

ダブルスキンファサードに作用する風圧力に関する実大測定について

河井宏允・西村宏昭*・鈴木雅靖**・大浦 豊***

* 日本建築総合試験所

** 鹿島建設株式会社

*** 三協立山アルミ株式会社

要 旨

室内側のスキン（インナースキン）に自動換気装置と開閉可能な窓を持つ単層換気タイプの実大ダブルスキンファサード4体を組み込んだ模型を自然風中に設置し、アウトースキン、インナースキンに作用する風圧および室内圧を測定した。インナースキンに作用する風圧は位置にかかわらず一定で、その風圧は変動を含めてアウトースキンの上下の換気口の圧力の平均となる。室内圧の実測結果は、インナースキンの自動換気装置の開口による圧力損失と室内に流入する空気量が一定という仮定のもとにキャビティ内圧力から算定した理論値と、変動を含めて良く一致する。風上面の場合、アウトースキンに作用するピーク風力は、通常のシングルスキンのピーク風力の29%、インナースキンに作用する風力は86%であった。また、自然風中の風圧変動のように、不規則な非定常信号の解析においては、移動平均による多重解像度解析が有効である。

キーワード: ダブルスキン, ピーク風力, 室内圧, 移動平均, 多重解像度解析

1. はじめに

近年、我が国においても、屋内環境の快適性とエネルギー節約の観点から、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させることにより、屋内環境を快適に保つ建物が増えている。しかし、ダブルスキンファサードに対する風荷重をどのように設定するかという研究は始まったばかりであり、耐風設計に必要な十分な資料は多くないのが現状である。

Kawai (2007)、河井(2006,2005)は、風洞実験によって全層換気および単層換気型のダブルスキンに作用する風圧を測定し、その耐風設計用風荷重の提案を行っている。また、Inculetら(2007)は230mの高さの高層建築物のダブルスキンに関する風洞実験から耐風設計用風荷重を提案した。Chinoら(1993,1997)は、既存の外装材の外側に新しい外装材を設置する場合に、外装材に作用する風圧力を風洞実験および実測によって検討した。

本研究では、実物建築物に取り付けられた実大の単層換気ダブルスキン4体を組み込んだ模型を作成

し、それを自然風中に設置し、アウトースキン、インナースキン及び模型室内の風圧を測定した。設置した実大ダブルスキンは、インナースキンの窓が開閉可能であるとともに、インナースキンに自動換気装置が組み込まれ、ダブルスキン間のキャビティ圧と室内圧の差に応じて換気量が調整される。測定では、窓の開閉、換気装置の作動状況を変化させ、それらの効果を測定した。

2. 測定概要

ダブルスキン実大模型は、Fig.1に示したように、相対する各面に高さ4205mm、幅1610mmのダブルスキンを2体組み込んだ、高さ5825mm、幅5200mm、奥行き2520mmのものである。インナースキンの窓の大きさは1400mmx2052mmである。インナースキンの窓の横に幅100mm、高さ2052mmの自動換気装置がついている。模型は京都大学防災研究所附属潮岬風力実験所内の野外実験場に、ダブルスキンの一面が西に正対するように設置した(Fig.2)。風圧係数算定の基準となる風速は、模型から西北20mの位置にあ

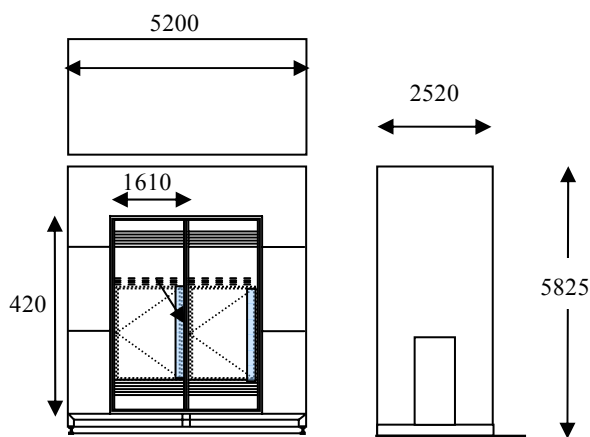


Fig.1 Model with double skin facades



Fig.2 Model set in a field

る気象観測塔の高さ5mの位置の3次元超音波風速計により測定した (Fig.2白丸印)。また、圧力測定の基準静圧は、模型の西南11mの位置に静圧測定用マンフォールを設置し、その中の圧力を模型まで導いた (Fig.2三角印)。

ダブルスキンに作用する風圧は、Fig.3に示したように、西面のアウトースキン23点、西面インナースキンキャビティ側22点、西面インナースキン室内側12点、東面アウトースキン13点、東面インナースキンキャビティ側14点、東面インナースキン室内側6点の合計80点で、室内圧は10点で測定した。圧力は、測定孔からビニールチューブで導いた圧力とマンフォール内から導いた静圧との差圧を半導体式ダイアフラム型圧力計で測定した。風圧に加えて、自動換気装置の弁の動きを測定するためのレーザー変位計及びキャビティ内の風速を測定する熱線風速計を適宜数箇所設置した。

風速、風圧、変位等の全信号は、AD変換器に導き、時間間隔0.01秒で同時にサンプルし連続計測した。自動計測では、超音波風速計の風速が一定値を超えると計測を行うように設定した。

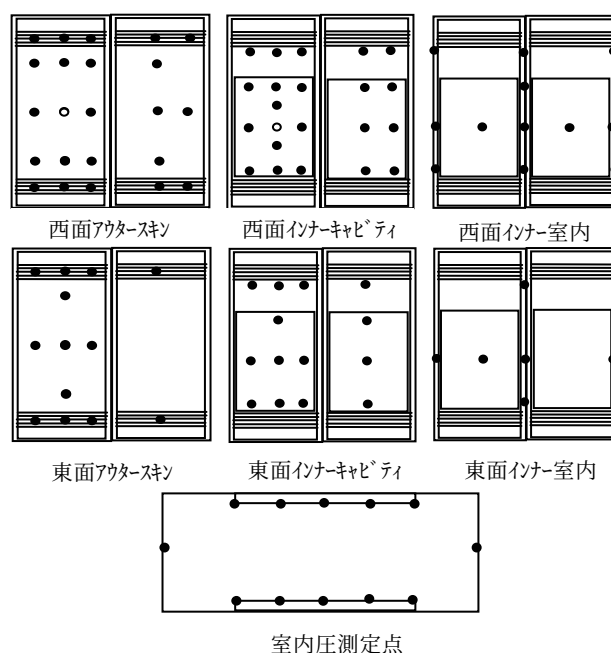


Fig.3 Pressure measurement points

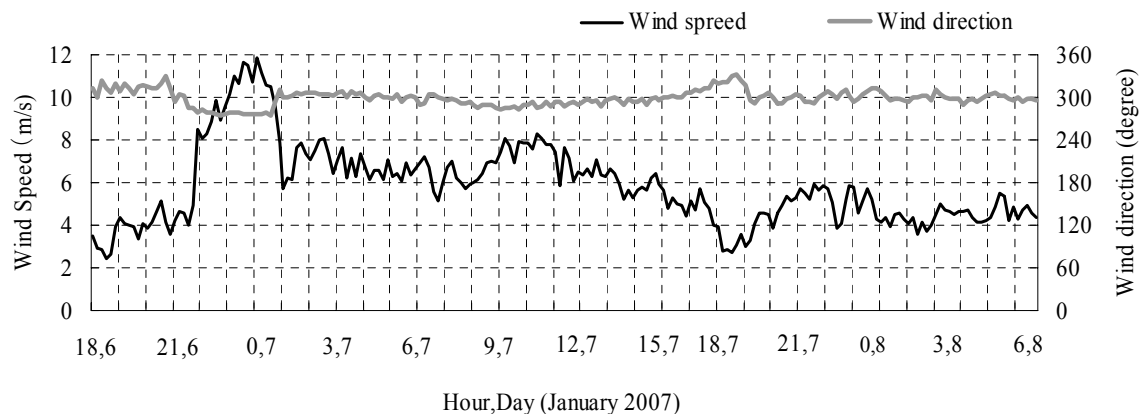


Fig.4 Records of wind speed and wind direction during observation

また、窓の開閉と自動換気装置の作動による風圧の違いを調べる測定に関しては手動計測を行った。

本論文では、平成19年1月6日～8日にかけて低気圧が日本を通過した際に観測したデータの解析結果に基づいて、ダブルスキンに作用する風圧力や室内圧の特性について述べる。

3. 測定結果

3.1 解析データの概要

解析には平成19年1月6日17時32分から8日8時30分までの記録を用いた。Fig.4はそのときの風速・風向記録の10分間平均値の時刻歴変化を示したものである。この期間は、2年間の観測期間中で唯一、10分間

平均風速10m/s以上の強風が連続して2時間にわたって吹き、平均風速6m/s以上の強風が20時間程度継続した。この期間の瞬間最大風速は29.4m/sに達した。風向は西から西北であった。半導体圧力計は温度によってドリフトが生じるが、この期間中の天候は曇りであり気温の変化が小さく、温度による圧力計のゼロ点の移動も少ないと考えられた。この期間中、インナー窓の開閉、自動換気装置の作動や停止など、Fig.5に示す様々なCaseについて観測を実施した。

Fig.6は瞬間最大風速29.4m/sを記録した時の平成19年1月6日23時50分から10分間の風速、風向、西面北側窓中央点(Fig.3中の白丸印)及び東面北側窓中央点(Fig.3中の白丸印)のアウトースキン、インナースキンキャビティ側、インナースキン室内側の風圧の時刻歴変化を示している。この記録の平均風向は277度、平均風速は11.6m/sであり、自動換気装置は4つとも作動状態

