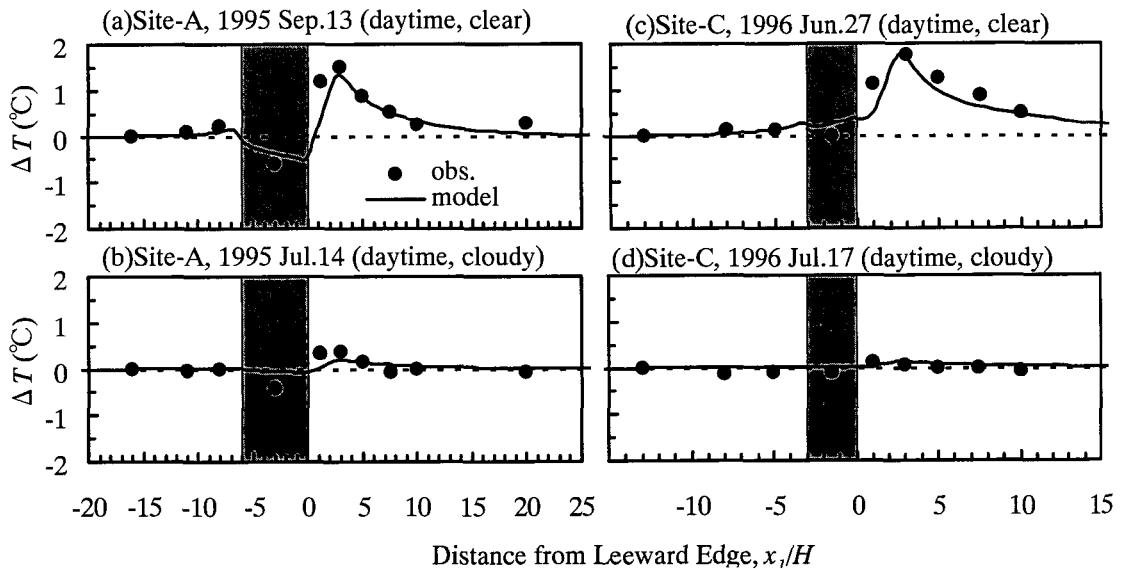


Fig. 28 Comparisons of calculated (lines) and observed (circles) air temperature difference (ΔT) at a height of $x_2/H=0.19$ (site A) and at a height of $x_2/H=0.20$ (site C). The observed and calculated data were obtained by averaging from 1000 to 1500. The reference is air temperature at the same height and at $x_1/H=-10-W/H$. The hatched areas indicate shelterbelts.

用いた 1995 年 9 月 13 日の気象データ (Table 7) を使用した。時間積分は前節と同様に、6 時から 15 時までで、10~15 時の平均値について評価した。防風林の構造は第三章と同じ (Table 4) にした。

D. 結 果

a. 異なる葉面積密度における気温の水平分布

Fig. 29 は、幅 W/H が等しく葉面積密度 PAD が異なる場合の、地上高 1 m ($x_2/H=0.1$) における気温差 ΔT の水平分布である。図は $W/H=1$

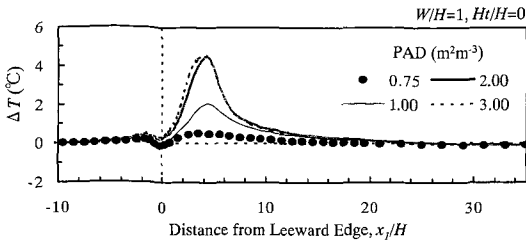


Fig. 29 Horizontal distributions of ΔT at a height of $x_2/H=0.1$ with various PADs and with $W/H=1$ and $Ht/H=0$. The reference is air temperature at the same height and at $x_1/H=-10-W/H$.

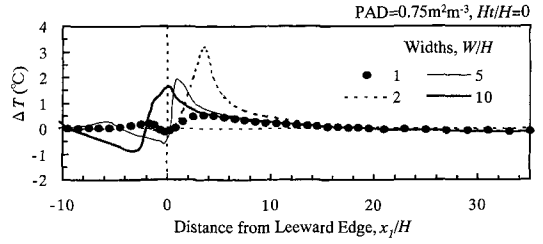


Fig. 30 Horizontal distributions of ΔT at a height of $x_2/H=0.1$ with various widths (W/H) and with $PAD=0.75\text{m}^2\text{m}^{-3}$ and $Ht/H=0$. The reference is the same as that in Fig. 29.

で、樹木の鉛直構造は $Ht/H=0$ の条件である。また、基準点は防風林風上端から風上 100 m ($x_1/H=-10-W/H$) 地点の同一高度である。

最大昇温量 (最大気温差) ΔT_{max} に着目すると、PAD が $0.75\text{m}^2\text{m}^{-3}$ で 0.5°C 、 $1\text{m}^2\text{m}^{-3}$ で 2.0°C 、 $2\text{m}^2\text{m}^{-3}$ で 4.4°C であり、PAD の増加につれて ΔT_{max} が増加している。しかし、PAD が $3\text{m}^2\text{m}^{-3}$ でも ΔT_{max} は 4.4°C で、頭打ちになっている。これは PAD が $2\text{m}^2\text{m}^{-3}$ 以上で逆流が発生していることが原因であり、後節で詳細な検討を行う。また、PAD の増加に伴い ΔT_{max} 出現後の気温回復が早くなり、PAD が $1\text{m}^2\text{m}^{-3}$ と $2\text{m}^2\text{m}^{-3}$ における気温差は $x_1/H=10$ 地点で 0.1°C にまで減少している。昇温効果の範囲として、防風林の風下側における $\Delta T \geq 0.2^\circ\text{C}$ の範囲 $DL_{\Delta T 0.2}/H$ に着目すると、PAD が $0.75\text{m}^2\text{m}^{-3}$ で 9.0、 $1\text{m}^2\text{m}^{-3}$ で 17.0、 $2\text{m}^2\text{m}^{-3}$ で 18.8 であり、PAD の増加とともに $DL_{\Delta T 0.2}/H$ も増加している。しかし PAD が $3\text{m}^2\text{m}^{-3}$ になると $DL_{\Delta T 0.2}/H=17.5$ となり、頭打ちになっている。

b. 異なる幅における気温の水平分布

Fig. 30 は、葉面積密度 PAD が等しく幅 W/H が異なる場合における ΔT の水平分布である。図は PAD が $0.75\text{m}^2\text{m}^{-3}$ 、 $Ht/H=0$ におけるもので、地上高と基準点は Fig. 29 と同じである。

最大昇温量 ΔT_{max} に着目すると、 $W/H=1$ で 0.5°C 、 $W/H=2$ で 3.2°C 、 $W/H=5$ で 1.9°C 、 $W/H=10$ で 1.6°C である。また、最大昇温の出現位置 $X_{\Delta T_{max}}/H$ に着目すると、 $W/H=1$ で 3.0、 $W/H=2$ で 3.5、 $W/H=5$ で 0.75、 $W/H=10$

で 0.25 である。すなわち $W/H \leq 2$ では、幅が広くなるにつれて $X_{\Delta T_{max}}/H$ は林から離れ、 ΔT_{max} は増加する。しかし、さらに幅が大きくなると、幅の増加に伴い $X_{\Delta T_{max}}/H$ は林に近づき、 ΔT_{max} は減少している。 $W/H=1$ と $W/H=2$ の水平分布を比較すると、 $W/H=2$ のほうが ΔT_{max} が大きいものの、 $X_{\Delta T_{max}}/H$ 以降の気温の回復が早く、両者の気温差は $x_1/H=10$ 地点で 0.2°C まで減少している。昇温効果範囲 $DL_{\Delta T 0.2}/H$ に着目すると、 $W/H=1$ で 9.0、 $W/H=2$ で 14.2 であり、 W/H の増加に伴い $DL_{\Delta T 0.2}/H$ も増加している。しかしさらに幅が広くなると、 $W/H=5$ で 11.9、 $W/H=10$ で 11.4 であり、 W/H が大きくなるにつれて $DL_{\Delta T 0.2}/H$ は小さくなっている。

c. 樹木の鉛直構造による気温の水平分布の相違

Fig. 31 (a), (b) は、葉面積密度 PAD および幅 W/H が等しく樹幹層の高さ Ht/H が異なる場合における ΔT の水平分布である。PAD は両図とも $2\text{m}^2\text{m}^{-3}$ であるが、幅は (a) で $W/H=1$ 、(b) で $W/H=5$ である。地上高と基準点は Fig. 29 と同じである。

