

正方形断面をもつ高層建築物の空力不安定性

谷池 義人・西村 宏昭・丸山 勇祐

AEROELASTIC INSTABILITY OF SQUARE PRISMATIC HIGH-RISE BUILDING

By *Yoshihito TANIKE, Hiroaki NISHIMURA and Yusuke MARUYAMA*

Synopsis

To consider aeroelastic instabilities of prismatic high-rise buildings in strong winds, i. e., vortex induced oscillation or galloping, unsteady aerodynamic forces must be investigated as the external forces acting on building. From this point of view, wind tunnel experiments were performed to obtain information of the fluctuating pressure on side face of buildings, which are subjected to the forced harmonic oscillation with a fundamental linear mode in a boundary layer. This paper presents the characteristics of fluctuating pressures on the side face of the oscillating square prism. The phase angle between fluctuating pressure and the displacement of the prism appeared positive value near the resonant velocity. The total work done by unsteady aerodynamic pressures suddenly jumped up from negative to positive near the resonant velocity. Mainly, the pressure on the lower part of building contribute to the immediate change of the work.

1. はじめに

風による構造物の振動には、大きく分けて風向方向のものと、風向直角方向のものがある。風向方向の振動には、風の乱れによって生じるバフエッティング振動がある。風向直角方向の振動には、物体の背後にできるカルマン渦による渦励振や物体の振動にともなって生じる付加的な空気力によるギャロッピング振動などがある。渦励振はカルマン渦の発生周波数と建物の固有振動数とが一致する風速付近で最大の振幅となり、ギャロッピングはある風速以上で発振し、風速の増加とともに大きくなる。これらの振動は、いずれも自励振動的な傾向が強く、一旦発生すると大きな振幅に発展し、場合によっては構造物の破壊に繋がる恐れもある。とくに高層建築物などの細長い構造物では、そういった傾向が強くなっている。したがって、渦励振やギャロッピング等の風向直角方向への空力不安定性状を詳しく調べることは、高層建築物の耐風設計にとって重要なことである。

これらの振動は、主として実験にもとづいて解析されてきた。これらの研究はまず2次元模型を用いて行われた。1970年代に、Novak等¹⁾により、流れの状態が高さ方向に異なる3次元角柱を用いた解析が行われている。これらの研究では、振動中の角柱に作用する時間変動的(動的)な空気力、いわゆる非定常空気力が静止角柱に加わる動的あるいは時間平均的(静的)な空気力に等価であると仮定して、現象の解明を試みたものである。しかし、外力である非定常空気力は振幅と風速に関して非線形となることから、この手法には多少の無理があり、実際の振動現象を正確に表わしえない場合もある。したがって、風向直角方向の振動現象を解明するには、非定常空気力の特性を調べる必要がある。

飛行機翼の非定常空気を理論的に求めた例はある。一般に建築の構造物は翼のような流線型ではなく、機能に応じて種々の形状をもつ。そのため、周囲の気流は剥離を生じており、構造物に作用する空気を理論的に解明することは極めて難しく、風洞実験に頼らざるを得ない。非線形物体に作用する非定常空気を実験的に求める方法として強制振動法²⁾と呼ばれる方法がある。これは対象とする物体を気流中で強制振動させ、直接非定常空気を取り出す測定法である。この手法を用いて2次元角柱や円柱を用いた研究^{3),4)}が多く行われた。しかし、その対象は断面軸方向に一樣な流れをもつと仮定される2次元的な構造物、例えばつり橋などに限られており、建築の分野で対象とする3次元的な構造物についてはあまり研究がされていない。

建築構造物のような3次元構造物では、高さごとに流れの性状や渦の影響が変化する。また、非定常空気に大きく関係する振動振幅も高さ方向に変化する。高層建築物の風直角方向振動の抑制や耐風設計において、建物が気流から受ける力の高さによる変化を明らかにすることは重要なことであると思われる。谷池・西村等^{5),6),7)}は境界層流で3次元角柱を用いた強制振動実験により、高層建築物の風直角方向振動時の非定常空気を検出し、空力不安定振動が、建物の形状、剛性、質量、減衰等の力学特性、さらには接近流の気流性状によってどのように変化するかを明らかにしているが、角柱側面の細部の空気力については明らかにしていない。また、石崎・谷池^{8),9),10)}は振動角柱側面に加わる風圧力を測定しているが、圧力計や解析のための機器が発達していなかったため明確な結果を示していない。本報では、多点同時測定が可能な圧力計を用いて、正方形断面を持つ3次元角柱の風直角方向振動時の側面に働く変動圧を直接測定できるようにした。振動時の角柱側面に作用する変動風圧を解析することにより、構造物側面のどの部分に渦励振やギャロッピングを引き起こす要因となる非定常空気が働くかを明らかにすることが目的である。

2. 実験方法

風洞実験は日本建築総合試験所の幅1.8m、高さ1.5mの測定断面をもつエッフェル型吹出式境界層風洞を用いて行った。気流は境界層の厚さ15cmの境界層流とした。風洞内で実験模型を風直角方向に強制振動させ、その側面に働く変動風圧を測定した。使用した模型は、幅 $B=70$ mmの正方形断面角柱であり、高さ $H=350$ mm、アスペクト比5である。

強制振動装置(Fig. 1)は、谷池・西村等が以前に開発したものに若干の改良を加えた。この装置は、パルスモータによる回転運動をカムを介して風直角方向のロッキング振動に変換し、カムによって振動振幅を変えられるようにした。模型の振動形態は1次の直線モードになる。強制加振振幅は建物の層間変位角 γ_r で表わし、0.004, 0.008, 0.016の3種類とした。また強制振動の振動数 f_m は8.1 Hzとし、測定時の風速は角柱頂部で無次元風速 $V_r=3\sim 12$ の範囲で15段階とした。角柱の振動変位は振動装置下部に設置したレーザー変位計により測定した。

変動風圧の測定は、角柱側面に設けた縦方向8点、横方向6点、合計48点の圧力測定孔から、ビニールチューブを介して圧力センサーにつないで行った。角柱の断面および側面はFig. 2に示す。側面の点は圧力測定孔である。使用した圧力計は差圧型のもので、10 mmaqで1Vの出力をする。使用したビニールチューブの長さは60cmで、その周波数特性をFig. 3に示す。解析領域は40 Hz程度であるから、ゲイン要素に関しては補正を行わなかった。また位相差に関しては、40 Hz付近まで直線的にずれると近似し、一定時間だけずらすことにより補正を行った。測定されたデータは直接A/D変換を行いデジタルデータをコンピューターに送り解析を行った。Fig. 4に計測および解析方法のブロック図を示す。

