

北海道における河川の結氷特性と結氷下の水理  
特性について

Characteristics of Ice Covered Rivers in Hokkaido

山下 彰 司   小林 正 隆   宮   昭 彦   平 山 健 一

---

1993年5月

北海道開発局開発土木研究所

河 川 研 究 室

# 北海道における河川の結氷特性と結氷下の水理特性について

## Characteristics of Ice Covered Rivers in Hokkaido

山下 彰司\* 小林 正隆\*\* 宮 昭彦\*\*\* 平山 健一\*\*\*\*

Shoji YAMASHITA, Masataka KOBAYASHI,  
Akihiko MIYA and Kenichi HIRAYAMA

寒冷地河川では結氷のため、冬季の流量観測精度の低下や取水障害が生じる。

本研究は、積雪寒冷な北海道の河川の結氷特性および結氷下の水理特性を明らかにし、冬季河川の結氷障害の対策の立案に資するものである。

《結氷河川；気温；フルード数；レイノルズ数；フラジルアイス》

In cold regions, ice covered rivers obstruct the inflow of water and reduces the accuracy of discharge measurements.

This study describes characteristics of ice covered rivers and under ice flows in Hokkaido rivers, and suggest planning measures against obstructions in ice covered rivers.

Keywords: ice covered river, temperature, Froude number, Reynolds number, frazil-ice.

### まえがき

北海道は積雪寒冷な地域であり、冬季間には河川の大部分は結氷する。河川が結氷することにより、その水理特性は開水路のときとは大幅に変化し、冬季の流量観測精度の低下や河川構造物における冬季の取水障害を招いたりする。

本研究では、全道の過去10カ年間の気象資料と流量観測資料をもとに解析した北海道の結氷特性について述べる。また、天塩川で行った現地観測のデータをもとに、結氷下の河川の水理特性についても述べるものである。

### 1. 北海道の結氷特性

#### (1) 基準年の算定

全道の河川の結氷状況の調査は山辺<sup>1)</sup>、山口<sup>2)</sup>によって行われたことがある。しかし、調査年は約20～30年前であり、近年は結氷状況が異なる可能性がある。そこで、過去10年間（1982年～1991年度）の全道の気象データを用いて10年間の平均の基準年を決定し、その年の全道の流量観測所のデータから基準年の結氷状況を明らかにする。

基準年を決定するにあたって、基準とする気象観測地点を北見、中川、帯広、留辺蘂、留萌、新得、天塩、浦幌の8地点とする。各地点において、各年度の12月～3月までの10年間の月平均気温偏差の二乗和をとったものが図 1.

\*河川研究室主任研究員 \*\*岩手大学建設環境工学科修士2年 \*\*\*同大学建設環境工学科修士1年 \*\*\*\*同大学建設環境工学科教授

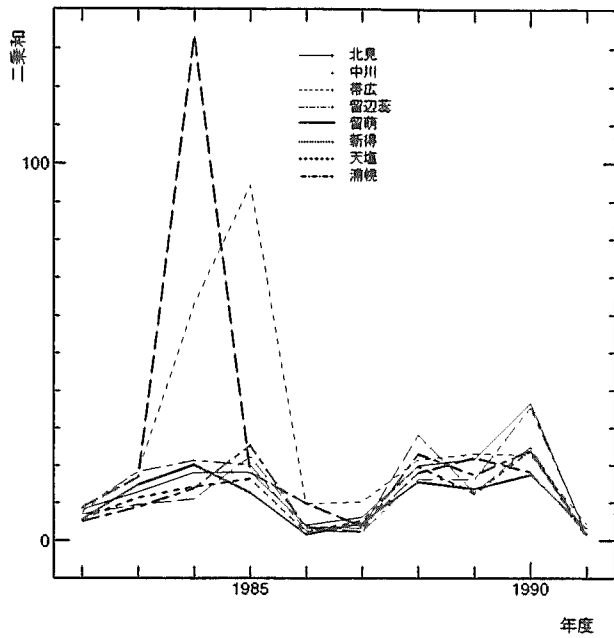


図 1.1.1 月平均気温偏差の二乗和

1.1である。二乗和が0に近い方が平均に近いことを示す。図 1.1.1をみると、1991年度が最も各地点において二乗和が小さい。しかし、図 1.1.2にあるように冬季平均気温の10カ年

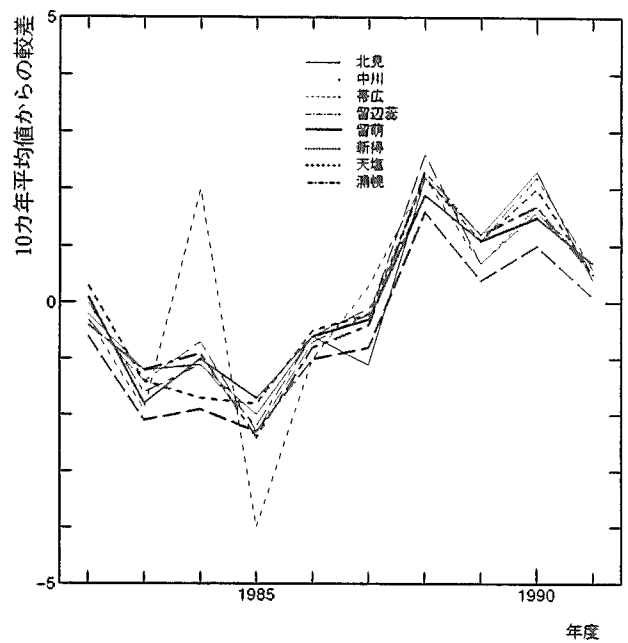


図 1.1.2 冬季平均気温の10カ年平均値からの較差

平均値からの較差をみると1991年度はプラスとなる。今回の検討は結氷状況についての検討であるため、10カ年平均気温よりプラスであることは好ましくない。したがって、基準年は1991

