

原著論文

骨格に基づくスキーブーツ設計に関する基礎的検討[†]

鈴木 聡一郎* 林 末 義**

A Basic Study on Design of Ski Boots Based on
Features of a Frame of the Skier[†]

Soichiro SUZUKI* and Sueyoshi HAYASHI**

Abstract

Ski boots are generally important for assisting progress in ski turn technique as an interface between a skier and a ski. This study is aimed at developing a new ski boot that can improve the results of alpine ski races for Japanese players. In this paper, a new design of a ski boot that is adjusted to the features of the frame of Japanese athletes was experimentally examined. As a result, it was demonstrated that the front part of the upper shell of a ski boot should be lower and the rear part should be higher than the normal upper shell for providing well-balanced quick leaning of the leg in the ski turn. Finally, the effect of the new upper shell was verified in giant slalom and slalom test by Japanese alpine ski players of the first rank.

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

1. 緒 論

日本のスキー場は、豪雪地域における主要産業を支える社会的役割を担っている所が多い。しかしながら、スキーブームの衰退によりスキー人口が大幅に減少しているうえ、地球温暖化が要因といわれる雪不足の影響により、倒産や閉鎖に追い込まれるスキー場が跡を絶たず、地域社会に大きな影響を与えている。本邦では、例えば近年のカーリングやバドミントンブームのように、オリンピックなど世界規模の大会での日本人選手の活躍がマスメディアに頻繁に取り上げられた結果、そのスポーツ愛好者

数が急上昇する事例がしばしば見受けられる。このことは、アルペンスキー競技において世界的に活躍する日本人選手を輩出することで、スキーブームを再び引き起こす可能性があることを示している。アルペンスキー競技における日本人のオリンピックメダリストは、猪谷千春氏が1956年に開催されたコルティナダンペッツォオリンピックの回転競技で銀メダルを獲得して以来、半世紀以上も誕生していない。この原因として、選手育成システムの不備やスキー場の練習環境整備の必要性などが指摘されているが、選手が使用するスキー用具の問題にはあまり言及されていない。これは、多くの日本人

[†]原稿受付 2008年9月4日

*北見工業大学 〒090-8507 北海道北見市公園町165番地

**隆祥産業株式会社 〒550-0013 大阪府大阪市西区新町3-2-19

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

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

選手が欧米人選手とほぼ同じ規格で設計された用具を使用しているためと考えられる。

本研究では、スキーマーとスキー板のインターフェイスとして、スキーマーのスキルレベル向上やパフォーマンス発揮に重要といわれるスキーブーツの設計に着目し、日本人と欧米人の骨格の違いを基に日本人スキー選手に適したスキーブーツ設計について検討する。スキー用具の研究としては、スキー板の機械的特性や設計に関するもの¹⁾⁻⁵⁾や、ターン動作とスキー板設計の基本的な関係に着目した例⁶⁾⁻¹³⁾が圧倒的に多く、競技能力向上を目的としてスキー板やスキーブーツ設計と選手の運動との関係について検討した例は見当たらない。本報では、日本人アルペンスキー選手がより良好な競技成績を残すためには、下肢の骨格に適合するようにスキーブーツのアップーシェル設計を見直す必要があることを明らかにしたうえで、雪上滑降実験でその有効性を検証する。

2. スキーブーツ設計

2.1 ブーツの構成

スキーブーツの一般的な構成を図1に示す。多くの場合、ロワシェルとアップーシェルはカント角調整機能が付属したジョイントにより接合されている。カント角調整とは、前額面内における脛骨の傾斜角度に、アップーシェルの傾斜が適合するよう調整することである。シェル内部にはインソールを内包したインナーブーツがあり、インナーブーツ底面とロワシェルの間にはフットベッドがある。スキー選手はカント角調整以外にも、自分の足部形状や寸法に合わせてシェルを熱変形させたり切削することで個



図1 スキーブーツの一般的構成

人に合わせた調整を行っている。しかしながら個人的な調整以前の段階で、シェル設計そのものが古くから欧米人の骨格を基本として開発されたものであり、日本人には適合していない可能性がある。

