

並列円柱のウェイクギャロッピングと制振対策検討

Wake galloping of The Tandem circular cylinders and Examination of The Damping Countermeasure

齊藤 善昭* 岡野 哲** 竹口 昌弘*** 宮崎 正男****
Yoshiaki SAITOU* Satoshi OKANO** Masahiro TAKEGUCH*** Masao MIYAZAKI****

*住友重機械工業(株) 鉄構機器事業本部 (〒254-0806 神奈川県平塚市夕陽ヶ丘63-30)
**財団法人 道路開発振興センター (〒102-0093 東京都千代田区平河町2-6-2)
***本州四国連絡橋公団 長大橋技術センター (〒651-0088 神戸市中央区小野柄通4-1-22)
****住友重機械工業(株) 鉄構機器事業本部 (〒141-0001 東京都品川区北品川5-9-11)

For divergence vibration which appears in the tandem circular cylinder (the hanger cable of the Akashi-Kaikyo Bridge) this study, the reason why basic section vibrates and aerodynamic characteristic of countermeasure cross section were examined by the wind tunnel test. The object cross section are basic section and aerodynamic countermeasure cross section which spirally installed the trip wire. As a result of examining, countermeasure cross section damping effect as following. 1)the range that the width of exfoliation flow of the upstream circular cylinder decreases and that it vibrates it is also decreased. 2)strength and weakness horizontally arise of the upstream circular cylinder of the exfoliation flow. 3)axially generating action aerodynamic force of the downstream circular cylinder is not uniform.

Key Words:Tandem circular cylinders,wake galloping,trip wire,wind tunnel test

1. ま え が き

一般に、並列状態にある円柱の有風時に発現する振動として、渦励振の他に発散振動となる風下側円柱のみに発現する風方向（インライン）が卓越した楕円振動が知られている。この発散振動は、高風速域で発現する振動でウェイクギャロッピングやウェイクフラッターと言われ2柱の間隔が直径の4倍以上では2柱の直列軸に対してある範囲の偏角で入射する風が起因するとされている。その発生する範囲（相対偏角の範囲）は、実験諸元は異なるが文献1)よりいくつかの研究成果^{2) 3) 4)}について2柱間の相対位置における発散振動の有無をまとめたものが図-1に示されている。図中のXは2柱間の水平方向距離を、Zは鉛直方向距離を示し、横軸及び縦軸共に直径：Dで無次元化している。この図より、発生範囲には連続性があると思われる。尚、文献5)より、実機と同様な自由度を持つタウトス

トリップ試験結果からはケーブル間隔：8Dで振動の発生が確認されている。

本研究は、明石海峡大橋のハンガー間隔：9Dを中心に基本断面における発散振動の発生要因及び空力対策断面の空力特性を風洞試験により検討したもので、ここに検討結果を報告する。対象とした断面は、基本断面（対策を施していない断面）とトリップワイヤーを円柱表面に螺旋状に設置した断面（以下、対策断面）である。

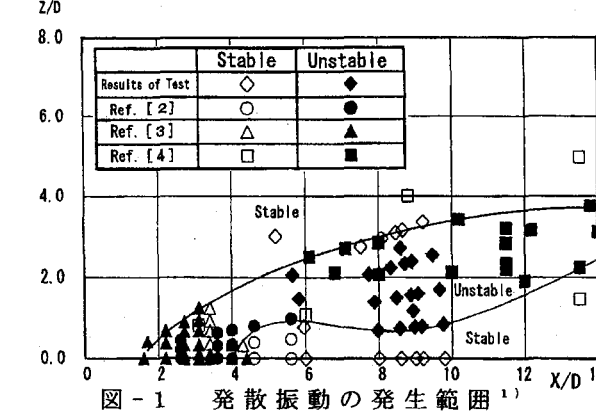


図-1 発散振動の発生範囲¹⁾

2. 使用風洞模型

円柱模型は直径： $D=8.7\text{cm}$ 、模型長さ： $L=163\text{cm}$ の二次元剛体模型で、表面に実機と同じフッ素被覆加工を施している。対策模型は、基本断面に市販のコード類を螺旋状に巻いたものである。ワイヤーの設置を図-2に示すが、図中の“巻ピッチ”とはワイヤー1本が1回転（1周）した時の軸方向の間隔である。また、圧力測定用模型では、図-3に示すように模型中央位置の断面周りに 10° 毎に圧力孔（タップ）を設けている。

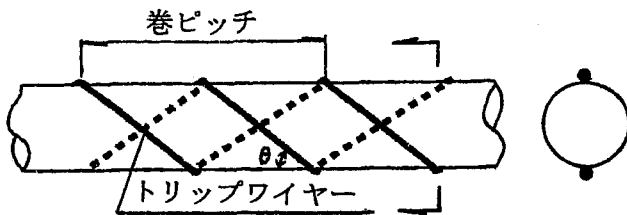


図-2 トリップワイヤーの設置状態
《2本巻》

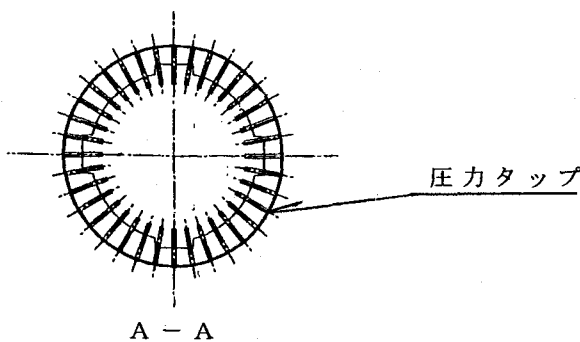
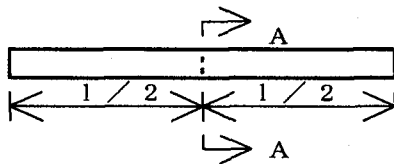


図-3 圧力測定用模型の圧力孔位置

3. 応答試験結果及び考察

3.1 試験条件

模型の支持は、図-4に示すように2体の模型を水平に設置し、上流側の円柱模型は固定に、下流側模型のみをコイルバネで斜め十字に吊り鉛直及び水平方向に自由度を与えている。尚、試験気流は一様流とし、試験条件を表-1に示す。

表-1 試験条件

	実機	実験値
縮尺	---	1/1
円柱直径 [m]	0.087	0.087
単位重量 [Kgf/m]	25.6	25.6
振動数 [Hz]	約0.7	0.71
対数減衰率： δ	0.001	0.003

