

〔研究ノート〕

## スキー滑走時の下肢関節運動とスキー板ひずみの計測

齋藤健治・前田 寛

名古屋学院大学／大分大学名誉教授

### 要 旨

モーションセンサとひずみゲージを用いて、スキー滑走時の下肢関節運動とスキー板のたわみを計測した。右ブーツ内側と右大腿外側に六軸のモーションセンサを装着し、スキー滑走時の下腿部と大腿部の角速度を計測した。また、右スキー表面に三軸ひずみゲージと単軸ひずみゲージをそれぞれ2枚ずつ貼付し、滑走時のスキー板のたわみを検出した。実験参加者には平均斜度14度の斜面で、大回りターンと小回りターンで滑走してもらった。計測した角速度とひずみはフィルタ処理を施した後、それぞれのパワースペクトルを求め、さらに相互相関関数と自己相関関数を求めることで、滑走時の運動の特徴やスキーのたわみとの関係を調べた。

**キーワード**：下肢関節運動，角速度，ひずみ，相互相関関数，周波数

## Measurements for joint motion of lower limb and strain of ski during ski-turn

Kenji SAITOU, Hiroshi MAEDA

Nagoya Gakuin University/  
Oita University

---

発行日 2021年7月31日

## はじめに

スキー計測は、自然を利用した斜面の移動に加え、気候、滑走斜面の雪質や状況（荒れ具合）など種々の影響を受けるため、計測条件を安定させるという点において、その難度は高いといえる。そのような中でも、滑走中のスキーヤーによるスキー板への圧力はスキーのターン軌跡や回転に直接関わるため、その計測に焦点を当てた研究が主流となっている [1-4, 6-9, 13, 14]。一方で、スキー板そのものの振動特性を分析した研究 [5, 10]、スキーヤーの運動学解析や筋活動解析を行った研究 [12] があるが、道具の反応特性、道具とスキーヤーのインターフェース、スキーヤーの運動のすべてを計測対象とすることは容易ではない。本研究では、スキーヤーの運動をモーションセンサにより、スキーの応答（たわみ）をひずみゲージ [11] により計測し、滑走中のそれぞれの振る舞いとそれらの間の関係について計測分析することを目的とした。

## 方法

### 1. 対象および滑走環境

SAJ（全日本スキー連盟）準指導員の資格を持つ男性1名を対象とし、最大斜度20度、平均斜度14度のコースを大回りターンでは左右2回ずつ、小回りターンでは左右7回ずつターンしてもらった。当日の気温は3~5℃でゲレンデの雪質は柔らかめであった。

### 2. 実験試技および計測

#### 2-1. モーションセンサによる計測

6軸モーションセンサ（スポーツセンシング社製、38 mm×53 mm×11 mm）2個を、それ

ぞれ右ブーツ内側（センサ1）と、右大腿外側（センサ2）に装着した（図1）。センサ1のx軸回りの角速度は股関節の内転・外転運動や身体の左右傾を反映した下腿部の角速度、y軸回りの角速度は股関節の内旋・外旋運動や身体長軸回りの回転を反映した下腿部の角速度、z軸回りの角速度は足関節の背屈・底屈（下腿部の前傾・後傾）を反映した角速度となる（図2a）。また、センサ2のx軸回りの角速度は股関節の内転・外転運動や身体の左右傾を反映した大腿部の角速度、y軸回りの角速度は股関節の内旋・外旋運動や身体長軸回りの回転を反映した大腿部の角速度、z軸回りの角速度は股関節の屈曲・伸展を反映した大腿部の角速度となる（図2b）。これらの角速度はサンプリング周波数1kHz、精度16 bitで一旦モーションセンサ内のメモリに格納し、実験後、パソコン内に取り込んだ。

#### 2-2. ひずみゲージによるスキー板のたわみ計測

三軸型ロゼットゲージ（KFG-1-120-D17-11、ゲージ長1 mm、共和電業）と単軸ひずみゲージ（KFG-1N-120-C1-11、ゲージ長1 mm、共和電業）を、スキー板表面の4カ所（右スキーの両エッジ側に2カ所ずつ）に接着剤で貼付した（図3b）。貼付したゲージチャンネルは計8チャンネルであった（図3a）。

8つのひずみゲージの信号はブリッジコネクタ（DB-120C-2、共和電業）を介して、ひずみアンプ（シグナルコンディショナ CDV-400B、アンプユニット CD-10B、共和電業、応答周波数 DC~2.5kHz）で増幅した。増幅した信号は精度16bit、サンプリング1kHzでAD変換しデータロガー（DSPワイヤレスアナログ電圧データロガー、スポーツセンシング社製）に取り込んだ。ブリッジコネクタはベルトに固定して腰に巻き、アンプとデータロガーをケー

