

天塩川における 解氷現象と気温の関係について

寒地土木研究所 寒地河川チーム 吉川 泰弘
北見工業大学 社会環境工学科 渡邊 康玄
寒地土木研究所 寒地河川チーム 平井 康幸

結氷河川の河川管理を行う上で有益となる解氷現象の知見を得るために、氷板厚を非接触で連続測定し、解氷に至るまでの気象、水理条件について検討を行った。今回の天塩川円山観測所での解氷現象は、気温の上昇のため雪が雨に変わり流量が増加し、上流において解氷が起き、河水および流水が下流の円山観測所へと流下するため流量を増加させ、氷板下の流速が速くなるため氷底面の融解が促され氷板厚が薄くなり、水位上昇に伴い氷板の強度が弱まり解氷へと向かう事が現地観測および数値計算から推定された。

キーワード：結氷河川，氷板厚，音響測深機，積雪深計，解氷，気温，天塩川

1. はじめに

結氷河川の解氷 (Breakup) 現象は、融雪や降雨により河川流量が増加し、河道内の河水が融解および破壊され下流へと流下する現象であり、流下した河水は蛇行部、狭窄部または橋脚箇所滞留しアイスジャムを引き起こす¹⁾可能性がある。このため解氷現象に関する知見は、結氷時の河川管理を行う上で有益と考えられる。

既往の解氷現象に関する研究は、解氷時の水温の観測²⁾や解氷の始まりから終わりまでを平面的に観測³⁾した研究があり、解氷時に水温が上昇する事や河水が細分化して解氷する等、いずれも有益な知見が得られている。一方、解氷時の氷板厚は解氷現象の規模の大きさに影響すると考えられるが、観測自体に危険を伴う事もあり研究事例は少なく、現在、解氷時までの氷板厚の挙動は十分には解明されていない。また、解氷が始まる主な要因については、気温の上昇が考えられるが、現在、十分には検討されていないため、解氷現象と気温の関係についての検討が必要である。

本研究は解氷現象を解明するための第一歩として、氷板厚の挙動を解明するために雪面高と氷底面高を非接触で連続的に測定し、氷板の変動および解氷に至るまでの気象、水理条件を明らかにする事を目的としている。

2. 現地観測

雪面高と氷底面高を測定した観測地点は図-1に示す北海道北部に位置する天塩川の円山観測所 (KP30.00) とし、観測期間は河水で覆われている結氷時から解氷後の 2008 年 2 月 5 日 13:00 から 3 月

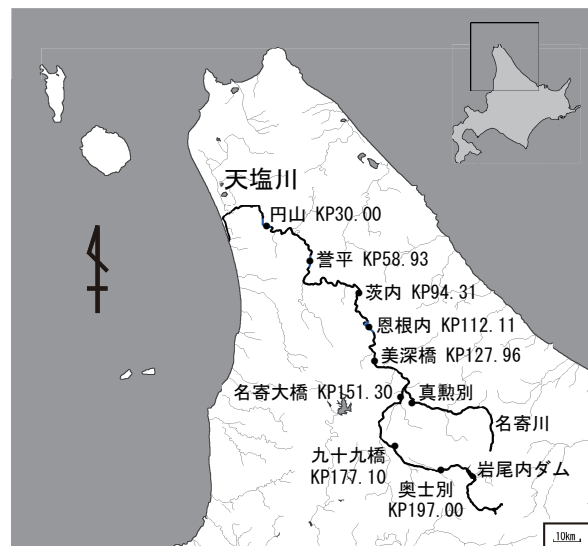


図-1 天塩川における観測地点

25 日 13:00 の 49 日間とした。

氷底面高は音響測深機を用いて測定しており、現地観測に先立って音響測深機で氷底面高が測定可能かどうかの実験を行った。

(1) 観測項目

円山観測所における測定機器の設置位置を図-2に示し、設置状況を写真-1に示す。雪面高の測定は左岸から 60 m 地点に設置した積雪深計 (SDM-301S, 新潟電機株式会社, 測定精度 3m 以下 $\pm 1.5\text{cm}$, 3m 以上 $\pm 2.5\text{cm}$) を用い、氷底面高の測定は左岸から 65 m 地点の河底に設置した音響測深機 (PS-20R 型, 200kHz, 株式会社カイジョ, 測定精度 $\pm (3\text{cm} + \text{深度} \div 1000)$) を用いて 1 時間毎に行った。また、定期的に雪面高と氷底面高を直接観測する横断測量を行った。音響測深機で測定した河水の状態は、横