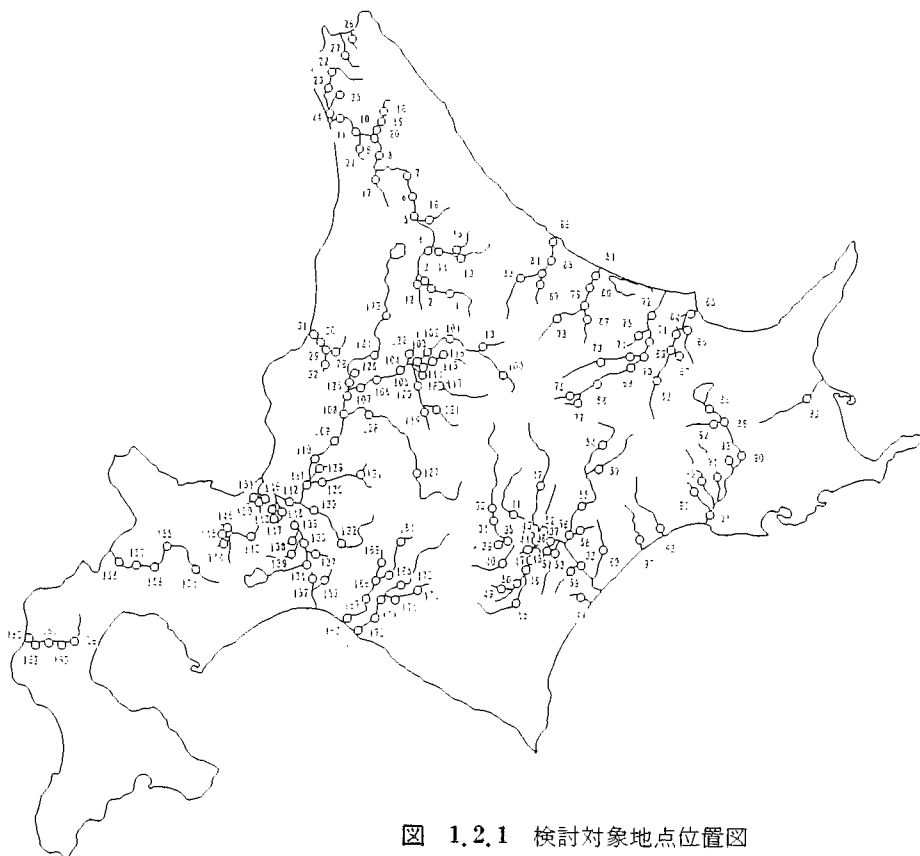


図 1.2.1 検討対象地点位置図

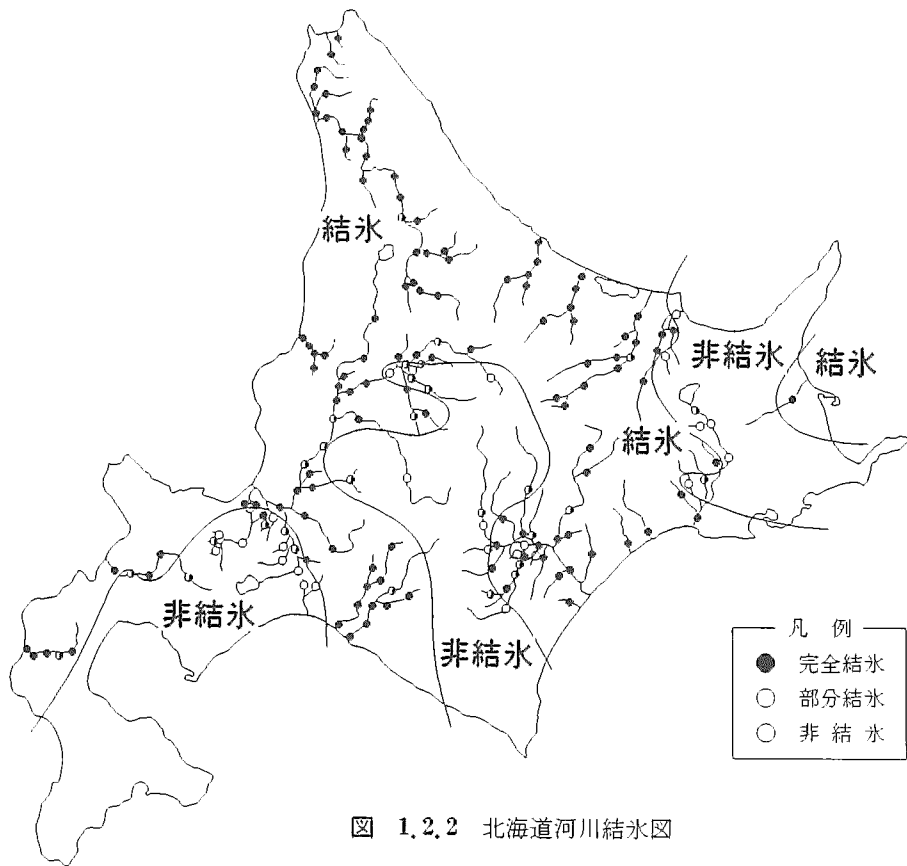


図 1.2.2 北海道河川結水図

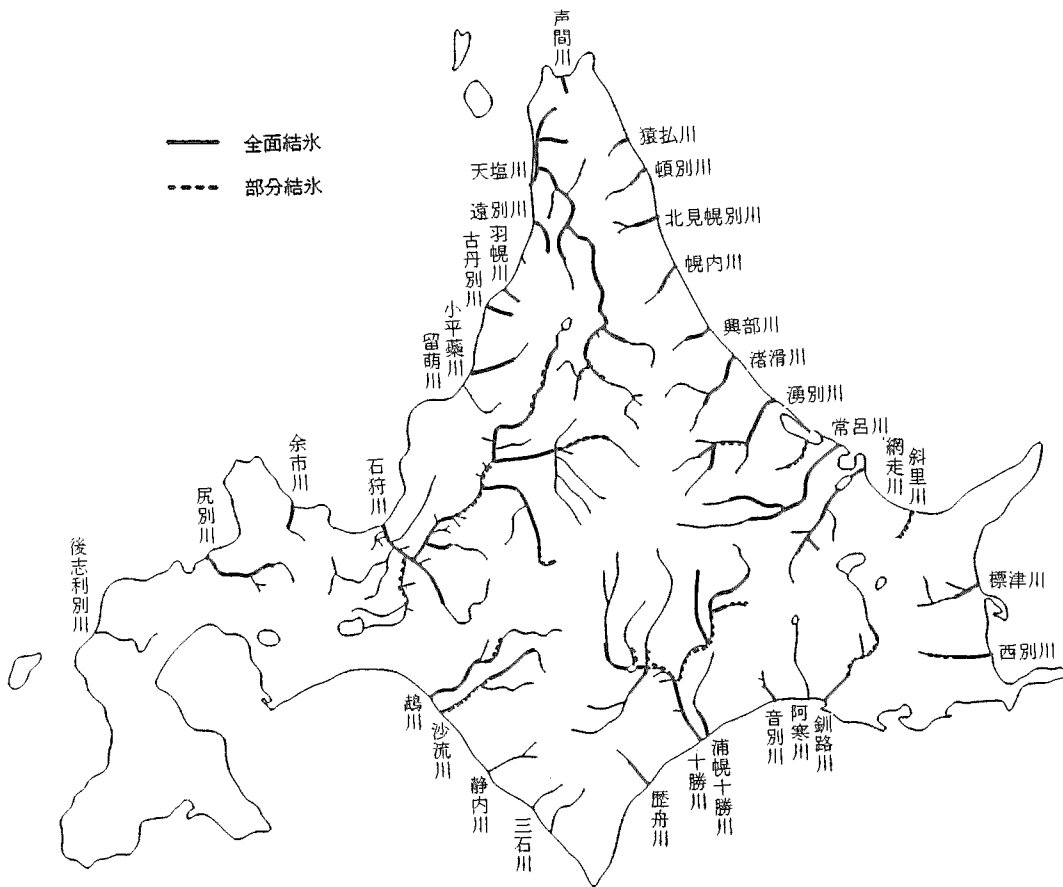


図 1.2.3 山辺氏の北海道河川結水図

年度について二乗和が小さい1986年度を採用した。

(2) 基準年における結氷状況

全道20水系175観測所の資料を用いて、冬季間の河川の結氷状況を把握する。検討対象地点の位置は図 1.2.1の175カ所である。図 1.2.2には、冬季間に一度は結氷する河川の分布状況を示す。主要水系ごとの対象地点数に対する完全結氷地点の割合は、表 1.2.1のとうりである。天塩川、留萌川などの道北の河川や渚滑川、湧別川、常呂川などのオホーツク海地方の河川で結氷率が高くなっている。北海道において、冬季に結氷しない地域は図 1.2.2より日高山脈、大雪山を中心とする道央山系と道南地方であることがわかる。道南地方の非結氷は

気温があまり低下しないためと思われるが、道央地方の非結氷はこの地域が北海道でも特に寒冷な地であることから、気温ではなく流況の因子によるものだと考えられる。

図 1.2.3は、山辺<sup>り</sup>による北海道の河川結氷図である。図 1.2.2と図 1.2.3を比較すると、石狩川中流部や十勝川中流部は両者とも部分結氷となっている。完全結氷した個所も、両者ともほぼ一致している。図 1.2.4は、1960年～1969年度までと1982年～1991年度までの室蘭、旭川、帯広および札幌における冬季間（12月～3月）の平均気温の年度ごとの変化を表わした図である。図 1.2.4より、1960年代は気温の変化が各地点で各年度においてほぼ一定であるのに対して、1980年代は1986年度までの前半は1960年代より気温が低く、1986年以降の後半は1960年代よりも高くなっている。基準年とした1986年度はちょうど気温変化の中間にあたり、1960年代の平均気温とほぼ同じである。このため、今回の結氷図（図 1.2.2）と山辺の結氷図（図 1.2.3）でほとんど相違がないと思われる。図 1.2.5～図 1.2.10は、期別ごとの結氷図である。12月の下旬から河川の結氷は留萌川、鶴川・沙流川下流、十勝川下流、オホーツク海側河川、天塩川下流から始まる。1月上旬になると十勝地方太平洋岸からオホーツク海岸、道北地方にかけて結氷する。石狩川、鶴川、沙流川は中流部を除いて完全結氷する。1月下旬から2月下旬にかけては石狩川、十勝川において河床勾配の急な道央の山間部と支笏湖の湖水が流入する千歳川と湧水の多い

