

多雪地帯における氷の特性に関する 基礎的研究

STUDY ON THE CHARACTERISTIC OF ICE FORMED IN REGION OF
HEAVY SNOWS

高橋喜一¹・宇佐美宣拓²・柴田俊夫³・松尾優子⁴・植田知行⁵・佐伯浩⁶
Kiichi TAKAHASHI, Norihiro USAMI, Toshio SHIBATA, Yuuko MATSUO,
Tomoyuki UEDA, 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 工修 札幌市役所 (〒060-8611 札幌市中央区北1条西2丁目)

⁵正会員 工修 富士通FIP (〒135-8686東京都江東区青海2-45 タイム24ビル)

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.

In this study, the ice thickness were surveyed at the area that assumed the route of Ishikari inland Navigation. And field test and laboratory test about the flexural strength of snow ice and freshwater ice are carried out.

Keywords: Ishikari River, Inland Navigation, Ice Thickness, Flexural Strength of Ice

1. はじめに

舟運は古くから物流の軸としてその役割を果たしてきた。産業革命以降、舟運による輸送は鉄道、トラック輸送へとシフトしているものの、欧州においては、1992年に北海と黒海を結びヨーロッパ大陸を縦断するライン・メイン・ドナウ運河が建設されるなど、現在においても主要な物流の軸として利用されており、例えばオランダの国内貨物輸送における内陸水運の占める割合は、トン・キロベースで22.7%を占めている(1998)。

北海道の石狩川においては、1888年にイギリス人の港湾技師C.S.Meikにより、内陸部で産出される石炭の積み出しに、石狩川を利用した舟運の構想が検討された。北海道の内陸開発のための調査や入植者の輸送に舟運が利用され、明治5年には汽船も航行したが、その後の鉄道、道路の整備に伴って舟運は衰退した。しかしながら現在、内陸部への輸送コストの低減や、モーダルシフトによるCO₂排出量の削

減など地球環境問題への対応、さらには生活空間や教育の場としての河川の活躍が期待されており、再び舟運に対し注目が集まっている¹⁾。

このような背景に鑑み、著者らは石狩湾新港を中継拠点とした北海道内陸部への物流に石狩川の舟運を活用した物流の可能性について調査している。また石狩川の流況及び橋梁のクリアランスから、現状において満水位時に河口から30km上流の江別市内までは1,000トンクラスのプッシャーバージが航行するための水深・航路幅が確保できる²⁾。

しかしながら石狩川は寒冷地に属し、冬期間は水面が結氷することが知られており、冬期間は船舶の航行のために、砕氷による航路確保が欠かせない。

本研究では砕氷船あるいは砕氷型バージによる砕氷能力を推定する際に重要なファクターとなる、氷厚・氷の曲げ強度について、氷厚については現地調査を、氷の曲げ強度については現地試験と室内試験を行うことで、想定する航路における氷の成長過程と氷の強度特性を把握するための基礎的研究である。

2. 結氷範囲の調査

石狩川舟運で航路の対象と想定される石狩川、茨戸川、志美運河、石狩放水路地点について、2002年12月下旬～2003年3月下旬にかけて結氷範囲と氷厚の調査を計7回実施した(図-1)。石狩川の結氷調査範囲については、河口より約30km上流の江別市内まで、茨戸川の調査範囲は航路と想定する石狩放水路から志美運河までの区間とした。

一例として2003年1月11日、2月8日、3月8日の結氷範囲の模式図を図-2に示す。茨戸川、石狩放水路では3月中旬までは完全に結氷し、3月下旬には茨戸川は全面、石狩放水路は一部を除いて解氷した。

石狩川本流は河口部より約3km上流地点までは、1月上旬を除いて、流速の小さな湾曲部内側など一部を除いては結氷しなかった。これより上流では南より流下する豊平川、千歳川合流部においては期間を通じて未結氷であり、また江別市内の沿川に立地する製紙工場の排水口付近でも同様に結氷は見られなかったが、その他の水面は2月下旬までは結氷しており、3月上旬には概ね全面解氷した。

