

石狩川の結氷調査報告 (第4報)

—— 特に全面結氷下の流量と流泥量について ——

村木義男* 鎌田新悦**

目 次

- §1 ま え が き
- §2 測定地および測定方法
- §3 気 象 要 素
- §4 氷盤の上下変動
- §5 全面結氷下の流水断面
- §6 全面結氷下の横断方向流速分布
- §7 全面結氷下の水位と流量の関係
- §8 全面結氷下の水位、流速と浮泥量の関係
- §9 全面結氷下の水位、流量と流泥量の関係
- §10 全面結氷下の河床変動
- §11 全面結氷下の流速測定についての考察
- §12 総 括
- §13 あ と が き

§1 ま え が き

全面結氷下の河の流れは、氷と河床に囲まれた一種の管の中の流れとなっており、非結氷期における開水路の流れとはその状態を異にしている。したがって、水位、流速、浮泥量など諸種の水量についても、またこれら相互の関係についても、開水路の場合とは異なった特性があるものと思われる。これらのことについては、これまでのところ詳細な調査、考察はなされていないのが実状で、河川管理また利水計画の立場からは夏期と同様、その実態を究明しておく必要があると考える。

われわれはこれまでの調査¹⁾⁻³⁾により、流水断面を形づくっている河の氷についてその構造、発達機構、上下変動、崩壊機構などある程度その実態を知ることができたので、昭和37年度はこれらの知識を基に、特に全面結氷下の流水状態、水位と流量との関係、浮泥量などについて調査を

行なった。以下これらのことについて得られた結果を報告する。

§2 測定地および測定方法

測定地は第1報および第2報とほぼ同じ場所、江別市内重兵衛渡しの上流約100mのところである。今回の調査では、全面結氷期における流量および流泥量の精密測定に主眼をおいたので、測点を従前(5箇所)より大幅にふやし16箇所とした。同地点における河幅は約200m、測点間隔は12.5mである。後の説明の都合上、これら各測点を左岸側よりNo.1, No.2, …… No.16と呼ぶことにする。写真-1および写真-2に現地の状況を示した。

今回の調査において測定した主要素は、水位^{注1)}、河水厚^{注2)}、氷盤上面のレベル^{注3)}、氷盤の上下変動量^{注4)}、河床レベル、流速、浮泥量などである。また調査を実施した期間は38年1月25日から2月25日までの1箇月である。

水位、河水厚、氷盤上面のレベル、および流速の測定は、各測点においてこの調査期間中ほとんど毎日行なった。河床レベルの測定は調査期間中3回行なった。また氷盤の上下変動量の測定および浮泥量の測定は、測点No.4, No.8, No.12においてほとんど毎日行なった。

流速測定にはプライス電音型を用いた。使用に当たっては、器体を棒の先に固定して流水に流されないよう留意し、河床より25cm, 40cm, 70cm, 以下30cm間隔で河水の下面まで測定した。浮泥量測定のための採水には図-1に示すような採水器を使用した。採水位置は河床より約20cm、河水の下面、その中間の3点である。河水厚の測定は、氷にあけた穴を利用し図-2および写真-3に示すような要領で行なった。この穴は調査期間中同一のもので、流速測定、河床測量、水位測定、採水などにも利用した。

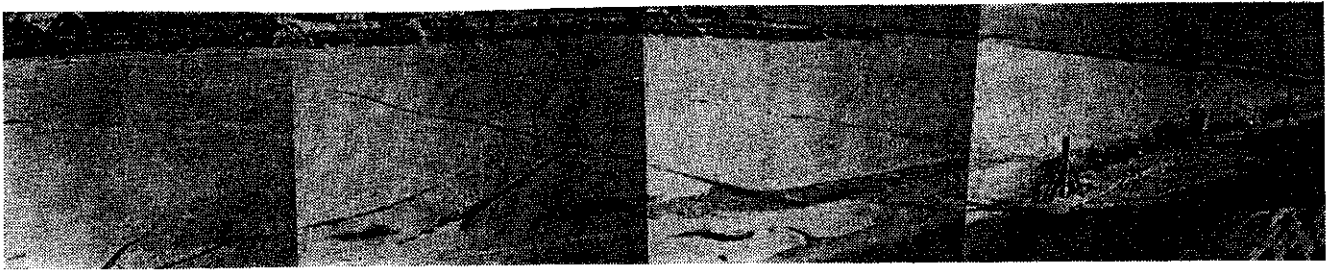
* 工博 応用理化学研究室長, ** 同室(応用物理班) 主任研究員

注1) 氷にあけた穴の中にできる水面の位置をいう。夏期と同じ量水標で読み取る。

注2) 北海道における河の氷は一般に、真氷(いわゆる氷)ともろみ(雪が変化してきた氷の粒の集り)のいくつかの層からなっている。これら全部を含めたものを河水、その厚さを河水厚と呼ぶことにする。

注3) 河幅全面にできた河水を見かけ上1枚の弾性板とみなした場合これを氷盤と呼ぶことにする。氷盤上の雪を除いてあらわれた面が氷盤の上面である。

注4) 河水に固定(底面以下までつき通し)したポールにより示される氷盤の変動量。

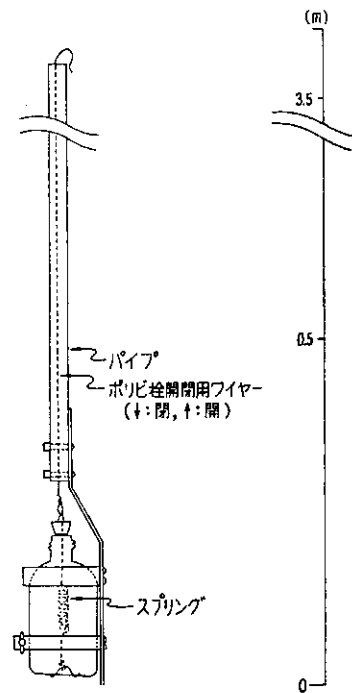


写真—1 測定地全景

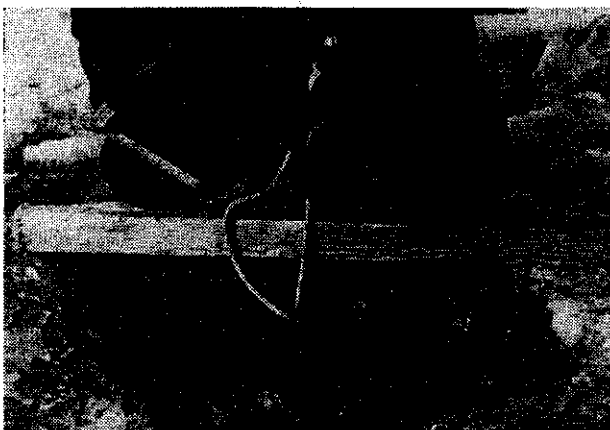
No. 4, No. 8, No. 12 の測定点に見られる Pole は氷盤の上下変動測定用。
また測定点に平行している黒い線は地元民が氷橋として利用している通路。
百葉箱の左下に見えるのが水位測定用 B.M.



