魚巣ブロック開口部における乱流剪断層の水理特性

中島, 央晶
九州大学農学部生物資源環境学科生物資源生産科学コース生産環境情報学研究室

卒業論文

魚巣ブロック開口部における乱流剪断層の水理特性

九州大学　農学部　生物資源環境学科　生物資源生産科学コース

生産環境情報学研究室

中島　央晶

平成１４年３月

目次

第1章　序論

近年，河川の護岸工事が進む中で，多自然型，近多自然型水路作りの気運が高まり，そのひとつとして人工魚巣（魚巣ブロック）もその有効性を認められるようになってきた．人口魚巣とは，内部に空間を施したコンクリートブロックのことで，河川護岸工事の際にコンクリート張り一辺倒ではなく，この人工魚巣を設置することによりその内部空間で魚や多様な生物が生活できるようになり，従来の護岸の機能を有しつつ，河川生態系の保全親水護岸としての機能も確保できるようになる．これまでに大河川，農業用水路など様々な場所で施工されてきているが，人工魚巣に関する研究はあまりなされていないのが現状で，そのため，土砂に埋没するなど有効とはいえない設置があるなど，手探り状態の施工が続いている．人工魚巣の水理特性を明らかにすることは，有用な人工魚巣の設計，設置につながる．また，人工魚巣周辺の流れは，剪断層の発達，剥離渦の発生，発達，崩壊，あるいは逆流域，死水域の存在といったような複雑な乱流場を形成し水理学的に非常に興味深い局所流となる．

人工魚巣に要求される基本的機能として流水の減勢，内部空間の確保，魚巣内外の物質交換が挙げられる．牧平(2000)，山本(2001)の両氏はこのうち，物質交換に着目し，魚巣内外の大まかな流れ，人工魚巣開口部における剪断層の特性について研究してきた．この物質交換には開口部上流端から発生する剥離渦が大きな影響を与えており，また，このときの乱れ強度や，レイノルズ応力にはフルード数が大きく関わることが報告されている．

本研究ではフルード数をパラメータとして流速変動の時系列の測定結果に基づき，河川と人工魚巣の境界に形成される乱流剪断層に発生する渦の特性を明らかにするのが目的である．

第２章　　人口魚巣について

―現地調査から見る人口魚巣の現状―

現在，人口魚巣は各地の河川や護岸に設置されており様々な役割を果たしている．基本的な形状は，写真.1 **に示すような横** 1m，**縦** 0.5m **の長方形ブロックで正面に正方形の開口部を持っている．**

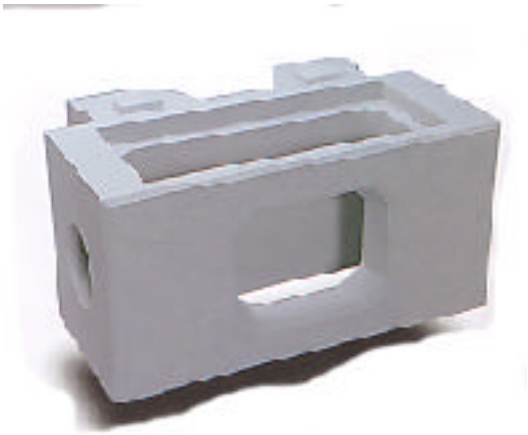


写真.1　**人工魚巣**

また，内部の側壁にも，隣接するブロックとの物質交換を可能にするための空洞を持っている(写真.2).

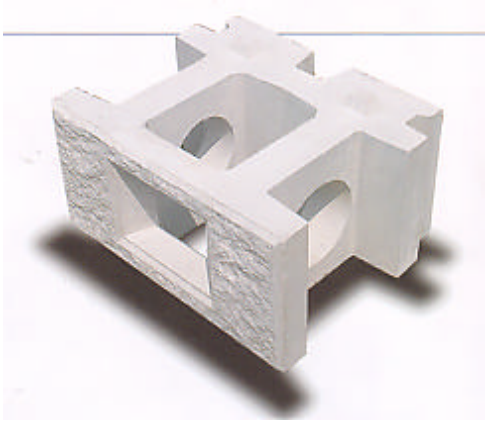


写真.2　**人工魚巣**

写真.3　熊本県宮原川の人口魚巣

写真.4　魚巣ブロックと植生ブロック

写真.3 のように開口部の形に特徴をもたせ，さらに内部に自然石を詰めているものもあり，自然の生物の生息空間を再現しようという工夫が見られる．また，魚巣の上方には植生ブロックが施工されていることが多く，そこに植物が生息し，河川の自然保護に一役買っているといえる(**写真**.4)．

しかし，**写真**.5 のように川の両岸に施工されているもので，半分は土砂に堆積してしまっているようなものもあり，手探り状態の施工計画が見て取れるようなものもあった．

写真.5　**熊本県豊田川の施工例**

このように人工魚巣はその設置数を増やしながらも，本来の機能を発揮できなくなっているような施工などもあり，魚巣周辺の水環境の解明とともに，施工時の妥当性の水理学的な検討や，明確な維持管理の在り方についても考慮する必要性があるのが現状である．

第３章　水理実験

３．１　実験装置の概要

実験は全長 5m，幅 25cm のアクリル製循環型水路を用いて行った．魚巣模型として，高さ 13.0cm，横 10.5cm，縦 18.5cm のアクリル製のボックスを用い，これを３つ並べた（**図３.１**）．魚巣開口部の大きさは横 10.0cm，縦 7.5cm で水路床からの高さは 3cm にしてある（**図３.２**）．各ボックスは直径 5.0cm，長さ 6.5cm のアクリル製パイプで連結しており，開口部の間隔は 15.0cm である（**図３.３**）．作業流体として水道水を用いた．これらにより実際に河川に設置してある魚巣周辺の環境を再現した．

