

乱流境界層中の3次元角柱に作用する風圧力の アスペクト比による変化について

石崎 潑雄・桂 順 治・谷池 義人・奥田 泰雄

WIND PRESSURES ON 3-DIMENSIONAL SQUARE PRISMS IN TURBULENT BOUNDARY LAYER

By *Hatsuo ISHIZAKI, Junji KATSURA, Yoshihito TANIKE*
and *Yasuo OKUDA*

Synopsis

The wind pressures on 3-dimensional square prism models with various aspect ratios (h/b) were measured in a turbulent boundary layer. The models with the height of 40 cm and the widths of 2, 4, 10 and 20 cm were used not to change the flow characteristics at the same height of them.

In the windward surfaces the wind pressures were not so much influenced by aspect ratios. In the other surfaces the wind pressures were influenced and to be distributed more uniformly along the height with decreasing aspect ratio.

1. ま え が き

今日まで、様々な形状の模型に加わる風圧力について、一様流中・一様乱流中・乱流境界層中で数多くの研究が行われてきた^{1)~8)}。その結果、模型に加わる風圧力に影響を及ぼすパラメータとして流れの平均速度・乱れの強さ・乱れのスケール等、模型の高さと幅の比であるアスペクト比・乱れのスケールと模型の幅の比であるスケール比・風向角等が存在することがわかった。これらのパラメータについて一様流中・一様乱流中ではそれらの影響はかなり解明されているが、乱流境界層では鉛直方向に変化する平均速度・乱れの強さ・乱れのスケール等の流れのパラメータを制御し、上述のパラメータについてその影響を独立にかつ体系的に研究したものは少なくよくわかっていない点が多い。

また、風洞実験で得られたデータを実際の建物の耐風設計に応用するために、各国の荷重規準の多くは風圧力についてストリップ理論の仮定という考え方をとりいれている。この考え方とは、“建物に作用する風力はそれが作用する高さでの速度圧によって定める” というもので、我が国の昭和57年改定の風荷重指針においてもこの考え方をほぼ踏襲しているといえる。

そこで今回の研究では模型のアスペクト比 (h/b) に注目し乱流境界層の流れのパラメータは変えずに風圧力に及ぼすアスペクト比 (h/b) の影響を調べ、同時にストリップ理論の仮定の有効性について考察した。

2. 実 験 方 法

実験は境界層風洞で行い境界層外側での基準風速は約 10 m/s であった。このとき測定位置での平均風速、乱れの強さ、乱れのスケールの鉛直分布が Fig. 1 である。平均風速はべき指数 $\alpha=0.3$ でべき法則にのっており、 $z=200$ mm での乱れの強さは約20%、乱れのスケールは約 20 cm であった。

模型は Fig. 2 のように高さ h が 40 cm で幅が 20, 10, 4, 2 cm の 4 種類のアクリル製の剛な正四角柱である。これをターンテーブルに固定し、各測定点について平均風圧力と変動風圧力を測定した。平均風圧力は差圧型圧力変換器（航空計器 P7D）を用いて測定した。この時ピトー管の静圧を圧力変換器の背圧としその出力電圧を約 1 分間平均して読取った。変動風圧力は半導体を貼ったダイヤフラム型圧力変換器（豊田工機 PMS 5-0.5 H）を用いて測定した。測定状態でのこの圧力変換器の周波数特性は桂⁹⁾の検定法で検定すると約 1 kHz までフラットで測定上問題はなかった。また変動風圧力の RMS 値は圧力変換器の出力電圧を約 1 分平均して読取った。

