

海氷と地盤との摩擦係数に与える 因子の効果について

ON THE EFFECTS OF FACTORS INFLUENCING FRICTION COEFFICIENTS OF SEA ICE ON SAND

竹内貴弘¹・佐々木幹夫²・三浦一夫³

Takahiro TAKEUCHI, Mikio SASAKI and Kazuo MIURA

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

³八戸工業大学大学院 土木工学専攻 (〒031-8501 八戸市妙大開88-1)

The ice ride-up and ice gouging processes are related to the interaction between ice and sand or gravel. The friction coefficients of ice with those materials are important factors in calculating loads during these processes. However, there is little information available on these friction coefficients. Therefore, tests on the friction between saline ice and sand were conducted in an indoor cold chamber to evaluate the static (μ_s) and kinetic (μ_k) coefficients of friction of ice on sand as functions of the normal stress, temperature and other variables. This paper examines the results of those tests.

Key Words : friction; sea ice; sand; gravel

1. はじめに

結氷する海域の、特に浅海域では、風や流れなどにより移動する氷盤が海底に影響を及ぼすことがある。これらの相互作用形態は、主に、Level IceのPile-up, Ride-up現象や氷厚の大きいIce Ridge, Rafted Iceなどが沖側から岸側へ押される現象に分かれる。特に、ガス・油田開発に伴い敷設(埋設)されるパイプラインの保護層と様々な形態の氷(氷盤, Ice Ridge, Rafted Ice, Hummock Iceなど)が相互作用し、氷の移動に伴い荷重が地盤へ伝達され、場合によっては海底面を削り取るIce Gougingが発生する。Kioka et. al. (1998)は、Ice Gouging時の荷重計算モデルを提案している¹⁾。また、流氷の移動が岩礁地帯の昆布やホッキ貝などへ圧力を及ぼしたことも報告されている²⁾。さらに、結氷する湖沼などにおいても風により移動した氷盤が揚陸する現象(Ride-up, Pile-up)が発生し、寒冷地の水理構造物の設計には氷の影響を考慮する必要があるとの報告もある³⁾。これらの現象に伴い、氷により伝達される荷重を推定する場合には、氷と地盤との摩擦係数を入力値として与える必要がある。これまでには、海氷と他材料との摩擦係数に関する系統的な研究⁴⁾や淡水氷と他材料との摩擦係数に関する研究が報告⁵⁾されている。しかし、砂礫と海氷との摩擦係数の

測定は、Shapiro and Metzner (1987)によるアラスカ北部のポーホート海での現地観測結果⁶⁾がある程度で、他にはあまり見当たらない。本研究では、塩水氷と砂との摩擦係数を室内試験より計測し、それに与える各因子の影響を検討したので、この結果を報告する。

2. 実験方法と計測

(1) 実験の概要

実験では、図1に示す滑り摩擦試験機を新たに製作し、コンプレッサーにより圧縮した空気をレギュレーターで調整し、エアシリンダーにより種々の鉛直応力 σ を塩水氷供試体に与えた。鉛直応力 σ とは、鉛直力 P を塩水氷供試体の断面積で除した圧力である。計測にあたっては、ワイヤー変位計で水平方向相対速度 V と歪ゲージ式ロードセル(max:5kN)で水平方向荷重(摩擦力) F をサンプリング周波数100Hzで測定した。また、鉛直応力 σ を載荷後、数秒以内に台車を水平方向に移動させた。これは、塩水氷が鉛直応力 σ 下において時間の経過とともに変形する粘弾性的な性質により、砂と塩水氷の境界面での接触面積増加による摩擦力 F の過大評価を防ぐためである。

(2) 塩水氷供試体

塩水氷供試体の作成にあたっては、100cm×100cmのボックスに15pptの塩水を用意し、-15℃の条件下で約1週間成長させた塩水氷を用いた。これをコアドリルで氷の成長方向にコアリングし、端面を水平にカットして円柱形の塩水氷供試体とした。供試体の直径は平均9.5cmで、平均塩分濃度は約5pptであった。平均塩分濃度の約5pptは、実海域の一年氷の平均的な塩分量に相当し、この値を目標に、塩水の濃度を幾つか変化させて予備試験を行い、結氷した氷の塩分量を計測して目標の塩分量となる様に塩水の濃度15pptを決定している。また、サンプルから切り出した水平面における氷の結晶写真撮影から、砂と接する部分の氷は、柱状氷でC軸方向が水平面内でランダムなS2タイプであり、このグレイン（結晶粒径）と面積が等しい円の直径（円相当粒径）⁷⁾に換算すると、0.7~1.4cmとなり、平均0.97cmであった。

