

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19500528  
 研究課題名（和文） 雪とスキーの摩擦現象の研究  
 <摩擦の滑走速度依存性に着目したアプローチ>  
 研究課題名（英文） Study of Frictional Resistance Between Snow and Ski  
 <Dependence of Gliding Velocity>  
 研究代表者  
 仁木國雄 (NIKKI KUNIO)  
 電気通信大学・電気通信学部・教授  
 研究者番号：80208248

研究成果の概要（和文）：雪の融点近くで、短いモデル・スキー（長さ 20 cm）を用い、遅い滑走速度（0.001~1 m/s）における摩擦係数を斜面滑走法およびトライボメータ法を用いておこなった。その結果、摩擦係数( $\mu$ )が、滑走速度と雪の温度に依存することが解った。そして、 $-10$  °C程度の低温で、速度が極めて遅い場合に最も小さな  $\mu$  値を示す事を見出した。今回の実験結果で最も注目すべき点は、モデル・スキーの低速度における摩擦係数の温度依存性が、高速度で滑る実際のスキーの温度依存性と反対になった点である。また、モデル・スキーの摩擦係数に荷重依存性が測定されなかったことから、低温、低速度における小さな摩擦係数は摩擦融解による解け水の潤滑摩擦では無いと考えられる。すなわち、低温では凝着力が小さくなるために良く滑ると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Frictional resistance coefficients ( $\mu$ ) of a model ski (20 cm length) at low gliding velocity (0.001~1 m/s) were observed near the melting point of snow by means of the slope glides method and the tribometer method. The  $\mu$  values were depending upon the gliding velocity and the snow temperature. The smallest  $\mu$  was observed at around  $-10$  °C and slower than 0.01 m/s. A noteworthy result of the temperature dependency was the opposite effect with the actual skis. As an obvious load effect was not observed at low velocity with the model ski, it is suggested a possibility that the  $\mu$  of the model ski becomes small without generation of melt water-film by the frictional heating on snow, which suggests the main mechanism of frictional resistance is regarded as adhesion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：スポーツバイオメカニクス、トライボロジー

## 1. 研究開始当初の背景

スキーが良く滑る原理としては「**雪とスキーの間の摩擦熱により発生する水が潤滑剤の働きをする**」という Bowden らの摩擦融解説が広く普及している。これはスキーが高速度で滑走しているときの摩擦係数が 0.05 程度或いはそれ以下であることを説明できる唯一の説である。さらに、摩擦によりスキー滑走面の温度が上昇することは測定されている。しかし、滑走界面の水は実際には観測されておらず、真実接触面積や雪との接点に於ける圧力等も推測の域を出ていない。

ところで、スキーは気温、雪質や雪表面の状態、或いはスキー滑走面の状態やワックスなどにより滑走性が異なる。そして、それらの影響を反映する物理量で、「**唯一測定できるのは摩擦係数**」である。しかし、もともと小さな値である摩擦係数のしかもその僅かな変化を検出し原因解析することは不可能である。

しかし、多くのスキー関係者は高速度滑走という条件における支配的原理の候補と考えられる摩擦融解説を唯一の科学的根拠と信じ、用具の設計や材料の選択、スキー技術の研究に応用しようとしている。

## 2. 研究の目的

物性が自然条件により大きく変化する「**雪**」の摩擦現象については未知の部分が多い。そのため、競技に用いられるスノースポーツの道具やワックス、スタッ

ドレスタイヤの材質や形状などの設計に職人の経験や勘に頼る部分が多い。この研究はスキーの材料やワックスの使い方、スキー技術の理解に科学的裏付けを与える目的で、基礎科学的見地からスキー滑走原理を明らかにすることを旨とするものである。

## 3. 研究の方法

### (1) 摩擦係数の測定

スキーの滑走メカニズムを明らかにするために、**色々な条件の雪**について、**短い滑走体**を用い、**2種類**の測定法による摩擦係数を比較する方法を用いた。

<回転雪皿法>等速回転する雪皿に、ロードセルを介して固定したモデルスキーを載せ、雪皿の周速度やモデルスキーの重さ、滑走面の状況を変えてロードセルにより滑走抵抗を測定した。

<自然滑走法>雪を載せたパレットを固定して自由に角度を変えることのできる傾斜台を用い、滑走速度を測定し、それから加速度を計算することによって摩擦係数を導いた。

なお、**回転雪皿法**は動力を用いた強制滑走で、本来滑らない条件の摩擦係数を測定している可能性が大きい。従って摩擦熱が発生して水ができ易く、潤滑摩擦状態となることが考えられる。一方**自然滑走法**は自重による自然滑走における摩擦現象を検討するもので、荷重を十分小さくかつ、傾斜角を小さくすれば摩擦熱の発生を抑え、固体摩擦の状況が測定

