

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：82102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13994

研究課題名（和文）降雪結晶起源の弱層形成に関する数値的アプローチ

研究課題名（英文）Numerical approach for weak layer formation caused by precipitation particle

研究代表者

田邊 章洋（Tanabe, Takahiro）

国立研究開発法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究部門・契約研究員

研究者番号：90830448

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、雪崩を引き起こす積雪層内部の弱層形成の要因の一つである降雪結晶に注目し、その理解の推進と防災に資する情報発出につなげるために、非球形粒子を用いた数値堆積実験系を構築した。比較的簡易な非球形粒子形状について、初期の姿勢や速度等が堆積時のマクロな量にどのように影響するか調べた。さらに、モデルで再現が難しい新雪の変態過程を明らかにするために、冬季間の野外観測を実施することで、雪粒子が自然に圧密し、安定化する様子を観測した。また、雪崩発生危険箇所を推定したのちに重要となる、雪崩の流動範囲の図示についての研究も実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の冬季インバウンド観光の一つの目的にスキー等のスノーアクティビティがあるが、スキー場外の滑走を行うバックカントリースキーでは、時に弱層に起因する雪崩事故が発生する。本研究課題はこの弱層形成の一つの要因である降雪結晶について、粒子形状を非球形粒子でモデル化することで、その形成や安定化等を明らかにするものである。また、本研究課題で構築した非球形粒子を用いた数値計算モデルは、これまで球形が仮定されてきた様々な雪氷現象の高度化に資するものであると考える。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a non-spherical particle simulation method to model the deposition of snow crystals, in order to understand the weak layer formation of snowpack caused by precipitation particle. We investigated how the initial orientation and rotation velocity of relatively simple non-spherical particle shapes affect the macroscopic quantities of the bulk, such as void fraction and the final orientation of sediment particles. Furthermore, in order to clarify the densification process of new snow, which is difficult to reproduce with the simple deposition model, field observations were conducted during winter. We observed the time series of new snow height and density on snow bords with several time steps.

研究分野：防災工学

キーワード：降雪結晶 雪氷防災 積雪 雪崩 数値計算

1. 研究開始当初の背景

雪の結晶形状は上空の気温、湿度等を反映して決まっており、その形状そのものが多くの人々を魅了している。このような雪が山地に降り積もると、雪山登山やスキーなど冬季レジャーの対象となる。一方で、雪山では時として雪崩事故が発生し、人的被害や交通障害を引き起こす。雪崩の発生原因については、古くから研究がなされており、雪崩のすべり面を積雪内部に持つ表層雪崩は、弱層理論によると積雪内部にできた相対的に弱い層(弱層)の上に積もった雪の荷重が、弱層のせん断強度を超えることで発生する。つまり、表層雪崩は荷重の増加によって引き起こされるため、登山やスキー等人的的要因によって誘発されることに加え、弱層は積雪内部に形成されるため、雪崩発生の前兆現象が見られない。そのため弱層が形成される条件を知ることは、雪崩事故防止の観点から重要になる。

雲中で形成された降雪粒子は地表に降り積もって積雪となり、降雪の度に様々な性質の雪が層を成して積み重なる。各積雪層の性質は、降雪結晶の形状や気象条件によって決まる。雪面では日射や風、気温等の気象条件に直接晒され、積雪中でも温度勾配に起因する水蒸気移動によって雪質の変化が起こる。弱層とは、このような過程の中で形成される、上下の層に対して相対的に弱い層である。弱層の形成要因は、降雪結晶に起因するものと、雪が降り積もり、積雪表層または積雪内部で変化して形成されるものとの2つに分けることができる。本研究は特に前者の弱層形成を対象とした研究である。降雪結晶起源の弱層を形成する降雪結晶として、雪粒子に多量の雲粒が付着したあられ粒子や、幅広六角のような板状で大型の雪結晶形状が知られており、これらの結晶は結晶粒子間の結合力が弱いいため、その上に短期間で大量の雪が降ることによって積雪層内部に強度の弱い層が形成される。しかしながら、このような降雪-積雪過程及びその安定化過程(時間経過による弱層ではない積雪層への変化)を実験的に再現することは難しく、これらが弱層形成の要因であることは知られているものの、その安定化の機構等、防災上重要な性質は未知の部分が多い。

