

## 大気乱流中における多面体形静圧検出装置の試作について

桂 順治

### ON A POLYHEDRON TYPE DETECTOR OF STATIC PRESSURE IN TURBULENT FLOW OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

By *Junji* KATSURA

#### Synopsis

The feasibility of a omnidirectional probe of the static pressure in the atmospheric boundary layer was investigated by using the internal pressure of a perforated globe with circular rises corresponding to 32-hedron and the dynamic pressure observed by an anemometer. In the wind tunnel test there were two kinds of flow pattern due to the wind directions; one was symmetrical and the other asymmetrical. The quasi-steady condition required the wavelength beyond 200 times diameter of the globe in consequence of the flow directional oscillation test in the uniform flow. The variations of the internal pressure and dynamic pressure in the field test correlated only in strong gusts with peak speed over 10 m/sec at 2 m height of ground. The internal pressure coefficient could be derived from the correlation coefficient between those pressures and coincided with that of the wind tunnel smooth flow. The static pressure detector of polyhedron type is hopeful, if the number of facets increases and the frequency response of the internal pressure is measured elaborately.

#### 1. はじめに

自然風中で構造物表面に作用する風圧を計測すると、定常的な風洞気流中の計測からは予測できない結果が得られることが多く<sup>1),2)</sup>、これは自然風の時空間的不均一性に起因するものであると考えられるが、大気中の静圧自体の変化が現象を複雑化しているものもあるように思われる。前報<sup>2)</sup>の風圧計測では基準となるべき一定の静圧が存在しないことがわかり、突風時の速度圧と室内圧との変化の様子から適宜決定せざるを得ないものであることを示した。このとき速度圧と室内圧との変化は比例的ではなく、突風の直前から中ほどにかけては静圧が高くなっている傾向が見られた。このようなことから大気乱流中の静圧の計測方法の開発を試みた。

これまで乱流中の静圧を計測する方法として成功しているものとして Elliott<sup>3)</sup>のものと Kataoka<sup>4)</sup>等のものを挙げる事ができる。Elliottのものの感部は縁から剝離が生じにくいように縁を仕上げた薄い円板で、それを平均流と平行に置き、円板の中央部の両側の圧の平均値が静圧になるというものである。これは平面に沿って流れる平均流がある場合には有効なのだが、通常の凹凸があり、円板に垂直な成分も発生すると思

われる野外の計測には使えない。Kataoka 等のもは一樣流中の球殻の上流側に生じる圧力分布から圧を相殺する16点を定み点から放射状に選んで孔をあけたものが感部になっている。偏角が $35^\circ$ まで速度圧の2%以下に抑えられるというものである。これならば構造物が存在する接地境界層内でも絶えず風向に注意していれば使えないことはないかもしれない。

しかしながら、ここでは速度圧は別に計測するものとして、スカラー量である静圧を無指向的に検出する方法を追求してみる。まず指向性がないということは外形が球であることを意味し、球殻の表面に無数の孔が均等にあるとすれば、その内圧は速度圧によるものと静圧によるものから成る。そこで速度圧による成分を差引くと、静圧によるものだけが残るとというのがこの方法の基本原理である。しかし球に均等な有限個の孔を設けることができるのは外接正20面体の面の中央、もしくは内接正12面体の頂角に相当する20個までである。しかるに正12面体の要素である正五角形の中点を外接球面までもち上げて得られる60面体、その要素である3角形の重心を外接球面までもち上げて得られる240面体、さらに同様の操作を繰返して得られる960面体と面の数を増しても、要素の3角形は正3角形から離れていくとは考えられない。つまり近似的ではあるが孔の配置は均等に近くなると思われる。ここではいきなり面の数を増しても、実験に要する時間的制約から正20面体と正12面体の合いの子である32面体相当のものについて、Reynolds 数の影響、指向性、多数の孔の加算平均効果、内圧の流速変化に対する準定常性、野外での突風応答など基本的現象について述べる。

