

戦-27 新しいセンサ技術を活用した流量観測データの信頼性向上に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：水災害研究グループ（水文）

研究担当者：深見和彦、今村仁紀、萬矢敦啓

【要旨】

河川計画・管理の基盤となる流量観測業務の省人化・効率化と観測データの精度確保・信頼性の向上の両立を図ることが緊急の課題となりつつある。一方音響技術や電子技術の発達による新しいセンサ技術の発達が望ましい。このことから、新しいセンサ技術を活用することで省人化・効率化と流量観測データの信頼性向上の両立を図ることのできる新技术を確立することを目的として、流速計検定施設を用いた超音波ドップラー流速プロファイラー（ADCP）の流速観測精度検証を行うとともに、実河川の洪水において同センサによる観測結果から洪水中の横断方向の流速分布の検討を行い、流量観測に影響を与える洪水流の構造の一端を明らかにした。

キーワード：流量観測、流速分布、超音波技術を応用した河川流量観測センサ

1. はじめに

河川計画・管理を的確に行うための基盤である流量観測データは、国土交通省河川局の各種技術基準（建設省河川砂防技術基準（案）¹⁾等）に基づいてその観測が実施されており、長年にわたり水文資料の品質確保と継続的な資料収集・蓄積に貢献してきた。しかし、これらの基準の基本部分は、1950年代に当時の建設省によって定められて以来、ほぼ、そのままの形で踏襲されてきており、流量観測に熟練した観測要員を多数確保できた当時と観測体制が大きく異なってきている中で、流量観測データの質・量のみならず、社会から期待される迅速な情報公開等の新しいニーズに対応することが今後難しくなることも懸念される。一方、近年電波や超音波のセンサ技術を利用した新しい流速センサが民間より提案され、川の流れの実態をよりの確に計測できる技術として期待されている。

本研究では、これらの新しいセンサを駆使して、河川における横断方向・鉛直方向の流速分布等について水理学的な観点から分析することにより、高水流量観測に関する技術基準の再評価を行うとともに、新たな流量観測技術の実務への適用性について検討を行い、流量観測データの信頼性向上を目指して実施するものである。

2. 研究概要

2.1 河川流量観測センサ精度検証

2.1.1 ADCP 観測精度検証

土木研究所が所有する流速計検定施設を用いて、ADCP

（Acoustic Doppler Current Profilers）についての観測精度検証を行った。

(1) 等流速検証

検定台車の速度を0.5～4m/sの間で0.5m毎に段階的に変化させ、その間における ADCP の観測精度を検証した。各モードにおける設定条件を以下の表に示す。

表 1 等流速検証における ADCP 設定条件一覧

No	観測モード	層厚	層数		発信ピッチ数		間隔
		(m)	設定	実測	WP	BP	
1	標準	0.10	15	7	30	10	3.78
3	ハイレゾリューション	0.10	15	7	5(15)	1	5.21
5	ハイレゾリューション	0.10	10	4	10	1	0.93

WP：流速計測用に発信するピッチ数

BP：河床計測用に発信するピッチ数

ハイレゾリューションモードにおける WP 発信ピッチ数の括弧内は1回ピッチを発信する間に補完的に発信するサブピッチ数を示す。

この設定条件において等流速検証を実施した結果を図1に示す。図は横軸に設定速度（検定台車速度）縦軸に ADCP 測定流速としている。以下に結果を示す。

- ・ 設定流速が1.0m/s～3.0m/sにおいては、各種モードの下で良好な観測精度が得られた。
- ・ ハイレゾリューションモードは3つの設定の中で最も良好な観測精度が得られた。
- ・ 但し、低流速（微流速）での実験ではハイレゾリューションモードが最も良好な観測精度となった。
- ・ 低流速においては、ADCP 流速が大きく観測される傾向があるが、これは検定水路がコンクリートの3面張り水路であることによる超音波の乱反射が影響し

