

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

Observations on Behavior of thickness of the bottom of River ice and on Ice moving velocity during Ice Breakup

(株)福田水文センター
北海道フィールドサポート(株)
(独)土木研究所寒地土木研究所

○正 員 橋場 雅弘 (Masahiro Hashiba)
正 員 白井 博彰 (Hiroaki Shirai)
正 員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)

1. はじめに

寒冷地に位置する河川は、冬期の気温低下に伴い河道内に河氷が形成される。春先には、気温上昇により降雨や融雪が促されるため河川流量が増加し、河氷は融解および破壊されて下流へと流下し、橋脚箇所、蛇行部、狭窄部において河氷が滞留した場合には、急激な水位上昇を伴うアイスジャムが発生する可能性がある。解氷現象の解明には、詳細な現地観測が必要であるが、解氷時は多量の河氷が流下するため、現地に入り観測を実施することは危険を伴うため、非接触で連続的に解氷現象を観測する技術が望まれている。

解氷時の氷板厚については、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、氷板厚を非接触で連続的に測定する方法を示している。しかし、解氷時の氷板厚のみの観測であるため、水量と密接に関係する解氷時の河氷の流下速度は観測できていない。

結氷時の河氷底面の測定については、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⁾があり、時間経過とともに氷板厚は増加し晶氷厚は減少するが、合計厚さはほぼ一定を保っているという有益な知見が得られている。しかし、ADCP の測定値がどの晶氷濃度を測定しているかについての検証の必要性が示されている。一方、ADCP を用いて海水の移動速度を測定した既往研究⁴⁾があり、河川においても河氷の移動速度を測定することが可能であるかの検証が必要である。

本研究は、音響測深機と ADCP における河氷底面の測定値について、大型水槽を用いて検証を行うとともに、音響測深機と ADCP を実河川の河床に設置して解氷現象を観測した。さらに、ADCP による解氷時の河水流下速度の測定値の検討を行った。

2. 河氷底面測定の水槽実験

(1) 観測機器の機能

超音波ドップラー式流速計 ADCP は、Teledyne RD Instruments 社の WorkHorse Sentinel 1200kHz を用い、音響測深機は、(株)カイジョーの PS-20R 型 200kHz の精密小型音響測深機を用いた。本実験においてはこれらの機器の送受信面を水面方向に向けた設置方法とした。各観測機器の機能を図-1 に示した。

図-1 (a)において、ADCP のボトムトラッキング値は、4つの送信面から20°の角度で水面に向けて流速測定用の短いパルスとは異なる長いパルスを送り、河氷

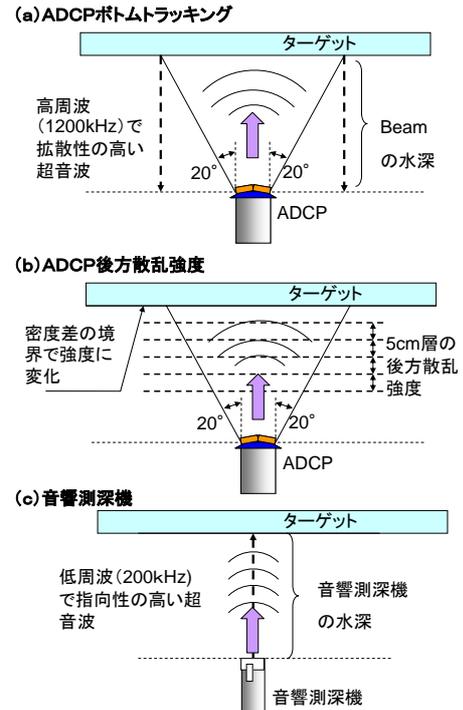


図-1 観測機器の機能

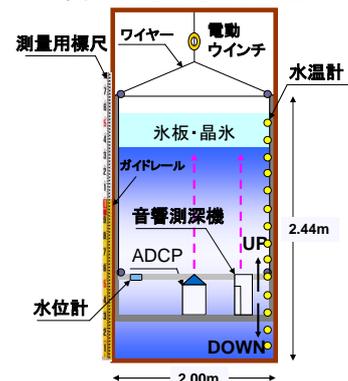


図-2 実験水槽の概要

底面からの反射波の受信により測定される距離である。

図-1 (b)における ADCP の後方散乱強度は、4つの送信面から照射された超音波の反射の強さを示し、水中の散乱体および氷板・晶氷との反射強度の違いによって水深を計測するものである。