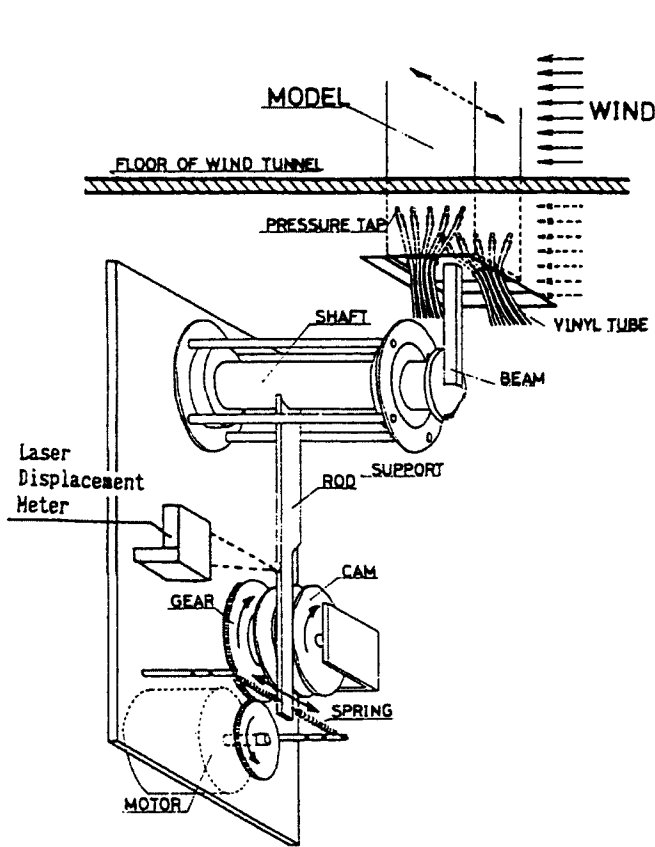


Fig. 1. Forced oscillation instrument

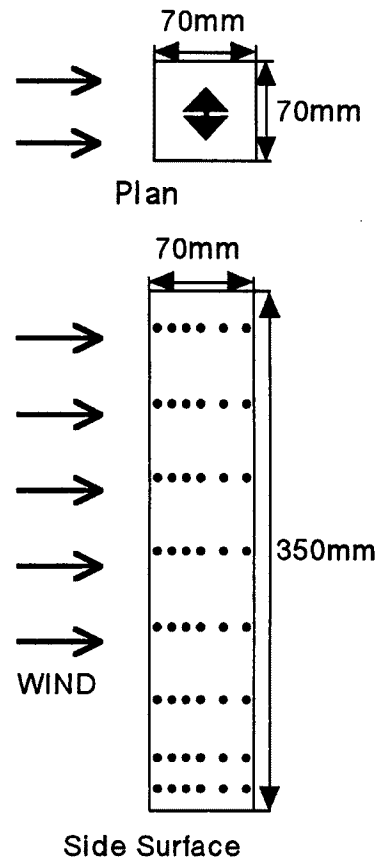


Fig. 2. Plan and side surface with pressure taps of prism

3. 角柱側面の風圧分布

Fig. 5 (a), (b) に角柱側面の圧力分布を示す。振動振幅による違いは見られなかったため、振動時は $y_r = 0.008$ の場合についてのみ示す。図の (a) は、基準の静圧 P_0 から測った平均圧 ($\bar{P}_i - P_0$) を基準の速度圧 $q_0 (= 1/2 \rho V^2, \rho$ は空気密度) で割った平均圧係数の分布を、(b) は変動圧 $P_i(t)$ の標準偏差 (rms) を q_0 で割った変動風圧係数の分布を示す。 P_0 と q_0 は角柱の影響を受けない前方の、角柱頂部の高さで測定した値である。

角柱側面の平均圧は、静止時と振動時を比較するとあまり大きな違いは見られなかったが、やや振動時の方が負圧の絶対値は大きくなっている。振動時には風速を変化させてみたが、風速による変化はあまり見られない。平均圧の分布の形状は高さ方向にほとんど変化せず、側面全体がほぼ一様な値をとる。

変動風圧係数は、静止時と比較し振動時の値はやや大きくなっている。振動時の値は共振風速付近で最も大きくなるが、これは同期領域に入ると空気力の絶対値が大きくなるためであると思われる。

