

剥離渦と2次流構造に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TIDAL VORTEX IN A STRAIT

岸本秀隆¹・石垣泰輔²・馬場康之³
Hidetaka KISHIMOTO, Taisuke ISHIGAKI and Yasuyuki BABA

¹学生員 京都大学大学院 修士課程 工学研究科土木工学専攻
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所附属災害観測実験研究センター
(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

³正会員 工修 京都大学助手 防災研究所附属災害観測実験研究センター

In a strait where geometric characteristics enhance vortex pairing and stretching, strong vortices can be observed in a quite stable manner. In this paper vortex behavior in the wake of a flat plate set up perpendicular to the flow is studied by flow visualization and velocity measurements. The experiments are conducted in three boundary conditions, i.e. a rectangular channel, a compound channel and a rectangular channel with being locally shallow around the flat plate. The results show that vortex pairing and stretching are more stable in the last case than the others. The results also indicate that secondary flow structure brought by the basic boundary condition strongly affects the local behavior of the vortices, especially in the stretching process.

Key Words : tidal vortex, secondary flow, vortex pairing, vortex stretching, flow visualization velocity measurement

1. はじめに

海洋における単独渦のスケールは2000km規模の海洋循環から、10m程度の潮汐渦(渦潮)まで広範囲である。例えば鳴門海峡では、世界5大潮流の1つに数えられる強い潮流が発生し、大規模な渦潮が観測されることで知られている¹⁾。航空写真やLandsatデータ等を用いたリモートセンシングによるこれまでの研究により、海峡部における剥離渦の生成・発達の過程が明らかにされ、海峡を通した海水交換への寄与が非常に大きいことが指摘されている^{2), 3)}。海峡周辺の海底地形は変化に富んでおり(図-1)、3次元的で複雑な流れを発生させ、鉛直軸をもつ剥離渦に大きな影響を与えていると考えられる。しかしながら、従来行われてきた海峡部で発生する剥離渦を対象とする水理実験³⁾や数値実験⁴⁾は、平面2次元的な検討が中心になされてきた。本研究は、海峡部における剥離渦と海底地形に起因する局所的な2次流の発生機構及びそれらの相互干渉を明らかにするために、一方向流の水路内に海峡部の海底地形を考慮した装置を設置し、流れの可視化および速度計測を用いた実験的検討を行った

