

舟運関連施設における冬期間の結氷対策

MEASUREMENT OF ICE PROBLEM ON FACILITY OF INLAND NAVIGATION IN WINTER SEASON

高橋喜一¹・宇佐美宣拓²・柴田俊夫³・大塚夏彦⁴・寺島貴志⁵・佐伯浩⁶
Kiichi TAKAHASHI, Norihiro USAMI, Toshio SHIBATA, Natsuhiko OTSUKA,
Takashi TERASHIMA, 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正会員 工博 北日本港湾コンサルタント(株) (〒003-0029 札幌市白石区平和通2丁目北11番18号)

⁵正会員 工博 (株)クマシロシステム設計 (〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目8番地)

⁶フェロー会員 工博 北海道大学工学研究科 (〒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 problem for locks are considered.

Key Words: Lock, Measurement of Ice Problem, Adfreeze Bond Strength
Ishikari River, Inland Navigation

1. はじめに

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、一般的に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。この問題に対する対策として、著者等は石狩湾新港を中継地点とした石狩川を利用した舟運による物流を提案している¹⁾。

北海道の中央部を流れる石狩川は、国内では第3位の流路延長、第2位の流域面積を誇る河川であるが、中流から下流にかけての河床勾配は小さく流量も豊富であり、橋梁のクリアランスなどの制約も少ないことから、舟運成立の可能性は高いと考えられる。また、石狩川流域に接する市町村の人口は、全道の人口に占める割合も大きく、石狩川に沿って工場や発電所も立地しており、このことは経済的な面からも河川舟運の活用の可能性を示している。

ところで実際に石狩川を船舶が航行するには、現状では一部の釣り船などを除いては困難であり、物

流を目的とした船舶の航行のためには閘門や係留施設、荷役施設等、船舶の航行を支援する施設の建設が不可欠となる。石狩川は寒冷地に位置し、冬期間は結氷することが知られており、舟運の関連施設も同時に結氷する恐れがある。船舶の年間を通じた航行を実現するには、砕氷等による航路の確保と同様にこれらの施設に対する結氷対策が必要となる。

本研究では舟運の関連施設のうち閘門に着目して、施設整備計画を行う上で必要となる結氷対策について課題を抽出し、国外の事例を参照して検討する。また氷の凍着に係わる問題については、複数の材料を用いて凍着強度を求める実験を行い、最適な対策方法について検討する。

2. 石狩川舟運の想定ルートと閘門

(1) 石狩川舟運の想定ルート

著者等は現在まで、石狩川舟運成立の可能性に関する基礎的な研究を行ってきた²⁾。経済面・環境面から見た舟運成立の可能性として、貨物輸送の実績

から舟運へ転換可能な貨物を抽出した。陸送と舟運による貨物輸送を想定して各々輸送コスト、CO₂排出量を試算して両者を比較した。その結果舟運を活用した場合、トラック輸送と比較して15~30%の輸送コスト削減と、70~80%のCO₂排出量の削減が見こまれ、舟運活用が経済面・環境面の両面において有利との結果を得ている。

また石狩湾新港を外部との中継拠点とし、石狩川を利用した舟運のルートについては2つのルート(図-1)が想定される。気象条件・海象条件・水理条件から両者の航路の年間稼働日数を算出して比較検討した結果、一部構造物の改良が必要とはなるが、石狩湾新港-石狩放水路-茨戸川-石狩川を結ぶルートが航路の年間稼働率の面から有利との結果を得ている。

