

平成 22 年 6 月 28 日現在

研究種目：基盤研究(A)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19200046  
 研究課題名(和文) アルペンスキーにおける膝前十字靭帯損傷発生メカニズムの解明およびその予防へ向けて  
 研究課題名(英文) ACL injury mechanisms during alpine skiing and its prevention.

研究代表者  
 石毛 勇介 (ISHIGE YUSUKE)  
 国際武道大学・体育学部・准教授  
 研究者番号：30251317

研究成果の概要(和文):アルペンスキーにおける膝前十字靭帯損傷発生のメカニズムについて、バイオメカニクス的手法を用いて力学的に考察をした。その結果、危険であると想定した2つの状況(後傾姿勢、膝関節外反・外旋位からのスキー板の切れ上がりによる膝関節外反・内旋位への急激な移行)において、それぞれ大きな張力が膝前十字靭帯に作用していることが明らかとなった。予防策としては、後傾時に上半身を出来る限り前に倒すこと、およびターンの外足に荷重をすることを極力避け、ターンの内足に荷重をして外足の荷重を内足に逃すことが重要である。

研究成果の概要(英文): ACL injury mechanisms during alpine skiing were investigated through biomechanical methods. Backward fall and rapid change of knee valgus-external rotation to valgus-internal rotation during ski turn were predicted as critical situations. To avoid those situations, skier should make his upper body forward as much as he can during backward fall and put his body weight to his inside ski in the latter situation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	17,100,000	5,130,000	22,230,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：アルペンスキー、膝前十字靭帯損傷、バイオメカニクス

## 1. 研究開始当初の背景

アルペンスキーは世界中で多くの人に親しまれており、ウィンタースポーツにおける花形種目の1つであるといえる。多くの人々が実施するスポーツであるために外傷発生件数も当然多くなる。また、発生件数のみならず

外傷発生率も他の種目と比較して多く、1000人のスキーヤーあたり約3件という報告もある(Hunter,1999)。アルペンスキーにおける外傷の中で最も多いのは下肢の外傷であり、中でも膝関節の外傷が圧倒的である。スキーブーツの素材が皮で、しかも紐で締め

るタイプであった 1970 年代以前には、足関節の捻挫や足関節周辺骨折などの外傷が多発していた。そうした点を改善するためにバックル付のブーツが開発され足関節をより強固に固定しようという試みがなされ、さらに素材が皮からプラスチックへと進化した。これにより、足部の外傷は 1970 年代に入り激減したが、逆にブーツ上端部での下腿骨折や膝関節の外傷が増加する傾向となった。その後セーフティービンディングの開発や啓蒙活動により下腿骨折は減少したが、膝関節の外傷に関しては減少することなく現在に至っている。膝関節の外傷の中でも、膝前十字靭帯損傷 (ACL 損傷) は重篤な外傷として、その予防が問題とされている。

Deibert(1998)によれば、スキー滑走中の ACL 損傷の発生率は、スキーヤー 2000 人に対して 1 人の割合であり、他の種目と比較して明らかに高い数字となっている。ACL 損傷は一度受傷すると日常生活への復帰すらかなりの時間を要し、外科的処置 (手術) などのストレスも多大である。国際スキー連盟 (FIS) では、ACL 損傷などの重篤な傷害に見舞われた選手に対して、救済措置としてルール面から FIS ポイント (選手のレースにおけるスタート順が決定されるもの) をレース復帰まである程度保証するといったことを行っている。いずれにしても、アルペンスキーにおいては、他の種目と比較しても高い ACL 損傷の発生率をいかに抑えるかということが重要な課題である。