## 2. 実験方法

作製した検出器は Fig. 1 に示す。球殻は市販されているグローブ温度計の覆いを用いた。直径は15 cmで、素材は銅である。圧力導入孔は内接する正12面体の頂点20点と、面の中央に対応する位置12点であるが、1点は内圧取出し用の柄につぶされている。この圧力導入孔の位置はつぎのように見ることできる。すなわちこの球殻を中央水平面で2分割すると、内接する正20面体の頂角の一つが頂点の孔に一致する半球で、同じ半球が下から $36^\circ$ ずれてついている。そして底部が柄になっているのである。圧力導入管は粘性による加算平均機能を考慮して内径2 mm、長さ10 mmとした。

風洞実験は計測部が室内開放形になった回流形風洞で行い、その吹出口径は1 mで正8角形になっている。野外実験は潮岬風力実験所の芝生がある実験場で、冬冬季節風下で行った。周囲とくに障害物のない場所で、高さ2 mのポールの上に3成分の超音波風速計(海上電機 DA 310)を設置し、ポールから90 cm離れた周囲 $120^\circ$ 間隔の3地点に検出器を3個、柄を下向けに配置した。検出器の柄を軸にした回転方向は特に揃えていない。

圧力変換器は絶対圧型(豊田工機, PSM 5-1 H)で、補助的に差圧型(Setra System Model 239)を用いた。データ収録には風洞実験ではデジタルレコーダ(TEAC DRFI)、野外ではPCM型レコーダ(NF回路設計ブロック MS-525)を用いた。

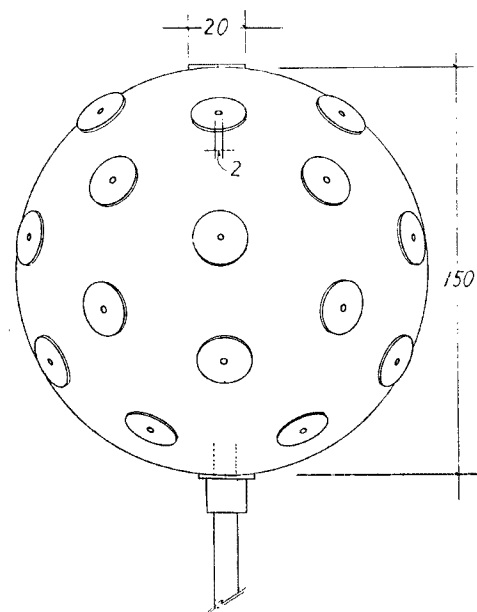


Fig. 1. Probe with 31 rises and taps.

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 Reynolds 数について

検出器の直径は 15 cm, 風速を 20 m/sec とすると, そのときの Reynolds 数は約  $2 \times 10^5$  となって臨界値に近い。亜臨界と超臨界での表面圧の平均値は圧力係数でそれぞれ  $-0.29$  と  $-0.44$  と異なるため, できるだけ, 臨界域を避けるべきであると考えた。そのために設けたものが, 直径 2 cm, 厚さ 2 mm の突起であり, その効果により, Fig. 2 に示すように超臨界と亜臨界の中間的な表面圧分布が得られた。この分布は風速を 10 m/sec および 25 m/sec に設定して得られたもので, 厳密には高風速の場合に背圧が上昇して Reynolds 数の効果が認められるが, 等圧線を共通にしても不自然さはないほどその差は小さい。また背面の対称性も崩れているが, これについては後ほど論じる。

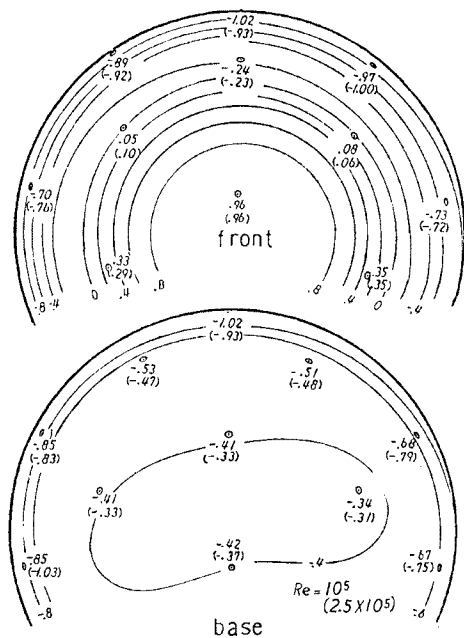


Fig. 2. Pressure distribution in vertical style.

