

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：14602

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24710008

研究課題名(和文)次世代衛星による大気汚染観測に向けた新アルゴリズム開発

研究課題名(英文)Algorithm for the observations of air pollution by next generation satellites

研究代表者

野口 克行(Noguchi, Katsuyuki)

奈良女子大学・自然科学系・助教

研究者番号：20397839

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円、(間接経費) 540,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の大気汚染観測として、静止軌道衛星や国際宇宙ステーションの利用が想定されている。これらを用いた大気汚染観測では、地表面反射率の入射方向依存性(BRDF)が大きく影響する可能性がある。本研究では、陸域観測衛星データを用いて土地被覆タイプ毎のBRDFの特性を明らかにし、対流圏二酸化窒素の観測を想定したシミュレーションを実施してBRDFを考慮しない場合の問題点を明らかにした。土地被覆タイプを考慮したBRDFを実装するアルゴリズムを採用することにより、上記で述べられた問題点が解決されることが示された。成果は、国内・国際学会発表ならびに欧州の専門誌であるAMTD誌において論文として掲載された。

研究成果の概要(英文)：The algorithm for the observations of air pollution by using next generation platforms, such as geostationary satellites and the international space station, has been developed. The dependence of the surface reflectivity on the incident and outgoing directions was considered, since the dependence is important for those platforms. The results were presented in the domestic and international conferences and published in the peer-reviewed journal, Atmospheric Measurement Techniques Discussion (AMTD).

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：衛星観測

1. 研究開始当初の背景

1990年代頃から中国の急速な経済発展に伴って窒素酸化物をはじめとする大気汚染物質の排出が急増しており[Akimoto, 2003]、風下である日本への輸送が懸念されている。従来、大気汚染と言えば空間スケールが数km~数十km程度の局所的な汚染を指し、その影響は国内都市部に限られていた。しかし、近年になって国家間や大陸をも越えるような広域的な大気汚染[Stohl, 2004]、つまり越境大気汚染の存在が明らかになってきた。

地上観測や航空機観測の時空間カバーの限界をクリアし、相補的な役割を持つと考えられるのが、広域的かつ長期的に観測が可能な人工衛星観測である。人工衛星による対流圏の大気汚染観測は、対流圏と衛星軌道上の間に中層大気が存在することや、対流圏の雲により観測が遮られやすいという問題があり、一般的に困難とされてきた。しかし、近年のセンサ技術と導出アルゴリズムの向上にともない、1990年代になって人工衛星による対流圏の大気汚染観測が本格的に挑戦され始めた。その中でも先駆的なセンサが、欧州宇宙機関が打ち上げた GOME センサ(紫外・可視域)及び SCIAMACHY センサ(紫外~近赤外域)である。これらのセンサの成功によって、従来の観測手法では得られなかった二酸化窒素(NO₂)、オゾン、二酸化硫黄、さらにはホルムアルデヒド、一酸化臭素などの化学種の時空間分布が明らかになり始めた[Burrows et al., 1999]。例えば、東アジア域の大気汚染に関しては、Richter et al. [2005] が GOME / SCIAMACHY による観測データを用いて、中国上空で NO₂ が年々増加していることを観測的に明らかにした。

従来の衛星による大気汚染観測は、いずれも太陽同期衛星によって行われてきた。太陽同期観測は、全球を同じ観測条件で網羅することに大きな貢献をしてきた一方で、観測時刻が固定され(例えば 10 時/14 時)時々刻々と変化する様子(日内変化)を観測できない。そのため、次世代衛星による大気汚染観測は、同一測器で異なる時刻に観測可能な軌道で実施することが望まれる。

このような観点から、衛星による世界初の大気汚染の日内変化観測を目指し、日本において次世代衛星開発の検討が進行中である。例えば、気象衛星のような静止軌道観測(一日を通した観測が可能)を目指す GMAP-ASIA [Akimoto et al., 2009]、国際宇宙ステーション(ISS、低高度軌道・太陽非同期)を利用した観測を目指す APOLLO プロジェクトなどである。

