

馬蹄形渦の時空間構造

深江 忍*¹ 佐賀孝徳*²

Time and Space Structure of Horseshoe Vortex

Shinobu FUKAE*¹ and Takanori SAGA*²

Abstract

The characteristics of horseshoe vortex around a cylinder in the shear flow are investigated by using the flow visualization technique of plan view and whole view of the flow for various Reynolds number and various object shape. In order to clarify coherent structure of horseshoe vortex in the shear flow, horseshoe vortex in the shear flow are compared with that in the uniform flow. The results of comparison show coherent structure and time-space characteristics of horseshoe vortex movement. It is found that horseshoe vortex movement change by Reynolds number and object shape.

Key Words : horseshoe vortex, coherent structure, scour, flow visualization, shear flow

1. 緒論

物体周りの流れは、物体前面のよどみ点から物体に沿って流れる境界層が形成された後、逆圧力勾配下で剥離現象を生じる。そして、その剥離点からさらに剥離せん断層を形成し、物体の両側より発生した剥離せん断層の相互作用により後流が基本的に形成される。さらに壁面近くに馬蹄形渦が存在することが知られている^{1),2),3)}。この馬蹄形渦は、柱状物体の接合部から放出する渦の挙動などを支配する重要な因子であると考えられ、橋脚の洗掘現象、船舶の造波抵抗に関連する工学上重要な現象である。洗掘現象とは、河床や海底面上に構造物を設置すると、水の流れに3次元的な加速流や渦流が形成され、これに伴い、土砂を移動させる力（掃き出し力）が場所的に変化し、結果として構造物周辺の水路床面や海底面が洗掘を受ける現象をいう^{4),5)}。

近年、この馬蹄形渦により構造物周辺が洗掘を受け、施設の機能を損なう事例が多く見受けられる。そのようなことから、馬蹄形渦の特性を明らかにすることは工学上非常に意義がある。層流中における馬蹄形渦について調べられた研究⁶⁾は多くあり、その渦システムは明らかにされているが、せん断流中における組織構造についてはまだ十分には解明されていない。

*¹ 環境建設工学専攻

*² 土木建築工学科

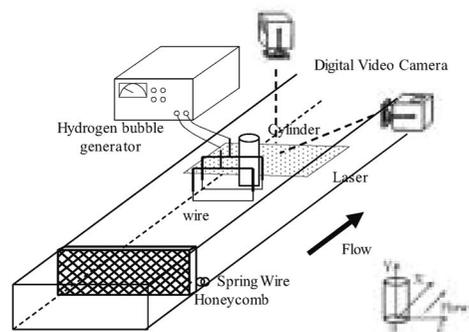


図-1 実験装置の概略

そこで本研究では、実際に橋脚の洗掘現象が生じるときの流れ場である、せん断流中に形成される固有の馬蹄形渦の組織構造および変動特性を一様流中のそれと比較し、さらに、物体の形状が馬蹄形渦に及ぼす影響とレイノルズ数の変化に伴う洗掘範囲の変化についても考察を行なうことにより明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

実験装置には、長さ 10m、幅 60cm、高さ 15cm 水路床勾配 1/1000 の総アクリル製開水路が用いられた。せん断流に

においては上流端に整流用のハニカム、下流端には水位調節用の堰を設置した。比較検討のため一様流でも実験を行ない、一様流における実験では水素気泡発生装置より80cmの位置にハニカムを設置した。この開水路流れの中に円柱を垂直に挿入し、水平断面視、斜め上方からの全体視による撮影を行なった。また、その同時可視化も行った。流れの可視化には、水素気泡法、及び蛍光染料(比重1.005)を用いた。図-1に実験装置の概略図、表-1に実験条件を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 せん断流と一様流中の馬蹄形渦の比較

