

# 河川音響トモグラフィシステムによる 河川流量の自動計測

AUTOMATIC MEASUREMENTS OF STREAM FLOW USING  
FLUVIAL ACOUSTIC TOMOGRAPHY SYSTEM

川西 澄<sup>1</sup>・金子 新<sup>2</sup>・江田憲彰<sup>3</sup>・児子真也<sup>4</sup>

Kiyosi KAWANISI, Arata, KANEKO Noriaki GOHDA and Shinya NIGO

<sup>1</sup>正会員 工博 広島大学大学院准教授 工学研究院社会環境空間部門 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究院社会環境空間部門 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1)

<sup>3</sup>正会員 理博 共同代表 水環境モニタリング有限責任事業組合 (〒723-0047 広島県三原市青葉台 12-2)

<sup>4</sup>正会員 流域調査係長 国土交通省中国地方整備局河川部河川管理課 (〒730-8530 広島市中区上八丁堀 6-30)

Discharges of a tidal river and a gravel-bed river were measured using an innovative technology called Fluvial Acoustic Tomography (FAT). Reciprocal sound transmission was performed between two acoustic stations located on both sides of rivers. The FAT system makes a breakthrough with the following aspects: (a) accurate time with GPS clock signals, (b) high signal-to-noise ratio with 10th order M-sequence modulation, (c) deducing cross-sectional average velocity from multi-paths that cover the cross-section, (d) low power consumption, small and lightweight. Even for a tidal river with periodic intrusion of salt wedge, the river discharges of the FAT system were in good agreement with the discharges observed by an array of ADCPs. The discharge measurement by the FAT system was carried out successfully even in flood events with high suspended sediment concentration and large ambient noise levels of sound. The discharge of the FAT system also agreed well with the results of the ADCPs and the float observations during the flood events.

**Key Words:** *acoustic velocitimeter, acoustic tomography, discharge, saltwater intrusion, tidal estuary, gravel-bed river*

## 1. はじめに

治水・利水および河川環境の整備と保全のために、省力型で安全・確実な河川流量観測技術の確立は喫緊の課題の一つである。水位の測定は流速測定と比べると遙かに容易であることから、最も広く使われているのが水位から間接的に流量を推定する  $H-Q$  法であるが、水位から流量が一義的に決まらない場合には使えない。直接的に流量を求めるには、断面平均流速を測定する必要があるが、これは特に洪水時には大変難しく、ADCP による横断観測<sup>1)</sup> や H-ADCP の移動測定<sup>2)</sup> を除けば、断面内の流速測点の数や配置は不十分である場合がほとんどである。そこで、何らかの方法で断面内の流速分布を推定し、限られた流速測点から流量を求めることが考えられており、これまでに、数値解析による方法<sup>3,4)</sup> や情報エントロピーの考えに基づく方法<sup>5)</sup> が提案されている。また、横断面内に、単位幅流量と全断面流量の相関が高くなる場所が存在することを利用し、河床に設置

した1台の ADCP によって感潮域の流量を推定しているものもある<sup>6)</sup>。

流速の測定には、ADCP に加え、電波流速計や PIV など水面流速を測定するもの<sup>7)</sup>、超音波流速計や H-ADCP で特定の水深の横断平均流速や横断流速分布を測定するものがある<sup>4,8)</sup>。このうち、H-ADCP は濁りによる音波の減衰や密度分布による音波の屈折、河床や水面に超音波ビームが反射することによる測定限界が指摘されている<sup>9)</sup>。上下流への音波の伝播時間差から横断平均流速を求める超音波流速計は、歴史も古く、広幅河川の流量を連続測定できる有力な方法であるが、高精度な時計や高度な信号処理技術が要求され、改良の余地が残されている<sup>10)</sup>。

著者らは世界で初めて塩水遡上のある河口・感潮域においても流量の自動計測を実現した、河川音響トモグラフィ (FAT) システムの開発に成功した<sup>11-13)</sup>。本論文では、その概要と、FAT システムを感潮河川である太田川放水路 (広島市) と礫床河川である江

