超音波ドップラー流速計を用いた現地観測に基づく河川感潮域における流量観測に関する研究

中央大学大学院　学生員　○河津　元
中央大学理工学部　学生員　高木　宏郎
高知工業高等専門学校　正会員　岡田　将治
中央大学理工学部　フェロー会員　山田　正

1.はじめに

河川の流量は，治水･利水とともに河川環境を考慮した河川計画･管理を行う上で最も重要なデータである．このために流量，特に洪水時のピーク流量を正確かつ安全に測定する観測技術の開発，確立は重要である．また，河川感潮域では水位が潮汐の影響を受けるためH-Q式が得られないことや流速が潮汐により周期的に変動することから，平水時においても正確な流量算出が容易ではない．著者らは，感潮域における流量観測法の精度向上，流況・流動把握を目的とし，2004 年の平水時に鶴見川末吉橋地点（5.9km）において，水平設置型ADCP(以後H-ADCPと記す)とともにADCP搭載ボートを用いた集中観測を行った[1]．本研究では，H-ADCPおよびADCP搭載ボートを用いた集中観測結果と電磁流速計を用いた流量観測結果を比較することにより感潮域に適した流量観測法の検討を行うとともに，集中観測結果から感潮域における平水時の流速・流量変動特性の把握を試みた．また，感潮域における洪水時の流況把握およびH-ADCPの精度検証を目的として，2006 年の洪水時にH-ADCPともにADCP搭載橋上操作艇(以後，リバーボートと記す)を用いた橋上操作観測を行った．

2.観測概要

観測対象河川は鶴見川(流域面積 235km^2，流路延長 42.5km)である．鶴見川は，河口から 13.8km付近まで潮汐の影響を受けている．本研究で対象とするADCPとH-ADCPによる流量観測地点は，河口から 5.9kmにある末吉橋直上流に位置している(**図-1**)．

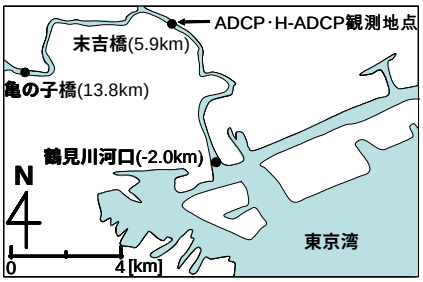


図-1　鶴見川概要図

(1) H-ADCP による流量観測

図-2 に末吉橋地点付近の平面図を示す．末吉橋直上流左岸に設置されている H-ADCP は 2003 年 1 月から計測を開始し，平水時，洪水時においても水位に応じて自動昇降･回転して 10 分ごとの水位，断面流速分布および流量を出力する観測システムである．H-ADCP の諸元は，出力 600kHz，測定層数 30，測定層厚 3.0m，First ブランク 1.0m である．水面下 1.0m や河床付近は不感帯となり流速データが得られないため，流量換算の際は計測された最も近い層の流速値と同じ値を与えている．

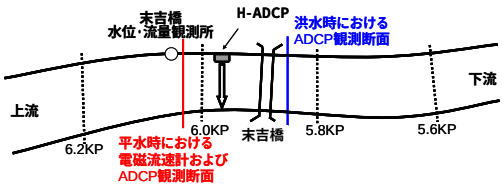


図-2　末吉橋地点(5.9km)付近の平面図

(2) ADCP による流量観測(移動観測，定点観測，橋上操作観測)

移動観測：H-ADCP 観測地点の上流約 50m の断面において ADCP(ワークホース ADCP 1200kHz,Teledyne RDI 社製)をボートに搭載し，平水時の小潮時(2004 年 8 月 10-11 日)と大潮時(2004 年 9 月 1-2 日)に 24 時間連続の曳航観測を行った．ADCP の計測条件は，層数 30，層厚 0.25m，First ブランク 0.2m，Bottom Tracking 有効，High Rate Pinging モードに設定している．移動観測では，H-ADCP の観測データと比較できるように，10 分間隔(ボート速度約 0.8m/s)で同じ断面を往復し 5 分間隔の流速・流量データを得た．

