

水工学シリーズ 11-A-5

感潮河川流量の自動連続計測を可能にする 河川音響トモグラフィシステム

広島大学大学院 工学研究院 准教授

川西 澄

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2011 年 8 月

感潮河川流量の自動連続計測を可能にする河川音響トモグラフィシステム

Fluvial Acoustic Tomography System for Continuous Measurement of Streamflow in Tidal Estuaries

川西 澄

Kiyoshi KAWANISHI

1. はじめに

河川流量は河川・水資源管理や水循環を考える上で極めて重要な水文量であることから、安全かつ確実な河川流量観測法の確立は、世界的な喫緊の課題である。これまで様々な河川流量の計測法が考えられてきたが、多くの欠点・制約を抱えており、流量観測の高度化が強く望まれている。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河川感潮域の流量観測には使えないし、水位と流量の関係式は過去の観測データに基づいて作成されているので、現在の河川流量評価には使えない可能性がある。また、 $H-Q$ 式を作成するのに多大な労力を必要とする問題もある。

流量観測のための流速測定には、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(AVM)²⁻⁶⁾やH-ADCP⁷⁻¹⁰⁾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。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、超音波ドップラー多層流向流速計(ADCP)による横断観測や水平計測式ADCP(H-ADCP)の移動測定¹¹⁾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、限られた測点の流速から流量を求めることが考えられているが、塩水遡上のある感潮域のように流速分布が複雑な場合には十分な計測精度は望めないと考えられる。

従来型流速計を用いた方法では連続した流量観測が難しい流れとして、①塩水遡上のある非定常性が強い感潮河川流、②浅い広幅河川流、③洪水流、が挙げられる。長期連続流量観測の可能性をもつH-ADCPやAVMを用いた方法は、①に対しては、密度分布による音波の屈折が障害となる上に、横断面内の複雑な流速分布に対応できない。②に対しては、河床や水面に超音波ビームが反射することが問題となり、水深が数十センチの浅い河川には適用できない。ADCPによるスポット的な横断観測でも水面と河床付近の計測不能領域の全水深に対する割合が大きくなり、必要な流量計測精度が得られる保証はない。③に対しては、浮遊土砂による音波の減衰や水中雑音が障害となる。

このように、洪水流に加え、水深が数十センチしかない浅い河川や塩水遡上のある河川感潮域における流量観測は非常に困難で、長期連続観測を可能にする実用的な方法はこれまで存在しなかった。本研修会では、こうした状況を打開するために開発した河川音響トモグラフィシステム(Fluvial Acoustic Tomography System; FATS)¹²⁻¹⁶⁾の概要を説明し、水深と塩分が大きく変動する太田川放水路で行った実地試験の結果を用いて、河川流量計測に対する音響トモグラフィの有効性を示す。

2. 河川音響トモグラフィシステム (FATS) の概要

2.1. 計測原理と誤差

河川の横断平均流速を求めるために、図-1に示すように、音線が河川を斜めに横断するように1対のト

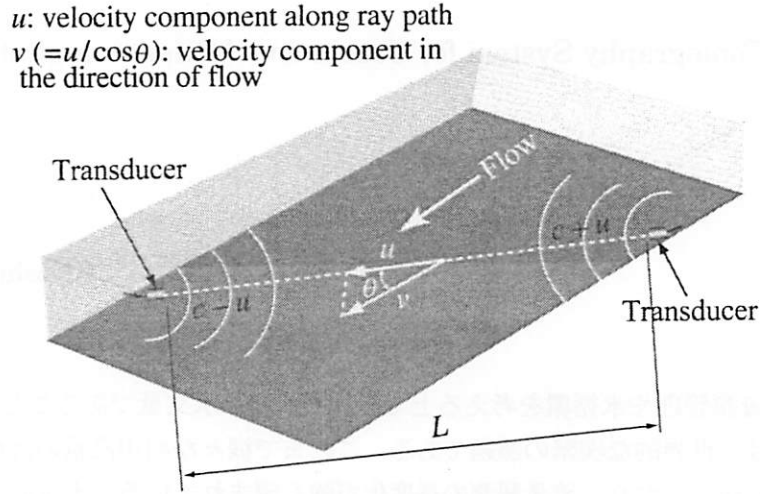


図-1 音源の配置と計測流速成分

ランスデューサーを配置する. 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 と 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 と 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, $t_m = (t_1 + t_2)/2$, $\Delta t = t_1 - t_2$ である. 流速の分解能を上げるためには, $\Delta t/L$ を小さくする必要がある. すなわち, 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 を長くとることによっても測定可能な最小流速を小さくできる. FATS の流速分解能 u_r は次式で与えられる.

$$u_r = \frac{c_m^2}{2L} \frac{1}{2f} \quad (4)$$

ここで, f はランスデューサーの中心周波数である.

式(2)と(3)から, c_m と u_m の相対誤差はそれぞれ,

$$\frac{\delta c_m}{c_m} = \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta t_m}{t_m} \quad (5)$$

$$\frac{\delta u_m}{u_m} = \frac{\delta L}{L} - 2 \frac{\delta t_m}{t_m} + \frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t} \quad (6)$$

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 項は除くことができる。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、時間精度はそれほど重要ではない。ただし、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要求されるので、音線の距離が正確に決まっていなければならない。一方、流速の相対誤差に関しては式(6)の右辺第 3 項の分母である時間差が小さいため、時間精度の確保が非常に重要となる。通常、流速測定に必要な距離精度は十分確保できる。

クロック誤差 $\delta t_1, \delta t_2$ を含んだ一対のトランスデューサー (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 $t_{12} + \delta t_2$ とすると、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

$$\begin{aligned} t_2 &= (t_{12} + \delta t_2) - (t_0 + \delta t_1), \\ t_1 &= (t_{21} + \delta t_1) - (t_0 + \delta t_2) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。両者の平均をとると

$$t_m = \frac{1}{2}(t_2 + t_1) = \frac{1}{2}(t_{12} + t_{21} - 2t_0) \quad (8)$$

となり、クロック誤差 $\delta t_1, \delta t_2$ は消える。

河川流量 Q は、河床形状の測量結果と水位 H から求めた、音線に沿った断面積 $A(H)$ と u_m から、次式で求められる。

$$Q = A(H) \tan \theta \quad (9)$$

ここで、 θ は図-1 に示す主流方向と音線との夾角である。

2.2. 音波の伝播損失

音波の強度は水中を伝播する間にしだいに減衰する。多量の浮遊土砂が含まれている洪水流の観測では、水中雑音とともに、音波の大きな伝播損失が超音波計測の障害となる可能性がある。音波の伝播損失は、主として拡散損失と吸収損失から構成される。拡散損失は音波が音源から拡がっていくために生じる損失で、音源からの距離だけの関数である。一方、吸収損失は水と浮遊粒子による損失に分けられる。