FIS では、ACL 損傷発生を重大な事項として捉え、スキー板の長さ、横幅 (ビンディング部分の滑走面の幅)、最小回転半径、ビンディングの高さ、スキーブーツソールの厚さ等をルールによって規定し、外傷の発生を抑え、選手を保護しようという試みがなされている。こうした規定はいずれもカービングターン (雪面をスキー板が横ズレすることなく “彫る” ように進むため、ターンを行った後のスキーのシュプール (雪面の滑走痕) は幅が非常に狭く、レールを敷いたように 1 本のラインがついている) のターンの質が高まることによって、滑走速度が過剰に大きくなることを制限したり、スキーヤーの制御が可能な範囲を超えてターンの質が高まるということ (ミスカービング) を規制しようというものである。しかし、その理論的根拠についてはあいまいな点が多く、具体的な数値等で示されていないということも事実である。

アルペンスキーにおける ACL 損傷の発生メカニズムについては、McConky(1986)や Ettliger(1995)の報告が有名であるが、それらは、いずれも質問紙法を用いて、受傷したスキーヤーから受傷時の状況を確認したものであり、そのメカニズムを力学的に検証したものではない。そうした、報告では大き

く分けて、以下にあるような 3 つの受傷メカニズムが挙げられている。

- A. 膝関節外反・外旋
- B. ブーツによって誘発される大腿骨に対する脛骨の前方引き出し
- C. 膝関節屈曲内旋

いずれのメカニズムにおいても転倒時にビンディングが開放されないなどの状況に対する報告はあるが、そうした状況においてなぜ膝前十字靭帯が損傷してしまうのかという点に対する仮説・検証については、ほぼ皆無であるといつてよい。つまり、これまでの先行研究では ACL 損傷が発生すると思われる状況についての報告は多数あるが、なぜそうなるのかという点について、力学的な考察を与えた報告は見られない。

## 2. 研究の目的

本研究では、アルペンスキーにおける ACL 損傷発生のメカニズムについて、バイオメカニカルな観点から力学的考察を行い、そのメカニズムを明らかにするとともに、外傷予防の観点から、どういった方策が有効であるかという点について、具体的な示唆を与えることを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) アルペンスキー競技における ACL 損傷の発生メカニズムを検討するために、受傷時のビデオ映像の分析を行ない、想定される傷害発生メカニズムを検討した。全日本スキー連盟の協力の下、ナショナルチーム所属選手の受傷時のビデオ映像、並びに海外のナショナルチーム所属選手の受傷時のビデオ映像を収集した。映像はいずれもレース中もしくはゲート練習中に発生したものであった。収集したビデオ映像に関して選手本人またはコーチもしくはチームドクターに対してヒアリングを行ない、受傷後に確かに ACL が損傷したという医師の診断を得ていることを確認した。

得られた映像を分析し、ACL 損傷発生のパターンを分類した。

(2) アルペンスキー競技における ACL 損傷を引き起こすと考えられる動作を陸上においてシミュレートし、下腿の膝関節部分に作用する力とモーメントを算出するための実験系を整備した。この実験系はスキー板を固定する装置、力センサ、スキー板、筋電図 (EMG) 測定装置、高速度ビデオ (HSV) より構成されている (図 1)。この実験系を用いて、ACL 損傷を引き起こすと考えられる動作の 1 つである後傾動作をシミュレートし、その際に下腿の膝関節部分に作用する力とモーメント

を計算により求めた。

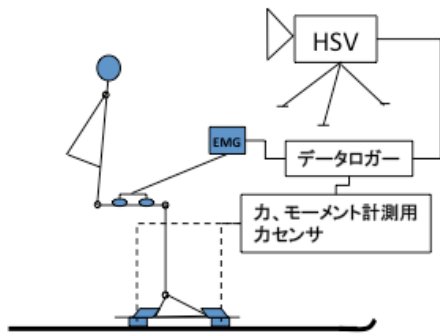


図1 陸上における実験系セットアップ

シミュレートした動作は、立位姿勢から後傾し、また元の立位姿勢に戻るといものである。後傾時の最大膝屈曲角度  $90^\circ$ 、動作速度  $0.75\text{Hz}$  を基本動作とし、最大膝屈曲角度を3種類 ( $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ )、動作速度を3種類 ( $0.5\text{Hz}$ 、 $0.75\text{Hz}$ 、 $1\text{Hz}$ ) に規定し、それぞれ成功3試技を分析した(図2)。また、基本動作 ( $90^\circ$ 、 $0.75\text{Hz}$ ) では、後傾時に上半身を最大限前側に倒す動作も行った。

