

流氷群とアイスブームの相互作用に関する水理 模型実験とその数値計算に関する基礎的研究

MODEL EXPERIMENT AND NUMERICAL SIMULATION ON INTERACTION BETWEEN SEA ICE FLOES AND ICE BOOMS

木岡信治¹・森昌也²・山本泰司¹・遠藤強³・竹内貴弘⁴

Shinji KIOKA, Masaya MORI, Yasuji YAMAMOTO,
Tsuyoshi ENDO and Takahiro TAKEUCHI

¹正会員 博(工) (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 (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)

³正会員 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)

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 have 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. In addition to our previous studies, we examined experimentally the behaviors of ice floes and characteristics of ice loads acting on ice-booms when the formation of “ice-arch” among poles mooring the ice booms was taken into consideration. From a practical point of view, we found that the ice-arching would form when the ratio of size of the ice floe to interval of the poles becomes 0.2. We also attempted to develop a fundamental numerical method using DEM to simulate the interaction between ice floes and ice booms. The simulation results showed a close correlation with the experimental results in terms of ice loads acting on the ice booms.

Key Words : Sea ice, Ice boom, Ice control, Ice load, ice-arching

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、非連続体である流氷群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依存し、まだ不明な点が多い。このため、著者等は、過去の実験を拡張した水理模型実験、解析的検討（抗力や流れの検討等）、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。このうち既報⁴⁾では、水理模型実験結果の一部を報告した。

本研究では、既報に続き、アイスブームに係留する支柱間におけるアイスアーチの発生を考慮したア

イスブームへの氷群の集積、荷重伝達特性について実験的に検討した。これは、上流側の平面地形や施設配置、流れの状態、氷の形状や大きさ等によっては、アイスブームへの伝達荷重を減ずるような氷群の骨格形成が生じる場合がある事に着目したものである。例えば、図-1のように、支柱を支点としたアーチが形成すると、アイスブームへの作用荷重は減少し、アーチより下流側のみの荷重を考慮するだけで良いことになる。

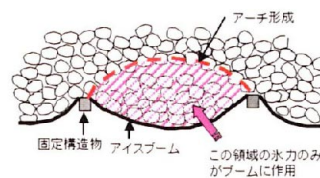


図-1 アーチ形成の例

また、氷群挙動の基礎的な数値シミュレーションも試み、実験値と比較することによりその妥当性を調べた。

2. 実験方法

基本的な実験方法は既報⁴⁾とほぼ同様であるので、その概要のみを述べる。図-2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-3に示すように、密度と摩擦係数が実物

の氷と近い模擬氷（ポリプロピレン）（図-4）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。模型アイスブームは、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。その長さは、支柱間隔の1.2倍とした。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に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(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。

次に計測項目も既報と同様、アイスブームの張力と支柱に作用する荷重、水路内流速、および水位で、測定方法も同様であるが、特に後者について再度簡単に説明しておく。図-2に示すよう、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（氷群タイプ：円形、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

