

琴似発寒川でのアイスジャム発生による流量の急変

Research into the Sudden Increase in Discharge of River due to Ice Jam in Kotonihassamu River in Sapporo

社団法人 北海道開発技術センター

原 文宏

Hokkaido Development Engineering Center

Fumihiro HARA

北海道大学工学部土木工学科

河合 孝治・佐伯 浩

Faculty of Engineering, Hokkaido University

Takaharu KAWAI, Hiroshi SAEKI

北海学園大学工学部土木工学科

山口 甲

Faculty of Engineering, Hokkaigakuen University

Hajime YAMAGUCHI

Abstract

An unusual heavy rainfall on Feb. 22, 1994 in Sapporo caused flooding of some small rivers in the city. The sudden increase in the water level at the Kotonihassamu River, one of such rivers, attacked an operator of a shovel excavator working in the river channel to install a fishway.

This research reports on the results of the field survey at Kotonihassam River after the accident and a laboratory experiment. We clarified that the sudden increase in river water level was the consequence of ice arching, ice jam and their collapse which occurred at upstream bridge piers.

キーワード：異常出水, 河川結氷, アイスジャム, 橋脚

1. はじめに

1994年2月21日から22日にかけて、台風なみに発達した低気圧が日本列島を北上し、北海道に2月としては異常に大量の雨を降らせた。そのため、札幌市や小樽市では、小河川が氾濫し、住宅や店舗が床上、床下浸水したほか道路も冠水した。このような状況の中、札幌市の北西部を流れる琴似発寒川において、22日午前9時45分頃、河道内でショベルドーザーを使って魚道工事をしていた作業員が、急激な増水によってショベルドーザーごと流される事故が発生した。ショベルドーザーは約600m下流に流れ、歩道橋の橋脚に衝突して止まっていた。新聞報道によれば流された作業員は、工事現場の下流約2kmの位置から遺体で発見された。本河川上流にはダム等は設置されていないことから放流等による増水ではなく、何らかの理由で水がせき止められ、その後決壊して異常な出水に至ったと推測された。

著者らの現地調査によれば、工事現場上流にある長栄橋付近に大量の氷盤や雪塊が堆積していることから、この位置でアイスジャム（氷詰）が発生し、流下する水や雪氷をせき止め、その後決壊した可能性が高いことが判った。本論文では、この長栄橋周辺の詳細な現地調査結果、模型氷を使用したアイスジャム形成の有無に関する模型実験結果を中心に報告する。

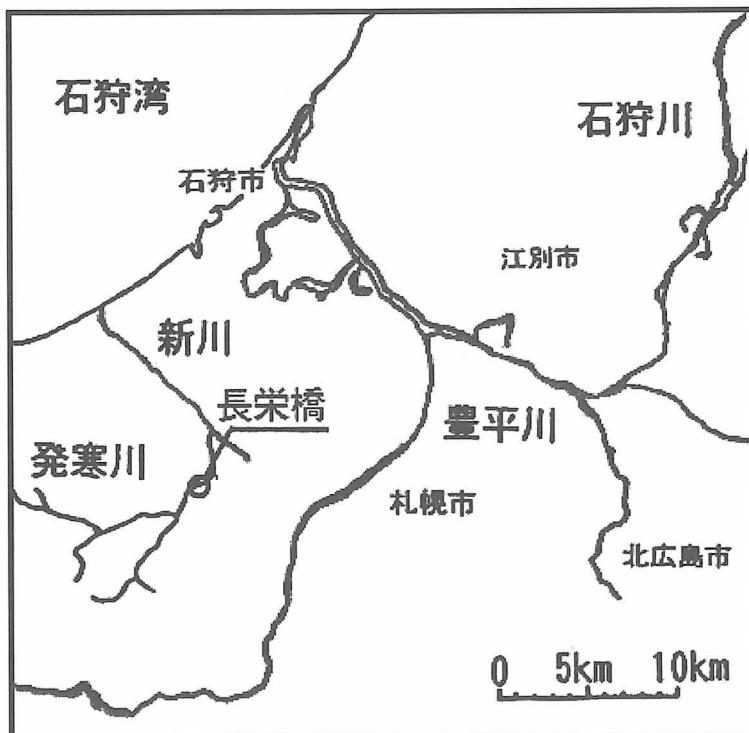


図1 琴似発寒川の位置図

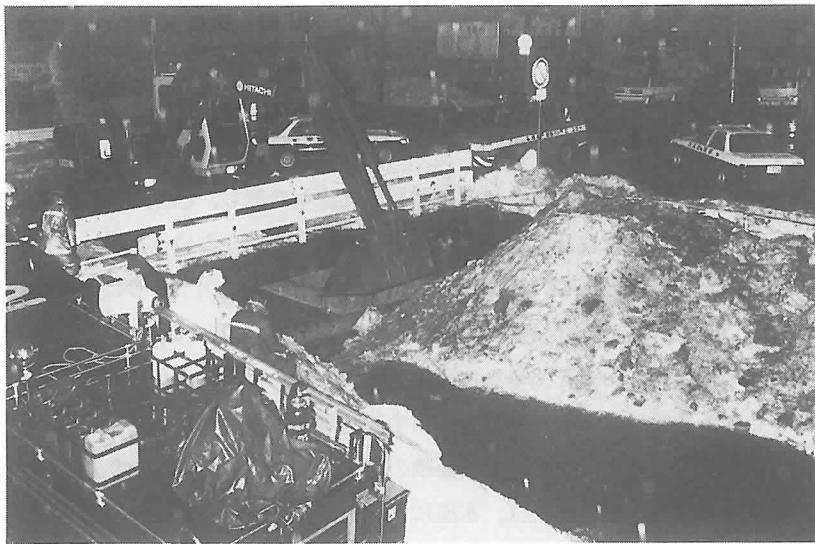


写真1 排雪で河道が狭くなり増水した望月寒川
(北海道新聞社 平成6年2月22日)



写真2 床下まで水につかった住居
(北海道新聞社 平成6年2月22日)

2. 河川概況と気象状況

2. 1 琴似発寒川の概況

琴似発寒川は、手稻山の南面を源として幾つもの支流が合流し、西区の平和、西野、琴似を貫流して新川に注ぐ。公式には「2級河川新川水系琴似発寒川」という。

琴似発寒川は、出水時と渴水時の流量の差が非常に大きな荒れ川で、しばしば水害を発生させていた。また、新川との合流点付近での流路勾配が1/300に対して新川は1/3000であるため、合流点付近に土砂が堆積し河積を狭めるために、その上流一帯で洪水が頻発した。このため、昭和29年の平和ダム建設にはじまる琴似発寒川の砂防事業が行われた。

改修計画の水理諸元を表1に示す。流域面積の最下流は事故が発生した魚道工事現場のすぐ下流にある鉄道橋である。砂防事業は、本流に2つのダムを設置し、山からの土砂流出を抑止するとともに、落差工によって急勾配を緩和し土砂の流出を抑えるとともに、帶工や床固工などで河床洗掘を防止し、両岸は護岸によって浸食を防ぐ工事が行われた。このような工事の結果、現在の琴似発寒川では土砂流出も少なく、新川との合流点での土砂堆積もない。

また、治水事業と平行して、昭和50年度からは砂防環境整備事業が新たに加わり、低水護岸を設けて水量が少ないときの蛇行、乱流を防ぐとともに護岸には自然石を使用して景観に配慮し、水と親しめるような工夫がされている。高水敷には流水を阻害しない程度に公園の整備を推奨し、河川敷地の境界部には植樹などを行っており、地域住民から親しまれる河川づくりが行われている。

