

結氷河川におけるSWIPを用いた 河氷の晶氷厚の測定

MEASUREMENT OF A FRAZIL ICE THICKNESS ON ICE-COVERED RIVER USING SWIP

橋場雅弘¹・吉川泰弘²・渡邊康玄³

Masahiro HASHIBA, Yasuhiro YOSHIKAWA and Yasuharu WATANABE

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)

³正会員 博(工) 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

The behavior of the river ice and the frazil ice were important for study of the ice-covered river. However, it was difficult to investigate the river ice and frazil ice thickness and behavior on the ice-covered river. We enabled to measure the ice layer thickness using the snow depth meter, the depth sounder, and SWIP(Shallow Water Ice Profiler). And we could investigate time series behavior of the river ice internal structure that was snowfalls, the river ice and the frazil ice. Especially, we could understand the behavior of the suspended frazil ice that existed in water by using SWIP. As a result, the suspended frazil ice would originate in the weather condition such as the snowfalls and temperature. And at the Break-up, the suspended frazil ice would exist by high concentration from the upper stream transportation by the rise of the water temperature. This study presented the time series measurement technique of thickness and behavior of the river ice and the frazil ice.

Key Words : SWIP, suspended frazil ice, time series behavior, ice-covered river, measurement technique

1. はじめに

北海道の一部の河川では冬期間の気温低下に伴い河氷が形成され、河氷は大別すると硬い氷板とその下に存在する軟らかい晶氷に分けられる。晶氷は河川勾配急変部において滞留および氷化して全面結氷の原因になることや、氷板下に滞留してアイスダムを形成し、著しく流積を狭めることが知られている。これらの現象は、急激な水位上昇を引き起こす可能性があり、ロシアや北米の河川ではアイスジャムフラッドと呼ばれ、大きな洪水を引き起こしている。一方、北海道における河川水は、上水道、発電、工場用水と幅広く通年、利用されており、河川結氷時は12月下旬から4月上旬までと年間の約3割に相当することから、河川結氷時においても安定して取水することが求められる。しかし、石狩川上流の永山取水施設において、河川内を流下する晶氷が取水口に侵入して滞留および閉塞されるという取水障害が2000年に発生するなどの利水上の問題が発生しており、晶氷の挙動に関する知見が望まれている。また、河氷および晶氷の挙動を解明するためには、連続的なモニタリングが重要となるが、結氷した河川上での観測は常に危険を伴うため、有効な観測手法の確立が望まれている。

河氷および晶氷の測定については、積雪深計で河氷の上面である雪面高を測定し、河床に設置した音響測深機で河氷の下面である氷板底面高を連続測定した既往研究^{1) 2)}や氷板下に晶氷が存在する流れ場においてADCPを河床に設置して連続測定を実施した既往研究³⁾がある。また、これらの機器の観測精度を実験水槽で検証した研究⁴⁾では氷板と晶氷の底面は音響測深機とADCPで測定することが可能であることを示している。しかし、晶氷の挙動や発生メカニズムの解明には、晶氷自体の粒径、濃度の詳細な観測が必要である。

このような立場から、近年、カナダにおいて開発されたSWIP⁵⁾を用いて、晶氷の粒径や濃度の推定が試みられており⁶⁾、カナダなど北米やロシアで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。

これに対し、日本では世界で有数の豪雪地であることから、日本で発生する晶氷は河川に降った雪が低水温下で溶けずに晶氷化する雪由来の晶氷が存在することが予見され、カナダと日本では晶氷の主たる発生要因が異なることが想定される。

本研究は、北海道の結氷河川における晶氷厚の測定技術の開発を目的として、SWIPを用いた現地観測を実施し、晶氷の挙動について検討した。

2. 現地観測

(1) 対象河川と観測期間

対象河川は図-1に示す北海道北部に位置する天塩川とした。天塩川は、流路延長約256km（全国第4位）、流域面積約5,590km²（全国第10位）の日本有数の規模を持ち、北見山地の天塩岳の源流から、北方に流下し、天塩平野を経て日本海に注ぎ、冬期は北方に位置する下流域が完全結氷する典型的な結氷河川である。対象地点は、既往の観測データを基に、天塩川において晶氷が多く存在する茨内観測所（KP94）とした。観測期間は結氷開始から解氷後までの2008年12月25日から2009年3月31日とした。なお、茨内観測所より約2km下流の音威子府、約20km上流の美深における気象庁のアメダス観測所で降雪量を観測している。

