

浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討

FUNDAMENTAL STUDY ON MEASURING ACCURACY FOR FLOOD DISCHARGE WITH FLOATS

原田靖生¹・二瓶泰雄²・酒井雄弘¹・木水啓³

Yasuo HARADA, Yasuo NIHEI, Takehiro SAKAI and Akira KIMIZU

¹学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博(工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科(同上)

³学生員 修(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士課程(同上)

To examine the measuring accuracy for river discharge with floats, flood discharges obtained with float and ADCP measurements have been compared. Since the ADCP can measure vertical velocity distributions and water depth simultaneously, it may be one of accurate discharge measurements under various flow conditions except high flow conditions (e.g., $u > 3\text{m/s}$). We also try to improve the accuracy of the float measurement with special attention to evaluations of lateral and vertical velocity distributions. The observed results indicate that the measured discharges obtained with floats are relatively larger than those with the ADCPs. The modifications of the lateral and vertical velocity profiles presented here may improve appreciably the measuring accuracy for flood discharge with floats.

Key Words : discharge measurement, float, ADCP, flood flow, dynamic interpolation method

1. はじめに

治水計画の基礎となる洪水時の流量を計測するために、浮子を用いた観測が広く一般に行われている^{1, 2)}。浮子観測では、横断面を分割し、その区分された各断面の所定の位置に浮子を投下して、浮子の移動速度を計測する。表層流速に相当する浮子の移動速度から、修正係数(=水深平均流速/表層流速)を用いて水深平均流速 u を求め、 u と断面積 A の積の総和を流量 Q とする。浮子観測は、簡便であり、表面浮遊物が多量に存在する場合でも確実に計測でき、かつ、全ての条件で完全に置き換わる有力な手法がないため、長年慣用されている。しかしながら、浮子観測には、図-1に示すように、①浮子が流下方向に真直ぐ流れない等の流速計測値自体の問題と、②修正係数の妥当性の検証例が少ない、③浮子の数が少ないために十分な流速横断分布が得られない、という流量推定上の問題が指摘されている^{3, 4)}。

浮子観測の計測精度に関する研究としては、数値解析による詳細な検討例はあるものの^{5, 6)}、現地観測結果を用いた事例研究はそれほど多くない^{4, 7)}。また、福岡ら⁸⁾は、浮子観測の計測精度を向上させるために、縦断方向に密な水位計測及び平面二次元解析を組み合わせた高

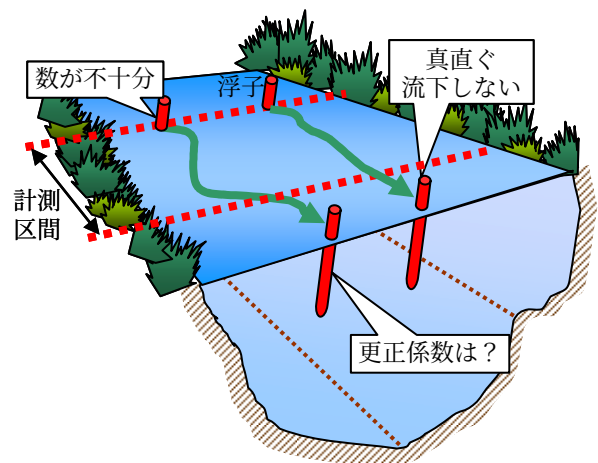


図-1 浮子観測の概要と問題点

精度流量推定法を提案している。

本研究では、実測データに基づいて浮子観測の流量計測精度を検証するために、洪水時の浮子流量観測結果及び超音波ドップラー流速分布計(ADCP)を用いた流量観測結果を比較する。また、上述した浮子観測の②、③の問題に着目して、簡便な方法により浮子観測の流量推定精度を向上させることを試みる。本論文で調査した出水イベントは年に数回から2、3年に一回程度の中小規模であり、大規模出水用の観測法である浮子観測の流量計