受信音波の強度 P_r は次式で表される¹⁷⁾。

$$P_r \propto \frac{1}{r^2} e^{-r(\alpha_w + \alpha_s)} \quad (10)$$

ここで、 r は音源からの距離、 α_w と α_s はそれぞれ水と浮遊土砂による吸収損失係数である。水による吸収損失係数 α_w には色々な経験式が提案されているが、いずれも音波の周波数の 2 乗に比例する関係となっている。一方、浮遊土砂による吸収損失係数 α_s は

$$\alpha_s = \frac{1}{r} \int_0^r \zeta M(r) dr \quad (11)$$

ここで、 ζ は次式で表される減衰係数、 $M(r)$ は浮遊粒子濃度である。
減衰係数 ζ は

$$\zeta = \frac{1}{\rho a_s} \left\{ \frac{\beta (ka_s)^4}{1 + (ka_s)^2 + \frac{4}{3} \beta (ka_s)^4} \right\} \quad (12)$$

で評価される¹⁸⁾。ここで、 k は音波の波数、 a_s は粒子の半径、石英粒子の場合 $\beta \approx 0.18$ である。 $ka_s \ll 1$ の場合、 $\zeta = (\beta / \rho a_s) (ka_s)^4$ となり、波数や粒径とともに減衰係数は急激に大きくなる。減衰係数は音波の波数（周波数）の4乗に比例するため、数百 Hz～数 MHz の高い周波数を用い、さらに後方散乱波を処理している（往復した音波を受信している）H-ADCP は、浮遊土砂濃度が高くなると計測距離が著しく短くなってしまうことがわかっているが¹⁰⁾、これは、以上の減衰係数に関する考察から当然の結果である。

H-ADCP より1オーダー低い周波数を用い、送信波を直接受信するAVMやFATSは、大量の浮遊土砂を含む洪水流の計測に関してH-ADCPよりはるかに有利である。式(4)に示したように、音波の周波数（波数）を下げると流速の解像度は低下するが、浮遊土砂による吸収損失が減少するので、流速の解像度と吸収損失はトレードオフの関係にある。幸いなことに、周波数に対する感度は減衰係数の方が遙かに高い、すなわち $\Delta u_r / u_r = -(\Delta f / f)$ に対し、 $\Delta \zeta / \zeta = 4(\Delta f / f)$ であるので、少し周波数を下げれば、さほど流速の解像度を犠牲にしないで音波の伝播損失を大幅に押さえられる。

2.3. 疑似ランダム信号の送受信

水中雑音や伝播損失、送信波形の変形などのため、音源から単純な正弦波を発射しても音波の到達時間を正確に計測することは困難で、伝播時間計測の精度を上げることは出来ない。従来のAVMでは単純に正弦波を送信していただけなので、正確な受信時間が特定できず、しばしば欠測となっていた。

信号対雑音比（SN比）を上げるためには、送信信号として、搬送波を疑似ランダム信号の一つであるM系列で位相変調した信号の1周期分を用いる^{19,20)}。図-2に、搬送波を3次のM系列で位相変調した時の波形を典型例として示す。この例では、M系列の1ディジット幅に搬送波が3波含まれているので、位相変調波を変形させずに送波するには、音源が $2f/3$ の周波数帯域幅を持つことが要請される。そのため、この要請を満たすブロードバンド音源が必要となる。

位相変調した送信波 $S(t)$ は、次式のように表される。

$$S(t) = A(t) \sin(\omega t + \varphi(t)) \quad (13)$$

ここで、 $A(t)$ 、 $\varphi(t)$ はそれぞれ、振幅関数と位相関数である。受信側で、この信号に $2 \sin \omega t$ 、 $2 \cos \omega t$ を乗じてローパスフィルターを通して高周波成分を落とし、送信波の位相変調に使ったM系列との相互相関をとれば、SN比を大幅に向上させて正確な受信時間を計測できる。N次のM系列を使った場合、 $(2^N - 1)$ だけ受信信号のSN比を増加させることができる。

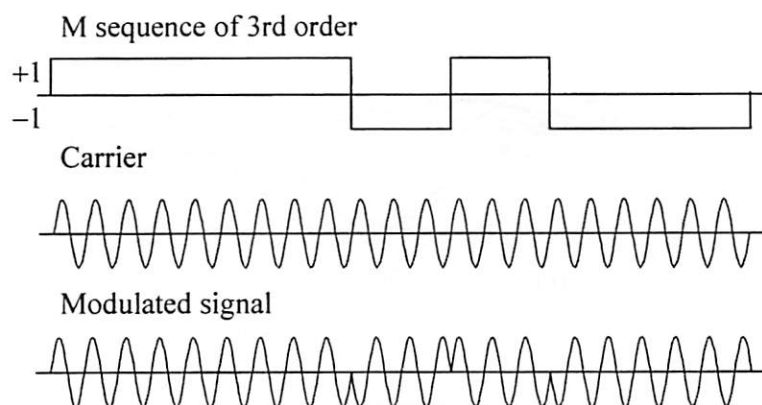


図-2 M 系列による位相変調

2.4. 無指向性音源と多重音線の利用

FATS では水面と河床をウェーブガイドとして横断面内を覆うように伝播する多重音線を利用して、流量算出に必要な断面平均流速を直接計測する。これがまっすぐな直達音線のみを利用する AVM との決定的な違いである。密度成層が存在する河川では音波は屈折し、直達音線など存在しない。水面と河床で何度も反射した音波は減衰して SN 比が低下し、AVM では受信波を処理することは出来なかった。FATS では M 系列変調波を用いてこうした問題を克服しているのである。

図-3 に太田川放水路の低水路内における音線分布の一例を示す。塩水遡上により強い密度成層状態にあり、音速は河床に向かって増加している。そのため、音線は大きく屈折して水面と河床で反射を繰り返して断面を覆うように伝播している様子が分かる。複断面水路である太田川放水路において、水位が高水敷を超えた洪水流量を計測するためには、高水敷上の本堤防付近にトランスデューサーを設置しなければならない。図-4 は洪水時の複断面を想定して行った、音線解析シミュレーションの結果である。高水敷上の本堤防の法尻にトランスデューサーを設置した場合でも、ほぼ横断面を覆う音線が存在することから、断面平均を計測することができると考えられる。低水路護岸の法尻に設置したトランスデューサーも併用すれば、低水路内のシャドーゾーンも埋めることができ、インパース解析を行って、横断面内の流速分布の概形を知ることができるであろう。

