

低速度におけるスキー滑走抵抗の理解

仁木國雄, 金子克己, 齋藤悟, 荒川欣吾, 青木猛, 白畑一貴, 小川徹, 浅野樹, 小本創, 泉谷旬人,
北村考志, 山本拓史, 富澤一郎, 灰塚正次 (電通大), 阿部修 (防災研), 石井明 (香川大)

Understanding of the Sliding Resistance for Ski at Low Speed

Kunio NIKKI, Katsumi KANEKO, Satoru SAITO, Kingo ARAKAWA, Takeshi AOKI, Toru OGAWA,
Kazuki SHIRAHATA, Tatsuki ASANO, Hajime OMOTO, Masato IZUMIYA, Takayuki KITAMURA,
Takuji YAMAMOTO, Ichiro TOMIZAWA, Shoji HAIZUKA (University of Electro-Communications),
Osamu ABE (Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies) and Akira ISHII (Kagawa University)

Abstract: Speed dependent sliding resistance of ski was studied in detail. When sliding speed of a ski is appreciable, the coefficient of frictional resistance converges to the value (ca 0.05). This is explained by the melt-water lubrication theory. At a low sliding speed, less than 1 m/s, the value was still high and the obvious influence of the ski and the snow parameters in the frictional resistance coefficient were observed by using the rotate truck method (a rotating snow track with a static model ski) and the natural sliding method (an angle changeable snow slope with a sliding model ski). The behavior of the frictional resistance under several running conditions was obtained. These included several types of snow, different densities and temperatures of snow, different length of the model ski. Preparation and evaluation methods for test snow conditions were discussed.

Keywords: Sliding resistance measurement, Frictional resistance coefficient, Snow type, Snow density, Snow temperature

1. はじめに

スキーが良く滑るのは、雪との摩擦熱により僅かな水ができ、それが水の膜を形成してスキーと雪の結晶の間で潤滑剤の働きをするためであると言われている。すなわち、スキーは、滑り始めてからその速度が上がるに伴い動摩擦係数が減少し、1 m/s 程度の速度で普通の固体間の摩擦係数に比べ十分の一程度の小さな値となる^{1, 2)}。この摩擦係数の速度依存の様子は、スキーとは速度も荷重も違う機械における潤滑摩擦（滑り軸受けや歯車に油をさして運転した場合）とよく似た現象と言える^{3, 4)}。そして、両者の動摩擦係数の値

(ca 0.05) がほぼ同じであることは興味深い。

上述の摩擦融解説は Bowden により、氷の上を滑る小さな滑走体の摩擦係数の検討から導かれたもので、柔らかい雪の場合も同じ様に成り立つかどうかは証明された訳では無い。Colbeck らは実際のスキーに熱電対を埋め込み、雪の上の滑走によりスキー板の温度が上昇することを確認、熱伝導度の悪い材質ほど良く滑ることや、滑走した雪の表面からスキーとの摩擦によりできたと思われる氷を見つけ出しているなど、摩擦融解説の状況証拠を沢山集めている^{5, 6)}。

ところで、スキー板の先端部分は常に新しい雪

と接するわけで、その部分にも水膜ができることは考えにくい。従って、実際のスキー滑走では、固体摩擦と潤滑摩擦の割合を見積もる必要がある⁶⁾。さらに、Buhl らの最近の報告によれば、100 km/h 程度の滑走では、 -3°C 辺りが最も良く滑り、雪温が -2°C よりあがると滑走速度は急激に落ちる。一方、雪温が下がるに伴い滑走性は徐々に悪くなる傾向にあるが、温度以外の条件の変動によるばらつきも大きい。ただし、 -10°C 以下の場合、体重の重い選手の方が速く滑る⁷⁾。この現象は、低い温度の下では固体摩擦を考慮する必要がある、と解釈すべきであろう。

ここで、測定可能な物理量は速度、或いはそれから導出される摩擦係数で、その情報だけから雪の表面がどの位、どの様に融けるのか、或いはどんな水の層が出来るかなど定量的な議論は無理である。まして、雪の条件の違いが、初めから小さな値の摩擦係数の、そのまた僅かな変化として測定できたとしても、その解析は不可能である。一方、予想される摩擦熱から、発生する水の量を計算することは可能であるが、界面における真実接触面積に関するデータは得られていないので、水膜の厚さは推測の域を出ない。従って、現時点では摩擦融解説についても、肝心の水の働きについては推測でしかないと言っても過言ではない。

とは言え、滑走界面における現象を正確に捉え、膜の厚さや働きを明らかにしなければ、科学に基づいたスキーの設計や、滑走面の仕上げ、ワックスの開発やその根拠のある使用方法を提案することができない。

この研究は、摩擦現象を直接示す摩擦係数の測定と、摩擦界面に起こった現象の状況証拠を同時に測定あるいは観察し、摩擦現象のより確かな理解を求めることを目的としている。そのために、ここでは摩擦係数の値が大きく、測定精度も高い、「低速度滑走における摩擦係数と状況証拠の関連」を求めることにターゲットを絞っている。研究の次の段階としては、それらの現象の速度依存性を検討し、実際のアルペンスキーの滑走速度における摩擦面の現象を推測することを目指す。

2. 方法

スキーの滑走抵抗には、硬い氷の上を滑る「いわゆる摩擦抵抗」の他に、スキーとスキーヤーの重みで柔らかい雪を押し固める「圧雪抵抗」およびその結果としてスキーの先端部分に働く「除雪抵抗」がある。我々は、スキー滑走時のスキー板と雪の摩擦界面に起こる諸現象を理解する目的で、3種類の滑走抵抗測定装置を作成し、上述した3種類の抵抗要素を分離して考察する試みを行ってきた^{8, 9)}。

ここでは、雪面の状態を注意深く調整し、いわゆる除雪抵抗、圧雪抵抗などはほとんど考慮しないで良い状況を作って実験を行った。今回の測定には回転雪皿法⁹⁾ および自然滑走法(後述)の2種類の滑走抵抗測定装置を用いた。

2.1 滑走抵抗および滑走に関連する雪のパラメータの測定装置

2.1.1 自然滑走法

雪を詰めたパレット上に、モデルスキーを静止させておき、ゆっくりとパレットを傾けていくことにより、モデルスキーが滑り出す角度を求める。さらに、滑り出した角度でパレットを固定し、モデルスキーの位置と時間の関係を測定する。

