

園芸用パイプハウスの強風被害とその低減対策*

東北大学 植松 康・田中賢嗣

大和ハウス工業㈱ 中原浩一

農村工学研究所 森山英樹・佐瀬勘紀

1. パイプハウスの強風被害

農林水産省の農林水産統計情報総合データベース¹⁾によれば、植物の生産施設としての温室は、被覆材の種類によって、ガラス室とプラスチックハウスに大別される。実際の設置面積をみると、約95%がプラスチックハウスである。プラスチックハウスの中でも、パイプハウスの占める割合が高く、設置面積では温室全体の約80%を占める。温室では、一般に光合成に必要な光透過量を確保するために骨組部材寸法と部材数が最小限に抑えられる。一方、強風中に人間が滞在することは殆どないことより通常の建物と同じ安全性を確保する必要はなく、建設コストの観点からも、通常の建築物より細い部材や軽微な基礎が利用される。さらに開けた場所に建設されることが多いため、より強い風に曝される。従って、一般の建築物に比べて耐風性に乏しく台風等の強風で被災することが多い。

パイプハウスの強風被害状況を分類すると、被覆材(フィルム)の剥離・飛散(図 1(a))、アーチパイプ接合部のはずれ(図 1(b))、アーチパイプの座屈(図 1(c))、および、基礎の浮き上がり(図 1(d))に大別される。このような被害の発生要因としては、先ず、園芸施設には建築基準法が適用されず、設計者や使用者の耐風設計に対する認識も低いことが挙げられる。強風被害を低減するためには構造強度を上げる必要があるが、コスト高を招くため敬遠されがちである。できるだけコストを上げずに耐風性を高める工夫が求められる。また、耐風性能を評価するための設計指針やマニュアルが整備されていないことも被害発生の大きな要因である。園芸施設の設計は日本施設園芸協会「園芸用施設安全構造基準」²⁾に基づいて為されることが多いが、この基準には我が国で一般的なパイプハウス形状の風力係数は与えられておらず、正しい風荷重評価ができない。従って、我が国で一般的に普及しているパイプハウス形状に対して、風力の動的荷重効果を適切に考慮した設計用風荷重の整備が急務の課題である。

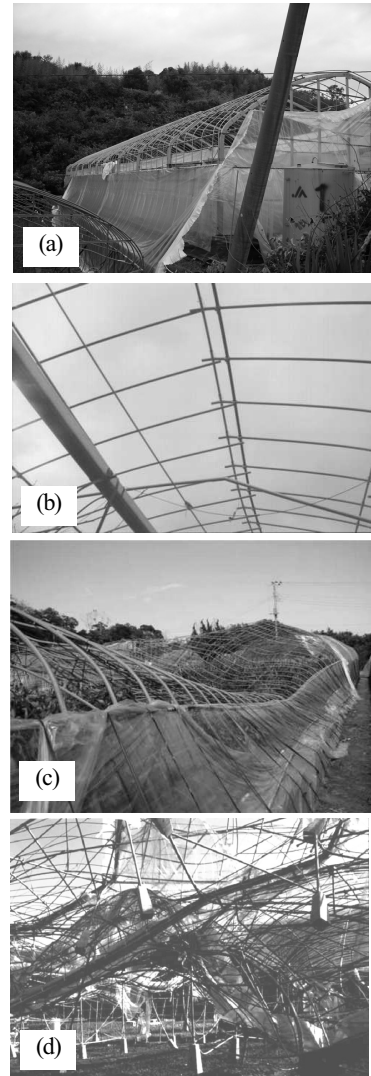


図1 パイプハウスの強風被害例

*Wind-induced damage to pipe-framed greenhouses and its mitigation by Yasushi Uematsu, Satoshi Tanaka, Koichi Nakahara, Hideki Moriyama and Sadanori Sase

2. パイプハウスの強風被害低減の試み

強風被害は、構造物の耐力と構造物に作用する荷重との大小関係で決まる。従って、被害を低減するための基本的な考え方は、構造強度を上げるか、あるいは風荷重を低減させるかのいずれかである。構造強度を上げるには、①部材寸法の増大、②部材接合部強度の増大、③基礎の補強、④方杖や斜材の設置などが有効である。しかし、これらはいずれもコスト高を招いてしまう。一方、構造物に作用する風荷重の特徴は、その大きさや分布が構造物の形状に大きく依存することであり、この性質を逆に利用すれば、ハウスの断面形状やディテールを工夫することで風力低減を期待できる。例えば、Uematsu et al.³⁾は断面形状を「翼型」にすることで抗力係数が大幅に低減することを示した。Richardson et al.⁴⁾によれば、切妻屋根の軒先形状を変化させるだけでもある程度の風力低減効果が期待される。側壁面に適当な開口を設けることでも同様の効果が得られると期待される。