備考) 0.7Hzは実機ハンガー長140m程度の1次モードに相当。

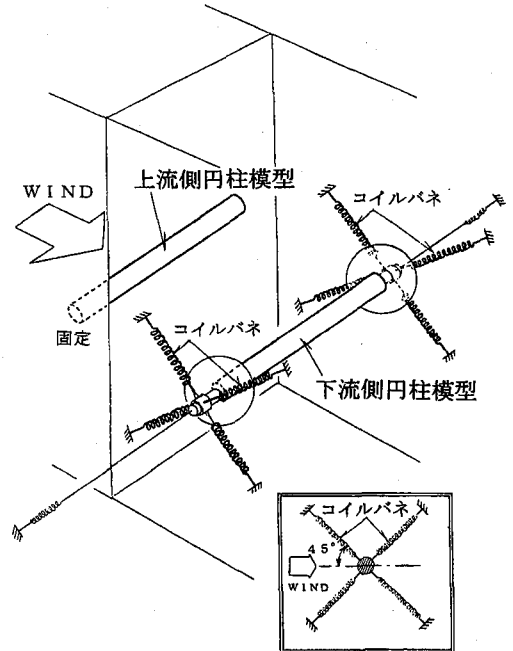


図-4 応答試験概念

3.2 試験結果及び考察

基本断面及び対策断面よりトリップワイヤー径 $\phi=5\text{mm}$ の巻きピッチ300mmとワイヤー径 $\phi=9\text{mm}$ の巻きピッチ800mmの応答試験結果から、振動が発現した相対迎角として 5° 、 10° 、 15° の風速と振幅の関係を図-5～図-7に、相対迎角の定義を図-8に示す。

1) 相対迎角 5° の場合

基本断面が振幅依存性の振動性状に対し、対策断面のワイヤー径9mmでは振幅と風速が限定した振動に変化し、ワイヤー径5mmでは制振されているのが判る。

2) 相対迎角 10° の場合

3断面で発散振動が発現し、基本断面<対策断面（ワイヤー径9mm）<対策断面（ワイヤー径5mm）の順で発現風速が高風速側にシフトしているのが判る。

3) 相対迎角 15° の場合

基本断面のみ発散振動が発現し、対策断面では発現していないのが判る。

以上の結果から、対策断面は迎角によって振動が残るものの基本断面に比べて発現する迎角範囲は狭まり発生頻度はかなり減少すると考えられる。

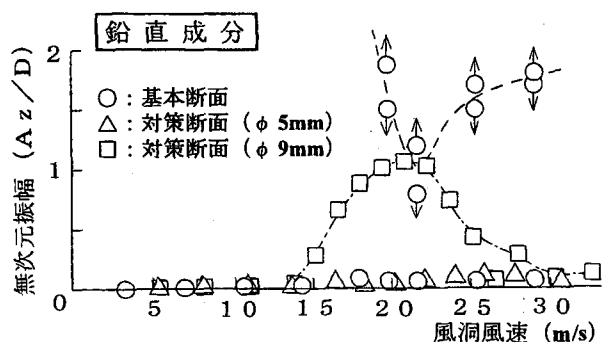


図-5 風速と振幅の関係《相対迎角 5°》

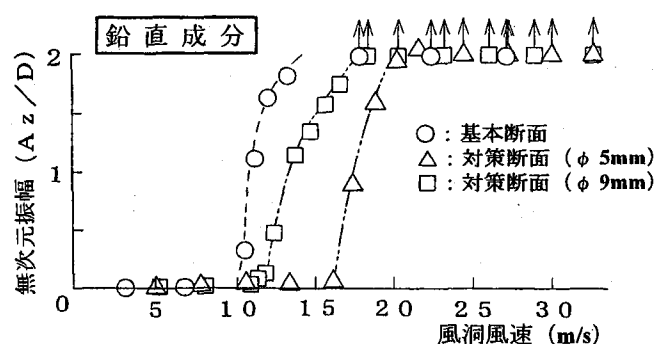


図-6 風速と振幅の関係《相対迎角 10°》

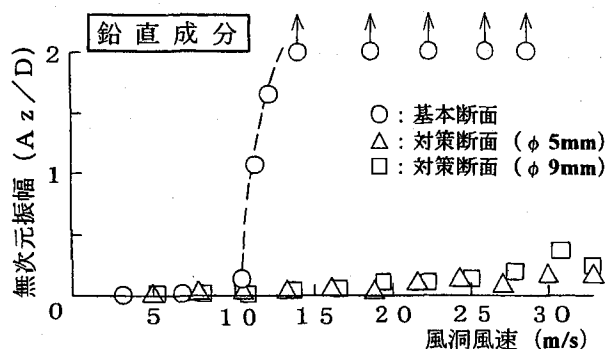


図-7 風速と振幅の関係《相対迎角 15°》

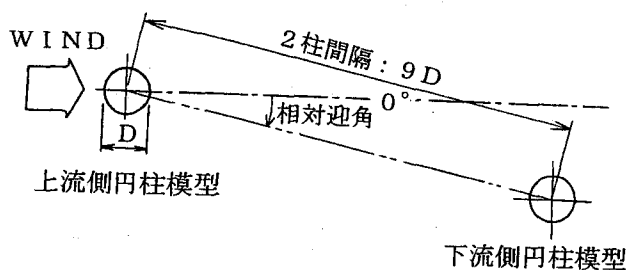


図-8 相対迎角の定義

4. 風速分布測定試験結果及び考察

基本断面及び対策断面を対象に、上流側円柱模型の後流域における平均風速と主流方向の乱れ強さ (I_u) の分布を調査した。計測範囲は2柱間の水平距離: $X=4D \sim 12D$ で鉛直距離は $Z=2D \sim 5D$ 、風洞風速は $V=20\text{m/s}$ である。試験は一様流中で、試験に用いたトリップワイヤーの外径は $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 9\text{mm}$ である。

試験結果より、基本断面及び対策断面 (ワイヤー径: $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 9\text{mm}$) の模型中央位置における鉛直分布を図-9～図-12に示す。図中の○は接近流に対する各計測点の平均風速の比 (%) を、△は各計測点の主流方向の乱れ強さ: I_u (%) をそれぞれ示す。また、文献6)の応答結果より図中の大きな○は振動なしを、●は振動発生を示している。尚、模型断面上の●は計測面に相当するトリップワイヤーの位置を示している。

4.1 基本断面と対策断面の比較

図-9と図-10の水平距離: $X=9D$ の位置で比較すると、剥離流れの幅 (接近流: 100%が減少する境目) は基本断面に比べて対策断面の方が狭くワイヤー径 $\phi 5\text{mm}$ では $1D$ 程度狭くなっており、図中の応答結果の発現する外側の相対位置が上流側ウェイク中心軸方向に狭まっていることと整合している。このことは、風速の速度勾配の存在 (位置) が発生要因に深く関わっており、文献7)ではその速度勾配の大小が振動発現を左右すると述べられている。

4.2 対策断面のトリップワイヤー形状による影響

図-10と図-12の比較から巻ピッチ (300mm) が同じ場合、ワイヤー径が太い方 ($\phi 9\text{mm}$) が剥離流れの幅 (接近流: 100%が減少する境目) は広がっている。また図-11と図-12の比較から、ワイヤー径 ($\phi 9\text{mm}$) が同じ場合は巻きピッチが大きい (800mm) 方が剥離流れの幅は広がっている。これは、前述の図-2中で示している模型軸方向とワイヤーとの成す角度: θ が鋭角になるほど剥離点となるワイヤー部分が多くなるためと思われる。