幅が狭い場合 (Fig. 31 (a)) の最大昇温量 ΔT_{max} に着目すると、 $Ht/H=0$ で 4.4°C 、 $Ht/H=0.2$ で 1.6°C 、 $Ht/H=0.5$ で 1.0°C である。また最大昇温の出現位置 $X_{\Delta T_{max}}/H$ に着目すると、 $Ht/H=0$ で 4.5、 $Ht/H=0.2$ で 7.5、 $Ht/H=0.5$ で 9.5 である。すなわち、樹幹層の高さ Ht/H が高くなるにつれて ΔT_{max} は小さくなるが、 $X_{\Delta T_{max}}/H$ は林から離れる。一方、昇温効果範囲 $DL_{\Delta T 0.2}/H$ は、 $Ht/H=0$ で 18.8、 $Ht/H=0.2$ で 19.4、 $Ht/H=$

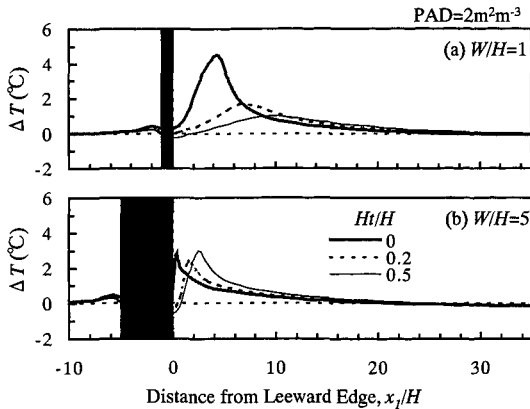


Fig. 31 Horizontal distributions of ΔT at a height of $x_2/H=0.1$ with various values of Ht/H and with $PAD=0.75\text{m}^2\text{m}^{-3}$. (a): $W/H=1$. (b): $W/H=5$. The reference is the same as that in Fig. 29. The hatched areas indicate the shelterbelt.

0.5で20.0であり、 Ht/H が高くなるにつれて $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ は大きくなる傾向があるが、顕著ではない。

幅が広い場合 (Fig.31 (b)) の ΔT_{max} に着目すると、 $Ht/H=0$ で 2.7°C 、 $Ht/H=0.2$ で 2.5°C 、 $Ht/H=0.5$ で 3.0°C である。また $X_{\Delta T_{max}}/H$ は、 $Ht/H=0$ で 0.25 、 $Ht/H=0.2$ で 1.5 、 $Ht/H=0.5$ で 2.5 である。すなわち、幅が狭い場合 (Fig. 31 (a)) と比較して幅が広い場合 (Fig. 31 (b)) は、樹幹層の高さ Ht/H が ΔT_{max} と $X_{\Delta T_{max}}/H$ に及ぼす影響は小さくなっている。 $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ は、 $Ht/H=0$ で 13.8 、 $Ht/H=0.2$ で 14.9 、 $Ht/H=0.5$ で 15.7 であり、幅が狭い場合と同様に、 Ht/H の増加とともに大きくなる傾向があるが、顕著ではない。

E. 考 察

本節では、防風林の構造と関連づけて防風林が及ぼす気流の変化が昇温効果に及ぼす影響について考察し、その結果を踏まえて昇温効果に関する最適な防風林の構造を検討する。

a. 防風林が及ぼす気流の変化と最大昇温の関係

1) 最大昇温の出現位置

Fig. 32 は、相対風速のイソプレット (等値線図) と気温差分布を合成したものである。相対風速の基準点は、防風林の風上 $x_1/H = -10 - W/H$ 地点の地上高 $x_2/H=1$ である。気温差は、風上 x_1/H

$H = -10 - W/H$ を基準とした同一高度における差を示している。図は樹幹層なしの場合 ($Ht/H=0$) で、異なる葉面積密度 PAD 、幅 W/H の場合について示した。

相対風速のイソプレットにおいて、マイナスは逆流すなわち渦が発生していることに注意して、下層における最大昇温の出現位置 $X_{\Delta T_{max}}/H$ に着目してみる。渦が発生しない場合 (Fig. 32 (a))、最大昇温の出現位置 $X_{\Delta T_{max}}/H$ は約 4.5 で、最小風速の出現位置 $X_{U_{rmin}}/H$ も約 4.5 であり、最小風速の出現位置で最大昇温が出現していることがわかる。これを明確にするために、地上高 $x_2/H=0.1$ において $X_{U_{rmin}}/H$ と $X_{\Delta T_{max}}/H$ の関係を整理したものが Fig. 33 である。図によれば、 $X_{U_{rmin}}/H$ と $X_{\Delta T_{max}}/H$ が $1:1$ の直線上に分布し、最小風速の出現位置で最大昇温が出現していることが明らかである。この原因として、最小風速の出現位置では乱流拡散が弱いことによって地表面温度が上昇し、その結果として大気下層の気温が上昇するものと考えられる。真木(1979)⁹⁾ は、防風ネットにおける温度観測結果から、気温よりも地表面温度で昇温が大きいことを報告している。Fig. 32 (a)によれば、防風林風下側下層で最も大きく昇温しており、観測と一致した結果である。

一方渦が発生する場合 (Fig. 32 (b)~(d)) を詳しくみると、例えば、Fig. 32 (b)の場合、最大昇温の出現位置 $X_{\Delta T_{max}}/H$ は約 2 である。相対風速 0% の等値線が地表と交わる位置は $x_1/H=2, 8.5$ の 2 カ所存在する。この 2 カ所のうち風上側を XVW 、風下側を XVL と呼ぶことにすると、 $X_{\Delta T_{max}}/H$ はちょうど XVW に相当している。 XVW では渦の発生によって水平流が収束して上昇流が発生する。一方、 XVL では下降流になる。 XVW では、渦が発生しない場合と同様に乱流拡散が小さいために地表面温度が上昇して気温が昇温するだけでなく、逆風による暖気の移流も要因となって、最大昇温するものと考えられる。しかし XVL では、上層からの冷気の移流によって昇温量が小さくなると考えられる。

Fig. 32 によれば、幅が大きくなるにつれて最大昇温の出現位置 $X_{\Delta T_{max}}/H$ は林に近づいている。これは、 $X_{\Delta T_{max}}/H$ は $X_{U_{rmin}}/H$ や XVW の位置