また、茨戸川と石狩川合流部にある運河においては期間を通じて一度も結氷が観測されなかった。これはこの地点の流速が早い事から、結氷に至らなかったものと考察される。今回の調査結果は、著者等が2000年に実施した同地域の結氷範囲の調査結果³⁾と比較すると、概ね同様な傾向を示している。

3. 氷厚の調査

(1) 多雪地帯における氷の成長過程

多雪地帯における氷の成長過程は、降雪の影響を受けることから、柱状氷の成長過程とは異なることが知られている。降雪が無い場合には氷は結氷が開始してから積算寒度の1/2乗に比例して成長することがStefan等により熱伝導理論を用いて示されている。

一方降雪があるときの氷の成長過程は以下のプロセスにより示される(図-3)。

- ① 水面が冷却されることにより、一定厚の柱状氷が形成される。
- ② 降雪により、その氷盤(柱状氷)上に積雪する。その雪の自重により氷盤は水中へ沈み、雪は水分を含むことで雪泥状となる。
- ③ 氷盤上の雪泥は冷却されることで表面より固結して雪氷を形成し、氷盤全体の氷厚は増加する。
- ④ 降雪により氷盤は水中へ沈み、その雪は雪泥となる。以前の雪泥が完全に固結する前に降雪があると、氷盤は雪泥を内部に含む構造となる。

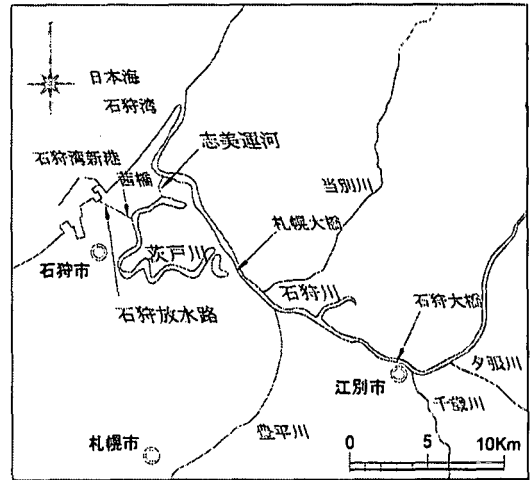


図-1 結氷調査範囲

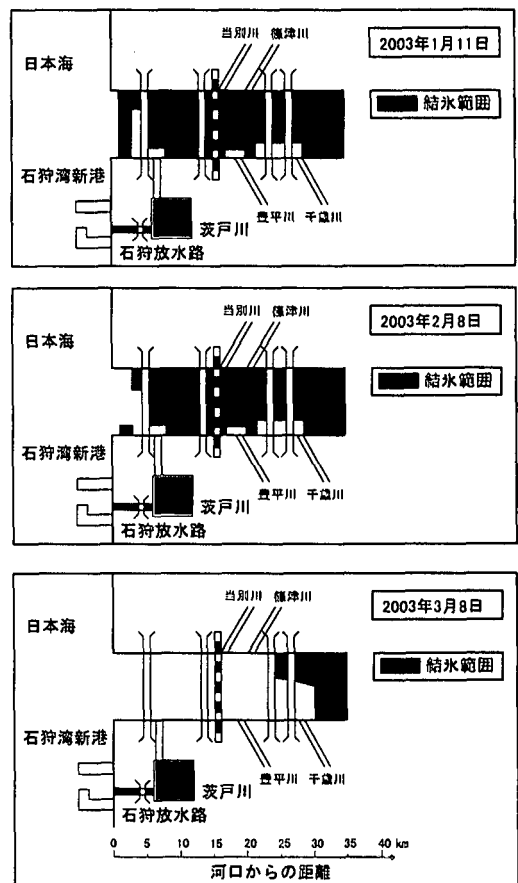


図-2 結氷範囲

あるいは①の柱状氷が形成される以前に降雪があり、雪氷が最初に形成される場合も存在するものの、降雪の度にプロセス③～④を繰り返すことで氷盤全体の氷厚は増加することとなる。

