

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

FIELD OBSERVATION OF RIVER ICE BEHAVIOR DURING BREAKUP IN THE TESHIO RIVER

橋場雅弘¹・吉川泰弘²
Masahiro HASHIBA, Yasuhiro YOSHIKAWA

¹正会員 (株)福田水文センター (〒001-0024 北海道札幌市北区北24条西15丁目)

²正会員 工修(独)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1番34号)

This study aimed to analyze field data on the behavior of river ice and hydraulic phenomena during river ice breakup collected using non-contact instruments of SWIP(Shallow Water Ice Profiler), ADCP and Echo-Sounder. We conducted an experiment with a large water tank in order to test the accuracy of instruments. In the field study, we observed the behavior of river ice and hydraulic phenomena seen in the Teshio River using SWIP and ADCP units. It was found that the rise of water levels during ice breakup tends to lag behind the maximum flow rate because of ice accumulation as well as ice jams formed in the upstream part of the river. A phenomenon was observed in which ice fragments and frazil that were formed upstream and flowed downstream moved under river ice. It was found that the Froude number under ice-covered conditions remains at about 0.1, and that the coefficient of roughness tends to decrease because of changes in river ice thickness. Based on analysis of the field data collected, we propose that ice-transport capacity can be described using a dimensionless flow strength formula.

Key Words : SWIP, ADCP, accuracy of instruments, river ice ,breakup , dimensionless flow strength

1. はじめに

河川水位は、河川管理者にとって治水、利水、環境の観点から注視すべき重要な観測データであり、河川水位は河川流量、河道断面形状、河床粗度の影響を受ける。結氷する河川の水位は、これに加えて、河氷による流積の変化、河氷粗度の増減の影響を受ける。特に、河道内の河氷が存在し始める結氷初期と河氷が流下する解氷時においては、河川水位の変動が大きい。このため、河氷の挙動を明らかにすることは河川管理上重要となる。

河氷の構成要素には水面上の積雪、水面近くの氷板、その下に蓄積する晶氷に分けられる。結氷河川の河氷厚については、積雪深計で河氷の上面である雪面高を測定し、音響測深機で河氷の下面である氷板底面高を測定した既往研究^{1) 2)}があり、河氷厚を非接触で連続的に測定する方法を示している。また、ADCPのボトムトラッキングを用いて河氷の底面変動と流下速度を測定した既往研究⁴⁾では、河氷の流下と水位の変動傾向が一致するという知見が得られている。晶氷については、低温下で河川水が凍結した針状・棒状の氷片や、大量の雪が河道内に供給されて氷板下に集積するものがあり、氷板に比べて固定されていないため蓄積、流下の挙動が大きく、河

氷変動をとらえる上で重要な要素である。氷板下に晶氷が存在する流れ場においては、ADCPを河床に設置して晶氷厚を連続測定した既往研究³⁾がある。カナダなど北米ではSWIP(Shallow Water Ice Profiler)を用いて晶氷の粒径や濃度の推定が試みられており⁵⁾、発生する晶氷は針状または板状の氷片で、氷点下の冷却された条件下で発生するなどの知見が得られている。また、積雪深計、音響測深機、SWIPを用いた既往研究⁶⁾では、晶氷の発生原因が降雪、気温などの気象条件に起因する可能性や、解氷の過程で上流からの晶氷の流下により浮遊状態の晶氷が集積することなど新たな知見が得られている。これらの研究から、結氷河川の河氷測定に非接触の音響機器が有効であることが示されたが、各観測機器の定量的な精度検証は十分には行われていない。また、解氷時の現地観測は危険が伴うため、既往研究事例が少なく、観測データの蓄積が必要である。

本研究は、SWIP、ADCP、音響測深機における河氷底面の測定値について、大型水槽を用いて精度検証を行った。さらに、これらの機器を実河川の河床に設置して現地観測を実施し、得られた観測データについて既往の研究成果を用いて検証するとともに、解氷時の水理現象と河氷の挙動について検討を行った。

2. 河水底面測定の水槽実験

(1) 観測機器

河水底面を測定する非接触機器は、SWIP, ADCP, 音響測深機の3つの機器とした。SWIP(Shallow Water Ice Profiler, 546kHz, ASL Environmental Sciences社製)は、河床から水面方向に超音波を発射して、後方散乱強度から河水底面や晶氷の集積などを測定する観測機器である。ADCP (超音波ドップラー式流速計, WorkHorse Sentinel 1200kHz, Teledyne RD Instruments社製)は、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、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測定機器である。また、設定層別の流速を測定可能である。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、受信信面を水面方向に向けて設置し、河水底面を測定する機器である。