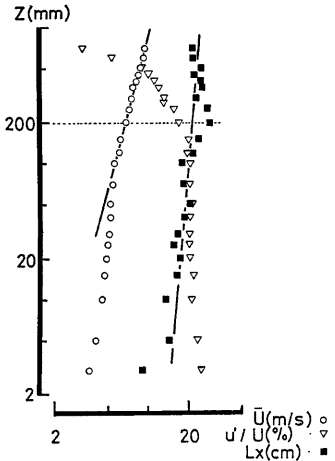


Fig. 1 Profiles of wind velocity, turbulence intensity and turbulence scale

風向角 α は測定している面に対して接近が直角に当たる場合を 0° とし反時間方向の回転角によって定義した。つまり、正面は 0° 、側面は 90° 、背面は 180° である。

圧力変換器の出力電圧を一旦データレコーダ (TEAC R-270) に記録し、これをもとに風圧変動のパワースペクトルを FFT 法により求めた。データの読取り間隔は 2 ms、個数は 1024 個なので Nyquist 周波数は 250 Hz、最小の分解できる周波数は 0.5 Hz であり今回の実験では十分であると考えられる。1 回の読取り

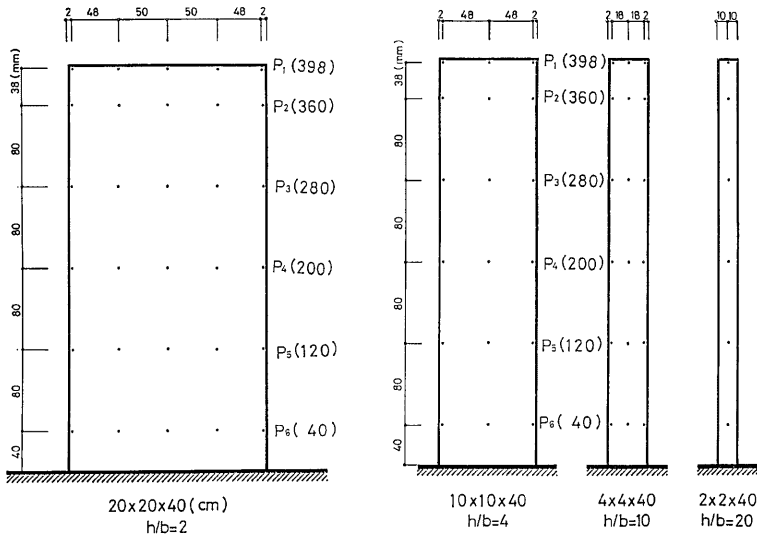


Fig. 2 Dimensions of models and positions of pressure taps

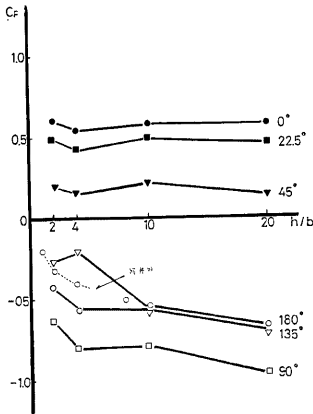
時間は約2秒としこれを10回繰返してアンサンブル平均しパワースペクトル密度を求めた。

3. 実験結果

3.1 平均風圧係数

平均風圧係数 C_p は境界層の外側に置いたピトー管の速度圧より模型頂部の高さでの速度圧を換算しこれを基準に各点について求めた。

$$C_p = \frac{p_m}{\rho_0 (\bar{U}_0 / \bar{U}_m)^2} \dots\dots\dots (1)$$



ここに、 q_0 は境界層の外側に置かれたピトー管の速度

- p_m は各測定点での平均風圧
 - \bar{U}_0 は境界層外の基準風速
 - \bar{U}_m は模型頂部の高さでの平均風速
- である。

Fig. 3 は模型中央点 ($z=200$ mm) の平均風圧係数 C_p をアスペクト比と風向角について示したものである。点線は河井⁶⁾ の一様乱流中での3次元角柱背面の実験結果である。風向角 $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ ではほぼ一定でそれぞれ0.55, 0.45, 0.20程度であるが、風向角 $\alpha=90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ ではアスペクト比が大きくなるとともに負圧が大きくなる傾向にある。また、風向角 $\alpha=180^\circ$ の結果と河井の結果を比較するとほぼ同様な傾向にある。測定値に差があるのは接近流が一樣乱流であるため、乱れの強さや乱れのスケール等の性

