

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ウインタースポーツの実環境におけるアスリートの心理生理状態及び技能の定量化に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	松村聖司
Author(English)	Seiji Matsumura
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12069号, 授与年月日:2021年9月24日, 学位の種別:課程博士, 審査員:吉村 奈津江,金子 寛彦,熊澤 逸夫,小尾 高史,小池 康晴
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12069号, Conferred date:2021/9/24, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学位論文（博士）

ウインタースポーツの実環境におけるアスリートの
心理生理状態及び技能の定量化に関する研究

東京工業大学大学院
総合理工学研究科 物理情報システム専攻

松村 聖司

2021年9月修了

目次

第1章 緒論	2
1. 研究背景 ～スキー・スノーボードに関する研究の現状と課題～	3
2. 研究目的	6
3. 本論文の構成	7
第2章 スノーボードのジャンプ競技における試技前の心理生理状態と競技パフォーマンスの関係	8
1. 緒言	9
2. 実験	14
3. 解析	21
4. 結果	28
5. 考察	38
6. 結言	44
第3章 簡便な計測系によるスキーターン技能の特徴抽出	45
1. 緒言	46
2. 実験	47
3. 解析	57
4. 結果	60
5. 考察	93
6. 結言	96
第4章 意義と課題	97
第5章 結論	99
研究実績	102
参考文献	104
謝辞	111

第 1 章

緒論

1. 研究背景 ～スキー・スノーボードに関する研究の現状と課題～

スキーやスノーボードは、足に滑走用具を装着し、雪上を颯爽と滑走、跳躍するウインタースポーツの代表的な種目である。スキーやスノーボードで雪上を自由自在に滑走するためには、技能の習得が必要不可欠である。また、キッカーと呼ばれるジャンプ台を跳躍する際などは、心理面がパフォーマンスに大きな影響を与えると経験的に考えられている。これら技能面や心理面で新たな知見を提供することは、スキーやスノーボードに競技者として臨んでいる人々だけでなく、レジャー白書 2017 (日本生産性本部, 2017)によると全国に 580 万人もいるとされるレジャーとしてウインタースポーツを嗜む人々にも有益である。

スキーやスノーボードに関する先行研究としては、心理や技能に関する報告をはじめ、身体的能力や怪我、用具といった多方面からの報告がある。身体的能力に関して、Andersen らは優秀なアルペンスキーヤーの筋力、持久力、柔軟性などの身体的能力を調査した (Andersen & Montgomery, 1988)。Weinstein らはスキーヤー、スノーボーダーの怪我の傾向を報告している (Weinstein et al., 2019)。Immler らは用具に関する研究として、スキーブーツの個々の屈曲剛性を測定するデバイスを開発した (Immler et al., 2019)。

技能面に関する報告では、滑走や跳躍動作が慣性センサやビデオカメラ、圧力センサ、力センサなど様々なデバイスを用いて計測、解析されている。Bessone らは、ウェアラブルな足底圧分布センサと慣性センサを用いて、スキージャンプ競技におけるランディング動作の地面反力とキネマティクス解析を行った (Bessone et al., 2019)。Yu らは、慣性センサを用いたアルペンスキーヤーのパフォーマンス解析手法を検討した (Yu et al., 2016)。伏見 らは、慣性センサを用いて、スノーボードのオーリー動作を解析した (伏見 et al., 2018)。近藤 らは、慣性センサと力センサを用いて、実滑走中の下肢筋張力推定、運動解析を行い、滑走中のスキーヤーの筋の働きとその特徴を評価した (近藤 et al., 2013)。Fasel らは、GPS と慣性センサを用いて、アルペンスキーヤーの三次元動作解析を行った (Fasel et al., 2016)。Yeadon は、カメラ撮影された滑走動作をデジタル化し、スキージャンプ中の身体動作を解析した (Yeadon, 1989)。廣瀬 らは、加速度及びジャイロ、地磁気センサを搭載した姿勢計測装置と GPS レシーバからなる軌跡計測装置を用いて、カービングターンとスキップターンにおける滑走軌跡、滑走速度の特徴や相違点について定量的に評価した (廣瀬 et al., 2011)。さらに計測したデータから技能評価を行った報告もある。村山 らは、表面筋電図と膝関節角度を計測し、スキーターン中の筋活動を抽出し、筋活動の特徴を指標として運動技能を客観的に評価した (村山 et al., 2011)。木本 らは大回転競技における技術評価を目的として、加速度計を用いて、スキー板の鉛直方向及びスキー板の長軸に直交する方向の加速度情報から、スキー板の振動ならびにスキー板の横ずれを定量

的に導出した (木本 et al., 2018). 中川らは, 拡張現実技術を用いて第三者視点でのリアルタイム視覚フィードバックシステムの有効性を検討した (中川 et al., 2018). このように技能を定量的に捉え, それをフィードバックしようとする試みはある. フィードバックについて, スキーやスノーボードの指導の現場では, 前傾後傾といった身体の姿勢変化や, つま先荷重, 外足荷重といった板への荷重傾向など, 姿勢と荷重の観点から滑走動作の特徴を捉えて議論されることが多い. そのため, これらアスリートにとって馴染みのある動作の特徴を定量的に捉えた方が現場のアスリートにとっては有益であると考えられる. また, 現場のアスリートが簡便に使える計測系であることも重要と考えられるが, これらの観点を満たした技能評価法は十分に確立されていない.

一方, 技能面ほど多くはないがスキーやスノーボードを対象とした心理面に関する報告もある. 心理的な変化は自律神経活動に影響を与え, この自律神経活動の変化は心拍変動などの生理状態変化として捉えることができる (Kreibig, 2010). そのため, 木本らはアルペンスキー競技中の選手の心電図計測から, 心理面の指標とされる自律神経活動の推定や心拍数から選手の心理生理状態を評価した (木本 et al., 2018). また, スポーツにおける心理面の研究では, 心理生理状態の時系列的な変化や技術レベルによる差を調査した報告がある. 心理的な変化を定量的に捉える方法として, 質問紙による感情の評価や心電図や精神性発汗, コルチゾールなどの生理状態を計測する方法がある. Mateo らは質問紙と心電図計測から, 自転車競技の一種である BMX 選手の試技前の不安 (Anxiety) 傾向調査と心拍変動解析を実施し, 大会時は練習時より不安傾向が増し, 交感神経活動が優位な傾向になることを報告した (Mateo et al., 2012). Fernandez-Fernandez らは, 女性テニス選手のコルチゾールを大会当日の朝, 試合前, 試合後, 夜と経時的に計測し, 試合後が最も高いことを示した (Fernandez-Fernandez et al., 2015). Carrillo らは, アーチェリーにおいて, 上級者と初級者の試射直前の心電図から心拍変動解析を実施し, 上級者は副交感神経活動が優位になっている傾向を示した (Carrillo et al., 2011). Radzi らは, 個人スポーツとチームスポーツにおける競技前の不安傾向と生理状態を, 競技の 1 週間前, 1 日前, 1 時間前に計測し, スポーツ間で不安傾向に差はみられず, チームスポーツにおいてのみ心拍数が競技 1 日前より 1 時間前で高くなることを報告した (Radzi et al., 2013). さらにこれら生理状態とパフォーマンスの関係を調査した報告もある. Ortega らは, 技能レベルの異なる射撃選手の競技前の心拍数と競技スコアを計測し, 上級者は初級者よりも心拍数が低く, 競技スコアも良いと報告した (Ortega & Wang, 2018). Rodríguez-Zamora らは, 優秀なアーティスティックスキミングの選手は, 競技直前の心拍数と競技スコアに負の相関があることを発見した (Rodríguez-Zamora et al., 2012). スポーツ以外では, Clemente-Suárez らは軍事分野において, 空挺パラシュート隊員は, パラシュート降下後に交感神経が

賦活化し、下肢などの筋力が増大することを発見した (Clemente-Suárez et al., 2017). また, van Fenema らは音楽分野において, バイオリストは安静時よりステージ上では交感神経活動が優位になっていると報告した (van Fenema et al., 2017). スキーやスノーボードの選手にとっても, 目前の競技会で如何に高いパフォーマンスを発揮するかは重要な課題である. しかし, スキーやスノーボードに関して, この競技前の心理生理状態がパフォーマンスにどのような影響を与えるかについては殆どわかっていない. これを解明することは, 例えばメンタルコンディショニングと呼ばれているような競技前に自身の状態を整える方法論に客観的な知見を付与することに繋がると期待される.

本研究では, 上述の技能面, 心理面それぞれの課題を解決することを通じて, これら両面からスキーヤー・スノーボーダーの能力向上に寄与することを目標とした.

2. 研究目的

前節の通り、ウインタースポーツの代表的な種目であるスキー・スノーボードに着目し、これらに臨むアスリートの心理的及び技能的側面を定量化し、これら両面から効果的なトレーニング法を提案することを最終的な目標としている。この目標を達成するためには、現象の定量化と介入法の確立と2つの大きなステップがあると考えられる。本研究では心理、技能の両面において、現象を定量化することを目的とし、介入法の確立は今後の課題とした。

心理面については、ウインタースポーツの実戦環境において、心理生理状態の変化が競技パフォーマンスにどのように影響を与えるのかは十分に解明されていない。そのため、第2章では、実戦環境における選手のこれらの関係を調べることを目的とした。本研究では、心理的な影響が大きいと考えられるスノーボードのジャンプ競技を対象とした。なお、本章で検討した内容の新規性は、「スノーボードのジャンプ競技において、優秀なアスリートの実戦環境における試技前の交感神経の賦活化と競技パフォーマンスに正の相関が示唆されること」を発見したことである。

また、技能面については、スキーやスノーボードのトレーニングの現場において、現状ではコーチの目視による指導やビデオ撮影によるフィードバックが主流であることから、アスリート自身が現場で簡便に使い尚且つ定量的かつ直感的に技能面を評価できるトレーニング法の確立が期待されている。スキーやスノーボードにおいては、姿勢や滑走用具への荷重方法が重要であるとされており、これらも考慮したトレーニング法の開発を想定し、第3章では、アスリートが現場で簡便に使える計測系で、姿勢と荷重の観点から熟練者の技能の特徴を定量的に抽出する方法を確立することを目的とした。本研究では、両種目において重要なターン動作に着目し、種目はスキーを対象とした。本章で検討した内容の新規性は、「スキーターンの技能評価において、簡便な計測系で姿勢と荷重の観点から熟練者のターン動作の特徴を抽出したこと」である。

3. 本論文の構成

第1章は緒論であり、本研究の背景及び先行研究を紹介した後、本研究の目的について記述した。

第2章では、スポーツにおける心理的な側面に着目し、実戦環境におけるスノーボーダーの試技前の心理生理状態と競技パフォーマンスの関係を検証した。そのために、スノーボードのジャンプ競技に参戦中のアスリートの試技（ジャンプ）前の心電図と手のひらの皮膚電気活動を生理状態として計測した。そして、公開練習や予選、決勝といった競技シチュエーションの違いによる生理状態の変化、及びこれら生理状態と競技パフォーマンスの関係を調査した結果について述べる。

第3章では、スポーツにおける技能に関する側面に着目した。スキーターンを対象とし、スキーヤー自身が簡便に現場で利用可能な技能評価法のための基礎的検討を行った。ウェアラブルな小型の慣性センサと足底圧分布センサを用いた簡便な計測系で熟練者と中級者のターン動作の違いを定量的に評価することができる特徴量の抽出法を提案する。

第4章では、本研究全体を通しての意義及び今後の課題を述べる。

第5章は結論であり、本研究を総括する。

また本研究は、日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所（NTT CS 研）との共同研究として実施された。

第2章

スノーボードのジャンプ競技における試技前の 心理生理状態と競技パフォーマンスの関係

1. 緒言

スノーボードはメジャーなウィンタースポーツの1つである。スノーボードの中で、特にフリースタイル種目は、雪山の斜面を滑走しながら、ジャンプして技を披露したり、様々な障害物を攻略したりと魅力的な種目である (International Ski Federation, 2017)。我々はこの魅力的なフリースタイル種目に臨むアスリートのパフォーマンスを向上させることに関心がある。先行研究において、生理学的特性、身体的特性、動作解析などの観点から、スノーボーダーのパフォーマンス向上を目的とした報告はいくつかある。スノーボーダーの身体的、生理学的特性については、競技パフォーマンスとの関係性が調べられてきた。スノーボードの平行、クロス、ビッグエア、ハーフパイプ競技者の aerobic capacity, balance など8項目を調査し、これらの指標が競技パフォーマンスの61~98%を説明したとの報告がある (Platzer et al., 2009)。アスリートのウォーミングアップを観察し、試技前の生理学的影響を調査した報告もある (Sporer et al., 2012)。ハーフパイプ中の選手の心拍数を計測した報告もある (Kipp, 1998)。さらに、Strength Asymmetry, Muscular Strength and Power, Aerobic Fitness, Anthropometric Characteristics を調査した報告 (Vernillo et al., 2018)、優秀なスノーボーダー (アルペン、クロス、フリースタイル) の前足と後足の非対称性を評価した報告 (Vernillo et al., 2016)、ハーフパイプ選手の大腿骨筋は一般人より短いとする報告などがある (Sun et al., 2018)。また、怪我の多い競技であり、怪我予防の観点から、スノーボードで発生する怪我の傾向を調査した報告もある (Owens et al., 2018; Sachtleben, 2011; Weinstein et al., 2019)。怪我予防の観点から動作解析した報告もあり、テーブルトップ着地時の地面反力やキネティックスを計測した報告 (Mcalpine et al., 2012) やインソール型の圧力計と慣性センサを装着して雪上で滑走中の動作を計測した報告などがある (Krüger & Edelmann-Nusser, 2009)。さらに、スノーボードのフリースタイル種目は、大きな身体的リスクを伴うことからエクストリームスポーツにも分類されている (Donnelly, 2006)。エクストリームスポーツでは心理的な状態が大きく変化することが知られている。BMX 競技では、競技前に不安傾向が増大するとの報告がある (Mateo et al., 2012)。スカイダイビングでは、ジャンプ前に心拍数が上昇することが報告されている (Allison et al., 2012)。そのため、このフリースタイル種目で良いパフォーマンスを発揮するためには、優れた身体能力や技能を有するだけでなく、競技前の心理的な状態が重要であると考えられている。このような心理的な変化は、自律神経活動に影響を与えることが知られており、この自律神経活動の変化は、心電図などの生理状態変化から推定することができる (Jacobs et al., 1994; Malik, 1996)。しかし、スノーボードのフリースタイル種目において、競技前の心理生理状態とパフォーマンスの関係はよくわかっていない。

スポーツの実戦環境において、心理生理状態とパフォーマンスの関係性を調べた報告

はいくつかある。射撃競技では、競技前の心拍数は上級者の方が初心者より低い状態で、上級者の方が良いパフォーマンスを発揮することが知られている (Ortega & Wang, 2018)。アーチェリーでも同様に、競技中の心拍数は上級者の方が初心者より低く、パフォーマンスも上級者の方がよかった (Carrillo et al., 2011)。アーティスティックスイミングでは、競技直前の心拍数とパフォーマンスに負の相関があった (Rodríguez-Zamora et al., 2012)。一方、スポーツではないが実環境という枠組みにおいて、軍事関係のパラシュートジャンプではジャンプ前から心拍数が上がり、ジャンプ後に跳躍力などが増加した (Clemente-Suárez et al., 2017)。さらに、アーチェリーを対象とした報告では、練習、公開練習、予選、決勝と異なる競技シチュエーションにおける試技前、途中、試技後の心拍数を計測し、競技シチュエーションが厳しくなる決勝に進むにつれ、心拍数が上昇した (Robazza et al., 1999)。柔道においては、非公式戦より公式戦の前で心拍数が上昇するという報告もある (Morales et al., 2013)。また試技前のタイミングとして、前述した射撃の報告では競技約 15 分前を対象としているが、アーティスティックスイミングの報告では競技直前 1 分間を対象としている (Ortega & Wang, 2018; Rodríguez-Zamora et al., 2012)。このように実環境における生理状態と身体運動を伴うパフォーマンスの関係を調べた報告はあるが、その内容は一貫しておらず、スノーボードのフリースタイル種目に先行研究の内容を適用することは難しい。そのため、このスノーボード競技において、試技前の生理状態と競技パフォーマンスにはどのような関係性があるのかを調べる必要がある。また、スノーボード競技においても、練習や予選、決勝という異なるシチュエーションが存在することから、競技シチュエーションの違いがどのように影響するのかなどについても調べる必要がある。

従って本研究の目的は、スノーボードのフリースタイル種目であるジャンプ競技に参戦中の優秀なスノーボーダーの試技前の心理生理状態と競技パフォーマンスの関係を調べることである。ジャンプ競技は、キッカーと呼ばれるジャンプ台を跳躍するワンメイク競技であり、規模が大きくなるとビッグエアと呼称されることもある。このジャンプ競技の一般的な形式として、公開練習、予選、決勝と異なるシチュエーションがある。またその競技形式から、試技数十分前から安静状態を確保することができる。そのため、競技シチュエーションの違いによる生理状態への影響を調査することができる。先行研究の主張に一貫性が見られないことから、競技シチュエーションが厳しくなるほど、優秀なアスリートは副交感神経活動が増加するような生理状態になる可能性も考えられるが、エクストリームスポーツである側面を考えると、その逆に交感神経活動が増加するような生理状態になる可能性も考えられる。

1.1. 自律神経系とスポーツ

神経系は、中枢神経系と末梢神経系に大別される。中枢神経系が脳と脊髄から構成されるのに対して、末梢神経系は中枢神経系以外の全ての神経系が該当する。末梢神経系はさらに、体性神経系と自律神経系に分類される。体性神経系は主に外部感覚を受け、骨格筋を制御している。一方、本研究で対象としている自律神経系は、心臓や内臓などの器官を無意識下で自律的に制御している。自律神経系は、交感神経系と副交感神経系から構成されている。自律神経系はこれら2つの神経系の活動バランスで、身体器官の活動を調節している。そして、この自律神経活動の変化は、心拍数や皮膚電気活動の変化などの体表の生理状態変化から推定することができる (Kreibig, 2010; Palomba et al., 2000; Schachter & Singer, 1962; Schmitt et al., 2006; 堀 et al., 2017)。交感神経系は興奮や外部からのプレッシャー、ストレスを受けることで賦活化し、心拍数が増加し、血管収縮、瞳孔散大、手のひらの精神性発汗などの生理反応が起きる。一方、副交感神経系はリラックスなどで賦活化し、心拍数の減少や瞳孔縮小、唾液の分泌促進などの生理反応が起きる。

優秀なアスリートは、優れた身体能力と適切な心理状態で勝負に臨み、競技会で高いパフォーマンスを発揮している (Artioli et al., 2009; Mangine et al., 1990)。この心理状態は自律神経活動と密接に関連している。先行研究において、大会のようなプレッシャーの大きい状況では、下位の選手は不安が増加する傾向にあり、自律神経活動を安定させることができないが、優秀なアスリートは安定させることができるという報告がある。例えば、ゴルフに関する研究では、選手の不安が小さい時、スコアが改善された (Weinberg & Genuchi, 1980)。柔道に関する研究では、国際大会に出場できるレベルの選手は、公式戦と非公式戦で自律神経活動が同じような状態であったが、国内大会レベルの選手はそうではなかったと報告されている (Morales et al., 2013)。これらの研究では、不安の高まりは交感神経の賦活化と関係があり、競技パフォーマンスには負の影響があると考えられている。一方、交感神経の賦活化は、体性感覚にポジティブな影響があり、身体運動の適切な制御に寄与している可能性がある。交感神経の賦活化は、身体運動のコーディネーションと重要な関係がある自己固有感覚 (Proprioception) にポジティブな効果があるという報告もある (Horslen & Carpenter, 2011; Matre & Knardahl, 2003)。

本実験では、スポーツ競技会に参戦中のアスリートの心理的变化と関連のある自律神経活動を推定するため、生理状態を計測することを目的としている。この競技会という実戦の場を尊重した上で計測を実施するため、心拍数と手のひらの精神性発汗を計測対象とした。

1.2. スノーボードのジャンプ競技

スノーボードには、アルペン、クロス、フリースタイルといった競技カテゴリがある。本研究で対象としているジャンプ競技は、フリースタイルに属している。このジャンプ競技は種目名として、キッカーと呼ばれるジャンプ台を用いて、一発のジャンプ中での技の出来栄を競うことからワンメイク、ジャンプ台の規模が大きくなるとビッグエアと呼ばれる。フリースタイル種目にはこの他に、ハーフパイプやスロープスタイルといった種目がある。ハーフパイプやスロープスタイルは、1度の試技の間に複数回のジャンプやジブと呼ばれる障害物を攻略する種目である。一方、ジャンプ競技は、1度の試技に対して1回のジャンプで競技成績がつけられる。そのため、本研究の目的である試技前の生理状態と競技パフォーマンスとの対応を付けやすく、本研究ではこのジャンプ競技を研究の対象とした。

ジャンプ競技では、選手は図 2-1 のようなコースで試技を実施する。スタートするとまずアプローチ斜面で助走し、跳躍に必要な速度を得る。その後、トランジションと呼ばれる比較的平坦な区間を経て、ジャンプ台を駆け上がり、リップと呼ばれるジャンプ台先端で跳躍し、空中に飛び出る。空中では放物軌道を描きながら、回転や板を掴むなどの技を披露した後、ランディングエリアに着地し、試技を終了する。

競技方式としては、予選や決勝などのセッションで決められた本数を試技し、順位を競う方式や、決められた時間内で、選手は好きなだけ試技を行い、その中で点数の高かった試技で順位を競うジャムセッションと呼ばれる方式などがある。本研究では、前者のセッションを設けて順位を競う方式を採用した。また、競技成績は後述の通り、ジャッジによる採点によって評価された。

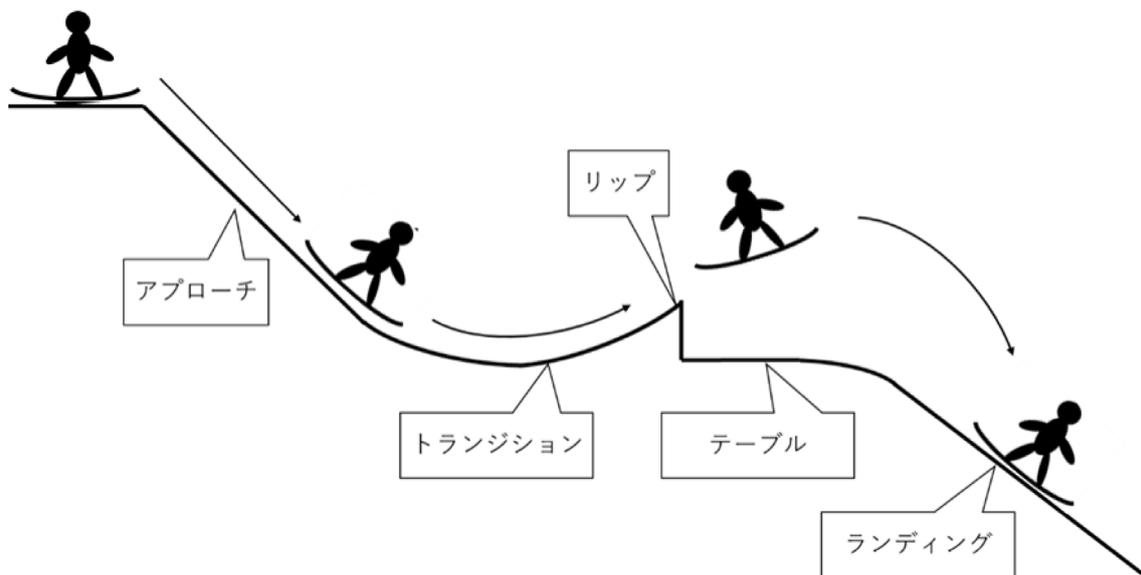


図 2-1. ジャンプ競技のコースレイアウト。アプローチ斜面で加速し、トランジションを経てジャンプ台を駆け上がり、リップと呼ばれるジャンプ台先端で踏み切り、跳躍する。空中では放物軌道を描きながら、回転や板を掴むなどの技を披露する。その後、ランディングエリアに着地し、試技終了となる。

2. 実験

2.1. 実験参加者

実験参加者は、大会に参加した44名のスノーボーダー（男性35名，女性9名，平均年齢 23 ± 9 歳）であった。大会には44名が参加したが，本実験では公開練習から決勝まで全セッションのデータが揃っている決勝進出者20名（男性19名，女性1名，平均年齢 22 ± 8 歳）を解析対象とした。この20名の内12名は，スノーボード関連企業などとスポンサー契約を結び，プロとして活動している選手であった。プロ選手らのキャリアは平均で 3.3 ± 1.2 年であった。実験参加者には，本研究の目的が記された書類が配布された。彼らは書面によるインフォームドコンセントを提出し，ペナルティなしにいつでも実験を辞める権利を有していた。本実験で実施されるすべての手続きは，ヘルシンキ宣言を順守し，NTTコミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会から承認を受けた。本実験に関するNTTコミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会のプロトコル番号は，H30-002である。

2.2. 実験手順

実験環境であるスノーボードのジャンプ大会は、テーブル長 5m のジャンプ台（キッカー）を使い、室内スキー場（スノーヴァ新横浜，日本）で開催された。室温は -1.5 ± 1.5 °Cであった。全ての計測は、同日の 14:00～21:00 に実施された。

本大会は、一般的なスノーボードの大会を模擬し、公開練習、予選、決勝の 3 つのセッションで構成された。全選手はまず、公開練習と予選でそれぞれ 2 回ずつ試技（ジャンプ）を実施した。その後、予選の結果、上位 20 名が決勝に進出した。本研究では、この決勝進出者を解析対象とした。本研究では、選手が実際の試合のように本気で勝負に臨んでいる環境での生理状態変化を計測できるように、大会の優勝賞金として 600,000 円が設定された。

この実験兼大会は図 2-2 のようなスケジュールで実施された。出場選手は、11:00 から 14:00 の間に大会会場に会場に到着し、実験の説明を受けて生理計測に同意した後、大会への参加登録を済ませた。参加登録後、選手はウェアラブル心電計を装着し、ウォーミングアップに臨んだ。ウォーミングアップでは選手はジャンプ台を飛ぶことはできず、ストレッチや斜面を滑走することは許された。公開練習は 14:00 から 16:30 まで実施され、全選手はそれぞれ 2 回ジャンプした。公開練習中、1 名の選手が怪我のためにリタイアした。予選は 16:30 から 19:00 の時間帯で実施され、選手はさらに 2 回ずつジャンプした。予選終了後、予選結果は 19:00 から 19:30 の間に集計され、決勝進出者が発表された。予選の成績はベストスコア方式が採用され、予選 2 本のジャンプの内、得点が高い方で順位付けされた。予選結果集計中は、選手は休息やウォーミングアップをしていた。決勝は 19:30 から 21:00 に実施され、決勝進出者はさらに 2 回ジャンプを実施した。最終成績もベストスコア方式が採用され、決勝の試技 2 本の内、点数の高い方で順位付けされた。

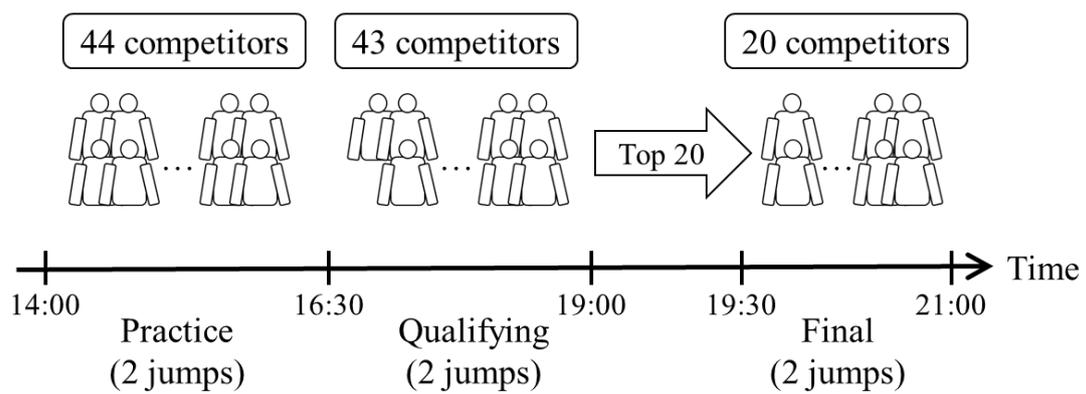


図 2-2. 大会のスケジュール. 選手は 14:00~16:30 に公開練習, 16:30~19:00 に予選に臨んだ. その後 19:00~19:30 に予選結果が集計され, 予選の上位 20 名が 19:30~21:00 に決勝に臨んだ.

