

報告書概要

技術研究開発課題名	地域課題分野（河川）
技術研究開発テーマ名	結氷河川における晶氷の発生予測と取水障害対策の開発
研究代表者	
氏名	所属・役職
吉川 泰弘	北見工業大学社会環境工学科・助教
共同研究者	
氏名	所属・役職
黒田保孝	寒地土木研究所・主任研究員
阿部孝章	寒地土木研究所・研究員
川村里実	寒地土木研究所・研究員
【1】背景・課題	
<p>寒冷地の河川では、気温の低下に伴い河道内に河氷が形成され結氷する。河氷は、硬い氷板と軟らかい晶氷に大別できる。形成された河氷は、河道内を流下および河道内に堆積する。一方で、寒冷地の河川では、河川結氷時においても流水を取水している。河道内を流下する晶氷が、取水口に堆積および閉塞すると、冬期の取水障害が発生する。特に、寒冷地の北海道では、生活用水および工業用水の水源は河川水が93%を占め、全国と比べて河川水への依存度が高いこともあり、冬期の取水障害が課題となっている。</p> <p>現状把握のため、2014年6月から11月の期間において、寒地土木研究所が中心となり著者らとともに、道北道東地域の河川水を取水している市町村へ聞き取り調査を実施したところ、聞き取り調査が実施できた35市町村の内、37%にあたる13市町村が、河川結氷時の冬期取水において課題があるとの回答を得た。諸外国においても、冬期の取水障害の事例が報告されている。</p> <p>寒冷地河川の晶氷の発生、流下、堆積による晶氷変動現象および冬期の取水障害対策について、既往研究の結氷河川現象のフロー図、現地観測および聞き取り調査に基づき整理したものを図-1に示す。図-1の上流域の晶氷発生については、開水面が存在し気温が零下の条件において、層流では薄氷が形成され、乱流では晶氷が形成される。水温が零下で降雪があれば、降雪は河川内に供給される。河床材料周りに氷が形成されればアンカーアイスとなる。アンカーアイスは、水温の上昇や流速の増加により、河床材料から剥がれて、水よりも軽いため河川水面に浮上する。水温が零下で河川近傍で吹雪があると、陸地の積雪は巻き上がり、これらの雪は河川内に供給される。水温が零下で河川近傍で雪崩があると、これらの雪は河川内に供給される。これらの河氷は形成要因によって呼称が異なるが、本研究では総称して晶氷と呼称する。図-1の下流では、上流で発生した晶氷が開水面および結氷面に流下し晶氷が堆積する。</p> <p>晶氷の発生に関して、既往研究では、海氷を対象とした低温室内実験により、室温が低く風速が速いほど晶氷が多く発生することを定量的に明らかにしており、特に風の影響が大きいことを指摘している。晶氷発生については室温の影響が大きく、晶氷の粒径の大きさについては流速の影響が大きいことを明らかにしている。また、26,470以上の観測データから、晶氷の平均粒径は、3.15mmであり、晶氷の粒径の大きさは、乱流状態の時間経過に影響を受けることを指摘している。晶氷の発生に関して気温と風速が影響を与えることが分かっている。</p>	