表1 改修計画の水理諸元

流域面積	67.8km ²
計画日雨量	172.0mm
同上確率	1/35
計画降水流量	400m ³ /sec
比流量	6.3m ³ /sec/km ²
平均河床勾配	1/100～1/32
計画河床勾配	1/160～1/50



写真3 親水性に配慮された琴似発寒川

2. 2 気象状況

事故当時の気象状況を札幌管区気象台の地上気象観測原簿をもとに再現する。1994年2月20日はほぼ快晴で21日の昼は雨、夜半から大雨となり22日には夕方から雪となった。気温は、20日の午前9時を境にプラスに転じ、その後は22日の午後5時まで昼夜を通じて0℃以上で推移した。21日の正午あたりから雨が降りはじめ夜半からは大雨となって、翌22日の午前10時頃まで降り続いた。その間の降水量の合計は45mmに達した。

また、積雪は気温がプラスに転じた20日の午前10時の段階では96cmであった。その後、気温が上昇する昼間に融雪が進み、特に雨が降り始めてからは気温が+5℃以上で推移したことと、雨による密度増加が重なって、急速に積雪深が減少した。そのため、異常出水による事故のあった時刻の少し前、22日9時の観測では積雪深は78cmになっており、気温がプラスに転じてからの積雪深の減少は18cmに達した。したがって、異常出水にいたるまでに琴似発寒川流域には、雨による降水と融雪量に相当する融雪水が存在し、そのほとんどが琴似発寒川に流れ込んだと考えられる。

積雪深は気温が0℃以上になってから減少はじめ、降雨とともに著しく減少した。しかし、この減少は融雪だけでなく降雨による密度増加による減少が大きいと考えられる。

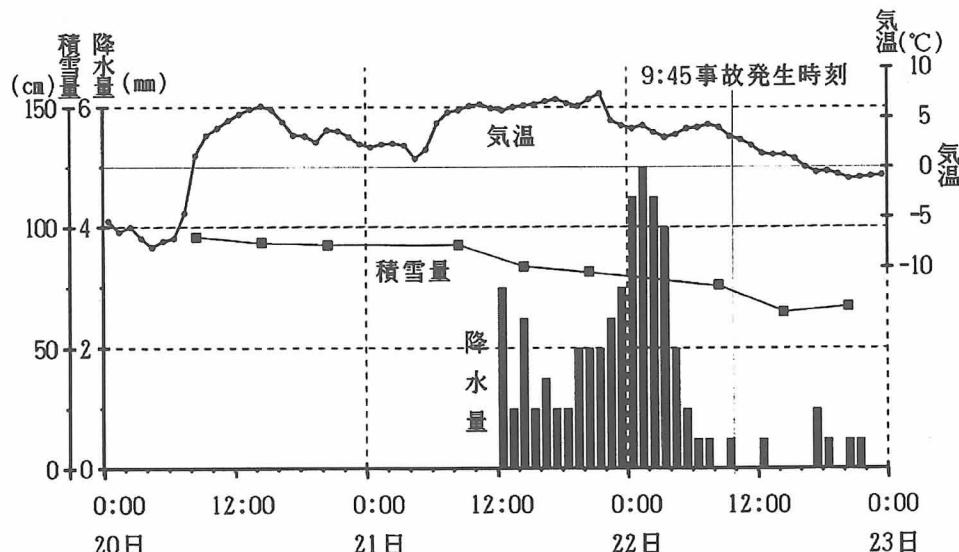


図2 異常出水前の気象状況

2. 3 融雪量の推定

積雪深は、気温が0°C以上になってから減少しはじめ降雨とともに著しく減少した。しかし、この減少は融雪だけでなく降雨による密度増加による減少が大きいと考えられる。事実、北大低温科学研究所での秋田谷による積雪の観測結果によると、降雨の前後では雪密度が2.7 g/cm³から4.2 g/cm³へと急激に上昇しており、このことを裏付けている。したがって、融雪量は積雪の変化によるのではなく、純粋に気温の条件によって推定する必要がある。

気温による融雪量の推定については、成瀬・小島等(1970)が気温融雪による経験式を整理した結果、(1)式を得ている。

この式から気象データをもとに気温が0°C以上になってから、事故のあった時間までの気温融雪量を計算したのが表2である。20日の午前10時から22日の午前10時までの間に降水量換算で42mmの融雪があったことになる。雨が降り始めた21日の午後12時から事故のあった時刻までの融雪量は約26mmであった。また、累計降水量が45mmであり、同じ期間内の融雪量を降水量換算して加えると約71mmの降水量があった計算となる。

$$M_A = 4.0 \sim 6.5 \cdot V_1 \cdot T_1 \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

M_A : 単位時間の気温融雪量 (g/hr)

V_1 : 雪面上1mの高さの風速 (m/sec)

T_1 : 気温 (°C)

3. 現地調査結果

3. 1 異常出水時の状況

図3は異常出水による事故が発生したときの琴似発寒川の現況を示している。魚道工事の現場は清水橋と鉄道橋に挟まれた箇所(図3③)で、鉄道橋のすぐ上流である。作業は河道の中に雪でマウンドを作りショベルドーザ等の建設機械を使って行われていた。工事関係者によると事故発生直前の河道内にはほとんど水がなく、この出水が極めて短時間に急激に発生したことを物語っている。流された建設機械は約600m下流の歩道橋の橋脚に衝突して止まった(図3④)。その下流100mから約1kmに渡って雪氷が入り交じった雪泥状態のものが厚く滯留し川面を覆っていた(図3⑤)。事故現場より上流では、雪泥状の雪や氷盤が低水路部に添って散在し、低水路及びその周辺の雪や氷を巻き込んで流下したことがその痕跡からわかる。上流およそ600mの位置に長栄橋(図3②)他2橋が架かっており、上流から長栄新橋(図3①)、歩道橋そして長栄橋の順である。

長栄新橋及び歩道橋は、河道に橋脚を持たない構造となっているため、流水に対する影響はないが、長栄橋はパイルベンド式橋脚が約7m間隔に5基設置されており、流水の円滑性を阻

表2 気温融雪量

月日	時刻	V(m/sec)	T(°C)	MA(g/cm ²)
2/20	9	2.9	1.2	0.017
	10	2.7	3.2	0.043
	11	3.8	3.9	0.070
	12	2.0	4.7	0.047
	13	1.8	5.3	0.048
	14	2.2	5.8	0.084
	15	2.3	6.1	0.070
	16	1.8	5.7	0.051
	17	0.8	4.5	0.018
	18	1.3	3.2	0.021
	19	1.2	3.1	0.019
	20	1.7	2.5	0.021
	21	3.4	3.7	0.083
	22	4.3	3.6	0.077
	23	6.4	3.0	0.096
	24	3.4	2.3	0.039
2/21	1	2.3	2.0	0.023
	2	2.9	2.3	0.033
	3	3.1	2.4	0.037
	4	2.0	2.2	0.022
	5	2.8	0.9	0.013
	6	2.9	1.8	0.026
	7	3.5	4.4	0.077
	8	4.1	5.5	0.113
	9	5.2	5.7	0.148
	10	4.6	6.1	0.140
	11	3.6	6.3	0.113
	12	3.2	5.9	0.094
	13	3.1	5.7	0.088
	14	5.4	6.0	0.162
	15	4.2	6.2	0.130
	16	6.7	6.3	0.211
	17	5.0	6.6	0.168
	18	5.7	6.8	0.194
	19	5.0	6.4	0.160
	20	3.1	6.1	0.095
	21	6.5	6.8	0.221
	22	6.1	7.4	0.228
	23	1.3	4.7	0.031
	24	2.5	4.2	0.053
2/22	1	3.0	3.9	0.059
	2	2.5	4.2	0.053
	3	3.6	3.5	0.063
	4	3.6	3.0	0.054
	5	3.7	3.3	0.061
	6	5.8	3.9	0.113
	7	5.0	4.0	0.100
	8	5.5	4.3	0.118
	9	7.4	4.0	0.148
	10	6.9	3.1	0.107
			合 計	4.215

