

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500735

研究課題名(和文) 雪面特性とスキー滑走に関する研究

研究課題名(英文) Study of properties of snow surface and skiing

研究代表者

香川 博之(Kagawa, Hiroyuki)

金沢大学・機械工学系・講師

研究者番号：40251938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：スキー滑走のメカニズム解明を目的に、本研究では雪面の摩擦および押込み変形特性について雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所及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実験的に調べた。摩擦係数を測定し、雪温や滑走速度の影響について明らかにし、滑走体がポリエチレンの場合には、高温低速及び低温高速領域で摩擦係数が大きくなること、高速領域では摩擦係数があまり変化しないこと等がわかった。円すい圧子や平板圧子を使って雪面硬度を測定し、雪面密度、雪温、雪粒子径との関係を明らかにすることで、スキーのエッジング・プロファイル及び圧密領域の大きさを予測することが可能になった。

研究成果の概要(英文)：To elucidate mechanism of skiing friction and deformation properties by indentation of snow surface have been experimentally investigated at Shinjo cryospheric environment laboratory, Sugadaira space radio observatory, and so on. By using a tribo-meter influence of snow temperature and sliding velocity on coefficient of friction has been clarified. In case of polyethylene the coefficient became larger in two regions, that is, high temperature and low velocity, or low temperature and high velocity. And also the coefficient didn't change so much in high velocity. By hardness test using conical or flat indenter influence of density, temperature, and grain size of snow on hardness has been clarified. Thereby, edging profile and shape of compaction area under the indentation in skiing can be predicted.

研究分野：スポーツ工学

キーワード：雪 摩擦 硬度 スキー 押込み変形 圧密領域

## 1. 研究開始当初の背景

申請者は、これまでにスキー滑走中に使用できる雪面作用力センサーやスキー板たわみセンサー、スキー場で使用できる雪面硬度計などを独自に開発し、スキー滑走に関する実験を行ってきた。その過程で以下の問題点を認識した。

### 問題1：摩擦特性評価の必要性

スキーがなぜ滑るのかということ自体がまだ解明されていない。100年前には圧力融解により水膜が生じるためという誤った説まで広く支持されたこともある。現在の常識では、Bowdenらが提唱した摩擦熱融解説で、雪面をスキー板が滑走するときの摩擦熱により水膜が生じ、潤滑作用により滑るというものである。しかし、申請者が参加した人工雪を使った低温室での実験等により、少なくとも低速領域では水膜の発生が困難な低温状態においても低摩擦であることがわかってきた。また、雪温によっては速度増加に伴い摩擦係数が低下する場合があるなど、潤滑膜による滑走とは矛盾する実験結果が得られている。摩擦発生メカニズムを明らかにするため、高速域までの摩擦特性の把握、滑走表面の観察が欠かせない。

### 問題2：押し込み特性評価の必要性

スキー滑走時で特にターンを行う場合には、雪面に対して大きな力が作用し、スキー板の押し込み(エッジング)により溝状の滑走痕が形成される。スキー板が雪面に押し込まれる量や形状について検討するためには、雪面(特に表面の近傍)の押し込み硬度試験による機械的特性評価が欠かせない。そもそもスキー滑走に大きく影響を与える雪表面は、現状では、経験者の感覚により、例えば、「新雪、アイスバーン、ざらめ雪」などと表現(注：雪氷学会の定義とは別)され、それをさらに「硬め、やわらかめ」などと区別することが多く、競技用斜面であっても気象条件と雪温などを除き定量的な評価方法が規定されていない。スキー滑走を行う雪面条件を整えるためにも重要な問題となる。

### 問題3：滑走時におけるスキー板変形挙動や雪面反力分布評価の必要性

スキー板の設計・製作段階で静的な曲げやねじり特性などは把握されているが、滑走時の変形挙動や雪面反力の分布についてはよくわかっていない。

### 問題4：エッジング・プロファイル予測方法の必要性

スキー板は、形状や材質、静的および動的変形挙動などを考慮して設計されるが、雪面状態の評価値をどのように活用するのかなどの方法について検討する必要がある。静止時や滑走時にスキー板がどのように変形しながら、雪面に押し込まれるのかは重要な問題で

