

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：寒冷地河川におけるリアルタイム流量自動観測システムの開発
- (2) 研 究 期 間：平成 27～29 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：福田 浩一（株式会社福田水文センター・代表取締役）
- (4) 研 究 代 表 者 名：澤田 浩一（株式会社福田水文センター・環境水工部 次長）
- (5) 共 同 研 究 者 名：橋場 雅弘（株式会社福田水文センター・総合企画部 次長）
北野 和之（株式会社福田水文センター・調査部 技師長）
土田 宏一（株式会社福田水文センター・調査部 福技師長）
芳賀 聖一（株式会社福田水文センター・調査部 主任技師）
甲斐 達也（株式会社福田水文センター・旭川支店 副技師長）
二瓶 泰雄（東京理科大学理工学部土木工学科・教授）
吉川 泰弘（北見工業大学工学部地域未来デザイン工学科・
助教）
- (6) 補助金交付総額：29,313,000 円
- (7) 技術研究開発の目的
- ・河川流量は治水、利水、環境を維持するうえで重要な要素であるが、北海道の寒冷地河川は勾配が緩く下流では塩水が遡上しやすい。さらに冬期間は水表面が結氷するといった複雑な水理条件が発生する。
 - ・このため、現行の手法では流量精度の向上が難しいことや、出水ピーク時の確実な取得や観測員不足、河川結氷時の観測の危険性などが課題である。
 - ・そこで、人力観測なしでも、機器観測と数値計算を組み合わせることで感潮域・結氷時・出水時を含めたリアルタイム流量の算出を可能とする完全自動化システムの構築を目的とする。

(8) 技術研究開発の内容と成果

1) 研究開発の背景

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、安全確実に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水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層で存在するため、非定常に変化する塩淡水境界面をリアルタイムで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。

本研究開発では、流量観測を完全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。同時に、現地観測から流量算出、データ配信までを一連としたリアルタイム流量配信システムを構築した。

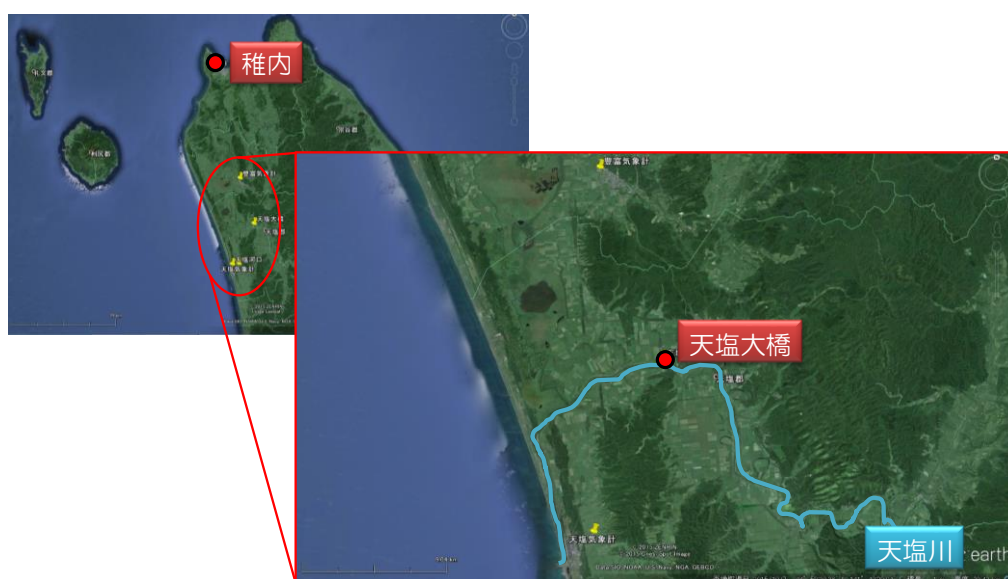


図-1 調査箇所

2) 技術研究開発実施計画と成果

技術開発の内容と成果について、各年度の交付申請書で記載した実施計画等と対比して表-1～3に示す。

表-1 実施計画と成果の対比表 (F/S)

年度	実施計画	成果
平成 27 年度 1 年目 F/S	① 河川管理者及び利水関係者との事前協議の実施 ② 既往調査資料及び現地踏査を基に水平設置型 (H-ADCP) と河床設置型 (V-ADCP) による連続流速値の取得が可能かつ有効な地点を選定。 ③ 数値計算の基礎資料となる水面勾配 (上下流の水面の傾き：河川水的位置エネルギー) を把握するため、観測箇所とその上下流に自記水位計による観測を実施。 ④ 取得した連続流速値の有効性検証するため、曳航型 ADCP 観測結果との比較検証を実施。 ⑤ V-ADCP の反射強度から得られる海水と河川水の境界面の有効性と水温及び海水が超音波に及ぼす特性を把握ため、多項目水質計による現地観測との比較検証を実施。 ⑥ V-ADCP の得られる河氷底面高の有効性は冬期流量観測結果をもとに比較検証を実施。	① 河川管理者 (北海道開発局留萌開発建設部) との協議を実施。 ② 資料収集整理により経年的な横断面データ及び現地踏査から H-ADCP の設置水深及び、V-ADCP の設置地点を選定。 ③ 当地点の 200m 区間の水面勾配は、1/15000～1/20000 程度と限りなく平坦で、風波等によって容易に逆転現象が発生することが判明した。 ④ 平常時では曳航型 ADCP と H-ADCP、V-ADCP は類似した傾向が見られた。 ⑤ リアルタイムシステム構築を考慮して流速で評価を行った。観測した塩分の鉛直分布から推定した塩淡水境界と VADCP の流速 (逆流が発生した水深) とは最大 1m 程度の差がみられたが、流量差は 2%以内となり、V-ADCP の逆流発生水深を塩淡水境界面として淡水流量を算出することが可能と判断 ⑥ V-ADCP の河床把握機能を上向きに用いて、河氷底面高を測定した精度は実測値と 0～-12%で河氷の変動を再現できていると評価。

表-2 実施計画と成果の対比表 (R&D 1 年目)

年度	実施計画	成果
平成 28 年度 2 年目 R&D 1 年目	① 塩水層とH-ADCP 観測値の有効範囲の課題 F/S の現地観測で塩水層が最大 $H=-2.0\text{m}$ 付近まで上がることが観測された。塩水がH-ADCP の設置標高 ($H=-1.5\text{m}$) を超えた場合は淡水流量を把握できないという課題とH-ADCP は上下に1.7 度の広がり超音波が広がるため、塩水層が上昇すると超音波ビームが干渉して曲がってしまい、正しい計測距離と流速値を得られないという課題があった。 ② 結氷時の流量算出の課題 H-ADCP は河岸部でH 型鋼に取り付けて観測しているが、河岸部の河氷が1.0m 程度まで厚くなることからHADCP のビームが河氷に干渉して遠方まで届かない現象が発生した。河川結氷時の河氷変動を考慮した観測方法と流量算出方法の確立が課題となった。 ③ 出水時の流量算出の課題 F/S の調査期間が平成27年10～2 月であったため、重要な洪水時の有効性を評価できていなかった。	① 塩水遡上時は塩水層の上昇やH-ADCP のビームが境界面で湾曲するため、2 層で明瞭に密度層が分かれる場合はH-ADCP の計測が困難であるため、ビームアングルが鉛直方向のV-ADCP の点流速を用いることとした。その場合、流速の乱れがあるため、鉛直流速を単位幅流量に換算し、塩淡境界面を河床とした対数則式から $H=-1.5\text{m}$ (H-ADCP 設置標高) の点流速を算出→流量を求めた。 ② 河川結氷時はH-ADCP が設置している H 型鋼の河氷厚が大きくなり、ビームの発射障害になるため、塩水遡上時と同様にV-ADCP の点流速を用いることとした。V-ADCP の鉛直流速を単位幅流量とし、河床からの対数則式から $H=-1.5\text{m}$ (H-ADCP 設置標高) の点流速を算出→流量を求めた。 ③ 現地観測を継続し、平成 28 年 8 月に $2000\text{m}^3/\text{sec}$ 程度の出水を観測した。当手法の流量と従来法 (浮子) とは 10% 以内の誤差であった。

表-3 実施計画と成果の対比表（R&D 2 年目）

年度	実施計画	成果
平成 29 年度 2 年目 R&D 2 年目	① R&D1 年目で構築した観測手法及び流量算出手法をもとに、トータルシステムを完成させる。 ② 完成したシステムを現地実装し、事業化に向けた試験運用を行う。 ③ 事業課後の活用を想定した維持管理計画を策定する。	① 河床の V-ADCP からは水中無線通信でデータを陸上部まで送信し、H-ADCP は有線で陸上部の通信制御装置まで送る。そこから事務所サーバに 10 分毎のデータが届き、アルゴリズムに基づいた流量算出と GUI の作成を行う。これらは任意の PC から Web 経由でアクセスが可能である。通信装置の電源はソーラーとした。 ② 平成 30 年 1～2 月に現地実装し、寒冷地条件の耐性を評価した。氷点下条件や日照の無い日が続いた場合でもシステムに異常はみられなかった。 ③ 維持管理計画では定期点検、総合点検と劣化や河床設置の危険度、維持管理コストなどを算出した。

3) 現地観測による水理現象の把握

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 18.6 km）において、平成 27 年 10 月～平成 28 年 2 月と平成 28 年 6 月～平成 30 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-4 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、河氷に横断測線上の 12m 毎に穴を開け、ADCP 本体を河氷の穴に入れて静止し、120 秒間の観測を行った。