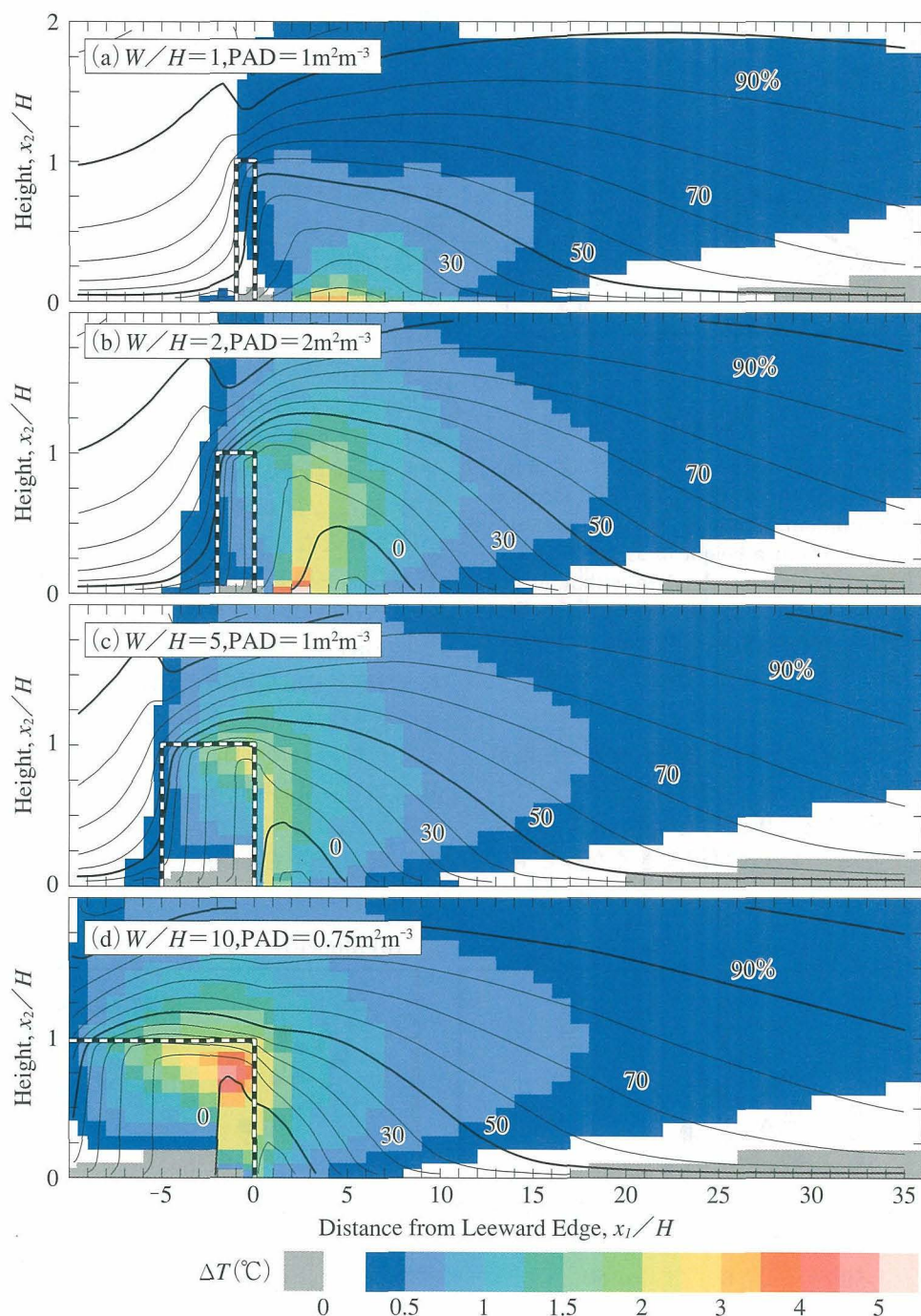


Fig.32 Isopleths of relative wind speed and distributions of air temperature difference at various widths (W/H) and PADs with $Ht/H=0$. The reference wind speed is that at $x_1/H=-10-W/H$ and at $x_2/H=1$. The reference temperature is that at $x_1/H=-10-W/H$ and at the same height. The dashed lines enclose the shelterbelt.

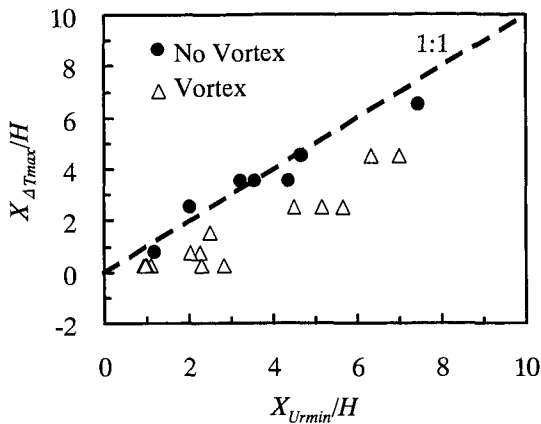


Fig. 33 Relationship between location of minimum wind speed ($X_{U_{rmin}}/H$) and location of maximum difference in air temperature ($X_{\Delta T_{max}}/H$) at a height of $x_2/H=0.1$. The triangles represent the data with a vortex in the leeward of the shelterbelt. The circles represent the data with no vortex. The dashed line represents a function of 1:1.

に対応しているが、第三章で検討したように幅が大きくなるにつれて $X_{U_{rmin}}/H$ や渦が林に近づくことが原因といえる。 $W/H=5$ の場合、XVW は林縁付近となる。さらに幅が大きくなって $W/$

$H=10$ になると XVW は林内に位置している。しかし Fig. 32 (d)からわかるように、林内下層では植物体による日陰のために低温化し、さらに、林内風下側上層では植物体による熱交換によって昇温している。それらの結果、 $X_{\Delta T_{max}}/H$ は XVW ではなく風下林縁に位置するようになる。すなわち幅が大きくなると、最大昇温の出現位置 $X_{\Delta T_{max}}/H$ は、防風林が及ぼす気流の変化以外に、植物体による熱的影響を強く受けるようになると思われる。

2) 最大昇温量

Fig. 34 は、地上高 $x_2/H=0.1$ における最小風速 U_{rmin} と最大昇温量 ΔT_{max} の関係を示したものである。前節での検討の結果から最大昇温の出現位置 $X_{\Delta T_{max}}/H$ は幅 W/H の影響を受けることが明らかとなったので、幅を $W/H=0.2\sim 2$ と $W/H=5\sim 10$ に分けて示した。図において、 $U_{rmin}<0\%$ は渦が発生して逆流が発生していることを示している。前節の検討から、幅が広がると昇温効果は植物体による熱的影響を受けることが示された。そこで、植物体の熱的影響を無視したモデル ((IV-1), (IV-2), (IV-7), (IV-8) において葉面積密度 $A=0$ とする) による実験結果も示した。ここでは、植物体の熱的影響を考慮したモデルを model-A、無視したモデルを

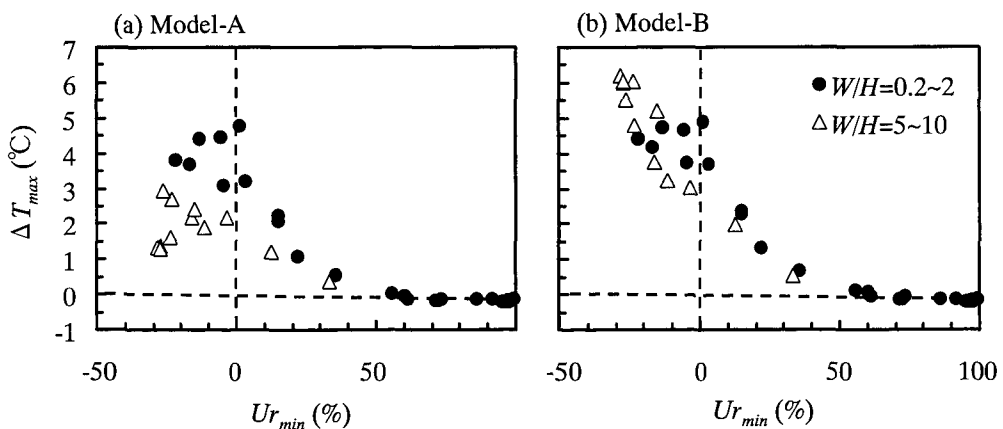


Fig. 34 Relationships between minimum wind speed (U_{rmin}) and maximum difference in air temperature (ΔT_{max}) at a height of $x_2/H=0.1$. (a): Calculated by model-A. (b): Calculated by model-B. The circles represent the data for widths of $W/H=0.2\sim 2$. The triangles represent the data for widths of $W/H=5\sim 10$.

model-B と呼ぶことにする。

幅が狭い場合 ($W/H=0.2\sim 2$) は、model-A、model-B 共に、最小風速 $U_{r_{min}}$ と最大昇温量 ΔT_{max} の相関は明瞭であり、 $U_{r_{min}}$ が減少するにつれて ΔT_{max} が増加している。特に、 $U_{r_{min}} < 20\%$ で ΔT_{max} が急激に変化している。この特徴は、第II章における観測結果および熱収支解析結果 (Fig. 10, Fig. 11) と一致している。また、 $U_{r_{min}}$ と ΔT_{max} の関係は、model-A と model-B でほぼ同一である。一方、幅が大きい場合 ($W/H=5\sim 10$)、model-B では $U_{r_{min}}$ の減少に伴い ΔT_{max} が増加する傾向が認められる。model-A でも同様の特徴がみられるが、不明瞭である。したがって幅が大きい場合、 ΔT_{max} は気流変化以外に植物体の熱的影響を強く受けることが確認された。

b. 防風林が及ぼす気流の変化と昇温効果範囲の関係

Fig. 35 に、地上高 $x_2/H=0.1$ における減風効果範囲 (防風林風下における相対風速が80%以下の範囲) $DL_{U_{r80}}/H$ と昇温効果範囲 (気温差が 0.2°C 以上の範囲) $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ の関係を示す。また前節と同様に、幅を $W/H=0.2\sim 2$ と $W/H=5\sim 10$ に分けて示した。さらに、model-B を用いた実験結果も示した。