害する要因となる。その上、河川中央から左岸側は2m以上に高さで雪が河道内に排雪されており、河幅の半分以上は常時閉塞された状況になつていて、流水は主に右岸の低水護岸部を流下していたと思われる。

3. 2 橋梁周辺の状況

(1) 橋梁部

工事現場から上流約600m位置にある長栄橋付近は、両岸に約2m近い積雪が刃物で切り取られたように垂直な面を出して残っていた。長栄橋は、橋長が44.12mで5基の橋脚を有する橋梁である。長栄橋構造図を図4に示す。橋脚はパイルベンド方式で3本のコンクリート製杭を枕梁で連結し、その上に上部構造がのる形式となっていた。橋脚間隔は1スパン当たり7.02mであるが、左岸の1スパンだけは9.02mである。

低水路部は親水護岸が施され、河道内を蛇行するように設置されていた。長栄橋位置での低水路部は右岸の2径間目と3径間目の間を通過しており4～6径間の部分は、大量の積雪によってダムのように閉塞した状況となっていた。この大量の雪は、橋梁上から排雪されたことは明白であり、近隣の住宅地等から運び込まれたと思われる。そのために事故当時の長栄橋付近は低水路部分だけが通水断面となっていた。冬期は一般に渇水期であるため、通常であればこのような狭い断面でも支障ないが、今回は大量の雨が降り、河川断面が狭くなっているところに、大量の氷盤が流下したために、アイスジャムが発生したと考えられる。

