

海水移動によるコンクリート製海洋構造物の 磨耗量の推定法と磨耗対策

ESTIMATION AND COUNTERMEASURE ON ABRASION OF OFFSHORE STRUCTURE MADE OF CONCRETE DUE TO SEA ICE MOVEMENT

竹内貴弘¹・中澤直樹²・三上隆³・渡部靖憲³・佐伯浩⁴

Takahiro TAKEUCHI, Naoki NAKAZAWA, Takashi MIKAMI, Yasunori WATANABE
and Hiroshi SAEKI

¹ 正会員 工博 八戸工業大学大学院工学研究科 (〒031-8501 八戸市妙大開 88-1)

² 正会員 工博 システム工学研究所 (〒145-0071 東京都大田区田園調布 2-35-13)

³ 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

⁴ フェロー 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

Offshore structure made of concrete in ice-covered sea areas is likely to meet an abrasion due to sea ice movement, and needs to be a light weight because of long carriage for its installation. Therefore, it is necessary to determine the thickness of covered concrete with high accuracy. The method to estimate an amount and area of abrasion is shown in considering both local ice pressure distribution and change of water level due to tide. The way to reduce the abrasion is also proposed.

Key Words: abrasion, offshore structure, sea ice

1. 研究目的

寒冷地海洋に建設される構造物の設計においては、海水の移動による構造物喫水線近傍における材料の磨耗に充分配慮せねばならない。特に、現在石油・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が活発な海域であることから、精度の高い磨耗量分布の予測が必要とされている。特に、サハリン海域では、鉄筋コンクリート製海洋構造物が予定されていて、1000 km以上の海上輸送の後に設置されることからその軽量化に迫られており、磨耗対策としての“かぶり厚”の増加にも制限が生ずることになる。このため、磨耗量(A)を精度良く評価することが必要とされている。これまで、佐伯ら¹⁾が行ってきた系統的な研究から、海水による構造物諸材料の磨耗量(A)は、磨耗距離(L)、接触圧力(σ_v)さらに磨耗速度(m_v)から推定できることが報告されている。磨耗距離(L)は、対象とする海域での海流や風による氷盤の主に水平方向の移動速度や結氷期間などの自然条件に起因する。磨耗速度(m_v)は、コンクリートや鋼材など構造物表面の材料に応じて決まる。接触圧力(σ_v)は、構造物に作用する氷荷重に起

因し、それはある分布形状があるにも拘らず公表されたデータが少ないことから、これまで平均的な氷の接触圧力(σ_v)で検討せざるを得なかった。さらに、潮汐変動による氷盤の鉛直変動も重要な要素となる。本研究は、局部氷圧力の分布形状や潮汐変動を考慮に入れた磨耗量(A)の推定精度の向上、さらに、その結果に基づいた磨耗対策についての報告である。

2. 磨耗量に与える因子の影響

佐伯ら¹⁾の研究から平均磨耗量(A) [mm]は、以下の式で評価できる。

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

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。この式は、氷温(T_i)が-10℃以上に適用できると考えて良い。

平均磨耗速度(m_v)に関し、花田ら²⁾は佐伯¹⁾の研究を基に自然石を含めた各種材料と海水相互作用時の平均磨耗速度(m_v)の関係を整理している。これを表-1に示す。

表-1 各種材料と平均磨耗速度(m_i)の関係(海水)

各種材料	平均磨耗速度(m_i) [mm/(km)/(kgf/cm ²)]
Concrete	0.00178
Steel	0.00030
Urethan	0.00030
Zebron	0.00078
LDPE (低密度ポリエチレン)	0.00022
HDPE (高密度ポリエチレン)	0.00030
砂岩	0.00049
凝灰岩	0.00251
輝石安山岩	0.00084
石英安山岩A	0.00065
石英安山岩B	0.00177
花崗岩	0.00216

この場合、氷温 (T_i)は-10℃で、平均接触圧力(σ_c)は10kgf/cm² から求められた値である。また、氷温 (T_i)が-10℃以下の場合には海水中のブラインから塩類($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 氷温-8.2℃)が析出すること起因し、その結晶粒の影響から磨耗が促進すると報告されている。さらに、(T_i)が-22.9℃でブラインから塩類($\text{Ca}_2\text{CO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)も析出し、同時に氷の強度増加も加わりさらに磨耗量は増加する。