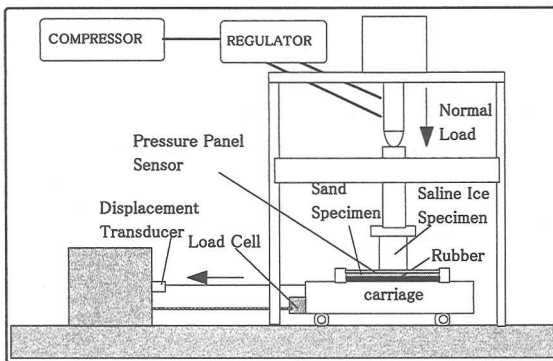


図1 実験装置

(3) 試験条件

試験条件を設定するにあたっては、浅海域における氷盤の水平移動による海水と地盤の相互作用形態²⁾を考慮した。氷盤と地盤の相互作用は、海水中と空中の両方においても発生するため、水中と空中の両条件下で摩擦試験を実施した。砂の供試体は、市販されている粒径 ϕ が均一なケイ砂3種類（S- $\phi=0.106\text{mm}$, M- $\phi=0.425\text{mm}$, L- $\phi=2\text{mm}$ ）を用意し、厚さ1cmのゴム板にスプレー糊で塗り付け、所定の温度条件で用いた。これは、試験中の砂の変形を防ぎかつ洗掘状態で発生する水平方向荷重（bulldozing force）を可能な限り無くすためである。これにより、試験時に計測される水平方向の力にはbulldozing forceを含めない配慮を行った。また、実海域の海底砂礫の粒径 ϕ は多様であると考えられるが、例えば、カナダグランドバンクでの調査結果を示すと、 D_{50} で砂0.5mm（深度0-2m）、礫2mm（深度0-0.6m）程度と報告⁸⁾されており、試験条件を決める上での参考とした。また、相対速度 V は、スクリージャッキを用いてインバーターによる任意可変方式で変化させた。海水と海底地盤の相互作用と同様に相対速度 V も様々であり、ここでは、 $V=0.3\sim 2.0\text{cm/s}$ （ $V=0.3, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0\text{cm/s}$ ）

とした。氷盤と砂との相互作用時の鉛直応力 σ は、氷の自重のみからPile-upした状態、さらに、局部的には氷の破壊強度に至るまでの状態における応力も想定できる。可能な限り広範囲の試験条件とするために、鉛直応力 σ は、 $\sigma=0.035\sim 0.451\text{MPa}$ （0.0351, 0.0697, 0.1389, 0.2255, 0.4506MPa）の5種類を今回は供試体に与えた。塩水氷供試体の温度 T_1 は2種類に設定し、 $T_1=-3^\circ\text{C}$, -12°C 付近とした。海水の温度は、海水の塩分濃度に依存するがほぼ -2°C 付近であり、海水中下の氷の温度も海底面付近では海水とほぼ同じ温度になる。また、空中では、気温に左右される。これらの自然環境条件を考慮して、試験時の塩水氷の温度を決定した。砂の供試体の温度も同様に一定とするため、両供試体を1日間低温室に保管し、これらを試験に用いた。また、水中・空中条件下での摩擦係数の違いを評価するため、低温下で結氷しない高濃度の塩水を用意し、それがあつた場合（水中）とない場合（空中）で試験を行った。砂と氷の実際の接触面積の推定値 A_c や圧力分布を把握するため、試験開始前に平面圧力パネル（Tekscan社製、Rパネル、130~1300kPa）を用いた⁹⁾。これは、圧力計測領域が縦11.2cm、横11.2cmで、その内部の縦44点×横44点の計1936点という微小領域（約2.5mm×2.5mm/点）での圧力 P_0 が時刻歴的に計測できるものである。したがって、境界の圧力分布から実際の接触面積の推定を行った。以上の方法・条件で、合計318ケースの試験を実施した。

3. 実験結果と考察

(1) 摩擦係数

図2は、塩水氷と砂との摩擦試験の様子である。また、図3は、摩擦試験で計測された摩擦力 F の時刻歴の例である。摩擦力 F は、台車が移動してからピークに達し、その後変動を伴う波形を描いた。図に示すように、最初のピーク値から静止摩擦係数 μ_s を、その後の平均値から動摩擦係数 μ_k を計算した。以下に、各因子と摩擦係数の関係を示す。

