

## 原著論文

日本人アルペンスキー選手に適した下肢骨格に基づくスキーブーツ設計<sup>†</sup>

鈴木 聡一郎\* 林 末義\*\* 柴 又 勇\*\*\*

Design of Ski Boots for Japanese Alpine Ski Racer Based on Leg Frame of the Skier<sup>†</sup>

Soichiro SUZUKI\*, Sueyoshi HAYASHI\*\* and Yu SHIBAMATA\*\*\*

## Abstract

Ski boots, which are the interface between a skier and a ski, are important for making progress in ski turn technique. Especially in alpine ski races, suitability of design of the boots for racers becomes more important for achieving accurate and quick lean of the leg in ski turns. This study aimed at building a new design concept of a ski boot that can improve the results of Japanese alpine ski races. In this paper, a new design of an upper shell of a ski boot that was adjusted to the features of the frame of Japanese alpine ski racers was analytically and experimentally examined. As a result, it was demonstrated that the front and rear parts of the upper shell of a ski boot should be separately adjusted to the length of the shank of each player for well-balanced quick lean of the leg in the ski turn. Finally, the effect of the new design of the upper shell was verified in laboratory experiments on leaning balance and field tests for RSV by a Japanese female ski racer of the first rank.

Key words : Ski Boot, Upper Shell, Shank, Frame of Athlete, Alpine Ski Race

## 1. 緒 論

冬季オリンピックや世界選手権でのアルペンスキー競技における日本人選手のメダリストは、コルティナダンペッツォオリンピックの回転競技で猪谷千春氏が銀メダルを獲得して以来、半世紀以上も誕生していない。近年では、2006年に開催されたトリノオリンピックで皆川賢太郎選手が4位になっているが、これも技術系種目の回転競技での入賞であり、スーパー

大回転や滑降などの高速系種目では記憶に残る日本選手の活躍はない。この原因として、ジュニア世代からの一貫した選手育成システムがないことや、長距離コースでの練習を可能とするスキー場の環境整備の必要性などが指摘されている。

一方、国際大会に出場する多くの日本人選手は、欧米人選手と同じ規格で設計されたスキー板やブーツを使用している。それに対して、日本人選手が世界的に活躍している野球、スピー

<sup>†</sup>原稿受付 2009年9月7日

\*北見工業大学 〒090-8507 北海道北見市公園町165

\*\*隆祥産業株式会社 〒550-0013 大阪府大阪市西区新町3-2-19

\*\*\*北見工業大学大学院 〒090-8507 北海道北見市公園町165

\*Kitami Institute of Technology, 165, Koen-cho, Kitami, Hokkaido, Japan (090-8507)

\*\*Ryusyo Industrial Co. Ltd., 3-2-19, Shin-machi, Nishi-ku, Osaka, Japan (550-0013)

\*\*\*Graduate School of Kitami Institute of Technology, 165, Koen-cho, Kitami, Hokkaido, Japan (090-8507)

ドスケート、フィギュアスケートなどでは、選手の体格や要望に応じた用具設計がなされている。また最近では、スキージャンプのルール改定によって用具変更を余儀なくされた日本人選手の競技成績が低迷したことにより、スキー板やジャンプスーツの影響<sup>1)</sup>が大きく取り上げられたことや、競泳用水着の性能による記録更新の話題<sup>2)</sup>に注目が集まったことが記憶に新しい。

本研究では、アルペンスキー競技における選手の体格と用具の特性との関係に着目し、日本人選手の世界的活躍を目標として日本人の骨格的特徴を基に日本人スキー選手に適したスキーブーツ設計を検討する。スキー用具に関連した先行研究としては、スキー板の機械的特性や設計に関する検討<sup>3)-5)</sup>や、スキーヤーのターン動作とスキー板の特性との関係を解析した例<sup>6)-9)</sup>が多く、競技能力向上を目的としたスキーブーツ設計について検討した例は見当たらない。著者らはこれまでに、日本人アルペンスキー選手の競技成績向上を目的に、下肢の骨格に適合したスキーブーツのアップシェル設計を実験的に検討した。選手の下腿長に基づくアップシェル設計により、ターン時におけるスキーヤーの内傾角度が増加し、滑降タイム短縮に有効であることを示した<sup>10)11)</sup>。本報では、数値シミュレーションとバランスボード実験により、このアップシェル設計がタイム短縮に有効である要因を力学的に検討し、提案する設計が女子選手に対しても効果的であるか検証する。

