

海水と各種構造物材料間の摩擦係数の評価について

Factors Influencing the Coefficient of Friction Between Sea Ice and Various Materials

中澤直樹*・寺島貴志*・佐伯 浩**

Naoki Nakazawa, Takashi Terashima, Hiroshi Saeki

Coefficient of friction test between sea ice and various construction materials were conducted to clarify the ice-material interaction. This ice-material properties are necessary to calculate the ice forces on sloping structures in cold coastal and offshore regions. Through the six years experimental studies, the following conclusions have been drawn (Saeki et al. 1986): The coefficient of friction have been found to be affected by the following: i) relative velocity; ii) sea ice temperature; and iii) surface roughness of construction materials. They have been found to be relatively unaffected by the following; iv) contact area; v) normal stress; vi) growth direction of sea ice; and vii) water at the sea ice-material interface.

Keywords: ice, friction,

1. 緒 言

傾斜面を持つ耐氷構造物に作用する氷力、および砕氷船に作用する氷の摩擦抵抗の算定においては、海水と構造物材料間の摩擦係数の評価が重要となる。著者等は過去数年に渡る海水と各種構造物材料間の摩擦係数の実験により、次の結果を得た (Saeki et al. 1986)。海水の摩擦係数は、i) 氷と材料間の相対速度 (移動速度)、ii) 氷温、iii) 材料の表面粗さ、に影響される。一方、iv) 氷と材料間の接触面積、v) 鉛直応力、vi) 氷の成長方向に対する移動方向、vii) 氷と材料間の水膜の存在には、大きくは影響されない。

本論は、著者等の海水の摩擦係数に関する実験結果をまとめることにより、氷の摩擦係数への影響因子、他の研究結果との比較、海水と各種材料間の摩擦係数の評価について論じたものである。

2. 実験装置

海水と各種構造物材料間の摩擦係数の特性を明らかにするために、以下に示す項目の影響を調べた。

- i) 氷と材料の接触面積
- ii) 接触面における鉛直応力
- iii) 氷の成長方向に対する移動方向
- iv) 相対速度 (移動速度)
- v) 接触面における水膜の存在
- vi) 氷温
- vii) 構造物材料の表面粗さ

Fig.1に実験装置を示す。油圧ジャッキにより水平方向に移動することができる台車の上に材料供試体を固定し、その上に氷供試体を置く。氷供試体の上に鋼製のキャップがかぶせられ、この上に鉛直荷重が作用する。台車の移動速度は油圧ジャッキにより変えることができる。

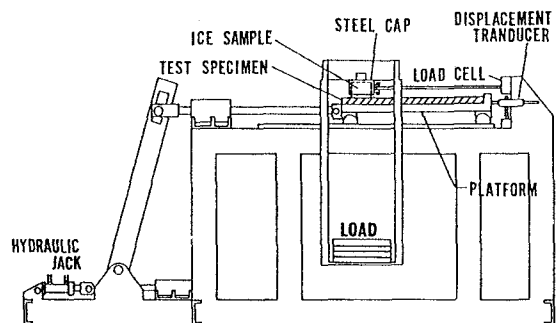


Fig.1 Diagram of experimental setup.

3. 材料供試体および氷供試体

1) 材料供試体

材料供試体としては、海岸・海洋構造物材料として多く使われている次の材料および表面加工が用いられた。

* 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株)
* 正会員 北海道大学工学部土木工学科

- i) steel plate – uncoated and uncorroded,
- ii) steel plate – uncoated but corroded
by sea water,
- iii) steel plate – coated with marine paint
:ZEBRON,
- iv) steel plate – coated with marine paint
:INERTA160,
- v) concrete – smoothed by trowel.

2) 氷供試体

氷供試体は直径4.5cm, 10.0cmおよび15.0cmで、高さは10cmとした。実験は主に直径10cmの氷供試体を用い、直径4.5cmと15.0cmのものは接触面積の影響の実験に用いられた。

4. 実験結果

1) 接触面積の影響

Fig.2にuncoated steel (uncorroded)の結果を示す。動摩擦係数(μ_k)および静止摩擦係数(μ_s)ともにほぼ一定値を示し、本実験の接触面積の範囲では、大きく影響を受けないことが示された。coated steel, corroded steel, concreteにおいても同様の結果が示された。本実験に用いた海水のgrain size (D_{gr})は8–12mmであった。