写真—2 測点の状況, 手前より No. 1, No. 2, ……



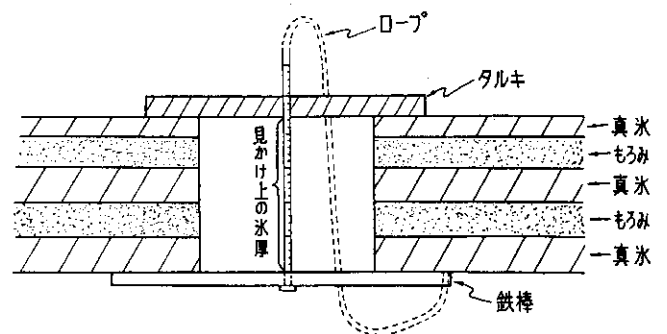
図—1 採水器



写真—3 河水厚測定状況

§3 気象要素

河川の結氷に特に関係が深いとみられる 2, 3 の気象要素についてその観測結果をここにまとめて載せておく。



図—2 河水厚の測定要領

図-3 は前日の午前 10 時から当日の午前 10 時までの積算寒度の日々の変化を示したものである。図-4 は毎日の最高および最低気温を示したものである。図-5 は日降雪量を示したものである。図-5 からわかるように、1 月末に若干の降雪があり、その後 2 月 8 日までほとんど降雪がなかつ

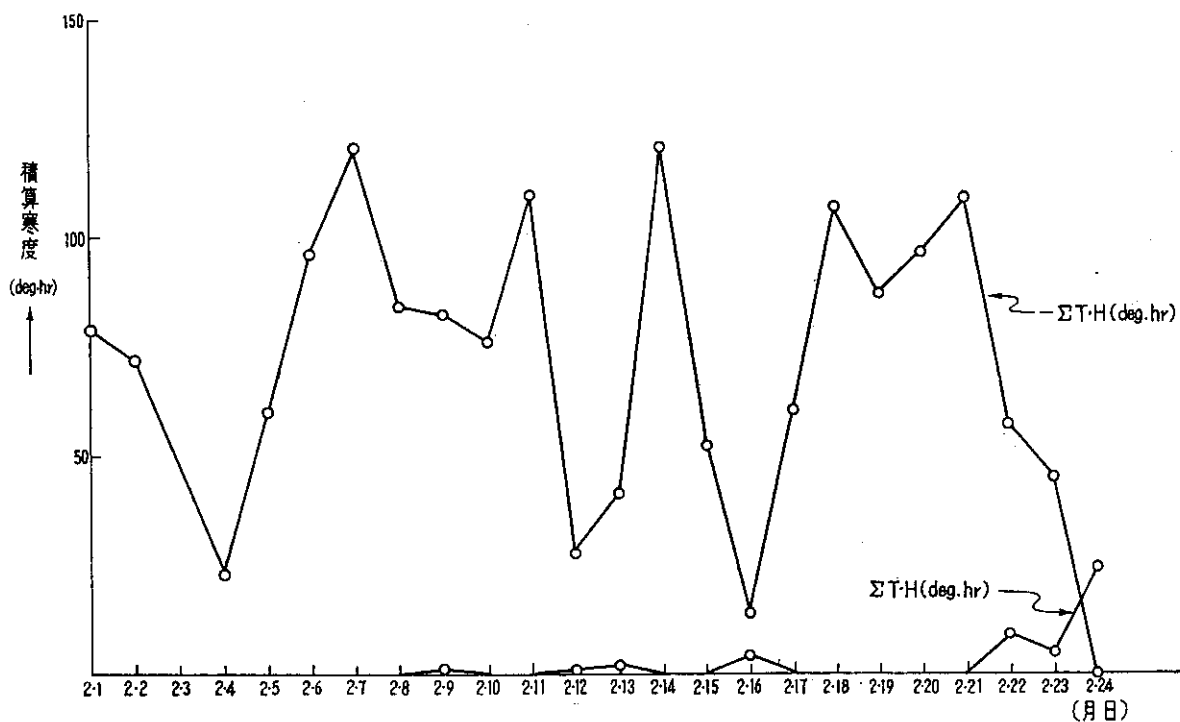


図-3 前日の午前10時より当日の午前10時までの積算寒度

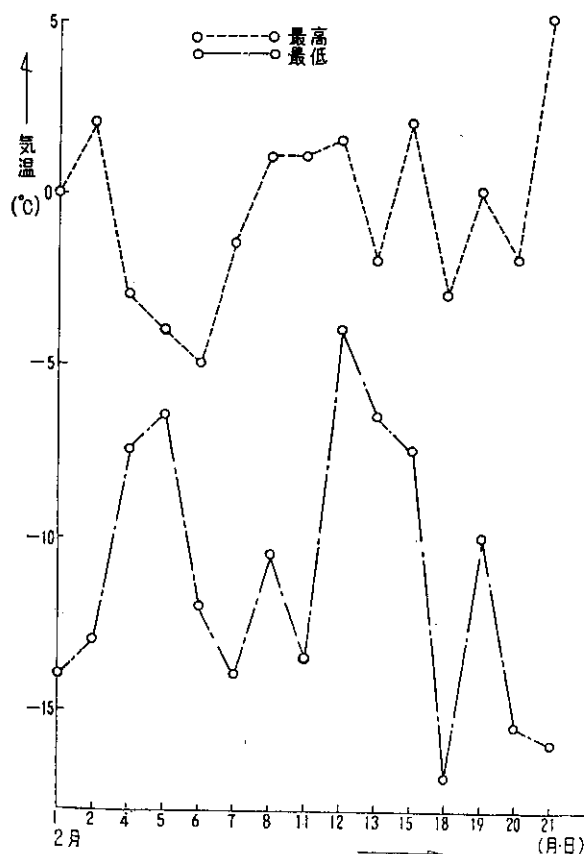


図-4 最高最低気温

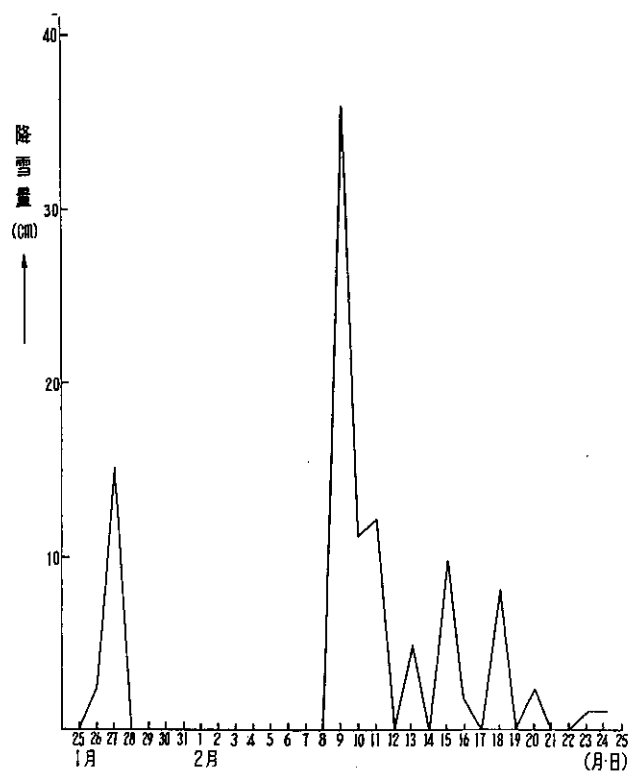


図-5 測定現場における降雪量

たが、2月9日に多量の降雪があり、その後は2月20日頃までの間に若干の降雪がみられた。2月9日の多量の降雪

は後述する諸種のことがらに密に関係してくることをここで記しておく。

§4 氷盤の上下変動

氷盤の上下変動はこれまでは主として解氷機構との関連において取り扱ってきたが、流水断面、流速分布、流量とも密接な関係をもつので、ここで今回観測した結果を述べておくことにする。

図-6 は本調査期間中における水位と氷盤変動量との関

係を示したものである。この図によれば、水位と氷盤変動量との関係は、2月8日以前についてはおおむね一つの曲線で示されるが、2月12日以降のプロットはこれからずれていることがわかる。このずれは、2月9日から11日にかけて降った多量の降雪による氷盤自重の増加に伴うものであると思われる。

