

低層小構造物に作用する風圧の計測

桂 順治

A WIND PRESSURE MEASUREMENT ON A MODEL OF LOWRISE BUILDING

By *Junji* KATSURA

Synopsis

Using a lowrise building model, a wind pressure measurement was carried out in the highly turbulent and gusty wind in the test field of Shionominaki Wind Effect Laboratory. The relationship between the variations of the dynamic pressure and the absolute indoor pressure was introduced to predict the temporal reference pressure during gusts. The slight non-uniformity of the gust produced the unsymmetrical flow pattern around the symmetrical model. Time lags were found in the formation of the pressure field on the surface of the model and differed from part by part on the surface. The pressure measuring system combined the absolute pressure transducers with the multi-channel tube manometer was successful to detect the change of the pressure field in detail.

1. はじめに

高層建物の場合にも共通していることであると思われるが、低層建物の場合とはとくに流れのスケールが小さく、物体まわりの流れの形態は複雑に変化する。その複雑さの程度は前報¹⁾に詳しく述べられている。ここでは準定常性が仮定できたのはたったの1例で、その他のものは現象を記述するだけで、どうにもならなかった。それは前報の実験模型が計画建物で、基本的な現象を探索しようとするよりは、設計荷重をどの程度にするかという方が問題であり、実物に忠実な模型が採用されたことであった。結果論ではあるが、壁面に突き出た16枚の控え壁があり、壁面に沿う流れを乱したために現象の複雑さを増した。計測方法としては本報のものとほぼ同じで、絶対圧型圧力変換器と多成分傾斜管マノメータとの併用である。当時、室内圧の検出はできなかったため、室内圧が基準となった計測になっていた。

この種の低層建物に対する実験計測として有名なものに Aylesbury の家屋模型の実験²⁾がある。マンホールの中を基準圧に選んだり、圧力変換器に Newberry が考案した歪ゲージ型のものを用いて、当時としては一流の計測であった。そのためこれを風洞実験で再現できないはずはないと信じ、世界各国で同じ模型を用いた風洞実験のキャンペーンが行われた。得られた結果は平均圧は何とか合ったが、変動圧は全くだめ、とか風洞実験同志はよく合うが、実物とはもう一つ、とかいった不幸なものだった。このような試みをしようとする意識には根本的な誤りを含んでいるものである。例えばマンホールから変換器まで基準圧を引いて来るにはいろいろ複雑な伝達系を含むであろう。もし基準圧が変化しないというならば、それは絶対圧計測と同義であろう。その意図としてはゆっくりした大気圧変動のようなものは除き、風圧変動のみを測定しよう

としたのであろうが、風圧変動にゆっくりした成分がないとは言えないし、大気圧変動に早い成分がないとも言えない。現時点でも強風時の大気圧変動を計測する確実な方法がなく、その影響がデータ解析の支障の一つとなっていることは以後の節でみられている。それから平均圧と変動圧に関する事項であるが、平均圧というのは風洞実験にのみ通用するものであることを認識すべきである。例えば、風速を等しいものとして、1/200の模型で安定した風圧を計測するのに10秒要したとする。これは実物の時間に直すと2000秒の平均ということになる。それが無意味であることは自明である。筆者が剥離流の乱れによる変動圧を基準速度圧で除して、それが一定値になることを確認し、変度圧係数と称した³⁾。それをスケールの小さい乱れを含む流れに対してまで用いたために混乱が生じた。ここでいう変動圧というのは剥離流が変動して生じる変動圧を指すのであって、速度圧の変化に伴って生じる変動圧ではない。しかし、これを明確に区別することは現時点でも難しいことである。

