

自然風中にある角柱表面に作用する風圧変動に 関する基礎的研究

石 崎 潑 雄・河 井 宏 允

FLUCTUATING WIND PRESSURE ON A SQUARE CYLINDER IN NATURAL WIND

By *Hatsuo ISHIZAKI and Hiromasa KAWAI*

Synopsis

This paper describes the experiments of fluctuating wind pressure on a square cylinder in natural wind.

As the results of measurements some characteristics of fluctuating wind pressure were obtained as follows.

1. The spectral density of fluctuating pressure in higher frequencies on a windward wall was smaller than that of fluctuating velocity pressure in free wind.
2. The spectral density of fluctuating pressure on a leeward wall had a peak at $nD/V=0.1$.
3. When the angle of attack was zero, periodical pressure fluctuations on the walls of both sides in wind direction were observed.
4. The angle of attack had a marked influence on the characteristics of the fluctuating pressure on the walls of both sides in wind direction. In the case of the angle of attack 25° the spectral density of wind pressure fluctuation on one side of walls had a peak at $nD/V=0.12$ due to vortex shedding but the spectral density of that on the other side had a tendency to decrease with the frequency of pressure fluctuations increasing.

1. ま え が き

建築物に加わる風力の研究は、風荷重を静的な外力と見なし、様々な形の建築物について平均風圧係数、平均風力係数を求めるという形で進んできた。しかし近年、建築物が大形となり、しかも軽量化するにつれ、従来一部の構造物についてしか問題とはならなかった風による建築物の振動がきわめて重要な問題となってきた。しかし、風による構造物の振動に関する本格的な研究は、ようやく十数年前から始められたにすぎず、いまだ説明すべき多くの問題が残されている。

建築物の風による振動問題を説明するためには、建築物自体の動的諸性質を詳しく知ると同時に、建築物に加わる外乱（変動風力）の性質を詳細に把握することがきわめて重要である。

高層建築物の断面形はそのほとんどが矩形である。従って角柱に加わる変動風力の性質を知ることは、工学上の見地からみて特に重要である。そのため、風洞や自然風中での模型実験、及び高層建築物における測定等を通して、これまでに多くの研究が進められてきた。

B. J. Vickery は、乱流風洞を用いて角柱に加わる変動抗力・変動揚力、及び角柱表面の変動風圧等を詳しく測定し、乱れのない一様流中での実験結果と比較している^{1), 2)}。彼によると、乱流中の実験でも乱れのない一様流中と同様に、角柱から周期的な渦が発生する。渦の発生する無次元周波数（ストローハル数）の値は、乱れのない一様流の場合とほぼ等しく 0.12 位である。しかし、周期的変動揚力の大きさは乱れのない場合の半分ぐらいであり、揚力変動のスペクトル密度も乱れのある場合の方がより巾広くなり、揚力変動

の不規則性は増大する。変動揚力の大きさの減少には、角柱表面の変動風圧の大きさの減少のみでなく、角柱表面の二点間の風圧変動の相関の減少も大きな役割を果たしていることを報告している。

また立川正夫は、自然風中での模型実験から、自然風中でも角柱の側面上には、両側面で位相が π だけずれた周期的な風圧変動が存在することを確認した。側面の周期的風圧変動は、迎角 $\alpha=0^\circ$ の場合のみ生じ、迎角 $\alpha \neq 0^\circ$ の場合には生じなかったと彼は報告している^{3), 4)}。

しかし、自然風中での実験は立川によるもの以外あまりまとまったものがなく、また実在建築物における測定でも、側面に強い周期的風圧変動が存在するという報告は、今までのところ数少ない。

今回筆者が行った実験は立川の実験とほぼ同種のものであるが、彼の実験がペントハウス上で行われたのに対し、筆者は地上に設置した固定角柱を用いて行った。従って、彼の実験に比較してより実在建築物との類似性が高いといえる。

また実験結果の整理については、建築物の動的耐風設計という観点から種々の確率的諸量を中心にまとめた。特に揚力変動による風向直角方向の振動については、現在までのところまとまった考え方が確立していない段階なので特に注意を配った。

2. 実験の概要

2.1 模型設置場所

実験は、京大防災研究所附属施設潮岬風力実験所の野外実験場で行った。Photo. 1 で示したように、実験場の周囲には南北にわずかの建物が点在するのみで、東西方向には完全に開けている。

模型角柱は、この野外実験場のほぼ中央の位置に設置した。角柱はその各面を東西南北に向け、頂部から4本のワイヤーを引張って固定した。また基準風速を測定するため、角柱から西方7.3m離れたところに測風柱を設置した(Fig.1)。

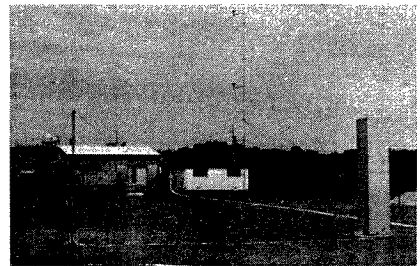


Photo. 1
Experimental field.

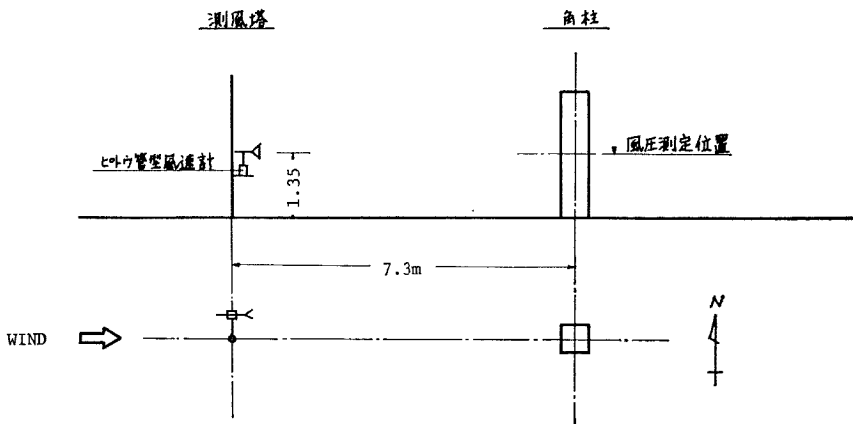


Fig. 1 Arrangement of a square cylinder and a pole for velocity measurement.

