

千代田実験水路の水理特性及び 更正係数に関する一考察

寒地土木研究所 道東支所 ○市原 哲也
寒地河川チーム 島田 友典
帯広開発建設部 治水課 辻 珠希

十勝川千代田実験水路は、人工洪水により実験ができる日本最大規模の実物大河川実験施設である。昨年度より越水破堤実験を行っているところであるが、2007年度から2008年度にかけて、実験水路の基礎的な水理特性を明らかにすることを目的に予備実験を実施した。この予備実験の観測データを用いて、ADCPにより観測した流速分布の結果と、既往の理論式による流速分布の比較及び検討、更にこれらの結果から浮子を用いた流量算出のための更正係数に関する検討を行った。

キーワード：十勝川千代田実験水路，流速分布，更正係数

1. はじめに

河川の流量観測は主に、流速計測法や浮子計測法により流速を計測し流量を算出しており、洪水時などの厳しい条件下では、浮子測法による流量観測がよく用いられている。既往の研究¹⁾においては、この浮子の流量観測に用いる更正係数について、ADCPによる観測値から算出した更正係数に比べ大きい結果を得ているものがある。

十勝川の中流には治水安全度を高める千代田新水路があり、この一部に図-1、2に示した十勝川千代田実験水路(以下、千代田実験水路と称する)がある。千代田実験水路は人工洪水により実験を行うことができる日本最大規模の実物大河川実験施設である。現在この千代田実験水路では、実スケールでの3次元的な越水破堤メカニズムの解明を目的とした越水破堤実験²⁾が行われているところであるが、これに先立ち、2007年度から2008年度にかけて実験水路の基礎的な特性を明らかにすることを目的に予備実験⁴⁾を実施した。

本論文はこの予備実験の観測データを用いて、更正係数の導出根拠である流速鉛直分布の理論⁶⁾とADCPの観測による流速分布の比較を行うと共に、その流速分布から更正係数を算出し、予備実験の流況下における更正係数について検証を行ったものである。

2. 観測概要

予備実験にて行った各観測は図-3に示す箇所、水位観測、通水前後の河床高・河床材料調査、流量観測、ADCP観測等である。

2007年度は全6回、2008年度は全2回の予備実験を実施

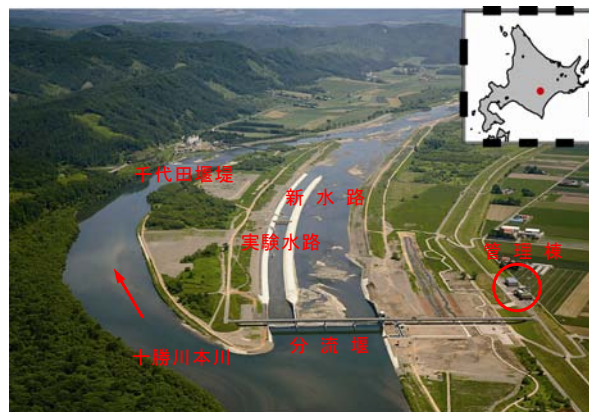


図-1 千代田新水路及び実験水路

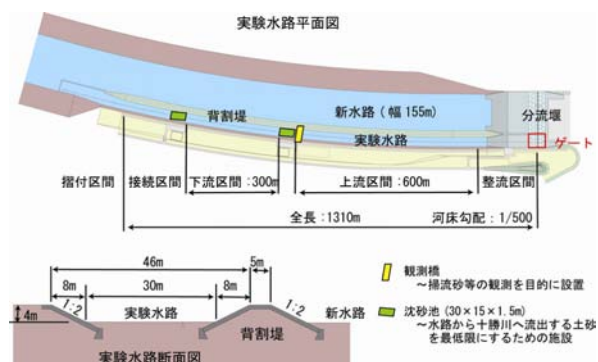


図-2 千代田実験水路の概要

した。なお今回の検討に用いた観測データは、実験時の水深が十分にあり、ADCPによる流速分布の取得ができた2007年度第2回通水(Case1)、2008年度第1回通水(Case2)、2008年度第2回通水(Case3)とした。各実験の通水前に設定した目標流量は、Case1が $45\text{m}^3/\text{s}$ 、Case2が $100\text{m}^3/\text{s}$ 、

