

結氷河川における流量推定式と音響測定機器を用いた現地観測

DEVELOPMENT OF THE DISCHARGE FORMULA AND FIELD OBSERVATION USING ACOUSTIC INSTRUMENTS FOR ICE COVERED RIVER

橋場 雅弘¹・吉川 泰弘²
Masahiro HASHIBA and Yasuhiro YOSHIKAWA

¹非会員 株式会社 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)

²非会員 工博 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062- 8602 札幌市豊平区平岸1 条3 丁目)

Flow discharge at the period of a frozen river is the important data for a long term full-year plan of water resources plan. There is a problem in safety at the ice-covered river observation and accuracy of flow discharge. We developed a formula for estimating flow discharge of ice-covered river using the water level and ice covered area. We succeed to observe field data on the behavior of river ice and hydraulic phenomena during ice-covered period collected using acoustic instruments of SWIP(Shallow Water Ice Profiler), ADCP and Echo-Sounder.

Key Words: Ice-Covered River, Discharge Formula, ADCP, SWIP

1. はじめに

積雪寒冷地の河川では、冬期の気温の低下や降雪によって、河道内に河氷が形成される。河川内に氷が形成される河川を結氷河川という。この結氷期間は、北海道では12月下旬から4月上旬の約100日である。図-1に一般的な結氷時の河川横断面を示す。横断面の上面に積雪(Snow)、その下に硬い氷板(Ice sheet)、さらにその下に軟らかい晶氷(Frazil)が存在する。

結氷河川の流量については、年間の渇水流量を記録することが多く、年間を通した長期的な水資源計画を策定する際には重要な資料となる。また、今後、気候変動により冬期間の流量が増減する場合には、今よりも増して河川結氷時の流量を精度よく推定することが望まれている。一方、結氷時の流量観測は、吹雪などの気象条件の変化や、河川表面が氷で覆われている現場条件など、観測自体に危険性が伴うことから、観測者にとって厳しい条件である。また、河川結氷時は、河氷の影響によって開水時で得られる水位と流量の関係(H-Q式)が成り立たず、河川結氷時の流量を連続的に推定する手法は、河氷が流水へ与える影響を考慮していない従来の手法はあるものの推定精度が低いという課題がある。

本報告では、現在の結氷河川における流量観測の現

状と課題及び現場で求められている知見について示し、河川結氷時における新しい流量推定式を紹介するとともに、ADCPを用いた河川結氷時の流れと河氷の変動の連続モニタリングについて紹介する。

2. 流量観測の現状と課題

(1) 観測の時間

結氷時の流量観測の時間について、除雪および観測穴を開けるための解氷作業の時間が、流量観測に係る時間以上にかかっているのが現状である。流速の測定時間は、非結氷時(氷がない状態の時)と同様にしてはいるが、晶氷が流下する場合には、流速が時々刻々と変化するので、測定時間が長い事により観測精度を悪

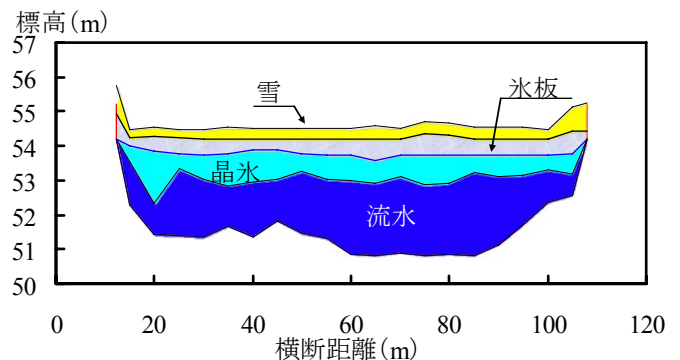


図-1 結氷時の河川横断面

くしている可能性がある。感潮域やダムを有する場合も同様であり、結氷時の観測時間についての検討が必要となっている。

(2) 観測の安全性

河水が河川の全面を覆う完全結氷時の流量観測では、総計4名のパーティで、氷の上を徒歩によって作業を実施する。水深測定用の測点、水深と流速測定用の測点では、氷上から氷開削用のノミを用いて0.2~0.5m四方の穴を開け、開削した穴に、測深ロットおよび流速計を入れて測定する。河水が河川を部分的に覆う部分結氷時では、通常は約5名のパーティが必要であるが、氷の状況によっては、作業が著しく困難になる場合がある。結氷していない開水部分は、船を用いて作業を実施し、結氷部分は、氷を少しずつ割りながら安全を確認し、氷の上を徒歩によって作業を行う。結氷直後の写真を図-2に示す。観測の安全性については、観測断面の横断方向、縦断方向の氷の厚さには、ばらつきがあり氷上からではその厚さは確認できないため、必ず先発隊が、ポールやピンを持って安全に作業できるかどうか確認を行う。万が一、氷が割れて氷下に転落して流された場合は、開水路と異なり、浮上する方法がなく、きわめて危険な状態となる。

また、結氷初期と解氷期は流量変化が大きいので、密な流量観測が望まれるが、危険を伴うため現在の観測手法では難しい状況となっている。

(3) 観測の断面

結氷時は、氷板や晶氷により流積が変化する。このため、流速分布が複雑となる場合や流量が偏在する場合があります。観測精度を向上させるために、結氷時の観測断面では密に測線を設けている。氷板や晶氷の発生、流下、堆積の現象は、現在、十分には解明されていないため、結氷時の流量の精度を向上させるためにも現象の解明が望まれている。

(4) 測定方法

結氷時には、流水断面が河水で狭められることから、河水厚を正確に測定する必要がある。現状では、図-3に示す、L字型の河水測定用定規によって手の感触で判断し測定している。軟らかい晶氷の場合は、非常に感触が伝わりにくく、観測には相当の熟練が必要である。一方で、測定の困難さから値の信頼性に懸念がある。晶氷は流積および流量に大きな影響を与えるため、測定方法の確立が望まれている。

流速の測定にはプロペラ流速計を用いている。プロペラは零下となる空气中で凍結するため、常に凍結防止を行う必要がある。河水底面から河床までの水深の2割・8割の点流速を測定しており、その妥当性は既往研究¹⁾により検証されている。