2.3. 生理計測

生理状態として、心電図 (Electrocardiogram: ECG) 及び左手指先の皮膚電気活動 (Electrodermal activity: EDA) が大会中に計測された。これらの生理指標は大会会場の図 2-3 で示す場所で、各試技のスタート 10 分前に 2 分 20 秒間、1 分前に 40 秒間計測された。10 分前計測では、選手はスノーボードを未装着かつ座位安静の状態で見守られた。計測終了後、選手はスタート台に移動し、スノーボードを装着し待機した。スタート 1 分前になると、スノーボードを装着した立位安静状態で 40 秒間計測された。そして計測後、直ちに試技を開始した。各生理計測において、選手はできるだけリラックスして臨むよう指示された。大会中、選手は飲酒と喫煙が禁止された。それ以外の飲食は、試技 10 分前計測のさらに 10 分前からその試技が終了するまでは制限されたが、その他の時間帯では自由に摂取できた。

ECG 計測のために、全実験参加者はウェアラブルな心電計 hitoe[®] (東レ株式会社, 日本) を装着した。ECG のデータは、hitoe[®] トランスミッター (株式会社 NTT ドコモ, 日本) によって取得された。ECG 計測におけるサンプリング周波数は 200 Hz であった。ECG のデータは、hitoe[®] トランスミッターから実験参加者が携帯するスマートフォンに無線 (Bluetooth) で転送・保存された。

EDA は、左手の人差し指と中指間のコンダクタンスが計測された。電極には、Ag-AgCl 電極が使用された。計測されたアナログデータは、BIOPAC[®] MP160 (BIOPAC[®] Systems, Inc., USA) を使って、サンプリング周波数 1,000 Hz でデジタルデータに変換された。

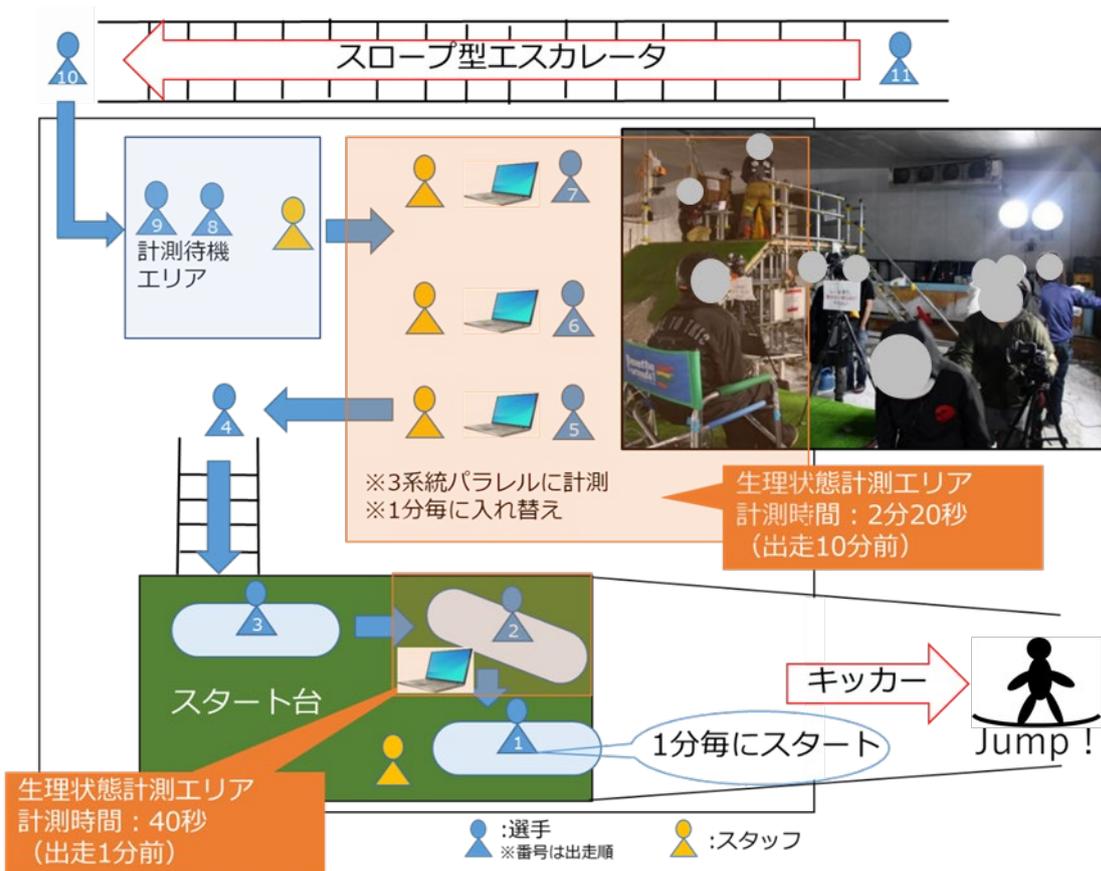


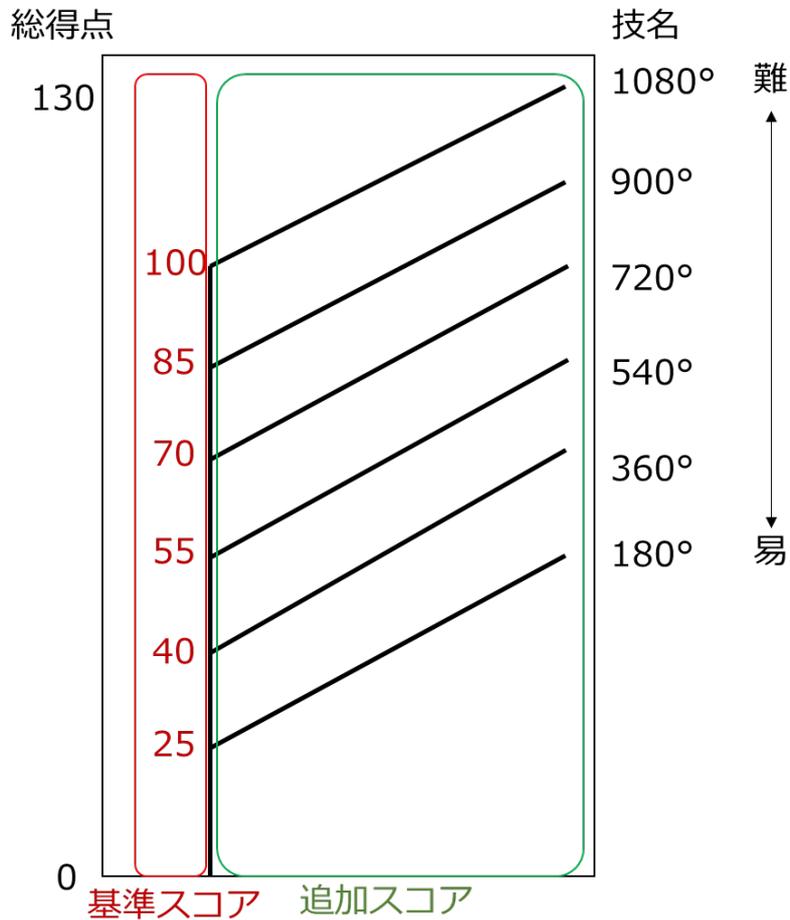
図 2-3. スタートエリア周辺の概略図. 選手はまず, スタート台の下で試技 10 分前に座位安静で 2 分 20 秒間の 1 回目の生理計測に参加した. その後スタート台に移動し, スノーボードを装着した後, 試技 1 分前に立位安静で 40 秒間の 2 回目の生理計測に参加した. そして 2 回目の計測後, 直ちに試技を開始した.

2.4. パフォーマンス評価

競技成績は、3人のジャッジが採点したスコアによって評価された。ジャッジは、ジャッジ経験のあるプロのスノーボーダーが担当した。採点は一般的な大会に倣い、難易度、高さ、完成度、スタイル、着地の観点から評価された (International Ski Federation, 2017)。スコアの構成を図 2-4 に示す。採点は、2つの手順で実施された。まずジャッジは、着地が成功したか否かを判定した。もし選手が転倒などで着地に失敗した場合は、スコアは 0 点となる。着地が成功だった試技の場合は、その他の観点を評価する工程に進み、各観点を付けられた点の合計点はその試技のスコアとなった。難易度は、試技の基礎となるスコアであり、技の回転数などに応じて、予め設定されていた。高さ、完成度、スタイルは追加得点であり、高さはジャッジが主観的に評価したジャンプの高さ、完成度は技の出来栄、スタイルは試技の斬新さを基準に評価された。このような採点方式のため、試技のスコアは難易度点と大まかに相関する設計となっていた。この採点手順で3人のジャッジがそれぞれ独立して採点し、それらを合計した総合得点で順位付けが実施された。

$$\text{スコア} = \boxed{\text{難易度}} + \boxed{\text{完成度} + \text{高さ} + \text{スタイル}}$$

基準スコア (Max100) 追加スコア (10+10+10)



※転倒は難易度問わず0点。

図 2-4. スコアの構成. 技の難易度によって決まる基準スコアと異なる 3つの観点から評価された追加スコアから構成される.

3. 解析

3.1. 解析対象

全セッション（公開練習，予選，決勝）間での生理状態変化を検証するため，決勝進出者 20 名を解析対象とした．まず決勝進出者全体を解析対象とし全体的な傾向を調査した．その後，決勝進出者 20 名を競技成績を基準に，1 位から 10 位までの上位群と 11 位から 20 位までの下位群に分け，上位選手にみられる傾向を調査した．解析対象 20 名分のデータの内，7 名分のデータは計測中の不慮の中断による欠損や多量の発汗に伴うノイズ過多などの理由により，解析対象から除外された．最終的には図 2-5 のように，上位群は 7 名，下位群は 6 名が解析対象となった．また，上位群と下位群はそれぞれ独立して解析された．

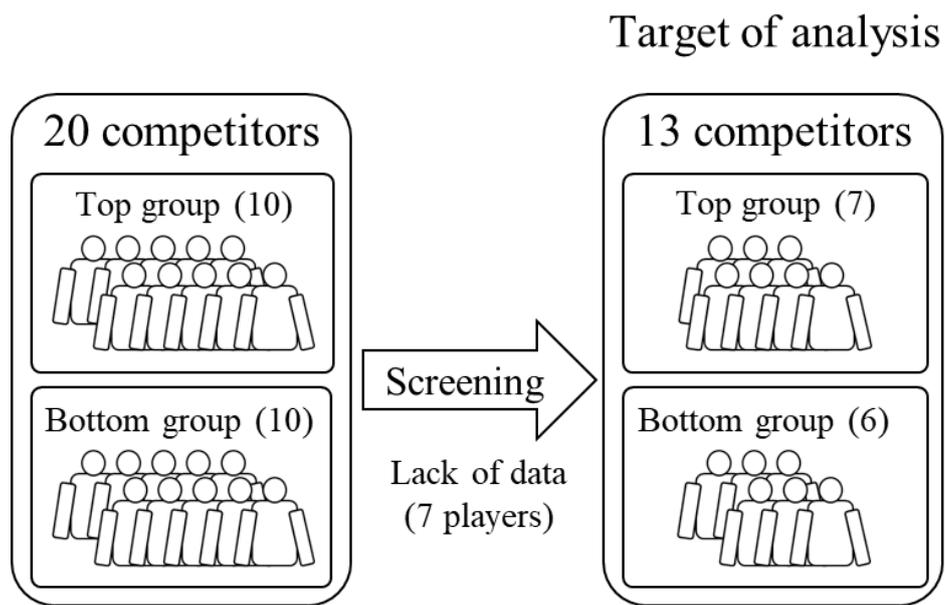


図 2-5. 解析対象者. 決勝進出者 20 名を解析対象とした. さらに, 競技成績を基準に上位 10 名と下位 10 名の 2 群に分けた. この内, 上位 3 名と下位 4 名分のデータは, 計測中の不慮の中断や多量の発汗に伴うノイズ過多などの理由で解析対象から除外された. 最終的には, 上位 7 名と下位 6 名の 13 名分のデータが解析対象となった.

3.2. ECG 解析

ECG 計測から R-R インターバルを取得した。ECG データから R-R インターバルを計算するため、R 波のピークを検出した。身体動揺などによるアーティファクトに関連し、不適切に R 波として検出された波形は視覚的にスクリーニングし排除した。心拍 (Heart rate: HR) 解析では、R-R インターバルを秒のオーダーで求め、60 秒をこの R-R インターバルで除算することによって算出された値が、心拍数 (Beat per minute: BPM) として表現された。さらに計測期間における心拍数の平均値を、平均心拍数 (mean HR) と定義した。平均心拍数は、交感神活動が優位か、副交感神経活動が優位かといった自律神経活動の相対的な状態を推定する指標とされている。

その後、離散値である R-R インターバルデータは、3 次のスプライン補間によって 10 Hz でリサンプリングされた。リサンプリングされた R-R インターバルのデータを用いて、自律神経活動の大きさを推定するために、心拍変動解析 (Heart rate variability: HRV) を実施した (Malik, 1996)。リサンプリングされた R-R インターバルデータに、離散フーリエ変換 (discrete Fourier transformation: DFT) を適用した。DFT 適用前に、線形成分が除去され、ハニングウインドが適用された。DFT の結果、0.15~0.4 Hz 帯域のパワースペクトルの積分値を高周波 (High frequency: HF) 成分とした。HF 成分の大きさは、この積分値を自然対数で表現した値 (lnHF) で評価された。この HRV の lnHF は、副交感神経活動の指標とされている。ECG 解析手順を図 2-6 に示す。

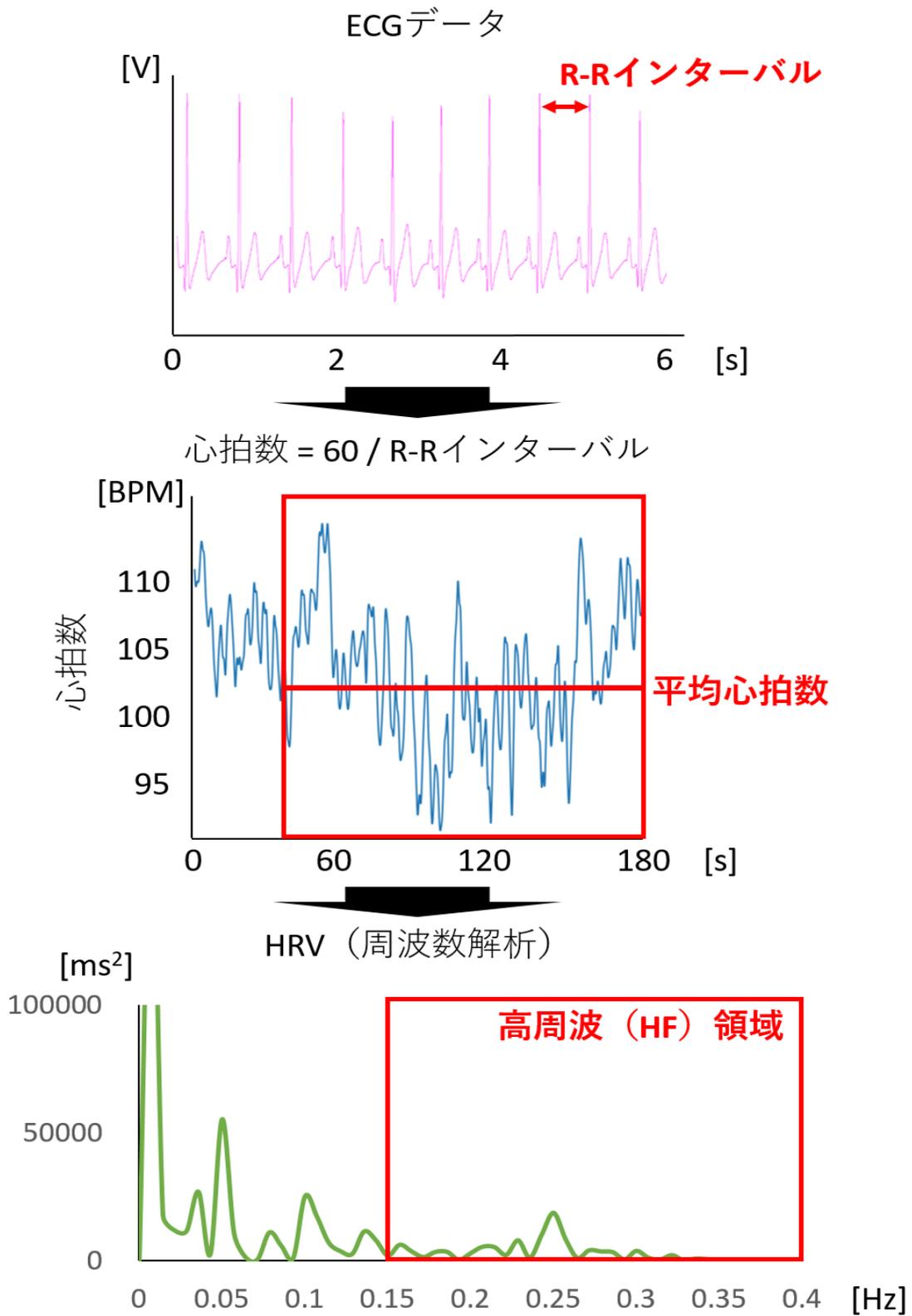


図 2-6. ECG 解析手順.

3.3. EDA 解析

EDA 信号からは、皮膚コンダクタンスレベル (Skin conductance level: SCL) が取得された。EDA 信号はまず、ハムノイズや身体動揺によるアーティファクトを除去するために、3 Hz のローパスフィルタを適用した。SCL は、このフィルタ処理後の EDA 信号に対して、計測期間で平均した値として算出された (図 2-7)。汗腺は交感神経系によって支配されており、EDA 信号は汗腺の活動を反映している。それゆえ、SCL は交感神経活動の指標とされている (Jacobs et al., 1994; Sequeira et al., 2009; Wallin, 1981)。

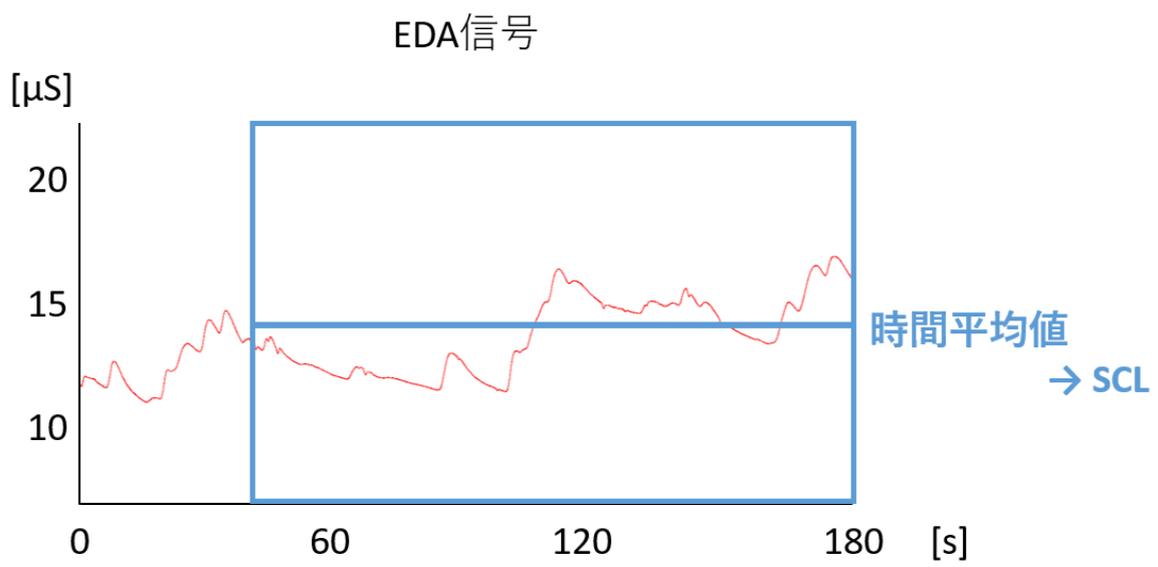


図 2-7. SCL 算出の概略図. SCL は EDA 信号を計測期間で平均した値.

3.4. 統計解析

平均心拍数と HRV の lnHF, SCL は全てのセッションで、全選手から取得された。

まず、大会中の決勝進出者全体での生理状態変化を調査した。生理状態を変化させる要因として、セッション（公開練習、予選、決勝）、計測タイミング（試技 10 分前、試技 1 分前）を設定し、2 元配置反復測定分散分析（Two-way repeated measures ANOVA, ANOVA: analysis of variance）を行った。また下位検定では、Holm 法によって有意水準を補正した多重比較を実施した。

さらに、生理指標と競技スコアの相関を試技 10 分前と 1 分前それぞれで統計的に検証した。選手間で生理指標と競技スコアを比較できるようにするために、まずは選手個人内で規格化を行った。生理指標は、選手個人内の全セッションでの平均値で規格化した。ジャッジが採点した競技スコアは、選手個人内において、各試技でのスコアと全試技からの平均スコアとの差分を規格化スコアとした。規格化した生理指標とスコアの相関を統計的に検証するために、Pearson の相関の方法を利用した。

次に決勝進出者を上位群、下位群に群分けし、それぞれの試技 10 分前の生理指標の変化を調べた。群分けした理由として、本計測に協力してくれた選手達は熟練者であり技能の差は小さいと考えられ、このような選手達における成績の差は心理的な側面による影響が大きいと考えたためである。この群分けでは、セッション（公開練習、予選、決勝）による効果を検証するために、1 元配置反復測定分散分析（One-way repeated measures ANOVA）を行った。また下位検定では、Holm 法によって有意水準を補正した多重比較を実施した。

各群について、規格化した生理指標とスコアの相関を統計的に検証するために、Pearson の相関の方法を利用した。自律神経活動の相対的な状態を推定する指標であることから、平均心拍数を生理指標の代表値として使用した。

さらに総得点ではなく、難易度、高さ、完成度、スタイルといったスコアの各要素点と生理指標との関係を検証するために、これらスコアの要素点を独立変数、生理指標を従属変数として重回帰分析を実施した。重回帰分析をするにあたり、それぞれの変数は、z スコアによって規格化された。また重回帰分析の前処理として、独立変数間の相関関係を確認し、相関がある場合はどちらか一方の変数を代表値として利用することとした。

統計解析ソフトウェアは JASP (ver. 0.14.1) を使用した。また統計的仮説検定では、 p 値が 0.05 未満を統計的に有意とみなした。

4. 結果

4.1. 決勝進出者全体における解析結果

決勝進出者全体で、それぞれのセッション、計測タイミングにおける選手の生理状態を検証した後、各生理指標と競技スコアの相関を検証した。

4.1.1. セッション、計測タイミングにおける生理状態変化

図 2-8 にそれぞれのセッション、計測タイミングにおける生理状態を示した。図の上段 A は平均心拍数を、図の中段 B は HRV の lnHF を、図の下段 C は SCL の結果である。

平均心拍数に関して、2 元配置反復測定分散分析の結果、セッションで主効果がみられた ($F_{(2, 24)} = 6.781, p = 0.005, \text{partial } \eta^2 = 0.361$)。下位検定の結果、予選と決勝における平均心拍数は公開練習時と比較し有意に増加した (公開練習-予選: Cohen's $d = -0.968, p = 0.006$; 公開練習-決勝: Cohen's $d = -0.767, p = 0.021$)。また、計測タイミングでも主効果がみられ ($F_{(1, 12)} = 136.627, p < 0.001, \text{partial } \eta^2 = 0.919$)、試技 1 分前における平均心拍数は試技 10 分前の平均心拍数と比較し有意に増加した

(Cohen's $d = -3.242, p < 0.001$)。さらに、セッションと計測タイミングの間には表 2-1 の通り、有意な交互作用がみられた ($F_{(2, 24)} = 5.279, p = 0.013, \text{partial } \eta^2 = 0.305$)。

HRV の lnHF に関して、2 元配置反復測定分散分析の結果、セッションで主効果がみられた ($F_{(2, 24)} = 4.856, p = 0.017, \text{partial } \eta^2 = 0.288$)。また、下位検定の結果、予選と決勝における HRV の lnHF は公開練習時と比較し有意に減少した (公開練習-予選: Cohen's $d = 0.776, p = 0.030$; 公開練習-決勝: Cohen's $d = 0.718, p = 0.032$)。また、計測タイミングでも主効果がみられ ($F_{(1, 12)} = 36.661, p < 0.001, \text{partial } \eta^2 = 0.753$)、試技 1 分前における HRV の lnHF は試技 10 分前の HRV の lnHF と比較し有意に減少した (Cohen's $d = 1.679, p < 0.001$)。一方、セッションと計測タイミングの間には有意な交互作用があるとはいえなかった ($F_{(2, 24)} = 1.614, p = 0.220, \text{partial } \eta^2 = 0.119$)。

SCL に関して、2 元配置反復測定分散分析の結果、セッションで主効果がみられた ($F_{(2, 24)} = 3.850, p = 0.035, \text{partial } \eta^2 = 0.243$)。また、下位検定の結果、予選と決勝における SCL は公開練習時と比較し増加傾向を示した (公開練習-予選: Cohen's $d = -0.678, p = 0.067$; 公開練習-決勝: Cohen's $d = -0.654, p = 0.067$)。一方、計測タイミングで有意な主効果はみられなかった ($F_{(1, 12)} = 2.331, p = 0.153, \text{partial } \eta^2 = 0.163$)。また、セッションと計測タイミングの間には有意な交互作用があるとはいえなかった ($F_{(2, 24)} = 1.102, p = 0.348, \text{partial } \eta^2 = 0.084$)。

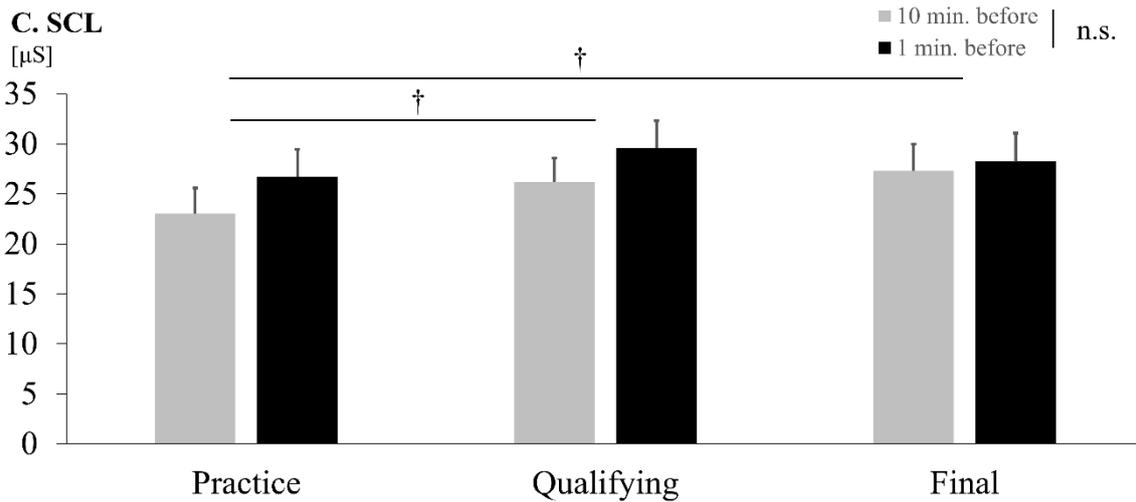
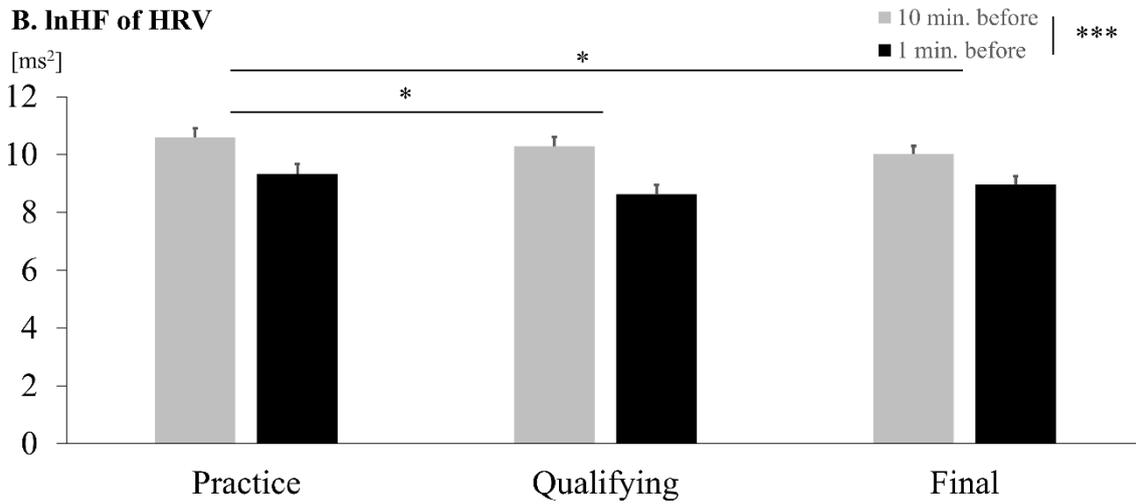
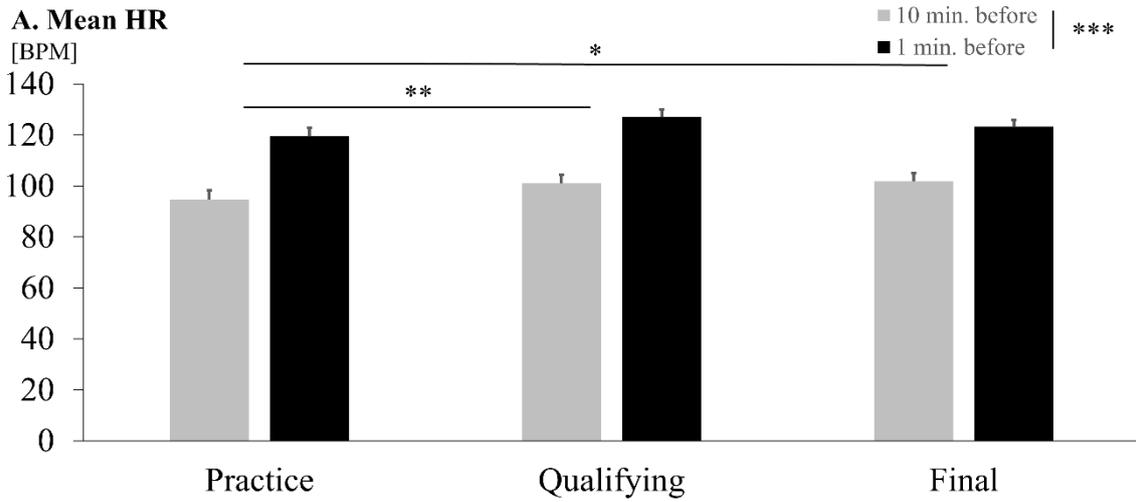


