

地球全体の大気状態を知るための研究

○石橋 俊之(気象観測研究部)

1. はじめに

地球全体(全球)の大気状態を知ることは、大気のカオス性により科学的な難問です。つまり、ある時刻の大気状態推定の誤差が微小であっても、数日後には低気圧の位置が100kmずれるような大きな誤差に成長するため、気象予測に十分な精度で大気状態を推定するには、膨大な観測データ(10⁶個程度)と精緻な数値大気モデル予測(10⁹次元程度)、及びそれらの不確実性を確率として記述した量(確率密度関数(Probability Density Function: PDFと呼ばれます)を用いて大自由度系の逆問題(結果から原因を予測する問題)を解く必要があるためです。大気状態推定は、大気科学、統計数理、計算科学にまたがる学際的な科学分野です。

全球大気の状態推定は上記のようにそれ自体が科学的なテーマであると同時に、大気科学研究に必要な基本的な情報(大気科学の基盤情報)であり、社会活動に必要な基礎情報(社会基盤情報)の構築にも不可欠です。例えば、現在や過去の気象や気候の研究、将来気候予測のためのモデル構築や検証、数値天気予報の初期値、日々の天気予報や大雨や暴風の予測といった防災情報、近年急速に発展している機械学習による数値大気予測モデルの構築のいずれにおいても全球大気状態推定は不可欠です。

このように全球大気の状態推定の研究は重要なものですが、「静かな進化」(Bauer et al. 2015)と評されるように、その重要性は十分認識されていないかもしれません。本発表では全球大気状態推定を基礎から最新研究まで紹介します。最新の研究成果として全データのPDFを新たに客観推定して精緻化し、これを用いて状態推定することで、非常に高精度な大気状態推定が可能になることを紹介します。

2. 大気状態を知る方法

はじめに、大気状態とは何でしょうか？大気の物理的状態を決めるのに必要な変数は、気温、水蒸気量、3次元風速、地表面気圧、雲量等です。大気は流体ですが、大気を十分細かい格子で区切って全格子点でこれらの物理量がわかれば十分な精度で全球の大気状態を知ったこととなります。大気では、雨粒から惑星スケールの波まで様々な時空間スケールの現象が切れ目なく複雑に相互作用しています。例えば天気をつくる波は2週間程度で地球を一周します。このため例えば日本の天気予測をしたい場合でも、全球の大気状態を知る

必要があります。

上述の物理量について我々が持っている情報は、観測データ(ラジオゾンデや衛星観測データ等)と数値気象モデルによる予測結果です。しかしこれらの情報はすべて誤差をもっています。データ同化はこれらの曖昧な情報を統合して無矛盾に状態推定を行うことを可能にする枠組みです。理論的な基礎は以下の一つの式(ベイズの定理と呼ばれます)です。

$$P(x|z) = \frac{P(z|x)P(x)}{P(z)}$$

ここで、 x は真の大気状態、 z は我々がもつ大気に関する情報(観測や予測値)、 $P(b|a)$ は a が発生しているときに b が生ずる確率を表すPDFです。大気状態推定とは、この式の左辺の $P(x|z)$ を推定することです。そのためには右辺の量が必要ですが、実はこれらは理論から一意に決まらない量です。このためこれらを精度良く推定することが、データ同化による状態推定の主な研究テーマとなっています。PDFの形は未知ですが、誤差の一般的な性質により平均値にピークをもつ山形の分布(正規分布またはガウス分布と呼ばれます)で良く近似できることが数学的に証明されており(中心極限定理と呼ばれます)、実際のデータでこれが確認できます。したがってガウス分布で近似すれば大気状態推定が可能となります。

3. 新しい全球大気状態推定

PDFはガウス分布で近似できることがわかりました。次の問題はどのようなガウス分布か知ることです。ガウス分布はモデルの自由度や観測データの数の2乗個程度のパラメータ(誤差共分散行列, Error Covariance Matrix: ECMと呼ばれます)を与えることで形が完全に決まります。本研究では、従来よりも高精度にECMを推定することで、全球の大気状態の推定精度や予測精度を大幅に向上させます。そのためにはまず従来の手法の問題点を見ておきましょう。これまでの研究や現業システムでは、ECMは試行錯誤(経験的調整と呼ばれます)で値が決められてきました。例えば観測のECMの場合、観測と予測誤差の和はデータから推定できるため、これを初期推定値としてデータ同化を行って予測精度を評価し、次に少し値を変えて予測精度を評価することを繰り返し、もっとも予測誤差が小さかった値を選びます。これを観測の種類ごとに行います。この方法は非常に多くの開発コストを要する

一方で、真のECMIに近づく保証はなく、得られたECMの理論的妥当性が低いことが問題です。では、ECMの推定精度を良くするにはどうしたら良いでしょうか？そのためには、データ同化の理論を最大限に利用してすべてのデータのECMを推定します。以下で詳しく見てみましょう。