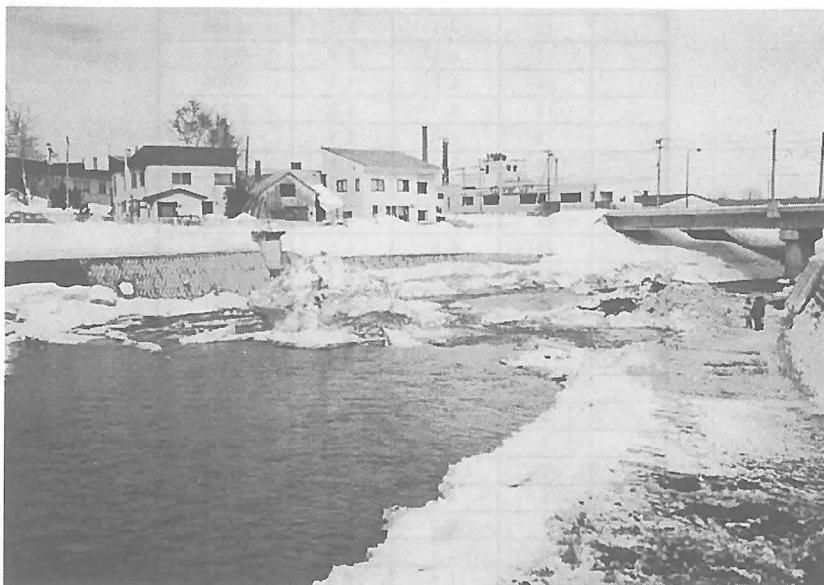


写真4 異常出水直後の魚道工事現場

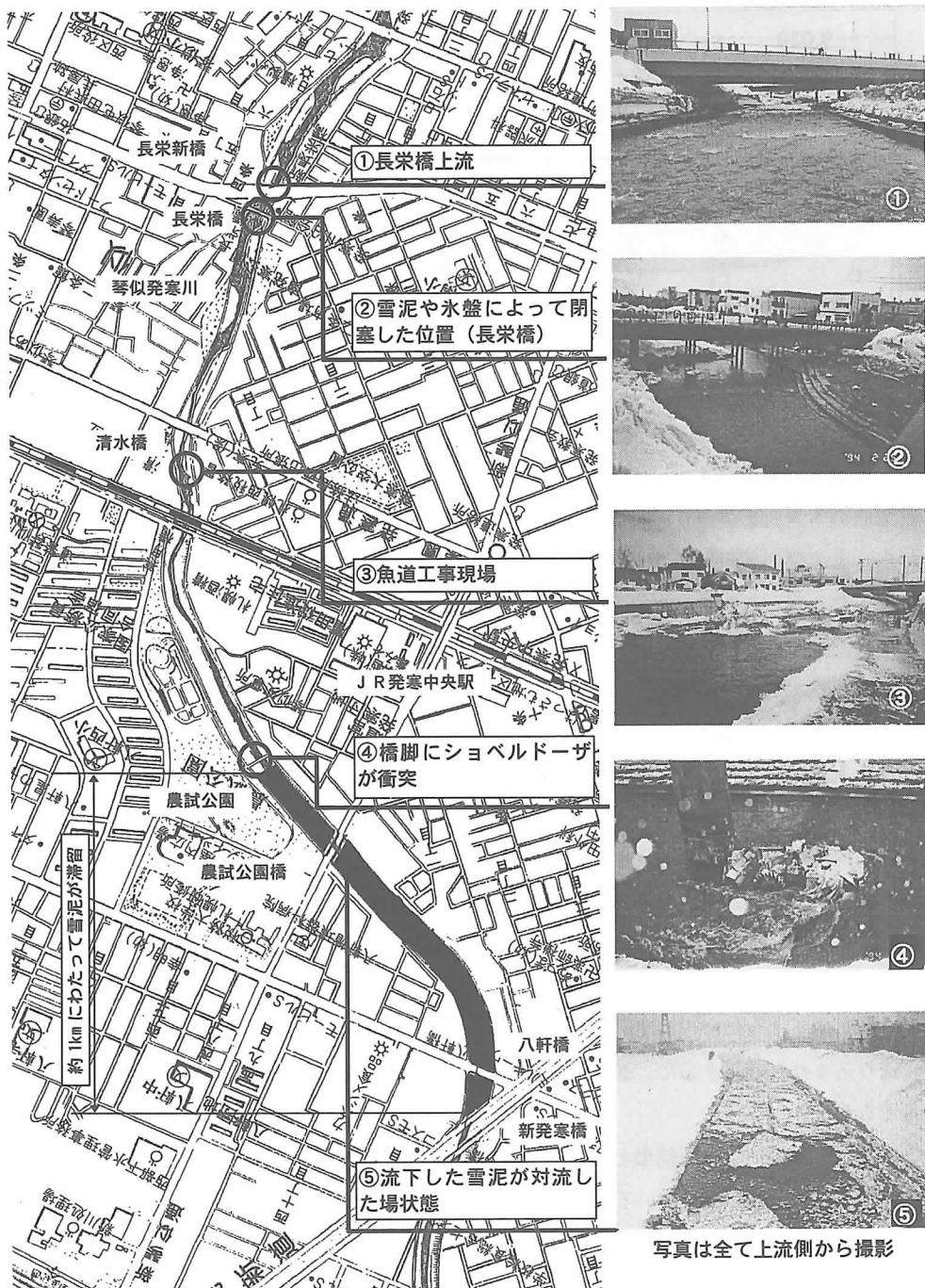


図3 事故直後の琴似發寒川の状況

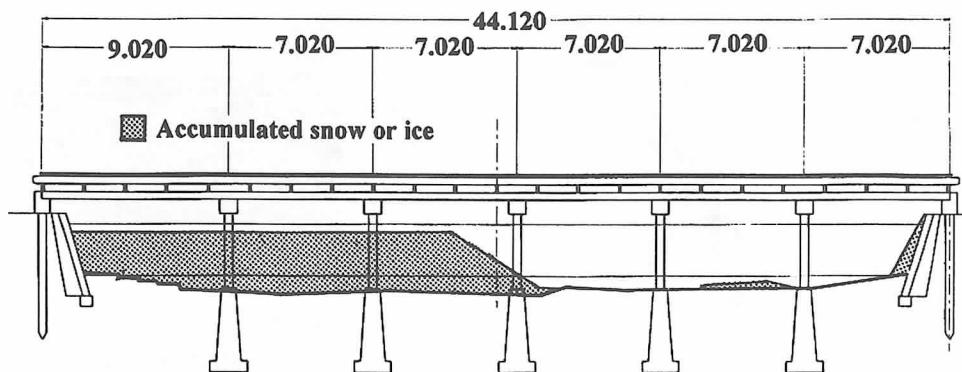


図4 長栄橋構造図

(2) 河道内の雪氷分布

長栄橋の下流側を側点0として、上下流100mの範囲を10m間隔で河川横断の測量を行った。その内、上流側の河川横断の実測結果を図5に示す。点線で表した高さは護岸の痕跡から流出時に達したと想われる最高水位である。図中の斜線部分は雪氷が堆積している部分で、空白の部分は流下したと考えられる。

図から明らかなようにおよそ100m上流では、ほぼ低水路に沿って流下してきたが、上流70mあたりから流下した部分が高水敷におよび長栄橋に近づくにしたがって右岸側に拡大している。しかし、上流20mからは逆に左岸側に雪氷の残った部分が表れ、じょじょに広がり長栄橋付近では河幅のはば半分をふさいでいる。長栄橋付近の大量の雪は、すでに述べたように長栄橋下流の河道内に排雪が行われた雪が堆雪しているためである。

流下部分が左岸側から右岸側に移動しているのは、基本的には低水護岸に沿った動きである。しかし、長栄橋に近づくにしたがって、河幅全体に広がり、長栄橋位置では流下部分が右岸に偏っていることから、長栄橋下流に排雪された多量の雪がダムのような役割をし、流下物を右岸側へ押しやるように作用していたと考えられる。このように狭い河川断面に大量の氷盤が一度に送り込まれた結果として、流下能力は落ち、長栄橋上流に流下物が堆積し水位が上昇したと考えられる。

このことを裏付ける調査結果として、流下部分と残存部分の境界位置での積雪深さが長栄橋に近づくにつれて高くなっている。また、流下物の中には、ほとんどが氷盤で占められていた。氷盤の厚さは20~30cmで、橋脚位置でせきとめられ、その間に雪が詰まって、非常に高い密度となっていた。上流20m付近で行った雪の密度調査によれば雪の密度はおよそ 0.57 g/cm^3 であり、雪の密度が高くなる融雪期の一般的な積雪密度 $0.40\sim0.45 \text{ g/cm}^3$ に比べても高く、流れがせき止められ滞留するとともに上流からの流下圧力が密度を高めたと考えられる。残存している箇

所の観察でも、橋脚に氷盤が衝突もしくはひっかかり、その後につづく雪や水をせき止めるような形で残つていた。



写真5 橋脚にトラップされた氷盤

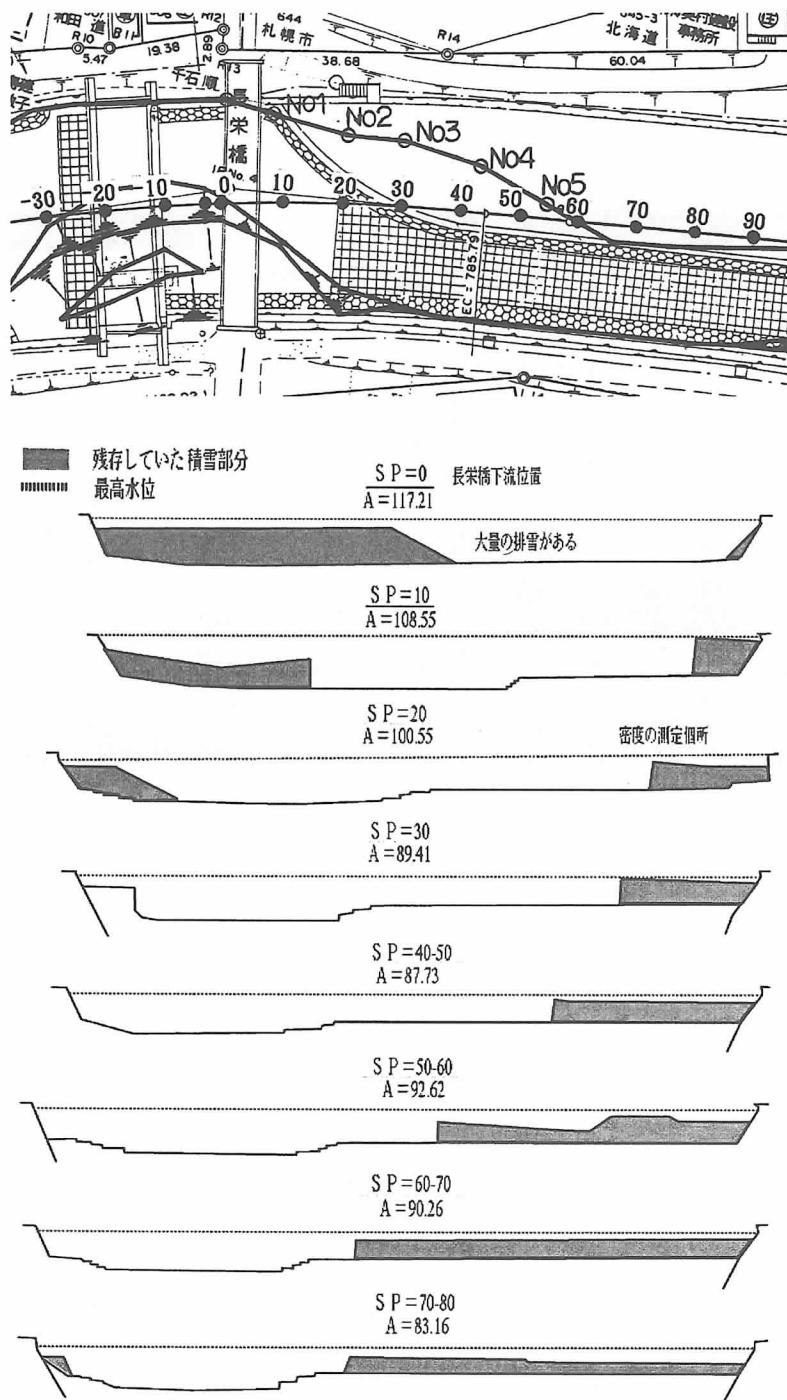


図5 河川平面図及び横断図

3. 3 最高水位高さ

長栄橋周辺の護岸部に残る痕跡からアイスジャム発生時の最高水位高さの調査結果を図6に示す。長栄橋より上流の左右岸の最高水位高さは、標高21.5~22.0mの間にありほぼ一定で水深が約2.5~3.0m程度であるのに対し、橋梁下流部の水深は2m程度と1mも少なくなっている。また、上流部のアイスジャム等が起こった痕跡のない落差工で行った調査結果をもとに、越流量の式から求めた越流水深 $H = 0.73\text{ m}$ と比較しても、長栄橋上流部の水深は約4倍も高い。以上のことから、河川断面が上下流ともにほぼ同じであることを考えれば、橋脚位置で氷盤がいわゆる氷詰まり（アイスジャム）の現象を起こし、せき止められたことがうかがえる。