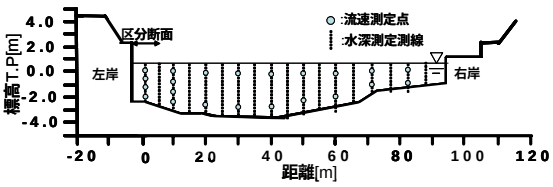


図-3　末吉橋地点(5.9km)付近の横断面形と流速測定位置概念図

キーワード　流量観測　河川感潮域　ADCP　H-ADCP
連絡先　〒112-8551　東京都文京区春日 1-13-27 中央大学　ＴＥＬ03-3358-6620 E-mail：gen@civil.chuo-u.ac.jp

定点観測：移動観測と同様の断面において，ADCP 搭載ボートを断面最深部付近に停泊させ，平水時の小潮時(2004 年 8 月 12-13 日)に 24 時間連続の集中観測を行った．ADCP の計測条件は，層数 30，層厚 0.2m，First ブランク 0.2m，Bottom Tracking 有効，High Rate Pinging モードに設定している．定点観測では，断面最深部における 10 秒間隔の鉛直方向の流速データを 24 時間連続で得た．

橋上操作観測：末吉橋直下流の断面において 2006 年の洪水時(10 月 6-7 日)にリバーボートを用いた集中観測を行った．ADCP の計測条件は，層数 40，層厚 0.15m，First ブランク 0.15m，Bottom Tracking 有効，High Rate Pinging モードに設定している．橋上操作観測では，リバーボートを約 20 分間隔で往復させることにより，約 10 分間隔の流速・流量データを得た．

(3)電磁流速計を用いた流量観測

電磁流速計を用いた流量観測は，移動観測の下流約 10m の断面において平水時の小潮時(2004 年 8 月 10 日)に ADCP 搭載ボートを用いた集中観測とともに 2 回行った．**図-3** に末吉橋付近の横断面形と流速測定概念図を示す．流量は流速測線上で流速を測定し，その流速値と区分断面積を乗じたものの総和として算出される．横断方向の水深測線は 18，流速測線は 9 である．水深・流速ともに各測線において 2 回測定しその平均値を流量算出の際の水深・流速として用いている．流速測定については，1 回目は全ての流速測線上において水深の 2 割，8 割の 2 点を測定した．2 回目は左岸から 2 測線は流速測線上において水深の 2 割，4 割，6 割，8 割の 4 点を測定し，それ以外の測線は流速測線上において水深の 2 割，8 割の 2 点を測定した．測定断面の水深・流速測定に要した時間は，1 回目は 16:40～17:38 であり，2 回目は 17:44～18:43 であった．電磁流速計による流量観測では，測定に要した時間の中間時刻である 17:09 と 18:14 を観測時刻とする．

3.観測結果および考察

(1) ADCP，H-ADCP を用いた流量観測結果と電磁流速計を用いた流量観測結果の比較

図-4 に末吉橋地点における小潮時の水位と流量の時系列を示す．これより流量は潮汐と同じ約 12 時間の周期の変動とともに 90～130 分の短周期で変動していることがわかる．流量の変動幅は潮汐による場合は 50～60 m^3/s であり，短周期の場合は約 20 m^3/s である．一方，水位は流量に見られたような短周期の変動はせず，潮汐とほぼ同周期で変動している．**図-5** に末吉橋地点における電磁流速計を用いた観測時の水位と流量の時系列を示す．これより電磁流速計を用いて測定断面を 1 回測定する間に ADCP による流量が 1 回目は 22m^3/s から 10 m^3/s に，2 回目は 2 m^3/s から 18 m^3/s に変化していることがわかる．続いて，ADCP による流量と電磁流速計による流量の比較を**表-1** に示す．ここでは，電磁流速計による流量と ADCP による流量の瞬間値(電磁流速計の観測時刻に最も近い値)および平均値(電磁流速計の観測期間中の平均値)を比較した．ADCP による流量の瞬間値に対する電磁流速計による観測流量の相対誤差は，1 回目については 95%，2 回目については 37%であった．また，ADCP による流量の平均値に対する電磁流速計による流量の相対誤差は，