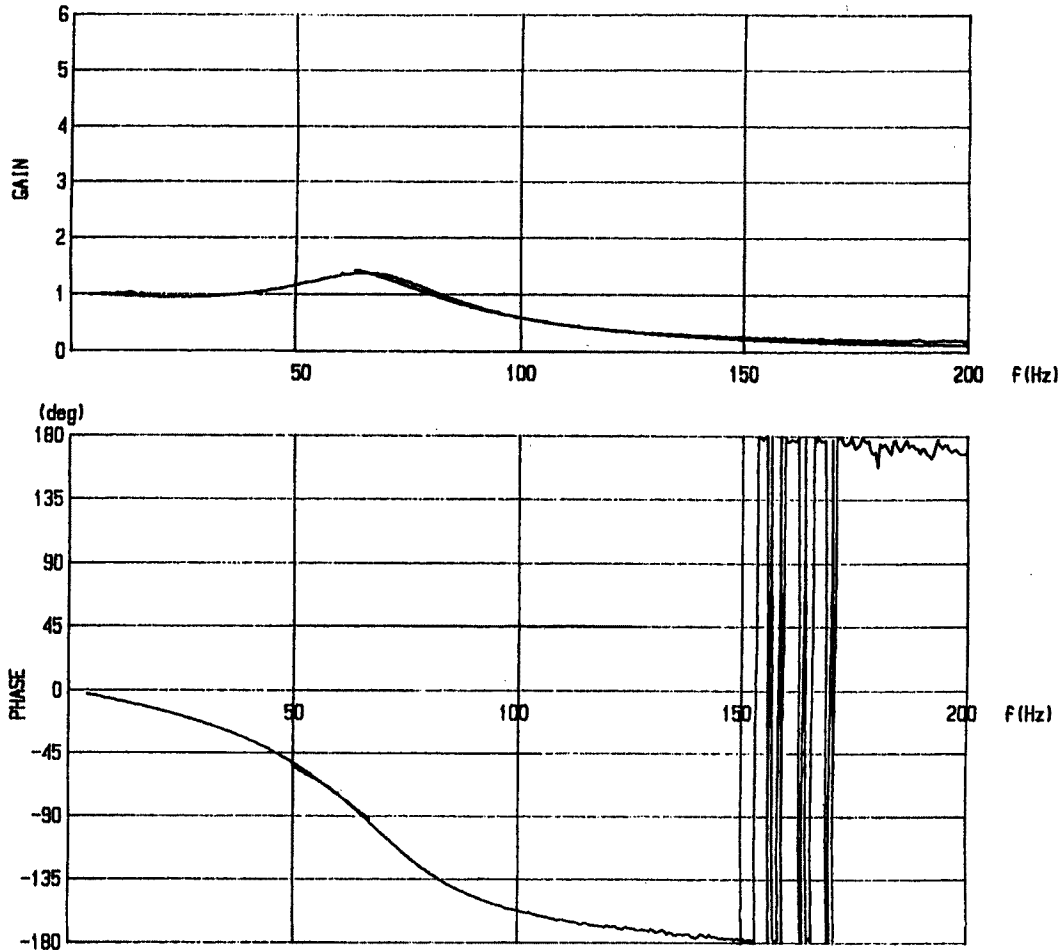


Fig. 3. Response of the pressure sensing system

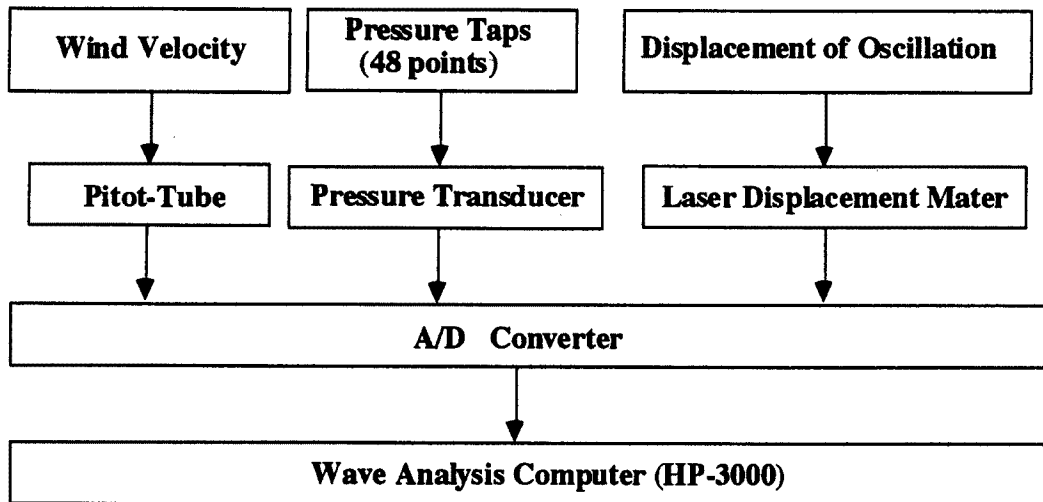


Fig. 4. Block diagram for measurement and analysis

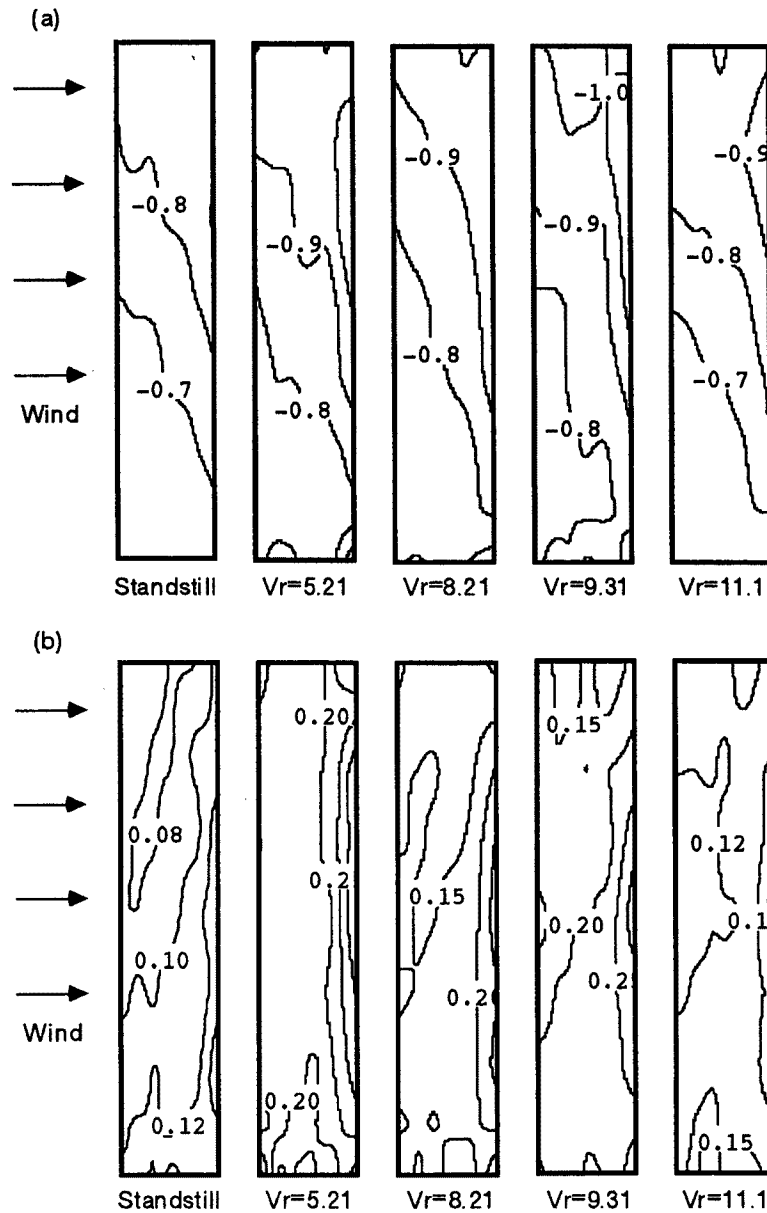


Fig. 5. Mean (a) and fluctuating (b) pressure distribution on the body surface of prism

4. 変動風圧のスペクトル解析

角柱側面に働く変動風圧の主成分を調べるため、スペクトル解析を行った。スペクトル解析の結果、振動振幅による差はほとんど見られなかったため、ここでは $y_r = 0.008$ のものと静止時のものについての結果を示す。Fig. 7, Fig. 8は Fig. 6に示す代表的な点での結果を静止時と4種類の風速について示している。横軸は周波数 (Hz), 縦軸は各周波数のパワーを20 Hzまでの全パワーで割ってパーセントで表示したものである。周波数領域での分解能は、サンプリング周波数を100 Hz, データ数を1,024点としている。