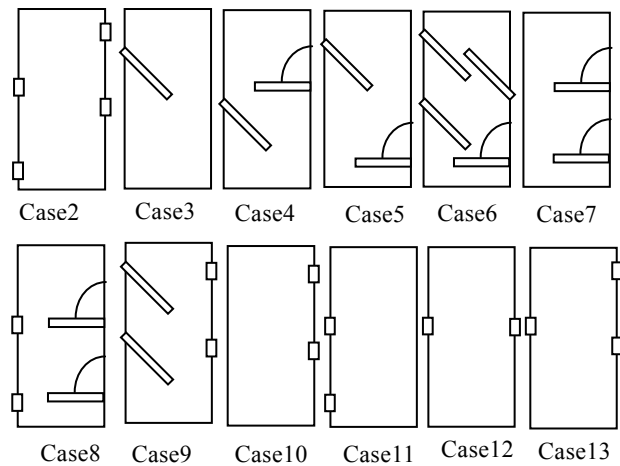


Fig.5 Cases for measurement

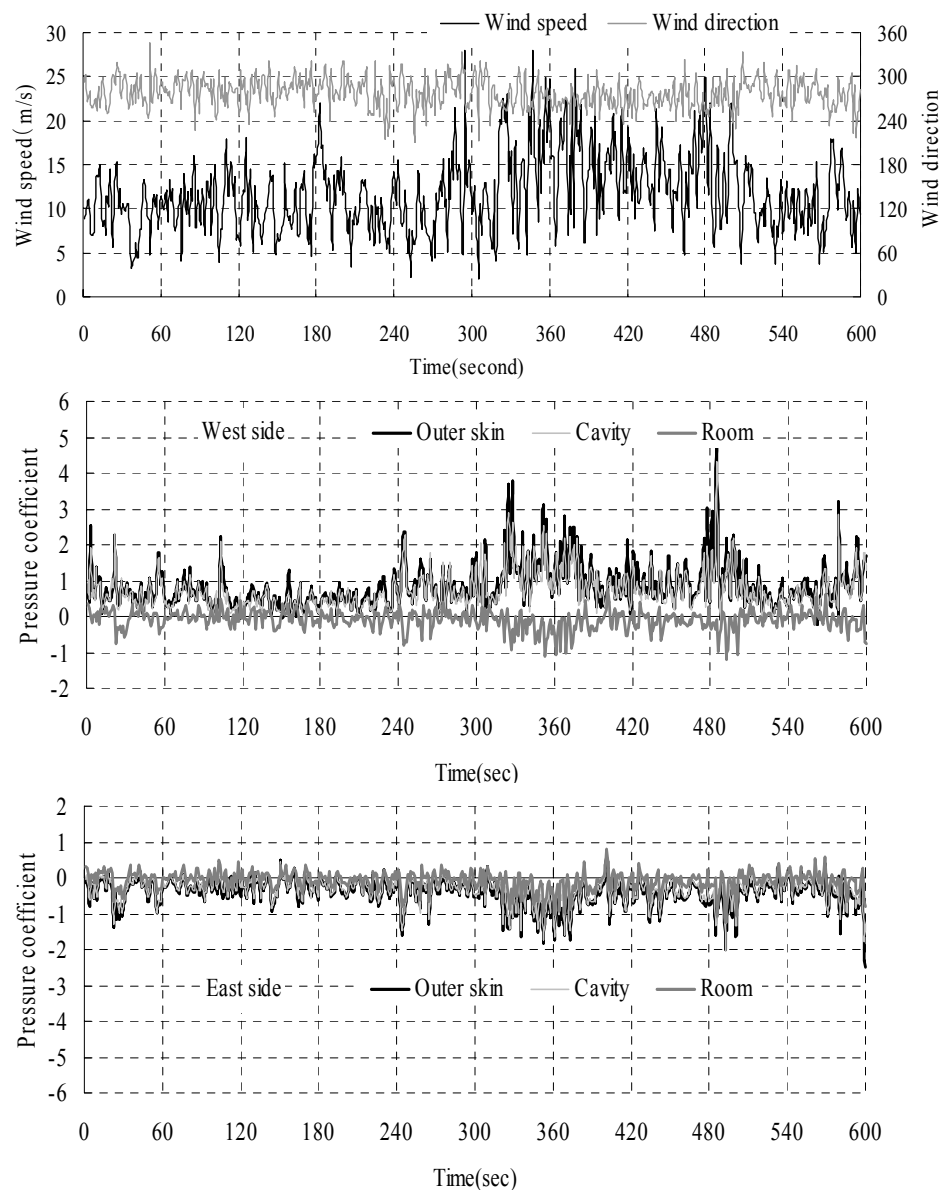


Fig.6 Records of wind speed, wind direction, pressure on outer and inner skin and internal pressure in a room

(Fig.5Case2)である。Fig.6では、風圧は10分間平均風速に基づく速度圧で基準化された風圧係数として示されている。風速計が模型設置位置から離れているため、風速変動と風上面である西面の風圧変動との相関は、ゆっくりした変動以外あまり良くなく、風圧が最大となるのは瞬間最大風速が生じた時刻ではなく、2番目に大きな風速を記録した記録を開始してから482秒後である。

Fig.6より風速がかなり激しく変動していることが分かる。ちなみに乱れ強さは34%、突風率は2.5と非常に大きい。なお、この時間帯以外の時間帯でも風速の変動は激しい。

風圧の変動は、風速よりもより顕著であり、大きな突風が襲来している時刻320秒前後と時刻480秒前後には、風圧係数にして4～5程度の大きな風圧力が作用することが分かる。風が西面にほぼ正対して当たるため、アウトースキン、インナースキンキャビティ側の圧力は正でほぼ等しく、インナースキン室内側の圧力および東面の圧力は負でほぼ同程度である。

Fig.7は、Fig.6に示した時刻歴から、風速が最も大きい320秒から330秒の10秒間を拡大したものである。Fig.6に示されているように、この10秒間で、風速は7m/sから30m/s、風向は240度から290度まで大きく変動する。アウトースキンに作用する風圧は、風圧が大きくなる時刻ではインナースキンキャビティ側の圧力より大きいことが分かる。また、キャビティ側の圧力変動はアウトースキンの圧力変動よりも若干時間が遅れて生じているように思われる。インナー

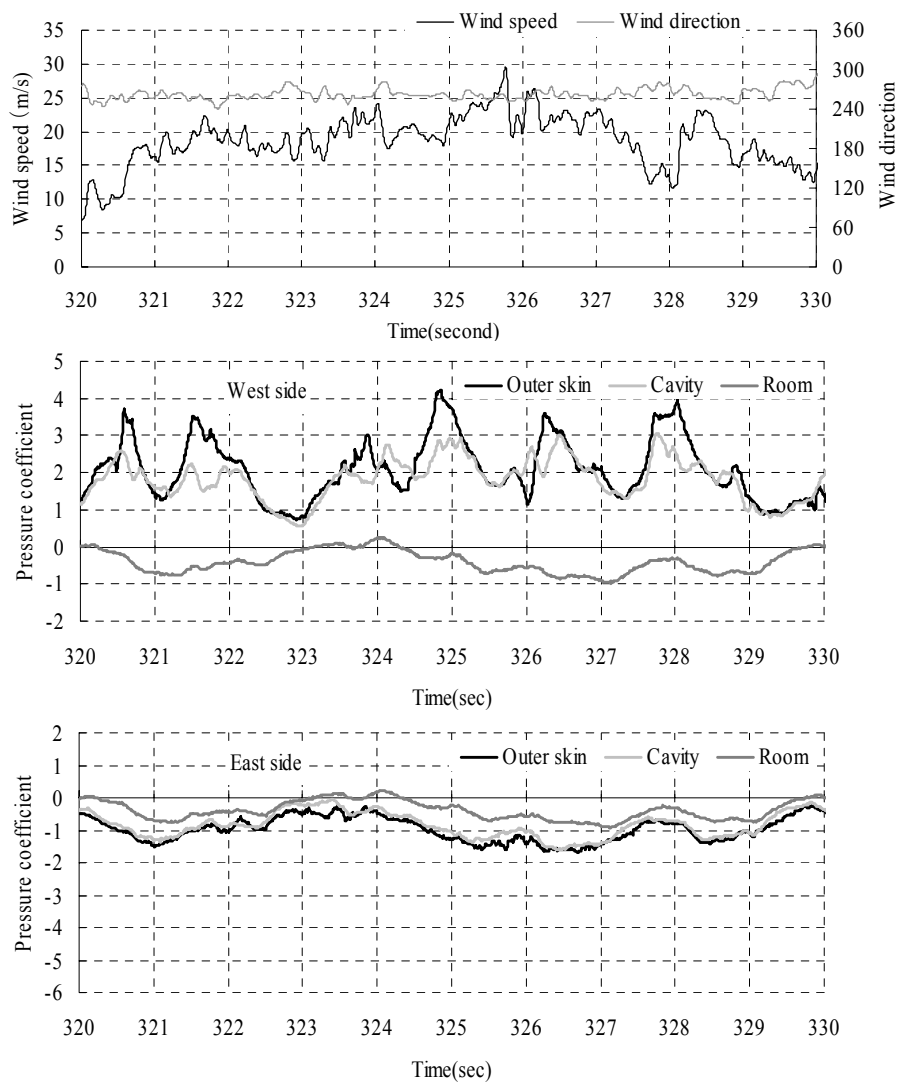


Fig.7 Records of wind speed, wind direction, pressure on outer and inner skin and internal pressure in a room

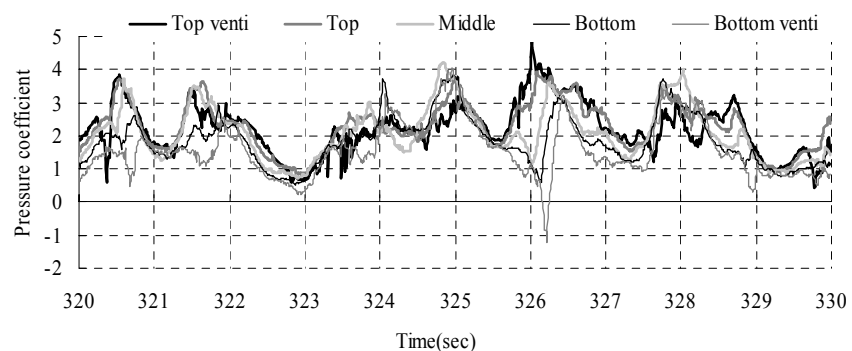


Fig.8 Records of pressure on outer skin and ventilation opening.