スキー滑走時の下肢関節運動とスキー板ひずみの計測

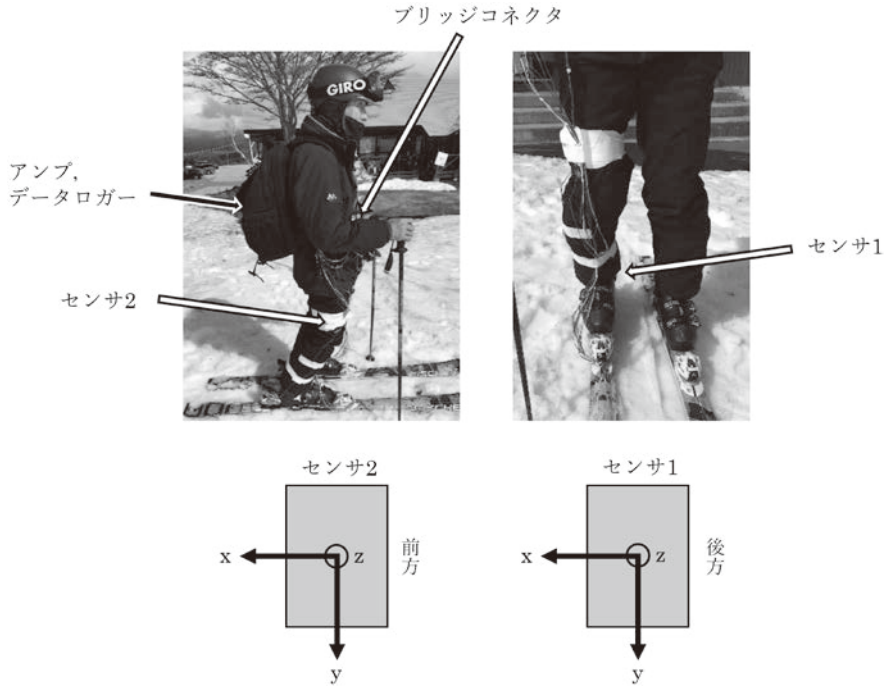


図1 モーションセンサの装着位置と軸の説明図。モーションセンサ1を右ブーツ内側に、モーションセンサ2を右大腿外側に装着した。

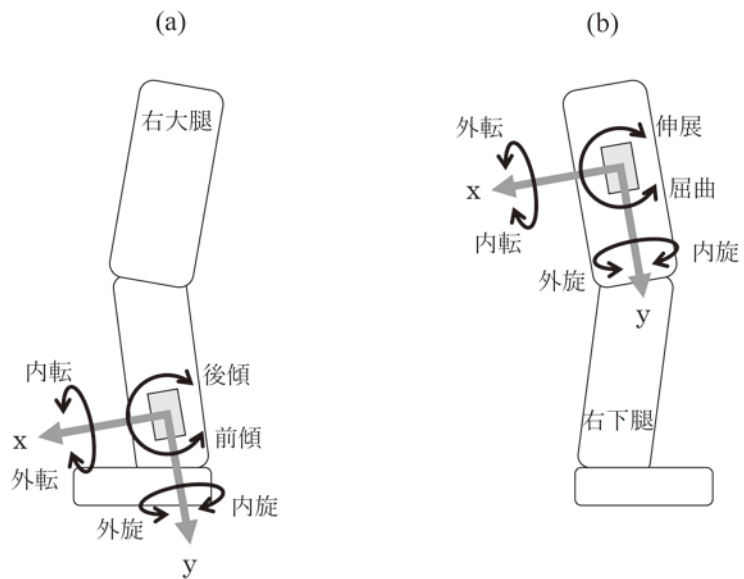


図2 (a) 右ブーツ内側部に装着したモーションセンサ1により計測される下腿部の運動と、(b) 右大腿外側部に装着したモーションセンサ2により計測される大腿部の運動。

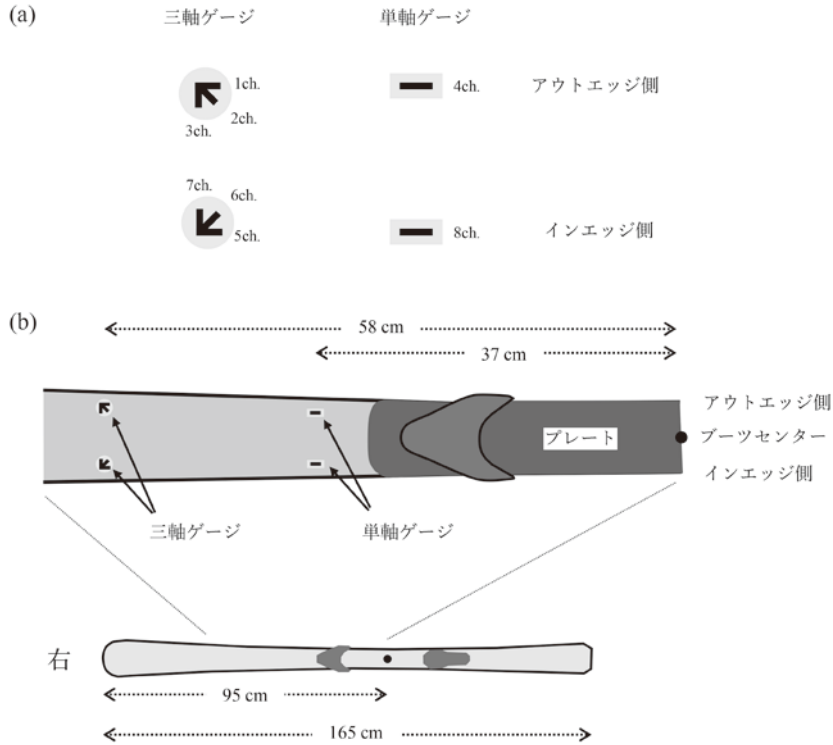


図3 (a) 貼付したひずみゲージとデータ取り込みチャンネル。(b) ひずみゲージの貼付位置。ブーツセンターから先端方向58 cmの位置に三軸ゲージ、37 cmの位置に単軸ゲージを貼付した。三軸ゲージはスキー板長軸方向と直交する方向および45度方向のひずみを、単軸ゲージはスキー板長軸方向のひずみを検出。

ブル接続しバックパックに入れ、背負った状態で滑った(図1)。

モーションセンサとデータロガーの制御はノートブックパソコンの制御ソフトを用いて無線通信で同期した状態で行った。ただし無線によるデータ取得をより確実なものにするため、験者がパソコンを持ち、対象の後方を滑りながらデータ収集した。

### 3. 信号処理, 分析

図4と図5に大回りターン滑走時と小回りターン滑走時のモーションセンサで計測した角速度とひずみゲージで計測したひずみデータの

パワースペクトルを示す。いずれもターン運動に応じた周波数成分を確認することができ、これらを元に、モーションセンサで計測したデータは高域遮断3Hz、ひずみゲージ計測したデータは高域遮断5Hzのローパスフィルタ(4次のバターワース型)をかけてノイズ成分を除去した。

その後、改めてパワースペクトルを求めて運動の周波数とひずみの周波数を確認し、さらに、角速度波形間、ひずみ波形間および角速度波形とひずみ波形間の相互相関関数を求めた。