なお, この実験は Fig. 1 に示す状態で内圧の取出し柄を鉛直にし, 紙面の正面から流れを当てて行った。

#### 3.2 指向性について

本検出器のように圧力導入孔が少ない場合, 指向性を調べるには種々の風向についての測定が必要であると思われるが, ここでは無指向の可能性の検討方法として, Fig. 3 に示すように柄の軸を水平面から  $45^\circ$  に固定して, 鉛直軸に  $360^\circ$  回転する方法を用いた。その結果は期待に反して, 内圧係数が大きく変化することが同図よりわかる。 $180^\circ$  の場合を中心とするほぼ対称的な変化の様子から, 製作誤差的なものではない。また  $0^\circ$  の場合と  $180^\circ$  の場合とで近い値を示すことから柄の影響は小さいと考えられる。結局これらの変化

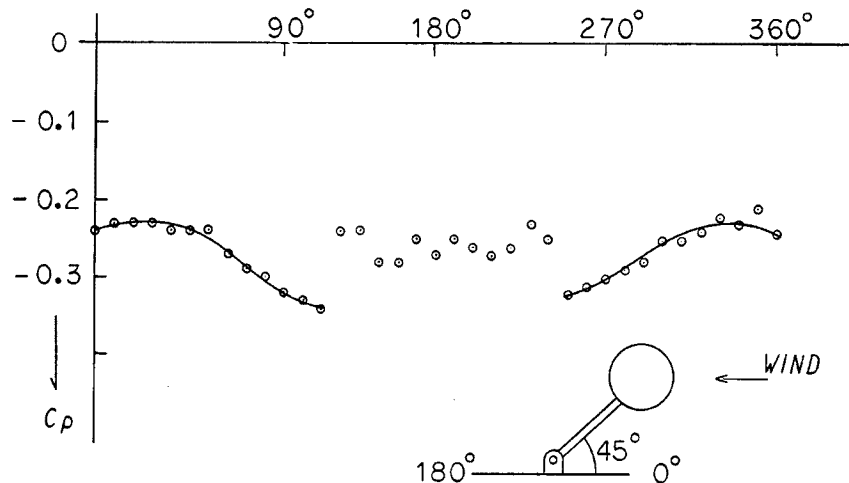


Fig. 3. Internal pressure change to vertical rotation, keeping  $45^\circ$  inclination.

は検出器上流部に沿う流れと突起との位置関係が原因であり、それによって生じる検出器まわりの流れの形態が変化するものと考えた。90°の場合が前項 Fig. 2 の柄を鉛直にした場合に相当することから、これを縦型と称し、柄を下流に向け主流に平行にした場合を横型と称して、流れの形態をこの2つに代表させる。横型の圧力係数の分布を Fig. 4 に示す。Fig. 2 の縦型と比較して背圧が高く、突起の効果が強いのを示している。両者の違いとしては Fig. 4 で計測点に突起があることを考え合わせると、淀み点をはじめとして放射状に連続して突起を通過する部分と、突起の間を通過する部分とがはっきりしているのに対して Fig. 2 では突起を通らずに流下するせん断層はほとんどない。したがって結果が逆であっても不思議ではなさそうである。もう一つの見方として、縦型の場合水平面で検出器を半分に割ったとき、上半分と下半分では突起の分布がわずかに異なる。例えば Fig. 1 で、紙面からの流れに対して上半分の突起の数が上流寄りに多くなる。