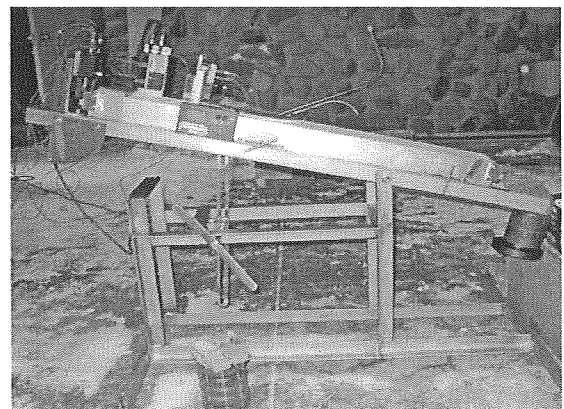
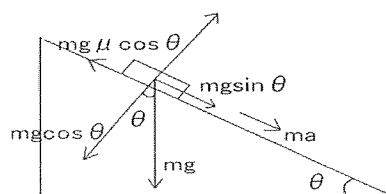


図1 自然滑走法実験機(傾斜台)

今回は赤外線距離センサ(Sharp 製 GP2D12, 距離 100 ~ 400 mm 程度が測定可能)および超音波変位センサ(キーエンス製 UD-500, 距離 300 mm ~ 1300 mm が測定可能)を用いて、モデルスキーの滑った距離とそれに要した時間を測定して滑走

速度および加速度を計算した。従って、モデルスキーが滑り落ちる角度と加速度を求めることにより、静止摩擦係数と動摩擦係数が算出できる。



静止摩擦係数： $\mu_s = \tan \theta$

最大摩擦力： $F_s = \mu_s \times mg \cos \theta$

動摩擦係数： $\mu_k = \tan \theta - a/g \cos \theta$

動摩擦力： $F_k = \mu_k \times mg \cos \theta$

ここで、 m ：物体の重量， a ：物体の加速度

g ：重力加速度

図2 斜面を滑る物体の模式図

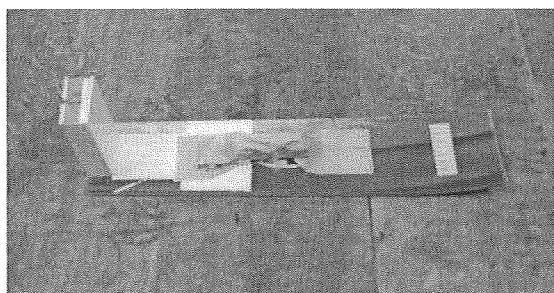


図3 赤外線および超音波の反射板を取り付けたモデルスキー

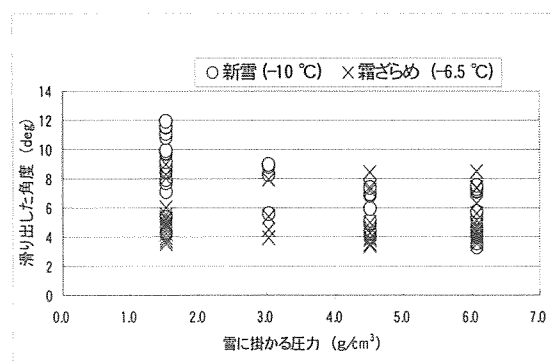


図4 モデルスキーの滑り出した角度

図4から、新雪では雪にかかる圧力により滑る出す角度が違うが、霜ざらめでは荷重によらず低い角度で滑る。この測定では温度が違うので討論

しにくい、静止摩擦係数が雪の条件により異なる事はわかる。

モデルスキーには、市販のスキーの先端部分を使用した。雪との接触面における圧力は錘を載せることにより調節した。図5は2種類の雪質について、傾斜台の角度による滑走の様子を比較したもので、非常に遅い速度の測定には安価な赤外線センサーでも実用になることがわかる。一方、図6は荷重の違いによる効果を求める実験であるが、ある程度長い距離の滑走が必要のため、超音波変位センサーでなければ測定が困難である。

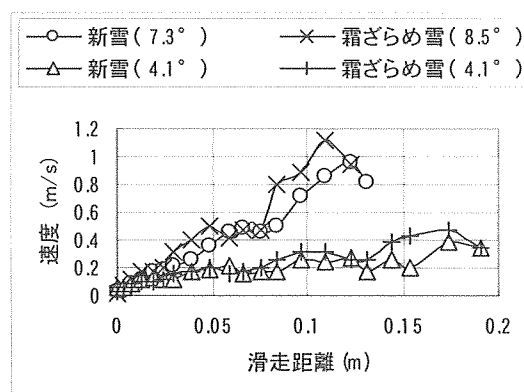


図5 赤外線距離センサ (SHARP 製 GP2D12) による速度と滑走距離の関係 (雪質と温度の影響)

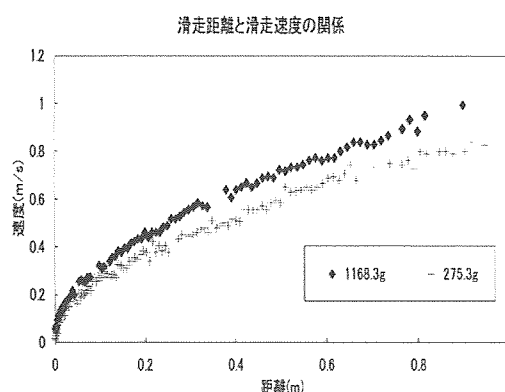


図6 超音波変位センサ (UD-500) による速度と滑走距離の関係 (荷重が異なる場合の測定例)

2.1.2 回転雪皿法

モータにより回転速度を自由に制御できる円盤を回すことにより水平に作った雪面を回転させる。回転する雪面上に自然滑走法と同じモデルスキー

を乗せ、そのスキーを支柱にロードセルを介して固定する。ロードセルにかかる負荷が滑走抵抗となる。従って雪皿上の滑走した場所の周速度を求めれば滑走速度と摩擦係数の関係がわかる⁸⁾。



図7 回転雪皿法実験装置

この装置の回転雪皿の直径は 1,800 mm と大きく、モデルスキーは短いので、得られた滑走抵抗は直線滑走による値であるとみなした。実際は、滑走速度が 1 m/s を超えると、遠心力の効果は無視できないほど大きくなり、モデルスキーに横揺れが観測された。