スキン室内側の圧力は西面、東面ともほぼ等しい。したがって、室内圧は変動を含めてほぼ同じと考えられる。東面での圧力は、アウトースキン及びインナースキンキャビティ側でほぼ等しく、西面に比べて平均、変動ともかなり小さい。また、室内圧は東面の圧力より若干小さいが、極めて似た変動性状を

示している。

Fig.8は、西面北側窓の中央線上の測定点に作用する風圧の時刻歴を示したものである。Fig.8からアウトースキンの風圧(外圧)が上部から下部へと伝搬する様子が見てとれる。伝搬速度は、時刻によって若干異なっているが、時刻326秒付近では約6.5m/sである。この時の風速は20m/s程度であるから、伝搬速度は風速の約1/3程度ということになる。風圧変動の伝搬は、風上から接近した乱渦が模型周りの流れ場に沿って移動することに伴って生じると考えられる。

3.2 風圧係数と基準化速度圧(準定常の仮定)

Fig.6～8に示した風圧の時刻歴では、風圧係数は10分間平均風速に基づく速度圧により基準化されたものである。Fig.6に示されたように、今回のように風速変動が極めて大きい自然風場では、基準風速を10分間平均風速にした場合には、ピーク風圧は極めて大きくなる。Fig.9は全てのデータに関して、西面北側アウトースキン中央点の平均風圧係数とピーク風圧係数(10分間の瞬間最大風圧を基準速度圧で除した値)を、平均風向を横軸にとって示したものである。Fig.9に示されているように、平均風圧係数は風向とともに減少し、風向315度(西面に45度から風が当たる場合)で0となりその後負に転じるが、測定ごとのバラツキは小さく安定した結果となった。ピーク風圧係数(正側)も、平均風圧係数と同様に風向によって減少する傾向にあるが、測定ごとのバラツキは極めて大きく、時に8を超える値を示す。

Fig.10は、自動換気装置が全て作動している状態での西面北側アウトースキン中央点における平均風圧係数(白丸)及びピーク風圧係数(黒丸および灰色丸)と風向の関係を示したものである。平均風圧係数は10分間の平均値を10分間平均速度圧で基準化したもの、黒丸で示したピーク風圧係数は、10分間のピーク風圧を瞬間最大速度圧(平均化時間0.01秒)で基準化し10分間平均風向に対してプロットしたもの、灰色丸は10分間のピーク風圧を瞬間最大速度圧(平均化時間0.01秒)で基準化し、瞬間最大風速が観測され

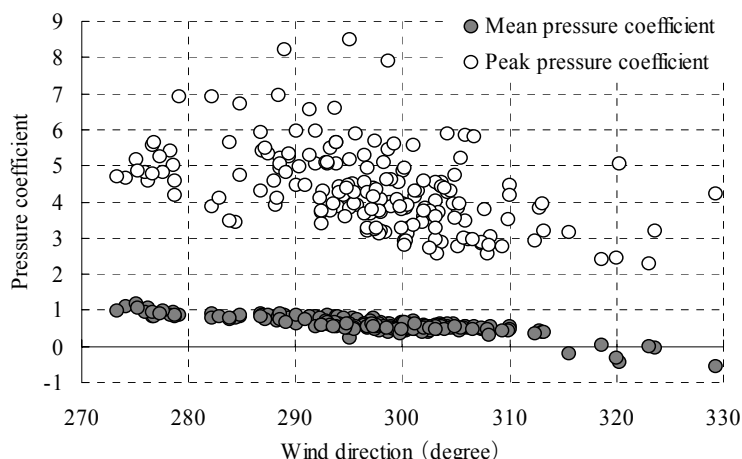


Fig.9 Mean and peak pressure coefficients at a center point of a west face (10 minute mean reference velocity pressure)

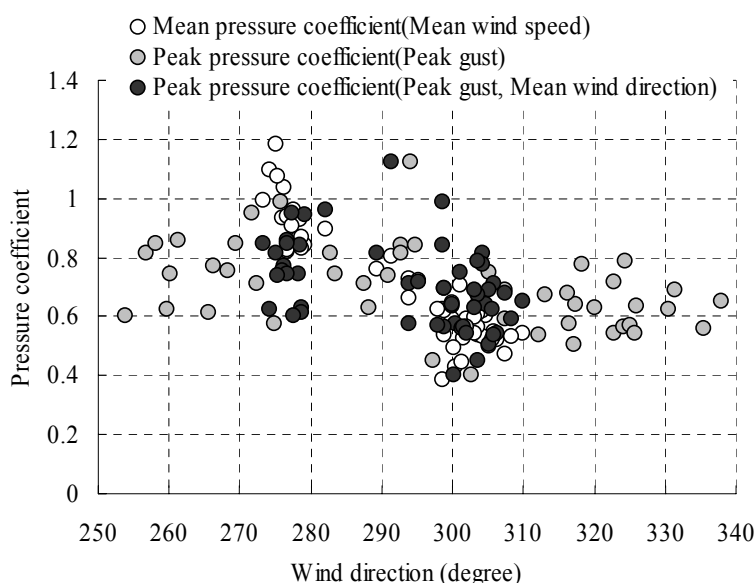


Fig.10 Mean and peak pressure coefficients at a center point of a west face (10 minute mean and peak gust reference velocity pressure)

た時の瞬間風向に対してプロットしたものである。

Fig.10に示されているように、平均風圧係数とピーク風圧係数の値はほぼ一致する。したがって、風圧は瞬間速度圧に比例して変動している(準定常の仮定)と考えられる。ただし、前述したように、風速計の測定位置は模型北西20mの位置にあり、瞬間最大風速とピーク風圧は同時刻には発生しないことに注意する必要がある。詳細な比較では、平均風圧係数に比べてピーク風圧係数の方が、風向が270度以上では風向の増大に伴う風圧係数の減少の度合いが小さい。即ち、西面正面から風が斜めに当たるようになって、ピーク風圧係数はあまり大きくは減少しない。このことは、ピーク風圧が生じる時の風向が平均風向と異なることを示唆している。

そこで、最大瞬間風速が生じた時の風向を横軸にとって、ピーク風圧係数をプロットしてみた(Fig.10灰色丸)。Fig.10に示すように、様々な風向で風速は最大値をとる。このときの風向でピーク風圧係数をプロットした場合、ピーク風圧係数は広い風向にわたってあまり変化しないことが分かる。しかし、この結果は、当初予想していたものとは異なるものである。準定常の考えによれば、この風向を用いてプロットすれば、ピーク風圧係数の風向による変化は平均風圧係数の風向による変化により近くなるはずである。しかし、Fig.10では風向が340度になってもなお、ピーク風圧係数はかなり大きく、平均風圧係数とは異なる傾向を示している。この原因の一つとして、風速計が模型からかなり離れた位置にあり、風速計位置において風速が最大になる時には、風圧がピーク値をとっていないことがあげられる。他の原因としては、斜めから風が当たる場合には、準定常の仮定が成立しないのではないかと考えられる。平均風圧係数が0の場合には、準定常の仮定ではピーク風圧も0となるが、乱渦が小さく風圧場が局所的な流れ場に影響される場合には、ピーク風圧が0になるとは限らないからである。

3.3 評価時間と空間平均

前節では、最大瞬間風圧が最大瞬間速度圧によって評価することができることを示したが、外装材の耐風設計を考える場合、最大、最小風圧の平均化時間をどの程度に設定するかは非常に重要である。外装材の耐風設計にとっては、外装材全体に瞬間的にどのような風力が作用するかが問題となるが、外装材全体の風力を評価するためには、外装材の様々な点に作用する風圧力の空間平均を求める必要がある。しかし、このような計測は手間と時間が掛かるため、風洞実験や指針などでは、一点に作用する風圧力の時間平均によって空間平均を代用する場合も多い。ここでは、平均化時間を変化させた解析結果から、外装材全体に作用する風力がどの程度の評価時間に相当するかを調べた。

まず、各点で計測される最大風圧が平均化時間によってどの程度変化するかを調べる。本計測のサンプリング時間は0.01秒である。Fig.11は、0.01秒で計測されたデータの移動平均をとったデータセットの最大値が、元のデータに対してどの程度減少するかを西面北側中央点について示したものである。平均化時間0.1秒では、ほとんどの計測点において、最大