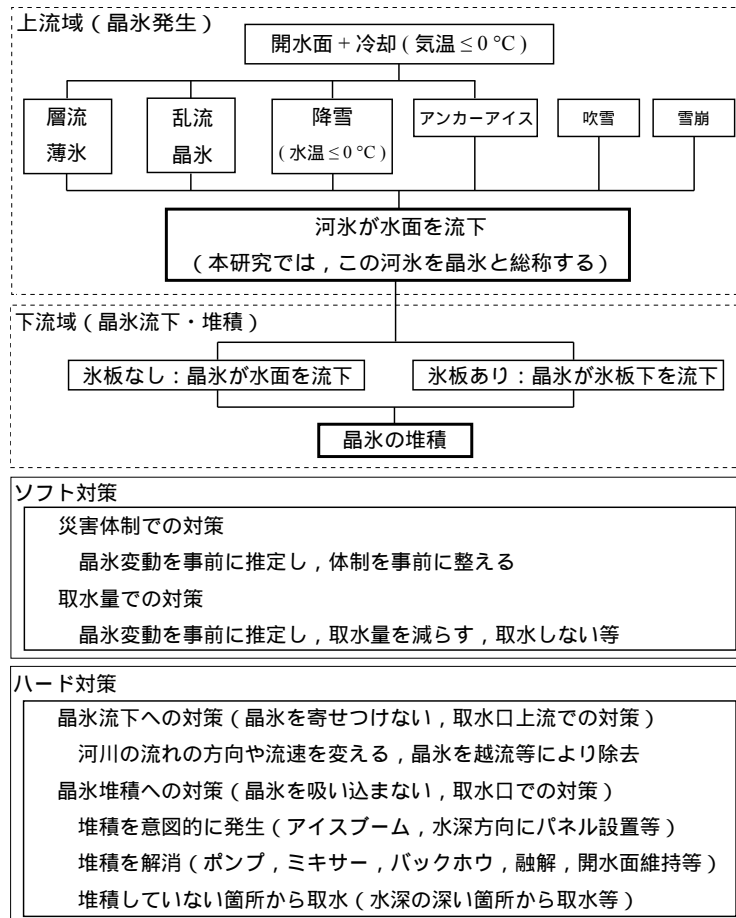


図-1 晶水変動の現象と冬期の取水障害対策

気象庁による北海道の地球温暖化予測において、年平均気温(排出シナリオ：A2，期間：2081年から2100年)は、3～4程度上昇し、年間降雪量(排出シナリオ：A1BとB1，期間：2081年から2100年)は、標高300m未満の地域ではオホーツク海側を除いて減少し、標高300m以上の地域では増加する予測結果となっている。今後、気温の上昇により寒冷地河川において結氷期間の開水面積が広くなり大気と水面の熱交換により晶水発生量が増加し、標高が高い上流域での降雪の増加によって河川内の晶水量が増加する可能性が考えられる。特に、降雪量が多い日本においては、降雪による晶水量の増加を考慮する必要がある。降雪による晶水量の増加については、現場での経験知はあるが、定式的な研究は実施されていない。

図-1の下流域の晶水流下・堆積については、上流で発生した晶水が、下流において、氷板がない場合は水面を流下し、氷板がある場合は氷板下を流下する。晶水の流下速度が遅くなると、その地点で堆積する。なお、取水施設においては、下流に取水堰が設けられていることが多く、堰上げのため流速が遅くなるため、河水が形成されやすい地点となる。晶水の流下および堆積に関する既往研究では、諸外国での現地観測、水理実験から、摩擦速度と粒径を用いて流下と堆積を表現する晶水輸送量式を提案している。なお、著者らは、日本の河川の天塩川においても、本計算式は適用が可能であることを確認している。

図-1のソフト対策については、事前の準備や体制を整える対策、取水量の調整による対策が考えられる。実際の現場では、取水量の低下を確認した時点で直ぐさま現場に入って対応しており、その時間帯は深夜の場合もある。現場では、現在、入手できるデータを用いて、取水口に晶水がいつ、どのくらい流れてくるのかを推定する実用的な手法が望まれている。しかし、実河川の晶水変動の現象は、氷板下の現象であり現場でも目視ができないため、十分には解明されていない。このため、現場では対症療法的に対応がなされている。

図-1のハード対策については、晶水流下への対策として、冬期に意図的に流れを変化させる対策、水面の晶水のみを越流させる対策がある。晶水堆積への対策として、流水雪流入防止対策工、アイスブー

ムなどの晶氷の堆積を意図的に発生または解消する対策がある。ハード対策は、個別的な現地状況に合わせた対策がそれぞれ実施されている。

本研究は、寒冷地河川における晶氷発生メカニズムの解明のために、熱収支、降雪を考慮した晶氷発生計算モデルを開発した。さらに、図-1 における氷板下の晶氷変動の現象解明とソフト対策となる晶氷変動の推定手法の開発を行った。直接的に目視できない氷板下の晶氷変動現象を解明するために現地観測を実施し、事前の体制を整えるための晶氷変動を推定する手法を開発した。

【2】技術研究開発の目的

本研究は、結氷河川における晶氷の発生・流下のプロセスを解明し、取水障害に対して効率的な投資が可能となるよう晶氷の発生予測技術の開発と取水障害対策の提案を目的とする。

寒冷地河川における晶氷発生メカニズムの解明のために、熱収支、降雪を考慮した晶氷発生計算モデルを開発した。さらに、図-1 における氷板下の晶氷変動の現象解明とソフト対策となる晶氷変動の推定手法の開発を行った。直接的に目視できない氷板下の晶氷変動現象を解明するために現地観測を実施し、事前の体制を整えるための晶氷変動を推定する手法を開発した。

【3】技術研究開発の内容・成果

現地観測の観測期間は 2014 年 12 月 15 日から 2015 年 3 月 13 日、観測地点は図-2 の天塩川水系名寄川の合流点から上流 7.05km 地点に位置する真勲別頭首工周辺とした。本観測地点は、2005 年 1 月、2009 年 2 月、2013 年 1 月に、晶氷堆積による取水障害が発生している。真勲別頭首工上流の観測項目を図-2 に示す。KP7.2, KP7.6, KP8.0, KP8.4 において、10 分毎に水位測定(応用地質株式会社, S&DL mini)を実施し、晶氷と氷板の断面積測量を計 6 回実施した。河川結氷時の横断測線上に設けた四辺形の観測穴に L 型ボールを入れて、手に伝わる感覚を基に晶氷厚と氷板厚を測定し、四辺の平均値を測定値とした。これらの測定値から横断面における晶氷面積と氷板面積を求めた。晶氷粒径調査を KP7.2 で計 3 回、KP7.6 で計 2 回、KP8.0 で計 1 回実施した。晶氷粒径は、河氷に穴を空けてバンドーン採水器により採取し、写真撮影および画像解析により測定した。各粒子ごとに、長径、中間径、短径を測定した。KP8.4 付近には、国土交通省が設置している CCTV を用いて結氷状況を確認した。KP とはキロポストの略で、天塩川との合流点からの距離 km である。



