

機関番号：13102

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20500540

研究課題名 (和文) スキー実滑走時模擬振動暴露シミュレータによる  
ヒト疲労および感性の間接的評価の試み研究課題名 (英文) Indirect Evaluation of Fatigue and Kansei in Skiing  
using Simulated Ski Vibration Exposure Simulator

研究代表者

塩野谷 明 (SHIONOYA AKIRA)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：50187332

研究成果の概要 (和文)：本研究では、スキー実滑走時のスキー振動がヒトの疲労や感性にどのような影響があるかを検討した。そのために、機械力学信号 (情報) とヒト生理信号 (情報) を同期計測するユニットを構築し、スキー実滑走時の振動と疲労の関係を明らかとした。さらに、上記ユニットを中心に振動暴露シミュレータを構築、振動と疲労・感性の関係を検討した。その結果、スキー滑走時は板の固有振動がヒトの疲労に強く影響すること、またシミュレータからは 40Hz 前後の振動周波数から疲労の出現ならびに感性的な不快感の増加が認められた。

研究成果の概要 (英文)：The influences of the ski vibration on human fatigue and kansei in skiing were investigated in this paper. For these purposes, the unit, could concurrent measure the mechanical signal and physiological signal, was developed. The relationship between the ski vibration and the fatigue in skiing was investigated. Furthermore, the simulated ski vibration exposure simulator using the above-mentioned unit was developed and the relationships between ski vibration and the fatigue and the kansei were investigated. This study concluded as follows; the natural frequency of ski influenced the fatigue in skiing and the appearance of fatigue and the increase in discomfort were detected when the vibration frequency exceeded about 40Hz in simulator driving.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

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：スキー実滑走、模擬振動暴露、ヒト感性、疲労、間接的評価

## 1. 研究開始当初の背景

スキーの振動は、主に 1 次から 5 次のモードで構成され、非常に興味深い物理現象を引き起こす。例えば、200Hz 前後の高い周波数成分は、スキーの滑走速度に影響を与えることが報告され、本研究代表者はスキー滑走メカニズムの解明の糸口と考えている。また、30～40Hz の 2 次のモードは強度が強く、スキー滑走において減速要因となることも報告

される。

一方、こういったスキー振動がヒトの疲労や滑走中の感覚・感性にどのような影響を与えるかについては、おそらく何らかの影響は予想できるが、その定量的検討についてはあまり多くの研究をみない。

その原因の 1 つとして測定周波数の違いから、これまで単一ユニットで両者を同期計測することが少なかったためと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究は、スキー実滑走時のスキー振動がヒトの疲労や感性にどのような影響があるか、特に研究開始当初には 200Hz 前後の高い周波数成分に視点を向けて検討していくことを目的とした。そのために、測定周波数の異なる機械力学信号（情報）とヒト生理信号（情報）を単一のユニットで同期計測するシステムを構築し、スキー実滑走時のスキー振動と疲労の関係について検討していくこととした。さらに、上記ユニットを中核としてスキー実滑走時振動暴露シミュレータを構築、スキー実滑走時のスキー振動と疲労の関係を模擬的に再現・暴露し、スキー振動と疲労・感性の関係について検討することを目的とした。

## 3. 研究の方法

スキー実滑走時計測ならびにスキー実滑走時振動暴露シミュレータシステムは、データロガーを兼ねた汎用生体信号計測器を中心に、生体信号計測用センサー、加速度計、加速度計駆動電源およびボックス回路によって構成した。また、計測器の設定およびデータの回収・参照のためラップトップ型コンピュータ（PC）を用いた。後述する打撃加振実験においては、前述の加速度計、加速度電源装置、データロガー兼用生体信号計測器に加えてインパルスハンマーを用いている。

図 1 に、スキー実滑走時スキー振動と筋電図の同期計測の構成について示す。スキー実滑走実験の事前に、開発したシステムならびにインパルスハンマーを用いた打撃加振実験によって使用するスキー板の固有振動周波数を導出した。本実験で用いたスキーの場合、16. 36、32. 35、96. 44Hz が強く発現しており、これらがスキー板の固有周波数と考えられた。