(5) 観測データの整理

観測結果の妥当性を判断する精度管理手法が確立されておらず、現行では、精度管理図、上下流の逆転の有無、前回との比較により実施している。

しかし、図-4に示すとおり、河川結氷時は、河水の影響によって開水時で得られる水位と流量の関係(H-Q式)が成り立たないため、開水路と同じ流量算出方法では精度が確保できない。そこで、結氷期間の適切な流量を算出するため、結氷補正が行われている。結氷補正方法としては、北海道開発局方式(Eye-Method法)が標準の結氷補正方法として用いられている。これは実測流量をH-Q式に代入して、結氷影響を受けない逆算水位を求め、観測日間は直線変化として比例配布した水位(あるいは12時水位との水位差)を結氷補正值とするものである。しかし、ダム放流など利水影響を受けて人為的な流量変化が発生している地点は、この方法では妥当な流量を求められないため、各河川の特성에応じた独自の結氷補正方法で行われている。また、水位変動が大きい期間は時刻流量を算出せずに、日流量の1データとして表記しており、流量年表へ反映するために、結氷補正を行い連続流量を算出しているが、補正の妥当性が確保されていないという課題もある。



図-2 河川結氷直後の流量観測測線(天塩川恩根内)

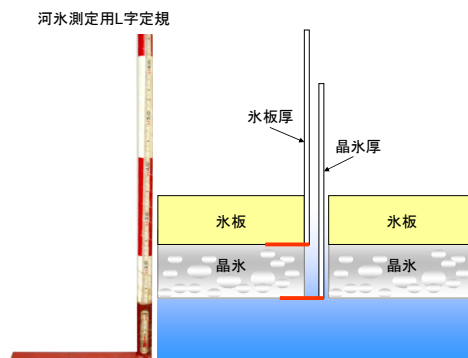


図-3 河水の計測

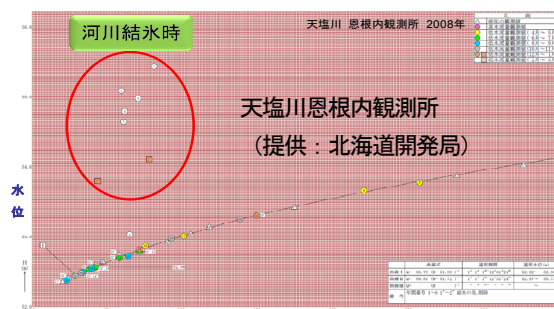


図-4 寒冷地河川における水位と流量の関係

3. 河川結氷時の流量推定式

河川結氷時は河水の影響によって開水時で得られる水位と流量の関係（H-Q 式）は成り立たない。また、河川結氷時の流量は複合的な影響を受けて一義的に決まらないため、これらの影響を考慮した河川結氷時の流量推定式(1)が開発されている。この式の導出過程については、吉川らの既往研究²⁾を参照して頂きたい。

ここでは本推定式の具体的な意味と活用方法について述べる。

$$Q = C B_w^{-\frac{1}{4}} A_o^{\frac{5}{4}} \quad (1)$$

ここで、流量 Q [m³/s]、 C [m^{3/4}/s]、川幅 B_w [m]、流水面積 A_o [m²]である。河川結氷時の横断概念図を図-4に示す。図中において、積雪面積 A_s [m²]、水位 H [m]、喫水 d [m]である。

(1) C 値

C値の物理的意味は、河水底面が流水により融解されて滑らかになることによる粗度の減少の程度を表している。なお、本推定式は、河床の変動は無視し河床の粗度は一定と考えて、その影響はC値に織り込まれていると仮定している。C値は小さいほど河水の影響によって流れにくくなるため、流量は小さくなる。

(2) 川幅 B_w

本推定式の川幅 B_w は、定期流量観測で得られる流量測定図における区間距離の合計であり、横断面内において河水が存在する左岸側の測線から右岸側の測線までの距離である。

(3) 流水面積 A_o

本推定式の流水面積 A_o は、流量測定図における区分断面面積の合計であり、河水が流れる面積である。なお、晶氷面積 A_f [m²]は流量測定図の晶氷（モロミ）面積の合計であり、氷板面積 A_i [m²]は流量測定図の水面上氷面積と水面下氷面積の合計であり、積雪面積 A_s [m²]は、流量測定図の雪面積の合計である。

4. 河川結氷時の流量推定手法

流量推定に必要な入力データは、月3回の間隔で定期的実施されている流量観測から得られる流量、積雪面積、氷板面積、晶氷面積、川幅、水位とし、連続的な水位データは、水位流量観測所の水位データおよび、国土交通省の水文水質データベースから得られる1時間毎のデータとした。

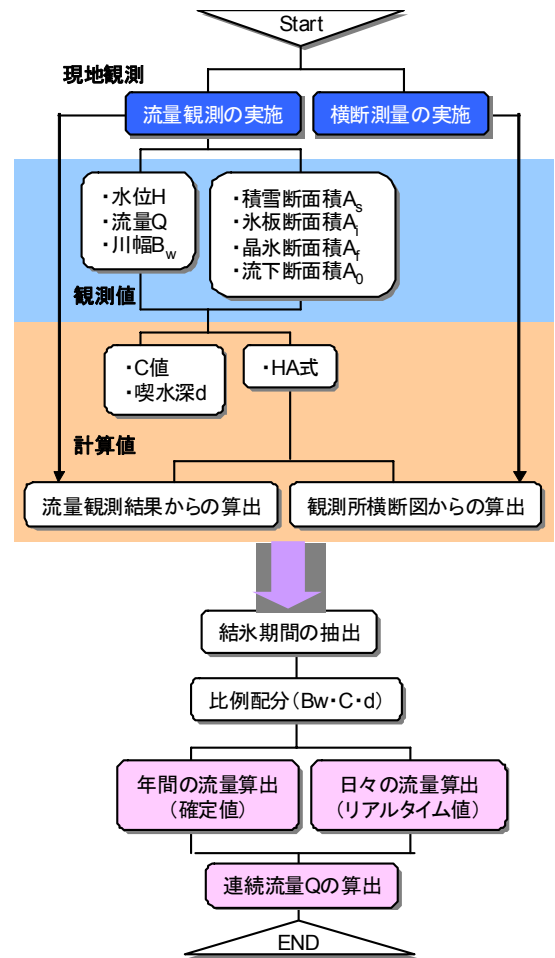


図-5 流量推定フロー

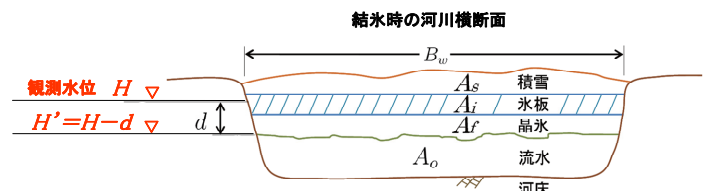


図-6 河氷面積と流水面積

(1) 流量推定手法の手順

本流量推定手法の実際の手順を図-5に示す。

- 1) 開水時のHA 式（水位 H と流積 A の関係式）を横断測量データから導出する。
- 2) 結氷時の定期観測データから、喫水 d 、 C 値、川幅 B_w を得る。観測を実施していない日の d 、 C 、 B_w は、その日を挟む観測日の値を用いて線形補完により求める。（図-9、図-10）
- 3) 図-6に示す結氷時の連続水位 H から喫水 d を差し引いた値 H' を HA 式に代入して A_o を求めて、式(1)に C 、 B_w 、 A_o を代入して結氷時の流量 Q を推定する。

