

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500726

研究課題名(和文) スキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータの開発とスキー滑走機構解明の基盤構築

研究課題名(英文) Development of a simulator generating ski board vibrations in actual skiing and basic construction for clarifying skiing mechanism

研究代表者

塩野谷 明 (Shionoya, Akira)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：50187332

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、スキー実滑走時模擬振動暴露シミュレータの開発を行なうとともに、スキー滑走メカニズム解明のための基盤構築を目的とする。シミュレータは、スキーヤーを想定した雪塊を、雪面に見立てたスキー滑走面で滑走させるものである。スキー板の振動は、ボールバイブレータを圧縮空気で回転させ、発生させる。シミュレータでは雪塊が滑走する際の動摩擦力、動摩擦係数、滑走速度が算出される。実験の結果、250Hz付近の振動を板に暴露した場合、滑走速度の増加、摩擦係数の低減、滑走速度の増加に伴う動摩擦係数の低下が認められた。以上の結果より、本シミュレータはスキー滑走メカニズム解明の基盤として適当であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this study are to develop a simulator generating a ski board vibration in actual skiing and to perform the basic construction for clarifying the ski sliding mechanism. In simulators, the surface on the bottom of the ski was assumed as to be a snowy slope and a snow pack assuming a skier had slid on this ski bottom surface. The vibration on the ski was caused by a ball vibrator. A dynamic friction force, a coefficient of kinetic friction and the velocity of the snow pack were measured and calculated when the snow pack was sliding. The experiment was carried out in the low temperature laboratory. The velocity of the snow pack with 250 Hz vibration was higher than that without vibration. The coefficient of kinetic friction with vibration was lower than that without vibration. Furthermore, as increase in velocity of snow pack, the coefficient of kinetic friction was decreased. From these results, the simulator is suitable for clarifying the ski sliding mechanism.

研究分野：1402

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学

キーワード：スキー実滑走 模擬振動 発生源シミュレータ スキー滑走理論

1. 研究開始当初の背景

スキー滑走のメカニズムは、スキーというスポーツが誕生して200年余未だ完全に解明されていない。そして、物理学およびその他の諸科学に関係する謎でもある。

スキー板の振動は、主に1次から5次のモードで構成される。例えば、2~300Hz前後の比較的高次の周波数成分は、スキーの滑走速度に有利に働くことが報告される。また、スキー滑走中は30~40Hzの2次モードの強度が高く、スキー滑走において減速要因となることも報告される。このように、スキー板の振動はスキー滑走速度との関連性があり、本研究代表者はスキー滑走メカニズム解明の糸口と考えている。

しかしスキーが滑走する雪面とスキー滑走面の関係は、気温、雪温、湿度、含水率、果てはスキーの滑走速度や板から受ける圧力等によって時々刻々変化をするため、非常に扱いにくいものである。それがスキー滑走メカニズム解明を阻んできた大きな要因と考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、スキー滑走の理論的解明を目指すシステムとして新しいコンセプトのスキー実滑走時模擬振動暴露シミュレータの開発を行なうとともに、スキー滑走メカニズム解明のための基盤構築を目指すものである。具体的には、開発するシミュレータを用いて、スキー滑走時のスキー板の振動がスキー滑走のダイナミクスにどのような影響を及ぼすか、特にスキー滑走速度、動摩擦係数との関係を定量的に明らかにする。

シミュレータは、それを用いた実験で環境・条件を幅広く制御できるように低温実験室内を設置した。また、シミュレータにおけるスキー滑走を、斜面滑走および機械的牽引滑走を駆動源とする2タイプのシミュレータを構築することとした。

本研究の成果からはスキー滑走の機構に迫るとともに、競技性(滑走性)の高いスキー板や高齢者向けの滑走速度を抑えたスキー板等多面的なスキー開発のコンセプト構築が可能になると考えている。

3. 研究の方法(成果としてのシステム開発)