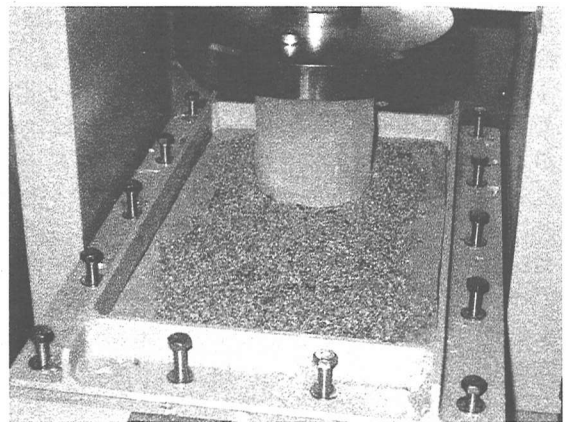


図2 実験様子

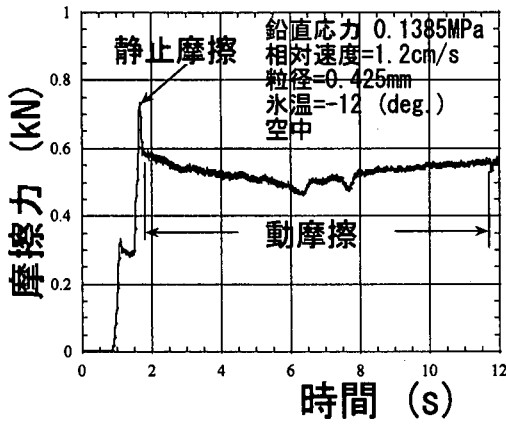


図3 摩擦係数の計測例

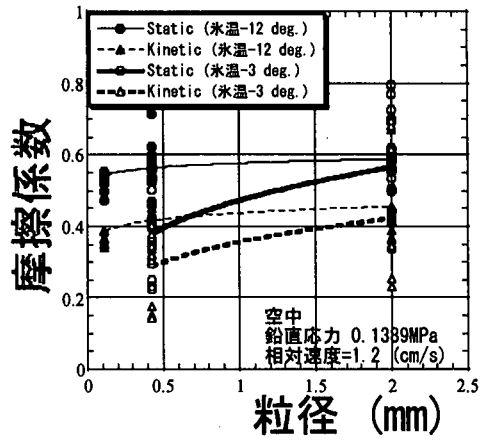


図5 砂の粒径と摩擦係数の関係

(2) 相対速度Vの影響

摩擦係数に与える相対速度 ($V=0.3\sim 2\text{cm/s}$) の影響を検討した。図4は、試験条件が鉛直応力 $\sigma = 0.1389\text{MPa}$ 、砂の粒径 $\phi = 0.425\text{mm}$ 、 2mm 、氷の温度 $T_i = -12^\circ\text{C}$ と一定で空中における場合であり、 V と静摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_k との関係を示したものである。静止・動摩擦係数 (μ_s 、 μ_k) とともに、相対速度が増加するに伴い、わずかに減少する傾向がみられた。また、砂の粒径 ϕ が大きいほど、両摩擦係数ともに大きな値を示していた。

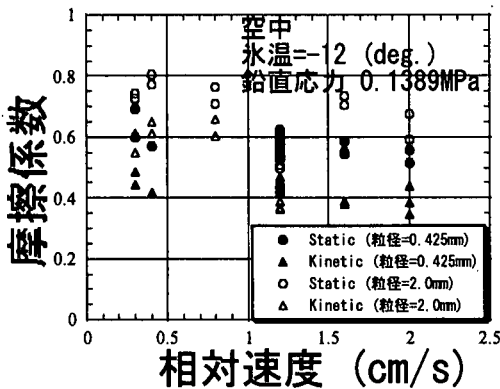


図4 相対速度と摩擦係数の関係

(3) 砂の粒径φの影響

砂の粒径 ϕ を 0.106mm 、 0.425mm 、 2mm と3種類に変化させ、同様に摩擦係数 μ との比較を行った。図5は、試験条件が鉛直応力 $\sigma = 0.1389\text{MPa}$ 、相対速度 $V = 1.2\text{cm/s}$ 、氷の温度 $T_i = -3^\circ\text{C}$ 、 -12°C と一定で空中における場合であり、 ϕ と静摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_k との関係を示したものである。静摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_k とともに、砂の粒径 ϕ が増加するに伴い、徐々に増加する傾向を示した。特に、氷の強度が比較的低い $T_i = -3^\circ\text{C}$ の場合に対する影響が大きく、これは、掘り起こし抵抗の影響と推察される。

