

晶氷の発生と冬期河川水温に関する現地観測

Field Observations of Frazil Ice Formation and Water Temperature in Rivers during Winter

小林正隆^{*}、山崎 誠^{**}、山下彰司^{***}、堺 茂樹^{****}、平山健一^{*****}

By M. Kobayashi, M. Yamazaki, S. Yamashita, S. Sakai and K. Hirayama

Abstract

Frazil ice is an ice crystal formed in turbulent water. Its production is closely related to the ice cover formation in rivers and gives severe trouble for water intakes during winter. Field observations of frazil ice formation and water temperature were performed in Yubetsu and Niuppu river in Hokkaido to investigate conditions for frazil ice production in rivers. From these observations it is concluded that massive production could occur when the daily air temperature is less than -7.5°C , and supercooling of water is an indication of frazil ice initiation. A variation of hourly water temperature is simulated favorably by a simple model using air temperature as an input.

Keywords : air temperature, water temperature, supercooling, frazil ice

1. はじめに

山口らの研究¹⁾によれば、北海道の大部分の河川水温は8月下旬から降下を始め、12月上旬に結氷点に近づく(図-1)。水温が 0°C に達した後、水面からの熱の放出がさらにすすむと、流れの緩やかな区間では岸氷が成長するが、河川主流部では流水の乱れにより水温は過冷却状態になり、流水中の浮遊物を核として氷の結晶である晶氷が発生する。このときの過冷却の程度は100分の数度といわれている。晶氷は流下しながら成長し、互いに固着して氷盤、さらに結氷板を形成する。晶氷は発電用水、工業用水などの取水スクリーンに付着して取水障害を生じる。また形成された結氷板は、流水断面の縮小、水位の上昇な

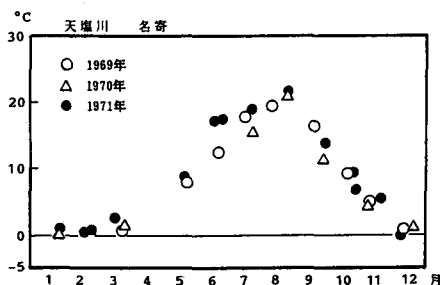


図-1 天塩川の水温の年変化

- | | | | |
|-------|----------|--------------------|----------------------|
| * | 学生員 | 岩手大学大学院工学研究科 修士課程 | (〒020 盛岡市上田4丁目3-5) |
| ** | 正会員 工修 | 北海道電力株式会社 土木部 | (〒060 札幌市中央区大通り東1丁目) |
| *** | 正会員 | 北海道開発局 開発土木研究所 | (〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目) |
| **** | 正会員 工博 | 岩手大学助教授 工学部建設環境工学科 | (〒020 盛岡市上田4丁目3-5) |
| ***** | 正会員 Ph.D | 岩手大学教授 同上 | (同上) |

どの河川管理上の問題が発生する。結氷期の水温の予測と晶氷の発生の予測は、取水障害の防止や結氷による種々の障害を防ぐための構造物であるアイスダム、アイスブーム等の効果を知る上でも重要である。

本報告では、湧別川における定時写真撮影と網走における気象資料、天塩川水系仁布川の水温観測結果等をもとに、晶氷の発生条件、結氷期の河川水温の変動と気温との関連を調べ、水温予測モデルの作成を試みた。

2. 湧別川（開盛地点）における晶氷の観測結果

湧別川開盛地点は、冬期間川幅25～26m、水面勾配1/700～1/3000、流量6～10m³/sの流況を持つ。本地点で昭和54年度より3年間、定時（午前8時）に写真撮影により晶氷の流下状態を観測したが、水温の測定は行われなかった。図-2は昭和55年度の観測より、河川が全面結氷した2月18日以前について晶氷の発生状態と網走の気象資料により得られた水面熱収支量の関係を示した。ここで、晶氷の流下量は写真から、河川横断方向に設けた測線上において、50%以上が覆われていれば多いと判定した。図によれば水面熱収支量が約-5cal/cm²/hour以上でなければ晶氷は発生せず、また-15cal/cm²/hrを境に多量の晶氷の流下が見られている。