スキー実滑走中、加速度計で計測された振動（スキー先端部・中央部）と筋電図（大腿

二頭筋、大腿四頭筋、下腿三頭筋、前頸骨筋）は回路を介して、データロガーに取り込まれ、実験後 PC を用いて解析した。解析は、機械力学振動および生体筋電図ともに FFT による周波数解析を行い、スキーの振動と疲労の関係について検討した。筋電図からの疲労の検討には以下の MPF を用いた。

$$MPF(n) = \frac{\int_{f_1}^{f_h} f \cdot W(f, n) df}{\int_{f_1}^{f_h} W(f, n) df} \quad (1)$$

但し  $n$  はサンプリング時間、 $f$  はサンプリング周波数、 $f_h$  は最大周波数、 $f_1$  は最小周波数。

スキー実滑走時計測の結果に基づいて、スキー実滑走時のスキー振動を模擬的に暴露するシミュレータを構築した（図 2 参照）。振動の発生源は、トレッドミルのベルト回転とグランジヤー車輪部 38mm 間隔の 16 の溝である。

模擬振動暴露実験は、トレッドミル速度 3 ~ 12km/h（予測基本振動周波数 15 ~ 100Hz）の範囲で複数の条件設定から振動暴露実験を行なった。主なものは、次のとおりである。

- 1) 3 ~ 8km/分のベルト速度（周波数）漸増条件での振動暴露
- 2) 3km/h (15 ~ 20Hz) および 5km/h (30 ~ 40Hz) のベルト速度固定条件で 30 分間の振動暴露

これらは実験中、グランジヤー先端部に装着された加速度計によって常に確認される。また上記条件での振動暴露中、被験者からは前述の機械力学・生理振動の同期計測ユニットによって心電図、呼吸曲線、筋電図が導出され、それぞれの周波数解析からヒト疲労・感性の間接的評価を行なった。

評価指標として、筋電図からは前述の MPF、心電図からは R-R 間隔時系列の周波数解析から 0. 15-0. 4Hz (HF) および 0. 04-0. 15Hz (LF) 成分、そして呼吸曲線からは主要周波数成分の変化とした。また被験者には、独自の感性スケールによる主観的感性評価も併用した。



図 1：スキー実滑走時計測の構成

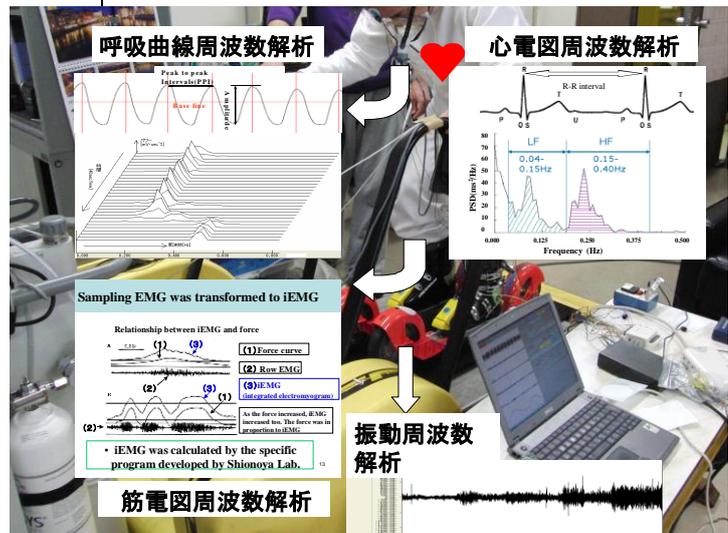


図 2：スキー実滑走時模擬振動暴露シミュレータ

#### 4. 研究成果

図3は、測定周波数の異なる機械力学信号(情報)とヒト生理信号(情報)を単一のユニットで同期計測するシステムによって計測された一例である。上から生体信号としての3つの筋電図信号、機械力学信号としてのスキー板またはグランジヤーからの加速度信号、さらに生体信号としての呼吸曲線、心電図信号の時系列データとなっている。ここに、前述の打撃加振実験等の場合にはインパルスハンマー等によって得られる力量信号も挿入が可能となる。これはスポーツ工学分野における実験においては、非常に有用なデバイスと考えられる。

図4はスキー実滑走中の大腿二頭筋、大腿四頭筋、下腿三頭筋、前頸骨筋の筋電図ならびにスキー先端部および中央部の加速度信号の時系列データである。本研究で開発した

機械力学信号(情報)とヒト生理信号(情報)を単一のユニットで同期計測するシステムは、スキー実滑走といったフィールド実験においても有効なデバイスとなることが証明された。

