

流水群と防氷施設の相互作用に関する 水理模型実験

MODEL EXPERIMENT ON INTERACTION BETWEEN SEA ICE FLOES AND ICE CONTROL FACILITY

木岡信治¹・蒔田俊輔²・山本泰司¹・森昌也³・竹内貴弘⁴

Shinji KIOKA, Syunsuke MAKITA, Yasuji YAMAMOTO,
Masaya MORI and Takahiro TAKEUCHI

¹正会員 工博 (独) 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

²正会員 工博 日本データサービス株式会社 (〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目1-14)

³正会員 (独) 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

⁴正会員 工博 八戸工業大学大学院教授 環境建設工学科 (〒031-8501 八戸市妙大開88-1)

Ice booms were installed at the entrance of Lake Saloma to prevent sea ice moving into the lake, which had caused serious damage to aquaculture facilities. We performed the model experiments on interaction between sea ice floes and an ice control facility such as the ice boom in order to develop an appropriate design method. Loads acting on ice booms did not depend greatly on the shapes of ice floes and the conditions of side walls (flat or not) of the water channel, considering variations of the loads under the same test condition. Also, we developed an analytical solution for the transmitting ice force into downstream, which was taken the influence or restriction by side walls or ice floes themselves into consideration. We confirmed that the solution could represent tendencies of the experimental results.

Key Words : Sea ice, Ice boom, Ice control, Ice force

1. はじめに

毎冬、北海道オホーツク沿岸に流氷が来襲し、様々な被害を及ぼしている。我が国においては、特に漁業や海上交通などに与える影響が大きいのが特徴的であるが、近年では様々な対策や耐氷設計がなされつつある。特にサロマ湖では、過去に多発していた湖内への流氷流入によるホタテなどの養殖施設の被害を防止するために湖口部に防氷施設（アイスブーム）が設置されており、今後も能取湖口など沿岸部での防氷施設の設置が計画されている。過去に、水理模型実験が精力的に行われ^{例えは 1)2)3)}、サロマ湖の防氷施設の設計に大きく貢献した。しかし、本来、非連続体である流氷群と構造物との干渉が非常に複雑であり、特に、湖口部の形状・地形、氷群下面凹凸等に大きく影響を受け、まだ不明な点が多い。その経済的な設計と機能評価を可能とするために、氷群の挙動や作用氷力をさらに精度良く推定することが要請されている。このため、著者等は、非連続体である流氷群の作用を受けるアイスブームを始めとした氷海構造物の合理的設計法の構築を目的として、模型実験、解析的検討（抗力や流れの検討含む）、個別要素法（DEM）を応用した数値計算といった幾つかのアプローチより研究を行っている。

本研究では、このうち、アイスブームに関する過去の実験を拡張した水理模型実験を行い、種々の条件の違いによるアイスブームへの荷重伝達特性や氷群の挙動などについて述べる。また、氷群の壁面による拘束を考慮した下流への伝達荷重の理論解の導出を試み、実験値と比較した。

2. 実験方法

図-1 に示すように、幅 2m×有効長 10m の木製水路（水深約 11cm）を設置、水位差（上流側で水を連続供給）を利用して流れを発生し、図-2 に示すように、密度と摩擦係数が実物の氷に近い模擬氷（ポリプロピレン）を流下させて模型アイスブームでトラップさせた。実験縮尺は、能取湖口に設置が計画されるアイスブームと航路の規模、および実験室の規模を勘案し、1/100～1/150 とした。なお模型アイスブームはサロマ湖での下部ネット付特殊型とし、ネット、フロート（発砲スチロール性のひも）、ネットとフロートを取り付ける釣糸、それから錘から構成される。これを水路中央に1スパン、その両側に半スパンのブームを設置した。模型氷（氷群）の投入地点はアイスブーム設置位置から上流側に約 6.5m 地点とし、所定の密接度となるよう、できる

だけ均一に氷を水面に供給した。氷群供給方法は、できるだけ水面の動揺や波が発生することのないよう、水面付近から静かに人手により供給した。氷の供給量は、密接度（または被覆率；ある水面に氷の占める面積の割合）で 10%程度を目標としたが、成果は 6～24%(平均 13%)であった。また個々の実験では、最大被覆長(2m および 4m)を設定し、それを各被覆段階に分けた（2m までは 50cm 間隔、それ以降で 1m 間隔）。各被覆段階での長さ達したら氷群の流下をストップし、そのまま 10 分間静止させ、所定の最大被覆長までこれを繰り返した。

