

I-1 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チーム

研究担当者：深見 和彦、菅野 裕也

萬矢 敦啓

【要旨】

河川計画・管理の基盤となる流量観測データの精度確保と効率化を図るとともに、その信頼性の向上を図ることが喫緊の課題となっている。このことから、流量観測に関する新技術の確立や観測データの精度確保と効率化を図ることを目的として、超音波技術を応用した流量観測センサ（ADCP）の観測精度向上と適用性の検討を行うとともに、同センサによる観測データを用いて横断・鉛直方向流速分布について検討を行った。また、水位流量曲線式（以下、HQ 式という）作成・照査過程における省人化・コスト縮減を図ることを目的に、水位流量曲線式作成照査支援システム（以下、HQ システムという）の改良を行った。その結果、ジンバル機構を有した ADCP 搭載器により、ADCP を鉛直下向きに保つことで、データ取得率の向上が可能であることが解った。また、従来の流量観測が持つと考えられる計測精度および計測誤差を算定した。HQ システムについては、データベース管理ソフトの変更により動作の安定化を図るとともに、システムに関する意見・要望を整理した上で問題点を解決するための改良を行った。

キーワード：流量観測、流速分布、超音波技術を応用した流量観測センサ、ジンバル機構、HQ システム

1. はじめに

河川計画・管理において、最も重要でその基盤となってい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、抜本的な改定はなされていない状況である。このような背景の中、近年では新たなニーズとして流量観測に関する新技術の開発や、省人化・コスト縮減の必要性および流量観測データの精度確保と効率化が求められているところである。平成 20 年度には国土技術政策総合研究所と土木研究所の共同提案による「流量・流砂量高度化プロジェクト」が開始され、新技術の特性・限界を把握した上で統合的に有効活用し、省コスト・省人型で安定した精度を確保できる流量観測手法の確立を目指し、実河川での計測・検証を実施しているところである。

本研究では、超音波技術を応用した河川流量観測センサ等を活用し、河川における横断方向・鉛直方向の流速分布等について、既存の観測方法の再評価

を行うとともに、河川流量観測センサ等を用いた新たな流量観測技術の適用性等について検討を行うものである。また、流量観測統計資料を確定する上で重要な HQ 式の作成・照査を効率化するための支援システムを改良し、流量確定作業における精度確保と省人化・コスト縮減を図り、低水・高水流量観測データの信頼性向上を図るものである。

2. 研究方法

2.1 河川流量観測センサの精度検証

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。

2.1.1 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表 2-1-1 に示す。

表 2-1-1 等流速検証における ADCP 設定条件一覧

No	観測モード	層厚 (m)	層数		発信ピング数		間隔 (s)
			設定	実測	WP	BP	
1	標準	0.10	15	7	30	10	3.78
3	ハイスピード	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ング数

※BP:河床計測用に発信するピング数

※ハイスピードモードにおける WP 発信ピング数の括弧内は1回ピングを発信する間に補完的に発信するサブピング数を示す。

2. 1. 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 2-1-2 に設定検証の条件を示す。

表 2-1-2 設定検証における ADCP 設定条件一覧

No	観測モード	層厚 (m)	層数		発信ピング数		間隔 (s)
			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

2. 2 ジンバル機構を有した ADCP 搭載器による観測精度向上の検討

流量観測の手法として ADCP による流れの計測が広く用いられるようになった。ADCP 単独での計測は不可能であり、観測船、RTK-GPS、音響測深機など複数の機器を併用することで流量計測のためのシステムが完成する。土木研究所、国土技術政策研究所では洪水時に ADCP を用いた河川流量計測を行うため、橋上操作艇の作成、システム全体の構成方法の検討を行ってきた。一方 Okada et. al (2009) は ADCP が揺動することによる計測結果の誤差を指摘している。すなわち pitch および roll 角度を計測する ADCP の内部センサーが液面型であることから、高精度の傾斜計を用いて ADCP が揺れる場合の計測性能を検討している。他方橋上操作艇に関しては、舟艇としてモノハル、トリマランのどちらが適しているかは、安全面、ADCP の計測への適合性を考慮して決定する必要がある。一般的な船体設計の考え方からするとトリマランの方が揺れが少ないので Okada et al.(2009) が指摘する観点からすると、より高い計測精度を確保することができる。しかしながら洪水時の流下物をより避けやすく

することを最優先とするならば、モノハル型もトリマラン型以上に優先度の高い選択肢になり得る。そこで本検討は、モノハル型の橋上操作艇を設計する際、高い精度を確保するためのオプションとして、ボートが揺れても ADCP は揺れない仕組みを考える。

具体的にはジンバル機構を採用することで、ADCP を搭載しているボート本体が揺れたとしてもジンバル機構を持っている治具に固定されている ADCP は常に鉛直下向きを向いていることになる。具体的には図-2-2-1 のようになる。本検討では治具を含めたジンバル機構を有した ADCP 搭載器の検討を行なう。

2. 2. 1 ジンバル機構を有した ADCP 搭載器の考え方

ADCP を橋上操作艇に搭載する方法として二つの考え方がある。一つは船体から ADCP を突き出すもので、これは市販のリバーボート等で採用されている。もう一つは本検討のように搭載器を作成し、船体内に ADCP を格納することである。後者を選択している理由は二つある。一つは洪水時の河川で ADCP 観測を行なう際に、ADCP が船体から突き出ていることで、浮遊物などによる破損の心配がある。もう一つは ADCP 本体が突起物となることで、そこから泡が発生し計測に障害がでる可能性があることである。しかしながら高速流のなかでリバーボートを用いて計測した結果、泡の発生に関しては特に問題が無いことを確認している。

ジンバル機構を有した ADCP 搭載器を用いる場合、搭載器下部を低密度ポリエチレンで塞ぎその中を水で満たすことで、ADCP のトランスデューサが空气中に露出しないようにする。ここから派生する問題点は搭載器が大きすぎて ADCP との間隔が開いてしまう場合、トランスデューサから発し、受信した音波が搭載器内で残響することがある。これが起こると ADCP 観測の問題点である上層不観帯が長くなることや、計測値そのものに問題がでることが懸念されている。それゆえ、ジンバル機構をもたない一般的な搭載器の内径は ADCP の直径+5cm 程度にしなくてはならない。一方、ジンバル機構とは、搭載器の頂点で ADCP を吊り下げ、舟艇の傾きと同時に ADCP は搭載器内で自然に鉛直下向き（但し 20 度程度の範囲内）に傾かせる機構であることから、搭載器のサイズを大きくして ADCP が揺れる

だけのスペースを確保する必要が生じる。その場合、最大の困難は、ADCP と搭載器の隙間がある事により発生する残響の問題である。本検討では、ADCP と搭載器の隙間をなくすべく、図 2-2-2 のように伸縮性の高い生地で ADCP 全体を囲む。ADCP 本体が片方に傾いたとき、その反対側が伸びることで、隙間をうめて、ADCP 本体は常に鉛直下向きになる。

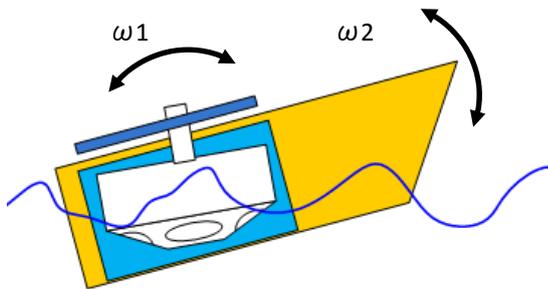


図 2-2-1 ジンバル機構を有した ADCP 搭載器
概念図



図 2-2-2 作成したジンバル機構

2. 2. 2 検討方法

本研究では、下記の 2 通りの搭載器を持ったフロートを作成し、それぞれによる ADCP のデータ計測値の特性を確認した。

- a) ジンバル機構を搭載したフロート (図 2-2-3)
- b) ジンバル機構を持たないフロート



図 2-2-3 ジンバル機構を搭載したフロート

実験地点は、利根川 76.5km 地点 (布川観測所周辺) を対象とし、フロートを有人船により牽引しての移動観測 (図 2-2-4) と、強風時において橋上操作による定点観測 (図 2-2-5) を実施した。尚紙面