また、接触圧力(σ_c)は、実験時の鉛直荷重を見かけの接触面積で除した値を接触圧力(σ_c)とした平均値である。この時には、中央の高い圧力が発生する領域では相対的に磨耗量が多いことが報告されている。これは海水と海洋構造物の相互作用時の氷荷重の場合も同様となり、佐伯ら³⁾の報告では、海水の一軸圧縮強度(σ_c)の4-6倍の局部氷圧力(σ_l)が主に氷厚(h)の中央部分で発生していることが示されている。また、最近、平面圧力パネルセンサー⁴⁾を用いた同種の実験から、局部氷圧力(σ_l)分布を表す以下の近似曲線 (2)が報告された⁵⁾。

$$\sigma_l = \sigma_c \times k(z/h) = \sigma_c \times m_1 \times \exp\left\{-m_2 \left(\frac{z}{h}\right)^2\right\} \quad (2)$$

ここで、 $k(z/h)$ は一軸圧縮強度(σ_c)に掛ける倍数で、 z は氷厚中央からの鉛直距離、また、 m_1 , m_2 は係数である。海水と構造物の相対速度を(v)、氷厚を(h)とすると、 m_2 は、($v/h \geq 3 \times 10^{-3}$ (1/s); brittle)の条件では100、($v/h < 3 \times 10^{-3}$ (1/s); ductile)の条件では15である。また、構造物幅方向の対象幅を W_r とすると、 m_1 は brittle, ductile の条件に応じて図-1 (a), (b)の様になる。今、 $W_r/h=1$ の条件を当てはめると、一軸圧縮強度(σ_c)に掛ける倍数 $k(z/h)$ は図-2の形となる。対象とする海域の海水一軸圧縮強度(σ_c)が与えられると、海水と構造物相互作用時の局部氷圧力(σ_l)分布形状が分かり、これを接触圧力(σ_c)とし磨耗量の計算に用いることができる。

3. 磨耗量の計算

図-3 に示す海洋構造物の隅角部 (面取部分) における海水移動による構造物材料の磨耗量を例に検討する。

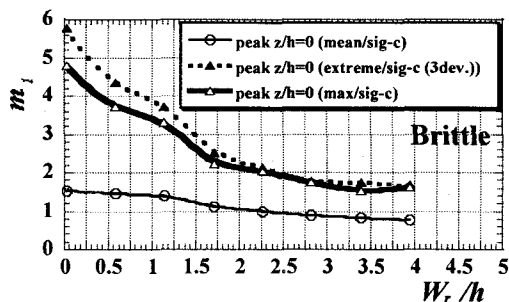


図-1 (a) $W_r/h=1$ と m_i の関係 (brittle)

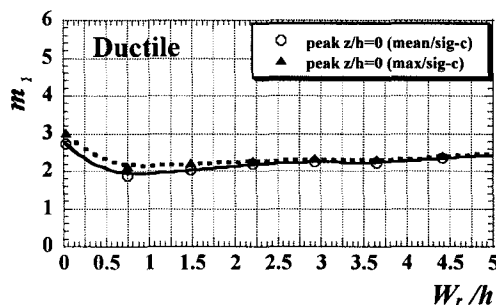


図-1 (b) $W_r/h=1$ と m_i の関係 (ductile)

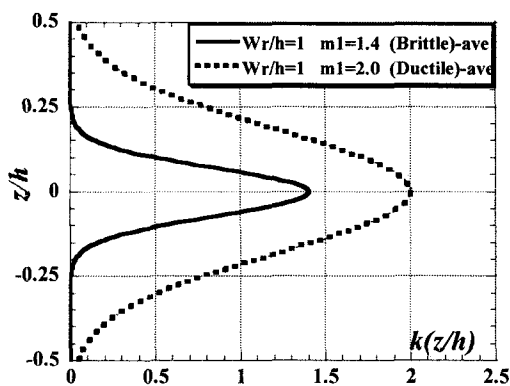


図-2 $k(z/h)$ と m_1 の関係 ($W_r/h=1$)