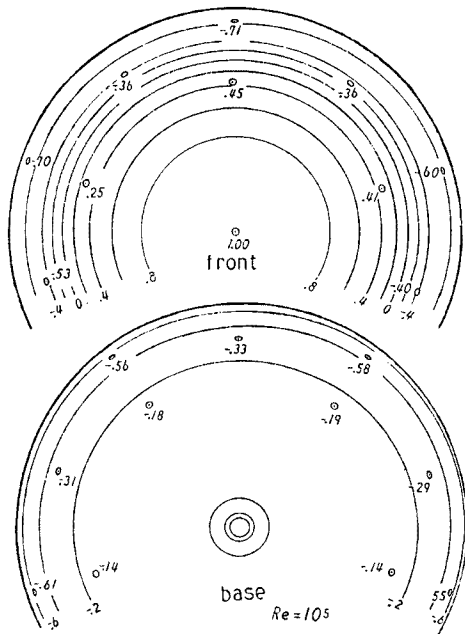


Fig. 4. Pressure distribution in horizontal style.

これを鉛直軸まわりに36°回転し、柄の部分の点を無視すれば、上下関係が逆になるためその中間に対称性を保つ角度が存在するかも知れるが、そうではなく、鉛直軸まわりにいくら回転させても内圧の変化は誤差的なものである。Fig. 3 の90°の場合は Fig. 1 で18°の回転に相当しているが、内圧は縦型のものである。このように2種類の流れの形態を考えると Fig. 2 の背面が対称にならないことも理解でき、Fig. 3 で横型に相当する角度が広いことも納得できる。もしこのような理由ならば、多面体の面数を増やすことによってこの問題を解決することができる。Fig. 3 において110°で流れの形態が急変する部分が見られる。検出器が柄よりも上流にある場合の角度に対する内圧の変化は連続的なものであるから、これは柄の部分で生じる乱れの影響であろう。

3.3 加算平均機能について

Fig. 5 には突起部と圧力導入孔の断面図を添えてある。いかに各導入孔の製作精度が揃っていても、流れ

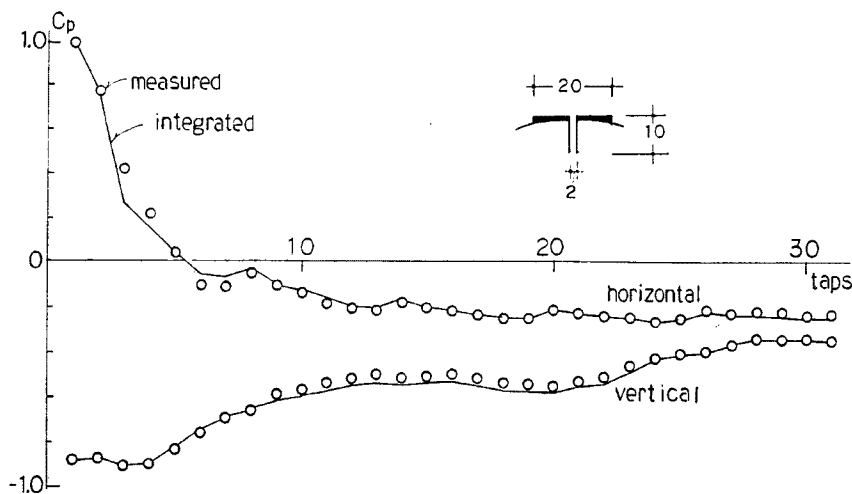


Fig. 5. Averaging function of multi-tap system.

に接している外側と、ほとんど流れのない内側とでは、内外の圧差に比例した流量が生じるとは考えにくい。そこで本質的には各点での圧力計測方法と同じなのだが、最初にすべての圧力導入孔をテープで塞いでおき、順次導入孔を開放して内圧を計測し、各個別に計測したものを算術平均した場合と比較した。Fig. 5は横型の図が淀み点から順に開放したもので、縦型の図が負圧の強い頂部から順に開放したものである。なお、実線は平均値を示している。圧導入管端部近傍の流れに関する不確実性にかかわらず、また圧差の大きい場合の影響が誇張される傾向にかかわらず、孔の数が30に近くなると、内圧が表面各点での圧の平均値に近く定まるといふ加算平均機能はこの場合うまく働いている。最終の内圧係数は縦型で $-0.35$ 、横型で $-0.25$ であった。

