

広島大学 学生会員 ○石川 和彦
 広島大学 正会員 川西 澄
 広島大学 学生会員 矢野 順貴
 広島大学 非会員 宮田 一希

1.はじめに

河川流量は河川計画、河川環境、水循環を考える上で最も重要な水文量の一つであるため、安全、正確かつ確実な河川流量連続観測技術の確立は喫緊の課題である。現在主流の河川流量計測手法として H-Q 法(水位流量曲線式)があるが、非定常性の強い感潮河川や洪水流において正確な流量を求めることは困難であることが知られている。

他に自動計測可能な手法として AVM や H-ADCP が挙げられるが塩水遡上のある感潮域、浅い広幅河川の流量計測は困難である。その主な理由は、塩水遡上のある感潮河川においては音波が屈折すること、密度流により流速分布を推定することが困難であること、浅い広幅河川においては音線が水面や河床で反射するため、計測できる範囲が制限されていることである。また、洪水流では水中の浮遊土砂により超音波が散乱、吸収により減衰することで測定できる範囲が減少し、精度が低下することが報告されている¹⁻³⁾。

著者らが開発した河川音響トモグラフィシステム(Fluvial Acoustic Tomography System,以下 FATS と呼ぶ)は感潮河川、浅く広い礫床河川においても河川流量の連続測定が可能であることが示されているが^{4,6)}。その中で浮遊土砂が超音波計測に影響を与える事が確認されている。

本研究では山地河川である江の川において、音響理論より求めた音波減衰量と FATS を用いて実測した音波減衰量を比較、検討した結果を報告する。

2.観測概要

広島県三次市を流れる江の川水系尾関山水質観測所付近において FATS による流量の連続観測と同時に雑音強度の計測を行った。江の川は中国地方最大の一級河川であり、流域面積は 3,900 km² である。観測



図-1 観測地点

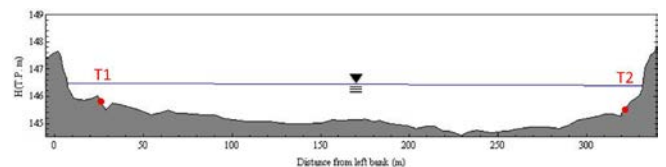


図-2 計測区間横断面図

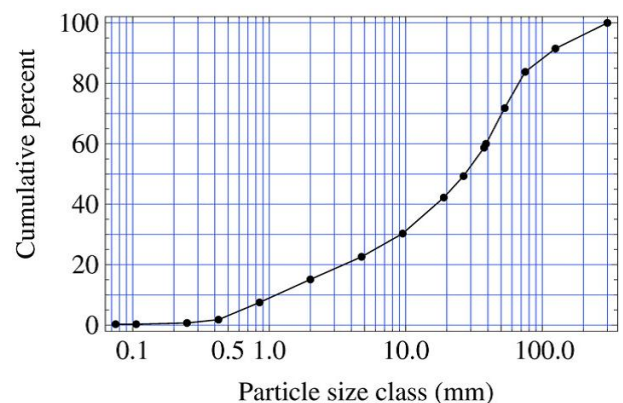


図-3 河床材料粒度分布

地点は江の川本流と西城川、馬洗川の合流点より約 1.9 km 下流に設けており、合流点より 500m 下流にある尾関山水位流量観測所における年平均流量は約 73 m³/s である。

図-1 に観測地点を示す。2011 年 10 月 31 日より尾

関山水位・量観測所から約 1.5km 下流の兩岸に FATS を固定し、流量の連続観測を開始した。低水路幅は約 115m、観測地点付近の平均河床勾配は 1/900 である。上流左岸と下流右岸に中心周波数 25kHz の広帯域トランスデューサーを設置しており、10 次の M 系列による位相変調を行った超音波パルスを 1 分間隔で双方向に発振し、断面平均流速と信号対雑音比 (Signal-to-Noise Ratio, 以下 SN 比) の連続測定を行った。図-2 に測定区間の横断面図を示す。T1-T2 間の距離 295.8m に対して年平均流量に対応する水深は左岸、右岸それぞれ 0.65, 0.80m であり、計測断面のアスペクト比が非常に大きい事が分かる。

図-3 に観測地付近の河床材料の粒度分布を示す。D₅₀ は 36mm、D₉₀ は 103mm でありシルトや粘土などの細粒分はほとんど存在しない。

浮遊土砂による影響の評価を行うため、出水時に観測地点より 1.2 km 上流である祝橋にて橋上の中央部からバケツを用いて表層の採水を行った。採取した水はガラス繊維濾紙法から SS を、レーザー回折式粒度分布計から粒度分布を測定した。また、採水と同時に ADCP による横断面内の流速分布の計測と濁度計による濁度の計測を行った。

