

寒冷地感潮域河川におけるDIEX法を用いた 流量観測自動化

AUTOMATIC DISCHARGE MEASUREMENT USING DIEX METHOD IN COLD REGIONS TIDAL RIVER

橋場雅弘¹・吉川泰弘²・二瓶泰雄³・土田宏一¹・澤田浩一⁴

Masahiro HASHIBA, Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasuo NIHEI,
Koichi TSUCHIDA, 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) 北見工業大学工学部助教 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

³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)

⁴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)

In this study, the authors developed an automatic discharge measurement using ADCP and DIEX method. We observed the four different hydraulic phenomena downstream of Teshio river. 1) flow at the time of normal and flood stage, 2) flow at the salinity intrusion, 3) flow at the covered with ice, 4) flow at the salinity intrusion while being covered with ice. In the case of the normal and flood flow, the discharge was calculated by DIEX method using horizontal flow velocity distribution of H-ADCP. When the salinity intrusion or being covered with ice, firstly, we estimated the fresh-salt water interface and bottom height of ice using the velocity profile and bottom tracking of V-ADCP. Secondly, we calculated the unit width discharge to measured velocity profile. Thirdly, we calculated the logarithmic law flow velocity profile of the open channel flow with same the unit width discharge. Finally, the discharge was calculated with DIEX method using one representative point of the logarithmic law flow velocity profile. The discharge accuracy was about $\pm 10\%$ under the four different of hydraulic phenomena. This result showed that it was possible to calculate the discharge automatically without man working.

Key Words : automatic discharge measurement, salinity intrusion, ice, ADCP, DIEX

1. はじめに

雨量, 水位, 流量などの水文観測データは, 河川計画の策定や河川整備に加えて, 河川管理施設の運用・管理・気候変動モニタリング等のニーズや活用の多様化が進んでいる。国土交通省の川の防災情報がインターネットで公開されたことにより, 一般に幅広く利活用することが可能になっている。しかし, 雨量・水位観測が自動化されているのに比べ, 河川流量観測は, いまだに人力による観測が行われており, 観測員不足, コスト, 安全性, 確実性など多くの課題が指摘されている¹⁾。

倉光ら²⁾は, 高水流量において, 無人で連続観測が可能な観測技術を活用し, 安全確実で連続的かつリアルタイムに観測データを取得する重要性を述べている。一方で, 低水であっても, 寒冷地河川では, 冬期間は結氷した河氷上に人が乗って観測を行うことから, 滑落する危険が伴うため無人化観測が望まれている。さらに, 河川結氷時は, 経時変化する河氷厚を把握して流量を算出しなければならないという精度上の課題がある。一方で感

潮域では, 河川下流部は海からの潮汐影響を受けるため水位と流量の関係が一価の関数とならず, 一般的な水位流量曲線式で流量管理ができないという課題がある。また, 塩水が緩混合等で遡上している河川では, 上層に淡水, 下層に塩水が2層で存在する。非定常に変化する塩淡水境界面を把握して流量を算出しなければならないが, 塩淡水境界面の分離方法などは不明確である。感潮域での流量算出については, 佐藤ら³⁾が河床設置したADCPの鉛直方向の単位幅流量と観測流量の関係を用いて長期的な流量を算出しており, 吉川ら⁴⁾は, 河川結氷期でも有効であることを示している。しかしながら, これらの手法は塩淡水2層構造には対応していないことと, 流量を算出するためには, 人力による観測値が不可欠なため, 完全自動化には至っていない。河川流量観測の自動化は将来的な水文観測の継続性を考える上で重要な課題である。

本研究では, 流量観測を自動化するシステム開発を目的として, ADCPとDIEX法を用いて, 河川感潮域及び結氷する河川での水理現象を正確に把握し, 境界条件の自動把握と精度の高い流量算出手法の開発を行った。

2. 現地観測

北海道の北部に位置する天塩川天塩大橋水位流量観測所（川幅約130m、河口から18.6km）において、2015年10月～2016年2月と2016年6月～2017年2月に現地観測を実施した。右岸にH-ADCP300kHzWB（Teledyne RD Instruments社）を標高-1.5m、左岸から312mに設置し、河床にADCP1200kHz（Teledyne RD Instruments社）を、標高-7m、左岸から286mに図-1のように設置した。