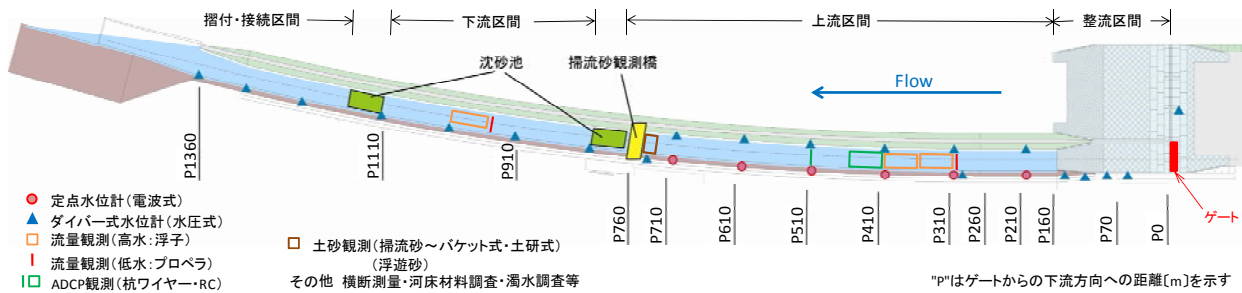


図-3 観測実施箇所

表-1 ADCPの仕様

RD Instruments 社製	
モデル	杭ワイヤー式：モニター RCボート：センチネル
周波数	1200kHz
長期測定精度	±0.25% 又は ±2.5 mm/s
最大測定レンジ	24m
測流範囲	±5m/s(初期設定) 最大±20m/s
分解能	1 mm/s
設定層数	1～128層
設定層厚	5 cm～4m
最小 Ping 発信間隔	2Hz～5Hz(設定による)

Case3が75m³/sであり、通水時間は各ケース概ね7時間程度であった。

(1) 水位観測

定点水位計(電波式)、ダイバー式水位計(水圧式)により、共に5秒毎にデータを取得し、60秒平均を1データとした。

(2) 河床高・河床材料調査

河床高については50m毎に横断測量を実施し、河床材料調査は横断方向に中央及び左右岸の3箇所を3測線上(P260, P460, P660)において通水前後の2回実施した。

(3) 流量観測

a) 高水及び低水流量観測

浮子を用いた高水流量観測は、各ケースにおいて、上流区間は2区間を各5回、下流区間は1区間を5回行い、1ケース当たり計15回の観測を実施した。より精密に計測を行うため、1横断面当たり6測線にて流速を計測し、通水後の河床形状の測量結果を用いて流量算出を行った。なお、浮子の吃水長はCase1, 3が0.5m、Case2が1.0mである。

低水流量観測は回転式流速計を用い、Case1, 3において、1横断面当たり10分割し2点法により、各3回の観測を実施した。

b) ADCP観測

ADCP観測は杭ワイヤー式観測船(以下、杭ワイヤー式)⁴⁷⁾とラジコンボート(以下、RCボート)の2種類で実施した。両観測船共にADCPの他に、音響測深器及びGPSを搭載しており、Case2, 3においてはRTK-GPS測位(Real Time Kinematic Global Positioning System)にて流速、流向、水位、水深を観測した。なおCase1においては、GPSの不具合により単独測位での観測となっている。ADCPによる流量観測は、杭ワイヤー式がCase1で19測線、Case2が13測線、Case3は10測線を実施し、RCボートはCase1が5測線、Case3は2測線を実施した。なお、ADCPの仕様は表-1に示すとおりである。また、ADCPの主な設定は層厚；0.1m、Ping数；3(Case1, 2), 2(Case3)、モード数；12(ハイレートピンギングモード)であり、喫水深は杭ワイヤー式が全ケースで約11cm、RCボートはCase1が約5cm、

