

矩形断面柱の渦励振発生機構に関する基礎的研究

ON MECHANISM OF VORTEX-INDUCED OSCILLATIONS FOR RECTANGULAR CYLINDER

松本 勝^{*1} 白石成人^{*2} 白土博通^{*3} 八木知己^{*4} 田中 港^{*5} 山岸 稔^{*6}
by Masaru MATSUMOTO, Naruhito SHIRAISHI, Hiromichi SHIRATO, Tomomi YAGI,
Minato TANAKA and Minoru YAMAGISHI

The onset reduced velocity of the motion-induced excitation is fundamentally expressed by $V_{on}=(B/D)/0.6$ at the range of the slenderness ratio B/D from about 2 to 6. However, at this B/D range characteristic reduced frequency $1/V_{on}$ ($=0.6/(B/D)$) is close to the Strouhal number. Vortex-induced oscillations at this B/D range seem to be, in consequence, caused by both vortices, that is Karman vortex and motion-induced vortices. In this study, the existence of two vortices was clarified and the mechanism of vortex-induced oscillation, interaction of two vortices and the effect of turbulence on this oscillation were experimentally investigated.

1. まえがき

一般に矩形断面の剥離点は上流側の隅角部に固定されているが、矩形断面周りの流れの特性はその断面辺長比 B/D (B : 幅員, D : 桁高) によって顕著な違いを見ることが知られている。矩形断面の渦励振発生機構を断面辺長比 B/D で大別すると、 B/D が0~約2、約2~約6、約6以上と3種類に分けられる。この3種類の流れのパターンに密接に関連して、カルマン渦の放出特性も異なっている。ストロハル数 ($St=fD/U$, f : 渦放出周波数, U : 接近流速) の断面辺長比に対する変化を調べると、上述の断面辺長比 $B/D=2.8$ 及び6.0付近で St 数が不連続になることが確認されている^{1) 2)}。このうち、 B/D が約2~6の断面では、物体自身の振動に伴って断面周りの剥離せん断層の不安定性が増幅され、断面前縁からの剥離渦と後縁からの剥離渦とによって自己励起型渦励振が発生する³⁾。この自己励起型渦励振の発生する桁高比の特徴は、自己励起型渦励振の開始無次元風速、 $1.67B/D$ とストロハル数の逆数で定義される $1/St$ が極めて接近していることである (図-1)。なお、 B/D が約2より小さな断面では、実用上重要な小振幅に限定した場合、前縁から剥離した流れが断面背後に巻き込んで生じるカルマン渦によって完全剥離型 (カルマン渦型) 渦励振が発生し、 B/D が約6より大きな断面では後縁から発生するカルマン渦によって、励起される再付着型 (カルマン渦型) 渦励振が発生する。

- | | | | | | |
|----|----|---------|----------|----------|-----------------|
| *1 | 工博 | 京都大学助教授 | 工学部土木工学科 | (〒606 | 京都市左京区吉田本町) |
| *2 | 工博 | 京都大学教授 | 工学部土木工学科 | (〒606 | 京都市左京区吉田本町) |
| *3 | 工博 | 京都大学助手 | 工学部土木工学科 | (〒606 | 京都市左京区吉田本町) |
| *4 | 工修 | 京都大学大学院 | | (〒606 | 京都市左京区吉田本町) |
| *5 | | (株) 熊谷組 | 技術研究所 | (〒300-22 | 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043) |
| *6 | | 京都大学大学院 | | (〒606 | 京都市左京区吉田本町) |

B/Dが約2～6の断面の渦励振発現風速付近では、前縁剥離渦とカルマン渦の放出周波数が極めて接近しているため渦励振発現風速域において、物体の振動にカルマン渦が引き込まれた状況になる場合と2種類の周波数成分を持つ渦放出が行われている場合がある。従って、この両渦の存在が、物体の渦励振応答特性に如何なる影響を与えているかを明らかにする必要がある。本研究では、振れ中心を断面後縁よりD後方に置くと(図-2, ③)渦励振応答のピークが2つ存在するような断面辺長比4の矩形断面を用い、上述の2種類の渦の存在を指摘し、更に両渦が渦励振応答特性に及ぼす影響の解明を試みた。