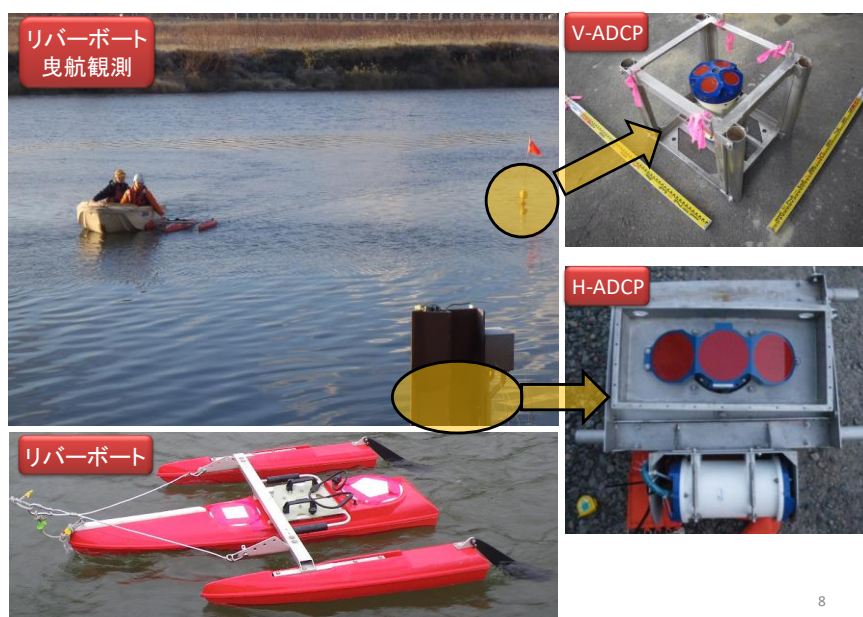


図-2 観測機器

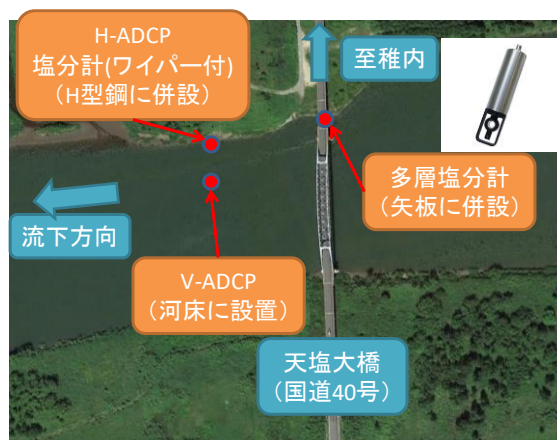


図-3 観測機器設置平面図

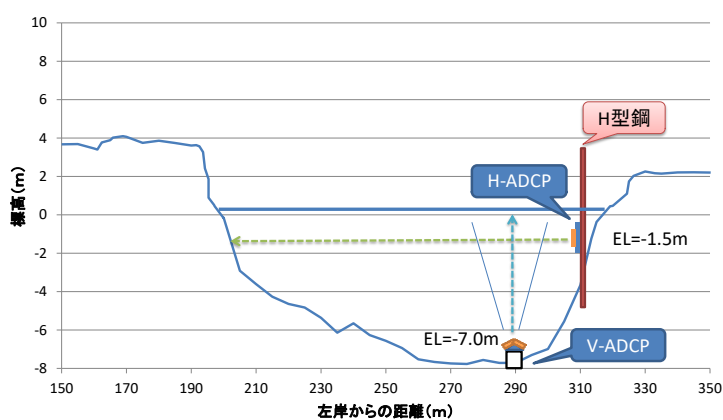


図-4 観測機器設置横断面図

潮汐影響による流量変化をリバーポートで観測した結果を図-5 に示す。



図-5 感潮域の流量と水位の関係

流量の最小は上げ潮中間時で、最大は下げ潮中間時に発生している。

干潮時と満潮時は水位が異なるが、流量は同程度である。

感潮域のメカニズムは図-6 に示すようになり、感潮域では水位と流量の関係が一義的にはならず、従来水位流量曲線式で流量管理することが難しい。

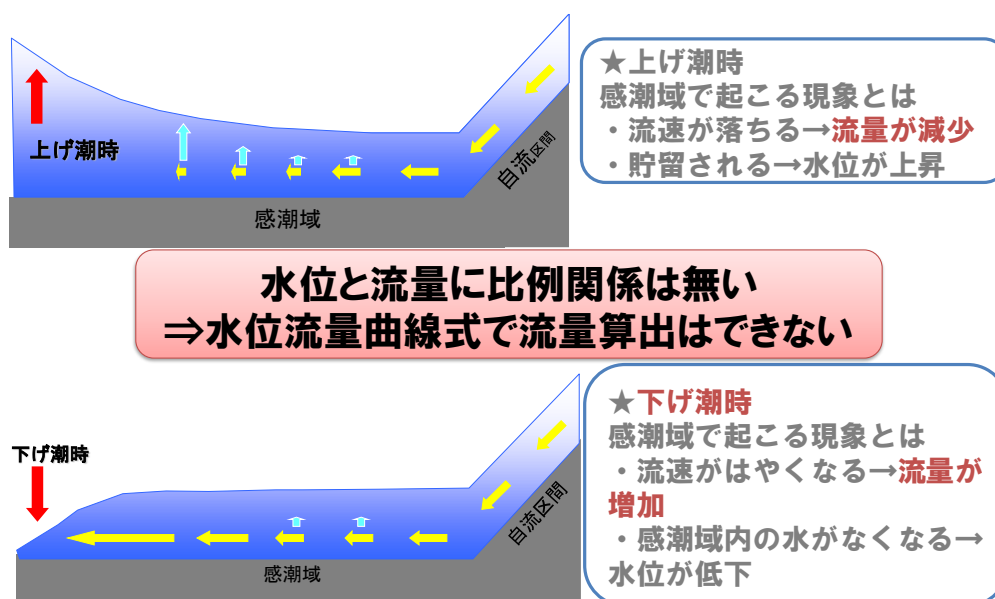


図-6 感潮域の流量と水位のメカニズム

平成 27～29 年度の現地調査結果から、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-7 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-8 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、6～7 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-9 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-10 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-11 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平成 29 年 1～2 月に観測された。

なお、塩水遡上時に出水が生起した場合は、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。

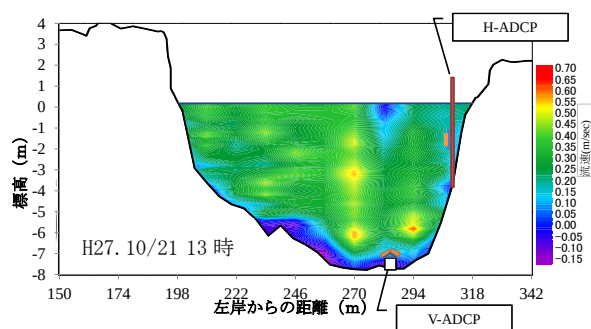


図-7 平常時流速分布

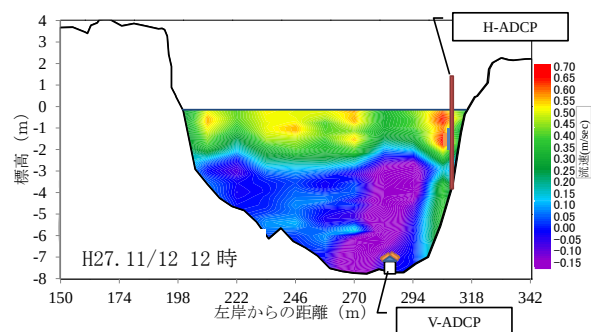


図-8 塩水遡上時流速分布

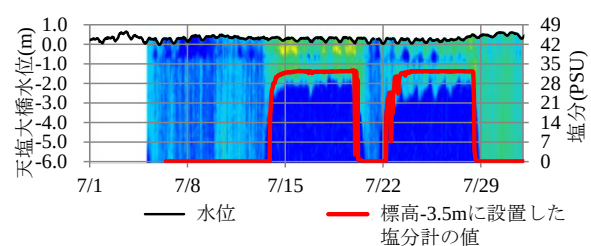


図-9 塩水遡上の時系列変化 (V-ADCP)

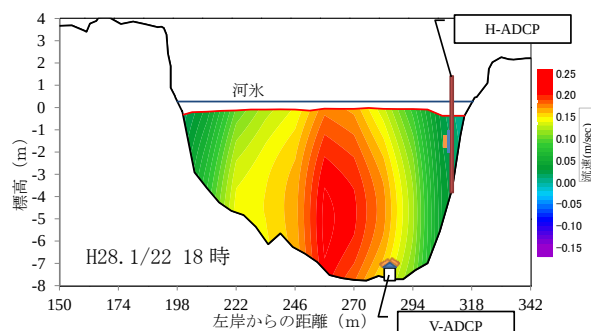


図-10 結氷時流速分布

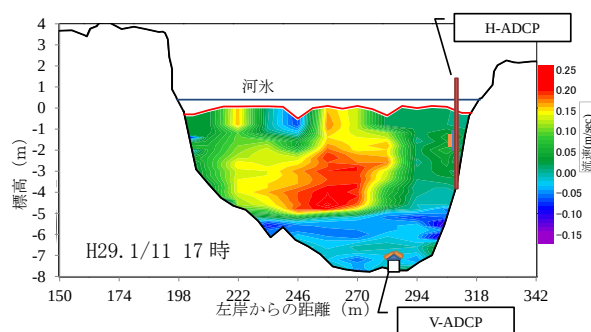


図-11 塩水遡上+結氷時流速分布

< 塩水遡上時 >

平成 28 年 7 月の塩水遡上が発生した時期の時系列観測の結果を図-12 に示す。

塩分計 (JFE アドバンテック Compact-CT) は標高 (-1.0m、-1.5m、-2.0m、-2.5m、-3.1m、-3.5m、-4.0m、-5.0m、-6.0m) に固定設置 (天塩大橋橋梁右岸の護岸) している結果である。

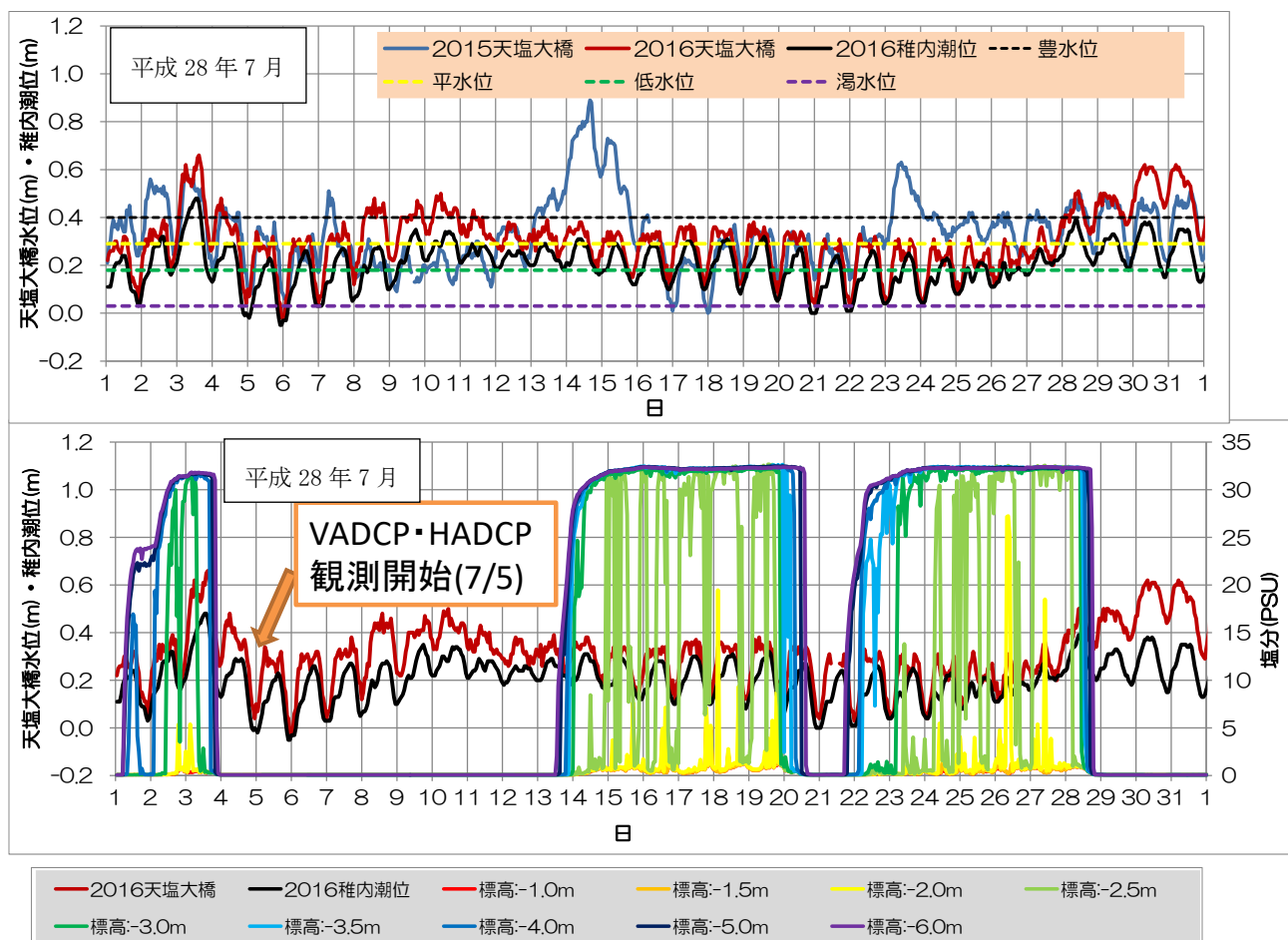


図-12 塩分と水位の時系列変化 (平成 28 年 7 月)

平成 28 年 7 月 14~20 日と 22~28 日に塩水遡上を観測。標高-2.0m までの遡上を確認している。塩分は 6 日程度継続するが、塩水の遡上と消失は短時間である。7 月下旬は降水に伴う水位上昇がみられている。

H-ADCP の時系列変化を図-13~15 に示す。

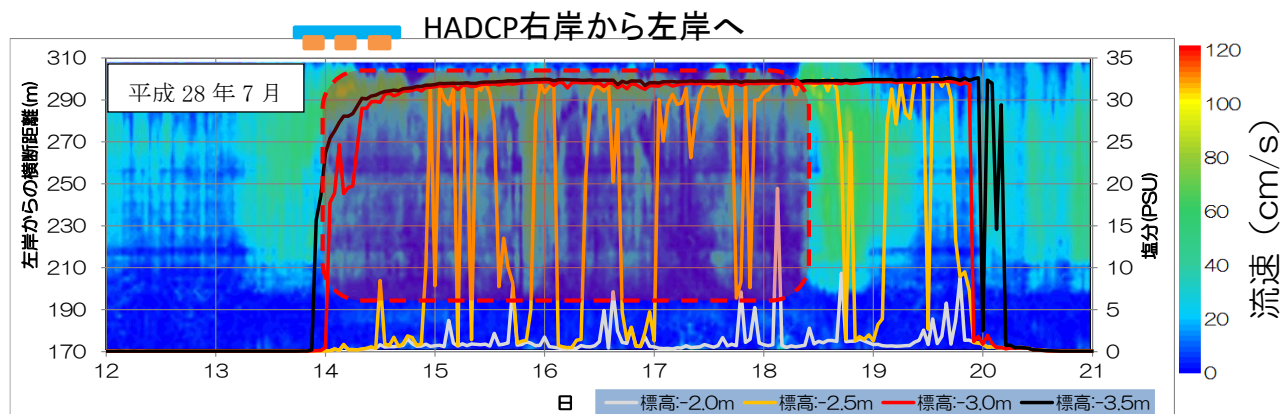


図-13 H-ADCP の時系列変化 (平成 28 年 7 月 12-21 日)

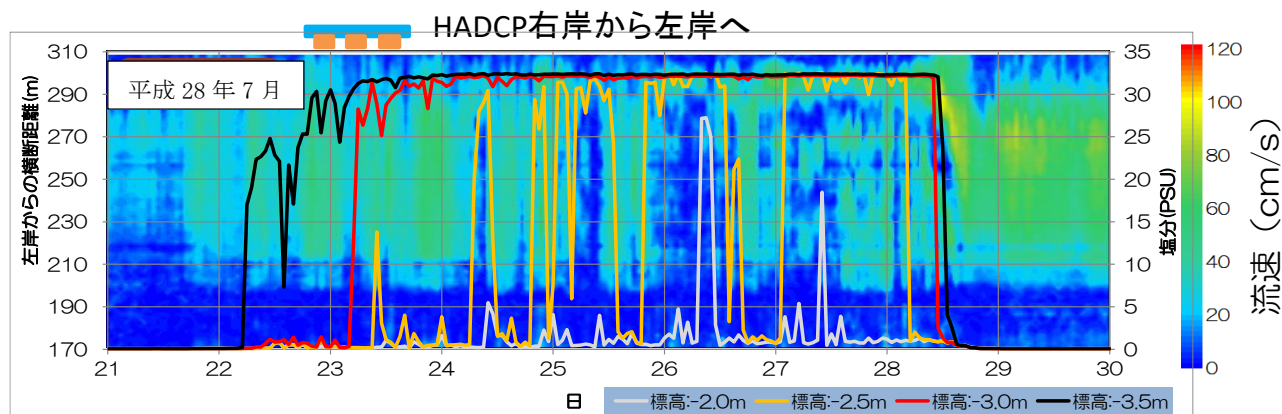


図-14 H-ADCP の時系列変化 (平成 28 年 7 月 21-30 日)

