

極超臨界レイノルズ数領域における円柱構造物後流域 大規模渦の水面流況現地観測

The Surface Flow Structure of Large Scale Vortices at the rear of a Cylindrical Pier for the
Flow of Transcritical Reynolds Number

石野和男* 藤田一郎** 河口浩二***

by Kazuo ISHINO, Ichiro FUJITA, Kouji KAWAGUCHI

The surface flow structure of large scale vortices at the rear of a cylindrical pier is studied for the flow of transcritical Reynolds number is over 10^8 . The field observation around AKASHIKAIKYOU OHASHI bridge pier was carried out. Water surface images are taken from top of the main tower using a video camera. And an image analysis method using a correlation method for the calculation of two dimensional velocity distribution of surface is examined. In the rear side of the pier, large scale vortices like Karman vortices could be seen by video and MEM spectrum of surface velocity fluctuation.

Keywords : transcritical Reynolds number, field observation, large scale vortex, cylindrical pier, Strouhal number.

1. はじめに

円柱周辺の流れに関する研究は古くから行なわれていて、レオナルドダビンチのスケッチに詳細な橋脚周辺の水面運動の観察記録が残されている¹⁾。その後の Von Karman の Karman Vortex street の研究につづいて、Roshko²⁾はレイノルズ数（以下、 R_e 数と略す）の違いにより円柱に働く抵抗が変化することに着目し、 R_e 数が 3.8×10^5 を超える領域を transcritical（極超臨界）領域と名付けた。

R_e 数を高めるためには、接近流速を高め、かつ円柱径を大きくする必要がある。このため風洞実験では、 R_e 数が 10^7 以下の領域にとどまっている。 R_e 数が 10^7 ($R_e = 1.1 \sim 2.8 \times 10^7$) の領域では眞田ら³⁾による大型煙突へ風が作用した状態での現地計測値が見られる程度である。なお、円柱構造物ではないが Tsuchiya⁴⁾は R_e 数が 2.0×10^{10} における衛星写真を用いて済州島の後流域にカルマン渦に相当する大規模渦が発生していることを示している。そして、 R_e 数が 2.0×10^{10} 領域におけるカルマン渦の発生は、接近流自体が乱流であ

* 正会員 工博 大成建設株式会社技術研究所
(〒245 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

** 正会員 学博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

*** 本州四国連絡橋公団第1建設局垂水工事事務所第2工事長
(〒655 神戸市垂水区平磯1丁目1の66)

り、動粘性係数のかわりに渦動粘性係数を用いると、レイノルズ数が200程度となり、実験室の現象との対応関係が成り立つとされている⁵⁾。

Ishino et al⁶⁾は、世界で初めて R_e 数が 10^8 領域での円柱構造物（現在建設中の明石海峡大橋3P主塔基礎）周辺の流れを現地観測し、その流れ構造を考察した。ここでIshino et al⁶⁾は、3Pケーソン近傍の流れの目視観測および①入射潮流速、②ケーソン側壁の水面形状、③ケーソン回りの水面下5mの表層流速、④ケーソン回りの捨石上面から1.5mの底層流速を計測した。その結果の概要を示すと、入射流速が3.3m/sec時の3Pケーソンからのはく離渦の発生周期は約30sec前後であった。水面変動には、このはく離渦発生周期の4倍周期の変動が見られた。この大スケールの変動周期を用いて求めたストローハル数 S_t ($S_t=f \cdot D/u$ ここで、 f : 渦の発生周波数、 D : 円柱径、 u : 入射流速)は0.21であった。この値は R_e 数が $1.1 \sim 2.8 \times 10^7$ での眞田らの計測値 $S_t=0.19 \sim 0.26$ にほぼ等しい。このことから R_e 数が 10^8 領域でも $S_t=0.21$ 程度の大規模な渦による変動が後流域に発生していることを示唆した。しかし、ケーソン後流域の大規模渦を観測するまでには致らなかった。その後、筆者の1人は3Pケーソンに建てられた高さ約300mの主塔上から、ケーソン後流域の大規模渦の発生流況を写真およびビデオ撮影する機会を得た。本研究では、この3P主塔上から撮影した写真およびビデオ画像を用いて大規模渦の発生流況を考察するとともに、藤田ら⁷⁾が開発した相関法を応用した画像解析法を用いて、3P後流域の大規模渦の発生状況を定量的に考察した。

