

令和 6 年 9 月 9 日現在

機関番号：23304

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11448

研究課題名（和文）スキーの雪面摩擦と雪粒子のミクロな結合力の関係

研究課題名（英文）Relation between friction of snow surface and micro bonding of snow particles in skiing

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、「スキーなどの滑走面と雪粒子のミクロな結合力は、マクロな摩擦特性にどのように影響しているのか」という問いに対し実験的に調べるものである。新たに開発した2軸マイクロ負荷試験装置を使って、スキー板と見なしたガラス平板に対して、雪粒子を固めて作った雪圧子を垂直に押しつけた後、ガラス板に水平に力を作用させることで、ミクロな静止摩擦力の測定を行った。それに先立ち、垂直押し込み後に、除荷することで凝着力についても評価した。なお、本装置は、実験中に2方向の力を測定しながら、真実接触面積を測定することができる。さらに、ガラス平板でできた滑走体を雪面上で牽引することで、マクロな静止摩擦力の測定も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スキー板を開発する上で雪面摩擦発生メカニズムの解明が課題になっている。本研究により、真実接触面積を測定しながら押し込みおよび静止摩擦実験を行うことのできる2軸マイクロ負荷試験装置を開発することができた。これにより、滑走面の表面エネルギーと雪面の凝着力の関係が実験的に明らかになった。また、凝着力と静止摩擦の関係についても調べることができた。これらの成果は、スキー開発に限らず、冬タイヤの開発や屋根の着雪対策など研究に役立つと考えている。

研究成果の概要（英文）：This study experimentally investigates the question of how the micro bonding forces between snow particles and a sliding surface of skis, affect macroscopic frictional characteristics. Using a newly developed two-axis micro-load testing device, an indenter of snow was pressed vertically onto a glass plate regarded as a ski surface. Subsequently, horizontal forces were applied to the glass plate to measure micro static friction. Prior to this, adhesive forces were evaluated by unloading after vertical compression. This device allows measurement of forces in two directions and also simultaneously measures the true contact area during experiments. Furthermore, macro static friction was measured by towing glass plate sliders on snow surfaces.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：スキー 雪 マイクロ負荷試験 真実接触面積 凝着力

1. 研究の背景

申請者は、スキー板の開発などに必要な雪面の機械的特性のうち、雪面硬度に着目し、雪面変形モデルを構築し、エッジング・プロファイル予測方法の提案を行っている。また、雪面摩擦に対する雪温やスキー滑走速度の関係についても調べている。さらに、テストスキーヤーによる実滑走実験を行い、スキー板の変形挙動やスキー板に作用する雪面圧力分布についても、マクロな実験的アプローチにより明らかにしてきた。

この研究過程で、雪面摩擦発生メカニズムとして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り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難しいという実験結果も得られている。また、分子動力学による解析や AFM を用いた実験など、最近の研究によりミクロな結合力の影響が明らかになってきているが、滑りにより界面に生じる厚さがサブミクロンの疑似液体層（氷表面にある液体水のような薄い層）により潤滑されると結論づけられている。この層は摩擦抵抗に影響するが、層が形成されにくい極低温でも氷が滑りやすいことや、滑りのない静止摩擦においても低摩擦を示すことの説明は難しく、さらなる実験による検討が必要と考えられる。スキー滑走面と雪面のミクロな結合力には、滑走面の表面エネルギーが関係していると考えられ、これらと摩擦特性の関係を明かし、雪面の真実接触面の形成過程を把握できれば、スキー板、スノーボード、ワックスの開発への貢献も期待できると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、スキー滑走面と雪面のミクロな結合力が、マクロな摩擦特性にどのように影響するかについて実験的に調べるものである。

これまで本研究室で行ってきた独自手法を発展させて、スキー板と見なしたガラス平板に球状雪粒子固めて作った雪圧子を押しつけるミクロな実験を計画した。実験では、押し込み荷重や真実接触面積を同時に測定し、温度、雪の粒子径、接触時間（ガラス平板に雪面が押し込まれて静止している時間）、ガラス平板の表面エネルギーの影響について調べる。また、負荷荷重を除荷し、ガラス平板と雪圧子の凝着力を調べる。静止摩擦力についても、押し込み荷重と真実接触面積を同時に測定しながら調べた。さらに、雪面とガラス平板を使ったマクロな静止摩擦実験も行う。得られた結果を比較して、ミクロな結合力と静止摩擦力の関係について考察を行うことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

