

堀川の潮汐流動に伴う流量特性と 河岸凹部の流れ構造の現地観測

FIELD MEASUREMENTS OF DISCHARGE AND FLOW STRUCTURES IN A RIVERSIDE CONCAVITY ZONE INDUCED BY TIDAL FLOW IN THE HORIKAWA RIVER

富永晃宏¹・佐々木高士²・郭緯²

Akihiro TOMINAGA, Takashi SASAKI and Wei GUO

¹正会員 工博 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Field observations on characteristics of discharge were conducted in an urban tidal river, the Horikawa River. Velocity distributions and discharges on various cross sections were measured by acoustic Doppler profiler (ADP). The longitudinal distribution of maximum discharge caused by tidal flow was revealed. The velocity structures in a falling stage were different from those in a rising stage. In the falling stage, the surface-layer velocity is higher and the lower-layer velocity is lower than the log-law profile. In the rising stage, the medium-layer velocity indicates maximum value. In a concavity zone of the tidal river, horizontal vortices were observed in both the falling and rising stages. The flow structures in the concavity zone indicate three-dimensional feature. The surface vortex structures were different between falling and rising stage.

Key Words : *tidal flow, field observation, ADP, discharge measurement, concavity zone, flow structures, horizontal vortices*

1. はじめに

名古屋市の中心部を南北に流れる堀川を再生して、都市に水辺環境を取り戻そうという市民運動が活発である。堀川再生のためには、現状の水質では不十分であり、第1に水質を改善することが求められている。堀川は源流を持たず、庄内川からの導水と流域からの下水処理水が水源となっている。また、堀川は延長16.2kmのうち13.6kmまでが感潮域であり、河川規模が小さく自流量が小さいことから、その流れは潮汐による流動に支配されている。水質にとって問題となるのは、汚濁物質が潮汐の往復流により下流へ流送されずに堆積しヘドロ化すること、塩水遡上に伴う密度成層の形成によって、底層が貧酸素化することである。特に干潮時にはヘドロが露出してSSが増加し、悪臭が発生する。堀川の場合、河口の名古屋港の水質が良くないことも水質が改善しない理由のひとつである。このような水質特性については、著者ら¹⁾および武田・松尾²⁾が現地観測により明らかにしている。この問題の解決策として環境導水、酸素供給などの対策が取られているがこのような流動形態が効果的な対策を困難にしている。最近では、木曽川を水源とする

上水用水の一部を堀川へ導水する社会実験が平成19年3月から3年間の予定で実施されている。これに伴って一般市民、大学、民間企業と行政が一体となって第3次の「堀川1000人調査隊」が結成され、堀川全体の水質調査を行っている。導水流量が大きくないことから、上流部ではある程度の効果が見込まれるものの、中下流部での効果はあまり期待できない。さらに、堀川では浮遊ゴミが潮汐流によっていつまでも往復しながら漂っている点も印象を悪くしている。こうした、河口域における浮遊物質や堆積物の挙動については多くの観測があるが^{3),4),5)}、それぞれの河川における潮汐流動特性を明らかにしておく必要がある。

そこで根本的な対策としては、潮汐流動を制御するか、また潮汐流動のエネルギーを利用するかが考えられる。前者のケースとして堰を設ける場合は、流れは淡水化し順流となって安定するが、流速の低下により堀川への汚濁負荷が堆積して水質が悪化するのを防止しなければならない。後者のケースとして、凹部を利用した浮遊物質の捕捉や、干潟や空隙などを組み合わせた浄化システムが考えられる。これらのことを考える上では、まず堀川の潮汐流動の構造を明らかにしなければならない。また、断面

