
衛星からの大気粒子解析システムGRASPの紹介

Review on GRASP (Retrieval system for atmospheric aerosols)

藤戸 俊行 (京都情報大学院大学)

Toshiyuki Fujito (The Kyoto College of Graduate Studies for Informatics)

Abstract

GRASP (Generalized Retrieval of Aerosol & Surface Properties) is a versatile algorithm for characterizing atmospheric aerosols observed from satellite. Aerosol characteristics play important roles in global environmental problems. Satellite remote sensing is very efficient to retrieve spacial distribution of aerosols. GRASP has been developed based on various simulations in the coupled Earth atmosphere-surface model including multiple light scattering by non-spherical particles in the polarized radiation field mainly at LOA (Laboratoire d'Optique Atmospherique) of Lille University in cooperation with Catalyts. GRASP is designed as an open source software package and it will be available soon.

1. はじめに

昨今、温暖化などの地球環境問題に関心が集まり、国際的な議論が高まっている。地球大気は太陽放射の影響を強く受け、その中でも大気エアロゾルが不安定要素として脚光を浴びるようになった。大気エアロゾルは微小な液体や固体の粒子であり、地球大気に入射した太陽放射を散乱・吸収する。また、雲粒子の生成に関与し、雲による散乱・吸収に影響を及ぼす。二酸化炭素などの温室効果ガスが地球温暖化に与える影響に関しては研究が進み、高い科学的理解度に達しているが、大気エアロゾルについては未解明な点が多く残されている[1]。

大気中の空気分子は気圧に従い、ほぼ均一に分布するが、大気エアロゾルの分布は時間的・空間的な変動が大きい。地球規模で大気エアロゾルの分布を把握するには、人工衛星による観測が最適である。衛星観測データを用いた大気エアロゾル特性情報の導出はエアロゾルリモートセンシングと呼ばれ、放射シミュレーションの結果と観測データを比較照合し、最もよく一致する大気エアロゾル特性を導出する。ただし、主にグローバルな情報取得を目指す衛星観測データから、様々な時間的・空間的条件下にあるローカルな大気エアロゾルの特性を効果的に導出するには、衛星からだけでなく地上から観測されたデータや、様々な数値モデルを統合して用いなくてはならない。

また、衛星に搭載されたセンサは主に放射輝度を計測するものであるが、大気エアロゾル特性を得るには、偏光状態を計測することが有効であることが分かっている。2015年現在、偏光観測情報を提供しているのはフランス航空宇宙局のPARASOL衛星に搭載されたPOLDERセンサのみであるが、日本でも偏光観測が可能なSGLIセンサを搭載したGCOM-C1衛星の打ち上げが予定されている。偏光観測データを用いたエアロゾル・リトリバルのためのアルゴリズムとしてGRASP (Generalized Retrieval of Aerosol & Surface Properties) がある[2]。公開されているエアロゾル・リトリバルアルゴリ

ズムのなかでも、偏光観測データを処理することができるものは少ない。本稿では近い将来公開される予定であるGRASPを紹介する。

2. GRASP

2.1 エアロゾル・リトリバルとは

一般的な衛星観測データを用いたエアロゾル・リトリバルは、大気モデルにおける放射シミュレーション結果をLUT (Look-Up Table) に保存し、1画素ごとに観測データと最もよく一致する値をLUTから探し出すものである。導出対象となる大気エアロゾル特性には、大気エアロゾルの組成を表す複素屈折率や、量を表す光学的厚さ、放射を吸収する強さを表す単散乱アルベド、散乱による角度ごとの放射の散らばり具合を表す散乱位相行列などがあり、これらのパラメタを基に放射伝達計算を行い、衛星で観測される放射輝度をシミュレーションする。衛星で観測される放射は、地球大気に入射し、地表面で反射されたものであるため、シミュレーションには地表面反射モデルが必要であり、BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function), BPDF (Bi-directional reflectance and Polarization Distribution Function) が用いられることが多い。地表面反射モデルのパラメタもシミュレーションに反映され、衛星観測データを用いたリトリバルの対象に含まれる。大気エアロゾルのパラメタおよび地表面反射モデルのパラメタをそれぞれ想定される範囲内で変更し、シミュレーションを繰り返すことでLUTは作成される。また、LUTと観測データを比較する際には、内挿によって導出する値を決定することもある。

2.2 概略

GRASPはPOLDERの解析アルゴリズム[3]と地上観測データ解析アルゴリズムであるGARRLiC[4]をベースに、Dobovikらによって開発された多目的衛星リトリバルアルゴリズムで

ある。前述の大気エアロゾル粒子の特性と地表面反射特性の他に、大気エアロゾルの高度分布や、サイズ分布、形状分布といった情報を導出することができる。GRASPは解析が難しいとされる偏光データ解析が可能であり、非球形エアロゾルのシミュレーションを実装している。多くの放射伝達モデルは、放射伝達計算を簡略化するために大気エアロゾル粒子を球体と仮定しているが、実際には砂塵粒子や海塩粒子など、自然起源の粗大粒子の多くが球形ではない。これらを様々な大きさや形状の楕円体と仮定し、偏光を考慮した放射シミュレーションを行うことで、GRASPはより現実に近い観測値を再現することが可能である。