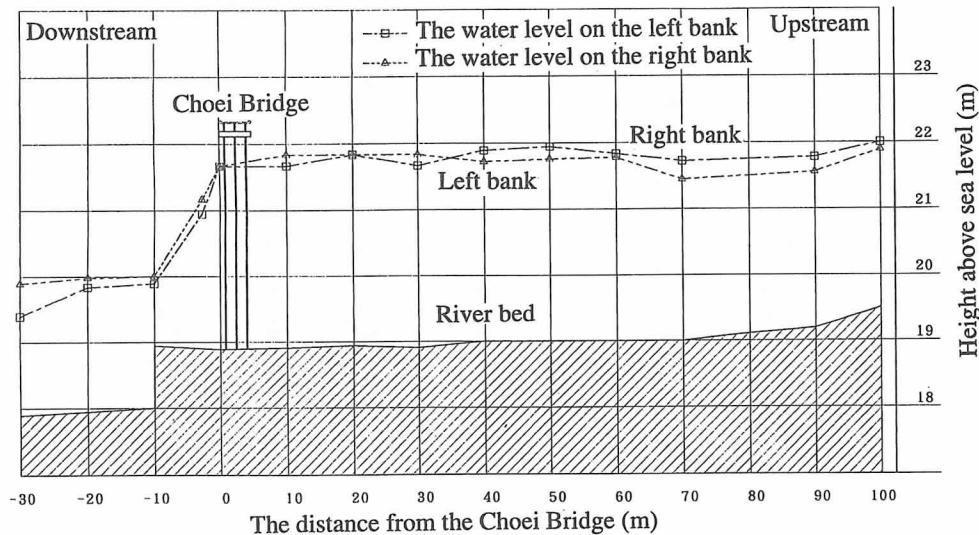


図6 最高水位痕跡調査結果

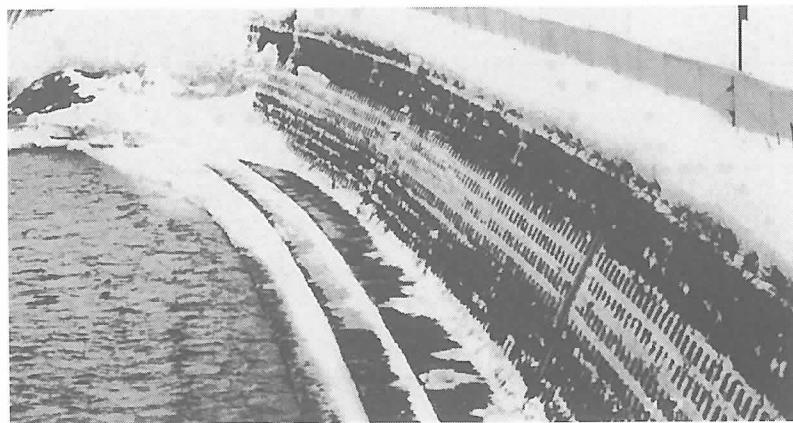


写真6 最高水位の痕跡（長栄橋上流）

3. 4 氷盤の形状

橋梁周辺に残された氷盤について、その大きさと厚さを計測した結果を下図に示す。氷盤形状は4角形や五角形が多く、円形などはなかった。調査した氷盤は71個である。図7は、現地計測した氷盤の面積を正方形換算したときの一辺の長さについて20cmごとの頻度をみたものである。ほとんどが80~180cmの範囲であり、120~160cmの氷盤が全体の40%を占めていた。

また、図8は氷盤の厚さと辺長の関係であるが、辺長が長くなるにしたがって氷盤厚も増加している。頻度の多かった一辺が120~160cmの氷盤では、氷厚が20~25cmの範囲であり、全体としては10~30cmの範囲にほとんどが分布した。

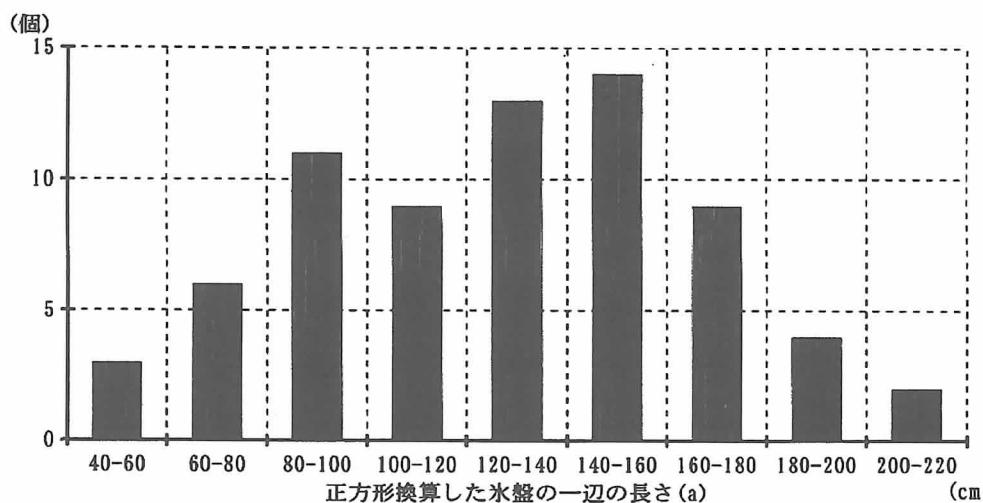


図7 正方形換算したときの現地氷盤の一辺の長さ

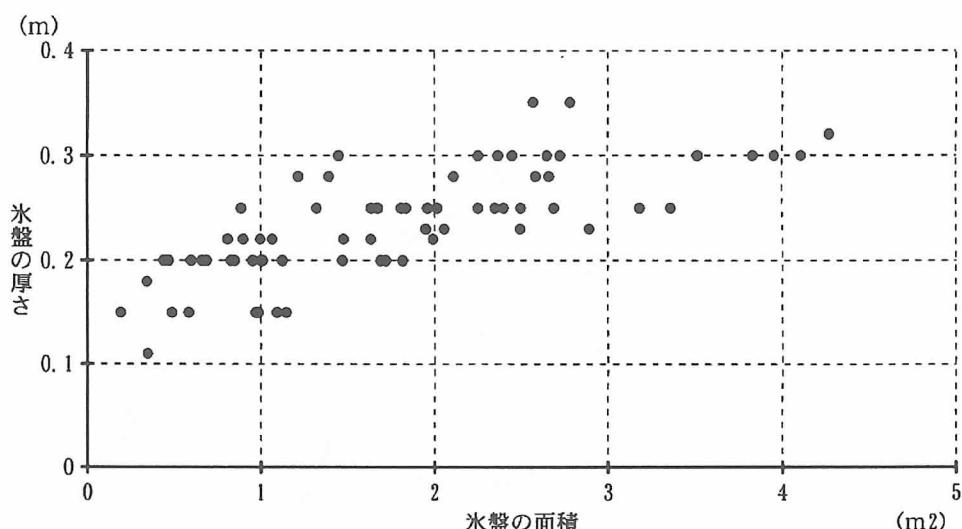


図8 氷盤の氷厚と面積の関係

3. 5 流速

当時の流量や流速を正確に導くことはそのときの観測データがない以上、極めて難しい。ここでは、河道が閉塞した長栄橋から上流約850mある落差工で、河川断面と当時の最高水位を両岸に残された痕跡を測定し、越流量の式から流量を推定する。越流量は一般に以下の式で表される。

$$Q = KBH^{3/2} \dots\dots (2)$$

Q : 流量 (m³/sec)

K : 流量係数

H : 越流水深 (m)

B : 落差工の幅 (m)

