

氏 名 高 田 守 昌

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第430号

学位授与の日付 平成11年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 極域科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 レーザートモグラフィによる極域雪氷コアの微細堆積構造の解析

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 神山 孝吉  
教 授 藤井 理行  
教 授 渡邊 興亞  
教 授 山内 恭  
教 授 庄子 仁（北見工業大学）  
助 教 授 東 信彦（長岡技術科学大学）

## 論文内容の要旨

極域の水河・氷床内陸部では、降り積もった雪は気象条件を反映した変質を受け、堆積構造をもつことになる。表面の堆積層は、後からの降雪の荷重により圧密氷化するが、氷化後もこの堆積構造は水中に含まれる気泡の不均一性として保存されている。従って、氷化後の雪氷コアの気泡形状・数・分布を測定することにより、微細堆積構造が明らかになり、過去の気候推定の手がかりが得られることになる。しかし、気泡情報を高精度で迅速に測定する方法は確立されておらず、微細堆積構造の解析は不可能であった。そこで本研究は、簡便に微細堆積構造解析が可能な装置の開発を行い、さらにこの装置を用いてグリーンランドNGRI P地点で採取された雪氷コアの微細堆積構造を明らかにし、その雪氷学的特性を考察した。

堆積構造測定のため、光を氷に照射し氷と空気の屈折率の違いにより生じる光の散乱から気泡を検出するレーザートモグラフ装置を作成した。本装置は、レーザ光を試料側面から入射し散乱光を試料上面からビデオカメラで撮影する方式とした。装置は、レーザ光源とビデオカメラを同時に等速度で移動させながら撮影し、デジタルビデオで気泡からの散乱光を記録するものである。デジタルビデオで記録された情報を動画としてパソコン上に取り込み、この動画を構成している全画像から画像処理により堆積構造を解析した。

まず、この装置を用い水中の微細な気泡情報を抽出するため、測定条件および画像処理方法について検討した。長さ90 mm (x方向)、幅45 mm (y方向)、厚さ25 mm (z方向)に切り出した氷試料を用い、レーザートモグラフによる測定を行なうとともに、片薄片観察でこの水中に存在する気泡の三次元の分布を測定した。この両者の気泡分布を比較し、その一致率からレーザートモグラフによる画像処理方法の検討を進めた。テストに用いた氷試料の密度は $870 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ であり $10^0 \text{ mm}$ オーダーの気泡を多数含んでいた。レーザートモグラフにより測定する直前に、氷試料の測定面およびレーザ入射面は平らに整形した。ビデオカメラの撮影範囲は、x方向が約35 mm、y方向が約25 mmであり、画像の解像度は約 $0.05 \text{ mm/dot}$ であった。また、レーザ光源とビデオカメラの移動速度は約 $5 \text{ mm/s}$ とした。実際の観察および撮影で得られた画像で、レーザ光軸上に気泡が存在する画素は周囲に比べ高輝度であった。そこで、気泡率の指標としてレーザ光軸上の輝度の積算値を用いた。しかし、レーザ入射の近傍と遠方とは大きさや形状の同じ気泡が存在した場合でも輝度値が異なること、およびレーザ入射点から遠方の気泡が検出されにくいことがあるため、レーザートモグラフによる気泡率指標と片薄片観察による気泡率の相関は悪かった。そこでこれらの問題を解決するため、二点についての画像処理方法の改良を行った。まず、レーザ入射の近傍と遠方に存在する気泡を同等に評価するために、全ての画像を二値化することにした。そして、レーザ入射点から遠方の気泡が検出されていないことを改良するために、レーザ光軸から離れた地点においても気泡による散乱が起ることを利用し、レーザ光軸を中心としたある幅の画像を用い加え合わせる方法とした。この改良した画像処理方法により水中の気泡を検出するため、レーザートモグラフの撮影条件、画像処理上の変数の最適値およびレーザ照射により気泡が検出可能な範囲について検討した。検討した項目は、レーザ入射深さ、二値化の閾値分布、レーザ光軸近傍のx方向の加え合わせ幅、レーザ光の到達するy

方向の有効幅、z 方向の観察範囲、二次二値化閾値である。二次二値化閾値とは、ある位置の画素は数枚の二値化画像の加え合わせから構成されるが、そのうちの何枚の二値化画像で同一個所から散乱が起きているかで、その画素が気泡であるか否かを判断する閾値のことである。検討の結果、下記の結果が得られた。レーザーの入射深さは、多重散乱による影響を少なくするために浅いほうが良く、測定面から深さ方向に1 mmの位置とした。閾値分布は、各画素の閾値を全画像の平均値を基本とし、ノイズレベルを除去できる閾値分布が適当であった。また、x 方向の加え合わせ幅は100 dot (約5 mm) が最適であった。y 方向は入射直後の40 dot (約2 mm) を除きそこから200 dot (約1 cm) までの範囲がz = 0 ~ 1 mmに含まれる気泡を90%以上の精度で検出できるため評価に有効な範囲であった。そしてz = 0.25 ~ 0.75 mmの範囲で一致率が高く、この範囲で散乱が起りやすく気泡の検出精度が高いことが分かった。さらに、x 方向の加え合わせ幅を100 dot (約5 mm) とすると各個所は27枚の画像に写し込まれるが、このうち13枚の画像で散乱が起った場合を気泡と判断した、すなわち二次二値化値閾値を13としたとき、片薄片観察とレーザートモグラフィによる気泡率の相関係数が最大となった。これらの結果、レーザートモグラフィを用いて水中に含まれる気泡の分布を相関係数0.8で評価することが可能となった。