2.2 模型角柱の概要と測定計器

模型角柱は、Fig. 2 に示したように一辺が60cmの正方形断面をした高さ2.7mの大きさのものである。角柱の骨組は鉄骨で、外装はアルミ板で作られ、各部材の剛性は充分高く完全な固定角柱とみなすことができる。

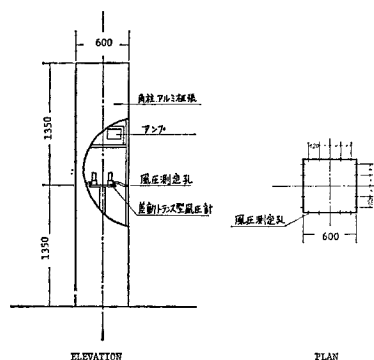
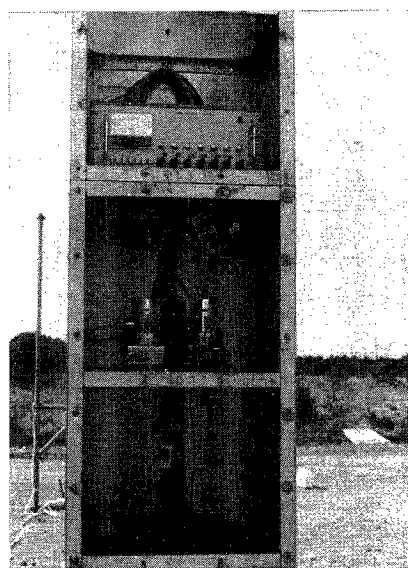


Fig. 2 Outlook of the square cylinder.

Photo. 2
Pressure transducers and an amplifier.

角柱表面の風圧及び基準風速は、**Fig. 1** で示したように地上 1.35 m の高さすなわち角柱高さの半分の位置で測定した。

基準風速の測定には、ピトー管式風速計を用いた。従って測定された量はすべて速度圧に相当する。

角柱表面の変動風圧は、角柱表面にあけた直径 6 mm の穴からビニールチューブで差動トランス型風圧計に導き、電気量に変換して基準風速とともに、電磁オシログラフに記録した。角柱内部に組み込んだ差動トランス型風圧計と、電源増幅部を **Photo. 2** で示した。

風圧測定孔は、**Fig. 2** に示したように各面五個ずつ周囲全体にあけてある。

3. 実験結果

実験は、昭和 46 年 2 月末の強い季節風の吹いたときに行った。実験時の風向はほぼ西、風速は地上 1.35 m の高さの位置で約 7 m/sec、角柱の一边の長さを基準としたレイノルズ数は約 3×10^5 であった。

実験結果は、実際の建物の動的設計方法にとり特に重要と思われる、平均風圧係数・変動風圧係数・角柱表面の風圧変動の確率密度関数・スペクトル密度関数を中心にして整理した。

上記の諸量は、電磁オシログラフに記録したデータを 0.05 秒ごとにサンプリングし、それにより作られたデジタルデータより計算した。なお、平均風圧係数・変動風圧係数は式 (1) で定義し、スペクトル密度の解析にはピークの有効性が自由度により判定できる Tukey の方法を用いた⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt, \quad \overline{P'^2} = \frac{1}{T} \int_0^T \{P(t) - \bar{P}\}^2 dt \\ C_{p,m} &= \frac{\bar{P}}{\bar{P}_v}, \quad C_{p,r.m.s.} = \frac{\sqrt{\overline{P'^2}}}{\bar{P}_v} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

T 記録時間
 $\bar{P}_v$ 基準速度圧
 P 角柱表面の風圧
 $C_{p,m}$ 平均風圧係数

$C_{p,r,m,s}$ 変動風圧係数

以下解析結果を風上面, 側面, 背面別に示す。

3.1 風上面の風圧変動

建築物の風向方向の振動解析は, A. G. Davenport により線型系による出入力変換という形で体系化された^{6), 7)}。その理論の第1段階は, 抗力変動は風速変動の線型変換で与えられるという仮定である。そしてこの変換要素を Aerodynamic admittance と呼ぶ。

そこでこの項では, 風速変動と風圧変動の比較に重点を置いて報告する。

実験時の基準平均風速は, 7.0 m/sec, 乱れの強さは28%であった。乱れが強かったのは, 測定点が地上からあまり離れていなかったためと考えられる。

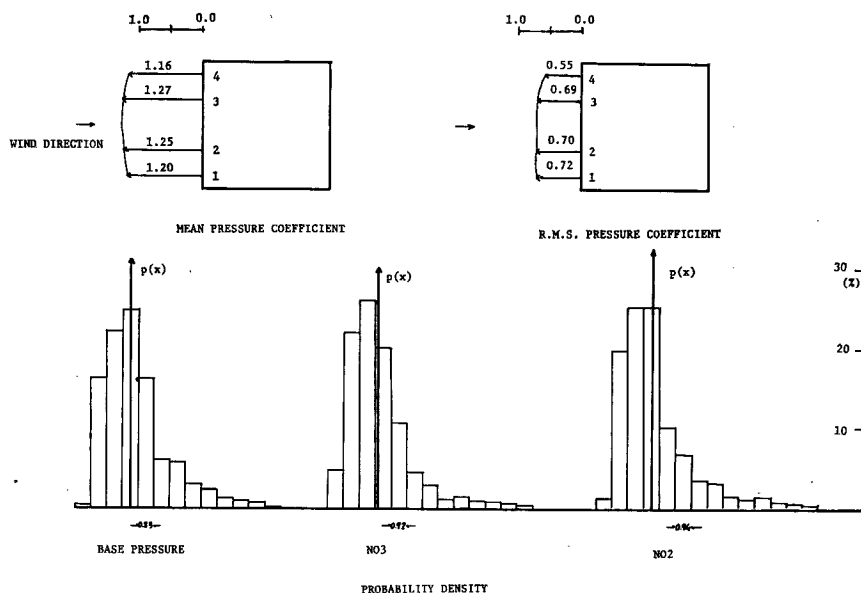


Fig. 3 Pressure coefficients and probability density of the fluctuating pressure.