2. 断面辺長比4の矩形断面柱の渦励振応答特性

断面辺長比4の矩形断面は、図-3、図-4(振れ中心が断面中心にある場合)、図-5(振れ中心が断面後縁からD後方にある場合)に示すように極めて興味深い応答特性を示す。断面を撓み1自由度にバネ支持した際の渦励振応答では、渦励振開始無次元風速が $V_{on}=1.67B/D=6.68$ に対応した自己励起型渦励振が発生している。更にカルマン渦を抑制する目的で断面後縁より1.25D後方にスプリット板を挿入すると、応答振幅はスプリット板を挿入しない場合に比べて約2倍に大きくなることがわかる。振れ中心を断面中心に設定したとき(図-4)、渦励振開始無次元風速 $V_{on}=(2/3)1.67B/D$ に対応した自己励起型渦励振が発生している。なお、B/D=5の二次元矩形断面の振れ渦励振開始無次元風速が $V_{on}=(2/3)1.67B/D$ となることが、TamuraらによるCFD解析によっても報告されている⁴⁾。そして、自己励起型渦励振発現時では、図-

2, ①②に示されるように、撓み1自由度の場合は、断面の前縁、後縁でそれぞれ上面と下面に渦を形成しているのに対して、振れ1自由度(振れ中心を断面中心においた場合)の場合は、前縁、後縁ともに上面に渦を形成しており、両者は逆相となっている。そこで、撓み1自由度と同相となるように(図-2, ①③)、振れ中心を断面後縁からDだけ下流側に設定し、振れ1自由度にバネ支持した。

従って、自己励起型渦励振の発現風速は撓み1自由度時とほぼ等しい。その際の渦励振応答(図-5)は、明確に2つの応答ピークがみられ、低風速側の渦励振は自己励起型、高風速側の渦励振はカルマン渦に起因したものと判断される。このように、自己励起型渦励振の開始風速 $1.67B/D$ と $1/St$ が接近している断面において、

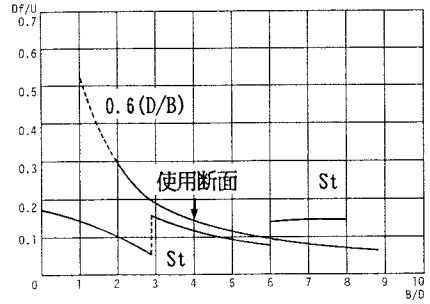


図-1 ストロール数と無次元周波数-断面辺長比B/D特性

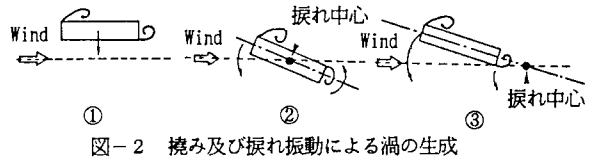


図-2 撓み及び振れ振動による渦の生成

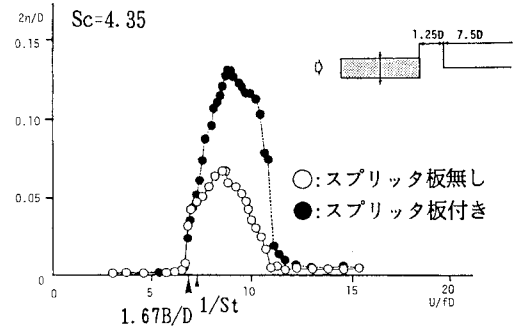


図-3 撓み1自由度応答 振幅図^{*)}

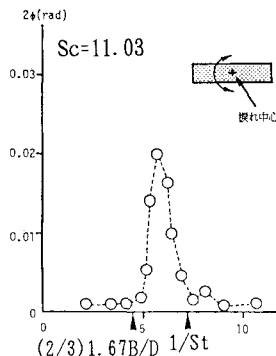


図-4 振れ1自由度応答振幅図^{*)}
(振れ中心が断面中心にある場合)