の都合上、定点観測の結果は割愛した。



図 2-2-4 布川地点における移動観測



図 2-2-5 布川地点における定点観測 (橋上操作)

2. 3 鉛直方向流速分布についての研究

流量観測の精度向上を図ることを目的として洪水時の鉛直方向流速分布に着目し、流速分布推定式である安芸の式・Bazin の式・対数分布式を用いて鉛直方向流速分布の推定値を算出し、ADCP 観測による実測値との比較を行うことで、それぞれの流速分布推定式の特性について評価を行った。本研究では、実測値として北陸地方整備局管内の阿賀野川馬下観測所にて平成 18 年 10 月に観測された ADCP 観測データを用いた。

はじめに、ADCP 観測データの各アンサンブルの実測値と各式から得られた推定値の比較(図 2-3-1)により、鉛直方向流速分布における決定係数を算出し、各式の整合を評価した。次に、水深・河道状況に着目し、表面流速を鉛直方向平均流速で除して算出した流速比と水深との相関図を作成し、各式の特性を評価した。流速比は、1 に近づくほど鉛直方向の流速が一樣となり、値が大きくなると鉛直方向の流速分布で水面付近の流速が大きい分布形状となることを示している。

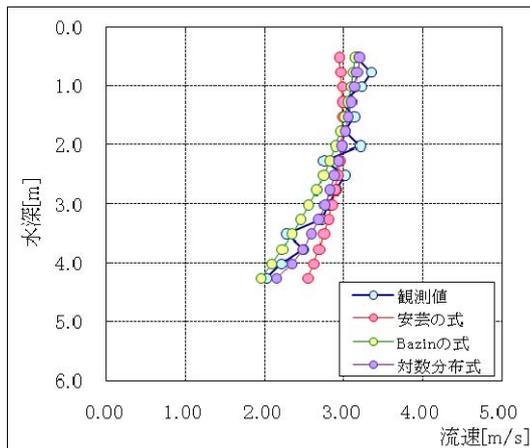


図 2-3-1 ADCP 観測データと各式による推定値

2. 4 横断方向流速分布についての研究

本研究では流れの変動成分の特性を調べるために出水中の計測結果を用いて横断方向流速分布に対してフーリエ級数展開を行うことで、代表流速および変動成分を抽出することを試みる。本研究は国土交通省北陸技術事務所が木下良作氏の指導のもとに計測したデータを用いて分析を行った。

2. 4. 1 計測・解析手法

現地計測および解析手法のフローを図 2-4-1 に示す。

- ① ADCPにおいて、河道横断方向へ計測を行う。河道線形より左右岸の出発および到着地点を決定しておく。また上記両地点を直線的に結んだ測線で計測することが望ましい。
- ② ボートの航跡が直線でない場合、それを直線にする。河道の条件によっては、ボートの操作が困難になり、必ずしも直線的に移動できないこともある。測線間隔をボートの航跡によらず一定にするために以下のことを仮定して航跡の直線化を行う。
 - 1) 流速値、水位、河床高は縦断方向に変化しない。
 - 2) 河道の縦断方向とは①で決定した測線に垂直であること。航跡の直線化に関しては 図2-2-3 により詳細に説明する。
- ③ ADCPの計測値の水面から3から5層の計測値を平均する。この層を選択した理由は、水面付近の計測値が本論文の議論の対象であること、1, 2層はADCPから近すぎて流速値に何らかの影響を受けている可能性があることがあげられる。
- ④ 不均等に存在する測定点の間を等間隔 (0.1 m 毎) に補間するために線形補間を行う。ボートの移動速度は必ずしも一定ではないため、フーリエ級数展開を成功させるためのデータ処理の一つで

ある。

- ⑤ フーリエ級数展開を行う。使用する式と今後用いる係数は下記ようになる。

$$a_n = \frac{2}{L} \int_{-L/2}^{L/2} u(x) \cos \frac{2n\pi x}{L} dx \quad (1)$$

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

$$ue(x) = \frac{a_1}{2} + \sum_{n=2}^N \left(a_n \cos \frac{2n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{2n\pi x}{L} \right) \quad (3)$$

$u(x)$ は④の出力値、 a_n , b_n はそれぞれの波の振幅を示す。 L は FFT を成功させるための処理 ⑤ を行って、計測範囲の河道幅のほぼ二倍程度の値とした。 $ue(x)$ は式(1) および(2) から算出した a_n , b_n および式 (3) を用いて計算した流速値である。理論上、 N が無限大のときに、 $u(x)$ と $ue(x)$ は等しくなるが、計測値を用いる場合 N が L に等しいときとなる。

- ⑥ 代表流速 $Uave(x)$ および変動成分 $du(x)$ を決定する。このとき、 $Uave(x)$ は式 (3) の任意の N を用いて算出する。 $du(x)$ は $u(x)$ から $Uave(x)$ を差し引いて求める。
- ⑦ 変動率を算出する。これは変動成分を代表流速で除した $du(x)/Uave(x)$ と定義する。
- ⑧ $Uave(x)$ とその場所での水深 h を乗じて単位幅流速 $q(x)$ を算出する。

以上の解析結果をもとに、フーリエ解析から推定される洪水流の横断方向の乱れスケール、および、流況 (単位幅流量) に応じた乱れ成分の変化について議論を行う。

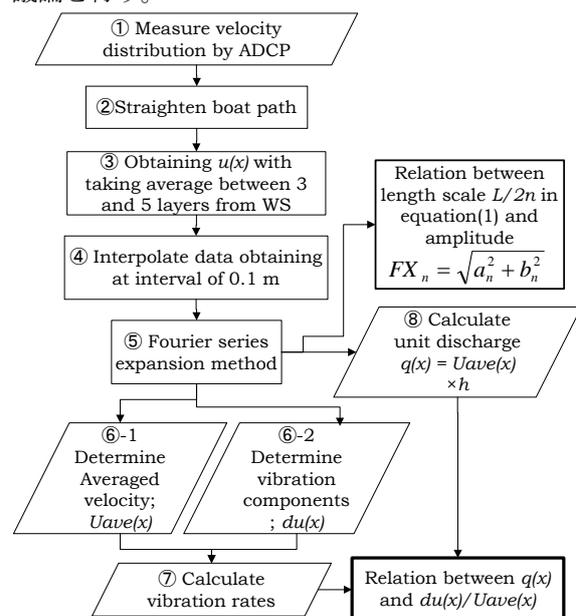


図 2-4-1 解析手法のフロー

2. 4. 2. 使用した現地計測データの取得状況

ADCP を用いた計測作業は、北斗測量調査株式会社により行われた。計測は有人船、またはラジコンボートを用いた。計測手法の詳細は参考文献⁵⁶⁾を参照されたい。ADCP は Teledyne RDI 社製の Work orse ADCP (1200 kHz) を用いている。ADCP の計測条件は、計測モードを通常モード、アンサンブル数あたりの ping 数を 5、計測層厚を 0.25 m、計測層数を 40 とした。この設定によりアンサンブルあたりの計測時間は約 1.2 秒である。また音響測深機、RTK-GPS を補助的に搭載し、位置情報は RTK mode の計測値を用いている。