ているものと考えられる。

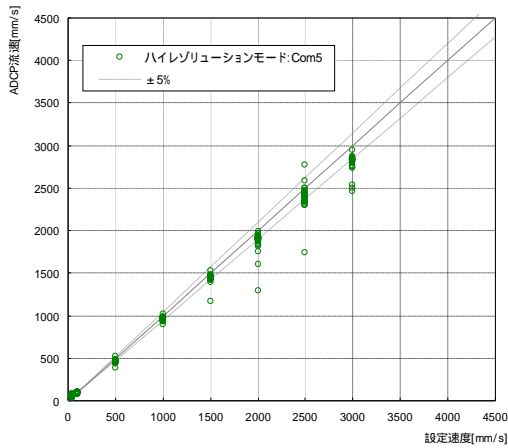
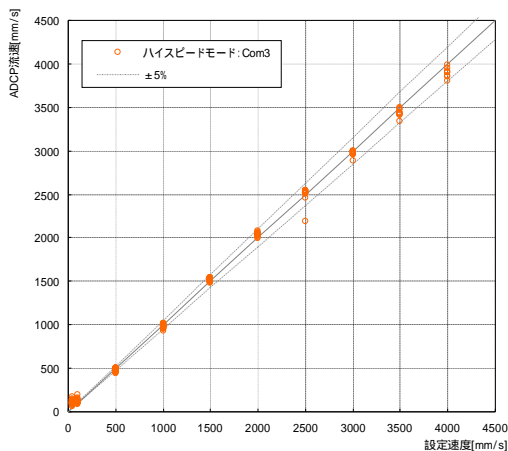
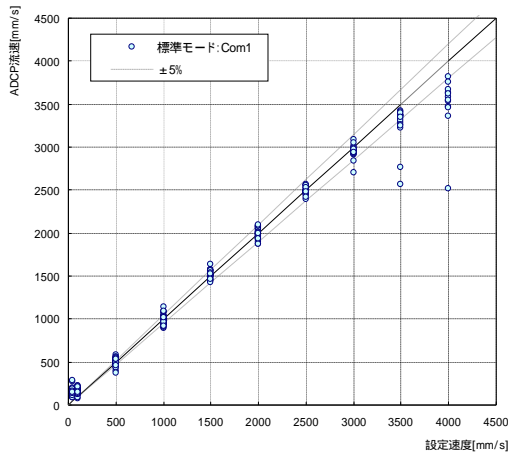


図1 等流速検証結果

(2) 設定検証

台車速度を二つの一定速度（低速代表値 0.5m/s、高速代表値 3.0m/s）で走行させその間の、各観測モードおよび各設定値（各ピング数）における観測精度の差異について検証を行った。表2に設定検証の条件を示す。

設定検証の結果を図2と以下に示す。

・設定速度が0.5m/sの場合は、ハイレゾリューションモードが最も観測値にばらつきが少なかった。但し、過小評価の傾向が見られる。

表2 設定検証における ADCP 設定条件一覧

No	観測モード	層厚	層数		発信ピング数		間隔 (s)
		(m)	設定	実測	WP	BP	
7	標準	0.10	10	5	10	1	0.96
8		0.10	10	4	5	1	0.53
9	ハイスピード	0.10	10	4	5(15)	1	2.21
10		0.10	10	4	3(10)	1	0.51
11	ハイレゾリューション	0.10	10	2	5	1	0.52
12		0.10	10	2	3	1	0.46

- ・設定速度が3.0m/sの場合には、標準モードとハイスピードモードについても観測精度は向上した。

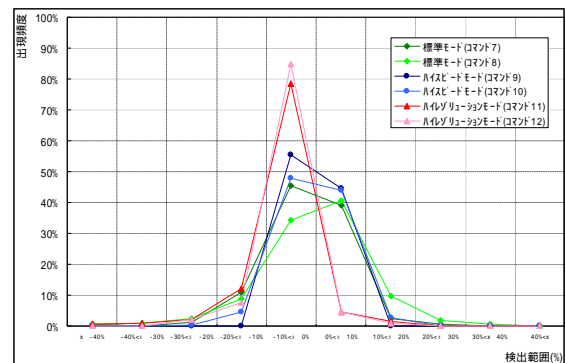
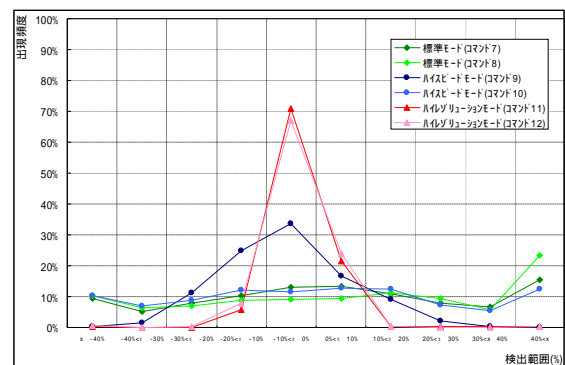