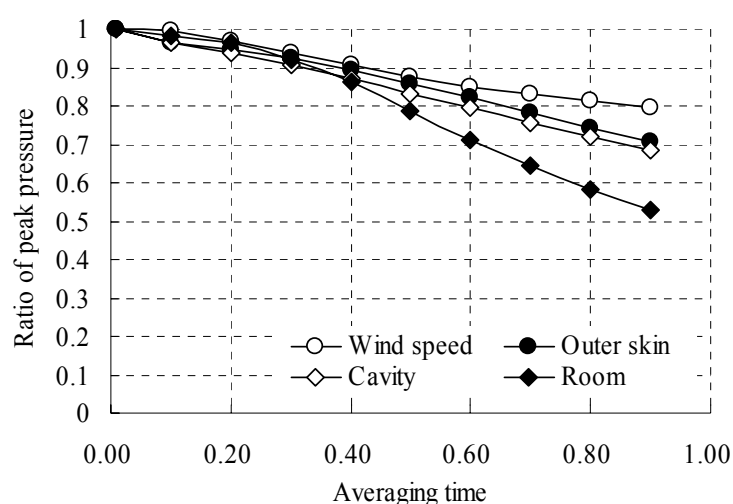


Fig.11 Variation of normalized peak pressure coefficient with averaging time

値は元のデータの96.5パーセント以上である。このことは、10Hz以上の高周波数成分が極めて小さいことを意味している。

アウトースキンの場合、94%になるのが平均化時間0.2秒、90%になるのが平均化時間0.4秒、86%になるのが平均化時間0.5秒程度である。インナースキンキャビティ側の圧力もアウトースキンとほぼ同じ傾向を示す。しかし、インナースキン室内側の風圧は、平均化時間0.4秒以上になると平均化時間の増大とともに、急速に最大風圧が減少する。

同じデータに対して窓面で計測された9点の風圧変動の最大値を評価した。評価は、風圧変動の最上部、中間部、最下部、全面の空間平均を求め、それに基づいて最大風圧係数を算出した。最上部、中間部、最下部の各点の最大風圧の平均（3点の平均）に対して空間平均の最大値は98パーセントと極めて大きく、水平方向ではどの部分でも最大値はほぼ同時に生じている、即ち風圧はほぼ同じように変動していると考えられる。全面(9点平均)では85パーセント程度となり、最上部と最下部で最大値は、Fig.8で既に示したように、必ずしも同時に生じることはない。また、西アウトアの中央点を風圧変動の代表値とした場合、中央点の最大風圧係数と、全面で空間平均された風圧変動の最大値の比は0.94程度でかなり大きい。これは、この点の平均化時間を0.2秒程度に設定した値と同じである。以上より、窓全体のピーク風圧係数は、中央点の風圧変動の平均化時間を0.2秒とした場合の中央点のピーク風圧係数に相当すると考えられる。

3.4 キャビティ内の平均およびピーク圧力

Fig.7より西面のキャビティ内のピーク圧力がアウ

タースキンに作用する圧力よりも小さくなる事が分かる。この原因は、Fig.8で示された上下の換気口のピーク圧力が同時に生じないことによる。Fig.12は、Case2について西面北側中央点のインナースキンキャビティ側の圧力変動を、アウトースキンの上下の換気口の圧力変動の平均と比較したものである。Fig.12では上下3箇所におけるキャビティ内の圧力変動がプロットされているが、それらはほとんど重なり一本に見えている。したがって、キャビティ内では圧力は位置によって変化せず一定であると考えられる。このことは、キャビティ内における流れの摩擦損失が極めて小さいことを示している。熱線風速計によって測定したキャビティ内の流れの速度は1m/s以下で、この結果を裏付ける結果となっている。

Fig.12の灰色の太線はアウトースキンの上下の換気口の圧力変動の平均値を示しているが、ピーク圧力は多少キャビティ内のピーク圧力より大きいものの、変動はほとんど同じであるといえる。したがって、キャビティ内の圧力変動は、換気口の圧力変動の平均で表されることが分かる。

圧力変動から観測される事柄を更に確認するため、平成19年1月6日22時4分から1月7日0時55分までのCase2の16の10分間記録について10分間ごとの平均風圧係数及びピーク風圧係数を求め、上下換気口の圧力係数の平均値と比較し

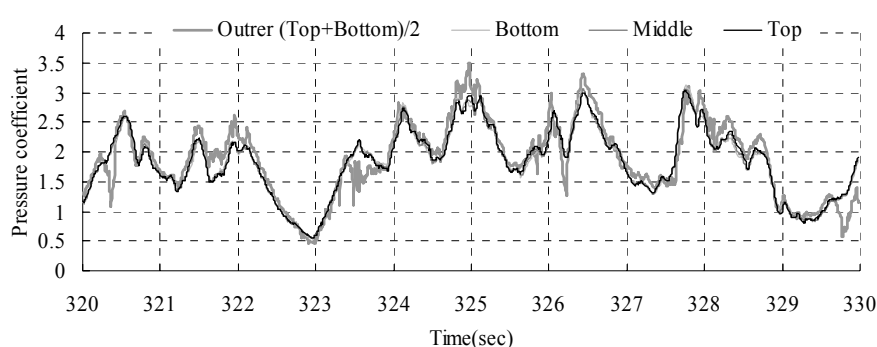


Fig.12 Pressure coefficient on the west inner skin at the cavity side

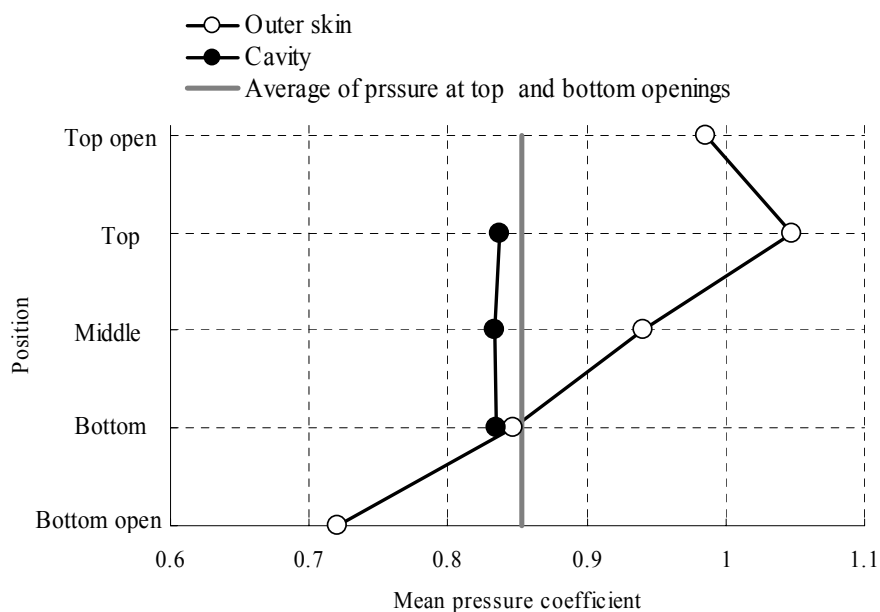


Fig.13 Mean pressure coefficients on the outer skin and the inner skin at the cavity side, gray line shows the average of pressure coefficients at the openings.

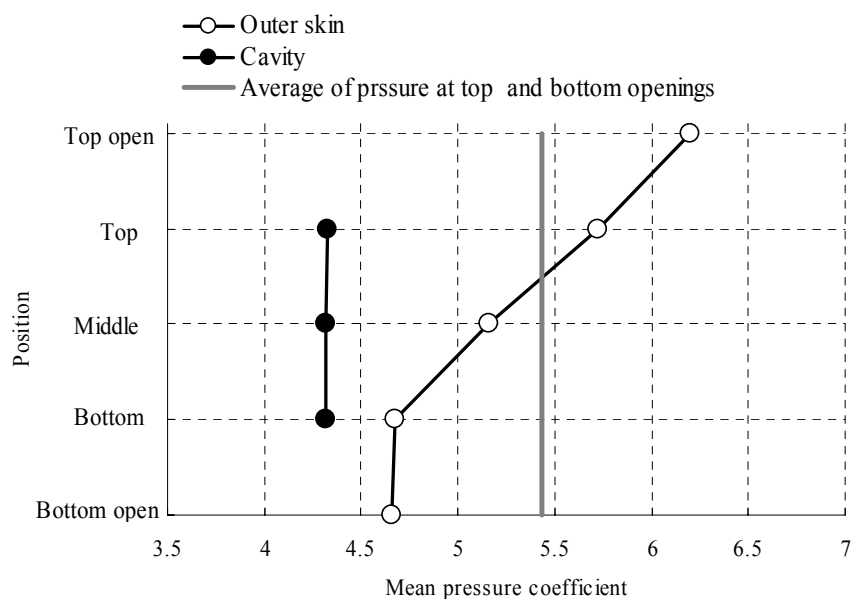


Fig.14 Peak pressure coefficients on the outer skin and the inner skin at the cavity side, gray line shows the average of pressure coefficients at the openings.

Fig.13及びFig.14に示した。解析したデータの平均風向は277度で、風は西面に対してほぼ直角に当たる。図中の灰色太線は、上下換気口の圧力係数の平均値である。キャビティ内の平均圧力係数は上下換気口の平均圧力係数の平均値とほぼ等しく、キャビティ内ではほぼ一定となる。Fig.14から分かるように、キャビティ内ではピーク風圧係数も一定となるが、その値は上下換気口のピーク圧力係数の約8割程度である。これは、後述するように、高周波数領域での圧力変動が減少することが原因である。

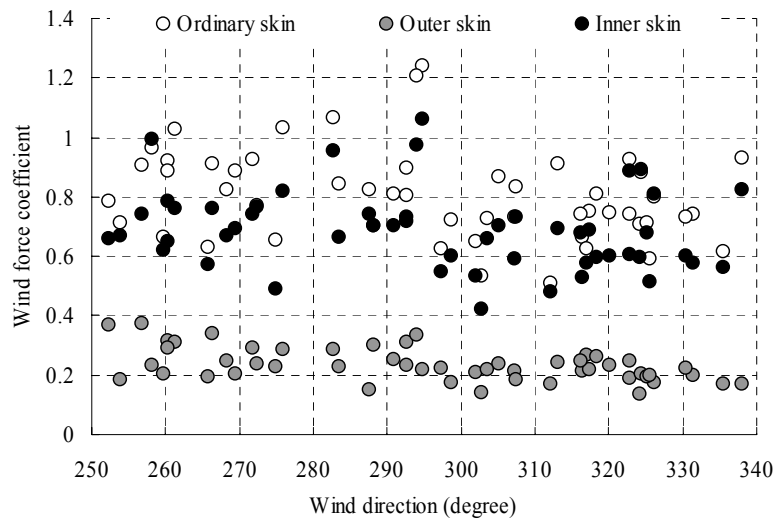


Fig.15 Peak wind force coefficients on an ordinal single skin and the outer skin and the inner skin

