

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（c）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500570

研究課題名（和文）

雪温と滑走速度に依存するスキー滑走抵抗の研究

研究課題名（英文）

Study of Ski Sliding Resistance Depending upon Snow Temperature and Sliding Velocity

研究代表者

仁木 國雄 (NIKKI KUNIO)

電気通信大学・宇宙・電磁環境研究センター・客員研究員

研究者番号：80208248

研究成果の概要（和文）：スキーの材料開発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研究した。そのために、短いモデルスキーを用いて、静摩擦係数、低速度の動摩擦係数について、雪粒子の大きさ、雪表面の硬さなどの雪の条件をコントロールして温度依存性、速度依存性を厳密に測定した。その結果、実際のアルペンスキーよりは遅い滑走速度に関してではあるが、摩擦現象が、雪表面の擬似液体層を考慮した凝着力の温度依存性およびそれとは逆の温度依存性を示す雪のせん断応力により矛盾無く説明できる事が分かった。また、低速度でも実際のスキーやスケートで測定されている様な低い摩擦係数が実現するので、摩擦熱による融け水の生成などのような、良く滑るメカニズムを考える必要は無いことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：The ski sliding mechanism was studied to give the scientific base for the ski technology. Temperature and velocity dependence of static and kinetic frictional coefficients of a short model ski (20 cm length) were observed with well prepared snows which particle sizes and surface hardness were controlled. As the result, the observation were done for the low sliding velocity than real ski, the mechanism of ski sliding friction is explained by means of the temperature dependence of the adhesion force which contains the effect of the liquid-like layer of ice and the opposite temperature dependence of the shear force of ice. It is clear that there is no necessary to think about the melt-water lubrication theory for ski sliding because the low frictional resistance like real skis was taken place at low temperature and low velocity for the short model ski.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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
スケートやスキーの摩擦係数が 0.05 或いはそれ以下であることは良く知られているが、

その値が通常の固体の値の 1/10～1/100 であることは氷の結晶構造や物性と関連して興味深い。また、雪崩や屋根雪の落下などの災

害やスタットレスタイヤや靴底の開発などと直接関連して工学的にも重要なテーマである。

スキーやスケートの摩擦に関するだけでもこれまでに多くの研究が行われて来たが、この特別に小さい値を説明するものとして、Bowdenらの摩擦融解説〔雪とスキーの間に発生する摩擦熱により水が発生し、その融け水が潤滑剤の働きをする〕が、欧米を中心に広く支持されている。しかし、滑走による滑走面温度の上昇は観測されているものの、滑走界面の水は実際には観測されていない。さらに、真実接触面積や雪との接点に於ける圧力等が測定できておらず、摩擦熱により水ができるというの推測の域を出ていない。

ところで、小さな雪の結晶の集合体である積雪は氷と比べても、その表面の物性はばらつきが大きく、自然条件による変化も速いので定量的評価が困難である。そのため、スノースポーツの道具の形状や材質の設計等には、摩擦原理は摩擦融解説を基礎としながら現在でも職人の経験や勘に頼る部分が多い。

平成 16, 17 年度の科研費による我々の研究は、摩擦現象の精密な測定可能な低速度の滑走にターゲットを絞り、「低速度（1 m/s 以下）における滑走抵抗は雪の性質や条件に大きく依存している」事を見いだした。すなわち低速度においては、摩擦の原理が速度や温度により異なる可能性があることがわかった。

平成 19, 20, 21 年度の科研費による研究からは、低速度の滑走において、温度、速度により異なる抵抗要素が存在することが明らかとなった。また、低温で低速度という、摩擦熱による水の発生は起こりにくい条件でも摩擦係数が高速度のアルペンスキーと同程度となることを見出した。

現在この研究に必要なことは、これまでのほとんどの研究者が行った様に雪や氷の摩擦係数が小さい原因を探求するのではなく、測定結果を基に、色々な条件における摩擦の原理を明らかにすることである。

2. 研究の目的

この研究はスキーの材料開発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の摩擦原理を解明することを目指している。今回は「雪面評価法の確立」と複数考えられる「各滑走抵抗要素と滑走速度、雪温の関係」を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 雪の特殊性に関して

