

## 近接する並列円柱系の空気力学的挙動

### THE AERODYNAMIC BEHAVIOR OF TANDEM-TYPE CIRCULAR CYLINDERS

宇都宮英彦\*・鎌倉米康\*\*

By Hidehiko UTSUNOMIYA and Yoneyasu KAMAKURA

#### 1. まえがき

近接する2つの構造物の空気力学的現象の1つとして、Wake Excitation が知られている。これは、上流側物体の背後に、剥離渦を伴って形成された後流内に位置する、他の物体との空力不安定現象に関する一般的な表現である。対象を円形断面構造物に限定しても、送電線の振動を初め、並列煙突、斜張橋吊材、また化学プラント等多方面にわたって、この種の風による振動の存在が認められている。さらにまた、円形断面は構造要素の1つの典型でもあり、この分野の研究の基礎となる情報を得ることができるという意味もあって、しばしば研究対象に取り上げられている。

Cooper および Wardlaw は、送電線の風による振動に関する研究の中で、後流内で励起される円柱の振動を以下のような3つのタイプに分類している<sup>1)</sup>。

- (i) Vortex Vibration (渦励振振動)
- (ii) Resonant Buffeting (選択共振振動)
- (iii) Wake Galloping (後流ギャロッピング)

(i) は上流側物体から放出される渦による強制振動であり、(ii) は上流側物体背後の後流場の乱流エネルギーのうちで、物体の固有振動数に一致する変動流成分との選択共振によって生じる、バフエッティングに似た不規則性の強い振動である。岡島は、低レイノルズ数領域での下流側円柱の渦励振現象に着目して、円柱間距離、系の減衰比などのパラメーターと応答との関係を調べ、これらによるストローハル数や後流の変化の様子を詳細に観察している<sup>2),3)</sup>。また Simpson は (iii) の Wake Galloping に類する不安定現象について、一連の研究を行っている<sup>4)~7)</sup>。ここでは、下流側円柱を2自由度静連成系として、準定常理論によって応答解析を行い、この現

象を Wake Induced Flutter と表現している。Tsui もまた、Simpson の方法に従い、さらに減衰項を考慮して、Routh-Hurwitz の安定判別条件を用いて系の安定性を詳細に検討している<sup>8)</sup>。これらの研究は、いずれも円柱間距離が、その直径の10~20倍と比較的大きい場合を対象とするものが多く、近接する円柱についてはデータも乏しく、また空気力の非定常性についての考慮も不十分である。

近接する円柱の場合には、上流側からの剥離渦の複雑な作用により、下流側円柱の表面圧力分布が大きく影響を受け、遮蔽効果や干渉効果が顕著に認められるようになる。Zdravkovich は、近接する2本の円柱の種々の空間配置に対して、下流側円柱の表面圧力分布、静的空気力、後流渦が形成する流れのパターン等について報告している<sup>9),10)</sup>。そこで、円柱間距離が円柱直径の3.8倍の所で、静的空気力が不連続に変化することを指摘し、これが両円柱間の流れ (gap flow) の双安定的な性質によるものであると述べている。わが国においても、斎藤らは実際の斜張橋ケーブルを用いた風洞実験により、不安定振動の発生の可能性を示唆しており<sup>11)</sup>、また宮田らは、上流側円柱を定常強制加振した際の、下流側円柱の楕円振動現象について報告し、また不安定振動の発生を定量的に評価することにもある程度成功している<sup>12)</sup>。

著者らも、一連の風洞実験によって、Simpson の示した連成不安定振動とは異なる現象の存在することを指摘し、考察を加えてきた<sup>13),14)</sup>。本研究においては、種々の支持条件のもとで、上下流の2本の円柱の応答曲線 ( $V-A$  曲線) を求め、応答に関与する主要なパラメーターに対する考察を行った。次に、特に空気力学的に興味深い応答性状を示した、円柱間距離が直径の3倍の場合について、後流内円柱に作用する表面圧力、あるいは動的空気力を測定して、静止時と振動時について比較している。これら一連の実験結果から、近接円柱系の下流側円柱の応答特性を、変動空気力のなす仕事によって説明

\* 正会員 工博 徳島大学教授 工学部

\*\* 正会員 工修 八千代エンジニアリング

し、振動円柱と後流のある種の連成振動の重要性を指摘している。

## 2. 実験の概要

実施した風洞実験は大別して、並列円柱系の空力応答を総合的に把握する目的で行った、部分模型によるばね支持応答実験と、下流側円柱に作用する空気力を直接測定するために行った、自由振動法および強制振動法による表面圧力等の測定とから成っている。使用風洞は徳島大学工学部多目的風洞（三菱重工製・水平押込式・測定胴 1.5m×1.5m×5m・閉、開断面両用型・最大風速 18 m/s）および徳島大学工学部建設工学科に設置された吸込式風洞（測定部 0.95m×1m×2m・最大風速 15 m/s）であり、乱れ強さはいずれも 1% 以下である。

円柱模型は直径 6 cm、長さ 60 cm のアルミパイプ製であり、両端に直径 25 cm の端板を付した。模型中央部には内径 1 mm の圧力孔を 180° の間隔で 2 か所に設け、圧力変化は長さ 80 cm のビニールチューブを介して模型外部の圧力計に伝達される。圧力孔を回転させることにより、円柱上の任意位置の圧力変動を測定できる。圧力計には PD 80 A 型差圧計（ST 研究所製）を 2 基用いた。