(2) 観測機器と観測方法

SWIP（Shallow Water Ice profiler：ASL Environmental Sciences社製）の外観を写真-1に、SWIPの諸元を表-1に示す。SWIPは、546kHzのソナー、2軸傾斜計、水温センサー、圧力センサーをアルミケース内に装備した計測機器で、海水用に用いられていたアイスプロファイラーを浅水用に改良した機器である。測定方法は、機器上部のトランスデューサーから6°の照射角で超音波を発射し、氷板や浮遊している晶氷の粒子に反射して返ってくる後方散乱強度を測定する。また、得られた後方散乱強度は、密度や粒子径などによって変化するため、河水や晶氷の存在を高解像度でモニタリングすることが可能となる⁵⁾。測定データはコンパクト・フラッシュメモリ（16GB）に保存され、2Hz以上の連続サンプリングが可能である。今回の観測間隔は1秒とした。電源は専用の26AH内蔵バッテリーを使用し、約6ヶ月の連続観測が可能である。機器の設定はASL Environmental Sciences社製ソフトウェアIPS5LINKを使用し、出力は同社製ソフトウェアIPS5EXTRACTおよびProfileViewを用いて鉛直プロファイルを作成した。

SWIPの測定データとの比較のため、河氷厚の上面と下面の連続測定を実施した。上面は、コーナシステム株式会社製のレーザー式積雪深計（測定精度0～10m±1.0cm）を用いて雪面高を測定した。下面は（株）カイジョーのPS-20R型 200kHz（測定精度±（3cm＋深度÷1000））の精密小型音響測深機を河床に設置して、河氷底面の測定を実施した。測定間隔は1時間とした。

さらに、解氷時の流水部の流速と河氷の動きを把握する目的で、2月よりTeledyne RD Instruments社のADCP（WorkHorse Sentinel 1200kHz）を河床に設置して観測を実施した。ADCPはハイレゾリューションモード（WM8）を使用し、測定間隔は10分で、1回に30ピングの超音波を発信してアンサンブル平均したものを使用した。流速誤差は0.01m/sec以下とした。



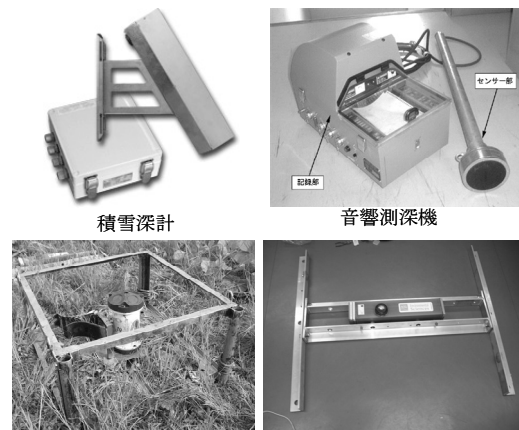
図-1 現地観測箇所



写真-1 SWIPの外観

表-1 SWIPの諸元

項目	諸元
周波数	546kHz
ビーム角	6°
サンプリング間隔	2Hz以上
電源	8-15V、90mA
測定範囲	1-20m
水深精度	±0.05m
水温精度	±0.1℃
傾き精度	±1.0°（±20°まで）
圧力精度	±0.03psia（0-30psia）



ADCP

SWIP

写真-2 観測機器の外観

観測機器の外観を写真-2に示し、平面の機器配置図を図-2に、横断の配置図を図-3に示す。流心部河床に音響測深機、ADCP、SWIPを一体で設置し、積雪深計は水位観測用のH型鋼に、音響測深機のログ一部は有線で陸上に設置した検査内に格納した。SWIPとADCPは機器内にバッテリーと記録メモリを装備しているため架台に取り付けて河床に設置した。

合わせて、アレック電子(株)のCOMPACT-CT自記水温計（分解能0.001℃、精度±0.05℃）を現地のH型鋼に設置し、(株)MCSの気温計（精度：JISA級±0.15℃以下）を現地の右岸陸上の気象観測箇所に設置して、水温と気温の測定を実施した。