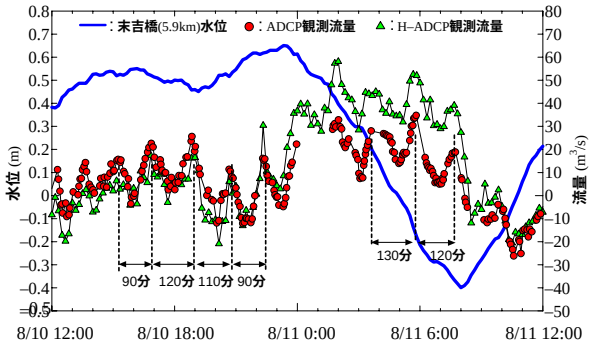


図-4　小潮時における水位と流量の時系列
(2004/8/10 12:00-8/11 12:00)

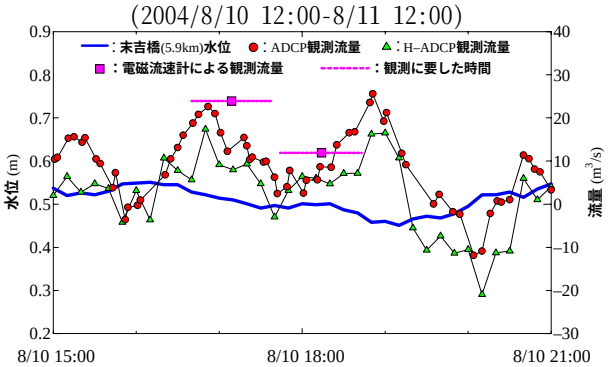


図-5　電磁流速計を用いた観測時における水位と流量の時系列
(2004/8/10 15:00-21:00)

表-1　ADCP による流量と電磁流速計による流量の比較
(a)1 回目

観測方法	データ時刻	流量[m³/s]
ADCP	瞬間値(17:06)	12.26
	平均値(16:40～17:38)	15.16
電磁流速計	17:09	23.91

(b)2 回目

観測方法	データ時刻	流量[m³/s]
ADCP	瞬間値(18:13)	8.67
	平均値(17:44～18:43)	8.99
電磁流速計	18:14	11.90

