

実用的な港内結氷シミュレーション手法の構築とその活用方法

木岡信治* ・ 本間大輔** ・ 山本泰司***
窪内 篤**** ・ 西多道祐*****

主に北海道の港湾漁港において、種々の経済的損失をもたらしている「港内結氷」に対する対策工法の効果の評価を支援するためのツールとして港内結氷シミュレーション手法に取り組んでいるが、本研究では、さらに計算方法・条件等の改良を加え、より実用的な手法を構築した。北海道東部の大津漁港を対象とし、港内水温の経時変化、結氷範囲の日変化、結氷厚分布を観測結果と比較した結果、実現現象を概ね再現できることを確認した。また「寒さ」の代表指標の導入により、計算コストを大幅に削減できるほか、比較的少ない過去の気象データから、「寒さ」に応じた結氷状況や出漁不能日数等（対策工法による効果含む）を推定できる可能性を示した。

1. はじめに

冬季に港内水面が凍結する港内結氷は、北海道各地の港湾・漁港において、出漁不能、船舶の待機・損傷など、大きな経済的被害を与えており（大村ら, 2000）、結氷対策の地元の要請は高い。比較的水温が高い外海水供給や港形改良、氷盤排除など様々な対策案（本間ら, 2001；泉ら, 1988；遠藤ら, 1989）が考えられるが、それらの効果を評価する手法が未だ確立されていない。このため、著者らは主に、ほぼ毎年結氷する大津漁港を対象として、気象観測等による水面での熱収支特性や結氷メカニズムの解明等の基礎研究のほか、提案される対策案の効果の評価を支援することを主な目的とした結氷シミュレーションモデルの開発などに取り組んできた（Kioka ら, 2004；本間ら, 2002）。大津漁港は、北海道東部の太平洋に面し、十勝川河口の南西部に位置する掘込式の第 4 種漁港である（写真-1 参照）。この漁港の主な結氷要因は、冬季の気温が比較的低いこと、掘込式であるため外海との熱交換が起りにくい他、発生した氷が排出されにくい、などが指摘されている（本間ら, 2001）。

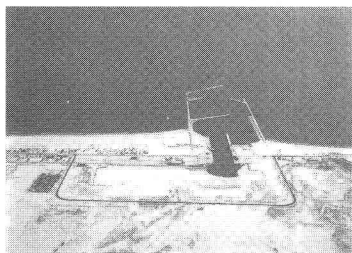


写真-1 大津漁港の結氷状況の例 (2001年冬季)

本研究では、この結氷シミュレーション手法のうち、従来では融解過程の表現に課題があった雪/氷の相変化の計算方法の改良、および重要な熱供給源のひとつ「港外の海水」の水温や港内の初期水温の設定方法の改良を試み、春先の融解期を含む長期間のシミュレーションが可能となる実用的な手法を構築し、観測結果よりその妥当性を検証した。また、大津漁港を対象とした過去25年の結氷状況を計算し、気象等の年変動性を考慮した結氷対策の効果の定量評価が可能となる基礎的手法についても検討した。

2. 結氷シミュレーションモデル

(1) シミュレーションモデルの全体構成

本結氷シミュレーションモデルは、後述する幾つかの改良点はあるが、基本的には本間ら（2002）と同様であり、その概要をごく簡単に紹介しておく。本モデルは大きく分けて、①港内の海水流動、②氷盤の移動、③氷/雪の相変化、を計算する3つのサブモデルからなり、海水温、結氷厚分布（平面分布）等の経時変化をアウトプットできるものとなっている。一方、本研究における計算方法の主な改良点は、上記③の氷/雪の相変化の計算方法、および初期条件・境界条件となる港内と外海の水温の設定方法である。

(2) 港内の海水流動モデルと氷盤の移動モデル

湾や湖、エスチャリー等における海水流動の準3次元的な解析を行うための数値モデル（多層密度流モデル）が提案されており（藤原ら, 1992）、本モデルの港内の海水流動モデルにもこれを採用している（本間ら, 2002）。また、氷盤の移動モデルは、本間ら（2002）が示したように、氷盤上面に作用する風によるせん断力と下面に作用する流れによるせん断力を外力とした氷盤の運動方程式より計算した。

