

論文の内容の要旨

論文題目 **Observational study on spatiotemporal characteristics of hydrometeors and aerosols using multi-platform satellite measurements**
(複数の衛星観測を用いた雲・降水粒子とエアロゾルの時空間特性に関する観測的研究)

氏 名 菊池麻紀

雲・降水・エアロゾルなどの大気粒子は放射過程や水循環への影響を通して地球の気候の形成・変化に深く関与している。大気粒子が気候に及ぼすこのような影響は、粒子の相や形状、さらには粒子間の相互作用によって大きく決定づけられるが、これらに関する全球規模での理解は乏しく、気候変化の予測における大きな不確実要因の一つとなっている。この不確実性を軽減するためには、大気粒子の相や形状といった微物理特性およびその時空間特性を全球規模で観測することが必要であり、衛星観測はそのための唯一の有効な手段を与える。

本研究では、近年急速な発展を遂げている衛星観測にもとづいて、大気粒子の微物理特性とその時空間分布に関する観測的研究を行った。すなわち、能動型測器による鉛直次元での観測と次世代静止気象衛星による時間次元での観測を活用して、雲・降水・エアロゾルの微物理特性が様々な時空間スケールでどのように分布・変動しているかを解析するとともに、その知見をもとに、複数の異なる粒子タイプを識別するアルゴリズムを開発した。具体的には、ライダーを搭載した衛星観測を用いて雲粒子の相と氷晶粒子の形状の鉛直分布を全球規模で解析し（第3章）、それをレーダ観測と組み合わせることで雲・降水粒子タイプを包括的に識別するアルゴリズムを開発した（第4章）。さらに、次世代静止気象衛星による高時間分解能の観測を活用して、雲とエアロゾルの時空間変動特性の違いを利用して両者を分離し、エアロゾル推定において雲を除去するアルゴリズムを開発した（第5章）。

第3章では、ライダーを搭載した CALIPSO 衛星から得られる偏光と後方散乱の観測を用いて、雲粒子タイプの全球解析を行った。この解析では、先行研究によって開発された識別手法に改良を加えることで、未定義だった粒子タイプに適切な氷晶タイプを割り当てるように修正し、解析期間を通年に拡張することで粒子タイプの季節変動の解析が可能となった。また本手法では、広く用いられている NASA の公式プロダクトとは異なり、鉛直に解像された雲の微細な構造に関する情報が得られる。これらの利点を有する本手法を用いた統計解析によって、鉛直に変化する気温や湿度等の環境条件にどのように依存して様々な雲粒子タイプが出現し、それらがどのよ

うな季節変動特性を持っているかが全球規模で示された。特に、水平配向した平板状氷晶が年間を通じて気温 -15°C 付近に集中して出現することが明らかとなり、これは氷晶粒子の気候値的な特徴であることが示唆される。

第4章では、このように識別される雲粒子タイプが形成される微物理条件を調べるために、CALIPSO ライダ観測を CloudSat 衛星によるレーダ観測と複合することで、粒子タイプの気温と粒径に対する依存性を全球的に解析した。この解析によって、雲粒子と氷晶粒子の出現頻度は気温と粒径の両方に系統的に依存することが明らかとなり、従来室内実験で報告されてきた凍結過程に見られた現象と類似の特徴が全球規模でも見られることがわかった。このような全球規模での知見にもとづき、CloudSat と CALIPSO を複合して様々な雲・氷晶・降水粒子タイプを包括的に判別するアルゴリズムを開発した。これは、両衛星による感度が相互補完する性質を利用することで、巻雲から深い対流雲、さらには弱い降水までを包含する様々な雲システムに対して、粒子タイプの詳細な鉛直構造を与えるものである。これにより、従来の衛星研究で得られていた全球の雲出現頻度に対して、雲を構成する粒子タイプの内訳が明らかとなり、従来の衛星では捉えられなかった雲内部の微物理構造に関する情報が得られた。

第5章では、次世代静止気象衛星ひまわり8号による高時間分解能（十分間隔）の観測を用いることで雲・エアロゾルを分離する手法を開発した。従来の受動型測器による雲・エアロゾルの識別はエアロゾル推定における共通課題であったが、エアロゾルと雲の時空間変動特性が顕著に異なることから、高時間分解能の観測を利用することで両者の識別が可能になる。これにより、エアロゾルの遠隔測定において雲の混入を従来に比べて精度良く除去し、エアロゾル物理特性の推定を改善する。実際、この手法にもとづく解析結果を地上観測によって検証したところ、エアロゾル光学的厚さの平均二乗誤差平方根、相関、バイアスのいずれについても定量的な改善が確認された。本手法は、時空間変動特性の違いによって、異なる大気粒子を識別する手法として位置付けられる。

本研究では、衛星地球観測の新しい要素である鉛直次元と時間次元での観測を活用して、大気粒子の微物理特性とその時空間特性を定量的に評価し、それらの知見をもとに新しいアルゴリズムを開発した。これにより、エアロゾル・雲・降水粒子をそれらの微物理特性（粒子の相・形状）や時空間変動特性の違いにもとづいて識別することが可能となり、異なる大気粒子の間の相互作用を調べる上で有用な観測情報が得られると考えられる。今後は、本研究で開発された手法を他の衛星観測に適用するとともに、より多くの航空機観測や地上観測による検証評価を経ることで、大気粒子の四次元的な描像に関するより精度の高い観測情報が得られることが期待される。また、このようにして得られる観測的知見は、数値気候モデルにおける大気粒子の表現方法の検証やそれによる気候予測の不確実性低減にも役立つと考えられる。また、本研究で対象とした鉛直次元と時間次元での観測をさらに複合した解析を行うことで、大気粒子の微物理構造の時空間変化を支配する物理素過程への理解が進展することが期待される。