

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

本間大輔*・梅沢信敏**・山本泰司***
木岡信治****・川口 勉*****

北海道の港湾・漁港においては、冬季の港内結氷が地域の経済活動に大きな影響を与えている。港内結氷対策としては、外海水導入などによる港内への熱供給、水中ファンによる氷晶排除など種々の方法が考えられるが、これら対策の効果を評価する目的で港内結氷シミュレーションモデルを開発した。本モデルは、海水流動モデル、熱交換モデル、結氷融解モデルおよび氷盤移動モデルから成り、気温、水温、日射量、雲量、風、潮汐、潮流等現地の多様な条件を考慮できる。本モデルにより現地の港内水温変化や結氷状況を良好に再現することができた。さらに、各種対策工の結氷抑制効果の評価を行った。

1. ま え が き

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、大きな経済的被害を与えている。港湾利用者からも対策を求める要望が強く、効果的な対策法を早急に開発する必要がある。結氷を制御する方法としては、遠藤ら (1989) および山中ら (1991) が岸壁周辺の氷板を排除するエアバブル工法について報告している。また、その他の対策としては、港内への熱供給、氷晶排除、港形の工夫などが挙げられるが、現地の諸条件を考慮して最適な方法を選定する必要がある。本研究では、これら対策工法の効果を適切に評価する目的で港内結氷シミュレーションモデルを開発した。本モデルは、海水流動モデル、熱交換モデル、結氷融解モデルおよび氷盤移動モデルから成り、結氷発生の要因である気温、水温、日射量、雲量、風、潮汐、潮流等現地の多様な条件を考慮できる。また、本モデルの再現性を、現地観測データとの比較により検討するとともに、現地の漁港を対象に各種対策工の結氷抑制効果の評価を行った。

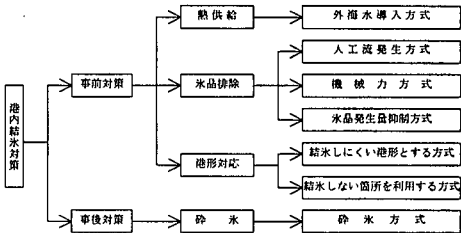


図-1 港内結氷対策

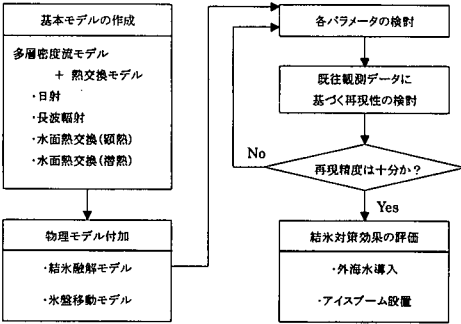


図-2 シミュレーションモデルの流れ

2. 港内結氷対策とシミュレーションモデル開発の流れ

(1) 港内結氷対策

港内結氷対策案を図-1に示す。現状では、結氷発生後に作業船等により砕氷を行い、利用水域を確保する砕氷方式をとっているところがほとんどであり、外海水導入等の事前対策を、現地条件を考慮して最適に検討・評価するのは難しいのが現状である。このため、各種対策工の組み合わせを含めた最適な方法を検討・評価するためのツールとして本モデルを開発する。

(2) シミュレーションモデル

図-2にシミュレーションモデル開発の流れを示す。流れ場を計算するモデルとしては、藤原ら (1992) によ

る多層密度流モデルを用い、これに大気と海水の熱交換に関するモデル、結氷の成長融解モデルおよび氷盤移動モデルを付加し、気温、水温、日射量、雲量、風、潮汐、潮流等の多様な条件を考慮できるものとした。主要なパラメーター値は、感度分析や既往現地観測データの再現性の検討を詳細に行い決定した。