GRASPは拡張性を考慮して設計されており、各機能が独立したモジュールとなっている。これによりGRASPは様々な衛星のデータ解析に応用することができる。GRASPの主要な機能は2つのモジュールで構成される。1つは放射伝達シミュレーションを行うForward Modelモジュールで、もう1つは統計学的な解析を行い、各特性情報を導出するNumerical Inversionモジュールである。

Forward Modelモジュールは大気エアロゾルの光学的パラメータ（光学的厚さ、単散乱アルベド、散乱位相行列）と地表面の反射パラメータ（非偏光データ使用時はBRDF、偏光データ使用時はBPDF）を用いて、放射伝達シミュレーションを行い、衛星に搭載されたセンサによる観測値を求める。このとき、地表面反射は、観測時の幾何条件、すなわち、太陽および衛星それぞれの天頂角、方位角および放射の波長によって、BRDFまたはBPDFを用いたモデル計算によって求められる。また、大気エアロゾルモデルには非球形粒子も含まれており、多重回散乱の計算によって、より現実に近い状態が再現される。

Numerical Inversionモジュールは統計学的な処理を行い、シミュレーション値と観測値を比較して大気エアロゾル特性および地表面反射特性を導出する。GRASPの特徴の1つとして、LUTを使用しないことが挙げられる。過去の研究から経験的に得られた制限を各パラメータに課し、すべてのパラメータが制限範囲内に収まる組み合わせを探すことでリトリバルを行う。

もう1つの特徴は、1つの画素ごとにはではなく、複数の画素をグループ化し、グループごとに各特性導出を行うMulti Pixel Inversionが実装されていることである。地球大気中を進む放射は、空気分子および大気エアロゾル粒子によって散乱され、進む方向と強さが変わる。散乱によって、1つの画素の地表面にはあらゆる方向から放射が入射し、同様に衛星に搭載されたセンサにある方向から入射する放射は、1つの画素の地表面から反射されたものとは限らない。複数の画素をグループ化し、各グループごとに大気エアロゾル特性および地表面反射特性をまとめて導出することで、単一の画素ごとに特性導出を行うよりも、周囲の画素による影響を考慮することができ、実際の観測値に近い値を得ることができる。グループ化された画素は3次元(x-y:水平方向, t:時間方向)のデータとなる。これは、エアロゾル粒子の空間的分布が、ある程度の範囲内では、水平方向に対して滑らかに変化すること、および、地表面反射

の様相は時間的に滑らかに変化することを利用している。すなわち、大気エアロゾル粒子は同じ高度であれば、中心から離れるにしたがって徐々に拡散し、周囲に対して急激に密度が変化するような画素はないこと、地表面の状態は時間経過で急激に変化することはなく、植生の状態など、地表面の様相は徐々に変化することを仮定している。この仮定を基に、Numerical Inversionモジュールは各画素間の変化が滑らかになるように内挿を行う。

アルゴリズムの手順を以下に示す。

1. 各パラメータの初期値を決める
2. 観測時の幾何条件とパラメータをForward Modelモジュールに与え、シミュレーション値を得る
3. 手順1, 2を画素ごとに行い、グループを作る
4. 統計的な誤差を設定する
5. グループ内の各画素の変化が滑らかになるように内挿を行う
6. シミュレーション値と誤差の和を制限範囲内に収める組み合わせが見つかるかどうか判定する

上記の手順6の結果として、各パラメータの組み合わせを決定することができるまで、1から6を繰り返すことで組み合わせの絞り込みを行う。

3. まとめ

GRASPによるリトリバル結果は精度が高く、またPOLDER以外の衛星センサにも応用できることが報告されているが[5]、アルゴリズムの複雑さゆえに、実行には高性能なコンピュータをもってしても、時間がかかることが報告されている。この問題に対しては、GRASPのコードをGPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing Units) に対応させることで高速化を図る試みがなされている。GPGPUはコンピュータに搭載された画像描画処理用の演算装置であるGPUを一般的な数値計算に転用する技術である。GPUは並列計算処理に長けており、並列化されたコードを実行する際にはCPUを用いるよりも、数十倍～数百倍というはるかに高速で処理が可能である。

2013年にAspetsbergerらはGPGPUによって以下のようなGRASPの高速化を達成したと報告した[6]。

- 放射伝達シミュレーションにおけるメモリ使用量
380MB → 0.1KB
- 1ピクセルのデータ導出に要する時間 (CPU)
10秒 → 3秒

なお、上記の報告ではGPUによる1ピクセルのデータ導出に必要な時間は0.2秒とされる。

例えば、上記と同様の性能を持つCPUを1つだけ用いて、空

間解像度 0.05° の全球データを解析した場合を考える。なお、簡略化のためにオーバーヘッドは無視する。この場合、ピクセル数は 3600×7200 であるから、1コアのCPUで処理を実行したとすると、完了までに必要な時間は900日である。昨今主流となってきている4コアのCPUを用いたとしても225日、つまり7.5ヵ月かかることになり、実用的なデータ解析が可能であるとは言い難い。