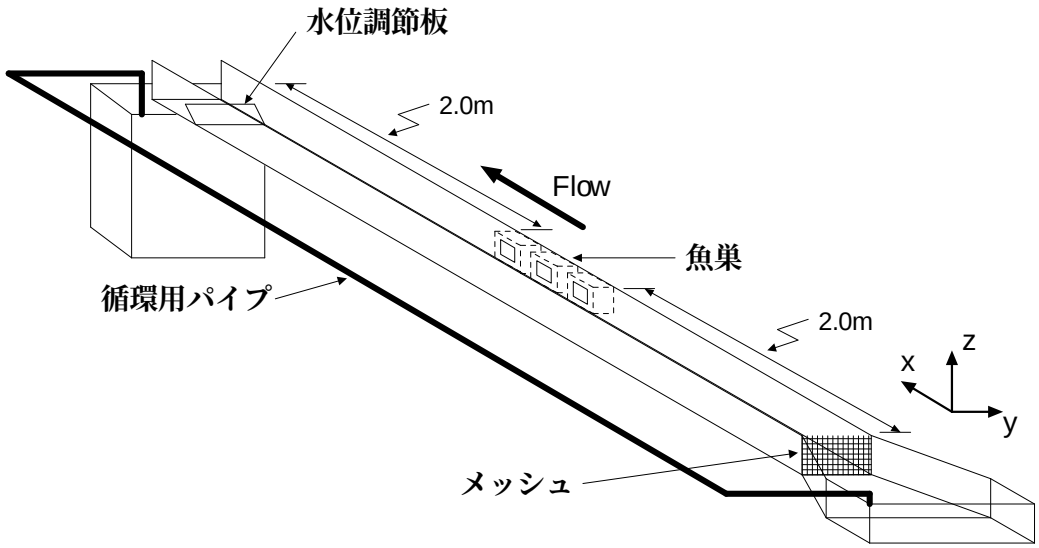


図３.１　実験水路

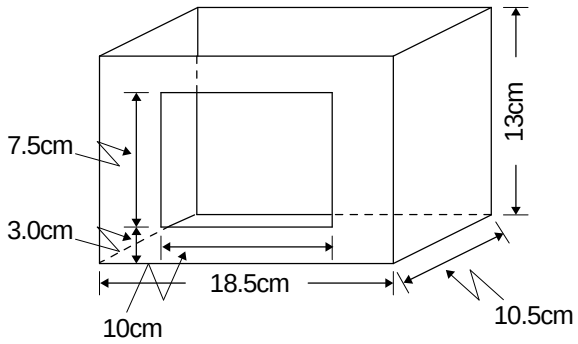


図３.２　魚巣模型

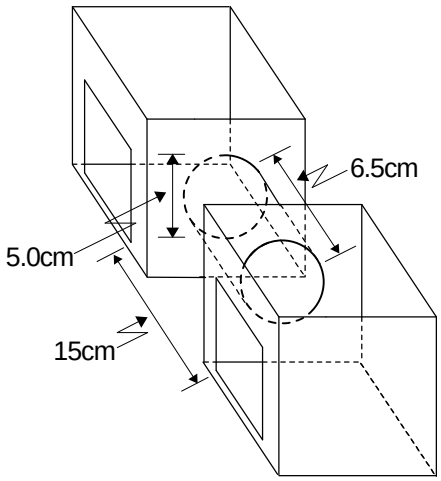


図３.３　魚巣間の位置関係

３．２　実験１の装置及び方法

実験１は魚巣開口部周辺の流れの可視化による画像データ取得である．魚巣ブロックを暗中に置き，側面から幅 5mm のスリットを通した光を段階上に当て，上方から魚巣開口部周辺を撮影した．トレーサーとしてアルミ粉末を用いている．撮影には，高速度カメラ(PHOTORON FASTCAM-PCI)を用いた．表 3．1 に撮影条件を実験条件を表 3．2 にそれぞれ示す．得られた画像データから，開口部周辺の乱流剪断構造に発生する剥離渦のスケーリングを行った．また、流体画像解析ソフトウェア「Flow-Vec32」(株式会社　ライブラリー製)で解析し，速度ベクトル等のデータを得ることが出来た．なお，作業流体には水道水を用いている．

表 3．1　撮影条件

周波数	60fps
総フレーム数	1088flame
総カップル数	1087couple
観測点	約 1000 点

表 3．2　実験条件

RUN	Q(l/s)	H(cm)	U(cm/s)	Fr	Re
Ⅰ-1	3.1	11	11.3	0.11	6610
Ⅰ-2	3.1	7	17.7	0.21	7947
Ⅰ-3	3.1	5	24.8	0.35	8853

実験２の実験装置及び方法

実験２では魚巣開口部周辺の流速分布と剪断層における流速変動時系列の測定を行った．

図３．５に示すように魚巣開口部上流端を原点にしたｘ－ｙ平面において、流速分布に関する測点として、（ｘ，ｙ）＝(－1，1)から(ｘ，ｙ)＝(0，8)まで観測を行った．ｙ＝1．0～4．0 については 5mm間隔で、それ以降の点については１ｃｍ間隔で測定を行っている．また，（ｘ，ｙ）＝(10，1)～(ｘ，ｙ)＝(10，8)についても同様の間隔で測定を行っている．

剪断層の流速変動については，（ｘ，ｙ）＝(1．1)から(ｘ，ｙ)＝(9，2.5)まで観測を行い、ｙ＝1～2.5 について 5mm間隔で 4 ラインについて流速変動を測定した．実験条件を表 3－3 に示す．

Ｘ型熱線流速計(IFA300 Thermal Pro)でｘ方向とｙ方向の速度成分について同時観測し，それぞれの観測点について解析を行った．なお，測定時間は 100Ｈｚで 20.48 秒間測定し，各点につき 2048 個のサンプリングデータを得た．

表 3．3　実験条件(流速変動測定)

RUN	Q(l/s)	H(cm)	U(cm/s)	Fr
1	3.3	7	18.9	0.23
2	3.3	5	26.4	0.38

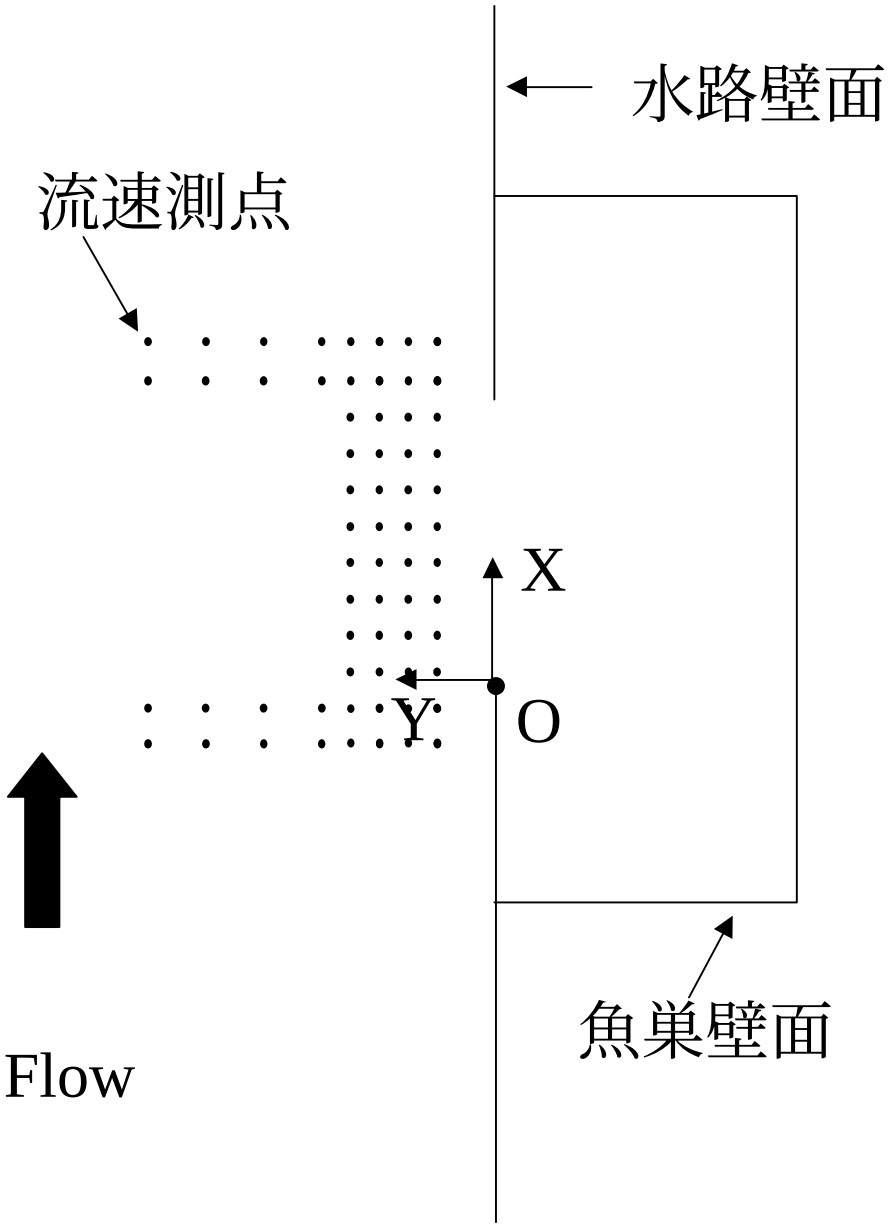


図 3．5　流速変動測定点

以降，実験結果については魚巣開口部の長さを L，水路幅を B とし，x，y 座標についてそれぞれ x/L，y/B と表記する．

第４章　実験と考察

４．１　渦の発生周期と渦径

魚巣ブロックを開水路の流れのなかに置くと、開口部周辺で剪断が生じる．この際に、剥離渦が発生し，それが魚巣内外の物体交換に影響を与えていることがこれまでに報告されているが，今回，流れの可視化を行うことでも確認された．また，渦の発生周期，渦径に影響を及ぼすパラメータとしてフルード数が挙げられているが，RUNⅠ－１～Ⅰ－３とそれぞれフルード数を変化させて実験を行うことで，それぞれ比較できた．

基本的に，フルード数が増加することで，渦の発生周期，渦径，ともに大きくなることが確認された．実験ごとの発生周期と渦径とについて画像データから得られた各フルード数についてのデータを表４．１に示す．これによると，フルード数が増加することで段階的に渦径は大きくなっているが，周期に関しては，RUNⅠ－１～RUNⅠ－２よりも RUNⅠ－２～RUNⅠ－３の方が飛躍的な増加が認められる．これに関しては，実験２の時系列解析の結果との比較から検討したい．

