



Title	大気の熱的諸現象の模型実験とその農業への応用に関する研究
Author(s)	高橋, 英紀; TAKAHASHI, Hidenori
Citation	北海道大学農学部邦文紀要, 10(2), 147-175
Issue Date	1977-01-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/11889">https://hdl.handle.net/2115/11889</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	10(2)_p147-175.pdf



# 大気の熱的諸現象の模型実験とその農業への 応用に関する研究

高橋 英 紀  
(北大農学部農業工学科)  
(昭和51年4月30日受理)

## Model experiments of thermal phenomena of atmosphere and those applications to agriculture

Hidenori TAKAHASHI  
(Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture,  
Hokkaido University, Sapporo, Japan)  
(Received April 30, 1976)

### 目 次

緒 論 .....	148	の相似性 .....	159
1. 耕地風および熱伝達に関する相似理論 .....	148	h) 密閉度が異なる防風垣風下の 気温分布 .....	161
(1) 耕地風の構造と模型実験における 相似理論 .....	148	(4) 要 約 .....	162
(2) 耕地における熱の輸送と模型実験における 相似理論 .....	149	4. 温室外表面からの顕熱伝達 .....	162
2. 主な実験装置の構造と性能 .....	150	(1) 温室の熱収支 .....	162
(1) 多段式熱線風速計 .....	150	(2) 実験方法 .....	163
(2) 実験用風洞 .....	152	(3) 実験結果と解析 .....	164
3. 防風垣風下の気温分布 .....	153	a) 野外実験と風洞実験の比較 .....	164
(1) 防風垣の防風効果と保温効果 .....	153	b) 風向変動の影響 .....	166
(2) 実験方法 .....	155	c) 地表面粗度長 $Z_0$ の影響 .....	166
(3) 実験結果と解析 .....	156	d) 風の乱れの強さの影響 .....	167
a) 野外実験場と風洞内の地表面粗度長 .....	156	(4) 要 約 .....	167
b) 防風垣風下の風速垂直分布に及ぼす 風速の影響 .....	156	5. 温室外表面からの顕熱伝達に及ぼす 防風垣の効果 .....	168
c) 防風垣風下の風速垂直分布に及ぼす 気層の安定度の影響 .....	156	(1) 温室の防風 .....	168
d) 防風垣風下の風速分布の相似性 .....	157	(2) 実験方法 .....	168
e) 防風垣風下の気温の垂直分布に及ぼす 気層の安定度の影響 .....	158	(3) 実験結果と解析 .....	169
f) 防風垣風下の気温の垂直分布に及ぼす 風速の影響 .....	158	a) 野外実験と風洞実験の比較 .....	169
g) 大きさが異なる防風垣風下の気温分布		b) 風速と防風施設の保温効果 .....	169
		c) 防風垣の高さと保温効果 .....	170
		d) 防風垣の密閉度と保温効果 .....	170
		e) 防風垣と温室の間の距離 .....	170
		(4) 要 約 .....	171
		おわりに .....	171

## 緒 論

農地の環境条件を人為的に改良しようとする試みは、人間が漁猟や放牧の生活から農耕を中心とする定住の生活に入った時期より始まったと言えよう。以来、約1万年以上もの間、栽培技術の改良や品種の改良を重ねることにより栽培地を、より気象条件の厳しい地方へと拡大してきた。しかし農業における技術改革の歩みは他の産業に比べて速かったとは言いがたい。その主な要因としてはやはり農業が気象条件や土地条件に左右されるところが多く、それらの影響を克服し得なかったためと言える。しかし近年、特にここ20～30年の間の農業技術の進歩はめざましく、プラスチックフィルムなどの使用により農地の気象条件を大幅にコントロールできるようになって、今まで不可能と思われていた地方でも作物の終年栽培が可能となってきた。しかし北海道のように寒冷な地方では温度管理のための費用がかさみ、気候の温暖な本州地方には価格的に太刀打できない場合が多いのが現状である。

したがって気候が冷涼な地方では農地の温度条件の改善が最も重要な課題であり、施設園芸におけるプラスチックフィルムの利用だけではなく、防風林、防風垣による気温の上昇、温水池、温水路などによるかんがい水温の上昇など種々の工夫がなされてきた。しかし農地における気温、地温などの温度現象は放射、風、蒸発散、土壌水分、土壌の種類と構造、植生の状態など数多くの要素に影響され、一つの現象、例えば風速と耕地上の気温分布の関係を把握すると言ふような簡単な解析でさえ、実際の耕地で行なうのは容易なことではない。しかし野外での現象を人為的に実験室内で再現し、これを自由に制御し、解析を加えて、結果を再び野外での現象に適用できれば、農業における環境条件改善のテンポは急速に早まるものと考えられる。他の産業で例をあげるならば現在、建築学方面で問題となっている高層ビル周辺における突風現象の問題は、風洞による模型実験の結果が、実物を使つての実験が困難な場合に大きな成果をあげている。

農業においてもこの様な試みはなかった故ではなく、かつて盛んに行なわれた防風林、防風垣の効果に関する風洞内模型実験は、耕地の風害対策に計り知れない貢献をしている。しかし、その後の農業気象学の分野では、野外における気象的諸現象を実験室内で再現しようとする研究はほとんどなされてはいない。ここ4～5年来、大型電子計算機を使つて、温室内の気温や日射の分布状

態などをシミュレートする試みがなされつつあるが、そのために必要な基礎データは現在のところ十分に整っているとは言いがたい。この基礎データは主に野外における実測によって得られることが多いが、野外においては先に述べたごとく、数多くの要因が相互に影響し合い、かつ不規則に変動しているため、1つの現象だけを単純化して把握することは難かしく、このことが基礎データ不足の一因となっている。

著者は昭和42年ごろから農地における熱的な現象、例えば防風垣前後の気温の分布、温室内外の熱伝達などの現象を風洞を用いて、実験室内で再現することを試み報告してきた。この論文はそれらの成果をとりまとめたものであり、現在盛んに行なわれつつある電子計算による農地環境のシミュレーションと野外での実際の現象との間の空白を埋める一助となるものと確信する。

本論文を草するに当たり、学部学生時代から今日に至るまで、ともすれば実験室内に閉じこもりがちな著者にフィールドでの実験の重要性を説き、常に視野を広げるように心がけて下さった恩師、北海道大学名誉教授、農学博士、横田廉一先生の心温まる御指導、御鞭撻に対し、深甚なる感謝の意を捧げるとともに、理学的知識の乏しい著者に理学的な考え方、知識を日常の研究生活を通じて御教授賜り、さらに本論文の作成に際しては貴重な御注告、御指導をいただいた同学部教授、農学博士、堂腰純先生、および御多忙にもかかわらず、本論文の御校閲、御指導の労を賜った同学部教授、農学博士、片岡隆四先生に心から御礼申し上げる。

なおまた、本研究を進めるに当って、終始御協力と御激励を賜った先輩の同学部助教授、農学博士、堀口郁夫先生ならびに本論文にも関係の深い諸研究を卒業論文のテーマとして選び、数多くの貴重な資料を残して行ってくれた同学部農業物理学講座出身の卒業生各位に対しても深く感謝の意を表する次第である。

## 1. 耕地風および熱伝達に関する相似理論

### (1) 耕地風の構造と模型実験における相似理論

気層が熱的に中立で浮力の影響を考慮に入れる必要がない場合、耕地風の垂直分布は次の対数式で示される。ここで  $U_z$  は高さ  $Z$  での風速、 $V_*$  は摩擦速度、 $k$  はカ

$$U_z = \frac{V_*}{k} \ln \frac{Z-d}{Z_0} \quad (1-1)$$

ルマン定数、 $Z_0$  は地表面粗度長、 $d$  は地表面修正量である。

気層に温度勾配があり浮力の影響を考慮に入れなければ

ばならない場合は次の式で示される。ここで  $L_s$  は気層の安定度を示す量で長さの次元を持ち、オブコフの長さ

$$U_z = \frac{V_*}{k} \left( \ln \frac{Z-d}{Z_0} + \alpha \frac{Z}{L_s} \right) \quad (1-2)$$

$$L_s = - \frac{V_*^3}{k \frac{g}{T} \cdot C_p \cdot \rho} \quad (1-3)$$

と呼ばれている。 $g$  は重力の加速度、 $T$  は気温、 $C_p$  は空気の定圧比熱、 $\rho$  は空気の密度、 $Q$  は熱フラックスである。気層の安定度を示す量としては、この他にリチャードソン数があり次式で示される。

$$Ri = \frac{\frac{g}{\theta} \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} + \Gamma \right)}{\left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \cong \frac{\frac{g}{\theta} \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)}{\left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad (1-4)$$

ここで  $\Gamma$  は気温の断熱減率である。オブコフの長さ  $L$  は式中に気層の熱フラックスを入れており、簡単には値を求めることはできない。一方リチャードソン数  $Ri$  の方は比較的測定が容易であることから、この論文では、気層の安定度を主にリチャードソン数を用いて表わした。

自然風を対象として風洞内模型実験を行なう時に考慮しなければならないことは、(1) コリオリの力、(2) 空気の圧縮性、(3) 重力の影響、(4) 気圧の高度変化、(5) 空気の粘性、(6) 気層の熱的安定性、(7) 乱れの強さ、(8) 乱れの構造など数多くの要素がある。しかし、一般に農耕地に現れる現象を取扱う場合には垂直高度はせいぜい 50 m、風速も最大 50 m/sec 程度であるのが大部分であり、したがって (1)~(5) の影響はきわめて小さく、無視してもかなわない。また、気層が熱的に中立で、浮力の影響を考慮に入れなくてもよい場合には (6) の条件は除かれて、(7)、(8) の 2 条件が相似条件となる。

この (7)、(8) の 2 条件を満たすため井上 (1952)、根本 (1961) によって次式が導かれた。

$$Z_{0M}/Z_{0N} = L_M/L_N \quad (1-5)$$

$$U_M/U_N = (L_M/L_N)^{\frac{1}{3}} \quad (1-6)$$

ただし、添字  $M$  および  $N$  は、それぞれ模型実験での現象と野外での実物大の現象を示し、 $Z_0$  は地表面粗度長、 $U$  は代表的風速、 $L$  は代表的長さを示す。根本 (1961) は上記、(1-5)、(1-6) 式が成り立てば、平均風速の分布の一致、乱れの構造の近似的相似が得られることを実験的にも明らかにしている。

気層に温度勾配があり、浮力の影響を考慮に入れなければならないときについては、根本 (1962) は次式を導いている。

$$U_M/U_N = (L_M/L_N)^{\frac{1}{3}} \quad (1-7)$$

つまり、気層の安定度が中立で、浮力の影響を考慮に入れる必要がなければ、風速の縮率は模型の縮率の 1/3 乗、気層が安定または不安定で浮力の影響を考えなければならないときは 1/2 乗と、それぞれ矛盾した条件が必要となる。しかし、気層の安定度の影響が小さければ、無視することも可能であろう。

## (2) 耕地上における熱の輸送と模型実験における相似理論

耕地上における風の運動量の拡散と熱の拡散は、ほぼ同一のメカニズムで行なわれているが、気層の安定度により、両者の拡散係数は差を生じてくる。CHARNOK (1967) は運動の拡散係数 ( $K_m$ ) と熱の拡散係数 ( $K_H$ ) の比  $K_m/K_H$  は気層の安定度により 1.0~3.5 まで変化すると報告している。ただし、極端な安定または不安定状態でなければ  $K_m/K_H$  は 1.0 に近い値をとる。

気層の安定度が中立状態に近く、 $K_m/K_H \cong 1.0$  のときは、耕地上における熱輸送量は次式で求められる。

$$Q_H = \frac{-k^2 \cdot \rho \cdot C_p (\theta_2 - \theta_1) (u_2 - u_1)}{\left( \ln \frac{Z_2 - d}{Z_1 - d} \right)^2} \quad (1-8)$$

ここで  $Q_H$  は熱フラックス、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  は高さ  $Z_1$ 、 $Z_2$  での気温、 $\rho$  は空気の密度である。

(1-8) 式は風洞内にもそのまま適用でき、一例として風洞内の水平平板上における顕熱の伝達について検討してみる。

平板の先端から距離  $x$  の位置での境界層の厚さ  $\delta$  は、次式で求められる。

$$\delta = 0.366 x \left( \frac{\nu}{U_x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

ここで  $\nu$  は空気の動粘性係数、 $U$  は境界層外の風速である。平板などでは地表面修正量  $d=0$  と考えてよいから平板の先端からの距離  $x$  の位置における代表的な高さとして境界層の厚さと地表面粗度長  $Z_0$  をとり、それぞれの高さにおける気温を  $\theta_\delta$ 、 $\theta_{Z_0}$  とすると、距離  $x$  の位置での顕熱伝達量  $Q_H$  は次式で示される。

$$Q_H = \frac{-C_p \cdot \rho (\theta_\delta - \theta_{Z_0}) k V_*}{\ln(\delta/Z_0)} \quad (1-10)$$

一方、熱伝達係数が  $h'_x$  であるときの顕熱伝達量は

$$Q_H = h'_x (\theta_\delta - \theta_{Z_0}) \quad (1-11)$$

で示されるから、(1-10) 式と (1-11) 式から

$$h'_x = \frac{-C_p \cdot \rho k V_*}{\ln \frac{\delta}{Z_0}} \quad (1-12)$$

または

$$h'_x = \frac{-C_p \cdot \rho k^2 U_a}{\left(\ln \frac{\delta}{Z_0}\right)^2} \quad (1-13)$$

となる。

以上は気象学的な立場から、風洞内での顕熱の伝達について検討を行なった結果であるが、水平平板上の顕熱伝達については伝熱工学の立場からも古くから研究されており、前端からの距離  $x$  の位置での顕熱伝達係数  $h_x$  は、境界層内が乱流であるとの条件の下で次式で表わされる。

$$h_x = 0.029 \frac{\lambda}{x} \left(\frac{U_x}{\nu}\right)^{\frac{4}{5}} \cdot \left(\frac{\nu}{\kappa}\right)^{\frac{1}{5}} \quad (1-14)$$

ここで、 $\lambda$  は空気熱伝導率、 $\kappa$  は静止空気熱拡散係数である。

この (1-14) 式と先の (1-13) 式とを比較してみると、両者の理論的結びつけは不可能であることがわかる。(1-13) 式では平板表面の粗度長  $Z_0$  を考慮に入れ、空気熱伝導率  $\lambda$ 、拡散係数  $\kappa$ 、動粘性係数  $\nu$  を無視しているのに対し、(1-14) 式では  $\lambda$ 、 $\kappa$ 、 $\nu$  を考慮しているが、平板の表面の状態を示す粗度長  $Z_0$  が含まれていない。しかし、数値的には同じ値を示すはずであるから、気温  $20^\circ\text{C}$  の条件下で、平板から  $100\text{ cm}$  の位置での顕熱伝達係数を求め比較した (図 1-1)。ただし、 $h'_x$  の計算では、 $Z_0 = 0.1, 0.01, 0.001\text{ cm}$  の3段階とした。その結果、 $h'_x$

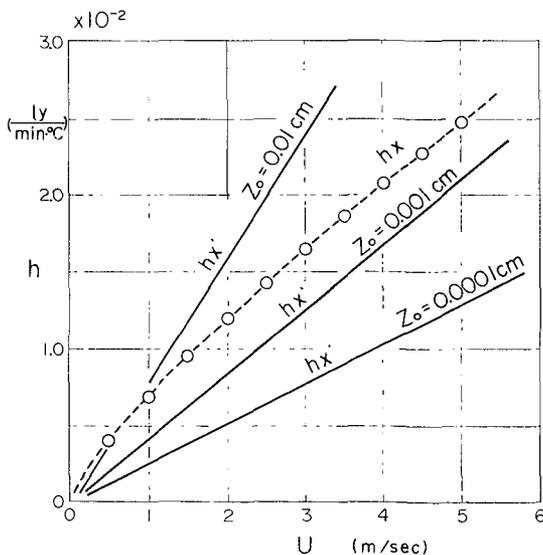


図 1-1 風速  $U$  と  $h_x, h'_x$  の関係

では風速の増大にともない、ほぼ直線的に値が増加している。一方、 $h_x$  では上に凸の曲線で、風速が大となるにしたがい勾配がやや緩くなっている。

また、実験式 (1-14) は  $Z_0 = 0.002 \sim 0.005$  程度の粗さの平板上で行なわれた実験の結果であることが推測された。

以上のように、大気中における熱の移動現象を風洞内で再現するための相似理論は、気象学的立場からの理論をそのまま風洞風に適用した場合と、従来、伝熱工学において得られていた実験式を用いた場合とでは若干の差異が認められ、これが水平平板というきわめて単純な形のものを対象にした場合に生じていることから、さらに複雑な模型の場合には、厳密な理論的裏付けを期待することは困難である。したがって本論文ではある程度の理論的裏付けを行ないながらも、最終的には、模型実験の結果を野外での実測結果と対比させ、実験により相似性の検討を行なった。