スキー滑走時の下肢関節運動とスキー板ひずみの計測

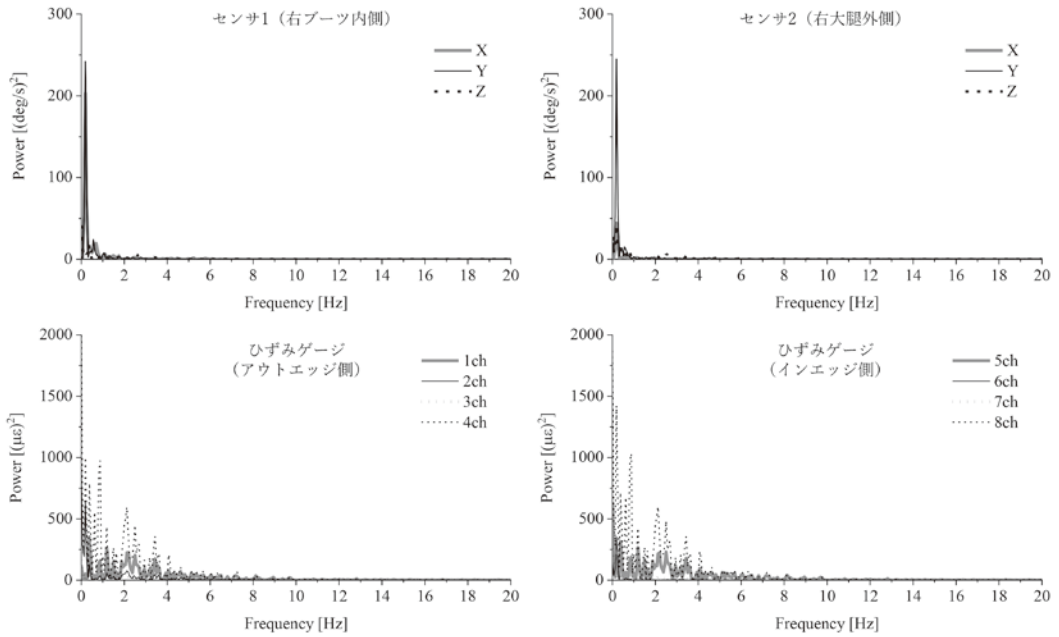


図4 大回りターン時にモーションセンサにより計測した角速度生波形とひずみゲージにより計測したひずみ生波形のパワースペクトル。

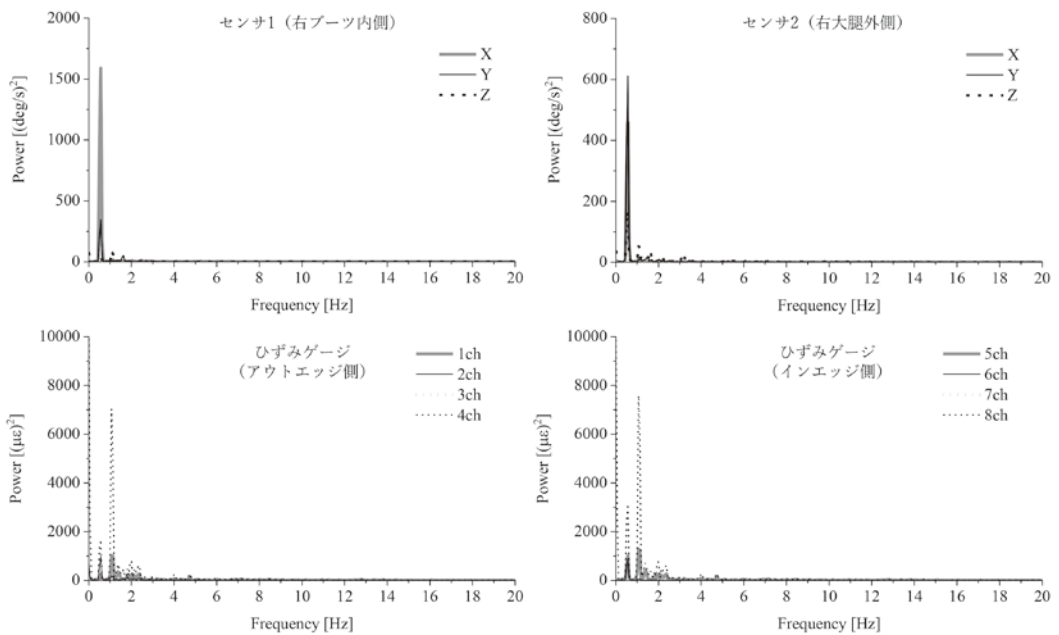


図5 小回りターン時にモーションセンサにより計測した角速度生波形とひずみゲージにより計測したひずみ生波形のパワースペクトル。

結果

1. ターン中の足関節と膝関節の運動

図6に大回りターン時（左右2回ずつ）に、

センサ1とセンサ2により計測した(a)下腿部と(b)大腿部の角速度を示す。左ターン時には下腿部、大腿部ともに外転・内旋運動の角速度、右ターン時には内転・外旋運動の角速度が認め