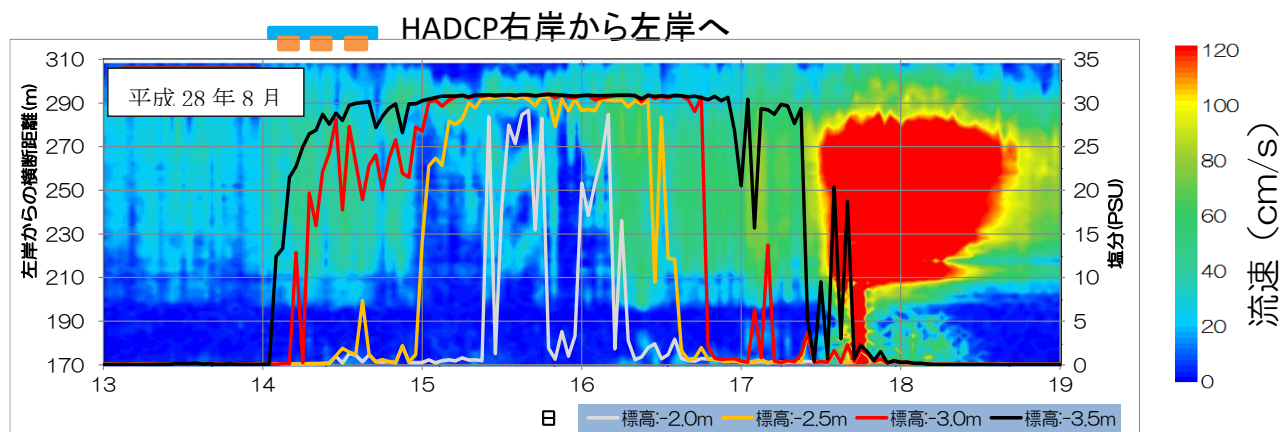


図-15 H-ADCP の時系列変化 (平成 28 年 8 月 13-19 日)

鉛直塩分計測結果と H-ADCP 計測結果の比較により、塩淡水境界面が一定の標高に達すると、右岸側の一部を除き流速計測結果が遅くなる現象が発生している。これは、塩淡水境界面に H-ADCP の超音波ビームが接触することで、ビームの直進性が阻害された可能性が推察される。

これより、塩淡水境界面などの明瞭な密度境界がある場合は、H-ADCP のデータが正しい流速値をとらえきれていないことが懸念される。

次に、同時期の V-ADCP の結果を図-16 に示す。

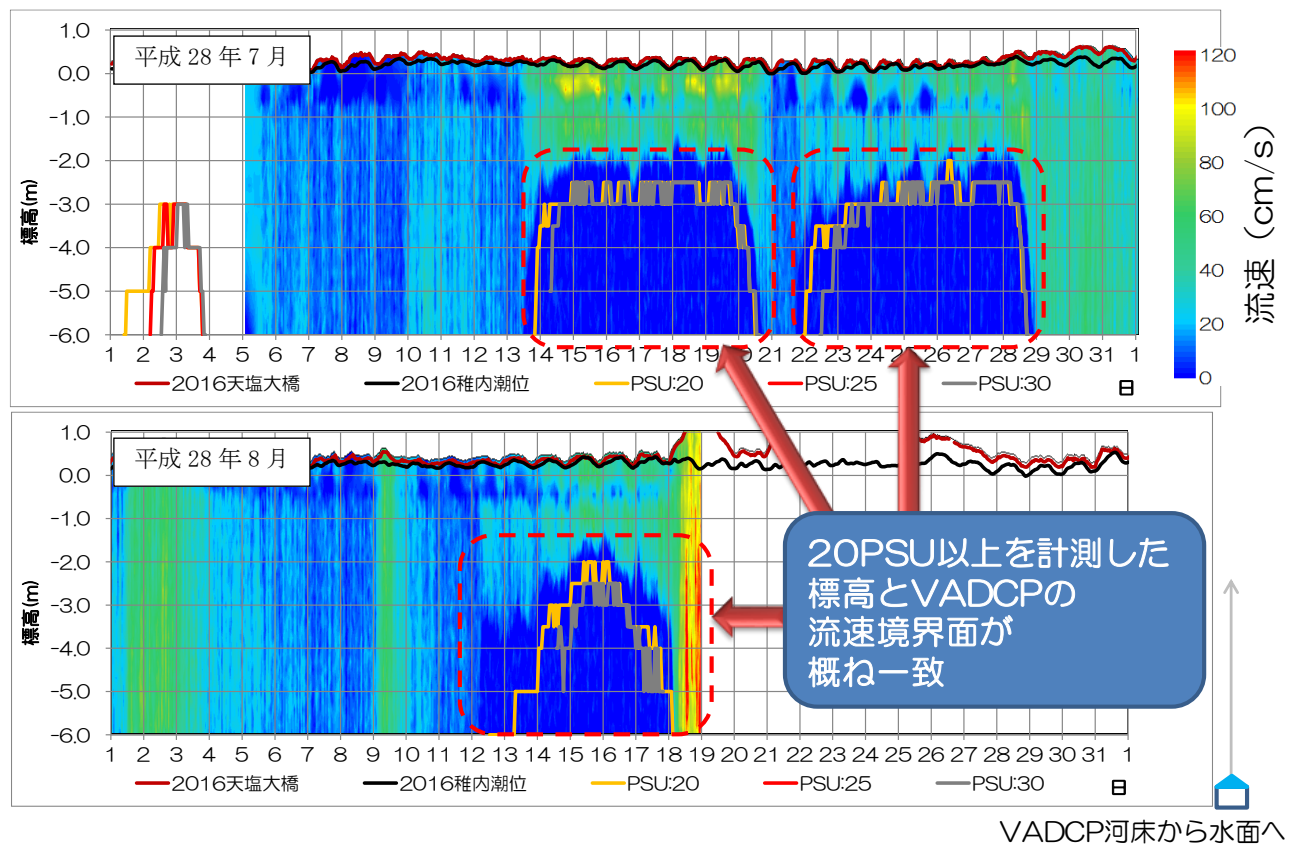


図-16 V-ADCP の時系列変化（平成 28 年 7-8 月）

鉛直塩分計測結果と V-ADCP 計測結果を比較すると、V-ADCP の鉛直流速分布境界面と鉛直塩分計の 20PSU 以上の計測標高の波形が概ね一致している。

これより、V-ADCP の鉛直流速分布による塩淡水境界面の判定は有効であると考えられる。

<結氷時>

平成 27 年 12 月～平成 28 年 1 月の結氷直前から結氷後の連続データを図-17 に示す。

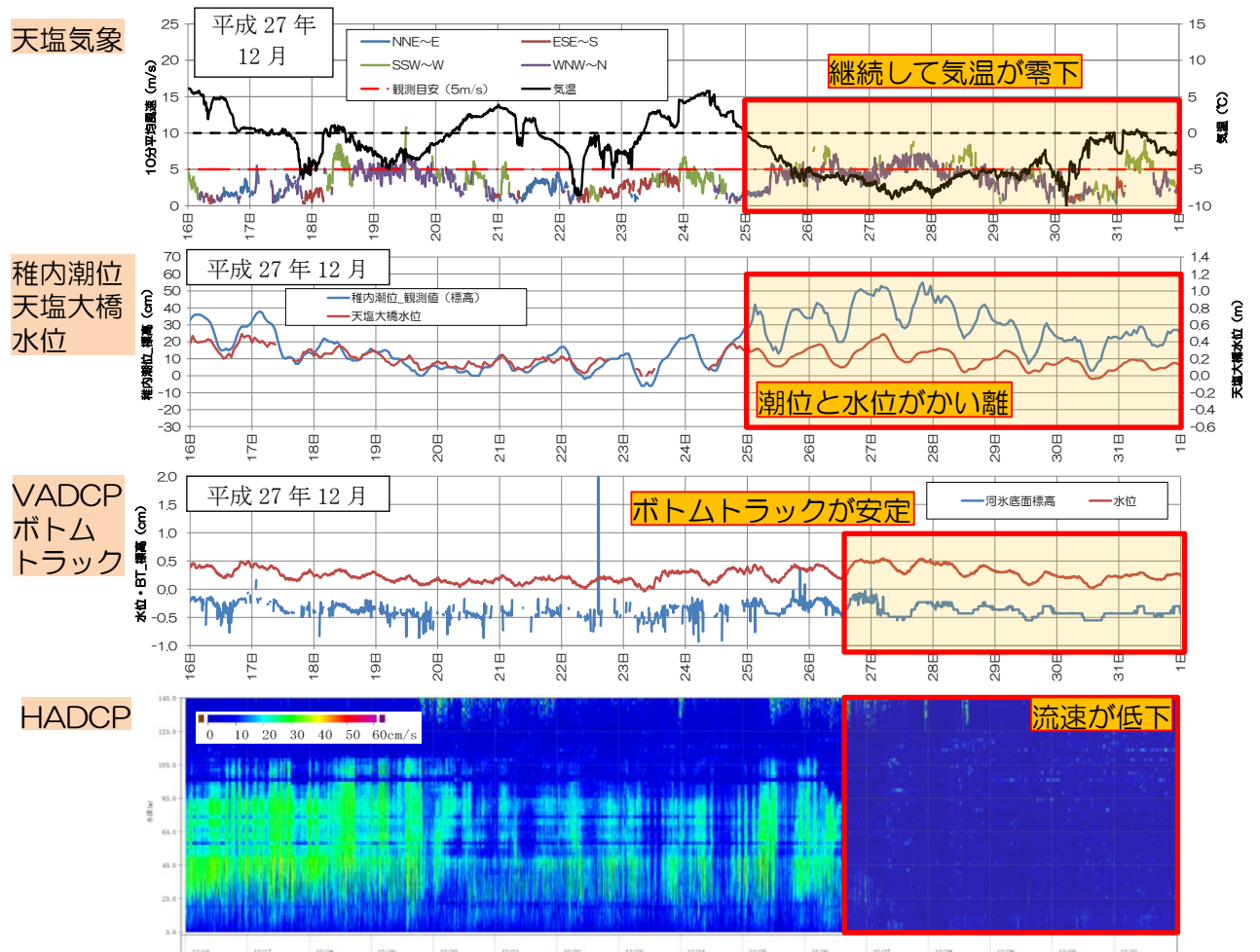


図-17 ADCP の時系列変化（平成 27 年 12 月～平成 28 年 1 月）

赤枠の 12 月 26～27 日にかけて結氷したと推定できる。

理由として、継続して気温が氷点下を示し、結氷前は、潮位と水位がほぼ一致していたが、結氷後は乖離している。

また、V-ADCP のボトムトラッキング（河氷底面標高）が、結氷前は不安定であるが、12 月 26 日以降は安定して推移している。

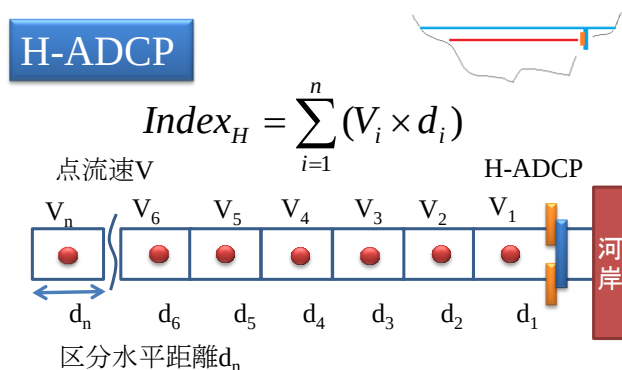
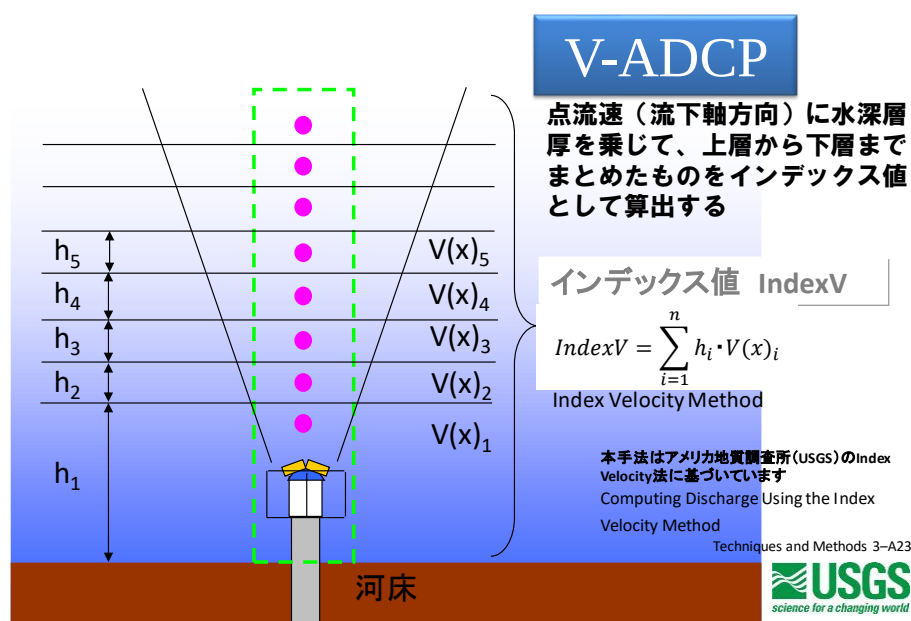
ボトムトラッキングは水面に当たる場合は乱れが生じるが、河氷底面等に当たる場合は安定する傾向があるため、結氷の判断として V-ADCP のボトムトラッキングが有効と考えられる。

