

令和元年6月28日現在

機関番号：23304

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01656

研究課題名（和文）スキー滑走のための誘電特性を利用した雪面摩擦の研究

研究課題名（英文）A study on friction of snow for skiing by using dielectric properties

研究代表者

香川 博之（Kagawa, Hiroyuki）

公立小松大学・生産システム科学部・教授

研究者番号：40251938

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：実験は、雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所および電気通信大学菅平宇宙電波観測所等の施設を利用して行った。本研究では、水、雪粒子、空気の誘電率の違いを利用し、スキーなどの滑走体と雪面が接触する場合の真実接触面積を櫛型電極により評価する新しい方法を開発した。静摩擦係数と真実接触面積の関係についてもまとめ、ほぼ直線関係になることを示した。また、連続摺動実験により融解水の発生時に摩擦力が増加することなどを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スキーなどウィンタースポーツ用具の開発に欠かせない、雪や氷が良く滑る原因の説明には諸説ある。これらについて検証するためには、スキーと雪面の真実接触面積、滑走時の摩擦熱により発生する融解水がいつどのような条件で生じるのか等について把握する必要がある。本研究では、櫛型電極で誘電特性を測定することで、真実接触面積の大きさや融解水の存在を評価できる新しい方法を開発した。また、本実験の範囲では、真実接触面積と静摩擦係数がほぼ比例することや、連続摺動により融解水が生じると摩擦係数が増加することなどを示した。

研究成果の概要（英文）：The experiments of this study have been conducted at Shinjo cryospheric environment laboratory, Sugadaira space radio observatory, and so on. In this study new evaluating method of real contact area has been experimentally developed by using different dielectric properties of water, snow particle, and air. The relationship between the static friction coefficient and the real contact area was shown to be roughly proportional in our experiment. And it has been found that melted water increased friction force by continuous sliding test of a doughnut-shape plate on snow surface.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：スポーツ工学 スキー 雪 摩擦 真実接触 誘電特性 評価法 融解水

1. 研究開始当初の背景

申請者は、スキーの滑走やターンについて検討するため、これまでに回転雪皿法および自然滑走法により雪面摩擦特性、開発した押し込み硬度装置による雪面硬度特定、スキー滑走中のスキー板変形および雪面作用圧力分布などの測定を行ってきた。その過程で、雪面の密度、粒子の大きさ、温度と、雪面押し込み変形量の関係を明らかにし、さらに押し込み圧痕の下に形成される圧密領域の大きさを実験式により推定することを可能とした。しかし、雪面摩擦が発生するメカニズムは依然不明のままで、多くの研究者が支持している Bowden らの提唱した摩擦熱による融解水が生じて潤滑剤の働きをするという考え、すなわち摩擦融解説では説明がつかない実験結果が申請者らにより多く得られ始めている。これらを解決するには今まで測定できなかったマイクロな接触状況を把握することが重要になる。

水、氷（雪粒子）、空気の比誘電率は、図1のように、水は大きく、空気は小さいが、氷は加える交流電圧の周波数により大きく変化する。

原理的にはこの性質を利用して、高い周波数では水と氷の割合を、低い周波数では空気と氷の割合を測定できることになる。

橢型電極を使うと、電気力線は電極の近くで密度が高く、電極近傍の材料の誘電特性の影響を受けることになる。雪表面に橢型電極を接触させると、電極と雪粒子が接触している部分は氷の影響を受け、接触していない部分は空気の影響を受ける。したがって、1kHz 程度の低い周波数を使えば、真実接触面積が大きいほど比誘電率が大きくなるものと考えられる。

申請者は誘電特性を利用し真実接触面積の変化を電氣的に捕られると考えている。顕微鏡観察による真実接触面の観察とこの誘電特性の測定を様々な条件で実施し、比較検討することで両者の関係を明らかにし、静止状態に限らず滑走状態においても雪面の真実接触面積を評価できることが期待される。

さらに、同じ装置を使って、1MHz 程度の高い周波数を使えば、接触面における融解水の存在についても評価できることになる。

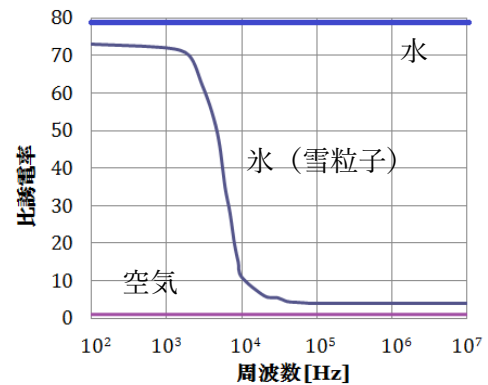


図1 誘電特性

2. 研究の目的

本研究の目的は、水、雪粒子、空気の誘電率の違いを利用し、スキーなどの滑走体と雪面が接触する場合の真実接触面積を橢型電極により評価する新しい方法を提案することである。また、橢型電極を内蔵した滑走体を使って様々な条件で滑走（招動）実験を行い、雪面の真実接触面積と摩擦力の関係について調べることで、摩擦発生メカニズムについて検討を行う。具体的には以下の各課題について取り組んだ。

