農業気象 (*J. Agr. Met.*) 36 (1): 3–12, 1980

温室の換気

I. 風洞実験による単棟温室の風圧係数と 流量係数の測定

佐瀬勘紀*・古在豊樹**・奈良 誠***・根岸久雄***

(* 東京大学農学部
** 千葉大学園芸学部
*** 農林水産省農業土木試験場)

Ventilation of Greenhouses.

I. Wind Tunnel Measurements of Pressure and Discharge
Coefficients for a Single-span Greenhouse

Sadanori SASE*, Toyoki KOZAI**, Makoto NARA ***
and Hisao NEGISHI***

(* Faculty of Agriculture, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113
** College of Horticulture, Chiba University, Matsudo-shi, Chiba 271
*** Laboratory of Agricultural Structures, National Research Institute of
Agricultural Engineering, Yatabe, Tsukuba, Ibaraki 305)

1. はじめに

温室の本来の目的は、日射透過性被覆材で覆われた空間に日射エネルギーを保つことである。しかし、その利点はそのまま欠点にも通じ、密閉温室の日中の室内気温は作物の適温以上に上昇することがある。また、炭酸ガス施肥を行わない密閉温室では、日中、光合成の原料である炭酸ガスの濃度は、外気の半分以上に低下することもある。さらに、湿度も高くなる。このような温室内環境を作物に好適な環境に改善する最も簡便な方法は、換気を行うことである。

自然換気では、風圧力が換気の駆動力として重要な役割を演じるが、風圧力と換気性状に関する研究はあまり見あたらず、温室に関する風圧力の研究は主として耐風構造との関連で行われている。従来の自然換気に関する研究は、ガス・トレーサ法を代表とする実測報告(たとえば、船田ら、1975)、あるいは熱収支解析に基づくもの(たとえば、矢吹、1977)がほとんどである。これらは、温室の換気性状の基本的性格を明らかにするには有

益であった。しかし、換気設計の立場から、(1)温室の形状、(2)窓の形状・位置、(3)風向・風速などの因子と換気性状の関係を明らかにすることを目指した研究はほとんど行われなかった。たとえば、連続した天窓や側窓を持つ間口の広い連棟温室と非連続の天窓を持つフェンロー型温室との換気性状の比較、あるいは、大型ビニールハウスの谷間換気やつき上げ天窓などの換気能力の比較は、現に多くの使用例が見られるにもかかわらずなされていない。このように、熱収支解析から必要な換気量が求められても、その換気量を実現するためにどのような設計を行えば良いかという実用指針が示されていない現状では、換気設計は経験的に行わざるを得ない部分が多い。

建築工学の分野では、流体力学の理論から、換気量を開口部前後の圧力差と空気流動の抵抗から推定する手法が、換気設計の基本的手法となっている(たとえば、斎藤、1974)。風圧力は窓の形状・位置によって異なり、風圧係数を比例定数として、風の速度圧に比例するとして表わされる。流量係数は、開口部の空気流動の抵抗の逆数に相当する。一般建築物の風圧係数と流量係数の資料は、風洞模型実験によって集成されている(日本建築

昭和54年4月2日 全国大会にて発表

昭和55年1月23日 受理

学会, 1957)。

Kozai and Sase (1978)は, 上記の手法を用いて温室の自然換気のシミュレーションを行い, 風速, 連棟数, 内外気温差と温室の換気性状との関係を明らかにした。しかし, そこではシミュレーションに不可欠な温室の窓開口部の風圧係数・流量係数として, 一般家屋の値が流用された。温室のこれらの係数値に関しては, わずかに船田ら(1975)の妻面単純開口の流量係数の測定例があるのみである。また, 建築工学の分野では, 側窓に該当するはね出し窓の無風時における流量係数が測定されている(Baturin, 1972)。一方, 風圧係数に関しては, 耐風構造の問題から, 中崎ら(1973)は, 風洞模型実験によって温室の壁面における風圧係数分布を測定している。これら一般家屋における資料や壁面の風圧係数を換気計算に流用することは, 次の点で問題があると考えられる。

1) 温室は, 間口に対して奥行が非常に長いという特殊形状の建築物である。

2) 側窓や天窓は連続でかつ長く, 一般家屋に比べ開口面積が大である。また, 取付位置も特異である。特に, 両開き天窓をどのように取り扱うべきか。

3) 窓開口部の風圧係数を壁面のそれと同一として良いか。

4) 流量係数は, 有風時にも無風時のそれと同一として良いか。すなわち, 有風時に周辺気流の影響によって変化しないか。

本報告は, 以上のような観点から, 風洞模型実験によって単棟温室の窓開口部の風圧係数と流量係数を, 窓の形状・位置・開度, 風向・風速の関数として明らかにし, 温室の換気設計・換気制御の基礎資料としようとするものである。温室の熱収支をも考慮した換気計算法と, 本研究で得られた風圧係数・流量係数の測定値に基づいたシミュレーションの数例は, Kozai *et al.* (1980)ですでに報告しているが, 詳細なシミュレーション解析は続報として発表する予定である。

