

寒冷地河川で発生する晶氷に 関する現地観測

FIELD OBSERVATION OF FRAZIL ICE
RIVER IN COLD REGION

宇佐美宣拓¹・吉田剛²・山下俊彦³

Norihiro USAMI, Go YOSHIDA and Toshihiko YAMASHITA

¹正会員 工修 北電総合設計株式会社 (〒060-0031 札幌市中央区北1条東3丁目1)

²学生会員 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

In cold region, many rivers and lakes are freeze up in winter season. Frazil ice is a small particle that generated in supercooled and turbulent water surface. They are casual factor of freeze up the water surface of rives. In addition, the water intakes that located at riverside are often clogged by accretion of frazil ice at midwinter. To overcome about these types of ice problem, it is important to know about the property of the frazil ice flow down in a cold stream.

In this study, in order to collect frazil ice, field observations were carried out at the Teshio River in winter season. The distribution of frazil ice in the stream and the volume of generated frazil ice were measured.

Key Words : *Frazil ice, the Teshio River, water intake*

1. 研究目的

北海道は積雪寒冷地に属しており、冬場の厳寒期には気温の低下に伴い河川水温も結氷点に近づく。河川の急流部では水温が氷点下以下に過冷却され、晶氷 (Frazil Ice) と呼ばれる微小な氷が発生される¹⁾。

晶氷は流下する間にフロック状となり体積を増加させ、河川結氷の要因にもなる。一方、河川に建設された生活用水や工業用水、発電用水等の取水口においては、取水と共に晶氷や雪泥が流入し、スクリーンに晶氷等が付着・堆積したり、導水路等が閉塞するなど取水障害が引き起こされ、これまでに様々な対策が考案されている²⁾。

著者ら³⁾は、水道・水力発電施設の管理者に対してヒアリングを実施し、晶氷流入による被害状況と対策の現状を整理した。また、晶氷の取水口への流入予測と、

効率的な対策工の開発、の2点を管理上の課題として整理している。これらを解決するためには、実河川における晶氷の発生条件と発生量、流下状況等を知る必要がある。晶氷の発生条件については、室内実験等により種々の知見が得られている^{例えば4),5)}が、実河川での調査については室内実験と比較すると報告事例は少ない。この

理由としては、気象条件が過酷であること、水中での観測自体が困難なこと、観測技術が確立されていないこと、などが想定される。

本研究は、北海道の北部に位置する天塩川を調査地点として、厳寒期における実河川での晶氷の発生量と流下状況に関する現地観測を行い、これらの実測データを取得するものである。

2. 調査内容

(1) 調査範囲

現地観測により晶氷の発生量を求めるには、観測区間内において上流から晶氷が供給されないことが求められる。この条件に合致する状況として、上流側が完全結氷し、下流側が開氷している氷象の流域が挙げられる。今回は初年度の調査であり、該当する箇所を特定することができないため、過去に行われた河川結氷に関する調査 (冬期間の航空写真撮影記録) に基づき、比較的結氷・非結氷の位置が安定していると想定された、北海道美深町を流れる一級河川である天塩川を調査地点として選択した。

調査範囲は、結氷-非結氷境界である天塩川KP110.3付近から小車大橋（KP109.4）の約1kmの範囲とする。調査範囲を図-1に示す。調査地点の標高はEL60m程度、調査区間の河川の計画河床勾配は1/1,000である。

(2) 調査項目と調査方法

a) 晶氷流下状況の確認

調査範囲をボートで移動し、晶氷の流下状況を目視により確認した。

b) 晶氷の採取

調査対象範囲において、100～200mごとに調査断面を設定した。最上流の結氷-非結氷の境界より下流へむけボートで移動し、調査断面においてボートを停泊させ、水面及び水中から晶氷を採取した。採取機材には、晶氷の大きさと、採取後の速やかな脱水を考慮して、目の細かいストッキング素材を使用した既成の網（約6cm×8cm）を使用して流下する晶氷を一定時間採取した。作業終了後、採取した晶氷の重量を計測した。

c) 晶速・水深の調査

調査地点で河川の表面流速と水深の計測を行った。表面流速は20秒間の平均値とし、1地点につき2回計測を行った。

d) 気温・水温の調査

調査地点で水温の計測を行った。水温の計測は水面付近を基本とした。また、調査範囲内において、調査期間内（3日間）に気温計・水温計を設置し、外気温と水面付近の水温の定点観測を行った。