Fig. 3 は平均風圧係数, 変動風圧係数及び風圧変動の確率密度関数を示している。平均風圧係数は, 辺全体にわたって一様で 1.2 前後である。平均風圧係数が 1 以上の値を示したのは, 基準速度圧の測定位置が角柱高さの半分の高さであったためと考えられる。また乱れがない一様流中での実験結果と比べると, 端部での減少が小さく, 辺全体にわたってより一様となっている。

変動風圧係数も, 平均風圧係数と同様風上面の辺全体にわたってほぼ一様であり, その大きさは乱れの強さの 2 倍強である。また風上面の風圧変動と基準速度圧変動の確率密度関数は, ほぼ同形で風圧の高い方へ片よった分布型になった。

Fig. 4 は, 風上面上の四つの点の風圧変動と基準速度圧変動の記録の一部である。Fig. 4 より次のことがわかる。第一に基準速度圧変動を約 1 秒ずらすとほぼ風上面の風圧変動と一致する。第二に, 基準速度圧変動にみられる急激な変動が風圧変動には認められない。第三に, 1 Hz 以上の高周波成分の変動の様子がやや異なる。

Fig. 5 は基準速度圧変動と風上面の風圧変動のスペクトル密度である。このスペクトル密度の自由度は 125 分解能は 0.1 Hz である。Fig. 5 より次のことがわかる。

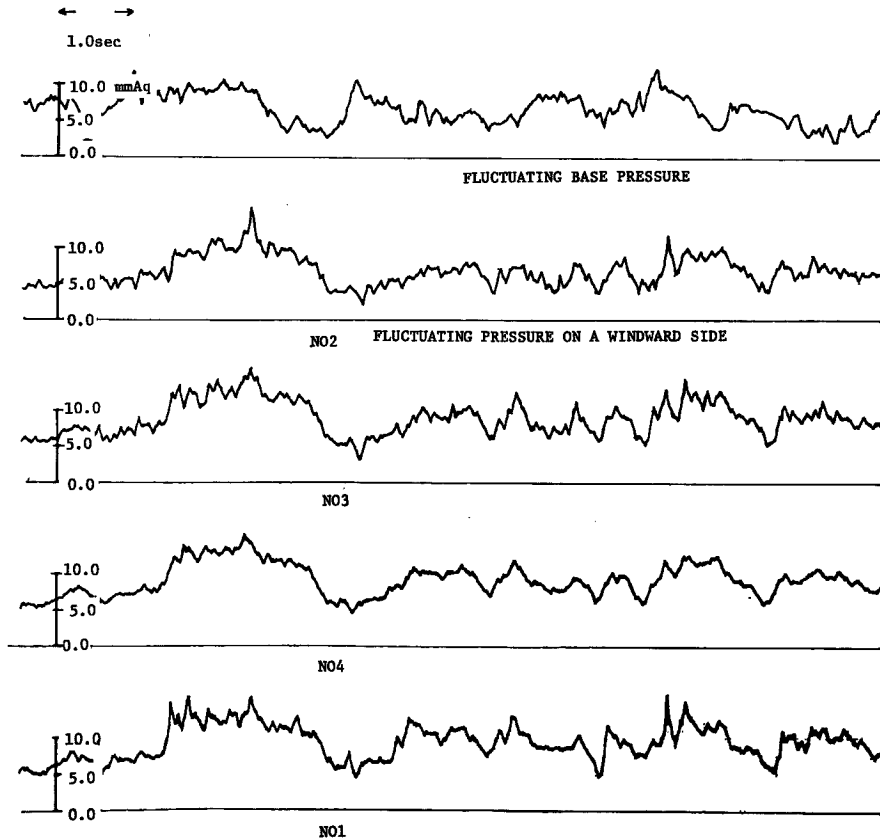


Fig. 4 An example of traces of the fluctuating pressure.

(1) 基準速度圧変動と風上面の風圧変動のスペクトル密度はほぼ同じである。

(2) 風上面の風圧変動のスペクトル密度は、基準速度圧変動のそれに比べて、よりなめらかに減少する。特に基準速度圧変動のスペクトル密度に存在する波数 0.1 m^{-1} のところのピークは、風圧変動のスペクトル密度には存在しない。

(3) 高周波域のスペクトル密度は、風上面の風圧変動の方が、基準速度圧変動より少し小さい。

3.2 側面の風圧変動

角柱の様に鋭い角をもった形の場合は、風向が変化することにより側面の風圧は著しく変化する。従って自然風のように風向が非定常な状況のもとでは、角柱の側面の風圧変動も定常とはならず時間的に変化する。そのような理由から、側面の風圧変動の解析は、風向が比較的定常とみなせる記録を取り出して行った。

3.2.1 迎角 $\alpha=0^\circ$ の場合の側面の風圧変動の諸性質

Fig. 6 は、各面中央点の風圧変動の記録の一部である。側面の風圧変動には、両面の位相差が π で周期が約 1 秒の比較的規則正しい風圧変動が認められる。

Fig. 7 は、側面の四つの点の風圧変動及び基準速度圧変動のスペクトル密度を表わしている。このスペクトル密度の自由度は 125 分解能は 0.1 Hz である。またこの実験時の基準風速は 6.6 m/sec 、乱れの強さは 28% であった。