(3) 雪/氷の相変化モデル

著者らの従来モデルでは、雪/氷内の温度分布は準定常近似解を採用、つまり、直線分布であると仮定してい

* 正会員 博(工) (独法)北海道開発土木研究所 港湾研究室
** 正会員 北海道開発局 港湾行政課 技術審査係
*** 正会員 博(工) (独法)北海道開発土木研究所 港湾研究室
**** 正会員 (独法)北海道開発土木研究所 港湾研究室
***** 北海道開発局 十勝港湾事業所

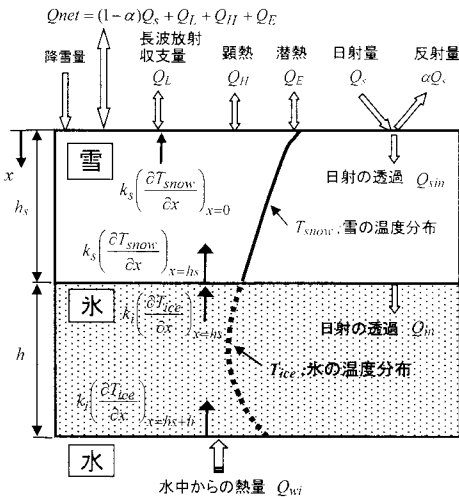
た。しかし、日中では水の中層で氷温が最小になることが知られており、事実、大津漁港での気象観測結果による熱収支の考察から、日中には氷表面の融解が生じている事が示された (Kioka ら, 2004)。特に結氷対策の効果の検討には、出漁日数という観点から、春先の融解期を含む長期間のシミュレーションを実施する必要があることから、より相応しいモデルの適用が必要である。このため、雪/氷の表面融解や日射の雪/氷内への透過を考慮できるものとした。図-1に示すような1次元の熱伝導・熱収支のモデルを仮定すると、雪および氷の層における熱伝導方程式はそれぞれ式 (1)、(2) となる。

$$\frac{\partial T_{snow}}{\partial t} = a_s \frac{\partial^2 T_{snow}}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho_s C_{ps}} \frac{\partial Q_{sin}}{\partial x} \quad (0 < x < h_s) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_{ice}}{\partial t} = a_i \frac{\partial^2 T_{ice}}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho_i C_{pi}} \frac{\partial Q_{in}}{\partial x} \quad (h_s < x < h_s + h) \quad (2)$$

ここに、

$$Q_{sin} = Q_s(1-\alpha)\exp(-\kappa_s x) \quad (3)$$



本文中で用いた記号の説明

Q_L : 長波放射収支量, Q_H : 顕熱伝達量,
 Q_E : 潜熱伝達量, Q_s : 日射量 (入射), α : アルベド
 Q_{net} : 大気-雪 (氷) 表面での熱収支量
 $= (1-\alpha) Q_s - Q_L - Q_H - Q_E$
 Q_{wi} : 海中からの熱伝達量 (流れによる)
 Q_{sin} : 雪表面を通じた日射透過量
 Q_{in} : 氷表面を通じた日射透過量
 T_{snow}, T_{ice} : 雪、氷の温度
 k_s, k_i : 雪、氷の熱伝導率
 ρ_s, ρ_i : 雪、氷の密度
 C_{ps}, C_{pi} : 雪、氷の比熱
 κ_s, κ_i : 雪、氷の減衰定数
 h_s, h : 雪、氷の厚さ
 T_{sm}, T_{im} : 雪、氷の融解温度
 L_s, L_i : 雪、氷の融解潜熱
 $R_{insnow}(t)$: 単位時間当たりの降水量

$$Q_{in} = Q_s(1-\alpha)\exp(-\kappa_s h_s - \kappa_i x) \quad (4)$$

また境界条件は、雪の表面において、

$$Q_{net} - k_s \left(\frac{\partial T_{snow}}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 \quad (5)$$

