

氏 名 井上 峻

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2526 号

学位授与の日付 2024 年 9 月 27 日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Spatial and temporal variations in density, microstructure,
and chemical properties of near-surface firn in Dronning
Maud Land, East Antarctica

論文審査委員 主 査 藤田 秀二
極域科学コース 教授
川村 賢二
極域科学コース 教授
中澤 文男
極域科学コース 准教授
青木 輝夫
国立極地研究所 特任教授
藤田 耕史
名古屋大学 大学院環境学研究科 教授
飯塚 芳徳
北海道大学 低温科学研究所 准教授

博士論文の要旨

氏 名：井上峻

論文題目：Spatial and temporal variations in density, microstructure, and chemical properties of near-surface firn in Dronning Maud Land, East Antarctica

Near-surface firn on polar ice sheets plays a crucial role in climate signal formation within the firn column, surface albedo, and surface mass balance. Despite numerous observations of near-surface firn properties on the Antarctic ice sheet over the past half century, the properties remain inadequately documented, given its vast expanse and diverse local climate conditions. This PhD study aims to better understand how density, microstructure of ice matrix and pores, and chemical properties are characterized at the surface and how these properties evolve with depth depending on local climate conditions across the ice sheet, through field observations and sample analyses.

The inquiry of this study begins with a wide-area investigation of surface firn microstructure in east Dronning Maud Land. We measured the snow specific surface area (SSA) of ~2150 surfaces between a coastal base near Syowa Station, located 15 km inland from the nearest coast (elevation: 615 m), and Dome Fuji, located 1066 km inland (3800 m), during the 2021–2022 summer. The measured SSA shows no elevation or temperature dependence between 15 and 500 km from the coast (elevation: 615–3000 m). Beyond this range, SSA increases toward the interior. SSA shows significant variability depending on surface morphologies and meteorological events. For example, (i) glazed surfaces formed by an accumulation hiatus in katabatic wind areas show low SSA, decreasing the mean SSA and increasing SSA variability in the area. (ii) Freshly deposited snow shows high SSA, but the snow deposition is inhibited by snow drifting at wind speeds above 5 m s^{-1} . Our analysis clarified that a combination of temperature-dependent snow metamorphism, snowfall frequency, and wind-driven inhibition of snow deposition play crucial roles in the spatial variation of surface snow SSA in the Antarctic inland.

The depth evolution of SSA over the wide area was then investigated using data from 16 pit observations extending to 1 m depth along the traverse route. Vertical SSA profiles show an increasing trend in SSA in the top ~0.5 m toward the interior, similar to surface snow SSA, but no significant trend or a slight decrease toward the interior below the depth. There are also noticeable differences in mean SSAs between neighboring sites, which correlate with surface mass balance. These results suggest that the magnitude of SSA decrease with depth largely depends on the residence time of snow under temperature gradients that facilitate water vapor transport through the

firn column; prolonged residence time leads to pronounced SSA decrease.

The focus of this study is then put on a low-accumulation area (23–30 mm w.e. yr⁻¹), where deep ice cores are extracted. We measured density, microstructural anisotropy of ice matrix and pore shapes, and SSA at high resolutions finer than 0.02 m on six firn cores collected within 60 km of Dome Fuji. The main findings are (i) a lack of significant density increase in the top ~4 m, (ii) lower mean density near the dome summit (~330 kg m⁻³) than in the surrounding slope area (~355 kg m⁻³) in the top 1 m, (iii) developments of a vertically elongated microstructure and its contrast between layers within the top ~3 m, (iv) more pronounced vertical elongation at sites and periods with lower accumulation rates than those with higher accumulation rates, (v) a rapid decrease in SSA in the top ~3 m, and (vi) lower SSA at lower-accumulation sites, but this latter trend is less pronounced than that of microstructural anisotropy. These observations can be explained by a combination of the initial physical properties on the surface set by wind conditions and the metamorphism driven by vertical temperature gradients in the top few meters. The magnitude of the metamorphism depends on the duration of firn layers under the temperature gradient, determined by the accumulation rate.

The evolution of firn microstructure with depth around Dome Fuji was further investigated by considering chemical properties. We conducted continuous flow analysis of major elements and water stable isotopes on the same cores. A comparison between chemical and physical properties reveals three types of layers; (i) High-density layers, characterized by vertically elongated, fine microstructure, show relatively low Na concentration and high $\delta^{18}\text{O}$. In contrast, moderate- (or low-) density layers, characterized by relatively isotropic, coarse microstructure, show both (ii) relatively high Na concentration and low $\delta^{18}\text{O}$ and (iii) vice versa. Our analysis suggests that variations in Na concentration and $\delta^{18}\text{O}$ primarily arise from their variability in snowfall rather than being overwritten by post-depositional processes. Therefore, high-density layers with vertically elongated microstructure likely originate from non-winter seasons and are formed by pronounced snow metamorphism driven by steep temperature gradients and high vapor pressure during sun exposure periods.

Overall, this study provides abundant observational data and detailed insights on near-surface firn properties, which are crucial for several glaciological applications. The initial microstructure of surface snow across Antarctica is complexly influenced by temperature, precipitation, and wind conditions. This study also highlights the primary role of accumulation rate in determining the magnitude of post-depositional alternation of firn microstructure through temperature gradient metamorphism. These conclusions are uniquely robust, supported by an extensive empirical dataset.