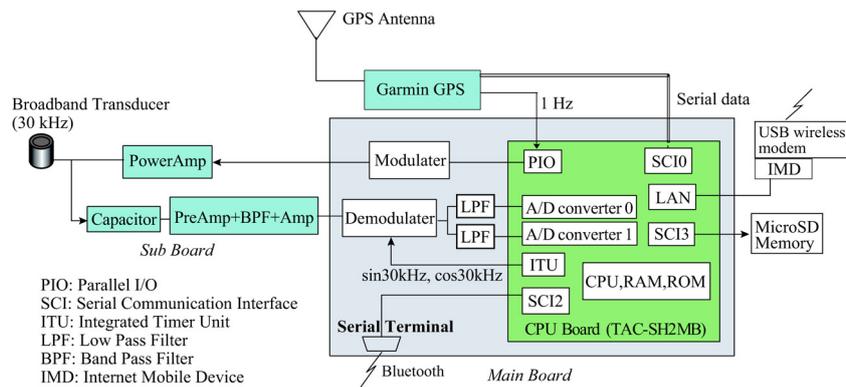


図-1 河川音響トモグラフィシステムの構成図

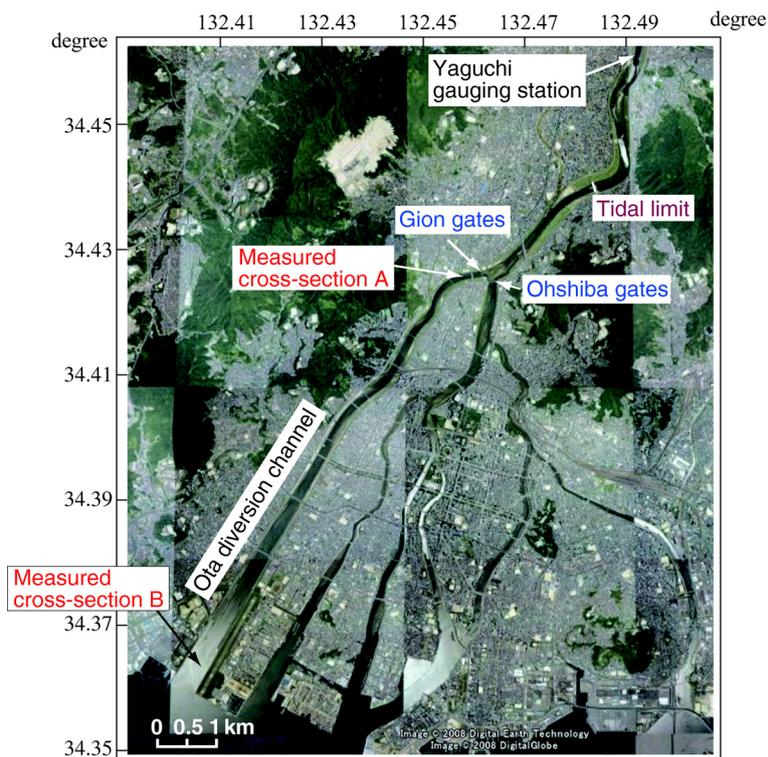


図-2 太田川放水路の観測断面位置

の川（三次市）に適用した結果を報告する。

## 2. 河川音響トモグラフィ (FAT) システムの概要

基本的な測定原理は時間差方式の超音波流速計と同様である。ただし、FAT システムは河川横断面を覆う音線を利用するため、特別な場合を除き、流速分布を考慮する必要がない。また、符号化された擬似ランダム信号 (M 系列) で位相変調しているため水中ノイズに強く、受信波を確実に検出できる。さらに、低流速でも測定が可能のように、GPS の正確な時間情報を用いている。

著者らが新たに開発し河川音響トモグラフィシステムの構成図を図-1 に示す。2 台 1 組で構成され

る本流量測定システムは、GPS の原子時計を利用して、同時に送受波器 (トランスデューサー) から双方向へ超音波を放射する。超音波パルスの送出が完了後速やかに、トランスデューサーは送信回路から受信回路に切り替えられる。一般に、従来のように単純に規則波を送っても、水中雑音の中から送信波の受信時刻を正確に判定することは困難である。そこで、本システムの送信波は 10 次の M 系列で位相変調されており、受信波の高い SN 比が確保されている。この位相変調技術と GPS の正確な時間情報の利用によって、高精度な受信時間の測定が可能となっている。

