九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

密度2成層流における円柱後流域の混合特性

河合, 憲三
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

https://hdl.handle.net/2324/1498264

出版情報：Kyushu University, 2007, 学士, 学士
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

卒業論文

密度 2 成層流における円柱後流域の混合特性

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

河合　憲三

2008 年 3 月

第1章　序論　1
第2章　円柱後流の流動特性
2.1　はじめに　4
2.2　二次元円柱の後流　4
2.3　三次元円柱の後流　6
2.4　有限円柱の後流　7
第3章　密度2成層流における円柱後流域の流れパターンに関する実験
3.1　実験目的　8
3.2　実験装置　8
3.3　座標系　9
3.4　実験方法　9
3.5　実験結果と考察
3.5.1　1本円柱の後流について　11
3.5.2　2本円柱の後流について　13
3.5.3　3本円柱の後流について　18
3.5.4　5本円柱の後流について　24
3.6　まとめ　29
第4章　密度2成層流における円柱後流域の乱れに関する実験
4.1　実験目的　30
4.2　実験方法　30
4.3　実験結果と考察
4.3.1　同一水深の平面上における乱れ強度分布に関する結果及び考察　33
4.3.2　流下方向における密度と乱れ強度の鉛直プロファイルによる考察　39
4.3.3　円柱本数と密度の最大乱れ強度との関係についての考察　45
第5章　結論　46
謝辞　47
参考文献　48

第 1 章　序論

均質流体の一様な流れの中に円柱が置かれているとき，低いレイノルズ数において，流れは定常流から振動流へ遷移する．流れが振動流になると，円柱が長期にわたり周期的な力を受けて破断に至る現象が報告されている．例えば，原子力発電所等における配管中の流体温度計測のために配置された温度計の保護桿の破断がある．この問題等防ぐために流れの振動を制御する研究がなされている．一方，円柱を過ぎる流れの安定解析に関する研究において，1 本の円柱を過ぎる流れは，レイノルズ数（$\mathrm{Re}=Ud/\nu$，U：平均流速，d：円柱直径，ν：動粘性係数）が 45.4 以上のときに不安定となり対称な定常流から周期流へと遷移することが明らかにされている．

また，流れと直角に並べられた 2 本の円柱を過ぎる流れにおいて，2 本の円柱間隔がおよそ円柱直径を超える場合，2 円柱の後流は一対の特徴的な流れとなることが実験的に確認されている．さらに，その流れはレイノルズ数や円柱間隔の大きさによって数種類に分類されることも示されている．

円柱間隔が円柱直径程度よりも小さい場合，高いレイノルズ数において 2 本の円柱間の流れは対称ではなく，一方に偏ることが確認されている．円柱間隔が広い場合については，比較的低いレイノルズ数で円柱間距離がおよそ円柱半径から円柱直径の 5 倍の範囲での可視化実験から，円柱間隔が円柱の直径を超えるとき，2 つの円柱の後流は同期して同位相と逆位相の 2 つの流れパターンが発生することが見出されている．

このように，均質流体中に円柱が置かれた場合の後流について，円柱が 1 本および 2 本の場合について水理実験，数値計算により研究がなされ，流れはレイノルズ数や円柱間隔および初期条件などに依存することが水理実験，数値実験から明らかにされている．

しかし，密度 2 層流中に円柱が置かれた場合について，円柱後流の特性を取り扱った研究は見当たらない．2 層流中に円柱が置かれた場合，円柱前面の圧力変動や円柱後流域における流速，圧力変動に基づく，円柱周りの流れ，いわゆる後流は，2 層界面に影響を及ぼし，2 層界面に形成される内部波の砕波等を引き起こし，上・下層間の流体混合に影響を及ぼすものと考えられる．

そこで，本研究では，まず，2 層流中に円柱が置かれた場合の円柱後流の特性について，可視化実験により検討を行った．ついで，円柱後流域の流れ場の変動に基づく密度界面における上下層の混合について，水理実験により検討を行った．

なお，本研究に取り組むきっかけは以下のようである．ため池などのような閉鎖水域では,水域への流入出量が非常に小さく,密度成層が形成されやすい．これにより，閉鎖性水域では，溶存酸素量の多い上層の水塊が下層に輸送されず，底層の貧酸素化を招き，水質悪化が生じる．そのため鉛直混合能力を抑制する成層を解消させることは，閉鎖性水域おける水質問題を考える上で非常に大きな問題である．成層化の解消は，日中の日射および夜間の放射冷却による熱対流，または風の作用による吹送流に起因する連行現象によってなされる．しかし，密度界面上に沈水植物が存在する場合，植物周辺の流れは植物がない場合の流れ特性と異なり，連行規模が異なることが推察される．この種の研究には 2，3 の研究例があり，そのうちの 1 つとして，密度界面上に沈水植物が存在する場合の連行現象に関する実験から，植物の存在はその周辺における密度界面近傍の乱流エネルギーに影響を及ぼし，鉛直混合能力が増大することが報告されている（村松ら　2002，　尾崎ら　2003）．また，水生植物を模擬した円柱周りの流れに関する PIV 計測実験から，円柱から回り込み加速した上層流が界面から剥離する際に特に連行が生じ，剥離部分，円柱間から放出される

上昇流部分で強い乱れが発生し，密度界面における連行を促進する可能性があるという結果を得ている（山崎ら　2007）.

以上のように，ため池等の閉鎖性水域の水質問題を考える場合に重要である密度成層の消長を明らかにするためには，吹送流や熱対流に対する密度界面の連行現象に，水生植物がどのような影響を及ぼすかを定量的に把握することが極めて重要となる．しかし，これに関する研究例は少なく，未解明な点が多く残されている．そこで，その基礎研究として，単一円柱の後流や複数円柱を配置した場合の円柱後流と円柱間の相互干渉など，流れの特性について明らかにするとともに，それらの流れによる密度界面の混合現象についても明らかにすることが重要と考えた．

第2章　　円柱後流について

2.1　はじめに

本研究では，２成層流体における円柱周りおよび後流の流れ特性，および後流域の密度界面における上下層間の混合現象を明らかにするために実験を実施した．

まず，本章の各節では，均質流体の一様流れ場に置かれた円柱後流の二次元および三次元流れ特性，有限円柱の後流特性について概説する．

2.2　二次元円柱の後流

流れの中に物体がある場合や静止流体中を物体が動く場合，物体背後の流れを後流という．流れに対して鈍い物体においては，前面では面に沿って流れるが後面では流れが物体表面からは剥離してしまう．これは，表面に沿って流れるためには大きな角度で曲がらなければならないが，流れは慣性のために曲がりきれないためであると考えられる．この流れの剥離が鈍い物体の特徴で，この剥離によって大きな抵抗を生じ，また強い乱れが生成される．

いま，均一流体の流れ場を考える（単層流）．一様な流れに対して垂直に円柱が立っている場合，円柱を過ぎる流れは，流速が十分小さいときは左右対称な流れが実現する．しかし，流速が次第に大きくなると流れの様子は一変する．すなわち，次式で定義するレイノルズ数R_eの大小によって流れのパターンが異なってくる．

$$R_e = \frac{\rho U d}{\mu}$$

ここに，Uは一様流速，dは円柱の直径，ρは流体の密度，μは粘性係数である．

Fig.2-1 はレイノルズ数の大小による円柱まわりの流れ模様の変化を示したものである．レイノルズ数が十分に小さい間は粘性の作用が圧倒的であるから，流体は円柱を沿うように流れる．このとき，円柱まわりの流線は下流に向かって前後左右対象である（Fig.2-1(a)）．レイノルズ数が 0.1 の程度になると前後左右対象性がくずれ出し，レイノルズ数が 5 程度を超えると流れは剥離して，下流側に反対方向に回転する一対の渦が発生する（Fig.2-1(b)．これを双子渦と呼ぶ)．この双子渦はレイノルズ数の増加とともに下流側に伸びる．流れのパターンはまだ対象性を保持し，時間的にも変化しない．レイノルズ数がさらに大きくなり 40 程度になると，渦が円柱の左右から交互に剥がれ，反対方向に回転する渦が互い違いに 2 列ならんだ渦列ができる（Fig.2-1(c)，この渦をカルマン渦と呼ぶ)．

このカルマン渦列はレイノルズ数が 160 程度のところまでみられるが，レイノルズ数がこれよりおおきくなると渦列の規則性が乱れ始める．このように，レイノルズ数が 40 程度以下の場合には，円柱周りの流れは安定であるが，この値を越すと流れは不安定になることがわかる．流れが不安定になると円柱表面から剥離した 2 つのせん断層が内側に巻き込まれる結果，円柱の背後に渦が形成されることになる．この渦は，通常，円柱の両側から交互に渦形成領域内において形作られ，その形成順序に従って下流へ放射される．さらにレイノルズ数が 1000 程度になると，流れの乱れが激しくなり，円柱のまわりの流れは非常に複雑な流れになる（Fig2-1(d)）．しかし，流れが時々刻々複雑に変動していても，集団平均をとると，速度分布にカルマン渦列に類似したジグザグ型渦列構造が再現できる．

さて，レイノルズ数が 40 以上になると，円柱を過ぎる流れに発生するカルマン渦列において，渦対の発生周波 f は

$$f = S_t \frac{U}{d} \quad , \qquad S_t \approx 0.2$$

であることが知られている.ここにＳｔはストローハル数と呼ぶ.この関係は，規則的なカルマン渦列が発生するレイノルズ数の範囲$40 \le R_e \le 160$を越えて，$40 \le R_e \le 10^5$の範囲で成立すると言われている.

先に見たように，レイノルズ数が 40 以下では円柱まわりの流れは左右対称であるから，円柱が流体から受ける力は一様粒の方向を向いている．つまり，抗力を受ける．しかし，レイノルズ数が 40 を越えてカルマン渦ができると，流れは非対称になり一様流に垂直な力の成分が現れる．つまり，揚力が作用することになる．渦塊が左右交互に剥がれるのに同期して，揚力の向きも周期的に変化する．つまり，円柱まわりの流れのレイノルズ数が 40 を越えて，カルマン渦が発生するようになると，円柱は抗力だけではなく，揚力が作用することになり，円柱は横揺れ振動をすることになる.

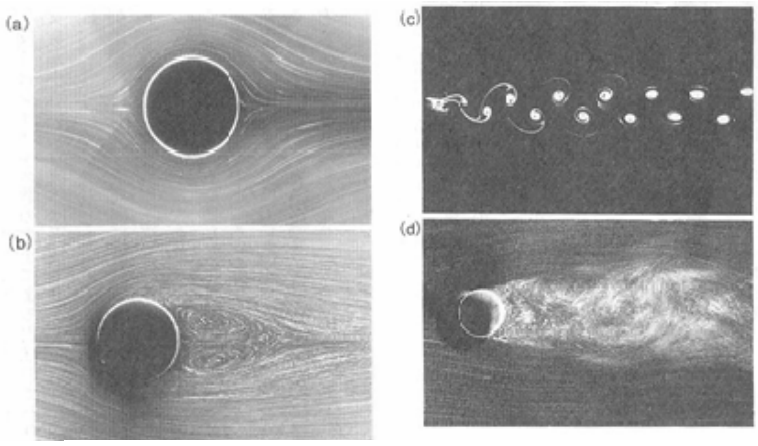


Fig.2-1 レイノルズ数の変化による流れ模様

以上のように，円柱を過ぎる流れ（円柱後流）はレイノルズ数に依存し，カルマン渦を発するようになると，円柱は横揺れ振動することになり，その後流特性も複雑になるものと推察される．したがって，本論文で対象としている沈水植物の茎の後流についてもこのことを考慮して検討する必要がある.

2.3　三次元円柱の後流

三次元円柱では，二次元円柱では考慮しなかった速度勾配の影響が生じる，特に壁面部分に存在する境界層の影響は大きい．円柱前縁部では，境界層部分において馬蹄型渦が生じ，円柱後流域では後流剥離渦が生じ，水路床近傍の流れを巻き上げる．カルマン渦は主流と後流剥離渦の境界に生じる強い渦度が帯状に下流へ引き伸ばされることによって生成される（宇民　1974）．

2.4　有限長円柱の後流

有限長円柱では，壁面近傍の境界層及び円柱端の影響のため，二次元円柱の場合とは異なる三次元的な流れとなる．有限長円柱後流の三次元性を特徴付ける流れとしてはとくにその円柱先端からの吹き降ろしの存在がある．また，低アスペクト比の円柱では周期的な渦列が存在しないとされ，また，高アスペクト比の円柱の渦列の渦流出振動数は円柱軸方向に変化するとともに，アスペクト比とR_e数に大きく依存し，特にアスペクト比の減少につれ，その振動数は大幅に減少する（岡本・八木田　1972）．二次元円柱とはかなり異なる流動特性となる．

第3章　密度2成層流における円柱後流域の流れパターンに関する実験

3.1 実験目的

均質流体中に円柱が置かれた後流の場合と同様に，密度2層流中に置かれた円柱後流についても，その流れの特性はレイノルズ数や円柱間隔などに依存するものと考えられる．

そこで，密度2層流中に円柱が置かれた場合について，円柱前面の圧力変動や円柱後流域における流速や圧力の変動に基づく，円柱周りや円柱後背域の流れ，いわゆる後流の流れパターンを把握するために，異なるレイノルズ数および円柱間隔の条件の下で実験を行った．また，流れのパターンは上層のみ把握した．

3.2 実験装置

密度2成層場は，Fig.3-1に示すように，幅20cm，高さ12cmの水槽を用いて作成した．上層に淡水（水道水），下層に塩水の密度2成層場を形成し，塩水の濃度は1‰としてその密度差を約1.0^{-3}g/cm^{3}とした．上層には所定の流量が流れるように淡水を流入させ，下層の塩水は静止状態となるようにし連行による密度界面の低下を防ぐため，下層両端に穴あきゴムチューブを這わせ，低下速度に合わせ徐々に塩水を補給できるようにした．また上層，下層の水深はそれぞれh_1=5cm，h_2=5cmとする．代表流速の設定は，淡水の流れる上層部分の面積100cm^2（h_1×水路幅）を流水断面とし，（所定の流速u）×（流水断面積）となる流量が流れているように流量を調節することで行った．段落ち部分から30cm下流部に円柱を設置し，色素流脈法により流れの可視化を行い，流れパターンの測定を行った．

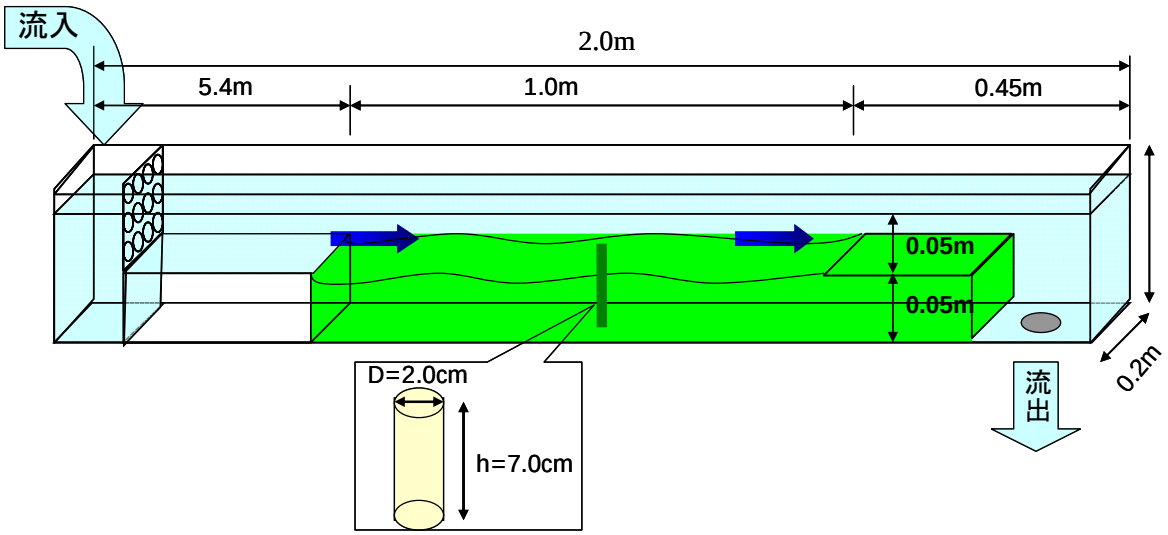


Fig.3-1　実験水槽

3.3　座標系

座標系は Fig.3-2 に示すように，水槽の中心軸から下流側に x 軸，水路横断方向に y 軸，円柱後流域の平均密度界面から上向きに z 軸を設定する．

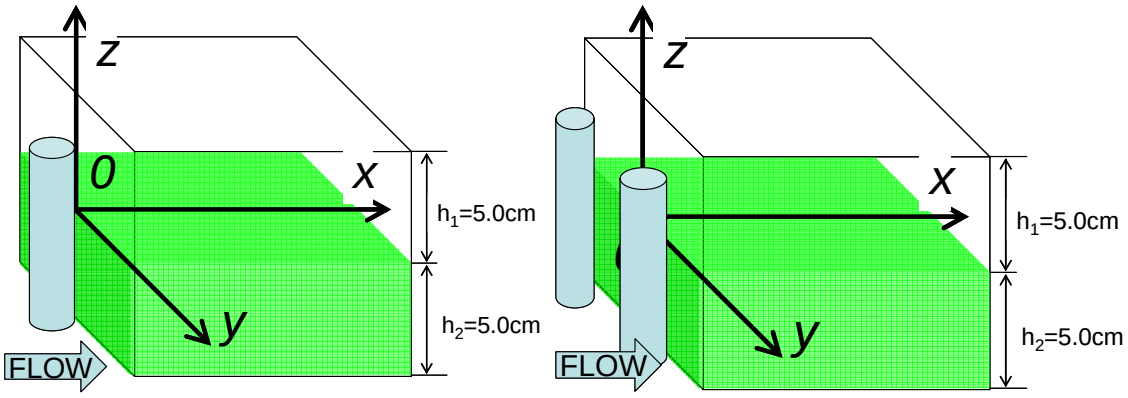


Fig.3-2　座標系

3.4 実験方法

実験は，上層流動，下層静止の 2 成層流として行い，上層平均流速と円柱の直径を用いたレイノルズ数を変化させて行った．実験に用いたレイノルズ数は約 50，100，150，200 の 4 ケースである．円柱の配置は，Fig.3-3 に示すように 1 円柱，2 円柱，3 円柱，5 円柱の 4 パターンである．複数円柱の場合には，各レイノルズ数について，無次元円柱間隔 $\lambda = m/d$ を 0.5，1.0，2.0，3.0，5.0 の 5 ケース変えて実験を行った．ここに，m は円柱間隔，d は円柱直径である．なお，円柱形状は長さ l=7.0cm，直径 d=1.0cm の木製円柱である．

