

結氷河川の水利に関する諸特性について

Characteristics in Hydraulics of Ice-covered Streams

岩手大学 正員 平山 健一
 岩手県庁 正員 赤松 久生
 岩手大学 佐々木正宏

1 はじめに

河川の結氷は、我が国では限られた地域の自然現象であるが、河川水の冷却による氷板の形成発達の前測やその過程における晶氷、氷板による水理構造物、河川の通水能に関連する種々の障害などが問題となる。本報告は、結氷した河川の水利学的特性を現地観測の結果から示し、さらに結氷期の水路の通水能や水位と流量の関係を理解する上で重要な流れに対する氷板の抵抗の大きさに関して調べたものである。

2 従来の研究

Schochlichが結氷河川の水位と流量の関係式が非結氷時と異なることを指摘したのは1937年であり、我が国よりも自然条件の厳しい北欧、北米、ソ連においても氷板の流れに対する抵抗、管路としての特性などは未知の点の残る研究課題と考えられている。Meizer は1942年に結氷初期の氷板の凹凸が厳寒期に向って段々平滑化することを、Putyagin (1966) は融氷期に氷板表面に波模様があることを観測している。氷板の流れに対する抵抗をマニング粗度係数を用いて量的に示したのはNozhikovskiy (1964), Carey (1966, 1967), Larsen (1969) 等である。Nezhikovskiy はソ連の冬期流量観測値や既往の成果をまとめて氷板下にSlush (晶氷, モロミ) のある場合、無い場合について係数の範囲を示している。Carey は米国のSt. Croix 河でIce ripple, 流量などの観測を行い、河床と氷板の効果を含んだ断面合成粗度係数の観測値とBelokon-Sabaneev の経験式を用いて氷板粗度係数を求め、 $n = 0.0039 \sim 0.0142$ を得、Larsen はスエーデンの発電用水路におけるIce ripple, 氷板によるエネルギー勾配の増加、断面合成粗度係数と河床、氷板の係数の関係を考察している。我が国では大橋、浜田 (1970), 鎌田 (1977) の報告があり、前者は北海道の数ヶ所の流量観測点の氷板粗度係数を最大流速の相対水深の観測値と経験的に導かれたPavlovskiy の式を用いて計算した。又、鎌田は石狩川下流の数年にわたる結氷河川の観測により氷板の上下変位、流速分布、氷の成長などに関する多くの資料をえて、氷板の水位変動に伴う応力解析、氷厚の予測、氷板下の流れのモデル化などを行っている。

		12月	1月	2月	3月	4月
3 調 査	月平均気温 網走	-3.0	-6.6	-7.1	-2.9	3.9
	(℃) 浦河	-0.4	-3.3	-3.1	-0.2	4.7
	月最低気温 網走	-6.4	-10.4	-11.2	-6.5	0.1
	(℃) 浦河	-3.6	-6.6	-6.6	-3.4	1.5

昭和50年度の予備調査(当別川, 夕張川)にも 表-1 気温の概況
 とずき比較的冬の降水量の少ない苫小牧地方(沙流川, 鶴川), 網走地方(常呂川, 美幌川など)を調査地点としている。両地方の気温の概要は表-1に与えられる通りである。非結氷期には調査地点を下見して、通常12月と1~2月に各1回次のような項目について調査が行われた。(1) 結氷河川の水利的諸現象の観察, (2) 水面勾配の測定, (3) 氷厚の分布の測定, (4) 流速分布の測定, (5) モロミの性状調査, (6) 氷板の上下動に関する調査。はじめの数期間は観測日数も短かく、耐寒装備の不備などにより十分な成果をあげることができず、吹雪、暖冬などの自然条件によって作業内容が制限される場合もあった。使用した流速計はT・F式プロベラ型流速計、同型微流速計、野外用ピトー管一式(φ=10mm)、電磁流速計であり、プライス式流速計は晶氷の流下時にはカップに氷がつまり正常に機能しないことがわかった。ピトー管の使用にあたっては保温のため水道凍結防止用のテープ型ヒーターを本管、マノメーター部分にとりつけてある。又、電磁流速計は試験的