次に計測項目としては、アイスブームの張力と支柱に作用する荷重、水路内流速、それに水位である。アイスブームの張力測定箇所は 4 カ所で、アイス

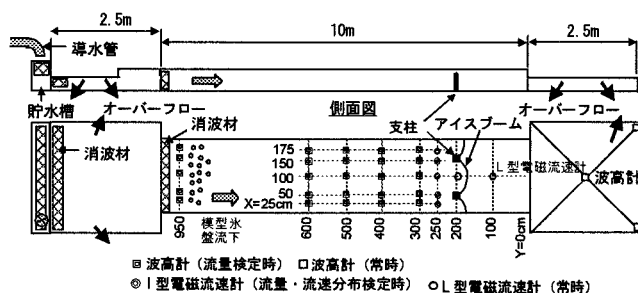


図-1 アイスブームの実験装置の概要図

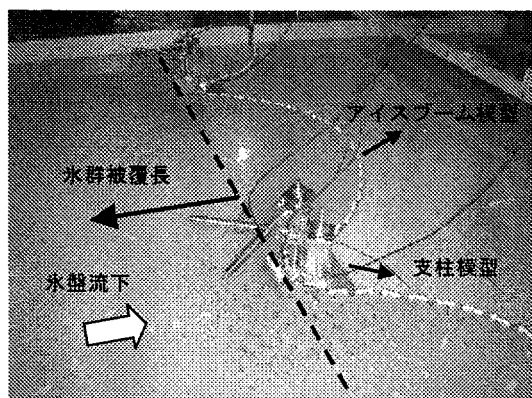


図-2 実験風景

ブームに取り付けたケーブル（前述の釣糸）を、滑車を介して、支柱背後にある小型ロードセル（共和製微小荷重ロードセル；LVS-200GA, 2N）に接続することにより計測した。また水位と流速は、図-1に示す地点に計測器を配置することにより測定した。まず常時計測したものは、L 型電磁流速計により、2 つの支柱を結ぶ中間およびその下流 1m 地点での流速（およそ水深の半分的位置、水路床より 6cm）、さらにその下流部における水位である。また流量（断面平均流速）検定時（常時ではない）では、代表的なケース（氷盤タイプ：円盤，氷群被覆長 4m）において、支柱より上流側 0.5m での流速分布（横断・鉛直方向）と水位を計測した。ただし、この場合、一つの流速計を各ポイントに順次に移動しつつ、流速分布を計測した。この理由は、流速計の不足もあるが、水深がたかだか 10cm の条件下、多数の流速計を同時に使用することは、流況や氷群の動きに影響を与えるおそれがあり、技術的に困難であったため、詳細な流量や流速分布の常時計測は行わず、分離して行ったわけである。この流速分布より断面平均流速（流量）を推定し、その時の平均水位との関係式（いくつかの流速条件で）を予め求めた。各実験での断面平均流速（流量）は、その時の水位を用いて、その関係式から逆算して推定した。

次に、実験条件を図-3 に示す。実験で変化させたものは、流速（目標 0.05m/s～0.15m/s）、氷盤タイプ（標準的なサイズは 3cm、；円形，正方形，混合）、支柱間隔(0.5m, 1m)、水路壁面（フラット，凹凸）のタイプである。氷盤タイプは、厚さ 0.5cm をもつポリプロピレン盤で、図-3 に示すように、円盤（直径 3cm）、正方形盤（1 辺 2.7cm）、正方形混合（一辺が 2.7cm および 1cm の正方形盤の混合）の 3 タイプ用意した。水路壁面の状態の「フラット」とは木製の水路に何も加工しない場合、「凹凸」とは、図-3 に示すように、直径 3cm の半円柱を水路壁面に取り付けた状態を示す。この場合、壁面が消波ブロックや矢板など凹凸である場合を想定し、ごく近傍の氷群を拘束あるいは壁面に付着した場合に相当した場合とも見なせる。