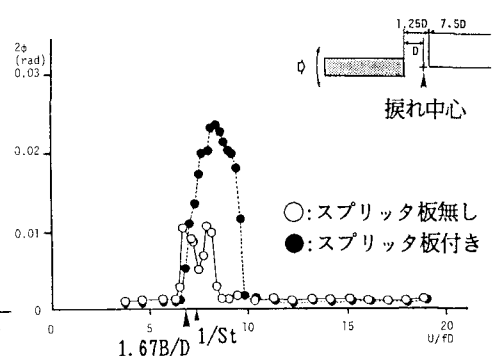


図-5 振れ1自由度応答振幅図^{*)}
(振れ中心が断面後縁よりD後方にある場合)

2種類の渦励振が分離して確認されるのは極めて稀な例であるといえよう。同様に後流域にスプリット板を挿入すると、2つの応答ピークは1つになり、応答振幅も撓み1自由度の場合と同様に約2倍に増大している。一方乱流中では、この渦励振応答は低減され、大きく安定化することが知られている⁵⁾。

3. 撓れ1自由度(撓れ中心を断面後縁よりD後方に設定)強制加振時の渦生成特性

物体の後流域において、実際にカルマン渦と前縁剥離渦の両者が同時に存在しているのか、仮に存在するならば如何なる干渉を及ぼしているかは全く不明である。そこで、撓れ1自由度強制加振されている物体上面の非定常圧力を測定し、更に、断面後縁より3D後方、断面下端よりD下方に熱線プローブを設置し(図-6)、主流方向の変動流速のパワースペクトル密度を測定した。

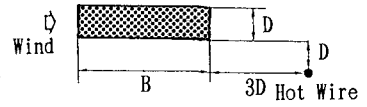


図-6 熱線プローブ設置位置

測定風速は渦励振が発現している無次元風速 $U/fD=6.1\sim 8.9$ のうち 6.8, 7.4, 8.3を選定した。 $U/fD=6.8$ は自己励起型渦励振の開始風速 $V_{on}=1.67B/D$ 、 $U/fD=7.4$ は図-5における第2ピークに至るまでの途中の風速、そして、 $U/fD=8.3$ は図-5における渦励振終了時の風速に相当する。また、加振振幅は $2\phi=0.01\text{rad}$ 、一様流中、乱流中及びそれらにスプリット板を設置した場合について測定した。但し、加振振動数は $f=8.05\text{Hz}$ である。

これら3風速における模型前面の動圧 $(1/2\rho U^2)$ で無次元化されている変動圧力係数 $\tilde{C}_p$ の分布が流れの種類やスプリット板の有無で如何に変化する

かを図-7～図-9に示す。剥離せん断層不安定性増幅領域、すなわち渦励振開始風速付近で変動圧力成分は最も大きくなっており、以後風速が上がるに従って各値は減少している。また、一様流+スプリット板、一様流中、乱流中の順に変動圧力分布の値が小さくなることは、スプリット板を挿入した際に応答振幅が大きくなること、乱流中で応答振幅が低減することによく対応している。更に、乱流中ではスプリット板の影響がほとんど無い

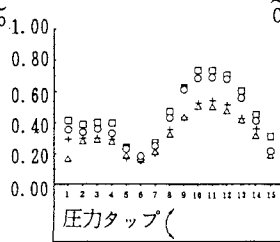


図-7 $U/fD=6.8$

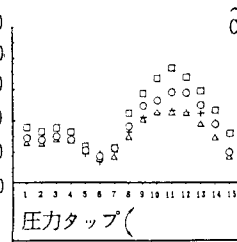


図-8 $U/fD=7.4$

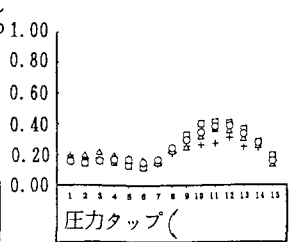


図-9 $U/fD=8.3$

撓れ1自由度強制加振時の変動圧力分布($2\phi=0.01\text{rad}$, $f_0=8.05\text{Hz}$)

(○:一様流 □:一様流+スプリット板

△:乱流(Iu=4.8%) +:乱流(Iu=4.8%)+スプリット板)