2) 鉛直応力の影響

Fig.3にuncoated steel (uncorroded)の結果を示す。鉛直応力が0.1MPaから1.0MPaの範囲において、動摩擦係数はほぼ一定の値を示した。また、静止摩擦係数については鉛直荷重の増加に伴いデータのバラツキが少なくなり、かつ、 μ_s が減少傾向を示し、 $\sigma_v \geq 0.5\text{MPa}$ の範囲において一定値を示した。

3) 相対速度の影響

摩擦係数に対する相対速度の影響を明らかにすることは、水による砕氷船への摩擦抵抗を評価する上でも重要となる。Fig.4とFig.5にuncoated steel (uncorroded)とconcreteの結果を示す。両材料において、静止・動摩擦係数ともに相対速度の増加とともに減少し、uncoated steelでは $V \geq 3\text{cm/s}$ の範囲において、concreteでは $V \geq 30\text{cm/s}$ の範囲において一定値に近づく傾向を示した。本実験における相対速度の範囲 $0.01 \leq V \leq 130\text{cm/s}$ において、次の様な結果が得られた。

- i) uncoated steel (uncorroded)

$$\frac{\mu_k(\text{min})}{\mu_k(\text{max})} = 0.4, \quad \frac{\mu_s(\text{min})}{\mu_s(\text{max})} = 0.4$$

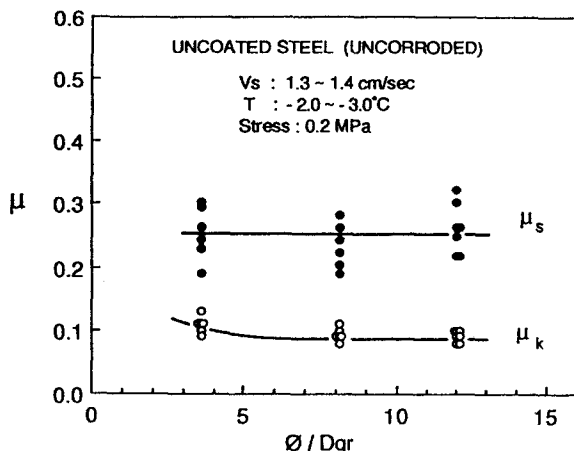


Fig.2 Effects of contact area for uncoated steel (uncorroded).

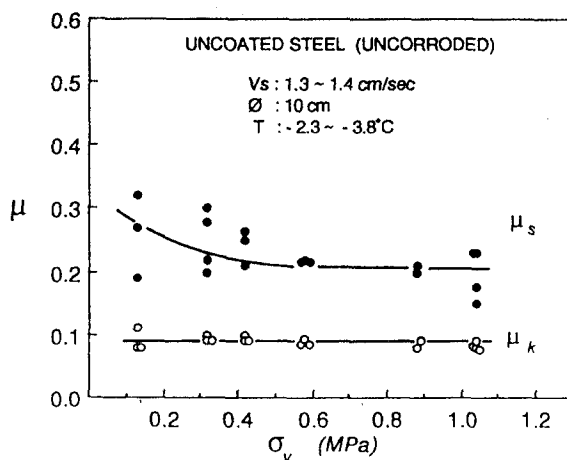


Fig.3 Effects of normal stress for uncoated steel (uncorroded).

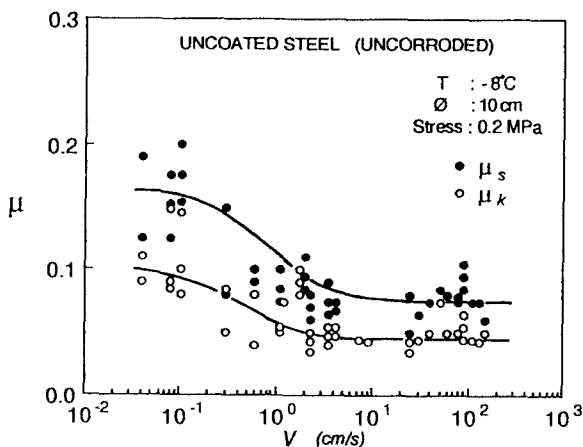


Fig.4 Effects of relative velocity for uncoated steel (uncorroded).

