

河川用流量測定技術の開発と大河川での実地検証結果

Development of a River Discharge Measurement Technique and Its Field Verification at a Large River

小田 将広 ODA Masahiro JFE アドバンテック 河川事業部 河川グループ 課長・博士(工学)
西島 真也 NISHIJIMA Shinya JFE アドバンテック 河川事業部 河川グループ長

要旨

河川流量は河道設計、河川の維持管理などにおいて重要な水文データの一つである。河川流量を大河川、洪水時においてもリアルタイムで測定することを目的として、製鉄プロセスで培われた超音波技術と数値シミュレーション技術を組み合わせた ATENAS 流量測定装置を開発し、高精度に河川流量を連続自動測定することを実現した。わが国の代表的な河川の一つである利根川の下流域に ATENAS 流量測定装置を設置し、既存の流量観測手法との比較検証を実施した。ATENAS 流量測定装置は、測線長約 590 m であっても平均流速を欠測なく連続測定することができ、調査目的で精密測定に使用される流速プロファイラと同程度以上の精度で流量を連続測定することを確認した。

Abstract:

River discharge is one of important hydrological quantities for river design, river management, and disaster prevention, etc. A river discharge measurement system with high accuracy has been developed by combining hydroacoustic technology with numerical simulation of river flow. This new measurement system, ATENAS (advanced technology of numerical simulation of flow velocity distribution and hydroacoustics), was installed at the downstream region of the Tone River where river width is 500 m or wider to verify its measurement performance. Mean flow velocity was successfully measured stably and continuously even along the long acoustic path of 590 m by using ATENAS. The measurement accuracy of flow velocity and discharge was comparable to or higher than that of precise measurements by an acoustic velocity profiler.

1. はじめに

昨今、局地的集中豪雨の頻度が増大し、河川堤防の破壊や内水氾濫による水害が繰り返されている。そのため、降雨によって河道に流入する雨水を適切に流下させる河道設計、堤防や河川管理施設の維持管理、さらに降雨量や水位変動からの洪水水位予測とそれに基づく避難指示などを適切に行うことが、これまで以上に要求されている。また、環境保護の側面からは、河川の正常な機能を維持するための正常流量の確保が必要とされている。

河川整備では、過去の降雨実績に基づいて、たとえば 100~150 年に 1 度程度の頻度の豪雨での降雨パターンを想定し、貯留関数法などの流出解析によって河道を流れる流量（基本高水）を算出し、それが安全に河道を流下できるように河道、洪水調整設備などの整備計画が策定される。河川整備計画の裏付けとなる流出解析に使われるモデルや

パラメータの妥当性検証や精度向上には、実際に発生した洪水での河川流量を測定し、降雨量などを関連付けるほかない。また、ダムなどの洪水調節機能の検証、通常時の支川・水路への合分流や水利用のための取水などにおいても、流量を知ることが必要である。このように、低水であれ洪水であれ、河川流量は河川管理、水管理の非常に重要な水文データの一つである。

現状の河川流量は、スポット的に測定員がプロペラ式流速計あるいは浮子などを用いて測定した流速と更正係数、流水断面積から流量を算出し、その時の水位との関係式を作成しておいて、それに基づいて水位の連続観測値を流量に換算するということで求められている¹⁾。

しかし、この従来からの手法にはさまざまな問題点や精度向上の必要性が指摘されており^{2,3)}、それに代わる流量（および流速）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・信頼性はまだ実現されていない。

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、筆者らは、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、超音波による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定を組み合わせた新たな ATENAS (advanced technology of numerical simulation of velocity distribution and hydroacoustics) 流量測定システムを開発した。実システムを利根川下流域に設置して広幅河川におけるその測定性能をさまざまな観点から検証した。

2. 高精度流量測定のための要素技術の開発

2.1 既存の流量観測手法の問題点

2.1.1 水位流量曲線に基づく流量評価の問題点

水位流量曲線はスポット的な観測流量とそのときの水位との関係を単純な関数で近似して作成される。しかし、水位と流量の関係は、緩勾配、潮汐、堰操作、植生などの影響を受けて流量増大時と減少時で一致せずにループを描き⁴⁾、一義的な関係が得られないことが多い。