摩擦係数以外の雪表面の物性を測定し摩擦係数との相関関係を調べることにより、滑走抵抗のメカニズムの理解を深める。また、自

然に圧密・焼結された雪やスキー場のしまり雪の評価と摩擦係数の関係も検討し、抵抗要素の普遍性を確かめる。そのため、種々の雪についての摩擦現象を研究している防災科学研究所と共同実験を企画する。

(2) スキーの特殊性に関して

スキーと雪の摩擦現象は大変複雑で、しかも測定条件により異なる場合もある。複雑に見える原因の1つとして、スキーのトップとテール部分では摩擦現象の異なることが予想される。実際のスキーに比べ十分短いモデルスキーを用いれば、たとえ摩擦融解説が正しいとしても、融け水による潤滑摩擦領域は少なくなり、固体摩擦の効果を強調して測定できると考えられる。実際に今までの我々の実験結果でも、低速度における滑走抵抗はその値自体が大きい場合が観測され、さらに雪の性質や条件（雪粒子径や雪温）に依存している。これは固体摩擦の効果が現れている証拠であると考えられる。

(3) 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。〔装置に関しては前回の科研費の研究で用いたものを一部改良して用いた。〕

<回転雪皿法>

一定速度で回転する雪皿に、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、滑走距離と時間を測定し、それらから速度、加速度を計算することによって摩擦係数を導く。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もある。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。

さらに、今回は摩擦のメカニズムを探るために静摩擦の測定を行い、動摩擦との関係を検討した。

(4) 自然滑走法の高速化

今までの自然滑走法は1 m/s の速度までの超低速度を想定した固体摩擦の現象を研究することを目的としたものであった。今後は実際のスキー滑走の速度を研究の視野に入れ、できる限り高速度の摩擦係数測定に挑戦す

る。そのために、本予算で購入したレーザ通過センサを用いて傾斜台の角度を急にする
ことにより、今までよりも高速度の実験にお
いても測定精度の高い滑走速度の測定が可
能となった。

(5) 圧雪の表面物性の測定

この研究では、摩擦係数を測定するために、
安定した雪試料の作成と評価が必要である。
また、除雪抵抗や圧雪抵抗が無視できるよ
うに滑走体を滑らせても変形したり、傷が付
かない程度に硬い雪が好ましい。今回の実験
では、雪の密度を目安に新雪やしまり雪など
を原料雪として人工的に圧密し、さらに一定
時間測定する温度に近い状態で焼結させ摩
擦実験に用いた。

また、その表面の温度、密度、硬さ、粒径等
の計測をおこない、最終的には押し込み硬
さのデータから十分に硬い雪面であり、滑
走抵抗として得られる内容の大部分が圧雪
抵抗や除雪抵抗では無いことを確認してき
た。

4. 研究成果

(1) 静摩擦の測定

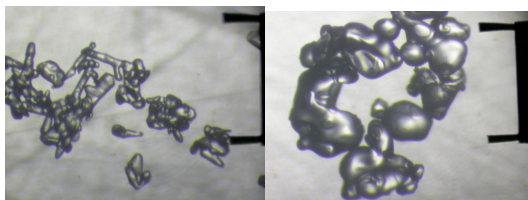
従来より動摩擦の測定に用いてきたモデル
スキー（実際のスキーを長さ 10 cm に切り滑
走面を平滑に整形した）を用い、一定の時
間雪面に静置〔接触時間〕後ロードセルを介
して牽引し、そのときの最大値を静摩擦力と
した。

静摩擦係数は接触時間の対数に比例した。こ
の現象は、摩擦係数の値は桁違いに大きい
が、厚紙やプラスチックなど通常の固体摩
擦に共通する。これは接触時間に依存して
真実接触面積が増加すると言う、凝着現象
の特徴と一致する。

さらに、雪の粒子が小さい場合に比例定数
〔グラフの傾き〕が大きくなった。この現象
は、小さい粒子の方が単位面積当りの接
触点数が多く、従って真実接触面積が大き
くなることと対応する。

