

開水路底面上の大規模粗度付近における渦運動について

Vortex Motion around Large Roughness Elements in Open Channel Flow

東京大学大学院 学生員 田 中 規 夫 Norio TANAKA

芝浦工業大学 細 川 智 徳 Tomonaru HOSOKAWA

東京大学工学部 正 員 玉 井 信 行 Nobuyuki TAMAI

Flow around large roughness elements in open channel flow is studied by flow visualization using hemisphere and hemicylinder in a flow. When water depth to roughness height ratio( $H/R$ ) equals 3, shed vortices reach the water surface and there occurs 'boiling phenomenon'. The flow around a two-dimensional roughness (hemicylinder) was found similar to that of the hemisphere, and boiling phenomenon appeared in 5 rows. Near the reattachment point, the mean flow is upward in the "vortices head's" section and downward in the "leg's" section. Results show the effect of vortices' motion on the mean velocity profile.

Keywords : flow visualization, hemisphere, hemicylinder, boiling phenomena, reattachment point

## 1. はじめに

開水路流れに設置された構造物の周辺には、強い2次流や剥離渦の形成に伴う複雑な渦運動が生じ、局所洗掘などによる災害が発生しやすい。また、河床波背後にも剥離渦が形成され浮遊砂の輸送に大きく関連しているが、3次元物体背後に形成される剥離域の変動特性についてはあまり明らかにされていない。筆者らはこれまでに、水路床に半球を設置して、その周りに形成される流れを可視化により調べ、半球前面部には半球を取り囲む複数の馬蹄型状の渦管が形成されること、半球後方にはアーチ状の剥離渦が放出され、レイノルズ数が2000を越えると剥離渦同士が合体して放出されることなどを明らかにしてきた<sup>1)</sup>。しかし、剥離領域内部の変動特性や、渦塊によって輸送される乱れなどの変動量にたいして、定量的な面は明らかにされておらず、また粗度の形状、粗度高さとし水深との比、接近流との関連などについて不明の点が多く、今回、その点について実験的に明らかにすることを試みた。

## 2. 実験装置及び方法

半球近傍の局所的な流速の変化に対する渦構造や放出周波数特性を調べるため、まず曳航型水槽において境界層厚と半球の比を変えて調べた。次に、長さ20mの可変勾配水路に上流端から10mの位置に粗度を設置し、染料により可視化しビデオに納め、渦塊の挙動を追跡した。また、アルミ粉による断面の可視化より渦構造を把握し、渦放出周波数特性について調べた。粗度は、半球以外に二次元的な粗度(半円柱を底面に張り付けたもの)の周りの流れを調べ、半球の場合との比較を行った。また、粗度水深比 $H/R$ ( $H$ :水深、 $R$ :粗度高さ)は3,4,5,10のものについて行い、渦塊の移動流速、後流幅、水面にまで達する剥離渦の有無等について調べた。また、2次元粗度の場合に流跡処理(補間間隔  $R/5$ )を行い、二次元物体後方に形成される剥離泡の3次元特性や、放出される渦塊の乱れ速度の特性等について調べた。

## 3. 実験結果

### 3-1. 半球周りの流れ

#### (1) 境界層厚 $\delta$ と半球高さの比 $\delta/R$ の変化に対する検討

図2に半球前面部の渦の高さ $h_1/R$ の変化を、レイノルズ数 $Re (=UR/\nu)$ 、 $U$ :断面平均流速、 $\nu$ :水の動粘性係数)に対して示す(実験条件、図1)。渦の高さは全体としては減少傾向であるが途中増加することもありよく傾向がつかめない。そこで、図3に渦の数の変化を整理できる<sup>1)</sup>レイノルズ数 $Re_{eff} (=u(h_0)h_0/\nu)$ 、 $h_0$ :半

球前面部の逆流域の高さ、 $u(h_0)$  (逆流域高さの流速) に対して、渦の数の変化と併せて示す(A:渦の数が1つ、B:渦の数が2つ、C:渦の数が3つ)。渦の数が変動する点で渦の高さはピークをもち、渦の数の変動に合わせて微妙な位置の変動をしており、このパラメーターでよく表現できることがわかる。前回、データにばらつきの見られた<sup>1)</sup>半球後方の剥離渦の放出ストローハル数 $St (=fR/U, f$ :渦の放出周波数) に関してもこのような局所的な流速及び代表長さを用いるのが適当と思われる。そこで、局所的な流速に対する検討として、境界層厚 $\delta$ と半球高さの比 $\delta/R$ を図4のように変化させて実験を行った。図5はレイノルズ数 $Re$ とストローハル数 $St$ の関係を示したもので、境界層厚が薄いものほど $St$ が大きくなることがわかる。そこで、半球の高さの流速 $U_R$ と前面部の渦の高さ $h_1$ を考慮にいれた有効レイノルズ数 $Reff_2 (=U_R(R-h_1)/\nu)$ と有効ストローハル数 $Steff (=fR/U_R)$ で示すと図6のようになり非常によく表現できることがわかる。