予備的な実験として、上流側円柱によって形成される後流内の平均風速、乱れの強さおよび周波数特性を調べ、次いで三分力荷重計（日章電機 K K 製）にセットした円柱を、この後流内に設置して、下流側円柱に作用する定常空気力を測定した。同時に、表面圧力を測定し静止円柱に関する既往のデータとの比較を行った。これらについては、一部すでに発表したとおりであるが<sup>14)</sup>、定

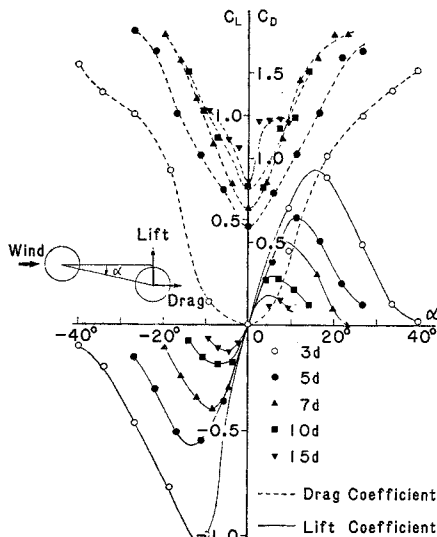


図-1 下流側円柱の静的空気力係数曲線

常空気力の測定結果を図-1に示す。本図における $\alpha$ は通常の意味での迎角ではなく、並列円柱相互の位置関係を示す偏角を表わしており、定常空気力は位置の関数として求められている。また煙による流れの可視化によれば、近接円柱の場合、振動中にこのような定常的な流れの場が保持されているわけではなく、準定常的な扱いが難しいと考えられる。

ばね支持模型による応答実験は、支持条件（自由度）、質量減衰比、主流方向および主流直角方向振動の振動数比等のパラメーターを変化させて、合計 103 例についての V-A 曲線が求められた。強制加振実験においては、風洞内の Active Model と、風洞外で慣性力の除去に用いられる Dummy Model を同時に加振し、模型取付部の U ゲージ型荷重計により変動空気力を測定するとともに、先の静止模型の場合と同様に表面圧力の変動を求めた。なお、本実験におけるレイノルズ数は、およそ  $10^4$  のオーダーであり、亜臨界域に属している。

## 3. ばね支持された並列円柱の空力不安定振動

上流側円柱の後流内に位置する下流側円柱の、空気力学的挙動に関する基礎的な情報を得るために、ばね支持模型による一連の応答実験を行った。2本の円柱は、それぞれ主流方向(X)、主流直角方向(Y)に4本のコイルスプリングで拘束された2自由度静的非連成系であるが、ピアノ線により適宜拘束して自由度を変化させた。座標系は図-2に示すように上下流の円柱を CW, CL で表わし、両円柱間の主流方向距離を  $D_x$  として円柱直径  $d$  を用いて  $D_x=3d$  のように表わす。中立位置  $Y=0$  から主流直角方向への変位は、偏角  $\alpha$  によって表わす。

応答実験は、開断面および開断面風洞を併用したが、ばね支持応答実験の大半は開断面風洞を用いており、他の圧力測定や、強制振動法による空気力の測定は開断面風洞を用いた。前者は閉塞率は 5% 以下であったが、前者は 6% であり、その影響もあって V-A 曲線には若干の相違が認められ、開断面の場合応答の発生、成長がやや抑制される傾向があった。しかし各パラメーターと応答との基本的な関係は変わっていない。以下、本節で示すデータは開断面で測定された結果である。考察は主として下流側円柱 CL の応答に対してなされている。

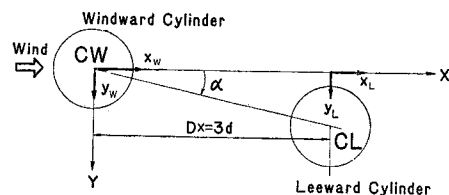


図-2 並列円柱の配置と記号

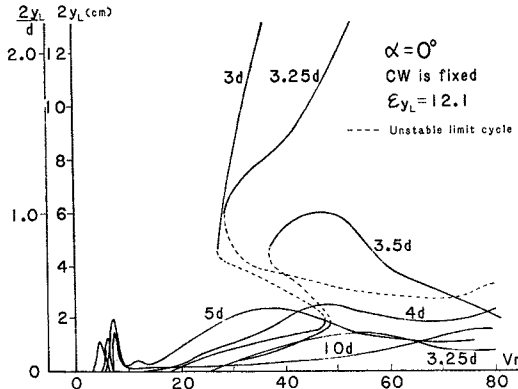


図-3 円柱間距離の変化による応答振幅 (上流側円柱固定)

a) 円柱間相互距離の影響

図-3はCWを固定し、CLを2自由度支持した場合のY方向応答振幅を、 $D_x$ をパラメーターとして示している。偏角 $\alpha=0$ 、XおよびY方向の固有振動数比 $f_{xL}/f_{yL}=1$ 、また質量減衰パラメーター $\epsilon=2m\delta/\rho d^2=12.1$ に統一した結果である。ここに $m$ は単位長さ当たり模型質量であり $\delta$ は対数減衰率、また $\rho$ は空気密度を表す。 $D_x=(3.0\sim 3.5)d$ の範囲では、応答はハードフラッター型の特徴を示しており、円柱間距離の増加とともに応答振幅は減少し、同時に限界風速 $V_{cr}$ も上昇して安定化傾向を示す。一方、 $D_x > 4d$ となると、上記の非線形的な空気力の作用が弱まり、一見ソフトフラッター型の応答が現われる。しかし、観測される振幅の乱れは大きく、むしろパフエッティング型の応答に近い。つまり近接する円柱の場合には、上流側円柱の後流渦の生成や自由流線の変動と、下流側円柱の振動の相互作用によって空気力が非定常的に変化して、自励的な振動を発生させているのに対し、円柱間距離が大きくなるとその距離が弱まり、後流内の乱れのエネルギーに対して選択共振的に振動するようになる。これらは煙による流れの可視化によっても確認されている。

