

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K11545

研究課題名（和文）スキーにおける前十字靭帯損傷リスクを低下させる滑走技術の解明

研究課題名（英文）Identifying skiing techniques that reduce the risk of anterior cruciate ligament injury in alpine skiing

研究代表者

吉岡 伸輔 (Yoshioka, Shinsuke)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：20512312

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：アルペンスキーにおいて前十字靭帯（ACL）損傷は深刻な予後を招くことから、ACL損傷リスクの低い滑走技術について明らかにすることを目的として本研究を実施した。スキー滑走データを取得し、それらとシミュレーションを組み合わせて解析を行った。シミュレーションでは、ACL受傷の主要状況であるスリップ後に再度雪面をキャッチする（スリップキャッチ機構）の場面を設定した。解析の結果、滑走技術の違いによる影響は小さいことが明らかとなった。また、スキー動作の基本特性である、スキーテールの挺子作用およびスキーの雪面保持力が重要な因子であることが示唆された。当研究よりACL損傷防止の困難さが改めて浮き彫りとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アルペンスキーにおいて前十字靭帯（ACL）損傷のリスクが、スキー動作の基本特性（長い板を足部に固定して、雪面をグリップして滑走するという性質）と密接に関連していること、および、スキー技能やスキー板種別の差異の影響が小さいことが示された点に学術的意義がある。一方、実践的（社会的）な観点では、スキー指導においても格闘技の受け身技に類する技能を学習初期に基本技能として学習することが重要かもしれないことが示された点が重要と言える。

研究成果の概要（英文）：This study was conducted to identify skiing techniques with low risk of ACL injury, since anterior cruciate ligament (ACL) injury is a serious prognostic factor in Alpine skiing. Skiing data were obtained and analyzed by combining those data with dynamical simulations. In the simulation, a situation in which the ski catches the snow surface again after slipping (slip-catch mechanism), which is the main situation for ACL injury, was set up. The results of the simulations showed that the influence of different skiing techniques was small. It was also suggested that the leverage action of the ski tail on the lower limb and the catch characteristics of the skis, which are fundamental characteristic of skis, were important factors. Our study once again highlights the difficulty in preventing ACL injuries.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：前十字靭帯損傷 スリップキャッチ機構 アルペンスキー

1. 研究開始当初の背景

アルペンスキーは、冬季レジャーとして、また、競技としても盛んなスポーツである。その特徴は滑走スピードであり、その点に由来する爽快さ、スリルが醍醐味である。一方、その高速性ゆえに怪我のリスクの高いスポーツでもある。アルペンスキー黎明期よりその安全対策は主要な関心事項であり、多くの研究がなされてきた (Spörri et al., 2017)。現在、アルペンスキーにおいて、最も多く、そして重症度の高い外傷が、膝関節の前十字靭帯 (以後、ACL: anterior cruciate ligament) 損傷である (Haaland et al., 2016)。そのため、スキー研究の中でも ACL 損傷を扱った研究は多い。

アルペンスキーにおける ACL 損傷では、スキーヤーが滑走中にバランスを崩した際や転倒時に受傷する非接触式の受傷パターンが多い。スキーでは通常、スキーヤーの身長程度の長いスキー板が足部に固定されていることから、スキー板が杖子として働き、雪面より身体にかかる力が増大する。また、その長いスキー板がビンディングとブーツを介して下肢に強固に固定されているため、スキー以外の動作と比較して大きなトルクや力を受ける機会が多く、怪我が誘発されやすい (Johnson et al., 1974)。加えて、カービングスキーに代表されるようにスキー板の回転性能が向上してきたことに関連する受傷メカニズムも示されている (例、スリップキャッチ機構)。いずれの機序で受傷するにしても、ACL 損傷予防の困難な点は、前記のスキーの用具特性がスキーの運動特性と密接に関わる上に、運動特性向上と損傷予防の方向性が対立する点にある。

ACL 損傷がその後のスポーツ活動に与える深刻さを考慮すると、運動特性 (例えば、スキー板の回転性能、いわゆるラディウス) を制限することで ACL 損傷のリスクを減少させられる可能性があるのであれば検討に値するものである。国際スキー連盟はスキー板のラディウスに下限を設けるよう (回転性能に上限を設けるよう) 用具規則を変更し、外傷を減らすことを試みた。しかし、その結果は予想に沿うものではなく、規制前後で ACL 損傷に関わる怪我に差異は認められなかった (Haaland et al., 2016)。