水位は、流量と河床形状、河道内の抵抗（河床粗度、構造物などによる）によって定まる副次的な量であることから、水位から流量を算出するには限界があると考えられる。

さらに、曲線の基となる流量のスポット観測手法にも、以下のような精度上の問題がある。

2.1.2 流量のスポット観測手法の問題点

既存の流量スポット観測手法は、低水時のプロペラ式流速計または電磁流速計などと洪水時の浮子観測に大別される。しかし、いずれの手法も低水から洪水までの適用範囲を持たないため、一貫した測定手法での測定が望ましい。

河川管理上は洪水時の流量が特に重要であるが、洪水時に実施される浮子観測では、浮子が並列螺旋流のような2次流や橋脚などの構造物による局所的な流れの乱れの影響を受けながら流下するため、流速測定の安定性、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、ビデオカメラなど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・低流速には適用困難であるなど、測定環境の制約を受けやすいという原理上の問題が残されている。

また、浮子流下速度を断面内平均流速に換算する更正係数は、1950年代の研究結果に基づいて暫定値が決められているが、観測サイトによっては適切ではない報告がなされている⁵⁾。これは実際の流速分布が暫定値設定の際に想定している流速分布と乖離しているためである。

更正係数不要の手法として水平設置型流速プロファイラも報告されている⁶⁾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。

2.1.3 課題の整理

以上のような既存の流量観測技術の課題を整理すると、以下の2点に集約される。

- (1) 河川水の流速を連続して精度良く、外乱の影響を受けずに測定すること
- (2) 観測状況ごとの流速分布を考慮した更正係数を適切に決定すること

これらの問題点を解決するための新技術を開発し、実際の大川において検証を行った。

2.2 要素技術の開発

2.2.1 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、広い範囲の平均流速を測定することが望ましい。そこで、Fig. 1に示すように河川兩岸水中に超音波送受波器を対向して配置し、流れに沿う方向と流れに逆らう方向の超音波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^{1,7)}（伝播時間差法）を採用した。

この方法を用いて大河川においても安定して流速を測定するためには、

- (1) 安定して超音波を伝播させること
- (2) 超音波の伝播時間を高精度に測定することが重要である。

(1)の観点からは、超音波を減衰させずに遠方まで伝播させることが必要である。水中の超音波減衰は、距離拡散、水による吸収および浮遊物による散乱によって引き起こされる。距離拡散に対しては、強力超音波を発信する大出力超音波トランスデューサを採用することで対応した。また、水による吸収損失や浮遊物による散乱損失は周波数が低いほど少なくなる⁸⁾ため、可聴域よりやや高い28 kHzという低周波数超音波を適用した。

これにより、適用河川幅を従来機器での100 mから1 000 mまで拡大することができたと考えている。

(2)の観点では、特に水深に対して幅の広い大河川を伝播させるため、最短時間で到達した超音波に別の伝播経路

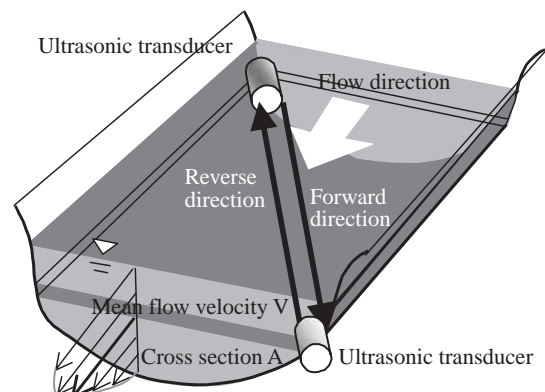


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic travel time method

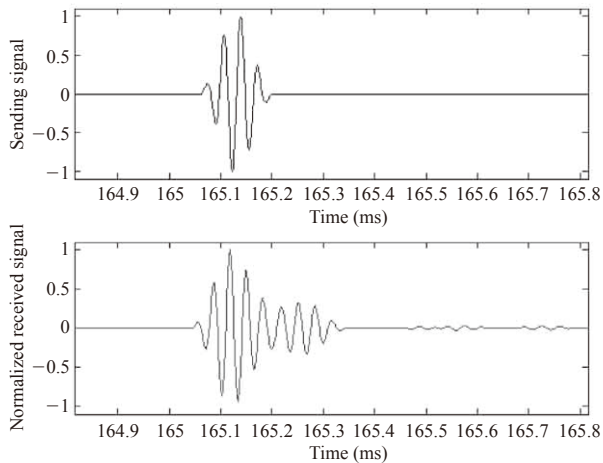


Fig. 2 Simulated received ultrasonic waveform based on ray-tracing calculation (Upper: Sending signal, Lower: Calculated received signal)

