氷群下面の凹凸を考慮したアイスブームへの伝達荷重に関する基礎的研究

ICE LOAD ON ICE BOOM CONSIDERING ROUGHNESS OF SEA ICE BOTTOM

木岡信治¹・竹内貴弘²
Shinji KIOKA 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 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)

We made the experiments on interaction between sea ice floes and ice booms, which were especially focused on the effect of the roughness under ice floe on the ice loads acting on the ice booms. While the ice load on ice boom in case of the ice floes with undulation was proportional to the square of current velocity as well as in case of the flat ice floes, the ice load by the ice floes with undulation nonlinearly increased with ice cover length unlike the case of the flat ice floes. We estimated the drag coefficient of the each ice condition in this experiments from the theoretical model [Kioka et al., 2009] and related the coefficients with statistical values of the ice conditions. We also roughly estimated the drag coefficient of actual sea ice with undulation (deformed ice) in the Okhotsk Sea by using these results, and got the drag coefficient of $C_s=0.03-0.04$.

Key Words : Sea ice, drag force, ice boom, roughness

1. はじめに

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水施設(アイスブーム)が設置され、さらに、2009年には、能取湖口での設置も完了した。今後も多目的でアイスブームが活用される可能性もあり、より合理的な設計方法が望まれる。また、一般の沿岸施設の流氷群との接触による劣化損傷評価の観点からも、流氷群挙動や接触荷重・圧力などを推定する手法の確立が必要である。過去に水理模型実験が精力的に行われ¹⁾²⁾³⁾、サロマ湖の防水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依存し、未だ多くの課題が残されている。著者等は、過去の実験を拡張した水理模型実験⁴⁾⁵⁾、理論解析⁶⁾、DEMによる数値計算⁵⁾⁷⁾といった多角的なアプローチより、流氷群挙動や伝達荷重等(施設に作用する氷荷重)の推定手法の構築を目的とした研究を行っている。このうち、既報の水理模型実験⁴⁾⁵⁾では、特に氷の下面が平坦な流氷群の場合について実施してきた。しかし、現実の氷野では変形海氷と言われる氷盤相互の潜り込み等によって下面は凹凸^{例えば 8)}である場合が多い。過去に上田ら³⁾は、一枚の板状のパラフィン盤の下面に規則的な凹凸を設けてこれを台車でけん引することにより、抗力係数などの推定を試みている。本研究では、より実現

象に近い状態で行うため、回流水路に、厚さの異なる多数の円柱型の模擬氷群を流し、アイスブームへトラップさせた。一般に氷に作用する抗力は圧力(形状)抗力と摩擦(せん断)抗力からなるが³⁾、本研究では、特に凹凸の摩擦抗力成分に着目した様々な凹凸状態の氷群の伝達荷重や抗力係数などについて調べた。また、オホーツク海における流氷群下面凹凸の観測結果から抗力係数を概略的に推定する方法についても若干検討を加えた。

2. 実験方法

実験方法は既報⁴⁾⁵⁾とほぼ同様であるため要点のみ述べる。幅 2m×長さ 10m の木製水路(水深約 11cm)に、水位差(上流側で水を連続供給)を利用して流れを発生し、密度と摩擦係数が実海氷と概ね等しいパラフィン製の模擬氷盤²⁾を流下させてアイスブームでトラップさせた(写真-1)。模型アイスブームは、既報と同様に、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、その長さは、支柱間隔の1.2倍とした。模型縮尺は1/100程度を想定し、アイスブームを係留する支柱間隔を $b=100\text{cm}$ (純径間 $B=92\text{cm}$)、表面流速を0.05~0.15m/s(目標値)の範囲で実施した。また、氷群の凹凸を、直径 $a=3\text{cm}$ の円柱で、厚さの異なる2種類の模擬氷盤[5mm および 20mm]により表現した(写真-2)。この場合、その凹凸差である振幅 Δh を一

