

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

LONG-TERM CONTINUOUS MONITORING OF WATER DISCHARGE IN A TIDAL RIVER WITH A NEXT-GENERATION ACOUSTIC VELOCIMETER

川西 澄¹・渡辺 聡²・金子 新³・阿部 徹⁴
Kiyosi KAWANISI, Satoshi WATANABE, Arata KANEKO and Toru ABE⁵

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 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)

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 channel, which is 120 m wide and 0.3 ~ 3 m deep, had been continuously measured using a next-generation acoustic velocimeter (NAV). The NAV 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. The NAV has a few noticeable functions represented by the accurate measurement of travel time using the GPS clock and the attainment of high signal-to-noise ratio as a result of transmission signal modulation by the 10th order M-sequence. The NAV, operated at the shallow tidal channel with large changes of water depth and salinity, successfully measured the cross-sectional mean velocity over a long duration. The water discharge deduced from the NAV was compared with that measured by ADCPs.

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

1. はじめに

河川流量は治水、河川環境、水資源管理などを考える上で最も重要な水文学量であることから、安全で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、この方法は、感潮域のように、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、スポット的にはともかく、長期にわたって連続的に断面平均流速を測定することは容易ではない。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¹⁾、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^{2,3)}。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⁴⁾。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⁵⁾。

著者らはすでに、音響トモグラフィ技術を用いて開発した次世代超音波流速計を用いて、短期的には流量の連続測定が可能であることを確認している⁶⁻⁸⁾。本論文では、広幅感潮河川である太田川放水路の分派流量を長期間にわたり連続して観測した結果を報告する。

2. 次世代超音波流速計の概要

図-1 に次世代超音波流速計 (以下 NAV と呼ぶ) のシステム構成を、表-1 に主な仕様を示す。2 台 1 組で構成される NAV は、GPS 衛星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発射する。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

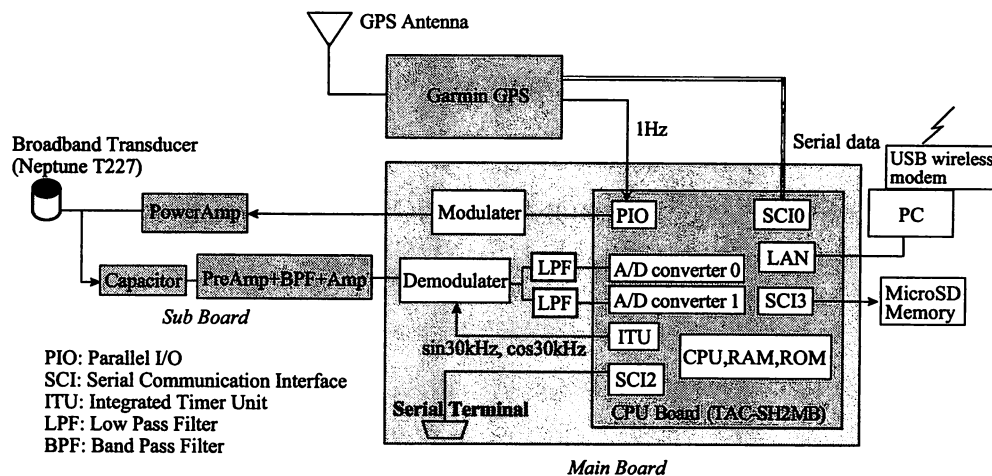


図-1 次世代超音波流速計 (NAV) のシステム構成

表-1 次世代超音波流速計 (NAV) の主な仕様

送受波器の動作周波数 (kHz)	30
計測可能距離 (km)	0.1~2.0
送信音圧レベル (dB re. 1 μ P at 1 m)	183
使用疑似ランダム信号	10 次 M 系列
音波送信間隔	1 分 ~ 24 時間 (1 分単位で設定可)
時間精度	< 0.5 μ s, (長期安定度: < 1×10^{-13} 1/sec)
使用電源	本体: 12 V, 0.25 A (3W) 音波発信: 24V, 4.2 A (100W)
装置重量 (バッテリーを含む)	10kg (空中重量)
装置寸法	本体: 30cm $\times$ 20cm $\times$ 20cm 送受波器: ϕ 5cm $\times$ 5cm

