

学位論文題名

Interpretation of detailed density profiles of alpine ice cores as past environment proxy signal

（山岳雪氷コアの精密密度プロファイルによる古環境復元）

学位論文内容の要旨

本論文は山岳雪氷コアの精密密度プロファイルを用いてコアの年代を高時間分解能で決定し、月スケールでの超高時間分解能の古環境復元を可能としたものである。雪氷コアは涵養された雪に加え、大気中を循環している物質を直接保存しているという点ですぐれた古環境プロキシである。特に高涵養、高所のサイトで掘削された山岳雪氷コアには月～季節スケールといった高時間分解能解析の実現可能性があり、また低地の観測では得られない自由対流圏の情報が保存されている。山岳雪氷コアから超高時間分解能での古環境復元が実現すれば、コアの情報と大気観測情報を季節性を考慮して組み合わせた解釈が可能となり、気候システムや物質循環の研究に新たな観測に基づく知見を提供出来る。しかしながら、雪氷コア中の主たる古環境プロキシである降雪及び湿性沈着によって堆積した物質は、堆積イベント時の情報のみを反映し、堆積がない期間の情報は保存しない、という欠点がある。さらには積雪の削剥や融解により古環境情報が変質を受ける場合がある。従来の研究では積雪の堆積、削剥、融解といった情報を雪氷コアから抽出することが困難であり、このことがコアの解釈に不確実性を与えるとともに、月～季節スケールといった高時間分解能での年代決定の障害となってきた。また、山岳雪氷コアについては、それぞれが山岳地特有の気象条件下にあるため、近隣のコア同士であっても堆積環境の比較検証が困難であり、また同じ標高には比較検証し得る他の古環境プロキシが存在しないため、堆積環境が山岳コアのプロキシデータに与える影響については深く議論されてこなかった。本研究では堆積時の情報を直接反映すると考えられる密度プロファイルに注目し、山岳雪氷コアから新たに堆積環境の情報を取り出すと共に、月～季節スケールでの高時間分解能解析への応用と山岳雪氷コアサイトの堆積環境を評価することを目的とした。

本論文は以下の6章で構成されている。

第一章では山岳雪氷コアの古環境プロキシとしての優位性と欠点に触れ、過去の雪氷コアの密度プロファイルに関する研究を概観した後、本研究の目的を説明した。

第二章では本研究で扱った北米北太平洋地域に位置する二箇所の雪氷コア掘削サイト、ランゲル山山頂カルデラ(62°N, 144°W; 4100 m as.l.)とローガン山キングコル(61°N, 141°W; 4135 m as.l.)

を紹介した。また、両サイトで行なった雪氷コア掘削や積雪深観測の方法、雪氷コアに対する深さ分解能1mm、精度1%での精密な密度の測定法とそれぞれの結果について説明した。

第三章では雪氷コアの鉛直密度プロファイル過去の堆積イベントのプロキシデータとして解釈した。具体的には、ランゲル山山頂カルデラでの通年の積雪深観測結果、対応する期間のコアの目視観察による層位と密度プロファイルを比較検討し、1年間に相当するコアの各層の堆積日を推定した。その結果から、密度のステップ的な変化が堆積中断及び削剥に伴うウインドスラブの層に対応することを示した。また、複数年にわたって掘削した雪氷コアの密度プロファイルの比較から、このような密度の相対的ステップ変化は数年間にわたって上載積雪による圧密を経ても保存されることを示した。

第四章ではランゲル山の積雪深観測結果と低地の測候所の気象データとの高い相関関係を利用して、第三章で得られた結果をもとに、ランゲル山の1992年から2003年に相当する50m長のコアについて月スケールで年代を決定した。その結果、コアの深さ方向に対して平均18点/年という多点で年代を決定することに成功した。各点の年代誤差は ± 0.5 ヶ月である。この年代決定を利用して、各年について月毎の涵養量分布を算出した。また、季節的な変動を示す安定同位体比およびトリチウムについて月毎の変動を算出した。その結果、涵養量分布及び安定同位体比についてはある程度決まった季節性があるものの、そのピークの時期については数ヶ月の幅で経年変動があることを示した。またトリチウムについてはピーク時期の経年変動が小さく、毎年3月から6月の間に極大となることを示した。

第五章では堆積環境が大きく異なると考えられる複数の山岳雪氷コアサイトについて、涵養量の時間、空間的な変動と密度データを比較検討し、山岳地という特殊な環境が堆積環境に与える影響について評価した。評価サイトとして、ランゲル山山頂カルデラの他に、山の鞍部に位置するローガン山キングコル及び強風で知られるマッキンリー山(63°N, 151°W)を選択した。結果として山の鞍部では削剥の影響が大きく、ローガン山キングコルでは涵養量の経年変動幅がランゲル山や近隣の測候所の観測値の数倍に及ぶこと、削剥イベントの有無については密度プロファイルから判別したウインドスラブ層により評価出来ることを示した。マッキンリー山においては降雪イベント後にはほとんど新雪が残らない氷河の平坦地が存在する一方で、数kmの範囲には地形要因により極端に新雪が堆積するサイトが存在することを示した。