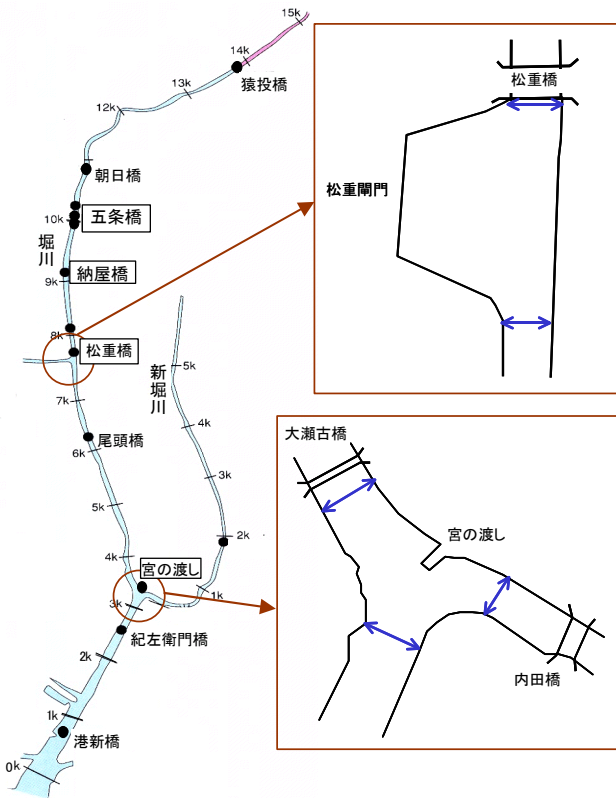


図-1 堀川全体図と松重閘門詳細図

形状変化部における潮汐流動の流れ構造を知ることが必要である。そこで本研究では、ADPを用いた流速の現地観測を行い、堀川の各地点における潮汐による流量特性を調べるとともに、側岸に凹部を有する松重閘門区域の流れ構造を検討した。

2. 現地観測の概要

図-1に堀川の全体図と河岸凹部である松重閘門地点と合流部の宮の渡し地点の平面形状を示す。流量計測場所は図に示した宮の渡し(3.3km)、松重閘門地点(7.5km)、松重橋(7.6km)、納屋橋(9.1km)、五条橋(10.0km)を選定した。宮の渡しは堀川と新堀川の合流地点であり、松重閘門地点は堀川右岸に台形状の凹部を有する地点である。計測日時はそれぞれで異なり、2005年9月から2007年の8月にかけて大潮前後の日を選択して行ったものである。表-1に各計測地点の観測日時、図-2に観測時の名古屋港潮位を示す。宮の渡しでは、合流部、分岐後の堀川、新堀川の横断面で計測を行い、松重閘門の凹部においては、流れ構造を調べるために複数断面において計測を行った。詳細な計測断面については後に示す。

流速計測には超音波流向流速計(Sontek社製・River Cat)を用いた。これは発信周波数3MHZのADPを曳航装置に取り付けたもので、コンパスを内蔵し、ボトムトラッキングを有しているため、移動しながら流速を計測することができる。最小セルサイズは

表-1 観測日時

観測地点	観測日	観測時間	川幅
宮の渡し合流部	2005.9.18	9:00~15:00	82.0m
宮の渡し堀川			62.0m
宮の渡し新堀川			66.0m
納屋橋	2006.8.27	8:00~16:30	21.0m
松重橋	2006.12.6	6:00~16:30	20.0m
五条橋	2007.8.16	8:00~18:00	23.0m

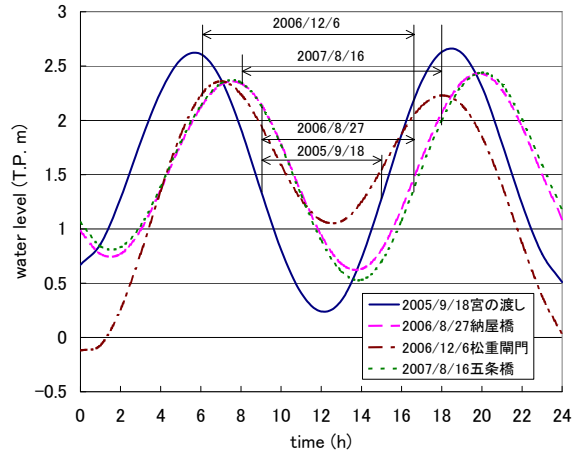


図-2 観測日時における名古屋港潮位

15cmで最大6mまで計測可能である。また、この装置は無線モデムを内蔵し、計測データを無線LANを用いてパソコンで受信し、リアルタイムで流速、流向、移動経路などの情報を取得することができる。河川横断方向にロープで牽引するかまたはボートで曳航しながら、サンプリング時間5秒で計測を行った。曳航速度は約20cm/sから30cm/sであった。この流速計では水面から20cmは不感帯で計測できず、底面近傍も水深の10%以下のところは底面の反射により計測できないため、流量を求めるには流速分布にべき乗則を用いた外挿を行っている。また側岸についても外挿を行っている。