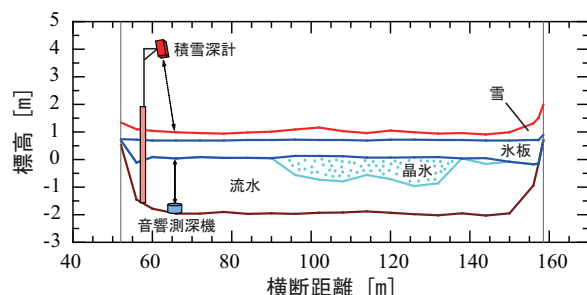


図-2 円山観測所における測定機器設置位置と横断測量結果 (2008/2/26)

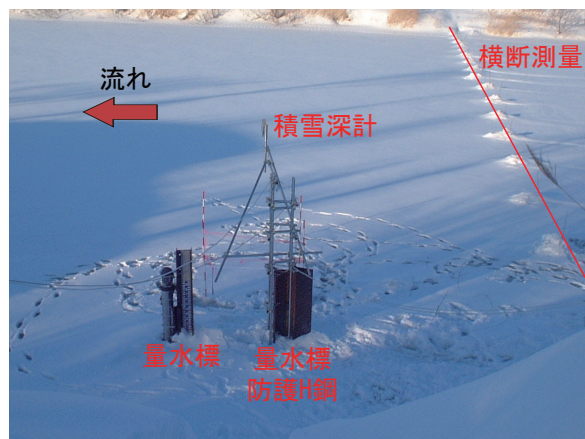


写真-1 円山観測所における測定機器設置状況

断測量の結果より、晶氷ではなく、測定期間中いずれも氷板であった。

観測地点より 250m 上流の地点においては、10 分毎に気温、風向風速および水温の観測を実施し、観測地点より上流の誉平観測所 (KP58.93) と恩根内 (KP112.11) においても観測を実施した。水位は国土交通省の水文・水質データベースの時刻データを用い、降雪深と降水量データは気象庁のアメダスのデータを用いた。また、KP とはキロポストの略で河口からの距離 [km] である。

(2) 雪氷底面測定実験

河川の河床測定で用いられる事が多い音響測深機で、雪および氷の高さを測定可能かどうかを明らかにするために雪氷高測定実験を行った。実験状況を写真-2 に示す。実験は水で満たした透明塩ビ製円筒容器 (直径 0.2m) の底部に音響測深機を設置し、水面に雪 (晶氷を想定) および氷を投入し筒上部から棒で押し沈めて、センサーから雪氷底面までの距離を 0.4m から 1.9 m まで変化させて実験を行った。

音響測深機の記録紙のチャート高 (測定値) と実測値の相関図を図-3 に示す。図-3 より、雪と氷の明確な判別は困難であるが、氷の方が雪よりも測定値と実測値の相関が高い。また、雪と氷の測定値と実測値の相関係数は 0.99 と高い相関が得られたことから、音響測深機は雪および氷の高さを精度良く測定可能である事が実験結果より明らかとなった。