・HA 式と喫水 d の導出について

HA 式の導出は、開水時の横断測量データを用いて、
 図-7に示す水位 H' と流水面積 A_o の関係式(2)を導く。
 河川結氷時の水位 H を式(3)に代入して、相当水位 H'
 を求め、この H' を HA 式に代入し A_o を算出する
 (図-8)。なお、河川結氷時の水位 H は河氷底面の
 横断面平均標高となり、喫水 d は式(4)より算出³⁾した。

$$A_o = f(H') \quad (2)$$

$$H' = H - d \quad (3)$$

$$d = \frac{\rho_s A_s + \rho_i A_i + \rho_f A_f}{\rho_w B_w} \quad (4)$$

ここで、 ρ [kg/m³]は密度であり、水の密度 $\rho_w = 1000.00$ 、
 雪の密度 $\rho_s = 100.00$ 、氷の密度 $\rho_i = 917.40$ 、
 晶氷の密度 $\rho_f = 950.38$ とした³⁾。

・C 値の算出について

定期観測データの流量 Q 、川幅 B_w 、流水面積 A_o を
 式(5)に代入して C 値を算出する。

$$C = \frac{Q}{B_w^{-\frac{1}{4}} A_o^{\frac{5}{4}}} \quad (5)$$

(2) 本手法の利点と欠点

本手法は結氷時のみの観測データを用いており、
 流量の推定手法が明確となっているため、推定流量と観
 測流量が一致しない場合においては、その原因につい
 ての考察が可能であることである。

また、精度的にも図-11に示すように、従来手法と比
 べて推定精度が高い。従来法との比較は吉川らの既往
 論文²⁾を参考にしてほしい。

本手法は各河川の現場条件に応じて、本流量推定式
 の係数を設定しさえすれば、より精度の高い流量を推
 定可能であり、コストをかけずに結氷する河川の管理
 技術の向上を図ることが可能である。

本手法の欠点としては、河床変動を考慮していない
 ため、その影響を見積れないこと、喫水 d を式(4)を
 用いて算出する際の積雪密度、氷板密度、晶氷密度は、
 本研究では定数として与えているが、地点および時間
 によって、その値が異なることが予見されるため、各
 値の与え方については検討が必要であることである。

なお、吉川らは熱収支モデルを基にした実用的な氷
 板厚計算式を開発⁶⁾しており、気温から喫水 d を予測す
 ることが可能である。本研究は、河川結氷時を対象と
 しているため、開水時から結氷時の初期結氷期間
 (Freeze-up period)、結氷時から解氷時の解氷期間 (Break-

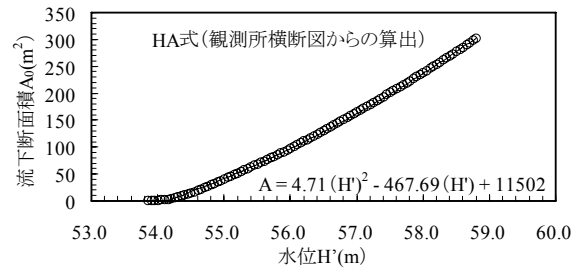


図-7 H-A図

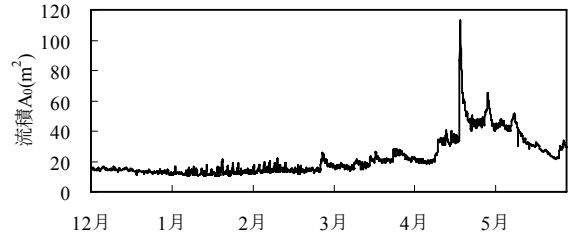


図-8 流積の時系列変化

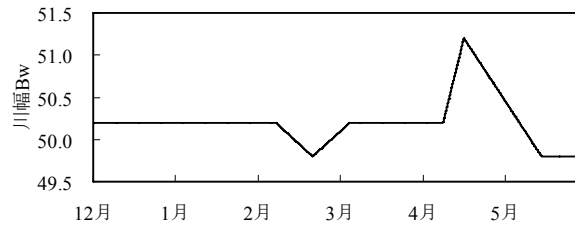


図-9 川幅Bwの時系列変化

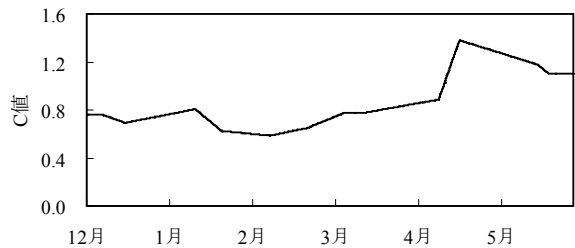


図-10 C値の時系列変化

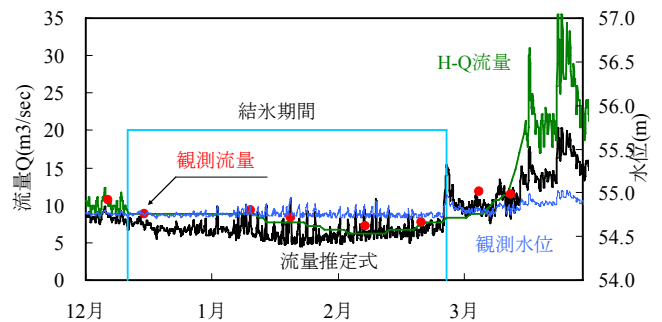


図-11 推定流量

up period)の流量を推定するためには、さらに検討を要
 する。この課題の解決のためには、新たな現地観測お
 よび観測データの解析を行う必要がある。また、本検
 討は、1河川、1シーズンを対象としているため、本
 手法の汎用性、有効性、適用条件を明らかにするため
 には、本手法を広く他の現場へ適用し検討を重ねる必
 要がある。

5. 現地観測機器の河水測定精度検証

現在の河川結氷時の流量観測は、月3回の間隔で実施しており、河水に穴を開けて水深や河氷厚、流速を測定する時系列的に断続的な観測である。近年の観測機器の発達によって、今まで不可能であった河氷下の流れや河氷厚の連続観測が可能になっている。

結氷時の観測は河床に機器を設置して、河氷底面方向に流向流速や河氷底面高を連続的に測定する必要がある。ここではまず、現地観測で使用する機器の河氷底面高の測定精度試験を、大型水槽を用いて実施した。