雪/氷の界面において、

$$k_s \left(\frac{\partial T_{snow}}{\partial x} \right)_{x=h_s} = k_i \left(\frac{\partial T_{ice}}{\partial x} \right)_{x=h_s} \quad (6)$$

$$T_{snow}(h_s, t) = T_{ice}(h_s, t) \quad (7)$$

氷の底面において、

$$T_{ice}(h_s + h, t) = T_{im} \quad (8)$$

式 (5)、(6) は、雪と氷の融解がない状態の熱収支の式を表す。また、式 (1) と (2) の雪/氷内部の日射吸収量を表す式や係数は、青田ら (1981) を参照した。次に、氷と雪の相変化について考える (これも境界条件に含まれる)。まず、雪の相変化を表す式は、雪の底面では融解が生じないと仮定し、雪表面における熱収支より得られる。この時、雪の表面温度 $T_{snow}(0, t)$ が雪の融解温度 T_{sm} より低い場合 (融解が生じない)、および融解が生じる場合の条件式は、それぞれ次式で表される。

$T_{snow}(0, t) < T_{sm}$ のとき、

$$\frac{dh_s}{dt} = R_{insnow}(t) \quad (9)$$

$T_{snow}(0, t) > T_{sm}$ のとき、 $T_{snow}(0, t) \rightarrow T_{sm}$ として、

$$\rho_s L_s \frac{dh_s}{dt} = \rho_s L_s R_{insnow}(t) + k_s \left(\frac{\partial T_{snow}}{\partial x} \right)_{x=0} - Q_{net} \quad (10)$$

上式 (10) において、 $T_{snow}(0, t) < T_{sm}$ のとき、境界条件 (5) より、右辺 2 項と 3 項との和は 0 となり、式 (9) と一致する。一方、氷の相変化も同様に、氷の表面温度 $T_{ice}(h_s, t)$ が氷の融解温度 T_{im} より低い場合 (融解が生じない)、氷の底面での熱収支より式 (11) で与えられ、融解が生じる場合は、氷表面と氷底面における熱収支により、式 (12) で表される。

$T_{ice}(h_s, t) < T_{im}$ のとき、

$$\rho_i L_i \frac{dh}{dt} = k_i \left(\frac{\partial T_{ice}}{\partial x} \right)_{x=h_s+h} - Q_{wi} \quad (11)$$

$T_{ice}(h_s, t) > T_{im}$ のとき、 $T_{ice}(h_s, t) \rightarrow T_{im}$ として、

$$\rho_i L_i \frac{dh}{dt} = k_i \left(\frac{\partial T_{ice}}{\partial x} \right)_{x=h_s+h} + k_s \left(\frac{\partial T_{snow}}{\partial x} \right)_{x=h_s} - k_i \left(\frac{\partial T_{ice}}{\partial x} \right)_{x=h_s} - Q_{wi} \quad (12)$$

なお、上式 (12) において、 $T_{ice}(h_s, t) < T_{im}$ のとき、境界条件 (6) より、右辺 2 項と 3 項との和は 0 となり、式 (11) と一致する。なお、海中からの熱量 Q_{wi} については本間ら (2002) と同様、平山ら (1985) による方法を用いた。

以上の問題は、移動境界問題であり非線形問題となるが、この計算法には、各層の領域を常に固定するように

図-1 熱伝導・熱収支の模式図

座標変換し、固定境界の問題に置き換える方法である境界固定法 (Saito, 1978) を適用した。

(4) 海水の熱的性質

海水は固相、液相、気相から成り立つ混合物であり、その熱的性質は複雑である。ゆえに、海水の熱伝導率、融解潜熱、比熱などのパラメータは、ブライン量、水温、気泡量などさまざまな因子に依存し、刻々変化する。本研究では、計算手法としては厳密ではないが、前の時間ステップにおける水温分布の平均値 T_i のみを用いて、これらのパラメータを順次更新することとした。この場合、水の塩分量 S_i 、密度 ρ_i 、熱伝導率 k_i 、比熱 C_{pi} は空間的な変化がないと仮定し、以下の式を適用して計算した。

