

# 寒地河川における冬期渇水後期の流量変動予測

山崎 誠<sup>1</sup>・小山俊<sup>2</sup>・長谷川和義<sup>3</sup>・平山健一<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 北海道電力株式会社札幌支店 (〒060 札幌市中央区大通東1-2)

<sup>2</sup> 正会員 北海道電力株式会社総合研究所

<sup>3</sup> 正会員 工博 北海道大学工学部土木工学科

<sup>4</sup> 正会員 Ph.D. 岩手大学工学部建設環境工学科

本研究は北海道北部の山地河川において、冬期渇水後期にみられる日周期で振動する河川流量変動について、著者らが実施した冬期間の観測データに基づき、氷の堰 (Anchor Ice Dam) によるステップ・プールのモデル化した予測計算手法を提案し、考察を行ったものである。この結果、1) 放射収支がマイナスとなる夜間の平均気温が $-4 \sim -6^{\circ}\text{C}$ を下回ると流量変動の振幅が大きくなる。2) 全面結氷から一部開水路となった河道内に Anchor Ice によって形成されたステップ・プールが観察された。3) Anchor Ice Dam はアクティブ状態で発達し、パッシブ状態で退行すると仮定した計算モデルにより、日周期で発生する流量変動を説明することができる。

**Key Words :** frazil slush, anchor ice, river discharge, supercooling, step-pool

## 1. はじめに

積雪寒冷地の河川、特に北海道のほとんどの河川では、冬期間に、結氷の発達、フラジルスラッシュ (泥状晶氷) の流下および蓄積がみられる。河川の結氷の発達は、岸氷が形成された後、徐々に中心部まで発達し全面結氷となった時点で開水路から閉水路の状態に流れが変化する。春先の本格的な解氷 (Break-up) に至る直前に、流心付近が細長く開きふたたび開水路の流れに戻る。本論では部分的に結氷板が開いた状態を開氷と表現する。

筆者らは 1992 年以来、北海道電力(株)仁字布川発電所において、流氷雪の取水口への流入を防止するためにフェンスブーム型の対策工を設置し、除去作業に要する労力を大幅に削減することができた。また、現地観測結果から、対策工上流に人工的に形成されたプールのフラジルスラッシュ堆積状況および結氷面下の流速分布などの水理特性について明らかにしてきた<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。

一方、仁字布川発電所の取水河川である天塩川水系ペンケニウプ川は、河川勾配の急な山地河川で、冬期渇水期の後期である3月上旬に、全面結氷状態から流心付近が開き、兩岸に結氷板が残った開水路の流れとなる。本論は、この時期に水温の過冷却現象によるアクティブフラジルが河道にアンカーアイスによる階段状のステップ・プールを形成することに着目し、このステップ・プールをモデル化した予測計算手法を提案し、大きな日周期の流量変動が発生する機構について考察した。

## 2. 晶氷の成長

河川結氷のはじまりは、フラジル (晶氷) と呼ばれる小さな氷の結晶の誕生である。フラジルは流れの中に満遍なく分布し、水温が過冷却の状態にあれば活性化し、フラジル同志がフロック状に凝集したり、水門や河床の石など他の物体に付着してアンカーアイス (錨氷または底氷) を形成する一方、ある程度の浮力を持つ程に成長すれば水面に浮上する。

Michel<sup>5)</sup>は 1963 年にアクティブフラジル (Active Frazil) の表現を用い、河川水温が過冷却状態で、強い付着力を有する特性について述べている。一方、パッシブフラジル (Passive Frazil) は、河川内を多くのフラジルスラッシュ、蓮葉氷 (Pancake Ice) などが流下するものの、水温が氷点あるいは少し高い状態で氷の成長が停止している状態のことをいう。

ここで、既往の研究からフラジルの発生と気温の関係を要約すると、山口ら<sup>6)</sup>が北海道全域にわたる調査結果から、河川の結氷開始と最も関係の深い期間の気温は3日間平均気温であり、 $-5.5^{\circ}\text{C}$ と報告している。また、平山<sup>7)</sup>は、湧別川で日最低気温が $-6^{\circ}\text{C}$ 以下になるとフラジルスラッシュ、蓮葉氷の流下が見られたと報告している。

次に、河川氷と流速の関係を既往の研究から要約すると、Carstens<sup>8)</sup>は、表面流速を用いて河川の結氷状況を3分類している。 $0.6\text{m/s}$ 以下では全面結氷が生じ結氷面下

にフラジルスラッシュが蓄積する。0.6から1.2m/sまでは全面結氷せずフラジルスラッシュは河川表面に浮んで流下する。1.2m/s以上のときフラジルスラッシュは全水深にわたって分布し河床にアンカーアイスが形成される。岩手大学工学部<sup>9)</sup>はペンケニウブ川において観測を行い、アンカーアイス発生限界流速を0.7~0.9m/s以上と報告している。Tesaker<sup>10)</sup>は、ノルウェーにおける急勾配の山地河川で、緩やかな流れから急変する箇所ではアンカーアイスが発生していることに注目し、アンカーアイスダムの観測事例を報告している。

以上のように、河川の結氷およびフラジルの生成は、地勢に支配される気象要因と河川の水利要因に支配される。河川勾配が急で水深の浅い山地河川は、瀬や淵に代表されるように勾配が複雑に変化し、流速も緩急を繰り返す。したがってCarstensが説明した各種の結氷状態も上流から下流にかけて数多く繰り返して発達することになる。特に冬期渇水後期は、両岸に残った氷板によって開水路の幅が狭まり単位幅あたりの流量が増加するため、河川勾配の急変部でアンカーアイスが発達しやすくなる。

### 3. ペンケニウブ川における結氷調査

仁宇布川発電所の取水河川であるペンケニウブ川は、北海道の北端を北上して流れる一級河川天塩川水系の支流であり、河川勾配が約1/100の急な山地河川である。発電所は最大出力1,850kW、使用水量最大7.13m<sup>3</sup>/sと小規模である。発電所取水堰から源流部までの長さ約20km、流域面積は184km<sup>2</sup>である。図-1に示すように一冬の積算寒度が1,000℃以上に達する寒冷地である。