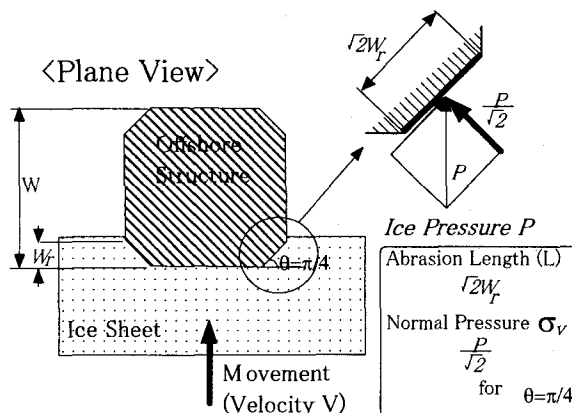


図-3 海洋構造物と海水の相互作用形態

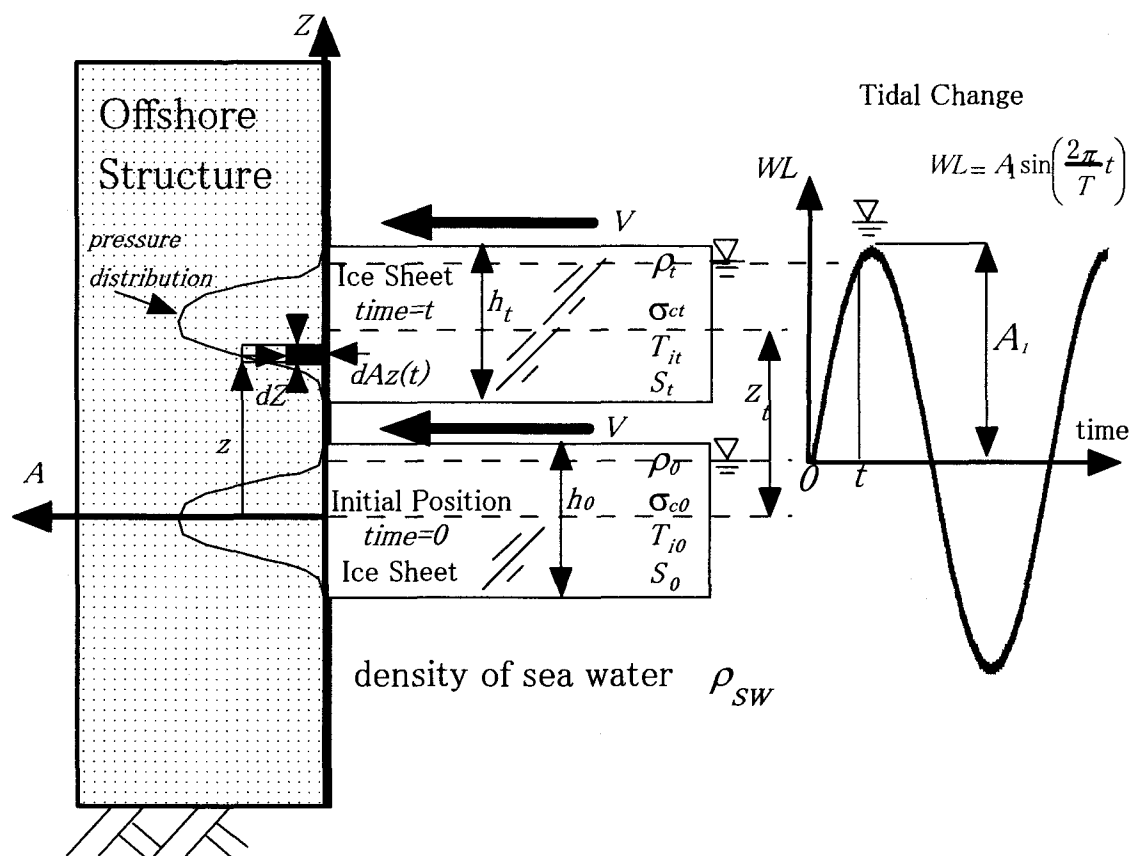


図-4 潮汐変動と局部氷圧力分布を考慮に入れた相互作用形態模式図

面取部の角度を45度とすると磨耗距離(L)と接触圧力(σ_c)の積は(1)式の関係や、幾何形状からそれらのそのままの積として良い。さらに、潮汐変動と局部氷圧力分布を考慮に入れた相互作用形態を図-4に示す。time=0にある氷盤は、速度vで水平に移動し、同時に潮汐の変動によりtime=tには鉛直変位 Z_t を被る。この場合、海水の密度(ρ)、一軸圧縮強度(σ_c)、氷温(T)、氷厚(h)、さらに塩分量(S)も実際には変化する。ここでは、簡単のためこれらを一定(すなわち、 $\rho=\rho_0=\rho_t$; $\sigma_c=\sigma_{c0}=\sigma_{ct}$; $S=S_0=S_t$; $T=T_0=T_t$; $h=h_0=h_t$)とする。また、対象とする海域は、多くの資源が眠るサハリン島北部東岸の沖合いとし、表-2に示す計算条件とした^{6)~8)}。時間間隔dt(time=t ~ t+dt)のz位置における材料の磨耗量の増加 $dA_z(t)$ は、以下の(3),(4)式で計算できる。

$$dA_z(t) = m_v \times \left[m_1 \times \exp \left\{ -m_2 \left(\frac{z-z_t}{h_t} \right)^2 \right\} \right] \times \sigma_{ct} \times v \times dt \quad (3)$$

ここで、

$$Z_t = A_i \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) + h_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_{sw}} - 0.5 \right) - h_t \left(\frac{\rho_t}{\rho_{sw}} - 0.5 \right) \quad (4)$$

計算では微小なdz毎に上式を積分し、ここでは120日

間の計算を行った。

表-2 計算条件

パラメーター	数値
一軸圧縮強度 (σ_c) [kgf/cm ²]	10, 20
潮汐	正弦曲線
潮位半振幅 A_i [m]	0, 0.25, 0.5, 0.75
潮汐の周期 T_p [hour]	24