2.2 身体寸法比率とシェル設計

欧米人と日本人では骨格などの違いにより、身体各部の寸法比率や慣性特性が異なるため、同じ設計のスキーブーツでは同じ運動ができない可能性がある。特にターン中は、スキーマーにはバランスとセンターポジションの保持が求められる。バランス保持のためには足関節の運動が重要¹⁴⁾であるため、足関節の動きやすさに影響する下腿長とシェル全高の比率が問題になると予想される。そこで、Winter¹⁵⁾ならびに阿江ら¹⁶⁾の統計値を基に欧米人と日本人の身体寸法比率ならびに慣性特性の違いがバランス保持とセンターポジションに与える影響について検討する。身体各部における部分長の身長に対する比率を、欧米人と日本人で比較した結果を表1に示す。それぞれの部位は、頭頂、胸骨上縁、大転子点、膝関節中心ならびに足関節中心を基準に分割する。仮に同じ身長だとすると、欧米人に比べ日本人は胴体が長く大腿部および下腿部は短い反面、足長は大きく変わらないため同じシェルサイズのブーツを使用する可能性が高い。ターン切り換え時の運動であるクロスオーバーでは、体重心を滑降コースの最大傾斜線下方向へ大きく移動することが求められるが、足

表1 日本人と欧米人の身長に対する身体各部の寸法比率

身体部分	寸法比率	
	日本人	欧米人
頭部	0.140	0.130
胴体	0.300	0.288
大腿	0.230	0.245
下腿	0.276	0.285
足部	0.148	0.152

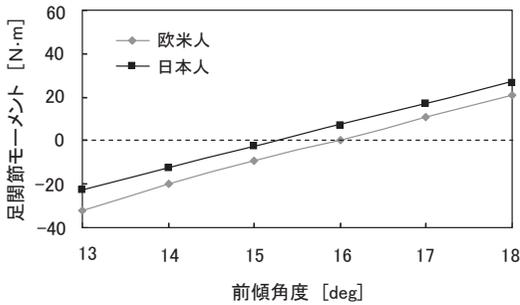


図2 日本人と欧米人のセンターポジション

関節を動かす際に下腿長に対してシェルが高すぎると下腿部の動きが拘束され、この運動がしづらくなることは容易に想像できる。下腿長とシェル全高の比が欧米人と等しくなるように身体比率から計算すると、日本人は欧米人に比べ約3.2%シェル全高が低いブーツを履く必要があることが示された。

次にセンターポジションについて比較する。ここでは身体各部に作用する重力の影響で足関節まわりに生じるモーメントの総和が零になる姿勢をセンターポジションとして想定する。この姿勢では、バランス保持に要する筋肉の仕事が最小になり体重心の作用を最も効果的に利用してスキー板をたわませることができると考えられる。下腿部と胴体の前傾角度は等しくなると仮定し、身体各部の質量分布により生じる足関節モーメントの計算値と前傾角度の関係を図2に示す。欧米人と日本人を比較すると、足関節モーメントが零になる前傾角度は日本人の方が小さく、効果的にスキー板をたわませるためには欧米人より後傾姿勢になることが明らかになった。

以上の結果をまとめると、日本人は下腿長が欧米人より短く同じ姿勢でも体重心位置が異なるため、同じブーツを履いた場合は欧米人に比べクロスオーバーで体重心を最大傾斜線下方向に移動しづらく、ターン時には後傾姿勢になるといえる。このことは、日本人選手の欠点としてよく指摘される点と一致することから、ブーツ設計が日本人選手の身体寸法比率に適合していないことがひとつの要因であり、シェル全高



図3 傾斜角センサによる最大内傾角度計測

と前傾角度を見直す必要があると考えられる。下腿部の前傾角度はシェルの前傾角度だけでなく、シェル全高やフットベッド形状およびインソールなどの影響も受けることから、本報ではシェル全高、すなわちアップーシェル上縁部の設計に的を絞って検討する。

2.3 滑降時間と内傾角度

アルペンスキー競技とは、コース内に設定された旗門により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り、選手の体力のみならずスキー技術やコース戦略などの総合力が求められる。コース戦略については最速経路に関する報告¹⁷⁾などもあるが、基本的には滑降コースの最大傾斜線方向の加速度を可能な限り大きくするようターン時間を短く、グライディング時間を長くすることが有効であると考えられている¹⁸⁾。これを実現するためには、スキー板のサイドカーブで決定される設計上の曲率半径が国際ルールで規制されている以上、ターン時にスキーヤーがいかに深く内傾しスキーを大きくたわませることで実効曲率半径を小さくすることができるかが重要だと考えられる¹¹⁾。ここで内傾とは、スキーヤーの下肢が回旋内側に倒れることにより、スキーの角付けを行うためのものである。はじめに内傾角度が滑降時間に及ぼす影響を明らかにするため、図3に示すようにターン時の内傾角度をスキーブーツのアップーシェル後部に取り付けた傾斜角センサ

