

音響トモグラフィー法による河口域における淡水流量の測定

Measurement of Freshwater Discharge in an Estuary by Acoustic Tomography

川西 澄¹・Mahdi RAZAZ²・金子 新³・阿部 徹⁴

Kiyosi KAWANISI, Mahdi RAZAZ, Arata KANEKO and Toru ABE

The freshwater discharge is an important hydrological quantity on coastal planning, management, and environment conservation. In order to monitor the discharge in real time, an acoustic velocity meter (AVM) has been developed and deployed at a tidal estuary. The AVM installed at a shallow tidal river, where water depth and salinity change significantly, successfully measured the cross-sectional average velocity and discharge in a spring tide. In addition, the mean salinity was measured from the sound speed data of the AVM. The freshwater discharge was deduced from the discharge and salinity data.

1. はじめに

河口・沿岸域の諸問題に対処するために、淡水流量の連続モニタリング技術の確立は喫緊の課題である。しかしながら、感潮域では $H-Q$ 法が適用できないため、現在のところ感潮河川の流量データはほとんど存在しない。本研究は、著者らが音響トモグラフィーの高度な音響処理技術（金子ら, 2003）を用いて開発した、次世代超音波流速計による流量と塩分の同時測定によって、淡水流量の連続モニタリングを試みたものである。

新たに開発した超音波流速計は従来の超音波流速計と同様、上下流方向への音波の伝播時間差から流速を求めるものであるが、本流速計は、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、2) 符号化された疑似ランダム信号（M 系列信号）で位相変調した音波の送受信による SN 比の飛躍的改善、を達成したものである。流量を求めるためには、流速の断面平均値が必要となるが、広幅河川では音波が反射や屈折しながら、断面内をほぼ覆うように伝播するため、底面付近に置いた 1 対の送受波器だけで断面平均値が測定可能であると考えられる。

本流速計では、流速と同時に上下流方向への音波の平均伝播時間から音速が求まる。音速は塩分、水温、水深の関数であるが、水深が小さい河口域では水深の影響は無視できる。したがって、水温変動に比べて塩分変動が圧倒的に大きい、水温が別途測定されていれば、得ら

れた音速から塩分を推定することが出来る。このように、本流速計を用いて流量と塩分の同時測定が実現できることから、淡水流量を連続的に把握することが可能である。

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。

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。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（川西ら, 2008）。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。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。

音速は、水温、塩分、圧力の関数であり、Medwin

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専攻
2 学生会員		広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
3 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専攻
4 正 会 員		国土交通省太田川河川事務所所長

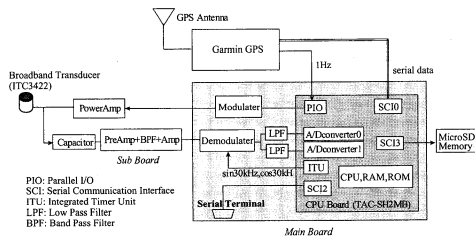


図-1 流速計の回路ブロック図

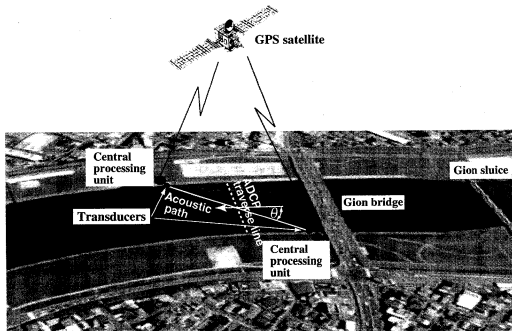


図-2 測定概要

表-1 流速計の主な仕様

送受波器の動作周波数 (kHz)	30
復調波のサンプリング周波数 (kHz)	60
計測可能距離 (km)	0.1~0.5
送信音圧レベル (dB re. 1μPa 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 μs (長期安定度: < 1 × 10 ⁻¹³ / sec)
使用電源	本体: 12 V, 0.5 A (6W) 音波発信: 24V, 4.2 A (100W)
装置重量 (バッテリーを含む)	10kg (空中重載)
装置寸法	本体: 30cm × 20cm × 20cm 送受波器: φ5cm × 5cm

