

松重閘門水域を利用した堀川の水質改善方法に関する研究

指導教員 富永晃宏 教授

花井 一雄

1. はじめに 名古屋市を中心部を流れる堀川は自己水源が乏しく、名古屋港の潮汐の影響を受ける感潮河川である。近年では堀川の水質悪化が問題となっており、様々な市民団体が堀川浄化のための活動を行っている。本研究では、堀川中流部に位置し、本川に接する広大な凹部を有する松重閘門水域を研究対象とし、潮汐流動及び中川運河からの導水が松重凹部、また、松重閘門水域に及ぼす影響について現地観測と室内実験より検討する。

2. 水質観測 松重閘門水域における水質の変化特性を明らかにするために観測を行った。観測場所を図-1に示す。計測機器として、多項目水質計(東亜 DKK 製 WQC24)を使い、各場所の河床から0.5mの位置にワイヤーで固定し、10分間隔でpH、DO、塩分濃度、水温を計測した。また、表-1に中川運河からの導水状況について示す。また、中川運河から導水される水塊は堀川に存在する水塊よりも高DOであることが従来の研究よりわかっている。図-2より、中川運河から導水が行われ始めた時間から、すべてのポイントでDOの上昇がみられた。通常、堀川では上げ潮時に塩分の遡上に伴いDO値が低下することがわかっている。しかし、今回は上げ潮にも関わらずDO値の上昇がおこった。この要因として考えられるのは中川運河からの導水であると考えられる。導水により、上昇したDO値はしばらくの間維持されることもわかった。

3. 流速観測 松重閘門内における流動特性を明らかにするために流速計測を行った。観測を行った日とその日の導水の状況を表-2に示す。計測機器として、RiverCAT(超音波流向流速計)を使用し、図-3に示すラインをボートで1時間ごとに曳こうして計測した。また、図-3に導水口の場所を示す。導水はこの場所の河床から1.5m程度の高さから行われている。大潮の日は、9時～13時が下げ潮、14時が干潮で15時～上げ潮であった。小潮の日は12時まで上げ潮、13時が満潮、14時から下げ潮であった。計測結果を図-4に示す。図からわかるように、どちらの潮の時も中層では導水の影響を受けていることがわかり、凹部内の中層の流れは導水に支配されていることがわかる。上層では時計回りの循環流が発生していることがわかる。また、大潮の上層では凹部上流側からの凹部内への流入がみられる。通常の長方形側岸凹部では凹部下流



図-1. 観測場所(○内は松重閘門からの距離)

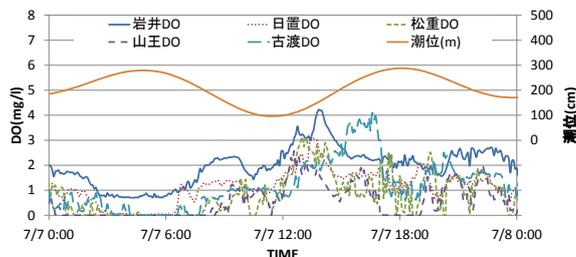


図-2. 水質観測結果

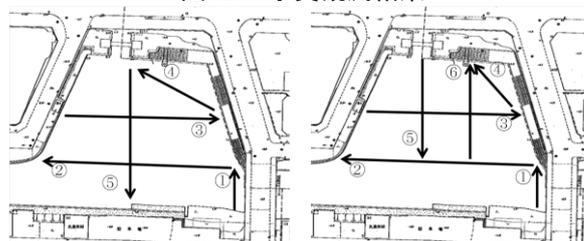
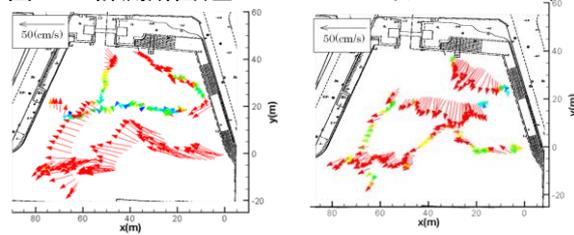
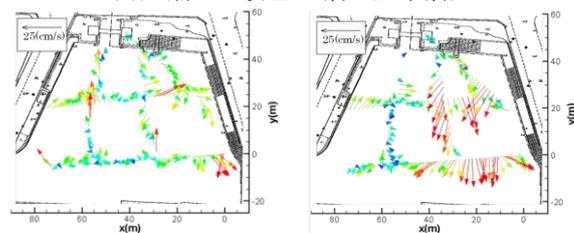


