

斜張橋ケーブルの空力振動に関する研究

ON AERODYNAMIC OSCILLATIONS OF CABLES FOR CABLE STAYED BRIDGES

松本 勝*・白石成人**・辻井正人***・平井滋登****

By Masaru MATSUMOTO, Naruhito SHIRAISHI, Masato TSUJII and Shigeto HIRAI

This study is for the clarification of the cable-aerodynamics of a cable-stayed bridge induced by wind and rain, that is called "Rain-Wind Induced Vibration", which is one of recent majoring subject in bridge aerodynamics. In conclusion, an inclined cable shows aerodynamic instability because of intensive axial flow in its near wake. This axial flow plays similar role of splitter plate submerging in the wake which can make a circular cylinder aerodynamically unstable.

Keywords: rain-wind vibration, inclined cable, axial flow, cable attitude relative to wind

1. はじめに

近年、斜張橋の建設が多くなるに伴い、斜張橋ケーブルの Rain Vibration 現象（雨と風の共同作用によるケーブルの曲げ方向振動現象）が問題化してきている。ケーブル基部の疲労や橋梁使用者に与える不安感の防止のためにも早急の対応処置が望まれている。この現象は、樋上ら¹⁾によって名港西大橋で最大倍振幅 0.26 m の振動が確認されており、これに関する実験によれば、Rain Vibration は降雨時のみ発生し、塔の風下側に位置するケーブルに限定されており、風向が橋梁軸直角方向と一致した場合には発生しないと報告されている。さらにケーブル表面には上下面に雨水が流れる水路が 2 本形成され、特に上面側の水路が振動発生の主要因であるとされている。また、安治川橋梁²⁾に関する風洞実験結果からも上面側水路の重要性が示されており、雨量の影響によって振動特性が変化することも併せて指摘されている。国内では、荒津大橋³⁾において最大倍振幅約 0.6 m、海外では、Faroe 橋⁴⁾において最大倍振幅約 1 m もの

振動が確認されている。

この Rain Vibration と同様に円形断面の形状変化による振動現象としては、通信線と吊線を 1 本化した 8 字形架空送電線⁵⁾や着水水状態の長径間送電線⁶⁾などにおける振動などが知られている。

これら Rain Vibration を中心とする種々のタイプのケーブル振動現象の発生機構に関しては依然未解明な点が多く残されており、報告される特性についても幾分異なった箇所がみられ、きわめて微妙な振動であるといえる。

著者らは、無雨状態での傾斜円柱の有する空力不安定性について検討し、断面背後の軸方向流の役割について人工的に類似した流れを発生させるという方法により考察を加えた。その結果、風に対して偏角をもつ斜張橋ケーブル自身が空力的に不安定であることがわかった⁷⁾。

本論文では静止状態にある傾斜円柱の断面背後の軸方向流に注目し、その流速を定量的に測定することにより、その軸方向流れをパラメーターとして、傾斜円柱の空力的不安定性との関連と制振対策について考察を加えた。

さらに、有雨状態、無雨状態での応答、ケーブルの姿勢に対する検討も含めて斜張橋ケーブルの Rain Vibration の発生機構および制振対策について総括的に述べる。

*正会員 京都大学助教授 工学部土木工学教室
(〒606 京都市左京区吉田本町)

**正会員 京都大学教授 工学部土木工学教室

***正会員 新日本製鐵㈱ (元・京都大学大学院)

(〒100 千代田区大手町 2-6-3)

****学生会員 京都大学大学院

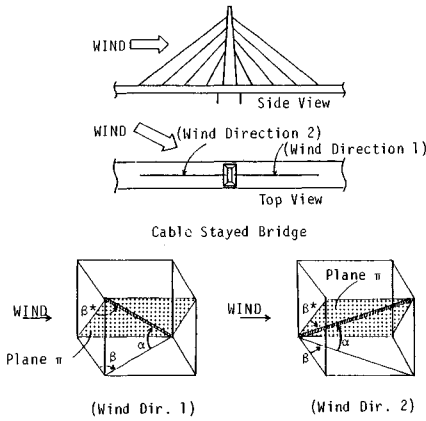


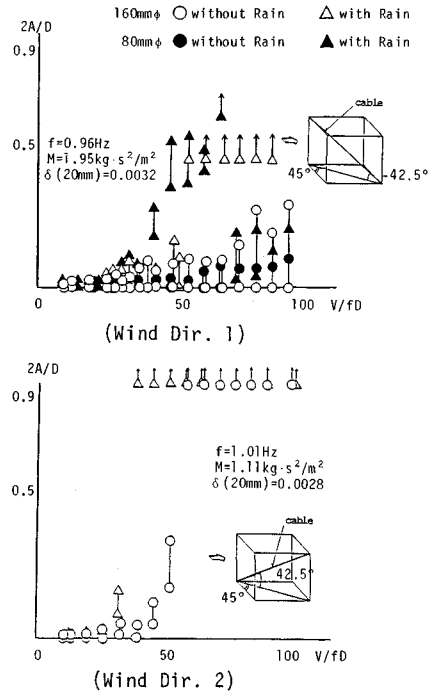
Fig. 1 Attitude of Cables.

2. Rain Vibrationの再現および非定常圧力特性

実験には、京都大学工学部土木工学科教室に設置された吹き出し式エッフェル型風洞（幅0.7 m、高さ1 m）を使用した。測定部（長さ1 m）を開放型とし、ここに橋梁ケーブル被膜材料として使用頻度の高いポリエチレン（PE）で覆われた円筒管模型（長さ1600 mm、直径160 mm or 80 mm）を設置した。模型の姿勢については、Fig. 1に示すように実橋で塔の風下側ケーブルに相当する姿勢を Wind Dir. 1（鉛直面内傾斜角 $\alpha = -42.5^\circ$ or -30° 、水平面内風向偏角 $\beta = 45^\circ$ ）、その逆を Wind Dir. 2（ $\alpha = 42.5^\circ$ or 30° 、 $\beta = 45^\circ$ ）とした。振動方向については実橋観測においてケーブル面内振動が多く確認されていることから、いずれも鉛直方向の振動を測定した。測定方法は支持ばね基部のコの字エレメントに貼り付けられたひずみゲージを用い、ホイストブリッジ（新興通信 K.K.）、動ひずみ測定器（新興通信 K.K., DSA-602 B）により検出し、直流増幅器（三栄測器 K.K., 6L02）で増幅後、ローパスフィルター（NF回路設計ブロック K.K., E3201）で6 Hz カットし、リニアコーダ（グラフテック、WR 3101-6 H）に振動波形を記録した。

また、降雨装置として4本の給水ノズルを用い、総雨量1.2 l/minを直接、模型に噴霧した。この雨量は、実橋において10 mm/h程度の降雨時に100 m長ケーブルの中央点において上方から流れ落ちる水量に相当する。

Fig. 2に雨の有無に関する風速応答振幅図を示す。Wind Dir. 1（ $\alpha = -42.5^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ ）において無雨時では振動状態はみられず、降雨時に Rain Vibration現象

Fig. 2 Effect of Rain on Response (160 mm, 80 mm ϕ PE Tube).