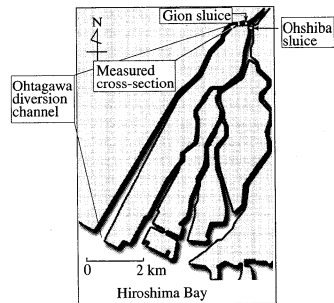


図-3 観測地点

(1975) によれば、水中音速 c は

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 2.9 \times 10^{-4}T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D \quad (6)$$

と表される。ここで、 T は水温 (°C)、 S は塩分、 D は水深 (m) である。式(6)を使うと、距離誤差が塩分に与える影響は

$$\delta S = \frac{c}{(1.34 - 0.01T)} \frac{\delta L}{L} \quad (7)$$

で見積もられる。ここで、 $\delta L/L$ は音線距離の相対誤差である。式(7)から、水中音速が大きいため、音線距離の相対誤差が小さくても大きな塩分誤差が発生することがわかる。たとえば、音線距離の相対誤差がわずか 0.1 % でも、水温 25°C のもとで塩分の誤差は約 1.4 となる。

3. 次世代超音波流速計の概要

図-1 に超音波流速計 (以下 AVM と呼ぶ) の回路ブロック図を、主な仕様を表-1 に示す。2 台 1 組で構成される AVM は、GPS 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。超音波パルスの送りが完了後速やかに、トランスデューサーは送信回路から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信波の受信時刻を正確に判定することは困難である。そこで、AVM の送信波は 10 次の M 系列で位相変調され

ており、受信波の高い SN 比が確保されている。この位相変調技術と GPS 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、AVM 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 30kHz 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 60kHz 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。

4. 測定方法

図-2 に測定の概要を、図-3 に観測地点の位置を示す。図-3 に示すように、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ている。測定断面の位置は祇園水門から 246m 下流である。平常時は大芝水門は全開、祇園水門は 3 門の内、右岸側の 1 門のみが開度 0.3m 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。

AVM による測定値の妥当性を検証するため、ADCP による流速分布の横断観測と CTD による塩分と水温分布の測定をあわせて行った。トランスデューサーは低水

路護岸の河床上約30cmの高さに設置し、音波の送受信間隔は1分とした。測定期間は2007年9月9日の17時30分から10日の12時30分で、大潮期の初めである。測定地点では、大潮期の水位変化幅は3m弱あり、平水時の干潮時には護岸付近は干出する。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189mであった。水温と塩分の鉛直分布は、流速測定断面の直上流に架かっている祇園大橋からCTDを降ろして測定した。測定箇所は、低水路左岸から26.5m, 58.4m, 100.7mの3箇所である。

図-2中に破線で示す測線上で浮体に取り付けたADCPを、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10m, 1点あたりの測定時間は70s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分かかった。従って、測定中に水位、流速ともある程度変化していることに注意する必要がある。ADCPのセンサーヘッドの深さは7cm, 不感知距離5cm, 層厚は10cmとした。

5. AVM のデータ処理

両岸でMicroSDカードに記録された相関波形を解析することにより、音波の平均伝播時間と伝播時間差が求められ、式(2)と(3)を使って音速と流速の断面平均値が得られる。AVMで求められる流速は音線に沿った流速の平均値である。従って、1対の送受波器だけで断面平均流速を測定するためには、音線が横断面を覆うようになっていなければならない。後述するように、河口域では音波は屈折し、水面と河床で反射しながら伝わるため、横断面を覆うような音線が存在する。

音線に沿った平均流速 u_m は、 $\cos \theta$ で除して断面平均流速 V_{AVM} に変換される。 θ は図-2に示す主流方向と音線との夾角である。