Fig. 3 Mean wind pressure coefficients vs aspect ratios

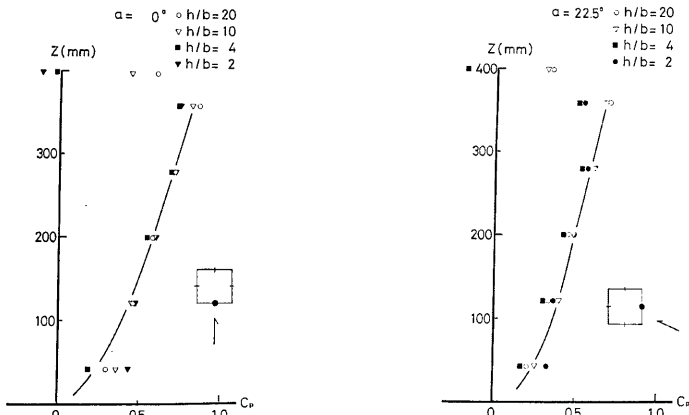


Fig. 4 Distributions of mean wind pressure coefficients along the height

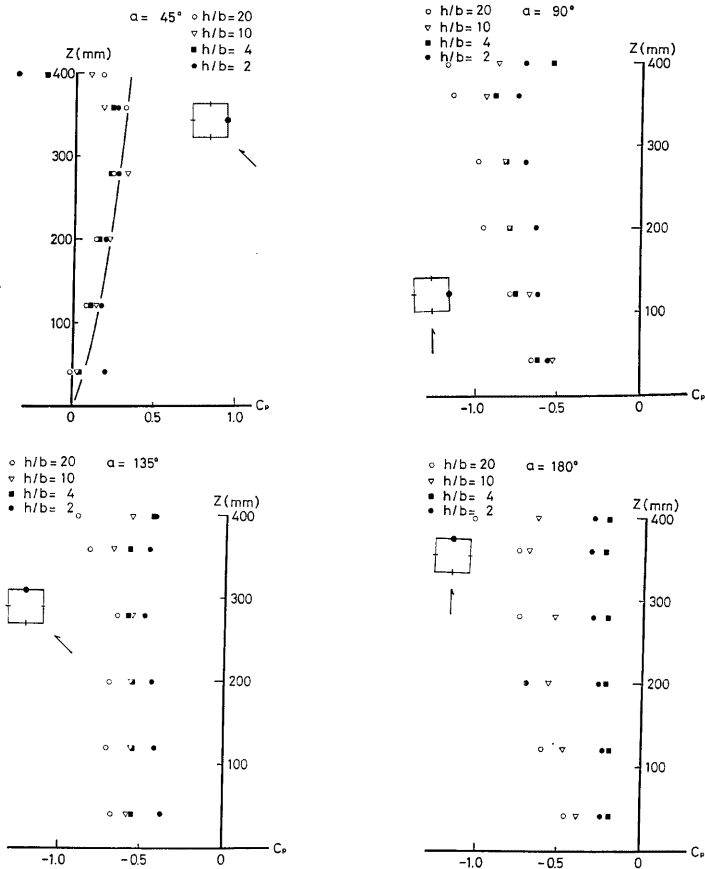


Fig. 4 (Continued)

質が違うからである。

Fig. 4 は模型の中央線上の測定点の平均風圧分布を6 風向について示したものである。実線は中央点 ($z = 200$ mm) の風圧係数をもとにストリップ理論の仮定をあてはめたものである。

