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

Numerical Calculation of Contact Force on Structure and Movement of Sea Ice in Lake Saloma

木岡信治¹·河合孝治²·竹内貴弘³·牧田佳巳⁴

Shinji KIOKA, Takaharu KAWAI, Takahiro TAKEUCHI and Yoshimi MAKITA

We developed a numerical method using 2-D DEM to simulate the interaction between ice floes and structures, which will be needed to consider countermeasures against the deterioration of marine structures due to contact with sea ice floes. The validity of the numerical method was made by comparison with observation results concerning contact forces by load cells embedded in the channel wall in the 2nd entrance of Lake Saloma. The numerical calculation results not only agreed well with the observation results regarding the static/dynamic contact forces, but they were also able to estimate or interpret the interaction forms and behaviors of ice floes which would have existed around the structure. Thus, this method was found to be very useful as one of general analysis tools to estimate interaction between ice floes and structures.

1. はじめに

サロマ湖では、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2ヶ所の湖口(第1,第2) にアイスブームが設置されている.アイスブームは主に メインワイヤーと鋼製のフロートからなり、これが流氷 を受け止めてその張力をアイスブームを係留する固定構 造物に伝達する.このうち第2湖口の水路(写真-1)では、 側壁に用いられている鋼矢板等に著しい損耗・劣化が確 認されている。第2湖口では非常に早い潮流が発生し、 特に湖内が結氷していない状態では流氷の挙動が活発と なる. 流氷の衝突や摩擦等によるものと思われる変形・ へこみや、摩耗などが確認されているほか、貫通孔や開 孔腐食等が認められている.特に後者については腐食に よって劣化した材料に流氷が作用した結果とも考えられ るし、また流氷の作用が腐食を促進したとも考えられる. これまで鋼矢板などの劣化調査が実施され、これらの損 耗・劣化は流氷の関与が高いと考えられている(寺島ら, 1997;河合ら, 2010). この他, オホーツク海に面した導 流堤等の鋼矢板にも流氷による著しい損耗や破損が見ら れ(写真-2参照),何らかの対策が望まれている.佐伯ら (1985) は、この劣化のメカニズムのひとつ、海氷と構造 材料とくにコンクリートとの摩耗特性を明らかにし, 摩

1	正会員	博(工)	(独法)土木研究所 寒地土木研究所 寒冷 沿岸域チーム 主任研究員
2	正会員		(株)クマシロシステム設計 計画調査 第2部 次長
3 4	正会員 正会員	博(工)	八戸工業大学工学部教授 北海道開発局釧路開発建設部

耗量は接触圧力に大きく依存する事を示している. 鋼材 に関しては、摩耗に加え、流氷による錆層の剥離が腐食 を促進している可能性もある.劣化対策を考えるうえで は、まず、流氷挙動や接触荷重およびその作用形態等を 推定する必要があると考えられる.しかし、連続体とし ての扱いが困難な流氷群の挙動解析のための有効な手法 が開発されていない.そこで本研究では、個別要素法を 適用した計算によってこれらを推定する手法を検討した. サロマ第2湖口の矢板護岸に設置された計測器による接 触荷重の実測結果(河合ら,2010)との比較から、その 計算法の妥当性を検証し、汎用的な流氷群の挙動解析ツ ールとしての可能性についても検討を加えた.



写真-1 冬期のサロマ第2湖口



写真-2 オホーツク海に面した導流堤(鋼矢板)の破損例

2. 計算方法

(1) 計算地点

本検討で対象とするサロマ湖の第2湖口(写真-1)は、 湖内の水質環境向上を主目的としているほか、航路として の利用も考慮して、昭和53年に建設された.水路幅は 50m,水路延長は260mで,外海側には2本の導流堤,水路 には橋梁が建設されている.この水路の側壁は鋼矢板で建 設され、橋台のコンクリートは鋼管杭で保護されている. この橋台は水路幅方向に凸に張り出した形となっている.

(2) 計算条件と境界条件

氷群は粉体や粒状体などの非連続体と見なせるため、 そのシミュレーションに適している個別要素法(DEM) の適用を試みた.著者らは単純な境界条件を有するアイ スブームに関する水理模型実験を実施するとともに、そ の氷群伝達荷重の推定に2次元のDEMを使用し、実験値 との比較からその妥当性を示した(木岡ら,2009).本 計算においてもそれらを準用した.本計算において重要 な外力条件は、氷群に作用する流れ(潮流)による抗力 (F_{ice})である.これを、圧力抗力と摩擦抗力から成ると 考え、次式で定義した(上田ら,1992).

$$F_{ice} = \frac{1}{2} \rho_w C_{dws} A |V_w - V_i| (V_w - V_i) + \frac{1}{2} \rho_w C_d h' |V_w - V_i| (V_w - V_i)$$
(1)