4) 水理現象を考慮した流量観測手法の検討

①インデックス法

ADCP の線方向に一定間隔で得られる点流速から流量を算出する手法は、アメリカ地質調査所 (USGS) 等で使われている Index Velocity 法がある。(図-18、図-19)

これは ADCP の点流速を水深方向 (VADCP) 及び水平距離方向 (H-ADCP) で線流速 (単位幅流量) としてまとめてインデックス値とし、既往観測で得られた平均流速と相関式を作成して流量を算出するものである。



V-ADCP と H-ADCP のインデックス値と観測流量との比較（平成 27 年観測分）を図-20、図-21 に示す。

V-ADCP についてはややばらつきがあるが、概ね線形相関がみられる。H-ADCP はインデックス値と観測流量は大きくばらつきがみられる。この原因として、図-22 に示すように塩水遡上が発生した場合、緩混合で二層に分かれることが挙げられる。H-ADCP の測定ラインが上層の淡水部分になるため、下層の塩水層を考慮できず、流量に差異が発生している。また、本手法は、観測流量と ADCP で得られたインデックス値との相関式によって流量を算出するため、人力による観測が必須となる。

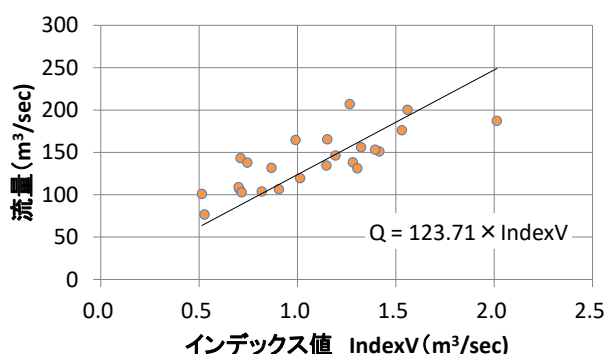


図-20 V-ADCP インデックス値と観測流量の関係

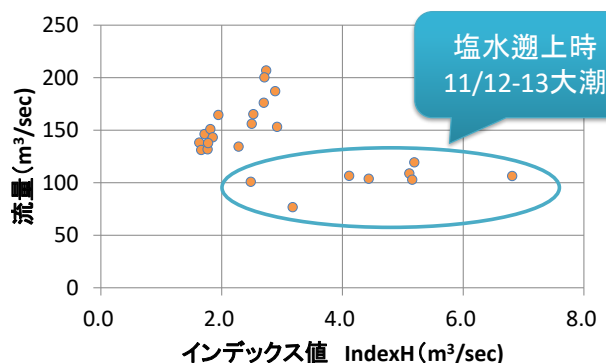


図-21 H-ADCP インデックス値と観測流量の関係

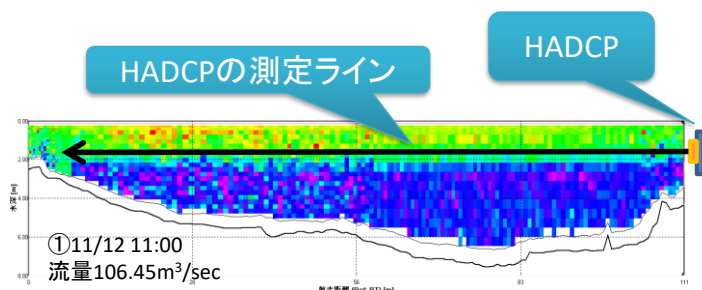


図-22 H-ADCP のインデックス値と観測流量の差異の理由

②DIEX 法（力学的内外挿法）

DIEX 法^{5) 6)} とは流速観測値を合理的に取り込み、データ同化手法を導入した流動モデルを用いて、流速の横断分布や流量を推定する方法である。

計算は、流体運動の力学条件を満足しつつ、流速データの空間内外挿を行うので、この手法を力学的内外挿法（Dynamic Interpolation and Extrapolation method）と呼ぶ。

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。

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

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 ($= gn^2/h^{1/3}$ 、 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 $n=0.02 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、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。

DIEX 法の概要を図-23 に、従来法の浮子との比較を図-24 に示す。当手法は流速の連続値があれば、点又は線から面に内外挿して流量を算出できるため、観測流量との相関式は必要ないため完全自動化が可能である。

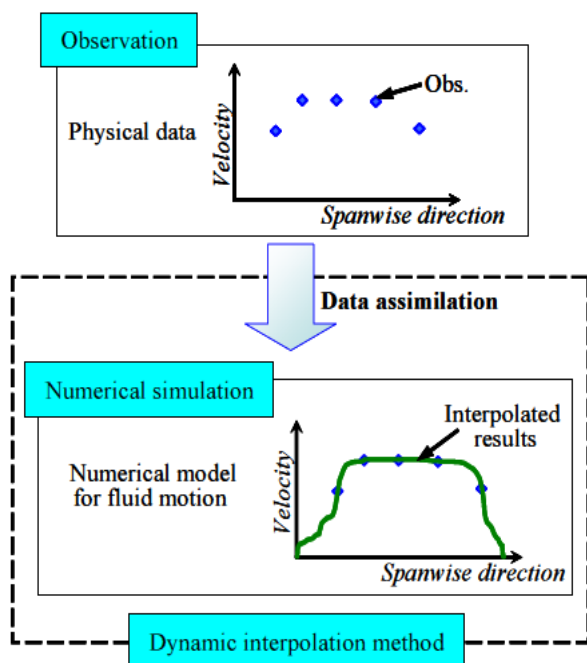


図-23 DIEX 法の概要

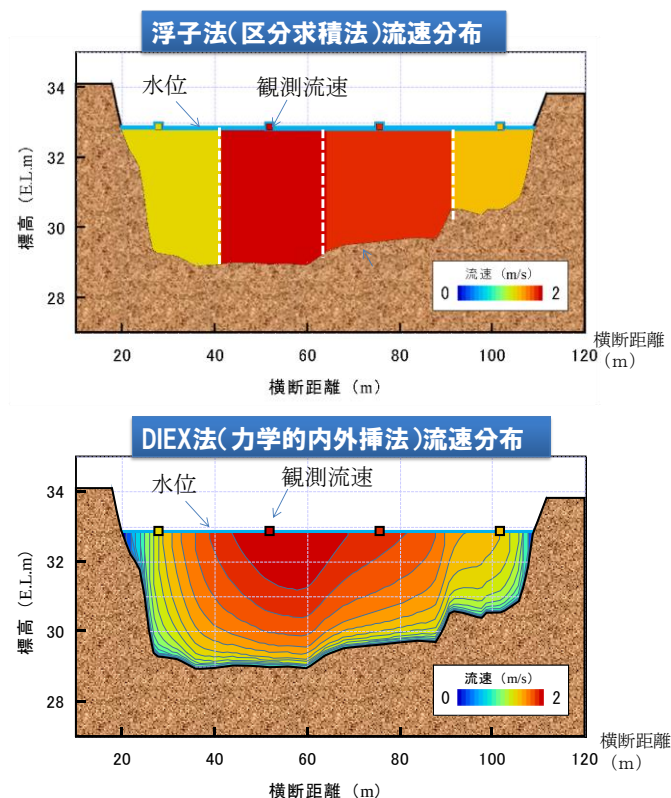


図-24 従来法 (浮子) と DIEX 法の概要

a) 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-25 に示す。

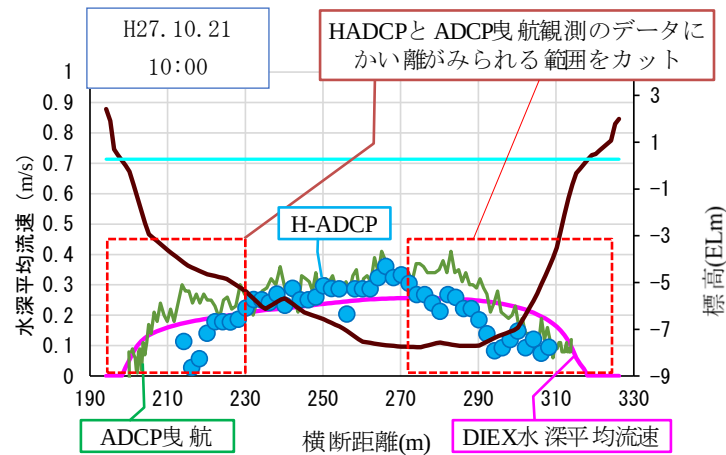


図-25 H-ADCP のデータ有効範囲

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。

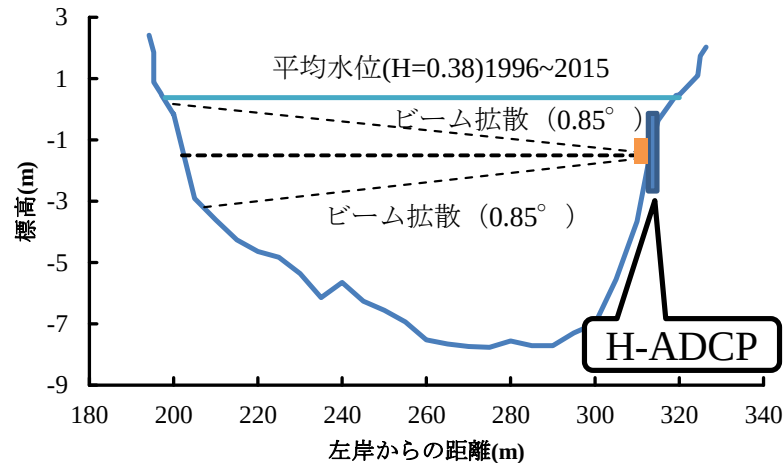


図-26 H-ADCP の音信図

左岸は、図-26 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。

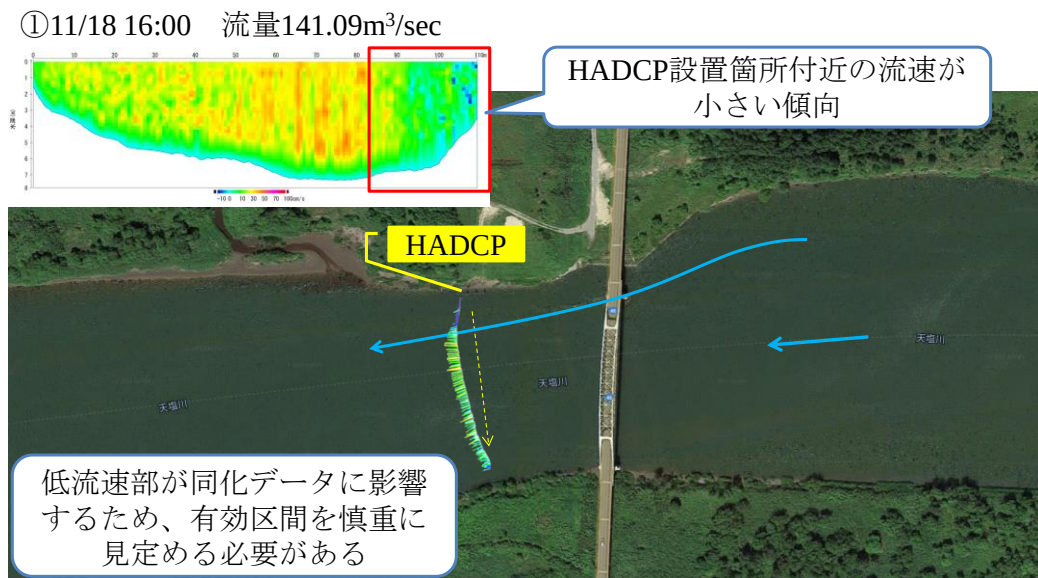


図-27 縦断河道形状

一方、H-ADCP が設置されている右岸域は、図-27 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。

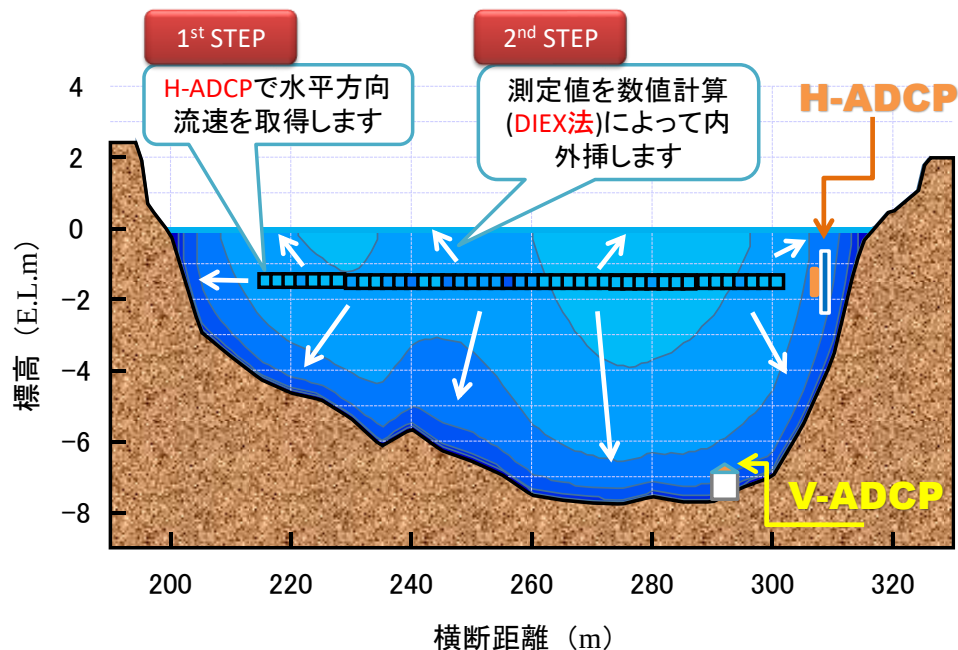


図-28 平常時および出水時の自動流量算出方法

本研究では、ADCP 曳航観測流速の H-ADCP の設置標高 (H=-1.5m) 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-28 に示す方法で流量を算出した。

b) 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-29 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。

