DIEX法を用いた河川流量観測の 簡略化に関する考察 A STUDY ON THE SIMPLIFICATION OF RIVER DISCHARGE MEASUREMENT USING DIEX METHOD

橋場雅弘¹・二瓶泰雄²・土田宏一³・甲斐達也³・津田哲也³・澤田浩一³ Masahiro HASHIBA, Yasuo NIHEI, Koichi TSUCHIDA Tatsuya KAI, Tetsuya TSUDA, Koichi SAWADA

¹正会員(株)福田水文センター(〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)
²正会員 博(工)東京理科大学理工学部教授 土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
³非会員(株)福田水文センター(〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)

This study presents how to simplify the river discharge measurement. The collected data were the float measurement discharge at the large-scale floods in Ishikari River about 26years. We considered how to reduce the cross-section measurement points while maintaining the river discharge accuracy. The result showed the discharge error rate was within 10% at the measurement point to 1/2 or less in the float method. But, at the single point measurement, the discharge error rate of compound cross-section was higher than the single cross-section. Regardless of the single cross-section or compound-cross section, even if only a single point measurement, it was possible to calculate the high accuracy discharge using Dynamic Interpolation and Extrapolation (DIEX) method. The discharge error rate was about \pm 10%. It was an important view point for the future of the river discharge monitoring.

Key Words : discharge, simplify, large-scale flood, error rate, DIEX

1. はじめに

近年の河川洪水の激甚化が著しく、計画規模を超過し た洪水が頻発している.出水特性を把握するために流量 の実測値は重要である.現在適用されている高水流量観 測の浮子測法は、昭和29年10月9日に総理府令第75号で 発令された「水位及び流量調査作業規定準則」に則って おり、河川に投下した棒浮子の流下速度を測定して点流 速を測定し、流量に換算する方法である. 浮子測法には、 ①投下した浮子が測線上を直線的に流れず流心に引き寄 せられる. ②高水敷上では、河床形状の他に繁茂する河 畔林や河道内構造物の影響により浮子の流線が乱れバラ ツキの少ない流速値が得にくい. ③浮子の長さは水深に よって5パターン(表面, 0.5m, 1.0m, 2.0m, 4.0m)を 使い分けるが、それぞれを鉛直平均流速に変換するため の更正係数がある.しかし、これらは室内実験や理論値 の考察で得られたもので、十分な検証が行われていない などの課題がある¹⁾. こうした課題を解決する方法とし て,超音波²⁾³⁾⁴,電波^{5)の7)},画像解析⁸⁾⁹⁾⁰⁾などを用いた モニタリング技術が研究され、点流速の計測の精度向上 が進んでいる.しかしながら、流量を算出する上で、限

られた測点の点流速精度が良くても、横断面全体に拡張 させることができなければ流量精度向上には至らない. そこで、二瓶ら¹¹⁾¹²は、実測した点流速を運動方程式に 基づいた数値計算によって格子状に内外挿するDIEX

(Dynamic Interpolation and Extrapolation)法を開発し, 限定的な点流速から流量を算出するアルゴリズムを示し た.また,柏田ら^{13) 14)}はADCPのデータから擬似浮子の データを作成し、点流速からDIEX法を用いた流量算出 を可能とした.これにより、限定的な観測値でも流量精 度向上が可能になるという有益な知見が得られている.

現行では、国土交通省河川砂防技術基準調査編¹⁵に よって、表-1に示す川幅に対応した浮子の測線数が定め られている.表-1の上段を「標準法」、下段を「緊急法」 と呼称する.しかし、測線数と流量精度の研究事例は少 なく、その妥当性に対する知見は不足している.また、 大規模出水時では、観測機材や観測員の不足、急激な水 位上昇への対応など、より厳しい条件下での作業となる ため、可能な限り簡略化した観測手法の構築が求められ る.本研究では、実測した点流速を、運動方程式に基づ いた数値計算によって格子状に内外挿するDIEX法に着 目し、流量精度を維持しながら、いかに観測点を最小化 できるかを検証した.