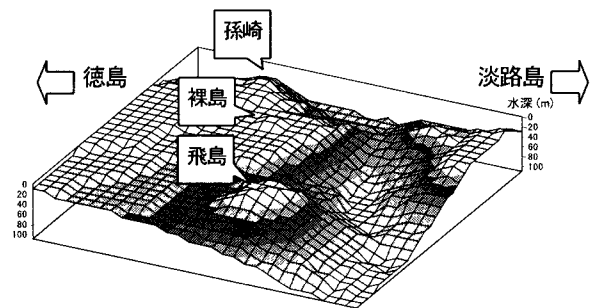


図-1 鳴門海峡島瞰図

ものである。なお、本研究で検討する2次流構造は、時間平均値のみでなく、平均化により見落とされる瞬間値も含むものとする。

2. 実験装置および方法

実験は、直線水路内の一方向流中に3種の海底形状モデルを設置し、流れに直角に置いた仕切板の先端より発生する渦を対象とした。3種の海底形状とは図-2に示す

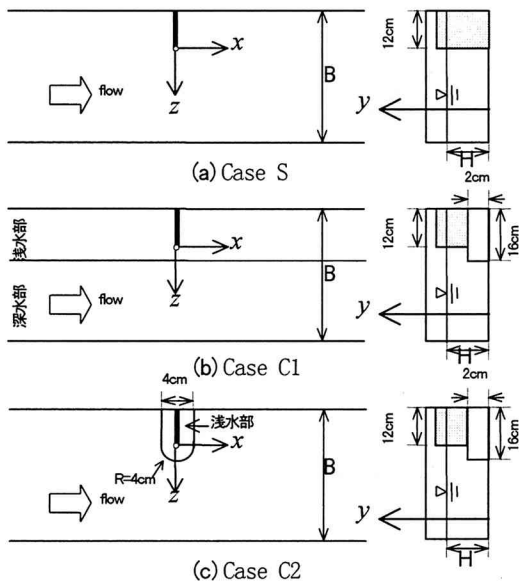


図-2 実験装置

表-1 水理条件

Case	流量 Q (l/s)	水路幅 B (cm)	水深 H (cm)	断面平均流速 (cm/s)
S	0.541	39.0	4.0	5.0
C1	0.503			
C2	0.503 (0.520)	39.0 (40.0)		

() 内は流速計測時の水理条件

ように、長方形断面水路に仕切板を設置した場合 (Case S)、複断面河道のように流れ方向に異なる深水部と浅水部があり、浅水部に仕切板を設置した場合 (Case C1)、仕切板の周囲に局所的な浅水部を設けた場合 (Case C2) である。水理条件を表-1に示す。

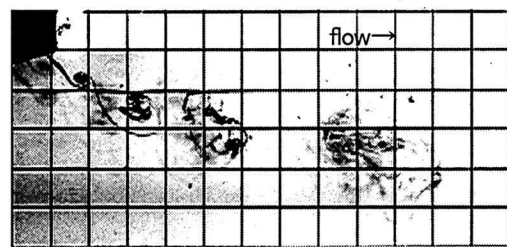
可視化実験では、メチレンブルーを外径1.5mmの真鍮パイプを通して注入し、剥離渦や流れの構造を可視化した。このように可視化された渦や流れは、水路上方および側方から2台のデジタルビデオカメラで同時撮影した。得られたビデオ画像をパソコンに取り込み、市販の画像処理ソフトを用いて処理した。速度計測は、2成分LDAを用い、流下方向と鉛直方向速度成分 (u および v) の計測を行った。

3. 流れの可視化手法による検討

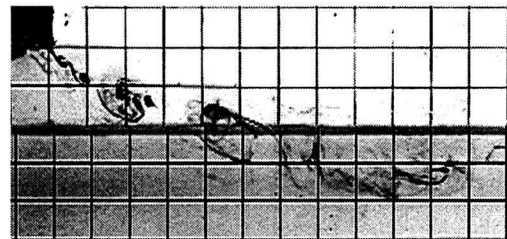
(1) 剥離渦の発生・発達過程の検討

仕切板先端付近から染料を注入し、剥離渦の可視化を行った。各ケースの代表例を図-3に示す。

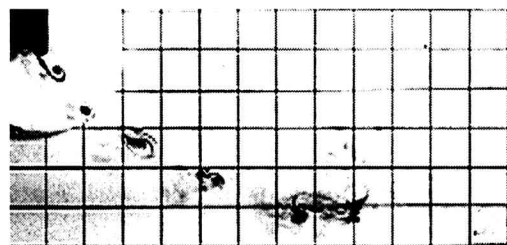
Case Sでは、従来の大規模渦運動の研究で指摘されるように、渦の合体や、流下するにつれて渦径が増大していく様子がみられる。Case C1では、浅水部に渦がある



(a) Case S



(b) Case C1



(c) Case C2

図-3 可視化結果

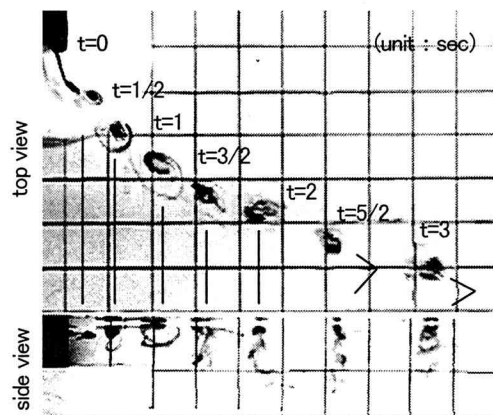


図-4 渦の伸長 (Case C2)

