

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

DEVELOPMENT OF DISCHARGE MEASUREMENT TECHNIQUE COMBINED WITH MEASUREMENT OF TRANSVERSE-AVERAGED FLOW VELOCITY AND NUMERICAL SIMULATION OF CROSS-SECTIONAL VELOCITY DISTRIBUTION, AND ITS FIELD VERIFICATION AT A LARGE RIVER

中川一¹・小野正人²・小田将広³・西島真也⁴

Hajime NAKAGAWA, Masato ONO, Masahiro ODA, and Shin-ya NISHIJIMA

¹正会員 工博 京都大学教授 防災研究所流域災害研究センター (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

²国土交通省 関東地方整備局 利根川下流河川事務所 広域水管理課 (〒287-8510 千葉県佐原市佐原イ4149)

³正会員 博 (工) JFEアドバンテック株式会社 河川事業部 (〒663-8202 兵庫県西宮市高畑町3-48)

⁴JFEアドバンテック株式会社 河川事業部 (〒663-8202 兵庫県西宮市高畑町3-48)

The river discharge is one of principal and significant hydrological quantities on river planning, management, and environmental conservation. In order to perform a highly accurate measurement of discharge, the authors have developed techniques for estimating cross-sectional average flow velocity in conjunction with a hydroacoustical measurement of local velocity and a numerical simulation of velocity distribution. The newly developed discharge measurement system “ATENAS” was installed at the Tone River, and verified its performance at the river 500m in width. The obtained accuracy was comparable with or better than that of an acoustic Doppler current profiler. By using the ATENAS, the discharge from the reverse flow to 4,000m³/s was measured continuously and stably, while the discharge estimation by floats revealed its instability during the flood. In the case of high volume of discharge, the current profiler underestimated the flow velocity, which was considered to be caused by sediment motion on the riverbed.

Key Words : large river, discharge, velocity, distribution, continuous measurement, high accuracy

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下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、現実に流下している流量を観測し、それに対応する降雨量データ等を関連付けて解析する以外に方法はない。したがって、洪水であれ低水であれ、防災や水利用、河川環境保全という様々な側面において、河川の流量を

把握することは非常に重要である。

現状の流量観測手法としては、浮子観測や精密流観などで測定されたスポット的な流量から水位流量曲線を予め作成し、観測水位を流量に換算する方法が広く採用されている¹⁾。しかし、この方法には様々な問題点や精度向上の必要性が指摘されており²⁾、それに代わる流量(及び流速)観測技術も提案されてきているが、置き換わるほどの精度・信頼性はまだ実証されていない。

このように流量データの重要性に比べてその測定技術が未成熟な状況に鑑み、著者らは、広幅河川において出水時、高濁度時でも流量を高精度かつ連続して測定することを目的として、川幅横断方向平均流速測定技術と数値シミュレーションによる流速分布推測を組み合わせた新たな流量測定技術を開発し、利根川下流域に実機測定システムを設置して、広幅河川におけるその観測性能を

様々な観点から検証してきた。

本稿ではそれらの結果を述べ、新技術を搭載した ATENAS (Advanced TEchnology of Numerical simulation of velocity distribution and hydroAcousticS) 流量測定システムによって、低水から洪水まで従来技術と同程度以上の精度で流量の連続測定が可能となったことを示す。

2. 現状の流量観測技術の課題と開発した新技術

(1) 現状の流量観測技術とその課題

a) 水位流量曲線による流量評価の問題点

水位流量曲線は水位と流量の関係が一義的であることを前提とするが、実河川では緩勾配、潮汐、堰操作、植生などの影響を受けて、水位上昇時と下降時でループを描くなど、一義的な関係が成り立たない場合が多い。

b) スポット流量観測の問題点

スポット的な流量観測では、ある範囲の流水断面*i*内の局所的な流速 v_i を測定し、更正係数 k_i を乗じてその断面内の平均流速に換算し、面積 A_i を掛けて、それらの総和として流量 Q を求める。

$$Q = \sum_i k_i V_i A_i \quad (1)$$

ここで、流速については、例えば洪水時の浮子観測では、並列螺旋流等の局所的な流れや橋脚の影響などから、その安定性、信頼性に疑問が呈されている²⁾。浮子の代替手法として電波、超音波、ビデオカメラ等を用いた表面流速測定技術が開発されたが、風雨の影響や夜間・低流速には適用が困難であり、測定環境の制約を受けやすい問題が残されている。