- ・熱伝導率 (Maykut and Untersteiner, 1971)

$$k_i = k_0 + \beta \frac{S_i}{T_i} (\beta = 0.13 \text{ Wm}^{-1}) \dots \dots \dots (13)$$

k_0 は純水の熱伝導率で、次式で計算した (Yen, 1981)。

$$k_0 = 9.828 \exp \{-0.0057(273 + T_i)\} \quad (\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}) \dots \dots \dots (14)$$

- ・融解潜熱 (小野, 1968)

$$L_i = 333.6 - 2.114T_i - 0.1143S_i + 18.05 \frac{S_i}{T_i} + 0.00335S_iT_i - 0.00377T_i^2 \quad (\text{kJ/kg}) \dots \dots (15)$$

- ・比熱 (Ono, 1967)

$$C_{pi} = C_0 + aT_i + b \frac{S_i}{T_i^2} \dots \dots \dots (16)$$

C_0 は純水の比熱 ($2113 \text{ Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$) で、係数 a, b はそれぞれ、 $7.53 \text{ Jkg}^{-1}\text{C}^{-2}$ 、 $0.018 \text{ MJ}^\circ\text{Ckg}^{-1}$ で与えられる。後に示す計算では、 ρ_i 、 S_i は一定と仮定し、それぞれ 900 kg/m^3 、 8‰ とした。

(5) 雪/氷の表面を通じたヒートフラックス

図-1 に示したように、雪/氷の表面を通じたヒートフラックスは日射収支量 $(1-a)Q_s$ 、長波長放射収支量 Q_L 、対流熱伝達による顕熱伝達量 Q_H 、水蒸気輸送にともなう潜熱伝達量 Q_E とした。日射量 (全天日射) については、近傍の測候所から入手できるデータを用い、その反射量は、アルベド α を、水で 0.1、雪/氷で 0.75 と仮定して計算した。また、 Q_L 、 Q_E 、 Q_H については、風速、気温、相対湿度、雲量、水蒸気圧など、他の気象データから計算によって推定した (Kioka ら, 2004)。なお、後に示す大津漁港の結氷シミュレーションでは、風速、気温は大津アメダス、その他の気象データは広尾測候所のものを用いた。なお、大津漁港における気象観測結果から、日射量は広尾測候所のものとはほぼ一致し、 Q_L についても、計算値とほぼ一致することを確認したほか、 Q_L が熱損失量に占める割合が一番大きく 5 割以上であることを確認している (Kioka ら, 2004)。

(6) 初期条件・境界条件

従来の計算条件では、港内への重要な熱供給源のひとつ「港外の海水」の水温は、過去の実測水温が少ないことから、断熱 (自然) 境界条件を採用していた。しかし、外海からの熱供給は無視できないことは明らかであり、春先まで含めた長期間の計算は困難であった。このため、今回は 2000 年までは、気象庁海況統計資料 (1971-2000) (1° メッシュ, 36 旬) を、2001 以降については第一区海上保安本部海洋情報部が提供する「北海道近海の海況」海面水温 (24 旬) を参照した。大津漁港の結氷シミュレーションでは、その沖合に最も近い海面水温を用い、図-4 に示す外海領域の境界にその温度を適用した。また、各旬を挟む 2 点 (旬の始終日) による算術平均温度が、その間の旬平均水温に一致するように、順次、その点の水温を求めて直線補完することにより、計算ステップ毎の水温を推定した。

港内水温も同様、既往の実測値が極めて少ない。ある時期から計算を始める場合、初期水温として与える必要がある。図-2 に、例として 2003 年度冬季における大津漁港港内の実測水温 (港奥部) と海上保安庁が提供する漁港沖合に最も近いと思われる海面水温との比較を行った。この場合、港内の実測水温の方が低いが、11 月上旬では両者は等しく、それ以降、徐々に外海と港内の温度差は大きくなると見なすことができる。このことから、これを根拠とし、港内の初期水温には外海水温を与え、計算は 11/1 より開始することとした。以上のように考えれば、現地データがない場合でもシミュレーションを実施することが可能となる。

