

直列2本円柱の空力応答特性に関する実験的研究

白石成人・松本 勝・白土博通・佐川信之・横田哲也

ON THE AERODYNAMIC INSTABILITIES OF TANDEM CIRCULAR CYLINDERS

By *Naruhito SHIRAISHI, Masaru MATSUMOTO, Hiromichi SHIRATO,
Nobuyuki SAGAWA and Tetsuya YOKOTA*

Synopsis

Wake Galloping is defined as cross flow oscillation of leeward cylinder in higher wind velocity due to Kármán vortex shedding when two cylinders are suitably arranged in series with approaching flow.

In this study, in order to discuss the physical mechanism of Wake Galloping, some wind tunnel experiments were carried out, like static and dynamic pressure measurements on the surface of leeward cylinder, flow visualization by smoke wire method. On the basis of these measurements, some characteristics concerning the relationship between the flow pattern around two circular cylinders with the unsteady pressure are investigated.

1. ま え が き

複数の構造物が互いに近接して配置された場合、それぞれの構造物が空力的に不安定な状態におかれることがあり、渦励振・Resonant Buffeting・Wake Galloping・Wake Induced Flutter等の各種空力不安定現象の発現することが知られている。複数の近接構造物は、多導体送電線・高層煙突群・独立状態の吊橋主塔・斜張橋ケーブル・Twin Building・原子力発電プラントの冷却用パイプ群などに数多くみられるものである。また、これら空力振動による実構造物の損傷例も報告されており、多導体送電線の損傷・直立するアンテナの疲労破壊・重水プラントにおける基礎や締付けボルトの損傷・吊橋主塔の塔柱継手部の損傷などはその一例である。

これら複数柱状構造物の空力不安定現象は、1つの物体の後流域内に他の物体が配置されるため、その発生要因は単独物体に比べより複雑となり、そのため上流側構造物背後に形成されるwake内の流れと後流側構造物の振動の関連について多くの研究がなされている。直列2本円柱を対象とした研究例として、Cooper & Wardlaw¹⁾は下流側円柱の槽軌道を描く大振幅振動と後流内の静的空気力特性との関連を示し、Simpson²⁾は下流側円柱を2自由度連成系として準定常理論により応答解析を行ない、これをWake Induced Flutterと称した。これらの研究例は円柱間隔が直径の10~30倍程度とかなり大きく、2本の円柱がさらに近接した場合にも自励的な大振幅振動(Wake Galloping)の発現することが指摘されている。宇都宮³⁾は円柱間隔が直径の3倍の場合に、下流側円柱に働く変動空気力のなす仕事から応答特性を説明し、Ruscheweyh⁴⁾は上流側円柱の剥離流と下流側円柱の相互干渉に起因する自励振動であるとし、変動揚力の変位に対する位相差を考慮して、静的揚力係数勾配の正負が不安定現象の可能性を決定するとしている。このようにWake Gallopingは、後流側円柱に作用する揚力の非定常性と密接な関連をもつことが指摘されている。しかしながら、この揚力の非定常性をもたらす要因が何であるか、あるいはwakeという流れの非一様性・非定常性と後流側円柱の振動の関連性については依然未解明の点が数多く残されている。

本研究では、このような観点から近接構造物の空力不安定現象のうち Wake Galloping を対象とし、後流側円柱の静的圧力分布ならびに非定常圧力を測定し、円柱に作用する空気力の非定常性および流れの非定常性より振動発生メカニズムに対して検討を加えた。

2. Wake Galloping と wake 内の空力特性

直列 2 本円柱の下流側円柱は上流側円柱の wake 内に位置し、その流れの特性が Wake Galloping と密接な関連を持つものといえる。流れの特性の一例として、直列 2 本円柱には円柱間隔によって空力特性が不連続に大きく変化する限界中心間隔が存在し、それが直径の約 3.8 倍であることが一般に知られている。

M. M. Zdravkovich⁵⁾ は、限界中心間隔以上では上流側円柱・下流側円柱において、それぞれ次のような変化が生じるとしている。

(i) 上流側円柱

- (a) 渦放出が始まる。
- (b) 背面の圧力係数が低下する。
- (c) 抗力係数が不連続に増加する。

(ii) 下流側円柱

- (a) 上流側円柱からの剝離流れの再付着点が消える。
- (b) 背面および側面の圧力係数が低下する。
- (c) 渦放出周波数が不連続に増加する。
- (d) 前面の圧力係数および抗力係数が不連続に増加する。

Z. G. Kostic & S. N. Oka⁶⁾ は、物体後流の渦形成領域および下流側円柱への剝離せん断層の再付着に関する研究から、次のように報告している。

(i) 円柱間隔が限界中心間隔より大きい場合

上流側円柱断面回りの流れは、下流側円柱の影響をほとんど受けず単柱のそれと大きな差はないが、下流側円柱には乱れの大きい流れが作用するため後流幅が縮小する。

(ii) 円柱間隔が限界中心間隔より小さい場合

上流側円柱からの剝離流れは、下流側円柱の前面に再付着し両円柱の間に死水領域を形成する。中心間隔が直径の 2.3 倍以下では、両円柱間に closed vortex region と呼ばれる定常的な流れが生ずる。