1992~1994年の現地観測のうち、図-2に1992年の冬期観測結果を毎正時ごとに示す。河川水温の記録から、氷点以下の水温をアクティブ、それ以上をパッシブの状態と仮定した。また、アクティブとパッシブの発生する一日の割合を度数分布にあらわして過冷却インデックスと呼ぶこととする。なお、実測流量の測定値は仁宇布川水力発電所(Q<sub>max</sub>=7.13m<sup>3</sup>/s)の発生電力量から換算したものであり、水温計に使用した白金測温抵抗体および記録計の測定分解能は2/100℃である。

冬期渇水期間(1~3月)の河川流量は、図-3に示すように日平均流量では指数関数的に逡減するが、時間流量では図-2下段に示すように日周期の流量変動が発生している。この振動の発生要因は河川水温とフラジルスラッシュの形成、アンカーアイスの発達ならびに岸氷の発達による河道の狭窄現象などが関係している。そこで、冬期間の結氷の発達過程を、岸氷が発達する1月~2月上旬までの期間を〔前期〕、全面結氷し開水路が

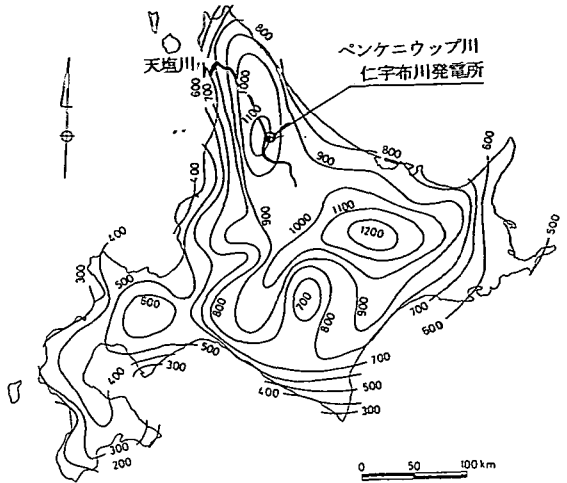


図-1 北海道の積算寒度分布(1974-1975)<sup>11)</sup>と調査位置

ら閉水路と流れが変わる2月中旬~下旬の期間を〔中期〕、河川流心の結氷板が一部開氷し再び開水路に戻る3月上旬を〔後期〕に区分して考察すると、次のような特長がある。

#### a) 前期：1月~2月上旬

- ・アクティブフラジルの発生頻度が高い。
- ・流れは開水路の状態から閉水路の状態に移行する。
- ・河道が開水路状態のときは流れの抵抗が少なく、大量のフラジルスラッシュが取水口に入る危険性がある。
- ・アンカーアイスが累積して発達し、その上流部に結氷板の発達が促される。
- ・結氷板の下にフラジルスラッシュが堆積し、懸垂氷堰(Hanging Ice Dam)ができる。
- ・河川流量の減少はみられるものの、急激な流量増加はみられない。
- ・河川水位は結氷の進行とともに上昇する。

#### b) 中期：2月中旬~下旬

- ・全面結氷によりパッシブ状態が比較的長く続き、河川水温がわずかながらプラスになる。
- ・河道内に堆積していたフラジルスラッシュが減少し、全面結氷状態から流心付近の氷板の一部が細長く開水する。
- ・結氷板の範囲では、アルベドが大きく、放射収支量が小さい。
- ・河川流量の日周期の変動幅は小さい。
- ・河川水位は冬期渇水期間中で最も高くなるが、フラジルスラッシュの減少によって徐々に低下する。