b) 模型の自由度および振動数比の影響

$D_x=3d$ 程度の近接する円柱を、それぞれ2自由度支持した場合と、上流側円柱CWのみを固定した場合、下流側円柱CLのY方向応答にはかなり大きな差異が認められる。近接する円柱では、CLの自励的な振動を誘起する流れの場が、CWの振動によって乱されて作用空気力が不規則性を増すために、定常的なリミットサイクルが形成されにくくなるためである。一方、 $D_x$ が大となって $5d$ 程度になると、応答はパフエッティング的になって、流れの場の微妙な変化が、直接応答に大きく関与することがなくなり自由度の影響を受けにくくしている。図-4は $D_x=3d$ 、 $\alpha=0^\circ$ で両円柱を2自

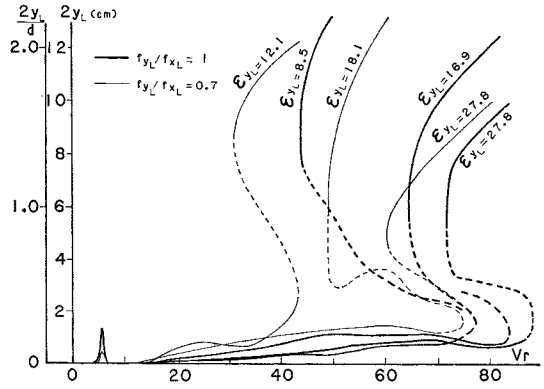


図-4 振動数比による応答の変化

由度支持した際のCLの応答 $y_L$ を振動数比 $f_{yL}/f_{xL}$ との関係で示したものである。限界風速は発振風速、停止風速ともに $f_{yL}/f_{xL}=1$ の場合が最大で、X、Y方向の振動数を変えると不安定性が強まり限界風速は低下する。これは下流側円柱の応答が本質的に主流直交方向(Y方向)の1自由度振動であって、連成振動ではない、ことを意味しており、 $f_{yL}/f_{xL}=1$ とすることにより流れの場から流入するエネルギーがY方向に集中し、振動モードが安定して限界風速を低下させているわけである。

c) 質量減衰パラメーターの影響

正方形断面の不安定振動の判別に関するScrutonの表示と同様に、質量減衰パラメーター( $\epsilon=2m\delta/\rho d^2$ )によって、下流側円柱の振動発生領域を示すと図-5のようである。図中の観測値は、 $3d$ の場合に後流励振(Wake Excitation)において振動停止風速(quench velocity)を用いているほかは、すべて応答が、円柱直径の5%に達する際の換算風速値を採用している。

渦励振振動は $\epsilon$ の増加とともに応答が減少するという一般的傾向を有し、 $3d$ 、 $5d$ ともに本質的な相違はない。 $\epsilon$ は基本的には応答振幅の大きさに影響するものと考えられるが、 $5d$ の場合のように応答がパフエッティング型である場合には、5%振幅の出現する風速はそれほど変化しない。一方 $3d$ の場合、quench velocityは

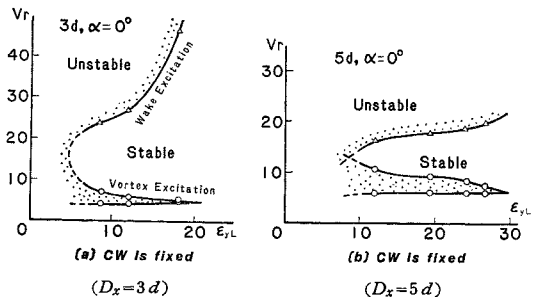


図-5 質量減衰パラメーターと安定領域

$\varepsilon$  に対して敏感に変わり、たとえば上流側固定の図一7 (b) の場合、 $\varepsilon > 20$  では応答は現われない。このような後流励振の振幅は、他の5%振幅に比べてはるかに大振幅であり、 $\varepsilon$  の振幅依存性も加わってこのような結果に至ったものと思われる。

d) 偏角  $\alpha$  の影響

偏角の影響については、 $3d$  を中心に  $\alpha$  を  $5^\circ, 10^\circ, 18^\circ, 25^\circ$  に設定して応答を調べたが、後流内で不安定領域を特定するにはデータが不十分であった。 $3d$  においては  $\alpha=10^\circ$  付近まで応答が生じる可能性があるが、これは  $\alpha=0^\circ$  において後流側円柱を振動させたのと同じ剝離流の巻き込み効果によるものと思われる。この領域の  $V-A$  曲線がソフトフラッター型であることもこの推定の裏付けとなる。

円柱間距離が大になると、 $\alpha$  の大きい領域では後流励振から外れ、抗力の影響で主流方向の振動が卓越するようになる。また特定の条件のもとでは下流側円柱が精円振動を行うこともあり、 $\alpha$  の効果はきわめて複雑である。