図5(左図:スキー先端、右図:スキー中央部)は、スキー実滑走中のスキーの加速度信号を周波数解析した後時系列に示したものである。スキー滑走中、様々な周波数成分の振動が励起されていることが確認される。これらの振動と疲労の関係をまとめ、マトリックス化したものが表1である。

このマトリックスより、例えば大腿二頭筋や腓腹筋の筋活動がスキーの固有振動との相関がみられながらも、振動MPFとの相関は小さいため、他の振動周波数ではなく、固有振動がスキー滑走時の筋活動そして疲労に影響を及ぼすものと考えられる。すなわち、

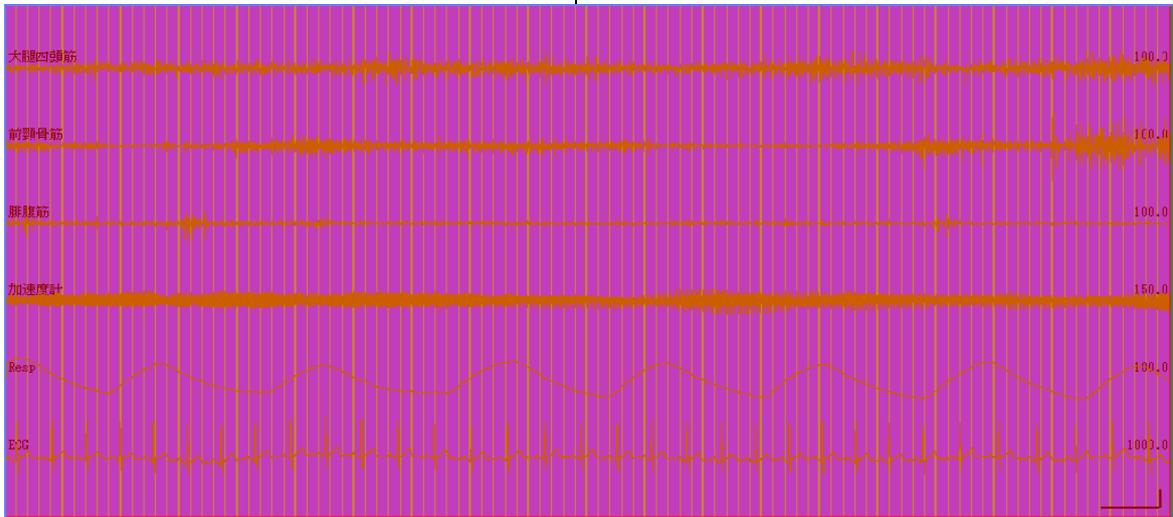


図3: 機械力学信号(情報)とヒト生理信号(情報)の同期計測システムによる計測例

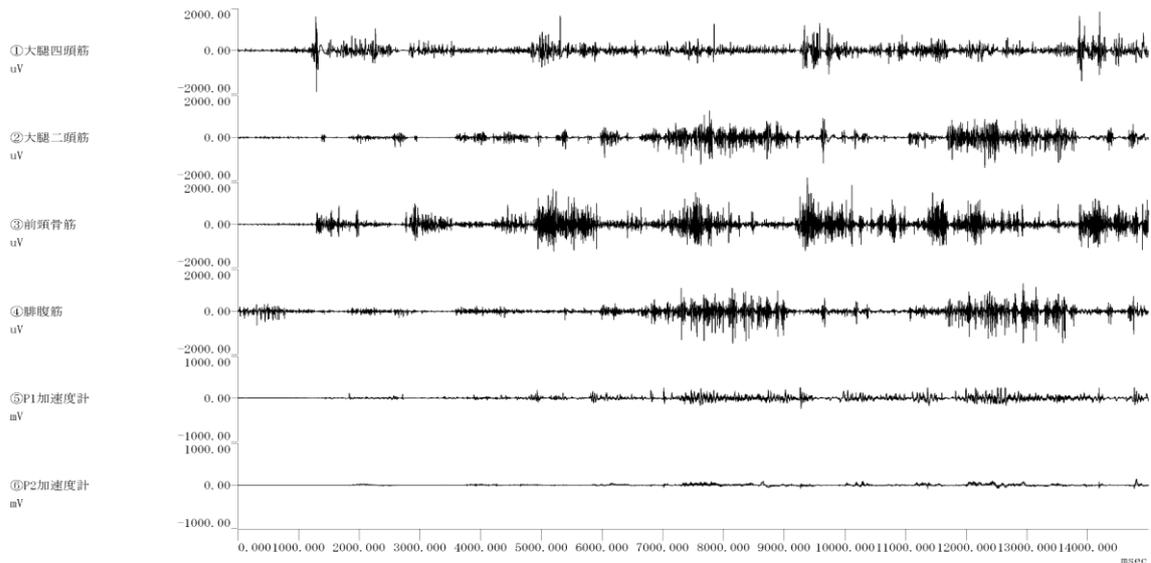


図4: スキー実滑走時ヒト筋電図信号と機械力学振動信号の計測例

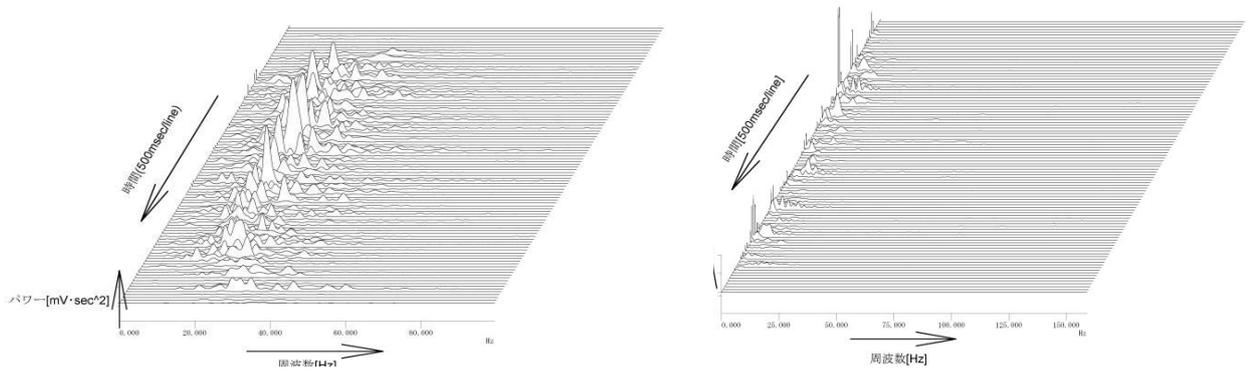


図5：スキー実滑走時スキー先端（左図）

およびスキー中央部（右図）振動周波数の時系列データ

表1：スキーの各振動周波数成分と各筋のMPFの相互相関マトリックス

	P1:16.357Hz	P1:32.349Hz	P1:96.436Hz	P2:16.357Hz	P2:32.349Hz	P2:96.436Hz	大腿四頭筋	大腿二頭筋	前脛骨筋	腓腹筋	P1.MPF	P2.MPF
P1:16.357Hz	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	1 .174** 335	.197** .001 335	.144** .008 335	.225** .000 335	.098 .073 335	.098 .073 335	.311** .000 335	.205** .000 335	.300** .000 335	-.193** .000 335	-.051 .352 335
P1:32.349Hz	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	.174** .001 335	1 .007 335	.146** .000 335	.198** .000 335	.199** .000 335	.060 .518 335	.035 .042 335	.111** .008 335	.144** .041 335	-.190** .000 335	-.026 .633 335
P1:96.436Hz	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	.197** .000 335	.146** .007 335	1 .000 335	.194** .002 335	.186** .000 335	.415** .001 335	.181** .000 335	.386** .000 335	.234** .000 335	.369** .000 335	-.036 .508 335
P2:16.357Hz	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	.144** .008 335	.198** .000 335	.194** .000 335	1 .000 335	.218** .000 335	.214** .034 335	.116** .000 335	.207** .002 335	.165** .000 335	.198** .000 335	-.063 .247 335