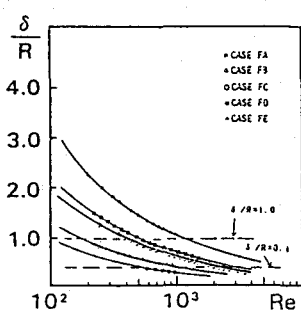


図1 実験条件 (前面部)

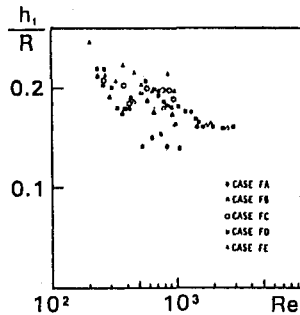


図2  $Re$ と $h_1/R$ の関係

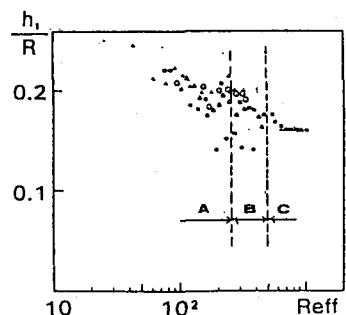


図3  $Reff$ と $h_1/R$ の関係

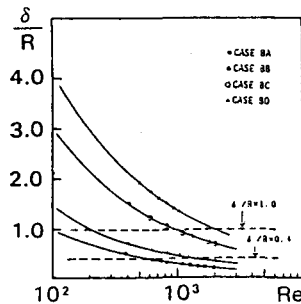


図4 実験条件 (後方部)

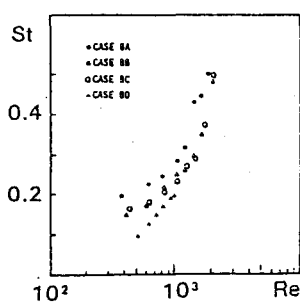


図5  $Re$ と $St$ の関係

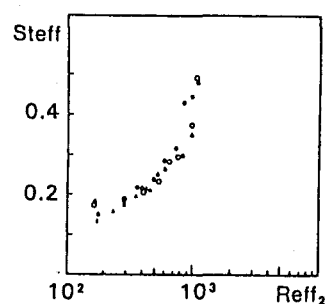


図6  $Reff_2$ と $Steff$ の関係

## (2)粗度水深比の変化に対する検討

図7に $Re$ と $St$ の関係を相対水深比 $H/R$ の変化に対して示す。 $H/R$ の小さいものほど、同一レイノルズ数では放出ストローハル数が大となる。これは、相対水深比の小さいものほど剥離点近傍の流速が大となり、(1)で述べた剥離点付近の局所的な流速が効いてくることによるものと思われる。後流の広がり幅は、 $Re$ 数が大のものほど広がり幅が大となる傾向があり、特に、剥離渦が合体せずに平均流によって引き延ばされながら上昇していく場合( $Re < 2000$ )と、合体して強い乱れをもった渦塊となって上昇していく場合( $Re > 2000$ )とではその差が大きい(図8)。放出された渦塊は移動流速の20%から40%に達する流速で上昇し、 $H/R$ が3のものについては、 $L/R$  ( $L$ :半球からの流下方向距離)が10程度の所で水面に達する強い上昇流となる。渦塊が水面に達する位置( $L/R$ )については変動が大きいものの、 $Re$ 数が大であるほど $L/R$ が小となる傾向を示す(図9)。水面に達する剥離渦の割合は形成された剥離渦5個に1個ぐらいの割合( $UTb/H=2\sim4$ ,  $Tb$ :ボイリングの発生周期)で、自然河川でのjacksonの実測値<sup>2)</sup>、福岡らの実験値<sup>3)</sup>とほぼ同じ値となる。