また，流れの可視化に用いたトレーサーの着色には，アニリンブルーを用いた

流れパターンは，密度界面近傍の平面と密度界面から約 1.5cm から 2.0cm 上方の平面の 2 平面について，測定した．

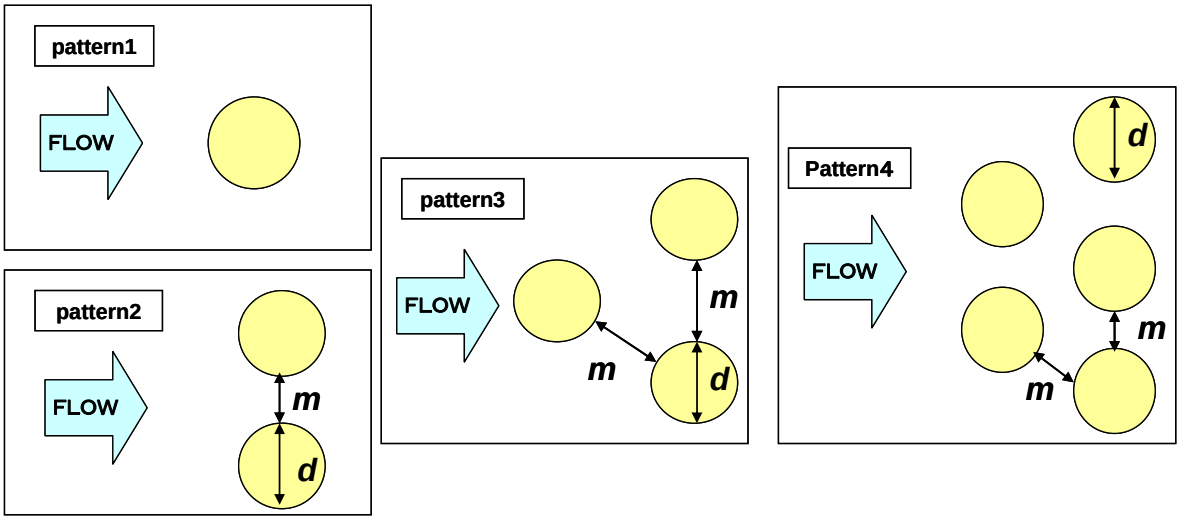


Fig.3-3 円柱の配置パターン

3.5　実験結果と考察

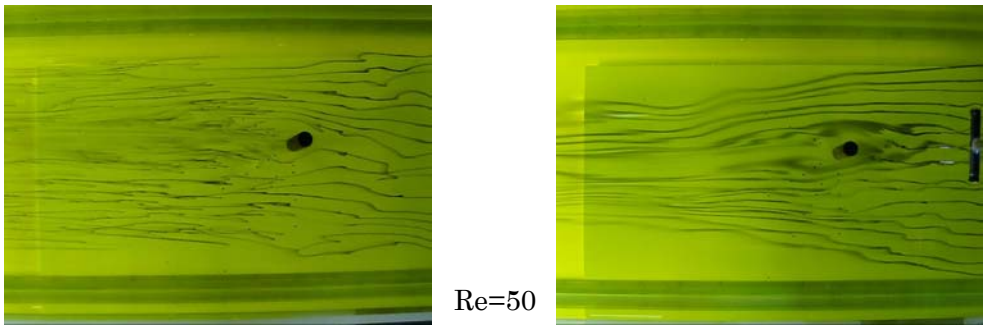
3.5.1　1本円柱の後流について

Fig.3-4 は，1本円柱後流の流れパターンの測定結果を示している．図中の H は密度界面から約 1.5～2.0cm の高さにおいて，L は密度界面のごく近傍において測定された流れパターンである（これ以降の結果説明図のL，Hは全て同じ意味である）．また，流れの方向は，図の右から左である（これ以降の図における流れ方向も全て同様である）．

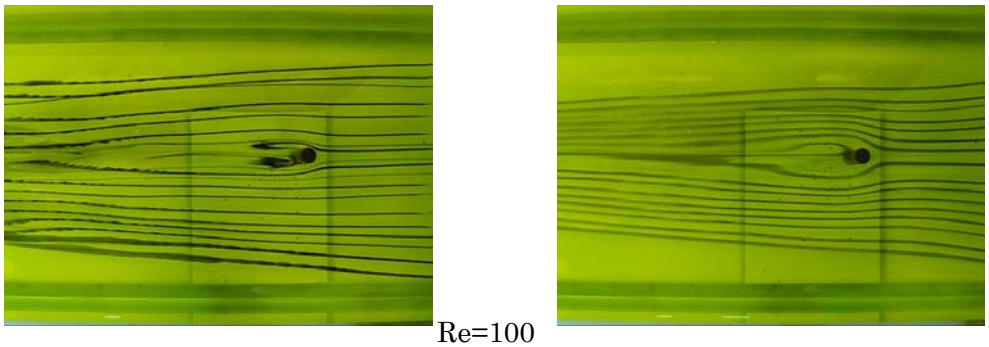
均質流体における 1 本円柱を過ぎる流れに関する既往の研究では，低いレイノルズ数において対称定常流であり，ある臨界レイノルズ数を超えると振動流へ遷移し，その臨界レイノルズ数はおよそ 45 程度であると報告されている．

密度 2 層流における円柱後流に関する本実験の結果も，臨界レイノルズ数の大きさは異なるようであるが，均質流体と同様な流れを呈している．また，密度 2 層流の場合には，上層の流れに流速分布が存在するために密度界面近傍(L)，密度界面から離れた平面（H）の流れパターンが異なることが示されている．また，Fig.3-4 に示されているように，レイノルズ数が 100 以下の場合には，ほぼ対称定常流であることがわかる．また，レイノルズ数が 150 以上の場合には，後流域に振動が見られる．本実験では，流れの遷移の臨界レイノルズ数を明らかにすることができなかったが，その値は均一流体の場合より大きく，また密度界面からの高さによっても異なるようことが推察される．

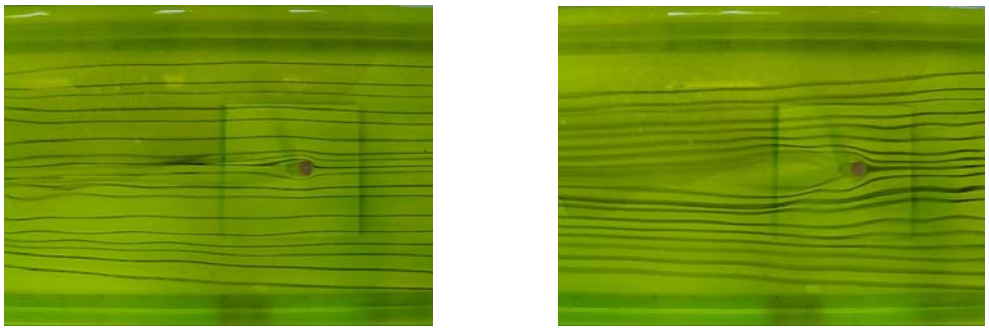
H　　L



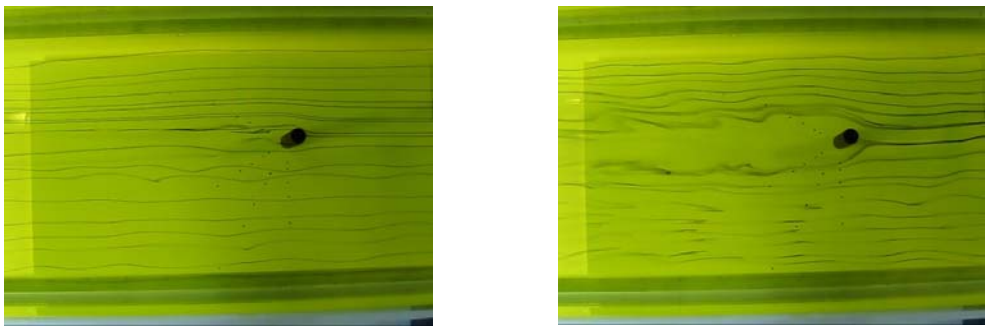
Re=50



Re=100



Re=150



Re=200

Fig.3-4　1 本円柱の流れパターン

3.5.2　2 本円柱の後流について

Fig.3-5(a)～Fig.3-5(d)は，2 本円柱を過ぎる流れのパターンの測定結果を示している．レイノルズ数および円柱間隔比λが変化することによって，流れのパターンが変化していることが示されている．低レイノルズ数では，1 本円柱後流の場合と同様に対称定常流状態にあるが，ある臨界レイノルズ数を超えるとそれぞれの円柱後流は振動するようになる．また，この振動流は，λの値によって，その流れ形態が異なることがうかがえる．つまり，あるλの値まで（λの臨界値(λ_c)）までは，円柱後流の振動流は同位相の流れパターンをもち，その以上のλの場合には，円柱後流の振動流は逆位相のパターンを持つような傾向を示している．つまり，2 本円柱後流の流れパターンにおいて，$\lambda \leq \lambda_c$の場合の流れは，2 本の円柱が接近しているために互いの円柱周りの流れが強く干渉し合う流れとなる．一方，$\lambda > \lambda_c$の場合の流れは，一方の円柱が他方の円柱の後流に影響を受ける流れであると考えられる．均質流体の一様流中に配置された 2 円柱の場合，流れの偏りは間欠的に変化すると言われており，密度 2 層流の場合も同様の傾向を示すことがわかる．本実験では，λの臨界値(λ_c)の決定を試みたがよい結果を得ることができなったが，λの臨界値はおよそ 2～3 の値をとるものと推察される．また，$\lambda \leq 1$の場合，円柱間を通る流れが片方の円柱に偏る傾向を示すことがある．その結果，各円柱背後には広い後流域と狭い後流域が形成される．このように，2 本柱間を通る流れは不安定で間欠的に向きをそらせる現象が見られた．

このように一様流に対して直角方向に 2 本の円柱を配置した場合，幾何学的には対称であるにもかかわらず，円柱間隔がある値より小さいと流れパターンは非対称となるのは興味深い現象である．

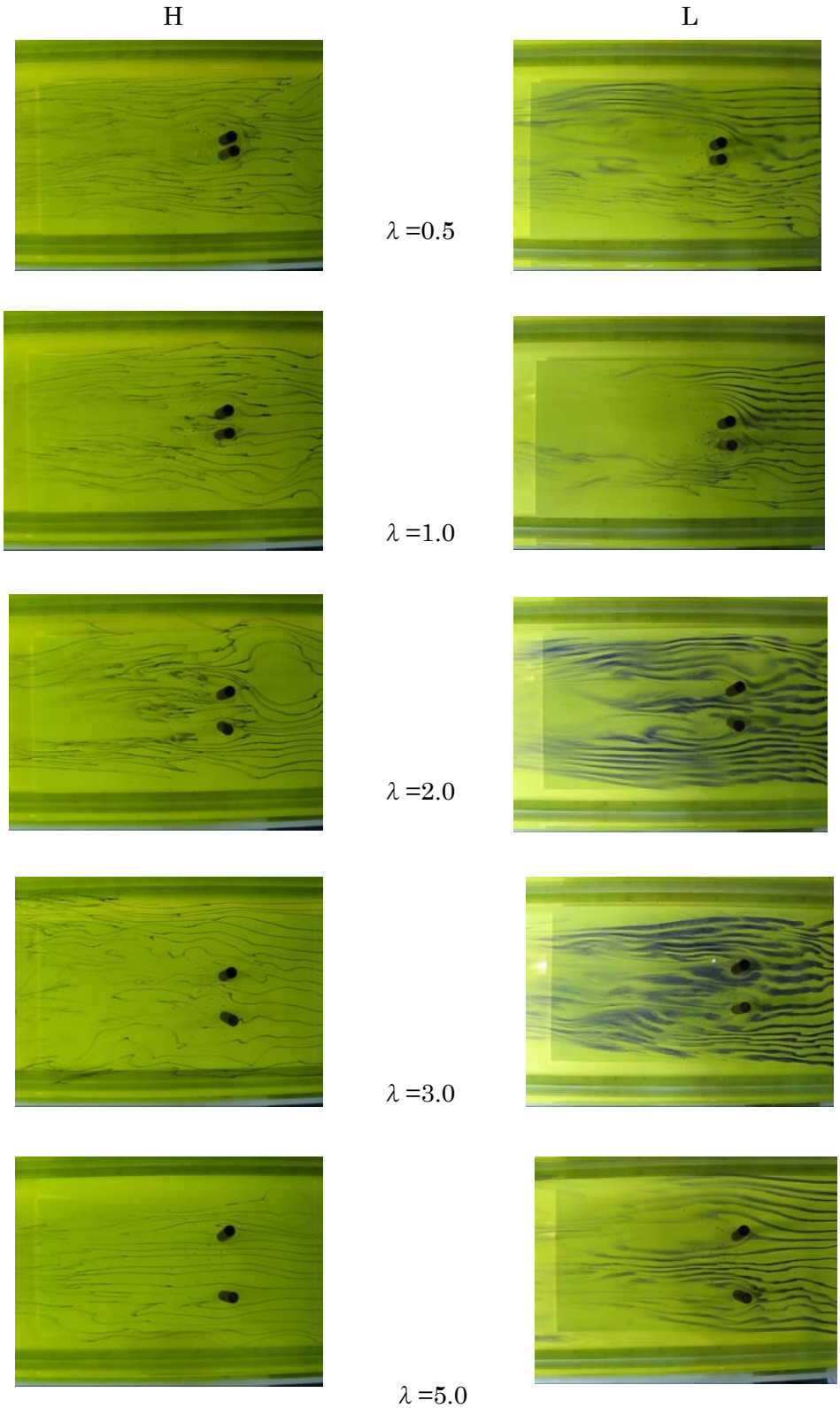
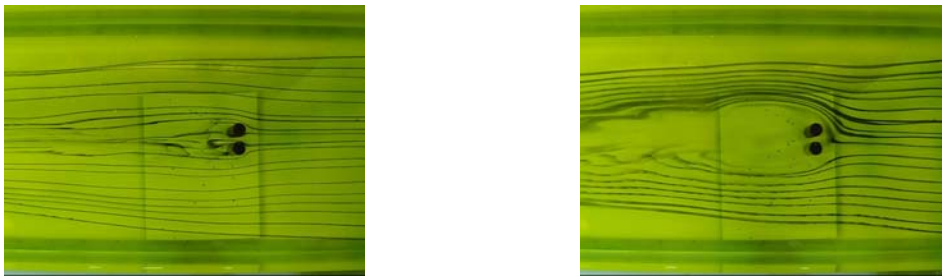
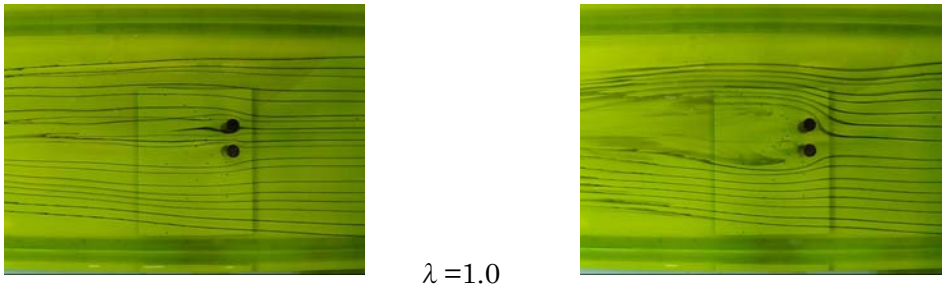


Fig.3-5(a)　2 本円柱の流れパターン(Re=50)