断面平均流速と同時に、式(6)を用いると、平均水温とAVMで測定された断面平均音速から、断面平均塩分が推定できる。

河床形状の測量結果と水位 h から求まる、音線に沿った断面積 $A(h)$ と、音線に沿った平均流速 u_m から、次式で流量 Q_{AVM} が求められる。

$$Q_{AVM} = A(h) u_m \tan \theta \quad (8)$$

6. 結果と考察

(1) 流速の横断面分布

図-4にADCPで測定した下げ潮時の流速の横断面分布を示す。流速は下流方向を正としている。ADCPの反射強度から求めた河床形状が、測定時刻によりやや異なっているのは、ADCPが完全に同じ測線上を通過していない

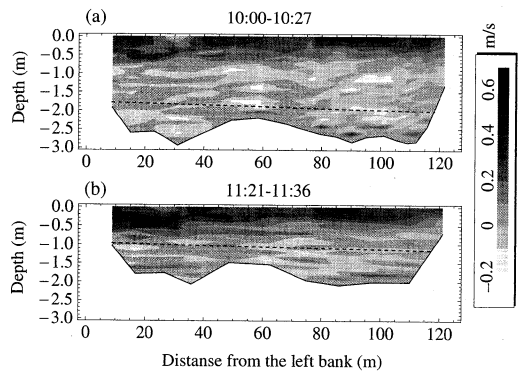


図-4 流速の横断面内分布

ためである。下げ潮期にもかかわらず、深さ1m付近より下層には弱いながら上流に向かう流れが存在しており、河川水は主に1m以浅の上層を通過して下流している。このように、塩水楔が進入しているために、流速分布は一樣流体の流速分布とは大きく異なっている。

図中の破線は、AVMのトランスデューサーを結んだ直線をADCPの測定断面に投影したものである。音線がこの直線のみであれば、AVMによる測定流速は断面平均流速とは大きく異なったものとなるが、実際には横断面全体を覆うような音線が存在するため、一対のトランスデューサーのみを有するAVMでも断面平均流速の測定が可能となる。

(2) 音線シミュレーション

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、以下の常微分方程式を解いて音波経路が求まる(Dushaw・Colosi, 1998)。

$$\frac{d\phi}{dr} = \frac{\partial c}{\partial r} \frac{1}{c} \tan \phi - \frac{\partial c}{\partial z} \frac{1}{c} \quad (8a)$$

$$\frac{dz}{dr} = \tan \phi \quad (8b)$$

$$\frac{dt}{dr} = \frac{\sec \phi}{c} \quad (8c)$$

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、水底でも入射捕角が10度以下であれば、ほぼ全反射する。

図-5に式(8)を積分して求めた音線を音速場とともに示す。9月10日9:00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。一方、干潮に近い10日12:00の結果を見ると、左岸側のトランスデューサーが音速の鉛直勾配の非常に大きな表層に位置しているため、左岸側では底層を通過する音線は存在していない。

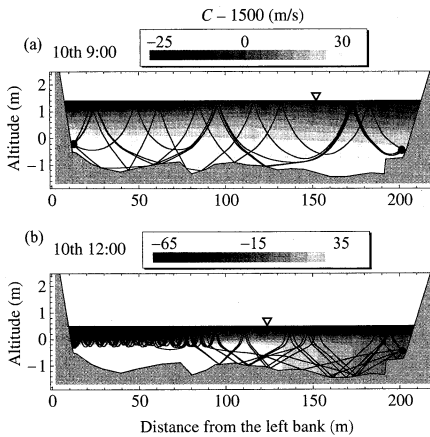


図-5 音速分布と音線解析の結果

各音線の伝播時間と伝播距離を図-6に示す。伝播時間、伝播距離とも9:00より12:00の方が大きくなっている。伝播時間の増加は、図-5(b)に示したように、干潮に近い12:00は塩分の減少にともない音速が小さくなっていることに加え、音速勾配の大きな表層内を伝播するとき、水面で多数の反射を繰り返し、伝播距離も長くなっていることが原因である。伝播距離とトランスデューサー間の直線距離の差を距離誤差 δL と考えると、相対誤差 $\delta L/L$ は9:00と12:00でそれぞれ、0.5%と1%程度となる。前述したように、この程度の相対誤差は流速に関しては問題にならないが、塩分を推定する際には無視できない大きさであるので、音線シミュレーションを行って伝播距離の増加量を見積もっておく必要がある。