### 3.4 内圧の準定常特性について

1節で述べたように自然風は本質的に非定常である。しかし緩い非定常性であれば準定常の仮定が期待される。非定常性の強さは間違いなく Euler 座標での流れの加速度であるが、物体の大きさを長さの尺度とし、準定常という概念を考慮すると、単に乱れのスケールあるいは波長といった長さで非定常性の程度を表わすことができるものと思われる。つまり物体の大きさに比して十分大きいスケールの変動からスケールを小さくするとき、応答が準定常からずれる度合いを知ることが目標とするのである。

ここでは検出器を一樣流中で正弦的に動かすとき、速度圧の変動に対して内圧の変動の位相がどれだけずれるかといったもっとも単純な方法を用いた。その方法は Fig. 6 の添図に示すように検出器を横型にし、長めの柄の2点を天井より V 字形のひもで吊るして、別のひもで風洞の下からメトロノームに合わせて手で揺らせるだけである。その周波数範囲は $0.33\sim 1.6$  Hz とあまり広くないが、流速の変化 $3.5\sim 20.9$  m/sec を重ねると波長は $2.2\sim 63$  m とかなり広くできる。この場合波長といっても1周期間の風程であるが、それで十分であろう。また振巾は風速や周波数により一定ではないが、検出器の径の $1\sim 2$ 倍程度としたので速度振巾も $3$  m/sec. 以下となっており、流速が最低のときでも逆流状態にはならない。最低周波数と最高流速の組み合わせは正弦波が得にくく、波長として十分に長いのでデータから除いた。速度圧の波形の検出は柄に固定された I 形プローブをもつ熱線流速計により行い、内圧は柄の端部に絶対圧形圧力変換器を埋め込んで蓋をして検出した。

Fig. 6 は横軸に周波数  $n$  を検出器の径  $d$  と流速  $U$  で無次元化した量を対数スケールでとり、縦軸に時間

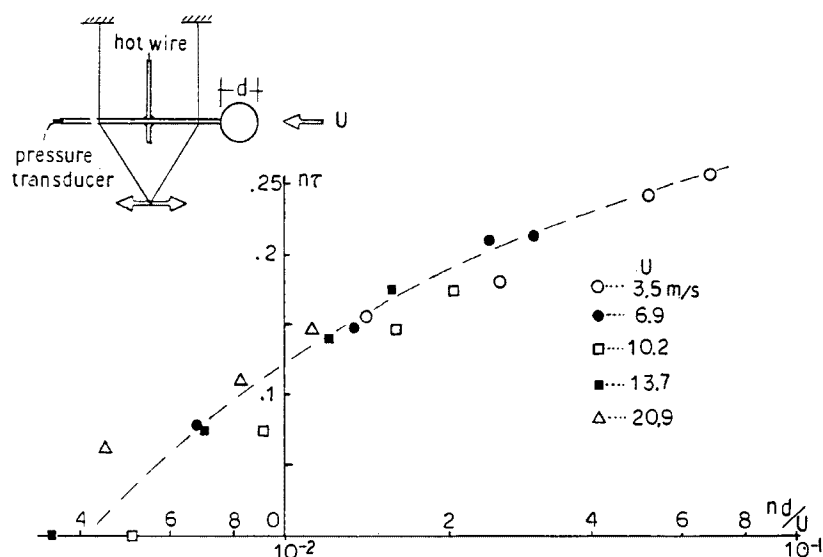


Fig. 6. Phase lags of internal pressure to dynamic pressure.

遅れ  $\tau$  を周期  $1/n$  で無次元化した量をとって、各計測値をプロットしたものである。したがって縦軸の 0.25 というのは  $90^\circ$  の位相遅れに相当する。粗っぽい計測ではあるが、結果は一定の傾向を示している。柄の部分の共振周波数は  $50\text{ Hz}$  以上、密閉した室内に検出器を入れ、扉の急開による応答時間は  $1/300\text{ sec}$  程度、圧導入孔内端に円環渦の生成を伴うようなものについては実験を行っていないが、もしこれが顕著ならば、Fig. 6 で流速にかかわらず周波数が等しいときに時間遅れが等しい傾向を示すはずである。したがって図示した時間遅れは検出器まわりの流れの形態を形成するのに要する時間と考えられ、位相差がほとんど無視できる無次元周波数  $nd/U$  を  $0.005$  とすれば、球のような非流線形物体に準定常仮定が成立つ波長は径の  $200$  倍にもなるということがわかった。