われわれは第2報²⁾において、氷盤の変動は水位のみで

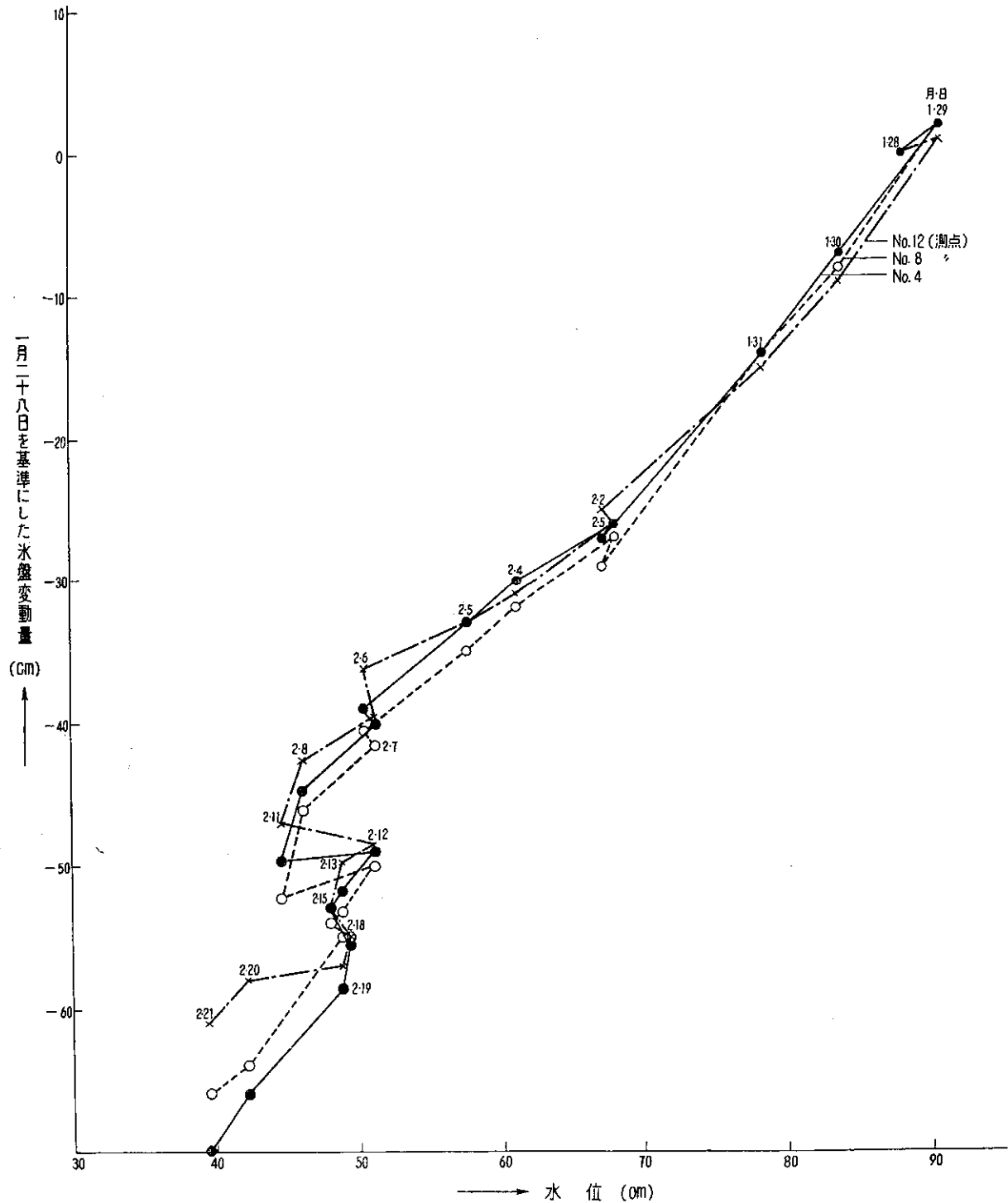


図-6

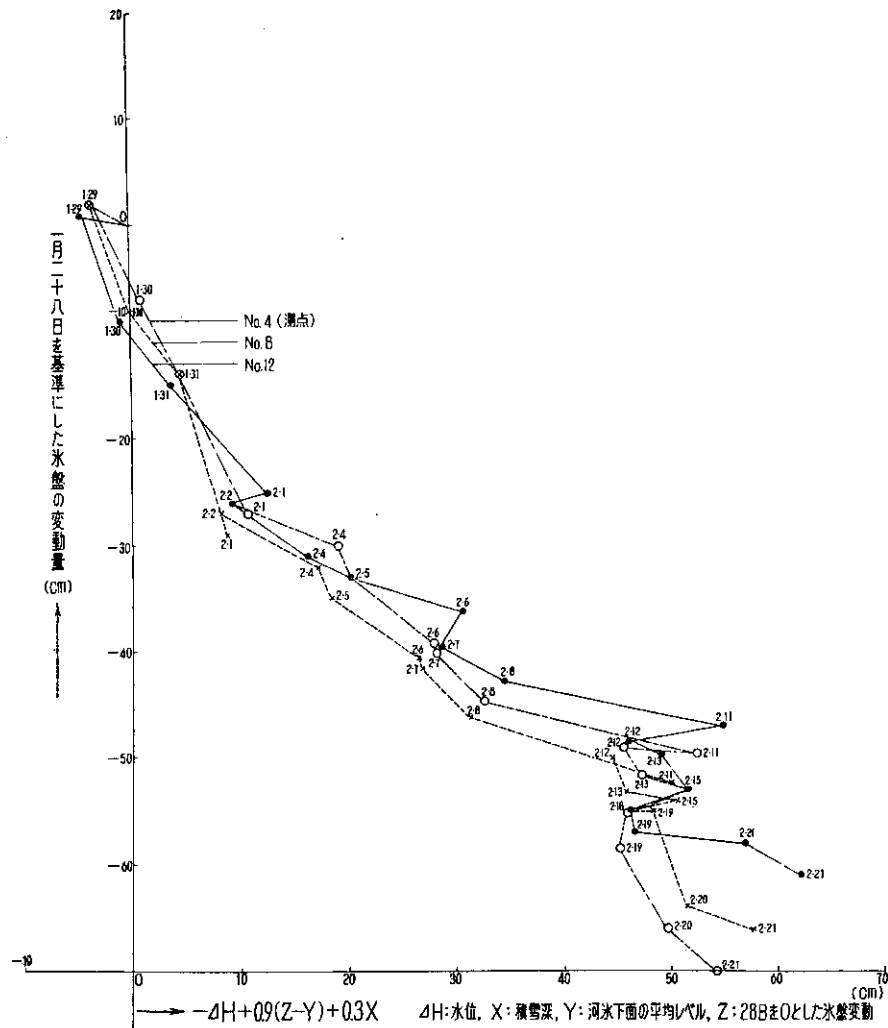


図-7

なく降雪を含めた氷盤の自重にも関係することを述べた。そこで、この氷盤の自重をも考慮に入れて氷盤の上下変動をしらべてみると 図-7 のとおりの結果を得た。図において横軸には 1 月 28 日を基準とした $-\Delta H + 0.9(\Delta Z - \Delta Y) + 0.3 \sum X$ の値をとってある。式中 ΔH は水位の変動量、 ΔZ は氷盤の変動量、 ΔY は河水下面の変動量 (16 箇所の平均)、 X は降雪量、0.9 は水の比重、0.3 は降雪の密度である。第二項が氷盤自重の変動量をあらわす。この図によれば、氷盤の変動は 2 月 15 日までは一つの関係曲線にのるとみなせる。水位のみを考慮した場合 (図-6)、2 月 11 日以降はそれ以前の関係からずれていた。この両者を比較するとき、氷盤の変動の取り扱いには、水位のみでなく氷盤の自重 (降雪量をも含む) をも考慮に入れたほうがより一般的であるということがいえる。また 図-7 において 2 月 18 日以降が急にそれ以前の傾向からずれているのがみられるが、これは先の報告²⁾ で述べてあるように解氷の前兆を示すもので、現にこれより数日遅れた 2 月 23 日に氷盤の亀裂崩壊をみている。