図 2-8. セッション (Practice: 公開練習, Qualifying: 予選, Final: 決勝), 計測タイミング (10 min. before: 試技 10 分前, 1 min. before: 試技 1 分前) それぞれにおける実験参加者全体で平均化された生理指標。エラーバーは標準誤差を示す。† $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

表 2-1. 平均心拍数のセッション, 計測タイミングにおける交互作用. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

		Mean Difference	SE	t	p_{holm}
公開練習 10 分前	予選 10 分前	-6.338	2.128	-2.979	0.022 *
	決勝 10 分前	-7.289	2.128	-3.425	0.009 **
	公開練習 1 分前	-24.881	2.241	-11.102	< 0.001 ***
	予選 1 分前	-32.397	2.895	-11.191	< 0.001 ***
	決勝 1 分前	-28.579	2.895	-9.872	< 0.001 ***
予選 10 分前	決勝 10 分前	-0.95	2.128	-0.446	0.658
	公開練習 1 分前	-18.542	2.895	-6.405	< 0.001 ***
	予選 1 分前	-26.059	2.241	-11.628	< 0.001 ***
	決勝 1 分前	-22.24	2.895	-7.682	< 0.001 ***
決勝 10 分前	公開練習 1 分前	-17.592	2.895	-6.077	< 0.001 ***
	予選 1 分前	-25.109	2.895	-8.673	< 0.001 ***
	決勝 1 分前	-21.29	2.241	-9.5	< 0.001 ***
公開練習 1 分前	予選 1 分前	-7.517	2.128	-3.533	0.008 **
	決勝 1 分前	-3.698	2.128	-1.738	0.247
予選 1 分前	決勝 1 分前	3.819	2.128	1.795	0.247

Note. p -value adjusted for comparing a family of 15

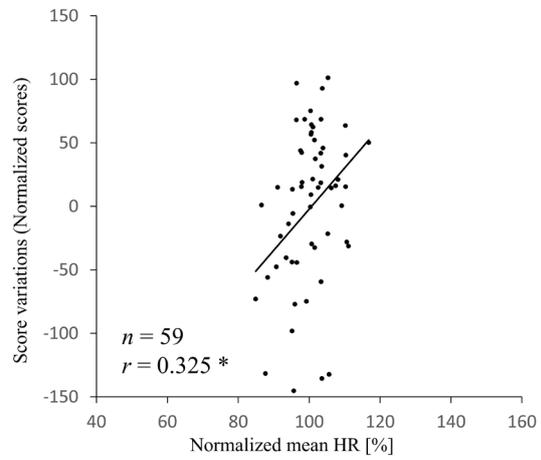
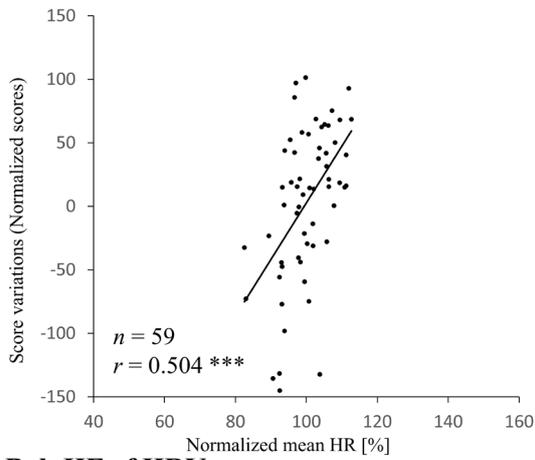
4.1.2. 生理状態と競技パフォーマンスの関係

選手個人内で規格化した各生理指標とスコアの関係を図 2-9 に示す。規格化平均心拍数は、試技 10 分前、1 分前いずれにおいても規格化スコアと有意に正の相関を示した（試技 10 分前: $n = 59$, $r = 0.504$, $p < 0.001$; 試技 1 分前: $n = 59$, $r = 0.325$, $p = 0.012$ ）。規格化 HRV の lnHF は、試技 10 分前、1 分前いずれにおいても規格化スコアと有意に負の相関を示した（試技 10 分前: $n = 59$, $r = -0.433$, $p < 0.001$; 試技 1 分前: $n = 59$, $r = -0.372$, $p = 0.004$ ）。規格化 SCL は、試技 10 分前において規格化スコアと有意に相関しているとはいえなかったが、試技 1 分前においては規格化スコアと有意に正の相関を示した（試技 10 分前: $n = 59$, $r = 0.117$, $p = 0.378$; 試技 1 分前: $n = 60$, $r = 0.280$, $p = 0.030$ ）。

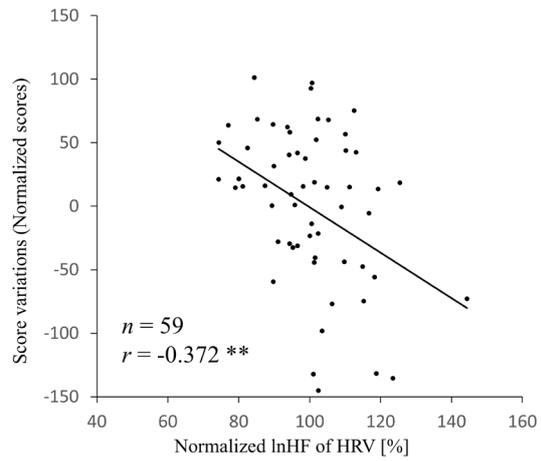
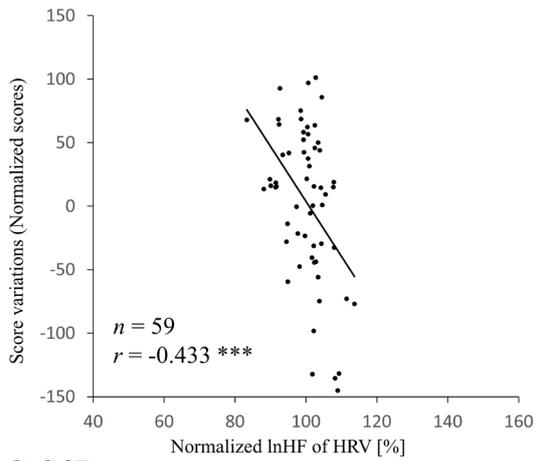
10 min. before the jump

1 min. before the jump

A. Mean HR



B. lnHF of HRV



C. SCL

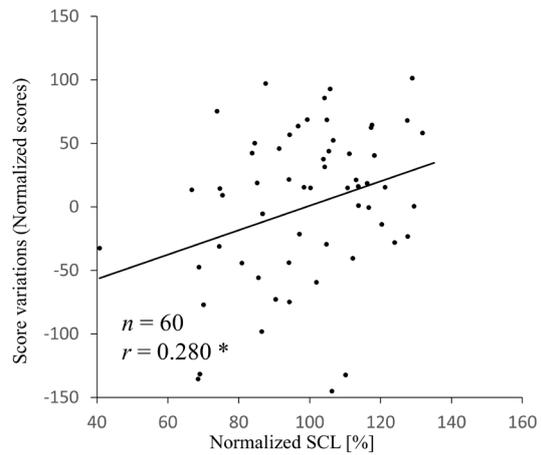
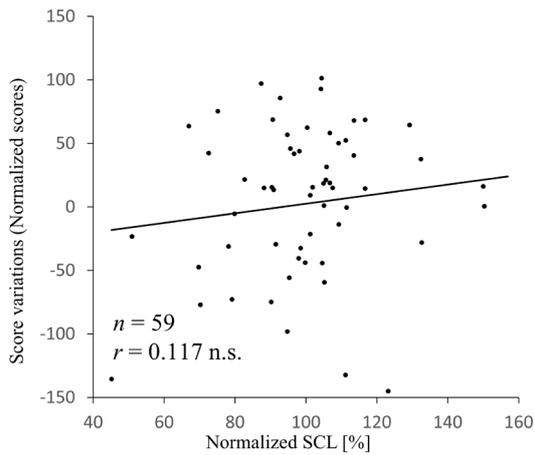


図 2-9. 試技 10 分前 (左図) と 1 分前 (右図), それぞれにおける規格化生理指標と規格化スコアの相関. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

4.2. 上位群, 下位群における解析結果

決勝進出者を上位群, 下位群に群分けし, それぞれの試技 10 分前の生理状態を検証した。その後, 規格化した生理指標と規格化スコアの相関を統計的に検証した。さらに, 総得点ではなく, 難易度, 高さ, 完成度, スタイルといったスコアの各要素点と生理指標との関係を検証するために, これらスコアの要素点を独立変数, 生理指標を従属変数として重回帰分析を実施した。

4.2.1. セッションにおける生理状態変化

図 2-10 に各セッションにおける生理状態を示した。図の左側は上位群の生理状態, 右側は下位群の生理状態である。図の上段 A は平均心拍数, 図の中段 B は HRV の lnHF, 図の下段 C は SCL の結果である。

平均心拍数に関して, 上位群は 1 元配置反復測定分散分析の結果, セッションで主効果がみられた ($F_{(2,12)} = 10.337, p = 0.002, \text{partial } \eta^2 = 0.633$)。また, 下位群の結果, 予選と決勝における平均心拍数は公開練習時と比較し有意に増加した (公開練習-予選: Cohen's $d = -1.037, p = 0.036$; 公開練習-決勝: Cohen's $d = -1.705, p = 0.002$)。一方, 下位群は 1 元配置反復測定分散分析の結果, セッションで有意な差があるとはいえなかった ($F_{(2,10)} = 1.907, p = 0.199, \text{partial } \eta^2 = 0.276$)。

HRV の lnHF に関して, 上位群は 1 元配置反復測定分散分析の結果, セッションで主効果がみられた ($F_{(2,12)} = 8.983, p = 0.004, \text{partial } \eta^2 = 0.600$)。また, 下位群の結果, 決勝における値は公開練習もしくは予選における値と比較し有意に減少した (公開練習-決勝: Cohen's $d = 1.562, p = 0.004$; 予選-決勝: Cohen's $d = 1.089, p = 0.028$)。一方, 下位群は 1 元配置反復測定分散分析の結果, セッション間で有意な差があるとはいえなかった ($F_{(2,10)} = 0.968, p = 0.413, \text{partial } \eta^2 = 0.162$)。

SCL に関して, 上位群は 1 元配置反復測定分散分析の結果, セッションで主効果がみられた ($F_{(2,12)} = 5.464, p = 0.021, \text{partial } \eta^2 = 0.477$)。また, 下位群の結果, 決勝における値は公開練習における値と比較し有意に増加した (Cohen's $d = -1.225, p = 0.021$)。一方, 下位群は 1 元配置反復測定分散分析の結果, セッションで有意な差があるとはいえなかった ($F_{(2,10)} = 3.019, p = 0.094, \text{partial } \eta^2 = 0.377$)。

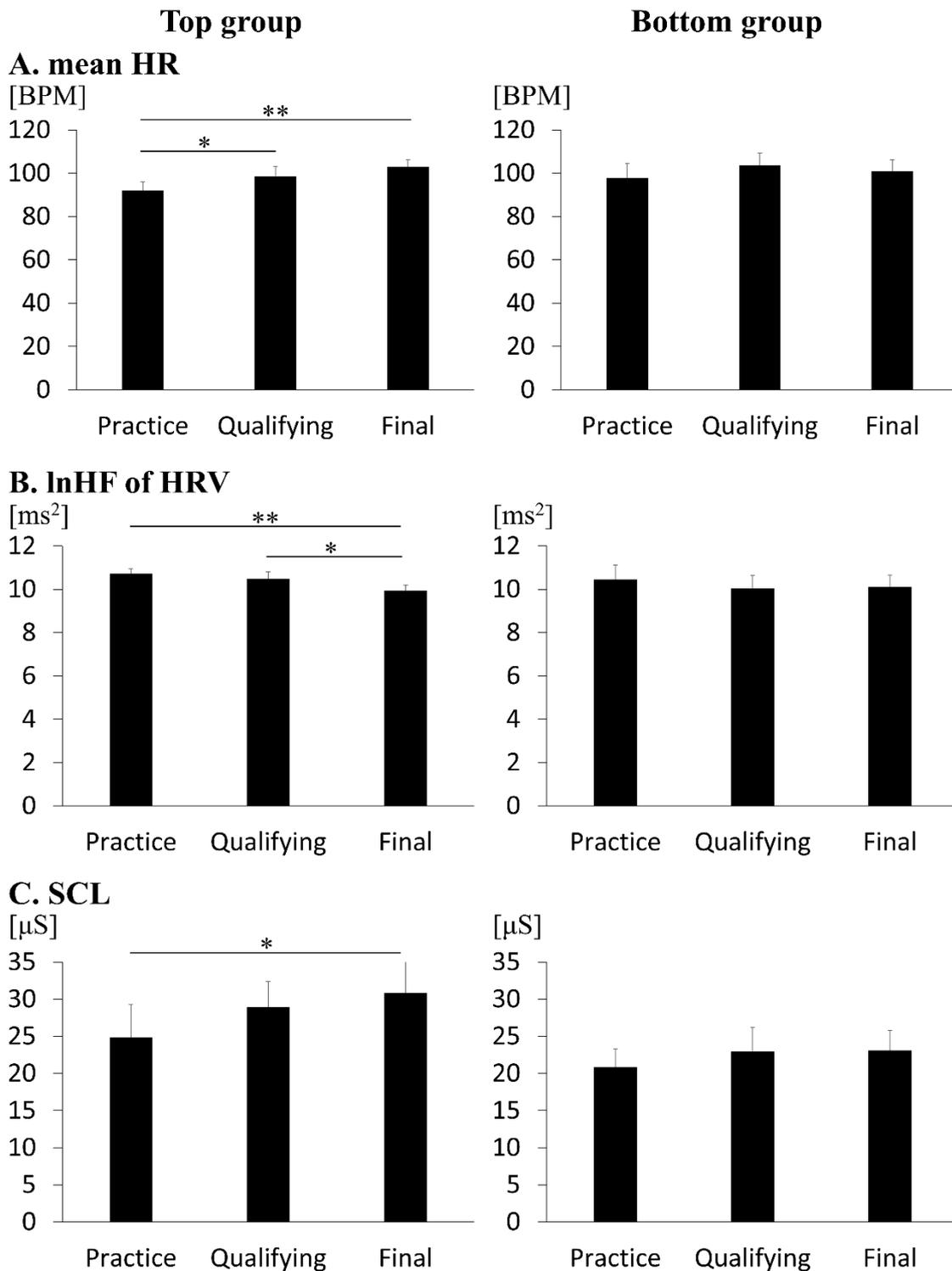


図 2-10. 上位群, 下位群それぞれの試技 10 分前の各セッション (Practice: 公開練習, Qualifying: 予選, Final: 決勝) における群内で平均化された生理指標. 左図が上位群, 右図が下位群. エラーバーは標準誤差を示す. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

4.2.2. 生理状態と競技パフォーマンスの関係

生理状態と競技パフォーマンスの関係を検証する前に、生理指標間の相関関係を調べた。上位、下位の両群において、平均心拍数はHRVのlnHFと相関していた（上位群: $n = 41$, $r = -0.716$, $p < 0.001$; 下位群: $n = 36$, $r = -0.770$, $p < 0.001$ ）。また、平均心拍数は両群において、SCLと相関していた（上位群: $n = 41$, $r = 0.548$, $p < 0.001$; 下位群: $n = 35$, $r = 0.337$, $p = 0.048$ ）。さらに、HRVのlnHFも両群において、SCLと相関していた（上位群: $n = 41$, $r = -0.344$, $p = 0.028$; 下位群: $n = 35$, $r = -0.434$, $p = 0.009$ ）。これらの相関関係も考慮し、自律神経活動のバランスを表現している平均心拍数を生理指標の代表とした。

規格化平均心拍数と規格化スコアの関係を図2-11に示す。上位、下位群共に、規格化平均心拍数は規格化スコアと有意に正の相関を示した（上位群: $n = 33$, $r = 0.500$, $p = 0.003$; 下位群: $n = 26$, $r = 0.528$, $p = 0.006$ ）。

さらに、難易度、高さ、完成度、スタイルといったスコアの要素点と生理指標の関係を検証するため、スコアの要素点を独立変数、生理指標の代表として平均心拍数を従属変数とした重回帰分析を実施した。前処理として、スコアの要素点間の相関関係を検証したところ、難易度は完成度、高さ、スタイルと有意に相関があった（完成度: $n = 60$, $r = 0.286$, $p = 0.027$; 高さ: $n = 60$, $r = 0.564$, $p < 0.001$; スタイル: $n = 60$, $r = 0.540$, $p < 0.001$ ）。完成度は高さ、スタイルと有意に相関があった（高さ: $n = 60$, $r = 0.750$, $p < 0.001$; スタイル: $n = 60$, $r = 0.807$, $p < 0.001$ ）。高さはスタイルと有意に相関があった（スタイル: $n = 60$, $r = 0.831$, $p < 0.001$ ）。いずれの要素点間にも有意に相関がみられたが、難易度と完成度間の相関は相関係数が0.286と他と比較しても弱い相関であったことから、続く重回帰分析では難易度と完成度を独立変数として採用した。

スコアの要素点の内、難易度と完成度を独立変数、平均心拍数を従属変数とした重回帰分析の結果を表2-2に示した。重回帰モデルは上位、下位共に有意であった（上位群: $F_{(2, 30)} = 6.255$, $p = 0.005$; 下位群: $F_{(2, 23)} = 4.417$, $p = 0.024$ ）。上位群は難易度と完成度の偏回帰係数が有意であった（難易度: $\beta = 0.555$, $p = 0.005$; 完成度: $\beta = 0.315$, $p = 0.047$ ）。一方、下位群は難易度の偏回帰係数のみが有意であった（難易度: $\beta = 0.410$, $p = 0.020$; 完成度: $\beta = 0.053$, $p = 0.795$ ）。

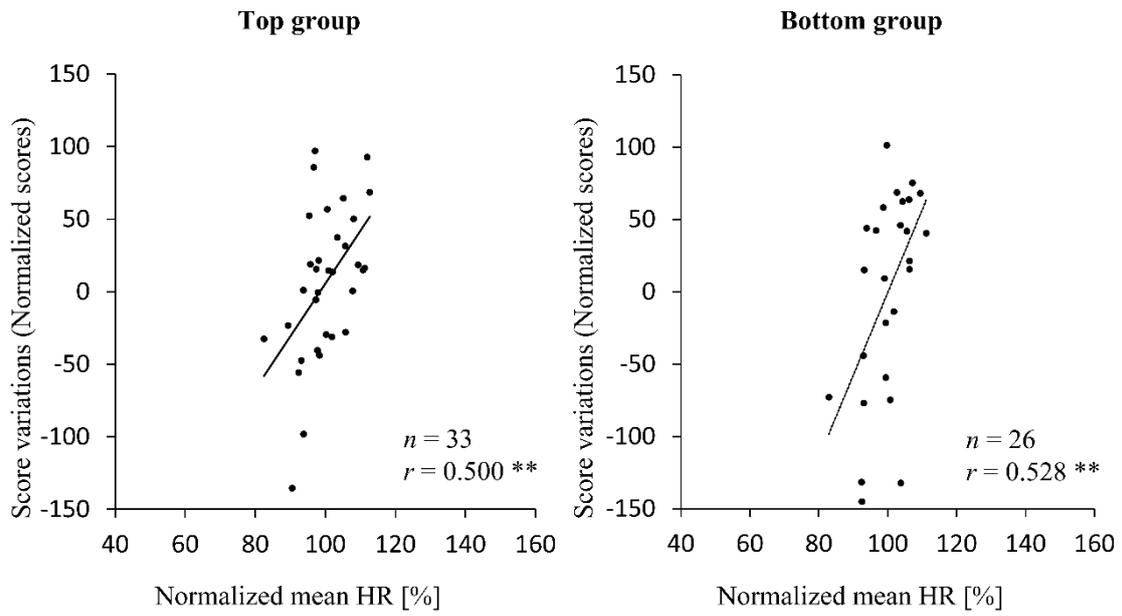


図 2-11. 規格化平均心拍数と規格化スコアの相関. 左図が上位群, 右図が下位群.

** $p < 0.01$.

表 2-2. スコアの要素点を独立変数, 平均心拍数を従属変数とした重回帰分析の結果. 表中の値は, 各独立変数の標準偏回帰係数. 左が上位群, 右が下位群. *Difficulty* は難易度, *Execution* は完成度. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

	Top group	Bottom group
<i>Difficulty</i>	0.555 **	0.410 *
<i>Execution</i>	0.315 *	0.053

5. 考察

本研究では、スノーボードのジャンプ競技において、セッションと計測タイミングにおける試技前の生理状態を比較した。さらに生理状態と競技パフォーマンスの関係を調査した。決勝進出者全体の傾向として、平均心拍数は、公開練習より予選、決勝で有意に増加しており、試技10分前よりも1分前の方が高かった。HRVのlnHFは公開練習より予選、決勝で有意に減少しており、試技10分前よりも1分前の方が低かった。一方、SCLはセッションで主効果が見られたが、計測タイミングによる主効果があるとはいえなかった。これらの結果から、スノーボードのジャンプ競技における優秀な選手は競技シチュエーションが厳しくなるにつれ、副交感神経活動が減少し、相対的に交感神経活動が優位になっていたと推定される。

生理状態と競技スコアの関係を見た結果では、試技10分前は平均心拍数と競技スコアに正の相関があり、HRVのlnHFと競技スコアには負の相関があったことから、副交感神経活動が減少するとパフォーマンスが上昇する傾向がみられた。さらに試技1分前になると、平均心拍数と競技スコアに正の相関があり、HRVのlnHFと競技スコアには負の相関があり、SCLと競技スコアにも正の相関があった。これらの結果から、副交感神経活動が減少し、交感神経活動が増加するとパフォーマンスが上昇する傾向がみられた。以上を総括すると、スノーボードのジャンプ競技における優秀な選手は、交感神経活動が相対的に優位な方が、競技パフォーマンスがよくなる傾向であることが示唆される。

5.1. 競技シチュエーションの違いによる自律神経活動の変化

各セッションにおける生理状態を解析した結果から、上位群はセッションが進むにつれ、副交感神経活動が減少し、交感神経活動が増加したと推定される。一方、下位群に関しては、セッションの違いによる自律神経活動の変化は見られなかった。

先行研究では、優秀なアスリートは試合のような心理的プレッシャーが大きいであろう状況でも、安定した生理状態を維持しているという報告がある (Morales et al., 2013; Weinberg & Genuchi, 1980)。しかし、本研究においては、大会上位の選手は、公開練習から決勝とシチュエーションが厳しくなるにつれ、交感神経が賦活化されるような生理状態の変化がみられた。さらに、上位群はスコアと平均心拍数に正の相関がみられたことから、上位に入れるアスリートは競技シチュエーションが厳しくなるにつれ、段階的に交感神経を賦活化させ、決勝という最も心理的プレッシャーが大きいであろう状況で高いパフォーマンスを発揮していたと考えられる。

一方、下位群はセッション間での生理状態変化に有意な差はみられなかったが、スコアと平均心拍数には相関があった。また、スコアの要素点と平均心拍数の重回帰分析の結果、難易度に関する偏回帰係数が有意であったことから、下位群の生理状態変化は主に技の難易度と関係していたと考えることができる。スノーボードのジャンプ競技において、難しい技を試みることは身体的なリスクが増加すると考えられる。先行研究では、身体的リスクにさらされるスカイダイバーの心拍数はスカイダイビング中に増加するという報告がある (Allison et al., 2012)。そのため、本研究における下位群は、難しい技を試みようとするリスクをとる行為が心拍数の増加の主要因になっていたのではないだろうか。このように上位群と下位群で異なる生理状態が観察されたことから、推測の域はでないが、実戦環境においてパフォーマンスを発揮できる適切な心理生理状態に遷移できているか否かが、技能差が小さいであろう熟練者間で成績に差が生じる要因になっていると考えられる。

5.2. 交感神経の賦活化が競技パフォーマンスに与える影響

上位群は、スコアの要素である難易度、完成度を独立変数、平均心拍数を従属変数とした重回帰分析の結果、難易度だけでなく完成度の偏回帰係数も有意であった。このことから、上位群は単純に難しい技を試みようとする事によってのみ心拍数が上昇したのではなく、技の出来栄を良くするために心拍数が上昇したと考えられる。また、上位群の心拍数が上昇した際は交感神経の賦活化が示唆されることから、交感神経の賦活化は技の完成度と正の関係があると推察することができる。国際スキー連盟が発行するスノーボードのジャンプ競技におけるルールブックによると、完成度の定義として、「*試技は安定して滑らかに行われるべきである。試技は完全にコントロールされて行われるべきである。*」との記載がある (International Ski Federation, 2017)。このことは、全身運動のコーディネーションを洗練させることが、高い完成度を得るためには必要であると暗に示している。自己固有感覚は、全身運動のコーディネーションを高めるために重要な要因であると考えられている。先行研究によると、自己固有感覚の喪失によって、関節のコーディネーションが乱されたという報告や (Sainburg et al., 1993)、自己固有感覚の高まりが交感神経活動と正の関係にあるという報告がある (Horslen & Carpenter, 2011; Matre & Knardahl, 2003)。これらの報告をふまえると、大会で上位に入れるような優秀なスノーボーダーは、決勝という競技シチュエーションが厳しくなる状況にむけて、交感神経が賦活化され、自己固有感覚が高まり、運動のコーディネーションが良くなり、高いパフォーマンスを発揮しているのではないだろうか。

さらに、平均心拍数と HRV の $\ln HF$ は、10 分前より 1 分前に計測した方が競技パフォーマンスとの相関が高かった。また、1 分前になると SCL も競技パフォーマンスとの相関を示した。10 分前は副交感神経活動が減少することに伴い相対的に交感神経活動が優位な状態で競技パフォーマンスと正に相関していたが、1 分前は交感神経活動そのものも競技パフォーマンスと正の相関を示した。先行研究では、試技直前になると心拍数が増加し、パフォーマンスと負の相関を示した報告もある (Rodríguez-Zamora et al., 2012)。そのため、試技直前における交感神経活動の高まりは、運動パフォーマンスの向上に寄与するだけでなく、難しくリスクのある技を試みようとする事による影響を受けていた可能性が考えられる。

5.3. 本実験の限界

本実験ではスポーツ競技大会という実戦環境で計測を実施したため、いくつかの限界 (Limitations) を考慮すべきである。

まず1点目として、実戦環境においては、様々な要因がアスリートの生理状態に影響を及ぼしていた可能性がある。これら要因について全てを考慮することは難しいが、考えられるいくつかの要因について議論したい。

カフェイン摂取は生理状態に影響を与え心拍数を減少させるという報告がある (Hara et al., 2014)。しかし、本実験においては、一般的な大会ではカフェイン摂取に関する制限がないことから、実戦の場を尊重しカフェイン摂取を制限しなかった。実験の結果から、上位群はカフェイン摂取を制限していなかったにも関わらず、セッションが進むにつれて心拍の上昇が見られたので、カフェインの摂取が生理状態の変化に大きな影響を与えていなかったと考えられる。一方、下位群はセッション間による生理状態の変化に差が見られなかったので、カフェインの摂取による影響が大きかった可能性は捨てきれない。ただし、本実験中に過剰にカフェインを摂取しているような選手が見られなかったことから、このカフェインによる影響は限定的であったと考えられる。

本実験は、14:00 から 21:00 までと長時間におよんで実施されたため、概日リズムが生理状態に影響を与えた可能性は捨てきれない。しかし、公開練習、予選、決勝といったセッション単位で実験時間をみた場合、全選手は同じ時間帯に計測をしているので、各セッション内では概日リズムの影響は小さいと考えられる。さらに、先行研究によると、本実験の時間帯は心拍が下がる傾向にあると報告されているが (Vandewalle et al., 2007)、本実験においてはこのような時間経過による一貫した心拍の減少はみられなかった。従って、概日リズムによる影響は限定的であったと考えられる。

事前の状況が生理状態に影響していた可能性も考えられる。例えば、前回の試技における成功や失敗に伴う心理的要因が、その次の試技前の生理状態に影響を与えていた可能性はある。また、事前の影響として、疲労も考えられる。先行研究によると、疲労は生理状態に影響を及ぼし、パフォーマンスを低下させる (Schmitt et al., 2013, 2015)。本実験では、疲労の影響を極力取り除くため、計測 10 分前から安静状態を確保し、各選手の試技と試技の間には少なくとも 30 分のインターバルを設けた。さらに、もし疲労の影響を受けていればパフォーマンスは低下傾向を示すはずであるが、本実験では疲労が蓄積されるであろう競技が進むにつれてパフォーマンスの向上が確認された。従って、本実験において、疲労の影響は大きくなかったと考えられる。

飲食も生理状態を変化させる要因となりうる。本実験では飲食の影響を抑えるために計測の 10 分前からそれに対応する試技終了まで、飲食を制限した。一方、その他の

時間帯では実戦という環境を尊重し、制限を加えなかった。しかし、先行研究によると、飲食後数時間は生理状態に影響を与えることが報告されている (Christiani et al., 2021; Nacht et al., 1987)。そのため、実戦環境を尊重した本実験において、飲食の影響を完全に排除することは困難であった。

