

単層換気ダブルスキンファサードに作用する風力について

河井宏允

要 旨

ダブルスキンファサードに作用する風荷重を風洞実験によって調べた。実験対象ダブルスキンは室内側のスキンに開閉可能な窓を持つ単層換気タイプである。室内側の窓が全閉の状態では、屋外側スキンのピーク風荷重はシングルスキンの約半分であった。1 面のみ窓を開けた場合には、窓を開けていない面の室内側スキンに作用するピーク風荷重は、速度圧の 60% 程度増加した。隣り合う 2 面の窓を開けた場合には、屋外側スキンでも、ピーク風荷重はシングルスキンの場合より大きくなる。圧力平衡理論によりダブルスキンに作用する風圧を計算した結果、平均風圧は実験と理論で極めて良く一致し、ピーク風圧については理論の若干の修正が必要であることが分かった。

キーワード：ダブルスキン，単層換気，風荷重，室内圧，開閉窓

1. はじめに

近年、快適性への関心の環境への配慮の高まりや、窓枠を用いないガラスの支持方法の普及に伴って、外壁全体をガラスで覆う建物が増えつつある。特にヨーロッパでは、屋内環境の快適性とエネルギー節約の視点から、ファサードにダブルスキンを使用し、空気を室内外に換気にさせることにより、屋内環境を快適に保つ建物が数多く出現している。ダブルスキンに作用する風圧に関する研究として、既存建物の外装改修に伴って使用されるようになった 2 重壁構法の風圧評価に関して風洞実験及び実物測定(Chino et al.1993,1997)が行われおり、目地の開放によって外装材間の圧力を屋外側の外装材に作用する圧力に均衡させることで、屋外側の外装材の風圧が低減できることが明らかとなっている。また、養生シートや防音パネルに作用する風力の評価についても、それらの外側と内側の圧力の差として風力が評価されている。しかし、本研究が対象とした換気を目的としたダブルスキンに作用する風力を評価した研究は少なく、換気の為の開口部の影響などについては明らかにはなっていない。特に、室内側の窓の開閉はダブルスキンに作用する風力に大きな影響を与えると予想されるにもかかわらず、その風荷重評価のための資料は十分には整っておらず、耐風

設計にはシングルスキンに関する従来の風洞実験結果を流用しているのが現状であろうと思われる。

ダブルスキンは、Fig.1 に示したように、各階あるいは窓ごとに区切る単層換気タイプ(Story-high Type)と、壁面全体を区切らずに換気する全層換気タイプ(Building-high Type)の 2 つに大きく分類できる。単層換気タイプのダブルスキンには空気の吸気及び排気の方法によって様々なものが考案されている。Fig.1 及び Photo1 に示したものは、窓の下側から吸気し上側から排気するタイプのものである。単層喚起タイプでは、比較的小区画で換気するため、ダブルスキン間のキャビティ内の圧力は、換気孔における圧力とほぼ等しく、屋外側のスキンに作用する外圧がキャビティ内の圧力とほぼ釣り合う。その結果、屋外側スキンには作用する風圧は小さく、室内側のスキンにのみ大きな風圧が作用する。一方、全層換気タイプのダブルスキンは、キャビティ内の圧力は、換気のための開口部の位置(通常は建物頂部あるいは側端部)によって大きく左右され、屋外側スキンに作用する外圧とは釣り合わず、室内側スキンと同様に屋外側スキンにも大きな風圧が作用する。

なお、ダブルスキンの中には、その特性を生かして、屋内側の窓を開け外気を屋内に取り入れるようになっているタイプもある。このようなタイプのダブルスキ

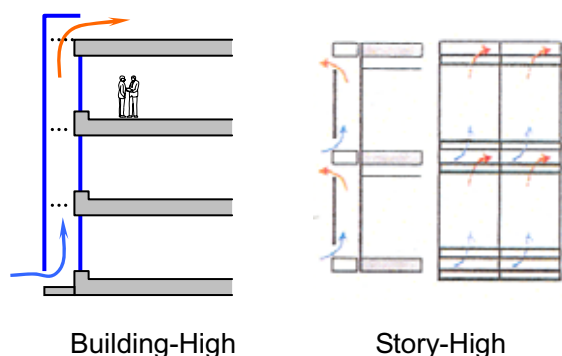


Fig.1 Double skin glazing system

ンの場合、屋内側の窓を開けることによって室内圧が変化し、ダブルスキンに作用する風力が大きく変化する。

本研究は、単層換気タイプのダブルスキンファサードについて行った風洞実験結果により、シングルスキンと比べてこの種のダブルスキンにどの程度の風力が作用するかを検討したものである。特に、屋内側の窓を開けた場合の室内圧の上昇あるいは低下に伴って、ダブルスキンにどのような変化が生じるかを詳細に検討し、圧力平衡に基づく理論(Holmes(1979), Lin et al.(1981), Harris(1990))と比較検討した。窓を開けることによって、ピーク風圧はほぼ開けた窓の平均風圧分だけ上昇あるいは低下することが明らかとなった。

2. 実験概要

実験は京都大学防災研究所の境界層風洞（測定部断面 2.5m×2m，測定部長 21m）を用いて行った。実験の対象とした建物は、都市内に建設される 76m×28m の矩形平面を持つ高さ 108m の事務所建築である。実験には実物の約 1/200 の直方体模型（380mm ×140mm × 540mm : W×D×H）を使用した。実物では、ダブルスキンは 1.8m×4.25m の区画（窓）に区切られ、窓の上下に換気のための開口があるが、模型製作上の問題から、Fig.2 に示したように、模型では 4 つの窓に相当する 20mm×45mm ごとにダブルスキンを区切り、上下に換気のための開口を設けた。また、室内側スキンには、実物の窓を模擬するために、3mm×25mm の開口を設けた。この開口は実験状況に応じて、テープで塞ぎ実験を行った。屋外側スキンと屋内側スキン間の距離は 3mm（実物換算 60cm）である。

風圧測定点は Fig.2 に示したように、広い面（以下 A 面と呼ぶ）の屋外側および室内側スキンに各 7 7 点、狭い面（以下 B 面と呼ぶ）の屋外側および室内側スキンに各 40 点、および模型の内部に 10 点の計 234 点設



Photo 1 Storey high double skin glazing facade

置した。風圧はスキンにあげた直径 1mm の穴から内径 1.6m，長さ 1m のビニールチューブで圧力センサー（DUXL-05D：技術開発総合研究所製）に導入して測定した。模型内部の圧力を正確に計測するため、模型からビニールチューブを外側へ導く際にパuffaを設け、パuffa内をシリコンで封入した。

模型は、風洞吹き出し口から 16.5m の位置に設置した。風洞内に境界層を発達させるため、測定部入り口に高さ 40cm の鋸型バリアーを設置し、その後ろに 6cm ×6cm のブロックを 50cm 間隔で千鳥状に敷設した (Photo 1)。この状況での平均風速分布のべき指数は 0.24、建物頂部の乱れの強さは 10.8%であった (Fig.3)。実験時の風速は、模型頂部で実風速の 1/4 である風速 10m/s に設定した。

実験は、屋内側の窓の開閉状況を様々に変化させた 2 3 ケースについて行った。また、風力係数の比較のため、ダブルスキン模型と同じサイズのシングルスキンモデルによる実験も行った。実験では、各ケースについて、風向を 0 度（A 面に風が直角に当たる場合）～360 度まで 5 度おき（半時計周りを正、一部 10 度おき）に変化させた。また、各風向について、サンプリング間隔 500Hz（実物換算 0.1sec）、記録時間 12 秒（実物換算 10 分）の計測を 5 回行った。実験結果は、模型頂部での平均風速に基づいた速度圧を基準としてまとめた。本論文で示した全ての風圧係数は 5 回の測定のアンサンブル平均であり、ピーク風圧係数の平均化時間は 0.01sec（実時間換算で 0.5 秒）である。