- 課題 A 静止時の真実接触面積はどれくらいあるのか
- 課題 B 楕型電極を使った誘電特性評価により接触状況をどの程度把握できるのか
- 課題 C 静摩擦と真実接触面積の関係はどうなるのか
- 課題 D 摩擦により融解水が生じるかどうか
- 課題 E 滑走時の動摩擦と真実接触面積の関係はどうなるのか

3. 研究の方法

3. 1 偏光顕微鏡による真実接触面積の測定

滑走体が静止しているときの真実接触面積を調べるため、倒立型偏光顕微鏡を改造して接触面観察装置(図2)を作成した。LED光源に赤外線遮断フィルターを入れるなどの対策を行い、実験開始前に観察領域に熱が伝わっていないことをサーモグラフィにより確認した。

実験は、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の低温実験室にて行い、室温を -15°C 、 -10°C 、 -5°C 、 -2°C に変え一定とした。また、電気通信大学菅平宇宙電波観測所の屋外でも冬季に実験を行った。

滑走体とみなしたガラス板の上に錘をつけた雪ブロックを置き、雪面とガラス板の接触面をタイムラプスカメラで撮影した。このとき、雪温や接触圧力、雪粒子の大きさの条件を変えた。撮影した写真データを画像解析して真実接触面積を評価した。

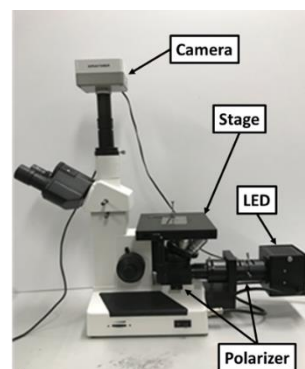


図2 接触面観察装置

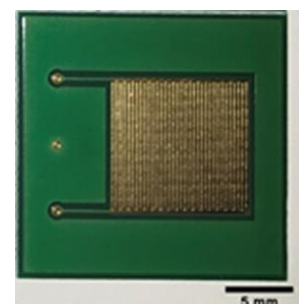


図3 楕型電極

3. 2 楕型電極による誘電特性の測定

実験を行う前に、有限要素法を使った電場解析により雪面の接触に適した楕型電極の形状を調べて、図3に示すような電極を作成した。この電極にLCRメータを接続し、PCのプログラムで制御して、印加電圧の周波数を $1[\text{kHz}]$ と $1[\text{MHz}]$ を切替えながら、接触時の誘電特性を接触時間の経過とともに測定した。なお、LCRメータを安定的に動作させるために、恒温ボックスを作成し電極を除く測定機器の温度を一定に保った。また、実験条件は前述の偏光顕微鏡観察にあわせ、結果比較の便をはかった。

3. 3 静摩擦係数および動摩擦係数の測定

滑走体に楕型電極を内蔵した実験を当初行う予定であったが、電極とLCRメータを接続する配線の位置が変わると誘電測定に影響が出た。この問題を解決できなかったため、前述の偏光顕微鏡観察および誘電特性測定と条件が同じ接触面圧になるようにして実験を行った。

実験に使用する滑走体の滑走面には、表面エネルギーの異なるポリエチレン、ゴムなどを貼り付けた。

摩擦実験を行うため、一軸アクチュエータにフォースゲージを取り付けた直線滑走による摩擦試験システム（図4）を作成した。フォースゲージに剛性の小さなコイルばねを介して、滑走体を牽引できる。

静摩擦係数の測定には、滑走体を少し牽引し雪面上を移動させた後、プログラミングされた停止時間（接触時間）が経過した後、静止した滑走体を再度牽引するように PC で制御した。そのときの荷重を測定し、最大値を重量で除したものを静摩擦係数とした。なお、接触時間は、5、20、40、60[秒]とした。

動摩擦係数の測定は、プログラミングした一定速度で滑走体を牽引して行った。なお、牽引速度は、0.005、0.01、0.03、0.2、0.5、0.5、1.0[m/s]とした。