に用いて結氷下での性能を試したが、晶氷の流下時に磁場が乱されて指示が不安定になる点が改良されるべきであるが、可動部分がなく取扱いは容易であった。これらの流速計はいずれも河床に先端が固定する支持棒にとりつけられ、流速計の深さを正確に保持することができる。氷厚、流速、晶氷等の観測はすべて氷板にチェーンソー、チーゼルであけた穴より行い、氷板下の状況については、氷板を大きく切とって反転して裏面を写真撮影したり、照明付の潜望鏡で観察を行った。

北海道の河川の結水状況は図-1に与えられるように気候の温暖な渡島半島部と都市の多い石狩川本流の中流以下が不凍である。結氷は12月上旬から1月下旬よりはじまり約3ヶ月におよび、4月上旬まで水のこる地域もみられる。これらの河川では8月をすぎると水温の低下がはじまり12月上旬に氷点に近づき、結氷の前兆であるザラ、アイス、モロミ等と俗称される晶氷の流下がみられるようになる。晶氷は流水中の浮遊物質や降雪が核となつてつくられる氷の結晶およびその集合体であり流下しながら大きさを増し蓮葉氷、氷盤と成長していく。これらは流れのゆるやかな区間、セキ、河口などから滞留を生じ河川の全巾の結氷が1日で完了して、上流に結氷が進行していく(TYPE Iの結氷と呼ぶ)。流量観測資料によればTYPE Iによる氷板の形成は水面勾配が $1/700 \sim 1/1,000$ 以上では起らず、又測線平均流速が 0.8 m/s をこえると晶氷の滞留は生じないことが観察された。このような場合、氷は兩岸より除々に流心に向つて成長するTYPE IIとなる。

図-1 北海道の河川の結氷状況

部分結氷の状態や全面結氷の完了する直後は氷面に凹凸が残るが時節が進むにつれて平坦化してくることは氷厚の薄厚によって温度勾配に大小が生ずることから説明される。しかし、氷厚の増大は水との接面での成長の他に、積雪により氷板が沈下し、雪の中に浸透した水が凍って雪氷が在来の氷板の上に形成される場合も多い。図-2 は最初に形成された黒氷と雪氷の層よりなる氷板の例である。従って氷厚の大きさは積算日平均気温が最も支配的なパラメーターであるが、我が国のように多雪であり冬期の降雨なども生じうる気象の場合は降水量についても十分考慮しなければ予測の精度は向上しない。河川の急流部・地下水の湧出などにより開水面があれば、気温の低下によりさらに晶氷が発生し、氷板の存在のため幾分ゆるやかになっている区間では、氷板下に晶氷が滞留することがある。このような晶氷が固化して氷板と一体化すると、流下時に運んできた土砂を含んだ褐色の水となるので、容易に見分けることができる。一方、氷板下を流れる水流の温度は、積雪などによって大気による冷却の効果がよわめられれば0℃以上となり流水に接する氷板はその接面で融解を生じ、いわゆる Ice ripple といわれるゆるやかな波形が発生する。

図-2 多層よりなる氷板の例

さらに融解がすすめば波形勾配が急になり、流れに剥離が生じ波形が非対称となってくる。 Ashton は波長は流速の逆数に比例するとしている。このような融解の過程は同時に氷板の強度の劣化がすすみ融雪などによる流量の増大によって氷板の破壊と流失があり、河川の開氷となる。

5 氷板の上下動と水面形

氷板の成長、降雪、流量の変動などがある場合、氷板下の流れがどのような圧力と断面積をもった管路を形成しているかを知るために非結氷期から結氷初期、厳寒期にわたる水面の変動、それに伴う氷板の上下変位について述べる。Larsen によればスエーデンにおける発電用水路では岸近くの氷厚が中心部の数倍になっており氷板は流量の変化に対して不変であり、一度氷板が形成されると定断面をもつ管路として取扱われている。我が国の凍上深はスエーデンほど大きくはなく、積雪によって地面は保温されるので巾の狭い用水路、鉄道橋の橋脚間などを除いた通常の河岸では、氷板との結びつきは必ずしも強固ではない。図-3は常呂川上川沿地点における結氷前後の水面形を示している。結氷時の流れ方向の氷厚は±5 cm 程度のバラツキはあったがほぼ一定とみなされる。結氷初期 (b, c)