2. 風洞実験における相似則

最初に風洞気流と自然風の相似について考える。地表面付近の水平方向の空気の流れ方程式は, 一般に次のように表わされる。

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + K \nabla^2 \mathbf{V} + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (1)$$

ここで, $\mathbf{V}$ は空気の流れベクトル, ρ は空気密度, p は気圧, K は空気の渦動粘性係数, ν は空気の分子動粘性係数である。(1)式において, 代表量を空気の流速と長さとし, それぞれ V および L として無次元化すると, 次の二つのパイ・ナンバールが導かれる。

$$R_g = VL/\nu \quad (2)$$

$$R_t = VL/K \quad (3)$$

これらは, それぞれレイノルズ数, 乱流レイノルズ数と呼ばれる。従って, これら二つのパイ・ナンバールが風洞気流と自然風で一致することが必要である。

一方, 自然風の持つ乱流構造との相似も考えねばならない。そのためには, 乱れの強さ, 乱れのスケール, 風速の垂直分布などにおけるパイ・ナンバールの一致が必要である。乱れの強さやスケールに関しては, いまだに一般的手法が確立されていないので, 本研究では風速の垂直分布についてのみ考慮した。

自然風の風速の垂直分布が, 対数法則に従うものとすると,

$$V = (u_* / \kappa) \ln(z/z_0) \quad (4)$$

ここで, V は高さ z (m)における風速 (m s^{-1}), z_0 は粗度長 (m), κ はカルマン定数 (約 0.41), u_* は摩擦速度 (m s^{-1})である。自然風と風洞気流の対応する高さにおける局所的な乱流レイノルズ数の一致の条件は,

$$(Vz/K)_M = (Vz/K)_N \quad (5)$$

ここで, 添字 M, N はそれぞれ風洞気流, 自然風を示す。また,

$$K = \kappa u_* z \quad (6)$$

(5)式に(4), (6)式を代入して,

$$(z/z_0)_M = (z/z_0)_N \quad (7)$$

すなわち, 風洞気流の風速の垂直分布を模型の縮尺に合わせて自然風と相似にすればよい(関根, 1978)。

レイノルズ数の一致を実現することは不可能に近い。たとえば, 縮尺 1/15 の模型を用いる場合, 風洞気流の風速を 15 倍にしなければならない。しかし, 風圧力への影響は, レイノルズ数よりも乱れの程度の方が大きいとされている(石崎, 1977)。すなわち, 曲面を持つ建築物以外では, 剥離点は角によって決まってしまう, レイノルズ数の影響は無視できるとされている。

一方, 風速の垂直分布を自然風と相似にする(7)式で示される相似則については, Jensen and Frank (1965)によって, 風圧力に関する実物実験との比較がなされ, この相似則を用いることによって, 風洞実験の結果が実物とよく一致することが確かめられている。

窓の流量係数は, 次元解析の手法により, 次のように表示される(日本建築学会, 1957)。

$$\alpha = F(\beta, v/V, vd/\nu) \quad (8)$$

ここで, β は風向角(度), v は窓開口部を流れる空気平均流速 (m s^{-1}), d は窓の等価直径(m)である。実験によれば, 開口部の流れのレイノルズ数がある程度大きい範囲では, レイノルズ数による特性変化は無視できるとされている(石原, 1960)。レイノルズ数 6×10^3 以下

では、流量係数はレイノルズ数によって変化する(勝田, 1950)。そこで、流量係数はレイノルズ数 6×10^3 以上の場合、次のように表示できる。

$$\alpha = F(\beta, v/V) \quad (9)$$

上式で流量係数が風向と風速の関数となっていることは、周辺気流の影響を受けることを示している。

以上のことから、風洞気流の風速の垂直分布は、模型の縮尺に合わせて相似にし、流量係数は、風向および窓開口部の平均流速と風速の比の関数として整理した。

3. 風圧係数・流量係数の算定方法

ある開口部の風圧力は次のように表わされる。

$$P_w = C(r_o/2g)V^2 \quad (10)$$

ここで、 P_w は風圧力 (kg m^{-2})、 C は風圧係数、 r_o は外気の比重量 (kg m^{-3})、 g は重力加速度 (9.8 m s^{-2})、 V は風速 (m s^{-1}) である。ただし、風圧力が外気が流入するように働く時、 C は正、逆の時は負と約束される。