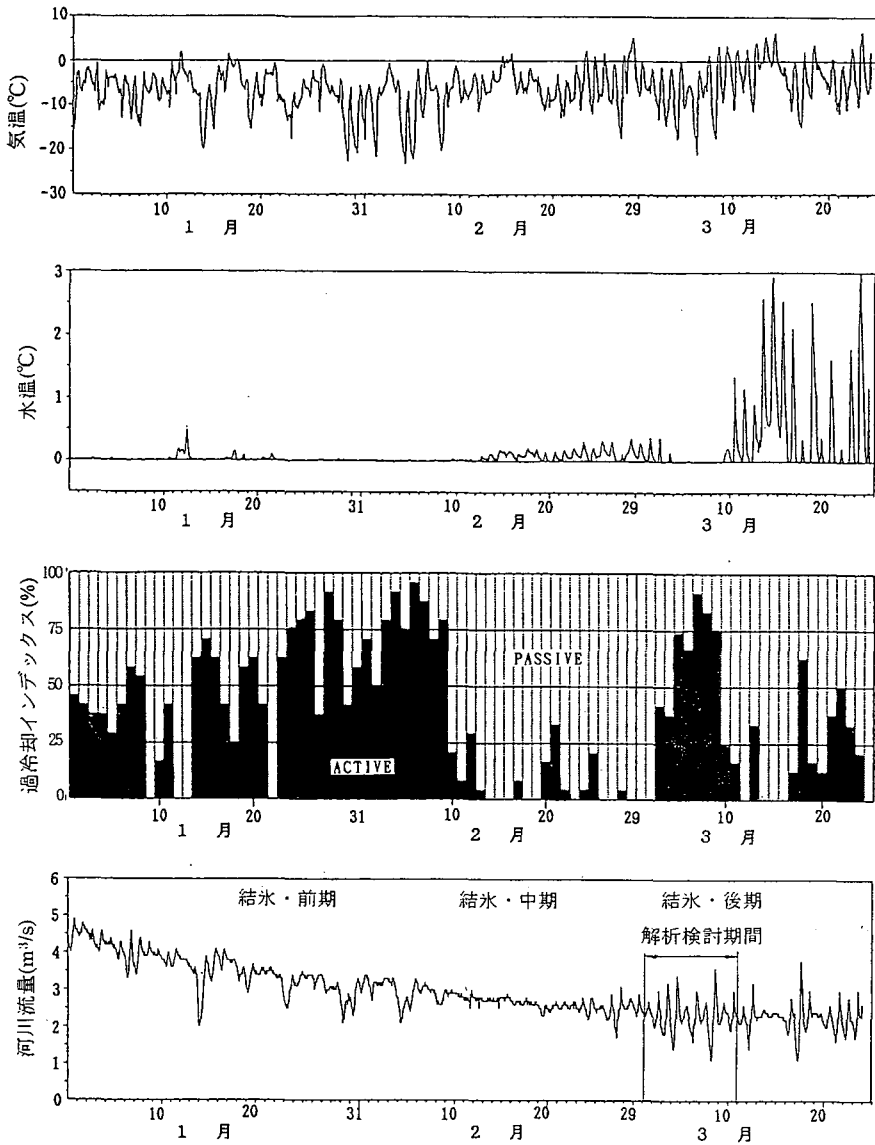


図-2 ベンケニウプ川における、気温、水温、過冷却インデックス、河川流量の変化（1992年1月～3月）

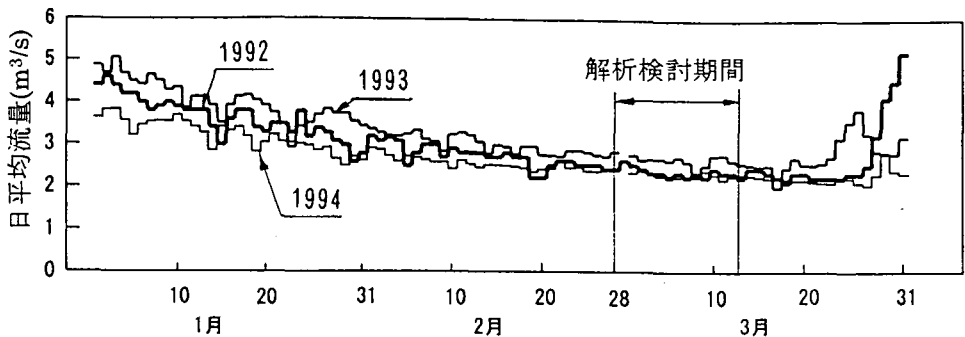


図-3 ベンケニウプ川における冬期濁水期の日平均流量変化（1992～1994年）

c) 後期：3月上旬～中旬

- ・結氷板が開氷し自由水面が広がることによって、アクティブフラジルの生成が活発になる。
- ・アンカーアイスによる氷の堰 (Anchor Ice Dam) が発達しステップ・プールが形成される。その結果、河川流量は急激に減少する。
- ・夜間のアクティブと日中のパッシブが明瞭に現れるため大きな日周期の流量変動が生じる。
- ・水温がパッシブな状態では、堆積していたアンカーアイス、フラジルスラッシュが付着力をなくし、河川内を浮んで流下する。
- ・河道内をフラジルスラッシュが流下し閉塞水 (Ice Jam) が発生する。
- ・急激な流量増加などによってアンカーアイスが崩れ、小規模な Ice Run が発生する場合がある。
- ・開水面の範囲では、アルベドが小さく、放射収支量が大きくなる。
- ・河川水位は閉水路から開水路に変化する時点で一気に低下する。

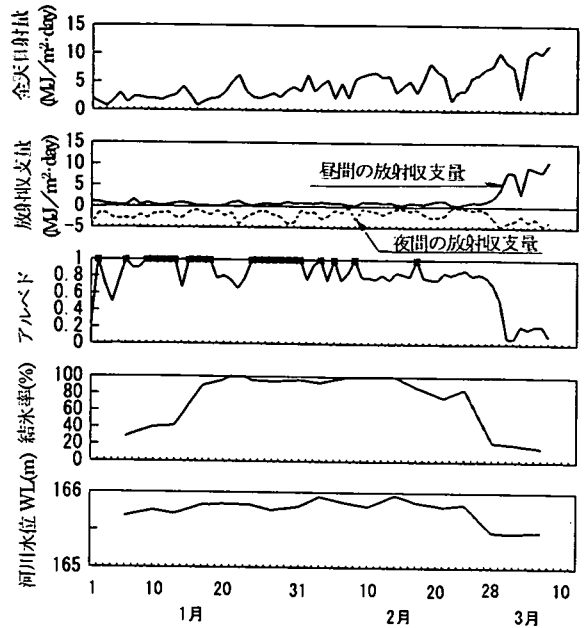


図-4 1994年のベンケニウブ川における放射量各成分および取水口上流500mの河川結氷状態の変化

4. 冬期渇水後期の流量変動予測手法

(1) 河川水の熱収支

河川における水温変化、結氷発達、フラジルの生成を論じる場合、河川水面（あるいは結氷面）における熱収支を求めなければならない。熱収支の入出力の差がマイナスの時は水温を低下させ、0℃以下の過冷却状態となるとフラジルの生成が始まる。

対策工の上流20mの位置に放射収支計（英弘精機製CN-11）と日射計（英弘精機製MR-22）を水面上2.0mの高さに設置した。気温・雨雪量などの気象観測項目は対策工の下流約310mの発電所取水堰右岸側に設置した。

図-4にベンケニウブ川における1994年1～3月の全天日射量、放射収支量、アルベドの放射量各成分ならびに対策工上流180mの河川結氷率（全川幅に対する結氷幅の割合）と河川水位の変化を示す。結氷率と河川水位は週に2回測定した。日射量は太陽高度に関係するため1月は日照時間が短く熱量も小さいが徐々に増加する。アルベドは太陽高度が最も高くなる11～13時の平均値で表わし、図中1.0のところには\*がついているのは、日射計あるいは放射収支計に雪や霜がついたり不確かさが考えられる場合である。1月～2月は太陽高度が低く積雪の載った結氷表面のアルベドが大きいため、日合計の正味放射収支量はほぼ負の値が連続するが、全面結氷状態から50%以上開氷し自由水面が広がった2月28日以降は、アルベド、放射収支量に大きな変化がみられる。この開氷前後の河川の状況は、2月23～28日まで連続して水温のパッシブ状態が続き、28日夜半に小規模

なIce Runが発生して、細長く一部開氷していた川幅が一気に広がった。このため3月1日以降は夜間の放射冷却により水温が過冷却になりやすく、アクティブフラジルの生成が活発になり、日中の大気から水中へ入射する熱量も増加した。アルベドの長期的変化は結氷板の上に積雪がある場合は0.8前後、開水面の場合は0.1～0.2の値を得た。

河川水の熱収支のうち、最も主要な熱要因は放射収支であるが、降雪等の影響により長期間の正確な観測が困難であり、本論においては現地でも得られた観測結果をもとに気温データにより検討を行うものとする。