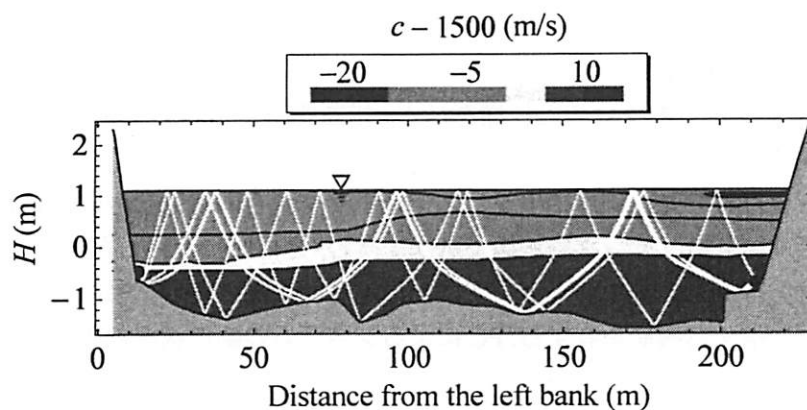


図-3 塩水侵入のある太田川放水路における音速と音線分布の例；
コンターは音速 c の分布

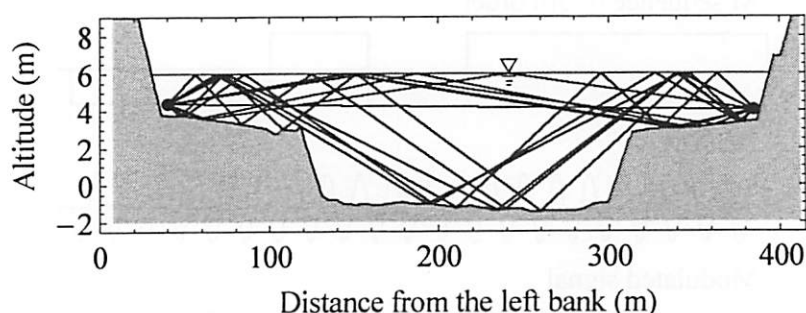


図-4 水位が高水数を超えた洪水時の太田川放水路における音線分布の例

2.5. FATS の特徴

従来の超音波流速計 (AVM) は信号処理技術が未熟だったため、水中雑音に弱く、洪水時には欠測となることが多かった。また、低水時には水深の制限により測定出来ない問題点があった。さらに、装置が大きく商用電源を必要とするため、持ち運びが困難で、スポット的な流量観測には使えなかった。新開発の河川音響トモグラフィシステム (FATS) は、以下のブレークスルーを有しており、従来の方法では連続流量観測が出来なかった感潮河川や浅い広幅河川でも流量計測を可能にしている。

表-1 河川音響トモグラフィシステム (FATS) のブレークスルー

疑似ランダム信号 (M 系列) 変調による S/N 比の飛躍的な改善	洪水時の水中雑音や高濁度による欠測の回避
GPS クロックを利用した音波の同時双方向発信と音波伝搬時間の高精度計測	断面平均流速の高精度計測
小型のブロードバンド送受波器の使用	低水時の水深制限の緩和、概ね水深 30cm まで測定可能
河川の横断面を覆う音線群を利用	流速分布に係る校正係数が不要

2.6. FATS の構成と主な仕様

図-5 に FATS の構成図を、表-2 に主な仕様を示す。横断距離が 100～2000 m の河川流を想定し、FATS では中心周波数 25 kHz または 30 kHz の広帯域トランスデューサーが使われている。M 系列で位相変調した音波は、GPS クロックに同期して、兩岸のトランスデューサーから同時に全方向に発射される。復調した受信波は中心周波数の 2 倍のサンプリング周波数で AD 変換し、送信時に使用した 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し、メモリーカードに記録する。また、処理結果は、携帯電話会社のインターネット回線を利用して送信する機能を有する。PC によるシステムの動作状況の確認と設定パラメーターの送信は Bluetooth によりワイヤレスで行うことができる。

写真-1 は可搬型 FATS の外観を示したものである。省電力に設計されているので、容量 4000 mAh のリポ電池を使用した場合、1 分間隔の計測でも 10 時間程度の連続運転が可能である。また、写真-2 に示すように、30 W 程度の太陽電池と 12 V バッテリーを使えば商用電源に頼ることなく、長期連続観測が可能である。

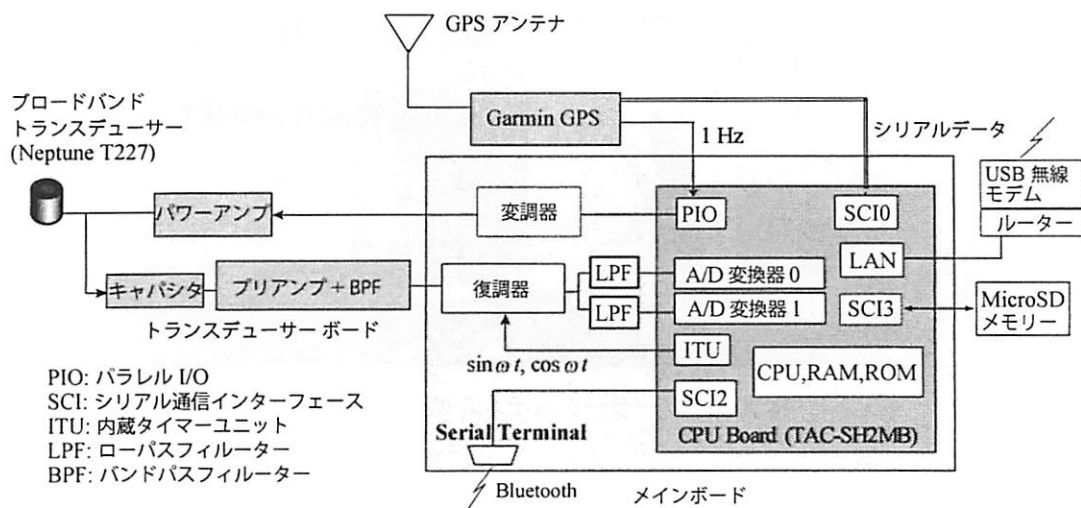


図-5 FATS のブロック図

表-2 FATS の主な仕様

送受波器の動作周波数	20~30 kHz
計測可能距離	0.1~2.0 km
送信音圧レベル	183 dB (re. 1 μ P at 1m)
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)
流速精度	測定値の 1 % $\pm$ 0.1 cm/s (音線長 500 m の場合)
流速分解能	5 cm/s (音線長 500 m の場合)
使用電源	本体: 12 V, 0.4 A (5 W) 音波発信: 12 V, 8.4 A (100 W)
装置重量	2 kg
装置寸法	本体: 34 cm $\times$ 25 cm $\times$ 17 cm 送受波器: ϕ 5cm $\times$ 5 cm