2. 明石海峡大橋3P主塔基礎ケーソンおよび主塔

明石海峡大橋は、図-1、2に示す様に神戸市垂水区と淡路島を結ぶ中央径間1990m、全長3910mの吊橋である。3Pは、図-3に示すように、直径78m、全高62mの鋼製ケーソンを用いた主塔基礎であり、水深37mの海底面を20mの深さで事前掘削した水深57mの海底面上に設置されている。

明石海峡では、最大8kt (4.1m/sec) に達する潮流が発生するため、主塔基礎の周辺の海底面には洗掘防止工を設置する必要があった。洗掘防止工は、50mm～150mmの碎石を網袋の中に入れて一袋の重量を約1tonとしたフィルターユニットと呼ぶ網袋式洗掘防止工と、1ton～2tonの捨石洗掘防止工で構成している。フィルターユニットは、掘削海底面から2mの厚さで、ケーソンの外周に5mの幅で設置し、捨石はフィルターユニットの上、厚さ約8mとし、掘削孔を約半分程度埋戻す形状に施工した⁸⁾。

図-2に示すように、主塔の全高は283mで頂上の標高はTP+297.2mである。

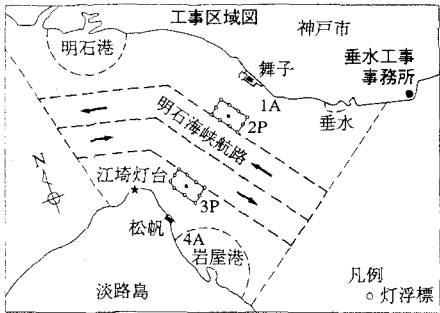


図-1 明石海峡大橋位置図

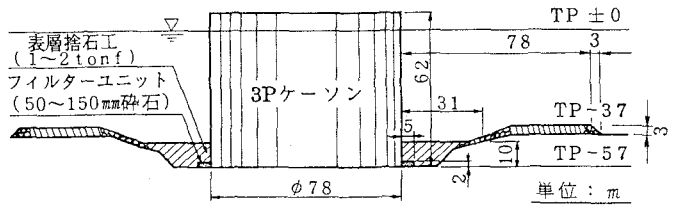


図-3 3Pケーソンおよび捨石洗掘防止工

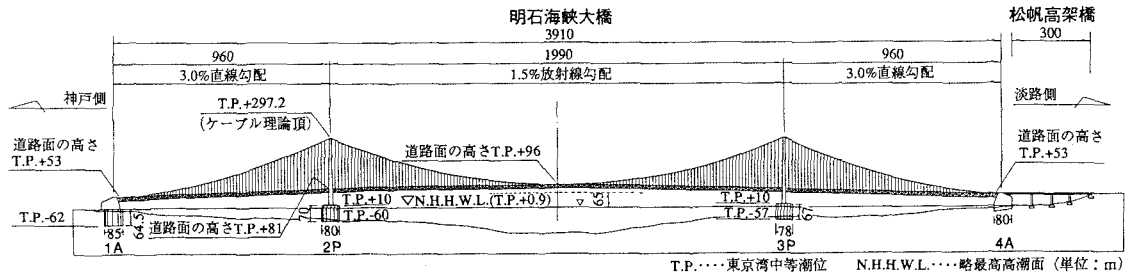


図-2 明石海峡大橋縦横断面図

3. 現地観測方法

観測は、1994年5月の大潮時すなわち、5月24日10:30~14:45の間に実施した。なお、この間の潮流は東流（大阪湾へ流入する流れ）で潮流予測ではピーク流速は12:32頃に発生しピーク流速値は3.2m/s（6.2kt）であった。

観測項目は、3P主塔上からの3P後流域の水面流況および2P後流域の水面流況である。3P後流域の水面流況は、カメラおよび8mmビデオカメラで、2P後流域の水面流況は、カメラで撮影した。