円柱周りの一様流とせん断流中における馬蹄形渦の可視化の様子を図-2に示す。それぞれ、上図は水路上方、下図は水路斜め上方より同時可視化を行ったものである。これより、一様流中においては乱れが少なく、剥離現象に伴う安定的な3本の渦構造が見られる。せん断流中ではbursting現象に伴う低速渦の形成から、上昇流と下降流が時空間的に非定常に形成されており⁷⁾、常に乱れが生じるため、渦構造は不安定となる。

これらの渦はビデオ観察より円柱近傍へと移動することが認められ、その変遷をまとめたものが図-3であり、上図は一様流、下図はせん断流の移動特性である。縦軸は円柱前端を原点とした上流方向への距離(L)、横軸は時間軸(t)を示し、それぞれ使用円柱径(D)、渦の発生周期(T_0)で無次元化している。これより、一様流では円柱径の8割程度より馬蹄形渦が安定的に発生し、移動していることが示される。しかし円柱近傍に形成される渦は、あまり変動せずに渦の接近に伴い上流方向へ移動する。

せん断流においては、円柱径の6割程度から渦が発生し、形象は不明瞭となり安定的な3本の渦構造も見られないが、円柱近傍の渦(下図c)は、わずかな移動を伴いながらも安定性を保つ。特に、ビデオ映像より、せん断流中の変動特性は円柱から周囲方向への流れが一様でないため、強い流れが形成される領域では、外部からの円柱方向への流れと強い相互作用が認められた。

これらの考察から、一様流とせん断流における馬蹄形渦の形成にはさまざまな相違が認められるが、円柱より最も遠方に形成される渦の発生周期は両者とも約6秒であった。

3.2 物体形状による馬蹄形渦の変化特性

物体形状と、よどみ点の影響を明らかにするために角柱を用いた可視化形象を図-4に示す。角柱の平面を流れと垂直に配置し(以下Rec90とする)、さらにその状態

表-1 実験条件

	水深	平均流速	代表長さ	Re		
	H(cm)	U(cm/s)	D(cm)	Red=UD/ν	Reh=UH/ν	
case1	10	5.5	8	3500	4400	
case2	9.9	5.5	3.9	1700	4300	一様流
case3	10	5.6	8	4800	6000	せん断流
case4	10	5.5	4	1800	4400	せん断流
case5	10	5.5	4	1800	4400	一様流
case6	10	5.5	5.66	2500	4400	せん断流
case7	10	5.5	5.66	2500	4400	一様流
case8	10	5.6	3.9	2400	6000	せん断流
case9	7	7.8	8	6800	6000	せん断流
case10	7	7.8	3.9	3300	6000	せん断流
case11	9.9	5.6	8	3500	4333	

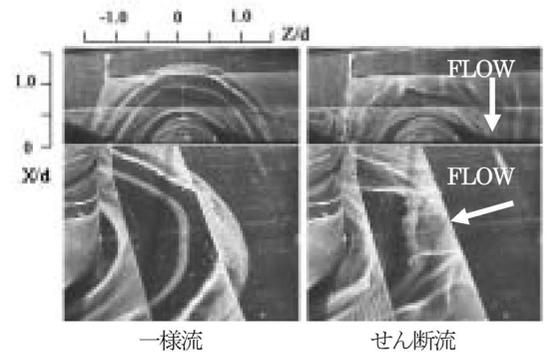


図-2 馬蹄形渦の可視化(CASE1)