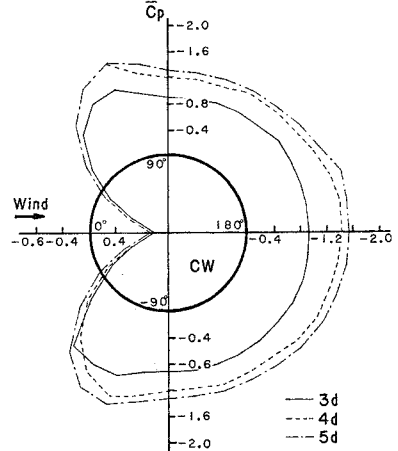
4. 並列円柱に作用する表面圧力

前節に述べた近接する円柱の空力挙動を、従来のような negative slope theory で求めようとすることは必ずしも適当ではないために、ここでは発振機構をより正確に把握すべく、円柱の表面圧力を静止系および振動系に対して測定した。実験の方法は 2. で説明したとおりであり、強制加振時の加振機は EMIC 製 F 100 型加振機を用いた。

a) 静的圧力特性

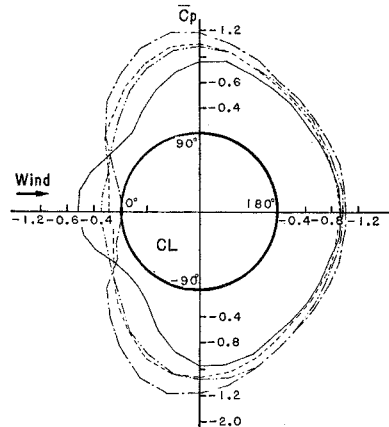
図一6 は上下流の円柱がともに静止している場合の  $\alpha=0^\circ$  での平均圧力係数  $\bar{C}_p = (\bar{p} - p_\infty) / (1/2) \cdot (\rho V_\infty^2)$  を示している。ここに  $V_\infty, p_\infty$  は無限遠点での風速、圧力であり  $\bar{p}$  は円柱表面圧力、 $\rho$  は空気密度である。両円柱ともに  $D_x$  が  $3d$  になると、圧力分布が大きく変化していることがわかる。 $3d$  では上流側円柱の  $\theta=180^\circ$  における背面圧 (Base pressure) と、下流側円柱の  $\theta=0^\circ$  付近の前面圧とがほぼ等しく、この距離では gap flow がほとんど存在しないことを示している。 $D_x$  が増加すると、上流側円柱からの剝離流が巻き込みを生じ、下流側円柱の前面圧が上昇し、抗力が増加する。

図一7 は偏角  $\alpha$  の変化による平均圧力の変化を  $3d$  における下流側円柱について示している。 $\alpha$  の増加とともに正圧を示す再付着点が現われ、 $\theta=40^\circ$  付近から徐々に前方へ移っている。 $\alpha=4^\circ \sim 6^\circ$  で剝離流線の巻き込みが始まり、局所的に流速が増加して上下方向の圧力差が大となり、大きな揚力 ( $\alpha=0^\circ$  方向に作用) を生ぜしめている。 $D_x > 4d$  となると、このように顕著な変化



(a) Windward Cylinder  $\alpha=0^\circ, Re=2.4 \times 10^4$

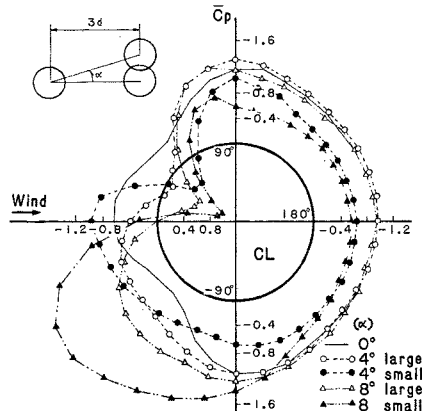
(a) 上流側



(b) Leeward Cylinder  $\alpha=0^\circ, Re=2.4 \times 10^4$

(b) 下流側

図一6 静止円柱に作用する平均圧力



図一7 偏角による下流側円柱の平均圧力分布と不安定性

は認められず再付着点の移動や圧力上昇も、ずっと緩やかになる。図中に示す large, small の区別は、圧力変動の大きさを表わしたもので、 $\alpha$  が  $4^\circ$  から  $8^\circ$  の範囲では、流れの場はわずかなバランスの差によって巻き込みを生じたり生じなかったりして、双安定的な現象のごとくに観察される。可視化による観察によれば剥離渦が gap 内に巻き込む場合には全体的に表面圧力は小となりその変動も小さく、安定した状態となっている。上流側円柱は、このとき図-6 に近い分布状態のままである。

**b) 動的圧力特性**

並列円柱の空力挙動の考察において、最も有力なデータは実際に不安定状態にある円柱に作用する空気力を、直接測定することによって得られる。ここでは振動中の円柱表面の圧力を、静止時と同様に求めた。精度的には多少問題が残ったが不安定状態に対応する圧力特性の変化が観察された。強制振動法を実施するための基準 V-A 曲線は、開断面風洞で得られたものを用いたが、これは、強制加振装置の構造上の制約によるものである。図-8 は  $D_x=3d, \alpha=0^\circ, f_{yL}=2.10\text{ Hz}$  での応答曲線であり、図中の・印が下流側円柱の強制加振振幅と設定風速を示している。なお上流側円柱は固定している。

