

感潮狭水路に設置された構造物表面の 海水移動による磨耗量の推定について

ABRASION OF THE SURFACE OF STRUCTURE IN OPEN CHANNEL OF ESTUARY ZONE DUE TO SEA ICE MOVEMENT

竹内貴弘¹・木岡信治²・寺島貴志³

Takahiro TAKEUCHI, Shinji KIOKA and Takashi TERASHIMA

¹正会員 工博 八戸工業大学 工学部環境建設工学科 (〒031-8501 八戸市妙大開88-1)

²正会員 工博 (独) 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

³正会員 工博 (株) クマシロシステム設計 (〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目8)

Since the movement of sea ice in open channel of estuary zone in cold regions is so active due to tidal current, the surface of the structure at the zone is likely to suffer the abrasion due to sea ice movement. Once the type of material of the structure is known, the ice velocity which is influenced by the nature of sea ice as well as pressure perpendicular to structure become important factors for the estimation of abrasion depth. In the paper, the method for calculating abrasive zone and depth at the surface of the structure is shown through sample calculations for 2nd open channel at lake Saroma using sinusoidal curve and tide at Mombetsu. It is concluded that the roughness coefficients between sea ice and fluid, which represents the nature of sea ice, play an important part in the estimation.

Key Words : Abrasion, Sea ice, Estuary zone, Open channel

1. はじめに

石油・天然ガス開発が始まったサハリン島東岸のオホーツク海沿岸域は、南下する東樺太海流により海水の移動（一定方向）が活発な海域であることから、資源開発のための構造物の喫水線近傍における磨耗量の評価が重要である。また、一方で、サロマ湖や能取湖の様にオホーツク海と海水交換が行われている湖口部（図-1）では、潮位変動に伴い順流・逆流が交互に発生し、特に湖内が結氷していない状態ではそれに伴って流氷の移動が非常に活発となり月間の延べ水平移動距離が1000km以上となる場合がある。特に暖冬の場合には氷の移動をより活発にする傾向がある。この様に、海水の延べ水平移動距離が長く、移動速度が変動し、さらに、潮位変動による鉛直移動も加わる条件下の海岸構造物表面の磨耗量評価も重要となる。寺島ら¹⁾は、サロマ湖第2湖口を対象に氷盤の移動による鋼矢板の磨耗計測を行ってきた。本研究では、このような感潮狭水路に設置された構造物表面の海水による磨耗量分布の計算法と事例計算を行い、磨耗量に及ぼす氷の状態の影響を検討したのでそれらの内容を報告する。

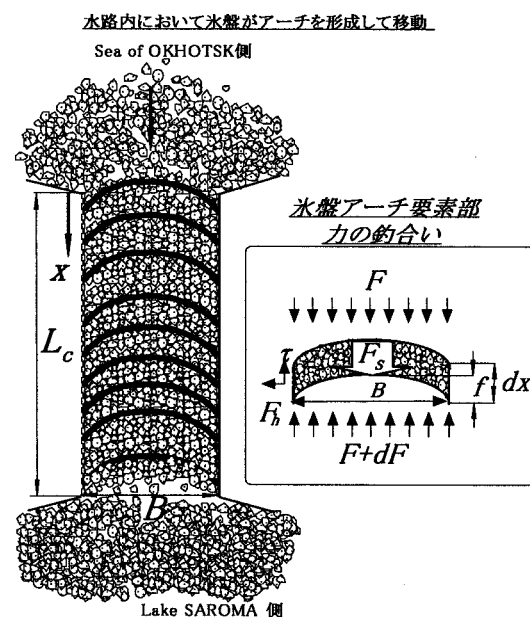


図-1 サロマ湖第2湖口部での氷盤の移動概念図

2. 磨耗量分布の計算

(1) 磨耗量の影響因子

海水の移動による各種材料表面の磨耗量評価に関する系統的な研究として佐伯ら²⁾、浅井ら³⁾、伊藤ら^{4) 5)}や花田ら⁶⁾などの結果から磨耗量(A) [mm]は、(1)式で評価できる。