かな流れ、下流では勢いのある流れである。秋期の調査は、冬期の流況と比較するため、流量が少なく、ほぼ冬期と同程度の水位の時期に実施した。秋期の調査日の水位は恩根内大橋においてWL52.43mであった。秋期の流況と比較して、冬期の方が全般的に流速が早く、フルード数が大きな傾向を示している。これは、水位の違いによることに加え、河川結氷に伴う通水面積の減少により流速が増加することもあると考えられる。

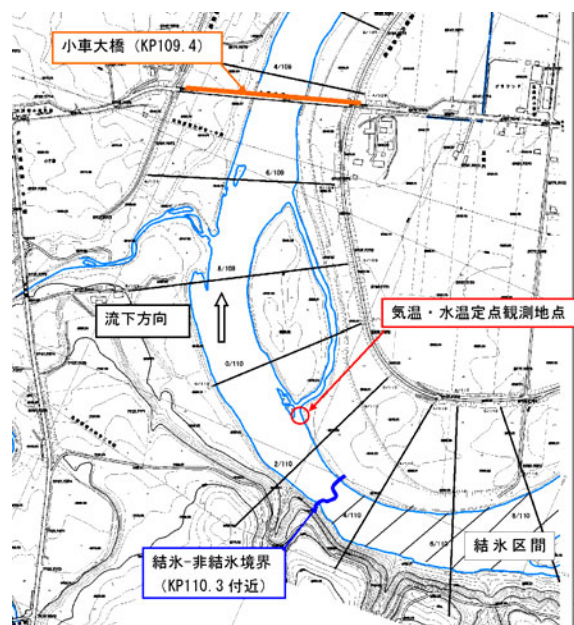


図-1 調査範囲（天塩川 KP109.4～KP110.3）

3. 調査結果

(1) 調査日程

第1回調査 平成19年1月27日（土）～29日（月）

第2回調査 平成19年2月11日（日）～13日（火）

(2) 調査日における気象・流況

調査地点近傍の美深観測所観測結果から、1月1日を起算日とした過去5年間の積算寒度を図-2に示す。2006-2007年は暖冬と言われたが、この結果からもその傾向が示される。一方、流況として国土交通省水質水文データベースのホームページより、調査地点最寄の恩根内大橋（KP112.1）における水位の変化を図-3に示す。1月中旬に3m程度水位が上昇したのは、日周期はあるが概ね安定した流況を呈している。なお、1/8～1/15にかけての水位上昇の原因は不明である。

(3) 流速・水深測定結果

2006年9月及び第1回調査時に計測した流速・水深から、調査対象流域の流況をフルード数に整理して図-4に示す。KP110.00近辺を境界として、上流では比較的穏や