同図によれば、減風効果範囲 $DL_{U_{r80}}/H$ と昇温効果範囲 $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ に強い相関があることが明らかである。これは、防風林の風下では下降流や乱流輸送によって上層の運動量が下層へ輸送されて風速が回復するのに対応して、上層の冷気が下層へ輸送されるために気温が回復することが原因と考えられる。すなわち、昇温効果範囲も防風林が及ぼす気流の変化に影響を受けるといえる。

model-A と model-B を比較すると、幅が広く ($W/H=5\sim 10$)、 $DL_{U_{r80}}/H$ が ≤ 18 の場合において、model-B のほうで、 $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ が小さくなっている。これは、樹冠上層で植物体が昇温し、それが風下へ移流することが原因と考えられる。この様子は、Fig. 32 から認められる。

c. 昇温効果を対象にした最適な防風林の構造について

最後にこれまでの結果を踏まえて、昇温効果を対象にした最適な防風林の構造について検討する。防風林を防風対策に用いる場合は、可能な限り減風することが要請される。しかし、昇温効果を期待する場合は防風対策ほど単純ではない。これは、昇温効果にはマイナスの側面があるからである。例えば、昇温が大きいと、蒸発が盛んになって乾燥化することがある⁴⁾。また防風林の風下側

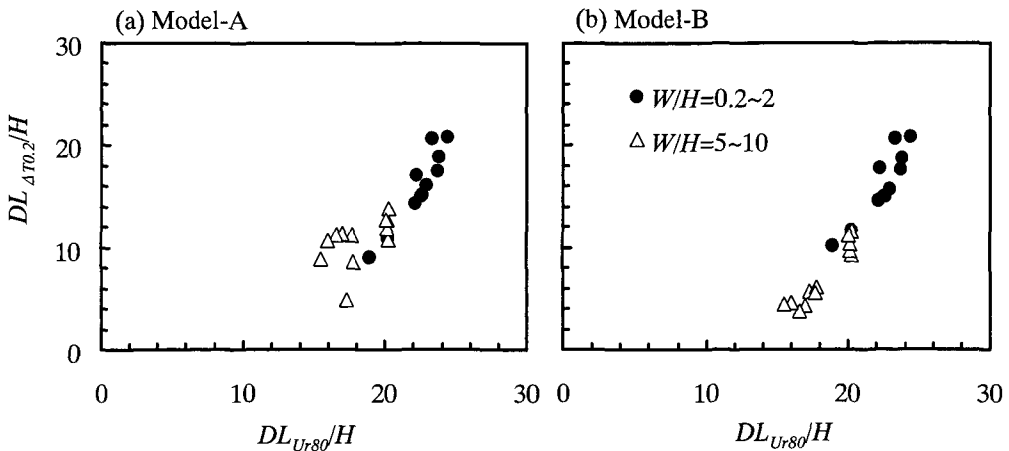


Fig. 35 Relationships between shelter distance ($DL_{U_{r80}}/H$) and warming distance ($DL_{\Delta T_{0.2}}/H$) at a height of $x_2/H=0.1$. (a): Calculated by model-A. (b): Calculated by model-B. The circles represent the data for widths of $W/H=0.2\sim 2$. The triangles represent the data for widths of $W/H=5\sim 10$. $DL_{U_{r80}}/H$ is the distance over which wind speed is reduced below 80% at the leeward. $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ is the distance over which air temperature rises above 0.2°C at the leeward.

では減風効果が原動力となって、Fig. 5から明らかのように日中は昇温するが夜間は低温化し、日中の昇温が大きいと夜間の低温化も大きくなる。そのため夜間の低温化によって、霜害が発生することもある⁵⁶⁾。このようなマイナスの効果は、地表状態や気象環境に大きく影響を受けると考えられる。したがって防風林の目的に応じて、地表状態や気象環境毎に、本章で構築したモデルによる数値実験を行い、最適な防風林の構造を検討する必要がある。本研究では簡単のために、最大昇温量 ΔT_{max} および昇温効果範囲 $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ が最も大きくなる防風林の構造を最適構造と定義する。

これまでの考察から、昇温効果は防風林が及ぼす気流の変化に影響を受けることがわかった。さらに第三章から、減風効果は防風林構造、特にHPAIと強い相関が認められた。したがって、昇温効果もHPAIと相関関係があるものと考えられる。Fig. 34, Fig. 35によれば、 ΔT_{max} および $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ を大きくするには U_{rmin} を小さく、 $DL_{U_{r80}}/H$ を大きくすればよい。それには、第三章の結果からHPAIを大きくすればよい。ただし、幅が大きくなると、植物体による日陰の影響で ΔT_{max} が小さくなることに注意しなければならない

い。

Fig. 36に、樹幹層の高さ $Ht/H=0, 0.2, 0.5$ におけるHPAIと ΔT_{max} の関係を示す。前節における検討結果から最大昇温量 ΔT_{max} は幅 W/H の影響を受けることが明らかとなったので、幅を $W/H=0.2\sim 2$ と $W/H=5\sim 10$ に分けて示した。同図によれば、 $W/H=0.2\sim 2$ と $W/H=5\sim 10$ のそれぞれで、HPAIと ΔT_{max} に強い関係が認められる。また樹幹層の有無にかかわらず、HPAIが等しくても、 $W/H=5\sim 10$ よりも $W/H=0.2\sim 2$ の場合で ΔT_{max} が大きい。 $W/H=0.2\sim 2$ に着目すると、樹幹層が無い場合($Ht/H=0$)、HPAIの増加に伴いHPAIが15~20までは ΔT_{max} は急激に増加するが、その後は頭打ちになる。一方樹幹層がある場合は、緩やかに増加している。

Fig. 37に、 $Ht/H=0, 0.2, 0.5$ におけるHPAIと $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ の関係を示す。この図でも、幅を $W/H=0.2\sim 2$ と $W/H=5\sim 10$ に分けて示した。同図をみると、 $W/H=0.2\sim 2$ と $W/H=5\sim 10$ のそれぞれで、HPAIと $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ に強い関係が認められる。また、樹幹層の有無にかかわらず、HPAIが等しくても、 $W/H=5\sim 10$ よりも

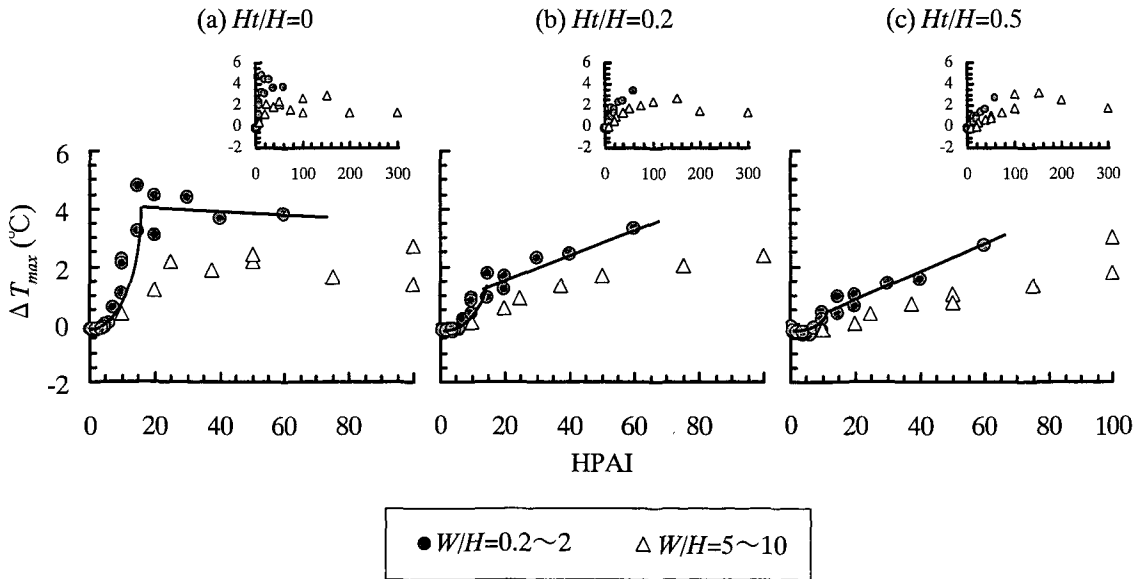


Fig. 36 Relationships between maximum difference in air temperature (ΔT_{max}) and HPAI at various values of Ht/H and at a height of $x_2/H=0.1$. The circles indicate the data of $W/H=0.2\sim 2$, and the triangles show the data of $W/H=5\sim 10$. The curves are averages of visual estimations.