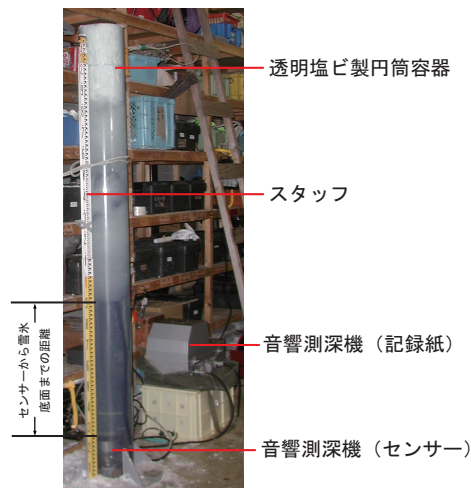


写真-2 音響測深機の雪氷底面測定実験

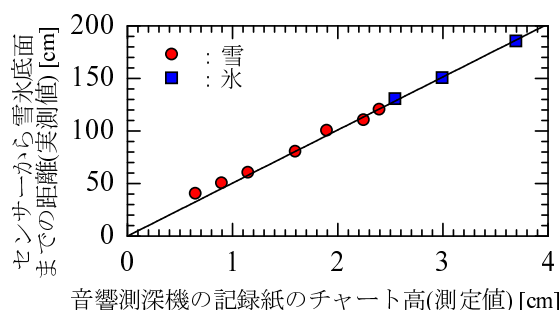


図-3 音響測深機の測定値と実測値の相関図

3. 雪面高と氷底面高の測定結果

測定機器および横断測量による雪面と氷底面、水位と気温を図-4 に示す。横軸は 2008 年 1 月 1 日 0 時を 0 日とした経過日数としている。また、測定機器の測定値と横断測量の観測値との比較を図-5 に示す。図-5 より測定値は観測値と良く一致しており、誤差範囲は $\pm 20\text{cm}$ 程度であった。

図-4 における 43 日目と 54 日目の雪面高の上昇、67 日目から 72 日目の水位の下降および上昇、72 日目から 81 日目までの水位の上昇、解氷時の水位と水温の関係、氷板厚の変動要因についての考察を行う。

(1) 積雪深の変動

43 日目と 54 日目の雪面高の上昇の要因として、氷板上の積雪深の増加が考えられる。連続測定した雪面高と氷底面高のデータを用いて、氷板の比重を 0.9 と仮定し式 (2) より積雪深を算出した。図-6 に算出に用いた測定値の概要図を示す。