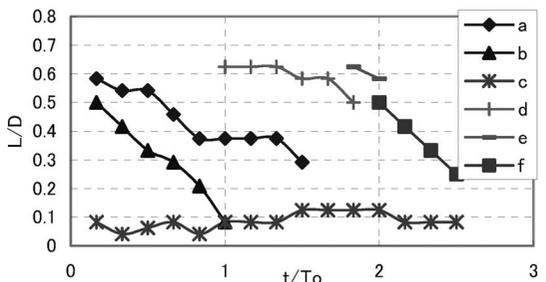
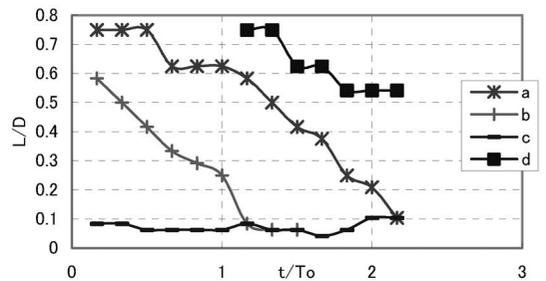
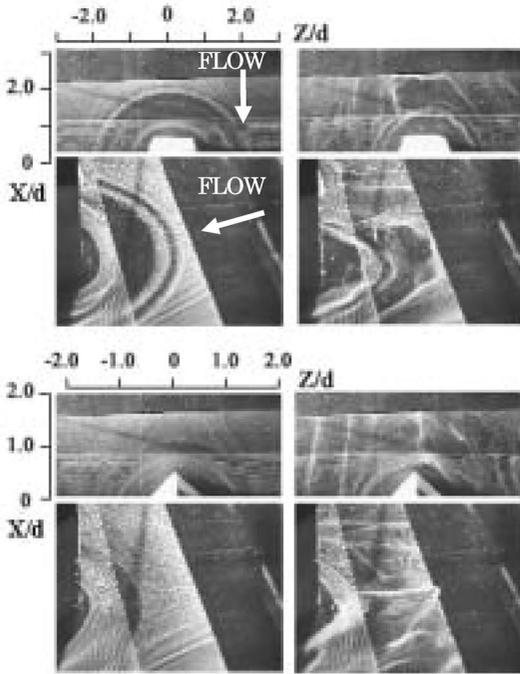


図-3 馬蹄形渦の変動特性



一様流(CASE5, 7) せん断流(CASE4, 6)

図-4 角柱まわりの可視化形象

から角柱を 45° 傾けた (以下 Rec45 とする) 2 ケースの実験を行った結果、せん断流中において、渦が物体形状によって変形することが認められた。このことは、馬蹄形渦が円柱径レイノルズ数(以下 Red とする)やよどみ領域の影響だけでなく、物体の形状の影響も受けていることを示唆している。ただし、一様流中においてはこの傾向は示されなかった。

円柱を使用した実験と同様に、角柱における馬蹄形渦の変動特性を図-5 (上図は一様流, 下図はせん断流) に示す。ただし、縦軸の物体前端から上流方向への距離 (L) は、それぞれ角柱の一边, または対角線により無次元化したものである。

これより Rec90 では変動が顕著であり, Rec45 では変動がなく安定していることが認められる。これらは、よどみ領域の大小に影響していると考えられ、また、せん断流における変動特性には、すべての渦変動が互いに強い相関を持つことが認められる。なお、Rec45 における渦形象は2本のみであった。

3.3 レイノルズ数による変化特性

せん断流中においてレイノルズ数 (以下 Re とする) を変化させた馬蹄形渦の変動特性を図-6 に示す。なお、変動幅の測定は、3, 4 馬蹄形渦の組織構造の考察から、円柱