振動時に作用する平均圧力は、上流側円柱については図-6 に示す静止時のものにほぼ等しく、下流側円柱の振動は上流側へはほとんど影響していない。図-9 には  $D_x=3d, \alpha=0^\circ, V/fd=35.7$  における加振振幅と平均圧力分布の関係を示している。上、下対称の分布であるので  $\theta=0^\circ\sim 180^\circ$  の上半平面のみを示している。一定振幅で加振して、風速を上昇させると、再付着による圧力

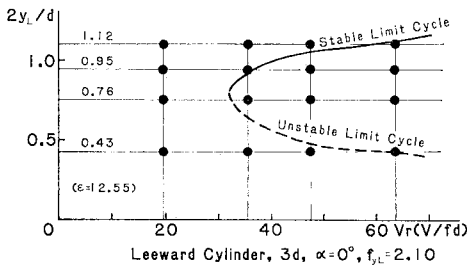


図-8 強制振動法における基準 V-A 曲線 (開断面)

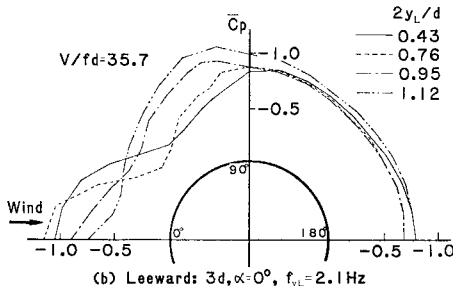


図-9 強制加振時の平均圧力分布 (風速一定)

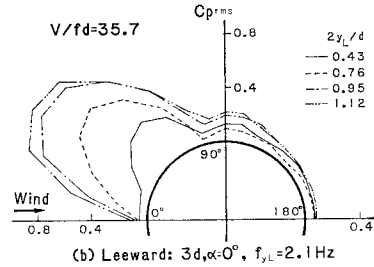
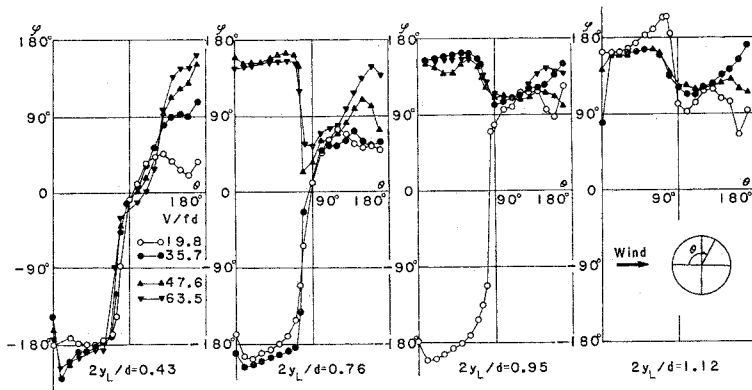


図-10 強制加振時の変動圧力 (一定)

上昇は弱められて全体的に圧力は均一化される傾向があるが、 $V/fd=19.8$  の安定領域の場合のみ前面の圧力分布が異なっている。一定風速下で、加振振幅を変えると、 $2yL/d=0.43$  の安定領域と、 $0.76$  以上の不安定領域では、揚力、抗力ともに大きく変化していることが認められる。しかしこれらの力は振動の1サイクルに対しては仕事をしないので、不安定振動を直接的に説明し得るものではなく、単に流れの場の変化を示している。

円柱の不安定振動に直接的に関与する空気力は、円柱の固有振動数に近い周波数の変動圧力である。平均圧力と同時に測定された変動圧力をスペクトル分析すると、大部分は、渦によるストローハル成分と、加振振動数に対応する成分であった。この加振振動数成分に注目して  $p=p_0 \cos(\omega t + \varphi)$  のように表示したとき、 $p_0$  についてはその2乗平均値を  $C_{p,rms} = p_0 / (1/2) \cdot (\rho V_\infty^2)$  のように無次元表示すると図-10 のようになる。なお  $\omega$  は強制加振振動数であり、 $\varphi$  は加振変位との位相差である。上流側円柱からの剥離流が下流側円柱に再度接触する付近での変動がきわめて大きく、背面では圧力変動はほとんど問題とならない。変動圧力の加振振動数成分は、風速に対してはほぼ規準化できるが、同時に振幅に大きく依存していることがわかる。

図-11 は、4段階の加振振幅に対し、各風速での変動圧力の加振変位に対する位相差  $\varphi$  が、特徴的に変化する様子を示している。 $2yL/d=0.43$  では、すべての風速に対して安定である場合の位相特性を示す。背面 ( $\theta > 120^\circ$ ) では、変動圧力が微弱であり加振振動数成分が特に卓越する傾向も認められないため、位相差の情報には誤差が大きく含まれていると思われるが、応答への寄与も無視し得る程度に小さい。 $2yL/d=0.76\sim 1.12$  と振幅が増加するとともに、高風速側から位相差に変化が現われ、 $|\theta| \approx 60^\circ\sim 90^\circ$  の領域の  $\varphi$  が負から正値へと変わっている。なお図には  $\theta > 0^\circ$  の半平面のみを示している。ここにみられる  $\varphi$  の符号の負から正への変化は、円柱に対して変動圧力のなす仕事が、減衰仕事から発散仕事へと変わって系が不安定になることを意味している。このような位相変化は両円柱間に流線の巻き込みが生じたことによるものと考えられる。