図1に、斜面滑走をスキー滑走源とするスキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータの概要を示す。また、図2ではシミュレータ設置した低温実験室内の実験環境を示す。シミュレータはスキー滑走面を表面とし、裏面(化粧板)に加速度センサー(PCB PIEZOTRONICS社 352B10)を設置し、整流器(PCB社 480B10)を介して加速度信号をA/Dコンバータ(ELMEC社製 EC-2360-1)によりA/D変換した後、PCに取り込み運動解析システムWAAP-WINでスキー板が発生する振動およびその周波数等の検出・解析を行う。スキーは角度調整を可能とし、スキー・スキーヤ

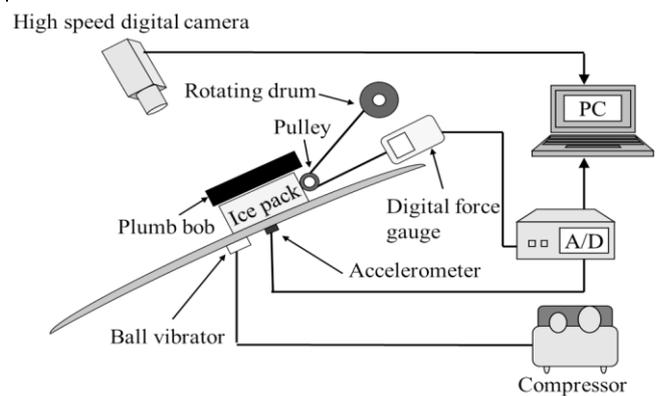


図1: 斜面滑走型のスキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータの概要

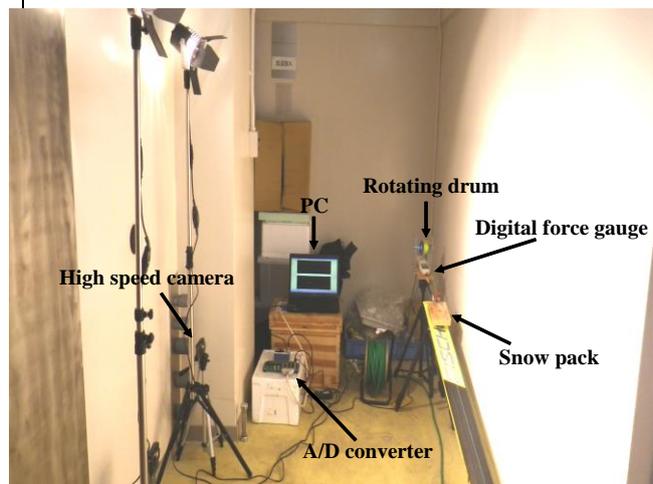


図2: 低温実験室内のシミュレータ実験環境

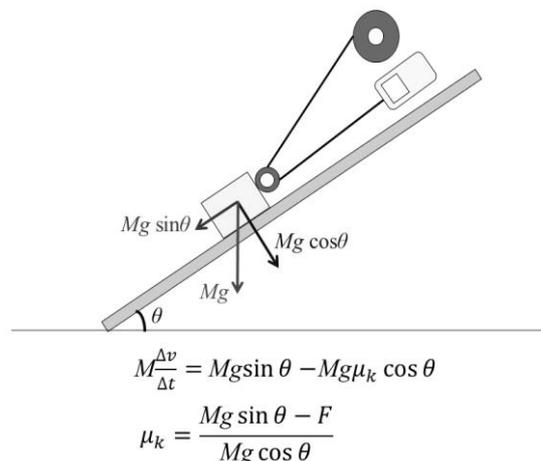


図3: 斜面滑落時のスキー滑走面・雪塊間の動摩擦係数の算出

一系を想定した雪塊ブロック(重錘によって質量を変化させる)がスキー滑走面を滑走する仕組みとなっている。すなわち、スキーヤーを想定した雪塊の滑走は斜面滑落による等加速度運動となる。雪塊ブロックには滑車を装着し、ワイヤーを介してワイヤーの一端をスキートップ部外に固定したデジタルフォースゲージ(IMADA社製DPX50-490N)に装