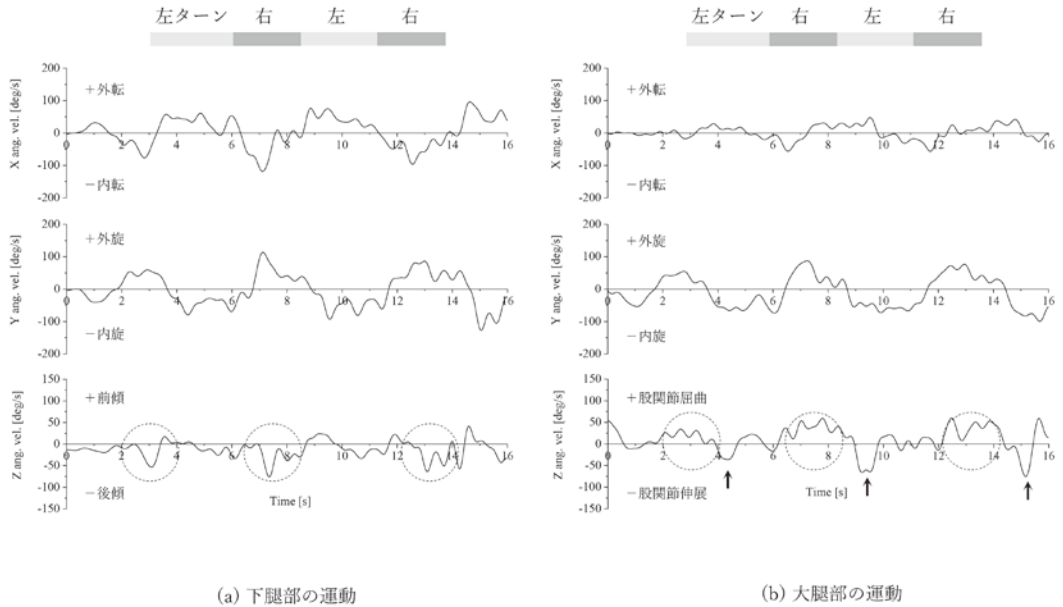


図6 大回りターン時の下腿部と大腿部の運動の角速度。上部にターン方向の目安を示す。

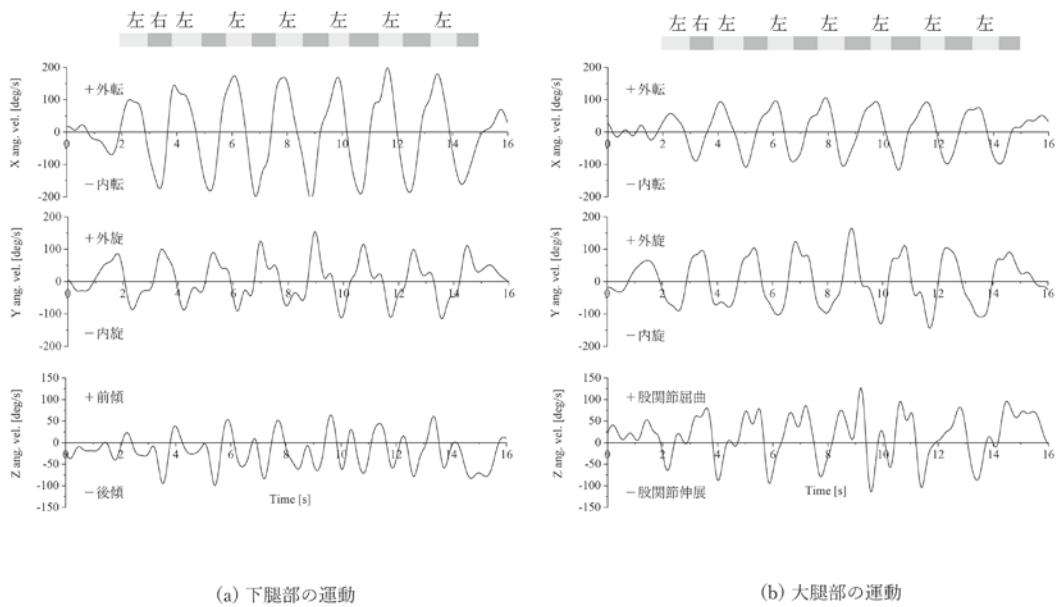


図7 小回りターン時の下腿部と大腿部の運動の角速度。上部にターン方向の目安を示す。

られた。ただし、内外転の角速度は振幅が大きくなる下腿部の方が大きい。また、右ターンの後半に下腿部の後傾動作（足首の緩み）が認められた（図6a下段破線丸）。それは、股関節屈曲（大腿部が寝る方向の動き）の角速度のタイミングで起こっており（図6b下段破線丸）、山足（内足、山スキー）が前に出ることによって考えられる。また、いわゆるストレッチング動作と認められる股関節伸展の角速度は左ターンのみで認められた（図6b下段↑で示す）。

小回りターンにおいても上記の傾向は同じであるが、大回りよりリズムクであり、スキーの振りが早くなる分、すべての角速度が大きくなった（図7）。

## 2. ターン中のスキー板のひずみ

図8、9に大回りターン時と小回りターン時のスキー板表面ひずみの波形を示す。ひずみの

特徴は大回りターン小回りターンで概ね共通しており、全体的特徴として、ひずみ変化は小回りターンの方が大きく、両ターンともに圧縮ひずみの方が多く見られたが、振動的にひずみが変化する中で引っ張りひずみも認められた。

1chと5ch、4chと8chはスキー板長軸方向のひずみをインエッジ側とアウトエッジ側で計測しているため、滑走時に違いはほとんど見られなかった。また、3chと7chはともにそれに直交する方向のひずみを計測しているため、同様に滑走時の違いはほとんど見られなかった。1chと4ch、あるいは5chと8chは、ブーツからの距離が異なるだけでスキー板長軸のひずみ波形であるため、ひずみの大きさはブーツに近い側（4ch、8ch）が大きいものの、ほぼ同位相の変化が認められた。