## 2. 主な実験装置の構造と性能

### (1) 多段式熱線風速計

風洞内で用いる風速計は、測定部が小さなものであることが第1の条件で、その他、目的により、応答速度が速いこと、自記記録が可能であること、多数の個所で同時測定ができること、などが条件となる。

本論文で使用した風速計は上記の諸条件をある程度満すように、熱式の風速計とし、多段式の熱線風速計を作製した。

熱線には直径  $0.03\text{ mm}$  の白金線を用い、この白金線の

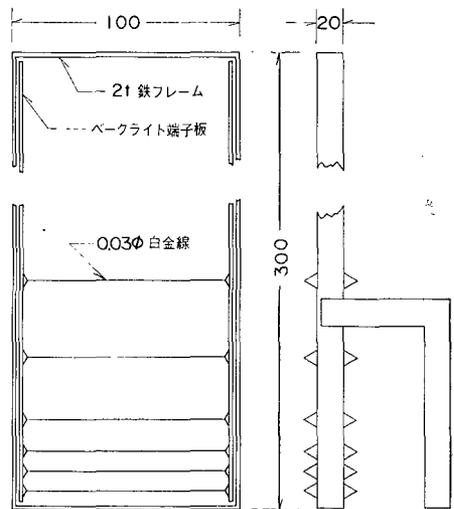


図 2-1 A 型熱線風速計の構造 (単位 mm)

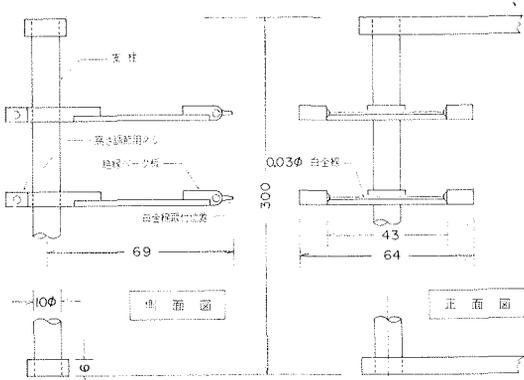


図 2-2 B 型熱線風速計の構造 (単位 mm)

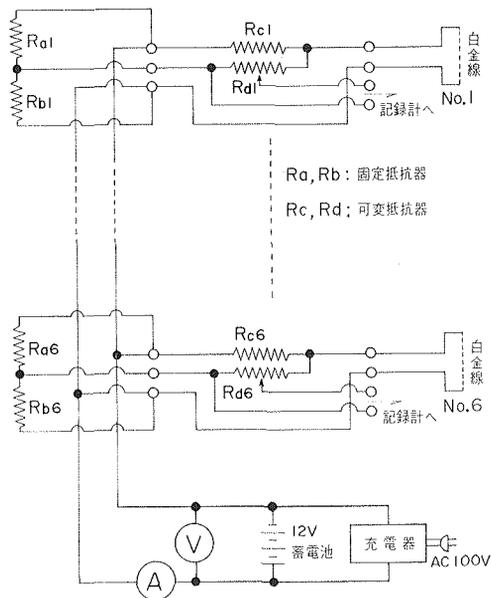


図 2-3 B 型熱線風速計の回路

抵抗変化を電圧変化に変えて記録計へ接続する回路としては、定電圧方式のブリッジ回路を用いた。なお、当初製作した熱線風速計は、エレメントの高さを調節できない方式のものであったが(以下 A 型風速計と呼ぶ、図 2-1)、エレメント数は 15 個と多いうえに、それぞれのエレメントについて実験の度ごとに検定を行なわなければならない、実験の進行上に支障をきたしたので、次にエレメント部を 6 個とし、それぞれを任意の位置に移動できる型のものを製作した(以下、B 型風速計と呼ぶ)。B 型風速計の構造とブリッジ回路を図 2-2、図 2-3、写真 2-1、写真 2-2 に示す。

熱線風速計の時定数は一般に次式で与えられる。

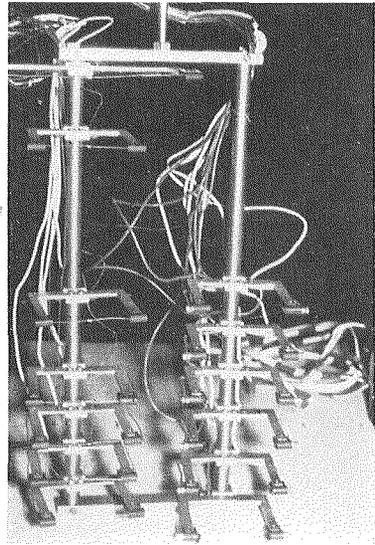


写真 2-1 B 型熱線風速計感部

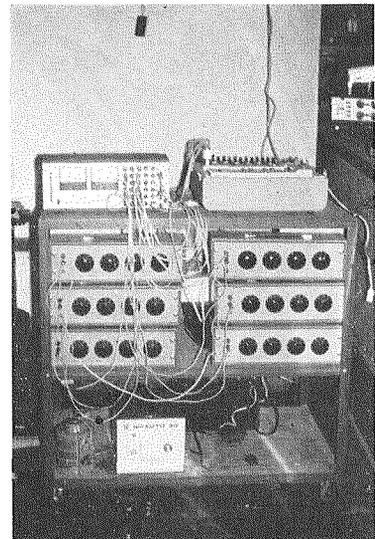


写真 2-2 B 型熱線風速計のブリッジ回路部と記録計

$$\tau = \frac{4.2 \rho \delta l s (t - t_0)}{i^2 R_0} \quad (2-1)$$

ここで、 $\rho$ : 熱線の密度 [g/cm<sup>3</sup>]、 $\delta$ : 熱線の断面積 [cm<sup>2</sup>]、 $l$ : 熱線の長さ [cm]、 $s$ : 熱線の比熱 [cal/g°C]、 $t_0, t$ : 熱線温度の平均値と瞬間値 [°C]、 $i$ : 熱線を通る電流、 $R_0$ : 熱線の平均的な抵抗値 [Ω]。熱線の時定数を求めることは難しく、正確を期し難いが、実験中の白金線の発色の程度から見て、風速 3 m/sec で白金線の温度は 600°C、1 m/sec で 1000°C として B 型風速計の場

合の時定数  $\tau$  の計算を行なった。B型風速計では、白金線の直径は  $d=0.003\text{ cm}$ 、長さは  $l=4.3\text{ cm}$  であるから、風速  $3\text{ m/sec}$  の時を平均的な状態として  $R_0$  を計算すると  $R_0=19.29\ \Omega$  となる。この時の電流は実測によると  $i=0.5\text{ A}$  であり、 $\rho=21.4\text{ g/cm}^3$ 、 $s=0.032\text{ cal/g}^\circ\text{C}$ 、 $t_0=600^\circ\text{C}$ 、 $t=1000^\circ\text{C}$  として計算すると  $\tau=0.0073\text{ sec}$  となる。

変動している現象を測定する場合、測定器の応答速度が遅ければ得られた出力は実際の現象より振幅は小さくなり位相は遅れる。今、入力信号を  $x$ 、出力信号を  $y$  とすると

$$\tau \frac{dy}{dx} + y = x \tag{2-2}$$

$$y = x(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \tag{2-3}$$

なる関係があり、入力信号が (2-4) 式で表わされるような周期変動である場合には、出力信号を (2-5) 式で表わして、両者の振幅比  $y_0/x_0$ 、位相差  $\varphi$  を求めると、それぞれ (2-6) 式、(2-7) 式のごとくとなる。

$$x(t) = x_0 \cos \omega t \tag{2-4}$$

$$y(t) = y_0 \cos(\omega t + \varphi) \tag{2-5}$$

$$\frac{y_0}{x_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \tag{2-6}$$

$$\varphi = -\tan^{-1}(\omega\tau) \tag{2-7}$$

これから明らかなように、入力の周波数  $\omega$  が大きくなると出力の振幅は小さくなり、位相の遅れも大となる。B型風速計の  $\tau=0.0073\text{ sec}$  を例にとって周波数の変化と振幅の減少度合、および位相の遅れを求めてみると図2-4のごとくとなり、40 Hz以上の周波数変動では出力振幅は入力振幅の50%以下となり、80%以上とす

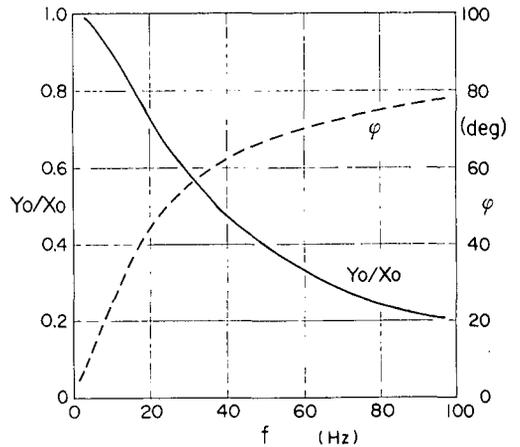


図2-4 風速の乱れの周波数と熱線風速計の振幅の減少および位相の遅れ

るためには15 Hz以下の周波数でなければならないことが明らかとなった。

(2) 実験用風洞

今回の実験ではあまり強い風を必要としないため、構造的にはやや弱いのが、3 cm×3 cmのL型アングル、0.6 cm厚ベニヤ板、0.4 mm厚の亚克力樹脂板を主体として図2-5のごときエッフェル型の風洞を製作した。通風部の1ユニットの長さは180 cm、高さ90 cm、幅80 cmであり、設置場所の広さに応じて多数連結できるようにした。送風機はプロペラ直径50 cm、消費電力74 Wの換気扇2台を並列にならべ、また、プロペラの回転による乱れの影響をさけるため、吸入方式とした。吸入口には格子間隔2 cm×2 cm、長さ10 cmの整流格子を設けた。風洞気流に温度成層を与えるための発熱冷却板は

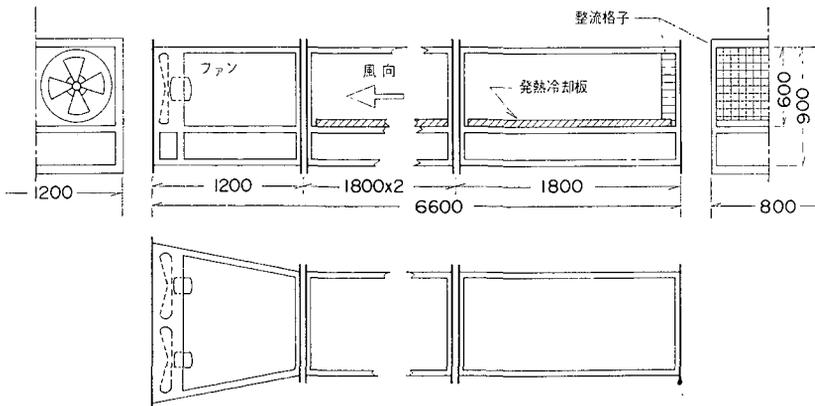


図2-5 実験風洞 (単位 mm)

24番の亜鉛引鉄板に10mmφの銅管を溶接し、通水によって鉄板表面を冷却させ、発熱の場合は電熱温床線を張って熱源とした。

風洞底板に人工的に粗面を作る方法としては、砂を底板に吹きつけて固定させたり、模型林を多数並べるなどの工夫がなされてきた。しかし著者は最も簡単で、かつ $Z_0$ の値を色々変えうるように図2-6に示したL型の粗度板を多数、風洞底板上に並べる方法を用いた。人工粗

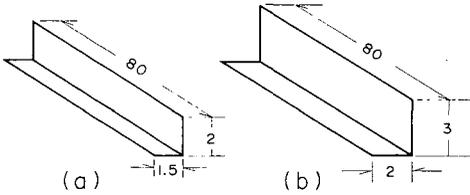


図2-6 L型粗度板 (単位 cm)

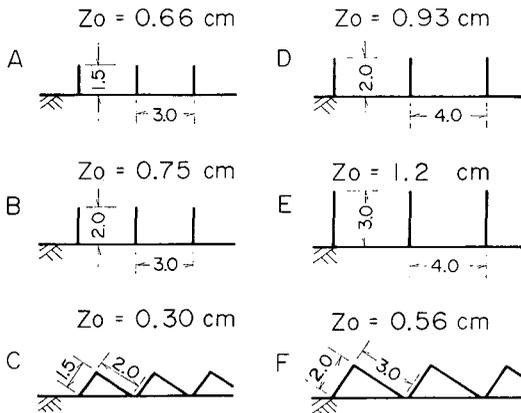


図2-7 各種人工粗面と $Z_0$ 値 (単位 cm)

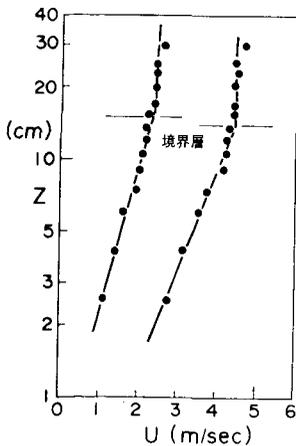


図2-8 風洞内風速垂直分布と境界層の厚さ

面の並べ方と $Z_0$ 値は図2-7に示す通りである。

この風洞内の観測部(風洞先端から4.5mの位置)における風洞風の境界層は、高さ約15cmであった(図2-8)。したがって、高さ15cm以下での現象が、模型実験の結果として利用しうることが明らかとなった。

風洞底面の影響を受けた乱流境界層の内部において、上方または下方から熱が与えられると、風速における運動量の拡散と同様に、熱の乱流拡散により次式で示されるような気温分布が形成される。

$$\theta - \theta_0 = \frac{\theta_*}{k} \left( \ln \frac{Z}{Z_0} + \alpha \frac{Z}{L_s} \right) \quad (2-8)$$

ここで、 $\theta$ : 高さ $Z$ での気温、 $\theta_0$ : 高さ $Z_0$ での気温、 $\theta_*$ : 摩擦温度。この風洞においても底板内部に張った電熱線により加熱すると図2-9に示すとき気温分布が得られた。(2-8)式によれば気層の安定度 $L_s$ により気温の垂直分布は対数法則から若干のずれを生じるはずであるが、今回の実験程度の安定度では影響は認められない。温度分布の場合も、高さ15cmの位置を境にして気温分布の勾配が異なっている。このことは風洞底面による乱流境界層がこの位置までであることを意味し、風速分布の境界層の高さと一致している。

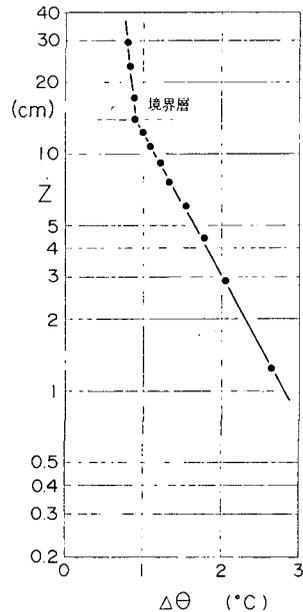


図2-9 風洞内における気温の垂直分布

### 3. 防風垣風下の気温分布

#### (1) 防風垣の防風効果と保温効果

防風林、防風垣の防風効果を表現するには防風の目的

とすることで方法が異なる。例えば風食防止が目的の場合には、地表面近くでの風速が土砂移動の臨界風速以下となる範囲を示さなければならないであろうし強風による作物の倒伏を防止する目的であれば風速だけではなく、風の乱れも考慮しなければならない。この様に防風垣の防風効果の表現には様々な方法があるが、最も一般的な方法は、防風垣を設けた場合の風速を垣がない時の風速との比で表現する方法であり、この方法によ

れば、比較的簡単に防風林、防風垣の防風効果の概略を知ることができる。図3-1は高さ1mの寒冷紗（密閉度50%、60%、70%の3種）防風垣前後の風速水平分布を示したもので、風速の測定高さは50mで垣高の1/2、基準風速としては垣の風上10mでの風速をとり、風速比率で効果を表現している。

防風垣の保温効果は風速の減少にともない顕熱の拡散係数が減少することによって生じる。したがって昼間は日射によって地表面が高温となって、それにともない接地気層も高温となるが、防風垣を設けると下層の熱は上方に拡散されず、気温は上昇する。しかし夜間には放射冷却により逆に地表面の方が低温となって、いわゆる安定な状態となり、このような時に防風垣があると、上方からの暖気が乱流拡散により下方へ供給されることが少なくなり、地表付近の気温は防風垣を設けない場合よりも低くなる。図3-2は密閉度約60%の寒冷紗を用いて水田の周囲（18m×24m）を囲い、その防風圏の内外の気温差を測定した結果であり、最高気温は防風区の方が高く、最低気温は逆に防風区の方が低くなっている。