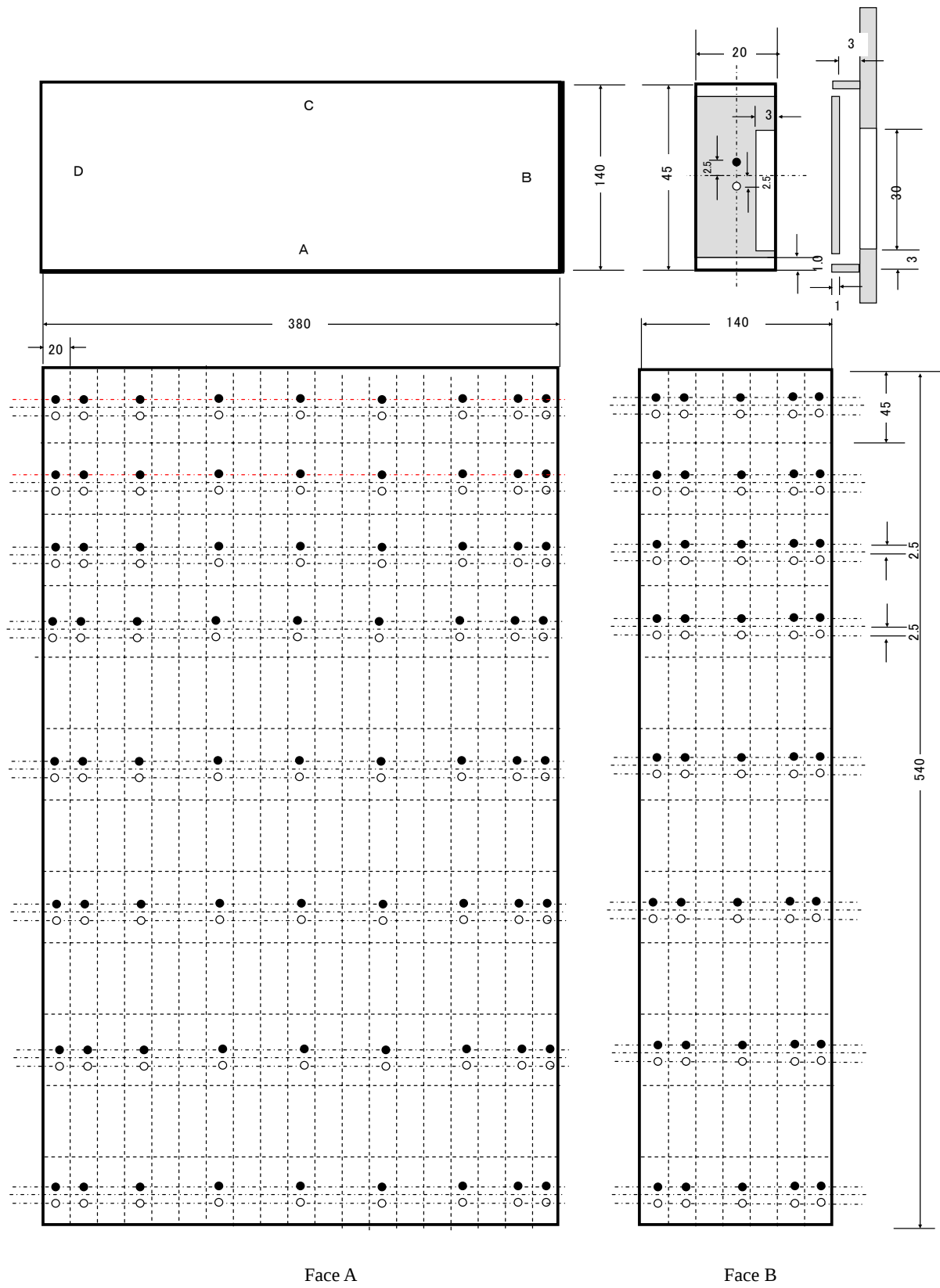


Fig. 2 Model and pressure holes

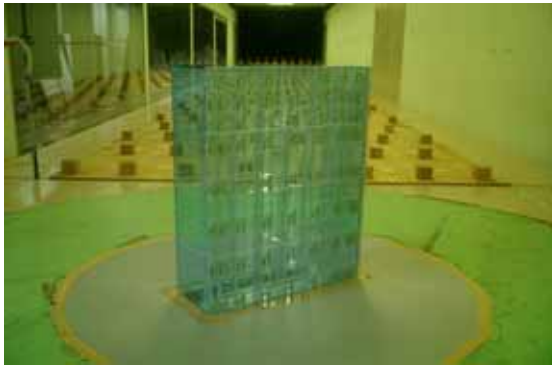


Photo 2 Model of building with double skin facades in the wind tunnel

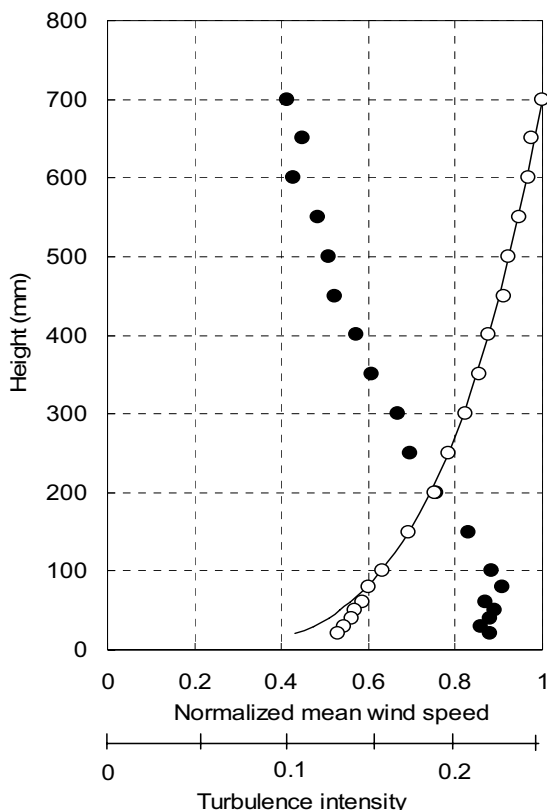


Fig.3 Profiles of mean wind speed and longitudinal turbulence intensity

3. 実験結果

3.1 屋内側スキンの窓を開けない場合

Fig.4 は、屋内側スキンの窓を全て閉めた場合の、A面の中央点の屋外側スキンおよび屋内側スキンの平均風圧係数の風向による変化を示したものである。ダブルスキン間のキャビティ内の平均圧力は屋外側圧力と釣り合うために全ての風向で0に近く、屋外側スキンには平均的にはほとんど風力が作用しない。一方、屋内側スキンにはシングルスキンに作用する平均風圧と

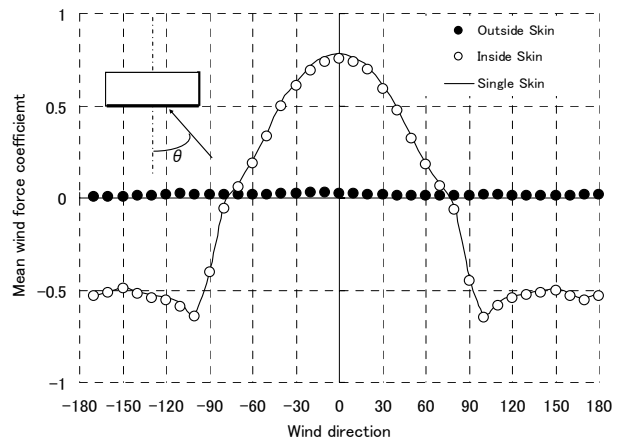


Fig.4 Mean wind force coefficients on the inside and the outside skins at the center point of the face A, No open window is in the inside skin. A solid line shows a mean wind force coefficient on a single skin.

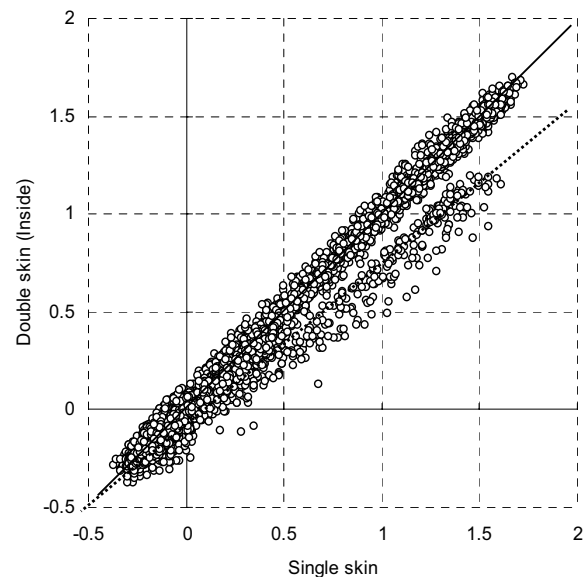


Fig.5 Comparison between the maximum peak wind force coefficients on the inside skin and the maximum peak pressure coefficients on the single skin. No open window is in the inside skin.