更正係数については、暫定値¹⁾が与えられているものの観測場所での実際の流速分布に必ずしも適合するわけではなく、精度上の問題が残っている。超過洪水のみならず洪水など発生頻度の低い流況に対しては、適正な更正係数が得られていないのが現状である。

実際に、感潮域でかつ場所によっては深掘れのある河床形状を持つなど水理的に複雑な利根川下流域での出水時の浮子観測では、図-1に示すように観測所間で最大1,000m³/s程度も流量が異なり、また観測値の不安定性も認められている。

なお、更正係数を不要とする手法としてドップラー効果を利用した流速プロファイラーの曳航観測があるが、スポット的な観測であって実用上連続観測できない点や高流速下での曳航が困難であるなどの限界がある。また、水平設置型流速プロファイラーの観測例も報告されている³⁾が、測定不可領域の流速推定や適用河川幅の制約、高濁度時の測定性などの課題が指摘されている。

c) 課題の整理

以上のことから、流量測定における課題は、以下のよう整理される。

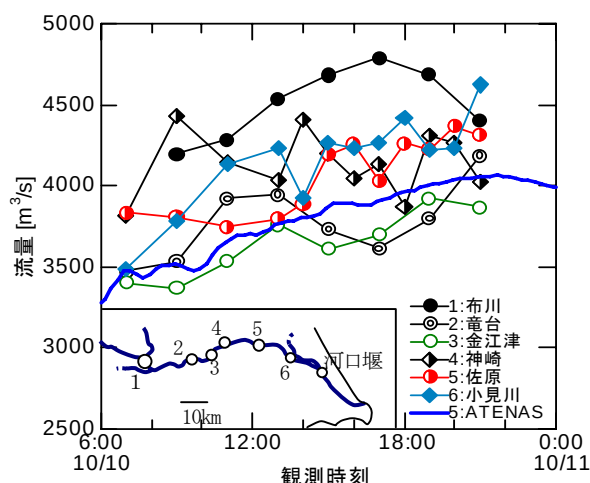


図-1 2004年台風22号出水時の利根川下流域浮子観測結果

(i) 測定環境の影響を受けずに、局所的な流速を高精度かつ連続して測定すること。

(ii) 観測状況ごとの流速分布を考慮した適正な更正係数を決定すること。

これら両課題を解決する技術を組み合わせることで流量の高精度連続測定が可能になると考えられる。

(2) ATENAS流量測定システムの新技术の概要と特長

前節で述べた課題を解決するため、著者らは大河川においても河川環境の影響を受けずに流速を連続して正確に測定する技術、及び高精度な更正係数を得る技術を柱とした技術開発を行ってきた。

a) 大河川流速測定技術

流速測定において局所的な流れの乱れや外部要因の影響をできるだけ小さくするには、より広い範囲の平均流速を得ることが望ましい。そこで、河川兩岸の水中に超音波送受波器を設置して超音波を川幅方向伝播させ、流れに沿う方向の伝播時間と流れに逆らう方向の伝播時間の差から川幅横断の線平均流速を測定する超音波測法^{1), 4)}を採用した。往復の伝播時間を用いるので、水中音速を変化させる水温や塩分濃度の影響が測定システムに原理的に含まれない点も本法の特長である。

本流速測定法は1970年代から実用化されてきたが、100m超の幅広河川や洪水時などの濁度上昇時に超音波の減衰による欠測等の問題があった⁵⁾。超音波減衰の主要因である水による吸収や浮遊物質による散乱は周波数が低いほど生じにくくなる⁶⁾ため、従来の100～200kHz超音波に代わり、大出力(2kW)の28kHz超音波を導入した。これにより、水中での吸収減衰は1000m程度の伝播距離であってもほぼ無視できる。また、例えば浮遊砂の粒径を20μmと仮定すれば、同SS濃度における散乱減衰係数は、200kHz超音波のその約1/3に低下する⁷⁾。

