

## 河川結氷時の河氷底面形状の現地観測

FIELD OBSERVATION ON BOTTOM SHAPE OF RIVER ICE IN ICE-COVERED RIVER

(株)福田水文センター

○正 員 橋場 雅弘 (Masahiro Hashiba)

(独)土木研究所寒地土木研究所

正 員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)

北見工業大学 社会環境工学科

正 員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)

### 1. はじめに

寒冷地の河川では冬の気温低下や降雪により河道内に河氷が形成される。河川結氷時の河氷の粗度は、流量の推定を行う上で重要な要素である<sup>1)</sup>。河氷の粗度は、河氷の構成材料や河氷底面形状の影響を受けると考えられ、その形状は凹凸であることが想定される。河氷の構成材料については、既往研究<sup>2)</sup>により、河氷は硬い氷板と軟らかい晶氷で構成され、結氷から解氷に至る河氷の挙動については、ADCP、SWIPを用いた現地観測によって多くの知見が得られている。しかし、河氷の底面形状については、観測技術が確立されていないことから観測事例がない。

本研究では、超音波機器を用いて、河氷の面的な底面形状を観測することを目的としている。さらに、ADCPにより流速分布を測定して、相当粗度を算出し、河氷底面形状の観測値から算出した相当粗度との比較を行った。

### 2. 現地観測

北海道北部に位置する天塩川（流路延長 256km、流域面積 5,590km<sup>2</sup>）の中流 Kp111.70 に位置する恩根内観測所で現地観測を実施した。図-1 に観測位置を示す。観測期間は、2010 年 12 月～2011 年 2 月とした。

恩根内観測所では、冬期間は全面結氷し、図-2 のように、雪(Snow)の下に、硬い氷板(Ice Sheet)が断面全体を覆い、その下に軟らかい晶氷(Frazil)が発生する。本論文では、雪・氷板・晶氷を合わせて河氷と呼称した。恩根内観測所は、天塩川の中でも晶氷が多く集積する箇所となっている。観測項目は、2011 年 2 月 16 日に左岸からの横断距離 25m と 85m での河氷底面形状の測定を実施し、2010 年 12 月 22 日から 2011 年 2 月 20 日まで、85m 地点の河床に ADCP を上向きに設置し、河氷下の流向流速を測定した。

#### (1) 河氷底面形状測定

##### ①観測機器の機能

河氷の底面形状のプロファイリングには、図-3 の 360° 回転式の超音波機器（881A イメージングソナー 広和株式会社）を使用した。当機種は、水中のターゲット状況に合わせて、280kHz から 1.1MHz まで 5Hz 刻みで超音波の周波数を変えることが可能で、扇形の超音波を照射しながらヘッドを全周囲 360° に回転させることで、面的な河氷底面測定を可能とした。ソナーは RS232C によるシリアル接続でノートパソコンに接続し、ソナー制御やデータ保存はノートパソコン上で行った。



図-1 調査箇所

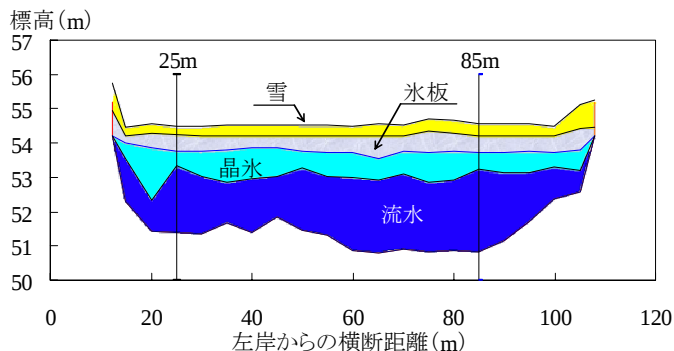


図-2 横断面図（恩根内観測所）



図-3 イメージングソナー（左）と観測状況（右）

重量は 2kg 程度、長さ 20cm 弱とコンパクトな形状である。

##### ②測定方法

測定は天塩川恩根内観測所の左岸から 25m、85m の 2 箇所で行った。河氷に 20cm×20cm の穴を開け、図-4 のようにイメージングソナーを測管の先端に装着して、ソナーを規定の水深（25m：標高 52.0m、85m：標高 51.45m）に入れ、河氷上で固定した。測定前にキャリブレーションを行い、周波数 1MHz、測定レンジ 3m、

