B-28 スキーターンにおけるたわみと圧力に関する測定と考察

Measurement and Investigation on the Ski Deflection and Ski-Snow Contacting Pressure During the Turn on the Snow

○北出 基紀 (金沢大院), 米山 猛 (金沢大), 長田和隆 (小賀坂スキー製作所)

Motoki KITADE(Kanazawa University), Takeshi YONEYAMA(Kanazawa University), Kazutaka OSADA (Ogasaka ski company)

Deflection of the ski, ski-snow contacting pressure, boot-ski loads have been measured during the turn on the snow slope on the two skis of different bending stiffness distribution. The result shows that the ski-snow contacting pressure distribution is different in spite of that boot-ski loads and ski deflections are similar in the same carving turn remaining the same snow groove. From the deflection data, snow groove dimensions and measured pressure distribution, ski-snow contacting situation have been estimated by the correspondence between the deflected edge line with edged ski sliding surface and the snow groove surface. The idea that the front part of the ski bends to compress the snow surface and rear part of the ski rides on the formed snow groove surface is validated from the investigation. The difference of the ski-snow contacting pressure distribution attributes to the difference in the bending stiffness distribution of the ski.

Key Words: Sports engineering, ski, turn, measurement, deflection, pressure

1. 結 言

ターン中のスキーのたわみと雪面との接触圧力を知ることは、ターンメカニズムの解明のためにも、スキーの設計のためにも必要なことである。筆者らは、これまで、ターン中のスキーのたわみを検出するたわみセンサビームを開発するとともに、スキーと雪面との接触面における圧力を測定する方法を開発し、カービングターン中の実働のたわみと接触圧力分布の測定を行った。その結果ロングターンにおいて、スキーのたわみにはゆれがともないながらも舵取り期において、ほぼ一定のたわみを維持し、そのたわみ形状は3点曲げのたわみ形状とは異なること、個々の箇所での圧力は激しく変動するものの、平均処理すれば、一様な圧力分布を呈することなどがわかった。またスキー前部において、圧力の増減とたわみの増減が連動し、たわみが大きいときに雪面からの圧力も大きくなることも示した。

雪面溝とスキーとの接触状態についても推定したが、その推定方法を明確にし、スキーと雪面との接触状態とターンメカニズムを考察するための基礎を明らかにする必要がある。

一方、スキーの設計において、スキーの曲げ剛性分布をどう与えるかが重要な課題である。スキーの曲げ剛性の違いによって、たわみや雪面圧力はどう異なるのかを調べ、剛性分布の与え方についての設計指針を得たい。

そこで、本研究では、たわみ、圧力と雪面溝との関係から、スキーと雪面との接触状態を推定する方法を詳しく検討する。曲げ剛性分布の異なるスキーを用いて、たわみ、圧力、荷重、雪面溝の測定を行い、スキーの剛性による違いについて調べる。

2. 測 定 装 置

2.1 たわみセンサ

たわみセンサビームの概略を図1に、実際にセンサビームと圧力センサを取り付けたスキー板を図2に示す。ターン中のスキー板のたわみを計測するためのセンサは、曲げ角度を検出するセンサ (曲げセンサと呼ぶ) を 6mm 角のアルミニウムビームを介して接続し、スキー板の上面にとりつけたものである。曲げセンサを、ブーツセンターより前側に5個、

Fig.1 Structure of the deflection sensor beam

Fig.2 Ski with a deflection sensor beam and pressure sensors

後ろ側に4個を配置した。曲げセンサの構造は図3のように十字ばねの薄板にひずみゲージを貼り付けたものである。

本研究で使したスキー板の全長は1750mmで、たわみセンサビームの長さはブーツセンターより前方に800mm、後方に700mmとした。センサビーム全体の質量は約0.2kgである。スキー板の滑走面を平らにした状態をゼロ点としてたわみゼロとし、各曲げセンサで検出した角度とそれらをつなぐビームの長さから各センサ点の位置を求め、それらをつないでたわみ曲線を求める。

なお、以後の測定結果でねじりについては記述しないが、たわみセンサビームにはねじりを検出するためのねじりセンサも有している。

2.2 圧力センサ

雪面での滑走中の圧力を実測する方法として、市販の直径6mmの圧力センサをスキー板滑走面に装着して測定した。

使用した圧力センサは共和電業製小型圧力センサ PS-10KB (定格圧力1MPa) である。センサの感受部分はダイヤフラム構造で、受圧面が圧力を受けて生ずるたわみによって生じるひずみをひずみゲージで検出するものである。図4のように、圧力センサの受圧面が滑走面と同一になるようにセンサの高さを合わせて固定した。圧力センサはスキー板の右エッジ側に8箇所取り付けただ、左足に履いたときに右ターン外足のエッジ側圧力が測定される。