一般的に、スポーツ障害は多数の内的・外的リスク要素の相互作用の結果として発生する (Bahr & Krosshaug, 2005)。スキーにおいても同様であり、他の要素の影響で効果がマスクされた可能性も存在することから、Bahr の提案する各種リスク要因を制御/考慮したモデルによる ACL 損傷の仕組み解明が望まれる。加えて、Spörri et al. (2017) においては、変化の大きい自然環境下での原因解明において、そもそも統計的手法では厳しい可能性についても言及されており、その点考慮した研究が求められる。

2. 研究の目的

以上の背景のもと当研究では、各種リスク要因を同時に考慮したモデルによる ACL 損傷の仕組み解明を最終目標とおき、その第一段階として、定常滑走における滑走動作と受傷リスクの関連性について明らかにすることを目的として研究を実施した。

3. 研究の方法

本研究では、まず実際の滑走動作を計測し、その後、当該実滑走動作を入力とした動力学シミュレーションを用いて滑走動作の ACL 損傷評価を行い、ACL 損傷のメカニズムについて調べた。当研究に関しては、申請者所属組織の倫理審査委員会の許諾を得た (課題番号 682, 682-2)。

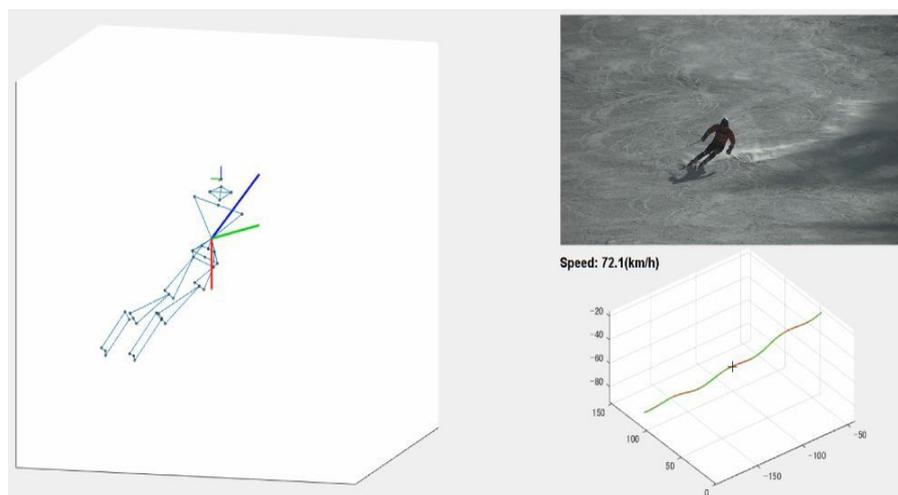


図 1 : 実滑走動作の計測結果例

滑走動作の計測)

滑走動作については、大きく分けて3種類の条件で計測した(1. スラローム板を用いたフリー滑走、2. スラローム板を用いたゲート滑走、3. ジャイアントスラローム板を用いたフリー滑走)。いずれの条件においても6名計測した。図1は計測結果例である。

可能な限り条件を統一するため、スキー板については同一のものを使用した。ブーツについては、被験者が平時使用しているものを使用した。Yoshioka et al. (2018)の方法を用いて滑走中の姿勢を計測した。計測部位は身体の9つの部位(頭部、上腕、下腕、大腿左右、下腿左右、スキー左右)であった。サンプリング周波数は1000Hzにて計測した。計測後、10Hzのカットオフ周波数に設定したバターワース型4次ローパスフィルターにてデータを平滑化した。

身体位置および速度についてはGNSSのRTK方式にて、サンプリング周波数は5Hzにて計測した(FKL-ST-01、フォーアシスト社)。その後、位置および速度の運動学的関係を考慮したカルマンフィルターを用いて各データについて処理した。位置および速度データを姿勢データと合わせるため、スプラインを用いてデータを補間した後、1000Hzにアップサンプリングした。GNSSデータから得られた加速度と、頭部に貼付した慣性センサの加速度の相互相関が最も高くなる時点を同期時刻とした。各計算には数値計算ソフト Matlab R2020a(MathWorks社)を用いた。

動作データのシミュレーション入力用の処理)

股関節・膝関節・足関節の関節角度、下腕のオイラーパラメータ、およびGNSSにより求めた頭部の位置および速度データについて、3次スプライン関数を用いて表現し、シミュレーション入力として使用した。下腕の向心加速度が最小となるフレームを左右ターンの境界フレームとして、一連の滑走データを左右の各ターンに分割した。

各ターンについて、1ターン中の斜面変化はないものと仮定し(斜面が一様であると仮定し)、スキー板の位置情報より近似平面を算出した。近似平面を算出後、スキー板が平面に接するよう、下腕のオイラーパラメータを補正し、補正後の値をシミュレーション入力のためのデータとした。これは、シミュレーションにおいて1ターン中の微細な斜面変化を考慮していないためである。

