

河川音響トモグラフィーによる太田川放水路の 洪水流量と断面平均塩分の連続測定

CONTINUOUS MEASUREMENT OF FLOOD FLOW AND CROSS-SECTIONAL AVERAGE SALINITY IN THE OTA DIVERSION CHANNEL WITH FLUVIAL ACOUSTIC TOMOGRAPHY

川西 澄¹・Mahdi RAZAZ²・渡辺 聡³・金子 新³・阿部 徹⁴
Kiyosi KAWANISI, Mahdi RAZAZ, Satoshi WATANABE, Arata KANEKO,
and Toru ABE

- ¹ 正会員 工博 広島大学大学院准教授 工学研究科社会環境システム (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)
² 学生員 広島大学大学院博士課程後期 工学研究科社会環境システム (同上)
³ 学生員 広島大学大学院博士課程前期 工学研究科社会環境システム (同上)
⁴ 正会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム (同上)
⁵ 正会員 国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所 (〒730-0013 広島市中区八丁堀 3 番 20 号)

Flow rate in the Ota diversion channel had been continuously measured by the use of Fluvial Acoustic Tomography System (FATS), which was developed by an innovative acoustic technology. In addition to flow rate, cross-sectional average salinity were deduced from the sound speed data collected by the FATS. Obtained cross-sectional velocities and flow rates were compared with those of Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs) and observations with floats. The FATS data were consistent with results of ADCPs and floats observations. Thus, the FATS worked well even throughout flood events in which turbidity and sound noise are very high. Moreover, the result showed that cross-sectional average salinity was able to be obtained from FATS. The diversion rate (ratio of Gion and Ohshima discharge) ranged approximately from 0.1 to 1.4; The rate converged to 1.4 with increasing the Ota discharge.

Key Words: *acoustic velocitimeter, discharge, saltwater intrusion, tidal estuary*

1. はじめに

著者らは感潮河川流量の自動観測を実現するために、革新的な音響トモグラフィー技術を用いた次世代超音波流速計(以下、河川音響トモグラフィーシステム; FATS と呼ぶ)を開発し、太田川放水路の分派点下流部に設置した FATS により、2008 年 6 月から放水路分派流量の長期連続測定を実施している。その結果、これまで測定が困難であった、塩水遡上のある水深変化の大きな浅い感潮域でも流量の長期連続観測が可能であり、さらに、測定された音速データから流量と同時に断面平均塩分が測定できることが確かめられている^{1,2)}。流量と断面平均塩分が同時に得られることは、淡水流量の推定が可能であることを意味する³⁾。

低水から洪水まで連続して流量を自動観測するシステムとして FATS は開発されたが、FATS の運転を開始してから太田川は渇水状態が続いていたため、

FATS の洪水に対する適用性は確認できなかった。しかし、2009 年 6 月末から 7 月下旬にかけて、祇園水門が全開となる出水が 3 回発生し、7 月 21 日には水位が高水敷高を超える洪水が発生した。本論文では、これら出水時の測定結果をもとに、FATS の洪水に対する適用性を検討するとともに、太田川の分派特性について述べる。

2. 測定方法

図-1 に示すように、太田川は河口から約 9 km 上流で放水路と市内派川に分派しており、放水路側に祇園水門、市内派川側に大芝水門が設置され、放水路と市内派川へ流入する流量配分が調整されている。基本計画高水量 8000 m³/s に対して、放水路流量は 4500 m³/s、市内派川の流量は 3500 m³/s である。祇園水門は、基本的に矢口流量が 400 m³/s を超える

