

傾斜円柱の空力不安定性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON AERODYNAMIC INSTABILITY OF A YAWED CIRCULAR CYLINDER

松本 勝*	チャールス・ナイスリー**	白石成人***
Masaru MATSUMOTO	Charles KNISELY	Naruhito SHIRAIISHI
辻井正人****	平井滋登****	
Masato TSUJII	Shigeto HIRAI	

In this study, aerodynamic characteristics of a yawed circular cylinder was experimentally examined in relation with "rain-wind induced oscillation" of cables of a cable-stayed bridge. The cylinder shows more sensitive aerodynamic instability with increasing of yawing angle. The secondary axial flow was observed in the near wake as being previously pointed out by Sirakashi et al.. This secondary flow seems to play an important role for the aerodynamic excitation of the cylinder. This hypothesis was confirmed by aerodynamic excitation of circular cylinder normal to flow with an artificial axial flow in a near wake.

1. まえがき

種々の橋梁形式の中でも比較的新しい形式である斜張橋は、近年、その構造的特徴あるいは幾何学的美観より長大橋梁から都市内の人道橋に至るまで幅広く採用されており、全橋梁に大きな比重を占めつつある。この斜張橋のケーブルの風と雨による振動（レインバイブレーション）の事例が報告されており、ケーブル定着点の疲労や使用者の抱く不安感といった点よりその効果的な防振対策が望まれている。レインバイブレーションを取り扱った研究例としては、樋上¹⁾が名港西大橋でこれを確認し、風洞実験で同種の振動を再現している。また、Ohshima, Nanjo²⁾も安治川橋梁に関して研究を行っている。これらの研究によりケーブル振動の特性が次第に明らかになってきているが、その発生機構については依然として不明な点が数多く残されており、有効な制振対策の方法も見出されるには至っていない。

著者らも、風洞内に傾斜ケーブルのレインバイブレーションを再現し、雨の有無の状態での傾斜したケーブルの振動応答の把握、非定常圧力による振動発生機構の考察、ケーブルに付加物を装着することによる制振対策の検討を行った。³⁾ それに加え、雨のない状態での傾斜円柱（鉛直角と水平偏角を有する場合）の空力特性というより基本的な場合についても風洞実験を行い、傾斜円柱の有する空力不安定性、それと斜張橋傾斜ケーブルのレインバイブレーションとの対応、雨水リプレットの役割等についても検討した。⁴⁾ 本

* 工博 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)

** Ph.D. 京都大学講師 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

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

**** 京都大学大学院 (〒606 京都市左京区吉田本町)

研究は以上の点を踏まえて、水平偏角を有する傾斜円柱の空力特性についてさらに検討を加え、特に断面後方に存在する2次流の役割について、人工的に類似した流れを発生させるという手法により、考察を加えようとするものである。

2. 実験装置及び模型

使用した風洞は京都大学工学部土木工学教室に設置された吹出式エッフェル型風洞（高さ1.0m、幅0.7m）であり、ケーブル模型として円形アルミニウム製パイプ（直径50mm）を用いた。風洞の側壁には適当な窓を設け、模型端部を風洞外において固定支持あるいはたわみ1自由度のバネ支持を行うようにした（図1）。この模型においては端板を設置していない。また、水平偏角48°の傾斜円柱を流れ方向からみた場合の断面を持つ楕円模型（長軸84mm、短軸56mm、端板付）についても測定を行った。実験におけるレイノルズ数は約 3.4×10^4 以下の範囲にあり、垂臨界レイノルズ数での実験である。模型をバネ支持した際の振動系の物理諸元を表1に示す。なお、人工的な軸方向流発生装置については3.4.を参照されたい。