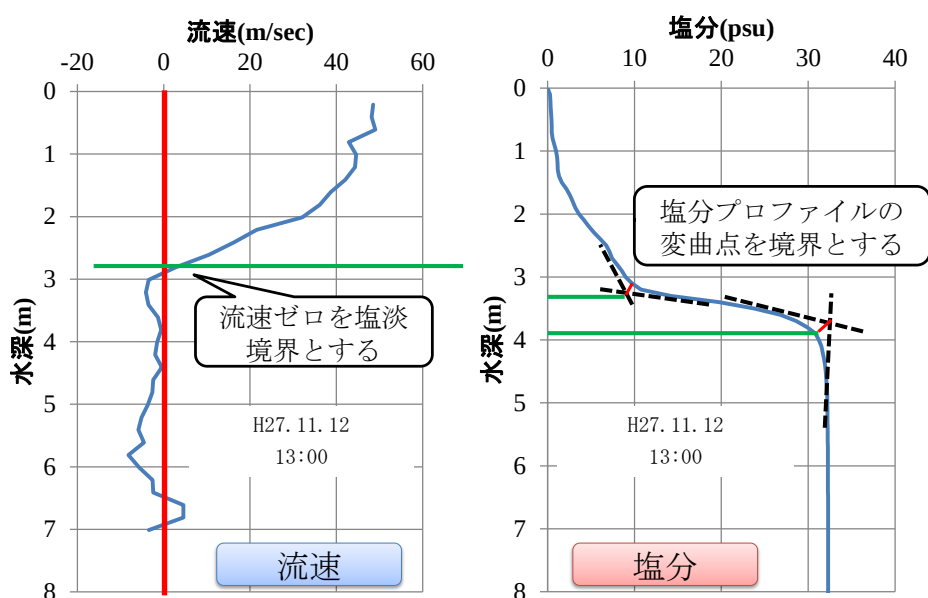


図-29 流速と塩分の鉛直分布

塩淡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境界面とした流量の比較を図-30 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境界条件として設定した。

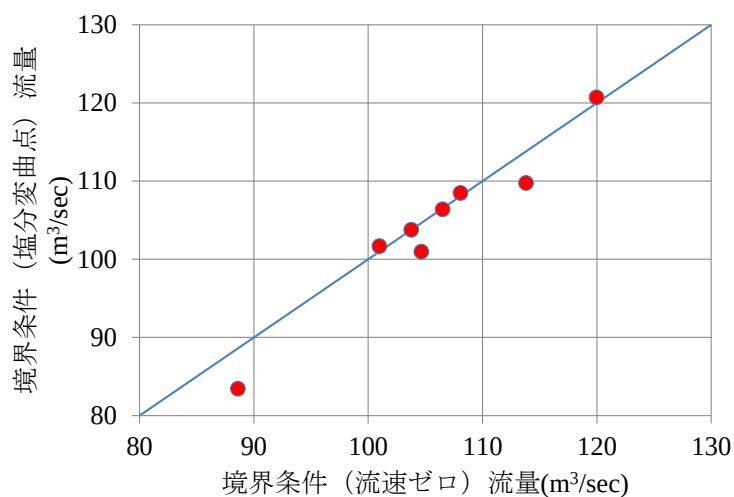


図-30 塩淡境界面の境界条件別による流量比較

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-31 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。

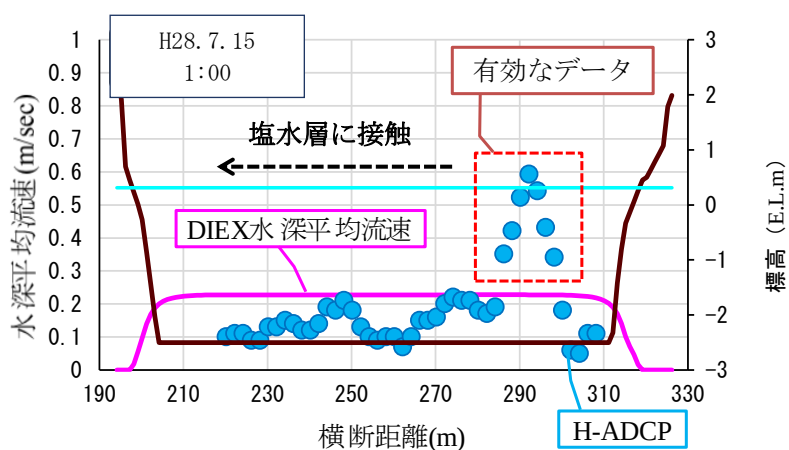


図-31 塩水遡上時の HADCP による DIEX 法内外挿

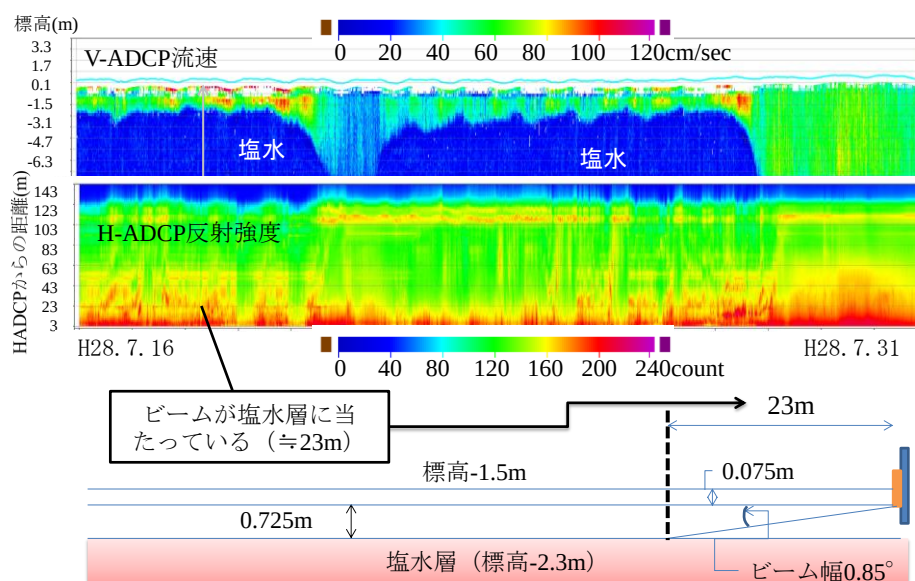


図-32 塩水遡上時の H-ADCP ビーム状況

図-32 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-33 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。

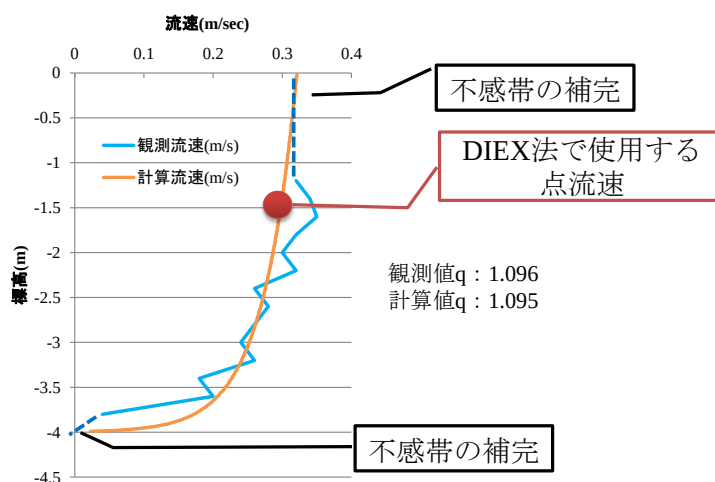


図-33 開水路時の V-ADCP と計算した流速分布形

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。

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

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 (constant)、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-33 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。

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

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。

以上より、図-34 に示す方法で流量を算出した。

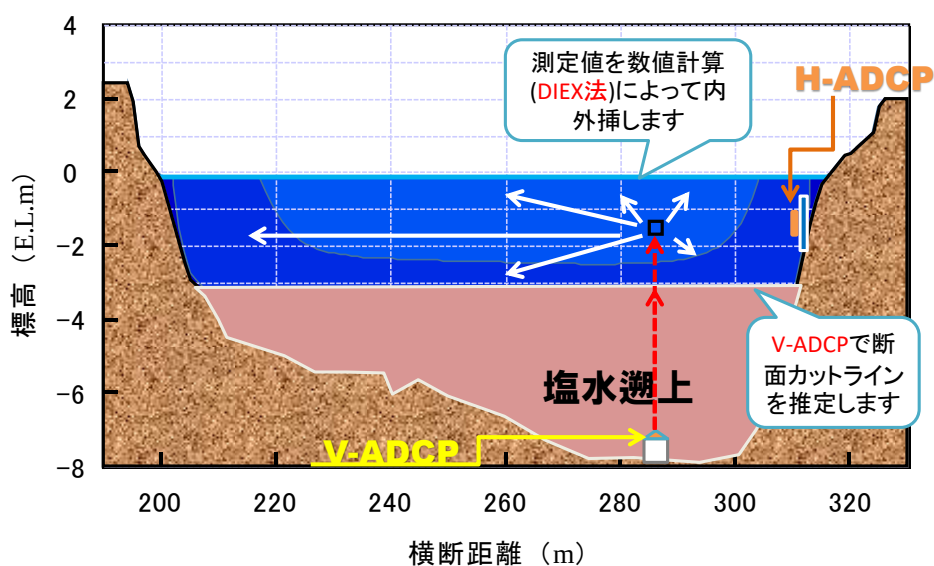


図-34 塩水遡上時の自動流量算出方法

c) 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-35 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。

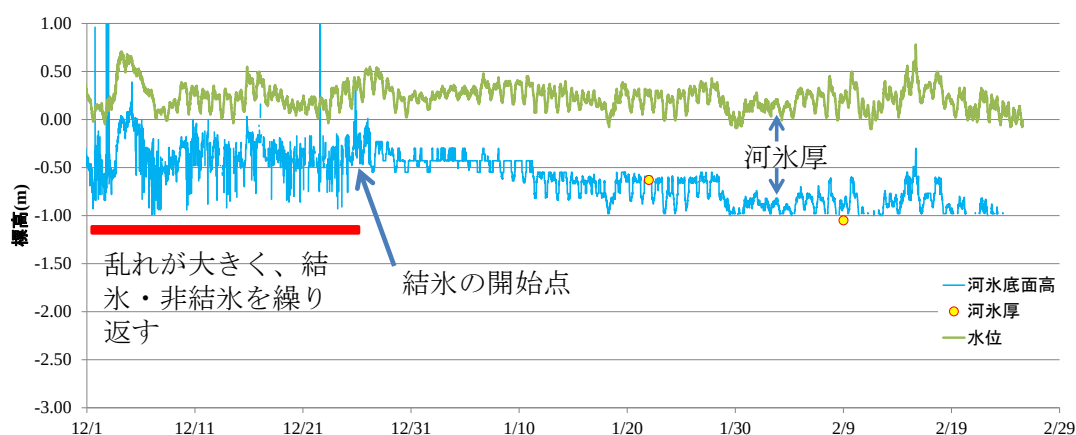


図-35 V-ADCP を用いた河氷底面高の自動取得

一方、河川結氷時は、図-36 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。

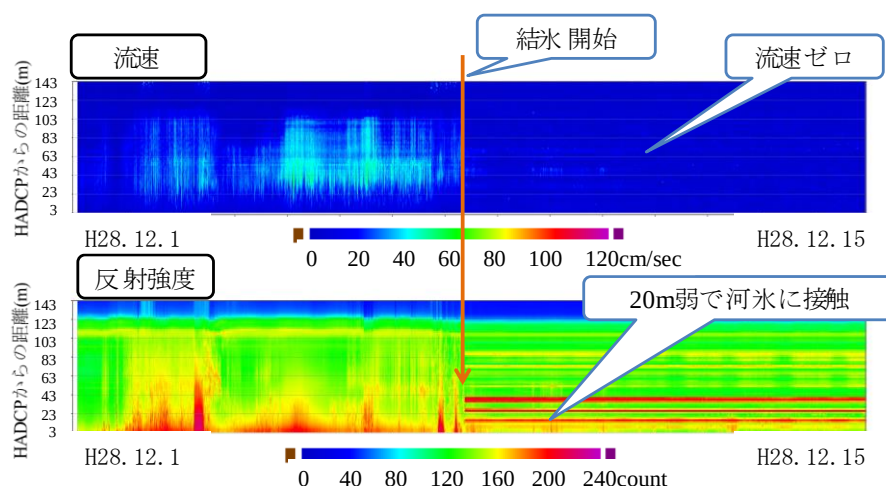


図-36 結氷時の H-ADCP 流速と反射強度

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-37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。

