

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04342

研究課題名(和文) 傾斜地における新雪面の力学的特性の定量化と雪上移動ロボットの開発

研究課題名(英文) Quantification of mechanical properties of fresh snow surface on slope and development of mobile robot on snow

研究代表者

有我 祐一 (Ariga, Yuichi)

山形大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40372338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、アルキメディアンスクリューを使用した雪上移動ロボットを開発することを目的としている。この技術を応用することで、表層雪崩の発生が予想される新雪斜面をロボットが自動的に調査するシステムを実現できると考えている。

開発した機体は、筒直径200mmのスクリューを2本搭載し、先行研究に比べて推進性能と積載性能を向上させている。新雪面上での実験の結果、平均傾度30度(最大33度)の斜面の登坂と降坂に成功した。また、前進動作ではスクリューの回転速度制御を行うことで直線的な移動が可能であり、さらに、前後退やその場での左右旋回といった新雪面上を移動するために必要な機能が備わっていることも実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義として、低密度な新雪面とアルキメディアンスクリューとの力の相互作用を明らかにすることで、新雪上を沈むことなく移動できる機構を開発した点が挙げられる。これにより、推進力や積載量などを設計段階で見積もれるようになった。

社会的な意義としては、本装置を発展させることで、予見が難しい表層雪崩が発生しそうな斜面を人命を危険にさらすことなく調査することが可能になる点が挙げられる。豪雪地帯では、雪崩による災害が毎年さまざまな場所が発生しており、予見が可能になれば雪国におけるQOL(Quality of Life)の向上につながる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a snow mobile robot using alkylid media screws. We believe that this technology can be applied to realize a system in which the robot automatically surveys fresh snow slopes where surface avalanches are expected to occur. The developed machine is equipped with two 200 mm diameter cylinder screws, which improves its propulsive and loading performance compared to previous studies. As a result of experiments on a fresh snow surface, the robot successfully ascended and descended a slope with an average inclination of 30 degrees (maximum 33 degrees). In addition, it was also demonstrated that the machine can move in a straight line by controlling the rotational speed of the screw during forward motion, and that it is equipped with functions necessary for moving on a fresh snow surface, such as forward/backward movement and turning left/right on the spot.

研究分野：制御工学

キーワード：雪上ロボティクス アルキメディアンスクリュー 移動機構 表層雪崩 GNSS

1. 研究開始当初の背景

(1) 日本海側の地域を含む豪雪地帯では、雪崩による災害が頻繁に発生し、人々の生活に深刻な影響を与えている。集落、道路、スキー場、観光地などでは、交通の麻痺、建物の倒壊、死傷者などが報告され、私たちの命と生活に危険が及ぶ可能性がある。

雪崩は斜面に積もった雪が重力の作用で下方に滑り落ちる現象であり、主に全層雪崩と表層雪崩の2つに分けられる。全層雪崩は、滑り面が地表面にあり、積もった雪が一斉に崩れて流れ落ちる崩壊型の雪崩である。融雪や降雨により、積雪と地面の間に水が入り、摩擦力が弱まると発生する。典型的な前兆としては、斜面上部にクラック(ひびわれ)や斜面下部にしわ(雪しわ)やこぶ状の隆起が見られることが多く、遠くからの視覚調査による予測が比較的容易な雪崩である^[1]。一方、表層雪崩は、滑り面が積雪の中にあり、上部の積雪が流れ落ちる一部崩壊型の雪崩である。雪粒同士の結合が弱い層(弱層)が形成され、その上に積もった雪が滑り落ちることによって発生する。表層雪崩は、激しい降雪による積雪量の急増によって発生するが、全層雪崩のような明確な前兆現象は見られないため、雪崩の予測は困難である^[2]。積雪内部の弱層を調査する方法として、圧縮試験(CT)、手試験、ストック試験、ラムゾンデを使用したラム硬度測定などがある。しかし、これらの方法はすべて人の手作業で行われるため、雪崩の危険地域での調査は雪崩の誘発の原因となり、巻き込まれる危険性がある。このため現状では遠くからの目視による調査程度にとどまっており、積雪構造を十分に把握することができず、しばしば想定外の雪崩が起こっている。

そこで、我々は表層雪崩を事前に検知する技術の開発を最終目標とし、人々が雪崩に巻き込まれることなく積雪層を調査するための方法として、雪上移動ロボットによる調査を提案する。このロボットは以下の機能を移動機構に備える必要がある。