(3) 平均流速と平均塩分の測定結果

図-7(a)にAVMによって測定した断面平均流速 $V_{AVM} = u_m / \cos \theta$ の経時変化を祇園水位観測所の水位WLとともに示す。残念ながら、干潮付近ではトランスデューサーが干出したため欠測となっている。10次のM系列信号で送信波を位相変調した結果、十分高い受信信号のSN比が得られた。平均流速は水位変化と異なり、正弦曲線からかなり歪んだ経時変化を示している。さらに、満潮時でも平均流速は0とならず、上流方向に流れている。ADCPによって測定された11:30における流速の横断面分布図-4(b)をみると、トランスデューサー設置高さの平均流速は負であるが、同時刻でのAVMの測定流速は正となっており、上層の下流方向流速を反映したものとになっていることがわかる。

AVMで測定された平均音速から推定した平均塩分の経時変化を図-7(b)に示す。ただし、水温の変化は小さかったので、水温はCTDで測定した平均値である27°Cに固定している。

平均塩分の増減は図-7(a)の平均流速の変化と良く対

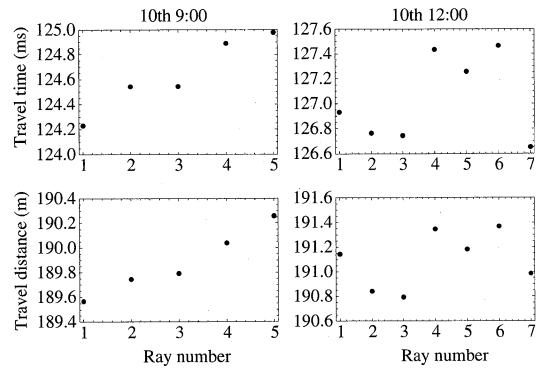


図-6 各音線の伝播時間と伝播距離

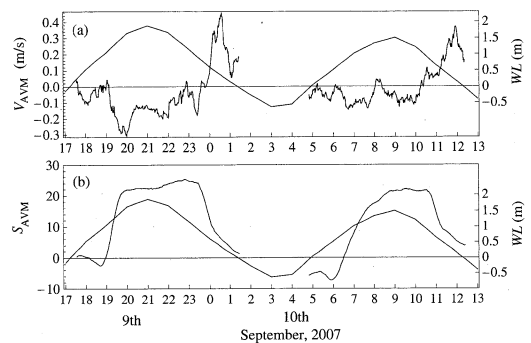


図-7 断面平均流速(a)と断面平均塩分(b)の経時変化

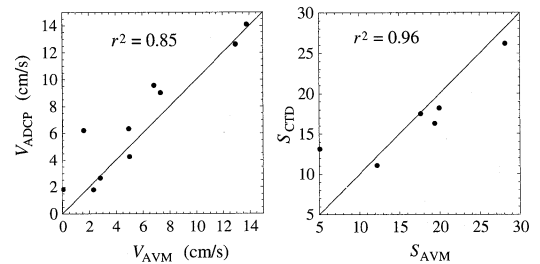


図-8 AVMの測定結果とADCP, CTDの測定結果の比較

応しており、塩水楔の挙動をうまく捕らえていると考えられる。ただし、水位が低いときは塩分が負となっており、平均塩分の推定値は明らかに過小評価となってしまう。塩分が過小評価となった主原因は、前述したように(図-6)、音波の伝播距離の増加である。式(7)から塩分の誤差を見積もると、 $\delta S \approx -14$ となる。

