

博士（地球環境科学） 奥山 純一

学位論文題名

Physical Processes in Ice Sheets and Ice Caps related to Paleoclimatic Reconstructions

(古気候復元に関する氷床、氷帽における物理過程)

学位論文内容の要旨

南極およびグリーンランド氷床において掘削された氷コアは、過去数10万年に及ぶ地球環境の変遷を、年単位の高い時間分解能で記録している。そして、これまでに行なわれた氷コア解析研究から、地球は急激な環境変化を繰り返してきたことが明らかになった。この発見は、地球の変遷を研究する幅広い分野に波及し、地球環境科学は分野横断型の研究として新たな局面を迎えるに至っている。このような状況の中、氷コア解析研究では、信頼性のある、より詳細な古環境の情報を読み取るために、従来の安定同位体組成分析や微量化学分析と並行して、氷コアの物理解析が進められている。しかし、氷コアの物理解析では、複数の解析項目について全層的あるいは連続的なプロファイルが得られておらず、雪、氷を特徴付ける個々の物理量の相互関連が明らかにされていない。そこで、本研究では、特に長年の懸案であった以下の二つの課題について、関与する物理過程の解明と新たな古環境情報の抽出を目的として、総合的な氷コアの物理解析研究を行った。

(1) 環北極圏地域の氷コア解析：全球規模での古環境復元を目的に、低・中緯度の高山、そして環北極圏地域の氷帽において、氷コアの掘削とその解析が進められている。ここで、これらの地域では夏に積雪の激しい融解が起こり、その結果積雪の同位体分別が生じる。従って、これら夏に積雪の激しい融解が生じる地域で掘削された氷コアでは、従来の安定同位体組成分析などから、詳細な古環境情報を抽出することが困難である。そこで、本研究では、新たに氷の結晶組織に着目することにより、詳細な古環境情報の抽出を行なう。

(2) 氷床・氷帽の圧密過程における氷結晶方位分布：著しい塑性異方性を示す氷結晶に関する知見は、氷床、氷帽の流動研究を進めていく上で欠かすことができない。これまでの研究から、氷化以深における結晶c軸方位分布の発達過程は概ね理解できるようになった。しかし、氷化に至るまでの圧密過程において、結晶c軸方位分布の変化が明らかにされていない。また、極域電波リモートセンシングによるデータを正確に解釈していく上でも、結晶c軸方位分布に関する知見は欠かすことができない。そこで、本研究では、氷コア解析に新たな研究手法を導入することにより、フィルンを特徴付ける物理量の測定を包括的に行ない、圧密過程における結晶c軸方位分布の変化を明らかにする。

第一の課題に関しては、カナダ・バフィン島のペニー氷帽山頂で掘削されたペニー96氷コアについて、融解-再凍結氷の割合、平均結晶粒径、そして結晶c軸方位の測定を行なった。その結果、(1) Holoceneにおける夏の気温変動の傾向、(2) 氷帽における再結晶過程、そして(3) 氷帽の流動履歴、などを明らかにした。特に、本研究では、従来の解析では困難であった氷コアの詳細な年代決定が、平均結晶粒径の変動に着目することにより、1年単位で決定していくことが可能であることを示した。更に、この結果と結晶c軸方位分布の

発達過程に基づく氷の歪み量の推定から、年間質量収支の変動を得るための新たな研究手法を確立した。そして、復元した年間質量収支から、小氷期以降の年間質量収支は増大の傾向にあること、また数年周期の変動があることを見出した。本研究の解析手法を、夏に積雪の激しい融解が起こる地域で掘削された氷コア解析に適用していくことにより、環境変遷の地域間比較の研究を詳細に進めることができ、しいては全球規模での古環境復元の研究発展に貢献していくことができると期待される。

