

## 5 今後の展望

### 5.1 外国気象機関の状況<sup>1</sup>

2 週間気温予報は、気候リスクを抱える多くの分野での利用が期待される一方で、予測精度の向上、ユーザーのニーズに応じた情報の作成など、今後も改善を進めていく必要がある。当庁は 2018 年 10 月に「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」<sup>2</sup>を策定、公表した。これは国民の安全・安心を守り、活力ある社会を実現するための数値予報の技術開発目標や、その実現のための方策をまとめたもので、同年 8 月に交通政策審議会気象分科会により取りまとめられた提言「2030 年を見据えた気象業務のあり方」<sup>3</sup>を踏まえたものでもある。この中で、社会経済活動への貢献のため、気候リスクを低減し、生産性向上に資する数か月先までの予測精度を向上させることとしており、2 週間先までの暴風や大雪などの極端現象、1 か月先までの熱波や寒波に関する予測情報を 2030 年までに提供することが目標として挙げられている。本節では、次節以降で今後の展望について述べる前に、そのヒントとなるような外国気象機関の取り組みや提供されているプロダクトを概観する。

ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) では、10～15 日間先までの様々なアンサンブル予報プロダクト<sup>4</sup>を、主にヨーロッパ各国の気象機関向けに提供している (一部は世界気象機関 (WMO) 加盟国や有料で商用向けにも提供) (ECMWF, 2013)。プロダクトとしては、気圧や気温などの予報マップに加え、アンサンブルデータを用いた確率予測資料、特定の地点における日ごとの気温、降水量、風などを箱ひげ図により予測の幅も含めて表示したメテオグラム、熱波や大雨、暴風などの極端現象の発生確率分布と気候値的な発生確率分布の差を指数化した顕著予測指数 (EFI: Extreme Forecast Index; Lalaurette, 2002; 2003) などが含まれる。また、ウェブアプリケーション ecCharts を

利用すると、アンサンブル予測データを簡単に可視化するだけでなく、あるしきい値を満たす現象の発生確率分布を算出、表示することも可能で、利用者ごとの個別のニーズに応じたプロダクトを作成することができる。

2016 年に策定された ECMWF の 10 か年計画 (ECMWF, 2016) では、2025 年までの目標として、2 週間先までの熱波や大雨、暴風などの極端現象の予測、4 週間先までの極端現象をもたらすような大規模な循環場の変動の予測を挙げている。このため、アンサンブル予報モデルの高解像度化 (水平解像度 5km、現在は 15 日までの予測は 18km) に加え、地球システムモデルの精緻化を進めることとしている (既に 2013 年から 1 か月先までのアンサンブル予報にも大気海洋結合モデルを使用)。また、今後も世界の数値予報センターをリードしていくため、高性能の大型計算機の整備、優秀な人材の確保 (そのための採用方法、雇用条件、労働環境等の整備) も進めていくこととしている。

英国気象局 (UKMO) では、6 日間先までの雨、風、雪、霧、凍結等の現象のリスク情報を地図とコメントという形式で一般向けに提供している<sup>5</sup>。リスク情報は、現象によるインパクトの大きさ×発生確率として、黄色、橙、赤の 3 段階で表示される (第 5.1-1 図)。黄色は影響の小さい現象が発生する可能性が高いとき、あるいは可能性が低いが発生すれば影響が大きいとき、赤は両方とも大きいときに発表される。また、UKMO には高度利用のためのコンサルタントを担うグループ (Applied Science and Scientific Consultancy) も設置されており、公的機関や民間に対して、気象・気候リスクを抱える業務でのリスク緩和のため、様々な時間スケールの予測情報の提供を行っている。対象分野には、エネルギーや海事に加え、小売、保険なども含まれる。リスク管理に関する情報では、アンサンブル予報データを用いた確率予測情報も提供される。なお、同局が 2015 年にまとめた 2021 年までの計画 (Met Office 2015) では、顕著現象や気候変動に係る気象・気候リスクの緩和、社会経済活動への支援のため、

<sup>1</sup> 大野 浩史

<sup>2</sup> [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/tecdev/nwp\\_strategic\\_plan\\_towards\\_2030.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/tecdev/nwp_strategic_plan_towards_2030.html)

<sup>3</sup> [https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/kishou00\\_sg\\_000077.html](https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/kishou00_sg_000077.html)

<sup>4</sup> プロダクトの概要は以下で確認できる。

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/medium-range-forecasts>

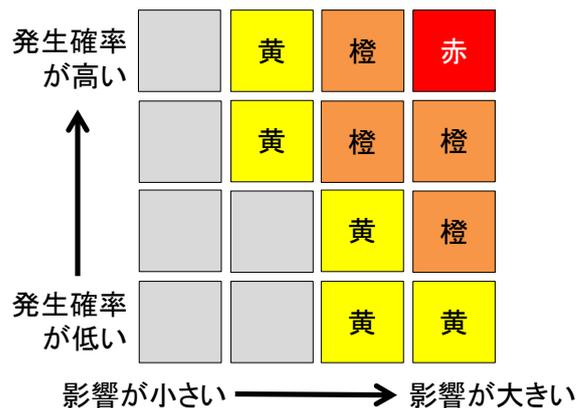
<sup>5</sup> <https://www.metoffice.gov.uk/public/weather/warnings>