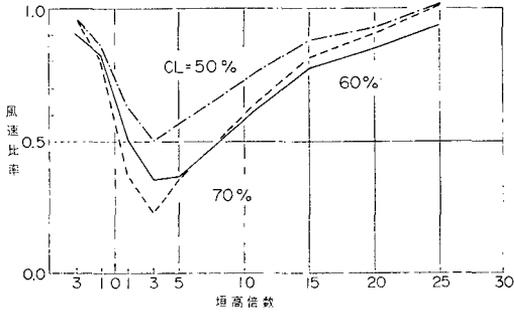


図3-1 防風垣前後の風速水平分布

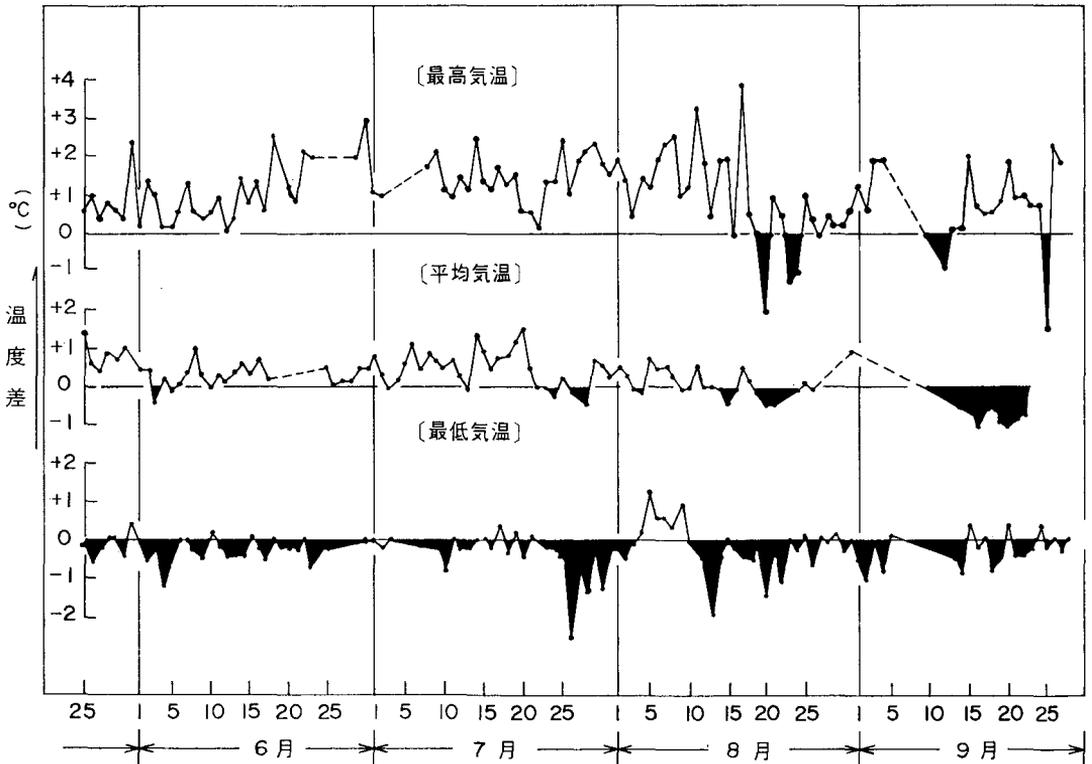


図3-2 防風圏内外の気温の差 (昭和42年, 北大農場内水田)

(2) 実験方法

野外実験

防風垣後方の気温分布という基礎的なデータを得るため、防風効果等については考えず、防風垣の基本的な型である密閉度100%の垣を対象に一連の実験を行なった。

防風垣は高さ0.9 m、長さ5.4 mのもので、密閉度を100%とするためベニヤ板を用い、北大農学部付属農場内に設置した。防風垣の風上は300 m~400 mほど平坦な牧草地が続いており、耕地風の実験には最適であった。

風速および気温の垂直分布の測定は防風区としては防風垣の後方0.9 m (垣高1倍)の地点、対照区としては防風垣から横方向に約5 m離れた地点を選んだ。

風速の測定には小型ロビンソン風速計を用い、防風区では0.3, 0.5, 1.0, 1.5 mの高さで、対照区では0.3, 0.5,

1.0, 3.0 mの高さで測定した。なお、風速の平均化時間は10分間とした。

気温の測定は銅-コンスタンタン熱電対線を用い、零接点として一端を地下1 mに埋め込み、電位差を $\mu V$ メーターで読み取った。気温の測定高度は防風区、対照区とも、0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 mの7点である。防風垣、風速計、温度計の配置を図3-3に示す。

風洞実験

風洞内模型実験では、まず野外実験との相似性を検討する目的で密閉度100%の防風垣について実験を行なった。また、風洞内模型実験どうしの相似性の検討を行うために、大きさの異なる2種類の模型を作成した。垣の高さ6.0 cmの模型 (以下実験Aと呼ぶ) と高さ12.0 cmの模型 (以下実験Bと呼ぶ) の2種類である。密閉度が100%以下で通風性のある防風垣には各種の寒冷紗を用

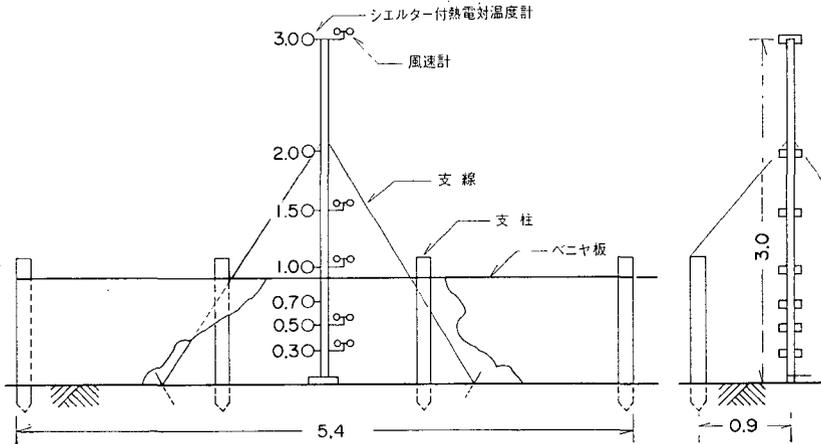


図3-3 野外実験での防風垣、風速計、温度計の配置 (単位 m)

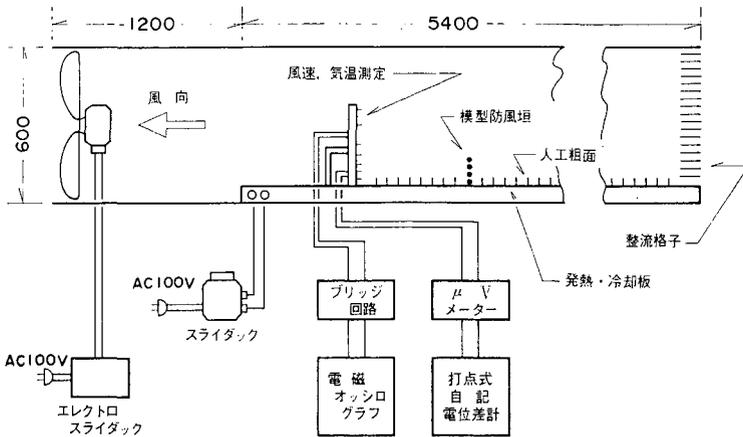


図3-4 風洞実験の概略 (単位 mm)

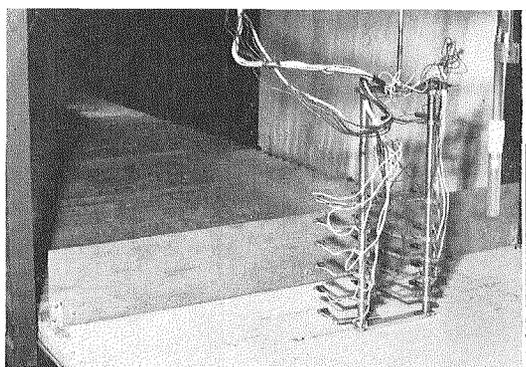


写真3-1 風洞実験(密閉度100%の模型防風垣風下の気温, 風速の測定)

い、実験Bの大きさで種々の実験を行なった。風速の測定は前述の多段式熱線風速計で行ない、気温分布は、多段式熱線風速計とほぼ同じ構造のフレームに白金線の代りに銅-コンスタンタン線をつけて測定した。風洞実験の概略を図3-4、写真3-1に示す。

### (3) 実験結果と解析

先に述べたごとく大気熱的現象を風洞内で取扱った例がほとんど見当たらないため、模型実験を行なうには、あらかじめその相似性を厳密に検討する必要がある。風

速分布に関しては従来行なわれてきている方法により比較的容易に相似な分布を得ることができるが、これに温度成層が加わると、気層の安定度がどの程度、風速分布や気温分布に影響を与えるか不明である。したがって、ここでは野外実験、風洞実験の両方について、防風垣後方の気温分布、風速分布に及ぼす風速の影響、気層の安定度の影響について検討し、その後に風洞内模型実験での相似性を明らかにした。それらの相似条件をもとに、応用実験として、防風垣の保温効果と密閉度の関係について、検討を行なった。

#### a) 野外実験場と風洞内の地表面粗度長

野外実験を行なった圃場は牧草地であったため、観測の時期により地表の植生の状態が異なり、8月の観測時には禾本科の牧草が草丈約50cmで密生していたが、10月の観測では採草後のため草丈は10cm程度であった。そのため、圃場の地表面粗度長も、8月では2~9cmであったのに対し、10月では0.5~0.8cmと小さな値を示した。

一方、風洞実験ではL型の粗度板を並べた人工粗面とした。

なお、野外実験、風洞実験における防風垣の高さと地表面粗度長をまとめると表3-1のごとくなる。

表3-1 野外実験、風洞実験の大きさや地表面粗度長

	防風垣の高さ $H$ (cm)	地表面粗度長 $Z_0$ (cm)	$Z_0/H$	表面の状態
風洞実験 A	6.0	0.30	0.05	人工粗面
風洞実験 B	12.0	0.66	0.055	人工粗面
野外実験	90	8月 2~9	0.02~0.1	禾本科牧草 草丈 50 cm
		10月 0.5~0.8	0.006~0.009	禾本科牧草 草丈 10 cm

#### b) 防風垣風下の風速垂直分布に及ぼす風速の影響

風のような流体の流れの中に平板などの障害物を入れた場合には、後流に渦を生じる。いわゆるカルマン渦とよばれるものであるが、この渦の数や位置は流速に影響される。防風垣の前後の風速分布の型は、風速にはあまり関係ないと言われてきたが、この点を明らかにするため、野外実験の観測データの中から気層の安定度が中立に近く ( $|Ri| < 0.005$ )、風速だけが異なる場合について垣風下での風速分布を比較した(図3-5)。

なお、記号としては、以後、防風垣の高さを  $H$ 、防風垣からの距離を  $x$ (風下方向を正、風上方向を負)、地表面からの高さを  $z$ 、風速を  $U$ 、防風垣の密閉度を  $CL$  とし、それに添字  $A, B, N$  をつけて、それぞれ、風洞実

験 A、風洞実験 B、野外実験での値を示すこととする。

図3-5を見ても明らかのごとく、あまり顕著ではないが、風速分布は風速により変動していることがわかる。図3-6は風洞実験 A での結果であるが、やはり同様な結果が得られている。

#### c) 防風垣風下の風速垂直分布に及ぼす気層の安定度の影響

耕地風の風速垂直分布が気層の安定度により影響されることは先に述べたが、防風垣風下の風速分布への影響も当然考えなければならない。したがって、野外実験の観測データの中から、風速は同じ程度で、気層の安定度が大きく異なる場合について比較した(図3-7)。その結果、風速が等しければ気層の安定度がある程度異なって

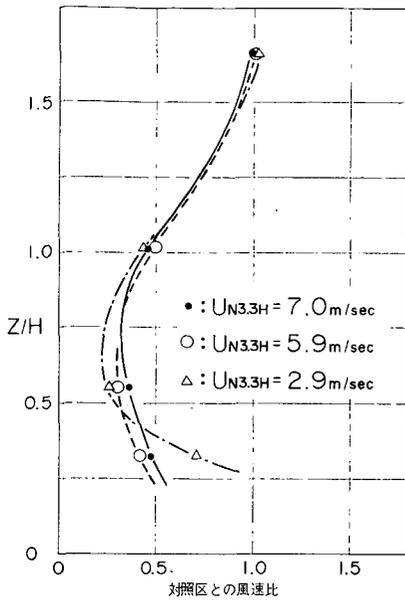


図 3-5 防風垣の減風効果に及ぼす風速の影響 (野外実験)  $x_N=90$  cm,  $H_N=90$  cm,  $CL_N=100\%$

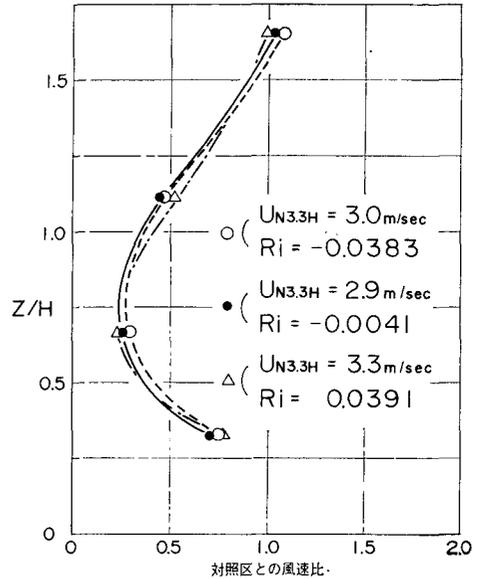


図 3-7 防風垣の減風効果に及ぼす気層の安定度の影響 (野外実験)  $x_N=90$  cm,  $H_N=90$  cm,  $CL_N=100\%$

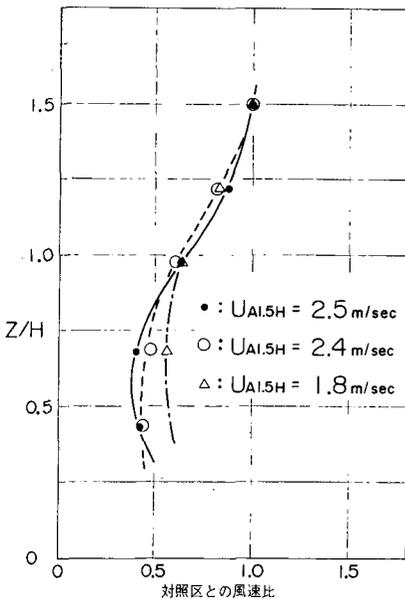


図 3-6 防風垣の減風効果に及ぼす風速の影響 (風洞実験 A)  $x_A=12.0$  cm,  $H_A=6.0$  cm,  $CL_A=100\%$

定な条件下での観測結果は得られていないため十分なこととは言えない。しかしながら、通常耕地上で見られる程度の気層の安定度ならば風速分布への影響は小さいものと考えられる。

なお、風洞実験はこの問題について行っていないがほぼ同様なことが言えるものと推察される。

d) 防風垣風下の風速分布の相似性

先に述べたごとく、根本 (1961) は風洞内において大きさの異なる 2 種類の衝立の風下側の風速分布の測定と江の島上空の風速分布と風洞内模型実験の比較から、先に述べた (1-5) 式, (1-6) 式が成り立てば、風速分布のパターンの相似と乱れの分布の近似的相似が得られることを明らかにしたが、そこで取扱われた現象は、例えば衝立の風下側の風速分布は衝立の高さ以上と言った比較的大きなスケールでの現象を対象としたものであり、この論文で取扱うような、防風垣の高さ以下での現象について相似性の検討を行なった例は少ない。したがって、ここではまず風洞実験で大きさの異なる 2 種類の防風垣について相似性の検討を行ない、次いで風洞実験と野外実験の結果とを比較した。

図 3-8 は風洞実験 A と風洞実験 B の結果を比較したものである。ここで、用いた防風垣の密閉度は  $CL=100\%$ 、風速の垂直分布を測定した位置は防風垣の風下側、垣高 2 倍 ( $x=2H$ ) の位置である。この時の風速は

いても、防風垣風下の風速分布はあまり影響は受けないものと考えられるが、今回の測定では極端な安定、不安

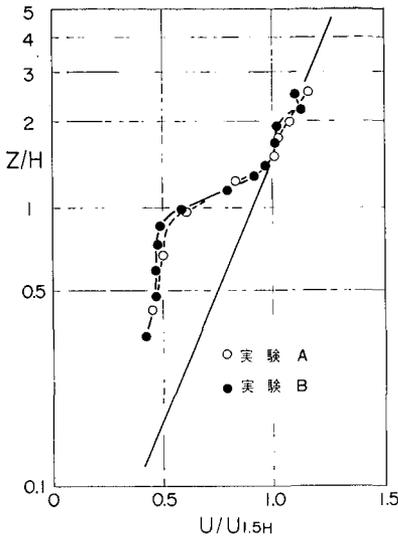


図3-8 大きさが異なる防風垣風下の風速垂直分布の比較 (風洞実験 A, B の比較)