位相変調波を発信するためにはブロードバンド型トランスデューサーが必要である。開発した 2 組のシステムでは、それぞれ、米国 ITC 社製の小型ラン

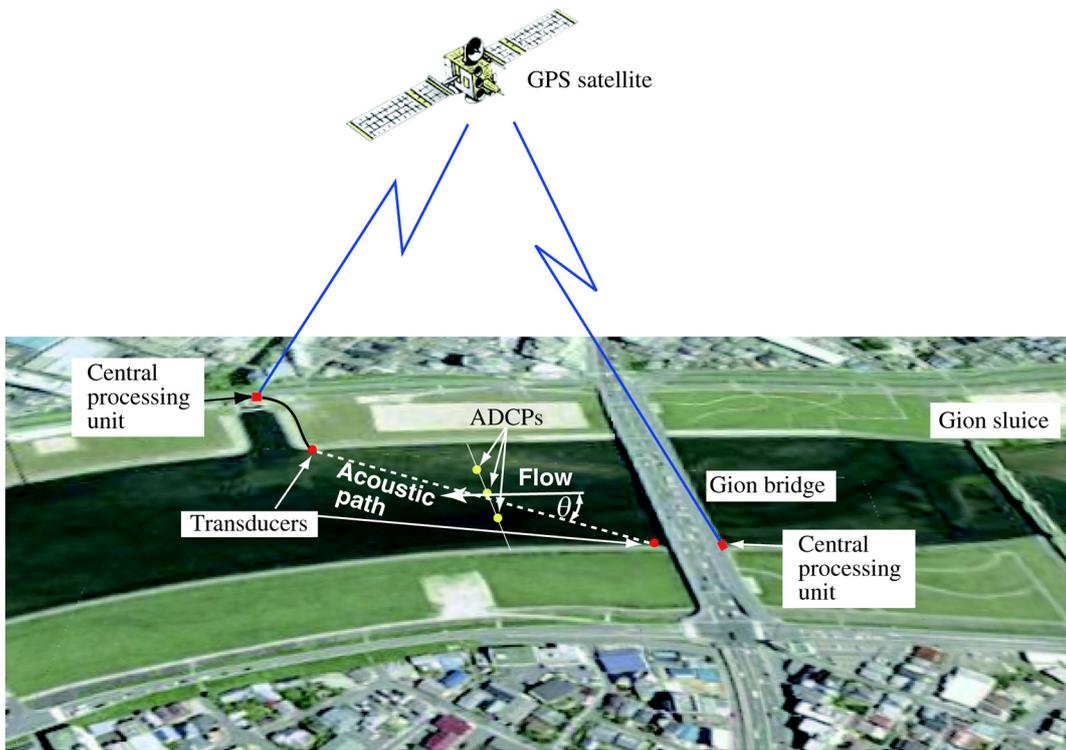


図-3 太田川放水路祇園地点における測定概要

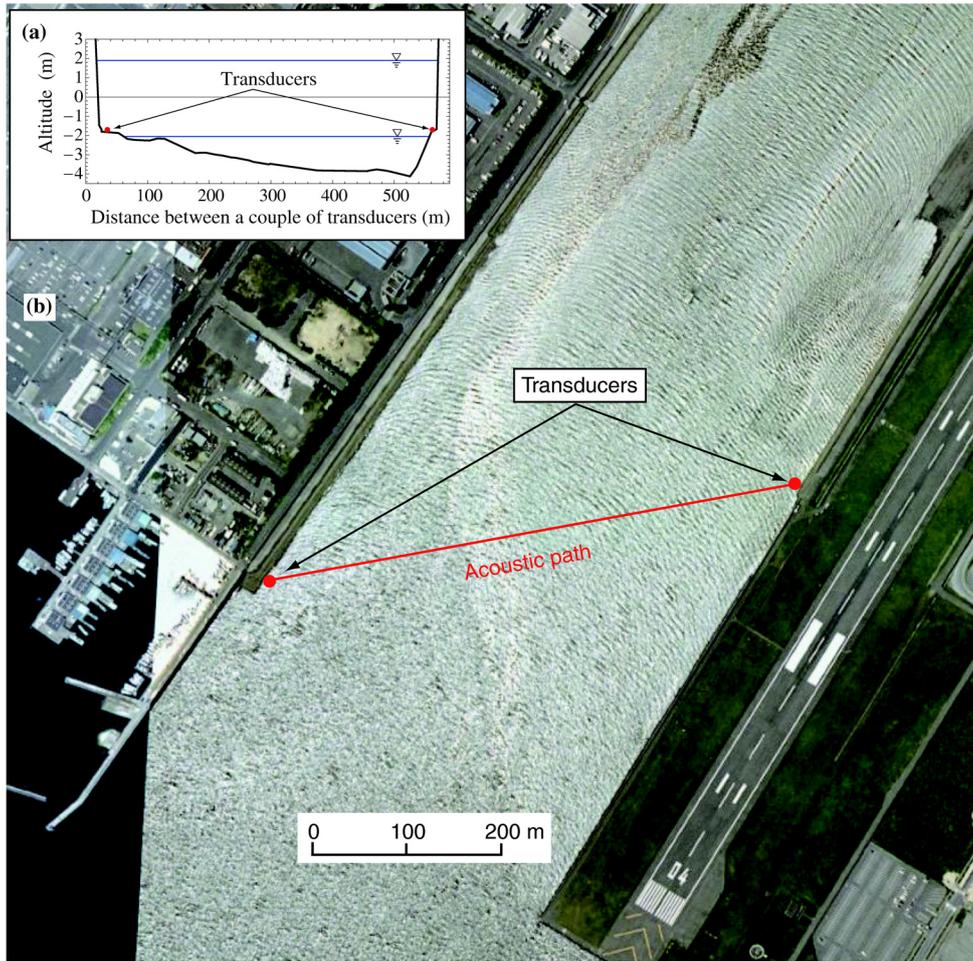


図-4 太田川放水路河口部における測定概要



図-5 江の川における観測断面位置（トランスデューサーの設置位置）

スデューサー（ITC3422；中心周波数 30 kHz）と英国ネプチューン社製の小型トランスデューサー（T227；中心周波数 25 kHz）が使用されている。開発したシステムは設定ファイルにより駆動周波数の変更が可能ないように設計されている。中心周波数  $\pm 20\%$  の範囲であれば、送信音圧レベルと受信感度の大きな低下はない。T227 の中心周波数は 25 kHz であるが、30 kHz で使用しても音波の到達距離は 2 km 超であることを確認しており、本研究では、流速の分解能を上げるため、中心周波数を 30 kHz にして使用している。トランスデューサーの指向性は弱く、超音波はほぼ全方向に発射される。

## 2. 測定方法

### (1) 太田川放水路観測

図-2 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。平常時は大芝水門は全開、祇園水門は 3 門の内、右岸側のスルースゲートのみが 0.3 m 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、次世代超音波流速計を祇園水門の下流に設置し、流量の連続測定を実施中である。水路幅は約 120 m で河床材料は砂である。大潮期における測定地点の潮差は 3 m 弱ある。測定の概要を図-3 に示す。一對のトランスデューサー（超音波の送受波器）を低水路護

岸法尻に、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、商用電源で作動させている。使用したトランスデューサーは ITC3422 である。

放水路上流端にある祇園水門下流部に加えて、図-4 に示すように、放水路河口部に FAT システムを設置し、河口流量を無人で計測した。使用したトランスデューサーは T227 で、電源はソーラーシステムを使用した。