室内外気温差に基づく浮力は次のように表わされる。

$$P_b = h(r_o - r_i) \quad (11)$$

ここで、 P_b は浮力 (kg m^{-2})、 h は床面から開口部中心位置までの高さ (m)、 r_i は室内空気 の比重量 (kg m^{-3}) である。

換気扇の圧力、 P_f (kg m^{-2}) は、静圧-風量特性曲線より求められる。

開口部の空気流動は次のように表わされる。

$$v = \alpha \sqrt{|P_i - P_w + P_b + P_f| (2g/r)} \quad (12)$$

ここで、 v は開口部を流れる空気 の平均流速 (m s^{-1})、 α は流量係数、 P_i は床面における室内圧 (kg m^{-2})、 r は空気 の比重量 (kg m^{-3}) で流入の時 $r = r_o$ 、流出の時 $r = r_i$ である。

なお、流量係数 α と圧力損失係数 ζ の関係は、

$$\alpha = \sqrt{1/\zeta} \quad (13)$$

これらの式は、換気計算における基礎式である。

窓開口部の風圧係数は、室内圧 P_i を測定することにより、(10)式を変形した次式によって求められる。

$$C = P_i / (V^2 r / 2g) \quad (14)$$

ここで、 P_i は模型温室の室内圧 (kg m^{-2})、 r は風洞内空気 の比重量 (kg m^{-3})、 V は実物換算 10m の高さにおける風速 (m s^{-1}) である。上式で得られる風圧係数を用いれば、風圧力は基準高さ 10m における外風速と空気 の比重量だけから求められる。以下では、基準風速として実物換算 10m の高さの値を用いる。

一方、流量係数の算定の場合は、窓開口部に既知の空気量を流す必要がある。そこで、一定空気量を模型温室床面の送風孔から送った。この場合、模型温室内外の気温は等しいので浮力の項は無視でき、かつまた、換気扇

の圧力も無視できる。従って流量係数は(12)式を変形した次式から求められる。

$$\alpha = v / \sqrt{|P_i - P_w| (2g/r)} \quad (15)$$

ただし、上式における風圧力 P_w は、あらかじめ算定される風圧係数を用いて(10)式から求められる。

4. 実験方法

風洞は、エッフェル型の吹出型を用いた。計測洞は、幅 4m、高さ 3.5m、長さ 20m である。最大風速は、 15 m s^{-1} である。風洞外観を Fig. 1 に示す。

Fig. 1. The outside view of working sections of the wind tunnel.

The measurements of working sections are 20 m long, 4.0 m wide and 3.5 m high.

The maximum wind speed is 15 m s^{-1} .

模型の風洞断面への投影面積が風洞断面積の 5% 以下であることが、風洞周辺壁による blocking-effect を無視し得るために望ましいとされている (Jensen and Frank, 1965; 勝田ら, 1971)。そこで、模型温室の縮尺を 1/15 とした。模型温室はアクリル製で、連続した側窓と天窗、および妻面出入口を有する典型的単棟温室である (Fig. 2)。実物温室を用いた実験を考慮して、模型温室は農林水産省農業土木試験場の 2 連棟ガラス温室の 1 棟と同型とした。外形寸法は、実物換算で間口 7.2 m、奥行 27 m、軒高 2.1 m、棟高 3.9 m、屋根勾配 1/2 である。また、開口部の寸法は、天窗幅 0.8 m、側窓幅 0.9 m、妻面出入口 (引き戸型) 1.8 m (W) $\times$ 1.5 m (H) である。奥行の長い温室構造の特徴を失わないように、奥行は間口に対して 4 倍近くになっている。

室内圧は、模型温室内壁面の 8 点で測定した。中央断面における各屋根面、各側壁面にそれぞれ 1 点、両妻面にそれぞれ 2 点である。測定点は、壁面に開けられた直径 3 mm の小孔で、壁面に埋めこんだ真ちゅうパイプから、テフロンチューブ、チャンネル変換器を経て、圧力変換器に導いた。圧力変換器はストレイン・ゲージによ

Fig. 2. One-fifteenth model of a single-span greenhouse with continuous side and ridge ventilators and entrance/exit at gable end, used for wind tunnel measurements of pressure and discharge coefficients. Internal pressure was measured at eight different points on the inside surfaces as shown in the figure.