また、小さな粒子 (0.2 mmφ) の場合に、
温度が高いほど静摩擦係数が大きくなった。

〔図 2〕 顕著な温度依存性が見られたの
は雪に特徴的で、この現象は、融点近く
の水や雪の表面に存在する擬似液体層の
厚さが温度と共に増すことと対応する。



(a) 粒径 0.2 mm

(b) 粒径 0.5 mm

図 1、実験に用いた雪の顕微鏡写真の例

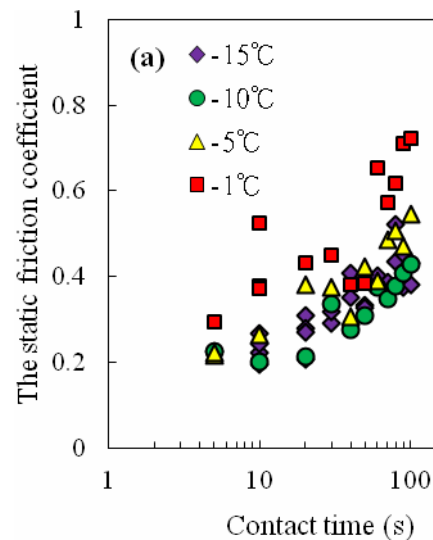
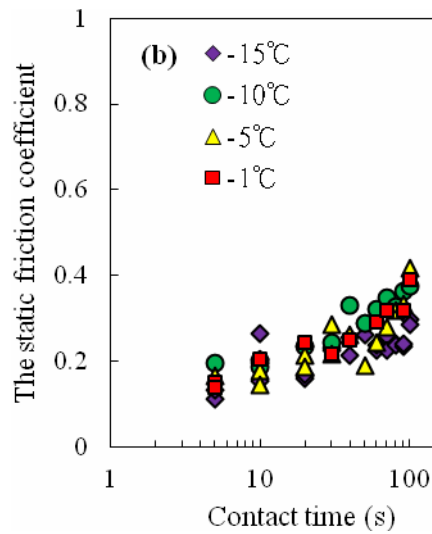


図 2、静摩擦係数と接触時間の温度依存性

小さい粒子 (0.2 mm) の場合 (a) にのみ温度
依存性が顕著に現れるのは、雪が理想的な球
だとして、大きな粒子 (0.5 mm) に比べ接
触点数が約 5 倍となる。従って、温度上昇に
伴う真実接触面積の増加も 5 倍となり、小
さい粒子の場合に顕著にその増加の影響が
現れると考えられる。

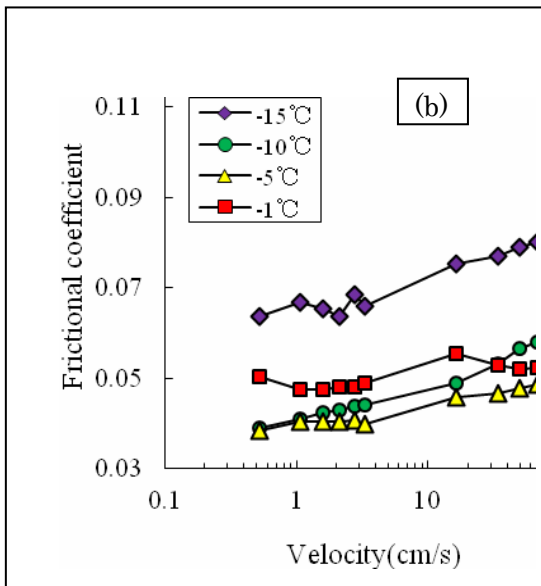
(2) 動摩擦について

図 3 は前回の科研費を用いた、異なる粒
径の雪に関する動摩擦の速度依存性の実
験結果である。一般に静摩擦力の接触時
間依存性の様子から、接触時間を十分に
短くしたものが動摩擦力であると考えら
れる。従って、速度が速くなれば凝着力
は小さくなり摩擦係数

