

氏 名 門 崎 学

学位（専攻分野） 博士（理学）

学 位 記 番 号 総研大甲第 804 号

学位授与の日付 平成 1 6 年 9 月 3 0 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 南極域における NOAA 衛星 AVHRR データによる雲の検出  
と分布特性に関する研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 山内 恭  
教授 神山 孝吉  
助教授 塩原 匡貴（国立極地研究所）  
教授 榎本 浩之（北見工業大学）  
主任研究 青木 輝夫（気象研究所）  
官

## 論文内容の要旨

氷床および海水に覆われている南極域は赤道域に対して地球の冷熱源となっており、また地球の気候システムを考える上で重要な役割を担っている。一方、雲はエネルギーバランスに多大な影響を与えている。また南極域の雲と雪氷圏との相互作用については、未だ十分な議論はなされておらず、雲の存在と雪氷圏の状態の関連を探るための研究は地球規模の気候を考える上で欠かすことは出来ない。

衛星画像から雲を検出する研究は数多く行われている。通常、中低緯度の雲の検出には衛星赤外データが利用できる。雲と地表面の温度が異なり、それらから放射される輝度温度が異なることを利用した手法である。しかし、極域、特に冬季の南極域は雪氷面の温度が低下し、雲との温度差が殆ど無くなるために雲と雪氷面の輝度温度に差が生じにくくなる。このため南極域の通年の雲を識別するためには他の方法が必要である。この様な条件下の極域の雲の検出に有効な方法の一つとして、極軌道衛星 NOAA の改良型超高解像度放射計 (AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer) の  $3.7\ \mu\text{m}$  帯の近赤外域 (以下 T3)、 $10.8\ \mu\text{m}$  帯の熱赤外域 (以下 T4)、および  $12\ \mu\text{m}$  帯の熱赤外域 (以下 T5) の輝度温度データから、2つの異なる波長から求めた輝度温度の差 (T3-T4, T4-T5) を算出し、T4 の輝度温度に対する分布を求める方法である。その分布は、雲粒のサイズ、雲の温度・光学的厚さによって変化する。しかし、この方法でも南極内陸域の温度が非常に低いため、異なる波長帯の輝度温度差そのものの値が非常に小さくなり、雲の検出は容易ではなかった。このため、これまでの南極域の雲の検出については、限られた期間、領域における研究がなされたのみであり、年間を通じた広域の定量的な雲の検出は行われていない。

本研究では、AVHRR データを用い、これまでの手法の拡張を行い、南極域における通年の雲の検出アルゴリズムの開発を行った。またその結果から 1997 年 3 月から 1998 年 1 月までのほぼ通年に亘る雲の分布特性についての考察を行った。

新たな手法を開発したことによって、雲の無い時の雪氷面上、開水面上の輝度温度差の特徴を見つけることが出来た。すなわち、雪氷面上では輝度温度 (T4) が増加するに伴って輝度温度差 (T4-T5) もわずかに増加することが分かった。この変化傾向は雪氷面の輝度温度 (T4) が約  $-40^\circ\text{C}$  以下ではほぼ一定の増加率で輝度温度差が増加する。一方約  $-30^\circ\text{C}$  以上では輝度温度差は約  $1^\circ\text{C}$  と一定である。この輝度温度差の傾向は  $-40^\circ\text{C}$  から  $-30^\circ\text{C}$  を境として大きく変化しており、要因は天候や場所の特徴によるものではなく、温度上昇による雪氷面の変化が放射特性に影響し起きたものと推測される。次に雪氷面上の近赤外と赤外の輝度温度差 (T3-T4) と輝度温度 (T4) の関係を日射の有る時と無い時で調べ、以下の結果を得た。日射が無い時は輝度温度 (T4) の増加に伴って輝度温度差 (T3-T4) が減少すること、日射のある時は、輝度温度 (T4) の増加に伴って輝度温度差 (T3-T4) は、日射の反射成分によって増加することが分かった。この増加分については、可視データ (ALB1) の変化から、見積もることが可能であった。さらに開水面上の輝度温度 (T4) と輝度温度差 (T4-T5) および輝度温度差 (T3-T4) の関係を調べた結果、開水面上では一年を通してどちらの輝度温度差についても変化が少ないことが分かった。また輝度温度 (T4) は最低で約  $-5^\circ\text{C}$  であり、輝度温度差のばらつきが少ないことを考慮すると開水面上の雲の検出は可能である。

またこれらの解析の中から、太陽が地平線に近い位置に存在する期間は、近赤外データに太陽光の影響、いわゆるソーラーコンタミネーションが生じていることが分かった。一つは、太陽光が放射をカウントする温度計に直接影響を与えるために生じる。一つは、

太陽光がセンサーに直接影響を与えるために生じると考えられる。前者によるエラーは、温度計と放射量の補正のためのキャリブレーション係数の急激な変化を検出することによって補正可能であるが、後者の要因によるエラーの補正は現在のところ手段が無い。

これまで述べてきたことを考慮し、雪氷面上・開水面上の雲検出のアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを用い、衛星データから昭和基地およびドームふじ観測拠点の雲の検出を行い、通常の地上観測によって得られた雲量と比較した。その結果、標高の低い昭和基地では雲の検出精度は良いが、標高の高いドームふじ観測拠点では雲の検出精度が落ちることが分かった。ドームふじ観測拠点では雲の観測が難しいことを考慮し、ライダー観測から得られた結果との比較を行った。ライダー観測で確実に雲と判定される雲については、衛星データでも検出が行えることが示された。この結果アルゴリズムの妥当性が示された。