図2 設定検証結果（上：0.5m/s、下：3.0m/s）

2.1.3 河川流量観測センサ精度検証のまとめ

等流速検証・設定検証の結果より、ADCP 観測値については、発信ピング数が多ければ多いほど観測精度が向上することが確認された。特に、短時間で多くのピングを発信することのできるハイスピードモードが良好であった。しかし、ハイスピードモードによる良好な結果が得られたのは、検定台車の設定速度（以下：台車設定速度）が 1000mm/s～3500mm/s の間であって、微流速設定時や 4000mm/s 以上の高流速では、大きな観測誤差（流速誤差）が確認されている。微流速設定時においては、むしろハイレゾリューションモードが最も良好な結果を示した。

2.2 ADCP 観測結果データの分析手法の検討

洪水の中の実河川は乱流でありあらゆる規模の渦が組み合わさって流れていることはよく知られている。その代表的なものとして河道が複断面であることから発生する大規模平面渦²⁾、水深規模で発生する並列螺旋流³⁾、河床波による乱れ等があり、その結果流速は空間的にも時間的にも変動する。これは流体力学的な興味もさることながら、工学的にも重要な意味を持つ。例えば流量の計測手法として従来の洪水流量観測である浮子法や設置型流量計測法があるが、これらは河道の一部を計測しそれを代表流速としているにすぎない。よって部分計測したものがどの程度河道全体を代表するものかを調べる必要がある。この章では連続計測結果を用いて部分計測値が持つ流れの代表性、誤差や分散の程度を分析する。

2.2.1 横断方向流速分布の変動特性の把握

ADCP による横断方向の連続観測結果を用いて、流下方向の流速分布をスペクトル解析により分析する。ここで横断方向の任意の観測ポイント毎に求めた代表流速を U_{ave} とし、実測データである鉛直方向平均流速の横断分布 (raw) から U_{ave} を除いた流れの変動成分を du とし、ある観測ポイントにおける流速の無次元変動幅を du/U_{ave} として表す。さらに、浮子観測、あるいは電磁流速計、電波流速計を用いて計測される、ある測線での流速観測値の変動幅が流況によりどのように変化するかを解明するために、各観測地点における流速と水深の積を q とし、 du/U_{ave} と q との関係式により、流量観測値の変動を評価する可能性について検討を行う。

(1) スペクトル解析

ここで用いたスペクトル解析の基本式は

$$u(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{2n\pi x}{L} \right) \quad (1)$$

$$a_n = \frac{2}{L} \int_{-L/2}^{L/2} u(x) \cos \frac{2n\pi x}{L} dx$$

$$b_n = \frac{2}{L} \int_{-L/2}^{L/2} u(x) \sin \frac{2n\pi x}{L} dx$$

であり、観測データをもとに数値的に a_n と b_n を求める。ここで x は河道横断方向の距離、 L は計測範囲の約 2 倍の長さとしこれを解析範囲とする⁴⁾。但し $x=0.01m$ としてその間の流速は線形補間を行って解析を実施した。積分範囲の M は理論上無限大まで計算する必要があるが数値計算上は観測ポイント数までとする。このスペクトル解析が正しく成功したかどうかは流速の分布形から見ると生データ (raw) と解析結果を単純に比較することで証明できる。紙面の都合上ここでは示さないが、両者はよく一致していた。

