

ウォータージェットの活用による 氷の除去に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DEICING METHOD OF LOCK WALL BY USING WATER JET

高橋喜一¹・宇佐美宣拓²・柴田俊夫³・近藤浩文⁴・石川亮⁴・佐伯浩⁵

Kiichi TAKAHASHI, Norihiro USAMI, Toshio SHIBATA, Hirofumi KONDO,

Ryo ISHIKAWA and Hiroshi SAEKI

¹フェロー会員 工修 (社)寒地港湾技術研究センター (〒060-0807札幌市北区北7条西2丁目8番地)

²正会員 工修 (社)寒地港湾技術研究センター (〒060-0807札幌市北区北7条西2丁目8番地)

³正会員 工学 (社)寒地港湾技術研究センター (〒060-0807札幌市北区北7条西2丁目8番地)

⁴学生会員 工修 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目)

⁵フェロー会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目)

Inland navigation had played a key role for physical distribution in earlier times. As railway and road had developed, however, inland navigation had declined. Recently, inland navigation draw renewed attentions from the aspects of reduce of physical distribution cost and global environmental problem.

Ishikari River is located in cold region and it is known that the water is frozen in winter season. So the measurements for the ice problem are needed on the facility of inland navigation.

In this study, some measures of ice buildup on lock wall are considered.

Key Words : Lock, Ice Buildup, Water jet, Ice Removal, Rubber sheet, Inland Navigation

1. 目的

北海道は4方を海に囲まれる地形的特徴を有している。内陸部には比較的大きな都市が形成されているが、港湾から内陸部への輸送はトラック輸送が大半を占め、輸送コストの削減が内陸部に立地する企業にとって重要な課題となっている。この問題に対し、著者等は石狩湾新港を中継地点とし、石狩川を活用した舟運による物流を提案している¹⁾。著者等が想定する舟運の航路には、河口部において2地点に水門が建設されており、船舶が水門を通過するためには、最低限この2地点にロックの建設が必要となる(図-1)。しかしながら当該地域は積雪寒冷地に位置しているため、例年12月～3月にかけて水面は結氷する。そのためロックにおいても結氷問題が発生することが想定され、その対策が必要となる。

本研究ではロックに係わる氷の問題のうち、氷のビルドアップについての問題に着目する。ビルドアップとはロック稼動時の水位低下により水に濡れた壁面が冷却される事で凍りつき、水位変動の繰り返し及び閘室を浮遊する氷片と凍着する事で発達し、

次第に閘室側へ氷が張り出す現象である(図-2)。氷のビルドアップが発生すると、ゲートの開閉操作が困難となる他、ロックの有効幅の減少や、水位調整時の船舶の係留が困難になるなどの被害の発生が予測される。そのため、ビルドアップした氷の除去方法として、ウォータージェットを活用する事で氷を除去する対策を考案し、実験的にその効果について

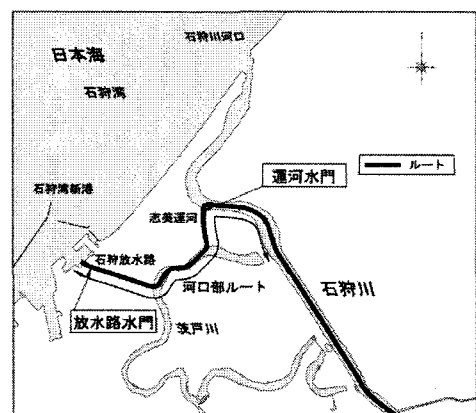


図-1 石狩川舟運想定航路(河口部)

て検討する。

2. 現地調査結果

著者等は2003年2月に、ロックの建設が想定される石狩放水路において水路壁面への氷の凍着調査を実施している²⁾。この結果、冬期間はほとんど水位変動の無い同放水路において、壁面に氷が凍着している状況が確認された。この現象は北向きの壁面で極めて顕著であり、水路への張出幅は最大で約80cmにも達した。一方で南向きの壁面では氷の凍着は部分的に確認されたものの張出幅は極めて薄く、凍着面が融解し周辺氷盤上に落下した氷塊も多数確認された。この状況から、太陽の輻射熱による凍着面の温度上昇効果が極めて大きいものと推測される。