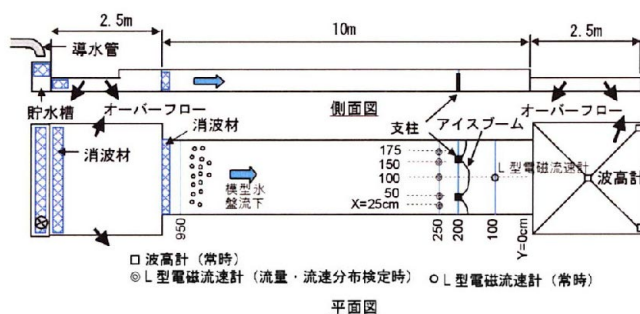


図-2 アイスブームの実験装置の概要図

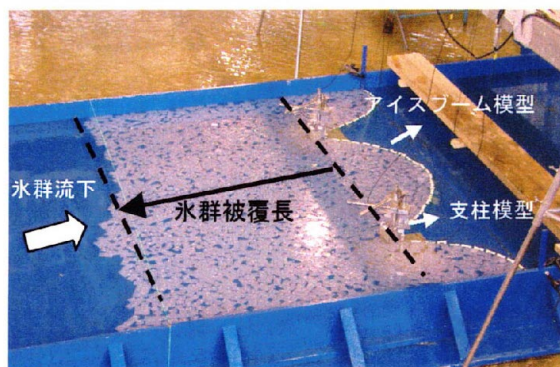


図-3 アイスブームの実験風景

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。

次に実験条件を表-1、図-5に示す。表面流速($V=0.05\sim0.15\text{m/s}$)、氷群の形状(円形、矩形、および混合タイプ)、氷群の大きさ(代表長 $a=3\sim10\text{cm}$)、そして支柱間隔($b'=12\sim92\text{cm}$)（図-5参照）、を様々変えて実施し、アーチ形成条件を概略的に検討した。表中の混合タイプの配合率は、重量比に基づき、その代表径として、各径にその配合率を乗じた重み付き平均として定義した。また矩形タイプの代表径は、円換算した場合の直径と定義した。

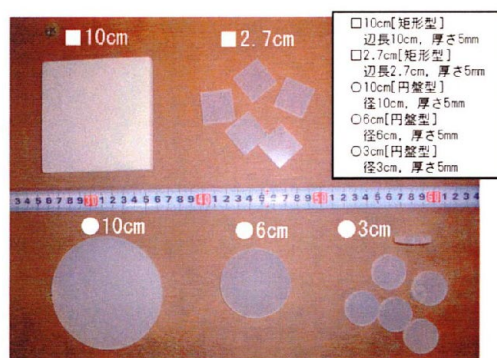
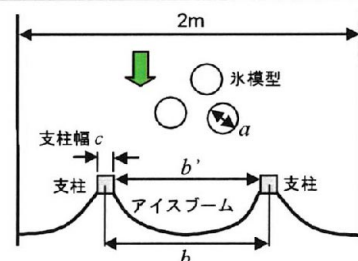


図-4 用いた氷群模型

表-1 主な実験条件

氷群タイプ	a cm	b' cm	目標流速 cm/s
(a) 円形タイプ			
○3cm	3	12, 42, 92	0.05-0.15
○6cm	6	12, 30, 42, 92	0.05-0.15
○10cm	10	12, 30, 42, 92	0.05-0.15
(b) 矩形タイプ			
□2.7cm	3	12, 30, 92	0.05-0.15
□10cm	11.2	42	0.05-0.15
(c) 混合タイプ			
○3cm(75%) □2.7cm(25%)	3	12	0.10
○3cm(50%) □3cm(50%)	3	12	0.10
○3cm(25%) □3cm(75%)	3	12	0.10
○3cm(50%) ○10cm(50%)	6.5	12	0.10
○3cm(85%) ○10cm(15%)	4.05	12	0.10



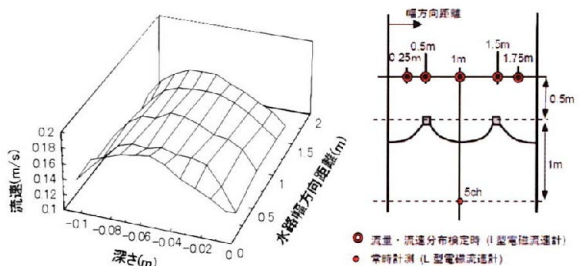
b: 支柱の中心間距離, b': 支柱の有効径間 (= b-c)
a: 模型氷の直径, c: 支柱前面の幅 (= 8cm)