3. 流量観測結果と考察

各地点において主に減水期から増水期にかけて30分から1時間間隔で横断計測を行った。図-3は各計測地点における流量の時間変化である。下流向きの流量を正、上流向きを負としている。宮の渡しでは合流部、分岐後の堀川、新堀川の横断面で計測を行ったが、主に下げ潮、上げ潮の最大勾配時付近でのみ計測を行った。下げ潮時では、堀川流量38.6m³/s、新堀川流量15.5m³/sであり、合流部流量57.1m³/sであった。一方上げ潮時の14:00から14:30では、分岐前流量57.3m³/s、堀川流量35.2m³/s、新堀川流量26.2m³/sであった。合流部の流量は両河川流量の合計に5%から7%の誤差であり、計測時間にずれがあることも考慮すると精度良く計測されていると言える。

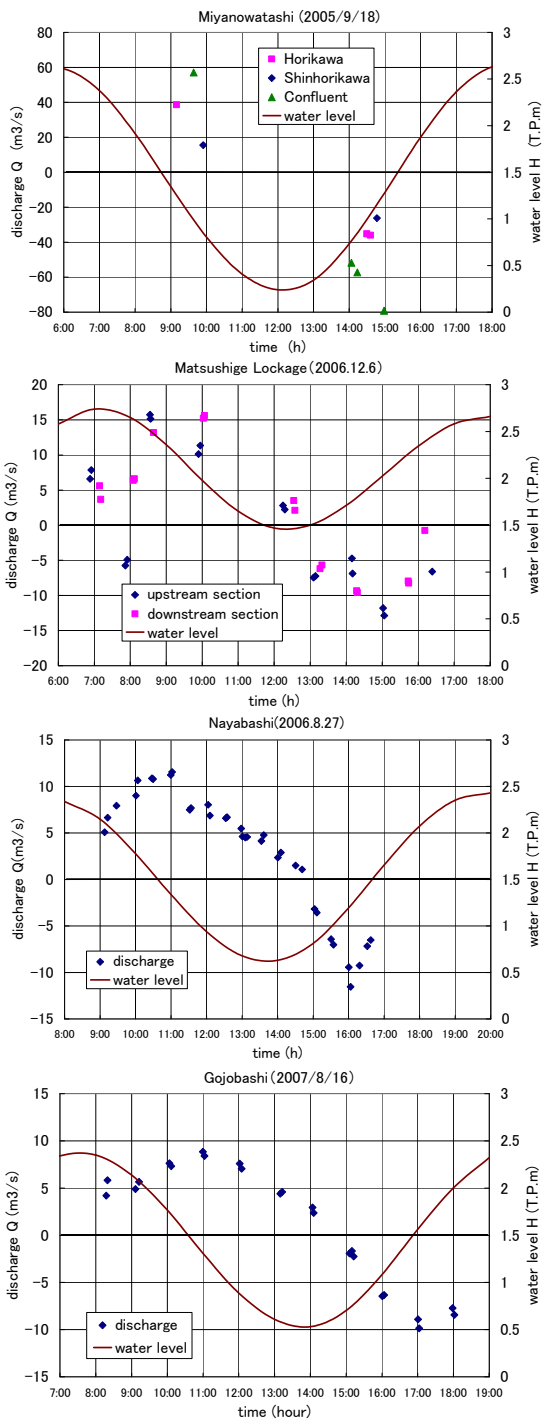


図-3 各地点における流量時間変化

松重開門では凹部の上流と下流の本川横断面で流量計測を行い、1断面で往復2回の計測を行った。この地点では流量にばらつきが大きく、特に満潮時、干潮時に短時間で流量が不安定となる。7:00前後ではほぼ満潮で順流が観察されているが、7:55頃凹部上流断面では急に逆流が発生している。しかし、ほぼ同時刻の下流側では順流となっている。凹部の影響により非定常な流れ構造が形成されている可能性もあり、詳細な流れ構造は後に考察するが、詳細は不明である。さらに、ここでは9:30から12:30にかけて中