(2) 実験装置の構造

実験に用いた水槽の概要を図-1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10.65 m^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て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./20m)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。

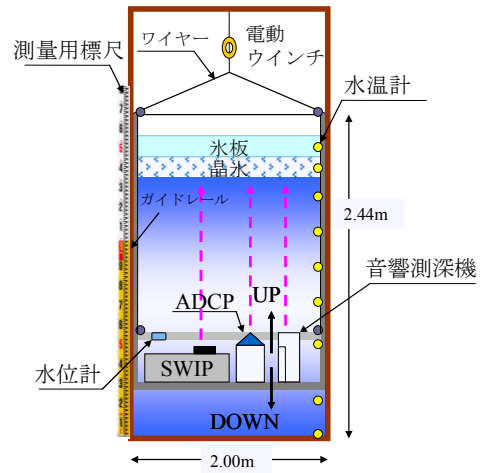


図-1 実験水槽概要

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の板状の氷を敷詰めて使用(密度: 0.966g/cm ³)
3	晶氷	自然堆積している雪を使用(晶氷低密度: 0.375g/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: 0.492g/cm ³ +自然堆積している雪(晶氷低密度))

氷板は縦50×横30×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34×50×30cm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0~2.0m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

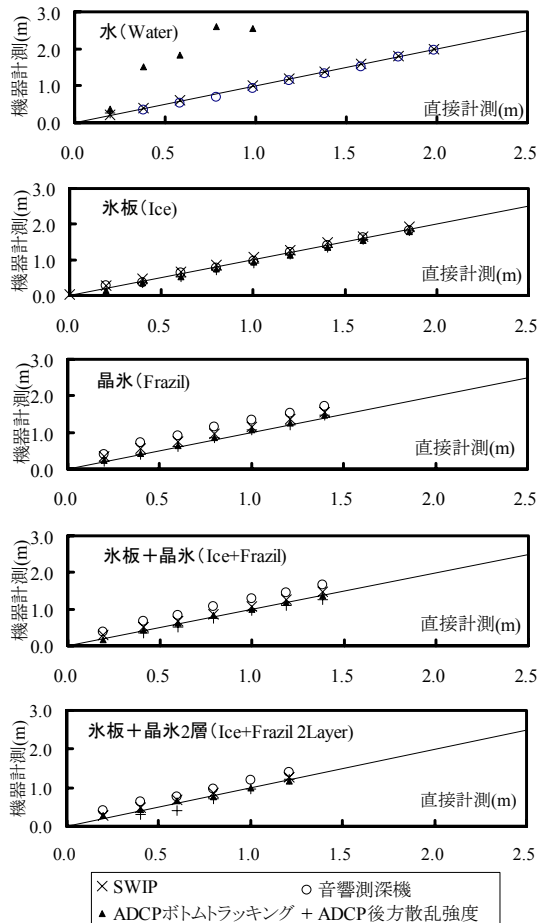


図-2 水槽実験検証結果



図-3 現地観測箇所

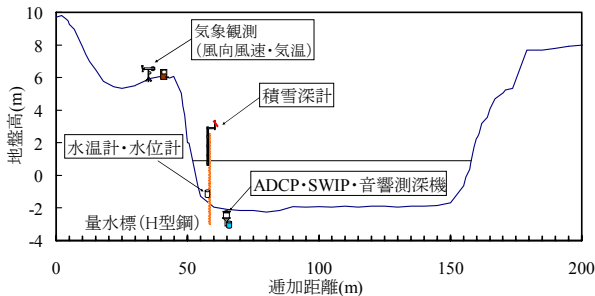


図-4 観測機器配置概要

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±0.02m 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-2に示す。水のみの場合、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°で広がるため、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0.03~0.04m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。河氷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氷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。

3. 現地観測結果

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、実河川における結氷から解氷に至る現地観測を行った。

(1) 観測箇所

対象河川は図-3に示す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。

(2) 観測機器と観測方法

観測機器は図-4に示す配置とし、河床にSWIP (ASL Environmental Sciences社 546kHz)、ADCP (Teledyne RD Instruments社 1200kHz)、音響測深機 (株) カイジョー PS-20R) を設置し、河氷の底面変化と晶氷集積、河氷の移動速度を観測した。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。