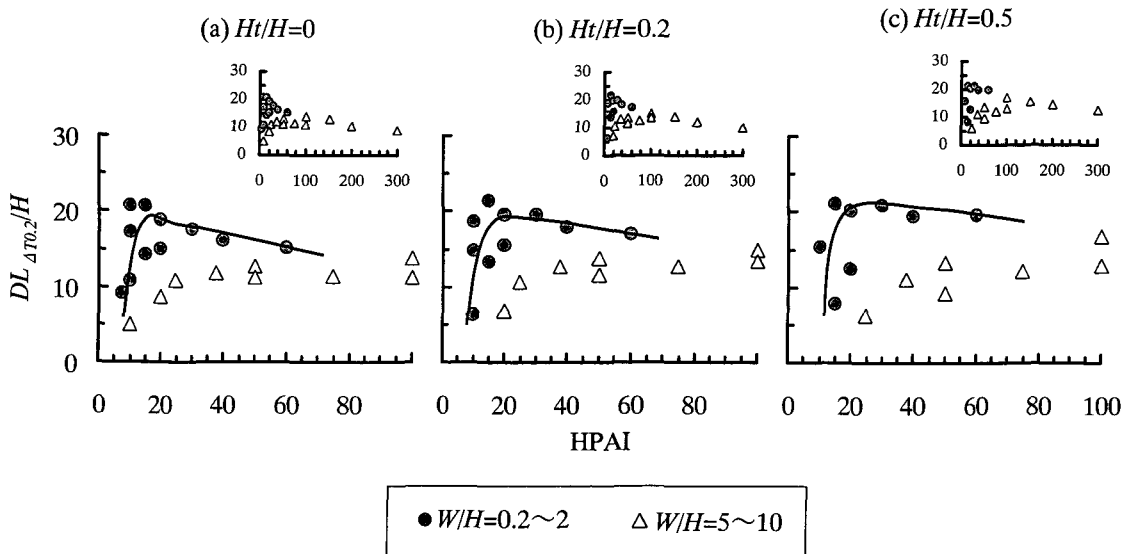


Fig. 37 Relationships between warming distance ($DL_{\Delta T_{0.2}}/H$) and HPAI at various value of Ht/H and at a height of $x_2/H = 0.1$. $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ is the distance over which air temperature rises above 0.2°C at the leeward. The circles indicate the data of $W/H = 0.2 \sim 2$, and the triangles show the data of $W/H = 5 \sim 10$. The curves are averages of visual estimations.

$W/H = 0.2 \sim 2$ の場合で $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ が大きい。 $W/H = 0.2 \sim 2$ に着目すると、樹幹層の有無にかかわらず、HPAIが増加するにつれて HPAI が 15~20 までは $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ は急激に増加するが、その後は漸減している。 $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ の最大値は、樹幹層の有無にかかわらず、どれも 20 程度である。

以上のことより、まず幅 $W/H = 5 \sim 10$ よりも $W/H \leq 2$ のほうが、 ΔT_{max} および $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ が大きい。さらに、同じ ΔT_{max} を達成するには、樹幹層がある場合 ($Ht/H = 0.2, 0.5$) は樹幹層が無い場合に比べて、より大きな HPAI が必要となる。すなわち、樹幹層がある場合は、より大きな幅または葉面積密度が要請されることになる。一方 $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ は、樹幹層の有無にかかわらず、HPAI が 15~20 で最大となり、その値はどれも約 20 である。したがって、樹幹層がなく、幅 $W/H \leq 2$ で、HPAI が 15~20 の構造が、最大昇温量 ΔT_{max} および昇温効果範囲 $DL_{\Delta T_{0.2}}/H$ を最大にする最適な構造といえる。樹幹層が無く HPAI が 15~20 の防風林の構造は、第三章で明らかになったように減風効果においても最適な構造である。これは、防風林が及ぼす風の変化が昇温効果の原

動力になるためと考えられる。

ここで求められた最適な防風林の構造は、1つの気象条件（1995年9月13日の千歳における気象データ）のみから検討されたものである。しかし、この防風林の構造は、第II章で考察したように、他の気象条件であっても昇温効果を最大にするものである。

F. まとめ

本章では、昇温効果からみた防風林の最適構造を把握するために、その構造と昇温効果の関係を数値実験によって検討した。最初に、防風林における温度分布の数値シミュレーションモデルを構築した。このモデルの最大の特徴は、防風林前後の温度分布を形成するプロセスを組み込んだ点にあり、このようなモデルは本研究がはじめてである。モデルの検証として、昼夜や天気の変えて、幅と葉面積密度が異なる2カ所の防風林において計算結果と観測結果の比較を行った。その結果、分布パターン、絶対値ともに一致し、数値実験にこのモデルを使えることが確認された。

次いで、幅、葉面積密度、樹木の鉛直構造が異なる様々な構造の防風林を対象にして、夏期晴天

日中における温度分布の数値実験を行った。その結果から、防風林が及ぼす気流変化と昇温効果の関係について考察した。さらに、HPAI(葉面積密度を防風林と直角に水平方向に積分した値)を用いて、防風林の構造と昇温効果の関係を整理し、最適な防風林の構造を提案した。得られた結果を以下にまとめる。

(1)防風林の幅が等しい場合、葉面積密度が増加するにつれて最大昇温量および昇温効果の範囲(防風林の風下側における気温が 0.2°C 以上上昇している範囲)は増加し、ある葉面積密度以上になると頭打ちになった。

(2)葉面積密度が等しい場合、幅が大きくなるにつれて、最大昇温量および昇温効果範囲は増加し、ある幅以上になると減少に転じた。

(3)樹幹層の高さが昇温効果範囲に及ぼす影響は小さかったが、幅が狭い場合、樹幹層の高さが高くなるにつれて最大昇温量は小さくなった。幅が広い場合、樹幹層の高さが最大昇温量に及ぼす影響は小さかった。

(4)防風林の風下側で渦が発生しない場合、最大昇温の出現位置は最小風速の出現位置と同一であった。渦が発生する場合は、渦の風上側で最大昇温が出現した。最小風速と最大昇温量、および減風効果範囲と昇温効果範囲に強い相関が認められた。

(5)HPAIと最大昇温量に強い相関が認められた。HPAIが等しい場合、幅が広い防風林($5H \sim 10H$; H は樹高)よりも、狭い($2H$ 以下)ほうが、最大昇温量が大きかった。幅が狭く樹幹層が無い場合、HPAIが増加するにつれてHPAIが $15 \sim 20$ までは最大昇温量は急増したが、その後は頭打ちになった。HPAIが等しくても、樹幹層のある場合のほうが最大昇温量は小さかった。

(6)HPAIと昇温効果範囲に強い相関が認められた。HPAIが等しい場合、幅が広い防風林($5H \sim 10H$)よりも、狭い($2H$ 以下)ほうが、昇温効果範囲が大きかった。HPAIの増加に伴いHPAIが $15 \sim 20$ までは昇温効果範囲が拡大し、その後はわずかな減少傾向に転じた。