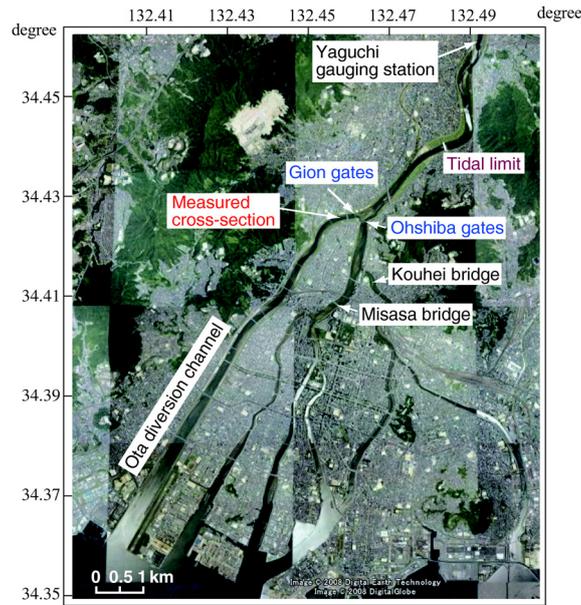


図-1 観測地点

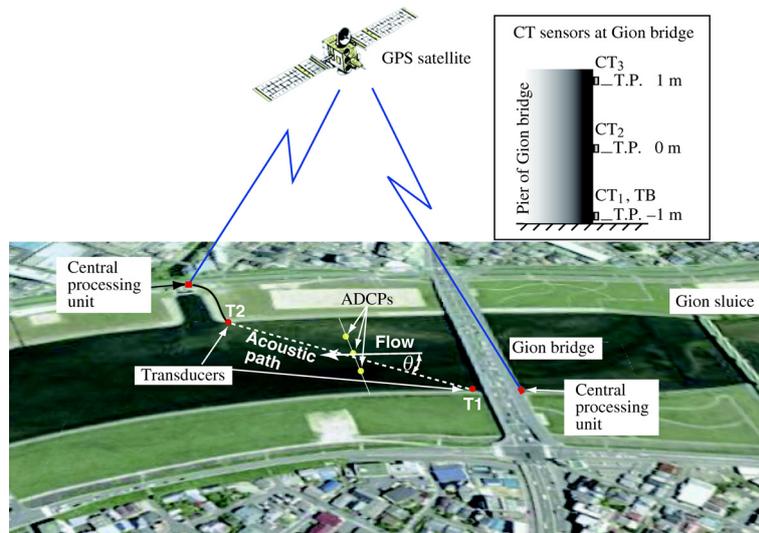


図-2 観測概要

と、全開となる。

平常時は、大芝水門は全開、祇園水門は3門(各水門幅は32m)の内、右岸側のスルースゲートのみが0.3mだけ開けられており、放水路と市内派川の流量比は1:9とされている。しかしながら、太田川の分派点は感潮域にあるため、流量比はたえず変動しており、既存の技術では正確な分派流量を把握することは困難である。そこで、太田川放水路への流入量の常時観測を目的に、FATSを祇園水門の246m下流に設置し、流量の連続測定を実施した。測定地点の水路幅は120mである。

測定の概要を図-2に示す。一対のトランスデューサー(超音波の送受信器)を低水路護岸法先に、FATSの処理装置本体は祇園大橋と右岸の安川樋門制御室に設置している。FATSは消費電力が小さいため(12V、

約5W)、小型のソーラーシステムでも十分長期連続運転が可能であるが、観測地点では商用電源の確保が容易だったので、AC100Vで作動させている。使用したブロードバンド型トランスデューサーはアメリカITC社製のもので、中心周波数は30kHz、寸法は直径と長さはともに5cmで、超音波はトランスデューサー前面から半球状に発射される。

高いSN比を確保し、超音波の受信時間を正確に測定するために、送信波は10次のM系列信号で位相変調されている。受信波とM系列との相互相関は処理装置本体で計算され、MicroSDメモリーに記録される。音波の送受信間隔は1分である。左岸側と右岸側のトランスデューサー(T1とT2)の標高は、-0.46mと-0.7mである。