- ・雪が降る山中の新雪上で移動可能であること
- ・表層雪崩が起こりやすいとされる30~40°程度の斜面を登ることができること
- ・雪崩の誘発を防ぐため、雪面に大きな負荷がかからないこと

(2) 一般的な雪上移動ロボットの移動機構として履帯が考えられる。しかし、履帯自体が重く、転輪などの部品も多いため、さらに高出力のエンジンが必要となり、機構全体が重くなる。その結果、山岳部で走行すると雪面に大きな力がかかり、雪崩を引き起こす可能性がある。

また、ドローンなどの空中を飛行する移動体は、吹雪や降雪時などの悪天候によって操縦が不安定になりやすいという点や、積雪層を調査する機構を搭載することが難しいという点から、適していない。

そこで、我々はアルキメディアンスクリューを使用した移動機構に注目した^{[3][4]}。この機構は、ねじ山を持った筒(以下、ドリル)を左右対称に取り付けた移動機構であり、我々はこれを「ドリル推進機構」と呼称している。この機構では、ドリル円筒内を発泡スチロールで満たすことで機構自体の重量を軽減できるため、雪崩を引き起こすことなく新雪上を移動することが期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、2列並列型のドリル推進機構の開発を目指す。この新型機体には以下の特徴がある。

- (1) 2個のドリルを使用
機体の小型化や制御の簡単化を図るため
- (2) ドリルの径の大型化
自重を支える接地面積を確保するため

また、本研究では、ドリル筒を大口径化することによって、先行機体[]と性能がどの程度変化するかを以下の2点で比較検証する。

- ・雪の力学的特性から構築した数式モデル
- ・ドリルの模型を用いた実際の新雪での試験

その結果を基に新型機体を製作し、最終的には新雪の斜面を登坂できるドリル推進機構の開発を目指す。

3. 研究の方法

新雪上を移動可能な移動機構を開発するために、以下の方法で検討を行った。

(1) 数学モデルを用いた性能の検討

雪の力学的特性から構築された数学モデルを使用し、機体の雪面への沈下量、積載重量、および推進力を計算することが可能にした。これを用いて、先行研究で使用された機体と本研究で開発した機体の性能を比較し、その妥当性を検討した。

(2) 推進実験による評価

新雪が積もった平地および斜面で推進実験を行い、開発した機体について、沈下量、機体の重心位置、推進の可否、および旋回の可否を評価した。

4. 研究成果

(1) 数学モデルを用いた性能の検討結果

本研究で開発する新型ドリルの口径を直径 200mm とし、先行研究（ドリル直径 100mm）と積載性能と推進性能の両面で比較検討を行った。

ドリル筒の半径分が雪面に沈下したときの割合を 100% とし、沈下割合に対する機体総重量（自重 + 積載量）を先行機体と新規機体で比較した（図 1）。この結果、新型機体の方が先行機体より荷重を大きくかけられることがわかった。また、先行機体では最大総重量は 6.4kg であるのに対し、新規機体は最大 25.6kg となっているため、積載量の制限に余裕があることも明らかになった。

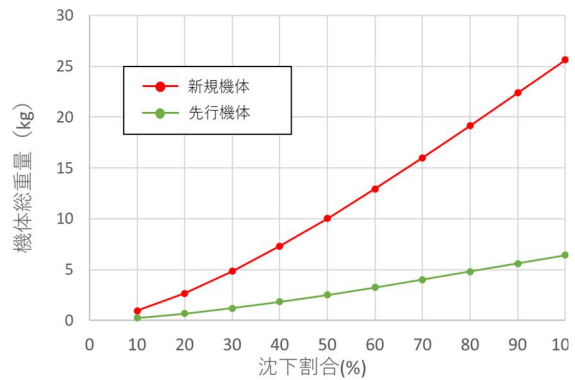


図 1 機体総重量と沈下量の関係

沈下割合に対する推進力と抵抗力を算出し機体の推進性能を比較した。先行機体の性能を図 2 に、新規機体の性能を図 3 に示す。これらの結果から、推進力が抵抗力を上回っているため、どちらの機体も新雪上を推進可能であることがわかる。しかし、推進力と抵抗力の差に着目すると、新規機体のほうが沈下割合によらず差が大きいことが分かる。また、沈下割合 100% ときの差は、先行機体が最大 105[N]なのに対して、新規機体は最大 306[N]となっている。この差により、実際に雪面で動作させた際、予測できない急な凹凸等によって抵抗力が増えた場合でも、十分に推進できる余裕が生まれると考えられる。したがって、新規機体の方が新雪面に対するロバスト性が向上していることが分かった。