Results of the Doctoral Thesis Defense

博士論文審査結果

Name in Full

氏名 井上 峻

Title

論文題目 Spatial and temporal variations in density, microstructure, and chemical properties of near-surface firn in Dronning Maud Land, East Antarctica
東南極ドロンイングモードランドの表層付近のフィルンにおける密度と微細構造、化学的性質の時空間変動

本論文は、南極氷床表層付近のフィルンの物理的および化学的特性に関する詳細な研究を行い、その時空間変動について新たな知見を提供するものである。特に、東ドロンイングモードランド地域において、表層のフィルンの微細構造、密度、比表面積の広域調査を実施し、その変動要因を特定した。これは従来の研究に新たな視点をもたらすものである学術的価値は、以下のように要約できる。

氷床表層付近のフィルンは、降雪が焼結と変態を経て氷に至る中間的な状態を指す。フィルンは、氷床コアに保存される気候シグナルの形成や表面アルベド、表面質量収支の観測において重要な役割を果たしている。南極氷床では、過去半世紀にわたりフィルンの物理・化学的性質の観測が行われてきたが、広大な土地と多様な気象環境のため、その時空間変動は未解明の点が多い。しかしながら、温暖化が進行する地球環境での極域の挙動を理解するために、フィルンの物理・化学的性質の知見を深めることが不可欠である。本研究の目的は、現場観測と試料の解析を通じて、南極氷床表層付近のフィルンの密度、微細構造、化学的性質の発達とその時空間変動の理解を深めることとして設定された。この目的に沿って、まず、東ドロンイングモードランドの表層フィルンの広域調査を行い、昭和基地からドームふじに至る約 1000 km のルート上で、氷床表面アルベドに重要な表面積雪粒子の比表面積（積雪粒径の指標）を約 2150 地点の雪面で観測した。沿岸から内陸への範囲では標高や気温に依存せず、雪面形態や気象イベントに応じて比表面積（単位体積中で氷と空隙がもつ界面の総面積）が変動することが確認された。例えば、カタバ風による堆積の中断で形成された光沢雪面は比表面積を減少させ、新たに積もった雪は風速によって増減が抑制された。これらの空間変動は、温度依存性、降雪頻度、風による影響が主要因と考察した。次に、同ルート上の 16 地点で深度 1 m のピット観測を行い、比表面積の深度発展を調査した。上部約 0.5 m の比表面積は内陸に向かうほど増加し、0.5-1.0 m の比表面積には顕著な変動は見られなかったが、内陸 500-1051 km の範囲では「しもざらめ雪」の発達とともに比表面積が小さくなることが判明した。また、内陸 0-600 km では地点間での比表面積の差が大きく、これが表面質量収支と相関することが示された。さらに、南極内陸の頂上部である「ドームふじ」周辺の低涵養地域で掘削されたコアを使用し、フィルンの密度、氷と空隙の幾何学的構造の異方性、比表面積を高分解能で調査した結果、特定の深度で密度や構造の変化が見られ、これが涵養量と強く関連していることを明らかにした。加えて、フィルンの化学的性質を分析し、密度や微細構造との関連性を調べたところ、高密度層や低密度層における Na 濃度と $\delta^{18}\text{O}$ （酸素同位体比）の変動が降雪

に由来することが示唆された。総じて、本研究は、南極氷床の表層付近のフィルムに関する豊富な観測データと詳細な洞察を提供し、その性質が気候研究にとって不可欠であることを示している。温度、降雪、風環境が複雑に絡み合い、フィルムの微細構造が変質していく過程を明らかにし、その変質が主に涵養量に依存することが解明された。学術的価値として、アイスコアのシグナル初期値を明らかにし、広域的な気候信号として解釈したことが、気候変動研究への貢献として評価された。

研究の独創性および主体性については、主体的に研究を進め、初期の手法を発展させた点が評価された。また、浅層コアの氷床表層部の微細構造の研究を気候シグナルに関連付けた点も高く評価された。方法論の適切さについては、研究手法やデータ解析手法が適切であり、計測や実験が丁寧に行われている。特に、計測器の補正方法に関する技術的貢献が認められている。結果の信頼性についても、得られたデータが高い信頼性を持ち、誤差評価が適切に行われている。これらにより、全体として信頼できる研究結果が得られていると結論付けられた。論文の構成と論理性には、全体として論理的で一貫した構成がなされていることが確認された。また、発表と質疑応答の能力についても、発表が明確で理解しやすく、質疑応答においても適切に対応できている点が評価された。特に、発表時にはイントロダクションの部分が特に丁寧に示され、研究の背景や意義が明確に示された。

なお、審査対象者の井上氏は、本博士論文執筆に至る途中段階での成果を国内外の学会で積極的に発表してきた。この分野のトップジャーナルと言える雑誌 (*The Cryosphere* 誌 (JIF 4.4)) で 2 編の第一著者論文として出版した。共著論文やその他の報告等も多数あることも評価された。そうした経過のなかで優秀発表賞を 3 回と論文賞を 1 回受賞している。さらに、日本南極地域観測隊に参加した経験もあり、フィールドでの活動やバイタリティも他の観測参加者から高く評価されている。研究の内容も、研究発表実績も、その研究姿勢としても、多方面から高評価を得てきた客観事実がある点を本博士論文審査委員会の場でも確認した。

総括として、本研究は審査委員会によって全体的に高く評価された。以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。