$$A = m_v \times \sigma_v \times L \quad (1)$$

ここで、 m_v は構造物表面の材料に応じて決まる平均磨耗速度[mm/(km)/(kgf/cm²)], σ_v は接触圧力(平均)[kgf/cm²], L は磨耗距離[km]である。特に、平均磨耗速度(m_v)に関しては、花田ら⁶⁾が各種材料に関する実用的な値をまとめており、例えば、0.00178 (Concrete), 0.00030 (Steel&Urethan)や0.00078 (Zebtron)である。今回は、図-2に示す潮位変動とそれに伴って変化する氷盤の移動速度を考慮し、また、鋼材(Steel)の磨耗を対象としている。したがって、接触圧力(σ_v)と磨耗距離 L (もしくは氷盤の移動速度 V_i)が評価できれば磨耗量分布の計算が可能となる。ここで、寺島ら¹⁾の研究を参照して湖口部内には氷盤による arch が発生しているものとし、また、さまざまな氷盤状態における流体力の研究として榎ら⁷⁾、上田ら⁸⁾、河合ら⁹⁾や蔭田ら^{10) 11)}などの結果から、接触圧力(σ_v)と氷盤の移動速度 V_i を検討した。

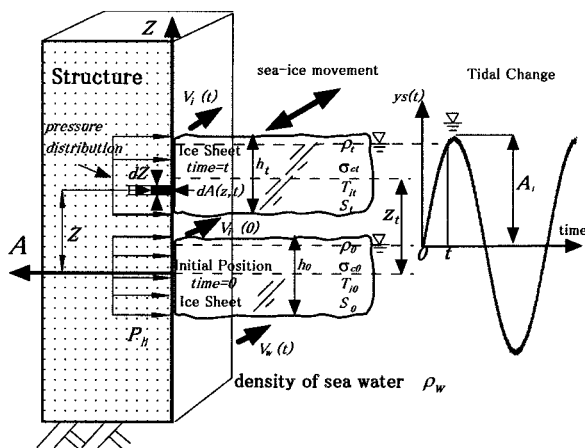


図-2 構造物と氷盤の相互作用模式図(往復流下)

(2) 側壁に作用する接触圧力

氷盤が arch を形成(放物線)するとした場合には、ヤンセンの式¹²⁾を準用して図-1の arch 要素部分に対しての力の釣り合い(準静的状態を仮定、慣性力は無視)を基に導かれた(2)式から F を計算した。ここでは、氷盤端部の圧力抵抗を無視している。

$$F = \frac{F_s l_{ar} B}{2K_0 \tan \phi} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{2K_0 \tan \phi}{B} x \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 F_s は(3)式に示すように、それぞれ氷盤と流

体との摩擦抗力(応力:単位面積当たり)であり、氷盤の移動速度 V_i (x 方向を正)とその下面の流速 V_w (x 方向を正)に依存する。ここでは、往復流は反転して考えると x 方向のみを考える。

$$F_s = \frac{1}{2} \rho_w C_f (V_w - V_i) |V_w - V_i| \quad (3)$$

ρ_w は海水の密度、 C_f は氷と流体との摩擦抵抗係数、 V_w は潮流の流速である。また、放物線 arch に一様分布荷重が作用する場合には K_0 は(4)式、また、放物線 arch の長さを $l_{ar} \times B$ とするとその係数 l_{ar} は、(5a)式や(5b)式となる。

$$K_0 = \frac{1}{8 \left(\frac{f}{B} \right)} \quad (4)$$

$$l_{ar} = \frac{1}{16 \left(\frac{f}{B} \right)} \left\{ \frac{1}{2} (r)^2 + 2 \ln r - \frac{1}{2} (r)^{-2} \right\} \quad (5a)$$

ここに、

$$r = 4 \left(\frac{f}{B} \right) + \sqrt{\left(\frac{4f}{B} \right)^2 + 1} \quad (5b)$$

氷盤と鋼矢板の摩擦係数 μ は氷盤の内部摩擦角 ϕ を用いて $\tan \phi$ とすると、図-1の F_h (N/m)や τ (N/m)は(6)や(7)式となる。

$$F_h = K_0 F \quad (6)$$

$$\tau = F_h \tan \phi \quad (7)$$

したがって、最終的に側壁に対して垂直に作用する接触圧力 P_h (側壁に向かう方向を正)は、(8)式となる。

$$P_h = \frac{\rho_w C_f (V_w - V_i)^2 l_{ar} B}{4h \tan \phi} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{2K_0 \tan \phi}{B} x \right\} \right] \quad (8)$$

