

令和元年6月12日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14614

研究課題名（和文）滑走体の機械的特性と雪質を考慮したスノーボード設計のための滑走特性解析

研究課題名（英文）Snowboarding analysis for snowboard design considering mechanical characteristics and snow conditions

研究代表者

吉田 達哉（Yoshida, Tatsuya）

福井大学・学術研究院工学系部門・講師

研究者番号：20734544

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：スノーボードの滑走を定量的に評価するための解析手法を構築することを目的とした。雪面を個別要素法により粒子要素の集まりとして、スノーボードは剛体あるいは弾性体としてそれぞれモデル化し、連成解析を行った。解析結果より、スノーボードの形状と剛性および雪質がターンに与える影響を評価できることを確認した。また、小型の模型の滑走試験により個別要素法を用いた滑走解析の妥当性を確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

雪は状態が変化しやすく統一された条件下での実験による機器類の評価は困難であるため、解析により設計変更時の性能への影響を定量的に評価することで、解析結果を設計へ適切にフィードバック可能となる。そのため本手法は設計の最適化や効率化に非常に有効である。また、雪と弾性体の連成シミュレーションに関しては、防災・減災のためのインフラ設計や、除雪機や雪上車の設計・運用シミュレーションにも応用が可能であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is development of an analytical method to quantitatively evaluate snowboarding. The snow surface is modeled with particle elements by the distinct element method, and the snowboard is modeled as a rigid body or an elastic body. The coupled analysis with these models is performed. From the analysis results, it is confirmed that the influence of the shape and stiffness of the snowboard and snow condition on the turn could be evaluated. Moreover, the validity of the developed analytical method using the distinct element method is confirmed by the snowboarding test with the small models.

研究分野：機械力学

キーワード：粒状体 雪 個別要素法 連成解析 スノーボード スポーツ工学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでにスキーおよびスノーボードの滑走シミュレーションの研究が行われてきたが、これらの研究では、板が雪面から受ける力は線形バネによって表現されている。ターン時は板の端部で雪面を切削し、切削した雪を押し分けながら滑走することになるため、雪の複雑かつ離散的な挙動や圧雪といった雪の性質に基づいた反力は計算されていないのが現状である。また、板の形状には様々なものがあり、形状によって雪面との接触状態が異なる。近年、様々な形状の板が市販されているが、それらには雪上での運動特性に差異が現れる。先行研究^[1]では雪面板の変形は平板の曲げの理論解析を応用したものであり、板形状に依存する接触状態を考慮した解析は困難である。ゆえに、雪面と板の相互作用力の算出方法の改良および板の幾何学的形状と変形時の雪面との接触状態を考慮することで、雪とスノーボードの特性に起因する滑走性能への影響を定量的に評価が可能となり、スノーボードの実用的な設計手法の発展が見込める。

2. 研究の目的

個別要素法と有限要素法の連成解析により、雪特有の特性およびスノーボードの形状および機械的性質がターンに及ぼす影響を定量的に評価するためのシミュレーション手法を開発する。そして、詳細な雪面 - 板間の相互作用に基づく滑走特性の解析を行い、スノーボードの形状と剛性および雪質がターンに及ぼす影響を評価する。

3. 研究の方法

(1) 解析モデルの構築

スノーボードが滑走する雪面は個別要素法により粒子要素の集合体としてモデル化を行った。個別要素法では、図1に示すフォークトモデルに基づき、粒子要素間の法線および接線方向の接触力を計算する。そして各粒子要素に作用する相互作用力の総和を求めて、運動方程式を数値的に解くことで、粒子要素ひとつひとつの挙動を計算する。図1中の η_n 、 η_s は粘性係数、 k_n 、 k_s は弾性係数を表し、添え字の n は2つの粒子の法線方向、 s はせん断方向を表す。せん断方向に関しては摩擦係数 μ_t により粒子のすべり摩擦、粒子の回転方向に関しては転がり抵抗係数 μ_r により転がり抵抗を考慮する。この粒子要素を斜面に敷き詰めることでスノーボードの滑走斜面を再現している。また、スノーボードと雪粒子との接触力もフォークトモデルにより計算している。