表-1 浮子流速測線数

浮子流速測線の目標数

水面幅	20m未 満	20~ 100m 未満	100~ 200m 未満	200m 以上
浮子流速 測線数	5	10	15	20

最小浮子流速測線数(やむを得ず緊急かつ迅速に行う場合)

水面幅	50m未 満	50~ 100m 未満	100~ 200m 未満	200~ 400m 未満	400~ 700m 未満	700m 以上
浮子流速 測線数	3	4	5	6	7	8

著者らは、北海道石狩川の1988~2014年の高水流量観 測資料を収集し、浮子観測の測線を任意に減じた場合の 流量精度比較を行った.なお、流量計算は現行法の区分 求積法と、DIEX法を用いた.全測線の浮子測法による 流量を真値と仮定し、ここから浮子測線を減じていった 場合の流量を、区分求積法とDIEX法を用いて比較した.

2. 浮子測法の現状と簡略化の必要性

浮子測法による現状の観測について北海道の石狩川中 流部~下流部を管理する北海道開発局札幌開発建設部管 内の60観測所を対象に浮子測法の実態を調査したアン ケート結果を図-1~図-3に示す¹⁶.

図-1は水面幅と浮子測線数を示す.水面幅に相当する 「標準法」の浮子測線数を赤丸で表示し、実観測の浮子 測線数を青丸で表示した. これによると、実観測の測線 数は表-1の「緊急法」に類似し、「標準法」は採用され ていないことがわかる. 図-2は浮子測線数と実観測によ る観測時間を示すが、5測線以上(水面幅100m以上)の 河川では最低でも30分、長くなると60分近く観測時間が かかっている. これは、今後想定される水位上昇量が大 きい出水では、観測中の水位変動が大きくなるため、流 量精度の確保が難しくなることが想定される. また, 図 -3は浮子測線数と実観測による観測人数を示すが、最小 測線数でも観測人数は5名程度必要となる、大規模出水 などでは多地点で同時に観測が必要になることが予測さ れ、多くの観測員を配置しなければならず、将来の観測 員不足が懸念される中では観測すらできない箇所が発生 することが予見される.よって、今後想定される大規模 出水に対応するためには、可能な限り観測測点を簡略化 しながら流量精度を維持する方法の確立が必要である.

萬矢ら^{17) 18}は流量観測の自動化を目的として,電波流 速計などの非接触型の流速計を用いたシステムを研究し ているが,流量観測を自動化する場合においても,最小 限の機器によって,低コストで効率的な施設設計を行う ために,観測測点の簡略化の議論は必要である.



3. 浮子測法の測線簡略化

今回対象とした観測所は石狩川中流部に位置する,橋本町水位流量観測所(Kp93.9)と奈井江水位流量観測所(Kp76.8)である.橋本町の浮子観測時の河床形状は水面幅約200mの単断面であるが,奈井江は水面幅約500mと広い高水敷を有する複断面である.浮子観測時の断面特性が対称的なこの2地点を対象とした. 選定した洪水は橋本町で17回(2500~4400m³/s),奈井江で22回(2700~5400m³/s)の大規模な出水時とした.流量は第1と第2見通断面の通過速度と平均断面から算出した.ここでは,実観測の浮子全測線で得られた流量を真値とし,測線を1/2以下に簡略化した場合と,流心1測線のみとした場合の流量精度を比較した.

実観測の浮子全測線で得られた流量と実観測の浮子流 速測点を横断面に2分割し2測線に減じた場合の比較を示 した図-4によると、単断面の橋本町では、-14~15%



図-5 浮子測法の測線簡略化と精度(複断面:高水敷あり)

(平均5%)の誤差となった.さらに,流心1測線のみの 場合は-3~37%(平均25%)と過大に算出された. 複断 面の奈井江も同様に比較した図-5によると,浮子測線を 1/2以下に減じた場合は、-10~16%(平均2%)となり、 流心1測線のみの場合は、-5~101%(平均36%)と単断 面よりも過大に流量が算出される傾向がみられた.