本解析は阿賀野川の馬下地区で計測された結果を用いた。馬下地区は河口から 30 km 地点に位置し、平均河床勾配は 1/1,150、河床の代表平均粒径は 51.7 mm 程度であり、セグメント M として分類される。比較的直線的な河道で、本観測時程度の出水ではこの区間は単断面水路に近い形をしている。出水当時、紀伊半島の南に発生した低気圧が日本列島の南沿を通過し特に東北から東日本では大雨と暴風をもたらした。計測時間と当時の馬下地区での水位変動を図 2-4-2 に示す。図 2-4-2 の計測 ① で ADCP による流量は 2,000 m³/s、計測 ⑤ の流量は 1,000 m³/s 程度であった。この地点における計画流量が 10,000 m³/s 規模であることを考えると観測当時の出水は中から小規模洪水である。

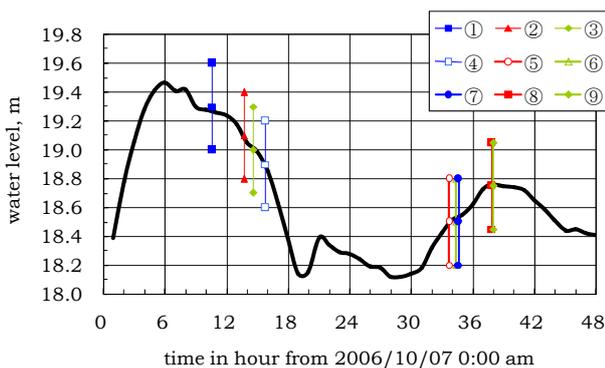


図 2-4-2 計測時の水位変化と計測時刻

計測データの一つを図 2-4-3 のように描く。図中のコンターは計測された絶対流速値、UV cm/s、青曲線は水位、黒曲線は河床高を示す。赤曲線は計測時のボートの航跡、橙曲線は直線化した仮想のボートの軌跡を示す。実際の計測に際して赤曲線が示すようにボートの航跡は必ずしも直線ではない。局所的な流速場の変化がボートの動きに大きな影響を及

ぼし、時には 360 度回転することもある。図 2-4-3 に示した例は極端ではあるが、河道に対して直線的な測線上にボートを走行させることは簡単ではないため、他の計測結果も多かれ少なかれ、測線からのずれが認められる。本解析ではフーリエ級数展開を行うため横断方向の長さを議論する必要がある。よって、図 2-4-1 の②で示した仮定を元に曲線的な航跡を直線化した。これは岡田ら²⁾の航跡補正とほぼ同様であるが、局所的な流速差をより際立たせるために基本的には平均化は行っていない。具体的には、航跡補正を行なう前の横断方向のアンサンブル数と比較すると二倍程度の数量を持つ格子を直線化した測線上に用意する。航跡から測線へは上述の仮説のもとに単純に平行移動してそれをその格子内の値とする。例えば観測船が 360 度回転をしてしまった場合は一つの格子内に複数のアンサンブル値が含まれることになるが、この場合に限り算術平均を行なう。また測線上の用意した格子内に値が存在しない場合、その場所はデータが存在しないものとする。ここで言う平均は、三次元的な流速、河床高、水位、位置情報が含まれる。

木下が複数の講演録⁷⁾で示しているように、図 2-4-3 で示す流速は短冊のような分布を持ち、速いところは水面から河床まで全体的に早く、遅いところでは同様の傾向を持つ。また流速分布は河岸から河道中央に向かうに従い単調的に増加するのではなく、早い短冊と遅い短冊が交互に現れ、徐々に流速が速くなる様子が見て取れる。

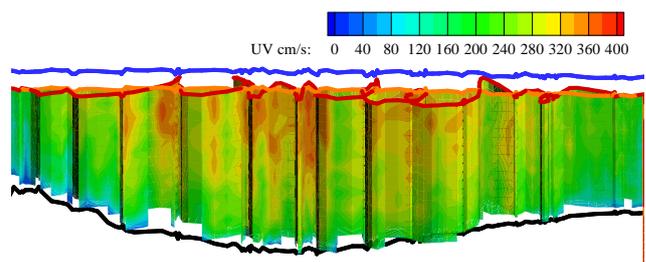


図 2-4-3 河道横断方向の流速分布 (コンター)、水位 (青曲線)、河床高 (黒曲線)、航跡 (赤曲線)、および直線化した航跡 (橙曲線)

2. 5 ADCP 移動観測適用観測所の検討

ADCP 移動観測による流量観測の標準化を目指すにあたって、本手法が実河川の洪水時の観測においてどの程度適用可能かについてあらかじめ把握しておくことが重要である。そこで、全国の一級河川

の主な流量観測所の流量観測データを収集し、平成14年～18年の計5年間の観測流量表から平均流速とフルード数を算出し、これまでの研究事例から推定される ADCP 移動観測の観測限界をもとに、洪水時の ADCP 移動観測適用性について網羅的な検討をおこなった。

2. 5. 1 ADCP 移動観測の観測限界

木下ら²⁾によれば、ラジコンボートによる洪水時流量観測は、洪水の表面の最大瞬間流速が 5m/s 以下、かつ、平均流速によって計算される流れのフルード数が 0.65 以下あたりを観測限界としている。また、橋上操作艇については、岡田ら³⁾が四万十川において最大表面流速約 3.5m/s の洪水流の計測を行っている。

一方、国土技術政策総合研究所および土木研究所は、利根川平成大橋付近の交互砂州の瀬において異なる形の橋上操作艇3艇を用いて橋上操作を行い、橋上操作艇の構造による揺動の影響を比較検討している。当該調査箇所は平常時でも最大流速 4m/s 程度、フルード数も局所的には1に近く、水面振動の激しい場所において計測を実施した。橋上操作艇の飛跳ね、大きな傾き、激しい揺動などの厳しい条件の中で、データ取得率を65%程度まで上げることができた。今後これを限りなく100%程度に上げることが今後の課題である。また、実際の橋上からの観測では、橋脚による乱流の発生等により、観測限界は低くなることが考えられ、岡田らの四万十川での観測事例にもある最大表面流速 3.5m/s 程度以下、というのが橋上操作艇における現時点での安全側を見た観測限界として妥当であると考えられる。

2. 5. 2 洪水時平均流速とフルード数の算出

全国の地方整備局管内（北海道開発局を含む）の160観測所における平成14年～18年の計5年間の浮子による流量観測データから、洪水流量観測時の平均流速とフルード数を算出した。フルード数の算出は、観測流量表中の水面幅と断面積から平均水深を算出し、平均水深と平均流速により算出した。

2. 6 ADCP 移動観測ガイドライン（案）の検討

近年、流量観測に ADCP が多く用いられるようになり国内においても観測に関するさまざまな研究が行われている。特に、感潮河川における低水時の流量観測や、ラジコンボートおよび橋上操作艇を用いた洪水時の流量観測が実施され、洪水時の流れの構造の解明、現状の流量観測手法の精度評価等が行われている。そこで、これらの研究成果と、土木研究

所および国土技術政策総合研究所で実施した、実河川での観測結果をもとに、ADCP 移動観測を実施する際の基本事項を取りまとめ ADCP 移動観測ガイドライン（案）を試作した。その上で、今後の課題と検証項目について整理した。

2. 7 HQ システムの検討

通常の河川管理においては、現地で計測した水位から水位流量曲線式（以下、HQ 式という）を用いて経時的に連続した流量を算出している。土木研究所では、この HQ 式の作成・照査作業を簡便に実施できるように工夫するとともに、その精度向上を図ることを目的として、平成10年度から HQ システムの開発に着手し、これまで試験運用およびシステム改良を重ねて来たところである。

これまでの HQ システムでは、将来的に国交省河川局の水文水質データベースと一体化することも視野に入れて、データベース管理ソフトとして Oracle を使用していた。しかし、Oracle はデータベースソフトとしては非常に優れたものであるが、その扱いは専門の知識が必要であること、河川事務所等では Oracle の専門知識を有する担当者が必ずしもいるわけではなく、Oracle 上で動作する HQ システムの動作が不安定になる場合があること、等の課題があった。そこで、データベース管理ソフトウェアについて再度精査した結果、HQ システムに求められるデータベース容量を考慮した場合、維持管理が容易な MS-ACCESS でも必要な機能を失わずに動作させることが可能であることが確認できたため、データベース管理ソフトを Oracle から MS-ACCESS へと変更した。この改良により、今まで以上に動作が安定し維持管理が容易なシステムとすることができたと考えられる。また、これまでの試験運用において集約した意見・要望を反映した上で、改良を行い、アプリケーションとしての操作性の向上を図った。