あり、その押し込み形状(エッジング・プロファイル)を予測する方法が欠かせない。

## 2. 研究の目的

前述の問題を解決するために、これまで開発してきた装置を改良する。雪面の機械的特性(摩擦および押し込み硬度)の定量的評価、スキー滑走時のスキー板の変形挙動および作用圧力分布の評価を実施する。具体的には、以下の各課題について取り組む。

課題A：雪面摩擦係数の測定

課題B：雪面押し込み硬度の測定

課題C：滑走時のスキー板変形および雪面作用圧力分布の測定

課題D：エッジング・プロファイル予測方法の提案

## 3. 研究の方法

### 3.1 摩擦係数の測定

仁木らが開発した回転雪皿法および自然滑走法による測定装置を高速滑走領域について行えるように改良する。後者については、滑走体の速度を測定するのに、申請者が開発した野球の球速測定装置の原理を応用し、レーザーセンサー・アレーにより通過時間を精度よく測定できるようにする。改良した装置を使用して、粒径や形状などの雪質と雪密度を制御した雪面に対して摩擦係数を評価する。そのとき、雪温、滑走速度との関係を詳細にしらべる。また、滑走面の状態を偏光顕微鏡等に観察する。

測定結果を使って、これまでに多くの研究者が提唱している仮説(圧力融解説、摩擦融解説、疑似液体層による説、凝着摩擦説など)を検証し、摩擦発生メカニズムについて整理する。

### 3.2 押し込み硬度の測定

申請者が開発した押し込み硬度測定装置(図1)を改良し、押し込み深さ測定精度を向上させる。硬度は、錘のある高さから自由落下させたときの押し込み量から、圧痕生成に使われたエネルギーを算出し、それを押し込み体積で除すことで評価する。降雪後は、摩擦係数評



図1 押し込み硬度測定装置

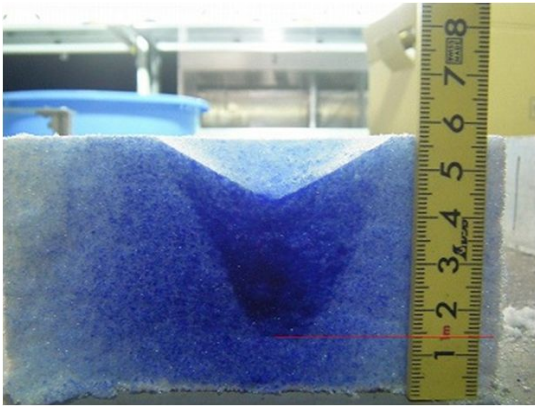


図2 インク法による圧密領域の観察

価と同様の雪面に対して実験を行い、基本データを収集する。実験条件として、錘の質量、落下高さなどを変え評価方法の妥当性について確認する。評価した硬度と雪質、雪温、密度との関係について詳細にしらべる。さらに押し込み位置を鋸で切り出し、インク法による断面観察により圧密領域の大きさを測定する。なお、平均粒径が0.2mm程度の雪については、図2のように圧密領域が色濃く変色することを予備実験で確認している。アニリン法などにより雪粒子を固定し、同様に観察を行う。さらに、スキー滑走をおこなう斜面に対して押し込み硬度評価を行う。

実験の結果から、雪面変形のメカニズムについて考察する。押し込み実験をシミュレートできる雪面変形モデルを構築する。

### 3.3 スキー滑走実験

申請者が開発したたわみ・ねじり測定装置(図3)を保守・改良する。ひずみゲージ式センサーは主に放電加工により作成するが、破壊しやすいため、多く作成し交換できるようにする。また、スキー板を加工して、滑走面に小型圧力センサーを埋込む。これも破壊しやすいため予備品を用意する。それらを使って、テストスキーヤーによる滑走実験を行い、滑走中のスキー板のたわみやねじりと圧力について詳細にしらべる。また、滑走後の軌跡についても観察し、スキー板に押し込まれた雪面形状すなわちエッジング・プロファイル測定する。