3.5 ピーク風力係数とピーク風圧係数

本節では耐風設計上重要なアウトースキンおよびインナースキンに作用するピーク風力が、通常の外装材に作用するピーク風力に比較してどの程度になるかを検討した。検討は、自動換気装置が全て作動したCase2について行った。

Fig.15は、自動換気装置が作動しているCase2の場合の西面北側の窓面全体に作用するピーク風力係数を示したものである。Fig.15に示したピーク風力係数は、Fig.10と同様に瞬間最大風速と瞬間風向に基づいて基準化したものである。白丸は、アウトースキンに作用する風圧と室内圧の差のピークを示したもので、通常の外装材のピーク風力係数に当たる。黒丸はインナースキンのピーク風力係数、灰色丸はアウトースキンに作用するピーク風力係数である。

ピーク風力係数は、風向が大きくなると若干小さくなる傾向にある。全てのデータに関するピーク風力係数は、通常の外装材が0.80、アウトースキンが0.69、インナースキンが0.23となった。したがって、アウトースキンは通常の外装材の29%程度、インナースキンは86%負担することになる。

3.6 圧力変動のパワースペクトル

Fig.16は、模型風上の風速変動のパワースペクトル密度である。Fig.16ではパワースペクトルに周波数を乗じたものを周波数に対してプロットしてある。周波数が5Hzまでは、風速変動のパワーは $-3/5$ 乗よりもやや大きい傾きで減少し、5Hz以上では周波数の -3 乗に比例して減少する。

Fig.17はCase2(平均風速11.6m/s, 平均風向277度)の西面北側中央点のアウトースキン、インナースキンキャビティー側、インナースキン室内側、及び上下

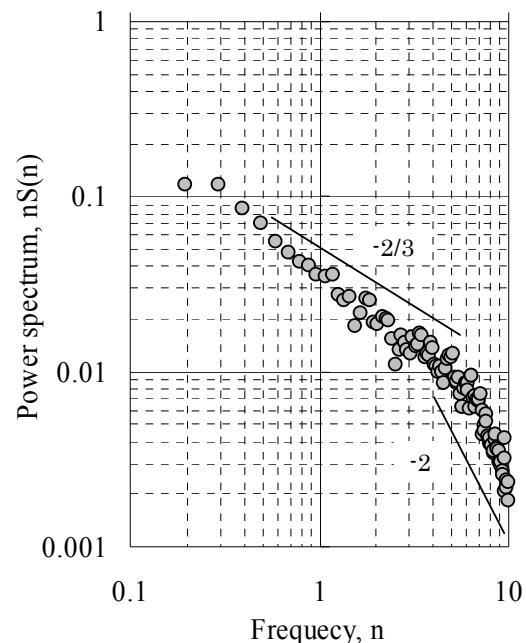


Fig.16 Power spectrum of wind speed

換気口の平均圧力のパワースペクトル密度を示したものである。河井(1981)の研究により明らかになっているように、アウトースキンに作用する風圧変動のパワースペクトルは、高周波数域において風速変動のパワースペクトルより急峻な勾配 -2.5 乗で減少することがFig.17に示されている。

キャビティ内の圧力変動は、周波数4Hzまではアウトースキンの風圧変動の7割弱のパワーとなるが、周波数6Hz付近にキャビティ内の圧力変動のヘルムホルツ共振に伴う小さなピークが生じた後、急速に減少する。また、上下の換気口の圧力変動の平均値(推定理論値)のパワースペクトルは、全ての周波数にわ

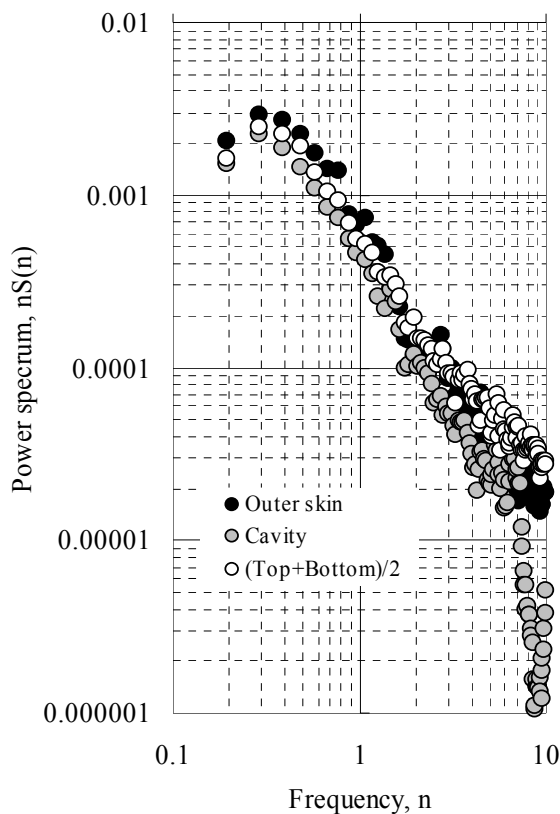


Fig.17 Power spectra of pressure on outer skin and inner skin at the cavity side

たってキャビティ内の圧力変動のパワースペクトルより大きい、特に2Hz以上の高周波数域では測定値を大きく上回る。したがって、キャビティ内のピーク風圧係数が推定理論のピーク風圧係数より小さい原因は、高周波数域でキャビティ内の内圧変動が外圧変動に追従しないことによるものであると考えられる。

Fig.18は、キャビティ内の圧力変動のパワースペクトルとアウトースキンの圧力変動との比、即ちキャビティ内圧力変動のアドミッタンスを示したものである。Fig.18からキャビティ内の圧力変動がアウトースキンの圧力変動よりも7Hz付近のヘルムホルツ共鳴域を除いて小さくなることが示されている。

Fig.19は、アウトースキンに作用する風力変動のパワースペクトルをアウトースキン、インナースキンキャビティ側の風圧変動のパワースペクトルと比較したものである。風力変動のパワースペクトルは、低周波数域では風圧変動のパワースペクトルよりかなり小さいが、2Hz以上の高周波数域では風圧変動のパワースペクトルより大きくなる。これは、低周波数域では、アウトースキンとキャビティ内の圧力変動の相関が大きく、高周波数域では相関が小さいことが原因であるが、これについては4章で考察する。

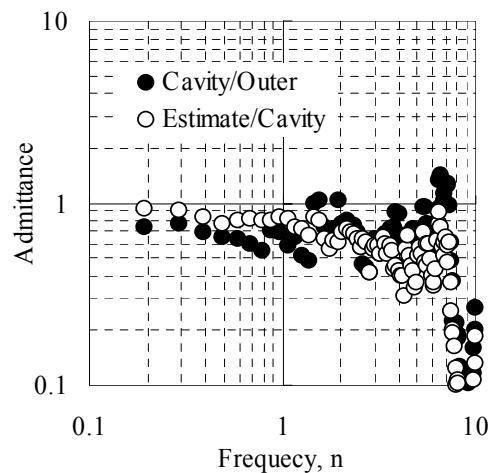


Fig.18 Admittance of pressure on the outer skin to the inner skin at the cavity side.

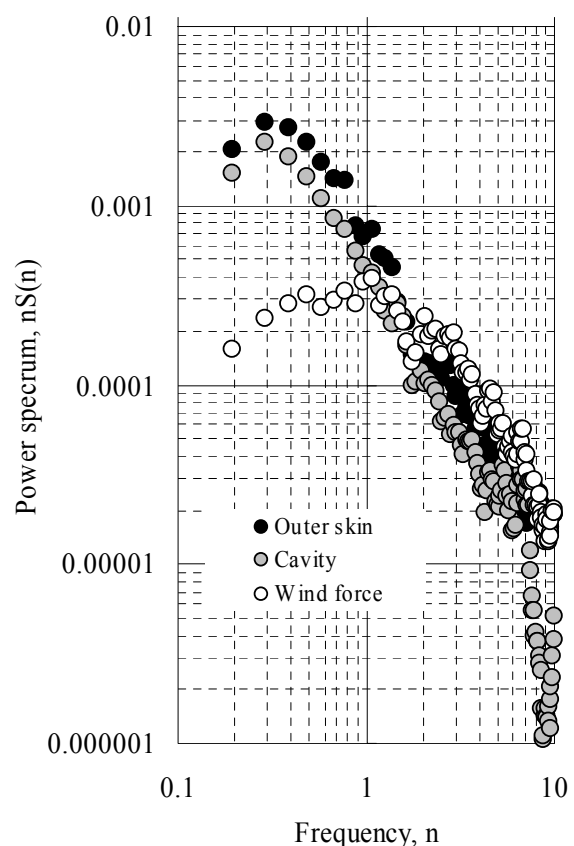


Fig.19 Power spectra of pressure on the outer skin, the inner skin at the cavity side and wind force on the outside skin

3.7 窓の開閉と自動換気装置が室内圧に与える影響

このダブルスキンのインナースキンの窓は開閉可能となっている。前節までは、窓が全て閉鎖され自動換気装置が作動しているCase2について、主に西面アウトースキンおよびインナースキンキャビティ側の圧力測定結果を示した。本節では、自動換気装置と窓の開閉が室内圧にどのように影響するかについ