アクティブフラジルの形成によってみられる河川の流量変動は、晴天の日と降雪の日で違いがあるが、日平均気温では両方の日もほぼ同じ平均値になることがあるため、放射冷却収支がマイナスとなる前日18時から当日の朝方7までの平均気温（以下、夜間平均気温という）により検討を行う。

図-5に示すように日最小流量と平均流量の差分 ( $Q_{min} - Q_{ave}$ ) と夜間平均気温の関係から、夜間平均気温が-4～-6℃を下回ると河川流量の大きな日周期の振動現象が生じていることがわかる。

(2) 冬期渇水後期の河川流量変動

冬期渇水後期である3月上旬は本格的な融雪流出が始まる約1ヵ月前で、河川流量は地下水の供給のほかに

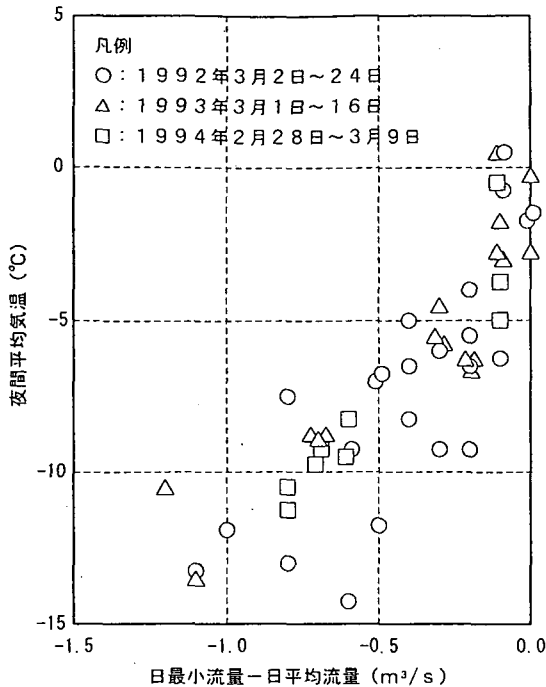


図-5 夜間平均気温と流量変動 ( $Q_{\min}-Q_{\text{ave}}$ ) の関係

地熱による積雪下面の底面融解により河川に供給されるが、年間を通して最も流量の少ない時期である。この時期に河川流量の日周期の振幅が大きい日と小さい日があり、それぞれ次に示すような特長がある。

- a) 日周期の振幅が大きい場合
- ・夜間の負の放射収支量が大きく、逆に昼間の正の放射収支量が大きいとき。
  - ・夜間の放射冷却により水温がアクティブ状態となり、日中に水温が上昇しアクティブからパッシブに変わるとき。
  - ・夜間（前日 18 時～朝方 7 時）の平均気温が  $-4 \sim -6^\circ\text{C}$  以下を下回るとき。
- b) 日周期の振幅が小さい場合
- ・水温が比較的高く、夜間もパッシブの状態が続く。
  - ・一日中降雪が続くときは、日中のプラスの放射収支量が小さく、日中でも水温が  $0^\circ\text{C}$  とアクティブ状態が続くが活発ではない。
  - ・夜間（前日 18 時～朝方 7 時）の平均気温が  $-4 \sim -6^\circ\text{C}$  を上回るとき。

3月上旬の放射収支量は、朝方 7 時頃にはプラスに転じるが、水温がアクティブからパッシブの状態に移行する時刻はほぼ 10 時までである。この遅れは、融雪流出解析で定義される Cold-Content (夜間氷点下になった積雪層を零度に達するまでに要する熱量) と同様に、河川のアクティブ状態が解消し水温が上昇し始めるまでに要する熱量と考えることができる。河川流量の日周期が

大きい場合、水温の上昇は放射収支の立ち上がりと比較しやや遅れ 10～12 時頃にプラスとなり、14～15 時頃に最大を示す。河川流量の最小は 7 時頃、最大は 17 時頃に発生する。一方、日周期の振幅が小さく水温がプラスの場合は、水温と放射収支の曲線の立ち上がりはほぼ一致する。

### (3) ステップ・プールによる流量変動予測

冬期間、急勾配の山地河川において、階段状に数多くのアンカーアイスによる氷の堰 (Anchor Ice Dam) ができる。図-6 にペンケニウプ川で観察されたアンカーアイスによるステップ・プールの写真を示す。ステップ・プールが形成された河川勾配は、約  $1/100$ 、その上流の河川勾配は約  $1/200$  で、緩やかな流れから急な流れに変化する急変部で発達することが観察された。アンカーアイスがよく発達した翌朝は、越流している開口部の幅は極端に狭く、日中の融解によって越流幅が拡がり、全幅堰に似た流れの形状に変化していくものと考えられることができる。

長谷川ら<sup>12)</sup>の山地河川におけるステップ・プールの研究成果を参考に、次のようなアンカーアイスによるステップ・プールの流量変動予測モデルを提案する。

水深の浅い結氷河川では、区間の短いステップ・プールが次々と発生するが、図-7 の模式図で示すように、区間全体に堰状の流れが仮定できるものとして、ステップ・プールからの流出量  $Q_{\text{out}}$  は、

$$Q_{\text{out}} = C_1 \cdot H^2 \left(1 - \frac{h_p}{H}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot B_0 \cdot H \quad (1)$$

ここに、 $H$ : プール最深部の水深 (m),  
 $h_p$ : アンカーアイスダムの高さ (m),  
 $C_1$ : 越流係数,  $B_0$ : 越流部の想定幅 (m).  
 $C_1 \cdot B_0 = C$  としてまとめると、

$$Q_{\text{out}} = C \left(1 - \frac{h_p}{H}\right)^{\frac{3}{2}} H^{\frac{3}{2}} = C (H - h_p)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

上流部のプールで貯留が生ずるものとして、貯留量を  $S$  とすれば、

$$\frac{dS}{dt} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} \quad (3)$$

ここに、 $Q_{\text{in}}$ : プール入口断面からの流入量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).  
貯留量  $S$  は河道貯留によるものなので、プール形状を三角形断面と仮定し、プールの長さを  $l$  とすると、

$$S = \frac{1}{2} \cdot 2m \cdot H \cdot l = mLH^2 \quad (4)$$

ここに、 $1/m$ : 斜面勾配,  $L$ : 貯流域の長さ (m).  
したがって、プール水深  $H$  の変化は、

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q_{\text{in}} - C (H - h_p)^{\frac{3}{2}}}{2mLH} \quad (5)$$