2点目は、各生理指標と競技パフォーマンスの相関が、弱いもしくは中程度の結果であったことは考慮すべきである。本実験では、運動パフォーマンスの評価がジャッジによる主観評価（採点）であった。また、個人内のデータ数が6点と少ないために、個人内で規格化した後、個人間をまとめた上で相関を検証した。これらによって、相関が弱くなった可能性が考えられる。

最後に3点目として、上位下位の傾向が他の事例（競技会など）でも当てはまるかは考慮すべきである。本実験の結果から、今回の上位群・下位群で見られた傾向が、他の事例でも当てはまるかを断定することは困難である。従って、アスリート間の技量差などに関係なく上位に入れる状況の時は本結果のような傾向が一貫してみられるのか、アスリート個人が相手との技量差を自覚することで生理状態の違いが引き起こされてしまうのか、などについては、今後慎重に調査していく必要がある。

上述の通り、いくつか考慮すべき限界はある。しかし、本実験では、競技シチュエーションについては十分に統制されていたので、競技シチュエーションの変化による生理状態の変化や、その生理状態と競技パフォーマンスの関係については、主張できるものと考えている。

5.4. 実用面での意義

本実験には、2つのアドバンテージがある。1つは、スポーツ競技大会という実戦環境において、優秀なスノーボーダーの真剣な振る舞いを観察できたことである。もう1つは、公開練習、予選、決勝と異なる競技シチュエーションにおいて、生理状態と競技パフォーマンスの関係を検証したことである。

本実験の結果から、優秀なスノーボーダーは、決勝戦にむけて交感神経が賦活化し、洗練された試技を披露している可能性が示された。この発見は、実際の競技の場面でどういった生理状態が適切であるかに関して、新しい知見を提供した。先行研究では、熟練したゴルファーは競技中の不安が低く、パフォーマンスとの関係は本実験結果と逆の傾向を示していた (Weinberg & Genuchi, 1980)。スノーボードのジャンプ競技は、競技特性の違いから、このゴルフのような状況は当てはまらないと考えられる。例えばゴルフでは、正確なショットをするためには、静的かつ繊細な体のコントロールが求められる。一方、スノーボードのジャンプ競技では、身体的リスクを伴いながら、空中でダイナミックな姿勢制御を滑らかに実行することが求められる。この競技特性の違いは、異なる自律神経活動の状態を要求し、その違いが異なる生理状態として現れてくると考えられる。このようにスポーツの競技特性によって、最適な生理状態は異なると考えられる。この観点から、本実験の結果はスノーボードのジャンプ競技のようなスポーツにおいて、アスリートの生理状態を適切かつ効果的に制御するための方法論の開発に繋がるであろう。また今後の課題として、アスリート個人内でより多くのデータを蓄積させていくことで、より個人に最適化していくことも実用の観点からは重要である。

6. 結言

本研究では、成績上位に入るスノーボーダーは、公開練習から決勝に進むにつれ、試技前に心拍数を高め、HRVのlnHFが減少し、SCLが増加することが観測された。また、競技スコアと平均心拍数が相関していることがわかった。さらに、スコアを構成する要素の内、難易度と完成度が心拍数の変化を説明していた。これらの結果から、優秀なスノーボーダーは大会における決勝のような心理的プレッシャーが大きいであろう状況で、交感神経が賦活化し、全身運動のコーディネーションを高め、洗練された試技を披露していると考えられる。本研究の結果は、スノーボーダーが大会のような場面で、高いパフォーマンスを発揮するために自身の生理状態を適切に制御する方法論を提供することに貢献するだろう。

第 3 章
簡便な計測系による
スキーターン技能の特徴抽出

1. 緒言

スキーは雪面を颯爽と滑走する魅力的なスポーツである。そして、スキーのターン動作を上手くコントロールできるようになると、よりスキーを楽しむことができる。ターン動作を適切にコントロールするためには、身体をスキー板に対して適切な位置に保ち、スキー板に適切なタイミングと強さで荷重することが重要である。

スキーのトレーニング現場では、2つのトレーニング法が主流である。1つは、熟練者や指導者に滑走を確認してもらい指導してもらう方法である。2つ目は、滑走動作を撮影し、自身や指導者らと確認し映像ベースで学習する方法である。しかし、これらの方法では、トレーニング（滑走）中のスキーヤー自身にとって、熟練者との滑走動作の違いを細かく知ることは難しい。そのため、より効果的なトレーニング法として、スキーヤー自身が滑走中に自身の動作を定量的に評価できる手法が望ましいと考えられる。

スキー動作を解析した先行研究では、スキー中の身体動作を細かく解析した報告がある。例えば、Yeadon はカメラで撮影された滑走動作をデジタイズし、スキージャンプ中の身体動作を解析した (Yeadon, 1989)。他には、慣性センサを身体に装着し、スキーターン中の動作を解析した例などもある (Yu et al., 2016)。また、足底圧分布センサを装着し、スキーターン中の足裏からスキー板への荷重を調べた報告もある (Lamontagne, 2001)。しかし、慣性センサや足底圧分布センサといった個々のセンサ情報を示すだけでは、スキーヤーにとって直感的に理解し易い情報になっているとは限らない。このような各種センサデータから効果的なトレーニング方法を提案するために、取得したセンサデータからスキーヤーが直感的に理解できるスキーターンの特徴を定量的に抽出することが重要である。そして、抽出した特徴量を利用し、身体的位置やスキー板への荷重とスキー板の挙動との関係性まで提示できることが望ましい。さらに、これらの計測系はスキー動作を妨げず、スキーヤー自身が簡便に取り扱えることが望ましい。

そこで本研究の目的は、簡便かつ効果的にスキーターン動作の特徴を抽出するための手法を提案することである。計測系はウェアラブルな小型の慣性センサと足底圧分布センサで構成された。慣性センサは身体やスキーの動作を計測するため、足底圧分布センサは足裏からスキー板への荷重傾向を計測するために使用された。実験では、これらのセンサを装着した技能レベルの異なるスキーヤーに滑走してもらい、熟練者のスキーターン動作の特徴を定量的に捉えることを試みた。

2. 実験

2.1. 実験参加者

5名のスキーヤーが実験に参加した。1名は熟練した技能を有するスキーヤーであり、残り4名は中程度の技能を有するスキーヤーであった。5名の内4名のスキーヤーは、日本スキー連盟（Ski Association of Japan: SAJ）が発行するスキー技能検定の資格を有していた。図3-1にスキー技能検定の資格名とそのランクを示す。熟練スキーヤーはテクニカルプライズの資格を有しており、中級スキーヤー3名は1級の資格を有していた。残り1名は特に資格を有していないが、直近10年における年間滑走日数が約30日であり、中程度の滑走技能を有していた。本研究では、理想的な技能を有すると考えられる1名の熟練スキーヤーと残り4名の中級スキーヤーとの技能の違いを定量的に検証した。実験参加者には、本研究の目的が記された書類が配布された。彼らは書面によるインフォームドコンセントを提出し、ペナルティなしにいつでも実験を辞める権利を有していた。本実験で実施されるすべての手続きは、ヘルシンキ宣言を順守し、NTTコミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会から承認を受けた。本実験に関するNTTコミュニケーション科学基礎研究所の倫理委員会のプロトコル番号は、H30-002である。

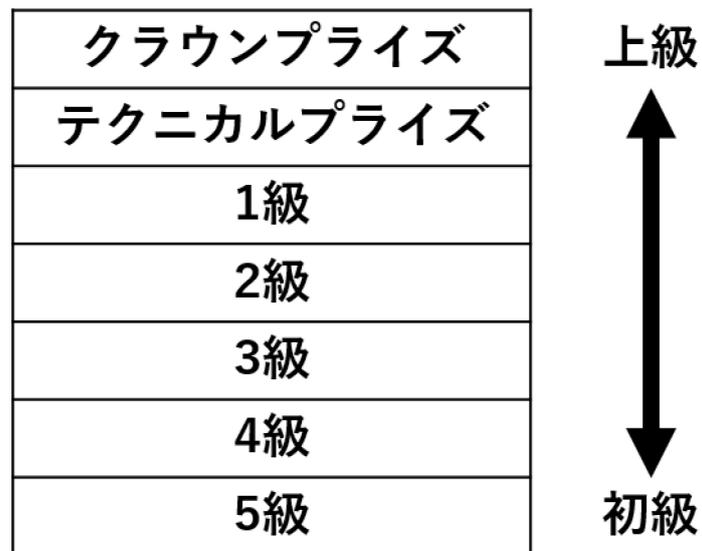


図 3-1. 日本スキー連盟発行の日本スキー技能検定の資格一覧。最上位資格のクラウンプライズから 5 級までの 7 段階で構成される。

2.2. 計測装置

2.2.1. 全体構成

ウェアラブルな小型の慣性センサと足底圧分布センサを使用した。全てのセンサは、計測開始時刻を同期させることで1つの計測系として統合された。各試技において、計測同期装置から計測開始を命令する無線信号が各センサに向かって同時に発せられることで、センサ間の時間的な同期を実現した。計測同期装置から各センサに送られる信号の発生誤差は0.1ミリ秒以内であり、運動計測の観点からみると同期しているとみなせる十分に小さいものであった。計測系の全体像を図3-2に示す。各センサが取得したデータは、センサ自身が保持するメモリに格納され、実験後に抽出された。また、本実験ではスキー板の違いによる影響を排除するため、実験参加者は指定されたスキー板（Salomon製、Rush 165 cm, 2019年モデル）を使用した。

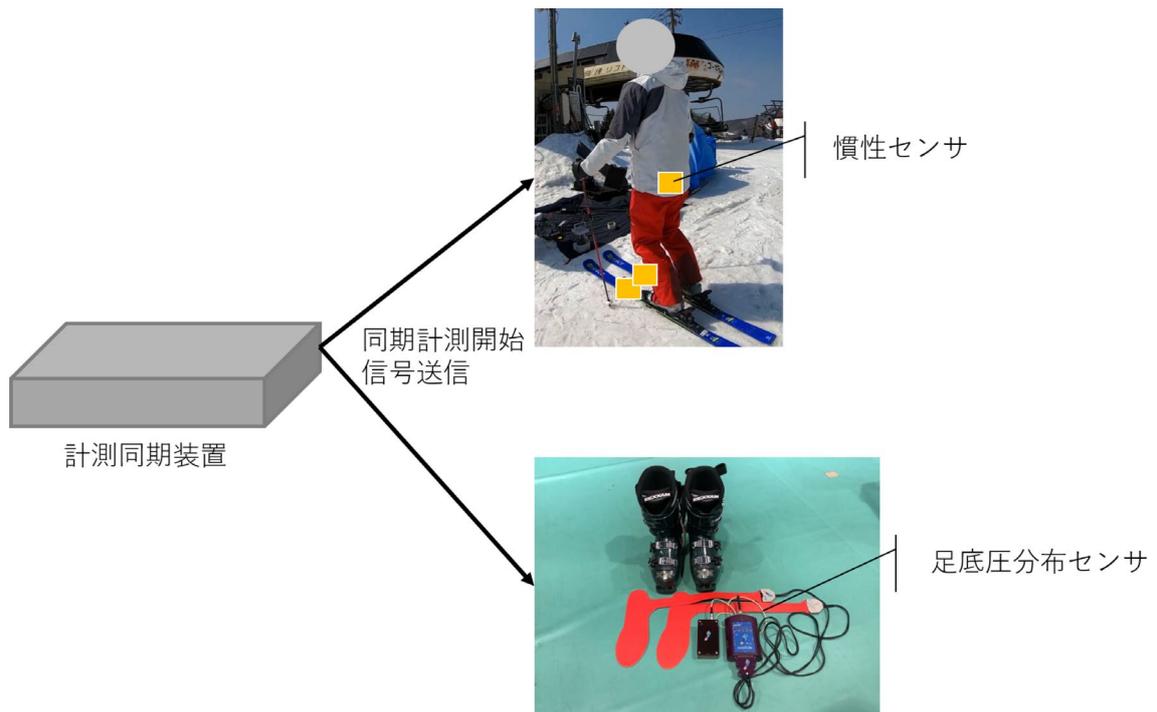


図 3-2. 計測システムの全体構成. 実験参加者は, スキー板と腰に小型の慣性センサを装着し, スキーブーツ内にインソール形状の足底圧分布センサを装着した. 両センサはウェアラブルであり, センサ間は計測同期装置を用いて, 無線で計測開始のタイミングが同期されていた.

2.2.2. 慣性センサ

使用した慣性センサは防水性で、3次元の加速度、角速度、地磁気をそれぞれ計測可能であり、4元数（Quaternions）も自動で算出する仕様であった（株式会社スポーツセンシング，日本）。この4元数からは、センサ装着平面の角度変化を、当該平面の姿勢変化として推定することができた。慣性センサのサンプリング周波数は、1,000 Hz に設定された。本実験では、3つの慣性センサが使用された。2つは2本のスキー板のつま先側のビンディング前方にそれぞれ装着され、残り1つは腰のL5-S1位置に装着された（図3-3）。スキー板の慣性センサはスキーの挙動を、腰の慣性センサは身体の代表点として身体運動を計測するために装着された。これらのセンサは小型軽量であったため、滑走動作を妨げることはなかった。

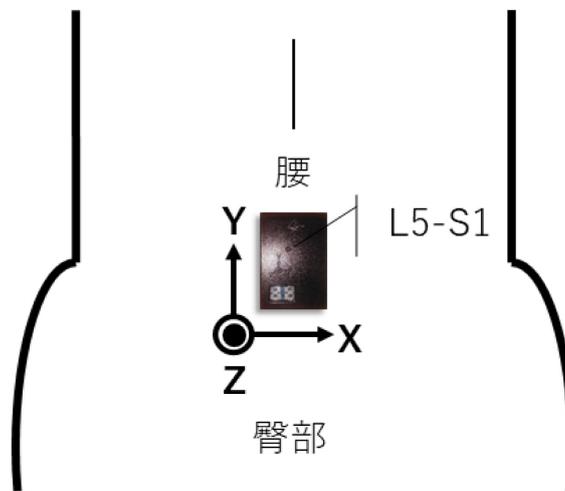


図 3-3. 慣性センサの装着個所。両スキー板の前側ビンディングの前方及び腰の L5-S1 位置に装着された。

2.2.3. 足底圧分布センサ

足底圧分布センサは、pedar[®]システム (novel gmbh, Germany)が使用された (図 3-4 の左図)。このシステムで使用されるセンサは、靴のインソール形状をしているため、スキーブーツの中に装着することが可能であった。センサデータは下肢に沿って有線で腰部に装着された制御ユニットに送られ、この制御ユニットが備えるメモリに保存された。そのため、システム全体でみてもウェアラブルな系となっていた。センサ部は、図 3-4 の右図の通り、足裏を 99 のエリアに分割し、各エリアで生じる圧力を計測することで、足裏全体の圧力分布を記録していた。足底圧分布センサのサンプリング周波数は、100 Hz であった。

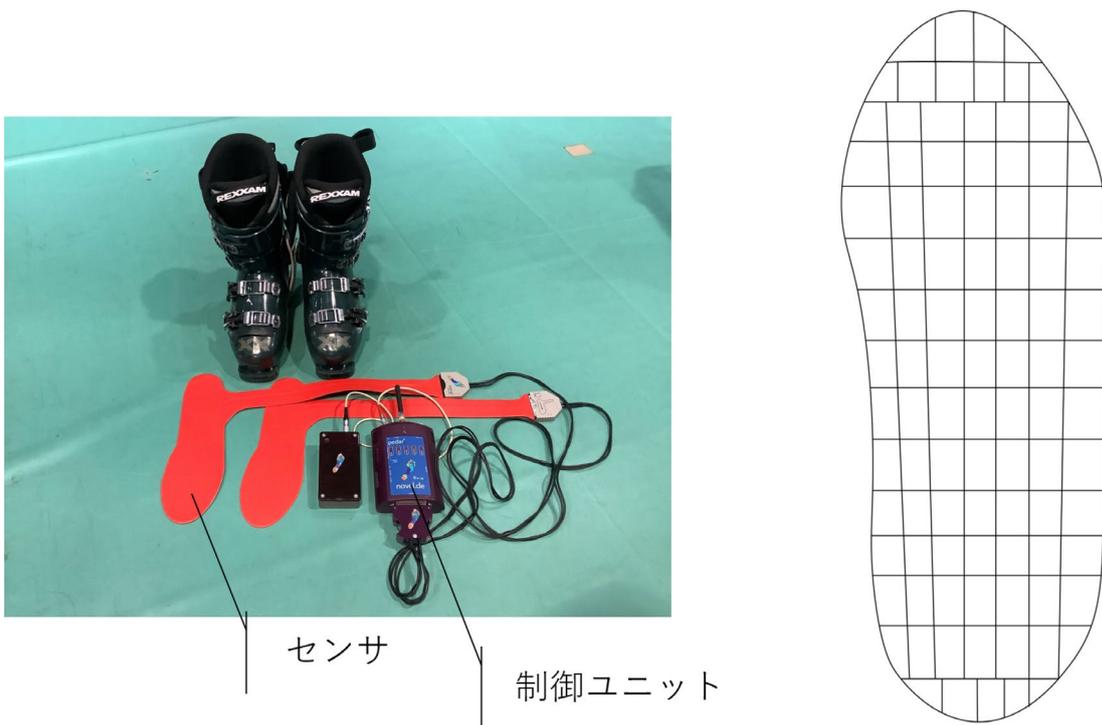


図 3-4. 足底圧分布センサ. センサはインソール形状で、スキーブーツ内に装着可能であった. 制御ユニットは腰にベルトで固定し、センサとは下肢に沿って有線で接続された. センサは右図のように足裏を 99 か所に分割し、各エリアの圧力を計測した.

2.3. 計測手順

実験は、3月に菅平高原スキー場で実施された。使用したコースは、斜度 25° の斜面であり、雪の状態は春雪と呼ばれる少し溶けたシャーベット状であった。実験参加者は大回りと呼ばれるターンで2回斜面を滑走した。各滑走において、左右3ターンずつ、合わせて6ターンするようインストラクションを行った。各滑走における計測手順を、図3-5に示す。実験参加者はまず、計測が開始されると、センサをキャリブレーションするため、斜面上部の平坦なエリアで斜面方向を向きながら、「ニュートラルポジション」と呼ばれる脱力し少し膝を曲げた直立状態で5秒間静止した。解析では、このニュートラルポジションからの変化を検証した。キャリブレーション後、実験参加者は斜面に移動し、滑走を開始した。滑走終了後、リフトに乗車し最初にキャリブレーションしたエリアに戻った。また各センサには、計測を開始してから120秒後に自動的に計測を停止する設定を施した。

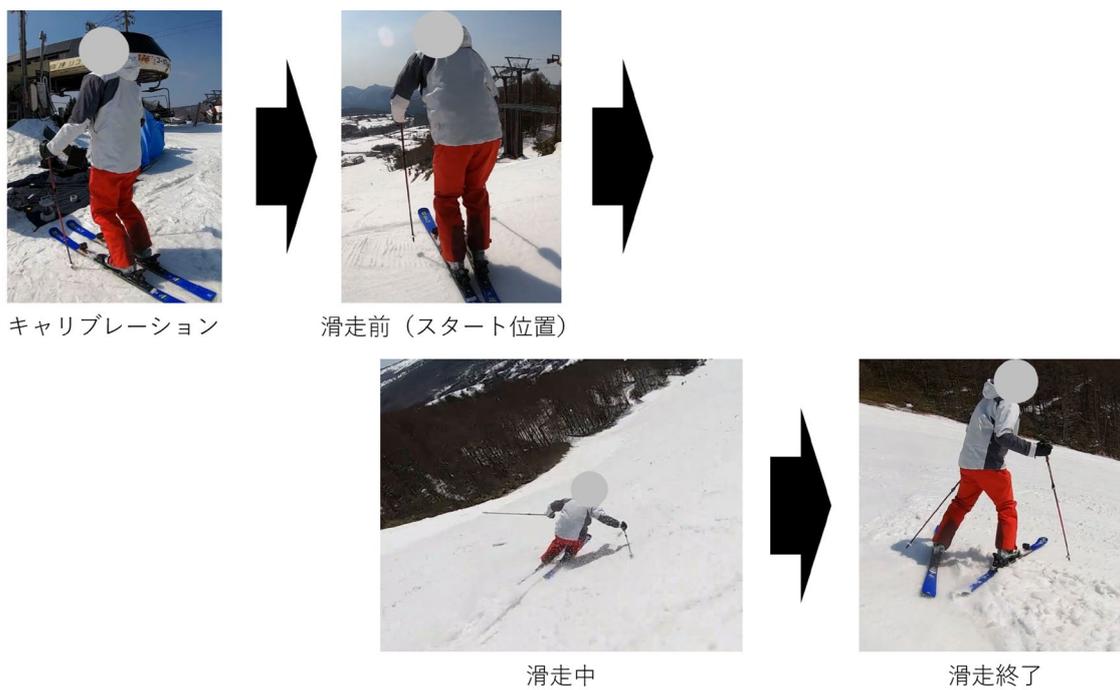


図 3-5. 試技毎の計測手順. 実験参加者は計測開始後にキャリブレーションのため「ニュートラルポジション」で5秒間静止し, その後斜面を滑走した.

3. 解析

まず、図 3-6 で示すようにスキー板に装着した慣性センサから、ターンにおけるエッジングの回転軸を示す Y 軸回りの角速度変化を利用して、1 ターンずつ切り出した。そして、1 ターン内での変化を検証した。1 ターンはこの Y 軸回りの角速度データにおけるピーク検出によって抽出することができた。Y 軸回りの角速度が正もしくは負の極値をとる時、ターン動作においてはターンを切り返す瞬間であり、前のターンの終わり及び対象とするターンの始まりを示していた。そのため、この角速度データのピーク間が 1 ターンに該当した。本実験では、正の極値から負の極値までの区間が左折方向の左ターンに該当し、負の極値から正の極値までの区間が右折方向の右ターンに該当するようにセンサが設置されていた。

慣性センサからは、X, Y, Z 軸それぞれにおいて、1 フェーズ内の加速度、角速度の時系列変化を抽出した。さらに慣性センサ設置面における姿勢変化を、センサから算出された 4 元数を用いて計算した。

また、足底圧分布センサからは、図 3-7 に示すように、足裏をつま先側と踵側の 2 つの領域に分割し、各領域におけるセンサ面に対して垂直方向の力を求めた。この分割によって、スキー板に対して、つま先よりで荷重しているのか、踵よりで荷重しているのかを検証した。

本研究では、スキー板の変化が動作としての最終的な出力であるとし、このスキー板の挙動と身体の代表点としての腰もしくは足裏からの荷重がどのような関係にあるのかを検証した。

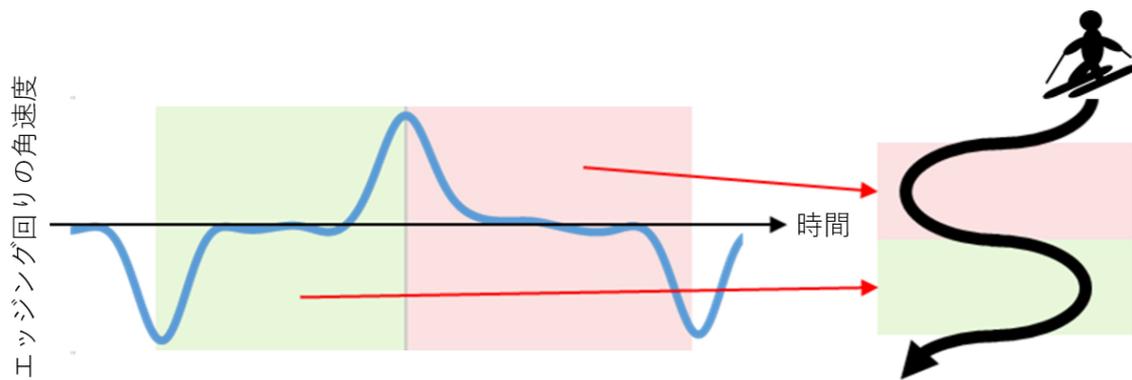


図 3-6. 1 ターンの切り出し. スキー板に設置した慣性センサの Y 軸回り (エッジング回り) の角速度から 1 ターンを抽出. 本実験では, 負のピークから正のピークまでが右折方向の右ターン, 正のピークから負のピークまでが左折方向の左ターンとなる.

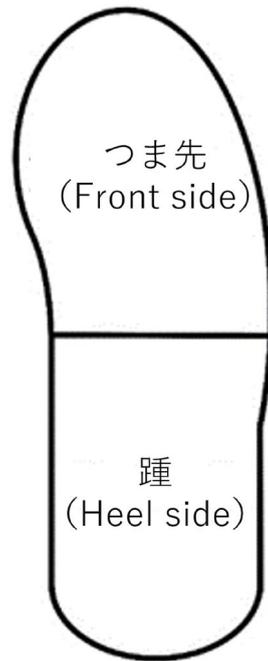


図 3-7. 足裏の分割の概略図. スキーへの荷重傾向を調査するため, 足裏をつま先と踵の 2 領域に分割した.

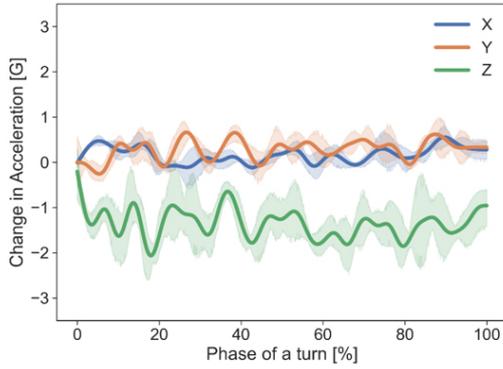
4. 結果

4.1. 加速度成分の時系列変化

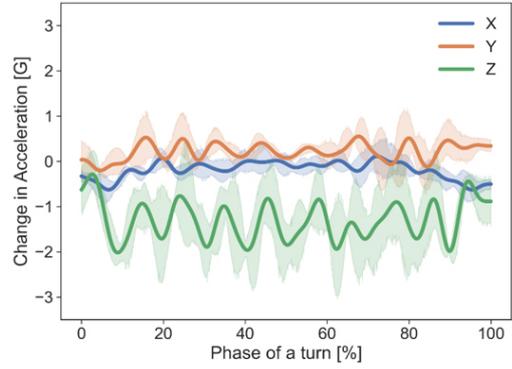
各計測部位における1ターン中の加速度の時系列変化を図3-8～図3-12に示す。1ターン毎に切り出された加速度のデータは、それぞれ5 Hzのローパスフィルタで前処理した。その後、フィルタ処理されたデータに3次のスプライン補間を適用し、3,000点でリサンプリングを行うことで、各ターンのデータ数を揃えた。これによって、異なるターン間を同じ1フェーズとして取り扱った。

各グラフは、同方向の全ターンの平均値を95%信頼区間付きでプロットした。実験参加者毎に、左ターンと右ターンそれぞれに対して、ターン中心からみた内側のスキーと外側のスキー、腰の3つのグラフで構成されている。左ターンにおける内側は左足、外側は右足が該当し、右ターンにおいては、内側は右足、外側は左足が該当する。

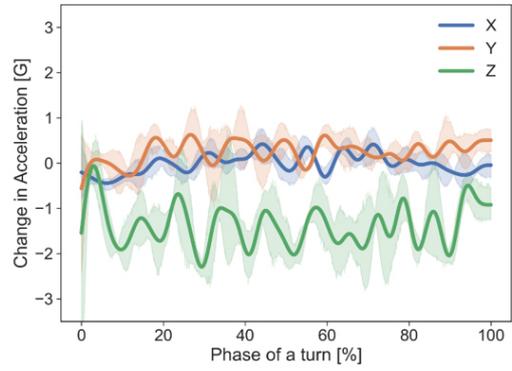
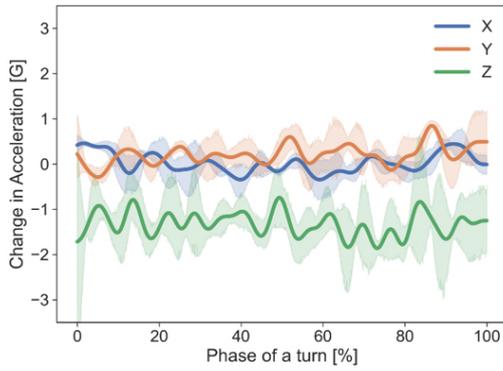
Left turn



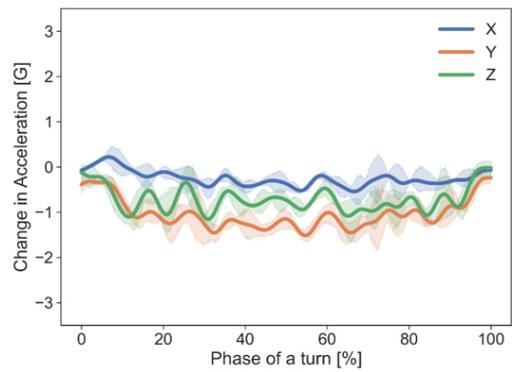
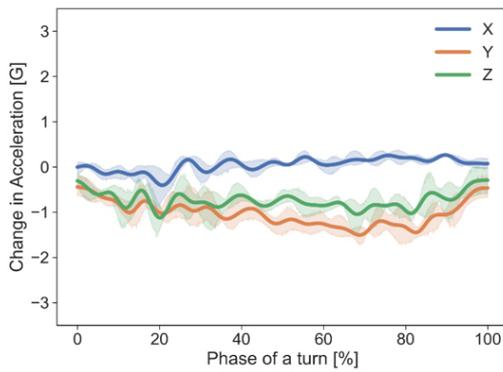
Right turn



Inside ski



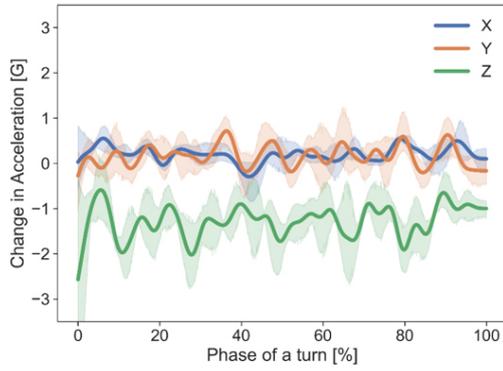
Outside ski



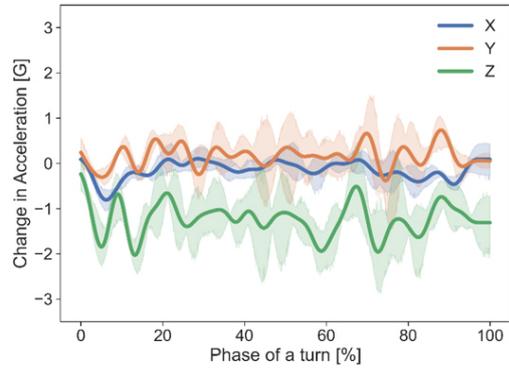
Waist

図 3-8. 熟練スキーヤーの 1 ターン中の加速度変化.

