

河川音響トモグラフィーによる礫床河川の流量モニタリング

広島大学 学生会員 池田 優雄

広島大学 正会員 川西 澄

国土交通省中国地方整備局三次河川国道事務所 斉藤 一正

国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所 兒子 真也

1. はじめに

河川計画では洪水防御が第一の目的であり、水系周辺の降雨により河道に流出する流量(計画高水)以下の流量を安全に流化させるよう河道計画が策定される。また、河川の適正利用、正常機能維持や環境保全の観点からは、正常流量の確保が河川計画のもう一つの目的となる。これらの計画プロセスにおいては、過去の降雨実績や水需要に基づく流出解析から流量を算出するが、その解析モデルやパラメータの妥当性検証、あるいは精度向上には、信頼できる河川流量データが必須である。

したがって、より高精度かつ連続的に河川流量を測定できる技術の確立は喫緊の課題である。従来の流量計測手法である浮子測法、ADCP、プロペラ式流速計を用いた流量計測といった流量計測手法では一時的にしか流量を測ることが出来ない。そこで河川音響トモグラフィー(Fluvial Acoustic Tomography System 以下:FATS)を用いた新たな計測法を検証する。

川西らは、FATS による感潮域等での流量の連続観測に成功し、FATS の実用河川での流量計測が可能であることを確認している。しかし、礫床河川においては、超音波が礫により乱反射し伝播時間の正確な計測ができない可能性がある。そこで、本報では FATS を礫床河川である広島県三次市江の川に適用し、プロペラ式流速計、ADCP と比較することによって、FATS の礫床河川での適用性について検討する。

2. FATの概要

本装置は大別すると、内部ホストコンピュータ、音波送信部、音波受信部、タイミング回路から構成されている。音波送受信の計測スケジュールの全ては、内部ホストコンピュータにより管理されている。電源は12Vのバッテリーを使用している。音波の送受信には英国ネプチューン社製のブロードバンド型の小型トランスデューサを使用している。音波の中心周波数は25KHz、消費電力は60Wで、超音波はトランスデューサ全面から半球状に発射される。本装置は完全に自動計測出来るようになっているが、計測前に外部コン

ピュータから計測に必要な諸条件を与えた初期条件ファイルを送信しなければならない。また、計測データは計測後に内部ホストコンピュータから抜き取ることができる。

初期設定ファイルで設定するパラメータは、計測開始時間や計測終了時間、相手局数、各局の位置座標データ、M系列の次数等である。

3. FATSの計測方法

水中に設置した2台1組の音響局間を結ぶ測線方向に流れのある場合、流れ方向とその逆方向に伝播する超音波では音響局間の伝播速度が異なり、各音響局で得られる伝播時間に差が生じる。FATS では、この伝播時間差を利用して音響局間の平均流速を求める。多数の音響局で対象海域を取り囲めば、多数の音響局ペアの間の平均流速を求めることが出来る。そして、このようにして得られる複数の伝播時間差データをインバース解析すれば、測線が被う対象海域の流速場を求めることが出来る。

図-1 に、FATS の両音響局間の水中での設置の様子を示す。上流側 A、下流側 B に音響局を設置し、1分間隔で両音響局から同時に超音波を発射し、超音波の伝播時間の測定を行った。

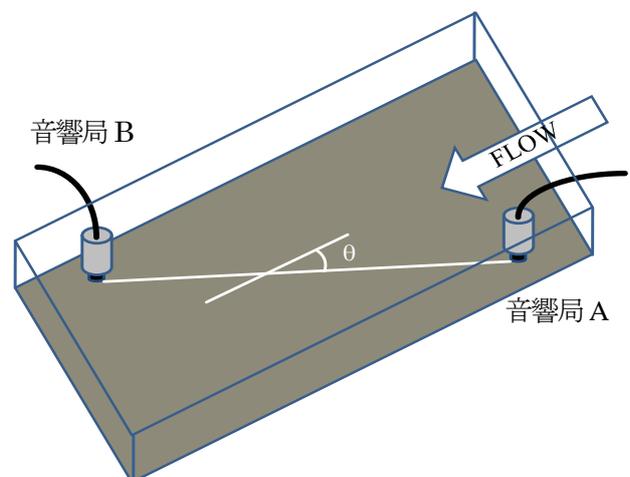


図-1 両音響局間の断面図

上流側から下流側に伝播する超音波の伝播時間 t_1 、下流側から上流側の伝播する超音波の伝播時間 t_2 は以下のように表わすことが出来る。

$$t_1 = \frac{R}{c_0 + u_0} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{R}{c_0 - u_0} \quad (2)$$