ii) concrete

$$\frac{\mu_k(\min)}{\mu_k(\max)} = 0.2, \quad \frac{\mu_s(\min)}{\mu_s(\max)} = 0.5$$

4) 水温の影響

Fig.6 に静止摩擦係数 (μ_s) に対する水温の影響を、Fig.7 に動摩擦係数 (μ_k) に対する影響を示す。 μ_s は実験に用いた全ての材料において水温の低下とともに増加している。 μ_k は concrete と corroded steel において一定値を示しているものの、uncoated steel (uncorroded) と coated steel (INERTA160) においては水温の低下とともに増加している。

5) 材料の表面粗さの影響

Fig.6 と Fig.7 に示されるように、同じ材料でも表面処理の違いにより摩擦係数が大きく違うことより、材料の表面の粗さの程度に着目し、表面粗度を測定し、それをパラメータとして摩擦係数への影響を調べ、Fig.8 にその結果を示した。 $\bar{h}/\bar{\lambda}$ ($\bar{h}$: 表面粗さの平均波高, $\bar{\lambda}$: 表面粗さの平均波長) が増加するとともに μ_s , μ_k ともに増加する傾向を示した。

以上の実験結果より、本研究においては水の摩擦係数においても Amontons の第1法則 (摩擦係数は接触面積に影響されない) と第2法則 (摩擦係数は鉛直応力に影響されない) が成立すること、また、水の摩擦係数については接触する材料表面の粗さが大きく影響することが示された。

5. ディスカッション

本ディスカッションでは、1) 鉛直応力と 2) 相対速度について他の研究結果と本研究の比較を行うとともに、3) 摩擦係数の評価について本研究で得られた結果から、そのまとめを示す。

1) 鉛直応力

Table1 に水の摩擦係数に対する鉛直荷重の影響についての5つの研究のまとめを示す。鉛直応力の範囲により $\sigma_v \leq 0.02\text{MPa}$ までの研究 (Oksanen (1980), Forland and Tatinclaux (1984), Arnold (1937)) と $\sigma_v \leq 1.00\text{MPa}$ までの研究 (Tabata and Tsushima (1979, 1981), Present study) に大別される。これらの研究より、動摩擦係数においては、鉛直応力の増加とともに μ_k は減少し、一定値に近づく傾向があることが示されている。従って、鉛直応力が大きい範囲において Amontons の第1法則が成立することが示されている。

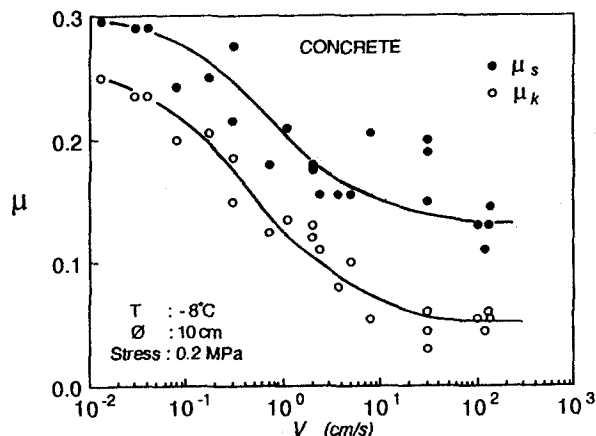


Fig.5 Effects of relative velocity for concrete.

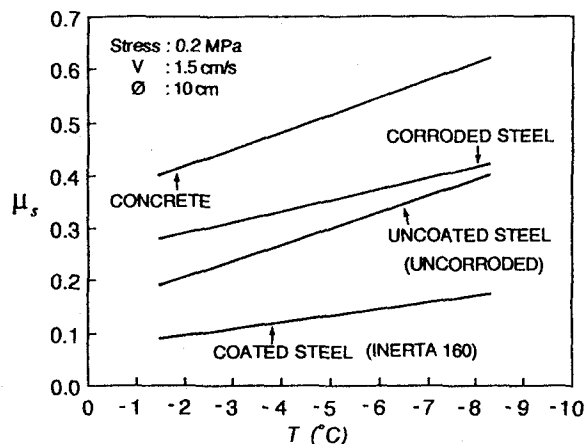


Fig.6 Relation between μ_s and T for various materials (1978).