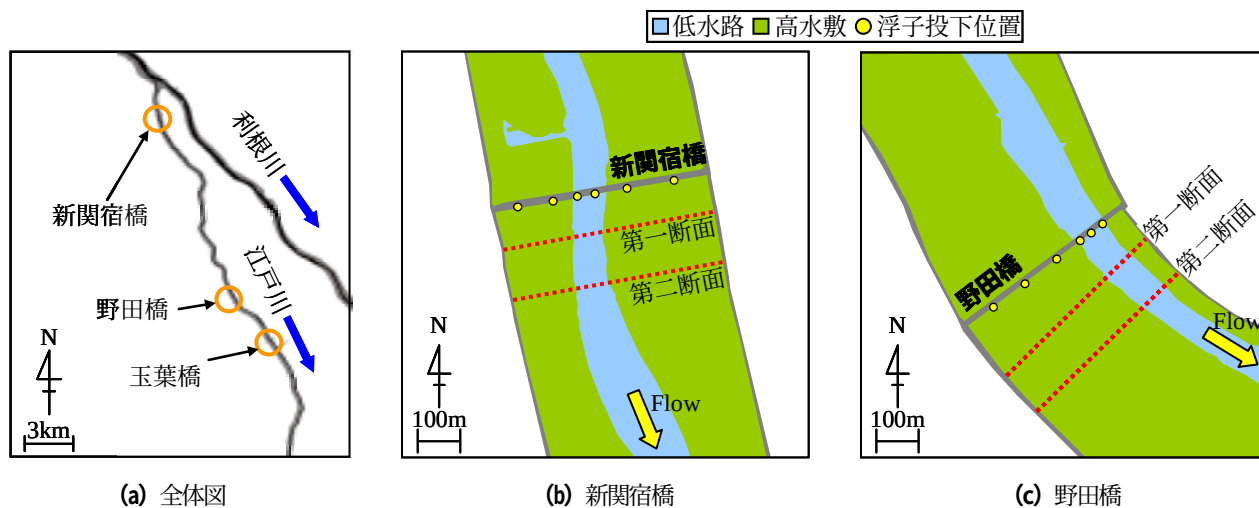


図-2 観測点の平面図

測精度を論じるのに十分な観測データとは言えない。しかしながら、これまで、実測データに基づく議論が少なかったため、ここで報告する。

2. 現地観測方法

(1) 浮子観測の概要

浮子観測は、図-2に示す江戸川の新関宿橋（河口より57.5km）と野田橋（39.3km）にて実施された。両橋ともに、低水路幅は約100m、堤間幅は約400mであり、横断面形状は複断面である。また、両橋付近の高水敷における植生分布状況は、低水路との境界付近ではヤナギが存在し、それ以外では草地かオギ・ヨシ群落が形成されている。

同図中の黄色の丸印は、河川橋上での浮子投下位置である。新関宿橋の浮子投下位置は、低水路2地点、高水敷左岸側2地点、右岸側2地点の計6地点である。野田橋では、低水路3地点、高水敷右岸側3地点の計6地点であり、高水敷左岸側は幅が狭いため観測地点が設けられていない。両橋ともに、流量計測用に分割された断面（区分断面）の数は6となる。このときの流速測線の数、洪水時などの緊急時として定められたものと対応している。また、本観測で用いる浮子長は、水深の関係で、低水路では2mと4m、高水敷では0.5mと1mである。浮子の移動速度から流量を算出する手順は、次のとおりである。

- ① 浮子移動速度に各浮子長に対応する更正係数を掛けて、水深平均流速 u を求める。
- ② 計測区間の上下流断面（第一・第二断面）における区分断面の面積の平均値を求める。ただし、断面測量は観測の前後に行われているので、観測前と後の断面積を算出する。
- ③ 区分面積と水深平均流速の積から、観測前後の測量データに対応する2つの流量を求める。