Case2, 3は約10cmであった。なお、杭ワイヤー式にあたっては、流量観測のための横断観測の他に、通水における河床形状の把握のため、縦断観測も実施した。

3. 観測結果

(1) 水位観測及び河床高の縦断・河床材料

観測結果より水位が安定していた時間帯の平均水位、通水前後の河床高及び、河床材料調査の結果を図-4に示す。水位が安定していた時間帯はいずれのケースも4時間程度であった。上流区間においては概ね水深が一定であり、等流状態であったと推測できることから、上流区間での観測結果を用いて検証を行った。

(2) 流量観測

前述したように、浮子による高水流量観測は、その簡便さと確実さから、厳しい条件下で最もよく用いられている。このことから、高水流量観測を基準とした場合の、各観測手法別による流量比較結果を図-5に示す。ここで示した流量は、上流区間において通水時に安定している時間帯における流量平均値である。ADCPによる流量観測については、ADCPの特性により、水表面付近及び河床付近の流速値が欠測であったため、補間(水面部では第1層流速値:constant, 河床部では理論式:power curvefit)⁸⁾を行い算出した。高水流量観測と低水流量観測との差は+6%(Case1), +4%(Case3)であり、ADCPによる流量観測との差は杭ワイヤー式が+1%(Case1), -6%(Case2, 3), RCボートが-9%(Case1), -14%(Case3)であった。ADCPによる流量観測については、高水流量観測との差がいずれ

表-2 各実験の水理量

	流量 $Q[m^3/s]$	平均水深 $h[m]$	平均流速 $u[m/s]$	フルード数 Fr	河床勾配 I_b	水面勾配 I_w	粗度係数 n	摩擦速度 $u_*[m/s]$	粒子レイノルズ数 Re_s	無次元掃流力 τ_*	無次元限界掃流力 τ_{*c}
Case 1	52.78	0.94	1.76	0.58	1/494	1/497	0.023	0.13	1,786	0.080	0.050
Case 2	109.92	1.49	2.24	0.59	1/507	1/505	0.024	0.16	2,130	0.122	0.050
Case 3	81.46	1.24	2.02	0.58	1/505	1/501	0.024	0.15	2,470	0.084	0.050