3. シミュレーションモデルの概要

(1) 多層密度流モデル

港内結氷シミュレーションの基本モデルは、前述した多層密度流モデルおよび熱交換モデルで構成される。多層密度流モデルは、密度変化があまり大きくなく、かつ水を非圧縮と仮定しており、圧力による変化を無視した連続の式 (1)、自由表面 (潮位) の式 (2)、運動方程式 (3)、熱収支の式 (4)、塩素量収支の式 (5)、密度を計算するため Knudsen の状態方程式 (6) を用いる。

* 北海道開発土木研究所 港湾研究室
** 正会員 北海道開発局 稚内開発建設部 技術管理官
*** 正会員 工 修 北海道開発土木研究所 港湾研究副室長
**** 正会員 博(工) 北海道開発土木研究所 港湾研究室
***** (株)日本データサービス

式(3)は、鉛直方向には速度変化および加速度が小さく静力学近似が成り立つとし、かつ f -plane 近似を用いている。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-H}^{\xi} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-H}^{\xi} v dz \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

x 方向

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + f_0 v - g \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$- \frac{g}{\rho} \int_{\xi}^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

y 方向

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) + f_0 u - g \frac{\partial \xi}{\partial y}$$

$$- \frac{g}{\rho} \int_{\xi}^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$\dots\dots\dots (3)$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uT) - \frac{\partial}{\partial y}(vT) - \frac{\partial}{\partial z}(wT)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$\dots\dots\dots (4)$

$$\frac{\partial Cl}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uCl) - \frac{\partial}{\partial y}(vCl) - \frac{\partial}{\partial z}(wCl)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial Cl}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial Cl}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial Cl}{\partial z} \right)$$

$\dots\dots\dots (5)$

$$\rho = \frac{\sigma_t}{1000} + 1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma_t = \Sigma_t + (\sigma_0 + 0.1324) \{1 - A_t + B_t(\sigma_0 - 0.1324)\}$$

$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708 Cl - 0.00157 Cl^2 + 0.0000398 Cl^3$$

$$\Sigma_t = -\frac{(T - 3.98)^2}{503.57} \times \frac{T \times 283}{T + 67.26}$$

$$A_t = T(4.7869 - 0.098185 T + 0.0010843 T^2) \times 10^{-3}$$

$$B_t = T(18.03 - 0.8164 T + 0.01667 T^2) \times 10^{-6}$$

ここで、 u, v, w : x, y, z 方向成分の速度ベクトル、 H : 平均水面から海底までの深さ、 f_0 : コリオリパラメータ、 ξ : 平均水面から自由水面までの高さ、 P_0 : 大気圧、 N_x, N_y, N_z : x, y, z 方向の渦動粘性係数、 T : 水温、 k_x, k_y, k_z : x, y, z 方向の熱に関する乱流拡散係数、 Cl : 塩素量、 K_x, K_y, K_z : x, y, z 方向の塩分に関する乱流拡散係数。

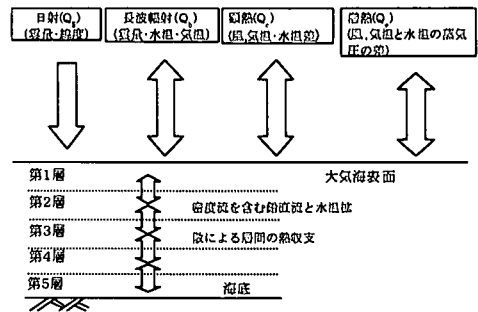


図-3 大気との熱交換モデル

(2) 大気との熱交換モデル

海水と大気は水面を介して図-3に示すような熱交換が行われる。大気との熱交換モデルでは、吸収日射量 Q_s (7) 式、有効長波輻射 Q_b (8) 式、大気との熱交換 (顕熱: Q_c) (9) 式、大気との熱交換 (潜熱: Q_a) (10) 式で表される。これらの式は主に水理公式集(土木学会編, 1999)によるが、式(8)には雲量と緯度を考慮した係数を追加している。式(9)は、薄い海氷上における熱収支の特性について研究した石川・小林(1984)の顕熱輸送係数 K_c を用いた。

