

感潮河川における音波の横断伝播特性と 次世代超音波流速計による横断平均流速の測定

TRANSVERSE PROPAGATION CHARACTERISTICS OF SOUND AND
MEASUREMENT OF CROSS-SECTIONAL AVERAGE VELOCITY IN TIDAL
RIVER WITH A NEXT-GENERATION ACOUSTIC VELOCITY METER

川西 澄¹・大庭尚史²・金子 新³・水野雅光⁴
Kiyosi KAWANISI, Naofumi OOBA, Arata KANEKO
and Masamitsu MIZUNO

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前期 工学研究科社会環境システム (同上)

³ 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)

⁴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)

An acoustic velocity meter (AVM) has been developed to measure river discharge continuously. The AVM has breakthroughs as follows: 1) accurate time with GPS clock signals, 2) high signal-to-noise ratio with tenth order M-sequence, 3) thrifty power consumption, reduction in size and weight. The AVM installed at the Ohtagawa diversion channel, where the water level and salinity change significantly, successfully measured the cross-sectional average velocity and discharge for a spring tide. In addition, the intrusion of saltwater was detected from the sound speed data of the AVM. The cross-sectional average velocity and discharge give close agreement with those deduced from an acoustic Doppler current profiler.

Key Words: *cross-sectional average velocity, discharge, saltwater intrusion, tidal 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。最近の流量観測技術については土木技術資料の特集¹⁾に取りまとめられているが、なかでも、上下流方向への音波の伝播時間差から流速を求める超音波流速計は、流量の常時測定を可能にする有力な方法である。しかしながら、我が国ではいくつかの使用例があるものの、広く普及するに至っていない。アメリカの大河川では長期にわたる運用例があるが、装置が大がかりで維持管理の面で問題を抱えている²⁾。中川ら³⁾は流速分布の影響を考慮するため、超音波流速計と数値シミュレーションを組み合わせ、利根川下流域の流量を測定している。木水・二瓶⁴⁾も、流速の横断分布計測が可能な H-ADCP と数値シミュレーションを組み合わせ、小河川の流量測定を試みている。

本論文では、広幅感潮河川の流量観測を実現するため、高度な音響モニタリング技術を用いた次世代

超音波流速計を開発し、その適用性を検討する。特に、潮汐による流況の変化が激しく、従来の方法では測定が困難である太田川放水路の流量測定を試みた結果を報告する。

本研究で開発した超音波流速計は以下のブレークスルーを有しており、従来の超音波流速計の普及を妨げている障害を取り除いたものとなっている。1) GPS 衛星のクロック信号を利用した両岸からの音波の同時発信と音波伝搬時間の高精度計測（低流速の測定も可能）。2) 符号化された疑似ランダム信号の送受信による SN 比の飛躍的改善（洪水時でも水中雑音から受波信号の分離・検出が可能）。3) 省電力で小型軽量（水深制限の緩和、設置・維持費用の低減、持ち運び可能）。4) 従来の測定システムと比べて格段に低価格。

2. 計測原理と計測誤差

長さ L の音線に沿って得られる平均音速と平均流速を c_m , u_m とすると、双方向で得られる伝播時

間 t_1 と t_2 はそれぞれ次式で与えられる.

$$t_1 = \frac{L}{c_m + u_m}, \quad t_2 = \frac{L}{c_m - u_m} \quad (1)$$

両式から c_m , u_m を求めれば次式を得る.

$$c_m = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \approx \frac{L}{t_m} \quad (2)$$

$$u_m = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \approx \frac{L}{2} \frac{\Delta t}{t_m^2} = \frac{c_m^2}{2L} \Delta t \quad (3)$$

ここで, $t_m = (t_1 + t_2)/2 \approx t_1 \approx t_2$, $\Delta t = t_1 - t_2$ である. 小さな流速まで測定するには, 時間差 Δt を測定する際の時間分解能が高いことが要求されるが, 音線の長さ L を長くすることによっても測定できる最小流速を小さくできる.