ここに、Aは氷の被覆面積、 ρ_w は水の密度、h'は氷の喫水 深、 $V_w \geq V_i$ はそれぞれ流れと氷の速度である。 $C_{dws} \geq C_d$ はそれぞれ摩擦(抗力)係数と形状(圧力抗力)係数で あり、平板の場合には、上田等(1992)により、0.007、 0.65と推定されている。本計算でも基本的にはそれを準用 したが、摩擦係数については、後述の理由により、0.005-0.03程度の範囲で検討した。なお、風による抗力は無視し た。また、流氷の諸元は、サロマ湖近傍の流氷調査(河 合ら、2010)を参考に、直径3m、厚さ1mの円盤とした。

図-1には計算対象であるサロマ第2湖口~アイスブーム までを簡略モデル化したものと,氷群の流入出の方法を 示した.5つのアイスブーム群を巨視的に一つの放物線と 近似し,橋脚部(アバット部)は,水路内に張り出して いる半径4mの半円柱とした.さらに,計算負荷が大きく なる外海領域の計算については,計算条件を簡略化し, 湖口近傍に仮想物体を設置した.これにより,下げ潮時 に,湖外の流氷の存在によって自由な流出が制限される 状態等を擬似的に表現し,湖内・口付近の氷の流出状態 を制御した.上げ潮時にも,様々な流入状態が考えられ ることから,これに準じる条件を付加した.水路内流速 については,潮位や地形条件から,竹内ら(2007)の方 法を用いて推定した.表-1に主な計算条件をまとめる.

他方,河合ら(2010)は,橋脚部から湖内側20m地点

の鋼矢板凹部に受圧板(縦0.5m×横0.3m)を取り付け, 平成20年2月25日より約1ヶ月間,ロードセル(200kN) で流氷群による側壁への接触荷重を計測した.潮位変動 にも対応できるようにL.W.Lを中心として上下2枚を取 り付けた.サンプリング周波数は状況に応じ,100Hz~ 1kHzとしている.本研究では,その実測結果と本計算結 果との比較を行い,本計算法の妥当性を検証した.また, その結果から,壁面を移動する流氷挙動,壁面へ及ぼす 荷重特性やその時の作用形態についても考察を加えた.



図-1 計算のためのサロマ第2湖口~アイスブームのモデル化 と氷群の流入出の方法

表-1 主な計算条件

時間ステップ(s)	4×10 ⁻⁴	
氷厚 $h_i(\mathbf{m})$	1	
氷の半径 r (m)	1.5	
氷の密度(kg/m ³)	0.9×10^{3}	
氷と水との摩擦抗力係数	$0.005\!\sim\!0.03$	
氷と水との形状係数(Cd	0.65	
氷のバネ定数(k _n)(MN/n	$10\!\sim\!100$	
摩擦係数(氷-氷)	0.4	
Gice(m)(下げ潮時)	$20 \sim 100$	
開口率L/2r	下げ潮時	1~2.5
開口率L/2r	上げ潮時	7.5

3. 計算結果

(1) 接触荷重の計算値と実測値との比較

図-2(a)(b)には,接触荷重の経時変化の計算値と実 測値との比較例,図-3にはそれらのスペクトルの比較例, さらに図-4には,間欠的に得られる接触荷重の比較的短



図-2 (a) 接触荷重の実測値と計算値との比較例(下げ潮) 2008年3/3 16:05-16:55下げ潮時(氷群は移動→静止 状態,この状態より荷重増大),湖口平均流速は推 定 1m/s



図-2(b) 接触荷重の実測値と計算値との比較例(上げ潮) 2008年2/2518:30-18:45上げ潮時(氷群は移動→静 止状態),湖口平均流速は推定0.6m/s

い時間での実測値と計算値との比較例を示した.まず, 図-2(a)には下げ潮時の場合であるが,実測結果の下の 写真はその時の流氷の状態(外海側および湖内側)を示

し、計算結果(2例)の下には、実際の壁面近傍での氷群 挙動や作用形態を推察するため、シミュレーションにお いてある注目する荷重の波形とそれに対応する接触状況 やモデルを示した.なお、同図(b)には上げ潮時の例を示 したが、紙面の都合、それらの図は省略している.まず、 図-2の実測値は、氷群が移動している状態から静止状態 に移行して得られた結果である.移動状態では図-4や後 述の図-5に示すように間欠的に接触荷重が発生する場合 が多いのに対し,静止状態では,静止後すぐ継続した荷 重となり、しかしそれは一定ではなく変動性をもつ場合 が多いことが特徴的であった.計算結果を見てみると, この結果も実測値と同様に移動状態から静止状態になっ た後の荷重履歴を示しているが、その荷重の大きさや変 動性を良好に再現していると言える. それらの荷重履歴 のスペクトルを示した図-3を見ると、両者に卓越した周 波数は見られないこと, また, 計算値の方がやや高周波 成分が多く含まれている感があるが、実測値のスペクト ルのバラツキなども考えると、本計算結果は、実測の荷



図-3 接触荷重の実測値と計算値のスペクトル(MEM 法によ る)の比較例



 図-4 比較的短い時間(氷群移動状態)での接触荷重の実測 値と計算値との比較例
2008年3/718:42~80sec.下げ潮時(氷群はごく遅いが 移動状態),湖口平均流速は推定1.13m/s 重履歴の波形特性と比べて不都合な相違はないものと思 われる.さらに、図-4から、氷群移動状態での間欠的あ るいは衝突的な荷重特性も良好に再現することが可能で ある.