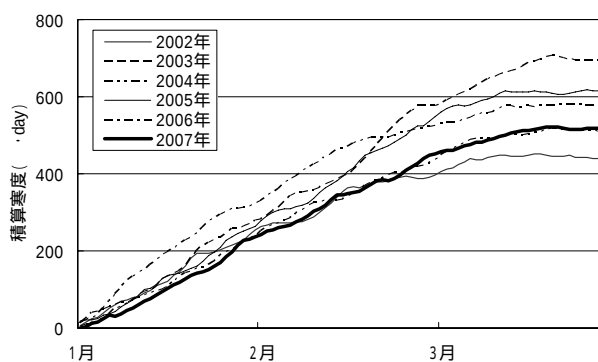


図-2 美深観測所における積算寒度の推移

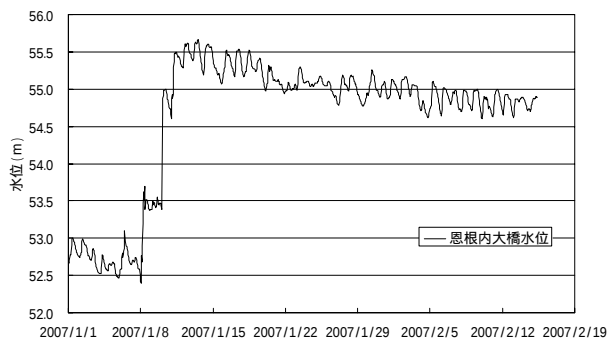


図-3 恩根内大橋（KP112.1）における水位の変動

(4) 気温・水温定点観測結果

定点観測地点（第1回：KP109.95、第2回：KP110.05）における、調査期間内の気温及び水面近傍の水温変動を図-5～7に示す。気温計のサンプリング間隔は10分である。日最低気温は概ね明け方に見られ、-15～-25 程度を記録し、晶氷が発生するとされる-6～-8 よりも低い。

水温については、第1回調査時はセンサーの設置不良により測定ができなかった。第2回調査時には水位の変化に対応できるよう、水深約30cmの位置にセンサーを固定した。サンプリング間隔は、数分のオーダーで発生するとされる過冷却を計測するため1分間隔とした。図-7に示す計測結果から水温の日変動は少なく、概ね0.00～0.03 で推移している。また、気温低下時において0 をわずかに下回る水温が観測され、過冷却が確認されている。

(5) 晶氷観測及び採取結果

結氷-非結氷境界から、小車大橋（KP109.5）にかけての開水面において、水面を流下する晶氷の採取を行った。計2回の調査とも、気温が低く過冷却が生じ、晶氷の発生量が最も多いと想定される午前3時程度に調査を行うのが望ましいが、視界不良により作業が危険であるため、安全性の観点から調査の時間帯は早朝7：00～9：00とした。結氷-非結氷境界は、第1回調査ではKP110.3であったのに対し、第2回調査ではKP110.2地点で観測され、結氷範囲が下流へと成長していた。観測の結果、上流側の氷板の下面に堆積する晶氷の移動が生じ、これらが氷板下流端より抜け出す現象に起因すると考えられる。開水面へ流出した晶氷の一部は、氷板下流端直下の死水域において滞留し、氷板に付着・固結することで、氷板は下流へ向けてゆっくりと成長する。

計4回（1/28、1/29、2/12、2/13）の調査のうち、1/29を除いては氷板下流端より晶氷の流出が確認され、特に、2/12においては大量に流出していた。1/29の状況は、晶氷の流出は確認されず、これより下流では晶氷の流出が確認されたため、この区間（開水面）において晶氷が明らかに発生している。

晶氷の採取は、河川の上流から下流へ向けて行い、結氷-非結氷境界と小車大橋間の数地点において実施した。また晶氷の鉛直分布を確認するため、水深方向に水面と水深30～50cmにおいても採取した。採取時間については、1回の採取時間30秒を基本としたが、晶氷の流量にあわせて適宜変更した。

図-8に晶氷の流下状況の一例を示す。流れの緩やかな区間では、過冷却により発生した晶氷は互いに緩く結合し、薄い層を成して水面を浮遊する。流速が早まると乱れの影響により水面での晶氷の緩やかな結合は崩壊して独立した粒子となり、水深方向へも混合される。その下流で再度流れが緩やかな区間になると、晶氷は水面へ浮上し、再度緩やかに結合しながら集合体としての体積を

