

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

CONTINUOUS MONITORING OF DISCHARGE, WATER TEMPERATURE,
AND SALINITY IN AN ESTUARY WITH A NEXT-GENERATION
ACOUSTIC VELOCIMETER

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)

Water discharge in a shallow tidal estuary had been continuously measured using a next-generation acoustic velocimeter (NAV), which takes advantage of innovative acoustic tomography technology. In addition to discharge, mean water temperature and salinity were deduced from processing the sound speed data collected by the NAV. Sound paths were examined by ray tracing. Results revealed that sometimes salt wedge under the transducer caused sound paths to be reflected, so those sound paths were not able to penetrate into bottom layers. Therefore, in some observations calculated discharge was corrected using a velocity profile of density currents. Obtained discharge was compared with that of acoustic Doppler current profilers (ADCPs). Discharge, water temperature and salinity obtained from NAV data fulfilled an acceptable compliance with results derived from ADCPs and temperature/salinity sensors.

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

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。しかし、水位から流量が一義的に決まらない場合には使えない問題がある。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¹⁾や H-ADCP の移動測定²⁾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^{3,4)}や情報エントロピーの考えに基づく方法⁵⁾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⁶⁾。

流速の測定には、ADCP に加え、電波流速計や PIV などで水面流速を測定するもの⁷⁾、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^{4,8)}。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⁹⁾。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¹⁰⁾。

本論文では、高度な音響モニタリング技術を用いて開発した、次世代超音波流速計^{11,12)}の広幅感潮河川に対する適用性を検討する。特に、潮汐による

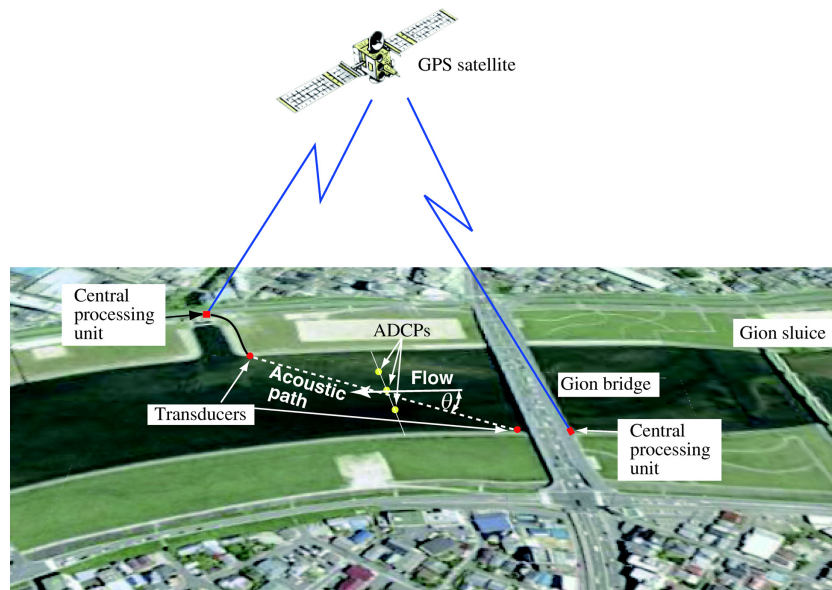


図-1 測定概要

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の連続測定を試みた結果を報告する。次世代超音波流速計は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。

2. 測定方法

太田川は河口から約 9km 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 0.3m 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、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した。測定の概要を図-1 に示す。一対の transducer（超音波の送受信器）を低水路護岸に、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 broadband 型 transducer 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 transducer 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