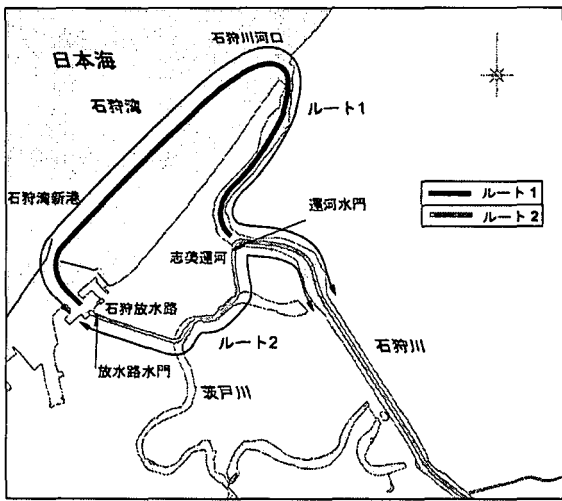


図-1 石狩川舟運ルート

(2) 閘門設置の必要性

上述のルートには、石狩湾新港と石狩放水路の接合部および茨戸川と石狩川の合流部に、それぞれ水門が存在している。石狩湾新港と石狩放水路の接合部にある放水路水門は、茨戸川では農業用水を取水していることや、内水面における漁業者、港内海水の流入に対する水質の保全など環境面に配慮して、茨戸川への塩水の遡上を防ぐため常時は閉じた状態となる。また志美運河と石狩川の合流部に設置されている運河水門は石狩川と茨戸川の水位調整機能を持つ。通常茨戸川は石狩川より水位が高いため、札幌市などを背後の流域に持つ茨戸川は石狩川へと流入する。しかし融雪期や出水時など石狩川の水位が茨戸川より高くなる場合、石狩川から茨戸川への流入を防止するため常時は開いている水門は閉じることになる。

このため各水門が閉じられた場合、各水門の機能を発揮しつつ、これらの区間を船舶が航行するためには、水門の脇に閘門を併設することが必要である。また、河口より55km上流地点には頭首工があり、

このため現状での航行可能範囲の上限となっている。これより上流へ船舶が航行するためには、水門の場合と同様に頭首工の脇に閘門等の設置が必要となる。

3. エアバブルを用いた氷の排除

(1) 結氷による閘門の機能障害

舟運が盛んに活用される欧米などでは水位差の異なる水路を結ぶためや河川を横断する構造物に対し航路を確保するため、塩水の遡上対策等により閘門が設置される事例が多い。

閘門の結氷問題としては、閘室への氷の侵入と、壁面水面部に氷が凍着するビルドアップの現象が欧米の事例^{3),4)}より報告されている。閘室のゲート格納部に氷が侵入するとゲートの開閉が困難となり、ゲート開放時に航路幅が狭まることで船舶の航行に際して危険となり、また船舶が閘門通過に要する時間も長くなる。また、壁面部にビルドアップが発生すると、水位調整時に待機する船舶の係留が困難となる(図-2)。

一方、石狩川舟運において設置を想定する閘門について、現地特有の解決すべき課題として、塩水の遡上対策と、冬期間の結氷対策が挙げられる。本研究ではこのうち冬期間の結氷対策について考察する。

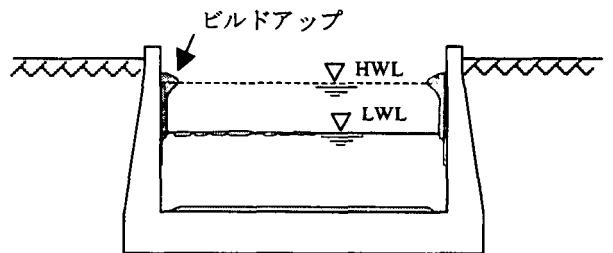
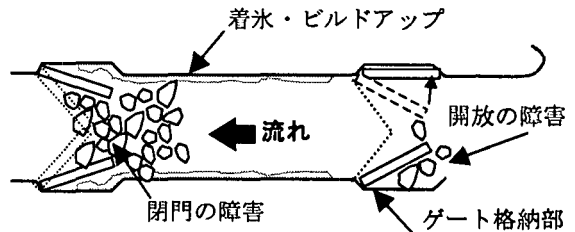


図-2 閘門における結氷障害⁵⁾

(2) 閘室での氷侵入防止方法

北米の事例では、航路に設けられる閘門は図-2に示すようなmiter gateと呼ばれる斜接型のゲートが使用されることが多い。ゲート開放時には船舶の航行を阻害しないよう壁面部を凹型に切りこみ、ゲート

を格納するためのスペースが確保される。しかしながら冬期間に上流より氷が流下すると、流速の小さいゲート近傍や閘室にてトラップされ、閘室に氷が滞積する現象が数多く発生している。この時ゲート格納部に氷が侵入するとゲートが完全に開かないため、船舶の航路幅を狭め、また船舶の閘門通過時間を長引かせる要因となる。