(4) 鉛直応力σの影響

図6は、試験条件が相対速度 $V = 1.2\text{cm/s}$ 、砂の粒径 $\phi = 0.425\text{mm}$ 、氷の温度 $T_i = -12^\circ\text{C}$ と一定で、水中・空中と σ が変化する条件での静摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_k との関係を示したものである。静摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_k とともに、鉛直応力 σ が増加するにつれて、減少し、一定値に近づく傾向を示した。この傾向は、水中・空中においても同様であった。また、水の有無の影響では、両摩擦係数 (μ_s 、 μ_k) とともに水中の方が若干低い値であることがわかった。

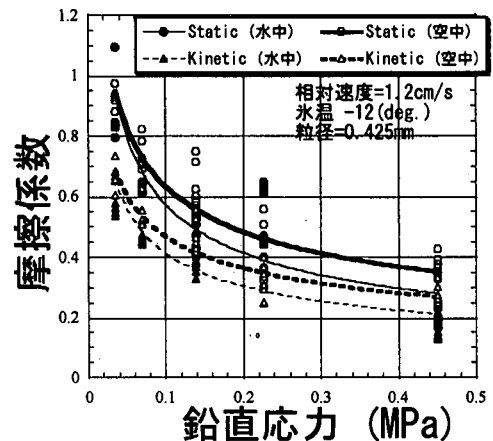


図6 鉛直応力σと摩擦係数μの関係

(5) 氷の温度T_iの影響

図7は、試験条件が砂の粒径 $\phi = 0.425\text{mm}$ 、鉛直応力 $\sigma = 0.1389\text{MPa}$ 、空中と一定で、相対速度 V と氷の温度 $T_i = -3^\circ\text{C}$ 、 -12°C が変化するときの各摩擦係数 (μ_s 、 μ_k) との関係を示したものである。両水温 T_i において、相対速度 V の増加に伴って、ばらつきはあるが図4と同様に静摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数

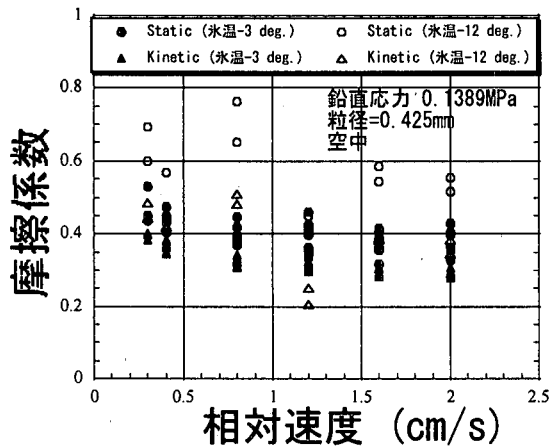


図7 氷温と摩擦係数の関係 (V変化時)

μ_k は減少する傾向を示した。さらに、氷温 T_i が -3°C の時に比較して、 -12°C の場合の方が両摩擦係数 (μ_s , μ_k) 伴に大きな値を与えた。

次に、図8には、試験条件が砂の粒径 $\phi = 0.425\text{mm}$ 、相対速度 $V=1.2\text{cm/s}$ 、空中と一定で、鉛直応力 σ と氷の温度 $T_i = -3 \sim -12^\circ\text{C}$ が変化するときの各摩擦係数 (μ_s , μ_k) との関係を示したものである。両氷温 T_i において、鉛直応力 σ の増加にともなって、図6と同様に各摩擦係数 (μ_s , μ_k) は減少し一定値に近づく傾向を示した。さらに、氷温 T_i が -3°C の時に比較して、 -12°C の場合の方が両摩擦係数 (μ_s , μ_k) とも大きな値となった。

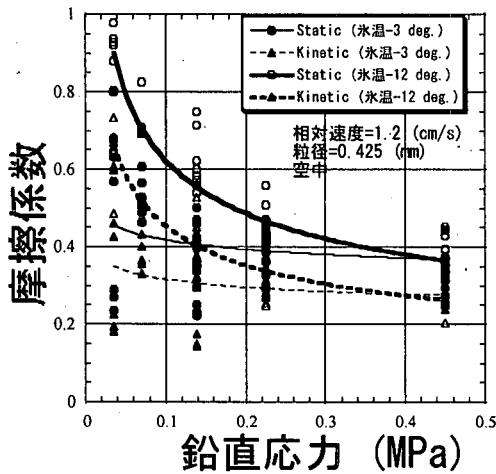


図8 氷温と摩擦係数の関係 (σ 変化時)