Polar モード、ゲイン 16db で測定した。ソナーが 360° 回転し、測定が終了したところで、図-4 に示す時計回りに 22.5° 毎に測管を回転させ、放射状に 360° まで測定した。データは専用ソフトウェア Win881A ver2.36 (広和株式会社) によって取得した。なお、測管には水準器を取付けて水平を維持した。データは、ソナーデータを XYZ 化する専用ソフトウェア (Convert\_881A\_To\_XYZ 広和株式会社) を使用して、X (横軸) と Y (縦軸) をプロットし、ソナー設置水深を基準に Z 値を算出した。図-5 は測点 (25m) の平面分布で、(0, 0) 点が河水に穴を開けて機器を投入した点である。これより、6m×6m を縦横 100 分割メッシュで 3 次元河氷底面図を作成した。

## (2) 水位・流速測定

水位測定は恩根内観測所のエネルギー勾配を水面勾配で表すため、恩根内観測所と下流の恩根内橋の 300m 直線区間に設置した。水位計は光進電気工業 (株) のデータロガー付絶対圧水位計 Mc-1100 (精度±1.0cm/sec) を用いて、10 分インターバルで測定を行った。

河氷下の流速測定には Teledyne RD Instruments 社の ADCP センチネル 1200kHz を使用し、図-6 に示す河床に上向きに設置して、10 分インターバルでの観測を行った。流速はモード 8 のハイレゾリューションモードで 30 ピング/アンサンブルで取得した。測定誤差は±0.94cm/sec とした。

河氷底面高は ADCP ボトムトラッキングを用いて、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。

## 3. 観測結果

### (1) 水位流速測定結果

観測期間 (2010 年 12 月 22 日から 2011 年 2 月 20 日) における、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 による流速時系列変化と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-7 に示す。実際の河氷厚は水位より上に氷板 (上氷) や積雪が存在するが、