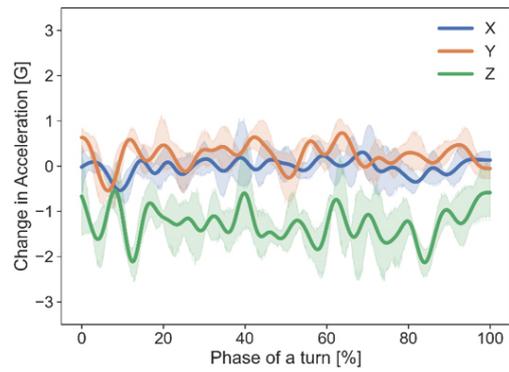
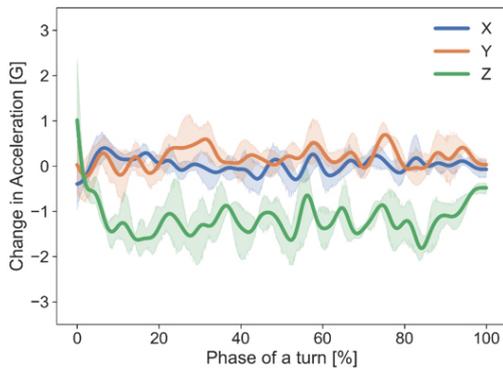
Left turn



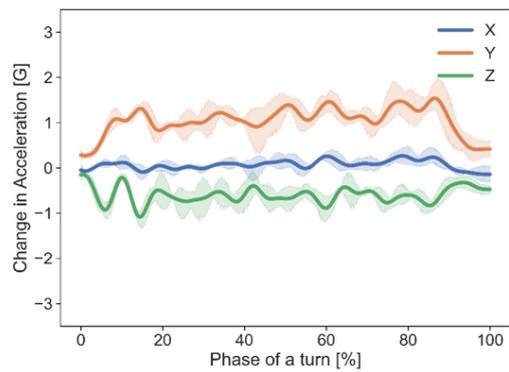
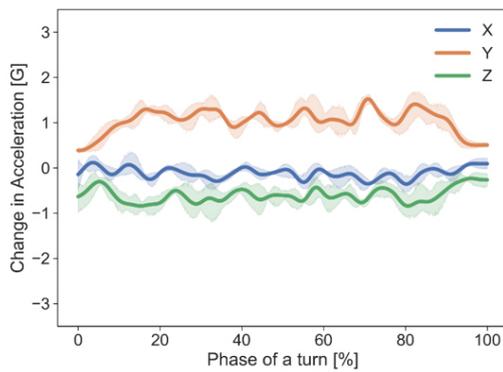
Right turn



Inside ski



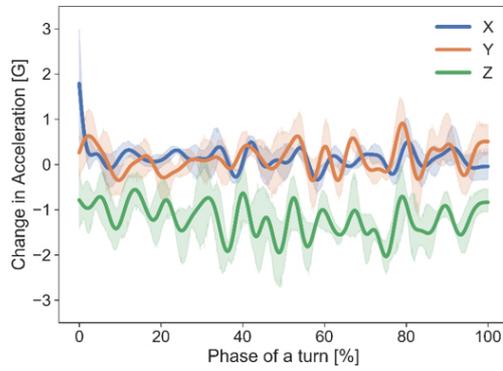
Outside ski



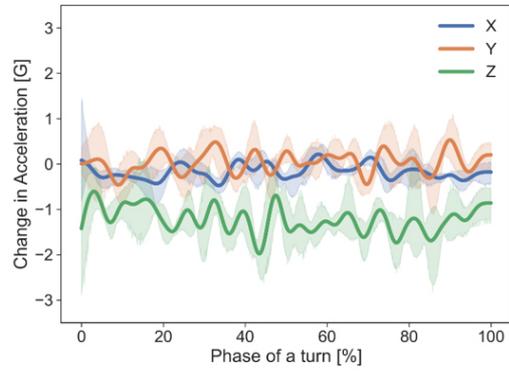
Waist

図 3-9. 中級スキーヤー1 の 1 ターン中の加速度変化.

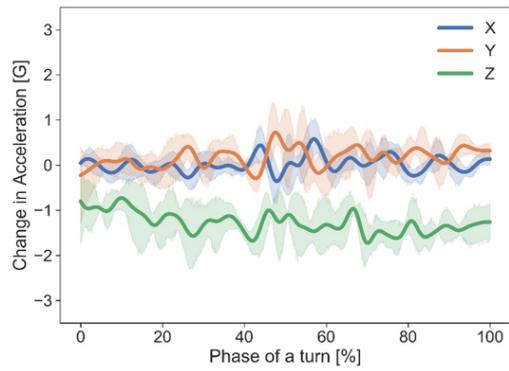
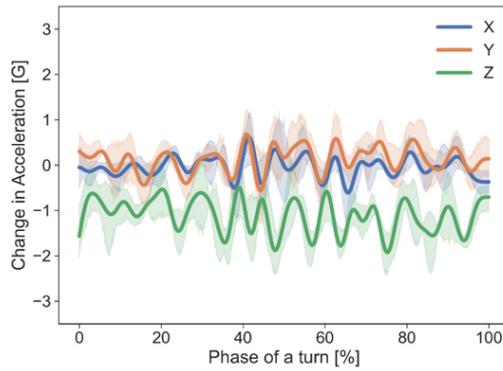
Left turn



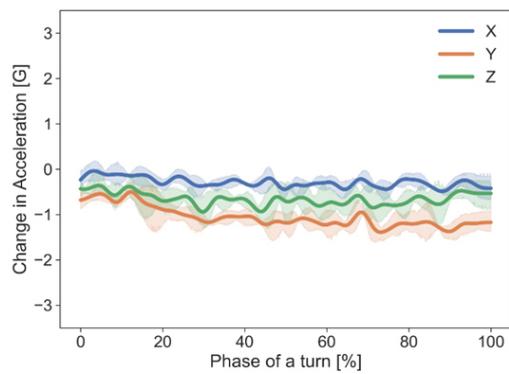
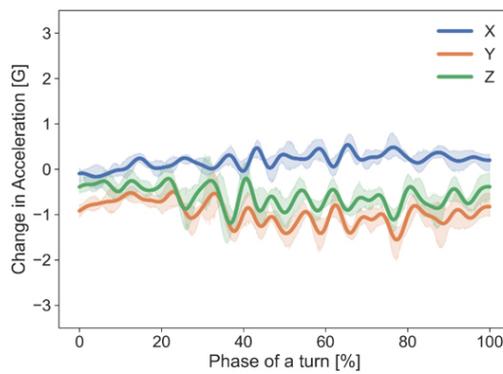
Right turn



Inside ski



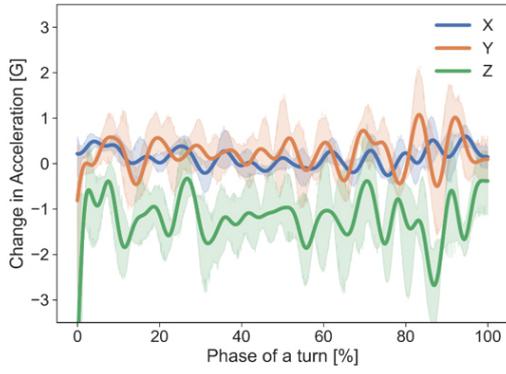
Outside ski



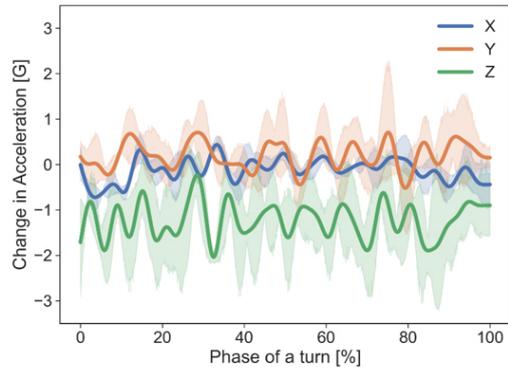
Waist

図 3-10. 中級スキーヤー2 の 1 ターン中の加速度変化.

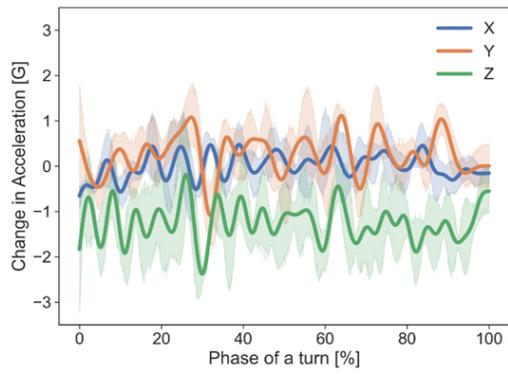
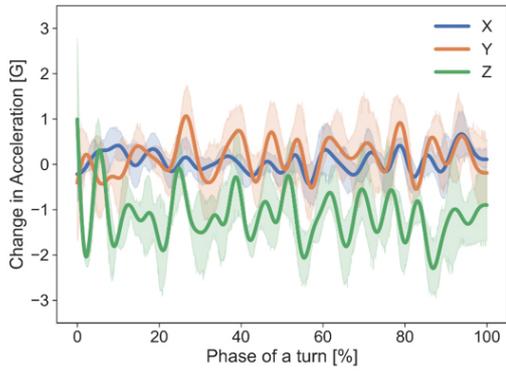
Left turn



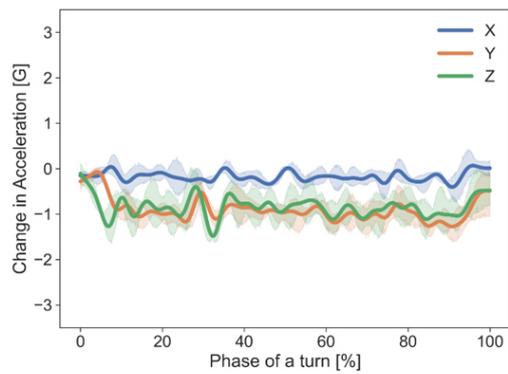
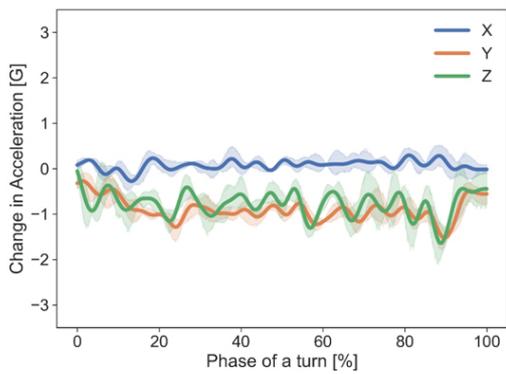
Right turn



Inside ski



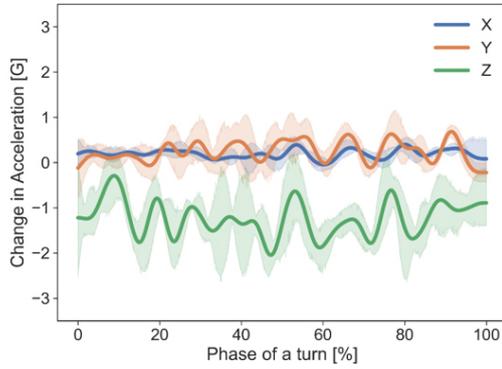
Outside ski



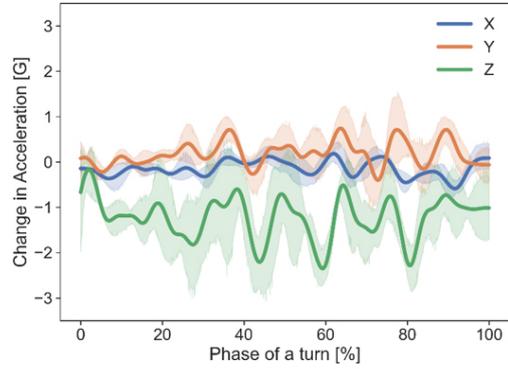
Waist

図 3-11. 中級スキーヤー3の1ターン中の加速度変化.

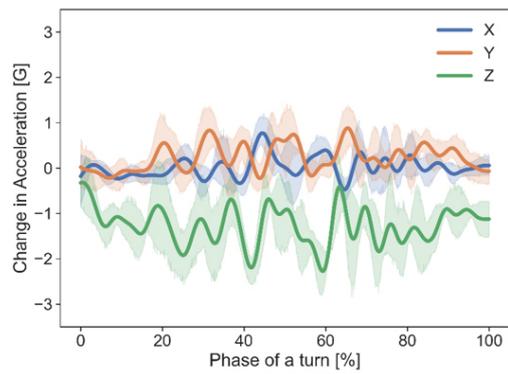
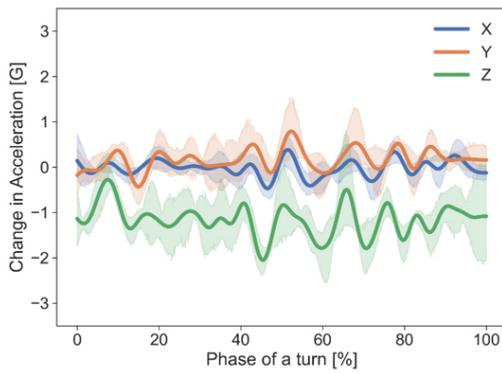
Left turn



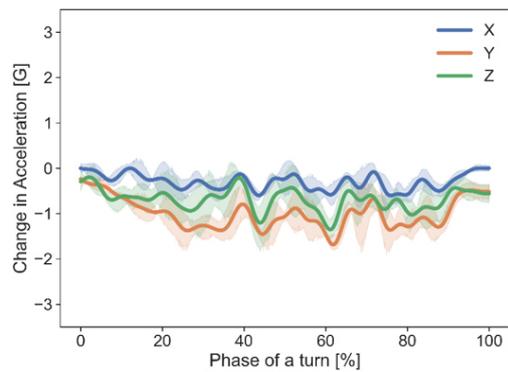
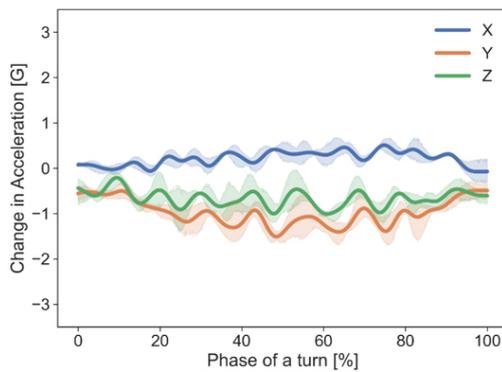
Right turn



Inside ski



Outside ski



Waist

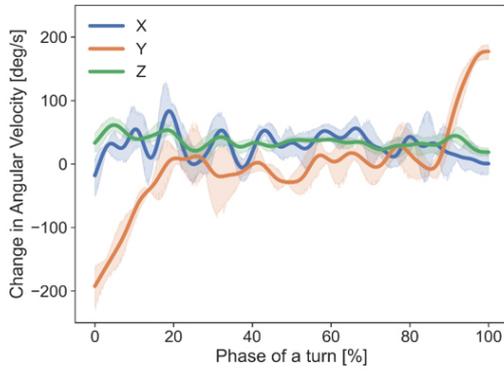
図 3-12. 中級スキーヤー4 の 1 ターン中の加速度変化.

4.2. 角速度成分の時系列変化

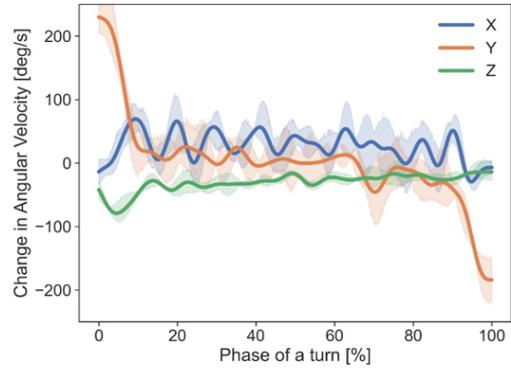
各計測部位における 1 ターン中の角速度の時系列変化を図 3-13～図 3-17 に示す。1 ターン毎に切り出された角速度のデータは、それぞれ 5 Hz のローパスフィルタで前処理した。その後、フィルタ処理されたデータに 3 次のスプライン補間を適用し、3,000 点でリサンプリングを行うことで、各ターンのデータ数を揃えた。これによって、異なるターン間を同じ 1 フェーズとして取り扱った。

各グラフは、同方向の全ターンの平均値を 95%信頼区間付きでプロットした。実験参加者毎に、左ターンと右ターンそれぞれに対して、ターン中心からみた内側のスキーと外側のスキー、腰の 3 つのグラフで構成されている。左ターンにおける内側は左足、外側は右足が該当し、右ターンにおいては、内側は右足、外側は左足が該当する。

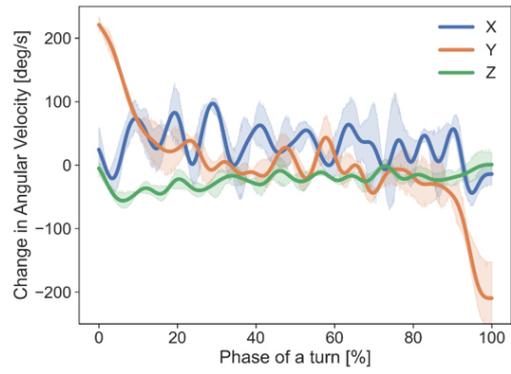
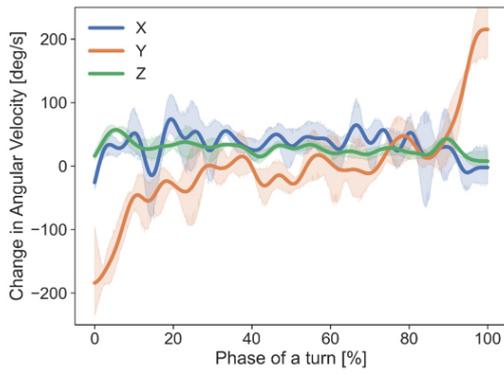
Left turn



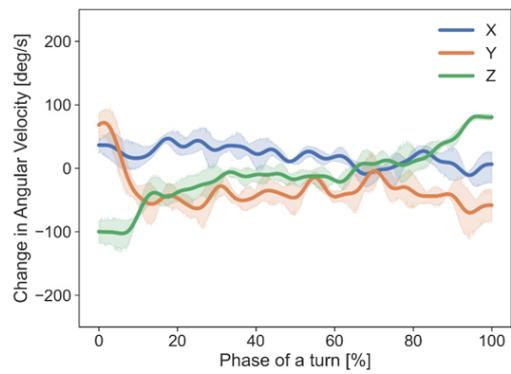
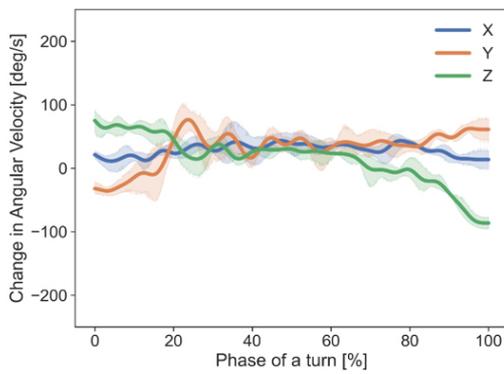
Right turn



Inside ski



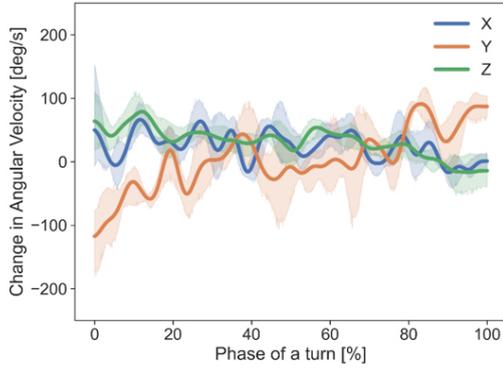
Outside ski



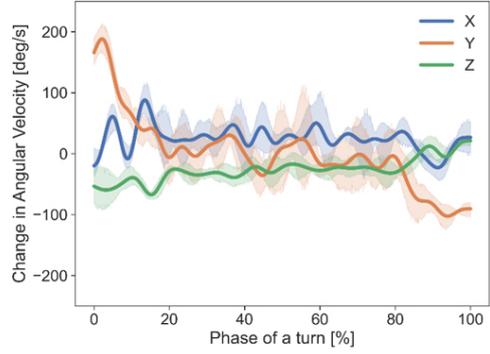
Waist

図 3-13. 熟練スキーヤーの 1 ターン中の角速度変化.

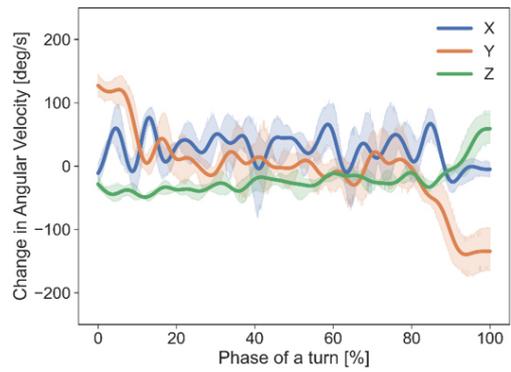
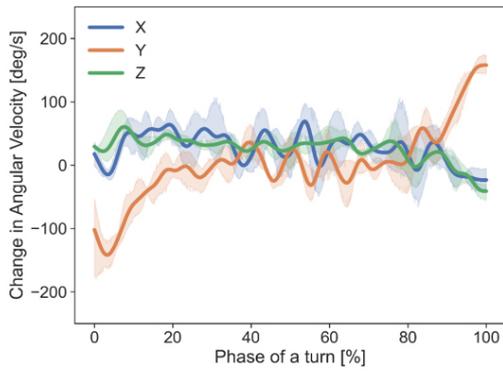
Left turn



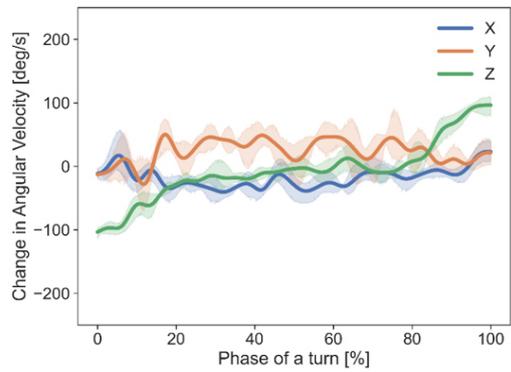
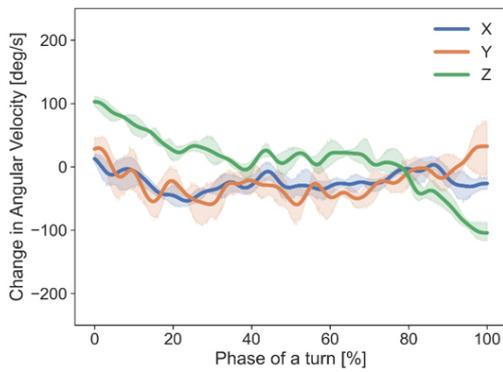
Right turn



Inside ski



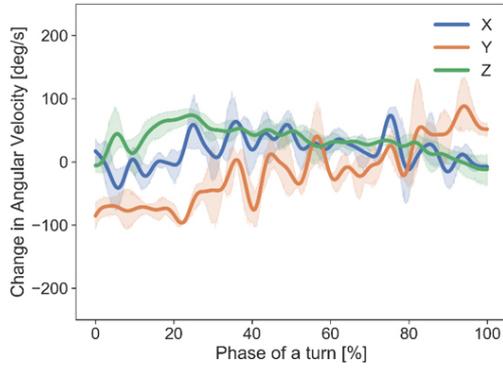
Outside ski



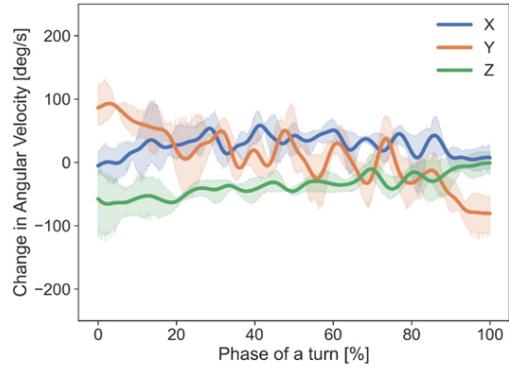
Waist

図 3-14. 中級スキーヤー1 の 1 ターン中の角速度変化.

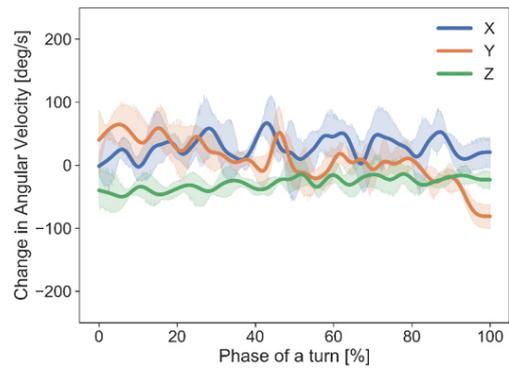
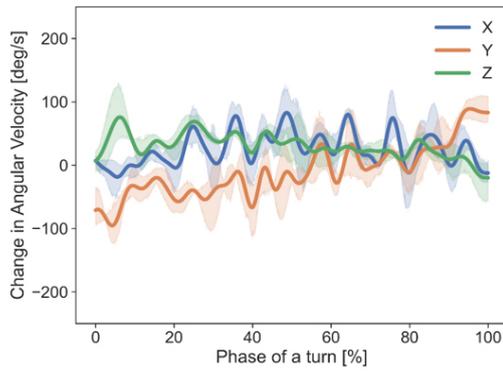
Left turn



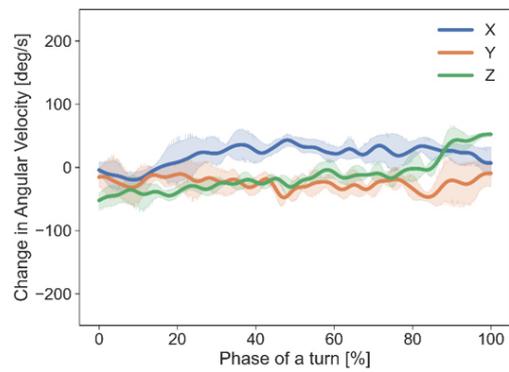
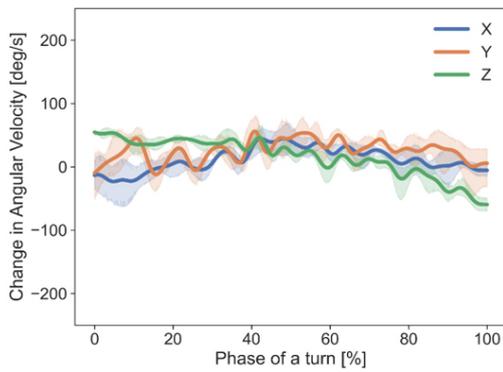
Right turn



Inside ski



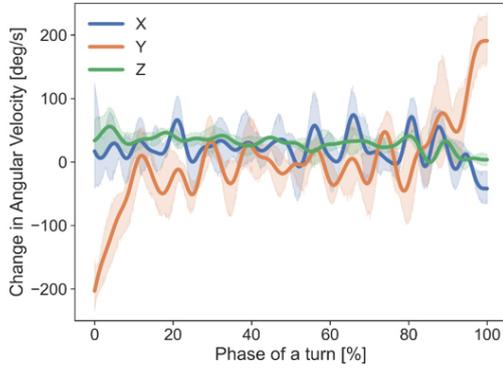
Outside ski



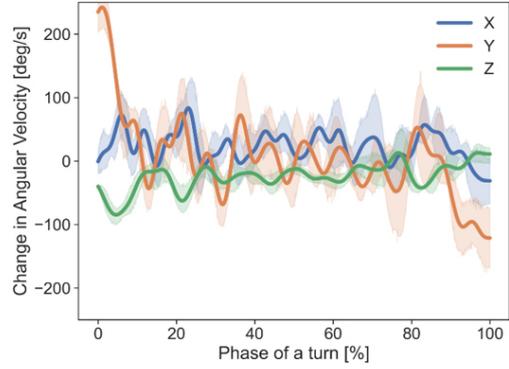
Waist

図 3-15. 中級スキーヤー2 の 1 ターン中の角速度変化.