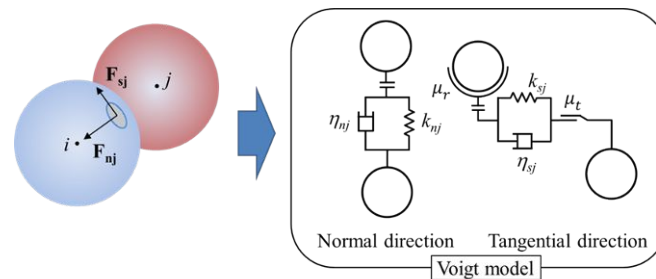


図1 フォークトモデルによる粒子要素間の接触力の算出

スノーボードの運動解析においてはスノーボードを剛体あるいは弾性体として計算した。スノーボードの6自由度の剛体運動を計算し、弾性体として解析する際は、有限要素法に基づきシェル要素を用いて板をモデル化した。個別要素法解析において粒子要素と有限要素の接触力を求めて、板の剛体運動および動的変形を再現している。動的変形はモード重ね合わせ法を用いて時刻歴応答を計算する。

(2) 個別要素法の妥当性検証

個別要素法による雪面のモデル化の妥当性検証を行うために図2に示す形状のスノーボードの小型模型を用いた。小型模型の全長は500 mm、厚さは1 mm、サイドカーブと呼ばれる板側面の円弧の半径は600 mmと1000 mmの2種類に加えて円弧がない板のあわせて合計3種類の板を作成し、サイドカーブ半径がターンに与える影響もあわせて評価した。その他の寸法および質量を表1に示す。さらに、小型模型に錘を取り付けて板の中心から図1中に示す y 軸の正方向に重心を移動させることで、滑走時に自重により x 軸周りのモーメントにより回転させ、一般的に角付け(エッジング)と呼ばれるスノーボーダーがターンを行う際の動作を再現している。また、ステレオカメラと小型模型に取り付けた慣性センサにより運動計測し、シミュレーションと比較できる。傾斜23度の斜面上に直径7 mm、長さ10 mmのポリプロピレンパイプを敷き詰めることで雪面を簡易的に模擬した。図3のように斜面上に $X-Y$ 座標を定義し、スノーボードの初期位置を原点に設定し、初期速度を与えず直滑降の姿勢から滑走を開始する。そして、錘の偏荷重により Y 方向にターンを行う。

また、シミュレーションでこの斜面を再現するために減衰比、摩擦係数および転がり抵抗係数の同定実験を行った。ポリプロピレンパイプを用いて安息角を形成させる実験を行い、パラメータを変化させて実験を再現するシミュレーションを行うことで安息角の応答局面を作成し