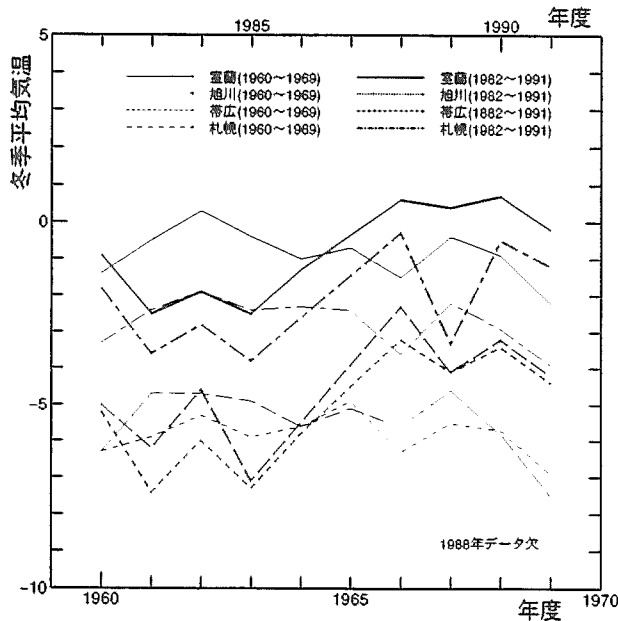


図 1.2.4 冬季平均気温変化図

表 1.2.1 水系別完全結氷率

水系名	地点数	結氷数	結氷率	水系名	地点数	結氷数	結氷率
天塩川	25	24	96%	釧路川	9	3	33%
留萌川	5	5	100	石狩川	52	24	46
十勝川	28	15	54	安平川	2	0	0
網走川	6	4	67	尻別川	5	3	60
常呂川	10	9	90	後志利別川	5	4	80
湧別川	5	5	100	鶴川	6	6	100
渚滑川	5	5	100	沙流川	6	5	83

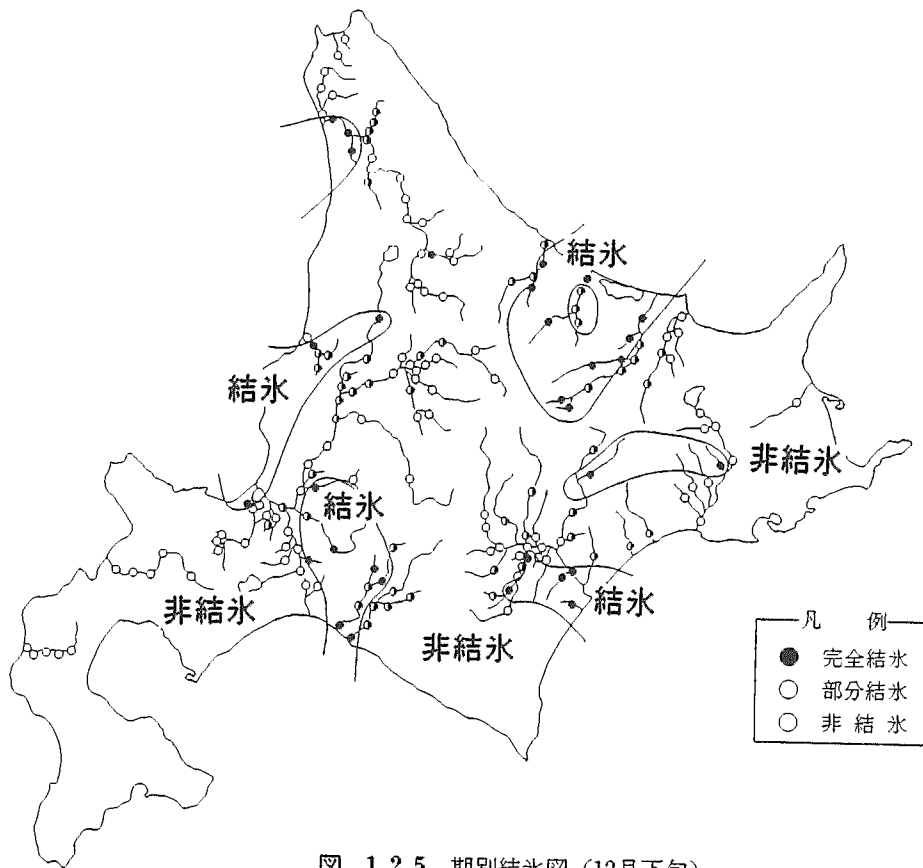


図 1.2.5 期別結氷図 (12月下旬)

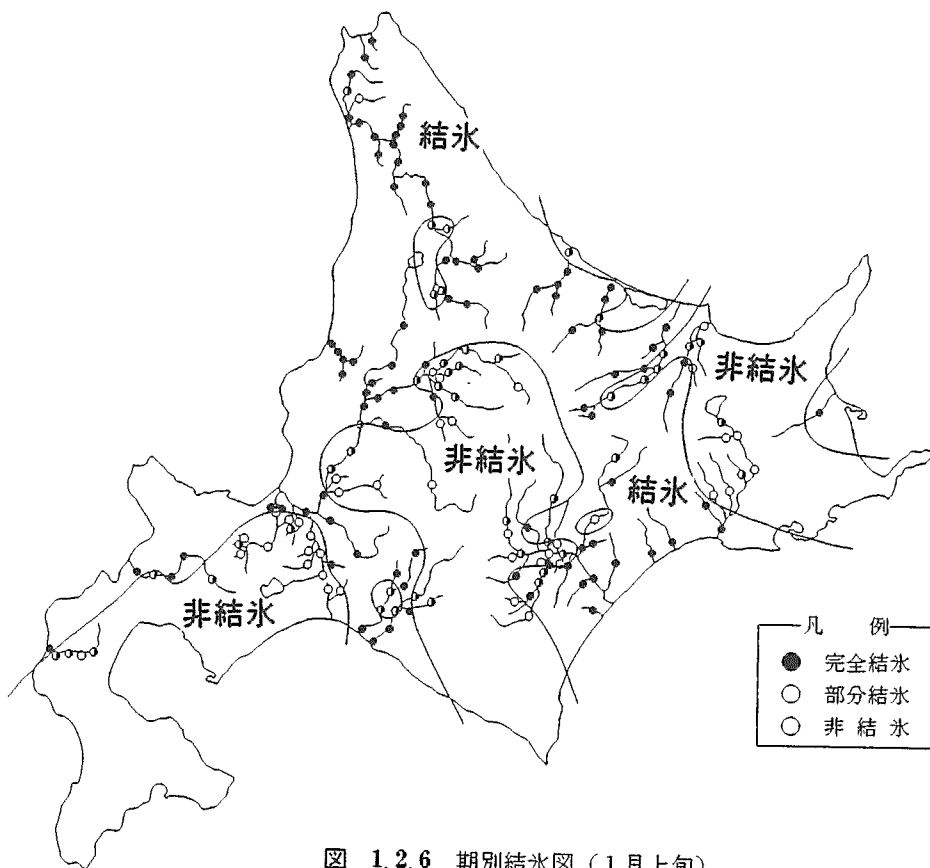


図 1.2.6 期別結氷図 (1月上旬)