と考えられる大振幅振動が発生した。この振動は、ケーブル径が160 mmの場合は発散型、80 mmの場合は限定型となった。模型表面では雨水の流れる水路が上面および下面に形成された。Wind Dir. 2（ $\alpha = 42.5^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ ）においては降雨時の方がより空力的に不安定であることがわかる。降雨時には上流側の水路は形成されず、やや大きな下面側水路がみられた。

テーピングによる人工水路を付設して Rain Vibrationを再現した状態（Wind Dir. 1）での模型断面まわり16ポイントの振動1周期間における単位面積当たりの無次元仕事量を算出した結果（文献7）に既出）、上下面両水路付近の正の仕事量が大きくなっており、この近辺の流れによる圧力変化が励振力として働いているものと考えられる。

Wind Dir. 2（ $\alpha = 42.5^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ ）においては無雨時においても振動が発生しており、また、Wind Dir. 2（ $\alpha = 30^\circ$ 、 $\beta = 45^\circ$ ）における無雨状態での応答実験の結果、明らかに振動が生じている（文献8）に既出）。これらのことによって、降雨時に限らず斜張橋ケーブルそのものが空力的に不安定であると考えられる。

3. 無雨状態におけるケーブルの基本的空力特性

Rain Vibrationを発生する風向偏角を有する斜め

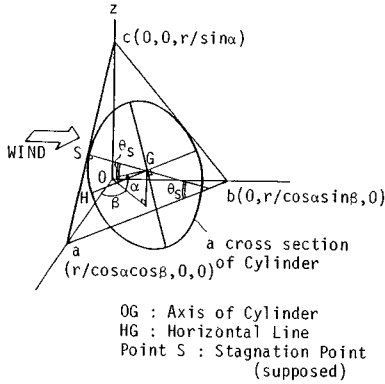


Fig. 3 Geometric Relation between Wind Direction and Location of Stagnation Point.

ケーブルの無雨状態における基本的空力特性をアルミニウム管模型（直径0.05 m, 長さ1.4 m, $f = 2.0425$ Hz, $\delta = 0.0028$, $FGPM = 0.062$ $\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$ ）を用いた実験により検討した。

(1) 傾斜ケーブルの Stagnation Point のずれ

Stagnation Point は主流の同時進行面が最初に斜張橋ケーブル断面に到達する点であるという理論的仮定に基づいて、 α および β が任意の場合の α , β と Stagnation Point の位置の角度 θ_s との関係について、Fig. 3において、以下の幾何学的考察を行った。

図中の θ_s を求める。点Sは仮定された Stagnation Point であり、点Gはケーブル直角断面の中心点である。OGはケーブル中心軸を指し、HGは水平線である。

点Gの座標を極座標で (r, β, α) 、すなわち直交座標で $(r\cos\alpha\cos\beta, r\cos\alpha\sin\beta, r\sin\alpha)$ として三角形abcの各座標を求めた。 $\angle bac$ は $(90^\circ - \theta_s)$ であることから、ab方向のベクトルUとacのベクトルVの内積を求めて、

$$\cos(90^\circ - \theta_s) = \mathbf{U} \cdot \mathbf{V} / \|\mathbf{U}\| \|\mathbf{V}\| \dots\dots\dots (1)$$

$$= \sin\alpha \sin\beta / (\sin^2\alpha + \cos^2\alpha \cos^2\beta)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ゆえに、次式が得られる。

$$\theta_s = 90^\circ - \arccos\{\sin\alpha \sin\beta / (\sin^2\alpha + \cos^2\alpha \cos^2\beta)^{1/2}\} \dots\dots\dots (3)$$

これより、 $\beta = 45^\circ$ の場合は次式となる。

$$\theta_s = 90^\circ - \arccos\{\sin\alpha / (1 + \sin^2\alpha)^{1/2}\} \dots\dots\dots (4)$$

比較のために水平面内風向偏角 β を 45° に固定したまま鉛直面内傾斜角 α を 0° から 30° まで 5° 間隔で変化させた状態で断面まわりの静的圧力を測定し、最大圧力値を示す点 (Stagnation Point) を探った。測定方法は、模型中央部に設けた圧力孔に作用する圧力を模型端部の導圧管を経てプレッシャーマイク (豊田工機, DD 101 k 0.1 F) により検出し、電圧値に変換した後、直流増幅器 (豊田工機, AA 2300) により増幅した電気信号をローパ

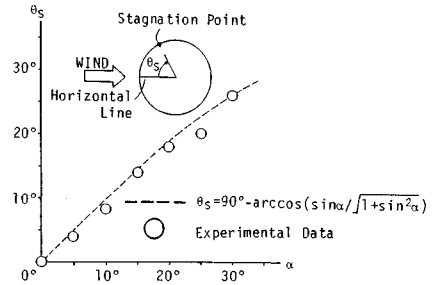


Fig. 4 α - θ_s (at Stagnation point) Diagram ($\beta = 45^\circ$).

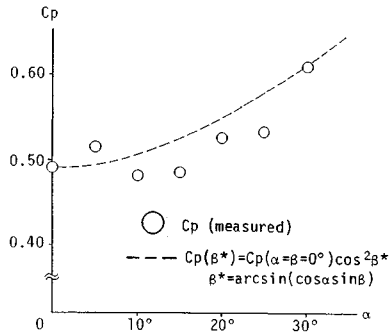


Fig. 5 α - C_p (at Stagnation Point) Diagram ($\beta = 45^\circ$).