2004年台風18号は、札幌管区気象台で最大瞬間風速50.2m/sを記録し、北海道に大きな強風被害をもたらした⁵⁾。図2(a)は、そのような強風下でも無被害であった北海道大学農場のパイプハウス(スパン約6.5m、長さ約40m、パイプフレーム間隔約0.5m)である。強風は南西の風と推定され、このパイプハウスの風上(南西方向)約120mには北海道大学のシンボルともいえるポプラ並木があり、図2(b)のように多くが倒れた(全体で約50本のうち約30本が倒木)。また、風下(北東方向)約40mにはボイラー棟があり、図2(c)に示すように屋根葺き材と野地板がほとんど全て剥離・飛散した。しかし、それらの中間に建っていた図2(a)のパイプハウスは全くの無被害であった。そこで筆者らが調査したところ、両側壁面のフィルムが40~45cmほど全長にわたって巻き上げられていた。すなわち、側壁面に開口があったため、ハウスまわりの流れのパターンが変化し、いわゆる「等圧効果」によって風力が低下して被害を免れたものと推測される。本研究ではこの点に着目し、ハウスの全体形状を変えることはせず、側壁面の開口を調整することで、どの程度の荷重低減効果が得られるかを風洞実験に基づいて検討する。

側壁面に完全な開口(開口率100%)を設けると、ハウス内部に強風が吹き込んで、中の植物に損傷を与えることが懸念される。フェンスの防風効果を検討した既往の研究(例えば、Raine and Stevenson⁶⁾)によれば、開口率40%程度の場合に最も風速低減効果が大きい。そこで、本研究においては側壁面の開口部にネット等適当な開口率をもつ部材を設置することを想定し(ここでは、具体的な材料や取り付け方法は検討外とする)、風上および風下側の側壁面の開口率を種々変化させ、それによる風荷重低減効果を検討する。なお、ここで対象としているパイプハウスは比較的小規模なものであるから、その応答は準静的であると仮定する。設計上最もクリティカルな荷重効果として、フレームの風上側柱脚部(柱脚は固定と仮定する)の曲げモーメントに着目し⁷⁾、LRC法(Kasperski⁸⁾)に基づき荷重評価を行う。すなわち、柱脚部の最大ピーク曲げモーメントに対応する等価静的風力係数分布を求める。また、それを用いて応力解析を行う。



(a)無被害であったパイプハウス



(b)ポプラ並木の倒木



(c)ボイラー棟の屋根被害

図2 2004年台風18号の強風による北海道大学構内の被害と無被害

3. 風洞実験

実験は、(独)農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所(以下、「農工研」)の大型風洞で行った。実験気流は、日本建築学会・建築物荷重指針が定める地表面粗度区分Ⅱに相当する境界層乱流である。平均風速のプロファイルを表すべき指数は $\alpha=0.15$ 、高さ $z=100\text{mm}$ における乱れの強さは $I_{100}=0.19$ 、乱れのスケールは $L_x=0.23\text{m}$ である。風洞実験模型を図3に示す。これは、プロトタイプとしてスパン7.2m、棟高さ3.9m、長さ21.6m、屋根勾配 30° のパイプハウスを想定し、幾何学的縮尺率1/40で作製したものである。図2(a)に示すように、我が国で普及しているパイプハウスでは、側壁はやや傾斜し屋根面にも若干の曲率がある。風洞実験模型はそれを単純化したものである。側壁は垂直、肩部は曲率を有しているが屋根自体はまっすぐである。両側壁面の床面から22.5mm(フルスケールでは90cm)までの高さは開口となっており、図4に示すように、外側から厚さ0.3mmの多孔板を貼り付けることで、風上側および風下側の開口率(ϕ_w および ϕ_l)を9通りに変化させた(表1)。図3に示す3ライン(E, C, G)上に、それぞれ表裏12個ずつ圧力測定孔が設けられており、気流中でそれらに作用する風圧を全点同時計測した。ただし、閉鎖型($\phi_w=\phi_l=0$)の場合、圧力測定孔は表面のみであり、各ラインに沿って14点である。風向 θ は図3に示すように定義し、 $-90^\circ\sim+90^\circ$ の範囲を 15° ピッチで変化させた。なお、ラインGについては、 $\theta < 0^\circ$ の場合の方が $\theta > 0^\circ$ の場合より風力が大きくなるので、以下においては θ の符号を入れ替えて表示する。