§5 全面結氷下の流水断面

流量を算出するには、流速と流水断面積を知る必要がある。一般に非結氷期の開水路の場合は、水位一断面積の係を用い、任意の水位における流水断面積を求めることができる。全面結氷下においては流水は氷盤におおわれているので、このように単純に流水断面積を求めることは困難であろう。しかし、流量をだすにはいずれにしてもこの流水断面積を知る必要があるため、ここで全面結氷下の流水断面について 2, 3 考察することにする。

全面結氷下の流水断面は河床と氷盤の下面によって形づくられている。それゆえに、氷盤厚および河床が一定である場合、流水断面積に変化をきたすには氷盤に上下の変動がなければならない。逆に、このような場合には氷盤の位置からそのときの流水断面積を知ることができるはずである。しかし、実際には氷盤厚は変化するものであるから、氷盤の位置から正確な流水断面積を知ることが困難である。河の氷は一般に積雪、多くのもろみ、真氷、これらの

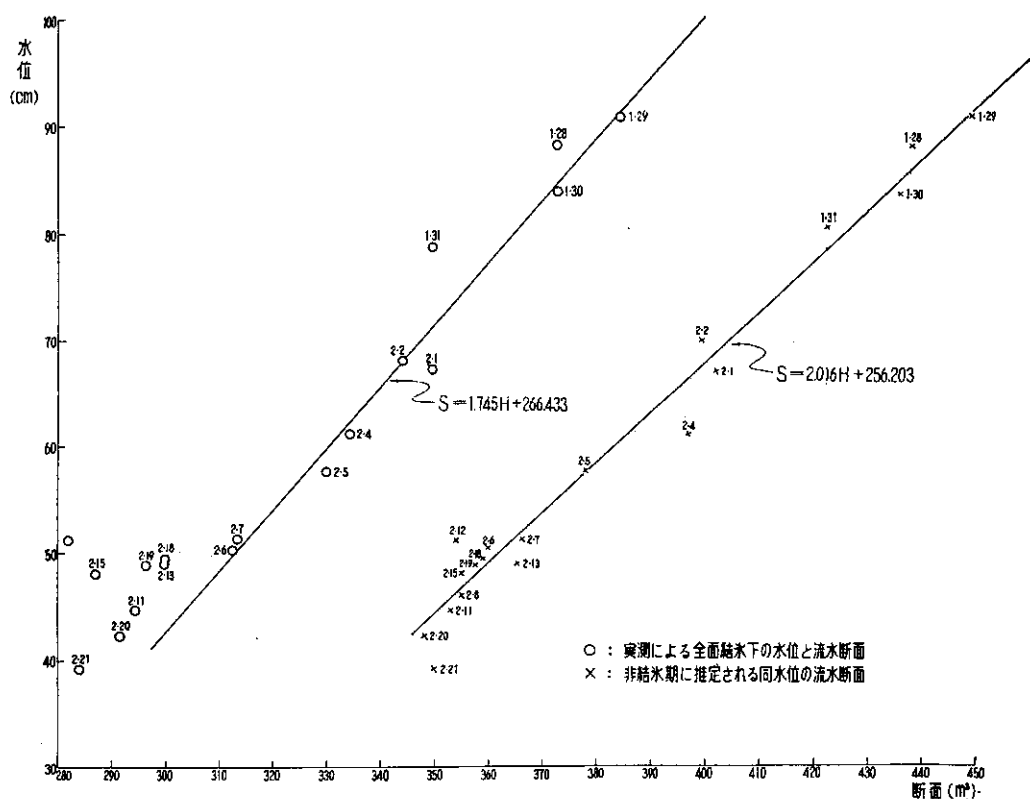


図-8 全面結氷下における水位と流水断面

いくつの層からなっており、積雪、もろみは熱伝導率が小さいので外気温の河水下面に及ぼす影響は非常に小さく、したがって氷の下方への成長はほとんどなく、逆に、流水による摩擦のため氷は下面より減少していく²⁾ (上面では成長していく)。したがって、氷盤が上下してもその分だけ流水断面面積が増減したとみなすわけにはいかないのである。

前節において、氷盤の変動は水位と氷盤の自重に関係することを述べたが、水位のみを用いてもかなりよい一義性がみとめられたので、ここで開水路の場合にならって水位と流水断面面積との関係をしらべてみる。図-8中(1)はその結果を示したものである。この図から、2月8日以前については、水位と流水断面面積の間にはほぼ直線的関係がみとめられ、2月11日以降についてはこの関係からずれていることがわかる。これは、2月8日以前は結氷状態があまり変化していないのに対し、2月9日以降は2月9日およびその後引き続き降った多量の雪のため結氷状態に急変をきたしたためと思われる。図-8中(2)は非結氷期における水位と流水断面面積との関係で、この場合は全範囲にわたってほぼ直線的関係にある。

図-8の直線(1)、(2)の実験式を求めるとそれぞれ

$$(1): S = 1.75 H + 226.4$$

$$(2): S = 2.02 H + 256.2$$

S : 断面面積 (m^2) H : 水位 (cm)

となる。両式の H の係数を比較すると、結氷した場合のほうが非結氷の場合よりかなり小さい値を示している。氷盤が水面に自由に浮いた状態では、氷盤は水位の変動に対し追従し、流水断面面積の変化は開水路の場合のそれと同じであるから、その係数も開水路の場合と同じであるべきはずである。このことから考えて、結氷期の係数が小さいのは、氷盤が両端固定の弾性ばりのようにはたつき、水位の上昇に抵抗し、流水断面の増加をさまたげているためと考えられる。

以上述べたように、全面結氷下の流水断面は結氷状態に左右され、結氷状態があまり変わらない間は夏期のそれと同じく水位と一義的な関係にあるが、結氷状態が急変すればそれに伴って関係曲線も他に移行する。一般に冬期の結氷状態は、降雪その他の条件により複雑に変化し、その年、その日で異なるので、水位または氷盤の位置から単純に流水断面面積を求めることはむずかしく、結局は実測による以外に方法はないのではないと思われる。

§6 全面結氷下の横断方向流速分布

開水路の状態にある河川においては、水位の増大(減少)とともに流速も増大(減少)する。この流速の増大(減少)は断面の一部に限られるものではなく、その度合は場所によって異なるであろうが、横断面全域にわたってみられる。