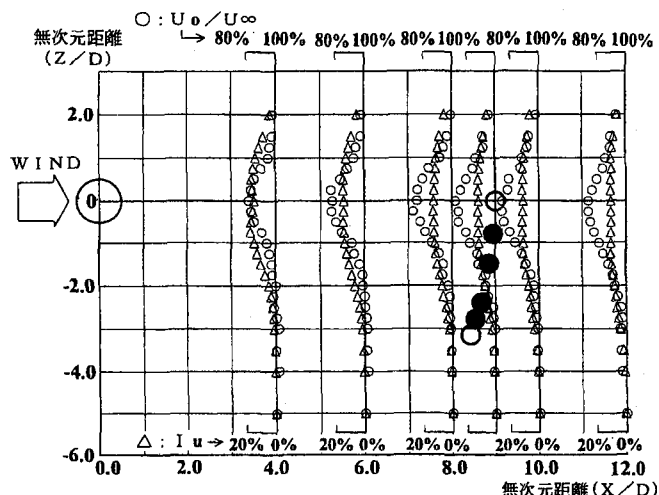


図-9 平均風速と乱れ強さの鉛直分布
《基本断面》

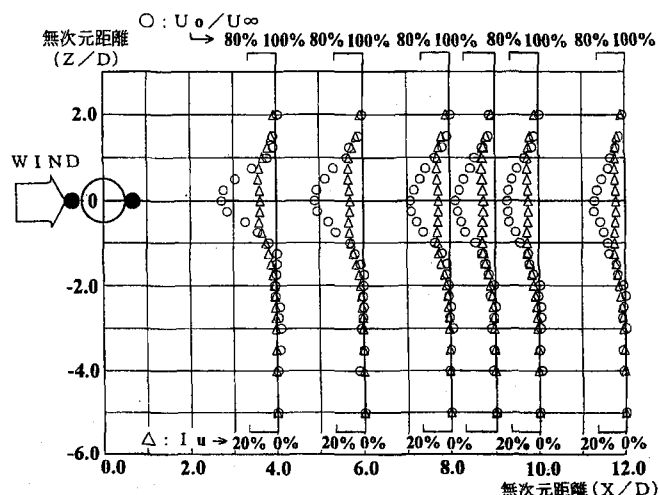


図-12 平均風速と乱れ強さの鉛直分布
《対策断面；φ9mm、巻きピッチ300mm》

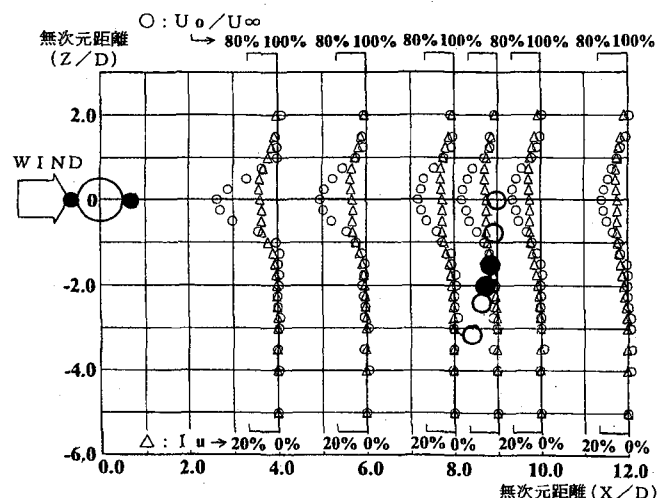


図-10 平均風速と乱れ強さの鉛直分布
《対策断面；φ5mm、巻きピッチ300mm》

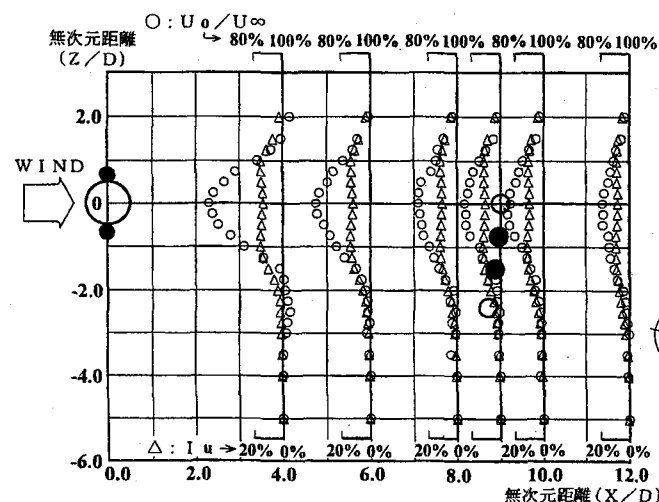


図-11 平均風速と乱れ強さの鉛直分布
《対策断面；φ9mm、巻きピッチ800mm》

4.3 対策断面の円柱軸方向分布特性

対策断面では、トリップワイヤーの巻き方により円柱軸方向の分布に影響が現れることが予想されたため、2柱の水平距離： $X=9D$ 位置で鉛直距離は上流側ウェイク中心軸を $Z=0D$ として $Z=-1D$ と $Z=-2.5D$ の計3測点を対象にした円柱軸方向分布を計測した。対策断面はワイヤー径φ9mmの巻きピッチ800mmで、風洞風速 $V=20\text{m/s}$ 時の結果を図-13に示す。図中の値は、円柱軸方向に計測された平均風速を模型中心位置（計測位置①）を基準とする）に対する比率（%）を表している。

試験結果より、鉛直距離： $Z=-2.5D$ 位置の剥離流れ付近では風速の水平分布はほぼ一定であるのに対し、基本断面に比べて剥離流れの内側になるほど風速の強弱が大きくなっていることが判明した。尚、基本断面の平均風速を図中の△で示す。

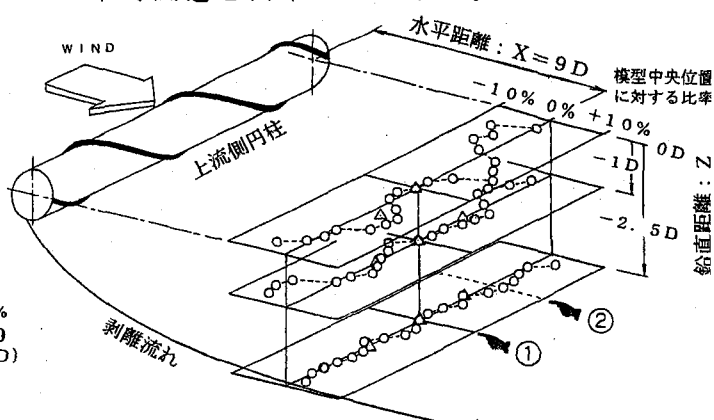


図-13 円柱軸方向分布特性《 $V=20\text{m/s}$ 》

4.4 円柱軸方向別の鉛直分布特性

前項で示した断面の円柱軸方向分布より、図-13に示す計測位置①及び②の鉛直分布を図-14～図-15にそれぞれ示す。（尚、計測位置①は図-12と同じものである。）
図中の破線は、接近流（100%）が減少する境目とした剥離流れを示している。