風圧の時刻歴データに対してLRC法⁸⁾を適用し、風圧の時間的・空間的変動を考慮した風荷重評価を行った。その際、設計上最もクリティカルな荷重効果として、フレーム風上柱脚部の曲げモーメントに着目した。また、開口がハウス内部の風速に及ぼす影響を検討するため、図3に示す4点(#1~4)における平均風速をサーミスタ風速計を用いて測定した。測定高さは12.5mmである。

表1 側壁の開口率

ケース	ϕ_w	ϕ_l
1	0	0
2	30	30
3	50	30
4	50	50
5	50	70
6	50	100
7	70	50
8	70	70
9	100	100

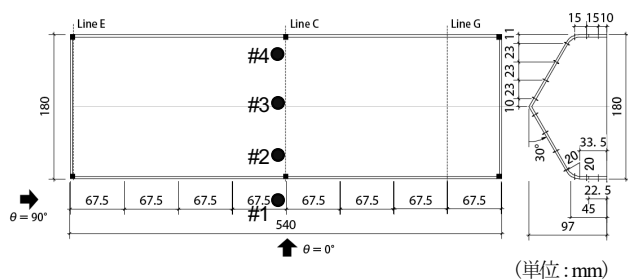


図3 風洞実験模型と記号の定義 (● 風速計センサー)

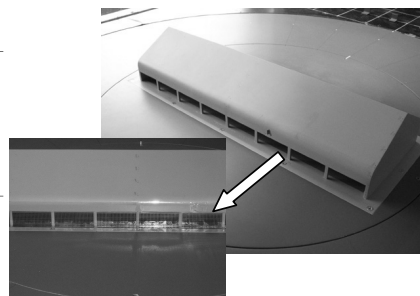


図4 風洞実験模型と開口部の詳細

模型頂部高さ H での実験風速は $U_H \approx 6.7\text{m/s}$ である。従って、風速および時間の縮尺率は、それぞれ $\lambda_V \approx 1/4.5$ 、 $\lambda_T \approx 1/8.9$ となる。各圧力測定孔に作用する風圧は、周波数200Hzで同時サンプリングされ、コンピュータのメモリに収録される。計測時間は5分であり、これより実風に換算して10分間相当の時刻歴データを4組得る。風圧や荷重効果の統計量は全て10分間の値とし、4個のデータのアンサンブル平均で評価する。各圧力測定孔で測定された風圧 $p(t)$ は、頂部高さ H での接近流の速度圧 q_H で基準化し、風圧係数 $C_p(t)$ で表す。風力係数 $C_f(t)$ は、同一点における外圧係数 $C_{pe}(t)$ と内圧係数 $C_{pi}(t)$ の差として、 $C_f(t) = C_{pe}(t) - C_{pi}(t)$ で与えられる。風力係数の符号は、外側から内側へ向う方向を正と定義する。

4. 実験結果と考察

4.1 外圧係数および内圧係数分布

各ライン上の平均外圧係数 C_{pe_mean} の分布を図5に示す。図の横軸 s は、風上側柱脚を原点とし屋根面に沿った座標であり、全長 S_{max} で基準化されている。ここでの風向 θ は後で示すように最大荷重効果をもたらす風向である。図より、いずれのラインにおいても、側壁面開口の影響は、風上屋根面の風圧分布に対しては小さいが、風下屋根面には比較的大きな影響を及ぼす。開口率が大きくなるほど風下屋根の負圧が小さくなる傾向が読み取れる。これは、開口を設けることで風上屋根に沿って流れる空気の流れが減少し(すなわち、風速が低下し)、頂部での流れの剥離が弱まったためと考えられる。