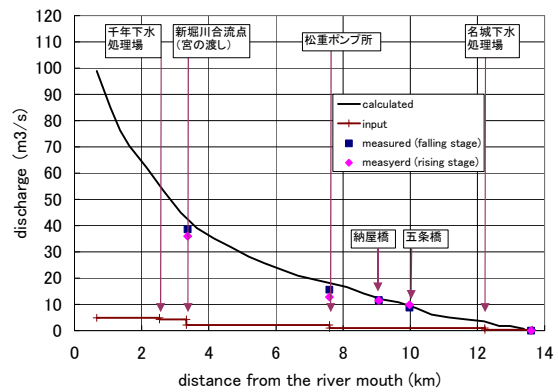


図-4 縦断位置における最大流量

川運河からのポンプ放流が行われており、この影響が現れている。このような変動はあるものの、この地点の代表的な下げ潮時の最大流量15.6 m³/s, 上げ潮時最大流量12.9 m³/sとみなせる。納屋橋では順流期間が長く逆流期間が短い。水位の時間勾配が最大になる以前に流量は減少傾向を示しているが、その後の計測がないため逆流がどこまで継続するかは不明である。五条橋では下げ潮、上げ潮時の水位の時間勾配がほぼ最大のところで最大流量を示している。ただし、干潮時にも順流が見られ、順流期間が長い傾向にある。

これらの最大流量を縦断距離に対して示したのが、図-4である。これらの結果は同一時間のもではなく、観測時の潮汐の形態も日潮不等により様々であることから一概には言えないが、おおむね大潮日前後の日時に観測したものであり、各地点における潮汐流動に伴う流量特性を示していると言える。図には庄内川からの導水量 (0.3 m³/s), 下水処理場からの流入量等を示している。また、1次元河川流解析ソフトであるMIKE11 (DHI製) を用いた流量の計算結果を示している⁶⁾。計算で与えた河口潮位時系列は、観測とは異なる時期のものであり厳密な比較はできないが、実際の流量は計算から予測されるものとほぼ一致することが示された。堀川の潮汐流動が自流量に比べて相当大きいことがわかる。

次に、下げ潮時と上げ潮時の横断面内流れ構造を比較した。図-5は宮の渡しの堀川合流地点における流速コンターである。下げ潮時は通常の開水路の対数則分布に比べると、表層が速く下層が遅くなっている。一方、上げ潮時では中層に最大流速が現れている。横断的に見ると、下げ潮時は表層近くで幅広く一様な流れとなっているが、上げ潮時は兩岸近傍において低速で中央が速い構造になっている。図-6は中央の30mから50m区間の平均鉛直分布を示す。下げ潮、上げ潮による鉛直分布構造の違いは明らかである。底層におけるせん断は上げ潮の方が大きいことがわかる。ここでは下層は常に海水に近い塩分を有し、表層に向かって塩分が減少する緩混合状態を

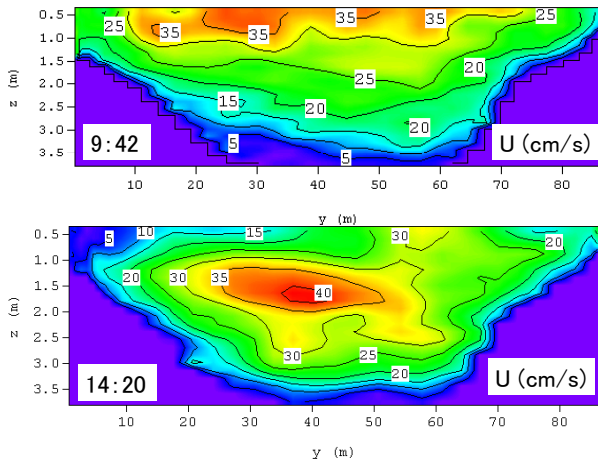


図-5 宮の渡し堀川合流部における流速コンター
(上：下げ潮時，下：上げ潮時)