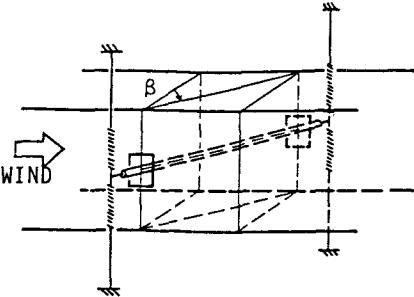


図1 模型の配置

表1 模型諸元

水平偏角 β	バネ定数 (上,下) その他	振動数 f (Hz)	対数減衰率 δ ($\times 10^{-3}$)				単位長当り質量 M ($\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^2$)
			倍振幅 20mm	15mm	10mm	5mm	
0°~45°	3k, k	2.042	3.1315	2.7938	2.7631	2.7999	0.06219
45°	2k, k	1.901	3.1739	2.3788	2.9430	2.1963	
	25k, 25k	4.914	3.2864	4.3827	2.7789	2.6411	0.20665
0°	楕円模型 (84x56mm) スプリッター板付	3.240	4.2226	3.2697	2.7426	2.6608	0.39732
	軸方向流発生装置付 (Compressor) 低振動数Type	0.853	7.1673	7.0524	6.9261	6.8156	0.16980
	軸方向流発生装置付 (Compressor) 高振動数Type	4.343	5.4443	4.7894	4.3104	5.4157	0.08583
	軸方向流発生装置付 (Compressor & Electric Cleaner)	1.044	7.8841	7.5832	7.3314	6.9420	0.24058

3. 実験結果

3.1. 表面圧力分布

図2は、固定された傾斜円柱及び楕円柱表面の平均圧力分布を示す。主流にその軸が直角方向の円柱（○印）と水平偏角が45°の傾斜円柱（●印）を比較すれば、平均圧力の絶対値はほぼ $1 : \cos^2 \beta$ の比になっている。これは、傾斜円柱においては、主流風速 U に関して円柱軸に直角な成分 $U \cos \beta$ が影響を及ぼしているものと思われる。また、水平偏角48°の傾斜円柱に対応する楕円柱の圧力（×印）は○印と●印の中間部に位置している。以上のことは、傾斜円柱においては、Shirakashiら⁵⁾の報告にあるように、流れが主流方向以外の成分も有し、円柱軸を直角に横切る3次元的な流れになっていることを反映していると思われる。

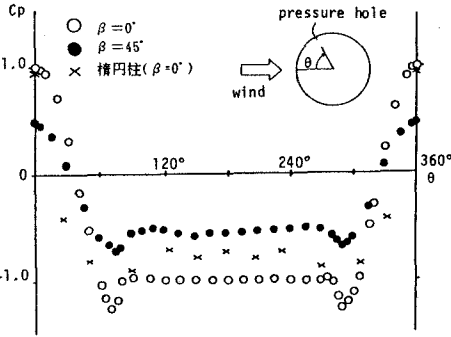


図2 表面平均圧力分布

3.2. 振動応答

(1) 水平偏角 β の影響 水平偏角 β を0°から45°まで変化させたときの円柱の振動応答の変化を図3に示す。円柱軸と主流方向が垂直の場合（ $\beta = 0^\circ$ ）には、無次元風速 (V/fD) が約125以下の範囲においてほとんど振動を生じていないのに対し、水平偏角を徐々に増加させると、22.5°まではローリングを伴うバフティング的な非定常性の強い振動が次第に発達する。ところが、25°を越えると急激にギャロッピング的な発