図-3. 計測断面(左:2012/11/16 右:2013/11/11)



(a)大潮 12時(左:上層 右:中層)



(b)小潮 14時(左:上層 右:中層)

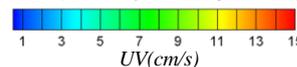


図-4. 計測断面(左:2012/11/16 右:2013/11/11)

表-1. 中川運河の導水状況

日にち	導水時間	導水量(t)
7月7日	10:50~13:00	57,720

表-2. 観測日程及び導水状況

観測日	観測時間	導水時間	導水量(t)	潮の形態
2012年11月16日	9:00~16:00	10:20~13:45	91,020	大潮
2013年11月11日	10:00~14:00	10:50~14:30	97,680	小潮

側から流入することが知られている。今回の計測結果となった原因としては松重閘門は台形形状であるとともに入口の角部分が丸みを帯びているため主流部の流れが凹部内に侵入しやすいものと考えられる。しかし、小潮の時の上層では凹部上流側からの流入がみられない。これは、小潮であるため潮汐による流れが弱いと同時に、導水が行われていたため凹部内に主流部の流れが入りづらかったことによると考えられる。図-4に凹部入口における横断方向流速 V の鉛直分布コンターを示す。ここで、正の値は凹部内への流入を示し、負の値は凹部内からの流出を示している。図からわかるように、大潮では中流から上流側の上層から中層で流入する流れがあり、中流から上流への下層では流出を示している。また、下流側では鉛直方向に一律に流出を示している。小潮では、上流側の中層で強い流出を示しており、導水口から放出された水塊は下層に広がることなく、導水口から直線的に凹部内から出ていくことがわかる。図-5に凹部入口における V の絶対値を境界面全体で平均した水交換速度 V_e (cm/s) を示す。図の中での白抜きのプロットは導水が行われている時間であることを示している。図からわかるように、大潮では導水が行われると水交換速度が増加していることがわかる。しかし、小潮においては導水が行われても水交換速度の増加は若干しか確認できず、導水が行われている状況では大潮時の方が、小潮時よりも水交換速度が大きかった。

3. 室内実験 中川運河からの導水が松重閘門凹部内に及ぼす影響を明らかにするために室内実験を行った。実験水路は、長さ 7.5m、全幅 0.3m の勾配可変開水路を用いた。流速計測方法としては PIV 計測を用いたため、側面はガラス張りでレーザー光の反射を防ぐために、全水路底に黒く塗った塩化ビニル板を敷いている。水路勾配は水路下流 6m 地点にある自動昇降装置により調節した。左岸側を奥行き 21.2cm、高さ 6cm の塩ビ板を設置することで高水敷をつくり、上流端の整流域から 3m の位置に開放区を設け、現場サイズに対する水平縮尺 1/213 の凹部模型を設置した。また、現場における水理条件をフルード相似側により合わせようとしたが、本実験設備では難しく可能な限り合わせたため、鉛直縮尺 1/80 のひずみ模型となっている。これらの実験条件を表-3に示す。水制の設置方法及び実験装置を図-6に示す。水制の設置場所は図-6に示すように A の場所と B の場所、及び水制を設置しない 3 パターンである。導水の方法については、図-7に示すように凹部模型に穴をあけ、下流側貯水槽からインバーターモーターで循環させる方法で導水を再現した。導水量としては模型縮尺に加え、時間縮尺 λ_t を河川における非定常運動方程式より算出し導入した。結果、現場を再現した導水量は $50\text{cm}^3/\text{s}$ となり、本実験では他に $25\text{cm}^3/\text{s}$ と導水なしのケースを行った。実験ケースについては表-4に示す。