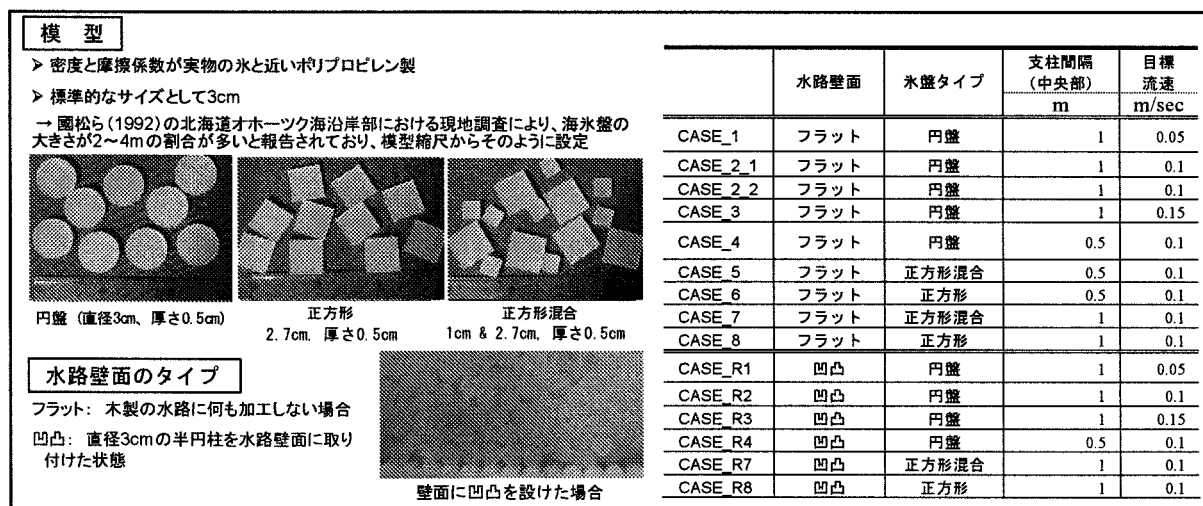


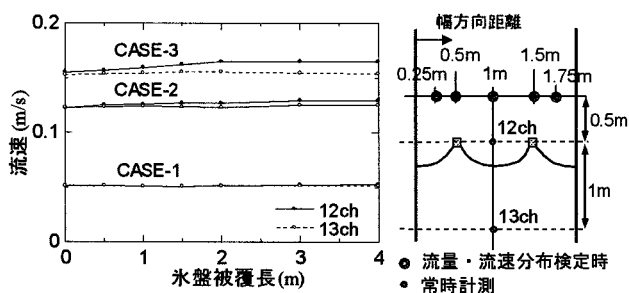
図-3 主な実験条件

3. 実験結果

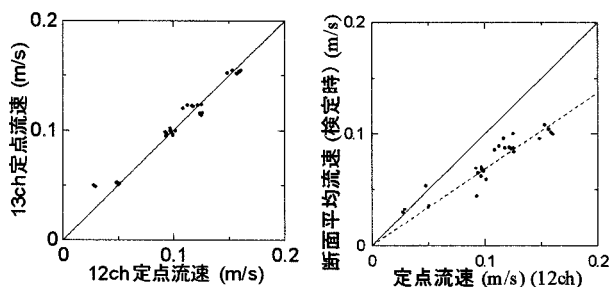
(1) 実験時の流速特性に関する検討

まず流速の鉛直分布をみると、水面には氷群が存在し、その影響を受けるため、ある水深で流速が最大値を示した。この場合、最大流速を示す位置は水路床寄りであったことから、水路床より被覆氷群の粗度の方がやや大きいことが推察された。

次に図-4(a)には、定点流速の氷群被覆にとまらう変化の例を示した(流速は水路床より6cm)。支柱間での12ch流速(同図(a)右参照)はやや増加気味であったが、大きな変化はなかった。また、ブームの下流側での13ch流速(自由水面)では概ね一定であった。一般に、氷群被覆長が大きくなれば、水路抵抗によって流速が減少すると考えられるが13chの結果を見る限りでは、この程度の被覆長では大きな損失はないものと考えられる。しかし、氷群被覆によって鉛直方向の流速分布は大きく異なる。12chで流速がやや微増したのは、被覆長に応じて、流速の鉛直分布がやや変化したためと思われる(境界層厚の変化、最大流速を示す位置が水路床側へ変化するなど)。同図(b)には、定点流速の0~4mの被覆の平均値をとった12chと13chの比較であるが、この場合、ほぼ1:1となっていて両者は等しくなった。この13chの位置でも、12chの流速分布をやや引き継いでいる可能性がある。最後に、同図(c)には前述の方法による断面平均流速(被覆長4m時)の推定値と定点流速(12ch)(0~4m被覆の平均値)との比較を示した。この場合、定点流速の計測位置は床から6cmで、流速が最大となる地点に比較的近いことから、断面平均流速よりは大きな値となり、その1.5倍近くとなっている。同図(c)から、常時計