同じ風圧が作用する。

キャビティ内の風圧は屋外側の風圧にほぼ追従して変動し、屋内側の最大・最小ピーク風圧はシングルスキンとほぼ等しくなる。Fig.5 は、計測した全ての風向について、屋内側のA面の全測定点の最大ピーク風圧係数をシングルスキンと比較したものである。最大ピーク風圧係数の場合、シングルスキンとほぼ等しくなる場合と、シングルスキンよりやや小さくなる場合の二つのケースに分かれる。シングルスキンよりも小さくなるのは、最上部の測定点である。この位置では風圧勾配が大きく、窓の下部の吸気口と窓の上部の排気口で瞬間的に風圧が異なり、キャビティ内の最大ピーク

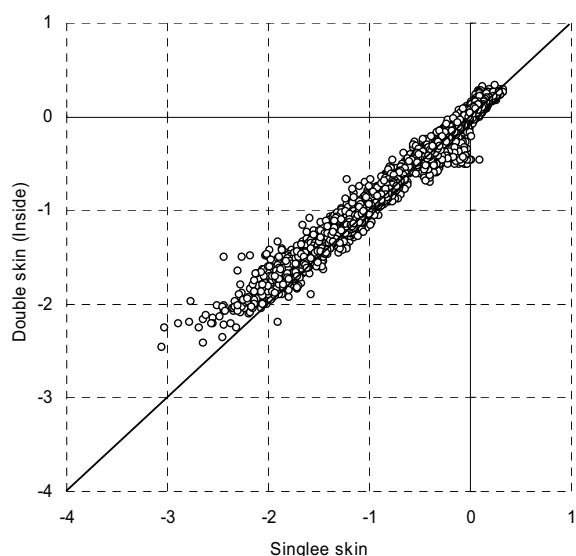


Fig.6 Comparison between the minimum peak wind force coefficients on the inside skin and the maximum peak pressure coefficients on the single skin. No open window is in the inside skin.

ク風圧は屋外側スキンの最大ピーク風圧よりも2割以上小さくなる。

Fig.6 は屋内側のA面の最小ピーク風圧係数をシングルスキンと比較したものである。シングルスキンの場合、 ± 90 度付近においてピーク風圧係数が -3 以下となる大きな負圧も観測されるが、屋内側スキンの最小ピーク風圧係数は -3 以下とはならず大きな負圧はかなり緩和される。なお、ピーク負圧はA面よりもB面の方が大きく、B面の最小ピーク風圧係数は、シングルスキンで -3.85 、ダブルスキンの屋内側スキンの -3.03 であった。

キャビティ内の圧力は屋外側スキンの外圧にほとんどの時間で釣り合っており、通常屋外側スキンの作用する風力はあまり大きくないが、時折キャビティ内の圧力変動が屋外側の外圧変動に追従せず風圧力に不釣り合いが生じ、屋外側スキンにはかなりの風力が作用する。Fig.7,8 は、A面の屋外側スキンの最大・最小ピーク風圧係数をシングルスキンの場合と比較したものである。正圧、負圧とも最大でシングルスキンに作用する風圧の半分程度の風力が作用し、その最大ピーク風力係数は 1.26 、最小ピーク風力係数は -1.59 となる。因みに、B面では、最大ピーク風力係数は 1.01 、最小ピーク風力係数は -1.96 であった。

なお、屋外側スキンの大きなピーク風力が生じる箇所は、A、B面とも、また正圧、負圧にかかわらず剥離した流れの再付着点近傍である。これは、再付着点近傍では圧力勾配が大きく、キャビティ内の圧力変動

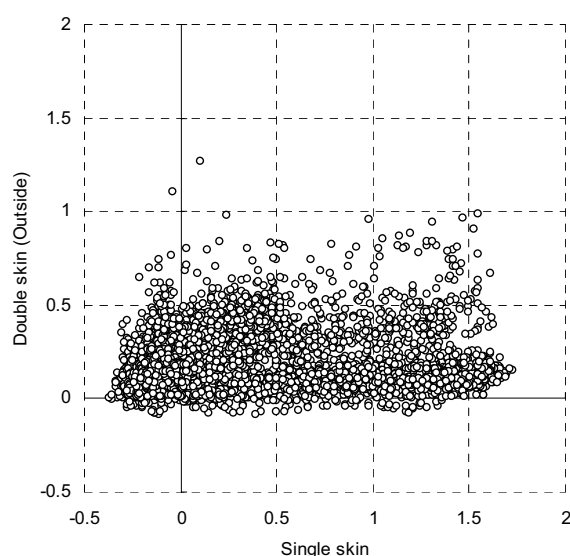


Fig.7 Comparison between the maximum peak wind force coefficients on the outside skin and the maximum peak pressure coefficients on the single skin. No open window is in the inside skin.

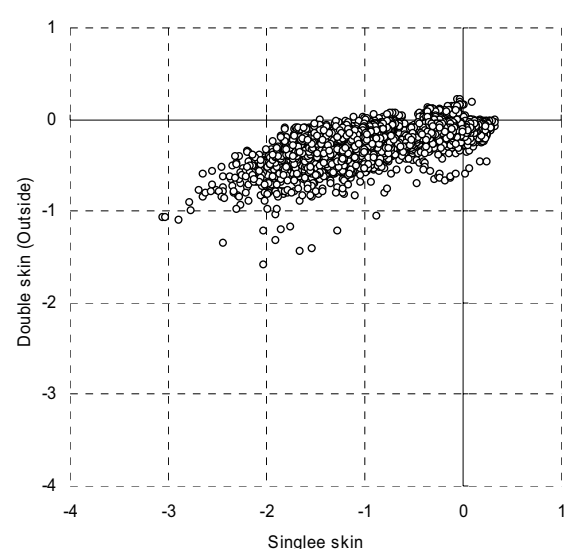


Fig.8 Comparison between the minimum peak wind force coefficients on the outside skin and the maximum peak pressure coefficients on the single skin. No open window is in the inside skin.

と外圧変動との釣り合いが崩れることが原因であると考えられる。

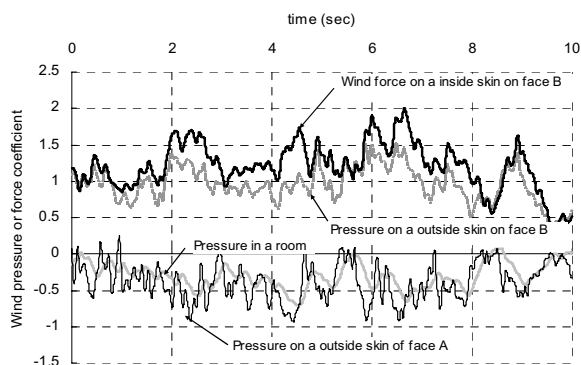


Fig.9 History of time series of the external pressure and the wind force on the inside and the outside skins when a window of the inside skin of the face A at 3/4 H is opened. Wind direction is 90 degree.