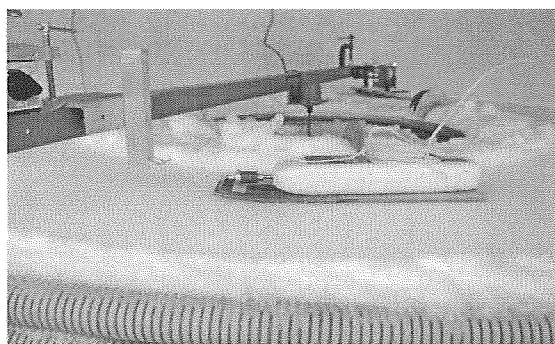


図8 回転雪皿法でモデルスキー牽引中

2.2 実験に供した雪の調整と雪のパラメータ計測方法

2.2.1 原料雪（自然雪および人工雪）

実験用の雪は、長野県菅平スキー場近くの電気通信大学菅平宇宙電波観測所近辺に降り積もった自然雪、スキー場の人工雪（雪粒子は球状の氷）および防災科学研究所低温設備で作った人工雪（ -15°C で発達成長させた霜をこそぎ落とした物、樹枝状新雪に類似）を採取した。以下に述べるデ

ータは1月上旬および3月上旬の菅平の自然雪について、積雪の断面を観察し¹⁰⁾、複数の雪質、時期による比較が可能であること、安定した雪が実験に必要な量採取できることなどを考慮し、新雪、しまり雪、霜ざらめ雪を用いた。防災科学研究所の人工雪は温度を制御して、保存、シンタリング、測定を行い、実験の再現性や精度を決める基準の雪とした。

2.2.2 採取した雪の加工

採取した雪を均質に、そしてより高い密度にするために、小型シャベル等で良くかき混ぜる攪拌や篩掛けなどの加工を施し、その後雪ヘラで圧縮し成型した。（表1）

新雪、しまり雪ともに、小型シャベル等で攪拌した後へらで押したり叩いたりして圧縮し成型した場合に、雪の密度が非常に高くなっている。へらで圧縮しただけの雪に対し、しまり雪では篩掛けの効果が現れているが、新雪ではその効果が現れていない。ただし、この結果はシンタリング（放置し焼結させる）が5～10時間の例で、雰囲気や温度やシンタリング時間による影響は明らかではない。これらの結果は、新雪としまり雪で、加工法による圧密¹¹⁾の効果が異なっていることを示唆している。

表1 加工方法と密度

雪質	原料密度	加工方法	密度
新雪	0.10~0.07	雪ヘラのみ	0.32
新雪	0.10~0.07	攪拌+雪ヘラ	0.43
新雪	0.10~0.07	篩	0.30
しまり雪	0.27~0.36	雪ヘラのみ	0.40
しまり雪	0.27~0.36	攪拌+雪ヘラ	0.41
しまり雪	0.27~0.36	篩+雪ヘラ	0.44

2.2.3 雪面の成型

図9は、自然滑走実験に用いる雪パレットに雪を敷き詰め、表面を成形しているところである。表面全長に 2mm 厚程度のアクリル板を置き、その上でローラーを転がし、フラットな雪面を作成

している。

ここでローラーの役割は、アクリル板を介して雪面に分布荷重を掛けることにある。アクリル板を用いているのは、雪が付着しにくく透明で雪面を観察しながら作業を行えるという理由からである。



図9 ローラーによる雪面成形

錘をぶら下げて固定したローラーの下を、2mm厚のアクリル板を被せた雪パレットを通過させた。そのとき表面の雪が動かない程度の重さの錘を用いると均一な雪面ができる（重すぎると雪がずれる）。なお、雪の粒子間の結合を促進させ雪表面を硬くするために、成型後一定時間のシンタリングを行なった。

2.3 雪面の観察（粒径、粒子の形、粒子の繋がり）

2.3.1 顕微鏡観察

雪は、その地方特有の性質を持っていると言われている。気温が低く乾いた所に降る雪は、降雪したままの状態が長く保たれ、気温が高く湿った所に降る雪は、降雪後に焼結や融解が進みやすく、新雪からしまり雪を経てざらめ雪となっていく過程も異なる¹¹⁾。雪質と動摩擦係数を比較するにあたって、雪の素性をできる限り明らかにしておくことは重要である。そのため、採取した原料雪と成形した雪について、粒径、粒子の形、粒子の結びつき状態を観察し、写真に残している。

図10に、写真撮影装置を示す。実体顕微鏡

(SL-60ZT) にデジタルカメラ(CoolPix4500)を接続すると、80倍程度までの拡大写真が撮れる。

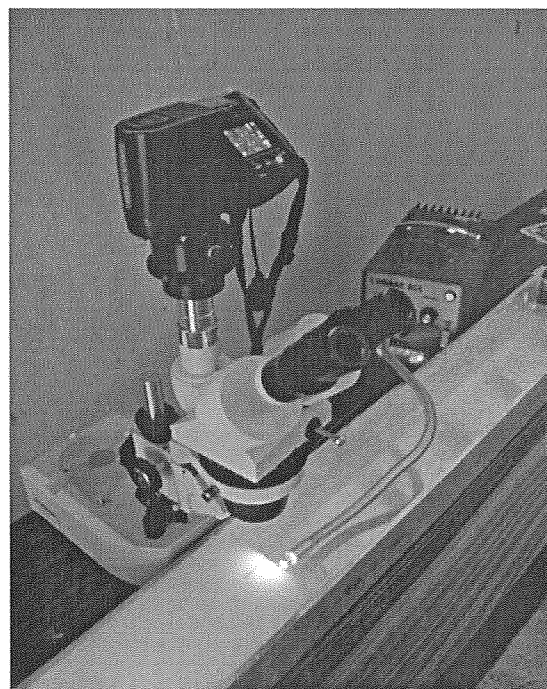


図10 顕微鏡写真撮影装置（雪の横から照明）

雪の側面から照明したり、雪穴を掘りその中にLED光源を入れ散乱光を用いて撮影している。光源の強さや光の当て方で大きな差が出るが、LED光（無色）を補助光（直接照明）として加えると雪粒子に反射光が写り、立体的で氷の質感に近い写真撮影が可能となった（図11）。