以上のことから、直列に配置された 2 本柱まわりの流れのパターンは、円柱間隔によって大きく次の 3 つに分類できる。

(1) 限界中心間隔より十分小さい場合

両円柱間に死水領域が形成され、周囲の流れは定常的でありあたかも 2 本の円柱が一体化されたような挙動を示す。

(2) 限界中心間隔より十分大きい場合

下流側円柱には上流側円柱の wake および渦放出の影響によって乱れの大きい流れが作用するが、両円柱相互の影響は小さくそれぞれ単独柱に流れが作用したような特性を有する。Wake Induced Flutter は、この領域で発現するものと考えられる。

(3) 限界中心間隔付近の場合

下流側円柱の位置によって上流側円柱の後流特性が大きく変化する、両円柱は相互に密接な影響を及ぼしあうものと考えられる。Zdravkovich⁵⁾ は、この領域では 2 つの流れのパターンが継続的に交互に現われる双安定的な特性を示すことを指摘しており、かなり非定常性の強い流れであるといえる。後述するように、Wake Galloping はこの領域で発現しており、下流側円柱の振動による流れの非定常性も加わるため、Wake Galloping は非定常性の強い流れの中での空力振動現象であると

いえよう。

Fig. 1 に円柱後流域の速度分布および乱れ強さの分布を示す。円柱からの距離 L が直径 D の 3, 5, 7 倍のいずれの場合にも、後流中心線上では $I_u \approx 30\%$ と非常に大きな乱れ強さを持つ。しかしそのスペクトルは、カルマン渦列に起因する渦放出周波数にパワーの大部分が集中する形状をとるものと考えられ、 $1/S$ より高い風速域においてしかもある風速値以上で時間的変動の少ない定常振幅振動が発現する Wake Galloping の主たる発生要因が、このような後流のスペクトル分布特性にあるとは言い難い。むしろ主流方向の平均風速が空間的分布をもち、後流側円柱の振動が速度勾配を持つ流れの場に置かれていることが、この現象に密接な関連を持つものと思われる。

次に、空力振動現象の直接的な発生要因と考えられる揚力（気流直角方向の空気力）について考察する。下流側円柱が後流中心線から気流直角方向にはずれて位置した場合、下流側円柱には後流中心線向き（内向き）の揚力の作用することが一般に知られている。Mair & Maull¹⁷⁾ は、wake 内の速度ベクトルの確率密度分布を求め、その最大期待方向が後流中心線方向から内向きにずれており、この方向に作用する空気力の分力として内向きの揚力が発生するとしている。Zdravkovich⁵⁾ は、2本の円柱に種々の相対的位置関係を持たせ、下流側円柱の静的揚力および静的圧力分布を測定した。この結果、内向きの揚力は両円柱間の大きな速度を持つ流れによるものであるとして、この流れを Gap-Flow と称した。Ruscheweyh⁴⁾ は、上流側円柱後流内における静的空気力係数 C_L の主流直角方向の偏心距離 X に対する勾配が、Wake Galloping の発現に関連があり、静的空気力係数勾配が急変する鋭いピークを有する場合に振動が発現するとしている。

このように、下流側円柱に作用する内向きの揚力は、Wake Galloping の発生機構に対して密接な関連を持つものと考えられる。しかし、非定常性の強い wake 内で大振幅振動を行なう下流側円柱の空力現象を静的な空力特性だけで取り扱うことは困難であり、その発生メカニズムには振動円柱と後流の非定常な相互干渉などが大きく関与するものと考えられ、流れや空気力の非定常性を考慮した研究が必要である。

3. 風洞実験

3.1 実験概要

本研究における風洞実験は、(1)風速—振幅振動測定実験 (2)静的圧力測定実験 (3)流れの可視化実験 (4)非定常圧力測定実験の4種類である。

使用した風洞は、京都大学工学部土木工学科に設置されたエッフェル型吸い込み式風洞（測定部高さ 1.5 m, 幅 2.5 m, 長さ 8 m）であり、模型支持ターンテーブル・模型支持アーム・スプリングなどによる気流のかく乱を防止するために風洞内に導風壁を設置している。風速は 0~20 m/sec の範囲で連続的に制御することができる。

以下、実験項目別に述べる。

風速—振幅振動測定実験 Fig. 2 に風洞実験に用いた上流側円柱模型および下流側円柱模型の配置図を示す。Wake Galloping の発現する高風速域では上流側円柱には定常振幅振動が認められないことより、本研究においては、上流側円柱を固定し下流側円柱は気流直角方向の1自由度支持を行なった。模型は直径 58 mm のジュラルミン製であり風洞内に鉛直に支持され、下流側円柱は上下4本計8本のコイルスプリングによって剛性を与えられている。