数値予報システムの改善やプロダクト、サービスの高度化を引き続き進めていくこととしている。

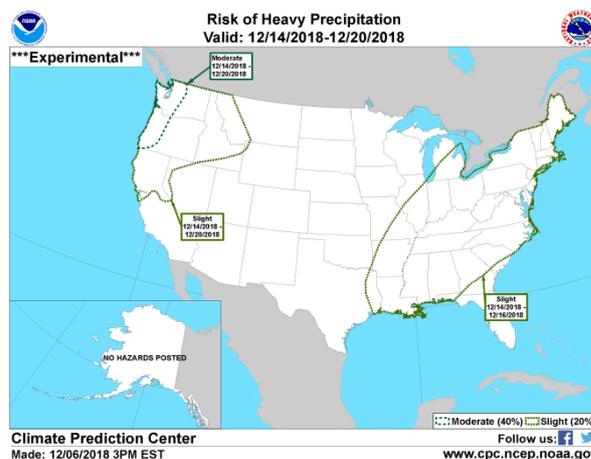
米国海洋大気庁気候予測センター(CPC/NOAA)では、14日間先までの顕著現象の発生予測を、Hazards Outlook<sup>6</sup>として公表しており、高温・低温、大雨、洪水、大雪、強風、干ばつの見通しを、警戒地域の分布図とテキストによる解説で提供している。また、試験的に2週目の顕著な高温・低温や大雨(上位15パーセンタイルとなるような現象で定義。気温は日別、大雨は3日間積算で評価)については確率的な情報も提供しており、その確かさに応じて、Slight(20%)、Moderate(40%)、High(60%)の3段階で発表している(第5.1-2図)。また、特定の基準を超える気温(例えば華氏温度で100度(100°F、摂氏温度では37.8度(37.8°C))を超えるような熱波)の発生確率の空間分布のマップも提供されている。

#### 参考文献

- ECMWF, 2013: 25 years of ensemble forecasting at ECMWF. *ECMWF Newsletter*, **153**, 20-31.
- ECMWF, 2016: Strategy 2016 – 2025: The strength of a common goal. 27pp. Available on line at <https://www.ecmwf.int/en/about/what-we-do/strategy>
- Lalurette, F., 2002: Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index. *ECMWF Tech. Memorandum*, **373**.
- Lalurette, F., 2003: Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3037-3057.
- Met Office, 2015: Met Office Science Strategy: 2016-2012. 42pp. Available on line at <https://www.metoffice.gov.uk/research/news/2015/new-science-strategy>



第 5.1-1 図 英国気象局のリスク情報のイメージ  
縦軸が現象の発生確率、横軸がその現象が発生したときの影響の大きさを表し、両者の程度に応じた警戒のレベルを色(黄色、橙、赤)で表している。



第 5.1-2 図 CPC/NOAA による 2 週目の大雨の発生確率マップの例  
2018 年 12 月 6 日発表の例。緑色の破線(40%)、点線(20%)で確率を表す。

<sup>6</sup> <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/threats/threats.php>

## 5.2 全球 EPS の将来的な開発の方向性と展望<sup>1</sup>

### 5.2.1 はじめに

当庁では、2 週間気温予報を支援する全球アンサンブル予報システム(全球 EPS; 第 3.6 節)に対して、大気モデルやアンサンブル初期摂動作成手法の継続的な開発に加えて、水平高解像度化、鉛直層数増強、アンサンブルメンバー数の倍増を計画している(本田, 2018)。また、2019 年に開始する 2 週間気温予報に合わせて、現在配信している全球域・日本域プロダクト(格子点データ及び統計値)を高解像度化・高頻度化する。本節では、さらに将来的な全球 EPS の開発について、2 週間先の予測精度に寄与する現象を概観し、当庁の 2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画<sup>2</sup>や海外数値予報センターの開発動向も踏まえた上で、その方向性と展望について述べる。

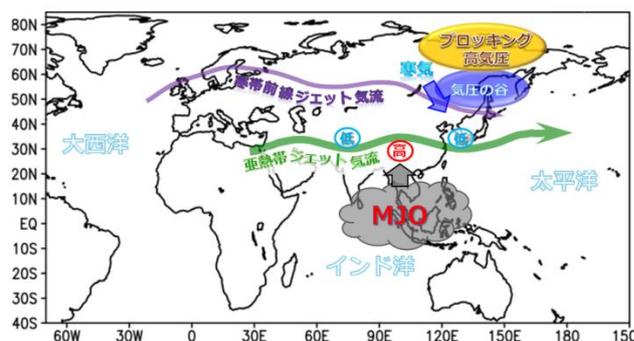
### 5.2.2 2 週間先の予測精度に寄与する現象

数値予報モデルの予測精度向上には、様々な時間・空間スケールで重ね合わさっている各現象とそれらの相互作用の表現の改善が必要となる。一般に日本域での日々の天気予報においては、日変化や傾圧不安定波動(総観規模擾乱)などの相対的に空間スケールが小さく、時間変動の周期が短い現象が大きく寄与する。そのため、対象時刻の瞬間値で予測精度を把握することができるが、これらの現象の予測可能性は数日を超えると低くなると考えられている。