Case 1: 2007年度第2回通水 Case 2: 2008年度第1回通水 Case 3: 2008年度第2回通水

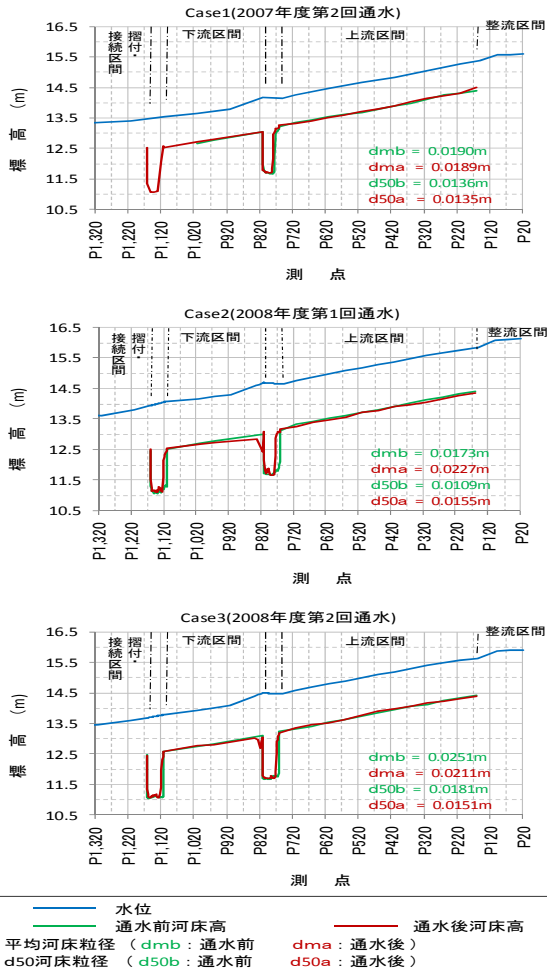


図-4 水面・河床の縦断形及び河床材の代表粒径

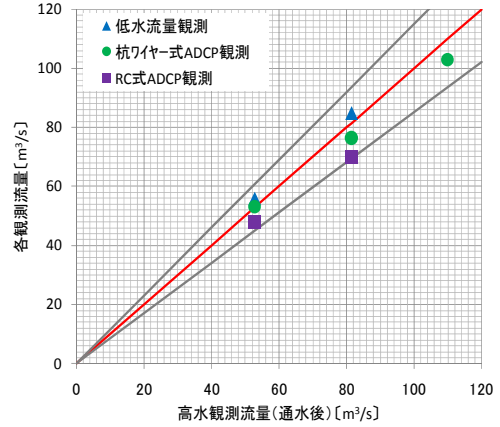


図-5 観測手法別の流量の比較

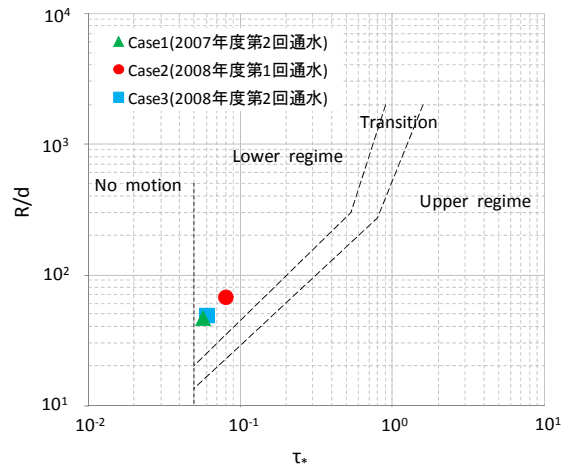


図-6 小規模河床形態の区分

のケースも+5%~-15%の範囲であり、木下⁹⁾の観測結果と同様であった。

なお、RCボートについては、流水や波の影響により、測線上を大きく蛇行した軌跡となったことから、観測誤差が大きいと考えられるため、高水流量観測との比較検証については、杭ワイヤー式の観測値を用いて考察を行うこととした。

(3) 水理量

ここまでの結果より、流況安定時における水理量等をまとめたものを表-2に示す。ここで Q は流量(通水後の河床形状の測量結果を用いた高水流量観測結果)、 h は水路内の平均水深、 u は流量と通水断面より算出した平均流速、 Fr はフルード数、 I_b は河床勾配、 I_w は水面勾配、 n はManningの平均流速公式より算出した粗度係数、 u_* は

摩擦速度、 Re_s は河床平均粒径(d50粒径の平均)に対する粒子レイノルズ数、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*c} は河床平均粒径(d50粒径の平均)に対する無次元限界掃流力である。

(4) 河床形態

今回の実験の各ケースが、河床波の理論上、どのような河床形態であったか、芦田・道上¹⁰⁾の小規模河床形態判別法を用いて判別を行った(図-6)。全てのケースにおいて Lower Regime(砂蓮・砂堆)の領域であった。砂蓮は、粒子レイノルズ数が20以上かつ、土粒子粒径が0.6mmを超える条件下では発生しないことから、全てのケースにおいて砂堆が発生していたことが推測できる。