スフィルター(前出)を介してマルチコーダ (渡辺測器製作所 K.K., MC 6612) に出力した。実験値による Stagnation Point の位置と式(4)とを比較したものが Fig. 4 である。両者ともよく一致し、Stagnation Point の位置に関する先の仮定が証明された。

次に、斜めケーブルを気流は軸直角に横切ると考えれば、風向の相対偏角 β^* を用いると、Stagnation Point の圧力係数 C_p は次式で表わされる。

$$C_p(\beta^*) = C_p(\alpha = \beta = 0) \cos^2 \beta^* \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 β^* は Fig. 1 における π 平面内の見掛けの相対偏角であり、

$$\beta^* = \arcsin(\cos\alpha \sin\beta) \dots\dots\dots (6)$$

となる。式(5)と実験による Stagnation Point の C_p 値を比較したものが Fig. 5 であり、これも同様に比較的よく一致する結果となった。つまり、Fig. 5 で α が大きくなることによって相対偏角 β^* (式(6))が小さくなるため C_p 値が大きくなっているものと判断できる。

以上より、Wind Dir. 1 および 2 などの傾斜ケーブルにおける Stagnation Point の位置のずれ、およびその静的圧力変化は、ケーブル姿勢を示す各角度 α および β 、あるいは、端的には風向の相対偏角 β^* によって理論的(幾何学的)に説明付けられることが判明した。

(2) 無雨状態での基本的振動応答特性

Wind Dir. 1 ($\alpha = -30^\circ, \beta = 45^\circ$) および 2 ($\alpha = 30^\circ, \beta = 45^\circ$) の状態で無雨状態での鉛直方向の振動応答と、

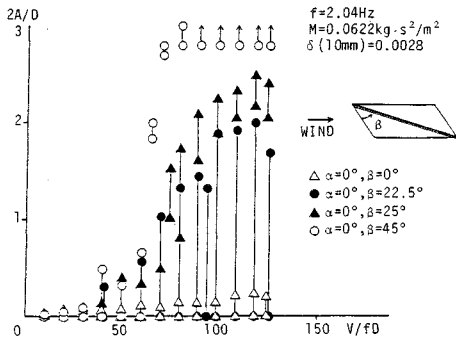


Fig. 6 Effect of Yaw Angle β on Response of Yawed Cable without Rain ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ \sim 45^\circ$).

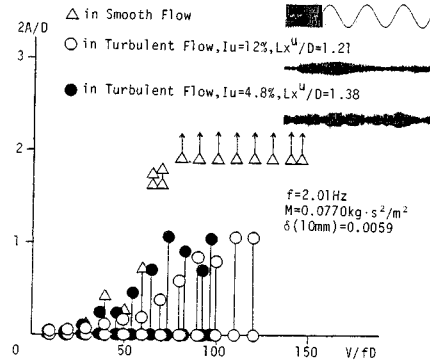


Fig. 7 Effect of Turbulent Flow on Response without Rain ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$).

Stagnation Point とケーブル中心点を結ぶ線 (Fig. 3 中の線 SG) およびケーブル中心軸線 (Fig. 3 中の線 OG) を含む平面に対して、ほぼ垂直方向に自由度を与えた場合の応答を調べた結果、後者の振動方向がより空力的に不安定化した (文献⁸) に既出)。この結果および前節 (1) の結果により、傾斜ケーブルは鉛直面内傾斜角 α をもつことにより Stagnation Point がずれるため、主流方向線とケーブル中心軸線を含む平面に直交する方向の方がはるかに空力的に不安定となると判断される。よって斜張橋ケーブルはケーブル面内のみならずケーブル面外方向の振動と連成した系で振動しやすくなると思われる。このことは、実際の橋梁においてケーブル面内外の連成振動も観測されていることに対応している⁴⁾。

以上のことから傾斜円柱はその姿勢にかかわらず、気流に平行な線と円柱軸を含む平面 (Fig. 1, Plane π) に直交する方向がより振動しやすいといえる。(1) 節の結果と (2) 節の結果を総合すると傾斜円柱の本質的な空力特性は水平面内 ($\alpha = 0^\circ$) に円柱模型を鉛直支持した状態で議論できるといえる。このような観点により、水平面 ($\alpha = 0^\circ$) 内に鉛直 1 自由度ばね支持し、風向偏角 β を $0^\circ \sim 45^\circ$ の範囲で基本的に 5° ずつ、 22.5° 付近では 2.5° ずつ変化させたときの振動応答変化を検討した。これらの代表的な 4 ケース (風向偏角 $\beta = 0^\circ, 22.5^\circ, 25^\circ, 45^\circ$) を Fig. 6 に示す。測定方法は $160 \text{ mm} \phi$ PE 管の場合と同様である。

$\beta = 0^\circ$ 程度では、振動は全く発生せず、模型はきわめて安定しているが、 $\beta = 22.5^\circ$ に近づくときビート状の不規則な振動波形を示し、模型中央部を中心とした Rolling 状態となる。やがて、 $\beta = 25^\circ$ を越えると振動波形の安定した定常振幅振動が発生する。 β が大きくなるほど振動応答が空力的に不安定化し、 $\beta = 45^\circ$ に至っては急激な発散型振動が発生する。なお、これらの大振幅振動はすべてリミットサイクルをもたず、ソフト型 Flutter の特性を有しており、無次元発振風速 V/fD (V : 主流流速、

f : ケーブル固有振動数、 D : ケーブル径) も 60 前後でほぼ同一である。この傾向は振動系の固有振動数を変化させた場合⁸⁾ も同様であった。以上より、斜張橋ケーブルは、風向偏角がある程度つけば、空力的に不安定な状態に陥り、大振幅振動を発生する特性を本質的に内在していることが判明した。さらに、振動発生の有無に関しては、風向偏角 $\beta = 22.5^\circ \sim 25^\circ$ の間に有意な境界が存在すると考えられる。なお、Fig. 2 において無雨時に振動が生じにくい原因は、鉛直角を有するため気流に対する相対偏角が減少していることや振動方向が鉛直方向でないこと、給水ノズルの影響が考えられる。