FATSによる流量の妥当性を検証するため、3台の

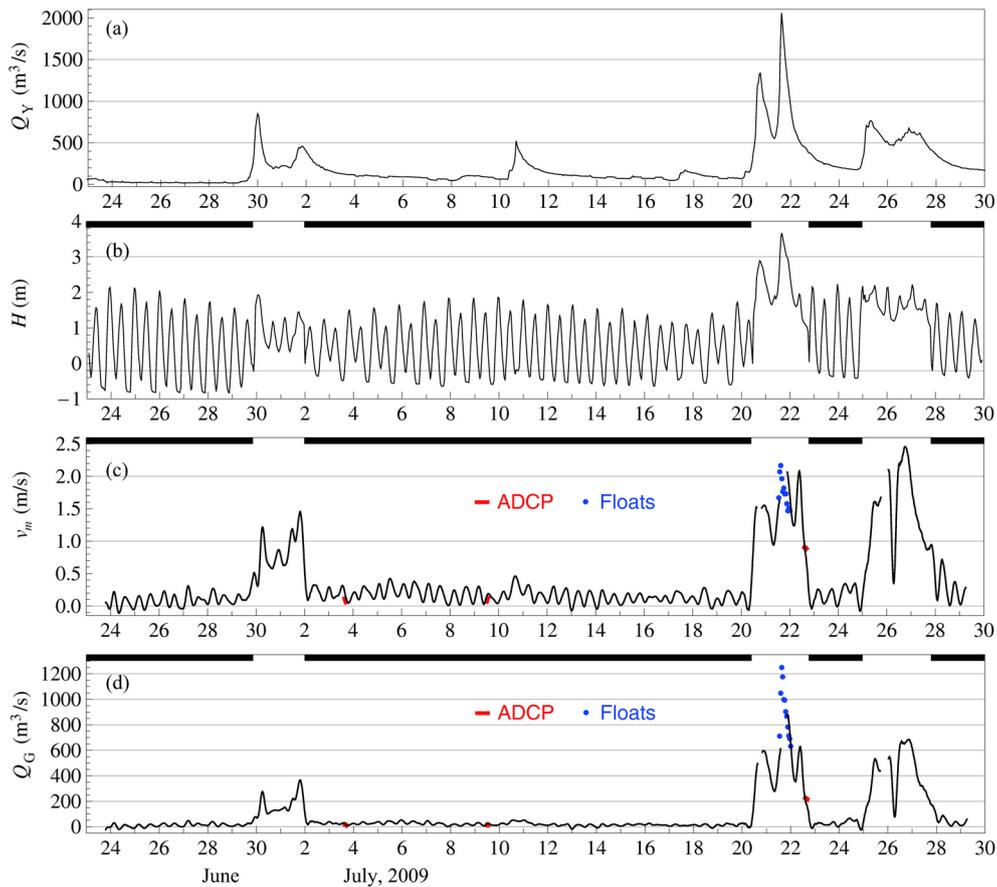


図-3 矢口流量 (a), 祇園水位 (b), 断面平均流速 (c), 流量 (d) の経日変化; 赤線は ADCP, 青点は浮子観測の結果

ADCP を用いて流量を測定した。ADCP の測定層厚は 0.1 m で、不感知距離は 0.05 m である。第 1 測定層から水面までは線形外挿し、測定可能な最下層と散乱強度から求めた河床位置との間は、河床流速を 0 とし線形補間した。

洪水時 (7/22 日) には、3 台の ADCP を横断方向に並べて祇園大橋に係留し、流量を測定した。橋脚の下流を避けた結果、ADCP の低水路左岸からの横断方向距離は、20, 63, 104 m であった。平常時は、横断方向に並べた 3 台の ADCP を横断させて流量を測定した。横断方向の測定間隔は 10 m で、横断に要した時間は 12 分である。洪水時、平常時とも、流量は ADCP で測定された流速分布を積分して算出した。

太田川河川事務所により、低水路の左岸から 40 m の位置にある祇園大橋の橋脚には、水位計と濁度計、3 台の水温塩分計が取り付けられており、水位と濁度、水温・塩分の鉛直分布が連続測定されている。図-2 に示すように、祇園大橋橋脚に取り付けられている水温塩分計 (CT) の標高は、T.P. -1, 0, 1 m, 濁度計 (TB) の標高は T.P. -1 m である。祇園大橋での水質測定に加え、市内派川側の大芝水門では ADCP により水門通過流量が連続測定されている。また、7 月 21 日 13 時から 24 時にかけて、祇園大橋と市内派川に架かる工兵橋、三篠橋や、分派点の 2 km 上流で太田川に合流している古川で浮子観測が実施された。