その一方、低周波数化により超音波の波長が長くなると、伝播時間(超音波受信タイミング)評価における一波長分の誤検出が流速に大きな影響を与えるため、単に

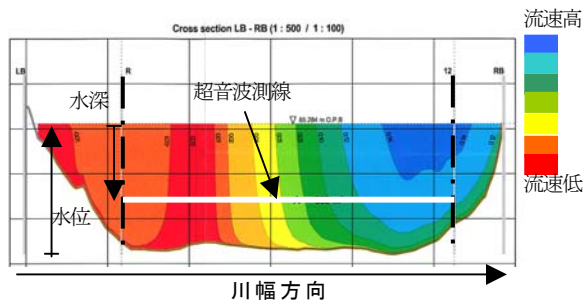


図-2 SIMK校正法で得られる河川断面流速分布

ある閾値を振幅が超えた時点をもって伝播時間を決定する方法では、測定値に大きな誤差が含まれてしまうことがある。このために、受信した超音波波形をデジタル化し、波形内の極大、極小点を追跡して伝播時間を求める独自の信号処理アルゴリズムを開発し、この結果、低周波数超音波の実使用が可能となった。

b) 流速分布を考慮した更正係数決定技術

更正係数は流速分布を考慮して決定する必要があるが、あらゆる流況についての実測データを揃えることは困難である。このため、観測位置において想定される様々な流況に対して、数値シミュレーションにより流速分布を計算し、更正係数を決定する手法を導入した。以後、本手法をSIMK校正法⁹⁾と呼ぶ。

SIMK校正法では、適切な数値モデルを用いて観測場所を含む上下流の河道をモデル化し非圧縮性流体についてのReynolds方程式を解いて、測定地点の鉛直断面内の流速分布を推定する。数値シミュレーションでは河川構造に応じた解析メッシュ設定の自由度が高く、河床の複雑な形状を再現するのに適している有限要素法を用いている。図-2に得られる断面流速分布の例を示す。この流速分布から全断面平均流速と超音波測線上の平均流速との比として更正係数を算出する。

これまでの結果⁹⁾から、ある流水断面に対しSIMK解析による流速絶対値が実測値と異なっても断面に垂直な流速成分分布はほぼ相似形が得られ、流速を無次元化した更正係数はSIMK解析により3%程度の精度で決定できることが確認できている。換言すれば、数値シミュレーションで得られた流速の絶対値ではなく、流速の相対的な分布のみを利用していることがSIMK校正法の特長である。

流量の変化と共に水位が変化すると断面内における超音波測線の水深方向位置が相対的に変化するため、更正係数も変化する。そこで、様々な水位における解析を実施し、水位 w と鉛直方向測線位置（水深） d の関数 $k(d, w)$ として更正係数を求めている。

このように、数値シミュレーションによる推定流速分布に基づき更正係数を決定することで、あらゆる流況に対して流速分布を実測せずに適切な更正係数を定めることが可能となった。また、流量計設置後の流量調整が不要となり、設置直後からの流量出力が可能となる。