2chと6chは、上記と45度ずれた方向のひずみであり、かつ互いに90度ずれているため、

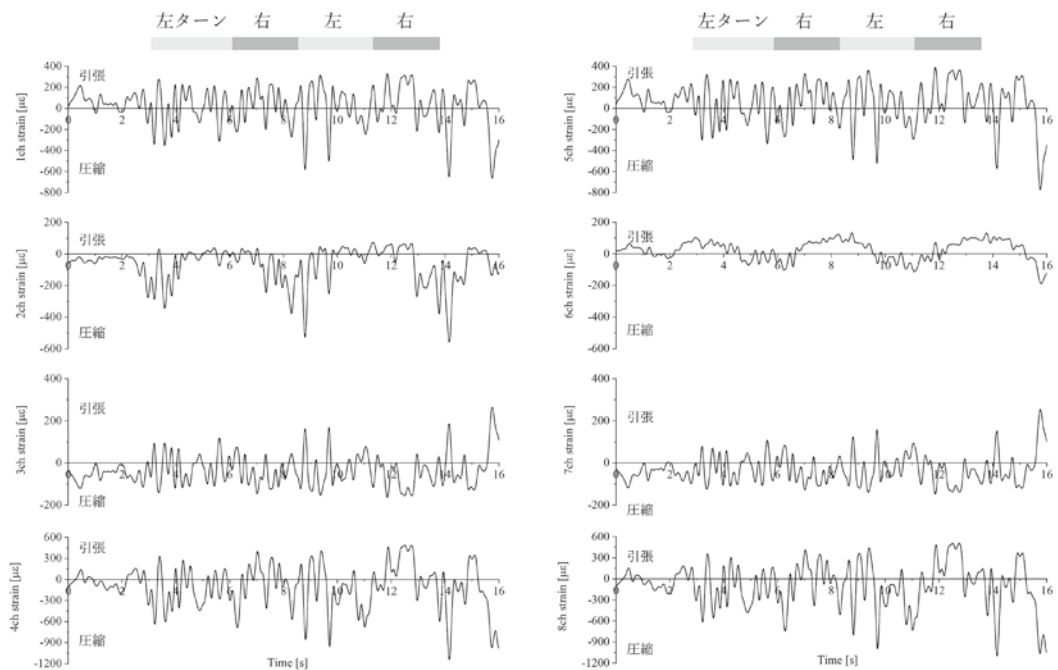


図8 大回りターン時のスキー板のひずみ。上部にターン方向の目安を示す。

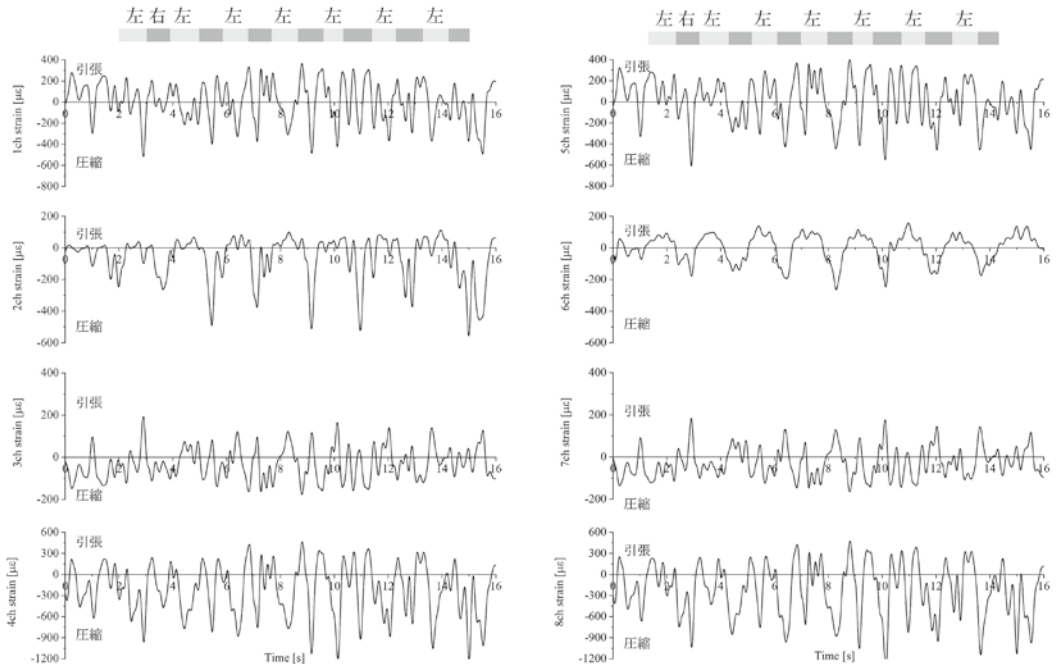


図9 小回りターン時のスキー板のひずみ。上部にターン方向の目安を示す。

この間でのみ滑走時のひずみに違いが認められた。大回りターンでは右ターン後半から左ターン前半の期間で両者の位相が逆転しており、左ターン後半から右ターン前半ではひずみ変化が少ない点で共通していた。小回りターンでも同様であるが6chの引っ張りひずみが大きく現れていた。

### 3. 角速度とひずみの周波数成分

図10, 11に角速度とひずみ波形のパワースペクトルを示す。大回りターンでは、下腿部も大腿部も0.19Hzが主成分となっていた。スキー板ひずみの方が広い帯域の周波数成分が認められたが、同様に0.19Hzのパワーが大きく、次いで0.88Hz, 0.38Hz, 0.63Hz, 2.12Hzで大きなパワーが認められた。下腿部と大腿部の動きの周波数とスキー板の周波数から、上下動等の動きがスキー板のたわみに影響していたと考え

られるが、それより高い周波数成分については現状不明である。小回りターンでは、下腿部、大腿部の動きは0.56Hzが主成分となっており、スキー板のひずみでは、同周波数成分も認められるが、その倍周波数の1.1Hzが主成分となっていた。

### 4. 角速度とひずみの相互相関関数、ひずみの自己相関関数

図12, 14に、大回りターン時と小回りターン時の角速度間あるいは角速度とひずみ間の相互相関関数について、特徴的なものを示す。また図13, 15には、大回りターン時と小回りターン時のひずみ間の相互相関関数とひずみの自己相関関数について、特徴的なものを示す。また、表1に大回りターン時の表2に小回りターン時の相互相関関数値絶対値の最大(相互相関係数)と時間差を示す。大回りターンは±4 sの時間



