

氷摩擦係数の垂直応力依存性

水上直己、前野紀一 北海道大学低温科学研究所

1 はじめに

氷摩擦の特徴として、他の物質の摩擦に比べて非常に滑りやすいことが挙げられる。この原因をつきとめるため、100年以上も前から氷摩擦の研究が行われてきた。しかし、過去の氷摩擦実験の多数はスキー、スケート等を対象にした氷-異物質間で行われ、氷に接触するスライダの形状も球形など平面でない場合が多い。これらの条件での氷摩擦実験では、「氷表面は異物質との接触により変化しやすい」「氷と異物質との硬度の違いにより、異物質の氷への貫入が起り、磨耗効果が増大する（特に接触の形状が球形の場合）」などの欠点が挙げられる。そこで、氷摩擦のメカニズムの解明には、氷と氷を平面接触させ摩擦力を測定することが、最も重要である。しかし、過去、平面接触で氷・氷摩擦実験を行ったのは、Bowden & Hughes (1939)、Oksenen & Keinonen (1982)、Beaman et al. (1988)、Jones (1989)、Cassasa et al. (1991) の 5 例のみであった。

この点を踏まえて、安留他 (1999) は、過去調べられていない速度領域で平面接触における氷・氷摩擦研究を行い、速度、温度依存性に関して報告した。本研究では、安留他 (1999) が詳しく調べることが出来なかった垂直応力依存性に着目して実験を行い、氷摩擦メカニズムについて考察する。

2 実験装置

安留他 (1999) と同じ回転式摩擦測定装置を用いて低温室内で実験を行った。装置全体の概略図を図 1 に示す。Z 軸ステージ（上下可動）に固定された氷円盤上で氷スライダを回転軸の腕の端に取り付けたホルダーに装着し、平面接触させ、メガトルクサーボモータを用いて一定の角速度で回転させた。本実験では、 4.0×10^{-3} 、 4.5×10^{-2} 、 3.6×10^{-1} m/s の 3 種類の速度を用いた。摩擦力は腕とモータの間に取り付けられたトルク計を用いて軸にかかるトルクとして測定した。

温度制御を厳密にするため装置を断熱ボックスで囲み、デジタル指示調節計を用いて、ボックス内の温度を制御した。その結果、氷

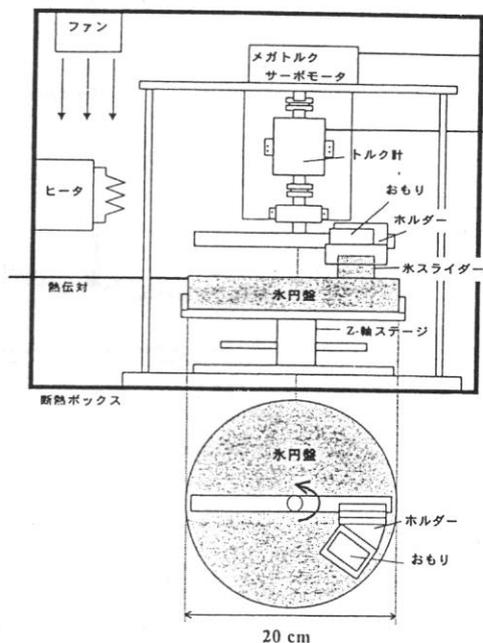


図 1. 回転式摩擦装置の概略図

表面温度は-0.5~-20℃の範囲において±0.1℃の精度で一定に保たれた。

垂直応力はホルダーの上におもりを載せることにより 1.2~17 kPa の範囲で変化させた。測定前に氷円盤、氷スライダー両方の表面をマイクロトームで平滑に仕上げ、1~2 時間、ボックス内の設定温度に氷を馴染ませ氷の表面温度が一定となっていることを確認した後、測定を開始した。

3 結果

図 2 にトルクの時間変化を示す。A が氷スライダーを氷円盤に接触させ回転させた時のトルクを示す。スライダーが動き出すには、動摩擦力（摩擦力）より大きい静止摩擦力に打ち勝つ必要がある。このため最初、トルクは大きい値となる。スライダーが動き出した後、トルクは比較的一定の値となった。10、24、28 秒付近で見られるふらつきは、マイクロトームでは制御出来ない場所による氷表面状態の違いから起こるものと考えられる。解析では静止摩擦や明らかに氷表面攪乱によるデータを避け、時間平均した。B は氷と氷を接触させないときのトルクの変化、つまり軸の回転によって発生するトルクの時間変化を示す（ブランクテスト）。接触時のトルクの時間平均とブランクテストの時間平均を差し引き、氷-氷の摩擦力のみによるトルクを求め、これから一つの摩擦係数を求めることができる。