4. DIEX 法を用いた測線数簡略化

DIEX法では横断面を計算範囲とし、3次元運動方程式 を簡略化した主流方向運動方程式に付加項F_aを導入した 式(1)を用いる.¹²⁾

$$gI + A_H \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \left(\frac{C_f}{h} + \frac{\beta C_D}{2}\right) u^2 + F_a = 0 \quad (1)$$

ここで、 y は横断方向、 u は主流方向水深平均流速, A_H は水深平均された水平渦動粘性係数(= αU_*h = $\alpha_{\sqrt{C_f}}uh$, a は比例定数, U_* は摩擦速度), h は水深, C_f は底面摩擦係数 (= $gn^2/h^{1/3}$, n:マニングの粗度係 数), I は水面勾配, g は重力加速度, β は植生密 度パラメータ, C_D は植生抵抗係数である.本研究では, 低水路のマニングの粗度係数を n=0.02 m^{-1/3}s, 高水敷を n =0.04m^{-1/3}s と同一設定し、水面勾配 I は観測毎の第一 断面, 第二断面の実測水位から与えた. 植生パラメータ αCp/2 は現地状況より考慮しなかった. 横断データはす べて第1見通断面を使用した.なお、第1と第2断面の 断面積誤差は橋本町で約10%, 奈井江で約4%であった. 浮子測法の流速を DIEX 法の同化データにする場合,点 流速の鉛直高は、図-6のように棒浮子の吃水中央と設 定した. 点流速は各測線での第1~第2見通断面を通過 した浮子通過時間から算出した. 付加項 Faの内外挿操 作は、横断方向に一様にとる「一様法」19を使用した. 理由は、観測点の横断間隔が粗いことや、浮子が直線的 に流下しないなどの流速誤差が推察されるため不自然な 付加項の横断分布で計算が発散するのを防ぐためである. なお、上述した計算方法や手順、係数設定等の詳細に関 しては 二瓶ら 11) 12)を参照されたい. 図-7 では、すべて の浮子測線で算出した DIEX 流量と浮子流量との誤差は ±10%以内に収まっている. DIEX 流量の横断面は第1

見通断面を使用し、浮子測法流量は第1と第2見通断面 の平均を使用しているが、断面積誤差程度に収まってい る.図-8 には単断面の橋本町観測所で、すべての浮子 測点を入れて DIEX 法で計算したものと、流心1測線の 点流速のみで DIEX 法で流量算出を行ったものを併記し た.水深平均流速の分布をみると、1 点のデータのみで





図-8 DIEX法を用いた測線簡略化(単断面:低水路)



図-9 DIEX法を用いた測線簡略化(複断面:高水敷あり)



図-10 流量算出精度の比較(1測点)

あっても、すべての測点を入れたものと同様の形状を示 しており、円滑に同化できていることが示されている.

図-9によると高水敷を含む複断面では低水路と高水 敷で流速分布が大きく変化するが, DIEX 法による水深 平均流速はこうした特徴を再現しながら横断面全体に円 滑に変化している.また,低水路流心部に代表点1測線 を設けた場合の水深平均流速(DIEX 法)でも,高水敷 と低水路の流速差が明瞭になっており,多点浮子測線で の計算結果と類似した結果を示した.



図-10には浮子測法流量と流心1 測線を DIEX 法で算 出した流量との比較を示した.単断面の橋本町では,浮 子流量を真値とすると,-13~11%(平均-2%)の誤差 となり,概ね±10%内に収まっていた.複断面の奈井 江では,-11~24%(平均5%)の誤差となり,概ね± 10%に収まったが,数点は超過する傾向がみられた.