3. 1 2軸マイクロ負荷試験装置の開発

計画ではピエゾステージを使用する予定であったが、配当予算が計画よりも減額され購入が難しくなったため、並行平板構造を利用した精密ステージを自作した。開発した2軸マイクロ負荷試験装置（図1）は、倒立型偏光顕微鏡に取り付けられており、一つのピエゾアクチュエータにより雪圧子を垂直方向に、もう一つのピエゾアクチュエータでガラス平板

を水平方向に PC 制御で移動させることができる。その移動量は、レーザ変位計で測定する。雪圧子に取り付けた2つのロードセルにより垂直および水平方向の荷重を測定できる。これらが、それぞれ押し込み荷重および摩擦力に対応する。また、押し込み時の真実接触面積は、倒立型偏光顕微鏡に取り付けたカメラ映像を画像処理して測定した。周囲の振動の影響を抑えるため、装置全体を防振台上に載せ、データロガーは無線式のものを用いた。

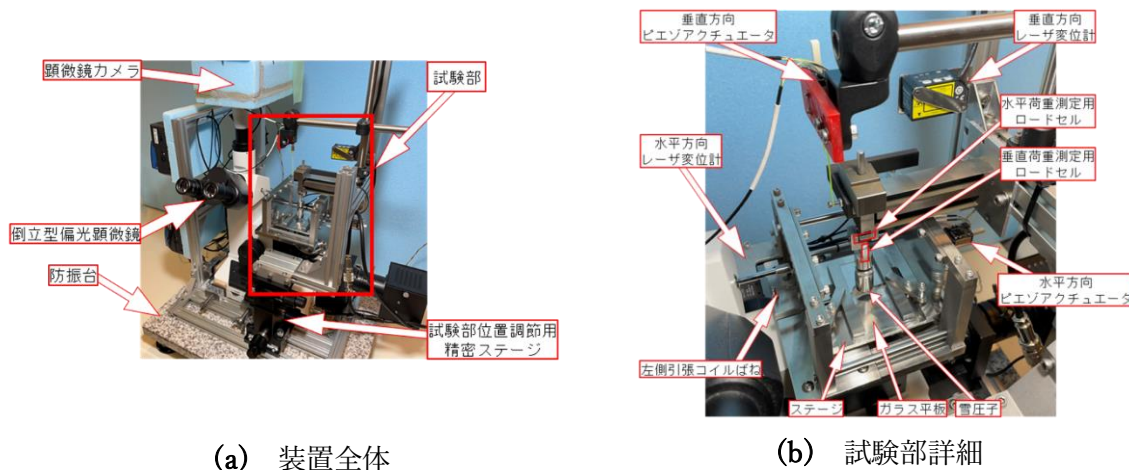


図1 2軸マイクロ負荷試験装置

3. 2 ミクロな結合力の測定

2軸マイクロ負荷試験装置を使って、ガラス平板に雪圧子を1方向すなわち垂直に押し込む実験を行った。最大押し込み荷重を1~3[N]に設定し、垂直荷重および真実接触面積の変化を測定した。実験パラメータとして、温度、雪の粒子径、接触時間（ガラス平板に雪面が押し込まれて静止している時間）を変化させた。また、2種類の表面処理を行ったガラス平板を用いて、表面エネルギーの影響についても調べた。押し込みによりガラス平板と雪圧子表面が凝着するため、除荷して荷重が0[N]になっても接触結合した状態になる。ピエゾアクチュエータで雪圧子をさらに引き上げることで、結合を引離した。このときの引離し力がミクロな結合力すなわちガラスと雪の凝着力になる。

3. 3 静止摩擦力の測定

まず、ミクロな静止摩擦実験を行った。前節と同様にガラス平板に雪圧子を垂直に押し込んだ後、ガラス平板を固定したステージに水平方向に徐々に力を加えた。ステージは平行平板で支持され、水平方向にのみ移動できるようになっている。ばねを介しリニアアクチュエータでこのステージを牽引すると、はじめのうちは摩擦力の作用でステージは動かない。アクチュエータ変位の増加に比例してステージに作用する水平牽引力が増加し、最大静止摩擦力を越えると雪圧子との接触部分が滑り、ステージが水平方向に移動する。このときの最大牽引力が静止摩擦力になる。