図 3 に氷表面温度-10℃、速度 4.0×10^{-3} m/s の場合における、垂直応力-摩擦係数の関係を示す。それぞれの点は 3 回の測定の平均値を示してある。また 3 回の測定値の標準偏差を誤差として示す。垂直応力が大きくなるにつれ摩擦係数は減少し、約 6 kPa 以上ではほぼ一定の値を示した。比較のため、安留他 (1999) の結果を示してある。安留他 (1999) は摩擦係数の垂直応力依存性はないと結論付けているが、これは、測定範囲が狭かったためと言える。この依存性の形は、測定が行われたすべての温度、速度で見られた。

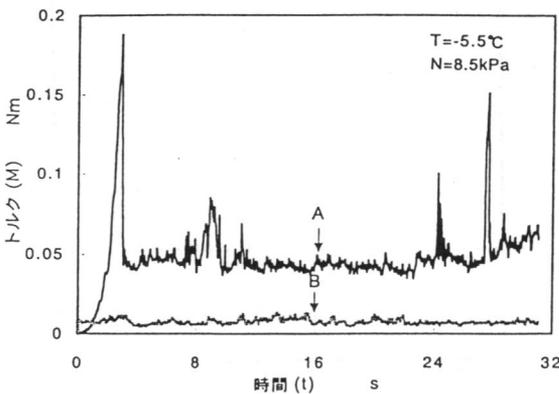


図2 トルクの時間変化

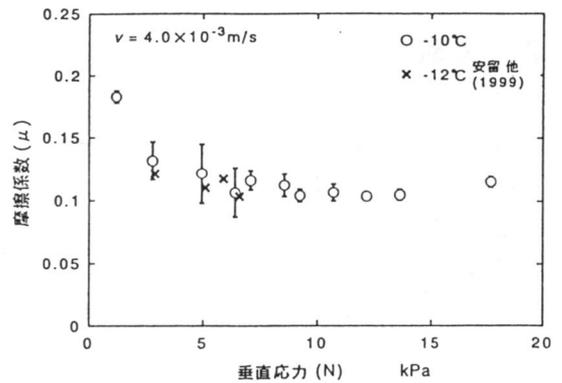


図3 垂直応力と摩擦係数の関係

4 考察

4-1 垂直応力-せん断応力の関係

以上の依存性に関する考察を、垂直応力-せん断応力グラフを用いて行った。図 4 に氷表面温度-10℃、速度 4.0×10^{-3} m/s の場合における、垂直応力と氷接触面に働くせん断応力の関係を示

す。結果は最小二乗法で直線近似できた。この直線は、せん断応力を S 、垂直応力を N とすると、

$$S = \mu_0 \cdot N + A \quad \dots \dots \dots (1)$$

と表すことができた。右辺第 1 項は垂直応力に比例する力、クーロン摩擦力であり、この直線の傾き μ_0 がクーロン摩擦係数である。しかし、垂直応力が 0 の場合においても、切片 (A) が存在する。この値 A は垂直応力が 0 の状態で接触している場合に発生するせん断応力である。つまり、この力は氷スライダーと氷円盤を接触させただけで起こる力であり、 A を付着力と呼ぶ。この式から、氷接触面に働く摩擦力は垂直応力に比例するクーロン摩擦力和垂直応力に無関係の付着力の和であることが分かる。摩擦係数はその定義 (せん断応力と垂直応力の比) より、

$$\mu = \mu_0 + \frac{A}{N} \quad \dots \dots \dots (2)$$

と表すことができる。この式から垂直応力が小さくなる程、付着力の項 (右辺第 2 項) が大きくなり、全体の摩擦係数も大きくなる。また、垂直応力が大きくなるにつれ、付着力の項は小さくなり、全体の摩擦係数はクーロン摩擦係数の値に近くなる事が分かる。従って、図 3 で垂直応力が小さい領域で摩擦係数が大きくなった理由は、付着力の寄与が大きくなったためである。また、この式よりクーロン摩擦係数と付着力の値が摩擦係数の垂直応力依存性の形を決定する。