スキー滑走時の下肢関節運動とスキー板ひずみの計測

差、小回りターンは±2 sの時間差で示している。また自己相関関数は偶関数であるため、そ

れぞれ0.0~8.0 sと0.0~4.0 sの時間差で示している。

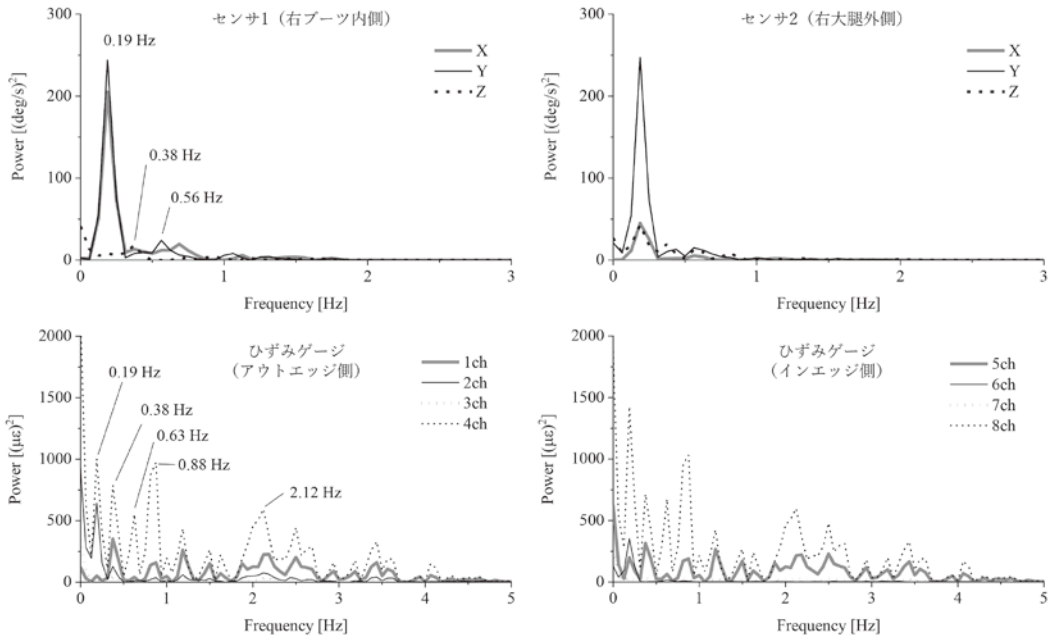


図10 大回りターン時の下腿部と大腿部の運動の角速度波形、およびスキー板ひずみ波形の周波数成分

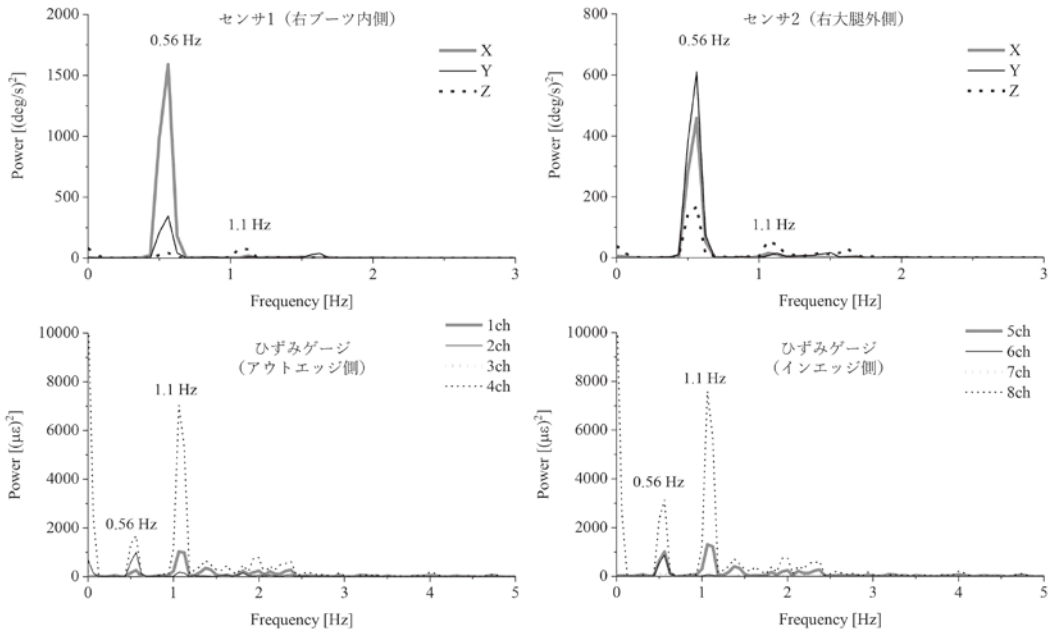


図11 小回りターン時の下腿部と大腿部の運動の角速度波形、およびスキー板ひずみ波形の周波数成分

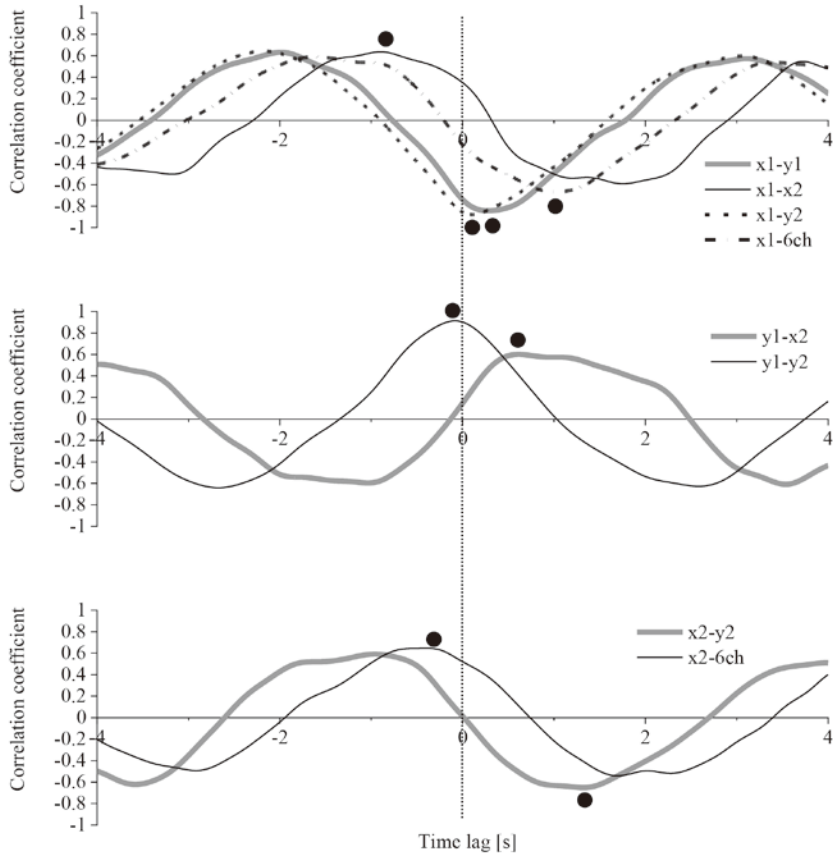


図12 大回りターン時の下腿部と大腿部の運動の角速度やスキー板ひずみ間の相互相関関数。●印は相関係数最大値（絶対値）の時間差を示す。

大回りターン（図12）では下腿部内外転角速度と下腿部・大腿部内外旋角速度が時間差0.1~0.3 sで位相は逆転しているが相関が高かった（ $x1-y1$ ,  $x1-y2$ ）。つまり、下腿部の内外転角速度が先行して、0.1~0.3 s遅れて下腿部・大腿部が内外旋角速度のピークを迎えていた。下腿部と大腿部の内外転角速度は同位相であるが大腿部が0.9 s程度先行していた（ $x1-x2$ ）。これは、クロスオーバー的な重心移動により身体の左右傾の影響であると考えられる。また、下腿部の内外転角速度はひずみ6chの圧縮ひずみに1.0 s程度先行していた（ $x1-6ch$ ）。

板への踏み込み前1 s程度、内外転運動が先行していたと考えられる。下腿部と大腿部の内外旋角速度はほぼ同期して（時間差0.08 s）かつ同位相であった（ $y1-y2$ ）。下腿部の内外旋角速度は大腿部の内外転角速度に0.6 s程度先行していた（ $y1-x2$ ）。大腿部の内外転角速度は大腿部の内外旋角速度と時間差1.32 sで位相が逆転していた（ $x2-y2$ ）。つまり、大腿部内外転運動に1.32 s遅れて大腿部内外旋運動がピークを迎えていた。また、大腿部の内外転角速度は6chのひずみに0.4 s遅れてピークを迎えていた（ $x2-6ch$ ）。