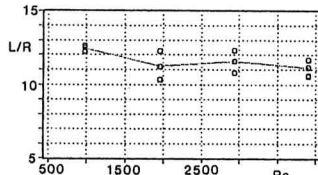
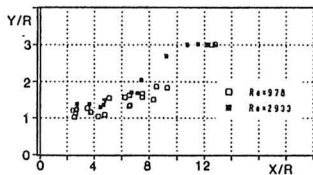
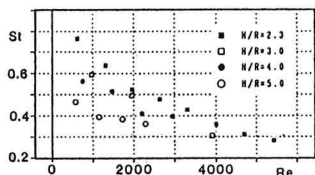


図7 H/Rの変化に対するReとStの関係 図8 Reによる後流の広がり幅の変化

図9 Reとボイル位置の関係

### 3-2. 2次元粗度（半円柱）まわりの3次元流れに関して

#### (1) 流れの概略

2次元的な粗度周りに形成される流れは、接近流における二次流等の影響で強い三次元性を示す。半円柱前面部においては、半球の時に形成されたような馬蹄型状の渦が、後方においても半球後方に形成されたものと酷似したアーチ型の渦管が形成され下流に放出される（図10(a)半球の場合、(b)半円柱の場合）。渦列の数は、粗度高さと水路幅の比 $B/R=40/1.5$ の場合（ $B$ :水路幅、 $H/R=3, 4, 5, 10$ ）では5列形成され、剥離領域内部においても、5つのセルが形成されそれが剥離渦の放出に合わせて横断方向に揺動する。図11(a)は、半円柱後方の剥離渦の断面を、(b)は放出された渦塊の断面をとらえたもので、強い上昇流をとまった渦が放出されているのがわかる。(c)は渦塊を横からスリットをあててとらえたもので、一対の渦管が形成されているのがよくわかる（このような渦対が5列並ぶ。流れは、いずれも右から左）。渦列の幅 $BW/R$ は、図12に示すように4~5となり再付着点距離とほぼおなじ値となる。この幅 $BW$ と水路幅 $B$ の比で渦列の数が決まるものと思われる。また、この場合も、 $H/R$ が3, 4のものについては剥離渦は水面にまで達し強いボイル渦列を形成する。図13は後流の広がり幅を同一水深比、同一レイノルズ数のものについて半球と半円柱の比較を行ったものである。半円柱の場合の方が横を隣の渦列に拘束されているため、また渦列同士の相互干渉が加わるため後流の広がり幅が大となる。

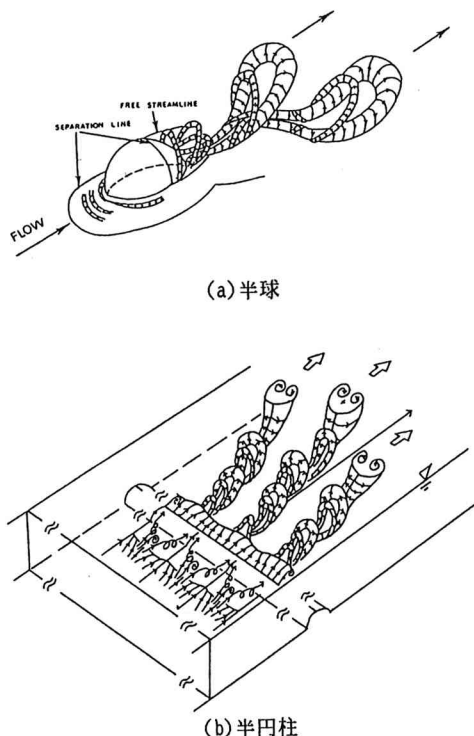
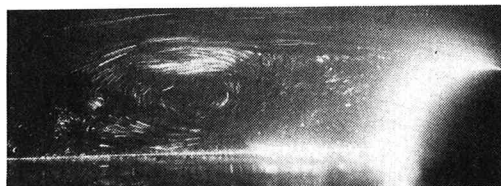
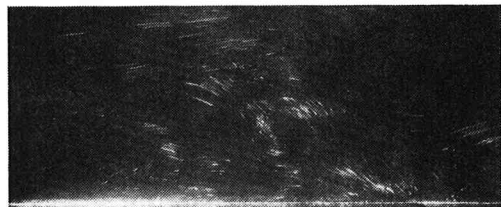