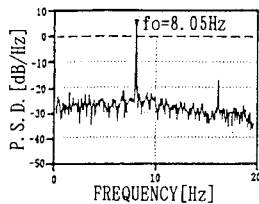


図-10 $U/fD=6.8$

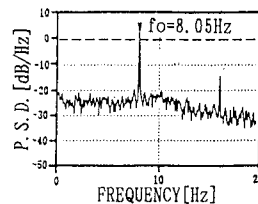


図-11 $U/fD=7.4$

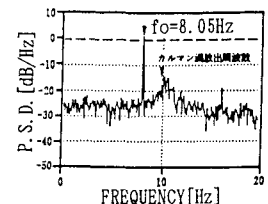


図-12 $U/fD=8.4$

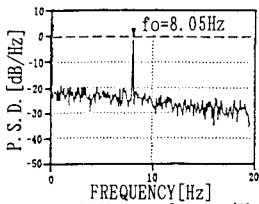


図-10 $U/fD=6.8$

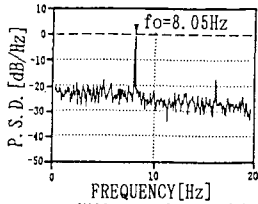


図-11 $U/fD=7.4$

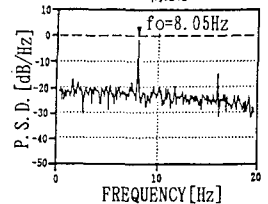


図-12 $U/fD=8.4$

撓れ1自由度強制加振時の後流域変動流速パワースペクトル密度

($2\phi=0.01\text{rad}$, $f_0=8.05\text{Hz}$)

ことから、乱流自身によってカルマン渦の放出はすでに抑制されているものと判断できる。

次にこれら3風速における主流方向の変動流速スペクトル密度図を図-10～図-12に示す。但し、ここでは、一様流中、一様流+スプリット板の場合について議論する。 $U/fD=6.8$ (図-10)は自己励起型渦励振の開始

風速であり、そこでは、カルマン渦放出周波数と物体の振動数が極めて接近しているため、パワースペクトル密度図は加振振動数8.05Hzのみで鋭いピークが立ち、カルマン渦が物体の振動に引き込まれているものと思われる。 $U/fD=7.4$ (図-11) はカルマン渦型渦励振のピーク、つまり、図-5の第2ピークへの途上での風速であり、変動流速のパワースペクトルは、物体の加振振動数に対応してピークが生じている。この風速においてもカルマン渦は物体の振動に引き込まれているものと思われる。このときの一様流中と一様流中+スプリッタ板のパワースペクトルのピーク値を比較すると、スプリッタ板を設置した場合の方が若干小さな値を示している。しかし、ここでは図を示していないが、前縁から後縁にいくに従い、圧力の位相が断面振動の位相に対する遅れが大きくなっており、渦が断面側面を流下している可能性を示唆している。更に、変動圧力分布を見てみると (図-8)、スプリッタ板を設置した場合の方が変動圧力係数は大きな値をとっているため、断面側面において、発達した渦が確認できる。この変動圧力分布の結果は、振幅応答図 (図-5) の結果と傾向的に一致している。しかし、変動流速パワースペクトルのピーク値の大小で応答振幅の値を議論することは不可能であり、また、変動流速パワースペクトルを測定した位置が後流域ということで、断面側面上で十分に発達した渦の存在が認められたとしても、後流域においては渦が拡散されやすくなるため、応答振幅図とパワースペクトルのピーク値との対応がとれていないものと考えられる。また、 $U/fD=8.3$ (図-12) は、渦励振終了時の風速であり、一様流中では前縁剥離渦成分とカルマン渦成分が分離され2種類の渦が存在している。スプリッタ板を挿入すると、カルマン渦成分は殆ど消滅していることが認められる。