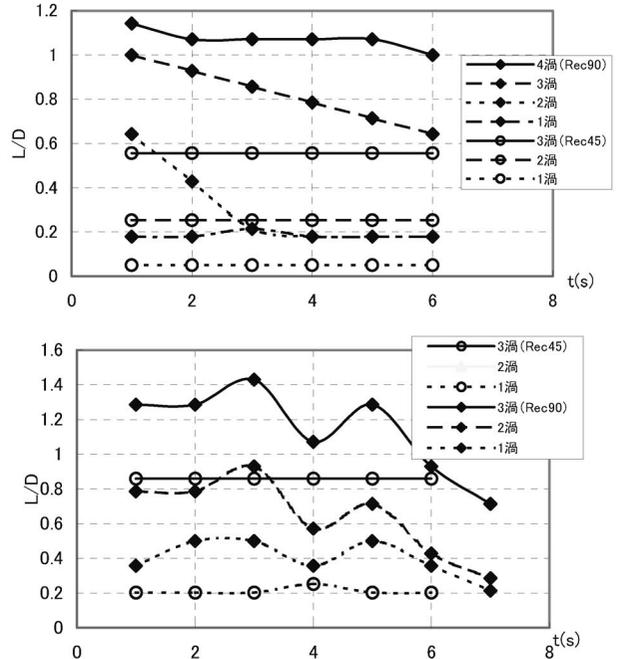


図-5 角柱まわりの馬蹄形渦の変動特性

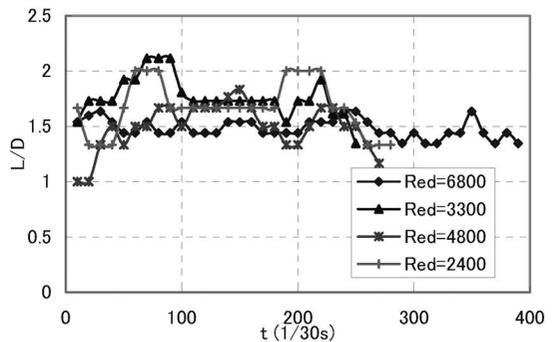


図-6 Re 変化による変動特性

前部での渦変動と後部での変動は連動しているものと考えられるため、変動の現れやすい後端で行なった。これより円柱径を用いたレイノルズ数, Red が高い場合は微細な変動を繰り返す傾向があり, Red が低い場合は、安定的でありながらも変動幅が増大することが認められる。また, Red の上昇に伴い、渦の発生周期が早まることが認められたが、変動幅が物体前部の渦変動と連動していることから、この変動特性は発生周期に関与していると推測される。

さらに Red が高いほど濃い筋状の馬蹄形渦が観察され, Red が低いほど薄い不明瞭な馬蹄形渦が観察された。濃い筋状の渦は水素気泡が集中している部分であり、渦度の

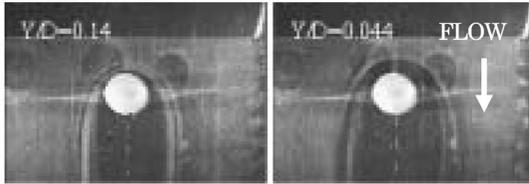


図-7 水平断面可視化 (CASE2)

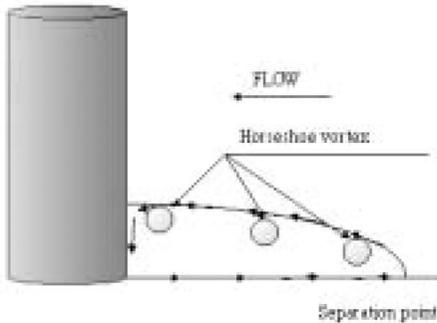


図-8 円柱前方馬蹄形渦の移動モデル

強い渦，つまり掃き出し力の強い渦にあたる．これは馬蹄形渦の発生要因であるとされる円柱前部の逆圧力勾配が Red の上昇に伴い増加するためと考えられる．これらのことより，短周期の変動，変動幅，発生周期，渦度の強さは，全て Red により変化するといえる． Red の上昇に伴い馬蹄形渦の微細な変動，渦度の強さは増加するが，変動幅は減少するということから， Red が大きい物体には，狭い領域に強い掃き出し力が生じるため，洗掘深がより深くなると考えられる．

3.4 馬蹄形渦の組織構造

3.4.1 物体前方の馬蹄形渦構造

図-7 は，各馬蹄形渦の形成領域を明らかにするため，可視化位置 Y/D を変化させたものである． $Y/D=0.14$ の場合は円柱近傍の馬蹄形渦が，より水路床に近い $Y/D=0.044$ では遠方の馬蹄形渦が可視化された．このことは，円柱より離れるに従い，馬蹄形渦の高度が下がることを示唆している．またビデオ映像より，3本の馬蹄形渦の外側に上流方向へ掃き出される流れが認められたことから，馬蹄形渦の物体前端での構造は図-8 のような模式図で示される．