以上より多雪地帯に形成された氷盤の内部構造は複雑である。一定の降雪の度に雪氷と雪泥が互いに層を形成し、全体としての氷厚を増加させる構造を示すこととなるが、その成長過程は一度の降雪量や降雪と降雪の期間、またその間の外気温など、気象条件による影響が極めて大きいものと考えられる。

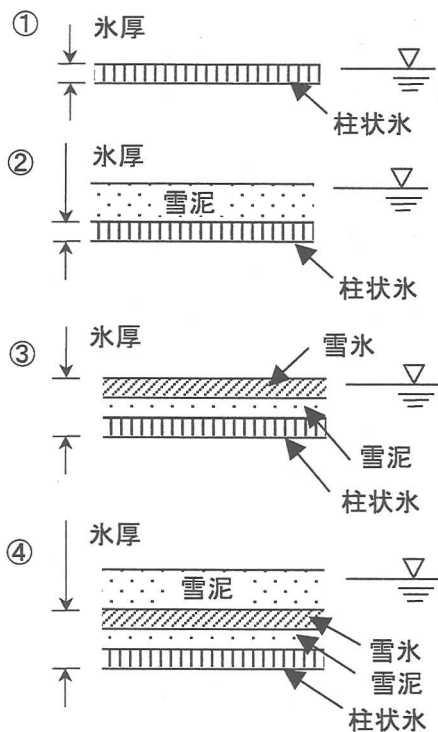


図-3 多雪地帯の氷の成長プロセス

(2) 調査結果

氷厚の計測は結氷範囲の調査と同時に計7回実施し、石狩川と石狩放水路の2地点で計測した。なお、石狩川の氷厚調査地点は2002年12月21日のみ石狩大橋付近で、以降は札幌大橋付近で実施した。石狩放水路は茜橋付近で実施した(図-1)。

対象地域は降雪の影響を受けない橋梁の下部等を除いて全層に渡って雪氷が形成されていた。氷厚が最も厚く成長した石狩放水路では、断面構造は鉛直方向に大別して3層の雪氷を含む雪氷が形成され、さらに各層は何層もの雪氷の層から形成されていた(図-4)。またその断面構造において柱状氷は観察されなかった。これは水面が結氷する前に積雪があると水を含むことで雪泥状態となるが、それが完全に固結する前に次の降雪により水中へ沈下するプロセスを繰り返すことを示唆している。石狩川の氷盤も石狩放水路と同様に雪泥を内部に含む雪氷により形成されていた。そのため今回の氷厚計測では、内部構造に雪氷と雪泥の層から形成される氷盤のトータルの厚さとして計測している。

橋梁の下部では積雪の影響を受けない柱状氷が成長していた。また石狩川においても放水路と同様に概ね雪氷が観察された。

石狩川(雪氷)と石狩放水路(雪氷、柱状氷)の氷厚の調査結果を図-5~7に示す。石狩放水路は流速がほとんど無く、合流する水路も無いため流れの影響を受けず、湖沼に近い条件下で水が厚く成長する。一方石狩川本流は、前節に記述したように支流との合流や温排水の影響など周辺環境の影響を受け、

期間内で氷厚の変動が見られ、かつ放水路と比べ早期に解氷する。

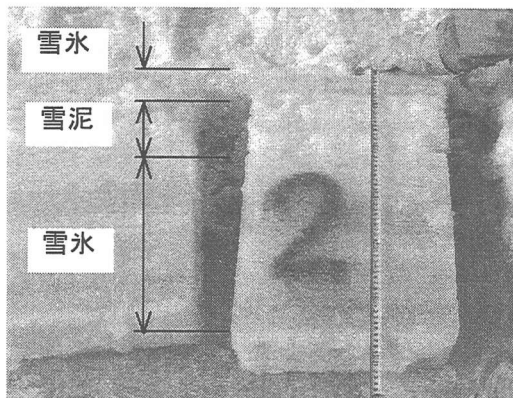


図-4 氷盤の断面構造(雪氷)

