原著論文

スノーボードと滑走平面の接触領域に関する実験的研究†

坂田 敏行* 谷本 恒** 細川 健治*

An Experimental Study on Contact Area between
Snowboard and Flat Slope

Toshiyuki SAKATA*, Hisashi TANIMOTO** and Kenji HOSOKAWA*

Abstract

To discuss the dynamics of a snowboard turn, it is necessary to consider a) a snowboarder's snowboard control, b) the shape and mechanical properties of the snowboard, c) the contact mechanism between snowboard and slope, and d) the shape and mechanical properties of the slope. However, until the present, there have been no reports taking these factors into consideration due to the mathematical difficulty. Especially, it is difficult to explain the contact mechanism between snowboard and slope.

The present study attempts to estimate experimentally the contact area between snowboard and slope. First, some models of snowboard are machined precisely by using machining center. Second, the contact area between the snowboard and slope is measured by using a thin sensor sheet. The effects of the slope (mechanical property and inclination), the snowboarder (weight and snowboard control), and the snowboard (width and length) on the contact area are discussed. From the experimental results and discussions it is concluded that one can estimate experimentally the contact area.

Key words : Snowboard, Contact Area, Deformation of Snowboard, Edging, Turn

1. 緒 言

スキー滑走あるいはスノーボーディングに関する力学的な研究は主として実験的に行われてきたが、近年、理論的な研究も行われるようになった^{1),2),3)}。文献(1)では、スキー板を直交異方性板で、スキーヤーを質点で、滑走面を弾性床でモデル化したスキーターンのシミュレーション

法が提案されている。文献(2)では提案されたシミュレーション法を用いて、スキー板の幅、長さおよび曲げ剛性を順次変化させた場合のスキーターンを解析し、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を検討している。文献(3)では文献(1)のシミュレーション法を拡張し、スノーボード・ターンの解析法を提案した。理論的な研究においては、まず最初

†原稿受付 2000年9月4日

*中部大学 〒487-8501 愛知県春日井市松本1200

**中部大学大学院 〒487-8501 愛知県春日井市松本1200

*Chubu University, 1200, Matsumoto, Kasugai, Aichi, Japan (487-8501)

**Graduate School of Engineering, Chubu University, 1200, Matsumoto, Kasugai, Aichi, Japan (487-8501)

に力学モデルを作成し、次に、そのモデルの変形および運動を解析する。滑走現象は一見単純に見えるが、多くの現象が総合化されて生じる。それらの現象の中には、力学モデルの作成に困難を伴うものも少なくない。例えば、スキー板あるいはスノーボードと滑走面の間の接触問題もモデル化が困難な現象の一つであり、未だ十分に解明されていない。接触問題の力学モデルおよびその解析理論の精度は、解析された接触領域、接触圧力分布、スキー板あるいはスノーボードの変形、滑走平面の変形等により評価できると考えられる。

本研究の目的は、上記接触問題の解の精度を評価する指標の一つとして近い将来必要になると予測される、スノーボードと滑走平面との間の接触領域を実験的に測定することの可能性を検討することである。本研究では、接触領域に及ぼす、a) スノーボードに作用する力の影響、b) 滑走平面の材質と傾斜角度の影響、c) エッジング動作の影響、d) スノーボードの形状の影響、を測定することを試みる。実際のスノーボードは測定面積が大きく、実験装置の制約から現有設備では測定不可能なため、アルミ板より製作したモデルを実験に用いた。本研究は接触問題に関する研究の第一歩であり、スノーボードの構造、使用材料、機械特性等の接触領域に及ぼす影響を明らかにすること、あるいは、実験結果と数値計算結果との比較等は今後の課題である。

2. スノーボードに作用する力と滑走平面材質の影響

写真1は実験の様子を示す。水平な滑走平面上にセンサ・シートを敷き、その上に薄いフェルト、スノーボード、重りを順次重ねた。スノーボードからセンサ・シートを介して平面に作用する力をセンサ・シートにより測定する。実験にはニッタ株式会社製圧力分布測定システム「BIG-MAT」を用いた。センサ・シートは厚さ0.1mm、大きさは一辺約50cmの正方形である。縦横10mm間隔にマトリクス状(44行×48列)に電