P2:32.349Hz	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	.225** .000 335	.199** .000 335	.186** .002 335	.218** .000 335	1 .000 335	.200** .087 335	.094 .000 335	.403** .001 335	.180** .000 335	.376** .000 335	-.030 .585 335
P2:96.436Hz	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	.098 .073 335	.060 .274 335	.415** .000 335	.214** .000 335	.200** .000 335	1 .000 335	.241** .000 335	.257** .000 335	.296** .000 335	.198** .000 335	.005 .924 335
大腿四頭筋	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	.098 .073 335	.035 .518 335	.181** .001 335	.116** .034 335	.094 .087 335	.241** .000 335	1 .110 335	.087 .000 335	.704** .000 335	.028 .608 335	-.071 .192 335
大腿二頭筋	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	.311** .000 335	.111** .042 335	.386** .000 335	.207** .000 335	.403** .000 335	.257** .000 335	.087 .110 335	1 .000 335	.233** .000 335	.938** .000 335	.034 .539 335
前脛骨筋	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	.205** .000 335	.144** .008 335	.234** .000 335	.185** .002 335	.180** .001 335	.296** .000 335	.704** .000 335	.233** .000 335	1 .000 335	.163** .003 335	-.228** .022 335
腓腹筋	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	.300** .000 335	.112** .041 335	.369** .000 335	.198** .000 335	.376** .000 335	.198** .000 335	.028 .608 335	.938** .000 335	.163** .003 335	1 .000 335	.044 .420 335
P1.MPF	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	-.193** .000 335	-.190** .000 335	-.036 .508 335	-.063 .247 335	-.030 .595 335	.005 .924 335	-.071 .192 335	.034 .000 335	-.228** .000 335	.044 .420 335	1 .000 335
P2.MPF	Pearsonの相関係数 有意確率(両側) N	-.051 .352 335	-.026 .633 335	.028 .611 335	-.140** .010 335	-.081 .138 335	.115** .036 335	-.182** .003 335	-.108** .049 335	-.125** .022 335	-.088 .107 335	.488** .000 335