$$h_i = (WL - IL)/0.9 \quad (1)$$

$$h_s = SL - (0.1h_i + WL) \quad (2)$$

ここで、 $h_i[m]$: 氷板厚、 $h_s[m]$: 積雪深、 $SL[m]$: 雪面高、 $WL[m]$: 水位、 $IL[m]$: 氷板底面高である。

算出した積雪深、風速および宗谷支庁豊富観測所の 1 日の合計降雪深を図-7 に示す。図-7 より、43

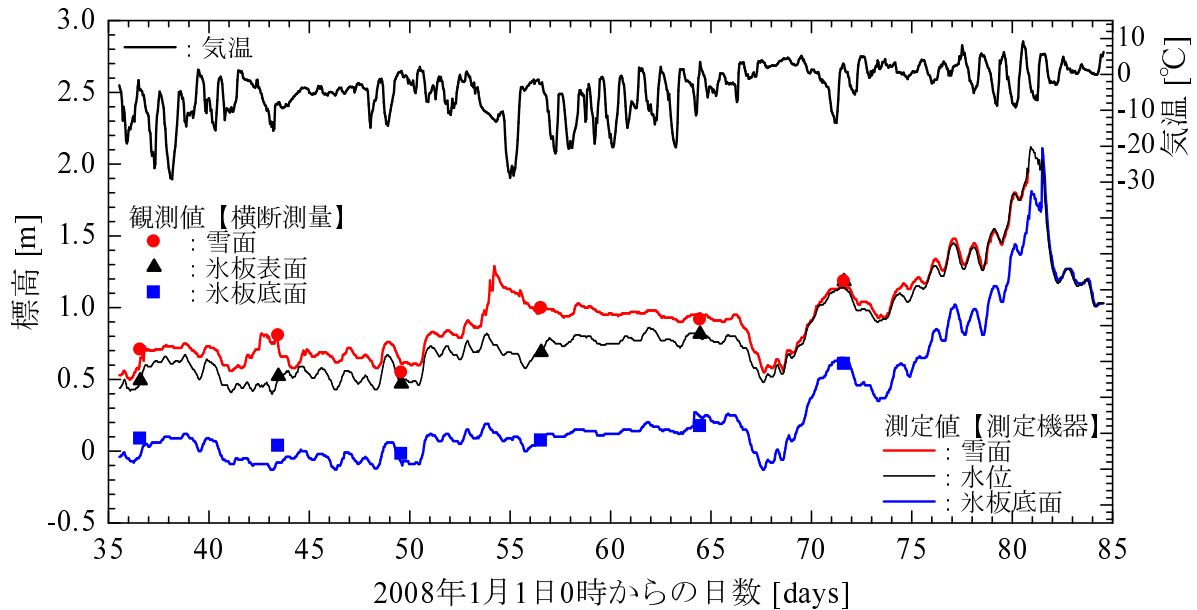


図-4 円山観測所 (KP30.00) における雪面高，氷底面高および水位，気温の経時変化

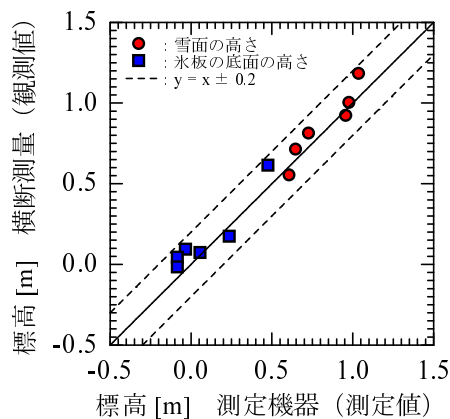


図-5 測定機器の測定値と横断測量の観測値との比較

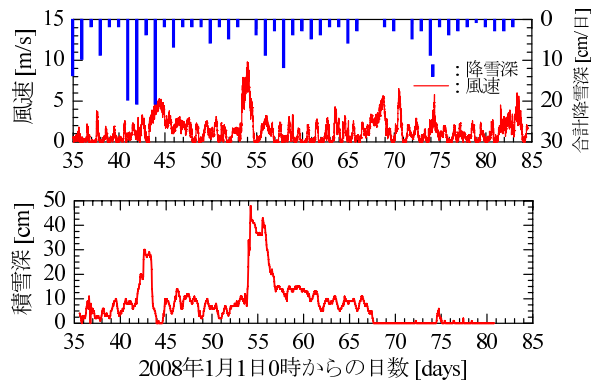


図-7 風速と降雪深，積雪深の測定値

(2) 水位の経時変化

図-4 における 67 日目から 72 日目の水位の下降および上昇，72 日目から 81 日目までの水位の上昇の要因として，上流および気温の影響が考えられる。天塩川の縦断的な水位の経時変化を図-8 に示す。本研究の観測地点は円山 (KP30.00) である。図-8 には水温とアメダスデータの一日の合計降水量をデータが存在する地点において合わせてプロットした。

気温については，各地点の積算暖度を図-9 に示す。積算暖度とは計算開始日からプラスの気温を積算した値であり，アメダスデータの 1 時間毎の気温を用いて算出した。ここで，縦断的な積算暖度の違いを見ると，図-9 より天塩川の中流に位置する名寄地点と美深地点が上流，下流に比べて気温の上昇が大きい事が分かる。

天塩川の結氷状況について，定期観測結果より，上流側の奥士別，九十九橋，名寄大橋では非結氷であり，美深橋では部分結氷である。下流側の恩根内，誉平，円山は完全結氷という状況である。これらの要因の一つとして，南に位置する士別市，名寄市，美深町と都市があるため，水温が高くなり結氷しず

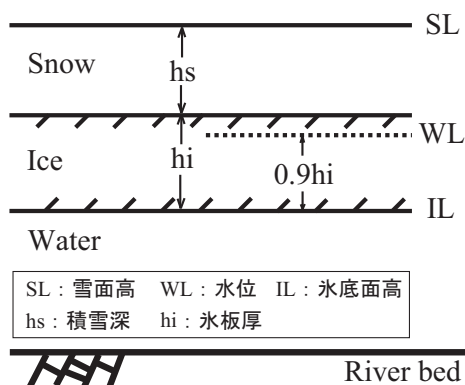


図-6 測定値の概要図

日目は前日に 20cm を超える降雪がある事から降雪による積雪深の増加と推察出来る。54 日目は降雪が少なく風速が観測期間内最大の 9.8m/s を記録している事から，強風により測定地点に雪が吹き溜まり，積雪深が急激に増加したものと推察出来る。測定結果より，氷板上の積雪深の増加は，降雪のみならず風の影響を強く受ける事が示唆された。