増してゆく。

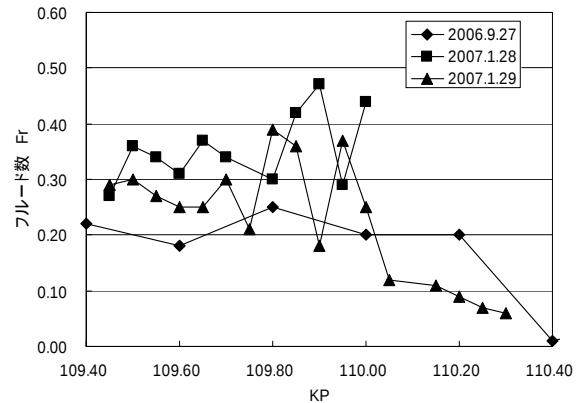


図-4 調査区間の表面流速（第1回調査）

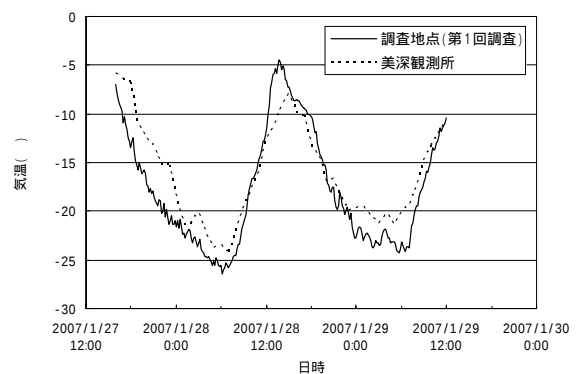


図-5 調査期間の気温（第1回調査）

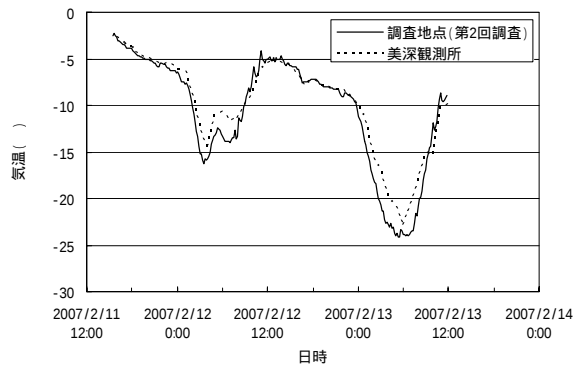


図-6 調査期間の気温（第2回調査）

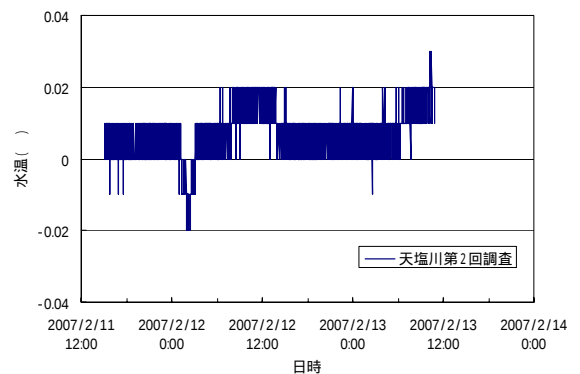


図-7 調査期間の水温（第2回調査）

図-9には採取した晶氷を示す．個々の晶氷の大きさは最大で数mm程度であるが，複数の晶氷が固結し，一塊の大きさとしては数cm程度であった．図-10～図-13に地点別の晶氷流下量を示す．結氷-非結氷境界の氷板下縁から晶氷の流出が確認されていない11/29の調査結果では，境界KP110.3から下流のKP110.05の区間については晶氷の流下量は次第に増加している．これは水面で晶氷が発生することによる．水深50cmでは晶氷の流下量は横ばいであるが，この区間で発生した晶氷は流れが緩やかなため水面で留まることを示唆している．KP110.0付近には横断方向に複数の岩が点在し堰の役割を果たしている．この地点では流れの影響で晶氷も水中へ巻き込まれる状況が確認されている．下流では流れは再び緩やかとなり，晶氷は再度水面へ浮上している．

一方，その他の観測日は上流の氷板下縁から晶氷が流出しているため，上流側の水面付近で採取された晶氷量が極めて大きい．下流側での晶氷の分布や流下状況は1/29の調査結果と似た傾向であったが，晶氷同士が固く固結した状態で流下し，乱れにより崩壊しにくい現象が確認されている．