一方、空間スケールが大きく、時間変動の周期が長い現象の方が予測可能性を持つことが知られており(Buizza and Leutbecher, 2015)、2 週間先での日本上空の予測に対しては、日本から少し離れた熱帯や中緯度からのこのような現象による寄与が重要となる。しかし、予測結果の有効利用には高周波・小スケールの現象の影響を軽減するための処理(時空間平均、ローパスフィルターなど)が必要となり、平年値からの偏差で応答・相互作用を把握することが多い。

このとき、数値予報モデルによる予測誤差の時間・空間的な伝播経路の把握が重要となる。例えば、数

日から数週間先の予測誤差は、中緯度の傾圧不安定波動の位相速度だけでなく、準定常ロスビー波の群速度によっても伝播する(前田, 2013)。特に、大規模に組織化した積雲が様々なスケールで相互作用するマッデン・ジュリアン振動(MJO)は、一度発生すると熱帯の循環場を持続的に支配するため影響が大きい。そのため、MJO に伴う対流の非断熱加熱により励起された準定常ロスビー波が亜熱帯ジェットに沿って伝播するような状況では、数値予報モデルの予測誤差も MJO が存在するインド洋から日本域に数日程度で伝播することが知られている(第 5.2-1 図; Roundy, 2012)。さらに、予測誤差は海洋や陸面など下部境界の影響を受け、アジアモンスーンやブロッキングなど熱帯と中緯度の様々な現象(第 3 章)とも相互作用しながら、太平洋から北アメリカを越えてヨーロッパやアフリカへ影響が及ぶことも認識されている(Stan et al., 2017)。



第 5.2-1 図 MJO に伴う熱帯と中緯度の相互作用の例  
MJO に伴う対流活発域の北側で高気圧性の渦が作られ、ロスビー波が亜熱帯ジェット気流に沿って伝播し、ブロッキングなど中緯度の様々な現象と相互作用する。

### 5.2.3 2 週間先の予測精度の改善に向けて

これまで 2 週間先の予測は、大気を持つ初期値鋭敏性のために難しいと考えられ、「予測可能性の砂漠」とも呼ばれていた(Vitart et al., 2012)。しかしながら、現業数値予報センターのモデル予測精度が向上して研究と理解が進むにつれて、現象の空間・時間スケールを選べばある程度は予測可能と認識されるようになり、研究促進に向けた S2S (Sub-seasonal to Seasonal) 予測プロジェクトが 2012 年に立ち上げられた(Vitart et al., 2017; White et al., 2017)<sup>3</sup>。当庁も全

<sup>1</sup> 小森 拓也、足立 恭将

<sup>2</sup> [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/tecdev/nwp\\_strategic\\_plan\\_towards\\_2030.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/tecdev/nwp_strategic_plan_towards_2030.html)

<sup>3</sup> 2018 年には「S2S 予測プロジェクト Phase 2」が提案され、2023 年まで継続される予定となっている。

球 EPS を用いて、この国際プロジェクトに参加している。様々な現象に対して S2S プロダクトを用いた国際比較が行われた結果、特に当庁の数値予報モデルは MJO の予測精度(振幅や位相速度など)が十分ではないため(Vitart, 2017; 久保, 2017)、その精度改善の必要性が内外で認識されている<sup>4</sup>。

1 か月先までの予測に対して、当庁では大気モデルを運用しているが、数値予報モデルの積分時間が進むほど海洋変動からの寄与が次第に大きくなるため S2S 予測プロジェクトへの参加機関の多くが大気海洋結合モデルを運用している。また近年では、相対的に解像度の低いアンサンブル予報モデルだけでなく、高解像度短中期予報モデルの大気海洋結合化の開発が主流となっている。例えば、カナダ気象局(ECCC)では2017年12月に大気海洋結合化した高解像度決定論全球モデルが世界で初めて現業化された。欧州中期予報センター(ECMWF)でも大気海洋結合化した高解像度決定論全球モデルが2018年6月に現業化された。英国気象局(UKMO)においては、2016年に5か年開発計画を策定し、2020年の高解像度決定論全球モデルの大気海洋結合化を目指して開発が進められている。

このような国際的な背景のもと、当庁でも全球 EPS に対して様々なフィージビリティスタディを行いながら開発を進めている。一般に、大気モデル本体(データ同化システムについては後述)に海洋が変動する効果を導入するためには、完全結合(Full Coupling)、部分結合(Partial Coupling)、2段階法(Two-Tiered Method)などの手法が知られている。