このような難しい問題を抱えながら、風洞実験の概念を捨て去り、実現象をできるだけ忠実に計測しようというのが本研究の意図である。

2. 計測方法

実験は前報¹⁾と同じく、京都大学防災研究所潮岬風力実験所の平坦な芝生の敷地内で行った。この敷地は冬期季節風に恵まれ、毎年10 m/secを越える風が3, 4回は吹く。Fig. 1は敷地内に設けた円形平面をもつ模型と圧力測定孔と風速計の配置を示す。模型は厚さ3 mmの合板にガラス布を貼付け、ペイントで仕上っている。このため気密性、耐水性にすぐれている。基準となる風向と風速のデータを得るため、風速計は水平2成分の超音波風速計(海上電気 DA-210)とした。風圧の計測には圧力変換器と傾斜管マノメータを併用した。圧力変換器は絶対圧計(豊田工機, PMS-1H, PD-106)で、圧力導入管を含めた系の固有振動数は約50 Hzである。この圧力変換器は温度補償はされているものの、 $\pm 1 \text{ kgf/cm}^2$ という広い動作域をもつので、使用範囲がわずか100 mmAq程度であるから、温度ドリフトはもちろんのこと、温度感度特性も一定でないという苛酷な条件下にある。しかしながら、雑音にさえ気を付ければ数10 dBの音圧をも検出できることがわかっている⁴⁾。そして後に示すようにマノメータと同じ圧の値を計測すれば、応答が遅いが圧をきちんと計測できるマノメータと、応答はよいが、圧の値自体が不確実な変換器とがうまく相互補間するのである。このような手の込んだことをしなくてももっと感度のよい変換器を用いればよさそうなのだが、風圧に比して桁違いに大きい大気圧変化のために、そのような変換器は壊れてしまう。この変換器を周壁に9点、屋根面端部に4点、季節風の風向を考慮して、風上側に重点をおいて配置した。測点の位置はマノメータと共用のよう

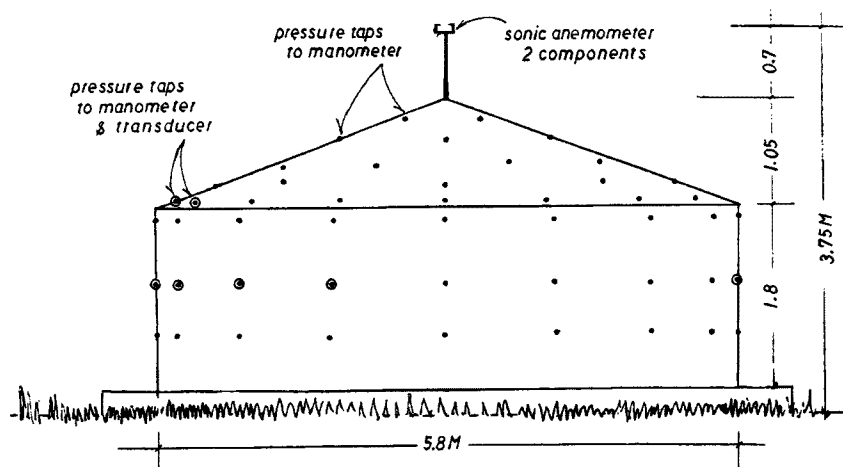


Fig. 1. Arrangement of apparatus.

に図示したが、現実には 20 mm ほど離れた別の点としており、応答特性が混乱しないようにしている。傾斜管マンノメータによる計測点数は周壁に 48 点、屋根面に 40 点設けた。測点からマンノメータまでの間は平均約 6 m にも及ぶ長いビニール管を介しているが、マンノメータの応答性が遅いため、その影響はない。マンノメータの応答特性は以前のものを改良し、内径 2 mm の管内を動く約 10% イソプロパノール溶液の粘性による時定数は 1.5 sec となった。このマンノメータの基準圧は室内圧である。室内圧の計測には変換器 (Setra system Model 239) の背圧側に断熱箱に入ったデュワ瓶を接続する方法で絶対圧計測⁵⁾した。

風速計、圧力変換器の出力は 32 チャンネルの PCM 型データレコーダ (NF 図路設計ブロック MS-525 他) に収録し、2 時間の連続観測を可能にした。マンノメータのデータはビデオカメラに撮影し、後にコマ送りして、必要な部分のみ目読した。このとき撮影と同時にパルス信号を発生させて、データレコーダに収録し、電気信号による入力との同時性を確保した。

3. 計測結果と考察

3.1. 基準静圧の設定

Fig. 2 では最大瞬間風速 21.6 m/sec の部分を含む 180 秒間の速度圧と室内圧のデータが示されている。室内圧のデータには上昇する大気圧成分が含まれており、風圧による成分のみを得るためには、これを除かななくてはならない。速度圧は風速データを 2 乗して求めたものであるから、大気圧の影響は入っていないと考えてよい。したがって、まず速度圧データから最大風速を含むトレンドがない部分を探すと図に破線で示した 60.3 秒間はその条件を満足する。幸いにもこの間の室内圧データのトレンドは直線的であり、これを大気圧の変化によるもののみと仮定して、これを除いたものを風圧によるものとみなす。