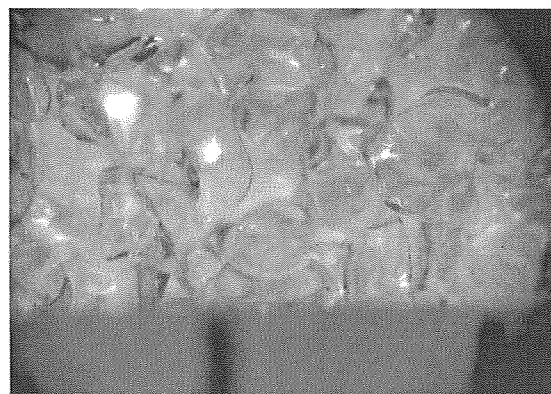


図11 しまり雪の例、粒子が0.3mm程度であることが観察できる。（画面下の目盛りが1mm）

2.3.2 試料雪の密度測定

採取してきた雪を自然滑走試験用雪パレット等に入れ、表面に圧力を掛けて、スキー場のゲレンデと同等の硬い雪面を作成する。

雪水学会等で広く用いられている密度サンブラ

ー (図 12)は、深さ 30 mm の範囲の平均密度を測る。本実験では、雪表面に圧力を掛け硬い雪面を作成しているが、このサンプラーでは、表面付近の密度が計れない。

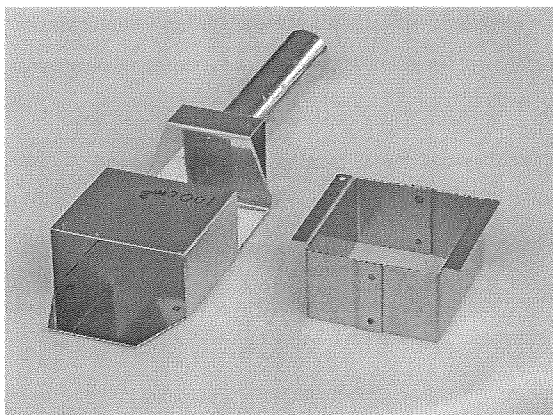


図 12 雪の研究に広く使われている通常の密度サンプラー

雪は表面に圧力を掛けた場合、圧力は深さ方向に均一に掛かることなく、表面付近で圧力を受け、この部分しか密度が高くない。このため、表面付近の密度を測れる円形密度サンプラー(深さ 10 mm でΦ 87.8 mm)で表面の硬い雪を切り出し、かさ比重を測定し密度とする。

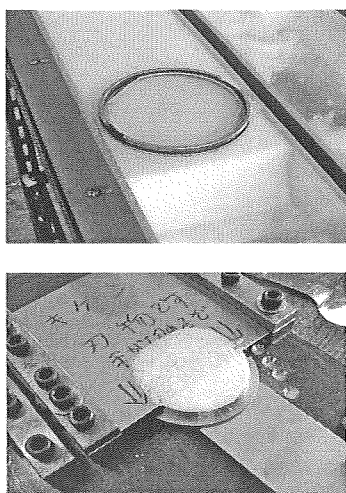


図 13 今回作製した円形密度サンプラーと雪面スライサー

なお、深さ 5 mm の円形密度サンプラーも作製し、密度測定を行ったが、雪の粒径が大きい霜ざらめ雪の場合、測定誤差が大きくなる傾向があるので、この研究では深さ 10 mm のサンプラーを採用した。

これを使用することにより、深さ 30 mm サンプラーよりは表面近傍の様子を反映している。

2.3.3 表面近傍の硬さの評価

図 14 の表面硬さ計は、一体となっている圧子と荷重台をバネで持ち上げてあり、荷重台に錘を載せるとバネ定数に比例した分だけ圧子が下がって行く仕組みとなっている。圧子軸の変位は上部のダイヤルゲージで計る。もし圧子の下に何も無く空気であれば、荷重と変位の関係はバネ定数そのものとなる。しかし、圧子の下に剛体があれば、圧子が剛体に接触したところから、変位は動かずに荷重だけが進む。この空気と剛体の間に測定対象がある。(図 15)

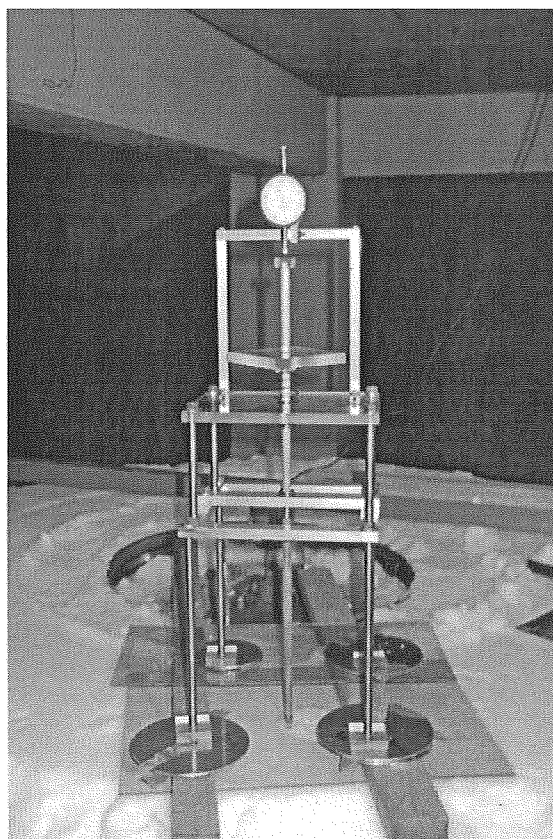


図 14 雪面押し込み表面硬さ計

測定物にあったバネ(硬さ或いはバネ定数)を選択することにより接触点近傍の硬さを計ることができる。また、測定物の性状に合わせ、圧子直径や圧子形を変えることによって、柔らかい材料の表面近傍の硬さの相対的比較が可能である¹²⁾。

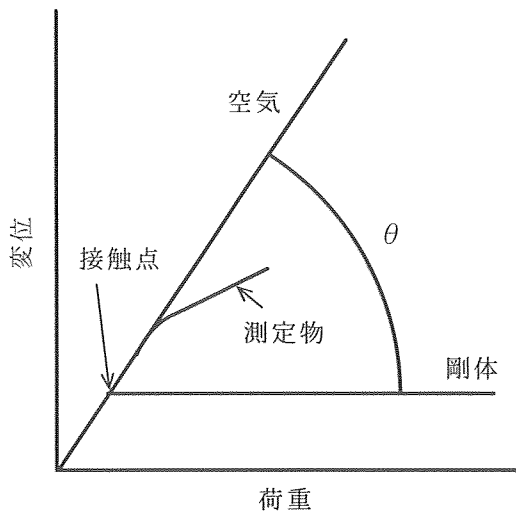


図15 雪面押し込み硬さ計の原理

以下に新雪としまり雪に関して、雪の加工法を変えたときの効果を比較するため、およびシンタリングの効果を見積もるために行った押し込み硬さの測定について、直径が10 mmの円柱型圧子を装着した場合の測定例を示す。