SWIPの測定値の精度検証を行うために、氷板厚と晶氷厚の直接観測を1月～3月まで計17回実施した。直接観測の方法は、図-4に示すように、河水に50cm×50cmの穴を開け、河水測定用の目盛りL型定規を差し込み、晶氷の底面と河水の底面を手触で測定した。

また、SWIPで得られた晶氷の挙動と密度との関係を把握するため、現地にて氷板、晶氷、雪を採取し、結氷初期の12月23日から解氷期3月10日まで計10回、密度を計測した。

密度の測定方法について、氷板は、現地において定形に切り取り、定規と秤によって容積（ V_i ）と重量（ W_i ）を測定し、単位体積重量（ ρ_i ）を算出した。

$$\rho_i = \frac{W_i}{V_i} \quad (1)$$

晶氷は水と混合しているため、容積が既知である容器（ V ）に晶氷を入れて重さ（ W ）を測定し、抜いた水の体積（ V_w ）と重さ（ W_w ）を測定することで晶氷密度（ ρ_f ）を算出した。

$$\rho_f = \frac{W - W_w}{V - V_w} \quad (2)$$

3. 観測結果

(1) 積雪深計、音響測深機、SWIPによる連続観測

結氷から解氷までの降雪量、気温、水温、平均流速、雪面高、水位、河氷底面高、SWIPによる後方散乱強度はコンターとして図-5に示す。

雪面高、水位および音響測深機で得られた河氷底面高は同位相で変動しており、水位の変動に応じて河氷が連動して動いていることが推察できる。また、雪面高と河氷底面高の差が、河川上に存在する河氷の厚さを示しており、経時的变化をみると、1月始めの結氷初期から河氷が成長し、3月の解氷に向けて減少していく様子が把握できる。

図-5のSWIPの最大散乱強度の上面は、音響測深機に

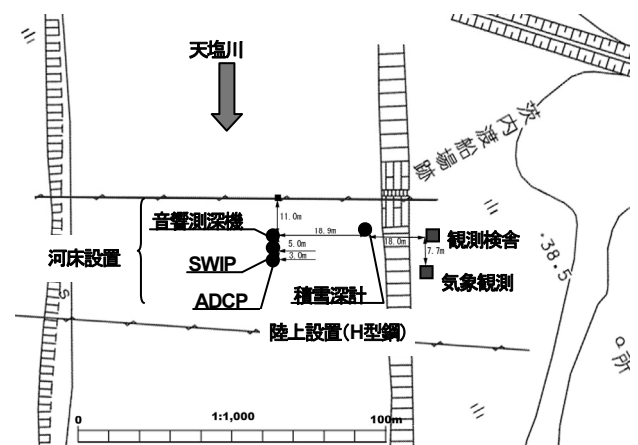


図-2 観測機器の平面配置図

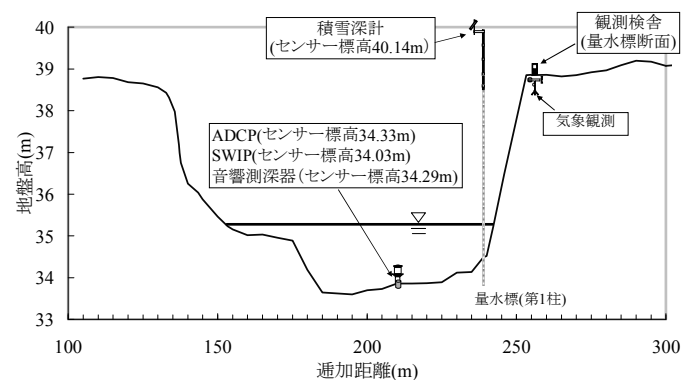


図-3 観測機器の横断配置図

河水測定用L字定規

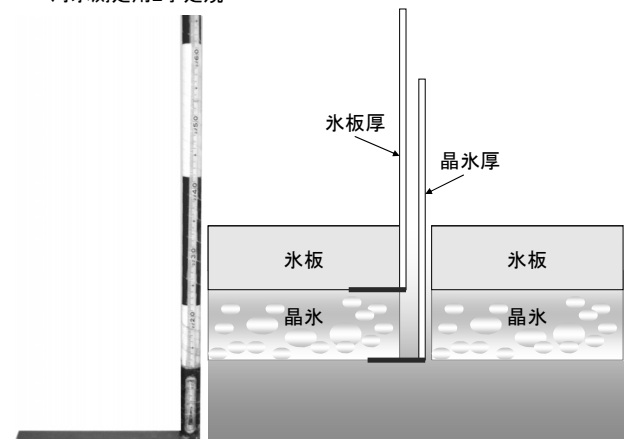


図-4 河氷・晶氷の概要

より得られた河氷底面高と一致している。音響測深機の値は河氷を形成する氷板と氷板に固定された晶氷の底面高と仮定すると、河氷底面高より下は、浮遊状態の晶氷であることが推察できる。