図-5 寸法の定義

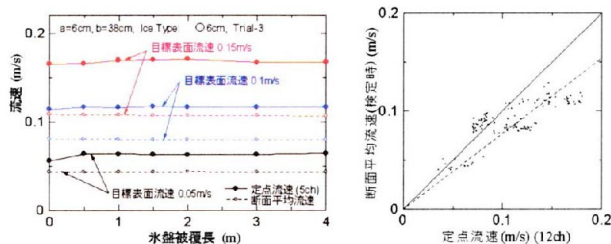
3. 実験結果および考察

(1) 実験時の流速特性に関する検討

図-6 には実験時の流速特性の一例を示す。同図(a)は氷群被覆長が4m、支柱設置位置より上流側0.5mの断面での流速分布の例を示す。まず横断方向の分布をみると、本来水路中央部で最大となるように思われるが、概ね平坦であり、また計測はできなかったが、壁面近傍で急に流速は減少するものと思われ、これが十分な乱流状態にある流速分布の典型例であると思われる。一方、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ている。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る。次に同図(b)には、5ch 定点流速（支柱より1m下流側中央部、水路床より6cmの位置）および断面平均流速の氷群被覆にともなう変化の例（異なる3種類の流速）を示した。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が、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、同図(a)で見たように氷群被覆によって鉛直方向の流速分布は大きく異なる。また、既報⁴⁾では支柱間の流速の計測も行ったが、5ch 位置の流速とほぼ同一であった。最後に、同図(c)には断面平均流速（被覆長4m時）と定点流速(5ch)（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をとる傾向があり、およそその1.33倍近くとなって



(a) 氷群被覆長が4mの場合の流速分布例
(左：目標流速が0.15m/sの場合、右：流速計測位置)



(b) 流速（定点計測および断面平均流速）の氷群被覆長による変化の例
(c) 断面平均流速（被覆長4m時）と定点流速（0~4m被覆の平均値）との比較

図-6 実験時の流速特性の例

いる。同図(c)から、常時計測の定点流速とそ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。以上は、既報⁴⁾での実験結果と概ね同様であった。

(2) アイスブームに作用する伝達荷重の正規化

便宜上、得られた荷重は既報⁴⁾と同様な方法で正規化した。再度概説しておく。図-7⁴⁾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（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。図より、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。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、アイスブームへの伝達荷重は、流れによる物体抗力や、閉水路における壁面せん断力（氷群下での流れ）の概念により⁵⁾、流速の2乗に比例することが示され、実験でもそれが示された⁴⁾。よって、既報⁴⁾と同様に、荷重は流体密度 ρ と流速 V の二乗で除した。さらに、張力(S)を支柱部でのアイスブームの傾き角(θ)（図-7参照）を考慮して流下方向の力(F)に換算し、中央アイスブームに作用する流下方向の荷重、および両側アイスブーム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（中央アイスブームの場合支柱間隔 b' ）で除した。さらに流速の代表値として5ch流速を用いた。

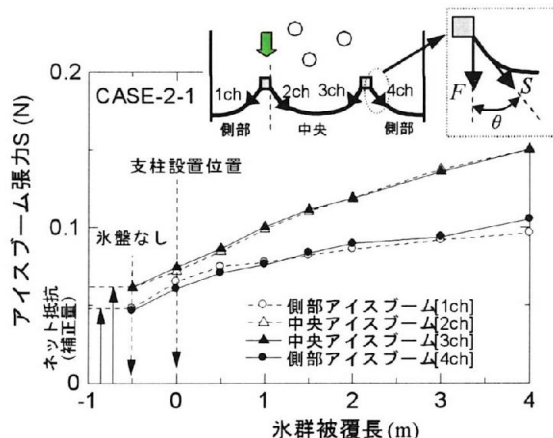


図-7 氷群被覆長に応じたアイスブームに作用する力の例⁴⁾
(○型氷群、被覆長1m、流速0.1m/s、 $a/b=0.0326$)

(3) アイスアーチ形成条件の推定

a) 氷群被覆長にともなうアイスブームに作用する荷重の推移

アイスアーチの発生条件（アイスブーム等の支柱間の構造物への荷重増加を減じようとする氷群の骨格形成）は様々考えられるが、おもに氷の形状や、氷の大きさと支柱間隔との比（本実験では a/b' ）に依存するものと考えられる。 a/b' が比較的小さい場合はアーチを形成しにくい、例えば、図-7 あるいは図-8(a) に示すように、その場合にはアイスブームに作用する荷重は被覆長に応じて単調に増加する。一方、同図(b)(c) に示すように、 a/b' が大きくなってくると、アーチが形成されやすく、被覆長増加にともなって荷重が増減し、あるいは一定値に近づくなど、荷重の増加はあまり見られなくなる。また、 a/b' による荷重のバラツキの違いも顕著に見られ、図-8(a) ではバラツキが少ないのに対し、同図