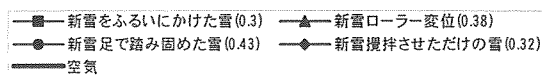


図16 新雪の加工法による硬さの比較

新雪の場合、篩にかけると、かなり一生懸命固めた雪と同様の硬さを示す。一方、しまり雪では篩をかけても攪拌と同じような雪にしか成らず、良く固めた雪とは大きく異なる結果を与えた。

このデータの密度は従来型の密度サンプラーを使用しているため、硬さとの相関が悪い。しかし、加工法による硬さの違いは雪質にも依存することがわかる。

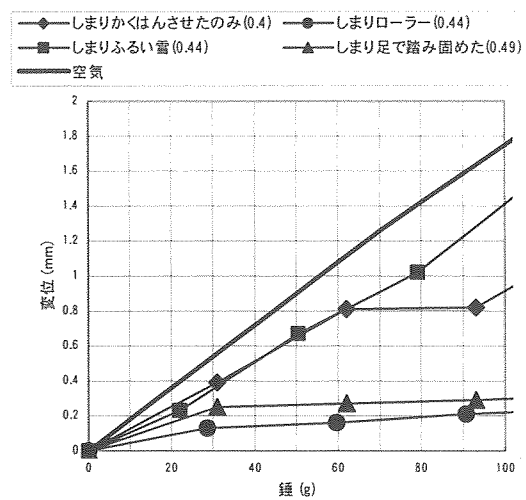


図17 しまり雪の加工法による硬さの比較

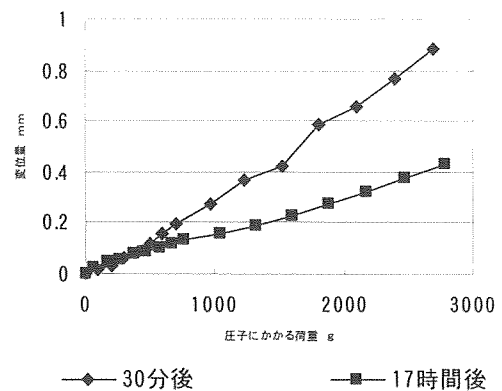


図18 押し込み硬さとシンタリング（静置）

17時間のシンタリングで同じ荷重をかけたときの変位量が30分後に比べ大幅に減少し、明らかに硬くなったことが読みとれる。

改良型押し込み硬さ測定装置

押し込み硬さ計は錘をかけ、一定時間待ち、その後変位量をマイクロメータで読み取る操作を繰り返すため時間がかかる。ここでは一定の圧力が圧子（今回は直径10 mmの円柱圧子に20 N）にかかるまで、できる限り一定の速度でロードセルを取り付けた圧子を雪の中に押し込み、その後は押し込みを止め、それまでの変位量をマイクロメータで読み取ると同時に、その後のロードセルにかかる雪の圧力の減衰の様子を10～20秒間測定する。（図21）

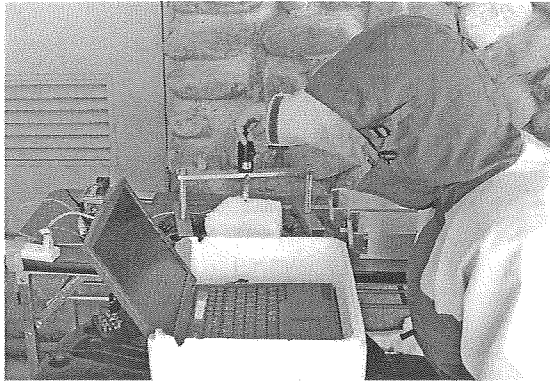


図 19 改良型押し込み硬さ測定装置



図 20 ロードセルと圧子

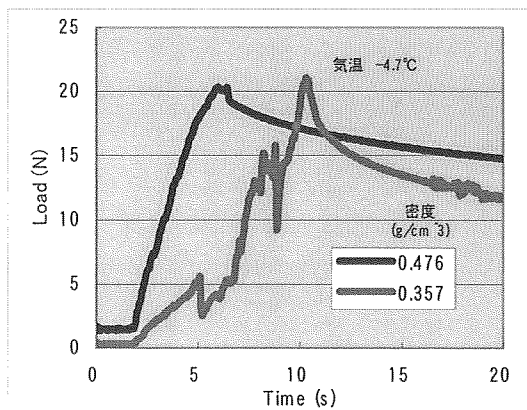


図 21 改良型押し込み硬さ測定装置による測定例（密度の異なるしまり雪）

図 21 で、密度の小さい方の雪では、20 N に到達前の変位が大きく、さらに 2 回急な押し込みが起こっており、直感的に硬さの比較ができており、圧子や押し込み速度、荷重がこの程度の硬さの測定に適正であることがわかる。

なお、雪の表面の硬さを均一にするのは難しいので、雪面評価のためには多点の測定が要求される。上述した改良型押し込み硬さ測定装置はその

ための迅速測定装置でもあるが、その他にソレノイドを用いた、押し込み硬さ測定装置を考案しテストした。それを用いると、多点の同時測定が可能であるが、ソレノイドコイルの発熱のため、精度の高い制御が難しいという問題が生じたため、現在は開発を中止している。

2.3.4 雪粒子の結合に関する情報計測の試み

雪面の硬さには、密度が密接な関係に有ると考えられるが、雪粒子間の結合強さも重要な要素であると思われる。ざらめ状の雪のように、氷としての密度は高くても粒子相互のつながりが弱ければ、柔らかい雪と表されなければならない。雪面に圧子を押し込む量にもよるが、押し込み硬さでは雪粒子の結合強さは表せない。

このことから、雪面に衝撃を与え、その振動と破壊の程度から、硬さと粒子の結合強さを表す試験法の開発を行っている。加速度センサーをある高さから雪面に落下させ、その時に得られた初動を FFT 解析し、高周波および振幅が大きいほど、硬い雪と評価できるのではないかと考えている。また、その衝撃によってできた損傷の程度で、雪粒子の結合の強さが比較できると考えている。