は晶水の滞留による流水のセキ上げが著しく、又厳寒期の水面形 (d) は流量のより大きい非結氷期の水面 (a) にくらべて、平行に水位上昇した形状を示しており氷板の形成による水位上昇と共に氷板がフレキシブルに水面形に対応して移動していることがわかる。今、図-4に示すような厚さ h の氷板が河巾 L の兩岸に固定されて、丁度、自重に釣合う浮力をうけている場合、水位変化、積雪による氷板の撓み、曲げモーメントの分布は弾性床上の桁の考え方より (1), (2) 式で与えられる。

$$w = \frac{q}{k} + C_1 \sin \frac{2\beta x}{L} \sinh \frac{2\beta x}{L} + C_2 \cos \frac{2\beta x}{L} \cosh \frac{2\beta x}{L} \quad (1)$$

$$M = -8D \left(\frac{\beta}{L} \right)^2 \left(C_1 \cos \frac{2\beta x}{L} \cosh \frac{2\beta x}{L} - C_2 \sin \frac{2\beta x}{L} \sinh \frac{2\beta x}{L} \right) \quad (2)$$

$$\text{但し } C_1 = -\frac{q}{k} \frac{\sin \beta \cosh \beta - \cos \beta \sinh \beta}{\sinh \beta \cosh \beta + \sin \beta \cos \beta}$$

$$C_2 = -\frac{q}{k} \frac{\cos \beta \sinh \beta + \sin \beta \cosh \beta}{\sinh \beta \cosh \beta + \sin \beta \cos \beta}$$

$$\beta = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{k}{4D}} \quad k: \text{バネ定数}, D = \frac{E h^3}{12}$$

$q: \rho_w, \rho_s$ を水、雪の密度、 h_w, h_s をそれぞれ水位低下量、積雪深とすると $q = \rho_w g \cdot h_w$ 又は $\frac{\rho_s}{\rho_w} g \cdot h_s$

いま、弾性係数 $E = 2 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$, $h = 0.3 \text{ m}$, $L = 30$, 100 m の場合、水位低下量 $h_w = 0.05 \text{ m}$ に対する w, M の分布は図-5のように与えられる。又、氷の曲げ強度 $\sigma_s = 8 \text{ kg/cm}^2$ として上記の河巾、弾性係数をもつ場合、各氷厚に対して曲げ破壊を生ずる水位低下量は図-6のように与えられ 10 cm 未満の水位低下によって氷板の流下方向にク