風向角 $\alpha = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ の場合4 種類のアスペクト比に対し模型中央部ではそれ値が変わらずほぼ実線にのりストリップ理論の仮定が成立つようである。特に、風向角が 0° のときはその傾向が著しい。しかし、アスペクト比が2 の太短い模型の下層部では理論値よりもかなり大きい値が出ている。これに対し風向角 $\alpha = 90^\circ$ の場合アスペクト比が大きくなると同じ高さの測定点でも負圧が強くなり C_p は最大で0.5 程度違う。またアスペクト比が大きい方が理論値に近づく傾向にある。しかしアスペクト比が小さい太短い模型では頂部から剝離した流れが下降し下層部に影響を及ぼし鉛直方向に一樣な分布となる。風向角 $\alpha = 180^\circ$ でも同様な結果となっているがその傾向が著しい。アスペクト比2, 4では $C_p = 0.2 \sim 0.3$ 程度ではほぼ鉛

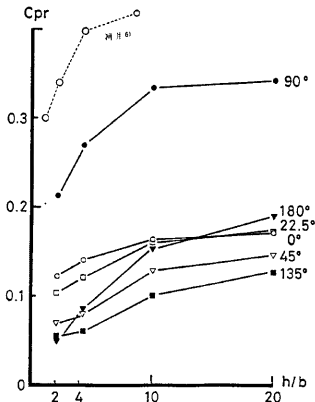


Fig. 5 Fluctuate wind pressure coefficients vs aspect ratios: $z=200$ mm

直方向に一様な分布となるがアスペクト比10, 20ではストリップ理論の仮定が成り立つ傾向にある。

3.2 変動風圧係数

変動風圧係数 C_{pr} は、乱流境界層の場合でも一樣流と同様に風圧の変動が、基準の速度圧に比例すると仮定し、境界層の外側に置いたピトー管の速度圧より模型頂部の高さでの速度圧を換算しこれを基準に各点について求めた。

$$C_{pr} = \frac{p_{mr}}{q_0(\bar{U}_0/\bar{U}_m)^2} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 p_{mr} は各測定点での変動風圧の RMS 値である。

Fig. 5 は模型の中央点について変動風圧係数の変化を示したものである。点線は河井⁶⁾の一樣乱流中での3次元角柱の側面の結果である。点線の結果は今回の風向角 $\alpha=90^\circ$ の結果と同じ傾向を示している。その値がかなり違っているのは接近流のプロファイルや乱れの強さの違い、スケール比によるものであろう。また

スペクトル比が大きくなるとアスペクト比やスケール比の影響を受けずは0.35程度に収束すると考えられる。他の風向角についても同じような性状が見られるが、風向角 $\alpha=90^\circ, 180^\circ$ に比べ風向角 $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ の結果の方がアスペクト比の変化に対しその差が小さくなっている。

Fig. 6 は風向角 $\alpha=0^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ について変動風圧係数の鉛直分布を示したものである。もし壁面に加わる風圧力の変動成分が接近流の主流方向成分により準静的に表わされると考えられるならば、変動風圧係数 C_{pr} は下式のようになる。

$$C_{pr} = 2 \frac{\sqrt{u'^2(z)}}{\bar{U}(z)} C_p \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

$\bar{U}(z)$ は測定点高さでの主流方向の平均風速

$\sqrt{u'^2(z)}$ は測定点高さでの主流方向の風速の RMS 値

C_p は各測定点での平均風圧係数

である。今回の実験で風圧の測定を行なった高さ 40 mm~400 mm の範囲では $\sqrt{u'^2(z)} \approx 1.1$ m/s であったので、ストリップ理論の仮定をあてはめると C_{pr} の鉛直方向の分布は平均風速分布に似た分布となる。図中の実線は中央点 ($z=200$ mm) の値をもとにストリップ理論の仮定を当てはめたものである。風向角 $\alpha=0^\circ$ では模型の頂部と下層部を除きストリップ理論の仮定が成立つが、風向角 $\alpha=90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ ではアスペクト比の影響を受け鉛直方向にほぼ一様な分布となりこの仮定は満足しない。