できると考えられる。

## (2) データの蓄積と装置改良

静止摩擦から動摩擦に至る低速度領域における雪の条件と摩擦係数の関係が滑走速度を上げたときにどのように変化するか、色々な雪質や温度条件で調査検討した。

## (3) 摩擦現象の理解促進について

非常に低速度の摩擦係数の速度依存性と雪の条件依存性を詳しく解析し、雪とスキーマの摩擦現象そのものを比較した。ことに、荷重の変化は摩擦現象の本質を検討する上で重要なファクターと考えた。また、自然滑走法においては、傾斜台の角度も変数とした。

## (4) スキーへの荷重分布と滑走抵抗の関係を検討した。

モデルスキーの上で荷重位置を変え、摩擦係数の速度依存性を検討した。

## その他、測定精度を上げるための工夫

### (1) 安定した雪の滑走用トラックを作製した。

自然の降り積もった雪は柔らかすぎてスキーが潜り込んでしまう。新雪あるいは深雪はこのような雪であり、再現性のある測定はできない。ここではアルペン競技に使われる固められた雪を念頭に置き、指は刺さらないが鉛筆なら突っ込める程度の硬さの雪を対象とした。従って、自然に降り積もった雪を固めてできる限り再現性のある実験用雪のトラックを作った。

### (2) 雪温、雪質や雪表面の硬さを評価する。

雪質とは、雪の結晶のタイプや大きさ、結晶同士の結合力の強さを言う。ところで、降り積もった雪は層状に堆積し、大地に接する部分は0℃に近い高温で積雪表面は通常低温となる。つまり両

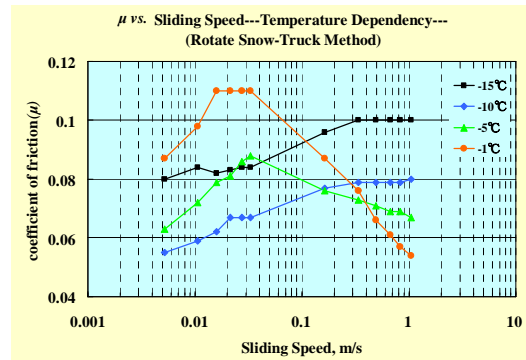
者の間には大きな温度勾配が生じ、層状をなす積雪の中で水蒸気の循環が起こり、雪は変質する。一般的には地面に近い部分は再結晶したサイズの大きな丸っこい氷状で、密度は大きい粒子同士の結合力の弱い雪（霜ざらめ雪）となる。比較的雪表面に近い部分はサイズが小さく粒子同士の結合力も強い。表面に近い雪は降ったときの結晶形が残り雪同士の結合力もさらに強い。もちろん、降ったときの結晶形や気象条件を反映してその後の変質や雪同士の結合の様子は大きく異なる場合もある。従って実験に先立ち積雪調査と実験に供する原料雪の選択も重要と考えた。

(3) 相互に影響を与え合う滑走抵抗要素（圧雪抵抗、除雪抵抗、摩擦抵抗）をできる限り分離して議論すること。そのために、異なる測定装置を用いて同時に測定してデータを比較検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 摩擦係数の速度・温度依存性

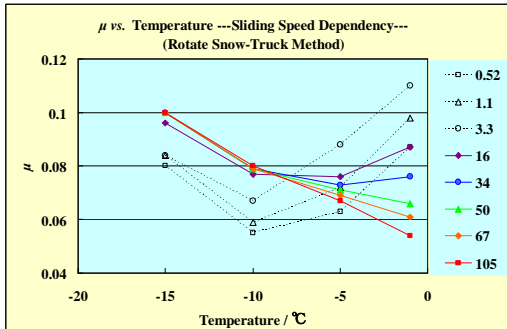
雪の融点近くで、短いモデル・スキー（長さ20 cm）を用い、遅い滑走速度（0.001~1 m/s）における摩擦係数を斜面滑走法およびトライボメータ法を用いておこなった。その結果、摩擦係数( $\mu$ )が、滑走速度と雪の温度に依存することが解った。



