

河川の結氷過程とそのモデル化

River Ice Formation and its modeling

岩手大学工学部 正員 平山 健一

1 はじめに

北海道東北部の河川は12月下旬から3月下旬まで、約3ヶ月間結氷する。水面の結氷板によって被覆されると流れは開水路から準管路になり、水面が外気から遮断されると共に、水温の低下が緩和され利水の障害となるフラジル・スラッシュの発生が抑えられる。又、氷板自体は大きな強度をもち、交通路として利用されることも多い。氷板下の流れは、水深の増大、流速分布の変化、混合機能の低下など通常の河川とは異なる流れパターンを形成する。このように河川の管理・計画には結氷に対する種々の配慮が必要であり北米、北欧、ソ連などでは古くから研究が行われてきたが、気象や地理的な条件の異なる我が国では、河川結氷に対する情報を把握し、これらの効果について検討することが必要である。本報告では、北海道網走地方の河川の結氷過程の実測より、その特徴を第2節に説明し、結氷による流れの変化を第3節にまとめて記述した。さらに第4節では、前節までの結論にもとづいて、結氷予測のためのシミュレーションモデルの一例を提案している。

2 結氷過程

北海道の河川の水温は8月をピークとして下降をつづけ12月上旬には、結氷点に近づき結氷の発生が可能な状態となる。著者は、1977年から1979年までの3年間、北海道開発局等の援助をうけ常呂川上川沿地点を中心に、道東北部河川の結氷状況、氷板下の流速分布等の冬期観測を実施した。又、1979年から3度の冬につき、湧別川開盛・遠軽地点において1日1回水位観測時に一定位置より一定方向に河川の結氷状況の写真撮影を実施した。撮影期間は12月1日より3月31日まで、撮影地点では横断方向に距離測定用のロープを張った。これらの現地調査資料及び北海道開発局流量資料により以下のような諸点について既に発表を行っている。(参考文献 (6), (10), (11), (12), (13), (14) 参照)

(1) 河川結氷の前ぶれは、過冷却した河川水より大量に発生する小さな氷の結晶(晶氷)とそれらが凝集して形成される泥状晶氷、或は降雪による雪泥、さらにこれらの附着、結氷のすすんだ蓮葉氷の流下である。湧別川開盛地点では、日最低気温が -6°C 以下になるとこれらの流下がみられた。

(2) 結氷板の形成は、2種類のタイプに大別され、流速の小さい兩岸より、流心に向って除々に成長する岸氷による場合(写真1参照)と大量に流下する蓮葉氷等の氷塊が緩流部より滞留して河川全市にわたって一時に凍結する場合である。後者に属する常呂川上川沿地点(写真2参照)、網走川本郷地点では結氷日を

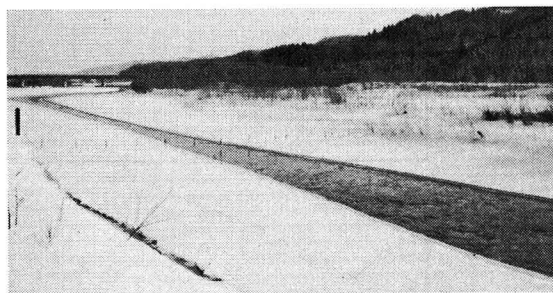


写真-1 湧別川開盛地点

1980年2月27日撮影。この年の岸氷の発達速度は $-0.04\text{ m}/^{\circ}\text{C}$ 日と計算された。



写真-2 常呂川上川沿地点

1977年12月21日。流下するシャーベット状の氷は当日だけで 1200 m^3 /日と見積られる。

含む3日間の日平均気温の合計が -20°C を目安に全面結氷日を予測できる。一方、岸氷の発達には気象条件ばかりでなく水理条件の影響も大きい。

(3) 氷板の厚さの増加については、一般に日平均気温の積算値である積算寒度 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$) の平方根に比例するという Stefan の法則があてはまるが、上川沿地点では、氷厚を m 単位として、比例定数は約 0.023 となっている。氷厚の増減は、気温の他、降雪量と降雨量の影響が大きい。

(4) 河川の解氷は、流量の増加と日射量の増加による氷板の強度の低下によって突発的に発生する場合が多いが、氷の劣化についての調査が不十分であり、解氷日を予測する明確なパラメーターはえられなかった。