なお、ここでは特に触れていないその他の計算条件や入力値については、本間ら (2002) と同様とした。

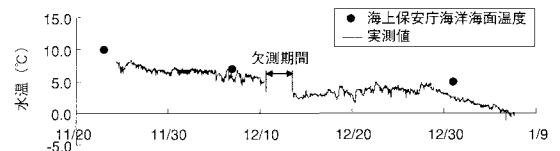


図-2 実測水温 (大津漁港港奥部・表層) と第一区海上保安本部の提供する表面水温との比較例 (2003 年度)

3. 結氷シミュレーション手法の妥当性の検証

大津漁港を対象とし、いくつかの観測結果と比較することにより、本手法の妥当性を検討した。まず、水温変化について、実測値とシミュレーションによる計算結果との比較例を図-3 に示す (1999 年度, 港奥部表層)。この場合、シミュレーション結果の方が、実測値よりもやや高い水温で推移しているが、11/1 からの計算結果であることを考慮すると、変動特性も含めた水温低下傾向と春先の上昇傾向など、実測水温を概ね良好に再現してい

ると言える。

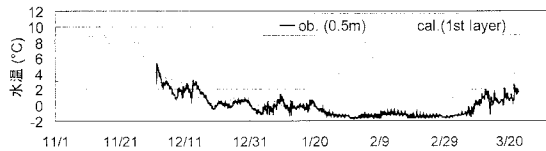


図-3 港内水温の実測結果と計算結果との比較例
(大津漁港・港奥表層, 1999 年度冬季)

次に、結氷(範囲)分布の計算結果と目視観測結果との比較例を図-4 に示す。上図が計算結果、下図が目視観測結果である。まず結氷日について、目視観測では、港奥部において12月よりごく縁では薄い結氷が見受けられたが、本格的に結氷範囲が広がっていくのが1/22以降であった。一方、計算結果では1/23となり、11/1より計算を開始している事を考慮すると、結氷日はほぼ一致している。またシミュレーションでは再現不可能な漁船による砕氷作業、または漁船の頻繁な航行・出入(船舶自身の事実上の砕氷、航跡波の影響などで氷が割れ、また氷が移動、港外へ排出されやすくなる)などが多少あった事を考慮すれば、結氷範囲やその融解過程等が概ね良好に再現されていると言えよう。前述の港内水温低下の再現性も考慮すれば、境界条件となる港外水温の導入方法、流動場のモデル、熱損失の扱い方などの考え方が概ね妥当であると思われる。

次に、2001年2月中旬に大津漁港の水厚の平面分布の調査が実施されたので(本間ら, 2001), この結果と計

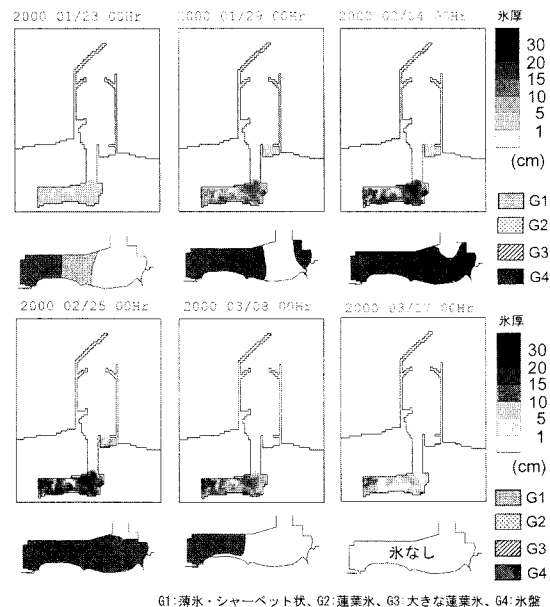


図-4 結氷(範囲)分布の計算結果(上段)と目視観測結果(下段)との比較例(1999 年度冬季大津漁港)

算結果との比較を図-5 に示す。この年は太平洋側の主要港湾も凍る程の厳しい気象であり、さらにこの調査時期は氷厚が最大となる時期であった。この時、氷厚は港奥で最大58 cm, 平均は30 cm を超えていた。一方、計算結果も、概ねこの氷厚を再現しており、妥当な範囲で推定可能であると思われる。