次に、ADCPにより縦断観測した各実験中における河床縦断形状の一例を図-7に示す。いずれのケースも砂堆が表れていることがわかる。なおいずれのケースも現

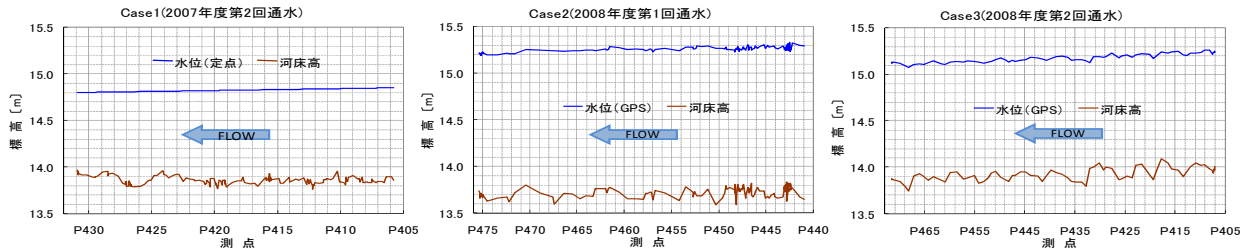


図-7 ADCP 縦断観測による河床縦断形状

地において、実験終了後、水路内の水が抜けた後に河床波が残されていることが確認できた。図-7 より判読した波長・波高の平均値は、Case1 が波長；3.4m，波高 0.15m，Case2 は波長；4.4m，波高；0.14m，Case3 は波長；5.5m，波高；0.15mであった。

4. ADCP 観測による更正係数

(1) 河床波上の流速分布

浮子による高水流量観測は、浮子の流下速度に更正係数を乗じて算出した水深平均流速と流下断面積を用いて流量を算出する。更正係数は安芸⁹⁾による流速鉛直分布の理論式によりまとめられたものであることから、更正係数の適用にあたってはこの理論式が成立していることが前提となる。

河床形態の節で述べたように、いずれのケースにおいても実験中は河床波が発生していた。そこで、安芸による流速鉛直分布の理論と ADCP により観測した河床波上の流速分布が成立しているか比較を行う。安芸の理論式は(1)式で表される。

$$u = \sqrt{Th} \left\{ C + \frac{20}{3} - 20a + 40a \frac{z}{h} - 20 \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここで z ：水面からの深さ， u ： z における流速， I ：水面勾配， h ：水深， C ：Chezy 係数($=R^{1/6}/n$)， a ：流速ピーク位置の相対水深(ここでは河幅及び水深から Case1；0.1, Case2, 3；0.2)である。比較結果を図-8 に示す。観測値は各ケースにおいて実施した ADCP 縦横断観測の無次元水深による平均値としている。各ケースの平均した観測回数は、Case1 が横断観測；19 回，縦断観測；3 回，Case2 は横断観測；13 回，縦断観測 4 回，Case3 は横断観測；10 回，縦断観測；8 回である。Case1 及び 3 については、上層から中間層において概ね理論値に一致しているが、下層では中折れし大きく外れている。また、Case2 については、上層は一致しているものの、中間層では徐々に理論値から外れ、下層では中折れし大きく外れている。いずれのケースも実験中に砂堆が発生していたことから、これらの中折れは、砂堆の形状抵抗によるものだと考えられる。よって、河床波が流速分布に影響を与えることで、安芸の理論式が成立していないことがわかる。