完全結合は、予測初期から海洋モデルと完全に結合する手法であるが、海洋モデル実行の計算機資源が必要となる上に、初期値を作成するデータ同化システムが結合化されていないと予測初期に不整合(初期ショック)を生じる要因となる。部分結合は、予測初期は SST 解析プロダクト<sup>5</sup>を用い、時間と共に完全結

合に近づける手法である。海洋モデル実行の計算機資源は必要であるが、初期ショックを抑制する効果が期待できる。2段階法は、大気モデルの下部強制力として、予め大気海洋結合モデルで予測された SST を用いる手法であり、当庁でも2003年3月から2010年2月まで現業季節 EPS(当時は大気モデル)に対して運用していた(新保ほか, 2009)。既存の大気海洋結合モデルを利用することにより、大気モデル単体の計算機資源はほぼ変わらず、SST 解析プロダクトを予測初期に用いれば初期ショック抑制も期待できる。SST 予測値を提供している大気海洋結合モデルが改良されると、自動的にその恩恵を受けられるが、モデル気候値を計算するための再予報を行う必要がある。

ECMWF では、2018年6月以降、決定論とアンサンブルの両現業モデルに対して、熱帯域では完全結合、中高緯度は部分結合(8日目以降は完全結合)を採用している。また、米国国立環境予報センター(NCEP)では、2022年までに天気予報から季節予報までを支援する統一的なモデルの枠組みの構築を計画しており、現在、結合化の効果を導入する2段階法のアプローチを試みている(Zhu et al., 2018)。

全球 EPS に海洋が変動する効果を導入するために当庁が行ったフィージビリティスタディの例として、低解像度版(約110km格子)の解析 SST 初期偏差固定の現業短期予報決定論モデル(大気モデル:米原, 2017)に対して、現業季節 EPS(大気海洋結合モデル:高谷, 2015)の海洋モデルを完全結合した実験結果を第5.2-2図に示す。大気モデルと結合モデルの根平均二乗誤差(RMSE)の差を大気モデルのRMSEで規格化した5日目の予測結果を見ると、東西平均気温(図(a))と500hPa高度(図(b))ともに、結合化することで熱帯では予測精度が改善し、中高緯度では悪化していることがわかる。なお、ECMWFでも同様の結果が得られており、海洋モデルの解像度が現業 SST 解析プロダクトよりも低く、中高緯度での海洋の中規模渦を解像できないためと推測されている。また、この中高緯度での精度悪化を抑制するためにECMWFでは部分結合が導入された(Mogensen et al., 2018)。第5.2-2図において、熱帯域での500hPa高度のRMSE(図(c))と200hPa速度ポテンシャルのア

<sup>4</sup> 第3回数値予報モデル開発懇談会の「委員からの主なご意見」:[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/suuchi\\_model\\_kondankai/part3/part3-gijigaiyou.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/suuchi_model_kondankai/part3/part3-gijigaiyou.pdf)

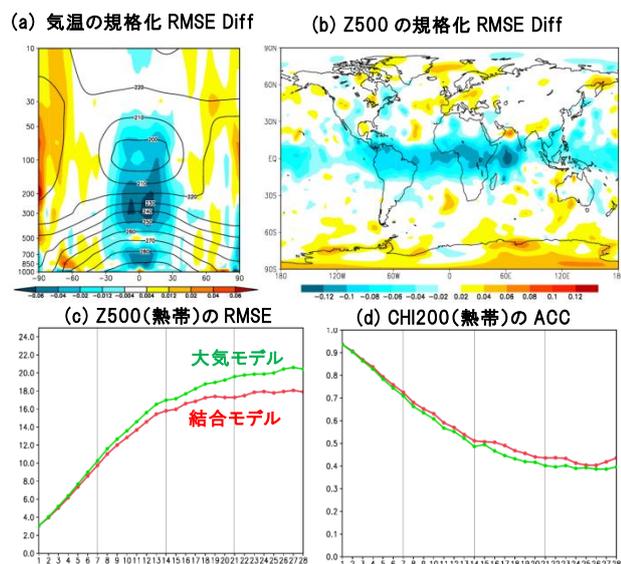
<sup>5</sup> 例えば、全球 EPS で使用している MGDSSST(栗原ほか, 2006)など

ノマリ相関係数(図(d))の時間変化を見ると、サンプル数が十分ではないものの、予測 28 日目にかけて結合化による改善が持続していることがわかる。今後は、現業全球 EPS の解像度(約 40km 格子)を用いた部分結合の実験や、季節 EPS の SST 予測値を用いた2段階法など現状の計算機資源で運用できる実利的なアプローチも試みる予定である。

一方、初期ショックを抑制して予測精度を向上させるために、データ同化システムの大気海洋結合化に向けた開発も各国で活発に進められている(Penny et al., 2017)。ECMWF では、実験的な大気海洋結合再解析(CERA-20C と CERA-SAT)での実績を踏まえて、海水域での弱結合同化システム<sup>6</sup>を 2018 年 6 月に現業化し、2019 年には海洋域でも現業化する予定であ