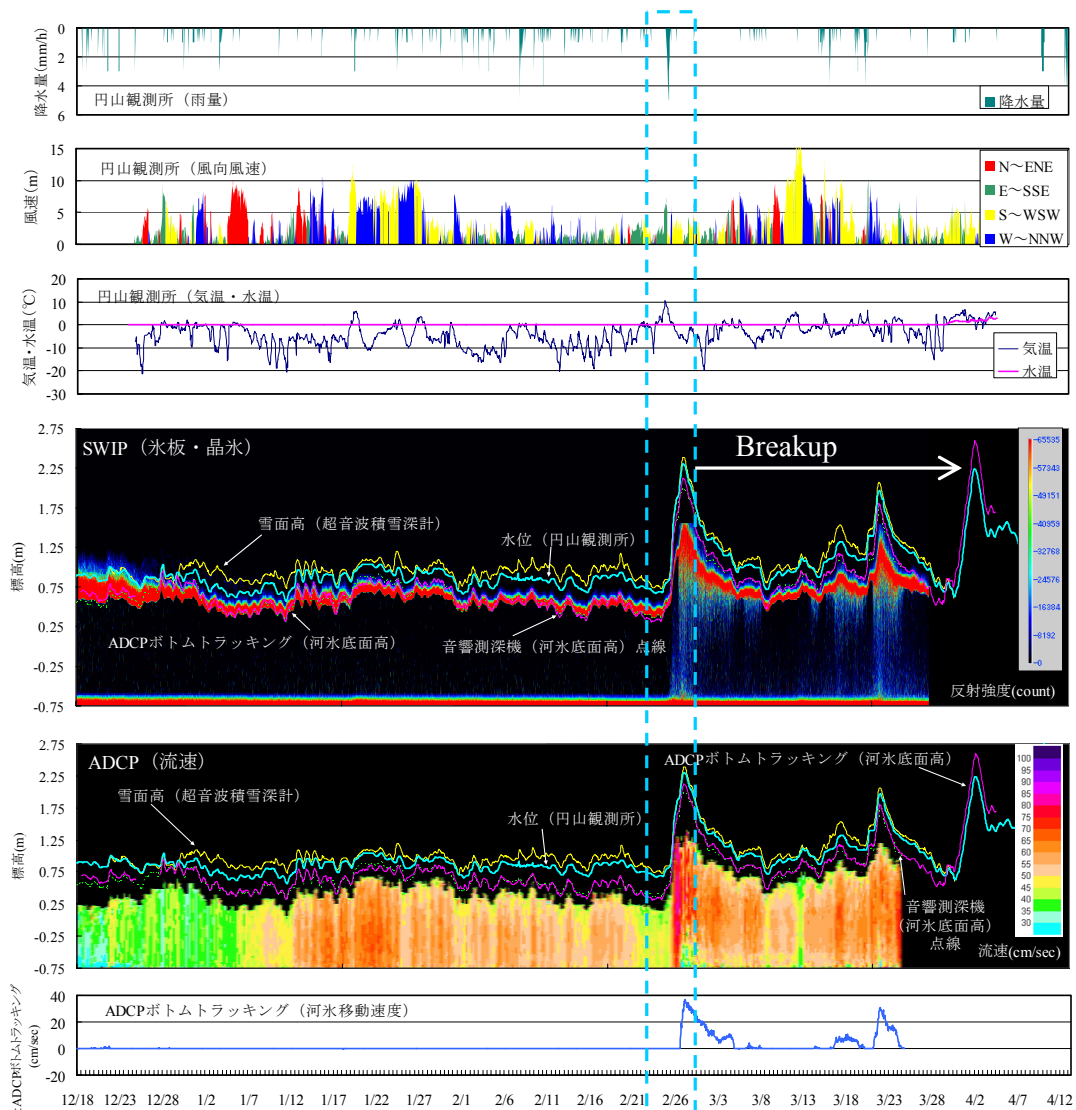


図-5 気象，河氷厚変動とSWIP後方散乱強度コンター，ADCP流速分布コンター，河氷移動速度

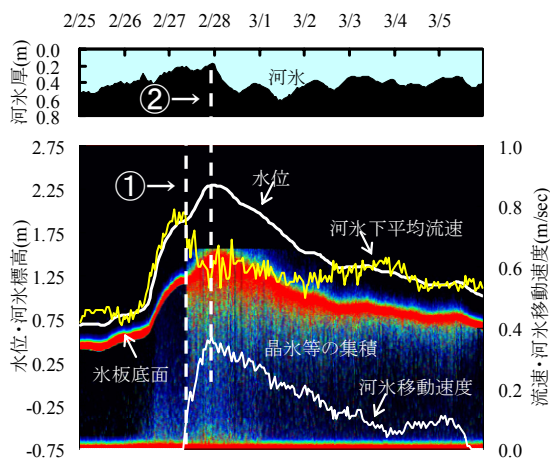


図-6 解氷時の河氷挙動と水理条件

(3) 観測結果

図-5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による河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 $+10.7^{\circ}\text{C}$ 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-6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-6①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-6②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可能性が示唆される．

4. 観測データの検証

(1) 合成粗度係数およびフルード数の経時変化

河氷厚と粗度の時系列変化を図-7に示す。粗度は ADCP と自記水位計の実測値を用いて、河氷と河床の合成粗度 n_0 とし、Manningの式 (1) より算出した。

$$v = \frac{1}{n_0} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I_e^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

v [m/sec]: 平均流速 (鉛直平均), n_0 : 合成粗度 (河氷・河床), R : 径深, I_e : エネルギー勾配

観測期間中は完全結氷状態であったため、河氷潤辺 S_i [m], 河床潤辺 S_b [m], 川幅 B [m], 断面積 A [m²], 有効水深 h_w [m], $B \gg h_w$ とすると, $S_i \approx S_b \approx h_w$ と仮定できるため、径深 R は式 (2) で表すことができる。