次に、一様流中の各風速における、前縁剥離渦放出周波数 (加振振動数) 及びカルマン渦放出周波数の相対関係を図-13に示す。但し、各周波数は加振周波数 $f_0=8.05\text{Hz}$ で規準化し、○をカルマン渦、●を前縁剥離渦とし、両者が一致しているときは便宜上○で表現している。図-5の応答振幅図における渦励振発現開始風速付近では、カルマン渦が物体の振動に引き込まれて、明確に2つの渦は確認できていない。更に、応答振幅図より渦励振が発生していない $U/f_0D \approx 8 \sim 10$ の風速域では、カルマン渦と前縁剥離渦がそれぞれ独立して存在している。しかしスプリッタ板を設置すると、例えば $U/fD=8.3$ (図-12) に示した様にカルマン渦の放出が完全に抑制されている。また、図-5において、渦励振が発現していることからカルマン渦は、自己励起型渦励振の応答振幅を低減させる効果を持つことが明らかとなった。

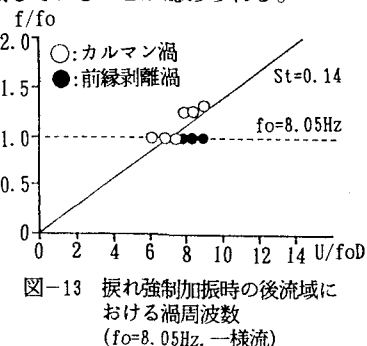


図-13 振れ強制加振時の後流域における渦周波数 ($f_0=8.05\text{Hz}$, 一様流)

4. 音響付加による物体周りの剥離せん断層の刺激

物体後流域における変動流速のパワースペクトル密度特性と渦励振応答特性の関係から、カルマン渦の自己励起型渦励振に対する干渉を明らかにした。しかし、無次元風速 $U/fD=6 \sim 7.5$ 付近では、物体自身の振動にカルマン渦が引き込まれており、カルマン渦の巻き込みによる影響が出ているものと思われる。従って物体の振動によるカルマン渦の巻き込みを排除した状態で、2種類の渦の存在を示し、スプリッタ板による効果を明らかにする必要がある。そこで、断面を風洞内に固定支持し、その断面の上下面を音響で逆相刺激することにより、断面周りの剥離せん断層の不安定性を増幅し、前縁剥離渦を発生させた。そして、断面後流域での変動流速パワースペクトル密度を測定した。但し、音響周波数は $f_s=16\text{Hz}$ で固定とし、風洞内風速 U_m/s を変化させて、無次元風速 U/f_sD を変化させた。実験ケースとしては、一様流中、乱流中及びそれらにスプリッタ板を設置した場合について無次元風速 $U/f_sD=2.3 \sim 11.1$ の22風速で測定した。各無次元風速で得られた変動流速パワースペクトル密度の周波数 $f=f_s$ でのパワースペクトル密度値 $Sp(f_s)$ の変化を調べた。図-14に一様流中における実験結果を示す。この図において、自己励起型渦励振の開始風速である

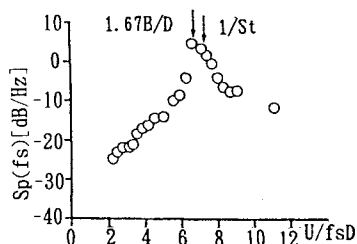
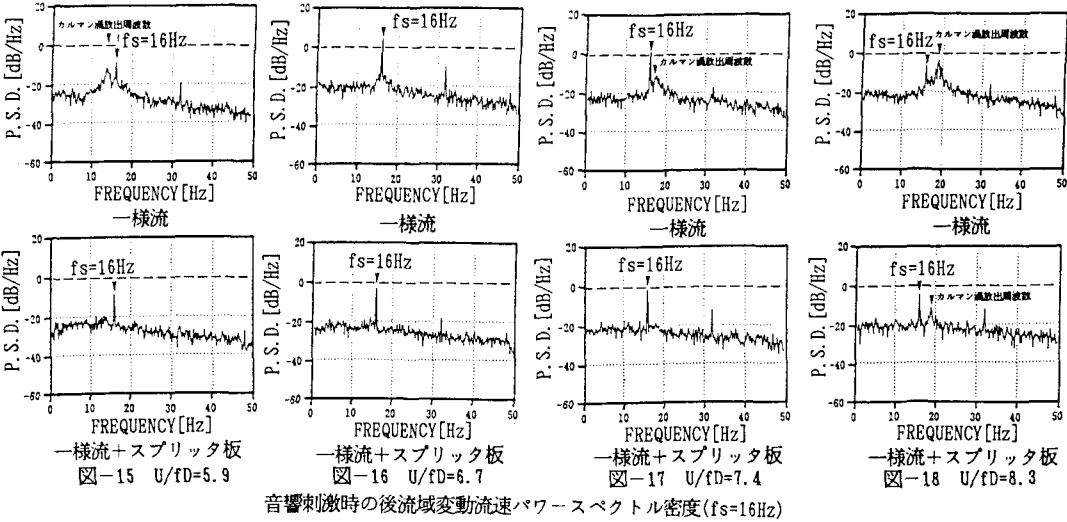