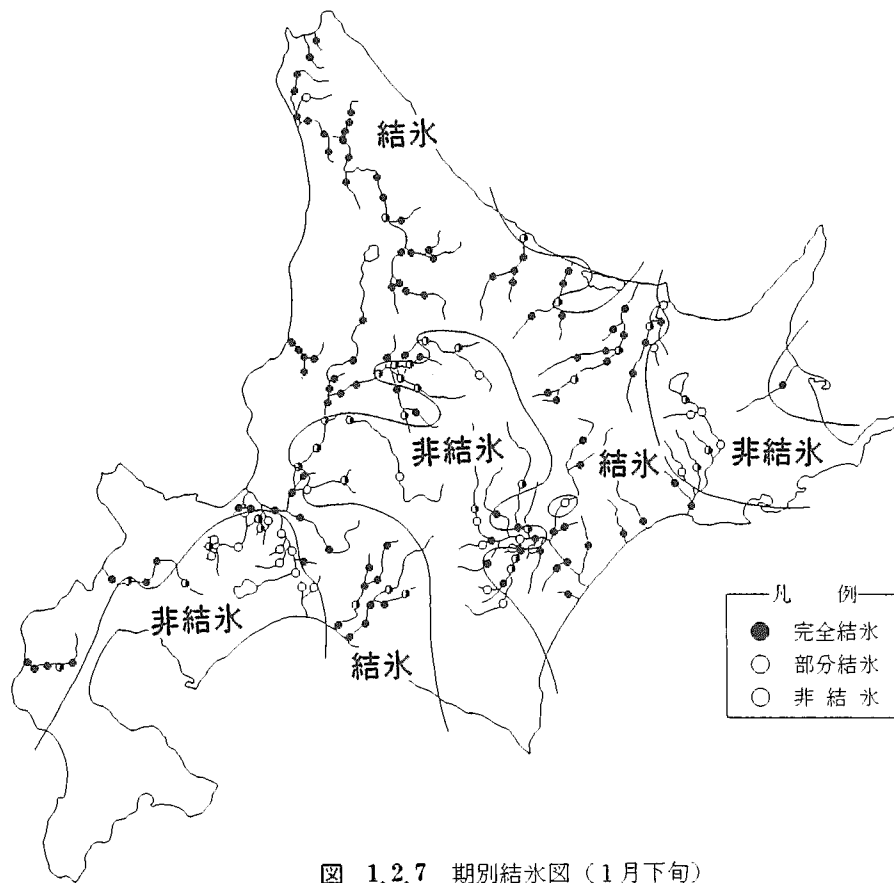


図 1.2.7 期別結水図 (1月下旬)



図 1.2.8 期別結水図 (2月上旬)



図 1.2.9 期別結氷図 (2月下旬)

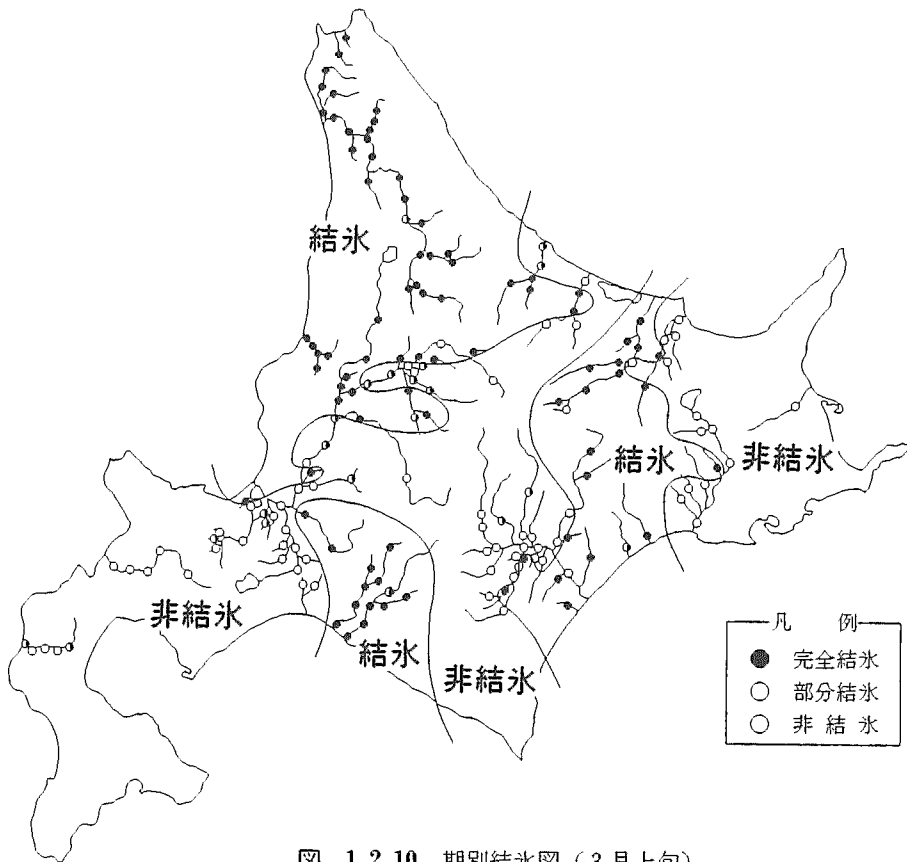


図 1.2.10 期別結氷図 (3月上旬)



美々川および屈斜路湖の湖水が流入する釧路川上流は完全結氷しない。3月に入ると道南の後志利別川、オホーツク海側の河川の下流部、十勝川上流から開氷していく。

(3) 北海道河川の結氷特性

河川が結氷するには、気温などの熱の因子の流速などの流況の因子が考えられる。結氷河川と熱収支の関係については、佐渡ら<sup>3)</sup>が報告している。ここでは熱の因子を結氷前の3日寒度で代表させ、主に流況の因子との関係について

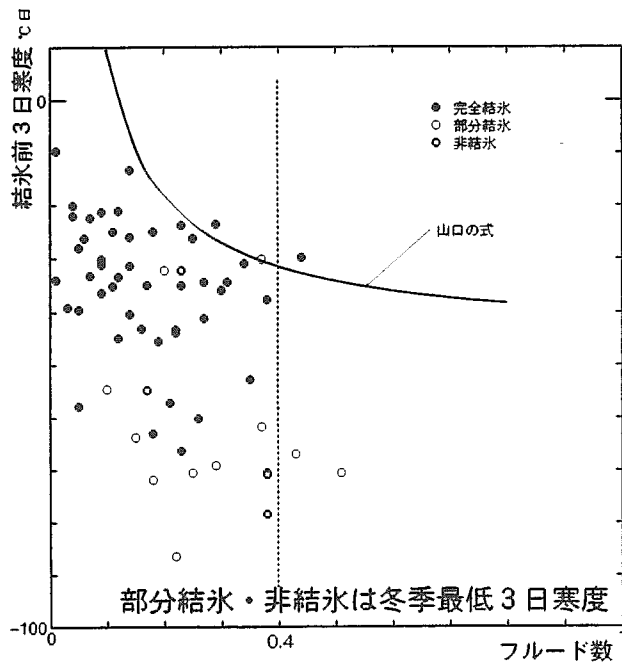


図 1.3.3 最低3日寒度—水深関係図

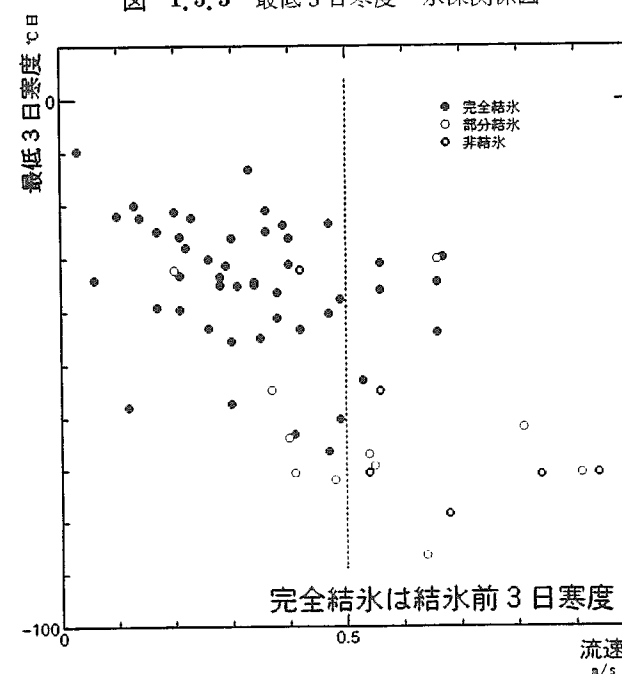


図 1.3.2 最低3日寒度—流速関係図

検討する。検討に際しては図 1.2.1 にあげた全道175カ所の検討対象地点のうち、水温調査が行われており、なおかつ、都市排水などによる異常水温の地点を除いたデータを用いる。既往の研究では、岸ら<sup>4)</sup>によると結氷はフルード数が0.4を越えると生じず、また山口<sup>2)</sup>は結氷条件となる以下の山口の式を提案している。 $T_3$  が右辺の式の値以下になると結氷する。

$$T_3 < 1.8 / Fr - 15$$

ここで、 $T_3$ ：結氷前の3日平均気温、 $Fr$ ：フルード数である。

図 1.3.1 は完全結氷した河川において、縦軸に結氷前の3日間の温度を合計した3日寒度を横軸に結氷直前のフルード数をとったものである。使用したデータでは、冬季の水温が異常に高いデータを除いてある。この図において、山口の式は  $3 \times T_3$  を3日寒度  $T_{c3}$  と考えて以下の形にする。

$$T_{c3} < 1.8 / Fr - 15$$

図 1.3.1 より基準年においても山口の式はなりたち、またフルード数が0.4を越えるとはほぼ結氷していない。山口の式を越える2点のデータは、渚滑川と湧別川のオホーツク海側の河川である。

