

マルチモデルアンサンブル

私たちが日頃から目にする天気予報は数値予報で行われており、数値モデル（以下、モデル）と観測データを元にした初期値が必要となる。ところが、大気や海洋などの連続体を離散化するモデルでは、離散化により直接表現できない積雲対流などの小さいスケールの現象をより大きなスケールの現象でパラメタライズ（近似）する必要があるため、実際の気象や海洋の運動を完全に表現できるわけではない。また、観測データにはさまざまな要因による観測誤差があり、初期値を作成するデータ同化にも空間的に不均一・不均質な観測データと不完全なモデルの結果に由来する（解析）誤差が含まれてしまう。大気にはカオスの性質があるため、これらモデルの不完全性や初期値の誤差（不確実性）は予測時間と共に増大し、天気予報を外す大きな原因となる。そのため、現業数値予報機関（以下、現業機関）は、モデルの精緻化や精度の良い初期値を作成することで予報精度を今日のレベルまで高めてきた。

さらに、大型計算機の急速な発展とともに、モデルの不完全性や初期値の不確実性を考慮した複数の予報からなるアンサンブル予報も1990年代前半から現業的に行われてきた。初期値の不確実性を考慮した複数の初期値を集合（アンサンブル）とする数値予報を初期値アンサンブルというのに対し、モデルの不完全性を前提とし複数のモデルの結果を集合とする数値予報をマルチモデルアンサンブルという。現業数値予報の観点からすれば現業機関単独で複数のモデルを開発・維持するのは容易ではないため、多くの現業機関は初期値アンサンブルのみを採用しているが、カナダ気象局では異なる物理過程（積雲対流パラメタリゼーションなど）を用いた“複数のモデル”を利用したマルチモデルアンサンブルもあわせて行われている（実際にはいくつかの物理過程を選択可能な1つのモデルとなっており、物理過程アンサンブルと呼ぶのがふさわしいが、広義には、物理過程アンサンブルはマルチモデル

アンサンブルの一種と解釈される）。前述の通り、現業機関単独でマルチモデルアンサンブルを実施するのは容易ではないが、他の現業機関のモデルの結果が手に入るのであれば（例えば、TIGGE (Bougeault *et al.* 2010), ENSEMBLES (Hewitt 2005) など）、現業機関単独であってもマルチモデルアンサンブルの敷居はずっと低くなる。実際、英国気象局では、TIGGEを用いたマルチモデルアンサンブルの結果を内部に試験的に提供しているそうである (Richard Swinbank 氏, 私信)。

アンサンブル予報の利用において、そのアンサンブル平均（決定論的予報を作る方法の一つ）を考慮することにより、個々の予報がもつモデルの不完全性や初期値の不確実性が相殺され、より確度の高い予報を得ることが可能になる（とはいえ、予報時間が長くなるにつれ、アンサンブル平均が表す場の物理的意味は薄れてくるので注意が必要である）。また、ある閾値（例えば、気温が平年値+2K）を超える予報（メンバー）を数えることで確率予報を提供したり、予報された天気図のクラスタリングを行うことで今後起こりうるシナリオを抽出することができる。マルチモデルアンサンブルが決定論的予報としても確率予報としても現業機関単独のアンサンブルより勝ることは多くの研究で示されており、各現業機関のアンサンブルのバイアス補正や各モデルの精度に応じた重み付けを行うことでより精度の高いマルチモデルアンサンブルになると言われている（例えば、Hagedorn 2010 ; Johnson and Swinbank 2009 ; Matsueda and Tanaka 2008）。また、初期値アンサンブルの一種として、各現業機関の初期値を交換して互いのモデルで積分を行うマルチアナリシス（多解析）アンサンブルも研究ベースで行われており、有効な方法の一つと言える（例えば、Matsueda *et al.* 2011 ; Mylne *et al.* 2002）。

マルチモデルアンサンブルは、短期・中期予報のみならず長期・季節予報から気候変動予測、温暖化予測にわたる、より時間スケールの長い予報・予測でも同様の方法で広く利用されている。時間スケールの長い

予報・予測では、短期・中期予報のようにある日の天気を予報・予測するというよりも、ある期間の平均的な場（例えば850 hPa 温度の季節平均場）やある期間に起こる異常気象（例えば、台風やブロッキング）の出現頻度などの予報・予測が主となる。これらの予報・予測では、海面水温、土壌水分の変化、温室効果ガスやエアロゾルの排出シナリオのような境界条件・外部強制力が支配的となる。そのため予報・予測の精度には、初期値の精度よりも、モデルの完全性が大きく影響するようになり、これが予報・予測の不確実性を把握する場面でマルチモデルアンサンブルがよく用いられる理由である。マルチモデルアンサンブルの有効性が中高緯度よりも熱帯でより顕著にあらわれることはDoblas-Reyes *et al.* (2000) により示されている。また、気候変動予測や温暖化予測は、外部強制力（温室効果ガスやエアロゾルの排出シナリオ等）に対する応答（シグナル）をみることであるが、気候システムは時折、外部強制力とは関係なく“気まぐれで”異常気象（ノイズ）を引き起こし、シグナルを不明瞭にすることがあるため、シグナルと内部変動によるノイズを分離することが重要である。そのため、マルチモデルアンサンブル（あるいは初期値アンサンブル）を利用する（例えば、アンサンブル平均を考える）ことによって、ノイズを相殺し、より確からしいシグナルを抽出することが可能になる。

マルチモデルアンサンブルも含めたアンサンブル予報・予測の利用により、より精度のよい予報・予測を得ることが可能である。しかしながら、本来の予報・予測精度の向上という観点からすると、アンサンブル予報・予測の利用はあくまでも現状の数値予報技術で最良の結果を得るために有効な過渡的手段に過ぎない。モデルやデータ同化の開発者達の日々のたゆまぬ努力が、予報・予測精度の向上に最も本質的であることは言うまでもない。

略語一覧

- ENSEMBLES：欧州諸国による季節予報から温暖化予測までを対象としたアンサンブル手法によるプロジェクト
 THORPEX：The Observing system Research and Predictability EXperiment 観測システム研究・予測可能性実験
 TIGGE：THORPEX Interactive Grand Global Ensemble THORPEX 双方向グランド全球アンサンブル

参考文献

- Bougeault, P. *et al.*, 2010 : The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble. Bull. Amer. Meteor. Soc., **91**, 1059-1072.
 Doblas-Reyes, F. J., M. Deque and J.-P. Piedelievre, 2000 : Multi-model spread and probabilistic seasonal forecasts in PROVOST. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **126**, 2069-2087.
 Hagedorn, R., 2010 : On the relative benefits of TIGGE multi-model forecasts and reforecast-calibrated EPS forecasts. ECMWF Newsletter, (124), 17-23.
 Hewitt, C. D., 2005 : The ENSEMBLES Project : Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts. EGGS newsletter, (13), 22-25.
 Johnson, C. and R. Swinbank, 2009 : Medium-range multimodel ensemble combination and calibration. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **135**, 777-794.
 Matsueda, M. and H. L. Tanaka, 2008 : Can MCGE outperform the ECMWF ensemble? SOLA, **4**, 77-80.
 Matsueda, M., M. Kyouda, Z. Toth, H. L. Tanaka and T. Tsuyuki, 2011 : Predictability of an atmospheric blocking event that occurred on 15 December 2005. Mon. Wea. Rev., **139**, 2455-2470.
 Mylne, K. R., R. E. Evans and R. T. Clark, 2002 : Multi-model multi-analysis ensembles in quasi-operational medium-range forecasting. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **128**, 361-384.

(海洋研究開発機構 松枝未遠)