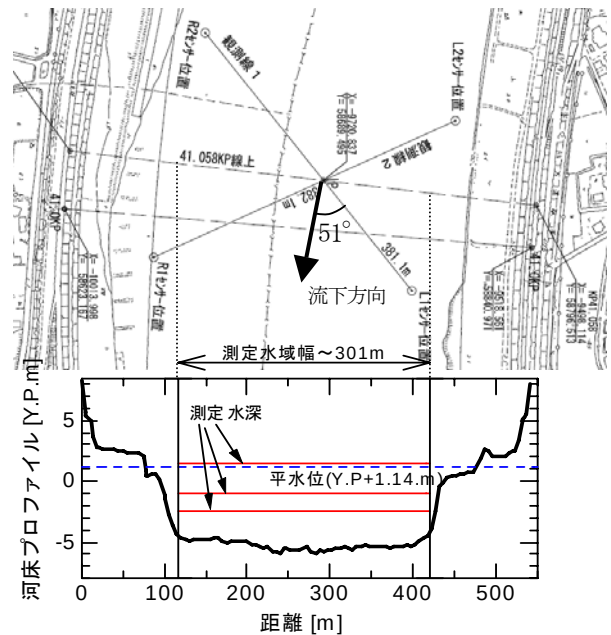


図-3 佐原地点の超音波測線配置状況

3. 流量観測精度の実地検証

(1) 検証地点と実証システムの概要

幅広河川において低水から洪水までの流況に対する新技術の観測性を検証するために、利根川下流域の佐原地点に実証システムを設置した。本地点は河口から約41kmで、感潮域内にある。河道内両岸付近にPHC杭を建て、超音波送受波器を設置した。超音波測線長距離は約381mである。設置したATENAS流量測定システムの配置概要を図-3に示す（図中、Y.P.はYedogawa Peil, すなわち江戸川工事基準面を意味する）。

事前に測量した河床プロファイルから水位と断面積の関係式を求めシステムに設定しておく。水位計による実測水位と関係式から断面積を計算し、流量計算に用いている。各層の流速測定は10秒に1回行い、平均処理を経て5分に1回流量を出力している。

更正係数は、観測点から上流側約2km、下流側約1kmの範囲内を詳細解析の対象として複数の流況についてSIMK校正法で決定した。解析に用いた粗度係数は現地の様子からU. S. Geological Surveyの推定値群¹⁰⁾を参考に低水路、高水敷等の場所に応じて設定した。

ATENAS流量測定システムの実地検証として、前節で課題として挙げた局所的な流速 V 、更正係数 k について流速プロファイラーの曳航観測を行って比較した。

曳航観測は、平成16年9月から平成17年1月にかけて、低水時や洪水時など様々な流況下で実施した。使用した2種類の流速プロファイラーの仕様を表-1にまとめた。流速プロファイラーは測定器自身に対する相対速度として流速を測定しているため、河床は不動であると仮定し、ボトムトラッキングによって測定した船速で補正を行って流速の絶対値を得た。

表-1 流速プロファイラー仕様

項目	仕様	
流速計	WorkHorse (RD Instruments)	RioGrande (RD Instruments)
周波数	1200kHz	
層厚	50cm	20cm
船速の補正	ボトムトラッキング	
データ収集ソフト	WinRiver	
適用流速範囲	低～中流速	高流速

(2) 測線平均流速 V の検証

a) 流速プロファイラーとの比較

ATENAS流量測定システムで測定した各測定水深での平均流速と流速プロファイラーによる平均流速を比較した結果を図-4に示す。逆流（-0.1m/s）から0.8m/sまでの範囲では、両者は非常によく一致している。この範囲内での各測定水深における両者の流速測定値の差は、標準偏差を誤差として、

第1層Y.P.-2.5mでの流速測定差 $= -0.01 \pm 0.02$ m/s

第2層Y.P.-1.0mでの流速測定差 $= 0.00 \pm 0.03$ m/s

であった。この誤差は曳航観測時の流速プロファイラーの平均流速評価誤差と同程度であり、低周波数超音波と長波長に対応した信号処理を導入したATENAS流量測定システムが少なくとも流速プロファイラーの曳航観測と同程度以上の精度を持って流速を測定しているといえる。

一方、0.8m/s超の領域では、流速プロファイラーが流速を過小評価したと考えられる。このような高流速下での過小評価は、木水ら¹¹⁾も江戸川の洪水時の観測結果において指摘しており、河床掃流砂が流速プロファイラーのボトムトラッキングによる船速測定に影響したためと考えられる¹²⁾。

b) 流速プロファイラーの過小評価の検証

流速プロファイラーの過小評価を検証するために、掃流砂の移動速度を以下のように評価することを試みた。

ボトムトラッキングのデータから、流下方向と逆方向の船速成分を掃流砂の影響と考え、船速成分を往復路で平均した値を掃流砂の移動速度の推定値とした。それを、江頭らによる次式¹³⁾を用いて計算した掃流砂層内の平均流速 U_s と比較した。

$$\frac{U_s}{U_*} = \frac{4}{15} \frac{K_1 K_2}{\sqrt{f_d + f_f}} \tau_* \quad (2)$$