H　　L

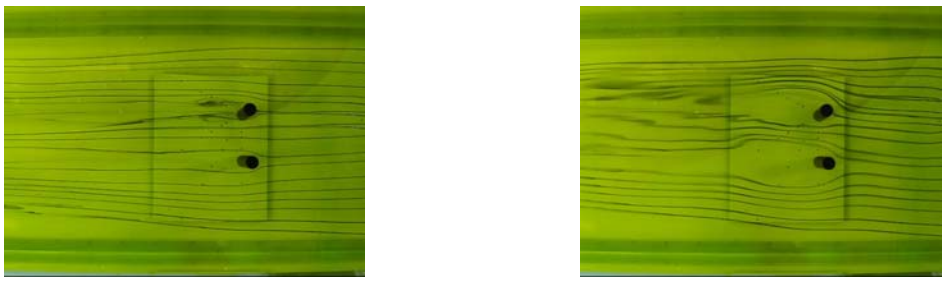


λ=0.5

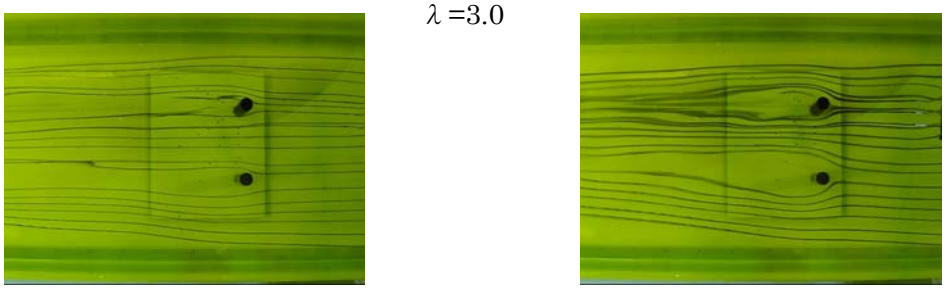


λ=1.0

λ=2.0



λ=3.0



λ=5.0

Fig.3-5(b)　2 本円柱の流れパターン(Re=100)

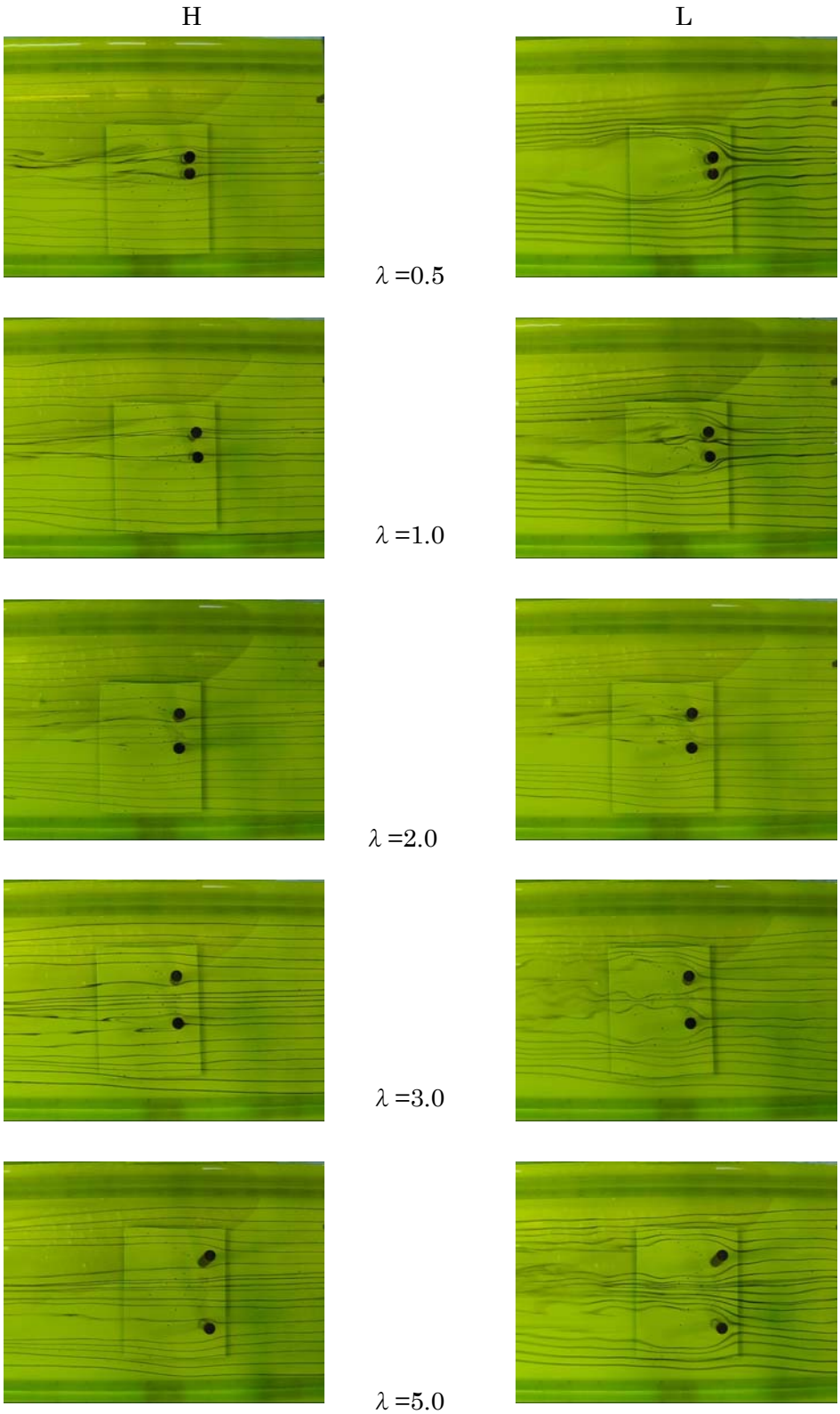


Fig.3-5(c) 2 本円柱の流れパターン(Re=150)

H　　L

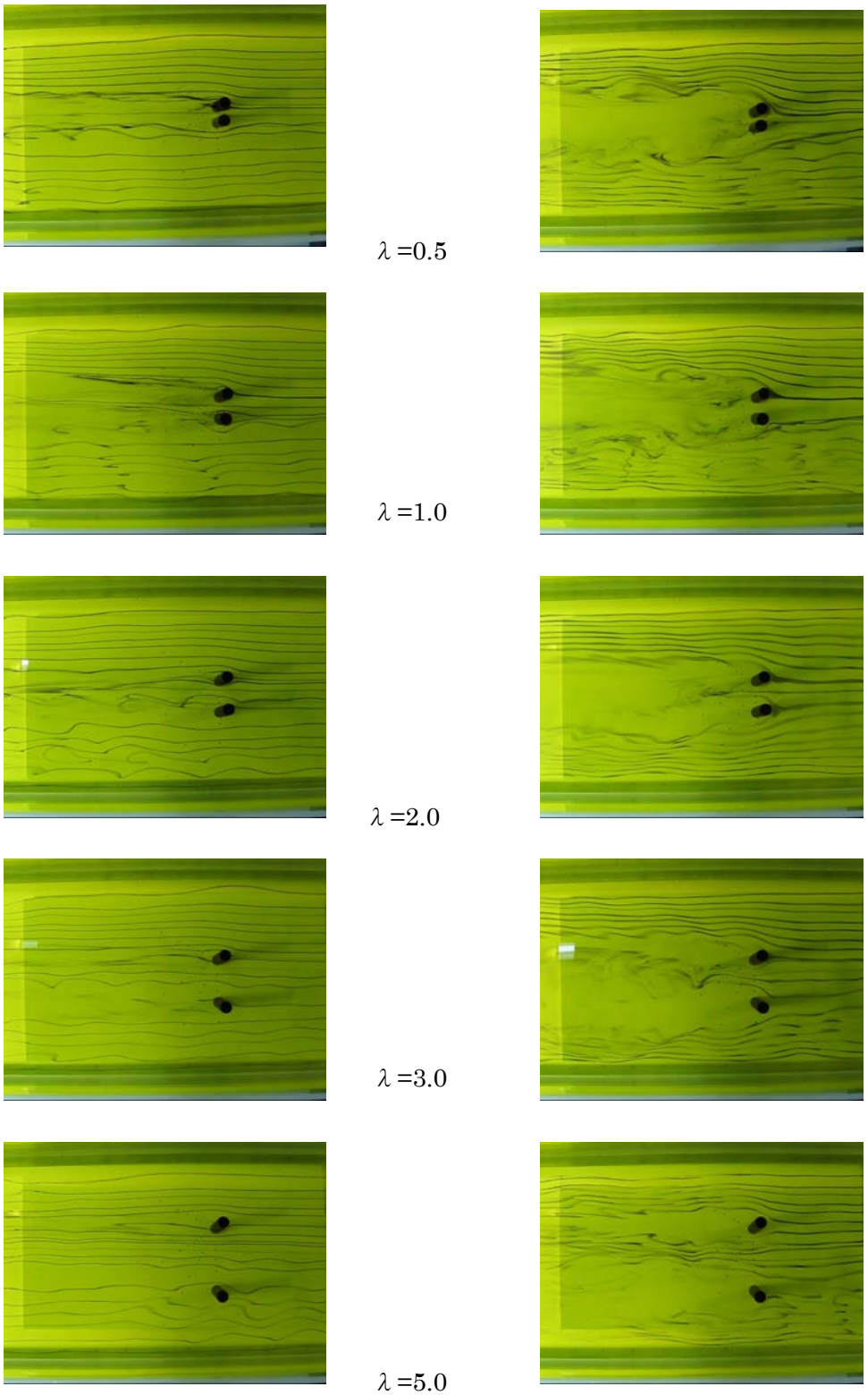


Fig.3-5(d) 2 本円柱の流れパターン(Re=200)

3.5.3　3 本円柱の後流について

一様流中における円柱後流に関する研究では，均質流体においても，3 本の円柱を配置した場合は，2 円柱に関する研究に比べると極端に少ない．

ここでは，密度 2 層流中に 3 円柱を互いに等距離に配置した場合について考える．3 円柱を互いに等距離に配置する場合，3 円柱の中心軸を結んでできる三角形が正三角形となるような配置は，1 つの基本的な配置と考えられるので，本研究ではこの配置を採用した．なお，この場合の配置には，一様流に対して幾何学的に対称な配置は 2 通りある．1 つは，流れに対して並列に配置した 2 本の円柱の前方に第 3 の円柱がある場合（タイプⅠ）であり，2 つ目は，並列 2 円柱の後方に第 3 の円柱がある場合（タイプⅡ）である．何れの配置においても 2 円柱の場合の流れと同様，円柱間隔によっては 3 円柱の周りの流れは対称とはならず，互いの円柱間の干渉による流れは，2 円柱の場合より複雑になると推察される．流れのパターンに関する実験では，前者の配置の場合について行った．第 4 章での密度界面における混合現象に関する実験では，両方の配置について行っている．

3 円柱後流の流れパターンについても，レイノルズ数，円柱間隔比 λ の値は 2 本円柱の場合と同じ条件で実験を行った．

Fig.3-6(a)～Fig.3-6(d)に 3 本円柱を過ぎる流れのパターンの測定結果を示している．2 本円柱の場合と同様に，レイノルズ数および円柱間隔比 λ が変化することによって，流れのパターンが変化していることが示されている．

(i) $\lambda \leq 2$ の場合

円柱間の間隔が狭い場合には，3 円柱間の相互作用が強い流れとなっている．前方の円柱を過ぎ，後方の 2 円柱の間を通る流れは，どちらかの円柱に偏る流

れとなる傾向を示している．また，流れが偏った方の円柱後流域は狭くなり，反対側の円柱の後流域は広くなる傾向を示している．この流れパターンは，λの臨界値は異なるものの 2 円柱の場合と同様の傾向であることがわかる．しかし，3 円柱の場合の後方 2 円柱の間を通過する流れは，いずれかの方向に流れが偏ると，そのパターンは安定に継続される傾向にある．また，流れが何れの円柱方向に偏るかはまったく偶然であるように推察された．

(i) $\lambda > 2$ の場合

流れの傾向は，2 円柱後流のλ>2～3 における流れと同様の傾向である．すなわち，この場合の流れは $\lambda \leq 2$ の場合に比べて 3 円柱間の相互作用は弱くなっていくことが示されている．円柱間の相互干渉はλの値の増加ともに次第に弱くなっており，前方円柱を過ぎ後方 2 円柱間を通る流れは，いずれの円柱方向への偏りもなくなっていることがわかる．

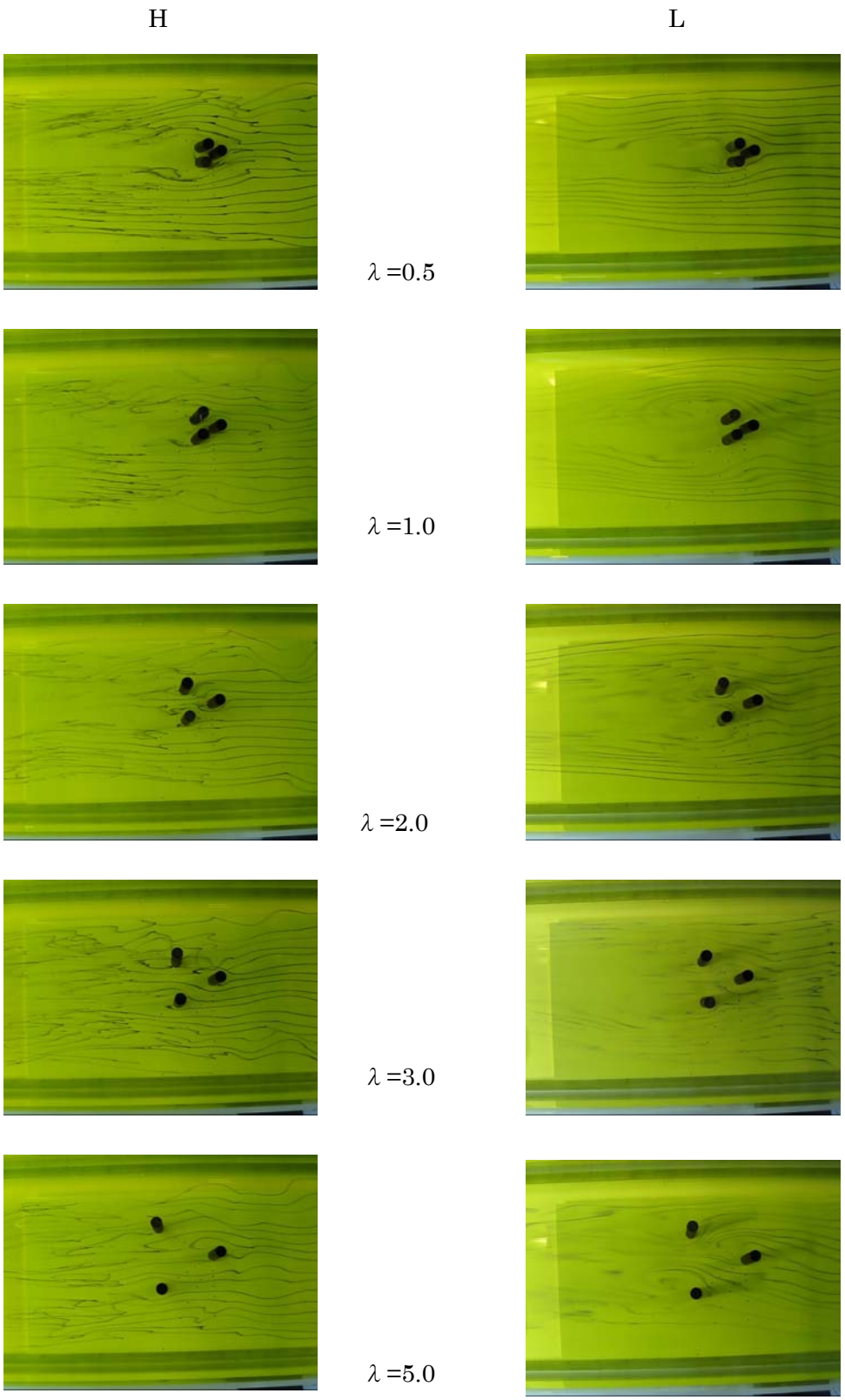


Fig.3-6(a) 3 本円柱の流れパターン(Re=50)

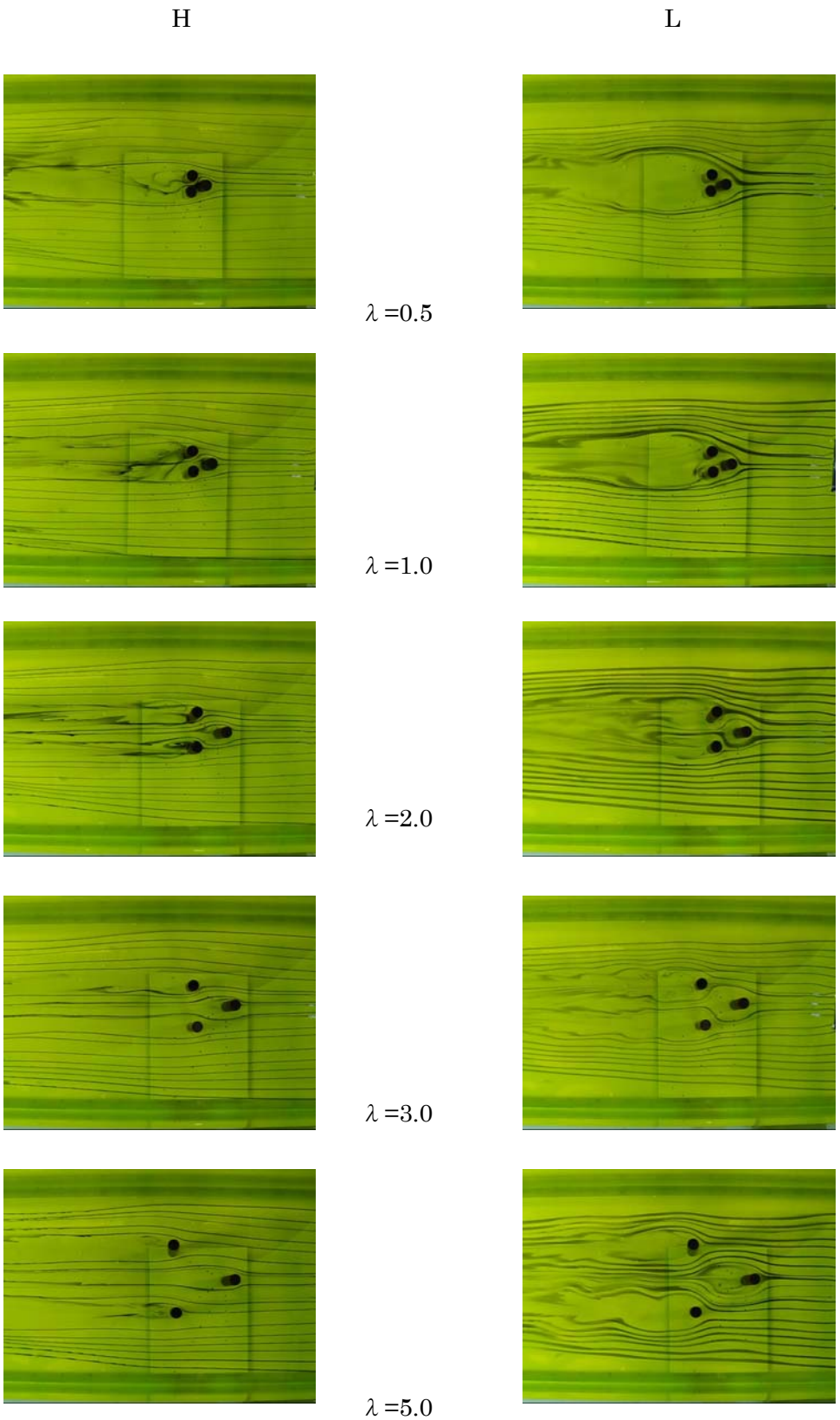


Fig.3-6(b) 3 本円柱の流れパターン(Re=100)