H-ADCPは水平方向に2.0m毎、ADCP（以降はV-ADCPと呼称する）は鉛直方向に0.2m毎で、10分インターバルで流向流速を測定した。この間、精度検証のために曳航型のADCP（River PRO ADCP : Teledyne RD Instruments社）を浮体ボートに寄せ、有人船で横断方向に曳航して流量観測を計41回実施した。結氷期については、河水に横断測線上の12m毎に穴を開け、ADCP本体を河水の穴に入れて静止し、120秒間の観測を行った。

本研究では、水理現象を踏まえた流量観測手法を確立するために、現地調査結果に基づき、当観測サイトで発生する水理現象を以下の4パターンに分類した。

a) 平常時または出水時

図-2のような一般的な開水路流れで、塩水遡上や河川結氷は発生しない。

b) 塩水遡上

図-3に示すように、上層は淡水、下層は塩水の2層構造になるパターンで、塩淡水境界面は横断面内で水平になり、6月～7月の降雨が少ない時期に発生しやすい。また、塩淡水境界面は図-4に示すように最大で水深2m程度まで上昇し、10日間程度残存する傾向がみられた。

c) 河川結氷

12月からは河川表面が結氷し、図-5に示すように、横断方向に0.3m程度の河氷厚となる。河氷は雪と氷板、晶氷で構成されるが、当観測サイトの河氷は、晶氷は少なく、主に雪と氷板で構成されている。

d) 塩水遡上および河川結氷

図-6に示すように、河川結氷時に塩水遡上が発生したパターンで2017年1月～2月に観測された。

なお、塩水遡上時に出水が生じた場合は、強混合型になると推察されるが、本研究ではこのような現象はみられていない。

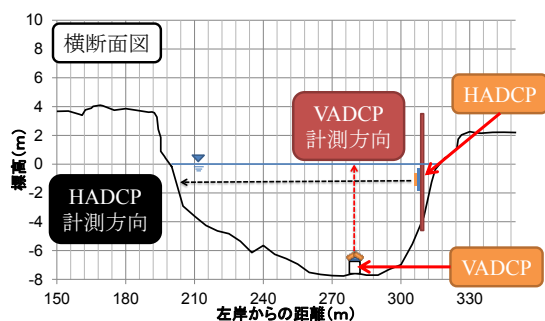


図-1 調査概要

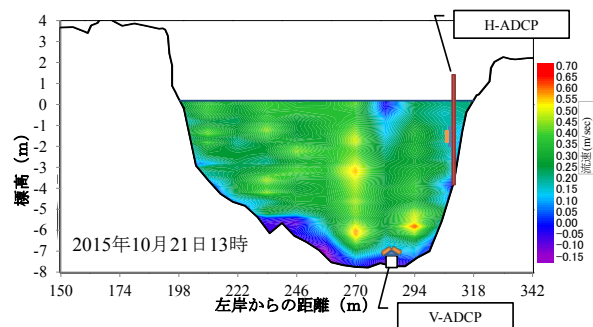


図-2 平常時流速分布

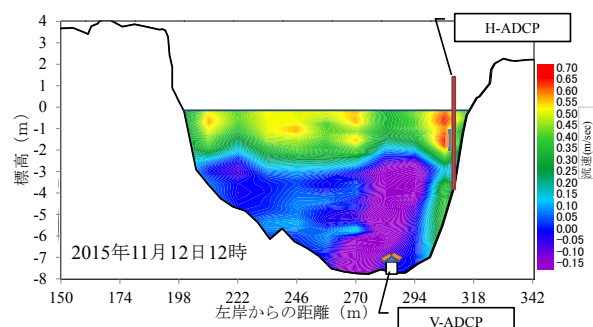


図-3 塩水遡上時流速分布

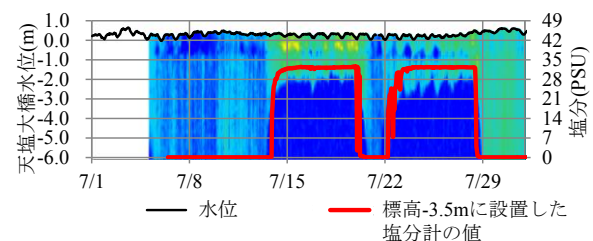


図-4 塩水遡上の時系列変化 (V-ADCP)