### (2) 江の川観測

FAT システムのトランスデューサーから発射された超音波は、水面と河床面をウェーブガイドとして、河川横断面を導波管として伝播する。したがって、河床材料が粗い場合、河床面で超音波が乱反射し、超音波の伝搬損失が大きくなる可能性がある。そこで、砂礫河床河川である広島県三次市の江の川において、FAT システムの現地実験を行った。

図-5 に観測断面位置（トランスデューサーの設置位置）を示す。なお、観測断面の 346 m 上流にある尾関山水位観測所において、H-Q 式により流量が評価されている。観測断面における河床の平均粒径は約 40 mm、川幅は約 115 m、平均水深は約 0.8 m である。使用したトランスデューサーは T227 で、電源はリチウムポリマー電池パック（Hyperion G3, 4000mAh, 14.8V）を使用した。

## 3. 結果と考察

### (1) 太田川放水路観測

太田川放水路に設置した FAT システムは、2008 年 6 月から 2010 年 7 月現在まで継続して流量を無人で計測している。2008 年は降水量が少なく、祇園水門

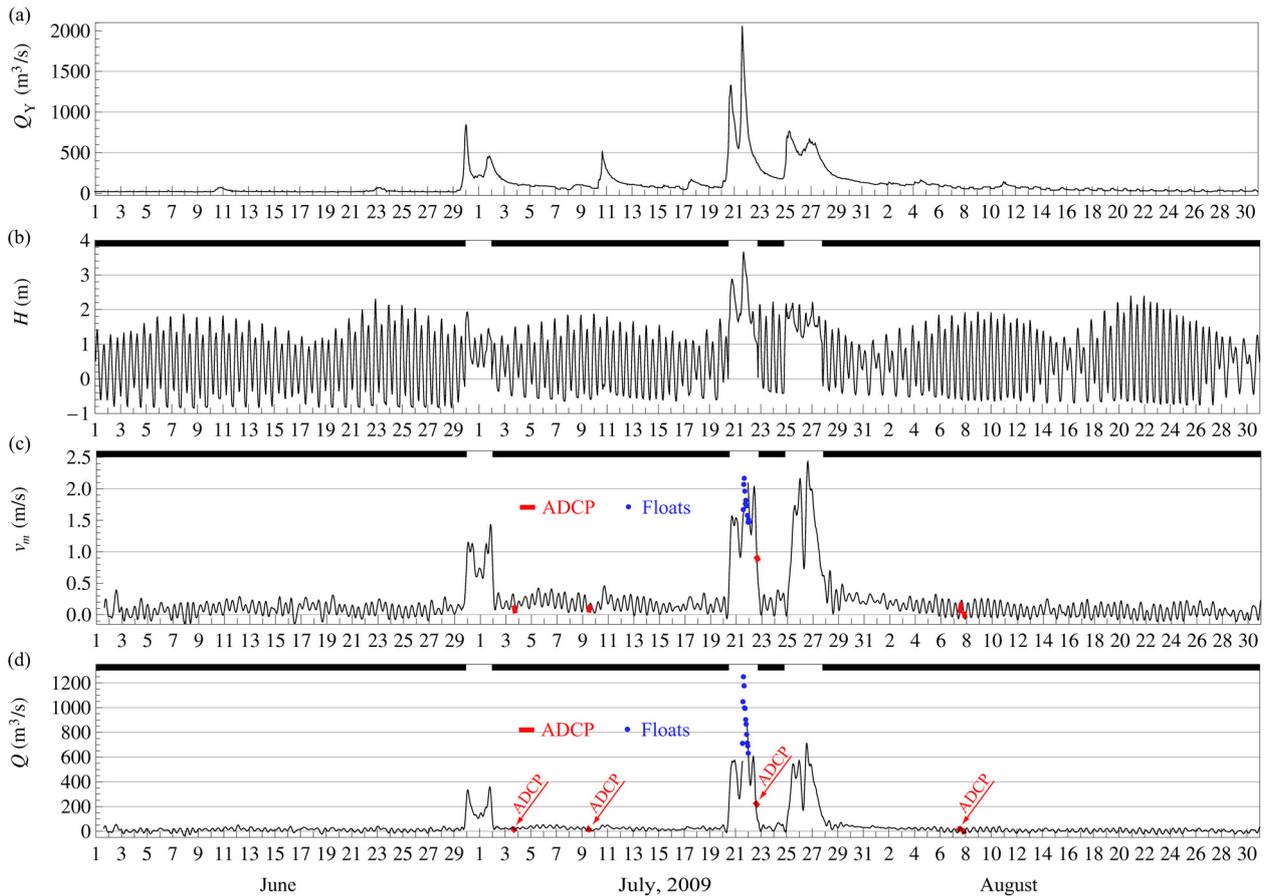


図-6 矢口流量 (a), 祇園水位 (b), 断面平均流速 (c), 流量 (d) の経日変化；赤線は ADCP, 青点は浮子観測の結果

が全開となるような出水は発生しなかったが、2009年の6月末から7月末にかけて梅雨前線の活動が活発になり、洪水が発生した。