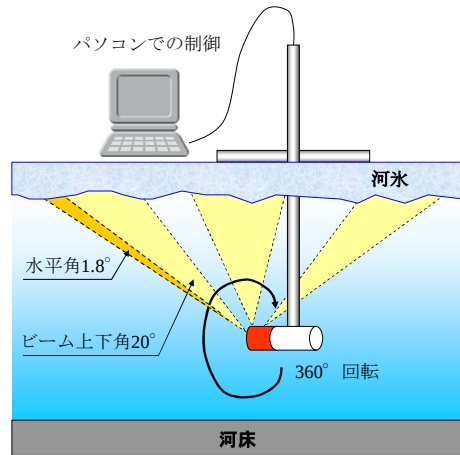


図-4 河氷底面形状測定の概要

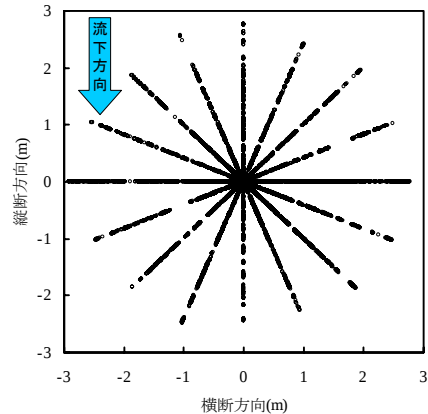


図-5 平面測定ポイント

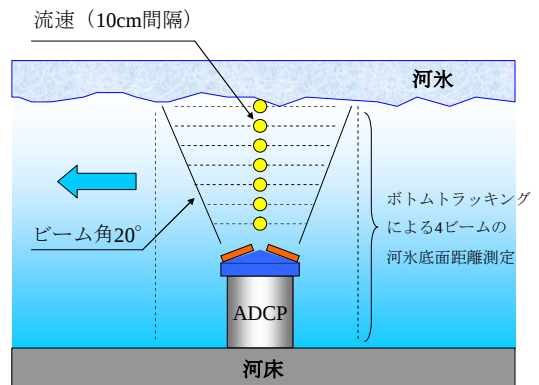


図-6 ADCP観測の概要

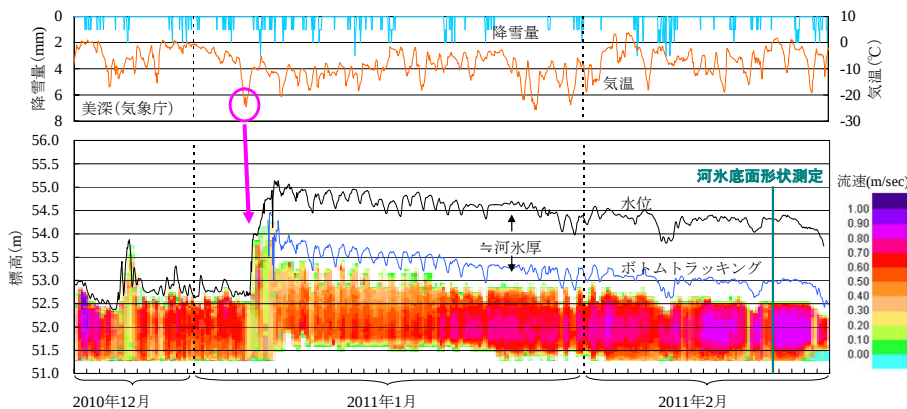


図-7 ADCPによる連続観測

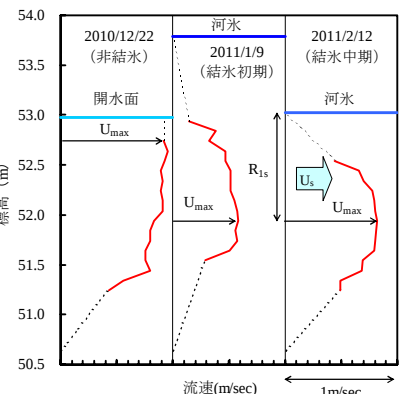


図-8 結氷期の鉛直流速分布

ここでは水位と河氷底面高の差を河氷厚とした。

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上昇である。結氷直後から河氷厚は1.2m程度で安定して推移しており、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の放流によって規則的に0.1～0.2m程度変動しており、河氷も連動して動いている。

図-8にADCPにより得られた流速分布を示す。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、図-8の流速分布では、結氷前は水面付近に最大流速  $U_{max}$  が発生し、結氷後は河水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分布であった。

## (2) 河氷形状測定結果

河氷形状測定日(2/16)と2日前(2/14)に実施した流速測定結果の鉛直平均流速分布を図-9に示す。いずれも完全結氷で表面すべてが河氷で覆われた条件である。

25m測線では流速が0.3m/sec弱と遅いが、河氷と河床の中間付近に最大流速をもつ流速分布を示す。85m測線は最大流速が0.7m/sec程度で、河氷と河床近傍では大きく流速が減衰しており、河氷の摩擦抵抗が大きいことが示唆される。

図-10に左岸からの横断距離25mと85mの河氷底面の形状を示す。流速の遅い25m測線では、河氷底面の凹凸は少なく、比較的平坦で、河氷形状に規則性はみられなかった。流速の早い85m測線では、流下軸方向に沿った縦列の溝が横断方向2m程度で明瞭に形成されており、25m測線より凹凸の変化が大きい傾向がみられた。また、いずれも上流から下流方向に河氷が薄くなる傾向がみられたが、流れによる測定時の測管の傾きなども影響するため、今後、誤差要因を精査する必要がある。今回の観測から、測定方法の課題が明らかになった。

## 4. 考察

河氷底面形状測定値の評価は、ADCPを設置した85m測線を対象として、河氷底面形状に影響を及ぼす流水近傍の相当粗度高  $k_s$  を仮想して比較した。

河川結氷時では、Manningの粗度係数  $n_0$  は河床底面と河氷底面の合成粗度となり、式(1)で示される。

$$n_0 = \frac{A_0 R^{2/3} I_e^{1/2}}{Q} \quad (1)$$

$A_0$  [m<sup>2</sup>] : 流水断面積,  $R$  [m] : 径深,  $I_e$  [無次元] : エネルギー勾配. 流速係数  $\phi$  [無次元] は式(2)で表される。

$$\phi = \frac{u_m}{u_*} = \frac{u}{\sqrt{g R I_e}} = \frac{1}{n_0 \sqrt{g}} R^{1/6} \quad (2)$$