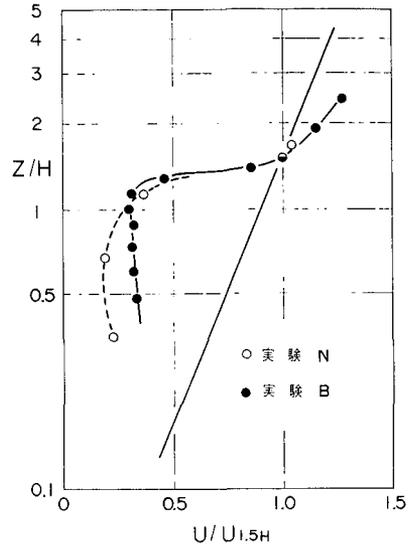


図3-9 大きさが異なる防風垣風下の風速垂直分布の比較 (野外実験と風洞実験 B の比較)

垣高の1.5倍の高さで、風洞実験 A では  $U_{A1.5H}=2.4$  m/sec、風洞実験 B では  $U_{B1.5H}=2.9$  m/sec であったが (1-6) 式から風洞実験 A の風速を風洞実験 B の大きさの風速に換算してみると  $U_{A1.5H} \times (H_B/H_A)^{\frac{1}{3}} = 3.0$  m/sec であって、ほぼ  $U_{B1.5H}$  に等しく、また表 3-1  $H_A/H_B = Z_{0A}/Z_{0B}$  で (1-5) 式も満している。図 3-8 を見ると 2 つの風速分布曲線はほぼ一致しており、先に示した 2 条件が相似条件として妥当であることを示している。

次に風洞実験 B と野外実験の結果を比較してみると、密閉度  $CL=100\%$ 、防風垣の風下側で垣高 1.0 倍の離れた位置での風速垂直分布は、それぞれ図 3-9 に示すごとくとなった。この時の野外実験の地表面粗度長は  $Z_{0N}=3.0$  cm で、 $Z_{0B}/Z_{0N}=0.02$  となり、大きさの縮率  $H_B/H_N=0.013$  とは若干異なるが、風速に関しては風洞実験 B の風速は  $U_{B1.5H}=3.0$  m/sec で、(1-6) 式から  $U_{N1.5H} \times (H_N/H_B)^{\frac{1}{3}} = 5.8$  m/sec となり、 $U_{N1.5H}=5.9$  m/sec とほぼ一致している。しかし、風速分布のパターンは垣の高さ ( $Z=1.0H$ ) 以下の部分で差が生じており、野外実験の方が風速比率は大となっている。このことは、風洞実験では熱線風速計を使用しているため、風速の水平方向 ( $x$  方向) および垂直方向 ( $Z$  方向) の 2 成分を測定しているのに対し、野外実験で使用している小型ロビンソン風速計では垂直成分が測定できないことに起因しているものと考えられる。特に防風垣の風下で垣に近ければ風が渦を巻くために垂直成分も多分にあるものと考えられ

この点を加味して考えれば、風洞実験 B と野外実験の風速分布は、大きな相異はないものと言える。

e) 防風垣風下の気温の垂直分布に及ぼす気層の安定度の影響

防風垣風下の風速垂直分布に対し、気層の安定度はほとんど影響を与えていないことが明らかとなったが、気温の垂直分布の場合も同様に安定度の影響を調べた。

図 3-10 は風洞実験 A において風速がほぼ同じで気層の安定度が大きく異なる時に密閉度  $CL=100\%$  の防風垣の風下、距離  $x=2.0H$  の位置で気温の垂直分布を測定したものである。なお、気温分布のパターンの比較を容易にするため、横軸には垣を設けなかった場合の気温との差 ( $d\theta$ ) を、高さ  $Z=1.0H$  での値 ( $d\theta_{1.0H}$ ) との比で示した。

同様に野外実験で比較したものが図 3-11 である。いずれの場合においても、気層の安定度による気温の垂直分布のパターンの影響は、今回得られたデータの範囲内では僅少であると言える。

なお、野外実験の場合にややずれが大きいのは、温度の測定回数が少なく、平均値がやや誤差を含むためと思われる。しかし、後述する風速による影響と比較すると、気層の安定度による影響はきわめて少ない。

f) 防風垣風下の気温の垂直分布に及ぼす風速の影響

先に述べたごとく、防風垣風下の風速分布のパターン

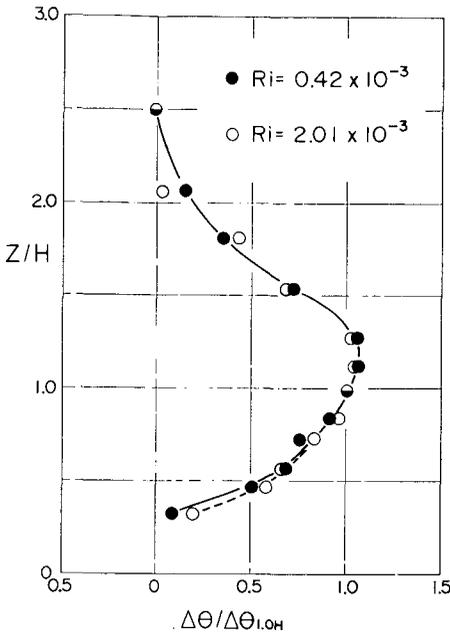


図3-10 防風垣風下の気温垂直分布に及ぼす気層安定度の影響(風洞実験 A)  $H_A=6.0$  cm,  $x_A=12.0$  cm,  $CL_A=100\%$

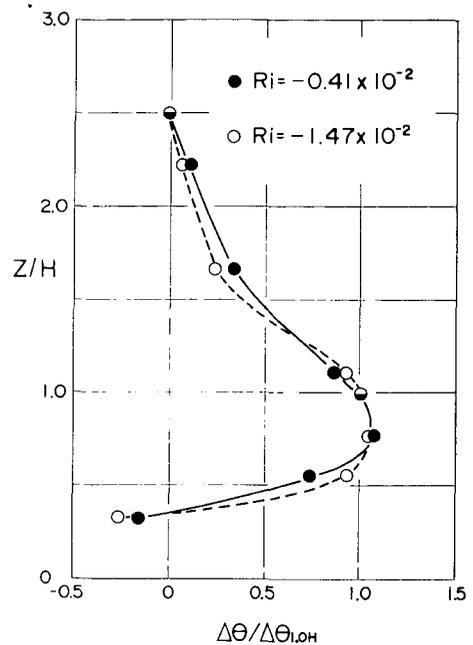


図3-11 防風垣風下の気温垂直分布に及ぼす気層の安定度の影響(野外実験)  $H_N=90$  cm,  $x_N=50$  cm,  $CL_N=100\%$

に風速が大きく影響していることから、気温の分布にも影響を及ぼしているものと考えられ、風洞実験 B、野外実験 N について風速別に気温垂直分布を比較した(図3-12、図3-13)。測定の方法等は、前述の気層の安定度についての比較の場合と同様である。

風洞実験 B、野外実験とも風速により気温垂直分布のパターンは影響を受けており、風洞実験 B の場合には風速が大きくなるほど  $Z(=1.0 H)$  以上の高さで気温分布のふくらみが大きくなっている。また野外実験では風速による気温の分布のパターンの変化は風洞実験に比べて大きくなっている。

g) 大きさが異なる防風垣風下の気温分布の相似性

これまでの実験結果から、防風垣風下の気温垂直分布のパターンは気層の安定度によってはあまり影響されず、主として風速により大きく変化していることがわかった。そこで、気層の安定度による影響を無視して、単純に風速分布の相似条件、(1-5)式、(1-6)式に基づき、風洞実験 A、風洞実験 B、野外実験について、相互の気温分布のパターンを比較した。

まず風洞実験 A と風洞実験 B とについて、密閉度 100% の防風垣の風下、 $x=2.0 H$  の位置での結果を比較すると図3-14のごとくとなる。この時の風洞実験 A

の風速は  $Z=2.5 H$  の高さで  $U_{A2.5H}=2.5$  m/sec であり(1-6)式から  $U_{A2.5H} \cdot (H_B/H_A)^{\frac{1}{3}}=3.1$  m/sec となり、風洞実験 B における風速  $U_{B2.5H}=3.3$  m/sec に近い値となる。(1-5)式の条件については表3-1に示したように風洞実験 A と風洞実験 B はほぼ条件を満している。この条件の下では気温の垂直分布のパターンは防風垣の大きさが異なっていても、明らかに良く一致する結果となっている。

一方、野外実験と風洞実験 B の比較の場合には密閉度 100% の防風垣の風下  $x=1.0 H$  の位置で測定した。結果を図3-15に示す。ここで風洞実験 B の風速は  $Z=2.5 H$  の高さで  $U_{B2.5H}=3.0$  m/sec で(1-6)式から  $U_{B2.5H} \cdot (H_N/H_B)^{\frac{1}{3}}=5.9$  m/sec となり野外実験における風速  $U_{N2.5H}=5.7$  m/sec とほぼ一致している。結果を見ると野外実験と風洞実験 B の気温分布のパターンには若干の差が見られる。このことは、野外実験のデータは秋の観測であったため、地表面粗度長がやや小さく、(1-5)式を十分満足していなかったためと考えられる。

しかし、ここで用いた比較の方法は先に述べたごとく防風垣の有無による気温の差をさらに  $Z=1.0 H$  または  $Z=2.5 H$  での値との比で表わすと言いきわめて厳密な

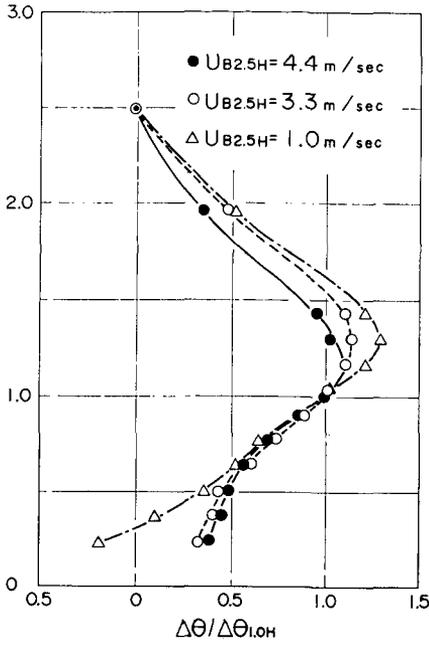


図3-12 防風垣風下の気温垂直分布に及ぼす風速の影響 (風洞実験 B)  $H_B=12.0$  cm,  $x_B=24.0$  cm,  $CL_B=100\%$

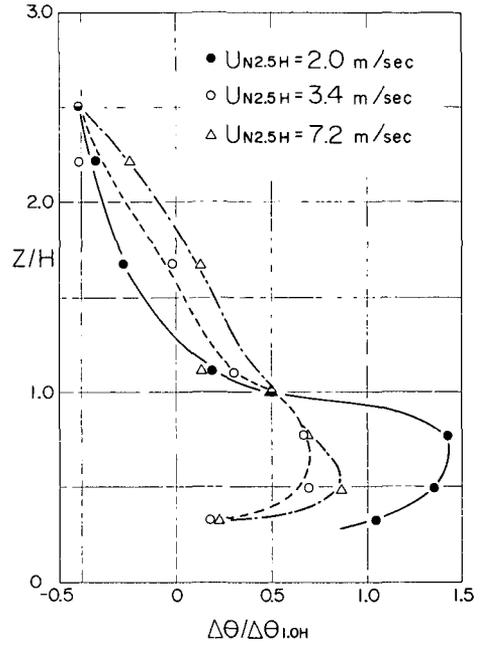


図3-13 防風垣風下の気温垂直分布に及ぼす風速の影響 (野外実験)  $H_N=90$  cm,  $x_N=90$  cm,  $CL_N=100\%$

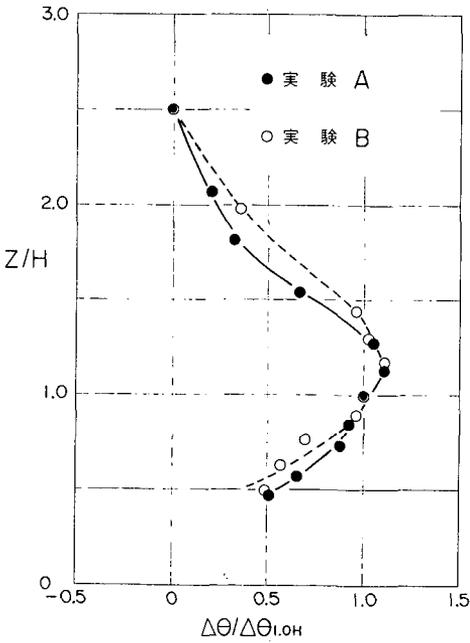


図3-14 大きさが異なる防風垣の風下の風速垂直分布の比較  $x=2.0H$ ,  $CL=100\%$

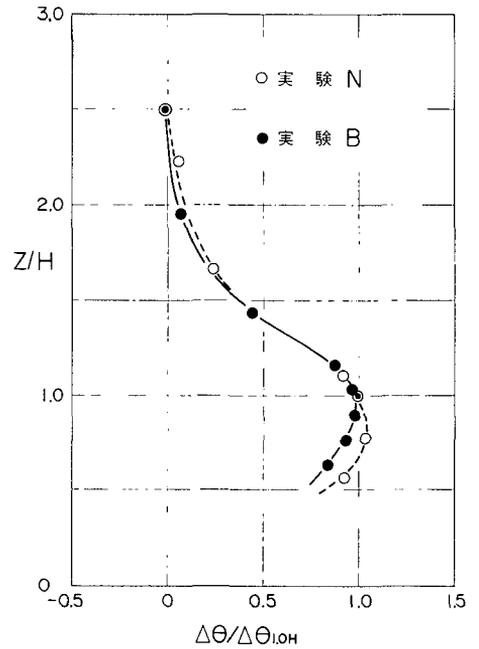


図3-15 大きさが異なる防風垣の風下の気温垂直分布の比較  $x=1.0H$ ,  $CL=100\%$

方法であって、図 3-14、図 3-15 程度に気温分布のパターンが一致していれば、十分とは言えないまでも、相似と見てもさしつかえないのではないと思われる。

**h) 密閉度が異なる防風垣風下の気温分布**

密閉度が異なる防風垣前後の風速分布については、これまで多くの実測および模型実験が行なわれ、密閉度 60~80% の防風垣が最適との結論が出されている。しかし、栽培されている作物の側から見ると、風速も重要な要素であるが、温度環境も見のがすことはできない。そこで、密閉度が異なる防風垣の風下側の気温の水平・垂直分布を風洞内模型実験で測定した。なお、実物との相似性については、先の実験で、風速分布についての相似条件が成り立てば、気温分布についても比較的に良く一致するとの結論が出されていることから、実際の防風垣にも十分適用できるものと考えられる。

実験は密閉度 100, 60, 30% の寒冷紗を用いた模型防風垣について風洞実験 B のスケールで行なった。結果

を図-16 に示す。

密閉度 100% の防風垣の場合には、昇温域は防風垣に近い位置で発生しており、その昇温の程度も大きい。垣後方  $x=6.0H$  以上離れた位置では逆に低温域となっている。これと同じ様な現象は野外における実測側でも見られており、図 3-17 に示した WOODRUFF (1959) の防風林での観測結果と良く一致している。防風垣の風下に低温域が発生する原因としては、上層の冷たい空気がこの位置で巻き込まれて、吹き降りてくることが考えられる。この低温域は防風垣の密閉度が減るにしたがって漸次後退し、密閉度 60% では  $x=15H$ 、密閉度 30% では  $x=18H$  以上の位置となっている。また、昇温域については密閉度 60% の防風垣の場合には  $x=1\sim7H$  の範囲で大きな昇温効果が認められるが、密閉度が 60% 以下となると昇温域は広がるが、あまり大きな昇温は期待できない。密閉度 60~100% の間の防風垣については実験を行っていないため明らかなことは言えないが、密閉度が 80% 以上となると風の巻き込みによる低温域が広がるものと考えられるため、気温を上昇させる目的であれば、密閉度 60% 前後の防風垣が最も適切であると言える。