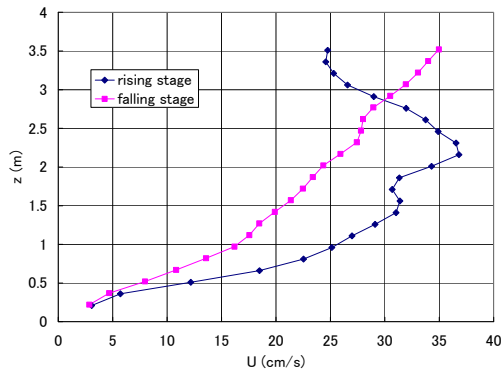


図-6 下げ潮時，上げ潮時の流速鉛直分布

示すことから，鉛直方向の密度差によりこのような顕著な差が現れたものと考えられる。

4. 河岸凹部における流れ構造

松重閘門凹部地点の流速計測結果について詳しく検討する。計測箇所は，流動形態を捉えるために必要だと思われる上流断面，下流断面，凹部中央横断，凹部境界縦断，凹部中央縦断の5測線を選定した。計測時間間隔は，上下流断面では毎時，その他では下げ潮、上げ潮のピーク時とした。図-7に凹部における測定断面を示す。ここでは中川運河からの放流の影響ない時間帯で8:30~9:00の下げ潮時，15:00~16:00の上げ潮時を対象として検討した。図-8に松重閘門凹部の河床高コンターを示す。ただし，基準水面から下方への距離として表現している。凹部奥に向かうにつれて河床が高くなり特に下流奥が高くなっている。凹部の上流側で50cm下流奥では150cmの堆積がある。この堆積にはヘドロが含まれており，水質悪化の原因となっている。また，本川の凹部下流側では河床が低くなっている。

平面構造を見るために，ADPで計測された表層，中層および底層の流速ベクトルを図-9に示す。図中の h' は水面からの距離を意味する。ベクトルの起点はボ

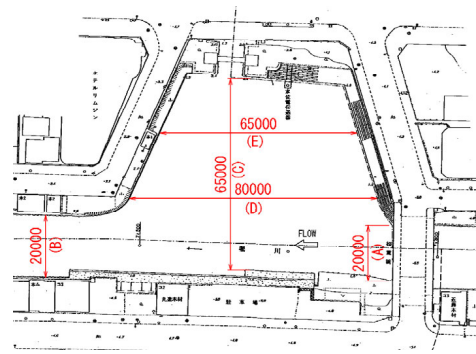


図-7 松重閘門凹部における流速測定断面

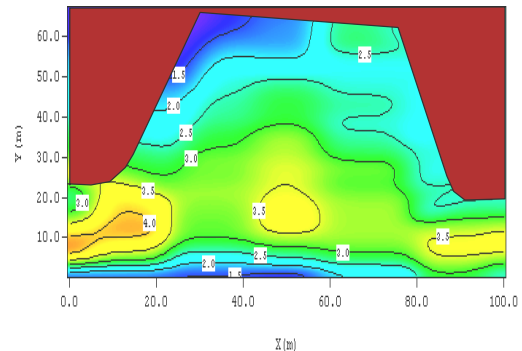


図-8 松重閘門凹部の河床高コンター

トムトラッキングによる得られた，ADPのボートによる曳航軌跡となっている。軌跡は必ずしも直線とはなっていないが，流れ構造を把握する上では問題は少ないと考える。表層では，主流が凹部上流から下流にかけて全体的に凹部内に入り込み，凹部下流側奥で時計回りの渦を形成しているのがわかる。これは河川わんどでみられる渦構造とは異なっている⁷⁾。中層では，凹部上流側で凹部からの流出がみられるようになる。表層より流速は弱まるものの，凹部全体に及ぶ時計回りの渦構造が明らかに認められる。底層では，凹部上流側で凹部からの流出がさらに顕著になっている。また，本川部分の流速が著しく低下しているのがわかる。以上のことから，下げ潮時は表層から全体的に凹部へ侵入して下流側へ至り，平面渦を形成しながら中底層の上流側から流出するという3次元な流れ構造が示唆される。

次に下げ潮時の各断面の流速コンターを図-10に示す。横断面では主流方向成分を示し，左岸側を原点として下流向きを正としている。縦断面では横断方向成分を示し，上流側を原点とし，凹部の奥方向を正としている。(A)上流断面では全体的に順流となっており，表層中央部が速いことがわかる。(B)下流断面では順流であるが，上流断面に比べて低速である。これは下流断面では上流より深くなっているためであり，流量はほぼ同程度であった。(C)凹部中央横断面では本川領域から凹部内の表層中央付近までが順流であるが，凹部奥から本川の中層に向かい逆