FATS は送信信号に M 系列(Maximum Length Linear Shift Register Sequence)を使用し、受信信号と送信信号に使用した M 系列の相互相関を取れば超音波が到着した時刻に鋭いピークが現れるため、到着信号を高精度で検出することが出来る。これにより周囲雑音レベルの高い環境下で音波の伝播実験を行う場合でも、M 系列を用いて相関処理を施せば信号とノイズの比(SN比)を大幅に改善できる。以上のような相関処理を施すことにより、音波の伝播損失のない理想的な場合に対し、N 次の M 系列の場合で 2^{N-1} だけ受信信号のパワー表記の SN 比が増加することになる。

N=10 の場合で、SN 比の増加は 1023 倍となり、SN 比が飛躍的に改善されることが分かる。ちなみに、この SN 比の増加は dB に換算すると $10\log_{10}(1023) = 30.1\text{dB}$ と見積もられる。受信波に対して、送信に使用した M 系列と相関を取ることで、ノイズと大差ないレベルの受信データに対してさえも SN 比が飛躍的に増大される様子を図-2 に示す。

(1), (2)から音線に沿う平均音速 C_0 、平均流速 u_0 は

$$C_0 = \frac{R}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \approx \frac{R}{t_m} \quad (3)$$

$$u_0 = \frac{R}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \approx \frac{C_0^2}{2R} \Delta t \quad (4)$$

双方向超音波伝播実験を行えば、両音響局間で生じる伝播時間差から音線に沿う平均流速を求めることが出来る。

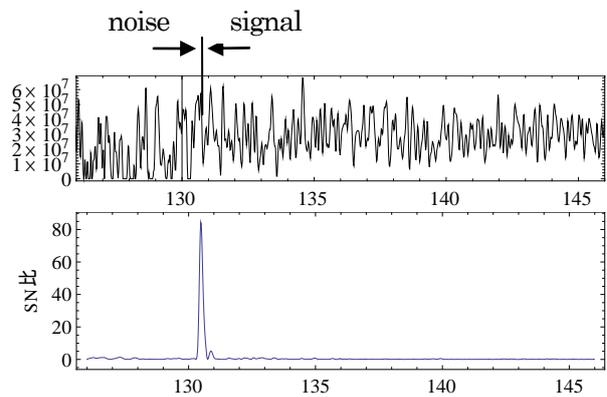


図-2 M 系列で位相変調した送信波の受信波形例

FATS の音響局から発射された超音波は、水面と河床を反射境界とする一種の導波管内を伝わるように伝播するが、礫床河川における FATS を用いた流量観測では、河床の礫により超音波が乱反射してしまう可能性がある。そこで、礫床河川である広島県三次市の江の川において、FAT システムの観測を行った。図-3 に観測を行った広島県三次市の江の川の位置図を表し、図-4 は FAT システムの設置状況を表す。