図-2 真勲別頭首工上流の観測項目(平面図)

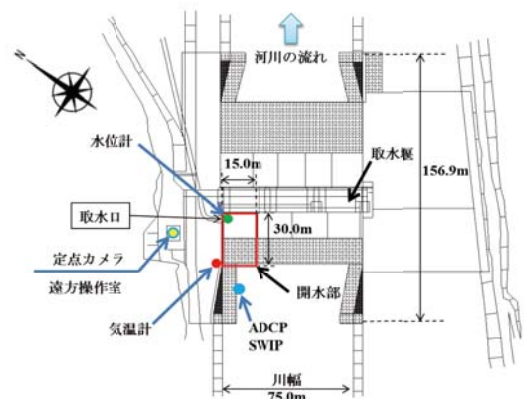


図-3 真勲別頭首工周辺(KP7.05)の観測項目(平面図)

真勲別頭首工周辺の観測項目を図-3 に示す。10 分毎に気温測定(onset, ティドビット v2)と水位測定(上記機器と同等)、1 分毎に定点カメラ撮影(brinno, TimeLapseCamera, TLC200)、頭首工より 44m 上流、左岸水際から約 7m において、河水速度と河氷底面の測定のための ADCP(Teledyne RD Instruments, WorkHorse Sentinel 1200kHz)、河氷の存在を確認するための SWIP(ASL Environmental Sciences, Shallow Water Ice profiler 546kHz)を河床から水面にセンサを向けて河床に設置した。SWIP は、センサから超音波を放射し反射強度を測定する機器である。反射強度の値が高いほど河氷が密に存在することを表す。なお、真勲別頭首工周辺では、取水障害対策のために、開水部(30m×15m)が設けられている。

定点カメラと CCTV の観測結果より、真勲別頭首工周辺(KP7.05)では、2014 年 12 月 6 日から 2015 年

3月19日までの期間、水面が河水で覆われる完全結氷期間であった。真勲別観測所周辺(KP8.4)では、2014年12月16日から2015年3月10日までの期間、完全結氷期間であった。結氷期間については、定期的に目視による観測を実施した。観測期間中、KP7.05からKP12.0付近までは完全結氷であった。KP14.3付近では部分結氷であり、晶氷が水面を流下する状況を確認している。

氷板下の晶氷が水深方向に堆積する現象を観測した。図-4に、晶氷堆積時の気温、水位、ADCP、SWIPの経時変化を示す。図-4において、SWIPの反射強度が高い箇所は河水である。真勲別頭首工での水位とADCPボトムトラッキングによる河水底面高で囲まれた領域は、SWIPの測定値より、河水の存在領域と判断できる。SWIPの河水変動をみると1月3日21時30分に水深方向に河水が堆積している。ADCPの河水底面高の測定値も、この時期に低下している。ADCPの河水移動速度は、1月3日19時20分に4cm/sであり、1月3日20時30分では24cm/sと速くなる。その後、1月3日20時40分では河水移動速度は0m/sとなった。SWIPとADCPの測定値から、1月3日21時30分に河水が水深方向に堆積したと判断できる。晶氷堆積後は、SWIPデータから有効水深が増加し、ADCPデータから1月14日20時20分より河水の移動が測定された。なお、ADCPのセンサは河水面に向いているため、ボトムトラッキングとボトム移動速度の測定値は、河水底面高と河水移動速度となる。

河水堆積時から2.35日前の気温をみると、1月1日12時10分で3.6℃、1月2日1時10分で-25.8℃と、13時間で気温が29.4℃低下している。この時期に、気温低下のため晶氷が多量に発生し、河川の開水面に晶氷が供給された可能性があり、観測地点で堆積した河水は晶氷である可能性が高い。本研究では、堆積した河水は晶氷と仮定して検討を進めた。なお、晶氷堆積時から約11時間前までは、気温は3.7℃まで上昇している。

真勲別頭首工上流のKP8.4の水位をみると、1月1日12時10分で102.42m、1月2日1時10分で102.29mと、12時間で水位が13cm下降している。その後、1月3日8時50分には元の水位の102.42mに戻り、その12時間40分後に晶氷が堆積した。河川結氷時の水位変動について、水位計の地点で結氷すると河水厚の影響を受けて水位は上昇し、解氷すると水位は下降する。水位計の上流で河水が堆積すると、上流で流水が堰き止められるため、下流の水位は下降する。水位計の下流で河水が堆積すると、下流で流水が堰上がるため、上流の水位は上昇する。河川結氷時の水位変動をみる場合、上流か下流のどちらかの影響を受けたのかを考慮する必要がある。今回の観測では、水位が下降した後に、水位は上昇し元に戻っていることから、上流で河水が堆積し、流水が堰き止められ、その後、河水は下流へと流下したと推察できる。

現地観測結果から、気温低下により発生した晶氷が上流の河川内に供給される。河川内の晶氷は、その下流の氷板下に堆積する。晶氷の堆積のため流れは堰き止められて、この地点よりさらに下流のKP8.4の水位は低下する。気温の上昇および晶氷の発生により、上流の晶氷の堆積は解消されて下流へと流下し、流れの遅い頭首工周辺において晶氷が堆積したと推察できる。