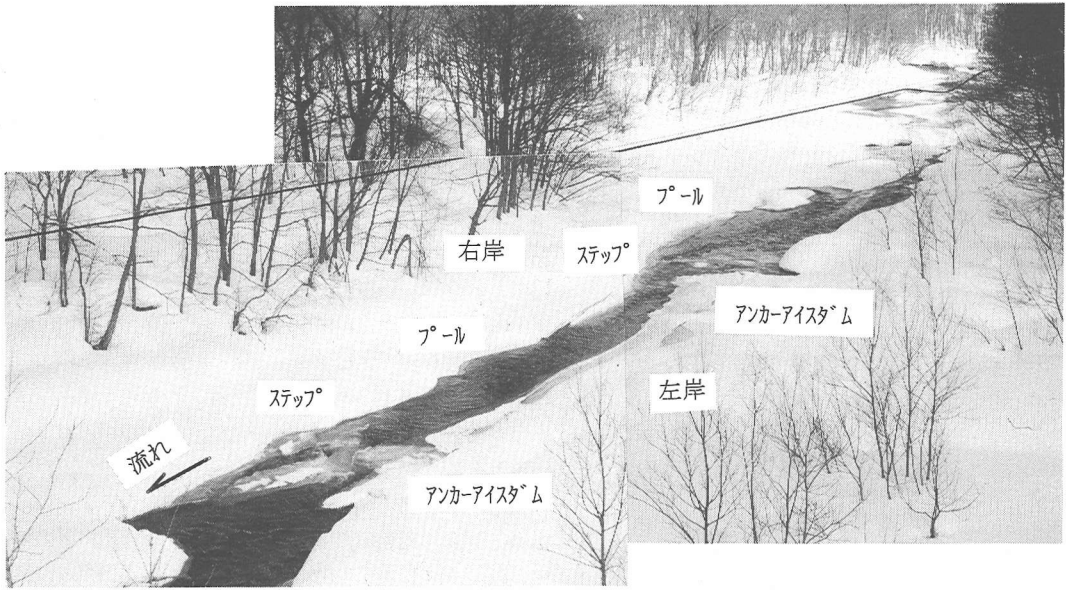


図-6 アンカーアイスによるステップ・プール (ペンケニウプ川, 1996年3月5日)

次に越流係数  $C$  は、水温のアクティブ状態でアンカーアイスが発達することにより、越流幅が縮小するため小さくなり、パッシブ状態でアンカーアイスが剥がれ越流幅が広がるため大きくなる。この変化  $\Delta C$  を水面と大気との熱交換に支配されるものとして、簡便的に気温  $T_a$  に関係すると考えると、

$$\Delta C = \alpha (T_a(t-t_0) - T_s) \quad (6)$$

ここに、 $T_a(t)$ : 気温 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t$ : 時間 (hr),  $t_0$ : 遅れ時間,  
 $\alpha$ : 熱交換係数に相当する係数 ( $\text{m}^{0.5}/\text{sec}/^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_s$ : アクティブ/パッシブの境界となる基準温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

また、アンカーアイスの堰高の変化  $\Delta h_p$  を越流係数の変化  $\Delta C$  と同様に考えると、

$$\Delta h_p = \beta (T_a(t-t_0) - T_s) \quad (7)$$

ここに、 $\beta$ : 熱交換係数に相当する係数 ( $\text{m}/^{\circ}\text{C}$ )

以上より、プールから流出する計算流量  $Q_{\text{out}}$  は、気温の関数式、式(6)、(7)により  $C$ 、 $h_p$  の変化量を求め、式(5)で水位計算を行い、式(2)に代入し求めることができる。

#### (4) 解析結果と考察

図-8は、3月上旬の河川流量において、変動の振幅が大きい場合と小さい場合に区分して、気温と放射収支量の関係を示したものである。一日のうち寒さが最も厳しく、水温がアクティブ状態となる深夜0時から朝方6時までの気温を積算したものを6時間積算寒度と呼び、日射および放射収支が最も大きく、水温がパッシブ状態となる正午を中心とした9時から15時までの気温を積

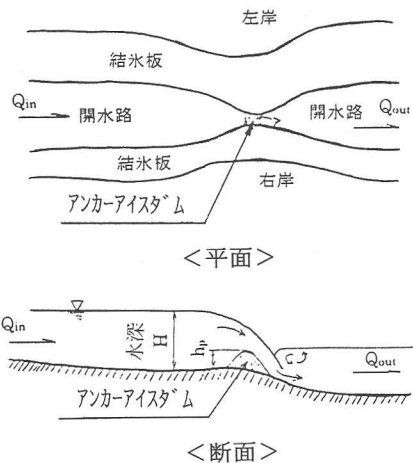
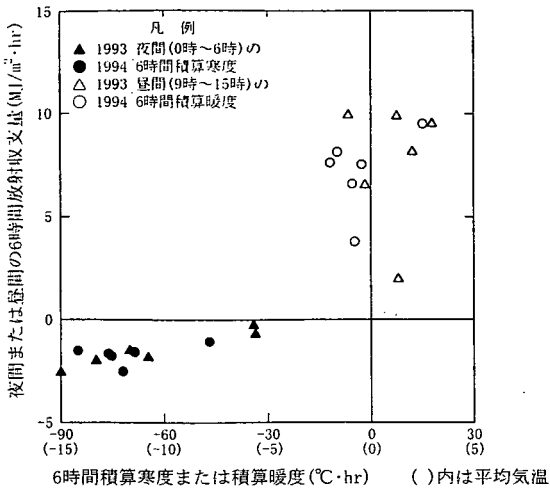