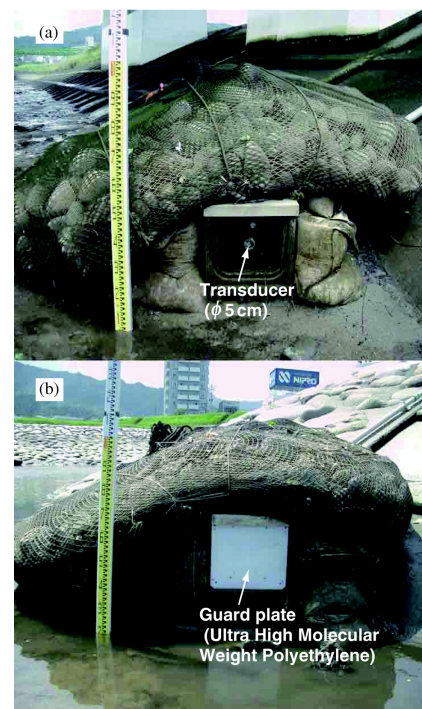


図-2 Transducer の設置状況；(a) 上流左岸側，
(b) 下流右岸側

調している。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。

Transducer の設置状況を図-2 に示す。下流右岸側は洪水時の安全性に配慮し、板厚 10mm の超高分子量ポリエチレン (UHPE) 板でカバーしている。UHPE は音響インピーダンスが水に近いため、超音波の反射・減衰はほとんどない。左岸側と右岸側の transducer の標高は、 -0.46 m と -0.7 m である。

次世代超音波流速計（以下 NAV と呼ぶ）による測定値の妥当性を検証するため、3 台の ADCP を横断

方向に並べて係留し、流量を連続観測した。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としてを線形補間した。

測定地点の水路幅120 mに対し、ADCPの係留間隔は30 mである。流量は、ISOに定められているDepth-velocity-integration (ISO/TC113/SC1)によって評価した。ADCPによる観測中には、祇園大橋で、CTDによる塩分と水温分布の横断面内測定をあわせて行い、NAVの音波経路（音線）を求めた。CTDの横断方向の測定間隔は20 m、一断面を測定するのに要した時間は約10分である。

また、低水路の左岸から40 mの位置にある祇園大橋の橋脚に水位計と3台の水温塩分計を取り付け、水位と水温・塩分の鉛直分布を連続測定した。水温塩分計の標高はT.P. -1, 0, 1 mである。

3. 結果と考察

(1) 音線の横断面内分布と測定流量の補正

塩水遡上がない河川では、音速場はほぼ一樣であるので、transducerから半球状に発射された音波は、水面と河床で反射し、横断面を覆うように伝播する。このため、NAVで得られる流速は断面平均流速と一致すると考えられる。しかしながら、音速場が一樣でない場合、音線はスネルの法則により屈折し、音波が通過しない領域が存在する可能性がある。そこで、以下の常微分方程式¹³⁾を解いて、横断面内の音線分布を求め、音線の状態を確認した。

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{\partial c}{\partial r} \frac{1}{c} \tan \varphi - \frac{\partial c}{\partial z} \frac{1}{c} \quad (1a)$$

$$\frac{dz}{dr} = \tan \varphi \quad (1b)$$

$$\frac{dt}{dr} = \frac{\sec \varphi}{c} \quad (1c)$$

ここで、 φ は音線の水平からの角度（入射捕角）、 r と z はそれぞれ、水平と鉛直方向の座標、 t は音波の伝播時間である。水面では入射角にかかわらず音波はほとんど全反射、河床でも入射捕角が10度以下であれば、ほぼ全反射する。

図-3に式(1)を積分して求めた典型的な音線分布を音速場のコンターとともに示す。ただし、図-3にはNAVのtransducerに到達した音線だけが示してある。音速 c は次のMedwinの式¹⁴⁾から求めた。

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 2.9 \times 10^{-4}T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D \quad (2)$$

ここで、 T は水温(°C)、 S は塩分、 D は水深(m)である。図-3に示した音速場は祇園大橋からCTDを昇降させて測定した水温・塩分分布をNAVの測定断面に投影して計算したものである。