(3) 湖口部の流速

潮汐に基づく往復流(順流と逆流)の流速 $V_w(t)$ は、オホーツク海とサロマ湖(第2湖口が関連する領域を考慮)が狭水路で連結し、水路内での水位勾配が一定であるとして両者間にベルヌーイの定理を適用することにより(9)式から概算できる(近藤¹³⁾)。ここでは、加速度項は潮汐に基づく変動のために比較的小さいとし無視している。

$$V_w(t) = \pm (f_0 + f_e + \frac{2gn^2 L_c}{R^{1/3}})^{-0.5} \sqrt{2g |y_s(t) - y_b(t)|} \quad (9)$$

ここに、 f_0 は狭水路の出口における損失係数でおよそ1.0、 f_e は狭水路の入口における損失係数でおよそ0.5、 n は狭水路内のマンニングの合成粗度係数、 R は狭水路の径深(m)、 L_c は狭水路の長さ(m)、 $y_s(t)$ はオホーツク海の潮位、 $y_b(t)$ はサロマ湖内の水位変動(m)である。また、湖内の水量の増減は連続の式から(10)式で計算できる。

$$\frac{dy_b(t)}{dt} = \frac{A_s}{S_L} V_w(t) \quad (10)$$

ここに、 A_s は狭水路の断面積(m^2) ($=Bh$, 狭水路の幅 B , 水深 h), S_L は内湾の面積 (ここでは, 第2湖口が海水交換に寄与する領域を萩野¹²⁾の研究を参照し, $47.7km^2$ と推定した) である。また, 本研究で対象としているのは狭水路に氷盤が存在する場合で, 海底と海水間のマニングの粗度係数 n_b と海氷と海水間のマニングの粗度係数 n_i の両方を考慮し, それぞれの区分の流速が全断面の平均流速に等しいとの条件から得られる(11)式で合成粗度係数 n を計算した。式中の s, s_i や s_b は各区分の潤辺である。

$$n = \left(\frac{s_i n_i^{3/2} + s_b n_b^{3/2}}{s} \right)^{2/3} \quad (11)$$

以上から、 $y_s(t)$ (オホーツク海の潮位としてここでは正弦曲線や紋別2007-1潮位) を与え, 初期条件 $y_b(0)=0$ の下で(9)&(10)式を解いて水位変動 $y_b(t)$ を求めて, その $y_b(t)$ を(9)式に代入し湖口の流速 $V_w(t)$ を計算した。

次に, 狭水路内の氷盤に対して, 運動エネルギーと仕事 (平均的な力が距離 L_c 間作用する) が釣り合うと仮定して以下の(12)式が成立する。また, 氷が狭水路(幅 B , 長さ L_c)に存在する時には加速度は発生せず, V_w と V_i ともに一定とする。

$$\begin{aligned} & \int_0^{L_c} \frac{1}{2} \rho_i l_{ar} B h V_i^2 dx \\ & = \int_0^{L_c} \frac{\rho_w C_f l_{ar} B^2 (V_w - V_i)^2}{4 K_0 \tan \phi} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{2 K_0 \tan \phi}{B} x \right\} \right] dx \end{aligned} \quad (12)$$

以上の条件から次の(13a)や(13b)式が導かれる。

$$\left(\frac{V_w}{V_i} \right)^2 - 2 \left(\frac{V_w}{V_i} \right) + C = 0 \quad (13a)$$

ここで,

$$C = 1 - \frac{\frac{1}{2} (\rho_i B h L_c)}{\frac{\rho_w C_f B^2}{4 K_0 \tan \phi} \left[L_c + \frac{\left(\exp \left\{ -\frac{2 K_0 \tan \phi}{B} L_c \right\} - 1 \right)}{\frac{2 K_0 \tan \phi}{B}} \right]} \quad (13b)$$

また, 氷が海水より早く移動することはないから既知の V_w (外海の潮位と湖内の水位との関係より) を通して (14)式より V_i が決定される。

$$m = \left| \frac{V_w}{V_i} \right| = \frac{2 + \sqrt{2^2 - 4 \times C}}{2} > 1 \quad (14)$$