図-6に、洪水データを含む2009年6月1日から8月31日までの測定結果を、 $H-Q$ 式から求めた矢口第一流量と祇園のテレメータ水位とともに示す。また、FATシステムの測定流量とADCP、浮子観測流量の関係を図-7に示す。図-6(b)-(d)の上部に示してある黒横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-6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。図-6(c)と(d)に示す断面平均流速と流量の経日変化にはADCPと浮子観測の結果も示してある。

FATシステムの連続測定結果は、低・平水時、洪水時とも赤で示したADCPの測定値と青点の浮子観測データと良く一致しており、本システムの測定値は妥当なものであると判断でき、FATシステム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がわかる。残念ながら、7月21日の一部は欠測となったが、これはトランスデューサーが、洪水で運ばれてきた大量の砂で埋まってしまったことが原因だと考えられる<sup>13)</sup>。

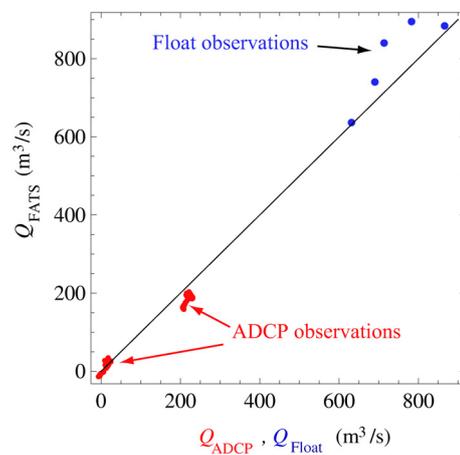


図-7 FATシステムの測定流量とADCP、浮子観測流量の関係

2009年2月7日～12日にかけて行った河口部での観測結果を図-8に示す。図-8(b)に示す河口流量振幅は祇園流量振幅の約10倍であり、これは水位変動から見積もった放水路内の貯留量を考えると妥当な大きさである。Medwin式<sup>14)</sup>を使って、水温と平均音速から推定した断面平均塩分が図-8(c)、淡水流量が図-8(d)である。このように、FATシステムを用いれば、沿岸域の流動場や水環境を論じる際に必須と

