

学 位 論 文 題 名

Mechanical properties and crystal textures
of Greenland deep ice cores

(グリーンランド氷床コアの力学的性質と結晶組織)

学位論文内容の要旨

地球の極地域に存在する氷床には雪とともに降り積もる不純物として、また積雪が圧密され氷となる時に気泡として取り込まれる空気として地球の過去の気候・環境変動情報が時間的層序を保ったまま記録、保存されている。近年の氷床内陸部における良質の深層コア掘削により過去数十万年にわたる気候・環境変動シグナルが氷床コアから読み取られている。また、氷床の存在は地球の気候変動システムの一部として、その巨視的な振舞いは気候変動を支配する要因の一部を担っている。氷床コアに記録、保存された気候・環境変動情報シグナルは氷床内部では氷体の自重により常に流動し、年層の厚さは深さとともに減少する。従って氷床コアから地球の古気候・古環境を復元するためには氷床の3次元的内部構造と氷床形成から現在に至る流動特性の理解が不可欠であり、気候変動システムを理解するにあたって地球極地域に存在する巨大氷体の動力学的挙動の知識が必要である。

本研究は、Greenland Ice-core Project (GRIP) によりグリーンランド氷床頂上ドーム位置 (72°34'N, 37°37'W) において掘削された全長 3028.8 m の深層コア (GRIP コア) の結晶組織と力学的性質の関係を明らかにした最初の研究である。特に、氷床頂上ドーム位置は気候・環境変動情報シグナルの記録、保存性において理想地点である。流動特性についても現在の水平方向の速度成分が最小であるという特異点であるが、その結晶組織と力学的性質の関係はこれまで部分的にしか調べられていない。本研究の目的はこの GRIP コアの結晶粒径、結晶 C 軸方位分布、固体電気伝導度（不純物濃度指標）、Cloudy band 構造（氷期の氷に観察される厚さ数 mm から数 cm の白濁層と透明層の互層縞模様）の分布を測定し、一軸圧縮試験を行ない、力学的性質を支配する主要な因子を明らかにし、氷床の流動特性を理解することである。さらに他の地点で掘削、解析された氷床コアとの比較により3次元的内部構造を明らかにし、氷床全体の流動特性を議論する。

結晶組織の測定結果として、結晶粒径と固体電気伝導度はともに Holocene（完新世）/Wisconsinan 氷期境界（深度 1624 m）以深で大きく減少し、氷期の氷には Cloudy band が分布していることが明らかになった。また、固体電気伝導度測定から得られた電氣的層構造は Cloudy band 構造とよい相関を示し、不純物が層状に分布していることが明らかになった。結晶 C 軸方位分布については Holocene/Wisconsinan 氷期境界部分で特異な変化はなく、深さととも

に徐々に氷床の鉛直方向に集中していくことがわかった。2500 m 付近で最も集中し、結晶C軸方位分布のパターンは著しい単極大型を示す。さらに深部では岩盤地形や底部の高温状態の影響で結晶粒径は粗大化し、結晶C軸方位分布の集中度は低下する。

一軸圧縮試験はコア軸から 45° 傾けて切り出された試片を用いて行った。圧縮試験時の最大分解せん断応力が氷床の水平方向に働くように応力軸を設定し、氷床の水平方向の流動パラメータ（温度、応力に依存しない因子）を議論する。流動パラメータは結晶粒径や固体電気伝導度が減少する Holocene/Wisconsinan 氷期境界で変化はなく、約 2100 m 以深では、これまで提唱されていた結晶C軸方位分布と流動パラメータの関係から求める値よりも数十倍以上流動パラメータが大きくなることが明らかになった。異常に大きな流動パラメータは結晶C軸方位の発達の結果、隣り合う結晶粒の角度差が小さくなり、結晶粒界が転位の移動の障害になる効果が減少したためであると考え、流動パラメータにこの効果を付加した。その結果、流動特性をよく再現することが示された。つまり、流動特性の主たる支配的要因は結晶C軸方位分布であることを明らかにした。さらに、結晶C軸方位分布が著しい単極大型を示す場合において、隣り合う結晶粒の角度差の影響を組み込んだ新たな流動則を提起した。この新しい流動則により、結晶C軸方位分布がランダムな状態から著しい単極大型に至る発達過程における流動特性を定量的に議論することが可能になった。