石狩放水路壁面における氷のビルドアップの発生要因としては、壁面上部からの融雪水の流下や裏込土からの排水で壁面が濡れ、その後凍結することが主な原因として考えられる。また発達する要因としては、ビルドアップした氷の濡れと凍結の繰り返しや、水面を浮遊する氷片と付着することが主な原因と考

えられる。しかし当該地点は冬期間の積雪量が極めて多いことから、濡れた壁面またはビルドアップした氷自体に着雪し、凍結することもビルドアップの発達の要因と考えられる。

このことから、放水路にロックが設置された際には、降雪の影響を強く受けるため、ビルドアップの発達する速度は速いと想定される。また当然ながらロックの壁面のみならず、ゲート及びゲート格納部においても氷のビルドアップの発生が予想され、除氷作業が必要とされるであろうことは容易に想定される。

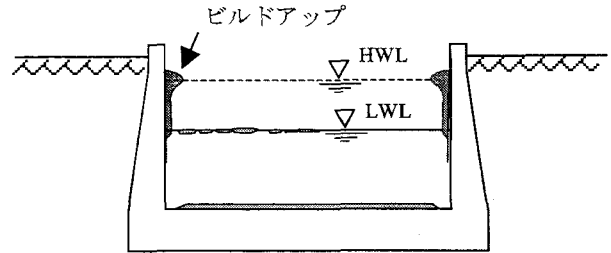


図-2 ビルドアップの発生

表-1 既存の除氷方法

除氷対策	対象となる現象			除氷効率		除氷の精度	施設維持費用	特 徴
	凍着防止	凍着力の低減	除氷	凍着初期段階	氷の発達時			
人力による除氷	×	×	○	×	×	△	—	多大な労力・作業時間を要する割に作業効率が悪く、また気象条件が厳しいことから、作業環境が過酷である。
壁面の塗装・被覆	×	○	×	—	—	—	△	氷の凍着力を弱め、小さな力で氷を除去可能。他の除氷作業の併用策としての活用となる。塗装・被覆する材料によっては定期的な補修が必要。
ヒーターの埋設による氷の融解	○	○	○	○	△	○	△	常時稼動では凍結を完全に防止。定期的に変更する場合、凍着面を融解し除氷が可能。設置方法、設置面積にもよるが、故障時の修理は困難となる。
バックホー等による氷の除去	×	×	○	×	△	×	○	北米で実績を有するが、作業の精度が悪く、除氷作業時に壁を削り、傷つけることが多い。
チェーンソーによる氷の切断	×	×	○	×	△	×	△	直線部においては効率的だが、非直線部においては作業効率が低下する。壁面に近づけすぎると壁面を傷つけるため、完全に氷を除去することは出来ない。
ジェット水による氷の除去	×	×	○	○	△	○	○	ゲート格納部など複雑な形状の地点でも効果を発揮。装置によっては移動が容易。常設とせず、冬期だけのリースでも対応可能。作業上壁を傷つける事が無いが、高圧の場合、作業自体は危険が伴う。
温水の散布	○	○	○	○	△	○	△	近傍に熱源があれば比較的低コストで適用可能。窄孔部の目詰まりの問題や、常時温水を放流しない場合、配管の凍結が懸念される。

3. 既存の対策とウォータージェットの活用

(1) 既存の除氷方法

ロック壁面の結氷防止・除氷対策を現象別に整理し表-1に示す。北米のロックでの除氷実績^{3),4)}では、ビルトアップが発達した時点で除去作業を実施する例が多い。除氷対策としては、人力またはバックホーによる除氷の事例が多い様であるが、人力による作業は効率が極めて悪く、また作業環境も苛酷となる。バックホーによる除氷作業では陸側から見ると壁面部はオペレーターの死角になることから、除氷作業時に壁面を削り傷つけること、また作業の精度が粗い等の問題点が指摘されている。

一方著者等は、ビルトアップの発生初期段階において定期的に氷を除去する方法を想定する。それに際し、恒久的な設備を必要としないこと、また除氷作業の効率と精度を考慮し、特にゲートおよびゲート格納部など、構造が複雑で除氷作業の効率の低下が想定される部分を重視する。表-1より、ウォータージェットの活用により除氷する方法を選択した。