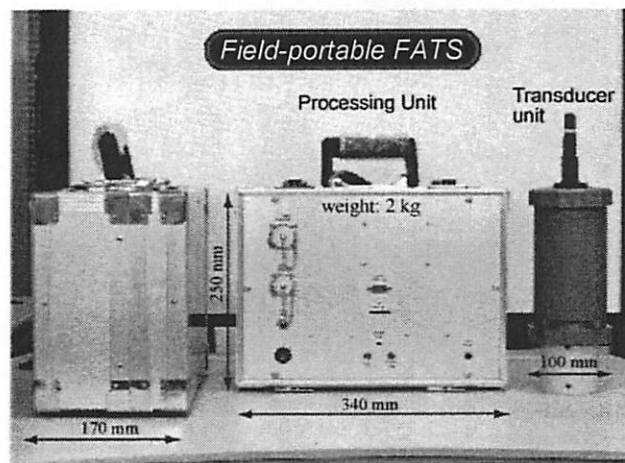


写真-1 可搬型 FATS の外観

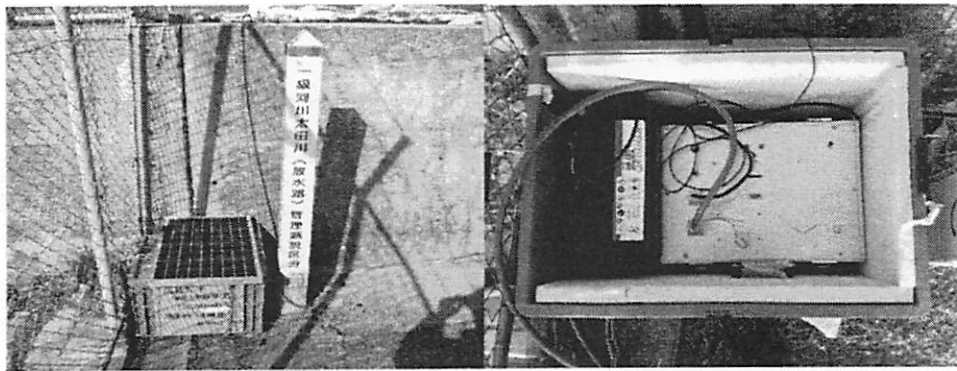


写真-2 ソーラーシステムを使った計測状況

3. 実地試験

3.1. 観測地点

図-6 に広島デルタを流れる太田川と観測地点を示す。太田川は河口から約 9 km 上流で放水路と旧太田川に分派しており、放水路側に祇園水門、旧太田川側に大芝水門が設置されている。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。矢口第一の流量が $400 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える出水時には、祇園水門は全開とされ、大芝水門で旧太田川（市内派川）への流量が調節されることになっている。

太田川の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。測定断面の位置は、太田川放水路に架かっている祇園大橋の直ぐ下流で、祇園水門から 246 m 下流である。観測地点は潮汐の影響が大きく、大潮期の潮差は 3 m 近くあり、潮汐 1 周期の間に塩分も 0 から 30 まで大きく変化する。測定地点での水路幅は約 120 m である。

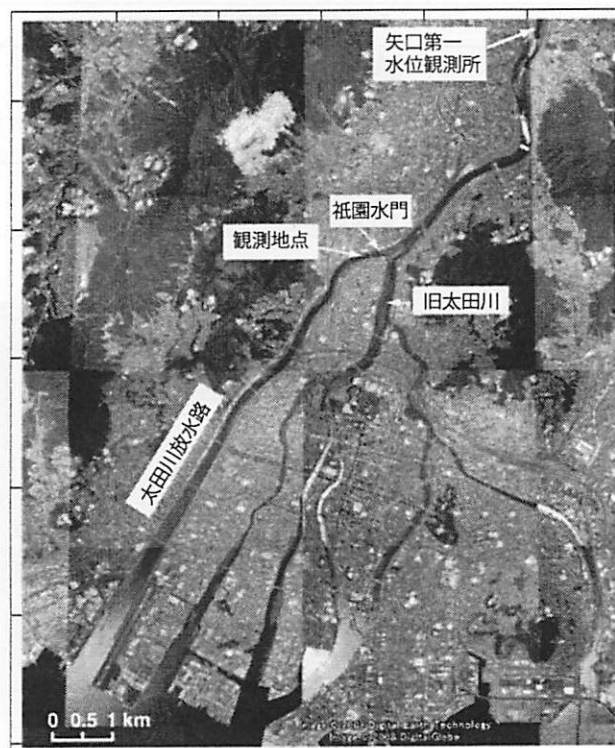


図-6 観測地点

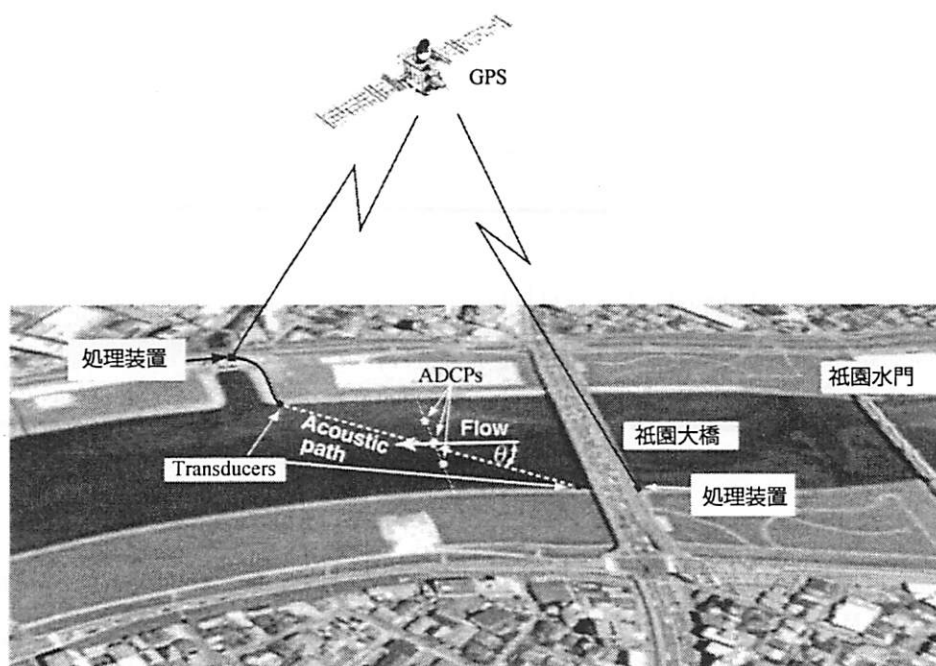


図-7 観測概要

3.2. 観測方法

FATSによる観測概要を図-7に示す。直径5 cmのトランスデューサー（中心周波数30 kHz）とプリアンプは塩ビ管に格納し、U字側溝を用いて低水路護岸河床上に設置した。洪水時における流木、転石などからトランスデューサーを保護するため、U字側溝前面は、超高分子量ポリエチレン(UHPE)板でその前面をカバーした。UHPEは水と音響インピーダンスが近いため、音波の通過に支障はなく、さらに耐衝撃性も優れている。

兩岸での超音波の送受信時間はGPSの原子時計を利用して正確に制御、測定されている。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している。FATSによる流量計測値の妥当性を検証するために、図-7中に示す測線上でADCP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（平常時）。1横断計測に約20分を要したので、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。ADCP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が、非定常性が強いと誤差を含むことになる。洪水時には移動観測は危険を伴うので、横断方向に等間隔に配置した3台のADCPで観測した。