定に保ち、その配合率を変えて様々な凹凸状態を創出した。 Δh は模型氷の比重(0.9)を考慮して、 $0.9 \times (0.02 - 0.005) = 0.0135\text{m}$ となる。なお、これらの氷群はランダムに流下させた。表-1 には、その配合率として 20mm 厚の氷盤（以下 20mm 氷という）の混入率（ ξ ）と平均的な波数を示した（直線上に均等に配列した場合で、前述のように実際には、2 種類の混合はランダムに行う）。

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。また水路内流速は、既報⁴⁾⁵⁾の方法により間接的に断面平均流速を推定し、データの整理には、流速の代表値としてこれを用いた。また流速の鉛直分布は、氷群（凹凸）および水路床（滑らか）からの境界層の発達により、やや水路床より最大をもつ分布であった。

本研究では、凹凸の状態が氷群伝達荷重へ与える影響を調べるとともに、氷群抗力の解析解⁴⁾より、各凹凸状態に応じた抗力係数を推定する一方、凹凸の幾何学的形状から、凹凸特性を表す、パワースペクトル、混入率や波数、平均パワー（分散）などの関係を理論的に導出、整理した。また、それらの量と抗力係数とを関連づけた。さらに、それらの関係を利用し、オホーツク海での流氷群下面凹凸の観測結果から、その抗力係数の概略的な推定を試みた。

写真-1 アイスブームの実験施設

写真-2 実験に用いた氷群モデル

表-1 凹凸氷群の実験条件

	20mm厚模擬氷盤の混入率 ξ (%)	波数 k_p (cycle/m)
ケース1	25	8.33
ケース2	11.1	3.7
ケース3	4	1.33
ケース4	1.56	0.52

3. 実験結果および考察

(1) アイスブームへの伝達荷重の速度依存性

図-1 には例として、20mm 氷の混入率 ξ が 4% および 25%の氷群が中央部アイスブームに及ぼす伝達荷重と断面平均流速(V_0)との関係を示す。荷重の代表値として氷群被覆長(L)が 2m と 4m 地点における荷重を図示しているが、氷の下面が平坦な場合と同様に、概ね速度の 2 乗に比例していると考えられる。これで、凹凸氷群においても、速度の 2 乗で除して規格化⁵⁾できる根拠が得られた。

(a) 20mm 氷混入率 $\xi=4\%$

(b) 20mm 氷混入率 $\xi=25\%$

図-1 流れの速度とアイスブームに作用する荷重の関係例（中央アイスブーム）

(2) 伝達荷重と氷群被覆長との関係の検討および、各凹凸氷群の抗力係数の推定

図-2(a) には、各凹凸氷群における氷群被覆長(L)とアイスブーム（中央部）に作用する荷重（アンサンブル平均）を示した。なお、荷重はアイスブームの幅 B 、流体密度 ρ 、断面平均流速 V_0 の 2 乗で除して規格化している。この図から $\xi=0$ 、すなわち平坦な氷では今までの議論からこの範囲では直線と見なされるが、凹凸を有するにつれて、曲線的になってくる感がある。ここで、次式に示す流下方向の伝達荷重の理論モデル⁴⁾を適用してみる。

$$\frac{F}{\rho V_0^2 B} = \frac{C_s B}{4K_0 \tan \phi} \left[1 - \exp \left\{ -2K_0 \tan \phi \frac{L}{B} \right\} \right] + \frac{1}{2} C_d h' \exp \left\{ -\frac{2K_0 \tan \phi}{B} L \right\} \quad (1)$$

ここに、 F は流下方向の伝達荷重（アイスブームに及ぼす荷重）、 B は水路幅（ここではアイスブームの幅に相当）、 ρ は水の密度、 ϕ は氷群の内部摩擦角、 K_0 は静止粉体圧係数に準じるもの、 C_s 、 C_d はそれぞれ、摩擦（せん断）抗力係数、圧力抗力係数、 h' は氷の喫水深、である。