スキー滑走実験結果と構築した雪面変形モデルを使い、エッジング・プロファイルの予測法について考案する。

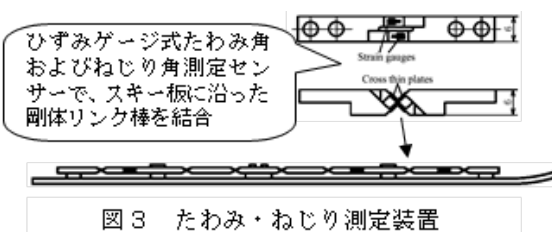


図3 たわみ・ねじり測定装置

## 4. 研究成果

### 4.1 摩擦係数の評価

低速領域については回転雪皿法(図4)で、高速領域については自然滑走法(図5)で動摩擦係数を測定した。

雪温-1、平均粒径0.08mmの雪面にポリエチレンを貼り付けた滑走体により測定した動摩擦係数 $\mu$ の例を図6に示す。滑走速度 $v$ が1m/s以上の高速領域では、低速領域ほど大きく変化しないことがわかった。

動摩擦係数に対する雪温と滑走速度の影響について把握するため、図7に示すコンター図を作成した。分布の様相は他のポリエチレン滑走体でもほぼ同様になり、全体的に動摩擦係数は小さいが、高温低速領域および低温高速領域が大きくなることがわかった。



図4 回転雪皿法(回転円盤)



図5 自然滑走法(傾斜台)

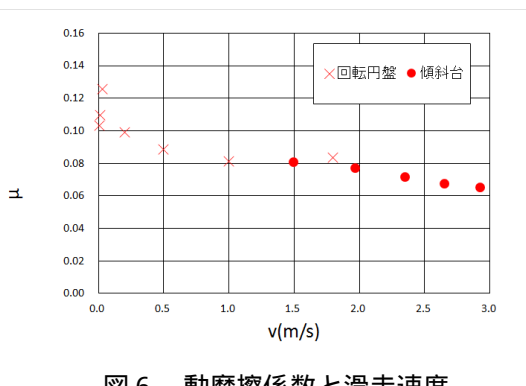


図6 動摩擦係数と滑走速度

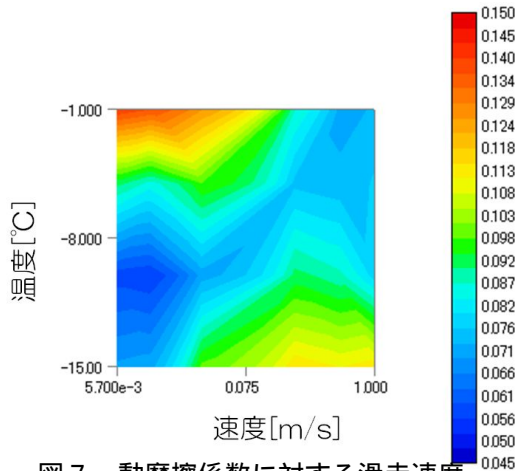


図7 動摩擦係数に対する滑走速度と雪温の影響

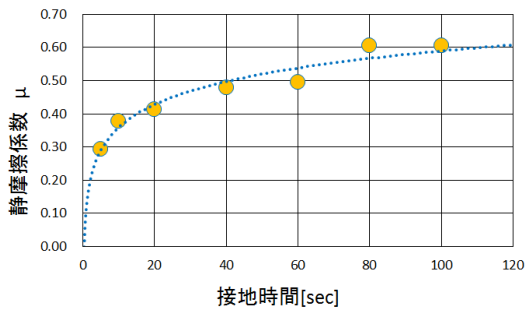


図8 静摩擦係数と接地時間

雪温-1、平均粒径 0.08mm の雪面にポリエチレン滑走体を静かに接地し、予め決められた経過時間後に測定した静摩擦係数の例を図8に示す。他の滑走体についてもほぼ同様の様相を示し、時間に対して対数的に増加することがわかる。これは、雪面ではない一般的な物体同士の凝着摩擦と同様の傾向を示している。