また、海面と大気の熱収支は、式(11)に示すようにこれらの和として表わされる。

$$Q_s = (1 - \alpha) Q'_s \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_b = \{\varepsilon \sigma T_w^4 - \varepsilon \sigma T_a^4 (0.51 + 0.066 \sqrt{e(T_a)})\} (1 - 0.65 n^2) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$Q_c = K_c (T_w - T_a) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$K_c = 2.77 \{ (0.14 + 0.23 W_h - 6.0 \times 10^{-3} (T_w - T_a)) \} \times 10^{-4}$$

$$Q_e = \frac{1}{B} \times Q_c \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$B = 0.66 \times \frac{T_w - T_a}{e(T_w) - e(T_a)}$$

$$Q = Q_s - Q_b - Q_c - Q_e \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 α : 水面反射率(アルベド)、 Q'_s : 地球に達した全日射量(全短波放射量)、 θ_w : 絶対温度の水温、 T_w : 表面水温、 $e(T_a)$: 気温 T_a における飽和水蒸気圧、 n : 雲量、 T_a : 気温、 W_h : 平均的な海面上の風速、 $e(T_w)$: 気温 T_w における飽和蒸気圧である。

(3) 結氷・融解モデル

図-4は、結氷・融解モデルにおける氷に関する熱交換を示したものである。ここで、吸熱放射量 Q_s 、有効長波輻射 Q_b 、顕熱 Q_c を考慮した1次元的な成長や融解を支配する熱収支方程式は次のように表せる。

$$\rho_i L_i \frac{dh}{dt} + Q_2 = Q_1 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 ρ_i : 氷の単位体積重量、 L_i : 氷の融解熱、 h : 氷

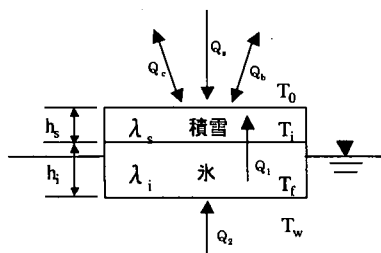


図-4 氷の成長・融解モデル

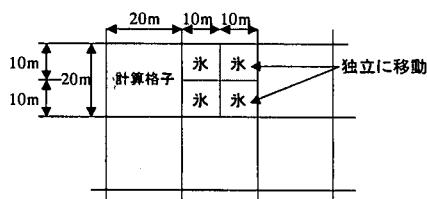


図-5 氷盤移動モデル

厚, Q_1 : 氷盤と積雪を通して大気へ流出する熱流束, Q_2 : 海水から氷盤に流入する熱流束で, Q_2 に関しては, 平山 (1985) と同様に式 (13) を用いた,

$$Q_2 = \lambda_s (T_w - T_f) \quad \dots\dots\dots (13)$$

また, Q_1 は, 佐渡 (1985) が提案した大気との熱交換から算定される熱伝達率 K_s , 平衡温度 T^* を用いて次のように表せる。なお, 本モデルでは, -1.8°C で結氷が開始することとした。

$$Q_1 = \lambda_s \frac{-T_0 + T_i}{h_s} = \lambda_i \frac{-T_i + T_f}{h_i} = K_s (T^* - T_0) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで, T_0 : 雪の表面温度, T_i : 氷の表面温度, T_f : 氷の底面温度, T_w : 海水の温度, λ_s : 積雪の熱伝達率, λ_i : 氷の熱伝達率, h_s : 積雪厚, h_i : 氷厚である。

(4) 氷盤移動モデル

図-5 は, 氷盤移動モデルを模式的に示したものである。本モデルでは, 氷盤上面に作用する風の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て氷盤の運動をモデル化しており, 結氷が開始となった場合に, 1 格子 (20 m×20 m) を 4 分割し初期氷を生成させ, それぞれの個体を独立して移動させる。また, 氷同士の衝突・離散は考慮せず, 氷盤が存在する箇所の海水の流動場には吹送流を考慮しない。氷盤移動モデルは次式のように表される。

$$M_i (\vec{v}_i^{t+dt} - \vec{v}_i^t) = \int_t^{t+dt} (A_i \vec{\tau}_a + A_i \vec{\tau}_w) dt \quad \dots\dots (15)$$