(2) 既存のウォータージェットの活用

北米で検討されたジェット水の活用方法は、ロック壁面にビルドアップした氷に対して、高圧ジェット水を噴射し切断することで除去することを目的としている。そのため要求される装置の能力も大きく、機械自体も大掛かりな装置とならざるを得ない。

Coveney (1981)⁵⁾はジェット水の噴射による氷盤(淡水氷、海水)の切断特性を把握するため、野外実験と室内実験を実施し、最終的にジェット水の氷への貫入深さとポンプ出力、氷温、スタンドオフ距離、ノズル移動速度との関係式を示している。一連の実験結果から、淡水氷の切断形状はジェットのノズル圧の大小によりKerf, Spalled trench, Melted grooveの3パターンに分類されることが示され、明瞭な切断形状を示すKerfの発生条件としてはノズル圧40MPa以上が必要と結論付けている。

また高圧ジェット水の噴射に際しては熟練した作業員を確保する必要があるうえ、切断する対象物に係わらず切断作業に際しては飛翔物の衝突やジェットの暴発などの危険が伴う⁶⁾。とりわけ該当地域は足場が凍結している恐れがあることから危険性は高いことは明白である。以上の点から、高圧ジェット水の噴射により氷を切断し除去する方法は、現状での実用化は困難と判断される。

(3) 新規のウォータージェットの活用方法

一方、今回著者等が提案するジェット水による氷の除去方法は、基本的には凍着面での氷の融解と氷の破壊の繰り返しによる氷の除去を目的としている。この方法ではそれほど高圧な水压を要求されないことから、ジェット装置は比較的小型の装置で良く、作業に際しても上記の装置と比較すると安全性が確保できる。

4. 実験方法

(1) 供試体の作成

実験に際しては、延長の長いロック壁面を再現することは困難であるため、鉄板(300×400×6mm)及びコンクリートブロック(300×300×60mm)を壁面と想定し、この表面に氷を凍着させることで、氷のビルドアップした壁面と見なした。また、氷を破壊させ除去を容易にする目的で、表面が滑らかでかつ微小な荷重で変形可能なゴムスポンジシート(硬度Cタイプ7, 10, 35, 厚さ10mm)、ゴムシート(硬度ショアA45, 65, 90, 厚さ10mm)、ウレタンシート(硬度ショアA70, 厚さ7mm)を鉄板表面に被覆した。これは実際にはロック壁面の水位変動部分に被覆し、各シートの表面上に氷を凍着させることを意図している。

以上の計9種の鉄板、コンクリート、ゴムシート等で被覆した鉄板(以下鉄板等と省略)を、水を張った水槽に、表面が水面に浸る様に設置する。

水槽全体を定温で冷却する事で、鉄板等の表面から鉛直下向きに一樣な厚さの氷を形成させる。氷が所定の厚さに達した時点で、水槽から鉄板等を採取し、チェーンソーを用いて周辺の氷を除去して整形する。この表面に氷が凍着した鉄板等を今回の実験の供試体と称する。

なお実際には、定期的に除氷作業を実施するものと想定するため、ビルドアップした氷はそれほど大きくは発達しないものと考え。よって今回の実験では氷厚、即ちビルドアップした氷の張出幅を0.5～5.0cmの範囲と想定し、供試体を作成した。

(2) 実験方法

供試体の構成要素である鉄板やゴムシート等の面をそれぞれロック壁面及び壁面に布設したゴムシート等と見立てるため、現地の状況に合わせ凍着面が垂直になるよう台座に固定する。その後供試体の噴射位置から所定のスタンドオフ距離、噴射角度の吐出位置に固定したジェットガンのノズルより、所定の圧力で、噴射時間 $t=60\text{sec}$ の条件でジェット水を氷へ向けて噴射した。ジェット水の噴射に伴う氷の融解や破壊状況を目視並びにビデオ撮影により確認し、ゴムシート等の被覆に伴う効果について調べた。実験終了後には除氷面積を計測するとともに、ゴムシートの破損状況についても確認した。