SWIPの散乱強度の変化は浮遊状態の晶氷濃度と関連付けられるため、1月14日に浮遊状態の晶氷が発生し、その後、増減を繰り返しながら、3月15日に解氷とともに消失していくという浮遊状態の晶氷の経時的な挙動を把握することができる。

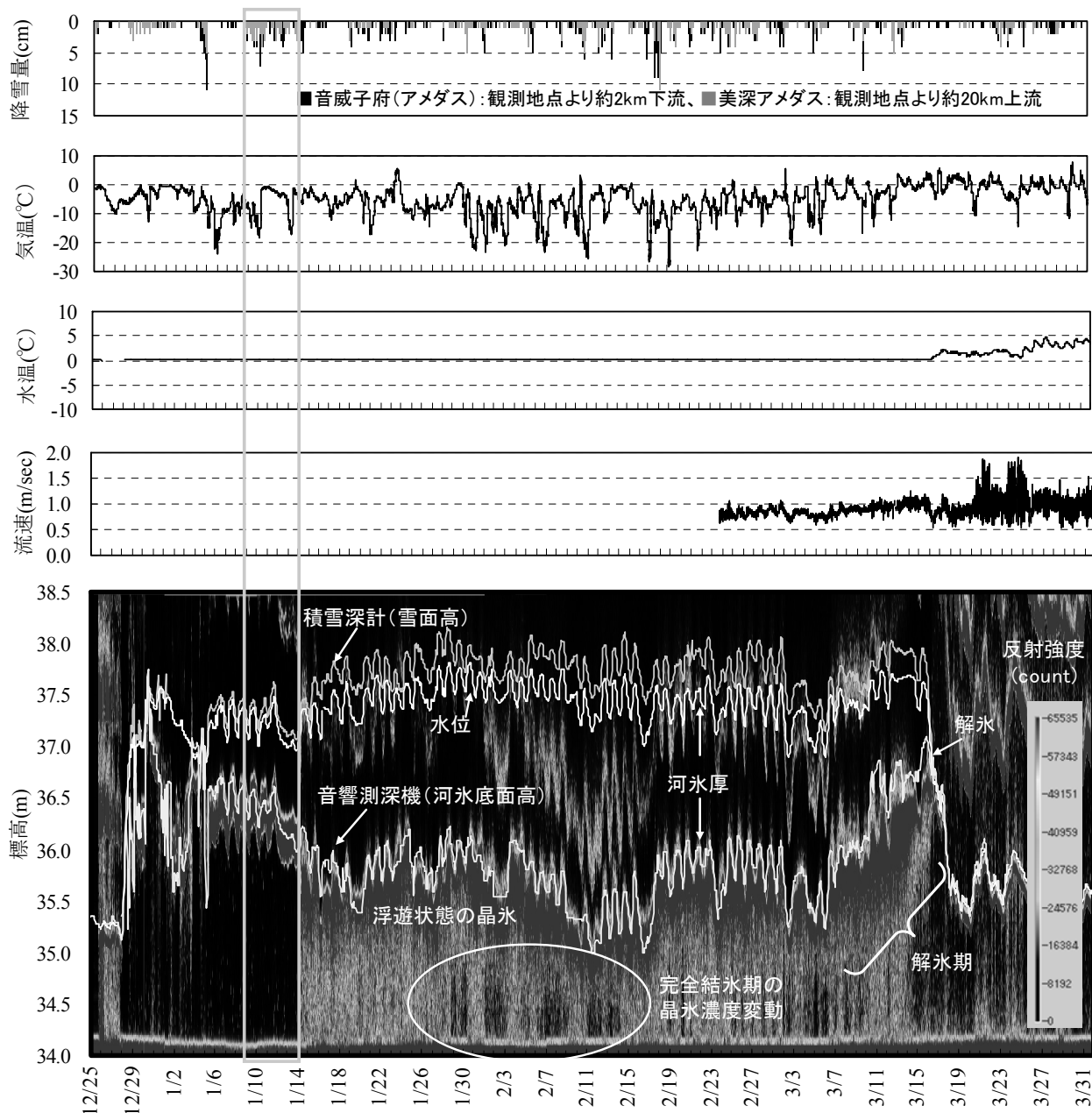


図-5 氷板底面高、晶氷厚、SWIP後方散乱強度コンター

a) 結氷初期

12月25日から27日まで結氷していたが、その後解氷し、再び、1月4日から5日にかけて気温が -20°C 前後に低下するに伴い結氷し、水位が上昇している。この結氷初期には、河水底面に晶氷は見られない。

1月14日においては、河水底面に浮遊状態の晶氷が存在しており、河床まで広がっている。これ以降は解氷まで河水底面に浮遊状態の晶氷が存在している。

浮遊状態の晶氷の発生直前には降雪や気温の低下が観測されており、浮遊状態の晶氷の発生要因となっていることが示唆される。

1月14日の水位は、浮遊状態の晶氷の発生によって流積が小さくなったため、50cm程度上昇している。

b) 完全結氷期

1月中旬から3月までは完全結氷となっている。本観測地点は、上流の岩尾内ダムの放流による水位の日周変動の影響を受ける地点であるが、浮遊状態の晶氷濃度は水位の変動によって影響され、水位の上昇時には鉛直方向の濃度が高くなり、下降時には鉛直方向の濃度が低下する現象が示唆される。

c) 解氷期

3月上旬から気温は上昇し、それに伴い氷板厚が薄くなっている。一方で、浮遊状態の晶氷厚は一時薄くなるが、その後増加し、さらに薄くなっている。上流からの晶氷の流下を考えると、気温の上昇により上流で滞留していた浮遊状態の晶氷が流下して、本観測地点に滞留したことが推察できる。

4. 観測データの検証

(1) SWIPの精度検証

SWIPの後方散乱強度の最大値（ターゲット値）と、河水測定用L型定規を使用した晶氷底面の直接観測との相関を図-6に示す。

SWIPの後方散乱強度の最大値は、明確な密度差が形成されている境界の値に相当するため、水と氷板底面の境界および、水と氷板下に固定されている晶氷底面の境界を示していると考えられる。