4. 写真およびビデオ画像を用いた水面流況の考察

4.1 ケーソン後流域の水面概況

写真-1a), b), c), d), e)に3Pケーソン主塔上から観測した2Pケーソン後流域の水面流況を示す。写真-1から以下の事項が示される。

- a)には、ケーソン中心から、下流側1.75D~3.5Dの範囲に、カルマン渦に相当する明確な大規模渦（左旋渦：反時計廻り）が観察される。
- a)から40秒後のb)には、上記の左旋渦が流下し、右転渦が発生し始めている。
- a)から90秒後のc)には、右転渦が明確に形成されている。
- a)から130秒後のd)には、右転渦も流下し、新たな左旋渦が発生し始めている。
- a)から180秒後のe)には、a)とほぼ同様な左旋渦が新たに形成されている。

以上から、大規模渦は約180秒で発生していることになる。

なお、写真-1から、右転渦に比べ左旋渦の方がより明確である。これは西村ら⁹⁾が指適しているコリオリ効果の影響と考えられる。

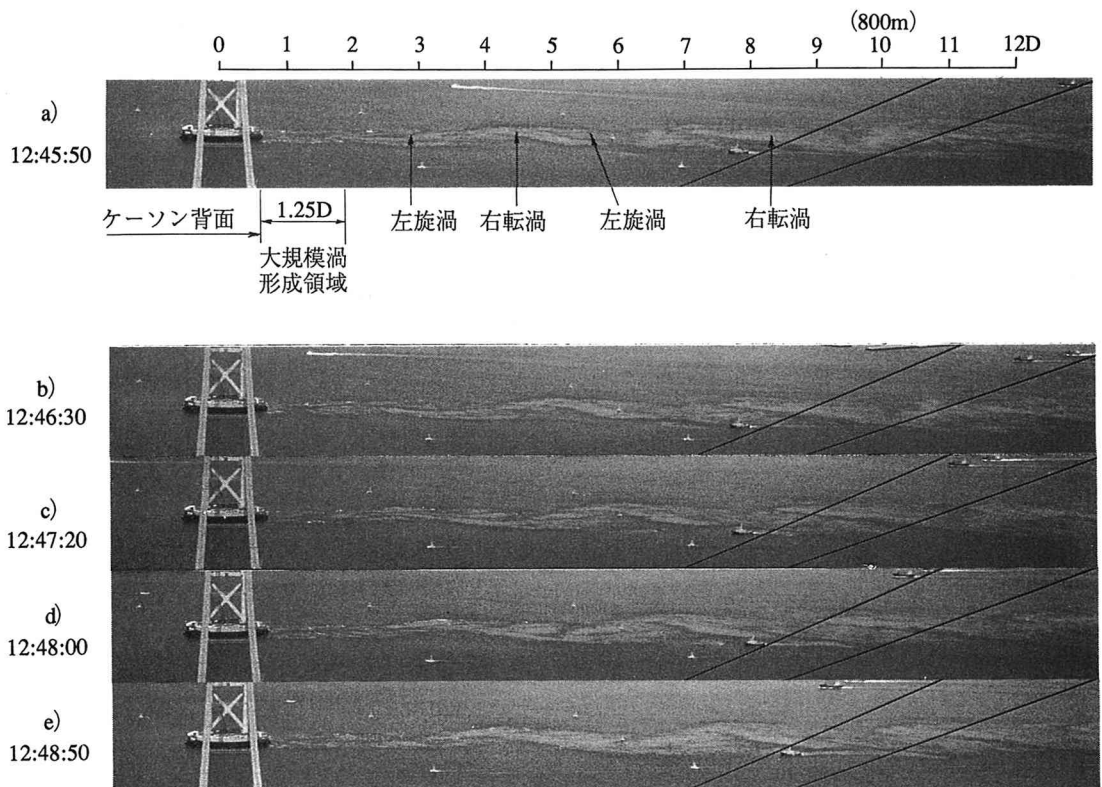


写真-1 3P主塔上から撮影した2Pケーソン後流域の水面流況

4.2 ケーソン背後の水面流況

写真-2f, g), h), i), j)に, 3Pケーソン主塔上から観測した3Pケーソン中心から約7D下流までの背後の水面流況を示す. 写真-2およびビデオ画像から以下の事項が示される.