るので、0.0976 Hzである。また結果は16回のアンサンブル平均を行っている。図中の f_m , f_s とあるのは角柱の振動数 f_m と角柱後方に発生するカルマン渦の発生周波数 f_s を表わす。

Fig. 7 は、角柱静止時の結果である。上層部でははっきりしたピークが見られず、中層部および下層部では明瞭なスペクトルピークが見られる。これは上層部に行くほど渦の影響が拡散しているためと思われる。スペクトルピークを示す周波数は、中層部、下層部とも同じであり、これからストローハル数 $St (= f_s \cdot b/V, f_s$ はピークを示す周波数) を計算すると、 $St = 0.105$ になった。これより、カルマン渦の発生周波数と角柱の振動数が一致 ($f_s = f_m$) する共振風速は $V_{RES} (= 1/St) = 9.5$ となる。

Fig. 8 は角柱を $y_r = 0.008$ で振動させたときの結果を示す。模型の振動数は $f_m = 8.1$ (Hz) である。上層部では常に振動数成分 (f_m 成分) が卓越し、ストローハル数成分 (f_s 成分) はほとんど見られない。共振風速付近でも他のものと大きな違いが見られない。中層部では f_m 成分, f_s 成分の両方のピークが見られるが、やや f_m 成分のほうが卓越している。共振風速付近では f_m 成分と f_s 成分の一致によりピークを示すパワーはかなり大きくなる。共振風速を超えてもしばらくは f_s 成分が明確に見られないが、これは同期現象が続いているためだと思われる。下層部では中層部同様に両方のピークが見られるが、低風速では f_s 成分がかなり卓越している。風速の増加とともに f_m 成分のピークが大きくなり、共振風速付近ではピークを示すパワーはかなり大きくなる。共振風速を超えても中層部同様にしばらく同期現象が続く。

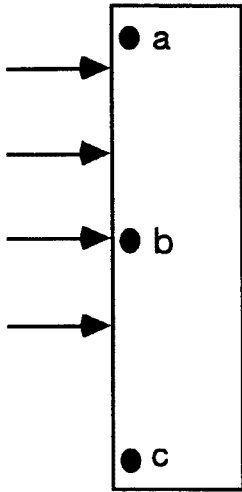


Fig. 6. The distinct points for description

f_s 成分が角柱の中層部から下の測定点では見られ、上層部で見られないのは、渦が角柱上部で拡散することによって起こると思われる。角柱前縁での剥離より生じるカルマン渦が、下部で渦度が強く上部では拡散するといった、谷池・奥田¹¹⁻¹³⁾の言う逆円錐形の形状をもつものと思われる。角柱の振動にともなって生じる渦については、 f_m 成分が角柱側面のどの部分においても一樣に見られることから、高さによる変化つまり流れによる変化はあまりないと思われる。

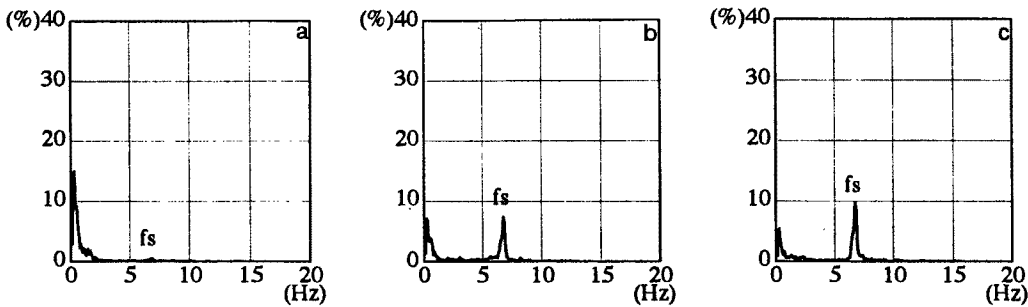


Fig. 7. Nondimensional power spectra of pressures on side surface (prism at a standstill)