第二の課題に関しては、南極・ドームふじ観測拠点で掘削された氷コアと上記のペニー96氷コアについて、X線透過率法による密度、X線CTによる氷粒子の形状、X線回折法による極点(結晶方位分布)、そして開放型共振器法によるマイクロ波誘電率テンソルの測定を行った。その結果、(1)フィルンの結晶c軸分布が鉛直または水平な方向に選択的な配向をもつ互層構造を形成していること、および(2)この配向が圧密の進行に伴い無秩序な配向へと変化していくこと、(3)フィルンの誘電異方性は氷化深度の近くでは氷粒子の形状異方性よりも結晶方位の選択的な配向に依存すること、そして(4)氷化深度における結晶c軸方位の選択的な配向は氷床全体の流動に影響を及ぼしえること、などを明らかにした。ここで、(3)の発見は、極域電波リモートセンシングのデータを正確に解釈していく上で基礎となる知見である。そして、本研究により、初めて明らかになった圧密過程における結晶方位の発達過程の知見から、寒冷源として役割を果たしている氷床、氷帽の発達過程に関する研究を詳細に進めることができ、しいては地球における環境変遷の研究発展に貢献していくことができると期待される。

以上の成果は、氷床・氷帽における物理過程の未解決課題を解決に導く新たな知見であり、氷コアによる気候・環境変動の研究に貢献するものである。

## 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

副査教授 大場 忠道

副査教授 Andrey Salamatin (カザン州立大学)

### 学位論文題名

### Physical Processes in Ice Sheets and Ice Caps related to Paleoclimatic Reconstructions

(古気候復元に関する氷床、氷帽における物理過程)

極地氷床や環北極圏地域の氷帽において掘削された氷コアから、様々な古環境情報を読み取るために、安定同位体組成分析や微量化学分析と並行して、氷コアの物理解析が進められている。本研究では、次の 2 つの課題について、関与する物理過程の解明と新たな古環境情報の抽出を目的として、総合的な氷コアの物理解析研究を行って、長年の懸案を解決に導いている。すなわち、(1) 夏に積雪の融解が生じる地域では、酸素安定同位体測定などの手法で詳細な古環境の復元を行なうことが困難であるが、本研究では、氷の結晶組織の詳細な解析を行うことによって、季節シグナルの抽出および流動履歴の解析を可能にした。また、(2) 氷床・氷帽のフィルン圧密過程における氷結晶の形状と方位分布の発達過程は、氷床全体の流動特性や電波探査の解釈に関する重要な物理過程であるが、その詳細は知られていない。本研究では、X 線やマイクロ波を使う新たな手法で、この過程を明らかにした。

本論文は 4 章から成り、第 1 章では、氷コア研究における物理解析研究の意義およびこれまでの研究の概観と本研究の目的が述べられている。第 2 章では、カナダ・バフィン島のペニー氷帽山頂で掘削された氷コアについて、融解-再凍結氷の割合、平均結晶粒径、そして結晶 C 軸方位分布の詳細な測定を行ない、従来の解析では困難であった氷コアの詳細な年代決定が可能になったこと、およびこの結果と結晶 C 軸方位分布の発達過程に基づく氷の歪み量の計算から、年間質量収支の変動を得るための新たな手法について述べられている。第 3 章では、南極・ドームふじ観測拠点で掘削された氷コアと上記のペニー氷コアについて、新たな解析手法を導入して、圧密過程の詳細な研究を行ったことが述べられている。すなわち、X 線透過率法による密度、X 線 CT による氷粒子の形状、X 線回折法による極

点(結晶方位分布)、そして開放型共振器法によるマイクロ波誘電率テンソルの測定を行って、フィルンの結晶 C 軸分布が鉛直または水平な方向に選択的な配向をもつ互層構造を形成していること、この配向が圧密の進行に伴い無秩序な配向へと変化していくこと、フィルンの誘電異方性は氷化深度の近くでは氷粒子の形状異方性よりも結晶方位の選択的な配向に依存すること、および氷化深度における結晶 C 軸方位の選択的な配向は氷床全体の流動に影響を及ぼすこと、を明らかにしている。第4章では、本研究の成果がまとめら、今後への展望が述べられている。

以上、本研究は、氷コアの物理解析研究における懸案を解決するものであり、本研究の解析手法を他の地域で掘削された氷コア解析に適用することによって、古気候・古環境復元に重要な貢献をなすばかりでなく、氷床流動研究や電波リモートセンシングの解釈に重要な知見をもたらすと期待される。また、新たな手法を導入して実施した氷コア解析は、申請者自らが計画、実施したものであり、研究者としての資質の高さを知るに十分なものである。

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)の学位を受けるに充分な資格を有するものと判定した。