従来衛星による大気汚染観測と大きく異なる問題点として、観測する度に太陽と衛星の位置関係が大きく変わることが挙げられる。太陽光を光源とする可視・紫外域分光観測においては、従来の太陽同期観測では無視されてきた地表面アルベドの天頂角・方位角依存性(BRDF)が、次世代観測では観測の度

に大きく異なることになり、地表面アルベドを一定と仮定する従来アルゴリズムでは観測精度が低下する可能性がある。Zhou et al. [2010] は、従来の太陽同期センサのうち衛星天頂角が変化する(視野を振る)OMI センサに着目し、BRDF を用いて可視域による NO₂ を再導出した結果、BRDF の影響が大きいことを明らかにした。日内変化観測を行う次世代衛星では太陽天頂角・方位角が従来と比較にならないほど大きく変わるため、BRDF の影響を詳細に解析し、その影響を考慮したアルゴリズムを開発すべきである。

2. 研究の目的

本研究は、日本による次世代衛星センサ開発に貢献することを目指し、フィージビリティ・スタディを行なう。特に、大きな誤差要因となり得る地表面反射率の BRDF 依存性に着目し、新たな導出アルゴリズムの開発に資するための解析を行なう。

3. 研究の方法

(1)まず、Noguchi et al. [2011]の手法を基に、主に ISS を想定したフィージビリティ・スタディを行なった。図1に研究の流れを示す。まず、大気放射伝達モデルを用いて地球大気スペクトルを計算する。各季節・各時刻の汚染物質(NO₂を想定)の高度分布や太陽衛星の幾何学的位置などを考慮して計算を行なう。次に、過去の衛星搭載用センサの検討を参考とし、センサのスペックに応じたノイズを見積もる。基本的なノイズ要因であるショットノイズを考慮した見積もりを行なう。センサの視野と観測時間に応じたノイズ振幅を見積もる。ノイズの見積もりが終わったら、乱数を用いて振幅の大きさに応じたノイズを上述の地球大気スペクトルに加え、

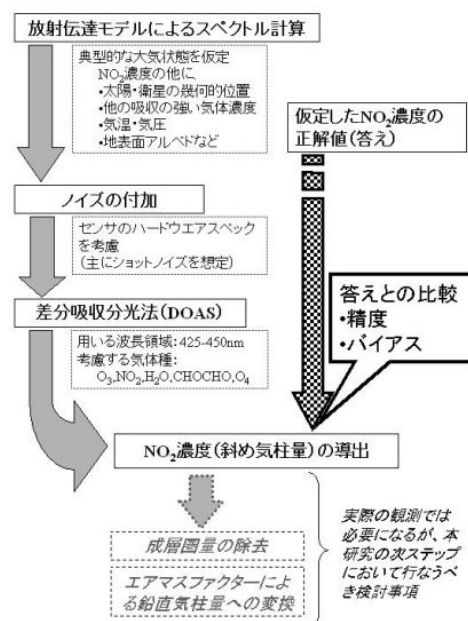


図1 フィージビリティ・スタディの流れ

これを擬似的な観測スペクトルとする。地球スペクトルから大気成分の濃度を導出する方法としては、差分吸収分光法 (DOAS) を用いる。これは、太陽光を光源として地表・大気反射 (散乱) 光を利用し、光路中にある大気成分の吸収量を測定する手法である。仮定した NO₂ の高度分布から、答えである NO₂ 濃度は分かっているので、擬似スペクトルから求めた NO₂ 濃度を比較して、誤差を見積もることができる。このようにして、センサのノイズの大きさに対して導出される NO₂ 濃度の誤差がどのくらいになるかを求めることができる。ISS の典型的な観測ジオメトリとして、天底観測、並びに衛星視線角が東西に 45 度傾く場合の計 3 ケースを想定して放射伝達計算ならびに DOAS 計算を実施した。

(2) 観測における BRDF の影響を明らかにするため、米国航空宇宙局 (NASA) の MODIS センサによる地表面アルベドの実測データを利用して、経験的な代表値データセットを作成し、影響を評価した。MODIS データは、チャンネルごとに地表面アルベドを決定する 3 つのパラメータとデータ品質フラグで構成され、2000 年の観測開始時から現在までのデータが配布されている。テストエリアとして関東平野に着目し、地表面アルベド値を構成する 3 パラメータがどのような時空間分布を持っているかを俯瞰した上で代表値データセットを作成した。