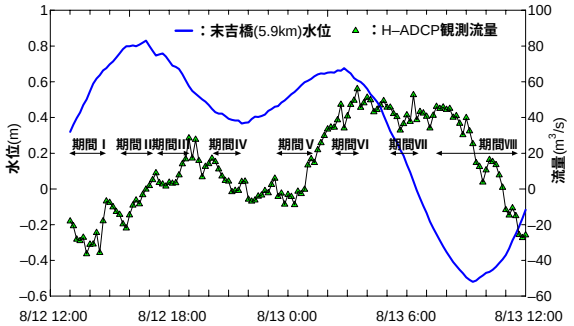
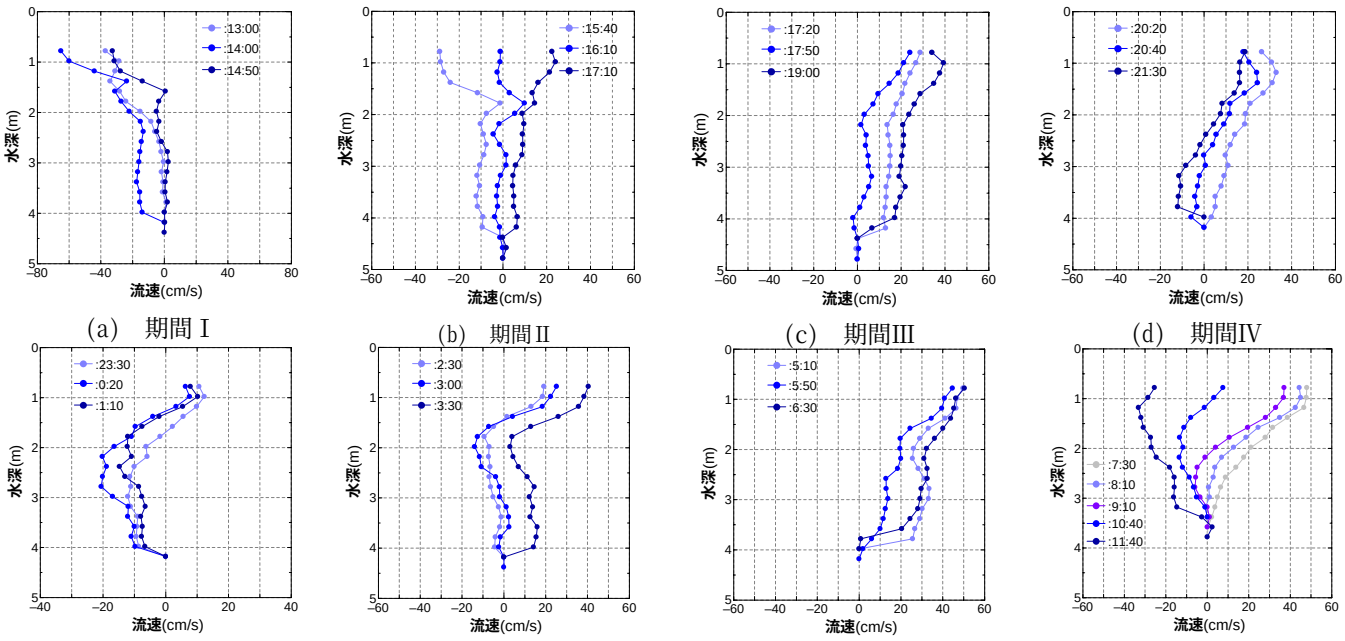


図-6　定点観測期間中の水位と流量の時系列
(2004/8/12 12:00-8/13 12:00)

1 回目については 57%，2 回目については 32%であった．これより，短時間で流速が変動する感潮域での流量観測は，横断面全体の鉛直方向の流速を瞬時に測定できる超音波ドップラー流速計を用いることが高精度かつ実用的であると考える．短周期の流速・流量変動については次章で考察する．

(2)定点観測結果(感潮域における流速の鉛直構造と時間変動特性)