た。その応答局面より滑走シミュレーションに用いる減衰比、摩擦係数および転がり抵抗係数を決定した。

表 1 板の寸法

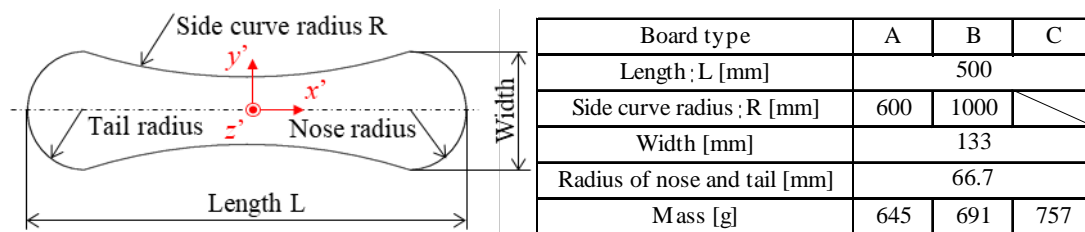


図 2 小型スノーボードの形状

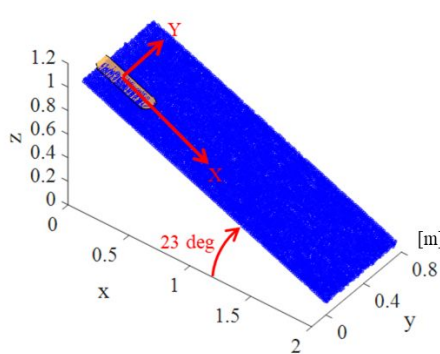


図 3 実験および解析における滑走時の初期姿勢

(3) 板の幾何学形状、機械的性質および雪質が滑走に与える影響の検証

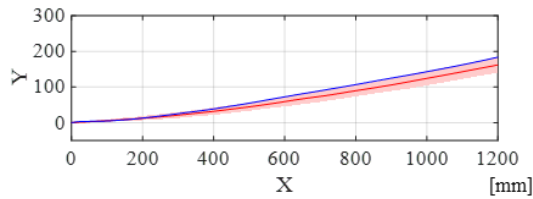
実際の雪面上での滑走を再現するため、個別要素法モデルのための雪粒子のパラメータは先行研究^[2]で用いられているものを調整して適用し、スノーボードの寸法全長 1.5 m、幅 0.3 m、厚み 0.01 m とした。幾何学形状の影響の検証では板のサイドカーブ半径を、機械的性質の影響の検証では板の弾性係数を変更することで剛性を、雪質の影響の検証では雪粒子の密度をそれぞれ変化させることで、スノーボードの滑走軌跡に与える影響を評価する。この時、スノーボーダーは 60 kg の集中質量とし、1 m/s の初期速度を与えて滑走させ、板中心にモーメント荷重を加えることでターンをさせる。板の長手軸周りに 30 Nm、さらに滑走開始後 0.5 秒間板の垂直方向の軸周りに 5 Nm のモーメントを与える。

板を傾け、角付けすることで、板端部が雪面に貫入して溝が形成され、この溝に沿ってターンを行う。この時、溝は円弧上になりその半径はサイドカーブに依存するため、一般的にサイドカーブが小さい板ほど大きくターンすると言われている。また、斜面に対して下方方向に凸形状で板がたわむことでこの溝の半径がさらに小さくなるため、よりターンが大きくなる。

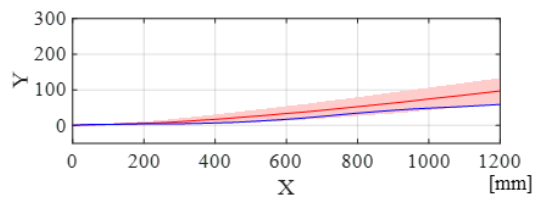
4. 研究成果

(1) シミュレーションの妥当性検証および板の幾何学形状の影響

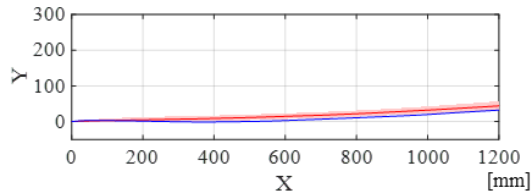
5 回滑走した際の板の中心の移動軌跡とシミュレーション結果を図 4 に示す。図 4 中の赤線は実験の平均値、赤い帯の範囲は実験値の分散 2σ に相当する。また、青線がシミュレーション結果を表す。図 4 より実験および解析結果よりサイドカーブ半径が小さくなるほど Y 方向への移動量が大きくなり、大きくターンしていることがわかる。一般的にサイドカーブ半径が小さい板ほど大きなターンができるとされており、その傾向と一致している。また、解析結果は実験の実験値の分散 2σ に収まっており妥当な結果が得られていることがわかる。また、実験結果と同様に、解析結果においてもサイドカーブ半径が小さくなるほど Y 方向への移動量が大きくなっており、スノーボードの幾何学形状による滑走への影響を評価できていると考えられる。