3 結氷下の流れ

結氷板の形成と共に、自由水面は氷の潤辺で覆われ、径深は最大、非結氷時の半分までに減少する。氷板は、解氷時まで流れの方向に移動することはないが、河岸と固結している期間は短く、水位変動に伴う流れ方向のクラックの発生などもあり、上下方向に浮動できる。図-1は、常呂川上川沿地点における全面結氷期間とその前後の流況を示している。1974年冬は、例年より寒さが早く到来し、同地点でも12月3日より4日にかけて水面は完全に氷に覆われ、下流での氷の滞留による大巾な背水の影響が表われている。12月中は、氷状がまだ不安定であり、水位にも変動がみられるが、時節の進行と共に水位変動は小さくなる。時節の進行と共に氷板の厚さがふえ最終的には、流積と同等の大きさとなる。本例では氷板下に滞留していた晶氷は1月下旬には流下して、厳寒期の氷状は非常に安定し、流量、流積は同様に漸減している。

非結氷時の水面勾配は、約 $1/2000$ であり、結氷期間も初期を除けば、ほぼ等しい値であり、粗度係数も、初期以外は、非結氷期の 0.022 より、やや小さい値となっている。上川沿地点は、その上下流区間が全面結氷して氷状が一様な例であるが、いつまでも開水面が残る流れでは、気温が低下すれば晶氷が発生・流下して、下流部の水位の変動は大きい場合が多い。氷板の粗度係数は、氷板の潤辺の状況により

平坦な氷板 0.01

Ice ripple のある氷板 0.02

程度であり、河床の粗度係数より小さい。平山らは結氷時の粗度係数が、非結氷時の値の 0.8 倍程度に仮定すると水位の上昇量、図-2に示すような岸氷の発達する地点における開水面への流量の集中化がよく説明されることを報告している。

次節では、図-2に示した湧別川開盛地点の岸氷発達のシュミレーション計算例を示す。

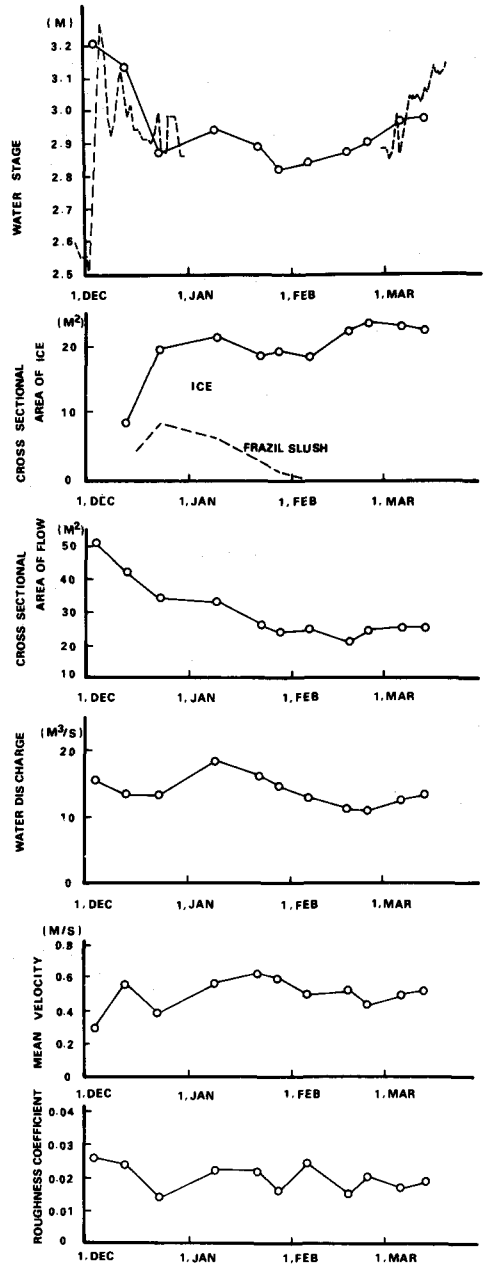


図-1 上川沿地点(常呂川)の冬季間の流況の変化(1974~75年冬)