ここで, M_i : 氷盤の質量, v_i : 速度, A_i : 水平面の面積, τ_a : 風によるせん断力, τ_w : 流れによるせん断力。

4. 再現性の検討

(1) 計算条件および計算ケース

本シミュレーションモデルの再現精度を検証するため, 北海道十勝支庁管内の天津漁港を対象として計算を行い, 港内の No. 1, 2 地点 (図-6) における水温の連続観測データとの比較検討を行った。計算は図-6 に示す範囲で行い, 計算格子間隔は $\Delta l = 20$ m, 水深方向分割は 5 層とした。時間ステップは, 流況については $\Delta t = 1.2$ s, 熱収支は $\Delta t = 30$ s とした。また, 流況の鉛直拡散係数を港内で $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$, 港外では第 1 層～第 3 層までは波浪による鉛直拡散が大きいと考えられるため $0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$ とし, 第 4 層および第 5 層は港内と同じ $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。潮汐は, 大潮と小潮の平均値をとり ± 0.5 m とし, 24 時間周期の正弦波形で与えた。気温, 風向・風速, 日照時間, 湿度, 雲量は気象庁観測データを使用した。風速は, 海上 1 m に補正した。計算期間は, 水温が 0°C 以下までに急激に低下した平成 11 年 12 月 10～29 日と, 結氷が発生した前後の期間の平成 12 年 1 月 18 日～30 日とした。また, 開境界部は自然境界として取り扱い, 水温は境界の 1 メッシュ手前の範囲まで計算を行い, 1 メッシュ手前の計算後の水温を境界水温とした。初期水温としては, 計算開始時点における実測値を一様に与えた。なお, 現地では 1 月 22 日に初めて結氷が観測された。

(2) 計算結果

No. 1 地点の水温の実測値と計算値を図-7 (12 月 10～29 日) および図-8 (1 月 18 日～30 日) に示す。12 月 12 日～14 日 (図-7) の急激な水温変化については正確に表現できていないが, その他の期間については, ほぼ実測と一致した結果が得られた。図-8 に示した期間については, 計算値は現地の水温変化を良好に再現している。また, 図には示していないが, No. 2 地点における