氷厚 h [m]	1.3 (一定)
構造物参照幅 W_r [m]	1.3
m_1 brittle	1.4 (平均値使用)
m_1 ductile	2.0 (平均値使用)
m_2 brittle	100
m_2 ductile	15
海水の移動速度 v [m/hour] for brittle	2778 (1.5 knot 相当)
海水の移動速度 v [m/hour] for ductile	$3 \times 10^{-3} \sim 3600 \times h$
対象材料	Concrete, Steel, Urethan, Zebron
計算時間間隔 dT [hour]	0.05 (180 秒毎)
計算すべき日数 [day]	120
計算時の鉛直微小長さ dz [m]	0.005

4. 磨耗量の計算結果と対策

はじめに、コンクリート材料を対象に、brittle 条件と ductile 条件について、磨耗量(A)の鉛直分布形状を示したものが図-5 である。ductile 条件の方が、局部氷圧力が大きくまた、分布幅も広い(図-2)。しかし、当然のことながら氷盤の移動距離(磨耗距離L)が、同じ日数であっても大幅に少ないため、磨耗量(A)はbrittle 条件の方が極端に大きくなる。また、この場合の潮位半振幅 A_1 は 0.5[m] であるが、潮汐変動の影響により初期氷厚中央部($z=0$)の磨耗量(A)が必ずしも最大とはならない。以上より、氷盤移動が活発な brittle 条件を評価対象とすることが妥当である。さらに、コンクリート材料を対象とし、 $\sigma_c=1.96\text{MPa}$ (20kgf/cm^2)、brittle 条件、氷盤の移動距離(磨耗距離L)が 1066.8km の場合とし、潮位半振幅 A_1 が 0, 0.25, 0.5, 0.75 [m] と 4 ケース変化させた場合の磨耗量(A)の鉛直分布形状の計算結果を示したものが図-6 である。当然のことながら氷盤の磨耗量(A)は、潮位半振幅 A_1 が 0 [m] の場合が極端に大きく、次に、 A_1 が 0.25 [m] と変化すると大きく減少することが分かる。今回は、正弦曲線のみ計算であるが、対象海域の潮汐変動が磨耗量(A)に与える影響を十分考慮に入れるべきである。 $\sigma_c=0.98\text{MPa}$ (10kgf/cm^2)の場合も図-7 に示す様に同様な結果となる。さらに、Steel と Urethan の場合(図-8)にも磨耗量分布は同様の形状、傾向となるが、磨耗量は大幅に小さくなる。