この装置を用いてグリーンランド氷床のNGRIPキャンプ地点で掘削された浅層コアの堆積構造解析を行なった。まず、レーザートモグラフィにより測定された気泡率から換算した平均密度と重量法で求めたバルク密度を比較すると、密度が $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ を超え氷化した範囲では良好な関係であった。しかし、氷化前の深度範囲では、レーザートモグラフィによる測定結果はバルク密度よりも軽い傾向を示していたが、この原因は散乱が気泡ではなく雪粒子表面で起っているためと考えられる。次に目視観測によるコアの組織とレーザートモグラフィのから得られた気泡率プロファイルと比較した。目視観測で確認したしもざらめ層の氷化した層では、レーザートモグラフィの測定では、顕著に気泡率が高くなり、気泡形状は鉛直方向に細長いことを確認した。また、しまり雪層の氷化した層では、気泡率には明瞭な差はなかったが、気泡数の増加が顕著であった。さらに、厚さ0.5 m程度の氷板が存在した場合、気泡率は0となるためにこの存在を確認することが可能であった。また、氷板の検出は、二次二値化閾値を低くするとより明瞭に検出可能であった。そして、目視観察およびレーザートモグラフィの結果を比べると、レーザートモグラフィによる気泡率のプロファイルは目視観察では検出できない微細な堆積構造を表していた。次に、5.4 m ~ 9.8 mの深さ範囲においてレーザートモグラフィで得た気泡率の周期性の解析を行ったところ、水当量で171 mmのところにも最大のピークが表れた。これはNGRIP地点の年間涵養水当量に相当し、日射がある夏季のしもざらめ層の形成による気泡率の上昇と、日射がない冬季の堆積後の変態を受けない気泡率の低い層が季節周期的に存在していることを示唆し、レーザートモグラフィによる解析で堆積構造の季節変化を検出することができることを示している。

本研究では、開発したレーザートモグラフィにより気泡を含んだ雪氷コアの定量的な微細堆積の解析を可能にした。

## 論文の審査結果の要旨

極域の氷河・氷床は、その堆積構造に気象条件を反映している。雪氷コアは、堆積構造を明らかにする有効な材料であり、近年様々な手法で雪氷コアから堆積構造の抽出する研究が行われている。とりわけ目視観測は従来より行われている有効な観測手法であるが、観測に多大の時間を要し、また観測者の条件に左右され測定値の標準化が難しかった。出願者は、簡便に微細堆積構造を取得できる装置を開発し、画像解析による堆積構造の解析手法の検討を行なった。さらにこの装置を用いてグリーンランドNGRIP地点で採取された雪氷コアの微細堆積構造構造を明らかにし、その雪氷学的特性を考察した。

論文は、第一章の測定法の開発と第二章の堆積構造の解析から構成されている。

第一章では、雪氷コア中の氷と空気の屈折率の違いにより生じる散乱を利用し気泡を検出するレーザートモグラフ装置と取得した画像情報の解析手法の基礎的検討が行われている。氷試料に対してレーザ光源とビデオカメラを同時に等速度で移動させ、デジタルビデオで全長に渡る画像を取得する。デジタルビデオ上の画像を動画としてパソコン上に取り込み、動画から得られる全画像の画像処理により微細堆積構造解析を行った。レーザートモグラフによる測定結果と片薄片観察によって得られた三次元気泡分布との比較を行って測定条件および画像処理方法について検討した。ここで画像情報から気泡を判定する最適条件を明らかにした。

第二章では、上記で検討した手法を用いて、グリーンランド氷床のNGRIPキャンプ地点で掘削された浅層コアの堆積構造の解析結果について検討を加えている。本手法によって測定した平均密度とバルク密度は、密度が $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上の氷化した範囲で良好な関係をしめし、さらに両者の比較によって氷化程度によって気泡で散乱を生じる場合と雪粒子表面で生じる場合があることを明らかにした。積雪中の水蒸気移動によって生じるざらめ層では、レーザートモグラフの測定で顕著に気泡率が高くなるとともに気泡形状は鉛直方向に細長いこと、さらにしまり雪層では、気泡率には明瞭な差はないが、気泡数の増加が顕著にみられることを示した。気泡率が0となる部分から厚さ0.5mm程度の氷板を確認した。そして、コアの深度方向の気泡率はNGRIP地点の年間涵養水当量である171mmの周期性を有することを明らかにした。その結果レーザートモグラフによる解析から夏季のしもざらめ層の形成による気泡率の上昇と冬季の堆積後の変態を受けない気泡率の低い層が周期的に存在していることを示唆した。

以上、レーザートモグラフによって気泡を含んだ雪氷コアについて定量的な微細堆積構造の解析が可能となり、今後雪氷コア解析を実施するうえで貴重な基礎研究であり将来の発展性が期待されるものと審査委員会は高く評価した。新たな解析方法を提案し、実際のフィールド試料に適用し解析した点は評価でき、審査委員会は全員一致で学位論文に相応しいものと判定した。