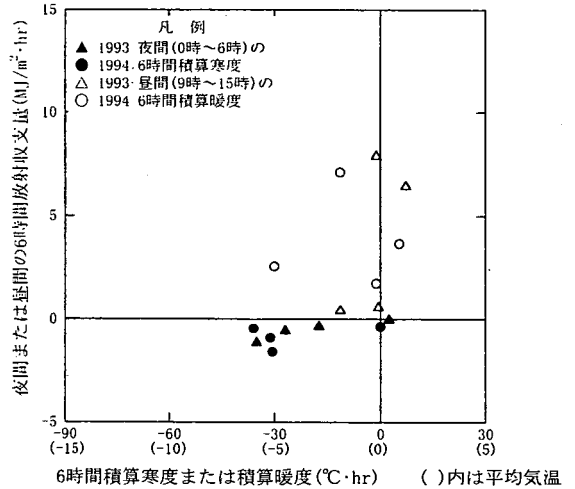
図-7 アンカーアイスによるステップ・プール模式図

算したものを6時間積算寒度と呼ぶものとする。

図-8(a)に示すように、変動の振幅が大きい場合、6時間積算寒度とマイナスの放射収支量はほぼ比例関係にあることがわかる。また、河川流量の変動の振幅が大きい場合、6時間積算寒度は  $-30^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$  (平均気温で  $-5^{\circ}\text{C}$ ) 以下であり、小さい場合は  $-36^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$  (平均気温で  $-6^{\circ}\text{C}$ ) 以上となっている。これらの観測結果から、式(6)、(7)のそれぞれの係数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $T_s$  は、次の仮定にもとづくものとした。



(a) 振幅が大きい日



(b) 振幅が小さい日

図-8 流量変動の振幅が大きい日と小さい日の気温と放射収支量の関係

a) アクティブ状態で越流係数  $C$  は減少し、アンカーアイスによる堰高  $h_p$  は増加するものとして、熱交換係数に相当する  $\alpha$ ,  $\beta$ , ならびに増減の基準温度  $T_s$  は、1992～1994年の試算により表-1に示す係数を与えた。なお、アンカーアイスによる堰高  $h_p$  の係数  $\beta$  は、岩手大学工学部<sup>9)</sup>がペンケニウプ川で実際に観測したアンカーアイスの発生量の実測結果から、6時間積算寒度-50°C・hrで約5cmを参考とする。

b) 越流係数  $C$  およびアンカーアイスによる氷の堰高  $h_p$  は、解析にもちいたペンケニウプ川の非結氷時の川幅および水深を考慮し、 $5 \leq C \leq 20$ ,  $0.1 \leq h_p \leq 0.4m$  の範囲で変化するものと仮定する。

c) 朝方アクティブからパッシブ状態に移行するための遅れ時間  $t_0$  (解析では4時間)を考慮する。また、午前中7～10時までは越流係数  $C$ , 堰高  $h_p$  とも変化しないものと仮定する。

ルンゲ・クッタ法による微分方程式の解法では、時間きざみ  $\Delta t = 1 \text{ hr}$  の差分を行うものとし、 $C=20$ ,  $h_p=0.1m$ ,  $Q_{in}$ =日平均流量を初期条件として代入する。また、実際の河道では複数のステップ・プールが階段状に発達しているが、解析では河道貯留の形状を  $m=30$ ,  $L=2000m$  の一つのステップ・プールにモデル化して計算を行う。

1992～1994年の3ヶ年の解析結果を図-9に示す。それぞれの計算開始日は、2月下旬に数日間連続してパッシブ状態が続き結氷板が開氷する時期で、河川流量の日周期の振動が小さい日を初日とした。係数を適切に選んだ場合に、流量の解析値と実測値が非常に良く一致することが分かる。

そこで、実測の河川流量変動に一致するように同定した係数  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $T_s$  について以下に考察を行う。

表-1 ステップ・プールの計算条件

解析検討期間	1992年	1993年	1994年
	3.2～3.11	3.1～3.10	2.28～3.9
期間平均温度(°C)	-6.6	-3.6	-4.9
基準温度 $T_s$ (°C)	-6	-4	-5
アクティブ: $\alpha$ ( $m^{0.5}/\text{sec}/^\circ\text{C}$ )	0.15	0.18	0.11
パッシブ: $\alpha$ ( $m^{0.5}/\text{sec}/^\circ\text{C}$ )	0.55	0.55	0.55
$\beta$ ( $m/^\circ\text{C}$ )	$\alpha \times 0.01$		

表-1に示す基準温度  $T_s$  の-4～-6°Cは、図-5または図-8(a)に示す流量変動が大きくなる時の夜間平均気温に等しいが、同時に解析検討期間である3月上旬の平均気温にほぼ等しい結果が得られた。またこの基準温度  $T_s$  は放射収支量がマイナスからプラスに転じる朝方9～10時の気温に一致していて、昼間のプラスの放射収支を基準温度を上回る気温の関数で、夜間のマイナスの放射収支量を基準温度を下回る気温の関数で相関させていると解釈することができる。

係数  $\alpha$  は、アクティブの条件で0.11～0.18、パッシブの条件で0.55となり、その比0.20～0.33は図-8(a)に示すように夜間の傾き(放射収支量/ $(T_a - T_s)$ )と昼間の傾きの比が3/10とほぼ一致し、越流係数  $C$  の変化に最も支配的な要素である放射収支量を気温の関数で簡便的に表わすことができた。また、係数  $\beta$  は、アンカーアイスによる堰高  $h_p$  を非結氷期の水深約0.4mを上限と仮定したこと、および岩手大学工学部<sup>9)</sup>の実測結果から、係数  $\alpha$  の1/100に設定した。

次に解析で得られた越流係数  $C$ , プール水深  $H$ , ステップ高  $h_p$  について考察を行う。

流量変動の日周期の振幅が大きい場合、越流係数  $C$  は日単位で最大 20 から最小 5 まで変化し、同時にプール水深  $H$  も上昇・下降を示す。水深が上昇する時に河川流量が減少する結氷期の流れは、非結氷期の水位・流量の関係と全く逆になる。一方、振幅の小さい場合には傾向の異なる 2 種類のパターンがある。一つは日中の気温が低く連続して厳しい寒さが続く 1992 年 3 月 6～7 日の場合で、越流係数  $C$  は最小の 5 付近で推移し、プール水深  $H$ 、ステップ高  $h_p$  も高い位置にあるのは、アンカーアイスが発達し越流幅が最小の状態 で安定していることを表わしている。もう一つは逆に日中の気温・水温とも高いか、降雪が長時間継続し気温の日変化が小さい 1993 年 3 月 3～7 日、1994 年 3 月 3～4 日の場合で、越流係数  $C$  は最大 20 付近で推移し、プール水深  $H$ 、ステップ高  $h_p$  も低い位置にあり、アンカーアイスの発達量が少なく越流幅は最大に開いた状態を表わしている。