図-8 水面を浮遊する晶氷



図-9 採取した晶氷

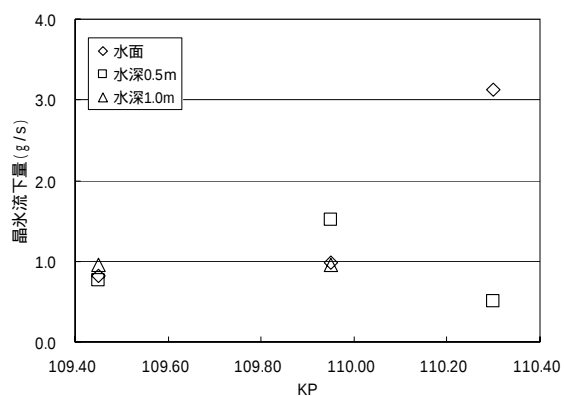


図-10 晶氷流下量（第1回調査：1/28）

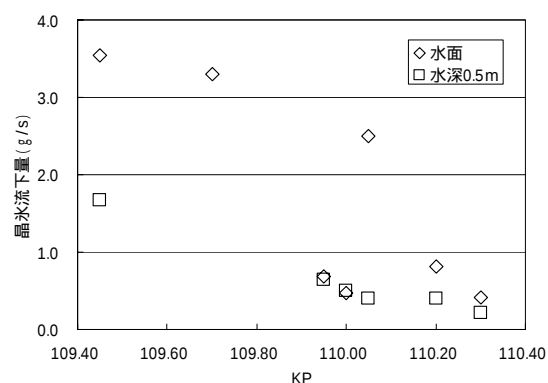


図-11 晶氷流下量（第1回調査：1/29）

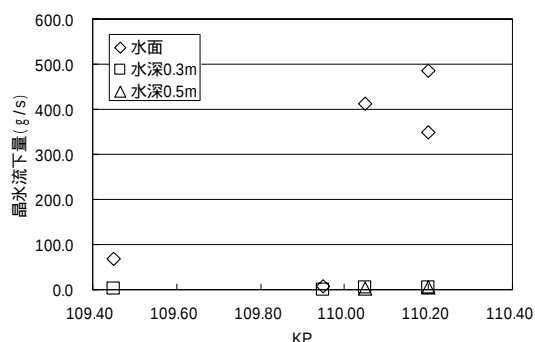


図-12 晶氷流下量（第2回調査：2/12）

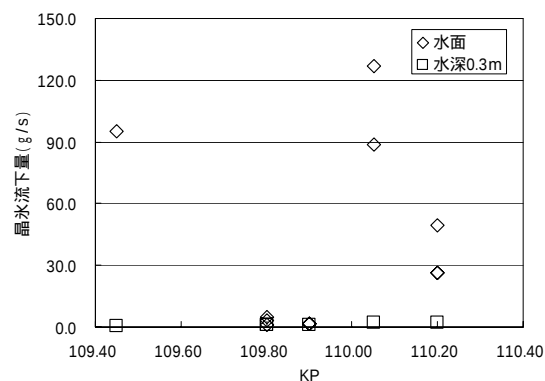


図-13 晶氷流下量（第2回調査：2/13）

4．水深方向の晶氷分布特性

取水口の周辺及びその上流において晶氷流入対策を検討する際に、晶氷の水深方向の分布特性を把握することは、対策の方針を定める上で極めて重要な要素である。今回の晶氷の流下状況の観測結果より、晶氷の水深方向の分布は流況に影響を受けると考えられる。ここでは、河川結氷-非結氷の判定要素として従来より用いられている⁹⁾フルード数をファクターとして晶氷の水深方向の分布特性について検討する。

定点における晶氷の深度分布を見るため、水中（水深30cmあるいは50cm）で採取された晶氷量を、水面における同量で除した値を、仮に深度分布率と定義する。比率が小さいほど、晶氷が水面近傍にのみ存在し、比率が大きいものは水中にも分布していることを示す。この比率と晶氷採取地点におけるフルード数との関係を示したものが図-14～15である。第1回の調査結果（図-14）から、フルード数の小さな領域には晶氷は水面付近に多く分布し、フルード数の増加に伴い水中においても増加する傾向が見られる。データ数が少ないため、現状では特定できないが、フルード数の増加に伴い深度分布率が1に漸近する可能性が示される。これについては、今後観測データを蓄積させる必要がある。

一方、第2回の調査結果（図-15）からは、このような傾向は見られない。これは氷象の違いによるものと想定される。第1回調査は結氷-非結氷境界からの晶氷流出量に比して発生量が多く、水面及び水中において規模の小さな晶氷が存在する。一方、第2回調査は境界から、上流より供給される晶氷が比較的硬い結合のものもあり、急流部でも結合が崩れにくく水中へ混合されにくかったものと想定される。

