

氏 名 本吉弘岐

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1152 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 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 衛星リモートセンシングによる東南極氷床域の積雪粒径の  
分布に関する研究

論文審査委員	主 査 教授	山内 恭
	教授	和田 誠
	教授	本山 秀明
	室長	青木 輝夫(気象研究所)
	准教授	亀田 貴雄(北見工業大学)

## 論文内容の要旨

積雪域は高緯度や標高の高い地域などを中心として寒冷な地域に分布しているが、この寒冷な気候の形成、維持に対して積雪自体の物理的性質が果たす役割は大きい。例えば、積雪の高いアルベドにより、積雪の有無が地表面で吸収される太陽放射エネルギーを大きく左右する。このため、季節積雪域と通年で消雪のない氷床などでは、地表面のアルベドの違いから、雪氷圏の気候変動に対する影響が異なる。近年の衛星センサーによるリモートセンシング技術の高度化に伴い、積雪面積だけでなく積雪物理量の推定が可能になってきた。これは、積雪粒径や積雪不純物濃度、雪面状態など積雪物理量が、雪面の反射率に影響を及ぼすという雪面の光学的性質を利用したものである。これにより積雪状態の変化や地域的な降雪や積雪の特徴を調べることが可能になる。気候変動の兆候の検知という点からも、衛星センサーを用いた広域の積雪状態の監視は今後重要になると考えられる。

積雪物理量の中で、積雪不純物濃度と積雪粒径が主に可視域・近赤外域における雪面の反射率に影響を与えるということが知られているが、南極氷床域の内陸部では積雪不純物濃度が非常に低いために、主に積雪粒径が雪面の反射率を決めていると考えられる。このことから、本研究では、南極氷床域の雪面付近の積雪粒径に着目した。積雪粒径は降雪や降雪後の積雪の変質過程と共に変動するため、積雪粒径の空間分布やその季節変化は、この地域の降雪や積雪の気候学的な特徴と密接な関係がある。そのために、本研究では、地球観測衛星 Terra に搭載された MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) のデータを用いたリモートセンシングにより、東南極氷床域における積雪表面付近の積雪粒子の粒径を推定し、その空間分布と春から秋にかけての季節変化を調べた。

MODIS の中心波長  $1.64 \mu\text{m}$  チャンネルを用いて、雪面付近における積雪粒径を抽出するアルゴリズムを用いた。大気上端反射率の計算において、平坦な雪面をもった球形粒子からなる十分に深い積雪を仮定し、大気モデルに南極氷床域の高度の影響を取り入れたモデルを用いた。

2003 年 10 月から 2004 年 3 月にかけての東南極氷床域を含む MODIS のシーンデータに対し積雪粒径推定アルゴリズムを適用し、積雪粒子の空間分布とその季節変化を求めた。2003 年 10 月の空間分布からは、内陸高原域では積雪粒径が  $15\text{-}20 \mu\text{m}$  と非常に小さく、沿岸域に近づくにつれて積雪粒径が  $30\text{-}100 \mu\text{m}$  程度まで増加し、標高が下がるとともに粒径が増加する傾向が見られた。季節変化でみると、春から夏にかけて積雪粒径は氷床域の大部分で増加傾向を示し、夏から秋にかけては春と同程度まで減少する傾向を示した。内陸部の乾雪域で夏に雪面付近の積雪粒径が大きくなり、また標高が下がるとともに粒径が大きくなる傾向から、積雪粒径の広域的な分布が、温度に影響を受けている可能性が示唆された。

昭和基地・みずほ基地・ドームふじ・南極点を結ぶルート上での積雪粒径を調べることで、光沢雪面やサスツルギ、デューンといった積雪の表面形態と、衛星センサーによる積雪粒径とに関係があることがわかった。1992 年 11 月に観察されたルート上での表面形態との対応から、光沢雪面帯では積雪粒径がより大きく、サスツルギ帯では積雪粒径がより小さいという傾向が見られた。これらの積雪粒径のルート上での変動幅などの季節変化から、

表面形態自体にも季節変化があることが示唆された。

ドームふじ基地では、2003年10月から2004年1月に、積雪粒径の地上検証のために、積雪の結晶写真が撮影された。ドームふじの近傍のMODISデータから積雪粒径の時系列を求め、積雪最上層の結晶写真から得られた積雪粒径と比較した。ともに春から夏にかけて積雪粒径が増加しており、両者の傾向は一致したが、衛星による積雪粒径は写真による粒径に対し過小評価であった。

最後に、2003年10月から2004年3月にかけて、MODISにより取得された南極点近傍ピクセルにおける大気上端反射率の日変化と季節変化を調べた。南極点近傍のMODISデータは観測時の太陽と衛星の相対的な幾何学的条件が1日でほとんど変化がないという特徴があるにもかかわらず、得られた大気上端反射率の時系列データでは半日周期の変動がみられた。この変動は、南極点付近の斜面下降風の影響下で発達する、卓越風向に沿った縞模様の粗度をもつサスツルギの影響と考えることで説明がつく。本研究で用いた積雪粒径抽出アルゴリズムは、平坦な雪面を仮定しているため、サスツルギのような粗度のある雪面に適用すると誤差を生じる。このような表面粗度による誤差を評価するため、半日周期を示すデータのみを抽出し、積雪粒径の1日の変動係数を求めた。変動係数は10月上旬がもっとも大きく30%、1月が最も小さく7%程度であった。2月以降は雲の影響により半日周期を示すデータが少なかった。