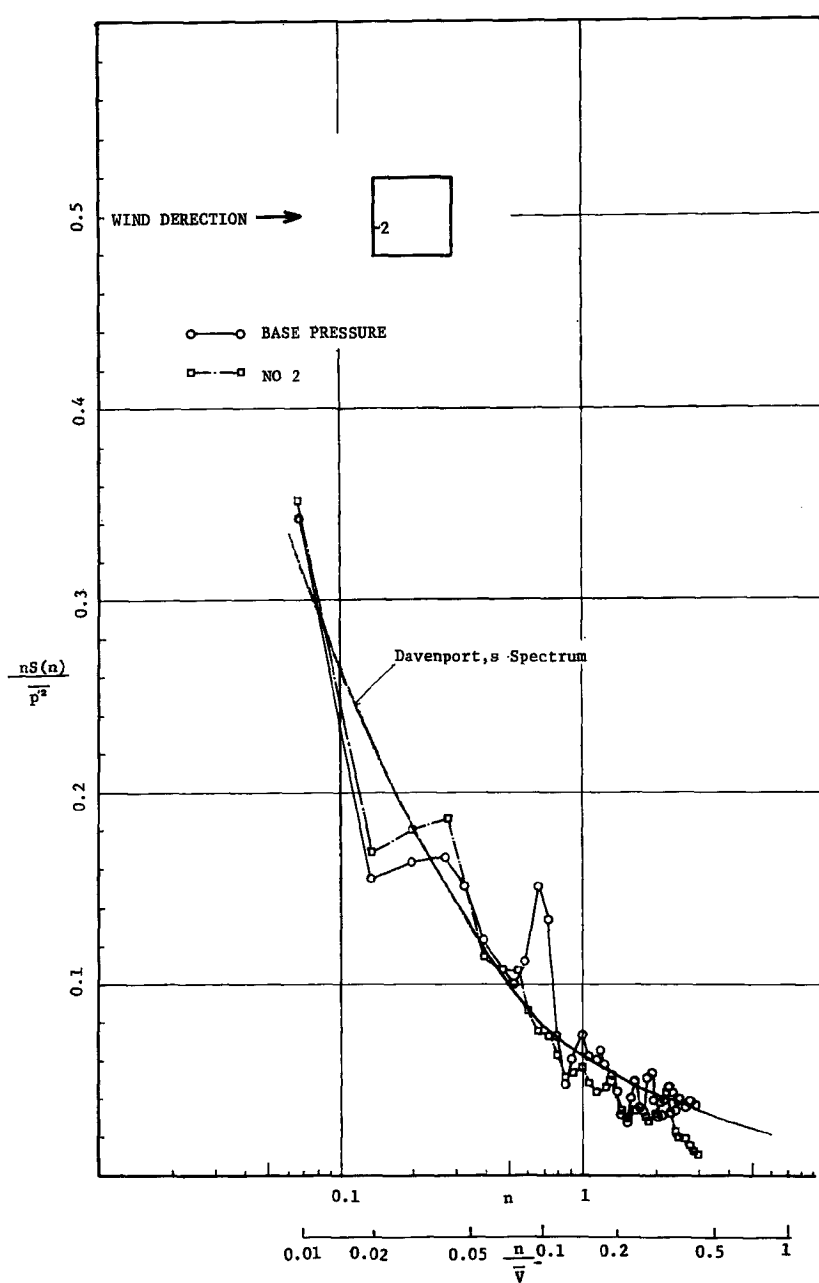


Fig. 5 Power spectrum of the fluctuating pressure on a windward wall.

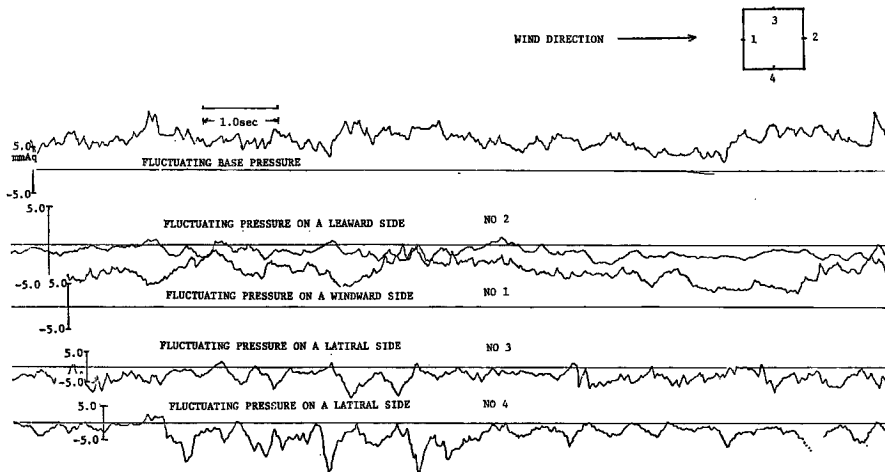


Fig. 6 An example of traces of the fluctuating pressure.

Fig. 7 のスペクトル密度には、Fig. 6 の記録からも予想されるように、無次元周波数 nD/V (n ; 周波数, D ; 角柱の一辺の長さ, V ; 平均風速) $= 0.12$ 付近に、はっきりとしたピークがある。また左右両面のクロススペクトル解析によると左右両側の風圧変動の位相差も、 $nD/V = 0.12$ 付近で π となる。このスペクトルピークの位置 ($nD/V = 0.12$) は、B. J. Vickery の乱流風洞による二次元模型における測定結果とほぼ等しい。しかし、スペクトル密度は筆者の実験結果の方がより巾広くなる。

Fig. 8 は、平均風圧係数・変動風圧係数・風圧変動の確率密度関数である。平均風圧係数は、風上側のがわずかに負圧である。変動風圧係数も、風上側の二点の方が大きい。この傾向は、B. J. Vickery, 桂⁸⁾ の乱流風洞中での実験結果とは多少異なる。すなわち、乱流風洞中での実験では、風上に最も近い点の風圧変動はあまり大きくならない。

また四点の風圧変動のクロススペクトル解析による、 $nD/V = 0.12$ 付近の位相差は Fig. 9 の通りで、風上側の二点間ではほとんど $\varphi = 0$ 、風下側の二点間では $\varphi = 1.6$ ぐらいとなった。