音響測深機は ADCP の後方散乱強度と同じ測定原理のシングルビーム方式であり、図-1 (c)に示すように、水面に向かって機器から直上へビームを発信して、測定値が得られる。

(2) 実験条件

実験の条件は、水面に 1.2cm 厚のベニヤ合板を設置する条件、何も設置しない条件、水面に氷板を設置する条件、水面に氷板と氷板下に晶氷を設置する条件の 4 つの条件で実験を行い、晶氷は低密度、中密度、高密度の 3 パターンに分けて実験を行った。機器の測定深度は対象面より 0~2.0m の範囲で 0.2m 間隔で測定を行った。

ADCP の測定値は、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、音響測深機の測定値は、得られた値を水槽内の水温で補正して得た。直接計測値は、ベニヤ合板、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。

実験に用いた氷板と晶氷は、実河川の状況に近づけるために、以下のように調整して設置した。実験に用いた実験材料を表-1 に示す。

- ・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。氷板の密度は 0.961g/cm^3 である。
- ・低密度の晶氷は 1×1cm ふるいにかけて通過したものとし、氷板下に 40cm の厚さで設置した。晶氷の密度は 0.262g/cm^3 である。
- ・中密度の晶氷は自然に積雪しているものを使用し、氷板下に 40cm の厚さで設置した。晶氷の密度は 0.288g/cm^3 である。
- ・高密度の晶氷は 34×50×30cm の容器に雪を入れて締め固めて、重量が 35kg 以上になったものとし、氷板下に 40cm の厚さで設置した。晶氷の密度は 0.322g/cm^3 である。

(3) 実験施設

実験に用いた水槽の概要を図-2 に示す。水槽の大きさは、実験条件の氷板、晶氷の厚さ、計測機器の移動深度、照射角 20° の ADCP 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。

水槽の前面は、実験状況を確認するために 2cm 厚の透明塩ビ板とし、水槽底、左右と奥の側面は音波の異常反響防止対策として金属の使用は極力避けて、木製の 2.4 cm 厚の耐水ベニヤ合板とした。漏水防止のために 2.5mm 厚の透明塩ビシートを内張りし、水槽外周には断熱材などは使用せず、10cm 角材を外枠に用いて補強した。

計測機器は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する構造とした。

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。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 0.2m 間隔で 14 個設置した。

実験時には、ADCP と音響測深機を水槽内の昇降架台に設置し、電動ウインチにより目標深度に設定した。また、架台に水位計 ((株)ノースワン KADEC-MIZU 精度 $\pm 2\text{cm} : 0.1\% \text{F.S}/20\text{m}$) を設置して、目視の機器深度の検証用とした。

表-1 実験材料

No	実験材料	密度(g/cm^3)	厚さ(cm)
1	ベニヤ合板	密度(0.4~0.6)	1.2
2	水	密度(1)	—
3	氷板	密度(0.961)	15
4	氷板+晶氷(低密度)	氷板(0.961)+晶氷(0.262)	氷板(15)+晶氷(40)
5	氷板+晶氷(中密度)	氷板(0.961)+晶氷(0.288)	氷板(15)+晶氷(40)
6	氷板+晶氷(高密度)	氷板(0.961)+晶氷(0.322)	氷板(15)+晶氷(40)