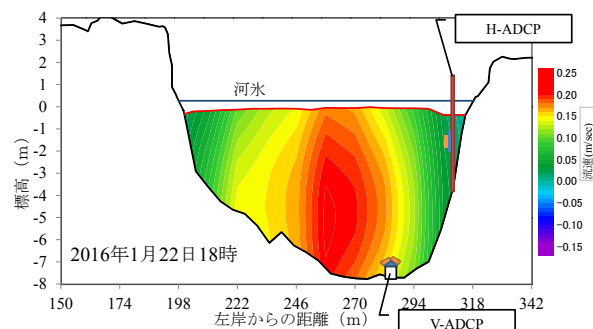


図-5 結氷時流速分布

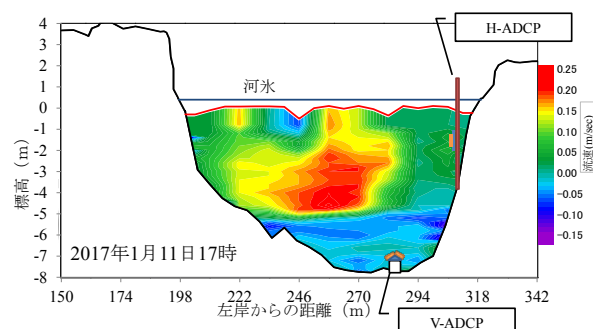


図-6 塩水遡上+結氷時流速分布

3. 水理現象を考慮した流量観測手法

自動算出する流量は、DIEX 法^{5) 6)}を用いて、H-ADCP の観測値を内外挿して算出した。DIEX 法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)を用いている。

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

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 ($= \alpha U_* h = \alpha \sqrt{C_f} u h$, α は比例定数、 U_* は摩擦速度)、 h は水深、 C_f は底面摩擦係数 ($= g n^2 / h^{1/3}$, 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 $n=0.02 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、高水敷を $n=0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、水面勾配 I は 0.0001 と同一設定した。植生パラメータ $\beta C_D/2$ は現地状況より考慮しなかった。河川横断形状データは水位基準断面の測量結果を用いた。

(1) 平常時または洪水時

流量は、H-ADCP の水平方向流速 (横断方向 2m 毎、標高 $H=-1.5\text{m}$) を DIEX 法によって内外挿して算出した。H-ADCP の水平方向流速と DIEX 法による水深平均流速、ADCP 曳航観測流速との比較を図-7 に示す。左右岸の H-ADCP の水平方向流速が ADCP 曳航観測流速と乖離する。左岸は、図-8 のように右岸の H-ADCP からビームが上下方向に 0.85° 毎に拡がると、距離 100m で 3m 程度のビーム直径になり、水面への接触などが障害になる。一方、H-ADCP が設置されている右岸域は、図-9 のように上流の川幅が広く、観測地点で狭窄することから、右岸域に剥離する複雑な流れが発生しやすいため、流速誤差が大きくなる要因になっていると推察される。本研究では、ADCP 曳航観測流速の H-ADCP の設置標高 ($H=-1.5\text{m}$) と同じ水平流速と、H-ADCP 流速が一致する有効範囲を検証し、有効流速範囲を 230~270m と設定した。以上より、図-10 に示す方法で流量を算出した。

(2) 塩水遡上

本研究では、塩水遡上時の河川流量を淡水層の流量と定義する。流量を自動算出するためには、塩淡水境界面を自動測定し、塩水層をカットして、淡水層のみの流量を算出する必要がある。塩淡水境界面の推定については、杉原ら⁷⁾ は河床設置型 ADCP を用いた塩淡水境界面の分離において、鉛直方向での流速差に着目して流