模型の応答変位は、スプリング端に取り付けられたコの字型エレメントに貼り付けられた歪ゲージの抵抗

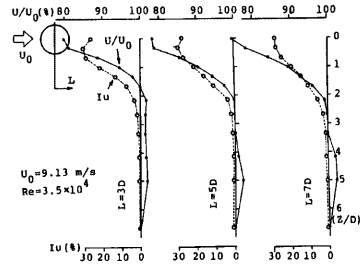


Fig. 1 Aerodynamic Properties in the Wake of Circular Cylinder

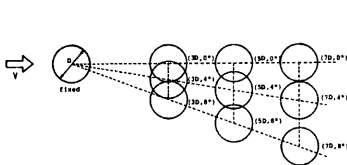


Fig. 2 Position of Downstream Cylinder

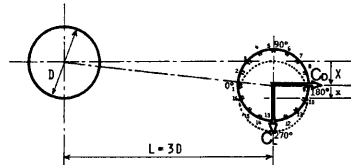


Fig. 3 Cross Section of Model

値の変化としてホイストンブリッジ（興和電気 K.K. 製）を通じて、動歪計（新興通信工業 K.K. 製 6008 F 型）により検出し、D.C. アンプ（三栄測器 K.K. 6L02 型）を用いて電氣的に増幅し、ローパスフィルター（NF 回路ブロック K.K. 製 E3201 型）を通した後、ペン書きレコーダー（渡辺測器製作所 K.K. 製 W.T.R. 281 型）に記録した。

平均風速は、NPL 型 ビートル管を用い 総圧・静圧の差圧をベッツ型マノメーター（理化学精機工業 K.K. 製）によって測定した。

静的圧力測定実験 Fig. 3 は圧力測定用模型の断面であり、模型スパン中央部に設けられた圧力孔の Point No. を示し、後流中心線に対する下流側円柱の中立位置の偏心距離 X 、振動変位 x 、揚力 C_L 、抗力 C_D の正方向の定義を併記した。

上流側円柱は固定し下流側円柱を気流直角方向に移動（ X を変化）させ、各地点での下流側円柱周囲の静的圧力分布を測定した。下流側円柱周囲の圧力孔における表面圧力は、アルミニウム製の導圧管により模型端部へ導かれ、さらにビニールチューブを通じて圧力変換器（豊田工機 K.K. 製 DD101K）により風洞内静圧との差圧を検出し、D.C. アンプ（豊田工機 K.K. 製 AA2330）を用いて電氣的に増幅し、ローパスフィルター（前出）により変動成分を除き、その平均値成分をマルチコーダー（渡辺測器製作所 K.K. 製 MC6612）に記録した。

非定常圧力測定実験 静的圧力測定実験と同一の模型を使用し、前述の風速—振動振幅測定実験と同様の支持方法で下流側円柱を支持し、Wake Galloping 振動中における非定常圧力を測定した。下流側円柱周囲の表面圧力は、圧力変換器（前出）によって検出され、D.C. アンプ（前出）によって増幅された後、データレコーダー（TEAC K.K. 製 R-280 および MR-10）にアナログ量として記録された。なお振動変位も同時にデータレコーダー（前出）に記録した。

流れの可視化実験 直径 66mm、スパン長 500mm の模型を用い、風速—振動振幅測定実験と同様の支持方法（但し模型は水平支持）および同一の応答検出装置を使用した。

流れの可視化は、Smoke wire 法により風洞風速に応じて適宜白煙を発生させ、モータードライブ付カメラ（日本光学製ニコン F3, MD-4）を風洞内に設置し、光学式自動シャッター（日本光学製ルミコントロール ML-1）を用いて風洞外部から遠隔操作によって写真撮影を行なった。光学式自動シャッターの発する赤外光を光学式変位計ディテクタ（UDT 社製 OP-EYE, 50mm レンズ付）により電圧信号に変換した後、A.C. 増幅器（UDT 社製 301B/AC）および演算器（試作品）を通してペン書きレコーダー（前出）に変位応答と同時に記録し、写真と振動変位の対応付けを行なった。

3.2 風速—振動振幅特性

Fig. 2 に示したように、円柱直径 D に対して円柱間隔 $L=3D, 5D, 7D$ の 3 タイプについて、各々水平偏角 $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ の 3 タイプ計 9 ケース（便宜上それぞれ $(3D, 0^\circ), (3D, 4^\circ), \dots, (7D, 8^\circ)$ と呼ぶ）を行なった。

無次元風速が $1/S$ に一致する風速域で発現する渦励振以外に振動現象が認められたのは、 $(3D, 0^\circ), (3D, 4^\circ), (3D, 8^\circ), (5D, 8^\circ)$ の 4 ケースであった。 $(3D, 8^\circ), (5D, 8^\circ)$ の 2 ケースに見られた振動現象は、その応

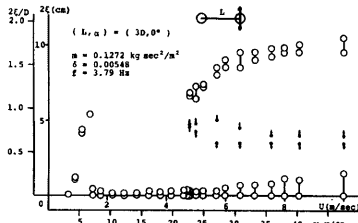


Fig. 4-1 Velocity — Amplitude Curve

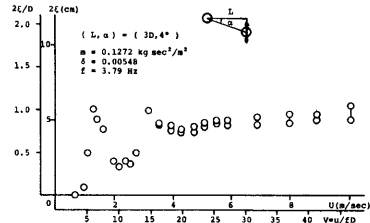


Fig. 4-2 Velocity — Amplitude Curve

答振幅がビート状になり後流の乱れの影響を受けたいわゆるパフェッティング振動であるものと判断される。これに対し、(3D, 0°), (3D, 4°) の2ケースでは高風速域で大振幅の定常振動 (Wake Galloping) の発現が認められた。一例として、Fig. 4-1 に (3D, 0°), Fig. 4-2 に (3D, 4°) の V-A 図を示す。

(3D, 0°) の場合、無次元風速22以上で不安定なリミットサイクルを有するハードフラッター型の応答を示しており、その応答振幅は風速によらずば一定の値 (無次元振幅 $2\eta/D \approx 1.7$) をとる。