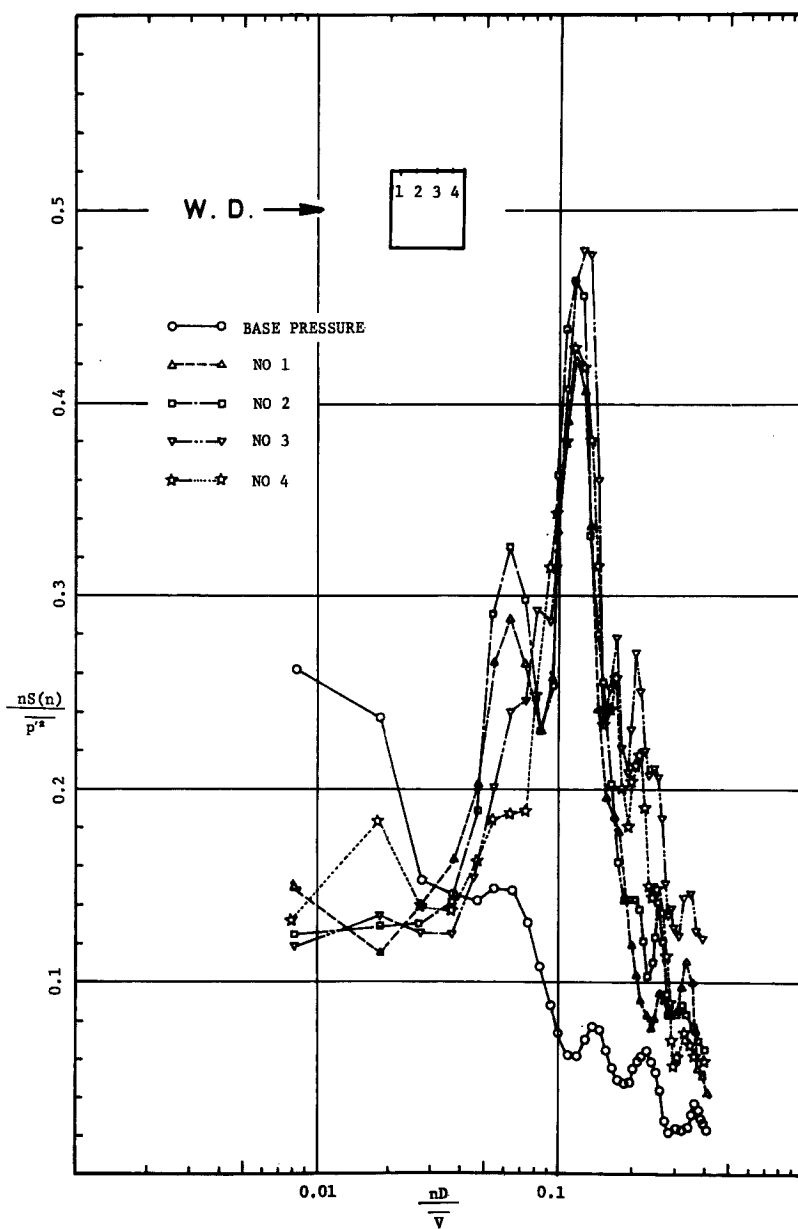


Fig. 7 Power spectra of the fluctuating pressure on a side wall. $\alpha=0^\circ$

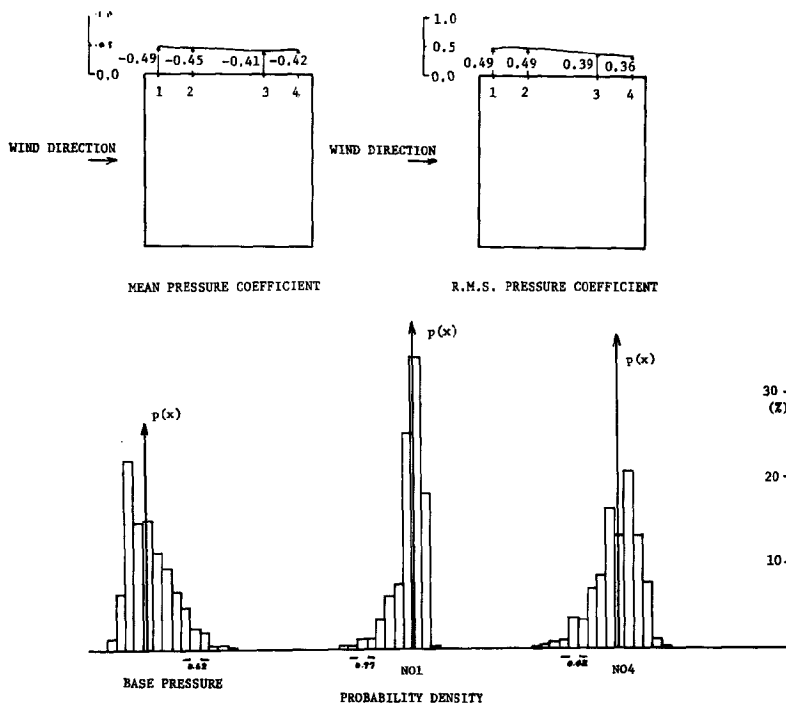


Fig. 8 Pressure coefficients and probability density of the fluctuating pressure.

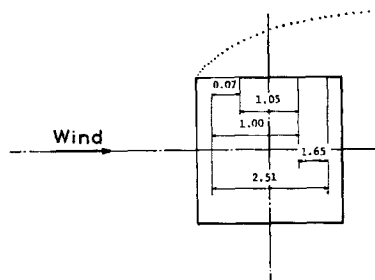
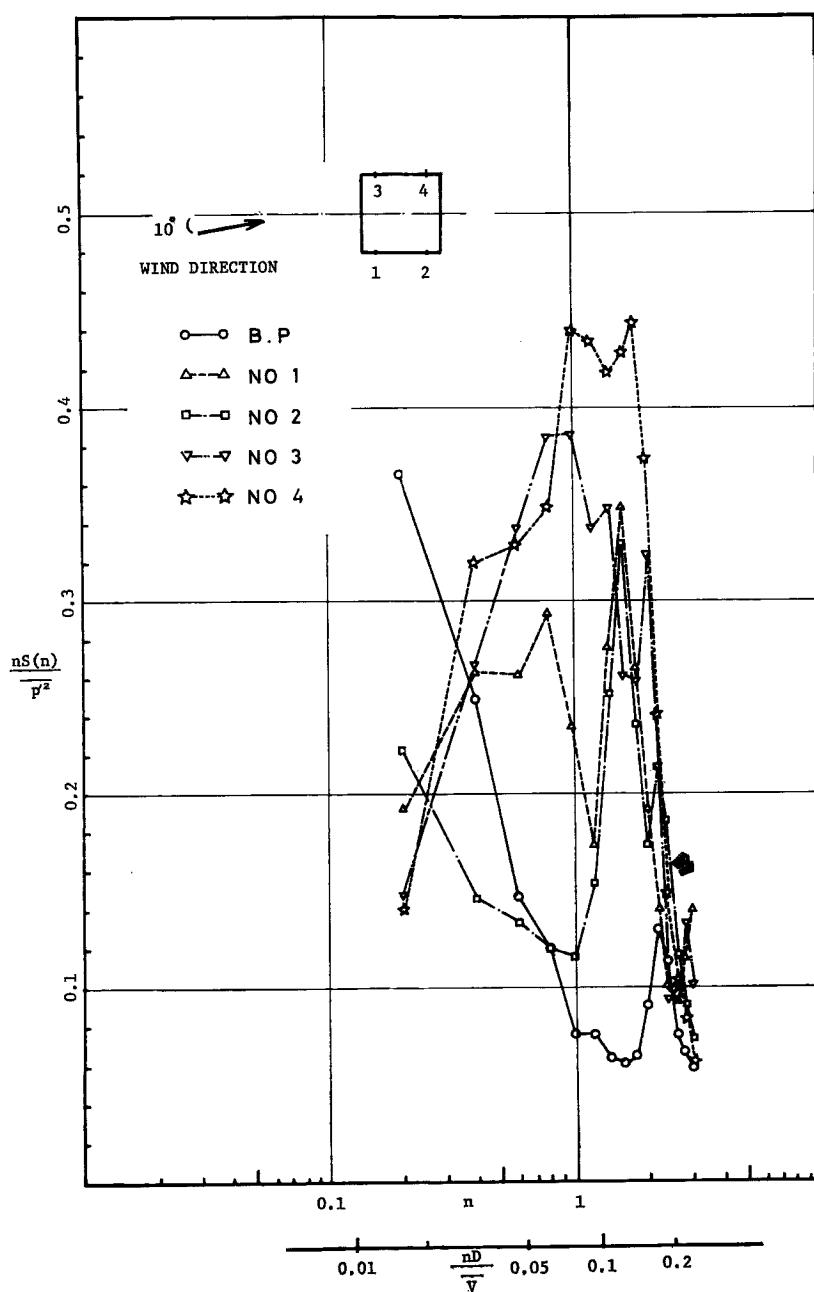