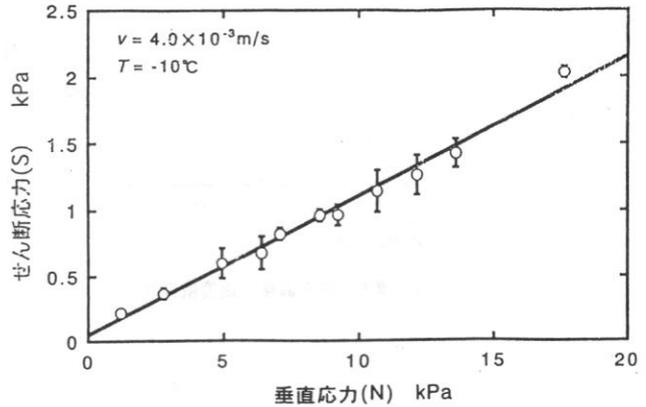


図4 垂直応力とせん断応力の関係

4-2 クーロン摩擦係数

本実験ではクーロン摩擦係数の温度、速度依存性を確認することが出来た (図 5)。速度が小さいほど、クーロン摩擦係数は大きい値となった。また、温度の上昇と共に、クーロン摩擦係数は減少した。しかし、 -5°C 附近を境に、それ以上の温度領域では、温度の上昇とともに μ_0 は増加した。これらの現象の殆どは氷摩擦の摩擦融解メカニズムで説明できる。摩擦融解とは、摩擦力により発生した熱エネルギーが氷への熱伝導と氷の融解熱に分配され、その摩擦熱により生成された水膜の粘性抵抗が摩擦力に相当するという考えである。この理論を考慮に入れると、速度依存性に関しては、低速程、発生する熱量が少ないため、融解熱の量も小さく、発生する水膜も少ない。従って摩擦係数が大きくなる。温度依存性に関しては、高温程、氷へ伝導する熱量が小さく、その分融解熱の量が大きく、その結果水膜の量も増え、摩擦係数が小さくなる。しかし、 -5°C 以上の温度領域では、摩擦融解の理論では説明できない。现阶段では、この温度領域での温度依存性に関して適切に説明できない。しかし、融点近傍での急激な氷硬度の減少が影響している可能性があると考えている。

4-3 付着力

この場合の付着力 (A) とは、上下の氷が相対的に動いている状態に起こる付着であり、静止させた状態での付着力 (いわゆる氷の破壊強度) の値 (数 MPa) の 1/1000 と非常に小さい値であった (図 6)。しかし、本実験により、明確な付着力の温度、速度依存性も得ることが出来た。付着力は温度の上昇とともに減少し、速度の増加とともに大きくなった。この温度、速度依存性の傾向は、氷の破壊強度の温度、速度依存性の傾向と同じである。

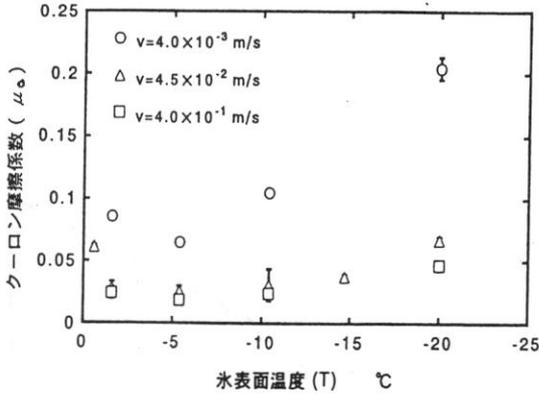


図5 クーロン摩擦係数の温度・速度依存性

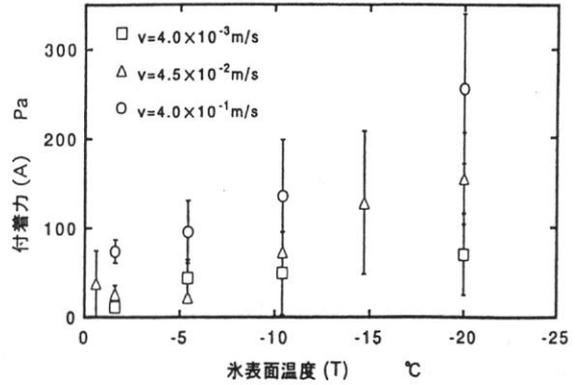


図6 付着力の温度・速度依存性

5 まとめ

最後に本研究で得られた結果について簡単にまとめる。本研究では、回転式摩擦測定器を用い、平面接触での氷-氷摩擦係数の垂直応力依存性を、1.2 kPa~17.6 kPa の範囲で調べた。その結果、測定を行ったすべての温度、速度において、摩擦係数は、垂直応力の増加とともに減少し、約 6kPa 以上では、ほぼ一定値となった。垂直応力とせん断応力の関係は、 $S = \mu_0 \cdot N + A$ で直線近似でき、その結果、垂直応力と摩擦係数の関係は $\mu = \mu_0 + A / N$ で表された。 μ_0 , A はそれぞれ、クーロン摩擦係数、付着力であり、両パラメータとも速度、温度依存性を確認することが出来た。

参考文献

- 1) Beeman, M., Durham, W.B. and Kirby, S.H. (1988) : Friction of ice. *Journal of Geophysical Research*, **93**, 7625-7633.
- 2) Bowden, F.P. and T.P. Hughes. (1939) : Mechanism of sliding on ice and snow. *Proceedings of the Royal Society of London*, **172A**, 280-298.
- 3) Casassa, G., H. Narita and N. Maeno (1991) : Shear cell experiments of snow and ice friction. *Journal of applied Physics*, **69**(6), 3745-3756.
- 4) Jones, D.F. (未発表): An experimental investigation of low-speed ice-ice friction. (Master of Engineering thesis, Dartmouth College, Thayer School of Engineering, 1989)
- 5) Oksanen, P. and J. Keinonen (1982) : The mechanism of friction of ice. *Wear*, **78**, 315-324.
- 6) 安留、荒川、前野 (1999) : 氷・氷摩擦係数の測定, 雪氷 61 巻 6 号 437- 443