$u_m$  [m/sec] : 平均流速,  $u_*$  [m/sec] : 摩擦速度. 平

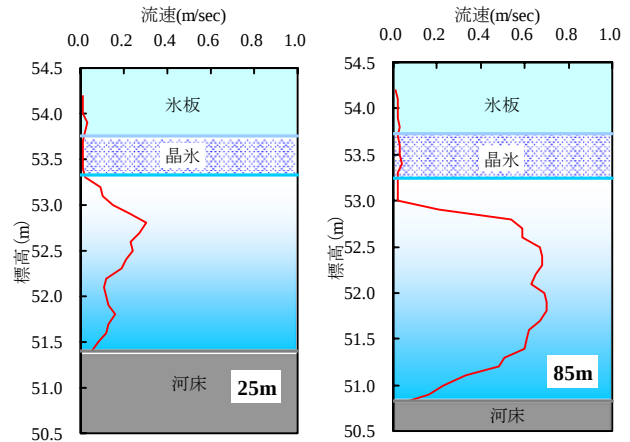


図-9 測定箇所流速分布

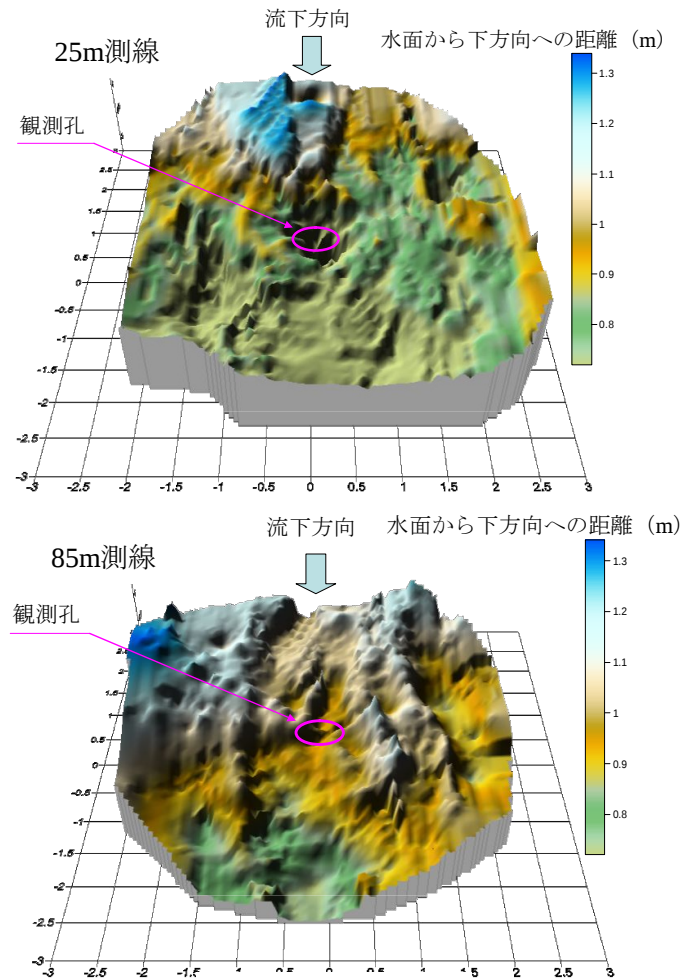


図-10 河氷底面形状

均流速  $u_m$  はADCPによる鉛直平均流速を用い、エネルギー勾配  $I_e$  は自記水位計による恩根内観測所と下流の恩根内橋(距離300mの直線区間)の水面勾配を用いた。

河川結氷時は流水と河床面、および流水と河氷面に摩擦抵抗によるエネルギー損失が生じていることから、管路流と仮定して検討できる。管路流のエネルギー損失はDarcy-Weisbachの式(3)で表される。式(3)を流速係数  $\phi$  で整理すると式(4)となる。ここで  $f$  [無次元] は摩擦抵抗係数、 $D$  は管路と想定した場合の管径で  $D=4R$  である。

$$I_e = \frac{f}{D} \frac{u_m^2}{2g} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{u_m}{u_*} = \sqrt{8/f} \quad (4)$$

河川結氷時の相当粗度高  $k_s$  は  $f$  と  $D$  の関係式 (5) で求められる。湧水流量を記録することの多い河川結氷時は、河床変動が無視できる程度に小さいと仮定すると、 $k_s$  は河氷の相当粗度高となる。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log_{10} \frac{7.40D}{2k_s} \quad (5)$$

図-11 に相当粗度高  $k_s$  の時系列変化を示す。相当粗度高  $k_s$  は結氷直後は 0.5～0.8m と一時的に高くなるが、時間の経過とともに低下し、2 月には 0.2m 程度を示した。図-12 に 85m 測線の河氷底面の縦横断形状を示す。図中の赤点で示した凹凸の高さと幅を図-13 にまとめた。横断・縦断ともに 0.4～1.4m 間隔に 1 個程度の凹凸があり、高さは大小含めて 0.04m～0.18m であった。これは、相当粗度高  $k_s=0.15$  と概ね一致する。しかし、本研究は 6m×6m の範囲内での結果であり、長周期の河氷形状も粗度係数に影響する可能性を考慮すると、今後は、広範囲に河氷底面の縦断形・横断形を調査する必要がある。