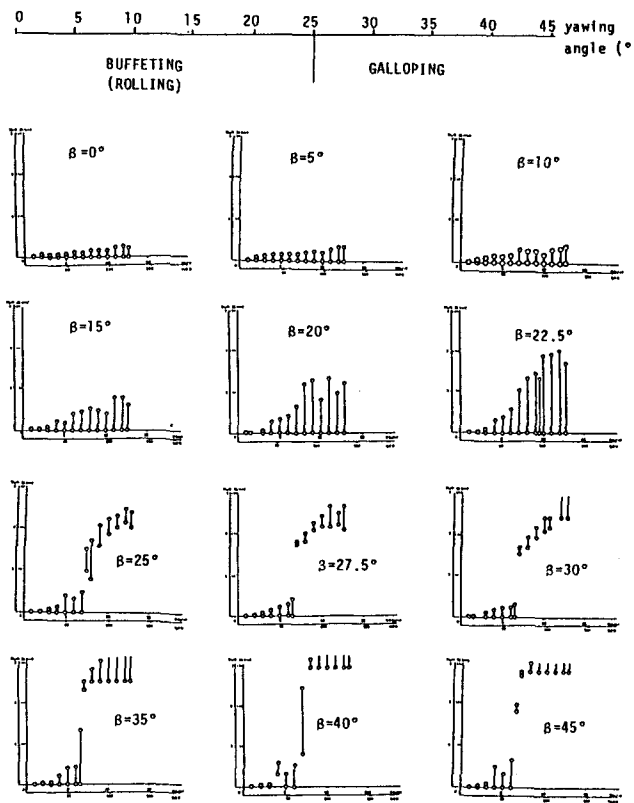


図3 水平偏角 β による振動応答の変化

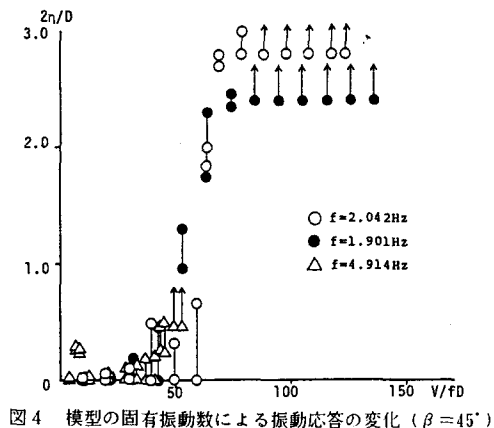


図4 模型の固有振動数による振動応答の変化 ($\beta = 45^\circ$)

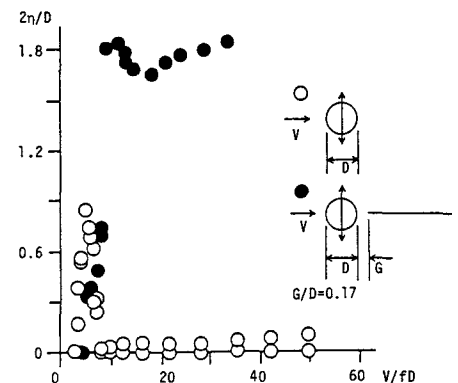


図5 スプリッター板の有無による円柱模型の振動応答の変化 ($\beta = 0^\circ$)⁶⁾

散型の振動に移行する。さらに水平偏角を増加させても、振動が発現する無次元風速はあまり変化せず、約60～70程度であるものの、水平偏角が大きいくほど振動の発散の度合いが激しくなり、空力的により不安定化する。このように傾斜円柱自体が空力不安定性を有しているものと判断される。

(2) 振動数の影響 図4は、水平偏角 45° の円柱において、模型の固有振動数を変化させた場合の振動応答の比較である。傾斜円柱の発散型振動の発現無次元風速は振動数によらずほぼ一定となった。樋上¹⁾の指摘するレインバイブレーションが無次元風速に依存しないという特徴は風速による雨水リプレット形成と関連するものであり、傾斜円柱の本質的な空力不安定性自体については無次元風速を用いて議論できるものと思われる。

(3) スプリッター板の影響 主流に直角方向の円形断面においては、断面下流側にスプリッター板を挿入することにより、空力的に不安定化されることが報告されている(図5)。⁶⁾ ここでは、水平偏角 $\beta = 48^\circ$ の傾斜円柱に対応する断面を有する楕円模型を主流に直角方向に弾性支持し、同様にスプリッター板の有無による振動応答の差異を調べた(図6)。スプリッター板なしでは限定振動のみを生じていたが、スプリッター板の設置により限定振動の発現風速から発散型の振動を生じている。これは、円形断面の場合と同様である。

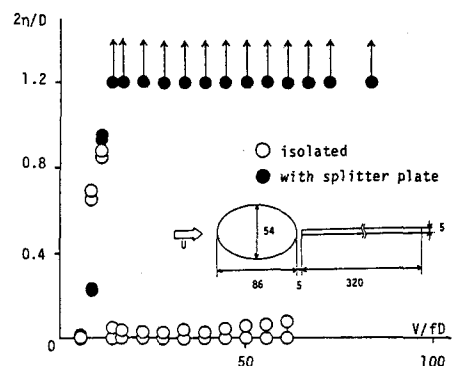


図6 スプリッター板の有無による楕円柱模型の振動応答の変化 ($\beta = 0^\circ$)

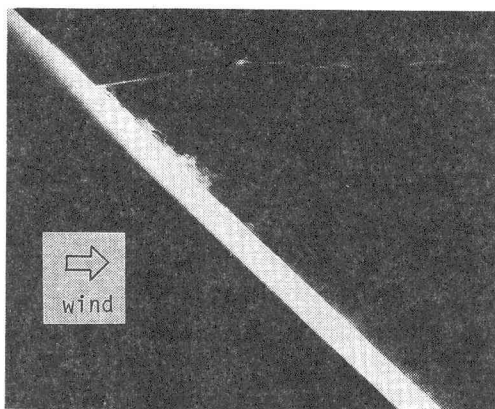


写真1 流れの可視化 ($\beta = 45^\circ$, 上方より撮影, 風速1m/sec)