(3D, 4°) の場合、風速によらずば一定の応答振幅を示すのは (3D, 0°) と同じであるが、不安定なリミットサイクルを有さず一見ソフトフラッター型の応答に見える。しかし、次に示すように Scruton 数を変化させた場合にはハードフラッター型の応答もみられており、上流側円柱と下流側円柱の相対位置だけが不安定なリミットサイクルの発現を左右するものとは言い難い。

上流側円柱と下流側円柱の相対位置が (3D, 4°) の場合の Scruton 数による応答の変化を Fig. 5 に示し、その諸元を Table 1 に示す。無次元風速20~30および30以上の2つの風速域において安定な定常振動が発現しており、不安定なリミットサイクルもみられる。特に、Scruton 数が2倍近く異なるにもかかわらず、その応答振幅値に顕著な差異は認められない。

Table 1 Properties of Models

Arrangement	(3D, 4°)	
Model	δ : small	δ : large
$f \eta$ (Hz)	3.451	3.4055
M (kg·sec²/m²)	0.1380	0.1378
$\delta \eta$ ($2\eta = 50$ mm)	0.00879	0.01507
$\delta \eta$ ($2\eta = 20$ mm)	0.00790	0.01007
$\delta \eta$ ($2\eta = 10$ mm)	0.00455	0.00999

以上のことから Wake Galloping は、下流側円柱が上流側円柱の比較的限られた空間領域に位置するときに発現し、他の Galloping や Flutter 等の自励振動に比較し、風速や Scruton 数が応答振幅にもたらす影響は少ないものと判断される。

3.3 静的圧力特性

Fig. 6 に下流側円柱を気流直角方向に移動させた場合の静的圧力分布の変化を示す。後流中心線から

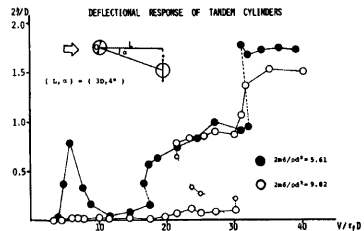


Fig. 5 Velocity — Amplitude Curve

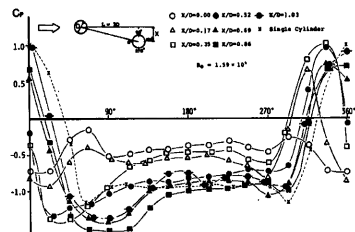


Fig. 6 Pressure Distribution Around Downstream Cylinder

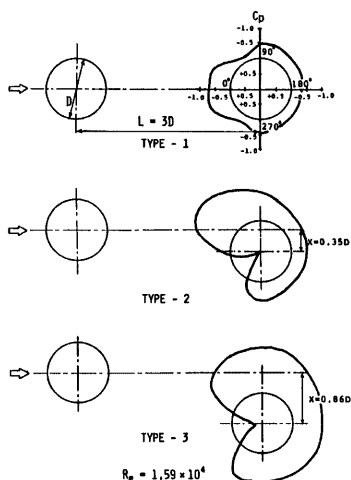


Fig. 7 Pressure Distribution Around Downstream Cylinder

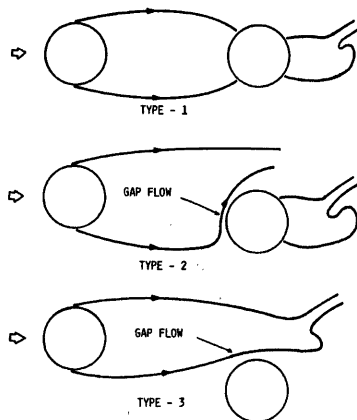


Fig. 8 Flow Pattern

の偏心距離 X を円柱直径 D に対して、 $X=0, 0.17D, 0.35D, 0.52D, 0.69D, 0.86D, 1.03D$ の 7 ケースの測定を行なったが、静的圧力分布形状は 3 タイプに大別できる。

それぞれの代表的圧力分布形状を Fig. 7 に示し、流れのパターンを Fig. 8 に示す。

TYPE-1 ($x=0$ 付近)

$\theta=60^\circ$ および 300° 付近に圧力回復が見られ、上流側円柱で発生した剝離せん断層の再付着によるものと考えられる。表面圧力はほぼ全周について負圧であり背面の負圧レベルは単独円柱に比べ小さく、下流側円柱では乱流剝離が生じているものと考えられる。

TYPE-2 ($x=0.35D$ 付近)

Stagnation Point が $\theta=340^\circ$ 付近に移動している。これは前述の剝離せん断層の再付着とともに、wake boundary より外側の自由流れに円柱の一部が突入するため、TYPE-1 より顕著な圧力回復すなわち正圧が生じたものと思われる。

また、 $\theta=45^\circ$ 付近には大きな負圧のピークが生じている。これは Zdravkovich が指摘する Gap-Flow すなわち Fig. 8 にも示すように、上流側円柱の剝離流れが下流側円柱によって極度に歪められ、両円柱間に速度の大きい流れが生ずるためと考えられる。

背面の負圧レベルは、TYPE-1 と同様に比較的小さい。

TYPE-3 ($x=0.86D$ 付近)