第六章では本研究で得られた成果をまとめ、結論を述べた。本研究から導かれた主な結論は以下の通りである。

1. ランゲル山山頂カルデラにおいて通年にわたる涵養量測定に成功した。標高4000mのランゲル山の涵養イベントと海水面高度に近い低地の測候所の降水イベントの間に相関関係があり、ランゲル山コアは古環境プロキシとして地域的な代表性を持つ。
2. ランゲル山、及びローガン山キングコル雪氷コアについて、mmスケールの密度プロファイルにおけるステップ的な変化は堆積中断イベントに相当する。また、極端な矩形のプロファイルは削剥に伴う激しいイベントの結果形成されたウインドスラブ層に相当する蓋然性が高い。
3. ランゲル山コアについて、密度プロファイルおよび測候所の気象データを用いて1991年から2006年までを月スケールで年代決定した。ランゲル山の涵養量、安定同位体比、トリチウムのプロファイルは概ね季節的な周期性を持って変動するがそのピーク時期は3~6ヶ月の幅で変動する。

4. 山岳雪氷コアサイトのうち、特に山の鞍部では削剥の影響を大きく受ける。涵養量の時系列データの解釈にあたってはサイト毎に異なる堆積環境の特性を考慮する必要がある。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 白 岩 孝 行

副 査 教 授 本 堂 武 夫

副 査 教 授 Ralf Greve

副 査 助 教 的 場 澄 人

副 査 准教授 東 久美子 (国立極地研究所)

学 位 論 文 題 名

Interpretation of detailed density profiles of alpine ice cores as past environment proxy signal

(山岳雪氷コアの精密密度プロファイルによる古環境復元)

雪氷コアは過去の気候や大気情報を記録する貴重な気候代替媒体であるが、その年代決定に難があり、これまでのところ、最も高時間分解能の事例においても1年から春夏秋冬程度の季節という解像度が限度であった。一方、地球温暖化を始めとする気候や大気への人為的な影響を議論するには、年々はもとより月単位のイベント的な現象（たとえば、春の黄砂飛来など）が重要になり、これを過去に遡って復元できる気候代替記録が待望されている。

本研究は、上記の目的を達成すべく、北米アラスカ州のランゲル山山頂に発達するカルデラを埋没する氷河に着目し、合計5本の雪氷コアの高精度X線密度計測から、密度に残る積雪表面で生じた堆積中断イベントの情報を抽出することを試みた。一方、ランゲル山山頂氷河において、1年間にわたり積雪深変化の無人観測を実施し、1年後に近傍で掘削した雪氷コアとの比較から、積雪深変化に伴う積雪の密度構造の発達を明らかにした。

その結果、密度プロファイルに残る顕著な密度の遷移的変動や、矩形波状の高密度ピークは、降雪の堆積中断および積雪の削剥によって形成されることを突き止めた。これらの堆積中断による密度プロファイルの特徴に加え、融解によるスパイク状の高密度ピーク、および目視による雪氷コアの層相観察に基づいて、雪氷コア中の密度プロファイルに残る種々の特徴と、コア取得地点および低地に存在する気象官署の気象記録に明瞭に記録されている気象イベントを対比し、過去15年間にわたって、合計263個の年代軸を雪氷コアに挿入することができた。その結果、雪氷コアに月精度の時間軸を入れることに成功した。

以上の高精度年代決定の結果、中緯度地域の雪氷コア研究にとって長年の課

題であった以下の4つの問題が解決された；

1. 水素同位体比の変動は、中緯度地域の山岳氷河においては必ずしも季節的な温度変動を反映しない：1回1回の降雪イベントの影響を大きく受け、降雪の多い夏期～秋期にかけては気温変動を反映しやすいが、降雪の少ないその他の時期には降雪の有無によって大きく値が左右される。
2. 1年の降雪量配分は、夏期に多い傾向があるが、年々変動が大きい。
3. 成層圏起源の物質と考えられるトリチウムは、春季に最大の濃度ピークが存在する。
4. 低地と自由対流圏近傍のランゲル山山頂では、ほぼ同じ降水機構で降水がもたらされ、気温にも高い正の相関がある。このため、ランゲル山の雪氷コアからもたらされる過去の記録は、低地の気候と密接な関係をもつ。

その他、山岳地域における地形の違いが堆積環境に与える影響を明らかにするため、鞍部状の地形で掘削されたローガン山キングコルの密度プロファイルと、平坦なランゲル山の密度プロファイルを比較し、鞍部状の地形では、かなりの頻度で積雪の削剥が生じていることを明らかにした。これは、山岳地域における掘削地点の選定の重要性に一石を投じることになる。また、高精度な密度測定によって、既に掘削された雪氷コアが受けてきた削剥履歴を評価することも可能になった。

以上の研究は、主査の推進するプロジェクトの一環として行われたものであるが、申請者は、本学位論文で対象とした野外観測と室内解析をほぼ独力で企画し実行した。特に、7mを超える多量の降雪量を有するランゲル山山頂において、申請者が独自に考案した温度センサーを利用して積雪深を測定する観測方法は極めてユニークな方法として賞賛されよう。学位論文を作成する過程において、約8ヶ月にわたりアラスカ大学フェアバンクス校に滞在し、現地の研究者と積極的に交流し、過去のデータを精力的に収集した行動力も評価できる。学位論文の主要内容のひとつであるランゲル山山頂の積雪深の連続観測結果は、雪氷学の主要な国際誌のひとつであるJournal of Glaciologyに受理済みである。

審査委員一同は、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、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。