このため北米では閘室における結氷対策が講じられている。方法としては流れを起すことで氷を排除する方法が一般的で、エアバブルを用いたエアスクリーンによる対処方法が最も知られている(図-3)。この方法は水面付近の氷を排除すべき水域に対し、水底に設置した孔を有するパイプに地上からコンプレッサで空気を送りこむことにより、水中から一定量のエアバブルを放出し、上昇流を形成する。水面付近では流れは水平方向へと変化し、水面に浮遊する氷を水平方向へ排除する方法である。また淡水の場合、水の密度は4℃が最大となるため、それより水面における水温が低い場合には、熱供給の効果も併せ持つこととなる。図-4に閘門への適応例を示す。これよりその機能はゲート格納部の氷を排除するものとゲート侵入部の氷を排除するもの、さらに閘門

上流側侵入口での氷を排除するものの3つに分けられる。

エアバブルにより発生する最大平均流速は、一般に次式で表される。

$$\frac{u_{\max}}{\sqrt[3]{gQ_0}} = \alpha \left(\frac{h+h_0}{h_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで、 u_{\max} は最大平均流速、 Q_0 は単位時間・単位長さあたりの空気供給量、 h_0 は大気圧の水柱高さ(10m)、 h はノズルの設置水深、 α は係数で栗林によると1.994、Bulsonによると1.46としている。この無次元最大流速とノズルの設置水深 h との関係は岩垣等⁶⁾により求められている(図-5)。

また泉等⁷⁾の港湾における氷象排除に関する研究によると、適応地点において風速が大きな場合、吹送流の影響でその効果を低減する恐れがあることから氷晶の排除方向と風向の関係、余裕を持った空気量の設置を考慮に入れるべき、としている。

以上北米での実績を鑑み、石狩川舟運の対象閘門に際し氷の侵入対策として、エアバブルを用いた氷の排除方法が可能性を有するが、現地への適応に当たっては、閘門の規模や稼動頻度、並びに現地の水理特性や水温分布、塩分量、風向・風速特性、気象、氷象について配慮した上で、水理模型実験を行うことにより妥当性を検討する必要がある。また石狩放水路地点は流速がない事から、エアバブルを導入しても、ゲート格納部近辺で排除した氷が閘室に留まり滞積すると想定され、閘室の除氷作業を要すると考えられる。