通常、安全側を見て、2つの流量のうち相対的に大きい

流量が浮子観測の流量（浮子流量）として選定されるが、本論文では、2つの流量の平均値を浮子流量とする。

(2) ADCP観測の概要

ADCPは流速鉛直分布と水深を同時計測する機器である。鉛直下向きに水面付近に浮かぶADCPを横断方向に移動させる、というADCP移動観測により、横断面全体の流速と水深が得られ、最終的に流量が求められる。用いるADCPはWorkHorse Sentinel 1200kHz (Teledyne RDI製)である。ADCPを水面付近に安定して浮かべるために、整流板を取り付けるか、専用浮体 (Riverboat, Teledyne RDI製) を用いる。ADCPの測定モードは、鉛直分解能20cm、層数65、サンプリング間隔15秒である。ADCPを横断方向に移動させる際には、複数の定点で固定して2〜3分計測させる場合（定点固定観測）とある一定速度で連続移動させる場合（連続移動観測）という方法を採用する^{7, 9)}。定点固定観測では、離散的な観測点における流速データから、流速を横断方向に内挿し流量を求めるために、後述する力学的内挿法¹⁰⁾を利用する。なお、底質移動の影響を受けないように、対地速度データを用いずに流量を算出する。このときのADCP移動観測の流量計測精度については、低水時では既に検証され^{9, 11)}、本研究で対象とする中小規模出水においても大きな問題はない⁹⁾。そのため、ここでは、ADCPによる計測結果を流量の真値と見なし、浮子観測の精度検証を行う。なお、大規模出水時では、計測中のADCPの姿勢の安定性や高濁度水による超音波の減衰等の問題に起因して、ADCP移動観測の計測精度や適用性が低下する可能性があり、今後検討すべき課題である。

ADCP移動観測は新関宿橋と玉葉橋（35.5km）で行われた。浮子観測結果と比べると玉葉橋ではなく野田橋でADCP移動観測を行うべきであるが、調査準備の都合上玉葉橋を観測場所とした。ただし約4km離れている野田橋と玉葉橋の間には横流入・流出がないため、洪水の伝播時間を考慮すれば両橋の流量を比較することは問題ない。

表-1 観測期間（関，野，玉は新関宿橋，野田橋，玉葉橋を示す．H.W.Lは野田橋での結果である）

	期間	場所	H.W.L [Y.P.m]	出水要因
①	2004/10/6～8	関，野／玉	7.63	秋雨前線
②	2004/10/21～23	関	8.74	台風0423号
③	2005/7/27	野／玉	8.02	台風0507号

表-2 更正係数の標準値と実測値

水深 [m]	浮子の喫水 [m]	更正係数	
		標準値	実測値
2.6～5.2	2	0.94	0.87
5.2～	4	0.96	0.90

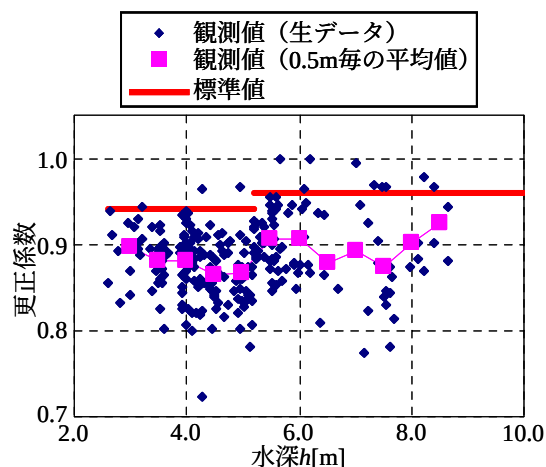


図-3 各水深における更正係数の実測値

(3) 観測期間

浮子観測とADCP移動観測を行った出水イベントの概要と観測期間・場所を表-1に示す。本論文では、3つの出水イベントを対象とする。これらのうち台風0423号により生じた出水イベント②が最も大きく、2，3年に一度生じる程度の出水規模である。この時、高水敷でも顕著な流れが生じたため、各橋の横断面全体において流量観測を実施した。一方、残りの出水イベント①，③では、高水敷は冠水したものの、明確な流れは観測されなかったため、低水路のみ調査を行った。