H　　L

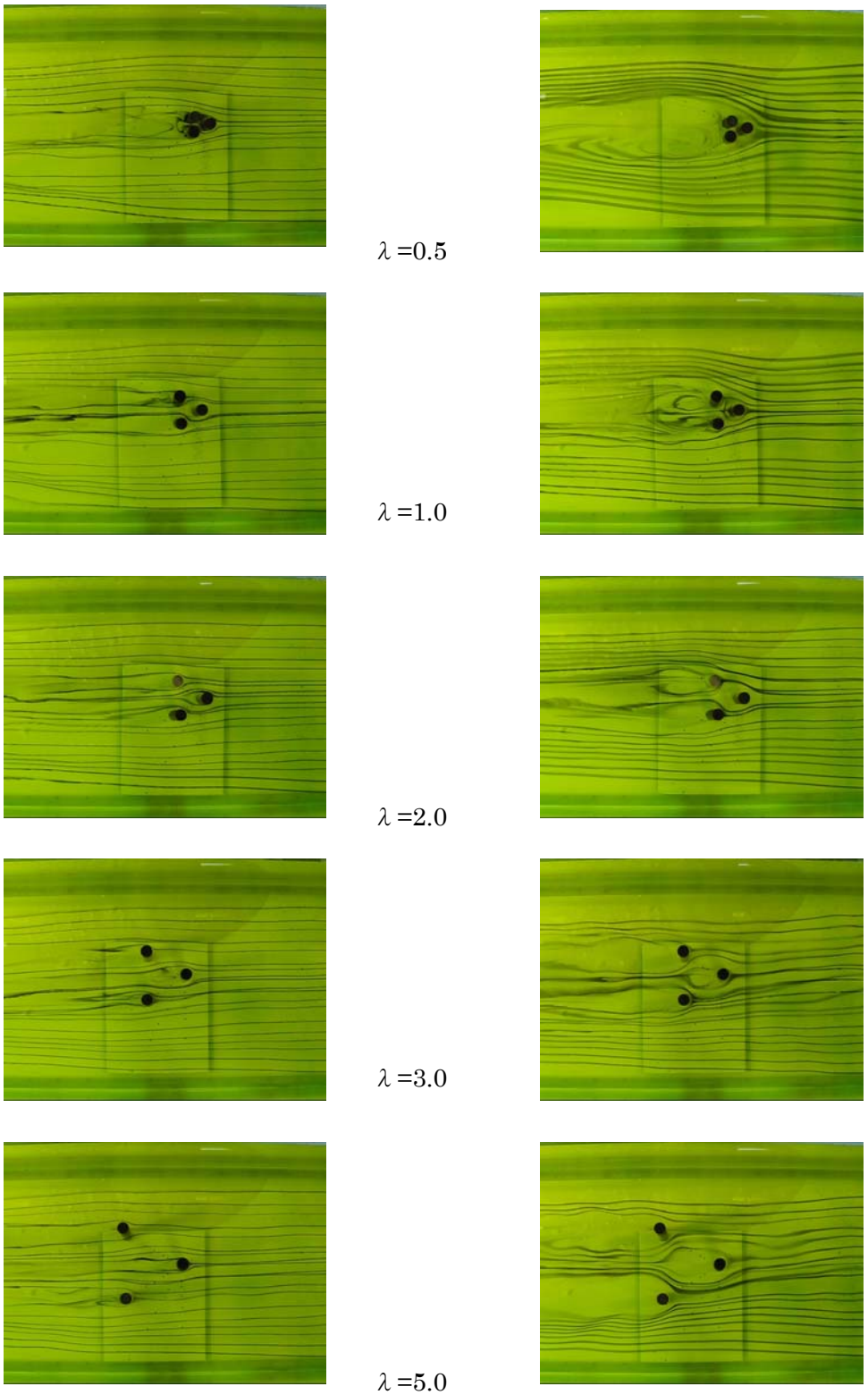
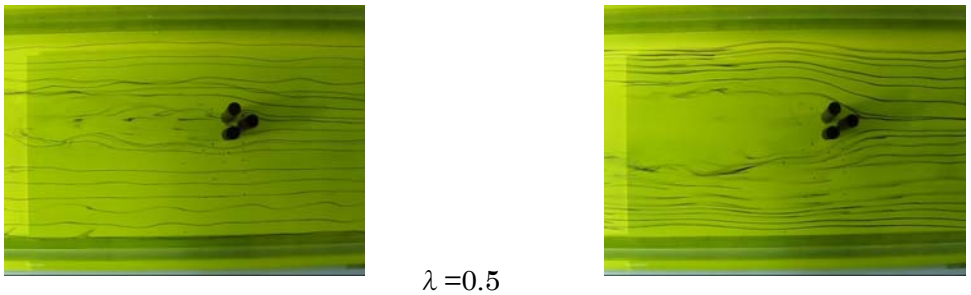
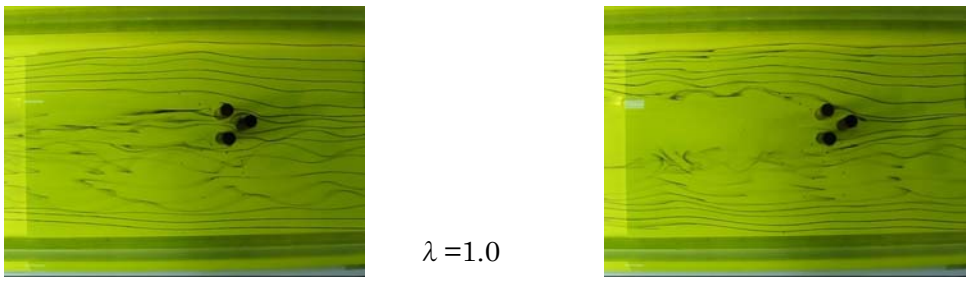


Fig.3-6(c) 3 本円柱の流れパターン(Re=150)

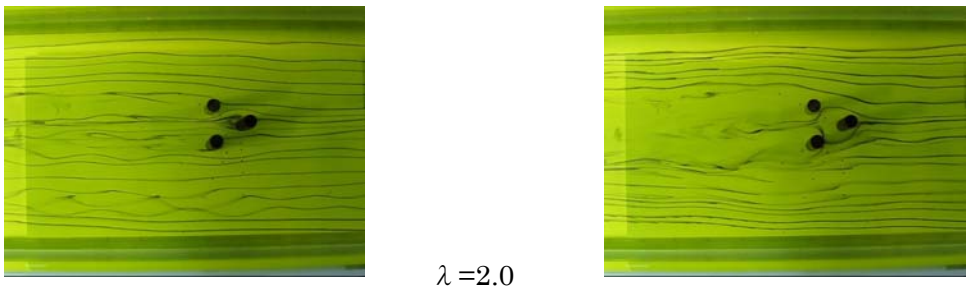
H　　L



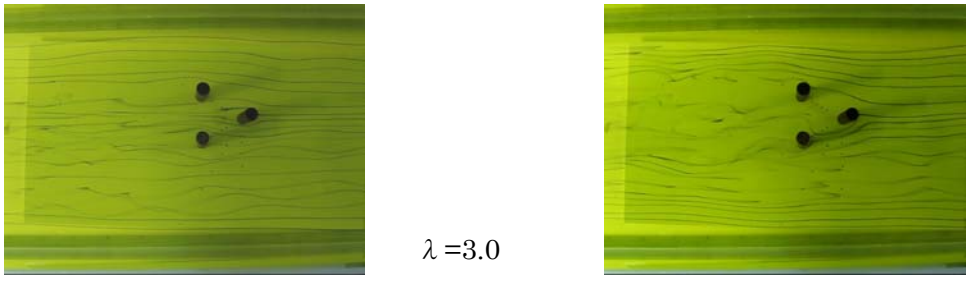
λ=0.5



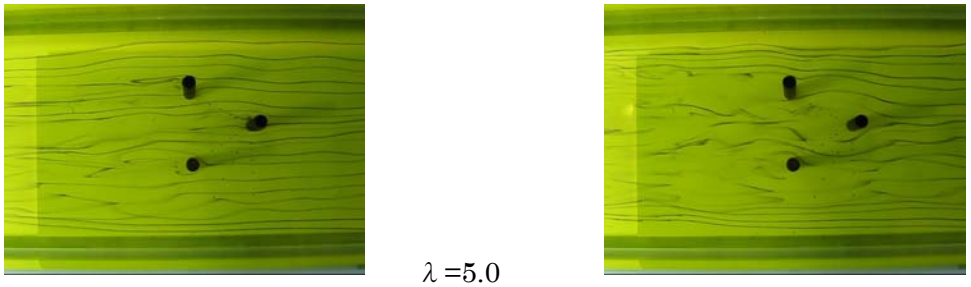
λ=1.0



λ=2.0



λ=3.0



λ=5.0

Fig.3-6(d) 3 本円柱の流れパターン(Re=200)

3.5.4　5 本円柱の後流について

ここでは，密度 2 層流中に 5 円柱を互いに等距離に配置した場合の実験結果について述べる．5 円柱を互いに等距離に配置する場合，3 円柱の中心軸を結んでできる三角形が正三角形となるような配置を基本型とし，これを組み合わせる配置方法が考えられるので，本研究ではこの配置法を採用し，2 タイプある 3 円柱配置のうち，タイプ I を並列に 2 つ並べる配置とした．

5 円柱の場合の流れについても，3 円柱の場合と同様，レイノルズ数および円柱間隔比 λ が変化することによって，互いの円柱間の相互干渉の程度が異なり，複雑になるものと推察される．

5 円柱後流の流れパターンについても，レイノルズ数，円柱間隔比 λ の値は 2 本円柱および 3 円柱の場合と同じ条件で実験を行った．

Fig.3-7(a)～Fig.3-7(d)は，5 本円柱を過ぎる流れのパターンの測定結果を示している．3 本円柱の場合と同様に，レイノルズ数および円柱間隔比 λ が変化することによって,流れのパターンが変化していることが示されている.また，後流域の流れパターンについては，これまでと同様な流れを呈しているが，その臨界レイノルズ数の大きさは 2 本円柱，3 本円柱の場合とは異なることが推察される．また，上層の流れに流速分布が存在するために密度界面近傍（L），密度界面から離れた平面（H）の流れパターンが異なることもこれまでと同様であるが示されている．

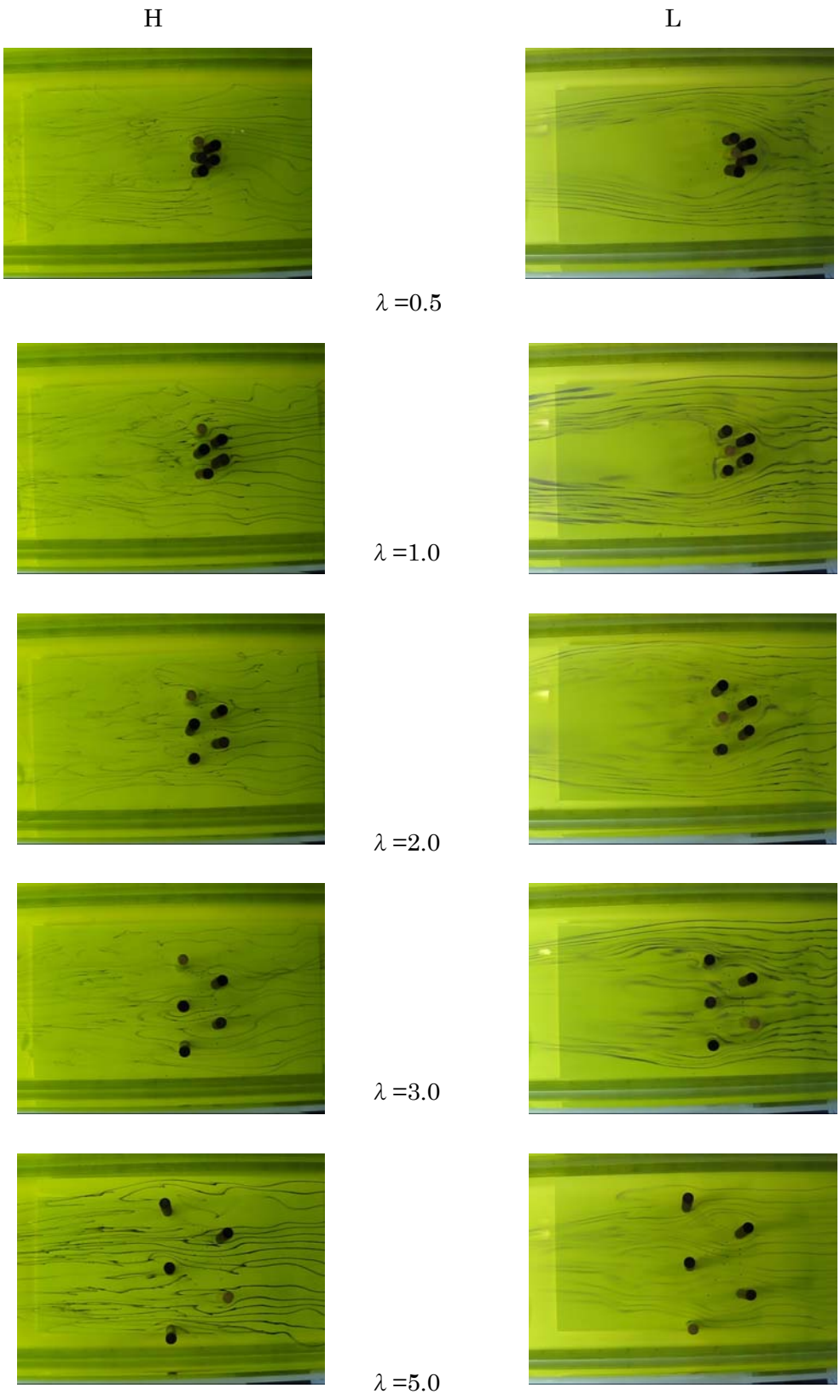


Fig.3-7(a) 5 本円柱の流れパターン(Re=50)