次に、部分結氷あるいは非結氷河川の特性に

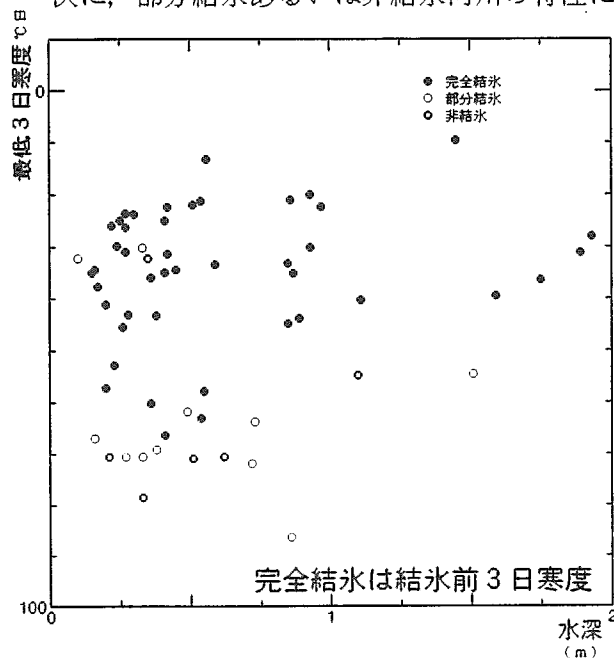
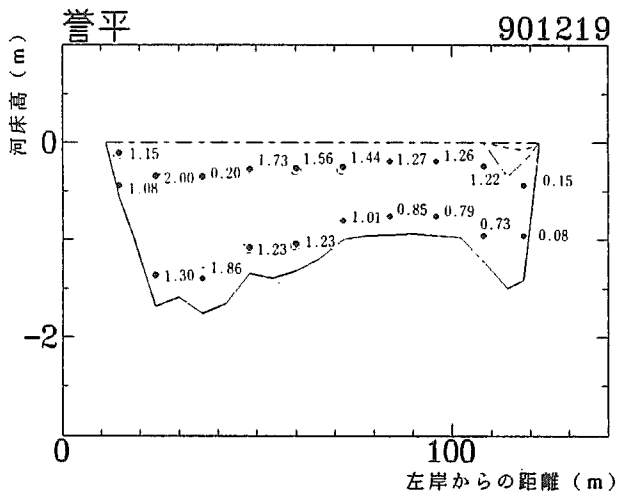


図 1.3.1 結氷前3日寒度—フルード数関係図

について述べる。図 1.3.2 は基準年における最低の3日寒度とそのときの流速を、図 1.3.3 は同様に最低の3日寒度と水深の関係を示した図である。図 1.3.2 および図 1.3.3 では、異常水温を示す河川のデータは除かれている。図 1.3.2 より3日間の寒度が $-50^{\circ}\text{C}$ を越えているにもかかわらず、部分結氷および非結氷の河川では流速が $0.5\text{m/s}$ を越えていることがわかる。したがって、流速は非結氷に対して必要条件ではないが十分条件ではあるといえる。また、図 1.3.3 より部分結氷および非結氷と水深に関する関係は認められなかった。このことは、結氷条件は主に流速条件により左右されることを示していると思われる。

## 2. 結氷河川と開水路との流れの比較



### (1) 現地データでの比較

平成2年度に天塩川で行われた流量観測データをもとに、結氷前と結氷後の流況の変化を比較する。比較検討観測所名は、以下の3カ所である。

#### ① 誉平

図 2.1.1 は、結氷直前の1990年12月19日と結氷後フラジルアイスが最も滞留した1991年1月24日横断面内流速図である。文中のフラジルアイスとは、寒冷な河川で水の中を流送される氷の結晶(晶氷とも呼ぶ)をいう。このときの水理条件は流量が1990年12月19日では $115.55\text{m}^3/\text{s}$ であり、1991年1月24日では $69.67\text{m}^3/\text{s}$ である。流下有効断面積は1990年12月19日で $130.94\text{m}^2$ であり、1991年1月24日では $115.09\text{m}^2$ である。結氷後の流下有効断

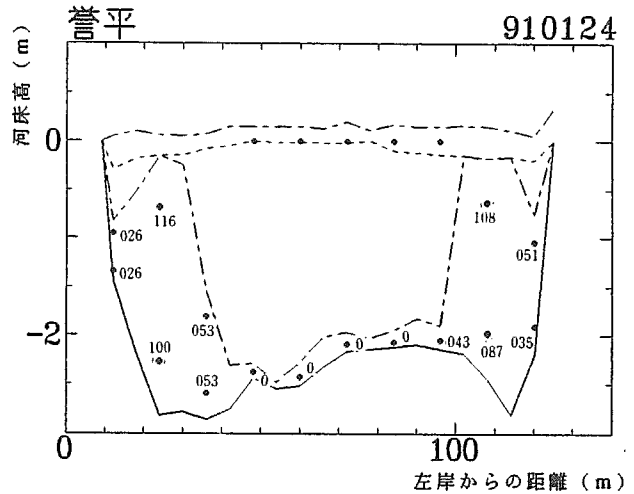


図 2.1.1 横断面流速比較図(誉平)

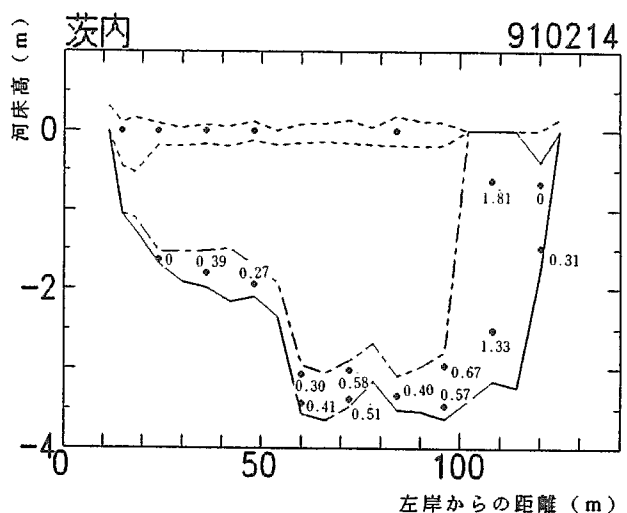
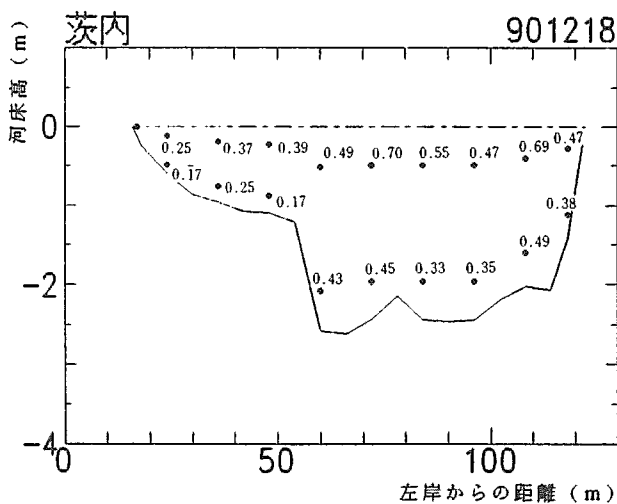


図 2.1.2 横断面流速比較図(茨内)