(3) 乱流効果

実橋状態に近い気流状態を検討するため 2 種類の格子乱流 (乱れ強さ $I_u = 12.0\%$ 、乱れのスケール $L_x^4/D = 1.21$)、($I_u = 4.8\%$ 、 $L_x^4/D = 1.38$) を用いて振動応答変化を検討した。これら乱流中と一様流中の ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$) のケーブル姿勢における振動応答および振動波形を Fig. 7 に示す。

その結果、いずれの乱流中においても振動が発生せず、応答が安定化した。また、乱れ強さが大きいほど、安定化傾向を示している。振動波形も定常振幅とはならず、ビート状の振動形状を示し、Buffeting および Rolling 状の不規則振動特性を呈している。これより、風向偏角をもつケーブルの無雨状態での大振幅振動が発生するためには、流れの一様性が重要な因子の 1 つになっていると判断できる。Rain Vibration が観測された斜張橋の多くは、海上や平野部などに位置しているため、比較的乱れの小さい立地条件を備えており^{1),3),4)}、今回の実験結果からもそのことが納得される。ただし、乱れが小さい地点に架設されているとはいえ、実橋⁹⁾ では、桁位置で $10 \sim 20\%$ 程度の乱れであり、Rain Vibration 現象が発生しているが、代表的なケーブル位置での乱れの強さは未知であり、今後、乱れに関するさらなる検討が望まれる。

4. 大振幅振動発生機構

(1) 斜めケーブル後流域の軸方向流

著者らは、Smoke Wire 法による流れの可視化実験により、斜めケーブル背部直後において Shirakashi ら¹⁰⁾によってすでに指摘されていたケーブルに沿った安定的な強い流れ、すなわち軸方向流 (Axial Flow) の存在を確認している (文献 9) に既出)。

この軸方向流の流れ方向を 360° の回転自由度をもつ小さな旗 (長さ 14 mm, 幅 9 mm, 厚さ 0.5 mm) により可視化した結果が Photo 1 である。旗は、円柱後端下流側 0.025 m の位置から主流方向に沿って 0.05 m ごとに鉛直に張り巡らしたピアノ線に取り付けられている。この結果によればケーブルに近い位置ほど流れが軸方向に向いており、最も内側ではほぼ円柱軸方向を示し、きわめて強い軸方向流が存在している。

可視化実験により存在が確認された後流域の軸方向流の風速を検討するため、I 型熱線プローブを用いて水平面内 ($\alpha = 0^\circ$) に設置した傾斜ケーブル中央部から 0.0025 m 後流側における軸方向流の流速分布を測定した。測定方法は I 型熱線プローブ (KANOMAX, K.K., model 0251 R-T 5) を鉛直に設置し、CTA アネモメータ (KANOMAX, K.K., model 1011), リニアライザ (KANOMAX, K.K., model 1013), 加減算器 (KANOMAX, K.K., model 1017) を介して、軸方向流の平均風速を DC 電圧表示器 (KANOMAX, K.K., model 1008) に出力するとともに、風速変動成分の R.M.S. 値を R.M.S. 電圧表示器 (KANOMAX, K.K., model 1015) によって表示した。風向偏角 β を $0^\circ \sim 45^\circ$ の範囲で変化させた場合の主流流速 V と傾斜円柱中央部背後の軸方向流速 V_a 、その変動成分 R.M.S. の軸方向流流速 (V_a) に対する割合との関係を Fig. 8 に併載する。ただし、ケーブル端部の風洞壁に窓を設けた場合と設けなかった場合を比べた実験においてケーブル中央部では V_a 値にあまり変化がないことが確認されている。しかしケーブル端部では窓の影響があり、軸方向流の一部が窓から供給されていることが考えられる。

ここでは、軸方向流流速は主流流速とほぼ比例関係を有している。風向偏角 $\beta = 45^\circ$ の場合は軸方向流流速が主

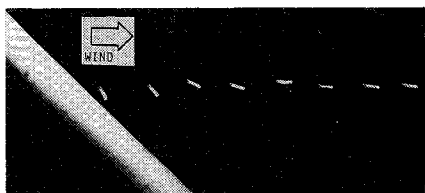


Photo 1 Axial Flow Direction in Wake of Yawed Cable ($\alpha = 0^\circ, \beta = 45^\circ$)

流流速の 90% 近くもあるのに対して、 β が 0° へと小さくなるにつれて 10% 程度に落ち込んでいる。また、変動成分 R.M.S. は逆に β が小さくなるにつれて 20% 程度から 70% 以上へと大きくなっている。すなわち軸方向流の特性は風向偏角 β に大きく依存していると判断できる。なお、 $\beta = 0^\circ$ において V_a 値が 0 でないのは、その R.M.S. 値が 70% 前後ととても大きいことから考えて後流における気流の乱れの影響と考えられる。

先の 3.(2) での振動応答測定結果において風向偏角 β が 25° 以上で大振幅振動が発生したことより、振動発生の有無に関する境界を図中に鎖線として示した。この結果より、斜めケーブル後流域に発生する軸方向流は、大振幅振動発生に大きく関与しているものと考えられる。よって、軸方向流流速が主流流速の 60% 以上かつ流速の変動成分 R.M.S. が軸方向流流速の 30% 以下であることが無雨時の大振幅振動発生の重要な条件であることが示唆された。

(2) 人工的軸方向流による応答変化

ケーブル模型を主流直角 ($\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$) に弾性支持し、気圧 0.75 kg/cm^2 (0.0735 MPa) のコンプレッサーおよび循環式に改造された電気クリーナー (100 V) を用いて人工的に円柱後流域に軸方向流を与えた。この装置および鉛直方向の振動応答変化を測定した結果を Fig. 9

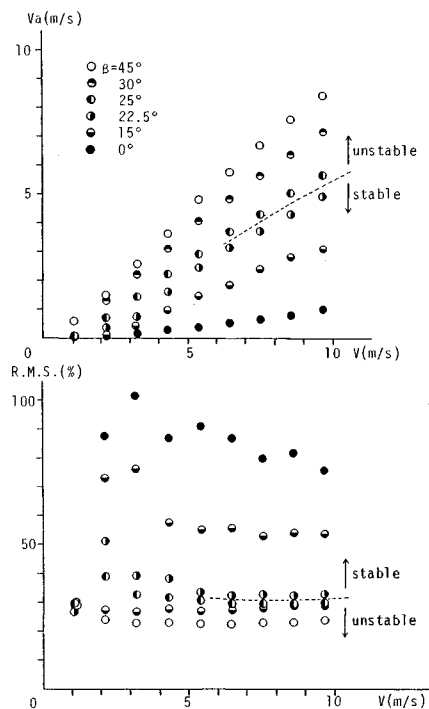


Fig. 8 Velocity Characteristics of Axial Flow and Aerodynamically Stable/Unstable Region ($\alpha = 0^\circ$) (1).