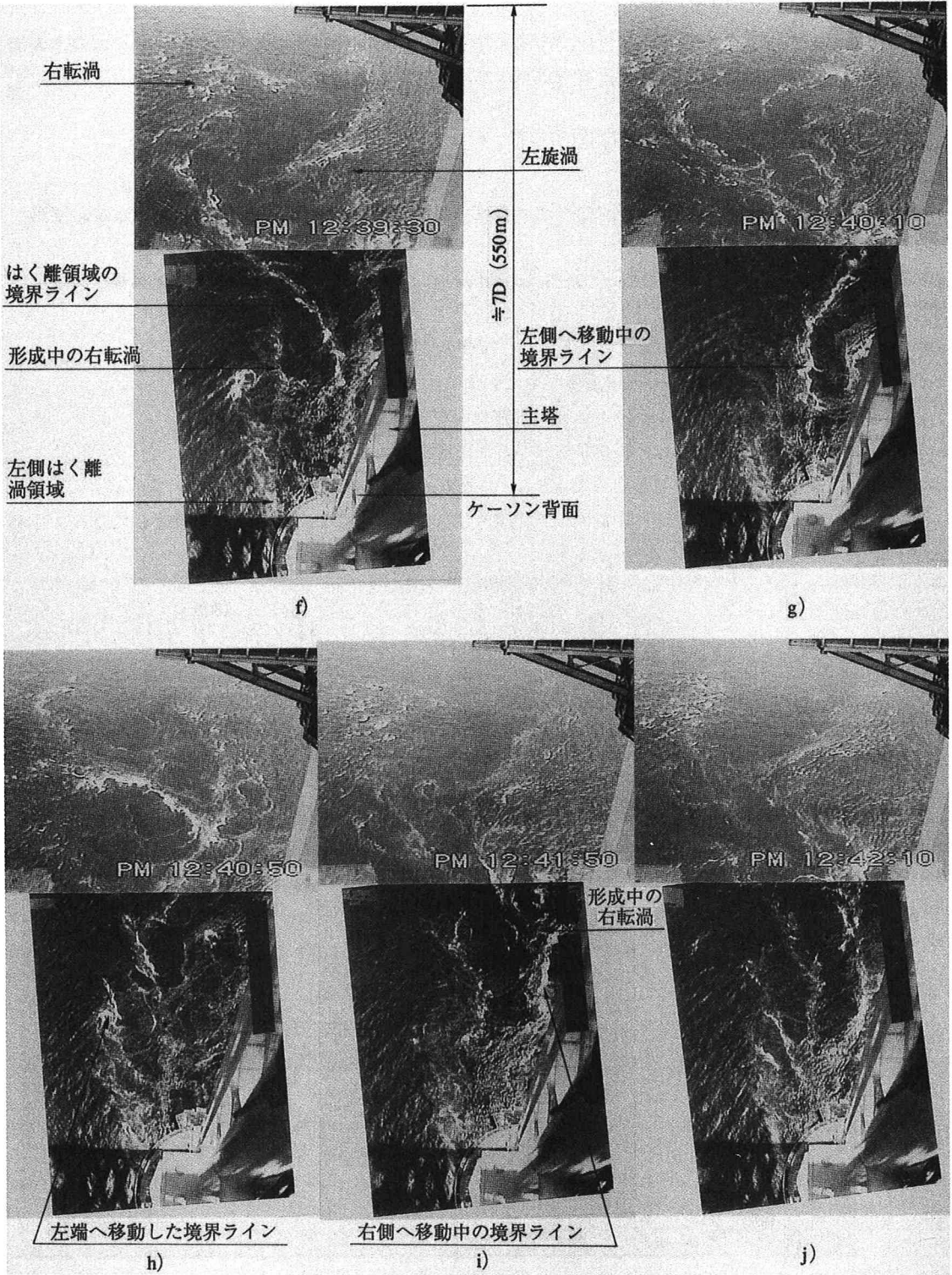


写真-2 3P主塔上から観測した3P背後の水面流況

- f)には、ケーソンから下流に向って左側に右転渦が形成され始めている。はく離渦の流下領域とその下流に左旋渦またその下流に右転渦が観察される。なお、写真中央には、ケーソン背後の左側のはく離渦領域と右側のはく離渦領域の境界を示すライン（以下境界ラインと略す）が白泡で可視化されている。
 - f)から、40秒後のg)では、ケーソン背後での境界ラインがより左側へ移動し始めている。なお、この間にもケーソンからのはく離渦は約20秒の間隔で流下している。
 - f)から80秒後のh)では、境界ラインが左側へ移動するとともに、境界ラインの右側に左旋渦が形成され始めている。またf)の左旋渦が発生していた場所に右転渦が形成されている。この時左側のはく離領域には、約4個のはく離渦が閉じ込められた形となる。
 - f)から、120秒後のi)ではケーソン背後で右側に比べ左側のはく離渦領域のエネルギーがより小さな範囲に閉じ込められ、このエネルギーが反発して、境界ラインが右側へ移動し始めている。
 - f)から、140秒のj)では、さらに境界ラインが右側へ移動し、境界ラインの右側に明確な左旋渦が形成されている。
 - f)から、160秒後のk)では、ほぼf)と同様の流況が新たに形成されている。
- 以上まとめると
- ケーソン中心から約1.75Dの範囲では、ケーソンから約20秒の間隔ではく離した渦の領域のエネルギーが左、右でアンバランスとなり、約1.75Dより下流に約20秒の8倍の約160秒の間隔ではく離渦が合体し、カルマン渦に相当する右転、左旋の大規模渦が発生している。

5. 画像解析手法を用いた大規模渦発生状況の解析

5. 1 画像解析手法の概要