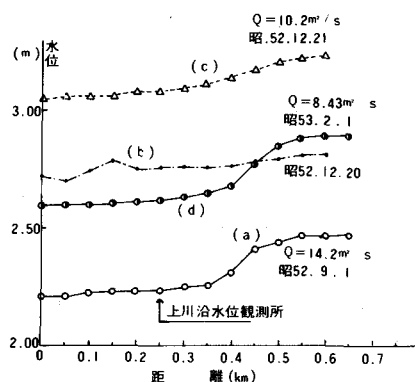


図-3 上川沿 (常呂川) の水面形の変化
今、図-4に示すような厚さ h の氷板が河巾 L

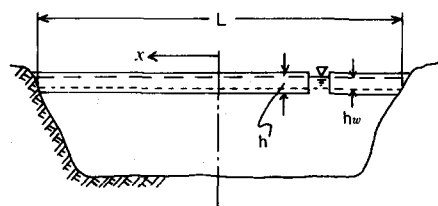


図-4 氷板の概念図

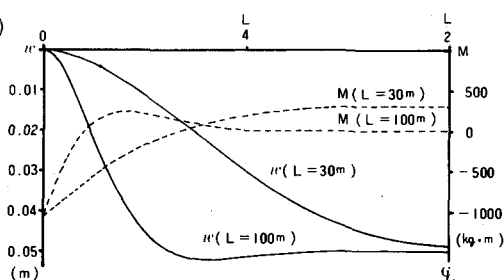


図-5 撓み、曲げモーメント分布

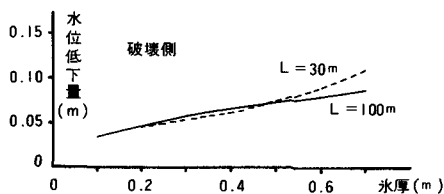


図-6 破壊のための水位変化量と氷厚

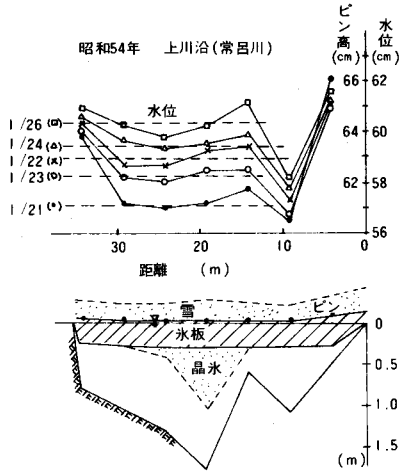


図-7 水位変化に伴う氷板の変位

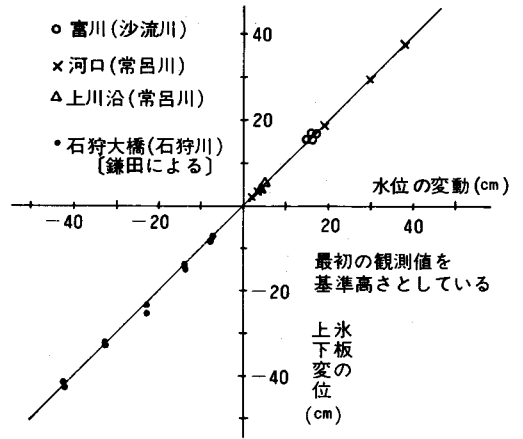


図-8 水位変動と氷板の高さの関係

ラックが発生する。水のせん断強度は曲げ強度より大きく通常の断面では曲げ破壊が卓越する。図-7は常呂川上川沿の氷板上に打った杭の高さと水面の位置、図-8は他地点の場合も含めた水位と氷板の変化量の関係であるが、いずれにおいても両度位置は等しく氷板が流量の増減に対して自由に上下しており氷板下の流れは、水の重さに等しい圧力をもつ変断面の管路とみなされる。

6 氷板の粗度係数

結水下の流れは、2つの異った粗さを持つ境界にはさまれており図-9に示すように鉛直方向の最大流速は非結水時にくらべて河床に近づく。流速分布を対数則で近似すれば流速分布よりマンニングの粗度係数 n は次の方法で求められる。

(1) U_* と k_s を分布より求め

$$V/U_* = \sqrt{f/8}, \quad f = 8gn^2/Y^{1/3}$$

あるいは近似的に Manning - Strickler の関係式を用いて n を求める方法。但し境界より最大流速までの深さを Y とし、その範囲の平均流速を V とする。

(2) 最大流速 V_{max} と平均流速 V を用いて

$$U_* = (V_{max} - V)/5.75 \text{ よりマサツ速度を}$$

求めて (1)の方法と同様に n を計算する方法。

上記の2つの方法で求めた n の値を比較すると図-10がえられるが方法(1)の値がやや大きく Nikitin によっても指摘されているように最大流速付近で流速分布が対数則よりはずれる傾向が本観測例でもみられている。一方、氷板下面の状態については本観測では次のように大別してある。(イ) 平坦な氷板、(ロ) Ice ripple のある氷板、(ハ) 晶氷が氷板下に滞留、付着している場合、(ニ) モロミが氷板下を流下中の場合。