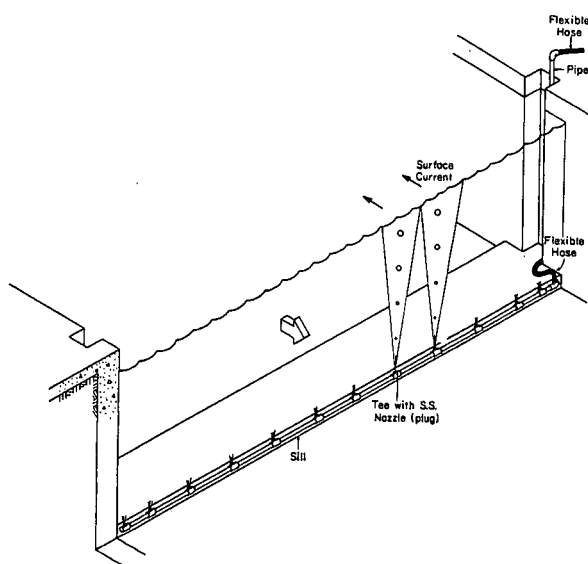


図-3 エアスクリーンによる対処法

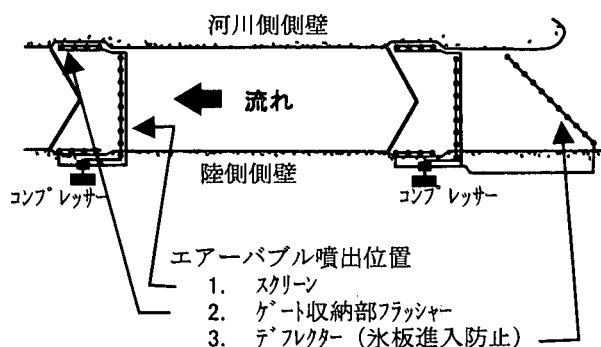


図-4 閘門へのエアバブルの適応例

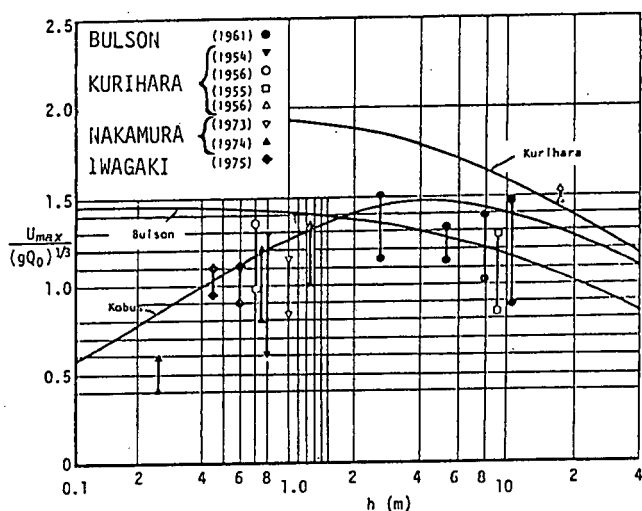


図-5 無次元最大水平流速とノズルの設置水深

4. ビルドアップの対策

(1) ビルドアップの調査

閘門の上流と下流で水位差がある場合、閘室内の

水位もそれに合わせて変化する。そのため上流側の水位で水面が結氷・壁面へ凍着することがある。その後水位の低下に伴い壁面と平行にクラックが発生し氷盤は破壊するものの、一部は壁面へ凍着したままとなる場合がある。この場合水位調整時の船舶の係留を困難とする。北米の閘門における冬期結氷問題としてこの事例が多数報告され、対策が必要とされている。石狩川舟運で想定される航路のうち、閘門の設置が必要となる石狩放水路において著者等が行った結氷調査から、対象地点においては積雪の影響を強く受け、氷厚が最大約80cmにも達し、ビルドアップの発生が予測される。

そのため、2003年2月16日に石狩放水路壁面への氷の凍着状況について目視並びにビデオ撮影により調査を行った。その結果、特に冬期間は水位変動量が少ない現状においても、水路壁面への氷の凍着が確認された。凍着した氷の大きさは、最大のもので水路内への張り出し幅が約80cm程度であり、水路延長方向へは約10mに渡って一塊の氷の凍着が観測された。図-6に示すように、最大突出部から水路壁上端部へかけて膨らんでいる事例が数多く観測された。これは水位変動に伴い破壊した氷盤の一部が壁面へ凍着した状態に対して、水路の上部から日中に融けた融雪水が壁面を伝い、それが冷えることにより体積を増加するためと推測され、また積雪も体積増加の一因と考えられる。さらに水路の壁面を伝う融雪水が冷えることでツララ状の氷の凍着も多数確認されている。

また石狩放水路は流路方向が東西へ向いているため、壁面は南と北向きとなる。このため、晴天時には南向きの壁面は日光の照射により暖められることから、凍着面が緩み氷塊が落下している事例があったのに対し、北向きの壁面では氷塊が壁面に凍着している割合が多く見られたのが特徴的である。また、壁面の裏込め土の暗渠排水口からの排水が壁面へ伝わることで、凍着面が緩んでいる事例も観察された。



図-6 石狩放水路でのビルドアップ事例

(2) 凍着強度試験

ビルドアップに対する対策として、北米で用いられている方法は大別すると、氷を凍着させない方法と凍着力を弱める方法がある。前者の代表例として水面付近にヒーターを埋めこむ方法が、後者は水面付近を塗装する方法がある。ここで著者等は凍着力を低減する方法として、凍着強度の小さな材料を用いる方法を提案する。

一般的に氷の凍着力は氷の凍着強度と凍着面積(氷厚×幅)の積で表される。海水と諸材料間の凍着強度については著者等のうち佐伯等によって系統立てた研究⁶⁾が行われ、氷温、氷厚、杭径、凍着対象物の表面粗さ等に依存することが示されている。このうち凍着力を人工的に低減させる方法としては、材料を変える事で表面粗さを変化させることのみ可能である。