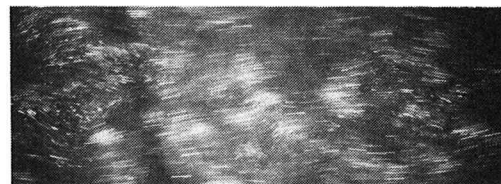
図10 渦構造の模式図 ( $Re > 2000$ )



(a) 剥離泡内



(b) 放出渦（縦断面）



(c) 放出渦（横断面）

図11 可視化写真

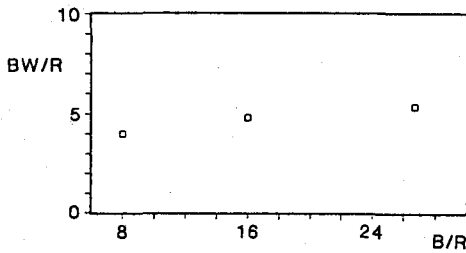


図12 渦列幅と水路幅の関係 ( $H/R=3.0, Re=700$ )

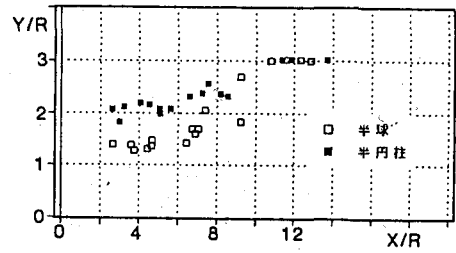
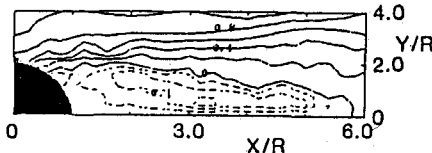


図13 後流の広がり幅 ( $H/R=3/0, Re=2933$ )

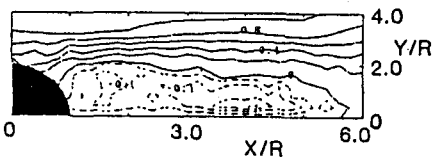
## (2) 流跡処理によりとらえられた断面構造

半円柱後方剥離泡内の3次元変動ならびに放出される渦塊によって作り出される流れ場の特性を、特に ( $H/R=4.0, Fr=0.054, Re=700$ ) のケースについて調べた。なお、以後、中央断面 (渦の頭に相当) の半円柱から  $0 \sim 6R, 7R \sim 14R$  をそれぞれ断面 I、II、中央からの  $B/10$  だけ側壁に近い断面 (B:水路幅=40cm、渦の足に相当) の  $0 \sim 6R, 7R \sim 14R$  をそれぞれ断面 III、IV と呼ぶことにする。

(i) 剥離泡内の平均流速場 : 図14(a), (b) に断面 I、III における  $u$  の等値線を示す。両図とも段落ち流れの場合と同様に  $5.5R$  付近に平均再付着点が存在し<sup>4), 5)</sup>、逆流域が形成されていることが解る。断面 I に比べると断面 III の方が再付着点に近い位置に逆流のピークが現れ、しかもそのピーク値、さらに剥離泡の大きさも断面 III の方が大きい。つまり、この断面からの流体の連行が大きいことが解る。図15(a), (b) は断面 I、III における  $v$  の等値線である。再付着点付近の流れをみると、断面 I は弱い下降流または上昇流、断面 III は強い下降流となっている。剥離泡内の断面 III の再付着点近傍で流体を上方から連行し、放出される渦についても断面 III から断面 I へと巻き込むような流れのあることが予想される。また、剥離点近傍を見ると断面 III の方に剥離点に向かう強い上昇流があることが解る。