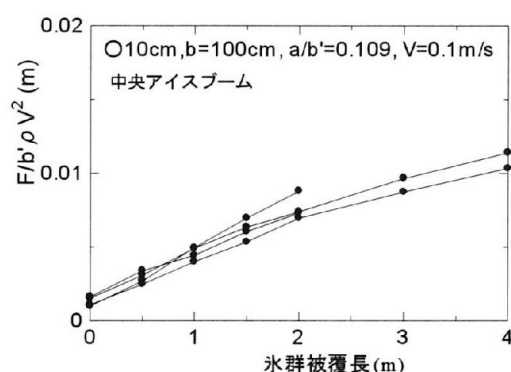


図-8(a) アーチを生じないケースの例

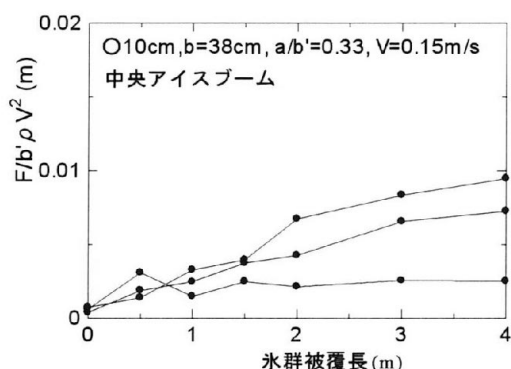


図-8(b) さらに a/b' が大きく、一旦はアーチを生じるケースの例

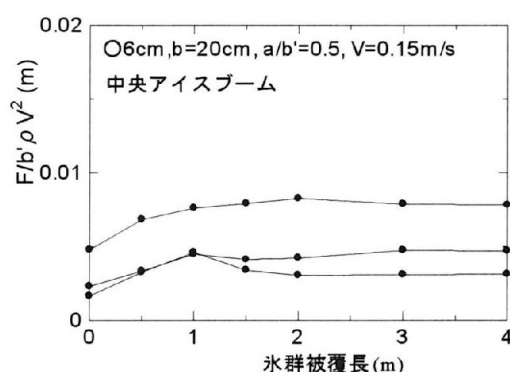


図-8(c) ほぼ完全にアーチを生じるケースの例

(b)(c) では、バラツキが大きくなる。これは、氷群配列がランダムでも、 a/b' が小さいとき、構造物に作用する氷の数が相対的に多く、平均化されて、全体的な荷重は大きく変わらないが、逆の場合には、その時々配列に依存してくるようになり、バラツキが多くなるためである。また図(b)に示すように同一実験条件でも、被覆長にともなって増減する場合がある。これは、一旦はアーチが形成されるが、後方からの氷群の影響で崩れ、再度アーチが形成するといったプロセスの繰り返しであると解釈される。同図(c) はほぼ完全にアーチが形成される例である。

b) アイスアーチングの指標の定義

一般的には、アーチ形成の判定は難しいが、簡略的に被覆長(L)に対する荷重の推移で判断することを考える。本研究では、図-9 に示すように、それを示す簡便な指標として、その骨格形成に必要な距離(ここでは 1m と仮定)以降の荷重増加率、つまり前節で定義した正規化荷重-氷群被覆長曲線の勾配(C_{arch})を定義し、その大小で判断する。完全にアーチが形成する場合には $C_{arch} = 0$ となる。