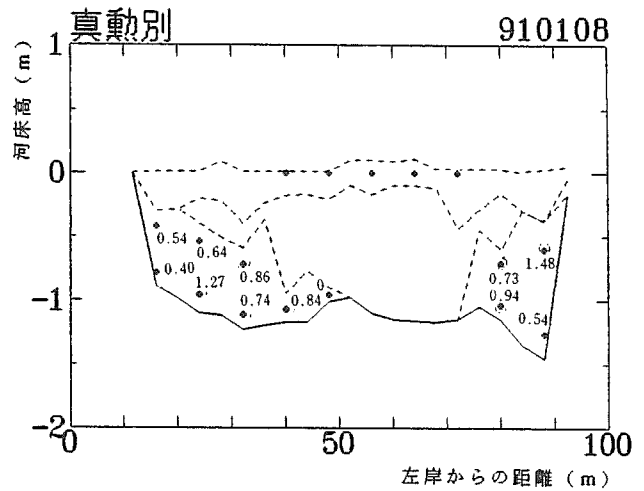
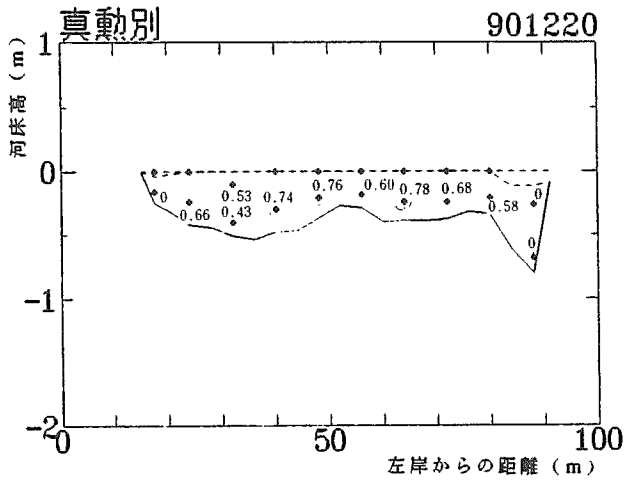


図 2.1.3 横断面流速比較図 (真勲別)

面積は結氷前の88%とほぼ同じであるが、流量比は結氷前の60%程度まで低下しており、結氷およびフラジルアイスの滞留による摩擦抵抗の増大の影響が現われている。この地点におけるフラジルアイスは、河川中央部に大量に滞留している。結氷前の河川中央部の流速は2割水深部で1.0m/sを越えているが、フラジルアイスが滞留すると河川中央部の流速はほぼ0.0m/sになる。結氷後の流れの主流部は川の兩岸近くになり、流速は0.7m/sを越える。

②茨内

図 2.1.2 は、茨内観測所において結氷前の1990年12月18日と結氷後の1991年2月14日の横断面内流速を比較した図である。茨内は全面結氷が生じず、フラジルアイスは結氷前に主流部であった河川中央に滞留するが、右岸近くは開水面が存在し、結氷後の主流部はこの部分に存在する。1990年12月18日と1991年2月14日の流量はそれぞれ77.92m<sup>3</sup>/sと

73.58m<sup>3</sup>/sとほぼ同じであるが、流下有効断面面積は179.29m<sup>2</sup>と106.57m<sup>2</sup>と結氷後の方が小さい。これは茨内観測所では完全結氷せず、開水面が存在するため主流部がこの個所になり、主流部の流速が結氷前の2倍程度になり、水深も約2倍程度になっていることが原因と思われる。フラジルアイスの滞留部の下の流速は小さい。

③真勲別

図 2.1.3 は、真勲別観測所において結氷前の1990年12月20日と結氷後の1991年1月8日の横断面内流速を比較した図である。結氷前の主流部はほぼ河川の中央に位置しており、結氷後のフラジルアイスの滞留も河川中央に集中する。結氷後の主流部は左岸と右岸の近傍になる。結氷前の1990年12月20日の流下有効断面面積は29.93m<sup>2</sup>、流量は14.48m<sup>3</sup>/sであり、結氷後の1991年1月8日の流下有効断面面積は32.78m<sup>2</sup>、流量は9.47m<sup>3</sup>/sである。流下有効断面面積は結氷前の方が小さいが、流

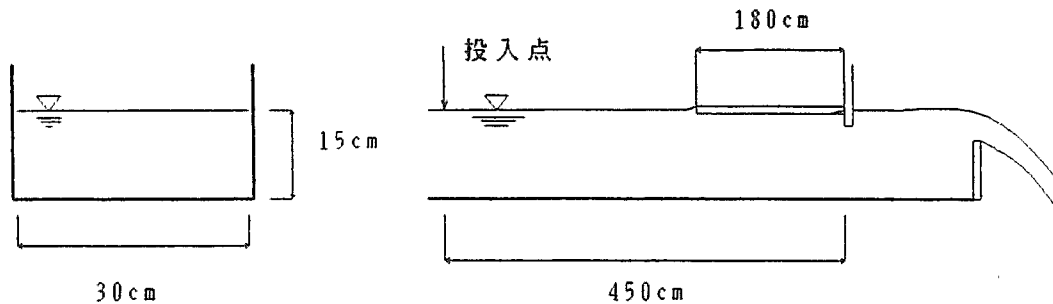


図 2.2.1 実験装置概略

量は結氷前の方が大きい。

(2) フラジルアイス滞留実験

実河川における結氷時のフラジルアイスの滞留状況を把握するため、岩手大学で行われた模型実験について述べる。

①実験条件

実験装置の概略を図 2.2.1 に示す。水路全長は700.0cmであり、幅は30.0cmである。水路底は鉄板表面ペンキ仕上げ、側壁はガラス、模型氷板は合板である。実験に用いた模型氷粒は、比重が0.90と水に近い直径3～4 mmのポリプロピレンを用いた。実験水深は15cmとし、実験流速は10cm/s～40

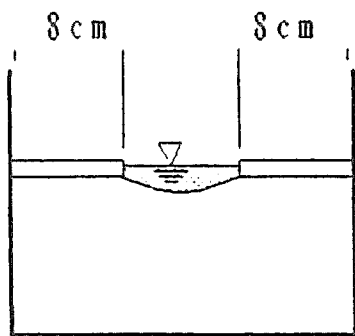


図 2.2.2 実験結果断面 1

cm/s, フルード数で0.08～0.33まで変化させた。模型氷板の全長は180cmであり、その上流270cm地点から模型氷粒を水路幅全体に均一に投入した。水路勾配は1/1000である。

②実験結果

a) 実験 1

図 2.2.2 のように、水路両側に模型氷板をおく。模型氷粒は氷板に達する前に水路中央に集まり流下する。氷板上流端部には滞留しない。氷板下に進入した氷は、前端から1 m 程度のところまでに中心部開

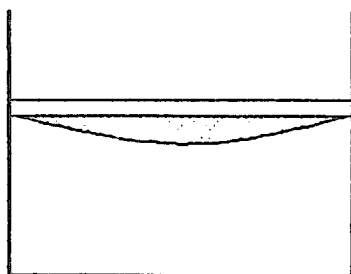


図 2.2.3 実験結果断面 2

水面に移動した。氷板下流端にせきを水面から5 mm程度まで挿入し、強制的に滞留させるようにすると中心部のみに滞留した。このときの滞留厚は氷板よりも厚くなった。

b) 実験 2

図 2.2.3 のように、水路全面に氷板を設置する。氷板下流端には5 mmのせきを設置して模型氷粒が滞留するようにした。滞留状況はまず氷板上流端部に滞留し、そこに滞留できない分は流下するが、やはり中心部に寄りながら流下する。滞留する量は少なく、流速を小さくしても少量

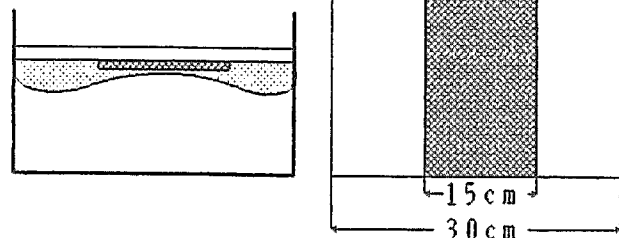


図 2.2.4 実験結果断面 3

しか滞留しない。

c) 実験 3

図 2.2.4 のように、中心部に幅15cm程度に砂を張りつけた結氷板を設置する。砂の粒径は4～5mm程度である。滞留状況はまず結氷板の上流端部に滞留し移動し始めるが、流速が速いときは両脇の砂のな