写真-2からも明らかなように、水面には大規模渦に伴って白泡が生じており、4.2ではその変化の状況を示した。ここではその白泡パターンを大規模渦の変動に対応するトレーサとみなし、画像解析手法の一つである相関法を適用して定量的な時系列解析を試みた。解析では、まず、ビデオ画像をパーソナルコンピュータ（NEC,PC9801RA21）に登載した画像処理ボード（DETECT製）を用いて512x512画素、256階調のモノクロ画像データに量子化した。ただし、画面に写し込まれている構造物等を解析領域から除外するために、任意形状の領域をマウス操作で設定できるように工夫した。解析対象は、12:30:00を開始時刻とする約30分間の映像とした。画像の量子化は2秒間隔で行い、約1000枚のフレーム画像を得た。解析では、各フレーム画像を奇数・偶数フィールドに分離し、フレーム画像と同一サイズとなるように補間調整した1秒間隔約2000枚の画像を用いた。すなわち以下の解析では、サンプリング周波数1Hzで約1000枚の瞬間ベクトルを利用した。

ビデオ映像としてはケーソン背後のものとケーソン後方のものを得ているが、前者の映像は多少斜め撮影になってはいるものの、撮影高度が高いことから歪補正は行わず、ケーソン直径（78m）をスケールとして一画素サイズは0.336mを得た。相関法のパターンマッチングに用いる参照フレームサイズは25×25画素としたので、得られる各流速ベクトルは約8.4m四方の流れ場を代表する値とみなせる。

5. 2 二次元流速分布

写真-2のf)、h)に対応する画像解析領域内の瞬間的な流速分布をそれぞれ図-4 α), β)に示す。これより、左右のはく離領域の空間的な揺動の様子をとらえることができる。はく離の境界ライン付近においては、 α)ではケーソンの中心軸に向かう流れ、 β)では外側に向かう流れが卓越しており、約80秒間で流向が反転していることがわかる。また、図-4 β)の(X, Y) = (1.5D, 0)の付近で見られる発散傾向のベクトルは湧昇流（ボイル）が水面に衝突した結果得られたもので、これはビデオ画像でも確認できた。