ほぼ $\theta=0^\circ$ 付近に Stagnation Point があり、背面の負圧レベルも単独円柱のレベルに等しく、圧力分布形状から下流側円柱は上流側円柱の後流域からはずれてほぼ一様流に近い流れの中に位置するものと判断される。しかし、 $\theta=90^\circ$ 付近では単独円柱に比べ大きな負圧がみられ、この付近では Gap-Flow の影響が顕著に表われているものと考えられる。

Fig. 9 に上述の静的圧力分布を断面周囲に積分して得られた 静的揚力係数の計算値を□で示した。なお Wardlaw & Cooper および Zdravkovich⁵⁾ の静的空気力係数測定結果を併記した。

円柱間隔 $L=3D$ で、下流側円柱を上流側円柱の後流内を気流直角方向に移動させた場合、偏心距離 $X=0.3D$ および $X=0.8D$ 付近で 2 つの揚力のピークが存在する。静的圧力分布から判断して、 $X=0.3D$ にお

るピークは $\theta = 340^\circ$ 付近の大きな正圧と $\theta = 45^\circ$ 付近の大きな負圧が、また $X = 0.8D$ におけるピークは $\theta = 90^\circ$ 付近の大きな負圧がその発生要因となっているものと考えられる。すなわち $X = 0.3D$ におけるピークでは Fig. 8 に示した TYPE-2 の流れのパターンが、 $X = 0.8D$ におけるピークでは TYPE-3 に相当する流れの状態が生じているものと考えられる。

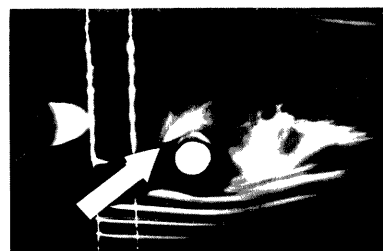
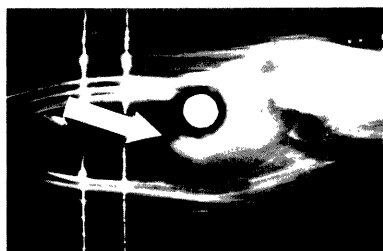
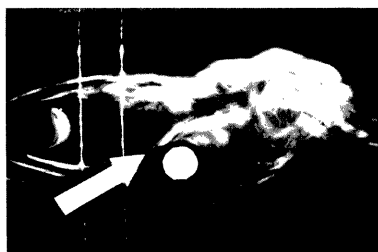


Photo 1 Gap-Flow at Wake Galloping

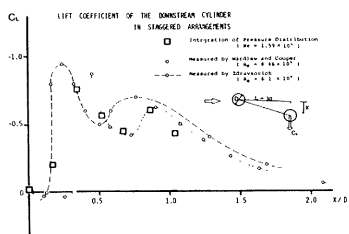


Fig. 9 Lift Coefficient of Downstream Cylinder

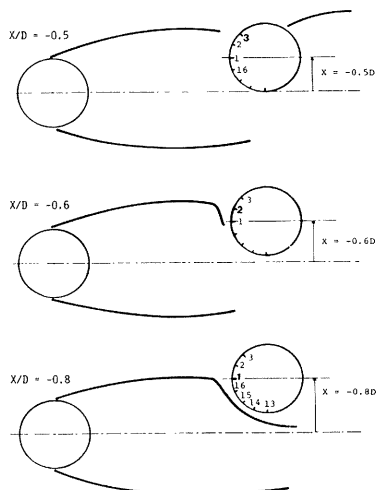


Fig. 11 Flow Pattern

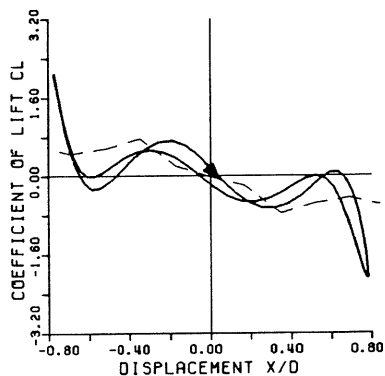


Fig. 12 Lissajous of Unsteady Lift Force

また、偏心距離 X を変化した場合の TYPE-1 より TYPE-3 へ至る流れのパターンの移行を考えると、TYPE-1 から TYPE-2 では Gap-Flow の有無に伴う不連続な変化が、TYPE-2 から TYPE-3 では連続的な変化が予想され、 $X=0.3D$ のピークが鋭く $X=0.8D$ のピークが緩やかであることに対応している。