式 (2) と (3) から, c_m と u_m の相対誤差はそれぞれ

$$\frac{\delta c_m}{c_m} = \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta t_m}{t_m} \quad (4)$$

$$\frac{\delta u_m}{u_m} = \frac{\delta L}{L} - 2 \frac{\delta t_m}{t_m} + \frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t} \quad (5)$$

となる. 後述するように, 平均伝播時間の誤差 δt_m は同時双方向送受信を行えば無視できるので, 右辺第2項は除くことが出来る. したがって, 平均音速の相対誤差は音線の距離の相対誤差に等しく, 時間精度は重要ではない. ただし, 以下に述べるように, 平均音速から水温や塩分を求める場合, 非常に小さい音速の相対誤差が求められるので, 音線の距離, すなわちトランスデューの位置が正確に決まっていなければならない.

音速は, 水温, 塩分, 圧力の関数であるが, 河川の場合は水深が小さいので圧力の影響は無視できる. したがって, 音速の誤差 δc は

$$\delta c = \frac{\partial c}{\partial T} \delta T + \frac{\partial c}{\partial S} \delta S \quad (6)$$

で評価できる. 音速の式として Medwin⁵⁾ によって提案された式

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055 + 2.9 \times 10^{-4} T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D \quad (7)$$

を使うと, 水温 $T = 25^\circ\text{C}$, 塩分 $S = 20$ 付近では

$$\delta c = 2.54 \delta T + 1.09 \delta S \quad (8)$$

となる. 音速に与える影響は水温の方が塩分より約 2.5 倍大きい. 音速の相対誤差がわずか 0.1% の場合でも, 水温の誤差は 0.6°C , 塩分の誤差は 1.4 となる.

一方, 流速の相対誤差では式 (5) の右辺第3項の分母である時間差が小さいため, 時間精度の方が距離精度よりも重要となる.

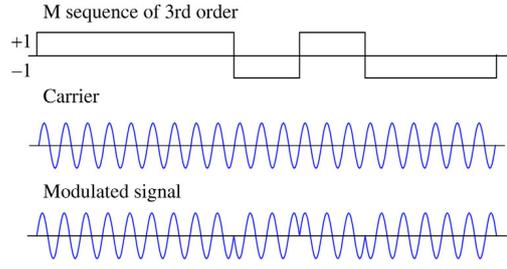


図-1 M 系列信号による位相変調

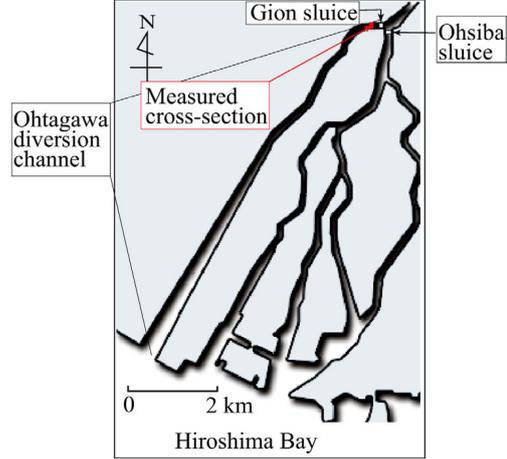


図-2 測定地点

なお, 塩分値は実用塩分 (PSU) であるが, 各国際委員会 (SCOR, IAPSO, ICES, IOC) の勧告により塩分には単位を付けないこととなっている.

以下に, 平均伝播時間 t_m に関して, 一対の音響局が持つクロック誤差が無視できる理由を述べる. クロック誤差 δt_1 , δt_2 を含んだ一対のトランスデュー (①, ②) の送信時間をそれぞれ $t_0 + \delta t_1$ と $t_0 + \delta t_2$ とする. ①での受信時刻を $t_{21} + \delta t_1$, ②での受信時刻を $t_{12} + \delta t_2$ とする. ①から②への伝播時間 t_2 , ②から①への伝播時間 t_1 は

$$t_2 = (t_{12} + \delta t_2) - (t_0 + \delta t_1) \quad (9)$$

$$t_1 = (t_{21} + \delta t_1) - (t_0 + \delta t_2) \quad (10)$$

となる. 両者の平均をとると

$$t_m = \frac{1}{2}(t_2 + t_1) = \frac{1}{2}(t_{12} + t_{21} - 2t_0) \quad (11)$$

となり, クロック誤差 δt_1 , δt_2 は消える.