これらによって得られた南極域の雲の分布特性を調査した結果、一年を通じて南極内陸の雲量は海洋・沿岸域と比較して非常に少ないことが明らかになった。また、海洋域では雲頂が均一で厚みのある雲が少ない傾向が見られた。海氷の張り出しが進む期間は海氷域の雲は少なく、このとき海氷域と開水域の境界付近で厚みのある層状の雲が多い。開水域で大気に供給された水蒸気が海氷域付近で冷却、凝結し、雲が生成されることで他の領域と比較して雲量が多くなると考えられる。このような海氷域と開水域の境界付近に見られる層状の雲は北極域においては北極層雲として知られている。このいわゆる北極層雲は北極域のみで発生するのではなく、両極に共通した現象と考えられ、海氷と大気の相互作用の結果としてこの様な「氷縁層雲」と呼ぶべき雲が形成されていることが示唆された。また、雲量の季節変化として海氷の張り出しが進む期間は海氷上で雲が少ないのに対し、海氷の後退する期間では海氷上の雲は開水面上と同様に多い傾向が見られた。このことは、雲が増加することによって海氷の後退が促進されるといった海氷と大気との密接な関係が存在することを示唆しており、大気場の影響、海氷の密接度などが雲量を左右する要因の一つとして重要な要素であることが示唆された。

雲はエネルギー収支や水収支を通じて地球の気候を支配する要因となっており、一方、南極域は氷床や海氷といった雪氷圏の存在から、地球全体の気候を左右する重要な場所になっている。従って、南極域における雲の存在は、この極域の気候に対する働きを左右する重要な要因であり得る。しかし、南極域における雲の分布特性、役割、特に地球放射収支に対する働きなどについてはいまだ不確実である。雲の存在が雪氷圏にどのような影響を与えているか、逆に雪氷圏の存在が雲分布特性に与える影響はどうかといった雲-雪氷圏相互作用についても、未だ明確な答えは存在しない。

本研究の目的は、南極域の雲の分布を導出する手法を開発し、その分布特性を明らかにすることである。広域の雲分布とその時系列を求める手法として、衛星観測データから雲を検知する。これまでも様々な手法が試みられてきているが、本来、太陽光の反射でみても、温度を表す赤外線で見ても、あるいはマイクロ波でも南極域の雲の検知は極めて難しい。地表面が雪や氷に覆われ、アルベドが高く、地表面温度が低く、雲と地表面が見分け難いためである。

ここでは、NOAA 衛星に搭載された高分解能可視・赤外画像データ (AVHRR) を使って雲検知のアルゴリズムを開発し、それを適応し南極昭和基地で受信した1年間のデータから南極域の雲分布特性を導出した。アルゴリズムについては、赤外  $10\mu\text{m}$  域のチャンネル同志の輝度温度差および近赤外  $3.7\mu\text{m}$  域と赤外  $10\mu\text{m}$  域のチャンネルの輝度温度差を利用し、雲と晴天域 (雪氷面、開水面上) を識別するもので、考え方は既に提案されたものに基づいている。年間を通じ、広範囲の条件に適応できるよう改良をはかったもので、晴天域の雪氷面の放射特性をより詳細に精密に把握して雲検知精度を高めている。即ち、晴天域の雪氷面についての輝度温度差の温度依存性をより精密に求めた。さらに、近赤外チャンネルについて、太陽光の流れ込みによるキャリブレーション定数の改変やデータの変質を見出し、前者については補正方法を提案し、さらに太陽光のある際の晴天域の雪氷面の反射の補正方法を提案した。このことから、太陽光のあるなしに関わらず均質な雲検知を可能とした。この方法によって昭和基地、ドームふじ基地等の上空の雲量を計算し地上観測点での雲量の観測結果と比較し、冬季の内陸域の一部を除き、地上観測結果と良い関係が得られることを示し、アルゴリズムの妥当性を検証した。

次に、この手法を適用し、南極域 (氷床上、海氷上、開水面上) の雲の分布特性を通年にわたって初めて実証した。雲量は氷床上で著しく小さく、海氷上では氷床上よりは大きい、開水面上よりは小さく、開水面上では著しく大きいことが導かれた。さらに、同じ海氷上でも、秋から冬の時期に比べ、春先、海氷の張り出しが縮小する時期には、海氷上の雲量は開水面上に匹敵する大きさとなること、海氷縁付近の雲量が大きく、特に低い一様な雲の比率が高いことを示した。このことは、雲-海氷相互作用を示唆するもので、極域の気候システムのなかで氷-アルベド・フィードバックを左右する可能性のある重要な結果である。

以上、大量の衛星データをもとに、これまで不確実であった南極域の雲分布導出手法を確立し、雲の分布特性を明らかにしたことで、大変意義のある成果であると認められる。さらに、雲の分布が海氷の分布と強い関連を有することを明らかにしたことは、大変興味ある結果で評価される。これらをもって、審査員全員一致で理学博士の学位論文として十分な価値があるものと判断した。今回は限られた領域のデータによる結果しか得られていないが、今後更に、解析領域を拡げ、また数年間のデータの解

析を進めることで、より優れた極域の気候研究に繋がっていくことが期待される。

審査委員全員の出席のもとでの公開の論文発表会を以下の通り行った。まず申請者による論文内容の発表を約 40 分間行い、引き続き審査委員および一般傍聴者による質疑応答を約 30 分間行った。更に審査委員のみによる質疑応答を約 50 分間行った。その結果、申請者は研究の目的、意義、データの取扱い、解析の手法の新しい点、得られた結果の評価などについて明確に説明した。また衛星リモートセンシングや極域気象・気候学に関する基礎的な学力を有することが確認された。若干の説明不足があったものの、複雑な解析・検討過程を要領よくまとめ、さらに質疑応答にも簡潔に対応した。また語学については、英文学術誌に論文がすでに掲載されている。これらのことから合格とした。