

大気観測人工衛星データ MODIS と 地上大気常時監視データについて*

山本 勝彦**

キーワード ①大気汚染 ②エアロゾル ③SPM ④人工衛星リモートセンシング ⑤MODIS

要 旨

アメリカの人工衛星 Terra, Aqua に搭載されているセンサー MODIS(MODerate resolution Imaging Spectrometer) データのうち, Web 上で公開されている AOD (Aerosol Optical Depth) 値について, 2009年5月と2011年2月, 11月の日本でのSPM高濃度時の大気常時監視時間値データとの比較を行った。AOD 値のグリッド(10 km 四方)の中に存在する常時監視局のSPM濃度との比較では, 相関は低かった。AOD 値のばらつきを少なくするため, Bin-Average 法を用い, SPM 濃度をデータ数が同じになるように10の区間に分割し, それぞれの区間のSPM濃度とAOD値を平均して比較したところ, 高い相関を得ることができた。

1. はじめに

人工衛星リモートセンシングデータの環境行政での利用は, 1980年代から試みられてきた。大阪府においても, 大規模開発による土地利用改変状況の把握や, 大気汚染物質拡散計算, 環境騒音予測計算における地表面状況や都市の建屋状況等のパラメータとして用いられている¹⁾。これらはいずれも人工衛星リモートセンシングデータにより地表面被覆状況を判別した結果を用いたものであった。人工衛星リモートセンシングデータから直接に地上の環境質を把握したものには, 熱赤外センサーの値から, 都市域のヒートアイランド現象を推計した試みがあげられる²⁾。

大気汚染分野への人工衛星データの活用については, 1981年にアメリカのスペースシャトル

「チャレンジャー」による低層大気のコ CO 測定に始まるとされている³⁾。わが国においては, 2000年代になって, アジア大陸からの大気汚染物質の飛来の寄与が顕在化するに連れ, アジア規模(海上も含めた)の大気環境の把握が必要とされるようになり, そのツールとしての大気観測人工衛星データが注目されている。将来的には, 東アジアを俯瞰する大気観測静止衛星の構想があり, 気象予報なみの活用が期待されている。

本稿は, 大気観測人工衛星データとわが国の地方自治体による地上大気常時監視データの比較を行い, 東アジア規模の大気汚染広域移流モニタリングのツールとしての人工衛星データ活用に資することを目的とする。

*Correlation between MODIS Data and Ground-based Air Monitoring Data in Japan

** Katsuhiko YAMAMOTO (地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所) Research Institute of Environment, Agriculture and Fisheries, Osaka Prefecture

2. 大気観測人工衛星データについて

2.1 大気観測人工衛星データの種類と応用

大気観測人工衛星データの種類については、J. Fishman が文献3)で詳説している。主なセンサーとしては、GOME (衛星名 ERS-2), SCIAMACHY (衛星名 ENVISAT), OMI (衛星名 EOS-Aura), MODIS (衛星名 Terra, Aqua) があげられる。Noguchi らは、GOME データを用いてわが国の関東地方の NO₂ 実測濃度データとの比較を行い、実測値とのよい相関と、類似した季節変化(冬季に高く、夏季に低い)を得ている⁴⁾。OMI については、Ziemke らが、成層圏オゾンを除いて対流圏オゾンを求め、そのグローバルな分布と化学輸送モデルとの比較を行っている⁵⁾。

また、筆者が属する国立環境研究所 II 型共同研究「PM_{2.5} と光化学オキシダントの実態解明と発生源寄与と評価に関する研究」の衛星データ活用グループは、OMI の対流圏 NO₂ データを用い、近畿地方(京阪神)において、2007年の自治体大気汚染常時監視データとの比較を試みた。週日の変化(曜日による濃度変化)および月ごとの変化において、OMI データが、地上測定値と同様に変化を示す結果を得た⁶⁾。

2.2 MODIS データについて

MODIS (MODerate resolution Imaging Spectrometer 中分解能撮像分光放射計)とはアメリカの人工衛星 Terra と Aqua の両方に搭載されているセンサーで、NASA により開発運用されている。電磁波の波長0.4~14 μm の範囲の36チャンネルを持ち、観測範囲が広く、2つの衛星で観測できることから、1日2回の観測が可能などの利点を持ち、エアロゾルだけでなく雲、放射エネルギー束、土地被覆、植生など広い範囲の観測に使われている。