3.2 屋内側スキンの窓を1面のみ開けた場合

はじめに述べたように、ダブルスキンの利点の一つに、屋外側スキンが風雨を防ぐため、屋内側スキンの窓を開けても、何時でも快適に外気を取り入れられることがあげられる。しかし、強風の時に屋内側の窓を開けた場合、屋外側の圧力がそのまま室内に伝達され、室内圧が大きく変化し、部屋の区切りが比較的小さいオフィスビルなどでは、室内圧の変化に伴って、屋内側スキンに大きな風圧が作用する恐れがある。特に、窓を開けていない面においては、大きな室内圧によって、屋内側スキンに大きな風圧が作用する。

Fig.9,10は、頂部から高さの1/4下層におけるA面の中央の屋内側の窓を開けた場合に、B面の屋内側スキンに作用する風力の時刻歴を示したものである。Fig.9,10には、A、B面の屋外側スキンの外圧変動と、室内圧変動も合わせて示してある。風向が90度の場合、室内圧は負となり、B面の屋内側スキンに作用する風力は大きく上昇する。一方、風向が0度の場合、室内圧は正で、B面の屋内側スキンに作用する風力は大きく低下する。B面の屋内側に作用する風力変動は、若干の時間の遅れ（位相の遅れ）が認められるが、B面の屋外側の外圧変動にはほぼ追従して変動する。特に室内圧の変動がゆるやかなため、風圧の急激な上昇や低下は外圧変動にほぼ追従している。

Fig.11は、頂部から高さの1/4下層におけるA面の中央の屋内側の窓を開けた場合のB面の中央点の平均風力係数の風向による変化を示したものである。Fig.中、実線がシングルスキンの平均風力係数であり、白丸が屋内側スキンの平均風力係数、黒丸が屋外側スキンの平均風力係数である。点線は窓を開けた位置の平均風圧を室内圧として、(1)式より計算した平均風圧係数である。Fig.11より分かるように、平均風圧に関しては、

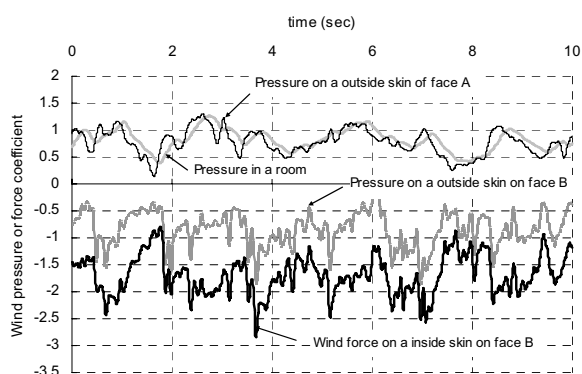


Fig.10 History of time series of the external pressure and the wind force on the inside and the outside skins of when a window of the inside skin of the face A at 3/4 H is opened. Wind direction is 0 degree.

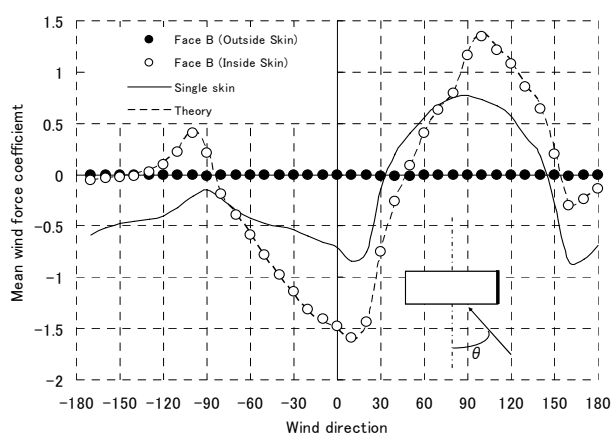


Fig.11 Mean wind force coefficients on an inside skin and an outside skin at the center point of the face B, when a window of the inside skin of the face A at 3/4 H is opened. A solid line shows a mean wind force coefficient on a single skin. The broken line shows Eq. (1).

当然のことながら(1)式によって、極めて良く表現できる。

$$\bar{C}_{f,in} = \bar{C}_{p,out} - \bar{C}_{p,open} \quad (1)$$

ここに、 $\bar{C}_{f,in}$ は屋内側スキンに作用する平均風力係数、 $\bar{C}_{p,out}$ は屋外側スキンの平均外圧係数、 $\bar{C}_{p,open}$ は窓を開けた位置の屋外側スキンの平均風圧係数である。

一方、ピーク風圧係数の場合には、このように簡単ではない。Fig.12は、頂部から高さの1/4下層におけるA面の中央の屋内側の窓を開けた場合の、B面の全測定点の屋内側スキンの最大ピーク風力係数（正のピーク風力係数）を、全風向に関してシングルスキンの場合と比較したものである。Fig.12に示されているように、散布図は3つのグループに分かれる。最初のグループは、B面の屋内側スキンのピーク風力がシングル

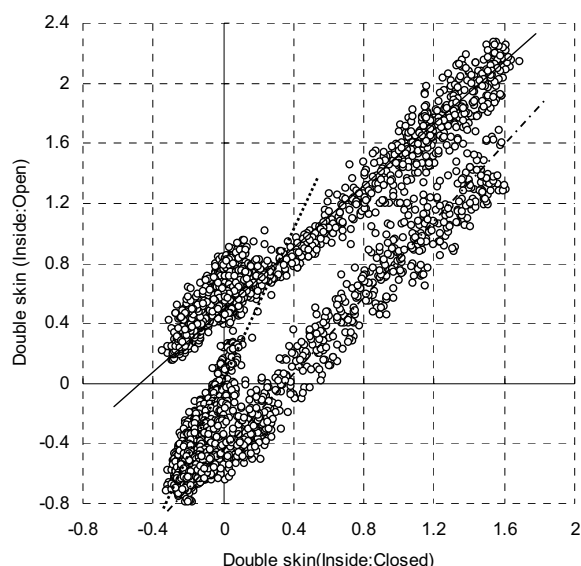


Fig.12 Comparison between the maximum peak wind force coefficients on the inside skin of the face B, when a window of the inside skin of the face A at 3/4 H is opened or closed.

スキンよりも大きくなるグループ、2番目がシングルスキンより小さくなるグループ、3番目かその橋渡しのグループである。B面の屋内側スキンのピーク風力がシングルスキンよりも大きくなる最初のグループは、風がB面に対して風上から吹く風向が75度から150度の場合、シングルスキンより小さくなる2番目のグループは風がA面に対して風上側から吹くグループである。風力が小さい、3番目のグループは風がB面の背面から吹く場合である。

Fig.13は、各測定点について、B面の屋内側のスキンのピーク風力係数の全風向における最大値をシングルスキンと比較したものである。Fig.13より、B面の屋内側のスキンのピーク風力係数は、B面の屋外側スキンのピーク外圧係数（シングルスキンのピーク外圧係数と等しい）を用いて以下の式で表現できる。

$$\dot{C}_{f,in} = \dot{C}_{p,out} + 0.6 (\pm 0.2) \quad (2)$$

ここに、 $\dot{C}_{f,in}$ はB面の屋内側スキンのピーク風力係数、 $\dot{C}_{p,out}$ はB面の屋外側スキンのピーク外圧係数である。上式より、A面の窓を開けることによって、B面の窓の位置によらず、B面の屋内側スキンのピーク風力係数は、シングルスキンに比べて高々0.6程度、最大でも0.8程度しか増加しない。窓を開けた位置におけるA面の屋外側スキンの負のピーク外圧係数の最小値は-1.5であるから、B面のピーク外圧係数とA面の最小ピーク外圧係数の差でB面の室内側スキンの風力係数を評価した場合にはかなり過大評価となる。

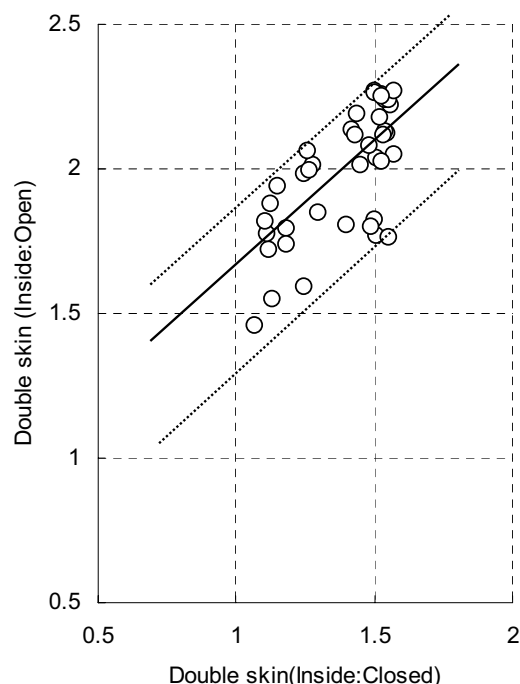


Fig.13 The maximum peak wind force coefficients on the inside skin of the face B, when a window of the face A is opened or closed.