平均内圧係数 C_{pi_mean} に関する結果を図6に示す。内圧係数は開口位置における外圧と開口の大きさに依存するため、風上および風下壁面の開口率の組み合わせによって複雑に変化する。例えば、風上側の開口率 ϕ_w と風下側の開口率 ϕ_l が等しい場合、開口率の増大に伴い C_{pi_mean} は負側にシフトする。また、 $\phi_w < \phi_l$ の場合、 $\phi_w = \phi_l$ の場合より C_{pi_mean} は負側にシフトする。これは、風上面の正圧より風下面の負圧の方が大きいからである。 C_{pi_mean} の空間的変化は小さく、開口率が0.5以下の場合には全面にわたってほぼ一定である。しかし、開口率が0.7以上になると、 C_{pi_mean} は風下に向かってやや大きくなる(負圧の場合、絶対値が小さくなる)。

4.2 等価静的風力係数分布と動的荷重効果

LRC法を用いて荷重評価を行う場合、ハウスの骨組(アーチパイプ)の寸法を仮定する必要がある。本解析では、パイプ外径 $d = 35\text{mm}$ 、パイプ肉厚 $t = 1.6\text{mm}$ 、フレーム間隔 $l = 50\text{cm}$ と仮定する。また、各風圧孔に作用する風圧(あるいは風力)と荷重効果の関係を表す影響係数が必要になるが、本解析では有限要素法を用いて計算する。さらに、解析における風荷重は、速度圧 q_H に圧力測定孔位置での風力係数 C_f と荷重負担面積を乗じたものを集中荷重として法線方向作用させる。ここで、速度圧は $q_H = 595\text{N/m}^2$ (設計風速 $U_H \approx 32\text{m/s}$ 相当) と仮定する。

LRC法により求められた等価静的風力係数 C_{f_eq} の分布を図7に示す。ケース0(閉鎖型)については、内圧は0とおき外圧のみ考慮している。上述のように、側壁面に開口があると、開口率に応じて平均内圧係数が変化する。一方、内圧の変動は比較的小さいため、各ケースの C_{f_eq} 分布はケース0の分布を全体的にシフトさせたような形状となっている。 $\phi_w = \phi_l$ の場合、開口率が大きい

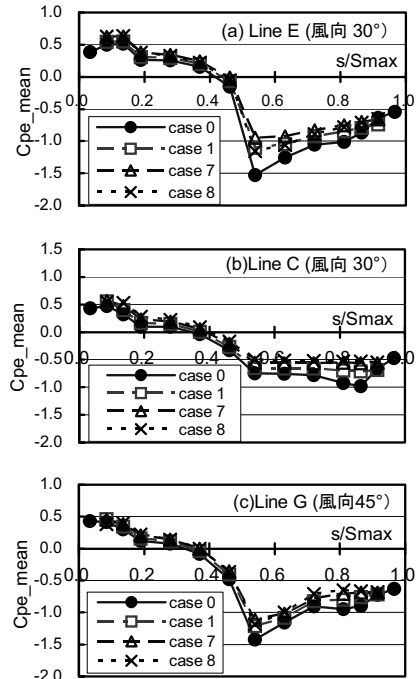


図5 平均外圧係数分布

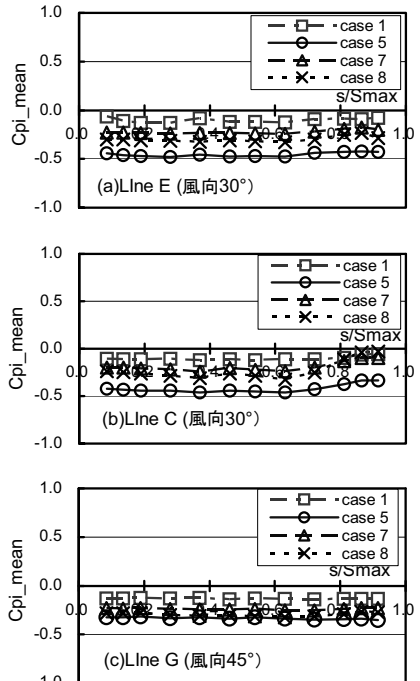


図6 平均内圧係数分布

ほど、より正側にシフトする傾向が読み取れる。

各ライン上の $C_{f,eq}$ 分布を用い、ライン上にパイプフレームがあると仮定して曲げモーメント M の分布を計算した(以下、フレーム名をライン名で表す)。各フレームに対し、風上柱脚部の無次元曲げモーメント $M^* (=M(q_{ref}SH))$ の風向 θ による変化を図 8~10 に示す。植松ら(2008)が検討した閉鎖型(ケース 0)と同様、 M^* は $\theta = 30 \sim 45^\circ$ で最大となる。中央部ではそれほど顕著ではないが、端部に近いフレームほどその傾向が強い。最も大きい M^* はフレーム G に生じる。側壁面開口による M^* の低減効果はこのフレームで最も大きく、 $\phi_w = \phi_e \approx 0.5$ の場合、低減率は約 20% である。ただし、開口率 0.3~0.7 の範囲では、開口率の影響は小さい。