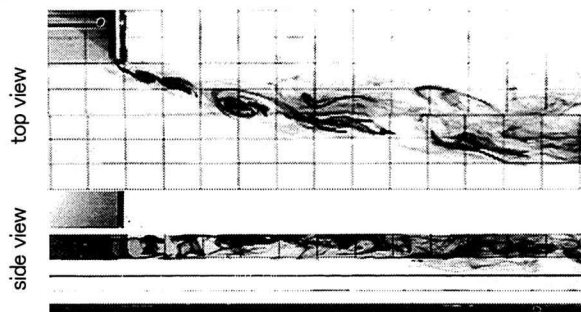


図-5 可視化結果 (Case C1)

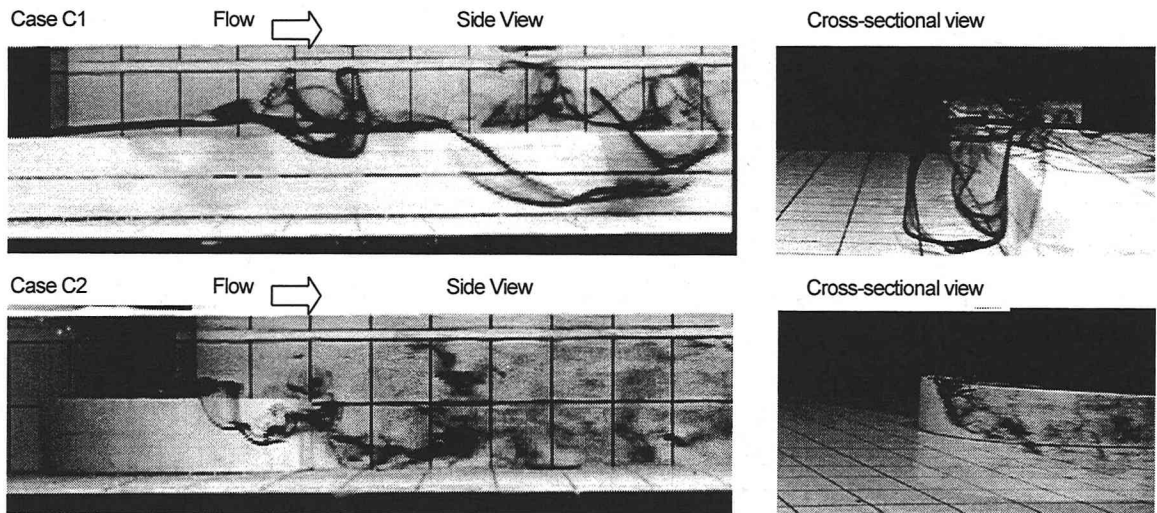


図-6 流れ場の3次元構造

間は渦の合体・拡大がみられるが、浅水部-深水部の境界付近に達すると崩壊する。Case C2では、浅水部において仕切板より発生した渦が単独で流下したり、他の渦と合体する様子がみられるが、深水部に達すると渦の回転速度が急激に上昇し渦径の増大が抑えられる。また渦径が余り変化せずに流下し、他の2ケースにくらべて強い渦が発生している。

(2) 剥離渦および流れ場の2次流構造

次に、Case C1, Case C2の両ケースとも渦が流下すると浅水部から深水部に進入するにもかかわらず、何故一方では渦が崩壊し、一方では強い渦が作られるのかということについて検討する。図-4は、Case C2における渦の3次元的挙動を検討するため、発生直後に合体した渦に着目し、1/2秒ごとの画像を合成したものである。top viewは水路上方から、side viewは水路側方から撮影した画像である。図より、 $t=0-1(\text{sec})$ の間で渦が合体し渦径が拡大するが、 $t=3/2(\text{sec})$ 以降では渦が鉛直方向に引き伸ばされて渦径が収縮し、回転速度が速く寿命の長い渦を形成していることがわかる。また、水表面に注入された染料が底面付近にまで達していることから、渦の中心付近では強い下降流が生じていると考えられる。図-5は、Case C1において、染料を仕切板先端付近から注入し、水路上方および側方から同時に撮影したものである。これから、浅水部と深水部の境界に達しても、渦の伸長が起きず、上方に押し上げられて崩壊していることがわかる。