の超音波が時間遅れをともなって重畳する「マルチパス」の影響が非常に強く現われる点が問題となる。

超音波の伝播を模擬する単純なレイトレース計算⁸⁾を用いてマルチパスによる受信波形の計算例を Fig. 2 に示す。上側に示す送信パルス波形に対し、下側に示す受信波形は送信パルスの倍程度の波数になっている。

加えて、低周波数超音波は波長が長いので、伝播時間測定に一波長分のずれがあると大きな流速誤差となる。

このため、超音波厚さ計などでの伝播時間測定に一般的に用いられるしきい値法や相互相関法、パルス圧縮などの手法を適用しても、精度良い測定は困難であると考えられる。

そこで、さまざまな形状の受信超音波の伝播時間を高精度に測定するために、受信超音波をデジタル化し、受信超音波の先頭位置を検出する信号処理アルゴリズムを開発した。

本アルゴリズムでは、まず送信パルスを模擬した参照波形との相互相関処理により受信波形の位置を大まかに特定する。その後、半波のピークサーチを行い、ノイズレベルを超える最初の半波ピークを決定する。これを多項式近似し、近似関数のゼロクロス点を波形先頭すなわち伝播時間とした。

さらに、大きな流速誤差をもたらす先頭検知位置の一波ずれを完全に除去することは困難であるので、それによる異常値を補正・除去する判定アルゴリズムを追加している。

2.2.2 適切な更正係数決定技術

更正係数は、局所的な測定流速を断面平均流速に換算する係数であるから、断面内流速分布と流速測定位置によって定まる。しかし、あらゆる観測サイト、流況において流速分布を実測して更正係数を決定しておくことは実際上不可能である。そこで筆者らは、あらかじめ数値シミュレーションにより想定流況における断面内流速分布を計算し、更正係数を算出する手法（以下、SIMK[®]）⁹⁾を適用した。

SIMK[®]では、レイノルズ平均を用いた乱流モデルに基づ

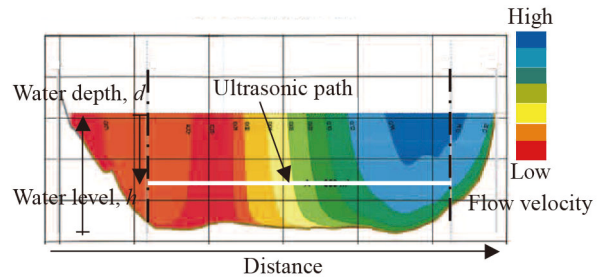


Fig. 3 Example of estimated flow velocity distribution by SIMK[®]

いて数値解析により測定場所を含む上下流の流れ場を推定し、測定断面内の流速分布を求めている。解法に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。代表的な流況ごとに、求めた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。流速分布推定の一例を Fig. 3 に示す。

これまでの結果¹⁰⁾から、ある流水断面に対し SIMK[®]で推定した流速の絶対値が実測値と異なっても断面内流速分布はほぼ相似形であり、流速を無次元化した更正係数は SIMK[®]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。すなわち、数値シミュレーションで得た流速の絶対値を用いず、流速の相対的な分布形状のみを利用していることが SIMK[®]の特長であり、解析条件の不確かさに由来する解析誤差の影響を極力受けないようにしている。

SIMK[®]により他観測手法流量との合わせ込みによる更正係数の決定が不要となり、未経験の出水（超過洪水など）に対しても更正係数をあらかじめ適切に決定することができ、流量測定システム設置直後からの流量測定を可能とした。