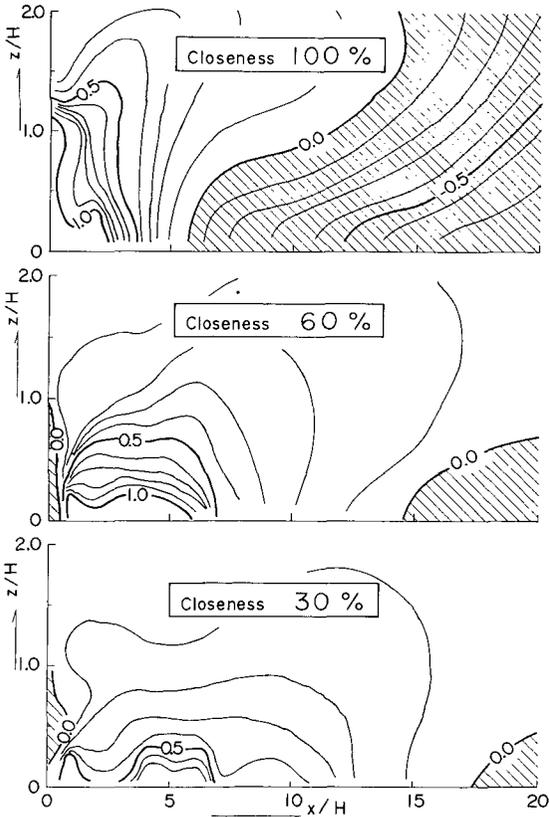


図 3-16 防風垣風下の気温分布 (単位 °C)  $CL_B=100\%$

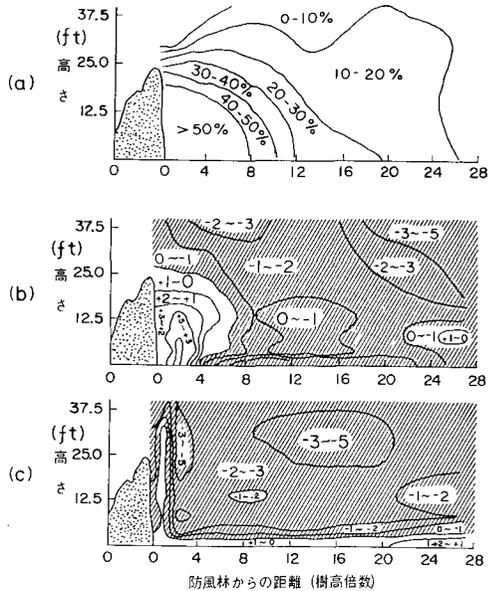


図 3-17 防風林後方の風速および気温分布 (Woodruff, 1959)

- (a) 風速分布 (対照区との比, %)
- (b) 昼間の気温分布 (対照区との差, °C)
- (c) 夜間の気温分布 (対照区との差, °C)

#### (4) 要 約

防風垣風下の風速および気温の分布について圃場での実測（野外実験：防風垣の高さ  $H_N=90$  cm）と温度成層を与える風洞内でのスケールの異なる2種類の実験（風洞実験 A：防風垣の高さ  $H_A=6$  cm，風洞実験 B：防風垣の高さ  $H_B=12.0$  cm）を比較した結果、次のことが明らかとなった。

1) 防風垣風下の風速垂直分布のパターンに及ぼしている風速の影響については密閉度100%の防風垣を用いて野外実験と風洞実験 A で測定した結果，風速による影響は大きいことが明らかになった（図3-5，図3-6）。

2) 一方，気層の安定度が風速垂直分布のパターンに及ぼしている影響については，野外実験において密閉度100%の防風垣で測定した結果，今回の測定の範囲内では影響は見られなかった（図3-7）。

3) 大きさの異なる防風垣の風下の風速垂直分布の相似性について，風洞実験 A と風洞実験 B，および風洞実験 B と野外実験において密閉度100%の防風垣で測定し，比較した結果，(1-5)式と(1-6)式を適用することにより相似なパターンを得ることができた（図3-8，図3-9）。

4) 防風垣風下の気温垂直分布のパターンに及ぼしている気層の安定度の影響については，密閉度100%の防風垣を用いて野外実験と風洞実験 B で測定した結果，影響は全く見られなかった（図3-10，図3-11）。

5) 一方，気温分布のパターンに及ぼす風速の影響については，風洞実験 B と野外実験の測定結果から見ると，風速の影響は大きく，特に野外実験の場合にはパターンの変動は大きかった（図3-12，図3-13）。

6) 大きさが異なる防風垣の風下側の気温の垂直分布のパターンの相似性については密閉度100%の防風垣を用いて，風洞実験 A と風洞実験 B，風洞実験 B と野外実験について，それぞれ比較した結果，風速分布の相似条件(1-5)式と(1-6)式を用いると，近似的な一致が得られることが明らかとなった（図3-14，図3-15）。

7) 密閉度が異なる場合の防風垣風下の気温の分布状態については，密閉度100, 60, 30%の寒冷紗を用いた模型防風垣による風洞実験 B での結果から，密閉度60%前後の防風垣が最も昇温効果を期待できることがわかった（図3-16）。

### 4. 温室外表面からの顕熱伝達

#### (1) 温室の熱収支

最も一般的な熱収支の例として適度に湿った，植生の

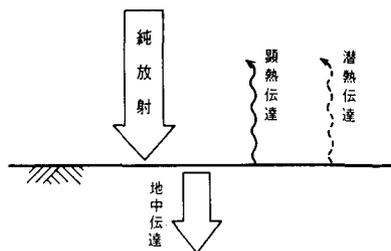


図4-1 地表面の熱収支（昼間）

ない土壌面を考える（図4-1）。地表面に向う方向を正とし，逆を負とすれば，地表面の熱収支方程式として次式が成り立つ。

$$R_{\text{net}} + H + LE + B = 0 \quad (4-1)$$

ただし， $R_{\text{net}}$ ：純放射量， $H$ ：顕熱伝達量， $L$ ：水の蒸発の潜熱， $E$ ：土壌面蒸発量， $B$ ：地中伝達量。

純放射量とは，天空から地表面に向う短波放射量（日射量）および長波放射量（大気放射量）と，逆に地上から天空に向う長波放射量（逆放射量）および天空から来る長短波放射量の反射との差引であり，顕熱伝達量は空気の乱流拡散によって運ばれる熱量である。土壌面蒸発量に蒸発の潜熱をかけた値（ $LE$ ）は潜熱伝達量とも言われる。地中伝達熱量は地中における熱輸送量で，伝導による熱移動である。以上の熱収支式中で最も測定が困難なものは顕熱伝達量であり，通常，他の熱収支項との残差から求めている。

温室においてはこれらの現象が温室内の地表面，温室内壁および外壁で起きており，相互に影響し合っているために解析がきわめて困難となっている。

温室内外における顕熱伝達も現象はきわめて複雑であるが簡略化した模式図を示すと図4-2のごとくなる。一般に顕熱伝達量は，2点間の温度と顕熱伝達係数とよばれる係数から，次式によって求めることができる。

$$H = h(\theta_1 - \theta_2) \quad (4-2)$$

ただし， $H$ ：顕熱伝達量， $h$ ：顕熱伝達係数， $\theta_1, \theta_2$ ：温度。

この顕熱伝達係数は顕熱伝達が主として大気の乱流拡散熱輸送によるものであるから，風速や乱れの強さなどに大きく影響される。この章では外気と温室の外側表面との間の顕熱伝達について述べるが，この外気と温室外表面との間の顕熱伝達については，関東地方以西の研究者は放射による熱移動に比べて量的に少ないとしてあまり重視していない。しかし，北海道のように寒冷な地方では，相対的に温室内外の気温差が大きく，顕熱伝達

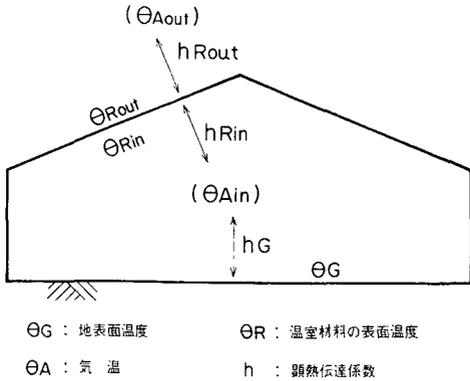


図4-2 温室における顕熱の伝達

よる熱損失も無視できないものと考えられる。図4-3は高さ1.8 m、間口1.8 m、奥行3.6 mの小型ビニール温室(東西棟)を対象に、南側の屋根の外表面における純放射量と顕熱伝達量を比較した結果である。(a)の場合には無加温で、さらに晴天日であったため、昼間は放射による熱移動量は非常に大きく、また、夜間においてはビニール表面の温度は外気温より低くなり、ビニール表面での顕熱伝達は受熱の傾向を示している。一方、1 kWの電熱温床線を内部に張って加温した(b)の場合には曇天日であることも重なって、顕熱による熱移動は常に放熱の状態であり、その量も無視できない大きさとなっている。

(2) 実験方法

野外実験

野外実験用に製作した温室は風向の変化に対応して容易に移動できるように、一般に使用されているものより

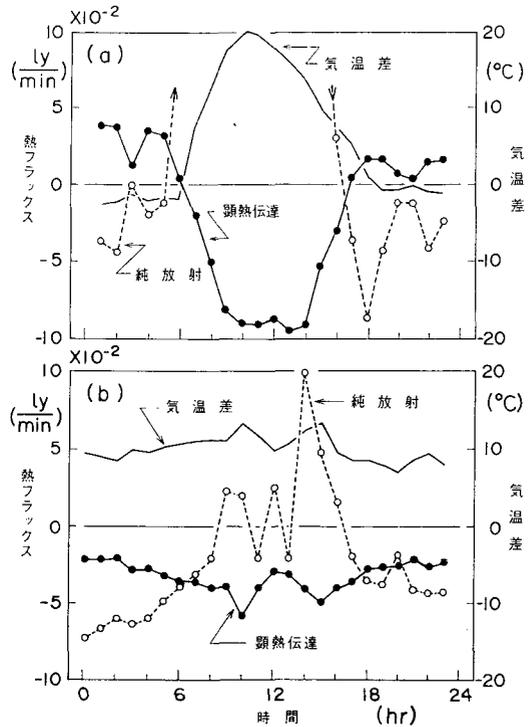


図4-3 ビニール温室外表面における放射および顕熱伝達 (昭和47年5月1日)

小型で、高さ1.8 m、1間口1.8 m、奥行3.6 mである(図4-4)。温室の表面には厚さ0.1 mmの黒ビニールを張り、ビニール表面の温度 $\theta_s$ は0.3 mmφの銅-コンスタンタン熱電対線を接着剤で張りつけて測定した。外気温 $\theta_a$ は温室の高さ2の倍の位置で測定し、ビニール表面温

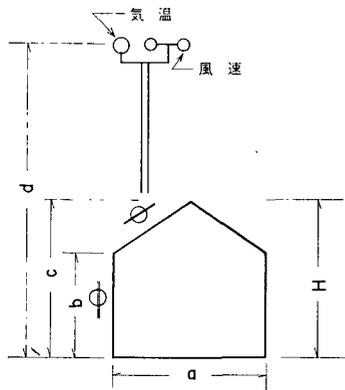
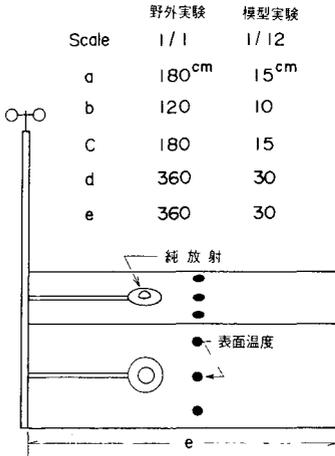


図4-4 実験用温室の構造と大きさ

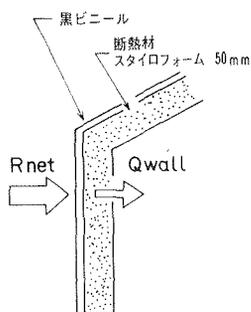


図4-5 野外実験用温室の断面

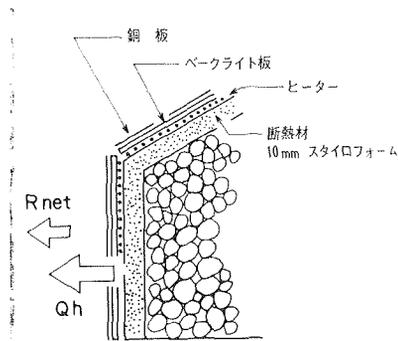


図4-6 模型温室の断面

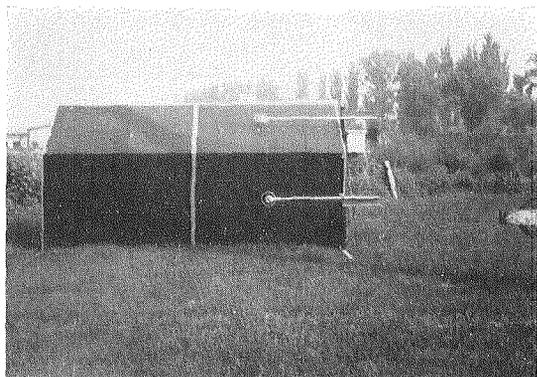


写真4-1 温室からの顕熱伝達量の測定 (野外実験)

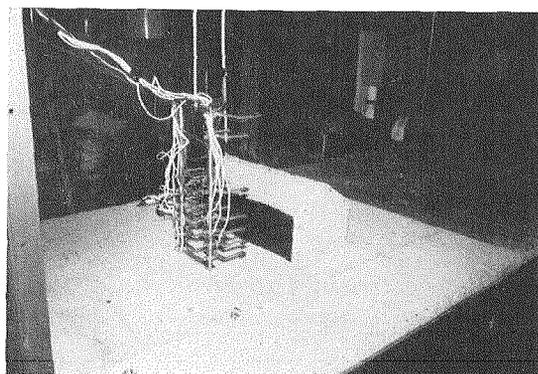


写真4-2 温室からの顕熱伝達量の測定 (風洞実験)

度との差を電子管式自記電位差計に記録させた。ビニールの裏面には厚さ50mmの断熱材(発泡スチロール製)を張って内部への熱移動 $Q_{wall}$ をできるだけおさえたがなお、若干の熱移動があるため、断熱材の両面に銅-コンスタン熱電対を張って表裏面の温度差を測定し、 $Q_{wall}$ の量を算出した(図4-5)。温室表面における純放射量 $R_{net}$ はフンクの純放射計を用いて温室表面から15cm離れた位置で測定した。

代表的な風速としては温室の2倍の高さでの値を用いることとし、風杯型光電式風速計を使用して、自記電位差計に記録させた。

なお、野外実験での温室表面の顕熱伝達係数 $h_N$ は次式で算出した。

$$h_N = (R_{net} - Q_{wall}) / (\theta_s - \theta_a) \quad (4-3)$$

風洞実験

風洞実験に用いた模型温室は図4-4に示したように高さ15cm、間口15cm、奥行30cmであり野外実験用温室の1/12の大きさのものである。風洞実験では野外実験の場合と異なり、日射による熱の供給は期待できないため図4-6に示したように側壁および屋根にマンガ

ニン線によるヒーターを埋設し、その上に表面を黒く塗った薄い銅板を張った。ヒーターの裏面には厚さ10mmの断熱材(発泡スチロール製)を張り、さらに内部に粒状の発泡スチロールをつめた。したがって、壁面を伝わって内部へ移動する熱は小さいものとして、顕熱伝達係数 $h_M$ の算出では無視した。銅板外表面の温度は0.1mmφの銅-コンスタン熱電対線を張りつけて行ない、温室表面における純放射量 $R_{net}$ は表面温度 $\theta_s$ と気温 $\theta_a$ から次式によって算出した。

$$R_{net} = \delta(T_s^4 - T_a^4) \quad (4-4)$$

ただし、 $\delta$ : ステファン・ボルツマン定数 ( $=0.813 \times 10^{-12}$  ly/min/ $^{\circ}K^4$ ),  $T_a$ ,  $T_s$ : 温室表面および空気の絶対温度 ( $^{\circ}K$ )。

ヒーターからの発熱量を $Q_h$ とすれば、模型温室表面での顕熱伝達係数 $h_M$ は次式で計算される。

$$h_M = (Q_h - R_{net}) / (\theta_s - \theta_a) \quad (4-5)$$

(3) 実験結果と解析

a) 野外実験および風洞実験の比較

まず温室の風上および風下側の屋根表面、側壁表面上

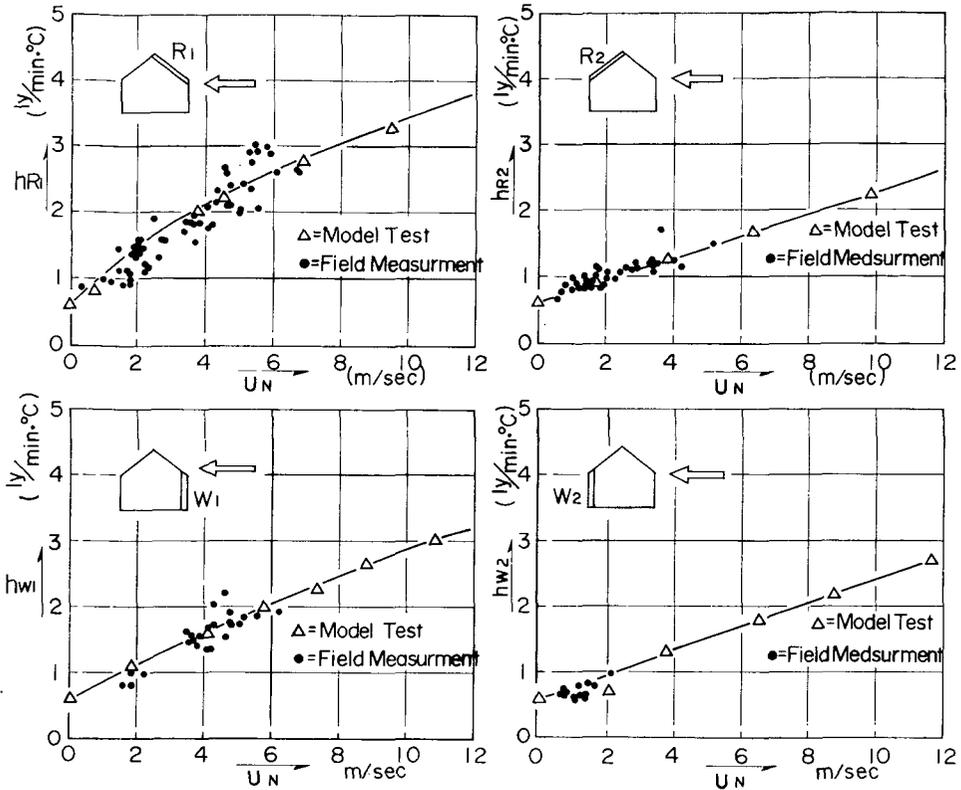


図4-7 温室表面上の顕熱伝達係数と風速との関係

の顕熱伝達係数について野外実験と風洞実験の結果を比較したものが図4-7である。なお、この時の風洞実験の風速は(1-6)式を使って野外実験での風速に換算してある。また、この時の風洞風の地表面粗度長は  $Z_{0M}=0.66$  cmで、野外実験の場合は  $Z_{0N}=5\sim 15$  cmであり、両者の比をとると  $Z_{0M}/Z_{0N}=0.132\sim 0.044$  となる。温室の大きさの比は  $L_M/L_N=0.083$  であるから  $Z_{0M}/Z_{0N}\cong L_M/L_N$  となり、風に関する相似条件は満している。