シミュレーションのモデル設定)

右下肢が外側となるターン(左方向へのターン、すなわち、左ターン)についてシミュレーションを行った。モデルは、右下肢を主としたものを構築した。スキー板とブーツが6セグメント(右スキー板の前部3セグメント、ブーツとスキー板中央部が一体となった1セグメント、後部2セグメント)より構成され、身体が3セグメント(右大腿、右下腿、それら以外の部位および用具をまとめた部位(上半身・ポール・左下肢・左スキー))より構成されるモデルとした。なお、まとめた部位のセグメント(以後、マーキングセグメントと呼ぶ)をモデルのルートセグメント、頭頂の点をモデルの原点に定めた。身体セグメントの慣性パラメータについてはDeLeva(1996)の値を用いた。スキー板およびビンディングについては質量を計測後、密度一定として慣性パラメータを求めた。ブーツについてはサンプルブーツ一足について求め、その値を用いた。

シミュレーションについては、モデルの運動方程式を定式化後、ラグランジュの未定乗数法を用いて関節角度の実験値を運動方程式と連立し、各時刻における運動方程式を解いた。加速度および速度の結果を Matlab の ode45 ソルバー(陽的ルンゲクッタ法)にて積分することで各時刻のシミュレーション結果を得た。シミュレーションの初期値には、関節角度に加えて下腕の姿勢および滑走スピードの実験値を設定した。速度ベクトルのノルム(スピード)は、GNSSデータと一致するよう設定した。スキー板と雪面に発生する力については、Mössner et al. (2014)のモデルを用いた。ただし、このモデルで用いられている雪面の力学特性は非常に硬い斜面が想定されたものであることから、雪面の力学特性を表現するパラメータについては調整して用いた。シミュレーションには数値計算ソフト Matlab R2020a(MathWorks社)を用いた。図2はシミュレーションの結果例である。

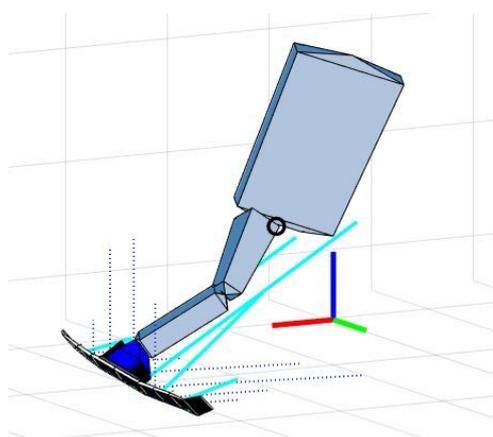


図2:シミュレーション動作の結果例
(水色の線は雪面反力ベクトルを示す)

シミュレーションの条件設定)

受傷の多いスリップキャッチ機構を想定し、シミュレーションの条件設定を行った。受傷がターン後半に多いことから、当シミュレーションではターン60%局面を初期値としてシミュレーションを行った。スリップキャッチ機構ではスリップした後の雪面接触時に受傷することから、当シミュレーションの初期値においては、雪面の接触はない設定とした。シミュレーション開始におけるマーキングセグメントの並進速度の初期値については、スピード(速度のノルム)は実

験値より入力し、方向については斜面に平行する方向はスキー板に対して10度ターン外方向へ、斜面垂直方向は斜面へ1m/sで下降する方向とした。なお、ターン60%局面を初期値とすること、および、外方向へ10度とすることいずれも予備検討の段階で結果に対して敏感な挙動をするものではないことは確認した。

4. 研究成果

研究開始時において、滑走動作と受傷リスクが関連していることを予想した。しかし予想に反し、スキー技能レベル・スキー板種別(スキー板のラディウス)・ターンサイズ・ゲート有無いずれにおいても膝関節モーメント(負荷)を大きく変化させる要素は認められなかった(図3)。