よって, 最終的に接触圧力 $P_h(t, x)$ は(15)式となる。

$$P_h(t, x) = \frac{\rho_w C_f l_{ar} B V_w^2 \left(1 - \frac{1}{m} \right)^2}{4 h \tan \phi} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{2 K_0 \tan \phi}{B} x \right\} \right] \quad (15)$$

期間 T の全氷盤移動距離 L_t は, (16)式で与えられる。

$$L_t = \int_0^T \frac{1}{m} |V_w(t)| dt \quad (16)$$

(4) 磨耗量分布

潮汐の影響を受け移動する氷盤の氷厚中心部分が $z(t)$ に位置する場合の z 位置における時間間隔 dt ($time=t \sim t+dt$)の材料の磨耗量増加分 $dA(z, t)$ は, 以下の(17)式や(18)式から計算できる。

$$dA(z, t) = m_v \times \sigma_v(z, t) \times V_i(t) \times dt \quad (17)$$

そして, $-\frac{h}{2} + z(t) \leq z \leq \frac{h}{2} + z(t)$ の範囲では, $\sigma_v(z, t) = P_h(t, x)$ (矩形分布近似; 図-2参照)とした。ここで,

$$z(t) = y_s(t) + h_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_w} - 0.5 \right) - h_t \left(\frac{\rho_t}{\rho_w} - 0.5 \right) \quad (18)$$

表-1 計算条件

パラメーター	数値
参照氷厚 h [m]	平均 1.0
海氷の密度 ρ [g/cm ³]	平均 0.9
海水の密度 ρ_s [g/cm ³]	1.02
海氷の内部摩擦角[度]	30
構造物 (鋼矢板) 参照幅 W_r [m]	0.3
サロマ湖第2湖口	水路幅 (B) は 50 m, 水路長 (L_c) は 260 m, 水深 (h) は 5 m
<計算時に与えた潮汐 type1 正弦潮位>	
潮位 y_s [m]	$y_s = A_s \sin(2\pi t / T_p)$ t は時間 0.05[hour]毎
潮位振幅 A_s [m]	0.25, 0.5, 0.75
潮汐の周期 T_p [hour]	24
<計算時に与えた潮汐 type2 紋別2007-1潮位>	
紋別の予想潮位 y_s [m]	30日間 (2007/1/20~2007/2/19) 0.05[hour]毎
構造物材料	Steel
対象材料の磨耗速度 m_v [mm/(km)/(kgf/cm ²)]	0.00030 (1kgf/cm ² $\approx$ 0.098MPa)
海氷と海水間の摩擦抵抗係数 C_f	0 (無氷状態), 0.026 (流氷 no ice jam相当), 0.1, 0.2, 0.3 (ice jam 形成時相当)
接触応力 (σ_v) [MPa]	湖口・水路内に氷盤 arch (ice jam: 放物線近似) が形成され, 流体抵抗を arch に働く等分布荷重とした場合に側壁に作用する準静的荷重. 接触圧の分布形状は矩形 (仮定) .
氷盤 arch の放物線形状	高さ (f) 20 m, 幅 (B) は 50 m
計算時間間隔 Δt [hour]	0.05 (= 180sec)
海底と海水間のマニングの粗度係数 n_b	0.024
計算日数 [day]	30
磨耗分布計算の鉛直微小長さ dz [m]	0.001

そして図-1に示すように, 潮位変動 $y_s(t)=0$ の時の氷盤の厚さ方向の中心位置 ($z=0$) を基準としている。また, 実際には時間とともに海氷の密度 (ρ), 塩分濃度 (S), 氷温 (T) や氷厚 (h) は変化するが, ここでは常に一定とし ((18)式では, $\rho_0=\rho_i$; $h_0=h_i$) , 微小な dz

毎に z を変化させ、それぞれの位置 z で(17)式を時間積分することから、構造物表面の磨耗量の分布形状を計算した。計算条件を表-1に示す。

3. 磨耗量の計算結果と考察

(1) 側壁に作用する接触圧力

はじめに、準静的な釣り合い条件から導かれた(15)式で与えられる側壁に作用する接触圧力 P_h を表-1の条件および氷盤の移動速度 $V_i = 1 \text{ m/s}$ の基で計算した結果を図-3に示した。 x が大きくなると海水と氷盤間の摩擦抵抗係数 C_f が大きい程流体抵抗が大きくなるため接触圧力も大きくなる。潮汐の変動に応じて往復流（順流と逆流）となるために、それにつれ x 方向が反転して接触圧力もそれに応じて代わるために中央位置 ($x=L/2$) での接触圧力を磨耗計算では用いた。