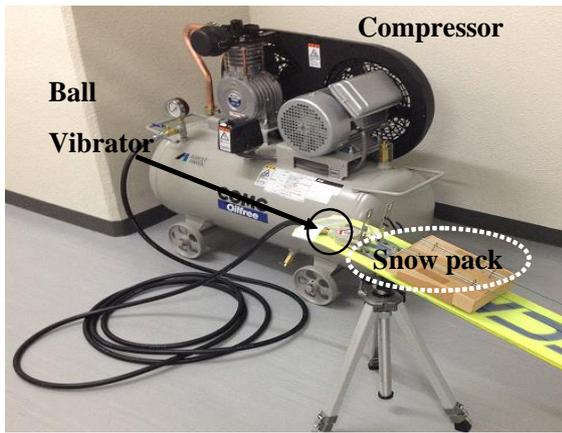


図 4：振動発生装置

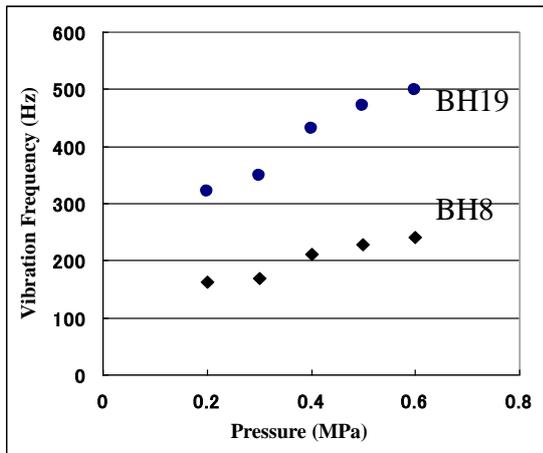


図 5：圧縮空気圧と振動周波数の関係

着、もう一端は巻き取り用のドラムに装着する（デジタルフォースゲージならびにドラムはスキートップ部よりも上に配置される）。この機構によって雪塊は動滑車となり、雪塊の滑走に伴い連続的に検出されるフォースゲージ出力が A/D コンバータを介してコンピュータに取り込まれる。取り込まれた出力値（動摩擦力）は、A/D 変換後スキーの角度を考慮して推進成分と垂直抗力成分の力より動摩擦係数 (μk) を算出する。図 3 に、その算出式を示す。スキー板の加振は、図 4 に示す振動発生装置を用いて行った。振動は、コンプレッサー（アネスト岩田社製 TFP07-10B）から噴出される圧縮空気圧（1.2MPa maximum）をスキー表面に固定したボールバイブレータ（エクセン社製 BH8）に送り、バイブレータ内の金属ボールを回転させることで発生させた。図 5 に圧縮空気圧と振動周波数の関係を示す。コンプレッサーの最大出力 1.2MPa を考慮すると、BH8 タイプによってスキー滑走時にスキー板に発生する高次の 2~300Hz の振動周波数が得られることがわかる。また雪塊滑走の様子は高速度カメラ（CASIO 社製 Exilim:EX-FH20）を用いて撮影し、画像解析システム（オクタル社製 OTPL8TZ）によって雪塊の速度、加速度等を算出した。