使用する水については、近傍に熱源や温排水の排水口が無い限り、現地では水域の低温水を吸い上げ、ビルドアップした氷へ向けて噴射することとなる。石狩放水路で水温の鉛直分布状況を計測した結果、水面付近では約0℃であり、水深が深くなるにつれ水温は上昇し、水深約5mの水底部分で約4℃と最高の温度を示したことから、今回の実験では0～4℃の低温水を用いた。

現地でのジェット水発生装置の適用に際しては、装置の入手が容易であること、操作が簡便であるこ

と、安全性が確保できること、寒冷地での使用が可能であること、が必須条件と想定される。そのため本実験では上記の条件を満たす装置として、建設現場で建設機械などの洗浄に用いられる高压洗浄機が最適と想定し、表-2に示す高压洗浄機をリースにより入手して一連の実験に使用した。

ジェット水は吐出ホースを通じ、ノズルから噴射されるため、その間の損失により流量が低下することが予測される。そのため今回の実験では、各吐出圧力に対する流量特性、またジェット水の衝突に伴う荷重特性を計測した。計測結果を図-3、4に示す。

表-2 実験で使用したポンプの仕様

メーカー	鶴見製作所
形式	HPJ-110B
相・電圧(V)	三相200
出力(kW)	11
構造	三連プランジャポンプ
吐出圧力(MPa)	14.7
吐出量 (l/min)	33.1
ノズル (チップ径)	ジェットガン・φ1.9 JG150-35B
吐水ホース	1/2"×20m

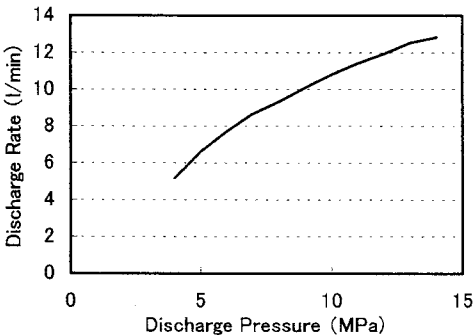


図-3 流量計測結果

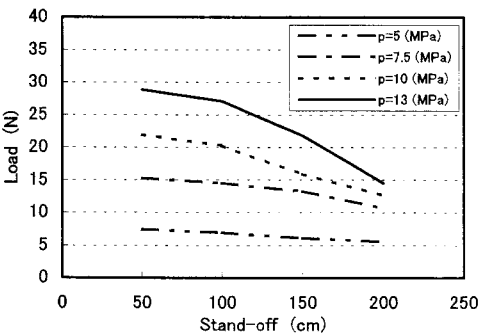


図-4 荷重計測結果

5. 実験結果

(1) 垂直噴射結果

実験当初は垂直に設置した供試体に対し、氷の面

に垂直に噴射し、除氷状況について確認した（図-5）。これは、ジェットの噴射により荷重を加えられた板状の氷に対し、載荷方向の背面（即ち凍着面）にゴムシートを敷設する事で氷のたわみの発生を許容し、曲げ破壊を生じさせる効果を狙ったものである。その結果、鉄板、コンクリートブロックに凍着した氷は、ジェット水の水圧程度では変形が許容されないため単純に融解するだけであった。一方、ゴムシート、ゴムスポンジ、ウレタンシートに凍着した氷については、吐出圧力13MPa以上、スタンドオフ距離50cm以下の条件下では平板に荷重を載荷した状態の曲げ破壊の形態を示し、同心円状に氷が破壊し、氷片が水圧で飛散することで除去される様子が確認された。しかしながら、高圧力、近距離からの噴射であったため、ゴムスポンジについては全てのケースで氷の破壊後、シート自体も水圧により即時に貫通し、鉄板との接着面が剥れる結果となった。ゴムシート、ウレタンシートについても即時貫通には至らないものの、一部のシートでは表面に破損が確認された。以上の結果より、この方法での氷の除去は困難との結果となった。