従って、発生したばかりの少量の晶氷と、発生後時間が経過して大量に流下する晶氷を比較すると、晶氷の状態（固結状況）により、特に流れが急な地点では水深方向の分布特性が異なるものと考えられる。今回の観測では実施しなかったが、晶氷の固結状況について調査を行い、固結状況により分類する必要がある。

5．晶氷の発生量

河川の開水面が一様に冷却され、晶氷が発生して流下する場合には、流下方向の晶氷量の増加は開水面の面積と比例関係にあると想定される。このため、調査範囲において横断測線ごとに結氷幅と開水面幅の簡易測量を行い、結氷率（結氷幅／全水面幅）を求めた。100%は横断方向に全面結氷を、0%は全面開氷を示す。結果は図-16に示すとおりである。また、これに基づき50m区間における河川の平均開氷面積の分布を図-17に示す。

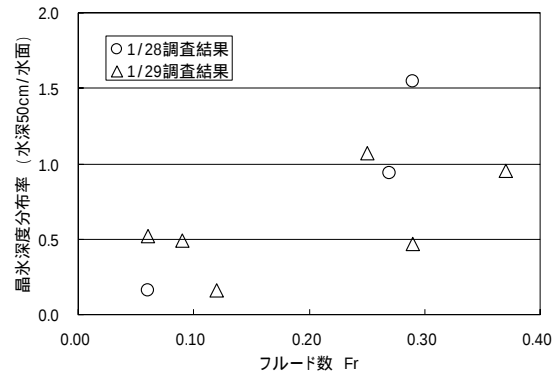


図-14 晶氷深度分布率とフルード数の関係（第1回調査）

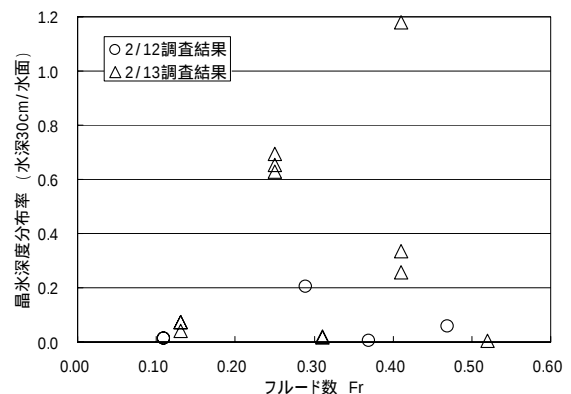


図-15 晶氷深度分布率とフルード数の関係（第2回調査）

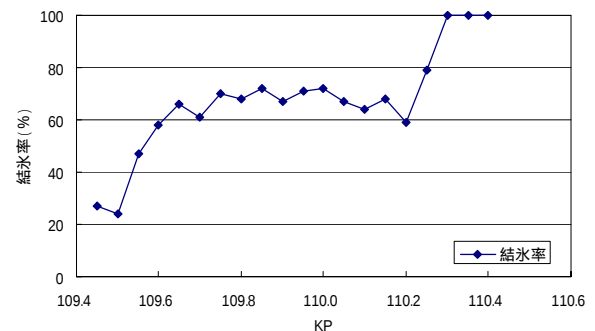


図-16 調査区間の結氷率（第1回調査）

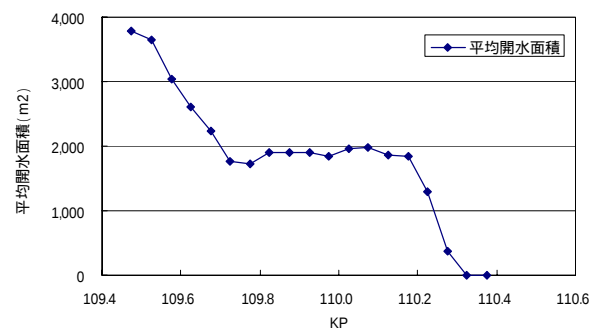


図-17 調査区間の平均開氷面積（第1回調査）

河川流下方向に一定の距離を置いた2断面において採取した晶氷の流下量から，区間内における晶氷の発生量は，おおよそ下記の関係により求められる．

$$\text{区間内晶氷発生量} = \text{下流断面2における晶氷流下量} \\ - \text{上流断面1における晶氷流下量}$$

但し，区間内における晶氷の融解や、アンカーアイスとして区間内に留まる分の損失は考慮しない。ここでは晶氷の発生率は時間的に一様であるとみなして晶氷の発生量に関する概算を行う．