3. M 系列による位相変調と受信波の検出

上述したように, 流速の測定には受信時間を正確に測定する必要があるが, 雑音が混入した受信波から音波の到達時間を判定することは, 単純な音波の送受信では困難である. 本研究では, 様々な雑音が混入した受信信号から正確に受信時間を判定するため, GPS 衛星のクロック信号に加え, 疑似ランダム信号である M 系列を使って位相変調した送信波を用いる⁶⁾.

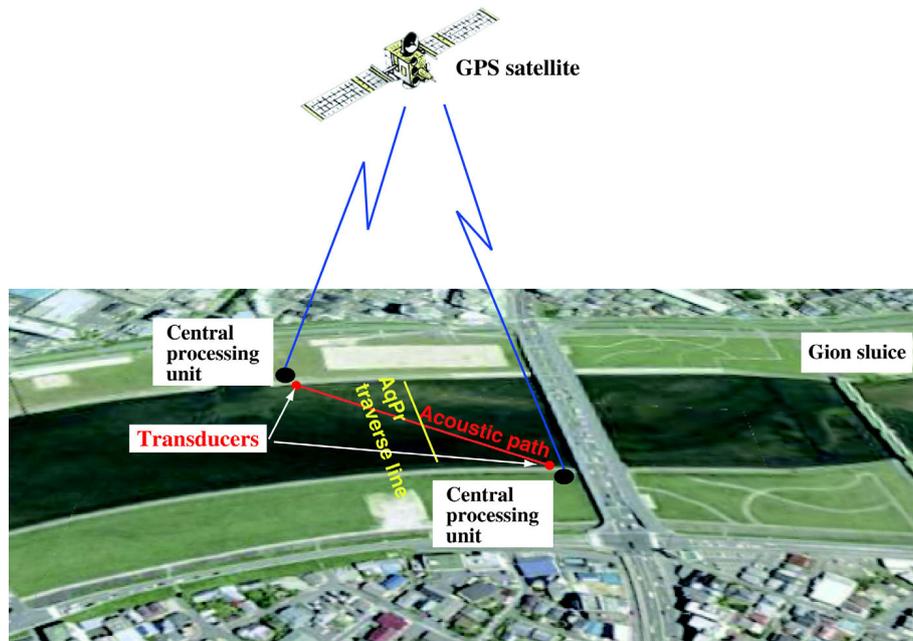


図-3 測定概要

図-1 に 3 次の M 系列を搬送波に掛けて位相変調した波形を示す. このような位相変調波を変形させずに送信するには $2f/Q$ の周波数帯域幅を持つブロードバンド型のトランスデューサーが必要になる. ここで f は搬送波の周波数, Q は M 系列の最小幅に含まれる搬送波の数である. 位相変調した送信波は

$$S(t) = M(t)A(t) \sin(\omega t) = A(t) \sin[\omega t + \psi(t)] \quad (12)$$

のように表せる. ここで, $A(t)$ と $\psi(t)$ はそれぞれ振幅関数と位相関数である.

受信信号に $2 \sin(\omega t)$, $2 \cos(\omega t)$ を乗じてローパスフィルターを通し, 送信波の位相変調に使った M 系列との相互相関をとることにより, 雑音の中から送信波を正確に検出することができる⁷⁾.

4. 測定方法

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, 右岸側のゲートのみが開度 0.3 m に設定されており, 他の 2 門は閉じられている. 太田川に分派点は感潮域にあるため, 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. 本研究は, 太田川放水路への流入量の常時観測を目指しており, 測定断面の位置は祇園水門から 246 m 下流とした.

音波の送受信には, アメリカ ITC 社製の小型トランスデューサー (ブロードバンド型, 直径と長さともに 5 cm) を使用した. 搬送波の周波数は 30 kHz, 消費電力は 60 W である. 受信信号はトランスデューサーに直結したプリアンプで増幅した後, 60 kHz の

サンプリング周波数で AD 変換し, M 系列との相互相関関数をマイクロコンピュータで計算後, MicroSD メモリーカードに出力した. 本研究で開発した測定システムは省電力 (処理装置の消費電力は 4 W) で小型軽量にできており, カーバッテリーで一ヶ月程度の連続測定が可能である. 搬送波の位相変調には 10 次の M 系列を使用し, 高い SN 比を確保しているので, 雑音の大きい洪水時でも十分測定できるものと考えられる.