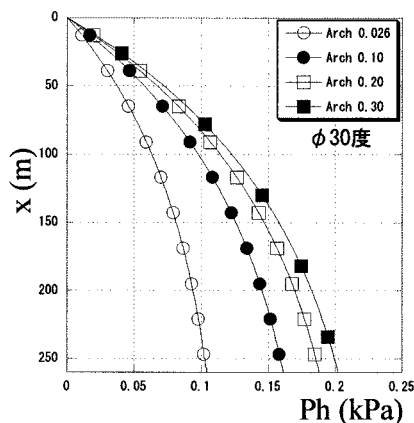


図-3 側壁に作用する接触圧力の例 ($V_w=1\text{m/s}$)

(2) 湖口部の流速と氷盤の移動距離

外海潮位 $y_s(t)$ に伴って変動するサロマ湖内の水位変動 $y_b(t)$ や湖口部の流速 $V_w(t)$ の計算結果の例（4日間分）をそれぞれ図-4～図-7に示す。これらは外海潮位を正弦曲線（半振幅0.75m）とした場合や紋別2007-1潮位を与えた場合に対して、それぞれ想定した氷盤の状態に応じて氷盤と海水との摩擦抵抗係数 C_f を変化させて計算したものである。 $C_f=0$ を無氷状態（ice free）, $C_f=0.026$ を通常の流氷がはびこるような場合, $C_f=0.10 \sim 0.30$ をice jamを形成している場合と想定した。さらに、湖内で結氷が発生していない氷盤の移動が活発な条件としている。湖内の水位変動が C_f の値に影響を受け、それに伴い湖口部の流速 $V_w(t)$ が変化している。 C_f の値が大きくなるにつれて流速 $V_w(t)$ は小さくなるが、一方で、流体力が大きくなるため側壁へ作用する接触圧力は大きくなる。これらは、磨耗量を評価する上で相反する効果となる。また、参考までに、湖内の水位変動は外海潮位の2～3時間遅れの位相差となることや流速（無氷状態）の