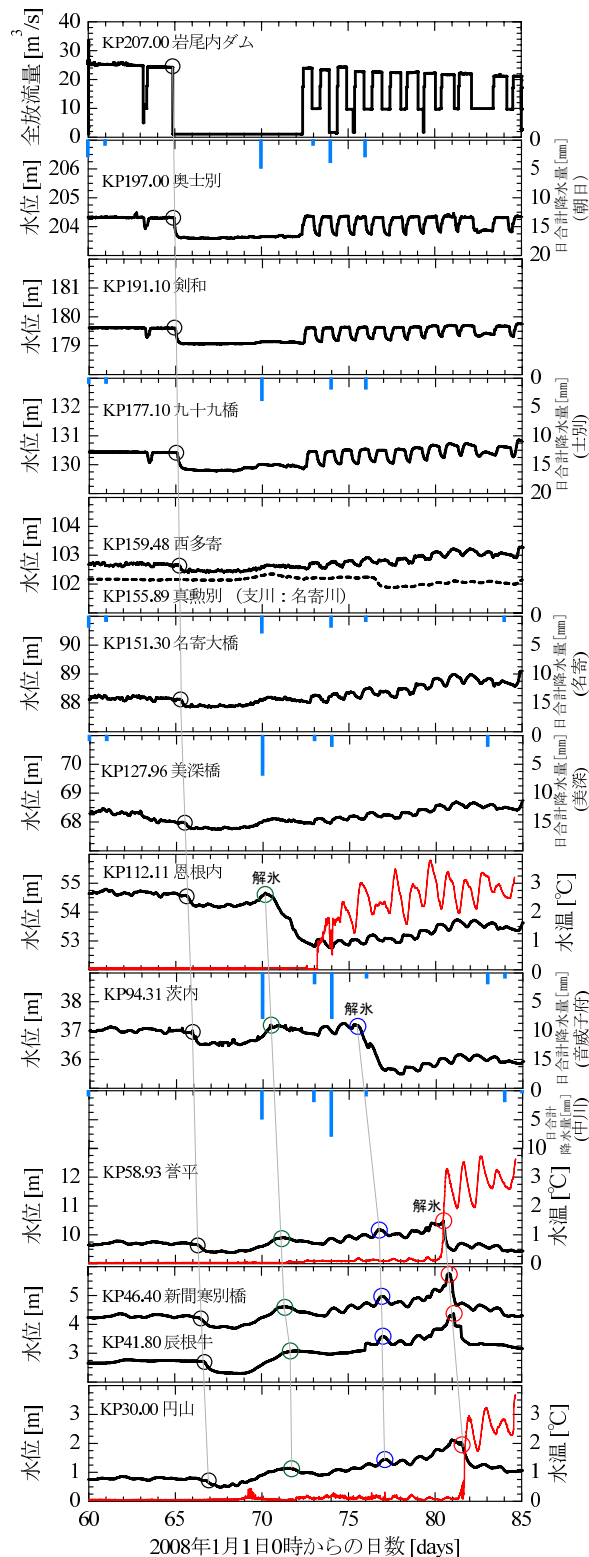


図-8 天塩川の縦断的な水位の経時変化と水温，降水量

らい事が考えられる．しかし，気温や地形等の要因も考えられる事から，現在，要因の特定には至っていない．

67日目からの水位の下降について，図-8の岩尾内ダムにおいて，約65日目(3月5日21時)に全放流量がゼロとなっており，この影響は55.7km下流の名寄大橋では約9時間後に現れ，112.69km下流

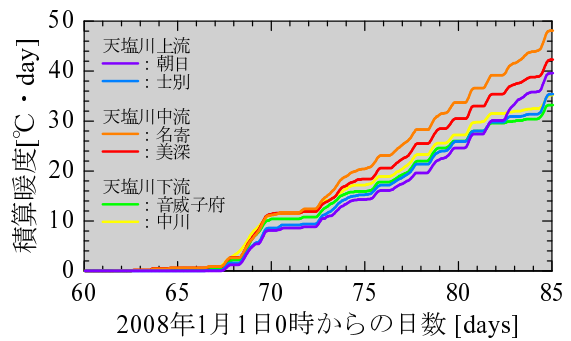
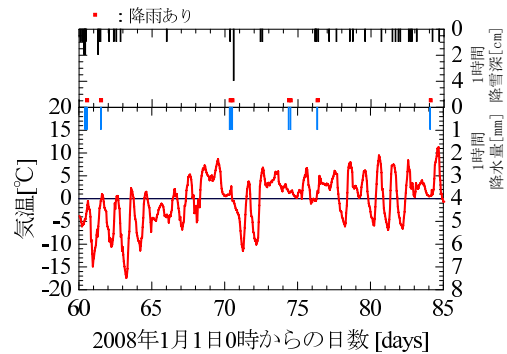
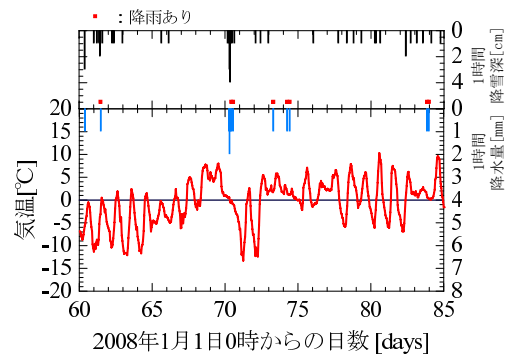