つぎに速度圧とトレンドを除去した室内圧および淀み点付近の変動圧との相互相関計算を行うと Fig. 3 のようになる。室内圧は速度圧に対して 0.875 秒遅れ、淀み点圧は 0.20 秒先行する。この事実は基準風速の測定位置によって、解析方法を工夫しなければならないことを示している。例えば、もし模型の風上端上方で基準風速を計測していたとすれば、淀み点での風圧と速度圧とは時差がなかったかもしれない。しかし、そこでの速度が模型全体の代表となるかどうかは疑問の余地があるということである。一方、淀み点の位置さえはっきりしていれば、基準風速など考えずに、そこでの変動圧を基準とするということを考えられる。しかしこれも複雑な乱れの中で淀み点に測点が当たる可能性は稀であろう。結局ここでは基準時刻としては淀み点近くのを、基準速度圧としては風速計の値を用いることにして、妥協することとする。つまり、淀み

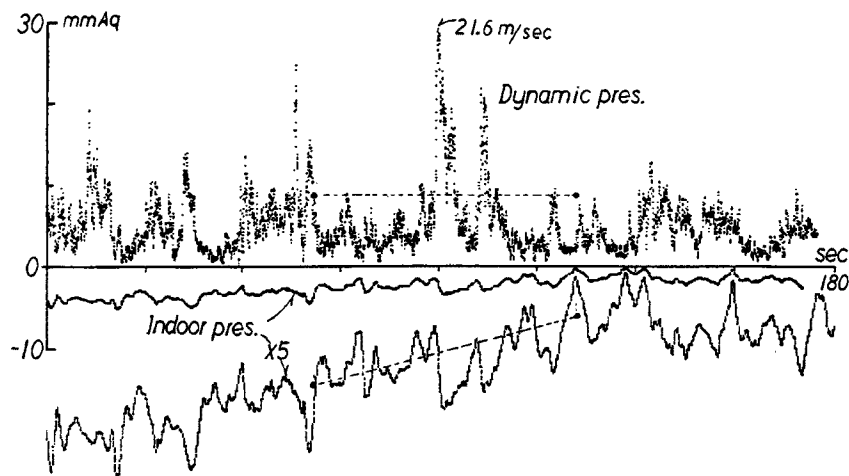


Fig. 2.- Records of dynamic pressure and indoor pressure including atmospheric pressure.

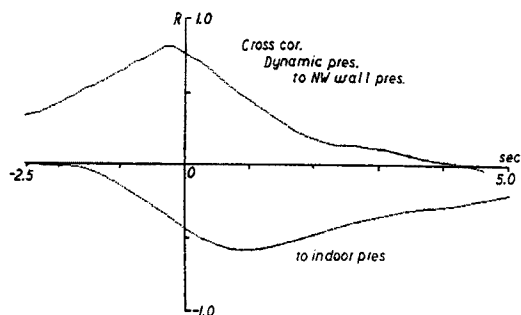


Fig. 3. Cross correlation of dynamic pressure to NW wall pressure and to indoor pressure.

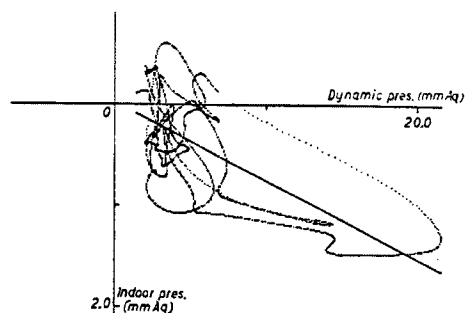


Fig. 4. Correlation between dynamic pressure and indoor pressure.

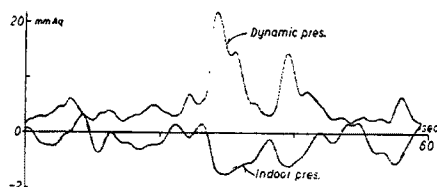


Fig. 5. Indoor pressure corresponding to dynamic pressure.