次に、浅水部と深水部の境界付近で発生する2次流の構造を検討する。図-6は、浅水部と深水部の境界付近に染料を注入して得られた可視化結果である。Cross-sectional viewは水路下流側から撮影したものである。Case C1では、複断面流れで観察される、斜昇流に伴う2

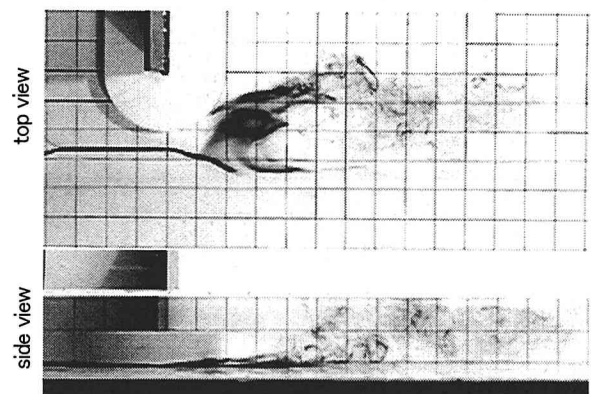


図-7 底面付近の流況(Case C2)

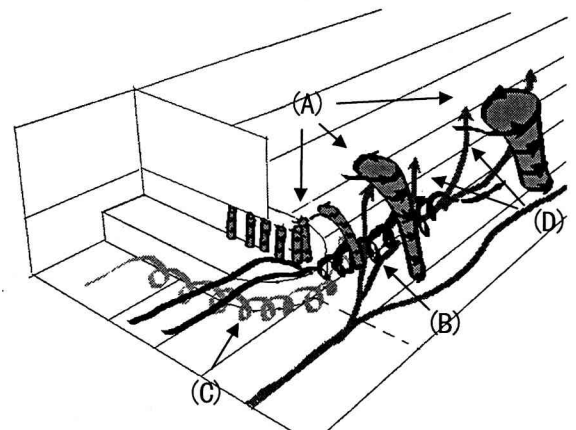


図-8 剥離渦および2次流構造模式図 (Case C2)