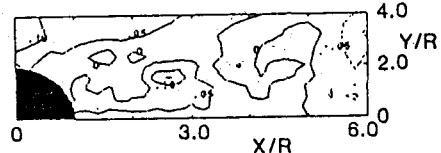


(a) 断面 I

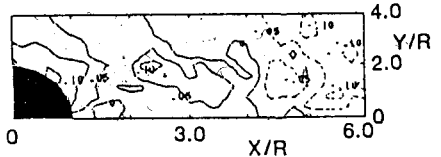


(b) 断面 III

図14 Uの等値線



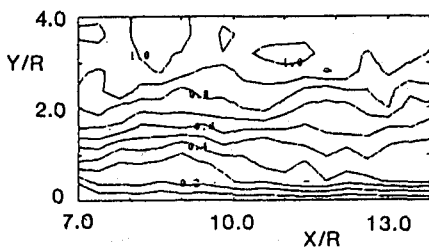
(a) 断面 I



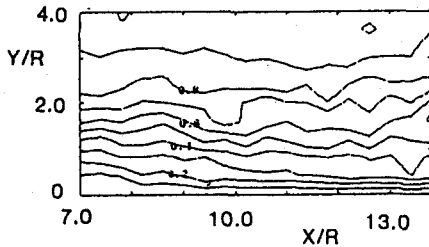
(b) 断面 III

図15 Vの等値線

(ii) 剥離泡下流の平均流速場 : 断面 II、IV の  $u, v$  の等値線をそれぞれ図16(a), (b), 図17(a), (b) に示す。断面 II では  $7R \sim 9R$  において等値線間隔が広がっているのに対し、断面 IV では間隔が狭くなっている。これは、II において底面付近の低速流体を巻き上げ、IV において高速流体が底面に向かって進入してきていることを意味する。すなわち、図17において渦塊の放出される断面 II では、強い上昇流が存在しているのに対し、IV では  $8R$  付近まで下降流が存在し、IV から II へ巻き込むような流れが存在しているのが解る。また IV における上昇流は II におけるほど強くなく、渦によって巻き込まれるようにして上昇して行くものと思われる。

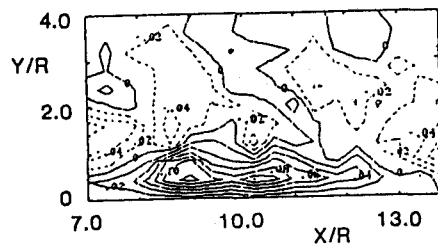


(a)断面II

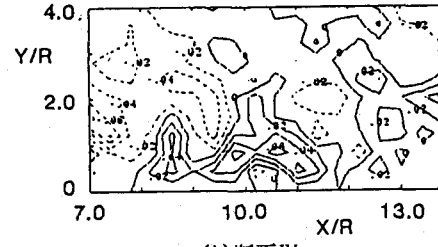


(b)断面IV

図16 Uの等値線



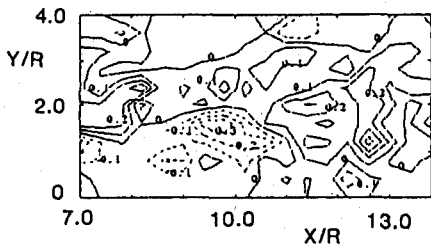
(a)断面II



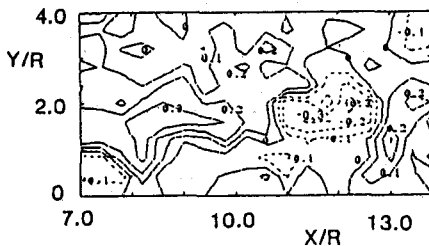
(b)断面IV

図17 Vの等値線

(iii)断面IIにおける乱れ速度、ならびに乱れ強さの空間分布特性 : 断面IIにおける主流方向乱れ速度 $u'$  ( $= (u-U)/U_0$ ,  $u$ :主流方向瞬間流速、 $U$ :平均流速、 $U_0$ :断面平均流速)の空間分布を図18(a),(b)に鉛直方向乱れ速度 $v'$  ( $= (v-V)/U_0$ ,  $v$ :鉛直方向瞬間流速、 $V$ :平均流速)の空間分布を図19(a),(b)に示す。ただし、(b)は(a)よりも $0.845T$ ( $T$ は渦の発生周期)だけ後のものである。渦の移動と共に流下方向に対して2割強、鉛直方向に対して1割強の $u' < 0 < v' > 0$ の流体塊が上昇しながら移動していくのが解る。図20に流下方向乱れ強さ $|u'| = ((u-U)^2)^{0.5}/U_0$ 、図21に鉛直方向乱れ強さ $|v'| = ((v-V)^2)^{0.5}/U_0$ の空間分布を示す。主流方向乱れ強さは渦の頭の通過する位置で、鉛直方向乱れ強さは渦の頭と底面との中間付近でピークを持つ。これは上昇流を維持する機構が足の断面(断面IV)から巻き込まれてくる流れにありそれは渦の頭の部分よりも底面付近の方が強いと思われる。