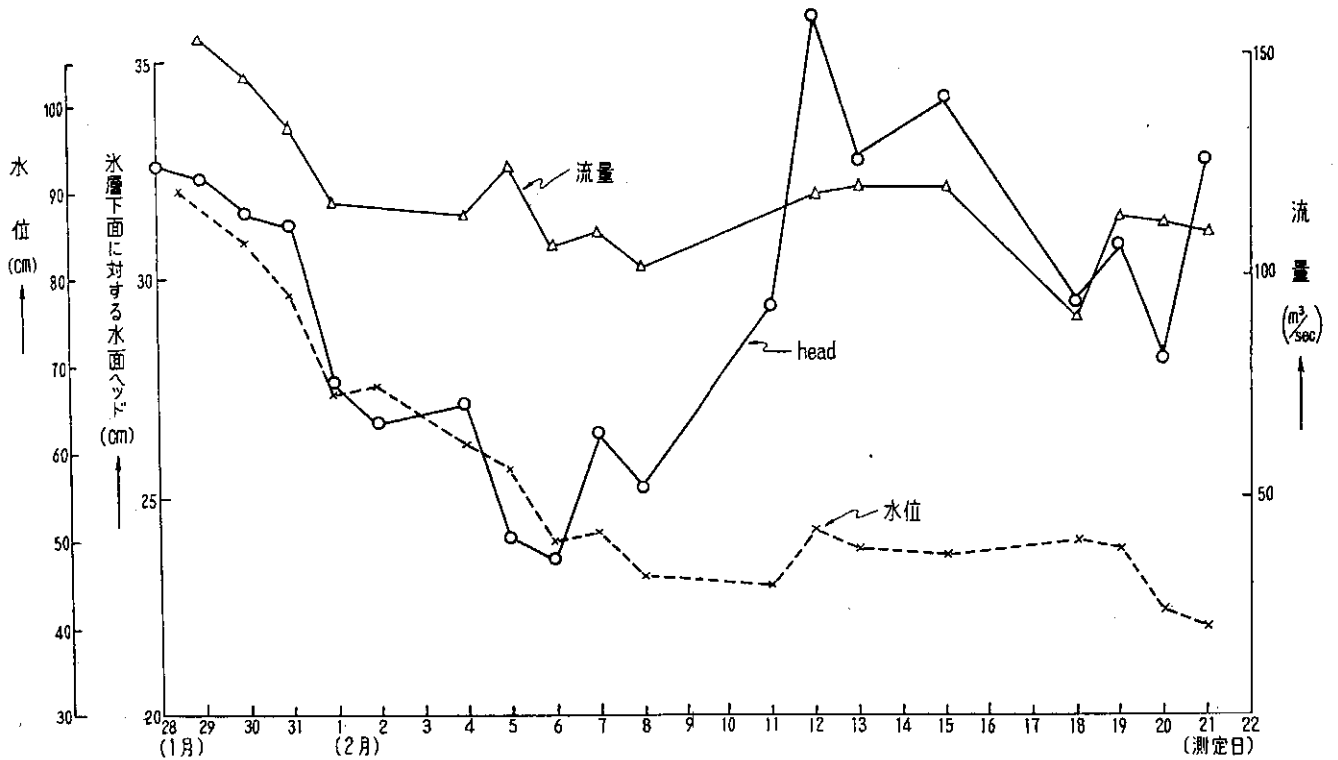


図-9 水位, head, 流量の時間的变化

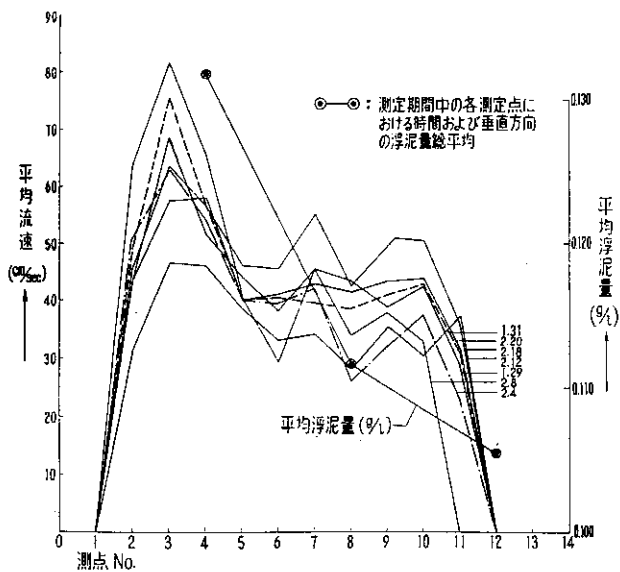


図-10 各測点における平均流速

全面結氷下の場合も一応これと同様のことが考えられよう。ただしこの場合は水位のみでなく、水面 head^{注5)} も関係してくる。ここで水位と水面 head の増減に伴う流速分布の様子をしらべてみる。

図-9 は調査期間中における水位、水面 head と流量の推移を示したものである。また図-10 は横断方向の流速分布を示したものである。図-9 にみられるように、2月8日ま

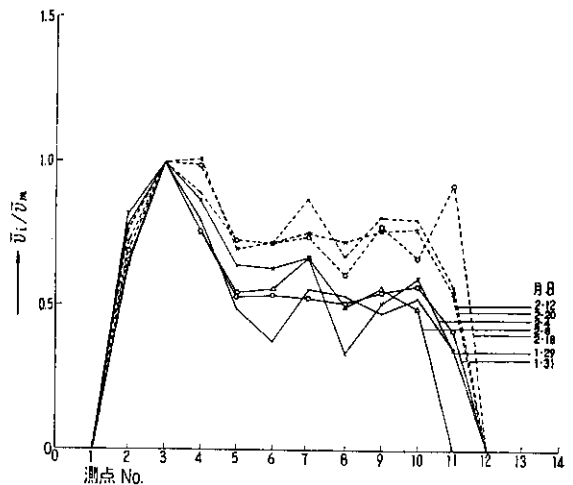


図-11 測点 No. 3 の平均流速 $\bar{v}_m$ に対する各測点の平均流速 $\bar{v}_i$ の比の分布

では水位、水面 head、流量とも減少の傾向をたどっており、これに対し流速分布も図-10 にみられるようにはほぼ同じ分布形状で減少の傾向をたどっている。しかし2月9日以降については、2月12日に水位、流量とも増加し、また水面 head も顕著に増大しているの、当然流速の増大が考えられるのであるが、これを図-10 によりみると、測点 No. 5~No. 11 の間では明らかに増大しているが、測点 No. 3 ではむしろ減少している。その分布形状は2月8日

注 5) 河水に穴をあけると河水が湧出し、その水面は河水下面より高くなる。流水は、河水下面から水面までの高さに相当する水圧を受けており、この水圧を水面 head と呼ぶことにする。

以前と以後とは急に変わっているようである。そこでこの分布形状をしらべるため、測点 No. 3 の流速を 1 としたときの横断分布を描いてみると 図-11 のとおりとなる。この図で実線は 2 月 8 日以前の分布形状を、点線は 2 月 12 日以降の分布形状を示してあるが、両者の間に明らかに相異がみとめられる。すなわち、2 月 12 日以降は分布がかなり一様になっていることがわかる。2 月 9 日を界にしてこのように流速分布に顕著な相異を生じた原因は、2 月 9 日に多量の降雪をみたことから考えて、この降雪による結氷状態の変化、またこれに伴って生じたと考えられる水面 head の顕著な増加によるものではないかと思われる。これについては後日検討を行ない、あらためて報告したいと考えている。

このように全面結氷下の流水状態は、開水路の場合とはかなり異なった複雑なものであることがわかった。

§7 全面結氷下の水位と流量の関係

一般に、水位の観測は常時行なわれているから、水位—流量曲線があればこれから希望する日時の流量を求めることができる。全面結氷時においても水位の観測は常時行なわれているが、この水位と開水路の場合の水位とは同一視することはできない。結氷期においては氷に穴をあけ、穴

の中に湧出した水面をもって水位としているから、開水路の場合の横断全域自由水面であるいわゆる水位とは様子がいささか異なるのである。また流水についても、開水路の場合は河床と自由水面によって規制される断面中での流水であるが、結氷下では河床と、河床に比べ変動しやすい氷盤とによって形づくられた変動しやすい閉断面中での流水であるから、両者の間には著しい相異がある。したがって開水路の場合の水位—流量の概念は全面結氷下の場合にあっては通用しないであろうと考えられる。しかし全面結氷の場合についてもなんらかの方法で間接的に流量を求めたい。種々検討してみたが、水位に代わる適当な因子を見出すことができなかった。開水路の場合にならい、結氷期においても常時観測されている水位を因子にとり、水位と流量との関係を考察してみた。

図-12 の実線は今回の観測による全面結氷時の水位と流量との関係である。また図中点線は、石狩川治水事務所観測による非結氷時の水位—流量曲線^{注6)}である。

まず今回の測定結果をみってみる。プロットした点は一見かなりばらついているが、これらは図に示してあるとおり 2 本の関係曲線で示すことができる。すなわち、2 月 8 日以前の関係曲線 (1) と 2 月 12 日以降の関係曲線 (2) とで示される。このように関係曲線が 2 月 9 日～11 日を界にして