(1) 観測機器

河氷底面を測定する非接触機器は、SWIP、ADCP、音響測深機の図-12に示す3つの機器を選定した。SWIP(Shallow Water Ice Profiler, 546kHz, ASL Environmental Sciences社 546kHz)は、河床から水面方向に超音波を放射して、後方散乱強度から河氷底面や晶氷の集積などを測定する観測機器である。ADCP (Teledyne RD Instruments社 1200kHz)は、ドップラースフト量から流向流速を測定する機器であるが、目標からの距離と相対速度を計測するボトムトラッキング機能を有しており、河床から河氷底面に当てることで河氷底面高を測定しようとするものである。同時に、ADCPは設定層別の後方散乱強度の変化点から密度差を推定することができる。音響測深機(精密小型音響測深機, PS-20R型 200kHz, (株)カイジョー)は、通常、受信信面を水面から河床に向けて音波を発信させて水深を測定する機器であるが、受信信面を水面方向に向けて設置し、河氷底面を測定しようとするものである。

(2) 実験装置の構造

実験に用いた水槽の概要を図-13に示す。水槽の大きさは、実験に用いる氷板、晶氷の厚さ、計測機器の移動深度、ADCPの照射角 20° の音波が直接測壁面に当たらない間口サイズなどを考慮して高さ2.44m×幅2.00m×奥行き2.18m、容量 10.65m^3 とした。

①構造

使用材料は前面20mm厚の塩化ビニール板を使用し、水槽内の観察を容易にし、超音波の異常反響を防止するため、底面と側面には金属ではなく、木製の2.4cm厚の耐水ベニヤ合板を使用した。漏水対策として透明塩化ビニールシートを内貼りにし、水槽の外周は角材(105mm×105mm)で枠組みをして補強した。

②昇降装置

試験に使用するSWIP、ADCP及び音響測深機は水槽内の左右壁面のガイドレール沿いに電動ウインチで任意の水深に移動停止することが可能な架台に設置した。実験時には、電動ウインチにより規定深度に昇降移動



図-12 観測機器

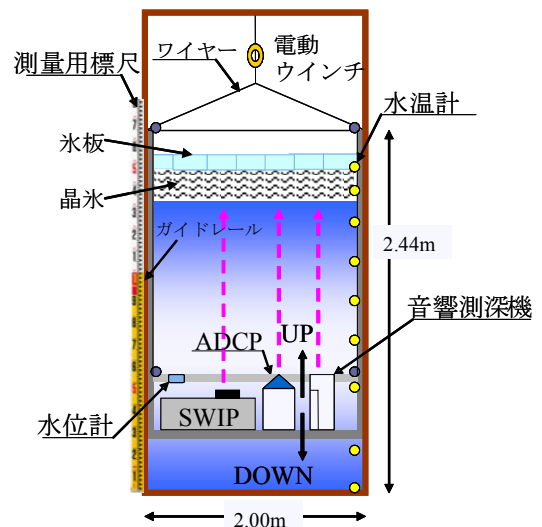


図-13 実験水槽概要

表-1 実験材料と作成方法

No	実験材料	作成方法
1	水	水道水をそのまま使用
2	氷板	50×30×15cmの板状の氷を数詰めて使用(密度: $0.966\text{g}/\text{cm}^3$)
3	晶氷	自然堆積している雪を使用(晶氷低密度: $0.375\text{g}/\text{cm}^3$)
4	氷板+晶氷	上記板状の氷(氷板)+自然堆積している雪(晶氷低密度)
5	氷板+晶氷(高密度)+晶氷(低密度)	上記板状の氷(氷板)+30×54×30cm箱に圧雪し重量が35kg以上になったものを使用(晶氷高密度: $0.492\text{g}/\text{cm}^3$)+自然堆積している雪(晶氷低密度)

して測定を行った。また、架台に水位計（株）ノースワンKADEC21-MIZU 精度 $\pm 2\text{cm} : 0.1\%F.S/20\text{m}$ ）を設置して、目視の機器深度の検証用とした。

③水槽内の実験環境管理

実験開始前には水槽内の水温を実河川に近づけるために、砕氷を投入して 4°C 以下とした。また、水槽水温は、超小型メモリー水温計（JFEアレック（株）MDS-MkV/T 精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ）を用いて、鉛直方向に底面から0.1m, 0.3m, 0.5m, 0.75m, 1.0m, 1.25m, 1.5m, 2.0m, 2.4mの間隔で9個設置して実験環境の管理を行った。

(3) 実験条件

①実験材料

実験材料は、表-1に示すように、水、氷板、晶氷（低密度、高密度）を組み合わせた5条件で行った。

氷板は縦 $50\times$ 横 $30\times$ 厚 15cm の板状の氷を水面に隙間なく並べて設置した。晶氷（低密度）は自然堆積している雪を整形や圧縮せずに、水面下に約 40cm の厚さで設置した。氷板+晶氷は、上層に 15cm 厚の板状の氷を、下層に 40cm 厚の晶氷（低密度）の2層とした。氷板+晶氷（高密度）+晶氷（低密度）では、上層に 15cm 厚の板状氷を、中層に 40cm 厚の晶氷（高密度）を、下層に 40cm 厚の晶氷（低密度）を設置し、3層構造とした。なお、高密度の晶氷は $34\times 50\times 30\text{cm}$ の容器に雪を入れて締め固め、重量が 35kg 以上になったものを使用した。

②実験方法

機器の測定は、昇降装置を用いて、水深 $0\sim 2.0\text{m}$ の範囲を 0.2m 間隔で行った。SWIPは観測間隔を 1sec とし、 60 ピング、解像度（Gain） 1 で得た。ADCPの測定値は、高解像度のハイレゾリューションモード（WM8）、層厚 5cm 、ピング数 30 の設定で取得し、ボトムトラッキング（BM5）は 30 ピングで、ADCP後方散乱強度は、水深方向に 5cm 毎に水深 30db 以上の差を生じた層を境界として得た。音響測深機は後方散乱強度の自記紙を読み取り、水槽内の水温を用いて補正を行った。直接計測値は、水面、氷板の底面、晶氷の底面を測量用標尺によって目視で直接計測した。

(4) 実験結果

水槽内の水温は 1.3°C 程度で維持され、鉛直水温差、実験時間内における水温変化はなかった。また、昇降架台の水位計によると、平均 0.20m 毎の移動において、誤差の最大値は $\pm 0.02\text{m}$ であった。実験結果において、横軸に直接の測定値を取り、縦軸に各機器の測定値を取って、条件毎に図化したものを図-14に示す。水の場合は、SWIPと音響測深機が水面の直接計測値と一致するが、ADCPボトムトラッキングとADCP後方散乱強度は水面をとらえることができなかった。氷板はいずれの観測機器も直接計測値と一致しており、河氷底面が平坦な氷板の場合は、測定精度が高いことを示し