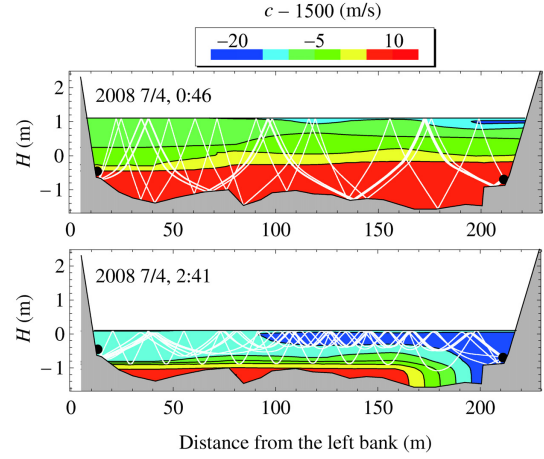


図-3 音速分布と音線解析の結果

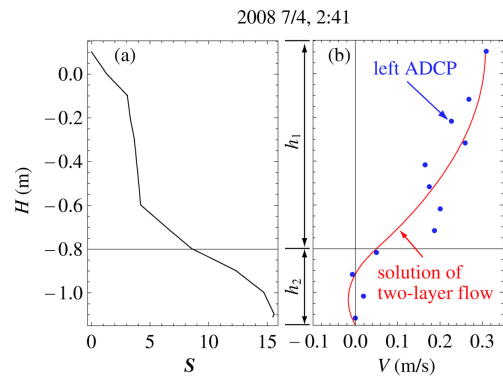


図-4 塩分(a)と流速(b)の鉛直分布

満潮の2時間後である7月4日0:46の音線を見ると、ほぼ横断面を覆うように音が伝播していることが確認できる。しかし、干潮の2時間前の2時41分の結果を見ると、強い音速（塩分）勾配のために音線は底面に達することなく、多くの音線が上層だけを通過していることがわかる。様々な潮汐位相の解析結果から、塩分躍層の位置がtransducerの設置高さ以下になると、音線が横断面を覆うことが出来なくなる場合があることがわかった。流速の大きな上層だけを音線が通過している場合、NAVによって測定した横断面平均流速は過大評価されていることになる。

図-4は、塩水楔がtransducerの下に存在している2時41分における左岸から40 mでの塩分と左岸側のADCPによる流速の鉛直分布である。NAVによる流量の測定精度を上げるためには、何らかの方法で流速分布を推定する必要がある。本研究では、嶋らによる2層密度流における上層流動の解¹⁵⁾を用いた。嶋らによる流速分布を用いると、水深平均流速 U は

$$U = \frac{1}{6(h_1 + h_2)} \left[2a_1h_1 + \frac{2a_2h_2^3}{h_1^2} + 6c(h_1 + h_2) + b \left(3h_1 - \frac{3h_2^2}{h_1} \right) \right] U_1 \quad (3)$$

となる。

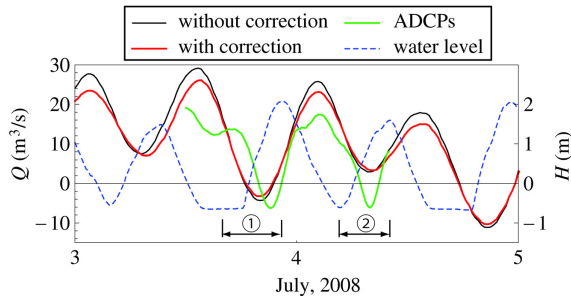


図-5 流量と水位の経時変化

ここで、 $a_1 = -6/(4 + 3K)$ 、 $a_2 = 9/\{K(4 + 3K)\}$ 、 $b = 12/(4 + 3K)$ 、 $c = 3K/(4 + 3K)$ 、 $K = h_2/h_1$ 、 h_1 は上層厚、 h_2 は下層厚、 U_1 は上層の平均流速である。音線が上層のみを通過している場合、NAV の測定流速は U_1 に等しいと考えられる。

図-4(b) に示すように、ADCP によって測定した流速分布は、赤線で示した嶋らによる流速分布¹⁵⁾ で近似できていることがわかる。

流速分布を推定するためには密度界面の位置を知る必要があるが、CTD で塩分分布を常時測定することは難しい。そこで、祇園大橋の橋脚に取り付けた塩分計で測定されている標高 -1m と 0m における塩分差が 8 以上の場合、transducer と平均河床の中間に密度界面が存在するとみなした。音線シミュレーションを行った結果、塩分差が 8 を下回る場合には、音線は河床まで届くことがわかったので、流速補正の必要性はないと判断した。

音線解析の結果、transducer 間の直線距離に対する音線長の変動は 0.5 % 程度であった。流速の相対誤差は距離の相対誤差に等しく反映される¹¹⁾ ことから、音線長の変動が測定流速に与える影響は無視できる。