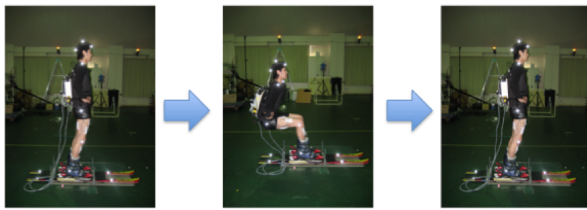


図2 陸上における後傾動作

(3) 雪上において ACL 損傷を引き起こすと考えられる動作をシミュレートし、下腿の膝関節部分に作用する力とモーメントを計算により求めた。雪上において使用した実験系は基本的には陸上におけるものと同一であるが、股関節、膝関節、足関節の3関節の角度の計測には慣性センサを用いた。

陸上での実験と同様に直滑降から後傾姿勢を取り、また元の直滑降の姿勢に戻るとい試行を行った。さらに、受傷時のビデオ映像の分析により明らかとなった危険動作(膝関節外反・外旋位からのスキー板の切れ上がりによる膝関節外反・内旋位への急激な移行)をシミュレートするために、ターン中に急激なエッジング動作を行わせる試行を実施した(図3)。



図3 雪上における実験の様子

#### 4. 研究成果

(1) ACL 損傷時におけるビデオ映像の分析から(男子5名、女子1名)、ACL 損傷を引き起こすと考えられる状況として、何らかの理由によりスキーヤーが後傾姿勢となり、結果的にスキー板がスキーヤーよりも先行する状況、およびターン前半に膝関節外反・外旋となり、それに引き続いてスキー板が急激に切れ上がり(カービングし)、膝関節外反・外旋の状態から一気に膝関節外反・内旋となる状況の2つの状況に分類された。当初は先行研究を参考として、ACL 損傷発生の状況として、膝関節外反・外旋、ブーツによって誘発される大腿骨に対する脛骨の前方引き出し(後傾)、膝関節屈曲内旋の3つを考えていたが、ACL に作用する張力に関する先行研究の値やその状況を検討した結果、ビデオ分析の結果得られた2つの危険な状況(後傾姿勢、膝関節外反・外旋に引き続きスキー板が急激に切れ上がり膝関節外反・内旋に移行するパターン)がアルペンスキー競技における ACL 損傷発生の状況として妥当であるということが明らかとなった。先行研究における ACL 損傷発生の状況はビデオ分析のみによるものであり、ACL 損傷発生のメカニズムとしてその裏付けに乏しい点は否めない。本研究においては、陸上および雪上でのバイオメカニカルな分析を通して、ACL に損傷発生の状況を客観的に示すことができた点が成果の1つとして挙げられる。

(2) 陸上における後傾動作をシミュレートした結果から、後傾時の最大膝屈曲角度には関係なく、動作速度が大きくなるほど  $F_{xk}$  の値が小さく(負に大きく)なることが明らかとなった(図4)。 $F_{xk}$  の値が小さいということは、下腿の膝関節部分に後方に作用する力が働くことを意味し、ACL により大きな張力が作用すると考えることができる。全ての試行を比較した結果、上半身を最大限前側に倒す動作が  $F_{xk}$  の値に対して最も効果的であることがわかった。