図—11 変動圧力の加振振幅に対する位相差

図—12 は 2 つの加振レベルにおいて変動圧力のなす仕事を模型単位長さ当たりについて求めたものである。変動圧は円柱表面に垂直に作用しているが、(a) の場合、その上下方向成分は負の仕事をし、減衰力として作用しているものが、(b) の加振レベルでは、 $V_r = V/fd = 19.8$  を除いて正の仕事をし、系を不安定化させていることがわかる。これらの仕事量  $W_p$  を円周まわりに積分し、系の初期減衰仕事  $W_D$  とを比較して、応答振幅を求めることができる。表—1 はその結果を示しており、 $W_D < W_p$  で応答が発生するわけであるが、図—11 と比較すると必ずしも一致しておらず、全般的に  $W_p$  が過大または  $W_D$  が過小である。これらの原因としては、空気力の模型軸方向での厳密な意味での 2次元性の保持、あるいは位相差  $\phi$  の測定精度、さらには初期減衰率の振幅依存性等もろもろの要因が考えられるが、下流側円柱の振動が、前面側の変動圧力によって支配されていること、特にその位相差の変化が、定性的に  $V-A$  曲線によく対応していることなどが判明し、この方法の有効性が確認できた。

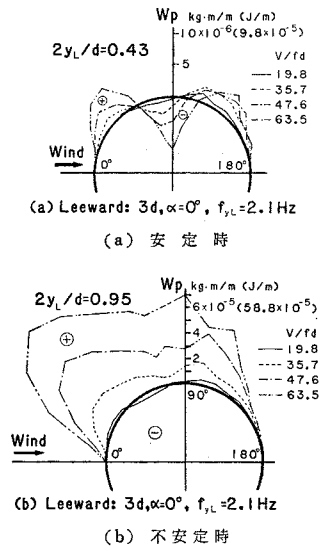
5. 動的空気力の直接測定と応答の評価

円柱表面の圧力分布と位相差の情報は、それなりにき

表—1 表面圧力のなす仕事

2yL/D	W <sub>D</sub> kg·m/m(J/m) [×10 <sup>-3</sup> ]	W <sub>p</sub> kg·m/m(J/m) [×10 <sup>-3</sup> ]			
		V <sub>r</sub> = V/fd			
		19.84	35.71	47.62	63.49
0.43	0.078 (0.763)	0.012 (0.117)	0.091 (0.888)	0.129 (1.265)	0.126 (1.239)
0.76	0.276 (2.701)	0.103 (1.006)	0.669 (6.559)	1.947 (19.082)	4.201 (41.169)
0.95	0.448 (4.391)	0.225 (2.207)	1.746 (17.108)	4.486 (43.960)	7.913 (77.550)
1.12	0.654 (6.413)	0.381 (3.738)	2.279 (22.336)	3.722 (36.477)	

W<sub>p</sub>: 変動圧力仕事, W<sub>D</sub>: 減衰仕事



図—12 変動圧力のなす仕事

わめて有益な情報を与えているが、実験精度上、定量的にはなお問題が残った。ここでは通常の強制振動法によって模型固定部に取り付けたUゲージ型荷重計により、作用空気力(揚力)の総和を求め、無次元空気力係数を定めた。

a) 動的空気力係数

ばねによりたわみ 1 自由度支持された 2次元円柱を、一定振幅の振動  $y = y_0 \cos \omega t$  で加振したとき、系に作用する動的空気力を、 $y$  に対する位相差  $\phi$  を考慮して次のように表わす。

$$L = L_y \cdot y + L_j \cdot \dot{y}$$

$$L_y = L_0 \cos \phi / y_0, \quad L_j = L_0 \sin \phi / y_0 \omega$$

ただし  $L_0$  は動的空気力振幅である。これらを円柱長  $l$ 、直径  $d$ 、換算振動数  $K$  によって無次元化すると、

$$L_0^* = L_0 / (1/2 \cdot \rho V^2 d l)$$

$$L_y^* = 2 L_y / (\rho d^2 l \omega^2), \quad L_j^* = 2 L_j / (\rho d^2 l \omega)$$

以上より  $L_0$  と  $\phi$  を実験的に求めれば系の安定性を支配するパラメーター  $L_y^*$  を求め得る。質量減衰パラメーター  $\epsilon = 2 m \delta / \rho d^2$  を用いると系の安定性は  $(\epsilon / \pi - L_y^*)$  の正負によって定めることができる。

b) 動的空気力の実測結果

前節の圧力測定と同様に、図—8 に示される  $V-A$  曲線に基づき、加振振動系を系の固有振動数 2.1 Hz に固定して、開断面風洞内で実験を行った。上流側円柱は固定とし、 $D_x = 3d$ 、 $\alpha = 0^\circ$  を原点として加振したことも前回と同様である。圧力測定の場合と同様に、ストローハル成分と加振振動数成分が卓越して不規則に乱れているために、スペクトル分析によって rms 値を求めて  $L_0$  とした。

図—13 は無次元空気力振幅  $L_0^*$  を  $V_r$  をパラメータ

一としてその振幅依存性について調べたものである。ただしここでは渦励振との共振領域は除外している。風速  $V_r$  に対するばらつきは小さくなったが、振幅に対してはきわめて非線形性が強いことがわかる。 $2y_L/d = 1.0$  付近で  $L_y^*$  は最大値を取っているが、図-8 によれば、この振幅以上になると安定定常振幅を越えるために、空気力が急激に減少していることと対応している。