(2) 測定流量の経時変化

河床形状の測量結果と水位から求めた、音線に沿った断面積 A と NAV で測定された音線上の音線に沿った平均流速 u_m から、次式で流量を求めた。

$$Q = A(h) u_m \tan \theta \quad (4)$$

ここで、 θ は図-1 に示す主流方向と音線との夾角である。NAV と ADCP による測定流量と水位の経時変化を図-5 に示す。Transducer が干渉するため、低低潮付近では欠測となっているが¹¹⁾、本論文では、欠測部分を直線補完した後、spline wavelet で潮汐周期より短い変動を除いている。

真の流量はわからないが、両者の測定値が同程度であれば、NAV による測定流量は妥当なものと判断される。夜間、ADCP を横断させることは困難であること、横断する間に水位が変化してしまふことから、測点数は十分ではないが、前述したように、横断方向に等間隔で係留した 3 台の ADCP で測定した

流速分布から比較のための流量を求めている。測定地点の流速場の強い非一様性を考慮すれば、NAV と ADCP による測定流量はほぼあっていると判断される。図-5 から、式 (3) を用いた補正後の NAV の方が ADCP との差が小さくなっていることがわかる。ADCP の測定結果を見ると、1 回目より潮差の小さな 2 回目の上げ潮時 (②)、逆流量が最初の上げ潮時 (①) より減少しておらず、不自然な結果となっている。本観測地点では、流速の横断方向の非一様性が非常に大きく、ADCP 間の水深平均流速の差は、断面平均流速の 3 倍程度もあったことから、横断方向に 30 m 間隔で係留した 3 台の ADCP から得られた流量は十分な精度を持っていないと考えられる。

図-6 に NAV の長期連続測定結果を水位変化とともに示す。祇園水門が平常状態にあるため、流量は少なく、潮汐に応じた変動が見られる。赤線は式 (3) を用いた補正後の流量を示したもので、測定期間の平均では補正前と比べて約 10 % 少ない流量となった。

図-6(b) は spline wavelet により、潮汐変動を取り除いた流量の長期変動を示したものである。赤線は、後述する NAV で評価された平均塩分を用いて推定した淡水流量¹²⁾ の長期変動である。流量と淡水流量との差がほとんどない時もあるが、平均すると淡水流量は測定流量の約 70 % である。

太田川流量の基準となっている、矢口第一における H - Q 式による流量と 3 台の ADCP で測定された大芝水門での流量、NAV の淡水流量の経時変化を図-7 に示す。ただし、wavelet フィルターで潮汐変動は取り除いてある。分流率は流量によって変動しているが、流量の多い期間 (6 月 22~24 日、6 月 30 日~7 月 2 日) では、放水路への淡水流入量は矢口流量の約 16 %、大芝流量に対する割合は約 13 % であった。

(3) 平均音速の経時変化と平均水温、平均塩分の推定

図-8 に NAV で測定した平均音速と祇園大橋に取り付けた水温塩分計で測定した平均水温の経時変化を示す。祇園大橋の平均水温は、鉛直方向に 1 m 間隔で設置された 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。式 (2) からわかるように、平均音速は水温と塩分とともに増加するが、水温 $T = 25^\circ\text{C}$ 、塩分 $S = 10$ 付近では

$$\delta c = 2.64 \delta T + 1.09 \delta S \quad (5)$$

となり、音速の変化 δc に対する影響は水温の方が塩分より約 2.4 倍大きい。図-8 をみると、潮汐による大きな塩分変動のため、音速は周期的に変動しているが、長期変動は水温の変化と同様な変動傾向を示していることがわかる。これは、水温変動に比べて塩分変動が音速に与える影響が小さいことと、潮汐変動を除いた平均塩分の変動が小さいためである。