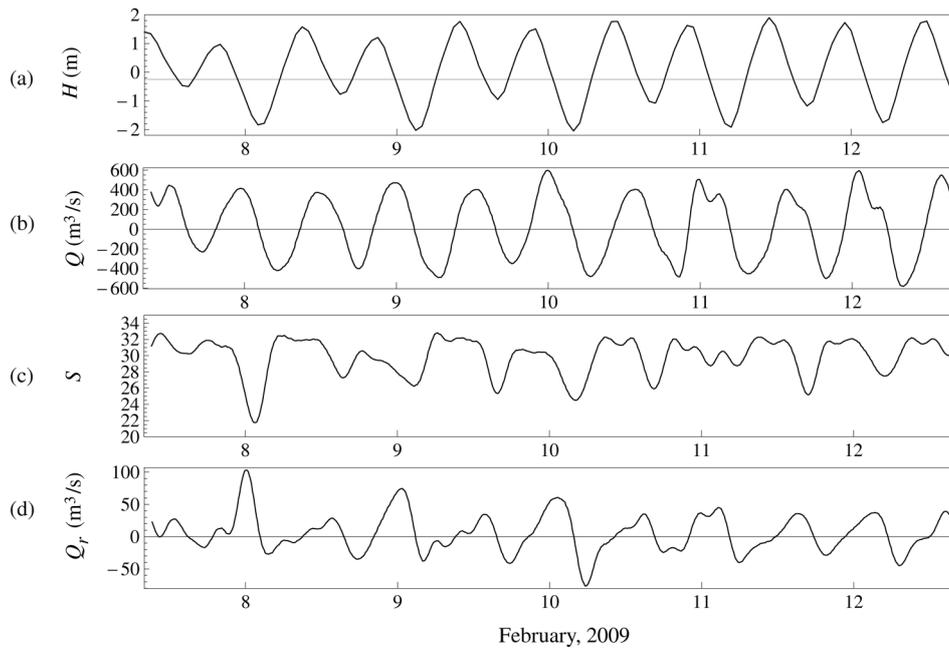


図-8 河口水位 (a) , 河口流量 (b) , 断面平均塩分 (c) , 淡水流量 (d) の経日変化

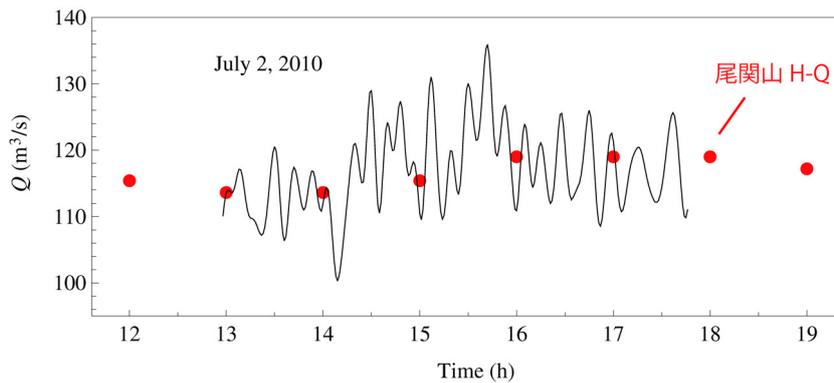


図-9 江の川流量の経時変化

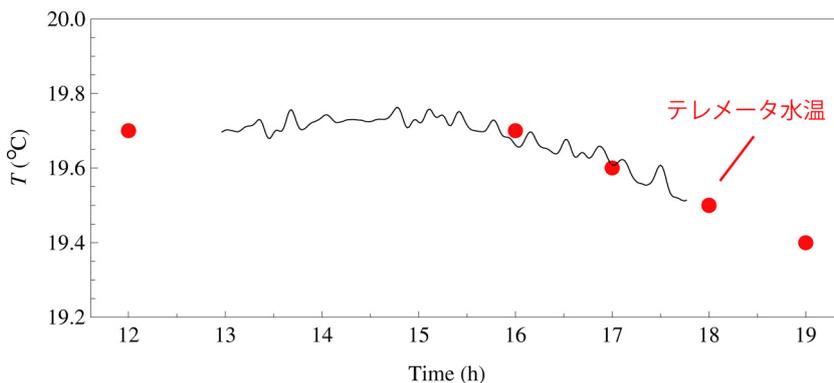


図-10 江の川の断面平均水温の経時変化

なる淡水流量を推定できる。

## (2) 江の川観測

図-5 に示したように、三次市尾関山水位観測所の下流において、2010年7月2日の13:00-18:00に実施した江の川観測の結果について述べる。図-9にFAT

システムによる流量の経時変化を、尾関山のH-Q式から求めた流量データとともに示す。両者は良く一致しており、FATシステムの動作は良好で、砂礫河床においても流量計測に問題がないことが実証された。また、心配した超音波の減衰もほとんど見られず、高いSN比を保持していた。

FATシステムによる流量の連続データには10分程度の周期変動がみられるが、こうした短周期の流量変動は、高い時間分解能を持つ流量の連続計測が可能になって初めて捕らえられるものであり、大変興味深い。観測期間中の流量変動の標準偏差は平均流量の5%強である。