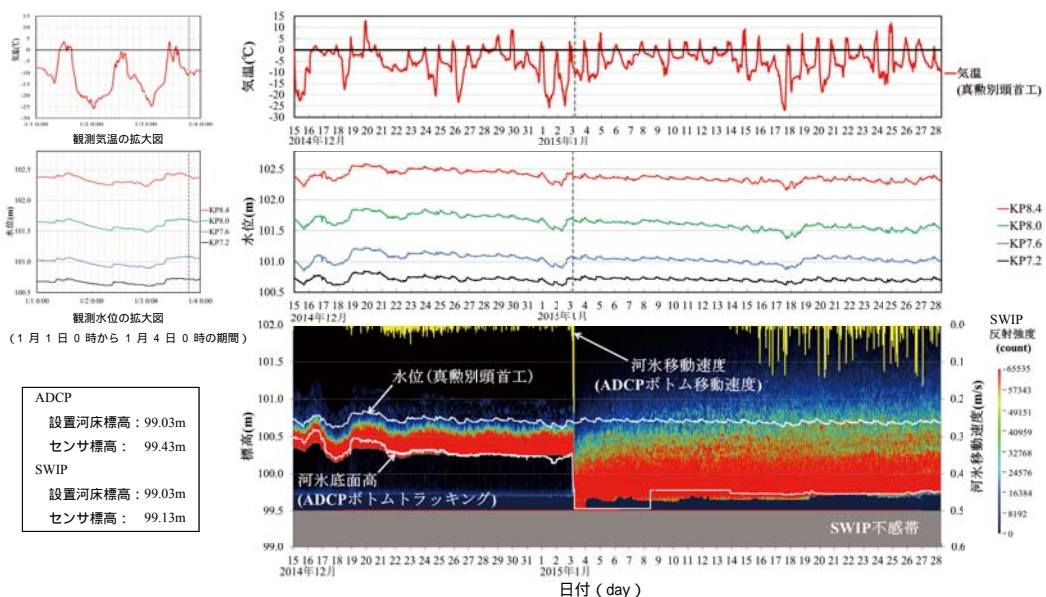


図-4 真勲別頭首工周辺(KP7.05)における晶氷堆積時の気温、水位、ADCP、SWIPの経時変化

本研究で観測された氷板下の晶氷堆積現象は、取水口より 44m 上流で発生した現象であり、取水障害の一手手前の現象である。氷板下の晶氷堆積現象を気象条件と水理条件により推定するために、晶氷変動計算モデルを構築した。本計算モデルを用いて、晶氷変動量を推定する手法を開発した。

本計算モデルは、開水面において点的な発生晶氷厚を計算する。入力値は、対象地点の緯度、河川の水深、河川の流速、気象庁から得られるデータとして気温、風速、日照時間、降雪深である。図-1 の層流時の薄氷、乱流時の晶氷、アンカーアイスは熱収支によって計算し、降雪による晶氷増加は、降雪深の観測値により計算した。

発生した図-1 の層流時の薄氷、乱流時の晶氷、アンカーアイスは、そのまま河川内に供給されて晶氷となると仮定し、次式で表わした。

$$\rho_i \frac{dh_i}{dt} + \rho_s \frac{dh_s}{dt} + \rho_i(1 - \lambda_a) \frac{dh_a}{dt} = \rho_i(1 - \lambda_f) \frac{dh_f}{dt} \quad (1)$$

ρ_i [kg/m³]:氷の密度 - 10 の場合の値の 917.4 を与え、 ρ_s [kg/m³]:雪の密度であり新雪の値の 100.0 を与えた。 λ_a [無次元]:アンカーアイスの空隙率であり 0.4 を与え、 λ_f [無次元]:晶氷の空隙率であり 0.4 を与えた。 h_f [m]:本研究で総称して呼称している晶氷の発生晶氷厚。 h_i [m]:図-1 の層流時の薄氷厚と乱流時の晶氷厚を合計した値。 h_s [m]:降雪深で観測値を与えた。 h_a [m]:アンカーアイス厚で計算式により求めた。 t [sec]:時間であり 1 時間とした。

$$\rho_i L_i \frac{dh_i}{dt} = -\phi_s + \phi_b + \phi_e + \phi_c - \phi_w \quad (2)$$

L_i [J/kg]:氷の潜熱であり 3.336×10^5 を与えた。 ϕ [W/m²]:熱フラックスであり、 ϕ_s :短波放射量、 ϕ_b :長波放射量、 ϕ_e :潜熱フラックス、 ϕ_c :顕熱フラックス、 ϕ_w :流水から晶氷への熱フラックスである。

式(1)に式(2)を代入し、河川内で発生した晶氷厚 h_f で整理すると、晶氷発生計算モデルは次式となる。

$$\frac{dh_f}{dt} = \frac{-\phi_s + \phi_b}{\rho_i L_i(1 - \lambda_f)} + \frac{\phi_e + \phi_c}{\rho_i L_i(1 - \lambda_f)} + \frac{(1 - \lambda_a) dh_a}{(1 - \lambda_f) dt} + \frac{\rho_s}{\rho_i(1 - \lambda_f)} \frac{dh_s}{dt} + \frac{-\phi_w}{\rho_i L_i(1 - \lambda_f)} \quad (3)$$

