

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：62611

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011 年度～2012 年度

課題番号：23810031

研究課題名（和文）南極新内陸観測基地建設のための三次元不同圧密沈下予測モデルの構築

研究課題名（英文）Three-dimensional snow consolidation modeling for a new research base at Dome Fuji, Antarctica

研究代表者

金 高義 (KIM KOUJI)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号：10609796

研究成果の概要（和文）：南極内陸部・ドームふじにおける新観測基地建設のために、不同圧密沈下予測のための数値解析モデルを構築した。第 54 次南極観測隊において、雪氷地盤構造と硬度を現地観測した。また、強固で一様な圧雪地盤がドームふじの極低温下において造成可能であることを実験によって確認できた。同時に 9m-天文観測架台のための圧雪地盤基礎を造成し、傾斜計より得たデータより不同変位が発生しない安定した施工に成功したことを明らかにした。さらに、不同沈下の主要因となる 9m-天文観測架台周辺の不均等な吹きだまり性状を風洞実験より定性的に評価する事が出来た。

研究成果の概要（英文）：A three-dimensional numerical consolidation model was developed to predict differential settlement for a new research base at Dome Fuji, Antarctica. During 54th Japanese Antarctic Research Expedition, the spatial distribution of snow hardness was evaluated. Hard compacted snow experiments were conducted under extremely low temperature as well. The hard compacted snow method was applied to 9m-telescope tower construction, and the method worked very well. Additionally, a experimental snowdrift study around the 9m-telescope tower was succeeded.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：自然災害科学

キーワード：南極，不同圧密沈下，多次元数値解析モデル，極地工学

1. 研究開始当初の背景

現在進行している南極内陸部の新観測基地建設計画において懸念されている最大の問題は、建物周囲に不均一に積もった積雪層（スノウドリフト）を主要因とする雪氷基盤の不同圧密沈下である。

新観測基地建設の設計のためには、雪氷基盤の原位置での圧密性能を評価して、最低でも 10 年間と計画されている耐用期間において不同圧密沈下を定量予測する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 申請者の三次元凍上モデル構築の経験を生かして、スノウドリフトの影響による三次元不同圧密沈下定量予測モデルの構築することを第一の目的とする。

(2) 新観測基地の建設予定地は年平均気温 -50°C を下回るが、そのような超低温域における雪氷基盤の物性値はほとんど報告されていない。そこで、申請者の参加が予定されている平成24年度・第54次南極観測隊でのドームふじ基地滞在の機会を生かして、原位観測によって超低温域における雪氷基盤物性値を測定することを第二の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 熱流・力学を結合した3次元不同圧密沈下予測モデルの構築：雪氷基盤の圧密は氷粒子相互の変位により説明され得る。例えば雪氷基盤上に構造物を設置する場合を考える。地表面近くの空隙が多い雪氷基盤は次々と積もる雪の自重と構造物荷重によって、機械的な破壊や滑りや移動による氷粒子の再配列がおこり空隙が埋められていく。そして、氷粒子間の接触面に焼結による結合が生じ全体の構造が緻密になり圧密沈下が進行していく。この氷粒子骨格構造変化を密度変化で代表すると、圧密特性は密度依存性によって評価される。また圧密特性は温度依存性を持つ。例えば温度が低下すると、氷粒子骨格構造が強くなりかつ焼結作用が抑制されるため圧密性能は低下する。雪氷基盤の圧密沈下を、密度と温度の二つを要素とする連続体として巨視的に三次元モデル化する。

(2) ドームふじ基地での原位置観測：雪氷は温度と時間に対して極めて不安定であるので、土のようにサンプリング→運搬→室内試験という手順を踏むことができないため、雪氷基盤の巨視的（工学的）な圧密性能の判定は原位置測定によることになる。よって、第54次南極観測隊でのドームふじ基地滞在中に、断面観測によって密度鉛直プロファイルを得る。その得られた密度プロファイルからBaderの回帰法によって各層における圧縮粘性係数を計算する。