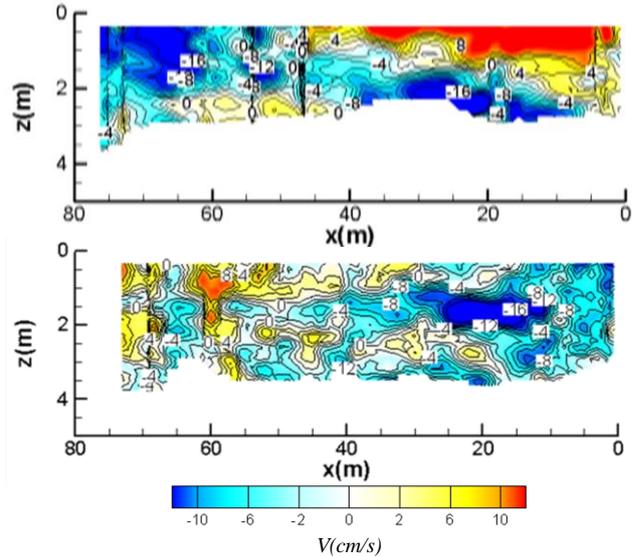


図-4. 凹部入口横断方向流速(上:大潮 下:小潮)

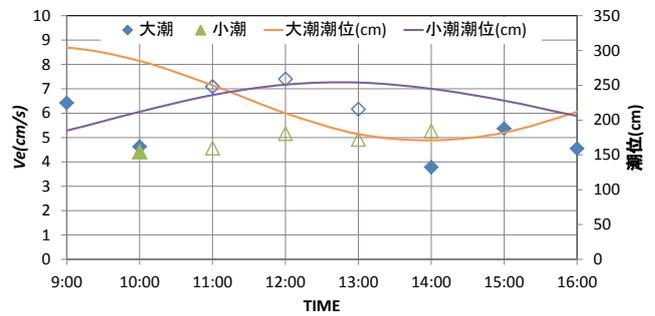


図-5. 凹部入口水交換速度 V_e (cm/s)

表-3. 実験条件

水深 h(cm)	流量 Q(l/s)	断面平均流速 Um(cm/s)	フルード数 Fr	勾配 I
5	0.2	4.5	0.07	1/2000

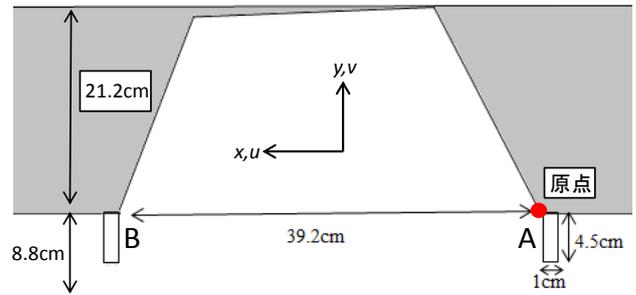


図-6. 水制設置場所及び実験模型

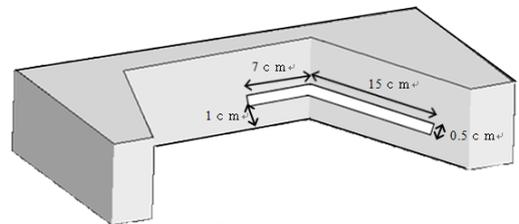


図-7. 凹部模型 導水口について

表-4. 実験ケース

case	流れ方向	導水量 (cm^3/s)	水制設置 パターン	case	流れ方向	導水量 (cm^3/s)	水制設置 パターン
case-A1	順流 (下げ潮)	0	なし	case-B1	逆流 (上げ潮)	0	なし
case-A2			A	case-B2			B
case-A3			B	case-B3			A
case-A4			なし	case-B4			なし
case-A5			A	case-B5			B
case-A6			B	case-B6			A
case-A7	50	50	なし	case-B7	50	50	なし
case-A8			A	case-B8			B
case-A9			B	case-B9			A