図-14 後流域変動流速の $Sp(f_s)$ と風速の関係 (一様流)

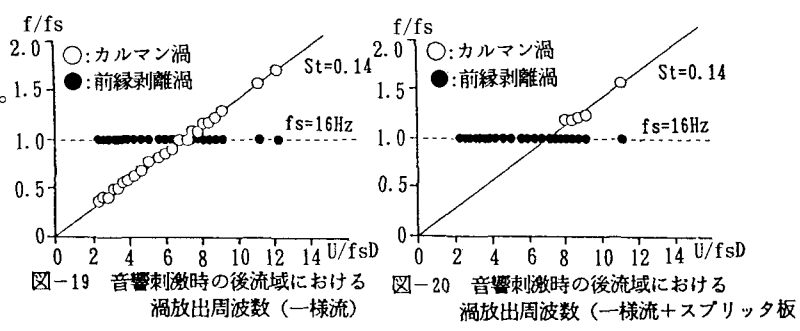
1.67B/D付近に $Sp(fs)$ のピークが見られる。この傾向は、一様流中に限らず、乱流中とそれらのケースにスプリッタ板を設置したときも同様である。この図より、B/D=4の矩形断面の渦励振は基本的に自己励起型渦励振であることが確認できる。

次に無次元風速 $U/fsD=5.9, 6.7, 7.4, 8.3$ の一様流中、一様流+スプリッタ板のみの主流方向の変動流速パワースペクトル(図-15~図-18)について議論する。 $U/fsD=5.9, 8.3$ は、渦励振発現前と発現終了時の無次元風速、 $U/fs=6.7$ は、自己励起型渦励振の開始無次元風速1.67B/D、そして、 $U/fs=7.4$ は、カルマン型渦励振のピーク、つまり、図-5における第2ピークへと向かう途中無次元風速に相当する。 $U/fs=5.9, 7.4, 8.3$ (図-15、図-17、図-18)の一様流中では、前縁剥離渦とカルマン渦の両渦が確認される。スプリッタ板設置時



ではカルマン渦がある程度抑制されているのが確認できる。ただ、 $U/fs=5.9, 7.4$ の場合では、カルマン渦の放出周波数がそれほど明確なピークを示していないのに対して、 $U/fs=8.3$ の場合は、明確なピークが確認できる。このことから、断面とスプリッタ板の間に、間隔が存在する場合、高風速になる程、スプリッタ板の効果は弱くなり、カルマン渦を完全には消滅させることはできなくなるものと判断できる。また、 $U/fs=7.4$ では、音響刺激による前縁剥離渦の変動流速のパワースペクトルのピーク値は、一様流中に比べ、一様流中+スプリッタ板の方が若干小さな値をとっており、3節における強制加振時でのピーク値(図-11)と同様の傾向を示しており、応答振幅図(図-5)との対応がとれていない。音響刺激時においてもスプリッタ板を挿入した場合、断面側面では前縁剥離渦は増幅されていると考えられるが、後流域においては、渦が拡散され易いため、図-17のような結果になったものと思われる。ただ、今後の課題として、断面側面上の変動圧力のパワースペクトル密度を測定し、応答振幅図との対応のとれ得ることを確認することが必要であろう。

$U/fs=6.7$ (図-16)においては、カルマン渦と前縁剥離渦の放出周波数が一致している。つまり、前縁剥離渦が支配的であると判断できる。また、一様流中の各風速における、前縁剥離渦放出周波数(音響周波数)及びカルマン渦放出周波数の相対関係を図-19に