点における変動と室内圧との時間差1.075秒を室内圧が生じる模型固有の値と考えるのである。ここで速度圧と室内圧とが線形系の入出力関係にあると仮定し、固有遅れ時間に相当するローパスフィルターを速度圧にかけて同時相関をとれば Fig. 4 が得られる。このとき室内圧のバイアスを回帰直線が原点で0になるよう調節して、基準静圧を設定するのである。この相関図から言えることは相関係数が0.65とそれほど高くはないこと、とくに風の強くないところで回帰直線がどちらを向いても不思議ではない。これは風

速が25 m/sec以上でないと風圧係数が定まらないといった Dalglieth の疑問⁹⁾と軌を一にしている。すなわち大気圧変化だとして簡単にトレンド除去を行ったが、まだまだ大気圧変化が残っている可能性があり、それらの大気圧変動は速度圧が大きくなっても、あまり関係しないものだと考えられる。したがって速度圧が大きくなれば、大気圧変動が目立たなくなると考えれば現象を説明することができる。これほど短時間のものではないが、風がないときにも大気圧が変動する例⁹⁾が発見されている。その意味でここで行った Fig. 4 の方法は止むを得ぬものである。このようにして得た室内圧と速度圧との関係を Fig. 5 に示す。風の強い部分以外にもよく対応している部分が見られる。しかし、常に正の値をとる速度圧に対して、室内圧は正になったり負になったりして圧力係数など定める段階ではない。この室内圧を基準にしたマノメータデータはすべてこの室内圧の値で補正される。

3.2. 表面圧分布の変化

Fig. 6 は前項で基準静圧を設定することができた Fig. 2 の約1分間の風向頻度分布である。風速がほとんど0でも風向が定まるのはあまり意味がないと考え、速度圧の重みをかけた。解析時間内には二つの突風が見られ、ピークを中心に±5秒間の分布の占める部分をそれぞれ区分して示した。Fig. 7 には表面圧の全測点とともに、突風の方向を示したが、最初の突風がNWから6°N方向に、2番目の突風はさらに7°N方向に寄った方向から来ていることがわかる。このように一旦風向を設定してしまうとそのまま変らない風洞実験とは異なるのである。

Fig. 8 (a), (b), (c) はそれぞれ淀み点に近い変動圧を基点とした相互相関計算結果を示したものである。0で示した位置が淀み点に近い位置であり、そこにおける相関は自己相関である。Fig. 8 (a) は0点を基点にした反時計まわりの相関のずれを示している。1で示した位置の現象は淀み点よりやや進んでいる。この現象は2の点での相関を合わせて考えるとよくわかる。2の点は淀み点から50°ほど下流である。その点では遙かに進んだ正相関と、やや遅れた負相関とになっている。これら相関計算は統計的に均質なデータを扱っているわけではなく、単に波形の類似性と時間ずれのみを検出しようとするものであるから、突風時の値が大き

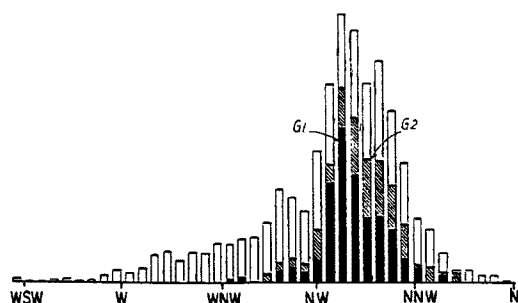


Fig. 6. Distribution of wind direction variation weighted by dynamic pressure.

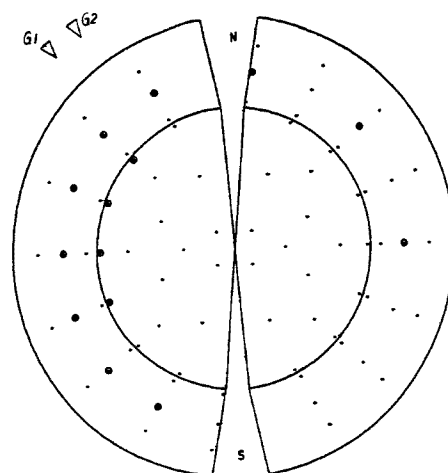


Fig. 7. Gust directions and arrangement of pressure tups.