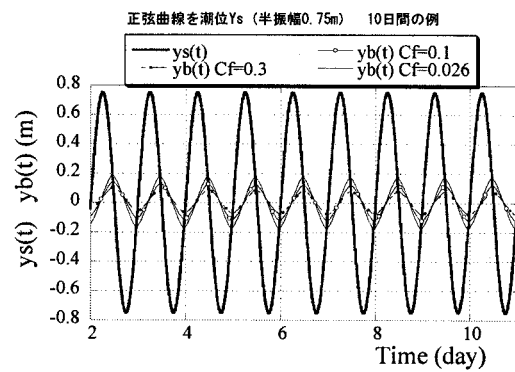


図-4 外海潮位を正弦曲線（水位変動）

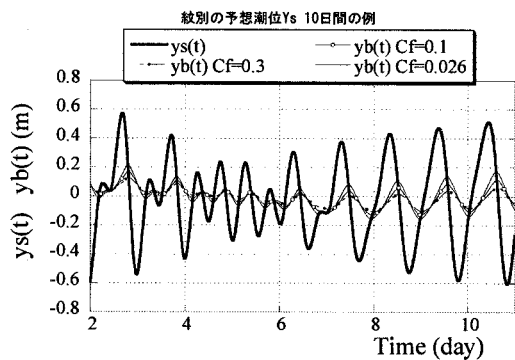


図-5 外海潮位を紋別2007-1（水位変動）

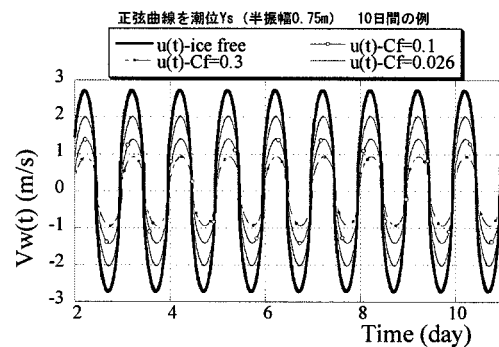


図-6 外海潮位を正弦曲線（流速変動）

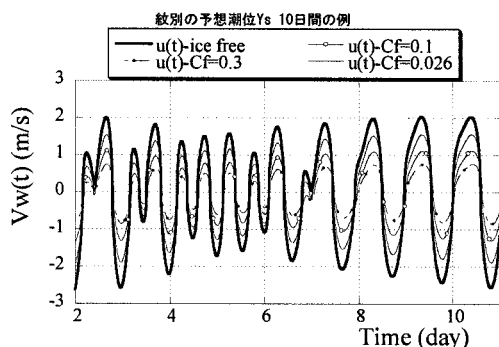


図-7 外海潮位を紋別2007-1潮位（流速変動）

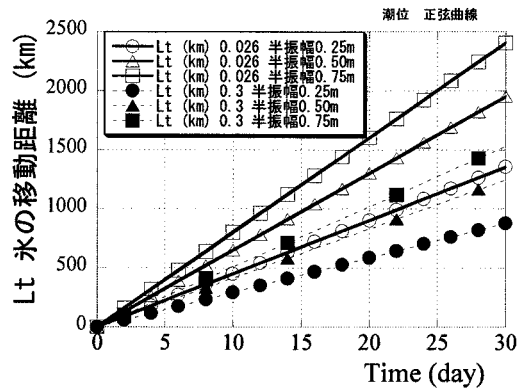


図-8 氷盤の全移動距離（正弦曲線）

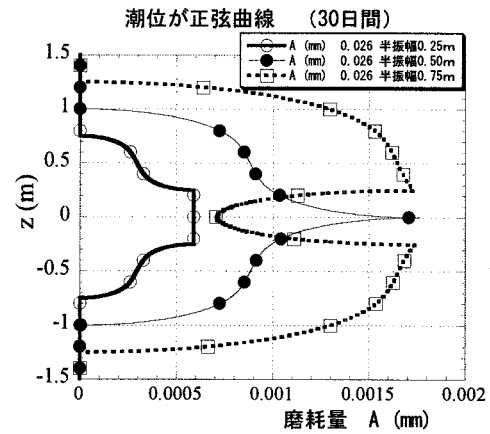


図-10 磨耗量分布の計算例（正弦曲線） $C_f = 0.026$

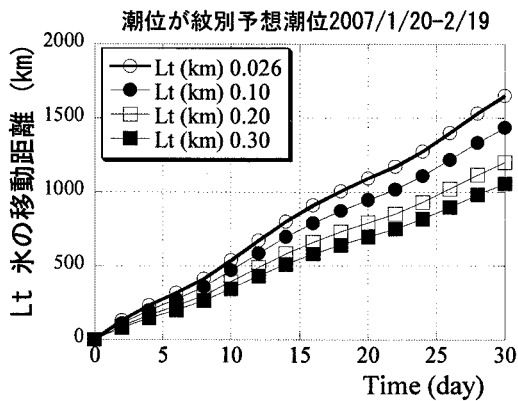


図-9 氷盤の全移動距離（紋別2007-1潮位）

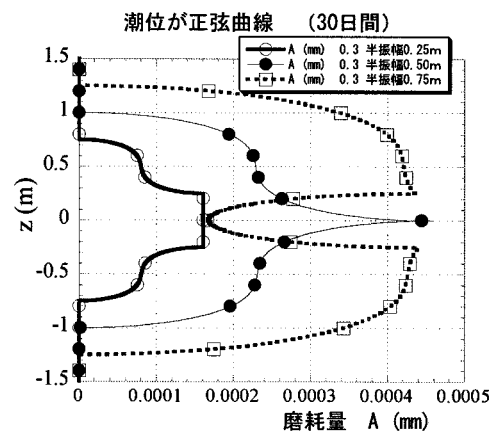


図-11 磨耗量分布の計算例（正弦曲線） $C_f = 0.3$

値も萩野¹⁴⁾，蒔田¹⁵⁾と対応している．図-8, 9には，氷盤の全移動距離 L_t と日数との関係を示した．30日程度の期間でさえも氷盤は1000km以上も移動することが分かる． C_f の値が大きくなるにつれ L_t が小さくなることが分り，磨耗量へ大きく影響を与えることが予想される．