(6) 平面圧力パネルの計測結果

微小領域で圧力計測が可能な平面圧力パネルを用い、摩擦試験開始前の状態での氷と砂との界面の圧力 P_g を計測した。図9に、鉛直応力 $\sigma = 0.1389\text{MPa}$ が一定で、砂の粒径 ϕ が異なる場合の応力分布を示す。鉛直応力 σ は同一であるが、砂の粒径 ϕ が大きくなると応力集中により高い応力が発生する箇所が現れ

る。この計測結果を基に、各点の圧力 P_g がゼロより大きい場合に砂と氷が実際に接触しているとして、接触面積の合計 A_c を計算し、さらに供試体の断面積で除した値を接触率の推定値とした (図10)。この場合、鉛直応力 $\sigma = 0.1389\text{MPa}$ は一定である。砂の粒径 ϕ が大きくなるにつれ、僅かに接触率の推定値は減少している。さらに、圧力センサーの最小計測領域と砂の粒径との関係を考慮した試験も今後必要である。

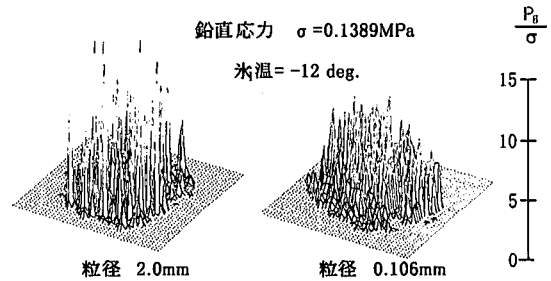


図9 平面パネルによる圧力分布

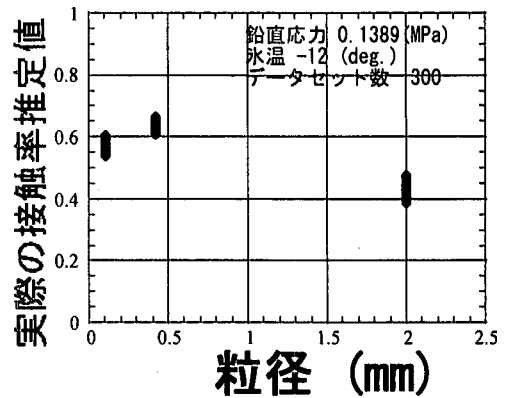


図10 砂の粒径と実際の接触率推定値

(7) 試験結果の考察

各因子が摩擦係数に与える計測結果からそれらの効果について検討する。相対速度の増加は、氷の粘弾性的な性質に関係して実際の接触面積を減少させるように作用すると考えられ、摩擦力 F を減少させる。さらに、摩擦熱の発生に伴う薄い水膜の存在が潤滑として作用することや、氷の温度上昇による強度の低下なども原因と推察される。また、水の存在は、卓越した応力集中の発生する箇所での掘り起こしに起因する摩擦力 F の減少を招き、結果として摩擦力 F を減少させていると推察される。さらに、特に、摩擦係数に影響を及ぼす氷の温度 T_i の低下は、氷の強度を増加させるため¹⁰⁾、実際の接触面積でのせん断抵抗や掘り起こし抵抗を増加させる様に作用

し、摩擦力Fを増加させる。また、砂の粒径 Φ の増加は、図9と10を参考にすると実際の接触面積が僅かではあるが減少するにもかかわらず摩擦係数が増加するのは、卓越した P_g を与える箇所での掘り起こし抵抗が増加するためと考えられる。これは、スパイク状でのスパイク（凸部）の存在が氷にくいこみむことによる掘り起こし抵抗の増加と同様である。そして、同一の実際の接触面積であれば、せん断抵抗より掘り起こし抵抗の方が大きいのである。最後に、鉛直応力 σ と摩擦係数の関係に関しては、図11に示すように、砂の粒径 $\phi=2.0\text{mm}$ と一定で、鉛直応力 σ を変化させた場合の圧力 P_g がゼロより大きい部分から実際の接触面積（接触率）を計算し、鉛直応力 σ が 0.0351MPa の時の摩擦係数を1として、各鉛直応力 σ に対する摩擦係数の比を計算したものである。これは、掘り起こし抵抗とせん断抵抗の両方の区別はしていないが、 σ が増加するに従い摩擦係数の比が減少し、ほぼ一定値になる。鉛直応力 σ の増加に伴う摩擦係数の減少は、 σ の“増加割合”に対する実際の接触面積の“増加割合”が小さいことに起因して摩擦力Fが減少するためと考えられる。

