

論文の内容の要旨

論文題目 Development of a comprehensive analysis system for satellite measurement of the cloud microphysical properties.
(衛星観測による雲微物理特性推定のための解析システムに関する研究)

氏 名 中島 孝

将来の気候予測を不確定にしている原因のひとつといわれるエアロゾル間接効果と密接に関係がある、雲粒の有効半径や雲の光学的厚さ等の微物理特性および光学特性を、衛星搭載の可視赤外イメージャーから推定するための解析アルゴリズムの研究を行い、その解析アルゴリズムを利用した広域の水雲の解析や、これまで行われてこなかった複数チャンネルを用いた水雲の解析、そして非球形粒子による電磁波散乱を考慮した氷晶雲の解析を行った。

衛星リモートセンシングは中程度の時間空間分解能を持つため（例えば1回/日、1~2km）、雲の微特性をグローバルスケールで観測するのに最適な方法といえる。このような研究モチベーションの元、雲粒の有効半径や雲の光学的厚さ等の雲特性を可視赤外センサーから推定する解析アルゴリズムの研究(Nakajima T. Y. and Nakajima 1995 他)、将来型の衛星搭載センサーを用いて高精度に物理量を観測するための搭載波長の最適化手法の研究 (Nakajima T. Y. et al. 1998)、そして暖かい水雲だけでなく、冷たい氷晶雲の雲特性を推定するために必要な非球形粒子による電磁波散乱問題に関する研究 (Nakajima T. Y. et al. 1997 他)を主に行ってきた。可視赤外を用いた雲の解析アルゴリズムでは、歴史的な理由から 0.64, 3.7, 10.8 μm の3チャンネルが使われる事が多いが、本研究では 3.7 μm の代わりに最近の衛星センサーがしばしば搭載する 2.1 μm を使用する解析、そして可視赤外イメージャーとマイクロ波スキャナーとを複合的に解析するアルゴリズムの研究(Masunaga et al. 2001)も行った。

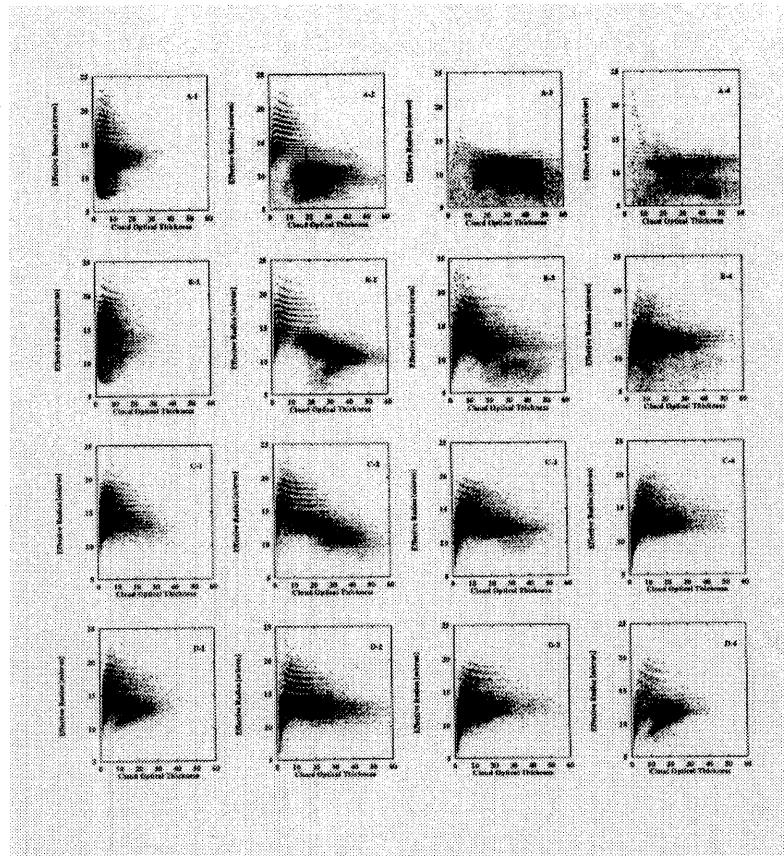


図1 FIRE 観測実験領域の光学的厚さ（横軸）と有効半径(縦軸)の相関。正と負の両相関がある。

(Chapter 2)