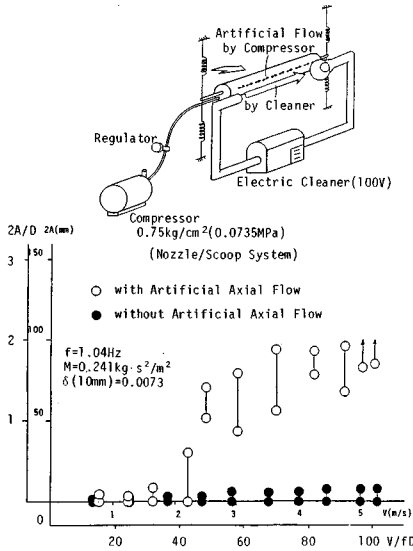


Fig. 9 Effect of Artificial Axial Flow on Response without Rain ($\alpha = \beta = 0^\circ$).

(文献9)に既出)に示す。ここでは、人工的軸方向流を与えると発散型の振動が発生し、空力的に不安定化した。よって軸方向流の存在が斜めケーブルの大振幅振動発生の直接的要因であると判断される。人工的軸方向流供給による振動現象は、主流直角方向に支持された物体後流域にスプリッター板を挿入した場合の応答^{11),12)}と類似している。

また、円柱とスプリッター板との距離が近いほど、ソフト型 Flutter 特性を強く表わすという報告¹³⁾があり、先の3.における斜めケーブルの大振幅振動の場合もすべてソフト型であることや、軸方向流がケーブル後背部直後に存在することなどから判断して、軸方向流は、後流域においてスプリッター板と同様の空力的効果を斜めケーブルに与えているものと考えられる。

(3) 無雨時の振動発生機構と雨との関係

無雨状態において風向偏角を有する斜めケーブルが発生する大振幅振動の発生機構に関して、ケーブル後流域に形成される軸方向流の存在がその主要因であると考えられる。以下に、これまでの結果から考察される振動発生機構を段階的に示す。

- ① 円柱断面を有するケーブルは傾斜することにより、風向偏角をもつ。
- ② 接近流はケーブル面を軸直角方向に横切る。
- ③ 円柱後流域に軸方向流 (Axial Flow) が発生する。
- ④ 軸方向流は後流域内において、剝離せん断層の相互干渉を断絶し、スプリッター板挿入と同様の働きをする。
- ⑤ この後流域分離効果により、剝離せん断層内に内

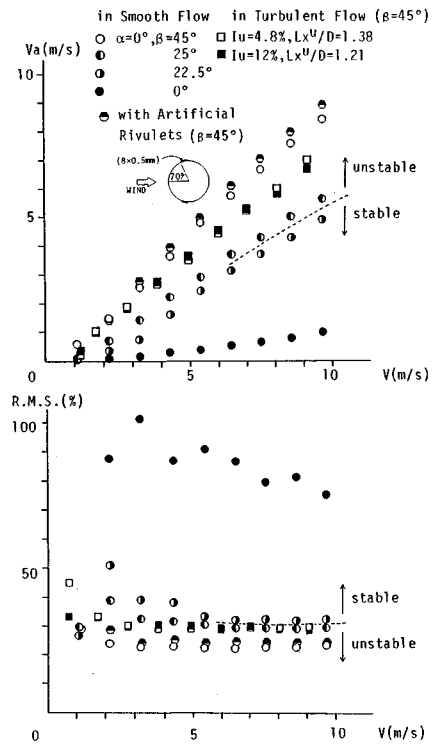


Fig. 10 Velocity Characteristics of Axial Flow and Aerodynamically Stable/Unstable Region ($\alpha = 0^\circ$) (2).

部循環流が形成される。

- ⑥ ケーブル表面の負圧増大が起り、従来の矩形断面で知られているのと同じ機構で大振幅振動が発生する。

Fig. 10に前出の3.(3)において $\alpha=0^\circ, \beta=45^\circ$ の姿勢で振動が安定化した格子乱流中の軸方向流流速特性および同じ姿勢のケーブル模型上下面に人工的水路 (幅8mm, 厚さ0.5mm)を設置した場合の軸方向流流速特性を併載する。この人工的水路は実橋での Rain Vibration 発生風速域における雨水水路の位置と対応させるため水平線より上下にそれぞれ70°の角度の位置に厚さ0.5mm, 幅8mmのテープを設置した。乱流中においては、軸方向流流速が低下しており、R.M.S.成分も振動の現われない境界付近まで上昇しているが、人工水路付きの場合は軸方向流流速が増大しており、大振幅振動が発生しやすくなっている。

先の無雨状態での斜めケーブル大振幅振動発生機構と実橋における Rain Vibration 現象との関係を示したのが Fig. 11である。実橋ケーブルの場合は、Wind Dir. 1 ($\alpha=-30^\circ, \beta=45^\circ$)と Wind Dir. 2 ($\alpha=30^\circ, \beta=45^\circ$)の2姿勢が存在する。降雨時になり、雨水の重力、表面