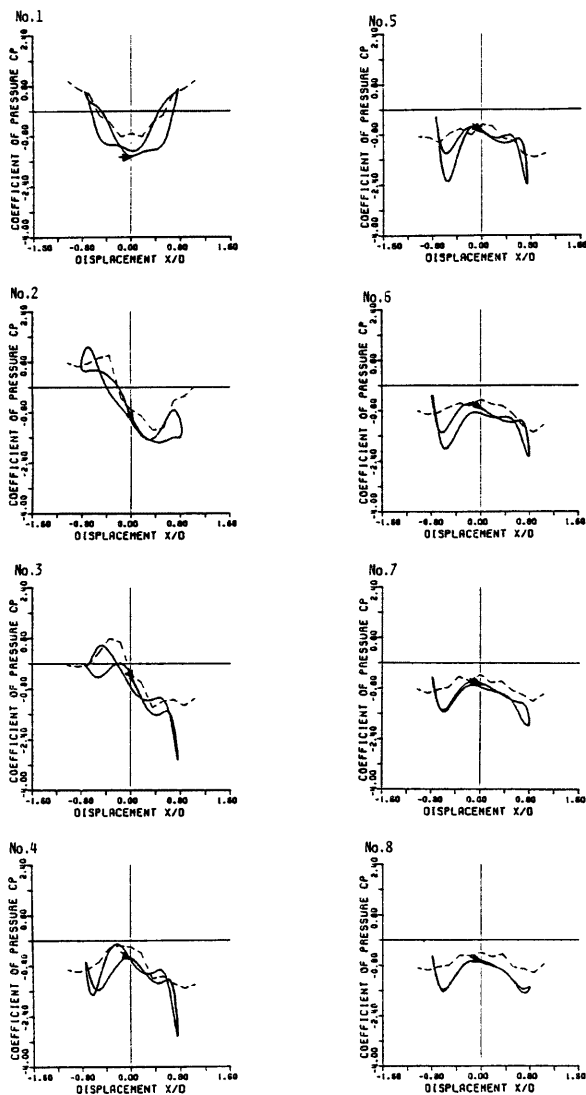


Fig. 10-1 Lissajous of Unsteady Pressure

3.4 流れの可視化

Wake Galloping 振動中の円柱周囲の流れのパターンを Smoke Wire 法によって写真撮影した一例を Photo 1 に示す。後流側円柱の振動変位が極大または極小に達する付近で矢印で示した Gap-Flow が存在し、

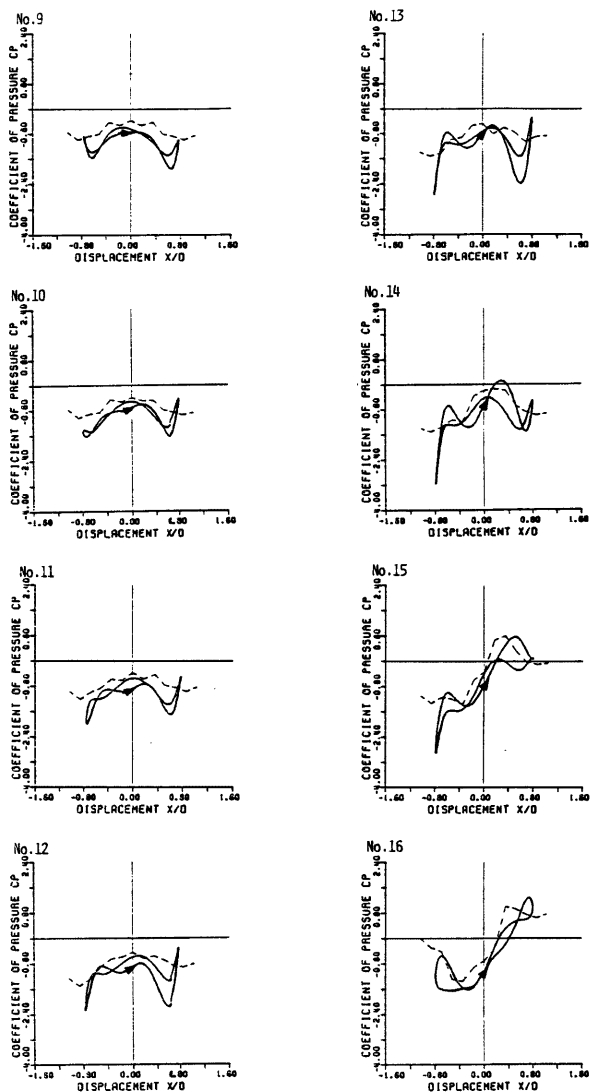


Fig. 10-2 Lissajous of Unsteady Pressure

しかも下流側円柱が wake boundary を横切る瞬間に生じるため、流れの状態はいわゆる switching flow となっている。従って、振動変位が極小・極大時における流れの急変は、下流側円柱の非定常空気力特性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

3.5 非定常圧力特性

Fig. 10-1 および Fig. 10-2 は、Wake Galloping 振動中における下流側円柱表面の変動圧力係数 C_p を振動 1 周期当りのリサージュとして、16個の圧力孔それぞれについて描いたものである。実線は変動圧力のリサージュを示し、静的圧力測定から得られた準定常値を破線で併記した。なお実験諸元は、Table 1 (δ : small) に同じである。

3.1 実験概要で述べたように、円柱周囲の圧力変動は模型内部のアルミニウム管およびビニールチューブ等の導圧管を経て圧力変換器へ導かれるため、真の圧力変動と測定された圧力変動との間には、導圧管内の圧力伝播速度に起因する time lag が存在するものと考えられる。その time lag の補正方法として、振動系の減衰による逸散エネルギーと非定常揚力のリサージュの面積から計算される流体が模型に対してなす仕事量が等しくなるように、圧力変動の time lag をパラメトリックに変化させ計算値を比較した結果、模型固有振動数成分における真の圧力変動と測定された圧力変動の位相差は、(3D, 0°), の場合 3.0°, (3D, 4°) の場合 23.4° となった。