3. 大川における開発技術の検証

3.1 検証(1)：利根川河口堰

3.1.1 流量測定システム設置場所概略

利根川河口堰は、利根川河口から約 18.5 km の汽水域に位置し、堰上流の適正な水利用のために、塩分濃度（塩水遡上）管理、湛水量の確保、維持流量の放流などの役割を担っている。

ATENAS 流量測定装置を堰直上流に設置し、流速測定試験¹¹⁾を約 2 年間実施した。設置場所の川幅は約 460 m、超音波測線長（伝播距離）は約 590 m である。測線配置概略を Fig. 4 に示す。

3.1.2 検証結果

まず、本サイトで受信した超音波波形の例を Fig. 5 に示す。同図・上には比較のために、試験水槽内に 1.7 m 間隔で対抗させた同超音波トランスデューサによる受信波形を示している。伝播距離が短い場合は 7 波程度の波形が受信



Fig. 4 Ultrasonic path layout at the Tone River Estuary Barrage

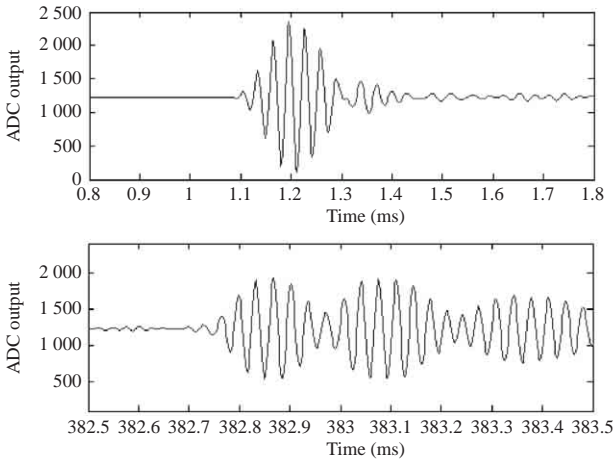


Fig. 5 Received ultrasonic waveforms (Upper: Measurement at an experimental tank, Lower: Measurement at the actual wide river)

されているが、同図・下に示す幅広河川での受信波形は Fig. 2 に示した計算結果以上に持続時間が長くなり、連続波のようにになっている。受信波形の特徴は時々刻々変化する。特定の（送信波形と同じような）波形のみを対象とした伝播時間評価アルゴリズムでは高精度と安定性の確保は困難である。

単純なしきい値法と新アルゴリズムでの流速測定の安定性を比較した例を Fig. 6 に示す。河口堰は全門全開であるが、従来のしきい値法では流速測定値が不安定で大きく振動してしまっている。それに対して新アルゴリズムの結果は流速範囲によらず、安定した測定がなされている。12 時

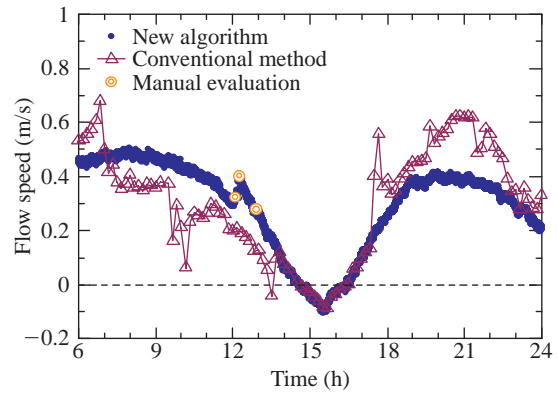


Fig. 6 Improvement of flow velocity measurement by new signal processing algorithm

付近のステップ状の流速変化も、採取した波形データから手計算で求めた結果と新アルゴリズムの結果は一致しており、さまざまな流況に対する有効性が検証できた。

低周波数超音波と開発した信号処理アルゴリズムによる大川での流速無人測定の例として、2004 年 10 月の台風 22 号による出水前後の流速連続測定の結果を Fig. 7 に示す（図中 Y.P. は Yedogawa Peil, 江戸川工事基準面を意味する）。同図では、いくつかのイベント時の流速、流量および水位の連続測定結果をプロットしている。3.2.2(2) 項で述べるが、上流にある国土交通省観測点でも最大 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の流量が観測されており、良く一致している。