これまで MODIS を用いた大気汚染の解析には、さまざまな試みが行われている。Hutchison らは、Aqua MODIS をアメリカテキサス州でのオゾンによる大気汚染のうち、州外からの流入による寄与の予測に用いている⁷⁾。また、同じくテキサス州において PM_{2.5} と MODIS の比較に当たり、Lidar 観測データを用いて、高さ方向の PM プロファイルを推計することで、高い相関を得ている⁸⁾。Gupta らは、世界の主要都市における

PM_{2.5} 濃度と、Terra, Aqua の MODIS データとを比較し、月平均値や日平均値で高い相関を得ている。そしてこの相関関係は、エアロゾル濃度、相対湿度、雲量、混合層深さに依存している⁹⁾。アジアでの事象については、向井らが黄砂の判別に MODIS データを用いる手法を提案している。ダスト粒子の波長特性、土壌性エアロゾルの反射特性から、MODIS のいくつかの波長帯を組み合わせることで指標を作成し、黄砂の判別に用いている¹⁰⁾。

2.3 MODIS データの利用

MODIS データは、ノイズ等の除去、幾何補正をしたものが NASA より公開されており、容易に利用することができる (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)。いくつかの処理レベルのデータが取得できるが、ここでは、Optical-Depth-Land-And-Ocean を用いる。このデータは、地上分解能約10 km であり、格納されている数値は波長 0.55 μm の AOD (Aerosol Optical Depth 光学的深さ) 値である。AOD 値は、以下の式で計算される無次元量である。

$$AOD = \int_0^r \sigma(r) dr$$

ここで σ は、エアロゾルによる光の散乱や吸収による減衰を現わす消散係数 (Extinction coefficient), r は高さである。この値は、地表面からセンサーまでの空気柱 (Column) に存在するエアロゾルによる光の減衰率であり、カラム中のエアロゾル存在量の指標となると考えることができる。

3. 解析方法

3.1 解析対象日

解析対象日は表1に示す3つの期間である。いずれも SPM の高濃度日であるとともに、日本周辺(とくに陸域)で雲等による欠測が少ない時期および衛星を選んだ。

表1 解析対象日と利用した衛星

解析対象時期	衛星	利用した測定局数
2009年5月18, 20日	Aqua	202
2009年5月18, 20日	Terra	718
2011年2月7日	Aqua	209
2011年11月30日	Terra	298

2009年5月18～20日は、 O_x 、 NO_2 、SPM濃度がともに高く、20日には九州から関東にかけての11都府県に光化学スモッグ注意報が発令された。夜間のオキシダント高濃度がいくつかの局で見られ、東アジア規模の広域移流の寄与が考えられる。この時期については、Aqua、Terraともに1日のデータ数が少ないので、18、20日の2日分のデータを用いた。

2011年2月7日は、九州から東北にかけて大気汚染高濃度が観測された。この時期(2月4～7日)の気象条件は、「煙霧」とされている(気象台の発表)。 O_x 、 NO_2 、SPMに加えて SO_2 濃度も高くなり、アジア大陸からの移流と考えられている¹¹⁾。SPM濃度は、黄砂飛来時なみの高さとなった。この時期についてはAquaを用いた。

2011年11月30日は、西日本でSPM、 NO_2 の高濃度が発生した。この期間(11月28～30日)は大気の状態が安定であり、大阪、松江、富山に国立環

境研究所が設置しているLidar観測データ¹²⁾から、地表面付近にエアロゾルの高濃度が見られ、地元の要因による高濃度と考えられる。この時期についてはTerraのデータを用いた。

解析対象日のうち、2009年5月20日のMODIS(Aqua)のAOD値の分布を図1に示す。

3.2 AOD値と対応する常時監視局SPM濃度の比較

MODISで得られたAOD値と、全国の自治体の大気汚染常時監視時間値データのSPM濃度とを比較した。SPMは、エアロゾルに近い項目と考えられる。AOD値の位置データと、日本全域の常時監視局の位置データから、AOD値の取得できている地点を中心とする一辺10kmの正方形(グリッド)の中に存在する常時監視局を選び、AODが取得された時刻を含む時間のSPM濃度との比較を行った。一つのグリッドの中に複数の局があるときは、取捨選択せずに、すべての値を