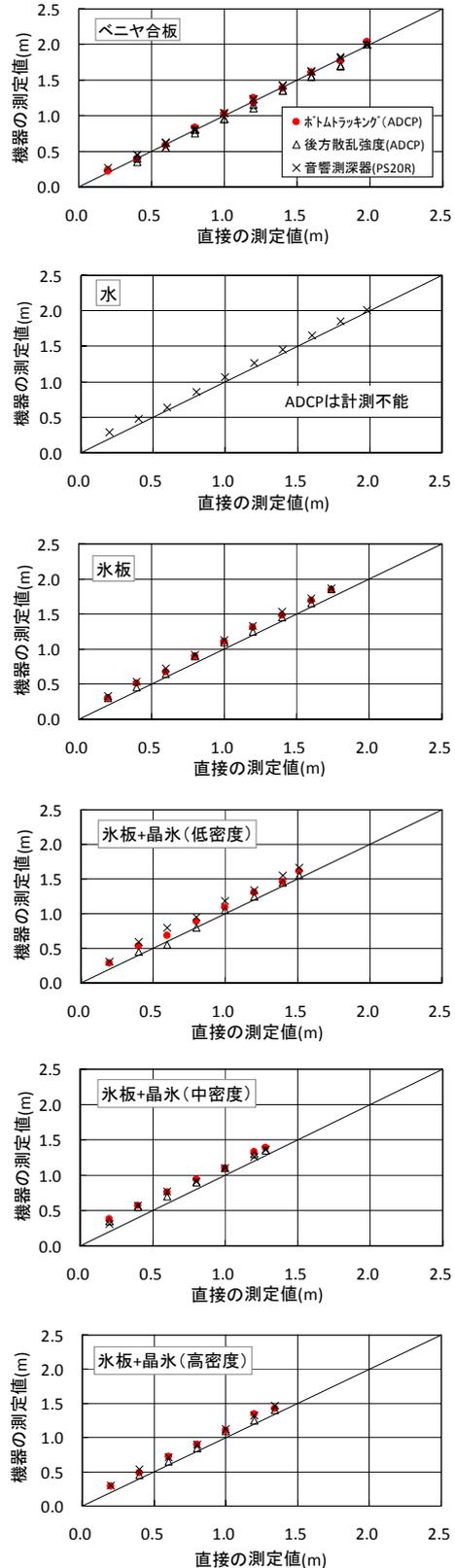


図-3 検証結果

3. 実験結果

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-3に示す。図-3より、板を設置した条件では、いずれの機器の測定値も直接の測定値と良く一致している。氷板、氷板+晶氷の条件の場合は、各機器の測定値は、直接の計測値よりも約10cm大きい。一方、水深変化に対する測定値の差異は一定である。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晶氷の下面を測定しているが、今回の実験からは、晶氷密度の違いによる各機器の測定値の明確な差はみられなかった。

氷板、氷板+晶氷の条件において、約10cmの差異が生じた原因として、水と河氷の境界層付近の密度差や、河氷底面の凹凸が超音波吸収などを引き起こすことが想定されるが、現時点では、これ以上の事は不明である。しかし、水深変化に対する測定値の差異は一定であることから、この値をオフセット値として設定することにより、氷板および晶氷の底面変動をより精度よく測定できることが示唆された。

ADCP から得られる4つのビーム値のばらつきを水深毎で整理して図-4に示す。図-4より、水深の浅い0.2mにおいてばらつきが大きい。この原因として、ADCPはビームの送受信が同じセンサーで行われているため、目標とする面が近く、センサー直近で反射されたビームが送信中に戻ってくると、受信できなくなるためと考えられる⁵⁾。また、ベニヤ板など硬い対象物に当たった場合もばらつきが大きく、強い反響音が閉鎖された水槽内では反射を繰り返すことが誤差要因になると考えられる。本実験により、ADCPのボトムトラッキングは通常モード(BM5/1200kHz)において、カタログ上の限界測定水深が0.8mとなっているが、氷板、晶氷を測定する場合には、0.8mより測定水深が浅くても測定が可能であることを示した。また、ボトムトラッキングには浅水域用モード(BM7/1200kHz)の設定があり、この場合は、0.3mから測定が可能であることから、今後、観測の精度を高める上で有効な手段であると考えられる。

4. 現地試験

水槽実験により音響測深機とADCPの機器の特性を把握したことから、実河川において、2009年2月初旬～4月上旬の期間で、これらの機器による観測を実施した。対象とする河川は天塩川とし、観測地点は、図-5に示す円山観測所(Kp30.00)と茨内観測所(Kp94.31)とした。また、河氷の上を測定するために、積雪深計(SDM-301S、新潟電気株式会社)を用いて積雪面の観測を実施した。

図-6に観測結果を示す。図-6より、水位の変動に合わせて、ADCPのボトムトラッキング値と音響測深機の測定値の変動が一致している。このことは、河氷は河岸に固定されておらず、水位の上下変動に合わせて変動していることを示している。