3. 研究結果

3. 1 河川流量観測センサの精度検証結果

3. 1. 1 等流速検証

表 2-1-1 の設定条件において等流速検証を実施した結果を図 3-1-1 に示す。図は横軸に設定速度（検定台車速度）、縦軸に ADCP 測定流速として示す。以下に結果を示す。

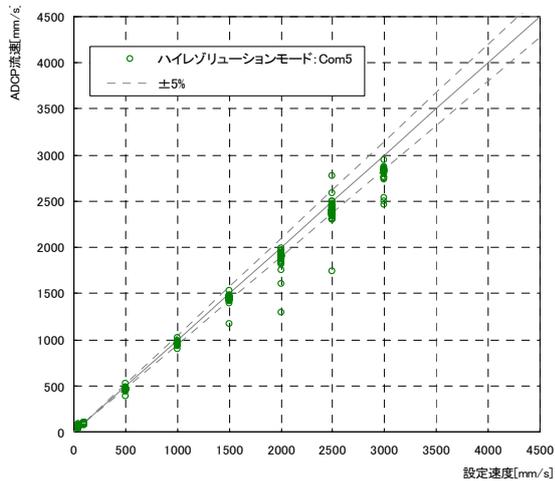
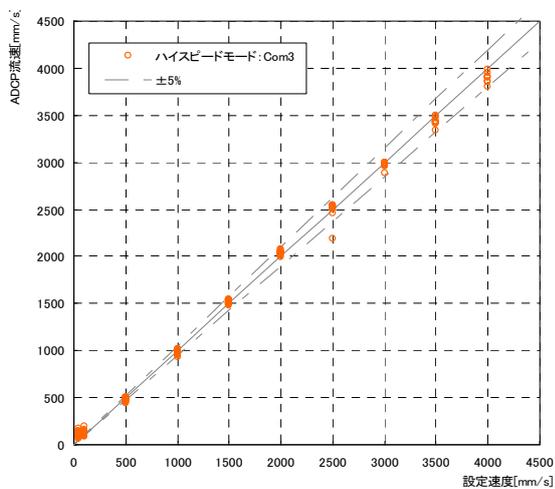
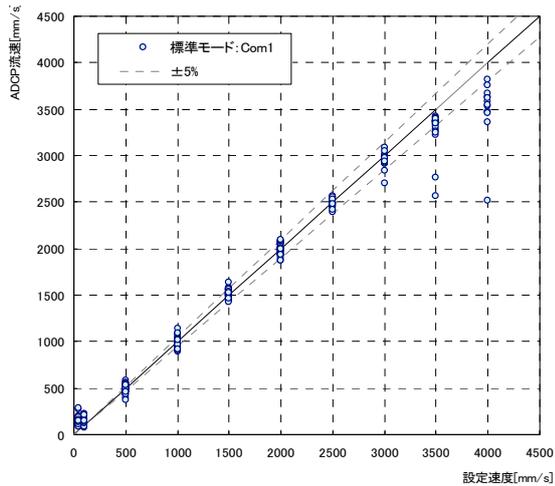


図 3-1-1 等流速検証結果

- ・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。
- ・ハイスピードモードは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_RESOLUTION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。

3. 1. 2 設定検証

表 2-1-2 の設定条件において設定検証を実施した結果を図 3-1-2 と以下に示す。

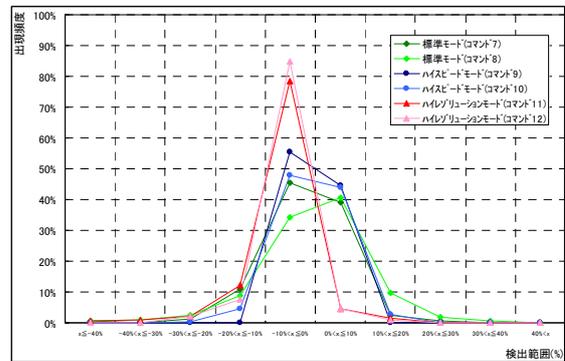
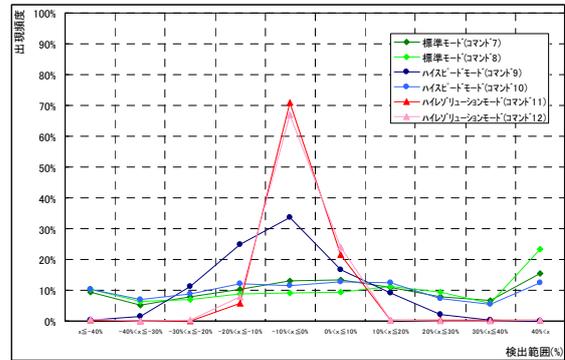


図 3-1-2 設定検証結果（上：0.5m/s、下：3.0m/s）

- ・設定速度が 0.5m/s の場合は、ハイ_RESOLUTION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。
- ・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。

3. 1. 3 検証結果のまとめ

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_RESOLUTIONモードが最も良好な結果を示した。

3. 2 ジンバル機構を有した ADCP 搭載器による観測精度向上の検討結果

3. 2. 1 実験による結果

本観測では、各フロートをあえて激しく揺動する様に河道内をランダムに走行し、ジンバル装置の効果を確認した。なお、『装置無し』の場合と『装置有り』の場合とでは、概ね同様の走行を行った。

その結果図 3-2-1 に示す様に『装置無し』では、ADCP の内部センサーによるピッチング値が 20° を越える場合が出現した。ADCP 内部センサーにより傾斜角が 20° を越えると、計測器の性能上当該アンサンブルは欠測してしまう。

これに対し、『装置有り』の場合は、 20° 以内に収まっており (図 3-2-2 参照)、ADCP が傾くことによる欠測は見られなくなった。

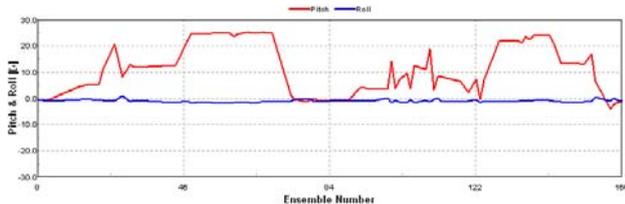


図 3-2-1 移動観測の ADCP の揺動 (装置無し)

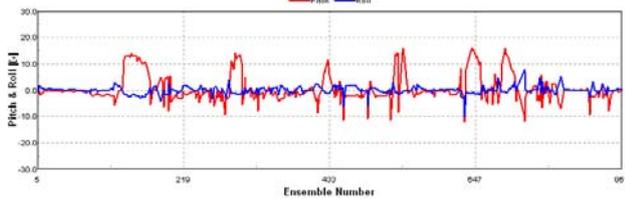


図 3-2-2 移動観測の ADCP の揺動 (装置有り)

また『装置無し』では、激しい揺動場においては ADCP データの欠測が多くなることが確認された。特に、低層付近のデータが顕著に欠測する傾向が見られた (図 3-2-3 参照)。一方『装置有り』では、ADCP 自体の揺動が抑制され、欠測状況が大きく改善された (図 3-2-4 参照)。すなわちジンバル無しの場合は、ADCP が揺動することで、トランスデューサが音波を発信したときと受信したときの向きが大きく変わることからデータ欠損が生じる。逆にジンバル機構は揺動によるトランスデューサの向きを変えないことから欠損を抑えることになった。このことはジンバル機構を有した ADCP 搭載器を構想しているときには想定することなく、従属的に発生したかつ、ジンバル機構を有した ADCP 搭載器を使用する上で最大の利点となった。