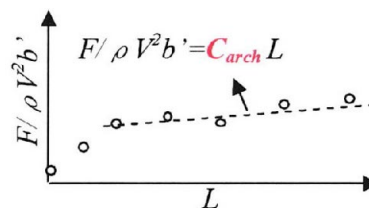


図-9 アーチ形成の指標の定義

c) アイスアーチの形成条件の検討

図-10 には、上記で定義した C_{arch} と a/b' との関係を示した。この図はアーチ形成状態、即ち、 a/b' によって支柱間の伝達荷重の増加を減ずる氷群の骨格形成状態を表す目安と考えることができよう。図中には○型氷群、□型氷群、流速毎に表示している。また複数の同一実験結果についてはその平均値を表示した。バラツキは大きい概して、ある a/b' までは C_{arch} が一定であるが、それ以降では、 a/b' とともに C_{arch} が減少傾向にあり、アーチ形成に推移すること、また、明らかに○型よりは□型氷群の方がアーチが形成しやすいことが分かる。○型氷群では、およそ a/b' が 0.3~0.4 より大きくなると C_{arch} が減少傾向にあり、0.6~0.8 の間で完全にアーチ形成が生じる。一方、□型氷群では、およそ $a/b' = 0.2$ 程度でアーチ形成が生じることが推察される。また流速の大小（あるいはフルード数）による明確な違いは見られないが、 a/b' が大きくなると、流速の大きい方が C_{arch} が減少傾向にあり、アーチが形成しやすい感がある。現実の氷野では、角張った形状の氷が多いことから、実用的には、 $a/b' = 0.2$ 程度でアーチ形成が生じると考えることができる。ただし、後方からより大きな氷が衝撃的に作用した場合や潮

汐による転流などにより一時的にアーチが崩壊する可能性もあるので別途検討が必要である。

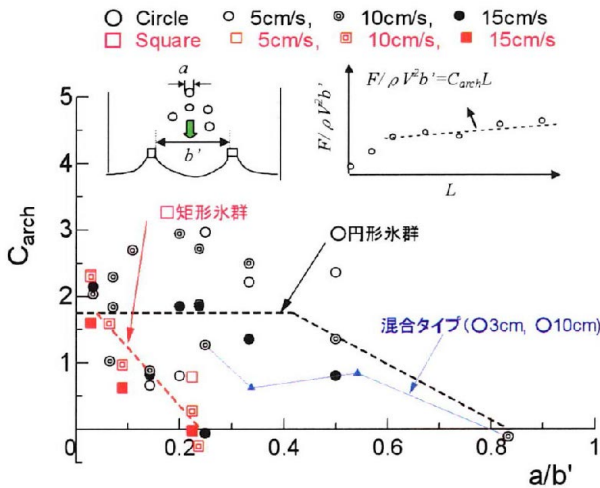


図-10 a/b' をパラメータとした場合のアーチ形成状態 (複数の同一実験についてはそれらの平均値)

(d) 混合タイプのアーチの形成条件

図-11 には、 $b'=12\text{cm}$ 、 $V=0.1\text{m/s}$ の場合の、 $\bigcirc 3\text{cm}$ 、 $\bigcirc 10\text{cm}$ の2種の氷の混合タイプについて、配合率を変えた場合の、 a/b' と C_{arch} との関係を示したものである(図-10にも図示されている)。同図の横軸は、前述のように配合率(重量比)に応じて平均粒径に換算したもので、上の横軸は $\bigcirc 10\text{cm}$ の氷群の配合率を示している。図-10と合わせて考えると、この実験時の目標流速が $V=0.1\text{m/s}$ であることから、混合タイプの方がアーチ形成がやや生じやすいと考えることもできる。

図-12 には、 $\bigcirc$ 型および $\square$ 型の混合タイプの場合のアーチ形成状態($\bigcirc 3\text{cm}$ 、 $\square 3\text{cm}$)を示した。 $\square$ 型氷配合率が大きくなれば形成が生じやすくなることを示している。この場合、配合率が25%と比較的 $\square$ 型氷の割合が少なくても C_{arch} は大きく減少し、アーチ形成が生じやすくなるものと推察される。

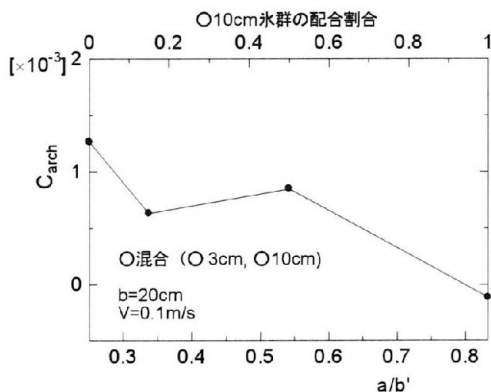


図-11 $\bigcirc$ 型氷群の混合タイプの場合のアーチ形成状態 ($\bigcirc 3\text{cm}$ 、 $\bigcirc 10\text{cm}$ の2種の氷の配合率を変化)