図-6 に定点観測期間中の末吉橋における流量と水位の時系列を示す．これより定点観測期間中も小潮時の集中観測時に見られたような短周期の流量変動が確認できる．**図-7** に定点観測期間中における流速の鉛直分布を示す．**図-7** 中の 10 分間隔の流速の鉛直分布は，10 分毎に前後 5 分の流速データ(10 秒間隔)を平均することにより作成した．流速が正の場合は順流，負の場合は逆流である．**図-7** の期間は**図-6** 中の期間と対応している．上げ潮期である期間Ⅰでは，流速はどの時間においても逆流であり，流速分布は水面から水深 2m までは強い逆流で，水深 2m 以下では弱い逆流となっている．水深 2m 以下の流速に着目すると流速は 13:00，14:00，14:50 に対し 0cm/s，-20cm/s，0cm/s と変動している．満潮時である期間Ⅱにおける流速は，ほぼ同じ鉛直分布形のまま逆流から順流に遷移している．下げ潮期である期間Ⅲにおける流速はどの時間においても順流であり，水深 2m 以上の上層部が強い順流，水深 2m 以下の下層部が弱い順流という流速分布をしている．この期間の流速の時間変動に着目すると，流速は鉛直方向にほぼ同じ分布形をしたまま，17:20 には水深 2m 以上は約 20cm/s，水深 2m 以下は約 15cm/s，17:50 には水深 2m は約 15cm/s，水深 2m 以下は約 5cm/s，19:00 には水深 2m 以上は約 30cm/s，水深 2m 以下は約 20cm/s となり，流速が順流方向に短時間で変動していることがわかる．干潮時である期間Ⅳでは，流速は水面から河床に向けて徐々に小さくなっていく流速分布を保ちながら，順流から逆流に遷移している．上げ潮期である期間Ⅴの流速は水深 1.5m 以上では順流，1.5m 以下では逆流であった．水深 2～3m 付近の流速は時刻 23:30，0:20，1:10 に対しそれぞれ-10cm/s，-20cm/s，-10cm/s と変動している．満潮時である期間Ⅵでは水深 1.5m 以上の流速は常に順流であるが，水深 1.5km 以下の流速は下げ潮期に向かうにつれて逆流から順流に遷移する．そして，大きな下げ潮時である期間Ⅶでは，流速は全て順流になり水深 1m 付近の流速は約 50cm/s になり，流速分布は対数分布のような形となる．また，水深 2.5m 以下の流速の時間変動に着目すると 5:10，5:50，6:30 に対し流速が 30cm/s，10 cm/s，　30 cm/s と大きく変動していることがわかる．干潮時の期間Ⅷでは，7:30～9:10 において水深 1.5m 以上の流速は順流であるが水深 2m 以下の流速は順流から逆流へ遷移する．そして，潮が上げてくるにつれて流速は下層から逆流となり 11:40 には鉛直方向全ての流速が逆流となる．期間Ⅷにおける流速分布および時間変動は塩水楔の影響によるものだと考えられる．定点観測期間中の流速の変動周期は 90～120 分であり，小潮時の集中観測における流量の変動周期とほぼ一致していた．つまり，鶴見川感潮域における流速は 90～120 分周期で変動しながら潮汐と同じ周期で順流・逆流を繰り返すこと



(a)　期間Ⅰ　(b)　期間Ⅱ　(c)　期間Ⅲ　(d)　期間Ⅳ

(e)　期間Ⅴ　(f)　期間Ⅵ　(g)　期間Ⅶ　(h)　期間Ⅷ

図-7　観測断面の最深部付近における流速の鉛直分布
(2004/8/12 12:00-8/13 12:00)

がわかった．以上のことから，感潮域における流量は 90～120 分の流速変動と潮汐の影響によって約 12 時間周期とともに短時間周期で変動していると考えられる．

短周期の流速・流量変動の発生要因については次のように考察した．**図-8** に鶴見川河口(-2.0km)における水位の時系列(2004 年 10 月 9 日～10 日)を示す．末吉橋地点で観測された流量変動とほぼ同様な 90～120 分周期の水位変動が，鶴見川河口においても確認された．この水位変動は，東京湾の他の潮位観測所においても観測されている．この期間中，非常に強い台風 22 号が，東京湾を北東方向に横断した．この台風の影響によって海水面が変動し，東京湾に 90～120 分周期を持つセイシュが起こったと考えられる．そこで，2003 年 2 月における鶴見川河口(-2.0km)の水位の卓越周期を調べるため，2003 年 2 月の水位データを用いてスペクトル解析を行った．その結果，**図-9** に示すように卓越周期は，約 12 時間と約 2 時間であることがわかった．ここで，鶴見川感潮域を一方向のみが開いた長方形水域と考えると，セイシュの固有周期$T_n(h_r)$は次式で与えられる．

$$T_n = \frac{4L}{(2n-1)\sqrt{gh}} \qquad (1)$$

ここに，g(m/s^2)：重力加速度，L(m)：感潮域の長さ，h：平均水深，n(=1，2，3…)：振動のモードを表すパラメータである．鶴見川感潮域の長さは 13.8km, 末吉橋における 2003 年 2 月の平均水深は 3.64mであるから，セイシュの固有周期はn=1，2，3 に対し，2.57，0.86，0.51h_rである．n=1 に対するセイシュの固有周期は，観測された流量変動の周期および鶴見川河口における水位スペクトルの卓越周期と概ね対応している．以上のことから，鶴見川末吉橋地点における短周期の流速・流量変動は鶴見川河口の水位変動，すなわち東京湾の水位変動(セイシュ)の影響により発生していると考えられる．