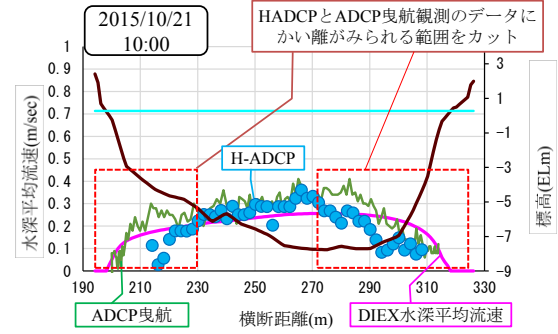


図-7 H-ADCPの有効範囲

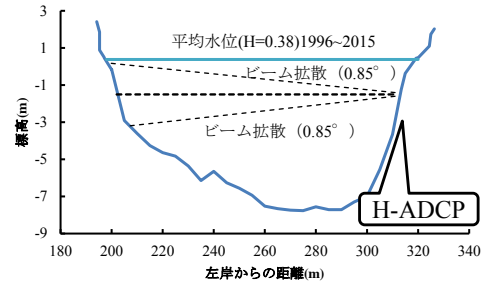


図-8 H-ADCPの音信図

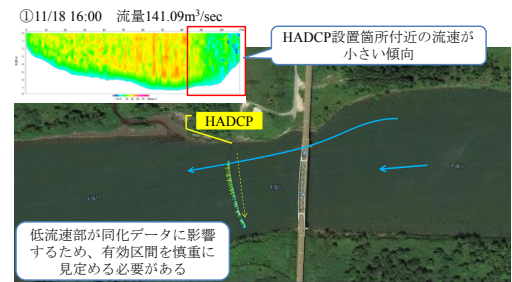


図-9 縦断河道形状

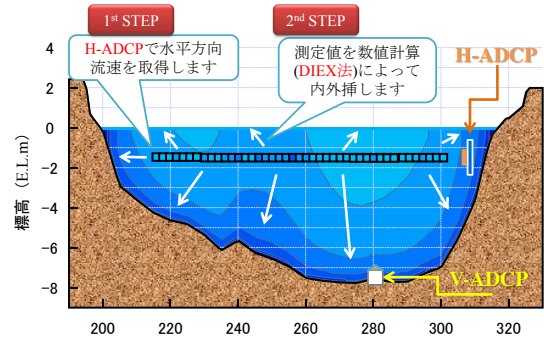


図-10 平常時および出水時の自動流量算出方法

速の急変部の位置を推定する手法を示した。また、嶋ら⁸⁾ は流れを定常的な二次元流と考え、運動方程式の非線形項を省略した式を用いた解析結果から、塩淡水境界面は水路床から流速分布のゼロの地点までの距離の 1.5 倍となることを示している。しかし、現地観測による V-ADCP の鉛直流速分布と、多項目水質計 (アレック電子株式会社 Compact-CTD ASTD687) で得た 0.1m 毎の塩分鉛直分布の結果によると、図-11 に示すように塩水プロファイルの変曲点は鉛直流速分布のゼロ流速水深よりも 0.5~1m 程度上層で発生している。

塩淡水境界面の推定については、自動化するために可能な限り簡素化する必要がある。そこで、V-ADCPの鉛直流速分布を表層から河床方向に見て流速ゼロになった水深を塩淡水境界面と仮定した。この流量と塩分プロファイルの変曲点を塩淡水境界面とした流量の比較を図-12に示す。流量差は最大で6.2%，平均誤差は1.5%となり、流量との差異が少ないと判断し、鉛直流速分布のゼロ流速点を塩淡水境界条件として設定した。

次に、流量算出のための流速について、H-ADCPを用いて淡水層の流速分布を取得したが、図-13のように塩水遡上時にH-ADCPの流速値が低下する現象が発生した。図-14のように塩淡水境界面が水深2.3mまで遡上した場合、H-ADCPの水平方向の超音波ビームは上下に0.85°に拡散するため23mで塩水層に接触した。これは反射強度にも同距離に痕跡がみられることから、H-ADCPの流速値が影響を受けることが推察できる。よって、塩水遡上時にはV-ADCPの鉛直流速分布を使用することとした。しかし、DIEX法は横断上に配置された同化データを計算対象としているため、V-ADCPの鉛直流速分布を、開水路流れを対象としたDIEX法へ適用するには、V-ADCPの鉛直流速分布の1点の代表流速を使用する必要がある。そこで、淡水層の流量をDIEX法で算出するには、V-ADCPの観測値である単位幅流量を活かして、単位幅流量同一の条件の基で、仮の開水路流れの流速分布に置き換えることとした。V-ADCPの観測値は1分間のアンサンブル平均値（60ピング：1ピング/秒）を取得しているが、図-15の青線に示すように、音速での瞬間値のため、水深毎の流速分布に乱れが大きい。よって、観測値の単位幅流量から開水路流れの流速分布を得ることで、流速のばらつきの解消を図った。V-ADCPの鉛直流速分布から水深幅 Δz 、水深毎の流速 Δu として、式（2）に示す単位幅流量 q を算出した。