(3) ドームふじ基地での現地圧雪地盤実験：積雪強度は密度よりも雪粒子間の結合力によって支配される事は広く認識されている。しかしながら、ドームふじでの超低温場（年平均気温 -54.8°C ）における圧雪地盤の雪粒子間結合プロセスについては、根拠の乏しい推論にとどまっている。この現状を打破するために第54次南極観測隊でのドームふじ基地滞在中に、圧雪地盤を現地において造

成して、硬度の時間変化を実測する。

4. 研究成果

(1) 数値解析：

雪氷基盤の力学挙動を表すにはMaxwell-Voigt直列結合要素モデルが用いられてきたが、本研究では、24時間以上の長期クリープの数値解析の場合、Voigt要素を省略しても工学的に有用な解が得られることを示した。また氷粒子骨格構造特性を密度、氷粒子の結合強さと焼結性能を温度によって、それぞれ代表して、さらに時刻硬化の影響を考慮して圧縮粘性係数を単純化する事が出来た。

(2) ドームふじ基地での原位置観測：

ドームふじにおいては、極低温と低積雪涵養量のため、表面付近でおよそ $400\text{kg}/\text{m}^3$ だった密度は、8m深さにおいても10%未満の増加にとどまり、圧密は進行していなかった。全層はしもざらめ雪（粒径 $1.0\text{--}2.0\text{mm}$ ）であったが、1cm厚さ以上のこしまり雪/こしまり雪層（粒径 1.0mm 以下）と数mm厚さのクラスト層が存在した。さらに焼結がすすんだ高密度なしまり雪層が確認できた。デジタル式荷重測定器（プッシュゲージ）に円板状とブレード状アタッチメントを取り付けて、積雪断面の硬度分布をそれぞれ計測した。しまり雪層においては、硬度は密度と同様に大きな値をしめした。断面観測の結果から、ドームふじの雪地盤は深さ方向に非常に不均等な硬度分布を持つことが確認できた。

(3) ドームふじ基地での現地圧雪地盤実験：

内陸部・ドームふじ（標高：3810m、年平均気温：約 -54°C ）において、圧雪地盤造成実験を実施した。

圧雪造成のパターンは、攪拌→積み上げ→踏み固め→一晩放置とした。輸送の関係上、雪の攪拌は人力で行い、30cmの積み上げ厚さの工区を造成した。圧雪地盤造成時から1週間ごとにラムゾンデ硬度観測を実施した。また、圧雪地盤造成直後と三週目には断面観測を実施し、各深度ごとの密度、雪温、熱伝導率を計測した。

3週間でラム硬度は全層において増加したが地表面から10cmの間で最も顕著で、造成直後のラム硬度は100kgほどであったが、2週間後には400kgに増加した。これは、大型輸送機C130が離発着するのに必要なラム硬度に相当する。以上より、ドームふじにおいても圧雪地盤造成は可能であることが分かった。

積雪は、氷粒子が複雑に絡み合った網目構

造を持つ。したがって、積雪は同じ密度であってもその微細構造によって硬度が支配され、また、熱伝導や拡散現象などの物理的性質も変わる。造成直後と3週間後の断面観測結果において、全深度で密度はあまり増加しなかったが、熱伝導率はおよそ40%の増加をしめた。これは氷粒子の結合が太く成長した結果であると考察できた。

(4) 圧雪地盤工法の適用：

ドームふじ基地において、大気攪乱の影響を避けるために9m-天文観測架台を設営し、その架台上で40cm赤外線天体望遠鏡とDifferential Image Motion Monitor (DIMM)法による観測を実施した。

ドームふじは露岩帯が一切存在しない氷原であるため、その脆弱なしもごらめ雪地盤を建物基礎にする場合、建物に著しい不同変位が発生し、天文観測にとって致命的な不具合となる。そのため強固で均一な圧雪地盤基礎を造成した。天文架台に設置した傾斜計の観測結果によると、現在まで不同変位はほとんど発生していないことが分かり、圧雪地盤造成法の有効性が実際の建築物から確認された。