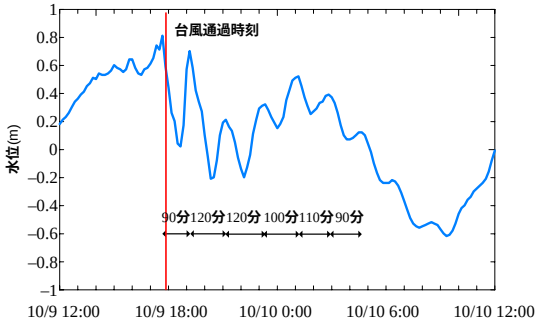


図-8 鶴見川河口(-2km)の水位の時系列
(2004/10/9 12:00-10/10 12:00)

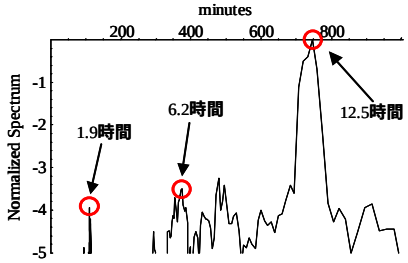


図-9 鶴見川河口における 2003 年 2 月の水位のスペクトル解析結果

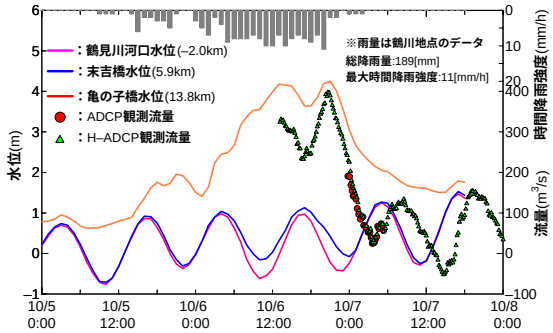


図-10 洪水観測時における各水位観測所におけると水位と流量の時系列
(2006/10/5 0:00-10/8 0:00)

(3)洪水時における ADCP，H-ADCP を用いた流量観測結果の比較

図-10 に洪水観測時における流量と鶴見川各水位観測所における水位の時系列を示す．末吉橋地点の水位に着目すると，上流から約 400 m^3/sの流量が流下するにも関わらず末吉橋地点のピーク水位は潮汐とほぼ同じ値を示している．このことから感潮域における水位は洪水時においても潮位とほぼ同じ値を示すことがわかる． 観測期間中におけるピーク流量は 398 m^3/sであった．H-ADCPによる流量とADCPによる流量を比較すると，ADCP観測期間を通じてほぼ同じ値を示していることがわかる．これよりピーク流量付近においてもH-ADCPによりADCP橋上操作観測法と同程度の精度で観測可能であることがわかった．

4.結論

本研究で得られた知見を以下のように示す．1) 感潮域での流量観測は横断面全体の流速を瞬時に測定できる超音波ドップラー流速計を用いることが高精度かつ実用的であると考えられる．2) 鶴見川感潮域においては，90～130 分周期で流速・流量が変動していることがわかった．この流速・流量変動の要因は，東京湾に発生するセイシュであると考えられる．3) 出水時の感潮域においてH-ADCPとともにADCPを用いた流量観測を行った結果，190 m^3/s程度の流量であればH-ADCPによりADCP橋上操作観測法とほぼ同じ精度で流量観測が可能であることがわかった．

謝辞：本研究で使用した水位データ，電磁流速計による流量データ，H-ADCPによる流量データおよび観測場所は国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所に提供していただいた．また，観測に使用したADCPは(株)エス・イー・エイにお借りした．ここに記して謝意を表する．

参考文献：1)岡田将治，森彰彦，海野修司，昆敏之，山田正：鶴見川感潮域におけるH-ADCPを用いた流量観測，河川技術論文集第 11 巻，pp.243-248，2005．2)水文観測(平成 16 年度版)，全日本建設技術協会．