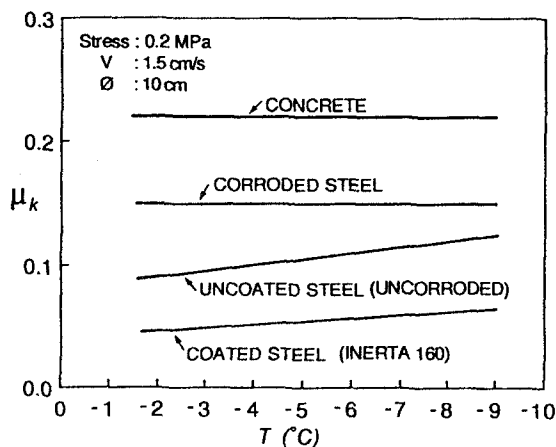


Fig.7 Relation between μ_k and T for various materials (1978).

2) 相対速度

Table2に相対速度の影響についてのまとめを示す。これによるとほぼ全ての研究において、相対速度が増加するとともに摩擦係数が減少する (Tabata and Tsushima (1979, 1981), Forland and Tatinclaux (1984))か、減少の後一定値に近づく (Present study, Oksanen (1980)) ことが示された。

3) 摩擦係数の評価

Fig.9に著者等の実験により得られた動摩擦係数の範囲を (a) corroded steel, (b) uncoated steel (uncorroded), (c) concreteについて示す。本研究からも示されたように海水の摩擦係数は多くの因子に影響されるものの、数年間の実験結果を動摩擦係数についてまとめると、それぞれの構造物材料に対して、図に示すような μ_k の値の範囲が得られた。数値に幅があるものの、実際の使用に對し、大まかな指標を与えるものと考え

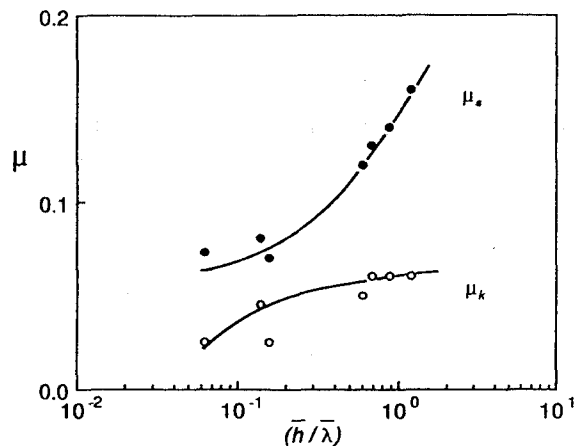


Fig.8 Relation between μ and steepness of irregularities $(\bar{h}/\bar{\lambda})$.

Table 1 Summary of normal stress effects.

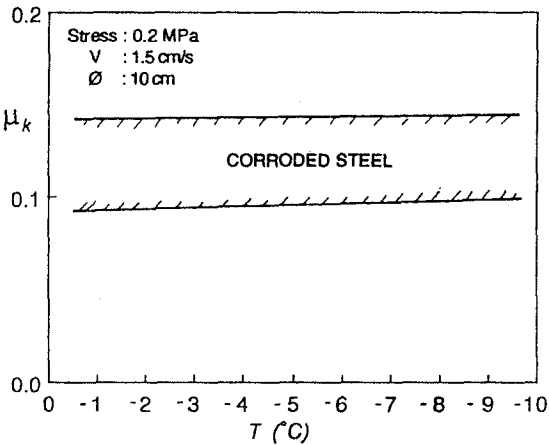
Author	μ	σ_v (MPa)	Material	Comments
Oksanen (1980)	μ_k	$0.001 \leq \sigma_v \leq 0.005$	Steel, concrete, coatings, plastics	μ_k decreases with increasing σ_v
Forland and Tatinclaux (1984)	μ_k	$0.001 \leq \sigma_v \leq 0.04$	Stainless steel	μ_k decreases and approaches constant for $\sigma_v \geq 0.007$ MPa
Arnold (1937)	μ_s	$0.001 \leq \sigma_v \leq 0.02$	Painted steel	μ_s decreases with increasing σ_v
Tabata and Tsushima (1979, 1981)	μ_k	$0.003 \leq \sigma_v \leq 0.23$	Metals, plastics, coatings	Independent of σ_v
Present study	μ_s μ_k	$0.10 \leq \sigma_v \leq 1.00$	Uncoated steel, coated steel, concrete	μ_k : Independent of σ_v μ_s decreases and approaches constant for $\sigma_v \geq 0.50$ MPa

Table 2 Summary of relative velocity effects.