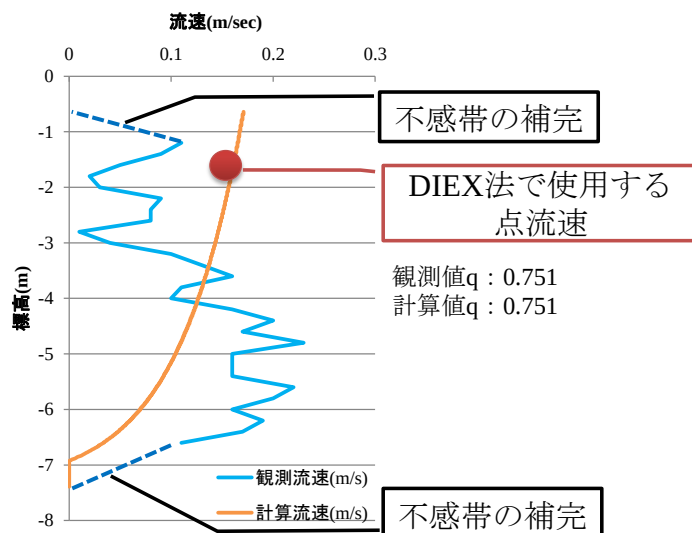


図-37 結氷期の V-ADCP と計算した流速分布形

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-37 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-38 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。

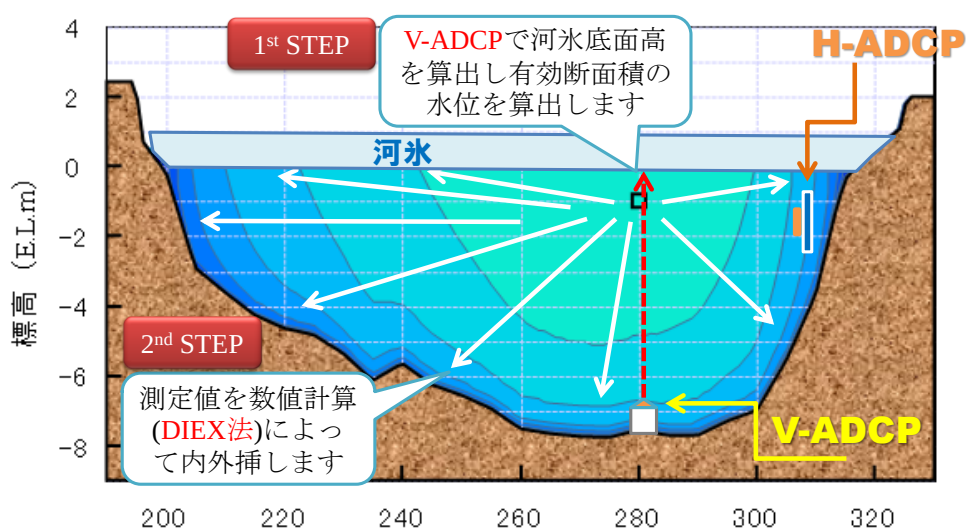


図-38 河川結氷時の自動流量算出

d) 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、b) と c) 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-39)。

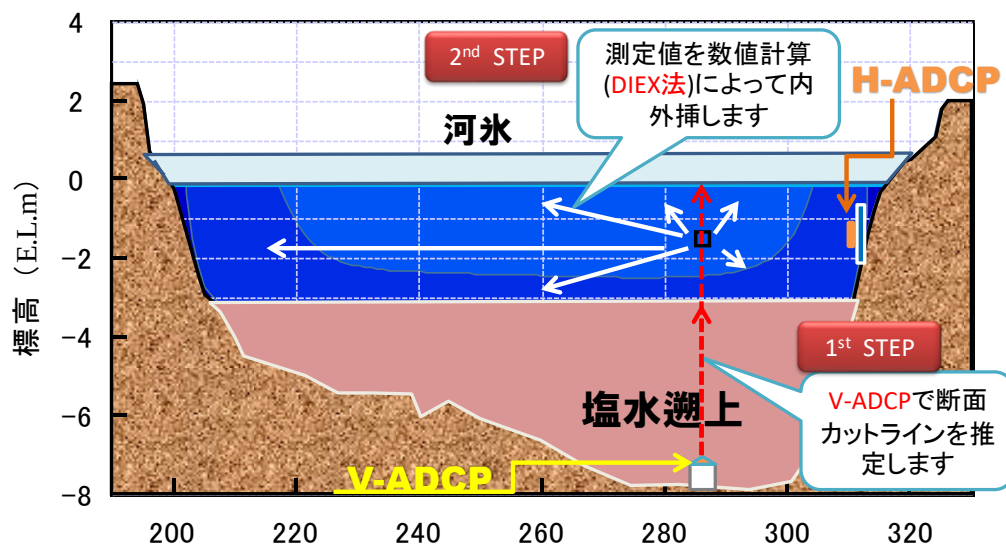


図-39 河川結氷および塩水遡上時の自動流量算出

5) 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氷に穴を開けて 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-40 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、河氷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、河氷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。

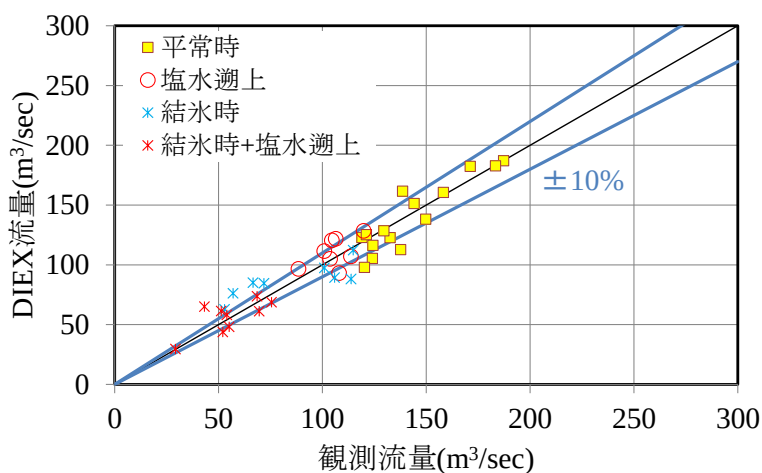


図-40 流量精度 (低水時)

図-41 に示す出水時には、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。

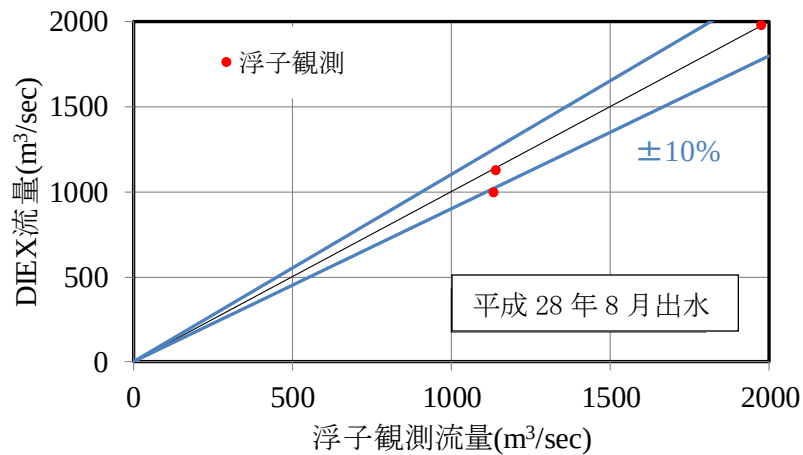


図-41 流量精度（出水時）

平成 28 年度の 3 つのイベントについて、図-42 をみると、水位と流量の関係は逆ループを描いている。増水期には流量が大きく、減水期には流量が小さくなる傾向がみられている。

高水時の流れの非定常性が明らかになっており、流量をリアルタイム監視することで特性を把握することが可能である。

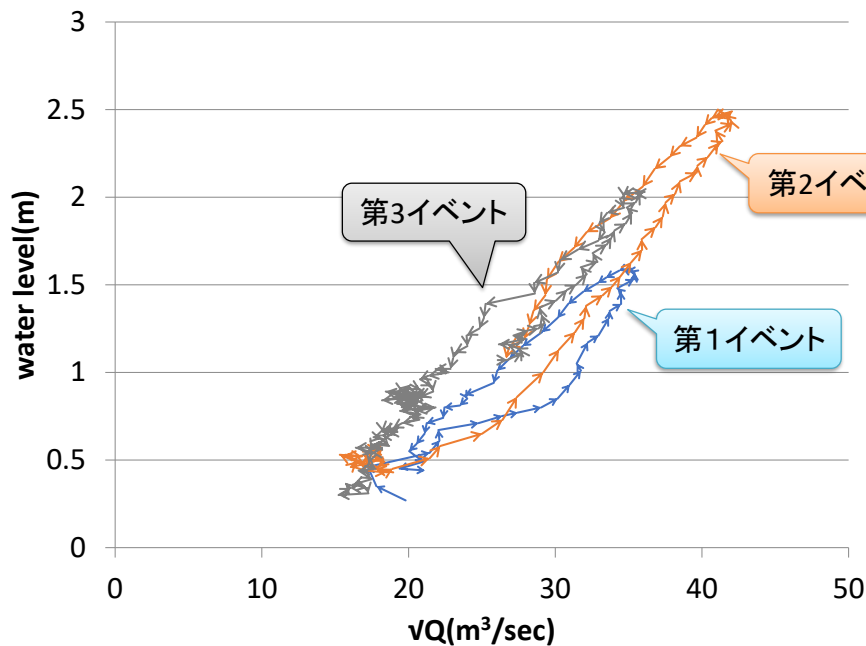


図-42 洪水ループ（出水時）

6) リアルタイム流量観測システム

リアルタイム流量観測システムは、図-43 に示すように、①V-ADCP のデータは超音波モデムを用いた水中無線で送信し、水中の H 型鋼の受信器で受信する。②有線ケーブルで陸上 H 型鋼に取り付けた通信装置に集約する。H-ADCP データは有線ケーブルで通信装置に送信する。③通信装置からインターネット回線で事務所のサーバにデータ取得（10 分）毎に集約する。その後、サーバで流量計算し、Web サイトに公開する GUI を更新する。④インターネットブラウザでユーザーがどこにいても閲覧可能となる。