(2) 代表流速 U_{ave} の決定方法

代表流速 U_{ave} を決める積分範囲 N の値を、河川砂防技術基準 (案)¹⁾ により決定する。河川砂防技術基準 (案) によると現況の浮子観測は水面幅、手法 (緊急法、標準法) により測線 (計測断面) 数を設定している。また現況の電波式流速計に代表される設置型流量計は緊急法程度の数のセンサーを持つ。例えば川幅 180m の河道であれば緊急法、標準法による測線数はそれぞれ 5、及び 15 である。ここで、式(1)の $N=5$ という意味は、5本の測線における観測データにより5個の係数 a_n 及び b_n を算定することと等価である。このことから緊急法及び標準法により得られた部分計測値の特性を調べるためにそれぞれ代表流速 U_{ave} を $N=5$ 及び $N=15$ として分析を進める。

図3はADCPを用いて連続観測より計測された鉛直方向平均流速の横断分布; raw、河床形状; depth、スペクトル解析により得られた $N=5$ と 15 の代表流速; $U_{ave1}(N=5)$ 及び $U_{ave2}(N=15)$ 、流れの変動成分; $du1(N=5)$ 及び $du2(N=15)$ を示す。横断方向の流速分布形状には、 U_{ave1} よりも U_{ave2} で示した分布形状の方がよく raw データの形状を示している。しかしながら必ずしも $du1$ や $du2$ が N の違いにより大きく変わるわけでもない。また、観測流量に対する差の割合は $N=5$ では 3.06% であり、 $N=15$ では 1.18% である。

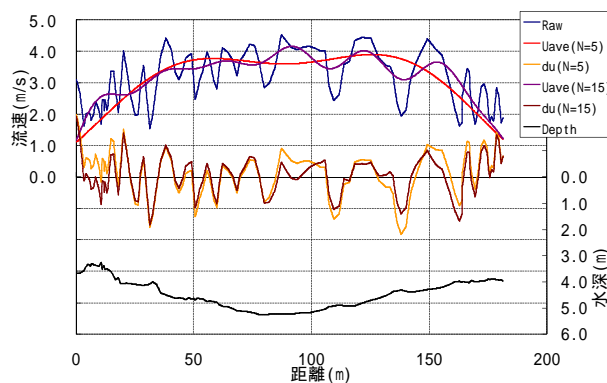


図3 ADCP 搭載ポートによる連続観測とスペクトル解析結果

(3) 流速の変動幅の検討

前節で求めた U_{ave} 及び du を用いて du/U_{ave} と q の関係を図4に示す。また、 q に対する du/U_{ave} の平均値および標準偏差として平均からの ± 1 及び 2 を求め、その値も図中に示した。

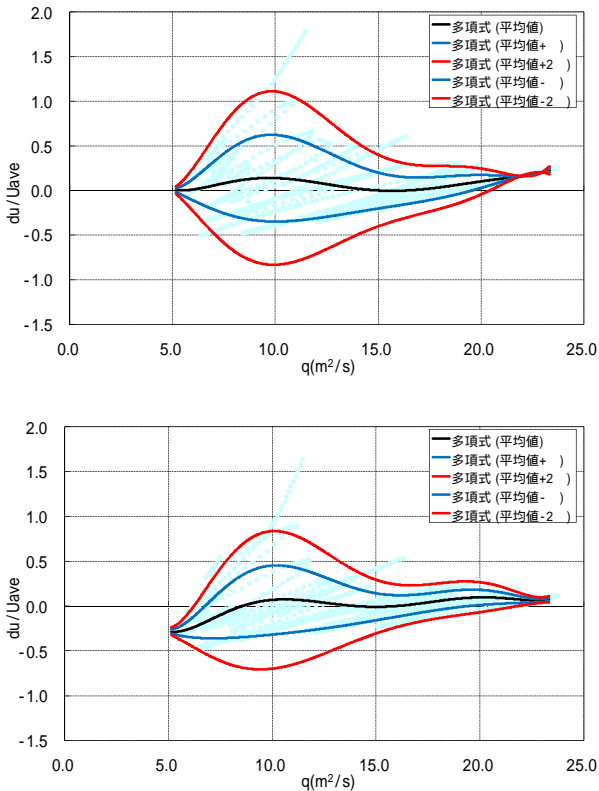


図4 du/Uave と q の関係 (上 : N=5、下 : N=15)