## 2. スキーブーツ設計

### 2.1 内傾角度と競技成績

アルペンスキー競技は、コース内に設定された旗門で滑降コースを制限された中で、スタートからゴールまでいかに短時間で到達するかを競うものである。そのため、ターンの回転半径を小さくすることで、スタートからゴールまでの滑降距離を短縮するとともに、ターン間のグライディングによる加速距離を長くとることが有効である<sup>12)</sup>と考えられ、選手にはターンの回

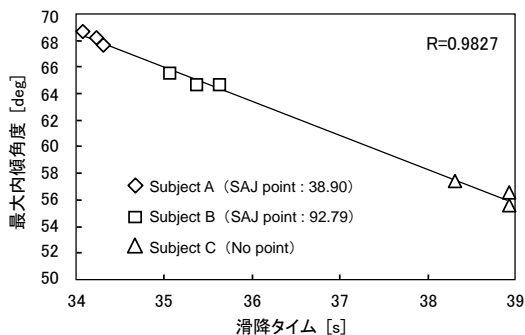


図1 最大内傾角度と滑降タイムの関係

転半径を小さくする技術が要求される。ターンの回転半径に大きく影響するスキーのサイドカーブは、設計上の最小曲率半径が国際ルールで定められているため、回転半径を小さくするために体軸の内傾角度を大きくとり、ターン中にスキー板を大きくたわませることでスキーの実効曲率半径を小さくする技術<sup>9)</sup>が選手にとって重要となる。ここで内傾とは、スキーヤーの下肢を回旋内側に倒すことにより、スキーの角付けを行う動作である。この技術の重要性を明らかにするため、ターン中の内傾角度が滑降タイムに及ぼす影響を計測した<sup>10)</sup>。ターン時の内傾角度をスキーブーツのアップシェル後部に取り付けた傾斜センサ (OMRON 製リニア傾斜センサ D5R-L02-60) で計測し、同一の大回転の旗門設定をスキルレベルの異なる3名のアルペン競技者に雪上滑降させ、滑降タイムと滑降中の最大内傾角度との関係について検討した。被験者A, BおよびCのスキルレベルはSAJ (Ski Association of Japan) の大回転ポイントを指標とし、それぞれ38.90, 92.79, ポイントなしであり、被験者Aのスキルレベルが最も高く、Cが最も低いことを示している。被験者1名につき滑降タイムと最大内傾角度を3回ずつ計測した結果を図1に示す。この結果、スキルレベルが高く短い滑降タイムでゴールできる選手ほど最大内傾角度が大きくなる傾向が認められ、相関係数Rが1に近いことからほぼ線形な関係になることがわかる。図2に示すように、ターン中に内傾角度を大きくする動作はターン前半