上げ潮時の流れを再現するために模型を上下流逆にして、下流側から導水するようにした。図-8に河床から4.5cmの代表的な3つのケースのベクトル図とレイノルズ応力のコンターを示す。まず、case-A1とcase-A2を比較すると水制を上流側に設置したことにより主流部が加速されておりその影響により凹部下流側からの流入速度が加速されていることがわかる。また、それに伴い凹部上流側に存在した淀み域が縮小していることがわかる。レイノルズ応力については、case-A1では凹部入口下流側から凹部入口に沿って中流に向かって正の値が分布していることがわかる。これは、せん断層において流速勾配に起因する乱れの発生を示しており、側岸凹部における基本的な特徴である。case-A2では凹部内奥下流側で強い負の分布がみられる。これは水制により加速された流れが凹部内に侵入してきたが、凹部奥で壁面により、急激な流速勾配が発生したためだと考えられる。次に、case-A1とcase-A7を比較するとcase-A7では導水の影響により流れ構造が大きく変化していることがわかる。case-A7では上流側からの凹部内への流入する流れが確認できる。レイノルズ応力については、case-A1と比べると凹部内に正と負の分布が広がっており、導水の影響により凹部内に乱れが発生していることがわかる。鉛直方向の流れを見るために、図-9に凹部奥(y=20cm)における鉛直ベクトル図を示す。case-A1とcase-A2では鉛直方向の流れは発生しておらず、2次元的な流れ構造になっていることがわかる。しかし、case-A7では導水の影響により上流側で鉛直渦の発生が確認できる。本研究では、凹部内に3次元的な流れ構造を発生させるためには、水制はあまり効果的ではなかった。そのため、凹部内に3次元的な流れを発生させるためには導水をうまく利用する必要がある。ここで、導水がある場合の下層の流れ構造をみるために図-10にcase-A7の下層のベクトル図と2012年に計測した松重閘門の河床形状を重ねた図を示す。図からわかるように下層では導水の影響が強く上層と異なった流れ構造がみられる。また、ベクトル図と河床形状を比較すると凹部奥下流側で循環流が発生している場所では河床が浅く土砂の堆積がみられる。このことから凹部奥の堆積は導水が原因と考えられると同時に本実験はおおむね現場の再現ができていていると考えられる。次に、凹部入口境界における横断方向流速Vを水深平均した V_m を図-11に示す。導水がない場合は水制を設置することにより、上流側と下流側の V_m の絶対値が大きくなっている。導水量だけを変化させた場合は、導水量が増えることにより下流側で負の値、上流側で正の値が大きくなっている。凹部境界における水交換速度を図-12に示す。X軸は導水量を平均流量で除して無次元化している。図からわかるように水制を上流側に設置した場合は導水量が増加するに伴い水交換速度が減少していることがわかる。しかし、水制を設置しない場合では導水量が $25\text{cm}^3/\text{s}$ までは水交換速度に変化はみられないが、 $25\text{cm}^3/\text{s}$ を超えると水交換速度が上昇し、 $50\text{cm}^3/\text{s}$ ではcase-A8よりも水交換速度が大