図-6より、誤差平均0.20m、標準誤差0.12であり、直接観測と概ね一致している。このことから、SWIPによる後方散乱強度の最大値は、直接観測で得られた氷板に固定された晶氷底面高を測定している可能性が高い。誤差の原因として、SWIPは 6° の照射角で超音波を発信するため、氷板に固定された晶氷底面に凹凸がある場合は、1点を測定する直接観測と誤差が生じる可能性があることと、L型定規での測定は手触で判断するため晶氷濃度が小さい場合などは感知しにくく誤差を生じやすいことが示唆される。

(2) 晶氷密度の経時変化

晶氷密度の観測値とSWIPの後方散乱強度のコンターを図-7に示す。

氷板は2月初旬に一時的に密度が小さくなるが、期間を通じて 0.9g/cm^3 程度と一定で推移している。1月中旬から2月上旬にかけて、晶氷密度は 0.2 g/cm^3 から 0.4 g/cm^3 にかけて大きくなる。密度が大きくなる要因として、この期間の晶氷が氷板下に滞留および維持されるため、晶氷が氷板下に固定され、氷化していることが考えられる。2月初旬から3月にかけては、晶氷密度は一時大きくなるが、経時的には小さくなる。一方で、SWIPによる晶氷厚は厚くなっており、要因として、晶氷密度の高い晶氷が解氷に向かい溶け出し、一方で、上流から密度の小さい晶氷が流下し、この地点で滞留したためと考えられる。

河水上の雪密度については、結氷初期の 0.1 g/cm^3 程度から徐々に密度が増え、3月の解氷期には 0.57 g/cm^3 程度と湿潤状態になっていることが確認された。

(3) 晶氷厚と水位

晶氷厚の変動についての既往の研究⁷⁾では、無次元せん断力が大きくなった場合、すなわち流速が増大した場合は晶氷が減少し、無次元せん断力が小さくなった場合、すなわち流速が減少した場合は、晶氷が増加、滞留するという知見が得られている。一方で、吉川ら³⁾のADCPのトラッキングを使った研究では、水位が上昇する場合は、氷板も上昇し晶氷にかかる圧力が小さくなるため、みかけの晶氷厚が厚くなる。水位が下降する場合は、氷