以上のように、アンカーアイスの発達および退行を考慮したステップ・プールのモデルにより冬期渇水後期にみられる日周期で振動する河川流量変動の概念を説明することができる。

## 5. まとめ

北海道電力仁宇布川発電所の取水河川であるペンケニウブ川において、冬期渇水期の観測結果を用いて種々の解析を行った。以下に本研究の成果を要約する。

(1) 3月上旬以降の一部開水した河川において、河川流量の変動幅は、放射収支がマイナスとなる前日 18 時から朝方 7 時までの夜間平均気温が  $-4 \sim -6^{\circ}\text{C}$  を下回ると大きくなることがわかった。

また、河川水温がアクティブからパッシブの状態に移行する時刻は 10 時頃までであり、最高水温は 15 時頃、河川流量の最大は 17 時頃に発生する。

(2) 結氷期間の河川流量は緩やかに逡巡するものと考えられていたが、懸垂氷堰や閉塞氷にアクティブフラジルが付着堆積するほか、河川勾配急変部において氷の堰(底氷堰: Anchor Ice Dam)が形成されることから、日単位で流量の減少あるいは増加現象が生じていることがわかった。特に、全面結氷が開水する 3月上旬に、一部開水路となった河道にアクティブフラジルがアンカーアイス発達させ、階段状にステップ・プールが形成されていることが現地観察された。

(3) ステップ・プールのモデルによる予測計算の結果は、実測流量とよく一致する。すなわち、底氷堰(Anchor Ice Dam)はアクティブフラジルの状態で堰高が高くなるとともに越流幅が縮小するなど越流係数が小さくなり、結果として水位が上昇し河道内に流量が貯留され下流河川へ流出する流量は減少する。一方、パッシブフラジルの状態では逆に越流係数が大きくなり、水位が低下し河川流量を増加させる。冬期渇水後期の 3月上旬は、夜間の気温低下ならびに日中の気温上昇にともない水温のアクティブ/パッシブが明瞭に現れるため、河川流量の日周期の振動現象が毎年同じ時期に発生する。