3. 結果と考察

2012 年 7 月 5 日の約 450 m³/s 程度の流量と 2012 年 10 月 17 日に生じた約 100 m³/s 時の採水から SS と粒径分布を分析した。図-4 にそれぞれの粒径加積曲線と頻度分布を示す。図-3, 4 より流出した土砂のほとんどが 100 μm 以下の成分で占められており、河床材料中に存在せず山地斜面より供給されたウォッシュロード成分であることが分かる。

水中における音波の減衰は R.J.Urick⁷⁾, S.D.Richards⁸⁾により提案された

$$I = I_0 e^{-2\alpha r} \quad (1)$$

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_s + \alpha_v \quad (2)$$

で求められる。ここで I は受信音圧、 I_0 は基準音圧であり、 $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_v$ はそれぞれ水、土砂による散乱、吸収による減衰係数、 r は伝播距離である。水による減衰係数は以下の式で表される。

$$\alpha_w = (10 \log e^2) \left(\frac{A_1 f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \right) \quad (3)$$

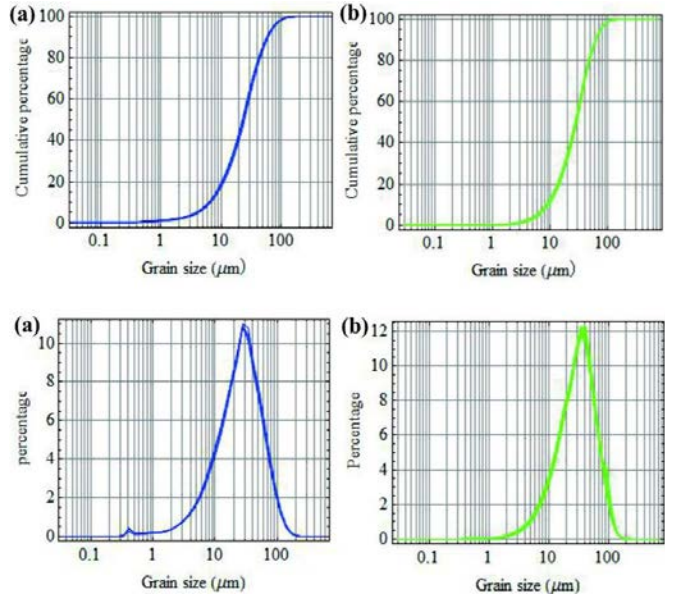


図-4 粒径加積曲線(上)と頻度分布(下)

(a) 450 m³/s, (b) 100 m³/s の流量

A_i は水温、 P_i は圧力、 f_i は緩和周波数であり、 $i=1$ は純水、 $i=2$ は硫酸マグネシウムイオン、 $i=3$ はホウ酸に関する係数である。また、土砂による吸収係数と散乱係数は以下の式で表される。

$$\alpha_s = (10 \log e^2) \left(\frac{\varepsilon K_\alpha \chi^4}{\langle a_s \rangle (1 + \xi \chi^2 + \frac{4}{3} K_\alpha \chi)} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_v = (10 \log e^2) \left(\frac{\varepsilon k (\sigma - 1)^2}{2} \left[\frac{s}{s^2 + (\sigma + \delta)^2} \right] \right) \quad (5)$$

ここで、式中の K_α, δ, s はそれぞれ

$$\chi = k \langle a_s \rangle, K_\alpha = \frac{1}{6} \left(\gamma_k^2 + \frac{\gamma_\rho^2}{3} \right)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{9}{2 \beta \langle a_s \rangle} \right], s = \frac{9}{4 \beta \langle a_s \rangle} \left[1 + \frac{1}{\beta \langle a_s \rangle} \right]$$

であり、 $\beta = \sqrt{\omega/2\nu}$ である。

ここで、 ε は浮遊土砂濃度、 a_s は平均粒径、 k は波数、 γ_k, γ_ρ はそれぞれ周囲流体と土砂の圧縮率と密度の比である。また、 ω は角周波数、 ν は動粘性係数である。

(1) 式の両辺対数を取り、10 倍すると以下の式

$$10 \log I = 10 \log I_0 - 20 \alpha r \log e \quad (6)$$

となる。(6) 式は信号の減衰量であるため、両辺に水中雑音の変動量 $10 \log I_n$ を引くと以下の式になる。

$$10 \log \frac{I}{I_n} = 10 \log I_0 - 20 \alpha r \log e - 10 \log I_n \quad (7)$$

ここで FATS より推定された SN 比は(7)式の左辺 $10 \log I/I_n$ である。したがって、FATS より得られた SN 比と水中の浮遊土砂による減衰項 $20 \alpha r \log e$ は線形関係にあると推定される。