図4が示す通り du/Uave の関係は q の値で 5.0 から 22.5 ぐらいの範囲を、du/Uave は N=5 のときで -0.5 から 1.7、N=15 のときで -0.5 から 1.7 ぐらいの範囲で変動する。特に q = 10.0 のとき最も広がりを持ち、q の両端ではあまり広がりを持たない。この点は、図4の両端において単に母集団の数が小さくばらつきが小さくなることに起因している。よって両端のデータも含めてデータのばらつきの変動を現段階で議論することはあまり本質的でない。緊急法を想定した N=5 のケースでは平均値として概ね正の値をとる。一方標準法を想定した N=15 のケースでは q が 7m²/s 以下のとき負の値をとるがそれを超えると全体としては正の値となることがわかる。

代表的なデータを表1にまとめる。標準偏差では緊急法の値が標準法より大きくなっている。具体的には q=10.0 のとき du/Uave は 0.11 ポイント異なるが、q の値より du/Uave は変動する。この数字が意味するものは、手法の違いによる q=10.0 のばらつきが 10%異なることを意味するが、手法全体として 10%異なることを意味しないことに十分注意しなくてはならない。以下にこの手法で注意すべきことを挙げる。

- 1) 図4の曲線は流量観測所に固有の流況・乱流特性を示すものと考えられ、ある地点で構築された関係を他の地点で使用することはできない。
- 2) 乱流の特性を考えると似たような河道の形状では近

い関係を持つ可能性が高いが現段階では定かではない。

- 3) 河床波の特性から流量規模と粗度の関係は単純な増加関係にないことから、図4で得られた曲線を外挿することはできない。
- 4) ばらつき具合を 1 か 2 を使うかは統計学としての考え方は議論できるが現象論としては当面結論が出ない。

表1 平均値と標準偏差の代表値

代表流量 (m ² /s)	N = 5		N = 15	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
10.0	0.16	0.52	0.08	0.41
15.0	- 0.06	0.18	- 0.04	0.16
20.0	0.08	0.05	0.11	0.05

2.2.2 まとめ

- 1) スペクトル解析を用いて河道横断方向の流れ特性を把握した。
- 2) 緊急法と標準法の異なる手法により発生した誤差を検討した。
- 3) 流れが局所的に大きく乱れることによるばらつき具合を検討した。
- 4) 図4を用いるために必要な注意点を列挙した。

2.2.3 今後の課題

今後は本文で紹介した計測結果を蓄積し、洪水流の本質の理解を進めるとともに同時にそこで得られたデータから図4にプロットすべきデータを増やす。また部分計測タイプの流速計に関してはそれぞれの特性を確認することで計測原理が持つばらつき具合を調べる必要がある。

【謝辞】

本報告で用いた貴重なデータは北陸技術事務所及び利根川下流河川事務所から提供して頂いた。ここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修、(社)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、山海堂、1997年10月
- 2) 例えば福岡捷二：洪水の水利と河道の設計法、森北出版株式会社、2005年1月
- 3) 例えば Nezu and Nakagawa : Turbulence in Open-Channel Flows, A.A.Balkema Publishers, 1993
- 4) 例えば日野幹夫、スペクトル解析、朝倉書店、1977年

STUDY ON IMPROVEMENT OF RELIABILITY OF RIVER DISCHARGE OBSERVATION DATA USING NEW SENSOR TECHNOLOGY

Abstract : It has been becoming issue to improve the accuracy, efficiency and reliability of river discharge measurement and its observational data as the basic foundation of river planning/management. This research aims to understand the physical phenomena and establish new technologies about discharge observation to attain the improvement of accuracy of river discharge observational data. Based on understanding, the different-observational data between ongoing and prospective new observational method is considered. Though observational data need to be accumulated, new conceptual idea is proposed in the paper.

Key words : discharge observation, velocity profile, new sensor using acoustic Doppler instruments, error factor