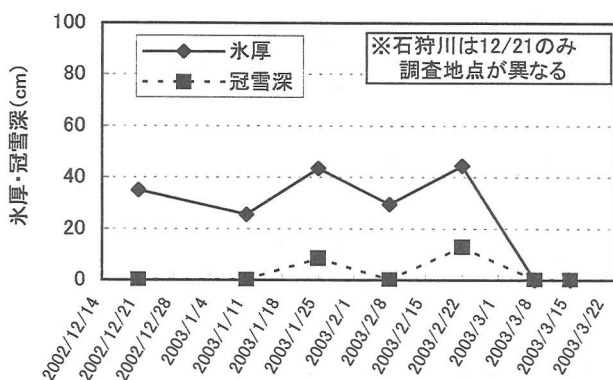


図-5 石狩川氷厚調査結果

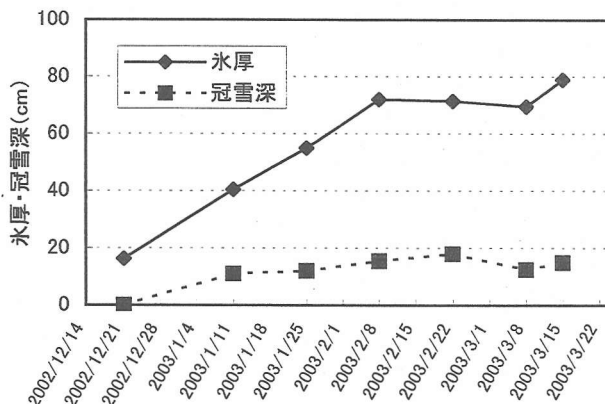


図-6 石狩放水路氷厚調査結果(雪氷)

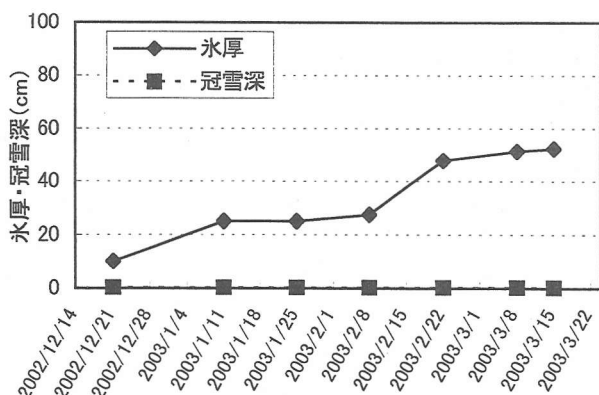


図-7 石狩放水路氷厚調査結果(柱状氷)

Stefanの理論式による氷厚と石狩放水路における氷厚を図-8に示す。柱状氷の氷厚は比較的良い一致を見る。また、桜庭等⁴⁾によると、氷盤上に降雪があると雪層の断熱性により氷の成長は抑制されることが知られているが、放水路の雪氷は逆に理論値を上回る。従って多雪地帯における氷の成長は、Stefan等の積算寒度による理論式を直接的に用いて氷厚を推定することは出来ないといえる。