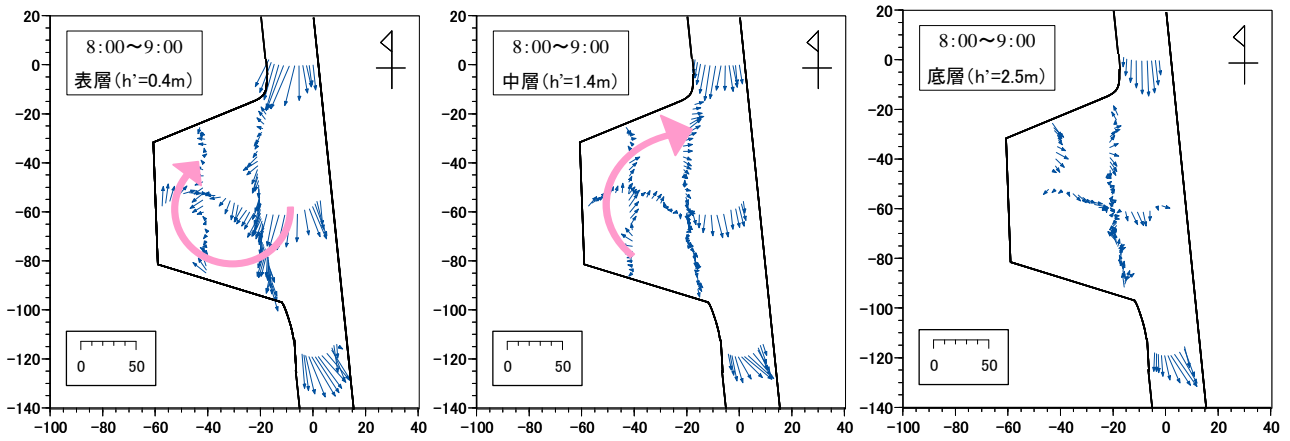


図-9 平面流速ベクトル（下げ潮時）

流がみられる。(D)本川凹部境界縦断面では凹部上流中層付近で凹部からの流出がみられるが、その他の領域では大きな流速はなく下流部分で弱い流出が見られる。(E)凹部中央縦断面では上流側の底層付近で凹部からの流出があり、上層では流入が見られる。下流端では下流端表層から上流側底層へ向かって傾斜した領域で流入が認められる。以上のベクトル図とコンター図により、時計回りの渦が底層に比べ表層ほど速くなっているのは、塩水楔の上部を流れる速度の速い水塊が凹部内に入り込んでいるためと示唆される。

図-11は上げ潮時における、表層、中層および底層の流速ベクトルである。表層では凹部の下流領域において反時計回りの渦構造が認められるが、下げ潮時と比べると、凹部内への主流の入り込みは小さく、渦構造は明確ではない。上流断面の流速が左岸方向を向いているが、この原因はよく説明できない。中層では凹部上流側から凹部への流入がみられ、凹部全体に及ぶ反時計回りの渦構造が明らかに確認される。凹部中央断面の本川領域では流れが本川中央に集中している。底層では凹部上流側からの流入が顕著となっている。以上から、上げ潮時は中底層を中心に反時計回りの渦構造を形成するが、上層では凹部内への流れ込みが小さいことがわかる。

上げ潮時の各断面の流速コンターを図-12に示す。(A)上流断面では全体に逆流となり、宮の渡し地点で見られたように中層部が速くなっている構造を示す。(B)下流断面でも逆流となっているが、上流側に比べて遅くなっている。これでは流量に大きな差ができるが、両者では時間的なずれの影響もあると考えられる。(C)凹部中央横断面では本川領域が逆流であり、凹部内で順流となり、特に凹部奥の河床上昇部付近で強い順流が見られる。全体として反時計回りの渦構造を示しているが下げ潮時と比べると構造が異なっている。(D)本川凹部境界縦断面では中流部付近で凹部から流出がみられ、上流側で流入が現れる。(E)凹部中央縦断面では下流側で凹部への流入が認めら

