

論文の内容の要旨

Development of remote sensing algorithm for atmospheric aerosol properties by multi-wavelength multi-pixel method

(多波長マルチピクセル法による大気エアロゾルのリモートセンシング
アルゴリズムの開発)

橋本 真喜子

様々な特性をもつ大気エアロゾルは太陽光を散乱・吸収し、放射収支の見積もりの不確定要素となっている。全球を観測できる利点のある衛星リモートセンシング観測によって、エアロゾルの光学特性が推定されているが、光学的に非常に厚い雲に比べて地表面反射率の影響を強く受けるため、様々な地表面タイプが存在し、時間変化をする陸上でエアロゾルを検知することは困難である。そのために様々な手法が研究されてきた。Kaufman et al., (1989, 1997b) は、地表面反射率の波長間比が既知とした地表面反射補正方法により、陸上のエアロゾル光学特性を導出した。2000年代に入り土壌粒子が顕著な光吸収をする青色～近紫外波長で砂漠域でのエアロゾル推定手法が開発された(Hsu et al., 2004; Fukuda et al., 2013)。しかし、都市域のような地表面反射率が複雑に入り組んだ領域では推定が困難で、これまで精度のよい結果が得られていない(Chu et al., 2003; Hernandez et al., 2007AMS)。そのために最近では、都市域の多点で地上日射観測を行い、衛星観測リモートセンシングと比較することによって、その精度と問題点を把握する局地実験が実施されている (NASA DRAGON)。一方で、都市域は大気汚染物質の発生源であり、地球大気に影響を及ぼすことから、都市域でのエアロゾル光学特性の把握は重要である。そこで本研究では、特に都市域などの地表面タイプが複雑に混合した領域でのエアロゾル光学特性の精度向上のため、様々な地表面タイプが混在する領域にも対応できる衛星リモートセンシング手法を開発することを目的とした。

本手法は Kaufman Neutral method (Kaufman et al., 1987; 2001)の原理を拡張し、波長・空間方向に反射率が変化する様々な地表面が混在する領域の観測点を同時解析することにより、その領域を覆っているエアロゾル特性を推定する。この問題を解くために、MAP 法 (Rogers, 2000) と解の空間方向の平滑化法 (Phillips-Twome 法) を組み合わせ、領域境界に境界条件を付加した最適化法により解く逆推定手法を開発した。本手法により衛星観測輝度から、ある領域の小粒子モードエアロゾルの光学的厚さ AOT(fine)、大粒子モードエアロゾルの光学的厚さ AOT(coarse)、Soot fraction (SF、小粒子モードエアロゾル中のススの体積混合比)、地表面反射率(Ag)を同時推定する。本手法では、このようなエアロゾル層が解析領域を覆っている状況を想定して、放射伝達問題を多ピクセルで同時に解く事を考える。これまでの手法は観測点の一点解析が一般的であるが、領域の各観測点を同時に解析する手法は行われていないため、新しい点といえる。また、本手法では、衛星画像解析で一般的に使われている放射輝度のルックアップ・テ

ープルを廃して、放射伝達計算をエアロゾル特性解の探索過程で毎回計算する手法を導入することによって、大気構造を問題に合わせて柔軟に変えられるアルゴリズムを実現した。

複数の地表面タイプを仮定し、本手法の精度評価を行った。特に、都市域のような反射率の高い地面と低い地面が混在する地表面タイプとして、雪面と水面が市松模様に分布した地表面を仮定した(図1)。

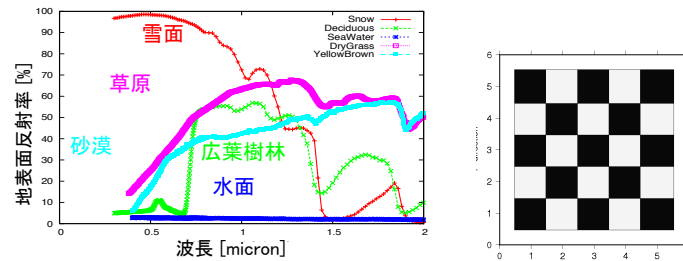


図1．仮定した地表面タイプと反射率（左:Aster spectral libraryより、右:都市域を仮定した地表面タイプ“都市面”）

GOSAT衛星に搭載されたCAIイメージャーによる観測を想定し、4波長（380, 674, 870, 1600[nm]）、5×5ピクセル観測領域（サブ領域）を設定した。推定するパラメータはAOT(fine), AOT(coarse), SFとAgで、観測値の誤差が2%程度である場合、AOT, SF, Agはそれぞれ、 ~ 0.03 , $\sim 5\%$, $\sim 5\%$ 程度の精度で推定された(雪面を除く)。