3.3 風圧力のパワースペクトル

Fig. 7~Fig. 8 は風圧力の規準化パワースペクトル密度で、各測定での風圧力のパワースペクトル密度を測定点と同じ高さでの平均流速 $\bar{U}(z)$ と模型の代表長さ (幅 b) で規準化したものである。

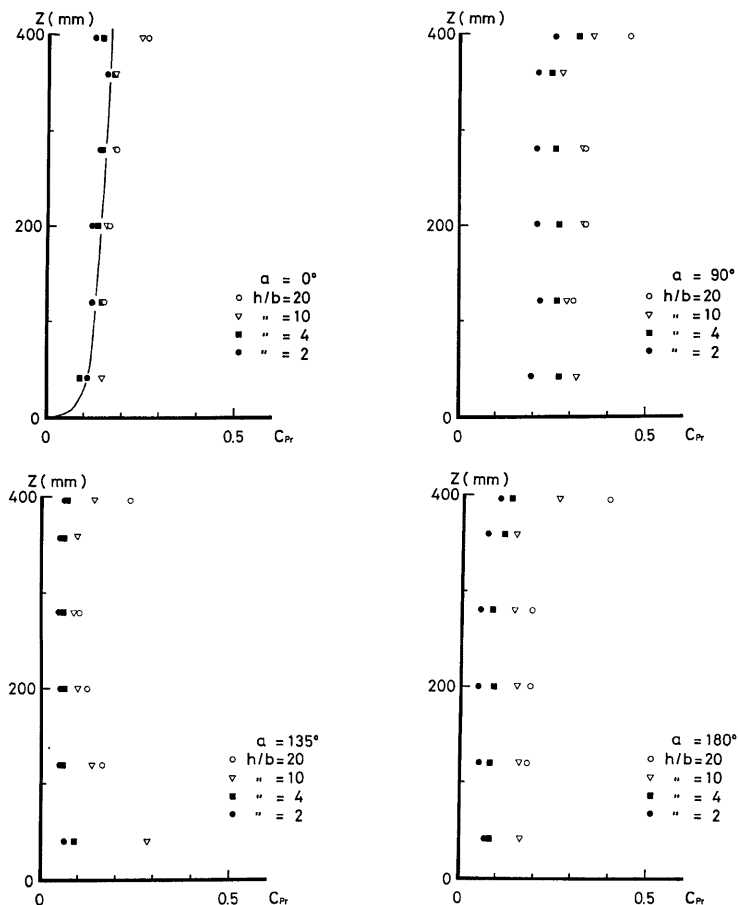


Fig. 6 Distributions of fluctuate wind pressure coefficients along the height

Fig. 7 は模型中央点 ($z=200$ mm) での風圧の規準化パワースペクトル密度を風向角 $\alpha=0^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ の4風向について表わしたものである。風向角 $\alpha=90^\circ, 135^\circ$ ではアスペクト比が10, 20の細長い模型について無次元周波数で約0.12~0.14にピークがみられるが、アスペクト比が2.4の場合ではそのような明確なピークが存在しなかった。風向角 $\alpha=180^\circ$ ではアスペクト比10, 20で無次元周波数約0.25~0.30にピークらしきものがある。

Fig. 8 は風向角 $\alpha=0^\circ$ の中央線上の6点での風圧の規準化パワースペクトル密度である。アスペクト比が20の細長い模型ではどの高さについても大きな差がなかったがアスペクト比が小さくなり模型の形状がより太みじかくなるにつれて高周波数域での差が大きくなっていく。また模型頂部を除く下層部になるほど高周