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られてきた音波の受信時間を正確に判定することは困難である。そこで、NAV の送信波は 10 次の M 系列で位相変調されており、受信時の高い SN 比が確保されている。この位相変調技術と GPS 衛星の正確な時間情報の利用によって、高精度な受信時間が測定可能となっている。

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り、NAV ではアメリカ ITC 社製の小型トランスデューサー (ITC3422) が使用されている。超音波の中心周波数は 30 kHz、直径と長さはともに 5 cm で、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。復調された受信波は 60 kHz で AD 変換後、送信時に使用した M 系列との相互相関関数が計算され、MicroSD カードに相関波形が記録される。さらに、測定システムの制御プログラムには TCP/IP が実装されており、無線モデムと携帯電話会社のインターネット回線を利用した、測定データの無線伝送が可能になっている。

3. 測定方法

測定の概要を図-2 に示す。一対のトランスデューサー（超音波の送受波器）を低水路護岸に、処理装置本体を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。音波の送受信間隔は 1 分である。

図-3 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、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、太田川に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。測定断面の位置は祇園水門の 250 m 下流である。

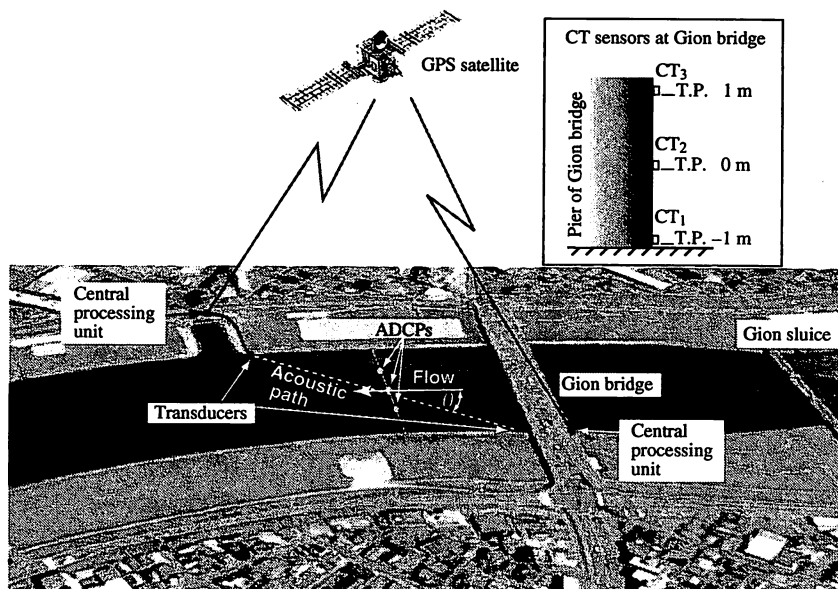


図-2 測定の概要

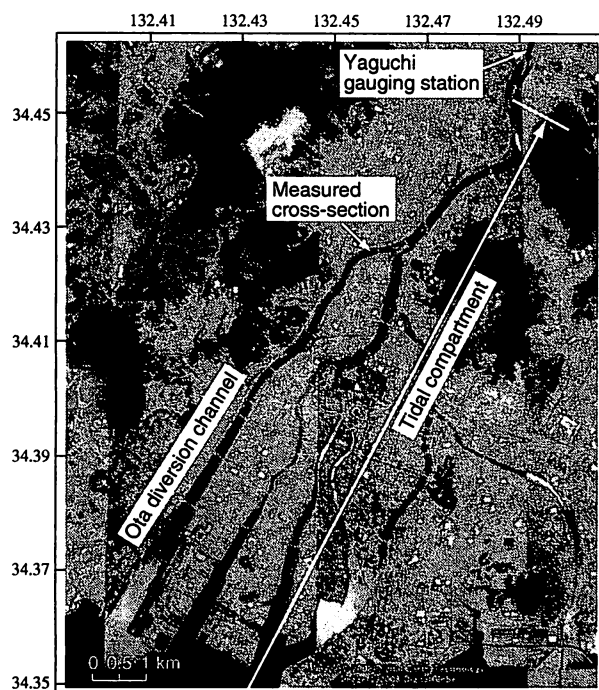


図-3 観測地点

トランスデューサーの設置状況を図-4に示す。下流右岸側は洪水時の安全性に配慮し、厚さ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ので、超音波の反射や減衰はほとんどない。左岸側と右岸側のトランスデューサーの標高は、 -0.46 m と -0.7 m である。