一方、淡水氷と諸材料間の凍着強度に関する研究成果は鋼材・コンクリート・木材など限られた材料の値しか得られていないのが現状である。そのため本研究では淡水氷と各種材料間の凍着強度を求めめるため実験を行った。海水の凍着強度の試験結果から凍着強度の試験方法による違いや、凍着強度に影響を与える要因についての一般的な傾向が得られている。そのため今回は既存の成果に基づき実験条件を設定した。

試験方法は現在のところ統一化された方法がなく、Push out試験、Pull up試験、Twist試験、Shear試験、Tension試験の5種の試験方法が考案されている。これらのうちPush out試験、Pull up試験、Twist試験、Shear試験については種々の条件下における試験の結果から、試験方法の違いが試験結果にほとんど影響を与えないことが明らかとなっている。そのため実際の凍着現象及び破壊現象に合わせた試験方法の採用が望ましいとされる。今回の試験では実験の実施や供試体作成の簡便さから判断してPush out試験を採用し、氷を凍着させた模型杭を下方へ押し込む試験を実施した(図-7)。

また、今回使用した材料は低密度ポリエチレン(LDPE)、高密度ポリエチレン(HDPE)、ウレタン、耐摩耗ウレタン、ポリエステル、レジモルタルの6種類の重防食鋼材による模型杭と、通常の建設材料として使用される鋼材、塗料で被覆した鋼材及びコンクリート(new, old)を加えた計10種の模型杭である。

試験条件は、杭径が10~12.5cm、氷温が-5~-8.2℃、氷厚は8.5~13.9cmである。また凍着強度に影響を与える要素として応力速度、ひずみ速度があり、応力速度は0.01~0.1MPa/s、ひずみ速度は0.1~1.0mm/sの範囲で緩やかなピークを示すが両者ともそれほど大きな影響を与える要因ではないことが知られている。今回の試験ではこれらの範囲なるよう条件を設定した。

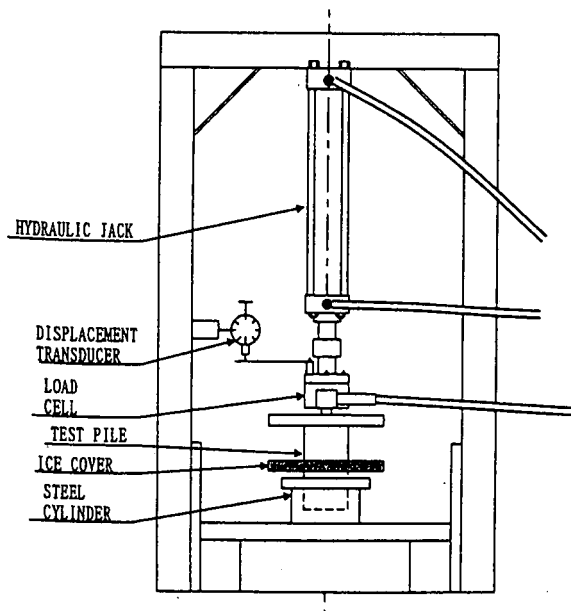


図-7 Push out試験機

(3) 試験結果

試験は各供試体を油圧ジャッキを用いて、氷盤と模型杭の界面で凍着破壊が発生するまで鉛直下方へ載荷する。荷重はジャッキと供試体の間に介したロードセルにより記録した。

一般的に凍着強度は以下の式で示されるため、今回の試験結果より以下の式を用いて凍着強度を算出した。

$$\tau_B = \frac{P}{A} = \frac{P}{h \times \pi \phi} \quad (2)$$

ここで、 τ_B : 凍着強度

P : 凍着破壊時の荷重=押込み力

A : 氷の凍着面積

h : 氷厚

ϕ : 杭径

前述したように、一般的な凍着強度の性質として、杭径及び氷厚に対し一定範囲までの依存性があるが今回対象とするビルドアップは壁面への凍着面積が大きいことから、実設計に使用できるよう依存性のない領域となる。杭径を20cm以上、氷厚を20cm以上の条件に凍着強度の試験結果を換算した。材料別の凍着強度を図-8に示す。これより、通常建設材料として用いられるコンクリートと比べ、低密度ポリエチレン (LDPE) やウレタン、ポリエステルでは凍着強度を低減できる。