H　　L

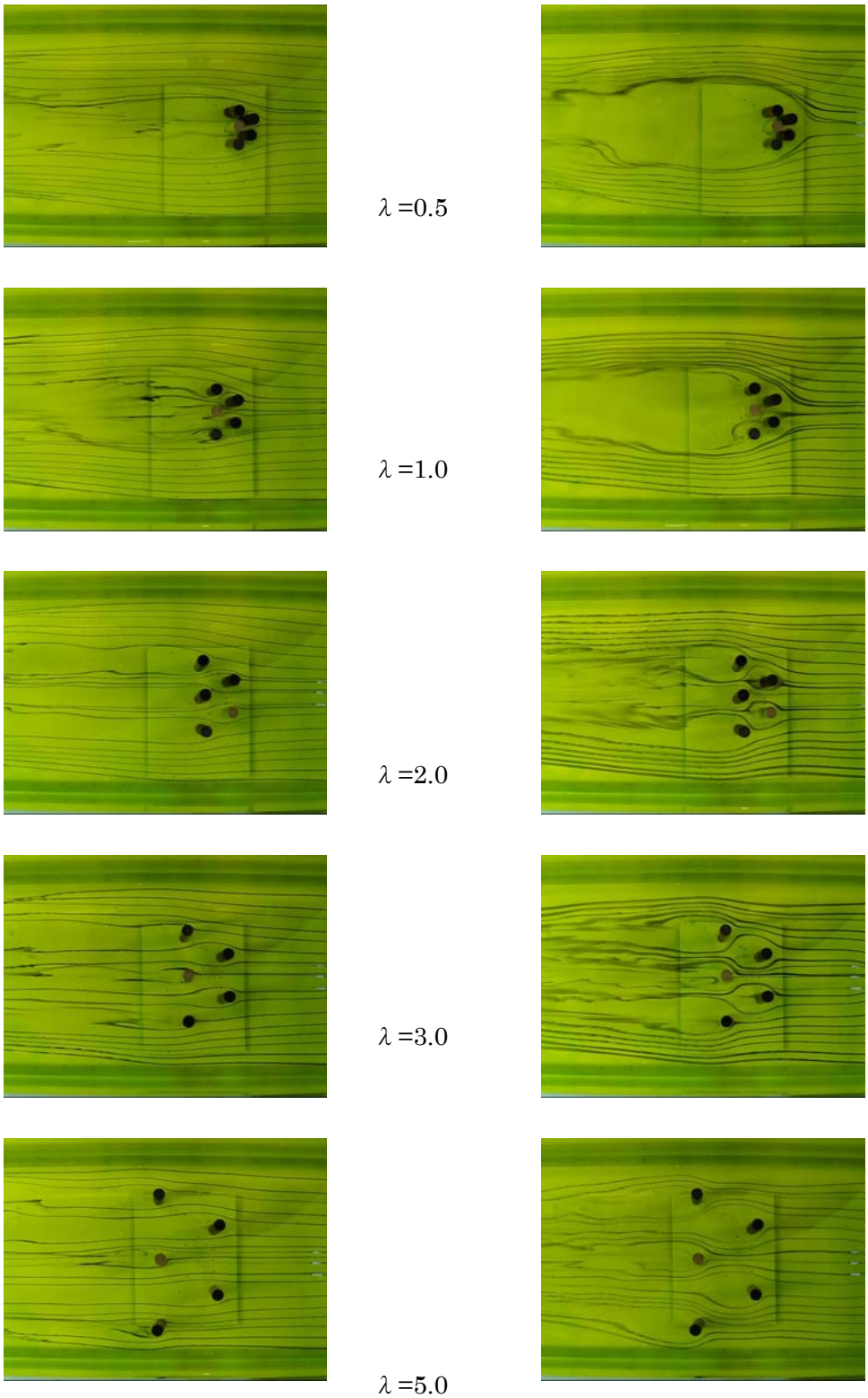


Fig.3-7(b) 5 本円柱の流れパターン(Re=100)

H　　L

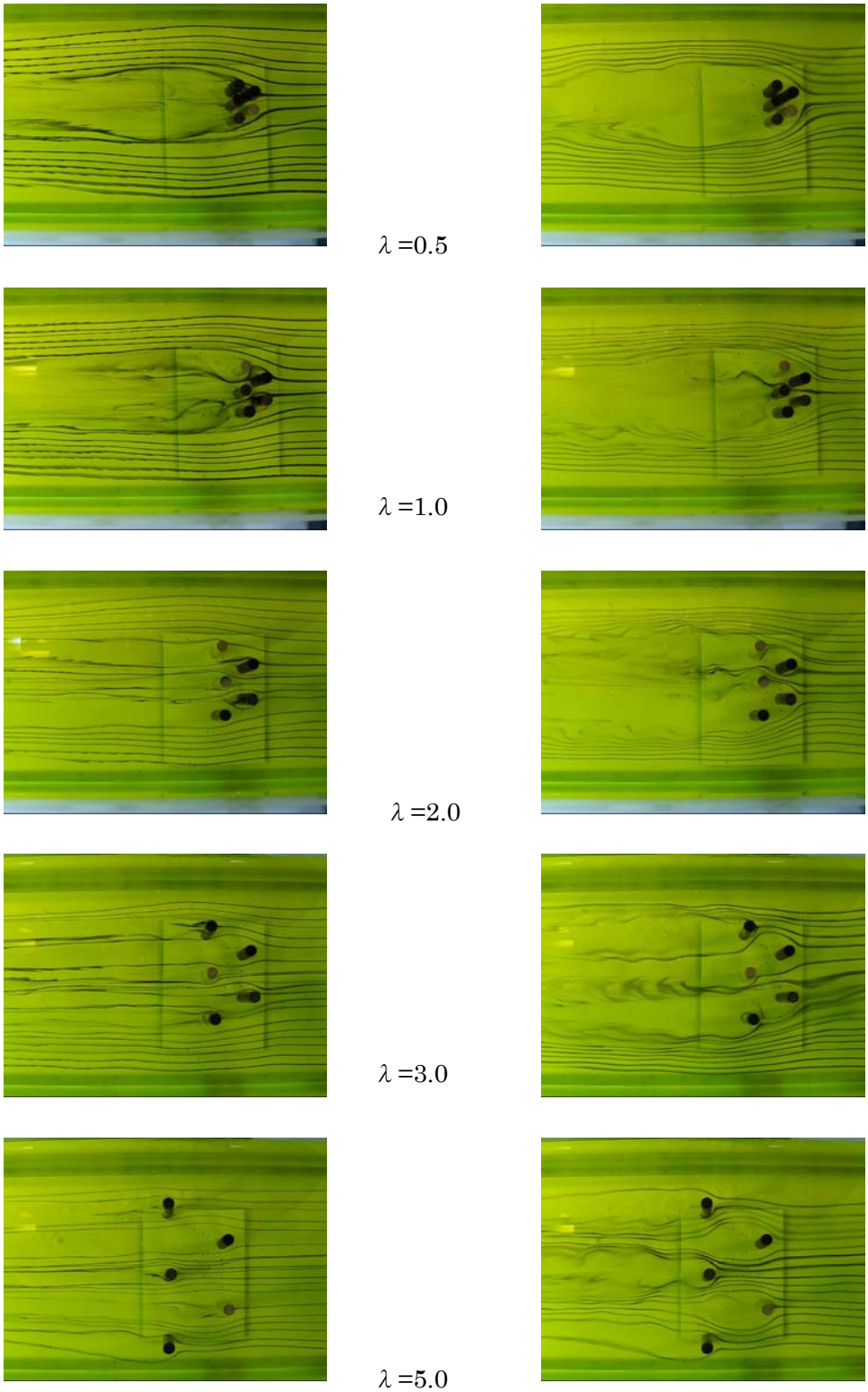


Fig.3-7(c) 5 本円柱の流れパターン(Re=150)

H　　L

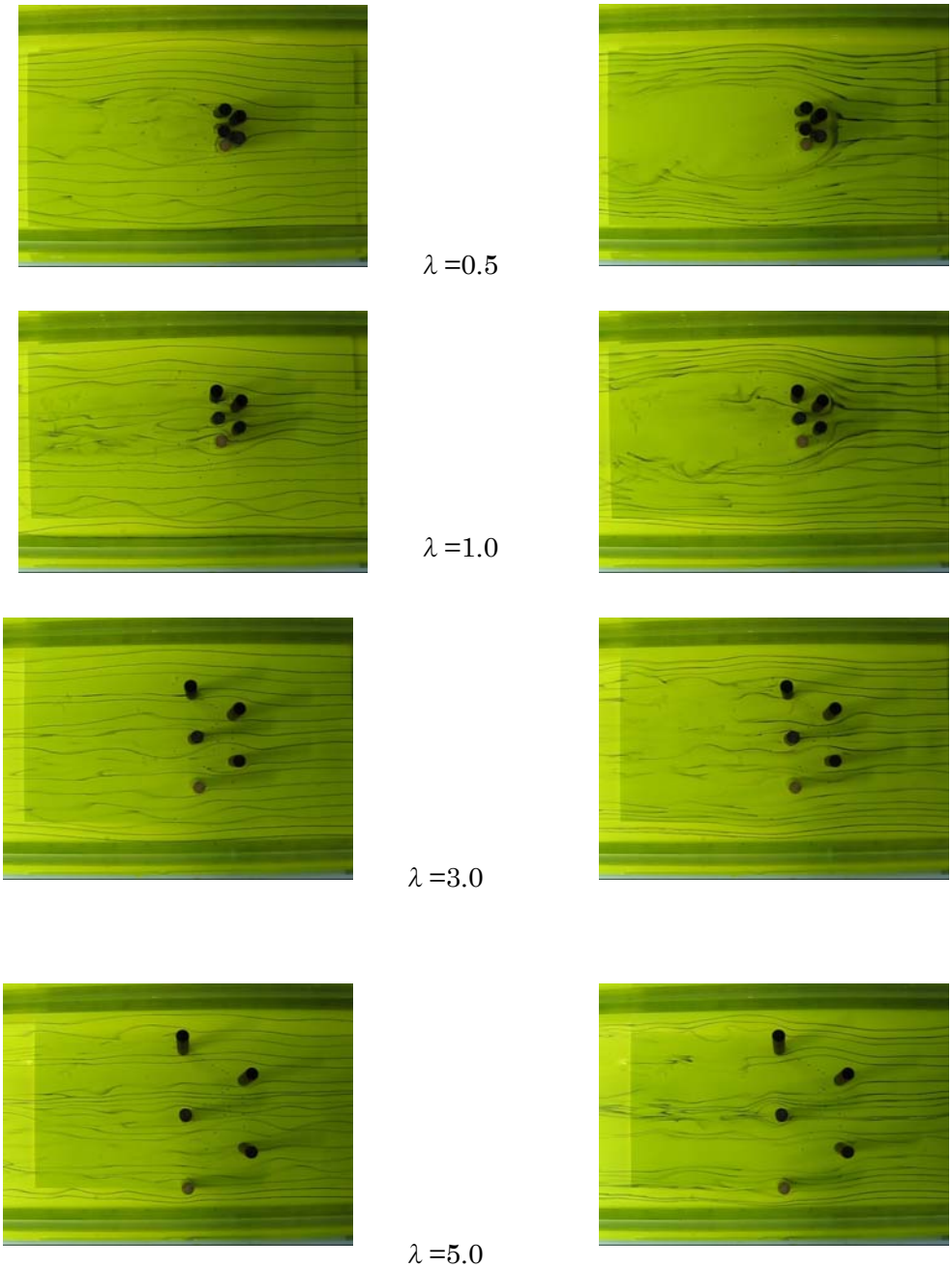


Fig.3-7(d) 5 本円柱の流れパターン(Re=200)

3.6 まとめ

以上，密度 2 層流中に円柱を配置した場合のいわゆる円柱後流について，配置する円柱の本数，レイノルズ数および円柱間隔比をパラメータとして，流れの可視化により得られた流れパターンの測定結果をもとに考察した．

その結果，均質流体に配置された円柱後流の場合と同様に，レイノルズ数の大きさによって，対称定常流と振動流の 2 つの流れが存在する．また，複数円柱の場合には,円柱間隔比の大きさによって流れのパターンが異なる.さらに，密度 2 層流の場合には，密度界面より上層に流速分布が存在するため，密度界面近傍（L)，密度界面から離れた平面（H）の流れパターンが異なることがわかった．

第 4 章 密度 2 成層流における円柱後流域の乱れに関する実験

4.1 実験目的

前述したように，閉鎖性密度 2 成層水域において，沈水生植物の存在は，吹送流により密度界面近傍に作用する乱流エネルギー量を維持あるいは増大するように働き，鉛直混合能力を増大させることが明らかにされており，また，PIV 計測から，円柱から回り込み加速した上層流が界面から剥離する際に特に連行が生じ，剥離部分，円柱間から放出される上昇流部分で強い乱れが発生し連行を促進するという結果が得られている．

そこで本研究では閉鎖性密度 2 成層水域における，沈水性植物が存在する密度界面近傍の流れを対象とし，2 成層流での円柱の後流特性について水理実験を行い比較検討した．なお，対照実験として円柱間の相互干渉の影響を調べるため，2 円柱，3 円柱，5 円柱の場合についても実験を行った．

2 層流中に円柱が置かれた場合の円柱後流の特性について，円柱後流域の流れ場の変動に基づく密度界面における上下層の混合について，水理実験により検討を行った．

4.2 実験方法

実験は 2 成層流において上層平均流速を変化させることで行った．上層流速 v_1=1.0，1.5cm/sにおいてそれぞれ 1 円柱，2 円柱，3 円柱，5 円柱の際の円柱後流域の測定を行った(Fig.4-1)．円柱形状としては長さ l=7.0cm，直径 d=2.0cm の木製円柱を使用しており 2 円柱，3 円柱，5 円柱の場合，それぞれの円柱間距離 m/d=1.0 の場合について実験を行った．

測定点はFig.4-2 に示すように円柱後流域の平均密度界面を鉛直測点基準として，同一平面上において円柱後流域 4×4cm，また鉛直上方に 0.2cm間隔に

0.6cm上方までの範囲の測定を行った．センサーは長さ 1.0cm，幅 0.2cmの小型に製作することでセンサー自体の影響が最小限となるように考慮した．測定時間をv_1=1.0，1.5cm/sともに 60sとして測定を行った．電気伝導度計から得られた数値は密度に換算し，各測定の平均密度，乱れ強度を算出することで円柱後流域の密度変化を定量的に把握した．

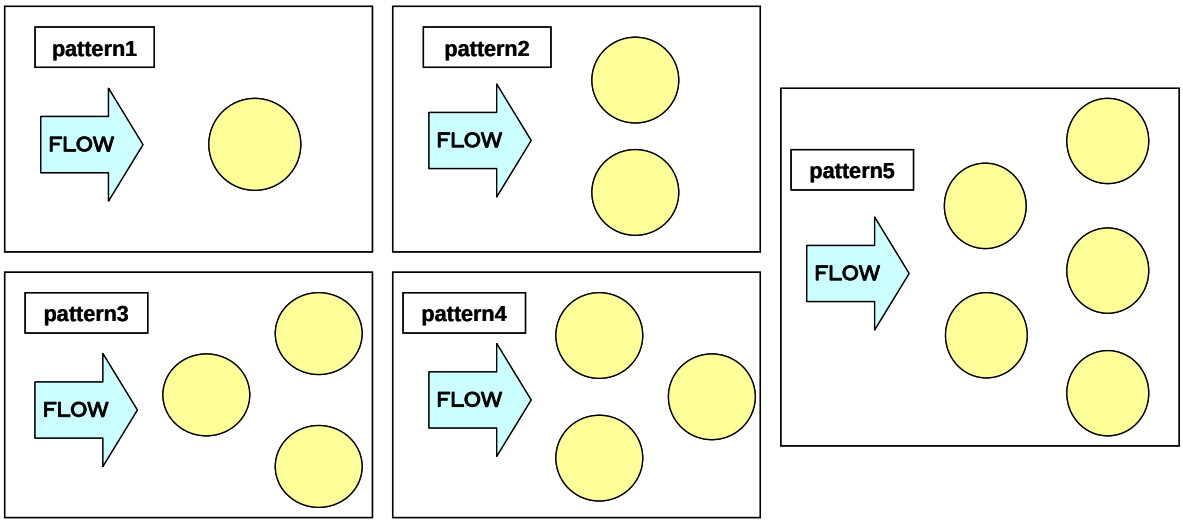


Fig.4-1　円柱の配置パターン

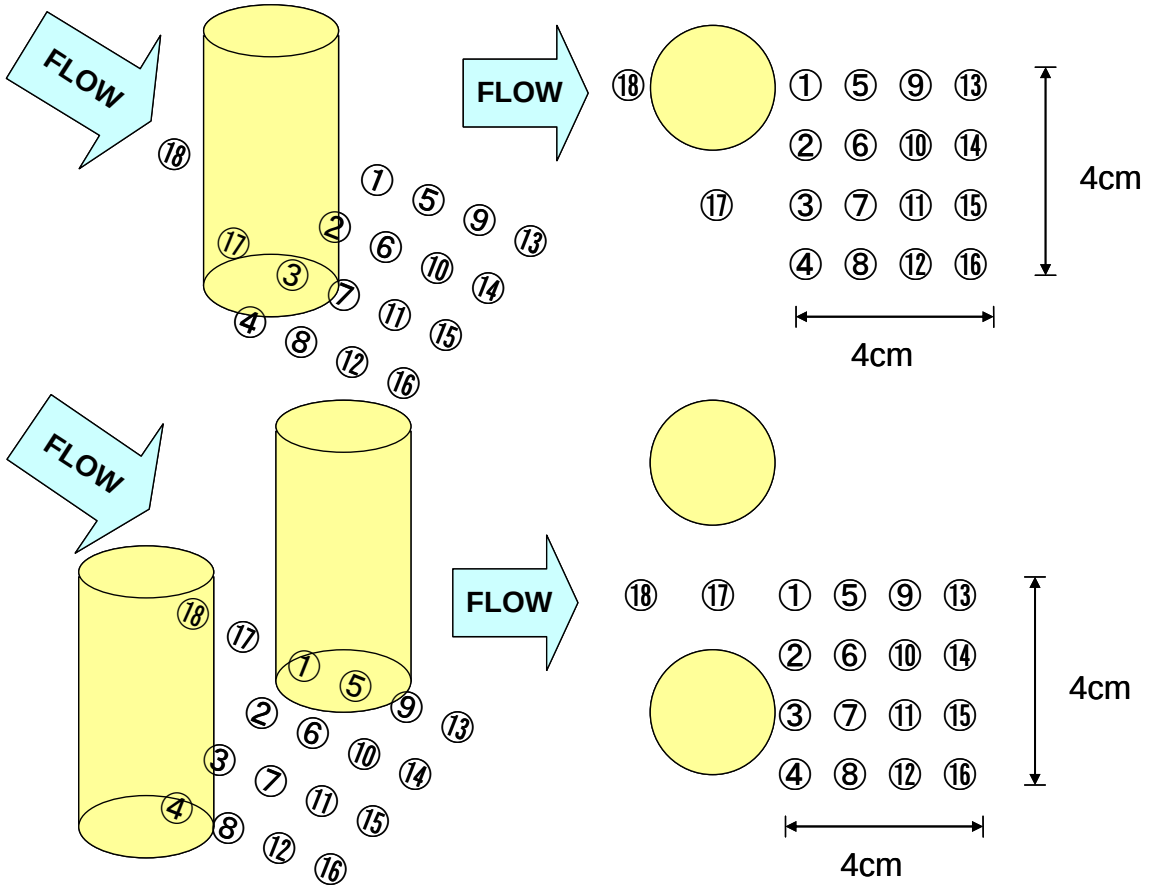


Fig.4-2　同一平面上における測定点

Table4-1 実験条件

Pattern	円柱本数	上層平均流速 (cm/s)	平均密度差⊿ρ (g/cm^3)	F_d	R_e
Pattern1_1	1	1.0	1.04E−03	0.444	176.1
Pattern1_2	1	1.5	9.81E−04	0.684	265.5
Pattern2_1	2	1.0	1.04E−03	0.444	175.6
Pattern2_2	2	1.5	9.83E−04	0.683	266.9
Pattern3_1	3	1.0	1.06E−03	0.438	175.1
Pattern3_2	3	1.5	1.02E−03	0.670	264.1
Pattern4_1	3	1.0	1.04E−03	0.444	175.6
Pattern4_2	3	1.5	9.95E−04	0.679	264.8
Pattern5_1	5	1.0	1.04E−03	0.443	177.0
Pattern5_2	5	1.5	9.52E−04	0.694	266.9