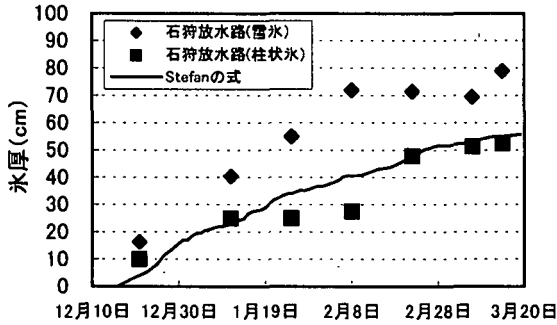


図-8 氷厚の理論値と実測値の比較

4. 氷の曲げ強度の現地試験

(1) 試験条件

現地における氷の曲げ強度の特性を把握するため、2003年2月15～16日にかけて現地試験を実施した。試験の実施地点は氷盤の形成状況や、作業の安全性等を考慮して、氷が厚く成長し氷盤下の流速が非常に小さな石狩放水路内で実施した。一般的に氷の曲げ強度の試験方法は、①片持ち梁試験、②3点曲げ試験、③4点曲げ試験、の3種類が代表的であるが⁴⁾、現地の気象・氷象を反映させるため、片持ち梁試験を採用した。载荷方法については砕氷船による破壊を想定し、供試体先端部を鉛直下方へ押し込み、氷盤表層から破壊を発生させるような方法とし、油圧ジャッキを用いて鉛直下方へ载荷した。同時にロードセルを用いて氷の変形に伴う荷重を、ダイヤルゲージを用いて鉛直方向の変位量を計測し、氷盤の曲げ強度、弾性係数をそれぞれ求めた。

試験サイトは水路の左岸側(サイト1)、右岸側(サイト2)に1箇所ずつ設け、チェーンソーを用いて供試体を作成した。ここでサイト1は水路壁面や上方の緑地帯の影響で日陰になることが多い場所であり、サイト2は直射日光が当たる場所である。氷厚については各サイトにおいて供試体近傍の2地点で計測した結果、それほど差がなかったことから各々の平均値(サイト1: 62cm, サイト2: 55cm)を用いた。供試体の寸法については、幅は約37cm, 長さは約230cmとし、供試体の高さ h に対する供試体の幅 b , 長さの L 比について、曲げ強度に影響を与えない範囲に関する前田等⁵⁾の研究成果に基づき、 $0.5 < b/h < 1.0$, $3 < L/h < 5$ の範囲とした。実験時の気温は $-1.0 \sim -3.2^{\circ}\text{C}$, 氷温は -0.5°C であった。

(2) 試験結果

供試体の破壊に至るまでの荷重の時系列は、最初に小さなピークを迎え、次に最大のピークを迎えるパターンと(図-9), 小さなピークが幾つか連続するパターン(図-10)に分類される。载荷時の氷盤の応力分布状態と、氷盤の成層状況を踏まえると、前者では概ね3層に大別される氷盤の断面構造のうち、下層部が固結している状態であり、後者は下層部の中に非固結部(雪泥)の層が幾層か含まれていたことを示している。

図-11に示す試験結果より、サイト2では強度は概ね一定であるが、サイト1では強度が2グループに分かれ、1オーダー近くの違いを有する。このことは氷盤下層部が固結している供試体と完全には固結していない供試体が存在し、サイト1の結果から判断するとその分布は一様ではないと想定される。いずれにしても砕氷能力の推定時には安全側から見て、固結時の必要砕氷力を見こむ必要がある。