(5) 模型風洞実験：

南極ではスノウドリフトと呼ばれる地吹雪による雪の再配分が発生する。構造物は、流れの剥離を生み、弱風域には雪の吹きだまりが発生し、不均一に積もった積雪は、建物の不同変位の主要因となる。日本で唯一の低温風洞であり、天然の雪に近い結晶形の人工雪を供給する事が出来る世界唯一の施設である、(独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所の利用申請が採択され、模型風洞実験を実施して、9m-天文観測架台周りのスノウドリフト性状を把握する事が出来た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計9件)

①金高義、沖田博文、桑原悠一、小山拓也、遠野菊夫、藤野博行、堀川秀昭、石沢賢二、市川隆、9m-天文観測架台の圧雪地盤基礎造成と不同沈下観測、第10回南極設営シンポジウム、2013年06月10日、国立極地研究所(東京都立川市緑町10-3)。

②金高義、南極ドームふじにおける極低温下での圧雪地盤造成実験、雪氷学会北信越支部・研究発表会、2013年05月11日、ときめいと(新潟大学駅南キャンパス：新潟県新潟市中央区笹口1-1)

③横山竜大、半貫敏夫、金高義、Hartwig Gernant、小杉健二、南極・独ノイマイヤー基地を対象とした吹きだまり性状に関する吹雪風洞実験、第56回日本大学理工学部学術講演会、2012年11月28日、日本大学理工学部駿河台校舎(東京都千代田区神田駿河台1-8-14)。

④金高義、竹内由香里、遠藤八十一、ブレード状アタッチメントによる積雪硬度判定方法の評価実験、雪氷研究大会、2012年09月23日～2012年09月27日、福山市立大学(広島県福山市港町2-19-1)。

⑤横山竜大、金高義、森脇千秋、半貫敏夫、Hartwig Gernant、小杉健二、南極・独ノイマイヤー基地を対象としたスノウドリフト性状に関する風洞実験、雪氷研究大会、2012年09月23日～2012年09月27日、福山市立大学(広島県福山市港町2-19-1)。

⑥森脇千秋、金高義、横山竜大、半貫敏夫、石鍋雄一郎、小杉健二、南極ドームふじ基地における高床式8m天文観測架台周辺のスノウコントロールに関する一考察雪氷研究大会、2012年09月23日～2012年09月27日、福山市立大学(広島県福山市港町2-19-1)。

⑦金高義、沖田博文、横山竜大、森脇千秋、半貫敏夫、Hartwig Gernant、新ドームふじ基地建設にむけた高床式建造物の設営手法に関する研究計画、第9回南極設営シンポジウム、2012年06月08日、国立極地研究所(東京都立川市緑町10-3)。

⑧金高義、竹内由香里、遠藤八十一、宮崎信夫、ブレード状アタッチメントによる積雪硬度判定方法の評価実験、雪氷学会北信越支部・研究発表会、2012年04月14日、セミナーハウスあいりす(石川県加賀市山田町リ243)。

⑨金高義、多次元不同圧密沈下予測モデルの構築 - 雪氷基盤物性値の力学的異方性 -、雪氷研究大会、2011年9月19日～2011年9月23日、新潟県・長岡市。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 高義 (KIM KOUJI)
国立極地研究所・研究教育系・助教
研究者番号：10609796

(2) 研究分担者：なし

(3) 連携研究者：なし

(4) 研究協力者：

小杉 健二 (Kosugi Kenji)
防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター
新庄雪氷環境実験所・室長

半貫敏夫 (Hannuki Toshio)
日本大学・理工学部・名誉教授

石鍋雄一郎 (Ishinabe Yuichiro)
日本大学・理工学部・助手