3.5 野外試験

以前に検出器 1 個と超音波風速計 1 台との系で予備試験<sup>5)</sup>をしたところ、速度圧と内圧との時間変化に相似性が乏しく、静圧変化がかなり強いものと予測されていた。ただ、検出器と風速計の設置位置の関係の問題を含んでいる可能性も考えられたため、今回は Fig. 7 の添図に示すように 3 個の検出器を正三角形に水平な流れに対して縦型で配置し、その中央に風速計を設置した。計測の高さの基準を地上  $2\text{ m}$  とし、風速計の感部はやや高めに、検出器の高さをやや低めに、風速計に検出器の後流の影響を受けにくいよう配慮した。

3 個の検出器からの出力である内圧の時間変化はわずかな時間ずれを除いてほぼ同一であったため、この程度ならば設置位置には問題はないことがわかった。Fig. 7 では速度圧の時間的变化に対応するものとして、3 個の内圧の平均値を示した。気圧の絶対値は問題にしていなくて、変動のみを描いている。ゆるやかな気圧の上昇は気圧配置の移動に伴うものとみなすことができるが、波形として見えるより短周期の変動で、速度圧に対応していることがわかるのは中央の突風の部分ぐらいである。この内圧と速度圧から準定常性を仮定することも難かしいため、風洞実験とは別に圧力係数が求められるかどうかを検討してみる。

検出器の内圧  $X_n$  は一応速度圧  $q_n$  により定まり、その係数を  $C$ 、2 乗誤差を  $S$  とすれば、

$$S = \sum_{i=1}^n (X_n - Cq_n)^2 \dots\dots\dots(1)$$

ただし  $n$  はデータ個数である。 $S$  を最小にする  $C$  の値は  $dS/dC=0$  より

$$C = R \frac{X_{rms}}{q_{rms}} \dots\dots\dots(2)$$

与えられる。ただし  $R$  は  $X_n$  と  $q_n$  との相関係数、 $X_{rms}$ 、 $q_{rms}$  はそれぞれ  $X_n$ 、 $q_n$  の実効値である。いま一時間余の連続データからガストピークを含む  $10$  秒間、 $500$  個の  $X_n$ 、 $q_n$  を  $30$  組選び、 $R$ 、 $X_{rms}$ 、 $q_{rms}$  をそれぞれ計算し、 $R$  の符号を変えて示せば Fig. 8 が得られる。ここで  $X_{rms}/q_{rms}$  の値は  $R$  が  $1$  に近いと

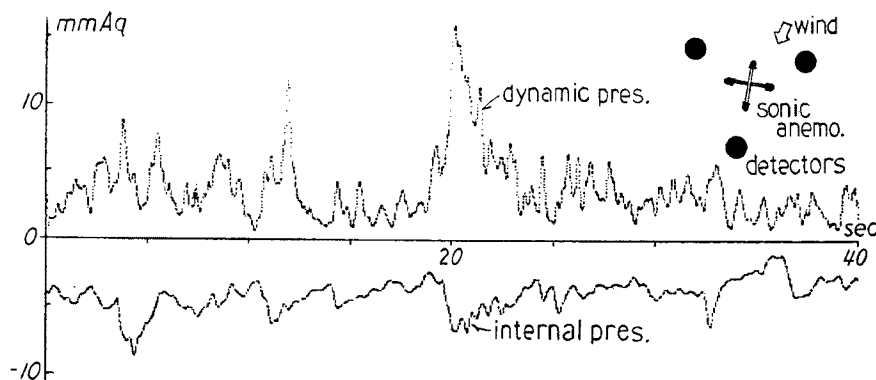


Fig. 7. Variations of dynamic pressure and internal pressure in natural wind.