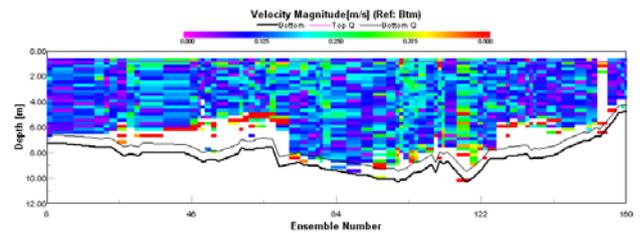


図 3-2-3 ADCP 観測データ (装置無し : WP=5)

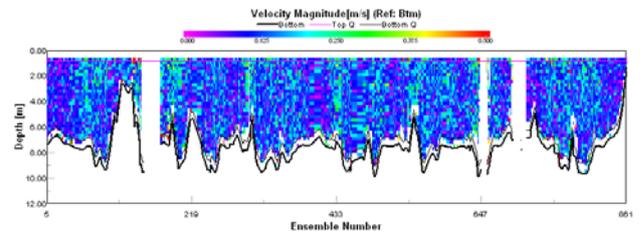


図 3-2-4 ADCP 観測データ (装置有り : WP=5)

図 3-2-5 は、移動観測の各観測時の全アンサンブルを対象として、1 アンサンブルにおけるデータの取得率 (鉛直方向流速のアンサンブル数と欠測が発生しない計測値の割合) の分布を示している。図 3-2-5 の装置無し (1 ping) はデータ取得率は非常に低い。他方、装置無し (5 pings) の場合、取得率 90% 以上の領域が装置無し 1 ping と比較すると大きく増える。これは、1 ping の計測が一般的に推奨されず、5 ping の計測が推奨される理由と符合している。

一方ジンバル機構を追加した装置有りの場合、データ取得率は大きく上がっている。特筆すべきことは装置有り (1 ping) は装置無し (5 pings) と比較しても取得率が高いことである。このことから、ジンバル機構を搭載することで、時間的により詳細な計測が可能になることがわかった。

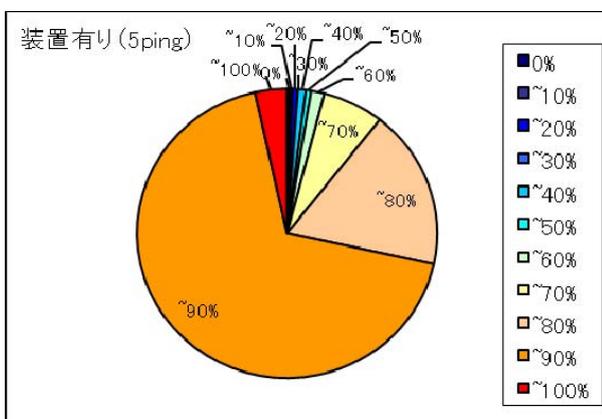
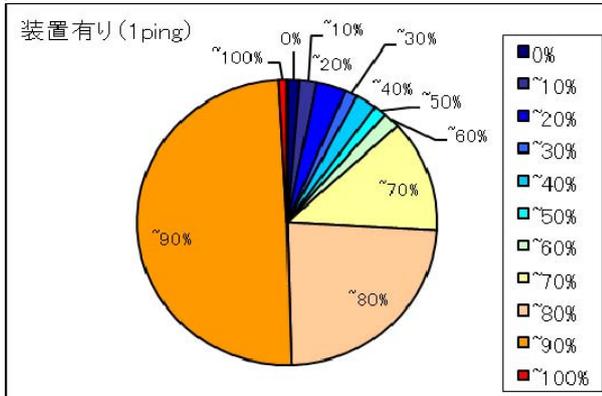
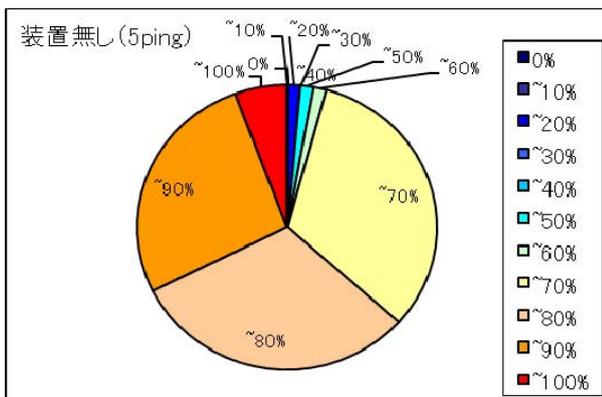
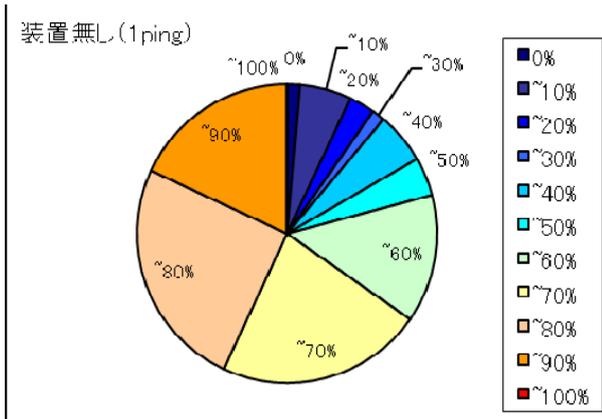


図 3-2-5 データ取得率

3. 2. 2 考察

本研究から、ADCP を鉛直下向きに保つことで、下記の 3 点の向上を図ることが可能であることが解った。

- a) データ取得率の向上
- b) データの安定化
- c) 測深精度の向上

これまでは、洪水時等での水面形が大きく荒れる状況化での ADCP の適用は困難であるとされてきた。しかし、ADCP を鉛直下向きに保つことで ADCP データの取得率が格段に向上し、洪水時の流況を把握することが可能になる。

3. 3 鉛直方向流速分布についての研究結果

実測値と各流速分布推定式から得られた推定値を比較し、算出した決定係数の出現頻度を図 3-3-1 に示す。

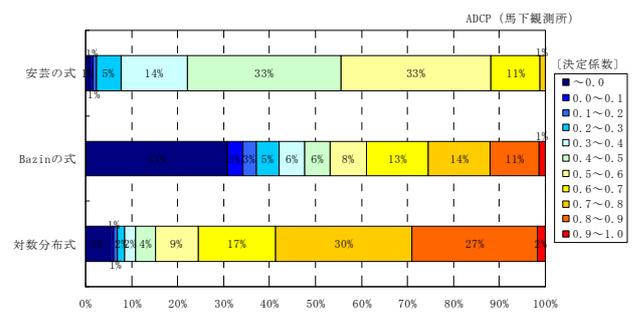


図 3-3-1 各式による決定係数の出現頻度

図 3-3-1 より、各流速分布式について以下の傾向が見られた。

- ・安芸の式は推定値が実測値から大きく外れるケースが少なく、安定性が高い。
- ・Bazin の式は決定係数が極端に低い割合が最も多い。
- ・対数分布式は決定係数が 0.6 以上の割合が約 7 割と、3 式の中で最も適合度が高い。