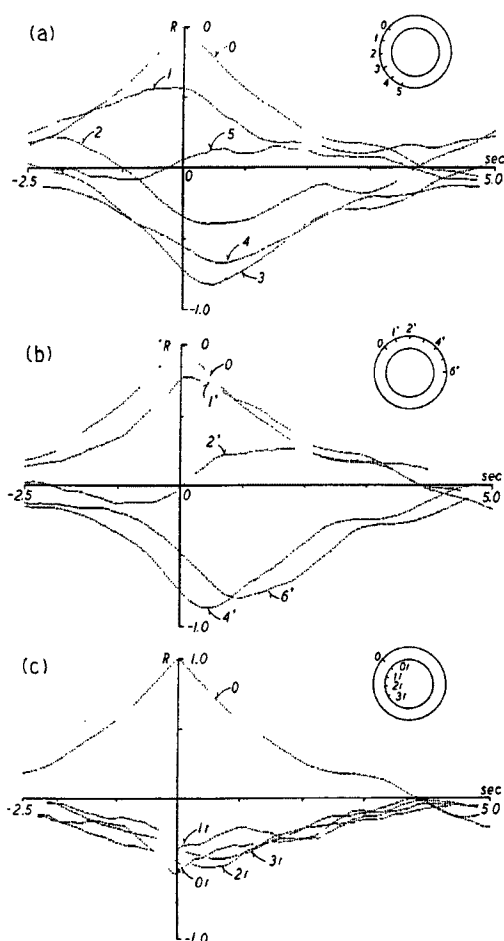


Fig. 8. Cross correlations of surface pressures to frontal wall pressure.

く影響しているものと考えることができる。そうすればこの正相関の位相の進みは突風時に西から北に向う風向変化があるということになる。測点3は負相関が大きく、側面に沿う流れがもっとも速くなる点に近い。測点4も同様の傾向を示すが、速度が落ちて、流れが回復していることがわかる。また注意深くみると、時間ずれが-1秒以前で相関の値が3と入替り、2の場合と同様風向変化の影響をうけていることがわかる。5の位置では淀み点とほとんど相関がなく、4の位置との間で現象の不連続性がみられる。その原因として剥離が考えられるが、後の分布図でみられるように大規模なものではない。Fig. 8(b)は0点を基点にして時計まわりに相関のずれを観察している。1'の位置は淀み点が0点との間にあることから高い相関が得られることは容易に理解できる。時間ずれが大きくなると、0点の自己相関と入替りすることも先の風向変化で説明できる。2'は(a)図の2の場合と逆対称である。ただ、2点が淀み点から50°下流だったのに対し、2'点では30°ほどである。これは対称的な形をもつ模型でもまわりの流れのパターンは必ずしも対称にならないことを示している。4'の形が(a)図の3に対応していることは明らかである。4と5の間で連続性が途切れていた(a)図とは異なり、6'に到ってもまだ連続性が保たれている。これも時計まわりの風向変化を考慮すれば容易に理解できる。前報¹⁾で、これとは逆方向の非対称性が現われたとき、地形の影響を疑ったのであるが、それもこの場合と同様わずかな風向変化の影響であることがここ

で明らかになった。**Fig. 8(c)**は淀み点と屋根面の端部から 20 mm の部分との相関を調べたものである。前報¹⁾ではこれらの点でのコヒーレンスの対応がよいことを見出ししていた。剝離流の乱れのために相関の値そのものは低い、その成分を除けば、よい対応が得られるものと思われる。しかしながら、壁面で風向変化の影響は時間ずれが前報と逆になっていることである。つまり屋根面での圧をみるかぎり、風向変化の影響はないものように思われる。前報でも壁面と屋根面では風向変化に対する追従性にずれがみられたが、そこでは逆に屋根面での追従性がよいということであった。これは前報の模型に設けられていた控壁の影響であることがここで明らかになる。つまり壁面に剝離を決定するような隅角部をもつ壁では風向変化の影響は受