風上側屋根  $R_1$  について見ると、野外実験の方はややバラツキはあるが、模型実験による結果と非常によく一致している。ただし、模型実験では風速との関係がやや曲線と域る傾向を示すのに対し、野外実験では風速の増加と共に顕熱伝達係数は直線的に増加しているようにも見える。この点については野外実験の強風時のデータがあれば明らかとなるが、今回の結果だけでは問題点として残るであろう。風上側側壁  $W_1$ 、風下側屋根  $R_2$  についても同様によく一致を示している。風下側側壁  $W_2$  の場合には野外実験のデータ数が不十分であるため確かなことは言えないが、他の3例で相似であったことを考慮

に入れると、この場合にも相似関係にあると言えるであろう。

以上のように風速分布の相似条件を用いて野外実験と模型実験とを比較した場合には、非常によい相似関係が得られたが、これに対し、伝達工学の方面で使われている顕熱伝達の相似条件について考えてみる。

伝達工学の方面では平板の強制対流熱伝達の式として次式が導かれている。

$$h = c \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot (Re)^n \cdot (Pr)^m \quad (4-6)$$

ただし、 $h$ : 平板上の平均的顕熱伝達係数、 $c, m, n$ : 実験定数、 $\lambda$ : 空気の熱伝導率、 $L$ : 平板の長さ、 $Re$ : レイノルズ数、 $Pr$ : プラントル数。模型と実物の顕熱伝達係数をそれぞれ  $h_M, h_N$  とすれば、 $c, \lambda, \nu, Pr$  は変わらないと見てよいから

$$\frac{h_M}{h_N} = \left(\frac{U_M}{U_N}\right)^n \cdot \left(\frac{L_M}{L_N}\right)^{n-1} \quad (4-7)$$

となる。

上式を用いて  $h_M=h_N$  となるための風速の縮率を求め

てみると、水平平板では  $n=0.8$  であるから  $U_M/U_N=(L_M/L_N)^{0.25}$  となり、垂直平板では  $n=0.731$  で  $U_M/U_N=(L_M/L_N)^{0.267}$  となり、風速分布のための相似条件  $U_M/U_N=(L_M/L_N)^{1/3}$  とはいずれも異なってくる。したがって、伝熱工学の方面で使われている顕熱伝達の相似条件は、今回のような実験に十分に適用できるとは言えない。また、風速分布の相似条件を第一と考えておかなければ、複雑な模型となった時に（例えば防風施設を設けた場合や、数棟の温室がならんだ場合など）、風速分布が異なるために顕熱伝達の相似性も失なわれてしまうおそれがある。したがって、顕熱伝達に関する模型実験を行なう場合には、まず、平均風速の分布のパターンを一致させることが必要であろう。

図4-8は温室各表面の顕熱伝達係数を比較したものである。風速が0のときは、 $R_1, R_2, W_1, W_2$  では  $h \cong 0.6$  [ly/min/°C] で一致しているが、風速が大きくなるにしたがって差を生じ、 $R_1$  が最も大きく、次いで  $W_1, W_2, R_2$  の順になっている。

なお、温室各表面における顕熱伝達係数と風速との関係は、それぞれ次の実験式によって示され、 $R_1, W_1$  は指数関数、 $R_2, W_2$  は直線式となる。

$$\begin{aligned} h_{R1} &= \{(U_N + 0.8)^{0.556} - 0.3\} \times 10^{-2} \\ h_{W1} &= \{(U_N + 5.4)^{0.556} - 2.3\} \times 10^{-2} \\ h_{R2} &= (0.163 U_N + 0.6) \times 10^{-2} \\ h_{W2} &= (0.181 U_N + 0.6) \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (4-8)$$

ただし、 $h_{R1}, h_{W1}, h_{R2}, h_{W2}$ : 風上屋根  $R_1$ , 風下側壁  $W_1$ , 風下屋根  $R_2$ , 風下側壁  $W_2$  の各表面における顕熱伝達係数 [ly/min/°C],  $U_N$ : 野外実験のスケールで、温室の2倍の高さでの風速 [m/sec]。

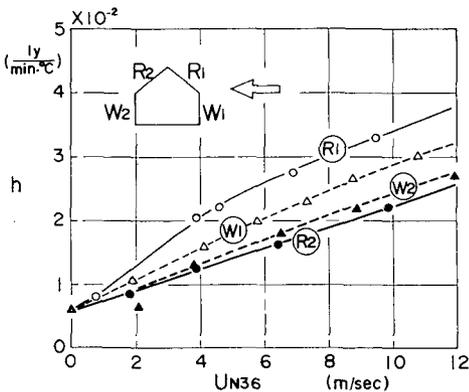


図4-8 温室各表面における顕熱伝達係数の比較

b) 風向変動の影響

風洞内模型実験の結果が野外実験とよく一致したことから、風洞実験において温室の外表面の顕熱伝達係数と風との関係について、種々の検討を加えることとし、まず、温室にあたる風の方向との関係について実験を行なった。

図4-9は棟と直角の方向から風をあてた場合と45度の角度で風をあてた場合の風速と顕熱伝達係数の関係を示したものである。ただし、この時の風速は風洞実験での値であり、野外実験の大きさには換算していない。

結果を見ると低風速の範囲内では斜方向の風の方が、直角に風をあてた時より顕熱伝達係数は若干大きい、風速  $U_M=3.5$  m/sec を越えると逆となっている。しかし、その差はあまり大きくはなく、したがって野外実験においても  $\pm 45$  度程度の風向変動では大きな誤差は生じないものと考えられる。

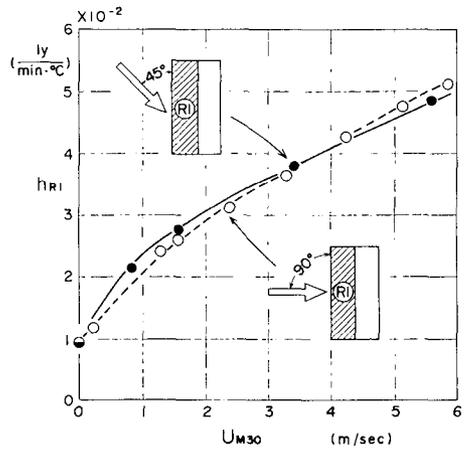


図4-9 風向と風上屋根の顕熱伝達係数

c) 地表面粗度長  $Z_0$  の影響

耕地においては周辺の植生の状態によって地表面粗度長  $z_0$  の値が大きく変わる。この地表面粗度長  $z_0$  の変化が温室表面での顕熱伝達係数にどのような影響を与えるかについて風洞内で模型実験を行った。

風速の測定は図4-10に示したように温室前方40cm、高さ12.5cmの  $P_1$  点で行ない、その値を代表風速とした。また、顕熱伝達係数は風上屋根  $R_1$  についてのみ測定を行なった。地表面粗度長  $z_0$  は1.2, 0.75, 0.3 cm の4段階とした。

図4-11は  $Z_0$  と風上屋根面  $R$  の顕熱伝達係数の関係を示したものであり、 $Z_0$  が大となるにしたがい、 $h_{R1}$  も直線的に大きくなっていることが明らかとなった。

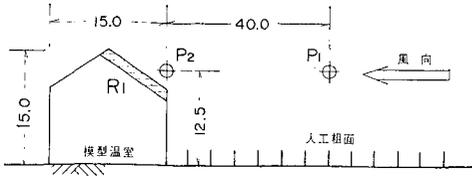


図 4-10 風速測定位置 (単位 cm)

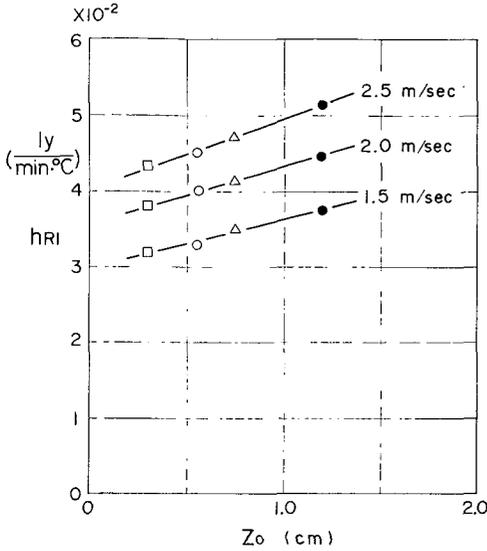


図 4-11  $Z_0$  と風上屋根の顕熱伝達係数

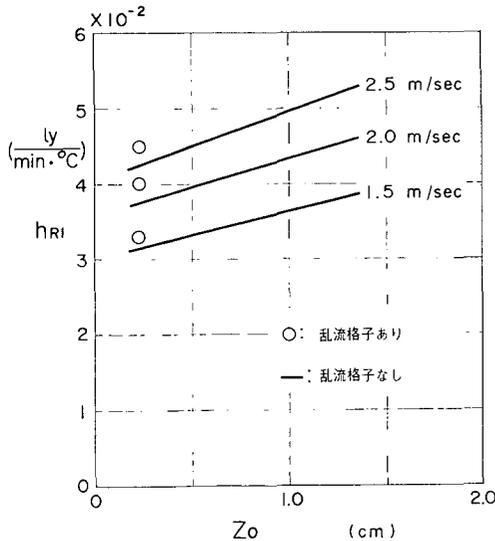


図 4-12 乱流格子の有無と温室の屋根面の顕熱伝達係数

d) 風の乱れの強さの影響

風の乱れの強さが、温室外表面の顕熱伝達係数に及ぼしている影響を調べるために、風洞内に乱流格子を設けた場合について実験を行なった。

乱流格子は風洞吸入口から 180 cm の位置に幅 5 cm の横板を 5 cm 間隔に取りつけたものである。この乱流格子により乱れの強さの増加は 16% であった。なお、この時の地表面粗度長は  $Z_0=0.23$  cm であった。

図 4-12 は乱流格子を設けた場合と設けていない場合について両者を比較したものであるが、乱流格子を設けた方が顕熱伝達係数が大となることが明らかとなった。

(4) 要 約

温室外表面からの顕熱伝達係数について図 4-4 に示す大きさの温室について野外実験および風洞内模型実験を行なった結果、風洞内において温室等の建築物外表面での顕熱伝達の模型実験が可能であることが明らかとなり、さらに模型実験により温室外表面の顕熱伝達係数と風の構造との関係について検討を加えた。得られた結果を要約すると次のごとくとなる。

1) 風速分布に関する相似条件、(1-5) 式、(1-6) 式を適用すると、温室外表面上の顕熱伝達係数は野外実験と風洞内模型実験とできわめて良く一致し (図 4-7)、温室など建築物外表面からの顕熱伝達についての風洞内模型実験が可能であることが明らかとなった。

2) 温室の屋根、側壁など各表面での顕熱伝達係数を比較すると、風上屋根  $R_1$  が最も大きく、次いで風上側壁  $W_1$ 、風下側壁  $W_2$  の順となり、風下屋根  $R_2$  が最も小さかった (図 4-8)。

3) 温室にあたる風の方向と顕熱伝達係数との関係について風洞内模型実験により測定した結果、 $\pm 45$  度程度の風向変動はあまり大きな影響はなかった (図 4-9)。

4) 地表面粗度長  $Z_0$  が異なる場合の顕熱伝達係数への影響については風洞内模型実験により温室風上屋根  $R_1$  について実験を行なった結果、地表面粗度長  $Z_0$  が大きくなるにしたがって顕熱伝達係数も大きくなることがわかった (図 4-11)。

5) 風の乱れの強さが温室外表面の顕熱伝達に及ぼす影響について、風洞内に乱流格子を入れて測定した結果乱れが増加すると、顕熱伝達係数も増加することが明らかとなった (図 4-12)。

### 5. 温室外表面からの顕熱伝達に及ぼす防風垣の効果

#### (1) 温室の防風

北海道のように冷涼な気候の地方では、春先の育苗期の苗代、ビニールハウス、ビニールトンネルなどに対する防風はきわめて重要であり、4~5月北海道内の水田地帯において苗代に防風施設を設けていない地方は皆無と言って良い。

防風施設が温床内の気温に及ぼす影響については著者が観測した例を示すと図5-1のごとくとなる。夜間にはあまり差はないが、昼間には防風垣の有無によって2°C以上の差となっている。このように北海道においては春先の強風から苗代や温室を守ることはきわめて大きな保温効果をあげているものと考えられる。しかし、今までは防風施設は主として平坦な耕地での防風効果だけに研究の主力がそそがれ、温室等に対する熱的な効果については全く報告が出されていなかった。したがって、この章では温室に対する防風施設の効果的な高さ、距離、密閉度などについて、風洞内模型実験により種々の検討を加えた。

防風垣を設置した。なお、防風垣の長さは6 mである。風速、顕熱、伝達係数の測定方法、計算方法は前章で述べた方法と同じである。

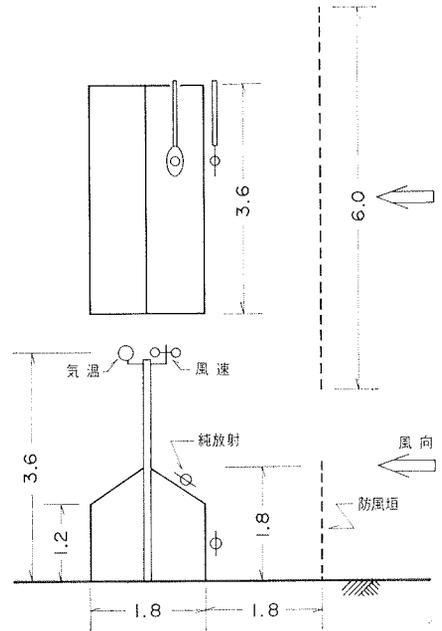


図5-2 野外実験概略図(単位:m)

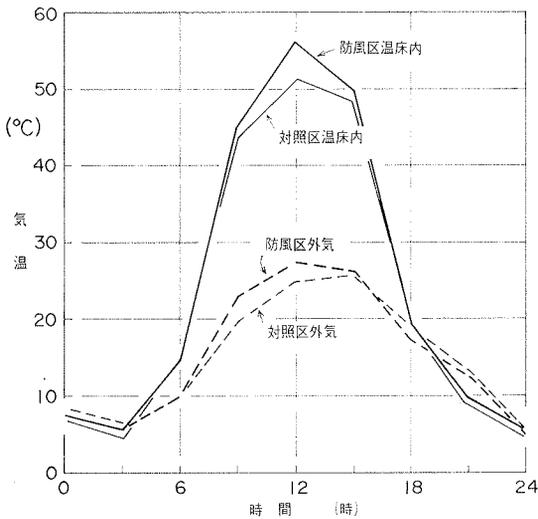


図5-1 防風区および対照区における温床内外の気温変化

#### (2) 実験方法

##### 野外実験

野外実験で用いた温室は図5-2に示すように高さ1.8 m、間口1.8 m、奥行3.6 mのもので、この温室から風上側に1.8 mの位置に高さ1.8 m、密閉度60%の寒冷紗

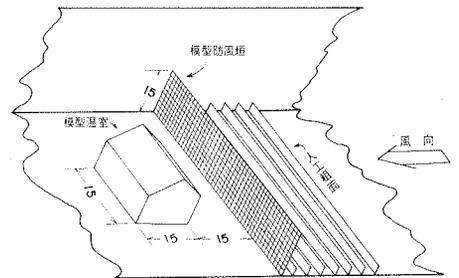


図5-3 風洞内模型実験の概略図(単位:cm)