図 6 には、2 つ目のシミュレータとして機

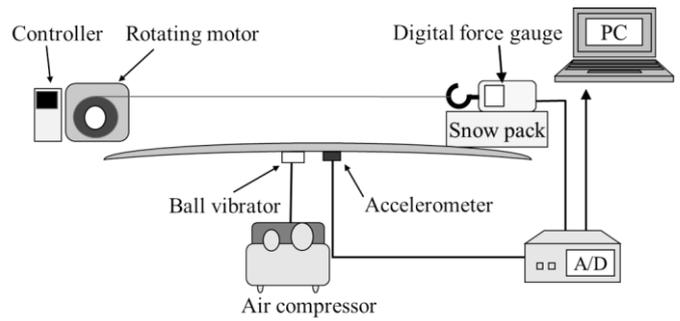


図 6：機械的牽引型のスキー実滑走時模擬振動

発生源シミュレータの概要

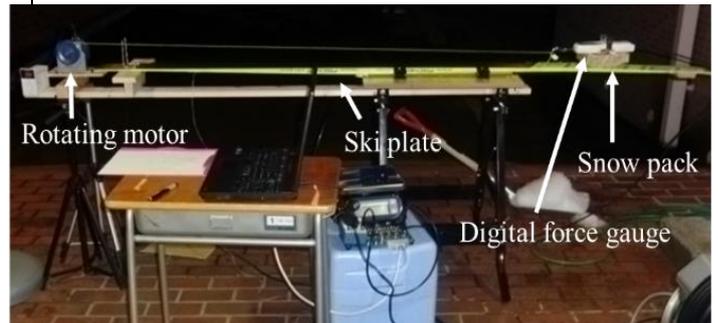


図 7：機械的牽引型のシミュレータによる実験時の構成および配置

械的牽引を滑走源とするシミュレータの概要を、また図 7 に実験時の構成および配置を示す。振動発生機構および振動検出方法は、斜面滑走型シミュレータと同じであるが、機械的牽引によるため雪塊は加速度 0 の等速度運動となる。本シミュレータではスキーを水平に設置し、牽引によって雪塊をスキー滑走面上で滑走させる。雪塊の上には、前述のデジタルフォースゲージを取り付けるとともに、デジタルフォースゲージのフック部にワイヤーの一端を繋ぎ、もう一端は巻き取りモーター（オリエンタルモーター社 NexBL US タイプ BLM5120-GFV）に接続した。巻き取りモーターは付属のコントローラーにより、任意の速度設定を行うことで、等速度での雪塊滑走を可能とした。また、この機構によって、滑走する雪塊に取り付けたフォースゲージ