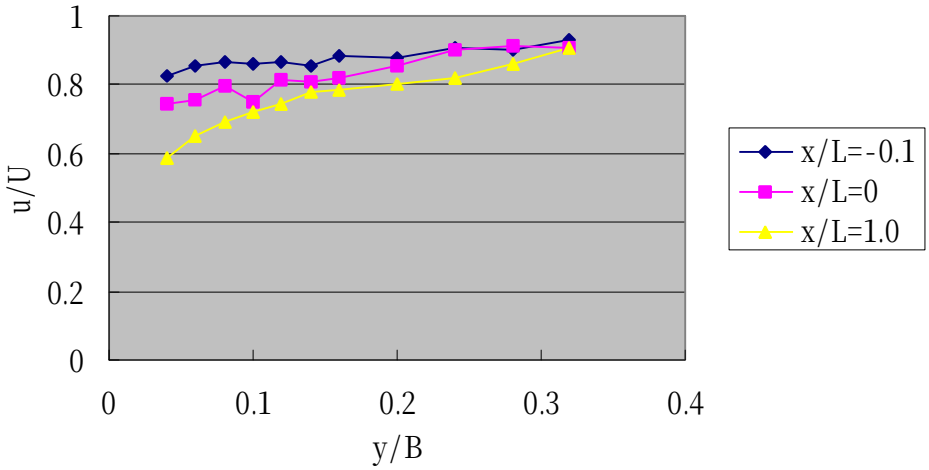
表 4．1　渦の発生周期と渦径

RUN	H(cm)	平均渦径(cm)	発生周期(s)
Ⅰ－1	11	1.76	1.50
Ⅰ－2	7	2.36	1.07
Ⅰ－3	5	2.98	0.53

４．２　魚巣開口部始端及び終端の流速分布

これより，**図３．５**に示す**ｘ**＝-1，0，0，10**ｃｍ**の各測点において平均流速成分**ｕ**，**ｖ**，乱れ成分 u', v'レイノルズ応力 $\overline{uv}$ の**ｙ**方向分布を示したのが**図４．２**である．**図４．２**(a), (b)はそれぞれ RUNⅡ-1，RUNⅡ-2 の結果である．平均流速については RUNⅡ-１，RUNⅡ-２ともに，流下してきた流れが魚巣に近づくにつれて減勢してきているのがわかる．通常の開水路の流れと今回の実験の測点との相違点として留意しておかねばならないのが，３つ連結した魚巣の２番目の魚巣について観測しているというところであろう．後に示す実験結果からも分かるように，魚巣開口部近傍を流下した流れは，一時的にその流速が落ちる．そのまま回復せずに次の魚巣を向かえる流れと通常の流れとは大きく異なるのである．通常の流れならば，主流と水路壁面の間に十分に発達しえる流速の境界層が，一度，魚巣周辺を流下することで変形し，次の魚巣を流下する際に乱れのエネルギーが大きくなる．しかし，今回の実験では開口部始端でのレイノルズ応力をみてみると，それほど大きい値を示しておらず，前の魚巣での乱れを回復した流れとすることができる．よって，魚巣周辺を通過する流れは前の魚巣の影響を引きずらない，主流部からの連続した流れとみることができる．

(a)RUN Ⅱ -1(H=7.0cm)



(b)RUN Ⅱ -2(H=5.0cm)

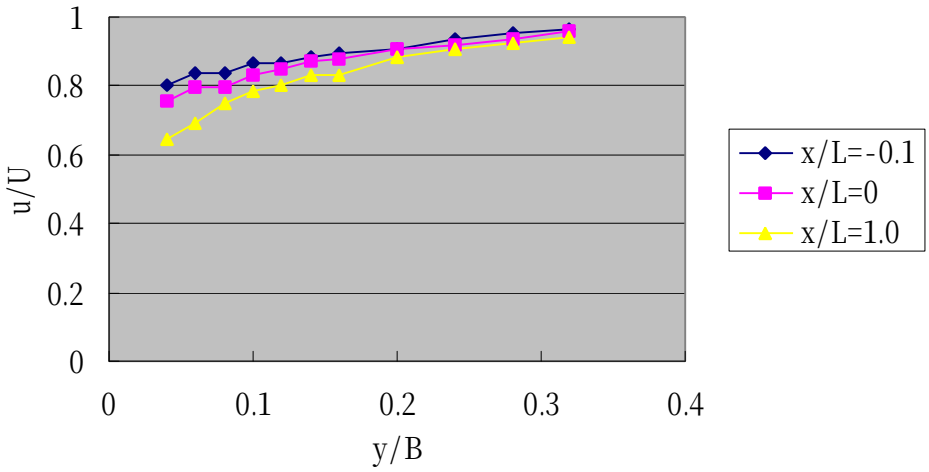
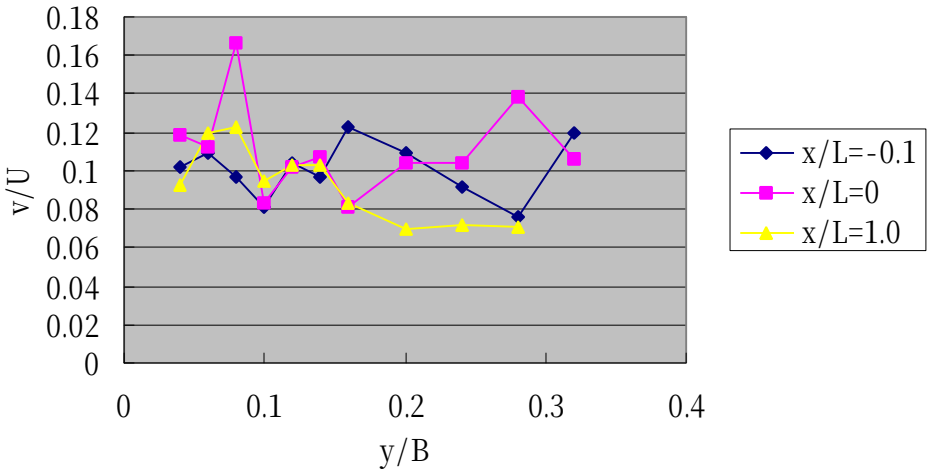


図４．２．１　時間平均流速ｕのｙ方向分布

(a)RUN Ⅱ -1(H=7.0cm)



(b)RUN Ⅱ -2(H=5.0cm)

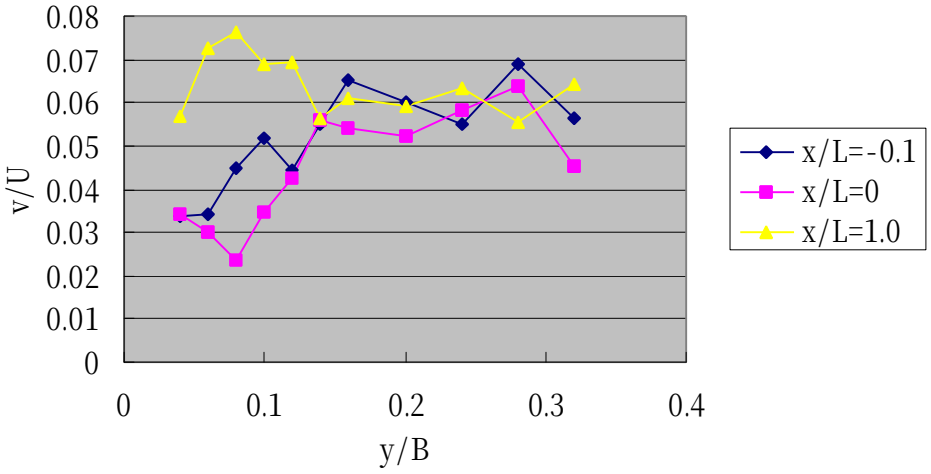
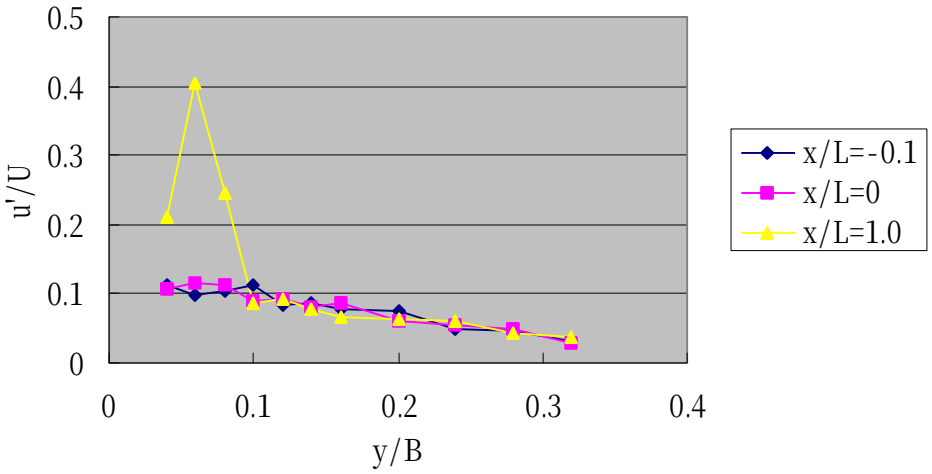