式(3)の右辺は晶氷発生要因として区別できる。第一項は放射、第二項は対流、第三項はアンカーアイス、第四項は降雪、第五項は流水による晶氷の融解の影響である。最終的な計算モデルへの入力値は、気温、風速、日照時間、降雪深、河川の水深、河川の流速、対象地点の緯度となる。

アンカーアイスの厚さ h_a の時間変化は、アンカーアイス表面の増加・減衰を計算する既往研究による次式から求めた。

$$\frac{dh_a}{dt} = \frac{1}{1 - \lambda_a} \left(\bar{\gamma} C_v + \frac{\phi_{wi}}{\rho_i L_i} \right) \quad (4)$$

$$\phi_{wi} = C_{wi} \frac{U_w^{0.8}}{h_w^{0.2}} (T_i - T_w) \quad (5)$$

$\bar{\gamma}$ [m/s]:アンカーアイスの増加係数で、本計算モデルでは、簡便のため、上流から流下してくる流水中の晶氷がアンカーアイスとなる現象は無視して 0 を与えた。 C_v [無次元]:流水中の晶氷濃度である。 C_{wi} は $1622(\text{W} \cdot \text{s}^{0.8})/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.6})$ を与え、 U_w [m/s]:流速、 h_w [m]:水深である。真熱別観測所の過去の観測データより、 U_w は断面平均流速 0.401、 h_w は断面平均水深 0.576 を与えた。 T_i []:氷(アンカーアイス)の表面温度で 0.0 を与えた。 T_w []:水温である。本計算モデルでは、水温が 0 よりも高い場合は、アンカーアイスは形成されないと仮定して $dh_a/dt=0$ とした。なお、本計算式は河床からアンカーアイスへの熱フラックスを 0 としているため、この影響がある場合には誤差を含むと考えられる。

水温は次式の簡易水温計算式より求めた。

$$T_w = \frac{T_a}{1 + \gamma} + \frac{\gamma T_w'}{1 + \gamma} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{h_w \rho_w C_p}{h_{wa} \Delta t} \quad (7)$$

T_a []:気温, T_w' []: Δt 前の水温, Δt [sec]:計算の時間ステップ, 本研究では1時間を与えた. h_w [m]:水深, ρ_w [kg/m³]:水の密度で1000.0を与え, C_p [J/(kg·)]:水の比熱で4200.0を与えた. h_{wa} [W/(m)]:大気と水との熱交換係数で20.0を与えた.

ϕ_s :短波放射量, ϕ_b :長波放射量, ϕ_e :潜熱フラックス, ϕ_c :顕熱フラックス, ϕ_w :流水から晶氷への熱フラックスの計算方法の詳細については, 既往論文を参照されたい.

本計算モデルによる晶氷発生時期の妥当性を確認するために, 計算値と観測値の比較を行った. 観測期間は2013年12月とし, 観測地点は, 天塩川水系名寄川の合流点から上流7.05km地点に位置する真敷別頭首工周辺とした. 観測項目は, 4分毎に水面の晶氷を確認するために定点でカメラ撮影(brinno, TimeLapseCamera, TLC200)を実施した. 10分毎に水深方向に4地点(水深:0.3m, 0.8m, 1.3m, 1.8m)で定点水温測定(JFEアドバンテック, MDS-MkV/T, 測定レンジ-4~40, 精度±0.05)を実施した. カメラ撮影において, 夜間は現場に照明がないため撮影はできない. 水温計は, 流出を防ぐために硬質ポリ塩化ビニル管内に入れて, 流水中に設置した.

晶氷発生時の定点カメラ画像より, 以下の現象が明らかとなった. 12月1日は晶氷は発生していない. 12月3日, 4日, 14日, 15日は晶氷が発生している. 15日に発生した晶氷は多量であったため, ロングアームを装着したバックホウによる除去作業を計4回実施している. 20日, 22日に晶氷が発生している. 22日に発生した晶氷は昼過ぎには滞留し, その後, 結氷が始まった. 現地観測により, 晶氷発生時期を明らかにすることができた.

晶氷発生計算モデルによる発生晶氷厚の計算値を図-5に示す. 図には, 発生した晶氷の由来を, 短波放射と長波放射による放射, 潜熱と顕熱による対流, アンカーアイス, 降雪に加えて, 流水による晶氷の融解に区分して示した. また, 図には最終的な計算値を赤色で示し, 現地観測により得られた晶氷発生時期を緑色で示した. 図-5より, 晶氷発生について, 各由来を相対的にみると, 短波放射と長波放射による放射は変動が少なく, 潜熱と顕熱による対流は気温が低下し風があると急激に増加する. アンカーアイスは気温が低くなると増加し, 降雪は急激なピークをもって増加することが分かる. 流水による晶氷の融解は, 気温が高い時期に影響が大きい. 図-5より, 現地で晶氷発生が確認された時期において, 発生晶氷厚が大きくなっており, 本計算モデルは晶氷発生現象を表現できている. 一方で, 本計算モデルの発生晶氷量に関しては, 観測データが得られておらず妥当性の確認はできていない. 今後, 定量的な比較を行うためには, 発生晶氷量の観測技術を開発し, 観測データを取得する必要がある.