3.3. 流れの可視化

写真1は、水平偏角 45° の固定された傾斜円柱の後流側の流れの様子（風速約1m/sec）をsmoke wire法により可視化したものである。円柱後方には、主流方向の流れの他に、Shirakashiら⁵⁾も報告している円柱軸に沿った2次的な流

れが存在していることが確認できる。この2次流は風洞に設けた窓を通した気流の供給と排出によって安定化されているものと思われる。この2次流の存在に起因する流れの3次元性が傾斜円柱の空力不安定性に何らかの役割を果たしていることは十分に考えられる。

3.4. 人工的軸方向流発生実験

以上のように、傾斜円柱後方には軸方向の2次流が発生している。この2次流の影響を調べるため、流れがほぼ2次元적であると思われる主流に直角方向の円柱に対し、すぐ後方に人工的に軸方向流を発生させることを考えた。

第1の方法として、円柱背面に50mm間隔で小さな傾斜穴を設け、円柱内部の圧力を高めることにより穴から定常的に空気を吹き出すようにした（図7）。円柱内部には風洞外に出た端部より、コンプレッサーと圧力バルブを用いて一定圧の空気が供給される。円柱に設けた穴は水平面内で斜め方向を向いており、さらにテープで穴の一部を覆うことにより、できる限り空気が軸方向に沿って吹き出すようにしてある。

次に、第2の方法として、模型とは独立に、電気cleanerを利用して風洞の片側より空気を吹き出し、反対側より吸い込むことにより、円

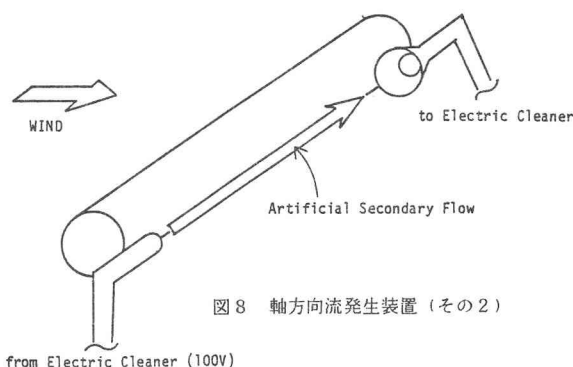


図8 軸方向流発生装置（その2）

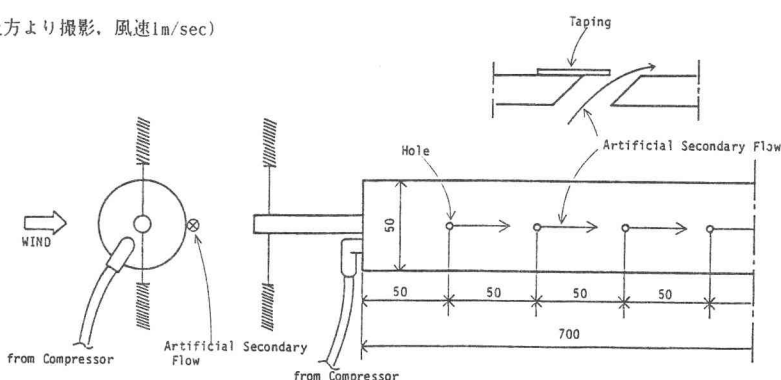


図7 軸方向流発生装置（その1）

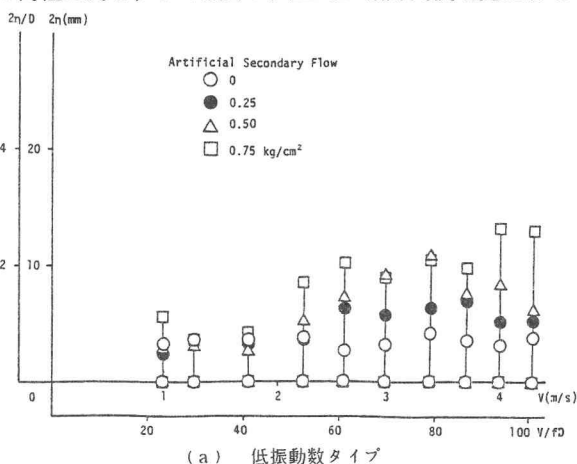


図9 人工的軸方向流発生による振動応答の変化（コンプレッサー使用）

柱の後方に沿う気流を発生させた(図8)。

cleanerに与える電圧を調整することにより流れの強さを変化させることが可能である。

まず、第1のコンプレッサーを用いる方法で応答振幅の変化を調べた結果が図9である。加える空気圧を3種類とるとともに、模型の固有振動数を変化させ2種類の風速域で調べている。振動数の低い場合(a)には、無次元風速50程度よりローリングを伴う定常性の弱い振動の発生がみられ、人工的な軸方向流により模型の空力不安定性が増していることがわかる。その程度も、模型内部の空気圧を高めるほど大きくなっている。この振動がみられた風速域は、水平偏角を有する傾斜円柱で発散型の振動が発生した領域とよく対応している。また振動数の高い場合(b)には、圧力を加えていない2次元