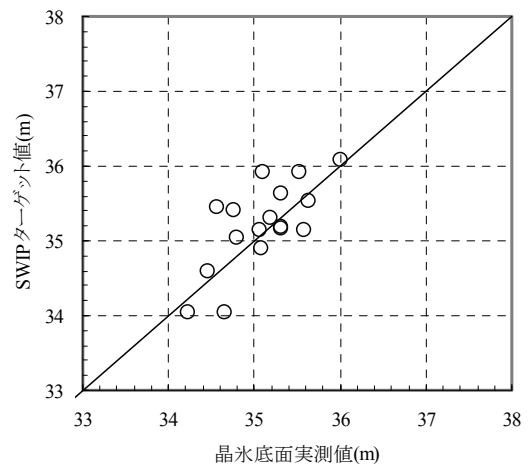


図-6 SWIPの精度検証

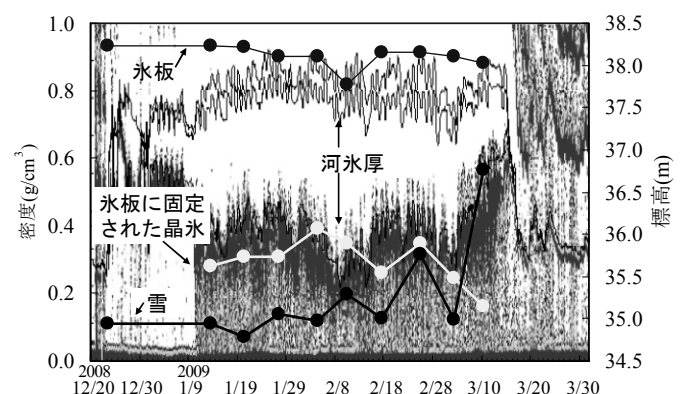


図-7 晶氷厚と密度の変化

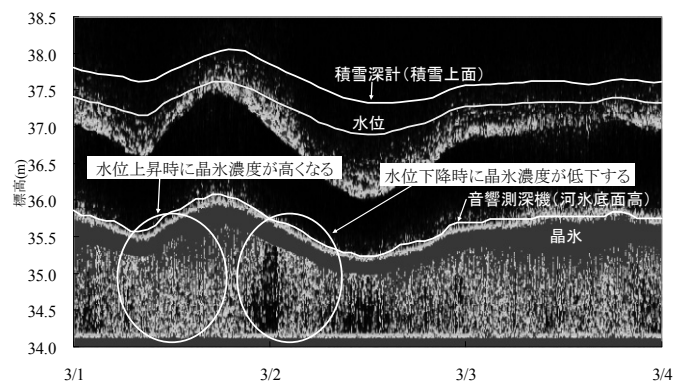


図-8 晶氷厚と水位の変化

板も下降するため晶氷にかかる圧力が大きくなるため、みかけの晶氷厚が薄くなる現象が示唆されている。

本観測で得られたSWIPデータの一部を2010年3月1日～3月3日まで日単位で図-8に示す。SWIPの後方散乱強度は浮遊性の晶氷濃度を表わすことから、図-8より、水位上昇時には鉛直方向の晶氷濃度は高く、下降時には鉛直方向の晶氷濃度は低くなることが観測された。晶氷濃度の増減は水位変動による圧力変化および、縦断的な河水底面形状による滞留や、上流からの晶氷の供給によって増減している可能性があるが、現在のところ、これ以上のことは不明である。