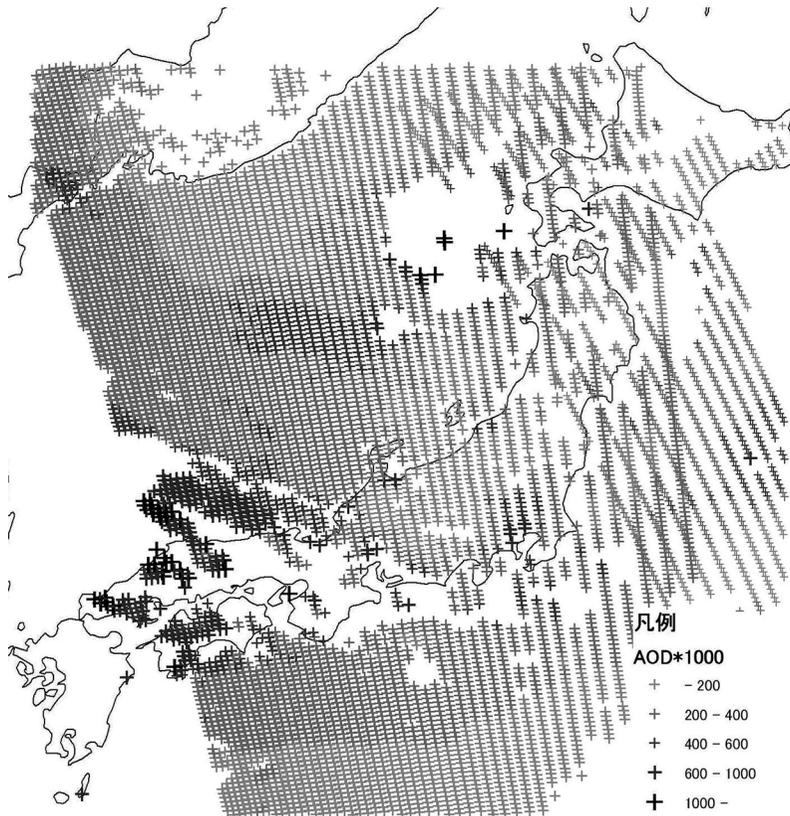


図1 MODIS(Aqua) AOD値の分布(2009年5月20日)

用いた。ここで得られた AOD 値と SPM 濃度を補正等行わずに比較を行った。

3.3 Bin-Average 法を用いた AOD 値と SPM 濃度の比較

陸上には、光のさまざまな反射、吸収特性を持った地物が存在するため、AOD 値のばらつきが大きいことが考えられる。そこで、AOD 値のばらつきを少なくするための平均化を Bin-Average 法を用いて行い、SPM 濃度と比較した。

Hutchison らは、MODIS データとテキサス州の PM_{2.5} 濃度データの比較に当たって、Bin-Average 法を用いている。これは、PM_{2.5} 濃度を 5 μg/m³ ごとの区間に分割し、その区間の PM_{2.5} 中央値と、それに対応する AOD の平均値を求め、比較を行うものである¹³⁾。先に触れた Gupta らも同様の手法を用いている⁹⁾。

Hutchison らは AOD 値を y 軸としているが、本解析では、MODIS の AOD 値を用いて SPM 濃度を推計することを目的とするので、SPM 濃度を従属変数とした。また、AOD 値のばらつきを少なくすることが目的であることから、SPM 濃度を等間隔に分割することとせず、データ数が同じになるように10分割した。また、SPM 濃度は区間の中央値ではなく区間の平均値とした。したがって、個々の区間の幅は一定でなく、AOD 値、SPM 濃度両方とも区間での平均値を用いた。