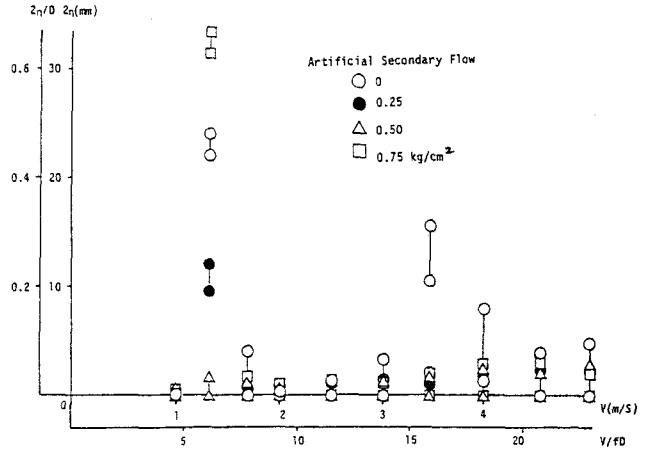


図9 (b) 高振動数タイプ

的な状態では、2つの限定振動の発生がみられる。無次元風速6付近の第1の振動は通常の渦励振であり、無次元風速16付近の第2の振動はDurginら⁷⁾の報告している"Lower Mode"の渦励振に対応するものと思われる。人工的な軸方向流の発生により、第2の振動のピークはいずれの場合も安定化され、第1のピークも空気圧が最大の場合を除き安定化の傾向にある。これは、先の場合とは逆に、円柱から一様に吹き出す流れによって、周期的に発生していたカルマン渦の影響が弱められた結果と推定される。不安定化した例については今後さらに検討を要する。

次に、第1の方法に第2のcleanerを用いる方法を組み合わせて得た結果を図10に示す。この場合、軸方向流を発生させることにより発散型の振動が生じ、その発生風速域は先の場合と同様に無次元風速50程度以上である。第1の方法のみの場合より振動がより定常的なものとなり、傾斜円柱でみられた振動と本質的に同じものと考えられる。

以上のことから、本来空力的に安定で限定振動のみを生じていた主流にその軸が直角方向の円形断面も、人工的な軸方向流を発生させれば不安定化し、発散型の振動を生じ得ることが認められた。

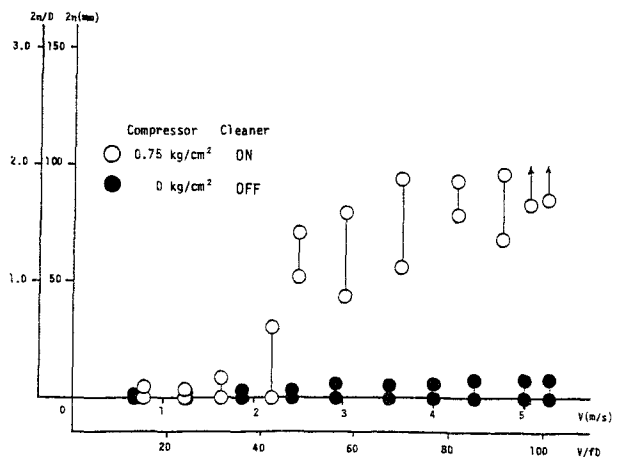


図10 人工的軸方向流発生による振動応答の変化
(コンプレッサーおよび電気Cleaner使用)

4. 考察

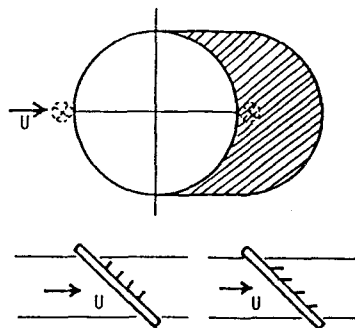
3. 2. (3) に示したように、円柱

及び楕円柱は、断面のすぐ後方のwake中にスプリッター板を設置することにより空力的に不安定化され発散型の振動が生じる。これは、スプリッター板が上下2つの剝離せん断層の相互干渉を妨げ、断面自体の振動に伴って内部循環流が形成され、それにより負圧が増大するためと考えられる。⁶⁾ 一方、3. 4. から、人工的に軸方向流を発生すれば、主流に直角方向の円柱も傾斜円柱に類似した空力不安定性を示し得る。このとき風洞内に生じている流れ、あるいは傾斜円柱の軸方向2次流については、今後定量的な評価を検討を