\*\* 相関係数は 1% 水準で有意(両側)です。

\* 相関係数は 5% 水準で有意(両側)です。

16.36、32.35、96.44Hz のスキー振動が疲労に関与していることが示唆される結果であった。

図6は、スキー実滑走時模擬振動暴露シミュレータによる3km/hから8km/hの速度漸増条件での、振動周波数の変化を示したものである。斜め縦軸は30秒ごとの速度を示し、上から下へ3km/hからの速度漸増を示している。ここでは注目される次の2つの点を確認される。1つ目は、予測された基本振動周波数(3km/hでは15Hz)とは別にその2倍の周波数成分が認められることである。基本振動周波数は、グランジャーのベクトル作動車輪に刻まれた36mm間隔16本の溝とトレッドミルのベルト速度、ならびに本研究前に行なっ

た先行研究から予測したものであり、ほぼ測定値に近いことが確認された。これとは別にほぼ基本振動周波数の2倍に相当する周波数も確認され、これは2つの車輪による振動発生源の位相差が原因と考えられる。しかし、これによって研究開始当初に着目していた高い振動周波数成分に近い振動も暴露されると考えられ、さらにはスキー実滑走時のヒトの疲労に関与する振動成分が、条件1)によって被験者に暴露されたことが示唆されるものである。

2つ目は、速度の漸増に伴う振動周波数のスペクトル強度が5km/h(40Hz)をピークとし、以後低下するという点である。これについては何が起因しているのか、現時点では特