図-10は、Medwin式<sup>14)</sup>を使って、FATシステムで測定された平均音速から推定した断面平均水温の経時変化である。観測期間内の水温の変動幅はわずか0.25であるが、FATシステムにより計測された水温は、図中に赤丸で示したテレメータ水温(13時から15時は欠測)と良く一致しており、微少な水温変動をとらえていることがわかる。このように、淡水域であれば、FATシステムは流量計測と同時に非常に高精度な水温計測を可能にするものである。

#### 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(FAT)システムを用いて、これまで実現できなかった塩水遡上のある感潮河川の流量の自動連続計測に成功した。FATシステムは流量と同時に断面平均塩分を測定できることから、河口域の淡水流量を推定できる。このことは、数値モデルによる沿岸域における水環境の予測精度を格段に向上させることを意味する。

FATシステムは上流域の礫床河川でも全く問題なく機能し、流量と同時に断面平均水温を高精度に測定可能である。

以上のように、新たに開発した河川音響トモグラフィ(FAT)は、感潮域を含む様々な河川における流量の自動計測を可能にする強力な流量観測法になることが期待される。音響局の数を増やし、インバース解析を行えば、複断面内や蛇行部の流速分布も推定できると考えられ、FAT計測の発展性は非常に大きい。なお、開発したFATシステムは、水環境モニタリング有限責任事業組合によって実用化されている。

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(課題番号第31号、研究代表者：川西澄)および(財)河川環境管理財団河川整備基金(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) 岡田将治, 橋田隆史, 森本精朗, 増田稔: ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測, 水工学論文集, Vol. 52, pp. 919-924, 2008.
- 2) 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, Vol. 11, pp. 243-248, 2005.
- 3) 中川一, 小野正人, 小田将広, 西島真也: 横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発と大河川での実地検証, 水工学論文集, Vol. 50, pp. 709-714, 2006.
- 4) 二瓶泰雄, 木水啓: H-ADCP観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築, 土木学会論文集B, Vol. 63(4), pp. 295-310, 2007.
- 5) Chiu, C. L., Hsu, S. M. and Tung, N. C.: Efficient methods of discharge measurements in rivers and streams based on the probability concept, *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 3935-3946, 2005.
- 6) 横尾啓介, 吉田静男, 岡田幸七, 野村佐和美: 感潮域におけるADCPを用いた河川流量の推定, 水工学論文集, Vol. 52, pp. 931-936, 2008.
- 7) 大手方如, 深見和彦, 古谷純一, 東 高德, 田村正秀, 和田信昭, 淀川巳之助, 中島洋一, 小松 朗, 小林範之, 佐藤健次: 非接触型流速計測法の開発, 土木技術資料, Vol. 45(2), pp. 36-44, 2003.
- 8) Sloat, J. V. and Gain, W. S.: Application of acoustic velocity meters for gaging discharge of three low-velocity tidal streams in the St. John River Basin, Northeast Florida, *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report*, Vol. 95-4230, 26 pp., 1995.
- 9) 原田靖生, 二瓶泰雄, 北山秀飛, 高崎忠勝: H-ADCP計測と数値計算に基づく感潮域の河川流量モニタリング～隅田川を例として～, 水工学論文集, Vol. 52, pp. 943-948, 2008.
- 10) (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.
- 11) 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, pp. 1466-1470, 2008.
- 12) Kawanisi, K., Razaz, M., Kaneko, A. and Watanabe, S.: Long-term measurement of stream flow and salinity in a tidal river by the use of the fluvial acoustic tomography system. *Journal of Hydrology*, 380(1-2), pp. 74-81, 2010. [doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.10.024]
- 13) 川西澄, Razaz, M., 渡辺聡, 金子新, 阿部 徹: 河川音響トモグラフィ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. 水工学論文集, Vol. 54, pp. 1081-1086, 2010.
- 14) Medwin, H.: Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 58, p. 1318, 1975.

(2010.7.20 受付)