次に、マクロな静止摩擦実験を行った。広い雪面上でガラス平板の牽引を行い、多くの雪粒子が接触する場合の静止摩擦特性についても調べた。

4. 研究の成果

4. 1 ミクロな結合力

垂直押し込み試験の結果例として、温度-5[°C]、雪粒子径 50[μm]の雪圧子、表面エネルギーが小さく水滴による接触角 105[deg]のガラス板を用い、最大押し込み荷重 1[N]にした場合の結果を図 2 に示す。押し込み荷重が(a)図のようにほぼ一定になっていても、真実接触面積は(b)図のように時間とともに増加する。時間が約 70[s]の荷重が負値を示すが、これは引張力であり、この最大値が凝着力になる。これらの値は同じ条件でばらつくが、荷重を真実接触面積で除して(c)図のように平均接触圧にするとほぼ同じになった。

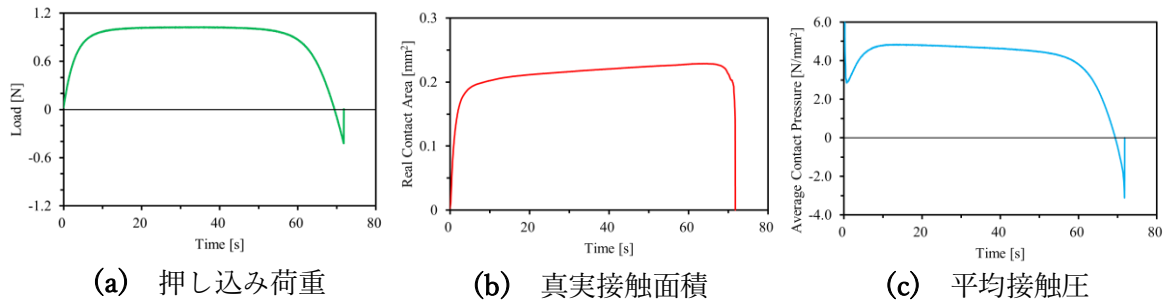


図 2 垂直押し込み試験の結果例

凝着力を真実接触面積で除した平均接触圧すなわち負の最大接触圧を凝着応力 $\sigma_{\text{pull-off}}$ と定義した。これがガラス平板と雪粒子のミクロな結合力と考えられる。

接触角 105[deg]のガラス板で温度-5[°C]における凝着応力と最大押し込み荷重の関係についてまとめると図 3 が得られた。凝着応力は、最大押し込み荷重の影響はほとんどなく、粒子径が小さい方が大きくなった。

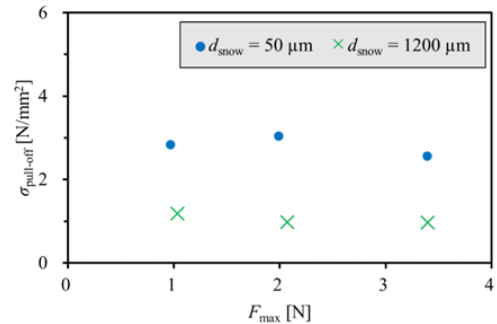


図 3 凝着応力と最大押し込み荷重

粒子径 50[μm]と小さい雪粒子の凝着応力と温度の関係についてまとめると図 4 が得られた。凝着応力は、ガラス平板の表面エネルギーが大きい方が大きい、どちらも低温領域ではほぼ一定になり、氷の融 0[°C]に近い高温になるとほぼ 0 になった。これは、高温では雪粒子表面の疑似液体層の厚さが大きくなり、ミクロな結合力が小さくなったものと考えている。

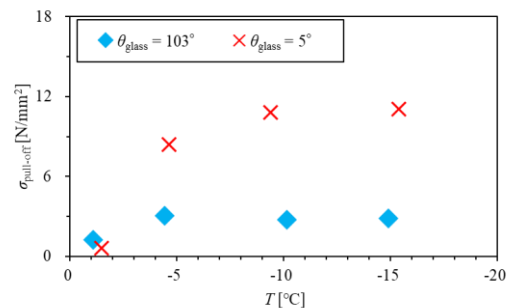


図 4 凝着応力と温度

接触時間の凝着応力に対する影響は小さかった。

4. 2 静止摩擦力

2軸負マイクロ負荷試験、すなわち垂直押し込んだ後に水平方向に荷重を負荷して得られたマイクロな静止摩擦力の結果例を示す。摩擦力は真実接触面積の影響を受けるため、ここでは静止摩擦係数 μ_{snow} で考える。接触角 $105[\text{deg}]$ のガラス板で温度 $-5[^\circ\text{C}]$ における静止摩擦係数と最大押し込み荷重の関係についてまとめると図5が得られた。静止摩擦係数は、雪の粒子径が小さい方が大きい。また、最大押し込み荷重が小さい $1[\text{N}]$ で大きくなるが、粒子径の大きい場合にはほとんど変わらない。粒子径が小さい場合には、同じ真実接触面積でも接触点の数が多く、接触点あたりの接触面積が小さくなる。