写真1 実験の様子（重りを使用）

極（セル、感圧抵抗性物質）が配置されており、各電極毎に作用する力（圧力の測定範囲は $0.02 \sim 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ ）を測定可能である。各セルに作用する力はADコンバータ（分解能8ビット）によりデジタル化され、パソコンにリアルタイムで送られる（サンプリング速度は最大10ms/フレーム）。ADコンバータの分解能は8ビットであり、測定時のノイズをも考慮して測定圧力の閾値を $3/255$ とした。接触領域の測定は平面の凸凹、平坦度、ゴミ等の異物の存在により大きな影響を受ける。また、今回の実験では作用圧力がセンサーシートの測定範囲よりも小さい場合もある。そこで、センサ・シートの各セル上に厚さ0.18mm、一辺5mmの正方形のテフロンシートを貼るとともに、スノーボードとセンサ・シートの間に薄いフェルトを挿入し、できるだけ上記の影響を排除して安定した接触圧力が測定できるように工夫した。

図1は実験に使用したスノーボードの形状を示す。図1(a)および(b)はそれぞれ設計時の平面図と側面図（厚さ方向にのみ4倍に拡大）である。スノーボードのショルダー幅 $B_s=70\text{mm}$ 、ウェスト幅 $B_w=40\text{mm}$ 、接雪面の長さ $L=345\text{mm}$ 、サイドカーブの曲率半径 $R=1000\text{mm}$ 、中央部付近の厚さは3mm、前部と後部の厚さは2mmであり、質量 $M_s=0.12\text{kg}$ である。サイドカーブの曲率中心は中心Oを通り長手軸に垂直な線上にある。

図1 スノーボードの形状(1)

スノーボードはマシニングセンタを用いてアルミ平板より精度良く製作した。機械加工の結果生じたひずみにより、スノーボードにはキャンバー高さ(最大値は2.1mm)が自然につき、側面図(厚さ方向にのみ4倍に拡大)は図1(c)に示すようになった。

2.1 スノーボードに作用する力の影響

水平に置いたスポンジ(ばね係数 $2.88 \times 10^6 \text{ N/m}^3$, 厚さ20mm)製の滑走平面の上で実験を行った。スノーボードの中心Oに重り(質量 $M = 1, 2, 3, 5 \text{ kg}$)を置き, その時の接触領域を測定した。測定結果を図2に示す。センサ・シートのセルは10mm角であり, 接触・非接触は小さい正方形の集合で表示されている。図の黒色の部分が接触している部分を, 白色の部分が非接触部分を示す。図に示されているスノーボードの外形線は, 接触領域の測定後, 書き加えたものである。スノーボードには最大2.1mmのキャンバー高さがあるため, 質量が小さい場合にはスノーボードの前部と後部のみが滑走平面と接触し, 外力の作用する中心部Oの近傍は接触して

図2 接触領域に及ぼす作用力の影響

いない(図2(a)参照). 作用する重りの質量が大きくなるにつれて, スノーボードの中心部分のたわみが大きくなり, 中心部分でもスノーボードと滑走平面が接触するようになる(図2(b)および(c)). 重りの質量が5 kg程度になると, 接雪面のほぼ全域で接触する(図2(d)参照). 接触領域に作用している接触圧の総和を求めると, それぞれ11.9N(重りとスノーボードの質量和が1.12kgの場合), 19.7N(質量和が2.12kgの場合), 30.6N(質量和が3.12kgの場合), 50.4N(質量和が5.12kgの場合)であり, 荷重の総和の測定精度は良いことがわかる.