ADCPはセンサーヘッド付近と境界付近の流速は測定不能である。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として線形補間した。

4. 太田川放水路における長期連続計測結果

4.1. 2009年の実証試験

洪水データを含んでいる2009年6月24日から8月30日にわたるFATSの測定結果を図-8(c), (d)に示す。図-8には、 $H-Q$ 式で評価した矢口第1観測所の流量（図-8(a)）と祇園水位（図-8(b)）の経日変化も合わせて示している。図-8(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

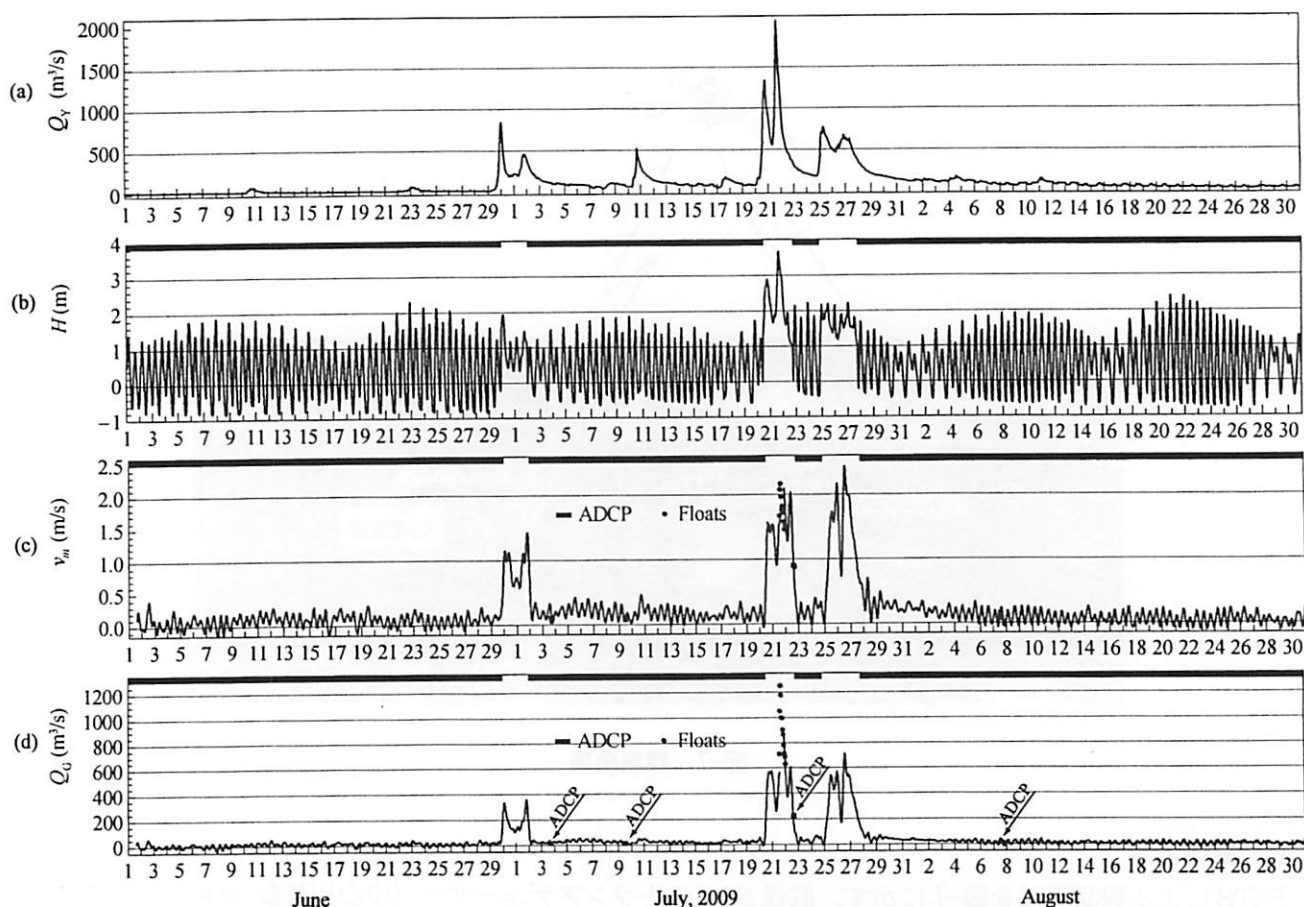


図-8 2009年の観測結果：(a) 矢口流量，(b) 祇園水位，(c) 祇園断面平均流速，(d) 祇園流量

門のみ開度 0.3 m，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-8 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 月 21 日の午後に観測された $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ である．図-8(b)に見られるように，河口から約 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-8(c)，(d)は，7 月 21 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，ADCP の測定値や浮子浮子測法のデータと良く一致しており，FATS の計測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ことから，最大 1 % 程度と見積もられる．

FATS のトランスデューサーは低水路護岸法尻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．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高水敷上の本堤防付近に設置する必要がある．欠測となった期間は水位が高水敷を超えていたので，流速を計測できたとしても，流量を正確に求めることはできなかったことになる．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，①高濃度の浮遊土砂による音波の減衰，②大きな水中雑音，③気泡²¹⁾である．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，低水路護岸法尻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，気泡も欠測の原因とは考えにくい．断定はできないが，洪水時の高濃度の浮遊砂による伝播損失やトランスデューサー上に堆積した土砂が欠測の原因として考えられる．

図-8(c)に示した FATS の断面平均流速には, ADCP と浮子測法の結果と比較してややズレがみられるが, これは計測位置が完全に一致していないことによるものである。すなわち, 計測位置の断面形の違いが原因である。

4.2. 2010 年の実証試験

2010 年における水位と流量の経日変化を図-9 にまとめて示す。5 月下旬, 6 月下旬, 7 月中旬に祇園水門が全開となった洪水が起こっている。特に, 7 月中旬の洪水では祇園の水位が高水敷を 2 m 程度上回った。FATS のデータには 2 つの欠測期間がみられるが, 6 月下旬の欠測はメモリーカードの不具合が原因である。7 月中旬の洪水ピーク時の欠測期間は, 2009 年と同様, 水位が高水敷を超えている期間にほぼ一致している。水位が高水敷を上回ると, 一部の音線は高水敷上伝播することになるが, 当然, これらの音線は低水路護岸法尻に設置したトランスデューサーでは受信できない。したがって, 大きな洪水に対しては高水敷上にトランスデューサーを設置しておかなければならない。また, 高濃度の浮遊砂は音波の伝播損失を大きくするため, 浮遊砂が障害になっていることも考えられる。今後, 搬送波の周波数を下げることにより音波の減衰