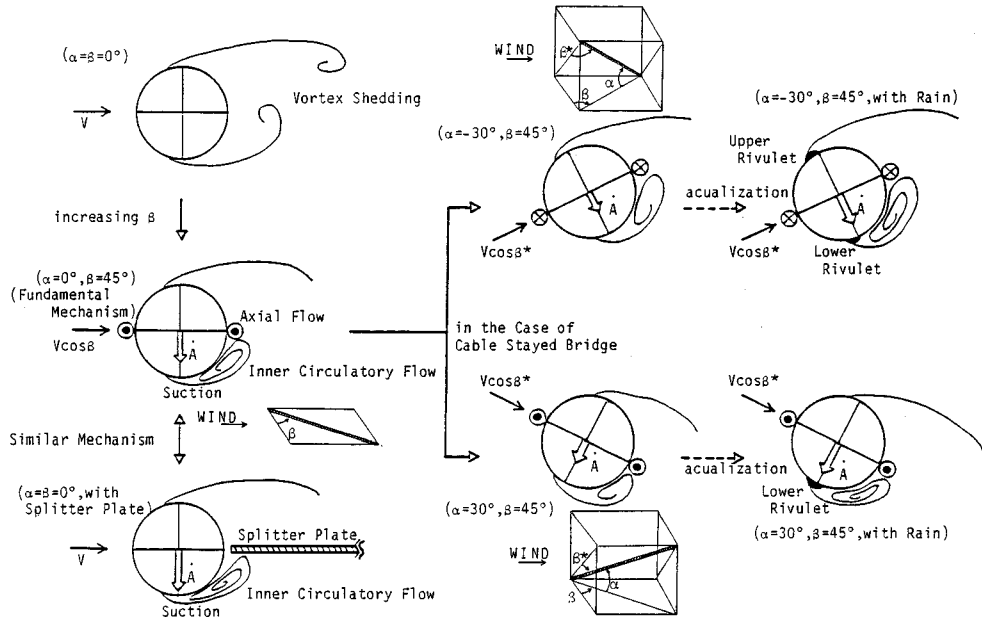


Fig. 11 Mechanism of Rain Vibration.

張力，風力がつり合った状態で，Wind Dir. 1 ($\alpha = -30^\circ$ ， $\beta = 45^\circ$)ではケーブル表面上下両面に，Wind Dir. 2 ($\alpha = 30^\circ$ ， $\beta = 45^\circ$)では下面にのみ水路が形成される。よって，雨の形成する水路により流れの剥離が促進され，軸方向流が強く安定的に供給されるために空力不安定現象 (Rain Vibration)を表わすと考えられる。種々の実橋報告^{1),3),4)}を総合して判断すると Rain Vibration の発現風速域は実橋風速 10~15 m/s 程度である。Wind Dir. 1 の姿勢で Rain Vibration 現象の発現頻度が高いのは，この水路形成の差異によるものと思われる。また，さらに高風速になり振動が収まるのは，高風速域において水路形成が破壊され，水滴が表面にばらつき表面粗度が増すことおよび気流に含まれる乱流による安定化効果によるものであると考えられる。

5. 制振対策

(1) ケーブル表面設置物による制振効果

風向偏角をもつ斜めケーブルの大振幅振動の制振対策を検討するため，($\alpha = 0^\circ$ ， $\beta = 45^\circ$)のケーブル模型 (直径 50 mm) にケーブル軸に平行な矩形突起 (高さ 1.5 mm，幅 3 mm) を 12 本設置した。これは，過去の直径 160 mm のポリエチレン管を用いた降雨状態での実験的研究⁷⁾において Rain Vibration の制振効果が認められた方法で，相対的な大きさを縮尺したものである。この模型の振動応答を測定した結果 (Fig. 12)，軸平行矩形突起では，Case 1 (Stagnation Point が矩形突起の位置にある場合)，Case 2 (突起間にある場合) とともに発散型大

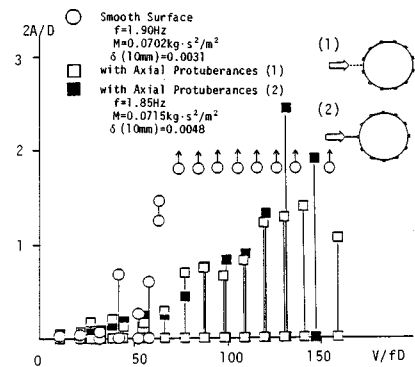


Fig. 12 Effect of Axial Protuberances on Response without Rain ($\alpha = 0^\circ$ ， $\beta = 45^\circ$).

振幅振動が収まった。ただし，振動形態は，モードが Buffeting および Rolling 状態に入れ替わる不規則振動特性を示した。この傾向は Case 2 の場合に顕著に現われている。

次に，前章で考察した斜めケーブルの発生機構の本質的な主要因であると考えられる軸方向流を直接的に遮断するため，半円上の Fin (直径 0.025 m) を 0.28 m 間隔でケーブル後流域に軸に垂直に 4 枚設置した。結果を Fig. 13 に示す。この場合にも Buffeting 状の振動状態になるが，その規模は小さく，大きな制振効果を示した。

これら模型の後流域流速測定を行った結果が Fig. 14 である。軸平行矩形突起の場合，Case 1，2 で多少の相違があるが，軸方向流速が振動発生の有無を示す境界線付近にまで低下しており，これら動的特性および静的

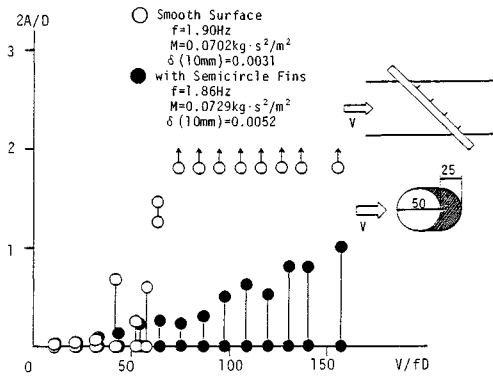


Fig. 13 Effect of Semicircle Fins on Response without Rain ($\alpha = 0^\circ, \beta = 45^\circ$).

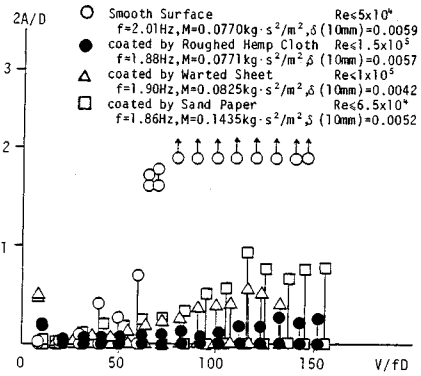


Fig. 15 Effect of Cable Surface on Response without Rain ($\alpha = 0^\circ, \beta = 45^\circ$).