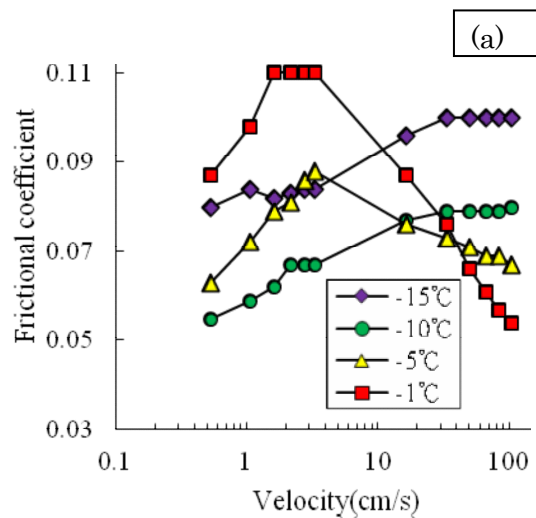
も小さくなる事が予想される。しかしながら、 -10°C 以下の低温では動摩擦係数は温度が低い方が大きく、しかも、速度上昇と共に僅かでは有るが増加している。この温度では擬似液体層もほとんど存在しない。

ところで、摩擦力は摩擦界面におけるせん断応力であるから、凝着の強さが直ちに摩擦力の強さに現れるとは限らない。ことに水(氷)の場合は、そのブリネル硬さに比べてせん断応力が特別に小さい事が報告されている。しかも融点近くで温度依存性が顕著である。従って、この低温で増加する摩擦力の原因は凝着力によるものではなく、雪が硬くなったためにそれまで小さかった雪表面の僅かな凹凸に起因する掘り起こし抵抗が増加したためと考えられる。

一方、小さな粒子に関しては、摩擦係数は -5°C 以上で複雑な速度依存性を示した。



(a)



(a)

図 3, 色々な温度における摩擦係数の速度依存性 (a)粒径 0.2 mm (b)粒径 0.5 mm

また、今まで示した雪の摩擦現象の実験結果には荷重依存性が見られなかった。ちなみに、荷重は人間が実際のスキーに乗った場合の荷重[およそ 4 g/cm]の前後で数倍変化させている。従って、摩擦力の源は接触面における分子間相互作用(いわゆる凝着力)のせん断応力と考えるのが妥当と思われる。また、摩擦熱により水が発生するならば、融け水の量に大きな変化が予想されるが、摩擦力には変動がみられなかった。

図4は、小さな雪粒子の場合の雪温と滑走速度に関する摩擦係数の等値マップである。摩擦係数の大きくなる極地が2箇所あることがわかる。すなわち、異なる摩擦の原因があることが明らかである。低速で雪の融点に近い辺りに出現する摩擦係数の大きな領域は、擬似液体層の存在を考慮した凝着現象で説明できる。ただし、同じ温度領域で滑走速度が上がると摩擦係数が低くなる現象は、融点近くでは、凝着力は大きいとその一方で雪粒子自身のせん断応力が小さくなるためであろう。

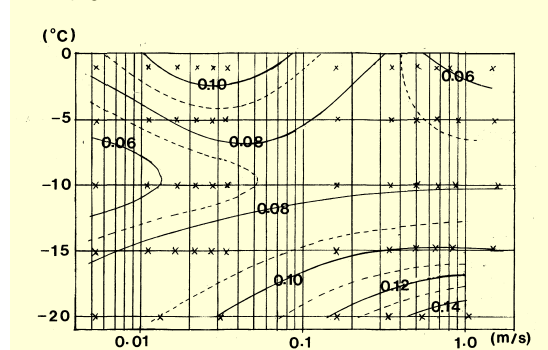


図 4, 動摩擦係数の温度と滑走速度に対する等値マップ

図5は滑走後の雪面の偏光顕微鏡による観察結果である。融点に近い場合にのみ平らな面や滑走方向への摩擦痕が観測された。これは、滑走面に水の発生は無く、むしろ温度上昇によりせん断応力が減少して、雪の粒子が壊れると考えられる。すなわち、低温では滑走体と雪の凝着力が小さいので、滑り面は雪との界面である。一方、温度が上昇して擬似液体層が厚くなり凝着力が増すと摩擦力が増加するがその一方で雪のせん断応力が減少する。従ってある時点で滑り面が雪との界面から雪粒子の破壊面に移動すると考えられる。