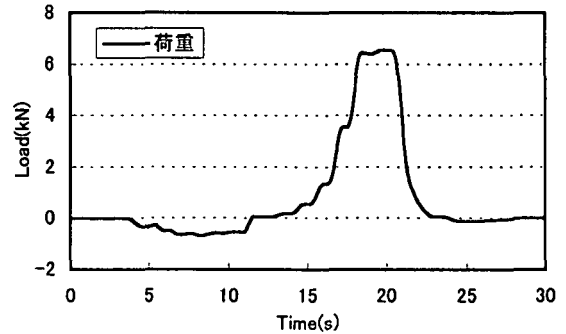


図-9 荷重時系列その1

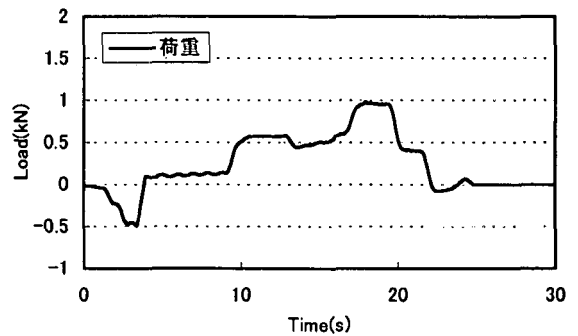


図-10 荷重時系列その2

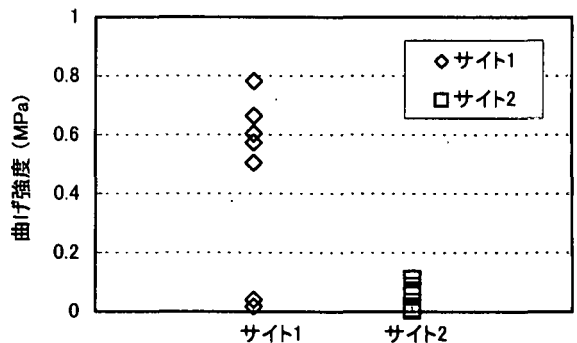


図-11 曲げ強度現地試験結果

5. 氷の曲げ強度の室内試験

(1) 試験条件

3章に記述したように現地の雪氷の断面構造は大別して3層に構成されていたことから、層ごとの強度特性を把握するため、現地の氷盤を切出して層別に室内試験を実施した。室内試験では通常3点曲げ試験と4点曲げ試験が実施される。両者の特徴としては3点曲げ試験が供試体スパン中央部での破壊を起させるのに対し、4点曲げ試験は供試体に一様な曲げ応力を発生させ、供試体の最も弱い断面で破壊を生じさせる試験方法であり、例えば供試体に微小なクラックが入っていた場合、実際の強度よりも低く見積もられる恐れがある。今回の試験は砕氷能力を推定するための基礎データの取得であり、強度が実際よりも低く見積もられることは砕氷能力の推定上危険となるため、試験方法は3点曲げ試験とした。また合わせて橋梁下部で形成された積雪の影響を受けない柱状氷についても現地の氷盤からチェーンソーで供試体を切出して室内試験を実施した。

雪氷の断面構造は上層と下層が固結しており、中層が雪泥の弱層であった。このため試験は上層と下層の試験とし、下層は氷厚が厚かったことから、2層に分けて実施した。また柱状氷も氷厚が厚かったことから、同様に2層に分けて試験を行った。供試体寸法は現地試験と同様に寸法の効果を考慮して、雪氷でスパン40cm、氷厚8~17cm、幅10~15cm、氷温は-2℃、淡水氷でスパン80cm、氷厚20~22cm、幅18~20cm、氷温は-2、-5℃で実施した。

(2) 試験結果

図-12, 13に示すように、雪氷を形成する層のうち、上層では曲げ強度は0.3~0.6MPa程度、下層(上部)では0.1~0.3MPa程度、下層(下部)では0.1~0.5MPa程度と、上層が下層より大き目の強度を示し、下層内でも強度に差が見られる。また弾性率と強度の比 E/σ_f は、上層で概ね400~1,200、下層(上部)で概ね200~600、下層(下部)で概ね200~600である。

柱状氷については図-14, 15に示すように、上層、下層においてさほど強度の違いは見られず、0.3~1.2MPaと強度に多少バラツキが出た。また、 E/σ_f は概ね500~3,000の範囲であった。著者等が過去に実施した他の実験結果⁷⁾と比較して強度的にはやや小さ目の値となっている。

以上より室内試験結果を概括すると、雪氷の方が淡水氷よりも曲げ強度が小さい傾向が見られる。また航路の大半を占める雪氷の曲げ強度から、砕氷船・砕氷型バージの推進力を推定することが可能である。