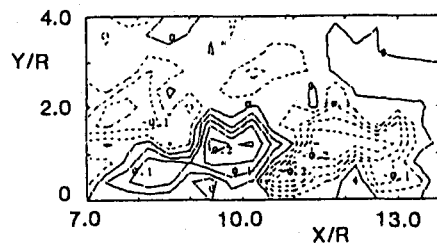


(a) $t=t_1$

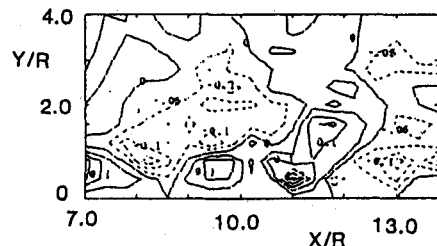


(b) $t=t_1+0.845T$

図18 流下方向乱れ速度の空間分布



(a) $t=t_1$



(b) $t=t_1+0.845T$

図19 鉛直方向乱れ速度の空間分布

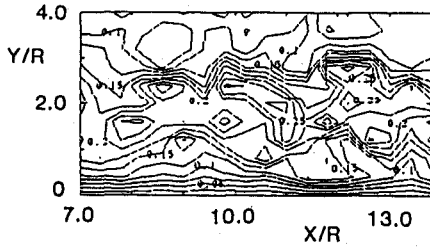


図20 流下方向乱れ強さの空間分布

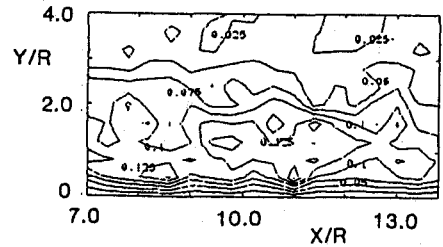


図21 鉛直方向乱れ強さの空間分布

#### 4. 結論

- (1) 半球前面部の渦の高さは、前面部の逆流域の高さとその点での流速を用いたレイノルズ数で、半球後方の剥離渦の放出周波数は剥離点での流速と前面部の渦の高さを考慮にいれたレイノルズ数でよく表現できる。
- (2) 粗度水深比を変化させると、放出周期に関しては局所的な流速が効くことにより、同一レイノルズ数では、粗度水深比が小のものほど放出ストローハル数が大となる。渦塊は移動流速の20%~40%に達する流速で上昇し、粗度水深比が3のものについては半径の10倍程度の位置で水面に達する強いボイル渦列を形成する。
- (3) 2次元的な粗度（半円柱）の周りには、3次元粗度（半球）周りに形成される流れに酷似した複数の渦列が形成される。物体後方の剥離泡も複数のセルに別れ、渦の放出に合わせて揺動する。渦列の幅は、再付着点距離とほぼ同じ値となり、粗度高さと水路幅により渦列の数は変化する。後流の広がり幅は、半球よりも半円柱の方が広く、粗度水深比が3,4のものについては剥離渦は水面にまで達し、強いボイル渦列を形成する。
- (4) 半円柱後方の流れに対し流跡処理を行った結果、平均流に関しては、渦の頭の形成される断面では再付着点付近から上昇する流れ、渦の足の断面では再付着点付近に下降する流れが生じ、足の断面から頭の断面に向けて巻き込むような流れがあること、また再付着点付近では足の断面の方が逆流が強く流体の連行は足の断面の方が強いこと、また剥離点近傍でも足の断面の方が逆流が強く流体の供給が大であることなどが明らかになった。また、変動量に関しても再付着点付近から放出される渦塊は流下方向に対して2割強、鉛直方向に対して1割強の $u' < 0$ で $v' > 0$ の流体塊を輸送し、流下方向乱れ強さは渦の頭の通過する位置で、鉛直方向乱れ強さは渦の頭と底面の間付近でピークをもつ。

#### （参考文献）

- 1) 玉井信行、浅枝隆、田中規夫：平板上の半球周りの流れの構造について、第31回水理講演会論文集、pp.371-376, 1987
- 2) Jackson, R.G.: Sedimentological and Fluid-Dynamic Implications of the Turbulent Bursting Phenomenon in Geophysical Flows, J.F.M., Vol. 77, Part 3, pp.531-560, 1976
- 3) 福岡捷二、福島祐介、奥津一夫：大規模渦によって誘起される上昇流およびボイルの構造、土木学会論文報告集、第298号、pp.41-52, 1980
- 4) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulent Structure of Backward-Facing Step Flow and Coherent Vortex Shedding from Reattachment in Open-Channel Flows, Turbulent Shear Flows 6, pp.313-337, 1989
- 5) 川西澄、余越誠一郎：段落ち流れの組織構造、第33回水理講演会論文集、pp.463-468