

※ プログラムから一部変更があります。

データ同化の基礎・適用事例とその課題^{*}

中村 和幸 (Kazuyuki Nakamura)

明治大学 総合数理学部

JST さきがけ

データ同化とは、コンピュータシミュレーションと観測データを融合して、各々単独では得られない情報を得るための手法であり、気象学・海洋学の分野において発展してきた手法である(中村他, 2005)。気象現象においては、ローレンツによる決定論的カオスの研究で示されたいわゆる「バタフライ効果」からもわかる通り、気象現象を模擬したコンピュータシミュレーションによる長期予測は事実上不可能である。その一方、気象に関しては、物理プロセスの数理解モデル化が高度になされており、コンピュータによる予測計算のための「適切な初期値」を設定することにより、短期的な予測に関しては高い精度を持つことが可能である。そこで、現実の情報である観測データを適宜気象モデルに取り込むデータ同化を行うことにより、その時々で適切な初期値を再構成することで、精度の高い予報が可能となる。この仕組みは現業の天気予報においても使われている。

データ同化手法はさまざまなものがあるが、近年使われるデータ同化手法は、数理的な観点からは、状態空間モデルにおける状態推定の問題と捉えることができる。状態空間モデルは、時間発展する「システムモデル」と、観測プロセスに対応する「観測モデル」から構成されるもので、ベイズ統計モデルの一種と見ることができる。「システムモデル」は、状態ベクトルという時間発展する確率変数を持ち、データ同化においては、コンピュータシミュレーションにおけるシミュレーション変数をもとに構成される。「観測モデル」は、各時点での観測に対応する観測ベクトルとその時点での状態ベクトルを対応付けるモデルである。観測ベクトルが与えられたという条件のもとでの、状態ベクトルの条件付き確率やそれに基づく推定値を与える問題である。このような推定を与えるアルゴリズムは、データ同化分野も含め様々な分野で開発が進んでいる分野である。

このように、データ同化手法については、少なくともメタモデルとその推論プロセスは数理的にはクリアである。そのため、気象分野以外であっても、コンピュータシミュレーションが構成され、計測データがあるようなシステムであれば、適用は理論的には可能である。実際に、適用分野は、気象学・海洋学の分野だけでなく、生命科学(Nakamura *et al.* 2009)、地盤工学(Shuku *et al.* 2012)、材料科学(Ito *et al.* 2017)といった分野にまで拡大してきている。

その一方、気象だけに限らずさまざまな分野においてデータ同化を適用するという観点からは、常に課題が存在する。例えば、システムの時間発展や観測プロセスにおける「不確かさ」をどのように設定したらよいか、システムモデルを変えたときと観測を増やした時の精度向上の比較はどう考えるべきであるか、どのような推定アルゴリズムを用いるのが「適切」であるか、などが具体的な問題として挙げられる。このような点は、未知のプロセスが存在するなどの純粋な科学的制約だけでなく、実際上の計算コストなどによる制約による近似をどこまで許容するかといった、研究プロセス上の制約も関係する複雑な問題である。

本発表では、まず、データ同化の基礎的な概念と定式化について説明する。次に、いくつかの適用事例について、上記に示した課題の観点にも適宜触れながら説明する。さらに、システム同定、機械学習、Uncertainty Quantification などの周辺分野との関係について触れ、データ同化の適用における課題とその解決に向けて進めている研究について紹介する。

謝辞

本研究は、JST、さきがけ、JPMJPR1774 の支援を受けたものである。

参考文献

Ito, S., H. Nagao, T. Kasuya, and J. Inoue "Grain growth prediction based on data assimilation by implementing 4DVar on multi-phase-field model," *Science and Technology of Advanced Materials*, 18(1), 857-869, doi:10.1080/14686996.2017.1378921, 2017.

中村和幸, 上野玄太, 樋口知之, 「データ同化：その概念と計算アルゴリズム」 *統計数理*, 53(2), 211-229, 2005.

K. Nakamura, R. Yoshida, M. Nagasaki, S. Miyano, and T. Higuchi, "Parameter estimation of in silico biological pathways with particle filtering towards a petascale computing," *The Proceedings of 14th Pacific Symposium on Biocomputing*, 227-238, 2009.

T. Shuku, A. Murakami, S. Nishimura, K. Fujisawa, and K. Nakamura, "Parameter identification for Cam-clay model in partially loading tests using the particle filter," *Soils and Foundations*, 52(2), 279-298, 2012.