

流速分布測定による氷板下面の粗さの算定

Caluculation of Ice Cover Roughness

from Velocity Distributions

山下彰司・平山健一** 堺 茂樹*** 山口 甲****

by Shoji YAMASHITA, Ken-ichi HIRAYAMA, Shigeki SAKAI and Hajime YAMAGUCHI

Field measurements of velocity profiles for ice-covered streams were performed in Hokkaido. Surface conditions of the cover were classified into smooth ice cover, rippled ice cover and cover with frazil slush. Adaptability of logarithmic velocity distribution was first investigated. The friction factor f_i and Manning's roughness coefficient n_i were calculated based on an assumption of the logarithmic distribution; average values n_i for smooth and rippled cover were 0.012 and 0.021 respectively.

Keywords : ice cover, velocity distribution, roughness coefficient
ice ripple, frazil slush

1 まえがき

北海道の河川の多くは12月から3月に至る冬期間結氷する。このため川の流れは管路化して水位は上昇し、非結氷時の水位・流量の関係は成立しない。また、水利構造物には結氷に起因する障害が生じ種々の対策が必要となる。これまで結氷河川に関する調査・研究は、その必要性が認められていたにもかかわらず非常に少なく、結氷に対する河川計画・管理上の配慮は経験的な手法によっていた。本報告は氷板下の流速分布の対数則の適合性を確かめ、結氷流れの基礎的性質を示すパラメーターである氷板の流れに対する抵抗の大きさを明らかにするため実施された現場測定の結果をまとめたものである。

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所研究員

(〒062 札幌市豊平区平岸1-3)

** 正会員 岩手大学教授 工学部土木工学科

(〒020 盛岡市上田3-4-5)

*** 正会員 岩手大学助教授 工学部土木工学科(同上)

**** 正会員 北海学園大学教授 工学部土木工学科

(〒064 札幌市中央区南26西11)