るもので、圧力はA/D変換され、ミニ・コンピュータに収録された。

圧力の基準は、模型上流側約3 mの位置における風洞床面静圧にとった。本来、圧力の基準は風洞内静圧にとらねばならないが、予備実験によって双方の静圧に差がないことを確認した。これは実験上の便宜によるものである。

風速の垂直分布は、計測胴上流側入口の格子式流路分割型垂直分布可変装置と、床面に roughness brock として置いた角材を用いて対数法則に従うように調節した。温室の周囲が自然草原の場合を仮定して、粗度長を1 mmとした。従って、模型の縮尺が1/15であるので、風洞気流の粗度長は0.067 mmとなる。得られた風速の垂直分布は、Fig. 3に示すように、ほぼ1 mの高さまで対数法則に従っている。実物換算10 mの高さ(風洞床面から0.67 mの高さ)で、風速 7.6 m s^{-1} である。

測定は、それぞれの窓について個別に行い、ある窓の測定を行う場合は、他の窓はすべて閉じた状態とした。ただし、両開き天窓については、換気計算時に二つの窓としてとらえると、それぞれの窓が非常に近接しているために、一方の窓から流入して温室に換気効果を与えぬまま、もう一方の窓から流出する空気量までも含めて計算してしまうことになる(いわゆる、天窓における風のすりぬけ問題)。その結果、換気量が過大に見積られる危険性がある。そこで、両開き天窓を片開き天窓と区別して一つの窓として測定した。風圧係数と流量係数の算定の概要をFig. 4, Fig. 5にそれぞれ示す。

Fig. 3. Logarithmic wind speed profile in wind tunnel.

The roughness length is 0.067 mm. The reference wind speed at a height of 0.67 m above the floor of wind tunnel is 7.6 m s^{-1} . The height of 0.67 m corresponds under full-scale conditions to a height of 10 m above the ground.

Fig. 4. Test procedure to determine pressure coefficients of side and ridge ventilator openings, and entrance/exit at gable end. V and P_i denote the reference wind speed at a height of 0.67 m above the floor of wind tunnel and the internal pressure of model greenhouse, respectively. Pressure coefficient of each opening was determined by measuring the internal pressure with the other openings closed. However, when both ridge ventilators were open, they were treated as one larger opening because they are very adjacent each other.

Fig. 5. Test procedure to determine discharge coefficients of side and ridge ventilator openings, and entrance/exit at gable end. 'v' denotes the mean air speed through opening.

窓開度 50° の場合、特に側窓に関しては、風下側表面での室内圧の測定値が他の 6 点に比較してわずかに異なった。そこで、室内圧は最大値と最小値を除いて相加平均して求めた。この測定値のばらつきは、風圧係数の算定に際して、窓開口部の空気の出入りはないものと仮定しているが、実際には天窗や側窓は非常に長いため、奥行方向に風圧力の分布が生じ、その不平衡によって窓開口部に空気の出入りが生じることによって考えられる。流量係数の算定の場合にも、同様の理由で窓開口部の流れが均一とはならず、その結果、各点の測定値が一致しないことがある。しかし、これは、天窗や側窓を奥行方

向に分割して測定すれば改善できる。

5. 結果と考察

5.1 風圧係数

側窓、天窗、および妻面出入口の風圧係数を Fig. 6 に示す。風向は、棟に対して直角に風が吹く時、風向角 0° とする。ただし、側窓と片開き天窗では、開放された窓が風上側にある時風向角 0°、風下側にある時風向角 180° である。

1) 側窓の風圧係数

側窓の風圧係数は、窓開度によってほとんど変化せず、風向のみの関数であった。風圧係数は、風向角 0~180° に対して階段状に二回減少する。すなわち、風向角 0° の時 0.3、30° まではほぼ一定で、75° の時 -0.04 の負圧となる。これより風向角 120° まではほぼ一定であり、急減して 165° の時 -0.4 となり、その後 180° までは一定である。

風向角 0° における風圧係数 0.3 という値は、British Standard Code (亀井ら, 1959) や中崎ら (1973) に比べてかなり小さい。また、園芸用施設安全基準 (羽倉, 1974) と比較すると、風力係数と風圧係数の差を考慮しても、同じことが言える。これは、本実験における風洞気流の乱流境界層がかなり厚いのに対し、従来の研究では乱流境界層がきわめて薄いことによる。かつまた、窓を閉じた状態での壁面と窓開口部での空気の流れの性状は、必ずしも同一であるとは言えない。

Fig. 6 には、窓開度 0° として、窓全閉時の壁面の風圧係数の分布から側窓位置における平均値を示した。壁面の風圧係数は、窓の風圧係数測定用模型と同形状の椀形

Fig. 6. Pressure coefficients of continuous side and ridge ventilator openings, and entrance/exit at gable end as a function of θ and wind angle.

θ and V denote the angle of ventilator opening and the reference wind speed at a height of 10 m, respectively. Wind angle is 0° when the wind blows perpendicular to the ridge line, facing the ventilator open.