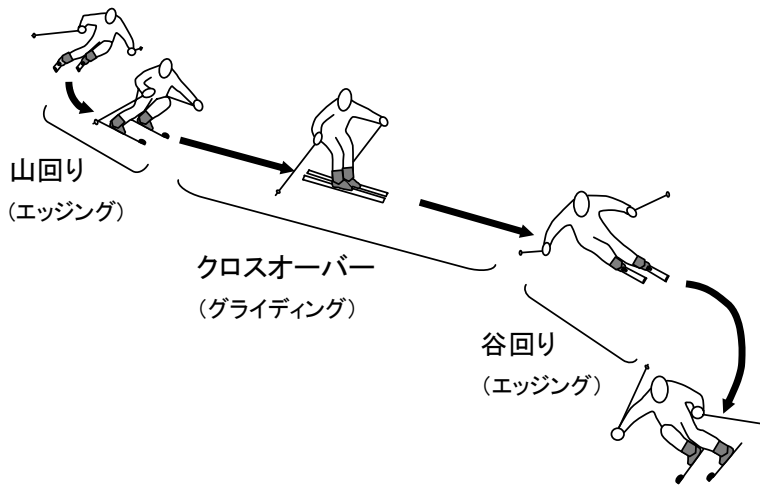


図2 スキーターンの構成

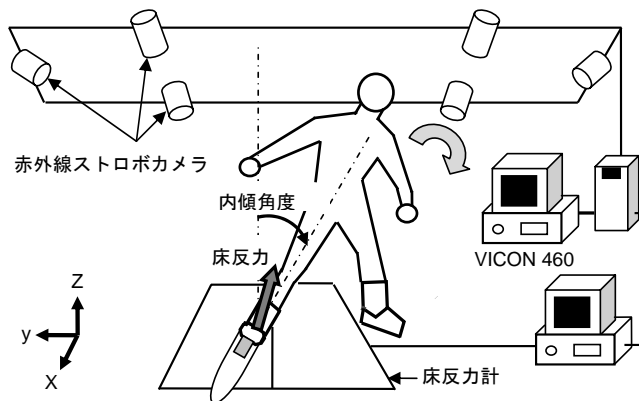


図3 室内傾倒バランス実験の概観

の谷回りでしか行えないため、スキー選手が滑降タイムを短縮するためには、ターン切り換え後に短時間でより大きく内傾する必要があるといえる。すなわち、内傾時の角速度を大きくするブーツ設計が重要となる。

## 2.2 日本人選手に適したアップーシェル設計

著者らはこれまでに、室内の傾倒バランス実験により日本人選手に適したスキーブーツのアップーシェルについて検討し、雪上滑降実験により有効性を検証した。傾倒バランス実験は、図3に示すように被験者がスキーブーツを履いた状態で、片足でバランスを取りながら傾倒していく動作を三次元モーションキャプチャ

システム VICON 460 と床反力計で解析し、傾倒時の下腿部の角速度を計測する。被験者にはフォースプレート上の床に貼り付けたマーカーでスタンスを指定し、両足に均等に体重をかけた状態から片足を上げて意図的に初期バランスを崩し、限界までスキーを履いた支持脚で傾倒してもらい、国際競技に出場するジュニアナショナルチームの男子選手から SAJ ポイントを持たないローカルレース出場レベルの選手に至るまで、さまざまなレベルの選手で実験した結果、図4に示すように日本人選手に適したブーツとして、従来のブーツと比較してアップーシェル前部は低く、後部は高く設計すると、傾倒中の内傾角速度が最大となることを示した<sup>10)</sup>。さら

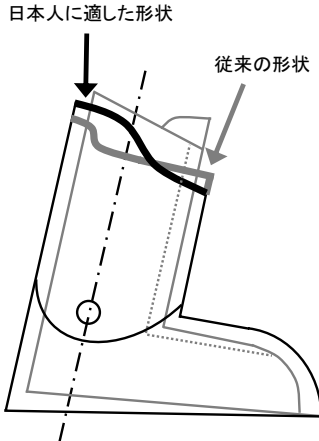


図4 日本人の骨格に適したアッパーシェル設計

に、アッパーシェル設計の最適値は選手のスキルレベルに関係なく、選手がブーツを履いた状態でのブーツ底面から膝蓋骨上端までの高さに対して、前部は  $44.5 \pm 1.5\%$ 、後部は  $61.0 \pm 2.0\%$  であることを明らかにした<sup>11)</sup>。とくに前部の高さは、従来のブーツに比べ3%程度低くなる傾向があり、これは同じ身長の人と日本人の下腿長の差とほぼ等しいことがわかっている。最終的には雪上滑降実験により、この設計が滑降タイム短縮に有効であることを明らかにした<sup>10)11)</sup>。実際の雪上滑降では、斜度変化や斜面の凹凸の影響を受けながらターンをするため、スキーヤーが斜面から受ける反力はダイナミックに変化する<sup>7)</sup>。そのためバランスがとりづらいブーツは、室内実験で内傾角速度が速くても、実際の雪上滑降では不安感からスキーヤーは結果的に大きく内傾することができなくなると予想される。そこで本報ではスキーブーツに求められる性能として、内傾角速度ならびにバランスのとりやすさの二項目を取り上げ、アッパーシェル設計の最適値の力学的要因を明らかにする。