これらの期間を含む設置期間中、さまざまな流況で測線長 590 m という長伝播距離であっても ATENAS 流量測定システムによって安定して流速を連続測定できることが確認できた。さらに、超音波の受信強度から川幅 1000 m までの設置にも十分対応できると考える。

超音波の伝播を阻害するもう一つの要因である浮遊土砂に関しては、ある出水イベント減水期において 150 mg/l という測定値を得たが、高濃度の浮遊土砂が流下する状況での測定検証は今後の課題である。

観測された出水イベントについて見てみると、10 月 4 日

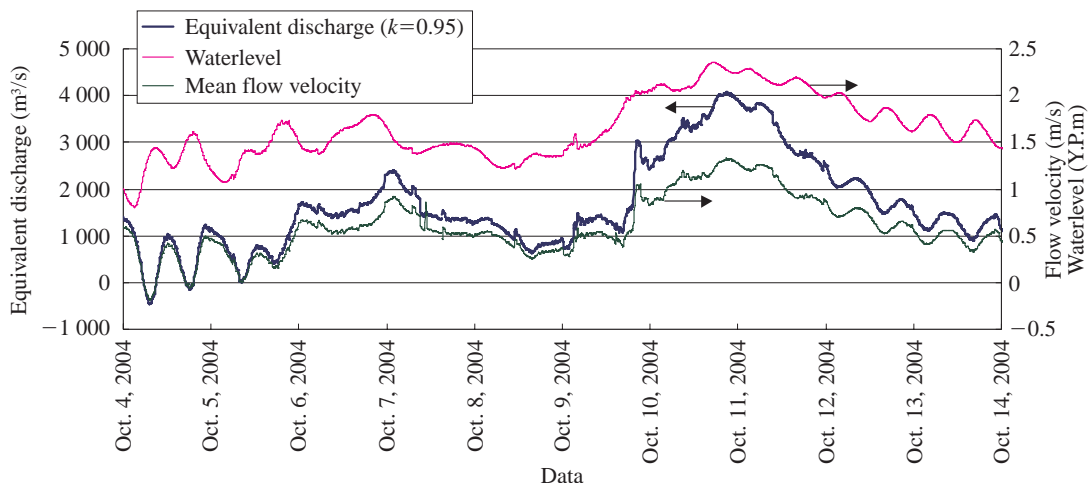


Fig. 7 Continuous measurement of flow velocity at Tone River Estuary Barrage in flooding caused by the Typhoon No. 22, 2004

～6日は利根川河口堰が全開操作であり、河口潮汐の影響を受けて流速（流量）と水位が周期的に逆位相で変化している様子が測定されている。

10月9日～14日に台風22号通過による出水があり、流速・流量ピークは10月10日21時頃、水位ピークはそれより早い17時頃に生じている。測定測線での最大流速は1.33 m/s（流量は4090 m³/s程度）であった。ピーク以降の減水期にあっても流速や水位は河口潮汐の影響を受けて周期的に変化しており、いずれのイベントにおいても、水位から流量を推定する既存の方法での正確な流量把握は困難であるといえる。

3.2 検証(2)：利根川佐原地先¹²⁾

3.2.1 流量測定システム設置場所概略

利根川佐原地先は、河口から約41 kmの感潮域内（香取市）に位置する。低水路と高水敷からなる複断面の河床形状となっており、低水路の幅は約400 m、高水敷を含めた川幅は約540 mである。Fig. 8に測線の平面および断面配置を示す。超音波の測線長は約381 mである。設置した装置は国土交通省の流量測定装置として流量連続測定を実施している。

3.2.2 検証結果

(1) 流速プロファイラとの比較検証

ここでは、開発したATENAS流量測定システムの流量測定精度の確認を主眼に検証を行った。

比較データを取得するために、さまざまな流況において、調査目的に一般に用いられている流速プロファイラをボートに登載し、川幅方向に曳航して横断面内流速分布を測定した。流速測定の超音波周波数は1200 kHz、船速補正には河床が移動しないことを前提とするボトムトラッキング方式を用い、流速を測定で