既往研究は, 天塩川の開水面において晶氷発生量の現地観測に成功している. 観測された晶氷発生量は約10g/(m²min)であり, この値を $\rho_i(1-\lambda_a)$ で割ると, 0.1cm/hourとなる. 宇佐美らの現地観測地点と本観測地点の場所の違い, 気象条件と水理条件の違いはあるが, 図-5の放射と対流による発生晶氷厚と宇佐美らの観測データを比較すると, オーダー的には同程度の値である.

本検討により, 晶氷の発生メカニズムは, 気温, 風速, 日照時間, 降雪深, 水深, 流速の複合的な要因によって発生することが分かった.

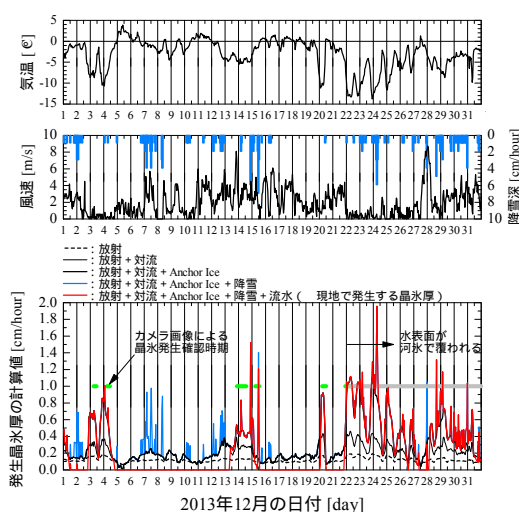


図-5 晶氷輸送量と発生晶氷厚の経時変化(計算値)

晶氷輸送計算モデルは、次式を用いた。

$$\Phi = 5.487(\Theta - 0.041)^{1.5} \quad (8)$$

$$\Phi = \frac{q_f}{F \sqrt{\Delta g d_f^3}} \quad (9)$$

$$\Theta = \frac{U_*^2}{F^2 \Delta g d_f} \quad (10)$$

Φ ：無次元晶氷輸送量， Θ ：無次元せん断力， q_f [m²/s]：単位幅晶氷輸送量， d_f [m]：晶氷粒径， U_* [m/s]：摩擦速度， Δ [無次元]：水中比重で $(\rho_w - \rho_i)/\rho_w$ である． ρ_w [kg/m³]：水の密度で 1000.0 を与えた． g [m/s²]：重力加速度で 9.8 を与えた． F [無次元]：沈降速度係数は次式を用いた．

$$\frac{1}{F} = 3.18 - 18.22\alpha_p + 80.46\alpha_p^2 - 171.46\alpha_p^3 + 140.95\alpha_p^4 \quad (11)$$

$$\alpha_p = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (12)$$

a [m]：長径， b [m]：中間径， c [m]：短径．晶氷粒径調査による計 162 個の晶氷粒子の平均値を与えた．具体的な値は，長径 7.8mm，中間径 6.0mm，短径 4.3mm である．

摩擦速度 U_* は次式となる．

$$U_* = \sqrt{gRI} \quad (13)$$

R [m]：径深， I [無次元]：エネルギー勾配である． R は以下のように求めた．北海道開発局が実施している真敷別観測所における流量観測のデータを用いて，流水断面積 A [m²]，川幅 B [m]，有効水深 h [m] を取得した．本観測所は完全結氷であり水面は河水で覆われているため，近似的に $R \cong A/(2B + 2h)$ として値を得た．連続値への変換については， A は，水位から河水の喫水深を引いた有効水位と流水断面積の関係式(H - A 式)を求め，連続測定水位を H - A 式に代入することにより流水断面積の値を得た． B は，流量観測時の川幅を線形で与えた． h は， $h=A/B$ として求めた． I は，水面勾配として KP8.0 と KP8.4 の測定水位より与えた．

KP8.4 における晶氷輸送量と発生晶氷厚および発生晶氷厚の積算値を図-6 に示す．図-6 の晶氷輸送量は，相対的にみると減少している．しかし，1月3日0時(34.00 日目)では 0.01m²/s，1月3日17時では 0.02m²/s と，晶氷堆積現象が発生する前では晶氷輸送量が増加している．観測地点(KP7.05)の晶氷堆積現象が発生する前に，上流の KP8.4 において晶氷輸送量は増加している．

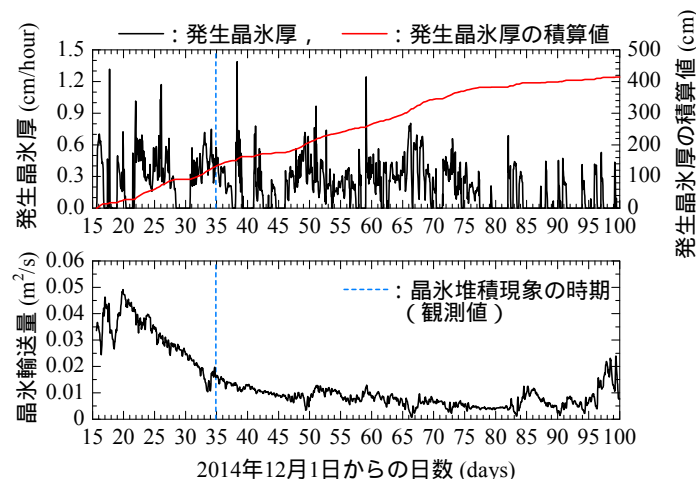


図-6 晶氷輸送量と発生晶氷厚の経時変化(計算値)