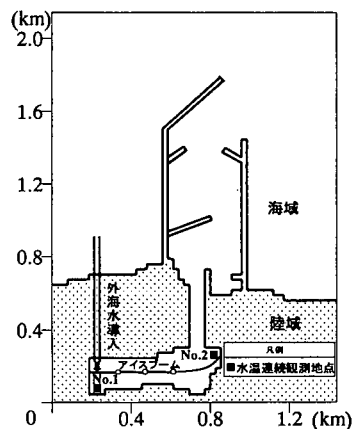


図-6 シミュレーション範囲

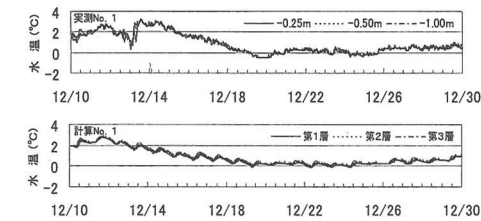


図-7 No. 1 地点の結氷前の実測値と計算値

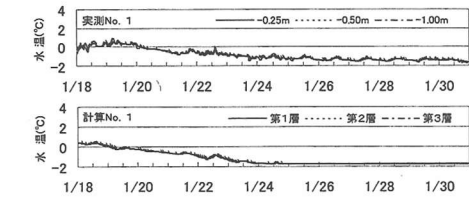


図-8 No. 1 地点の結氷時の実測値と計算値

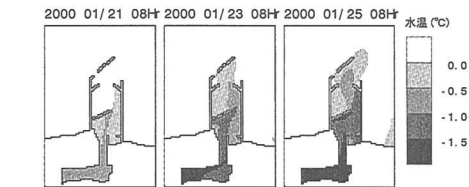


図-9 結氷時の水温分布図

水温変化の再現性も良好であった。

現地では1月22日に初めて結氷が観測されたが、再現計算では1月24日に初めて結氷が発生した。図-9は結氷発生前後の表層水温分布を2日毎に示しているが、港奥部から水温が下がっていく様子がわかる。図-10は、結氷後の氷厚分布を示したものである。結氷が港奥部から発生し、次第に港内全体の氷が厚くなる様子がわかる。これは現地の結氷発生・発達状況をよく表現している。

図-11は、結氷時における海水域と氷盤域の日射・輻射・顕熱・潜熱・熱伝達の各要素の単位時間あたり熱量を示したものである。海水域と氷盤域の熱量の総和は計算水域の全熱収支量を表している。図に示すように海水域では、海面を冷却する負の熱量として、雲量の影響を強く受けている輻射熱が最も大きい。これは、雲量が小さいと放射冷却により海水の熱が大きく奪われるためである。また、氷盤域においては熱伝達の影響が大きい。

5. 対策工による効果

(1) 計算条件および計算ケース

港内よりも水温の高い外海水を港奥部に導入することによる結氷抑制効果を検証するため、前述の計算期間と同期間である平成12年1月18日～30日について計算を行った。また、外海水導入による効果を高めるため、

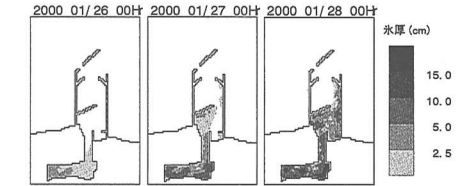


図-10 結氷時の氷厚分布図

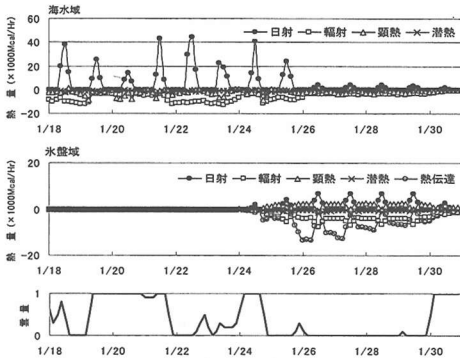


図-11 各要素毎の熱収支および雲量

アイスブームとシルトフェンス等で港内水域を2分割したケースについても計算を行った。外海水温は2℃および4℃とし、それぞれについてアイスブームを設置した場合としない場合について計算した。各ケースの外海水導入量、水温、アイスブームの有無の条件を表-1に示す。なお、アイスブームの配置および外海水の導入箇所は、前掲図-6を参照されたい。

(2) 計算結果

パターン1～4の1月27日から1日ごとの氷厚分布図を、それぞれ図-12～15に示す。

図-12に示すように、パターン1では無対策である図-10と比較して結氷の遅延効果があることがわかるが、港内全体の結氷を抑制することはできない。図-13に示すパターン2では、港内泊地の結氷をほとんど抑えることができるが、導入する海水温度を4℃としており、現地の実際の水温を考慮すると、外海水を上昇させる工夫が必要になる。

図-14に示すパターン3では、アイスブーム等により

表-1 各種対策工の条件

	導水量	水温	アイスブーム
パターン1	1.9 m³/s	2℃	なし
パターン2	1.9 m³/s	4℃	なし
パターン3	1.9 m³/s	2℃	あり
パターン4	1.0 m³/s	2℃	あり