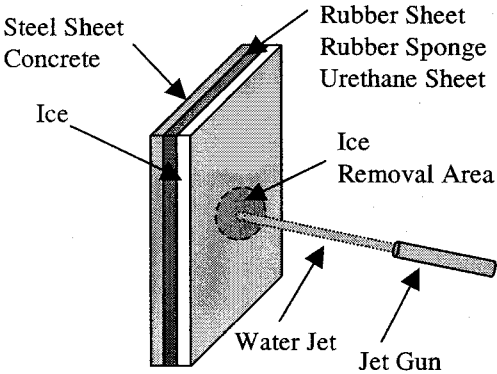


図-5 実験状況（垂直噴射時）

(2) 凍着境界面噴射結果

実験当初の噴射方法による氷の除去は困難であったため、次に氷の凍着境界面を狙って噴射実験を実施した（図-6）。この方法は、凍着面を融解させることで氷塊と壁面を剥離させることを目的としている。実験条件を表-3に示す。ポンプの条件ではスタンドオフ距離L（cm）、噴射角度α（°）、吐出圧力p（MPa）を、氷の条件では氷温を変化させる事で、計5ケースの条件で一連の実験を実施し、それぞれの要素が除氷効率に与える効果について把握した。また使用した材料は、鉄板、コンクリート、ゴムシート（硬度45、65、90）、ウレタンシート（硬度70）の計6種である。ゴムスポンジは強度が弱い事から使用を中止した。

各ケースの試験結果を図7～11に示す。スタンドオフ距離については、当然ながら近い方が凍着面に対する貫入深さは深くなり、除氷面積も大きくなる。吐出圧力については、高圧なほど除氷面積が増加す

る傾向が確認される。噴射角度については、 45° と 30° を比較した場合、 30° のほうが貫入深さは深くなり、除氷面積も大きくなる。一方、 45° の場合には、氷の面に対する垂直方向成分が増加することから、条件によって氷は前述の曲げ破壊を示すことも予想されたが、実際には融解のみであった。ここで、近距離・高圧な程除氷効果は高まるものの、その分ゴムシート等に作用する水圧も上昇することから、一定の条件を超えると、ゴムシート等の表面に損傷を与えることとなる。今回の実験では事前にゴムシートの損傷程度を確認した所、 $L=100\text{cm}$ 、 $p=13\text{MPa}$ 、 $t=60\text{sec}$ の条件下で、ゴムシート（硬度45）、ウレタンシートの一部に表面の損傷が確認されている。

ここで特筆すべき点は、ゴムシートまたはウレタンシートなどを被覆した場合にのみ、一部のケースにおいて氷の破壊が生じた点である。除氷面積が 100cm^2 を超えたものは概ね氷の破壊が生じたケースである。実験結果からも明らかな様に、この現象が発生すると、除氷面積は飛躍的に増加する。氷の破壊の発生条件については、今回の実験結果からは明確な区分は出来ないが、全般的な傾向として水温が -5°C の場合においてのみ発生し、氷厚が小さいほど破壊領域が大きくなる傾向が見られる。一方で、水温 -10°C のケースでは、氷厚にかかわらず破壊は確認されなかった。

表-3 実験ケース

	スタンド オフ距離 L (cm)	噴射角度 α ($^\circ$)	吐出圧力 p (MPa)	氷温 T_i ($^\circ\text{C}$)
CASE1	100	30	13	-5
CASE2	100	30	10	-5
CASE3	100	45	13	-5
CASE4	150	30	13	-5
CASE5	100	30	10	-10