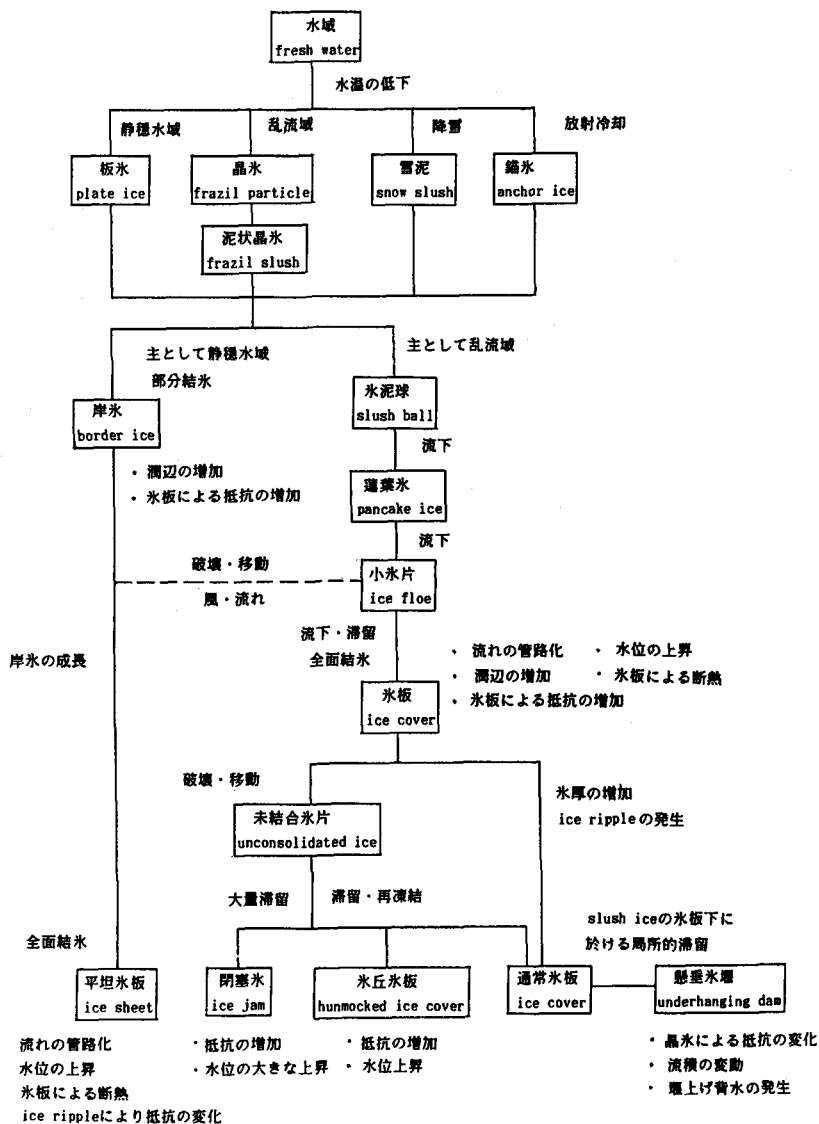


図-1 水域の結氷過程

2 結氷過程

北海道に於ける河川水温の低下は気温の変化にやや遅れて9月頃より始まり、12月には平衡水温は0℃に達する。氷の発生は流水が更に冷却される場合であるが、図-1にはこれまでの調査で明らかにされた氷核の発生から種々の氷の形態が形成されるまでのフローが図示されている。気象・水理条件の組合せにより種々の氷の形態が出現し、流れは・印の項目に記してあるような影響を受ける。結氷河川の流れに新たな境界を与える氷板は、最初、氷片が結合して凹凸のある氷板が形成されることが多いが、徐々に厚さを増しながら流水との界面は平坦化していく。しかし上流の未結氷区間で発生する晶氷が流下して氷板下に滞留する場合や、わずかにプラスの水温により凍結融解が生じてアイスリップルが発生する場合など流水に与える氷板の抵抗は時節と共に変化する。

3 北海道の結氷河川の分布

北海道の河川に於ける結氷状況は山辺¹⁾、山口²⁾によって調べられているが、その成果は図-2のようである。この調査はアンケート調査と流量観測野帳(昭和49年度)に基づいている。道南の河川を除いて河川結氷が見られ、下・中流部での全面結氷と上流部に於ける部分結氷が特徴的である。最近では都市域による温暖化や生活排水の流入により結氷域が図-2よりも減少しているとの観察もあるが、河川結氷は治水、利水施設への障害、水理観測の精度低下、さらには氷板形成による環境への影響など冬期河川の計画・管理上重要であることは明かである。

4 現場測定

流速分布に関する現場測定は1978年度から1980年度まで常呂川、湧別川、天塩川、留萌川等で実施された。これら河川の冬期の水理条件を表-1に示したが、渇水期に相当するため流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下の観測地点が多い。測定は氷板に $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ 程度の穴を開け、支持棒に取り付けた流速計を降ろして行われた(図-3参照)。流速計はピトー管(直径 1cm)、プロベラ型流速計、プライス型流速計、電磁流速計が試されたが、プライス型は晶氷がカップに詰まり、これらの回転数に影響が生じ、また電磁流速計は晶氷の通過時に磁界が乱され信号が不安定となることが分かったのでこれら2機種は不適当と判断された。本解析に用いられた流速分布はピトー管、プロベラ型流速計を使用し、主流方向に鉛直方向に氷板下面から河床までの深さにつき $1\sim 7\text{cm}$ 間隔で $10\sim 20$ 点の平均流速を測定した。流速分布観測の前後、氷板下面の状況や流況は照明付き潜望鏡で観察した。測定後観測地点の氷板より $70\text{cm}\times 100\text{cm}$ 程度の大きさの氷片を切取り、裏返して流水との接