物体よりも遠方の領域で剥離した流れが，馬蹄形渦を形成し，壁面から離れながら流下する．物体前端まで移送した渦は物体近傍の渦と相互作用しながら水路床方向へ巻き込まれ，馬蹄形渦の下側を通して剥離点方向の

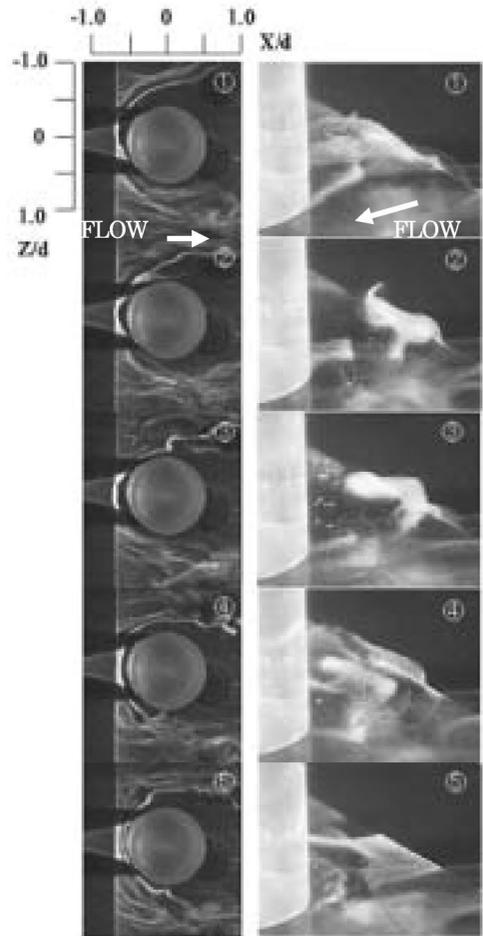


図-9 馬蹄形渦の時系列変化 (CASE3)

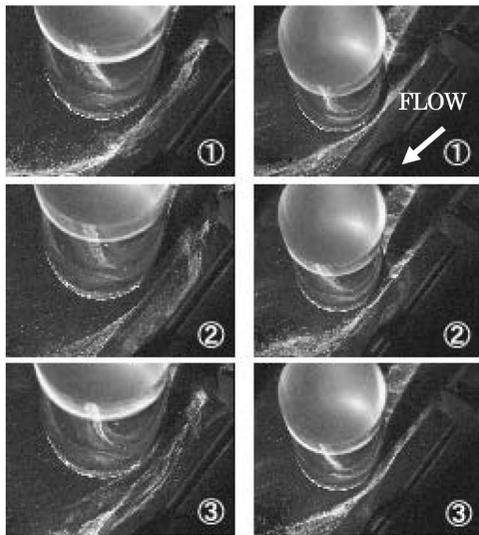
流れを形成する．その流れ強さの非一様性は，図-9 にも見られるように，せん断流では顕著である．

3.4.2 円柱側方および後方領域の変動特性

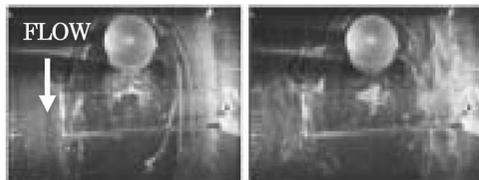
円柱前部，および水平視における変動形象の時系列図を図-9 に示す．各形象は1秒間隔であり，同時可視化による左右対応した形象となっている．

ここでは馬蹄形渦の円柱前端での変動が，側方，後方領域での変動に影響していることが認められる．例えば，図-9②③のように，馬蹄形渦の前端が上流に位置している場合，側方，後方領域の馬蹄形渦も外側に大きく広がり，逆に図-9④⑤のように渦が円柱近傍に位置し，左右の対称性が保たれない場合は，側方領域において，内側への巻き込みと変動の幅の縮小，左右の非対称性といったような現象が認められる．