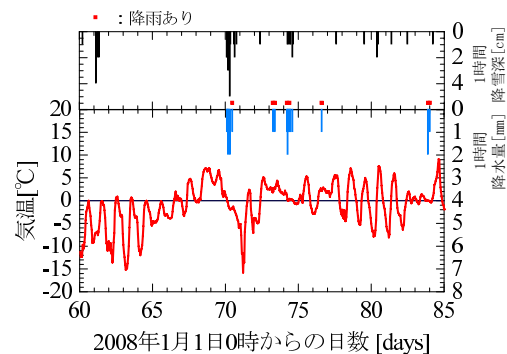
図-9 各地点の積算暖度



a) 名寄地点



b) 美深地点



c) 音威子府地点

図-10 1時間毎の気温，降水量，降雪深の経時変化

の茨内では約25時間後に現われている．この伝搬速度は名寄大橋で約1.7m/s，茨内で約1.3m/sであった．この事から円山観測所における67日目からの水位の下降は，岩尾内ダムの全放流量がゼロとなった影響と推察できる．なお，円山観測所までの伝搬速度は，この地点が潮汐の影響を受ける感潮区間で

あるため算出していない。全放流量がゼロとなった原因は、例年ならばこの期間は発電放流がなされているが、今回の対象期間である 2008 年 3 月 5 日から 13 日に発電施設の修理があり、一時的に稼働していなかったためである。

72 日目までの水位の上昇について、流量の増加が原因として考えられる。図-9 より 70 日目付近で積算暖度が上昇しており、図-8 より 70 日目に上流において降水量があることから、降雨による流量の増加が推察される。

しかし、図-8 の気象庁のアメダスデータである降水量は、ある時間内に降った雨や雪などの量であり、雪などの固形降水の場合は溶かして水にした時の量となるため、図-8 の降水量が雨が雪かを明らかにする必要がある。降雪深を観測している名寄、美深、音威子府地点において、1 時間毎の気温、降水量、降雪深を図-10 に示す。降水量を F_w 、降雪深を F_s として、下記の条件より降雨の有無を判断し、降雨がある場合は図-10 に図示した。

$$[\text{降雨あり}] \quad F_s = 0 \quad \text{and} \quad F_w > 0$$

図-10 から、70 日目に雪ではなく雨が降った事が分かる。雨が降る一方で、図-8 の恩根内において 70 日目に水位の急激な下降が観測されている。降雨により流量が増加したため河水が融解および破壊され、今まで存在していた河水が下流へと流下したため流積が広くなり、水位が急激に下降したと推察できる。また恩根内で解氷が起こると、河水および流水が下流へと流下し、河水が下流で滞留すると流積が狭められ、かつ流量が増加するため、下流の水位が上昇する事が推察できる。

以上の考察から、今回の観測地点の円山における 72 日目までの水位の上昇の原因は、気温が上昇し降雪が降雨に変わった事により上流の流量が増加し、恩根内地点で解氷が起きたため、河水および流水が下流へと流下し、下流に位置する円山において河水により流積が狭められ、かつ流量が増加したことにより、水位が上昇したと推察できる。

72 日目から 81 日目までの水位の上昇については、恩根内の解氷と同様に、図-8、図-10 より、74 日目の降雨および茨内の解氷、誉平の解氷に伴って、水位が上昇したものと推察できる。

(3) 解氷時の水位と水温の関係

図-8 には、恩根内、誉平、円山において測定した水温データも示している。図-8 から、解氷時の水位と水温を見ると、誉平と円山は解氷後すぐに水温が高くなっているのに対して、恩根内は解氷後遅れて水温が高くなっている。ここで言う解氷は、水位が急激に下降した時期としている。