3. 流量推定精度の改善法の概要

浮子観測の流量計測精度を示す前に、前述した浮子観測の流量推定上の問題点を改善する手法として、流速鉛直分布（更正係数）や流速横断分布の取り扱いを述べる。

(1) 更正係数の設定

浮子による表層流速から水深平均流速に変換するのに必要な更正係数として一般的に使われている値（以下、

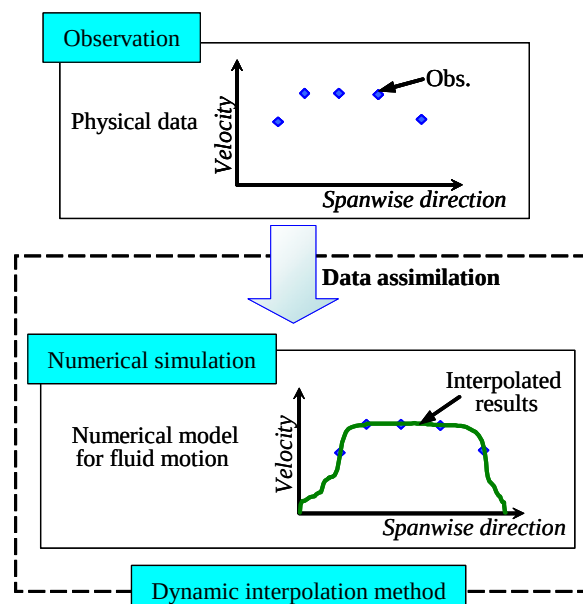


図-4 力学的内挿法の概要¹⁰⁾

標準値と呼ぶ)は表-2のとおりである。ここでは、低水路にて投下された浮子長 2m, 4m の更正係数を示す。更正係数は、流速鉛直分布に関する安芸の理論式¹²⁾から与えられる¹³⁾。しかしながら、実河川での洪水流の実測値を用いて更正係数を検証した例は少なく¹⁴⁾、係数の妥当性の検証が必要とされている³⁾。

そこで2(2)で示した ADCP 観測により得られた流速鉛直分布から水深平均流速と表層流速を求め、それらの比より算出した更正係数の実測値¹⁵⁾を図-3に示す。図中には、更正係数の生データと 0.5m 毎の平均値、標準値を示す。また、表-2に従い水深 $h=2.6\sim5.2\text{m}$, $5.2\text{m}\sim$ において、各々表層 2m, 4m 流速に対する更正係数を算出している。これより、更正係数の実測値は、全体的に標準値よりも小さい。表層 2m, 4m 流速に対する更正係数の平均値は、表-2に示されるように、標準値よりも 0.06～0.07 小さい。そこで本論文では、得られた実測値を更正係数として用いて流量を算出する。

(2) 流速横断分布の推定

横断面内の測定点数が不十分な浮子データは、横断方向に大きく変化する流速分布を正確に計測できず、流量の推定誤差が増加するものと考えられる。そこで、疎らな観測点における流速データを力学条件を満たした形で内挿し、精度良く流速横断分布や流量を推定することが可能な平面二次元河川流解析法である力学的内挿法¹⁰⁾を導入する。力学的内挿法の基本的な構成は図-4に示すとおりである。この方法の大きな特徴は、水深平均流速を横断方向に内挿するために、流速観測値を合理的に数値計算に取り込むことが可能なデータ同化手法を組み込んでいることである。この手法では、移流項等を省略する代わりに、付加項 F_d を導入した運動方程式を基礎式とし、

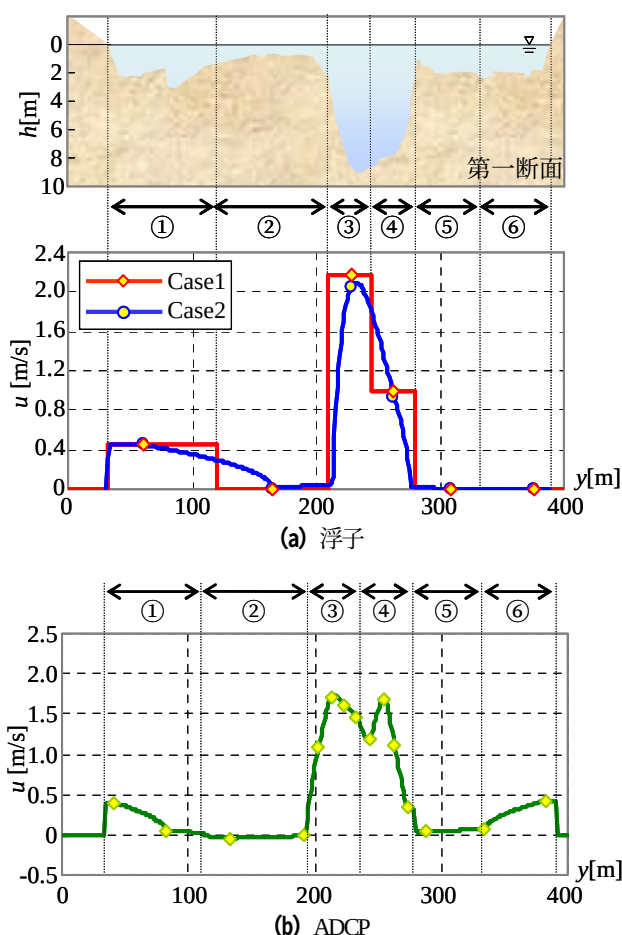


図-5 水深平均流速の横断分布の比較
(出水イベント②, 新関宿橋)