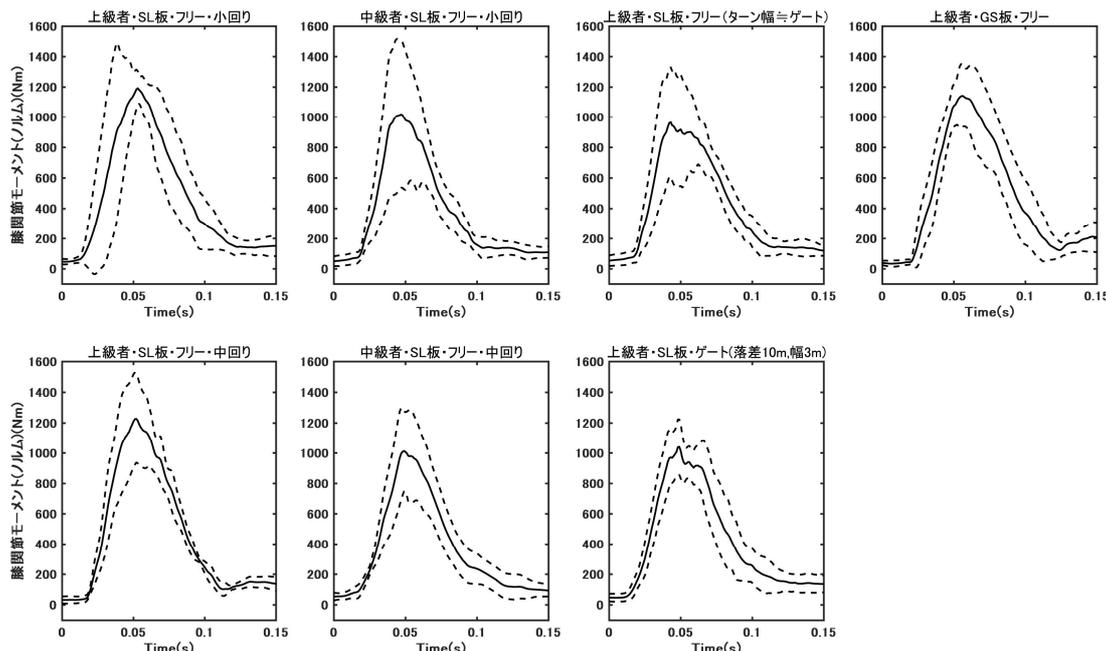


図3：各滑走条件におけるスリップ後のキャッチ局面における膝関節モーメント(ノルム)時系列変化

同時に全条件において、スキー板が雪面をキャッチした後、数十ミリ秒以内に一般的に報告される膝最大筋力水準(300Nm)を大幅に超える水準(1,000Nm付近)に達する結果が得られた(現実の状況ではこの値に達する途上で靭帯が損傷し、この値に達することはないものと推察される)。この結果は、スリップ後のキャッチ局面において、身体を制御して負荷の上昇を回避するような時間的余裕がないことを示すものであり、スキーヤーのスキー技術や危機回避判断能力によらず膝を負傷するリスクが高いことを示すものと言える。なお、実験実施中にACL損傷が発生してしまった試技の結果がSpörri et al. (2022)によって報告されている。彼らの結果は雪面反力であり膝関節モーメントではない点に留意する必要があるものの、通常の反力の3倍にも及ぶ反力が一瞬(10ミリ秒程度)にして発生していることを報告している。負荷の上昇時間について、ヒトが制御可能な時間よりも早いという点で本研究の結果と整合するものである。

これらの結果はキャッチ後にスキーヤーによる制御が難しいことを示しており、ACL損傷予防において、次の2点を示唆するものである。1点目は、スキーヤーはスリップ後にキャッチしないことが重要であること、2点目はキャッチしてしまった際に瞬間的に負荷を逃すことはヒトの負荷回避技能に頼るのではなく、負荷回避機構を用具に備えることが重要であることである。アルペンスキーにおいては、スキー板とブーツを接続する金具(ピンディング)にすでに解放機構が備わっている。しかし、この機構は足首と脛骨の傷害予防を目的に設計されており、膝の怪我に対しては効果が見込めない(Natri et al., 1999)ことから、新たな機構の検討が必要と考えられる。

以上の知見を得た後、各要素を柔軟に変更可能であるというシミュレーションの特徴を活かし、膝関節モーメントに影響の大きい要因を探索した。その一つとして、スキーテール部の雪面反力がスキーテールを梃子として、膝関節に大きなモーメントを発生する仕組みが挙げられた。スキーテール部に雪面反力が発生しない設定とし、シミュレーションを行ったところ、図4の結果を得た。膝への負荷は約30%低下し、図3で示した前記要因等に比較して、影響が大きかったことが明らかとなった。ただし、依然として筋力を超える水準のモーメントが発生している点に留意する必要がある。高速で着地し、雪面をキャッチした場合、スキー板に垂直な方向の運動量変化は大きくなる。加えて、雪面キャッチが瞬間的に生じた場合、力積の観点から大きな力が生じることが避けられない。以上の結果は、前記の予防策2点について、キャッチ後の負荷を逃がすことよりも、キャッチ自体を避けることが相対的に重要な予防策であることを示唆するもので