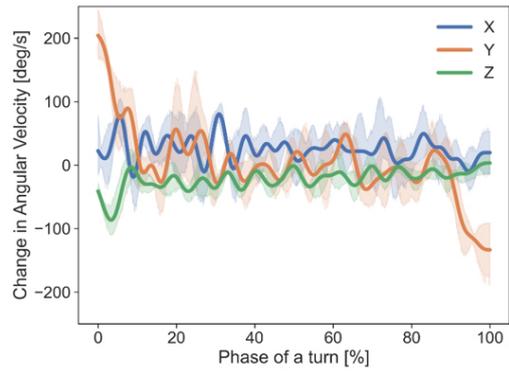
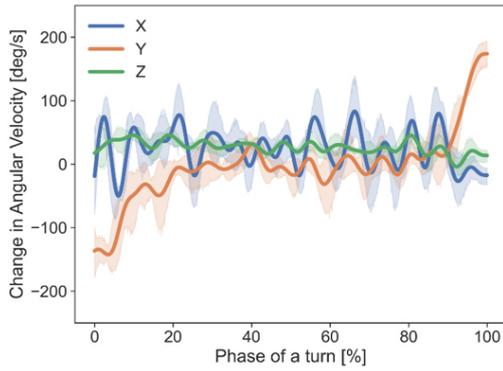
Left turn



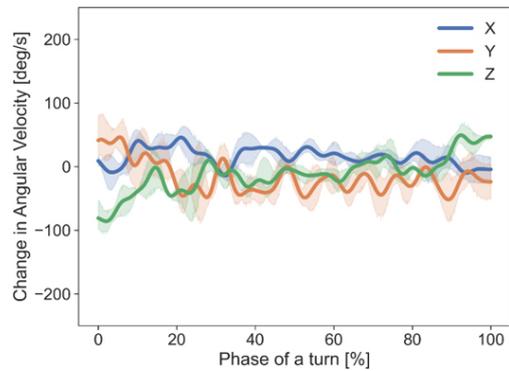
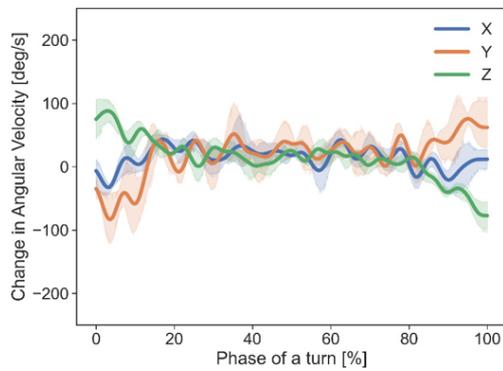
Right turn



Inside ski



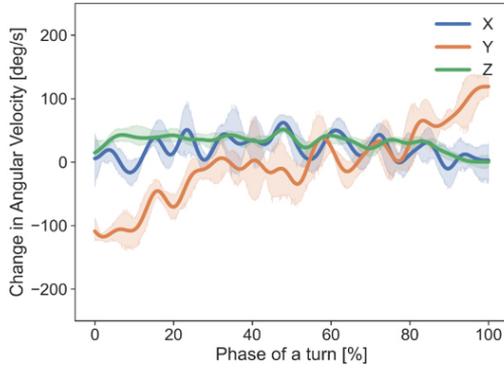
Outside ski



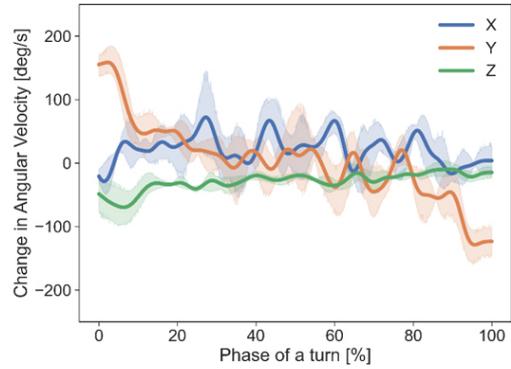
Waist

図 3-16. 中級スキーヤー3 の 1 ターン中の角速度変化.

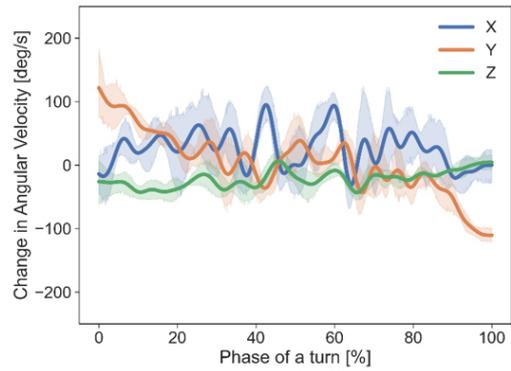
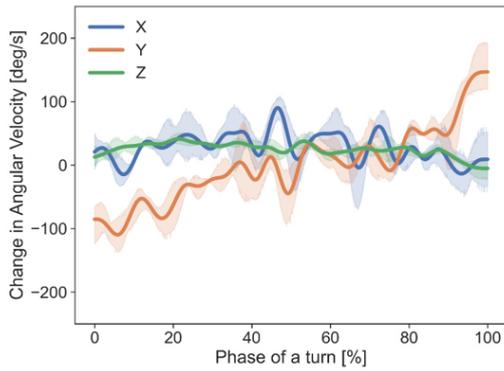
Left turn



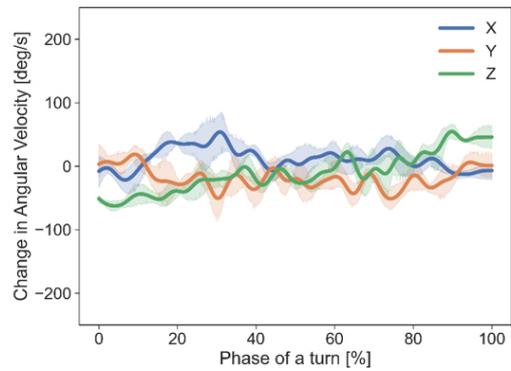
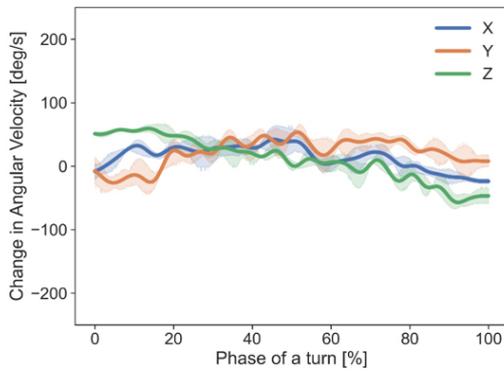
Right turn



Inside ski



Outside ski



Waist

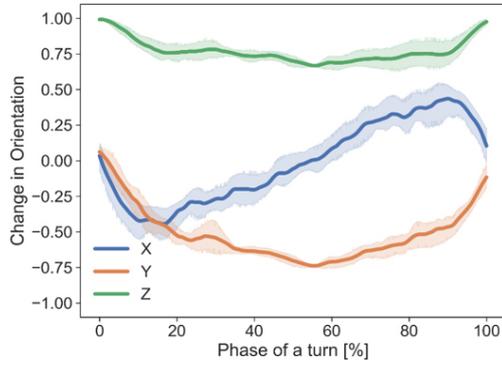
図 3-17. 中級スキーヤー4 の 1 ターン中の角速度変化.

4.3. センサ設置平面の姿勢変化

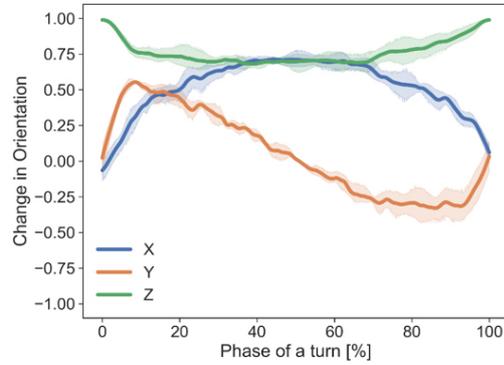
各計測部位における1ターン中のセンサ設置平面の姿勢変化を図3-18～図3-22に示す。姿勢変化は、センサ設置平面におけるセンサ中心からの単位法線ベクトル $[0, 0, 1]$ のキャリブレーション位置からの変化を表している。センサが出力した4元数の値を用いて、この法線ベクトルを原点中心に回転させ、各時点におけるベクトルの座標を求めた。このため、対象の平面の姿勢変化は、平面原点からの単位法線ベクトルが、原点から距離1 [norm]の単位球面上を移動する様子で表現されている。その後、3次のスプライン補間を適用し、3,000点でリサンプリングを行うことで、各ターンのデータ数を揃えた。これによって、異なるターン間を同じ1フェーズとして取り扱った。

各グラフは、同方向の全ターンの平均値を95%信頼区間付きでプロットした。実験参加者毎に、左ターンと右ターンそれぞれに対して、ターン中心からみた内側のスキーと外側のスキー、腰の3つのグラフで構成されている。左ターンにおける内側は左足、外側は右足が該当し、右ターンにおいては、内側は右足、外側は左足が該当する。

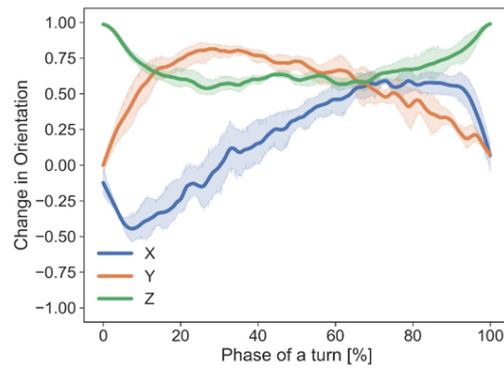
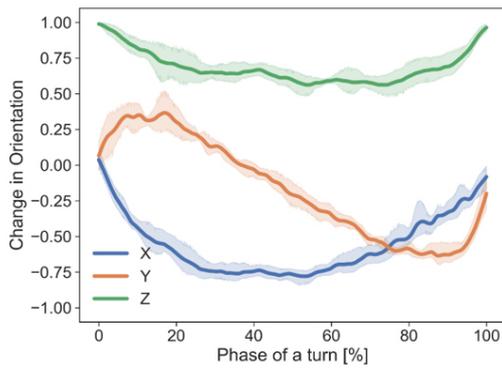
Left turn



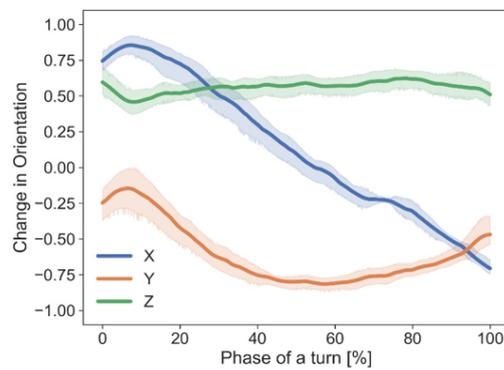
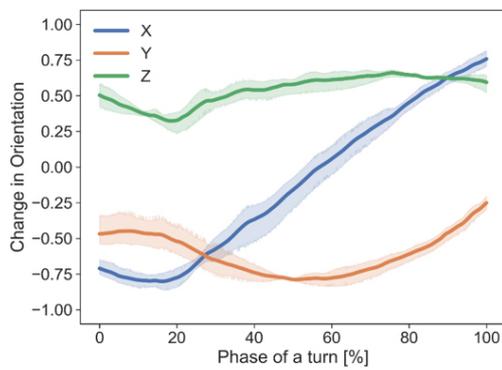
Right turn



Inside ski



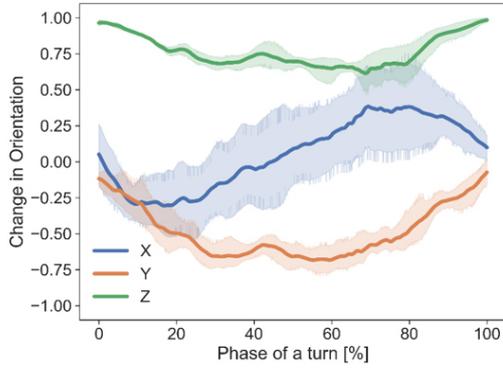
Outside ski



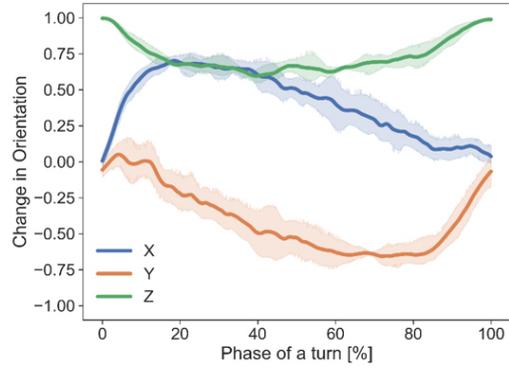
Waist

図 3-18. 熟練スキーヤーの1ターン中の姿勢変化.

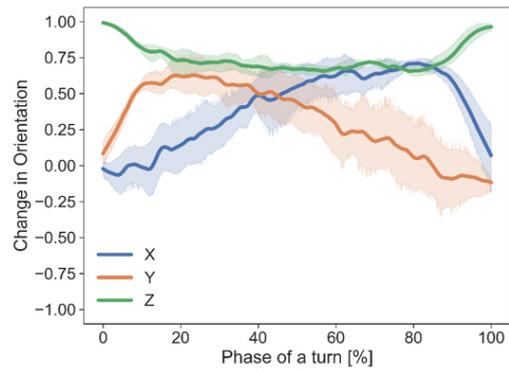
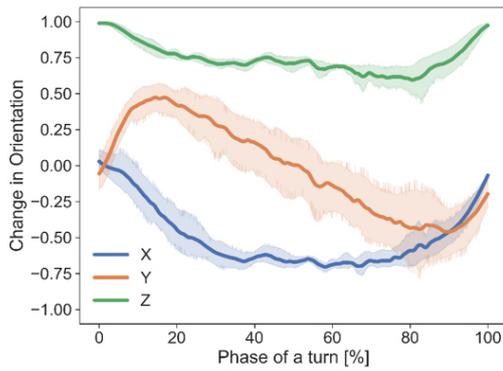
Left turn



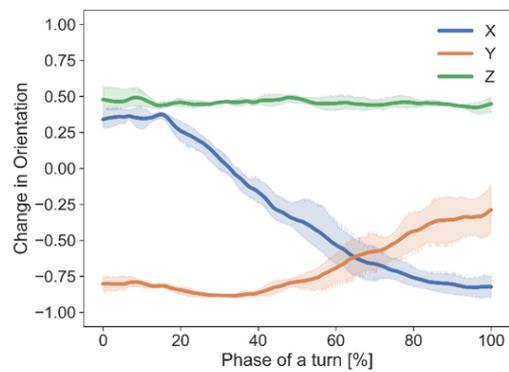
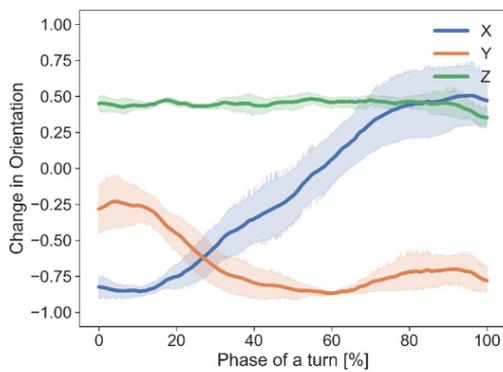
Right turn



Inside ski



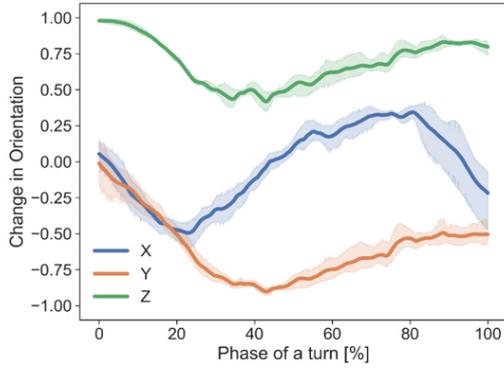
Outside ski



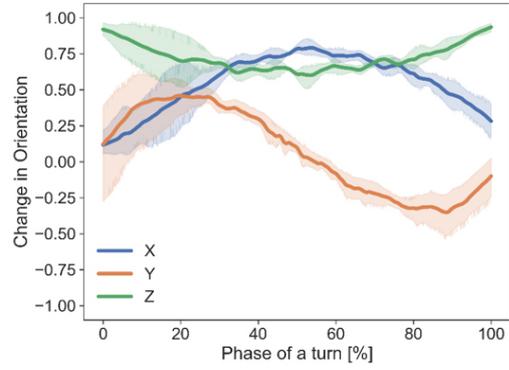
Waist

図 3-19. 中級スキーヤー1の1ターン中の姿勢変化.

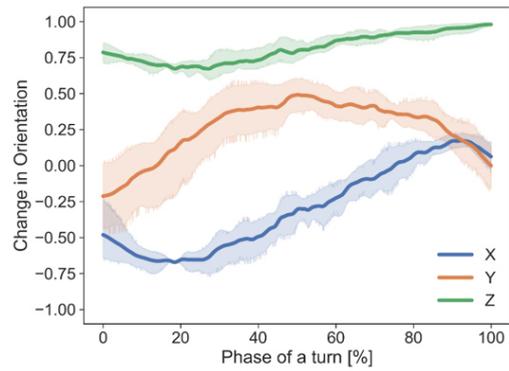
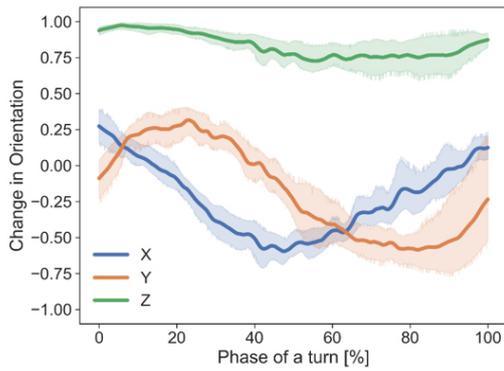
Left turn



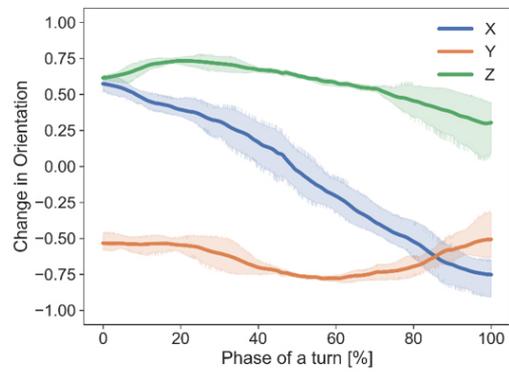
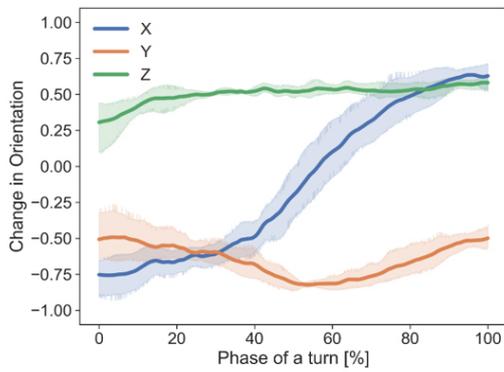
Right turn



Inside ski



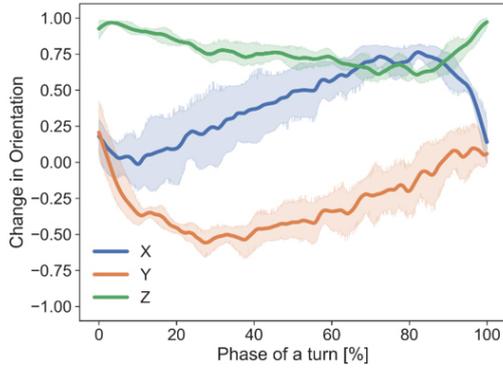
Outside ski



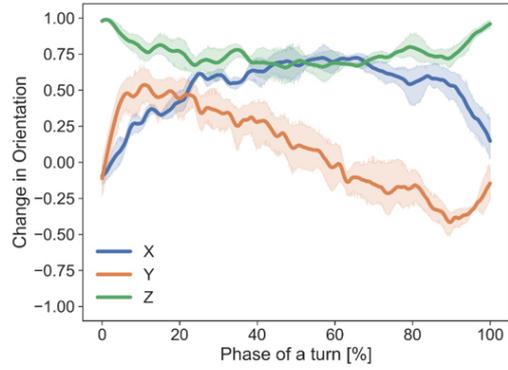
Waist

図 3-20. 中級スキーヤー2 の 1 ターン中の姿勢変化.

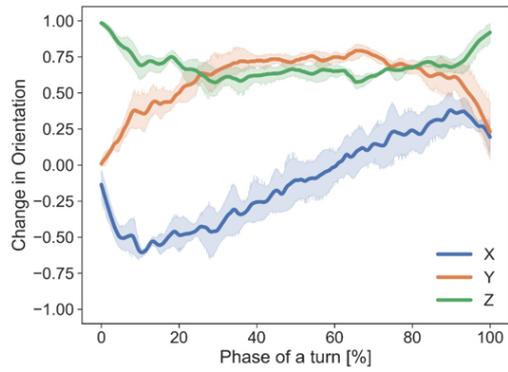
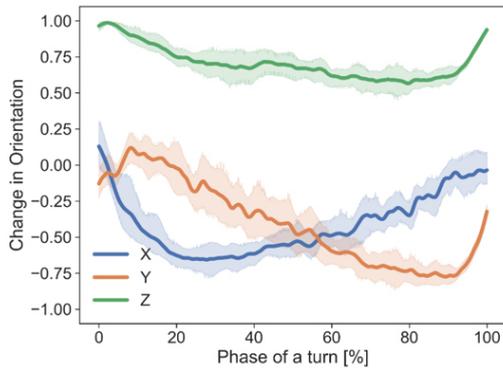
Left turn



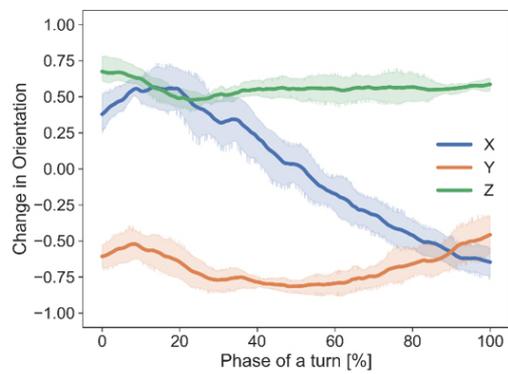
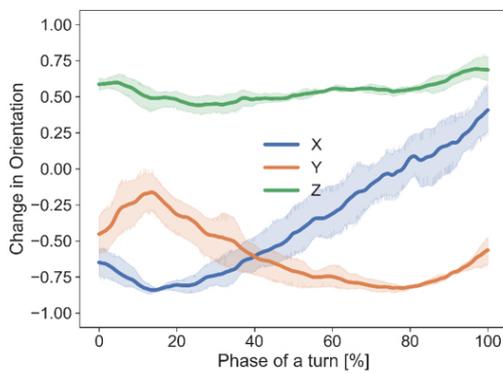
Right turn



Inside ski



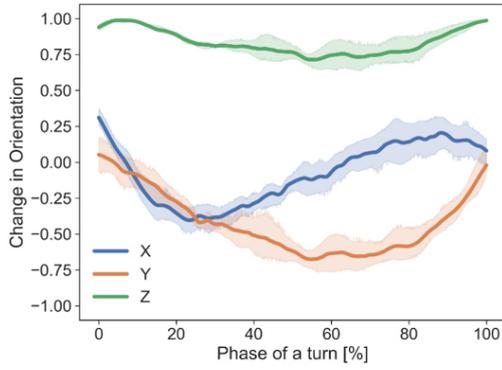
Outside ski



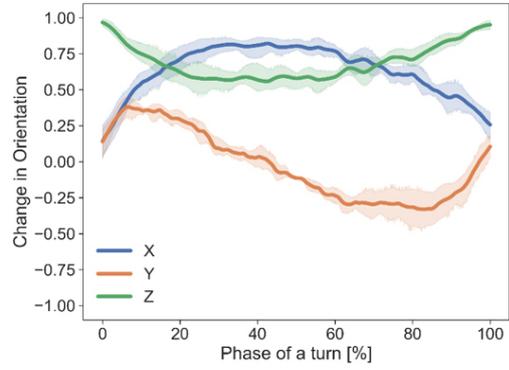
Waist

図 3-21. 中級スキーヤー3 の 1 ターン中の姿勢変化.

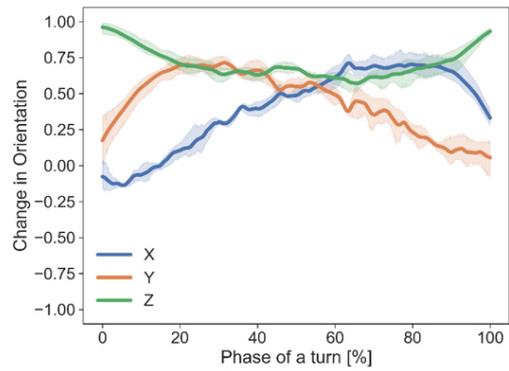
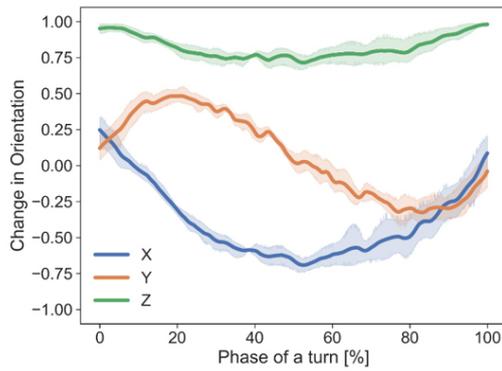
Left turn



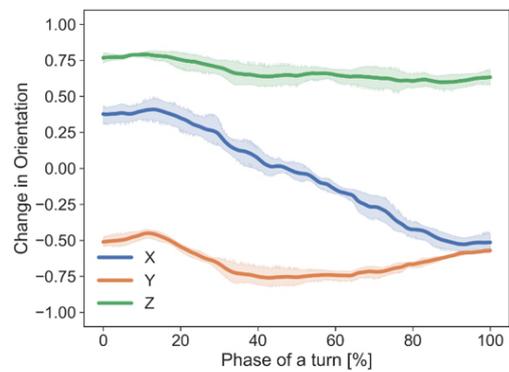
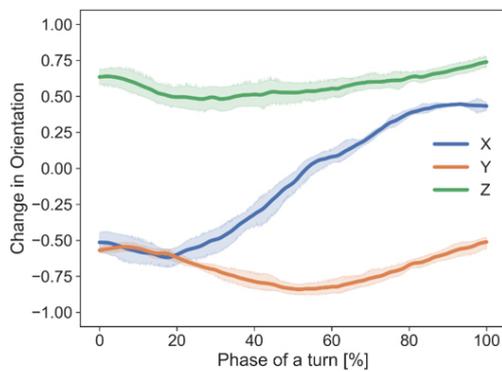
Right turn



Inside ski



Outside ski



Waist

図 3-22. 中級スキーヤー4 の 1 ターン中の姿勢変化.