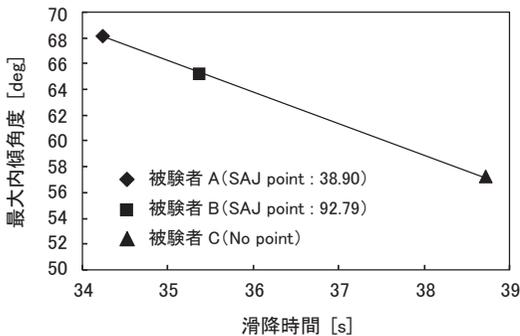


図4 滑降時間と最大内傾角度の関係

(OMRON 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複数のアルペン競技者に雪上滑降させ、滑降時の所要時間と最大内傾角度の関係について検討した。被験者 A から C までのスキルレベルは SAJ (Ski Association of Japan) ポイントを指標とした。3 名の被験者の SAJ ポイントは、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。被験者 1 名につき滑降時間と最大内傾角度を 3 回ずつ計測し、その平均値の比較を図 4 に示す。この結果、スキルレベルが高く短い滑降時間でゴールできる選手ほど最大内傾角度が大きくなり、両者はほぼ線形な関係になることがわかる。一般にスキー上級者はスキーの進行方向が最大傾斜線を越え、いわゆる山回りに入ると内傾角度を次第に小さくし、次のターンへの切り返しに備える¹⁹⁾といわれている。そのため内傾角度を大きくする動作は主にターン前半の谷回りですることになり、スキー選手が滑降時間を短縮するためには、ターン切り換え後に短時間で大きく内傾する必要があるといえる。そこで日本人選手の競技成績向上を目指し、バランス保持がしやすく、すばやく大きな内傾が実現できるアッパーシェル設計を明らかにする。

3. 室内傾倒バランス実験

3.1 実験装置および方法

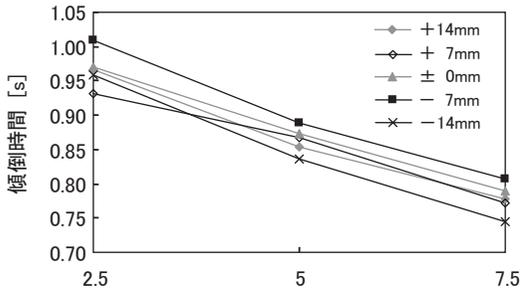
アッパーシェル設計を詳細に検討するため、

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解析する。三次元モーションキャプチャシステム VICON460 で傾倒時の下腿部の角速度と最大内傾角度を計測し、(株)共和電業製フォースプレートを用いて傾倒時の床反力変化を計測する。

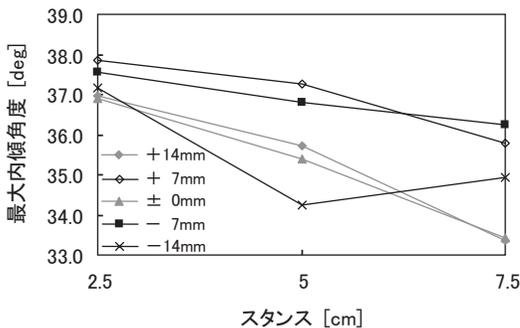
実験の手順としては、フォースプレート上の床に貼り付けたマーカでスタンスを指定し、被験者には両足に均等に体重をかけた状態から片足を上げて意図的に初期バランスを崩し、限界まで片足で傾倒してもらう。被験者の下肢体表面とブーツに貼り付けた赤外線反射マーカの位置情報から膝および足関節中心を求め、両者を結ぶベクトルから傾倒中の内傾角度と平均角速度を算出する。被験者が片足になった瞬間に立脚側に体重心を移動してしまうと傾倒動作が大きく異なってしまうため、床反力を参照しながら傾倒開始時に体重心移動がないように監視した。最大内傾角度は限界まで傾倒した時点での内傾角度であるが、限界時には立脚側の床反力が急激に小さくなるため、この床反力変動により決定した。