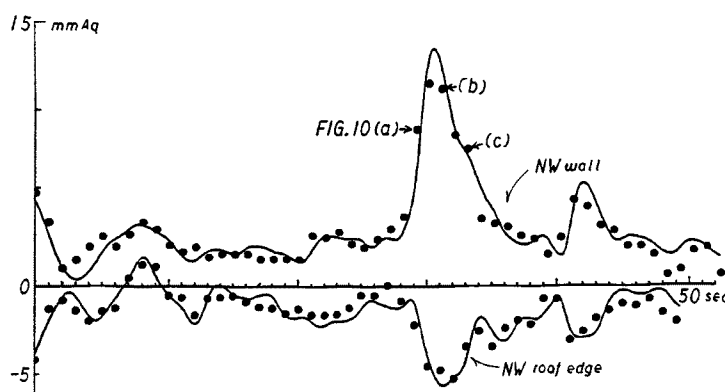


Fig. 9. Time indices in Fig. 10. and comparison of manometer data and transduced data.

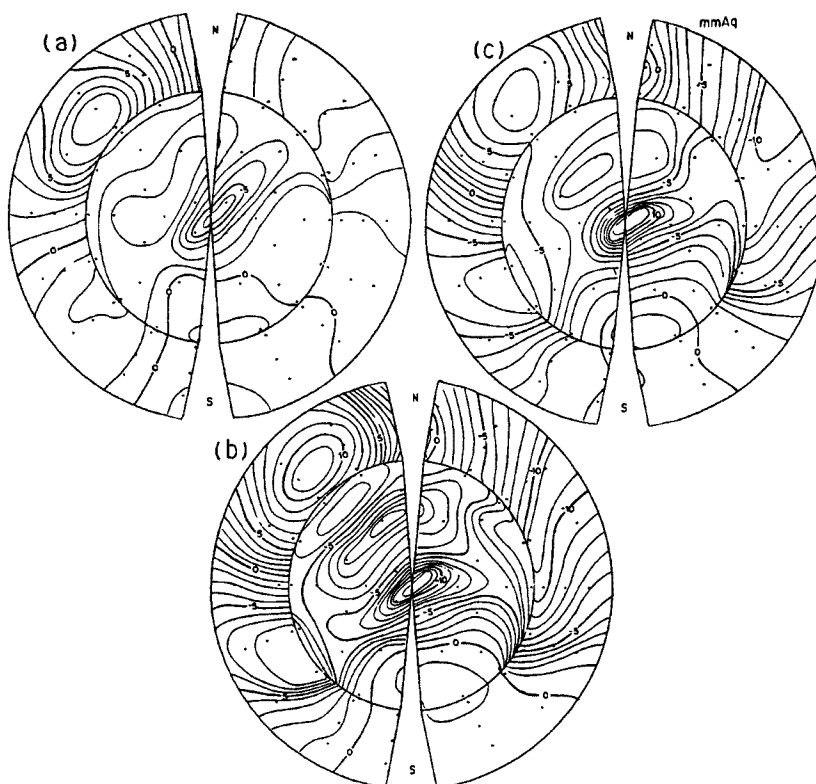


Fig. 10. Variation of surface pressure field due to gust.