調査では、落差工位置での越流量深は H = 0.98m であった。しかし、当時河川には、20~30cm の氷盤があったことから、この厚さ分を控除すると、H = 0.78~0.68m となる。したがって、概略計算上は平均値をとって H = 0.73m とした。流量係数はせきの形や流量によって異なるが、およそ K = 1.7 程度であるので、この値を採用する。落差工の幅は測定の結果、B = 29.1m である。以上のことから流量は以下のように推定される。

$$Q = 1.7 \times 29.1 \times 0.73^{3/2} = 30.86 \text{ m}^3/\text{sec} \dots\dots (3)$$

この流量から当時の流速を推定する。河川断面は、閉塞した長栄橋上流の河川横断図から閉塞による影響をあまり受けていないと思われる上流90mの流下断面とし、A (河川の断面積) = 24m² であった。したがって、水位が最大の時の流速 V = 30.86/24 = 1.29m/sec となる。

以上の結果は、かなり流量が多いときの流速である。平常時の流速については、札幌土木現業所で 2 月に行った流量観測結果 0.25m³/sec (1994年 2 月 4 日測定) からマニングの公式を使って推定する。このときの粗度係数は 0.03 とした。その結果、流速は V = 0.43m/sec となつた。

4. 長栄橋でのアイスジャム発生に関する模型実験

以上のような現地調査の結果、長栄橋の橋脚に氷盤がトラップされ、氷盤が橋脚を支点とするアーチ構造を形成して、その後に流下する氷盤や雪塊をくい止め、アイスジャムを形成した可能性が高いことがわかった。このような、氷盤によるアーチ形成について現地条件を再現した模型実験を行った。

4. 1 実験方法

実験は図 9 に示すように長さ 20.0m、深さ 0.6m、幅 2.0m 水路を用いた。上部部に模型氷を

供給するフィーダーを設置した。模型氷を $0 \sim 30\text{cm/sec}$ の速度範囲で自由に送り出すことが出来る。下流側に設置した模型橋脚は厚さ 5 mm の鋼鉄板で幅 4 cm, 長さ 10 cm, 高さ 50 cm の鋼鉄の箱の上流側に直径 4 cm, 高さ 50 cm の円柱の縦割りにした形の物をモルタルで作りこれと鋼鉄箱をシリコンシーラントで接着した。模型氷は、氷の密度と同じ 0.9 gf/cm^3 のポリプロピレン製の矩形氷盤を用いた。このポリプロピレン板同士の摩擦係数は、氷相互の動摩擦係数 $0.1 \sim 0.2$ とほぼ同じであった（乾燥状態で 0.188, 水中で 0.146）。

実験では、フィーダーから水路に放出する模型氷の水面を覆う割合 (Q : カバー率) をフィーダーの送り速度を調整し $10\% \sim 100\%$ の間で変化させ、橋脚の心間距離 (b_2) の間隔ごとにアーチ形成の有無を確認し、真上から写真撮影を行い記録した。

アーチができるか否かの判定は以下の基準により行った。一度形成されたアーチが 10 数分以上変化しない場合、安定したアーチが形成されたということで Arching と分類する。逆にまったくアーチが出来ないか、ほんの数秒か長くとも 20～30 秒間出来るごく弱いアーチは No Arching に分類される。数分のオーダーでアーチができる状態を Transitive Arching とし、Arching, Transitive Arching, No Arching の 3 つに分類した。ただし、Transitive Arching を Arching か No Arching のどちらかに分類するとすれば弱い Arching ではあるが、数分間は存在することから Arching の方に分類されるべきものと考える。

表 3 アーチングの判定

分類	MARK	判定基準
Arching	●	アーチが形成され 10 数分以上変化なし
Transitive Arching	▲	数分のオーダーでアーチが形成される
No Arching	○	全くアーチを形成しないか、形成しても 20～30 秒程度の弱いアーチ

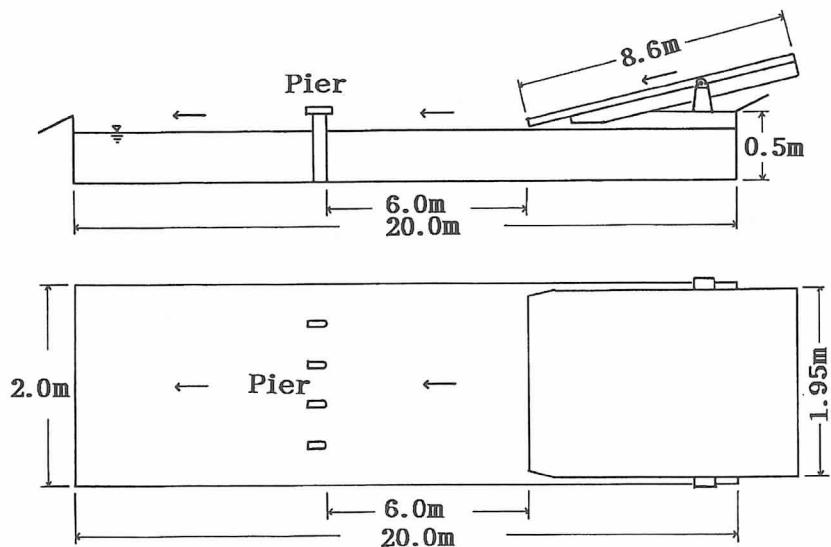


図9 実験水路

v = surface velocity
 Q = percentage of model ice covering the water surface
 b_1 = clear span
 b_2 = distance between centers of piers
 B = width of watercourse
 h = thickness of model ice

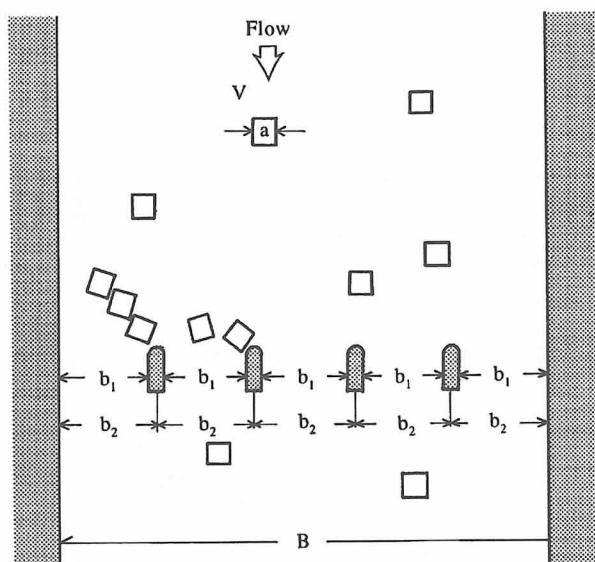


図10 実験の緒元

4. 2 実験条件

実験縮尺は使用したポリプロピレン板の厚さが1cmで、現地の氷盤のおおよその平均厚が20cmであったことから $1/20$ とした。次に、使用可能な模型氷のサイズは、一辺が5cm, 7cm, 10cm, 13cmの4種類であったので、現地調査から以下のように4つに区分した。

表4 模型氷盤のサイズと混合率

現地氷盤サイズ	現地混合率	実験混合率	模型氷盤サイズ
40～80cm	12%	10%	5cm
80～120cm	28%	30%	7cm
120～160cm	36%	40%	10cm
160～220cm	24%	20%	13cm

フィーダー上に4種類の模型氷を1列当たり1:3:4:2の割合で並べ水面に供給する。模型氷は現地氷盤に壊れて小さくなかった形跡が見られたことから、やや大きめの設定とした。橋脚は幅4cm、長さ10cm、高さ50cmで上流側に半円形のモルタル製Noseを取り付け、Noseは垂直である。

氷盤の移動速度は、水中ポンプの能力から4cm/sec, 8cm/sec, 12cm/secの3段階とした。橋脚の間隔は30cm, 40cm, 50cmの3種類で行い、アーチの限界線を求め、長栄橋の橋脚間隔35cm(702cmの $1/20$)の時のアーチ形成の有無を検証し、アイスジャム形成の可能性を考察する。