図-6の晶氷現象発生前の発生晶氷厚をみると、12月30日17時(30.73日目)から晶氷が発生している。その後、1月2日1時(堆積現象の1.83日前)に0.72cm/hour、1月3日3時(堆積現象の0.75日前)に0.75cm/hourと2つのピーク値がある。晶氷堆積現象が発生する直近では、発生晶氷厚が増加している。計算開始(15.00日目)から晶氷堆積現象発生までの期間において、発生晶氷厚の積算値は増加している。晶氷輸送量は、晶氷堆積現象発生時に比べて、この期間の方が値が大きい。

2014年12月25日の結氷区間調査では、観測地点(KP7.05)からKP14.3まで結氷しており、これより上流は水面が確認できる開水状態であった。上流の開水面で発生した晶氷が、その下流の氷板下に堆積することにより、発生した晶氷は、直ぐさま下流の観測地点まで到達しない現象が予見される。

現地観測結果および数値計算結果に基づく考察から、観測地点における晶氷堆積の要因として、晶氷輸送量の増加、直近の発生晶氷厚の増加、上流での包蔵晶氷量の影響が想定された。

完全結氷時の取水施設における取水障害の危険性は、晶氷輸送量、直近の発生晶氷厚、上流での包蔵晶氷量に比例すると仮定して、本研究では、取水障害の危険度を表す値を晶氷変動量と呼称して次式で定義した。

$$F_v = q_f \times h_{fc} \times D \quad (14)$$

F_v [m³/s]:晶氷変動量であり、値が高いほど晶氷が堆積する可能性が高く、取水障害の危険性が高い。
 h_{fc} [m]:直近の発生晶氷厚の積算値であり、本観測において晶氷堆積の2.35日前から、気温が急激に低下した現象を参考に、簡便のため、2.0日前から現在までの発生晶氷厚の積算値を与えた。 D [無次元]:上流での包蔵晶氷量の割合($0 \leq D \leq 1$)であり、次式で定義した。

$$D = \frac{h_{fadd} - h_{fmin}}{h_{fmax}} \quad (15)$$

$D=0$ の場合、発生した晶氷は、河水下に包蔵されて下流へは流れない。 $D=1$ の場合、発生した晶氷は、河水下にこれ以上包蔵できないため下流へと流れる。

h_{fadd} [m]:計算開始から現在までの発生晶氷厚の積算値である。 h_{fmin} [m]:完全結氷晶氷厚で、計算開始から完全結氷するまでの発生晶氷厚の積算値である。本検討では、完全結氷の状態から計算を開始しているため、0.0mを与えた。 h_{fmax} [m]:取水施設より上流で包蔵可能な限界包蔵晶氷厚である。上流の開水面における発生晶氷体積 V_f [m³]、下流の結氷面の縦断距離 L_i [m]、下流の結氷面の川幅 B_i [m]として、 $h_{fmax}=V_f/(L_i B_i)$ と定義した。本検討では試行錯誤により $h_{fmax}=1.5$ mとした。

取水施設での晶氷変動量 F_v を図-7に示す。図中には、入力値が異なる[推定手法1]と[推定手法2]、晶氷堆積現象の時期を示した。前述した手法は推定手法1である。図-7より、取水口より44m上流で発生した取水障害の一手手前の晶氷堆積現象の時期において、計算期間中、最も晶氷変動量が大きい。晶氷変動量 F_v は、取水施設周辺での晶氷堆積現象を推定可能であることを示した。なお、過去の取水障害を対象に、後述する推定手法2で $h_{fmax}=1.5$ 、 $h_{fmin}=1.5$ として F_v を計算し、本計算モデルの検証を行った。検証の結果、取水障害時の F_v は、相対的に高い値を示す結果を得ている。

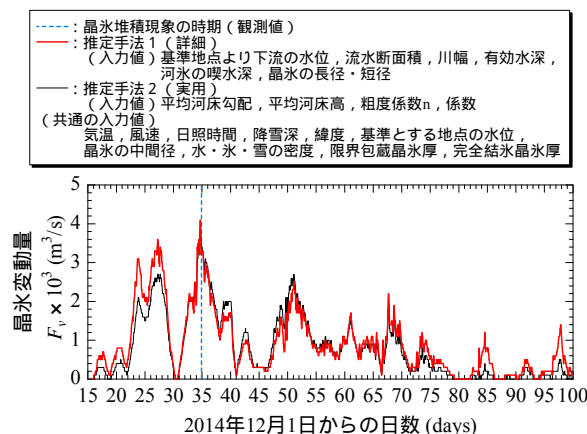


図-7 取水施設の晶氷変動量(値が高いと取水障害の可能性大)

