

2012年度秋季大会スペシャル・セッション「大気微量気体 およびエアロゾルの同化とその気候研究への利用」報告

岩崎 俊 樹^{*1}・宮崎 和 幸^{*2}・関山 剛^{*3}・五藤 大 輔^{*4}
中島 映 至^{*5}・弓本 桂 也^{*6}・鵜野 伊津志^{*7}・塩谷 雅 人^{*8}

1. はじめに

大気環境の監視と予測及びその気候影響の理解に向けて、データ同化により大気微量気体やエアロゾルの濃度と発生・沈着フラックスを推定することは、重要な研究開発課題となってきた。化学輸送モデルの性能が向上したこと、衛星による大気微量成分観測が充実してきたこと、データ同化手法の開発が進んだことにより、大気微量成分のデータ同化はまさに時宜を得た課題である。本報告では、日本気象学会2012年度秋季大会中に開催したスペシャルセッション「大気微量気体およびエアロゾルの同化とその気候研究への利用」(2012年10月3日、北海道大学・学術交流会館にて)について報告する。

データ同化は初期条件を得るための技術として、とりわけ数値予報分野で発展してきた。基本的には、力学系が既知の場合に、限られた観測データを統合し、実況値を推定する技術である。そこで培われた技術は実況監視と予測の問題に幅広く応用が可能である。4次元変分法やアンサンブルカルマンフィルタなどの優れたデータ同化手法が開発された(Kalnay *et al.* 2007)。とくに、アンサンブルカルマンフィルタが実用化され、力学系の詳細には踏み込まずシステム化で

きるようになり、予測式の複雑な大気微量成分のデータ同化にも容易に取り組めるようになった。

データ同化では、様々な観測データの情報を補完することにより、推定の精度を高める。しかし、単純に統合しただけでは、悪貨が良貨を駆逐する、という結果になりがちである。データ同化が成功するためには、観測データの種目ごとの丁寧な扱いが不可欠であり、本セッションの重要な課題の一つである。

大気化学のデータ同化においてはとりわけ以下の問題を考えておく必要がある。第1は拡散の問題である。化学輸送モデルの鉛直拡散の扱いは予報変数である大気微量成分の混合比に大きく影響する。しかし、輸送モデルにおける拡散の問題はまだ不確実性が大きく、データ同化においてもこの不確実性に配慮した扱いが必要である。第2は、微量成分の中には光化学反応時定数の短い成分や日変化の大きい成分も含まれることである。この場合は、推定値の誤差は初期条件よりも反応係数や他の成分の誤差に起因することも多い。第3は、予報変数の数の多さである。各微量成分濃度の多くは予報変数として扱われる。各成分間の化学的な結合は多様であり、データ同化時に相関をあまり多く考慮するとシステムは不安定となる。第4は、観測の特性である。微量成分について様々な衛星観測データが得られるようになったが、データの時空間密度、空間代表性、感度、誤差特性など詳細に検討し、データ同化に反映する必要がある。(岩崎俊樹)

2. 対流圏微量気体

国内の大規模プロジェクトに関する2件の講演の後に、個別ターゲットの詳細に関する講演が行われた。まず、対流圏微量気体について3件の講演があった。笠井康子(NICT)は、日本国内で計画を進めてい

^{*1} Toshiaki IWASAKI, 東北大学大学院理学研究科。

^{*2} (連絡責任著者) Kazuyuki MIYAZAKI, 海洋研究開発機構(神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)。

E-mail: kmiyazaki@jamstec.go.jp

^{*3} Tsuyoshi T. SEKIYAMA, 気象庁気象研究所。

^{*4} Daisuke GOTO, 国立環境研究所。

^{*5} Teruyuki NAKAJIMA, 東京大学大気海洋研究所。

^{*6} Keiya YUMIMOTO, 気象庁気象研究所。

^{*7} Itsushi UNO, 九州大学応用力学研究所。

^{*8} Masato SHIOTANI, 京都大学生存圏研究所。

© 2013 日本気象学会

る APOLLO 衛星観測の目的と期待される成果を紹介した。本観測計画では、国際宇宙ステーション (ISS) からオゾンとその前駆気体を観測することを提案している。ISS の低軌道観測の利点を活かすことで、大気汚染物質の濃度と排出源の日変化に関する情報を高分解能に取得できる可能性がある。本講演では観測システムシミュレーション実験の有用性にも言及しており、観測-モデル研究者の積極的な連携の必要性を強く感じた。