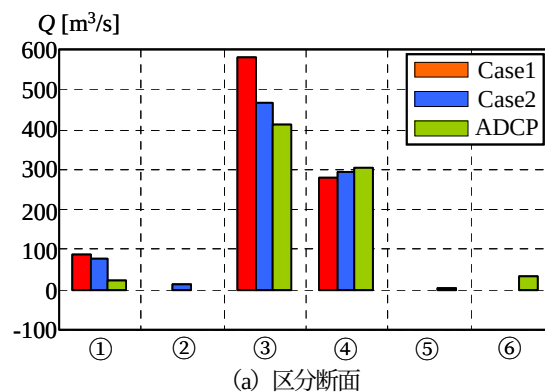
その付加項を介して、データ同化を行う。ここで用いる力学的内挿法の計算パラメータの設定等は二瓶・木水¹⁰⁾を参照されたい。

以下では、浮子観測データを用いてこれまでの流量推定手順による結果（浮子流量, Case1）に加えて、本章で示した力学的内挿法と修正係数の実測値を用いて浮子観測データを修正して得られた結果（修正流量, Case2）について、ADCP移動観測結果と比較する。

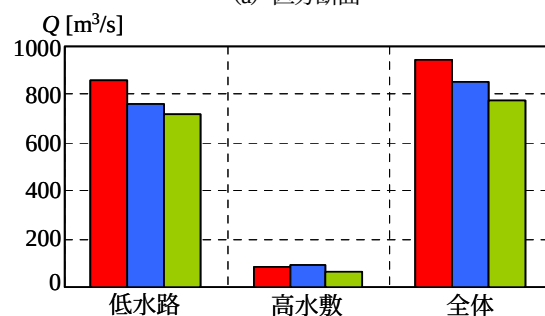
4. 結果と考察

(1) 流速横断分布

浮子観測により得られる横断面内の流速分布の特徴を見るために、出水イベント②の新関宿橋における浮子流速の計測結果を図-5 (a) に示す。ここでは、浮子流速に修正係数の標準値を掛けて、水深平均流速に変換した結果 (Case1) と修正係数の実測値を採用し、力学的内挿法を流速横断分布推定に用いて得られた結果 (Case2) を表示している。また、図中には、第一断面の断面形及び①～⑥の区分断面の設定も合わせて示す。この時刻では、高水敷上の区分断面②, ⑤, ⑥では、浮子は投下されて



(a) 区分断面



(b) 低水路と高水敷, 全域

図-6 横断面内の各エリアにおける流量の比較
(出水イベント②, 新関宿橋)

いないため、そこでの浮子流速は0である。これより、Case1の流速は各区分断面で様となり、流速横断分布は角ばった形状となる。特に、ヤナギが繁茂して流速が低下することが予想される低水路側岸付近においても、浮子流速は大きな値のままとなる。それに対してCase2の流速は横断方向に滑らかに変化し、低水路側岸付近においても植生抵抗や底面摩擦により流速が低下している。

図-5 (b) は同図 (a) とほぼ同時刻において行われたADCPによる水深平均流速の横断分布を示す。低水路内では、主として低水路平面形や橋脚の影響を受けて、2つの流速ピークが現れている。また、左右の低水路側岸付近ではヤナギの流体抵抗により流速が低下している。一方、高水敷に関しては、植生が密に繁茂する区分断面②, ⑤では、数cm/sもしくは上流向きの流れが生じているのに対して、植生分布が疎らな区分断面①, ⑥では40～50cm/sという大きな流速が生じている。