温室を用いて、かつ同一条件で測定した。窓全閉時と窓開放時の風圧係数を比較すると、風向角 $90 \sim 165^\circ$ を除いて両者は一致する。換気計算に耐風構造の問題から得られた壁面の風圧係数を用いる場合には、この点が考慮されねばならない。なお、側壁に出入口がある場合には、風圧係数としてその位置における値を用いた方が合理的である。なぜならば、側窓の風圧係数は連続する開口部の平均値であるからである。

2) 片開き天窓の風圧係数

片開き天窓の風圧係数は、窓開度の増加に伴ってその絶対値がわずかに増加する。特にこれは風上側で顕著である。たとえば、風向角 0° では、窓開度 10° の時 0.23、 40° の時 0.35 と 5 割程大きくなる。これは、屋根面に沿う流れの性状が天窓という突起物の角度によって異なるためと考えられる。一方、風下側で風圧係数が窓開度に影響されないのは、棟部から発生する剥離した流れの中に天窓が入ってしまうからであると考えられる。

風向についてみると、側窓と同じような傾向を示して、風向角 $0 \sim 180^\circ$ に対して二回階段状に減少する。ただし、側窓のように風向角 $150 \sim 180^\circ$ で最小とはならず、完全に風下側となる風向角 180° よりも 45° 傾いた風向角 135° の時最小値をとり、以後風向角 180° までわずかに増加する。これらは、棟や妻面の角から発生する剥離のでき方に微妙に影響されるからであると考えられる。

側窓の場合と同じように、窓開度 0° として窓全閉時の壁面の風圧係数を Fig. 6 中に示した。窓開度 0° の風圧係数は、すべての風向で負の値を示し、風向角 $90 \sim 120^\circ$ を除いて窓開放時の風圧係数とは一致しない。従って、換気計算には窓開放時の風圧係数を用いねばならない。

3) 両開き天窓の風圧係数

両開き天窓の風圧係数は、窓開度と風向によって顕著に変化した。窓開度についてみると、風圧係数は窓開度 20° と 30° の時最小となり、これは天窓がほぼ水平に開放された場合に相当する。風圧係数は窓開度の増加に伴って減少し、水平付近に開放された時点でピークに達し、以後窓開度の増加とともに増加すると考えられる。

風向については、風向角 $0 \sim 90^\circ$ のすべての風向で負圧であり、風向角 $30 \sim 45^\circ$ の時最小値をとる。

4) 妻面出入口の風圧係数

妻面出入口の風圧係数は、勝田ら (1962) の一般家屋の結果とほぼ同様の傾向を示した。ただし、その絶対値に関しては、前述したように乱流境界

層の厚さの違いによってわずかに異なっている。勝田らは、妻面に対してかなり小さな単純開口について測定を行ったが、その結果は、開口面積が大きくともあてはまるようである。

妻面出入口に直角に風が吹く時、すなわち風上側風向角 90° の時、風圧係数は 0.6 となり、同じ風上側でも側窓の約 2 倍である。風上側風向角 $75, 60^\circ$ では 0.5 とわずかに減少し、これより風向角 0° まで直線的に減少し -0.5 となる。風下側では、風向角 30° の時 -0.2 に増加し、 75° までは変化せず、 90° の時わずかに増加して -0.1 となる。

5.2 流量係数

無風時の流量係数を Table 1 に示す。流量係数は開口部の流速によって変化するが、レイノルズ数 6×10^3 以上では一定となった。表中の値は、Baturin (1972) のはね出し窓に関する値とほぼ一致しているが、全体的にわずかに大きい。しかも、Baturin では流入時の値が流出時の値よりもほんのわずかではあるが大であるのに対し、本実験の結果では逆である。また、形状の同じ側窓と片開き天窓でもわずかに値が異なる。片開き天窓の流量係数は側窓よりもやや大きい。片開き天窓と両開き天窓を比較すると、窓開度の増加とともに片開き天窓の流量係数の方がやや大きくなる。これらの相違は、単純な平面に取り付けられた窓でなく、温室という構造物の一部として流量係数を測定しているため、窓の位置、すなわち温室壁面(屋根面や側壁面)や温室周辺面の影響によるものと考えられる。一般に無風時の流量係数は、温室周辺気流の影響を無視できるような場合、あるいは強制換気時のように、窓開口部の流速が温室周辺気流の流速に比べて相対的に大きい場合に用いられるべきであろう。

有風時の流量係数を Fig. 7 に示す。ここで流量係数は、正の風圧係数に対して流入を、負の風圧係数に対して流

Table 1. Discharge coefficients of continuous side and ridge ventilator openings, and entrance/exit at gable end (sliding door type) under windless condition and under the Reynolds number based on the conditions of openings $> 6 \times 10^3$.