また、エアロゾル特性は水平方向に大きく変化しない条件で複数のピクセル領域を同時に解析し、エアロゾル特性を推定することで、都市域を仮定した都市面でAOTとSF、特に高反射率面上での推定精度が改善された(図2)。これは、異なる地表面タイプで波長方向にも情報を持つため、エアロゾルがほぼ均質と仮定し、空間方向と波長方向の反射率が異なることを利用することで、尤もらしい解に収束した結果と考えられる。結果より、本手法を用いることによって、都市域などの地表面が複雑に入りこんだ領域上でのAOTとSFの同時推定が可能であり、推定精度が向上すると考えられる。

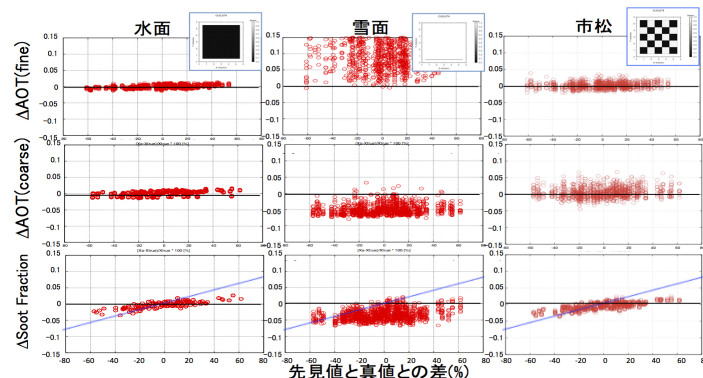


図2 水面、雪面、それらが市松状に分布した市松（都市面）での数値実験で解析したAOT(fine), AOT(coarse)とSFの真値からの誤差。

本手法を用いて GOSAT/CAI イメージャーセンサのデータを用いて解析を行った。データ校正には、

Shiomi et al., (2010)を適用し，地表面反射率は最小反射率法に値を用いた (Fukuda et al., 2013)．複数の地上放射観測点 (AERONET, SKYNET) と都市域地表面含む領域である，パリ周辺とアメリカ・チェサピーク湾周辺 (-77.0°W – 76.0°W , 38.7°N – 39.4°N) で検証・解析を行った (期間:2009 年 7 月～12 月)．検証の結果，地上観測に近い AOT の結果が得られ (図 3)，本手法により都市域での AOT の推定が可能であるといえる．また，様々な地表面が混在する領域で AOT の滑らかな分布結果が得られた (図 4)．