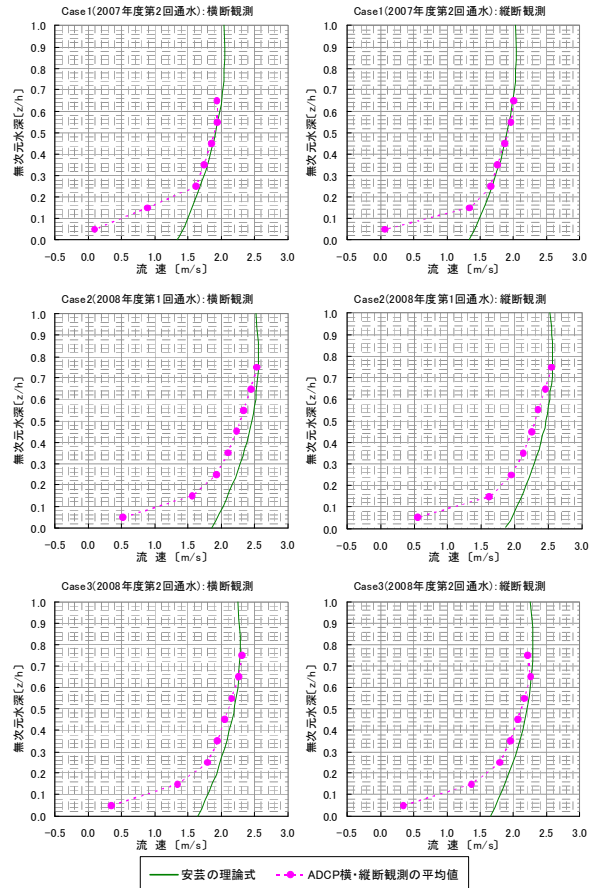


図-8 流速分布の理論値と ADCP 観測結果との比較

(2) 観測結果より算出した推定更正係数

砂堆が発生している場合、その影響により、水深方向の流速分布が理論と一致せず、標準の更正係数よりも小さくなることが示唆される。ここでは高水流量観測の結果に直接影響を及ぼす更正係数について、砂堆が発生する条件下における更正係数の妥当性を検証する。

図-9 は各ケースにおける河床縦断形状(図-6 と同様の観測結果)と ADCP 観測結果より各測点ごとに算出し推定した更正係数の一例である。また、河床高ライン上のマーカーは、推定更正係数が標準の更正係数(Case1, 3；0.88, Case2；0.91)より 5%以上小さい測点を示している。河床形状と推定更正係数の関係は、河床波の影響により、河床の落ち込んだ箇所やクレスト部において、特に小さい推定更正係数を示している。なお、図-9 の各図の推定更正係数の平均値は、Case1 が 0.83, Case2 は 0.87,