(3) 上述の BRDF パラメータの代表値データセットを用いて、地表面アルベドの方向依存性を考慮した放射伝達計算を行い、地表面アルベドの天頂角・方位角依存性の影響評価を行った。評価の際には、エアマスファクター (AMF) という量を用いた。

4. 研究成果

(1) 図 2 に、フィージビリティ・スタディで得られた ISS における観測精度のシミュレーション結果の一例を示す。シミュレーションの結果、冬には天底観測が一番測定精度が良かったが、夏の場合は必ずしも天底観測が良いとは限らないことが明らかになった。これは、主に AMF の太陽天頂角依存性の違いが関係していると思われる。

(2) 図 3 に、関東平野における地表面 BRDF を計算するのに必要な 3 パラメータの月変化を示す。このデータを代表値データセットとし、以後の AMF 計算に用いることとした。

(3) 図 4 に、上述の BRDF 代表値データを利用して計算した対流圏 NO₂ の AMF の日変化を示す。対流圏 NO₂ の AMF は、土地被覆タイプによって大きく異なる値を持つことが明らかになった。都市タイプの地表面における AMF が一番大きく、常緑樹タイプの AMF が一番小さいという結果が得られた。それらの差は、数十%にも及ぶ。つまり、土地被覆ごとの BRDF を考慮しなければ、NO₂ コラム量の実測量もこの差に応じて変わることが明らかになった。他の土地被覆タイプの AMF の大きさ

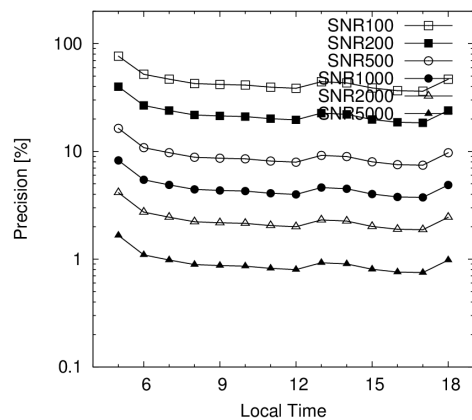


図 2 ISS 観測精度のフィージビリティ・スタディ。夏の天底観測の例。

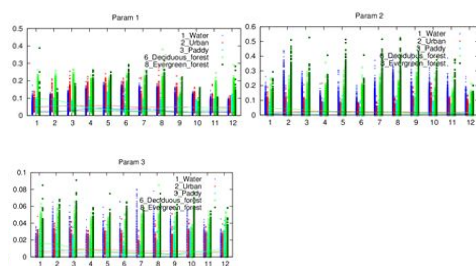


図 3 関東平野における地表面 BRDF を計算するのに必要な 3 パラメータ (MODIS センサで採用されている Ross-Tick-Li-Sparse モデルで用いられるパラメータ) の月ごとのプロット。土地被覆ごとにプロットしている。

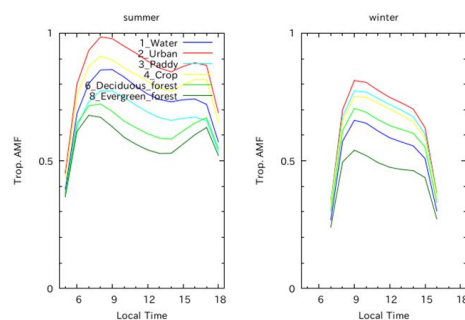


図 4 土地被覆ごとの対流圏 NO₂ の AMF の時刻変化。左が夏、右が冬の結果。

の順位は、季節により変わっていた。特に、落葉性樹木などの季節性のある土地被覆タイプの場合は、AMF にもそのような季節変化が含まれ得る。水田の場合は、夏季に水が入っている時期と夏季以外の水が入っていない時期とで振る舞いが大きく変わることが明らかになった。日本を始めアジア諸国は都市域の周辺に水田が位置することも多いため、都市汚染を衛星で観測する際には水田による地表面アルベドの不連続的な季節変化の影響が示唆された。

(4)以上の解析結果から、太陽天頂角や衛星天頂角が大きく変化する次世代衛星観測においては、土地被覆タイプを考慮した BRDF を実装するアルゴリズムを採用することにより、上記で述べられた問題点が解決されることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Noguchi, K., Richter, A., Rozanov, V., Rozanov, A., Burrows, J. P., Irie, H., and Kita, K., Effect of surface BRDF of various land cover types on the geostationary observations of tropospheric NO₂, Atmos. Meas. Tech. Discuss., 7, 3443-3469 (2013 年度内に受理済み).

doi:10.5194/amtd-7-3443-2014, 2014.