上式は、主働粉体圧の Janssen 式に準じるものと考えることができる。氷が平坦で、単純な境界条件を有する構造物などの理想的な場合には、 $L=0$ のとき圧力抗力となるが、本実験では、支柱位置を $L=0$ とし、これより上流側に氷群被覆長としている。しかし実際には、支柱～ブームまでも摩擦抗力が働いており、これを分離するのは困難であるため、 $L=0$ のとき $F=0$ となるよう補正する。この場合には氷の喫水深 h' に依存する圧力抗力を無視することになるが、式(1)あるいは、あるいは図-2(a)からも推察されるように、被覆長が大きくなるほど、摩擦抗力が支配的となるため、本研究では摩擦抗力 C_s について検討することとした。ここで、式(1)の右辺第二項を無視し、さらに B で除して無次元化

図-2(a) 氷群被覆長(L)とアイスブーム（中央部）に作用する伝達荷重(F)（アンサンブル平均）との関係例

図-2(b) 上図の補正 ($L=0$ のとき $F=0$)（圧力抗力無視の場合）および式(2)の当てはめの例

すると、

$$\frac{F}{\rho V_0^2 B^2} = k_a \{ \exp(-k_b L) - 1 \} \quad (2)$$

$$k_b = \frac{2K_0 \tan \phi}{B}, \quad k_a = -\frac{C_s}{4K_0 \tan \phi}$$

ここで式(2)を図-2(a)の実験データに当てはめ、最小二乗法により C_s 、 $K_0 \tan \phi$ を推定した。図-2(b)にはこうして補正し、無次元化した荷重を示すとともに、式(2)を当てはめた例も示した。この図より、式(2)はそれらの実測値の被覆距離による推移をよく表している。図-3 には、その方法で推定された抗力係数 C_s と 20mm 氷の混入率 ξ との関係を示す。なお、既報⁴⁾の結果を用いて、 $\xi=0$ 、つまりほぼ平坦氷群の場合の C_s も推定し、図示している。 ξ が増大するにつれ、抗力係数 C_s も増大するが、その増加率は減少し、いずれある混入率で最大をとるような感がある。次項以降ではもう少し、混入率と C_s との関係について定量的・一般的に考えてみる。

図-3 20mm 氷の混入率 ξ と図-2(b)および式(2)から推定された C_s との関係

(3) 混入率と波数・スペクトル・平均パワー（分散）との関係

混入率 ξ を、凹凸特性を表す平均値、平均パワー（分散）あるいはスペクトルに対応させておくと、実用的には便利で、汎用性が広がる。まず図-4 に示すように、配合した氷群を直線的にみた場合、その凹凸形状を矩形波と仮定する。

図-4 配合した氷群の矩形波としての単純モデル化

いま凸部の幅 L を 20mm 氷の直径 ($L=0.03\text{m}$) とし（円形の場合には、直径は L の最大値となるが、ここではそのように仮定する）、平均的な周期を T とすると、混入率 ξ は L/T となる。また平均的な波数 kp は ξ/L と表される。以上まとめると、

$$\xi = \frac{L}{T}, \quad k_p = \frac{\xi}{L} \quad (3)$$

図-5 には種々の混入率に対する（線）スペクトルを示した．なお，その定義により，縦軸は振幅 Δh で除して無次元化するとともに，横軸の波数 k は L を乗じて無次元化している．ただし，本実験の場合， $\xi=1$ が最大値であるから，最大波数は 33.3cycle/m ($kL=1$) となる．

図-5 各混入率 ξ における矩形波のフーリエスペクトルの例

また，氷の喫水厚 h の平均値を混入率 $\xi (=k_p L)$ を用いて，表現すると，

$$\bar{h} = \frac{1}{T} \int_{-T}^T h dx = \frac{L h_{\max} + h_0 (T - L)}{T} = \Delta h \xi + h_0 \quad (4a)$$