2.3 荷重センサ

スキーヤーからスキーへ作用する荷重を検出するセンサを図5に示す。ビンディングプレートとスキーとの間に設置するもので、ビンディングプレートから受ける荷重を中央のピンジョイント部で受け、前後で支えているビームの側面に45度方向にひずみゲージを貼り付けて検出する。せん断力を検出する構造としたので、高さの低いコンパクトな構造となった。この荷重センサを図6のように、ブーツセンターから前後110mmの位置に、前2個、後ろ2個の、計4個を装着した。ブーツセンター前左側のロードセルをFL、前右側をFR、同様にブーツセンター後方の左側をRL、後右側をRRと名付ける。

3. 測定

3.1 スキー

長さ1750mm、サイドカーブ23mで、曲げ剛性分布の異なる2種類のGS競技用スキーを用いて測定した。2種類の板の剛性分布を図7に示す。板Aは、ブーツセンター付近の剛性が、板Bと比較して低く、板Bは、ブーツセンターより後方で最も曲げ剛性が高くなっている。

3.2 データ収集

測定システムを装着した被験者を図8に示す。センサを取り付けたスキーを左足に履き、滑走中のそれぞれのデータを、肩掛けリュック内にある、市販データロガー (キーエンス NR-ST04 および NR600) で記録した。データサンプリング周期は2msとした。

3.3 測定

測定は、2009年3月18日、志賀高原高天原スキー場にて行った。気温は5度、新雪の圧雪状態であった。被験者は、身長185cm、体重90kgの上級スキーヤーである。滑走場所の斜度はおよそ20度で、長さ300mの滑走雪面において4周期程度のロングターンを行った。滑走後、雪面に残ったターンの軌跡を測定した。スキーAとスキーBの左スキーにそれぞれたわみセンサビーム、圧力センサ、荷重計を取り付け、スキーAでターンした後、スキーBに履き替えた後、スキーBで同様の滑走をおこなった。それぞれの時刻で気温に差が

Fig.3 Structure of the bending sensor in the deflection sensor beam

Fig.4 Pressure sensor equipped near the ski edge

Fig.5 Load cell for binding-ski load

Fig.6 Location of the 4 load cells

Fig.7 Bending stiffness distributions of the two skis

Fig.8 A skier with measuring system

Fig.9 Turn trajectory

なく、ターンを行った雪面状態は同様であった。

4. 測定結果

4.1 滑走軌跡

滑走後の滑走軌跡を図9に示す。左から右へ斜面を下る方向である。板の特性による違いを得るために、スキーヤーはそれぞれの滑走で、ほぼ同じ軌道を滑っている。第2右ターン中盤におけるターン半径は約30mで、通過時間から求めたターン中の平均速度は19m/s(67km/h)であった。

4.2 荷重

第2ターンにおける外足(左足)スキーにかかる荷重の変化を図10に示す。スキーAにおける荷重が図10(a)、スキーBにおける荷重が図10(b)である。ターンの中盤以降においては、かかとと内側にかかる荷重RRがつま先内側にかかる荷重FRよりも大きい。外エッジ側にはほとんど荷重が作用していない。ターン中盤における4点の荷重を比較したものを図11に示す。どちらのスキーを用いても4点の荷重のかけ方には大きな違いがないことがわかる。

4.3 たわみ

第2ターン中盤における左足(外足)スキーのたわみを図12に示す。0.2秒間(100点)の平均値を示す。ブーツセンターより前部のたわみはスキーBの方がスキーAよりも少し大きい。ブーツセンターより後部のたわみは、スキーAとスキーBでほぼ同様である。

4.4 雪面溝

滑走後に雪面に残った溝の様子と断面寸法を図13に示す。スキーAのターンにおいてもスキーBのターンにおいても溝深さはほぼ同様で、溝の外側(スキーの滑走面と当たる面の幅は40~50mm程度で、この面は滑走前の雪面よりも硬く

Fig.10 Comparison on the loads on the left ski during the right turn

Fig.11 Comparison of the loads on the four points at the middle of the turn arc

締まった表面となっている。この面が雪面となす角度は約55°で、スキーのエッジ角度がこの値であったと考えられる。一方溝の内側の面はターンの半径方向に少しカーブした曲面となっており、雪面を切り取った断面となっていて、締め固まった面ではない。また溝の外側面と内側面とのなす角度は約110°程度あり、90°よりも大きい。