3. 4 動摩擦係数および誘電特性の測定

前述までの滑走体とは異なり、ドーナツ状の亚克力板を雪面に押し付け回転させ、連続摺動を行うことのできる装置（図5）を開発した。亚克力板の表面には、楕型電極を取り付け、摺動時間ともに変化する誘電特性を測定した。誘電特性を安定させるため、亚克力板を固定し、雪面を回転させることにより実験を行った。亚克力板には温度計や熱流速計も取り付けたが、雪面に直接接触させることが困難であったため、摺動時の微妙な温度変化を捉えることはできなかった。そこで、サーモグラフィ（図6）を使って、亚克力板のすぐ外側と少し離れた位置の雪面温度の測定を行った。また、トルク計により摺動中の摩擦力を測定し、押し込み力で除すことで動摩擦係数を評価した。雪面の回転速度は、490、980[rpm]とした。これは、ドーナツ状

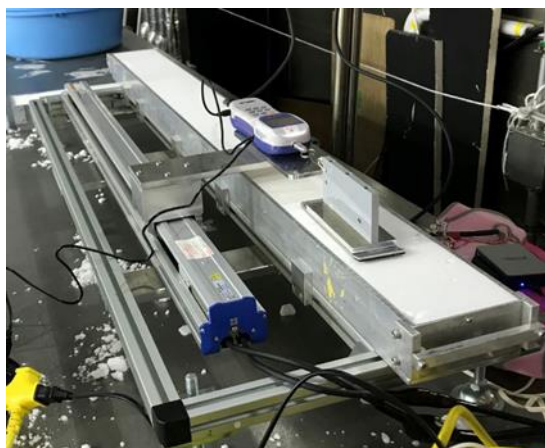


図4 摩擦試験システム（直線滑走）

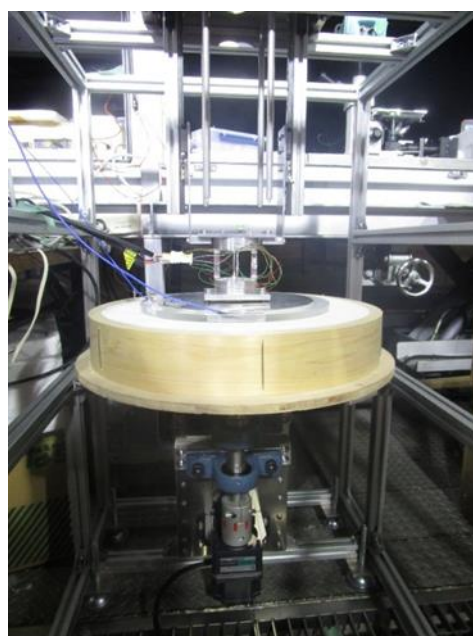


図5 連続摺動装置



図6 サーモグラフィ

アクリル板の幅の中央付近の速度が約 0.75、1.50[m/s]に対応しており、直線滑走による動摩擦実験の範囲に近い値を設定した。

4. 研究の成果

4. 1 接触時間と真実接触面積

直径 6[mm]の円形表面をもつ、平均粒子径が約 0.08[mm]の雪ブロックをガラス面に接触させた場合の結果を図 7 に例として示す。真実接触面積は、時間経過とともにほぼ対数関数的に増加した。また、真実接触面積は大きくても接触面の約 0.09%程度であった。雪温が高いほど、接触圧が大きいほど真実接触面積が大きくなった。また、粒子径が小さいものの方が、大きいものより真実接触面積が大きくなった。

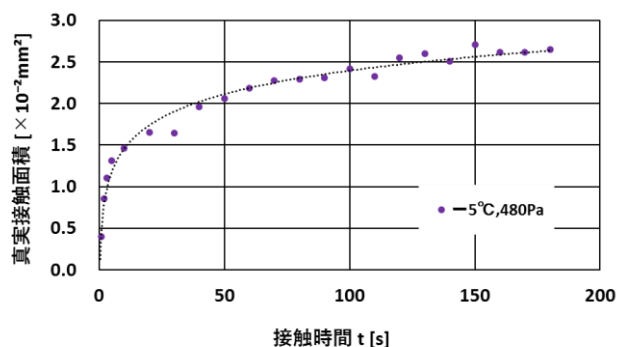


図 7 真実接触面積と接触時間

4. 2 誘電特性による真実接触面積の評価

楕型電極で測定した比誘電率と偏光顕微鏡で測定した真実接触面積の関係をプロットした例を図 8 に示す。本研究の範囲では、雪粒子径には関係なく、温度ごとに相間があることがわかる。この関係を利用して、誘電率から真実接触面積を推定することが可能と考えられる。