円柱軸方向に計測位置を変えた場合、両図を比較すると剥離流れの幅が変化している。これより、上流側対策断面からの剥離流れ内部は、下流域の円柱軸方向に風速が一様でない分布をしていると推測される。

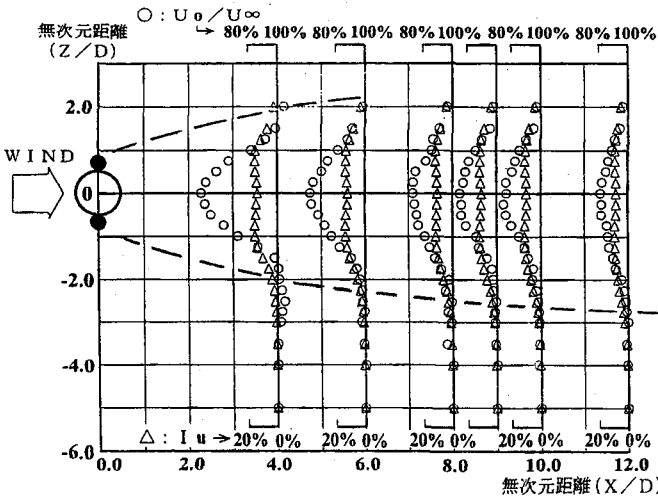


図-14 計測位置①における鉛直分布

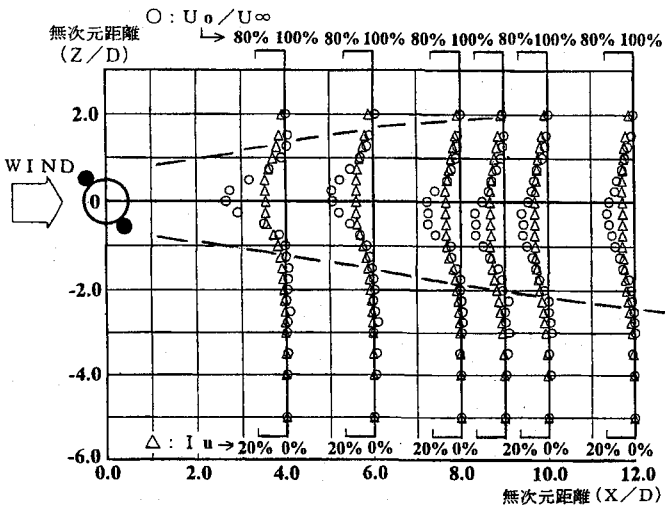


図-15 計測位置②における鉛直分布

4.5 剥離流れ付近の周波数解析

水平距離： $X=9D$ における剥離流れ付近の測点（鉛直距離： $Z=-2.5D$ ）でストローハル数を調査するために周波数解析を実施し

た。風速 $V=20\text{m/s}$ 時の基本断面を図-16に、対策断面のワイヤー径 $\phi 9\text{mm}$ 巻きピッチ 300mm と同 800mm 、ワイヤー径 $\phi 5\text{mm}$ 巻きピッチ 300mm を図-17～図-19にそれぞれ示す。

試験結果より、基本断面では円柱のストローハル数成分（ $St=0.2$ ）の明確なピークが、ワイヤー径： $\phi 5\text{mm}$ 巻きピッチ 300mm では僅かではあるがストローハル数成分のピークがそれぞれに認められた。一方で、ワイヤー径 $\phi 9\text{mm}$ の両巻きピッチは完全にノイズレベルに埋没しており、その成分周波数を特定出来なかった。これは、トリップワイヤー径が太くなるにつれ剥離流れは強くなり、ワイヤー以外の円柱本体から発生する剥離流れを乱したためと推測される。