(a) 流速(定点計測)の氷盤被覆長による変化の例



(b) 各定点流速(12ch&13ch) (c) 断面平均流速(被覆長0~4m被覆の平均)と定点流速(12ch)(0~4m被覆の平均)との比較

図-4 実験時の流速特性の例

測の定点流速と前述の方法で推定した断面平均流速とはバラツキはあるものの、よい比例関係が認められたので、この方法は妥当であったと考えられる。

(2) アイスブームに作用する伝達荷重の正規化と理論値との比較

図-5には氷群被覆長に応じたアイスブームに作用する張力の例(CASE-2-1)を示した。なお、この場合荷重の代表値として、各被覆段階における荷重の定常値(静的荷重)とした。厳密に言えば、氷群がアイスブームあるいは先行の氷群に接触するときに、衝突的な荷重が発生するが、それは氷の構造物の物性、形状により大きく異なる。本実験では、氷の物性・形状を正確に与えることは困難、それにアイスブームのフレキシブル性能(移動・伸縮)にも大きく依存すること、さらには、本実験では、氷群投入による水面の動揺や波による影響がややあるため、本検討においては、ひとまず、このピークの荷重あるいは動的荷重は考えず、定常値(静的荷重)のみを考慮することとしている。

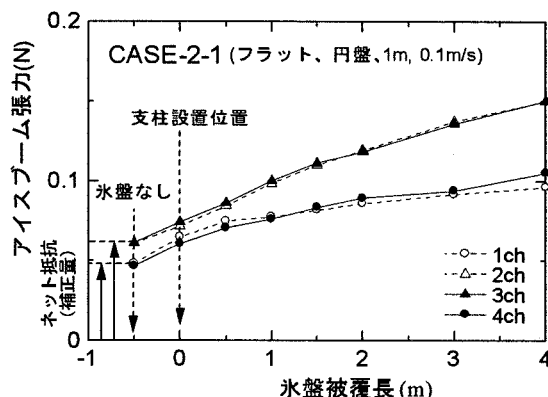


図-5 氷群被覆長に応じたアイスブームに作用する張力の例(CASE-2-1)

図を見れば、張力は被覆長とともに増大していること、氷群がない場合でも張力は0ではないことが分かる。まず、後者の原因はアイスブームの流体抵抗であり、氷群のみによる荷重を考慮する場合にはこの抵抗を差し引いて初期値補正をする方がよいと考えられるので、以後は補正後の荷重について考える。また被覆長に応じた荷重の増大は、物体抗力、閉水路における壁面せん断力の概念から説明できる⁴⁾。それによれば、抗力は氷群下の流速の2乗に比例して大きくなること、また、被覆長増大による摩擦抵抗による流速減少や、境界層厚の発達、それに側壁の影響などにより、抗力は被覆長に正比例して増大するわけではないことが示される。図からも推察されるように、本実験結果でも完全な正比例ではなく、やや増加率が減少する傾向が見られる。しかしながら、境界層の発達は氷群縁から意外にも早く定常に落ち着くこと、それに、被覆長があまり長くない場合には、概ね直線近似可能であることが示されてい

る⁴⁾。本実験においても被覆長があまり大きくなく、事実、顕著な流速減少は見られなかったため、荷重は速度の二乗に比例、被覆長の1乗に比例すると仮定し、さらに圧力抗力を考慮した次式を採用した³⁾。

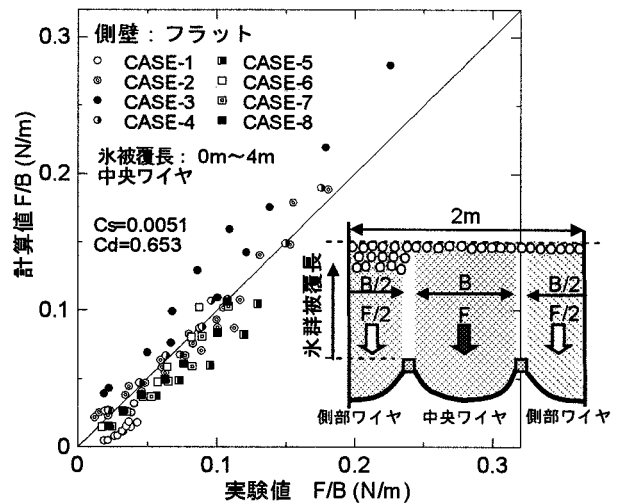
$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_s A V^2 + \frac{1}{2} \rho_w C_d h' V^2 \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2} \rho_w B (L C_s + C_d h') V^2$$