て考察する。

Fig.20, 21はCase2～11における、西面北側アウトースキン、西面北側インナースキンキャビティ側、西面北側インナースキン室内側、東面北側インナースキンキャビティ側、東面北側アウトースキンの平均風圧係数を示したものである。凡例の括弧の数字は風向を表している。全ての窓がしまっているCase2では、室内圧は西面キャビティ圧と東面キャビティ圧の差を1:3.26の比で平均した値となる。即ち、東面キャビティ圧が3倍強、西面キャビティ圧よりも室内圧に貢献している。この差は東面の自動換気装置の一つが正常に作動せず、強風でも完全に閉じていなかったためと考えられる。この点についての理論的裏付けは4章で考察する。

西側インナー窓を開けたCase3の場合には、室内圧は西側アウトースキンの平均風圧より若干大きくなった。これは、室内圧を測定する圧力計が開けた窓に取り付けられているせいではないかと考えられる。西面と東面の両方の窓を開けたCase4の場合も、室内圧は両キャビティ圧よりも小さくなった。この場合、流れが西面から東面へと室内を流れるために、室内圧は流れに大きく影響される結果、このような状況が生じたと思われる。Case5, 6もCase4と同様に両側の窓を開けた場合であるが、開けた窓の位置が異なるため、キャビティ圧、室内圧ともに、Case4とは大きく異なる。このように、室内に空気が流れる場合には、室内圧は流れの状態によって影響を受け、測定位置、測定状況によって大きく異なる。

Case8, 9は片側の窓を開け、反対側の自動換気装置を作動させた場合である。この場合、自動換気装置はあまり効かず、室内圧は窓を開けた側のアウトースキンの風圧と同じとなり、反対側のキャビティ圧は反対側のアウトースキンの圧力とほぼ等しい。Case11は自動換気装置が片側だけ作動している場合であるが、この場合、室内圧は換気装置が作動している側のキャビティ圧と同じとなる。

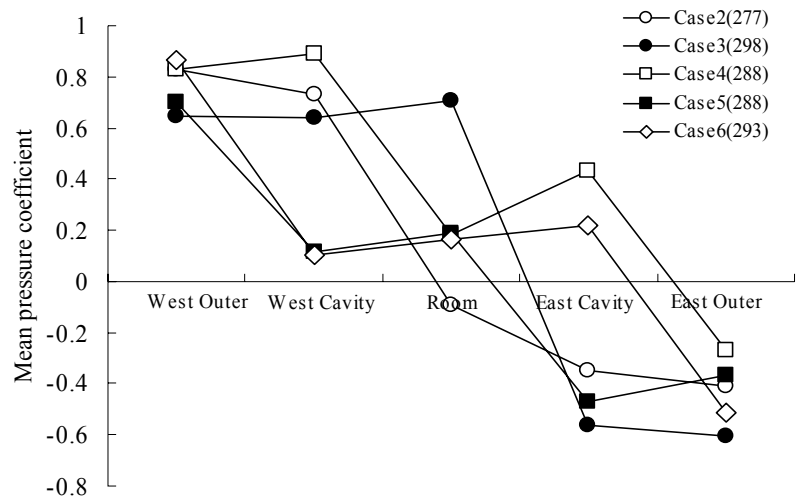


Fig.20 Mean pressure coefficients for the various cases

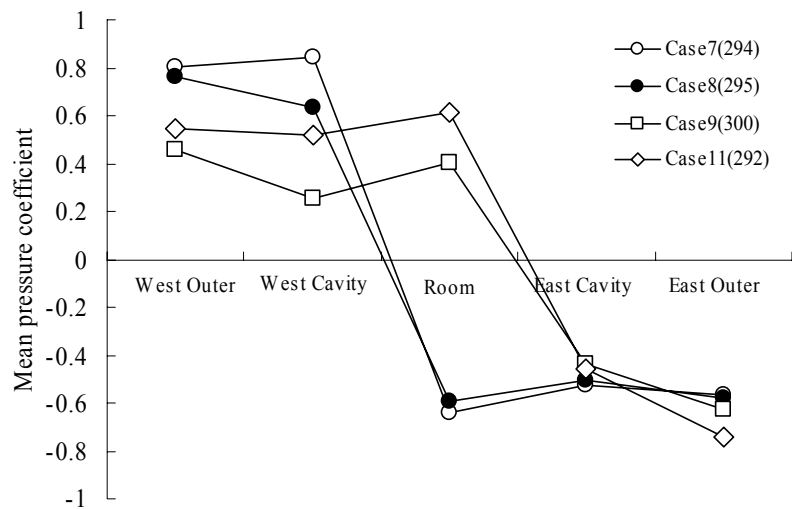


Fig.21 Mean pressure coefficients for the various cases

4. 考察

4.1 風力変動のパワースペクトル

3.3節で示したように、風力変動のパワースペクトルは、高周波数域ではアウトースキンの風圧変動よりも大きい。高周波数領域でのパワーの増大は、一見おかしいと考えられるかも知れないが、その原因は高周波数域においてアウトースキンの風圧変動とキャビティ内の圧力変動がほとんど相関を持たないことによっている。アウトースキンに作用する風圧変動を $p_{out}(t)$ 、キャビティ内の圧力変動を $p_{cav}(t)$ とすると、アウトースキンに作用する風力変動のパワースペクトル $S_f(\omega)$ は式(1)で表される。

$$S_f(\omega) = S_{out}(\omega) - 2Co(\omega) + S_{cav}(\omega) \quad (1)$$

ここに、 $S_{out}(\omega)$, $S_{cav}(\omega)$ はアウタースキン及びキャビティの風圧変動のパワースペクトル、 $Co(\omega)$ はアウタースキンとキャビティの風圧変動のコ・スペクトルである。

(1)式から分かるように、コ・スペクトルが大きいと風力変動のパワースペクトルは小さくなり、コ・スペクトルが小さいと風力変動のパワースペクトルは大きくなる。Fig.22は基準化コ・スペクトラム $Co(\omega)/\sqrt{S_{out}(\omega)S_{cav}(\omega)}$ を示したものである。0.8Hz以下の低周波数域では、アウタースキンの風圧変動とキャビティ内の圧力変動の相関は大きく、基準化コ・スペクトルは1に近い値を示す。その結果、Fig.19に示したように風力変動のパワースペクトルも小さい。しかし、0.8Hz以上ではコ・スペクトルは、急速に減少し、3Hz付近で負に転じ、6Hz付近で最小となる。このときの基準化コ・スペクトルの値は-0.5程度であり、アウタースキンの風圧変動とキャビティの圧力変動は逆位相に近い変動特性を示す。そのため、風力変動はアウタースキンとキャビティの風圧変動の和に近い振幅で変動する。コ・コヒーレンスが最小となる周波数は、Fig.18に示したようにキャビティ内の圧力変動のパワーがヘルムホルツ共鳴によって増大する周波数より若干小さい。したがって、アウタースキンの風圧変動とキャビティ内の圧力変動の位相の変化はヘルムホルツ共鳴によって生じると考えられ、共鳴現象が風力変動に影響を及ぼすことが分かる。

4.2 室内圧変動と開口面積

3章で述べたように、室内圧は風上側と風下側の開口面積比によって大きく変化する。自動換気装置を全て作動した状態でも、換気装置の動作の状況によって室内圧は大きく変化することが分かった。ここでは、開口面積が室内圧にどのように影響するかを、室内の空気が圧縮されないという仮定のもとに、連続の定理と開口における圧力損失から開口面積と室内圧の関係を導き測定結果に適用する (Harris(1990),

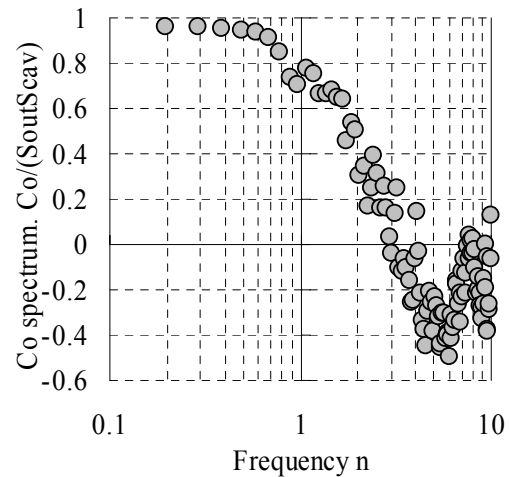


Fig.22 Normalized co-spectrum between pressure fluctuations on the outer skin and the inner skin at the cavity side

Holmes(1979),Liu(1981))。西面と東面の開口面積をそれぞれ A_1, A_2 とし、西面と東面のキャビティ内の圧力を p_1, p_2 とすると、開口部における圧力損失は(2)式で表される。

$$|p_1 - p_i| = \frac{1}{2} \rho U_1^2 k_1 \quad (2)$$

$$|p_2 - p_i| = \frac{1}{2} \rho U_2^2 k_2$$

ここに p_i は室内圧、 ρ は空気密度、 U_1, U_2 は西面および東面から室内に流入する空気の流速である。

(2)式と連続の式(3)

$$U_1 A_1 = U_2 A_2 \quad (3)$$

より、室内圧は西面、東面のキャビティ圧を用いて

$$p_i = \frac{p_1 + \gamma^2 p_2}{1 + \gamma^2}, \gamma = \frac{A_2}{A_1} \quad (4)$$