4.4. スキーへの荷重の時系列変化

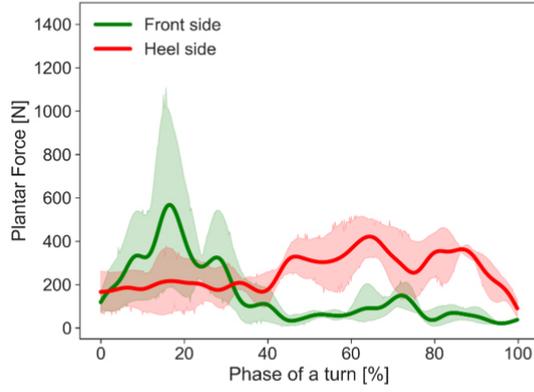
1 ターン中の足裏からスキーへの荷重変化を図 3-23～図 3-27 に示す。足底圧分布センサからは、図 3-7 に示すように、足裏をつま先側と踵側の 2 つの領域に分割し、各領域におけるセンサ面に対して垂直方向の力を式 (1) に従って求めた。これを足裏からスキーへの荷重量とした。式 (1) において、 F は対象領域から生じた力 (スキー板への荷重)、 A は足裏を 99 分割している各センサの面積 (センサ固有の既知の値)、 P は各センサで計測される圧力である。

$$F = \sum_{i=\text{target sensor's id}} A_i P_i \quad (1)$$

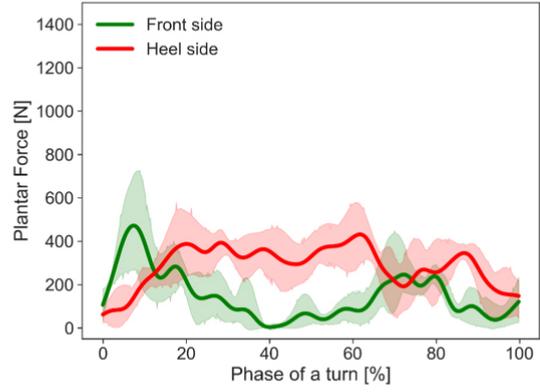
1 ターン毎に切り出された荷重データは、それぞれ 5 Hz のローパスフィルタで前処理した。その後、フィルタ処理されたデータに 3 次のスプライン補間を適用し、500 点でリサンプリングを行うことで、各ターンのデータ数を揃えた。これによって、異なるターン間を同じ 1 フェーズとして取り扱った。

各グラフは、同方向の全ターンの平均値を 95% 信頼区間付きでプロットした。実験参加者毎に、左ターンと右ターンそれぞれに対して、ターン中心からみた内側のスキーと外側のスキーの 2 つのグラフで構成されている。左ターンにおける内側は左足、外側は右足が該当し、右ターンにおいては、内側は右足、外側は左足が該当する。各グラフには、つま先側 (Front side)、踵側 (Heel side) からの荷重量がプロットされている。

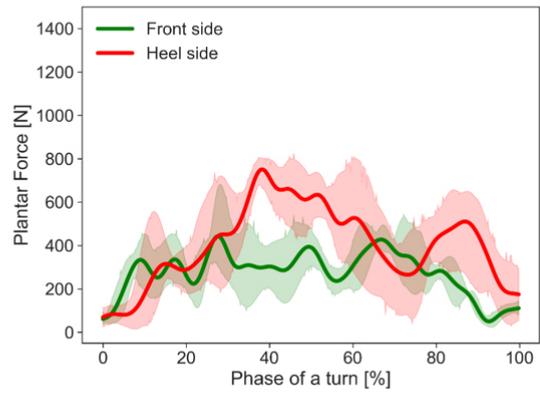
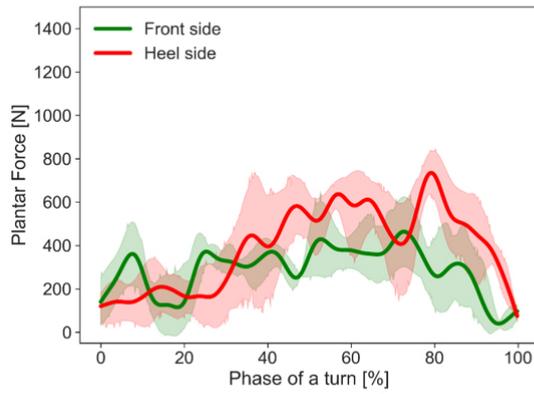
Left turn



Right turn



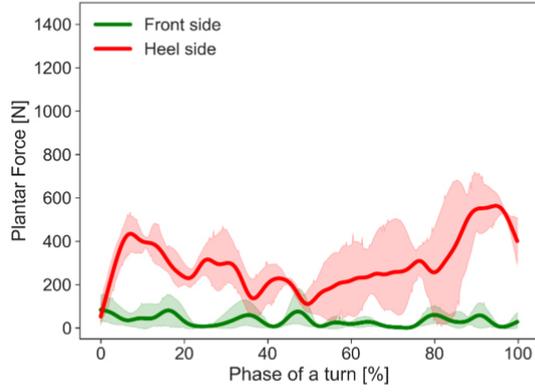
Inside ski



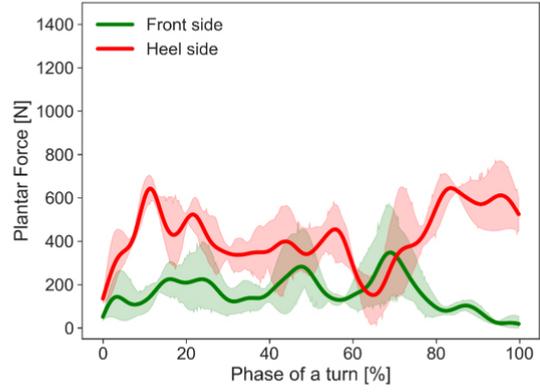
Outside ski

図 3-23. 熟練スキーヤーの 1 ターン中のスキーへの荷重変化.

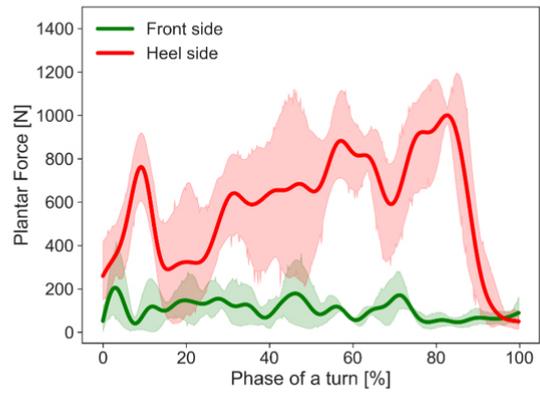
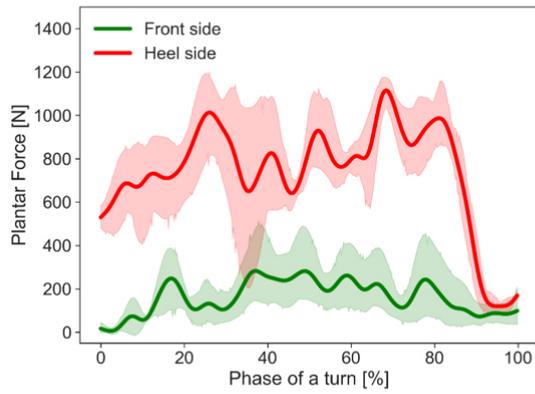
Left turn



Right turn



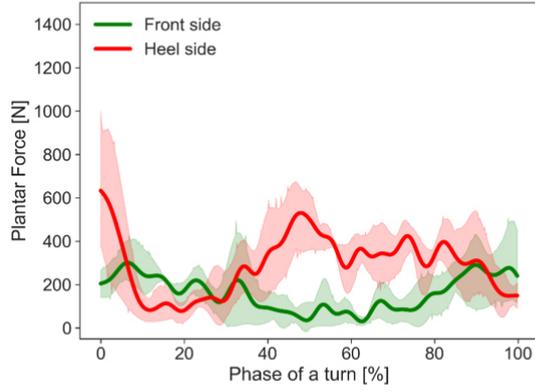
Inside ski



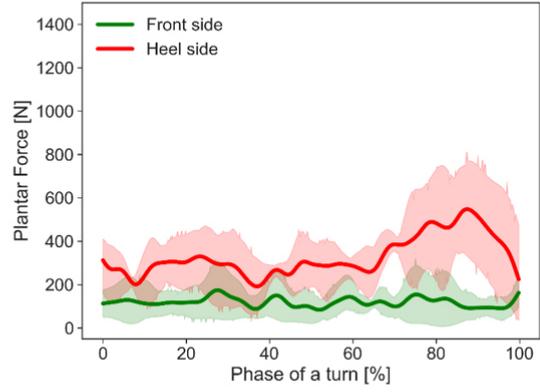
Outside ski

図 3-24. 中級スキーヤー1 の 1 ターン中のスキーへの荷重変化.

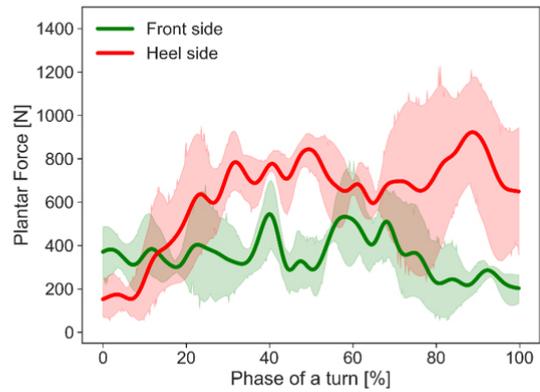
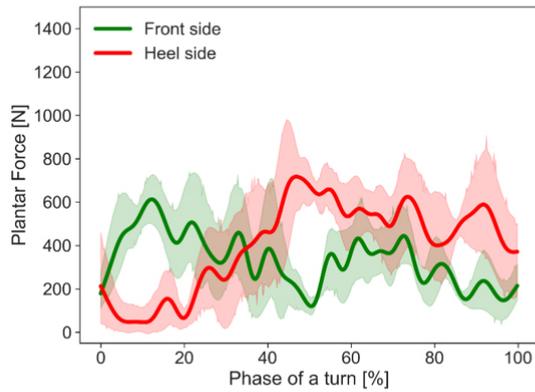
Left turn



Right turn



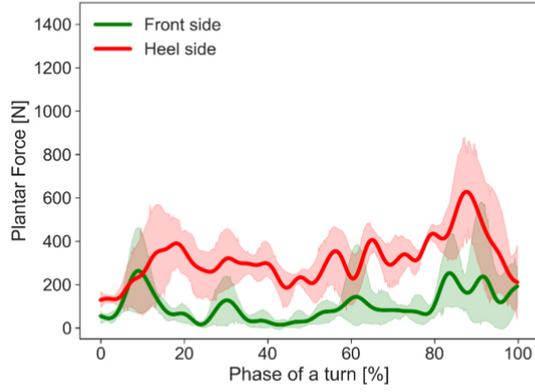
Inside ski



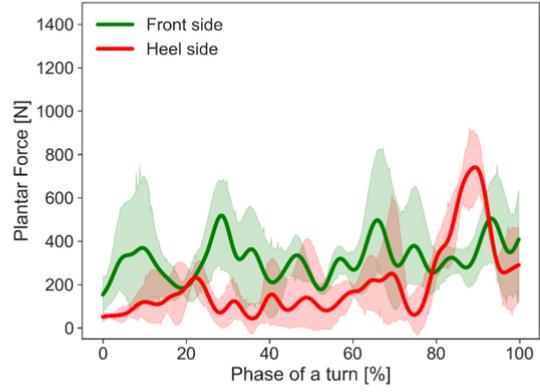
Outside ski

図 3-25. 中級スキーヤー2 の 1 ターン中のスキーへの荷重変化.

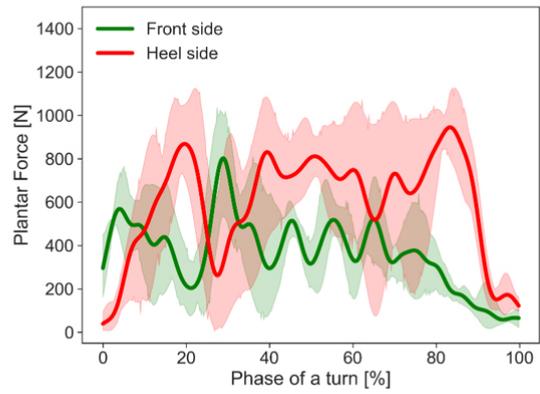
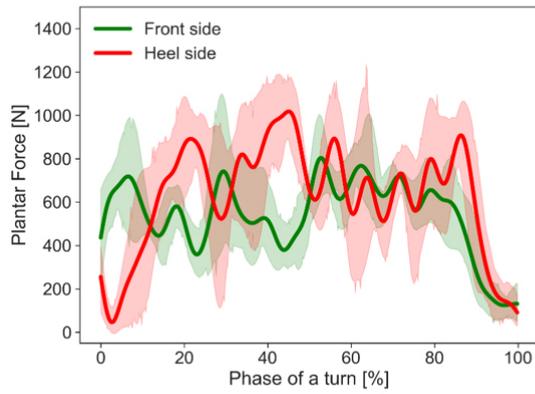
Left turn



Right turn



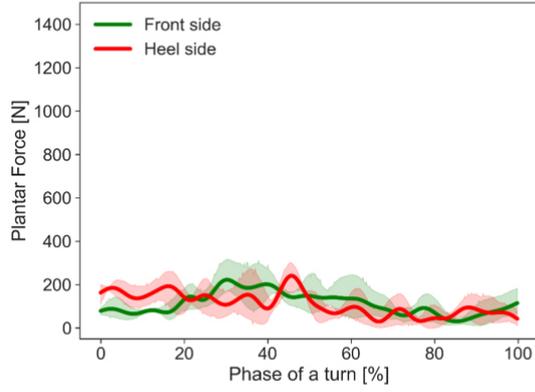
Inside ski



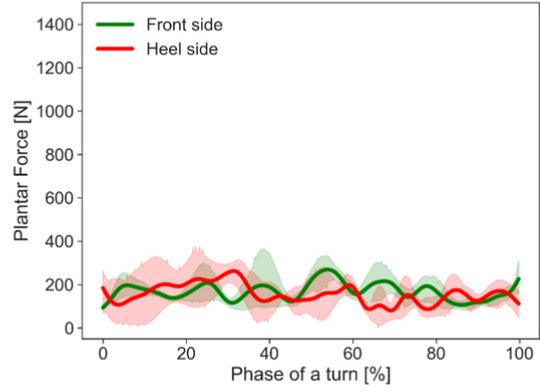
Outside ski

図 3-26. 中級スキーヤー3 の 1 ターン中のスキーへの荷重変化.

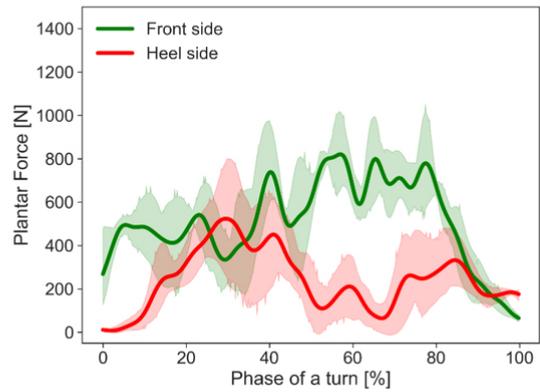
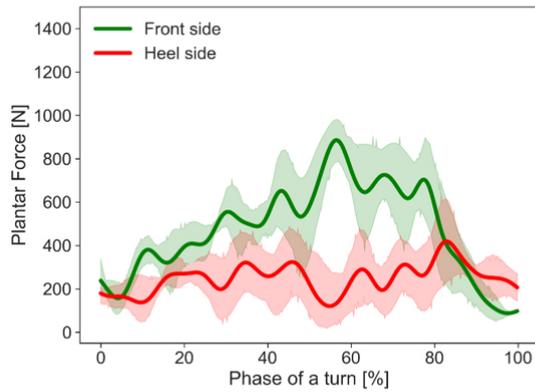
Left turn



Right turn



Inside ski



Outside ski

図 3-27. 中級スキーヤー4 の 1 ターン中のスキーへの荷重変化.

4.5. 特徴量抽出

スキーの技能差を表現する特徴量を検討するにあたり、1ターン中の各軸のデータから平均値、標準偏差、総和、二乗総和、peak-to-peak値、前後荷重比などを算出し、スキーヤーにとって解釈しやすく、技能差を表現している特徴量の検討を行った。その結果、スキー板の挙動の特徴として、スキー板に設置した慣性センサのY軸回りの角速度の総和を採用した。また、腰の挙動の特徴として、体軸回りの姿勢変化(X座標の変化)のpeak-to-peak値を採用した。スキーへの荷重変化の特徴として、ターン中の内外足及び足裏前後の荷重比を採用した。

4.5.1. スキー板の挙動から抽出した特徴量

スキー板の挙動からは、スキー板に設置した慣性センサの Y 軸回りの角速度の総和を特徴量として採用した。この値は、ターン開始時のエッジング速度変化とターン終盤のエッジングを戻す速度変化が同等であると、0 に近づく。結果を図 3-28 に示す。熟練スキーヤーは、両ターンにおいて、外側スキー、内側スキーともに安定して小さい値を示した。

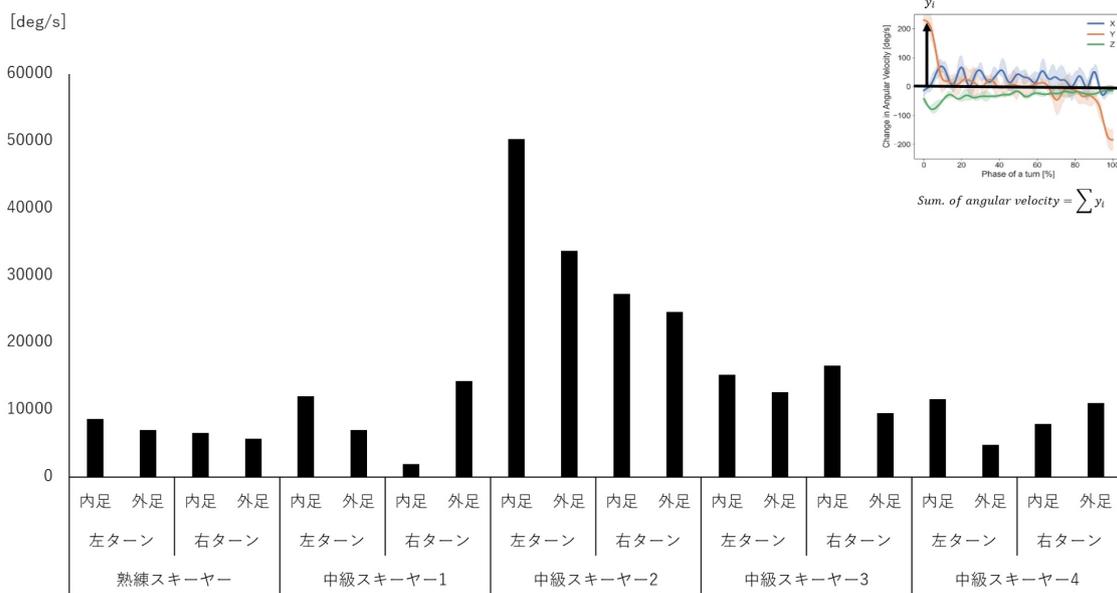


図 3-28. スキー板のエッジング方向の角速度変化の総和.

4.5.2. 腰の挙動から抽出した特徴量

腰の挙動からは，体軸回りの姿勢変化（X座標の変化）の peak-to-peak 値を特徴量として採用した．この値が大きくなると，スキーヤーはターン中，体軸回りに腰を大きく旋回させていることになる．結果を図 3-29 に示す．熟練スキーヤーは，両ターンにおいて，概ね左右対称で大きな値を示した．

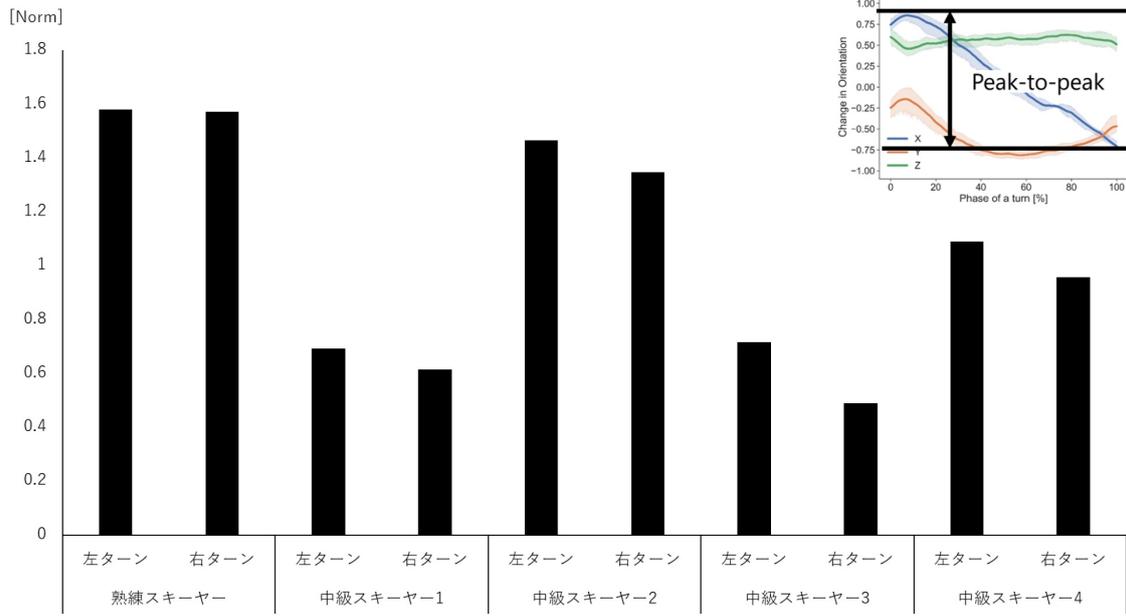


図 3-29. 腰の体軸回りの姿勢変化の peak-to-peak 値

4.5.3. スキーへの荷重から抽出した特徴量

スキーへの荷重からは、ターン中の内外足及び足裏前後の荷重比を特徴量として採用した。体重の異なる実験参加者間の荷重変化を比較するため、実験参加者毎に左ターン時の外スキー（右足）への総荷重量を1として規格化した。結果を図3-30に示す。熟練スキーヤーは左右ターンで均質な荷重ができていた。さらに、内足と外足の荷重比が、約3.75:6.25であり、各足内の前後荷重比は約3.3:6.7で安定していることが分かった。

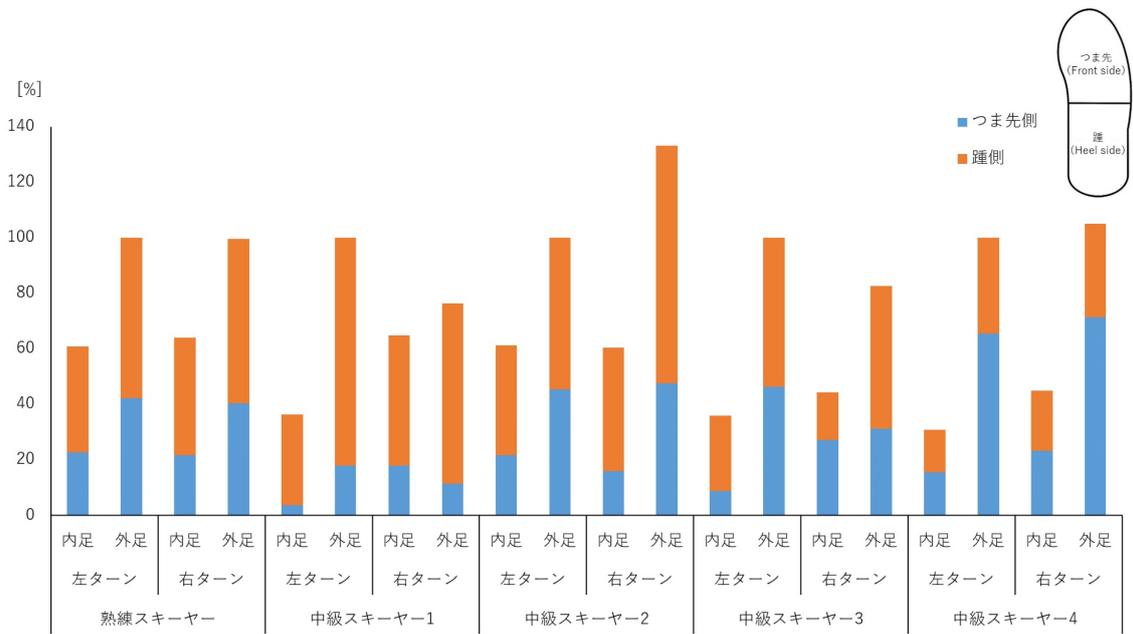


図 3-30. 内外足及び足裏前後のスキー板への荷重比

4.5.4. 特徴量間の関係

スキー板の挙動は、足裏からの荷重や身体の姿勢とインタラクションしている。そのため、前節で報告したスキー板の挙動、腰の挙動、スキー板への荷重からそれぞれ抽出した特徴量を用いて、スキー板の挙動とスキー板への荷重もしくは腰の姿勢との関係性を調査した。スキー板と荷重の関係を図 3-31（上）に、スキー板と腰の姿勢の関係を図 3-31（下）に示す。熟練スキーヤーは、エッジング方向の角速度の総和が小さく、両足からスキー板への総荷重量に対する外足の荷重割合が約 60%と安定しており、腰を大きく旋回していることがわかった。

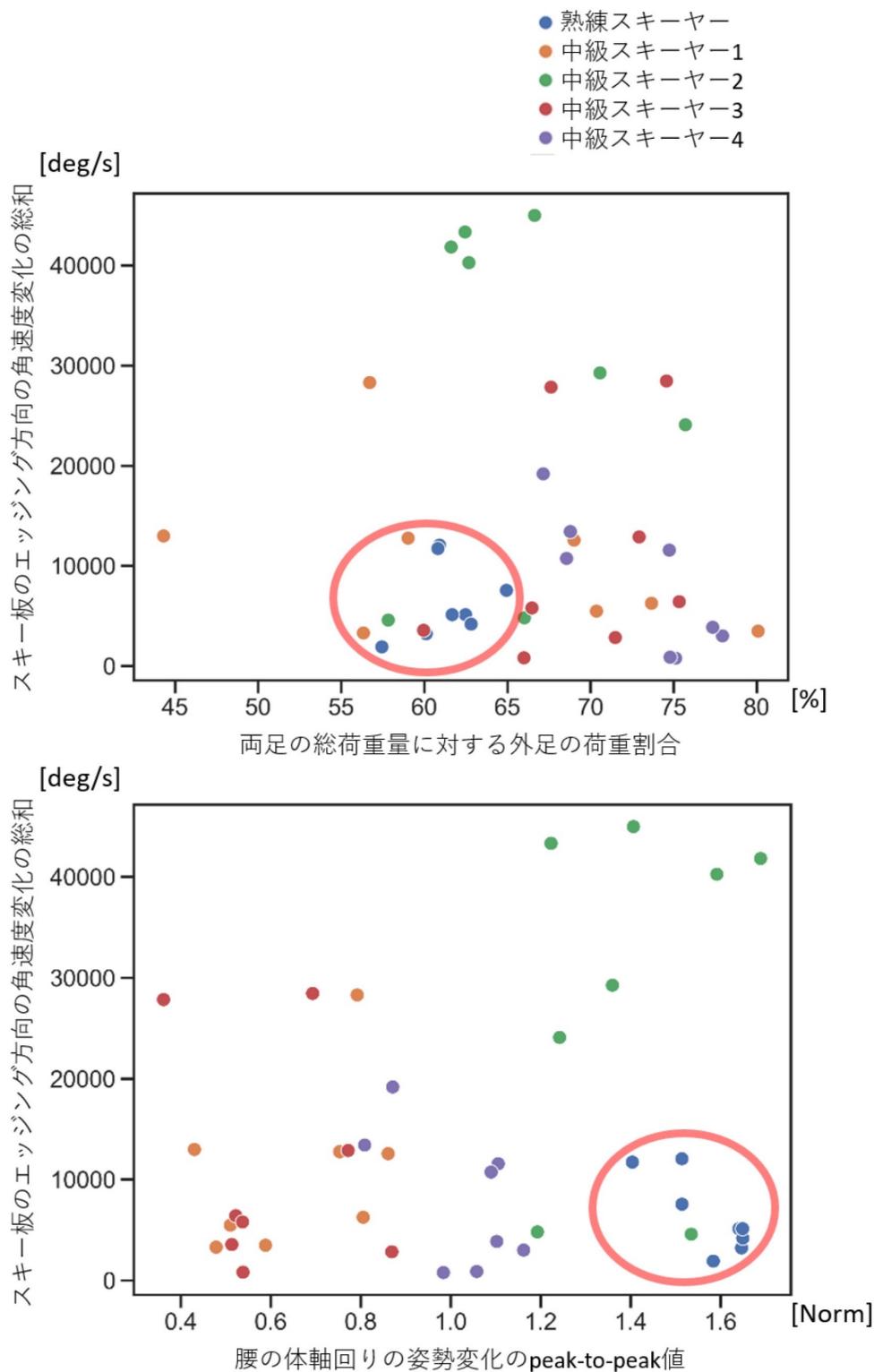


図 3-31. スキーへの両足からの総荷重量に対する外足の荷重割合とエッジング方向の角速度総和の関係 (上), 腰の体軸回りの姿勢変化の peak-to-peak 値とエッジング方向の角速度総和の関係 (下).