本研究では、衛星リモートセンシングにより積雪粒径の推定を行うことで、広範囲にわたる積雪粒径を推定することだけでなく、積雪表面に関与する環境（温度、降水など）や、積雪表面の形態などとの関係について調べた。南極域における積雪粒径の季節変化についての研究はまだ少なく、東南極氷床域の積雪表面状態の季節変化と気候的な特徴との関係についての知見を得られたことは重要である。積雪粒径抽出アルゴリズムの精度においては、地上観測による積雪粒径の評価方法や雪面反射率モデル、表面形態による誤差などの問題点があったが、アルゴリズムを改良し得られる物理量の精度を高めていくことは、リモートセンシングによる積雪域のモニタリングに対して非常に重要な課題である。

## 論文の審査結果の要旨

極域雪氷圏は、その表面を覆う雪・氷の反射率—アルベード—が高いことで、地球規模気候形成に主要な役割を果たしている。南極氷床の表面アルベードは、太陽放射に対し80%を超える高い値で、入射放射量の大部分を反射してしまい、地球の冷源域を構成している。ところが、この表面アルベードは、雪氷表面状態、特に積雪中の不純物濃度や積雪粒子の大きさにより大きく左右される。大気が清浄で、積雪中不純物のほとんど存在しない遠隔地である南極氷床上では、積雪粒径がアルベード変動要因のほとんど全てである。積雪分布変動のない1年中氷床に覆われる南極では、重要な気候要素となっている。したがって、これら積雪粒径の変動を把握することは、気候変動の兆候を検知する上にも必須のこととなる。しかし、広大な南極氷床上での地上観測点はまばらで、積雪表面状態、特に積雪粒径についての観測は限られる。

本論文は、人工衛星リモートセンシングの手法により東南極氷床上の積雪粒径を広域にわたって導出し、その地域分布、標高依存、季節変化を明らかにしようというものである。地球観測衛星“Terra”に搭載されたMODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer; 中解像度画像分光放射計) のデータのうち、近赤外1.6  $\mu\text{m}$  域の反射率を用い、積雪—大気系の放射伝達モデル計算に基づく積雪粒径推定アルゴリズムにより、積雪粒子の粒径を導いている。全体で6章からなり、第1章では積雪の物理的状态とそのリモートセンシングによる観測の概要、これまでの研究についてのレビューを述べ、第2章では理論的背景を、第3章では用いた衛星データおよびアルゴリズムの概要を述べた。第4章で実際の解析結果および考察、第5章で太陽高度の日変化のない南極点データを使った表面粗度の影響評価を行い、第6章はまとめである。

具体的には、東南極氷床域を解析対象とし、2003年春から夏、2004年秋にかけて、太陽の出ない冬をのぞいた期間についてのMODISシーンデータに対し、波長1.6  $\mu\text{m}$  (バンド6) を用いた積雪粒径推定アルゴリズムを適用し、積雪のごく表面付近における積雪粒径の推定を行った。このアルゴリズムは、球形の氷粒子からなる無限厚の積雪層とその上の大気層からなる積雪—大気系についての多重散乱を含む放射伝達モデル (Aoki et al., 1999; 2000) により大気上端での双方向反射率分布関数 (BRDF) を計算し、ルックアップテーブルから衛星データに対応する粒径を決めるという方法である。

2003年10月の結果から、内陸部の高原域では粒径が15–20  $\mu\text{m}$  と小さく、沿岸域に向かうに従い30–100  $\mu\text{m}$  程度まで増加する傾向がみられ、標高とともに粒径が変化する特徴が得られた。季節変化をみると、春から夏にかけて粒径は氷床域の大部分で増加傾向を示し、逆に夏から秋にかけては減少傾向を示し、秋には春と同程度の粒径になった。高度が低い地域で粒径が大きくなる傾向とともに、夏期に粒径が大きくなることから、積雪粒径の広域的な分布が温度に影響をうけていることが示唆された。地上観測の行われているドームふじ基地近傍のピクセルから積雪粒径の時系列を求め、同時期に地上検証のために撮影された積雪最上層における積雪結晶写真から得られた積雪粒径と比較したところ、春から夏にかけての粒径増加傾向は一致したが、衛星による粒径は地上での積雪写真による粒径に対し過小評価であった。昭和基地—みずほ基地—ドームふじ基地—南極点を結ぶルート上での推定結果を詳しく調べ、積雪粒径と雪氷学的に調べられている積雪表面形態

とが密接に関連していることが明らかになった。衛星により求められた積雪粒径は細かい変動を示しているが、この変動の一部は1992年11月にルート上で観察・記述された光沢雪面やサスツルギ、デューンといった積雪の表面形態と良い対応を示した。さらに、南極点では、太陽高度の日変化が無視できることから、大気上端反射率の方位角依存、時系列データが得られ、半日周期の変動がみられた。これは、斜面下降風（カタバ風）領域に属する南極点で卓越風向に沿って発達するサスツルギの影響であり、一日の間の反射率の変動は本解析で用いた積雪粒径推定の粗度による誤差要因となることが示された。

以上、本論文により、南極氷床上で広域にわたり積雪粒径の分布と季節変化が詳細に記述され、また雪氷学的な知見との有意な対応付けが示されたことは新しい成果である。氷床上での積雪物理特性の変化という形で気候の変動に関連するものであることから、広域的な長期観測により南極域の気候的特徴や気候変動の兆候を捉え得るということで、インパクトの大きい結果である。これらの点から、学位論文として高く評価された。ただし、論文記述については、一部について未だ書き込みが不十分で、気候学的な考察などについて、さらに充実させることが望まれた。最終提出までに加筆を行い、これら要望に対応されることを期待することとした。

以上、極域科学専攻の博士論文として十分価値を有するものと認められた。