4.3 ハウス内風速

$\phi_w = \phi_e$ であるケース 1 および 3 について、風速分布に関する実験結果を図 11 に示す。ここに、縦軸の風速比 (R) は図 2 に示した測定点 1~4 における平均風速 $V_i (i = 1 \sim 4)$ を同一高さにおける接近流の平均風速 V_0 で除した比である。 R の値は、測定点 1(ハウス外側)では風向によって大きく変化するが、ハウス内の測定点 2~4 では変化は比較的小さく、風下に向かって小さくなる傾向を示す。当然のことであるが、開口率が增大すれば、 R も大きくなる。

いま、フレームの構造設計上重要となる $\theta = 30 \sim 45^\circ$ に着目すると、 $\phi_w = \phi_e = 0.3$ の場合 $R \approx 0.4 \sim 0.2$ である。 $\phi_w = \phi_e = 0.5$ では $R \approx 0.5 \sim 0.3$ 、 $\phi_w = \phi_e = 0.7$ では $R \approx 0.8 \sim 0.5$ である。

5. 結論

我が国で広く普及している断面形状を有するパイプハウスを対象として、側壁面に意図的に開口を設けた場合の風荷重低減効果を縮尺 1/40 の模型を用いた風洞実験により検討した。閉鎖型の場合と同様、風向 $\theta = 30 \sim 45^\circ$ のとき、妻面からいくらか内側に入ったフレーム(本検討ではフレーム G)に最大荷重効果が生じる。風上および風下側壁面の開口率(ϕ_w および ϕ_e)が 0.5 程度のとき荷重低減効果が最大となることが示された。実際のハウスの場合、風の吹く方向が定まっている訳ではないので、 $\phi_w = \phi_e$ とするのがよいであろう。開口率 $\phi = 0.3 \sim 0.7$ の範囲では、荷重低減効果の ϕ による変化は小さい。一方、ハウス内の風速は ϕ の低下とともに低減するので、骨組の荷重低減とハウス内の風速低減を併せて考えれば、今回実験した範囲では $\phi \approx 0.3 \sim 0.5$ 程度が適当と考えられる。

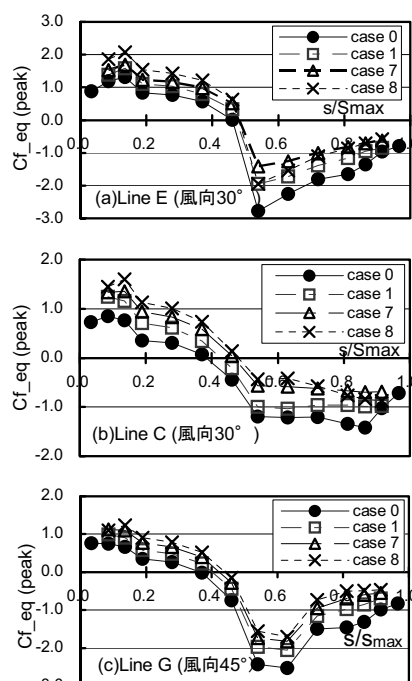


図 7 等価静的風力係数分布

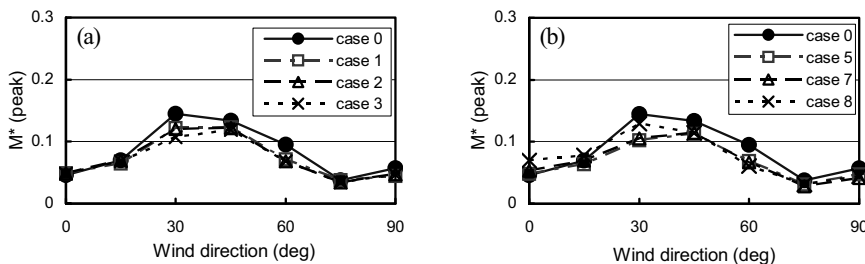


図 8 風上柱脚部の最大ピーク曲げモーメント (フレーム E)