さらに，凹部を基準としたとき，つまり凸部の平均値を無次元量で表すと，上式より，

$$\frac{h - h_0}{\Delta h} = \xi \quad (4b)$$

となり，混入率 ξ となる．

ここに， $h_{\max}$ および h_0 はそれぞれ 20mm 氷および 5mm 氷の喫水厚で，それぞれ 0.018m, 0.0045m, $\Delta h = h_{\max} - h_0$ (凹凸振幅) である．

次に，氷の喫水厚 h の分散（平均パワー） C_0 を混入率 $\xi (=k_p L)$ を用いて，表現すると，

$$\begin{aligned} C_0 &= \text{Var}(h) = \frac{1}{T} \int_{-T}^T (h - \bar{h})^2 dx \\ &= \frac{1}{T} \{ L(h_{\max} - \bar{x})^2 + (T - L)(h_0 - \bar{x})^2 \} \\ &= \xi(1 - \xi)\Delta h^2 \end{aligned} \quad (5a)$$

これを，無次元で表すと，

$$\frac{C_0}{\Delta h^2} = \xi(1 - \xi) \quad (5b)$$

図-6 に，式(4b)および式(5b)を図示した．あると（あるいは k_p ）で平均パワー（分散値）は最大を示すが， $\xi=0$ および 1 の極限で，5mm 氷および 20mm 氷の平坦氷に近づくから，分散も減少し，どこかで最大をもつことになるが，この場合 $\xi=0.5$ で最大値をとる．つまり，平面的に薄い氷と厚い氷が交互に現れるときに分散は最大となる．

図-6 氷群凹凸の波数 k_p ，混入率 ξ と平均値や平均パワー（分散）との関係

(4) 他の実験結果³⁾ との比較

上田ら³⁾は，図-7 に示すように，一枚の板状のパラフィン盤(長さ 0.6m, 幅 0.4m)の下面に規則的な凹凸を設け，これを一定速度でけん引することにより，凹凸氷盤の抗力係数などの推定を試みている．ここでは，本実験で得られた結果と比較してみる．

図-7 上田等³⁾による凹凸氷盤の抗力に関する実験方法

この実験では，凸部の高さ k を 2, 4cm の 2 通り，凸部の間隔 S を 4 通り変えて，実験結果を S/k で整理している．それによれば， $k=2\text{cm}$, 4cm とともに， $S/k=7.5$ で受ける力は最大となり，その時の摩擦抗力係数 C_s は 0.0257 となることを示している．また上田らは，開水路の椀形粗度による抵抗を調べた結果⁹⁾を引用し， $S/k=8$ で最大をとることを示している．さらに，この研究は数 mm 程度の凹凸であるにもかかわらず結果はほぼ一致することを強調している．図-8 には，本実験結果の C_s を S/k で整理したものを示した．なお，本研究で用いた記号でいえば， $S/k \rightarrow T/\Delta h$ となる．また，同図には上田等の実

験結果も図示したが、文献では、 S/k の推移は抗力
で示されており、 $S/k=7.5$ で最大となる C_s が示され
ているのみであったため、図中では、波線でその増
減をイメージするにとどめた。さらに、同図には、
 $T/\Delta h \rightarrow \infty$ 、つまり平坦氷の場合の抗力係数も波線で
示した。本実験では $T/\Delta h < 8.8$ 以下では実験をして
いないが、前述のように、20mm 氷の混入率が大き
くなると、20mm 氷で構成する平坦な氷に近づくた
め、分散が減少し、 C_s も低下してくるものと思わ
れる。したがって、上田等と同様な傾向を示すと考
えられる。しかし、上田等の結果と比較して、その
抗力係数は約 2 倍ほど本研究の結果の方が大きい。
この違いは、①流れの状態、つまり上田等の実験で
は氷を移動させている一方、本研究では水流を発生
させていることの違いや、水深の違い、氷被覆長の
違い等にもなる境界層厚（発達）の違い¹⁰⁾、②上
田等の凹凸は規則的で 1 次元式的であるが、本実験
では平面的であり、より不規則性が内在している、事
などが考えられる。いずれにしても、本研究と上田
等の実験から推察されることは、凹凸氷の場合の
 C_s は 10^{-2} のオーダーであること、 $T/\Delta h$ が 1 のオー
ダーで C_s が最大となると予想されること、などが
挙げられる。