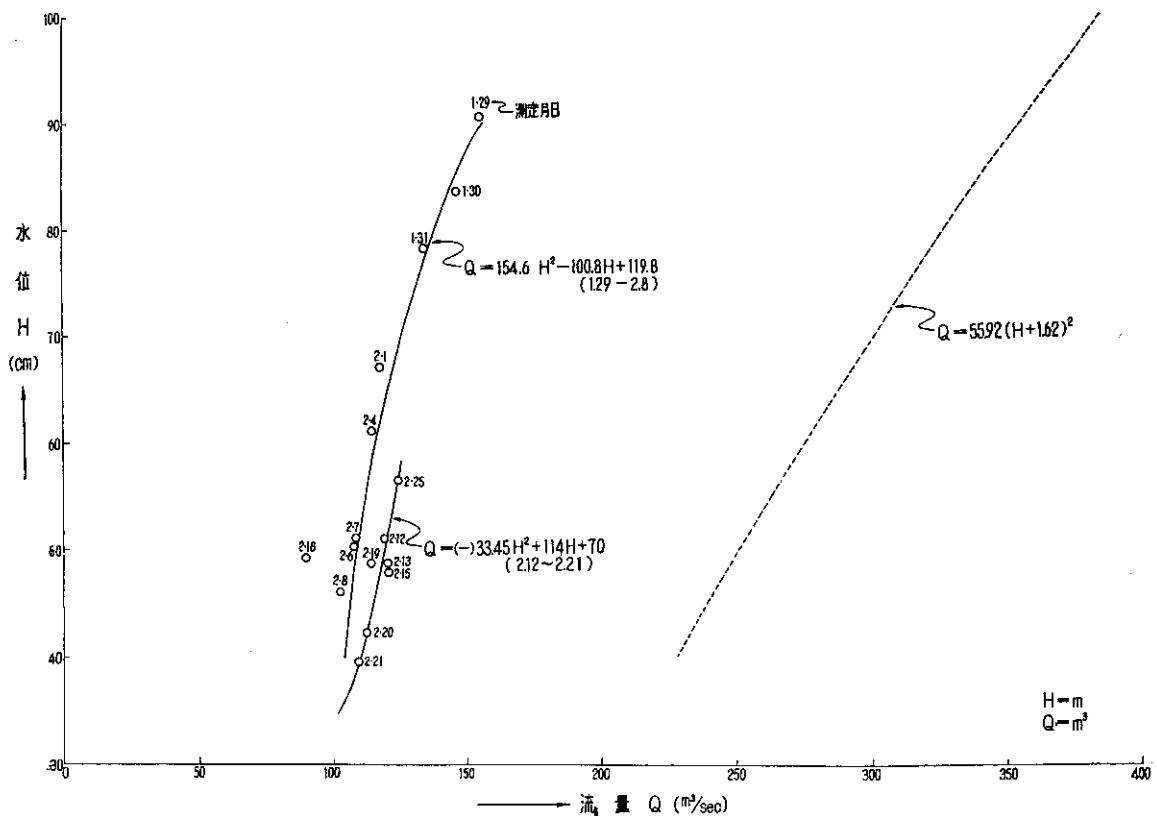


図-12 全面結氷下における水位と流量の関係

注 6) 本調査地点より約 1 km 下流江別大橋地点における観測。

急変しているのは、この急変の時期が氷盤の上下変動、流水断面、流速分布に関しみられた急変時期と一致していることから考えて、2月9日～11日にみられた多量の降雪に伴う結氷状態の急変によるものと思われる。すなわち、降雪に伴う氷盤の降下、これに伴う水位の上昇、水面 head の増大、流水断面の変化、流速分布の変化、これらが相関連してこのような結果を示したものと考ええる。

このように水位と流量の関係は、詳細にみれば2本の関係曲線で示されるが、その開きはそれほど大きくないから(10～20%)プロットした点全部を含め1本の曲線で関係づけても実際上はよいであろう。しかし、この関係曲線はその年々の結氷状態によりかなり変化することが考えられるから、開水路の場合のような一般性はない。

次に非結氷期のそれと比較し考察してみる。全面結氷下では水位は氷盤下面よりも高く、したがって、流水は水圧 head をもった流れとなっているから、流速も速く、この流速の増加分が、結氷盤の存在による流水断面の減少分を補い、実際の流量は開水路とみなした場合の流量とそれほど差はないであろうと当初考えた。すなわち、全面結氷下の水位-流量曲線と非結氷期のそれとはそれほど差はないのではないかと考えていた。しかし図-12によりこれを見ると、両者の間にはかなりの開きがあり、非結氷期の水位-

流量曲線をそのまま全面結氷期に使用することは到底許されないことがわかった。

図-12に示した(1)と(2)の関係曲線を式であらわすと

$$(1): Q = 154.6 H^2 - 100.8 H + 119.8$$

(1月29日～2月8日)

$$(2): Q = -33.5 H^2 + 114.0 H + 70.0$$

(2月12日～2月21日)

Q : 流量 (m^3/sec) H : 水位 (m)