次世代超音波流速計(NAV)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、流速を連続観測した。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

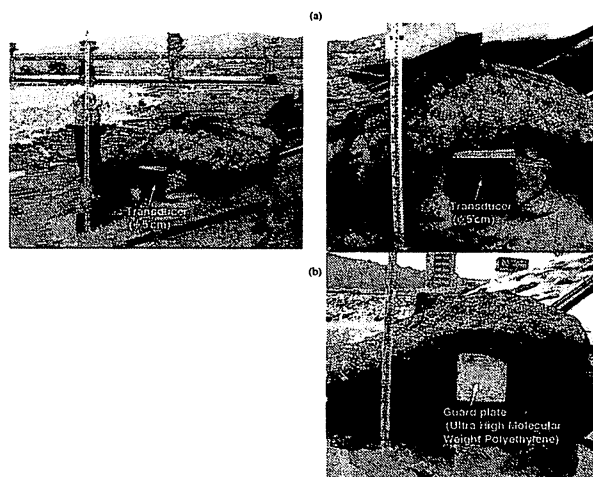


図-4 トランスデューサーの設置状況；(a) 上流左岸側，(b) 下流右岸側

強度から求めた河床位置との間は、河床流速を0として線形補間した。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。

低水路の左岸から 40 m に位置している祇園大橋の橋脚には、太田川河川事務所により、水位計と3台の水温塩分計が取り付けられ、水位と水温・塩分が連続測定されている。水温・塩分計の標高は、図-2に示すように、T.P. $-1, 0, 1\text{ m}$ である。

4. 結果と考察

(1) 超音波の受信と測定流速の検証結果

図-5に、復調された受信波の振幅関数と相互相関係数の一例を示す。M系列乱数との相関係数は鋭いピークを示し、受信波の振幅だけでは判定が困難な音波の到達を、正確に検出できていることがわかる。観測期間内に洪水は発生しなかったが、信号のSN比

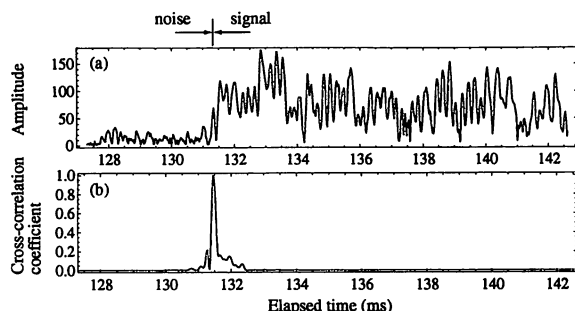


図-5 受信波の振幅関数と相互相関係数

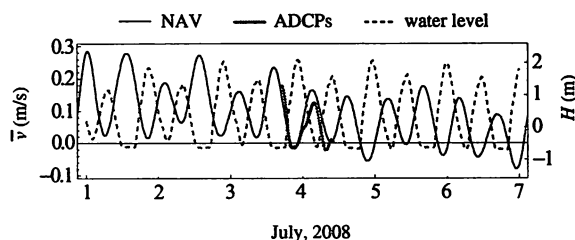


図-6 断面平均流速の比較

が 20 dB 程度と高かったことから、高濁度、高雑音となる洪水時でも受信波の到達時間を正確に検出でき、流量を測定できると考えられる。

断面平均流速を測定するためには、横断面を覆うように音が伝播していることが必要であるが、塩水楔がトランスデューサーの下に存在している一部の時間（干潮前）では、強い音速（塩分）勾配のために音線は底面に達することができなくなる場合がある。そうした場合は、2層密度流の流速分布を用いて断面平均流速を補正している⁸⁾。