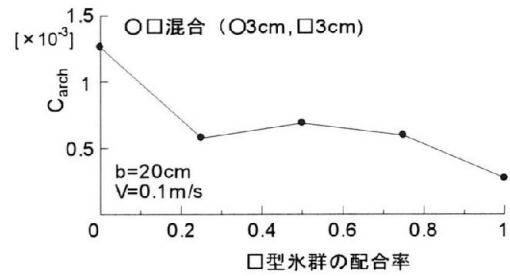


図-12 $\bigcirc$ 型および $\square$ 型氷群の混合タイプの場合のアーチ形成状態 ($\bigcirc 3\text{cm}$ 、 $\square 2.7\text{cm}$)

4. DEMを利用した数値シミュレーションの検討

(1) DEMの概要と計算条件

構造物と氷群との干渉のシミュレーションに、粒状体などの非連続体の挙動シミュレーションに適している個別要素法(D.E.M.)の適用を試みた。この手法は粒子のもつ物性値を間接的に考慮でき、複雑な粒子の移動・衝突に合うようチューニングすることにより、様々な状況に応じた挙動を推定できるといふ柔軟性を有している。この数値実験が可能となれば、低コストで複雑な境界条件を有する氷群の挙動を容易に推定できるものと期待できる。ここでは、その計算結果を実験結果と比較することにより、本シミュレーション手法の妥当性を示す。要素(個々の氷盤)の集合体において、次式に示すように、個々の要素毎に独立した運動方程式をたて、これを差分近似して時間領域でステップ・バイ・ステップで前進的に解くことにより要素の挙動を追跡し、その集合体としての動的挙動を解析するものである。

$$\begin{aligned} m_i \ddot{\mathbf{u}} + C_i \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{F}_i &= 0 \\ I_i \ddot{\phi} + D_i \dot{\phi} + M_i &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

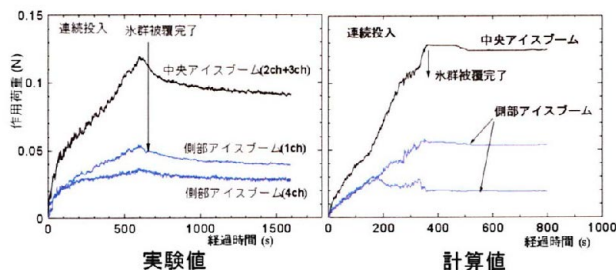
ここに、 m_i :要素(i)の質量、 $\mathbf{F}_i$:要素に働く合力、 M_i :要素に働く合モーメント、 I_i :要素の慣性モーメント、 C_i 、 D_i :減衰定数、 $\mathbf{u}$:要素の変位ベクトル、 ϕ :要素の回転変位、である。なお、要素同士が接触しているとき、 K を弾性定数として、 $\mathbf{F}_i = K\mathbf{u}$ 、 $M_i = Kr^2\phi$ (r は要素半径)、非接触のとき、 $\mathbf{F}_i = M_i = 0$ で表される。なお、外力 F_{ice} を考慮する場合は、合力の項で考慮する。外力 F_{ice} は、流れによる抗力として圧力抗力と摩擦抗力とし、次式で定義した⁴⁾。

$$\begin{aligned} F_{ice} &= \frac{1}{2} \rho_w C_s A |V_w - V_i| (V_w - V_i) \\ &\quad + \frac{1}{2} \rho_w C_d h' |V_w - V_i| (V_w - V_i) \end{aligned} \quad (2)$$

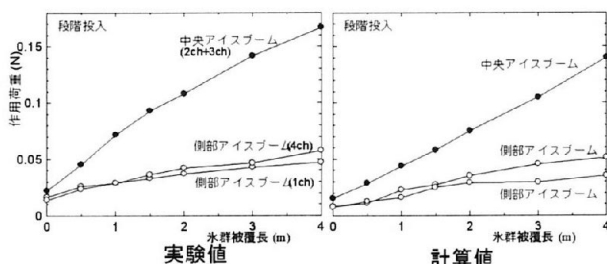
ここに、 A は氷の面積、 h' は喫水深、 V_w 、 V_i はそれぞれ流速、氷の漂流速度、 C_s と C_d はそれぞれ、摩擦(抗力)係数と形状(圧力抗力)係数である。上田等(1992)の研究³⁾により、平板の場合には、その係数がそれぞれ、0.007、0.65と推定されている。氷は、実験結果と比較するため、円盤とし、2次元として扱った。主な計算条件を表-2に示す。