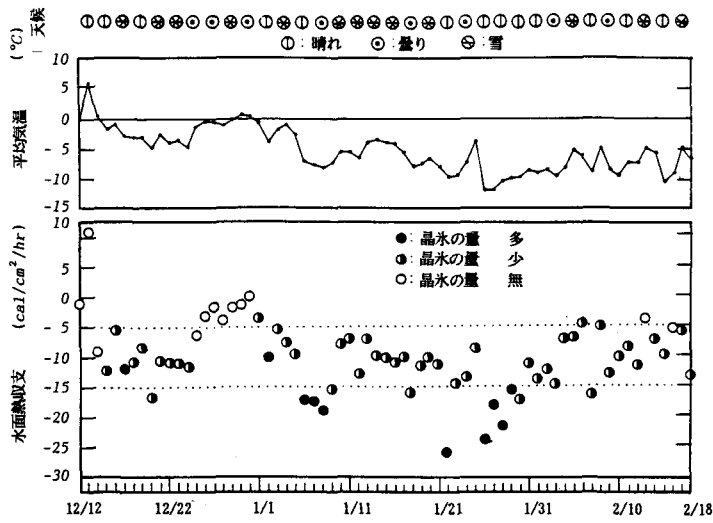


図-2 気温、水面熱収支と晶氷発生量

また水面よりの総熱収支と日平均気温 θ_a と水温 θ_w の差との関係は図-3のようになり、かなりのばらつきが見られるが、式(1)で近似されることが明らかになった。

$$HS \approx 2 \cdot (\theta_a - \theta_w) \quad (\text{cal/cm}^2/\text{hr}) \quad (1)$$

本観測により、晶氷の流下の有無は気温を用いておおよそ予測が可能であり、図-2から平均気温が-7.5°C(=-15cal/cm²/hr)以下であれば晶氷の大量発生が予想されることがわかった。

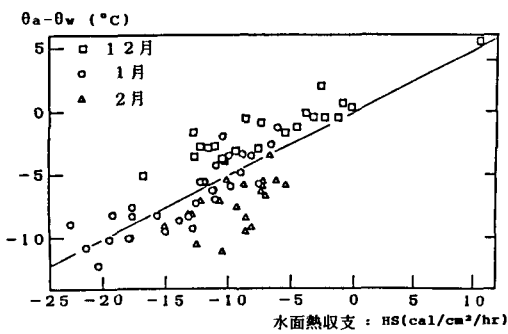


図-3 温度差と水面熱収支

3 仁宇布川での気温、晶氷と水温の観測

平成3年度天塩川水系支川仁宇布川で、晶氷を貯留するためのアイスダムの現場試験が実施され、晶氷の発生、水温、気温が観測された。観測された1時間毎の気温と水温の変動は図-4に示すとおりである。

水温はほぼ日周期で変動しており、気温が 0°C 以下でも水温は上昇している。また低温が続くと水温は 0°C に低下し、 0.02°C 程度の過冷却の状況になっている。本観測では水温が負になると晶氷の発生が観察され、晶氷の発生予測には水温が過冷却されることが条件であることが確認された。また図-5は、水温と気温のピーク出現時間の頻度を示すが、ほぼ13～14時頃に最高水温、最高気温が出現することがわかる。気温