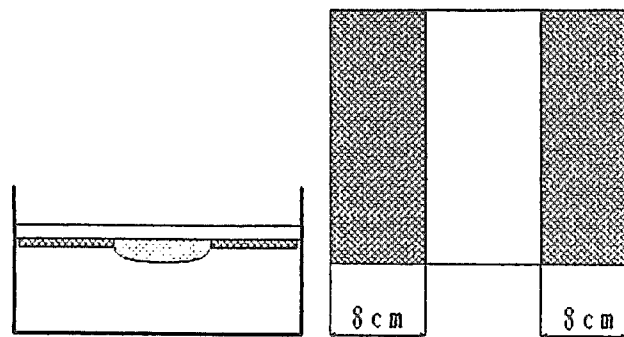


図 2.2.5 実験結果断面 4

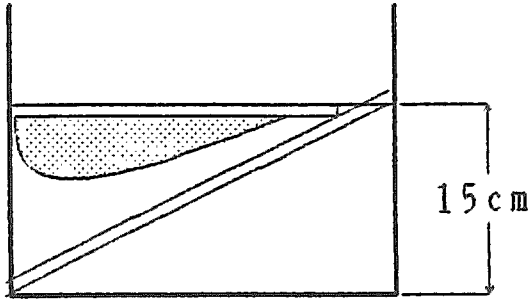


図 2.2.6 実験結果断面 5

い部分に多く流れる。流速を落とすと中心部にも流れるようになり、粗度の大きい部分に滞留する。このときに滞留する量は実験2のときよりも多い。脇の模型氷粒はそのまま流下する。

d) 実験4

図 2.2.5 のように、両脇に幅 8 cm ずつ砂を張りつけた結氷板を設置する。このとき模型氷粒は中心部を流下し、脇の部分にはほとんど流れない。中心部には滞留せず、脇の砂を張りつけた部分に少量滞留する。

e) 実験5

図 2.2.6 のように、水路底を斜めにして粗度を上げる加工をしていない結氷板を設置する。浅い方には模型氷粒は進入せず、壁面近くに多く流れる。流速が早いところに溜まる傾向がある。

### 3. 結氷河川の水理特性

#### (1) 現地調査個所の気象特性

結氷下の水理特性をさらに詳細に調査するため、天塩川の河口より64.3KPにある誉平水位観測所で結氷下の精密流量観測を行った。この地点での河幅は約120mであり、観測穴の間隔は6mであり、したがって、観測穴の数は19カ所に及ぶ。流量観測のための流速測定は、各観測穴において有効水深で（氷板およびフラジルアイスの下から河床までの水深）10cm間隔で行った。平成3年度の冬季（平成3年12月～平成4年3月）における気温変化は、図 3.1.1 のとおりである。平均気温は12月からの累積日数が60～70日するとき（2月上旬）に最低になり、3月に向けてまた上昇していく。またこの期間の積算寒度の変化は図 3.1.2 のとおり

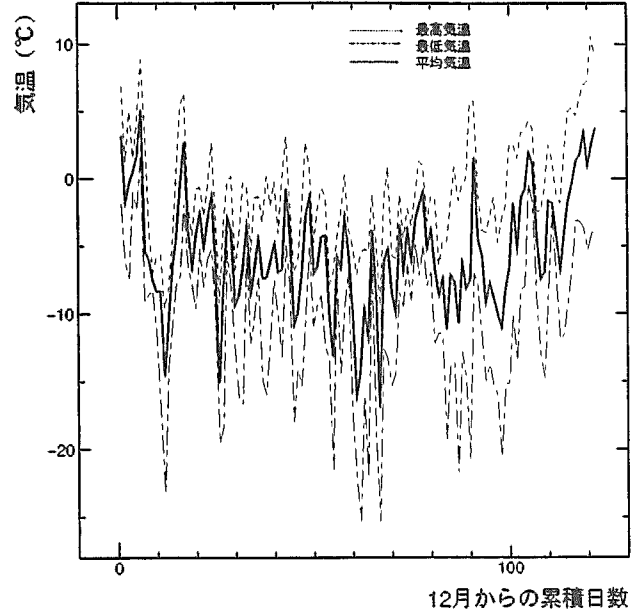


図 3.1.1 平均3年度冬季気温変化図（誉平）

であり、12月からの累積日数が100日（3月中旬）まではほぼ一直線で増加していく。このとき1次回帰式を求めると、積算寒度  $Y$  と12月からの累積日数  $X$  の関係は以下ようになる。

$$Y = aX + b$$

ここで、 $a = 6.322589$ 、 $b = -3.59417 \times 10$  であり、相関係数は0.996である。相関係数は非常に高く、積算寒度が12月からの累積日数と非常に良い相関にあることを示している。積算寒度