### 3. 力学的要因の検討

#### 3.1 ODEによる内傾角速度の検討

室内の傾倒バランス実験において、アッパーシェルの高さが異なるブーツによって、傾倒時

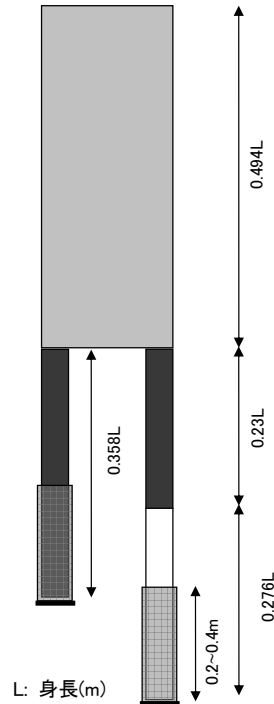


図5 ODE 簡略化モデル

の内傾角速度に違いが生じることが明らかになった<sup>10)11)</sup>。そこで、剛体運動シミュレーションツールである ODE (Open Dynamics Engine) を用いて、簡略化した力学モデルによる数値シミュレーションでその力学的要因について検討する。これまでに実施した室内実験ならびに雪上滑降実験では、すべての被験者において提案するアッパーシェル設計の有効性を検証することができた。このことは、被験者個々の身体的特徴や運動の違いによらず、比較的単純な力学的要因で内傾角速度が変化しているものと予想される。そこで図5に示すように、スキーヤー、ブーツならびにスキー板ともに剛体矩形ブロックで簡略化し、スキーヤーの傾倒動作をスキー板のエッジを中心とした回転運動と想定したうえで、ブーツの高さが内傾角速度に与える影響を解析する。スキーヤーとブーツは、インナーブーツおよび下腿部と足部の粘弾性を考慮し、回転ばねと回転ダンパーで接続する。スキーヤーは身長 180cm、体重 80kg の日本人青

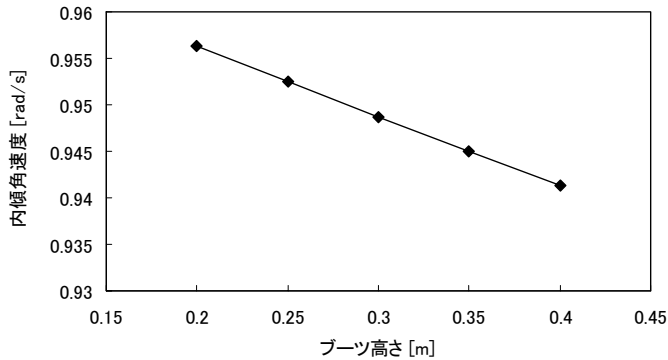


図6 ブーツ高さと内傾角速度の関係

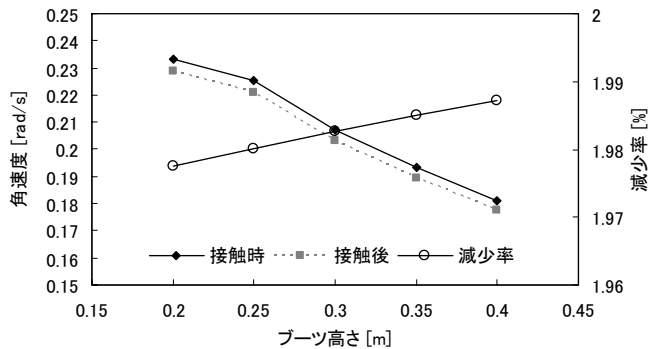


図7 接触前後の内傾角速度と減少率の比較

年アスリートと想定し、上半身は頭部および両腕も含めて一つのブロックで表されるが、各部の重心位置や慣性モーメントの値は阿江らの統計値<sup>13)</sup>を用いて計算する。スキー板は、長さ165cm、幅10cm、厚さ1cmの様な板とし、質量は3.6kgとした。傾倒バランス実験と同様に片足を上げて初期バランスを意図的に崩して傾倒を開始する。傾倒開始直後はスキーヤーのみがわずかに傾き始めるが下腿部とアッパーシェル上縁部が接触した時点でブーツスキー板系とスキーヤーが一体となって傾倒する。アッパーシェルの高さは本モデルではブーツ全体の高さとなるが、これを20cmから40cmまでの意図的に大きな範囲で5cm刻みに設定し、傾倒開始から終了までの内傾角速度の平均値を図6に示す。この結果、ブーツの高さが低いほど平均角速度が向上することが明らかになった。角速度の差は最大で約1.5%程度であるが、