(2) 区分断面流量

このADCP移動観測結果と浮子観測結果 (Case1, 2) は、計測断面が異なるため、流速分布による比較は難しい。そこで、各区分断面における流量分布を図-6 (a) に示す。ここでは、図-5と同時刻、同場所における結果を示す。まず、低水路内の区分断面③, ④に着目すると、浮子流量 (Case1) はADCP観測結果よりも断面③では過大、断面④では過小にそれぞれなっている。それに対して、修正流量 (Case2) は、Case1における差をそれぞれ修正して、ADCP観測結果により近づいている。このように、Case2で用いる力学的内挿法により、流速分布の推定結果が良

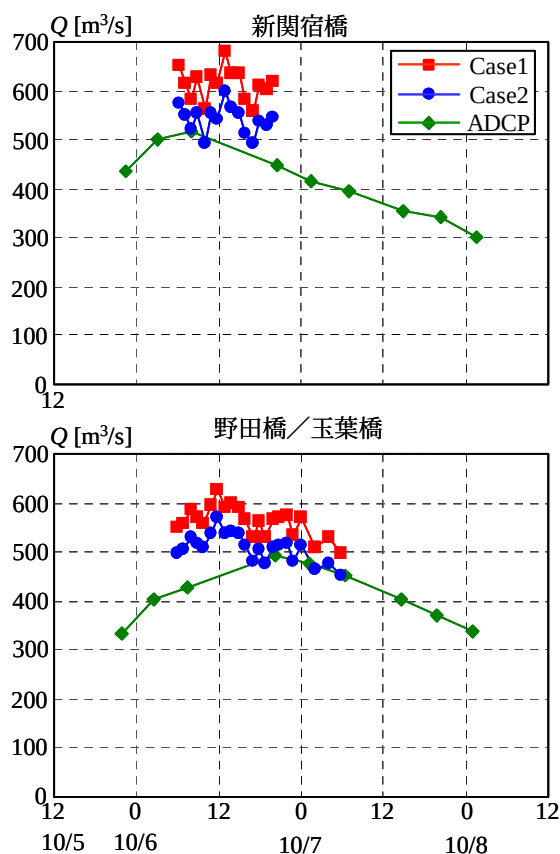


図-7 出水イベント①における流量の時間変化

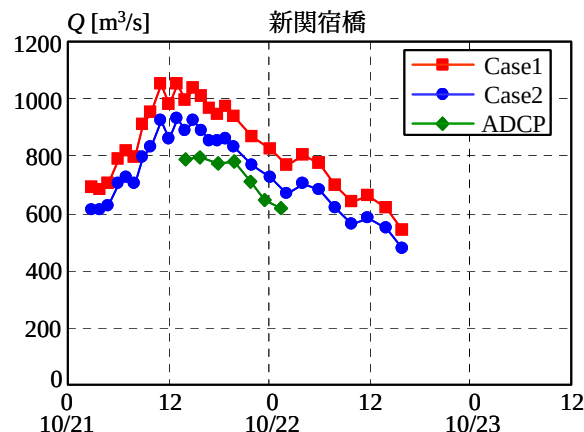


図-8 出水イベント②における流量の時間変化

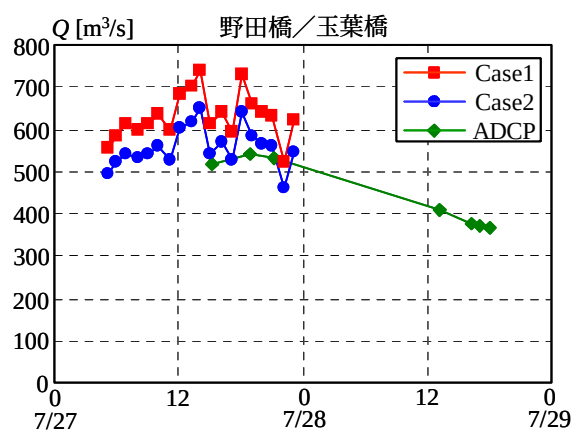


図-9 出水イベント③における流量の時間変化

好に改善されている。一方、高水敷に関しては、区分断面②、⑤では全てのケースの流量がほぼ0である。区分断面①、⑥では、Case1、2ともにADCP観測結果と一致していないが、その差は低水路内の結果と比べると小さい。