ここで、 U_* は摩擦速度、 τ_* は無次元掃流力、また式中の他変数は、

$$K_1 = \frac{1}{\cos \theta \tan \phi - \tan \theta}, \quad K_2 = \frac{1}{c_s} \left(1 - \frac{h_s}{h_t} \right)^{1/2},$$

$$f_d = k_d (1 - e^2) (\sigma / \rho) c_s^{-1/3}, \quad f_f = k_f (1 - c_s)^{5/3} c_s^{-2/3},$$

$$\frac{h_s}{h_t} = \frac{1}{(\sigma / \rho - 1) c_s \tan \phi - \tan \theta}, \quad c_s = \frac{c_*}{2}$$

であり、 θ は河床勾配、 h_t は水深である。その他のパラメータは江頭らが用いている $\phi = 34^\circ$ 、 $c_* = 0.52$ 、

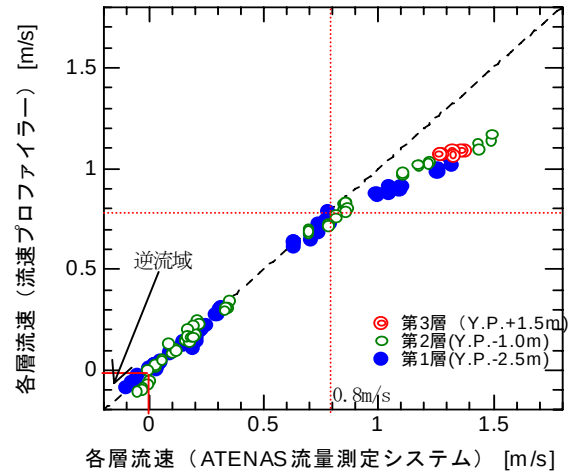


図-4 各層流速値の比較結果

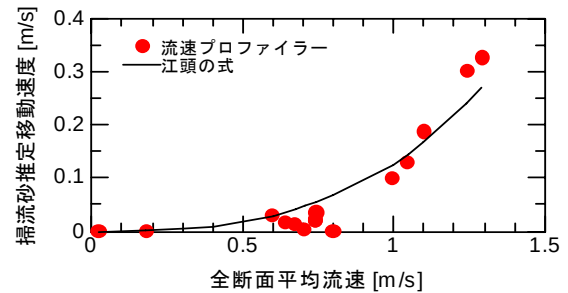


図-5 掃流砂推定移動速度の検討結果

$e = 0.85$, $k_d = 0.0828$, $k_f = 0.16$, $\sigma / \rho = 2.65$ とした。掃流砂の粒径は佐原で採取された河床材料に基づいて0.21mm、河床勾配は1/10,000とし、径深には水深を代用した。断面平均流速と摩擦速度の関係は、掃流砂層厚に対して水深が十分大きいと考えられるので全体として対数分布則が成立すると仮定した。相当粗度は計算値と推定値が一致するよう値を選定し、48mmを用いた。

掃流砂移動速度の推定値と計算値を比較した結果を図-5に示す。計算値は、推定値の変化を良く再現しており、観測地点での掃流砂の発生を示唆している。このように、特に高流速下での流速プロファイラーの曳航観測では掃流砂の影響が無視できない場合があることに注意が必要である。なお、ボトムトラッキングではなくディファレンシャルGPSを用いて船速を求めるなどで掃流砂による流速誤評価を回避することは可能である¹⁴⁾。

ATENAS流量測定システムは掃流砂の影響を受けないため、図-4に示された流速測定値の偏差が、ボトムトラッキング補正における掃流砂の影響と見なすことができる。よって、両者を組み合わせることで掃流砂の平均的な移動速度を簡便に評価できると考えられる。