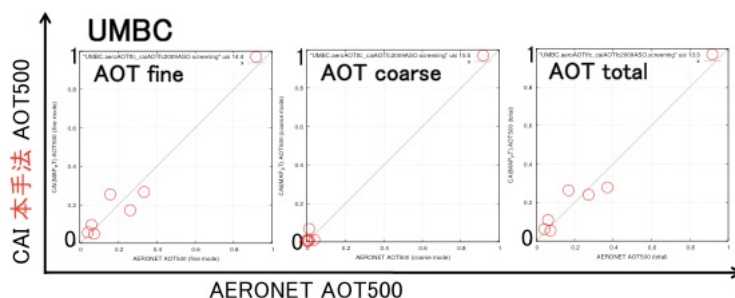


図 3. 推定した AOT(fine), AOT(coarse), AOT(total)のチェサピーク湾周辺の AERONET 観測点 UMBC 近接点での比較

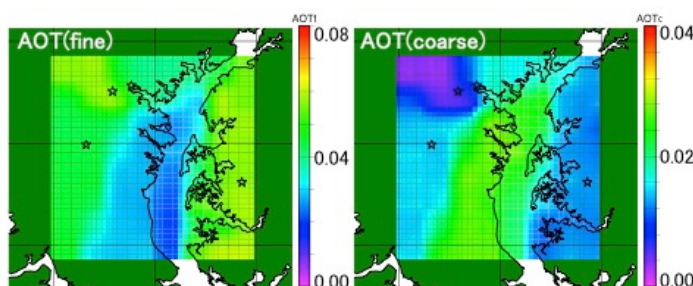


図 4. 2009 年 12 月 1 日チェサピーク湾周辺, 晴天時の AOT の解析結果 (左: AOT(fine), 右: AOT(coarse))．

MODIS では都市域で AOT を過大に見積もる傾向が指摘されている (Hernandez et al., 2007 AMS) が，本手法で地上観測に近い値が得られており，都市域での AOT 推定精度が改善しているといえる．

AERONET (SSA, $\text{AOT}_{440} > 0.4$) と本手法 SSA の値を比較し，SSA が夏に対して冬に小さくなる傾向が見られた．2009 年北京の現場観測で BC が冬期に増加することが報告されており (Song et al., 2013)，その結果と整合する結果が得られた (図 5)．

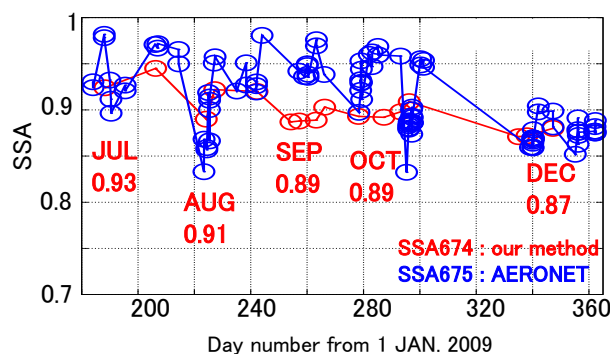


図 5 北京 SSA(674m)解析結果と AETONET の SSA(675m)との比較．2009 年 7 月～12 月，図中の数字は本手法による結果を月平均した値

放射伝達モデルの組み込によりエアロゾルモデルを追加・変更することが可能である。雲もエアロゾル粒子(AOT(cloud))として仮定し、雲の同時推定を試みた。結果、CAI RGB コンポジット画像で雲が確認できる場所で雲粒子が検出された(図 6)。この結果は、本手法を用いれば、雲スクリーニングをエアロゾル特性の推定と同時に行うことが期待できることを意味する。

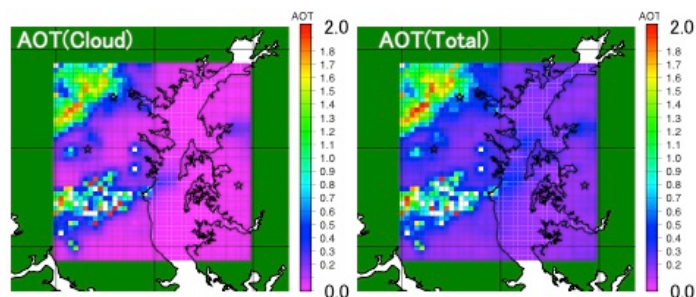


図 6. チェサピーク湾周辺での AOT の解析結果 (左 : AOT(Cloud), 右 : AOT(Total)). 2009 年 8 月 30 日 (雲同時推定の例)

複数の地表面反射率と波長データを利用した本手法により、これまで推定が困難であった都市域での AOT 推定精度が改善された。人為起源エアロゾルの発生源である都市域のエアロゾル推定が可能になるため、大気やエアロゾル研究への貢献が期待できる。また、アルゴリズムに放射伝達モデルの組み込みにより、様々な波長データやエアロゾルモデルを仮定することが可能となった。実際に、雲粒子解析が期待できる結果が得られ、応用範囲の広い手法であるといえる。この手法は LUT 法を用いないため、他の衛星への適用が容易である。

一方、課題として挙げられるのは、ルックアップ法に比べて計算時間がかかる点である。今後は放射伝達計算を短縮するためにアジョイントコードの導入やニューラルネットワーク法の導入し、将来打上げ予定の GCOM-C/SGLI, GOSAT2/CAI2、ひまわり 8・9 の全シーン解析が可能になるような拡張を行う予定である。