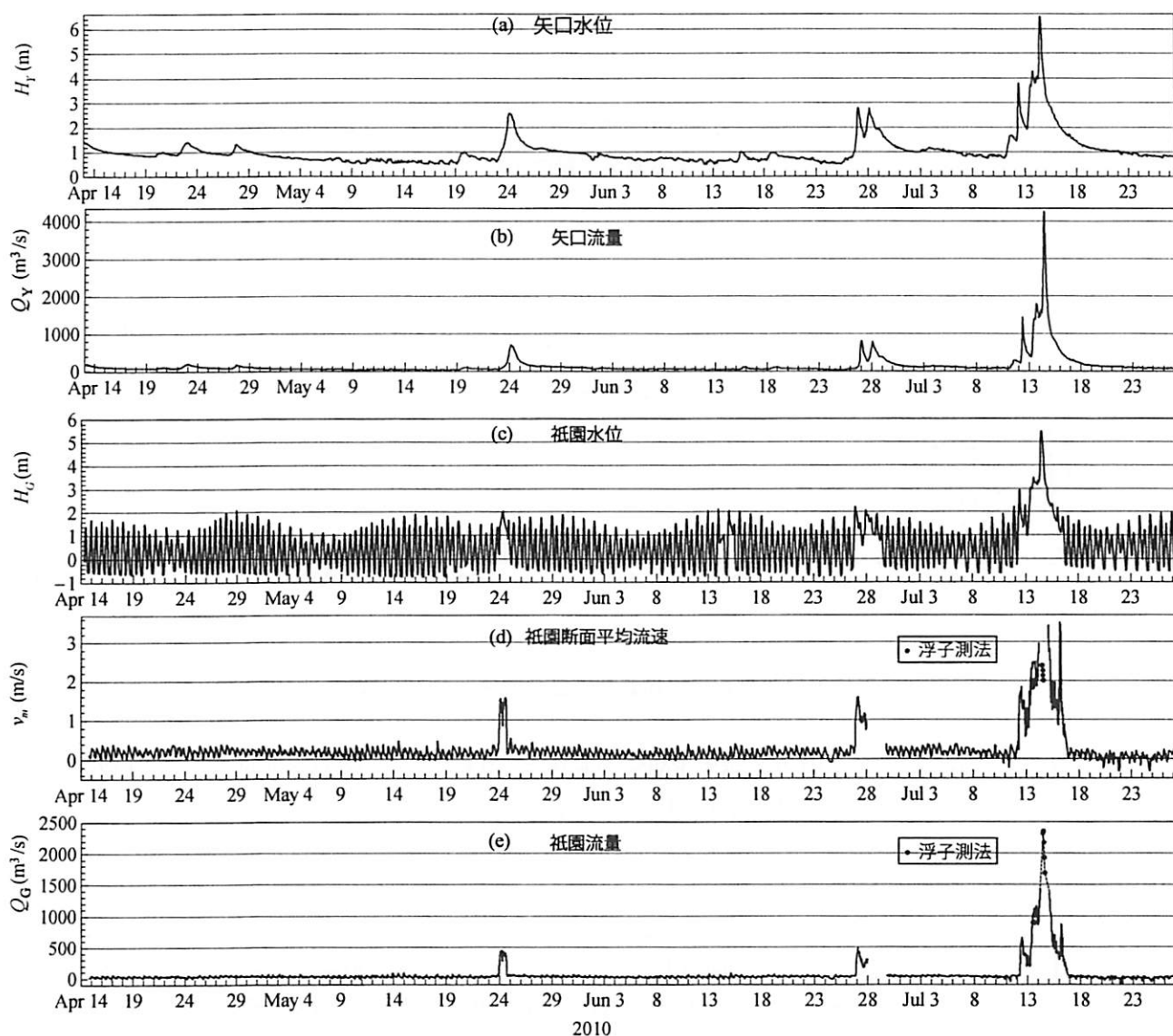


図-9 2010 年の観測結果 : (a) 矢口水位, (b) 矢口流量, (c) 祇園水位, (d) 祇園断面平均流速, (e) 祇園流量

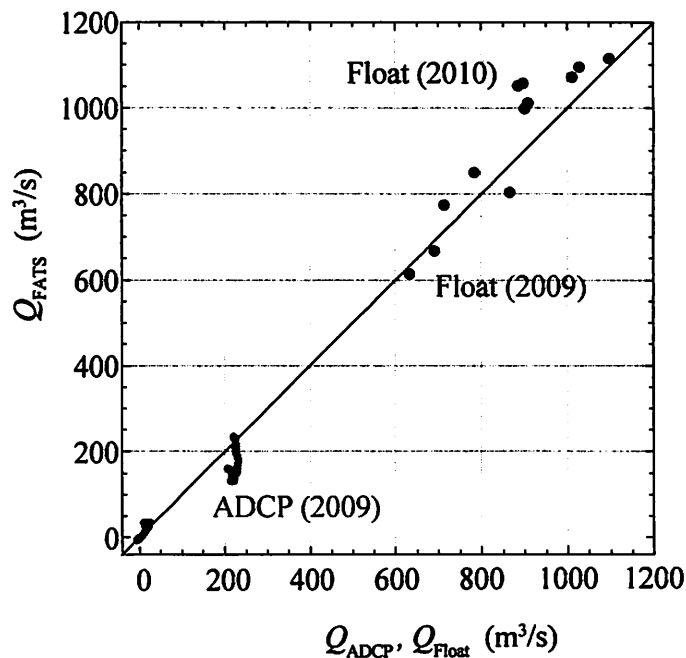


図-10 ADCP, 浮子測法と河川音響トモグラフィシステム (FATS) による測定流量の比較

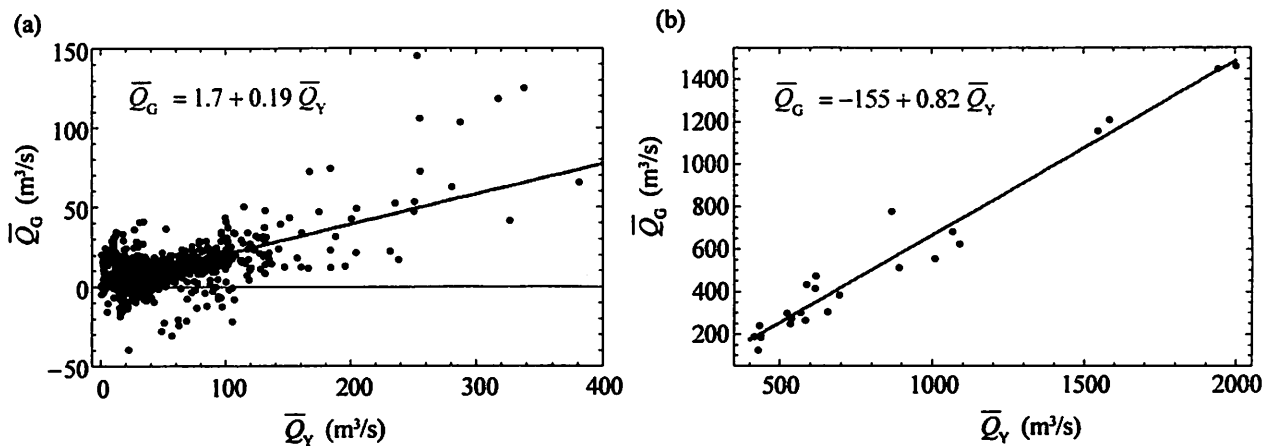


図-11 日平均矢口流量と日平均祇園流量の関係；(a) 平常時，(b) 洪水時

を軽減して実験する予定である。図-9 に示す FATS の流量は、計測できている洪水期間では、浮子観測の結果と良く一致している。点線部は浮子測法の結果を利用して内挿した部分である。