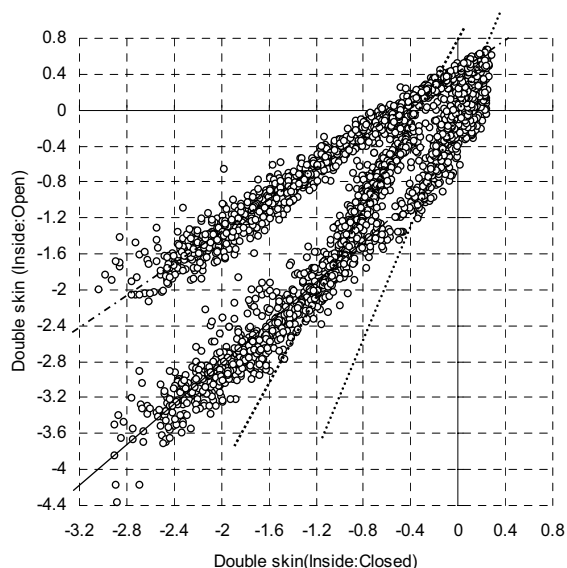


Fig.14 Comparison between the minimum peak wind force coefficients on the inside skin of the face B, when a window of the inside skin of the face A at 3/4 H is opened or closed.

Fig.14は、B面の屋内側スキンの最小ピーク風力係数をシングルスキンの場合と比較したものである。この場合、散布図は4つのグループに分かれる。最初のグループは、B面の屋内側スキンの負のピーク風力がシングルスキンよりも大きくなるグループ、2番目がシングルスキンより小さくなるグループ、3、4番目

はシングルスキンに作用する負のピーク風力が小さく、ダブルスキンに作用する負のピーク風力が大きい場合である。B面の屋内側スキンの負のピーク風力がシングルスキンよりも大きくなる最初のグループは、風がA面に対して風上から吹く風向が -30 度から 30 度の場合、シングルスキンより小さくなる2番目のグループは風がA面の風下側から吹く風向が -145 度から 145 度の場合、3, 4番目のグループは風がB面の風上側及び風下側から吹く場合である。

Fig.15 は、各測定点について、B面の屋内側のスキンの負のピーク風力係数の全風向における最小値をシングルスキンと比較したものである。Fig.15 より、B面の屋内側のスキンの負のピーク風力係数は、B面の屋外側スキンのピーク外圧係数（シングルスキンの負のピーク外圧係数と等しい）を用いて以下の式で表現できる。

$$\dot{C}_{f,in} = \dot{C}_{p,out} - 0.8 (\pm 0.3) \quad (3)$$

ここに、 $\dot{C}_{f,in}$ はB面の屋内側スキンの負のピーク風力係数、 $\dot{C}_{p,out}$ はB面の屋外側スキンの負のピーク外圧係数である。正のピーク風力の場合とは若干異なり、B面の屋内側スキンの最小ピーク風力係数は、シングルスキンの最小外圧係数に比べて -0.6 程度、最大で -1.2 程度減少する。窓を開けた位置におけるA面の屋外側スキンの最大ピーク外圧係数は 1.6 であるから、負のピーク風力の場合には、B面の最小ピーク外圧係数とA面の最大ピーク外圧係数の差でB面の室内側スキンの負のピーク風力を評価した場合でも、それほど過大評価とはならない。

3.3 隣り合う2面の屋内側スキンの窓を開けた場合

前節で述べたように、1面の窓のみを開けた場合には、窓を開けていない面においては、室内圧の増加によって屋内側スキンの作用する風圧は増大するが、A, B二面の窓を開けた場合には、室内圧はA, B面に作用する外圧の平均となり、A, B面の屋内側スキんに作用する風力は、シングルスキンに比べてあまり増加しない。しかし、この場合、1面のみ開けた場合に風力が極めて小さかった屋外側スキンにかなりの風力が作用する可能性がある。本節では、このような場合に、屋外側スキンにどの程度の風力が作用するかを検討する。

Fig.16,17 は、A, B面の中央の屋内側の窓を開けた場合に、A, B面の窓を開けた位置における屋外側スキんに作用する風力変動の風向 0 度の場合の時刻歴を、屋外、屋内側スキンの外圧変動及び室内圧変動の時刻

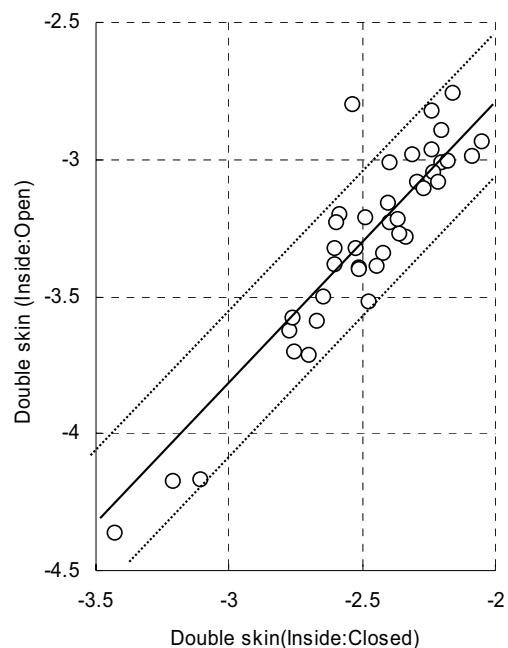


Fig.15 The minimum peak wind force coefficients on the inside skin of the face B, when a window of the face A is opened or closed.

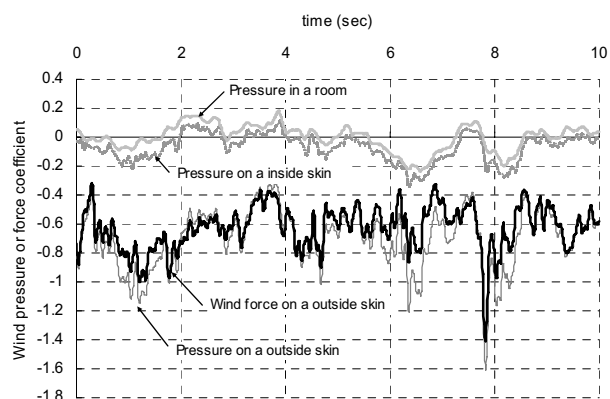


Fig.17 The external pressure and the wind force on the inside and the outside skins at the center of the face B when windows of the inside skin at the center of the face A and B are opened. Wind direction is 0 degree.

歴とともに示したものである。風向が 0 度の場合、A面の屋外側スキンには正の風力が作用し、その大きさはA面に作用する外圧の 6 割程度である。一方、B面の屋外側スキンには負の風力が作用し、その大きさはB面に作用する外圧とほぼ等しい。

Fig.18 は、A, B面の中央の屋内側の窓を開けた場合のB面の中央点の平均風力係数の風向による変化を示したものである。Fig.18 中、実線がシングルスキンの平均風力係数であり、白丸が屋内側スキンの平均風力係数、黒丸が屋外側スキンの平均風力係数である。

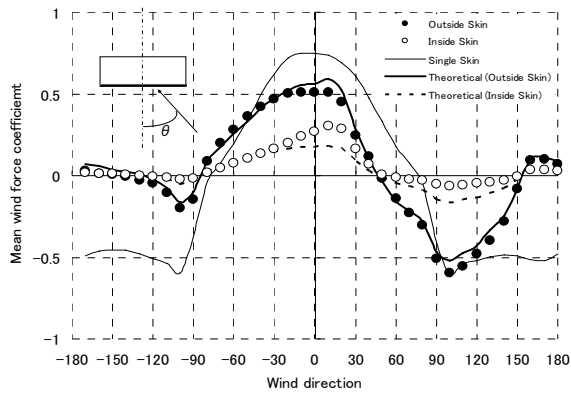


Fig.18 Mean wind force coefficients on an inside skin and an outside skin at the center point of the face A, when windows of the face A and B are opened. A thin solid line shows a mean wind force coefficient on a single skin. A thick solid line shows Eq. (5). The broken line shows Eq.(7).