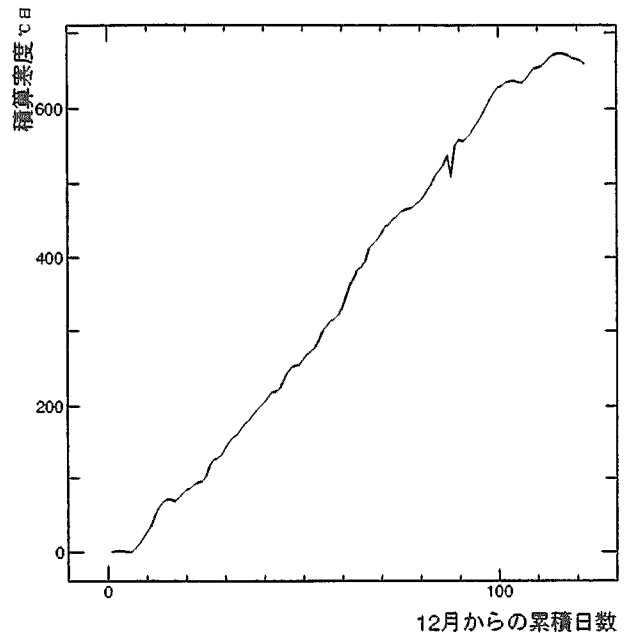


図 3.1.2 積算寒度図（誉平）

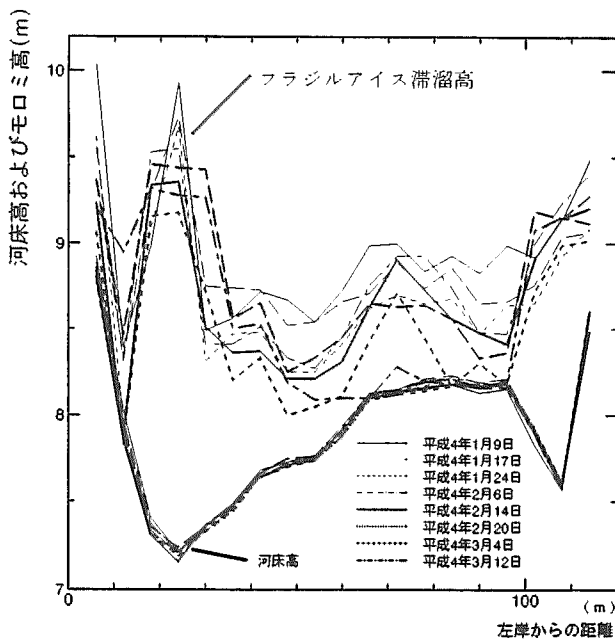


図 3.2.1 平成3年度河床変化図

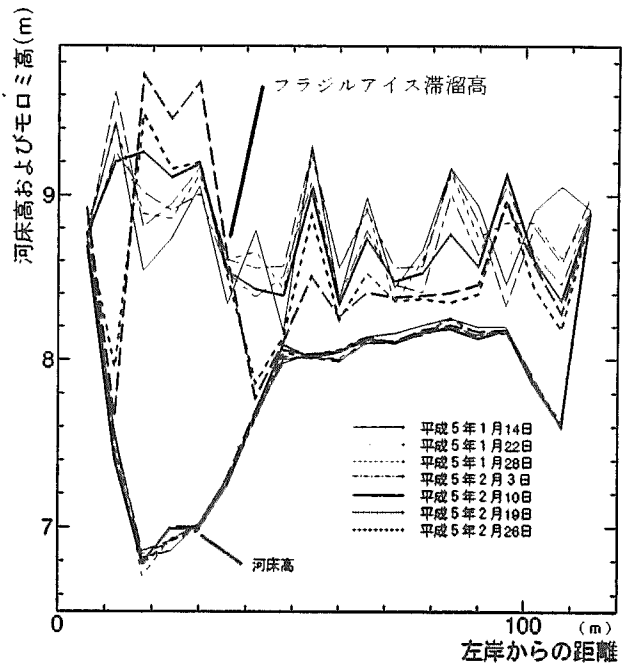


図 3.2.2 平成4年度河床変化図

は氷板厚の増加とも密接な関係がある。

(2) 現地調査個所での河床変動

図 3.2.1と図 3.2.2は、それぞれ平成3年度(平成3年12月～平成4年3月)と平成4年度(平成4年12月～平成5年3月)に菅平で行った現地調査のときの河床の変化とフラジルアイスの滞留状況を表わした図である。図よりフラジルアイスの滞留状況はかなり変化するが、河床はそれほど変化しないのがわかる。これは一般に冬季間の流量はそれほど大きくなく、また流量変動の幅も小さいからだと思われる。

(3) 結氷河川での水理特性

表 3.3.1に、平成3年度に行った現地調査結果を示す。表中で、有効断面積は全断面積から水面下の氷の断面積とフラジルアイスの断面

積を除いたものである。また、完全結氷下の流れは疑似的に管路流と考慮して有効直径<sup>5)</sup>を想定する。有効直径は河幅を  $B$ 、平均水深を  $h$  として、

$$d_{eq} = 4A/P$$

ここで、 $A : B \times h$ 、 $P = 2 \times B \times h$  として、

$$d_{eq} = 4Bh / (2B + 2h)$$

$$d_{eq} = 4h / (2 + 2h/B) = 2h \quad (B \gg h)$$

となる。この有効直径を用いて、摩擦係数とレイノルズ数を算出する。

結氷河川の水理特性を管路流と比較するため、横軸にレイノルズ数、縦軸に摩擦係数を

表 3.3.1 平成3年度現地調査結果

観測日	流量	有効断面積	水面勾配	有効水深	有効直径	平均流速	平均摩擦係数	平均フルード数	平均レイノルズ数
H4.1.9	67.02	115.26	0.001319	0.998	1.996	0.581	0.1526	0.186	1159676
H4.1.17	53.46	84.84	0.001555	0.741	1.482	0.630	0.1138	0.234	933660
H4.1.24	65.98	104.02	0.001425	0.907	1.814	0.634	0.1259	0.213	1150076
H4.2.6	69.03	98.98	0.001181	0.864	1.728	0.697	0.0822	0.240	1204416
H4.2.14	62.37	87.71	0.001145	0.768	1.536	0.711	0.0682	0.259	1092096
H4.2.20	49.68	69.42	0.001005	0.612	1.224	0.716	0.0471	0.292	876384
H4.3.4	69.29	98.66	0.000795	0.860	1.720	0.702	0.0543	0.242	1207440
H4.3.12	60.08	81.93	0.000840	0.716	1.432	0.733	0.0439	0.277	1049656

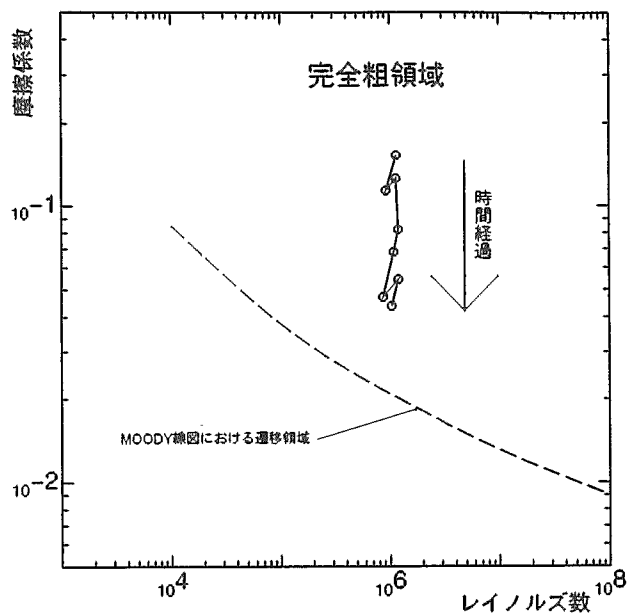


図 3.3.1 摩擦係数—レイノルズ数関係図

とって整理すると図 3.3.1 のようになる。図中の破線は *moody* 線図における遷移領域であり破線より上は完全粗領域となる。現地調査の結果はレイノルズ数はほとんど変化しないが、摩擦係数は時間とともに低下する傾向にある。すなわち、流れの力学的相似条件は冬季間を通じて変化しないが、粗度要因は滑らかになっていくことが示されている。冬季間を通じて観測個所の上下流は十分な距離で結氷していた。

#### あとがき

今回は、過去1982年度～1991年度までの10カ年の全道175カ所における流量観測所の資料と平成3年度、平成4年度に行った完全結氷河川での現地調査資料を用いて、北海道における河川の結氷特性と結氷下の水理特性を明らかにしようとした。

結氷特性については既往の研究成果があるが、近年地球環境の変化がいわれており、過去の成果と相違がでるのではないかと考えられるが、結果としてほぼ同じ成果が得られた。また、今回部分結氷および非結氷河川での水理河川での水理条件について検討した。結果として、部分結氷および非結氷河川では流速が0.5 m/s を越えていること、水深条件よりは流速の条件の方がより関係があることがわかった。

ここで、冬季にしては河川水の水温が異常に高い地点が数カ所あり、都市排水、ダム放流などの人為的影響が結氷・非結氷の状況に大きな影響を与えており、今回の研究ではこの影響を可能な限り除いた。

次に、現地調査資料を用いて結氷下の水理特性について検討した。まず、実河川において開水面から結氷河川に変化することによる流況の変化を検討した。結果は寒冷地河川特有のフラジルアイス、開水面の流れで主流部となる個所に多く滞留することがわかった。滞留の状況を、模型実験によって再現しても同じ傾向が得られた。また、結氷河川での河床変動の可能性を調べたが、今回の現地調査結果では大きな河床の変化はみられなかった。調査個所は天塩川の誉平観測所1カ所だが、冬季の流量があまり変化しない他地点および他河川でも同じ傾向ではないかと思われる。最後に、結氷下の流況を疑似的に管路流と考慮して有効直径を想定することにより、結氷下の流れを検討した。結果として冬季間流れの力学的相似条件は変わらなかったが、粗度要因はだんだん滑らかになっていく傾向がつかめた。

以上、実河川の結氷河川の特性を明らかにした。しかし、実河川で問題となるフラジルアイスの滞留条件や形態は、まだわからないことが多い。今後の研究としては、以下のものがあげられる。

- ①フラジルアイスの滞留限界
- ②フラジルアイスの滞留状況
- ③フラジルアイスの性状
- ④フラジルアイス・結氷板による抵抗

さらに上記の基本的研究をもとに、フラジルアイスの制御、冬季流量観測精度の向上などの研究に進めたい。

#### 参考文献

- 1) 山辺功二；北海道の河川結氷、水温の研究 第12巻第1号、1968.
- 2) 山口 甲、西村 豊；河川の水温と結氷に関する研究、土木試験所日報No.238、1973.
- 3) 佐渡公明、中尾隆志；冬期の河川結氷と熱収支について、日本雪氷学会誌 雪氷45巻1号、

1983.

次学術講演会講演集, 1961.

4) 岸 力, 中尾欣四郎; 北海道における河川結  
氷と冬季湯水量について, 土木学会第16回年

5) 大橋秀雄; 流体力学(2), 1969.

\*

\*

\*