次に、流速比と水深の相関図を図 3-3-2 に示す。

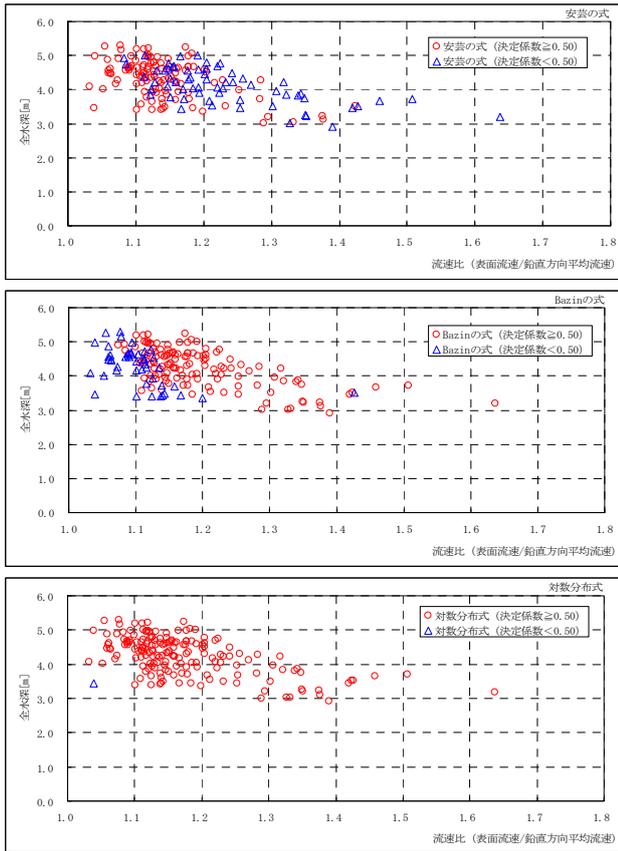


図 3-3-2 水深と流速係数の相関図

図 3-3-2 により、各流速分布式について水位・河道状況での適合度を評価したところ、状況によって以下の通り適合範囲が異なる傾向が見られた。

- ・安芸の式は水深が深く、流速分布が一様である状況で適合度が高い。
- ・Bazin の式は水深が浅く、流速分布の傾きが顕著な場合に適合度が高い。
- ・対数分布式は、水深が浅く、流速分布が一様である場合に適合度が高い。

今回の検討では、水深・河道状況（流速分布形状）によって流速分布推定式の適合範囲が異なる傾向が見られた。このことから、水深・河道状況に応じて最適な式を適用することにより、流量観測精度の向上が図られる可能性が示唆された。しかしながら、今回対象としたのは限られた観測所における、ごく限定的なデータであったことから、今後は様々な水理条件下での検証が必要であると考えられる。

3. 4 横断方向流速分布についての研究結果

3. 4. 1 変動特性に関して

図 3-4-1 は単位幅流量と変動幅の関係を示したものである。⑧ から得られた単位幅流量、 q を横軸、⑦ で得られた $du(x)/Uave(x)$ を縦軸、 $Uave(x)$ を

第二縦軸に描いた。図中の黒点は $du(x)/Uave(x)$ 、紫点は $Uave(x)$ を示す。また、赤曲線は q の平均値、二つの青曲線はそれぞれ q の平均 $\pm 1\sigma$ 、同様に二つの橙曲線は q の平均 $\pm 2\sigma$ を示しており、いずれも最小自乗法で最適化した 6 次曲線による滑らかな近似曲線により表現した。これらの曲線、特に橙曲線は黒点の包絡線の役割を持ち、流況（単位幅流量）の変化に対応した流速乱れの変化の大まかな傾向を掴むことができる。ここでは単位幅 q における統計値を算出したときの母集団に関しては、考慮せずに図 3-4-1 を描いた。この図の具体的な使用方法は、例えば観測者が現在の水深を把握し、その後何らかの方法で代表流速を求めたとする。その二つから求めた q m^2/s の値が $13 m^2/s$ であれば、そのときの変動率は最大でも $+10\%$ 程度、 -20% 程度の値を持つことを意味する。

図 3-4-1 で橙曲線により挟まれた幅により示される流速の変動成分 $du/Uave$ の大きさは、3 つの極大値を持つように見える。紙面の都合上ここでは示さないが他の計測結果も同様の傾向を示す。すなわち一つは q が $10.0 m^2/s$ 以下のときと、他の 2 つは $10.0 m^2/s$ 以上のときの値である。紫点が示すように、 q が $10.0 m^2/s$ 以下のときは $Uave$ は $2.5 m/s$ 以下の値を示すことになり、前述のとおり、フーリエ級数展開により代表流速を算定することが困難な領域であるため、物理的な考察はあまり意味がないと考えられることから、 $10.0 m^2/s$ 以上の領域での $du/Uave$ に関してのみ議論を進める。

その領域における $du/Uave$ は、大まかな平均値として ± 0.15 程度の値を持つが、代表的な値を抽出するため、ここでは最頻値により代表させることとする。その根拠を以下に述べる。

流速分布は中心ほど早くなるが、左右岸からの流速差が大きい。平均流速として考えると $3 m/s$ 以上の流速が河道の大部分を占める。またこの河道は単断面河道に近いので水深の変化もそれほど大きくない。それ故ある範囲内の q の母集団が全体の流速値の大半を占めることがある。本解析の場合、 $q = 20 m^2/s$ から $22 m^2/s$ の間に全体の 30% 近いデータが集中している。よって河道のある水位での代表的な $du/Uave$ に最頻値を用いる方が、その断面における最も代表的な特性を示す上で有効であると考えられる。

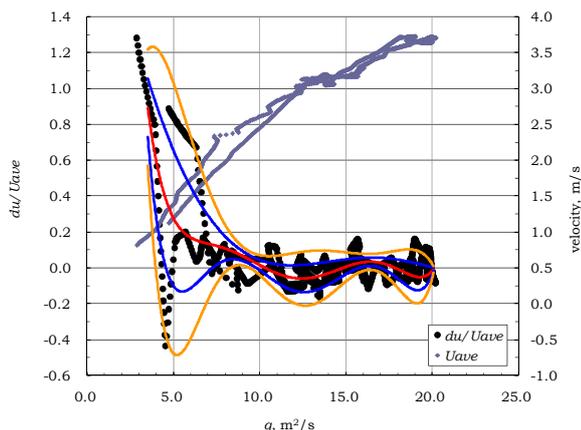


図 3-4-1 単位幅流量と変動成分の関係

次に図 3-4-2 に du/U_{ave} と水位の時間変化を示す。 du/U_{ave} は最頻値により求めたもので、 $N = 5$ 、 15 のときの結果が示されている。ここから水位の変化に伴う明確な特徴を捉えることは難しいが、全体的に水位が低いほど値が小さいこと、 $N = 5$ のときの方が値にばらつきが大きく極端に大きな値を算出することがあること、全体的に $N = 5$ の方が大きな値を取ること、 $N = 5$ のとき 12% から 20%程度、 $N = 15$ のとき 10%から 14%程度の値となることがわかる。

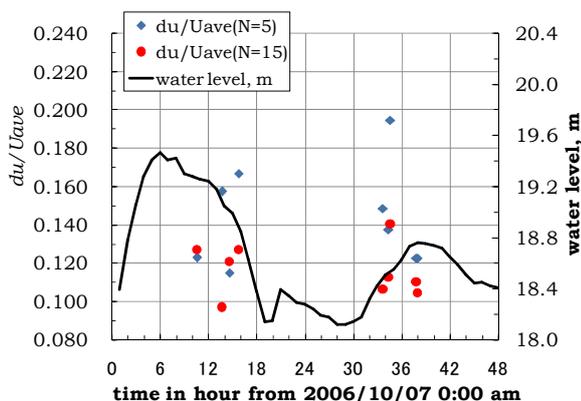


図 3-4-2 du/U_{ave} と水位の時間変化

3. 4. 2 結論

本検討は ADCP で河道を連続的に観測した計測結果を用いて、フーリエ級数展開により空間的な代表流速、そこからの差分として定義される変動成分を抽出する手法を構築し、そこから推定される流量観測における不確定性について議論を試みたものである。その結果をまとめると以下ようになる。

- 従来の洪水流量観測である浮子観測が持つと考えられる計測精度および計測誤差について、上記の諸仮定のもとで考察を試みた。
- 本検討の範囲では緊急法程度 ($N = 5$) のとき 12% から 20%程度、標準法程度 ($N = 15$) のとき 10%