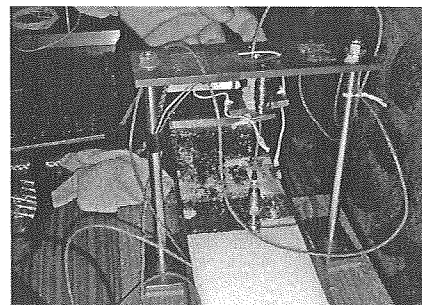
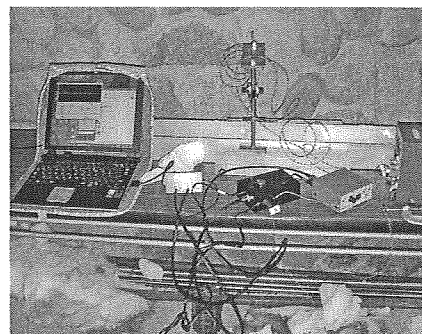


図 22 雪面の衝撃試験風景

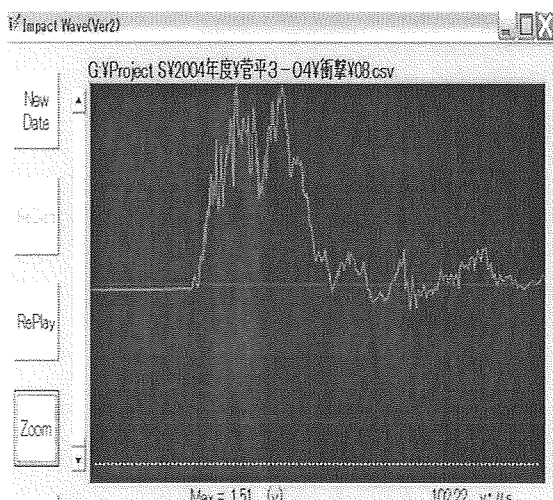


図 23 雪面の衝撃試験測定例（硬いほど線幅が狭く強度が大きくシャープな波形を示す。）

2.3.5 実験環境

自然の気象条件下、屋根のみの外気条件、および暖房の無い観測所前室のドアを開け放つ、等による気温のコントロールの下に測定した。実験方法や雪の取り扱い方法の確立は防災科学研究所の低温施設で行い、同じ人工雪を用いた測定により再現性の確認を行っている。

3. 結果と考察

3.1 回転雪皿法

図 24 に、しまり雪について 3 種類の密度、温度における摩擦係数の滑走速度依存性を、回転雪皿法（図 7）により求めた結果を示す。

ロードセルによりモデルスキーの滑走抵抗を計測し摩擦係数を導出したものである。モデルスキーは、図 3 を用い、重りを載せたときの総重量を 770 g（圧力 4.3 g/cm^2 、普通のスキーは 15 g/cm^2 程度）とした。 -5.0°C については、モデルスキーの滑走する場所における円盤の周速度 0.01 m/sec ～ 2 m/sec まで変化させ、その他の雪温の場合は、0.5 m/sec 以下の非常に遅い滑走速度について検討した。

図 24 に示した全体の傾向としては、低速度では大きな摩擦係数を示し、0.1 m/s から 1 m/s にかけて滑走速度が上がるに伴いその値は急激に小さくなる。

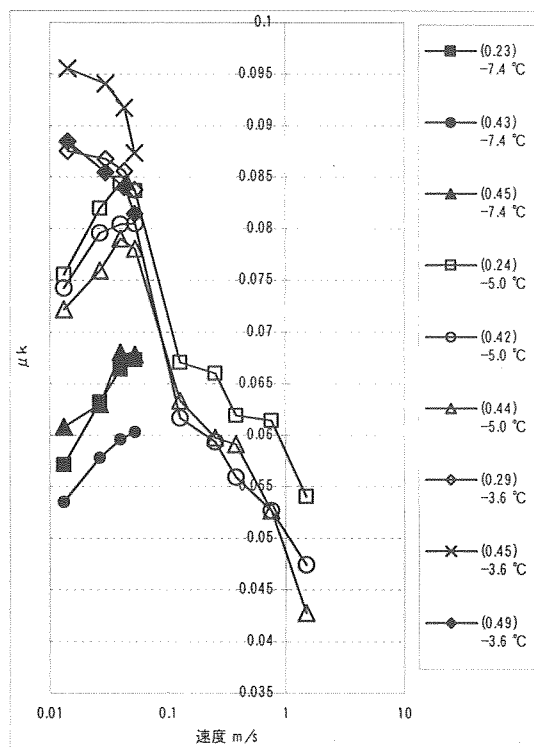


図 24 回転雪皿法による雪温を変えたときの摩擦係数と速度の関係（括弧内は雪の密度を示す）

以下にそれぞれの雪の硬さ測定の結果を示す。

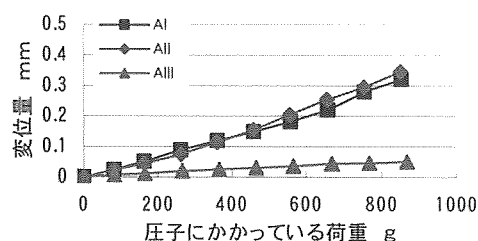


図 25 雪温 -3.6°C のときの押し込み硬さ
(A I: 0.29 g/cm^3 , A II: 0.45 g/cm^3 , A III: 0.49 g/cm^3)

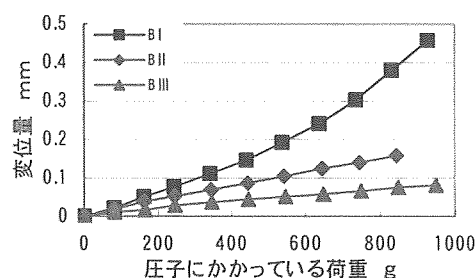


図 26 雪温 -5.0°C のときの押し込み硬さ
(B I: 0.24 g/cm^3 , B II: 0.42 g/cm^3 , B III: 0.44 g/cm^3)