図４．２．２　時間平均流速ｕのｙ方向分布

(a)RUN Ⅱ -1(H=7.0cm)



(b)RUN Ⅱ -2(H=5.0cm)

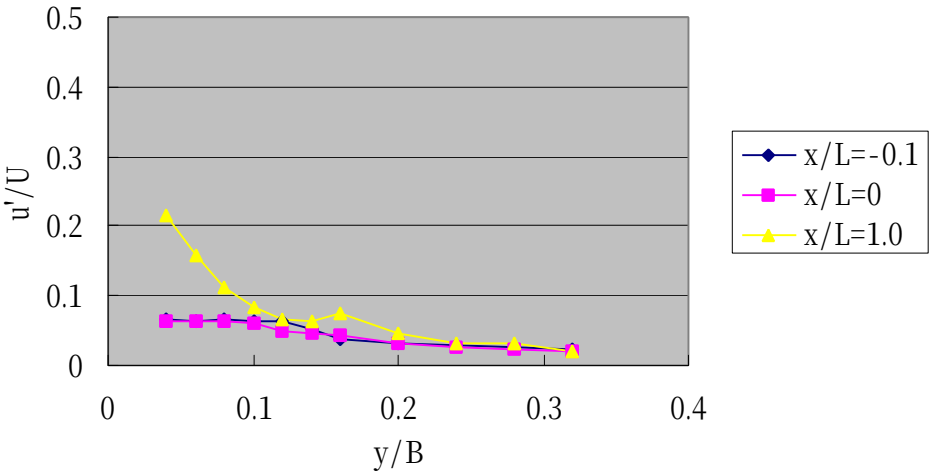
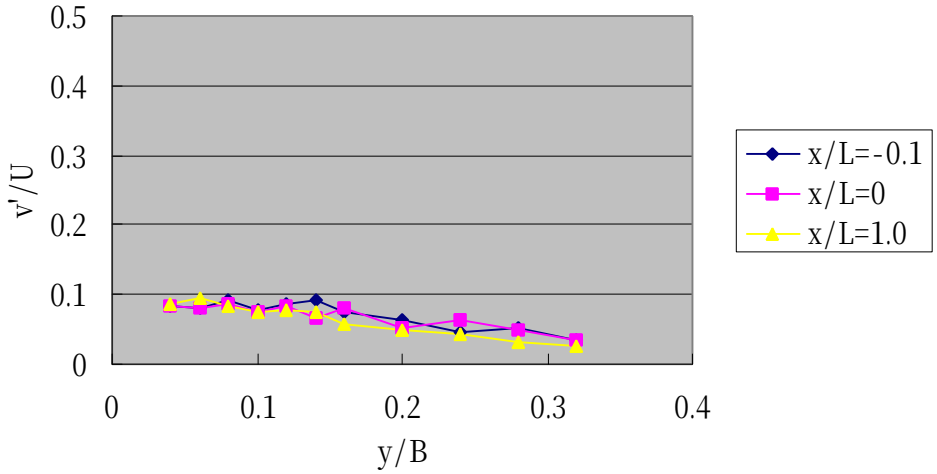


図４．２．３　乱れ強度 u'の y 方向分布

(a)RUN Ⅱ-1(H=7.0cm)



(b)RUN Ⅱ-2(H=5.0cm)

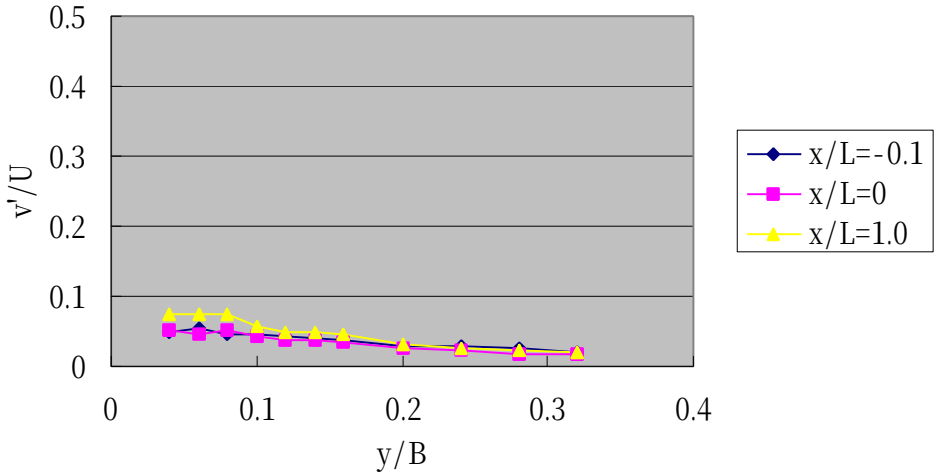
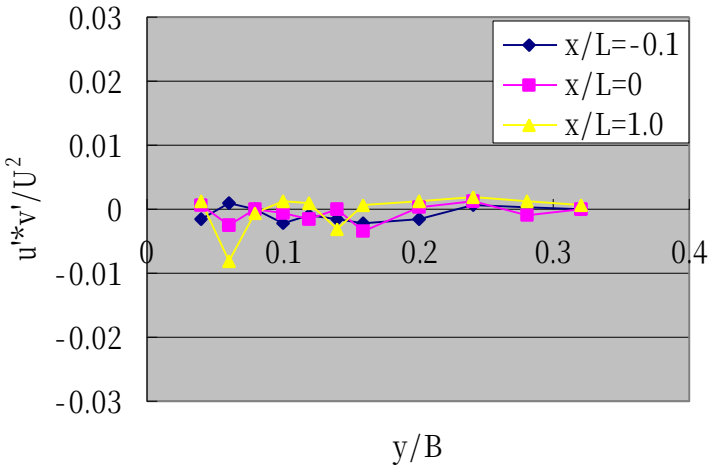


図４．２．４　乱れ強度 v'の y 方向分布

(a)RUN Ⅱ -1(H=7.0)



(a)RUN Ⅱ -2(H=5.0)