る。また弱結合同化から準強結合同化へ向けた開発が現在進行中であり、大気再解析 ERA5 の後継となる ERA6 は大気海洋結合再解析とする計画である。UKMO でも、弱結合同化システムの現業化に向けた開発が進んでおり、現在、テストモードでの結合予測実験が日々行われている。当庁では、気象研究所において弱結合同化システムの研究開発を行っており、全球 EPS の結合化とともに現業運用を視野に入れた今後の開発が期待されている。

結合同化は、大気と海洋・海氷のプロセスだけでなく大気と陸面・積雪のプロセスに対しても開発が行われている。ECMWF、UKMO、フランス気象局などでは、衛星観測データの効果的な利用に向けて陸面結合同化手法の研究開発が進められている。また、S2S 予測プロジェクトなどでは、陸面は大気や海洋と比べて 2 週間先の予測に対する寄与が大きいと考えられており<sup>7</sup>、モデル本体の開発と合わせて大気陸面結合同化の重要性が認識されている。将来的には、成層圏の気温や風に寄与する既存の物理過程(放射過程や重力波など)の改善だけでなく、オゾンや二酸化炭素の衛星データ同化など成層圏での化学過程との結合を通じて、対流圏と成層圏の相互作用による予測精度改善も重要な開発課題の一つとなり得る。



第 5.2-2 図 低解像度版(約 110km 格子)決定論モデルによる大気海洋結合化のインパクト実験結果(JRA-55 (古林ほか, 2015)に対する検証)

上段: 予測 5 日目の RMSE の差を大気モデルの RMSE で規格化した(a) 東西平均気温と(b) 500hPa 高度の結果(結合モデルの精度が高い領域が負)。下段: 熱帯域(20S-20N)での(c) 500hPa 高度の RMSE と(d) 200hPa 速度ポテンシャルのアノマリ相関係数の時間変化(緑線は大気モデル、赤線は結合モデル、横軸は予測日数)。2016 年 6 月から 2017 年 8 月の 91 サンプル(5 日毎)の結果。

<sup>6</sup> 「弱結合同化」では、第一推定値は結合モデルで作成するが、データ同化自体は大気と海で別々のシステムで行う。「準強結合同化」では、データ同化を別々のシステムで行いつつも、(アウトループの繰り返しにより)個々のシステムの解析インクリメントが他方のシステムに影響を与える。「強結合同化」では、1 つの同化システムとして結合データ同化を行う。

#### 5.2.4 不確実性情報の改善に向けて

一般に、計算機資源は数値予報システム(モデルとデータ同化)の高解像度化、物理過程の改良や新たなコンポーネント(海洋、海氷、波浪、化学過程など)の実装、アンサンブルメンバー数の増強などへ割り当てられるが、不確実性情報を改善するためには、アンサンブルメンバー数だけでなく、アンサンブル初期摂動作成手法の開発も重要となる。

現在、全球 EPS では、特異ベクトル(SV)法と局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)法の組み合わせによって各メンバーのアンサンブル初期摂動を作成している。一方、現業の 4 次元変分法データ

<sup>7</sup> 例えば、WWRP/WCRP Sub-seasonal to Seasonal Prediction Project (S2S) Phase II Proposal の Figure 2 参照

[https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WWRP\\_2018\\_4\\_S2S\\_Phase\\_II\\_Proposal.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WWRP_2018_4_S2S_Phase_II_Proposal.pdf)

同化システムに対して、LETKF を組み合わせて予報誤差を見積もるハイブリッドデータ同化システムへの高度化が計画されている(本田, 2018)。そのため、予報アンサンブルと解析アンサンブルがなるべく連動・整合する方向に開発することが望ましい。

また、全球 EPS では、モデルアンサンブル手法として確率的物理過程強制法 (SPPT) を実装しているが、ECMWF や UKMO では、より物理的に意味付け可能なアプローチとして物理過程のパラメータを直接扱う確率的パラメータ摂動法 (SPP) への移行へ向けた開発が進められている (Leutbecher et al., 2017)。現在、個々の物理過程の定式化自体を確率的にする様々なアプローチが研究されているが、開発・維持コストを考慮して実利的なものを実装する必要がある。

数値予報システム全体としての高解像度化が進む中、最適なメンバー数や過去の初期値での予測メンバーの利用 (LAF 法)、予測時間に応じた解像度の変更<sup>8</sup>など、その時の計算機資源に応じた継続的な開発と調整は今後も不可欠となるだろう。

### 5.2.5 おわりに

本節では、2 週間先を中心とした全球 EPS の予測精度改善に向けて、将来的に取り組むべき開発の方向性と展望について述べた。S2S 予測プロジェクトの国際比較などにより、(熱帯の循環場を持続的に支配して日本への影響が大きい) MJO に対する当庁の予測精度改善の必要性が内外で認識される中、大気モデル本体の改良、海洋結合化やアンサンブル初期摂動作成手法の開発などをバランスよく行っていくことが必要となる。その上で、海外数値予報センターの動向も踏まえると、①数値予報モデルとデータ同化手法に対する地球システム化、②短期予報から季節予報までのシームレス化、③数値予報システム(とプロダクト)の高解像度・高頻度化、を目指した開発が重要と考えられる。