Irwin 等⁸⁾ は圧力伝播速度を考慮した tubing system の位相補正について報告しているが、本研究においてもこの方法を用い導圧管内の圧力伝播速度が音速に等しいとして、実験に使用した導圧管の長さより time lag を求めた結果、上述の位相差とほぼ同一の値が得られた。Fig. 10-1 および Fig. 10-2 に示した変動圧力のリサージュならびに Fig. 11 の変動揚力のリサージュは、すべて上述の位相補正を行なっている。

(3D, 0°) における各圧力孔ごとの変動圧力のリサージュを Fig. 10-1 および Fig. 10-2 に示す。すべての圧力孔においてその形状は準定常値と比較的類似しており、その負圧レベルもほぼ等しい値を示す。また、前面 (Point No. 1, 2, 3, 15, 16) では上流側円柱の剝離流の再付着および wake 外側の自由流れの影響による圧力回復がみられ、振動変位 $x/D = -0.5$ では Point No. 3 が、 $x/D = -0.6$ では Point No. 2 が、振動変位が極小となる $x/D = -0.8$ では Point No. 1 がそれぞれ正圧のピークとなっている。(Fig. 11 参照)

また、振動振幅がほぼ極小となる $x/D = -0.6 \sim -0.8$ では、Point No. 13, 14, 15, 16 において準定常値の 2 倍以上という非常に大きな負圧が生じている。これは流れの可視化実験において、Wake Galloping 振動中にも振動変位が極小・極大となる前後で Gap-Flow の発現することが確認されており、この影響によるものと考えられ (Fig. 11 $x/D = -0.8$ 参照)、Gap-Flow の発現による流れの急変が、円柱表面特に後流中心線側の前面における空気力の非定常性をもたらすものと判断される。

これら Stagnation Point の移行および Gap-Flow による圧力の非定常性は、上流側円柱の後流幅と密接な関連を持つものと思われる。さらに、Wake Galloping の振動振幅が風速によらずほぼ一定値をとるという応答特性も、対象とした風速域ではほぼ一定である事と対応するものと考えられる。

Fig. 12 は、各圧力孔の変動圧力を各瞬間ごとに円柱周囲に積分し、得られた揚力係数 C_L の時間変動と振動変位 x/D からリサージュを描いたものである。図中の破線は Fig. 9 で示された静的揚力係数の計算値である。静的揚力係数と同様に非定常揚力係数においても $X/D = 0.3$ および 0.8 付近に 2 つのピークが認められる。 $X/D = 0.3$ 付近のピークは両者とも $C_L = -0.7 \sim -0.8$ とほぼ同じレベルにあるが、 $X/D = 0.8$ 付近のピークでは非定常揚力は静的揚力の 3 倍以上に達しており、前述の Gap-Flow の発現による流れの急変が大きく影響しているものと考えられる。

以上より、非定常圧力・非定常揚力ともに振動変位が極小・極大となる付近を除いてほぼ準定常値に近いレベルを保ち、極小・極大付近では switching flow という流れの急変が物体に作用する空気力に強い非定常性をもたらし、準定常値との間に大きな差異を生ずるものと考えられる。

3.6 運動方程式と位相特性

Wake Galloping の発現には、内向きの揚力が作用しその変動揚力と振動変位の間に位相差が存在するこ

とが重要な要因となることが指摘されてきた。Ruschewey⁴⁾ は、静的空気力係数勾配と Wake Galloping の発現の関連性に着目し、その特性を準定常理論を用いて線型運動方程式に定式化し、ある程度現象を説明できることを示した。ここではさらに簡略化した運動方程式を定式化し、振動変位と変動揚力の位相差が Wake Galloping の発現にもたらす影響について考察する。

物体に作用する空気力には変位 x に対しタイムラグ τ が含まれるものとすれば、運動方程式は式(1)で表わされる。

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = f_L(x(t+\tau)) \quad \dots\dots\dots(1)$$

変動揚力 f_L は変位 x に対し非線型の時間変化を呈するが、ここでは簡単のため Fig. 13 に示すように、振動変位 x/D に対する静的揚力係数曲線を原点付近の勾配 C_{L0} を用いて、式(2)のように線形近似する。

$$C_{L0}(x(t+\tau)) = C_{L0} \frac{x(t+\tau)}{D} \quad (C_{L0} > 0) \quad \dots\dots\dots(2)$$

準定常理論を適用すると空気力 f_L は式(3)で与えられる。

$$f_L(x(t+\tau)) = \frac{1}{2}\rho u^2 \frac{D}{m} C_{L0} \frac{x(t+\tau)}{D} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$x = x_0 \sin \omega t$ なる振動解を仮定して、式(3)を式(1)に代入すると

$$\left(-\omega^2 + \omega_0^2 - \frac{1}{2}\rho u^2 \frac{1}{m} \cos \varphi\right) \sin \omega t + \left(2\xi\omega_0\omega - C_{L0} \frac{1}{2}\rho u^2 \frac{1}{m} \sin \varphi\right) \cos \omega t = 0 \quad \dots\dots(4)$$