トランスデューサーは低水路護岸の河床上約 30 cm に設置し, 音波の送受信間隔は 1 分とした. 測定期間は 2007 年 9 月 10 日の 4 時 35 分から 12 時 40 分で, 大潮期の上げ潮と下げ潮を含んでいる. 測定地点は感潮域で, 大潮期の水位変化幅は 3 m 弱あり, 平水時の干潮時には護岸付近は干出する. 測定の概要を図-3 に示す. 簡易レーザー距離計で測定したトランスデューサー間の直線距離は 191 m であった.

図-3 中に黄線で示す測線上で Nortek 社製の超音波ドップラー流速分布計 (2MHz-Aquadop Profiler, 以下 AqPr と呼ぶ) を浮体に取り付け, ロープで横断方向に移動させて横断面内流速を測定した. 移動間隔は約 10 m, 1 点あたりの測定時間は 70 s とした. 測点間の移動に 20 秒を要したので, 測定時間間隔は 90 秒で 1 横断計測に約 20 分を要した. 横断中に水位, 流速とも変化していることに注意する必要がある. AqPr による断面平均流速と流量の測定結果は, 20 分程度の時間平均値に近いものだと考えられる.

超音波ドップラー流速分布計はセンサーヘッド付近と境界付近は測定不能である. そこで, 本研究では第 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 としてを線形補間した. AqPr のセンサー

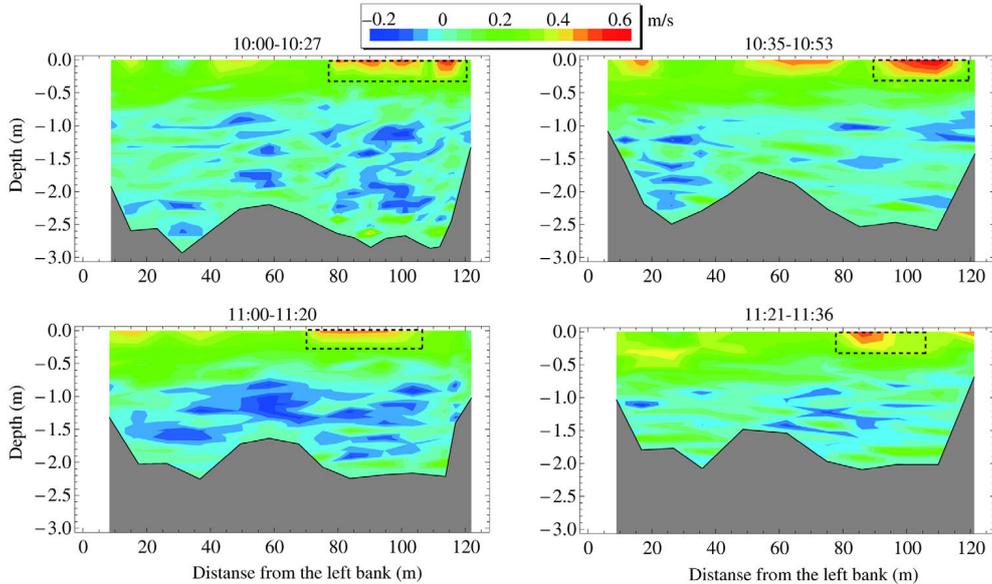


図-4 流速の横断面内分布

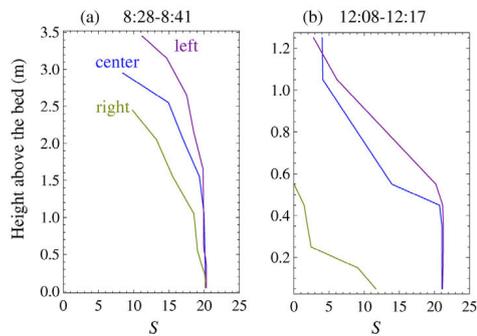


図-5 塩分の鉛直分布

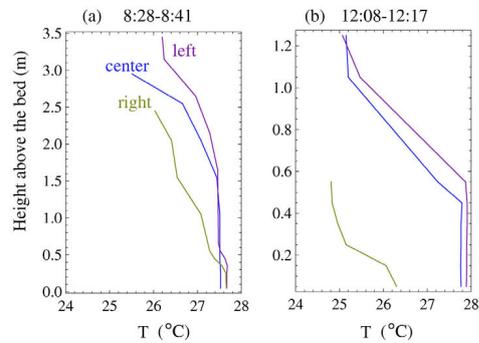


図-6 水温の鉛直分布

ヘッドの深さは7 cm, 不感知距離5 cm, 層厚は10 cmとしたので, 水面から第1測定層までの距離は22 cmである. 測定可能な最下層の水面からの距離は