(3) 磨耗量分布

次に，外海潮位を正弦曲線（半振幅0.25m，0.50m，0.75m）とした場合の磨耗量 A 分布を示したものが図-10（ C_f の値が0.026の場合）と図-11（ C_f の値が0.3の場合）である．磨耗量の分布形状は与えた接触圧力の分布形状（矩形），氷盤の厚さ，対象潮位などに大きく影響を受ける．たとえば，氷盤が構造物により破壊されbrittle crushingするような場合には概ねガウス分布で近似できるが（竹内ら¹⁶⁾），今回は分布が不明な為に様（矩形）を仮定した．したがって，精度を上げるためにも接触圧力とその分布形状についての現地観測が望まれる．

同様に，外海潮位に紋別2007-1潮位を与え，それぞれ想定した氷盤の状態に応じて氷盤と海水との摩擦

抵抗係数 C_f を変化させて磨耗量 A 分布を計算したものが図-12である．磨耗量は C_f の値に影響を受けることが分り，分布形状は概ね潮位に基づく氷盤の鉛直位置を反映しており，寺島ら¹⁾の現地観測結果と傾向が一致している．

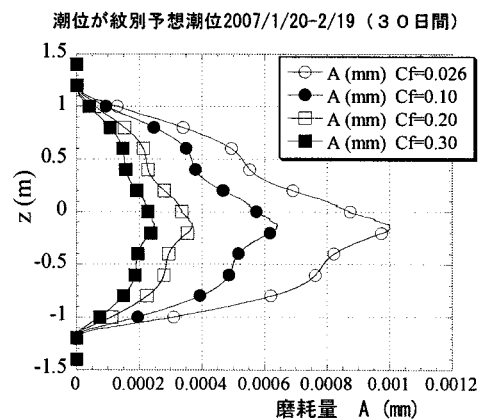


図-12 磨耗量分布の計算例（紋別2007-1潮位）

磨耗量は氷盤の状態を表す摩擦抵抗係数 C_f に影響を受けることから、横軸に C_f の値をとり、縦軸に磨耗量の最大値 A_{max} をプロットしたものが図-13である。外海潮位が紋別2007-1潮位の場合であっても正弦曲線で与えた場合であっても、磨耗量の最大値 A_{max} は摩擦抵抗係数 C_f の増加に応じて減少する。平坦氷の場合($C_f=0.007$ 程度⁸⁾)では実際問題として氷の移動が制限されるために、今回は、流水に相当する $C_f=0.026$ を最小の摩擦抵抗係数の値として計算を行っており、この場合には、摩擦抵抗係数 C_f の増加に応じて磨耗量の最大値 A_{max} は減少する傾向にある。しかし、今回の計算では磨耗量の最大値 A_{max} が0.001mm(紋別2007-1潮位, $C_f=0.026$)程度となり、寺島ら¹⁾の示した流水の影響を受ける飛沫帯での腐食速度(磨耗速度)0.2~0.3mm/yearよりはかなり小さな値となった。この違いには多くの理由が考えられるが、最も大きな理由は、図-3に示した準静的釣り合い条件から導かれた接触圧力 P_c はかなりその値が小さく、磨耗現象に寄与しているのではなく、たぶん衝撃的な現象を考慮すべきであることを示唆していると推測される。また、春先の流水衰退時期を含め、さらに別年度の潮位を用いた計算の必要性、接触圧力・分布や流水厚さ・状態の現地観測の必要性、さらにそれに伴う C_f の評価の重要性など、興味深い課題を提示している。

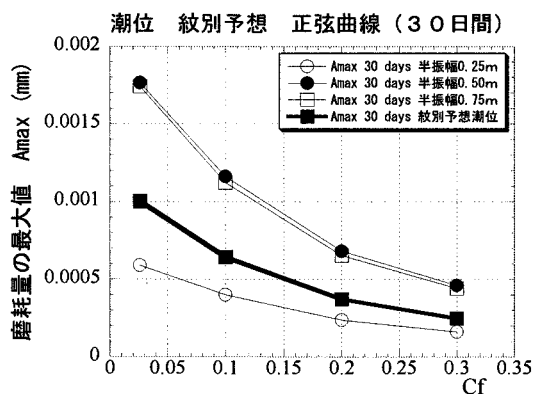


図-13 磨耗量の最大値 A_{max} と C_f との関係
(正弦潮位 & 紋別2007-1潮位)