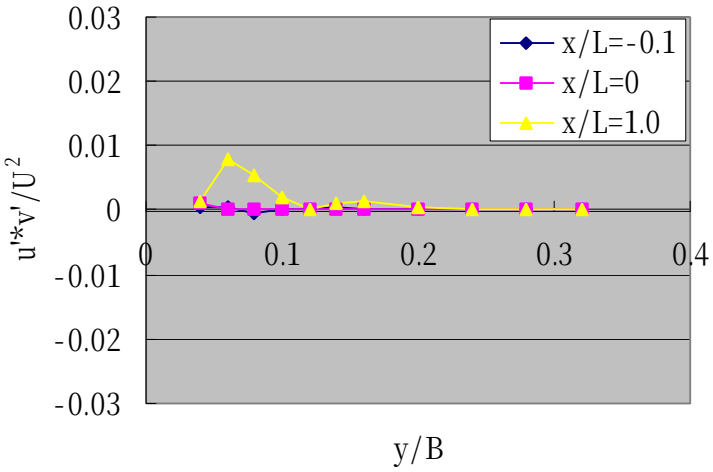


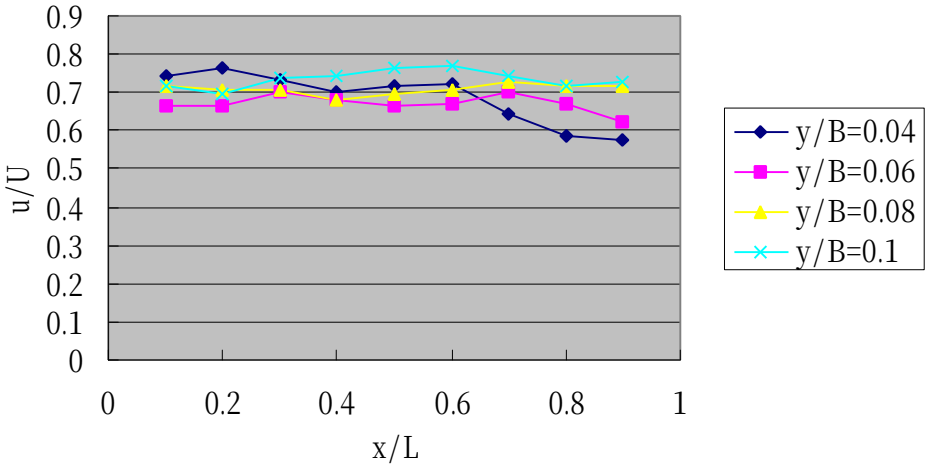
図４．２．５　レイノルズ応力の y 方向分布

４．３　魚巣開口部周辺の剪断層の流速変動時系列

次に，魚巣開口部に形成される乱流剪断層の構造について流速変動時系列を調べることによって解明したい. RUNⅡ-1, RUNⅡ-2 双方の実験データについて以下に列挙してある. 概して言えるのが，魚巣開口部に近いラインほど剪断層の影響を受けているということである．Y/B=0.04 のラインに関しては剪断層の一部であることが十分に見て取れる.

また，レイノルズ応力の分布から流下とともに乱れを増していくことが分かる.

(a)RUN Ⅱ-1(H=7.0cm)



(b)RUN Ⅱ-2(H=5.0cm)

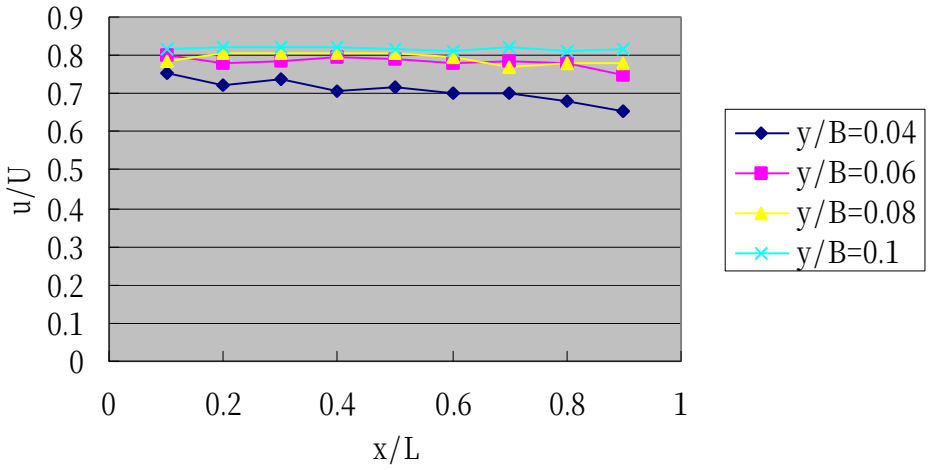
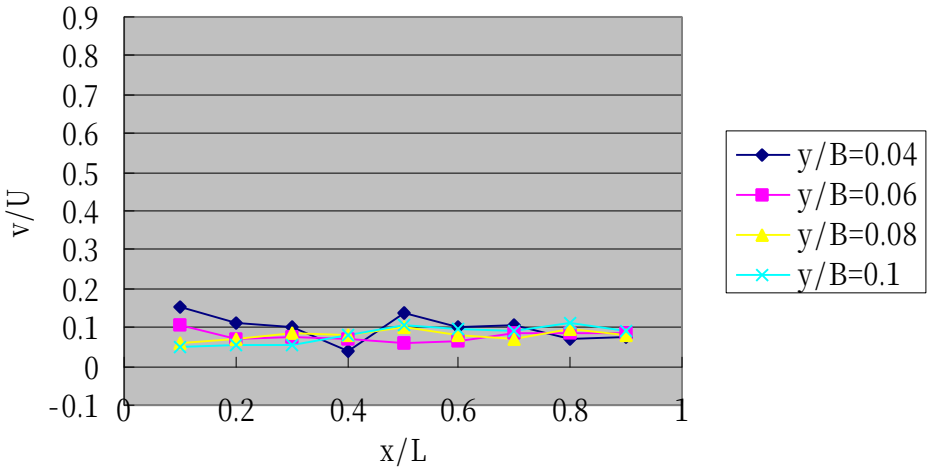


図４．３．１　時間平均速度成分ｕのｘ方向分布

(a)RUN Ⅱ -1(H=7.0cm)



(b)RUN Ⅱ -2(H=5.0cm)

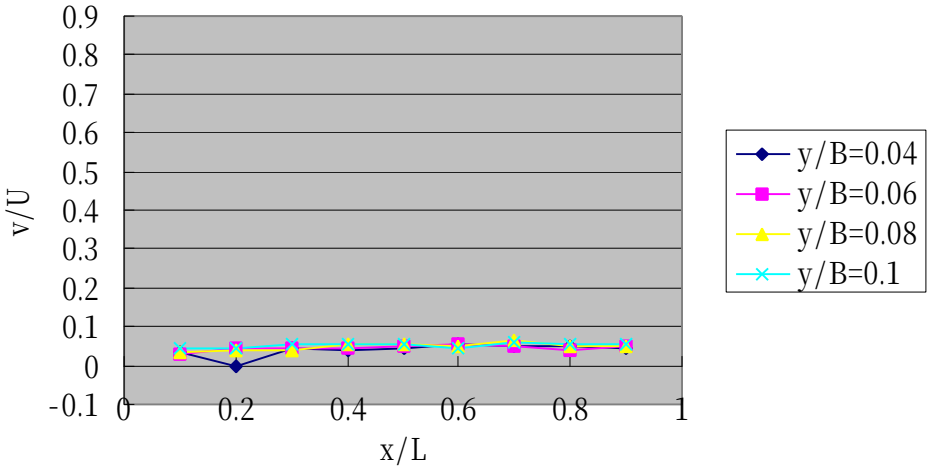
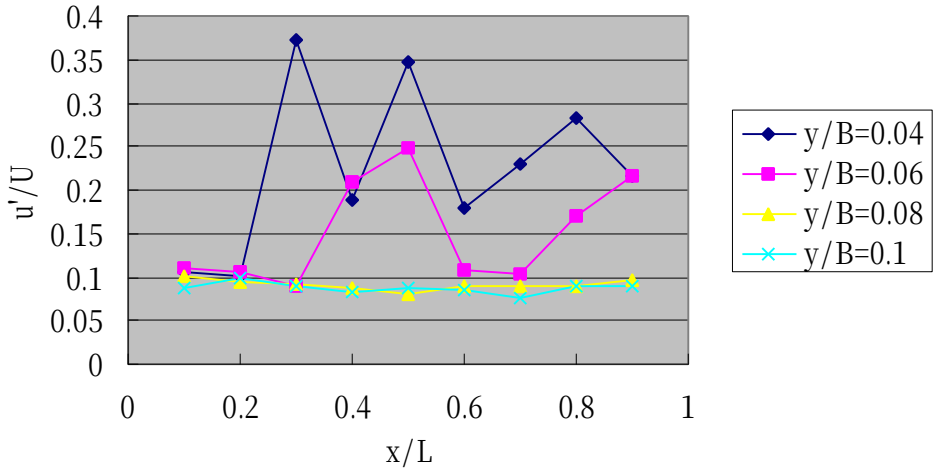


図４．３．２　時間平均流速 v の x 方向分布

(a)RUN Ⅱ-1(H=7.0cm)



(b)RUN Ⅱ-2(H=5.0cm)