(a) Deflection of ski A

(b) Deflection of ski B

Fig.12 Comparison of the ski deflection in the middle of the turn arc

Fig.13 Dimensions of the cross section of the snow groove

4.5 雪面圧力分布

第2ターン中盤における圧力分布の比較を図14に示す。スキーAにおいては、ブーツセンター前方200mmから後方400mm程度の領域において、圧力がほぼ平坦である。スキーの前方800~600mmにおける圧力は低い。スキー後部(-600mm)における圧力も比較的高い。それに対し、スキーBでは、ブーツセンター部において一旦圧力が低下し、ブーツセンターの後方350mm付近で最大となっている。つまりブーツセンターの前後に圧力のピークがある。その値はスキーAよりも低い。一方スキー前方800~400mmにおける圧力はスキーAよりも高くなっている。逆にスキー後部(-600mm)における圧力は低い。

このように、スキーAにおいては、ブーツセンター前後の圧力が平坦であるものの、比較的后方の圧力が高く、スキーBでは、ブーツセンター前後に圧力のピークがあり、比較的スキー前方の圧力が高くなっている。

(a) Pressure distribution on ski A

(b) Pressure distribution on ski B

Fig.14 Comparison on the ski-snow contacting pressure distribution in the middle of the turn arc

5. 考 察

5.1 圧力と雪面溝との関係

スキーの剛性分布の違いによる荷重やたわみ、圧力の違いを測定したが、これらの相互関係を分析する上で、基礎となるスキーと雪面の接触状態についてまず考察する。

図13のように雪面溝の外側面が雪面と55°の角度をなしていることから、スキーはおよそ55°のエッジ角(角付け)を持つと考えられる。この角度は、ターン半径とターン速度から求められる遠心力と重力とからスキーヤーに作用する力の方向と照らし合わせても妥当な値である。

ターンの間、雪面に対してスキーはこのエッジ角を持って押し付けられ、雪面が圧縮される。雪面溝における外側面(スキー滑走面との接触面)が硬く締めまっていることから、この面がスキーによる圧縮によって締め固まったと考えられる。つまりスキーを雪面に押し込んでその力を支えられるほど雪面との接触面が固くなったところまで溝深さが形成されると考えられる。したがって雪面が硬いほど溝は浅く、雪面が柔らかいほど、圧縮されて硬くなるまでの変位を必要とするので、溝が深くなると考えられる。図14のように、雪面からスキーに作用する圧力はスキー前部から後方に向かって高くなり、ブーツセンター付近で最大となった後、後方でまた減少している。圧縮された溝の深さはその深さまで圧縮された圧力よりも高い圧力が作用しないとさらに深くはならないと考えられるので、最大圧力よりも低いスキー後部では、雪面の溝の深さは変わらないと考えられる。したがって、スキーにおいて、圧力ピークよりも低い後部は掘りこまれた雪面溝の面の上に載っている状態にあると考えられる。また逆にスキー後部で圧力が検出されていることから、スキー後部が雪面よりも上空に持ち上がっているのではなく、雪面と接触していることが裏付けられる。

一方スキー先頭部から最大圧力点までは徐々に雪面を押し込んでいく過程であると考えられる。ターン軌道上を進行することで溝が形成されるので、スキーの先端部から雪面の押し込みが始まり、ブーツセンター付近の最大圧のところまで溝の圧縮が進行する。この過程における圧力には、雪面を

圧縮する圧力以外に進行方向逆向きに雪がスキーにぶつかってターン円弧より外側に吹き飛ばされる抵抗も含まれると考えられる。

5.2 スキーのエッジラインと雪面溝との関係

前節の圧力と雪面溝との関係についての考えをもとに、たわんだスキーが雪面溝と接触している状態を推定する。スキーのエッジラインが雪面に対してどのような関係になっているかを求めるため、図 15 のように、スキーのたわみからエッジラインを求める。まず計測されたスキーのたわみは、スキー中央線に平行なたわみ曲線であると考えられるため、図 15(a)に示すようにサイドカーブの曲線に沿って幅方向の変位を与え、エッジラインのたわみ曲線を求める。次にスキーをエッジ角分だけ進行方向を軸に回転させれば雪面に対するエッジラインが求まることになるが、5.1 で述べたようにスキー後部は雪面溝の上に載っていると考えられることから、スキー後部のエッジラインと雪面との距離はブーツセンター付近における距離とほぼ同一であると考えられる。そこで、エッジ角だけ回転させた後のスキー後部のエッジラインが雪面とほぼ平行になるように図 15(b)のようにスキーの前方を少し持ち上げた上で図 15(c)のように、進行軸周りにエッジ角だけ回転させる。

スキーAのたわみについて、ブーツセンター後方 120mm の位置を中心に 2° だけ前方を持ちあげ、エッジ角度 55° だけ回転させたエッジラインを雪面に垂直な上方向から見たラインを図 16(a)に示す。合わせて半径 30m の円弧を示す。この図からスキー後部が半径 30m の円弧とほぼ一致しており、ターン溝と一致する。スキー先頭のエッジは雪面まで持ちあがっている部分であり、雪面溝の内側面の縁を形成する部分であると考えられる。一方このエッジラインを雪面に平行な方向から見たのが図 16(b)である。ブーツセンターより後方はほぼ水平で、スキー先頭部の高さは雪面溝の底から雪面までの距離に相当する。