4.3. FATS 計測結果の検証

2009 年と 2010 年に行った放水路祇園地点における、FATS による測定流量 Q_{FATS} と ADCP、浮子測法による測定流量 Q_{ADCP} 、 Q_{Float} を比較した結果を図-10 に示す。図中には傾き 1 の直線が描かれている。図-10 をみると、データはほぼ傾き 1 の直線上に並んでおり、FATS 流量は低・平水時から洪水時まで、ADCP および浮子測法の結果と良く一致していることが分かる。流量 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 付近の ADCP との比較データのズレは、ADCP 計測の誤差に起因していると考えられる。すなわち、洪水時に ADCP を横断方向に移動させることは危険を伴うため、横断方向に等間隔で並べた 3 台の ADCP を祇園大橋から係留して流量を測定した。このため、高

精度な流量は計測できていないと考えられる（水位の減少期にもかかわらず、ADCP 流量はほぼ一定であった）。

4.4. 太田川放水路の分派（分流）率

太田川放水路の流量は様々な要因によって変動していると考えられるが、矢口流量、潮差、河口平均水位が主な影響因子としてあげられる。もちろん、祇園水門の操作が大きく影響していることは言うまでもない。平常時は潮流が卓越しているが、ここでは潮流成分を除いた日平均流量について、祇園水門の状態が異なる平常時と洪水時に分けて述べる。

図-11(a)は平常時における日平均した矢口流量 $\bar{Q}_v$ とFATSで測定された祇園流量 $\bar{Q}_g$ の関係を示したものである。図-11中の直線は最小2乗直線である。平常時、平均的には祇園流量と矢口流量の比は0.19で、設計分派比0.1より大きい。ただし後述するように、旧太田川との河川水の交換があるため、相関は高くない。決定係数は0.37であった。

次に祇園水門が全開となる洪水時の結果について述べる。図-11(b)は、洪水時における日平均した矢口流量 $\bar{Q}_v$ とFATSで測定された祇園流量 $\bar{Q}_g$ の関係を示したものである。祇園水門が全開となっているため、図-11(a)に示した平常時と異なり、相関は非常に高く、決定係数は0.96となった。矢口流量が分派点の総流量に等しければ、矢口流量の80%が放水路に流入していることになる。これは、太田川の計画高水流量の放水路への分派率(56%)よりかなり大きい。ただし、切片が0の回帰式を適用した場合、分派率は68%となった。洪水流量の大きさや河口平均水位によっても、分派率は変化していると考えられる。

水中音速は、主に水温と塩分によって決まる。FATSは正確な平均音速を測定しているので、流速と同時に、淡水環境なら正確な断面平均水温を求めることも出来る。汽水域では別途水温データを入手できれば断面平均塩分を、塩分データを入手できれば水温を推定できる。したがって、FATSを用いれば、汽水域の淡水流量を評価することも可能となる。

図-12は、FATSで測定された平常時の塩分と流量を水位とともに示したものである。大潮期（左図）と小潮期（右図）の1日間の経時変化を示している。流量は潮汐の影響を受けて周期的に変動しているが、この期間は逆流はみられなかった。大潮期の経時変化をみると、満潮より塩分のピークが遅れて発生していることがわかる。すなわち、満潮ではなく下げ潮期に塩分が最大になる特異な現象が発生している。一方、小潮期はこのような現象はみられず、満潮時に塩分は最大となっている。

大潮期の結果は、下げ潮期に祇園水門から高塩分水が放水路に流入していることを意味しているが、この高塩分水は、旧太田川から分派点を超えて遡上した塩水の一部であると考えられる。大芝水門が全開となっているために、塩水は放水路より旧太田川の方が遡上しやすい。小潮期では、塩水は分派点を超えて遡上できない、あるいは遡上してもその量はわずかであるので、下げ潮期に祇園水門から高塩分水が放水路に流入することはほとんどないため、下げ潮期に塩分の増加はみられない。

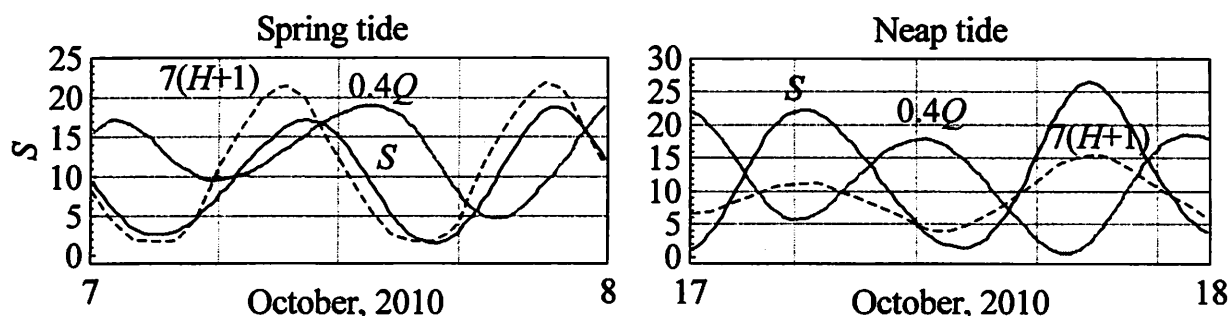


図-12 平常時における塩分（実線）と流量（グレー）、水位（破線）の経時変化（1日間）

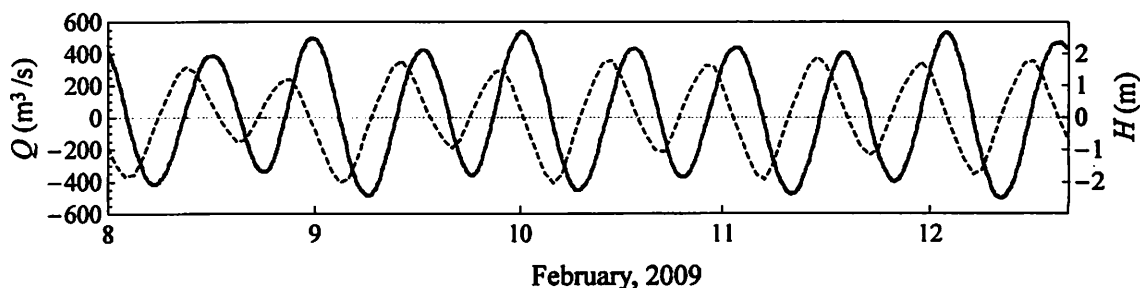


図-13 放水路河口部における流量観測結果：実線：流量，破線：水位

4.5. 河口部における潮流計測結果

2009年2月8日～12日の大潮期に，可搬型FATSを用いて放水路の河口部で潮流計測を行った．流量の計測結果を水位とともに図-13に示す．トランスデューサーユニットは小型軽量であり，それを護岸付近の河床上に置くだけなので設置作業は非常に簡単であった．