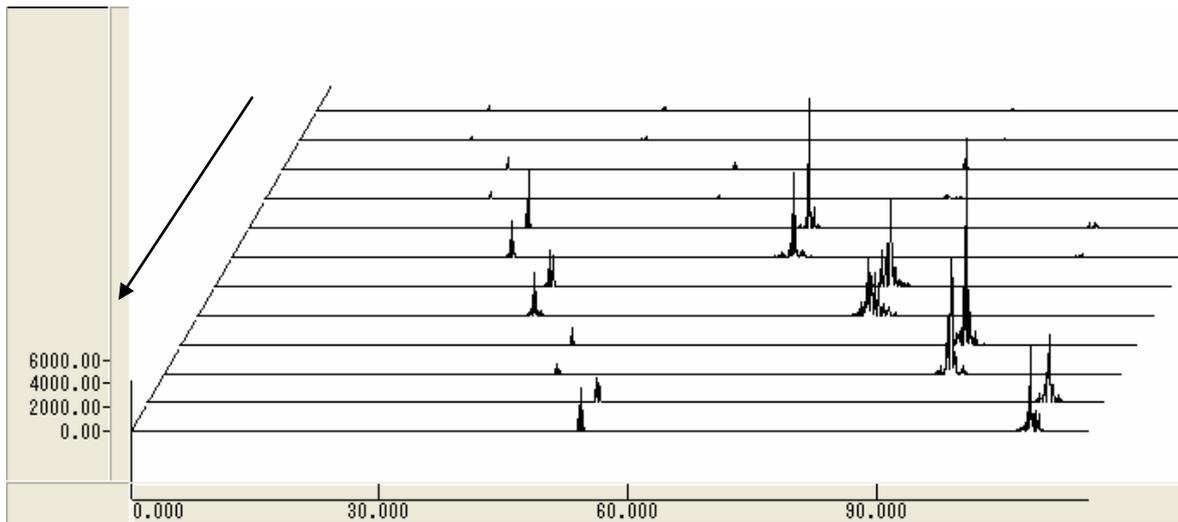


図 6：スキー実滑走時模擬振動暴露シミュレータによる  
速度漸増時振動周波数の変化（3km/h から 8km/h まで）

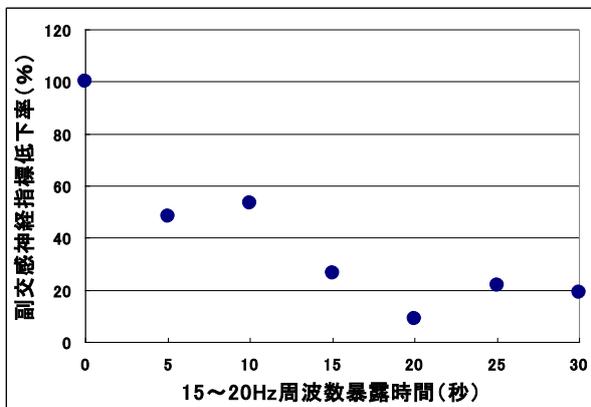


図 7：15-20Hz 振動 30 分暴露時の  
心電図副交感神経活動指標の変化

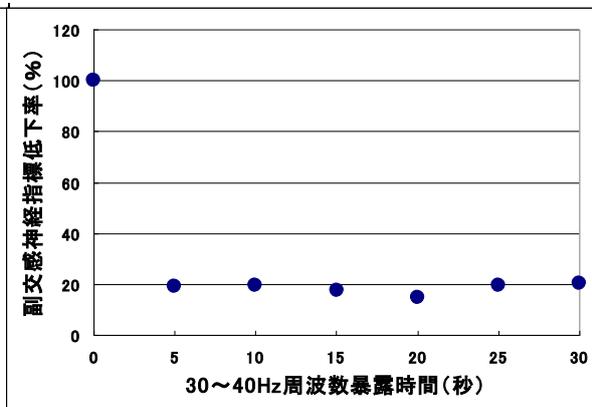


図 8：30-40Hz 振動 30 分暴露時の  
心電図副交感神経活動指標の変化

定できていないが、この 40Hz という成分はスキー実滑走時にヒト疲労に強く影響する  
と考えられた成分であるところに注目する。

例えば、かなり飛躍した仮説ではあるが、  
スキー滑走においてはいくつかの振動成分  
が、お互いその強度を減衰するように働き合  
い、結果それが 40Hz 前後の振動におい  
てもっとも高い強度となり、疲労に影響を  
与えるといったことがあるかもしれない。

さらには、本研究開始当初に着目した  
200Hz という高い周波数成分が滑走速度  
という物理現象に強く影響を与える理由  
について検証していくための資料（振動  
周波数が高くなると、その振幅は当然小  
さくなっていく）として位置づけ、次の  
研究課題の 1 つと考える。

図 7 は、スキー実滑走時模擬振動暴露  
シミュレータによる 15-20Hz 振動 30  
分間暴露時の心電図副交感神経活動指  
標として、心電図 R-R 間隔時系列周波  
数 0.15-0.4Hz (HF) の変

化をみたものである。また、図 8 は、同  
じく 30-40Hz 振動を 30 分間暴露し  
たときの変化である。これらはいずれも  
、研究の方法で述べた振動暴露条件 2)  
の結果一例である。15-20Hz 暴露  
では、5 分から 10 分にかけて副交感  
神経活動指標の低下は 50% 程度であ  
るが、ヒトの疲労に関係するとして 30-  
40Hz 暴露では、暴露 5 分の時点で  
20% に低下している。