(3) 更正係数 k の検証

更正係数の妥当性を検証するために、更正係数の基となる流速分布を求めた。更正係数の定義から、ある水位において、SIMK校正法で求めた更正係数の鉛直分布 $k(d, w)$ と流量測定システムが測定した流量 Q 、流水断面積 A から、鉛直方向流速分布 $V(d)$ は次式のよう

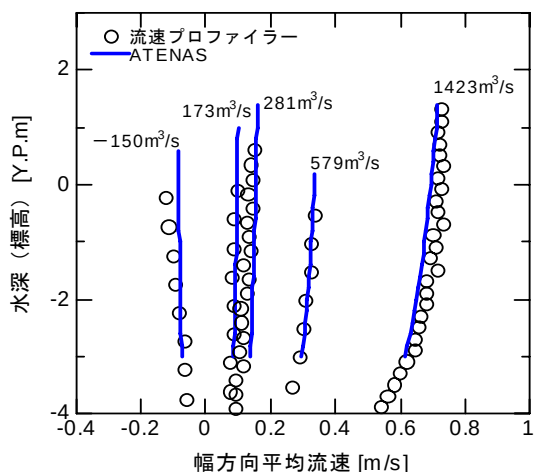


図-6 ATENAS流量測定システムで推定した鉛直方向流速分布と流速プロファイラー測定値との比較

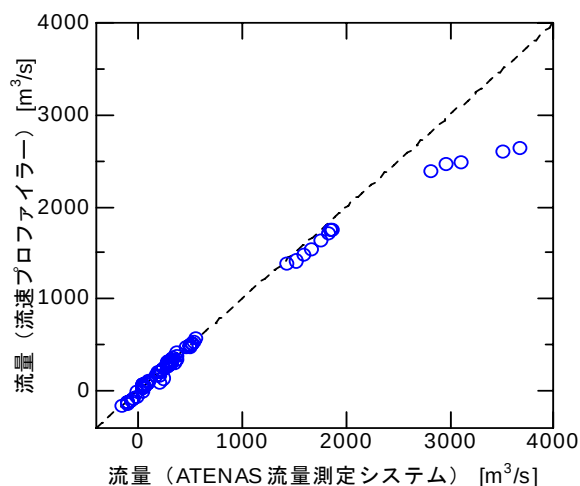


図-7 流速プロファイラーとの流量比較

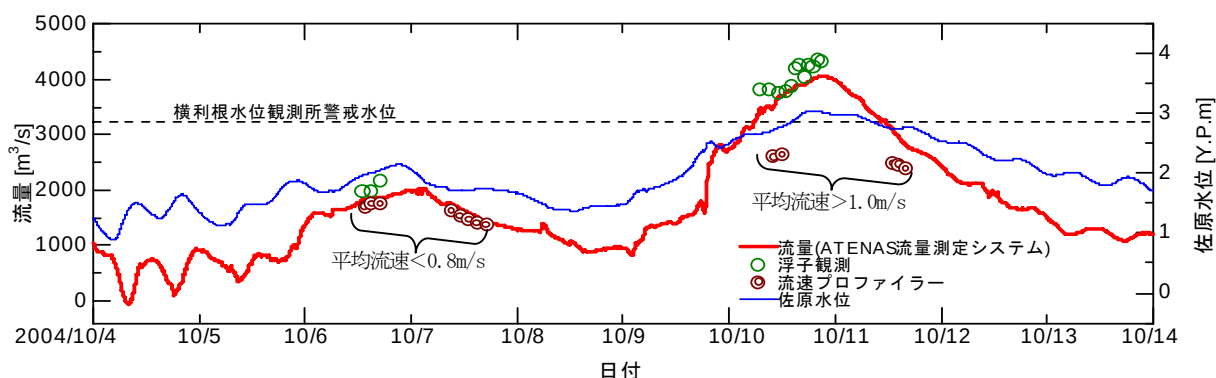


図-8 2004年10月秋雨前線～台風22号通過前後の利根川（佐原）におけるATENAS流量測定システムによる流量測定結果

に求められる。

$$V(d) = \frac{Q}{k(d, w) \cdot A} \quad (3)$$

様々な流量について(3)式から流速分布を求め、流速プロファイラーによる実測値と比較した結果を図-6に示す。流速プロファイラーに掃流砂がほとんど影響しない逆流の $-150\text{m}^3/\text{s}$ から $1,400\text{m}^3/\text{s}$ まで、いずれの流量ケースでも両者は良く一致しており、SIMK校正法が流況によらず河道内の流速分布を実用上問題のない精度で推測していることが確認できた。したがって、SIMK校正法による更正係数も十分な精度があると推定される。