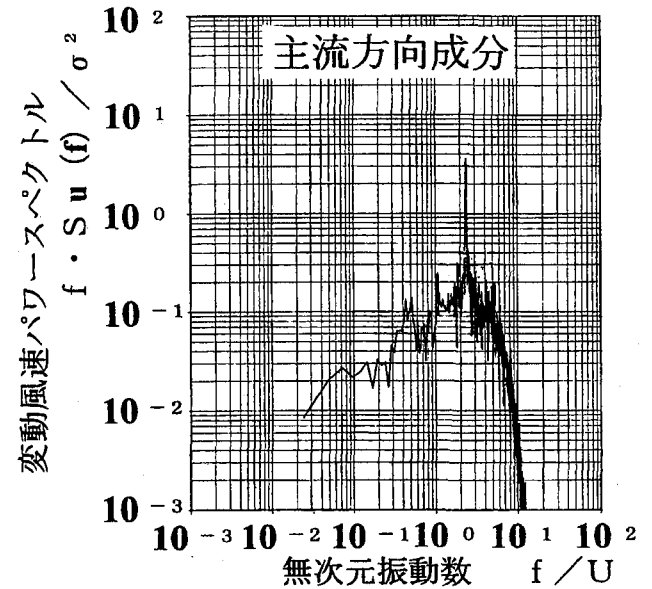


図-16 基本断面の周波数解析結果

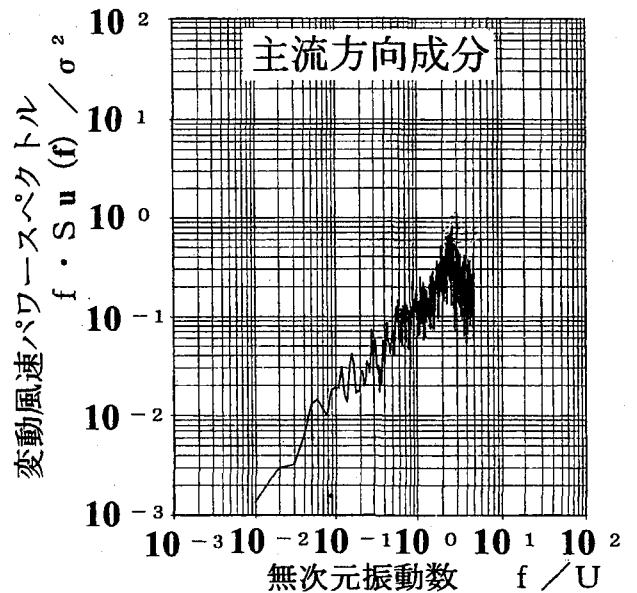


図-17 対策断面（ $\phi 5\text{mm}$ ）の周波数解析結果

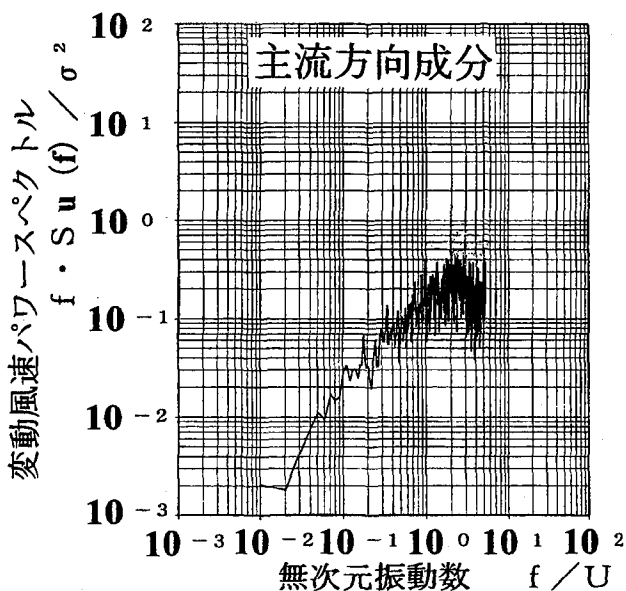


図-18 対策断面(φ9mm巻きピッチ300mm)の周波数解析結果

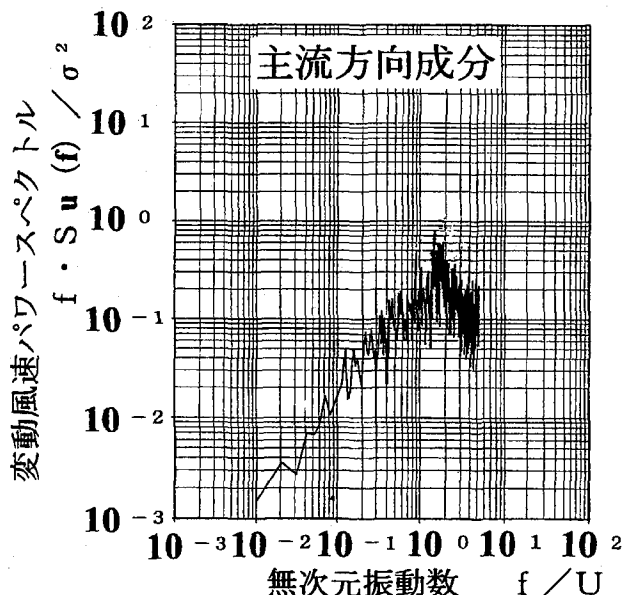


図-19 対策断面(φ9mm巻きピッチ800mm)の周波数解析結果

5. 圧力分布測定試験結果と考察

基本断面及び対策断面(ワイヤー径φ9mm、巻きピッチ800mm)を対象に、並列時の下流側円柱模型における模型表面周りの圧力分布を調査した。試験は、2柱間隔を9D一定として相対迎角(相対位置)を段階的に変化させ測定した。また、図-20に示すように対策断面に設置したトリップワイヤーは円柱軸方向に螺旋状であるため風向に対するワイヤー位置が変化していることから、

断面変更は便宜的に模型を模型軸周りに回転させて対応した。また、試験風速は3.節の応答試験結果より、発散振動の発現直前とその2倍の風速を目標に $V=10\text{m/s}$ と 20m/s に設定した。尚、相対迎角の定義は前述の図-8と同じである。

5.1 基本断面の表面圧力分布特性

基本断面の平均圧力： C_p 及び変動圧力： C_{prms} の分布図を各相対迎角の風速別に図-21～図-22にそれぞれ示す。図中の C_p には、上下面で最大となる側定点とその数値を示している。

試験結果より、相対迎角 $0^\circ \sim 10^\circ$ の範囲は風速に依らず上流側剥離流れの内側に位置するため一般的な円柱の亜臨界領域における平均圧力分布を示し、風速増加に伴う負圧の増加が認められる。相対迎角 15° では、風速増加に伴ない上面の負圧が大きくなっているのは剥離流れが上面に掛かっているためと推測する。相対迎角 20° では、上下面の圧力分布が同様で風速変化の影響は小さいことから、剥離流れの外側に位置していると思われる。また、相対迎角が $5^\circ \sim 15^\circ$ の範囲では上面の平均圧力の方が下面に比べ負圧が卓越しており、上流側円柱のウェイク中心線に向かう力が発生していることが伺える。尚、平均圧力： C_p が最大となる相対迎角は 10° で、変動圧力： C_{prms} が最大となる相対迎角は風速増加に伴ない 10° から 15° に変化している。