(2)計算結果からみる実測荷重特性の解釈と氷群挙動の推定

実測では、いくつかの特徴的な荷重特性(波形)が得 られた、これらは氷群の動きに応じたものと考えられる が,厳密に氷群挙動と荷重履歴(波形)が対応した実測 は難しいため、計算結果を用いて、本実測結果で特徴的 と思われる氷群挙動や作用形態の検討を試みた.まず, 特徴的な荷重特性としては、氷群に覆われているのにほ とんど荷重が作用しない場合が見られた.これは、図-2 (a) に示したように、計算結果から、一見、氷群に覆わ れていても受圧板への荷重伝達を担う有効な氷が接触し てないことが推察される. つまり、受圧板近傍はシャー ベット状の柔らかい氷 (frasil crystal, slash ice, etc) 等で覆 われている場合に対応する.次の特徴として、前述のよ うに氷群が静止状態にもかかわらず荷重が変動すること や、急に荷重が作用しなくなる場合が見受けられた、こ れらも計算結果から説明できる. 同図に示すように巨視 的には氷群が静止しているように見えても、個々の氷は 微妙に振動しながら、その位置は少しづつ変化するため、 荷重変動が生じ、いずれ受圧板から接触していた氷が消 滅することに対応しているものと推察される. また, 氷 群に覆われ、その氷群が移動しているのにもかかわらず ほとんど荷重が作用しない場合があった. つまり, 氷群 移動時にはあまり荷重がかからず(ゼロもしくは継続的 でなく間欠的あるいは衝突的),静止してから作用する場 合が多かった.これらを顕著に表す計算結果として,氷 群の移動状態から静止状態に至る接触荷重の計算結果を 抜粋したいくつかの例を図-5に示す.図-6のモデル図に も示すように、氷群が移動状態の場合で、外力(流れ) の向きが一方向のみの場合では, 氷群が同様に流れ(氷 同士の接触・接点が少なく),上流からの力の伝達量が少







図-6 氷群の移動状態の違いによる壁面への接触荷重特性を 説明する簡易モデル図

ない. 側部荷重(壁面接触荷重)への寄与はそれらの軌 道が乱された氷群の衝突程度であると推察される.また, 移動速度が遅いまたは静止状態では,氷群間の接触・接 点を介し,粉体圧のごとく,上流からの力の伝達(力の 集積)が行われることに対応しているものと推察される.

また、荷重が振動し、負値が出現する場合があった. この要因のひとつに、氷の作用に対する反力計測系(受 圧板~ロードセル~岸壁)の応答が考えられる.この考 え方に基づけば,前述の波形の振動(振幅)も計測系の 応答の結果である可能性も考えられ、さらに、固有振動 数と荷重作用時間(特に衝突的な荷重の場合)との比に よっては, 観測として得られる反力が氷群が及ぼす正味 の荷重(入力値)に等しいとは限らないという懸念が生 じる.残念ながら計測系の固有振動数が計測されてない ので、厳密な検討は難しいが、図-7に示す簡単な反力計 測系のモデルを計算に追加して概略検討を試みた.計測 系の質量Mを50kg,減衰定数h,を2%と仮定した応答計 算結果の例を同図に示した.いくつかの固有周波数fで計 算した結果,同図に示すようにおよそ = 300Hz以下となる と負値が現れ始め、一応の負値の出現の説明がつく.ま た先の懸念に対しては、推定される作用時間との関係も 考慮すると、fが数100Hz程度以上であれば、動的な増幅 もあまり生じず、得られた荷重(反力)は、実用上は氷 群が及ぼす外力と考えて良いと思われる。この点につい ては、まだ曖昧さは残るが、今後さらに検討を加えたい、

(3) DEMによる計算のための主なパラメータ

計算結果に比較的大きな影響を及ぼすパラメータは, 経験的には,主に氷要素間のバネ定数 (k_n) と摩擦抗力係 数である.まずバネ定数は,50-100MN/m程度とすると比 較的良い結果をもたらした.他方,これを海氷のヤング 率 (E)を用いて大ざっぱに推定してみる.海氷を半径r, 厚さ h_i の円盤の弾性体と考えると,フックの法則から,



図-7 反力計測系の簡易モデルとその応答計算例

ここに、 R^{θ}_{ij} はバネ長(=2rと仮定)、 A_c は接触面積、bは 接触幅であり、氷要素間に外接する正多角形の一辺の長 さと仮定した.この実測では海氷のヤング率は計測され ていないが、一般に数100MPa程度であるから、およそ この程度のバネ定数が得られる.したがって、DEMによ るバネ定数の初期値として式(2)を参照すればよい.