$$z_2 = (h - 0.07) \cos 25^\circ - 0.1 \text{ m} \quad (13)$$

で与えられる. ここで h は水深 (m) である.

水温と塩分によって音速が変化することから, 8:30-40 (満潮前) と 12:08-16 (下げ潮後半) の2回, 流速測定断面の直上流に架かっている祇園大橋からCTDを降ろして水温と塩分の鉛直分布を測定した. 鉛直分布は, 左岸から26.5 m (left), 58.4 m (center), 100.7 m (right) の3箇所で測定した.

5. 結果

(1) 流速と水温・塩分の横断面分布

図-4にAqPrで測定した下げ潮時の流速の横断面内分布を, 図-5と図-6に満潮前と下げ潮後半における塩分と水温の鉛直分布を示す. 流速は下流方向を正としている. 下げ潮期にもかかわらず, 深さ1 m付近より下層では上流に向かって流れており, 河川水は主に上層を通過して流下している. 右岸側のゲートだ

けが開いているため, 図-5に破線の矩形で示すように, 右岸側に強い上層の流れがみられる.

図-5に示す塩分も水門の状態に対応して, 右岸側で低くなっている. 図-5(b)をみると, 下げ潮期後半になっても中央より左岸側の底層塩分は減少していない. 図-6に示すように, 水温分布は塩分分布とよく似た分布形を示しており, 流入河川水は遡上水より低温低塩分であることがわかる. ただし, 水温の変動より塩分変動の方が圧倒的に大きく, 後述する平均音速の変化は主として塩分の変化によって引き起こされている.

図-4~6からわかるように, 本観測地点の流況はきわめて複雑で, 3 m近い水位変化が起こることを考え合わせると, 従来の測定技術では, 流量を常時測定することは困難である.

(2) 超音波の横断方向伝播特性

図-7に, 下流側と上流側で受信された相関処理後の受信波形の一部(上げ潮期)を時間の経過とともに上から下に向かって並べて示す. なお, 干潮時は護岸付近が干出したため測定不能となったが, トランスデューサーが水没している時間帯ではすべて超音波の送受信に成功した.

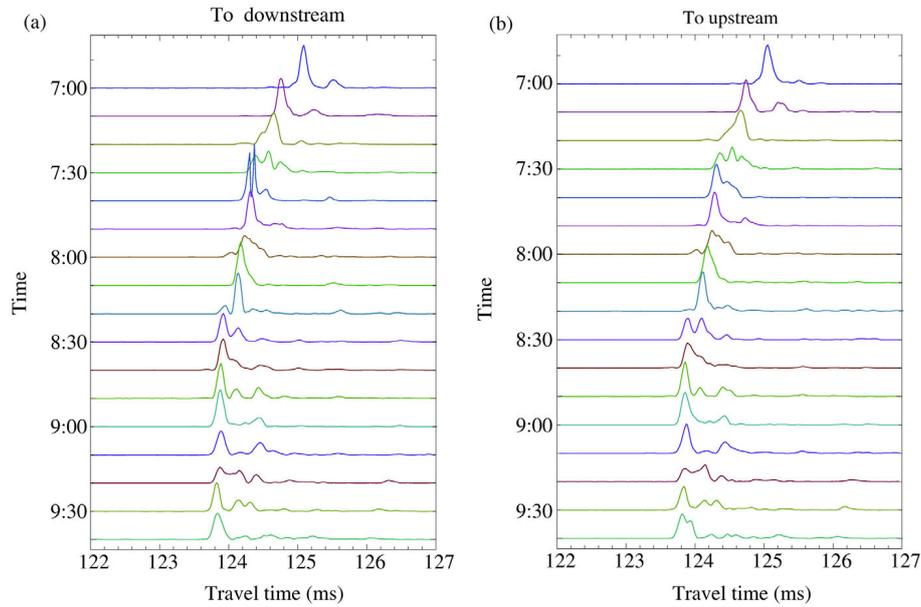


図-7 受信相関波形；下流で受信 (a), 上流で受信 (b)