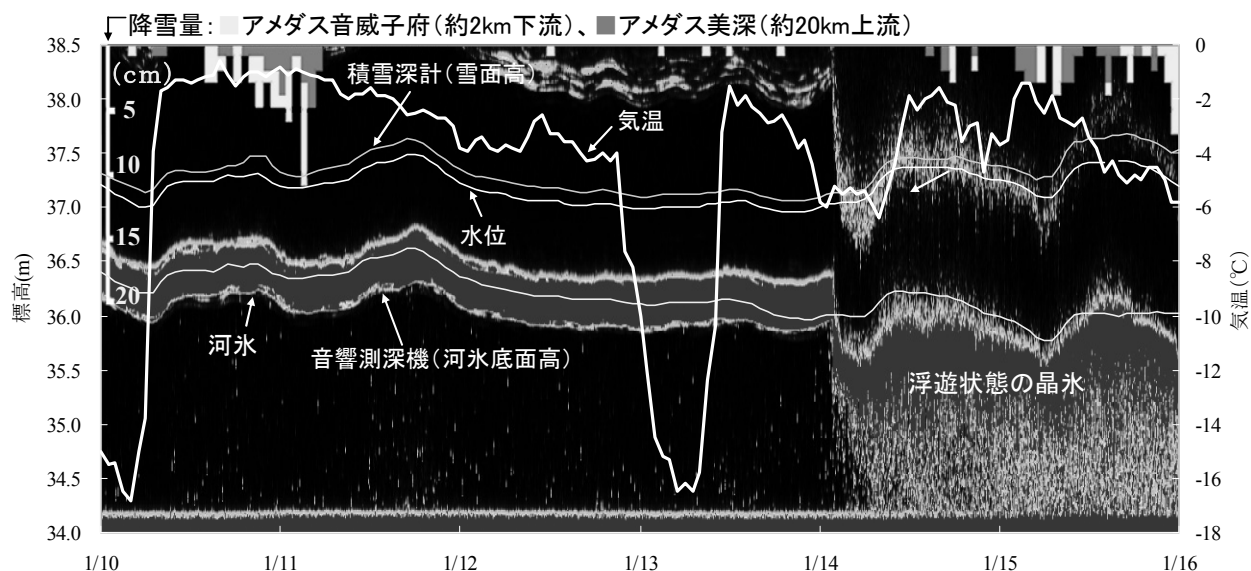


図-9 降雪量と晶氷厚の関係

(4)降雪量、気温と晶氷厚の関係

結氷初期の降雪量、気温とSWIPによる晶氷の挙動を図-9に示す。

1月14日に茨内観測所で浮遊状態の晶氷の発生が確認されており、晶氷の発生後は短時間で河床付近まで高濃度になる現象がとらえられている。

1月10日と11日には茨内観測所の下流約2kmに位置する気象庁アメダス観測地点の音威子府にて累計56cmの積雪が、上流約20kmの美深では累計28cmの降雪が観測されている。これらが浮遊状態の晶氷として河川内に供給された可能性がある。

また、1月13日に気温が-16.5℃に低下しており、河川水と大気との熱交換によって晶氷が流水内で発生したことが推察できる。

浮遊状態の晶氷の発生要因として、降雪と気温の急激な低下が考えられるが、本報告では、降雪、気温と晶氷発生の関係は定量化できていない。しかし、SWIPを用いて晶氷の挙動を捉えることができるため、今後の研究に資する資料の蓄積が可能であると考えられる。

5. まとめ

従来では測定が困難であった北海道の結氷河川の河水と晶氷の挙動について、積雪深計、音響測深機、SWIPを用いることにより、河水の内部構造である氷板とその上に存在する積雪の厚さ、および河水下の晶氷についても同時に測定可能であることを示した。特に晶氷の挙動については、SWIPを用いたことによって、水中に存在する浮遊状態の晶氷の挙動を把握することができた。

これより、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が高いことが示唆されたことや、水位の上昇、下降による浮遊状態の晶氷濃度

の変化が把握できたこと、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滞留することなどが現地観測から示されたことは新たな知見である。

本研究により結氷河川の現象解明に資する晶氷厚の測定技術の一手法を提示した。

今後、これらを実証する上でさらなるデータの蓄積と因果関係の解明を進めていく必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、北海道開発局旭川開発建設部には資料の提供等の御尽力を頂き、記して謝意を表します。

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，2009。
- 5) Jasek, M and J.R. Marko, 2008. Acoustic detection and study of frazil ice in freezing River during the 2007-2008 winter. In Proceedings of the 19th International IAHR Symposium on Ice, Vancouver, B.C., 24p
- 6) 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. John's, Nfld.
- 7) H.T. Shen, De Sheng Wang: UNDER COVER TRANSPORT AND ACCUMULATION OF FRAZIL GRANULES, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.121, No.2, February, pp184-195, 1995

(2010. 4. 8受付)