2. 研究の目的

本研究課題は特に降雪種に起因する弱層形成について、その特徴づけを行い、雪崩事故防止に資する情報の創出を目的とする。

降雪粒子結晶の観測と積雪の断面観測を継続的に行うことで、弱層形成過程とその安定化への経時変化、これらと降雪結晶形状の関係に関する知見が高められるが、このような調査は人手が必要で自動化することが困難である。また、降雪結晶形状は上空の気温や水蒸気量によって決定されるため、特定の形状を持つ雪結晶から構成される層構造を狙った積雪の観察を行うことも難しい。そこで本研究は数値計算を用いて、任意の形状を持たせた粒子系(以降非球形粒子と呼ぶ)を堆積させる数値堆積実験系を構築する。実際の降雪結晶粒子形状を模した非球形粒子を作成し、それを用いた数値堆積実験を行い、現実の積雪断面と比較することで、降雪結晶に起因する弱層形成機構を明らかにする。また、本研究で作成する非球形粒子は形状を模すものであり、簡易な相互作用のみを考慮するため、自然の積雪中で発生する粒子間の結合や圧密(積雪が雪自身の重みで圧縮し、密度が増加する現象)過程は別途モデル化する必要がある。これらを簡易的にモデル化するために、降雪中に野外観測を実施することで、新雪が圧密・変態する過程を調査する。本研究では、非球形粒子を用いた計算手法の構築と、新雪の圧密・変態過程のモデル化のための観測を行う。

3. 研究の方法

非球形粒子を用いた計算手法の構築には、離散要素法(Discrete Element Method, 以下DEM)を用いた。DEMは全粒子に対する連立運動方程式を数値的に解くことで、系全体の挙動を再現する。非球形粒子の表現方法はいくつか提案されているが、研究代表者は過去に球形粒子を用いたDEMの計算の経験があるため、球形粒子を結合することで非球形粒子を表現した。粒子間の相互作用として接触による斥力のみを考慮し、非球形粒子の並進及び回転の運動方程式を数値的に解いた。積雪内部で雪質の変化をもたらす焼結や破壊、融解等による雪粒の変化と、それによって生じる積雪構造の変化は考慮していないため、本研究の数値モデルが対象とするのは、これらが発生する以前、つまり降雪粒子が雪面に降り積もった直後となる。図1に本研究で構築した非球形粒子の例を示す。

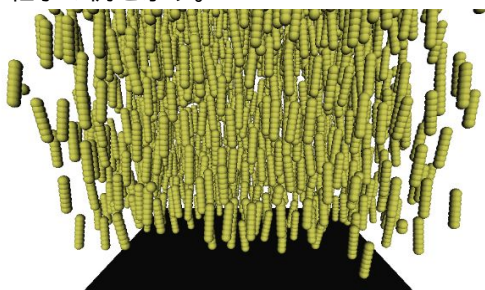


図1 本研究で構築した非球形粒子を用いた数値堆積実験系。



図2 降雪板を用いた新積雪の観測の様子。

上述のように積雪内部で進行する焼結や破壊等による雪粒子自体の変態は、それ自体のモデル化が必要なため、数値堆積実験系に取り込むことは難しい。そのため、新雪がどのように積雪となるか観測を行った。観測には降雪板と呼ばれる、50cm 四方の白色に塗装した木製板を使用した(図2)。降雪板は降雪中に屋外に安置し、一定時間ごとに雪の厚さ(新積雪深)と密度(新雪密度)を観測し、観測後は降雪板上の雪を取り除いて観測を継続または終了した。積雪が安定化するまでの時間を明らかにするために、降雪板は同時に複数枚野外に設置し、1時間から4時間までそれぞれ異なる時間ステップで観測した。またデータの解析時には、観測地と同じ敷地内にある気象測器やディストロメータ(降水強度、降水粒子の粒径および落下速度を計測可能な光学センサ)のデータも用いた。