以上の結果から、昇温効果を対象にした場合、樹幹層がなく、幅 $W/H \leq 2$ で、HPAIが $15 \sim 20$

の値の防風林が最適な構造であると結論づけられた。

V. 結 論

防風林は、減風効果、昇温効果など気象改良機能のほか、土壌保全機能も有しており、強風地域における作物の栽培および耕地の維持に重要な役割を果たしている。しかし、防風林の幅や植栽密度など防風林の計画・設計にあたっては、経験的な知見によるところが多く、定量的な計画・設計の指針がないまま今日に至っている。これは、野外観測で防風林の構造と気象改良効果の関係を把握することが困難なため、両者の関係が十分に解明されていないことが原因である。野外観測で現象の解明が困難な場合、モデルを構築して数値実験を行う手法が一般化しており、防風施設関係では、防風柵の空隙率と減風効果などが数値実験で明らかにされている。しかし防風林については、防風林の空隙率のパラメータ化、防風林内部の気流の動きの表現などが困難なため、精度の高い数値モデルはまだ構築されていない。

本研究は、以上のような問題点を踏まえ、防風林周辺の気流と熱的現象を精度良く再現できる数値モデルを構築することを通じて、防風林の構造と減風効果および昇温効果の関係を数値実験により定量的に把握することを目的とした。また得られた結果をもとに、最大の気象改良効果を得るための最適な防風林構造について検討した。研究結果の概要は以下のとおりである。

(1)構造の異なった防風林における風速と気温分布の観測

防風林の気象改良効果に関する数値モデルを構築するための基礎データを取得することを目的に、構造の異なった6ヶ所の防風林において風速と気温分布の観測を実施した。また得られたデータから、気象改良効果と関連づけるための新たな構造因子を検討した。

その結果、防風林の構造因子の中で防風林の幅と葉面積密度が減風効果・昇温効果に影響を与えていることが明らかになった。また、昇温効果は気象環境、特に放射環境の影響も強く受けることがわかった。さらに、新たな構造因子として

HPIA (Horizontal Plant Area Index; 葉面積密度を水平方向に積分した値) を考えた。この HPIA と防風林風下における最小風速との関係を整理した結果、防風林の幅や葉面積密度を単独に用いた場合よりも強い相関関係が認められた。これにより、HPIA は、防風林を計画・設計するうえで有効な構造因子になることが明らかになった。

(2)防風林の構造が減風効果に及ぼす影響に関する数値実験

防風林の構造と減風効果の関係を数値実験で明らかにするため、防風林前後における風の流れを表現する数値モデルを構築した。構築したモデルは、2次元中立のレイノルズ方程式、連続の式、 $k-\epsilon$ モデルから成り立つ。本モデルの最大の特長は、乱流渦の変化を防風林内にも適用した点にある。このようなモデル構築の試みは本研究がはじめてである。このモデルを使って野外観測を行った複数の防風林を対象に検証を行ったところ、計算結果と観測結果は良く一致し、本モデルが現象を精度良く表現していることがわかった。

本モデルを使って、防風林の幅、葉面積密度、樹幹層の高さが異なる様々な構造の防風林を対象に、防風林周辺の気流の変化に関する数値実験を行った。その結果、防風林の幅が等しい場合、葉面積密度が増加するにつれて最小風速は減少し、減風効果の範囲（防風林風下側における相対風速が80%以下の範囲）が拡大した。また、葉面積密度が等しい場合、防風林の幅が大きくなるにつれて最小風速は減少し、減風効果範囲は拡大したが、ある幅以上になると範囲の拡大が頭打ちになった。さらに、防風林下部に樹幹層が存在する場合、風の吹き抜けによって最小風速は増加するが、減風効果範囲は拡大する傾向がみられた。

以上の数値実験の結果をもとに、減風効果の指標として最小風速と減風効果範囲に着目して、HPIA との関係を整理した。その結果、HPIA と最小風速および減風効果範囲に強い相関が認められた。樹幹層が無い場合、HPIA が大きくなるにつれて最小風速は急激に減少し、HPIA が20を超えると風速の減少が頭打ちになった。一方減風効果範囲は、HPIA の増加に伴って拡大し、HPIA

が15を超えるとわずかな縮小傾向に転じた。また、HPIA が等しくても樹幹層のある場合のほうが最小風速は大きかった。これらの結果から、減風効果を対象にした場合、樹幹層がなく、HPIA が15~20の値の防風林が最適な構造であることが明らかになった。

(3)防風林の構造が昇温効果に及ぼす影響に関する数値実験

防風林の構造と昇温効果の関係を明らかにするため、防風林前後における温度分布を表現する数値モデルを構築した。モデルは、2次元の熱の移流拡散方程式、地表面熱収支式などから成り立ち、植物体の熱収支も考慮している。このモデルの特徴は、防風林前後の温度分布を形成するプロセスを組み込んだ点にあり、このようなモデルは本研究がはじめての試みである。このモデルを使って野外観測を行った複数の防風林を対象に検証を行ったところ、観測結果と計算結果が良く一致し、数値実験にこのモデルが使えることが確認された。

本モデルを使って、防風林の幅、葉面積密度、樹幹層の高さが異なる様々な構造の防風林を対象に、温度分布に関する数値実験を行った。その結果、防風林の幅が等しい場合、葉面積密度が増加するにつれて最大昇温量および昇温効果の範囲（防風林の風下側における気温が 0.2°C 以上上昇している範囲）は増加し、ある葉面積密度以上になると頭打ちになった。また葉面積密度が等しい場合、幅が大きくなるにつれて、最大昇温量および昇温効果範囲は増加し、ある幅以上になると減少に転じた。防風林における気流の変化と昇温効果の関係については、最小風速と最大昇温量、および減風効果範囲と昇温効果範囲に強い相関が認められた。

以上の数値実験の結果を基に、昇温効果の指標として最大昇温量と昇温効果範囲に着目して、HPIA との関係を整理した。その結果、HPIA と最大昇温量および昇温効果範囲に強い相関が認められた。HPIA が等しい場合、幅が広い防風林(5H~10H; Hは樹高)よりも、狭い(2H以下)ほうが、最大昇温量、昇温効果範囲がともに大きかった。幅が狭く樹幹層が無い場合、HPIA が増

加するにつれて HPAI が 15~20 までは最大昇温量は急増したが、その後は頭打ちになった。昇温効果範囲は HPAI の増加に伴い HPAI が 15~20 までは拡大し、その後はわずかな縮小傾向に転じた。HPAI が等しくても、樹幹層のある場合のほうが最大昇温量は小さかった。以上の結果より、昇温効果を対象にした場合、樹幹層がなく、幅が狭く (2H 以下)、HPAI が 15~20 の防風林が最適な構造であることがわかった。

本研究では、防風林による気象改良効果の数値シミュレーションモデルを構築し、数値実験を行うことによって、野外観測や模型実験では十分な検討が不可能だった防風林の構造と気象改良効果の関係を定量的に明らかにすることができた。本研究で構築した数値モデルは、防風林周辺の気流および温度分布を精度良く再現できるものである。このことから、本研究で構築した数値モデルによる実験は、防風林における気象改良効果を調査するうえで、有効な方法になると考えられる。

本研究で提案した防風林の構造因子 HPAI (葉面積密度を防風林と直角に水平方向に積分した値) は、従来用いられてきた幅、密度、空隙率に代わる新たな構造因子である。HPAI は幅と葉面積密度から算出できるのも大きな特徴であり、防風林の計画設計に使いやすい構造因子と考えられる。また、この HPAI を用いて減風効果と昇温効果からみた最適な防風林の構造を具体的に提案した。この成果は、防風林を計画設計するうえで、有益な資料になるものと思われる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、貴重な御指導と御助言を賜った、北海道大学農学部浦野慎一教授、長澤徹明教授、平野高司助教授に深甚な感謝の意をささげる次第であります。また、数値モデル実験という新しい研究のきっかけを与えて頂いたとともに、研究を最後まで指導していただいた北海道大学地球環境科学研究科高橋英紀助教授に心より御礼申し上げます。

北海道大学農学部名誉教授堀口郁夫教授には暖かい適切な御助言・教示を賜りました。帯広畜産大学辻修助教授には、北海道の防風林の研究に対

する気概ある姿勢を授けて頂きました。さらに、北海道立林業試験場鳥田宏行氏とは、機会ある毎に防風林の構造因子について議論させて頂きました。この場を借りて厚く誠意を申し上げます。