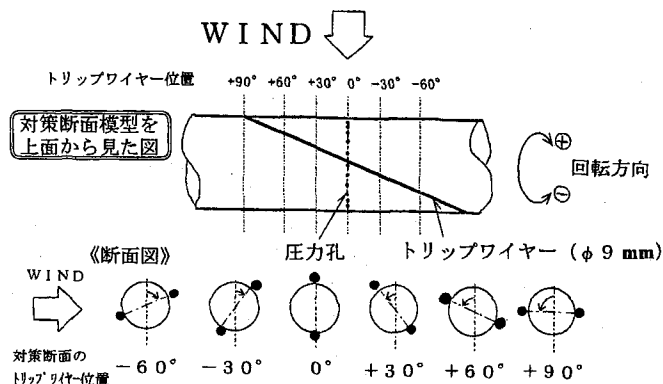


図-20 対策断面の測定断面

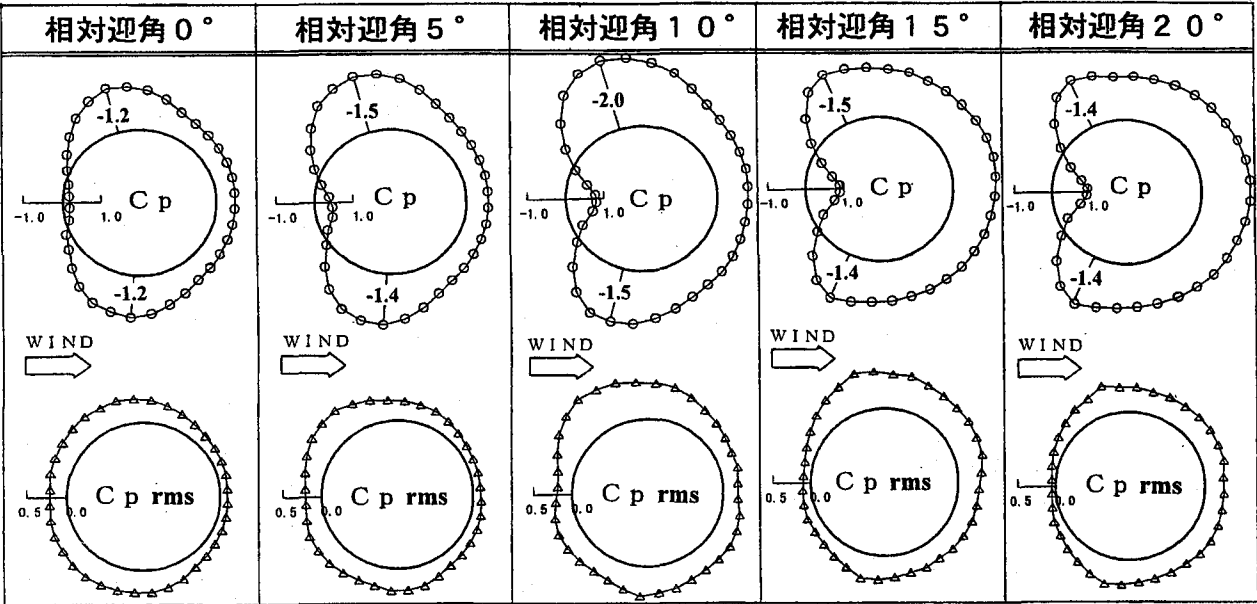


図-21 基本断面における相对迎角別の平均圧力分布と変動圧力分布《V=10m/s時》

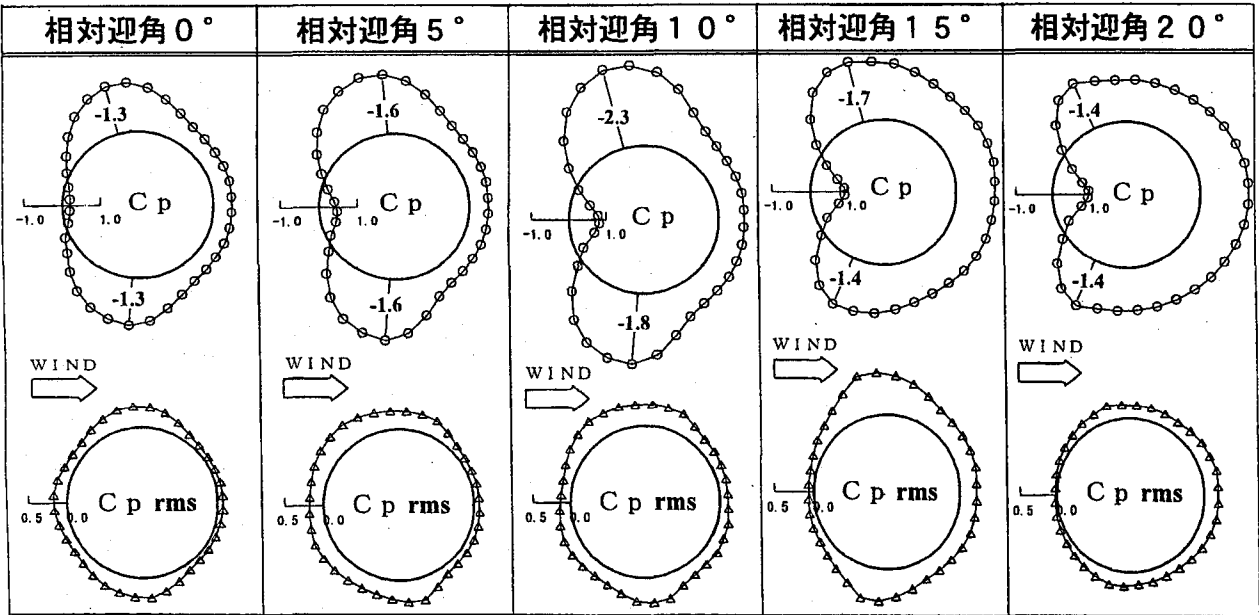


図-22 基本断面における相对迎角別の平均圧力分布と変動圧力分布《V=20m/s時》

5.2 対策断面の圧力分布特性

相对迎角 10° に設定した場合の下流側円柱表面の平均圧力： C_p 及び変動圧力： $C_{p\text{ rms}}$ の分布図を測定断面毎（回転角度で表示）の風速 $V=10\text{m/s}$ 時と 20m/s 時を図-23～図-24にそれぞれ示す。

試験結果より、回転角 0°、+30°、+60° の各断面で風速の変化により平均圧力分

布の形状が変化しなかった理由は、剥離点がトリップワイヤーに固定されたためと考えられる。また、回転角 90° 断面では、風速の増加に伴い上下面の負圧が増加しているのが判る。このようにトリップワイヤーの位置により圧力分布が異なっていることから円柱軸方向の作用空気力は一様でないといと推測される。