奈井江で24%の誤差が発生した1999年7月29日20 時の事例を図-11に示した.実観測による流速の最速点 は中央側(赤丸)に表れているが,DIEX法による水深 平均流速の最速点は,水深の深い右岸側で発生している. 観測点1点(赤丸)で水深平均流速を算出すると,多点 の水深平均流速(青線)に比べて過大になる(赤線)こ とが示される.DIEX法は運動方程式をベースにして計 算するため流速分布は河床形状にも影響される.よって, 測点が少ない場合は最大流速が横断面最深部で発生する 必要があり,一致しない場合は,流量誤差が大きくなる ことが推察される.河床形状が複雑な観測所では単点で の流量算出には点流速データの精度に注意が必要である.

5. まとめ

本研究では、高水流量観測の簡略化を目的として、流 量精度を保ちながら測定測点をどこまで削減できるか検 討を行い以下の結論を得た.

- 1) 石狩川における単断面と複断面の観測所では、大 規模出水時に浮子測法の測線を1/2以下に減じても 流量誤差は±10%程度に収まった.
- 浮子測法による流心部1点での最大流量誤差は、単 2) 断面で30%以上, 複断面では100%以上過大に算出 された.
- DIEX法を用いた場合は、流心部1測点の観測値で 3) あっても、水深平均流速は多点観測と一致する傾 向がみられた. 単断面でも複断面でも流速分布の 特徴を捉えていた. 流量精度は、単断面では± 10%程度の誤差に、複断面では一部10%を超過す るものがあったが、概ね±10%程度となった.
- 4) DIEX法の1測点で誤差が10%を超過するのは、河 床形状と流速分布が合致していない場合に生じる 傾向がみられた.
- DIEX法を用いることで横断・鉛直測点を任意に設 5) 定できるため、浮子以外の観測手法(ADCP, 電波, 画像等)の簡略化にも適用可能である.
- 本研究より、実測する点流速測点が少なくても、 6) 力学的内外挿によって流量精度が維持しやすいと いうDIEX法の特性を用いることによって、緊急性 を要する大規模出水時の流量観測を大幅に簡略化 できる可能性を示唆した.

6. 今後の研究課題と応用

DIEX法を用いることで、安定した河床形状であれば1 測点でも±10%程度の精度をもった流量を得ることがで きる可能性を示した.流量誤差の発生要因は点流速と河 床断面の整合性が要因のひとつと推察された. そこで, 得られた最速流速が発生する測点と最深部が合致してい るかなど、流量観測所の特性を踏まえて観測測点を決定 しておくことで、精度向上を望めるものと推察される. しかし、簡略化が他の観測所や中小規模の出水でも適用 できるかについて、今後事例を増やして検証する必要が ある.また、付加項F。の横断方向の内外挿方法(一様法、 線形,3次関数補間等)¹³⁾と流量精度の比較検証が必要 である.大規模出水時は,観測所の機能が働かず,通常 の高水流量観測すら難しくなることが予測される.よっ て、簡略化した観測データでも精度の高い流量が算出可 能であれば、迅速な観測で出水ピークの取り逃がしや観 測不能といった課題が解決できる.また,電波流速計や 画像解析等を用いて限定した測点から流量が算出可能で

あれば、観測自動化への応用が期待できる.

謝辞:本研究は、国土交通省北海道開発局札幌開発建設 部からご提供いただいた貴重な資料をもとに行われてい ます. 特に北海道開発局札幌開発建設部の得能泰治氏に は多大なるご協力をいただきました. ここに記して謝意 を表します.