以上の検討から、塩水氷と砂の摩擦機構は、摩擦力が、実際の接触面でのせん断力と掘り起こし抵抗に必要な力の和として表せる“凝着説”^{11), 12)}によって説明できる。

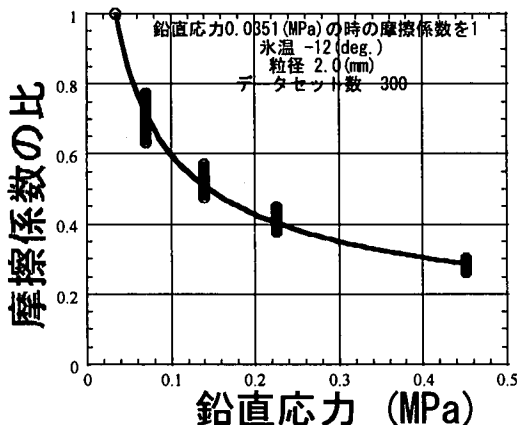


図11 σ と摩擦係数の比の変化

4. まとめ

今回の試験では、考慮したすべての因子において少なからず摩擦係数に影響を及ぼす結果となった。そして、塩水氷と砂の摩擦機構は、“凝着説”によって説明できる。その中でも、摩擦力Fの発生状態から、特に、「砂の粒径」と「氷の温度」の影響

が重要となった。

今回は、塩水氷の直径が一定であったが、直径（面積）の変化による影響を考慮すること、さらに、試験データのバラツキを考慮するために、データの収集と統計的な処理が今後必要と考えている。

謝辞：

試験を実施する上で、Prof. Shapiro (Geophysical Institute, University of Alaska-Fairbanks) に貴重なご助言を承りました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kioka, S., Terai, Y., Otsuka, N., Honda, H and Saeki, H., "Mechanical model of ice gouging on sloping sandy beach", Proc. of ICE SCOUR AND ARCTIC MARINE PIPELINES WORKSHOP, pp71-76, 1998.
- 2) 川森晃, 北村泰介, 榎国夫, 佐伯浩 "海氷盤と海底との相互作用について", 第6回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp393-398, 1990.
- 3) 平山健一, 堺茂樹, 笹本誠, 江口斉, "小川原湖における氷盤揚陸の観測例", 水工学論文集, 第35巻, pp. 257-262, 1991.
- 4) Saeki, H., Ono, T., Nakazawa, N., Sakai, M. and Tanaka, S., "Coefficient of Friction Between Sea Ice and Various Materials Used in Offshore Structure", Proc. of OTC, (OTC4689), pp.375-382, 1984.
- 5) 対馬勝年, "氷の摩擦の統一理論とスケート滑走のパラドックス", 寒地技術論文・報告集, Vol. 17, pp. 290-297, 2001.
- 6) Shapiro, L.H. and R.C. Metzner, "Coefficients of friction of sea ice on beach gravel"; Trans. ASME, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 109, pp. 388-390, 1987.
- 7) 前野紀一, 黒田登志雄, "雪氷の構造と物性", 古今書院, p. 209, 1996.
- 8) Sonnichsen, G.V. and King, E., "SURFICIAL SEDIMENTS, GRAND BANK, OFFSHORE NEWFOUNDLAND", PERD/CHC REPORT31-27, Geological Survey of Canada, pp. 1-43. 2001.
- 9) 若生大輔, 泉山耕, "氷荷重の分布特性について", 寒地技術論文・報告集, Vol. 13, pp. 412-417, 1997.
- 10) Saeki, H., Ono, T., Zong, N. and Nakazawa, N., "Experimental Study on the Direct shear Strength of Sea Ice", Proc. of Symp on Snow and Ice Processes at the Earth's Surface, pp.1-11, 1984.
- 11) 田中久一郎, "摩擦のおはなし", (財)日本規格協会, 1985.
- 12) 岡本純三, 中山景次, 佐藤昌夫, "トライボロジー入門", 幸書房, pp1-26, 2001.