①については、第 5.2.3 項で述べたとおり、既に各国で数値予報システムの大気海洋結合化に向けた開発が進められており、数値予報モデルとデータ同化に

おいて、大気と陸面・海氷・波浪などの各過程をいかに整合的に結合化できるかが今後の課題となっている。当庁では、まずは結合化した全球 EPS での 2 週間先の予測を目指し、さらに将来的には大気海洋結合同化による予測初期からの予測精度改善を視野に入れた開発を行うべく、現在、様々なフィージビリティスタディを行っている。

②についても、以前から短期予報から季節予報までを统一的に扱うシームレスなモデル開発の必要性が叫ばれてきており (Brunet et al., 2010; Hoskins, 2013)、既に世界的な開発の流れとなっている。当庁では、既に全球 EPS によって短期予報から 1 か月予報までを统一的に扱っているが、季節予報とのシームレス化についても、季節 EPS の 1 か月予報での利用に向けた開発を今後の方向性として検討している。

③については、限られた計算機資源を有効に使って予測精度を向上させるため、最適な解像度での各コンポーネント(例えば大気モデルと海洋モデル)の組み合わせや、1 初期値当たりのアンサンブルメンバー数を考慮しながら、より良い不確実性情報を提供できる構成での運用が課題となる。

モデル開発は日々の地道な努力の積み重ねである。今後も、各分野での研究や海外数値予報センターでの動向にも注視しながら、現業数値予報センターとして開発を着実に継続していく必要がある。

### 参考文献

- 久保勇太郎, 2017: MJO. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 33-37.
- 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, 73, S1-S18.
- 古林慎哉, 太田行哉, 原田やよい, 海老田綾貴, 守谷昌巳, 小野田浩克, 大野木和敏, 釜堀弘隆, 小林ちあき, 遠藤洋和, 宮岡健吾, 高橋清利, 2015: 気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55) の概要. 平成 26 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 66-115.
- 新保明彦, 平井雅之, 森浩俊, 足立典之, 出原幸志郎, 2009: 大気海洋結合モデルによる季節アンサンブル予報システムの概要と予測精度. 平成 21 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 93-100.

<sup>8</sup> 現在の全球 EPS では、予測 18 日目を以降に 40km 格子から 55km 格子に低解像度化して運用している。

- 高谷祐平, 2015: 概論. 平成 27 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1-4.
- 本田有機, 2018: NAPS10 における改良計画. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2.
- 前田修平, 2013: 季節予報に関わる現象のメカニズムを理解するための力学的な基礎知識. 平成 24 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 282-318.
- 米原仁, 2017: 全球数値予報システムの改良の概要. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-7.
- Brunet, G., M. Shapiro, B. Hoskins, M. Moncrieff, R. Dole, G. Kiladis, B. Kirtman, A. Lorenc, B. Mills, R. Morss, S. Polavarapu, D. Rogers, J. Schaake, and J. Shukla, 2010: Collaboration of the Weather and Climate Communities to Advance Subseasonal-to-Seasonal Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1397–1406.
- Buizza, R. and M. Leutbecher, 2015: The forecast skill horizon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 3366–3382.
- Hoskins, B., 2013: The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **139**, 573–584.
- Leutbecher, M., S. Lock, P. Ollinaho, S. T. Lang, G. Balsamo, P. Bechtold, M. Bonavita, H. M. Christensen, M. Diamantakis, E. Dutra, S. English, M. Fisher, R. M. Forbes, J. Goddard, T. Haiden, R. J. Hogan, S. Juricke, H. Lawrence, D. MacLeod, L. Magnusson, S. Malardel, S. Massart, I. Sandu, P. K. Smolarkiewicz, A. Subramanian, F. Vitart, N. Wedi, and A. Weisheimer, 2017: Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: state of the art and future vision. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 2315-2339.
- Mogensen, K., P. Browne, and S. Keeley, 2018: NWP gaps and needs. *Presentation at the workshop on observations and analysis of sea surface temperature and sea ice for NWP and climate applications*, available on line at: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2018/17978-nwp-needs-and-gaps.pdf>.
- Penny, S. G., S. Akella, O. Alves, C. Bishop, M. Buehner, M. Chevallier, F. Counillon, C. Draper, S. Frolov, Y. Fujii, A. Karspeck, A. Kumar, P. Laloyaux, J-F. Mahfouf, M. Martin, M. Pea, P. de Rosnay, A. C. Subramanian, R. Tardif, Y. Wang, and X. Wu, 2017: Coupled Data Assimilation for Integrated Earth System Analysis and Prediction: Goals, Challenges, and Recommendations. *WWRP report 2017-3*, Available on line at: [https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Final\\_WWRP\\_2017\\_3\\_27\\_July.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Final_WWRP_2017_3_27_July.pdf)
- Roundy, P. E., 2012: Tropical-extratropical interactions. In W. K.-M. Lau and D. E. Waliser (Eds.), *Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System* (pp. 497-512). Springer Praxis Books.
- Stan, C., D. M. Straus, J. S. Frederiksen, H. Lin, E. D. Maloney, and C. Schumacher, 2017: Review of tropical-extratropical teleconnections on intraseasonal time scale. *Reviews of Geophysics*, doi:10.1002/2016RG000538
- Vitart F., A. W. Robertson, and D. L. T. Anderson, 2012: Subseasonal to seasonal prediction project: bridging the gap between weather and climate. *WMO Bull.*, **61(2)**, 23–28.
- Vitart, F., C. Ardilouze, A. Bonet, A. Brookshaw, M. Chen, C. Codorean, M. Déqué, L. Ferranti, E. Fucile, M. Fuentes, H. Hendon, J. Hodgson, H.-S. Kang, A. Kumar, H. Lin, G. Liu, X. Liu, P. Malguzzi, I. Mallas, M. Manoussakis, D. Mastrangelo, C. MacLachlan, P. McLean, A. Minami, R. Mladek, T. Nakazawa, S. Najm, Y. Nie, M. Rixen, A. W. Robertson, P. Ruti, C. Sun, Y. Takaya, M. Tolstykh, F. Venuti, D. Waliser, S. Woolnough, T. Wu, D.-J. Won, H. Xiao, R. Zariyov, and L. Zhang, 2017: The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 163-173.
- Vitart F., 2017: Madden – Julian Oscillation prediction and teleconnections in the S2S database. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 2210-2220.
- White, C. J., H. Carlsen, A. W. Robertson, R. J. T. Klein, J. K. Lazo, F. Vitart, E. Coughlan De Perez, A. J. Ray, V. Murray, S. Bharwani, D. Macleod, R. James, L. Fleming, A. P. Morse, B. Eggen, R. Graham, E. Kjellström, E. Becker, K. V. Pegion, N. J. Holbrook, D. Mcevoy, M. Depledge, S. Perkins-kirkpatrick, T. J. Brown, R. Street, L. Jones, T. A. Remenyi, I. Hodgson-johnston, C. Buontempo, R. Lamb, H. Meinke, B. Arheimer, and S. E. Zebiak, 2017: Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions, *Meteorological Applications*, **24**, 315-325.
- Zhu, Y., X. Zhou, W. Li, D. Hou, C. Melhauser, E. Sinsky, M. Peña, B. Fu, H. Guan, W. Kolczynski, R. Wobus, and V. Tallapragada, 2018: Toward the improvement of subseasonal prediction in the National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **123**.