(4) 流量 Q の検証

これまでに局所的な測定流速 V と更正係数 k が十分な精度で得られていることを示した。ここでは、それらの結果として得られる流量についての比較を行った。

流速プロファイラー曳航観測では、流速を測定できない水面、河床、兩岸近傍の流速を仮定することで流量を評価できる。それとATENAS流量測定システムの流量とを比較した結果を図-7に示す。流速と同様に、 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超えるような高流量では流速プロファイラーに掃流砂に起因する顕著な過小評価が認められる。それを除けば、両者は逆流、順流を問わず非常によく一致している。従って、低周波数超音波、長波長に対応した信号処理ア

ルゴリズム、数値シミュレーションにより流速分布を推測するSIMK校正法を組み合わせることにより、精度ある流量の連続測定を行うことができると言えよう。

ATENAS流量測定システムの流量評価精度としては、まず、流速の測定精度は、デジタル化におけるサンプリング誤差から測定値に対する相対精度として $\pm 0.6\%$ と見積もられる。更正係数の不確かさは様々なサイトに対しておよそ相対精度 $\pm 3\%$ 程度と見積もられる⁹⁾。断面積は測量の精度から相対誤差 $\pm 1\%$ 程度とする。これらから、(1)式により評価される流量の精度は、測定値に対して $\pm 3.2\%$ となる。さらに、複数回測定の平均化により誤差を低減させることができる。例えば5回の測定で流量出力を行う場合、 $3.2\%/\sqrt{5} = 1.4\%$ が期待できる。

4. 出水時における流量測定

ATENAS流量測定システムを設置した直後の平成16年10月6日は秋雨前線による局地的豪雨があり、同月10日には台風22号が関東地方に襲来した。そこで、本システムの代表的な測定成果として、これらの出水時の流量連続自動測定結果を図-8に示す。ゼロ付近の流量から最大 $4,000\text{m}^3/\text{s}$ 超までを連続測定していることがわかる。

図には、同地点での流速プロファイラーによる曳航観

測, ならびに浮子観測の結果もプロットしている. 10月6日~7日にかけては三者はほぼ同様の流量を示しているが, 浮子観測がわずかに大きい. 10月10日~11日のピークでは, 流速プロファイラーでは前述したとおり最大3割程度過小評価である. 浮子観測はATENAS流量測定システムに比べてやはり高めの流量を与えている.

洪水ピーク付近の結果は冒頭の図-1でも示したが, ATENAS流量測定システムの測定流量は非常に滑らかに推移しているのに比べ, 狭窄部である布川以外での浮子観測結果は増減が大きく, 不安定であることがわかる.

水位と流量の関係を見ると, 10月4日から10月5日にかけては, 潮汐の影響で水位が周期的に変動し, 位相遅れを伴って流量が変化している様子が見られる. 10月11日以降の減水期でもやはり潮汐の影響が水位, 流量ともに現れている. このような潮汐や背水の影響による流量変化は, ATENAS流量測定システムのように流量を連続測定することで明瞭に把握することができる.

なお, 同月後半に台風23号が襲来し, やはり最大 $4,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度の出水が生じたが, この場合もATENAS流量測定システムは欠測無く連続自動測定が可能であった.