恩根内で水温上昇が遅れた原因として、図-10b), c) の恩根内の上流の美深地点、下流の音威子府地点で、解氷後の気温はマイナスとなっている事より、恩根内でも気温はマイナスであると仮定すると、大気と水面での熱交換が小さいため水温が上昇しなかったと推察できる。また、水温計は河床に設置しており、恩根内は平均水深約 1.5m に対して、誉平で約 1m、円山で約 0.5m であり、恩根内は誉平と円山に比べて水深が深いため、大気からの放射量の直達の時間差による水温上昇の遅れが推察できる。原因の特定には、熱交換を考慮した更なる検討が必要となるが、恩根内で水温上昇が遅れた原因として、気温が低い事と水深が深い事が上げられた。

円山の水温上昇について、水位と氷底面高が一致する 81 日目 (解氷時) の 3 月 22 日 12 時で 0.37 であった水温が、3 月 22 日 23 時には 2.98 と 11 時間で 2.6 の上昇を記録している。また、誉平においても解氷後に急激に水温が上昇している。今回の観測した 3 地点において、いずれも解氷後には水温が上昇しており、この原因として、解氷により氷板が流下するため大気と水面で熱交換が直接行われ、水温が気温より低いため、河川水が暖められ水温が高くなったと推察できる。なお、水温が気温より高い結氷初期においては、熱交換により河川水が冷やされ水温が低くなる。

(4) 氷板厚の変動要因

氷板厚の変動要因を明らかにするために、式 (1) より氷板厚を算出した。算出した氷板厚、連続測定した雪面から氷底面までの厚さと、気温、水位、水温を入力値とする氷板厚の数値計算結果を図-11 に示す。

数値計算モデルは、観測結果より気温が上昇するにつれて水温と流量が増加し氷底面の融解が示唆されることから、気温が上昇し始める 66 日目を境にして数値計算モデルを変える事とした。66 日目は、積算寒度を独立変数とする Stefan の式 (3) を用い、66 日目後は、氷底面の融解を表す Spyros⁴⁾ の式 (5) を用いた。

$$h_i = h_{i0} + \alpha \sqrt{S} \quad (3)$$

h_i [m]: 氷板厚, h_{i0} [m]: 計算開始時の氷板厚, α : 定数, S [°C·day]: 計算開始からの積算寒度である。 α は 0.012 であり試行錯誤を行い決定した。