各断面における晶氷流下量は，晶氷採取結果に基づき以下により求める．

$$Wi = Wi' \times Bi / b \quad (1)$$

ここに，

Wi ：断面 i を流下する単位時間当たりの晶氷量（g/s）

Wi' ：網で採取した単位時間当たりの晶氷量（g/s）

Bi ：断面 i の水面幅（m）

b ：採取網の幅（m）

また，上流断面と下流断面における晶氷流下量の差分を区間内の開水面積で除した値が，単位時間・単位面積当たりの晶氷の発生量となり，下記により求める．

$$W = (W_2 - W_1) \div A \quad (2)$$

ここに，

W ：単位時間・単位面積当たり晶氷発生量

A ：区間開水面積（平均開氷幅×区間延長）

今回の調査結果から，晶氷の発生が顕著に確認された1/29の調査結果のうち，流れの様な区間である，KP110.05～103.00の2区間において前述の考え方により晶氷発生量を求める．単位面積・単位時間当たりの晶氷発生量を図-18に示す．概算の結果，双方とも晶氷の発生量は約10g/m²/min程度であり，これより単位時間・単位面積あたりの晶氷発生量は，流速の緩やかな流況ではほぼ同一の値を示しており，晶氷発生量は開水面積に比例することが示される．

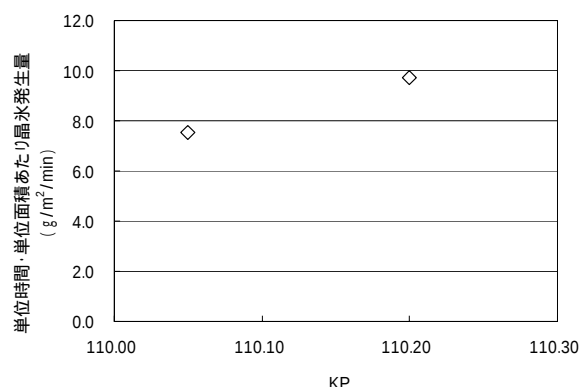


図-18 単位時間・単位面積あたり晶氷発生量
（第1回調査：1/29）

6．まとめ

- 1．2007年1月から2月にかけて，厳寒期の実河川における晶氷流下状況に関する現地観測を実施した．気象・流況・氷象などに関して限られた条件ではあるが，個々の晶氷の大きさ，凝集したフラジルスラッシュの大きさや固結状態などを観測により確認することができた．
- 2．晶氷の分布に関しては，晶氷が発生したばかりの流域では，水深方向の分布特性はフルード数に影響をうける可能性が示された．一方，晶氷同士の固結が進行する場合には，はっきりした傾向は見られない．
- 3．晶氷の発生量に関しては，2007年1月29日の早朝に理想的条件において調査を実施でき，この時の晶氷発生量は概算では10g/m²/min程度である．
- 4．今後は更なるデータの蓄積を行うとともに，晶氷発生に重要な要素である水面の熱収支についてもあわせて観測を行う必要がある．

参考文献

- 1) Ashton, G. D.: River and Lake Ice Engineering, *Water Resources Publications*, pp261-285, 1986.
- 2) Daly, S. F.: Frazil ice Blockage of Intake Trash Racks, *Cold Regions Technical Digest No.91-1*, CRREL, pp6-11, 1991.
- 3) 宇佐美, 吉田, 山下, 佐伯: 寒冷地の取水施設における晶氷流入対策の現状, 第22回寒地技術講演論文集, Vol.22, pp393-398, 2006.
- 4) Daly, S. F.: Report on Frazil Ice, Special Report 94-23, CRREL, pp5-17, 1994
- 5) 清原, 高見, 高江柄, 宮, 笹本, 堺, 平山: 晶氷の発生条件に関する実験的研究, 第10回寒地技術講演論文集, Vol.10, pp447-451, 1994.
- 6) 岸, 中尾: 北海道における河川の結氷と冬期湯水量について, 第16回年次学術講演会講演概要第 部, pp79-80, 1961.
(2007.9.30受付)