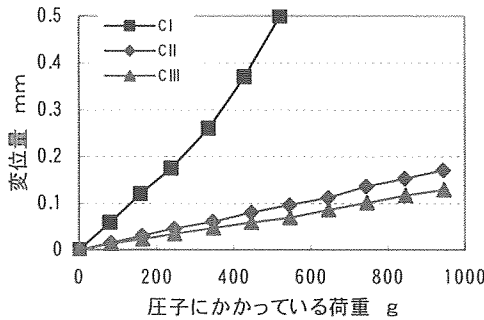


図 27 雪温 -7.4°C のときの押し込み硬さ
(CI: 0.23 g/cm^3 , CII: 0.43 g/cm^3 , CIII: 0.45 g/cm^3)

図 24 の全体的様子は従来の報告と同様¹⁾ に速度 1 m/s 前後で摩擦係数が急速に小さくなる傾向で、摩擦融解説を支持する結果である。しかし、ここで我々が注目したのは、滑走速度が 0.1 m/s 以下のスキーとすれば大変低速度における摩擦係数の挙動である。すなわち、摩擦係数が雪の条件(ここでは雪の温度)に著しく依存する事である。

摩擦係数

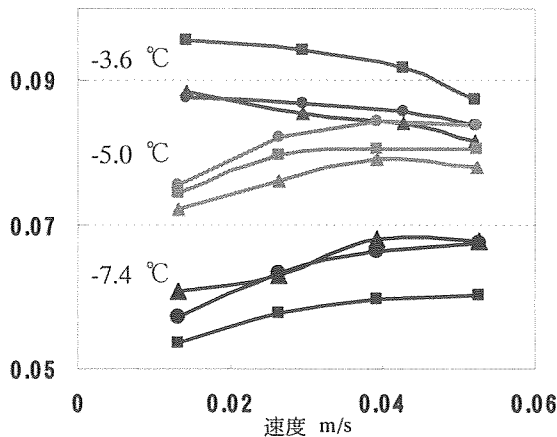


図 28 回転雪皿法による低速度の摩擦係数

図 28 に回転雪皿法による非常に低速度における摩擦係数の速度依存性をクローズアップして示した。除雪抵抗や圧雪抵抗をほぼ無視できるように固めたしまり雪では、密度の影響ははっきり現れず、むしろ雪温の変化が摩擦係数に大きな影響を与えていることがわかる。すなわち、 -5.0°C および -7.4°C の場合は滑走速度が 0.05 m/s 辺りの摩擦係数が極大となるが、それより高い温度では速度が遅いほど摩擦係数は大きくなった。

3.2 自然滑走法

3.2.1 雪質と滑走性

図 29 は、密度を同程度に調整した異なる雪質(しまり雪と新雪)の雪を用い、屋外であるが

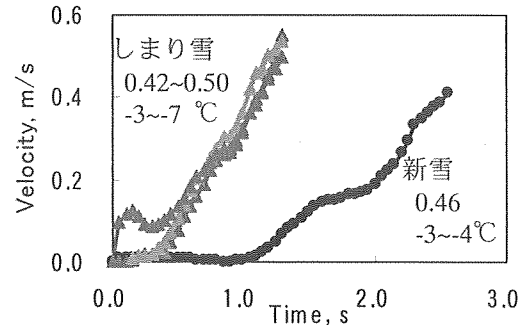


図 29 雪質を変えた場合の速度変化

できる限り近い雪温条件の下で、自然滑走法(赤外線距離センサ使用)により滑走距離と時間を計測し、滑走速度を求めた。新雪に比べしまり雪が格段に良く滑ることがわかる。また、しまり雪については、可能な範囲で密度を変えて測定したが、ここでは密度変化に伴う滑走性の顕著な変化は見られなかった。この測定に用いた雪の表面はステンレス製の雪へらで削って平面を出し、数時間シンタリングさせて固めた。

この実験から、密度が同程度(攪拌や人力で押し固める方法では最大に近い密度)でも雪質によって滑走性能が大きく異なることがわかった。

3.2.2 表面加工と滑走性

雪表面の加工の影響を示すために、同じ密度の

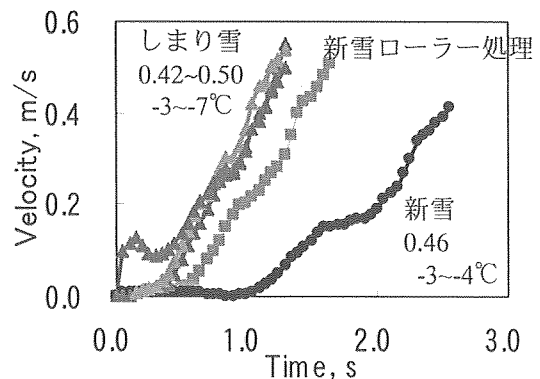


図 30 雪表面のローラー処理の影響(同密度)

新雪について、雪表面仕上げにアクリル板を用いたローラーがけを施した後に図 29 と全く同じ条件で滑走速度と時間の測定を行った。(図 30)

このローラーを用いた雪面加工により新雪の滑走性能は著しく向上し、良く滑るしまり雪に近い滑走性を示した。この結果は、雪表面の硬さや滑らかさが滑走性(低速度)の主なファクターとなっている事を示唆している。

ここでは、モデルスキーの滑走面は全ての測定で同じ物を用いている。(市販スキーの高密度ポリエチレンの表面を細かいエメリーペーパーで磨いて綺麗にした物を用い、滑走測定後ワックスリムーバーで汚れを取り乾燥させ、測定前はサンプルの雪と同じ雪にしばらく埋め滑走体と雪温をできるだけ近づけてから実験に供した。)

3.2.3 滑走体の長さの影響

図 31 に雪面にかかる圧力を同じにした、長さが異なるモデルスキーを用いた場合の滑走速度と時間の関係を示す。雪の密度はやや小さめのしまり雪であるが、スキーから雪表面に加わる圧力は 2.5 g/cm^2 程度で、通常のスキーの場合の $1/6$ 程度の値である。従って、接雪面が小さい事を考慮してもスキーの沈み込みは小さいと考えられる。

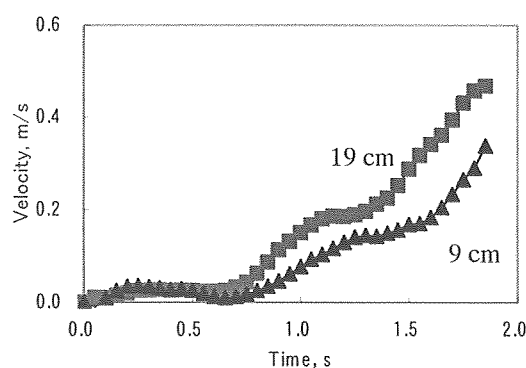


図 31 モデルスキーの長さが異なる場合

図 31 から、滑走体の長さによる滑走性の相違は顕著ではない。つまり、摩擦熱の蓄積効果が長さにより異なると考えられるが、この程度の長さの差からは明らかではない。また、滑走面の温度変化も測定しておらず、十分な議論はできない。