た。晶氷及び氷板+晶氷の場合はADCPボトムトラッキングとADCP後方散乱強度が直接計測値と一致しているのに対し、SWIPは 0.11m 程度、音響測深機は 0.25m 程度の誤差が生じていた。この原因として、最下層の晶氷（低密度）は自然堆積している雪を整形せずに使用しているため、晶氷底面に凹凸が生じ、直接計測している側壁付近とSWIPなどが測定している水槽中心付近の晶氷底面高に差が生じていた可能性が示唆される。ADCPはビーム角が 20° で拡がるため、直接測定する側壁付近に近い点を測定したことから直接計測値と一致したと推察される。また、晶氷と水の境界層付近の密度差や底面の凹凸による超音波散乱・吸収などが誤差要因になる可能性もあるが、現時点では不明である。しかし、いずれの機器も水深変化に対する測定値の差異は一定であり、標準偏差が各観測機器で $0.03\sim 0.04\text{m}$ 程度と小さいことから、測定精度は高いことが確認できた。河水や晶氷の密度の違いに関しては、各機器の測定値はどの密度でも河水最下層の底面を測定しており、晶氷密度の違いによる測定値の明確な差はみられなかった。また、超音波機器は送受信面と目標との距離が近いと受信できなくなる可能性があるが、本実験では最小 0.2m から測定が可能であることが示された。

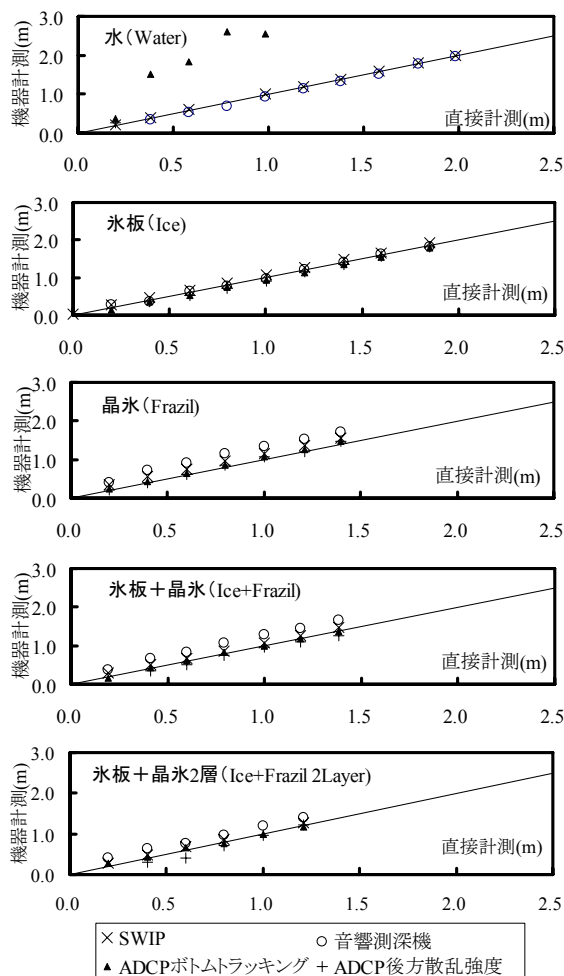


図-14 水槽実験検証結果

6. 河川結氷時の現地観測

水槽実験で各観測機器の特性と精度が確認できたことから、実河川における現地観測を行った。

北海道北部に位置する天塩川（流路延長256km、流域面積5,590km²）において、河口から111.70kmに位置する恩根内観測所で河川結氷時の現地観測を実施した。観測期間は、2010年12月から2011年2月である。

(1) 観測方法

河床にはADCP（Teledyne RD Instruments社）の1200kHzを図-15のように河床に上向きに設置して、10分インターバル、モード8のハイレゾリューションモード、30ピング/アンサンブル、水深0.1m間隔で測定した。結氷下の流水断面は、氷の発達とともに有効断面が変動する可能性があるため、できるだけ層厚を小さくする必要があることから、層厚0.1m以下の測定が可能なハイレゾリューションモードを使用した。ハイレゾリューションモードは高解像度で精度が高いが、高流速や流れの乱れに敏感で、測定不能になる場合がある。現地の流速は平常時でも1m/secを超えることや、結氷時の流れ河氷と河床に挟まれ、それぞれの凹凸形状によって乱れが生じやすいことから、ハイレゾリューションモードの中でも適応流速の範囲が1~2m/secまでと許容範囲が広いモード8を使用した。モード8は0.1m間隔で測定した場合、単ピング精度が5cm/sec以上であるが、1アンサンブルで発射するピング数を30ピングにまとめることで、誤差を1cm/sec以下（±0.94cm/sec）とした。

河氷底面高は、ADCPボトムトラッキング機能を用いて、河床から河氷底面までの距離を測定して求めた。測定はボトムトラッキングモード5で30ピング/アンサンブルで取得し、4つの送受信面で得られた平均値を用いた。ただし、ADCPから発射されたビームは20°の角度で拡がるため、直上の河氷底面はとらえられないことから、ビームが河氷に到達した面の4端の平均値とした。水槽実験結果によると、ボトムトラッキングは河氷の

最下層を構成する晶氷（Frazil）の底面をとらえることが示されており、水位とADCPのボトムトラッキングを併用することで、水面下の河氷厚の時系列変化が観測可能となった。

(2) 観測結果

恩根内観測所から15km上流に位置する美深（気象庁アメダス）の降雪量と気温、恩根内観測所のADCPによる鉛直流速の時系列変化とADCPボトムトラッキングによる河氷底面高と水位の変化を図-16に示す。

結氷初期の現象として、2011年1月5日5時に-20℃以下の気温となり、同日12時から急激に水位が上昇した。10hr後には1.0m、48hr後には2.0m以上の水位上昇がみられた。これは、-20℃以下の低温下で水表面から凍り始めた晶氷や氷片が上流から流下して集積し、河積が狭められたことによる水位上昇である。結氷直後から水面下の河氷厚は1.2m程度で一定の厚さを維持して推移している。これは、結氷後10日間の気温が-10℃以下で推移したため、滞留した晶氷や氷片が氷化して安定したと推察できる。この間の水位は、上流の岩尾内ダム放流によって定期的に0.1~0.2m程度変動しており、河氷も連動して動いている。