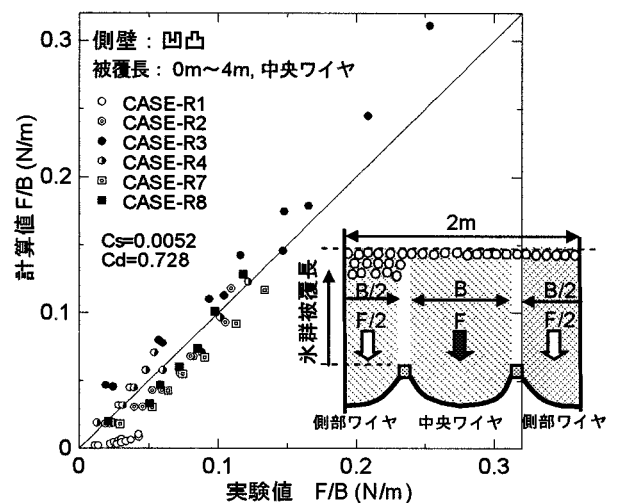
ここに、 $A (=BL)$ は氷の被覆面積、 h' は喫水深、 C_s と C_d はそれぞれ、摩擦(抗力)係数と形状係数(圧力抗力)であり、平板の場合、上田等(1992)の研究³⁾により、それぞれ、0.007、0.6 としている。

次に、上式で得られた計算値と実験で得られた荷重との比較を行う。その前に両者を比較しやすいように実験値を若干加工した。まず、図-6 に示すように、張力をアイスブームの傾斜角度を考慮して流下方向の力に換算し、中央アイスブーム(ワイヤ)に作用する流下方向の荷重、および両側アイスブーム(ワイヤ)に作用する流下方向の荷重として2つの力に集約し、各アイスブームの幅 B で除した。さらに流速の代表値として $12ch$ 流速を用いた。図-6 にはすべてのケースにおける中央アイスブームに作用する荷重(流下方向)の関係の計算値と実測値の比較を示す。計算値と実験値にはよい直線関係が見られ、上式が本実験条件にあまり依存せず、アイスブームへ作用する荷重特性を概略表すのが分かる。逆に言えば、後述するように、本実験条件の違いが及ぼす荷重特性への明確な影響はあまりないことが推察される。ただし、後述するように側壁の影響や流速減少が生じる両側アイスブームに作用する荷重については中央アイスブームより小さく、この限りではないが、後述のように側壁の影響を考慮した解析解が導かれる。また、後述の図とも合わせて考えると、この荷重はアイスブームの幅で単に除したものであるが、実験条件に支柱間隔が異なる(したがってアイスブームの幅)場合もあることを考えると、荷重は荷重を受け持つアイスブームの幅にも比例すると考えることができる。また、実験値と計算値との関係が 1:1 となるように摩擦抗力 C_s 、圧力抗力 C_d を推定すると、側壁がフラットでは、 $C_s=0.0051$ 、 $C_d=0.65$ 、凹凸では $C_s=0.0052$ 、 $C_d=0.728$ となった。まず後述のように、側壁がフラットと凹凸では大きな違いはないことが推察される。上田等³⁾の係数と比較すると、圧力抗力係数については、おおそ同程度の値となったが、摩擦係数 C_s はやや小さい値となった。上田等³⁾の場合、平板を曳航して算出したものであって、本実験のように円盤の氷群の集合体が静止して、流れが存在しているような状況下では異なるほか、代表流速の取り方の違いによるものと思われる(上田等では曳航速度を採用)。正確な断面平均流速を直接計測できるのであれば、それを採用すべきであると思われる。