図-6~8 の磨耗量の鉛直分布形状から分かるように、それぞれの潮位半振幅 A_1 に応じた磨耗量の最大値($A_{\max}$)が現れる。そのため、構造物表面の材料をコンクリート、鋼材(Urethan)、Zebron と 3 種類について同様の計算を行い、氷盤の移動距離(磨耗距離L)と磨耗量の最大値($A_{\max}$)との関係を示したものが図-9 である。表-1 の各種材料の平均磨耗速度(m_v)から分かるように、コンクリート、Zebron、鋼材(Urethan)の順で大幅に磨耗量の最大値($A_{\max}$)が減少する。さらに、同一の材料でみると、潮位半振幅 A_1 の増加により磨耗量の最大値($A_{\max}$)は大きく減少していく。しかし、その減少の割合は徐々に小さくなる。

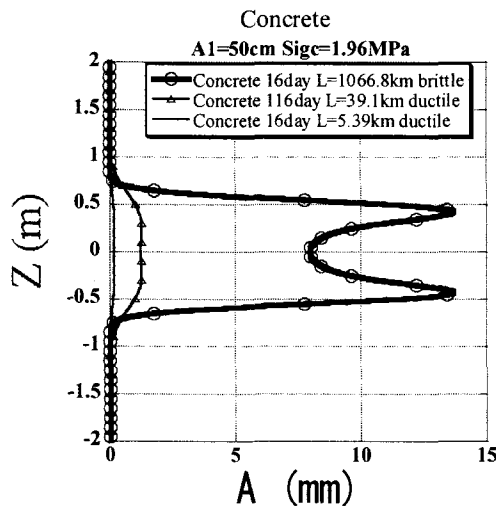


図-5 磨耗量(A)の鉛直分布形状 (v の効果)

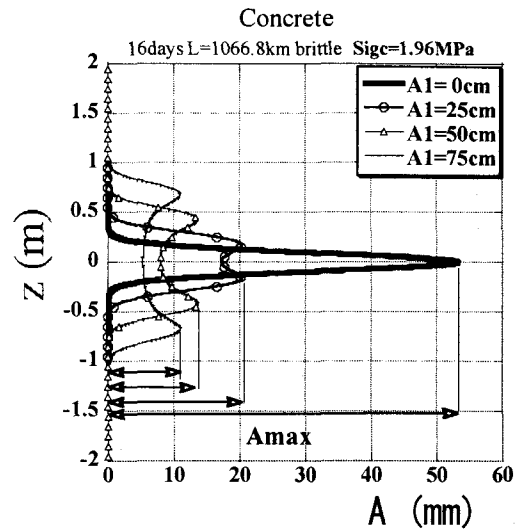


図-6 磨耗量(A)の鉛直分布形状 (A_1 の効果)

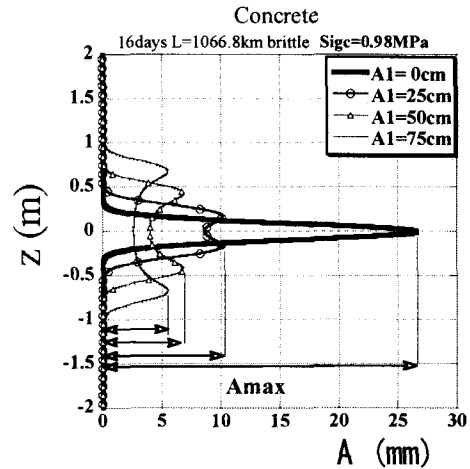


図-7 磨耗量(A)の鉛直分布形状 (A_1 の効果)

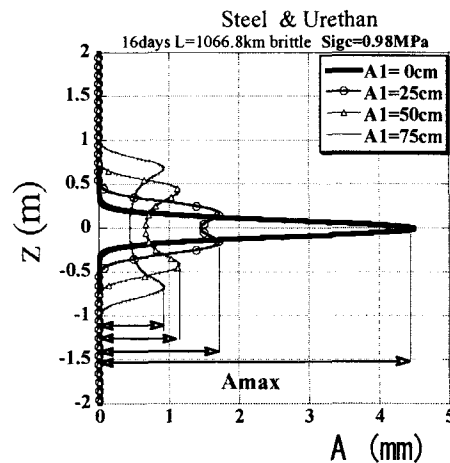


図-8 磨耗量(A)の鉛直分布形状 (A_1 の効果)