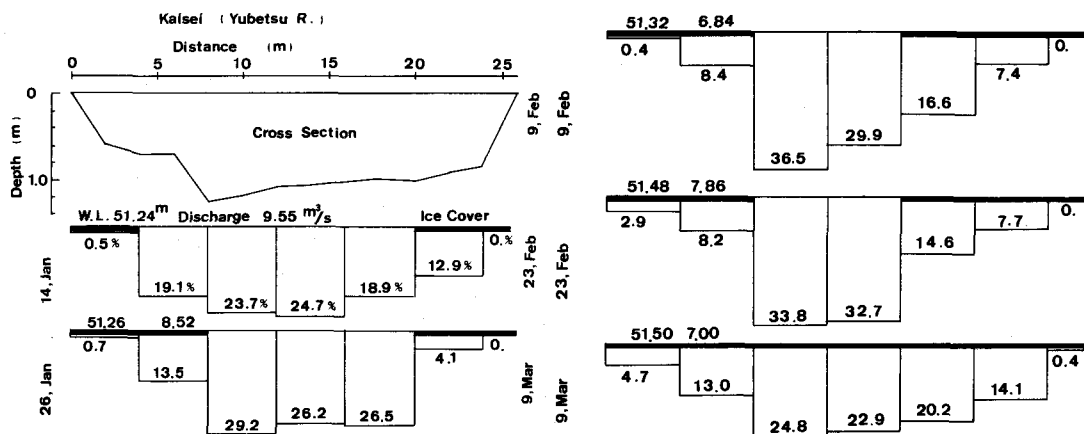


図-2 湧別川開盛地点における岸氷の発達と流量分布の変化

4 岸氷の結氷発達モデル

本節で述べる岸氷のシミュレーションモデルは、気温と流量の変化が岸氷の成長に及ぼす影響を検討するために、湧別川開盛地点を対象にして作製されている。計算は、流れの流速分布の計算、水温分布の計算を予め行い、次に、氷厚の増加量を計算して、氷厚の分布を決定する。

開盛水位観測地点は、上下流方向に、ほぼ様な断面をもつので、結氷直前の流量観測資料に与えられた断面形をもつ様水路を、上下流方向に、それぞれ250m仮定した。さらに横断方向に2m毎に区切り流速分布の計算では、それぞれの区分について平均流速をマニング公式より求めた。各区分において、氷板があるときは、径深は有効水深の半分であり、有効水深は水位から(氷厚×0.9)を差引いた値であり、その時の粗度係数は、前節の結果に従って、非結氷時の値の0.8倍とした。流下方向には50mの格子間幅とし、下流端の水位を固定したので、上流に向かって一断面づつ水位を仮定し水面勾配を求め、横断方向の各区分の流量の和が与えられた日流量に等しくなるように、各断面の水位と平均流速の分布を決めていった。計算期間中の流量は、流量観測資料より内挿して与えられた日流量を、河床勾配は $1/2800$ 、粗度係数は0.04を与えた。計算された水位は、岸氷の発達と共に、上昇がみられたが、下流端水位を固定したので実測より小さく計算された。又、横断面内の流量分布は、開水面区域に集中し前節で述べた測定結果に合致することはいうまでもない。

水温の計算式は、水温が深さ方向に一様とし、河巾方向の流速と流れ方向の拡散を無視すると次式で表わされる。

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + U \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial y} \left(E D \frac{\partial T_w}{\partial y} \right) - \frac{\phi}{\rho C_p D} \quad (1)$$

ここで、 T_w : 水温 (°C), U : 流速 (m/s), D : 有効水深 (m), ρ : 水の密度 (1000 kg/m³), C_p : 水の比熱 (4215 J/kg・°C), E : 拡散係数 (J/m²・°C), ϕ : 熱フラックス (W/m²・°C) であり E と ϕ は次式で計算する。

$$\text{氷板がない場合} \quad E_o = k U_* D \quad \phi = h_{wa} (T_w - T_a)$$

$$\text{氷板がある場合} \quad E_i = 0.5 E_o \quad \phi = h_{wi} (T_w - T_m)$$

上式において、 k は定数 (本計算では $k = 0.2$) , U_* はマサツ速度 (m/s) , h_{wa} は水面-大気間の熱交換係数で、風速 5 m/s を仮定して、 $h_{wa} = 25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, h_{wi} は、流水と氷板の間の熱交換係数で

$$h_{wi} = C_{wi} \times U^{0.8} / D^{0.2} \quad (C_{wi} = 1622 \text{ W} \cdot \text{s}^{0.8} \text{ m}^{-2.6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$$