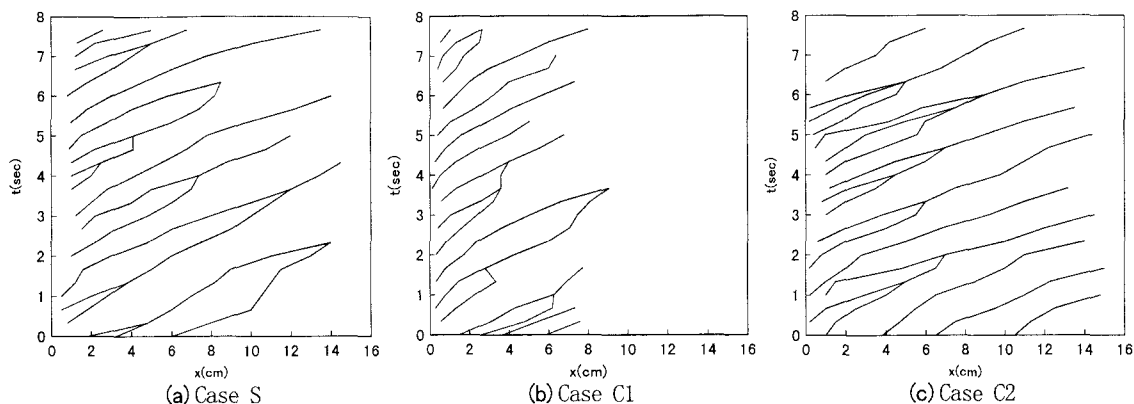


図-9 剥離渦の移流軌跡

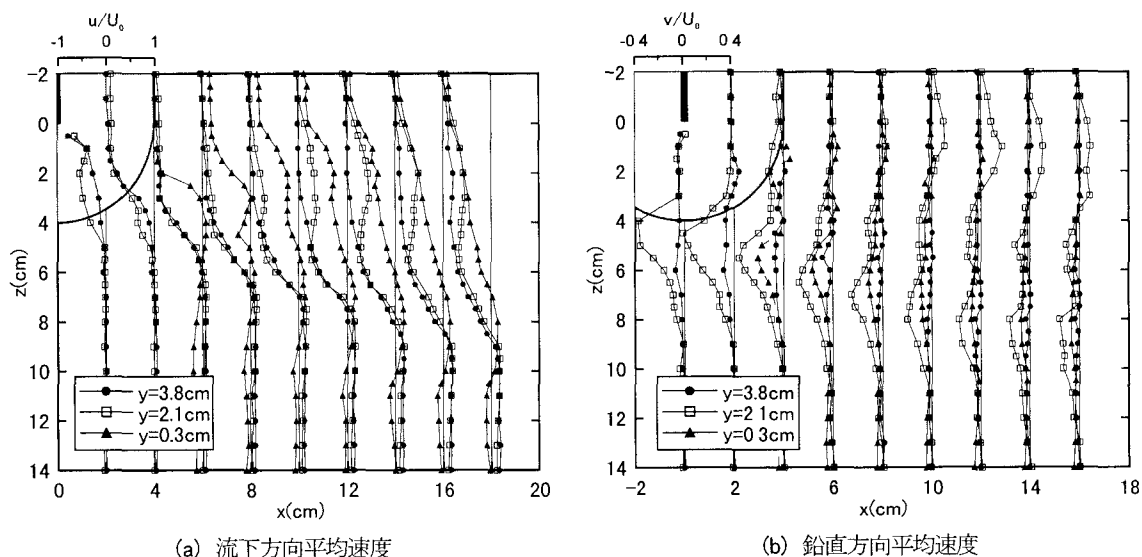


図-10 平均流速分布 (Case C2)

次流セルと同様の2次流が可視化されている。Case C2では、染料が浅水部の頂部から発生するらせん流に巻き込まれ、底面に下降して行くのがわかる。このらせん流の下降流部分が、剥離渦の鉛直伸長を引き起こしていると考えられる。また図-7は、浅水部頂部付近の底面で染料を注入した場合の可視化結果であり、仕切板背後のよどみ域に高速で進入し、減速した後上昇する噴流状の流れが可視化されている。以上の結果をまとめると、図-8のような構造が考えられる。すなわち、(A)：剥離渦(カルマン渦)、(B)：らせん流、(C)：馬蹄形渦、(D)：湧昇流である。

以上から、Case C1とCase C2では境界付近で発生する2次流の構造が異なり、一方の2次流は渦の鉛直伸長を抑制、もう一方は促進しており、剥離渦に与える2次流の影響が非常に大きいことが示される。

(3) 剥離渦の移流軌跡の比較検討

図-9は、ビデオ画像を1/3秒間隔で解析し、得られた渦中心の軌跡を流下方向距離 x および時間 t についてプロットしたものである。Case Sでは、1つの渦が単独で流下するパターンや、複数の渦が合体するパターンが不

規則に出現する。また、Case C1では、浅水部上ではCase Sと同様に渦の合体が見られるが、 $x=6$ 付近で渦が浅水部と深水部の境界に達し、崩壊してしまうので渦の寿命は短い。一方Case C2では、 $x<8\text{cm}$ の範囲では渦の合体がみられるが、 $x>8\text{cm}$ の領域では渦の合体はみられない。また、他のケースにくらべて、規則正しい並んだ渦列を形成していることがわかる。