結論

- 1) 感潮狭水路での海水の移動速度と氷盤の鉛直位置が同時に変動する場合における構造物表面の磨耗量分布についての計算法を示した。
- 2) 磨耗量分布やその最大値は、河口部の氷盤の状態を示す氷盤と海水との摩擦抵抗係数 C_f に影響を受ける。流水の状態を表す摩擦抵抗係数 $C_f=0.026$ を最小の値とすると、摩擦抵抗係数 C_f の増加に応じて磨耗量の最大値 A_{max} は減少する傾向にあることが分った。
- 3) 準静的な条件で得られた接触圧力(σ_c)からでは、

寺島ら¹⁾の現地観測結果である磨耗量分布形状をある程度表現することができる。しかし、その定量的な評価までには至らなかった。今後、例えば、衝撃荷重を考慮するなどの検討が必要と思われる。また、さらに接触圧力・分布や流水厚さ・状態についての現地観測や計算期間の拡張なども必要である。

参考文献

- 1) 寺島貴志, 今泉章, 佐藤光一, 中田克哉, 花田真州, 佐伯浩: 氷盤移動による鋼矢板の磨耗とその推定法, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 813-818, 1997.
- 2) 佐伯浩, 浅井有一郎, 泉きよし, 竹内貴弘: 海氷によるコンクリートの磨耗に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 1, pp. 68-73, 1985.
- 3) 浅井有一郎, 今野潔, 梶谷哲彦, 竹内貴弘, 佐伯浩: 海氷による各種コンクリートの磨耗に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 2, pp. 85-89, 1986.
- 4) 伊藤喜栄, 浅井有一郎, 佐藤栄一, 後藤克人, 佐伯浩: 砂を含んだ海水氷盤の移動による種々の建設材料の磨耗に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 167-170, 1990.
- 5) 伊藤喜栄, 浅井有一郎, 佐伯浩, 折谷徳弘, 石井千万太郎: 氷盤移動による海洋構造物の磨耗の予測と制御について, 海洋開発論文集, Vol. 8, pp. 147-151, 1992.
- 6) 花田真州, 原文宏, 伊藤喜栄, 佐伯浩: 海氷盤の移動による自然石の磨耗に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 229-233, 1995.
- 7) 榎国夫, 石井千万太郎, 国松靖, 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.
- 8) 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.
- 9) 河合考治, 原文宏, 蒔田俊輔, 佐伯浩: 浮氷盤の流体抵抗に関する実験, 寒地技術論文・報告集, Vol. 13, pp. 392-396, 1992.
- 10) 蒔田俊輔, 河合考治, 佐伯浩, 原文宏: トラップされた浮氷盤群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. 14, pp. 417-422, 1998.
- 11) 蒔田俊輔, 河合考治, 佐伯浩, 榎国夫, 原文宏: アイスジャムの流体力に関する実験的研究, 寒地技術論文・報告集, Vol. 14, pp. 368-375, 1998.
- 12) 粉体シミュレーション入門, 粉体工学会編, 産業図書, 1998.
- 13) 近藤一郎: 閉鎖性内湾の結氷が湾口潮流流速に及ぼす影響, 寒地技術シンポジウム講演論文集, pp. 103-107, 1985.
- 14) 萩野静也: サロマ湖の海水交流に関する研究, BULLETIN OF NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF FISHERIES ENGINEERING, No. 6, pp. 1-15, 1984.
- 15) 蒔田俊輔, 佐伯浩: 半閉鎖性水域の海水交換に与える養殖施設の影響, 海洋開発論文集 Vol. 20, pp. 395-400, 2004.
- 16) 竹内貴弘, 赤川敏, 中沢直樹, 木岡信治, 佐伯浩: 海洋構造物に作用する局部氷圧力の分布形状, 海洋開発論文集 Vol. 20, pp. 1235-1240, 2004.