要するところであるが、少なくとも定性的な範囲で類似性は確保されており、傾斜円柱の2次流がその空力不安定性の大きな原因の一つであることは疑いない。

以上のことより、傾斜円柱においてみられる軸方向の2次流が、主流に直角方向の断面後流中に設置されたスプリッター板と同様の役割を果たしていることが推察される。Wood⁸⁾は、翼断面において“base bleed”という主流方向の流れをwake中に補給すれば、スプリッター板の設置と同様の効果がみられることがあると報告している。傾斜円柱の2次流も、この“base bleed”と同じく、上下の剝離せん断層の相互干渉を妨げ、発散型振動を生じさせるというスプリッター板の設置と同様の効果を与えているものと考えられる。

これを逆にみれば、傾斜円柱の空力不安定性を抑え振動の発生を低減するために、軸方向の2次流を人工的に弱めるという手法が考えられる。図11に示すような半円形状のフィン付傾斜円柱($\beta = 45^\circ$)の後流側に取り付けたところ、定常的な発散型の振動からローリングが卓越した不規則振動へと移行し、空力的に安定化の傾向を示した。



5. むすび

本研究の主な成果をまとめれば以下になる。

- ① 主流に対して水平偏角を有する傾斜円柱では、断面背後に軸方向の2次流が発生し、この2次流が傾斜円柱の空力不安定性の主たる原因となっている。水平偏角が小さい範囲では、この2次流の影響が小さく、振動は非定常性の強いローリングを伴った不規則な振動となるが、水平偏角が 25° 以上では、定常的な発散型の振動へと移行する。
- ② 傾斜円柱にみられた上述の空力不安定性と同様の現象が、主流に直角方向の円柱において人工的な軸方向流の発生により再現された。
- ③ 傾斜円柱の空力不安定性を弱める方法として、断面後方の2次流の効果を弱めることが有効であると考えられる。この方法は、斜張橋ケーブルのレインバイブレーション防止にも応用される可能性を有していると思われる。

今後の課題としては、2次流のより定量的な評価や円柱前方の流れの状態等の検討が考えられる。

最後に、本研究は、阪神高速道路公団の委託を受けて、東神戸大橋斜張橋ケーブルの耐風性に関する研究調査の一環として実施されたものであり、阪神高速道路公団北沢正彦氏に謝意を表す。また、京都大学工学部土木工学教室白土博通氏、湯川雅之氏より実験、結果の整理についての協力を得たことを記し、謝意を表す。

6. 参考文献

- 1) 樋上秀一:斜張橋ケーブルのレインバイブレーション,日本風工学会誌第27号,1986.
- 2) K.Ohshima,M.Nanjo:Aerodynamic Stability of the Cables of a Cable-Stayed Bridge subject to Rain (A Case Study of the Ajigawa Bridge),Proc. of US-Japan Joint Seminar on Natural Resources,1987.
- 3) 松本勝,白石成人,北沢正彦,金洞石,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回風工学シンポジウム論文集,1988.
- 4) 松本勝,白石成人,北沢正彦,辻井正人,平井遊登:傾斜円柱の空力振動特性—ケーブルRain Vibrationとの関連性—,第10回風工学シンポジウム論文集,1988.
- 5) M.Shirakashi,A.Hasegawa,S.Wakiya:Effect of the Secondary Flow on Karman Vortex Shedding,Bullitin of JSME,Vol.29, No.250, 1986.
- 6) N.Shiraishi,M.Matsumoto,H.Shirato,On Aerodynamic Instability of Tandem Structures,Proc. of 6th Colloquium on Industrial Aerodynamics,1985.
- 7) W.W.Durgin,P.A.March,P.J.Lefebvre:Lower Mode Response of Circular Cylinder in Cross-Flow,Journal of Fluids Engineering, Vol.102,1980.
- 8) C.J.Wood:The Effect of Base Bleed on a Periodic Wake,Journal of the Royal Aeronautical Society,Vol.68,1964.

(1989年10月12日受付)