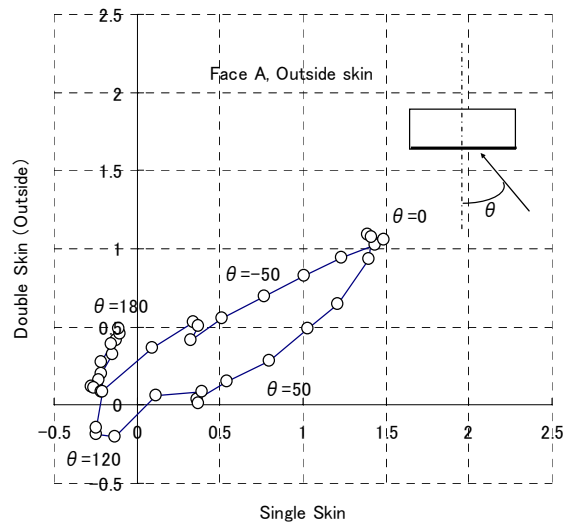


Fig.19 Comparison between the maximum peak pressure coefficient on the single skin and the maximum peak wind force coefficient on the outside skin of the face A at the center, when windows of the inside skins at the center of the face A and B are opened

平均風力の風向による変化の傾向は、屋外側スキンと屋内側スキンで違いは小さいが、大きさは屋外側スキンの方が屋内側スキンより2倍以上大きい。特に、風向が60度から120度、即ちB面の風上側から風が吹く場合には、A面の屋内側スキンにはほとんど平均風力は作用しない。シングルスキンとの比較では、風がA、B面の風上側から当たる場合には、ほぼ屋外側スキンと屋内側スキンでシングルスキンに作用する風力が分担される。一方、風がA、B面の風下側から当たる場合には、A面の屋外側、屋内側スキンともに作用

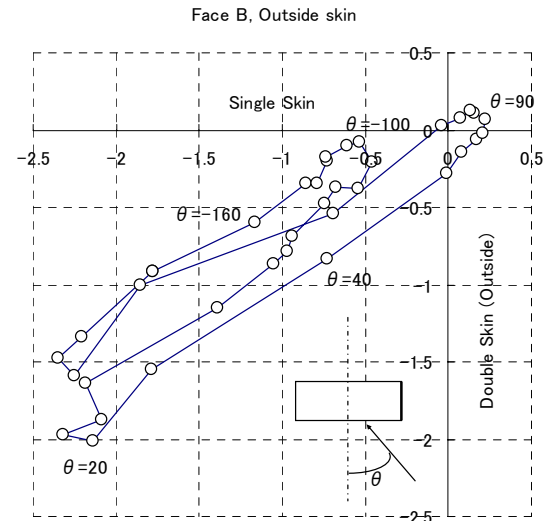


Fig.20 Comparison between the maximum peak pressure coefficient on the single skin and the maximum peak wind force coefficient on the outside skin of the face B at the center, when windows of the inside skins at the center of the face A and B are opened

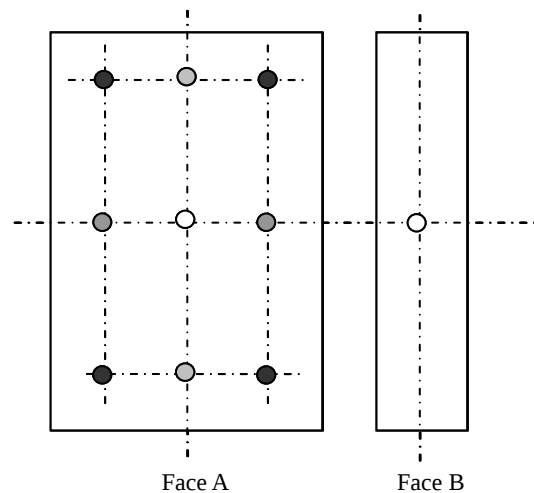


Fig.21 Position of open windows

する風力は小さい。

Fig.19 は、A面の屋外側スキンの最大ピーク風力係数をシングルスキンの最大ピーク外圧係数と比較したものである。A面の屋外側スキンに作用するピーク風力が最大となるのは風向0度の時で、前述した波形にも示されているように、その大きさはシングルスキンの6割程度である。

Fig.20 は、B面の屋外側スキンの最小ピーク風力係数をシングルスキンの最小ピーク外圧係数と比較したものである。B面の屋外側スキンに作用する負のピーク風力が最大となるのは、風がA面の風上側から吹く風向20度の時である。

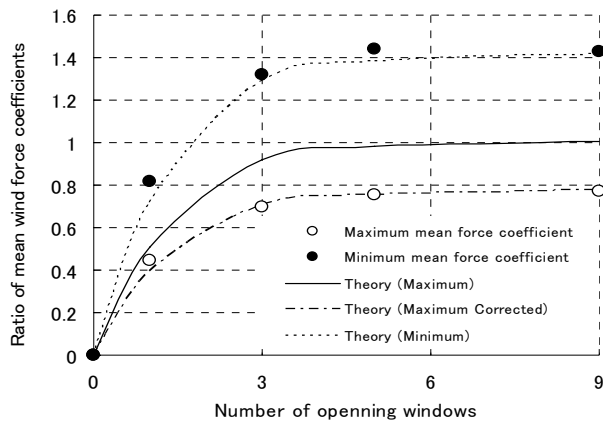


Fig.22 Minimum and maximum mean wind force coefficients on the outside skin at the center point of the face B for all wind directions, when several windows of the inside skin of the face A are opened. The solid and the broken lines show Eq.(9).

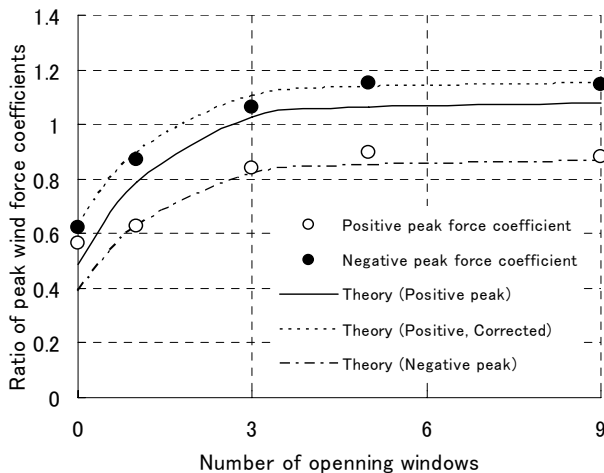


Fig.23 Maximum and minimum of peak wind force coefficients on the outside skin at the center point of the face B for all wind directions, when several windows of the inside skin of the face A are opened. The solid line shows Eq. (12). The broken line shows Eq.(13).

ある面の開口する窓数が他の窓面の開口窓数よりも多い場合、室内圧は開口の多い壁面の外圧の影響を強く受けるようになり、屋外側スキんに作用する風力が変化する。ここでは、A面の開口窓数を Fig.21 に示したように、1、3、5、9と順次増やしていった場合に、B面の開口窓位置（中央）の屋外側スキんに作用する風力がどのように変化するかを調べた。

Fig.22 は、B面の平均風力係数に対する開口窓数の影響を示したものである。図は、全風向の平均風力係数の最大値、最小値をシングルスキンの平均外圧係数

の比として示したものである。Fig.22 より、開口窓数が3程度までは、開口窓数が増えるにつれB面に作用する平均風力の大きさは急速に増大し、開口窓数が6個以上では平均風力係数はほぼ一定となる。開口窓数が6個以上では、B面の屋外側の窓に作用する平均風力係数は、正圧の場合（最大平均風力係数）にはシングルスキンと同程度、負圧の場合（最小平均風力係数）にはシングルスキンの1.4倍程度となる。

Fig.23 は、B面のピーク風力係数に対する開口窓数の影響を示したものである。ピーク風力も、開口窓数が少ないと開口窓数が増えるにつれ急速に増大し、開口窓数が6以上ではピーク風力係数はほぼ一定となる。シングルスキンとの比較では、平均風力係数よりもピーク風力係数の場合の方が、若干比率が小さく、正圧の場合にはシングルスキンの0.9倍、負圧の場合にはシングルスキンの1.15倍程度である。