氷床内部の結晶C軸方位の集中化は深さとともに増す鉛直ひずみ量に伴う結晶の回転で説明されているが、このモデルが氷床の大部分で適用することができる一般性が他地点掘削の深層コアの結晶C軸方位分布との比較により明らかになった。さらに、この結晶C軸方位の発達過程と新しい流動則が氷床の頂上から下流に至る流動特性の定量的な議論に応用できることが示された。これまで氷期の氷はある種の不純物、あるいはその氷特有のC軸方位分布の影響で流動パラメータが大きくなると議論されてきた。しかし、本研究により、結晶C軸方位の発達過程と新しい流動則で下流域における氷期の氷の流動パラメータが大きくなることを説明することができた。つまり、間氷期や氷期といった堆積環境に流動特性は影響されず、深さにともなう結晶C軸方位の集中化が氷床の流動をコントロールしていることが明らかになった。

また、Cloudy band 構造の透明層は白濁層に比べ結晶C軸方位の集中度が高いことを明らかにした。この結果から新しい流動則によりそれぞれの層の流動パラメータを求めると、深部ほど透明層の値が大きくなることが分かった。つまり、これらの結果は数 mm から数 cm スケールで変化する流動パラメータが氷床全体の流動特性に影響を与えていること示している。

本研究は氷床頂上部ドーム位置で掘削された氷コアの結晶組織と流動特性の関係を初めて明らかにした。また、新しい流動則と結晶C軸方位分布の発達過程から氷厚のみを知ることによりドーム地点の流動パラメータを深さの関数として求め得ることを示し、この関係が下流斜面域でも応用できることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 本 堂 武 夫

副 査 教 授 前 野 紀 一

副 査 助教授 水 野 悠紀子

副 査 助教授 成 田 英 器

副 査 教 授 庄 子 仁 (北見工業大学)

学 位 論 文 題 名

Mechanical properties and crystal textures of Greenland deep ice cores

(グリーンランド氷床コアの力学的性質と結晶組織)

極地氷床には過去数十万年にわたる気候・環境変動のシグナルが記録されている。また、氷床の巨視的な振舞いは地球の気候システムの一部として気候を支配する要因ともなっている。過去の気候・環境変動の情報が氷床にどのように記録、保存されているか、また氷床がこれまでどのように変動し、今後どのような変動が予想されるか、という問題を理解するためには、氷床の流動特性を知ることが重要である。特に、氷床頂上ドーム位置において掘削される深層コアは、気候・環境変動情報の記録性において優れており、その結晶組織や力学的な特性を明らかにすることが重要な課題となっている。

本研究は、氷床ドームで掘削された深層コアの結晶組織と力学的性質を全層にわたって調べた最初の研究である。本研究では、Greenland Ice-core Project (GRIP)によって得られた氷床コア (3028.8 m 長) の結晶粒径、結晶C軸方位分布、固体電気伝導度 (不純物濃度指標)、Cloudy band 構造 (氷期の氷に観察される厚さ数 mm から数 cm の白濁層と透明層の互層縞模様) の分布を測定し、力学試験を行ない、流動特性を支配する主要な因子を明らかにすることを目的としている。

その結果、結晶粒径、固体電気伝導度共にホロシン (完新世) / ウイスコンシン氷期の境界 (深度 1624 m) 以深で大きく低下すること、および氷期の氷には Cloudy band が分布していることを明らかにした。また、力学試験から得られた結果は、ホロシン / ウイスコンシン氷期の境界で流動パラメータに変化は

なく、さらに深い部分（2500 m 付近）でこれまでにない大きな流動パラメータを持つことを見出している。一方、結晶C軸方位分布は、深度とともに鉛直方向に集中する典型的な単極大型を示し、流動パラメータの大きなところでは極めて集中度が高いことを明らかにした。異常に大きな流動パラメータは結晶方位差角が小さくなることによる効果であると考えて、流動パラメータに新たな項を付加することによって、流動特性を再現できることを示した。

以上、本研究は氷床ドーム頂上部で掘削された氷床コアの結晶組織と流動特性の関係を初めて明らかにしたばかりでなく、結晶C軸方位分布の発達過程とそれを反映する新たな流動則を提起し、これがドームから下流に至る氷床流動の定量的な議論に応用できることを示した。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。