$$q = \sum_{n=0}^h \Delta z \Delta u \quad (2)$$

V-ADCPのデータは表面と河床近傍が不感帯域になるため、表面は最上層の観測値を与え、河床はゼロとして線形補間した。式（3）に示す粗面の対数分布則⁹⁾を用いて、観測値と計算値の単位幅流量の差が最小になるように繰り返し計算を行い、相当粗度 K_s を求めた。これより、図-15の赤線に示すV-ADCPの単位幅流量と等しい流速分布形を算出した。流速分布形から代表点（1点）を抽出し、DIEX法によって図-16に示す淡水層の流量を算出した。

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln \frac{z}{k_s} + A_r \cdot u_* \quad (3)$$

ここで、 $u_* = \sqrt{gRI}$ 、 κ ：カルマン係数（0.4）、 K_s ：相当粗度、 A_r ：粗面定数は標準的な8.5を与えた。

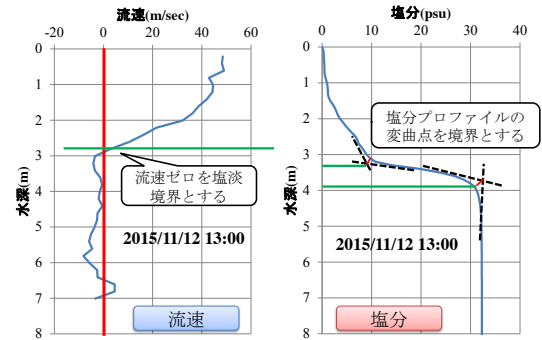


図-11 流速と塩分の鉛直分布

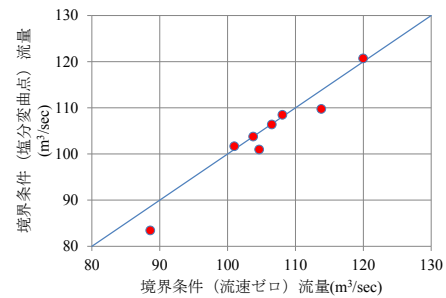


図-12 塩淡水境界面の境界条件別による流量比較

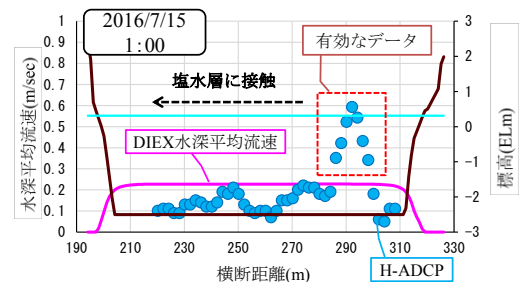


図-13 塩水遡上時のHADCPによるDIEX法内外挿

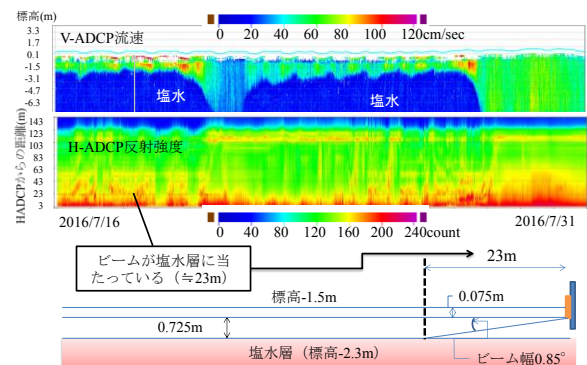


図-14 塩水遡上時のH-ADCPビーム状況

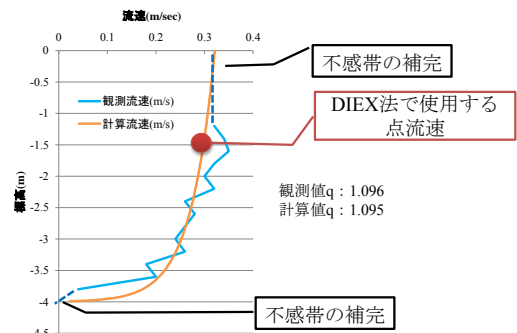


図-15 開水路時のV-ADCPと計算した流速分布形

(3) 河川結氷

