（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和５年度　海外派遣研究員研究報告書

令和７年４月２４日

日本大学理事長　　殿
日本大学学長　　殿

所　　属　　理工学部（理工学研究所）
資格・氏名　准教授・小田憲一

■本報告書の内容を公表することは了承しております。
（公表可の場合，チェック■すること）

令和５年度海外派遣研究員（長期）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　長期

２　研 究 課 題

雪と土砂及び火山灰が混合した流動現象に関する研究

３　派 遣 期 間　　西暦２０２４年　３月２７日　～　２０２５年　３月２７日

４　派　遣　先　　カナダ

５　研 究 目 的

本研究では，雪崩の運動を正確に予測することを目的に，擬塑性流体モデルに必要な低ひずみ速度の範囲を決定するために，雪の静的なせん断強度と動的な残留強度を求め，それぞれのひずみ速度を同時に整理し，擬塑性流体モデルの完全な導入を目指す。また，異なる雪の密度を用意し，雪質の違いでこれらを整理し，より力学的な高精度化を進めた。さらに，「雪崩内部に土砂が含まれるかどうかの計測」，「雪崩が発生するまでの積雪状況の予測」，の二つに関して実験・計測と数値解析を併用した検討を追加で行った。追加検討を行ったそれぞれの実験・計測は派遣期間前に実施しており，本研究の派遣期間中における目的は，実験・計測で得られたデータの分析と数値解析の適用である。これらの結果を得ることで，土砂を含んだ雪崩の発生メカニズムの解明や災害を抑制するための数値シミュレーションの改善を図る。また，国際的に広くネットワークを展開している研究機関と共同研究を行うことで，研究の質を向上させることも目的としている。

（ 様式D－２ ）

6　研 究 概 要

①研究の方法

まず初めに，雪の静的なせん断強度と動的な残留強度を求め，それぞれのひずみ速度を同時に整理し，擬塑性流体モデルの完全な導入を目指した。実験はカナダ・カルガリー大学が保有している低温室環境で行った。加えて，４月は自然の降雪が続いていたため，春先のザラメ雪のサンプリングを行った。これらの実験は滞在期間中に継続して行い，冬季を迎えた降雪期には新たに雪のサンプリングを行い，新雪からしまり雪の状態を対象とした実験も実施した。一方で，雪崩の擬塑性流体モデルの導入に関しては，構成モデルの作成を Richard Wan と協議しながら，すでに開発を進めている解析コードのブラッシュアップを進めた。

さらに，議論を進めるにあたって派遣者が別プロジェクトで扱っていた積雪とインフラ構造物との力学関係から積雪層の密度が時間変化で増加する予測モデルを導入することで，雪崩が発生する前の斜面積雪の密度プロファイルを詳細に再現して用いることが可能になり，実際の雪崩が発生する際にきっかけとなる弱層を再現した解析を行える可能性が見えてきたため，このプロジェクトの研究も進めることになった。この研究では，「雪崩内部に土砂が含まれるかどうかの計測」，「雪崩が発生するまでの積雪状況の予測」，の二つに関して実験・計測はすでに行っており，数値解析を併用した検討を追加した。

②渡航先での活動内容

（1）　雪試料のせん断試験に関する研究

本研究では地盤の構成モデルを実験・数値解析の両方から広く研究している University of Calgary の Richard Wan 教授のもとで，雪の繰り返しせん断試験を行った。派遣期間中は，実際に雪を使用したせん断試験を低温室内で雪を管理しながら行い，新雪からざらめ雪のせん断強度変化を求めた。

（2）　雪崩の数値流体解析手法における擬塑性流体モデルの導入に関する研究

雪崩の数値流体解析手法に疑塑性流体モデルを導入する。このモデルのフレームワークは完成しており，課題点として残っているものは，モデルが対象としている物体のせん断特性を正確に導入することにある。派遣期間中における研究計画として，雪と土砂，火山灰を対象とした際に，それぞれを流動体とした際のせん断特性について共同研究先と議論を行った。

（3）　雪崩内の土砂検出および積雪の密度プロファイル推定に関する研究

この研究では，「雪崩内部に土砂が含まれるかどうかの計測」，「雪崩が発生するまでの積雪状況の予測」，の二つに関して実験・計測はすでに行っており，数値解析を併用した検討を行う。具体的には，雪崩内部の土砂検出はマイクロ波ドップラーセンサを用いた移動物体の検出技術を応用した土砂検出，積雪状況の予測は積雪深の時刻歴に対して指数モデルで推定した積雪密度プロファイルの作成を行った。