これらの区分断面での結果を低水路、高水敷、全体でまとめた結果を同図(b)に示す。全体の流量におけるCase1、2とADCP観測結果との差は、Case1では169m³/s、Case2では74m³/sとなっている。Case1における誤差の大部分は、低水路流量に起因しており、また、Case2では、その差を半分以上を減らしている。高水敷については、両ケースともにADCP観測結果と一定の差が生じているものの、その絶対値は小さい。今回のケースでは、浮子流量推定手順(Case1)において生じている流量誤差の大部分は低水路の流量に起因している。また、流量推定手順において、更正係数と流速横断分布推定について修正を加えることで、区分断面毎や全体の流量の推定精度が向上する。

(3) 流量

出水イベント全体における流量データを見るために、出水イベント①、②、③におけるCase1、2及びADCP移動観測による流量の時系列変化を図-7、8、9に示す。ここでは、浮子観測とADCP移動観測の計測期間が完全には一致しないため、各計測結果のプロットしている範囲が異なっている。これより、全般的に、Case1の流量とADCP移動観測による流量には、一定の差が見られる。一方、Case2では、Case1において生じた差を減少させており、よ

りADCP観測結果に近づいている。この傾向は、前節までに述べた流速分布や区分断面流量の結果と一致する。

Case1と2における流量推定精度を定量的に検証するために、浮子流量(Case1)及び修正流量(Case2)とADCPによる流量観測結果の相関図を図-10に示す。ここでは、浮子観測とADCP移動観測は完全に一致する時刻で行われていないので、直近の2時刻の観測結果を線形補間して、両観測結果を比較する。また、図中には、ADCP観測値に対して5、10、20、30%の誤差に相当する直線を引いている。これより、浮子流量(Case1)については、ADCP観測結果とのずれが大きく、誤差10~30%あたりに分布している。一方、修正流量(Case2)に関しては、浮子流量(Case1)よりも誤差が減少し、誤差10%の直線周囲に分布していることが分かる。

これらの結果より、各ケースにおける相対誤差の平均値はCase1で20.9%、Case2は7.5%となり、本研究で示している二つの修正点を加えることにより13.4%の誤差を低減していることが分かる。この内訳としては、更正係数の実測値を用いたことによる効果は約7%であり、力学的内挿法による流速横断分布の修正による効果が約6%である。なお、この段階でも、修正流量(Case2)には未だに7.5%の推定誤差が存在するのは、流速横断分布の推定手順が不完全であることに加えて、浮子観測により求めた流速計測値自体の誤差の可能性も考えられる。そのため、

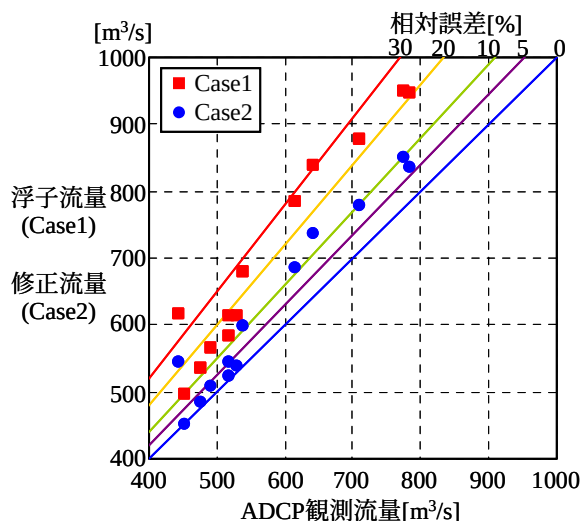


図-10 浮子流量 (Case1) と修正流量 (Case2) 及び ADCP 観測流量に関する相関図

直接的に浮子の瞬間移動速度や軌跡の実態を把握する必要があり、そのための調査を今後実施する予定である。なお、今回の浮子観測の誤差要因の一つは、浮子の投下数が不十分であったためであり、浮子測法を適切に行っていれば計測誤差が抑制できたものと考えられる。

5. おわりに

3つの中小洪水イベントを対象として、浮子観測結果と ADCP 観測結果を比較するとともに、流量推定手順に着目して浮子観測の流量推定精度を向上させることを試みた。そこで得られた知見は次の通りである。