可視化位置 Y/D を変化させた円柱側方領域の馬蹄形渦の挙動を，図-10 に示す．ここでは円柱後方での馬蹄形渦



Y/D=0.07 Y/D=0.14
 図-10 側報領域の可視化形象 (CASE3)



一様流 せん断流
 図-11 形成領域内の可視化形象(CASE11)

の巻き込みがとらえられた。Y/D=0.14 では上部に位置する馬蹄形渦の2次流れを可視化しており、後流形成領域の中心線に向かう流れが形成されていることを示している。また、水素気泡が底壁方向に引き寄せられたとき(図-10②)では、水路床近傍における馬蹄形渦の形象が同時に可視化されている。上部では巻き込みが強く、それに対して下部(Y/D=0.07)では外側への広がりが見られたことから、馬蹄形渦の上部では巻き込み流れ、壁面近くでは外側へ広がる流れを誘起していることが明らかである。

3.4.3 死水域の構成

図-11に、壁面近傍における形成領域の可視化形象を示す。一様流中においては物体背後の流れが停滞し、完全な死水域となっているが、せん断流中では死水域内において図-9、図-10にも確認されたような巻き込み流れが形成され、トレーサは停滞することなく渦的な挙動を示した。

その原因は巻き込み流れの発生に併せて、せん断流では死水域への運動量輸送が生じるためと考えられる。

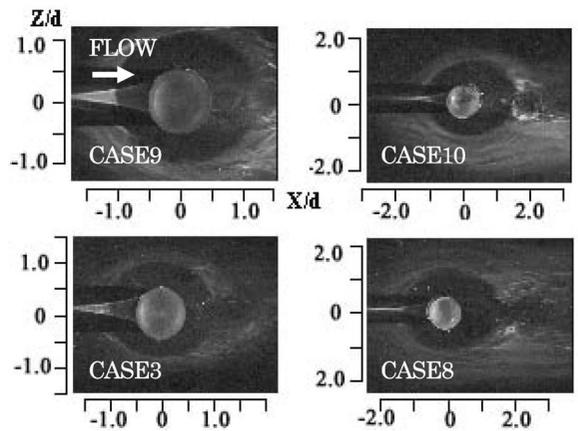


図-12 染料による掃き出し現象

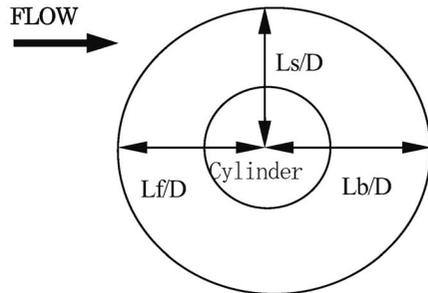


図-13 スケールの測定方法

3.4.4 洗掘範囲

図-12に染料による水平断面形象可視化を示す。壁面近傍の粘性低層に滞留した染料が、円柱近傍の流れ、特に馬蹄形渦により時間経過とともに円柱外側に掃き出されている。この掃き出し跡のスケールを測定し、図-14に示す。なお、測定値を円柱径Dで無次元化した値を縦軸に、横軸をReで示す。本実験では、Lf/D、Ls/D、Lb/Dは図-13のように定義する。

図-14より、Lf/D、Ls/DはともにRedの大小に関わらずほぼ一定の値を示す。一方、Lb/Dについて注目すると、Redの増加に伴い減少する。これはRedの上昇とともに、円柱後方への巻き込み力が強くなっていることを示唆している。また、水素気泡を用いた実験のビデオ映像より、形成領域の大きさと円柱前端近傍での馬蹄形渦の位置関係は、馬蹄形渦が円柱から最も離れるときに、形成領域が流れ方向に長くなっているように観察された。この変化を考察する上で、後流形成領域の長さを一様流中の流れの可視化実験より求めた後流形成領域を図中に実線、破線で同時に示した。その結果、実線で示した後流の形成領域と円柱後方での馬蹄形渦による掃き出し跡Lb/Dは