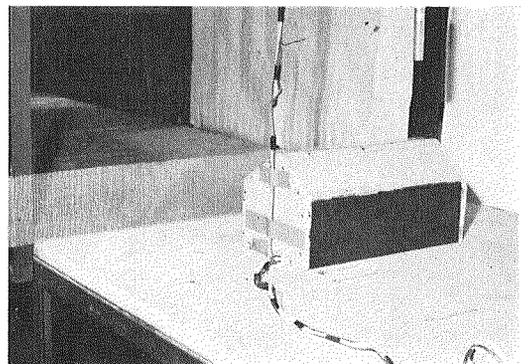


写真5-1 風洞内模型実験

風洞実験

風洞実験用の模型温室は、高さ 15 cm, 間口 15 cm, 奥行 30 cm であり、模型防風垣としては、野外実験と同様に寒冷紗を用い、長さは 80 cm とした。野外実験との相似関係を調べる実験では、温室の風上側 15 cm の位置に、高さ 15 cm, 密閉度 60% の防風垣を設けた。なお、風洞内の地表面粗度長は  $Z_0M=0.66$  cm である。

(3) 実験結果と解析

a) 野外実験と風洞実験の比較

防風垣には密閉度 60% の寒冷紗を使用し、垣の高さは温室の高さと等しく、設置位置は温室の風上側に垣高 1 倍の距離とした。適用した相似条件は前章と同じく (1-5) 式と (1-6) の 2 条件である。測定は風上屋根  $R_1$  と風上側壁  $W_1$  の 2 面だけであるが結果を図 5-4 に示す。

風上側壁  $W_1$  の場合には模型実験の方が野外実験よりもやや小さいが相似性は十分に認められる。一方、風上屋根  $R_1$  の場合には野外実験と風洞実験の差がやや大きくなっている。このことは野外実験の場合には風向が一定ではなく、主風向に対し  $\pm 45$  度程度変動していたこ

とによる影響と考えられる。温室だけの場合には先に述べたごとく、あまり風向変動の影響は受けないが、防風垣を設置した場合には、防風垣の減風効果自体が風向変動の影響をうけやすいことが主な原因であり、野外実験では防風垣の長さが 6 m と短かく、横から風が回り込んだことも原因の一つと考えられる。

b) 風速と防風施設の保温効果

図 5-5 は高さが温室と同じで、密閉度が 60% の防風垣を温室の風上側の垣高 1 倍の距離に設けた場合の温室各表面での顕熱伝達係数を比較したものである。防風垣を設けていない場合の図 4-7 と比較してみると、各表面とも防風垣を設けることにより、顕熱伝達係数は明らかに小さくなっている。さらに特徴的なことは、風上屋根  $R_1$  では風速 1~5 m/sec の範囲で顕熱伝達係数が相対的に小さくなっていることである。この傾向は風下屋根  $R_2$  についても若干見られるが、主として防風垣風下の風速分布のパターンが風速によって変わるためと考えられる。

防風垣の効果を見るために、風上、風下の屋根面積を  $A_{R1}, A_{R2}$ , 側壁面積を  $A_{W1}, A_{W2}$  とし、温室全体の平均的顕熱伝達係数  $h$  を次式で表わした。

$$h = \frac{A_{R1} \cdot h_{R1} + A_{R2} \cdot h_{R2} + A_{W1} \cdot h_{W1} + A_{W2} \cdot h_{W2}}{A_{R1} + A_{R2} + A_{W1} + A_{W2}} \quad (5-1)$$

ただし、実際の場合には、屋根、側壁の各表面温度が異なるため、全体の顕熱伝達量を求めるためにこの  $h$  をそのまま使用することは適当ではないが、防風施設の有無による差を比較するために用いるのはさしつかえないものとする。

防風垣を設けていない場合の温室の平均的顕熱伝達係数  $h_0$  と防風垣を設けた時の平均的顕熱伝達係数  $h_F$  を

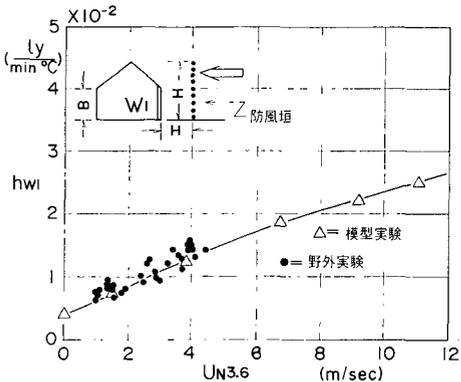
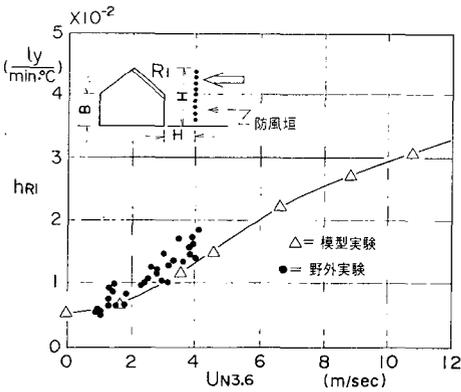


図 5-4 防風垣を設けた場合の温室屋根面上の顕熱伝達係数

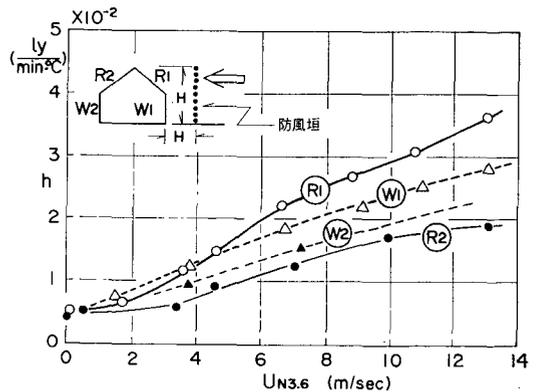


図 5-5 防風垣を設けた場合の温室各外表面の顕熱伝達係数

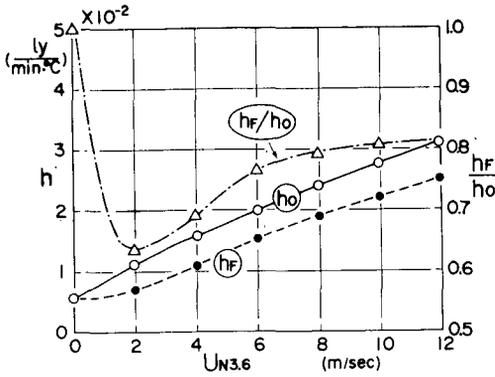


図5-6 防風垣の有無と温室全体の平均的顕熱伝達係数

(5-1) 式で求め、さらに両者の比  $h_F/h_0$  を図示したものが図5-6であり、横軸には野外実験のスケールに換算した風速をとっている。図を見ても明らかのように、 $h_F$  では  $U_{N3.6}=2$  m/sec 付近で  $h_F$  の増加が少なく、そのため  $h_F/h_0=0.63$  で最小値を示している。しかし、 $U_{N3.6}=2$  m/sec を越すと、徐々に防風垣の効果は減じ、 $U_{N3.6}=8$  m/sec 以上では  $h_F/h_0 \cong 0.8$  ではほぼ一定となっている。

c) 防風垣の高さと保温効果

防風垣の高さは高ければ高いほど温室の保温に有効であるが、実際に設置する場合に、高ければ防風資材にかかる風圧もそれだけ大となり、破損の危険性が増す。また、支柱も丈夫なものにしなければならぬため設置費用にも影響する。したがって、ここでは風洞内模型実験により、防風垣の効果的な高さについて検討を加えた。

防風垣の設置位置は温室側壁から風上側に温室の高さの1倍の距離とした。使用した防風垣は密閉度60%および50%の寒冷紗である。密閉度60%の実験では、風速は  $U_{N3.6}=3.7$  cm/sec、密閉度50%のときは  $U_{N3.6}=12.8$  m/sec であった。なお、風洞風の境界層の高さの関係上、防風垣の高さは、温室の高さ以上とすることはできなかったが、結果を図5-7に示す。

密閉度60%、 $U_{N3.6}=3.7$  m/sec の場合には、防風垣の高さが温室の高さの0.8以下では返って温室全体の顕熱伝達係数は防風垣を設置しない場合より大きくなっている。これは主として風上および風下の屋根面における顕熱伝達係数が大きくなるのが原因である。これに対し密閉度50%、 $U_{N3.6}=12.8$  m/sec の場合には、防風垣の高さが増すにしたがい、 $h_F/h_0$  の値は直線的に減じている。

今回行った2つの実験では密閉度の差と風速の違い

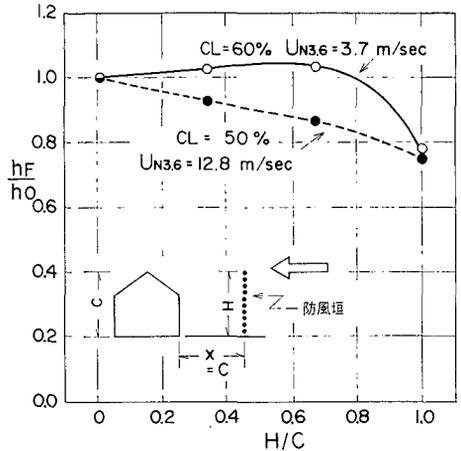


図5-7 防風垣の高さと温室外表面の平均的顕熱伝達係数

との2条件が複合しているため確かなことは言えないが防風垣の高さは温室の高さと同じか、またはそれ以上でなければ十分な効果は期待できないであろう。

d) 防風垣の密閉度と保温効果

防風垣の密閉度と温室外表面の顕熱伝達係数との関係については特に実験を行っていないが、今までに示したデータから若干の検討を行なった。

防風垣の高さが温室の高さと等しく、かつ防風垣の設置位置が温室から垣高1倍の距離である場合、密閉度50%の防風垣の方が効果が大きくなっている。また図5-7の2つの例を見てもわかるように、密閉度が大きいと防風垣の高さを低くしたときに屋根面での顕熱伝達係数が大きくなるため温室全体としても、防風垣を設けない場合より顕熱伝達係数は大となり逆効果となっている。以上のことから、温室用の防風垣として温室の高さ以下の垣を設ける場合、密閉度は通常耕地の防風に用いられているものより若干小さ目の方が効果を期待できる。

e) 防風垣と温室の間の距離

耕地における防風垣の防風効果は密閉度60~80%の時に、垣高の約5倍の位置で最大であると言われていた。しかし、温室などを対象とした場合には測定例は全くなかった。したがって、ここでは密閉度が60%、高さは温室の高さと等しい防風垣について、温室と防風垣の間の距離を変えて、温室外表面の顕熱伝達係数の測定を行なった。

風洞のスペースの関係上、温室と防風垣の距離は垣高4倍までしか変えることができなかったが、温室の各表面および全体の平均について得られた結果を図5-8に

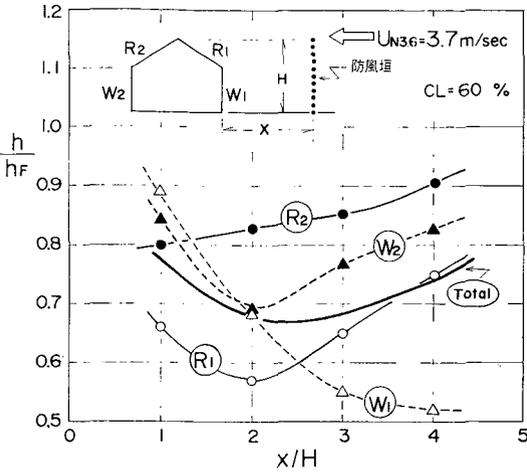


図5-8 温室・防風垣間の距離と温室外表面の顕熱伝達係数

示す。横軸は温室と防風垣の間隔を垣高倍数で示し、縦軸は温室の顕熱伝達係数を防風垣を設けていない場合との比で示してある。

まず温室全体としては顕熱伝達係数に及ぼす防風垣の効果は垣高2~3倍の距離の時に最大となっている。ただし、今回の測定は風速が  $U_{N3.6}=3.3$  m/sec の時だけの結果しか得られていないが、風速  $U_{N3.6}$  が変われば、この最大効果の位置は、多少変動するものと予想される。

屋根および側壁の各々について見ると、風上屋根  $R_1$  と風下側壁  $W_2$  では距離が垣高2倍付近の時に最も効果が大きい、風下屋根  $R_2$  では、相対的に効果が少ない上に距離が大きくなるにしたがって直線的に効果が減少している。また、風上側壁  $W_1$  では、この測定範囲内では距離が大きくなるにしたがって防風垣の効果は大きくなっているが、図から推定すると垣高4~5倍の位置で効果が最大となるものと考えられる。

(4) 要 約

温室外表面の顕熱伝達係数に及ぼす防風垣の効果について簡単な野外実験を行ない、風洞内模型実験と比較した。その結果、防風垣を設けた場合においても、風洞内における模型実験が可能であることが明らかとなったので(図5-4)、防風垣が温室外表面の顕熱伝達に及ぼす効果について模型実験により検討を行ない、次の結果を得た。

1) 密閉度60%、高さが温室の高さと等しい防風垣を温室から垣高1倍の位置に設置した場合、温室全体の顕熱伝達係数を防風垣を設けていない場合との比  $h_F/h_0$  で表わすと、風速  $U_{N3.6}=2$  m/sec 付近で  $h_F/h_0 \cong 0.63$  と

最小となり、 $U_{N3.6} > 8$  m/sec で  $h_F/h_0 \cong 0.8$  でほぼ一定となる(図5-6)。

2) 防風垣の高さが温室の外表面の顕熱伝達に及ぼす効果については密閉度60%、 $U_{N3.6}=3.7$  m/sec、および密閉度50%、 $U_{N3.6}=12.8$  m/sec の場合について測定した結果、防風垣の高さは少くとも防風垣の高さ以上でなければ効果を期待できないことが明らかになった(図5-7)。

3) 防風垣の密閉度と温室外表面の顕熱伝達係数の関係については十分な実験を行なっていないため確実なことは言えないが、温室の防風保温の目的には、通常、耕地防風に用いられている防風垣の密閉度より、若干小さい方が効果が期待できる。

4) 温室と防風垣の間の距離については、密閉度60%、高さが温室の高さに等しい防風垣を用いて、 $U_{N3.6}=3.7$  m/sec で測定した結果、垣高2~3倍の距離に設置するのが最も有効と認められた(図5-8)。

おわりに

農業における最も重要な気象要素は温度である。特に北海道のように寒冷な地方においてはその重要性はきわめて大きい。近年、プラスチックフィルムなどの普及により、農地の温度環境は飛躍的に改善され、従来、栽培が不可能と考えられていた地方においても高級果菜などが栽培されるようになってきた。しかし、作物の栽培は気象条件の厳しい地域へと拡大されるのが常であり、この厳しい条件を克服しようとする試みは永久に続くと言っても過言ではない。

本論文では農地における温度環境の改善対策の手法の一つとして、大気の熱的な諸現象、例えば防風垣風下の気温分布や、温室外表面上の顕熱伝達などの現象を風洞を用いて実験内で再現し、野外における現象との相似関係を明らかにし、風洞内模型実験の新しい分野を開き得たものと確信する。しかしながら、いまだ実験例数は不十分であり、今後は農耕地内のあらゆる熱的現象について模型実験の可能性を検討し、農業における温度環境の改善への寄与を目標に研究を続ける予定である。

参 考 文 献

- 1) ABE, M. (1941): Model experiment of atmospheric motion, J. Met. Japan, 22, 12-19.
- 2) 阿部・小田切・小野 (1960): 防風林の機能に関する実際的研究 (1). 農業気象, 16, 10-16.
- 3) BATCHELOR, G. K., 巽 友正訳 (1968): 乱流理論, 吉岡書店.