Type of opening	Angle of opening (deg.)				
	10	20	30	40	50
Outflow					
Side vent.	0.12	0.23	0.34	0.45	0.59
Ridge vent. (one open)	0.15	0.29	0.40	0.49	0.59
Ridge vent. (both open)	0.15	0.27	0.38	0.47	0.55
Entrance/exit at gable end	0.72				
Inflow					
Side vent.	0.12	0.22	0.31	0.39	0.48
Ridge vent. (one open)	0.14	0.25	0.38	0.51	0.63
Ridge vent. (both open)	0.12	0.24	0.34	0.42	0.47
Entrance/exit at gable end	0.69

Fig. 7. Discharge coefficients of continuous side and ridge ventilator openings as a function of θ , wind angle and v/V .

θ , v and V denote the angle of ventilator opening, the mean air speed through opening and the reference wind speed at a height of 10 m, respectively. Wind angle is 0° when the wind blows perpendicular to the ridge line, facing the ventilator open.

出の値を示す。有風時の流量係数は、温室周辺気流の影響で変化する場合があった。そこで、流量係数は、風向および開口部の平均流速と風速の比 v/V の関数として示した。流量係数は、 v/V の増加に伴って無風時の値に近づいた。側窓や妻面出入口の流量係数は、ほとんど周辺気流の影響を受けず、片開き天窓、両開き天窓の順で周辺気流の影響が顕著に現われた。以下にそれぞれの特徴を列挙する。

1) 側窓の流量係数

側窓の流量係数は、風向および v/V によって変化せず、ほぼ無風時の値に等しかった。これは側窓の開口部が地面に近接しているため、開口部の周辺気流の流速が開口部の流速に比べて相対的に小さいためであると考えられる。

2) 片開き天窓の流量係数

片開き天窓の流量係数は、窓開度 20° 以下では風向や v/V によって変化せず、無風時の値に等しかった。窓開度 30° 以上では、 v/V の減少に伴って流量係数は減少した。風向については、風向角 90° , 180° の時最大で無風時の値に最も近づき、 60° , $105^\circ \sim 135^\circ$ の時最小である。

3) 両開き天窓の流量係数

両開き天窓の流量係数は、風向や v/V によって顕著に変化した。たとえば、窓開度 40° の場合、無風時 0.47 に対し、風向角 90° では、 $v/V = 0.15$ の時 0.41, $v/V = 0.075$ の時 0.30, 風向角 0° では、 $v/V = 0.15$ の時 0.21, $v/V = 0.075$ の時 0.18 である。両開き天窓の場合も v/V の増加に伴って流量係数は増加し、無風時の値に近づくが、この傾向は窓開度の増加とともに顕著になった。風向については、風向角 $0^\circ \sim 45^\circ$ の時流量係数は最小であり、これより 90° まで増加する。これは風向角が 0° から 90°

に変化するに従い、天窓における風のすりぬけが減少し、その結果として流量係数が増加することを明確に示している。

4) 妻面出入口の流量係数

妻面出入口の流量係数は、 $0.2 \leq v/V \leq 1.0$ に対し、ほぼ一定で、風向によっても変化せず、無風時の値に等しかった。従って、Fig. 6 には示されていない。

以上のように、流量係数は一定値として取り扱えない場合があり、換気計算を行う場合、このことを充分考慮しなければならない。一方、温度差換気の場合など流速が特に小さい場合には、レイノルズ数の影響が現われてくると考えられる。この場合、空気粘性と流れの性状を考慮しなければならず、より厳密な解析には、流体力学の基礎方程式を用いた手法によらねばならない(奈良, 1973)。

6. 要 約

風洞模型実験によって、単棟温室の窓開放時の風圧係数・流量係数を、窓開度、風向、風速をパラメータとして算定した。得られた結果と今後の課題について以下に要約する。なお、風向は棟に直角に風が吹く時、風向角 0° とする。また、高さ 10 m における風速を基準風速とする。

6.1 風圧係数

(1) 窓開放時の風圧係数は、壁面の風圧係数とは異なる。従って、換気計算には窓開放時の風圧係数を用いなければならない。

(2) 側窓の風圧係数は、窓開度によらず風向のみの関数であった。風向角 $0^\circ \sim 30^\circ$ の時最大値 0.3, 風向角 180° まで二回階段状に減少して、風向角 $150^\circ \sim 180^\circ$ の時最小

値-0.4となった。

(3) 片開き天窓の風圧係数は、窓開度の増加に伴って風上側でわずかにその絶対値が増加した。風向に対しては側窓と同傾向を示すが、最小値は風向角 135° の時-0.5であった。