NAVによる測定値の妥当性は、ADCPを横断方向に並べて係留して求めた断面平均流速との比較により確認した。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うことから、測点数は十分ではないが、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断面平均流速を求めた。

図-6に比較結果の一部を示す。黒線がNAVによって測定された断面平均流速、灰色の太線が3台のADCPから推定した断面平均流速である。破線は観測地点の水位変化を示している。大潮の低低潮時はトランスデューサーが干出するため、欠測となっているが⁶⁾、本論文では、欠測部分を調和解析で補間した後、スプラインウェーブレットで潮汐周期より短い変動を取り除いている。測定地点は流速場の非一様性が強いため、3台のADCPから推定した断面平均流速の精度は高くはないと考えられ、NAVの精度評価には使えないが、NAVとADCPによる断面平均流速はほぼ一致しており、NAVで測定された断面平均流速は妥当なものであると判断される。

音線解析の結果、トランスデューサー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

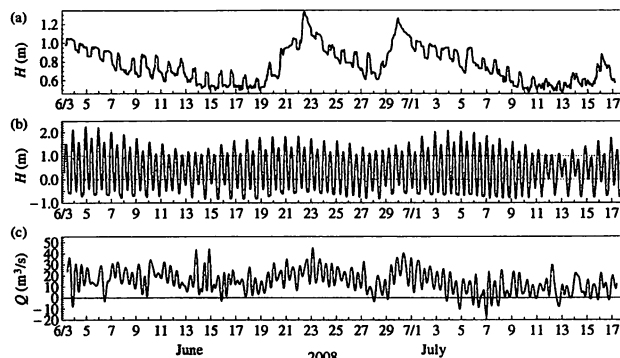


図-7 矢口第一水位 (a)、祇園水位 (b)、流量 (c) の経日変化

の相対誤差は距離の相対誤差に等しく反映される⁶⁾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。

$$Q = A(h) u_m \tan \theta \quad (1)$$

ここで、 θ は図-1に示す主流方向と音線との夾角である。図-7に、出水期である6月から7月にかけてのNAVの連続測定結果を、水位変化とともに示す。図-7(a)が、太田川流量を観測している矢口第一水位観測所の水位、(b)が観測地点の水位である。2008年は、太田川流域にはまとまった降雨がなく、祇園水門は平常時の状態であった。このため、放水路への分派流量は少なく、図-7(c)に示す流量の経時変化には、潮汐に応じた流量変動が明瞭に認められる。図-7の一ヶ月半の期間平均流量は $14.3 \text{ m}^3/\text{s}$ であったが、これは太田川流量の基準となっている、矢口第一観測所における $H-Q$ 式による流量の約20%に相当する。

図-7に示したように、NAVにより流量が連続測定できることが確認されたので、2008年8月からNAVの本格運転を開始した。8月から12月までの結果を図-8(b)に示す。スプラインウェーブレットにより、潮汐変動を取り除いた流量の長期変動も合わせて示してある。なお、10月8日から16日の期間はSDメモリーの交換を怠ったため、データが取得できていない。図-8(a)は祇園テレメーター水位の経日変化である。観測期間における太田川流域の降水量は少なく、渇水状態であった。このため、放水路への分派流量も少なく、8月から12月までの平均流量は、 $8.8 \text{ m}^3/\text{s}$ となった。

図-8(a)の水位変動をみると、冬期は平均潮位が低下するため、夏期より潮差がやや減少していることが分かる。このため、流量変動も冬期の方が小さくなっており、逆流流量のピークも減少している。