板橋 秀一 (九州大学) および宮崎和幸 (JAMSTEC) は、オゾンや窒素酸化物など大気汚染に関連するモデル-観測統合について講演した。板橋は、HDDM (Itahashi *et al.* 2012) と Green 関数最適法 (弓本・鶴野 2012) を融合させ、化学輸送モデルによる東アジア域での夏期オゾン濃度の過大評価を引き起こす要因を調査することを提案した。モデルと観測の不一致を引き起こす原因は越境汚染過程や局所的な化学反応など多岐に及ぶ。観測とモデル情報を統合利用する本解析手法では、複雑なモデル誤差要因を切り分けて評価可能であり、モデル誤差要因の特定および現象の理解に役立つものと期待できる。宮崎は、様々な衛星搭載センサにより取得された複数の化学種濃度の観測データをデータ同化により結合利用することで対流圏大気環境の統合解析が可能となることを示した (Miyazaki *et al.* 2012)。

APOLLO をはじめ様々な衛星観測計画が進められている状況の中、多種多様な観測データとモデルを適切に統合利用するデータ同化研究は今後ますます重要なものとなる。欧米の研究機関では関連研究が推進されているが、日本国内においても同研究分野の更なる活性化が望まれる。(宮崎和幸)

3. 成層圏微量気体

成層圏微量気体の衛星観測と数値モデリングは数十年の歴史を持ち、その両者を融合させる成層圏データ同化にも多くの先駆的研究が存在する。当セッションではその最先端を行く研究が2件発表された。また、データ同化に密接に関わる衛星観測の高度化について1件の発表があった。大気微量成分の数値モデリング精度について詳細に調べた理論的研究についても1件報告された。以下、それらを順に述べる。

中村 哲 (極地研/北大) は日本国内3研究機関で開発された4種類のモデルに対して同一のデータ同化スキーム (LETKF) を適用し、同一の観測値 (水平

風・気温・成層圏オゾン濃度・オゾン全量) を同化することによってマルチモデル相互比較を行った (Nakamura *et al.* 2013)。それによって各モデルが持つバイアス特性が解析や予報にどのような影響を持つのか評価することに成功した。大気微量成分データ同化システムについての定量的な相互比較は非常にチャレンジングでオリジナルな仕事と言える。

出牛 真 (気象研) は気象研化学気候モデルと LETKF を組み合わせてハインドキャスト実験を試みた。用いた観測値は衛星搭載 MLS による3次元オゾン濃度と OMI-TOMS で得られたオゾン全量である。気象庁での現業利用を目指したこの実験で、データ同化による初期値の改善がオゾン全量予測精度を有意に向上させることが示された。

塩谷雅人 (京大生存研) は2009年から約半年間 ISS に搭載された超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES) による成層圏微量成分の高感度観測について報告した。ISS の軌道は太陽非同期であるため、SMILES の観測する地方時は日々変化してゆく。このような観測はデータ同化によって数値モデルと融合させることによってさらに情報としての価値が高まると期待できるだろう。

榎本 剛 (京大防災研) は2次元移流モデルの混合特性について調べた。移流スキームの違いは計算結果に大きな違いをもたらすことが示され、大気微量成分シミュレーションを行う上での重要な示唆が得られた。シミュレーション精度の向上は観測の充実と同様にデータ同化を進展させる必須の条件である。

4. エアロゾル

エアロゾルに関しては6件の発表が行われた。五藤大輔 (環境研)、打田純也および Dai (東京大学) は SALS (大気環境物質のためのシームレス同化システム構築とその応用) プロジェクトで開発中の NICAM-SPRINTARS についての発表を行った。NICAM-SPRINTARS は全球雲解像モデル NICAM に全球エアロゾルモデル SPRINTARS を組み込んだものである。五藤は NICAM-SPRINTARS の概要を説明し、10 km の空間分解能で積分した結果と関東地方を中心に行われた集中観測 (FAMIKA) との詳細な比較を行った。打田は全球から特定の領域を切り出して計算を行う Diamond NICAM (領域版 NICAM) の開発状況と水平解像度3.5 km での計算例の紹介を行った。Dai は NICAM-SPRINTARS に

アンサンブルカルマンフィルタを導入し、衛星観測で得られたエアロゾル光学的厚さの同化結果を紹介した。特に、FAMIKA との比較は、大気汚染常時監視測定局（各自治体で行われている常時観測）のネットワークを利用した詳細な同化システムと予報システムの可能性を予感させた。また、Diamond NICAM は計算時間の短縮と高解像度での高い計算安定性を実現しており、アンサンブル計算やモデルの反復積分など計算コストが大きいデータ同化研究においてなくてはならないものであろう。