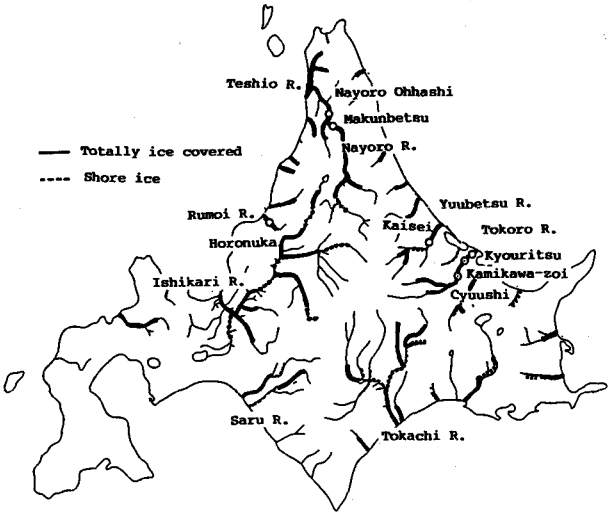


図-2 北海道の河川結氷

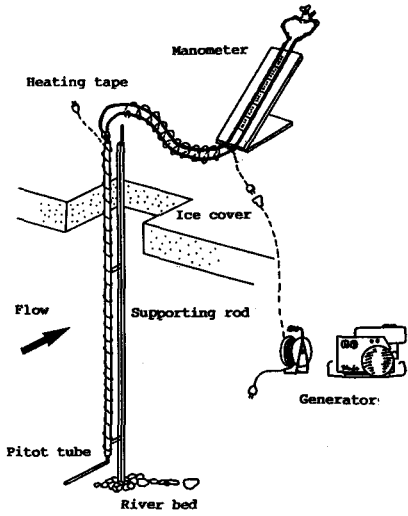


図-3 現場流速測定の配置図

表-1 観測箇所の流況

	Discharge (m^3/s)	Width (m)	Mean depth (m)	Slope
Kamikawa-zoi(Tokoro R.)	10	40	1.1	1/800~1/2000
Kyouritsu(Tokoro R.)	10	40~50	2.0	1/10000
Chushi(Tokoro R.)*	8~10	26	0.6	1/800~1/800
Kaisai(Yubetsu R.)*	8~10	26	1.1	1/800~1/2000
Makumbetsu(Nayoro R.)	5~6	40	0.7	1/800~1/2000
Shimokawa(Nayoro R.)	2~4	40~45	0.6	1/500
Horonuka(Rumoi R.)	2~3	15	1.0	1/2000~1/4000
Nayoro Ohashi(Teshio R.)	40~50	80	2.0	1/1800

* Shore ice (Static ice formation)

面の状況やアイスリップルなどの寸法を計測し、氷板の形態を平坦な氷板、アイスリップルのある氷板、晶氷の堆積している場合の3つに分類した。

解析の対象とした流速分布の得られた水深と平均流速及び測定数は表-2に与えられる。

表-2 流速分布測定点の水深、平均流速

Total depth (m)	Average Velocity (m/s)				
	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.80	0.8~1.0
0~0.4	0	11	8	0	0
0.4~0.8	2	28	22	14	4
0.8~1.2	0	7	11	4	0
1.2~1.6	0	1	6	2	0
1.6~2.0	0	3	3	2	0

5 流速分布

氷板下の流れは氷板と河床の影響を受ける。流速分布を最大流速点で上下に二分してそれぞれを氷板および河床の影響域とする（次節図-6参照）。両領域の平均速度 V_b, V_i を比較すると図-4のように上領域（氷板側）の速度が大きい。また影響域の幅は一般に下領域（河床側）が大きいが最大流速点近傍は分布がほぼ一様となり領域の明確な分離は難しい場合が多かった。対数則を仮定すると上領域（氷板側）の速度分布 $v(y)$ は次式で与えられる。

$$v = a \log y + b \tag{1}$$

y は氷板面よりの距離。aとbを定数と見なして測定値より最小2乗法で決定した。氷板面から最大流速点までの距離 Y_i を代入して得られた最大流速 V_m と計測された最大流速の比較は図-5に与えられるがやや計算値の方が大きく、この付近で対数則からはずれている事を示している。平均流速についてはよい一致が見られた。

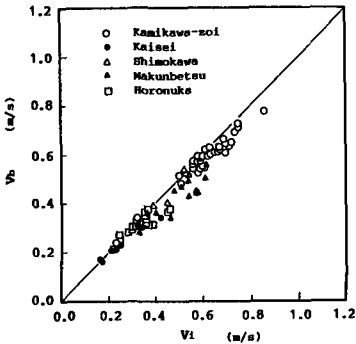


図-4 上領域（氷板）・下領域（河床）の平均速度の比較

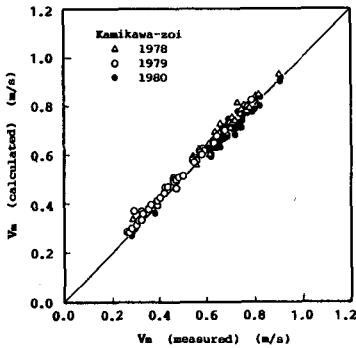


図-5 上領域における最大流速（実測、対数則）の比較

6 氷板の粗度係数

氷板が流れに与える抵抗の大きさは氷板が一様であれば水面勾配を測定しても算定されるが流路に沿った氷厚は不均一性が大きく分布の測定が必要であり大きな労力を要する。本報告では測定された局所的な流速分布から摩擦損失係数とマンニングの粗度係数を算出してみた。この様なアプローチはLarsen(1969)³⁾, Synotin(1965)⁴⁾, Kamada(1985)⁵⁾, Pratte(1979)⁶⁾, Majewski(1988)⁷⁾等がある。本報告ではMajewski(1988)の論文に詳述されるように対数則を仮定し、測定された分布より(1)式の定数a, bを決めれば、図-6を参照し