図-8 凸部の間隔と凹凸振幅との比($T/\Delta h$)と抗力係
数との関係および上田等の実験結果との比較

4. 北海道オホーツク海沿岸における流氷群 の摩擦抗力係数の概略推定

著者等は、数年にわたり北海道オホーツク海沿岸
部（紋別沖の海象計付近、沖合 8.2km、水深 52m）
において、ADCP（Acoustic Doppler Current
Profiler）と IPS（Ice Profiling Sonar）を海底に設置し、
流氷の移動速度、喫水深などの定点観測を実施して
いる（例えば⁸⁾）。IPS で得られた喫水深の時系列デー
タを、ADCP による流氷の移動速度データを用いて、
空間データに変換し、これを流氷下面形状と見なし、
それらの凹凸特性に関する定量分析を実施している。
図-9 に示すように、その底面形状は平坦ではなく、
数 m の凹凸を有する変形氷であることを示してい
る⁸⁾。変形氷は、静的に凍結した平坦な氷の相互の
乗り上げ（rafting）や、圧縮・せん断作用、座屈な
どの相互作用によって生じた破壊氷片が上下方向に

堆積して形成した氷の総称である。一般に静的に
凍った喫水（氷厚）は 1 年に、オホーツク海北部で
はせいぜい 1～1.5m、北海道オホーツク海沿岸部で
はせいぜい 0.5～1m と考えられるで、これらを越
えるものは、変形氷と考えられる。Fukamachi ら¹¹⁾
が、著者等と同じ観測法で、湧別沖 11km（水深約
60m）において流氷観測を実施した結果、最大 17m
の喫水をもつ海氷を観測しているほか、著者等の観
測でも 10m を超えるものが確認されており、一般
に大規模化する。

図-9 流氷の下面形状の例 [Kioka et al., 2008]⁸⁾

一般的に、流氷群の下面凹凸は非定常性かつ非線形
性を有するきわめて複雑なものであるが、Kioka et
al.⁸⁾ は不規則な下面凹凸の標準偏差を用いて、直感
的・視覚的な流氷下面の凹凸の大きさの指標を提案
することを目的として、海の波にならって有義振幅
について検討した。有義波高は、それが直感的かつ
自然に感じられる波の高さを与えるといわれている。
標準偏差と、ゼロアップクロス法による有義振幅と
の関係は直線であり、標準偏差に 3.4 を乗じると有
義振幅（海の波の場合は理論的に 4）となることを
示した。実際、図-9 に例示したように、局所的に
定常とみなされる区間⁸⁾の氷下面形状において、そ
の凹凸の標準偏差に 3.4 を乗じた有義振幅は、その
区間の流氷下面の凹凸の高さを直感的・視覚的に表
現し得るものであった。

以上の結果から、オホーツク海における流氷群の
摩擦抗力係数の概略推定を試みる。まず、本実験で
得られた抗力係数を $C_0/\Delta h^2$ の関数として整理した
ものを図-10 に示す。上記の凹凸の有義振幅を本実
験における Δh に相当するとし、標準偏差は C_0 の平
方根であるから、上記の結果を考慮すると、

$$\begin{aligned} \Delta h &= 3.4\sqrt{C_0} \\ \therefore \frac{C_0}{\Delta h^2} &= \left(\frac{1}{3.4}\right)^2 = 0.086 \end{aligned} \quad (6)$$