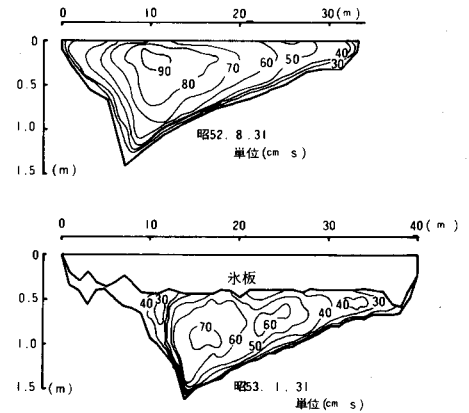


図-9 等流速線図

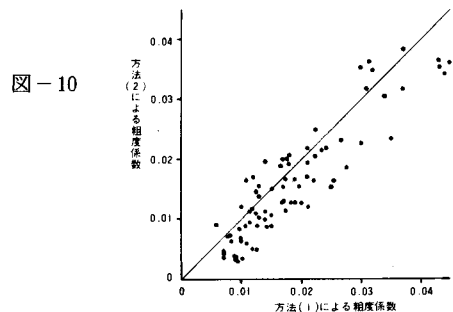


図-10

(イ)は 写真-1 に示すように平坦で滑らかな面を持ち
(ロ)は 写真-2 のような水流の剥離を生じないように
ゆるやかな波形をもつ場合から波長と波高の比が1に
近く非対称形を示すものまで、多様な形状を含む。

(イ)は 球状,あるいは円盤状のモロミが氷板下に滞留
して静止して雲状の層を形成している場合で、個々の
晶氷の結びつきは、機械的というよりは氷結による結
合と考えられる場合が多い。このような状態での
晶氷の体積(氷部分)は30~40%であり、ベーン
試験によるせん断強度は、1~100 gr/cm²の範囲
でバラツキがあったが、掃流力のオーダーを大中に上
廻っていた。使用したベーンの羽根の長さは10cm
回転の半径は4cmである。(ニ)の場合は晶氷の浮
力のため氷板に近いほど濃度が高くなり、晶氷の流下
量によっても流速分布は影響を受けた。又、この
流下は間欠的であり、通過時には速度が小さく測定さ
れる。図-11には縦、横軸にそれぞれ氷板、河床
の粗度係数を取り、方法(1)で求めた値を氷状(イ)~(ニ)
に分けて示してある。それぞれの氷状に対する平均
値は水深2.0m以下、流速1m/s以下の約130個の
観測値について次のように与えられる。

- | | |
|----------------------|----------------|
| (イ) 平坦な氷板 | $n_i = 0.0111$ |
| (ロ) Ice ripple のある氷板 | $n_i = 0.0211$ |
| (イ) 静止した晶氷 | $n_i = 0.0252$ |
| (ニ) 晶氷流下 | $n_i = 0.0168$ |

図-11より (イ)の場合 粗度係数の値は0.02以下に
限定され、(ロ)の場合は0.015から0.030の範囲に
で分布しており資料数は十分とはいえないが粗度係数
の大きさが波高と共に増大する傾向がみられた。又
モロミの滞留時の係数は0.02~0.03であり平坦な
氷板にくらべてかなり大きいことが明らかになった。

7 断面合成粗度係数

図-12に示すような河床と氷板にはさまれた結水下の流れを代表する断面合
成粗度係数の求め方について考案する。いま全水深 Y_0 に対するそれぞれの
境界の影響域を河床、氷板についてそれぞれ Y_1, Y_2 とする。また断面平均お
よびそれぞれの影響域の平均流速を V_0, V_1, V_2 であらわすと

$$Y_0 = Y_1 + Y_2 \cdots \cdots (1) \quad Y_1 V_1 + Y_2 V_2 = Y_0 V_0 \cdots \cdots (2)$$