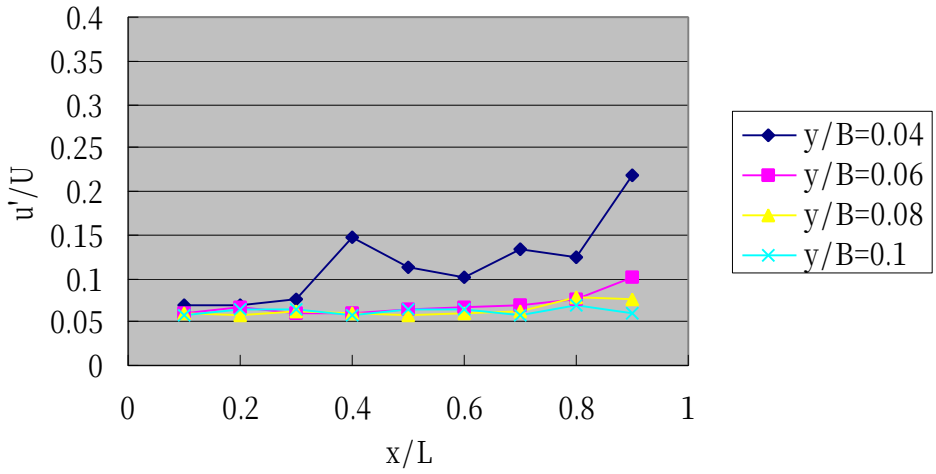
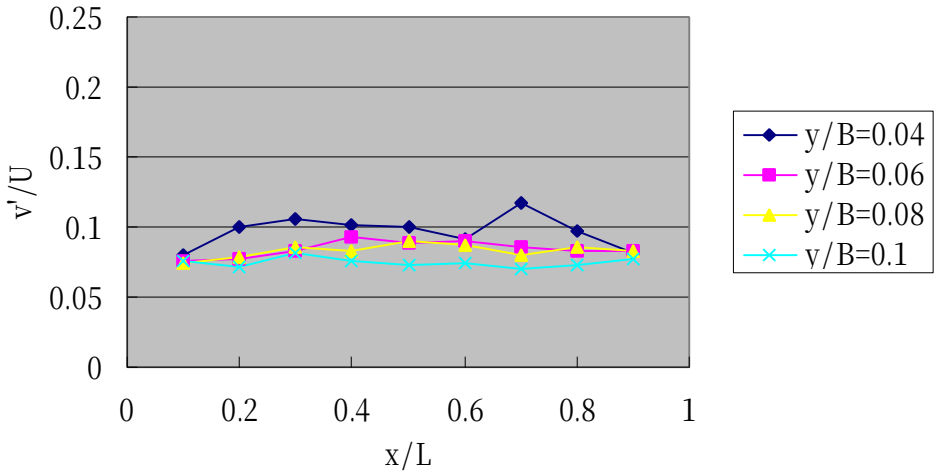


図４．３．３　乱れ成分 u'の x 方向分布

(a)RUN Ⅱ -1(H=7.0cm)



(b)RUN Ⅱ -2(H=5.0cm)

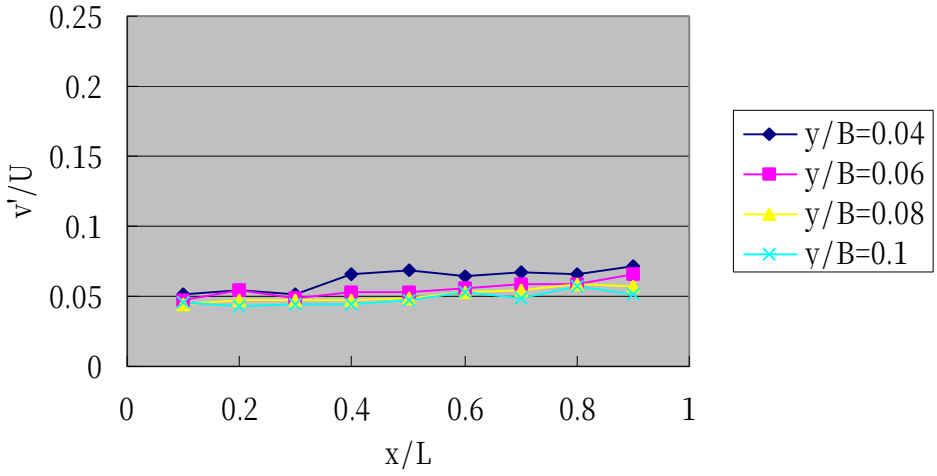


図４．３．４　乱れ成分 v'の x 方向分布

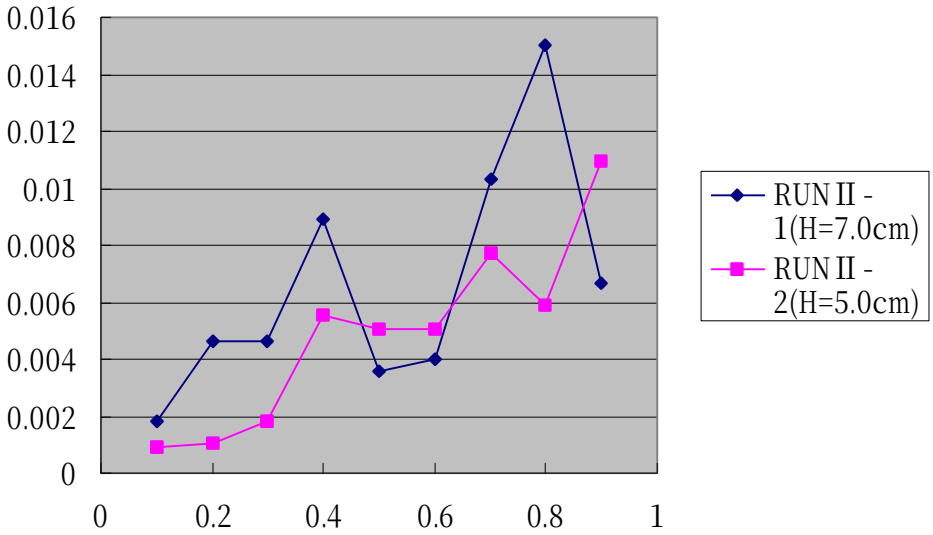


図４．３．５　レイノルズ応力の x 方向分布

４．４　乱流剪断層の平均渦径

実験１で，流れの可視化データより渦の解析を行ったが，ここでは乱流計測で得た流速変動時系列から乱流剪断層の平均渦径について検討する．

流速変動に関する x，y 方向の平均渦径 l_x，l_y は次のように算出する．x，y 方向の流速変動 u’，v’の自己相関係数 $R_{u'}(t)$, $R_{v'}(t)$ から

$$l_x = \bar{u}(x)\int_0^{t_0} R_{u'}(t)\,dt$$

$$l_y = \bar{v}(y)\int_0^{t_0} R_{v'}(t)\,dt$$

により求める．ここに t はずらし時間，t_0 は自己相関係数が最初に 0 になるまでのずらし時間である．

また，

$$t_{*x} = \int_0^{t_0} R_{u'}(t)\,dt$$

$$t_{*y} = \int_0^{t_0} R_{v'}(t)\,dt$$

は，渦の平均寿命時間である．

RUNⅡ-1	H=7.0	平均寿命	卓越周期	平均流速	渦径
x/L	y/B	t_0	t*	u_x(mean)	l_x
0.1	0.04	0.42	0.21	14	2.94
0.2	0.04	0.43	0.215	14.46	3.1089
0.3	0.04	0.42	0.21	13.87	2.9127
0.4	0.04	0.34	0.17	13.3	2.261
0.5	0.04	0.32	0.16	13.52	2.1632
0.6	0.04	0.43	0.215	13.64	2.9326
0.7	0.04	0.42	0.21	12.18	2.5578
0.8	0.04	0.23	0.115	11.12	1.2788
0.9	0.04	0.28	0.14	10.85	1.519
x/L	y/B	t_0	t*	u_y(mean)	l_y
0.1	0.04	0.34	0.17	14	2.38
0.2	0.04	0.43	0.215	14.46	3.1089
0.3	0.04	0.42	0.21	13.87	2.9127
0.4	0.04	0.34	0.17	13.3	2.261
0.5	0.04	0.32	0.16	13.52	2.1632
0.6	0.04	0.43	0.215	13.64	2.9326
0.7	0.04	0.38	0.19	12.18	2.3142
0.8	0.04	0.23	0.115	11.12	1.2788
0.9	0.04	0.28	0.14	10.85	1.519

表 4．4．1　渦の平均寿命と渦径(RUN**Ⅱ**-1)