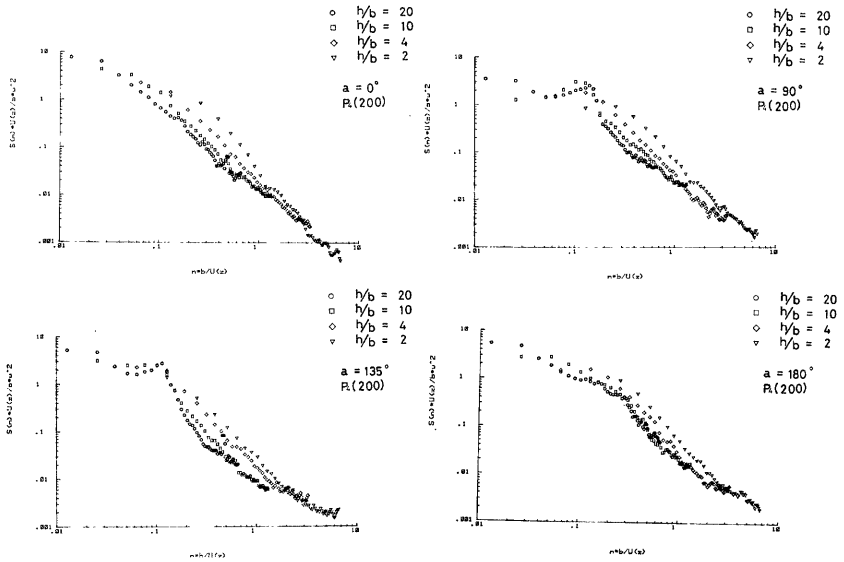


Fig. 7 Power-spectral-density function of fluctuate wind pressure vs aspect ratios: $z=200$ mm

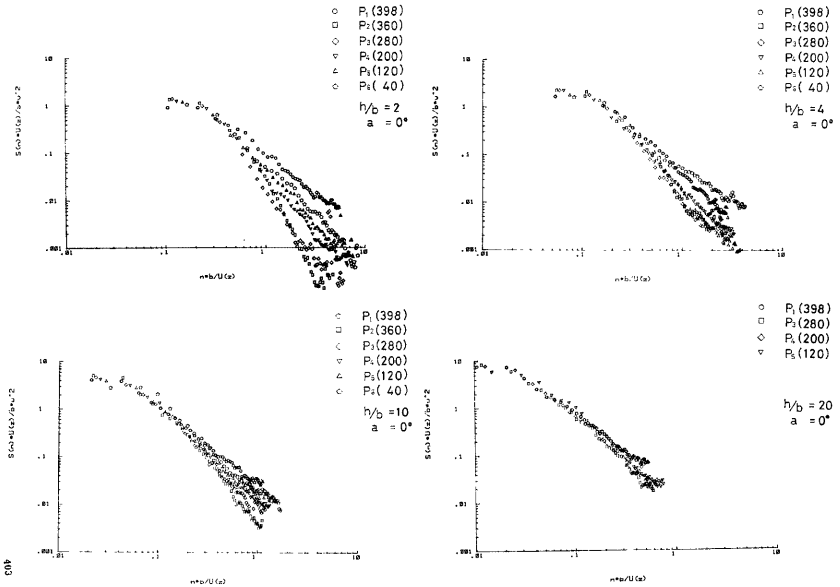


Fig. 8 Power-spectral-density function of fluctuate wind pressure along the height

波数域でのレベルが大きくなる傾向がある。

3.4 流速-圧力アドミッタンス

接近流の乱れによって物体表面に生じる圧力変動が接近流の変動の線形変換で表わせると考え、流速-圧力アドミッタンス $\chi(n)$ を下式で定義する。

$$\chi(n) = \frac{S_p(n)}{\rho^2 \bar{U}^2(z) S_u(n)} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $\chi(n)$ は流速-圧力アドミッタンス
 $S_u(n)$ は接近流のパワースペクトル
 $S_p(n)$ は各測定点での風圧力のパワースペクトル
 $\bar{U}(z)$ は測定点の高さでの平均風速