Fig. 9 Phase difference of the fluctuating pressure across a cylinder.

Fig. 10 Power spectra of the fluctuating pressure on side walls. $\alpha=10^\circ$

3.2.2 迎角 $\alpha=10^\circ$ の場合の側面の風圧変動の諸性質

Fig. 10 は、迎角が約 10° の場合の左右両側面上の四点のスペクトル密度を表わす。このスペクトル密度の自由度は25、分解能は0.2Hzである。**Fig. 10** より、左右両側面の風圧変動のスペクトルはかなり異なっていることがわかる。1・2点の風圧変動のスペクトル密度には、 $nD/V=0.12$ 付近でピークがあるが、 $\alpha=0^\circ$ の場合ほど顕著ではない。一方、3・4点の風圧変動のスペクトル密度は、 $nD/V=0.05\sim 0.1$ の広範囲にエネルギーの高まりが認められる。この場合の平均風圧係数は **Fig. 11** より、1点は -0.65 、2点は

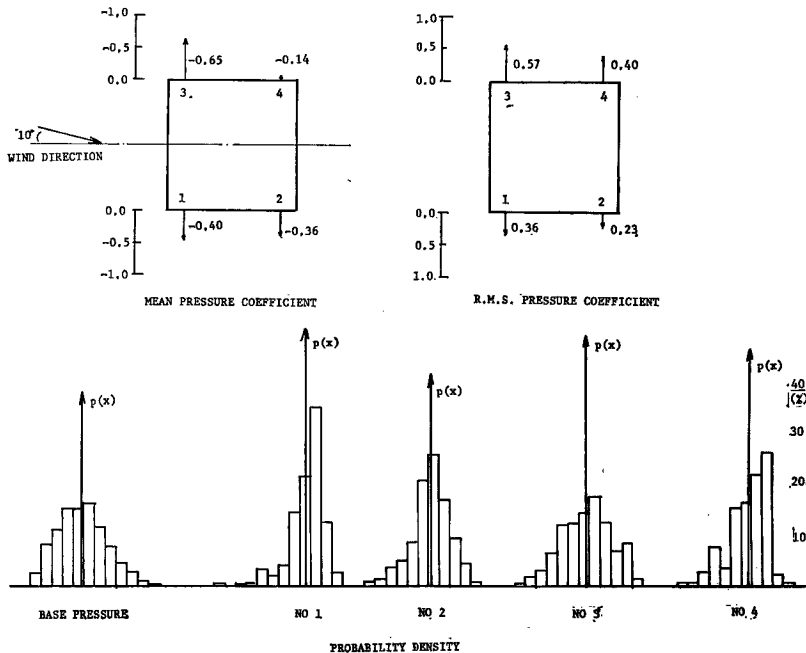


Fig. 11 Pressure coefficients and probability density of the fluctuating pressure.

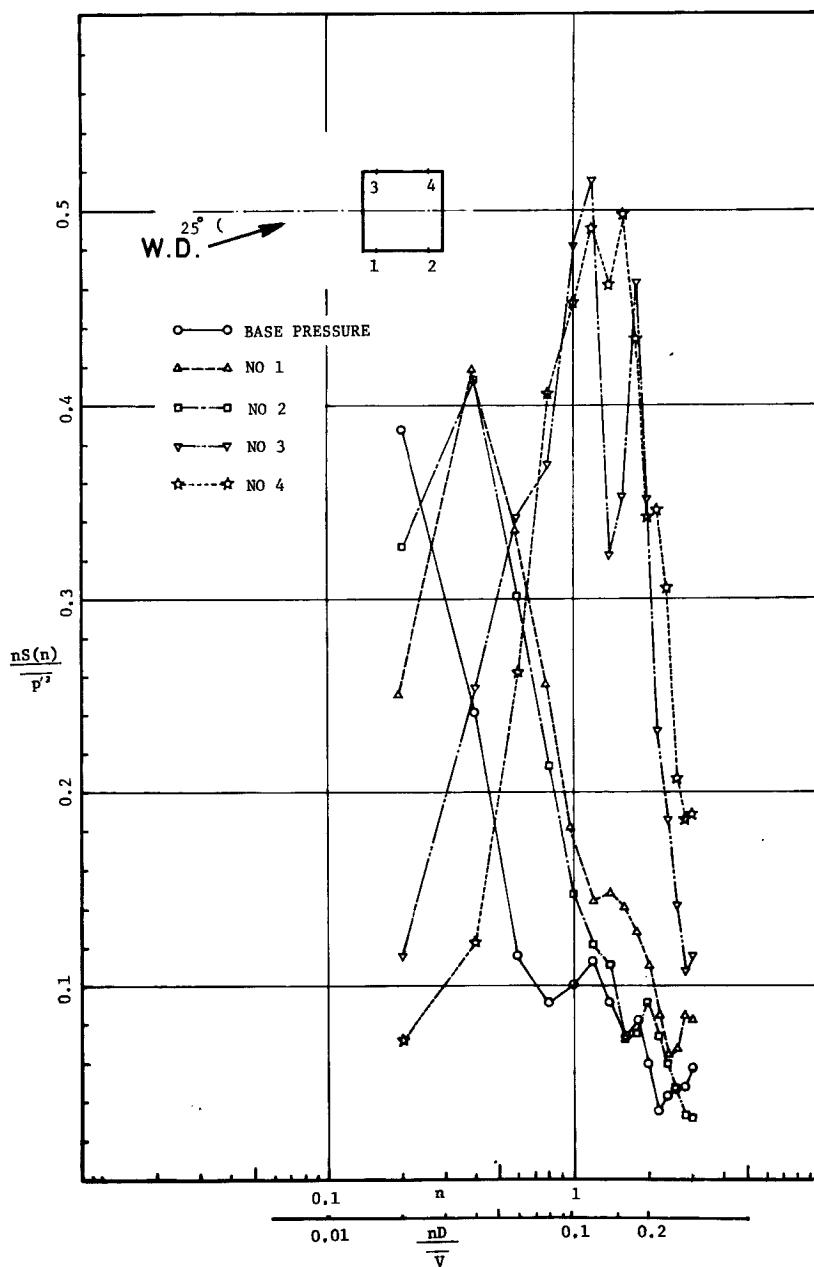
は -0.14 である。従って、この側面側では、剥離領域があまり大きくならず時には再付着も生じていると考えられる。そのため、渦の発生は不規則となり、**Fig. 11** のようなスペクトル密度となったと考えられる。