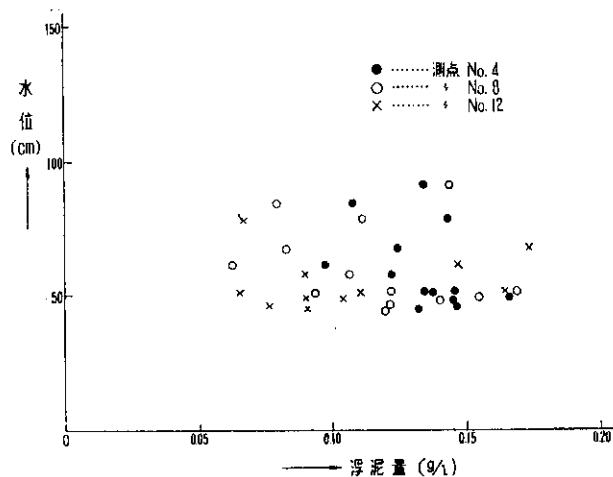


図-13 全面結氷下における水位と浮泥量の関係

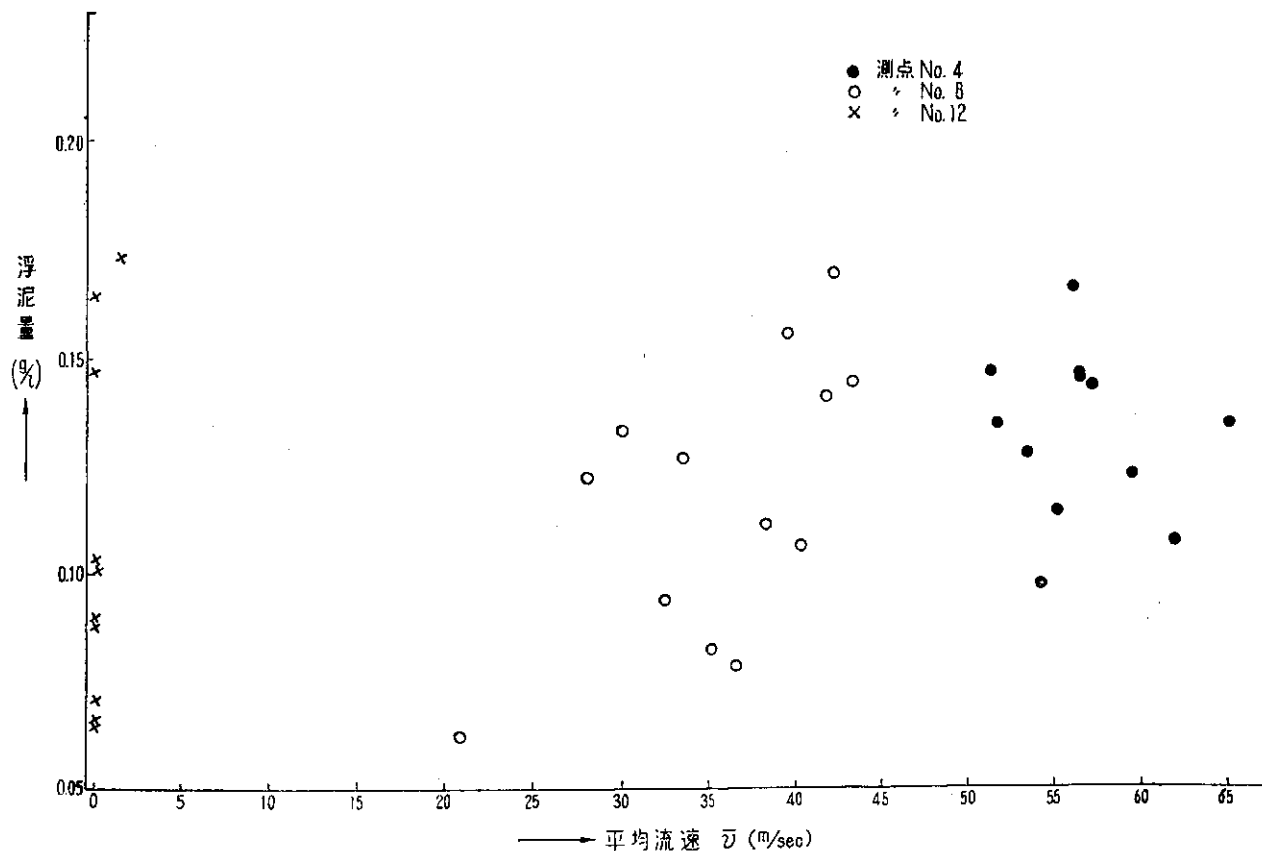


図-14 全面結氷下における平均流速と浮泥量の関係

となる。

全面結氷期を12月25日から2月25日までとし、この間の総流量(Q_t)を求めると

$$Q_t = 926 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$$

となる。

§8 全面結氷下の水位、流速と浮泥量の関係

図-13に全面結氷下の水位と浮泥量との関係を示した。非結氷期間においては、この関係についてはかなりよい相関性が一般にみられているが、今回の実測結果によると、浮泥量のばらつきが大きく、その相関性はほとんど認められない。これは、浮泥量のばらつきが大きい上に、測定期間中の水位の変動が小さいため、表面的に相関性が現われなかったとも考えられるが、一般に冬期間における水位の変動はおおむねこの程度であろうから、このことを考慮に入れば、冬期全面結氷下の水位と浮泥量との間には一義的な関係はほとんどないとみてよいであろう。

図-14に測点 No. 4, No. 8, No. 12 の各点における平均流速と浮泥量との関係を示した。この場合にもほとんど相関性はみることができない。測点 No. 12 において、平均流速がほとんどゼロにもかかわらず、かなり大きな浮泥量が測定されているが、これはおそらく測点 No. 12 の近く

の流速のある程度大きなところからの拡散によるものと思われる。

§9 全面結氷下の水位、流量と流泥量の関係

図-15に水位と流泥量との関係を示した。図からわかるように、プロットした点はかなりばらついている。水位と流泥量の関係は、水位-浮泥量の関係と水位-流量の関係を相乗したものであるから、水位と浮泥量の関係における

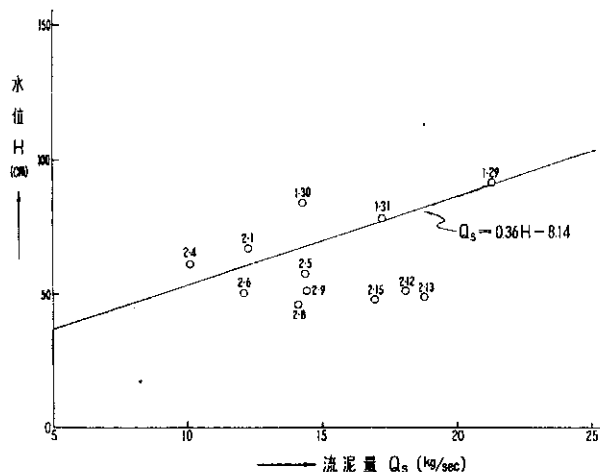


図-15 全面結氷下における水位と流泥量の関係

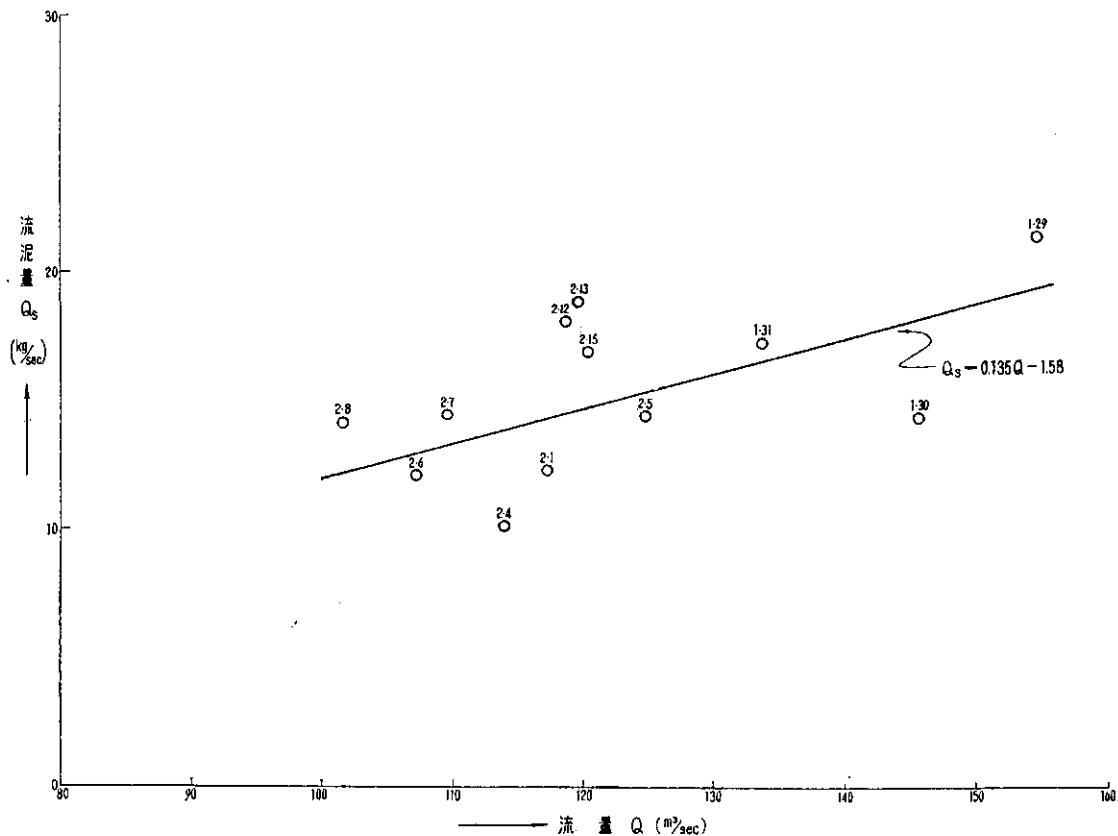


図-16 全面結氷下における流量と流泥量の関係

ばらつきがこのようなばらつきとなって現われたものである。また前節で述べたように、水位と流量との関係は、結氷状態の比較的一様だった2月8日以前と多量の降雪をみたこれ以降とは相異しているが、これも影響してくる。図-15において、2月12日以降のプロットがそれ以前の関係からややずれているのはこのためである。2月8日以前のプロットについては一応相関関係がみられる。これを直線関係とみなし、式であらわすと

$$Q_s = 0.36 H - 8.14$$

Q_s : 流泥量 (kg/sec) H : 水位 (cm)