(4) 両開き天窓の風圧係数は、すべての風向・窓開度で負であり、風向・窓開度によって変化した。風圧係数は、天窓がほぼ水平に開放された時、最小値-0.4であった。

(5) 妻面出入口の風圧係数は、風上側風向角 90° の時0.6、 0° まではほぼ直線的に減少して-0.5となった。風下側ではほぼ変わらず-0.2であった。

6.2 流量係数

(1) 無風時の流量係数は、建築工学の分野で得られた資料とはほぼ同じ傾向を示した。側窓と天窓は、窓開度10、30、 50° の場合それぞれ約0.1、0.4、0.6、妻面出入口は約0.7であった。ただし、窓の位置・形状によってわずかに異なった。

(2) 有風時の流量係数は、風向と v/V によって変化した。流量係数は、 v/V の増加に伴って無風時の値に近づいた。ここで、 v は開口部の平均流速、 V は基準風速である。

(3) 側窓と妻面出入口の流量係数は、風向や v/V による影響はほとんど無く、有風時においても無風時の値とはほぼ一致した。

(4) 片開き天窓の流量係数は、窓開度 30° 以上の時風向や v/V によって変化した。

(5) 両開き天窓の流量係数は、風向や v/V によって著しく変化した。たとえば、窓開度 30° の場合、風向角 0° の時0.11 ($v/V=0.075$)、0.18 ($v/V=0.15$)、風向角 90° の時0.22 ($v/V=0.075$)、0.32 ($v/V=0.15$)であった。

6.3 今後の課題

(1) 単棟温室における資料が、そのまま他の形状の温室にも適用できるかどうかは疑問である。各種の温室形状(たとえば、多連棟温室、フェンロー型温室、丸屋根型ビニール・ハウスなど)に対する資料の蓄積が望まれる。

(2) 相似則は、風速の垂直分布を基本とした。乱れの強さや乱れのスケールについての相似則は確立されておらず、今後究明が必要である。また、窓開口部の流速が特に小さい場合の流量係数も検討の必要がある。

(3) 自然風は風向・風速がたえず変化している。これらの変動分も、換気を起こす因子として考慮されねばならない。

(4) 今回の結果は、温室の周囲条件を自然草原と仮定した場合についてのものである。しかし、実際は温室の

周囲条件は種々であるので、これらの条件下についても究明される必要がある。

以上のように、単棟温室の換気計算に必要な窓開放時の風圧係数と流量係数が算定された。温室の設計段階で、必要な換気量が得られるかどうかの検討や、主風向に対する換気に最適な温室方位や窓形状・配置などの決定に有用な基礎資料となると考えられる。

終りに、本研究は著者のひとりである佐頼の千葉大学修士論文の一部として行われたが、その指導にあたってくださった千葉大学三原義秋教授、また、本報告の執筆にあたり貴重な助言を賜った東京大学立花一雄教授、高倉 直助教授、農林水産省農業土木試験場桜井喜十郎氏に深甚の謝意を表する。

引用文献

- 1) Baturin, V. V., 1972: *Fundamentals of industrial ventilation* (translated in English by O.M. Blunn). Pergamon Press, Oxford, 486 pp.
- 2) 羽倉弘人, 1974: 園芸用施設安全基準について, 施設園芸要覧, 日本施設園芸協会, 東京, 9-30.
- 3) 船田 周, 相原良安, 増井典良, 長野敏英, 1975: 応用施設, 生物の発育と環境調節(文部省特定研究「生物環境制御」成果編集委員会編), 日本学術振興会, 東京, 519-542.
- 4) 石原正雄, 1960: 越屋根の換気性能, 日本建築学会論文集, **65**, 66-72.
- 5) 石崎 潑, 1977: 耐風工学, 朝倉書店, 東京, 156 pp.
- 6) Jensen, M. and Frank, N., 1965: *Model-scale tests in turbulent wind. Part II*. Danish Technical Press, Copenhagen, 170 pp.
- 7) 亀井 勇, 松下清夫, 和泉正哲, 1959: 各国の風荷重規則, 建築学大系 20 建築耐風・耐雪論, 彰国社, 東京, 365-412.
- 8) 勝田千利, 関根 毅, 1962: 建築物壁面開口部による換気に及ぼす外部気流の影響, 空気調和・衛生工学, **36**, 376-393.
- 9) Kozai, T. and Sase, S., 1978: *A simulation of natural ventilation for a multi-span greenhouse*. Acta Horticulturae (Potential productivity in protected cultivation), **87**, 39-49.
- 10) Kozai, T., Sase, S. and Nara, M., 1980: *A modelling approach of greenhouse ventilation control*. Acta Horticulturae (Computers in greenhouse climate control), **106**(印刷中).
- 11) 中崎昭人, 玉井佐一, 桑原孝雄, 原 憲次, 1973: 切妻型1棟建ハウス周囲の二次元風圧分布特性, 農土論集, **44**, 49-56.
- 12) 奈良 誠, 1973: 温室の空気分布に関する基礎的研究, 東京大学博士論文, 165 pp.
- 13) 日本建築学会, 1957: 日本建築学会設計計画パンフレット 18 換気設計, 彰国社, 東京, 79 pp.