3.2.3 迎角 $\alpha=25^\circ$ の場合の側面の風圧変動の諸性質

Fig. 12 は、 $\alpha=25^\circ$ の場合の側面四点の風圧変動のスペクトル密度を表わしている。このスペクトル密度の自由度は25、分解能は0.2Hzである。 $\alpha=25^\circ$ の場合も $\alpha=10^\circ$ の場合と同様、左右両側面の風圧変動のスペクトルは、全くその傾向が違っている。すなわち、3・4点の風圧変動のスペクトルは、 $\alpha=0^\circ$ の場合と同じように、 $nD/V=0.12$ 付近にピークをもつ。一方1・2点のそれは、 $nD/V=0.03$ 付近にピークをもち、それ以上の周波数域では、基準速度圧と同じように単調に減少する。また **Fig. 14** より、平均風圧係数は1・2点でほんのわずかに正圧となる。従って、この側面側の流れはもはや剥離を起こしていないと推察され、 $nD/V=0.03$ 付近のスペクトルピークは、剥離によって生じた渦が原因ではなく、風向変化に対応したものであると考えられる。また1点の変動風圧係数は1以上という大きな値となった。

3.3 背面の風圧変動

Fig. 13 は各面中央点の風圧変動のスペクトル密度である。このスペクトル密度の自由度は140、分解能は0.1Hzである。**Fig. 13** より、背面の風圧変動のスペクトル密度にも、 $nD/V=0.1$ 付近にピークが認められる。しかし変動の大きさは各面中最低であった。

Fig. 12 Power spectra of the fluctuating pressure on side walls. $\alpha=25^\circ$

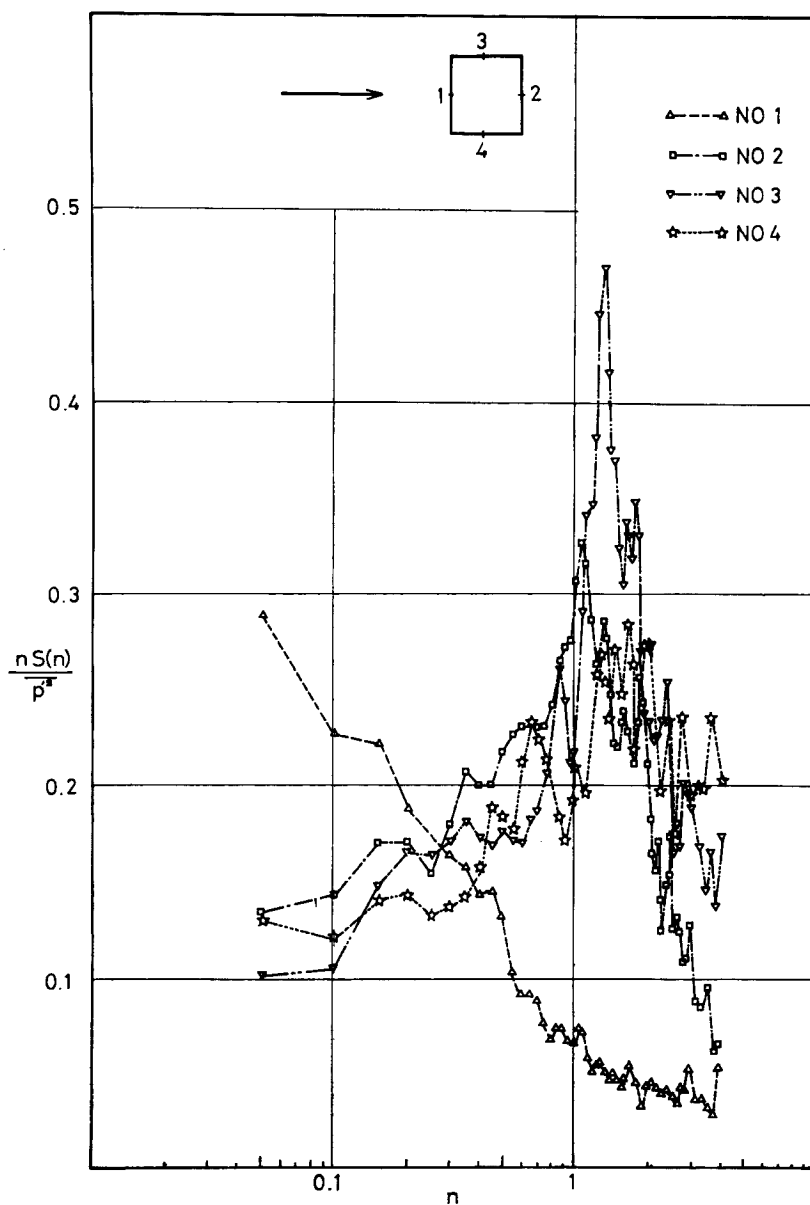


Fig. 13 Power spectra of the fluctuating pressure on walls.