4. 解析結果と考察

4.1 SPM 濃度と AOD 値の比較結果

5月18, 20日の 3.2 で示した方法で選択した SPM 濃度と AOD 値(Terra)について、補正等を行わずに散布図にしたものを 図2 に示す。相関係数は0.288であり、相関は認められなかった。表 2 に各解析対象期間の AOD 値と SPM 濃度との相関を示す。いずれも相関係数は0.2~0.3程度であり、相関は認められなかった。これは、陸域の AOD 値のばらつきによると考えられる。

4.2 Bin-Average 法による比較結果の考察

4.1 で得られた AOD 値と SPM 濃度について、Bin-Average 法による平均化を行った結果得られた散布図(時期、衛星は 図2 と同じ)を 図3 に、相関係数を表 3 に示す。概して、高い相関を示した。このことから、ここで用いた Bin-Average

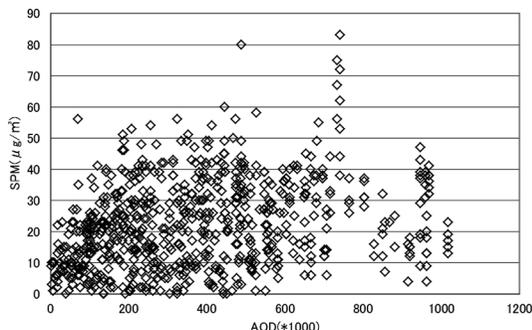


図2 MODIS(Terra) AOD 値と実測 SPM 濃度散布図 (2009年5月18, 20日)

表2 MODIS AOD 値と実測 SPM 濃度の相関

解析対象時期	衛星	相関係数
2009年5月18, 20日	Aqua	0.296
2009年5月18, 20日	Terra	0.288
2011年2月7日	Aqua	0.212
2011年11月30日	Terra	0.236

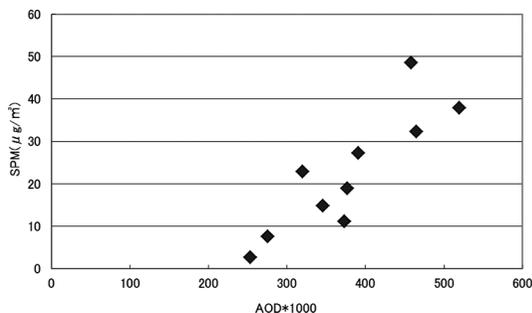


図3 Bin-Average 法により補正した MODIS (Terra) AOD 値と実測 SPM 濃度散布図(2009年5月18, 20日)

法のように、AOD 値のばらつきを補正すると、実測 SPM 濃度と MODIS AOD 値は高い相関を示すことがわかった。これにより、陸域で測定局の存在しない地域での濃度の推計に用いることができ、高濃度が発生した範囲を推計することが可能になる。

図3 から、SPM 濃度を従属関数として一次回帰式を作ると、負の切片を持つことがわかる。これは、ここで対象としたすべての時期に共通している。地表面での SPM 濃度が低いところであっても、地表から人工衛星のセンサーまでのカラムには、エアロゾルが存在するので、負の切片を持つことは十分に考えられることである。同時に先

表3 Bin-Average 法により補正した MODIS AOD 値と実測 SPM 濃度の相関

解析対象時期	衛星	相関係数	有意確率 (両側)	SPM 濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
				平均	最高
2009年 5 月 18, 20日	Aqua	0.866	0.01	27.1	80
2009年 5 月 18, 20日	Terra	0.864	0.01	22.3	83
2011年 2 月 7 日	Aqua	0.622	0.055	60.4	159
2011年11月30日	Terra	0.713	0.021	34.8	79

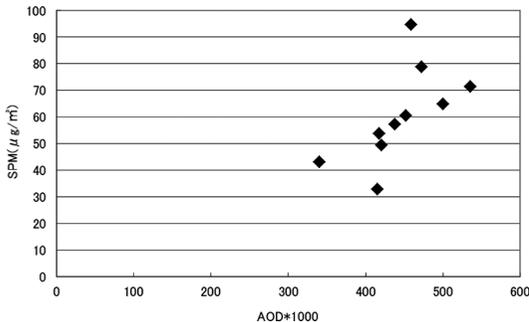


図4 Bin-Average 法により補正した MODIS (Aqua) AOD 値と実測 SPM 濃度散布図 (2011 年 2 月 7 日)