$$R = \frac{A}{S_i + S_b} \approx \frac{A}{2B} \approx \frac{h_w}{2} \quad (2)$$

算出した粗度は氷板と河床の合成粗度であるが、水位勾配が安定する1月19日以降は、河氷厚の増減にかかわらず、粗度は経時的に低下する傾向がみられた。これは河氷底面が流水により融解され滑らかになることによる粗度の減少と推察される。図-7の点枠中には、解氷時に河氷底面に滞留する河氷や晶氷により、一時的に粗度が高くなる現象がみられた。

結氷期のフルード数 Fr を式 (3) より算出した。

$$Fr = \frac{U_w}{\sqrt{g \left(\frac{A}{B} \right)}} \quad (3)$$

U_w [m/sec]: ADCP平均流速, A [m²]: 断面積, B [m]: 水面幅

岸ら⁷⁾ は、河川の完全結氷の条件が、気温、降水量、フルード数によって決まり、 $Fr \leq 0.2$ で完全結氷の可能性があり、 $Fr \approx 0.4$ を超えると結氷しないとしている。検討結果を図-8に示すが、期間を通じて $Fr \approx 0.1$ で推移しており、岸ら⁷⁾ の完全結氷の条件と一致した。

(2) 河氷厚と河氷移動速度の経時変化

ADCP, SWIPなどの非接触機器による河氷厚の経時的な観測を検証するため、吉川ら⁸⁾ の気温、水温、有効水深を独立変数とする実用的な氷板厚計算式を用いて検証した。氷板厚 h_i は式 (4) を用いた。

$$h_i = h_{i-1} - \left(\frac{65.2}{10^5} \right) \alpha \frac{T_a}{h_{i-1}} - \left(\frac{45.8}{10^2} \right) \beta^5 T_w h_w^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{U_w}{h_w^{\frac{2}{3}}}, \quad \alpha = 1.8 \quad (5)$$

h_i [m]: 氷板厚, h_{i-1} [m] は Δt 前の氷板厚, T_a [°C]: 気温, T_w [°C]: 水温, h_w [m]: 有効水深, α は試行錯誤の結果から無次元数1.8を与えた。