3.2 実験結果

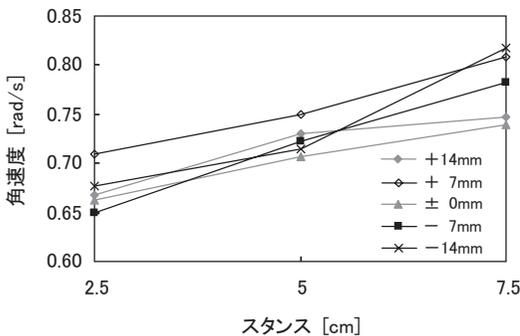
実験に使用したブーツは全て隆祥産業(株)REXXAM DATA130R であり、シェル全高の設定は無加工のアッパーシェルであるノーマルと、上縁部全周を±7.0mm および±14.0mm に加工した五種類で実験する。被験者のスタンスは、立脚した両足の中心からロワシェルソール部内側までの片側距離を基準とし、25mm, 50mm, 75mm の三種類に設定した。被験者は身長 165cm, 体重 62kg の健康な成人男子であり、SAJ スキー検定 1 級の資格を持つアルペン競技者である。各設定で 10 回ずつ計測を行い、その平均値を比較した。図 5 (a), (b), (c) にそれぞれ傾倒時間、最大内傾角度ならびに角速度の計測結果を示す。傾倒時間が長いということは、バランス保持がしやすいアッパーシェル設計といえる。図 5 (a) に示す結果から、アッパーシェルを 7.0mm 低く加工した場合に最も



(a) 傾倒時間の比較



(b) 最大内傾角度の比較



(c) 角速度の比較

図5 アッパーシェル設計による傾倒動作の違い

バランス保持がしやすいことがわかる。この値は232mmのシェル全高に対して約3%であることから、前章の身体寸法比率を基にした検討結果を裏付ける結果となった。さらに、競技成績を向上するために重要となる最大内傾角度と角速度については図5(b)および(c)で示されるように、いずれもアッパーシェルを7.0mm高く加工した場合に高い値を示した。以上の結

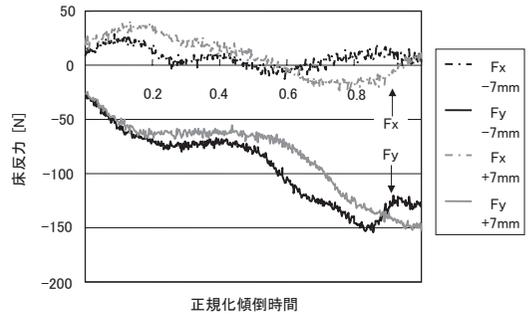


図6 傾倒中における床反力変化の比較

果は、アッパーシェルを身体寸法比率に従って低くするとバランス保持の面では性能が向上するが、すばやく深い内傾は実現できなくなることを意味する。この原因を明らかにするため、傾倒時の床反力変化を比較する。

図6に被験者の矢状面に平行な前後方向の床反力成分Fxと前額面に平行な左右方向成分Fyの変化を示す。図の横軸は、傾倒開始から終了までの傾倒時間で正規化している。足関節が底屈-背屈方向に回転するとFxが変動し、回内-回外方向に回転するとFyが変動することになる。また傾倒中にセンターポジションで理想的にバランスが保持されているとFxは完全に零となり、傾倒する方向に従ってFyが滑らかに増加あるいは減少する。Fxの変化についてアッパーシェルの高さで比較すると、-7.0mmのシェルでは傾倒開始から零を中心に大きな値をとることなく変動していることから、足関節がバランス保持のため正しく運動していることがわかる。それに対して+7.0mmのシェルでは、正負に大きく1回変動しただけで傾倒が終了しており、足関節がバランス保持に正しく機能していないことを示している。この結果、スキーブーツを履いた状態でも足関節の底屈-背屈運動による体重心位置の調整がバランス保持に大きく影響することが示された。一方、Fyについては、+7.0mmのシェルでは傾倒開始から終了まで滑らかに変動しているのに対し、-7.0mmのシェルでは内傾角度が最大値に近づいた傾倒終了付近で乱れが生じている。これは、内傾角度が大きくなると左右方向の balan

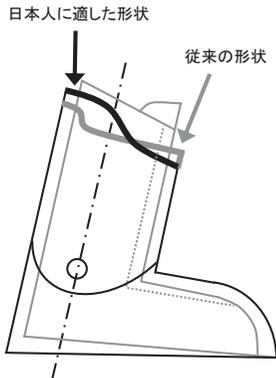


図7 日本人の骨格に適したアップーシェル設計

ス調整が重要になるとともに、下腿部側面と接触するアップーシェル側面により支えられる状態となるため、低すぎるシェルでは微妙な調整ができなくなるためだと考えられる。特に日本人の場合、腓腹筋の形状から脛脛がブーツと強く接してしまうため、欧米人よりもシェルを高くした方が下腿部とブーツの密着度が高くなり、左右のバランス調整がしやすくなることが予想される。