式(1)を Lax - Wendroff 型の陽形式の差分方程式に書きかえると、図-3 を参照して次式がえられる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) = & -\frac{1}{2} (U_{i,j}^n + U_{i+1,j}^n) \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i-1,j}^n}{2 \Delta x} + \frac{\Delta t}{2 (\Delta x)} \frac{1}{2} (U_{i,j}^n + U_{i+1,j}^n) (T_{i-1,j}^n - 2 T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n) + \\ & + \frac{1}{D_m} \left(\frac{1}{\Delta y} E_1 \frac{1}{2} (D_{i,j+1}^n + D_{i+1,j+1}^n) \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n}{\Delta y} - \frac{1}{\Delta y} E_2 \frac{1}{2} (D_{i,j+1}^n + D_{i+1,j}^n) \frac{T_{i,j}^n - T_{i,j-1}^n}{\Delta y} - \frac{\phi}{\rho C_p D_m} \right) \Big|_{i,j} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 n は時間方向の添字、 i, j はそれぞれ流下方向、河巾方向の添字を表わす。又、 E_1, E_2, D_m は

$$E_1 = \frac{1}{2} (E_{i,j+1}^n + E_{i,j}^n) \quad E_2 = \frac{1}{2} (E_{i,j}^n + E_{i,j-1}^n) \quad D_m = \frac{1}{4} (D_{i,j}^n + D_{i+1,j}^n + D_{i,j+1}^n + D_{i+1,j+1}^n)$$

で与えられ、上式を整理して(3)式の形に書きなおすと係数 a, b, c, d, e, f は次式のように与えられる。

$$T_{i,j}^{n+1} = a T_{i,j}^n + b T_{i+1,j}^n + c T_{i-1,j}^n + d T_{i,j+1}^n + e T_{i,j-1}^n + f \quad (3)$$

$$a = 1 - \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 \left\{ \frac{1}{2} (U_{i,j}^n + U_{i+1,j}^n) \right\}^2 - \frac{1}{D_m} \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} \frac{E_1}{2} (D_{i,j+1}^n + D_{i+1,j+1}^n) + \frac{E_2}{2} (D_{i,j}^n + D_{i+1,j}^n) -$$

$$- h_{wa} \Delta t / \rho C_p D_m \Big|_{i,j} \quad (\text{open flow}), \quad - h_{wi} \Delta t / \rho C_p D_m \Big|_{i,j} \quad (\text{ice covered flow})$$

$$b = - \frac{\Delta t}{4 \cdot \Delta x} (U_{i,j}^n + U_{i+1,j}^n) + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 \left\{ \frac{1}{2} (U_{i,j}^n + U_{i+1,j}^n) \right\}^2$$

$$c = \frac{\Delta t}{4 \cdot \Delta x} (U_{i,j}^n + U_{i+1,j}^n) + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 \left\{ \frac{1}{2} (U_{i,j}^n + U_{i+1,j}^n) \right\}^2$$

$$d = \frac{1}{D_m} \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} \frac{E_1}{2} (D_{i,j+1}^n + D_{i+1,j+1}^n)$$

$$e = \frac{1}{D_m} \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} \frac{E_1}{2} (D_{i,j}^n + D_{i+1,j}^n)$$

$$f = h_{wa} \Delta t / \rho C_p D_m \cdot T_a \Big|_{i,j} \quad (\text{open flow}),$$

$$\text{or } = 0 \quad (\text{ice covered flow})$$

格子割は、流速分布の計算と同じく、 $\Delta x = 5.0 \text{ m}$ 、 $\Delta y = 2 \text{ m}$

とし、時間間隔は、 $2 E \Delta t / (\Delta y)^2 < 1$ の条件より $\Delta t =$

3.0 s とした。兩岸、下流端などの境界では、境界の外側

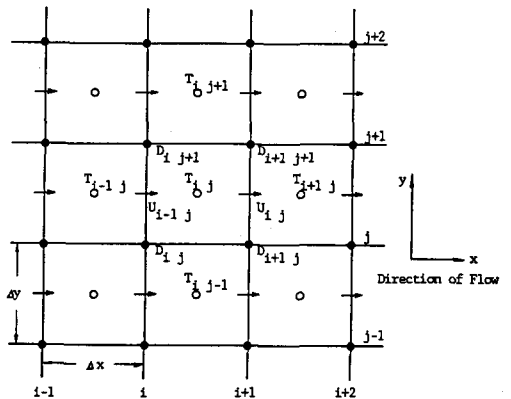


図-3 計算格子網

に仮想の水温点を設け、隣接点と同じ水温を与え熱移動はないものとしている。又、上流端では流入水の水温は一定として、十分結氷温度に近い+の温度で試算し氷の発生量を考慮して+0.1℃とした。水温は流下と共に低下するが、通常の河川の水温測定精度は±1℃程度であり水温の計算値と実測値を比較することは出来なかった。本計算例の流下距離は500mであり、与えた気温条件下で、水温は負となることはなく、氷板が形成されることによって水温の増加が認められた。