けにくいということである。

Fig. 9 はつぎの Fig. 10 に示す分布図の時点を示すことを目的としたものだが、同時に 2 節で述べた変換器とマンメータとの相互補間の説明にも兼用している。変換器のデータにはマンメータの時定数 1.5 秒に相当するローパスフィルタがかけられている。双方の標準偏差を合やすことによって、変換器の倍率を定め、平均値を合やすことによって変換器のバイアスを定めることができる。そして変換器のフィルタをはずせば応答性のよい風圧変動が得られ、マンメータの方は多点同時計測が可能で、Fig. 10 に示すような分布図が得られるということである。Fig. 10 (a), (b), (c) は Fig. 9 に示す最初の突風の前、ピーク時より少し後、突風の後と 2 秒間隔での風圧分布の遷移を示している。(a) 図では全体的に風が弱い状態での分布である。しかし(b) 図と比較してわかることだが、淀み点近くの圧が他と比較して高くなっている。2 秒後の(b) 図では圧の強弱がはっきりしていて、模型周辺全体で流れの形態が完成に近いことを示している。変換器出力の相関から予測された風向変化による淀み点の N 側移動も周壁に沿う流れの跛行性もよく表現されている。またここで屋根面前縁近くの剝離再付着に伴う高低圧部も出現している。屋根面と壁面がなす隅角部に着目すると、等圧線が不連続になる部分で圧の高い方から低い方に向かって剝離が生じているはずである。そのように考えると、屋根面への吹上げは、Fig. 8 の測点記号を用いると、時計まわりに 2 の位置から 3' の位置に限定されている。したがって、その部分の壁面の事情に大きな変化がないかぎり、屋根面での風向変化の影響は小さいものと考えられる。下流側での流れの跛行性に注目すると、流れの速い北側沿いでは屋根面からの吹降しがかなり強く、下流への圧上昇は緩やかで、壁面での剝離はほとんどない。これに対して、流れの遅い面沿いでは屋根面からの吹降しは側面の最低圧部に見られる程度で、前の相関解析から予測した通り、測点 4 から 5 に向けて急な圧勾配が見られ、壁面での剝離が想定される。このようにして、淀み点の真後ではなく、かなり偏ったところに後流に接する面ができる。結局壁面に前縁剝離を決める隅角をもたない物体ではわずかな風向変化が大きな横力を発生させることになる。(c) 図はさらに 2 秒後の突風の終わり近くの時点での圧の分布である。淀み点近傍の圧の低下、屋根面前縁の低圧部の消滅を除いて、わずかに全体的な圧差の減少はあるものの、ほとんどそのまま流れの形態は残っており、流れの形態の消滅はその生成よりも時間を要するようである。これは応答性の悪いマンメータによる結果である可能性も否定できないが、これほど現象を鮮明にできるのは同時計測に負うところが多い。いずれにしろ、10 秒以内の現象であり、いわゆる瞬間最大風速のもつ意味は大きい。

4. まとめ

多成分傾斜管マンメータと絶対圧計測用圧力変換器を併用した圧力計測システムを完成させ、自然風中の風圧計測に成功した。結果としては、

- (1) 強風が持続する短時間ならば、基準静圧が設定できることを明らかにしたこと、
 - (2) 対称な平面をもつ物体でもわずかな風向変化によって大きな非対称性を生み出すことを示せたこと、
 - (3) 大規模な剝離を伴わない物体まわりの流れの形態の完成は短時間のもので、通常平均風圧といわれている概念は実現象としてはあまり意味のないものであることを示せたこと、
- である。本論では定性的な現象の記述に止まり、定量的な解析は今後の問題として残している。できれば準定常を通り越して、時間のずれを考慮した非定常問題に進みこれを完了させたい。

謝辞

本研究は模型の作成に始まり、計測装置の準備、その維持管理、計測の実施と潮岬風力実験所の林助手、尾崎技官、河内技官の尽力に負うところが多い。とり分け尾崎技官にはマンメータの改良、ビデオカメラの同時性を確保するパルス装置の考案、マンメータデータの読み取りまで、面倒をみていただいた。重ねて感謝の意を表します。

なお、室内圧計測が成功した時点で、取扱いの面倒な絶対圧計測を室内圧を基準とした安定度がよい差圧

計測に切替えていくことが好ましい。その最初の試みとして科学研費一般研究 B「台風時の風の特徴およびその構造物に対する影響について」により購入した圧力変換器 (Setra system Model 239) は有用であった。

参 考 文 献

- 1) 石崎潑雄・桂順治：自然風中の模型ドームに作用する風圧について，京大防災研年報，第25号 B-1，1982，pp. 221-231.
- 2) Eaton, K. J. and R. J. Mayne: The Measurement of Wind Pressure on Two-Story House at Aylesbury, J. Ind. Aerodyn., vol. 1, 1975, pp. 67-109.
- 3) Katsura, J.: Fluctuating Wind Pressure on the Side Surfaces on Models with Long Rectangular Sections, Proc. 2nd USA-Japan Research Seminar on Wind Effects on structures, 1976, pp. 113-124.
- 4) 桂順治・守光正幸：変動風圧力変換器プローブにおける Helmholtz の共鳴現象について，日本建築学会大会学術講演梗概集，1972，pp. 373-374.
- 5) 桂順治：室内圧計測用擬似恒圧空気溜の試作，京大防災研年報，第31号，B-1，1988，pp. 393-398.
- 6) Dalglish, W. A.: Comparison of Model/Full-Scale Wind Pressures on a High-Rise Building, J. Ind. Aerodyn., Vol. 1, 1975, pp. 55-66.