以上、水温、結氷範囲、氷厚の比較により、本手法の妥当性を検証したが、実用に耐えるものであると思われる。従来では、氷の相変化モデル、外海水温などの境界条件の不備により、ごく短期間(特に結氷初期)しか計算できなかったが、これで冬期間を通じた対策工法の効果の推定が可能となる他、従来よりも再現性が向上した。

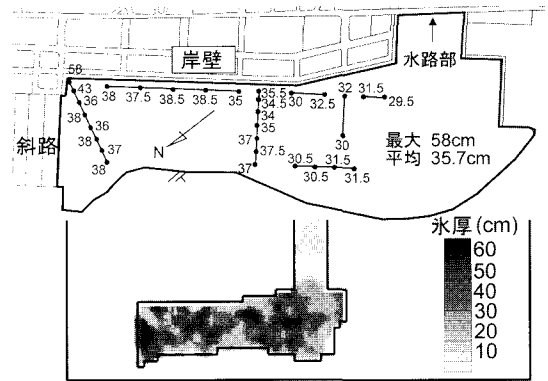


図-5 結氷厚の平面分布の観測結果と計算結果との比較(大津漁港, 2001年2月17, 18日)

4. 気象等の年変動性を考慮した結氷対策工法の定量評価のための基礎的手法の検討

シミュレーションによる結氷対策工法の効果の定量的評価や、効果的で経済的な対策工の最適案の決定を行う場合には、気象条件など年変動が大きな入力データの与え方も重要な課題のひとつである。例えば気象の「代表的」なデータの模擬は困難であるので、過去の気象条件を参照することになる。さらに、客観的な評価が可能となるよう、特定の年の気象データを用いるのではなく、海象・気象条件等の過去の統計情報も考慮する必要があるものと思われる。本研究では、この基礎的な手法も検討した。

まず、氷厚や寒さを表す簡便な代表(間接的)指標として、冬期間の港内水域からの熱損失量を定義した。この場合、前節で用いた各ヒートフラックスの和 Q_{net} が負の値になる(熱損失発生)日から3月末までの負の累積値とした。ここで、大津漁港を対象とし、過去25年分(1978~2002年度)の代表指標を計算し、対応する各年の結氷シミュレーションを実施した。一方、結氷による損害を表現する尺度の一つとして、年間の出漁不能日数

が考えられる。これを港内の平均氷厚が漁船の航行可能な氷厚を超える年度あたりの累積日数と定義した。なお、その限界氷厚は、大津漁港の場合、地元漁師により経験的に5 cmとされている。図-6には、その出漁不能日数の推定値と熱損失量との関係を示す。なお、破線は図中に示した関数形を仮定した場合の回帰曲線を示しており、ここでは、仮に $b = 120$ 日（最大結氷期間12～3月の4ヶ月と仮定）とし、 a 、 c は最小二乗法により推定した。また、その上下の点線は80%信頼区間を表している。多少のバラつきは見られるものの、導入した代表指標から、出漁不能日数（予測の期待値や範囲）は推定可能であると思われる。このバラつきの主な要因には、異なる気象条件に対し、それらの指標値が結果的には同程度となっても、個々の気象要因の経時変化の相違などによって結氷状況が異なることに起因している。さらに有効な指標値を構築する余地は残されているが、このように1つのパラメータで代表させるにはおのずと限界がある。しかし、実用的観点からは、容易に計算できるこの指標には便利な側面がある。比較的少ない過去の気象データから、「寒さ」の再現期間に応じた結氷状況の代表値（平均氷厚等）や出漁不能日数（あるいはその予測範囲）等を簡易的に推定でき、計算コストも大幅に削減できる。

また、対策工法の効果を直接的に表すものとして、無対策時と対策工実施時の出漁不能日数の差が考えられる。さらに、1日当りの漁獲物の水揚量等乗じ、その対策工によって生じる年間の効用（貨幣価値）も表現できる。同様に、前述の代表指標を用いれば、「寒さ」の再現期間に応じた効果の推定を行うことができる。そのうえ、この代表指標の確率分布や、出漁不能日数の回帰曲線からのバラつき（分布）等を仮定することにより、気象条件の年変動性を考慮した結氷対策工法の費用便益分析や最適案の決定、または、その対策工法の信頼性評価（例えば、耐用年数後にCBRが1を超える確率など）が可能となり、特定の気象条件によらない普遍的な定量評価を行うことができる。