がえられる。両境界に働くせん断力を τ_1, τ_2 としてエネルギー勾配が両域で等
しいと仮定すると

$$\tau_1 / \tau_2 = Y_1 / Y_2 \cdots \cdots (3) \quad \text{となる。}$$

一方、マッツ速度 $U_* = \sqrt{\tau / \rho} = \sqrt{f / 8} \cdot V \cdots \cdots (4)$ の関係を用いれば (3)式は

$$f_1 V_1^2 \cdot Y_2 = f_2 V_2^2 \cdot Y_1 \cdots \cdots (5) \quad \text{また} \quad \tau_1 + \tau_2 = 2 \tau_0 \quad \text{より}$$

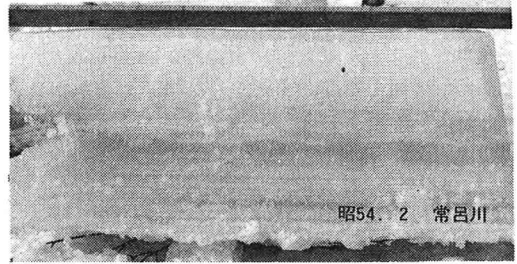


写真-1 平坦な氷板

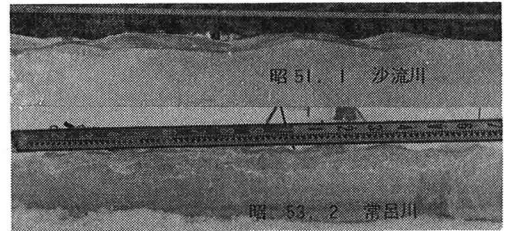


写真-2 Ice rippleをもつ氷板

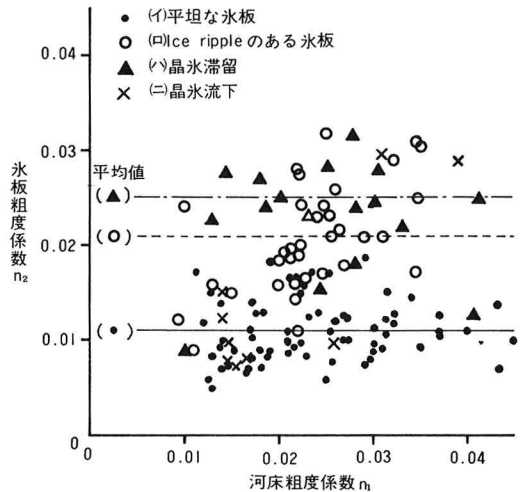


図-11 氷板と河床の粗度係数

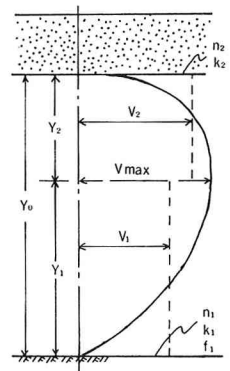


図-12 流れの概要

$$f_1 V_1^2 + f_2 V_2^2 = 2 f_0 V_0^2 \quad \cdots \cdots (6) \quad \text{ここで流速}$$

$$\text{分布式として} \quad u_i / U_{*i} = 2.5 \ln 30 y_i / k_i \quad \cdots \cdots (7)$$

(k_i は相当粗度, $i = 1, 2$ はそれぞれ河床, 氷板に対応) を用いれば, 平均流速は次式で与えられる。

$$V_1 = 2.5 U_{*1} (\ln 30 Y_1 / k_1 - 1) \quad \cdots \cdots (8)$$

$$V_2 = 2.5 U_{*2} (\ln 30 Y_2 / k_2 - 1) \quad \cdots \cdots (9)$$

これらを④式へ代入すると

$$\sqrt{8/f_1} = 2.5 (\ln 30 Y_1 / k_1 - 1) \quad \cdots \cdots (10)$$

$$\sqrt{8/f_2} = 2.5 (\ln 30 Y_2 / k_2 - 1) \quad \cdots \cdots (11)$$

である。①, ⑤式より Y_2 を消去して f と n の関係式を代入すれば 式⑫がえられる。

$$Y_1 = \frac{n_1^{3/2}}{n_1^{3/2} + (V_2/V_1)^{3/2} n_2^{3/2}} Y_0 \quad \cdots \cdots (12)$$