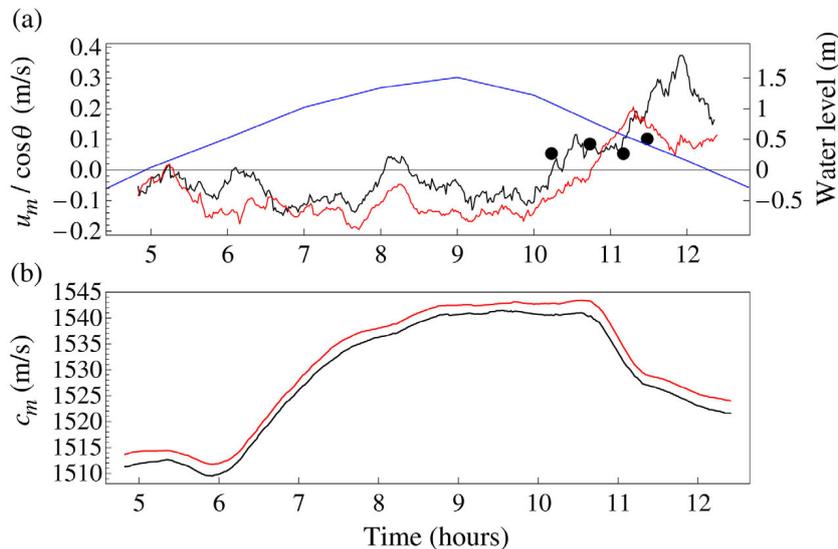


図-8 横断平均流速 (a) と平均音速 (b) の経時変化 (赤線：相関ピークの立ち上がり，黒線：相関ピークの立ち下がり)

各受信波形は、多重音線の到達を示す複数の相関ピークから構成されている。本論文では第1到達ピークを解析対象としたが、このピークも最短の直達音線と河床と水面で反射された音線の合成であると考えられる。ピークは非常に大きく、受信可能な横断距離はかなり長くできることが予想される。

図-7 の上げ潮期の結果は、音波の到達時間が時間の経過とともに短くなっていることを示している。これは後述するように、塩水の遡上により、音速が増したことによるものである。相関ピークの大きさはばらついているが、水位の上昇ともなまって小さくなる傾向がある。これは、水深の増加により音線間の到達時間差が増加するためである。

(3) 横断平均の流速と音速および流量の経時変化

図-8 に音波の伝播時間差から求めた横断平均の流

速と音速の経時変化を示す。いずれも、30分の移動平均後の結果である。あわせて黒丸で AqPr の横断移動測定の結果を、青線で水位の経時変化を示してある。赤線が相関ピークの立ち上がり、黒線がピークの立ち下がりを利用して求めた横断平均流速に対応している。これらの横断平均流速は、音線に沿った平均流速 u_m を $\cos \theta$ で除して求めたものである。ここで θ は音線と主流方向間の角度である。

相関ピークの立ち上がりで判定した到達時間は、河床と水面で反射することなく届いた音線に関するものである。本研究ではトランスデューサーを河床付近において測定しているため、赤線で示した流速は下層の横断平均流速の測定値を意味している。一方、相関ピークの立ち下がりによって判定した到達時間は、河床と水面で反射しながら到達した音線に対応していると考えられる。したがって、黒線で示した流速