4. PDFの客観推定による高精度な大気状態推定

データ同化の理論に基づいたECMの推定手法として、Desroziers et al. (2005)やFisher (2003)の推定手法があります。これらの手法は前述のベイズの定理から導出される様々な関係式を駆使してECMを推定します。ただし、これらの手法にはいくつかの仮定が含まれており、実際のデータでどの程度成り立つかは未知です。既存研究では特定のデータだけについて適用が試行されてきましたが、PDFは全データの関係を記述するものであるため、すべての観測と予測データについて客観推定を行う必要があります。本研究はこれを初めて行ったものです (Ishibashi 2020, 2024)。推定の結果を第1図に示します。観測データの誤差は多くのデータで半分以下、データ間には従来は知られていなかった大きな相関があることがわかります。つまり、新しく推定されたECMは従来のもとは全く異なります。客観推定したECMでデータ同化することでより多くの情報が適切に解析に反映され、高精度な解析、予測が実現されることが期待できます。第2図は客観推定したECMによる予報精度の改善を示しており、概ねすべての物理要素、領域、予報時間で顕著に予報精度が改善しています。改善の大きさは過去30年程度の同化研究の中でも最も大きいものの一つです。これと整合的に、台風やハリケーンの進路予報精度でも最大で38%程度の改善が見られます (第3図)。

5. まとめ

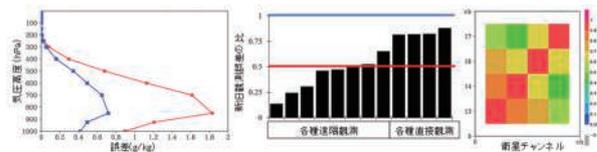
全球の大気状態を知るための研究は、大気のカオス性のために難しい科学的問題です。それはまた科学的及び社会基盤情報として不可欠です。大気状態の推定は、観測やモデル予測等の曖昧さを持った膨大な情報をベイズの定理に基づくデータ同化で統合することで可能となります。本研究ではすべてのデータのECMをデータ同化の理論に基づいて客観推定することで、大気状態推定の精度が顕著に向上することを示しました。発表では関連研究についても適宜紹介します。

謝辞

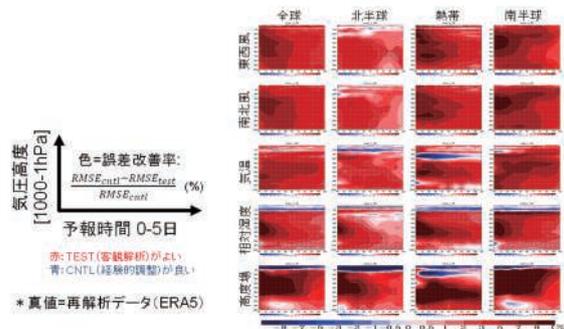
JSPS 科研費 17K05658, 22K03726 の助成に感謝します。

参考文献

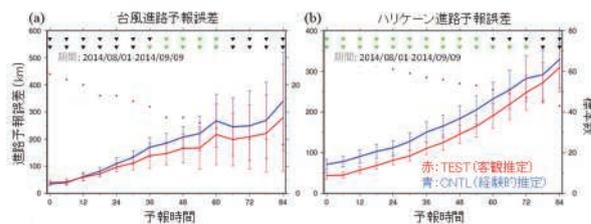
- (1) Bauer, P., et al., 2015: The quiet revolution of num



第 1 図: ECM の客観推定の結果。左から右に、予報誤差 (赤: 従来、青: 新)、観測誤差 (新/従来)、観測誤差の相関構造 (従来手法では考慮されない)。



第 2 図: 客観推定した ECM による予報精度の改善。従来手法に対して改善が赤、改悪が青。



第 3 図: 台風やハリケーンの進路予報の改善。赤が新手法、青が従来手法。

erical weather prediction. *Nature*, **525**, 47–55, <https://doi.org/10.1038/nature14956>.

- (2) Fisher, M., 2003: Background error covariance modeling. *Proc. ECMWF Seminar*, 45–64, <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2003/9404-backgr-ground-error-covariance-modelling.pdf>.
- (3) Desroziers, G., et al., 2005: Diagnosis of observation, background and analysis–error statistics in observation space. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **131**: 3385–3396. <https://doi.org/10.1256/qj.05.108>
- (4) Ishibashi, T., 2020: Improvement of Accuracy of Global Numerical Weather Prediction Using Refined Error Covariance Matrices. *Mon. Wea. Rev.*, **148**, 2623–2643, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0269.1>.
- (5) Ishibashi, T., 2024: Global atmospheric state analysis using objective Gaussian probability density functions. *Sci Rep* **14**, 22275. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71849-7>