また、河氷の厚さである雪面から河氷底面の厚さをみると、流速が増加すると河氷厚が薄くなる傾向がみられる。また、河氷厚がゼロとなる時点は、水位と河氷底面が一致した時点であり、解氷を示している。

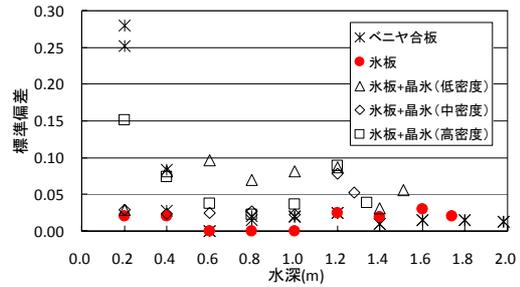


図-4 ADCP ボトムトラッキングのばらつき



図-5 現地試験箇所

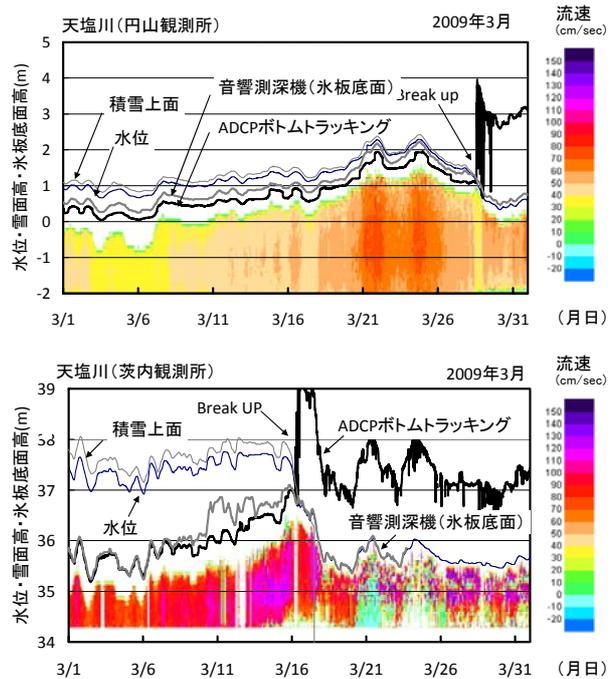


図-6 現地試験結果(上:円山,下:茨内)

図-6より、ADCPボトムトラッキング値と音響測深機の測定値の差異をみると、円山観測所で結氷時に約0.2m、茨内観測所では流速が増加する時期から差異が生じている。この理由として、ADCPは照射角20°の範囲で平均水深を測定するのに対して、音響測深機は直上の1点であるため、流速の増加による河氷の融解などによって河氷が変動し、河氷底面の凹凸が平面的に大きくなることが推察される。このような差異が生じるものの、ADCPと音響測深機を使った非接触型観測は、危険を伴う解氷時の現象を連続的に観測しており、現象の把握という観点において有用性が高いと言える。

4. 河水の流下速度の測定

ADCP はボトムトラッキング値により、自体の移動速度を測定することが可能である。これは、相対的な速度であり、ADCP が固定している場合は、目標とする面の移動速度を測定することになる。本検討では、ADCP による解氷時の河水の流下速度の測定を目的として、目標とする面の移動速度と河水の流下速度の関係について、Ashton⁶⁾ による河水の流下速度の理論値と観測値との比較から、ADCP の測定値の妥当性の検討を行った。

観測した ADCP の河水の流下速度を図-7 に示す。図-7 より、円山においては、解氷前は河水に動きがないが、解氷直前に大きく河水が動いていることが分かる。一方、茨内は解氷まで水位の上昇にあわせて常に河水の動きが観測されている。この理由として、茨内においては、柔らかい晶氷が氷板下に多く存在していることから、水位昇降や流速の増減により、晶氷が移動していると推察できる。また、図-7 から、河水の流下と水位の降下のタイミングが一致している。これは、出合ら⁷⁾ により、河水の流下時と観測水位の降下時の一致が確認されていることから、ADCP による河水の流下観測の妥当性が確認できる。なお、茨内では、解氷直後に ADCP 架台の転倒によりデータ欠測が生じている。

Ashton⁶⁾ は、解氷時のメカニズムの解明には、氷破片が氷板下に潜り込む速度を把握することが重要であるとの立場から、氷板の厚さの影響を考慮した式(1)で示されるフルード数 Fr を解氷時における主要なパラメータとしている。

$$Fr = \frac{Vc}{\left[gt\left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right)\right]^{1/2}} \quad (1)$$