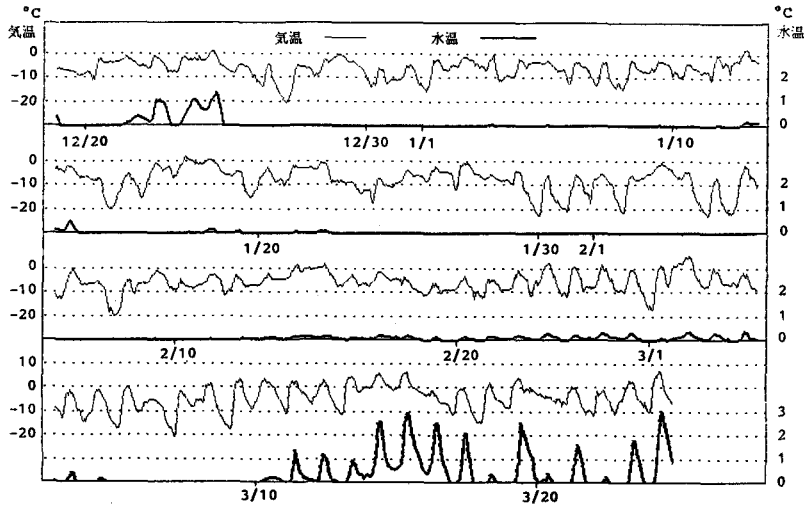


図-4 仁宇布川の気温・水温の時間変化

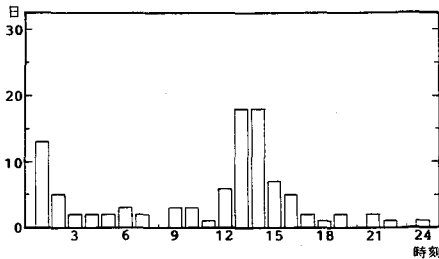


図-5 a 気温ピーク出現時刻

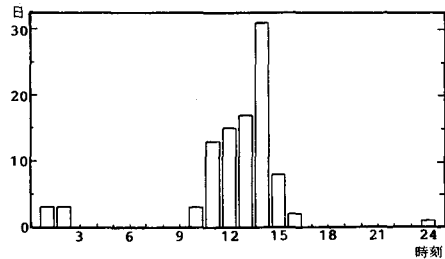


図-5 b 水温ピーク出現時刻

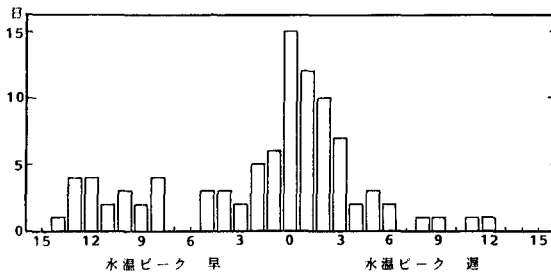


図-6 気温ピークと水温ピークの時間差

のピーク出現時間と水温のピーク出現時間の差は図-6に示すように、同時刻か水温が1～3時間遅れることが多い。しかし気温のピークがくる前に水温がピークに達する場合もあり、このことから、水温の形成は気温だけでなく他の要因が働いていると考えられる。

湧別川、仁宇布川での観測結果より次の点が明らかになった。

- (1) 晶氷の流下の有無については、日平均気温により予測が可能である。但し観測地点の流況、気温と晶氷の流下について予め観測資料の蓄積が必要である。
- (2) これまでの文献に紹介されているように水温が過冷却すると晶氷が発生・流下することが観察された。
- (3) 晶氷の発生量、発生時間を知るためには水温の変動を正確に予測する必要がある。
- (4) 水温の時間変動は、気温との相関が強いが、気温だけで表すことは不十分であり日射などの影響を考慮する必要がある。

4 冬期河川水温変化の支配要因

本節では、晶氷の発生を時間的に量的に予測する為に必要な河川水温の変動について検討する。河川水温は大気による冷却、流れによる表層水温の混合、晶氷の発生による冷熱の損失などの現象が重複して形成される。

仁宇布川の発電所取水口付近の流況について、河川水の冷却、混合、晶氷生産、それぞれに要するおおよそのタイムスケールを計算すると次のようになる。

河川水温の冷却率 $d\tau/dt$ は、熱平衡方程式から計算される²⁾。

$$\rho \cdot C_p \cdot A \cdot Y \cdot \frac{d\tau}{dt} = -\phi \cdot A \quad (2)$$

ここで τ は水温、 t は時間、 C_p は単位体積当り熱容量、 ϕ は単位時間熱損失量、 A は川の表面積、 Y は水深である。

水深 Y が0.5mのとき、 $\phi = 200W/m^2$ ($= 17.2cal/cm^2/hr$)、 $d\tau/dt = 0.95 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ C/sec$ とすれば、水温を $0.01^\circ C$ 下げるのに必要な時間は105secとなる。