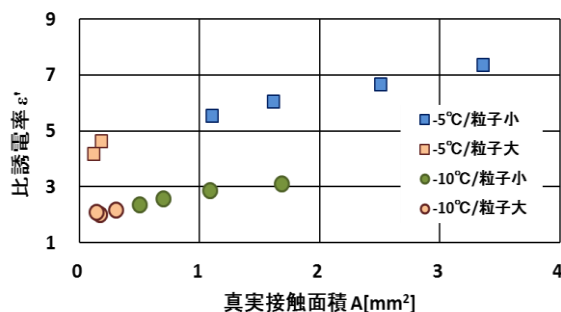


図 8 比誘電率と真実接触面積

4. 3 静摩擦と真実接触面積

例として、実験により得られた静摩擦係数と図 7 を使って同じ接触時間の真実接触面積を推定した結果を図 9 にプロットする。本研究の範囲ではほぼ直線上に並ぶことから、接触時間ともなう静摩擦係数の増加は、真実接触面積の増加が原因であるものと推測される。

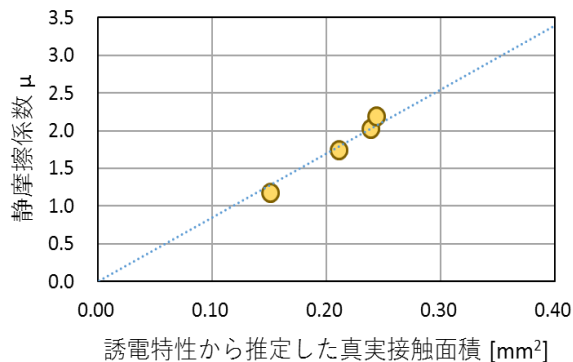


図 9 静摩擦係数と真実接触面積

4. 4 動摩擦と融解水の生成

ドーナツ状のアクリル板を -2°C の雪面に連続摺動した結果の例を図 10 に示す。摺動時間ともない動摩擦係数が増加した。初期は徐々に増加するが、これは摺動ともない雪

表面とアクリル板が馴染み接触面積が増加したことが考えられる。1kHz で測定した比誘電率も動摩擦係数と似た傾向で増加していることから、真実接触面積が増加したことが予想される。このとき、水を検出できる 1kHz で測定した比誘電率はあまり大きくないことも裏づけとなる。なお、測定された比誘電率の大きさが静的な実験結果に比べて小さくなっているのは、アクリル板の大きさが大きく、雪面との密着性が低くなっていることが考えられる。

約 400[s]経過した時点で、大きく動摩擦係数が増加しているが、このときアクリル板周辺から水滴が飛び散る様子が観察され、多くの融解水が発生したことがわかった。この頃から 1kHz で測定した比誘電率も大きく増加し、この融解水を検出しており、融解水の発生は摩擦力を減少ではなく増加させている可能性がある。

摺動時間の初期に着目し拡大すると、図 1 1 が得られる。摺動時間が約 270[s]辺りに僅かではあるが 1kHz の比誘電率の上昇が見られ、これに合わせて動摩擦係数も急激に上昇している。肉眼では観察できなかったが、この時点で既に融解水が発生し、摩擦力を増加させた可能性がある。

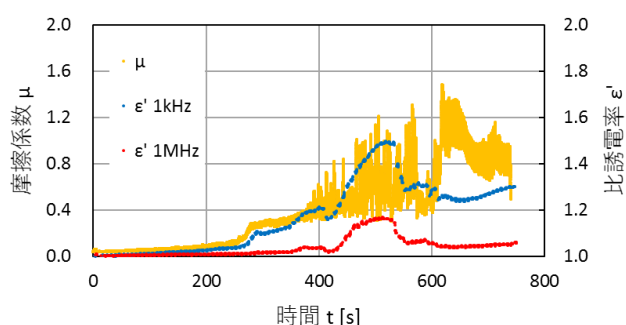


図 1 0 連続摺動時間と動摩擦係数

5. 主な発表論文等

今後、さらに結果を精査し、まとまりしだい順次公表していく予定である。現段階で、発表済みは国内学会 4 件、申込みは国内学会 1 件、国際学会 1 件となっている。

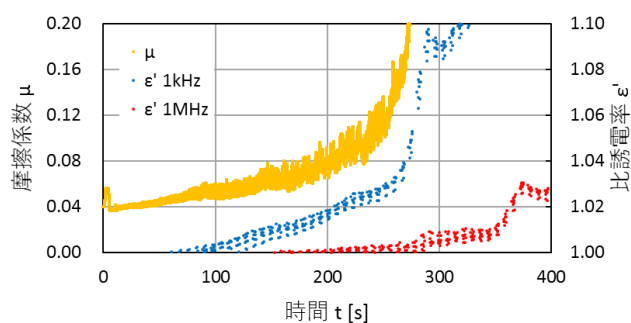


図 1 1 連続摺動初期の動摩擦係数

6. 研究組織

(1) 研究代表者

香川博之 (KAGAWA, Hiroyuki)

公立小松大学生産システム科学部・教授

研究者番号：40251938