次に、図-7 には流速とアイスブームに作用する荷重(流下方向)との関係の計算値と実測値の比較



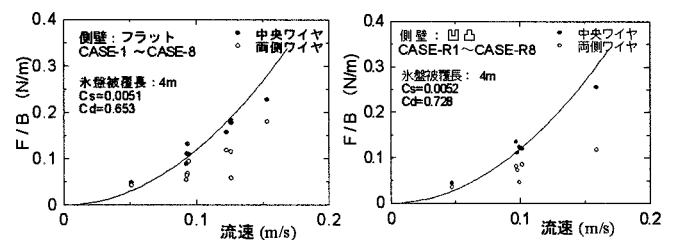
(a) 側壁：フラット (被覆長0~4m)



(b) 側壁：凹凸 (被覆長0~4m)

図-6 アイスブームに作用する荷重(流下方向)の計算値と実測値の比較(中央ワイヤ)

例を示した。なお、この場合の計算値は、前述で推定された抗力係数を用いている。中央アイスブームについては、計算値とよい一致が見られ、荷重が流速の2乗に比例して増大しているのが分かる。一方、両側アイスブームは側壁の影響や壁面近くの流速減少を受けて、中央アイスブームよりも荷重減少が見られ、この場合の計算値に合わなくなっているが、



(a) フラット (被覆長4m)

(b) 凹凸 (被覆長4m)

図-7 流速とアイスブームに作用する荷重(流下方向)との関係の計算値と実測値の比較例

速度の2乗には増加しているようである。以上より、アイスブームに作用する静的荷重は、氷群被覆長とともに増大すること、圧力抗力と摩擦抗力から成ること、荷重は速度の2乗に概ね比例することが示され、平板を台車で曳航することにより実施した上田等³⁾の実験と同じ傾向となった。単純な境界条件の場合には、その物体抗力の概念や実験的傾向から導出された氷力推算式(1)は本実験値の傾向を概ね表し、その妥当性を確認した。また荷重は、それを受け持つアイスブームの幅に概ね比例すると考えることができた。

(3) 実験条件による違いが及ぼすアイスブームに作用する伝達荷重への影響（各ケース間比較）

図-8には、各アイスブーム（中央・両側ワイヤ）に作用する流下方向荷重の実験条件の違いによる比較例を示したが、紙面の都合上、そのいくつかの例を示すにとどめる。なお、前述のように、荷重は、速度の二乗、アイスブームの幅 B 、流体密度 ρ 、で除して正規化した荷重（流下方向）である。まず全体に共通して言えることは、前述の理由により、荷重は被覆長に対して正比例して増大するわけではないが、この範囲では、概ね直線的に増大している。また、被覆長0の場合、つまり、支柱より下流へアイスブームによって囲まれた領域に氷群がトラップされた場合、この場合は氷群の摩擦抗力はわずかであると考えられるので、この荷重のほとんどは圧力抗力成分（形状抵抗）であると解釈される。氷群の被覆長が大きくなれば、その抗力は相対的に小さくなることが推察される。また、両側のアイスブームに作用する荷重は、側壁の影響を受けて、中央アイスブームのそれよりも小さくなる。また、側壁近傍では流速減少が生じているのも一因と思われる。

次に、ケース間の比較であるが、図中の矢印は比較対象を示しており、それぞれ、同一ケースでの比較（同一ケースでのバラつきをみるもの、いくつか

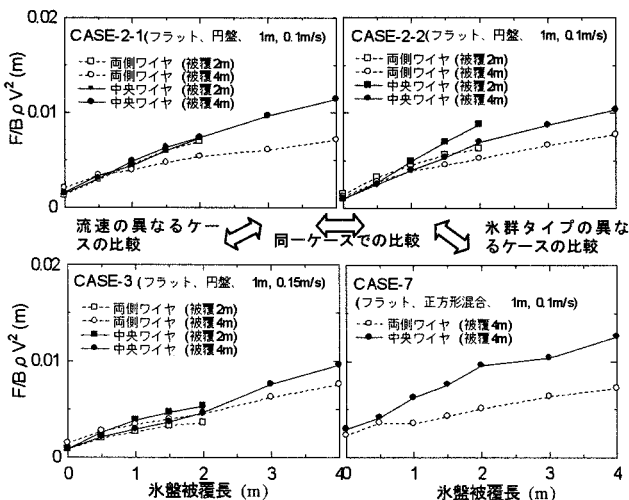


図-8 各アイスブームに作用する流下方向荷重の各ケース間の比較例（側壁がフラットの場合、荷重は、流速 (V) の2乗、径間 (B)、流体密度 (ρ) で除して基準化したもの、また側部ワイヤの荷重については両側の2つのワイヤに作用する流下方向荷重の合力