図-9に積雪深計とADCPボトムトラッキングの実測値から算出した河氷厚と式 (4), (5) から得られた計算値を示す。本研究では、 α を一定としてい

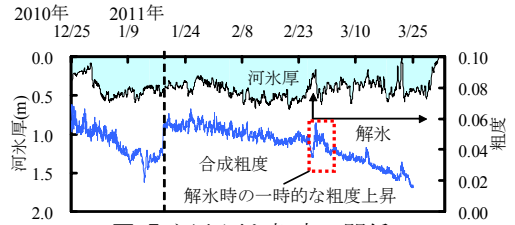


図-7 河氷厚と粗度の関係

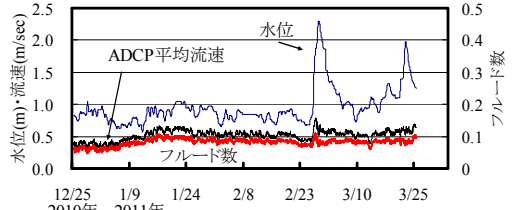


図-8 結氷時のフルード数

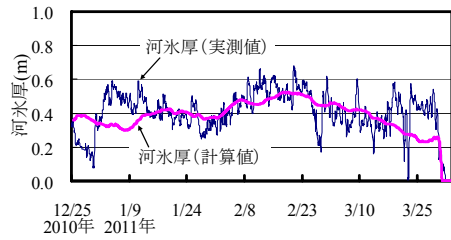


図-9 河氷厚実測値と計算値の関係

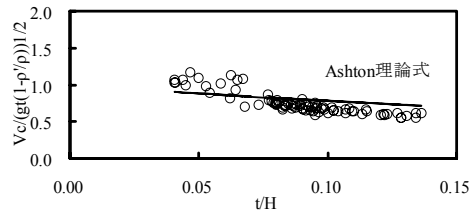


図-10 フルード数と河氷厚の関係

るため、河氷の流下による氷板厚の増減を考慮できていないため、河氷が動きやすい結氷初期 (12月下旬~1月上旬) と解氷期 (2月下旬~3月) で一致しないが、完全結氷期は一致した。

ADCPによる河氷移動速度の妥当性を検討するため、Ashton⁹⁾ の氷板厚さの影響を考慮した理論式 (6) で示すフルード数 Fr と観測値の比較を行った。

$$Fr = \frac{V_c}{\sqrt{gt \left(1 - \frac{\rho'}{\rho} \right)}} \quad (6)$$

ここで、 V_c [m/sec]: 結氷直上流の流速, t [m]: 氷破片の厚さ, H : 結氷直上流の水深, ρ [g/cm³]: 水の密度, ρ' [g/cm³]: 氷板の密度である。本検討では、 ρ は1g/cm³, ρ' は実測値より0.8g/cm³とし、 V_c は結氷直上流の値がないため結氷下のADCPによる平均流速を与え、 t は雪面上面から河氷底面までの厚さとし、 H は水位から河床高を引いた値とした。一方、式 (6) はAshton⁹⁾ より t と H を用いて式 (7) で表わすことができる。

$$Fr = \frac{2(1-t/H)}{\sqrt{5-3(1-t/H)^2}} \quad (7)$$

測定値を式 (6) に代入して求めたフルード数を縦軸に、横軸に観測値を用いて、 t を H で割った値を図-10に示す。また、式 (7) を理論値として図-10にプ

ロットした。観測値は理論値との平均誤差±偏差が-0.07±0.06と概ね一致した。

(3) 河水移動速度と水位，流速，無次元掃流力

ADCPボトムトラッキングで得られた河水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-11，図-12に示す。河水の移動速度は水位，流速と一義的な相関がみられた。河水の移動速度と無次元掃流力との関係をみるために，Shen¹⁰⁾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 を河水厚と置き換えて検討を行った。Shen¹⁰⁾らによる式を式(8)，(9)に示す。

$$\Theta = \frac{U_*^2}{gd \left(\frac{\rho - \rho_{ice}}{\rho} \right)} \quad (8)$$

$$\Phi = \frac{q_{ice}}{d \sqrt{gd \left(\frac{\rho - \rho_{ice}}{\rho} \right)}} \quad (9)$$

U_* [m/sec]: 摩擦速度 ($U_*^2 = \sqrt{gRI}$)， g : 重力加速度， d : [m]河水厚， ρ [g/cm³]: 水の密度， ρ_{ice} [g/cm³]: 河水の密度， 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} =河水の移動速度(V_{ice})×河水厚(d)として，式(9)に代入すると式(10)となる。

$$\Phi = \frac{V_{ice}}{\sqrt{gd \left(\frac{\rho - \rho_{ice}}{\rho} \right)}} \quad (10)$$