スキー実滑走時模擬振動暴露シミュ  
レータを用いる場合、振動暴露条件 1)  
および 2) に限らず、被験者はトレッド  
ミル上での立位姿勢を取るだけで、筋  
収縮等のダイナミックな運動は行なわ  
ない。そのため、規則的な筋の MPF  
の低下や心拍数等の顕著な増加は認め  
られなかった。心拍数においては、暴  
露条件に係らず 5~10% 程度の増加を  
認めるが、本研究で行ったすべての被  
験者に有意な増加は認められなかった。

すなわち、図 7、8 に示される副交感  
神経

活動指標の低下特に 30-40Hz での顕著な低下傾向は、心地よさや辛さといった感性的な側面（不快感の増加）が影響したものと考えられる。これは独自の感性スケールによって求めた主観的評価においても、すべての被験者で認められた。

以上のように本研究では、振動という機械力学現象と、疲労という生理現象、そして心地よさ・辛さといった感性現象に相互相関的な関係特に 40Hz という振動周波数でそれが認められていることから、今後はより詳細な解析を継続していく予定である。

また、本研究の最初の目的であった測定周波数の異なる機械力学信号（情報）とヒト生理信号（情報）を単一ユニットで同期計測するシステムの構築では、期待された精度のシステムが構築されたと考える。さらに本システムは、ダイナミックな運動における疲労の同定例えば **Anaerobic Threshold** の同定等にも応用が可能となった。しかし、2 つの信号の同期ユニットとするため例えば生体信号の検出には使用する電極等が制約を受ける等、システム向上の余地は依然として残されている。本研究の当該年度中は、機械力学信号を利用して筋の長さを推定し、同一長さのときの生理信号を導出・解析することで対応を試みているが、これらも今後の課題として継続研究していくものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 10 件、以下に主要なもの）

- ① 塩野谷明：スキー滑走メカニズム解明の試みと生体情報処理。査読無（招待講演論文），生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2011, 2011, 91-98.
- ② Akira Shionoya, Hiroki Sugimura, Toshinori Saijo : Development of Ergometry system for Anaerobic Threshold (AT) Determination. 査読有, Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conference on Applied Bionics and Biomechanics (IEEE). 2010, 1-6 (CD-R)
- ③ 塩野谷明, 西條暁里, 山本晋平 (他 2 名, 1 番目) : 実滑走時のスキー振動とヒト EMG の同時計測システムの構築。査読無, 日本スキー学会誌, Vol. 20(1), 2010, 83-90.
- ④ Akira Shionoya, Toshinori Saijoh : Parallel measurement of vibration and EMG in summer skiing; Fundamental study on the development of the system for estimating exhaustion. The Impact Technology on Sport. 査読有, 2009, Vol. 3, 69-73.
- ⑤ Akira Shionoya, Hiroki Sugimura : Kansei evaluation of tennis racket

concurrent Thurstone paired comparison and EMG analysis. 査読有, 2009, The Impact Technology on Sport. Vol. 3, 353-357.

〔学会発表〕（計 12 件、以下に主要なもの）

- ① 塩野谷明, 今村啓, 池田肇, 西條暁里, 山本晋平 : スキー実滑走時模擬振動暴露によるヒト疲労及び感性の間接評価—心地よい滑走性を求めるための評価コンセプトの構築—。第 22 回日本スキー学会（新潟・上越），2011.
- ② 塩野谷明, 今村啓, 西條暁里 : スキー実滑走中の機械力学情報とヒト生理情報の同期計測システムの構築—雪上でのスキー運動中の振動と筋電図の同期計測—, 日本スキー学会第 21 回大会（北海道・留寿都）、2010.
- ③ 塩野谷明, 篠田 崇, 西條暁里 : "スポーツギアの物理情報とヒト生体情報の同時計測の試み—スキーへの応用を目指して—" 生体情報処理・高度情報処理シンポジウム講演論文集, 2009, 143-146.
- ④ Toshinori. Saijou, Takashi Shinoda, Akira. Shionova : Parallel measurement of the vibration and the EMG in summer ski : Development of the system for estimating an exhaustion. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Kansei Engineering 2. 2008. 115-118.

〔図書〕（計 2 件）

- ① 塩野谷明, 近代科学社, 吉川敏則他編著 挑戦こそが成功の鍵：スキーはなぜ滑るか、2010、234-240.
- ② Akira Shionoya et. al, ELSEVIER, Procedia Engineering : Physical Work Capacity Required to Avoid Ski Accidents to examine using the Equation of Ski-skier System Motion (In print. Publication in August, 2011).

## 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・准教授  
研究者番号 : 50187332