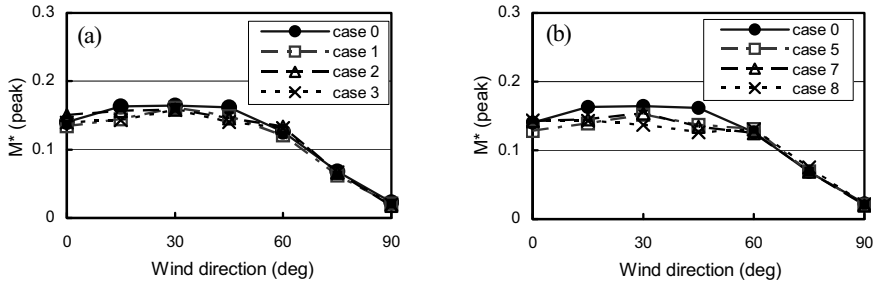


図9 風上柱脚部の最大ピーク曲げモーメント (フレームC)

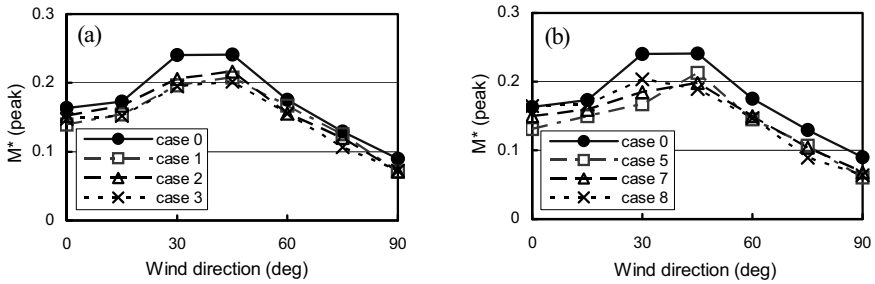
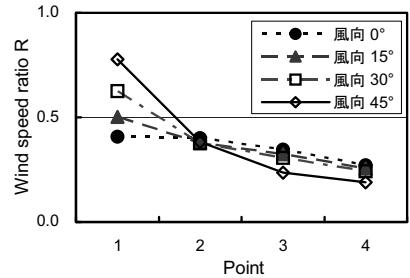


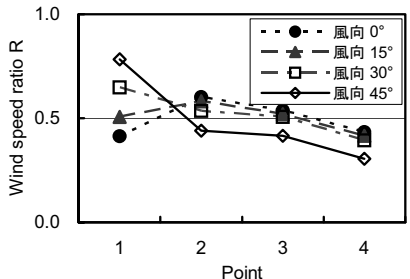
図10 風上柱脚部の最大ピーク曲げモーメント (フレームG)

参考文献

- 1) <http://www.tdb.maff.go.jp/toukei/toukei>
- 2) 日本施設園芸協会：園芸用施設安全構造基準(暫定基準)，1999.
- 3) Y. Uematsu, T. Orimo, S. Watanabe, S. Kitamura and M. Iwaya: Wind loads on a steel greenhouse with a wing-like cross section, Proc. 4th European and African Conference on Wind Engineering, Prague, Check Republic, 11 - 15 July, 2005.
- 4) G.M. Richardson, A.P. Robertson, R.P. Hoxey and D. Surry: Full-scale and model investigations of pressures on an industrial/agricultural building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 36, 1053-1062, 1990.
- 5) 植松 康, 桂 重樹, 桜井修次, 城 攻：2004 年台風 18 号 (SONGDA)による北海道の強風被害，東北地域災害科学研究, 41, 203-209, 2005.
- 6) J.K. Raine, D.C. Stevenson: Wind protection by model fences in a simulated atmosphere, Journal of Industrial Aerodynamics, 2(2), 159-180, 1977.
- 7) 植松 康, 中原浩一, 森山英樹, 佐瀬勲紀：園芸用パイプハウスの構造骨組用風荷重に関する研究—閉鎖型構造の外圧係数について—, 農業施設, 39(2), 35-46, 2008.
- 8) M. Kasperski: Extreme wind load distributions for linear and non-linear design, Engineering Structures, 14(1), 27-34, 1992.



(a) Case 1 ($\phi_V = \phi_L = 0.3$)



(b) Case 3 ($\phi_V = \phi_L = 0.5$)

図11 風速比分布