5.3 3次元モデルによる接触状態の検証

たわんだスキーと計測された雪面溝の3次元モデルを作り、スキーと雪面との接触状態について検証する。

雪面溝モデル上にたわんだスキー板を合わせた状態を雪面に垂直な上方向から見たのが図 17(a)である。スキーのブーツセンターより後部を雪面溝上に載るように置いたものである。ブーツセンターより前方のエッジラインが雪面溝の内側面の縁に向かっており、図 16(a)と対応している。また雪面に平行な方向から見たのが図 17(b)である。ブーツセンターより後部が雪面と平行で、ブーツセンターより前部が上方にむかっており、図 16(b)に対応したエッジラインとなっている。

さらに、スキー前方を、溝が形成される前の雪面として、スキーの滑走面と雪面との接触領域を示したのが図 17(c)である。雪面と接触する幅はスキー先端部からブーツセンター部へかけて徐々に幅が広くなり、ブーツセンター部以降はほぼ一定になっている。

この3次元の接触状態の図を斜め方向から見た図を図 18 に示す。ブーツセンター部での横断面を見ると、雪面溝の外側の面上にスキー板が載っていることを確認できる。

5.4 スキーの剛性とたわみ・圧力との関係

スキーの特性として曲げ剛性分布が与えられ、一定の斜度の雪面上において所定のターン軌道を所定の速度で滑走することを条件とすると、遠心力と重力から、ブーツを通してスキーに作用する力の総力がほぼ決まる。ブーツからスキーへ力が作用するときに、通常は前後のビンディングを通るため、スキーへの力は前部のビンディングと後部のビンディン

Fig.15 Investigation of the edge line of the ski on the snow surface

Fig.16 Estimated edge line of the ski

Fig.17 Investigation of the edge line of the ski and contacting surface between ski and snow by 3D model

Fig.18 Fitting of the deflected ski on the groove

グを通して与えられ、本測定で示した4点荷重のような状態でスキーに作用すると考えられる。前後の荷重の配分は本測定で検出されたものが一例となる。このような荷重によって、角付けされたスキーが雪面に押し込まれ、雪面との接触面が荷重を支える硬さまで掘りこまれた状態まで雪面溝が形成される。このとき、スキーのたわみは、スキー後部が雪面溝の上にのり、先頭部は雪面溝の内側面の縁にあるように形成される。スキーのたわみは、ブーツからの荷重と雪面からの圧力分布に対して、スキーの曲げ剛性分布に対応して形成され则认为られる。本測定では、ブーツからスキーへの作用荷重がほぼ同一で、たわみや雪面溝もほぼ同様であった。紙面の都合で詳細は省略するが、雪面の圧力分布と接触幅から、雪面からスキーに作用する荷重分布を推定し、モーメント分布を求めてスキーの剛性分布から曲率を求めてたわみを算出すると、たわみと圧力分布との関係が測定結果とほぼ同様

になった。したがって雪面圧力分布の違いは、スキーの剛性分布の違いに起因するものと考えられる。

雪面溝の形成においては、スキー板の押し込み圧力と雪面溝の深さとの関係など雪面の圧縮特性がからんでおり、またたわみによって形成される迎え角による抵抗の大きさも関係する。このような雪面特性を考慮してたわみと発生する圧力分布の予測ができれば、スキーの曲げ剛性設計に役立つと期待される。

6. 結 言

ターン中のスキーのたわみ、圧力、荷重を計測するシステムを用いて、曲げ剛性分布の異なるスキーを用いてターンを行い、比較を行った。その結果、たわみや荷重にはあまり違いがないものの、雪面圧力分布に違いが見られた。計測されたスキーのたわみと圧力分布、雪面溝のデータから、スキーと雪面溝との接触状態を推定し、ブーツセンターより前方で雪面が押し込まれ、ブーツセンター後方では形成された溝の上にスキー板が載るモデルの妥当性を検証した。これらの接触条件をもとに、雪面圧力分布の違いがスキーの曲げ剛性分布の違いに起因することを検討した。

文 献

- (1) Yoneyama, T., Scott, N., *Sports Engineering*, Vol.11, No.1(2008), pp.3-13.
- (2) Scott, N., Yoneyama, T., *Sports Engineering*, Vol.10, No.3(2007), pp.145-156.
- (3) Yoneyama, T., Kagawa, H. & Scott, N., *Proc. 6th International Engineering of Sport* (2006), pp.293-298.
- (4) Yoneyama, T., Kagawa, H., Tatsuno D., Scott, N. and Osada K., *Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.75, No.752 (2009), pp.336-343.