### 5.3 ガイドランスの改善に向けて<sup>1</sup>

本節では、ガイドランス作成手法について概観し、課題を挙げ改善の方向性を示す。

数値予測モデルの予測誤差は予測時間とともに増大するため、その誤差を適切に評価しなければならない。そのため、予測したい物理量を確率密度分布で評価する必要がある。

この確率密度分布を限られた計算機資源で推定するために、当庁など世界の多くの予報機関ではアンサンブル予報を行っている。しかし、アンサンブル予報から得られる分散は一般に予測誤差より小さくなる。予測誤差を引き起こす要因は、初期値誤差、物理過程の誤差、数値計算上の誤差など様々あるが、アンサンブル予報で考慮出来ている要因が限定的であることが分散過小の一因と考えられている(Raftery et al, 2005)。またアンサンブルメンバー数の不足も分散過小要因となる。そこで、統計的手法の併用により、確率密度分布の推定が必要となる。

Gneiting (2014)は、アンサンブル予報の結果から確率密度分布を推定する方法として、Ensemble Model Output Statistics(EMOS)と Bayesian Model Averaging (BMA)の二つの手法を紹介している。EMOSは、アンサンブル平均値やアンサンブルスプレッドなどのモデルの情報を用いて確率密度分布を定義するパラメータ(たとえば平均や分散)を可変にする手法である。通常、線形回帰を行った場合は誤差分布として等分散の正規分布を仮定している。このため、予測される確率密度分布の分散は一定となりモデルが環境場に応じて表現している誤差の情報が活用できない。EMOSでは、分散も可変にすることで修正の自由度が増すため、そのような点が改善される可能性がある。一方、BMAは、各モデルで予測した確率密度分布を重み付きで重ね合わせることで、モデルに固有の不確実性を考慮した確率密度関数を推定する手法である。

当庁の2週間気温予報や1か月予報におけるガイドランスでは、5メンバーの再予報データを用いて線形回帰を行い、正規分布のパラメータである平均の予測

式の作成および分散の推定を行っている。その上で、これらのパラメータを用いて、現業では26(または50)メンバーを5メンバーごとの5(または10)組に分けてそれぞれで正規分布を作成して重ね合わせている(田中ほか, 2017)。このようにすることでモデルの不確実性の情報を予測に反映させている。ただし、5メンバーごとの組から推定される正規分布の分散は線形回帰によって推定されたものであり一定となっている。このため、5メンバーの予測の散らばりを考慮できていない。この5メンバーの予測に前述のEMOSを用いることで、モデルの情報をよりくみ取れる可能性がある。