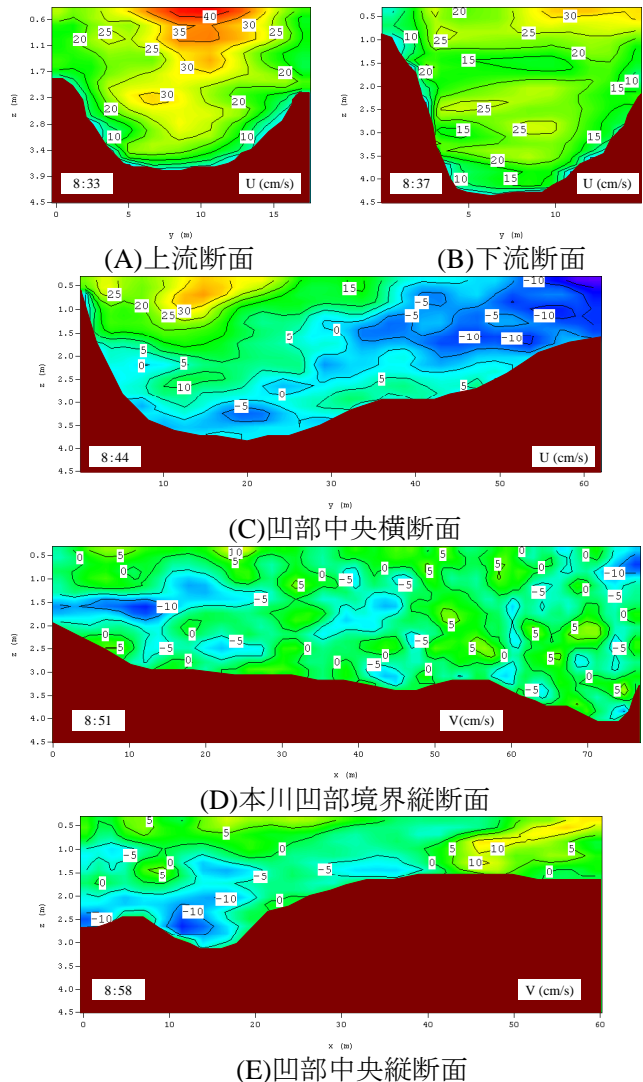


図-10 松重凹部における流速コンター（下げ潮時）

れ、上流側は底層付近において流出を示す。

以上のことから、この凹部においては密度成層の存在により層ごとに複雑な渦構造を示すことがわかった。また、表層では下げ潮時にゴミが凹部内に集積する機構が明らかとなり、同時にこれが凹部奥でのSSの堆積を促しているものと考えられる。

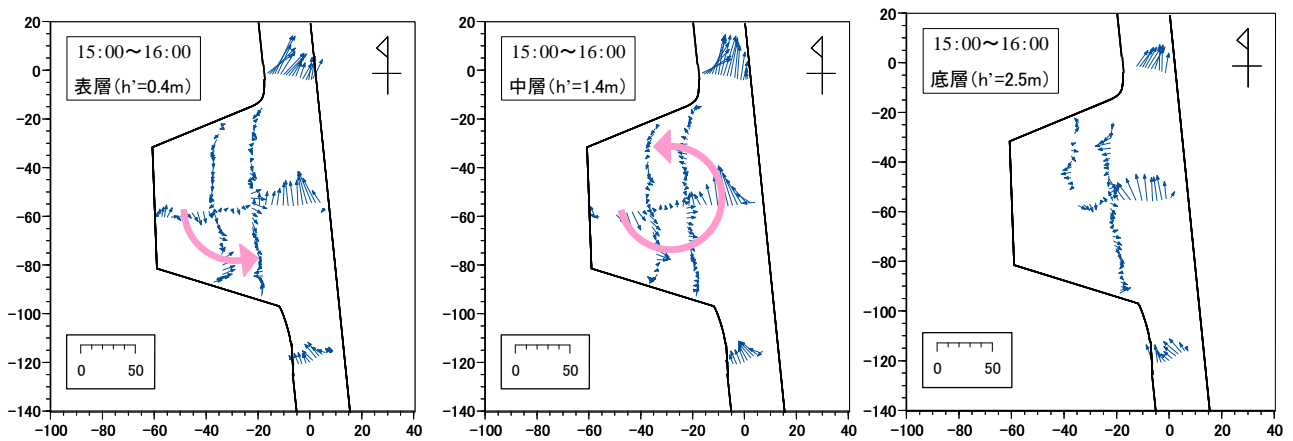


図-11 平面流速ベクトル（上げ潮時）

5. おわりに

潮汐の影響が非常に大きい堀川の流量特性を超音波流向流速計（ADP）を用いた現地観測で明らかにした。また、流速の横断面構造から下げ潮、上げ潮での流れ構造の違いが示された。下げ潮時是对数則分布に比べて底層が遅く表層が速い直線的な分布になるのに対し、上げ潮時は中底層が速く表層がむしろ遅くなる分布を示す。この特徴は全ての計測点において確認された。河岸に凹部を有する箇所では、はく離に伴う平面渦の形成は認められたが、下げ潮と上げ潮で3次元の流れ構造の違いが見られた。今後は、潮汐による流れ構造の違いがゴミの輸送やSSの堆積等と与える影響を、水質項目の計測により明らかにする必要がある。