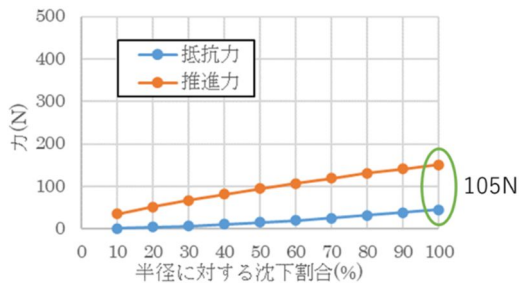


図 2 先行機体の推進性能

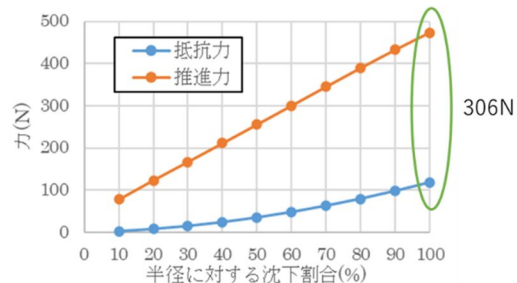


図 3 新型機体の推進性能

(2) 推進実験による評価

(A) 機体構成

開発した機体を図 4 に示す。幅 698[mm]、奥行き 754[mm]、高さ 349[mm]であり、重心は機体中央よりやや前側に位置するように設計した。各ドリルはチェーンを介して DC モーターによって個別に回転制御される。

アルキメディアンスクリューは、独自の 3D プリントを用いて印刷されており、筒直径 200[mm]、筒長さ 400[mm]、スクリュー翼の高さ 50[mm]、ピッチ 100[mm]となっている。

各ドリルの回転制御は、Arduino Mega、モータドライバ基盤（共立電子産業社 BOS0-8）、およびエンコーダを用いて回転速度の PI 制御を行った。

機体の推進状態を記録するために、準天頂衛星システム CLAS 対応の高精度測位端末「AQLOC-Light」と Raspberry Pi を用いた計測システムを構築して使用した。

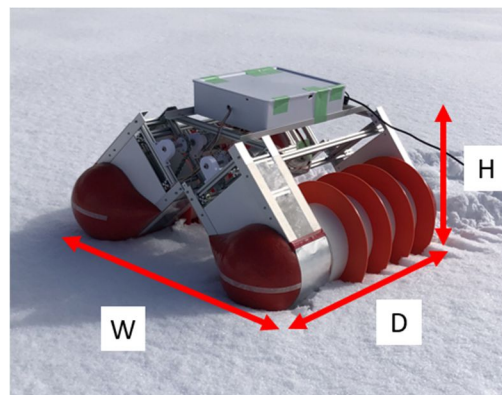


図 4 制作した雪上移動ロボット

(b)実験結果

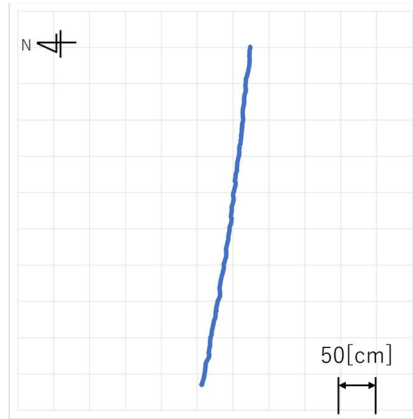
(b-1)平面上の推進

平らな新雪面（密度約 $120[\text{kg}/\text{m}^3]$ ）上で左右のドリルの回転数を揃えて前進させた結果を図5に示す。雪面上に残された轍と GNSS 測位結果のどちらからもほぼ直線的に移動していることが確認できる。

一方、左右のドリルの回転速度に差を持たせた場合（右 $0.99[\text{rad}/\text{s}]$ 、左 $0.76[\text{rad}/\text{s}]$ ）、一定の曲率で緩やかに左に旋回する軌跡となった（図6）。この結果から、左右のドリルの回転速度に差を持たせることで緩やかに旋回させることが可能であることが示された。