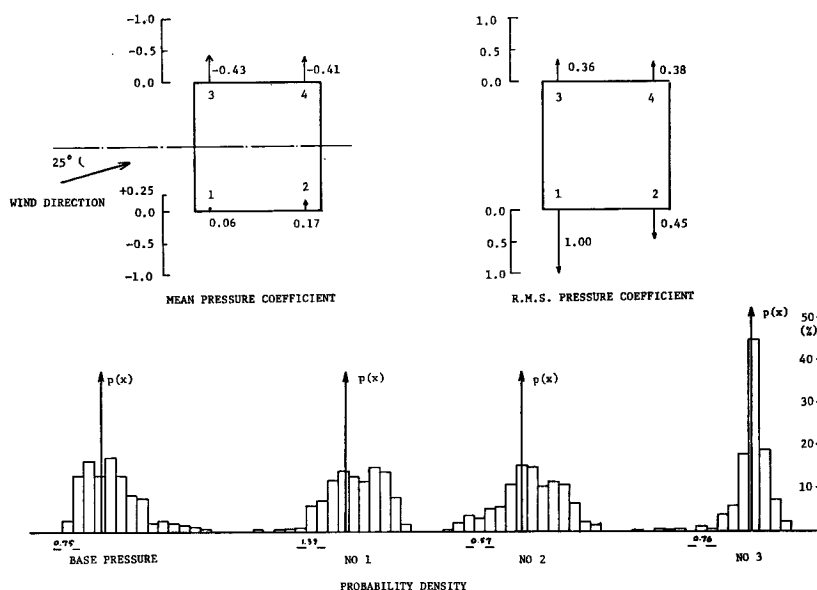


Fig. 14 Pressure coefficients and probability density of the fluctuating pressure.

4. 実験結果の考察

4.1 抗力変動の基本的特性

風上面の風圧変動のスペクトル密度は、A. G. Davenport が述べたように基準速度圧変動のスペクトル密度とほぼ一致する。しかし、 $nD/V=0.06$ 以上の周波数域では風圧変動のスペクトル密度の方がよりなめらかに減少し、 $nD/V=0.1$ 以上になると基準速度圧変動のそれより小さくなることがわかった。実在する建築物の n_0D/V (n_0 : 建築物の固有振動数) は 0.1 以上であり、上記の事実は建築物の動的耐風設計にとり重要であるといえる。また背面の風圧変動のスペクトル密度にも、 $nD/V=0.1$ 付近にピークが認められた。しかし変動の大きさは小さく、今回の実験では抗力変動にあまり大きな影響を及ぼさない。けれども、乱れが小さい場合には、前面の風圧変動の強さの減少から、背面の風圧変動がかなり大きな影響を抗力変動に与えると考えられる。そのような場合の抗力変動の r 次の振動モードに対応するスペクトル密度は下式のように表わすことができる。

$$S_{Fr}(n) = \int_0^H \int_0^H S_p(z_1, z_2; n) \mu_r(z_1) \mu_r(z_2) dz_1 dz_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$S_p(z_1, z_2; n) = S_{p11}(z_1, z_2; n) + S_{p12}(z_1, z_2; n) + S_{p21}(z_1, z_2; n) + S_{p22}(z_1, z_2; n) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$\mu_r(z_1)$ r 次の振動モード

H 建築物の高さ

$S_{p11}(z_1, z_2; n)$ 風上面の風圧変動のクロススペクトル

$S_{p12}(z_1, z_2; n), S_{p21}(z_1, z_2; n)$ 風上面と背面の風圧変動の間のクロススペクトル

$S_{p22}(z_1, z_2; n)$ 背面の風圧変動のクロススペクトル

更に、風上面と背面の風圧変動が独立ならば、

$$S_{Fr}(n) = \{S_{p1}(n) + S_{p2}(n)\} \cdot |J_{rH}(n)|^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$|J_{rH}(n)|^2 = \int_0^H \int_0^H \{R_1(z_1, z_2; n) + R_2(z_1, z_2; n)\} \mu_r(z_1) \mu_r(z_2) dz_1 dz_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$S_{p1}(n)$ 風上面の風圧変動のスペクトル密度

$S_{p2}(n)$ 背面の風圧変動のスペクトル密度

$|J_{rH}(n)|^2$ r 次のモードに対応した高さ方向の Joint-acceptance

4.2 揚力変動の基本的特性

実在する建築物における測定では、風向方向の振動より風向直角方向の振動の方が大きいことが報告されている。また筆者の実験結果をもとにした計算でも揚力変動のスペクトル密度の方が $nD/V=0.05$ 以上では大きくなり、 $nD/V=0.12$ では六倍以上、それ以上の周波数域でも二倍以上となった。このように、建築物の動的耐風設計にとって、風向直角方向の振動は非常に重要にもかかわらず、風向方向に対する A. G. Davenport が行ったようなまとまった考え方はなくその確立が重要な課題となっている。

三章でも述べたように、角柱等では風向の変化によって、著じるしくその変動揚力の性質が変化するものと考えられる。従って、自然風のように風向が非定常な場合には、揚力変動の性質も時間により変動する。その非定常性は、変動のスペクトル密度が時間的に変動するような種類のものであることが、今回の実験結果より明らかになった。従って、自然風中での平均揚力係数・変動揚力係数及び揚力変動のスペクトル密度等は、揚力変動による風向直角方向の振動の解析方法に従って定めなければならない性質のものである。

この研究に際して、実験・解析等全面にわたり手伝って下さった建築研究所の室田達郎氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) Vickery B. J.: Fluctuating Lift and Drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream, Jour. of Fluid Mech., Vol 25 Part 3, 1966, pp. 481-494.
- 2) Vickery B. J.: Load Fluctuations in Turbulent Flow, Proc. A. S. C. E. Journ. of Eng. Mech., 1968. 2, pp. 31-46.
- 3) 立川正夫：自然風中において構造物に作用する風圧力に関する実験的研究 その1～その5，日本建築学会論文報告集，昭43.8～昭44.6.
- 4) Tachikawa M.: Wind Pressure Measurement on Bluff Bodies in Natural Winds, Proc. of Seminar Wind Load on Structures, 1970. 10, pp. 203-218.
- 5) Blackman, R. B., and J. W. Tukey: The Measurement of Power Spectra. Dover Publications. New York, 1958.
- 6) Davenport, A. G.: The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures. Proc. of Inst. Civil. Eng. Vol. 19, 1961. 8.
- 7) Davenport, A. G.: Gust Loading Factor, Proc. A.S.C.E. Jour. of Struc. 1968. 6 pp. 11-33.
- 8) 桂 順治：長方形断面をもつ二次元模型に作用する風圧変動の強さについて 日本建築学会中国支部報告集 昭46.