- 4) CHARNOCH, H. (1967): Flux-gradient relation near the ground in unstable condition, *Q. J. R. M. S.*, **93**, 97-100.
- 5) 千葉 豪 (1956): 防風の温度効果. 北海道の農業気象, **6**, 28.
- 6) 大後美保 (1962): 農業気象学通論. 1-308, 養賢堂.
- 7) DAVENPORT, A. G. (1961): The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high wind. *Q. J. R. M. S.*, **87**, 194-211.
- 8) DYER, A. J. (1965): The flux-gradient relation for turbulent heat transfer in the lower atmosphere. *Q. J. R. M. S.*, **91**, 151-157.
- 9) DYER, A. J. (1967): The turbulent transport of heat and water vapor in an unstable atmosphere. *Q. J. R. M. S.*, **93**, 501-508.
- 10) ECKERT, E. R. G. (1954): Introduction to transfer of heat and mass. McGraw Hill.
- 11) ELLISON, T. H. (1957): Turbulent transport of heat and momentum from an infinite rough plane. *J. Fl. Mec.*, **2**, 463-466.
- 12) 絵内・荒谷・本間 (1970): 仮設用シートの熱伝達について. 日本建築学会講演集, 239.
- 13) 船田・橋本 (1970): 超音波風速計を用いたオンラインデータ処理による風洞の制御効果について (I). 生物環境調節, **9**, 39-46.
- 14) 藤本武助 (1968): 流体力学. 1-322, 養賢堂.
- 15) 藤田 進 (1963): 耕地防風林について. 北海道の農業気象, **13**, 7-10.
- 16) HILLER, F. (1957): Wärmehaushalt und Klimafaktoren des Gewächshauses. *Heiz. Lüft. Haustechn.*, **8**, 201-204.
- 17) 堀川 明 (1968): ランダム変動の解析. 共立出版.
- 18) 井上栄一 (1948): 応用力学. **1**, 15.
- 19) 井上栄一 (1952): 地表風の構造. 農技研報告, **A-2**, 1-93.
- 20) 井上栄一 (1959): 温度成層を考慮に入れた自然風現象の風洞模型実験について. 農業気象, **15**, 41-45.
- 21) 井上栄一 (1960): 穂波の研究 (6). 農業気象, **16**, 83-84.
- 22) 井上・谷・今井 (1953): 耕地風の測定 (2). 農業気象, **8**, 45-48.
- 23) 井上・谷・今井 (1955): 耕地風の測定 (4). 農業気象, **11**, 44-48.
- 24) 井上・今井・谷 (1958): 耕地風の測定 (7). 農業気象, **14**, 9-14.
- 25) 井上・谷・今井 (1955): 耕地風の乱れの測定. 農技研報告書, **A-4**, 1-36.
- 26) 磯部 孝編 (1968): 相関函数およびスペクトル. 東大出版会.
- 27) 磯野謙治 (1956): 気象学講座第6巻. 気象器械 (その2), 地人書館.
- 28) 伊藤・佐藤・岡・小原・新居 (1969): 自然風下における建築物外壁面の対流熱伝達について (III). 日本建築学会講演集, 69.
- 29) 岩切 敏 (1969): ガラス室の気象 (1)—気温環境について—. 農業気象, **24**, 177-184.
- 30) 岩切・内島 (1971): 昼間におけるガラス室の温度状態と熱伝達. 農業気象, **26**, 197-207.
- 31) 亀井・松下・和泉 (1959): 建築学大系 (20). 建築耐風・耐雪論, 彰国社.
- 32) KNUDSEN, J. G. and KATZ, D. L. (1958): Fluid dynamics and heat transfer. McGraw Hill.
- 33) 小泉睦男 (1969): 移動・速度論. 日晃堂.
- 34) LETTAU, H. (1961): Dissipation of energy by turbulence. *J. Met.*, **18**, 125-126.
- 35) LIEPMANN, H. W. and ROSHKO, A., 玉田 瑠訳 (1966): 気体力学. 吉岡書店.
- 36) MACCREADY, P. B. (1953): Structure of atmospheric turbulence. *J. Met.*, **10**, 434-449.
- 37) 三原義秋 (1961): 農業気象. 1-232, 地人書館.
- 38) MUNN, R. E. (1966): Descriptive Micrometeorology. 1-245, Academic Press.
- 39) 中島正善 (1972): ビニールハウスの防風に関する模型実験. 北大農学部農業工学科卒業論文.
- 40) NEMOTO, S. (1961): Similarity between natural wind in the atmosphere and model wind in a wind tunnel (II). *Pap. Met. geophys.* **12**, 117-128.
- 41) 根本 茂 (1967): 局地風を対象とした風洞模型実験の相似則. 農業気象, **22**, 129-136.
- 42) 農林省振興局研究部監修 (1964): 農業気象ハンドブック. 1-600, 養賢堂.
- 43) 大根田・楠瀬 (1959): よしず防風垣に関する研究. 北海道の農業気象, **9**, 6-9.
- 44) 岡 樹生 (1970): 市街地の中層建物の外表面熱伝達について (第4報). 日本建築学会講演集, 273.
- 45) 岡・佐藤・伊藤・小原 (1969): 市街地中層建物の外表面熱伝達率について. 日本建築学会講演集, 71.
- 46) PANOFSKY, H. A. and MCCORMICK, R. A. (1954): Properties of spectra of atmospheric turbulence at meters. *Q. J. R. M. S.*, **80**, 546-564.
- 47) PASQUILL, F. (1962): Atmospheric diffusion. Van Nostrand.
- 48) ROSENHEAD, L. (1963): Laminar boundary layers. Oxford.
- 49) SCHLICHTING, H. (1960): Boundary layer theory. McGraw Hill.

- 50) SENDERIKHIMA, I. L. (1961): On the relationships among the coefficients of turbulent momentum heat and matter in surface layer of the atmosphere. *proc. Main Geophys. Obs.*, **121**, 1-23.
- 51) 杉・高倉 (1965): 温室による植物環境条件制御に関する基礎的問題について (I). *農業気象*, **20**, 147-153.
- 52) 鈴木清太郎 (1954): 冷害と防風林の効果. *農業気象*, **10**, 70-71.
- 53) SUTTON, O. G. (1932): Note on the variation of the wind with height. *Q. J. R. M. S.*, **58**, 74-76.
- 54) SUTTON, O. G. (1953): *Micrometeorology*. 1-333, McGraw Hill.
- 55) SVERDRUP, H. U. (1936): Note on the logarithmic law of wind structure near the ground. *Q. J. R. M. S.*, **62**, 461-462.
- 56) 高橋英紀 (1968): 防風垣前後における熱拡散と温度分布に関する模型実験. *北海道の農業気象*, **19**, 22-26.
- 57) 高橋英紀 (1972): 農耕地における熱的現象の模型実験 (2). 温室外表面からの顕熱伝達, *農業気象*, **28**, 19-22.
- 58) 高橋英紀 (1972): 農耕地における熱的現象の模型実験 (3). 温室外表面からの顕熱伝達に及ぼす防風垣の効果. *農業気象*, **28**, 73-77.
- 59) 高倉 直 (1969): 温室内気温の降下現象について. *農業気象*, **25**, 183-186.
- 60) 高倉・立花・古在・碓 (1968): 温室の熱収支. *農業気象*, **24**, 115-118.
- 61) TAKEUCHI, K. (1961): On the structure of the turbulent field in the surface boundary layer—Analysis of the data obtained at O'nail, Nebraska—. *J. Met. Soc. Japan*, **39**, 346-367.
- 62) TALOR, F. R. S. (1972): Turbulence. *Q. J. R. M. S.*, **53**, 201.
- 63) 田中・谷沢 (1952): 防風垣前後の風に関する研究 (1). *農業気象*, **8**, 61-63.
- 64) 田中・谷沢・小寺 (1953): 防風垣前後の風に関する研究 (2), 防風垣前後の反対風. *農業気象*, **9**, 66-71.
- 65) 田中・谷沢・佐野・小寺 (1954): 防風垣前後の風に関する研究 (3), 防風林, 防風垣の切れ目. *農業気象*, **10**, 30-32.
- 66) 田中・佐野・谷沢・柿沼 (1955): 防風垣前後の風に関する研究 (4), 風向の変動と防風垣の機能. *農業気象*, **11**, 49-52.
- 67) 田中・谷沢・佐野・柿沼・小寺 (1955): 防風垣前後の風に関する研究 (5), 防風垣の高さと効果範囲. *農業気象*, **11**, 91-94.
- 68) 田中・谷沢・佐野・柿沼・小寺 (1955): 防風垣前後の風に関する研究 (6), 連壁の機能. *農業気象*, **11**, 97-99.
- 69) 田中・柿沼・谷沢・佐野 (1956): 防風垣前後の風に関する研究 (7), 林帯の型式と防風機能. *農業気象*, **12**, 9-12.
- 70) 田中・佐野・谷沢・柿沼 (1956): 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.
- 71) 田中・谷沢・佐野・柿沼 (1957): 防風垣前後の風に関する研究 (9), 防風垣風下の乱れの相関. *農業気象*, **13**, 7-15.
- 72) 谷 信輝 (1953): 防風墻の機能に関する研究, 模型防風墻の風洞実験 (その三). *農業気象*, **9**, 63-65.
- 73) 谷 信輝 (1955): 耕地風速高度分布と安定度との関係の測定. *農業気象*, **11**, 5-8.
- 74) 谷 信輝 (1958): 模型防風垣の風洞実験. *農技研報告*, **A-6**, 1-80.
- 75) 谷 信輝 (1959): 網の防風効果について. *農業気象*, **15**, 88-92.
- 76) 谷 信輝 (1960): 耕地上の風の測定結果について. *農業気象*, **16**, 88-92.
- 77) 谷 信輝 (1964): 防風林の効率に関する研究. *農業気象*, **20**, 47-50.
- 78) 谷・井上・今井 (1954): 耕地風の測定 (3). *農業気象*, **10**, 105-108.
- 79) 谷・井上・今井 (1956): 耕地風の測定 (5). *農業気象*, **12**, 17-20.
- 80) 谷・井上・今井 (1957): 耕地風の測定 (6). *農業気象*, **13**, 143-146.
- 81) 谷・岩崎・小中原 (1968): 静岡県柑橘試験場の気象改良工法に関する風洞模型実験. *農業気象*, **24**, 133-139.
- 82) TAYLOR, G. I. (1938): The spectrum of turbulence. *Proc. Roy. Soc., A*, **164**, 476-490.
- 83) THORNTHWAITTE, C. W. and HOLZMAN, B. (1939): The determination of evaporation from land and water surface. *Monthly Wether Rev.*, **67**, 4-11.
- 84) TIMOSHENKO, S., 谷下・渡辺訳 (1966): 工業振動学. 東京図書.
- 85) TOWNSEND, A. A. (1956): The structure of turbulent shear flow. Cambridge.
- 86) TOWNSEND, A. A. (1966): The flow in a turbulent boundary layer after a change in surface roughness. *J. Fluid Mechanics*, **26**, 255.
- 87) 槌田・山崎・秋山 (1970): 伝熱工学演習. 1-284, 学献社.

- 88) 内島・岩切 (1971): 夜間における無換気ガラス室の温度状態と熱伝達. 農業気象, **16**, 77-89.
- 89) 上村・久保・小沢 (1970): グラフトカーボン面熱体の気温および地温に対する昇温効果. 農業気象, **25**, 233-239.
- 90) WIJK, W. R. V. (1966): Physics of plant environment, 1-382. North Holland Publishing Company.
- 91) WITTLE, R. M. and LAWRENCE, W. J. C. (1960): The climatology of glasshouses, V. The heat consumption of glasshouses, J. Agric. Engng. Res, **5** (2), 399-405.
- 92) 矢吹万寿 (1972): 温室気象. 農業気象, **28**, 127-128.
- 93) 山本良三 (1959): 防風塙の防風効果に及ぼす前後の地物の影響. 農業気象, **15**, 151-160.
- 94) 山本雄二郎 (1970): ハウスの放熱係数について. 農業気象, **26**, 117-122.
- 95) 横田・堀口・高橋 (1966): 寒冷紗を使用した防風施設に関する研究 (I), 平垣, 単塙の場合の防風効果. 北大農業物理研究室報告, **1**, 12-30.
- 96) 横田・堀口・高橋・西尾 (1967): 寒冷紗を使用した防風施設に関する研究 (II), 海岸傾斜地の防風. 北大農業物理研究室報告, **2**, 1-12.
- 97) 横田・高橋・岡橋 (1967): 寒冷紗を使用した防風施設に関する研究 (III), 水田の防風. 北大農業物理研究室報告, **3**, 1-10.
- 98) 横田・高橋 (1966): 寒冷紗を使用した場合の防風施設の効果 (第1報). 北海道の農業気象, **17**, 7-9.
- 99) 横田・高橋 (1967): 寒冷紗を使用した場合の防風施設の効果 (第2報), 海岸傾斜地の防風. 北海道の農業気象, **18**, 13-16.
- 100) 横田・高橋・岡橋 (1968): 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.
- 101) 横田・高橋 (1972): 複雑に造成されている防風林の効果の実測と模型実験. 農業気象, **28**, 401-406.
- 102) 横田・高橋・萩原 (1972): 農耕地における熱的現象の模型実験 (I), 防風垣後方の気温の分布. 農業気象, **27**, 436-441.

### Summary

Thermal phenomena of atmosphere near the ground are affected considerably by the other meteorological factors. However, we have a very great difficulty to make clear the relations between the thermal phenomena of atmosphere and the other meteorological factors.

If we can show those thermal phenomena in a

wind tunnel as a model, it would be very easy to analyze the thermal phenomena of atmosphere.

This paper describes the model experiments of thermal phenomena of atmosphere near the ground and the applications of those results to agriculture.

#### 1. Influence of shelter-hedge on vertical profile of air temperature

In order to make clear the influence of shelter-hedge upon thermal condition of cultivated fields, measurements of wind and temperature profiles were made in the lee of model windbreaks. Experiments were made in a wind tunnel and on a cultivated field. The results obtained are summarized as follows:

(1) The similitude between phenomena observed in the wind tunnel and field experiments was examined by the following relations proposed by INOUE (1959) and NEMOTO (1961, 1967) for wind profile in the surface air layer.

$$\frac{I_M}{L_N} = \frac{Z_{0M}}{Z_{0N}}, \quad \frac{U_M}{U_N} = \left( \frac{L_M}{L_N} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Relationships among wind speed, roughness and height of shelter-hedge used in the experiments satisfied approximately the relations mentioned above, indicating that the results obtained in wind tunnel experiments may be applicable to field conditions.

(2) The vertical distribution of air temperature in the lee of the shelter-hedge (closeness 100%) is not very affected by thermal stratification of air flow. However, the distribution pattern of air temperature in the lee of the shelter-hedge (closeness 100%) changed considerably by wind speed. Especially, the temperature profiles observed in field experiments was much affected by wind speed.

(3) The temperature rising effect of shelter-hedge was studied in relation to the closeness of shelter-hedge in the wind tunnel. The model shelter-hedge with closeness of 100, 60 and 30% were set in the wind tunnel and temperature profiles in the lee of these shelter-hedges were measured by using thermocouples. Two-dimensional distributions of air temperature indicate that the temperature rising effect is highest in the lee of shelter-hedge with closeness of 60%.

#### 2. Sensible heat transfer from outer surface of greenhouse

The sensible heat transfer coefficients were mea-

sured at the outer surfaces of two vinyl houses, one in wind tunnel the other in open field, respectively. The similarity of heat transfer between a model and an actual vinyl house was discussed theoretically.

(1) The similarity law for heat transfer was found to be somewhat different from those obtained for model experiments of wind regime behind wind-shelter. The discrepancy in heat transfer coefficients obtained respectively from the model and the actual vinyl houses increased as the ratio  $L_M/L_N$  (where  $L_M$  and  $L_N$  are the representative scales of model and actual houses respectively) increased.

(2) Under conditions that the similarity law for wind regime was applied into model experiments and that the scale of vinyl houses is in the range used here, the sensible heat transfer coefficients obtained from both the experiments are in good agreement with each other. The results indicate that the value of heat transfer coefficient obtained from model experiments in a wind tunnel may be applicable to analysis the heat transfer of vinyl houses.

(3) The heat transfer coefficient at the outer surface of vinyl houses is remarkably influenced by the surface portion in relation to wind. The heat transfer coefficient is for the windward surface portion than the leeward. Especially, the heat transfer coefficient was the highest at the front surface portion of roof.

### 3. Effects of shelter-hedge to sensible heat transfer from the outer surface of greenhouse

To make clear the influence of a shelter-hedge on the sensible heat transfer from the surface of a greenhouse, experiments were carried out in

field and in a wind tunnel, respectively.

Similarity problem between field measurement and model test was examined by using the data of heat transfer at the outer surface of greenhouses, which were protected from wind by the shelter-hedge.

The effects of shelter-hedge on sensible heat transfer from the greenhouse were studied more minutely by using a model house in the wind tunnel. The results obtained are summarized as follows:

(1) The ratio  $h_F/h_0$  (where  $h_F$  and  $h_0$  denote respectively the average heat transfer coefficients for greenhouse with and without the shelter-hedge) decreased firstly with wind speed, reached the minimum at wind speed of 2 m/sec, increased secondary with wind speed and became nearly constant in the range over 8 m/sec.

(2) The experiments were carried under conditions that  $x=1.0C$ ,  $U_{N3.6}=3.7$  and 12.8 m/sec and  $CL=60$  and 50% (where  $x$  denotes the distance between the greenhouse and shelter-hedge,  $C$  the height of greenhouse,  $U_{N3.6}$  the wind speed and  $CL$  the closeness of shelter-hedge) to find out the influence of height of shelter-hedge upon the heat transfer from the greenhouse. Experimental results indicate that the shelter-hedge higher than that of greenhouse is more effective from the standpoint of greenhouse heating.

(3) The influence of shelter-hedge on the heat transfer from the green house was found to change with the distance between the greenhouse and the shelter-hedge. These relations were approximated by concave curves. The minimum value of ratio  $h_F/h_0$  was found in the range from  $x=2.0H$  to  $x=3.0H$ .