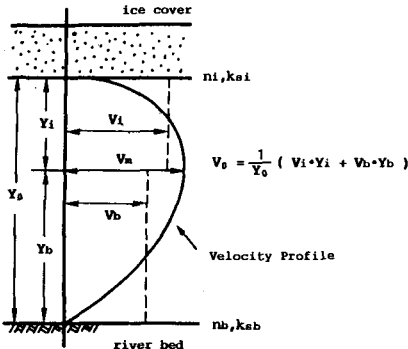


図-6 氷板下流れの記号の説明

て次式により氷板側の摩擦損失係数 f_i とマンニングの粗度係数 n_i が求められる。

$$k_{si} = 30 \exp(-b/a) \quad (2) \quad V_m = a \log Y_i + b \quad (3)$$

$$y_o = \exp(-b/a) \quad (4) \quad V_i = V_m Y_o / (Y_o - y_o) - a \quad (5)$$

$$f_i = 1.28 [(V_m - V_i) / V_i]^2 \quad (6) \quad n_i = \sqrt{f_i} / 8g (Y_i - y_o)^{1/6} \quad (7)$$

y_o は流速が零となる氷板よりの距離に相当する。平坦な氷板の場合、アイスリップルのある場合について図-7に相当粗度のヒストグラムを、晶氷のある場合を加えて図-8に摩擦係数のヒストグラムを、図-9に粗度係数のヒストグラムを

示した。図-7によれば k_{si} のオーダーが非現実的な数十cmの値をもつ場合も見られた。それぞれの氷板のケースにつき抵抗係数の平均値は表-3のように与えられた。平坦な氷板の場合の値はばらつきが小さいが、晶氷の場合はこれが大きく、堆積の密度、形態によるものと考えられる。アイスリップルのある場合について f_i とリップルの波形勾配の関係をプロットすると図-10が得られた。波形勾配と共に f_i の大きさが増すようにも見られるが、リップルの波長は数cmのものから数十cmのものまであり、さらに観測を続けて結論を出す必要がある。

7 まとめ

本報告に述べた観測により河川結氷の過程と氷板の形態、流水に対する平均的な抵抗の大きさを求めることが出来たが、実際河川に良くみられる晶氷の堆積層の限界洗掘速度、抵抗の大きさに関する要因、アイスリップルの形成機構と抵抗など今後の調査が必要である。