(2) シミュレーションと水理模型実験との比較

模型実験とシミュレーション結果との比較例を図-13 に、そのシミュレーション状況の例(図-13(a)に対応)を図-14 に示す。実際の計算では、式(1)を数値積分して、逐次変位ベクトルと回転変位を得る。アイスブームへの伝達氷荷重は、アイスブームに接触している個々の氷盤の接触力の合力とした。図-13(a)に示す実験では、氷群投入を各被覆段階に分けず、最大被覆長 4m まで連続的に被覆した場合である。実験値は、前述のように、氷群の投入による水面動揺・波の影響の有無により、被覆が完了する前から荷重は既にピークに達していき、その後、被覆が完了しても減少し、いずれ定常値に達する傾向となっている。これは、氷群投入を停止することによって水面が静穏となったこと、氷群の配列が徐々に変化し、安定した粒子配列となり、支柱の分担荷重が増大することなどが考えられる。シミュレーションでは、波の影響を考慮していないので、荷重減少の傾向は実験値ほど顕著ではないが、わずかには再現されており、後者の粒子配列の変化による荷重減少が説明できる。また、荷重の増加傾向や荷重の大きさは実験値と良い一致を呈しており、実験と計算との土俵の違い(計算では実験特性である波の発生およびアイスブームのフレキシブル性も考慮していない)があるものの、計算結果は概ね実験値の傾向を再現していると言える。また、図図(b)は、前述の実験方法で述べたように、氷群投入を各被覆段階に分け、被覆長に対する静的荷重の推移に着目した場合を示す。この場合も、被覆長にともなう荷重の増加傾向や大きさも実験値と良い一致を呈している。非連続体である流氷群の挙動を推定するツールの一つとして DEM が有効であり、特に、コストと労力のかかる実験を補完する場合や、実験が困難な条件での挙動推定に有効であると思われる。



(a) 氷群を連続流下させた場合



(b) 氷群を被覆長毎に段階的に投入した場合

図-13 アイスブームに作用する伝達氷荷重のシミュレーションと実験との比較例($a=3\text{cm}$, $V=0.1\text{m/s}$)

表-2 主な計算条件

時間ステップ(s)	0.00005
氷の半径(m)	0.015
氷厚(m)	0.005
流れの速度(m/s)	0.1
氷の密度(kg/m^3)	0.9×10^3
氷と水との摩擦 抗力係数	0.007
氷と水との圧力 抗力係数	0.65
氷の stiffness(kN/m)	160
氷/氷の摩擦係数	0.4
氷の慣性力係数	0.5



図-14 DEMによるシミュレーション状況の例

5. まとめ

本研究では、主にアーチの形成条件について実験的に検討した。これは、上流側からの氷群の伝達荷重を減ずるような骨格形成が生じ、アイスブームへの荷重が軽減する場合がある事に着目したものである。アーチ形成は、氷の代表長 a と支柱間隔 b' との比 a/b' 、氷の形状、流速等に依存する。○型より□型氷群の方が遙かにそれが形成しやすく、○型氷群では、 a/b' が $0.3 \sim 0.4$ 以上でアーチを発生する傾向にあり、 $0.6 \sim 0.8$ で完全にアーチ形成が生じるのに対し、□型氷群では、およそ $a/b=0.2$ 程度で生じた。さらに○型と□型の混合タイプについては、□型氷の配合率25%とその割合が少なくても、アーチ形成が生じやすくなるものと推察された。現実の氷野では、角張った形状の氷が多いことから、実用的には、 $a/b=0.2$ 程度でアーチ形成が生じると考えられる。

また、氷群が及ぼす伝達荷重についての実験とシミュレーションとの比較を行ったところ、シミュレーション結果は実験値の傾向を概ね良好に再現し、DEMの有用性が示された。

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, 蒔田俊輔, 山本泰司, 森昌也, 竹内貴弘: 流氷群と防氷施設の相互作用に関する水理模型実験, 海洋開発論文集, Vol.24, pp.1035-1040, 2008.
- 5) 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, 2007.