4. 速度計測による検討

前章で述べたように、Case C2において安定した強い渦が形成されることが示された。ここでは、その構造について速度計測結果を用いた検討を行う。

(1) 平均流速分布特性

Case C2の平均流速分布を図-10に示す。計測は2成分LDAを使用し、サンプリング周波数20Hz、サンプリング個数1200のデータを平均した。 $x=0$ の主流部の平均流速値($U_0=5.30\text{cm/s}$)で各平均流速値を無次元化した。計測は表層($y=3.8\text{cm}$)、中間層($y=2.1\text{cm}$)、底層($y=0.3\text{cm}$)

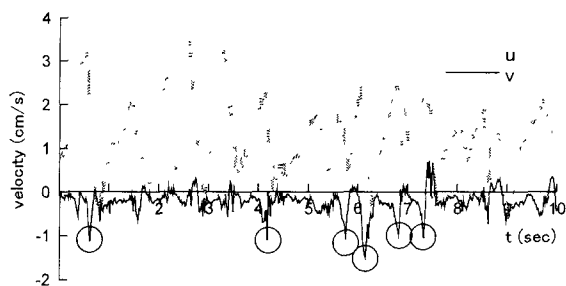


図-11 流速計測例 (Case C2)

の各層ごとに約150点で行った。以下は、渦の通過経路を挟んで水路中央側を主流部、反対側をよどみ域と呼ぶことにする。

a) 流下方向平均速度の分布特性

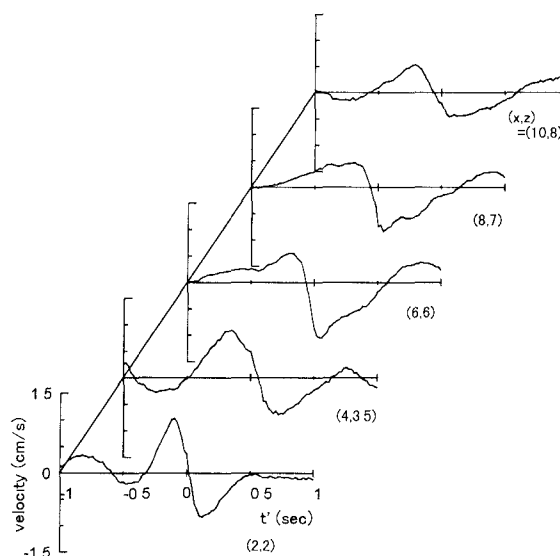
表層 (●印) の結果を見ると、測線 $x=0$ で仕切板先端付近にあるせん断層は、流下するに従って水路中央方向へ移動している。せん断層の位置は、ほぼ剥離渦の経路と一致しており、渦がせん断不安定によって発生・発達していくことがわかる。底層 (▲印) の流速分布では、 $x=6$ の測線上の極大点は $z=4$ にあり、流下するに従ってよどみ域の方に移動していく。これは図-7で示したよどみ域に入っていく噴流状の流れを捉えている。中間層 (□印) の流速分布は、 $x=0$ 、 $x=2$ で表層の流速分布に近いものの、浅水部の底面摩擦により、速度欠損が生じている。浅水部の表面摩擦の影響外となる $x=6$ から下流では、せん断層がほぼ表層と同じ分布をしている。しかし、 $x=6$ より下流側では、よどみ域に極大点が現れ、流下するに従って大きくなっていく。これは、底層付近の噴流状の流れが、流下するに従って中間層付近まで拡大してきていることを表している。