図-8に、AVMの測定値を、ADCPによる断面平均流速とCTDによる断面平均塩分と比較した結果を示す。ただし、2008年2月12日に行った追加観測の結果を加えてある。両者の測定結果はよく一致しており、AVMによる測定値の妥当性が確かめられる。AVMの平均塩分がCTDによる平均塩分よりかなり小さいデータがある

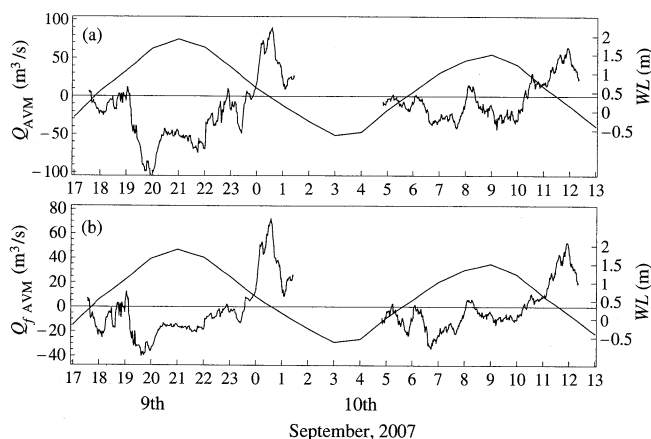


図-9 流量(a)と淡水流量(b)の経時変化

が、これは上述したように、音波の伝播距離が伸びたため、距離補正を行えば一致の程度はよくなる。

(4) 流量と淡水流量の測定結果

図-9(a)に Q_{AVM} の経時変化を示す。トランスデューサーが干出したため欠測となっている期間を線形内挿した上で求めた潮汐平均の流量は、 $-8.4\text{m}^3/\text{s}$ となり、上流方向へ流れている結果となった。

Q_{AVM} に $(S_0 - S_{AVM})/S_0$ を乗じて淡水流量 $Q_{f AVM}$ を求めた。ここで、 S_0 は広島湾の平均塩分で 32.5 とした。本論文では、横断面内における流速と塩分の断面平均値からの偏差の共分散は無視していることに注意する必要がある。また上述したように、水位が低く $S < 0$ となってしまう期間は $S = 0$ と置いている。欠測期間を線形内挿した上で求めた潮汐平均の淡水流量は、 $5.84\text{m}^3/\text{s}$ である。観測期間の太田川流量は約 $60\text{m}^3/\text{s}$ であったので、太田川流量の分派率は約 10% だったことになる。この分派率は太田川放水路の平常時分派率の設定値に等しく、概ね妥当な結果であると判断される。

7. 結論

トモグラフィ技術を用いて開発した超音波流速計を用いて、河口域における淡水流量の連続測定を試みた。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 開発した次世代超音波流速計により、河口域の流速と音速の断面平均値が連続測定可能である。

- (2) 平均音速から求められる平均塩分と測定流速を組み合わせてることによって、流量のみならず、淡水流量が推定可能である。

- (3) 10次の M 系列信号で位相変調した結果、十分高い SN 比が得られたことから、高雑音・高濁度となる出水時でも流量の測定は可能であると考えられる。

今後は、出水期を含む長期連続測定を行い、開発した AVM の性能確認を行うとともに、分派流量の長期変動を明らかにして行く予定である。

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、深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 金子 新・江田憲彰・鄭紅・高野忠・山岡治彦 (2003) : 沿岸音響トモグラフィ、海の研究、第12巻、1号、pp.1-19.
- 川西 澄・大庭尚史・金子 新・水野雅光 (2008) : 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、52巻、pp.371-375.
- Dushaw, B. D. and J. A. Colosi (1998) : Ray Tracing for Ocean Acoustic Tomography, Technical Memorandum, Applied Physics Laboratory, University of Washington, TM 3-98, 31pp.
- Medwin, H. (1975) : Speed of sound in water : A simple equation for realistic parameters, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.58, p.1318.