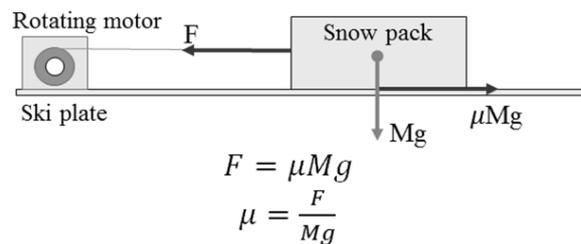


図 8：牽引滑走時のスキー滑走面・雪塊間の動摩擦係数の算出

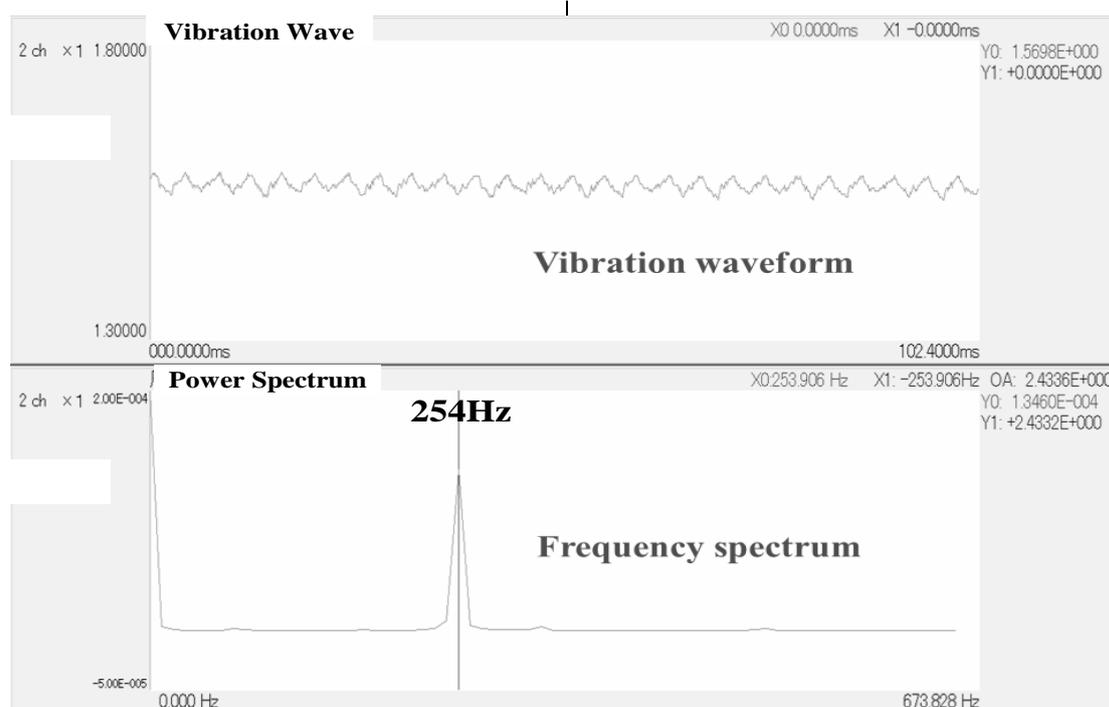


図 9：スキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータにより発生するスキー振動と周波数

から連続的に検出される出力値（動摩擦力）が、A/D コンバータを介してコンピュータに取り込まれ、図 8 に示す算出式から動摩擦係数（ μ ）を導出した。

図 9 には、構築したスキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータにより発生する振動と周波数成分の一例を示している。振動周波数は 254Hz で、おおよそ本研究の目的で上げた目標周波数を再現できていると考えられる。

このように研究の方法として、スキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータの開発について述べたが、これがスキー滑走メカニズム解明基盤となることから、このシステム開発が本研究の最も大きな成果と考える。

4. 研究成果においては、この開発した 2 つのシミュレータの計測精度の確認も含め、当該研究で行ったいくつかの条件下での実験結果についてまとめる。具体的には、2～300Hz の振動暴露がスキー滑走速度および動摩擦係数に及ぼす影響について、温度条件や速度条件を変えることによって、その違いを確認している。

また研究最終年度末には、スキー実滑走時の振動暴露および新型ダンパーによる振動減衰について、フィールド実験として実施している。このフィールド実験では、計測機器として科学研究費補助金（基盤研究（C）：課題番号 20500540）で構築したスキー実滑走時機械力学信号とヒト生理信号の同期計測ユニットを使用して行った。この実験結果については、平成 26 年 3 月 31 日現在解析を進めている。

4. 研究成果

図 10 は、斜面滑走型のシミュレータを用い、 -5°C の条件下でスキー板に振動を暴露しない条件と振動（250Hz 付近）を暴露した条件での雪塊の滑走速度について示している。図から確認されるように、振動暴露での滑走速度は、振動がない場合に比較して統計的に有意に高い傾向が認められた。

図 11 は、同じくスキー板に振動を暴露しない条件と振動（250Hz 付近）を暴露した条件での雪塊滑走時動摩擦力について示している。図から確認されるように、振動暴露の条件での動摩擦力は、振動なしの場合に比較して統計的に有意に高い傾向が認められた。

表 1 は、スキー板に振動を暴露しない条件と振動（250Hz 付近）を暴露した条件での雪塊滑走時動摩擦係数についてまとめたものである。振動がない場合、平均動摩擦係数は 0.059 であるのに対し、振動暴露条件では 0.044 と小さい数値となることが認められた。

これまでスキー滑走速度とスキー板の振動の観点から、実滑走中のスキーの振動計測を、滑走速度が高い上級者と滑走速度が低い初中級者で行い、上級者に 200Hz 付近の高次の周波数成分が認められる等が報告されている。今回は、こういった先行研究の結果を実験室で再現したものとする。また滑走速度と摩擦力の関係では、これも速度の増加に伴い摩擦力が上がるということが報告され、今回シミュレータを用いた実験から振動暴露に伴い滑走速度の増加が動摩擦力を増加させたと考えられ、この点についてもこれまでの先行研究と同様の結果が実験室で再現されたものと考えている。