また、季節予報で用いるガイドランスでは、降水量や降雪量といった本来は正規分布とならないような物理量においても2.5乗根するなどして正規分布に近づけるように変数変換を行い、正規分布を仮定することによって予測を行っている。このような手法について、久保(2012)は応答変数の「構造にあわせて適切な確率分布を選ぶ」ことが重要であり、変数変換による手法は好ましくない旨を主張している。季節予報ガイドランスにおいても、変数変換せずに、応答変数にあわせた確率分布を仮定するべきだろう。たとえば、Sheuerer and Hamil(2015)は、切断ガンマ分布を仮定して12時間降水量を予測した。その結果、5日先でもBSSは正となることが確認されている。

これまでは、再予報データと観測値から正規分布やガンマ分布など、ある特定の分布を仮定してそのパラメータを推定する手法について述べてきた。一方、パラメータを推定せず、過去のデータからその確率密度分布を推定する手法がある。Hamil et al.(2015)は、過去の予測データから現在の予測データと似た日を抽出し、その際に観測された値を集めて確率密度分布とする手法を提案している。分布を仮定する推定方法では、正規分布などの簡単な分布で仮定できる場合は良いが、より適切に予測するためには複雑な分布を検討しなければならないことがある。この手法は、そのような複雑な分布を検討する必要がないことが大きなメリットである。ただし、この手法は過去に出現したデータに依存してしまい、過去に出現したことがないような値を表現することは不得意となるため注意が必要である。

<sup>1</sup> 伊藤 晋悟

モデルの予測データを用いたガイダンスの手法だけでなく、実況データから Deep Learning を用いて予測する手法も報告されている。Saha et al.(2017)は、モンスーンの降水量について、モンスーンオンセットの数か月から 1 年程度前の実況値から推定できないか調査を行った。この際、自己符号化器(岡谷, 2015)を用いて実況データを“圧縮”し、“圧縮”されたデータを用いて回帰を行うことで予測している。この手法は過去の実況データを用いて予測をしたものである。同様の考えで、モデルデータを有効な情報に“圧縮”して、予測を推定する手法は、少ない説明変数で有効な情報を表現できるという点で優れているので、検討する価値があると見込まれる。

このほか、パラメータの誤差を考慮した予測を行う手法もある。これまでパラメータの推定には最小二乗法を用いており、決定論的に求めている。すなわち、回帰係数や分散などのパラメータは固定値であるとしている。パラメータに大きな誤差が見込まれない場合は良いが、サンプルが少ないなどの理由でパラメータに誤差が見込まれる場合は、ベイズ理論を用いてパラメータの事後確率を算出し、その分布を用いて予測分布を推定する方が精度が高くなる可能性がある(渡辺, 2012)。

以上挙げた手法のほかにも、ランダムフォレストによる手法も検討されている(Taillardat et al., 2016)。その他、未学習データに対しても高い識別能力を有するサポートベクターマシンなど、これまで統計分野で広く利用されている手法の選択も考えられる。また、これらの手法を現業に適用する際にはその開発や維持・管理コストを考慮することも重要である(工藤, 2018)。それぞれの手法について、その効果や開発および維持・管理コストなども考慮したうえで、最適な手法を採用できるよう、今後調査していく必要がある。

## 参考文献

- 岡谷貴之, 2015: 深層学習(機械学習プロフェッショナルシリーズ). 講談社, 176pp.
- 工藤淳, 2018: ガイダンスの開発と運用. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 86-87.
- 久保拓弥, 2012: データ解析のための統計モデリング入門—一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC, 岩波書店, 267pp.

- 田中基裕, 伊藤晋悟, 平井雅之, 2017: 1 か月予報及び異常天候早期警戒情報のためのガイダンスの改善. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 48-64.
- 渡辺澄夫, 2012: ベイズ統計の理論と方法. コロナ社, 226pp.
- Gneiting T., 2014. Calibration of Medium-Range Weather Forecasts, *ECMWF Technical Memorandum*, **719**.
- Hamill, T. M., M. Scheuerer, and G. T. Bates, 2015: Analog probabilistic precipitation forecasts using GEFS reforecasts and climatology-calibrated precipitation analyses. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 3300-3309.
- Raftery, A. E., T. Gneiting, F. Balabdaoui, and M. Polakowski, 2005: Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1155-1174.
- Saha, M., Mitra, P., and Nanjundiah, R. S., 2017: Deep Learning for Predicting the Monsoon over the Homogeneous Region of India. *Journal of Earth System Science*, **126**, 54.
- Sheuerer, M. and Thomas M. Hamill, 2015: Statistical Postprocessing of Ensemble Precipitation Forecasts by Fitting Censored, Shifted Gamma Distributions. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 4578-4596.
- Taillardat, M., Mestre, O., Zamo, M., and Naveau, P., 2016: Calibrated ensemble forecasts using quantile regression forests and ensemble model output statistics. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 2375-2393.