

混合分布モデルとデータ同化

Finite mixture models and data assimilation

モデリング研究系 上野 玄太 (Genta Ueno)

1. 混合分布モデルを用いたプラズマデータ解析

超高層物理学を専攻した大学院時から継続している研究課題である。宇宙空間のプラズマの速度分布は正規分布から離れた形状をとることが多く、複数のピークを持ったり分散の異なる分布の重ね合わせが見られたりする場合が多い。そのような複雑な分布の理解は、地上を優雅に照らすオーロラ現象のメカニズムの理解につながる。プラズマの速度分布を詳細に観測できるようになったのは、1992年に日米共同で打ち上げられた人工衛星ジオテイルが最初であり、現在に至るまで12秒ごとに速度分布データを取得している。

Ueno et al. (2001) は、プラズマ速度分布データに対して正規混合分布モデルを当てはめ、複数の成分に分離を可能としたものである。分離のために推定した各成分のパラメータ (混合比、平均ベクトル、分散共分散行列) は、プラズマの密度が急変する境界層と呼ばれる領域のデータ解析における基礎的な物理量としてそのまま利用できる。このモデルの適用により、25年間余りに取得・蓄積されている大量の速度分布データを対象にした統計解析の道を開いた。この手法により、磁気圏境界層での応用研究を進めた (Lui et al., 2005; Nishino et al., 2007a, d, c, b; Nakai and Ueno, 2011)。かつては高温プラズマに埋もれて取り扱いが困難であった低温プラズマの解析を実施したものである。このモデルはノイズ除去にも応用でき、電子観測データからの光電子成分の除去への応用が Ueno et al. (2001) にある。このモデルはもともとジオテイル衛星に搭載されたプラズマ観測器に対して開発したものであるが、その後、2007年にNASAにより打ち上げられた人工衛星テミスによるプラズマ観測データへ展開している (Chaston et al., 2013)。

応用研究と並行して、新しい方法論の提案を行った。中村 他 (2005) は、プラズマ観測装置に検出不可能な速度があることに動機を得て、データ欠損領域が存在する場合の混合分布モデルを提案したものである。

2. データ同化の方法論への展開

2005年度からは、大気海洋結合モデルを軸としたデータ同化手法の研究を集中的に進めた。Ueno et al. (2007) は大気海洋結合モデルにアンサンブルデータ同化手法を用いた初の研究である。つづいて、推定精度を上げることを目的として、システムノイズ・観測ノイズのパラメータの最適化を行うこととした。状態ベクトルの確率分布をアンサンブルによる近似表現すると、時系列モデルの尤度関数の表式が混合分布モデルのそれと同等の形になるところが面白い。この表式の類似性に注目することで、時系列モデルにおいてもEMアルゴリズムを導出が可能であり、特に観測ノイズの分散共分散行列の推定に有効である (Ueno and Nakamura, 2014)。最尤法によるパラメータ推定を大気海洋結合モデルに対して行った結果、予測精度の向上を実現すると同時に、データ同化による状態推定の限界を明らかにした (Ueno et al., 2010)。限界の一つは、静穏時の大気海洋の状態とエルニーニョなど変動時の状態で、結合モデルによる再現

性に違いが見られたことである。その状況を解決するため、パラメータに時変性を許し、観測状況に適応的にフィルタのゲインを推定するベイズ法を開発した(Ueno and Nakamura, 2016; Nakabayashi and Ueno, 2017)。

参 考 文 献

- Chaston, C. C., Yao, Y., Lin, N., Salem, C. and Ueno, G. (2013). Ion heating by broadband electromagnetic waves in the magnetosheath and across the magnetopause, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **118**, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/jgra.50506>.
- Lui, A. T. Y., Hori, T., Ueno, G. and Mukai, T. (2005). Plasma transport from multicomponent approach, *Geophysical Research Letters*, **32**, 1, DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL021891>.
- Nakabayashi, A. and Ueno, G. (2017). An extension of the ensemble Kalman Filter for estimating the observation error covariance matrix based on the variational Bayes's Method, *Monthly Weather Review*, **145**, 199–213, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-16-0139.1>.
- Nakai, H. and Ueno, G. (2011). Plasma structures of Kelvin-Helmholtz billows at the dusk-side flank of the magnetotail, *Journal of Geophysical Research*, **116**, DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2010JA016286>.
- Nishino, M. N., Fujimoto, M., Terasawa, T., Ueno, G., Maezawa, K., Mukai, T. and Saito, Y. (2007a). Geotail observations of temperature anisotropy of the two-component protons in the dusk plasma sheet, *Annales Geophysicae*, **25**, 769–777.
- Nishino, M. N., Fujimoto, M., Ueno, G., Maezawa, K., Mukai, T. and Saito, Y. (2007b). Geotail observations of two-component protons in the midnight plasma sheet, *Annales Geophysicae*, **25**, 2229–2245.
- Nishino, M. N., Fujimoto, M., Ueno, G., Mukai, T. and Saito, Y. (2007c). Origin of temperature anisotropies in the cold plasma sheet: Geotail observations around the Kelvin-Helmholtz vortices, *Annales Geophysicae*, **25**, 2069–2086.
- Nishino, M. N., Fujimoto, M., Terasawa, T., Ueno, G., Mukai, T. and Saito, Y. (2007d). Temperature anisotropies of electrons and two-component protons in the dusk plasma sheet, *Annales Geophysicae*, **25**, 1417–1432.
- Ueno, G., Nakamura, N. and Higuchi, T. (2001). Separation of photoelectrons via multivariate Maxwellian mixture model, *Discovery Science, Proceedings of the 4th International Conference, DS 2001* (eds. K. P. Jantke and A. Shinohara), Lecture Notes in Computer Science, **2226**, 470–475, Springer, Washington, D.C. 11.
- Ueno, G. and Nakamura, N. (2014). Iterative algorithm for maximum-likelihood estimation of the observation-error covariance matrix for ensemble-based filters, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **140**, 295–315, 1, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.2134>.
- Ueno, G. and Nakamura, N. (2016). Bayesian estimation of the observation-error covariance matrix in ensemble-based filters, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **142**, 2055–2080.
- Ueno, G., Nakamura, N., Higuchi, T., Tsuchiya, T., Machida, S., Araki, T., Saito, Y. and Mukai, T. (2001). Application of multivariate Maxwellian mixture model to plasma velocity distribution function, *Journal of Geophysical Research*, **106**, 25655–25672, 1.
- Ueno, G., Higuchi, T., Kagimoto, T. and Hirose, N. (2007). Application of the ensemble Kalman filter and smoother to a coupled atmosphere-ocean model, *SOLA*, **3** (1), 5–8, 1.
- Ueno, G., Higuchi, T., Kagimoto, T. and Hirose, N. (2010). Maximum likelihood estimation of error covariances in ensemble-based filters and its application to a coupled atmosphere-ocean model, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 1316–1343, 7, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.654>.
- 中村永友, 上野玄太, 樋口知之, 小西貞則 (2005). 欠損混合分布モデルとその応用, *応用統計学*, **34**, 57–73.