可視赤外イメージャーが観測する太陽光の雲反射成分を用いる雲解析アルゴリズムを開発し、そのアルゴリズムを用いて FIRE(First ISCCP Regional Experiment, by NASA)観測実験期間中の NOAA 衛星搭載 AVHRR(0.63, 3.7, 10.8 μ m)データを解析したところ、画像に光学的厚さと有効半径に正もしくは負の相関が現れることを示した(図1に 1000km X 1000km 程度の画像領域を16に分割した相関図を示す)。負の相関を持つ領域は、大気中にエアロゾルが大量に含まれることが予想される領域で、エアロゾルが雲凝結核(CCN)として働いた結果雲粒径が小さくなり降雨が抑制される、いわゆるエアロゾルの間接効果の発現と考えられる。FIRE 観測実験では、観測精度の見積もりのために衛星観測の結果と NASA 及びワシントン大学による航空機観測の結果を比較し、光学的厚さはほぼ一致、有効半径は約1ミクロンの精度で推定できることが判った。このように、衛星観測では衛星データから得られた結果の検証も重要な研究事項である。

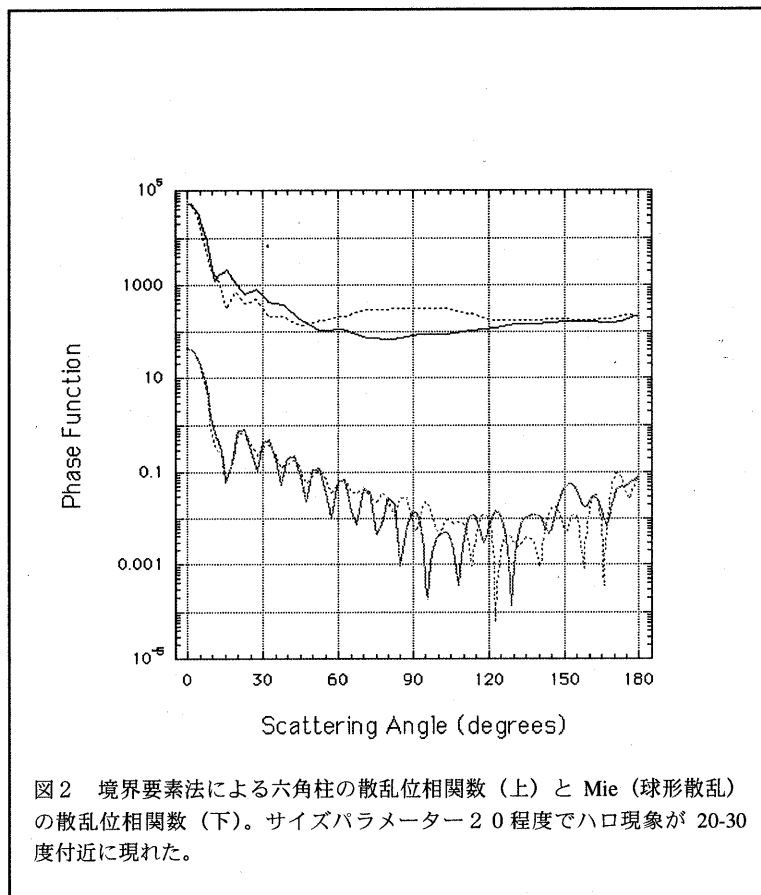
次に、1999年12月に打ち上げられた NASA/Terra 衛星搭載の MODIS という可視赤外イメージャーが装備している 2.1 μm チャンネルを利用した雲有効半径の全地球規模の解析を、同様に搭載されている 3.7 μm チャンネルによる雲有効半径と比較してみたところ、海洋以上では両者はほぼ一致していたが、陸上で差異が factor=2 にもなる領域が認められた。このような解析や報告は本研究が初めてである。異なる波長から求められた雲粒有効半径の差異に関する検証作業が今後の課題のひとつである。なお、2.1 μm 波長の利用は 3.7 μm を使用したアルゴリズムでは必須である熱放射補正が不要なので、その点で有利といえる。さらに、可視赤外イメージャーとマイクロ波スキャナーを複合的に利用し、水雲の降雨性に関する情報の抽出にも成功した。