表-1 に得られた SS と両データの平均粒径、また計測時の水温と各代表値から推定した $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_v$ とそこから求められた総減衰量 I_{loss} , FATS で計測した SN 比を示す。 $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_v$ の各損失項を比較すると、散乱損失 α_s は α_w, α_v と比較して 10^6 も小さく、ウォッシュロードに対しては浮遊土砂の粘性吸収項が支配的であることが分かる。また図-5 に浮遊土砂による損失量と FATS より得られた SN 比の相関図を示す。得られた点と近似曲線の決定係数は 0.99 と高く、両データは線形関係にあり、(7)式と合致することが確認された。

FATS の計測可能な SN 比は約 15dB であるので、粒度分布が一定であると仮定すると SS が 125 mg/L 以上で FATS の計測に支障が生じると考えられる。

4.結論

従来の計測手法では困難な出水時において FATS を用いた流量観測を行うと同時に、洪水流に含まれる浮遊土砂による超音波の減衰量と実測した信号対雑音比を比較するため、約 $450 \text{ m}^3/\text{s}$ と $100 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量時に超音波計測と採水を行った。

採水と河床材料の粒度分布を比較すると、出水時に河川を流れる浮遊土砂は河床材料中にほとんど存在しない細粒分が主成分であることから、散乱損失は無視できると考えられ、吸収損失が支配的である。

FATS により実測された SN 比と採水から求めた SS より推定された超音波減衰量の間には線形関係にあることが確認され、FATS による流量計測が困難になる浮遊土砂濃度は 125 mg/L 程度であると推定された。

本研究の採水では祝橋中央部の表層採水結果であるため、今後鉛直、横断方向の濃度分布を計測することでより精度の高い検証を行う予定である。

参考文献

1) Sloat, J.V. and Gain, W. S.: Acoustic systems for the measurement of streamflow, U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper, 2213, 26 pp., 1983
2) 二瓶泰雄, 木水 啓: H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新

SS (mg/L)	16.5	34	37	38	38	49.87
α_w (dB/km)	0.214	0.219	0.229	0.215	0.23	0.198
α_s (dB/km) $\times 10^6$	1.41	2.92	3.21	3.24	3.3	1.5
α_v (dB/km)	0.439	0.906	0.989	1.012	1.016	1.321
α (dB/km)	0.653	1.125	1.217	1.227	1.245	1.52
$20 \alpha r \log e$ (dB)	1.68	2.89	3.13	3.15	3.2	3.91
SNR_{FATS} (dB)	24.1	20.1	22.3	23.2	20.7	21.4
SS (mg/L)	59.5	59.46	64.1	77.76	80.27	
α_w (dB/km)	0.216	0.197	0.198	0.197	0.197	
α_s (dB/km) $\times 10^6$	4.23	1.79	1.89	2.22	2.41	
α_v (dB/km)	1.318	1.575	1.698	2.06	2.126	
α (dB/km)	1.534	1.773	1.896	2.257	2.324	
$20 \alpha r \log e$ (dB)	3.94	4.56	4.87	5.8	5.98	
SNR_{FATS} (dB)	21	20.1	21	14.1	18	

表-1 浮遊土砂濃度と計算結果

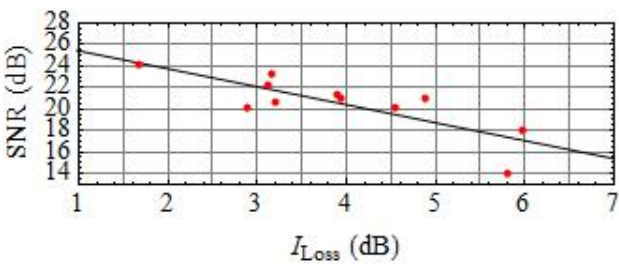


図-5 音波減衰量と SN 比の相関図

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, No.4, pp.295-310, 2007
3) 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, 2007
4) 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河川流量の長期モニタリング, 河川技術論文集, Vol. 15, pp.489-494, 2009.
5) Kawanisi, K., Razaz, M., Kaneko, A, and Watanabe, S., Long-term measurement of streamflow and salinity in a tidal river by the use of the fluvial acoustic tomography system, Journal of Hydrology., 380(1-2), 74-81, 2010
6) Kawanisi, K., Razaz, M., Ishikawa, K., Yano, J. and Soltaniasl., M., Continuous measurement of flow rate in a shallow gravel-bed river by a new acoustic system, Water Resources Research, vol.48, W05547, pp.10, 2012
7) R.J.Urick: 水中音響の原理, 共立出版株式会社, 1978
8) S.D.Richards, A.D.Heathershaw, P.D.Thorne: The effect of suspended matter on sound attenuation in seawater, Journal of acoustic society America, 1447-1450