葉面積指数の測定については、農林水産省北海道農業試験場山田一茂博士、鮫島良次博士よりプラントキャノピーアナライザーを快く貸して頂きました。また、北海道開発局より気象データを提供して頂きました。ここに心より謝意を表します。

本研究は、筆者が北海道大学農学研究科博士後期課程(社会人特別選抜)在学中において遂行されたものであります。財団法人日本気象協会北海道支社の皆様には、社会人学生という機会を与えて頂いたとともに様々な便宜を図って頂きました。また、竹内政夫博士、植松孝彦博士には、激励とともに常日頃から御指導を賜りました。心より御礼申し上げます。

引用文献

1. 真木太一：農林水産省構造改善局が実施した防風施設に関する実態調査概要。農業気象，**39**，225-234，1983。
2. 辻修：芽室町における農村景観の構造とアメニティの形成・保全。農業構造改善地域農業基盤確立総合支援コンサルタント活動 北海道芽室町地域農業計画，社団法人全国農業構造改善協会，東京，59 pp，1997。
3. van Eimern, J., Karschon, R., Razumova, L. A. and Robertson, G. W.: Windbreaks and shelterbelts. WMO Technical Note No. 59 (WMO-No. 147. TP. 70), 188pp, 1964.
4. 真木太一：風害と防風施設。文永堂出版，東京，301 pp，1987。
5. McNaughton, K. G.: Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **22/23**, 41-69, 1988.
6. 檜山徳治：海岸防災林。林業技術，**308**，18-21，1967。
7. Woodruff, N. P., Read, R. A. and Chepil, W. S.: Influence of a field windbreak on summer wind movement and air tempera-

- ture. Kansas Agric. Res. Tech. Bull. No. 100, 24pp, 1959.
8. 横田廉一・高橋英紀・岡橋準治：寒冷紗を使用した場合の防風施設の効果（第3報）水田における防風垣内外の微気象。北海道の農業気象, **19**, 17-21, 1968.
 9. 真木太一：防風網による水田の昇温効果。農業気象, **34**, 165-176, 1979.
 10. 泊功：気象災害の仕組みと対策 冷害（稲・豆類）。北海道の農業気象（監修堂腰純・島崎佳郎），北海道協同組合通信社，札幌，217 pp, 1982.
 11. Heisler, G. M. and Dewalle, D. R.: Effects of windbreak structure on wind flow. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **22/23**, 41-69, 1988.
 12. 横田廉一・高橋英紀・荻原守：農耕地における熱的現象の模型実験（1）防風垣後方の気温の分布。農業気象, **27**, 153-158, 1972.
 13. Kenney, W. A.: A method for estimating windbreak porosity using digitized photographic silhouettes. *Agric. Meteorol.*, **39**, 91-94, 1987.
 14. Naegeli, W.: Further investigation of wind conditions in the range of shelterbelts. *Mitteil. Schweiz. Anstalt Forstl. Versuchswesen*, **24**, 660-737, 1946.
 15. Nord, M.: Shelter effects of vegetation belts - results of field measurement. *Bound. Layer Meteorol.* **54**, 363-385, 1991.
 16. 田中貞雄・佐野洋・谷沢恒夫・柿沼計：防風垣前後の風に関する研究(8)林帯の幅及び遮蔽度と防風機能。農業気象, **12**, 73-78, 1956.
 17. Takahashi, H.: Wind tunnel test on the effect of width of windbreaks on the wind speed distribution in leeward. *J. Agric. Meteorol.*, **33**, 183-187, 1978.
 18. Wang, H. and Takle, E. S.: On three-dimensionality of shelterbelt structure and its influences on shelter effects. *Bound. Layer Meteorol.*, **79**, 83-105, 1996.
 19. 安原充・大宮司久明編：数値流体力学—基礎と応用—。東京大学出版会，東京，635 pp, 1992.
 20. 早川誠而・元田雄四郎：防風施設の前後における風の研究(1)計算で得られた水平流の特徴。農業気象, **41**, 31-38, 1985.
 21. Wang, H. and Takle, E. S.: Boundary-layer flow and turbulence near porous obstacles 1. Derivation of a general equation set for a porous medium. *Bound. Layer Meteorol.*, **74**, 73-88, 1995.
 22. Wang, H. and Takle, E. S.: A numerical simulation of boundary-layer flows near shelterbelts. *Bound. Layer Meteorol.*, **75**, 141-173, 1995.
 23. 農林水産省構造改善局計画部：土地改良事業計画指針「防風施設」。社団法人農業土木学会，東京，160 pp, 1987.
 24. 細野達夫・廣部明泰・青木正敏：気温測定における放射除け・通風筒の種類及び形状と測定誤差。農業気象, **44**, 215-218, 1988.
 25. Wells, J. M. and Norman, J. M.: Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agron. J.*, **83**, 818-825, 1991.
 26. Baldocchi, D. D., Matt, D.R., Hutchison, B. A. and McMillen, R. T.: Solar radiation within an oak-hickory forest: an evaluation of the extinction coefficient for several radiation components during fully-leafed and leafless periods. *Agric. For. Meteorol.*, **32**, 307-322, 1984.
 27. 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**, 123-133, 1982.
 28. 真木太一：防風網に関する研究(8)冬春季裸地圃場での防風網による微気象改良・風食防止効果。農業気象, **40**, 323-330, 1985.
 29. 気象庁：航空気象観測指針，161 pp, 1993.
 30. 近藤純正：地表面の熱収支の基礎。水環境の気象学（編集近藤純正），朝倉書店，東京，348 pp, 1994.
 31. Laundar, B. E. and Spalding, D. B.: The

- numerical computation of turbulent flow. *Comp. Meth. In Appl. Mech. And Eng.*, **3**, 269-289, 1974.
32. 平岡久司・丸山敬・中村泰人・桂順治：植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究（その1）乱流モデルの作成。日本建築学会計画系論文報告集, **406**, 1-9, 1989.
33. Wilson, N. R. and Shaw, R. H.: A high order closure model for canopy flow. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 1197-1205, 1977.
34. Baldocchi, D. D. and Mayers, T. P.: Turbulence structure in a deciduous forest. *Bound. Layer Meteorol.*, **43**, 345-364, 1988.
35. Irvine, M. R., Gardiner, B. A. and Hill, M. K.: The evolution of turbulence across a forest edge. *Bound. Layer Meteorol.*, **84**, 467-496, 1997.
36. Watanabe, T. and Kondo, J.: The influence of canopy structure and density upon the mixing length within and above vegetation. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **68**, 227-235, 1990.
37. Orlanski, U.: A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *J. Comput. Phys.*, **21**, 251-269, 1976.
38. Patankar, S. V.: *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere, Washington, D.C., 193pp, 1980.
39. Amiro, B. D.: Comparison of turbulence statistics within three boreal forest canopy. *Bound. Layer Meteorol.*, **51**, 99-121, 1990.
40. Grant, R. H.: The scaling of flow in vegetative structures. *Bound. Layer Meteorol.*, **27**, 171-184, 1983.
41. Lee, X., Shaw, R. H. and Black, T. A.: Modelling the effect of mean pressure gradient on the mean flow within forests. *Agric. For. Meteorol.*, **68**, 201-212, 1994.
42. Moritani, M., Sakamoto, H., Kiya, M. and Arie, M.: Fluctuating drag and lift in two circular cylinders. *Trans. J. Soc. Mech. Eng. B.*, **49**, 1364-1372, 1983.
43. Mayers, T. P. and Paw U, K. T.: Modelling the plant canopy micrometeorology with high-order closure principles. *Agric. For. Meteorol.*, **41**, 143-163, 1987.
44. Thom, A. S.: Momentum absorption by vegetation. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **97**, 414-428, 1971.
45. 真木太一・川島茂人：防風網に関する研究(7) 草地における防風網の昇温・減風効果および風の微細構造の空気力学的変質。農業気象, **39**, 79-89, 1983.
46. Halldin, S.: Leaf and bark area distribution in a pine forest. In *The Forest-Atmosphere Interaction* (eds. by Hutchison, B. A. and Hicks, B. B.), D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, pp.39-58, 1985.
47. Rauner, J. L.: Deciduous forests. In *Vegetation and Atmosphere, Volume 2, Case Study*. (ed. by Monteith, J. L.), Academic Press, London, pp.241-264, 1977.
48. Schwartz, R. C., Fryrear, D. W., Harris, B. L., Bilbro, J. D. and Juo, A. S. R.: Mean flow and shear stress distributions as influenced by vegetative windbreak structure. *Agric. For. Meteorol.*, **75**, 1-22, 1995.
49. Seginer, I.: Atmospheric-stability effect on windbreak shelter and drag. *Bound. Layer Meteorol.*, **8**, 383-400, 1975.
50. 檜山徳治：内陸防風林。林業技術, **309**, 23-26, 1967.
51. 渡辺力：植物と大気。水環境の気象学（編集近藤純正），朝倉書店，東京，348 pp, 1994.
52. Ross, J.: Radiative transfer in plant communities. In *Vegetation and Atmosphere, Volume 1*. (ed. by Monteith, J. L.), Academic Press, London, pp.13-55, 1977.
53. 庄司正弘：伝熱工学。東京大学出版会，東京，261 pp, 1995.
54. Jones, H. G.: *Plants and microclimate*. Cambridge university press, Cambridge,