これは60秒の滑走時間で0.9秒のタイム差に相当し、アルペンスキー競技では大差といえる。接触後にスキーヤーとブーツスキー板系が一体となってからは、慣性モーメントならびに重力による回転モーメントはアッパーシェルの高さを変えてもほとんど変化しないため、角速度の変化もほぼ一樣になる。そのため、平均角速度が異なるのは傾倒開始から接触までのスキーヤーの角速度が異なることが原因であり、ブーツの高さが低いほど接触時の内傾角度は大きくなり、スキーヤーの加速時間が長くなるためであると予想される。この点を明らかにするため、接触直前と直後の角速度を比較した結果を図7に示す。予想通りブーツが低いほど接触前の角速度は高い値を示している一方で、接触後の角速度はブーツの質量分布の変化によるわずかな慣性モーメントの違いから、アッパーシェルが高いときに減少率が0.01%程度大きくなって

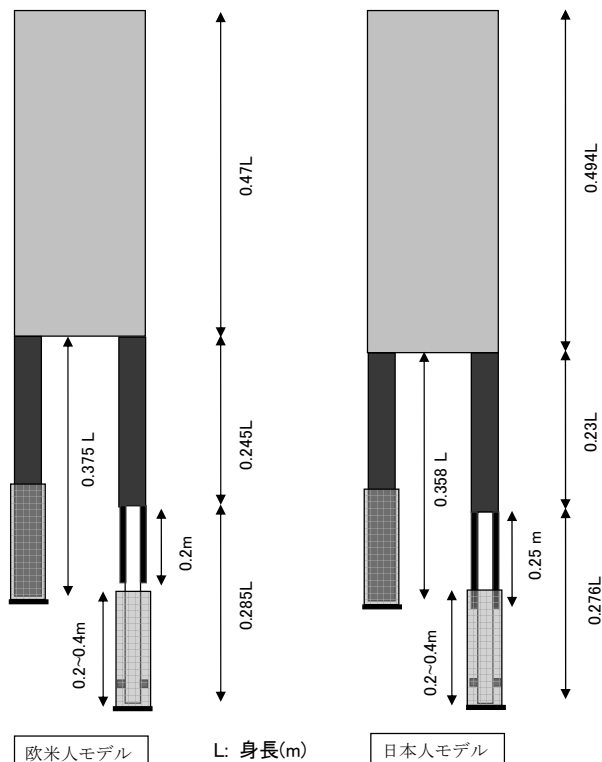


図8 欧米人と日本人のODE 簡略化モデル

いるが、ほとんど差はないといえる。このことは、スキーヤー単体での傾倒動作が加速される、下腿部とブーツの接触直前までの時間がブーツの高さによって異なることが、図6で示される内傾角速度が異なる要因であることを示している。

### 3.2 欧米人選手と日本人選手の比較

日本人選手は欧米人選手と比較して下腿長の身体寸法比率が小さいだけでなく、ふくらはぎの形状が異なるため、ふくらはぎ下部がブーツ内部に収まる場合が多い。このことは、前節での検討結果を考慮すると傾倒開始直後のスキーヤーの内傾角速度に大きく影響すると予想される。そこで、下腿部の形状の違いを考慮して日本人選手と欧米人選手の簡略化モデルを図8のように作成し、内傾角速度を比較する。またブーツ内におけるスキーヤーとの接触点として図のように踝をモデル化した。欧米人モデルの身体

各部の寸法比率と質量分布はWinterの値<sup>14)</sup>を用いる。下腿長に対するブーツ高さの比と内傾角速度の関係を身長180cm、体重80kgの欧米人選手と日本人選手で比較すると、図9で示されるようにブーツ高さが中間的な値では内傾角速度に差があり、それより低くても高くてもほとんど差がないことがわかる。これは、傾倒開始後に日本人はふくらはぎで接触し、欧米人は踝で接触するようなブーツの高さ設定では初期角速度の違いの影響が大きく、それ以外では両者ともに踝かふくらはぎのいずれか同じ場所で接触するためである。この接触点の違いによって前節の検討と同様にスキーヤーの加速時間に違いが生じ、角速度が異なる結果となる。さらに、選手の身長と角速度との関係についても解析すると、図10に示すように身長が低い選手ほど欧米人との差が大きくなることがわかった。欧米人と日本人では平均身長が10cmほど異なるため、この点でも日本人選手は欧米人選