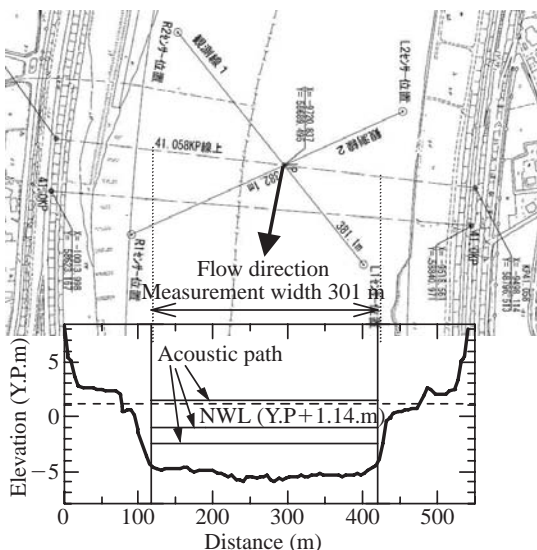


Fig. 8 Horizontal and Vertical Layouts of ultrasonic paths at Sawara, Tone River

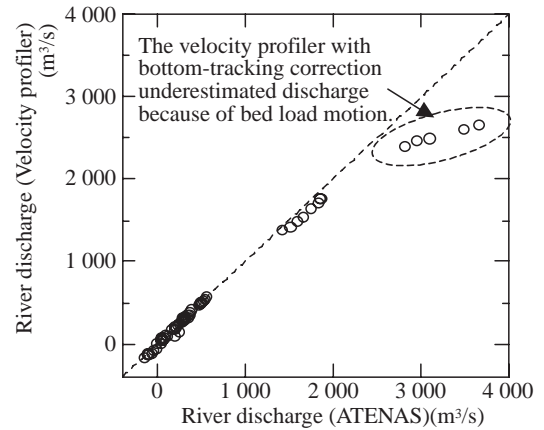


Fig. 9 Comparison of measured river discharge between ATENAS and velocity profiler

きない河床付近、水面付近および左右岸近傍について流速を外挿推定し流量を推定した。

ATENAS流量測定システムによる測定流量と流速プロファイラで推定した流量を比較した結果をFig. 9に示す。

流量の増大につれ、2000 m³/s以上の流量範囲では流速プロファイラが過小評価している。これは流量の増大につれて河床上を砂粒子が転動、滑動、跳躍しながら輸送されていく掃流砂が生じたため、ボトムトラッキングによる船速補正に誤差が生じたためと考えられる¹²⁾。その流量範囲を除くと、ATENAS流量測定システムは、逆流領域も含めて流速プロファイラと誤差50 m³/s程度で良く一致している。これは、流速の測定精度、SIMK[®]による更正係数決定精度もまた実用上十分なものであることを示しているといえる。

なお、本検証¹²⁾において、流速プロファイラと比較した場合の流速測定精度は2～3 cm/sという値を得ている。これは流速プロファイラ曳航観測での測定誤差と同程度である。また、SIMK[®]を用いて推定した鉛直方向流速分布が流速プロファイラの測定結果と良く一致することも確認している。

以上から、川幅500 m程度の河川においても、ATENAS流量測定システムは、流速プロファイラ曳航観測と同程度以上の測定精度を有するといえることができる。

(2) 出水時の連続測定

2004年10月の出水時の連続測定例をFig. 10に示す。10月6日の秋雨前線による増水から台風22号による出水という一連のイベントでも欠測なく流量の無人連続測定がなされている。同図には、流速プロファイラ曳航観測および佐原水位流量観測所での浮子観測による流量もプロットしている。