関山 剛（気象研）はアンサンブルカルマンフィルタを導入した全球エアロゾルモデル（MASINGAR）を用いた同化予報を含む多岐にわたるアプリケーション例を紹介した。特に、衛星搭載ライダー（CALIOP/CALIPSO）の同化にいち早く取り組んでおり、減衰後方散乱を用いた黄砂の排出量逆推定や将来の衛星観測計画を見据えた観測システムシミュレーション実験（OSSE）の成功例が示された（Sekiyama *et al.* 2012）。MASINGAR を用いた同化システムは2015年を目標に予報現実化が予定されており、その成果も期待される。

Chen（九州大学）はアンサンブルカルマンフィルタをMIROC-SPRINTARSの予報システムに適用し（Yumimoto and Takemura 2011）、アジア起源の越境大気汚染に対して、同化による予測精度向上の可能性を、日本の地上で観測されたPM_{2.5}のデータと比較することで検討した。

弓本桂也（気象研）は、4次元変分法をMIROC-SPRINTARSに導入し、4年間に渡る黄砂発生量の逆推定を3ヶ月という長い同化窓を用いて実現させた。MIROC-SPRINTARSはアンサンブルカルマンフィルタ、4次元変分法と2つの同化システムを取得したことになり、両者の結果の比較、組み合わせた同化手法の開発などが期待される。

IPCC第4次報告書（IPCC 2007）に見られる通り、エアロゾルの分布・微物理・気候影響への理解はまだ十分とは言えない。データ同化が気象予報や気象再解析データで大きな役割を果たしているように、エアロゾルのシミュレーションにおいてもその期待は非常に大きい。データ同化は強力なツールであるが、それと同時にモデルの緻密化（高精度化、高解像度化）、観測データの拡充（衛星データや集中観測）を含める三位一体となった研究の推進が重要であろう。

（弓本桂也）

5. 温室効果気体

当セッションの最後として、温室効果気体について5件の講演があった。まず二酸化炭素に関しては、Patra（JAMSTEC）が、二酸化炭素（CO₂）の輸送モデルの国際相互比較プロジェクトであるTransComの解析結果を紹介した。不確実性の高いCO₂のフラックス量を逆推定によって見積もることで、CO₂濃度の年々変動をうまく再現できることを示した（Patra *et al.* 2011）。そして更なる精度向上のためには、領域毎にフラックスのより良い見積もりがポイントとなることを示した。

次に、CO₂の逆推定をする際に必要な観測データの検証・補正に関する講演が3件続いた。眞木貴史（気象研）は、GOSAT衛星を含んだ複数の衛星観測から得られるCO₂濃度のバイアスを補正する方法を紹介した。衛星から得られるCO₂濃度バイアスは地上観測よりも大きい広域的なデータが得られるので、バイアス補正は非常に重要な研究であり、他のCO₂研究にも役立つことが期待される。高木宏志（環境研）は、GOSAT衛星のL1BスペクトルデータからCO₂のフラックス量を推定する際に含まれる様々な不確実性に注目し、5つの異なるプロダクト相互比較を行うことでCO₂濃度推定値のばらつきの結果を発表した。このようなプロダクト相互比較はユーザーの視点に立っても非常に意義のある研究成果である。今須良一（東大気海洋研）は、関東地方におけるCO₂のフラックス量を逆推定するために必要な観測データ群（特にGOSATによる集中観測結果）の解析結果を中心に発表を行った。空間不均一性の高い都市域におけるフラックス推定の精度は、逆推定に用いるための信頼性の高い観測データと高精度のモデル（フォワード計算・インバース解析）に依存するため、今後も継続的な発展が望まれる。

最後に、CO₂に次ぐ主要な温室効果気体であるメタンに関する研究が、林田佐智子（奈良女子大）から紹介された。東南アジアのようなバイオマス燃焼が多い場所ではバイオマス燃焼はメタンの重要な発生源であるのだが、湿地帯・水田からの発生と分離しにくいために発生量の推定が難しかった。そこで、複数の衛星結果を用いることでバイオマス燃焼起源のメタンフラックスを推定する試みがなされた。今後は、輸送モデルと組み合わせることで、より高精度のメタンフラックスが見積もられると期待される。（五藤大輔）

6. おわりに

衛星観測の黄金期という言葉が使われて久しい。最近では、大気微量気体とエアロゾルに関する全球規模の衛星データが豊富に得られるようになった。また、衛星観測の検証の必要性から NASA/AERONET などの地上観測網も確立し、精度の高いデータが整備されてきた。この間、大気物質に関する化学・輸送モデリングも大幅に進歩し、観測データに同化されたモデル場が作られるようになった。まさに、大気物質の観測とモデリングも、黎明期から黄金期に入ろうとしている。