5. 3 定点流速の時間変動特性

図-5に画像解析で得られた3点の流速時系列の一例を示す。ただし、座標系はケーソンの中心を原点

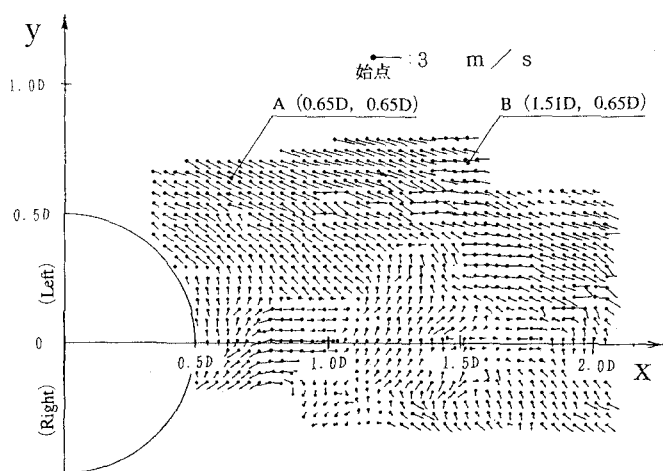


図-4 α) 画像解析により求めた平面二次元流速分布
(写真-2・f)に対応)

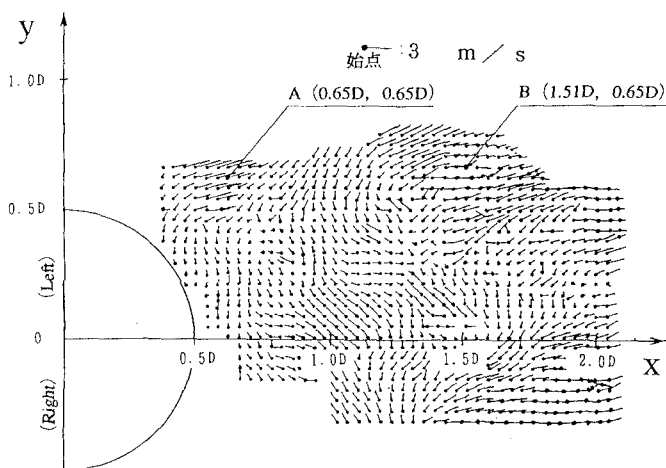


図-4 β) 画像解析により求めた平面二次元流速分布
(写真-2・h)に対応)