のケースでは最大被覆長が4mと2mの場合も図示)、流速、氷盤タイプが異なる場合を比較している。また側壁の影響については後述の図-10に合わせて示した。前項からも推察されたように、同一ケースでのバラつきも考えると、有意かつ明確な違いがないことがわかる。実用的観点からは、荷重は流速の2乗、アイスブームの幅 B の1乗に比例し、そして、後述のようにアイスアーチが生じない場合には、氷盤タイプ（形状）にあまり依存しないことが考えられる。ただ、図-6からも推察されるように、目標流速が5cm/sの場合、やや他のケースと異なっていた。5cm/sという流速は比較的小さいため、調整が不安定であり、流速の空間分布に大きなバラつきが考えられる。この正規化された荷重は、もとの荷重の速度の2乗で除しているが、少しでも流速に誤差があれば荷重はその2乗で利いてくるため、大きな誤差がともなっているとも考えられる。

また、支柱間にアーチあるいは荷重を軽減するような骨格形成（支柱や側壁への負担増大）の有無について検討した結果、氷群被覆長と支柱間隔との比が最大で4、および支柱間隔と氷盤の大きさの比が最大で3/50においては、壁面状態、氷盤の形状（円盤、正方形およびその大小混合）にかかわらず、すべてのケースで荷重は増大傾向であったことから、本実験の範囲内においては、それらの形成はなかったと考えられる。

4. 壁面/氷群相互の拘束を考慮した下流への伝達荷重の解析解と実験値との比較

壁面あるいは氷群（個々の氷盤）相互の影響・拘束を考慮した氷群被覆長による荷重の推移について検討し、実験結果と比較してみる。本検討では、比較的被覆長が短いことから、圧力抗力を考慮に入れた。まず、図-9に示すような準静的状態の力学モデルを考え、その力の釣り合いを考えると、

$$BF + F_s B dL - B(F + dF) - 2\pi dL = 0 \quad (2)$$

$$\tau = F_h \tan \phi \quad \text{を仮定して,}$$

$$F_h = K_0 F$$

上式を整理すれば、

$$\frac{dF}{dL} + \frac{2K_0 \tan \phi}{B} F = F_s \quad (3)$$

上式の解は、 $L=0$ のとき $F=F_d$ とすると、

$$F = \frac{F_s B}{2K_0 \tan \phi} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{2K_0 \tan \phi}{B} L \right\} \right] + F_d \exp \left\{ -\frac{2K_0 \tan \phi}{B} L \right\} \quad (4)$$

ここに、 K_0 は主動粉体圧係数、 F_s と F_d は次式に示すように、それぞれ摩擦抗力（応力）および圧力抗

力（単位幅当たり）である。

$$F_s = \frac{1}{2} \rho C_s V^2, \quad F_d = \frac{1}{2} \rho C_d V^2 B h' \quad (5)$$

ここに、 h' は氷の喫水深である。上式を $\rho V^2 B$ で割れば、

$$\frac{F}{\rho V^2 B} = \frac{C_s}{4K_0 \tan \phi} \left[1 - \exp \left\{ -2K_0 \tan \phi \frac{L}{B} \right\} \right] + \frac{1}{2} C_d h' \left\{ -\frac{2K_0 \tan \phi}{B} L \right\} \quad (6)$$

ここに、 $K_0 \tan \phi$ は壁面あるいは氷群相互の影響・拘束を表すパラメータと考えられる。

また、側壁の影響が無い場合は、

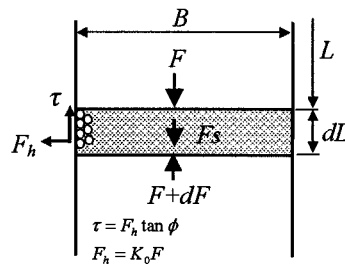
$$\frac{dF}{dL} = F_s \quad \text{となつて、} \quad F = F_s L + F_d \quad (7)$$