4. 理論解析

4.1 1面のみを開口した場合

3章で述べたように、1面の屋内側の窓を開けた場合には、室内圧は開けた窓の位置の屋外側スキんに作用する外圧とほぼ等しくなり、窓を開けない箇所の屋内側スキンの平均風力係数は、その箇所のシングルスキンの平均外圧係数と窓を開けた位置での平均外圧係数の差として(1)式で表すことができる。ここでは、この瞬間的にもこのような仮説が成立すると、屋内側スキんに作用する風力は(4)式で表すことができる。

$$f_{in} = p_{out} - p_{room} = p_{out} - p_{open} \quad (4)$$

ここに、 f_{in} は屋内側スキんに作用する風力、 p_{out} は屋外側スキんに作用する外圧（シングルスキンに作用する外圧）、 p_{open} は窓を開けた位置での屋外側スキんに作用する外圧（シングルスキンに作用する外圧）である。

Fig.24はA面の3/4Hの中央の屋内側スキンの窓を開けた時に、B面の屋内側スキんに作用する最大ピーク風力係数を(4)式により計算し、実験値と比較したものである。(4)式により算定される値は実験値よりやや大きい。また、Fig.25は最小ピーク風力係数を実験値と比較したものであるが、理論値と実験値は良く一致する。

4.2 隣り合う2面を開口した場合－平均風力

A、B2面の屋内側スキンの窓を開放した場合には、開放した窓の圧力の違いのために、気流の流れが生じ、3.3節で述べたように開口部の屋外側スキんにかなり大きな風力が作用する。本節では、この風力をシン

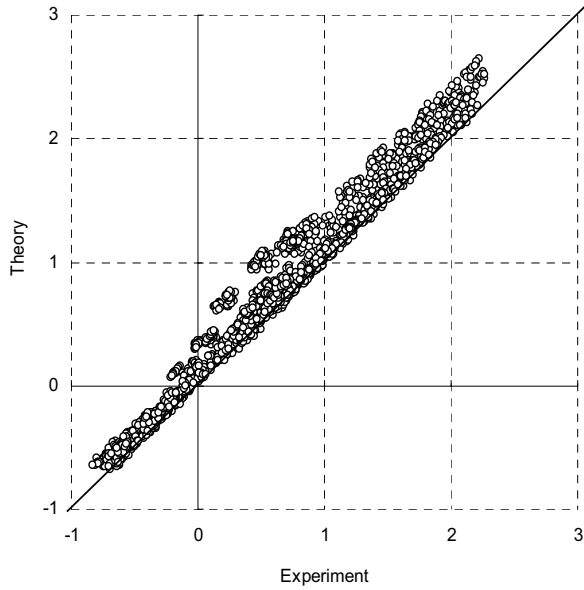


Fig.24 Comparison between the experiment and the theory for the maximum peak wind force coefficients on the inside skin of the face B when a window of the inside skins at 3/4H of the face A is opened

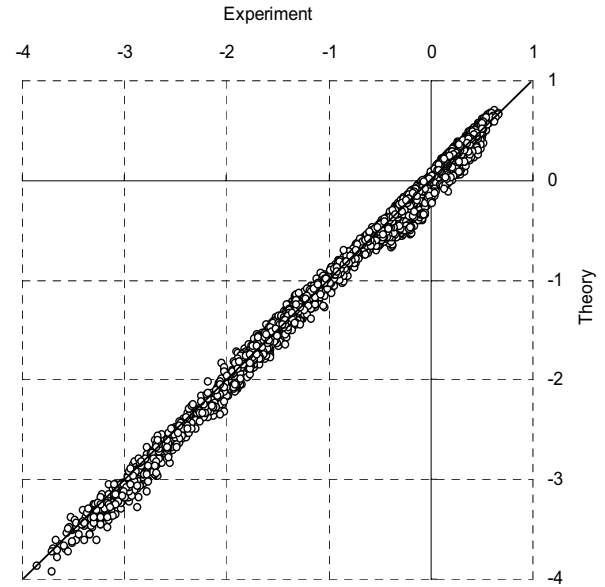


Fig.25 Comparison between the experiment and the theory for the minimum peak wind force coefficients on the inside skin of the face B when a window of the inside skins at 3/4H of the face A is opened

グルスキンに作用する外圧から見積もる方法について、理論的に考察する。

開口における圧力損失係数が窓を含めた全ての開口で等しいと仮定すると、A、B面に開口が1つずつある場合、窓を開放した位置におけるA、B面の屋外側および屋内側スキンの平均風力係数は、

$$\bar{C}_{f_{Aout}} = \frac{\gamma_i^2}{2} (\bar{C}_{p_{Aout}} - \bar{C}_{p_{Bout}}) \quad (5)$$

$$\bar{C}_{f_{Bout}} = \frac{\gamma_i^2}{2} (\bar{C}_{p_{Bout}} - \bar{C}_{p_{Aout}}) = -\bar{C}_{f_{Aout}} \quad (6)$$

$$\bar{C}_{f_{Ain}} = \frac{\gamma_o^2}{2} (\bar{C}_{p_{Aout}} - \bar{C}_{p_{Bout}}) \quad (7)$$

$$\bar{C}_{f_{Bin}} = \frac{\gamma_o^2}{2} (\bar{C}_{p_{Bout}} - \bar{C}_{p_{Aout}}) = -\bar{C}_{f_{Ain}} \quad (8)$$

$$\gamma_i^2 = \frac{A_i^2}{A_o^2 + A_i^2}, \quad \gamma_o^2 = \frac{A_o^2}{A_o^2 + A_i^2}$$

となる⁽¹⁾。ここに、 $\bar{C}_{f_{Aout}}, \bar{C}_{f_{Bout}}, \bar{C}_{f_{Ain}}, \bar{C}_{f_{Bin}}$ は、それぞれA、B面の屋外側スキン及び屋内側スキンの平均風力係数、 $\bar{C}_{p_{Aout}}, \bar{C}_{p_{Bout}}$ はA、B面の屋外側スキンの平均外圧係数（シングルスキンの平均外圧係数）

を表している。また、 A_i, A_o は、屋内側の窓及び屋外側スキンの開口の面積を表している。(5)～(8)式に示されているように、A、B面の平均風力係数は大きさが等しく符号が逆となる。

Fig.18 に(5),(7)式によって計算したA面の屋外側スキンおよび屋内側スキンの平均風力係数を実線及び点線で示した。屋外側スキンについては、理論式は実験値と良く一致する。屋内側スキンについても、理論値と実験値の対応は概ね良好であるが、風向 10 度及び 100 度付近では、理論値の方が平均風力係数の大きさ（絶対値）はやや小さく、若干過少評価となっている。

屋内側および屋外側の風力の分担は、それぞれの開口面積の比によって決まり、開口面積が等しい場合には、風力は屋外側スキンと室内側スキンの均等に配分される。本実験での開口面積比は 1.8 で、屋外側スキンは屋内側スキンの約 3 倍の風力を負担する。

3.3 節で述べたように、A面の窓を複数開放した場合、B面の風力は開放窓数が増えるにしたがって増大する。前述と同様の仮定により、A面の窓を複数開放した場合の、B面の屋外側および屋内側スキンに作用する平均風力係数を求めると、

$$\bar{C}_{f_{Bout}} = \frac{n^2}{n^2 + 1} \gamma_i^2 (\bar{C}_{p_{Bout}} - \bar{C}_{p_{Aout}}) \quad (9)$$

$$\bar{C}_{f_{Bin}} = \frac{n^2}{n^2 + 1} \gamma_o^2 (\bar{C}_{p_{Bout}} - \bar{C}_{p_{Aout}}) \quad (10)$$

となる。ここに、 n は開放する窓の数である。

(9)式からB面の屋外側スキんに作用する平均風力係数を求め、それらの最大値及び最小値について実験結果と比較し、Fig.22 に実線及び点線で示した。点線で示した最小平均風力係数では、(9)式による計算結果は実験結果と極めてよく一致するが、実線で示した最大平均風力係数は実験値よりも大きい。Fig.22 の一点鎖線は、(9)式から計算した最大平均風力係数に補正係数 $\beta = 0.77$ を乗じたものであるが実験値と良く一致する。