最大押し込み荷重を約 $3[\text{N}]$ とし、接触角 $105[\text{deg}]$ のガラス板で雪の粒子径約 $50\sim 100[\mu\text{m}]$ の場合の静止摩擦係数と最大押し込み荷重の関係についてまとめると図6が得られた。本研究の範囲では、温度低下にともない静止摩擦係数が増加する。

ガラス平板を雪面上で牽引することで得られたマクロな静止摩擦力の結果を示す。接触時間 t_{wait} を $5\sim 60[\text{s}]$ に変え、接触角 $108[\text{deg}]$

のガラス板で粒子径約 $100[\mu\text{m}]$ の場合の静止摩擦係数をまとめると図6が得られた。温度が高くなるにともない、マイクロな場合と同様に静止摩擦係数が大きくなる。これに対して、接触時間が長くなるにともない静止摩擦係数が大きくなり、マイクロな場合のほぼ変わらないという結果とは異なった。また、マイクロな場合に比べてマクロな場合の静止摩擦係数は全体的に大きくなった。マクロな実験では、ガラス平板の滑走体の質量が小さく、見かけの平均接触圧が $0.4[\text{kPa}]$ であるのに対して、マイクロな実験の見かけの平均接触圧は $10\sim 40[\text{kPa}]$ と非常に大きくなっている。すなわち、マクロな場合には、マイクロな場合の最大押し込み荷重が非常に小さい場合に相当している。図5のように最大押し込み荷重が小さいことから、静止摩擦係数が大きくなっている可能性もあると考えている。

その他、本研究のデータ範囲では断言できないが、真実接触部分に作用するせん断応力すなわち摩擦力が、凝着応力を考慮した有効平均接触圧と相関があるような結果も得られており、今後さらにデータを増やして検討を進める予定である。

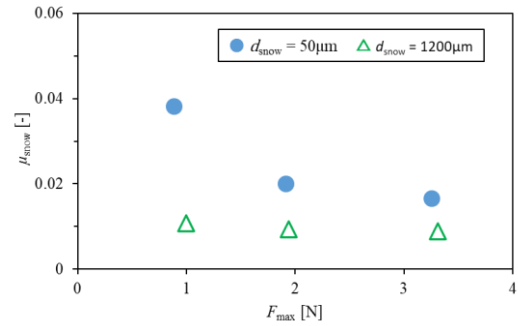


図5 静止摩擦係数と最大押し込み荷重

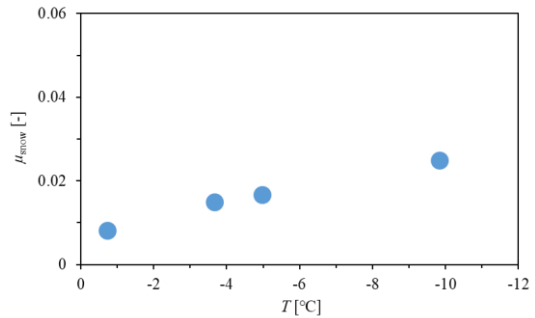


図6 静止摩擦係数と温度

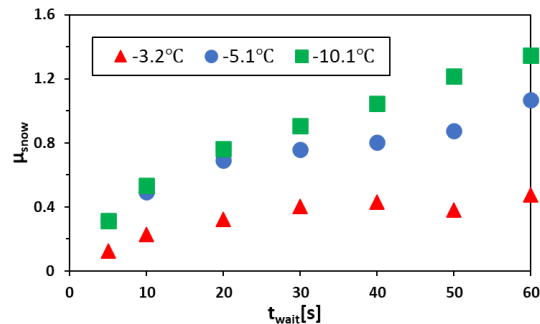


図7 マクロな静止摩擦係数と接触時間

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 竹内迪哉、山崎裕矢、香川博之
2. 発表標題 雪粒子結合力測定装置の開発と測定実験
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内迪哉、粕谷素洋、香川博之
2. 発表標題 スキーと見なしたガラス板に対する雪の押し込み試験
3. 学会等名 日本機械学会 シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹内迪哉、粕谷素洋、香川博之
2. 発表標題 接触部観察が可能な雪の静止摩擦試験装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2024 年合同講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------