流水の垂直方向の混合に要する時間は次式で計算される²⁾。

$$\tau_i = \frac{Y^2}{2(0.067 \cdot u \cdot Y)} = \frac{Y}{0.134 \cdot u} \quad (3)$$

ここで u は摩擦速度である。水深 $Y=0.5m$ ならば $u=0.16m/sec$ 、 $\tau_i=23.8sec$ となる。

晶氷の生産による冷却に必要な時間は、Ashton (1986)を参考にして、晶氷生成のための熱平衡方程式を基にした次式で計算される²⁾。

$$\tau_f = \frac{\rho \cdot C}{N \cdot R_d \cdot k \cdot Nu} \quad (4)$$

ここで N は晶氷の密度、 C は水の比熱、 R_d は晶氷の半径、 k は水の熱伝導係数、 Nu はNusselt数である。 $N=10^6$ 、

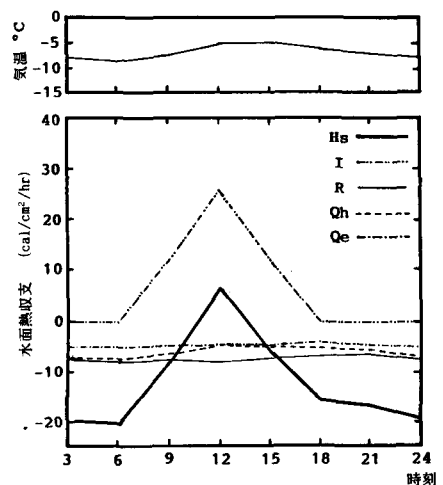


図-7 熱収支各成分

$R_d=1$ (mm) のとき、 $Nu=10$ のオーダーになるので、 $\tau_r=751.6$ (sec) となる。

以上の3つの過程に要する時間を比較すると、混合のタイムスケールは他の2つに比べてかなり短いの、河川水温は一様であり温度分布を持たない考えることができる。

次に網走の1981年の1月の気候観測資料を基に、同地方の水面の熱収支を3時間毎に計算し、1カ月の平均を求めた結果が図-7である。ここでIは短波放射、Rは長波放射、 Q_h は顕熱フラックス、 Q_e は潜熱フラックス、HSは総熱収支で、単位はともに (cal/cm²/hr) である。これから熱損失量において、日射量が大きな部分を占め、日中気温が0°C以下で、他の成分が負であっても総熱収支は正になる場合がある。よって水温の変動に対する日射量の影響は大きいと考えられる。

5 水温予測モデル

水温の形成には日射量が大きくかかわっているため、水温の予測には日射量を考慮した方がよい結果が得られると思われるが、日射量の観測資料は得難いのが難点である。そこで入手が易しい気温だけを用いて予測の可能性を検討する。

Billeloは、水温の時間的変化は気温と水温の差によるものとして、気温のみをパラメータとした次の支配方程式を提案した⁴⁾。

$$\frac{d\tau}{dt} = K(T - \tau) \quad (5)$$

ここでTは気温、 τ は水温(水面)、tは時間、Kは時間の逆数の次元を持つ定数である。

式(5)を積分し階差式にすると式(6)になる。

$$\tau_n = \tau_{n-1} + (1 - \exp(-K \cdot \Delta t)) (T_n - \tau_{n-1}) \quad (6)$$

ここで τ_n は時間nにおける水温、 τ_{n-1} は時間n-1における水温、 T_n は時間nにおける気温、 Δt はnとn-1との時間間隔である。

このモデルでは、全ての熱収支項を温度差によって代表させており、気温が0°C以下であれば、水温は上昇せず冷却の方向に働く。そのため仁宇布川のように気温が0°C以下でも水温が上昇するものには適用できない。

そこで、Billeloのモデルを基に次の式(7)のモデルを考えた。ここでは熱収支の各成分のうち短波放射である日射量は独立して与え、長波放射、顕熱フラックス、潜熱フラックスは気温と水温の差に比例する部分に含めた。

$$\rho \cdot C_p \cdot Y \cdot A \frac{d\tau}{dt} = A \cdot \{K' (T - \tau) + \alpha \cdot I\} \quad (7)$$