ここで、 Vc : 結氷直上流の流速、 t : 氷破片の厚さ、 H : 結氷直上流の水深、 ρ : 水の密度、 ρ' : 氷板の密度である。本検討では、 ρ は $1g/cm^3$ 、 ρ' は 2009 年 3 月 10 日の実測値より $0.6g/cm^3$ とし、 Vc 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 は積雪上面から氷板下までの厚さとし、 H は水位から河床高を引いた値とした。一方、式(1)は、 t と H を用いて以下のように表せる。

$$Fr = \frac{2(1-t/H)}{\left[5-3(1-t/H)^2\right]^{1/2}} \quad (2)$$

河水の移動速度が大きい茨内観測所を対象に、観測値を式(1)に代入して求めたフルード数を縦軸にとり、横軸に観測値を用いて t を H で割った値をとって図-8 に示す。図-8 には式(2)を理論値としてプロットしている。

図-8 より、観測値は理論値との平均誤差±偏差が 0.02 ± 0.04 と良く一致していることから、ADCP による河水の流下速度の測定値の妥当性が確認された。

5. まとめ

解氷時の河水の底面変動を観測する手法の一つとして、ADCPによる観測は、水槽実験結果と現地観測結果から、その有効性が高いことが示された。とくに、ADCPのボトムトラッキング値により、結氷時のみならず解氷時の河水の流下速度を測定可能であることが示唆された。

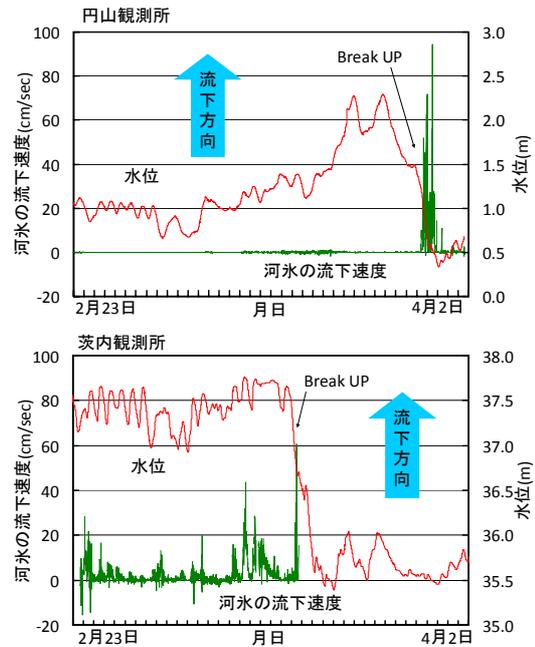


図-7 河水の流下速度

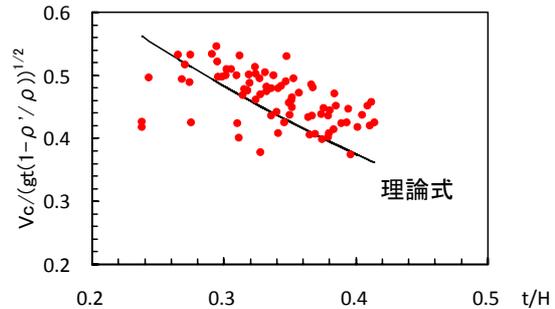


図-8 フルード数と氷厚の関係

謝辞：

本研究は、北海道開発局より資料提供のご協力を頂きました。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) 木岡信治・山本泰司・本間大輔：北海道オホーツク海沿岸における海水の喫水深と下面形状-2004 年観測結果-，北海道開発土木研究所月報，No630，2005。
- 5) 二瓶恭雄・色川有・井出恭平・高村智之：超音波ドップラー流速分布計を用いた河川流量計速法に関する検討，土木学会論文集 B Vol.64 No2,pp99-114，2008。
- 6) George D. Ashton : Froude criterion for ice-block stability, Journal of Glaciology, vol.13, No.68, 307-313, 1974.
- 7) 出合寿勇・吉川泰弘・尾形寿：天塩川における解氷現象に関する現地観測，第 25 回寒地技術シンポジウム，pp184-189，2009。