次に、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)

図-14 に水位と河氷底面高の差で算出した河氷厚と河氷粗度の時系列変化を示す。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。Andrew ら<sup>3)</sup> の ICETHK モデルでは、河氷粗度と河氷厚は相関関係にあるとしているが、今回は明瞭な関係はみられなかった。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、河氷底面がやわらかい晶氷で構成されることから、流水によって河氷底面形状が容易に変化しやすく、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。結氷下の粗度係数には河氷底面形状が重要な因子になることが考えられる。

## 5. まとめ

360°回転式の超音波機器によって、面的な河氷底面形

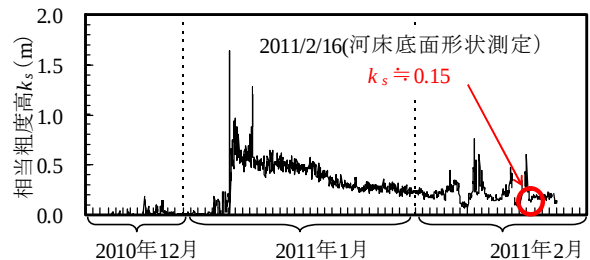


図-11 河川結氷時の相当粗度高の時系列変化

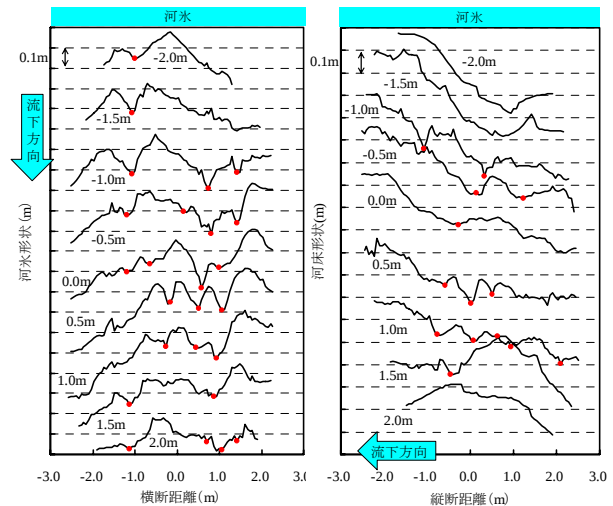


図-12 河氷底面縦横断

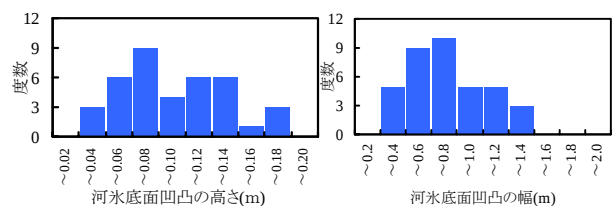


図-13 河氷底面凹凸の高さと幅

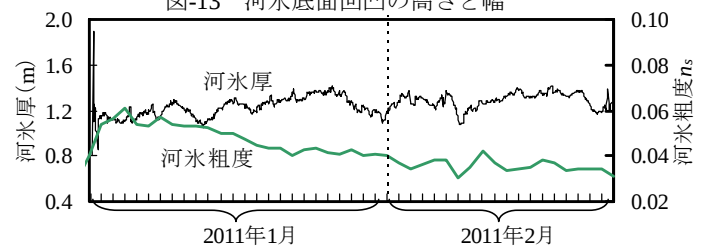


図-14 河氷粗度と河氷厚の時系列変化

状を測定することを可能とした。晶氷で構成される河氷底面形状は、流速が早いほど凹凸が多く、流下軸方向に明瞭な縦列の溝がみられた。結氷時の相当粗度高は、時間経過とともに低下する傾向がみられ、観測値と概ね一致した。河氷粗度は河氷厚とは明瞭な関係はみられず、河氷底面形状に起因すると推察された。

## 参考文献

- 1) 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，pp1075-1080，2010。
- 2) 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，pp365-370，2011。
- 3) Andrew M. Tuthill・James L. Wuebben・John J. Gagnon，ICETHK User's Manual version 1，Cold Regions Research & Engineering Laboratory，US Army Corps of Engineers，Special Report 98-11，1998。