図-3 広島県三次市を流れる江の川

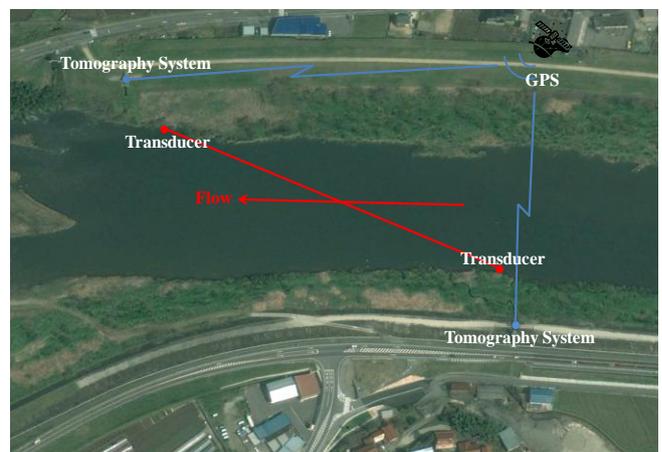


図-4 FAT システムの設置状況

図-5 に、両音響局間の測量断面図を示す。
 図中の赤点は音響局を示し、両音響局間の距離は約 294m である。

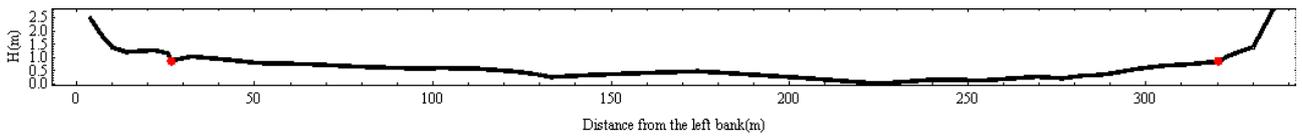


図-5 両音響局間の断面図

4. 測定結果

図-2 に示したように、広島県三次市尾関山水位観測所の下流において、2010年10月18日から10月29日の期間に行った流量の測定結果、2011年1月21日から2月3日の期間に行った流量の測定結果と、2010年10月18日から10月29日の期間に行った水温の測定結果について述べる。