RUNⅡ-2	H=5.0	寿命時間	卓越周期	平均流速	渦径
x/L	y/B	t_0	t*	u_x(mean)	l_x
0.1	0.04	0.17	0.085	19.88	1.6898
0.2	0.04	0.21	0.105	19.09	2.00445
0.3	0.04	0.3	0.15	19.47	2.9205
0.4	0.04	0.3	0.15	18.58	2.787
0.5	0.04	0.28	0.14	18.86	2.6404
0.6	0.04	0.28	0.14	18.52	2.5928
0.7	0.04	0.29	0.145	18.56	2.6912
0.8	0.04	0.3	0.15	18	2.7
0.9	0.04	0.31	0.155	17.21	2.66755
x/L	y/B	t_0	t*	u_y(mean)	l_y
0.1	0.04	0.17	0.085	19.88	1.6898
0.2	0.04	0.2	0.1	19.09	1.909
0.3	0.04	0.31	0.155	19.47	3.01785
0.4	0.04	0.31	0.155	18.58	2.8799
0.5	0.04	0.28	0.14	18.86	2.6404
0.6	0.04	0.28	0.14	18.52	2.5928
0.7	0.04	0.31	0.155	18.56	2.8768
0.8	0.04	0.31	0.155	18	2.79
0.9	0.04	0.23	0.115	17.21	1.97915

表 4．4．2　渦の平均寿命と渦径(RUN**Ⅱ**-2)

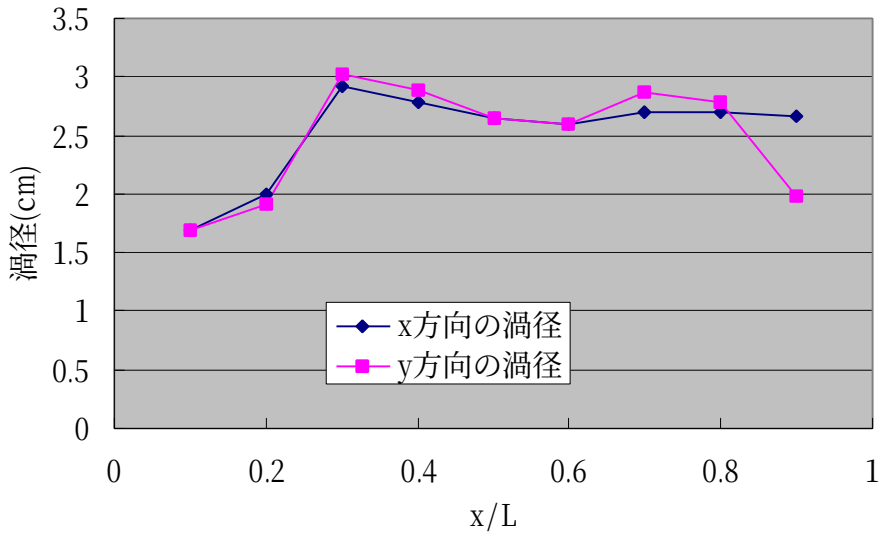


図 4．4．1　乱流剪断層の渦径(y/B=0.04)

図 4．4．1 のグラフを見ると，開口部付近で発生した渦は，そのスケールを増しながら流下していくのが分かる．また，x 方向と y 方向の渦径は，各地点においてほぼ等しい値を示す．これは乱流構造内に発生する渦は，ひずみが少ないと言えよう．また，実験 1 での渦のスケーリング結果と近い値の渦径を示すものがある．これから，流れの可視化による解析は有効であることが確認できよう．しかし，実際の渦径は，フルード数の変化による差はそれほど確認できなかったので，渦径の見た目の大きさとのギャップなど，今後の研究で明らかにしたい．

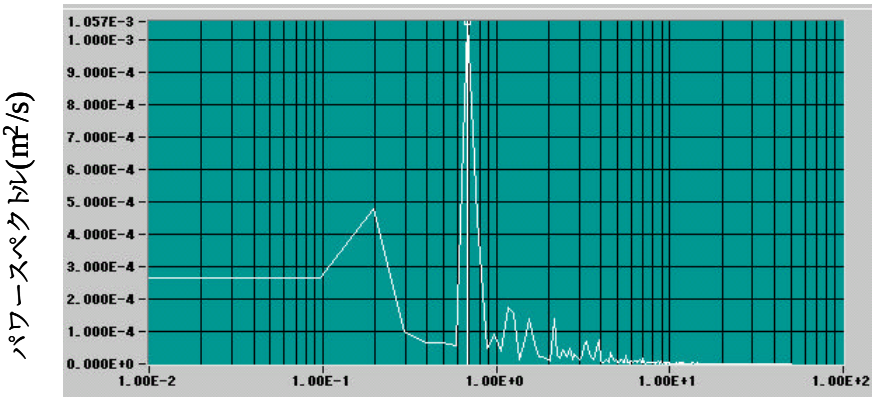
４．５　スペクトルにみる組織渦の周期性

スペクトル解析から組織渦の特性について検討してみたい．実験 2 において得られた流速変動時系列から各測点におけるパワースペクトルを得た．その中から，もっとも，乱流構造内に発生する組織渦の特性が顕著に表れている(x，y)＝(1.0，1.0)～(x，y)＝(9.0，1.0)のライン，つまり，一番，開口部に近いラインについてのスペクトルについて検討してみたい．

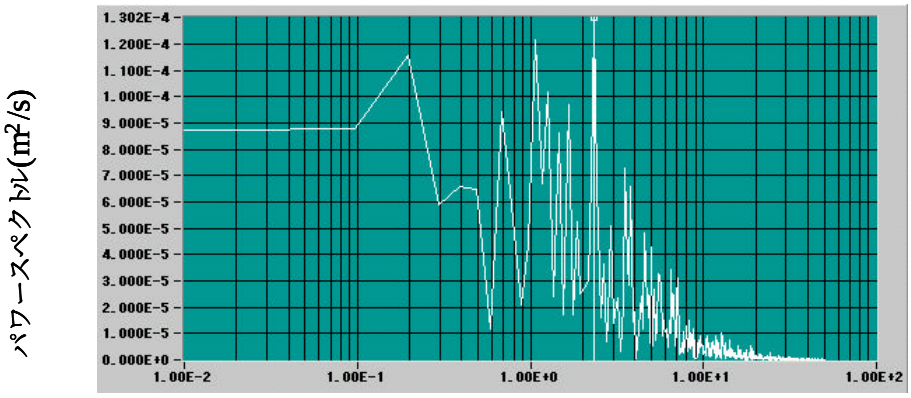
ＲＵＮⅡ-1 では 0.8hz，RUNⅡ-2 では 0.9Hz 付近にピークが出現している．これよりその発生周期がフルード数によって変化することが言えよう．

また，通常の乱流構造では，ピークを過ぎた後にこれほどの周期性は確認されない．これは，組織渦が発生しているためである．この組織渦の周期と深く関わるのが，魚巣ブロック内の水面変動，セイシュであると過去に報告されている．

RUN2-1



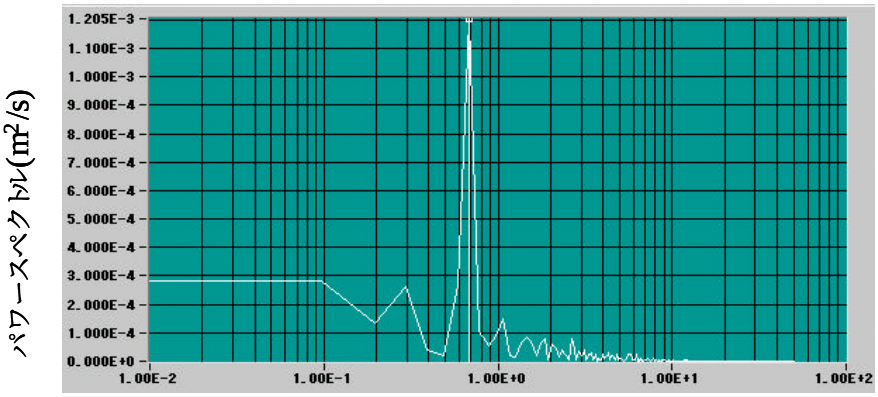
RUN2-2



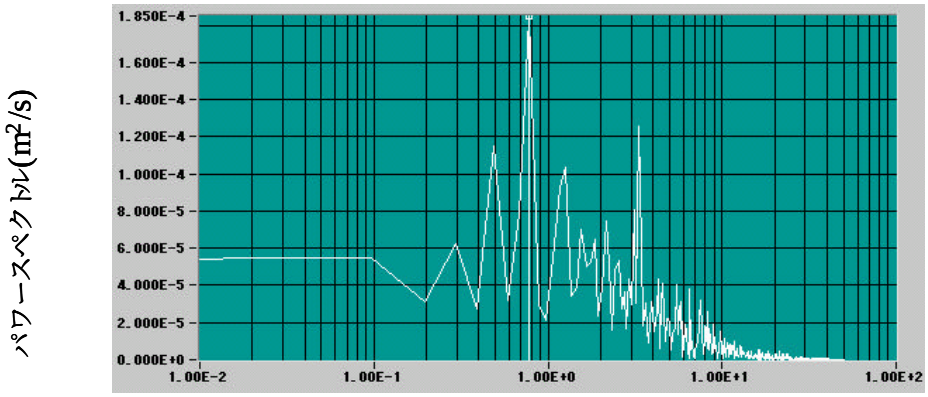
(x,y)=(-1,1)