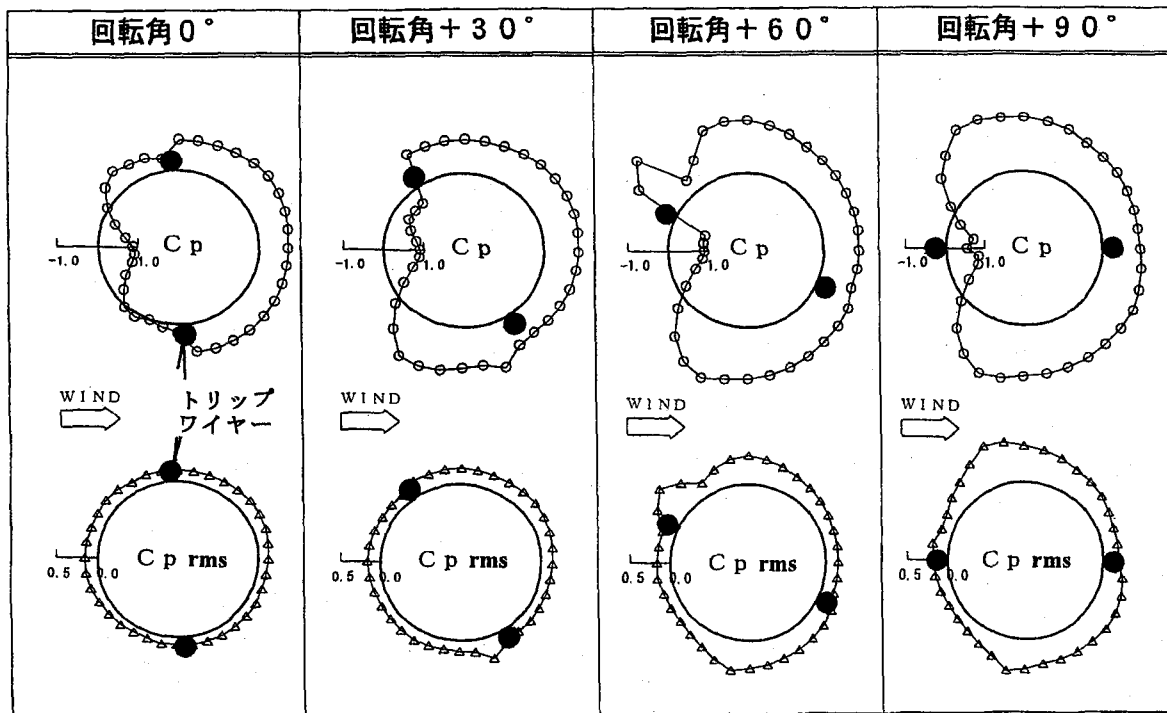


図-23 トリップワイヤー位置別の平均圧力分布と変動圧力分布《相対迎角 10° ; $V=10\text{m/s}$ 時》

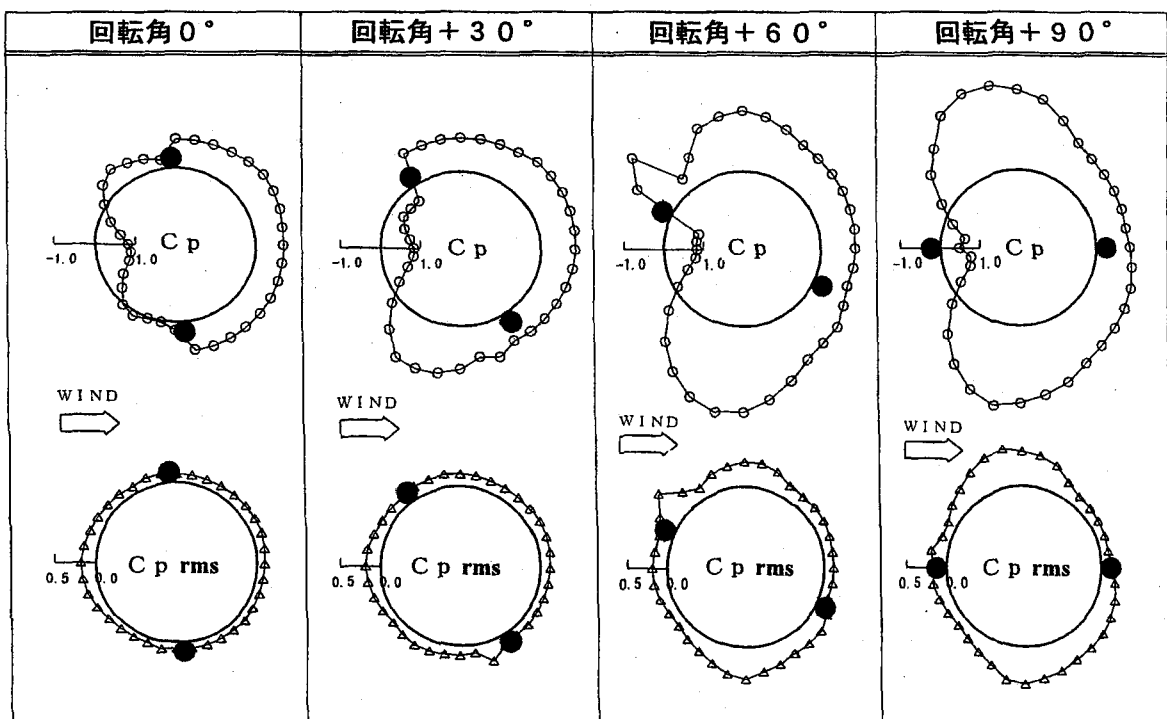


図-24 トリップワイヤー位置別の平均圧力分布と変動圧力分布《相対迎角 10° ; $V=20\text{m/s}$ 時》

6. 対策断面周りの流れの可視化試験結果及び考察

4. 節で示した対策断面の風速分布特性から、上流側対策断面の後流域に円柱軸方向

の分布を持つ理由を解明する目的で、対策断面（ワイヤー径 $\phi 9\text{mm}$ 、巻きピッチ 800mm ）の単柱時における模型表面周りの流れの可視化としてスモークワイヤー法を用いて実施した。対象とした断面は、圧力分布試験結果からトリップワイヤーの位置が剥離点

となる 0° 、 $+30^\circ$ 、 $+60^\circ$ の3断面とした。また、試験風速は $V=1.2\text{m/s}$ で、その時の Re 数は約7000である。可視化写真は、模型側面方向から撮影したもので、各断面の写真を写真-1～写真-3に示す。尚、写真で鮮明でない所があるため、剥離流れを強調するためのスケッチ画で図-25～図-27に示す。

試験結果より、回転角 0° 断面のワイヤー近傍ではワイヤーに沿う流れの影響で剥離流れが軸方向に歪んでおり、回転角 $+30^\circ$ 断面の剥離流れはワイヤーを直角方向に乗り

越え回転角 0° の図-25とは逆方向であることが判明した。また、回転角 $+60^\circ$ 断面の場合、剥離流れはワイヤーを軸方向に乗り越える弱い流れで乗り越えた後すぐに気流方向に戻っているのが判る。これらの結果から、風速分布試験で対策断面の剥離流れに軸方向の強弱があった理由は、ある範囲（ワイヤー位置； $0^\circ \sim +30^\circ$ ）でトリップワイヤーからの剥離流れが円柱軸方向に相反することで部分的に増速域が出来たことによると推測される。