同様に

$$Y_2 = \frac{(V_2/V_1)^{3/2} n_2^{3/2}}{n_1^{3/2} + (V_2/V_1)^{3/2} n_2^{3/2}} Y_0 \quad \cdots \cdots (13)$$

一方 V_2/V_1 の値は それぞれの領域の最大流速が一致することより

$$\sqrt{f_1} \cdot V_1 \ln 30 Y_1 / k_1 = \sqrt{f_2} \cdot V_2 \ln 30 Y_2 / k_2 \quad \cdots \cdots (14)$$

⑩, ⑪を代入して f を n で表示すれば

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{1}{2.5 \sqrt{n_1^2 \cdot g}} + 1}{\frac{1}{2.5 \sqrt{n_2^2 \cdot g}} + 1} \cdot \frac{\sqrt{\frac{n_1^2}{Y_1}}}{\sqrt{\frac{n_2^2}{Y_2}}} \quad \cdots \cdots (15)$$

⑮式と⑫式より求めた V_2/V_1 の比を等しいとおき, Y_2 を消去すれば Y_1/Y_2 は次式より求められる。

$$\frac{\frac{1}{2.5 \sqrt{g} n_1} \left(\frac{Y_1}{Y_0} \right)^{3/2} + \frac{1}{Y_0^{3/2}}}{\frac{1}{2.5 \sqrt{g} n_2} \left(1 - \frac{Y_1}{Y_0} \right)^{3/2} + \frac{1}{Y_0^{3/2}}} = \frac{\left(1 - \frac{Y_1}{Y_0} \right)^{3/2}}{\left(\frac{Y_1}{Y_0} \right)^{3/2}} \quad \cdots \cdots (16)$$

n_1, n_2, Y_0 を与えて上式を満足する Y_1/Y_0 がえられれば ⑫式より V_2/V_1 の比が求められ⑥式の関係より n_0/n_1 と n_2/n_1 の関係は式⑰で与えられる。

$$\frac{n_0}{n_1} = \left(\frac{1}{2} \right)^{3/2} \frac{\left\{ 1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{3/2} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{3/2} \right\}^{3/2}}{\left\{ 1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{3/2} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{3/2} \right\}^{3/2}} \quad \cdots \cdots (17)$$

前節で流速分布より計算された n_1, n_2 を用いて, 実測の Y_1/Y_2 との関係は図-13に示される。図中の曲線は n_1, n_2, Y_0 を与えて ⑮式より計算された値であるが, 水深 $Y_0 = 0.5 \sim 3.0$ m の範囲では, 図中の曲線で十分近似できる。実測値には かなりのバラツキがみられるが, ほぼ⑮式の関係を満足しているとみなせば, 同様の考え方より n_1, n_2, Y_0 が与えられた場合, 断面合成粗度係数 n_0 は式⑰により図-14のように与えられる。