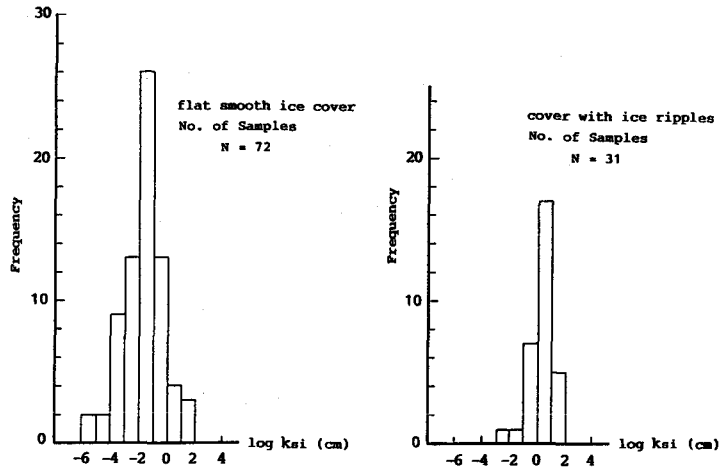


図-7 相当粗度のヒストグラム

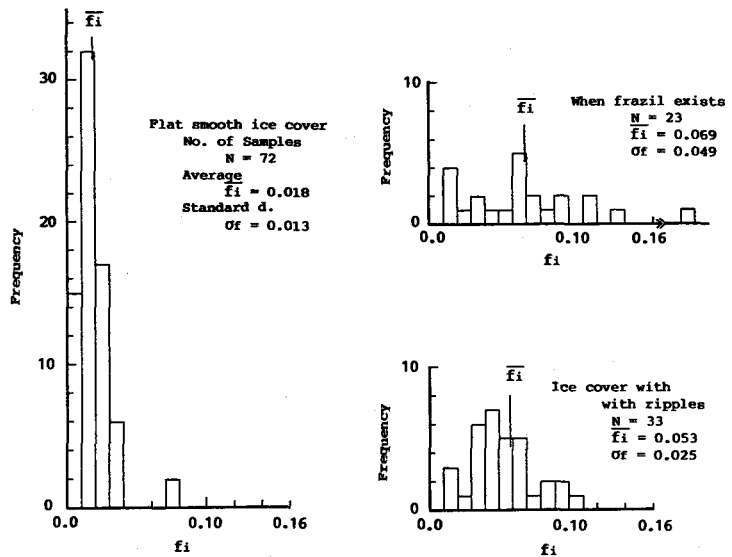


図-8 摩擦係数のヒストグラム

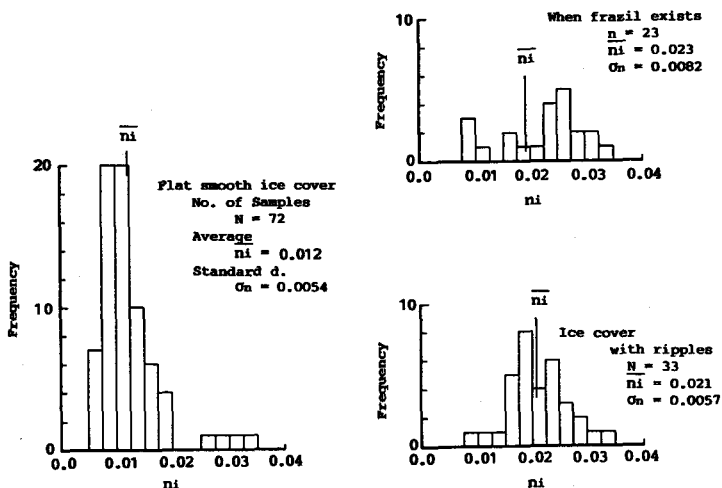


図-9 粗度係数のヒストグラム

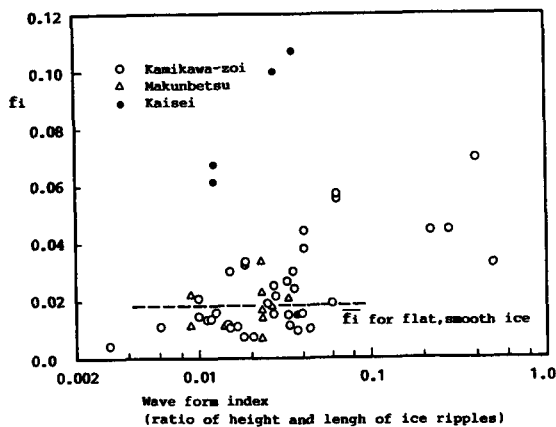


図-10 アイスリップルの波形分配と摩擦係数

表-3 氷板の状況と平均的抵抗係数

	f_i	n_i
Flat smooth ice cover	0.018	0.012
Rippled ice cover	0.053	0.021
When frazil exists	0.069	0.023

参考文献

- (1) 山辺功二 "北海道の河川結氷"、水温の研究、第12巻1号、pp.36-42、1968.
- (2) 山口 甲 "沖積河川における河道計画の研究"、北海道大学学位論文、1990.
- (3) Larsen, P., "Head Losses in Channels of Ice-covered Streams", J. of Boston Soc. of Civil Engrs., Vol.56, No.1, pp.45-67, 1969.
- (4) Synotin, M.S., "Velocity Structure of Flow under Ice Cover", IAHR XI Congr., pp.81-83, 1965.
- (5) Kamada, S., "Studies on Ice Formation and Streamflow under Ice Conditions in River", Report of Civil Eng. Res., No.38, Institute of Hokkaido Development Bureau, pp.1-66, 1965.
- (6) Pratte, B.D., "Review of Flow Resistance of Consolidated Smooth and Rough Ice Covers", Canadian Hydrology Symp., pp.54-84, 1979.
- (7) Majewski, W., and et al., "Determination of Roughness Coefficient of the Underside of the Ice Cover", IAHR Ice Symp., pp.122-130, 1988.