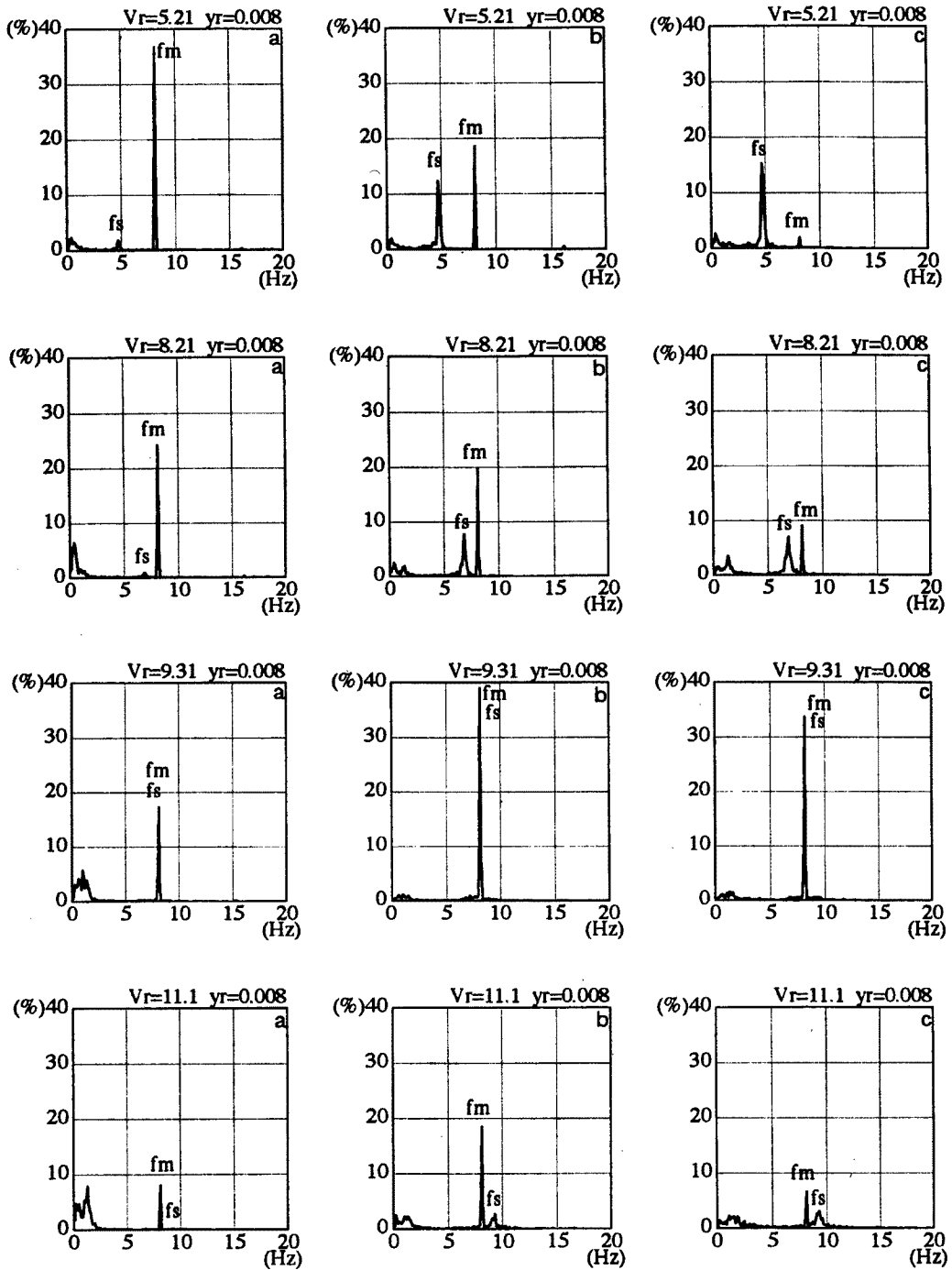


Fig. 8. Nondimensional power spectra of pressures on side surface (prism oscillating transversely)

5. 角柱側面の圧力変動の空間相関係数

2つの測定点の圧力変動 $P_i(t)$, $P_j(t)$ の相互相関係数 $R_{ij,\tau}$ を次式で定義する。

$$R_{ij,\tau} = \frac{\overline{P_i(t)P_j(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{P_i(t)^2}}\sqrt{\overline{P_j(t)^2}}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで t は時間, τ は隔たり時間, $\overline{\quad}$ は時間平均を示す。

Fig. 9 は, $\tau=0$ としたときの空間相関係数の分布を 4 種類の風速について表わしたものである。空間相関係数は, ストローハル数成分 (fs 成分) の渦の影響を最も強く受けていると思われる風上最下点 (Fig. 6 の c) の圧力変動を基準 $P_i(t)$ とし, その他の点の圧力変動を $P_j(t)$ として計算したものである。振幅による傾向の違いはあまり見られなかったので $y_r=0.008$ の場合についてのみ結果を示す。各々の図は左側が風上である。

静止時と比較すると振動時は相関が大きくなっている。また風速の変化に対しては, 共振風速までは風

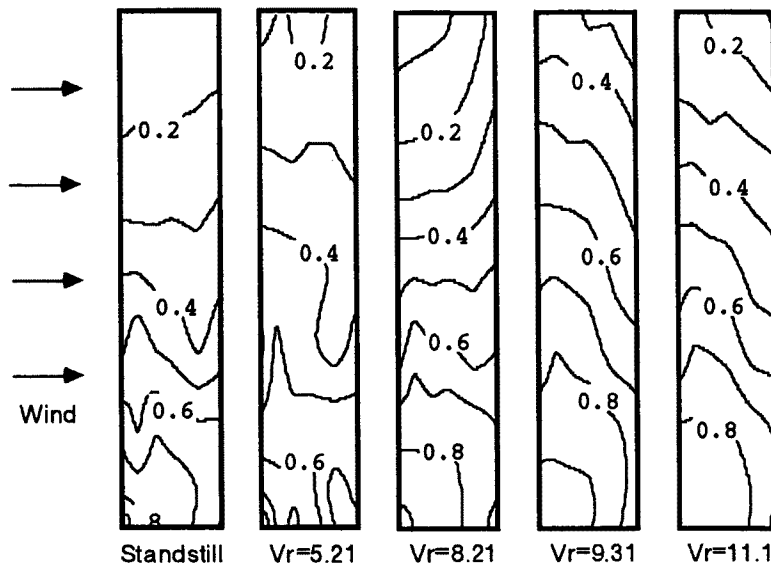


Fig. 9. Space correlation coefficients of pressures on side surface ($y_r=0.008$)

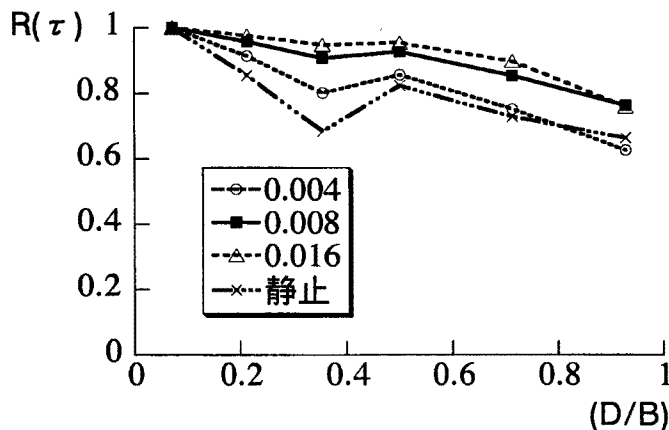


Fig. 10. Max cross correlation coefficients for wind direction

速の増加とともに相関は大きくなるが、共振風速を超えると相関が小さくなり始める。分布の形状を見ると、共振風速前と、共振風速以後では傾向の違いが見られる。共振風速前は、下層部では基準点を中心に放射状に分布が変化するが、角柱側面中央から上層部では風上頂部にむけて放射状に相関が小さくなっている。共振風速以後は、基準点を中心に放射状に分布が変化する傾向が角柱側面全体にわたって見られる。これについては空間相関係数からは詳しいことは分からないが、興味深い現象である。またこれは後で述べる変動圧と変位の位相差の関係と似た傾向を示している。

Fig. 10 は共振風速付近での風向方向の空間相関係数の最大値を最下段について示したものである。また Fig. 11 は同様に高さ方向の空間相関係数の最大値を前縁について示したものである。静止時と比較して振動時のほうが相関が良くなっている。また振動振幅が大きいものほど相関は良くなっている。