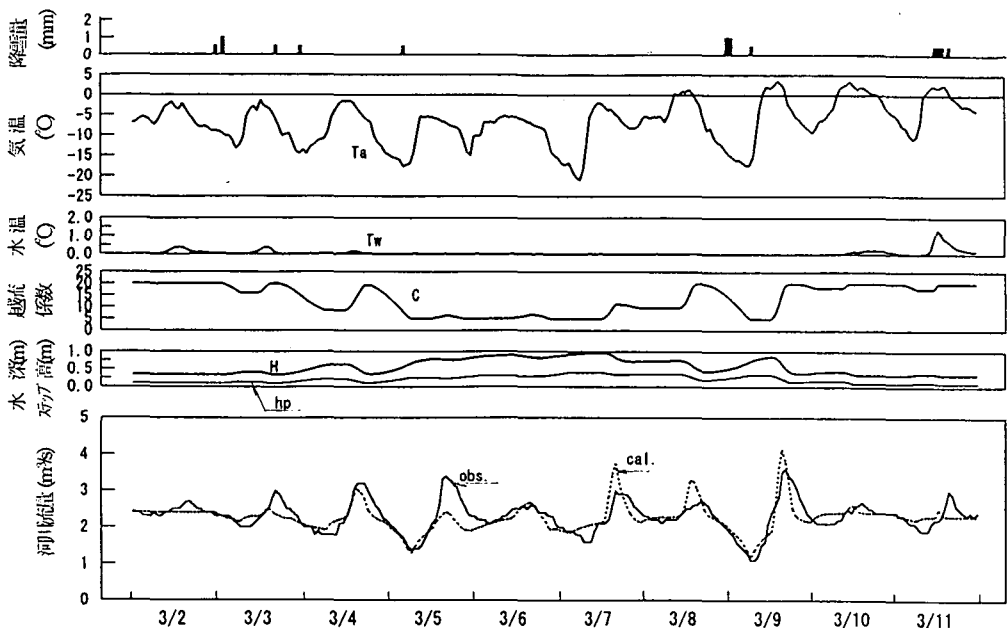


図-9 (a) 冬期渇水後期 (1992 年 3 月上旬) の河川流量変動予測結果



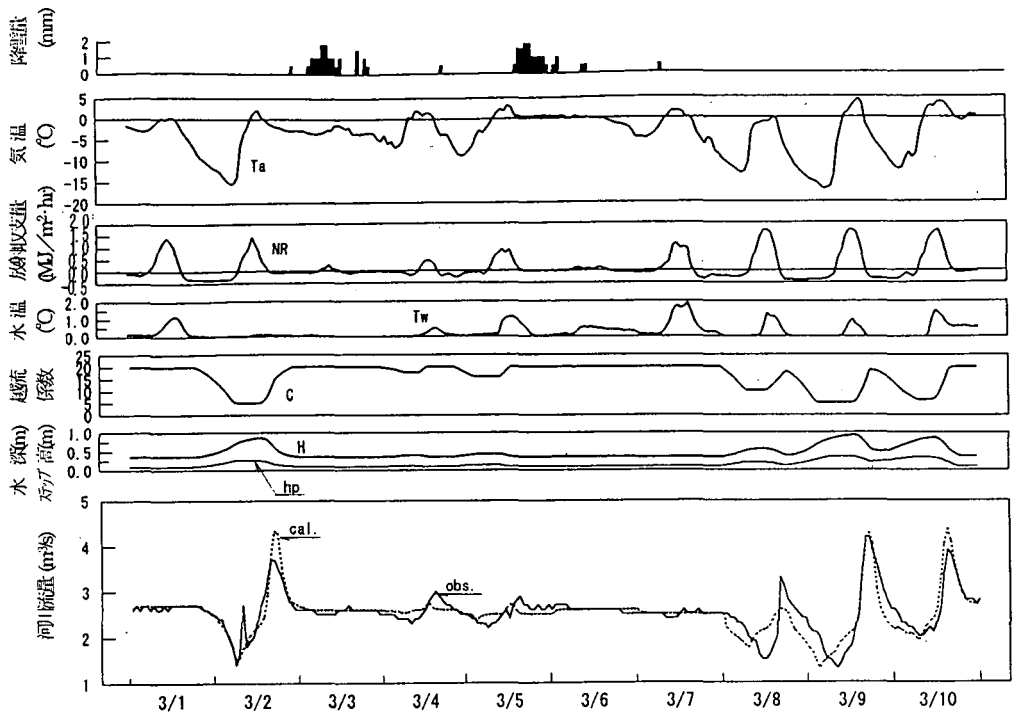


図-9 (b) 冬期渇水後期 (1993年3月上旬) の河川流量変動予測結果

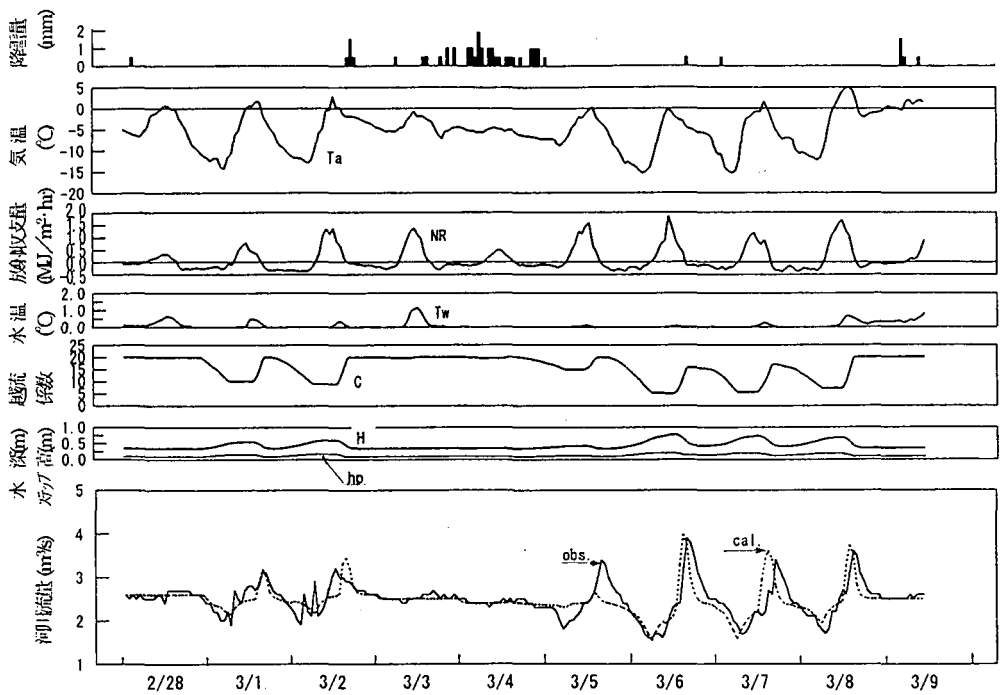


図-9 (c) 冬期渇水後期 (1994年3月上旬) の河川流量変動予測結果

**謝辞**：本研究は北海道電力釧路支店、雨竜ダム管理所、総合研究所、北電興業㈱技術部による流水雪対策工の観測資料をとりまとめたもので、同じ河川で実施した岩手大学工学部建設環境工学科によるアンカーアイスの観測結果を使わせていただいた。また研究を進めるにあたり、北海道大学工学部藤田睦博教授の懇切な御教示を賜った。ここに記して関係各位に謝意を表するものである。

### 参考文献

- 1) 峯田稔, 山崎誠, 平山健一, 杉田誠：小規模寒地河川における流水雪制御方法に関する研究, 土木学会水工学論文集 37, pp.135-140, 1993.
- 2) 小林正隆, 山崎誠, 山下彰司, 堺茂樹, 平山健一：晶氷の発生と冬期河川水温に関する現地観測, 土木学会水工学論文集 37, pp.123-128, 1993.
- 3) 山崎誠, 小山俊, 平山健一, 杉田誠：小規模河川における結水面下の流速分布, 土木学会水工学論文集 39, pp.845-848, 1995.
- 4) Mineta, M., Yamazaki, M. and Hirayama, K. : A Field Study of Ice Control Structure on River Rapids, *Proc. of IAHR Ice Sympo.*, Trondheim, Vol.1, pp.139-146, 1994.
- 5) Michel, B. : Winter Regime of Rivers and Lakes, *U.S. Army CRREL Monograph III-B1a*, pp.42-57, 1971.
- 6) 山口甲, 西村豊：河川の水温と結氷に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報第 238 号, pp.1-26, 1973.
- 7) 平山健一：河川の結氷過程とそのモデル化, 土木学会水工学論文集 29, pp.179-145, 1985.
- 8) Carstens, T. : Heat Exchange and Frazil Formation, *Proc. of IAHR Ice Sympo.*, Reykjavic, Vol.2, p.3, 1970.
- 9) Yamazaki, M., Hirayama, K., Sakai, S., Sasamoto, M., Kiohara, M. and Takiguchi, H. : Formation of Frazil and Anchor Ice, *Proc. of IAHR Ice Sympo.*, Beijing, Vol.2, pp.488-496, 1996.
- 10) Tesaker, E. : Ice Formation in Steep Rivers, *Proc. of IAHR Ice Sympo.*, Trondheim, Vol.2, pp.631-638, 1994.
- 11) 福田正巳, 武田一夫：北海道における昭和 49~50 年冬の積算寒度分布, 低温科学物理編第 33 輯資料集, p.89, 1975.
- 12) 長谷川和義, 藤田睦博：ステップ・プールに視点をおいた山地河道の流れの抵抗, 土木学会水工学論文集 30, pp.79-84, 1986.

(1996. 8. 1 受付)

## PREDICTION OF DISCHARGE CHANGE IN A COLD REGION RIVER

Makoto YAMAZAKI, Suguru KOYAMA,  
Kazuyoshi HASEGAWA and Ken-ichi HIRAYAMA

The cold region river forms a large quantity of frazil slush during winter period. In early March, the solid ice cover partially melts and remains along both sides of the river. Authors detect new phenomena, the discharge shows a daily oscillation in early March through field survey during 1992-1994 in Penkeniupu River.

This paper aims at analyzing physical mechanisms of such a daily oscillation and building its prediction model. Simulation results of the step-pool model considering anchor ice showed good agreement with the observed discharge.