(a) サイドカーブ半径 600 mm



(b) サイドカーブ半径 1000 mm



(c) サイドカーブ半径なし

図4 実験および解析結果における滑走軌跡

(2) 板の幾何学形状 (サイドカーブ半径) の影響

サイドカーブ半径が滑走に与える影響を把握するために、板を剛体とし、板のサイドカーブ半径を 5m、10m、15m およびサイドカーブが無い板の滑走を解析した。その際の滑走軌跡を図5に示す。サイドカーブ半径が小さくなるほど Y 方向の移動量が増加する。また、滑走時のエッジ角 (板と雪面がなす角) を図6に示す。サイドカーブ半径が小さくなるほどエッジ角が大きくなっている。エッジ角が大きくなることで板と雪面の接触面積が減少することで板端部の圧力が増加し、板が深く雪面に貫入して深い溝ができる。この溝により板の運動が拘束されやすくなり Y 方向への移動量が小さくなったと考えられる。また、エッジ角が大きくなることで、雪面から受ける板底面の垂直方向の力の斜面横方向 (Y 軸方向) の成分が大きくなり、Y 方向移動量が増加したと考えられる。

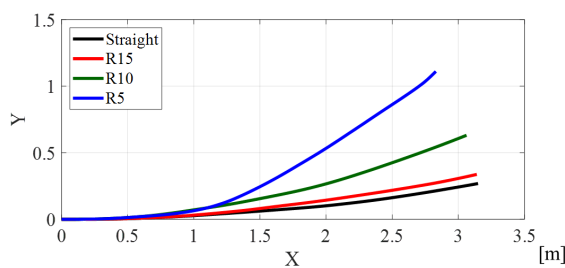


図5 サイドカーブ半径が滑走に及ぼす影響

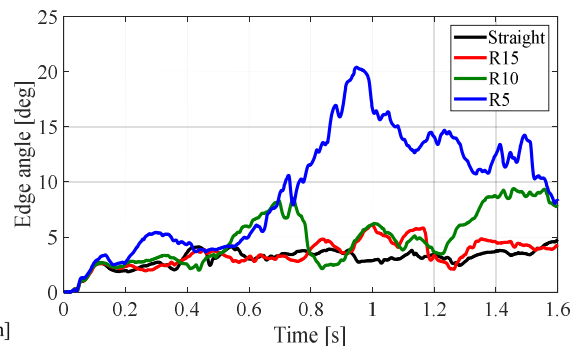


図6 滑走時のエッジ角の変化

(3) 板の剛性の影響

縦弾性係数を変更することで板の剛性を変更し、滑走シミュレーションを実施した。この時、板のサイドカーブ半径は 8 m とした。縦弾性係数、一次曲げ固有振動数および滑走時の板中心の Z 軸方向の最大変位を表2に示す。市販されているスノーボードの一次固有振動数は 15 Hz 程度であり、縦弾性係数を 7 GPa とした場合がそれに相当することになる。また、各弾性係数における板の滑走軌跡を図7に示す。表2より縦弾性係数が減少すると板の減少も増加し、1次固有振動数も低下するとともに滑走時の板の変形量も大きくなっている。滑走時には斜面に対して下方向に凸形状に変形すると、雪面との接触部分の円弧の半径がサイドカーブ半径からさらに小さくなり、その円弧の溝にそって板が進むためターン量が増加する。解析により板の剛性による滑走特性の影響を評価することができたと考えられる。

表2 板の弾性係数と変位量

Elastic modulus [GPa]	5	7	15	30
1st natural frequency [Hz]	12.5	15.32	21.56	30.64
Displacement [mm]	-28.6	-23.1	-20.0	-17.3