から 14%程度の誤差 (変動成分) を持つことがわかった。

ここから得られた結果を議論するにあたり以下のことを注意しなくてはならない。

- 図 3-4-1 の曲線は測線に固有のものであり、その場所での流況・乱れ特性であることが考えられ、ある地点で得られた結果を他の場所で使用することはできない。例えば、今回計測した河道が単断面水路に近いこと、流速がほとんど分布することがなかったが、上記結論に影響している可能性がある。
- 乱れ特性を考えると似たような河床形状を持つ河道は同様の乱れ特性を示す可能性が高いが、測線上の河床形状だけで相似性を判断することはできず、その測線の上下流を考慮して判断する必要がある。
- 上述のように期待される流速測定の変動幅の評価を試みたが、これは現実の流量観測が持つ誤差とは異なると見るべきである。すなわち、ある特定領域内での流速がある変動成分を有している中で、浮子がどの流速に対応して流下しているかは現状では定かではないからである。
- しかしながら河道断面内で極端に流速差があるような場所ではそれぞれの流速値を計測する必要がある。
- 例えば河道に複断面が存在するような場合は、複断面の代表流速は計測されるべきである。また橋脚の後流などにより流速差が極端に出るような観測地点では、例え流速がゼロであったとしてもそれをゼロと記録するなどの注意は必要となる。

今回の解析では、河道断面内の横断方向流速とその変動を扱った。今後は鉛直方向流速、河床変動が存在する場合の河積の変化について併せて検討しつつ考察を加えることが必要である。

3. 5 ADCP 移動観測適用観測所の検討結果

ADCP 移動観測適用観測所の検討結果を図 3-5-1 および図 3-5-2 に示す。対象期間内の洪水時の最大流速が 3.5m/s を超える観測所は 53 観測所(33%)であり、その内 5.0m/s を超える観測所は 12 観測所(7%)であった。また、フルード数 0.65 を超える観測所は 56 観測所(35%)であり、その内、1.0 を超える観測所は 9 観測所(6%)であった。

橋上操作艇を使用した観測適用範囲を 3.5m/s 程

度とすると、現在の技術では33%の観測所において、十分な観測データが得られない可能性があるという結果となった。また、ラジコンボートを使用した観測適用範囲を、フルード数0.65以下とした場合、35%の観測所において、十分な観測データが得られない可能性があるという結果となった。

今後も、船の揺動がADCP計測に与える影響を検討しながら観測手法の必要な改良を行っていくことで、橋上操作艇の適用範囲の拡大を目指す必要がある。

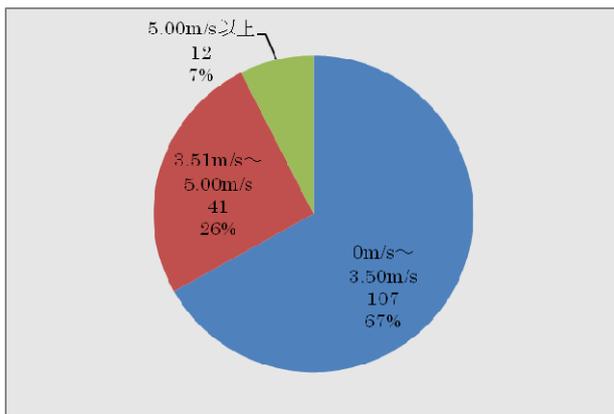


図3-5-1 高水流量観測時の平均流速(5ヶ年最大)

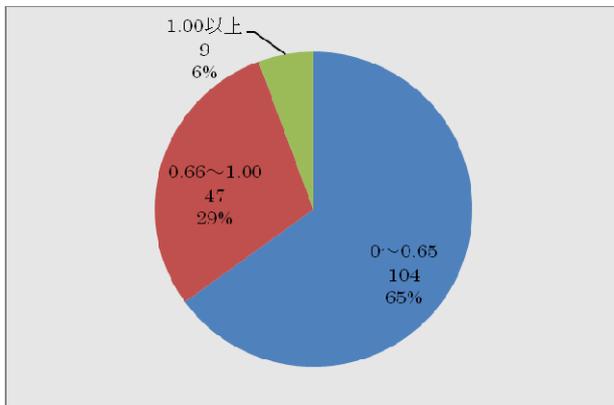


図3-5-2 高水流量観測時のフルード数(5ヶ年最大)

3.6 ADCP 移動観測ガイドライン(案)の検討結果

3.6.1 ADCP 移動観測ガイドライン(案)の概要

ADCPによる流量観測は定点観測と移動観測に分けられるが、本ガイドライン(案)はADCPによる流量調査のうち移動観測に関する標準的手法を取りまとめた。

ガイドライン(案)の概要を以下に示す。

(1)総説

本ガイドライン(案)をADCPによる移動観測に関するガイドラインとして位置付け、ADCPの

計測原理、観測可能なデータ、特性について解説を設けた。

(2)移動観測の方法

ADCP移動観測の方法として、橋上操作艇による観測、ラジコンボートによる観測、有人船による観測を位置付け、流量調査地点の立地条件、出水の規模等を勘案した上で適切なものを用いることを明記し、各観測手法の概要・特性について解説を設けた。

(3)観測機器の構成

移動観測時の機器構成として、音響測深器、RTK-GPS、トータルステーション、遠隔操作装置を位置付け、観測所の状況に応じて必要な観測機器を用いることを明記し、それぞれの観測機器の使用条件等に関する解説を設けた。

(4)観測回数

ADCP移動観測を実施する際の観測回数は、観測の目的および観測状況に応じて設定することを明記した。その上で、水文観測業務規程でいう流量観測を目的とする場合は「建設省河川砂防技術基準(案)」に従う必要があること等について解説を設けた。

(5)横断速度と精度管理

ADCPによる、1断面あたりの計測数(往復数)は1往復を基本とし、必要に応じて1断面あたりの往復回数を増やすこと、また、横断速度については、調査箇所の水変動特性に応じて決定することを明記した。

(6)観測モード

ADCPの観測モードとして、ハイレゾリューションモードを標準とした上で、流量調査箇所の特性および観測時の流況により、ハイレゾリューションモードの適用範囲を超える場合は、ハイスピードモード若しくは標準モードを使用することを明記し、各観測モードの特性について解説を設けた。

(7)観測データの処理

観測データの処理について断面平均流速および流量の算出方法について明記し、ADCP不感帯の補間方法について解説を設けた。

(8)観測記録

観測記録について、観測時に記録する必要がある項目について明記した。

(9)橋上操作艇による観測

橋上操作艇による観測について、観測適用条件

(地理的条件および流況条件) と、構造について明記した。観測適用条件としては流量調査箇所の上流に橋梁がある場合とし、事前調査により、橋梁の構造、出水時の河川流況および流木等の状況を把握した上で適用の可否を判断するものとした。また、橋上操作艇の構造については、モノハル型とトリマラン型があり、観測所の状況に最も適した形状を選定することとした上で、モノハル型とトリマラン型の利点と欠点について解説を設けた。

(10) ラジコンボートによる観測

ラジコンボートによる観測について、観測適用条件と構造について明記した。観測適用条件として、木下らが示した観測限界について明記した。また、ラジコンボートの構造については、空中プロペラ型と水中プロペラ型とした。

(11) 有人船による観測

有人船による観測について、低水時の観測等、安全性が確保される場合に適用する事を明記した。

3. 6. 2 今後の課題の考察

今後の課題と必要検証項目は以下のとおりである。

(1) 観測精度の評価方法

ADCP 移動観測精度の評価方法について検証を進める必要がある。ADCP 移動観測の観測精度については岡田ら²³⁾により偏差流速比、偏差流量比を用いる方法が提案されている。また、ADCP の揺れが及ぼす影響に関しては現在研究が進められている。