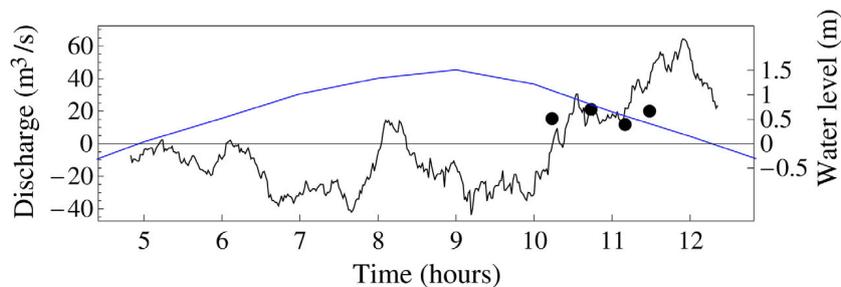


図-9 流量の経時変化

が横断面平均流速を意味している。AqPrの結果は4点しかないが、横断面を覆う音線を利用して求めた流速値は、AqPrの結果とほぼ一致している。

図-8(a)をみると、赤線で示す下層流速の方が、黒線の流速より負（上流方向）の値が大きいことがわかる。これは、塩水遡上による上流方向流速が、下層において大きいことに対応した結果である。図-8(b)は平均音速の経時変化であるが、塩水遡上に対応した音速の増加を明瞭に示している。図-8(a)の赤線で示す下層の流速が、正（下流方向）に変化するのと同時に、塩水遡上で増加した音速が減少に転じているのは自然な結果である。このように、本超音波流速計により、流速と同時に塩水遡上の様子もとらえられることがわかる。

図-9は、水位から求めた流水断面積を図-8(a)の横断面平均流速に乗じて求めた流量の経時変化である。トランスデューサーが干出するので干潮時までは測定されていないが、測定できている範囲で、下げ潮期の平均流量は $11\text{ m}^3/\text{s}$ であり、測定断面と祇園水門間の貯留分を差し引くと、水門からの流入流量はおよそ $7\text{ m}^3/\text{s}$ となる。矢口第1流量観測所の水位から求めた観測期間の太田川流量は約 $60\text{ m}^3/\text{s}$ であったので、下げ潮期の平均分派流量率は12%となる。これは、過去に数十回行ったAqPrの横断移動観測で得られている分派流量率と同程度であり、本流速計による流量測定値は信頼できるものと判断される。

6. 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、省電力で小型軽量の超音波流速計を開発し、従来の方法では測定が困難である浅い広幅感潮河川の流量観測を試みた。

相関処理後の受信波形は、多重音線の到達を示す複数の相関ピークから構成されている。解析対象とした第1到達ピークも最短の直達音線と河床と水面で反射された音線の合成であると考えられる。相関ピークの立ち上がりで判定した到達時間は、河床と水面で反射することなく届いた音線に関するもので、その到達時間時間差から得られる流速値は、トラン

スデューサーの設置高さにおける横断面平均流速である。一方、相関ピークの立ち下がりで判定した到達時間は、河床と水面で反射しながら横断面を覆うようにして到達した音線のものであることから、この音線から求めた流速は横断面平均流速を意味していると考えられる。この断面平均流速は、超音波ドップラー流速分布計の横断測定から求められたものとほぼ一致していた。したがって、固定された一对のトランスデューサーだけを用いて、水位が大きく変化する感潮河川の流量を測定することが可能である。

平均音速の経時変化は、塩水遡上に対応した音速の増加を明瞭に示しており、本超音波流速計を使って、流速と同時に塩水遡上の様子もとらえることが可能である。

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）および（財）河川環境管理財団 河川整備基金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) 氷山ほか：特集「新しい流量観測への取り組み」，土木技術資料，第45巻(2)，pp.16-57，2003.
- 2) Catherine, A. R. and DeRose, J. B.: Investigation of hydroacoustic flow-monitoring alternatives at the Sacramento river at Freeport, California: Results of the 2002-2004 pilot study, *Scientific Investigation Report, USGS*, 2004-5172, 2004.
- 3) 中川一・小野正人・小田将広・西島真也：横断面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，第50巻，pp.709-714，2006.
- 4) 木水啓・二瓶泰雄：H-ADCP観測と数値解析を融合した新しい河川流量推定システムの開発，土木学会第61回年次学術講演会，2-221，pp.437-438，2006.
- 5) Medwin, H.: Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 58, pp.1318, 1975.
- 6) Simon, M. K., Omura, J. K., Scholtz, R. A. and Levitt, B. K.: , *Spread Spectrum Communications Handbook*, McGraw-Hill, New York, 423 pp., 1985.
- 7) 金子新・江田憲彰・鄭紅・高野忠・山岡治彦：沿岸音響トモグラフィー，海の研究，第12巻，1号，pp.1-19，2003.

(2007.9.30 受付)