流速は、1月後半から2月にかけて河氷底面と河床の流速（10cm間隔）

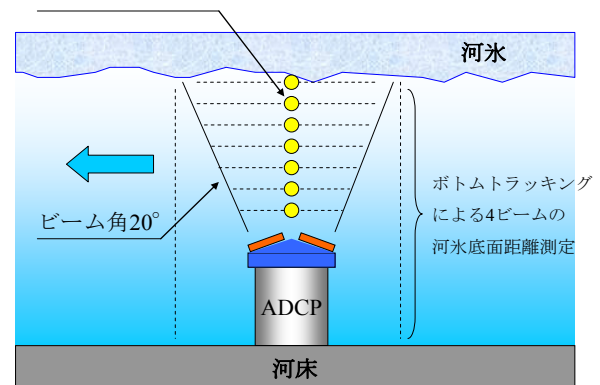


図-15 ADCPの河床設置

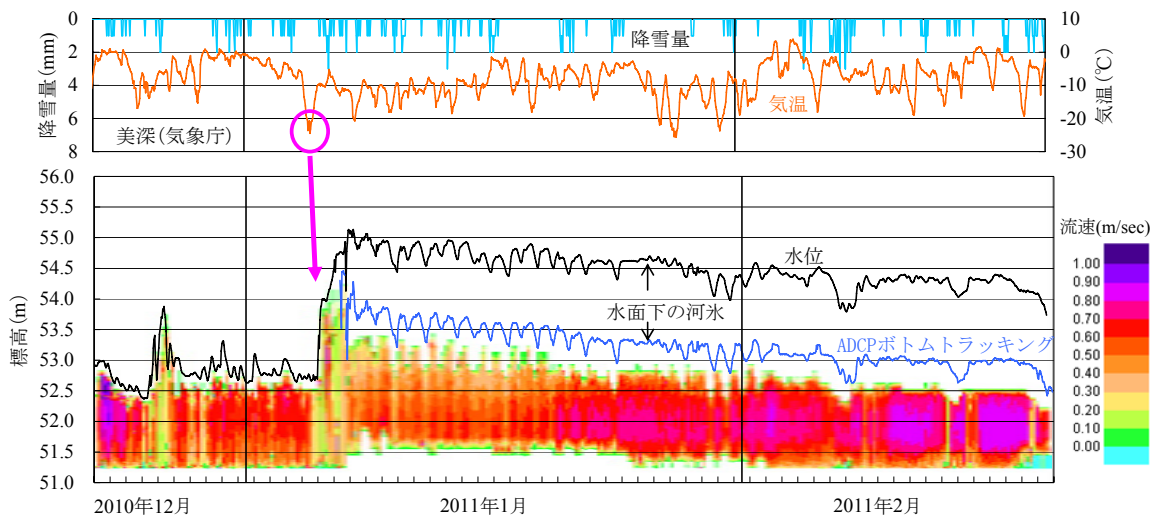


図-16 河氷および河氷下の流速分布時系列変化

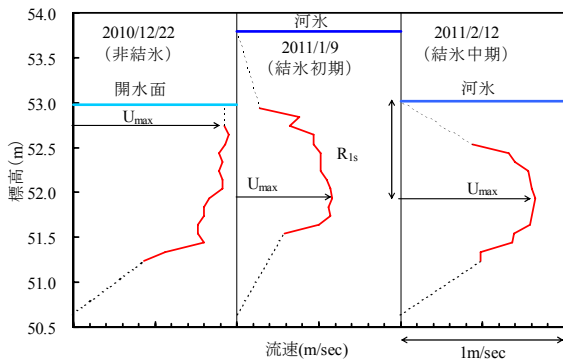


図-17 河氷下の流速分布

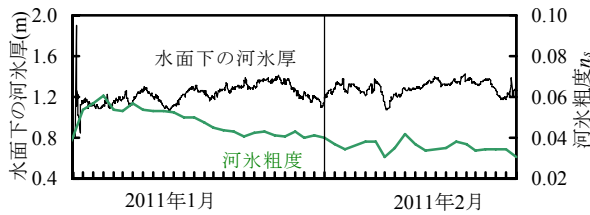


図-18 河氷粗度と氷下の河氷厚の時系列変化

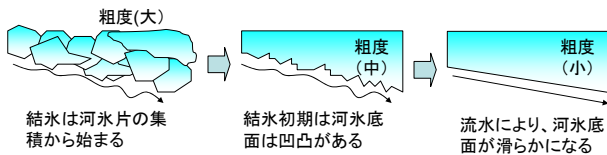


図-19 河氷粗度の変化概要

中間付近に早い流速分布が断続的に発生している。図-17にADCPにより得られた流速鉛直分布を示す。ADCPは河床付近と河氷付近が超音波の干渉により不感帯になるが、結氷前は水面付近に最大流速 U_{max} が発生し、結氷後は河氷と河床の中間付近に最大流速 U_{max} が発生する管路流に似た流速鉛直分布が観測された。

図-18に水位と河氷底面高の差で算出した氷下の河氷厚と河氷粗度の時系列変化を示す。

なお、河氷粗度は結氷下では粗度は河氷と河床の合成値であるが、河氷底面の粗度 n_s の時系列変化を、Manning式を用いて式(6)に示す。

$$n_s = n_0 \frac{u_0}{u_s} \left(\frac{R_{1s}}{R} \right)^{2/3} \quad (6)$$

n_0 [無次元] : 合成粗度 (ADCPによる鉛直平均流速と自記水位計による恩根内観測所と下流の恩根内橋の水面勾配から算出) , u_0 [m/sec] : ADCPの鉛直平均流速, u_s [m/sec] : 河氷底面から最大流速地点 (U_{max}) までの平均流速, R_{1s} [m] : 河氷底面から最大流速地点 (U_{max}) の径深 (≒距離) , R [m] : 径深 (≒河氷底面から河床までの距離)

氷下の河氷厚は結氷直後から1.2m程度で変化は少なく、比較的安定して推移している。これに対し、河氷粗度は結氷直後に高いが、時間の経過とともに低下

傾向がみられた。氷下の河氷厚が変化せずに河氷粗度が時間経過とともに低下する要因は、図-19に示すように、結氷直後は河氷片の集積で河氷底面の凹凸が多いが、河氷底面を構成する晶氷は柔らかいことから、流水や河氷下に潜り込んだ氷片の滑走によって、河氷底面が研磨、融解されることに起因していると推察できる。