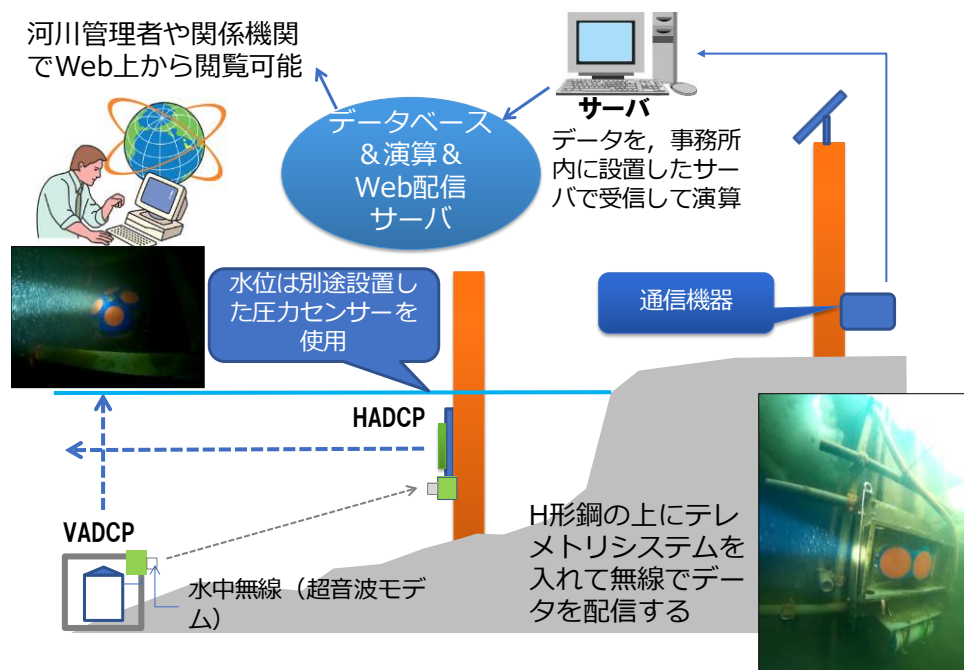


図-43 リアルタイム流量観測システムの概要

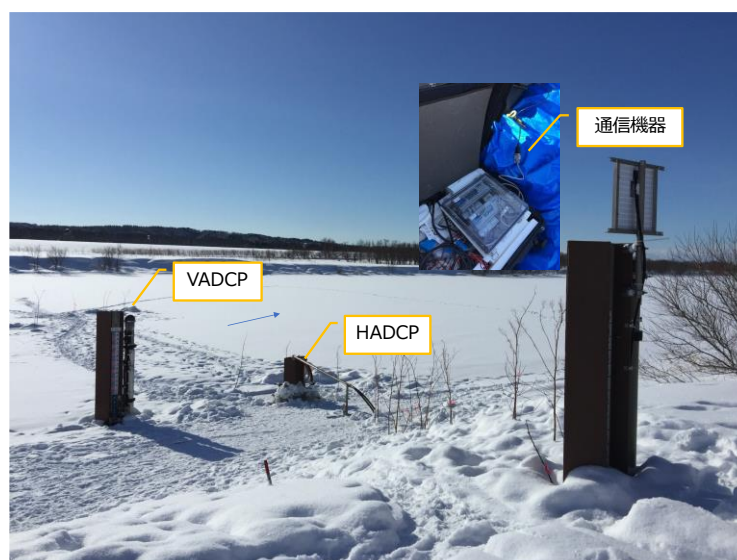


図-44 水上部の概要（冬期）



図-45 ソーラーパネル（冬期）

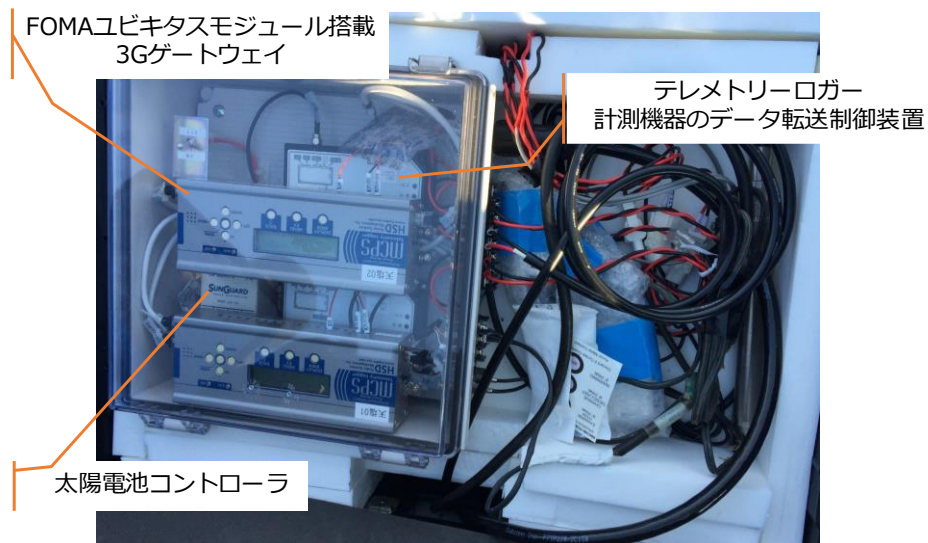


図-46 通信装置とソーラー電力制御装置

寒冷地河川では冬期間気温が氷点下に降下したり、降雪の影響を受けるため、システムの低温耐性が求められる。

平成 30 年の 1～2 月にかけて、制御ボックスを雪中に埋めた場合（前半）と雪上に出した場合（後半）に分けて 10 日間程度比較した。

ソーラー蓄電池の電圧は、雪中、雪上にかかわらず安定しており、トラブルはなかった。

次に、基盤とボックス内の温度変化を比較する。基盤温度とボックス内温度をみると、雪に埋めている前半の方が、気温の変化にかかわらず温度変化が少なく、0 度以上で推移しているのに対し、後半の雪上に出した場合は基盤やボックス内も氷点下の温度になっている。基盤の故障を回避するにはできるだけ安定した温度が望ましいことから、冬期間ではできるだけ雪に埋めて保温するのが効果的と推察できる。

また、日射量については、無日射日が数日あったが、バッテリー電圧には影響がなかった。今後、数年の時間が経過して、蓄電池の劣化が生じると、無日射日によってソーラー充電ができずに蓄電池容量が足りなくなる可能性もあるため、経年的なチェックが必要である。

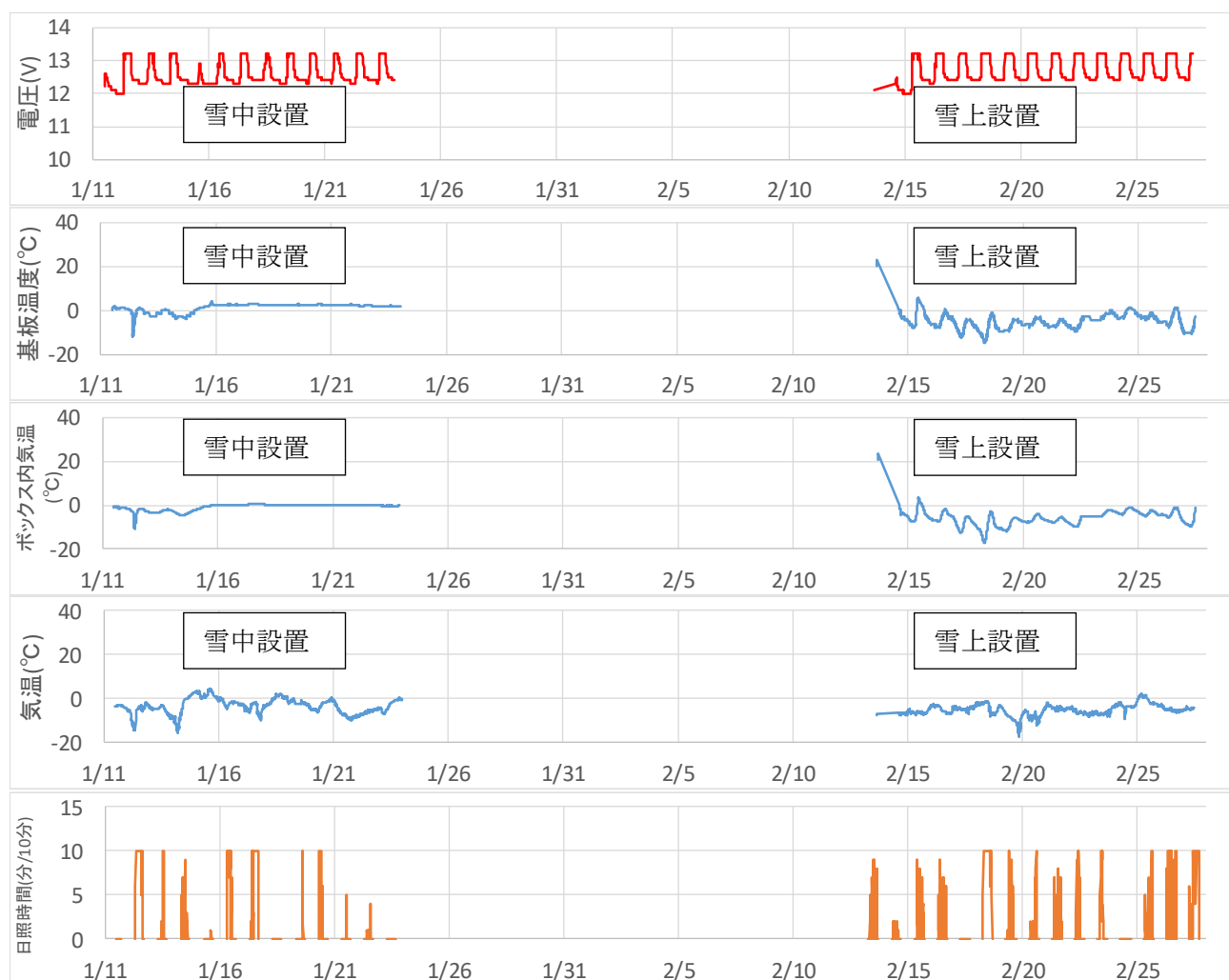


図-47 システム機器の耐寒性検証

リアルタイム粒老観測システムの GUI を図-48 に示す。

構築したシステムは、Web サイトから閲覧が可能で、水位、流量、流速コンター（横断面図）、過去のデータの閲覧及びダウンロード機能（Microsoft Excel 形式）が付属している。

自動で 10 分毎に画面が更新される。

画面は H-ADCP 用と V-ADCP 用の 2 画面同時起動しており、ユーザーが選択できるようになっている。

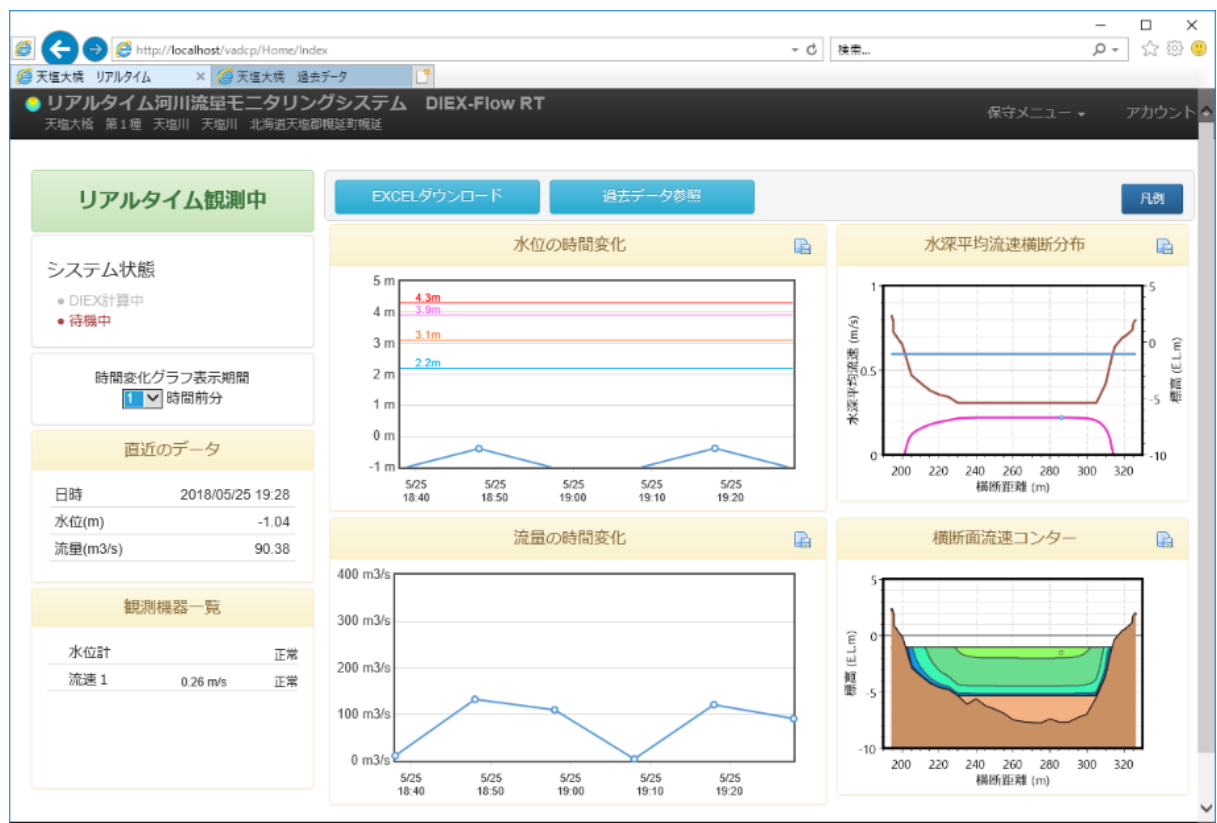


図-48 リアルタイム流量観測システムの GUI (V-ADCP)

なお、図-48 は結氷期の塩水遡上時の V-ADCP のデータを示しており、塩水遡上の場合は、断面図の下層（塩水層）は流速分布が描かれない。同時に結氷状況は上部に白枠が表示されるため、横断面流速コンターから容易に判断が可能である。

7) 維持管理計画

①維持管理の基本

維持管理の基本として、水文観測業務規程と水文観測データ品質照査の手引き（案）から抜粋したものを以下に示す。

水文観測業務規程

第8章 観測所の維持及び管理

（観測所の維持及び管理）

第24条

事務所長は、この規定による観測が適切に行われるよう、観測所、観測機械及び観測施設の維持及び管理に努めなければならない。

水文観測業務規程細則

第8章 観測所の維持管理等

（観測所の維持及び管理）

第25条

規程第24条に基づく、観測所、観測器械及び観測施設の維持及び管理は、別に定める**年1回以上の総合点検**及び**原則月1回以上の定期点検**とする。

水文観測データ品質照査の手引き（案） 平成16年9月

《参考》 観測所点検

適正な水文観測を実施するために、観測器械及び観測施設については、**毎月1回以上の定期点検、年1回以上の総合点検**を実施し報告することになっている。また、この点検報告によって観測値に異常値が含まれることが判明した場合には、その点検結果を基に、異常値が含まれた観測値の補正を行う。なお、必要に応じて出水後に点検を実施する。

①定期点検

定期点検は、雨量、水位、水位流量観測所について、月に1回以上実施しなければならない。定期点検とは、施設・設備において特に器械類を外側からの目視により点検するものである。この点検は、測定部、記録部、器械類の機能障害等の異常を早期に発見し、データの欠測が生じないように行うものである。

**月に1回以上の定期点検：外側からの目視による点検
潜水作業**

②総合点検

総合点検は、雨量、水位、水位流量観測所について、年1回以上実施しなければならない。総合点検とは、定期点検を実施した上で器械類の内部についても詳細な点検を実施するもので、模擬テスト等による点検も含まれる。これらの点検は、測定部、記録部、器械類の故障及び観測データの精度向上が図れるよう保守および校正を行うものであり、器械の老朽化や不調による欠測を未然に防ぐため器械の診断を行う。なお、修繕を必要とする項目については、その方法についても報告する。また、点検は出水期の前に実施することが望まれる。

**年に1回以上の総合点検：器械類内部の詳細な点検（出水前が望ましい）
潜水作業**

これより、定期点検（月1回）、総合点検（年1回）を原則とする。

②機器の劣化

表-4 ADCP の物理的劣化

No	内容	ダメージの大きさ	対策	発生確率
1	トランスデューサー(超音波受送信面)のウレタン部の劣化	超音波の受送信にかかわるため進行が進むと観測性能の劣化や観測自体が不可能になる	ウレタン部の再填充、再チューニング	A
2	Oリングの劣化	漏水などの原因になる	定期的なOリングの交換	A
3	内部基盤の劣化(PIO、CPU、DSP ボード)	データの取得、演算、通信などが出来なくなる	ボードの交換	C
4	内部コンパスの劣化	流向が定まらなくなり、データ異常が発生する	修理・交換	C
5	I/O 接続部の劣化	外部通信用の接続部	修理・交換	C
6	外部カバーの劣化	漏水などの原因になる	交換	C