謝辞：宮の渡しにおける計測データについては、NPO法人「堀川まちネット」の中島佳郎氏の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 富永晃宏, 庄建治朗, 川上哲生, 尾崎勝: 都市河川感潮域における塩水遡上と鉛直混合特性の現地観測, 水工学論文集, Vol.49, 1393-1398, 2005.
- 2) 武田誠, 松尾直規: 堀川の流れと水質に関する現地調査, 水工学論文集, vol.51, pp.1135-1140, 2007.
- 3) 伊福誠, 合田宏隆, 中田正人: 肱川感潮域における懸濁物質の挙動, 水工学論文集, VOL.47, 1165-1170, 2003.
- 4) 松本治彦, 坂本淳一, 天野卓三, 隈野博一, 羽田野袈裟義: 都市河川感潮部の水質と物質輸送の現地観測, 水工学論文集, Vol.42, 799-804, 1998.
- 5) 土屋十圓, 和泉清: 都市河川の感潮域における水質と汚濁堆積物の挙動, 水工学論文集, Vol.35, 573-578, 1991.
- 6) 可児誠, 川上哲生, 尾崎勝, 富永晃宏: 河川流量が感潮河川の潮汐流動に及ぼす影響, 平成16年土

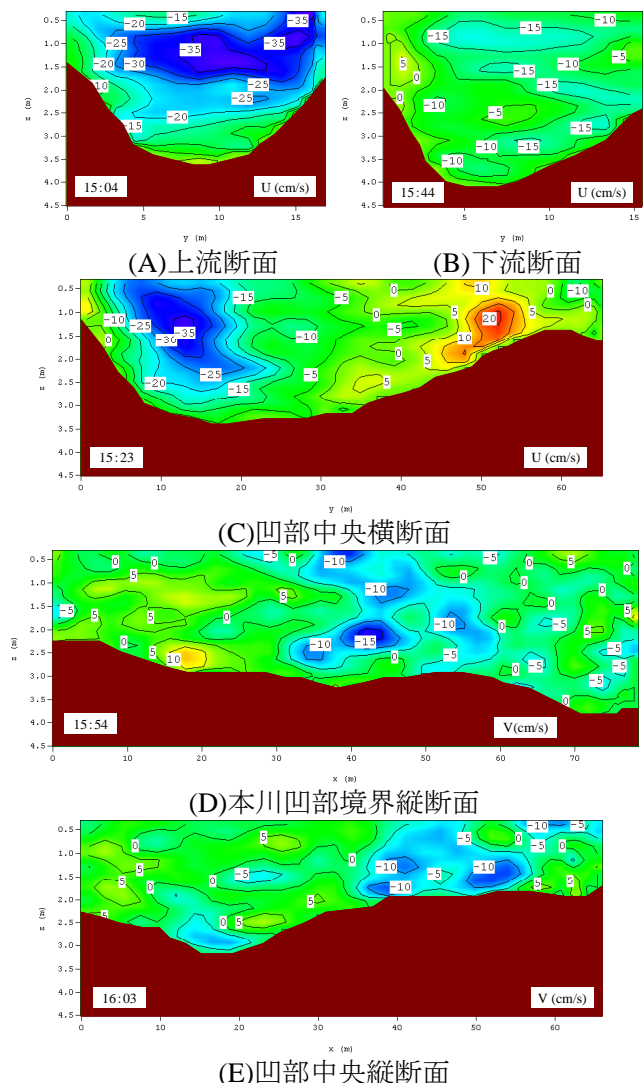


図-12 松重凹部における流速コンター（上げ潮時）

木学会中部支部研究発表会, II-29, 2005.

- 7) 富永晃宏, 鄭載勲, 阪巻実佳: 複断面開水路高水敷に設けられた凹部の流れ構造, 応用力学論文集, vol.8, 883-891, 2005.

(2007. 9. 30 受付)