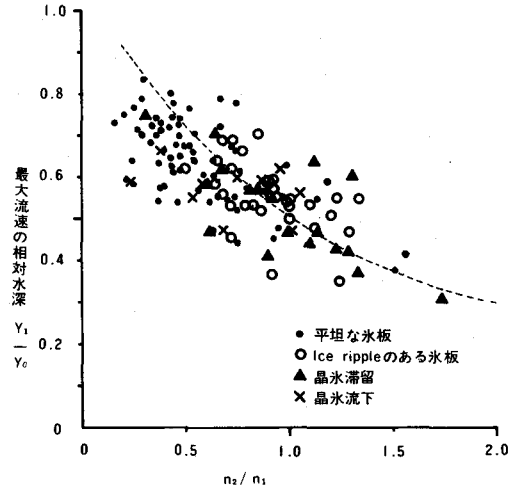


図-13 Y_1/Y_0 と n_2/n_1 の関係

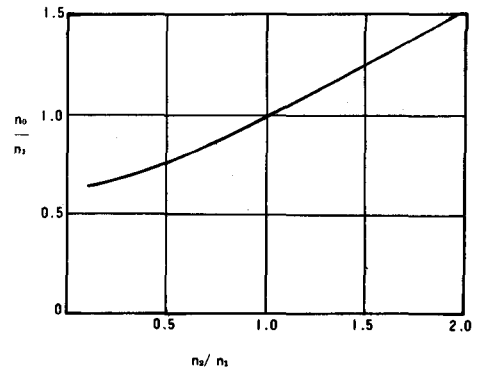


図-14 n_0/n_1 と n_2/n_1 の関係

8 結 び

本報告は 現地観測のまとめであり結氷河川の特性については、多くの知見をうることができたといえるが、それぞれの現象に対するより深い、 広汎な理解は今後の理論的考案、室内実験、あるいは 現地観測の資料の集積にまっところが大きい。 前節までにのべた主なまとめを以下に記すと、

- ① 我が国における河川結氷の発生、氷板の成長などの過程に対する理解が深まり、その概要があきらかになった。
- ② 一般の河川では、氷板は岸に固着せず水面に自重に等しい浮力をうけて浮いており、水面の高さは、氷板の厚さと、氷板、河床のもつ流れに対する抵抗の大きさによって決定される。
- ③ 結氷下の流速分布は、最大流速の位置が 非結氷時に比べて河床に近づき、流速分布は最大流速付近で対数則からはずれる傾向がみられた。
- ④ 氷板下面の水状を4つのパターンにわけ、観測資料よりそれぞれについてマニング粗度係数の大きさを把握した。
- ⑤ ことなる2つの境界にはさまれた流れについて、その断面を代表する断面合成粗度係数を求める式を導き、同じ考え方による最大流速の発生する相対水深について実測値と比較し満足すべき適合をえた。

なお、本観測にあたっては北海道開発局河川計画課、網走、室蘭開発建設部および岩手大学土木工学科の大村政義技官はじめ水工学研究室の皆様の多大な援助をうけましたのでここに記して謝意を表します。

9 参考文献

- 1) Ashton, G. D., Kennedy, J. F., Ripples on underside of River Ice covers, ASCE HY9, 1972.
- 2) Calkins, D. J., Deck, D., Martinson, C., Analysis of Velocity Profiles under Ice in Shallow Streams, Workshop on Hydraulic Resistance of River Ice, 1980.
- 3) Carey, K., The Underside of River Ice, St. Croix River, USGS PP 575-C, 1967.
- 4) Hirayama, K., Characteristics of Ice-covered Streams in connection with Water Discharge Measurements, IAHR Ice Symp. Lulea, 1978.
- 5) Komora, J., Sumbal, J., Head Losses in Channels with Ice cover, IAHR XII Congress, 1967.
- 6) Larsen, P., Head Losses caused by an Ice Cover on An Open Channels, Boston Soc. of ASCE, 1969.
- 7) Nozhikhorskiy R., Coefficient of Roughness of Bottom Surface of Slush-Ice cover, Soviet Hydrology, AGU Pub., No. 2, 1964.
- 8) Ohashi, K., Hamada, T., Flow Measurements of Ice-covered Rivers on Hokkaido, IAHR Ice Sym. Reykjavick, 1970.
- 9) Synotin, V. I., Velocity Structure of Flow under Ice-Cover, XI Congress of IAHR, 1965.
- 10) Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger S., Theory of Plate and Shells, McGraw-Hill Book Co., 1959.
- 11) Uzuner, M. S., The Composite Roughness of Ice-covered Streams, Jor. of Hydraulic Research, Vol, 13, 1975.
- 12) Yu, K. H., Graf, W. H., Levine, G., The Effect of Ice on the Roughness Coefficient of St. Clair River, Proc. of 11th Conf. Great Lakes Res., 1968.
- 13) 鎌田新悦, 河川の結氷とこれに伴う水理に関する研究, 北海道開発局土試報告, 1965, 1966.
- 14) 平山健一, 結氷河川の水位上昇量に関する研究, 第32回年講, 1977.
- 15) 平山健一, 佐藤敦, 大村政義, 結氷河川の流速測定と氷板の粗度係数, 第34回年講, 1979.