3. 結果と考察

(1) FATS による断面平均流速と流量の連続測定結果

洪水データを含んでいる 2009 年 6 月 24 日から 7 月 29 日にわたる FATS の測定結果を図-3(c),(d) に示す。図-3 には、 $H-Q$ 式で評価した矢口第 1 観測所の流量 (図-3(a)) と祇園水位 (図-3(b)) の経日変化も合わせて示している。図-3(b)~(d) の上部に示してある黒バーは祇園水門が平常状態 (3 門の内右岸側の水門のみ開度 30 cm, 他の 2 門は完閉) にあったことを、白抜きの部分は祇園水門が全開であったことを表している。したがって、図-3 の測定結果は祇園水門が全開となった 3 回の出水データを含んでいる。矢口第 1 での最大流量は、7/21 の午後観測された $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ である。図-3(b) に見られるように、河口から 9 km 上流に位置する観測地点では、水門の開閉にかかわらず潮位変動が明瞭に認められる。

図-3(c),(d) は、7 月 20 日と 21 日、25 日の一部期間を除いて、FATS が低水から洪水まで、断面平均流速・流量の自動連続測定に成功していることを示している。すなわち、FATS の連続測定結果は、赤線で示した ADCP の測定値や青点の浮子観測データと良く一致しており、FATS の測定値は妥当なものであると判断できる。FATS は GPS クロックを利用してい

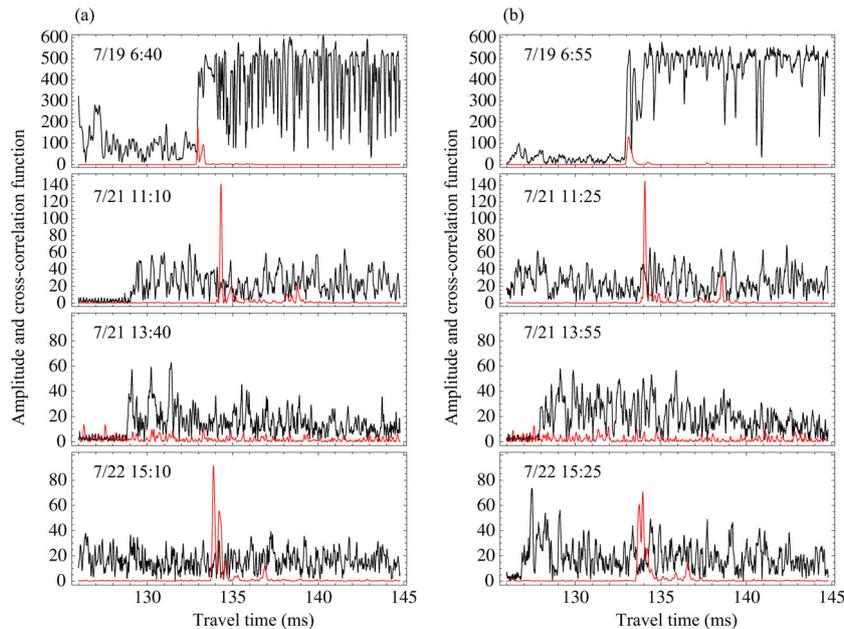


図-4 受信波の振幅関数（黒線）と相互相関関数（赤線）；上流左岸の受信結果（a），下流右岸の受信結果（b）

るので時間誤差は無視でき、平均流速に関するFATSの相対誤差は、音線長の相対誤差に等しい³⁾。したがって、本観測断面ではFATSによる測定流速の相対誤差は1%程度である。FATSが一部欠測となった原因については次節で考察する。なお、7月26日に一時的に流量が急減している原因は今のところ不明である。ADCPで測定されている大芝水門の流量も同様な変化を示しているので、分派点での総流量は一時的に急減してH-Q式で評価した矢口流量を下回っている。

FATSのトランスデューサーは低水路護岸法先に設置してあるので、FATSにより測定されているのは低水路内の断面平均流速と流量である。本洪水での最高水位は高水敷高をわずかに超えた程度であり、浮子観測の断面平均流速と流量も水位ピーク時の1点を除き、低水路内の12測線から算出されたものである。当然ながら、高水敷上の流量を含む全流量を測定するためにはトランスデューサーを本堤防の法先に設置する必要がある。

(2) 受信信号の振幅関数と相互相関関数

洪水時に生じる欠測の原因として従来指摘されているのは、高濃度の浮遊土砂による音波の減衰、大きな水中雑音、気泡である⁴⁾。この内、水中雑音に関しては、FATSは10次のM系列で変調した送信波を用いているので、問題にはならない。気泡の発生については、低水路護岸法先に直接トランスデューサーを設置しており、気泡発生の原因となる杭等を用いていないこと、目視では大量の気泡の発生は確認されないことから、気泡が欠測の原因とは考えにくい。