6. 河川解氷時の現地観測

対象河川は北海道北部に位置する天塩川の河口から30kmに位置する円山観測所で、観測期間は結氷後から解氷後までの2009年12月から2010年3月とした。

(1) 観測方法

観測機器は、晶氷の集積を観測するために河床にSWIP (ASL Environmental Sciences社 546kHz) を、河氷下の流況と河氷厚の変化および解氷時の河氷の移動速度を観測するためにADCP (Teledyne RD Instruments社 1200kHz) を、河氷底面高の測定に音響測深機 (株) カイジョー PS-20R) を設置した。また、量水標H型鋼の上に光波位相差検出式積雪深計 (新潟電機 (株)) を設置し、河氷上面である雪面高を得た。陸上部には風向風速計と気温計 (株) MCS) , 機器設置断面と上下流100m, 200m地点に自記式水位計 (光進電気工業 (株) MC-1100) と自記式水温計 (JFEアレック (株) COMPACT-CT) を設置した。

(2) 観測結果

図-20に降水量、風向風速、気温水温、SWIPによる河氷と晶氷コンター、ADCPによる氷下の鉛直流速コンター、河氷移動速度を示す。SWIPの最大散乱強度の上面は、ADCPボトムトラッキング、音響測深機で得られた河氷底面高と一致しており、水位と同位相で変動している。図中の点枠内は、解氷初期を示し、2010年2月24日7時~25日15時の32時間で気温が-12.6°Cから+10.7°Cへと急上昇し、2月25日20時~26日6時に累計30mmの降雨が観測された後、水位の急激な上昇と流速の増加、河氷の移動が発生している。解氷初期 (2010年2月25日~3月5日) の詳細を図-21に示す。ここで、河氷厚は雪面高から河氷底面高までの厚さを示す。水位と流速は同時に上昇し始め、水位は5cm/hrで、流速は0.4m/secから0.8m/secへと上昇する。図-21①では、流速のピーク後に河氷が動き出し、河氷底面に晶氷等の集積がみられる。これは、上流から砕氷・晶氷が流下し、河氷底面に潜る現象と推察される。その後、流速は減少し、水位は1.3m程度上昇してピークとなる。流速と水位のピークは約24hrの時間差が生じている。これは、河氷の集積や氷詰まりによって、水位が上昇し、背水影響によって流速が減少する現象と推察できる。また、

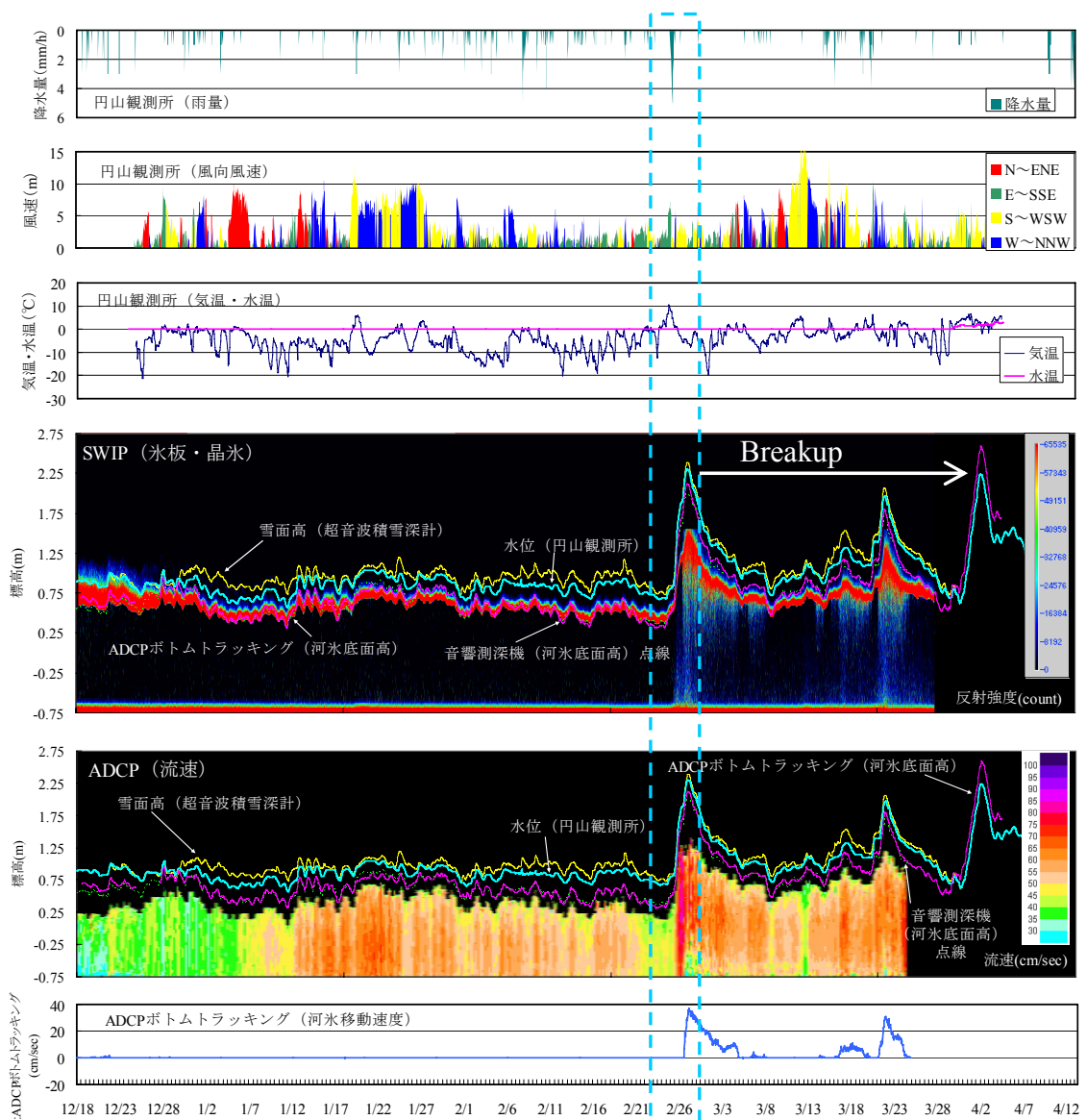


図-20 気象，河氷厚変動とSWIP散乱強度コンター，ADCP流速分布コンター，河氷移動速度

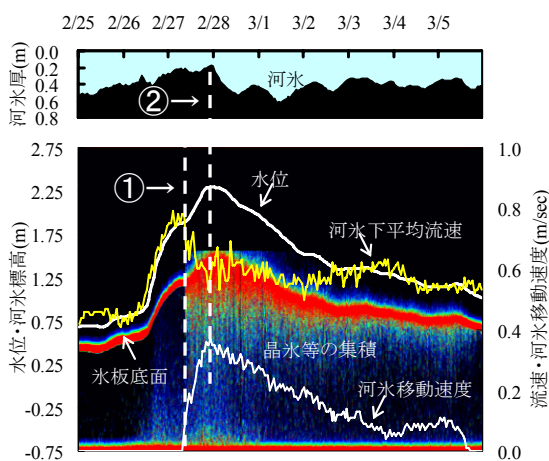


図-21 解氷時の河氷挙動と水理条件

図-21②では，河氷移動速度（最大0.4m/sec）のピークと水位ピークが合致し，河氷厚が最も薄くなることか

ら，流速，水位変化や，河氷底面と流下する砕氷・晶氷との接触により，河氷破壊が発生している現象と推察できる。

ADCPボトムトラッキングで得られた河氷の移動速度と水位およびADCPの有効水深の平均流速の関係を図-22，図-23に示す。河氷の移動速度は水位，流速と一義的な相関がみられた。河氷の移動速度と無次元掃流力との関係を見るために，Shen⁸⁾らにより研究された晶氷の移動量と無次元掃流力の関係を参考に，晶氷粒径 d を河氷厚と置き換えて検討を行った。Shen⁸⁾らによる式(7)，(8)に示す。