河川結氷時には、水面が河氷に覆われ、河氷下が流水断面になる。また、河氷厚は気温変化などによって変動するため、水位と有効断面積の関係が成り立たなくなる。よって、流量精度を向上させるためには、リアルタイムで河氷下の流水断面を把握する必要がある。そこで、V-ADCP が河床から河氷底面に発信するボトムトラッキング値から河氷底面高を測定した。図-17 に結氷初期からの連続観測結果を示す。河氷が安定しない結氷初期にはボトムトラッキングが大きく乱れるが、河氷が安定してからは、ボトムトラッキング値は水位の変動に連動して変化しており、河氷に穴を開けて実測した河氷底面高との誤差は0~12%と概ね一致している。一方、河川結氷時は、図-18 に示すように H-ADCP の流速がゼロを示した。反射強度をみると、H-ADCP から 20m 程度で強く反射する痕跡がみられ、ビームが河氷底面に接触したことを示す。これより、H-ADCP は不確実と判断し、V-ADCP を用いることとした。結氷時の鉛直流速分布は、図-19 のように河床面と河氷面が粗面となり、中間付近の最大流速地点を境に上・下層で対数則分布となる。しかし、結氷時の最大流速地点は水深によって変化するため、1 地点の最大流速地点から得た流速分布を横断面内で水平に拡張することができない。そこで、塩水遡上時と同様に、単位幅流量同一条件の基で、結氷時の流速分布を仮の開水路流れの流速分布に置き換えて DIEX 法により流量を算出することとした。はじめに、河氷面と河床面が流速ゼロとなるように V-ADCP の不感帯を線形補完し、単位幅流量を算出した。次に、式

(3) を用いて、観測値と計算値の単位幅流量が近似するように繰り返し計算を行い、 K_s (相当粗度) を算出した。これより、図-19 に示す結氷時の管路的な流速分布 (青線) を開水路の流速分布 (オレンジ線) に置き換えた。この流速分布形から、図-20 のように、代表する点流速を抽出し、DIEX 法により流量を算出した。

(4) 塩水遡上および河川結氷時

塩水遡上と河川結氷が同時に発生した場合は、(2) と (3) を併用する。塩淡水境界面及び河氷底面高を V-ADCP より取得し、有効断面を取得した。V-ADCP の鉛直流速分布から塩淡水境界面と河氷底面高を流速ゼロとして単位幅流量を算出し、対数分布則により開水路流れの流速分布形に換算後、DIEX 法で流量算出した (図-21)。