となる。

次に流量と流泥量の関係調べたのが図-16である。これについてもプロットした点のばらつきは大きい、全体的には一つの直線関係で示される。これを式であらわすと

$$Q_s = 0.135 Q - 1.58$$

Q_s : 流泥量 (kg/sec) Q : 流量 (m^3/sec)

となる。

一般に開水路の場合、水位と流量、流量と流泥量の関係はそれぞれ

$$Q = a(H + b)^2$$

Q : 流量 H : 水位 a, b : 常数

$$Q_s = a' Q^{b'}$$

Q_s : 流泥量 Q : 流量 a', b' : 常数

であらわされる。したがって水位と流泥量の関係は

$$Q_s = a' \{a(H + b)^2\}^{b'}$$

で示される。

上記の関係を、全面結氷下の河川にそのまま適用することは、条件がかなり異なるので困難と思われ、ここでは単に実験式を示すにとどめた。

これまでの関係式を用い、全面結氷期間と考えられる12月25日から2月25日までの総流泥量(Q_{st})を算出すると

$$Q_{st} = 130 \times 10^3 \text{ ton}$$

となる。

§ 10 全面結氷下の河床変動

図-17に全面結氷期間内に行なった3回の河床測量の結果を示した。第1回目は1月27日、第2回目は2月9日、第3回目は2月16日に実施した。今回の測定は場所も一定しており、また直接河床にスタッフを立てて行なったものであるから、かなり精確なものであると考える。

図によると、測点 No. 4~No. 8の間においては、10~30 cmの変動がみられ、またこれ以外の測点においてはは

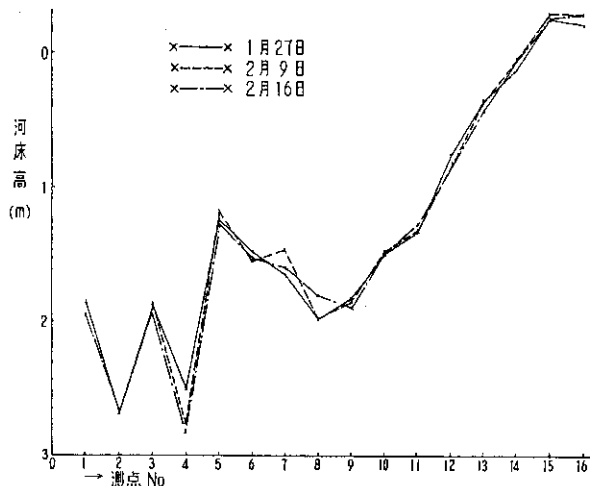


図-17 全面結氷下における河床変動

ば10 cm以内の変動がみられる。変動の時間的移り変わりについては、それぞれの測点において異なり、一義的なものは見出されない。ただ最も変動のはげしい測点 No. 4においては深くなっている傾向がみられる。

いわゆる河床変動は、長い年月を通じてみるべきものであるから、上記短期間の変動が特に意味あるものとは思われないが、10~30 cmの変動は量としては小さいものではないので、今後さらに測定を行ない、検討したいと考えている。

§ 11 全面結氷下の流速測定についての考察

全面結氷した河川の流速測定を行なう場合に、まず注意しなければならないことは、測定のためにあけた穴による流線の変化である。実際の測定現場でみられる流線は大体図-18のようになるので、氷の下面では当然流速はゼロであるにもかかわらず、かなりの流速として測定される。このむじゅんを除くため、氷の下面における流速は流速計による測定値とは無関係にゼロとすべきである。

次に流速計の取り扱い上の問題であるが、プライス型のような回転式のものを、氷点下の気温のもとで使用する場合、水にぬれた器体をできるだけ外気に触れさせないことである。ぬれたままで氷点下の外気に放置すると、回転軸

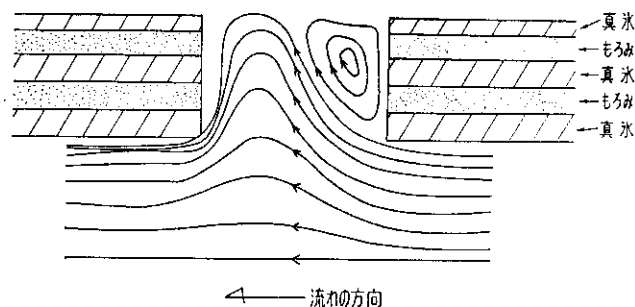


図-18 穴による流線の変化

が凍結し、したがって、流速計の係数に変化をきたし、正しい測定ができなくなるからである。これを防ぐには、ある測点での測定が終わったなら、次の測点の準備が十分整うまで器体を水から上げないようにし、移動するときはカップを手で回転しながら移動し、水中に投入してもすぐに測定を始めないで、しばらくの間流速の速い水深に放置し、流速計が正常（凍結していると回転が一樣でなく遅い。水中に入れておくと氷が融け一樣な回転となる。）であることを確認してから測定を始めることである。

§ 12 総 括

以上述べたことのうち主なことを要約して記すと次のとおりである。

- i. 氷盤の上下変動は、流水断面、流速分布、水位と流量との関係など、全面結氷下における河川の諸種のことがらに大きく関係する。
- ii. 全面結氷下の水位と流水断面との関係は、結氷状態が比較的一様な間は一つの関係曲線で示されるが、結氷状態に急激な変化があれば他の関係曲線に移行する。
- iii. 横断方向流速分布は、結氷状態の急変に伴いその分布形状を異にする。
- iv. 全面結氷下の水位と流量の関係は、ii と同様結氷状態が比較的一様な間は一つの関係曲線で示されるが、結氷状態に急激な変化があれば他の関係曲線に移行する。
- v. 全面結氷下の水位と浮泥量の関係、平均流速と浮泥量の関係についてはほとんど相関性は認められない。水位と流泥量の関係については、大まかではあるが直線的関係がみられる。

vi. 冬期間の河床変動については、一部の測点で 10~30 cm の変動がみられたが、他のほとんどの測点では 10 cm 以下で、しかもその移り変わりに一定の傾向はみられないので、大局に影響を与えるものではないと考える。

§ 13 あ と が き

結氷河川の問題は大きく分けると、第 1 に結氷そのものに関する問題、第 2 に結氷下の水理に関する問題、第 3 に結氷、流水に伴う護岸、構造物の被害に関する問題の 3 つに分けられる。第 1 の問題は基礎的な問題で、河川工学的立場からはむしろ第 2、第 3 の問題が重要である。

われわれは、第 1 報および第 2 報では主として第 1 の問題を取り扱い、第 3 報および本報告第 4 報では第 2 の水理に関する問題を取り扱ってきた。これまでに取り扱った問題についてもいまだ不明な点が多々あるが、今後は主として第 3 の問題すなわち、氷の護岸、構造物への付着、これに伴う被害などに関し調査をすすめたいと考えている。

終わりにのぞみ、本調査に終始御協力いただいた石狩川治水事務所江別事業所長ならびに所員の各位に対し、厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 村木義男・鎌田新悦；石狩川の結氷調査報告（第 1 報），北海道開発局土木試験所月報，No. 86，1960，3.
- 2) 村木義男・鎌田新悦；石狩川の結氷調査報告（第 2 報），北海道開発局土木試験所月報，No. 96，1961，7.
- 3) 鎌田新悦；石狩の結氷調査報告（第 3 報），北海道開発局土木試験所月報，No. 109，1962，7.

☆

☆

☆