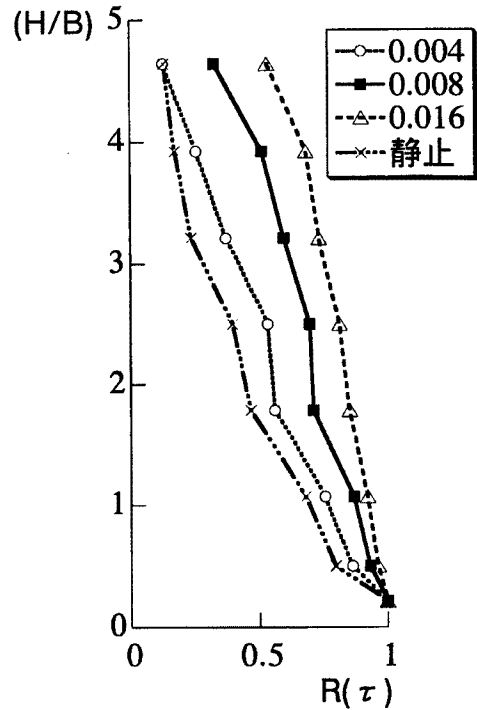


Fig. 11. Max cross correlation coefficients for vertical direction

6. 振動角柱側面に作用する空気力

角柱側面の各測定点で得られた変動風圧より振動に寄与する空気力（非定常空気力）を取り出すことを考える。ある点（ i 点）での1サイクル（ $1/f_m$ ）ごとに角柱が空気から受ける仕事量 W_i は、その点での変動風圧 $P_i(t)$ （ただし、平均成分を除く）と水平変位を $y_i(t)$ を用いて次式で表わされる。

$$W_i = \int_0^{1/f_m} P_i(t) \cdot dy_i \dots\dots\dots (2)$$

角柱の振動は、強制的に調和振動させているので、水平変位 $y_i(t)$ を次式のような余弦波とする。

$$y_i(t) = y_{0i} \cos 2\pi f_m t \dots\dots\dots (3)$$

式(3) を式(2) に代入すると、

$$W_i = \int_0^{1/f_m} P_i(t) \cdot dy_i = \int_0^{1/f_m} P_i(t) \cdot y_i(t) dt = 2\pi f_m y_{0i} \int_0^{1/f_m} P_i(t) \sin(2\pi f_m t) dt \dots\dots\dots (4)$$

ここで f_m は角柱の振動数、 y_{0i} は i 点での振動振幅である。三角関数の直交性より、変動風圧 $P_i(t)$ の中で仕事量 W_i に寄与するのは、周波数 f_m の成分であることが上式よりわかる。変動風圧 $P_i(t)$ から f_m 成分のみを取り出したもの $P_i'(t)$ を次式の様におく。

$$P_i'(t) = P_{0i}' \cos(2\pi f_m t + \beta_i) \dots\dots\dots (5)$$

ここで P_{0i}' は i 点に作用する変動風圧の f_m 成分の振幅を示す。 β_i は変動風圧と変位との位相差を示し、 $\beta_i > 0$ のとき、変動風圧は変位に対して位相の進みをもつ。式(5) を式(4) に代入すると、

$$W_i = \int_0^{1/f_m} P_i(t) \cdot dy_i = \pi y_{0i} P_{0i}' \sin \beta_i \dots\dots\dots (6)$$

P_{0i}' 、 y_{0i} は正であるから、 W_i の正負は $\sin \beta_i$ の符号によって決まる。 β_i が $2n\pi < \beta_i < (2n+1)\pi$ のとき (n

は整数), $0 < \sin \beta_i < 1$ になり, W_i は正になる。この場合 i 点に加わる空気力は, 角柱にエネルギーを与え, 振動を増大させる。逆に β_i が $(2n-1)\pi < \beta_i < 2n\pi$ のとき (n は整数), $-1 < \sin \beta_i < 0$ になり, W_i は負になる。この場合空気力は, 角柱からエネルギーを奪うことになり, 振動を減少させる。また, 側面全体の測定点に加わる変動風圧が, 1 サイクルあたりに角柱に対してなす仕事量の総和 W_T は次式となる。

$$W_T = \sum_{i=1}^{48} a_i W_i \dots\dots\dots (7)$$

ここで a_i は, i 点の風圧が分担する面積を示す。 W_T が正になるとき, 角柱側面は空気からエネルギーを与えられることになり, 振動を促進する力, つまり負減衰力を受ける。この空気力が風直角方向の空力不安定振動の原因となる。

Fig. 12 は角柱側面に働く変動風圧と変位の位相差の風速による変化を Fig. 6 に示す代表的な点において表わしたものである。ここで位相差 β_i は変位の周期を基準に $-180^\circ < \beta_i \leq 180^\circ$ の範囲で表わした。 β_i が 180° より大きくなるときは, $\sin \beta_i < 0$ になるので $(\beta_i - 360^\circ)$ で示し, 逆に β_i が -180° 以下になるときは, $\sin \beta_i \geq 0$ になるので $(360^\circ + \beta_i)$ で示した。横軸は無次元風速 V_r で表わしてあり $0 \sim 12$ となっ