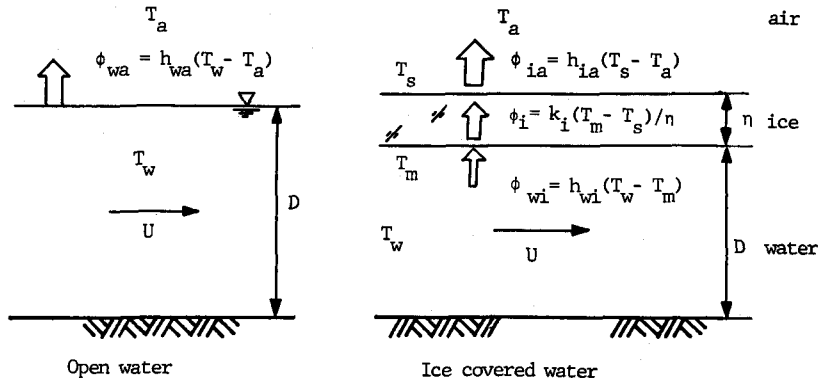
結氷板の発生及び成長に関する計算は、流水と氷板、氷板と大気との熱交換により次式のように表わせる。(図-4参照)

$$\phi_i - \phi_{wi} = \rho_i \lambda \frac{d\eta}{dt} \quad \phi_i = \frac{T_w - T_a}{\frac{n}{k_i} + \frac{1}{h_{ia}}} \quad \phi_{ia} = h_{ia} (T_w - T_m) \quad (4)$$

ここで、 ρ_i は氷の比重(916kg/m³)、 λ は氷の潜熱(3.34×10⁵ J/kg)、 η は氷厚(m)、 k_s は氷の熱伝導率(2.24 Wm⁻¹ °C⁻¹)、 h_{ia} :氷板と大気との熱交換係数で、 h_{wa} と同じとした。上式において T_w と T_a は一定ではないから、次式のように各時間ステップ毎の増加量を各水温計算点について求めることができる。

図-4

熱の移動機構のスケッチ



$$\Delta n = \frac{\Delta t}{\rho_i \lambda} \left\{ \frac{T_m - T_a}{\frac{n}{k_i} + \frac{1}{h_{ia}}} - h_{wi} (T_w - T_m) \right\} \quad (5)$$

氷板の発生の判定は、水温が 0°C 以下の場合とする基準もあるが、水温が十分 0°C に近ければ、水面より大気への熱移動量がより良いパラメーターと考えられる。又、河川のように流れがあれば、氷板が形成されても、十分な強さをもつ量に達しなければ流下してしまう。本計算例では、(5)式によって、 Δt 時間内の氷厚の増加量 Δn を計算し、 Δn が限界値を超えた場合にはじめて氷板が存在することとした。この限界値は流速の関数として、1981-82 年の資料による試算より(6)式のように与えた。

$$\Delta n_{cr} = \frac{2}{3} \times 10^{-4} U \quad (6)$$

この値は1980-81年冬の計算にも用いられている。

以上に述べた計算手順による開盛地点の計算結果は、図-5に与えられる。上より計算に用いた日平均気温、結氷率の変化、氷の断面積を河巾で除した平均氷厚を示したが、結氷率の計算値は河巾方向の計算間隔が2mのため気温の低下に対応してステップ状に増加しているが