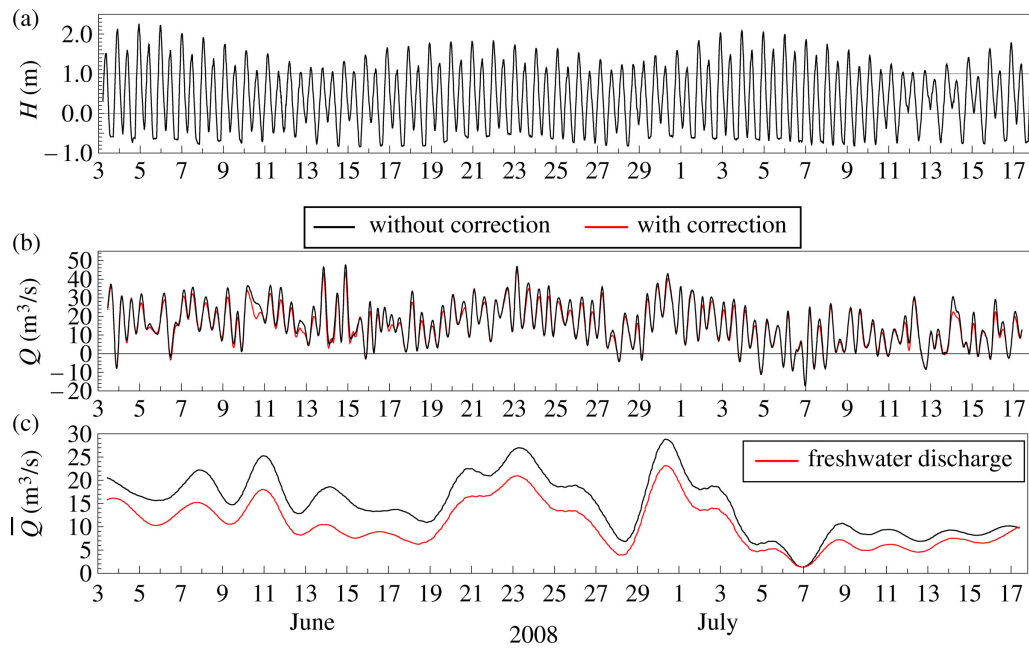


図-6 水位 (a) と流量 (b) の経時変化, 流量と淡水流量の長期変動

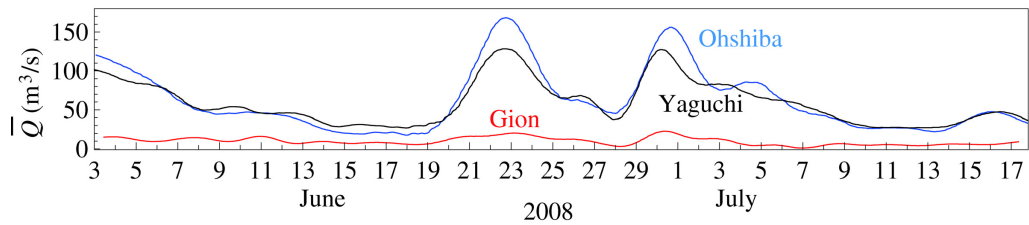


図-7 NAV の淡水流量と矢口流量, 大芝流量の長期変動

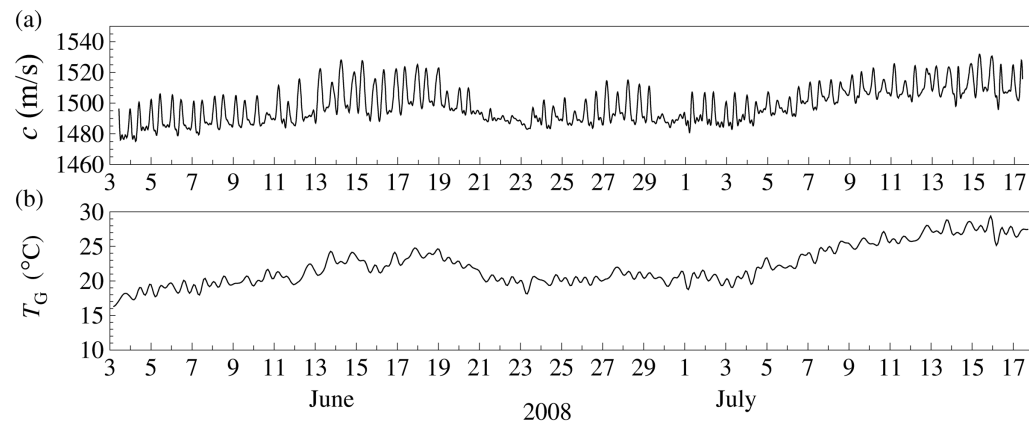


図-8 平均音速 (a) と平均水温 (b) の経時変化

平均音速と祇園大橋の平均水温から式 (2) を用いて推定した平均塩分 $\bar{S}_{\text{NAV}}$ と祇園大橋の平均塩分 $\bar{S}_G$ との関係を図-10 に示す. 平均水温の場合ほど相関は高くないが, 両者の間には比例関係が認められ, NAV で平均塩分が推定可能である.