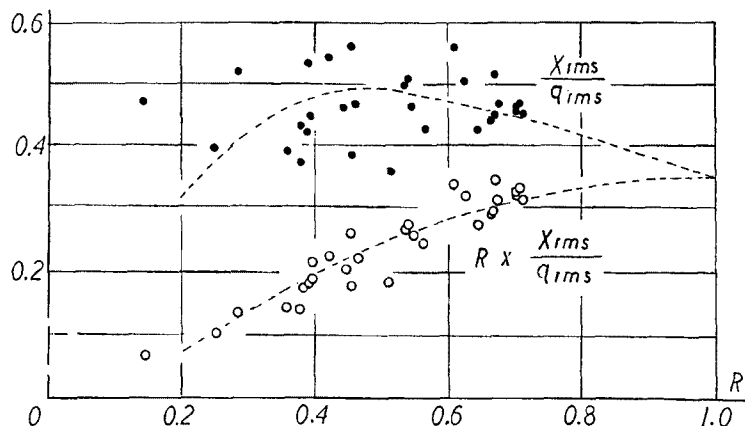


Fig. 8. An estimation method of internal pressure coefficient.

ここでは  $R$  に関して直線的に減少するものと仮定すると、 $C$  の値は上に凸の放物線となる。その頂上を  $R=1$  ところになるようにして、回帰放物線を描くと図の破線が得られる。 $R=1$  に対応する  $C$  の値は0.35となり、風洞実験の縦型の内圧係数-0.35と一致する。これは自然風中のこの程度の大きさの物体まわりの流れは風洞の一様流中で再現できることを示している。この結果より準定常性を仮定するためにはできるだけ内圧と速度圧との相関係数が大きいことが必要となるのだが、この場合相関係数が0.6以上のものはガストピークが10 m/sec 程度以上のものであった。つまりスケールの大きい速度変動のみが内圧に影響することがここにもみられている。

#### 4. ま と め

球に近い中空の多面体に孔を設け、指向性の少ない内圧から、大気乱流中の静圧を検出する試みについて、いくつかの項目について実験を行ったので、結果を以下にまとめておく。

- (1) Reynolds 数の影響については表面に適当な突起物を設けることによって解決できる。
- (2) 32面体では流れの対称性が崩れる方向が存在する。
- (3) 直径15 cm の球殻で、内径2 mm 長さ10 mm の圧力導入孔の管は30点ぐらいで加算平均機能をもつ。
- (4) 球状物体まわりの流れに準定常性を適用するためには、径の200倍もの速度場のスケールを要する。したがって大規模な突風については準定常性の仮定も成立つ。小規模なものについては検討を要する余地を残す。
- (5) 直径15 cm 程度の球状物体では自然風中でも風洞の一様流中でも流れの形態はあまり変わらない。

以上の結果より(2)の問題は面数を増すことによって解決する。(4)の問題は難かしそうであるが速度圧の影響が存在しない状態が最良という立場から見れば、3.4で行った動特性をより詳しく行うことによって、よりよい補正法が考えられる。

#### 謝 辞

本実験を行うに際して、検出器の製作は羽野技官、風洞での圧力計測は杉政技官に担当していただいた。また、自然風中の計測は潮岬風力実験所の林助手、尾崎技官、河内技官にお世話になった。ここに感謝の意を表します。なお本研究は文部省科学研究費一般研究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」の一環として行った。

## 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) 桂 順治：低層小構造物に作用する風圧の計測，京大防災研年報，第32号 B-1, 1989, pp. 413-420.
- 3) Elliot, J.A.: Instrumentation for Measuring Staticpressure Fluculation within the Atmospheric Boundary Layer, Boundary-Layer Met.,.2, 1972, pp. 476-495.
- 4) Kataoka, T., Y. Mitsuta and O. Tsukamoto: The Development of a Fast Response Static Pressure Instrument for Field Use, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 63, 3, 1989, pp. 351-357.
- 5) 石崎潑雄・桂 順治：突風時における球形検出器の内圧応答，日本建築学会大会学術講演梗概集，1984, pp. 1053-1054.