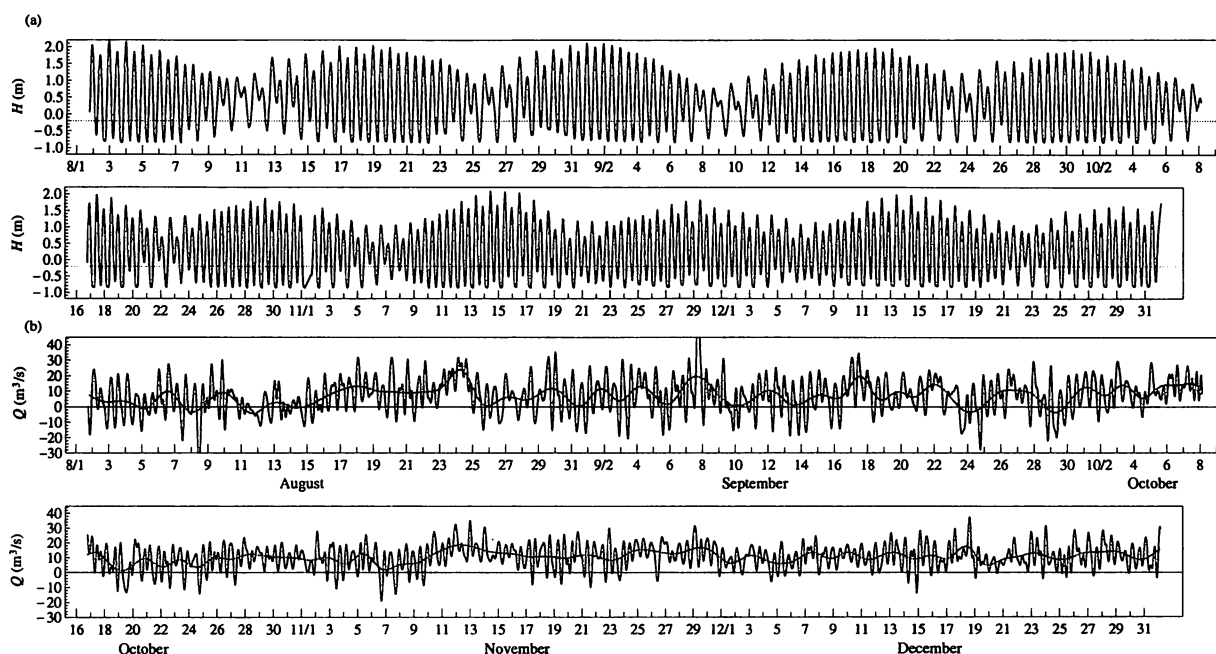


図-8 祇園水位 (a) と流量 (b) の経日変化

(3) 平均音速の経時変化と平均水温、平均塩分の推定

Medwin⁹⁾ によれば、水中音速 c は

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

と表される。ここで、 T は水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 S は塩分、 D は水深 (m) 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

$$\delta c = 2.64\delta T + 1.09\delta S \quad (3)$$

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。観測地点では潮汐による塩水の遡上があるため、周期的な塩分変動が起こっており、塩分変動が分からないと音速から水温を推定することは出来ない。しかし、潮汐周期平均した塩分の変化が小さいことに加え、上述したように、塩分変動より水温変動のほうが音速に与える影響が 2.4 倍大きいことから、平均塩分を仮定して水温の長期変動を推定することは可能である。

図-9 に NAV で測定した断面平均音速から推定した断面平均水温 $\bar{T}$ 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 $\bar{T}_G$ の関係を示す。祇園大橋の平均水温は、鉛直方向に 1m 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。観測期間の平均塩分は 17 とし、潮汐周期変動は取り除いている。図-9 の結果から $\bar{T}$ と $\bar{T}_G$ は概ね一致していることがわかる。両者の差が大きくなっている部分は、後述するように、太田川