(2) 流況に対応した ADCP 設定のマニュアル化

様々な観測環境に応じた測定モードから Ping 数、層厚等に関してマニュアル化する必要がある。これまでは使用者の経験に基づき設定されており、ADCP を使用したことが無いユーザーが今後使用するにあたって、その判断が困難となる可能性がある。なお、設定値をマニュアル化するためには、様々な観測環境において ADCP 観測を実施し、適切な設定条件を検討する必要がある。

(3) 左右両岸の不感帯距離の測定方法

ADCP の観測船が岸際までよる範囲には、船の形状や構造から限界がある。特に、RTK-GPS を使用した場合、岸際の河畔林等の影響により、正確な位置情報が得られない可能性がある。このため、不左右岸の不感帯距離の計測方法についてもマニュアル化する必要がある。

(4) 表層・底層の不感帯流量の算出方法について

現状での不感帯部流量算出方法は、表層・底層

ともに 3 種類が一般に想定されている。しかし、どの方法が最も適切なのかは不明である。これは、河川流況や流量規模によって変化することが推定される。よって、表層部の推定方法として非接触流速計測との連携方法のマニュアル化、および底層部流速測定方法のマニュアル化についても検討する必要がある。

3. 7 HQ システムの検討結果

3. 7. 1 HQ システムの改良点

以下に本研究における HQ システムの主な改良点を示す。

(1) データベース管理ソフトの変更

データベース管理ソフトを Oracle から MS-ACCESS へと変更した。

(2) 表形式データの入力機能の改良

横断測量データや流量観測データ等表形式でデータ入力する箇所について、行単位での挿入削除コピー・貼り付け機能を追加した。

(3) CSV 形式でのデータ入出力機能の追加

CSV 形式ファイルによる横断測量データの出力機能および観測流量表・HQ 式データの出力機能を追加した。

(4) 断面区分のデータ入力改良

流量観測の断面区分を適用水位毎に複数登録できるよう改良を行った。

(5) 観測開始日・終了日の項目追加

洪水時の流量観測は、日を跨いだ観測が行われる事があるため、これに対応するため観測開始日・終了日の項目を追加した。

(6) 流量観測データの観測日変更機能追加

流量観測データの観測日について、従来は初期入力後、変更不可であったが、データ入力後の変更機能を追加した。

(7) HQ 式作業番号の変更機能追加

HQ 式の作業番号について、従来は変更不可であったが、データ入力後の変更機能を追加した。

(8) HQ 式作成時の観測データ選択機能の改良

HQ 式を作成する際の対象となる流量観測データの選択機能として、グラフからの選択や、期間、水位範囲による選択機能を追加した。

3. 7. 2 今後の課題

今回の改良では、これまでの試験運用において集約した意見・要望を反映させデータベース管理ソフトの変更という大規模な変更を行うとともに、アプリケーションとしての操作性の向上を図ったが、本

質的な機能については従来のシステムをほぼ踏襲したかたちとなっている。

HQ システムは HQ 式の作成・照査作業の標準化と精度向上を目指して開発してきたものである。しかし、近年では各地方整備局において、水文観測業務規程に基づき水文観測データの品質照査が実施されており、特に流量観測データの照査については自動化(AQC)されておらず、技術者が直接照査を行う MQC のみで実施されている。今後は、HQ システムを広く普及させるためにも、水文水質データベースとの連携を含めた、HQ 式の標準照査機能の拡充を検討していく必要があるとともに、システムの維持管理も含めた運用方針の検討も必要である。

4. まとめ

本研究では ADCP を用いた流量観測技術の観測精度向上と適用性等について検討を行うとともに、同センサを活用し、河川における横断・鉛直方向の流速分布の検討を行い、既存の観測方法の再評価を行った。主要な成果は下記のとおりである。

- (1) 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) ジンバル機構を有した ADCP 搭載器により ADCP を鉛直下向きに保つことで、データ取得率の向上が可能であることが解った。
- (3) 鉛直方向流速分布推定式は水深・河道状況（流速分布形状）によって適合範囲が異なる傾向が見られ、水深・河道状況に応じて最適な式を適用することにより、流量観測精度の向上が図られる可能性が示唆された。しかしながら、今回対象としたのは限られた観測所における、ごく限定的なデータであったことから、今後は様々な水理条件下での検証が必要であると考えます。
- (4) ADCP 観測データを用いた横断方向流速分布の検討により、流れの変動成分の特性を調べるために、フーリエ級数展開を行うことで、代表流速お

よび変動成分を抽出することを試みた。その結果、従来の浮子観測が持つと考えられる計測精度および計測誤差を算定した。しかし、本算定データは計測した場所における特徴的な結果でありすべての場所に適用できるような一般化には至っていない。今後は複数の場所で同様の検討を行う必要がある。

- (5) 全国の主な流量観測所の流量データから、ADCP 移動観測の適用可能な観測所数を検討した結果、現在の観測技術では 35%程度の観測所において十分な観測データが取得できない可能性がある事が解った。今後も、ADCP 移動観測の適用範囲の拡大を目指す必要がある。
- (6) ADCP 移動観測ガイドライン（案）を提案するとともに、今後の課題を考察した。今後は、ADCP 移動観測の精度管理手法の検討、流況に対応した ADCP 設定左右両岸の不感帯距離の測定方法、表層・底層の不感帯流量の算出方法のマニュアル化等の検討が必要であり、様々な観測環境において ADCP 観測を実施し、適切な基準を検討する必要がある。
- (7) HQ システムについて、これまでの試験運用において集約した意見・要望を反映させデータベース管理ソフトの変更という大規模な変更を行うとともに、アプリケーションとしての操作性の向上を図った。今後は、HQ システムを広く普及させるためにも、水文水質データベースとの連携を含めた、HQ 式の標準照査機能の拡充を検討していく必要があるとともに、システムの維持管理も含めた運用方針の検討も必要である。

【謝辞】 今回の検討にあたり、北海道、東北、関東北陸、近畿、中部、中国、四国、九州の各地方整備局および、国土技術政策総合研究所より、貴重な流量観測関連データの提供を頂きました。ここに記して謝意を表します。

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) 岡田将治・橋田隆史・森本精朗・増田稔：「ADCP 搭載 無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流量観測」、水工学論文集、第52巻、pp919-924、2008年2月
- 3) 橋田隆史・岡田将治・新井励・下田力・出口恭：「ラジコンボートを用いた ADCP 移動観測の計測精度評価法に関する一考察」、河川技術論文集、pp295-300、2008年6月
- 4) 木下良作・中尾忠彦：「ADCP による河川流量の測定と河道水理機構の観測」、土木学会誌 2007年10月号、pp68-71、2007年10月
- 5) 例えば日野幹夫、「スペクトル解析」、朝倉書店、1977年
- 6) 木下良作：「河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案」、水文・水資源学会誌、pp460-471、1998年11月
- 7) 例えば木下良作：「ADCP と無人ラジコンボートで観測される洪水流量とその流れの構造について」、平成 15 年度応用水理研究部会特別講演・講演集、(社) 農業土木学会応用水理研究部会 共催 農業工学研究所水工部

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 management and its observational data as the basic foundation of river planning/management. For purposes of establishing new technologies, obtaining the accuracy of observed value, and improving the observation, the research team 1) improved the accuracy and inspected of the applicability of the discharge measurement with Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), 2) studied about cross- and vertical-sectional velocity distribution, which was obtained by ADCP, and 3) upgraded the PWRI's support software system for creating/checking HQ rating curves (HQ system) for eliminating the coast and the labor. As one of the research outputs, the research team improved the moving vessel in terms of acquisition rate with applying a gimbal structure, which is able to keep the ADCP facing vertical. In addition, the team estimated the observational expected accuracy/deviation of the traditional discharge measurement. Finally the team upgraded the HQ system for stabilizing the system with changing the data-operational software, and for solving the problems/requests which were informed by users.

Key words : discharge measurement, velocity distribution, river-discharge measurement system applying the acoustic technology, gimbal structure, and support software system for creating/checking HQ rating curve