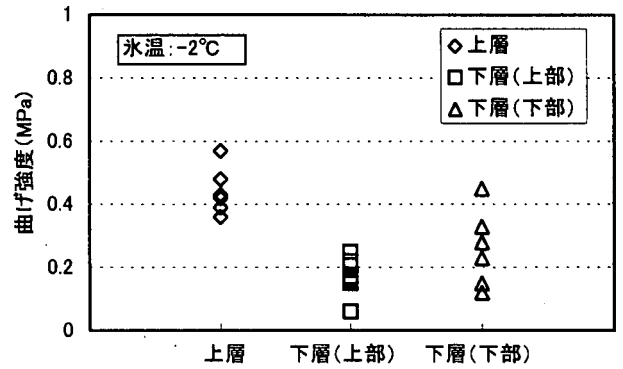


図-12 曲げ強度室内試験結果(雪氷)

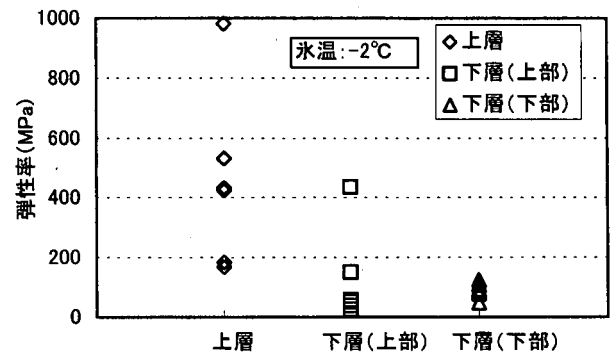


図-13 弾性率室内試験結果(雪氷)

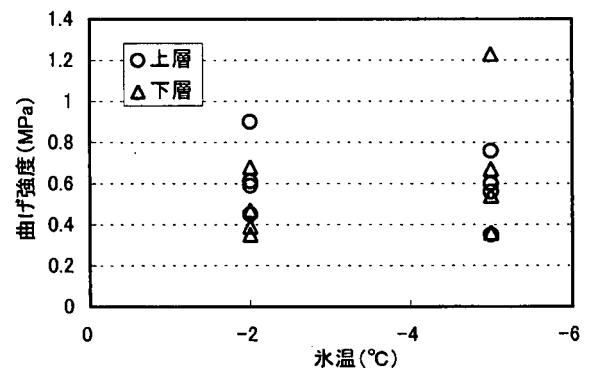


図-14 曲げ強度室内試験結果(淡水氷)

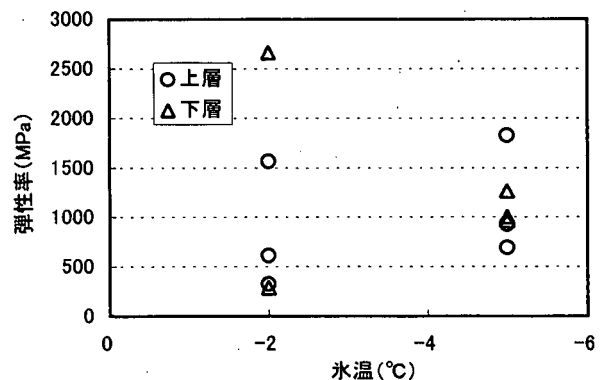


図-15 弾性率室内試験結果(雪氷)

6. 航路砕氷の考え方

砕氷船あるいは砕氷バージが平坦水中を運行するためには、次式に示される抵抗力 R を超える推進力を持たねばならない。

$$R = C_b \cdot \sigma_f \cdot B \cdot h + C_s \cdot \rho \cdot g \cdot B \cdot h^2 + C_i \cdot \rho \cdot B \cdot h \cdot V^2 + C_f \cdot \rho \cdot g^{1/2} \cdot B \cdot h \cdot V^{3/2} \quad (1)$$