$$\Theta = \frac{U_*^2}{gd \left(\frac{\rho - \rho_{ice}}{\rho} \right)} \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{q_{ice}}{d \sqrt{gd \left(\frac{\rho - \rho_{ice}}{\rho} \right)}} \quad (8)$$

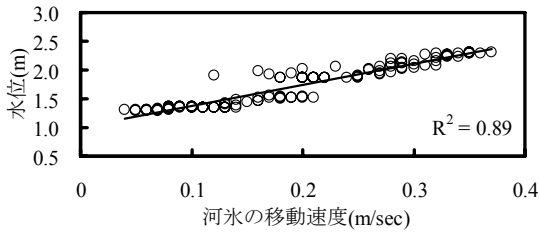


図-22 河氷の移動速度と水位の関係

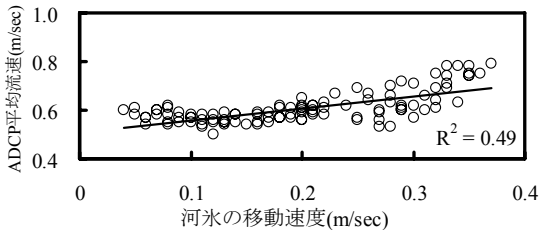


図-23 河氷の移動速度と流速の関係

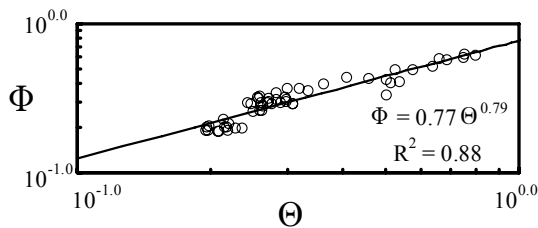


図-24 河氷の移動と掃流力の関係

U_s [m/sec]: 摩擦速度 ($U_s^2 = \sqrt{gRI}$), g : 重力加速度,
 d : [m]河氷厚, ρ [g/cm³]: 水の密度,
 ρ_{ice} [g/cm³]: 河氷の密度, R : 径深 (≒有効水深2),
 I : エネルギー勾配≒水位勾配である.

本検討では, ρ は1g/cm³, ρ_{ice} は2010年2月25日の実測値より0.8g/cm³とした. ここで, q_{ice} =河氷の移動速度 (V_{ice})×河氷厚(d)として, 式(8)に代入すると式(9)となる.

$$\Phi = \frac{V_{ice}}{\sqrt{(gd(\frac{\rho - \rho_{ice}}{\rho}))}} \quad (9)$$

図-24より無次元河氷移動速度 Φ と無次元掃流力 Θ は相関が得られており, べき乗近似式で関連づけられる. これより, 解氷時の河氷の輸送能力は, 河床物質輸送と類似した概念での検討が可能であることを示している.

6. まとめ

河川結氷時の流量観測の現状と課題を整理した.

連続的に流量を推定する式として, 新しい河川結氷時の流量推定式(結氷H-Q式)を示した. 本式は, 流水面積 A_o , 水面幅 B_w , C 値から連続的に流量を推定でき, 開水時の H-Q 式に依らず晶氷(モロミ)が滞留している地点においても適用可能であり, 現行の観測

資料のみで流量を推定することが可能である. 河川結氷時のみを対象としているものの, 渇水等による被害のない持続的発展が可能な水活用社会の実現に向けた社会的ニーズに応えた技術であり, コスト低減を考慮して現行の観測資料のみで流慮を推定することが可能であり, かつ従来手法と比べて推定精度が高いため, 今後の汎用性が期待される.

現地観測も河床設置のADCPやSWIPを利用することで, 河氷厚や河氷下の流速分布の連続観測が可能となった. これより, 結氷初期や解氷期に発生する上流から流下する河氷の詰まりによる急激な水位上昇や氷厚の変化, 晶氷の集積, 解氷時の氷の流下など, 特徴的な水理現象を把握することができた. 観測機器の高度化は, 今まで得られなかった多くの知見を得ることから, 現行の流量観測手法の検証および, 流量精度向上に向けた基礎資料として今後の活用が期待される.

謝辞: 本研究は北海道開発局旭川開発建設部より資料提供のご協力を頂きました. ここに記して謝意を表します.

7. 参考文献

- 1) 山下彰司, 井出康郎, 堺茂樹: 寒冷地河川の氷板下の流速分布の推定, 水工学論文集, 第40巻, pp.65-70, 1996.
- 2) 吉川 泰弘, 渡邊 康玄, 早川 博, 平井 康幸: 河川結氷時の観測流量影響要因と新たな流量推定手法, 土木学会, 水工学論文集, 第54巻, pp.1075-1080, 2010.
- 3) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 清治真人: 氷板下における晶氷厚の連続測定, 土木学会, 水工学論文集, 第53巻, pp.1027-1032, 2009.
- 4) 橋場雅弘・吉川泰弘・渡邊康玄: 結氷河川におけるSWIPを用いた河氷の晶氷厚の測定, 土木学会, 河川技術論文集, 第16巻, pp.271-276, 2010.
- 5) 橋場雅弘・吉川泰弘: 天塩川における河川解氷時の河氷の挙動に関する現地観測, 土木学会, 河川技術論文集, 第17巻, pp.365-370, 2011.
- 6) 吉川泰弘・渡邊康玄・早川博・平井康幸: 結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.1, 21-34, 2012
- 7) 橋場雅弘・吉川泰弘: 超音波測定機器を用いた河川結氷時の河氷底面形状の現地調査, 土木学会, 河川技術論文集, 第18巻, pp.149-154, 2012.
- 8) H.T.Shen・D.S.Wang: Undercover Transport and Accumulation of Frazil Granules, Journal of Hydraulic Engineering, vol.121, No.2, pp.184-194, 1995.

(2012.9.10受付)