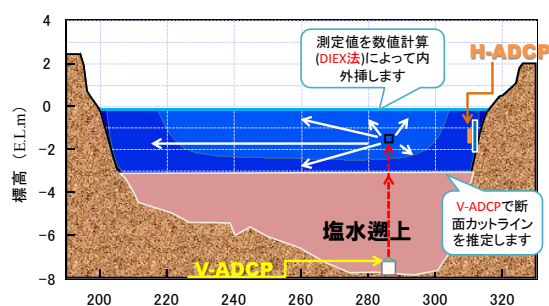


図-16 塩水遡上時の自動流量算出方法

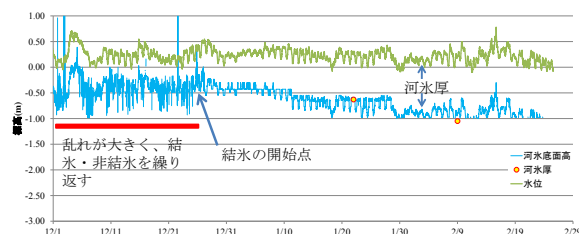


図-17 V-ADCPを用いた河氷底面高の自動取得

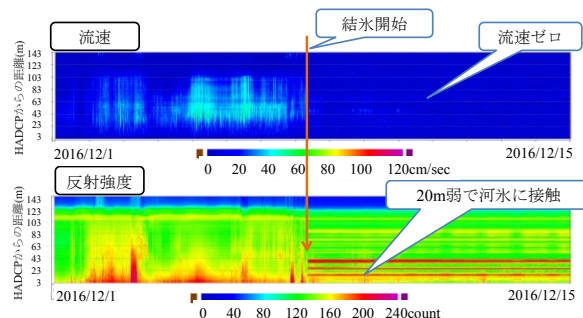


図-18 結氷時のH-ADCP流速と反射強度

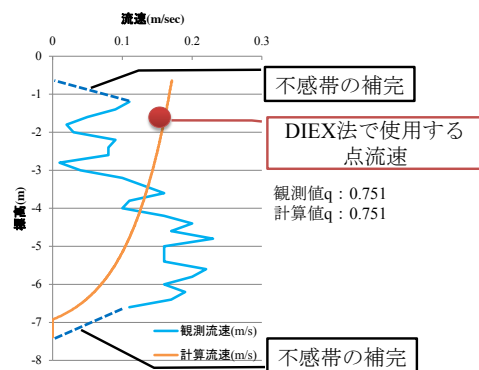


図-19 結氷期のV-ADCPと計算した流速分布形

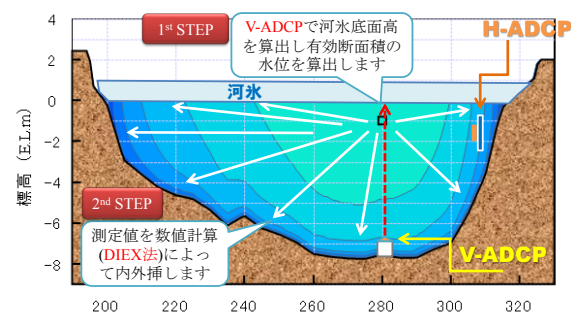


図-20 河川結氷時の自動流量算出

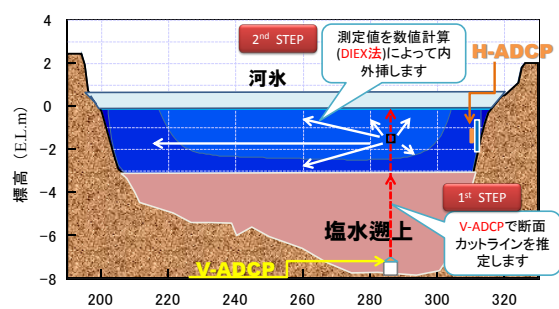


図-21 河川結氷および塩水遡上時の自動流量算出

4. 流量精度の比較

低水時における ADCP 曳航観測および結氷時の河水に穴を開けて ADCP 測定した人力の観測流量と、自動観測で得られた DIEX 流量の精度比較を図-22 に示す。塩水遡上時や河川結氷時、またはその両方が発生した事象において概ね $\pm 10\%$ の誤差になっている。結氷時にばらつきがみられるが、河水下の有効水深内の流速値をすべて採用して計算しているため、河水下の流速の乱れが原因になっていると推察される。よって、鉛直流速分布について乱れの影響をカットした有効範囲の精査が課題である。図-23 に示す出水時では、浮子観測に対する DIEX 流量は $\pm 10\%$ の誤差となり、当サイトで年間を通じて発生する水理現象に対応できると評価できる。