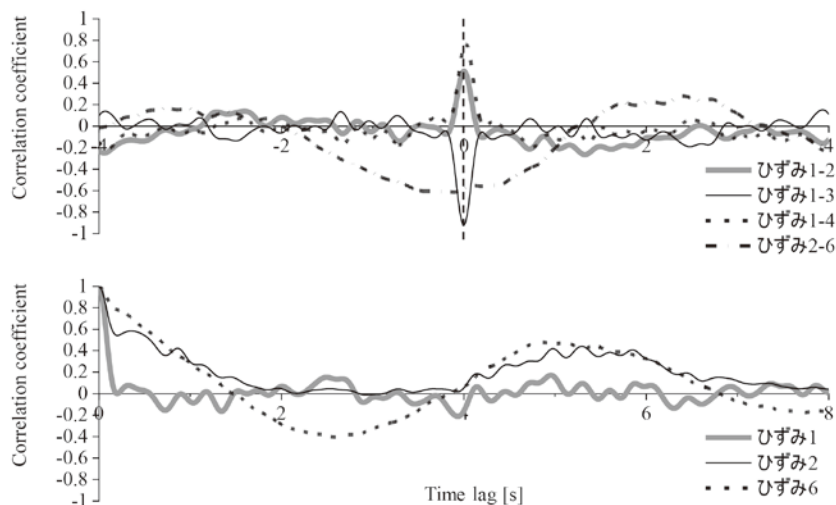


図13 大回りターン時のスキー板ひずみ間の相互相関関数（上）と自己相関関数（下）。

表1 大回りターン時のセンサ，ひずみゲージ間の相互相関係数最大値（絶対値）と時間差

	時間差 [s]	相関係数
x1-y1	0.277	-0.843
x1-x2	-0.898	0.637
x1-y2	0.103	-0.879
x1-ひずみ6	1.012	-0.666
y1-x2	0.613	0.602
y1-y2	-0.083	0.913
x2-y2	1.32	-0.651
x2-ひずみ6	-0.393	0.646
ひずみ1-2	0.001	0.512
ひずみ1-3	-0.001	-0.920
ひずみ1-4	0.019	0.768
ひずみ2-6	-0.106	-0.614

ひずみ間の相互相関関数は、1-2間と1-4間で同期した比較的高い相関が認められた（図13）。1-3間では同期しているが位相は逆転していた。これらは時間差が大きくなった場合の相関が低く、ある時点でのひずみの影響が長く

残らないことを示している。それに対し、2-6間のひずみは時間差0付近で位相が逆転しているのに加え、比較的長周期で振動的なのが特徴的であった。これは、自己相関関数（図13下のひずみ2と6）や図12の下腿部と大腿部の角

速度との相関が高いことからわかる。

小回りターン(図14)においても,角速度間,角速度ひずみ間の相関関係と時間差関係は大回りターンと同様な傾向で,相関係数は比較的高く,時間差は小さかった。

下腿部内外転角速度と下腿部・大腿部内外旋角速度が時間差0.05~0.2 sで位相は逆転しているが相関が高かった( $x1-y1$ ,  $x1-y2$ )。つまり,同様に下腿部の内外転角速度が先行して,0.05~0.2 s遅れて下腿部・大腿部が内外旋角速度のピークを迎えていた。下腿部と大腿部の内外

転角速度は同位相であるが大腿部が0.1 s程度先行していた( $x1-x2$ )。また,大回りターンと異なりひずみ6chが引っぱりひずみで下腿部の内外転角速度に0.56 s先行していた( $x1-6ch$ )。下腿部と大腿部の内外旋角速度( $y1-y2$ ),および下腿部の内外旋角速度と大腿部の内外転角速度( $y1-x2$ )の位相,時間差関係は大回りターンと概ね同様であった。下腿部の内外旋角速度は0.15 s程度,ひずみ6chの引張りひずみに先行していた。大腿部の内外転角速度と大腿部の内外旋角速度( $x2-y2$ )の関係,

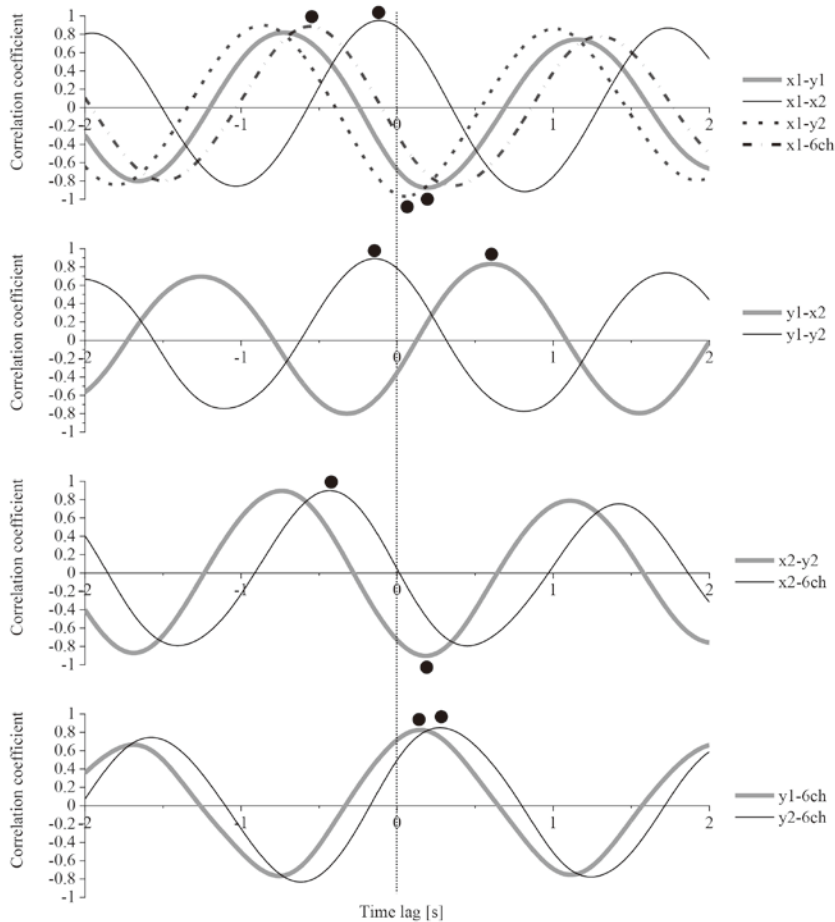


図14 小回りターン時の下腿部と大腿部の運動の角速度やスキー板ひずみ間の相互相関関数。●印は相関係数最大値(絶対値)の時間差を示す。

大腿部の内外転角速度とひずみ6ch (x2-6ch) との関係はx2-y2の時間差が小さいこと以外は概ね大回りターンと同様の傾向であった。下腿部の内外旋角速度とひずみ6ch (y1-6ch) の関係、大腿部の内外旋角速度とひずみ6ch (y2-