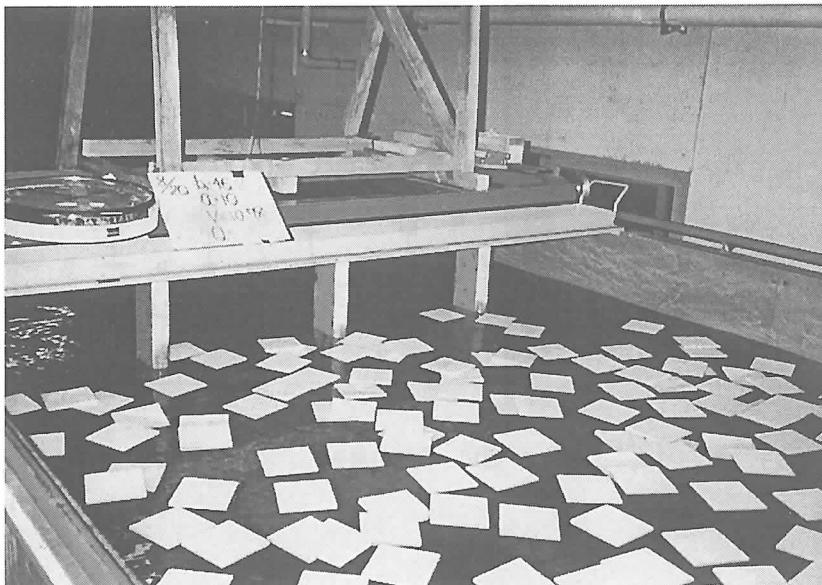


写真7 実験状況

4.3 実験結果

図11～図13は、流速ごとの a / b_1 とカバー率 Q の関係を示したものである。氷盤の移動速度が最も遅い $V = 4 \text{ cm/sec}$ (図11) の場合は、アーチを形成しても氷盤相互の結びつきが弱く、不安定なアーチが多かった。結果として Transitive Arching と分類されたケースが多い。全体としては、この程度の移動速度の違いでは、アーチ形成の限界線に大きな違いは見られなかった。

$V = 8 \text{ cm/sec}$ の時の実際の橋脚間隔 $b = 7.02 \text{ m}$ に対応するアーチを形成するカバー率 Q は 22%， $V = 12 \text{ cm/sec}$ でも 26% でアーチを形成することが図12、図13からわかる。平常時の実流速 (43cm/sec) を実験時の氷盤移動速度に換算すると $V = 9.62 \text{ cm/sec}$ となり、 $V = 8 \text{ cm/sec}$ と $V = 12 \text{ cm/sec}$ のほぼ中間に位置することから、アーチを形成する Q も 22～26% の範囲にあると思われる。

以上の実験結果から、降雨による流量増加に伴って水位が上昇し、氷盤が流下し始めた初期段階の水面をカバーする氷盤の割合が低い状態で、橋脚位置に氷盤アーチが形成されていた可能性が高いことが裏づけられた。

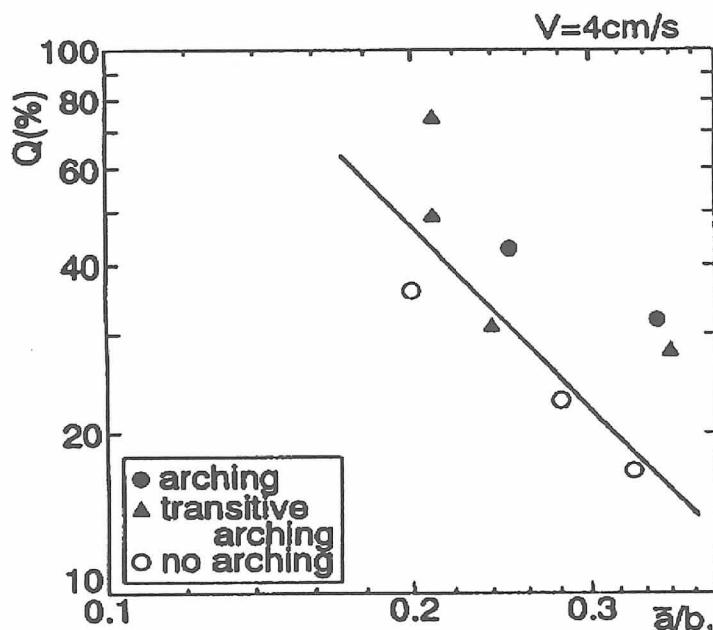
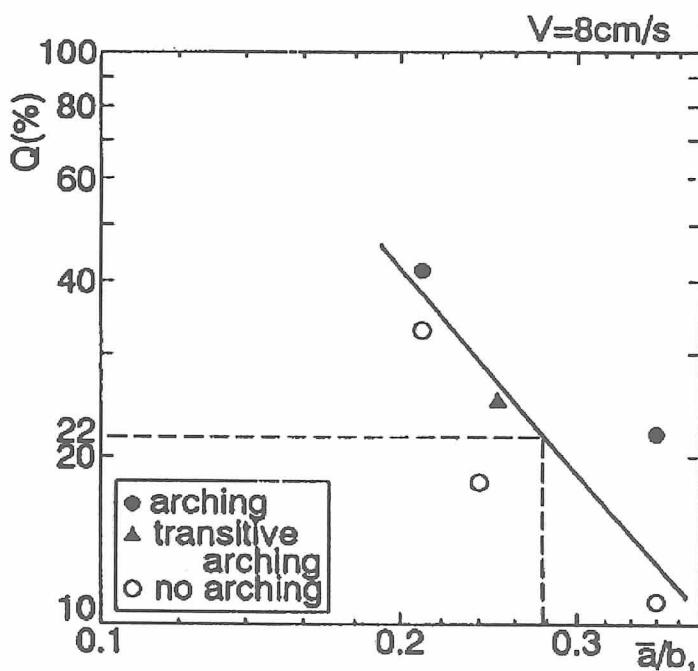
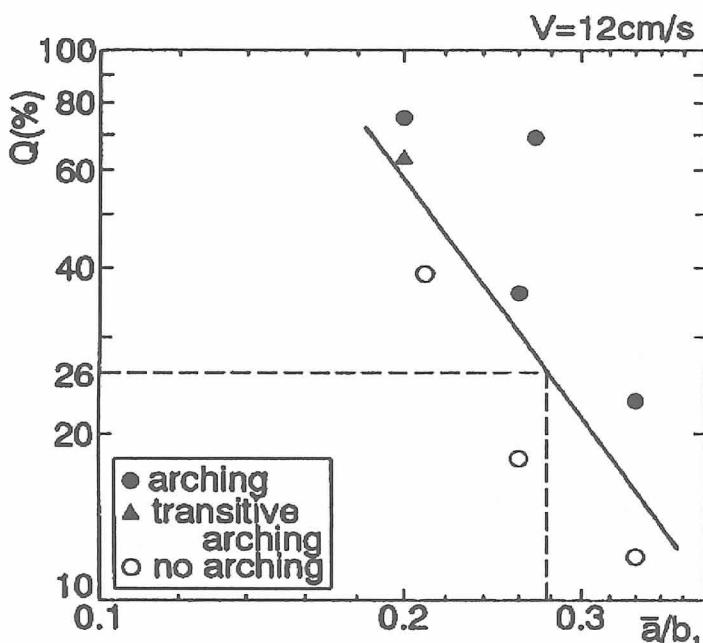