が得られ、図-10 から、 $C_s=0.03\sim 0.04$ の値が得られ
る。これは、他の観測結果¹²⁾で、氷下の流速プロ
ファイルを計測することによって推定されたラフな
氷の場合の抗力とだいたい同程度である。

図-10 摩擦抗力係数 C_s と $C_0/\Delta h^2$ との関係

以上のように、本研究では特に摩擦抗力係数について考察した。本研究の議論から、凸部の高さなど凹凸のスケールにこだわらず、凹凸形状が相似、つまり、 $T/\Delta h$ あるいは $C_0/\Delta h^2$ 等が同一であれば、同一の C_s を与えることになる。前述したように凸部の高さが影響するのは圧力（形状）抗力と考えられ、別途考慮する必要がある。なお、圧力（形状）抗力係数は 10^{-1} のオーダーが報告されている³⁾。ただし、氷群の被覆距離が長くなれば、相対的にその影響は小さくなると考えられる。

5. まとめ

本研究では、特に凹凸の摩擦抗力成分に着目した様々な凹凸状態の氷群の伝達荷重や抗力係数などについて調べた。主要な結論を以下に示す。

- 平坦な氷群の場合と同様、アイスブームへの伝達荷重は流速の二乗に比例した。伝達荷重と氷群被覆長の関係は、平坦な氷群の場合にはほぼ直線であったが、凹凸の場合には、曲線的（増加率が減少）であった。また、流下方向の伝達荷重の理論モデルは、この実験値の傾向を良く表すことを確認し（図-1）、このモデルより、各凹凸状態の氷群の抗力係数を推定した。
- 高さ（振幅）一定で異なる(20mm 厚氷盤の)混入率 ξ に対応する各凹凸状態を表す波数や分散などの単純な指標を算定し、それらと抗力係数との関係を推定した。
- 上田等の実験も考慮して、抗力係数は、 10^{-2} のオーダーであること、凹凸の周期と振幅の比 ($T/\Delta h$) が 1 のオーダーで C_s が最大となることが推察された。
- 本実験結果から、オホーツク海における流氷群の摩擦抗力係数の概略推定を試みた。現地観測結果の有義振幅と標準偏差との関係から、およそ 0.03～0.04 と推定された。

今後は、より ξ を大きくして、抗力係数が最大を

もつ事を確認するとともに、凸部の形状を、矩形のみならず、円形、三角形など様々な形状も試み、凸部の高さも不規則に変化させた実験等も実施する必要がある。あわせて、円柱形の氷盤のみならず、種々の形状の氷盤で実施する必要がある。

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: 流氷群と防水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, 森昌也, 山本泰司, 遠藤強, 竹内貴弘: 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, 海洋開発論文集, Vol.25, pp.1053-1058, 2009.
- 6) 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.
- 7) 木岡信治, 河合孝治, 竹内貴弘, 牧田佳巳: サロマ第二湖口における流氷挙動と水路護岸に作用する流氷接触荷重の数値計算, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No1, pp. 786-790, 2010.
- 8) Kioka, S, Yamamoto, Y, Sutou, A and T. Takeuchi : Characteristics of Ice Bottom Topography from the Sea of Okhotsk off Hokkaido - Observation Results in 2007 -, Proc. of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.1, pp. 594-601, 2008.
- 9) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文集, 第 104 号, pp. 33-44, 1964.
- 10) 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.
- 11) Fukamachi, Y., Mizuta, G., Ohshima, K.I., Toyota,T., Kimura, N.and M.Wakatsuchi, : Sea ice thickness in the southwest Sea of Okhotsk revealed by a moored ice-profiling sonar,” *J. Geophys. Res.*, Vol.111, C09018, doi:10.1029/2005JC003327, 2006.
- 12) Johannessen, O.M. : Note on Some Vertical Profiles Below Ice Floes in the Gulf of St.Lawrence and near the North Pole, *J.Geophys.Res.*, Vol.75, No.15, pp.2857-2861, 1970.