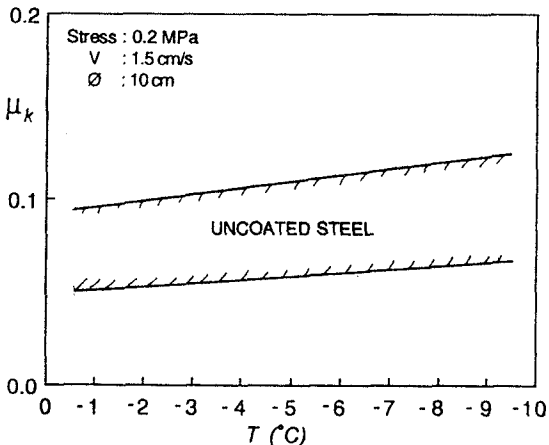
Author	μ	V_s (cm/s)	Material	Comments
Tabata and Tsushima (1979, 1981)	μ_k	$3.5 \times 10^{-1} \leq V_s \leq 0.20$	Metals, plastics coatings	μ_k decreases with increasing V_s
Forland and Tatinclaux (1984)	μ_k	$5.0 \leq V_s \leq 25.0$	Stainless steel, alminum, INERTA 160	In majority of tests, μ_k decreases with increasing V_s or is independent
Present study	μ_s μ_k	$0.04 \leq V_s \leq 110$	Uncoated steel, coated steel, concrete	μ_s and μ_k decreases and approach constant for $V_s \geq 3$ cm/s - uncoated steel, $V_s \geq 30$ cm/s - concrete
Oksanen (1980)	μ_k	$50.0 \leq V_s \leq 300$	Uncoated steel, coated steel, concrete	$T \leq -5^\circ \text{C}$ μ_k decreases and approaches constant with increasing V_s

参考文献

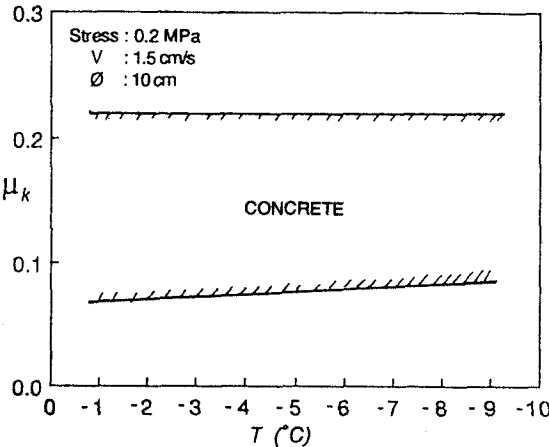
- Tabata, T., and Tsushima, K.(1979), "Friction Measurements of Sea Ice on Flat Plates Metals, Plastics and Coatings," Proceedings, Vol. 1, The 5th International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions (POAC 79), Trondheim, Norway, August 13 - 18, 1979.
- Tabata, T., and Tsushima, K.(1981), "Friction Measurements of Sea Ice on Some Plastics and Coatings," Proceedings, Vol. 1, The 6th Interantional Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions (POAC81), Quebec, Canada, July 1981.
- Forland, K. A., and Tatinclaux, J. C.(1984), "Laboratory Investigation of the Kinefic Friction Coefficient of Ice," Proceedings, IAHR Ice Symposium, Hamburg, W. Germany, 1984.
- Arnold - Alabieff, V. I.(1937), "The External Friction of Ice." Journal of Technical Physics, Vol.7, No.8, 1937.
- Oksanen, P.(1980), "Coefficient of Friction Between Ice and Some Construction Materials, Plastics and Coatings," Laboratory of Structural Engineering, Report 7, Technical Research of Finland, Espoo, Apr, 1980.
- Saeki, H., T.Ono, N.Nakazawa, M.Sakai and S.Tanaka.(1986),: "The Coefficient of Friction Between Sea Ice and Materials Used in Offshore Structures", Journal of Energy Resource Technology, Tarnsaction of The American Society of Mechanical Engineers, Vol.108, 1986.



(a) corroded steel



(b) uncoated steel



(c) concrete

Fig.9 Obtained values of coefficient of kinetic friction between sea ice and (a)corroded steel, (b)uncoated steel, and (c)concrete as a function of ice temperature.