となる。

3.5章で示した平均風圧係数によって、自動換気装

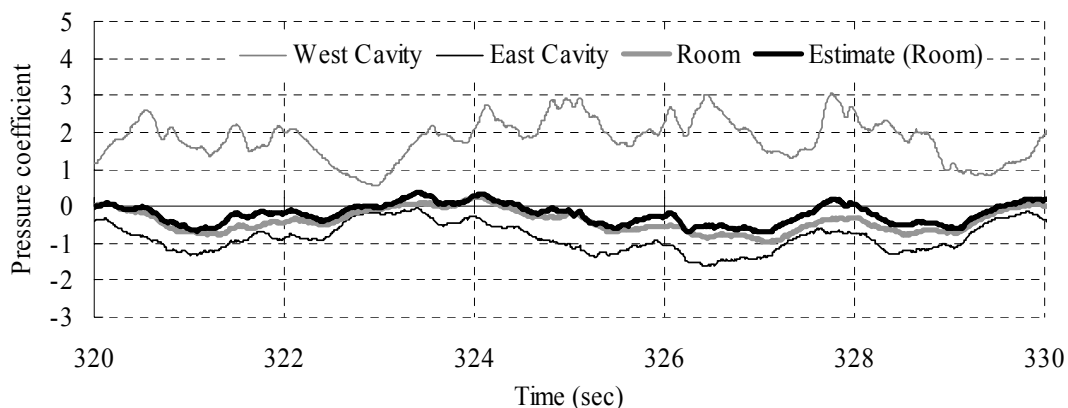


Fig.23 Records of pressure fluctuations in cavities and room

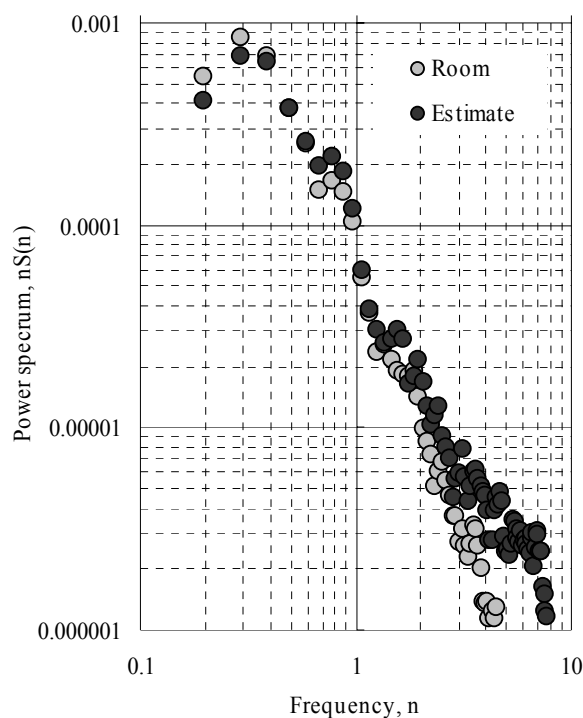


Fig.24 Power spectra of internal pressure in the room

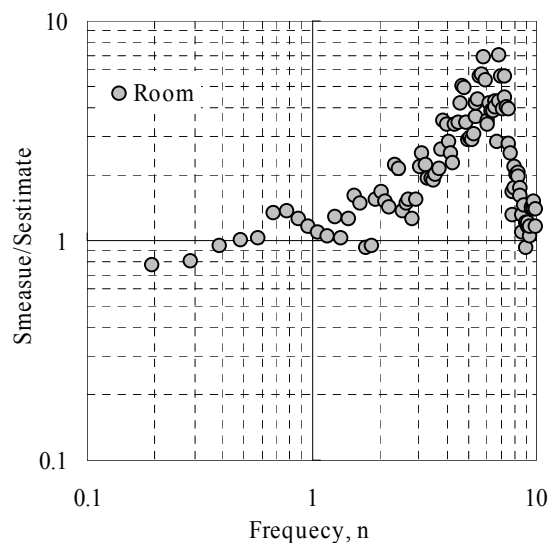


Fig.25 Ratio of power spectra

置が全て作動しているCase2の場合の開口比を求めると、 $\gamma=1.805$ となる。

上の関係が瞬間的にも成立するかどうかを確認するため、上の式により作った疑似室内圧の時系列と測定結果とを比較したのがFig.23である。Fig.23より、(4)式によって求めた風圧変動は、測定された風圧変動に極めて良く一致することが分かる。なお、3章で示したように、室内圧変動は東面キャビティ内の圧力変動とほぼ同様に変動している。

Fig.24は、(4)式から算出した推定室内圧のパワースペクトルを測定値と比較したものである。2Hz付近までは良く一致しているが、2Hz以上の高周波数域では推定値の方が大きいことが分かる。Fig.25は、推定室内圧と測定室内圧のパワースペクトルの比を示したものである。比は2Hz付近から7Hz付近まで急速に増大し、7Hz付近においては推定値のパワーは測定値のパワーの8倍程度になる。

Fig.26は、室内圧が西側と東側の開口比によってどのように変化するかを示したものである。西側キャ

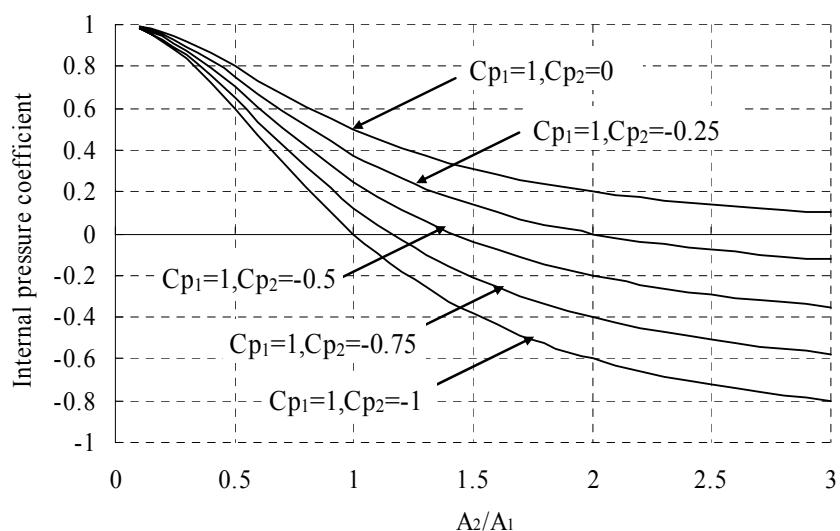


Fig. 26 Effect of open area on internal pressure

ビティ内の圧力係数を1として、東側キャビティの圧力係数を0～-1まで変化させている。キャビティ圧の内圧への分配比は開口比の2乗に比例しているため、開口比がわずかに変わると、室内圧は大きく影響される。例えば、東側の圧力係数が-0.5の場合、開口比が0.5では室内圧係数は0.7、開口比が1の場合には0.25、開口比が2の場合には-0.2となる。現行の建築基準法や建築物荷重指針で定める外装材用の内圧係数は0～-0.5となっているが、この値は建築物の各面

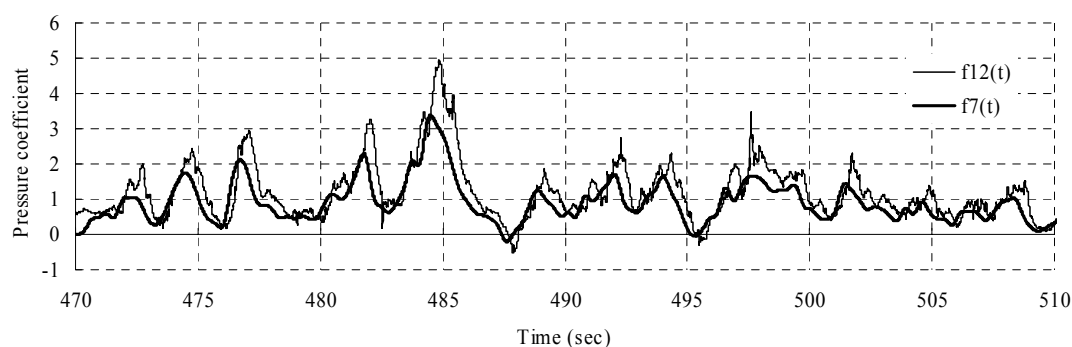


Fig.27 Comparison between original pressure fluctuation and f7 component of wavelet

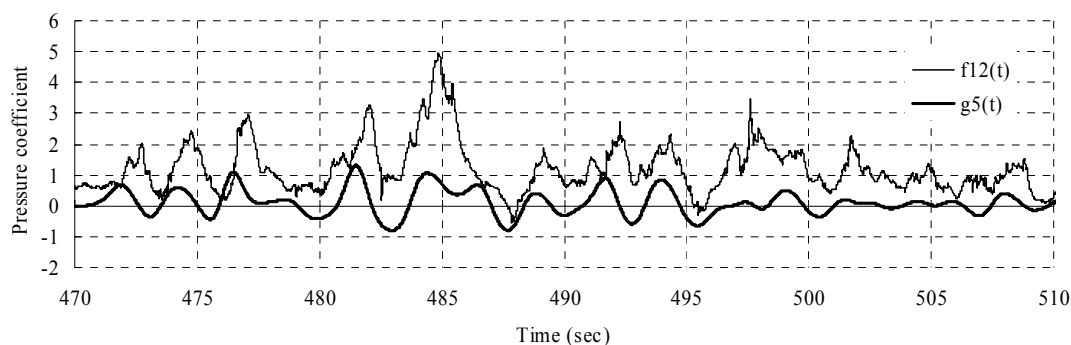


Fig.28 Comparison between original pressure fluctuation and g5 component of wavelet

の隙間(開口)面積が同じであるとして算定された値である。隙間の面積は建築物の外装の状況によって大きく変化するため、上記の結果からすると、もう少し幅をもって設定する方が良いと考えられる。

4.3 風圧変動の時間周波数特性

(1) ウェーブレット解析

自然風中では風圧は極めて大きく変動するため、これまで述べたスペクトル解析などの信号の定常性を仮定した解析方法では、ピーク風圧の性状が捉えられない可能性がある。時間とともに性状を大きく変える信号の非定常性を解析する手段としては、ウェーブレット解析がある。本節では、本測定で得られた信号についてウェーブレット解析を行い、その時空間的な特性を把握する。