7　研究結果・成果

(1)　雪試料のせん断試験に関する研究

この研究では，雪試料の静的から動的な範囲でせん断特性を把握することを目的に，実際に雪を使用したせん断試験を低温室内で雪を管理しながら行い，新雪からざらめ雪のせん断強度変化を求めた。しかしながら，雪の実験室における密度管理は想定以上に難航し，長時間を対象としたせん断試験を行う際は低温室においても時間によって密度が増加してしまい，一定の密度を維持する技術に課題が残った。

この実験において得られた反省点は，雪は同じ温度，湿度の環境であっても時間の変化とともに圧縮が進むことを考慮していない点である。そこで，この影響を正確に考慮するために数値実験によって積雪の密度プロファイルを再現する手法を導入し，繰り返しせん断中の雪試料の密度プロファイル変化を予測する検討を進めた。この手法の詳細は（3）の研究で詳しく説明する。

結果として，積雪の密度プロファイルを予測する手法はおおむね導入することができたが，繰り返しせん断試験中を模擬した数値実験の実行までは進むことができていないため，今後は数値実験を主に進めた検討を基に，共同研究先と議論を続けてゆく。

(2)　雪崩の数値流体解析手法における擬塑性流体モデルの導入に関する研究

共同研究先では擬塑性流体モデルに必要な低ひずみ速度の範囲を決定するために，雪の静的なせん断強度と動的な残留強度から粘性モデルを表現する方法について議論を行った。この議論の中で，静的なせん断強度と動的な残留強度から粘性モデルを表現するには，雪や土砂，火山灰について，それぞれを流動化させた粘度測定や大変形のせん断試験が必要であることを指摘されたが，(1) の研究の結果で述べた通り，雪材料を用いた繰り返しせん断試験は課題が残ったため，うまくデータを取得することはできなかった。

一方で，派遣期間中に固体と流体の連成解析を試験的に行う機会があり，この経験から雪崩の発生初期にみられる固体的な運動から，本格的に流動化した流体的な運動を同時に扱うことで疑塑性流体モデルに近い運動をシンプルに扱える可能性が見つかった。今後は，数値実験を加えた検証を進めていく予定である。

(3)　雪崩内の土砂検出および積雪の密度プロファイル推定に関する研究

雪崩内の構造や密度プロファイルを知ることは，正確な雪崩の運動を予測するうえで重要なことである。本検討は，派遣期間中に予定していた土砂等を含む雪崩の流動特性の把握に関係して，雪崩が発生する斜面上の積雪がどのような密度プロファイルを持っているのか，また流動中の内部構造がどのようになっているのかを予測しておく必要があることから追加した内容である。

雪崩内部の土砂検出を目的とした研究では，マイクロ波ドップラーセンサを使用した移動物体の反射係数を計測し，雪と土砂を差別化する方法の開発を進めている。この計測は派遣期間前にすでに終えており，本派遣期間中はデータの分析なら

びに得られた波形のフィルタリングを併用した雪と土砂の検出方法の開発を行った。この結果として，乾燥した雪と砂を対象とした差別化はマイクロ波ドップラーセンサを用いて実行できる可能性があることを確認した。現在この結果については，英論ジャーナルに投稿し，査読を受けている段階である。

また，積雪の密度プロファイルを予測する研究については，積雪深のデータを用いて指数モデルによって積雪密度の時間変化を予測する方法について検討を行った。モデルを適用するために，実際に派遣期間前に計測した日平均降雪量を用いて積雪深と積雪密度の時間変化を予測し，実際に計測された積雪深データと比較を行った。この結果，本研究で用いた指数モデルで積雪深の時間変化をうまく再現することができ，密度プロファイルも再現することに成功した。一方で，このモデルを滞在期間先のカナダ・カルガリーに適用できるかを試みたところ，積雪深の時間変化を再現することはおおむね可能であったが，密度プロファイルをうまく再現することができなかった。この要因として，日本とカナダの外気温が大きく異なることが関係していると考えられる。日本の冬季は，北海道や高山地を除いて0℃付近での降雪環境であるのに対し，カナダの寒冷地は－10℃～－30℃の低温で降雪するため，短時間の降雪であれば風等で積雪深がさほど高くならない。このことは実際に計測を行うことはできていないが，今冬の降雪を経験したことで大きな差につながっていると予想している。また，密度プロファイルの予測に加えて，構造物への積雪の沈降力の影響を分析した内容についても検討を進めた。この内容は，オンラインで行われた国際会議や，オンラインジャーナルへの投稿を行った。ジャーナルについては現在査読を通過し，公開待ちである。今後は，密度プロファイルの予測について指数モデルに風等の影響を加えた検討を行っていく予定である。

以　上