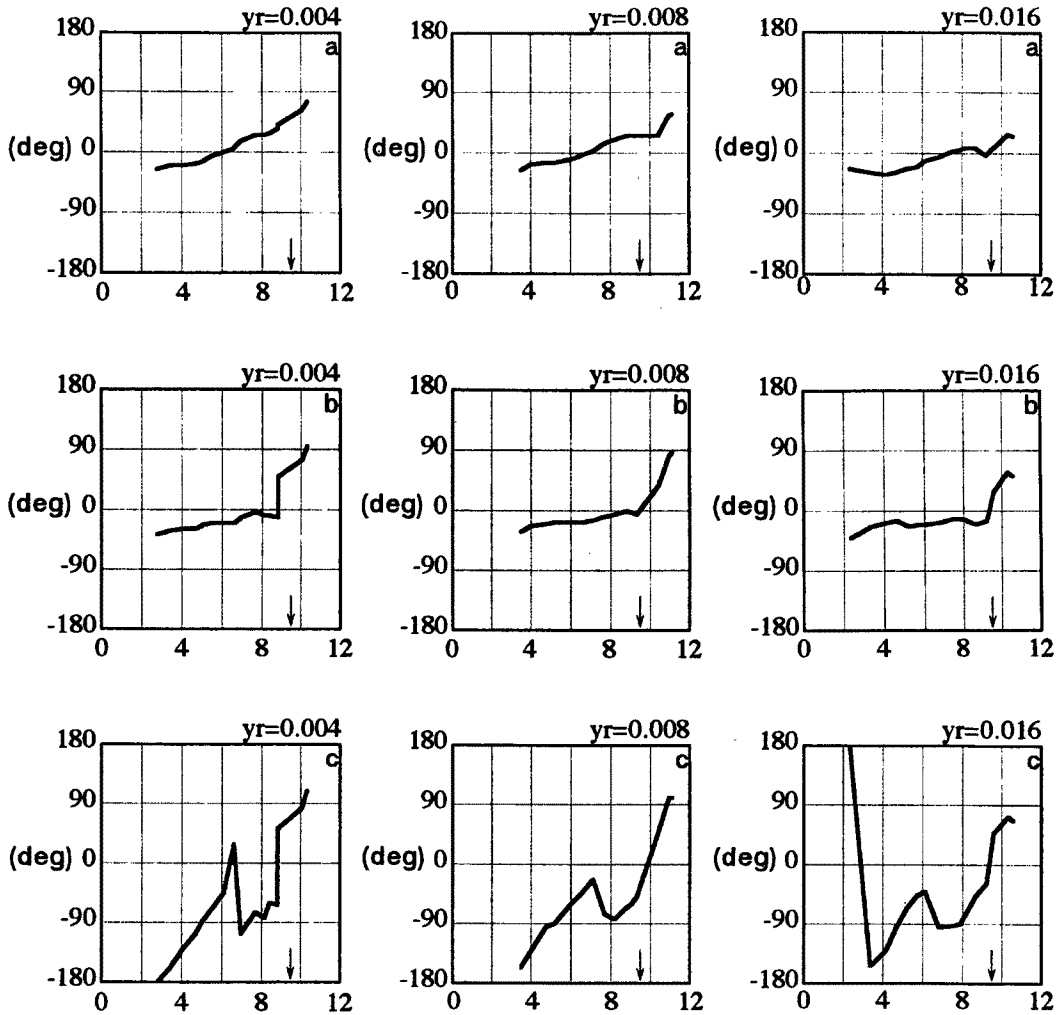


Fig. 12. Phase angle between fluctuating pressure and the displacement of the prism

ている。図中の矢印は共振風速を示す。また位相差 β_i は変位 $y_i(t)$ と変動風圧 $P_i(t)$ の相互相関係数が最大となる τ から求めたものである。

上層部では風速の増加とともに単調増加的に変動風圧の位相が進んでいる。また上層部風上を中心とした部分では共振風速以前から位相差 $\beta_i > 0$ となり、共振風速に達する前に $W_i > 0$ となっている。下層部から中層部にかけては共振風速付近で突然変動風圧の位相が進み、 $\beta_i > 0$ となる。また下層部では共振風速の約 $2/3$ 付近の風速のときにも位相差 β_i が大きくなり部分的に $\beta_i > 0$ となる場所が見られる。

上層部では、前章のスペクトル解析の結果からも明らかなように、カルマン渦の影響をあまり受けないので、中層部や下層部で見られるような共振風速付近での急激な位相の変化が見られない。つまり上層部の空気力を考える場合準定常的な表現が可能となる。風速の増加とともに位相差 β_i が単調増加する現象は、風速の増加とともに振動振幅が直線的に増加するギャロッピングの現象とよく似ていると思われる。この現象を振動振幅について比較すると、 $y_r = 0.004$ の場合は $y_r = 0.008, 0.016$ より位相差 β_i が正となるのがかなり低い風速で起こっている。中層部および下層部では共振風速付近で急激に負減衰が働き始めるが、これがロックイン現象であり、この負減衰力が渦励振の原因となると思われる。

Fig. 13 は位相差 β_i の分布を風速ごとに表わしたものである。図は位相差 β_i の変化が最も明確である $y_r = 0.004$ の場合のみ示す。図の左が低風速時のもので右に行くほど順に風速が高くなっている。低風速時 ($V_r = 5$) には角柱前縁で位相差 β_i が最も大きくそこから風下に進むほど位相が遅れている。無次元風速 $V_r = 7$ を超える付近から角柱前縁頂部で $\beta_i > 0$ となり、分布は角柱前縁頂部を中心に放射状に位相が遅くなっている。無次元風速 $V_r = 9$ を超えるまでこの傾向が続き、 $\beta_i > 0$ の範囲が広がっていく。共振風速付近になると急激に分布の形状が変化し、前縁最下点の位相差 β_i が正で最大となり、そこを中心に放射状に位相が遅くなっている。そのときの位相差は共振風速以前のものとあまり変化が見られない。共振風速時には前縁最下点で $\beta_i = 90^\circ$ となり、共振風速を超えると $\beta_i = 90^\circ$ となる領域が角柱の上方へ広がり、前縁最下点付近は $\beta_i > 90^\circ$ となる。このことから渦励振を起こすロックインの状態は、共振風速付近で急激に起こり共振風速を超えた後もかなりの間続くと思われる。

Fig. 14 は各点の仕事量の総和 W_T を式(7)より求めた結果を示している。横軸は無次元風速を表わし、矢印は共振風速を表わしている。縦軸は仕事量 W_T を代表長さ B 、角柱断面積 B^2 、速度圧 q_0 で無次元化した量で表わしてある。無次元風速の増加とともに仕事量が増大し、共振風速付近で急激に正となる。 $V_r =$

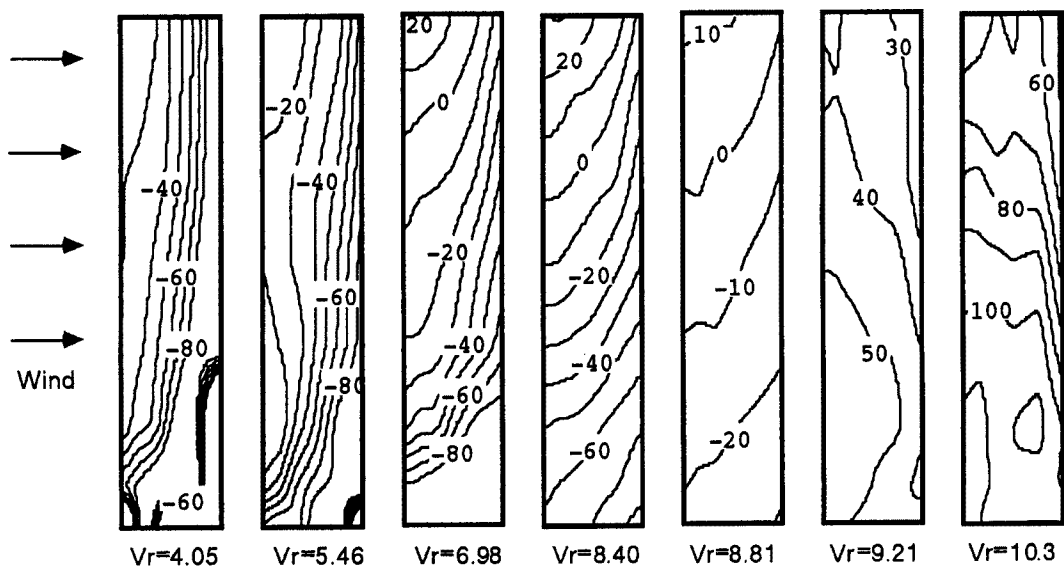


Fig. 13. Contours of phase angle with various reduced wind velocities ($y_r = 0.004$)