pp.393, 1983.

55. 近藤純正：日射と大気放射. 水環境の気象学
(編集近藤純正), 朝倉書店, 東京, 348 pp,
1994.
56. 三原義秋・鶴田孝一・根本修：防風施設によっ
て助長された霜害. 農業気象, **33**, 67-74, 1977.
(受付：2001.7.13 受理：2001.8.27)

Summary

Shelterbelts have various effects, including a wind reduction effect, temperature improvement effect and soil conservation effect, and play important roles in cultivation of crops in regions with strong wind and in maintenance of cultivated fields. However, since there are no quantitative guidelines for the planning and design of shelterbelts, we have simply planned and designed structural factors of shelterbelts, such as width and planting density, on the basis of empirical data. The relationships between shelterbelt structure and effects on climatic improvements have not been elucidated because of the difficulty in determining such relationships from field observations. A numerical model and numerical experiments are often used when it is difficult to understand a phenomenon by field observations. The relationship between wind reduction effect and porosity of fences has been clarified by numerical experiments. However, an accurate numerical model for a shelterbelt has not been developed because it is difficult to determine the parameter of porosity and because wind flow inside a shelterbelt is complex. The aims of this study were therefore to develop an accurate numerical model of wind flow and thermal phenomena around a shelterbelt and to determine the quantitative relationships of shelterbelt structure with wind reduction effect and warming effect by numerical experiments. The optimum shelterbelt structure for maximum effect on climatic improvements is discussed in this paper on the basis of the results of the numerical experiments.

The results obtained in this study are summarized as follows.

1. Field observations of the effects of various structures of shelterbelts on wind speed and temperature distribution

Field observations of wind speed and temperature distribution were carried out around shelterbelts of different structures in 6 sites to obtain basic data for the development of a numerical model of the effect of a shelterbelt on climate and to examine the correlation of a new structural factor with climatic improvement. It was found that width and plant area density of a shelterbelt are structural factors that have the greatest wind-reducing and warming effects. It was also found that the degree of warming effect is also greatly affected by the climatic environment, particularly the radiation environment. There were no obvious relationships between minimum wind speed and width of the shelterbelt or between minimum wind speed and plant area density of shelterbelt. However, a strong correlation was found between minimum wind speed and horizontal plant area index (HPAI), determined as the total surface area of plants (one side only) within a horizontal cylinder of unit cross-section. Consequently, HPAI is a valid factor with which to evaluate the effects of shelterbelt structure on wind speed.

2. A numerical experiment on the effects of shelterbelt structures on wind reduction

A numerical model for calculating the wind flow around a shelterbelt was developed to clarify the relationship between shelterbelt structure and wind reduction effect by a numerical experiment. This model is two-dimensional and consists of a continuity equation, Reynolds equation, and a $k-\varepsilon$ turbulence

model under the condition of neutral stratification. A model of change in a turbulent eddy inside the shelterbelt was used for the first time in this study. The calculated flow patterns and wind speeds for two or more shelterbelts agreed with the observed data, indicating that this model has a high level of accuracy.

Using this model, a numerical experiment on change in wind flow around a shelterbelt was carried out to determine the effects of various widths, plant area densities and heights of trunk space layer of the shelterbelt. It was found that as the plant area density increased, minimum wind speed decreased and protected distance (distance of 80% or less in relative wind speed leeward of the shelterbelt) increased when width of the shelterbelt was kept constant. Moreover, when the plant area density was kept constant, minimum wind speed continuously decreased and protected distance increased and then leveled off as the width increased. When there was a trunk space layer in the lower part of the shelterbelt, minimum wind speed increased and protected distance increased because the wind blew through the trunk space layer.

Based on the abovementioned results, the relationships of HPAI with minimum wind speed and protected distance as indices of wind reduction effect were examined. As HPAI increased, minimum wind speed decreased rapidly and then leveled off when HPAI increased beyond 20 when there was no trunk space layer. On the other hand, protected distance showed an initial rapid increase as HPAI increased and then showed a very slight decrease when HPAI exceeded 15. Moreover, minimum wind speed around a shelterbelt with a trunk space layer was higher than that around a shelterbelt without a trunk space layer when HPAI was kept constant. Thus, it was clarified that the optimum structure of a shelterbelt for wind reduc-

tion was one with an HPAI value of 15~20 and with no trunk space layer.

3. A numerical experiment on the effects of shelterbelt structures on warming

A numerical model for calculating the air temperature distribution around a shelterbelt was developed to clarify the relationship between shelterbelt structure and warming effect by a numerical experiment. This model is two-dimensional and consists of equations such as an advection-diffusion equation and heat balance equations at the ground surface and at the plant surface. The present study was the first study to use a model that includes the process by which air temperature distribution is formed around a shelterbelt. The calculated air temperature distribution for two shelterbelts agreed with the observed data, indicating that this model was sufficiently accurate to be used.

Using this model, a numerical experiment on air temperature distribution around a shelterbelt was carried out to determine the effects of various widths, plant area densities and heights of trunk space layer of a shelterbelt. When the width of shelterbelt was kept constant, it was found that maximum rise in air temperature and warming distance (area leeward of shelterbelt in which the air temperature increased by at least 0.2°C) initially increased and then leveled off as plant area density increased. When the plant area density was kept constant, maximum rise in air temperature and warming distance initially increased and then decreased slightly as width increased. The relationship between wind reduction effect and warming effect was investigated. Strong correlations were found between minimum wind speed and maximum rise of air temperature and between protected distance and warming distance.

Based on the abovementioned results, the

relationships of HPAI with maximum rise in air temperature and warming distance as indices of warming effect were examined. Strong correlations were found between HPAI and maximum rise in air temperature and between HPAI and warming distance. When HPAI was kept constant, maximum rise in air temperature and warming distance around a narrow shelterbelt (width of less than $2H$, where H the height of the shelterbelt) were larger than those around a wide shelterbelt ($5H \sim 10H$). In the case of a narrow shelterbelt with no trunk space layer, maximum rise in air temperature initially increased rapidly as HPAI increased, peaked at HPAI of $15 \sim 20$, and then leveled off, while warming distance also initially increased rapidly as HPAI increased, peaked at HPAI of $15 \sim 20$, and the decreased slightly. Moreover, maximum rise

in air temperature around a shelterbelt without a trunk space layer was higher than that around a shelterbelt with a trunk space layer when HPAI was kept constant. Thus, it was clarified that the optimum structure of a shelterbelt for warming is a narrow one (less than $2H$) with an HPAI value of $15 \sim 20$ and no trunk space layer.

HPAI has been proposed as a new structural factor of a shelterbelt in this paper. Quantitative relationships between shelterbelt structure and wind reduction effect and between shelterbelt structure and warming effect were determined by numerical experiments using a new numerical model developed in this study. In addition, the optimum structures of a shelterbelt for wind reduction and for warming were described.