一方、1つのGPUで計算を行ったとすると、必要な時間は60日となる。実際は複数のCPUとGPUで同時に計算を行うことにより、処理時間は短くなる。例えば、4コアのCPUと6つのGPUを併用した場合、1秒間に処理できるピクセル数は約31ピクセルである。この場合、全球(3600×7200 ピクセル)では約9.57日となる。多くの準天頂軌道衛星は3日ほどで全球のデータを得ることができる。すなわち、一般的なPCでは、上記の想定より高性能なコンピュータが存在するにせよ、1シーンの全球データ解析のために、観測実時間の3倍以上の時間がかかることになる。このことを考えると実用的なグローバル解析を行うにはPCでなく、より高い処理能力をもつスーパーコンピュータを使用せねばならない。

また、AspetsbergerらはNVIDIA社製のワークステーション向けGPUであるTesla K40 (4.3 TFlop/s)を使った実験を行ったと2014年6月に発表した[7]。実験の結果、2013年度よりもさらに高速にGRASPに動作させることが可能になったとされる。2015年6月現在ではGPU搭載個数や搭載メモリ容量がTesla K40の2倍となったTesla K80 (5.6 TFlop/s)が登場しており、これを使用することでさらなる高速化が期待できる。これらのGPUはスーパーコンピュータでなくとも複数基の搭載が可能である。現状では高価な高性能機に限られるが、PCでもGRASPが観測実時間以下で実行可能となる可能性があり、GPGPUはGRASPの高速化に対し、有効な手段と考えられる。

4. おわりに

GRASPは偏光解析に対応したオープンソースコードの衛星エアロゾル・リトリーバルアルゴリズムである。GRASPによる解析は非常に精度が高く、様々な衛星センサによって取得された観測データの解析に応用可能であり、すでにいくつかの衛星観測データ解析で優秀な成果を出していることが報告されている。GRASPの短所としては、アルゴリズムが複雑であるがゆえに、高性能なコンピュータをもってしても実行に時間がかかることがあげられる。ただし、この課題はGPGPUによる並列化処理で改善されつつある。開発者であるDubovikらは近い将来にGPGPUに対応したGRASPのコードを公開すると発表している。

GRASPは近い将来登場する偏光観測が可能な衛星センサのデータ解析に応用可能な、非常に優秀なシステムである。GRASPのコードを詳細に検証し、限定された課題に対しては、一般的なPCでも実行可能なようにカスタマイズの実現を行う予定である。

【参考文献】

- [1] IPCC 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC.
- [2] Dubovik O., Lapyonok T., Litvinov P., Herman M., Fuertes D., Ducos F., Lopatin A., Chaikovsky A., Torres B., Derimian Y., Huang X., Aspetsberger M., Federspiel C.: GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere, SPIE, Newsroom, 10.1117/2.1201408.005558.
- [3] Dubovik O., Herman M., Holdak A., Lapyonok T., Tanré D., Deuzé J. L., Ducos F., Sinyuk A., Lopatin A.: Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 975–1018, 2011.
- [4] Lopatin A., Dubovik O., Chaikovsky A., Goloub P., Lapyonok T., Tanré D., Litvinov P.: Enhancement of aerosol characterization using synergy of lidar and sun-photometer coincident observations: the GARRLiC algorithm, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2065–2088, 2013.
- [5] Dubovik O., Litvinov P., Lapyonok T., Huang X., Lopatin A., Ducos F., Fuertes D., Derimian Y., Amberger S., Ebner G., Hart C., Marth D., Aspetsberger M., Federspiel C.: Application of GRASP Algorithm for Retrieving Aerosol and Surface Properties from Sentinel-3 Observations, Sentinel-3 for Science 2015 workshop, Venice, Italy, June 2-5, 2015.
- [6] Aspetsberger M., Coman A., Planer W., Federspiel C., Dubovik O., Lapyonok T., Litvinov P., Holdak A.: Speeding Up Radiative Transfer Calculations and Complex Satellite Retrievals with GPGPU Computing, *ELS XIV - 18.06.2013*.
- [7] Aspetsberger M., Hartl C., Planer W., Federspiel C., Dubovik O., Lapyonok T., Litvinov P.: GRASP Aerosol Retrievals Latest Advancements with Accelerator Technology and Application Scenarios, *EUMETSAT 2014 - 23.09.2014*.

◆著者紹介

藤戸 俊行 Toshiyuki Fujito

京都コンピュータ学院教員。

近畿大学大学院総合理工学研究科エレクトロニクス系工学専攻博士前期課程修了、修士(工学)。

日本リモートセンシング学会、日本エアロゾル学会、

American Geophysical Union会員。