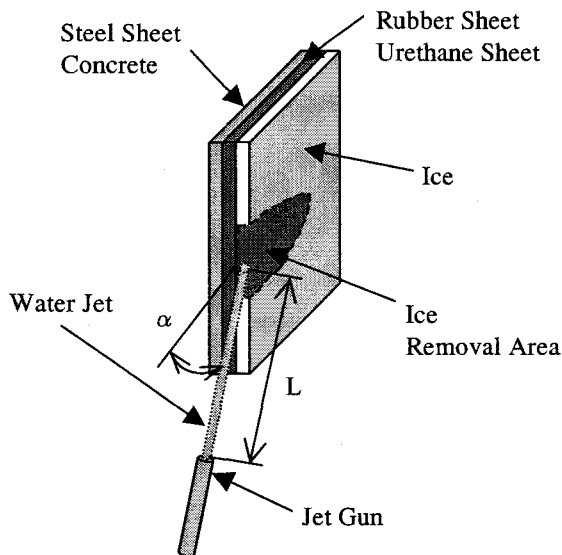


図-6 実験状況（凍着境界面噴射時）

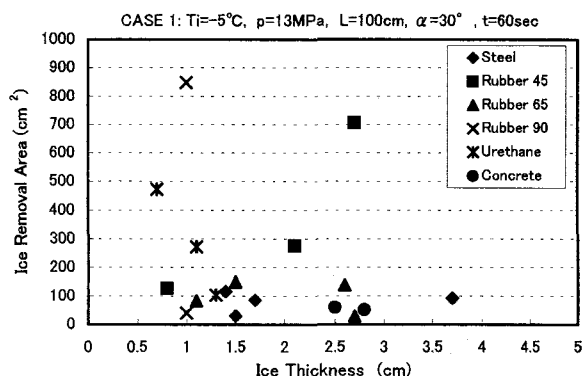


図-7 実験結果（CASE1）

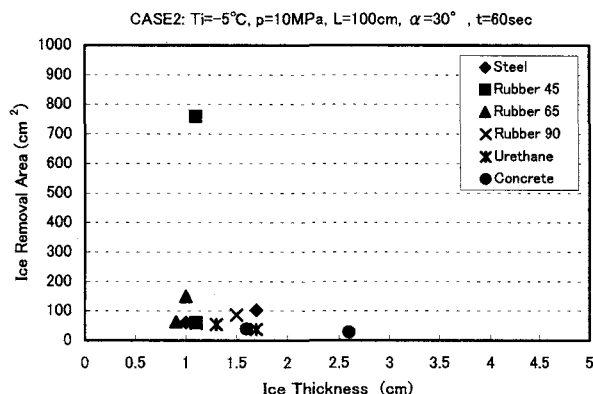


図-8 実験結果（CASE2）

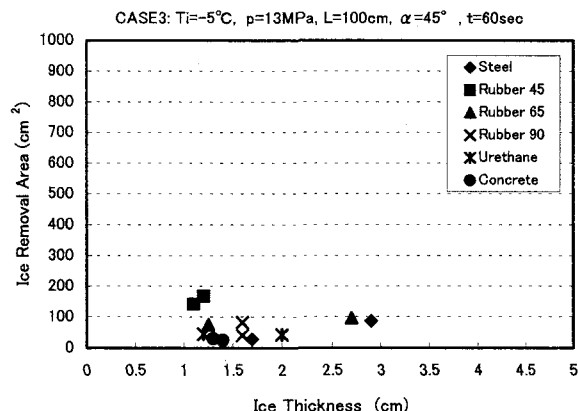


図-9 実験結果（CASE3）

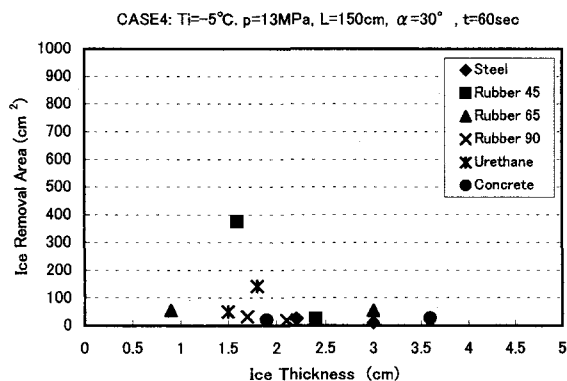


図-10 実験結果（CASE4）

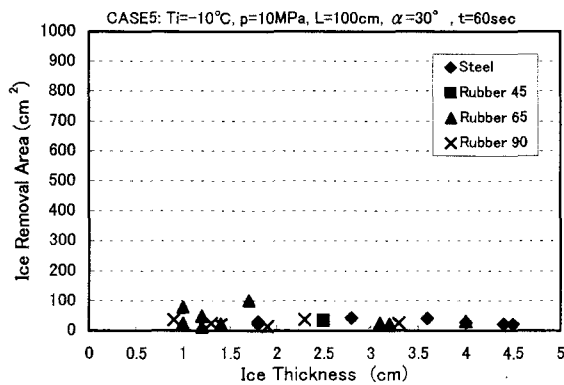


図-11 実験結果 (CASE5)