2.2 滑走平面の材質の影響

図3は滑走平面の材質をスポンジ(ばね係数 $2.88 \times 10^6 \text{N/m}^3$, 厚さ20mm, 柔らかい材質の例), ウレタンシート(ばね係数 $5.59 \times 10^6 \text{N/m}^3$, 厚さ20mm, やや固い材質の例), プラスチック(ばね係数無限大と仮定, 厚さ5mm, 固い材料の例)とした場合の接触領域を示す. 外力としては, スノーボードの中心Oに質量3kgの重り(重力は29.4N)を作用させた(スノーボードの質量は

0.12kg). 図3(a)は滑走平面のばね係数が小さいため, スノーボードの変形に応じて滑走平面も容易に変形し, 接触領域が広がっている. 図3(b)と(c)の場合には, 滑走平面のばね係数が大きいため, 平面がほとんど変形せず, スノーボードの前部, 中央部, 後部の3点で接触している. 本実験で作用させた外力30.6N(重りの質量3kg, スノーボードの質量0.12kg)ではウレタンのばね係数($5.59 \times 10^6 \text{N/m}^3$)より大きいばね係数ではほぼ剛体と見なせることが図3(b)と(c)の比較から読みとれる.

3. 滑走平面の傾斜角度とエッジング動作の影響

エッジング動作に伴う接触領域の変化を測定するために, 本章の実験では重りの代わりにスノーボード型ロボット(高さ317mm, 幅150mm, 奥行き215mm, 質量3.3kg)を用いた(写真2). ロボットは上体と下腿とからなり, それらは高さ122mmの位置に設けられたヒンジにより結合され, 上体は下腿に対して左右に回転できるようになっている(図5(a)). 上体が下腿に対して垂直の位置にあるときのロボットの重心はスノーボードの中心Oの上方(高さ109mm)にある. また, スノーボードは前章と同じものを用いた(図1).

図3 接触領域に及ぼす滑走平面の材質の影響

写真2 実験の様子

(スノーボーダー型ロボットを使用)

3.1 滑走平面の傾斜角度の影響

スポンジ(ばね係数 $2.88 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, 厚さ20mm)製の滑走平面を水平面に対して傾斜させ(傾斜角を β とする), その最大傾斜線に沿ってスノーボードを置いた場合に生じるスノーボードと滑走平面との接触領域を測定した(図4). 図中の◎マークは接触力の中心を示している. 図中の◎マークの位置がスノーボードの長手軸から右方向にずれているが, この原因はロボットの重心がロボットの中心から多少右方向にずれているためであると推定できる. また, ロボットをスノーボードに固定したため, スノーボードが多少変形したことが, 接触力の分布が左右対称でなくなっている原因であると考えられる.

滑走平面が傾斜していると, ロボットに作用する重力により, スノーボードの中央部より前の部分を滑走平面に押しつけ, 中央部より後ろの部分を滑走平面より引き離そうとするモーメントが生じる. このモーメントは滑走平面の傾斜角が大きいくほど大きくなる. 図4は傾斜角 $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ の場合の測定結果を示す. 図より, 斜面滑走時にスノーボードに作用する滑走平面からの反力はスノーボードの前部では後

(a) $\beta = 0^\circ$ (b) $\beta = 10^\circ$ (c) $\beta = 20^\circ$
図4 接触領域に及ぼす滑走平面の傾斜角の影響

部に比較して非常に大きくなることが明らかである. また, モーメントの影響は傾斜角度が大きくなるほど, 大きくなることも明らかである. このことはスノーボーディングを定性的に論じる場合には見落としがちなことであるが, 重要なことである.

3.2 水平な滑走平面上でのエッジング動作の影響

水平に置いたスポンジ(ばね係数 $2.88 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, 厚さ20mm)製の滑走平面上で, スノーボーダー型ロボットが上体を下腿に対して左右に 16° 傾ける動作(図5(a))を連続して行った場合の接触領域(図5(b))を示す. 上体の左右への揺動(ロボット重心の左右への移動)により, 接触領域が変化し, エッジング動作が行われていることが図より明らかである. また, 上体が垂直になった場合($\theta = 0^\circ$)の測定結果は3回ともほとんど同じ接触領域を示しており, 接触領域の再現性も良好であることが図より理解できる.