また凍着強度と各種材料の表面粗さについて、海氷の場合、凍着強度は表面粗さに対し、 $h > 10^2 \text{mm}$ の範囲においては大きく影響されるが、それ以下の範囲ではそれほど影響を受けず、付着エネルギーや硬度の影響を受けると想定されている⁶⁾。

今回の実験結果を表面粗さ別に図-9に示す。これより淡水氷の凍着強度も、表面粗さが小さくなると、あまり影響を受けないことがわかり、海氷と同様な傾向を示している。

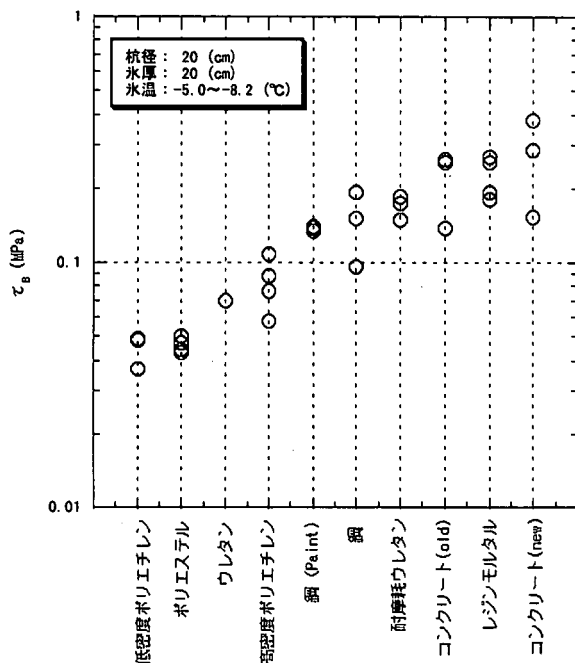


図-8 諸材料と淡水氷の凍着強度

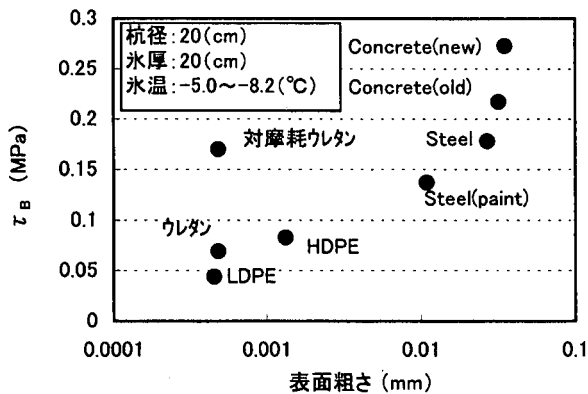


図-9 表面粗さによる淡水氷と凍着強度

(4) ビルドアップ対策への適応

前節の試験結果より、材料別の淡水氷の凍着強度が示され、この結果を開門のビルドアップ対策に適応できる。すなわち、開門の上下流において水位差がある場合には、開門上流側の水位に合わせてこれらの材料で被覆することにより、凍着した氷を比較的小さな荷重で剥離することが可能となる。

加えて、現地調査より南向きの壁面では日光の照射により壁体の温度が上昇することで、凍着面が緩む事例が観測されている。また氷温が高いほど凍着強度は低減できる。そのため熱を吸収しやすくするため、被覆材料を黒色など濃色、暗色など熱吸収の効率の良い配色にすると一層効果を発揮すると想定される。

また、氷を剥離する方法としては人力により棒等を用いて氷に載荷あるいは衝撃を加えることで氷を剥離する方法や、バックホーなど建設機械を用いる方法が挙げられる。しかしながら前者は作業環境が厳しいこと、後者は構造物を傷つけ、表面粗さを増加させることで益々凍着強度を増加させる危険性を有する、等の課題が残る。そのため、ウォータージェットを用いて氷を剥離させる方法がこの点では適しており、加えて温水を用いると最適である。これらの材料に凍着した氷を剥離するために必要なウォータージェットの流量などについては、現在実験を実施中である。