図-13に実線で示した潮流流量の振幅は， $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であり，これは祇園水門までの放水路内の水位変動を引き起こす貯留量変動から推定される結果と良く一致していた．流量変動と水位変動の位相差は $\pi/2$ ずれており，潮汐波が定在波の性質を示していることが確認できる．祇園に設置したFATSで得られた計測期間の流量の平均値は約 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ であったので，祇園水門から放水路に流入している流量は，河口部の潮流流量の振幅に比べると1桁以上小さいことになる．

一般に，河口部では船舶の航行や沿岸漁業のため，河川中央部に流速計を設置したりADCP等による横断観測を実施することは難しく，信頼性の高い流量データはほとんど存在していないと思われる．一般に，上流部で提供されている河川流量と河口部から流出している河川水の流量は異なっていると考えられ，沿岸環境を考える上でも河口部における河川流量のデータを蓄積することは重要であろう．

5. おわりに

太田川放水路の低水路護岸法尻に1対のトランスデューサーを固定した河川音響トモグラフィシステム（FATS）によって，感潮河川においても低水から洪水までの流量の長期連続観測が可能であることが確認できた．すなわち，最大3m程度の潮差と周期的な塩水の遡上があり，従来では流量の長期連続観測が不可能であった太田川放水路において，1対のトランスデューサーしか持たないFATSによって断面平均流速・流量が測定可能であることが，ADCP横断観測との比較で確かめられた．また，大量の浮遊砂が流下する洪水時においても，FATSは水位が高水敷を超えない範囲では問題なく流量の連続計測に成功し，浮子測法の結果と良く一致していた．

本稿には示していないが，従来では連続流量計測が困難である，浅い広幅河川におけるFATSの実証試験を，昨年からの礫床河川である江の川（三次市尾関山）で実施中である．これまで行った実験では横断距離300mの測線で，平均水深が0.6m程度となる低水時でさえ問題なく流量を計測できている．さらに，ダムのフラッシュ放流流量の連続計測にも成功している．

以上のように，新たに開発に成功したFATSは優れた性能を有し，河川流量観測の新時代を切り開くものである．今後はこの新しい流量観測技術を確立・普及させるため，洪水を含む様々な水理条件の下で，超音波の周波数やトランスデューサーの設置方法（堤防法尻に固定，水面下に係留），河床材料（砂泥，礫）の違いが，FATSの適用性に与える影響を明らかにする予定である．係留方式は洪水時のスポット観測を想定したものであるが，音線長が大きく変化する可能性があるため，水温を同時に計測して正確な音線長を自動的に算出できるように現在改良を進めている．

引用文献

- 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 (2003), 非接触型流速計測法の開発, 土木技術資料, 45(2), 36-44.
- 2) Laenen, A., and W. Smith (1983), Acoustic systems for the measurement of streamflow, *U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper*, 2213, 26 pp.
- 3) Sloat, J. V., and W. S. Gain (1995), 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*, 95-4230, 26 pp.
- 4) Simpson, M. R., and R. Bland (2000), Methods for accurate estimation of net discharge in a tidal channel, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25(4), 437-445.
- 5) Ruhl, C. A., and J. B. DeRose (2004), Investigation of hydroacoustic flow-monitoring alternatives at the Sacramento River at Freeport, California: Results of the 2002-2004 pilot study, *U.S. Geological Survey, Scientific-Investigations Report*, 2004-5172, 18 pp.
- 6) 中川一, 小野正人, 小田将広, 西島真也 (2006), 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, 50, 709-714.
- 7) Le Coz, J., G. Pierrefeu, and A. Paquier (2008), Evaluation of river discharges monitored by a fixed side-looking Doppler profiler, *Water Resour. Res.*, 44(W00D09), doi:10.1029/2008WR006967.
- 8) Hoitink, A. J. F., F. A. Buschman, and B. Vermeulen (2009), Continuous measurements of discharge from a horizontal acoustic Doppler current profiler in a tidal river, *Water Resour. Res.*, 45(W11406), doi:10.1029/2009WR007791.
- 9) 二瓶泰雄, 木水啓 (2007), 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, 63(4), 295-310.
- 10) 原田靖生, 二瓶泰雄, 北山秀飛, 高崎忠勝 (2008), 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, 52, 943-948.
- 11) 岡田将治, 森彰彦, 海野修司, 昆敏之, 山田正 (2005), 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, 11, 243-248.
- 12) 川西澄, M. Razaz, 渡辺聡, 金子新 (2009), 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, 53, 1015-1020.
- 13) 川西澄, 渡辺聡, 金子新, and 阿部徹 (2009), 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, 15, 489-494.
- 14) Kawanisi, K., A. Kaneko, S. Nigo, M. Soltani, and M. F. Maghrebi (2010), New acoustic system for continuous measurement of river discharge and water temperature, *Water Science and Engineering*, 3(1), 47-55.
- 15) Kawanisi, K., M. Razaz, A. Kaneko, and S. Watanabe (2010), Long-term measurement of stream flow and salinity in a tidal river by the use of the fluvial acoustic tomography system, *J. Hydrology*, 380(1-2), 74-81, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.10.024.
- 16) Kawanisi, K., M. Razaz, and S. Watanabe (2010), An innovative methodology/technology for streamflow observation, paper presented at 5th International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2010), Braunschweig, Germany, 2010/9/9.
- 17) Thorne, P. D., C. E. Vincent, P. J. Hardcastle, S. Rehman, and N. Pearson (1991), Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices, *Marine Geology*, 98, 7-16.
- 18) Sheng, J., and A. E. Hay (1988), An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous

suspensions of sand, *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(2), 598-610.

- 19) Simon, M. K., J. K. Omura, and B. K. Levitt (1985), *Spread Spectrum Communications Handbook*, 423 pp., McGraw-Hill, New York.
- 20) Zheng, H., H. Yamaoka, N. Gohda, H. Noguchi, and A. Kaneko (1998), Design of the acoustic tomography system for velocity measurement with an application to the coastal sea, *J. Acoust. Soc. Japan (E)*, 19, 199-210.
- 21) (株) 水文環境：超音波流速計の洪水観測への応用 (2001), 河川整備基金助成事業報告書, 62 pp.