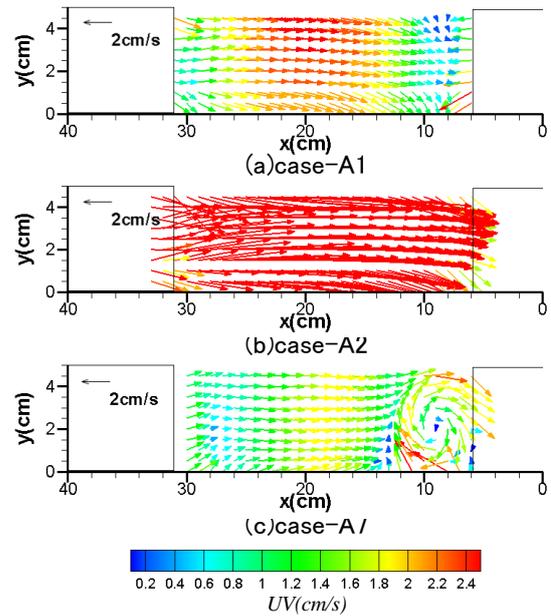


図-9. 鉛直ベクトル図

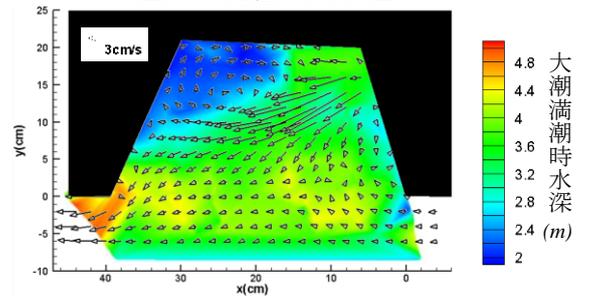


図-10.case-A7 下層ベクトル図及び松重閘門河床形状

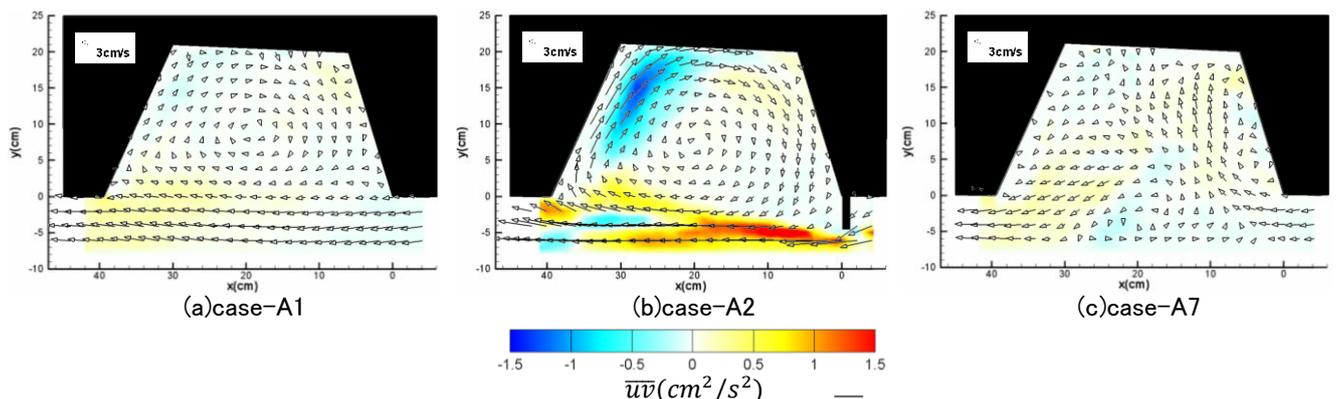


図-8. ベクトル図及びレイノルズ応力 uv ($z=4.5\text{cm}$)

きくなっている。次に凹部内上層における渦について考察する。図-13 に流線と 2 次元流速ベクトルの発散 $div\mathbf{V}$ を示す。流線からわかるように case-A1 では凹部内中央が循環流の中心となっている。case-A2 では循環流の中心は case-A1 と比較すると 5cm ほど主流側に移動している。また、循環流の大きさも case-A1 と比べて大きくなっている。次に導水が行われた case-A7 では一つの大きな循環流は確認することはできず、多数の微小な循環流が発生していることがわかる。また、 $div\mathbf{V}$ のコンターから case-A7 では他の 2 ケースとは違い収束と発散の領域が広がっており、3 次元的な流れ構造をとっていることがわかる。また、左上にある循環流の場所では $div\mathbf{V}$ は正の値をとっており発散しており、このような循環流ではゴミの集積などには利用できないので注意する必要がある。次に凹部内渦度強度 Ω_a を以下のように定義する。

$$\Omega_a = \frac{1}{\sum_{n=1}^N \Delta A_n} \sum_{n=1}^N |\Omega_n| \times \Delta A_n \quad (1)$$

N =計測点数 Ω_n =渦度 ΔA_n =計測点面積

渦度強度は凹部内の渦度の絶対値を渦域の面積で除して求めた。しかし、渦度分布はせん断領域のような流速シアが卓越する場でも渦域と判定されてしまう。そこで、本研究では Chong&Perry¹⁾によって提案された Δ 定義法を適用する。この方法では $\nabla \tilde{u} \equiv \partial \tilde{u}_i / \partial x_j$ の固有方程式の解条件によって渦の存在を判定するものである。この固有方程式の判別式が負の値となる場合は流線が閉じて渦が観察されるとみなされている。それに従い凹部内領域から渦領域を抽出した。 Ω_a を図-14 に示す。図からわかるように、導水がない場合では水制を設置し、凹部内への流入速度を上げた方が渦度強度が高いことがわかる。また、導水量が増えることによって凹部内の渦度強度が低下している。このことからゴミの集積などに凹部を利用する場合は導水をせずに、水制を利用することが効果的であると考えられる。

4. まとめ 現地観測では導水がある時の凹部の流れと水質の変化特性を計測した。室内実験では現場における大潮時の流れを大まかに再現でき、導水と水制が凹部内に与える影響について考察することができた。その上で、凹部内と主流部の水交換を活発にするためには導水がないときでは、上流側に水制を設置する方法が良いことがいえる。また、導水がある時は上流部に水制を設置してしまうと導水による水交換が弱まってしまうため水制の設置については可動式にするなどの検討が必要である。また、本研究の室内実験では、大潮時を対象としていたため、今後は小潮時などを対象にした実験や凹部内の土砂堆積についても検討課題である。

参考文献

1)Chong,M.S. and Perry,A.E:A general classification of three-dimensional flow fields,*Phys.Fluids,A*,Vol.2,No.5,pp.765-777,1990.