4. 研究成果

非球形粒子の堆積について、粒子形状をごく単純化して直線状に並べた非球形粒子(クラスター粒子と呼ぶ)を用いた数値堆積実験を実施した。クラスター粒子を構成する球粒子の数(球粒子が多ければ長い、少なければ短い直線状の非球形粒子となる)初期配向、初期に与える回転速度の回転軸をパラメータとして与えて数値堆積実験を実施し、堆積後のバルク中の空隙率 v を求めた。その結果、粒子形状については、形状が長くなるほど空隙率が大きくなること、初期配向については、同じ粒子形状であればランダムに初期配向を与えた場合に最も空隙が大きくなり、水平方向の初期配向を与えると空隙が小さく密に詰まることが分かった(図3)。また、初期に回転を与えることで、初期配向の影響が小さくなることも示唆された。

ここで、空隙率 v とバルクの粒子密度 ρ との間に成立する $\rho \propto (1-v)$ という関係を考える。既存の新積雪の観測によって、新積雪の密度は風速に比例して増加することが知られている(梶川ら, 2004, 雪氷)。単純化した粒子での結果であるが、数値計算結果は実際の積雪を考えた場合に以下のように解釈可能である。風が吹いている場合、風によって乱された雪粒子は吹雪等の影響によって破碎し、無風時と比べて小さな粒子になると考える。数値計算では、粒子形状が小さいほど空隙率 v が小さくなるため、上式よりバルク中の粒子密度 ρ は増加する。つまり、風が吹くほど粒子が小さくなり、その結果新積雪の密度が上昇する観測結果が説明される。

一方新積雪の観測に関して、密度が 500kg/m^3 までの積雪の圧縮は、粘性圧縮によっておこると言われており、その圧縮粘性率について、古くから関心がもたれてきた(例えば小島, 1957, 低温科学)。遠藤らの観測と理論によると、特に密度 300kg/m^3 以下の広い範囲の雪に対しては、圧縮粘性率が密度のべき関数で表されることが示されている(遠藤ら, 1990, 雪氷)。新積雪もこの密度の範囲に入っており、遠藤の理論によって理論的に積雪深が計算可能である。そこで本研究で実施した野外観測の結果を、遠藤の理論に従って計算した。遠藤の理論では、ある短い時間に形成された積雪層を考え、その積雪層は上載積雪荷重によって圧縮されると考える。本研究では最も短い計測スパンを1時間としていたため、1時間で形成された積雪層の積雪深と雪密度に対して遠藤らの理論を適用した。これらの積雪層が4時間(4層)積み重なったとして圧縮計算を実施し、同じ場所で4時間のスパンで計測した実際の新積雪と比較した(図4)。観測値と計算値は概ねよい一致を示したが、一部計算値が観測値よりも小さくなる事例が見られた。これらの事例において、観測地と同じ構内にあるディストロメータの観測結果と合わせて精査したところ、観測と計算が合わない事例では、粒径が大きく、雲粒付着が少なく、1時間ごとの密度が小さい降雪であるという傾向が見出された。雲粒付着が少ないという条件は、降雪結晶起源の弱層を形成する降雪結晶の条件の一つであるため、このよう

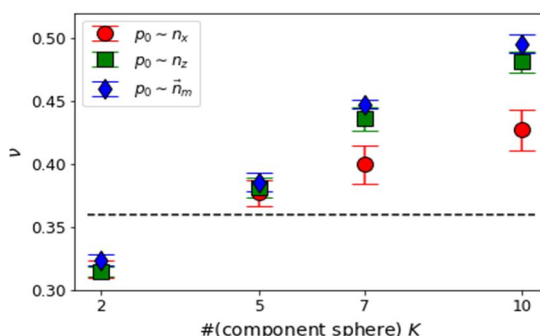


図3 粒子形状と空隙率の関係。横軸は球形粒子の数、縦軸は空隙率 v を表す。丸、四角、菱形はそれぞれ x 軸、 z 軸及びランダムな方位に初期配向を与えたことを表す。