6ch) との関係は、時間差が0.15~0.3 sで、いずれも内外旋角速度が先行していた。

ひずみ間の相互相関関数、ひずみの自己相関関数の傾向は大回りターンと同様であった (図15)。

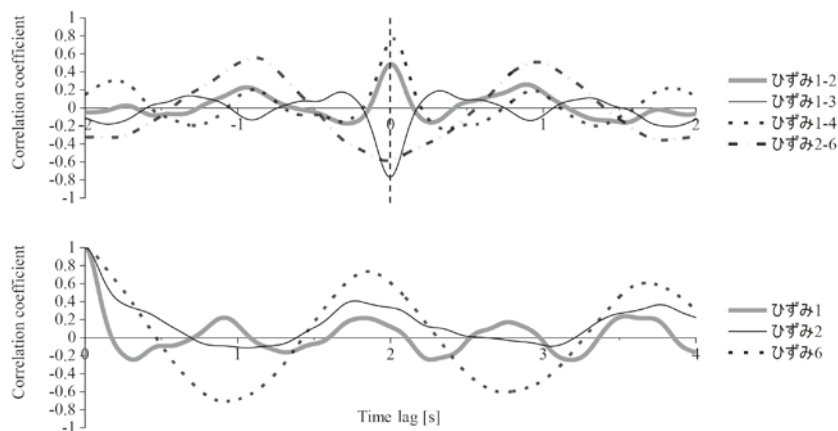


図15 小回りターン時のスキー板ひずみ間の相互相関関数 (上) と自己相関関数 (下)。

表2 小回りターン時のセンサ、ひずみゲージ間の相互相関係数最大値 (絶対値) と時間差

	時間差 [s]	相関係数
x1-y1	0.19	-0.874
x1-x2	-0.112	0.950
x1-y2	0.054	-0.968
x1-ひずみ6	-0.559	0.886
y1-x2	0.603	0.833
y1-y2	-0.144	0.890
y1-ひずみ6	0.148	0.826
x2-y2	0.182	-0.903
x2-ひずみ6	-0.433	0.898
y2-ひずみ6	0.274	0.850
ひずみ1-2	0.004	0.485
ひずみ1-3	-0.002	-0.769
ひずみ1-4	0.019	0.769
ひずみ2-6	-0.024	-0.588

## 考察

スキークのターン運動は周期運動であるため、ターン運動時の関節運動やスキー板のたわみ運動を、その周波数特性や相関の強さとその時間差の観点で分析しやすい。この視点は、個々のスキーヤーの、例えば、どの部位から運動を起こしてターンを開始しているか、またその時の部位間の位相差に現れる技術など、ターン運動時の技術論に介入できる手法となるかもしれない。スキー滑走時の下肢関節運動、足底あるいはブーツ下の圧力などについていくつか報告されているが [1-4, 6-9, 13, 14], 個々のターン技術に踏み込んだ計測・分析には発展していない。本研究において、個々のスキーヤーのターン運動時の技術論にも介入できる分析方法として今後のスキー分析の可能性を示すことができたといえる。

しかしながら、それでも今後の課題は多く、種々の問題が挙げられる。相関分析は2つの信号間の関係だけを個別に見ているため、3つ以上の運動間、あるいは複数の運動とひずみ間の関係を同時に分析する手法が求められる。今回は関節運動として下腿部と大腿部に焦点を当てたが、体幹の運動にも着目する必要があるかもしれない。また、今回は左右のターンをまとめて解析対象としたが、左右の脚はターン方向が変われば運動の役割が変わるため、分離して解析する方が望ましいといえる。そのためには、センサ計測と同期した動画撮影（ドローンによる上空からの撮影など）が必須になると思われる。その他、ひずみゲージの最適な貼付位置の検討、雪質との関係により変化するスキー板たわみ量の同定、ひずみとブーツ下圧力との関係、温度の影響、雪質の定量化など、検討材料は多い。

## 参考文献

- [1] Bon, I., Očić, M., Cigrovski, V., Rupčić, T., and Knjaz, D. (2021) What are kinematic and kinetic differences between short and parallel turn in alpine skiing?, *Int. J. Env. Res. Pub. Health*, 18, 3029.
- [2] 土岐 仁, 穂苺真樹, 小林義隆 (2005) スキー滑走フォームの運動解析と計測に関する研究, 日本機械学会 [No.05-15] Dynamics and Design Conference 2005 CD-ROM 論文集, 515.
- [3] Falda-Buscaiot, T., Hintzy, F., Rougier, P., Lacouture, P., Coulmy, N., (2017) Influence of slope steepness, foot position and turn phase on plantar pressure distribution during giant slalom alpine ski racing, *Plos One*, 12(5): e0176975.
- [4] 廣瀬 圭, 土岐 仁, 近藤亜希子 (2012) スキーヤーの関節角度・滑走速度計測によるスキー・ターンの運動解析に関する研究, *スポーツ産業学研究*, 22(1): 1-8.
- [5] 北沢俊二, 風間 武, 島田享久, 小林光征 (1999) スキー板のターンにおける振動特性の実験的評価法, *スポーツ産業学研究*, 9(2): 23-33.
- [6] 近藤亜希子, 土岐 仁, 廣瀬 圭 (2013) 実滑走におけるスキーヤーの3次元姿勢計測とターンの運動解析に関する研究, *スキー研究*, 10(1): 19-26.
- [7] 近藤亜希子, 土岐 仁, 廣瀬 圭, 永作 清 (2013) 実滑走計測によるスキーヤーの下肢筋張力推定と運動解析に関する研究, *スキー研究*, 10(1): 27-34.
- [8] 近藤亜希子, 土岐 仁, 廣瀬 圭 (2014) 実滑走計測によるカービングターン・スキップディングターンの運動力学解析に関する研究, *スキー研究*, 11(1): 3-12.
- [9] Matsumura, S., Ohta, K., Yamamoto, S., Koike, Y., and Kimura, T. (2020) Convenient method for detecting ski-turn features with inertial and plantar pressure sensors, *MDPI*

- Proceedings, 49(24).
- [10] 坂田敏行 (1993) スキー用具のダイナミックス, 精密工学会誌, 59(10): 17-21.
- [11] 佐藤裕久 (1986) ダイナミックセンサとしてのひずみゲージ-高速・柔構造型材料試験機への適用, 精密工学会誌, 52(4): 24-28.
- [12] 塩野谷明, 監物勇介, 西條暁里 (2013) スキー実滑走中の機会力学振動およびヒトEMG (Electromyography) の同時計測システムによるスキー板の振動とヒトEMGの相互相関分析の試み, スキー研究, 10(1): 1-11.
- [13] Supej, M., Ogrin, J., Šarabon, N., and Holmberg, H.-C. (2020) Asymmetries in the technique and ground reaction forces of elite alpine skiers influence their slalom performance, *Appl. Sci.*, 10, 7288.
- [14] 米山 猛, 香川博之, 立野大地, ネーサン・スコット, 長田和隆 (2007) スキーターン中のたわみと雪面接触圧力の測定, 日本機械学会 [No.07-24] シンポジウム講演論文集: 336-341.