4. 結論

短いモデルスキーの低速度滑走の特徴は、色々な条件により滑走性に測定可能な大きさの差が生じることである。しかし、その様子は滑り出した直後から、 0.5 m/s 程度の速度まで変わらない場合が多い。滑走性に顕著な影響を与えるファクターは、表面の硬さ(or 滑らかさ)と雪温である。これらの測定結果を総合的に見て、低速度ではいわゆる潤滑摩擦は支配的とはなっていない。さらに、短いスキーの場合 0.5 m/s 程度の滑走速度で新たに水ができることも無いと判断される。

Buhl らの雪の温度が低くなると高速度滑走でもスキーヤーの体重の影響が出たという報告や、滑走速度によらず雪温が -3°C 以下で摩擦係数が大きくなる現象は、通常の長さのスキーでも摩擦熱により潤滑に最適な量の水が出来ていないことを示している。つまり、いわゆる固体摩擦抵抗、および吸着や凝着などのその他の相互作用による滑走抵抗の影響がスキー全体の摩擦係数に現れていると考えられる。

実際のアルペンスキーでは、速度が 100 km/hour にも達しており、そのスピードにおける摩擦係数は潤滑摩擦の値に限りなく近づく。しかし、そのような状況でもスキーの先端部は新しい冷たい雪に接するので、その部分の固体摩擦の効果は存在すると考えられる。その僅かな抵抗力は瞬間的には測定できないほど小さいかも知れないが、競技のスタートからゴールまでの効果の積分値は無視できないであろう。すなわち、スキー競技には、スキー先端部の固体摩擦と、それ以外の場所(荷重最大点より後ろ)の潤滑摩擦の両方の領域に関する滑走性制御が必要と考えられる。

謝辞

この研究は電通大スキー科学研究会を中心に行なわれた。関係各位、菅平スキー科学セミナーに参加し討論頂いた方々のご協力に感謝致します。とりわけ、2005 年 3 月ご逝去された、当研究会参与の黒岩茂隆先生(信州大名誉教授)の長年に渡るご指導に心より感謝致します。なお、この研究

費用の一部は科研費（課題番号 16500395）より支出した。

参考文献

- 1) Bowden, F.P., Hughes, T.P.(1939): The mechanics of sliding on ice and snow. Proc. R. Soc. London, Ser. A 172, 280-298.
- 2) Bowden, F.P.(1953): Friction on snow and ice. Proc. R. Soc. London, Ser. A217, 462-478.
- 3) Haizuka, S., Ito, K., Nawate, F., Naruse, C. (2002): Studies on friction loss of low speed spur gears (Influence of lubrication oils and tooth forms). Trans. of the Japan Society of Mech. Engrs., 66-642c, 640-647.
- 4) Stribeck, R.(1902): Die wesentlichen eigenschaften der gleit und rollenlager. Z-VDI, Vol.46, No.36, 1341, 1432 and 1463.
- 5) Colbeck, S.C.(1992): A review of the processes that control snow friction. CRREL Monograph 92-2, 1-40.
- 6) Colbeck, S.C.(1994): A review of the friction of snow skis. J. Sports Sciences, 12, 285-295.
- 7) Buhl, D., Fauve, M., Rhyner, N.(2001): The kinetic friction of polyethylene on snow: the influence of the snow temperature and the load. Cold Reg. Sci. Technol., 33, 133-140
- 1) Tomizawa, I., Nikki, K., Haizuka S., Ishii, A. (2001): A combined measurement system for discriminating complex resistances affecting ski sliding. Proc. of 2nd International Congress on Skiing and Science, 250-261.
- 9) 仁木國雄, 富澤一郎, 灰塚正次, 坂井武夫, 太田康洋, 田辺一哉, 細谷典義, 伊藤泰範, 石井明 (2000): スキーと雪の間に働く複雑な摩擦抵抗の実験的ファクター分離に関する研究-1, 日本スキー学会誌, 10-1, 169-177,
- 10) 菊池勝弘, 大畑哲夫, 東浦将夫 (1995): 基礎雪氷学講座 2, 降雪現象と積雪現象, 古今書院, p.164
- 11) 前野紀一, 黒田登志雄 (1999): 基礎雪氷学

講座 1, 雪氷の構造と物性, 古今書院, p.131

- 12) 仁木國雄, 古岩信嗣, 萩原雅友, 金子克己, 灰塚正次, 富澤一郎, 江本聖司, 細谷典義, 石井明 (2001): モデルスキーを用いたスキー動摩擦係数測定と雪質および滑走面との関係, 日本スキー学会誌, 11-1, 175-186

著者

仁木國雄（につき くにお）：電通大,
量子・物質工学科, 助教授, 物理化学
金子克己（かねこ かつみ）：電通大, 技術部
齋藤悟（さいとう さとる）：電通大, 技術部
荒川欣吾（あらかわ きんご）：電通大, 技術部
青木猛（あおき たけし）：電通大, 技術部
白畑一貴（しらはた かずき）：電通大,
量子・物質工学科, 卒研生
小川徹, :（おがわ とおる）電通大,
量子・物質工学科, 卒研生
浅野樹（あさの たつき）：電通大,
量子・物質工学科, 卒研生
小本創（おもと はじめ）：電通大,
量子・物質工学科, 卒研生
泉谷旬人（いずみや まさと）：電通大,
量子・物質工学科, 卒研生
北村考志（きたむら たかゆき）：電通大,
量子・物質工学科, 卒研生
山本拓史（やまもと たくじ）：電通大,
量子・物質工学科, 卒研生
富澤一郎（とみざわ いちろう）：電通大,
菅平宇宙電波観測所, 助教授
灰塚正次（はいづか しょうじ）電通大,
知能機械工学科, 教授
阿部修（あべ おさむ）：長岡防災科学研究所,
新庄支所, 雪氷防災研究部門
石井明（いしい あきら）：香川大, 工学部,
知能機械システム工学科, 教授