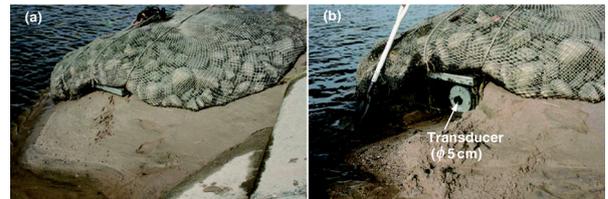


図-5 洪水後の堆積状況 (a), 堆積砂を除去した状態 (b)

欠測の原因を検討するため、受信波の振幅関数および、受信波とM系列との相互相関関数を図-4に示す。祇園水門が平常状態にある最上段の結果を見ると、受信時、振幅関数が急激に増加しており、増加位置は相互相関関数のピークと一致している。

2段目から4段目が洪水時のデータであるが、欠測となる前の2段目と欠測から回復した4段目では、振幅関数の大きさは平常時より小さくなっているものの、M系列変調の効果により相互相関関数には平常時と同程度のピークが存在している。したがって、流速測定および測定精度に問題はない。ただし、振幅関数が増加する時間は相関のピークより5ms以上早い。このことは、洪水時は水中音速よりかなり早く伝播する音波が存在していること、この音波は送信時のM系列による位相変調情報を保持していないことを意味している。洪水時の太田川は真砂土の流下が多く、護岸法先の河床上約10cmの高さに置いたトランスデューサーは、大量の掃流砂の中にあると想像される。掃流砂層を伝播する音波の速度は、水中音速より速く、激しく運動する砂粒子によりM系列情報が破壊されていると考えられる。欠測となった3段目をみると、振幅関数の大きさは欠測前後のものと同程度だが、相互相関関数には明瞭なピークは存在しない。したがって、欠測時でも音波は受信

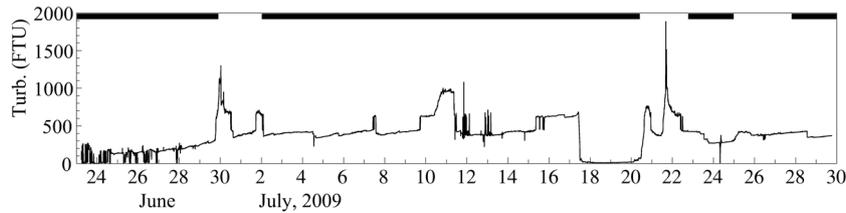


図-6 祇園大橋における濁度の経日変化

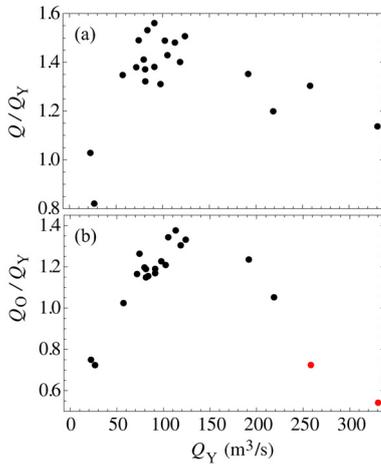


図-7 矢口流量と流量比の関係；分派点の総流量と矢口流量の比 (a)，大芝流量と矢口流量の比 (b)

されているが，M系列変調を保持した音波は受信できていないことが分かる．

洪水後の7月23日に撮影した左岸側トランスデューサー T1 の写真を図-5 に示す．図-5(a) に見られるように，洪水後，トランスデューサーは完全に粒径1~2mmの粗砂に埋まっていた．洪水観測に対応するためには，トランスデューサーの設置高さを高くするなどの対処が必要である．

浮遊土砂による超音波の減衰に関しては，欠測時でも弱いながら超音波は受信されていること，以下に述べるように，必ずしも高濁度が欠測の原因となっていないことから，FATSにとって洪水時の濁りは大きな障害とならない可能性が高い．