参考文献

- 橋場雅弘・甲斐達也・津田哲也・土田宏一 : 河川流量観 測の高度化に対する観測実務者からの視点,河川流量観 測の新時代,第4巻,2014. 1)
- 2) David S. Mueller · Chad R. Wagner : Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers form a Moving Boat, Chapter22 Section A.Surface-Water USGS of Techniques, Book3, Applications of Hydraulics, Techniques and Methods3-A22, Ver.2.0, 2013.
- 3) 萬矢敦啓・岡田将治・橘田隆史・菅野裕也・深見和彦 高速流におけるADCP観測のための橋上操作艇に関する
- 間述流にわりるADCF戦地のになりの間上はFIFMEに因うる 提案,土木学会河川技術論文集第16巻,pp.59-64,2010. 岡田将治・萬矢敦啓・橘田隆史・菅野裕也・深見和彦: ADCPを用いた洪水流観測の計測精度評価に関する総合 的検討,水工学論文集,第55巻,pp1183-1188,2011. 4)
- Kazuhiko Fukami · Takayuki Yamaguchi · Hitoki Imamura · 5) Yoichi Tashiro : Current status of river discharge observation using non-contact current meter for operational use in Japan, World Environmental & Water Resources Congress 2008 Ahupua'a,2008.
- 山口高志・新里邦生:電波流速計による洪水流量観測、 6)
- 二十学会論文集, No.497/Ⅱ-28, 1994. 萬矢敦啓・大平一典・菅野裕也・深見和彦:非接触型電 波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察, 土 7) 木学会河川技術論文集,第16巻,pp53-58, 2010.
- Fujita, I. Kumano, G. and Asami, K : Measurements of large 8) flood flow by a space-time imaging technique for evaluation of numerical simulation, The 12th International Symposium on Control, Measurement Fluid and Visualization,
- Fluid Control, Neasurement and Near Andrews, FLUCOME2013, on USB memory, OS2-01-2.pdf, 2013. 藤田一郎,原浩気、萬矢敦啓:河川モニタリング動画を 用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム 9) 計測システムの構築,土木学会論文集B1(水工学),
- Vol.67,No.4, p. I_1177-I_1182, 2011. 藤田一郎・小阪純史・萬矢敦啓・本永良樹:遠赤外線カ メラを用いた融雪洪水の昼夜間表面流画像計測,土大学 10) 会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, I_703-I_708, 2013.
- Yasuo Nihei, Akira Kimizu and Keita Sato: Evaluation of River 11) Velocity and Discharge with A New Assimilated Method, 4th Int.Symposium on Environmental Hydraulics and 14th Congress
- of Asia and Pacific Division, Vol.2, pp.2005-2010, 2004. 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,No.803/II-12)
- 10.00.7 加速市にに広りた来、エバナ云神(人来、10.00.7 山 73、 pp.155-160, 2005. 柏田仁・二瓶泰雄・高島栄二郎・山崎裕介・市山誠:力 学的内外挿法(DIEX 法)に基づく「点」から「面」流 速データ推定法の構築、河川技術論文集、第17巻、2011. 柏田仁・二瓶泰雄:幅広い条件下における力学的内外挿 13)
- 14) 法の流速・流量推定精度の検証,土木学会論文集B1(水 工学), Vol.71, No.4, p. L 835-L 840, 2015. 国土交通省水管理・国土保全局:河川砂防技術基準 調
- 15) 査編, 2014.
- 橋場雅弘・甲斐達也・津田哲也・土田宏一:「新たなス テージ」に対応した河川流量観測の提案,河川流量観測 16)
- の新時代、第5巻、pp. 28-37, 2015. 萬矢敦啓・大平一典、菅野裕也、深見和彦:非接触型電 波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察、河 17) 川技術論文集,第16巻, pp.53-58, 2010. 岩見洋一・萬矢敦啓・本永良樹・藤田一郎:非接触型流
- 18) 速計による河川の流量観測,河川流量観測の新時代第4 巻, 2014.
- 岩本演芸,二瓶泰雄:H-ADCP 計測と河川流シミュレーションに基づく複断面河道の洪水流量モニタリング,水 工学論文集, Vol.53, pp.1009-1014, 2009. 19)

(2016.4.4受付)