5. 結論

河川計画における流出解析モデルやパラメータの検証, 精度向上のためには, 実際に流下している流量を把握することが非常に重要である. 流量測定には, 流況変化に影響されず流速を安定に連続測定することと, 測定時の流速分布を反映した適正な更正係数を得ることが重要であり, 流速測定と数値シミュレーションを組み合わせることで流量を高精度に自動かつ連続して測定する技術を開発した. その実機となるATENAS流量測定システムを利根川佐原地点に設置し, 流速プロファイラーや浮子による流量観測との比較検証を行い, 以下の結論を得た.

- (1) 超音波測法に低周波数超音波とそれに対応した超音波信号処理アルゴリズムを導入したことにより, 流速プロファイラー曳航観測と同等以上の精度で流速を連続測定できることを示した.
- (2) 数値シミュレーションを用いて測定平均流速を断面平均流速に換算する更正係数を決定するSIMK校正法は, 河道内の流速分布を正しく推定していることを示した. それに基づいて算出された更正係数も実用上十分な精度を持っているといえる.
- (3) 低周波数超音波による流速測定と数値シミュレーションによる流速分布推定を組み合わせたATENAS流量測定システムは川幅500m程度の大河川において, 逆流からゼロ付近流量, 約 $4,000\text{m}^3/\text{s}$ 超まで, 流量を欠測することなく連続かつ自動測定可能であった. その測定精度は従来技術と同等以上である.
- (4) 高流量時, 河床掃流砂が生じてATENAS流量測

定システムは影響を受けないが, ボトムトラッキングを用いた流速プロファイラーでは, 流速・流量を過小評価することを示した.

- (5) ATENAS流量測定システムとボトムトラッキングを用いた流速プロファイラーの曳航観測を組み合わせることで, 掃流砂の平均的な移動速度を把握することの可能性を示した.

一連の結果から, 大河川におけるATENAS流量測定システムの基本的流量測定性は検証できたと考えている. 今後は, より広範な適用性を確認するための高濁度時の測定性検証や, 塩水楔の浸入等による部分流の高精度流量測定を検討していきたい.

参考文献

- 1) 日本河川協会編: 改訂新版 建設省河川砂防技術基準 (案) 同解説 調査編, 1997.
- 2) 深見和彦, 天羽淳, 大手方如, 古谷純一: 流量観測に関する技術基準の課題と新しい技術開発への対応, 土木技術資料, Vol.45, No.2, pp.22-29, 2003.
- 3) 岡田将治, 森彰彦, 海野修司, 昆敏之, 山田正: 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, vol.11, pp.243-248, 2005.
- 4) ISO 6416:2004 *Hydrometry – Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method*, 2004.
- 5) 蜂屋弘之, 王勇, 木下武雄: 河川の音波伝播特性の長期連続観測-超音波流量計の洪水観測への応用-, 海洋音響学会誌, Vol.28, No.1, pp.34-40, 2001.
- 6) Urick, R. J. : *Principles of under water sound (3rd. ed.)*, Peninsula Publishing, 1996.
- 7) Laenen, A., Smith, W. : *Acoustic systems for the Measurement of Stream Flow*, United States Geological Survey, Report No. 82, 1982.
- 8) Kölling, C. : *Method and device for measuring the discharge in partly filled or completely filled ducts and in open channels*, EP 0 681 683 B1, 1994.
- 9) Kölling, C. : *SIMK – Calibration of streamflow – Gauging stations in rivers and canals*, 5th Int. Conf. Innovation in Hydraulic Efficiency Measurement (Lucerne), No.11, 2004.
- 10) <http://www.wr.camnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/>
- 11) 木水啓, 二瓶泰雄, 望月健: 棒浮子観測とADCP観測に基づく洪水流量の比較, 土木学会第60回年次学術講演会2-257, pp.513-514, 2005.
- 12) Rennie, C. D., Millar, R. G., Church, M. A. : *Measurement of bed load velocity using an acoustic Doppler current profiler*, J. Hydraul. Eng., Vol.128, No.5, pp.473-483, 2002.
- 13) 江頭進治: 河川における流砂問題と流砂力学, 日本流体力学会年会2005, AM05-KN-001, 2005.
- 14) Simpson, M. R. : *Discharge Measurement Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler*, United States Geological Survey Open-File Report 01-1, 2001.

(2005. 9. 30受付)