(a) 雪面上に残された轍

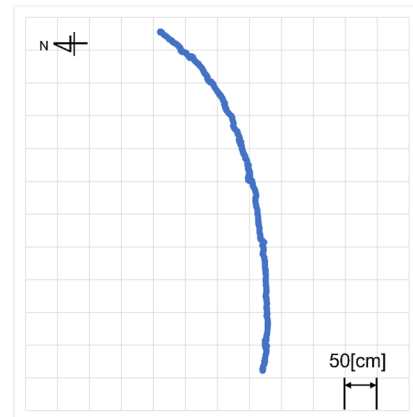


(b) GNSS から得られた軌跡

図5 回転速度を等しくした場合



(a) 雪面上に残された轍



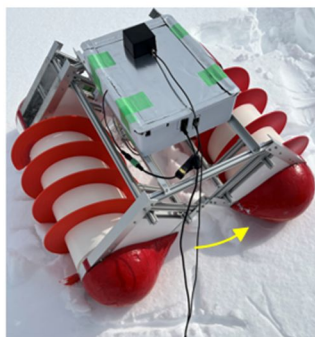
(b) GNSS から得られた軌跡

図6 回転速度差をつけた場合

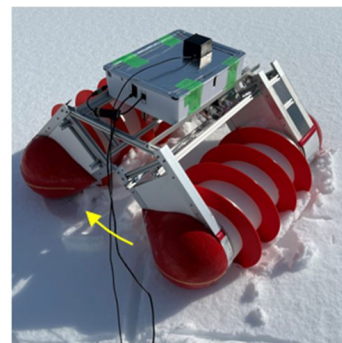
(b-11)平面上での旋回

左右の回転方向を同じにして15秒間回転させた場合、機体はその場で約30度旋回をした（図7）。

一般的なアルキメデアンスクリューを用いた推進機構や先行機体では、対称な左右のドリルを同じ回転方向で回転させたときには横方向へ移動する。これは重心位置が機体の中心にあるためである。しかし、本機体は重心位置が機体の前方にあるため、重心位置を支点として旋回するような動きになったことが考えられる。



(a) 左旋回



(b) 右旋回

図7 旋回動作

(b-II)平面上での旋回

斜面に機体を置き、前進動作により斜面頂上まで登坂させ、その後登頂地点から後退動作で斜面を降坂させた。斜面登坂、降坂の実験後の様子を図8に示す。実験の結果、平均傾度 30° (最大 33°)の斜面の登坂、降坂に成功した。

自然に積雪した斜面には緩やかな凹凸がある。それに影響されるため、直進動作をしていても機体は緩やかに旋回してしまう。しかし、その場での旋回動作を適切に行うことで、機体の向きを頂上方向に修正し目標地点に到達させることができた。

以上の結果から、開発した機体は新雪上を移動することが可能であり、斜度 30° の

新雪斜面上を登坂、降坂できることが実証された。また、斜面上の自然に積もった積雪面は緩やかな凹凸を有しており、それが機体の直進を妨げているが、適切な旋回動作をすることで目標地点に機体を到達させることが可能であることも示された。よって、表層雪崩調査用ロボットの移動機構として本機は有効であると考えられる。



図7 斜面登坂、降坂後の様子

< 引用文献 >

“最大で時速200kmものスピードに！雪崩(なだれ)から身を守るために”、政府広報オンライン、<https://gov-online.go.jp/useful/article/201311/4.html> (参照 2023-6-9)

雪崩災害調査チーム&雪崩事故防止研究会編、雪崩読本、山と溪谷社、pp.79-86、2017

有我祐一、菅原央道、雪上移動用推進機構の設計のための積雪表面層力学モデルの導出、第35回日本ロボット学会学術講演会講演論文集、RSJ2017AC2E1-05、2017

有我祐一、水野慶人、ドリル推進機構の機体構成と移動能力の評価、第36回日本ロボット学会学術講演会講演論文集、RSJ2018AC3C1-07、2018

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Yuichi ARIGA, Yusuke MORIMOTO, Kanta OKUYAMA
2. 発表標題 Measurement and Evaluation of Mechanical Properties of Drill Propulsion Mechanism on Fresh Snow Slope
3. 学会等名 2021 JSME CONFERENCE ON ROTOTICS AND MECHATRONICS
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有我祐一, 森本悠介
2. 発表標題 大口径スクリューを有する雪上移動機構の開発
3. 学会等名 日本機械学会東北学生会 第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有我祐一, 佐々木涼輔
2. 発表標題 樹木の状態がGNSS測位精度に及ぼす影響の定量的評価
3. 学会等名 日本機械学会東北学生会 第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichi Ariga, Yusuke Morimoto, Kanta Okuyama
2. 発表標題 Measurement and Evaluation of Mechanical Properties of Drill Propulsion Mechanism on Fresh Snow Slope
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021
4. 発表年 2021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
---------	---------