b) 鉛直方向平均速度の分布特性

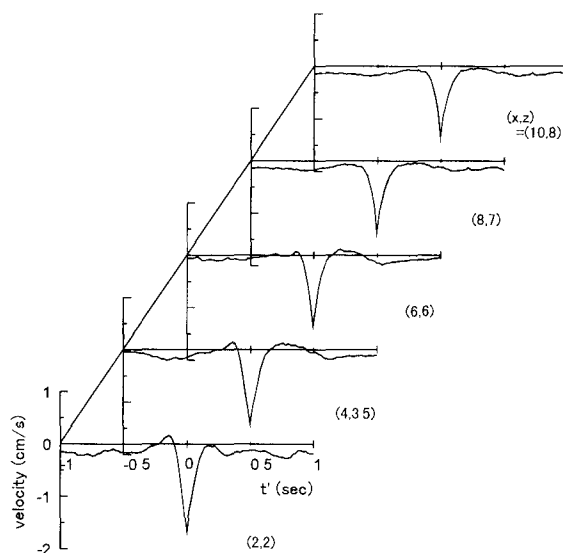
3層の中で最も特徴的な分布をしているのは、中間層 (□印) である。 $x=0$ から $x=6$ の間では、 U_0 の40%程度の下降流のピークが存在する。この下降流は、浅水部頂部付近から発生するらせん流に起因している。また $x=6$ 、8の測線上の極小点は渦の通過経路に近く、この下降流が、渦の鉛直伸長を引き起こしていると考えられる。また $x=10$ より下流では、よどみ域に極大点が存在し、上昇流が発生していることがわかる。表層 (●印) の流速分布では、 $x=0$ から $x=6$ の間で若干の下降流がみられるが、中間層ほど特徴的な分布はみられない。底層 (▲印) の $x=6$ 、8では、明瞭な極小点がみられ、先に指摘した下降流が底層まで達していることがわかる。下降流の分布は中間層より早く減衰し、特徴を失う。

(2) 条件付きサンプリング法を用いた渦構造の検討

剥離渦の構造を明らかにするために、条件付きサンプリング法による検討を行った。アンサンブル平均に用いるためのデータの計測は水表面付近 ($y=3.8$) で行った。



(a) 流下方向速度



(b) 鉛直方向速度

図-12 アンサンブル平均した波形 (Case C2)

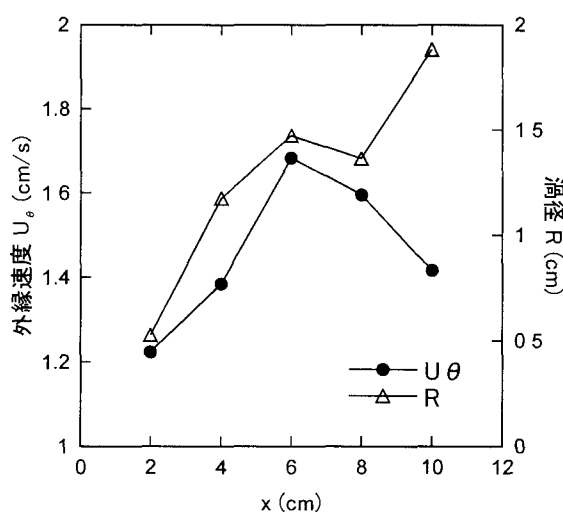


図-13 外縁速度および渦径

2成分LDAを用いて、サンプリング周波数50Hz、サンプリング個数15000の計測を3回繰り返す、計45000個のデータを解析に用いた。

a) データ抽出・処理の方法

図-11は、渦が頻繁に通過する点での測定結果であるが、○印で示されるように、明瞭な下降流のピークが現れている。可視化結果を考慮すると、このピークは渦の中心付近の下降流を捉えていると考えられる。従来、大規模渦を抽出する方法としては、VITA法⁵⁾、密度界面あるいは水面の変動を抽出条件とする方法^{6), 7)}が用いられているが、本研究では渦構造を考慮して、下降流のピークを抽出条件に用いることにした。ピーク検出には、2次多項式適合による平滑化微分の方法⁸⁾を用い、極小値のしきい値を適当に設定することにより、45000個のデータ中120~150程度のピークを検出した。さらに、流速値の鉛直方向成分が極小値となる時刻に流下方向成分値が負の勾配持っているものだけを選び出し、各測点につき80個~100個程度の渦を抽出することができた。各データ列は、流速値の鉛直方向成分が極小値の時を $t'=0$ として位相をそろえ、前後1秒間 ($-1 \leq t' \leq 1$) 間に渡って平均した。流下方向成分値については全データの平均値との差を用いている。