上式中、 C_b 、 C_s 、 C_i それに C_f は係数であり、 σ_f は曲げ強度、 h は氷厚、 B は破壊される氷盤の幅、 V は船速、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度である。今回の氷厚調査結果及び氷の曲げ強度に関する実験結果を用いれば、石狩川舟運航路における、砕氷船や砕氷型バージの推進力を決定できる。

ここで、石狩川舟運で想定される航路は流れのある航路（石狩川・志美運河）と流れのほとんどない航路（茨戸川・石狩放水路）に大別できる。流れのある区間については、砕氷により発生する氷は流れによって流下する。従って砕氷後の除氷作業は不要であるが、下流の湾曲部や川幅縮減部、河床勾配の急変する地点において ice jam が発生する危険性がある。また流れの無い区間においては、砕氷後に破壊された氷が流下しないことから、再凍結を繰り返すことが予想される。そのため、砕氷後の除氷方法について検討が必要であり、本研究の今後の課題となる。

7. まとめ

- 1) 結氷範囲調査の結果、石狩川は河口より 3～4 km 付近まではほとんど結氷が見られない。KP5.5 地点の石狩河口橋より上流では概ね全面結氷し、氷厚は 40cm 程度に成長した。また、積雪の影響を大きく受け、氷厚全層に渡って雪氷であり、柱状氷は観測されなかった。また、南方より流下する豊平川、千歳川との合流部及び温排水の流出部においては結氷が確認されなかった。
- 2) 石狩放水路、茨戸川についても石狩川と同様に雪氷が成長し、放水路における氷厚は最大約 80cm に達した。橋梁下部においては、積雪の影響を受けないことから柱状氷が形成され、氷厚は約 50cm であった。また茨戸川と石狩川を結ぶ志美運河地点では、ほとんど結氷が確認されなかった。これは志美運河地点における流速が大

きなことに起因するもとの考えられる。よって、砕氷船あるいは砕氷型バージの能力は茨戸川あるいは放水路の氷の条件で決定される。

- 3) 石狩放水路地点における氷盤の曲げ強度を求めるために、現地にて雪氷の片持ち梁の供試体を作成し、曲げ試験を行った結果、その供試体破壊時の最大荷重はサイト 1 での結果は 2 グループに分かれた値を示した。この結果より、現地氷盤の断面構造は固結していない層を含むものと、完全に固結しているものがあるものと考察される。現地における砕氷能力を推定する際には安全側から見て、完全に固結した状態を想定すべきである。
- 4) 室内にて持ちかえった雪氷・柱状氷の曲げ試験を実施した。試験の結果、雪氷(上層)では曲げ強度は 0.3～0.6MPa 程度、雪氷(下層)では 0.1～0.5MPa 程度、柱状氷では 0.3～1.2MPa 程度の値が観測され、航路の大半を占める雪氷の曲げ強度は柱状氷に比べ低い値が示される。このことは雪氷が形成された航路で船舶が航行する際の必要砕氷能力は、柱状氷が形成された水域を航行する船舶に比べ低減できることを示している。また、これにより砕氷船あるいは砕氷型バージの推進性能を決定できる。

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) 兵藤誠，中野涉，古屋温美，佐伯浩：寒冷地舟運の技術的課題，寒地技術論文・報告集 Vol.16, pp.525-530, 2000
- 4) 桜庭章彦，泉列，佐伯浩：氷厚の増加に及ぼす積雪の効果について，土木学会北海道支部論文報告集，pp309-312, 1984
- 5) G.D.Ashton, Editer: RIVER AND LAKE ICE ENGINEERING, WATER RESOURCES PUBLICATIONS, 1986
- 6) 前田智春，笹本誠，堺茂樹，石田宏，平山健一：試験条件をパラメーターとした氷圧縮及び曲げ強度の表示法について，寒地技術講演論文集 Vol.5, pp364-369, 1989
- 7) 大島香織，本田秀樹，正木智，佐伯浩：フラッキング時の氷盤の耐荷力について，寒地技術論文・報告集 Vol.13, pp451-455, 1997