以上の様に、対象海域の自然条件を十分に考慮した磨耗量の計算を行い、磨耗が発生する構造物表面の活動領域を明らかにする。そして、得られた計算結果や耐用年数から構造物表面の磨耗活動（対策）領域に、表-1 に示した磨耗速度の小さいUrethan もしくは, Zebron, LDPE, HDPE などを鋼材の上に部分的に巻きつけることが考えられる。これにより、鉄筋コンクリート製海洋構造物の軽量化に寄与することが可能になる。しかし、Urethan, Zebron, LDPE, HDPE には、厚く塗れないことや現地加工に問題がある点などを考慮し、現地にあった対策を施すことが必要となる。

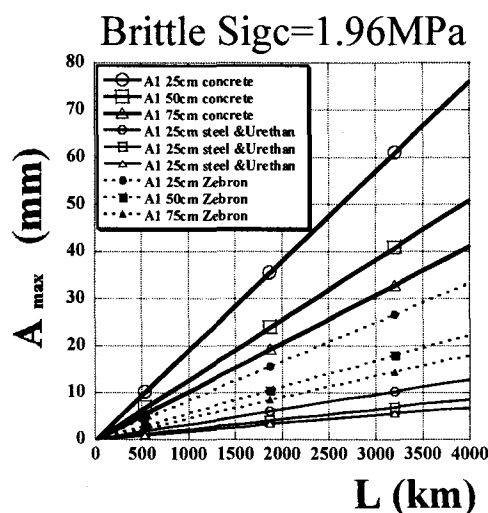


図-9 磨耗量の最大値(A_{max})と磨耗距離 (L) の関係
材料の影響

5. まとめ

1) 接触圧(σ_d)の分布形状を考慮した磨耗量の鉛直方向の活動領域を計算する方法を示した。さらに、潮汐変動による水位変化は、磨耗量の鉛直分布に大きく影響を与える。これから、これまでの接触圧(σ_d)の平均値を用いる場合に比較して精度の高い磨耗量評価を行うことができる。

2) 計算結果を基に、対象海域の潮位変動、海水の一軸圧縮強度(σ_c)や移動距離 (L)、さらに、既知である各種材料（鋼材、コンクリート、自然石、コーキング材など）固有の磨耗速度から、磨耗量や磨耗活動領域を評価できる。そして、これらの結果を基に、例えば、コンクリート製海洋構造物の磨耗活動領域に部分的に鋼材を取り付けるなど、平均磨耗量の低減と同時に構造物全体の軽量化にも貢献することが可能となる。

参考文献

- 1) 佐伯浩, 浅井有一郎, 泉きよし, 竹内貴弘: 海水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 (土木学会), Vol. 1, pp. 68-73, 1985.
- 2) 花田真州, 原文宏, 伊藤喜栄, 佐伯浩: 海水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.
- 3) 佐伯浩, 田中祐人, 小野敏行, 酒井雅史, 尾崎晃: 直立杭構造物に作用する氷圧力分布と氷盤の破壊周期について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 653-657, 1983.
- 4) 佐伯浩, 木岡信治, 宇佐美宣拓, 竹内貴弘, 佐々木幹夫, 赤川敏: 海洋構造物と氷板の相互作用評価を目的とした平面圧力パネルセンサーの測定精度の検証, 海洋開発論文集 Vol. 16, pp. 157-162, 2000.
- 5) 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, to appear, 2004.
- 6) JOIA : 平成13年度海洋石油開発技術調査 - 極限海域における海洋構造物の基礎研究 海洋石油等開発技術動向調査成果報告書, (社)日本海洋開発産業協会 (JOIA), 2002, 3.
- 7) Beketsky, S.P., Astafiev, V.N. and Truskov, P.A., "Design Parameters for Hummocks and Grounded Hummocks in the Sea of Okhotsk, Proc. Of ISOPE, Vol.2, pp.487-493, 1997.
- 8) Truskov, P.A., Surkov, G.A. and Beketsky, S.P., "STRENGTH PARAMETERS OF HUMMOCKS: FIELD OBSERVATIONS AND LABORATORY TESTS," Proc. Of 8th int. symp. On OKHOTSK SEA & SEA ICE, pp.82-95, 1993.