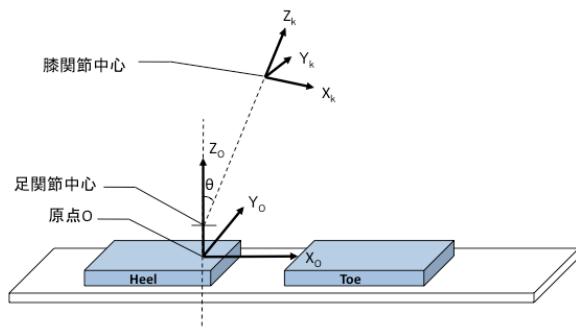


図4 カセンサおよび算出した力とモーメントの座標系

(3) 雪上における後傾動作をシミュレートした実験の結果から、雪上においては陸上における後傾動作のどの試行よりも  $F_{xk}$  の値が小さくなるのが明らかとなった。これは、雪上では陸上と比較して後傾姿勢をとった際に、足関節がより底屈位となり、結果的に  $F_{xk}$  が小さくなったと考えられた。足関節が底屈位になるということは、身体に対してスキー板が進行方向により先行することを意味しており、これは、陸上における後傾動作の動作速度を大きくするというものと一致する。また、雪上では  $F_{xk}$  が最小となるのは、膝関節最大屈曲位（後傾から元に戻る切り返しの部分）において  $F_{xk}$  がもっとも小さくなっており、この瞬間における  $F_{xk}$  の値をいかに変化させるかということが ACL 損傷予防において重要であることが明らかとなった。後傾による ACL 損傷の予防においては、まずは、後傾姿勢とならないように、しっかりと基本姿勢を維持すること、もしも後傾してしまった場合には、膝関節最大屈曲位において上半身を出来る限り前側に倒すことが重要である。もしくは、腰をより地面に近いところまで落とすようにして、筋力を使って踏ん張って身体を元に戻すということをしていないことによって傷害の発生リスクを低くすることができる可能性がある。

ターン中に急激なエッジング動作を行う試行の結果、スキー板のエッジングにより膝関節が外反・外旋の状態になり、それに引き続き、スキー板がカービング状態となって切れ上がり、結果的に膝関節が外反・内旋位となる状況が確認された。これは、Markolf ら (1995) が報告している ACL に作用する張力が大きくなる状況と一致している。さらにビデオ分析の結果からもこの状況に一致すると考えられるものが 2 例存在した。この状況はこれまで報告されていたアルペンスキーにおける ACL 損傷発生の状況とは異なるものであり、近年多発しているアルペンスキー競技における ACL 損傷の発生パターンの 1 つと考えられる。このパターンによる ACL 損傷の予

防策として、まずは、ターン中に膝関節外反・外旋の状態を作らないということが重要である。具体的にはスキー板がシェーレンするような状況を極力避けるということである。ターン前半部分において、スキー板のトップの方向を常に意識する必要がある。また、ターン中にももしも膝関節外反・外旋位に陥ってしまった場合には、ターンの外足に荷重をすることを極力避け、ターンの内足に荷重をして外足の荷重を内足に逃し、結果的に外スキーが膝関節外反・外旋位から急激にカービング状態になるということを避けることが大切である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

①石毛勇介、屋外広範囲のモーションキャプチャ、*体育の科学*、査読無、Vol. 60、No. 3、2010、pp. 179-185

②石毛勇介、特集「進化するスポーツギア」カービングスキー、*バイオメカニクス研究*、査読無、印刷中

〔学会発表〕(計 1 件)

①石毛勇介、ビンディング搭載型アルペンスキー用力センサの試作、*日本バイオメカニクス学会*、2008 年 8 月 26 日、仙台大学

〔図書〕(計 1 件)

①武藤芳照、*日本医事新報社*、*スポーツ医学実践ナビ*、2009、304-312

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石毛 勇介 (ISHIGE YUSUKE)  
国際武道大学・体育学部・准教授  
研究者番号：30251317

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

吉岡 伸輔 (YOSHIOKA SHINSUKE)  
立命館大学・スポーツ健康科学部・助教  
研究者番号：20512312