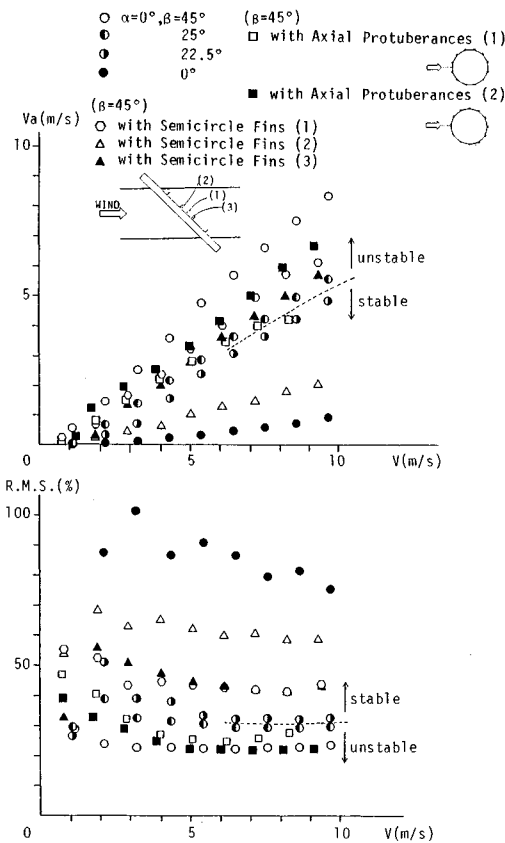


Fig. 14 Velocity Characteristics of Axial Flow and Aerodynamically Stable/Unstable Region ($\alpha = 0^\circ$) (3).

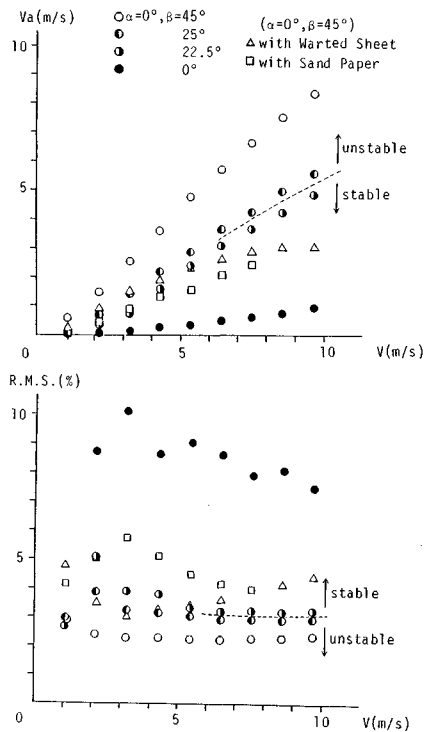


Fig. 16 Velocity Characteristics of Axial Flow and Aerodynamically Stable/Unstable Region ($\alpha = 0^\circ$) (4).

特性を総合的に判断すれば、工学的に有効な制振対策のうちの1つであるといえる。また、半円状の Fin の場合、Fin 間中央部および Fin の上流側では、流速の低下は小さいが、Fin の下流側では流速がほとんど認められず、変動成分 R.M.S. も非常に大きくなった。すなわち、この方法により、軸方向流が部分的に断ち切られるため、後流

域の安定した軸方向流の不連続性が起こり、結果的に制振作用を強く表わすことが判明した。

(2) 表面粗度変化による制振効果

直径 50 mm の滑らかなアルミニウム管ケーブル模型に粗い麻布 (Roughed Hemp Cloth)、疣状の包装用シート (Warded Sheet)、60 番のサンドペーパーを巻き付けて、ケーブル表面粗度を変化させることによる制振効果を検討した。4 種類の模型の ($\alpha = 0^\circ, \beta = 45^\circ$) の姿勢における振動応答を Fig. 15 に示す。その結果、表面粗度を

つけた3種類の模型すべてにおいて大振幅振動が発生し
ておらず、粗度が大きいほど振動応答が鎮静化した。

さらに Warded Sheet およびサンドペーパー巻き模型
の軸方向流速測定の結果(Fig. 16), 2 ケースともに軸
方向流速およびその変動成分 R.M.S.が, 応答安定領域
までおのおの低下および上昇した。すなわち, ケーブル
表面の粗度の増大により, 後流域の軸方向流が大きく弱
体化し, 不安定になると考えられる。

また, 過去の降雨中での実験的研究⁷⁾によれば, 表面粗
度を粗くした場合も滑らかな場合と同様に限定型振動状
態が現われることが確認されている。しかしながら, レイ
ノルズ数が直接的に振動発生の有無を左右するか否か
についてはいまだ十分明らかにされていないのが現状で
ある。Zdravkovich¹⁵⁾は従来のレイノルズ数の大別領域
をさらに細かく 15 の領域に分類し, 円柱の表面粗度や接
近乱流の影響によって, 見掛けのレイノルズ数領域分布
が移動するだけでなく, いくつかの領域が消滅するこ
とを示唆している。今後, Rain Vibration あるいは無雨時
のケーブル振動に及ぼすレイノルズ数の影響についてさ
らに詳細な定量的検討が望まれる。

(3) Oil Damper による制振効果

姿勢 ($\alpha = 0^\circ, \beta = 45^\circ$) の基本系ケーブル模型の Oil
Damper による制振効果を検討した。この Oil の粘性に
よって, スクルートン数 ($Sc = M\delta/\rho D^2, M: \text{Mass}, \delta:$
対数減衰率, $\rho:$ 空気密度) の変化が可能である。そ
の振動応答測定結果を Fig. 17 に示す。

Oil Damper (1) ($Sc = 9.9279$) によりスクルートン
数が, Damper をもたない基本系の 7 倍程度になっても
振動応答の変化は全くみられず, 両者とも同様の大振幅
振動が発生している。ただし, Oil の粘性を変化させて,
 $Sc = 47.877$ へと約 30 倍以上大きくした場合 (Oil
Damper (2)) には振動発生が収まっている。なお, 実橋
におけるスクルートン数は, 基本系の 10 倍程度となっ
ている。

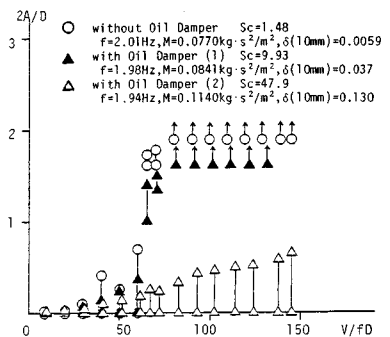


Fig. 17 Effect of Oil Dampers on Response without Rain
($\alpha = 0^\circ, \beta = 45^\circ$).