4.3　実験結果と考察

4.3.1　同一水深の平面上における乱れ強度分布に関する結果及び考察

下図は各円柱パターンでの同一水深の平面上における密度の乱れ強度の分布を示す．まず，全てのデータを通して z=0，つまり密度界面付近での乱れ強度の値が大きくなっている．これは上層の流動に伴い密度界面に内部波が発生することで乱れ強度の値に大きな影響を及ぼしていると考えられる．また流速での比較では，上層流速の増加は上方水深においても高い値の乱れ強度を示していることから上層と下層の流速差の増加がより連行を促進させると推察される．

Pattern1，4，5 では円柱周りを計測している，その中で円柱前部での乱れ強度が同一水深で比較しても圧倒的に小さい．これは，円柱前部において圧力の増加により密度界面が落ち込むため下層域の影響が出にくいと思われる.また，円柱横部から流下方向にかけての乱れ強度の大きさから円柱を回り込み加速した上層流が界面から剥離する際に生じる強い乱れを確認できる．

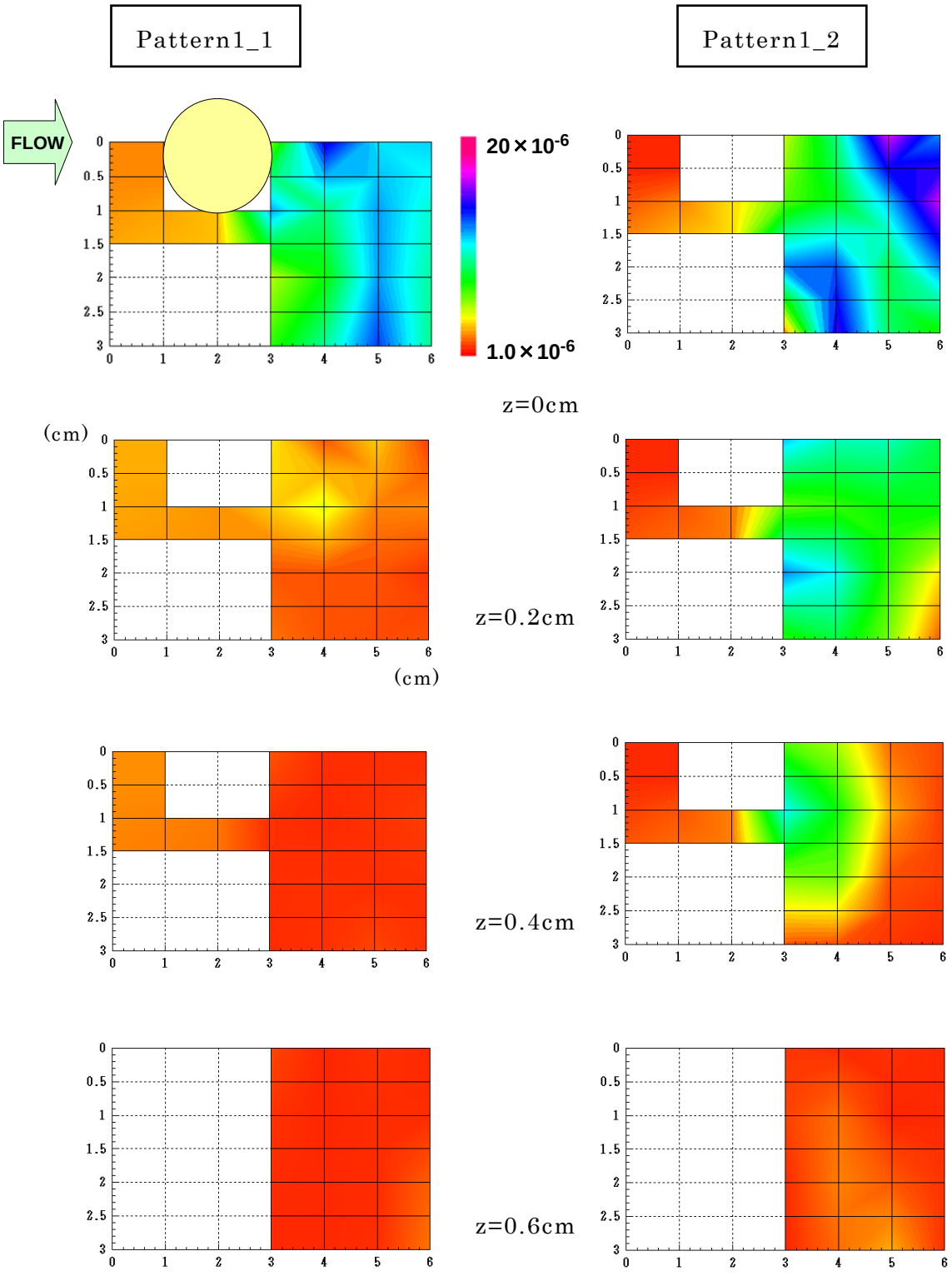


Fig.4-3-1　Pattern1_1, 各水深(z)における同一平面の乱れ強度分布

Fig 4-3-2　Pattern1_2, 各水深(z)における同一平面の乱れ強度分布

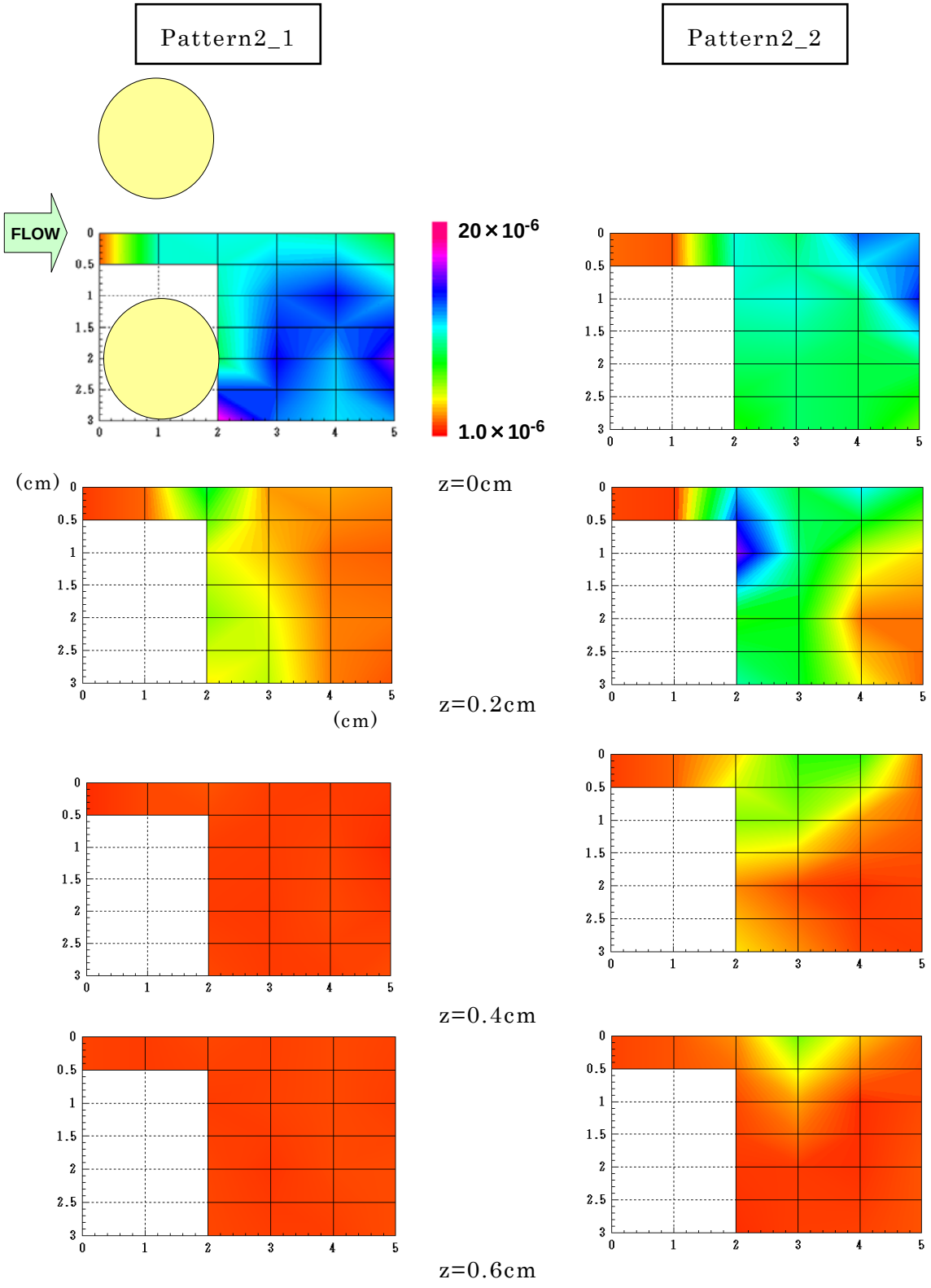


Fig.4-4-1　Pattern2_1, 各水深(z)における同一平面の乱れ強度分布

Fig.4-4-2　Pattern2_2, 各水深(z)における同一平面の乱れ強度分布

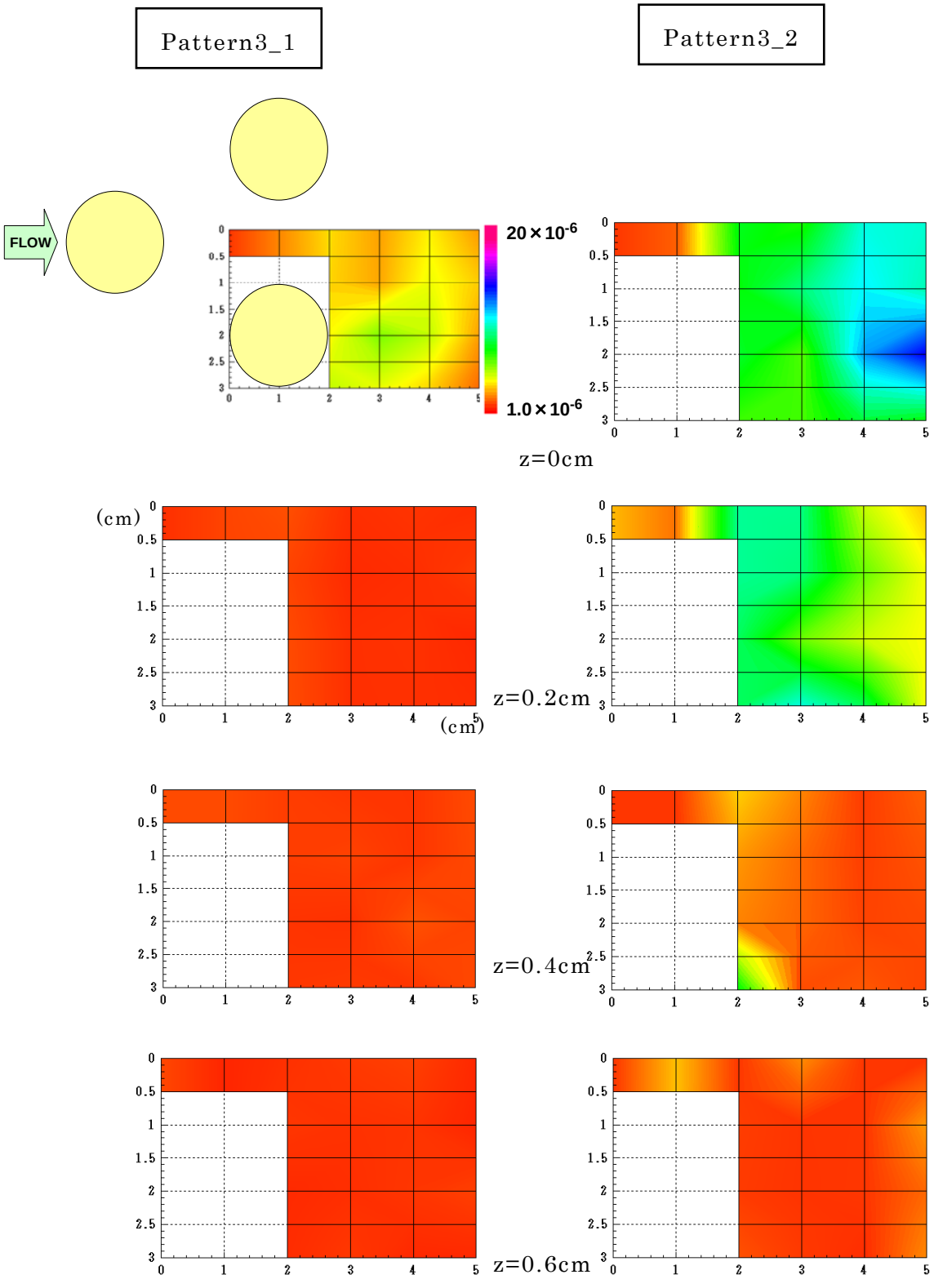


Fig.4-5-1　Pattern3_1, 各水深(z)における同一平面の乱れ強度分布

Fig.4-5-2　Pattern3_2, 各水深(z)における同一平面の乱れ強度分布

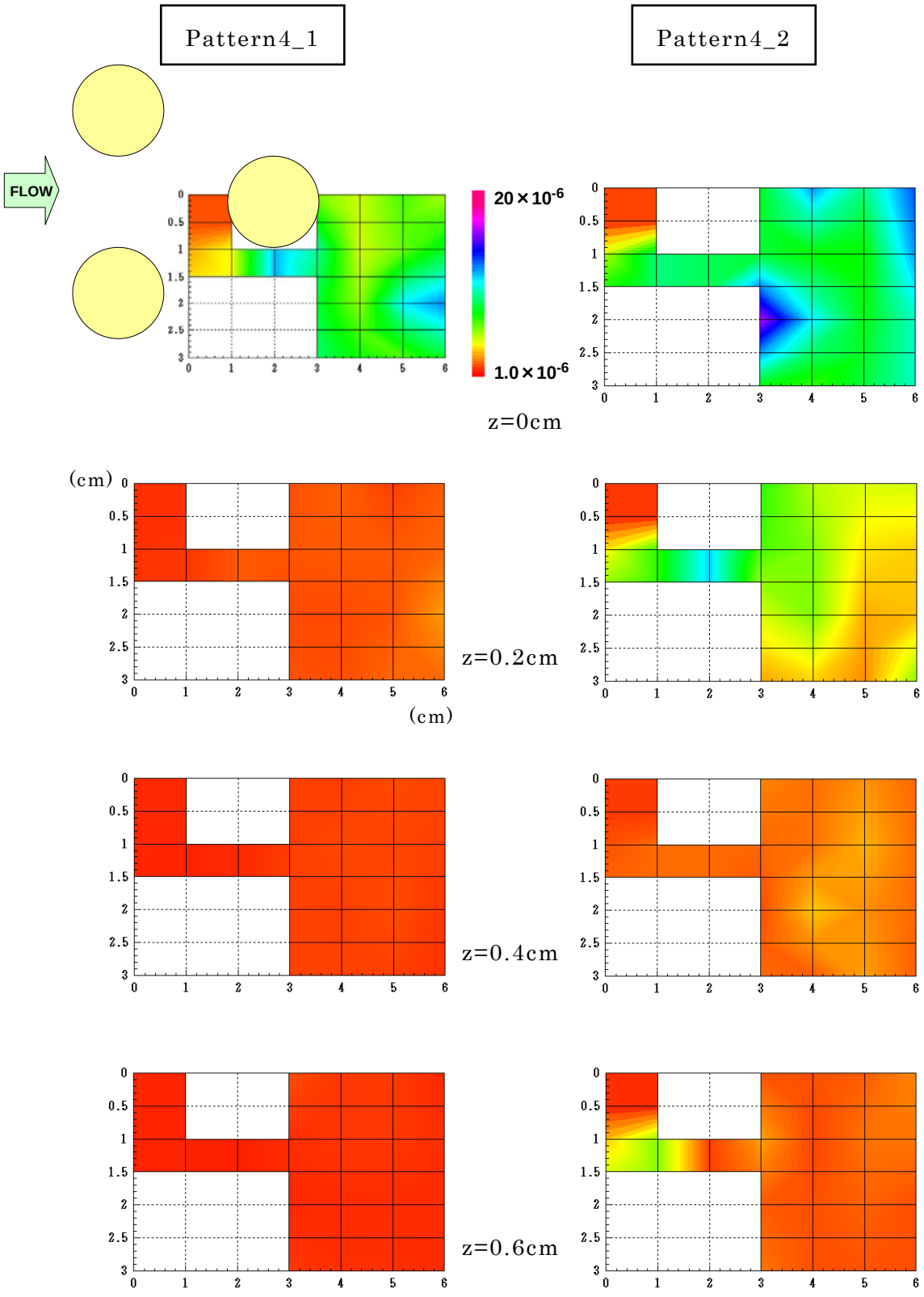


Fig.4-6-1　Pattern4_1, 各水深(z)における同一平面の乱れ強度分布

Fig.4-6-2　Pattern4_2, 各水深(z)における同一平面の乱れ強度分布

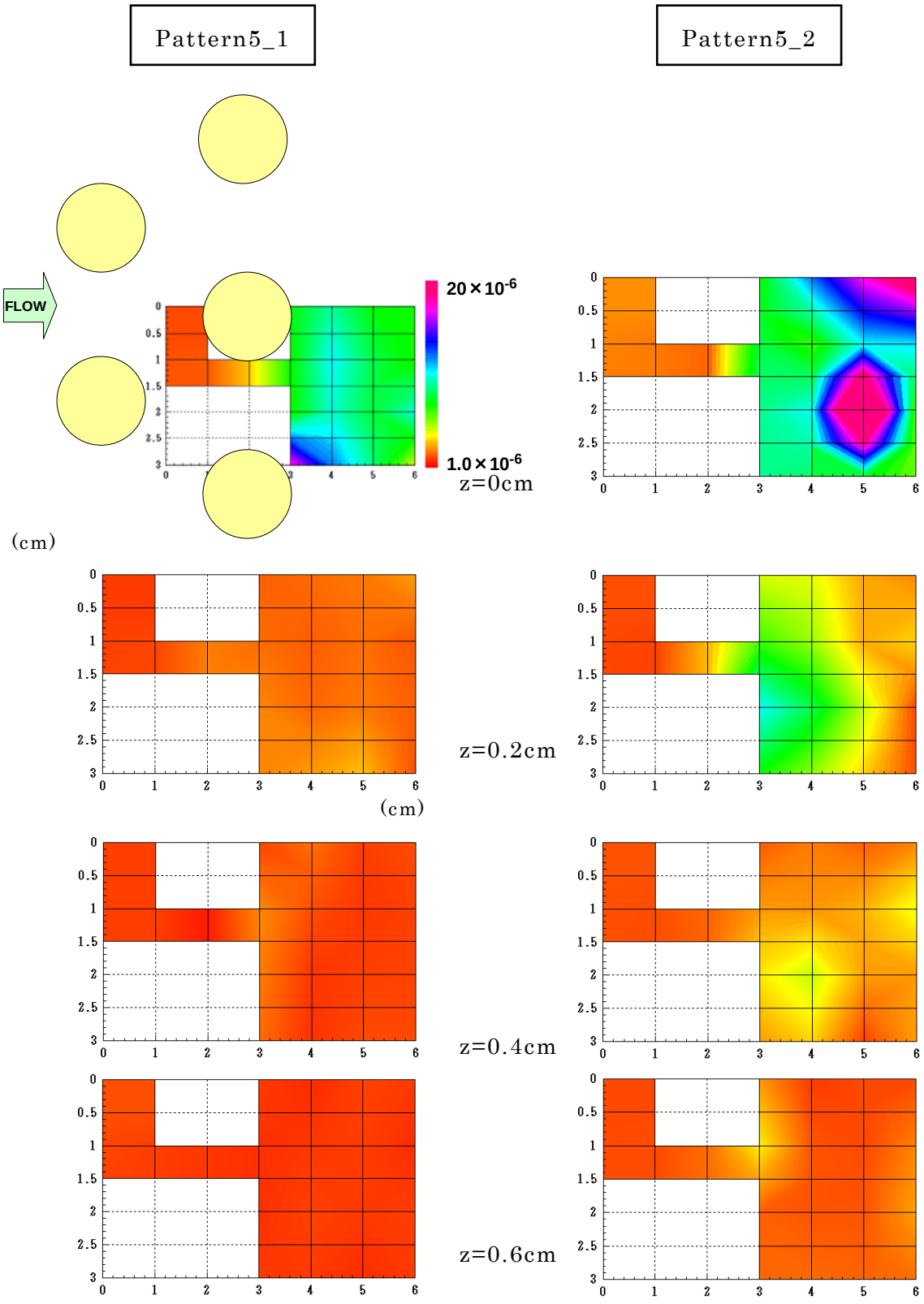


Fig.4-7-1　Pattern5_1, 各水深(z)における同一平面の乱れ強度分布

Fig.4-7-1　Pattern5_2, 各水深(z)における同一平面の乱れ強度分布

4.3.2　流下方向における密度と乱れ強度の鉛直プロファイルによる考察