さらに動摩擦係数については、これまで報

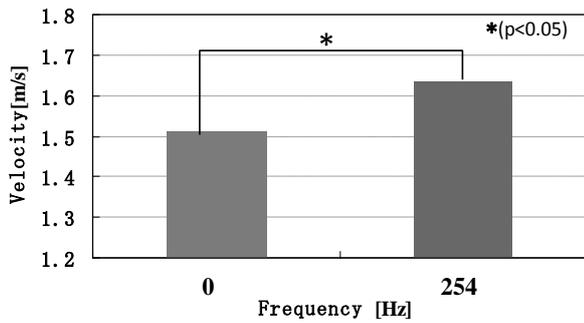


図 10: スキー板への振動暴露の有無と雪塊の滑走速度

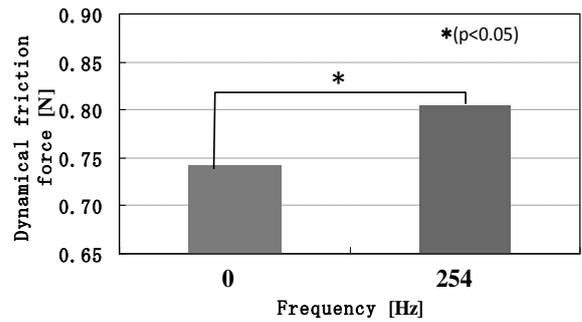


図 11: スキー板への振動暴露の有無と雪塊滑走時の動摩擦力

表 1: スキー板への振動暴露の有無とスキー板と雪塊間の動摩擦係数

Trials	Coefficient of kinetic friction	Coefficient of kinetic friction
	at 0 Hz	at 254 Hz
1st	0.052	0.041
2nd	0.058	0.043
3rd	0.065	0.044
4th	0.059	0.046
AVE.	0.059	0.044

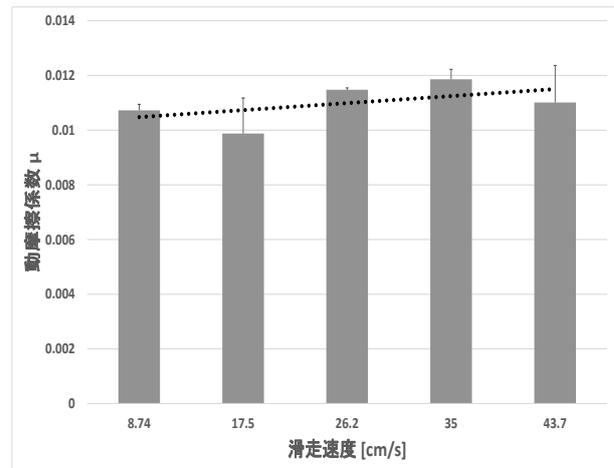


図 12: スキー板への振動暴露がない条件での雪塊滑走速度と動摩擦係数の関係

告されるスキー滑走面と雪面の動摩擦係数とはほぼ同じ数値であることから、本シミュレータが高い再現性を有する精度を持つと考えられる。加えて、滑走速度に有効とされる振動（200Hz 以上）をスキー板に暴露することで動摩擦係数の低下が認められたことは、本研究で開発したシミュレータから得られた貴重な成果のひとつと考える。

これらの結果については、斜度ならびに温度等を変化させた条件でも同様の傾向が認められるが、対象が時々刻々と条件変化をする雪であるため、必ずしも統計的に有意とならない場合があり、今後は計測環境・条件をより厳格に制御する必要性も認める。

図 12 は、機械的牽引型シミュレータを用い、0°Cの温度およびスキー板に振動を暴露しない条件で、多段階等速度に雪塊を牽引滑走させたときの動摩擦係数を示している。

統計的に有意ではないが、振動が暴露されない場合、速度の増加に伴い、動摩擦係数が増加する傾向が認められている。これは、速度の増加に乗じて抵抗が大きくなる粘性摩擦を示す結果と考える。粘弾性体である雪は融解によって、粘性力が大きくなり抵抗が増すことが考えられる。今回の結果は、スキーの滑走によって雪の融解が起こった結果なのか、あるいは実験環境（0°C）によって発生したものか同定はできないが、本シミュレータを用い、より厳密な環境・条件設定を行えば、スキー滑走に伴う雪融解の可能性の