Noguchi, K., A. Richter, J. P. Burrows, H. Irie and K. Kita, A study of BRDF over Tokyo for the spaceborne measurements of atmospheric trace gases, Proc. SPIE 8524, Land Surface Remote Sensing, 85242D (November 21, 2012); doi:10.1117/12.974818, 2012.

Hitoshi Irie, Hironobu Iwabuchi, Katsuyuki Noguchi, Yasuko Kasai, Kazuyuki Kita, and Hajime Akimoto, Quantifying the relationship between the measurement precision and specifications of a UV/visible sensor on a geostationary satellite, Advances in Space Research, 49(12), 1743-1749, 10.1016/j.asr.2012.03.012, 2012.

[学会発表](計9件)

野口克行, A. Richter, V. Rozanov, A. Rozanov, J. P. Burrows, 入江仁士、北和之、静止衛星及び低軌道衛星による対流圏 NO₂ 観測を想定した地表面 BRDF の影響に関する研究、PEM36-01、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、横浜、2014 年 4 月 28 日 (2013 年度内に発表決定済)

野口克行, 入江仁士、可視紫外波長域を用いた対流圏微量成分観測における土地被覆分類データの応用、第 16 回環境リモートセンシングシンポジウム、千葉大学、2014 年 2 月 21 日

Noguchi, K., A. Richter, J. Burrows, H. Irie, and K. Kita, The Effect of Surface BRDF of Various Land Cover Types on the Measurement of Tropospheric NO₂ from a Geostationary Orbit, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) Annual Meeting, Brisbane, Australia, 24-28 June, 2013. Kasai, Y., K. Kita, S. Hayashida, Y.

Kanaya, H. Tanimoto, H. Irie, N. Saitoh, H. Sagawa, K. Kikuchi, T. M. Sato, K. Noguchi, and H. Akimoto, Current Status of Air Quality Missions in Japan: APOLLO and GMAP-Asia, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) Annual Meeting, Brisbane, Australia, 24-28 June, 2013.

野口克行, アンドレアス・リヒター、ジョン・P・バローズ、入江仁士、北和之、静止衛星及び低軌道衛星による大気観測に向けた地表面 BRDF (二方向反射率分布関数) の影響評価 ~ エアマスファクターによる検討、第 27 回大気圏シンポジウム、相模原、2013 年 2 月 28 日

野口克行, 入江仁士、静止衛星・国際宇宙ステーション搭載紫外可視センサによる対流圏二酸化窒素の日内変動導出の検討、第 15 回 CEReS 共同利用研究発表会、千葉大学、2013 年 2 月 22 日

Noguchi, K., Andreas Richter, John P. Burrows, Hitoshi Irie, Kazuyuki Kita, The effect of the surface BRDF on the measurement of tropospheric NO₂ from geostationary orbit and ISS: evaluation of AMF, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 132 回総会及び講演会、B005-P009、札幌、2012 年 10 月 21 日

笠井康子、金谷有剛、谷本浩志、林田佐智子、入江仁士、野口克行、斉藤尚子、今須良一、林洋司、佐川英夫、佐藤隆雄、宮崎和幸、北和之、APOLLO 検討チーム、国際宇宙ステーションからの大気環境観測ミッション APOLLO 提案、日本気象学会 2012 年度秋季大会、札幌、2012 年 10 月 3 日

野口克行, アンドレアス・リヒター、ジョン・P・バローズ、入江仁士、北和之、静止軌道および ISS による対流圏 NO₂ 観測における地表面 BRDF の影響、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、幕張メッセ、2012 年 5 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野口 克行 (NOGUCHI, Katsuyuki)

奈良女子大学研究院自然科学系・助教

研究者番号：20397839