である。

Fig. 9 は風向角 $\alpha=0^\circ$ の場合の模型中央点 ($z=200$ mm) での流速-圧力アドミッタンスである。点線は河井²⁾ の一様乱流中及び乱流境界層中に置かれた3次元角柱での結果より求めた。

$$|\chi(z, n)|^2 = \frac{1}{\{1 + 20(nB/\bar{U}(z))^2\}^{2/3}} \dots\dots(5)$$

今回の実験でも流れの性質が異なるにも拘らずほぼこの実験式が当てはまった。

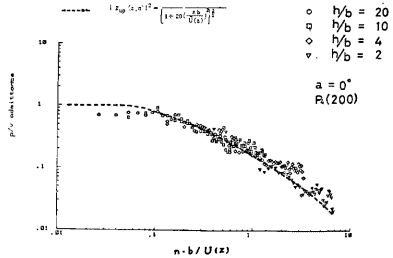


Fig. 9 P/V admittance vs aspect ratios: z=200 mm

4. ま と め

今回の実験結果をまとめると、

- 1) 平均風圧係数 C_p は風向角 $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ ではアスペクト比の影響を殆んど受けなかったが、風向角 $\alpha=90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ ではアスペクト比が小さくなるほど負圧の値が大きくなる傾向にあった。また平均風圧係数 C_p の鉛直分布についても風向角 $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ ではストリップ理論の仮定が成立つが、風向角 $\alpha=90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ ではアスペクト比が小さくなるとその影響より鉛直方向に一樣な分布に近づきこの仮定だけでは不十分である。
- 2) 変動風圧係数 C_{pr} はどの風向角についてもアスペクト比に対し単調増加しかつ収束する傾向にある。また変動風圧係数 C_{pr} の鉛直分布は風向角 $\alpha=0^\circ$ の場合アスペクト比の影響が小さくストリップ理論の仮定が成立つ。しかし、他の風向角ではアスペクト比の影響が大きく鉛直方向に一樣な分布となる。
- 3) 風向角 $\alpha=0^\circ$ でも模型の規模効果によりスペクトルの高周波数域でのばらつきが大きく、この傾向はアスペクト比が小さくなるにつれて著しい。また模型中央点での流速-圧力アドミッタンスは(5)式の河井の式で近似できた。

参 考 文 献

- 1) Baines, W.D.: Effects of Velocity Distribution on Wind Loads and Flow Pattern on Buildings, Proc. of the International Research Seminar, Wind Effects on Buildings and Structures, N.P.L., 1963, pp. 197-223.
- 2) Jensen, M. and N. Franck.: Model Test in Turbulent Wind, Part 1, Danish Technical Press, Copenhagen, 1963.
- 3) Katsura, J.: On Wind Pressure Distributions on the Side Surface of Models with Long Rect-

- angular Sections, Proc. of 2nd US National Conference on Wind Engineering Research, June, 1975, Colorado State Univ.
- 4) Lee, B.E.: Some Effects of Turbulence Scale on the Mean Forces on a Bluff Body J. Industrial Aerodynamics, Vol. 1, No. 4, Aug., 1976, pp. 349-360.
 - 5) Nakamura, Y. and Y. Ohya: The Effects of Turbulence on the Mean Flow Past Two-dimensional Rectangular Cylinders, J. Fluid Mech., Vol. 149, 1984, pp. 255-273.
 - 6) 河井宏允：乱流中におかれた3次元四角柱に作用する風圧力について第5回耐風物に関するシンポジウム論文集, 1978, pp.131-138.
 - 7) 河井宏允：乱流境界層中におかれた3次元角柱に作用する風圧力について, 第7回風工学シンポジウム, 1982, pp. 67-74.
 - 8) 桂 順治, 守光正幸：正方形断面をもつ角柱模型の側面における風圧変動について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1973, pp.443-434.
 - 9) 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. 389-390.