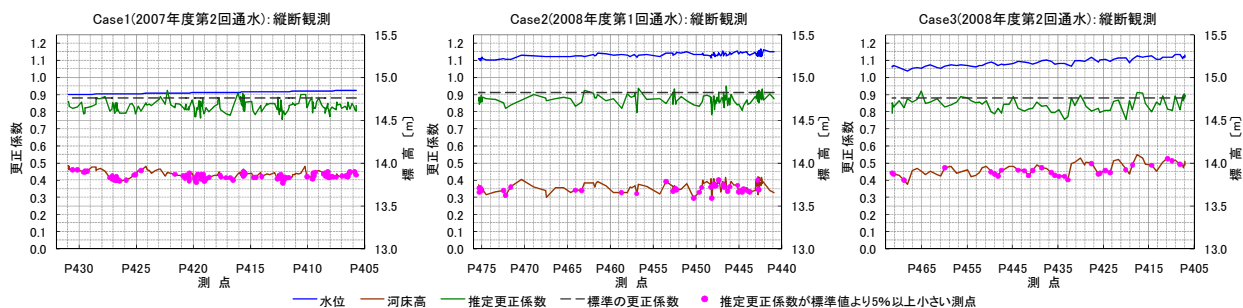


図-9 ADCPによる縦断観測結果と更正係数

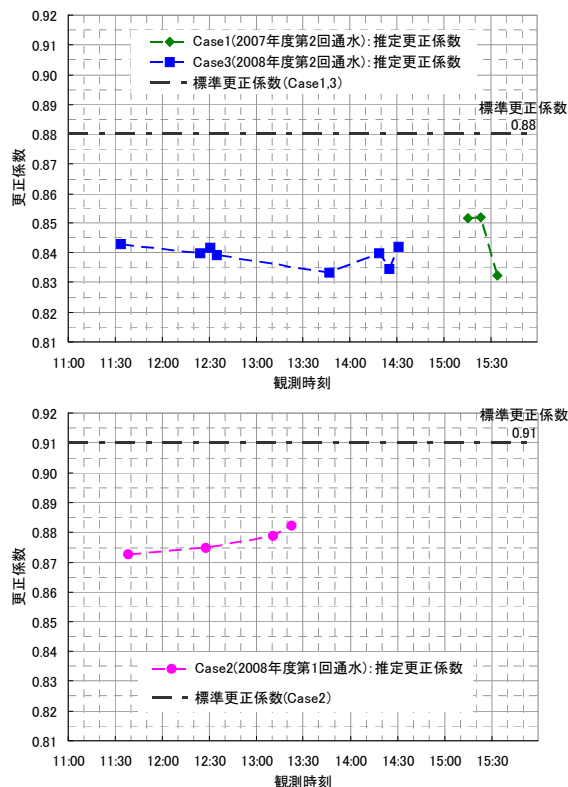


図-10 ADCP縦断観測結果より算出した各時間帯における推定更正係数

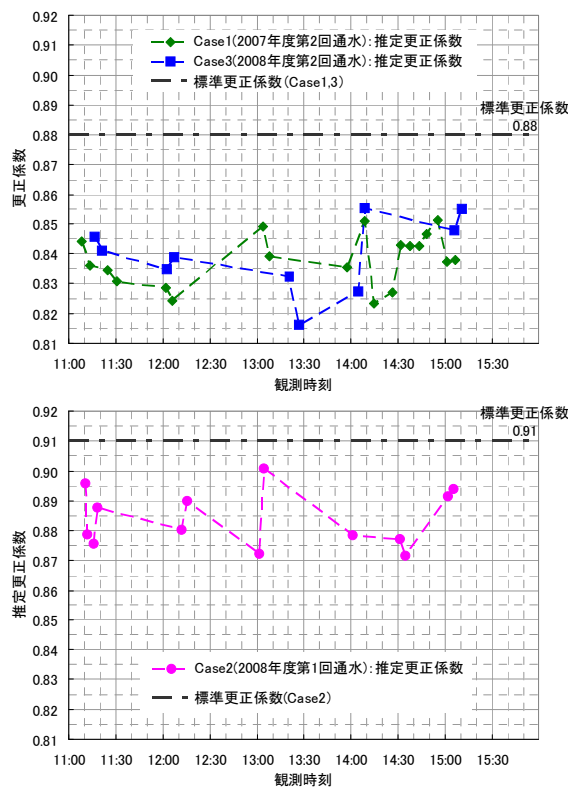


図-11 ADCP横断観測結果より算出した各時間帯における推定更正係数

Case3は0.84であり、標準の更正係数との差は6~4%程度であった。

次に、通水中において砂堆が移動している中、様々な時間帯において、更正係数がどのような傾向を示すかを明らかにすることを目的に、各時間帯により平均したADCP縦断観測(Case1; 全3回, Case2; 全4回, Case3; 全8回)の推定更正係数を図-10に示す。横断方向の位置は、それぞれ河道中心付近及び中心より左右岸に10mの測線上である。各時間帯の推定更正係数は概ね一定であり、その全平均値はCase1が0.85, Case2は0.88, Case3は0.84であった。いずれも標準の更正係数より3~5%程度小さい値であった。しかしながら、この縦断観測の横断位置は河道中心及びその左右岸の3測線のみ結果であることから、この推定更正係数を水路幅全体に適用できるか確認する必要がある。そこで横断方向に