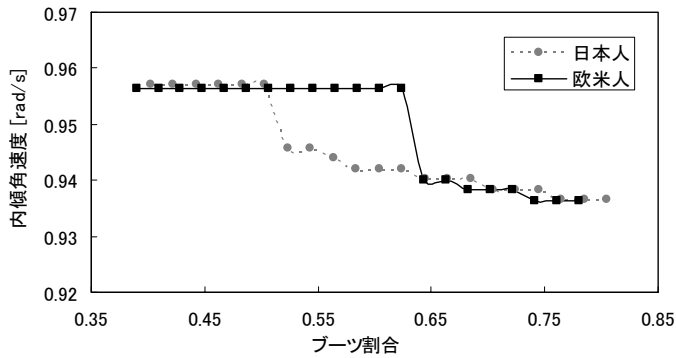


図9 欧米人と日本人の内傾角速度の違い

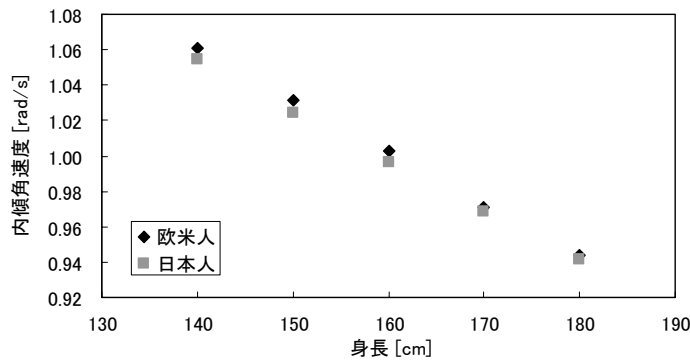


図10 身長による内傾角速度の差

手と同じ内傾角速度を獲得するのが困難であるといえ、日本の女子選手の世界的活躍がない原因の一つであると予想される。以上の結果、下腿長が短くふくらはぎ下部が太い日本人は、欧米人より低いブーツを履くことで脚部とブーツの接触点を踝にすることが可能となり、傾倒初期の加速時間を長くし、内傾角速度を大きくできることが明らかになった。

### 3.3 バランスボード実験

滑降中のスキーヤーは、ダイナミックに変化する斜面や反力の影響を受けながらターンしている。とくにスキー競技では、わずかなバランスの崩れが競技成績に大きく影響する。スキーヤーが最もバランスよくスキー板に荷重できるのはセンターポジションであり<sup>12)</sup>、力の釣り合いを考えると図11のようにスキーヤーにかかる重力と慣性力の合力ベクトルの方向が踝を通

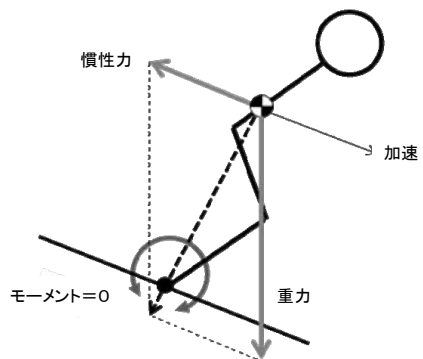


図11 滑降中のセンターポジション

過し、足関節モーメントが零になるポジションといえる。重力ベクトル、慣性力ベクトルともに三次元的にダイナミックな変化を伴うため、スキーヤーにはバランスの微調整で常にセンターポジションを維持することが要求される。センターポジションが維持できなければ、内傾角速度が大きくても不安感によって内傾角速度を