図-14 は強制加振による変位と動的空気力の加振振動数成分の位相差  $\varphi$  を示す。比較のために単独円柱における測定結果を併せて示している。 $\varphi > 0$  は変位に対して空気力の位相の進む側を示しており、このとき  $L_y^*$  は正となって、空気力は系に対して正の仕事をする。単独円柱では  $V_r \approx 8$  の渦励振領域以外ではすべて負の位相差であり、特に高風速時には  $\varphi \approx -90^\circ$  となって、強い制振効果のあることがわかる。一方並列円柱では、渦励振領域では同様であるが、 $V_r > 10$  でいったん負となった後、 $V_r > 20$  付近で再び正值を取っている。しかもこの値は加振振幅によって変わっており、 $2y_L/d \approx 1$  で

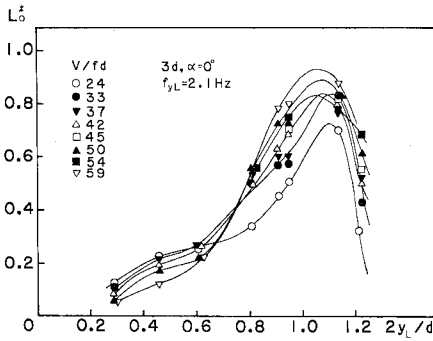


図-13 動的空気力の振幅依存性

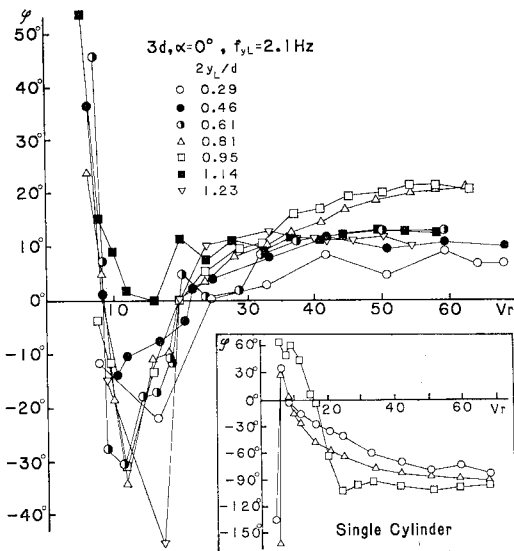


図-14 動的空気力と変位の位相差

最大となった後に減少傾向を示す。 $V_r > 50$  程度で、風速によらず、ほぼ一定値を取るようになる。

図-15 は動的空気力の速度比例成分  $L_y^*$  を、風速をパラメータとしてその振幅依存性を示したものである。 $V_r < 20$  では、全加振振幅に対して  $L_y^*$  は負値を取り、風速の上昇とともに正值に変わる。角柱では、 $L_y^*$   $V_r$  の上昇とともに一定値に収束し、これが準定常理論の適用を可能にする根拠とされるが、円柱の場合には、上流側円柱との距離と、応答振幅が非線形的に空気力に關与している。 $L_y^*$  の最大値は  $2y_L/d = 1$  の近傍で生じているが、これが風速の上昇とともにやや小振幅側へ移動している。これは、風速の増加によって上流側円柱の剝離点が後退し、Wake の幅が狭まることに対応していると考えられる。図中の一点鎖線は  $\varepsilon/\pi$  の値を、いくつかの実験データについて記したものである。たとえば、 $\varepsilon = 12.55$  の場合、 $V_r \approx 29$  において  $2y_L/d \approx 0.9$  で  $L_y^*$  が  $\varepsilon/\pi$  を越えて系は不安定な発散振動に移り、 $2y_L/d \approx 1.2$  で定常振動を保つ。また  $V_r = 33$  では  $2y_L/d \approx 0.6$  で発散に移り、約 1.25 で定常となることがわかる。これらの結果を、実際のばね支持応答実験結果と比較したものが図-16 である。定常振幅の推定値が

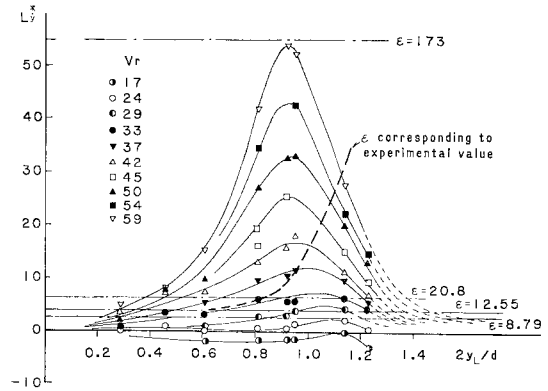


図-15 動的空気力係数  $L_y^*$  と質量減衰パラメータ

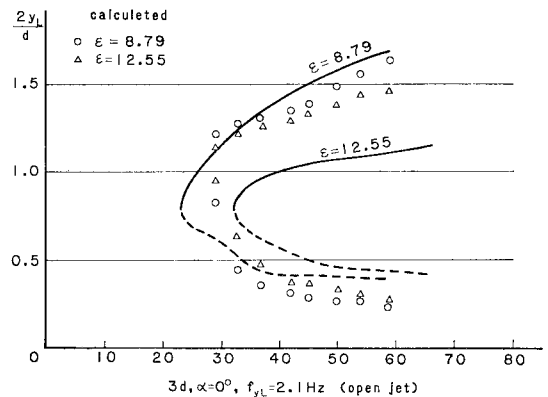


図-16  $V-A$  曲線とその推定値

$\epsilon$  によってあまり変化しておらず、 $\epsilon=12.55$  と  $\epsilon=8.79$  とがほぼ同一レベルとなっているが、全体として  $V-A$  曲線はかなりよくとらえていると思われる。誤差の原因としては、1つは総合的な実験精度の問題、特に位相測定を統計的な処理によって行った点と、他の1つは、 $\epsilon$  の設定にあたって必要となる対数減衰率  $\delta$  にあると思われる。今回の実験では、模型の自由振動時の  $2y=20\sim 30$  mm の振幅で統一的に  $\delta$  を定めたが、使用したダンパーが  $2y_L/d=1$  程度まで線形性を保ち得なかった可能性もあり、今回の実験ではその点のデータが不足している。図-15 に示す破線は、 $\epsilon=12.55$  の実測データに対応する  $\epsilon/\pi$  の値を概略示すものであり、大振幅での  $\epsilon$  の増加という傾向を考慮すれば、推定精度が上がる可能性を示している。