ほぼ一致した。

このことから、下流方向の掃き出し領域は後流の形成領域に関係していると考えられる。また、これまで行なわれた同じ水理条件の実験結果から、 $Y/H=0.2$ 以下の水平断面ではカルマン渦の形成が確認されていないが⁸⁾、この事はその上部の流れ構造が壁面に及んでいることを示唆し、注目すべき点である。

4. 結論

馬蹄形渦の可視化が行なわれ、その構造、変動特性が明らかとなった。本研究の主要な結果を以下に示す。

- (1) 物体前面では、複数の馬蹄形渦が形成され、物体方向への移動が生じる。一様流中では3本の安定した馬蹄形渦が形成されるが、せん断流中では、渦の本数が安定せず変動し、非一様性、非定常性を持つ。
- (2) 馬蹄形渦はその変動が円柱前部と後部で連動しており、一様流中では円柱後部での渦の巻き込みを生じないが、せん断流中では物体に沿った巻き込みを生じる。
- (3) Redの変化により馬蹄形渦の変動幅、渦度の強さ、発生周期は変化する。Redの増加に伴い変動幅は減少し、渦度は強くなり、発生周期は短くなる。
- (4) 物体の形状により馬蹄形渦は、その非一様性や渦形状に影響を受ける。よどみ領域が大きい形状ほど、広がり非一様性は増加し、よどみ領域が小さいと安定した馬蹄形渦が形成される。
- (5) 洗掘範囲は、Redの増加に伴い減少する。物体前、側面では一定であるが、背面では後流の形成領域に等しい変化を示す。

文献

- 1) 松口 淳, 津田宜久, 鶴野省三: 馬蹄形渦の乱流遷移過程の研究, 日本機械学会論文集 (B 編), 65 巻 629 号, pp. 28-35 1999.

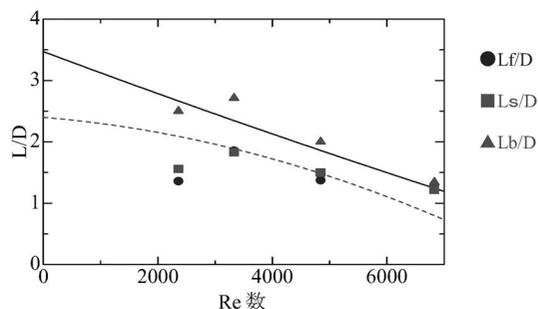


図-14 染料の掃き出しスケール

- 2) C. V. SEAL and C. R. SMITH: Visualization of a mechanism for three-dimensional interaction and near-wall eruption, *J. Fluid Mech*, 394, pp. 193-203, 1999.
- 3) 村富英: 壁面近くの円柱周りに生成する首飾り渦に関する研究, 平成12年度卒業研究論文集, pp. 109-110, 2001.
- 4) 谷 毅, 漆山 仁, 秋山真吾: 流れによる構造物周辺の最大洗掘深の予測と洗掘対策, 鹿島技術研究年報, 第47号, pp. 212-213, 1999.
- 5) 石野和男, 大谷英夫, 勝井秀博: 急潮流下における橋脚周辺の捨石洗掘防止工の設計法に関する研究, 土木学会論文集 No. 521/II-32, pp. 123-133, 1995.
- 6) C. J. BAKER: The laminar horseshoe vortex, *J. Fluid Mech*, 95-2, pp. 347-367, 1979.
- 7) 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤 隆: 壁面領域内乱流構造の立体可視化, 土木学会論文集, 第345号/II-1, pp. 65-67, 1984.
- 8) 佐賀孝徳, 今本雅恵, 渡辺勝利: せん断流中における円柱後流の三次元構造に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp. 541-546, 2

(2003. 9. 5 受理)