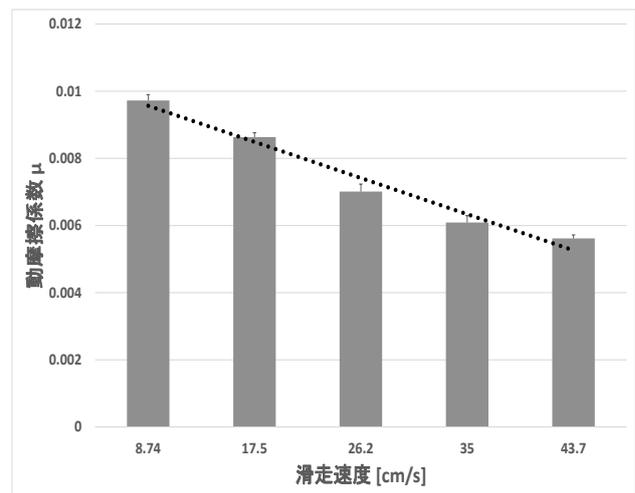


図 13: スキー板への振動（250Hz 付近）暴露条件での雪塊滑走速度と動摩擦係数の関係

の検証さらには融解雪の潤滑剤としての効果にまで迫ることができるものとする。すなわち、当該研究によるシミュレータの開発は、スキー滑走メカニズム解明の基盤となることがあらためて示唆されたものとする。

図 13 は、図 12 と同様の計測を、スキー板へ振動 (250Hz 付近) 暴露を行った場合の雪塊滑走速度と動摩擦係数の関係を示している。振動暴露により、速度の上昇に伴う動摩擦係数の低下が認められ、振動暴露によって粘性摩擦の影響が小さくなるとともに、垂直抗力に比例したクーロン摩擦が低減していることが予想される。

以上、当該研究の成果の一部からは、依然としてスキー滑走メカニズムの完全な解明には至っていないが、そのためのスキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータの有効性は当該研究期間内に十分に確認できたものとする。

今後は、前述のフィールド実験の結果についてまとめるとともに、シミュレータによる多様な実験条件での計測をとおしてスキー滑走メカニズムの完全な解明とその応用を目指していくものである。

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)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Akira Shionoya, Kazuhide Sato : Development of simulator generating ski board vibrations in actual skiing. 査読有, *Procedia Engineering*, Vol.60, 2013, 269-275.
- ② 塩野谷明: スキー研究と機械繊維. 査読無, *日本機械繊維学会誌*, Vol.66 (7), 2013, 1-6.
- ③ 塩野谷明、監物勇介、西條暁里: スキー実滑走中の機械力学振動とヒト EMG の同時計測システムによるスキー板の振動とヒト EMG の相互相関分析. 査読有, *日本スキー学会スキー研究*, Vol.10(1), 2013, 1-11.
- ④ 塩野谷明、佐藤和秀: スキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータの試作. 査読無, *日本スキー学会誌*, Vol.22(1), 2012, 37-42.

⑤

[学会発表] (計 6 件)

- ① 清水悠太, 平野雄大, 高坂大貴, 今村啓, 塩野谷明: スキー実滑走時動摩擦にスキー板の振動が及ぼす影響について—改良型シミュレータを用いて—. *日本スキー学会第 24 回大会 (新潟・妙高)*, 56-59, 2014.
- ② 清水悠太, 高坂大貴, 塩野谷明: スキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータの開発と実験 (ドライアイスと氷塊の滑走速度比較及び動摩擦係数の導出). *日本機*

械学会スポーツ&ヒューマンダイナミクス 2013 (東京・新宿), 2013.

- ③ 塩野谷明, 佐藤和秀: スキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータの試作: 200Hz でのスキー加振時のフォースゲージ出力値の検討. *日本スキー学会第 23 回大会 (長野・志賀高原)*, 2013.
- ④ 高橋雄太, 清水悠太, 高坂大貴, 塩野谷明: スキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータの開発. *日本機械学会シンポジウム・スポーツ&ヒューマンダイナミクスシンポジウム 2012 (愛知・豊橋)*, 168-171, 2012.
- ⑤ 長浜佑樹, 塩野谷明, 佐藤和秀: スキー実滑走時模擬振動発生源シミュレータの設計と試作. *日本機械学会北陸信越支部第 49 期総会・講演会 (石川・野々市)*, 2012.
- ⑥ 池田肇, 塩野谷明: スキー実滑走時模擬振動暴露によるヒト疲労・感性評価. *日本機械学会北陸信越支部第 49 期総会・講演会 (石川・野々市)*, 2012.

[その他]

- ① 塩野谷明: スキー滑走の原理 板から迫る「細かい振動がスピード生む」 *新潟日報朝刊* 2014 年 (平成 26 年) 2 月 15 日版

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩野谷 明 (SHIONOYA AKIRA)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号: 50187332