示す。但し、各周波数は音響周波数 $f_s=16\text{Hz}$ で規準化している。この図より、直線 $f/f_s=1$ ($f_s=16\text{Hz}$) と直線 $St=0.14$ の交点 ($U/f_s D=6.7$) でのみカルマン渦と前縁剥離渦の周波数が一致しており、その他の風速域ではカルマン渦と前縁剥離渦の両者が同時に存在している。従って、全ての風速域で両渦が同時に存在することが明らかとなった。また一様流中で、物体の後流域にスプリッタ板を挿入した場合の結果を同様に図-20に示す。この図より無次元風速 $U/f_s D=8$ 以下では、カルマン渦が完全に消滅しているが、それ以上の風速域ではカルマン渦が発生している。つまり、断面後縁とスプリッタ板間に、 $1.25D$ の距離が存在する場合には高風速になるほど、スプリッタ板はカルマン渦を完全に消滅できないものと思われる。

5. まとめ

- (1) 振れ1自由度（振れ中心は断面後縁よりD後方）強制加振されている断面の後流域における、変動流速パワースペクトル密度を測定し、渦放出特性を調べた。その結果、一様流中で明確に確認されるカルマン渦は、スプリッタ板の設置によってほぼ完全に消滅することが確認できた。
- (2) 振れ1自由度（振れ中心は断面後縁よりD後方）強制加振時においては、自己励起型渦励振発現風速付近でカルマン渦が物体の振動に引き込まれ、加振振動数成分の渦放出のみしか確認できないが、渦励振終了後の風速域ではカルマン渦、前縁剥離渦の両者が同時に存在している。更に2種類の渦励振終了後の風速域において、スプリッタ板を挿入した場合、カルマン渦の生成が完全に抑制されているのが確認され、かつ応答振幅図より渦励振の発現が認められている。従って、カルマン渦を抑制すると、自己励起型渦励振が増幅されることが明らかとなった。
- (3) また、振れ1自由度（振れ中心は断面後縁よりD後方）強制加振時の断面側面の変動圧力分布より、乱流中、乱流+スプリッタ板の変動圧力係数はともに一様流中に比べ、低減している。よって、乱流は前縁剥離渦の生成を抑制するものと考えられる。更に乱流中では、スプリッタ板の効果は顕著でなく、カルマン渦は乱流自身によって抑制されているものと判断できる。
- (4) 物体の振動によるカルマン渦の巻き込みを排除する目的で、断面を固定支持し、音響付加によって断面周りの剥離せん断層の不安定性を増幅させた。その結果、全ての風速域でカルマン渦と前縁剥離渦が同時に存在していることが認められ、更にスプリッタ板を挿入した際には、カルマン渦の生成が抑制されることが確認された。従って(2)の結果と合わせると、カルマン渦は前縁剥離渦に干渉し、自己励起型渦励振の応答振幅を低減させる効果を持つことが明らかとなった。

<参考文献>

- 1) Michalke, A.: The Instability of Free Shear Layers, A Survey on The State of Art, Deutsche Luft-und Raumfahrt, Marz, 1970
- 2) Rockwell, D. and Knisely, C.: The Organized Nature of Flow Impingement upon a Corner, Journal of Fluid Mechanics Vol. 93 part 3, 1979, pp. 149~169
- 3) 社団法人 日本道路協会: 道路橋耐風設計便覧, 1991年7月
- 4) T. Tamura, Y. Itoh, A. Wada and K. Kuwahara: Numerical Investigation on the Aeroelastic Instability of Bluff Cylinders, First International Symposium on Computational Wind Engineering Tokyo, 1992, pp. 505~510
- 5) Matsumoto, M., Shiraishi, N. and Shirato, H.: Bluff Body Aerodynamics in Pulsating Flow, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 28, 1988, pp. 261~270
- 6) 松本 勝, 白石成人, 白土博通: 主流方向脈流中におけるBluff Bodyの空力特性, 第9回風工学シンポジウム論文集, 1986年12月, pp. 175~180

(1992年9月21日受付)