(1) 浮子観測 (Case1) では、区分断面内での流速が一樣となるため、植生抵抗により流速低下が生じる低水路側岸付近においても大きな流速を保つ。この結果、浮子観測の区分断面流量は ADCP 観測結果と一致せず、そのずれは低水路において大きくなる。力学的内挿法を用いる Case2 ではこれらの問題を修正し、Case1 における区分断面流量のずれを減らしていることが示された。

(2) 浮子流量 (Case1) は ADCP 観測流量と比べて 10～30% ずれ、その相対誤差の平均値は 20.9% であった。一方、流速鉛直・横断分布の取り扱いを改良した修正流量 (Case2) では Case1 よりも ADCP 観測流量と近い結果になる。そのときの流量推定誤差の平均値は 7.5% であり、Case1 と比べて 13.4% の誤差を低減している。

(3) 浮子流量観測における流量計測精度を向上させる上では、更正係数の実測値導入と力学的内挿法による流速横断分布の推定は有用であることが示された。

なお、ここで示された知見は、本論文で示した中小規模の出水イベントにおける浮子観測については有用であるが、浮子観測が本来目的とする大規模出水時において適用できるかどうかは現段階では言及できない。特に、水

位が高くなるほど、横断方向の粗度の違いが不明瞭となり、横断位置による流速の違いは減少するため、本論文で示した結果よりも浮子流量の誤差は減少するものと考えられる。今後は、より大きな出水イベントにおける現地調査を行い、詳細な検討を実施していく予定である。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金・若手研究 (A) (研究代表者：二瓶泰雄) による成果である。浮子観測値は、国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所にご提供して頂いた。また現地調査実施には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏に多大なる御助力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省河川局, (株)日本河川協会: 改訂新版 河川防技術基準(案)同解説 調査編, pp.33-58, 1997.
- 2) 土木学会: 水理公式集 [平成 11 年度版], 丸善, pp.75-86, 1999.
- 3) 深見和彦, 天羽淳, 大手方如, 吉谷純一: 流量観測に関する技術基準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.
- 4) 山口高志: 洪水流速および流量観測 —その1—, 水文・水資源学会誌, Vol.15, No.6, pp.625-635, 2002.
- 5) 福岡捷二, 渡辺明英, 高次渉: 三次元解析による複断面蛇行流路の流量観測精度の研究, 水工学論文集, Vol.45, pp.577-582, 2001.
- 6) 福岡捷二, 渡辺明英, 高次渉, 坂本博紀: 浮子による流量観測精度に水路平面形, 横断面形の与える影響評価, 水工学論文集, Vol.46, pp.803-808, 2002.
- 7) 二瓶泰雄, 木水啓, 植田雅康, 中岡亮, 望月健: 陸域環境負荷評価のための調査方法及び解析法に関する検討—江戸川を例にして—, 海岸工学論文集, Vol.52, pp.1106-1110, 2005.
- 8) 福岡捷二, 渡辺明英, 原俊彦, 秋山正人: 水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算, 土木学会論文集, No.761/II-67, pp.45-56, 2004.
- 9) 色川有, 二瓶泰雄, 北山秀飛: ADCP による流量計測精度の基礎的検証, 土木学会年次学術講演会第二部門, Vol.61, pp.433-434, 2006.
- 10) 二瓶泰雄, 木水啓: 新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案, 土木学会論文集 Vol.803/II-73, pp.155-160, 2005.
- 11) 大内一男, 高橋利幸, 疋田真: ADCP の河川流量測定への適用性に関する検証, 水文・水資源学会 2005 年研究発表会要旨集, pp.110-111, 2005.
- 12) 安芸皓一: 浮子特に竿浮子による観測流速の更正係数に就いて, 土木学会誌, Vol.18, No.1, pp.105-129, 1932.
- 13) 竹内俊雄, 江川太郎: 浮子の更正係数, 土木技術資料, Vol.5, No.1, pp.18-21, 1963.
- 14) 松浦達郎, 吉谷純一, 寺川陽: 瀬沼川における洪水時の流速鉛直分布の観測, 土木学会年次学術講演会, Vol.52/II-288, pp.576-577, 1997.
- 15) 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, 土木学会年次学術講演会, Vol.61, pp.431-432, 2006.

(2006.9.30 受付)