Fig.4-8～Fig.4-12 は，各円柱パターンの流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイルを相対密度として無次元化して示している．Pattern1，2，3 は y=0cm，Pattern4，5 は y=2cm での流下方向成分であり，Pattern 1 は円柱後流，Pattern2，3 は円柱間，Pattern４，５は円柱横部にあたる．

Pattern1 の円柱後流の相対密度変化について，円柱直後を最大とし下流にかけて穏やかに減少していることがわかる．つまり円柱後流近傍において円柱の存在が密度界面上昇及び連行の働きに寄与していると考えられる．

Pattern2，3 では，st.1，2 にあたる円柱間では相対密度，相対密度の乱れ強度ともに小さく円柱の通過とともに広範囲に渡って平均密度の増加，乱れ強度の増幅が顕著である．これは円柱間から放出される上昇流が界面から剥離する際に大きく下層水を巻き上げており，その影響は鉛直上方にまで及んでいることがわかる．Pattern5 についても測点は円柱に近いが円柱間の動きと近い傾向を示していることが確認できる．

平均相対密度　$\varepsilon = \dfrac{\overline{\rho_1} - \rho_2}{\rho_2}$

初期相対密度　$\varepsilon_0 = \dfrac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2}$

相対密度の乱れ強度　$\widehat{\varepsilon} = \sqrt{\overline{\varepsilon'^2}}$

ρ_1：上層密度
ρ_2：下層密度

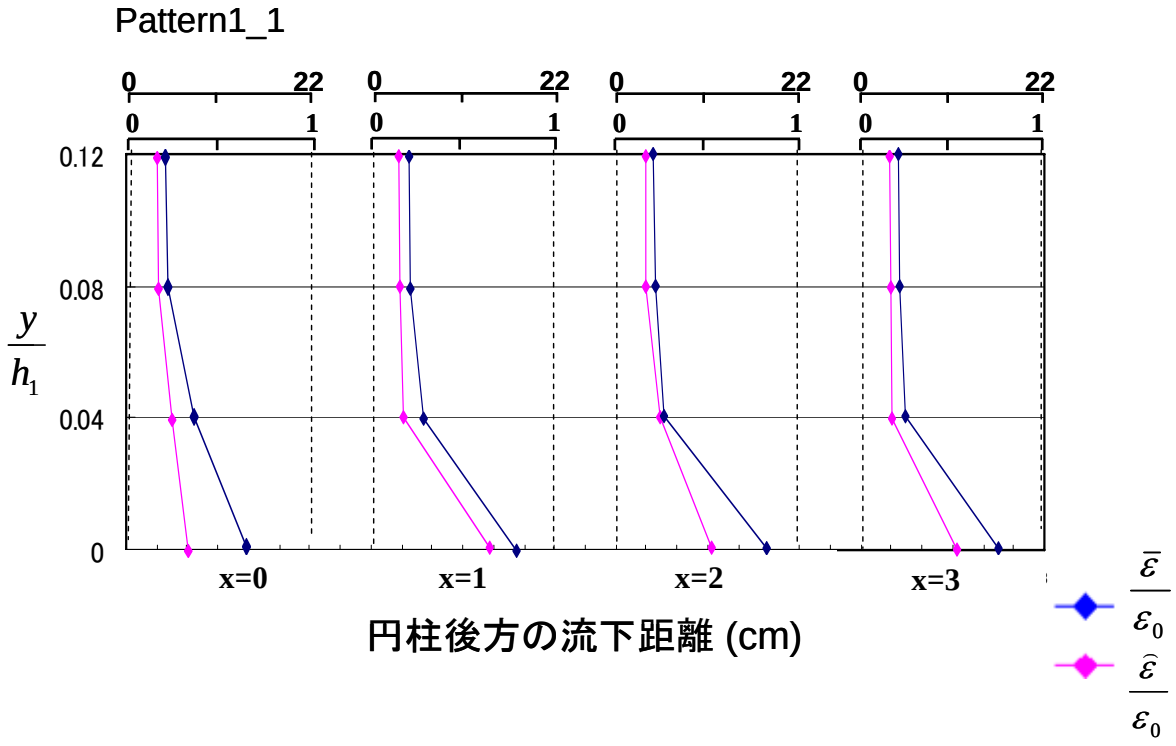


Fig.4-8-1 流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイル(y=0)

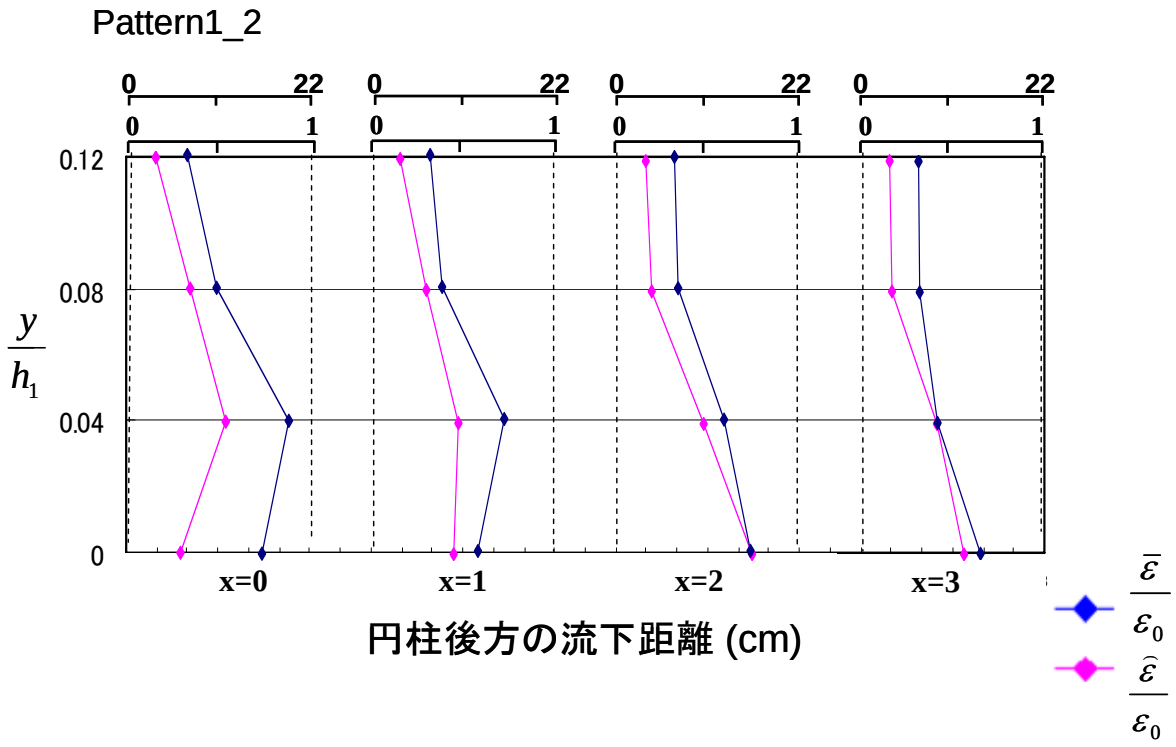


Fig.4-8-2 流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイル(y=0)

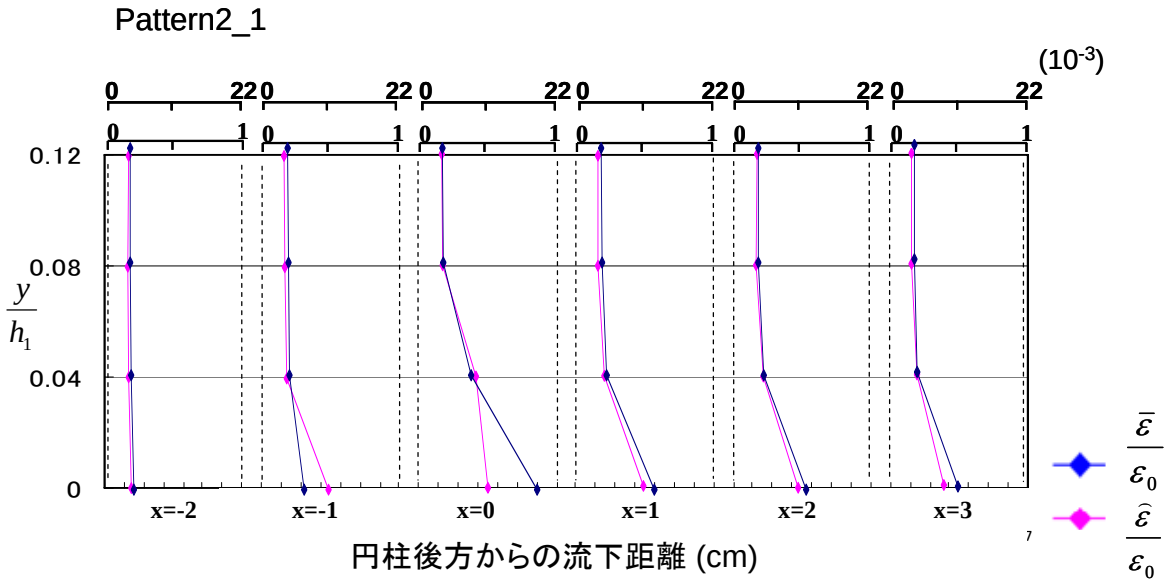


Fig.4-9-2 流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイル(y=0)

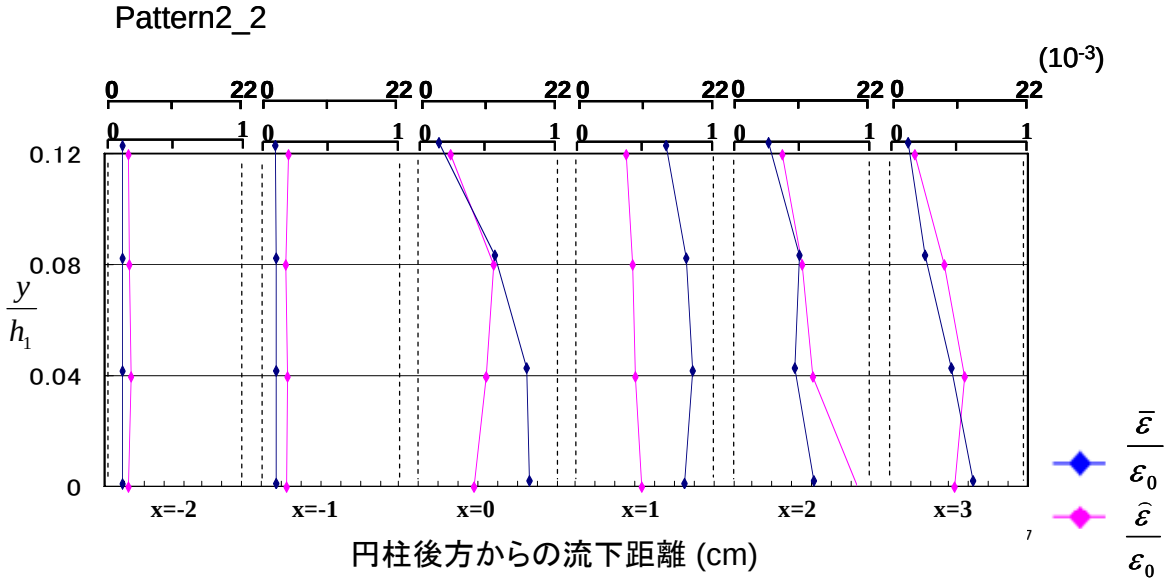


Fig.4-9-2 流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイル(y=0)

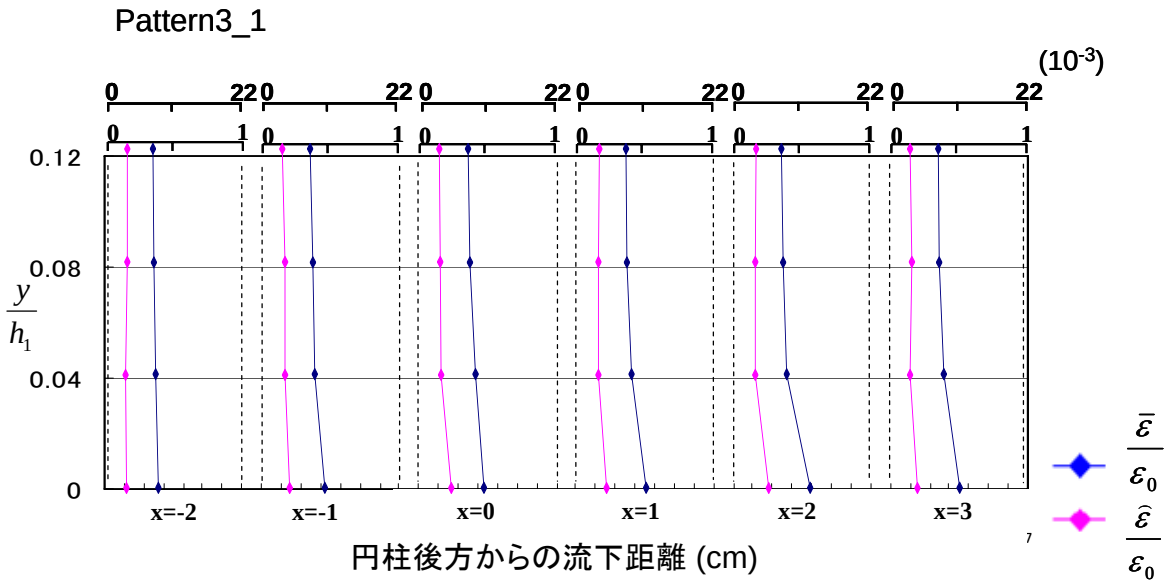


Fig.4-10-2 流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイル(y=0)