さらに、 $L/B \rightarrow \infty$ のとき、

$$F = \frac{\rho V^2 B C_s}{4K_0 \tan \phi} \quad (8)$$

となつて一定値に収束する。

図-10 には、壁面の影響あるいは氷群相互の拘束を表すパラメータである $K_0 \tan \phi$ をいくつか変えて計算した下流への伝達荷重と氷群被覆長との関係を実験値と比較したものを示した。この場合は、実験値は側壁がフラットおよび凹凸について表示しており、各条件において平均したものである。 $K_0 \tan \phi$ が大きくなるにつれて、氷群被覆長による荷重増加率が小さくなり、またその荷重も小さくなる。一方 $K_0 \tan \phi$ が 0 のとき、つまり摩擦がない場合は、被覆長との関係が直線となり、最も荷重が大きくなる。実験値と比較してみると、中央アイスブームについては、 $K_0 \tan \phi$ が比較的、0 近く、両



φは氷盤の内部摩擦角
F_sは要素に作用する氷盤の摩擦抵抗力
図-9 側壁の影響を考慮した場合の力学モデル

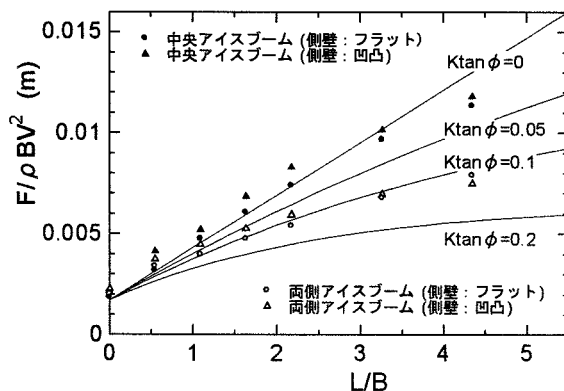


図-10 壁面の影響/氷群相互の拘束を考慮した伝達荷重モデル（流下方向）と実験値との比較

側のアイスブームについては、 $K_0 \tan \phi$ を大きくしていった計算値と合う傾向にある。ただ、被覆長に応じて正比例しない傾向は、前述のように被覆長増加による流速減少や境界層の発達による影響等もあるものと思われるが、本解析解によっても、実験値の傾向を概ね説明することができる。

また、もうひとつ、図-10 の意味するところは、前述のように側壁の状態による違いが伝達荷重に大きな影響を及ぼさない事を示しているが、同一条件でも、中央部と両側のアイスブームに差があり、壁面の影響は受ける。これはまた氷群被覆長の増大によって顕著になることが予想される。この場合、「壁面による影響・拘束の度合い」は、この程度の凹凸では大きな違いが見られないという意味であることを強調しておきたい。

5. おわりに

過去の実験を拡張した水理模型実験を行い、種々の条件の違いによるアイスブームへの荷重伝達特性や氷群の挙動などについて検討した。主な結果として、平板を台車で曳航することにより実施した上田等(1992)³⁾の実験と同じ傾向となり、単純な境界条件の場合には、その物体抗力の概念や実験的傾向から導出された氷力推算式は本実験値の傾向を概ね表し、その妥当性を確認した。伝達荷重は、同一条件でのバラツキも考えると、本実験の範囲内において、氷盤タイプや水路壁面（側壁）の状態による明確な違いはなかった。最後に、氷群の壁面による拘束を考慮した下流への伝達荷重の理論解の導出を試み、実験値と比較し、その妥当性を示した。

現在、個々の氷盤の大きさ、支柱間隔などを広範囲に変化させて、アイスアーチングやジャミングに関する検討のほか、氷群下面形状や水路形状を変化させた場合等の追加実験を実施しているが、これを次の機会に報告したい。さらにDEMを用いた数値計算手法についても検討を行っており、良好に実験結果を再現している。合わせて次回報告したい。

参考文献

- 1) 榎国夫、國松靖、大平正治、村木義男、佐伯浩：新型 Ice Boom の開発、第7回寒地技術シンポジウム論文集、pp.638-643,1991.
- 2) 榎国夫、石井千万太郎、國松靖、佐伯浩：Ice Boom による氷盤移動制御、海洋開発論文集、Vol.8, pp.153-158,1992
- 3) 上田俊也、佐伯浩、山下俊彦、村木義男、榎国夫：浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究、海洋開発論文集、Vol.8, pp.135-140,1992.
- 4) 木岡信治、竹内貴弘、蒔田俊輔：氷群下面に作用する抗力に関する理論的一考察、寒地技術論文・報告集、Vol.23, pp.213-218.