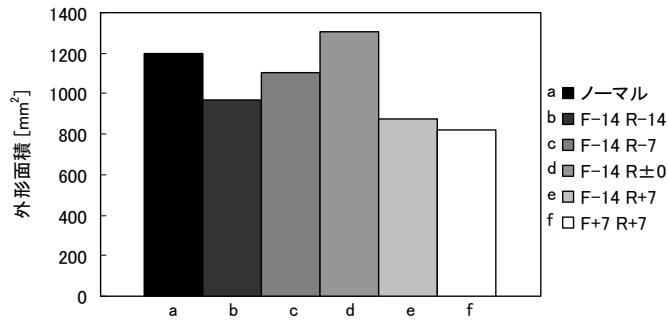


図12 ブーツ設計による重心動揺の外形面積の比較

大きくすることは困難になる。そこで、ブーツ設計によるバランス調整のしやすさについて、バランスボード実験で定量的に評価する。すべての方向に対してバランスをとる必要がある円形バランスボードを床反力計の上に設置し、被験者はスキーブーツを履いた状態で自然なスタンスを取り、10秒間にわたり重心動揺を計測する。計測結果から重心の移動軌跡を求め、その外形面積で評価する。この重心移動面積が小さいほど、静止に近い状態でポジションが安定していたことを示す。一例として、身長165cm、体重62kgの健康な成人男子でSAJスキー検定1級の資格を持ち、SAJのGSポイントが144.44の平均的アルペン競技者を被験者とした結果を図12に示す。比較対象としたブーツは、隆祥産業(株)製REXXAM DATA130Rのノーマルブーツを基準として、アッパーシェルの高さを-14mm、±7mmに調整したものをを用いる。アッパーシェルの前部を調整した場合を“F”、後部を調整した場合は“R”と表記した。この結果、アッパーシェル後部を高く設定したブーツの重心移動面積が小さく、バランスがとりやすいことがわかる。これはスキーブーツを履いた場合、足部も脛骨も前傾しているため、重力と慣性力の合力ベクトルの方向が踝を通過するセンターポジションでは、アッパーシェル後部によるバランス調整が重要になるためだと考えられ、他のスキー選手を被験者とした場合も同じ傾向を示した。

以上、力学的要因に関する検討結果をまとめると、内傾角速度を大きくするためにはアッ

パーシェル高さを低くする必要があり、センターポジションの維持のためには後部を高く設計しなければならないことが明らかになった。ODEによるシミュレーション結果から、内傾角速度を大きくするのは傾倒開始直後であるため、ターンのクロスオーバー後半から谷回り初期にかけては低いアッパーシェルが望ましいといえる。このときスキー先端は次のターン方向を向き、スキーヤーの上半身は最大傾斜線を向いているので、必然的にアッパーシェル前部と下腿部が接触することになり、前部の高さを低くすればよいことになる。

#### 4. 女子選手による検証実験

##### 4.1 室内傾倒バランス実験

既報での実験的検討は、すべて男子選手を被験者として実施してきたため、ブーツ設計の影響が大きいと予想される女子選手においてもアッパーシェル設計の最適値が有効であるか検証する。ODEシミュレーションで明らかにしたように、内傾角速度は傾倒開始後の下腿部とブーツの接触による慣性モーメント変化の影響を受けるため、実際の雪上滑降と同様の質量分布が重要となる。そこで、これまでにはブーツのみを履いた状態で行っていたが、図13のように支持脚はスキー板も装着した状態で実験する。被験者は、ナショナルジュニアアルペンチームに所属した経験がある現役のスキークロス選手C.H.である。隆祥産業(株)製REXXAM DATA110のノーマルブーツを基準に前部を-5mmおよび-10mm、後部を+7mmおよび+14mmに





図13 室内傾倒バランス実験の様子

調整したものを比較した。表1に示すように VICON460 で内傾角速度を計測した結果、ノーマルブーツおよびアッパーシェル前部はノーマル、後部を+7mm とした二つのブーツが高い値を示した。この設計は選手 C.H. の下腿長に対してそれぞれ前部は 45.2%、後部は 58.3% と 59.9% であり、ノーマルブーツの後部だけはこれまでに決定した最適値の範囲を 0.7% 下回っているが、2足の設計ともほぼ範囲内であることが示された。

#### 4.2 RSV 滑降実験

図14に示すブルーモリス製(Roller Ski Variable)は、雪上スキーの滑降感覚をアスファルト路面で再現することが可能なスキートレーニング用具である。RSV を用いた実験では、雪上滑降実験のように天候や雪質ならびに

表1 傾倒実験における内傾角速度の比較

ブーツ設計	内傾角速度 (rad/s)
ノーマル	0.546
F±0 R+7	0.532
F±0 R+14	0.408
F-5 R+14	0.429
F-10 R+7	0.389
F-10 R+14	0.384



図14 Roller Ski Variable

コース状態の変化に留意する必要がないことが大きな利点である。大回転のコース設定で、滑降タイムを BROWER タイミングシステムで計測し、同時にブーツに取り付けた傾斜角センサーで内傾角度を計測した。この結果、図15に示す通りこれまでの雪上滑降実験と同様に、滑降タイムと最大内傾角度の関係はほぼ線形となり、このとき最短時間でゴールしたのは傾倒バランス実験でも良好な値を示したアッパーシェル前部がノーマル、後部が+7mm の設計であった。以上の結果、女子選手の場合も男子選手と同様の最適値が適用可能であることを明らかにした。