本解析で用いたウェーブレットは4階のカーディナルBスプライン関数である(Chui(1992))。この関数は対称で滑らかなスケーリング関数を持ち、周波数分解能がよく振動のような周期的な信号の解析には適していると考えられている。また、効率よく計算が可能な多重解像度解析にも向いている。

解析は、西風の西北面アウトースキン中央点の風圧変動のデータに対して実施した。用いたデータは2007年1月6日23時55分10秒から51秒間の4096個(サンプリング間隔0.01秒)である。データは平均値を差し引いた後処理をした。多重解像度解析では、2の巾

乗で解像度が示される。データ個数が4096個の場合、最も次数の大きい $f_{12}(t)$ が元のデータを表し、次数の小さくなるにしたがって、高周波数域における変動が小さくなる。各時間における、各周波数における振幅の変化 $g_{j-1}(t)$ は、 $f_j(t)$ から次数が一つ小さい $f_{j-1}(t)$ を差し引くことで求めることができる。即ち、

$$g_{j-1}(t) = f_j(t) - f_{j-1}(t) \quad (5)$$

となる。

Fig.27は $f_7(t)$ と元の信号との比較、Fig.28は $g_5(t)$ と元の信号を比較したものである。 $f_7(t)$ では、1.56Hz以上の振動は含まれておらず、そのため風圧のピーク値の値がかなり小さいが、全体の様子は良く捉えられていると言える。 $g_5(t)$ は0.78Hz付近での変動を捉えたものであるが、ピーク風圧がほぼこの周期で変動していることがわかる。

(2) 移動平均による多重解像度解析

ウェーブレット解析は時間周波数解析にとって有効な手段ではあるが、我々の実務において必要となるピーク風圧の解析にとっては必ずしも有効とは言えない。それは、ウェーブレット解析で得られた結果と、物理現象あるいは設計荷重との対応がつけにくいためである。ここでは、風力と評価時間との関係を算出することに良く用いられる移動平均を用いた多重解像度解析を実施し、ピーク風圧の特性につ

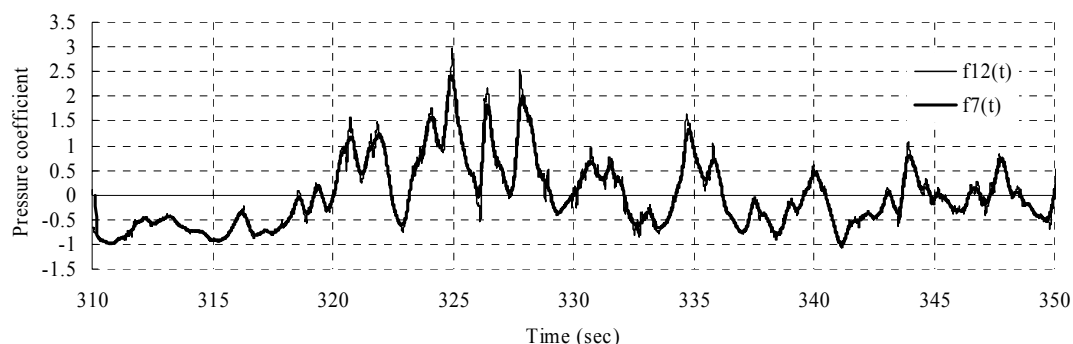


Fig.29 Comparison between original pressure fluctuation and f7 component of moving average

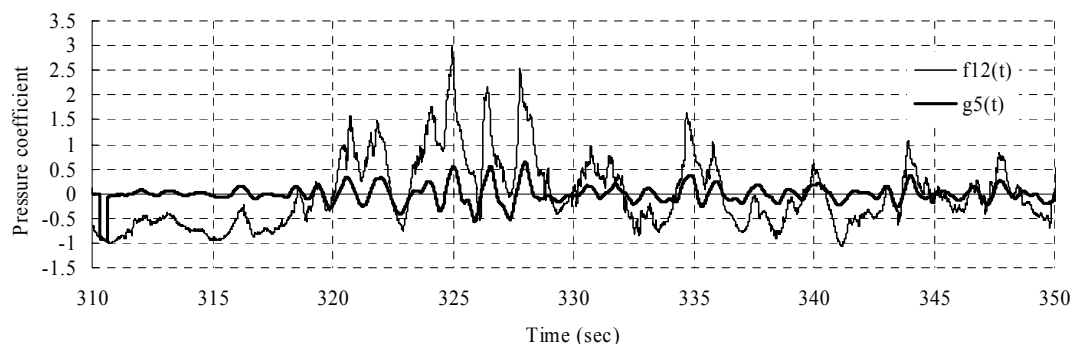


Fig.30 Comparison between original pressure fluctuation and g5 component of moving average

いて検討する。

Fig.29は、次数7の $f_7(t)$ を移動平均操作によって求めたものである。次数が7であるから、平均は $2^5=32$ 個のデータについて行っている。移動平均を用いる方法は、一定の幅を持つ矩形窓によるスケーリング関数（Haarのスケーリング関数）を用いて信号を処理する方法と原理的には同じであるが、Haarのスケーリング関数では離散的に処理されるため、32個ごとに値が変化する。一方、移動平均による方法はFig.29に示したように次数が変化しても波形は連続的に変化する。Fig.29に示されているように、この場合、32個の移動平均によってもピーク風圧はあまり低下しない。この点では、先のスプライン関数を用いた場合とは大きく異なっている。また、Fig.30は、 $g_5(t)$ を示したものであるが、ピーク風圧が生じる時の風圧変動の周期と極めてよく一致しており、風圧変動のような信号の解析には、移動平均操作の方がいいのではないと思われる。

5. 結論

潮岬風力実験所に、単層換気型の実大ダブルスキンを4つ組み込んだ模型を設置し、自然風中でダブルスキンに作用する風圧力等の実測を行った。その結果、次の結論を得た。

(1) ダブルスキンのピーク風圧係数を瞬間最大速度

圧を基準として評価した場合、風が正面から当たる場合には、ピーク風圧係数はほぼ平均風圧係数に一致する。

- (2) 1m^2 程度の面積を持つ外装材の場合のピーク風圧の評価時間は0.2秒程度が適切である。
- (3) ダブルスキン間のキャビティ内の圧力は、変動を含めて、上下の換気口の圧力の平均値となる。
- (4) 風上面においては、アウトースキンとインナースキン、それぞれ通常の外装材に作用するピーク風力(風荷重)の29%および86%を負担する。
- (5) アウトースキンの風力変動は、高周波数域、特にキャビティの空間に伴うヘルムホルツ共鳴周波数付近においては、アウトースキン及びインナースキンに作用する風圧変動の位相がほぼ逆転するため、風圧変動の倍以上のパワーを持つ。
- (6) インナースキンの窓の開閉により、反対側のインナースキンには大きな風力が作用する。両側の窓を開けると、室内を空気が流れ、場所によって室内圧は大きく異なる。
- (7) 室内圧は壁の隙間による開口面積を算定できれば、変動を含めてほぼ正確に評価できる。
- (8) 開口面積は室内圧に大きな影響を及ぼす。開口面積が2倍程度変わるだけで、室内圧は正から負へと大きく変化する。
- (9) 自然風での風圧データは極めて不規則に変動するが、耐風設計上重要なピーク風圧の特性を捉

えるには、ウェーブレット解析より移動平均による多重解像度解析が有効である。

謝 辞

本研究は、鹿島建設技術研究所と三協立山アルミ株式会社の協力により行われた。研究の実施にあたっては、両者の関係者に大変お世話になった。ここに記して感謝の意を表する。また、観測の実施にあたっては、技術職員の加茂正人氏、技術支援職員の河内伸治氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

河井宏允・石崎滂雄(1981):乱流中における2次元角柱の風上面に作用する風圧変動について、日本建築学会論文報告集、第300号、pp.51-59。
河井宏允・金杉忠久・小島浩士・西林達磨(2004):全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、第18回風工学シンポジウム論文集、pp.335-340
河井宏允(2006):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、京都大学防災研究所年報49号B、pp.473-486
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.

Chui, C.K. (1992): An Introduction to Wavelet, Academic press

Inculeta, D. R. Navarro, M.G. Isyumov, N(2007): The effects of an open double facade on structural and cladding wind loads, Proceedings of The 12th International Conference on Wind Engineering, pp.319-326

Harris, R.I. (1990): The propagation of internal pressures in buildings, Jour. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.34, pp.169-184.

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.

Kawai, H. (2007): Wind force on double skin façade with building high grazing, Proceedings of The 12th International Conference on Wind Engineering, pp.311-318

Liu, H. and Saathoff, P.J.(1981): Building internal pressure: sudden change, Jour. Eng. Mech. Div. A.S.C.E., Vol.107(EM2), pp.309-321

Filed Measurement of Wind Pressure on Story-High Double Skins with Open Windows

Hiromasa KAWAI, Hiroaki NISHIMURA*, Masayasu SUZUKI** and Yutaka OURA***

* General Building Research Corporation of Japan

** Kajima Technical Research Institute

*** Sankyo Tateyama Aluminum, Inc

Synopsis

Wind loads on double skin facades are investigated by field measurements using a model with 4 full scale double skin windows. Peak wind loads on the outer and the inner skins at a windward side are 29% and 86% of wind loads on an ordinary single skin respectively. Pressure in a cavity between the outer skin and the inner skin is the average of pressure at top and bottom open air inlet. Internal pressure in a room can be estimated by the theory derived from pressure loss and mass conservation. Time-frequency characteristics of pressure fluctuation was investigated by a multi-resolution analysis combined with moving average, which may be more suitable than a wavelet analysis for a non-stationary random process as like pressure fluctuation in natural wind.

Keywords: double skin, peak wind load, internal pressure, moving average, multi-resolution analysis