以上の実験結果をまとめると、シェル全高が低いと前後方向のバランスがとりやすくセンターポジションを保持しやすいが、傾倒の後半ではアップーシェルが高い方が左右方向のバランスが取りやすくなり、最大内傾角度と角速度が大きくなるといえる。これをスキーのターン動作に当てはめると、バランス保持が重要となるターン切り換えからクロスオーバーにおいては低いシェルが有効であり、最大傾斜線下方向に体重心を移動しやすくなると予想できる。またターンが始まり谷回りから山回りへの移行とともに内傾角度が大きくなる局面では、高いシェルが有効となる。滑降中にセンターポジションが保持できていれば、ターン切り換え時には主にアップーカフ前部と下腿部が接触し、回旋時には側面から後部にかけて接触するため、図7に示すようにアップーシェル上縁の前方を低く、側面から後方を高く設計すれば双方の利点を活用できる可能性がある。

表2 アップーシェル前後部の高さ設定

分類	アップーシェル設定	
	前部	後部
Type1	-7mm	-7mm
Type2	±0mm	+7mm
Type3	-7mm	+7mm

(±はノーマル比)

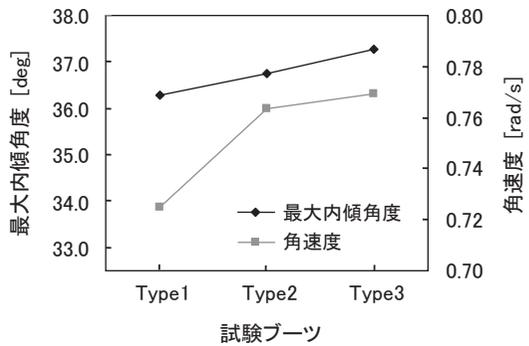


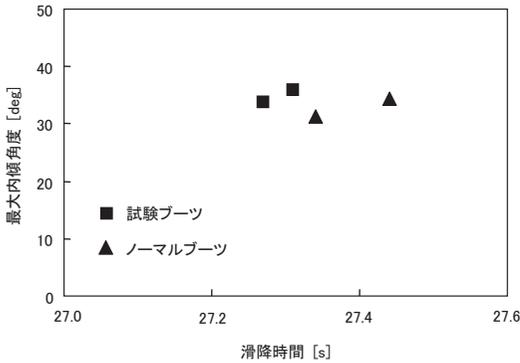
図8 アップーシェル設計の検証

3.3 アップーシェル設計の検証

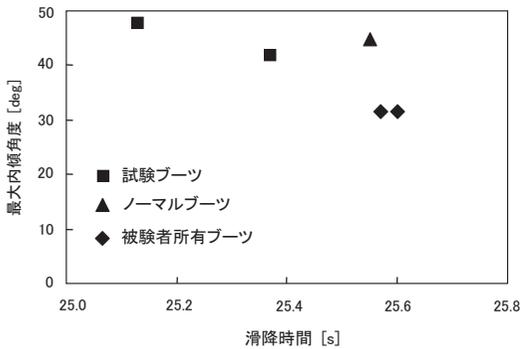
前節で検討したアップーシェル設計の有効性を検証するため、アップーシェル上縁部の前方ならびに側面から後方の高さを調整した三種類のシェルについて傾倒バランス実験を実施した。表2にアップーシェルの高さ設定を示し、図8にそれぞれのアップーシェル設計における最大内傾角度と角速度の実験結果を示す。この結果、予想通りアップーシェル前部を低く、側面から後部を高くしたType3のシェルが最大内傾角度ならびに角速度ともに最大値を示した。傾倒時間についてはType1が最も長くなったが、Type3との差は0.03sであり傾倒時間の約3%に過ぎないことから、Type3はバランス保持性能も十分に備えているといえる。

4. 雪上滑降実験

提案するアップーシェル設計が雪上での実滑降においても有効であるか、最終的に検証する。滑降中の最大内傾角度を計測するためスキーブーツに傾斜角センサを取り付け、データロガーならびに電源アンプはウエストバッグに収