図-6 に祇園大橋橋脚に取り付けられている濁度計のデータを示す．濁度計の設置高さが低く河床の影響を受けているため，流速が小さいときも濁度値が高い期間が多く信頼性には欠けるが，洪水に対応したピークは存在している．図-6 をみると，必ずしも高濁度が欠測に対応しているわけではないことが分かる．すなわち，欠測となっていない6月30日の濁度の方が，欠測となった7月20日や25日の濁度より高く，濁度値は欠測と対応していない．

(3) 太田川の分派特性

矢口流量 Q_Y に対する分派点での総流量 (FATS による祇園流量 Q_G と ADCP による大芝水門流量 Q_O の和) と大芝水門流量の比率の変化を図-7 に示

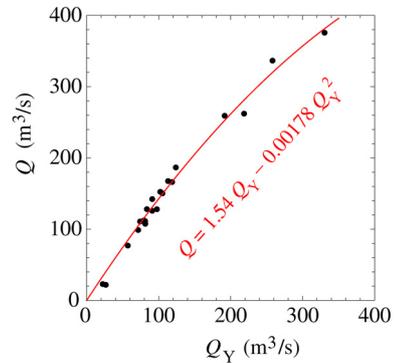


図-8 矢口流量と分派点総流量の関係

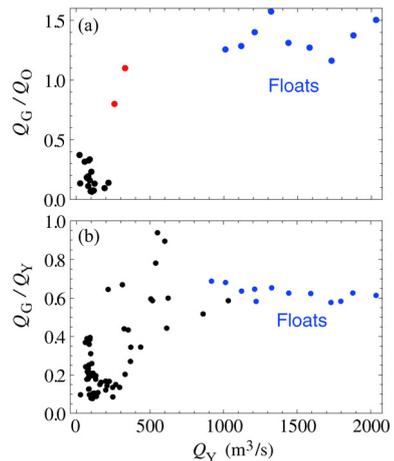


図-9 矢口流量と流量比の関係；祇園流量と大芝流量の比 (a)，祇園流量と矢口流量の比 (b)

す．ただし，潮汐変動を取り除くため，日平均した流量をプロットしてある．残念ながら，大芝水門に設置されている ADCP は流速レンジが狭く，正常に測定されている大芝水門流量は $450 \text{ m}^3/\text{s}$ 未満であったので，洪水時のデータはプロットされていない．なお，赤で示した2点は $Q_Y < 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ではあるが，祇園水門は全開であった期間のものである．

図-7 をみると，矢口流量に対する割合は， $Q_Y \approx 100 \text{ m}^3/\text{s}$ で最大となり，総流量で5割，大芝流量で4割程度矢口流量を上回っている．この原因の1つとして，分派点の上流2kmで太田川に合流している古川からの流入が考えられる．

矢口流量と分派点での総流量の関係を示したのが，図-8 である．図-8 中の赤線は2次式を当てはめた最小2乗曲線である．当然ながら，矢口流量と分派点の

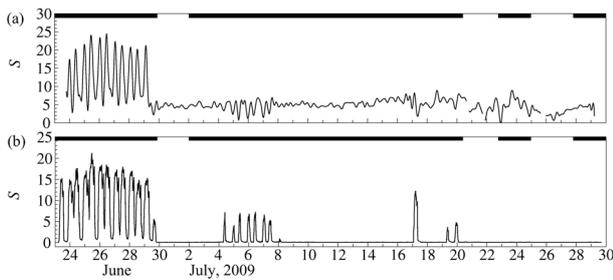


図-10 FATS の断面平均塩分 (a) , 祇園大橋塩分 (b)

総流量には高い相関がある。しかし、図-7(a) から容易に予想されるように、両者の関係は非線形で、低水時（概ね $Q_Y < 20 \text{ m}^3/\text{s}$ ）以外では矢口流量より分派点での総流量の方が最大 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度多くなっている。浮子観測が行われた洪水時でも、分派点の総流量（大芝流量は工兵橋と三篠橋流量の合計）の方が多かったが、流量差は古川での浮子観測のピーク流量 $95 \text{ m}^3/\text{s}$ にほぼ等しかった。