4.3 隣り合う2面を開口した場合－ピーク風力

A、B2面の屋内側スキンの窓を開放した場合の平均風力係数に関する理論が、ピーク風力係数の最大値及び最小値について適用できるとすると、B面の屋外側スキンの最大ピーク風力係数と最小ピーク風力係数はそれぞれ(11),(12)式によって表わされる。

$$\dot{C}_{f_{Bout}} = \frac{\gamma_i^2}{2} (\dot{C}_{p_{Bout}} - \dot{C}_{p_{Aout}}) \quad (11)$$

$$\dot{C}_{f_{Bout}} = \frac{\gamma_i^2}{2} (\dot{C}_{p_{Bout}} - \dot{C}_{p_{Aout}}) \quad (12)$$

ここに、 $\dot{C}_{f_{Bout}}, \dot{C}_{f_{Bout}}$ は最大・最小ピーク風圧係数である。

(11),(12)式をB面の屋外側スキンの最大及び最小ピーク風力係数に適用すると、それぞれ、 $\dot{C}_{f_{Bout}} = 1.14, \dot{C}_{f_{Bout}} = -1.48$ となる。これらの値は最大ピーク風力係数については、20%過大評価、最小ピーク風力係数については、その大きさが26パーセントの過少評価となる。この原因は、Fig.17の風圧変動の時刻歴に示されているように、室内及びダブルスキンのキャビティ内の圧力が、B面の屋外側スキんに作用するパスル状の大きな負の外圧に追従しないことにある。したがって、パスル状の負のピーク風力が生じる時に、キャビティ内の圧力を平均風圧となっていると仮定し、(11),(12)式を修正すると、屋外側スキんに作用するピーク風力は(12),(13)式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \dot{C}_{f_{Bout}} &= \dot{C}_{p_{Bout}} - \bar{C}_{p_{Bcab}} \\ &= \dot{C}_{p_{Bout}} - \gamma_o^2 \bar{C}_{p_{Bout}} - \frac{\gamma_i^2}{2} (\bar{C}_{p_{Aout}} + \bar{C}_{p_{Bout}}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{C}_{f_{Bout}} &= \dot{C}_{p_{Bout}} - \bar{C}_{p_{Bcab}} \\ &= \dot{C}_{p_{Bout}} - \gamma_o^2 \bar{C}_{p_{Bout}} - \frac{\gamma_i^2}{2} (\bar{C}_{p_{Aout}} + \bar{C}_{p_{Bout}}) \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、 $\bar{C}_{p_{Bcab}}$ はB面のダブルスキン間のキャビティ

内の平均圧力である。

(12),(13)式から計算される最大・最小ピーク風力係数はそれぞれ $\dot{C}_{f_{Bout}} = 1.18, \dot{C}_{f_{Bout}} = -2.08$ で、最大ピーク風力係数については依然として過大評価となるものの、最小ピーク風力係数については実験値と良く一致する。A面の開放窓数を増やした場合には、(12),(13)式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{C}_{f_{Bout}} &= \dot{C}_{p_{Bout}} - \bar{C}_{p_{Bcab}} \\ &= \dot{C}_{p_{Bout}} - \gamma_o^2 \bar{C}_{p_{Bout}} - \frac{\gamma_i^2}{1+n^2} (n^2 \bar{C}_{p_{Aout}} + \bar{C}_{p_{Bout}}) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{C}_{f_{Bout}} &= \dot{C}_{p_{Bout}} - \bar{C}_{p_{Bcab}} \\ &= \dot{C}_{p_{Bout}} - \gamma_o^2 \bar{C}_{p_{Bout}} - \frac{\gamma_i^2}{1+n^2} (n^2 \bar{C}_{p_{Aout}} + \bar{C}_{p_{Bout}}) \end{aligned} \quad (15)$$

(14),(15)式からB面の屋外側スキんに作用する最大・最小ピーク風力係数を求め、実験結果と比較し、Fig.23 に実線及び点線で示した。点線で示した最小ピーク風力係数は実験結果と極めてよく一致するが、実線で示した最大ピーク風力係数は4.2節で述べた最大平均風力係数と同様に実験値よりも大きい。Fig.23の一点鎖線は、(14)式から計算した最大平均風力係数に補正係数 $\beta = 0.8$ を乗じたものであるが実験値と良く一致する。

5. ダブルスキンの風荷重と耐風設計

前章までに得られた結果に基づいて、ダブルスキンの耐風設計用風荷重の設定についてまとめた。

(1)屋内側スキんに開閉窓のない構造の単層換気ダブルスキンの場合

屋内側スキンの風荷重はシングルスキンと同じ

屋外側スキンの風荷重はシングルスキンの6割

(2)屋内側スキンの一面にのみ開閉窓を設ける場合

開閉窓のある面の風荷重は開閉窓がない場合と同じ

開閉窓のない面の屋外側スキンの風荷重は開閉窓がない場合と同じ

開閉窓のない面の屋内側スキンの風荷重（通常の建物のピーク室内圧係数を0～-0.5と仮定）

正の風荷重はシングルスキンのピーク風力係数に0.3加えて風力を算定

負の風荷重はシングルスキンのピーク風力係数に-1.1を加えて風力を算定

(3)隣合う2面の屋内側スキんに開閉窓を設ける場合

屋内側スキンについては、1面に開閉窓を設けた場合の、開閉窓のない壁の屋内側スキンの風荷

重と同じ

屋外側スキンの開閉窓のない部分については、シングルスキンの風荷重の6割

屋外側スキンの開閉窓のある部分については、正の風荷重はシングルスキンと同じ（室内圧を考えると安全側）

負の風荷重はシングルスキンの2割増し

6. まとめ

単層換気ダブルスキンの屋外側及び室内側に作用する風力を、風洞実験によって求めるとともに、結果を拡張した圧力均衡理論と比較した。その結果、ダブルスキンの場合に、シングルスキンよりも風荷重を大きくする必要があるのは、1面あるいは2面の室内側に開閉窓を設けた場合の室内側スキンと、2面に開閉窓を設ける場合の屋外側スキンである。この場合、正の風荷重については、ピーク風力係数を0.3程度、負の風荷重の場合にはピーク風力係数を-1.1程度の加えたピーク風力係数で風荷重を算定すれば良い。なお、負の風荷重の増加が著しい箇所は、地表面近くの角付近である。

参考文献

- Chino, N., Iwasa, Y., Hagiwara, T., Matagi, Y. and Sato, H., (1993), Wind load acting on double composite exteriors - A study on internal pressure of double composite exteriors, Jour. Struc. Constr. Engng, AIJ, No.448, June, pp.29-36.
- Chino, N., Iwasa, Y. and Sato, H. (1997), Field measurements of wind load on double composite exteriors, AIJ Jour. Technol. Des. No.4, March, pp.25-30.
- Holmes, J.D (1979), Mean and fluctuation internal pressures induced by wind, Proc. 5th Int. Conf. on Wind Engineering, Fort Collins, CO, Pergamon, Oxford, 1980, pp.435-450.
- Liu, H. and Saathoff, P.J., Building internal pressure: sudden change (1981), Jour. Eng. Mech. Div. A.S.C.E., Vol.107(EM2), pp.309-321.
- Harris, R.I. (1990), The propagation of internal pressures in buildings, Jour. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.34, pp.169-184.

Wind Loads on Double Skin Façades with Opening Windows

Hiromasa KAWAIi

Synopsis

Wind loads on double skin facade are investigated by wind tunnel experiments. The double skin investigated is a type of a story high glazing system with open and closing windows on the inside skins. The peak wind loads on the outside skin are about 50% of those on the single skin when the all windows shut. When the windows are opened at a face, the peak wind loads on the inside skin of the other face with closed windows are increased by 60% to 80% of the velocity pressure. When the windows of two faces are open simultaneously, the peak wind loads on the outside skin at the open window is larger than those on the single skin. The theory for the internal pressure can give a reasonable estimate for the mean wind loads, but a little correction is needed for the estimation of the peak wind loads..

Keywords: double skin facade, wind resistant design, wind load, internal pressure, open window