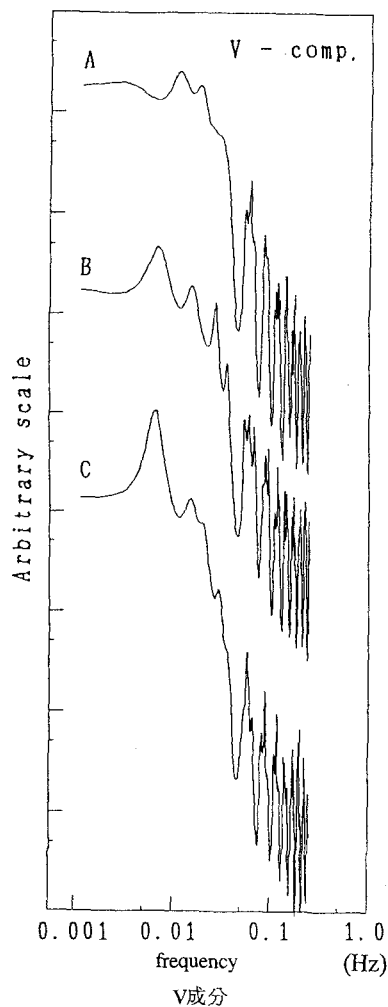


図-6 画像解析から求めた定点A,B,Cの
流速のMEMスペクトル解析図

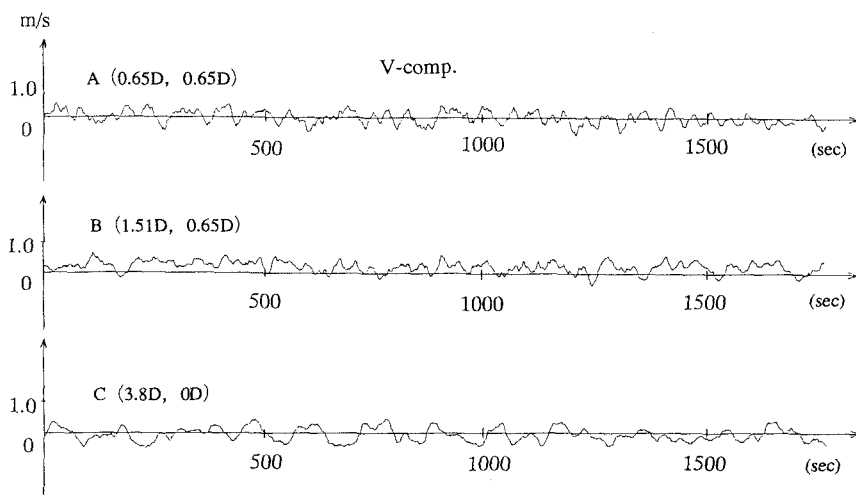


図-5 画像解析から求めた定点A,B,CのY方向流速成分Vの時系列値

とし、流下方向にX軸（U成分）、横断方向にY軸（V成分）をとり、高周波成分を除去するために移動平均処理を施している。これより、ケーソンから離れるにつれて低周波成分が卓越していく様子が良好にとらえられている。これらの周波数特性を調べるために求めたMEMスペクトルを図-6に示す。各スペクトルには複数のピーク値が現れているが、ケーソン近傍の点A（0.65D, 0.65D）ではピーク周波数が0.012Hz程度すなわち周期約80秒であり、4.2における考察を裏付ける結果が得られた。ケーソンから少し離れた点B（1.51D, 0.65D）ではピーク周波数は0.007Hz程度（ストローハル数 $S_t=0.17$ 、周期約140秒）と低周波側にシフトしている。この周期は写真-2および図-4の結果から推定できる周期160秒とほぼ一致している。

ケーソンからさらに離れた点C（3.8D, 0）ではピーク値の突出が著しくなる一方で、第二、第三のピークの減衰が見られる。これは、流下とともに離渦の合体および小規模渦の減衰が進行し、結果的に、より大規模な変動が顕著になったためと考えられる。ただし、点Bと点Cは距離があまり離れていないためか、ピーク周波数の低周波側へのシフト傾向は見られなかった。

6. 大規模渦発生周期とストローハル数の考察

Ishino et al⁶⁾は、1989年10月の入射流速3.3m/secの西流時に現地計測したケーソン周りの水面、流速変動スペクトルおよびケーソンからの離渦の周期が約30秒であることから、ケーソンの後流域に30秒の4倍周期の大規模渦が発生していることを示唆した。この結果から求めたストローハル数は $S_t=0.21$ で R_{eT} 数が 10^7 レベルの計測値 $S_t=0.19\sim0.26$ にほぼ等しい値を示した。

一方、1994年5月の入射流速3.2m/sec東流時に現地観測した本観測結果では、ケーソンの左側からの離渦の周期は約20secで、カルマン渦に相当する大規模渦の発生周期は20secの8倍の160secであった。

この結果から求めたストローハル数は、 $S_t=0.15$ である。両計測の条件の違いを求めると

。計測月が5月と10月で季節が異なる。

。流向が西流と東流で異なる。

。1989年5月の計測時に、ケーソン周りには、大きな粗度となる構造物が付加されていなかった。一方1994年5月の計測時には、水面下5m程度までであるがケーソン周りに足場の支持材が付加され、水面付近の粗度および乱れ促進効果を示している。

木村⁵⁾が指適しているように高レイノルズ領域において、入射流が乱流であることから動粘性係数 ν のかわりに渦動粘性係数 $\nu_T=10^7\text{cm}^2/\text{sec}^{10)}$ を用いて R_{eT} 数を評価すると、本観測条件下では

$$R_{eT} = \frac{u \cdot D}{\nu_T} = \frac{3.2 \times 10^2 \times 78 \times 10^2}{10^7} = 250$$