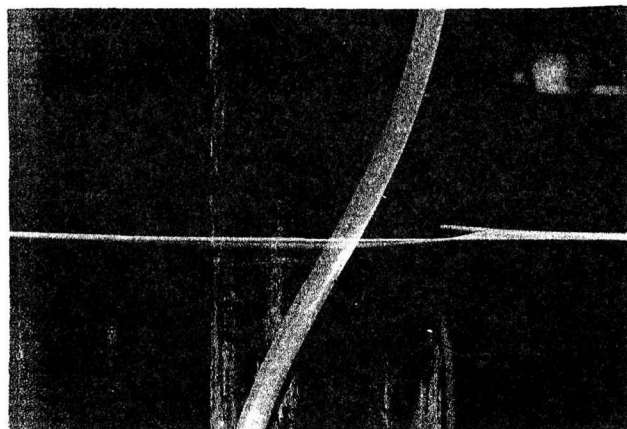


写真-1 ワイヤー位置 0° 断面の場合

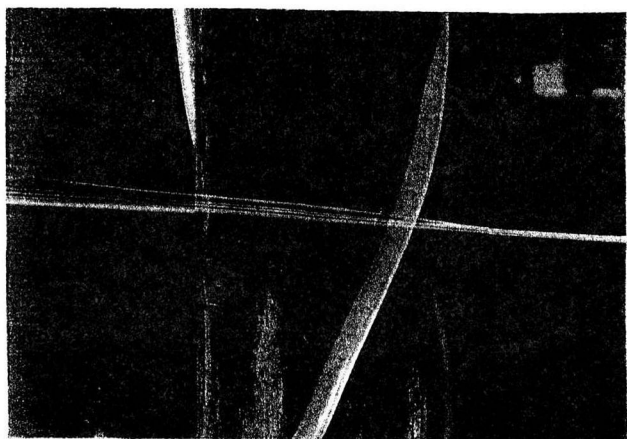


写真-2 ワイヤー位置 $+30^\circ$ 断面の場合

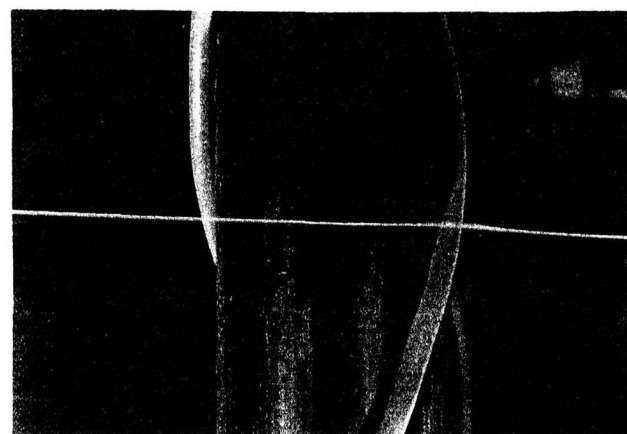


写真-3 ワイヤー位置 $+60^\circ$ 断面の場合

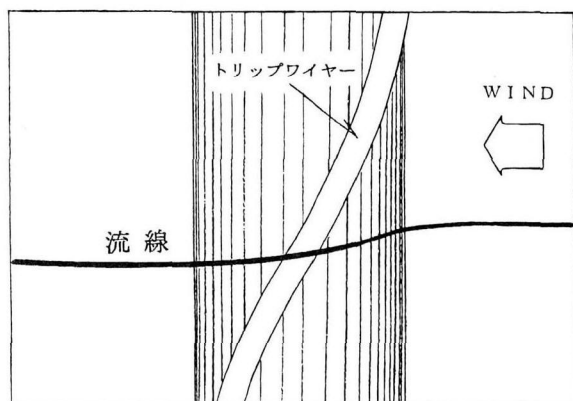


図-25 ワイヤー位置 0° のスケッチ

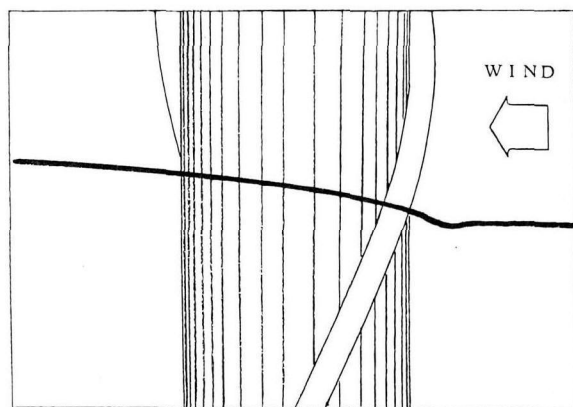


図-26 ワイヤー位置 $+30^\circ$ のスケッチ

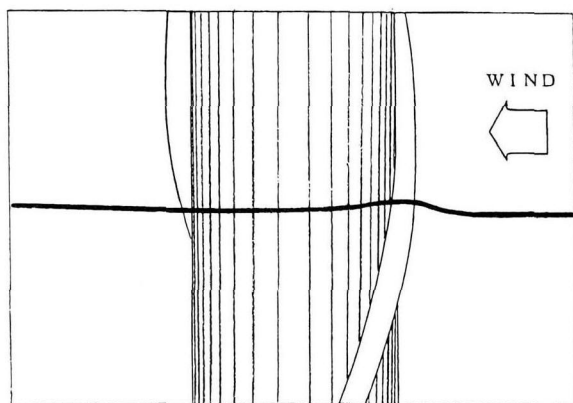


図-27 ワイヤー位置 $+60^\circ$ のスケッチ

7. まとめ

本研究は、並列円柱の発散振動を対象に明石海峡大橋のハンガー2柱間隔：9Dを中心に基本断面の発生要因ならびに空力対策断面の空力特性を風洞試験により検討したものである。以下に本研究で得られた成果の要点をまとめる。

- (1) 対策断面の応答特性から、基本断面で発生する風向範囲（相対迎角範囲）を狭める効果を有することが判った。
- (2) 対策断面（ワイヤー径： $\phi 5\text{mm}$ ）は、基本断面に比べて剥離流れの幅が1D程度狭くなり応答試験結果の発現範囲の減少と整合することから、風速の速度勾配の存在が発生要因に深く関わっていると思われる。また、対策断面（ワイヤー径： $\phi 9\text{mm}$ 巻きピッチ800mm）を対象とした円柱軸方向の風速分布は、水平距離：9D位置の剥離流れ付近（鉛直方向：-2.5D位置）における円柱軸方向分布の強弱は小さく、剥離流れの内側（上流側ウェイク中心軸方向）になるほど分布の強弱が大きくなっていることが判った。
- (3) 基本断面の相対迎角 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ の範囲では、平均圧力は上面が下面に比べて負圧が増加し上流側ウェイク中心軸に向かう力が発生している。また、風速に依らず相対迎角 10° で上面の負圧は最大となり、風速の増加に伴ない変動圧力が最大になる相対迎角は 10° から 15° に変化していることが判った。
- (4) 対策断面（ワイヤー径： $\phi 9\text{mm}$ 、巻きピッチ800mm）は、トリップワイヤーの位置により平均圧力及び変動圧力の分布が異なることから対策断面に発生する円柱軸方向の作用空気力は一様でないと推測する。
- (5) 対策断面単柱時における流れの可視化試験より、風向に対するワイヤーがある範囲（風軸直角の $0^{\circ} \sim$ 上流側 $\sim 30^{\circ}$ の範囲）においてワイヤーの位置によりその剥離流れは円柱軸方向に相反する流れになっていることが判明した。

以上の結果から、トリップワイヤー設置により得られる制振効果の要因は、①上流側が対策断面の場合、剥離流れの幅が基本断面に比べて減少して風向による発生範囲が狭まること、②上流側対策断面の剥離流れに円柱軸方向の強弱が発生すること、③下流側対策断面における円柱軸方向の作用空気力が一様でなくなること、が考えられる。また、下流側円柱の位相特性の変化も要因に含まれると考えられるため今後の検討課題としていきたい。

参考文献

- 1) R.Toriumi, N.Furuya, M.Takeguchi, M.Miyazaki, Y.Saito, : A study on wind-induced vibration of parallel suspenders observed at the Akashi-Kaikyo Bridge, 3th International Conference of Cable Dynamics, pp.177-182, 1999
- 2) 建設省土木研究所、斜張橋並列ケーブルの耐風制振に関する共同研究報告書（その3）、1995年3月
- 3) 白石、松本、白土他、「近接2本円柱の空力振動特性」、日本風工学会誌、No.32、1987年5月
- 4) R.L.Wardlaw, K.R.Cooper, J.A.Watts, : Wind Tunnel Analytical Investigations into the Aerodynamic Behavior of Bundled Conductors, Transactions Paper, IEEE Power Eng.Soc., IEEE Summer Meeting and Energy Resources Conf., 1974
- 5) 建設省土木研究所、斜張橋並列ケーブルの耐風制振に関する共同研究報告書（その2）、1994年3月
- 6) 本州四国連絡橋公団第一管理局、明石海峡大橋ハンガー風洞試験報告書、1998年12月
- 7) 白石、松本、白土、佐川：「直列柱状構造物の空力特性に関する基礎的研究」、第7回風工学シンポジウム概要集、pp.265-271、1982年12月

（2000年9月14日受付）