そして、摩擦係数の速度依存性が温度により異なることから、複数の摩擦力のメカニズム

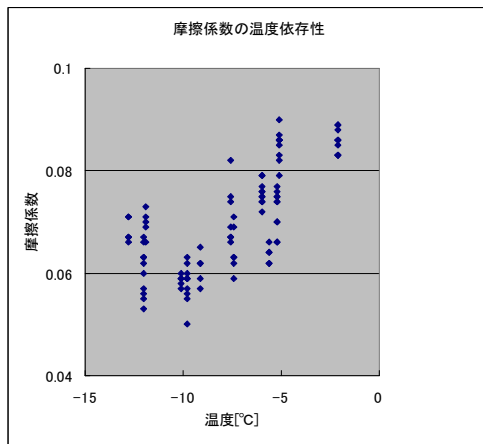
が共存していることが解った。

各滑走速度における摩擦係数の温度依存性

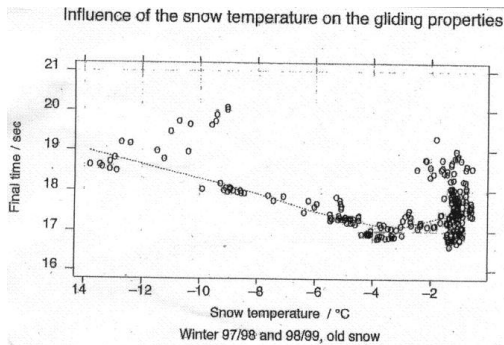


低速度滑走の場合、融点に近い温度で摩擦力が大きくなった。

### (2) 低速度における摩擦係数



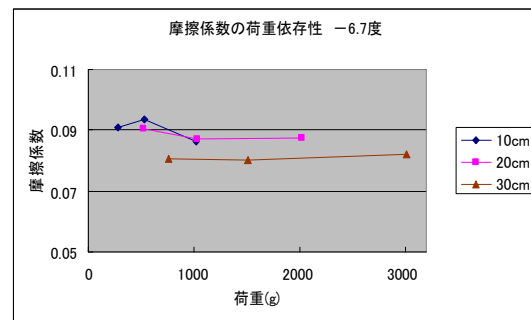
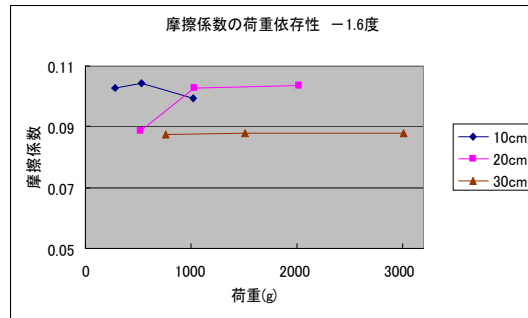
今回の実験結果で最も注目すべき点は、モデル・スキーの低速度における摩擦係数の温度依存性が、高速度で滑る実際のスキーの温度依存性（下図）と反対になった点である。



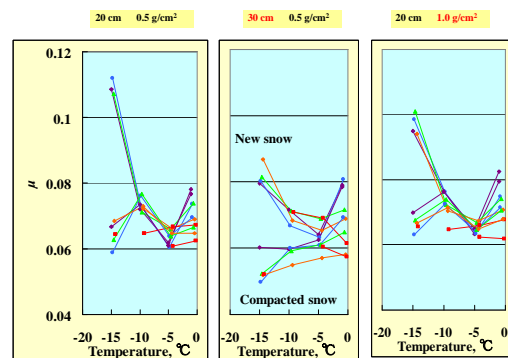
After; (Buhl. D, Fauve. M and Rhyner. H(2001)  
Cold Region Science and technology)

### (3) 摩擦係数の荷重依存性

モデル・スキーの摩擦係数に荷重依存性が測定されなかったことから、今回の実験条件下すなわち、低温、低速度における小さな摩擦係数は摩擦融解による解け水の潤滑摩擦では無いと結論される。よって、低温で摩擦係数が小さくなる現象は、低温では凝着力が小さくなるためであると考えられる。



### (4) 雪質による影響



-10 °C以下の低温では、雪質により摩擦係数が大きく異なる事が解った。

#### (5) スキー滑走原理の検討

−10℃程度の低温で、速度が極めて遅い場合に最も小さな  $\mu$  値を示す事を見出した(2)。そして、その摩擦係数の値が、高速度で滑る実際のスキーの摩擦係数と同程度の大きさとなった。この事実は、実際のスキーにおいても、広く引用されている、摩擦融解説を考えなくても、スキーが特別に良く滑ることを説明出来る可能性が有ることを示唆している、とも言える。

摩擦現象のメカニズムが少しずつ理解されることにより、スノー・スポーツのみならず雪崩、屋根雪の落下や歩行者、自動車のスリップなどの安全対策に応用できるものと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2件)

- ①中里光、笠原英明、武田麻衣子、西塚貴宏、仁木國雄、「低速度におけるポリエチレンモデルスキーの摩擦抵抗～温度・速度・荷重依存性について～」、摩擦の科学2009、9、(名古屋国際会議場) 2009.12.3～5.
- ② Kunio Nikki, Shoji Haizuka, Ichiro Tomisawa, Hideaki Kasahara, Hikaru Nakazato, Satoru Saito, Katsumi Kaneko, Akira Ishii, Osamu Abe, 「Discussion of the Friction of Snow Skis」, 4<sup>th</sup> international Congress on Science and Skiing, St. Christoph, Austria, 2007.12.14～20

[その他]

ホームページ等

<http://nikki.pc.uec.ac.jp/project-s/>  
<http://ssro.ee.uec.ac.jp/ssro/Ski-science/ski-science.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

仁木 國雄 (Nikki Kunio)  
電気通信大学・電気通信学部・教授  
研究者番号：80208248

##### (2) 研究分担者

富澤 一郎 (Tomisawa Ichiro)  
電気通信大学・電気通信学部・准教授  
研究者番号：50111696

金子 克己 (Kaneko Katsumi)  
電気通信大学・技術部・技術専門職員  
研究者番号：90377036

石井 明 (Ishii Akira)  
香川大学・工学部・教授  
研究者番号：90134866

##### (3) 連携研究者 なし