ここでIは日射量、 C_p は単位体積当り熱容量、Yは水深、Aは河川の表面積、 K' は温度差による影響の大きさを決定する定数、 α は日射による影響の大きさを決定する定数である。

この式を積分し、階差式とすると次式になる。

$$\tau_n = \tau_{n-1} + (1 - \exp(-\frac{K'}{\rho \cdot C_p \cdot Y} \Delta t)) \cdot (T_n - \tau_{n-1} + \frac{\alpha}{K'} \cdot I_n) \quad (8)$$

日射量 I は次式によって計算した値を用いた²⁾。

$$I = I_s (1 - 0.0065 \cdot c^2) \quad (9)$$

ここで I_s は晴天時の毎時日射地面到達量、 c は雲量で、天候から晴れの時は0、降水があるときと曇りの時は10、晴れのち曇りなど途中で天候が変わるときには、5として計算した。また結氷期間には結氷板により水体と大気が遮断されるので水温の変動は小さくなると考えて結氷期には K' の値を小さくとり、また氷板上の積雪によって日射が遮断されると考えて α の値も小さく与えた。今回の計算では結氷期には $K' \cdot \Delta t / \rho \cdot C_p \cdot D = 0.004$ 、 $\alpha / K' = 0.44$ 、非結氷期には $K' \cdot \Delta t / \rho \cdot C_p \cdot D = 0.05$ 、 $\alpha / K' = 0.11$ の値を与えた。この値は、実測値に最も近くなるように与えたものである。

この式により1時間毎に計算した結果を図-8に示す。ある程度までは水温の追跡ができたが、12月の部分では計算値が実測値よりかなり小さくなっており、また実測値と計算値のピーク発生時刻の不一致がときどき見られる。

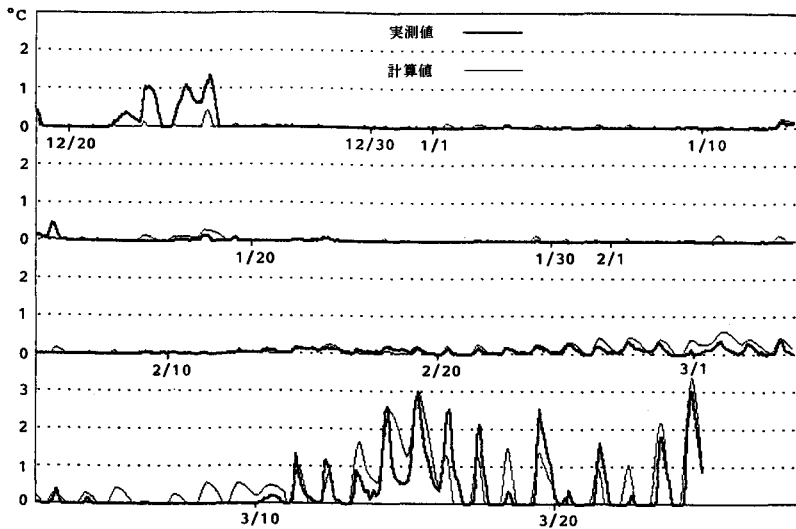


図-8 水温実測値と計算値

6 あとがき

本年度の観測では日射量など各熱収支項目の資料が得られなかったもので、水温計算に用いたパラメータの適否は、今後次年度以降の観測によりさらに検討する必要がある。またさらに正確な水温の予測を行うためには、降雪、流入する地下水の温度、地温などを検討することも必要と思われる。

参考文献

- 1) 山口 甲 西村 豊 河川の水温と結氷に関する研究 1973年2月
- 2) Ashton, G.D., "River and Lake Ice Formation", water Resources Publication, 1986
- 3) 竹内教浩 水域の結氷過程に関する研究 岩手大学大学院修士論文 1987年3月
- 4) Billelo, M.A., "Ice Predication Curves for Lake and River locations in Canada", CRREL Rsearch R eport 129, 1964.