## 6. むすび

本研究では並列円柱に作用する空気力と、その動的挙動を明らかにする目的で一連の風洞実験を行った。特に、 $D_x=3d$ 、 $\alpha=0^\circ$  という近接円柱の最も基本的な配置に重点を置いた実験を行ったわけであるが、得られた結果を要約すると以下のようである。

(1)  $3d$  程度の近接円柱系と、 $5d$  以上の比較的離れた円柱系の応答は、基本的に異なったタイプの応答といえる。前者はハードフラッター型の応答特性を有するのに対し後者はソフトフラッター型あるいはパフェッティング型の応答特性を有している。これらの相違は、下流側円柱が上流側円柱の死水域内にあるか否かによって異なる。

(2)  $3d$  程度の近接円柱系では、両円柱間の gap に剝離流線の巻き込みが生じることで非定常な揚力を生じている。円柱系と、剝離渦を含む流れの場との連成効果が振動の原因となっているため、各パラメーターの変化に対し、応答は敏感に変化する。

(3) 表面圧力の測定を含む、強制振動法による空気力の測定は、精度的に多少問題はあったが、実際の不安定状態によく対応した結果を示した。一連の測定によって動的空気力の位相成分を正確に評価することの重要性が確認された。

(4) 下流側円柱に作用する動的空気力は、円柱前面に作用する変動圧力によってほぼ決まり、背面圧の影響は少ない。またこの力は振幅依存性が強く、かつ非線形的な関係にあるが、この原因は主として上流側円柱の後流幅にある。さらには、後流幅は、風速の上昇に伴ってやや狭まる傾向があり、風速に対してもある程度非線形的に依存することになる。

(5) 動的空気力係数を測定し、その速度比例成分

$L_y^*$  と質量減衰パラメーターを比較することによって応答振幅を容易に推定し得ることを示した。

以上のように、近接する並列円柱系の空力挙動をいくつかの角度からとらえて、不安定振動の発生機構をある程度明らかにできたものと考えられる。しかしながら、実験や分析精度にも2, 3問題があり、また非常に複雑な現象の中の1つの局面に限定した研究であるため、特に流れの場の情報を補充しつつ今後の研究を進めていくことが必要であると考えられる。

最後に、本研究を進めるにあたって、実験を補助していただいた徳島大学工学部建設工学科、宗田和之技官を初め、土木設計学研究室の諸兄に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Cooper, K.R. and R.L. Wardlaw : Aeroelastic instabilities, Proc. of 3rd Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, Japan, pp. 647~655, 1971.
- 2) 岡島 厚 : 直列2本円柱のうず励振, 土木学会第30回年次学術講演会概要集, 第1部, pp. 435~436, 1975.
- 3) Tanida, Y. and A. Okajima, et al. : Stability of a circular cylinder oscillation, in uniform flow or in a wake, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 61, part 4, pp. 769~784, 1973.
- 4) Simpson, A. : Stability of subconductors of smooth circular cross section, Proc. The Institution of Electrical Engineers, Vol. 117, pp. 741~750, Apr., 1970.
- 5) Simpson, A. and T.V. Lawson : Oscillations of twin power transmission lines, Proc. of the Sympo. on Wind Effects on Buildings and Structures, Vol. 2, paper 25, Apr., 1968.
- 6) Simpson, A. : On the flutter of a smooth circular cylinder in a wake, Aeronautical Quarterly, pp. 25~41, Feb., 1971.
- 7) Simpson, A. : Wake induced flutter of circular cylinders : Mechanical Aspects, Aeronautical Quarterly, pp. 101~118, May, 1971.
- 8) Tsui, Y.T. : On wake-induced flutter of circular cylinder in the wake of another, Trans. A.S.M.E., Vol. 44, ser. E, pp. 194~200, 1977.
- 9) Zdravkovich, M.M. and D.L. Pridden : Interference between two circular cylinders; series of unexpected discontinuities, Journal of Industrial Aerodynamics, Vol. 2, No. 3, pp. 255~270, Nov., 1977.
- 10) Zdravkovich, M.M. : Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangement, Trans. A.S.M.E., pp. 618~633, Dec., 1977.
- 11) 斎藤 通, ほか : 斜張橋ケーブルの耐風安定性について, 土木学会第32回年次学術講演会概要集, 第1部, pp. 219~, 1977.
- 12) 真下和彦, ほか : 平行ケーブル構造の空力弾性振動に関する一考察, 土木学会第34回年次学術講演会概要集, 第1部, pp. 557~558, 1979.
- 13) 宇都宮英彦・鎌倉米康 : 並列円柱の空力学的挙動に関する考察, 第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集, pp. 207~212, 1978.
- 14) 宇都宮英彦・鎌倉米康 : 並列円柱に作用する表面圧力, 土木学会第35回年次学術講演会概要集, 第1部, pp. 598~599, 1980.