5. 主要な結論

- 1) 閘門の結氷対策のうち、閘室内ゲート格納部への氷の侵入に対しては、エアバブルを用いて、氷をゲート格納部へ侵入させず、流下させる方法が北米で実績を上げている。但し、石狩放水路地点へ適応を考える場合、流れが無いことから排除した氷が滞積することが想定され、閘室において除氷作業が必要となる。またゲート同士の接合面については、氷の存在によりゲート同士が密閉せずに隙間ができると、水密性を確保できない恐れがあることから、ヒーター等で凍着を防ぐ必要がある。
- 2) 氷のビルドアップについての対策として、凍着させない方法、早期に分離する方法が考えられる。壁面と氷を完全に凍着させない方法としてはヒーターを設置する方法が考えられるが、閘門の壁面及びゲートの水面付近に全面に渡ってヒーターを配置することは、コスト面から判断すると実現は困難と考えられる。氷が凍着しても早期に分離させるには、凍着強度の小さな材料で被覆、あるいはコーティングする方法がある。
- 3) 淡水氷と諸材料間の凍着強度に関する室内実験を実施した。これより通常の建設材料に用いられるコンクリートや鋼材と比較して、表面粗さの小さな材料である低密度ポリエチレン(LDPE)やウレタン、ポリエステルでは凍着強度を低減できる。氷の凍着面積(氷厚×幅)が一定の場合、凍着力は凍着強度に比例することから、これらの材料を壁面やゲートの水面付近に被覆することで、小さな荷重で氷を分離することが可能となる。なお、LDPE、HDPE、ポリエステルは加工が難しく、またコンクリートには付着しない。一方でウレタンはこれらと比

較すると加工も容易で、コンクリート・鋼材を問わず付着する。加えて氷に対する対摩耗性も高い。よって現地における施工の簡便さ、作業効率を考えるとウレタンの使用が望ましい。

- 4) 凍着強度は温度に大きく影響を受けることから、被覆材を黒又は濃色・暗色に配色すると、晴天時には日光照射により熱を吸収し、被覆材自体の温度が上昇することから、さらに凍着強度を低減できる。また状況次第では凍着面を融解することも期待できる。
- 5) ビルドアップした氷を除去する方法としてバックホー等の建設機械を用いると、被覆面を傷つける恐れがあり、このことは材料の表面粗さを増加させるため凍着強度の増加を招く。したがって、被覆面を傷つけないような氷を除去する方法としては、ウォータージェットにより氷を除去する方法が考えられる。またこの際、温水を用いるとより効果的と考えられる。

参考文献

- 1) 佐伯浩：舟運構想に夢を、港湾，pp65-70, 1999.6
- 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：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,15,pp89-100, 2003
- 3) G.D.Ashton, Editer: RIVER AND LAKE ICE ENGINEERING, WATER RESOURCES PUBLICATIONS, 1986
- 4) US Army Corps of Engineers: Winter Navigation on Inland Waterways, US Army Corps of Engineers , 1990
- 5) 大塚夏彦，高橋喜一，柴田俊夫，宇佐美宣拓，寺島貴志，佐伯浩：寒冷地における舟運関連施設の課題，寒地技術論文・報告集Vol.18, pp153-160, 2002
- 6) 岩垣雄一：空気防波堤，自然災害科学特別研究成果「海岸における波の制御に関する研究」1977
- 7) 泉列，佐伯浩，後藤克人，浜中健一郎：港湾の結氷防止に対する一考察，寒地技術講演論文集 Vol.4, pp322-329, 1988
- 8) 大槻富有彦，佐々木広輝，杉野文秀，小野敏行，佐伯浩：重防食鋼管に対する海水の凍着強度に関する実験的研究，海洋開発論文集Vol.3, pp167-172, 1987
- 9) 寺島貴志，中澤直樹，原文宏，宇佐美宣拓，佐伯浩：氷盤と構造物との凍着強度に関する研究，寒地技術論文・報告集Vol.14, pp406-409, 1998