#### 4.2 雪面硬度の評価

本研究で使用した硬度計は、木下式硬度計を改良したものであり、錘の繰返し落下により測定を行う。雪面硬度は、変形に使われたエネルギー（錘や圧子の位置エネルギーの減少量）を圧痕の体積で除して求めた。図9のように模式化し、錘落下回数が  $n$  や  $k$  のときの各値であることを下付文字で表すと、雪面硬度  $H$  は式(1)で表されることになる。

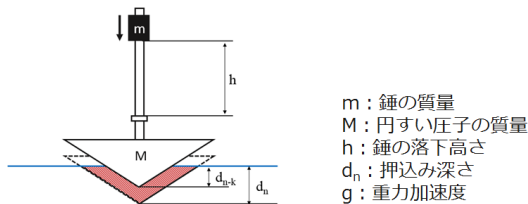


図9 雪面硬度評価の原理

$$H_{n,k} = \frac{g\{kmh + (m+M)(d_n - d_{n-k})\}}{\pi(d_n^3 - d_{n-k}^3)} \quad (1)$$

したがって、本研究の雪面硬度は Pa の次元になり、押し込み時の平均変形応力と考えることができる。また、その面圧まで雪面は物体を支えることができるものと考えられる。

円すい圧子を使った場合の雪面硬度  $H$  と密度  $\rho$  の関係は、図10に示すようになる。実線は式(2)の木下硬度と密度の関係を図示したものであり、粒径約 0.2mm 以上の雪面では本研究の雪面硬度は木下硬度とほぼ一致することがわかった。これらの関係は、平板圧子についてもほぼ同様であった。したがって、スキー板押し込みにもそのまま適用できることがわかった。

$$H = 10^{-8} \rho^4 \quad (2)$$

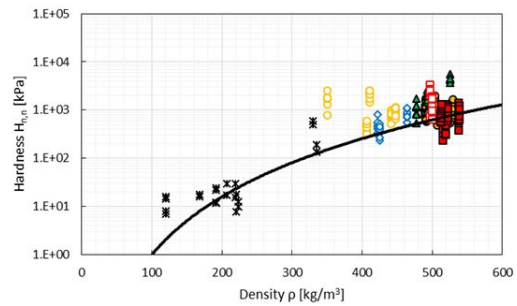


図10 雪面硬度と密度

圧痕の下に形成される圧密領域について調べたところ、その大きさは圧痕形状によりほぼ決まり、圧痕深さの3倍程度の深さの雪が圧縮され、初期密度の1.3倍程度に押し固められていることがわかった。また、圧密領域の外側はほとんど変形が生じないこともわかった。

以上の結果から、スキー板をはじめ様々な形状の物体を雪面に押し込む場合の圧痕深さやその下に形成される圧密領域について予測できるようになった。

#### 4.3 スキー板変形および作用力

スキー滑走中のスキー板の変形および雪面から作用する圧力分布について測定を行った。予測されるエッジング・プロファイルや作用圧力の関係などについては、まだ十分に整理できていないので、今後さらに解析を進めていく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

研究が終わったばかりでまだないが、まとまりを順次公表していく予定である。(現段階で、講演発表2件申込み済み)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

香川 博之 (KAGAWA, Hiroyuki)  
金沢大学理工研究域・講師  
研究者番号：40251938

##### (2) 研究分担者

米山 猛 (YONEYAMA, Takeshi)  
金沢大学理工研究域・教授  
研究者番号：30175020