10月4日～6日には、水位と流量が周期的に変動するという河口潮位の影響が河口から40 km以上上流の

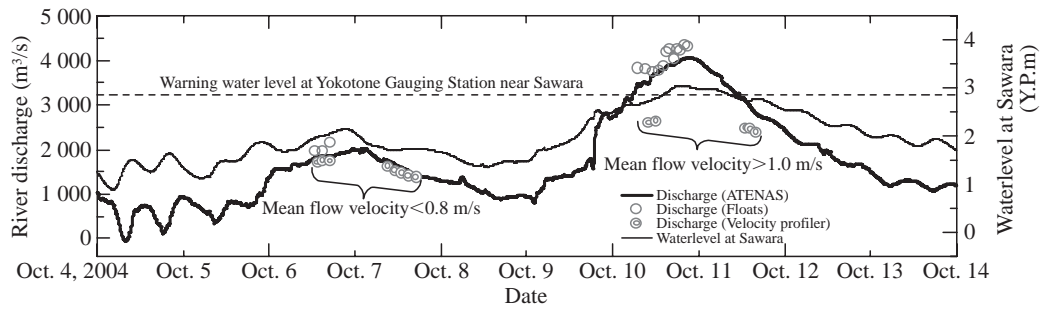


Fig. 10 Continuous measurement of river discharge at Sawara, Tone River in flooding caused by the Typhoon No. 22, 2004

佐原にも現われている様子が測定されている。

流量が比較的少ない10月6日～8日の増水では ATENAS 流量測定システムと流速プロファイラの流量観測結果は非常に良く一致している。

10月9日～14日の台風22号による流量ピークで流速プロファイラが1/3程度過小評価しているのは、すでに述べたように掃流砂の影響を受けているからである。

浮子観測はいずれのイベントでも過大評価傾向にある。浮子観測場所の右岸側には顕著な深掘があり、標準的な更正係数の適用性に問題があると考えられる。

佐原での流速・流量のピークは10月10日22時頃生じている。これは、Fig. 7に示した利根川河口堰（佐原より約22.5 km下流）に比べ1時間程度遅い。水位ピーク発生時刻（同日19時頃）は利根川河口堰よりも2時間程度遅い。

下流側で水位・流量ピークがより早く生じることや上下流で水位ピークと流量ピークの発生時刻差が変化することは、降雨パターン（上流からの流入量変化）と下流からの水位変化遡上の相互作用の結果として生じていると考えられる。この測定結果からも、水位観測から流量への換算は本質的に問題があるといえよう。

4. おわりに

低周波数超音波の実用化と数値シミュレーションに基づく更正係数決定により、ATENAS 流量測定システムは大川であっても高精度かつ安定して流速、流量を測定できることを実証した。現在、同システムは利根川の他に瀬田川（琵琶湖からの流出量把握）、信濃川（堰通過流量の把握）、熊野川（日本有数の洪水流量の把握）、水力発電所導水路（発電用取水量測定）など、さまざまな用途に応じて設置が進められている。

今後は、河川の大きな機能の一つである土砂移動や、それによる河床変動などにも対応した測定システムを開発し、総合的な河川管理とそれによる防災、減災、水利用の適切化などに貢献していきたいと考える。

利根川河口堰での測定データおよび航空写真は、(独)水資源機構利根川河口堰管理所殿より提供していただきました。ここに謝意を表します。

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. 東京, 山海堂, 1997. (ISBN 4-381-01180-5)
- 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, 2003, p. 22-29.
- 3) 原田靖生, 二瓶泰雄, 木水啓. 河川流解析(力学的内挿法)を用いた浮子観測の流量推定精度の向上. 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集. 2006, p. 439-440. (CD-ROM)
- 4) 襦津家久, 富永晃宏. 水理学. 東京, 朝倉書店, 2004, p.254. (ISBN 4-254-26139-X)
- 5) 酒井雄弘, 二瓶泰雄. ADCPデータに基づく浮子の更正係数に関する検討. 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集. 2006, p. 431-432. (CD-ROM)
- 6) 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, 2005, p. 243-248.
- 7) ISO 6416:2004. Hydrometry-Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method. 2004.
- 8) Urick, R. J. Principles of under water sound (3rd. ed.). United States, Peninsula Publishing, 1996.
- 9) 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.
- 10) Kölling, C. SIMK-Calibration of streamflow-Gauging stations in rivers and canals. 5th Int. Conf. Innovation in Hydraulic Efficiency Measurement (Lucerne), no.11, 2004.
- 11) 八丈裕己, 横田雅良, 解良一夫, 西島真也. 河口堰直上流における流速の連続観測. 土木学会関東支部第31回技術研究発表会. no. 37. 2004.
- 12) 中川一, 小野正人, 小田将広, 西島真也. 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川での実地検証. 水工学論文集. vol. 50, 2006, p. 709-714. (CD-ROM)



小田 将広



西島 真也