図 4．5．1　　剪断層における流下方向のパワースペクトル

RUN2-1



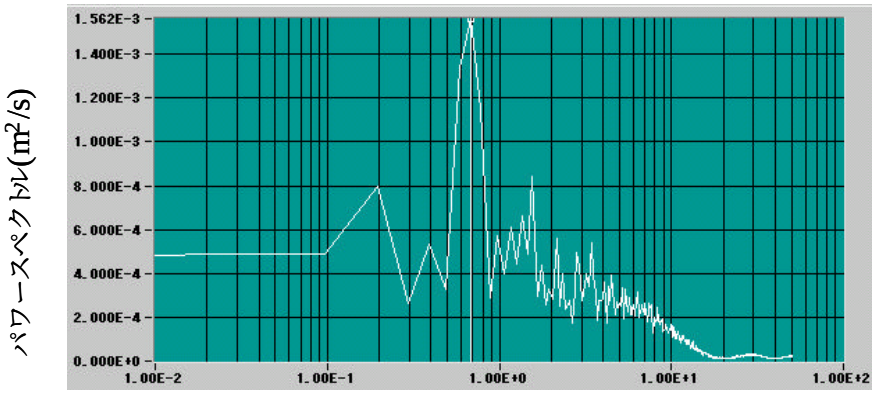
RUN2-2



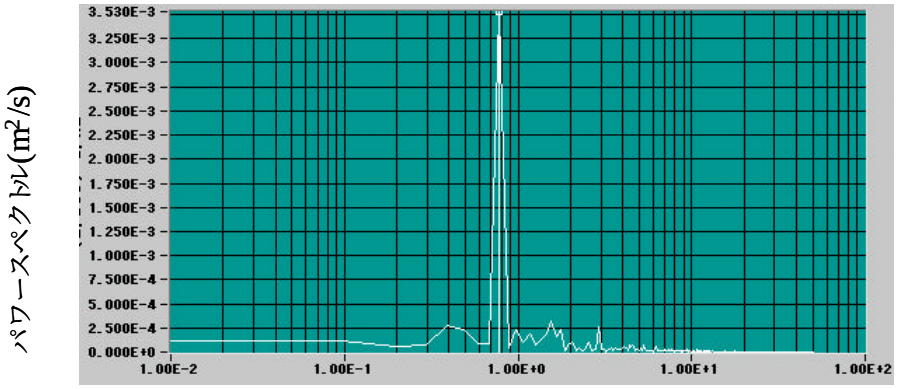
(x,y)=(1,1)

図 4．5．2　剪断層における流下方向のパワースペクトル

RUN2-1



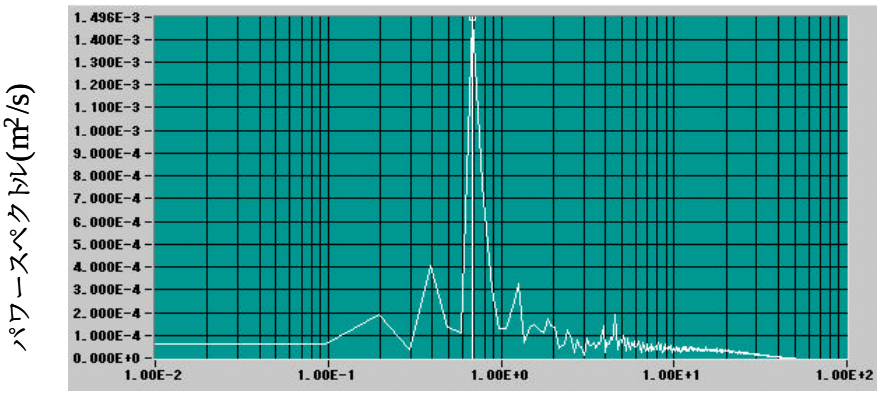
RUN2-2



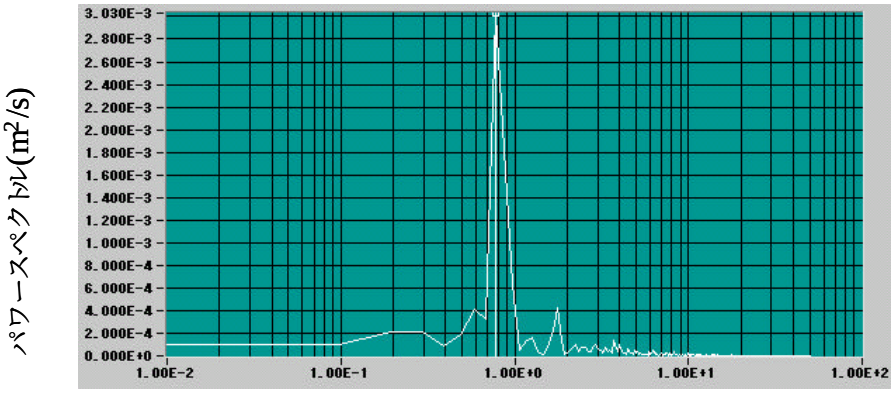
(x,y)=(5,1)

図 4．5．3　剪断層における流下方向のパワースペクトル

RUN2-1



RUN2-2



(x,y)=(9,1)

図 4．5．4　剪断層における流下方向のパワースペクトル

第5章　結論

本研究では人口魚巣開口部に形成される乱流剪断層の水理特性に関して，水理実験に基づき検討を行った．

得られた結果をまとめると以下のようである．

Ⅰ．　フルード数が大きくなるほど人工魚巣開口部周辺に発生する組織渦の渦形は大きくなり発生周期も早くなる．また，流下とともにその渦径は大きくなる．

Ⅱ．　水路壁面近傍の流速は人工魚巣開口部周辺を流下する際に減衰するが，連結されている，次の人工魚巣に差し掛かるまでにその流速は回復されている．

Ⅲ．　主流横断方向のレイノルズ応力は 0 付近の値を指し，乱れが小さいことを示す．

Ⅳ．　魚巣開口部周辺の剪断層は流下とともにその乱れを増す．

謝辞

本論文の作成にあたり，御指導，御協力を承りました九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学部門生産環境学講座の森健教授，井上英二助教授，原口智和助手に深く感謝し，厚く御礼申し上げます。

また，同講座修士課程衛藤鑑氏，尾崎彰則氏には，本研究を進めるに当たり終始惜しみない熱意と愛情溢れる御助言，御教示をいただくと共に，本論文の作成にあたり最後の最後まで温かい御激励をいただき，心より御礼申し上げます。

また，多方面にわたり広く御意見，御協力をいただいた同生産環境情報学講座の博士課程松井正実氏，平井康丸氏，修士課程紺屋秀之氏，高瀬敬史氏，桑野朋子氏，光岡宗司氏，すべての皆様に深く感謝いたします。

さらに，講座配属以来，本日に至るまで励ましあい，助け合った炭本祥生氏，中島敬太郎氏，中村生子氏，福島崇志氏，丸谷一郎氏，村松亮介氏に深く感謝いたします。

最後にいつもかげながら協力，激励してくださった家族に心より感謝の意を捧げて結びとさせていただきます。

2002 年 3 月

中島央晶

参考文献

有田正光(1998)：水圏の環境(東京電機大学出版局)

有田正光(1998)：流れの科学(東京電機大学出版局)

牧平朋大(2000)：人工魚巣の水理環境，九州大学農学部平成 12 年卒業論文

山本貴則(2001)：人口魚巣開口部における剪断層の乱流構造，九州大学農学部平成 13 年卒業論文