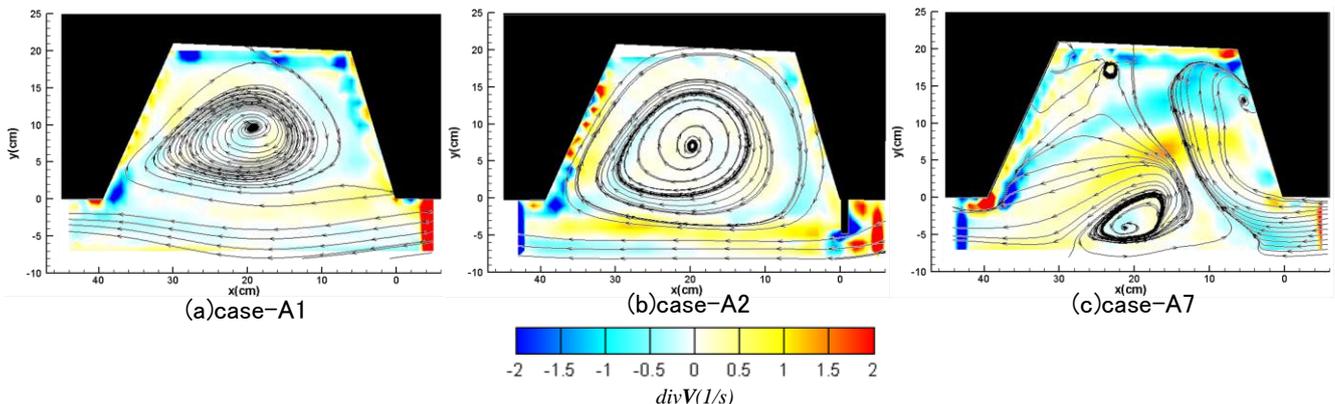


図-13. 流線と $div\mathbf{V}(z=4.5\text{cm})$

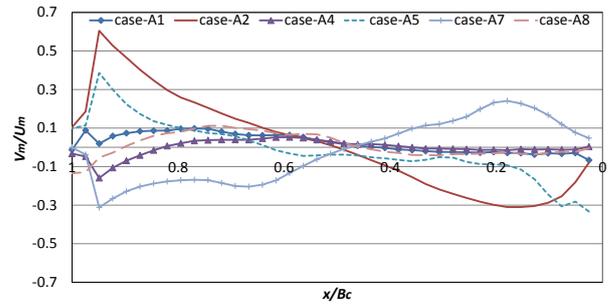


図-11. 凹部境界 V_m

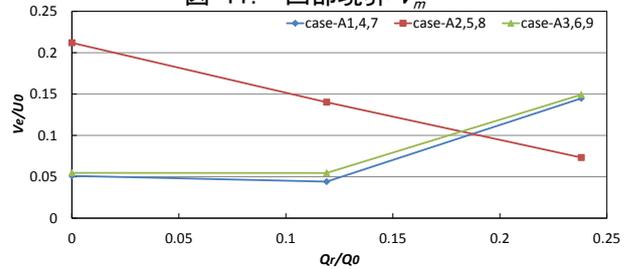


図-12. 水交換速度 V_{ex}

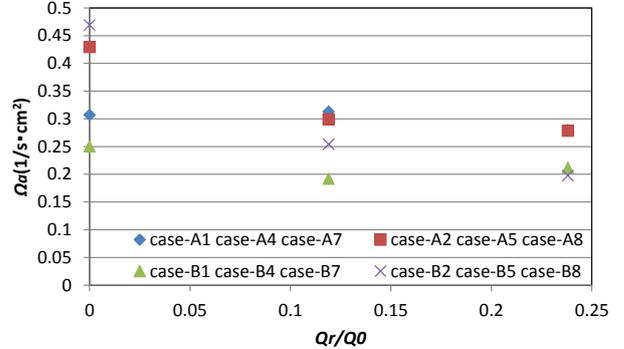


図-14 渦度強度