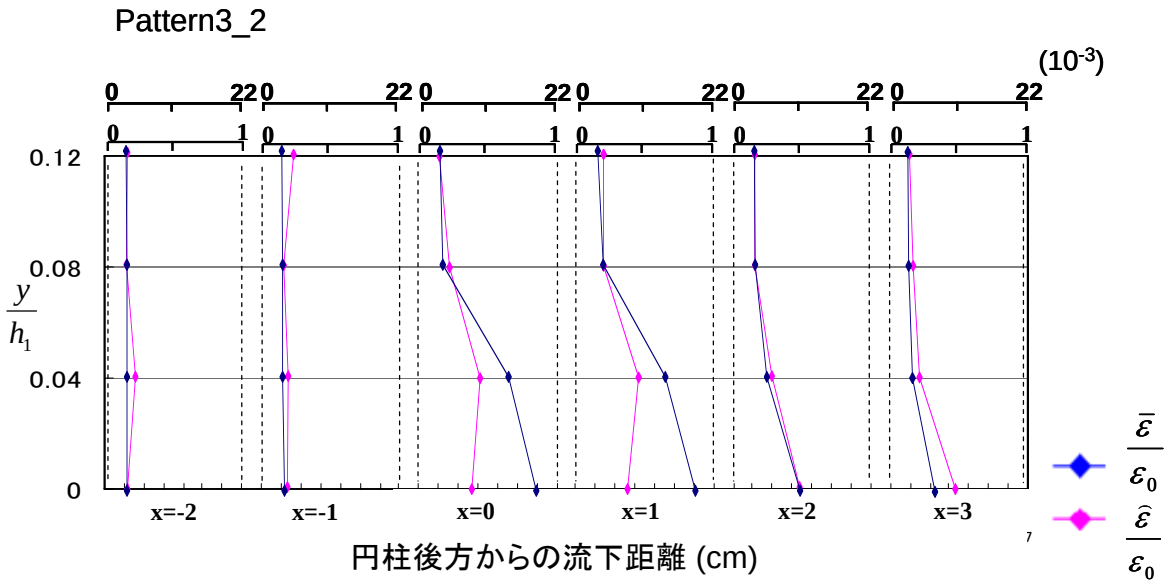


Fig.4-10-2 流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイル(y=0)

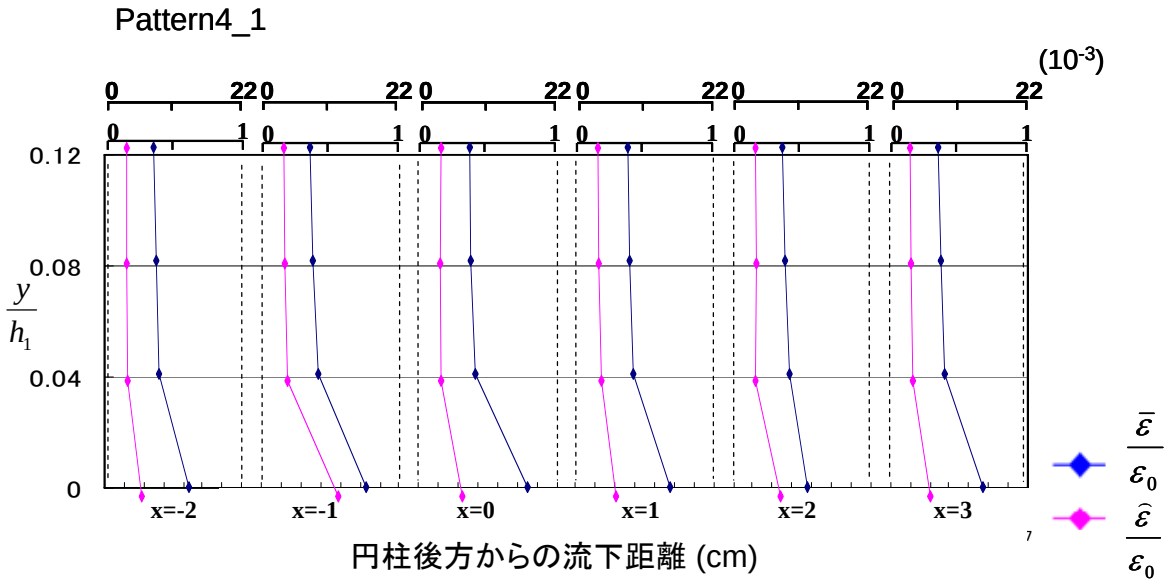


Fig.4-11-1 流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイル(y=2)

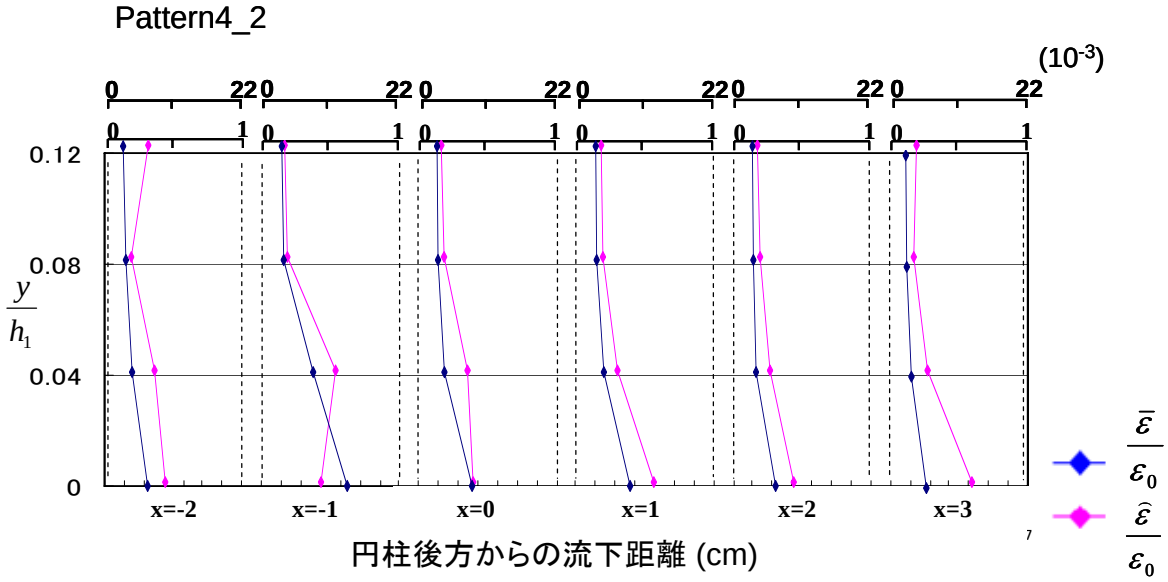


Fig.4-11-2 流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイル(y=2)

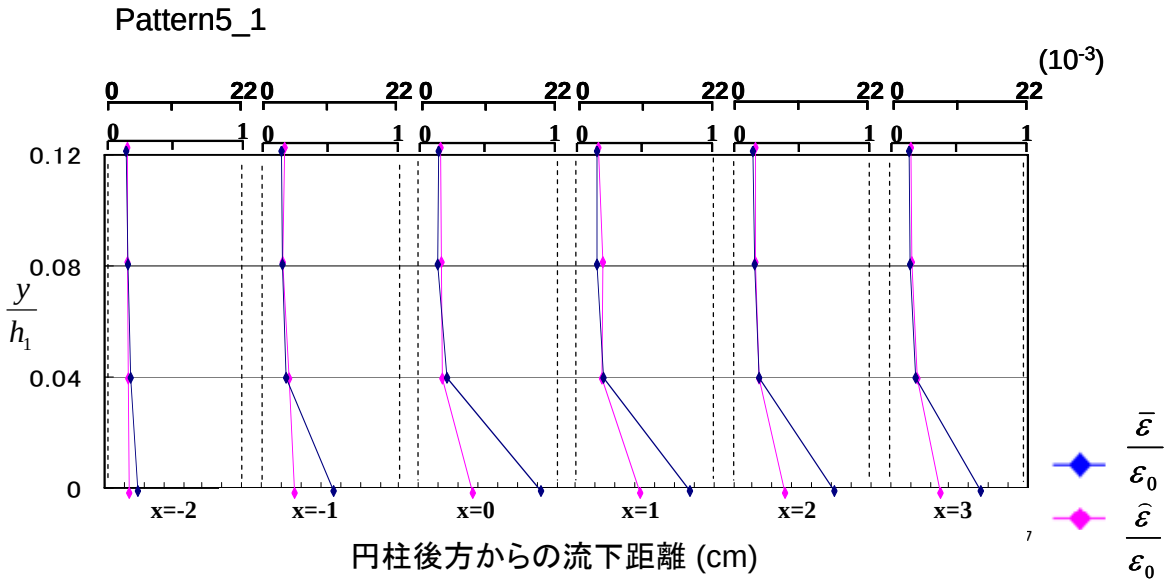


Fig.4-12-1 流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイル(y=2)

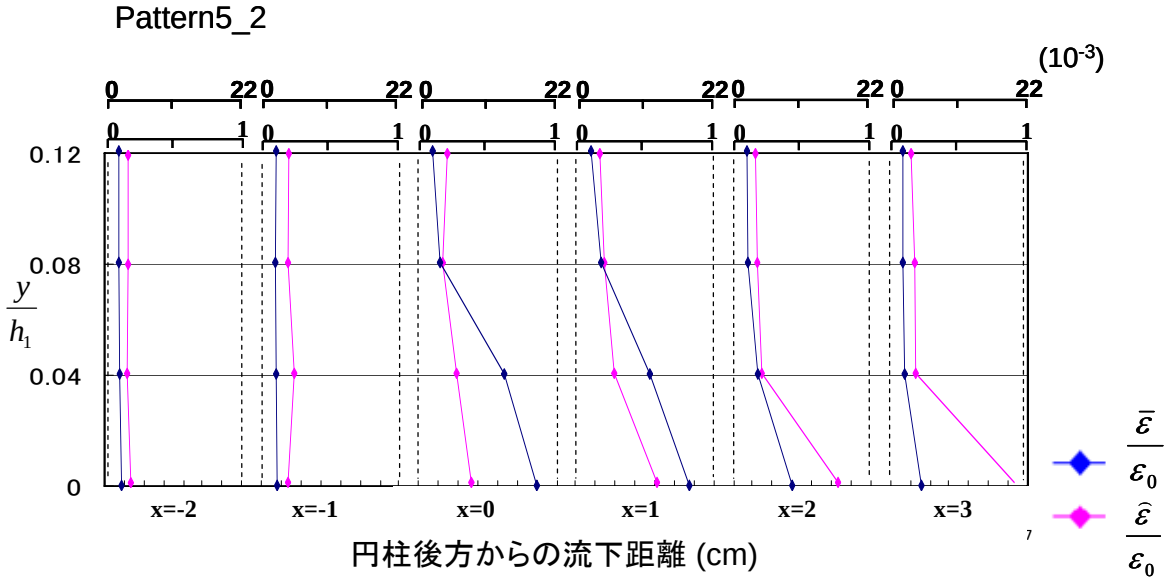


Fig.4-12-2 流下方向成分の平均密度，乱れ強度の鉛直プロファイル(y=2)

4.3.3　円柱本数と密度の最大乱れ強度との関係についての考察

密度 2 成層において，円柱本数と，その時の密度の最大乱れ強度F_dとの関係をFig.4-13 に示す．この関係から，円柱本数，F_dの増加により密度の最大乱れ強度にも増加傾向がみられる．このことから円柱の存在が上下層の連行に大きく影響を及ぼすと考えられる．

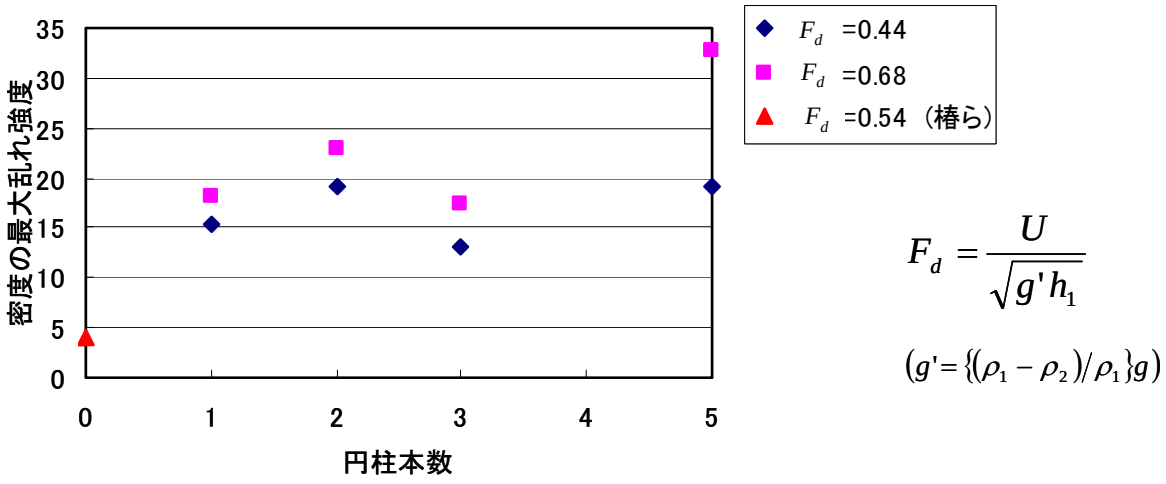


Fig.4-13　円柱本数と密度の最大乱れ強度との関係

第5章　結論

密度2成層流中に円柱が置かれた場合，その円柱後流は2層界面に影響を及ぼし，上・下層間の流体混合に影響を及ぼすものと考えられることから，本研究では，まず，2層流中に円柱が置かれた場合の円柱後流の特性について，可視化実験により検討を行った．ついで，円柱後流域の流れ場の変動に基づく密度界面における上下層の混合について，水理実験により検討を行った．

その結果以下のような結論を得た．

まず，円柱後流の流れについては，

(1)　密度2成層流中に配置された円柱後流は，配置する円柱の本数，上層流れのレイノルズ数および円柱間隔比により異なる．

(2)　均質流体に配置された円柱後流の場合と同様に，レイノルズ数の大きさによって，対称定常流と振動流の2つの流れが存在する．

(3)　複数円柱の場合には，円柱間隔比の大きさによって流れのパターンが異なる．さらに，密度界面より上層に流速分布が存在する密度界面近傍（L），密度界面から離れた平面（H）の流れパターンが異なる．

次に，円柱後流に基づく密度界面における上下層の混合については，

(1)　円柱前部では圧力の増加に伴い密度界面が低下し，密度変動の乱れ強度も小さくなる．

(2)　円柱側部から円柱背後にかけての密度変動の乱れ強度は大きくなる．このことは，円柱を回り込み加速された上層流により下層流体の上層への強い連行が生じたことを示すものである．

(3)　複数円柱の場合には，円柱間から放出される上昇流が下層水を巻き上げる現象が起こり，下層流体の連行量も大きくなる．

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農学研究院生産環境科学部門生産環境情報学講座の森 健教授，平井 康丸准教授に深く感謝し，厚く御礼申し上げます．

なお，本研究を実施するにあたり，九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門水環境学研究室に便宜を図っていただいたことに謝意を表します．

また，生産環境情報学講座博士課程濱上邦彦氏には，本研究を進めるに当たり御助言，御教示等，終始惜しみないご協力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講座の博士特別研究員Bui Quoc Lap氏，博士課程Nguyen Van Tuan氏，富田景子氏，修士課程柿崎新之助氏，木佐貫順子氏， Vu Chi Cong氏すべての皆様に深く感謝いたします．

参考文献

椿　東一郎　　：水理学Ⅰ，　森北出版株式会社，　1973

有田　正光　　：水圏の環境，　東京電気大学出版会，　1998

日本流体力学会　：流れの可視化，　朝倉書店，1996

岡本　哲史・八木田　幹　：一様流に平行な平面に垂直に置かれた有限長円柱の流れに関する実験的研究，　日本機会学会論文集，　1972

木田　重雄　　：いまさら流体力学？，　丸善株式会社，　1994

森　健ら　　:吹送流による密度界面の連行速度に関する実験的研究，　農業土木学会論文集，　2002

村松亮介　　:吹送流型2成層流に及ぼす浮揺性水草の影響，　九州大学卒業論文，2002

尾崎彰則　　：水生植物がある閉鎖性2成層水域の吹送流による連行現象，九州大学修士論文，　2003

山崎寛史　　:密度2成層流における円柱後流に関する研究，　九州大学修士論文，2007