- 14) 斎藤平蔵, 1974 : 建築気候, 共立出版, 東京, 287 pp.
- 15) 佐瀬勘紀, 1979 : 温室の換気に関する研究(主として模型実験を中心に), 千葉大学修士論文, 140 pp.
- 16) 関根 毅, 1978 : 建築物周辺気流と壁面風圧に関する風洞模型実験, 市街地風の研究(市街地風研究会編), オーム社, 東京, 71-103.
- 17) 勝田高司, 1950 : 自然換気に関する実験的研究, 東大生産技研報告, **1**, 37-76.
- 18) 勝田高司, 村上周三, 池田耕一, 上面 清, 1971 : 風洞気流に対する Blocking-Effect に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 101-102.
- 19) 矢吹万寿, 1977 : 温室制御の必要換気量, 施設園芸環境制御基準資料, 農業気象, **33** (特別号), 45.

Summary

The primary need for ventilation of greenhouses is to prevent excessive rise of temperature in sunny days, and the other needs are to replenish the carbon dioxide and to lower an excessive level of humidity. In the design stage of a greenhouse equipped with natural ventilation, it is very useful if the natural ventilation rate can be calculated theoretically as a function of (i) greenhouse structures, (ii) arrangements of ventilators or other openings and (iii) wind speed and wind direction.

It is possible to estimate the ventilation rate from the pressure differences across openings and the resistances to air flow through openings. Pressure and discharge coefficients of openings for a single-span greenhouse with continuous side and ridge ventilators, and entrance/exit at gable end were determined experimentally. A one-fifteenth model was installed in a boundary layer wind tunnel for the experiments. The wind speed profile in the wind tunnel was adjusted to be the logarithmic profile with the roughness length of 0.067 mm, which is a representative value observed often in nature. Based on the measurements of internal pressures and mean air speeds through openings, pressure and discharge coefficients were determined from the equations (10), (14) and (15).

The results are presented in Fig. 6, Table 1 and Fig. 7. Some noticeable features are as follows:

(1) All pressure coefficients across openings were not equal to those over surfaces at the ventilators closed, so that the calculation of ventilation rate should be based on the values for the ventilators open.

(2) Pressure coefficients of side ventilator were dependent only on wind direction, not on angle of opening. The maximum value of 0.3 was observed at the wind angles of 0–30° and the minimum value of –0.4 at the wind angles of 150–180°. It was assumed that the wind angle is 0° when the wind blows perpendicular to the ridge line facing the ventilator open.

(3) When only one side of ridge ventilators was open, pressure coefficients of the ventilator showed similar patterns to those of side ventilator, although the absolute values of them on the windward side increased slightly with increasing angle of opening. The minimum value of –0.4 was obtained at the wind angle of 135°.

(4) When both ridge ventilators were open, pressure coefficients of the ventilators were negative at any wind angle and angle of opening, and dependent on both wind direction and angle of opening. The minimum value was –0.4 at the wind angle of 30° when the ventilators were positioned horizontally.

(5) Pressure coefficients of entrance/exit at gable end changed from –0.5 to 0.6 with the change of wind angle of 0 to 90° on the windward side, and on the leeward side they were –0.2 at the wind angles larger than 30°.

(6) Discharge coefficients of ventilators under windless condition were approximately 0.1, 0.4 and 0.6 at the angles of opening 10, 30 and 50°, respectively, and that of entrance/exit at gable end was 0.7. However, those values changed slightly with the differences in types and mounted positions of ventilators.

(7) Due to the influences of circumambient wind around the greenhouse, discharge coefficients changed with the change of wind direction and v/V (mean air speed through opening to wind speed ratio). They reached the same values as those under windless condition with the increase of v/V .

(8) Discharge coefficients of side ventilator and entrance/exit at gable end were independent

of wind direction and v/V .

(9) When only one side of ridge ventilators was open, discharge coefficients of the ventilator were dependent both on wind direction and v/V at the angles of opening larger than 30° .

(10) When both ridge ventilators were open, discharge coefficients of the ventilators were notably dependent on wind direction and v/V , and the maximum values were observed at the wind angle of 90° .

It is clear but should be pointed out that the results for a single-span greenhouse cannot be extended to the other type of greenhouse without any experimental verification.