決定係数の低下には, 非一様性が強い塩分場で, 塩分の測定場所が一致していないことが大きく影響していると考えられる. 回帰直線は $\bar{S}_{\text{NAV}}$ が $\bar{S}_G$ より大きいことを示しているが, これは, NAV の測定位

置が塩分計のある祇園大橋より下流 (右岸側 174 m, 左岸側 3 m 下流) であるためと考えられる.

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, 次世代超音波流速計 (NAV) を用いて浅い広幅感潮河川の流量の連続測定を実施

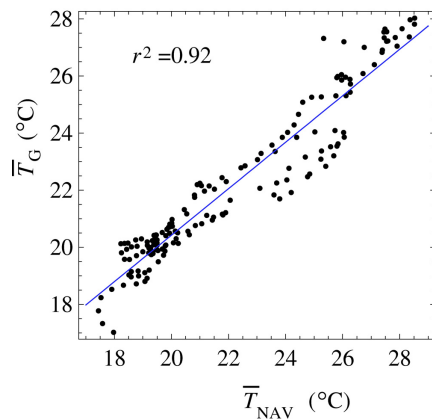


図-9 NAV で測定された平均水温 $\bar{T}_{NAV}$ と祇園大橋で測定された水温計による平均水温 $\bar{T}_G$ の比較

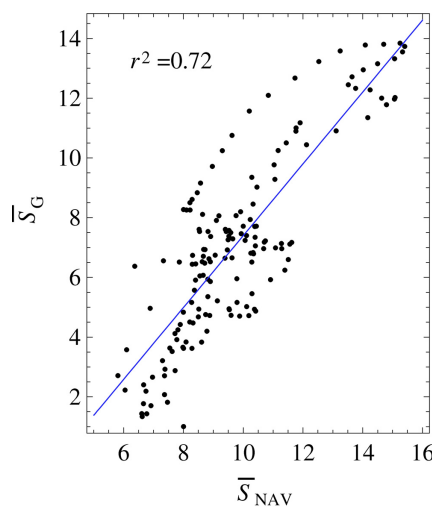


図-10 NAV で測定された平均塩分 $\bar{S}_{NAV}$ と祇園大橋で測定された塩分計による平均塩分 $\bar{S}_G$ の比較

した。

塩水楔が transducer の下に存在する場合を除き、transducer から半球状に発射した音波は、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することから、横断面内の流速分布にかかわらず、固定された 1 対の transducer だけで横断面平均流速を測定できる。

NAV で測定される平均音速から、流量と同時に平均水温や平均塩分を推定可能である。

NAV を設置してから 8 月現在まで祇園水門が全開となる出水は起きていない。従って、洪水時の NAV の性能評価は今後の課題であるが、M 系列による変調のおかげで高い SN 比が確保できているので、高濁度、高雑音となる洪水時でも問題なく測定できる可能性が高い。

今後は非感潮域も含め、様々な水理条件で NAV の性能評価を行う予定である。

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 (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, 橘田隆史, 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, 大庭尚史, 金子 新, 水野雅光: 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, 水工学論文集, Vol. 52, pp. 937-942, 2008.
- 12) 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, 印刷中.
- 13) Dushaw, B. D. and Colosi, J. A.: Ray tracing for ocean acoustic tomography, *Technical Memorandum, Applied Physics Laboratory, University of Washington*, TM 3-98, 31 pp., 1998.
- 14) Medwin, H.: Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 58, p. 1318, 1975.
- 15) 嶋 祐介, 椎貝博美, 玉井信行: 河床勾配のある場合の塩水楔について, 第 19 回年次学術講演会講演集, II-71, 2 pp., 1964.

(2008.9.30 受付)