ある。ただし、スキー板をキャッチしにくい特性とした場合、スキーの運動特性が大幅に低下することは容易に推察される。現状では、格闘技における受け身技のように、スキーヤー自身がスリップ時にそのままスリップしてしまうことが重要かもしれない。

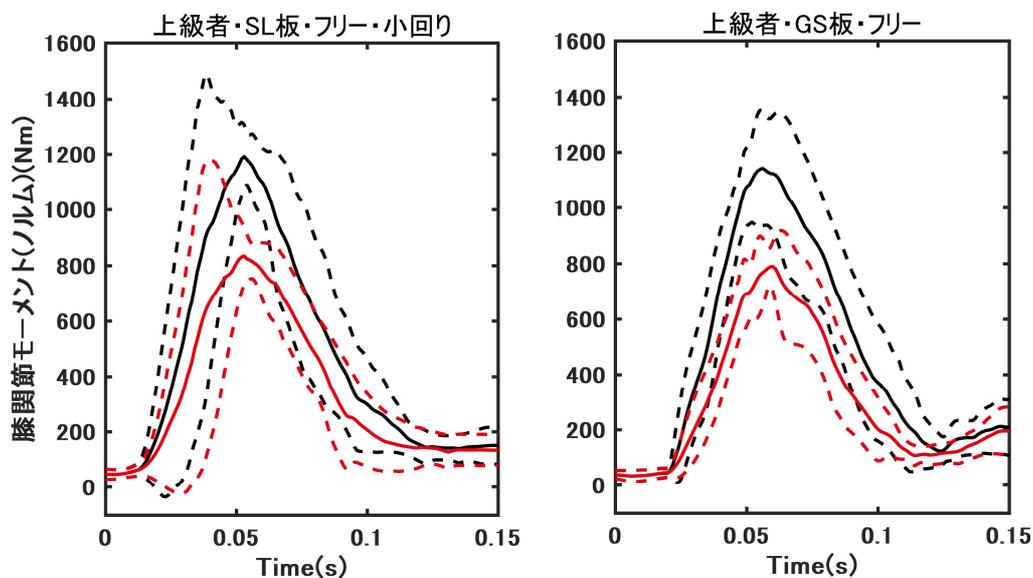


図4：通常条件（図3と同一）（黒線）と、テールにおいて雪面反力を受けない設定としたシミュレーションで得られた結果（赤線）の比較。ここに示さない他の滑走条件でも同様である。

参考文献)

- ・ Bahr, R., & Krosshaug, T. (2005). Understanding injury mechanisms: a key component of preventing injuries in sport. *British journal of sports medicine*, 39(6), 324-329.
- ・ De Leva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of biomechanics*, 29(9), 1223-1230.
- ・ Haaland, B., Steenstrup, S. E., Bere, T., Bahr, R., & Nordsletten, L. (2016). Injury rate and injury patterns in FIS World Cup Alpine skiing (2006–2015): have the new ski regulations made an impact?. *British journal of sports medicine*, 50(1), 32-36.
- ・ Johnson, R. J., Pope, M. H., & Ettliger, C. (1974). Ski injuries and equipment function. *The Journal of sports medicine*, 2(6), 299-307.
- ・ Natri, A., Beynnon, B. D., Ettliger, C. F., Johnson, R. J., & Shealy, J. E. (1999). Alpine ski bindings and injuries: current findings. *Sports Medicine*, 28, 35-48.
- ・ Schindelwig, K., Kaps, P., Schretter, H., & Nachbauer, W. (2014). Modeling the ski–snow contact in skiing turns using a hypoplastic vs an elastic force–penetration relation. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 24(3), 577-585.
- ・ Spörri, J., Kröll, J., Gilgien, M., & Müller, E. (2017). How to prevent injuries in alpine ski racing: what do we know and where do we go from here?. *Sports medicine*, 47, 599-614.
- ・ Spörri, J., Müller, E., & Kröll, J. (2022). “When you're down, stay down”: A lesson for all competitive alpine skiers supported by an ACL rupture measured in vivo. *Journal of Sport and Health Science*, 11(1), 14-20.
- ・ Yoshioka, S., Fujita, Z., Hay, D. C., & Ishige, Y. (2018). Pose tracking with rate gyroscopes in alpine skiing. *Sports Engineering*, 21, 177-188.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 原田将寛, 吉岡伸輔
2. 発表標題 アルペンスキーにおける中上級者のターン制御方略の差異
3. 学会等名 東京体育学会 第12回学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡伸輔
2. 発表標題 性センサおよびウェアラブルカメラを用いたスキー動作およびスキー板の挙動計測
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------