スクルートン数を支配する別の因子にケーブルの直径
および Mass が考えられる。2.)に前出のように直径が
80 mm に半減しても振動が発生したことを確認すると
ともに, 模型重量が 2 倍になった場合も, 振動開始後の
振幅発散率が小さくなる程度の変化はあるが, 同一の無
次元風速域から振動発生が現われた。

以上の結果より, 無雨時の斜めケーブルの大振幅振動
はスクルートン数の変化に対して鈍感な応答特性を有し
ていることが判明した。しかしながら, 安定化した空力
振動特性が雨の水路により再び不安定化する Rain
Vibration では, $\delta = 0.02$ もあれば安定になるとの報告
もあり, Rain Vibration に対する Damping 効果につい
ては今後の詳細な検討が期待される。

6. 結 論

本研究では, 斜張橋ケーブルすなわち風向偏角を有す
るケーブルの空力特性に関して種々の風洞実験および解
析を遂行した。斜めケーブル後流域に存在する軸方向流
に着目して, Rain Vibration の基本的原因であると考え
られる無雨時の大振幅振動現象の発生機構と雨との関連
性その制振対策を主目的として実験的考察を行った。以
下に結論を列挙する。

(1) 風向偏角を有する斜めケーブル後流域に存在す
る軸方向流が無雨時の大振幅振動発生の重要因子であ
り, この流れによるケーブル表面での内部循環流形成が
直接的発生原因となっている。

(2) 斜張橋ケーブルの空力不安定性は, Stagnation
Point とケーブル中心点を結ぶ線およびケーブル中心軸
線 (Fig. 3 中の SG および OG) を含む平面に直交する方
向に最大となる。よって, 実橋においては面内振動のみ
ならず, 面外振動と連成した系で振動し得る。

(3) 風向偏角をもつケーブルの無雨時の大振幅振動
に関する種々のパラメーターの影響が明らかになった。
すなわち, 振動発現風速の無次元風速 ($V/fD, V:$ 主
流速, $f:$ ケーブル固有振動数, $D:$ ケーブル径) へ
の依存性, 乱流による振動安定効果および, スクルート
ン数に対する振動発現の鈍感な反応特性などである。さ
らにレイノルズ数の軸方向流への影響が示唆された。以
上およびその他の各パラメーター間の相関図を Fig. 18
に示す。

(4) 斜めケーブルの表面にケーブル軸に平行な矩形
突起 (高さ 1.5 mm, 幅 3 mm) を等間隔に 12 本付設し
た結果, 定常振幅のみられないビート状の応答特性へと
安定化した。この突起により軸方向流のある程度の低速
化がみられ, 総合的に判断すれば, 制振対策として有効
であると考えられる。

(5) 半円状の Fin (直径 25 mm) を斜めケーブル後

流側に軸に垂直に 280 mm 間隔で付設した結果、軸方向流は、弱体化しながらも依然として存在するが Fin によって断続的になり、振動応答において大きな制振効果が認められた。

最後に、本研究を遂行するにあたり、多大なるご協力をいただいた阪神高速道路公団の北沢正彦氏、KAIST の金潤石氏、ならびに佐野祐一氏をはじめとする橋梁工学研究室の諸氏に対してここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 樋上瑋一：斜張橋ケーブルの Rain Vibration, 日本風工学会誌, 第 27 号, 1986.
- 2) Ohshima, K. and Nanjo, M.: Aerodynamic Stability of the Cables of a Cable-Stayed Bridge subject to Rain (A Case Study of the Ajigawa Bridge), Proceeding of US-Japan Joint Seminar on Natural Resources, 1987.
- 3) 吉村 健・田中千秋・佐々木伸幸・中谷信二・比嘉 智：Rain-wind induced vibration of the cables of the Aratsu bridge, 第 10 回風工学シンポジウム論文集, 1988.
- 4) Langsoe, H.E. and Larson, O.D.: Generating Mechanism for Cable Stay Oscillations at the Faroe Bridges, International Conference on Cable Stayed Bridges, 18-12, 1987.
- 5) 藤野陽三・山口宏樹・伊藤 学：8 字形断面を有する架空通信ケーブルのギャロッピング振動, 第 8 回風工学シンポジウム論文集, 1984.
- 6) 中村泰治・坂本雄吉：ケーブルの風による振動, 日本風工学会誌, 第 20 号, 1984.
- 7) 松本 勝・白石成人・北沢正彦・金潤石・辻井正人：風雨条件下のケーブル振動現象に関する考察, 第 10 回風工学会シンポジウム論文集, 1988.
- 8) 松本 勝・白石成人・北沢正彦・辻井正人・平井滋登：傾斜円柱の空力振動特性, 第 10 回風工学シンポジウム論文集, 1988.
- 9) 松本 勝・チャールズ ナイスリー・白石成人・辻井正人・平井滋登：傾斜円柱の空力振動不安定性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 35A, 1989.
- 10) Shirakashi, N., Hasegawa, A. and Wakiya, S.: Effect of the Secondary Flow on Karman Vortex Shedding, Bulltin of JSME, Vol. 29, No. 250, 1986.
- 11) Bearman, P.W.: Investigation of the Flow behind a Two-Dimensional Model with a Blunt, Trailing Edge and fitted with Splitter Plates, Journal of Fluids Mechanics, Vol. 21, Part 2, 1965.
- 12) Matsumoto, M., Shiraishi, N., Kitazawa, M., Knisely, C., Shirato, H., Kim, Y. and Tsujii, M.: Aerodynamic Behavior of Inclined Circular Cylinders-Cable Aerodynamics, Intl. Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and its Applications, 1988.
- 13) 中村泰治・友成義正：層流および乱流における矩形断面柱のギャロッピング, 第 4 回風工学シンポジウム論文集, 1976.
- 14) Shiraishi, N., Matsumoto, M. and Shirato, H.: On Aerodynamic Instability of Tandem Structures, Proceeding of 6th Colloquium on Industrial Aerodynamics, 1985.
- 15) Zdravkovich, M.M.: Conceptual Over View of Laminar and Turbulent Flows Past Smooth and Rough Circular Cylinders, International Colloquium on Bluff body Aerodynamics and its Applications, 1988.

(1989.3.9・受付)