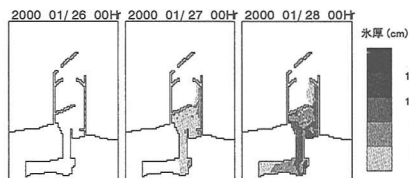


図-12 パターン 1 における氷厚分布図

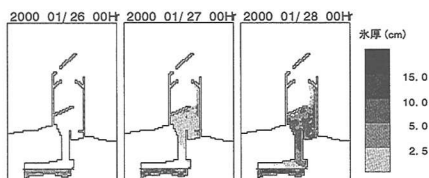


図-15 パターン 4 における氷厚分布図

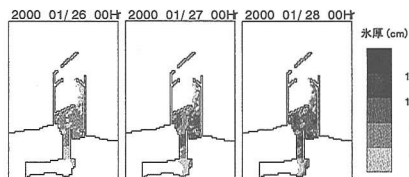


図-13 パターン 2 における氷厚分布図

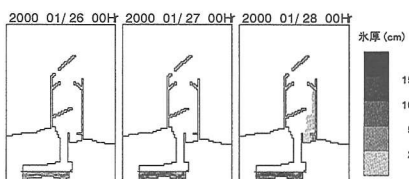


図-14 パターン 3 における氷厚分布図

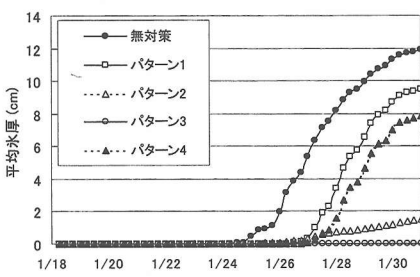


図-16 現況と各種対策工での港内平均氷厚

二分割された水域の一方の結氷をほぼ完全に防ぐことが可能であり、冬季の漁港利用に必要な水域を確保できる。図-15 に示すパターン 4 では、結氷の遅延効果、抑制効果がみられるが完全に防ぐことはできない。

図-16 は、港内水域に存在する氷の平均厚さの変化を、現況と各種の対策を行った場合について示している。パターン 2 およびパターン 3 では、港内平均氷厚は小さく、結氷をほぼ抑えることがわかる。パターン 1 および 4 では結氷発生の遅延効果があるものの、氷厚の成長を十分に抑えることはできないことがわかる。

6. 結 論

本研究で得られた結論を以下に要約する。

①港内結氷発生の要因である気象、海象の多様な条件を考慮できる結氷シミュレーションモデルを開発した。

②本モデルにより現地の港内水温の変化および結氷の発生状況を良好に再現できた。また、結氷前・結氷時における熱収支の各要素毎の特性を算出した。

③結氷対策としての外海水導入およびアイスブームの設置の効果について現地の漁港を対象に試算した。両工法を併用することにより、効果的に港内結氷を防止できることを示した。

謝辞：本研究を進めるに当たり、委員会を通し貴重な

助言をいただいた北海道大学大学院 佐伯浩教授、現地データを提供していただいた北海道開発局十勝港湾建設事業所の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 石川信敬・小林俊一 (1984): 薄い海氷上における熱収支の特性, 日本雪氷学会誌雪氷 46 巻 3 号, pp. 109-119.
- 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.
- 佐藤清富 (1987): オホーツク海海水の数値モデルによる解析, 日本雪氷学会誌雪氷 49 巻, 4 号, pp. 193-201.
- 佐渡公明 (1985): 貯水池結氷版の氷厚増加について, 第 29 回水理講演会論文集, pp. 185-190.
- 中野渡新一・風間 聡・沢本正樹 (1996): 熱収支モデルによる東京湾の熱循環評価, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1131-1135.
- 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, 水産技研報水産土木 14, pp. 13-35.
- 松沢孝俊・山口 一・林 昌奎・鈴木慎介・加藤洋治 (1996): DMDF モデルによるオホーツク海流氷運動の数値予測, 日本造船学会論文集, 第 179 号, pp. 49-57.
- 山中浩次・水野雄三・杉本義昭・時川和夫・梅沢信敏 (1991): 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 (2) 一直立壁の影響について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 706-710.
- 土木学会編 (1999): 水理公式集, pp. 588-590.
- Chang, K. R., H. Yamaguchi and H. Kato (1994): Numerical simulation of rectangle ice floes movement using a distributed mass / discrete floe model, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 175, pp. 151-159.