(a) 被験者J.K.の雪上滑降



(b) 被験者T.K.の雪上滑降

図9 雪上滑降による最大内傾角度と滑降時間の比較

納して旗門に衝突しないよう被験者に装着してもらった。被験者には大回転の旗門設定を滑降してもらい、BROWER タイミングシステムで滑降時間を計測した。最大内傾角度と滑降時間を比較するブーツは、被験者が普段使用しているブーツ、試験ブーツと同一モデルでアップシェル無加工のノーマルブーツ、ならびに提案するアップシェル設計に加工した試験ブーツの三種類である。被験者J.K.は元全日本ナショナルチーム所属でワールドカップや世界選手権の日本代表経験があり、被験者T.K.は国民体育大会の北海道代表選手で、複数回の上位入賞経験がある。両被験者の計測結果を図9(a)ならびに(b)に示す。なお所有するブーツとノーマルブーツが同一である場合は、ノーマルブーツとして統一している。大回転における両者の最大内傾角度と滑降時間の計測結果は、ともに

表3 全日本ナショナルジュニアチーム選手による滑降時間の比較

種目	測定回数	ブーツ	滑降時間 [s]
大回転	1	ノーマル	25.74
	2	ノーマル	25.45
	3	試験用	25.35
	4	試験用	25.30
回転	1	ノーマル	29.53
	2	ノーマル	29.53
	3	試験用	DF
	4	試験用	29.27

(DF : Did not finish)

試験ブーツを履いた場合に滑降時間が最も短く、最も大きな最大内傾角度を記録した。この結果から雪上での実滑降においても提案するアップシェル設計が競技成績向上に有効であることが検証できた。さらに、全日本男子ナショナルジュニアチームに所属し、全国高等学校総合体育大会において上位入賞を果たした現役選手D.S.を被験者として、大回転と回転の旗門設定で滑降時間を記録した。この選手は通常から試験ブーツと同一モデルのノーマルブーツを使用している。表3の計測結果が示すように、短い滑降コースにもかかわらずノーマルと試験ブーツでの滑降時間の差は、最小で0.10s、最大で0.44sとなった。この差はアルペンスキー競技においては非常に大きな差であるといえ、国内トップレベルの選手にとっても提案する設計が有効であることを確認できた。

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検討を行い、室内傾倒バランス実験によりアップシェル設計を明らかにした。さらに、北海道内ならびに国内トップレベルのアルペン選手による雪上滑降実験でその有効性を検証した。今後はさまざまなスキルレベルの、より多くの被験者で有効性を

検証しながら、設計の最適値について検討を進める。またフットベッド設計やシェルの前傾角度の影響についても検討する予定である。

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) 坂田敏行, 田川敏成; スキー板の動的曲げ変形解析, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.59, No.567, pp.123-129, 1993.
- 2) 棚橋良次; スキー複合構造体の曲げ剛性設計法, 日本複合材料学会誌, Vol.19, No.6, pp.24-32, 1993.
- 3) 多田憲孝; スキー板設計のためのスキー・シミュレータの試作, スポーツ産業学研究, Vol.12, No.1, pp.1-10, 2002.
- 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) Kagawa, H., et al. ; Development of a Measuring System for Joint Angles of a Skier and Applied Forces during Skiing, JSME International Journal Series C, Vol.41, No.2, pp.214-219, 1998.
- 7) 長谷川健二, 他; スキー操作とターンの機構, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.64, No.623, pp.52-58, 1998.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Sahashi, T., et al. ; Carving-Turn and Edging Angle of Skis, Sports Engineering, Vol.4, No.3, pp.135-145, 2001.
- 11) 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.
- 12) Tada, N. and Hirano, Y. ; In search of the Mechanics of a Turning Alpine Ski Using Snow Cutting Force Measurements, Sports Engineering, Vol.5, No.1, pp.15-22, 2002.
- 13) 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.
- 14) 新小田幸一; 人の動きと転倒のメカニズム, 第一回ひろしま転倒予防セミナー講演集, pp.3-7, 2001.
- 15) Winter, D. ; Biomechanics of Human Movement, A Wiley-Interscience Publication, 1979.
- 16) 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.
- 17) 平野陽一; アルペンスキーの力学と最速経路, スポーツ工学, No.3, pp.47-55, 2008.
- 18) 上林卓司, 他; トップの感覚と個性, 月刊スキージャーナル 9月号, pp.54-65, 2003.
- 19) Witherell, W. and Evrard, D. ; The Athletic Skier, EXSEEDS Company Ltd., 1998.