$$h_i = h_{i0} - M_r / 100 \quad (4)$$

$$M_r = 56.3 (U^{0.9} / y^{0.1}) T_w \quad (5)$$

M_r [cm/day]: 融解速度, U [m/s]: 平均流速, y [m]: 河床から氷底までの水深, T_w [°C]: 水温である。平均

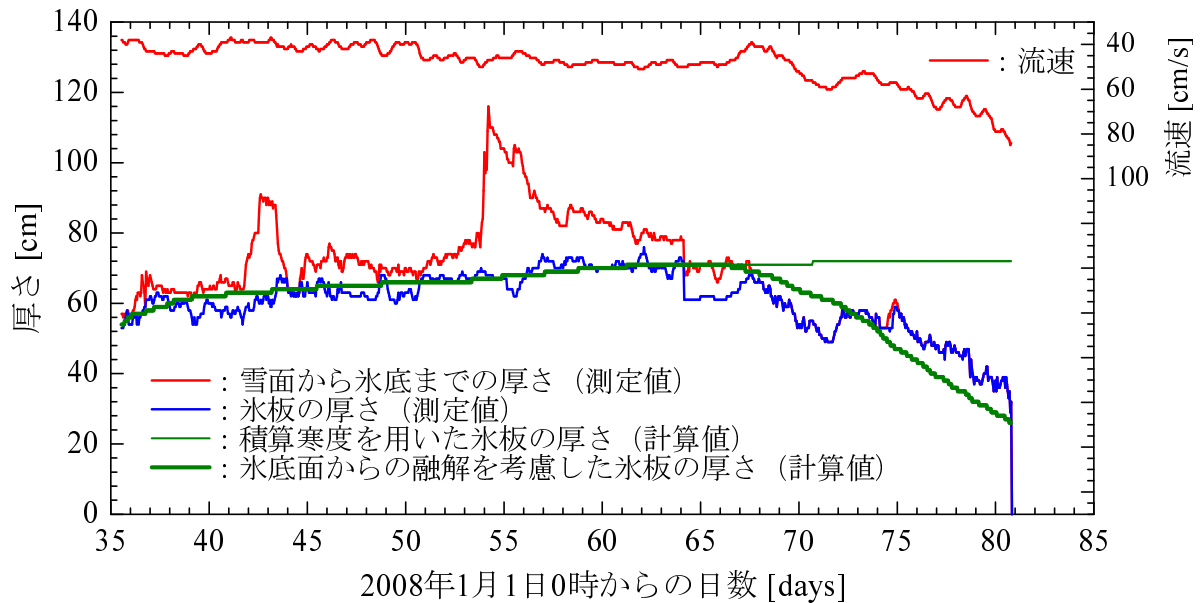


図-11 氷板の測定値と計算値

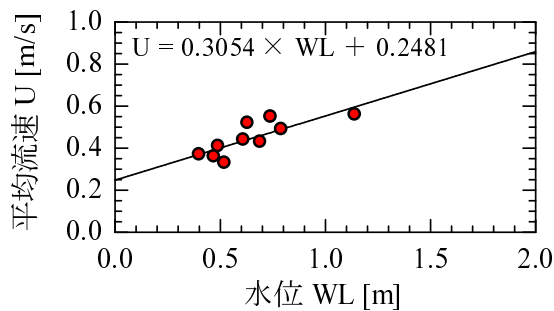


図-12 水位と横断面平均流速の関係

流速は連続的に測定していないため、流量観測データより図-12に示す水位と平均流速の相関式を導き、この式を用いて連続水位データから平均流速を算出した。ここで、平均流速は横断面における平均流速である。

図-11より測定値と計算値は良く一致している。このことから氷板厚の変動要因は、66日目より以前は気温による影響が大きく、66日目以降は流速と水温による氷底面の融解の影響が大きい事が数値計算結果から推定できる。しかし、今回の検討は氷底面の融解のみを考慮しており、大気と氷板の熱交換による氷板の表面の融解を考慮していないため、氷板厚の減少要因についてはさらなる検討を要するが、氷底面の融解を考慮した数値計算結果が測定値と一致する事から、氷底面の融解は氷板表面の融解よりも氷板厚の減少に寄与する事が推察できる。

4. まとめ

本研究は解氷時までの氷板厚の挙動を解明するための第一歩として、雪面高と氷底面高を積雪深計と音響測深機を用いて非接触で連続的に測定を行った。

室内実験結果より、音響測深機で雪および氷の高さを測定可能である事を示し、氷の方が雪よりも精度良く再現できる事が明らかとなった。

現地観測結果より、積雪深の変動要因について、増加に関しては降雪のみならず風の影響が無視できない事が示唆された。今回の対象とした結氷時の水位の経時変化については、ダムからの放流量、降雨による流量の増加、解氷による水位の上昇が要因となる事が分かった。解氷後の水温に関しては、氷板が流下するため大気と水面で直接、熱交換が行われ、水温が気温より低い解氷後では、河川水が暖められ水温が高くなる事が推察された。

今回の円山観測所での解氷現象は、気温が上昇し降雪が降雨に変わった事により上流の流量が増加し、上流で解氷が起きたため、河水および流水が下流へと流下し、下流に位置する円山において流量が増加し、流速が速くなるため氷底面の融解が促されて氷板厚が薄くなり、水位の上昇とともに氷板の強度が弱まり解氷へと向かう事が現地観測および数値計算から推定された。

解氷現象と気温の関係については、今回の研究により解氷現象における気温の上昇は必要条件であり、気温は解氷現象が始まる時期と密接に関係する事が予見された。

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、(株)福田水文センターより観測等の御協力を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) H.T.Shen, 山崎誠, 星清, 渡邊康玄, 平山健一: 渚滑川のアイスジャミングの検討, 第15回寒地技術シンポジウム, pp.370-375, 1999.
- 2) 山崎誠, 笠井秀男, 杉田誠, 平山健一: 河川結氷の解氷と水温の関係について, 第16回寒地技術シンポジウム, pp.518-524, 2000.
- 3) 原文宏, 高橋良正, 佐伯浩, 山口甲: 天塩川の”Break-up”現象の現地観測, 第10回寒地技術シンポジウム, pp.456-461, 1994.
- 4) Spros Beltaos: RIVER ICE BREAKUP, Water Resources Publications LLC, pp125-166, 2008.