5. 考察

5.1. 簡便な計測系によるスキル評価

本実験では、実際のスキー場のゲレンデにて、簡便な方法で熟練者のスキーターンの特徴を取得することを試みた。スキーヤーが直感的に解釈し易い3つの特徴量を抽出し、技能レベルの違いを評価した。その結果、熟練者のスキーと腰の挙動は左右のターンで対称であり、腰の挙動（旋回動作）については中級者と比較して大きいことがわかった。また、熟練者は荷重全体の約60%を踵側から荷重しており、左右の比率が対称的であることがわかった。これらの結果から、熟練者は腰を大きく動かし、僅かに踵よりでスキー板に荷重しながら、左右対称なターン動作を実現していることがわかった。

熟練スキーヤーが左右対称なターン動作をできることはよく知られており (Smith, 2020), 本実験では、熟練者のスキーの動き、腰の旋回動作、スキーへの荷重が左右対称であったことから、本提案手法が熟練スキーヤーの特徴を的確に捉えられていることがわかった。また、踵荷重比の結果は、熟練スキーヤーがつま先ではなく踵よりでスキー板に荷重しているという先行研究の結果を裏付けるものであった (Nakazato et al., 2011)。

さらに、本実験は競技志向ではない一般のスキーヤーにとっても有用であることを示唆する結果となった。本提案手法は、3つの小型の慣性センサと1組の足底圧分布センサで構成されており、既製品の構成と類似しているため ("*Smart Skiing System - with iPhone Ski Tracking App*," n.d.; "*XON ski-1*," n.d.), 一般のスキーヤーにも受け入れ易い構成となっている。これら既製品では、人工知能や便利なガジェットによって概括的な技能評価が提供されているが、スキーと身体運動の関係は十分に明らかにされていない。本提案手法は、スキーと身体運動の特徴を捉えており、これまで高価かつ複雑な方法で評価されてきたスキーターン技能の特徴を簡便かつ効果的に評価できるものである。

5.2. 本研究の限界

本研究では、提案手法の検証を容易にするため、少数の特徴量に着目した。しかし、提案手法の有効性をより広く検証していくためには、スキーの滑走方向の挙動や腰の前後運動など、他の動作特徴も考慮した検証が必要である。

さらに本提案手法では、簡便に利用可能なセンサを用いた計測については自動化されていたが、データ収集と分析、評価は手動で実施された。しかし、実用的な観点からは、これら手動のプロセスも自動化された計測・評価システムの開発が必要である。

5.3. 実用面での意義

本研究のようにウェアラブルかつ簡便な計測系で、スキーターンの特徴を抽出し、技能レベルを評価した事例はこれまで殆ど報告されていなかった。本研究で提案した手法は、熟練スキーヤーの技能の特徴を定量的に抽出することができた。また、これらの特徴がアスリートにとって馴染みやすいことも重要な指針である。この観点においても、例えば足裏からの荷重の特徴などは、スキーの現場で議論される前後荷重比を捉えており、アスリートにとって馴染みやすい特徴を定量的に抽出できたと考えている。従って本研究の成果は、トレーニング中のスキーヤーが独学で熟練者との違いを知ることができるトレーニングシステムの開発に貢献するだろう。ただし、5.2節でも述べた通り、より多くの特徴量を検討し、アスリートにとって馴染みやすい特徴量のバリエーションを増やしていくことは、より効果的なトレーニング法を確立していくためには重要である。

6. 結言

本研究では、スキーヤー自身が簡便に扱える計測システムの開発を念頭に、技能レベルの違いを示すことのできるターン動作の特徴量を抽出した。小型の慣性センサとウェアラブルな足底圧分布センサを用いて、滑走動作を妨げない計測系を構築した。熟練者1名を理想的なスキーヤーとし、滑走中の腰部の姿勢とスキー板の挙動、足裏からスキー板への荷重傾向を実際のゲレンデで計測し、それらを中級者4名の同様の計測結果と比較した。取得したデータから、スキーヤーにとって解釈しやすく、技能差を表現する特徴量をこれら計測部位から抽出でき、熟練者の技能の特徴を評価できることがわかった。本研究の成果は、スキーヤー自身がスキー場でターンの技能評価を簡便に行えるトレーニング法の開発に貢献するだろう。

第4章

意義と課題

本研究では、ウインタースポーツの実環境において、熟練アスリートの心理生理状態及び技能を定量化した。本研究全体の意義としては、アスリートのパフォーマンス向上を最終的な目標とした際に、その目指すべき指標を定量的に示したことである。

心理面においては、スノーボードのようなアグレッシブな競技において、実戦環境における選手の心理生理状態と競技パフォーマンスの関係を知ることができ、選手がどのような生理状態で競技に臨むことが望ましいかに関する1つの知見を提供できたことは意義深い。今後は生理状態と競技パフォーマンスだけでなく、身体運動もあわせて計測していくことが重要である。また生理状態に関しても、心電図や手のひらの精神性発汗以外にも含めて多角的に計測・検証していくことが重要である。そうすることで、実戦環境における生理状態、身体運動、競技パフォーマンスの関係をより詳細に捉えることができ、生理状態変化が競技パフォーマンスに影響を与えるメカニズムの解明や効果的な介入法の開発に繋がるであろう。

技能面においては、スキーターンのトレーニング現場のように、主観的な指導が主流の現場において、実際の滑走データに基づき、アスリート自身が簡便かつ定量的に評価できる技能特徴の抽出法を提案できたことには意義がある。

本研究全体を通じた今後の課題としては、主に2つが考えられる。1つは、個人への最適化である。本研究で捉えることができた心理生理状態や技能の特徴を用いて、個人のパフォーマンスを向上させることが最終的な目標である。本研究では、熟練者の一般的な傾向として目指すべき心理生理状態や技能の特徴を定量的に示した。しかし、個人単位でみた場合、その傾向の度合いが必ずしも同じとは考え辛く、個人差が存在すると考えるのが妥当である。従って、本研究の成果を個人に最適化していくためにも、例えば、アスリート個人単位でデータを蓄積していくことが重要であると考えられる。

また2つ目としては、介入（フィードバック）法の開発である。アスリートのパフォーマンス向上に貢献するためには、介入法の開発は必要不可欠である。この介入法の開発にむけて、本研究成果はそれが目指すべき指標を示すことができた。最後に介入法を開発するにあたり、その指針を示す。効果的な介入法を開発するためには、熟練アスリート自身が経験的に会得しているパフォーマンス向上を目的とした振舞いを観察することが重要であろう。例えば心理生理状態においては、自分自身を最適と思われる状態に遷移させるために、試技前に音楽を聴く者や静かに瞑想する者など、熟練アスリート個人が経験的に実践している振舞いは多い。したがって、このような振舞いをよく観察し応用していくことが、アスリートや愛好家にとって、効果的かつ親しみやすい介入法の開発に繋がるであろう。

第 5 章

結論

本論文では、ウインタースポーツにおけるアスリートの心理生理状態及び技能の特徴を実フィールドで定量的に調査した。

第1章の序論では、先行研究を紹介しつつ研究の背景と課題を述べた。そこから本研究の目的を記述した。

第2章では、ウインタースポーツにおける心理的側面に着目した研究について述べた。実戦環境におけるスノーボードの試技前の心理生理状態と競技パフォーマンスの関係を検証した。スノーボードのジャンプ競技に参戦中のスノーボードの試技（ジャンプ）前の心電図と手のひらの皮膚電気活動を生理状態として計測した。そして、公開練習や予選、決勝といった競技シチュエーションの違いによる生理状態の変化、及び生理状態と競技パフォーマンスの関係を調査した。その結果、成績上位に入るスノーボーダーは、公開練習から決勝に進むにつれ、試技前に心拍数を高め、HRVのlnHFが減少し、SCLが増加することが観測された。また、競技スコアと平均心拍数が相関していることがわかった。さらに、スコアを構成する要素の内、難易度と完成度が心拍数の変化を説明していた。本研究の結果は、スノーボーダーが大会のような場面で高いパフォーマンスを発揮するために、自身の生理状態を適切にコントロールする方法論を提供することに貢献するだろう。今後の課題として、より多角的に生理状態を計測しつつ、身体運動も同時に計測していく必要がある。これらを通して、実戦環境において、生理状態変化が身体運動にどのような影響を与え、そして競技パフォーマンスの変化に繋がっているかのメカニズムを解明し、効果的な介入法を検討していくことが重要である。

第3章では、スポーツにおける技能面に着目した研究について述べた。スキーターンを対象とし、スキーヤー自身が簡便に現場で利用可能な計測系で、ターン技能の特徴を定量的に抽出する方法を検討した。ウェアラブルな小型の慣性センサと足底圧分布センサを用いた簡便な計測系で熟練者と中級者のターン動作の違いを定量的に評価可能な特徴量の抽出方法を提案した。1ターン中の腰の姿勢と足裏の前後荷重比から特徴量を抽出し、スキー板の挙動との関係をみたところ、熟練者は中級者よりも、腰の旋回動作が大きく、やや踵よりでスキーに荷重しながら、左右対称なスキー操作をしていることがわかった。本研究成果は、スキーヤー自身が簡便かつ定量的に滑走技能を評価できる手法の開発に貢献するだろう。今後の課題として、より多くの熟練スキーヤーを計測し、今回の傾向が熟練者全般に対して主張できることかを検証する必要がある。また、本実験では基礎的検討として解析項目を限定したが、今後は様々なターンバリエーションでの検証や他の効果的な特徴量の有無を検討する必要がある。その後、これら特徴量を用いて選手が効果的にトレーニングするための介入法についても取り組む必要がある。

第4章では、本研究全体を通しての意義と今後の課題について述べた。

総括として、本論文ではウインタースポーツで重要と考えられる心理的、技能的側面から実環境で検証を行った。本研究の成果は、スポーツの現場で心理的な影響がパフォーマンスにどのように影響しているかの解明にむけ、その最初の位置付けとして実戦で起きている現象を把握することに貢献したと考えられる。また、技能面に関しては、アスリートがより直感的かつ簡便にスポーツの現場でトレーニングする手法の開発にむけ、その最初の位置付けとして直感的な理解に繋がる特徴量の抽出法を検討した。今後もウインタースポーツを題材に、スポーツ界全体にとって、心理的、技能的側面からアスリートの能力向上に貢献できるよう研究を進めて参りたい。

研究実績

論文

1. Matsumura, S., Ohta, K., Yamamoto, S., Koike, Y., & Kimura, T. (2021). Comfortable and Convenient Turning Skill Assessment for Alpine Skiers Using IMU and Plantar Pressure Distribution Sensors. *Sensors*, 21(3), 834. <https://doi.org/10.3390/s21030834>
2. Matsumura, S., Watanabe, K., Saijo, N., Ooishi, Y., Kimura, T., & Kashino, M. (2021). Positive Relationship Between Precompetitive Sympathetic Predominance and Competitive Performance in Elite Extreme Sports Athletes. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3, 231. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.712439>

査読あり国際会議

1. Matsumura, S., Ohta, K., & Kimura, T. (2018). Comfortable Measurement of Ski-turn Skill using Inertial and Plantar-pressure Sensors. *Proceedings of the 6th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support - Volume 1: IcSPORTS*, 145–148. <https://doi.org/10.5220/0006959301450148>
2. Matsumura, S., Ohta, K., Yamamoto, S., Koike, Y., & Kimura, T. (2020). Convenient Method for Detecting Ski-Turn Features with Inertial and Plantar Pressure Sensors. *Proceedings of the 13th Conference of the International Sports Engineering Association*, 49(1), 24. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020049024>

査読なし国際会議

1. Matsumura, S., Watanabe, K., Saijo, N., Kimura, T., & Kashino, M. (2019). Pre-competitive physiological state affects performance in snowboard jump competitions. *Neuroscience 2019, Society for Neuroscience (SfN)*. Chicago, USA.
2. Matsumura, S., Watanabe, K., Saijo, N., Ooishi, Y., & Kashino, M. (2020) Measuring heart rate of snowboard jumpers just prior to the activity is not assured of yielding the strongest correlation with observed performance. *2020 Conference, North American Society for the Psychology of Sport and Physical Activity (NASPSPA)*. Vancouver, Canada.

国内学会・研究会

1. 松村 聖司, 川瀬 利弘, 木村 聡貴, 柏野 牧夫, 吉村 奈津江, & 小池 康晴. (2015).

跳躍時における下肢部の筋シナジー. *計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 (SSI2015)*.

2. 松村 聖司, 木村 聡貴, & 柏野 牧夫. (2017). 筋シナジーによるスキーターンの左右対称性の評価. *第 11 回 Motor Control 研究会*.
3. 松村 聖司, 太田 憲, & 木村 聡貴. (2018). 慣性センサと足底圧センサを用いた簡便なスキーターン計測. *日本機械学会 シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2018 (SHD2018)*.
4. 松村 聖司, 渡辺 謙, 木村 聡貴, & 柏野 牧夫. (2019). スノーボードのジャンプ競技大会における選手の生理状態計測. *日本スキー学会 第 29 回学会大会*.

参考文献

- Allison, A. L., Peres, J. C., Boettger, C., Leonbacher, U., Hastings, P. D., & Shirtcliff, E. A. (2012). Fight, flight, or fall: Autonomic nervous system reactivity during skydiving. *Personality and Individual Differences*, *53*(3), 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2012.03.019>
- Andersen, R. E., & Montgomery, D. L. (1988). Physiology of Alpine Skiing. In *Sports Medicine: An International Journal of Applied Medicine and Science in Sport and Exercise* (Vol. 6, Issue 4, pp. 210–221). <https://doi.org/10.2165/00007256-198806040-00003>
- Artioli, G. G., Gualano, B., Franchini, E., Batista, R. N., Polacow, V. O., & Lancha, A. H. (2009). Physiological, performance, and nutritional profile of the brazilian olympic wushu (kung-fu) team. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *23*(1), 20–25. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318187687a>
- Bessone, V., Petrat, J., & Schwirtz, A. (2019). Ground Reaction Forces and Kinematics of Ski Jump Landing Using Wearable Sensors. In *Sensors* (Vol. 19, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/s19092011>
- Carrillo, A. E., Christodoulou, V. X., Koutedakis, Y., & Flouris, A. D. (2011). Autonomic nervous system modulation during an archery competition in novice and experienced adolescent archers. *Journal of Sports Sciences*, *29*(9), 913–917. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.568514>
- Christiani, M., Grosicki, G. J., & Flatt, A. A. (2021). Cardiac-Autonomic and Hemodynamic Responses to a Hypertonic, Sugar-Sweetened Sports Beverage in Physically Active Men. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, *apnm-2021-0138*. <https://doi.org/10.1139/apnm-2021-0138>
- Clemente-Suárez, V. J., Robles-Pérez, J. J., & Fernández-Lucas, J. (2017). Psycho-physiological response in an automatic parachute jump. *Journal of Sports Sciences*, *35*(19), 1872–1878. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1240878>
- Donnelly, M. (2006). Studying extreme sports: Beyond the core participants. *Journal of Sport and Social Issues*, *30*(2), 219–224. <https://doi.org/10.1177/0193723506287187>
- Fasel, B., Spörri, J., Gilgien, M., Boffi, G., Chardonens, J., Müller, E., & Aminian, K. (2016). Three-Dimensional Body and Centre of Mass Kinematics in Alpine Ski Racing Using Differential GNSS and Inertial Sensors. In *Remote Sensing* (Vol. 8, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/rs8080671>

- Fernandez-Fernandez, J., Boullosa, D. A., Sanz-Rivas, D., Abreu, L., Filaire, E., & Mendez-Villanueva, A. (2015). Psychophysiological Stress Responses during Training and Competition in Young Female Competitive Tennis Players. *International Journal of Sports Medicine*, *36*(1), 22–28. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1384544>
- Hara, A., Ohide, H., Miyagawa, K., Takeuchi, T., Nakatani, Y., Yokoyama, H., & Amano, T. (2014). Acute Effects of Caffeine on Blood Pressure and Heart Rate in Habitual and Non-Habitual Coffee Consumers: *Iryo Yakugaku (Japanese Journal of Pharmaceutical Health Care and Sciences)*, *40*(7), 383–388. <https://doi.org/10.5649/jjphcs.40.383>
- Horslen, B. C., & Carpenter, M. G. (2011). Arousal, valence and their relative effects on postural control. *Experimental Brain Research*, *215*(1), 27–34. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2867-9>
- Immler, L., Schindelwig, K., Heinrich, D., & Nachbauer, W. (2019). Individual flexion stiffness of ski boots. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *22*, S55–S59. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2019.01.015>
- International Ski Federation. (2017). *The International Snowboard Competition Rules* [PDF file]. Retrieved August 6, 2021, from http://www.ski.is/static/files/yomisogn/FIS/sb_fis_icr17snowboard_english.pdf
- Jacobs, S. C., Friedman, R., Parker, J. D., Tofler, G. H., Jimenez, A. H., Muller, J. E., Benson, H., & Stone, P. H. (1994). Use of skin conductance changes during mental stress testing as an index of autonomic arousal in cardiovascular research. *American Heart Journal*, *128*(6), 1170–1177. [https://doi.org/10.1016/0002-8703\(94\)90748-X](https://doi.org/10.1016/0002-8703(94)90748-X)
- Kipp, R. W. (1998). Physiological Analysis and Training for Snowboard’s Halfpipe Event. *Strength & Conditioning Journal*, *20*(4). https://journals.lww.com/nsca-scj/Fulltext/1998/08000/Physiological_Analysis_and_Training_for.1.aspx
- Kreibig, S. D. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological Psychology*, *84*(3), 394–421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.03.010>
- Krüger, A., & Edelmann-Nusser, J. (2009). Biomechanical analysis in freestyle snowboarding: Application of a full - body inertial measurement system and a bilateral insole measurement system. *Leisure/Loisir*, *2*(1–2), 17–23. <https://doi.org/10.1080/19346182.2009.9648494>
- Lamontagne, M. (2001). Plantar Pressure Distribution and Forces Measured during

- Slalom and Giant Slalom Turns Performed by Elite Skiers. *Proceedings of the 19th International Symposium on Biomechanics in Sports*, 211–214. <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/3891>
- Malik, M. (1996). Heart Rate Variability. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 1(2), 151–181. <https://doi.org/10.1111/j.1542-474X.1996.tb00275.x>
- Mangine, R. E., Noyes, F. R., Mullen, M. P., & Barber, S. D. (1990). A Physiological Profile of the Elite Soccer Athlete. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 12(4), 147–152. <https://doi.org/10.2519/jospt.1990.12.4.147>
- Mateo, M., Blasco-Lafarga, C., Martínez-Navarro, I., Guzmán, J. F., & Zabala, M. (2012). Heart rate variability and pre-competitive anxiety in BMX discipline. *European Journal of Applied Physiology*, 112(1), 113–123. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-1962-8>
- Matre, D., & Knardahl, S. (2003). Sympathetic nerve activity does not reduce proprioceptive acuity in humans. *Acta Physiologica Scandinavica*, 178(3), 261–268. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201X.2003.01122.x>
- Mcalpine, P., Kurpiers, N., Kersting, U., Determan, J., & Borrani, F. (2012). Biomechanical Analyses of Snowboard Jump Landings. *30th Annual Conference of Biomechanics in Sports*, 105–108. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.824.5083&rep=rep1&type=pdf>
- Morales, J., Garcia, V., García-Massó, X., Salvá, P., Escobar, R., & Buscà, B. (2013). The Use of Heart Rate Variability in Assessing Precompetitive Stress in High-Standard Judo Athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 34(2), 144–151. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1323719>
- Nacht, C. A., Christin, L., Temler, E., Chiolero, R., Jequier, E., & Acheson, K. J. (1987). Thermic effect of food: Possible implication of parasympathetic nervous system. *American Journal of Physiology - Endocrinology and Metabolism*, 253(5). <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1987.253.5.e481>
- Nakazato, K., Scheiber, P., & Müller, E. (2011). A comparison of ground reaction forces determined by portable force-plate and pressure-insole systems in alpine skiing. *Journal of Sports Science & Medicine*, 10(4), 754–762. </pmc/articles/PMC3761512/?report=abstract>
- Ortega, E., & Wang, C. J. K. (2018). Pre-performance Physiological State: Heart Rate Variability as a Predictor of Shooting Performance. *Applied Psychophysiology Biofeedback*, 43(1), 75–85. <https://doi.org/10.1007/s10484-017-9386-9>

- Owens, B. D., Nacca, C., Harris, A. P., & Feller, R. J. (2018). Comprehensive Review of Skiing and Snowboarding Injuries. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, *26*(1), e1–e10. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-16-00832>
- Palomba, D., Sarlo, M., Angrilli, A., Mini, A., & Stegagno, L. (2000). Cardiac responses associated with affective processing of unpleasant film stimuli. *International Journal of Psychophysiology*, *36*(1), 45–57. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(99\)00099-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8760(99)00099-9)
- Platzer, H. P., Raschner, C., Patterson, C., & Lember, S. (2009). Comparison of physical characteristics and performance among elite snowboarders. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *23*(5), 1427–1432. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181aa1d9f>
- Radzi, J., Yusof, S., & Zakaria, A. (2013). Pre-competition anxiety levels in individual and team sports athletes. *Proceeding of the International Conference on Social Science Research*, 1197–1206.
- Robazza, C., Bortoli, L., & Nougier, V. (1999). Emotions, heart rate and performance in archery. A case study. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *39*(2), 169–176. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10399428>
- Rodríguez-Zamora, L., Iglesias, X., Barrero, A., Chaverri, D., Erola, P., & Rodríguez, F. A. (2012). Physiological Responses in Relation to Performance during Competition in Elite Synchronized Swimmers. *PLOS ONE*, *7*(11), e49098. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049098>
- Sachtleben, T. R. (2011). Snowboarding Injuries. *Current Sports Medicine Reports*, *10*(6). https://journals.lww.com/acsm-csmr/Fulltext/2011/11000/Snowboarding_Injuries.9.aspx
- Sainburg, R. L., Poizner, H., & Ghez, C. (1993). Loss of proprioception produces deficits in interjoint coordination. *Journal of Neurophysiology*, *70*(5), 2136–2147. <https://doi.org/10.1152/jn.1993.70.5.2136>
- Schachter, S., & Singer, J. (1962). Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state. *Psychological Review*, *69*(5), 379–399. <https://doi.org/10.1037/h0046234>
- Schmitt, L., Hellard, P., Millet, G. P., Roels, B., Richalet, J. P., & Fouillot, J. P. (2006). Heart rate variability and performance at two different altitudes in well-trained swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, *27*(3), 226–231. <https://doi.org/10.1055/s-2005-865647>

- Schmitt, L., Regnard, J., Desmarests, M., Mauny, F., Mourot, L., Fouillot, J. P., Coulmy, N., & Millet, G. (2013). Fatigue Shifts and Scatters Heart Rate Variability in Elite Endurance Athletes. *PLoS ONE*, *8*(8).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071588>
- Schmitt, L., Regnard, J., & Millet, G. P. (2015). Monitoring Fatigue Status with HRV Measures in Elite Athletes: An Avenue Beyond RMSSD? *Frontiers in Physiology*, *6*, 343. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00343>
- Sequeira, H., Hot, P., Silvert, L., & Delplanque, S. (2009). Electrical autonomic correlates of emotion. *International Journal of Psychophysiology*, *71*(1), 50–56.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2008.07.009>
- Smart Skiing System - with iPhone Ski Tracking App*. (n.d.). Retrieved August 6, 2021, from <https://snowcookiesports.com/>
- Smith, W. (2020, January 21). How to master the ski technique of maintaining leg symmetry down the slopes. *The Telegraph*. Retrieved August 6, 2021, from <https://www.telegraph.co.uk/travel/ski/skills/ski-technique-maintaining-leg-symmetry/>
- Sporer, B. C., Cote, A., & Sleivert, G. (2012). Warm-Up Practices in Elite Snowboard Athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *7*(3), 295–297. <https://doi.org/10.1123/ijsp.7.3.295>
- Sun, H., Xu, M.-T., Wang, X.-Q., Wang, M.-H., Wang, B.-H., Wang, F.-Z., & Pan, S.-N. (2018). Comparison Thigh Skeletal Muscles between Snowboarding Halfpipe Athletes and Healthy Volunteers Using Quantitative Multi-Parameter Magnetic Resonance Imaging at Rest. *Chinese Medical Journal*, *131*(9).
https://journals.lww.com/cmj/Fulltext/2018/05050/Comparison_Thigh_Skeletal_Muscles_between.8.aspx
- van Fenema, E. M., Gal, P., van de Griend, M. V, Jacobs, G. E., & Cohen, A. F. (2017). A Pilot Study Evaluating the Physiological Parameters of Performance-Induced Stress in Undergraduate Music Students. *Digital Biomarkers*, *1*(2), 118–125.
<https://doi.org/10.1159/000485469>
- Vandewalle, G., Middleton, B., Rajaratnam, S. M. W., Stone, B. M., Thorleifsdottir, B., Arendt, J., & Dijk, D.-J. (2007). Robust circadian rhythm in heart rate and its variability: influence of exogenous melatonin and photoperiod. *Journal of Sleep Research*, *16*(2), 148–155. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2007.00581.x>
- Vernillo, G., Pisoni, C., & Thiebat, G. (2016). Strength Asymmetry Between Front and Rear Leg in Elite Snowboard Athletes. *Clinical Journal of Sport Medicine*, *26*(1),

- 83–85. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000194>
- Vernillo, G., Pisoni, C., & Thiébat, G. (2018). Physiological and Physical Profile of Snowboarding: A Preliminary Review. *Frontiers in Physiology, 9*, 770. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00770>
- Wallin, B. G. (1981). Sympathetic Nerve Activity Underlying Electrodermal and Cardiovascular Reactions in Man. *Psychophysiology, 18*(4), 470–476. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1981.tb02483.x>
- Weinberg, R. S., & Genuchi, M. (1980). Relationship between Competitive Trait Anxiety, State Anxiety, and Golf Performance: A Field Study. *Journal of Sport Psychology, 2*(2), 148–154. <https://doi.org/10.1123/jsp.2.2.148>
- Weinstein, S., Khodaei, M., & VanBaak, K. (2019). Common Skiing and Snowboarding Injuries. *Current Sports Medicine Reports, 18*(11). https://journals.lww.com/acsm-csmr/Fulltext/2019/11000/Common_Skiing_and_Snowboarding_Injuries.8.aspx
- XON ski-1. (n.d.). Retrieved August 6, 2021, from <https://xon.cerevo.com/en/ski-1/>
- Yeadon, M. R. (1989). A Method for Obtaining Three-Dimensional Data on Ski Jumping Using Pan and Tilt Cameras. *International Journal of Sport Biomechanics, 5*(2), 238–247. <https://doi.org/10.1123/ijsb.5.2.238>
- Yu, G., Jang, Y., Kim, J., Kim, J., Kim, H., Kim, K., & Panday, S. (2016). Potential of IMU Sensors in Performance Analysis of Professional Alpine Skiers. *Sensors, 16*(4), 463. <https://doi.org/10.3390/s16040463>
- 堀 忠雄, 尾崎 久記, 坂田 省吾, 山田 富美雄. (2017). *生理心理学と精神生理学 第I巻 基礎*. 北大路書房.
- 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. https://doi.org/10.14845/jskisciences.10.1_27
- 日本生産性本部. (2017). *レジャー白書 2017 余暇の現状と産業・市場の動向*. 公益財団法人 日本生産性本部.
- 中川 剣人, 三浦 智, 廣岡 和真, 梅沢 侑実, 神庭 弘行, 後藤 悠太, 藤本 浩志, 藤江 正克, & 彼末 一之. (2018). スキー滑走動作における拡張現実技術を用いた第三者視点からのリアルタイムフィードバックシステムの有効性の予備的検討. *スキー研究, 15*(1), 77–82. https://doi.org/10.14845/jskisciences.15.1_77
- 廣瀬 圭, 土岐 仁, 佐藤 伸幸, & 村田 浩. (2011). スキーヤーの姿勢・滑走軌跡計測を用いたスキー・ターンの運動解析に関する研究. *スキー研究, 8*(1), 21–27. https://doi.org/10.14845/jskisciences.8.1_21

- 木本 理可, 高橋 直也, 星野 直, 今村 啓, 神林 勲, 監物 勇介, & 塩野谷 明. (2018). スキー・レーシング・パフォーマンス評価支援システムの基盤計測技術の開発. *スキー研究*, *15*(1), 11-19. https://doi.org/10.14845/jskisciences.15.1_11
- 伏見 知何子, 近藤 亜希子, 千葉 遥, 廣瀬 圭, 高橋 護, & 土岐 仁. (2018). スノーボード・オーリー動作の運動学的解析に関する研究. *スキー研究*, *15*(1), 1-9. https://doi.org/10.14845/jskisciences.15.1_1
- 村山 敏夫, 遠藤 勇気, 木竜 徹, & 牛山 幸彦. (2011). スキー滑走を対象にした下肢筋活動に基づく運動スキルの定量的評価の提案. *生体医工学*, *49*(6), 911-917. <https://doi.org/10.11239/jsmbe.49.911>

謝辞

本論文は、東京工業大学大学院 総合理工学研究科 物理情報システム専攻 博士後期課程において、小池・吉村研究室在籍中の研究成果をまとめたものである。本研究を行うにあたり、多くの方々のご支援を賜った。

まず本研究を遂行するにあたり、実験参加者として計測にご協力いただいた、スノーボーダーならびにスキーヤーの方々に深く感謝申し上げます。また実環境において、実験系の構築にご協力いただいた、プロスノーボーダーの石川 敦士 氏、今村 佑良 氏をはじめ、ジャッジやスタッフの方々に厚く御礼申し上げます。さらに実験の場として施設をご提供いただいた、スノーヴァ新横浜、菅平高原スノーリゾートの方々にも併せて深く感謝の意を表す。

本研究は、日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所(NTT CS 研)との共同研究として実施された。研究全般に関して多大なご支援を賜った、当研究所の柏野 牧夫 フェロー、西條 直樹 主幹研究員、木村 聡貴 主任研究員、大石 悠貴 主任研究員、太田 憲 客員研究員、渡辺 謙 客員研究員、星 綾子 氏をはじめとした研究所の方々に深く感謝申し上げます。併せて、本論文の第3章に関する研究において、実験参加者の紹介から実験、解析まで幅広くご支援を賜った共同研究者の芝浦工業大学 山本 紳一郎 教授にも厚く御礼申し上げます。

本研究を行うにあたり、ご多忙な中、ご指導ご鞭撻を賜った、指導教員の吉村 奈津江 准教授、副指導教員の小池 康晴 教授に深い敬意と感謝の意を申し上げます。本論文をご審査いただいた、金子 寛彦 教授、熊澤 逸夫 教授、小尾 高史 准教授にも深く感謝申し上げます。

また本論文の第2章に関する研究は、JST, CREST, JPMJCR14E4 の支援を受けたものである。当機構は、研究デザイン、データ収集・分析、原稿作成、出版の意思決定等に一切関与していない。

最後に、本研究に従事するにあたり、常に生活面及び心身面を支えてくれた、妻 友美、娘 咲月、息子 悠太、父 義雄、母 美保子、妹 彩子に心から感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。