ここで φ は変位 x に対する空気力 f_L の位相差であり式(5)で表わされる。

$$\varphi = \omega\tau \quad \dots\dots\dots(5)$$

式(4)の第2項は $\dot{x}$ に関する減衰項であり、自励振動が発現する空力負減衰の状態になるには

$$\frac{1}{2}\rho u^2 \frac{1}{m} C_{L0} \sin \varphi > 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる必要があり、 $C_{L0} < 0$ より

$$\sin \varphi < 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

が成立しなくてはならない。

また、式(4)において第2項 = 0 とおくことにより、限界風速 V_{cr} が式(7)のように求められる。

$$V_{cr} = \frac{U_{cr}}{fD} = 2\sqrt{\pi} \sqrt{\frac{2m\delta}{\rho D^2}} \frac{1}{\sqrt{\sin \varphi C_{L0}}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式(7)より、Wake Galloping が発現するためには、変動空気力が振動変位に対して位相遅れの状態にあることが必要条件となる。このことは、Fig. 12 において変動空気力が振動変位に対して位相が遅れているという実験結果と一致する。

4. む す び

本研究では、wake 内に置かれた下流側円柱の静的圧力特性を調べるとともに、振動円柱の非定常空気力特性と Wake Galloping の関連性について考察しその発生メカニズムについて検討を加えたが、その結果得られた結論を以下に列挙する。

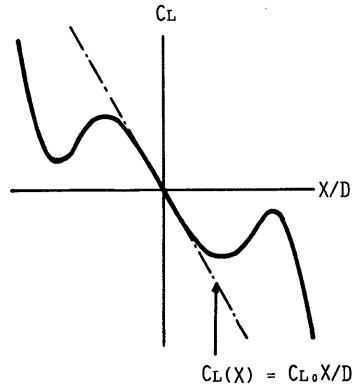


Fig. 13 Coefficient of Lift Force

(1) Wake Galloping は上流側円柱に対する下流側円柱の相対位置が $(3D, 0^\circ)$, $(3D, 4^\circ)$ という比較的限られた空間領域で発現する。

(2) 風速や Scruton 数が Wake Galloping 応答振幅にもたらす影響は、他の自励振動ほど顕著ではないものと思われる。

(3) 下流側円柱を気流直角方向に移動させた場合の静的圧力分布は、次の 3 つのパターンに分類された。
TYPE-1 ($X=0$ 付近) ほぼ全局について負圧が生じるが、 $\theta=60^\circ, 300^\circ$ 付近に再付着による圧力回復が存在する。

TYPE-2 ($X=0.3D$ 付近) Stagnation Point が $\theta=340^\circ$ 付近に移動し、 $\theta=45^\circ$ 付近に Gap-Flow による大きな負圧のピークを持つ。

TYPE-3 ($X=0.8D$ 付近) 単独円柱の圧力分布形状に類似し、 $\theta=90^\circ$ 付近に Gap-Flow による大きな負圧のピークを持つ。

(4) 静的圧力分布を断面回りに積分した静的揚力係数は、偏心距離 $X=0.3D$ および $0.8D$ 付近に 2 つのピークを持ち、その要因はそれぞれ TYPE-2, TYPE-3 の圧力分布形状によるものと判断される。

(5) 流れの可視化から、Wake Galloping 振動中においても、振動変位が極小・極大時には Gap-Flow の発現することが確認された。

(6) 下流側円柱断面周囲の変動圧力係数 C_p および変動揚力係数 C_L は、振動変位が極小・極大時を除き準定常値に近いことが明らかとなった。極小・極大時における相違は、Gap-Flow の発現に伴う流れの急変によって流体に強い非定常性をもたらすものと判断される。

(7) 非定常圧力のリサージュから、上流側円柱の後流幅が Wake Galloping の振動振幅に関連を持つものと考えられ、風速によらず応答振幅がほぼ一定であるという風速-振動振幅測定実験結果との対応がみられる。

(8) 変位と空気力の位相差を考慮した運動方程式から、Wake Galloping 発現の必要条件として、変動揚力が振動変位に対して位相遅れであることが導かれ、非定常空気力測定結果との一致が認められた。

最後に、本研究を遂行するにあたり風洞実験・データ整理等に多大な御協力を得た、徳島大学工学部 長尾文明氏、および油谷康弘氏をはじめとする京都大学工学部橋梁工学研究室のかたがたに心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) K. R. Cooper and R. L. Wardlaw: Aeroelastic Instabilities in Wakes. Proc. Third International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, Japan, September, 1971.
- 2) A. Simpson: Wake Induced Flutter of Circular Cylinders, Mechanical Aspects, Aeronautical Quarterly, pp. 101-118, May, 1971.
- 3) 宇都宮英彦, 鎌倉米康: 近接する並列円柱系の空気力学的挙動, 土木学会論文集, 第336号, 1983年8月.
- 4) H. P. Ruschweyh: Aeroelastic Interference Effects between Slender Structure, Sixth International Conference on Wind Engineering, March, 1983.
- 5) M. M. Zdravkovich: Review of Flow Interference Between Two Circular Cylinders in Various Arrangements, Trans. A. S. M. E., pp. 618-633, Dec., 1977.
- 6) Z. G. Kostic and S. N. Oka: Flow and Heat Transfer with Two Cylinders in Cross Flow. International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 15, 1972, pp. 279-299.
- 7) W. A. Mair and D. J. Maull: Aerodynamic Behaviour of Bodies in the Wake of Other Bodies. Transaction Royal Society, A, Vol. 269, 1971, pp. 425-437.
- 8) H. P. A. H. Irwin, K. R. Cooper and R. Gird: Correction of Distortion Effects Caused by Turning Systems in Measurement of Fluctuating Pressures. Journal of Industrial Aerodynamics, May, 1979, pp. 93-107.