に述べたような陸上での光のさまざまな反射吸収特性により、SPM 濃度が低いところでも、AOD 値が一定の値を持つことも考えられる。このことから、今回得られた陸上での SPM 濃度と AOD 値の相関関係を海上でもそのまま適用することはできないと考える。

また表3に見られるように、2011年2月の高濃度時については相関係数が低い。このときの散布図を図4に示す。この時期は、先に述べたように黄砂飛来時なみの SPM 濃度を示し(表3)、他の時期より SPM 濃度がかかなり高い。そして、図からは SPM 濃度の高いところで相関が高くないことが見て取れる。文献13)の Hutchison らの調査でも同様のことが報告されている。仮にこの時期のデータのうち、SPM 濃度が $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下のところで Bin-Average 法により相関をとると、相関係数は0.803となり、相関関係が高くなることが確認できた。このことから、黄砂飛来時のように SPM が極端に高くなるイベント時には、AOD 値が予想したよりも低くなることが考えられる。

5. ま と め

大気観測衛星データ MODIS の AOD 値と、地上大気常時監視より得られる SPM 濃度との間に

は、AOD 値のばらつきを補正する手法をとると、高い相関が認められた。同時に、SPM 濃度が $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えるような高濃度では、相関が低くなることが見られた。また、陸上での相関関係を直ちに海上に適用することはできず、さらに海上での実測濃度との比較を行う必要があると考える。

謝辞 この研究は、国立環境研究所Ⅱ型共同研究「PM_{2.5}と光化学オキシダントの実態解明と発生源寄与評価に関する研究」の衛星データ活用グループの一部として行ったものです。成果の一部を使わせていただいたことに感謝いたします。

—参考文献—

- 1) 厚井弘志ら：ランドサットデータを用いた環境騒音の予測，日本リモートセンシング学会誌，**12**，111-115，1992
- 2) 西村 昂，山本勝彦，大杉朗隆：ランドサットデータを利用したオープンスペースの地表面温度の分析，土木計画学研究・論文集，**13**，409-416，1996
- 3) Fishman J. et al.: Remote Sensing of Tropospheric Pollution from Space, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **89**, 805-821, 2008
- 4) Noguchi K. et al.: Comparison of Tropospheric NO₂ Observations by GOME and the Air-quality Monitoring Network Around Tokyo, Japan, 日本リモートセンシング学会誌，**29**，398-409，2009
- 5) Ziemke J. R. et al.: Tropospheric ozone determined from Ayr OMI and MLS: Evaluation of measurements and comparison with the Global Modeling Initiative's Chemical Transport Model, *J. of Geophysical Research*, **111**, D19303, doi: 10.1029/2006JD007089, 2006
- 6) 光化学オキシダント等に関する共同研究グループ：光化学オキシダントと粒子状物質等の汚染特性に関する研究，国立環境研究所研究報告，**203**，169-172，2010
- 7) Hutchison K. D., Smith S., Faruqui S.: The use of MODIS data and aerosol products for air quality prediction, *Atmospheric Environment*, **38**, 5057-5070, 2004
- 8) Hutchison K. D., Faruqui S. J., Smith S.: Improving Correlations between MODIS Aerosol Optical Thickness and Ground-based PM_{2.5} Observations Through 3D spatial Analysis, *Atmospheric Environment*, **42**, 530-543, 2008
- 9) Gupta P. et al.: Satellite Remote Sensing of Particulate

- Matter and Air Quality Assessment Over Global Cities, *Atmospheric Environment*, **40**, 5880-5892, 2006
- 10) 向井真木子ら：東アジアにおけるダストエアロゾル粒子の検出と解析, 日本リモートセンシング学会誌, **30**, 1-10, 2010
 - 11) 山神ら：2011年2月上旬に観測された広域的なPM2.5高濃度エピソード, 大気環境学会誌, 投稿中
 - 12) <http://www-lidar.nies.go.jp/>
 - 13) Hutchison K.D. et al.: Correlating MODIS Aerosol Optical Thickness Data with Ground-based PM2.5 Observations across Texas for use in a Real-time Air Quality Prediction System, *Atmospheric Environment*, **39**, 7190-7203, 2005