(Chapter 3)

衛星リモートセンシングでは、物理量を推定するための解析アルゴリズムを作成する場合に、放射伝達計算を陽に用いる。その放射伝達計算は、将来型センサーの波長設計にも同様に用いることが可能である。2002年に宇宙開発事業団が打ち上げる ADEOS-II 衛星搭載の可視赤外イメージャーGLI を対象に、仮想大気を観測した場合の観測輝度のシミュレーションを、放射伝達計算を用いて数多く行い、観測目標の物理量に感度を持たせつつ軽微な大気補正ですむような最適波長を調べる手法の研究を行った。その結果、可視域の海色観測チャンネル、0.753 μm 酸素吸収チャンネル、水蒸気吸収チャンネル、雲有効半径の推定等に使用される 3.7 μm 窓領域チャンネル、6.7 μm 水蒸気プロファイリングチャンネル、赤外スプリットウィンドウチャンネルについて波長位置や波長幅を最適化することが出来た。この手法や結果は、あらゆる将来型の可視赤外センサーに適用することが可能であり、その応用範囲は広い。

(Chapter 4)

これまでの雲解析アルゴリズムは水雲の雲特性のみを対象としていたが、氷晶雲についても同様に推定を行う必要がある。Chapter2 で開発した解析アルゴリズムに幾何光学近似の散乱特性を適用することにより、可視波長(0.64 μm)から光学的厚さが推定されることが NOAA の AVHRR 画像の解析から判明した。ところが、近赤外波長(例えば 3.7 μm)においては氷晶に対して幾何光学近似法が要請する大粒子近似が成立していないため、有効半径を推定することができなかった。この問題を解決するために、有限要素法の一つである境界要素法を用いて、近赤外領域に適用できる非球形粒子の散乱特性アルゴリズムに関する研究を行った。本研究では、混合型表面積分方程式を用いた数値計算を行った。本研究では、サイズパラメーター ($2\pi r/\lambda$: r 半径、 λ 波長) = 20 程度の非球形粒子の計算が可能になっている。粒子にランダム回転を与えた散乱位相関数には、幾何光学近似法では必ず発現するハロと呼ばれる光学現象が弱いながらも現れることが判った (図 2)。



今後の研究課題としては、 $2.1\mu\text{m}$ と $3.7\mu\text{m}$ の有効半径の差異を説明するための検証を行うこと、境界要素法の計算効率化を図ることにより、近赤外波長($3.7\mu\text{m}$)を用いた氷晶雲の有効半径の観測が可能となるようにする事項がある。さらに、本研究で得られた一連の成果を、2002年に打ち上げられる ADEOS-II 衛星 GLI のデータ解析に適用する予定である。

- Nakajima T. Y. and T. Nakajima, 1995: Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurement for FIRE and ASTEX regions. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 4043-4059.
- Masunaga, H., T. Y. Nakajima, T. Nakajima, M. Kachi, R. Oki, and S. Kuroda, 2001: Physical properties of maritime low clouds as retrieved by combined use of TRMM microwave imager and visible/infrared scanner. I. Algorithm. *J. Geo. Res.*, accepted.
- Nakajima T. Y., T. Nakajima, M. Nakajima, H. Fukushima, M. Kuji, A. Uchiyama, and M. Kishino, 1998: Optimization of the Advanced Earth Observing Satellite II Global Imager channels by use of radiative transfer calculations. *Applied Optics*, **37**, 3149-3163.
- Nakajima, T. Y., T. Nakajima, and A. A. Kokhanovsky, 1997: Radiative transfer through light scattering media with nonspherical large particles: direct and inverse problems. *Satellite Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere II*, eds. J. D. Haigh, *SPIE*, **3220**, 2-12, (London, UK)