4以下では急激に仕事量が減少している。 $y_r = 0.004$ のときは他の振幅よりやや低い風速で仕事量が正になっている。これは上層部での負減衰力の影響ではないかと思われる。前述の位相差との関係を調べて見る。角柱上層部では $V_r = 7$ 付近から $\beta_i > 0$ となり仕事量 $W_i > 0$ となっている。しかし仕事量の総和 $W_T < 0$ であるから角柱側面全体では負減衰効果は働いていない。下層部で $\beta_i > 0$ となると、側面全面が $\beta_i > 0$ となり仕事量の総和 $W_T > 0$ となっている。つまり、共振風速程度までの風速ならばカルマン渦による渦励振の影響の方が強いと思われる。

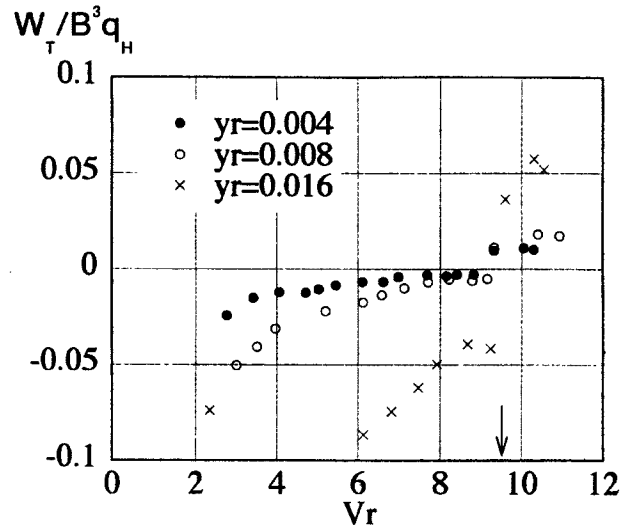


Fig. 14. Total work done by pressures on side surface of prism

7. む す び

正方形断面をもつ3次元角柱の、側面に作用する変動風圧力を多点にわたって測定し、その特性を無次元風速 V_r で3～12の範囲にわたって調べた。得られた結果を下記に示す。

- 1) 角柱の風直角方向への振動時に側面各部に加わる風圧力、いわゆる非定常な風圧力は、角柱の振動ともなって発生する渦と、角柱静止時に発生するストローハル数成分の渦とによって形成されることがわかった。
- 2) 角柱上層部では角柱の振動数成分の渦の影響を強く受け、角柱下層部では、特に前縁側ではストローハル数成分の渦の影響を強く受けている。
- 3) 角柱側面での変動風圧が振動変位にたいして位相の進み($0^\circ < \beta_i < 180^\circ$)をもつとき、この風圧力は角柱に対して、正の仕事なし、振動を増大させる働きをすることがわかった。一般的に無次元風速 V_r が低いときには位相が遅れ、 V_r の増加につれて風上側頂部から位相の遅れは回復する。
- 4) 共振風速を超えると下層部前縁付近の位相差が急激に進み、風圧力が角柱側面に正の仕事をするようになる。これより渦励振などの自励振動の発生には、下層部前縁の側面に加わる風圧力のなす仕事が寄与していることがわかった。
- 5) 共振風速の約2/3付近で中層部から下層部にかけて β_i の大きくなる場所が見られ、場所によっては $\beta_i > 0$ となり、この風速付近では振動が止まりにくくなることが予測される。
- 6) 角柱側面に加わる変動風圧の空間相関は静止時より振動時のほうが良くなった。また振動振幅の大きいものほど相関は良くなっていた。これは振動ともなって発生する渦が、静止時に発生するストローハル数成分の渦に比べ角柱全面でより一様になるからである。
- 7) 建築構造物のような3次元的な構造をもつものは高さ方向に異なる空気力を受けているので、渦励振やギャロッピングが異なる場所で同時に起こり、建物に大きな非定常空気力が働くことが予測される。

参考文献

- 1) Novak, M. : Galloping Oscillations of Prismatic Structures, Proc. ASCE, Vol. 98, EM1, Feb., 1972, pp. 27 - 46.
- 2) Bishop, R. E. D. and A. Y. Hassen : The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 277, 1964, pp. 51 - 75.
- 3) Nakamura Y. and T. Mizota : Unsteady Lifts and Wakes of Oscillating Rectangular Prisms, Proc. ASCE, Vol. 101, EM6, Dec., 1975, pp. 855 - 871.
- 4) 伊藤 学・宮田利雄・藤沢伸光：振動する正方形断面に作用する空気力の特性，土木学会第30回年次学術講演会概要集，I-208，1975-10.
- 5) 谷池義人：高層建築物の空力不安定性に関する研究，京都大学博士論文，1983.
- 6) 谷池義人・西村宏昭：境界層流中における高層建物の空力不安定振動，京大防災年報，第36号，B-1，1993，pp. 69 - 78.
- 7) 西村宏昭・谷池義人：境界層流中における高層建物の空力不安定振動—正方形断面をもつ高層建物の場合—，日本建築学会論文報告集，第456号，1994，pp. 31 - 37.
- 8) 石崎潑雄・谷池義人・近藤宏二：角柱振動時に側面に加わる動的な風圧力特性について（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，1982，pp. 1221 - 1222.
- 9) 石崎潑雄・谷池義人：角柱振動時に側面に加わる動的な風圧力特性について（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，1983，pp. 2405 - 2406.
- 10) 石崎潑雄・谷池義人：角柱側面に加わる非定常な風圧力，第7回風工学シンポジウム，1982，pp. 83 - 90.
- 11) 谷池義人・奥田泰雄・岩谷敏弘：直方体まわりの流れと圧力場について，京大防災年報，第32号，B-1，pp. 399 - 413.
- 12) 奥田泰雄・谷池義人：3次元角柱まわりの渦構造（その1・2），第11回風工学シンポジウム，1990，pp. 119 - 130.
- 13) 奥田泰雄・谷池義人：3次元角柱側面上に形成される逆円錐上渦，第12回風工学シンポジウム，1992，pp. 167 - 172.