6. 現地への適応について

本章では、石狩放水路地点にロックが建設された場合の除氷について、若干の考察を行う。放水路は茨戸川と石狩湾新港港内を連結している。茨戸川は農業用水の水源として利用されており、茨戸川に塩水が流入すると農作物に悪影響を及ぼすこととなる。よって茨戸川の水質環境を保全するため、通常は塩水の遡上を防止する目的で放水路水門は閉鎖されている。放水路水門自体は、水路幅50mに対し、25mのゲートにより2分割された形状を示している。一方、著者等の既存の調査¹⁾により、航行を想定する1,000トン級のバージの平均的な船幅は14.1mであることから、2つに分割されたゲートのうち、一方をロックに改良する事で、十分に航行は可能となる。

本構想では、ロックの上流側は茨戸川に、下流側は石狩湾新港に接続される。下流側のロックゲートでは、船舶航行時の水位調整に伴うビルトアップの発生に加えて、潮汐に伴う水位変動の影響を受けることとなる。一般的に日本海沿岸の潮差は15~25cm程度といわれているので、ゴムシートの敷設の際には、この潮差の影響を考慮する必要がある。

また操作上の面で想定される事項を以下に記す。今回実施した実験は、噴射位置を固定して60秒間ジェット水を噴射している。しかしながら、ゴムシート等に凍着した氷の場合、破壊自体は噴射後10秒~30秒程度で発生する事例が多数確認されている。このことより実際の操作上は、氷の破壊が生じた時点で、噴射位置を移動させることにより、さらに効率を上げることが可能となる。また、ポンプの能力が許容するならば、ジェットのノズルを複数に分岐させる事で、一度の噴射で複数のエリアでの除氷が可能になると想定される。加えて、氷温が高いほど氷の破壊が生じやすい傾向が見られることから、事前にビルドアップした氷に水を散布し氷温を上げておく事で、ジェット水の噴射に伴う氷の破壊を生じ

させやすくなるものと考えられる。

7. 結論

本研究の主な結論を以下に記す。

1. 一連の実験結果から、ゴムシート等と鉄板、コンクリートに付着した氷の除去状況を比較すると、噴射側の条件では、高圧、近距離の場合、ゴムシート等で被覆した壁面での氷の除去範囲が大きい傾向が見られる。
2. 氷の条件として、特に氷厚が薄い場合、即ちビルドアップの発生初期段階の場合、ゴムシート等で被覆した壁面では効率的な除氷が可能となる。また氷温が高い場合にも除氷効率は増加する傾向が示された。
3. よって、ロックの結氷対策としてウォータージェットの噴射を実施する場合、壁面へゴムシート等を敷設することで、除氷効率を増加することが可能となる。
4. 硬度の小さいゴムシート等を使用すると、シート表面の損傷が発生することが示された。除氷作業を繰り返し実施することを想定すると、ゴムシート自体に一定の強度が要求される。今回の実験結果を参照すると、硬度65以上のゴムシートを選択すべきである。
5. 実際にウォータージェットを用いて効率的に除氷作業を行う際には、所定の氷厚に達する前に、繰り返し除氷作業を実施する必要がある。また事前にビルドアップした氷に水を散布すると氷温を上げることができると、より効果的に除氷が可能となる。

参考文献

- 1) 高橋喜一、宇佐美宣拓、柴田俊夫、大塚夏彦、寺島貴志、佐伯浩：石狩川舟運の可能性に関する基礎的研究、日本沿岸域学会論文集No.15, pp.89-100, 2003.
- 2) 高橋喜一、宇佐美宣拓、柴田俊夫、大塚夏彦、寺島貴志、佐伯浩：舟運関連施設における冬期間の結氷対策、海洋開発論文集Vol.19, pp.785-790, 2003.
- 3) Tuthill, A. M.: Ice-Affected Components of Locks and Dams, Technical Report ERDC/CRREL TR-02-4, 2002.
- 4) Calkins, D.J, Mellor, M.: Cost Comparisons for Lock Wall Deicing, Third International Symposium on Ice Problems, IAHR, pp59-67, 1975.
- 5) Coveney, D.B.: Cutting Ice with "High" Pressure Water Jets, The 6th International Conference of Port and Ocean under Arctic Conditions, pp 1124-1134, 1881.
- 6) 日本ウォーター学会編：ウォータージェット技術事典、丸善、1993.