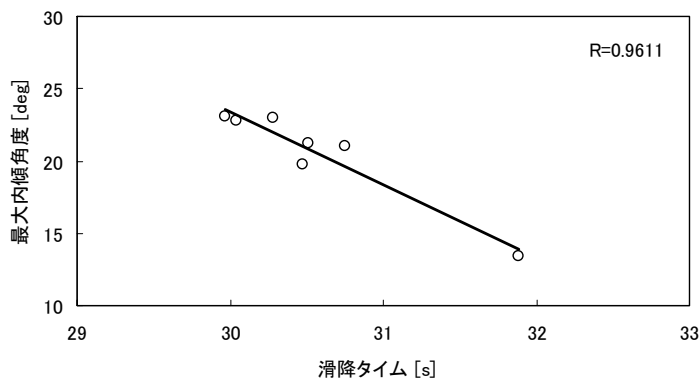


図15 RSV 実験における滑降タイムと最大内傾角度の関係

## 5. 結 論

日本人アルペン競技選手の成績向上を狙った新しいスキーブーツ設計について、日本人と欧米人の骨格の違いに着目したアッパーシェル設計の有効性について、その力学的要因を数値シミュレーションならびにバランスボード実験で明らかにした。さらに、提案するアッパーシェル設計が女子選手にも有効であることを室内傾倒バランス実験とRSV滑降実験により検証した。今後はより多くの被験者で有効性を検証しながら、室内の傾倒バランス実験と雪上滑降実験の整合性を高め、個々の選手に対する最適値の決定手法について検討を進める。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、多くの有益な助言と協力をいただいた有限会社キャンプダンガリー代表の山本鎮夫氏に心より感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) 村上正秀, 瀬尾和哉; スキージャンプ技術・用具の革新, スポーツ工学, No.2, pp.11-18, 2007.
- 2) 高木英樹; 高性能水着は競泳を変えるか? - レーザー・レーザー登場の衝撃と効果 -, スポーツ工学, No.4, pp.13-17, 2009.
- 3) 坂田敏行, 他; スキーターンに及ぼすスキー板の幅, 長さおよび曲げ剛性の影響, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.64, No.625, pp.46-51, 1998.
- 4) 坂田敏行, 宮原健一; スキー板断面の曲げ剛性の評価法, スポーツ産業学研究, Vol.15, No.2, pp.13-22, 2005.
- 5) Fisher, C., et al.; Dynamic Properties of Materials for Alpine Skis, The Engineering of Sport 6, Vol.1, pp.263-268, 2006.
- 6) Yoneyama, T., et al.; Joint Motion and Reacting Forces in the Carving Ski Turn Compared with the Conventional Ski Turn, Sports Engineering, Vol.3, No.3, pp.161-176, 2000.
- 7) Sahashi, T., et al.; Carving-Turn and Edging Angle of Skis, Sports Engineering, Vol.4, No.3, pp.135-145, 2001.
- 8) 河合茂博, 他; スキーターンに及ぼすスキー板モデルの影響, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.68, No.672, pp.85-91, 2002.
- 9) Heinrich, D., et al.; Influence of Ski Bending Stiffness on the Turning Radius of Alpine Skis at Different Edging Angles and Velocities, The Engineering of Sport 6, Vol.2, pp.207-212, 2006.
- 10) 鈴木聡一郎, 林末義; 骨格に基づくスキーブーツ設計に関する基礎的検討, スポーツ産業学研究, Vol.19, No.1, pp.1-8, 2009.
- 11) S. Suzuki, S. Hayashi; Design of Ski Boots for Alpine Ski Racing Based on Leg Frame of the Skier, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.3, No.3, pp.245-256, 2009.
- 12) Witherell, W. and Evrard, D.; The Athletic Skier, EXSEEDS Company Ltd., 1998.
- 13) 阿江通良, 他; 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定, バイオメカニズム 11, pp.23-33, 1992.
- 14) Winter, D.; Biomechanics of Human Movement, A Wiley-Interscience Publication, 1979.