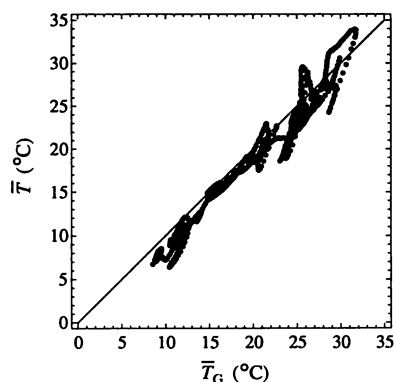


図-9 NAV で測定された平均水温 $\bar{T}$ と祇園大橋の水温計で測定された平均水温 $\bar{T}_G$ の比較

流量が増加し塩分が大きく低下した期間に対応している。

図-10 に、矢口第一水位、祇園水位、NAV の断面平均音速と祇園大橋で測定された平均水温から式 (2) を用いて推定した断面平均塩分 S の経日変化を示す。潮汐にともなう平均塩分の変動は非常に大きく、特に、観測期間の後半では、0 から広島湾の塩分に相当する値まで潮汐周期で激しく変動している。こうした傾向は、祇園大橋の橋脚に取り付けてある塩分計の値にも現れている。残念ながら、祇園大橋の塩分値 S_G にはセンサーの汚れによるドリフトが発生していたので、NAV による平均塩分との比較に S_G を使うことはできなかった。

潮汐周期変動を除いた塩分の長周期変動をみると、矢口第一水位（太田川流量）の上昇に対応して塩分が減少していること分かる。さらに、図-8(a) に示し

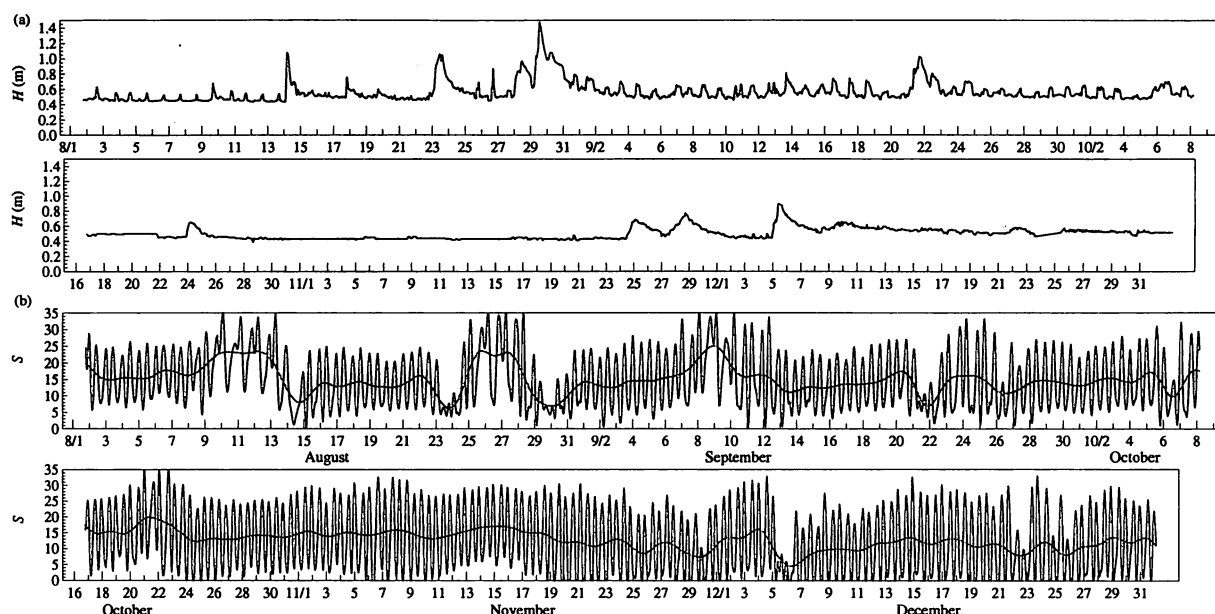


図-10 矢口水位 (a) と断面平均塩分 (b) の経日変化

た祇園水位変動と比較すると、塩分の長周期変動に対する潮差の影響も確認される。すなわち、大潮期より小潮期の方が塩分が高く、塩水遡上が強いことが分かる。

4. 結論

次世代超音波流速計 (NAV) を用いて、従来の方法では測定が困難であった水位変化の大きな、浅い広幅感潮河川の流量の連続測定を実施した。

塩水楔がトランスデューサーの下に存在する場合を除き、トランスデューサー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対のトランスデューサー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系列による変調を施した結果、受信波の高い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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) (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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Medwin, H.: Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 58, p. 1318, 1975.

(2009.4.9 受付)