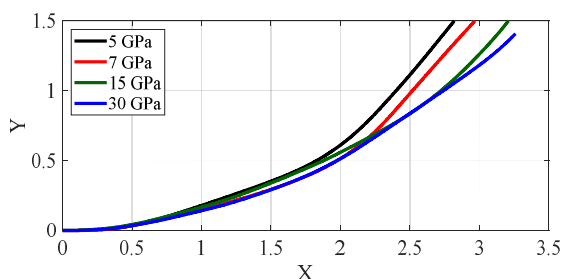


図7 弾性係数が滑走軌跡に及ぼす影響

(4) 雪質が滑走に及ぼす影響の検証

先行研究^[2]で用いられていたパラメータを変更して雪質の違いを再現するため、密度を 50% および 100% 増加させてより重たい雪質を再現し、滑走シミュレーションを行い雪質がターンへ及ぼす影響を把握した。図8に各雪質における滑走軌跡を示す。雪の密度が増加するとY方向への移動量が小さくなっている。滑走中は、板は雪を板底面で押し退け切削しながらターンを行う。雪粒子の質量が大きくなったことで雪粒子の流動性が低下するため、板の角付け時に溝が形成されにくくなったと考えられる。また、図9に板と雪面がなすエッジ角を示す。図9よりターン開始から1秒間までは密度が増加するとエッジ角は小さくなっている。そのため、Y方向の力の成分が減少し、Y方向の移動量が減少しターンが小さくなったことが考えられる。密度を100%増加させた場合、1.2秒前後でエッジ角が急激に増加しているが、雪粒子の配置が影響したと考えられる。板のスケールに対して十分に雪粒子の粒子径が小さい状態であれば、粒子の配置の影響は小さくなるが、十分に小さい場合は粒子の配置が影響を与える可能性がある。そのため、個別要素法解析における雪粒子の粒子径をより小さくする必要があると考えられる。

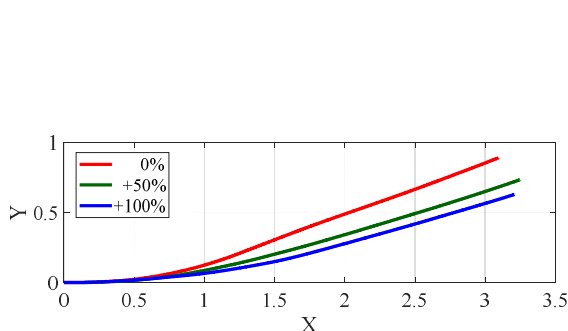


図8 雪の密度が滑走に及ぼす影響

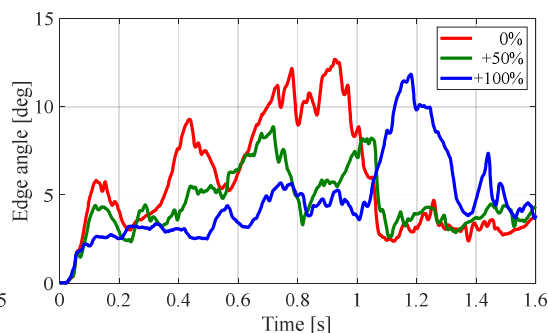


図9 滑走時のエッジ角の変化

<引用文献>

- [1] 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 巻 639 号 pp. 4431-4437
- [2] Masaziro Abe , Toshikazu Fujino , Fumiyasu Saito , Keisuke Takahata , Kasumi Iwamoto, Three-dimensional dynamic simulation analysis of snow removal characteristics of rotary equipment ,Journal of System Design and Dynamics ,Vol.5 ,No.5(2011) ,pp.982-993 .

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

T. Yoshida, A. Hojo, F. Kuratani, Simulation of snowboarding on snow surface modelled with particle elements, Proceedings of the 6th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support 査読有, 2018, pp.23-26

[学会発表](計3件)

T. Yoshida, A. Hojo, F. Kuratani, Simulation of snowboarding on snow surface modelled with particle elements, 6th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support(2018)

北條陽大、吉田達哉、鞍谷文保、個別要素法を用いたスノーボードの滑走シミュレーション手法の開発、Dynamics and Design Conference 2018(2018)

北條陽大、高倉涼、吉田達哉、鞍谷文保、個別要素法を用いたスノーボードの滑走シミュレ

ーション、スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017 (2017)

〔その他〕

ホームページ等

<http://mech.u-fukui.ac.jp/~kuratani/>

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。