3.3 斜面上でのターン時の接触領域

斜度 $\beta = 14^\circ$ の滑走平面上に厚さ約5mmのフェルト・カーペットを2枚重ねて敷き, 滑走用斜面を製作した(写真2). 滑走斜面上をスノーボーダー型ロボットを停止状態から約1m重力の作用のみにより直滑降させ, センサ・シートの直前でロボットの上体を下腿に対して右に 16° 傾けた場合, 傾けない場合, 左に 16° 傾けた場合の三種類の滑走を測定した. センサ・シート中央付近まで滑走した時の接触領域の測定結果を図6(a)~(c)に示す. 図6(a)は上体を下腿に対して右に 16° 傾けた場合の結果である. 上体を傾けることにより, スノーボードの右側が滑走平面に押しつけられる. また, 滑走平面は斜面であり, 3.1節で示したように, ロボットに作用する重力に起因するモーメントによりスノーボードの前部が滑走平面に押しつけられる. この二つの現象が同時に生じるので, スノーボードと滑走平面との接触領域は図6(a)に示したようになる. また, 右側のエッジに沿って滑走平面

(a) Motion of robot ($\theta_0 = 16^\circ$)

(b) Contact area

図5 接触領域に及ぼすエッジング動作の影響

からの反力がスノーボードに作用するので、スノーボードは右ターンを行う。このことはスノーボードの向きが進行方向に対して右側に傾いていることより判断できる。上体を下腿に対して左側に 16° 傾けた場合の結果を図6(c)に、上体を傾けなかった場合の結果を図6(b)に示す。左に傾けた場合にも、右側ほどではないが、左にターンを行っていること、左側のエッジ近傍のみに接触領域が集中していること等が明らかである。接触領域から判断すると、図6(c)の場合のエッジング動作の効果は図6(a)のエッジング動作の効果よりも少ないと考えられる。そのため、左ターンは右ターンよりも緩いターンとなっている。この原因は、図4に示されているように、ロボットの重心がスノーボードの長手軸よりも多少右側に偏心していることにあると考えられる。その他に、滑走平面やロボットの

(a) Right turn (b) Straight skiing (c) Left turn

図6 接触領域に及ぼすターンの影響

エッジング動作も原因として考えられるが、今後の検討課題である。

4. スノーボードの形状の影響

図7に示す形状をした7種類のスノーボード(表1)を用いて実験を行った。サイドカーブは点Bと点Aを通る円弧で近似した(円弧の中心は二点O, Bを通る直線上にある)。図は設計形状を示すが、マシニングセンターによる加工の結果、図1の場合と同じように、キャンバーが生じた。滑走平面は写真2と同じである(斜度は $\beta=14^\circ$)。ターンへのスノーボード形状の影響は非常に微妙であり、一方、エッジング動作(この実験では荷重と偏心量により規定する)

は大きな影響を与えると考えられる。実験では、重りにより加重するので、荷重の大きさは一定となる。そこで、重りの偏心量の差を極力少なくするために、この実験ではスノーボード型ロボットの代わりに図7の破線で示す位置に円形の重り(質量 $M=2.1\text{kg}$)を固定した(写真3)。図7および写真3に示すように、重りの中心とスノーボードの長手軸との偏心距離は $d=10\text{mm}$ とした。この重りにより、スノーボードには長手軸回りのねじりモーメント、長手軸に沿っての曲げモーメントおよび滑走平面への押しつけ力が作用する。

4.1 スノーボードのショルダー幅の影響

図7 スノーボードの形状(2)

表1 スノーボードの形状(図7参照)

Name of snowboard	Length of contact area L (mm)	Width of shoulder Bs (mm)	Width of waist Bw (mm)	Camber height (mm)
SB1	400	50	30	2.5
SB2	400	60	30	4.4
SB3	400	70	30	4.2
SB4	300	60	30	4.0
SB5	350	60	30	2.5
SB6	400	60	30	4.4
SB7	450	60	30	7.2