A：比較的早期に影響が出てくる（5年程度）

B：中期に影響が出てくる（10年程度）

C：影響がでることは少ない

物理的劣化で最も可能性の高いものは濁質粒子によるウレタン部の劣化である。

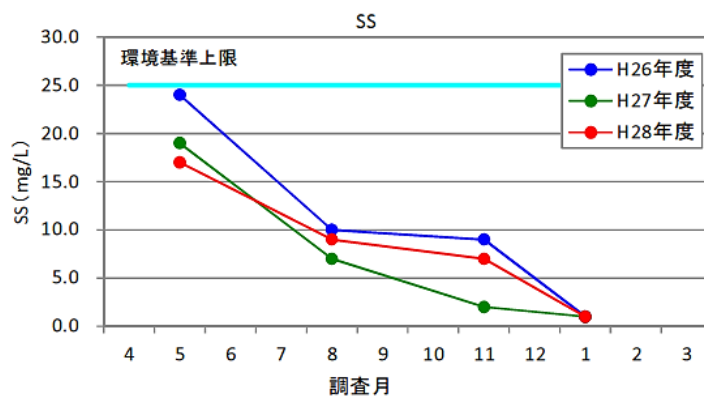


図-49 天塩川円山観測所の SS 濃度変化

天塩大橋円山水位流量観測所 (KP29.18)、天塩大橋 (KP18.6) より 10 km 上流地点での SS をみると、高くても 25mg/L である。

ADCP (8 年継続観測中) の石狩大橋は年平均 45 mg/L 程度で問題ないため、土粒子によるウレタン部の摩耗は少ないと推察される。

ADCP の CPU など演算基盤は経年劣化に比較的強く、高温による熱暴走やボルトの落下などによるショートがなければ耐用年数は比較的長いと考えられる。

外部カバーについては塩水と淡水が混じりあう感潮域では電蝕※が発生する。

外部カバーはプラスチック製であり影響は少ないと考えられるが注意を要する。

※電蝕とは：二種の異なる金属が同時に電解質溶液に接触したとき、金属間の電位差によりイオン化傾向の強い金属から弱い金属に電子が移動、電荷を失った金属原子がイオンとして溶液中に溶け出すことで金属が腐食する現象

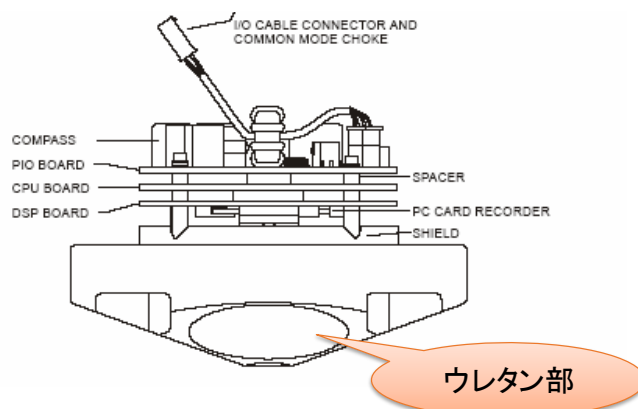


図-50 ADCP ウレタン部

経年劣化で最も重要なのが、超音波送受信装置のウレタン部の劣化で、劣化が進むと、測定ができなくなり機器自体の全損につながる。

天塩大橋では塩水と淡水の入れ替わりがあるため、電蝕に注意を要する。

③機器更新のコスト

次にシステムのイニシャルコストを表-5に示す。

表-5 システムのイニシャルコスト

機器名称	諸元	メーカー名	数量	単価	更新年数	備考
流速プロファイラー	HADCP300kHzWB	Teledyne RD Instruments社	1	550万	10年	河岸設置
流速プロファイラー	ADCP sentinel 1200 k Hz ハイスピードピング付	Teledyne RD Instruments社	1	500万	10年	河床設置
高速水中音響モデム	ATM-916	Teledyne benthos社	2	150万	10年	送信側と受信側含む
ダイバー式水位計	Level TROLL 500	In-Situ社	2	30万	5年	大気圧・水中
無停電電源装置	Smart-UPS 2200VA	APC	1	20万	5年	事務所内設置（新規）
ADCPサーバ	PowerEdge	デルコンピュータ	1	80万	5年	事務所内設置（新規）
通信制御装置	MCPSテレメトリ装置	(株)ハイドロシステム開発	1	200万	5年	収納箱で屋外設置
ソーラパネル			1	15万	5年	屋外設置

システムの維持管理コストについて表-6に示す。

機器管理としては、

ADCP バッテリ：5 万×3 個×2 回/年＝30 万

モデムバッテリー：20 万×2 回/年＝40 万

ニッケル水素電池：15 万×0.3 年＝5 万

テレメトリ 3G 通信費：5 千×12 か月＝6 万

年間：81 万の維持管理費がかかる。

表-6 システムの維持管理コスト

消耗品名称	諸元	メーカー名	数量	単価	交換年数	備考
ADCPバッテリー	ワークホースセンチネル 1200 k Hz用（450Wh）	Teledyne RD Instruments社	3	5万	0.5年	HADCP（2台）， VADCP（1台）
モデムバッテリー	水中モデム用リチウム バッテリー（1200Wh）	ハイドロシステム 開発社（LinkQuest 社）	1	20万	0.5年	送信側（河床設置） のみ
ソーラバッテリー	ニッケル水素電池12V		1	15万	3年	

点検作業としては、以下のパーティを基本として、点検作業を1回/月とした場合、パーティ概算15万×12か月＝180万が年間費用となる。

潜水土、潜水連絡員、測量技師補、測量助手、測量船操縦士 各1名で合計5名/パーティ

④維持管理上のトラブル

河床設置型 ADCP については、流下物の漂着や流出などのトラブルが想定される。河床設置型については、異常発生が確認できても、潜水土が潜れないとリカバリできないため、欠測が長期間になる可能性があるのが弱点である。考えられる要因の一つは河床変動である。図-51 では天塩大橋で約 2000m³/sec クラスの出水が発生した場合、河床が大きく変動することが示されている。また、図-52 のように流下ごみなどが引っ掛かった場合、欠測が長期化するトラブルも発生している。

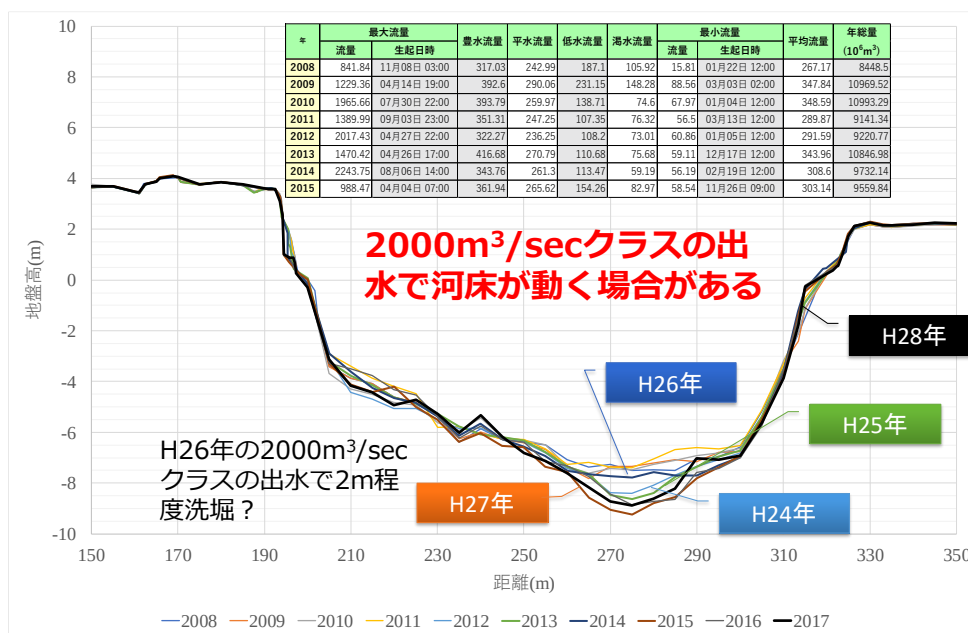


図-51 河床変動状況

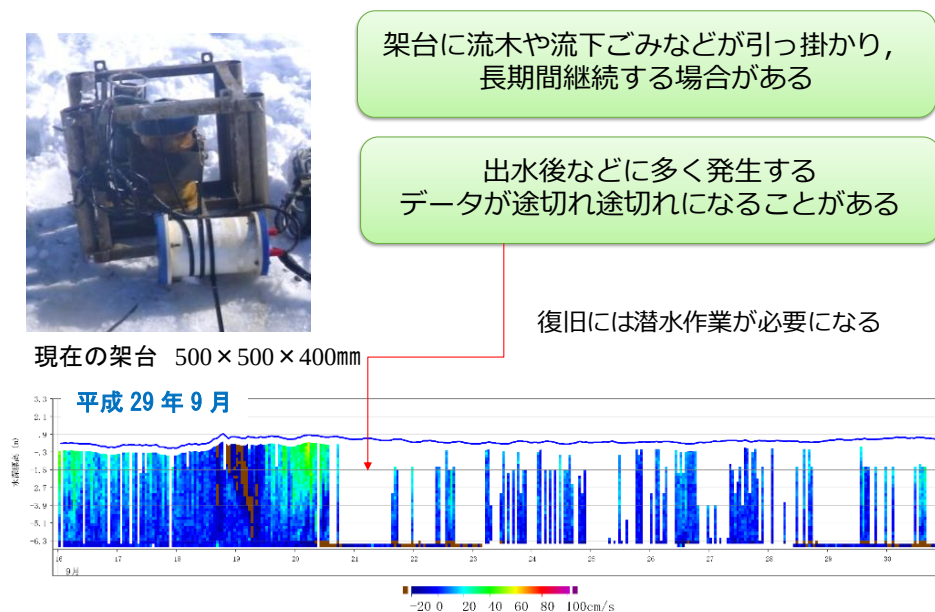


図-52 V-ADCP のトラブル発生（平成 29 年 9 月）

対策としては、図-53のように河床に着床して、流水抵抗が限りなく低くなるような形状の架台を設置することが一案として考えられる。



(株)ハイドロシステム開発Webサイトより抜粋

図-53 V-ADCP のトラブル対策案

観測の継続性に関するリスクを回避するために、確認すべき項目を図-54に示す。

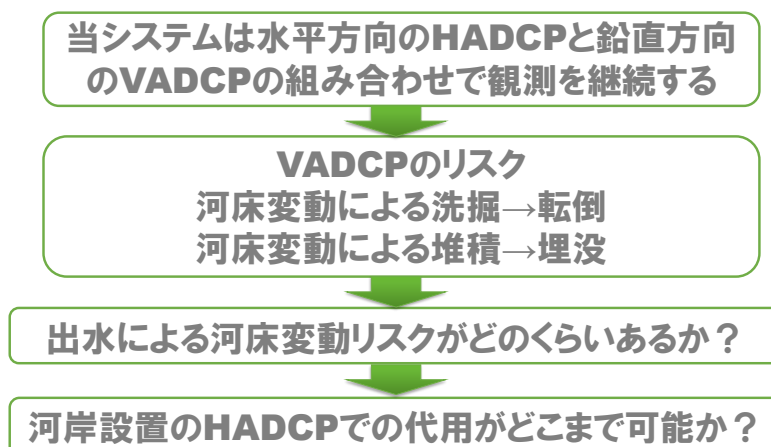


図-54 システムのリスクを把握

8) まとめ

本研究開発では、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。(a)平常時または出水時、(b)塩水遡上、(c)結氷時、(d)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 による河氷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、河氷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。
- ⑦ 水中無線とソーラーパネル、通信装置を用いたリアルタイム流量観測システムを構築し、2つの ADCP から得られた流速値と境界条件から 10 分毎の流量を表示し、流速コンター横断面を表示するシステムを開発した。
- ⑧ 維持管理計画を策定し、劣化リスクの評価、維持管理コスト、トラブル発生に対する対処についてまとめた。
- ⑨ 産学官テーマ推進委員会を F/S 発足年から R&D 最終年まで継続開催し、各分野からの有識者意見をフィードバックしながら遂行した。

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

(9) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
土木学会河川技術論文集 2017 年 (vol. 23 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)	H29. 6	土木学会	橋場 雅弘

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の 種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
なし				

(11) 成果の実用化※の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

- ・ F/S では、現地調査手法及び結果について、産学官テーマ推進委員会の場で活発な議論が行われ、学識経験者からは開発計画に対する具体的な専門技術的な知見をいただき、河川管理者（行政）からは実務的なアドバイスを、民間技術者からは別視点からの当技術の適用性などについて有益な意見をいただいた。
- ・ R&D1 年目では、現地での機器配置と数値計算（DIEX 法及び V-Profile 法）のアルゴリズムにより高精度に流量算出が可能という成果を得た。
- ・ さらに、R&D2 年目も引き続き現地データの蓄積による精度向上を図るとともに、取得データをテレメトリーシステムにより web 上へ配信可能であることを検証しており、河川管理者にリアルタイム流量を配信することが可能となった。
- ・ この構築したシステムは、当観測サイトを管理する河川管理者の利用を前提にしているが、F/S 段階から河川管理者が産学官テーマ推進委員会の委員として参加しており、事業目的を共有して協議を行っているため、成果の事業化の可能性が高いと評価できる。
- ・ 本研究開発を事業化することによって、河川管理者に有用なリアルタイム流量情報を提供することができ、河川管理者にとって治水・利水・環境に配慮した効果的な河川管理が可能になると期待できる。

(12) その他

なし