また,氷と水との摩擦抗力係数(C_{dws})については,オ ホーツク海の氷群底面は平坦ではなく凹凸に富んでいる (Kioka ら, 2008)ため,本来,2次元の計算でこれを表現 するのは難しいが,大きな氷群(連続氷野)の巨視的な 抗力係数を個々の氷要素に適用した.これは,個々の氷 要素が集積して連続氷野となった場合の静的な抗力との 整合性を優先していることに対応する.この場合,10²の オーダー(特に0.01~0.03)とすると,実測値をよく表す 結果となった.一般に,平坦な氷板であれば,10³のオー ダー(上田ら,1992;Wadhams,2000),氷の底面形状が roughな場合,0.03である(Johannessen,1970)と報告され ている.著者等の観測や検討でも,およそ10²のオーダー と推察されている(木岡ら,2007)ため,この間の値を 初期値として準用することは妥当であると思われる.

アイスブームへの氷群伝達荷重の実測値との 比較

サロマ湖には,冒頭でのべた第2湖口のアイスブーム の他,第1湖口(幅250m)にも13スパン(全長1430m) のアイスブームが設置されている.関口ら(1997)は, 1997年の2月に,施工途中のアイスブーム(固定杭No.7 に係留)に作用する荷重や氷象,風速や湖口流速等を計 測している.ここで,さらなる検証のため,本計算方法



図-8 アイスブームに作用する氷荷重の実測値と計算値との 比較 [No.7固定杭に係留されているワイヤロープの張 力で評価] [1997年2月9日 10:30-18:30]

を用いて,氷群の伝達荷重の経時変化ならびに氷群挙動 を推定し,その観測結果と比較した例を図-8に示す.た だし,流れは実測値(定点観測)から1方向のみの一様 な流れとして与えた.この図より,計算結果は氷群の堆 積状況と力の経時変化を良好に再現している.この結果 からも,本計算法が流氷群の挙動解析ツールの一つとし て有効である事が示されたと言える.

5.おわりに

本研究では、流氷との接触による構造物の損耗対策を 考える上で重要な接触荷重およびその作用形態等を個別 要素法を適用した計算によって推定する手法を検討した. サロマ湖口の矢板護岸における接触荷重やアイスブーム に作用する氷群伝達力の実測結果との比較から、その計 算法の妥当性を検証した.本計算手法は、いくつかの課 題が残るものの、実測の静的・動的荷重特性をおよそ再 現するだけでなく、そこに内在する氷群の作用形態や挙 動などの解釈や推定も可能と考えられ、汎用的な流氷群 の挙動解析ツールの一つとして有効である事が示された.

参考文献

- 上田俊也・佐伯 浩・山下俊彦・村木義男・榎 国夫 (1992) : 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.
- 河合孝治・牧田佳已・木岡信治・寺島貴志・竹内貴弘(2010): 流氷が作用する水域における鋼矢板護岸に作用する接触圧 力の現地計測,海洋開発論文集, Vol.26(投稿中).
- 木岡信治・竹内貴弘・蒔田俊輔(2007):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.
- 木岡信治・森 昌也・山本泰司・遠藤 強・竹内貴弘 (2009) :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.
- 佐伯 浩・浅井有一郎・泉 洌・竹内貴弘 (1985) :海氷に よるコンクリートの摩耗に関する研究,海洋開発論文集, Vol.1, pp. 68-73.
- 関口浩二・遠山哲次郎・荒田 崇・清水敏晶(1997):サロ マ湖湖口部に作用する氷力に関する研究,海洋開発論文 集, Vol. 13, pp. 853-858.
- 竹内貴弘・木岡信治・寺島貴志(2007):感潮狭水路に設置 された構造物表面の海氷移動による摩耗量の推定につい て,海洋開発論文集, Vol.23, pp. 697-702.
- 寺島貴志・今泉 章・佐藤光一・中田克哉・花田真州・佐伯 浩(1997):氷盤移動による鋼矢板の摩耗とその推定法, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 813-818.
- Johannessen, O.M. (1970) : 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.
- Kioka, S, Yamamoto, Y, Sutou, A and T. Takeuchi (2008) : 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.
- Wadhams P. (2000) : ICE IN THE OCEAN, GORDON AND BREACH SCIENCE PUBLISHERS, pp.112-114.