5. まとめ

本研究では、寒冷地河川感潮域で発生する水理現象に対して、ADCPを用いた自動流量算出を行い、以下の結論を得た。

- 1) 天塩川下流では、現地調査によって以下の4つの水理現象に分類できた。①平常時または出水時、②塩水遡上、③結氷時、④塩水遡上および結氷時
- 2) 平常時および出水時は、H-ADCPの水平方向流速からDIEX法によって流量を算出した。H-ADCPの有効範囲を230-270mに絞り込むことで流量精度が $\pm 10\%$ 以内となった。
- 3) 塩水遡上時は、V-ADCPの流速ゼロ水深による塩淡水境界面の自動把握を適用し、塩水層を水平に断面カットした。淡水層の流量はV-ADCPの単位幅流量から対数分布則による流速分布形を算出し、DIEX法で流量を得た。精度は $\pm 10\%$ 以内であった。
- 4) 河川結氷時はV-ADCPの河床からのボトムトラッキングの水深値によって有効断面を自動取得した。流量はV-ADCPによる河床底面と河床を流速ゼロとした単位幅流量から対数分布則による流速分布形を算出し、DIEX法で流量を得た。精度は $\pm 10\%$ を超過する場合があったが、河水下の流速の乱れが鉛直分布の有効範囲の精査が今後の課題である。
- 5) 塩水遡上および河川結氷時は、上記3)と4)の手法を用いて流量算出した。
- 6) 寒冷地感潮域において、H-ADCPとV-ADCPでの観測値とDIEX法を組み合わせることによって、4つの水理現象に整合する流量を、人力観測を行わずに自動的に算出できる可能性を示した。

謝辞：本研究は、国土交通省建設技術研究開発助成制度にて行われています。ここに記して謝意を表します。

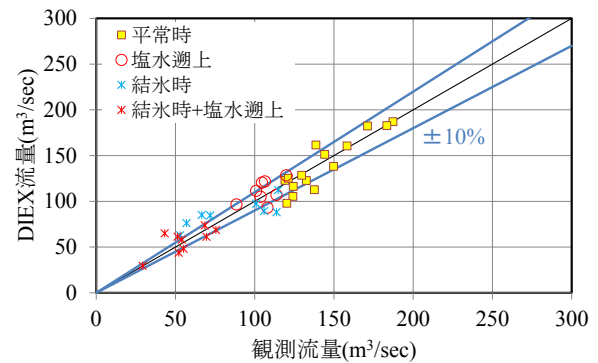


図-22 流量精度（低水時）

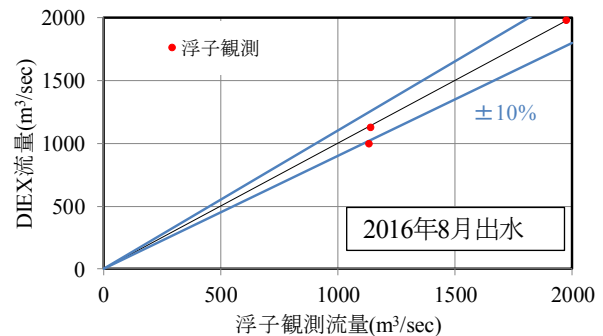


図-23 流量精度（出水時）

参考文献

- 1) 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。
- 2) 倉光大助・大坂誠一・遠藤哲雄・中尾忠彦・栗城稔：水文観測データ品質管理上の課題と今後の展開について，平成21年度河川情報シンポジウム講演集，2009。
- 3) 佐藤嘉昭・中津川誠・山下彰司：超音波流速計の長期観測による河川感潮域の流量の推定，土木学会第60回年次学術講演会，pp517-518，2005。
- 4) 吉川泰弘・渡邊康玄：結氷時の感潮域におけるADCPを用いた流量観測手法，寒地土木研究所月報，642巻，pp9-16，2006。
- 5) Nihei, Y. and Kimizu, A. : A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, Water Resources Research, Vol.44, W00D20, doi:10.1029/2008WR006970, 2008。
- 6) 二瓶泰雄，木水啓：H-ADCP観測と河川流量計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築，土木学会論文集B, Vol.63 No.4, pp.295-310, 2007。
- 7) 杉原幸樹・小林充邦・平井康幸：天塩川における塩水遡上形態とヤマトシジミ生息環境の関係，平成26年度北海道開発局技術研究発表会，2014。
- 8) 嶋祐之，椎貝博美，玉井信行：河床勾配のある場合の塩水楔について，土木学会，年次学術講演会講演概要集，第19回，2-71，pp.2, 1964。
- 9) 日野幹雄：明解水理学，pp.97，丸善株式会社

(2017. 4. 3受付)