このような大気科学の進展にとって重要な背景には、第3回世界気候会議（2009年）や WCRP 公開科学会議（2011年）などを通して明らかになってきたように、気候変動の適応策や軽減策に役立つ情報発信に対する社会からの期待の増大がある（中島 2011）。本セッションで発表された研究成果は世界に先駆けたものが多く、これらの社会応用のためにおおいに役立つものと考えられる。今後必要なことは、国内外の研究コミュニティおよび関係機関と協力して、応用に耐えられる精度の向上を図ることと、安定なデータ供給システムを構築することである。この観点で見ると今回のセッションの発表は若手研究者が中心になるものであり、必要な研究を担う次世代が育っているという印象を得た。（中島映至）

略語一覧

AERONET : Aerosol Robotic Network エアロゾル地上観測網
 APOLLO : Air Pollution Observing Mission 大気汚染観測ミッション
 CALIOP : Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization CALIPSO に搭載されたライダー
 CALIPSO : The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation NASA A-Train を構成する衛星の一つ、雲・エアロゾル観測衛星
 FAMIKA : Fine Aerosol Measurement and Modeling in Kanto Area 関東域における微小粒子観測とモデリング
 GOSAT : Greenhouse Gases Observing Satellite 温室効果ガス観測技術衛星
 HDDM : Higher-order Decoupled Direct Method
 ISS : International Space Station 国際宇宙ステーション
 LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ

MASINGAR : Model of Aerosol Species in the Global Atmosphere 気象庁/気象研究所開発の全球エアロゾルモデル

MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate 東京大学, 国立環境研究所, 海洋開発研究機構が開発した大気海洋結合モデル

MLS : Microwave Limb Sounder

NICAM : Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model 東京大学, 海洋研究開発機構, 理化学研究所で開発されている全球雲システム解像正二十面体モデル

OMI-TOMS : Ozone Monitoring Instrument - Total Ozone Mapping Spectrometer

OSSE : Observing System Simulation Experiment 観測システムシミュレーション実験

SALSA : Development of Seamless Chemical Assimilation System and its Application for Atmospheric Environmental Materials 大気環境物質のためのシームレス同化システム構築とその応用

SMILES : Superconducting Submillimeter-Wave Limb Emission Sounder 超伝導サブミリ波リム放射サウンダ

SPRINTARS : Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species 全球エアロゾルモデル

参考文献

IPCC, 2007 : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. S. Solomon *et al.* eds, Cambridge University Press, 1056pp.
 Itahashi, S., I. Uno and S.-T. Kim, 2012 : Source contributions of sulfate aerosol over East Asia estimated by CMAQ-DDM. *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 6733-6741.
 Kalnay, E., H. Li, T. Miyoshi, S.-C. Yang and J. Ballabrera, 2007 : 4-D-Var or ensemble Kalman filter? *Tellus*, **59A**, 758-773.
 Miyazaki, K., H. J. Eskes, K. Sudo, M. Takigawa, M. van Weele and K. F. Boersma, 2012 : Simultaneous assimilation of satellite NO₂, O₃, CO, and HNO₃ data for the analysis of tropospheric chemical composition and emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 9545-9579.
 中島映至, 2011 : 世界気候研究計画 (WCRP) 公開科学会議の報告と所感. *天気*, **58**, 1087-1089.
 Nakamura, T., H. Akiyoshi, M. Deushi, K. Miyazaki, C. Kobayashi, K. Shibata and T. Iwasaki, 2013 : A multi-model comparison of stratospheric ozone data assimilation based on an ensemble Kalman filter approach. *J. Geophys. Res.*, in revision.
 Patra, P. K., Y. Niwa, T. J. Schuck, C. A. M. Brenninkmeijer, T. Machida, H. Matsueda and Y. Sawa, 2011 : Carbon balance of South Asia constrained by

- passenger aircraft CO₂ measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 4163–4175.
- Sekiyama, T. T., T. Y. Tanaka and T. Miyoshi, 2012 : A simulation study of the ensemble-based data assimilation of satellite-borne lidar aerosol observations. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, **5**, 1877–1947.
- Yumimoto, K. and T. Takemura, 2011 : Direct radiative effect of aerosols estimated using ensemble-based data assimilation in a global aerosol climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L21802, doi:10.1029/2011GL049258.
- 弓本桂也, 鶴野伊津志, 2012 : グリーン関数法を用いた一酸化炭素排出量の長期間逆推定. *大気環境学会誌*, **47**, 162–172.
-