b) 波形分布特性

図-12(a)は流下方向速度、図-12(b)は鉛直方向速度のアンサンブル平均した波形である。流下方向速度の波形は、 $t'=0$ を挟んで明瞭な極大値および極小値がみられる。これは、回転流体の中心を通る測線上の波形を示しており、渦が抽出されていることを示す。鉛直方向速度の波形は、 $t'=0$ で著しいピークを持ちその外縁では、正もしくは0付近の値をとる。この分布から渦は中心が下降流、その周辺が上昇流という構造が推定される。

c) 渦径、外縁速度の変化特性

流下方向速度の波形から、各測点を通過する渦の外縁速度 U_θ および渦の直径 R を、次式を用いて算定した。

$$U_\theta = \frac{1}{2}(u_{\max} - u_{\min})$$

$$R = u_{\text{ave}} \cdot \Delta t / \cos \theta$$

ここに、 $u_{\max}$ 、 $u_{\min}$ は流下方向速度成分の極大値および極小値、 u_{ave} は全データの平均値、 Δt は極大点、極小点の時間差、 θ は流下方向と渦の移流方向のなす角度である。図-13は、得られた U_θ および R をプロットしたものである。 $x=2-4$ の間では、渦径が流下方向に増大していく。これは可視化結果からもわかるように、渦の発生後のまき上がりや渦の合体によるものである。渦の鉛直伸長のため、 $x=4-6$ の区間では渦径の増大傾向が弱まり、 $x=6-8$ では渦径が収縮する。 $x=8-10$ では再び渦径が増大傾向となる。外縁速度については、 $x=2-4$ の区間で、渦の合体により増加している。次の $x=4-6$ の区間ではさらに増加

率が大きくなるが、これは、渦径の収縮作用によるものである。さらに下流では徐々に外縁速度が遅くなり、渦が弱くなっていく。

5. おわりに

本研究では海峡周辺の地形を模した境界条件の下で、剥離渦と海底地形に起因して局所的・非定常的に発生する2次流との関係について、可視化手法ならびに速度計測の結果を用いた検討を行った。得られた主な結論を列挙すると次のようである。

- 1) 剥離渦の発達過程は、境界形状に起因する2次流構造に大きく影響を受け、2次流により Case C1では渦の伸長が抑制され、Case C2では促進されることが可視化結果から明らかにされた。
- 2) Case C2では、剥離渦の中心部で下降流が生じており、局所的に発生する2次流の効果により急激に伸長されることが、可視化結果および条件付きサンプリング手法を用いた速度計測結果で示された。
- 3) Case C2で発生した強い剥離渦は、下降流を抽出条件とした条件付きサンプリング手法によってその構造が検出されるとともに、その変化特性が明らかになった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、日頃のディスカッションを通して有益な助言を頂いた、京都大学防災研究所助手武藤裕則氏に深く感謝します。

参考文献

- 1) Lugt, H.J. 著、大橋秀雄監訳、山口信行訳：渦-自然の渦と工学における渦、朝倉書店、1988。
 - 2) 西村司：鳴門の渦潮-宇宙からその謎を追う、山文社、1986。
 - 3) 大西外明、田中總太郎、西村 司：Landsatリモートセンシングを導入した海峡部海水交換現象の研究、土木学会論文集、第298号、pp.63-75、1980。
 - 4) 木村一郎：開水路流れにおける大規模渦運動の数値解析法とその水工学への応用に関する研究、学位論文、pp.153-180、1997。
 - 5) 室田 明、中辻啓二、浅田浩章：2次元フォーストブルームの完全発達領域における組織的構造と連行機構に関する研究、土木学会論文集、第405号/II-11、pp.165-174、1989。
 - 6) 小松利光、山本賢一、梅永 哲：混合せん断流における大規模渦の時空間構造とその水理学的役割、土木学会論文集、第405号/II-11、pp.89-97、1989。
 - 7) 池田俊介、村山宣義、空閑 健：複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造、土木学会論文集、第509号/II-30、pp.131-142、1995。
 - 8) 南 茂夫編：科学計測のための波形データ処理、CQ出版社、pp.111-113、1986。
- (1998.9.30受付)