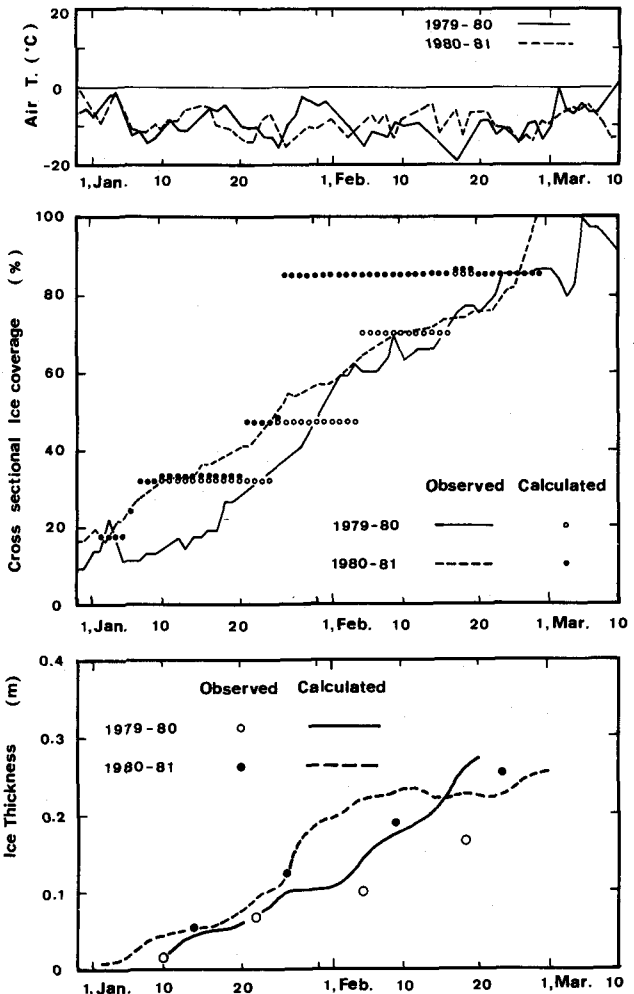


図-5 日気温及び結氷率と氷厚の計算値・実測値の比較

実測値を比較的良く説明している。氷厚については、実測値は流量観測時のみ得られるので測定点は少ないが、計算値は気温と対応して増減しており、実測値とも大体似た値となっている。その他、氷厚の横断分布等、本モデルによる岸氷の成長シュミレーションは、開盛地点の氷状の変化を一応再現しているが、精密な水温分布の実測や、本解析における $h_{wa} = h_{ia}$ の仮定の可否、 h_{wi} の見積りに対する検討などさらに現場測定が必要な点も多い。モデル自体についても、計算スキームの精度向上、積雪、氷板下の晶氷の滞留、風の考慮などさらに適応性を広めることが出来るが、特に(6)式で与えた条件式は、結氷率の計算の主要なパラメーターであり、今後実験等により検証することが望ましい。

5 おわりに

本研究では、北海道の河川の結氷時期における観測結果と流量観測資料から、河川の結氷過程と水理学的特徴のいくつかについてまとめを行った。特に、岸氷の発達についてシュミレーションモデルを提案したが本モデルをさらに発展させることにより、発電所等よりの温排水による結氷の予測と制御などにも利用できると考えられる。河川の結氷の形式は、今回、対象とした岸氷による場合ばかりでなく、第2節で述べたように、水面を流下する氷片が結合して一時に全面結氷する場合もあり、さらに汎用に供しうるモデルを完成する必要がある。おわりに本研究は、文部省科学研究費補助金（一般研究 代表者 筆者）の補助を受けたもので、深く謝意を表します。

参考文献

- 1 Michel, B., Winter Regime of River and Lakes, CRREL Monograph III-Bla, 1971
- 2 村上武, 非定常拡散方程式の数値計算方法, 海講, 1972
- 3 村岡浩爾, 中辻啓二, 河川流の非定常数値解析における数値誤差の評価, 土木学会論文集 213号, 1973
- 4 Engmann, J.E.O. 他, Transverse Mixing in an Ice-Covered River, Water Resources Research, Vol. 10, No. 4, 1974
- 5 土木学会編, 土木工学における数値解析/基礎編, サイエンス社, 1975
- 6 Hirayama, K., Characteristics of Ice covered streams in connection with Water Discharge measurements, IAHR Ice Symp., 1978
- 7 Ashton, J., River Ice, Annual Review of Fluid Mechanics 10, 1978
- 8 Calkins, D., Accelerated Ice Growth in Rivers, US CRREL Rept. 79-14, 1979
- 9 Ashton, J., Suppression of river ice by thermal effluents, US CRREL Rept., 79, 30, 1979
- 10 Hirayama, K., Hydraulic Resistance of Ice cover, IAHR Ice Symp., 1981
- 11 平山, 佐々木, 赤松, 結氷河川の水理に関する諸特性について, 水講, 1981
- 12 杉山, 大村, 平山, 河川の結氷過程の諸現象, 土木学会東北支部発表会, 1983
- 13 平山健一, 結氷した河川の流れと流量測定, 利水評論 No. 24, 27, 1983
- 14 平山, 杉山, 大村, 河川結氷時の断面平均粗度係数に関する考察, 年講, 1984
- 15 Shen, H.T., 他, Simulation of Growth and Decay of River Icecover, vol. 110 No. 7 Hy, ASCE, 1984