本研究では、図-1 のソフト対策に着目し、事前の体制を整えるための晶氷変動を推定する手法を開発し、ソフト対策として提案する。

現場で本推定手法を運用する場合、入力値は少ない方が利便性が高い。現地において、リアルタイムで取得可能なデータは、気象庁の気象データ、国土交通省の水位データである。真勲別頭首工では、気象データは名寄観測所、水位データは真勲別観測所で取得が可能である。地形データとして、夏期に測量を実施することにより、平均河床勾配、平均河床高の値は取得可能である。入力値を少なくした実用的な推定手法[推定手法 2]の晶氷変動量 F_v を図-7 に示す。推定手法 1 と推定手法 2 の F_v の絶対誤差の平均値は $0.2 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ 、相関係数は 0.9 であり相関が高い。

推定手法 2 の入力値の数の削減方法を以下に記す。

式(12)の α_p は、長径 a と短径 b における関係式を、式(12)に代入することにより $\alpha_p=0.5846604$ の一定値を得た。式(13)の I は平均河床勾配 $1/480$ を与えた。式(13)の R は完全結氷時のため $R \cong A/(2B + 2h) \cong h/2$ とした。水位 HZ 、河氷の喫水深 d 、平均河床高 Z とすると、有効水深は、 $h = HZ - d - Z$ により得られる。河氷の喫水深 d は、河氷厚 h_i とすると $d = (\rho_i/\rho_w)h_i$ となり、径深 R を求めるためには、河氷厚 h_i を求めればよい。河氷厚の計算は、河氷 \cong 氷板と仮定して、次式の氷板の形成融解の計算式により値を得た。

$$h_i = h_i' - \left(\frac{65.2}{10^5}\right) \alpha \frac{T_a}{h_i'} - \left(\frac{45.8}{10^2}\right) \beta^4 T_w h_i^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{u}{h^{2/3}} \quad (17)$$

h_i [m]:河氷厚, h_i' [m]は Δt 前の河氷厚, T_a []:気温, T_w []:水温であり気温から推定した。有効水深 h は、 $h = HZ - (\rho_i/\rho_w)h_i' - Z$ から求めた。 u [m/s]:流速は、マンシングの平均流速公式において、 n [$\text{s}/\text{m}^{1/3}$]:粗度係数 0.03, R は $R=h/2$, I は平均河床勾配を与えて値を得た。 α [無次元]は気温に対する氷板形成の程度を表し、本検討では 0.9 を与えた。

流量観測データの喫水深を線形補完した値と本計算式による気温データから求めた喫水深を図-8 示す。絶対誤差の平均値は 10cm であった。

過去の取水障害を対象に、後述する推定手法 2 で $h_{fmax}=1.5$, $h_{fmin}=1.5$ として F_v を計算し、本計算モデルの検証を行った。検証の結果、取水障害時の F_v は、相対的に高い値を示す結果を得ている。

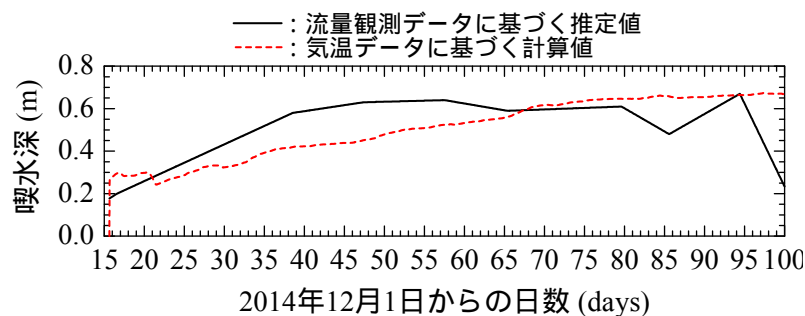


図-8 喫水深における推定値と計算値

【4】今後の課題・展望

現場では、取水量の低下を確認した時点で直ぐさま現場に入って対応しており、その時間帯は深夜の場合もある。取水障害対応の体制を整える上で、現場では「晶氷が発生する時期」に関する知見が求められている。晶氷が発生する時期に関する知見が得られれば、事前の準備や体制を整えることが可能となる。本研究成果は、これらの要望に応えうるものである。本研究により得られた成果である計算モデルは、追加の観測を行うことなく、現在、入手可能なデータのみで活用できる。今後、マイクロソフトのエクセル上で運用するなど、現場で活用できるように汎用性を高めることができれば、本研究成果の普及につながり、冬期の取水障害に対して効率的な投資が可能となる。

河川等政策への質の向上への寄与については、本研究成果は、晶氷が、いつ、どこで、どの程度の規模で発生するかを予測することができる。本研究成果により、晶氷が発生する時期に関する知見が得られれば、取水障害対応の事前の準備や体制を整えることが可能となり、管理実務に生かされる。本研究成果により、河川結氷期の治水上の一つの問題である「河道掘削による仮締切等の河川工事に伴うアイスジャムによる急激な水位上昇の予測」などに活用でき、河川管理上の有益な知見が得られる。