おける各時間帯により平均したADCP横断観測(Case1; 全19回, Case2; 全13回, Case3; 全10回)の推定更正係数を図-11に示す。観測した測点はP410~P440の一横断測線上である。縦断観測と同様に標準の更正係数より小さい値を示しているが、縦断観測に比べ時間変動が大きい。この要因として、横断観測時の観測船の移動速度が河床波の移動速度を上回っていたことから、横断観測中に一つの河床波が通過しておらず、河床波の形状の一部のみを計測していたことが考えられる。各時間帯における横断観測による推定更正係数の全平均値はCase1が0.84, Case2は0.88, Case3は0.84であり、いずれも縦断観測と同様に標準の更正係数より3~5%程度小さい値であった。

各時間帯における縦断及び横断観測の推定更正係数を平均することにより、様々な河床状況を把握することが

できたと考え、この平均した推定更正係数を水路幅全体に適用して差し支えないことが言える。このことから、標準の更正係数と ADCP 観測結果より算出した更正係数を比較すると、後者の方が小さいと言える。

(3) 推定更正係数による観測流量

以上の検討結果より、砂堆の形状抵抗の影響で、安芸の鉛直流速分布の理論と実際の流速分布が成立しないことに起因し、実際の水深平均流速が小さくなる。このことから、砂堆が発生している条件下では、標準の更正係数が過大となるため、高水流量観測の結果は大きくなると考えられる。

高水流量観測の浮子流下速度に、ADCP 観測による推定更正係数を乗じて算出した水深平均流速と流下断面積により流量を算出し直すと、流量観測の項で述べた高水流量観測と ADCP による流量観測(杭ワイヤー式)との差が、Case1 が+1%から+5%に、Case2 は-6%から-3%に、Case3 は-6%から-2%となった。Case2 及び 3 においては精度が向上したものの、3 ケースの中で最も流量規模の小さい Case1 では逆に差が大きくなっている。これについては、ADCP 観測において、Case2, 3 では RTK-GPS 測位で観測できたことに対し、Case1 では GPS の不具合により単独測位での観測であったことが要因の一つとして考えられる。

5. まとめ

今回の観測・検討結果より、砂堆が発生している場合、砂堆の形状抵抗の影響を受け、実際の水深平均流速が理論に比べ小さくなり、標準的に用いられる更正係数が過大になることが考えられる。これにより浮子による流量観測の値も大きくなる。

流速分布の理論と観測値との比較においては、流量規模が大きくなるにつれ、各層の流速の差が大きくなり、理論から外れていく傾向が見られた。実験ケースがまだ

少ないため、要因については不明だが、今後は、様々な流況下での現象を明らかにし、これらについて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 酒井雄弘・二瓶泰雄：ADCPデータに基づく大河川洪水流の更正係数に関する検討，土木学会水工学論文集，第51巻，pp733-738，2007.
- 2) 島田友典・渡邊康玄・横山洋・辻珠希：千代田実験水路における横断堤越水破堤実験，土木学会水工学論文集，第53巻，pp871-876，2009.
- 3) 島田友典・平井康幸・辻珠希：千代田実験水路における越水破堤実験，土木学会水工学論文集，第54巻，2010(投稿中).
- 4) 島田友典ほか：十勝川千代田実験水路の基礎的な土砂挙動特性，土木学会応用力学論文集，Vol.11，pp.699-707，2008.
- 5) 市原哲也・島田友典・渡邊康玄・辻珠希：十勝川千代田実験水路の水利特性及び河床形態，土木学会河川技術論文集，第15巻，pp243-248，2009.
- 6) 安芸皎一：浮子特に竿浮子に依る観測流速の更正係数に就て，土木学会誌，第18巻，第1号，pp.105-129，1932.
- 7) T.Shimada et al.：Basic hydraulic characteristic of the Chiyodaexperimental channel, River Flow 2008, Vol.3, pp.1805-1813, 2008.
- 8) 株式会社SEA：Win River操作手順書，pp31，2005.
- 9) 木下良作：ADCP(超音波流速計)によりうかがわれる洪水時の流れ構造，土木学会第51回水工学講演会，pp.12，2007.
- 10) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69，1972.