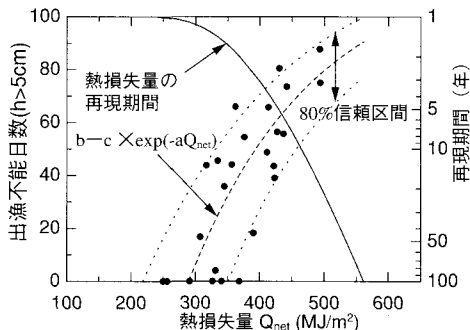


図-6 熱損失量をパラメータとした場合の年間出漁不能日数と熱損失量の再現期間の推定（大津漁港，1978～2002年度）

5. おわりに

港内結氷は多くの複雑な自然現象、船舶航行などの人為的活動の影響を受けること、また現地での詳細で正確な観測結果を得る事も難しいことから、将来的にも厳密に結氷状況を再現できるシミュレーション手法の構築は困難であると考えられる。しかし、提案される結氷対策の効果の評価や最適案の決定に至る一つの判断材料や根拠の提供を主たる目的とすれば、現段階でも十分実用性に耐えるものであると考えている。その場合、本手法による再現性の限界を踏まえた上で、総合的に判断・評価する必要がある。今後は、引き続き、前述の代表指標も含め、本シミュレーションモデルのさらなる精度向上に努めていきたい。

参考文献

- 青田昌秋、石川正雄(1981)：海水の消散係数について、低温科学、物理編、Vol.40, pp. 127-135.
- 泉冽・佐伯浩・後藤克人・浜中健一郎(1988)：港湾の結氷防止に関する一考察、第4回寒地技術シンポジウム、pp. 322-329.
- 遠藤仁彦・梅沢信敏・谷野賢(1989)：エアバブル工法による港内結氷制御に関する実験的研究、海岸工学論文集、第36巻、pp. 693-697.
- 大村高史・平澤充成・寺島貴志(2000)：北海道沿岸の港湾・漁港周辺における海水被害の現状について、海洋開発論文、Vol.16, pp. 151-155.
- 小野延雄(1968)：海水の熱的性質の研究、低温科学物理編、26巻、pp. 329-349.
- 本間大輔・梅沢信敏・山本泰司・木岡信治・川口勉(2002)：港内結氷シミュレーションモデルの構築と現地適用性の検証、海工論文集、第49巻、pp. 1261-1265.
- 本間薫・小玉茂義・梅沢信敏・沖野晃一・寺島貴志、佐伯浩(2001)：掘込式漁港における港内結氷メカニズムと対策に関する研究、海洋開発論文集、Vol.17, pp. 619-624.
- 平山健一(1985)：河川の結氷過程とそのモデル化、第25回水理講演会論文集、pp. 179-184.
- 藤原正幸・明田定満・武内智行(1992)：マルチレベル密度流モデルの開発と人工湧昇流への適用、水産技術報水産土木14, pp. 13-35.
- Ono, N.(1967)：Specific heat and heat of fusion of sea ice, Physics of Snow and Ice (H.Omura, Ed.), Part.1, Inst of Low Temp Sci, pp. 599-610.
- Kioka, S., D. Honma, Y. Yamamoto, N. Nishida and T. Terashima (2004)：Meteorological observations and method for estimation of ice production rate in fish port of hokkaido during winter season, Proc. 17th Int. Symp. on Ice, Vol. 1, pp. 385-392.
- Maykut, G.A. and N. Untersteiner (1971). Some results from a time-dependent thermodynamic model of sea ice, J. Geophys. Res., Vol. 76, pp. 1550-1575.
- Saitoh, T.(1978)：Numerical method for multi-dimensional freezing problems in arbitrary domains, J. Heat Transfer, ASME, Vol.100, p. 294.
- Yen, Y.C.(1981)：Review of the thermal properties of snow, ice and sea ice, CREEL Report 81-10, Cold Reg. Res. and Eng. Lab. pp. 1-27.