写真3 実験の様子（偏心質量を使用）

ショルダー幅 B_s のみが異なる三種類のスノーボード（表1に示すSB1, SB2およびSB3）を用いて実験を行った。実験結果を図8に示す。ショルダー幅が狭いSB1の場合（図8(a)）にはショルダー幅の広いSB2の場合（図8(b)）に比較してエッジング角（滑走平面とスノーボード底面とのなす角）が大きくなり、スノーボードと滑走平面との接触領域も狭くなる。しかしながら、SB2（図8(b)）とSB3（図8(c)）の比較では接触領域の幅と面積はほとんど変化していないが、SB3の接触領域の位置はスノーボードの右エッジに偏っている。このため、SB3の左エッジは滑走平面から浮き上がり、スノーボードと滑走平面の接触は無くなっている。滑走実験の結果ではSB1, SB2, SB3の順に、ターンが困難に（ターンの軌跡の曲率半径が大きく）なっている。また、スキーターンに関する数値計算の結果でも同様の結論が得られている²⁾。それぞれのスノーボードには偏心質量 M により同一のモーメントが作用しているが、それによって生じるエッジング角はスノーボードの形状（幅、長さ、キャンバー高さ等）、機械特性（曲げ剛性とねじり剛性）、偏心質量（大きさと偏心量）等が複雑に影響して決まるため、スノーボード・ターンの軌跡が異なると考えられる。

4.2 スノーボードの長さの影響

長さの異なる四種類のスノーボード（表1に示すSB4~SB7）を用いて実験を行った。図9に実験結果を示す。スノーボードが長くなるにつれて、接触領域はスノーボードの長手方向に

(a) $B_s = 50\text{mm}$ (SB1) (b) $B_s = 60\text{mm}$ (SB2) (c) $B_s = 70\text{mm}$ (SB3)

図8 接触領域に及ぼすスノーボードの幅の影響

引き延ばされたようになっている。先行研究²⁾であるスキーターンに関する数値計算からは、スキー板の長さはターンの軌跡にはほとんど影響しないが、スキー板の回転には影響する（スキー板が短いほど速く回転する）との知見が得られている。スノーボードと重りを一体の剛体と考えれば、ターンの軌跡は剛体の並進運動の結果であり、スノーボードの回転は剛体の回転運動の結果である。本実験では、スノーボードに作用する重力の総和は一定であるため、スノーボードの長さに応じて反力の分布が変化しても、反力の総和は変化せず、並進運動（ターン）の軌跡は変化しないと考えられる。雪面からスノーボードに作用する回転モーメントは反力分布の変化に応じて変化し、スノーボードの回転の速さが変化するものと考えられる。しかしながら、スノーボードの回転の差は非常に小さく、滑走実験ではスノーボードの回転に及ぼす長さの影響を明瞭に認められる結果は得られなかった。

図9 接触領域に及ぼすスノーボードの長さの影響

5. 結 論

スノーボードのモデルをアルミ板より製作し、様々な条件で滑走平面とスノーボードとの接触領域を測定した。定性的には、概ね妥当な測定結果が得られた。実験結果より、接触領域に及ぼす、a) スノーボードに作用する力の影響、b) 滑走平面の材質と傾斜角度の影響、および c) スノーボーダーのエッジング動作の影響、は比較的簡単に論じることが可能であることが明らかになった。また、スノーボードの幅および長さの影響はスノーボードの曲げ変形を考慮することにより、推定可能である。しかしながら、スノーボード・ターンに及ぼすスノーボード形状の影響は簡単には論じられないことが明らかになった。

本研究では滑走平面とスノーボードとの接触領域を測定できただけであるが、接触領域内の圧力分布、すなわち、接触圧力分布を知ること

は、スノーボード・ターンを理解する上で、非常に有益であるとの感触が得られた。

謝 辞

本研究の一部は、文部省のハイテク・リサーチ・センター整備事業の援助を受けて行われたものであり、関係者各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Sakata T. & Ito T., Simulation of a ski turn, The engineering of sports (Proceeding of The 2nd International Conference on The Engineering of Sport), pp.361-368, 1998.
- 2) 坂田敏行・谷徳之, 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), 64-625, 3294-3299, 1998.
- 3) 坂田敏行・月山雅晴・細川健治, スノーボードターンのシミュレーションに関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), 65-639, 4431-4437, 1999.