図-9 に放水路への分派率を示す。ただし、洪水時の大芝流量としては、工兵橋と三篠橋で行われた浮子観測流量を合算したものを使用している。祇園流量と大芝流量の比を示している図-9(a) をみると、流量比は矢口流量が $150 \text{ m}^3/\text{s}$ あたりで約 0.05 の最小値をとり、より小さな流量範囲では、矢口流量が減少するにつれて、流量比は 0.4 まで増加する傾向を示している。祇園水門が全開となっている場合、矢口流量が増加するにつれて流量比は増加し、浮子観測結果の平均値である 1.4 に近づいている。なお、1.4 の流量比は、大型模型実験の結果⁵⁾ にほぼ等しい。

祇園流量と矢口流量の比は、矢口流量が $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 付近で約 0.1 の最小値をとり、矢口流量が少ない場合、0.1~0.4 程度の範囲に分布している。小規模な出水時には、古川の流量が加わることもあり、1 近くの値を示しているデータもあるが、流量が増加するにつれて洪水時の約 0.6 に収束している。

(4) FATS による塩分の測定結果

FATS の平均音速と祇園大橋の水温塩分計から得られた平均水温から、Medwin の式⁶⁾ を用いて推定した断面平均塩分の経日変化を図-10(a) に、水温塩分計の平均塩分の経日変化を図-10(b) に示す。祇園大橋の平均水温と平均塩分は、鉛直方向に 1 m 間隔で設置されている 3 個のセンサーの内、冠水しているものを選んで平均したものである。

FATS と水温塩分計は同じ領域を測定しているわけではないので、両者の塩分は少し異なっているが、一部を除いてほぼ同様な変化を示している。すなわち、6 月末の最初の出水までは潮汐にともなう周期的な塩水遡上がみられるが、出水後は急激に塩分が

減少しており、次の水門全開まで 2 週間以上間隔があるにもかかわらず、塩分は出水前の状態に回復していない。これは、祇園水門が平常状態になっても、太田川の流量が 6 月 29 日以前より多いためであると考えられる。塩分とは対照的に、図-3(b) に示した水位変化は、水門が平常状態に戻った後、速やかに出水前の状態に戻っている。

4 . 結論

符号化された疑似ランダム信号 (M 系列) の送受信と GPS のクロック信号を利用して、音波伝搬時間の高精度計測を実現した、河川音響トモグラフィシステム (FATS) を開発し、低水から洪水までの自動連続流量測定に対する FATS の適用性を検討した。また、FATS の測定流量を用いて、広幅感潮河川である太田川放水路の分派特性を示した。

FATS を用いることにより、塩水遡上がある感潮河川においてさえ、低水から洪水まで連続して流量の自動観測が実現できることが確認された。さらに、トランスデューサーが掃流砂に埋没するような悪条件下でも、欠測は僅かであった。音速データから、流量と同時に断面平均水温または断面平均塩分が推定可能であり、FATS は河川流モニタリングに対する高いポテンシャルを持っていると考えられる。

謝辞：本研究の一部は 国土交通省建設技術研究開発助成制度 (研究代表者：川西 澄)、(財) 河川環境管理財団 河川整備基金 (研究代表者：川西 澄) および (社) 中国建設弘済会 技術開発支援制度 (研究代表者：川西 澄) の補助を受けて実施したものである。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 川西 澄, M. Razaz, 渡辺 聡, 金子 新: 次世代超音波流速計による感潮域の流量と水温・塩分の連続モニタリング, 水工学論文集, Vol. 53, pp. 1015-1020, 2009.
- 2) 川西 澄, Razaz, M., 渡辺 聡, 金子 新, 阿部 徹: 次世代超音波流速計による感潮河川流量の長期連続モニタリング, 河川技術論文集, Vol. 15, pp. 489-494, 2009.
- 3) 川西 澄, Razaz, M., 金子 新, 阿部 徹: 音響トモグラフィ法による河口域における淡水流量の測定, 海岸工学論文集, Vol. 55, 2008, pp. 1466-1470.
- 4) (株) 水文環境: 超音波流速計の洪水観測への応用, 河川整備基金助成事業報告書, 62 pp., 2001.
- 5) 水田 充喜, 坂本 治夫, 神谷 隆太郎, 斉藤 尚久: 太田川水門操作模型実験について, 太田川本川分水堰と放水路可動堰, 建設省中国地方建設局太田川工事事務所, pp. 1-40, 1968.
- 6) Medwin, H.: Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 58, p. 1318, 1975.

(2009.9.30 受付)