図-13より無次元河水移動速度 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，解氷時の河水の輸送能力は，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。

5. まとめ

SWIP, ADCP, 音響測深機の測定精度を検証した結果，水深に関わらず測定誤差は一定であり，各機器の測定値と実測値の標準偏差は0.03~0.04m程度と小さく，測定精度が高いことを示した。解氷時の水理現象と河水の挙動について，現地観測結果から以下の知見が得られた。急激な気温上昇と降雨によって流速は速くなり，流速のピークを向かえると同時に河水が下流へと移動する。移動した河水は河水底面に滞留し，河川の合成粗度を大きくさせるため，流速は遅くなり水位は上昇する。また，河水の移動速度のピークは水位のピークと一致する結果であった。さらに，完全結氷時はフルード数が0.1程度で推移すること，合成粗度係数は経時的に減少すること，無次元河水移動速度は，無次元掃流力と関連付けられることなど，新たな知見が得られた。本研究の新たな観測手法により，解氷時の水理現象と河水の挙

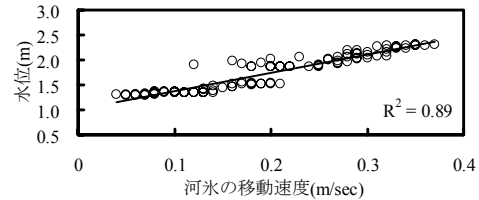


図-11 河水の移動速度と水位の関係

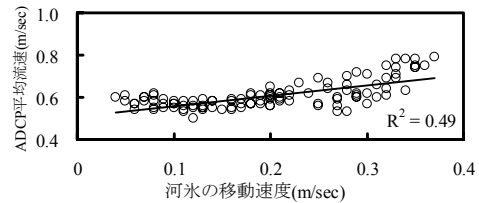


図-12 河水の移動速度と流速の関係

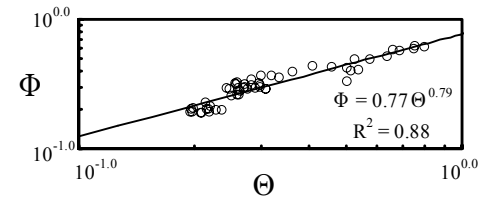


図-13 河水の移動と掃流力の関係

動を観測可能であることを示した。このことは，本観測手法が，結氷河川における長期的なモニタリング技術の一手法となることを示している。

参考文献

- 1) 吉川泰弘・渡邊康玄・白井博彰：天塩川における雪面高と氷底面高の連続測定，第24回寒地技術シンポジウム，pp210-215，2008。
- 2) 吉川泰弘・渡邊康玄・早川博・平井康幸：天塩川における解氷時の氷板厚に関する研究，土木学会，河川技術論文集，第15巻，pp315-320，2009。
- 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，pp1027-1032，2009。
- 4) 橋場雅弘・白井博彰・吉川泰弘：河川解氷時における河水の底面変動と流下速度の測定に関する現地観測，土木学会北海道支部，論文報告集，第66号，B-4，2009。
- 5) J.R.Marko and M.Jasek,2009.Estimation of Frazil Particle Size and Concentration from SWIPS Measurements in the Peace River:an Assessment of Options and Prospects.15th CRIPE workshop on River Ice,St.Johb's .Nfld.
- 6) 橋場雅弘・吉川泰弘・渡邊康玄：結氷河川におけるSWIPを用いた河水の晶氷厚の測定，土木学会，河川技術論文集，第16巻，pp271-276，2010。
- 7) 岸力・中尾欣四郎：北海道における河川の結氷と冬季渇水量について，土木学会，年次学術講演会講演概要集，第16回，pp79-80，1961。
- 8) 吉川泰弘・渡邊康玄・早川博・平井康幸：結氷河川における実用的な氷板厚計算式の開発，土木学会，年次学術講演会講演概要集，第64回，pp127-128，2009。
- 9) George D. Ashton : Froude criterion for ice-block stability, Journal of Glaciology, vol.13, No.68, 307-313, 1974.
- 10) H.T.Shen・D.S.Wang : Undercover Transport and Accumulation of Frazil Granules, Journal of Hydraulic Engineering, vol.121, No.2, pp184-194, 1995.

(2011.5.19受付)