となる。

ここで、 ν_T の値に変化があると R_{eT} は、大きく変化する。また R_{eT} が 10^2 オーダーでの S_t 数は、大きく変化している。このため、1989年10月の観測データから求めた S_t 数と1994年5月のデータから求めた S_t 数に違いが生じたと推測される。

7. 結論

明石海峡大橋3P主塔上から、2Pおよび3Pケーソン後流域のカルマン渦に相当する大規模渦を観測して以下の結論を得た。なお、本観測時の動粘性係数を用いたピアレーノルズ数は、 $R_e=2.5 \times 10^8$ である。また、動粘性係数のかわりに渦動粘性係数 $\nu_T=10^7\text{cm}^2/\text{sec}$ を用いた乱流ピアレーノルズ数は、 $R_{eT}=250$ である。

(1) 3Pでは、ケーソン中心から約1.75Dの範囲内で、ケーソンから約20秒間隔ではく離れた渦領域のエネルギーが左右でアンバランスとなり約1.75Dより下流域に約20秒の8倍の約160秒の間隔でカルマン渦に相当

する右転、左旋の大規模渦が発生する現象が観測された。

(2) 相関法を応用した画像解析法を用いて、ビデオ画像を解析して以下の結果を得た。

○各流速ベクトルを約8.4m四方の代表値として求めた瞬間的な二次元流速分布図は、ビデオ画像に見られるはく離渦の境界ラインの動きや湧昇流を表現できた。

○サンプリング周波数1Hzで1000枚の瞬間二次元流速ベクトル図の値を用いてMEMスペクトル図を求めた。その結果、ケーソンから離れるにしたがい、大規模渦に相当する長周期のスペクトルピークが卓越し、はく離渦に相当する短周期のスペクトルピークが減衰する現象が求められた。

(3) 1989年10月の現地観測では、入射流速が3.3m/secの西流でケーソンからのはく離渦の発生周期が約30秒であったのに対して、今回の1994年5月の現地観測では、入射潮流速が3.2m/secの東流で、はく離渦の発生周期は約20秒であった。また、それぞれ水面変動、流速変動のスペクトルにはく離発生周期の偶数倍の大規模変動が観測された。はく離渦の発生周期の違いは、季節（水温、水質等）の違い、東西流の違いやケーソン周りの足場支持材の有無による渦動粘性係数の変化が起因していると推測された。

参考文献

- 1) 桶津家久（1989）：水理学における乱流研究の動向、ながれ8, pp.106～120
- 2) Roshko,A.（1961）：Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds J.Fluid Mech.10, 345.
- 3) 眞田早敏, 中村 修, 吉田正邦, 坪倉 久, 高野秀男（1982）：大型RC煙突に作用する風圧力と煙突振動, 風工学シンポジウム論文集, pp.139～145
- 4) Tsuchiya,K.（1969）：The clouds with the shape of Kármán Vortex Street in the Wake of Chejû Island, Korea. J.Meteor. Soc. Japan, 47, 457～465.
- 5) 木村竜治（1985）：改訂版流れの科学, 東海大学出版会, pp.2～25
- 6) Kazuo Ishino, Hideo Otani, Ryota Okada, Yoshitaka Nakagawa（1993）：The flow structure around a cylindrical pier for the flow of transcritical Reynolds number, Proceedings of XXV Congress of International Association for Hydraulic Research, Vol.V pp.417～424.
- 7) 藤田, 河村（1992）：画像処理による合流部大規模剥離渦の運動特性に関する研究, 水工学論文集, 第36巻, pp.187～192.
- 8) 石野和男, 後藤英一, 中川良隆, 岡田凌太（1993）：急潮流下海洋構造物周辺の捨石洗掘防止工に関する研究, 土木学会論文集, NO.462/VI-18, pp.33～42.
- 9) 西村 司, 大西外明, 田中総太郎（1981）：自然界の流れへのcoherent構造モデルの適用と可視化手法としてのリモートセンシング, 第36回水理講演論文集, pp.187～192.
- 10) 中辻啓二, 栗田秀明, 狩野晋一, 村岡浩爾（1991）：大阪湾バイエリア開発構想に係わる水環境の変化予測, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.206～210.