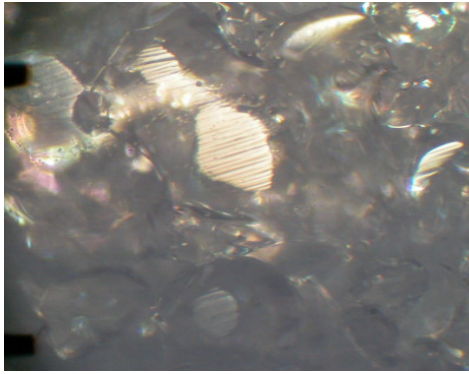


図 5, 雪面の偏光顕微鏡写真

一方低温領域で摩擦係数が徐々に大きくなるのは、低温で結晶が硬くなり氷のせん断応力が増加することが原因と考えている。すなわち、動摩擦力には上述した凝着力のせん断応力の他に雪表面の凸凹を削る抵抗〔雪粒子のせん断〕も加わっていると考えられる。

結論

実際のアルペンスキーよりは遅い滑走速度における実験の考察結果であるが、摩擦現象が、雪表面の擬似液体層を考慮した凝着力の温度依存性およびそれとは逆の温度依存性を示す雪のせん断応力により矛盾無く説明できる事が分かった。

また、低速度でも実際のスキーやスケートで測定されている様な低い摩擦係数が実現するので、新たに良く滑る原理を考える必要は無いことが明らかとなった。つまり、今までの定説である摩擦面に水が発生すると言うメカニズムは考えなく良い。

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)

[雑誌論文] (計 1 件)

1, Maiko Takeda, Kunio Nikki, Takaaki Nishizuka and Osamu Abe, Friction of the short model ski at low velocity, Journal of Physics, Conference Series, Vol. 258, No. 1, (2010) doi:10.1088/1742-6596/258/1/012007

[学会発表] (計 4 件)

1. 仁木國雄, 武田麻衣子, 西塚貴章, 香川博之, 伊東智季, 山田秀人, 阿部修, 雪とポリエチレンの凝着と摩擦, 日本雪氷学会・雪氷研究大会, 2012 年 09 月 (福山)

2. 伊藤智季, 山田秀人, 香川博之, 仁木國雄, 阿部修, 雪表面に対するスキー滑走面の摩擦の振る舞い, 日本機械学会 2012 年度年次大会 [2012. 9. 9-12] (金沢)

3. 仁木國雄, 武田麻衣子, 西塚貴章, 笠原英明, 中里光, 金子克己, 斎藤悟, 阿部修, 香川博之, スキーと雪の摩擦メカニズム, 日本スキー学会第 21 回大会, 2011 年 2 月, (新潟県高田)

4. Kunio Nikki, Katsumi Kaneko, Satoru Saito, Hideaki Kasahara, Hikaru Nakazato, Ichiro Tomisawa, Shoji Haizuka, Osamu Abe, Akira Ishii, Frictional Resistance of a Polyethylene-Base Model Ski at Low Velocity, International Symposium on Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate 2010. 6, (札幌).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仁木國雄 (NIKKI KUNIO)

電気通信大学・宇宙・電磁環境研究センター・客員研究員

研究者番号: 80208248

(2) 研究分担者

富澤一郎 (TOMISAWA ICHIRO)

電気通信大学・宇宙・電磁環境研究センター・准教授

研究者番号: 50111696

金子克己 (KANEKO KATSUMI)

電気通信大学・教育研究技師部・統括学術技師

研究者番号: 90377036

斎藤悟 (SAITO SATORU)

電気通信大学・教育研究技師部・学術技師

研究者番号: 50573151

阿部修 (ABE OSAMU)

独立行政法人防災科学研究所・雪氷防災センター新庄支所・研究員

研究者番号: 70414406

香川博之 (KAGAWA HIROYUKI)

金沢大学・機械工学系・講師

研究者番号: 40251938

石井明 (ISHII AKIRA)

香川大学・工学部・教授

研究者番号: 90134866