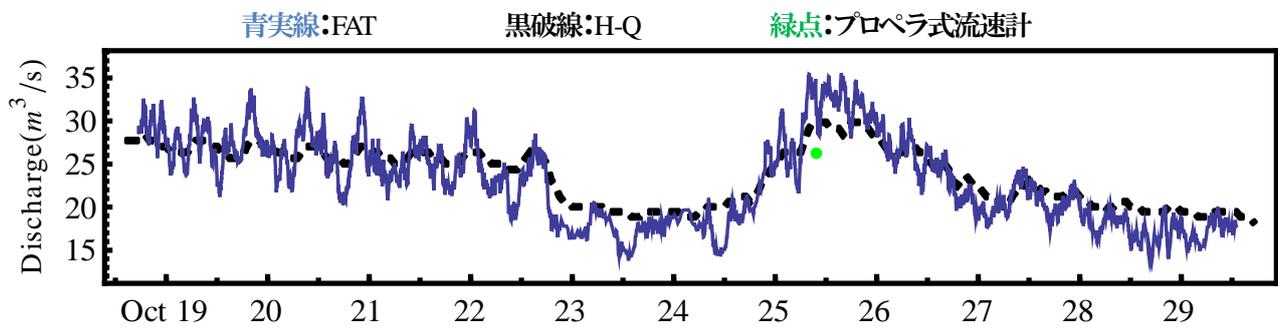


図-6(a) 2010年10月18日から29日までの期間の流量の経時変化

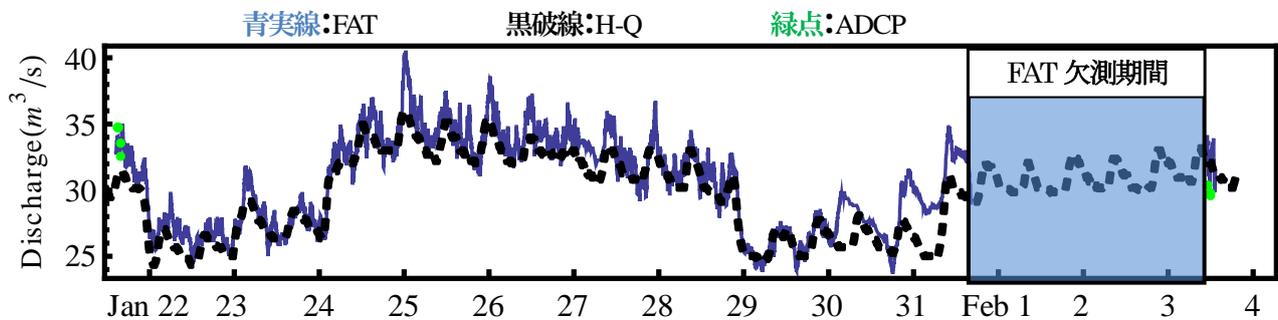


図-6(b) 2011年1月21日から2月3日までの期間の流量の経時変化

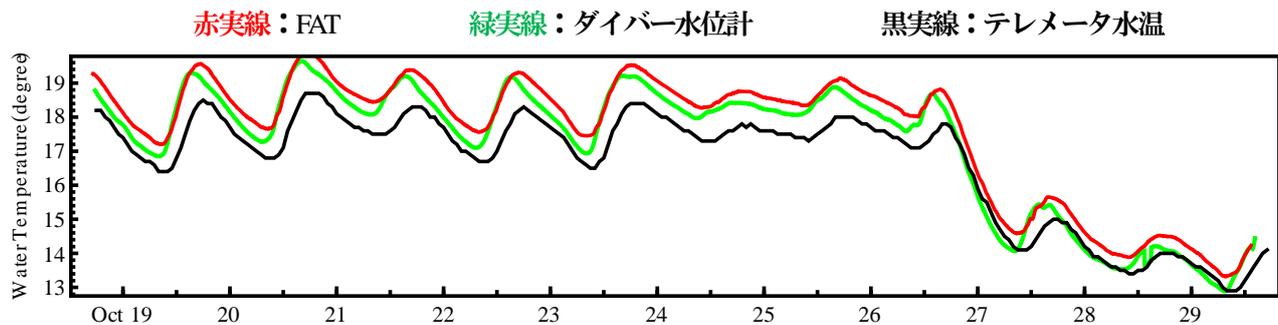


図-7 水温の経時変化

図-6(a)に2010年10月18日から10月29日の流量の経時変化を示す。ここで、黒破線はH-Qから求めた流量、青実線はFATSによる流量、緑点はプロペラ式流速計による流量であり、図-6(b)は、2011年1月21日から2月3日の期間に行った流量測定結果である。黒破線はH-Qから求めた流量、青実線はFATSによる流量、緑点はADCPによる流量を表わす。FATSで内部ホストコンピュータに問題が生じて、欠測してしまうこともあったが、FATSによる流量とH-Qから求めた流量はよく一致しており、礫床河川においても流量・水温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。

図-6(a), (b)ともに半日周期程度の流量変動がみられるが、これは広島県三次市の江の川水系にある発電用のダム取水・放流によるものであると思われる。図-6(b)を見ると、ADCPの流量計測結果にばらつきがあり、ADCPの流量のばらつきとFATSの流量変動がよく一致している。つまり、FATSを用いれば、連続的な流量を正確に計測することが出来ることがわかる。

2010年10月18日から10月29日の期間に行った水温の計測結果を図-7に表す。ここで、黒実線はテレメータ水温、赤実線はFATSによって計測された水温、緑実線はダイバー水位計による水温を表わしている。ここで、音速 $C(\text{m/s})$ は水温 $T(^{\circ}\text{C})$ 、塩分 S 、深度 $D(\text{m})$ によって変化し、室内実験に基づき多くの経験式が提案されているが、今回は最も簡単な経験式に属するMedwinによって提案された式を用いた。

図-7の水温の経時変化を見ても、FATSによる水温、ダイバー水位計による水温がよく一致し、礫床河川においてもFATSを用いて流速・流量とともに、高い精度で連続的に水温を計測出来る。

5. 結論

FATSは江の川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計測可能である。

FATSを用いれば、水深が30cm程度の浅い場合でさえ、正確に流量・水温を連続的に計測することが出来る。

以上のように、新たに開発したFATS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、複断面内や分・合流部の流速分布も推定できると考えられ、FATS計測の発展性は非常に大きい。

6. 謝辞

広島大学大学院工学研究科川西澄准教授、国土交通省中国地方整備局の斉藤一正氏、荒谷建設コンサルタントには、江の川の流量観測で協力を得た。ここに記して敬意を表す。

参考文献

川西澄, Mahdi Razaz, 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分派流量と断面平均塩分の長期連続モニタリング, 水工学論文集, Vol54, 2010

川西澄, 渡辺聡, 金子新, 阿部徹: 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, 第15巻, 2009.6

水文・水資源学会 研究グループ, 河川流量観測の新時代, 2010.9

Kawanishi, K., Razaz, M., Kaneko, A. and Watanabe, S., 2010. 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), 74-81.