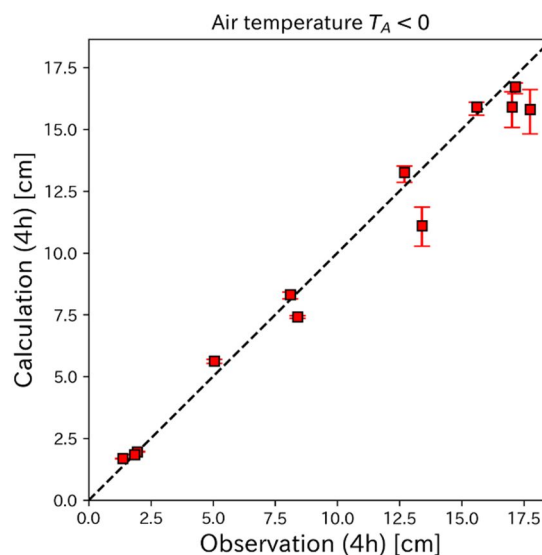


図4 (横軸)4時間で形成された観測による新積雪深と(縦軸)1時間ごとの観測値から計算した4時間経過後の新積雪深。

観測地と同じ構内にあるディストロメータの観測結果と合わせて精査したところ、観測と計算が合わない事例では、粒径が大きく、雲粒付着が少なく、1時間ごとの密度が小さい降雪であるという傾向が見出された。雲粒付着が少ないという条件は、降雪結晶起源の弱層を形成する降雪結晶の条件の一つであるため、このよう

な粒子の場合に圧密が進みづらいという結果が得られた。

以上のように本研究課題では、非球形粒子を用いた数値堆積実験系の構築と、冬季間の野外観測から降雪結晶起源の弱層になりうる積雪層の圧密の観測を行った。これらの研究から、粒子の堆積過程と堆積した粒子の圧密過程の理解が進んだが、これらの研究は別個に行われており、その統合が課題として残っている。本研究課題は、弱層が形成されやすい降雪結晶の形状や気象条件、弱層の形成機構の解明を目指すとともに、既存の雪崩発生予測モデルの高精度化や雪氷災害の面的予測の高度化により、雪崩の発生場所の推定に寄与する。次のステップとして、推定された弱層が破断して雪崩が発生した場合に、どこまで到達するかという問題を考える必要がある。このような意識で雪氷防災にかかわる共同研究を開始している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 田邊章洋, 荒川逸人	4. 巻 37
2. 論文標題 新庄における新雪の観測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 東北の雪と生活	6. 最初と最後の頁 3~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 田邊章洋, 志水宏行	4. 巻 84
2. 論文標題 雪崩動力学シミュレータfaSavageHutterFOAMの紹介と導入	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 雪氷	6. 最初と最後の頁 297~308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5331/seppyo.84.4_297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 田邊章洋	4. 巻 84
2. 論文標題 確率論的雪崩ハザードマッピングと精度検証 モンテカルロ法, ラテン超方格法, 多項式カオス求積法の比較	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 雪氷	6. 最初と最後の頁 309~321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5331/seppyo.84.4_309	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 YAMAGUCHI Satoru, ITO Yoichi, TANABE Takahiro, NISHIMURA Kouichi, ADACHI Satoru, SUNAKO Sojiro, SAITO Yoshihiko, OKAZE Tsubasa, NIIYA Hirofumi, TSUNEMATSU Kae, NISHIMORI Hiraku	4. 巻 42
2. 論文標題 Co-creation with local governments and ski resorts to generate scientific information that contributes to ski resort avalanche safety management	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Bulletin of Glaciological Research	6. 最初と最後の頁 9~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5331/bgr.23R02	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田邊章洋, 荒川逸人
2. 発表標題 新庄における新雪の観測
3. 学会等名 日本雪氷学会東北支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro Tanabe
2. 発表標題 The effects of precipitation particle shape on snowpack
3. 学会等名 WCCM2022-Yokohama (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro Tanabe
2. 発表標題 The effects of precipitation particle shape on snowpack -Numerical granular sediment experiments with non-spherical grains-
3. 学会等名 IGS Symposium on Snow (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田邊章洋
2. 発表標題 高頻度降積雪観測による積雪過程の研究
3. 学会等名 JpGU2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田邊章洋
2. 発表標題 PCQ法を用いた確率論的雪崩ハザードマップ作成に関する研究
3. 学会等名 JpGU2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田邊章洋
2. 発表標題 全層雪崩の観測事例を用いた雪崩モデルのパラメータ推定とその適応性
3. 学会等名 JpGU2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関