図11 $V = 4 \text{ cm/s}$ の時のアーチ形成限界線

図12 $V = 8 \text{ cm/s}$ の時のアーチ形成限界線図13 $V = 12 \text{ cm/s}$ の時のアーチ形成限界線

4. 4 氷盤によるアーチ形成を考慮した橋脚間隔の決定法

半円形断面で、直立の橋脚に対して、実験結果に基づいて、図14のようなチャートを作成した。架橋地点における、融冰期の流速、氷盤の形状（辺長、氷厚）等を調査し、ある程度把握することによって、水面の氷盤カバー率 Q が100%であっても、アーチを形成しない橋脚スパンを設定することが可能である。例えば、琴似発寒川長栄橋でのケーススタディーを行うと以下のようにになる。設計条件は、最も危険側となるように設定する。

1) 氷盤の大きさ

氷盤の辺長 $a = 2.2 \text{ (m)}$

氷厚 $h = 0.35 \text{ (m)}$

2) 氷盤の水面カバー率

$Q = 100 \text{ (%)}$

3) 流速（平常時程度）

$$V = 0.5 \text{ (m/sec)} \quad \frac{V^2}{gh} = \frac{0.5^2}{9.8 \times 0.35} = 0.07$$

4) アーチを形成しない橋脚スパン

$$\text{図より, } a/b_1 = 0.12 \quad b_1 = 18.3 \text{ (m)} \text{ (現在 } 6.52 \text{ m)}$$

したがって、氷盤アーチを形成しない橋脚間隔は現在の3倍の間隔が必要である。

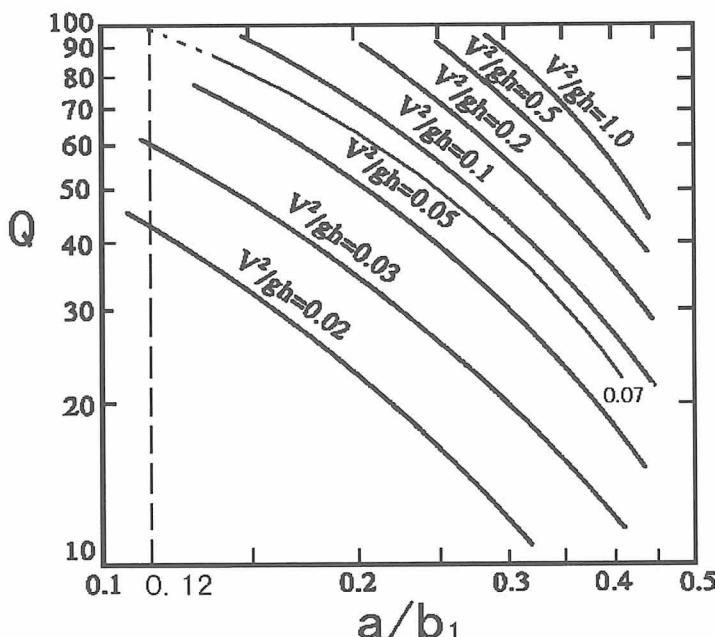


図14 流速ごとのアーチ形成限界線

5. ま と め

以下には、現地調査と模型実験結果をまとめることとする。

- ①聞き取り調査によれば事故直前の河道内には、ほとんど水が流れておらず、出水は急激におきた。また、上流の長栄橋はパイルベント式橋脚で約7m間隔に5基設置されており、流水の流れを阻害する要因となっていた。
- ②長栄橋下流には、大量の雪が排雪されており、河幅の半分以上が常時閉塞された状況になっていた。この大量の雪が堰のような役割をし、流下物を右岸側へ押しやるように作用しているため、狭い流下断面に氷盤が送り込まれ、アイスジャム発生の要因となっていた。
- ③アイスジャム発生時の水深は、長栄橋上流で約3.0mに対し下流では2m程度と、河道断面は変わらないにもかかわらず水深が約1m少なくなっている。また、上流部の堰の調査から導いた越流水深 $H = 0.73\text{m}$ と比較しても、長栄橋上流部の水深は約4倍も高い。以上のこととは、長栄橋の位置でアイスジャムが発生し、せき止められたことを裏付けている。
- ④河道内の積雪深さが長栄橋に近づくにつれて高くなっている、流下が阻害されていたことを証明している。上流20m付近の雪氷密度が 0.57 g/cm^3 と高く、大きな流下圧力がかかるところから見て、橋脚部分では閉塞に近い状態で流下が阻害されていた。また、流下物には大量の氷盤が含まれており、アイスジャムの骨格部分は氷盤によって形成されていた。
- ⑤現地調査に基づいて行った模型実験結果でも、流量が徐々に増加する初期段階で、長栄橋の橋脚位置には、氷盤によるアーチが形成されていた可能性が極めて高く、橋脚位置での氷盤によるアーチ形成が要因となってアイスジャムが形成されたことが、実験的に裏付けられた。
- ⑥以上のことから、今回の急激な出水は、長栄橋の橋脚位置に出来た氷盤アーチが、後から流下する氷盤や氷片をトラップしてアイスジャムに成長した。その後、流下圧力がアイスジャムの強度を上回ったために崩壊が起こり、急激な出水となったと結論される。この時、アイスジャムの骨格をなす氷盤の間には雪が詰まり、一時的にほぼ完全に流水の通過がストップした。
- ⑦長栄橋におけるケーススタディーの結果、最も危険側にみてアーチを形成しない橋脚間隔は現在の約3倍の長さが必要なことがわかった。このことから、架橋地点の融氷期の流速、氷盤の形状（辺長、氷厚）等を、ある程度把握することによって、アーチを形成しない橋脚スパンを設定することを可能にした。

6. おわりに

今回のような異常出水は、2月としては異常な大雨と極めて短時間の内に発生するなど、異例なことが多かった。しかし、河川工事は冬季渇水期に行われることが多く、河道内での工事も少なくないことから、今後もこのような事態が発生しないとも限らない。したがって、冬季といえども氷盤や雪氷が原因となる河道閉塞、その後の異常出水等を十分に考慮し、工事前に工事箇所の上下流を十分調査し、施工管理計画をたてる必要がある。

また、冬季間結氷する河川に建設される橋梁の計画においては、橋脚間隔の決定において、氷盤によるアーチ形成やアイスジャムの発生に配慮する必要があり、氷盤の大きさや氷厚、冬季の流速等に関する基本的な情報の収集が重要である。

7. 参考文献

- 1) Calkins, D. J. (1988) : Arching of Model Ice Floes at Bridge Piers Proceeding of IAHR International Symposium on ice, Vol. 2, pp. 495-507
- 2) Fumihiro Hara, Takaharu Kawai, Masakuni Hanada, Akifumi Nishihata, Hiroshi Saeki (1996) : Movement of Ice Blocks under an Ice Cover, Proceedings of The 13th International Symposium on Ice, Vol. 2, pp. 769-778
- 3) 原文宏, 国松靖, 藤井綱男, 畠山典晴, 榎国夫, 佐伯浩 (1992) : 橋脚による移動する氷盤のアーチ形成条件に関する研究, 第8回寒地技術シンポジウム論文集, pp. 379-387
- 4) Hara F., Kumimatu S., Saeki H. and Enoki K. (1993) : Study on Drift Ice Control Utilizing Arch Formation of Ice Floes, Proceeding of International Offshore and Polar Engineering Conferences, Vol. 2, pp 736-741
- 5) 原文宏, 榎国夫, 佐伯浩 (1995) : 橋脚形状が氷盤のアーチ形成に及ぼす効果に関する研究, 水工学論文集第39巻, pp 495-507
- 6) F. Hara, S. Kumimatu, H. Saeki(1994) : Condition of Arch Formation by Ice Floes at Bridge Piers , Proceedings of the 12th International Symposium on Ice, Vol. 2, pp. 867-873