

4 2030年に向けた季節予報の展望¹

4.1 はじめに

交通政策審議会気象分科会は、2018年8月20日に「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」を提言した。その中で、目標のひとつとして「気候リスク低減、生産性向上に資する数ヶ月先までの予測精度向上」を掲げ、取組みの具体的内容として、①2週先までの顕著現象(極端な高温、低温に加え、暴風、大雪等)の予測情報を提供、②1ヶ月先までの熱波/寒波等による極端な高温、低温の発生する可能性を週ごとに予測、提供、③3ヶ月先の冷夏/暖冬等の極端な高温、低温を現在の1か月予報と同等の精度で予測を挙げた。本報告では、数値予報システムによる季節予報技術に対して、提言を受けた2018年当時とその後の進展、そして今後の展望について述べる。

4.2 気象庁における季節予報技術の現状

気象庁では、1か月予報に対しては1996年に、3か月予報と暖・寒候期予報に対しては2003年に、数値予報システムを導入した。その後、数値予報システムの改善によって、着実に予測精度を向上させてきた。現在の数値予報システムは第4.2-1表のとおりで、1か月予報のためには大気モデルを用いた全球アンサンブル予報システム(全球EPS)、3か月と暖・寒候期予報には大気海洋結合モデルを用いた季節アンサンブル予報システム(季節EPS)を用いている。

(1) 1か月予報

第4.2-1図に、2018年当時までの1か月予報に用いる現業モデルの精度を示す。1981~2010年の30年間の再予報実験(ハインドキャスト)による北日本域における予測3~4週目(予測17~30日目までの14日平均)の2m気温偏差のアンサンブル平均と解析(不規則に分布した観測データから、データ同化と呼ばれる計算手法により規則的な格子点上に値を内挿して、大気の状態を表したもの)との相関係数である(アンサンブル数は5)。2014年3月までの現業モデルに比べ、2018年時点の現業モデルでは、冬期、春

期を中心に予測精度が大幅に向上し、相関係数が0.5以上の月もみられる。一方、この期間に限ると、夏期の予測精度は明瞭には改善していない。

冬期、春期については、顕著現象の予測精度も向上した。第4.2-2図には、2005年11月30日初期値の12月の予測事例を示す。この年の12月は、非常に強い寒気が南下し、日本海側では記録的な大雪となった。この冬の大雪を対象に気象庁は「平成18年豪雪」と命名した。また、この異常低温・大雪は、気象庁が異常気象分析検討会³を設置するきっかけにもなった。図に示すように、当時の現業モデルでは、予測初期に近い12月上旬の低温は予測できたが、中旬には平年並に戻ってしまった。一方、2018年時点の現業モデルでは、12月下旬までの低温の持続を予測できている。海面気圧の予測図からわかるとおり、アリ

第4.2-1表 気象庁の現業数値予報システム(気象庁ウェブページ²より:2023年1月現在)。赤枠内が季節予報関連。

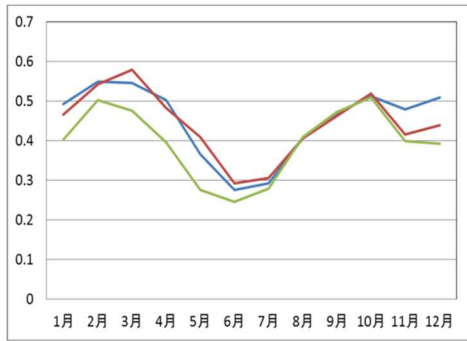
数値予報システム(略称)	モデルを用いて発表する予報	予報領域と格子間隔	予報期間(メンバー数)	実行回数(初期値の時刻)
局地モデル(LFM)	航空気象情報 防災気象情報 降水短時間予報	日本周辺 2km	10時間	毎時
メソモデル(MSM)	防災気象情報 降水短時間予報 航空気象情報 分布予報 時系列予報 府県天気予報	日本周辺 5km	39時間	1日6回 (03,06,09,15,18,21UTC)
			78時間	1日2回 (00,12UTC)
全球モデル(GSM)	分布予報 時系列予報 府県天気予報 台風予報 週間天気予報 航空気象情報	地球全体 約20km	5.5日間	1日2回 (06,18UTC)
			11日間	1日2回 (00,12UTC)
メソアンサンブル予報システム(MEPS)	防災気象情報 航空気象情報 分布予報 時系列予報 府県天気予報	日本周辺 5km	39時間 (21メンバー)	1日4回 (00,06,12,18UTC)
全球アンサンブル予報システム(GEPS)	台風予報 週間天気予報 早期天候情報 2週間気温予報 1か月予報	地球全体 18日先まで 約27km 18~34日先まで 約40km	5.5日間(注1) (51メンバー)	1日2回 (06,18UTC)
			11日間 (51メンバー)	1日2回 (00,12UTC)
			18日間 (51メンバー)	1日1回 (12UTC)
34日間 (25メンバー)	週2回 (12UTC 火・水曜日)			
季節アンサンブル予報システム(季節EPS)	3か月予報 暖候期予報 寒候期予報 エルニーニョ監視速報	地球全体 大気 約55km 海洋 約25km	7か月 (5メンバー)	1日1回 (00UTC)

(注1) GEPSは、00,06,12,18UTC 初期値の1日4回実行されるが、06,18UTC 初期値時刻の予測は、全般海上予報区(赤道~北緯60度、東経100~180度)内に台風が存在する、または同区内で24時間以内に台風になると予想される熱帯低気圧が存在する場合、または全般海上予報区外に最大風速34ノット以上の熱帯低気圧が存在し、24時間以内に予報円または暴風警戒域が同区内に入ると予想された場合に配信される。

¹ 榎田 貴郁、前田 修平(以上、大気海洋部気候情報課)、小森 拓也(情報基盤部数値予報課)

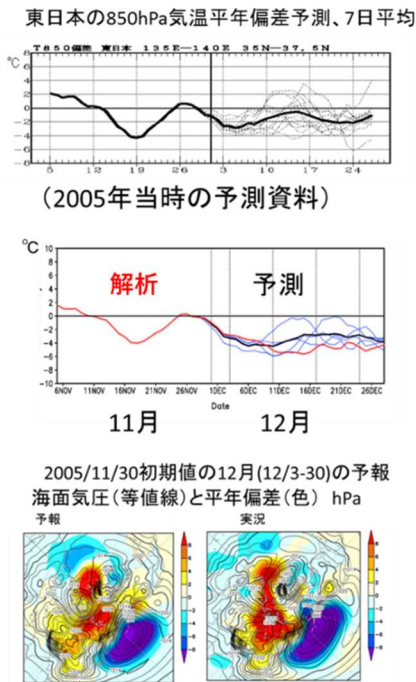
² <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/whitep/1-3-4.html>

³ <https://www.data.jma.go.jp/gmd/extreme/index.html>



第 4.2-1 図 北日本域 (37.5-45N,140-145E) の予測 3～4 週目 (予測 17～30 日目) の 2m 気温偏差の精度 (5 メンバーアンサンブル平均と解析との相関係数)

1981～2010 年の 30 年間の再予報実験と比較。緑:2011 年 3 月～2014 年 3 月の現業モデル (水平約 110km、鉛直 60 層)、赤:2014 年 3 月～2017 年 3 月の現業モデル (水平約 55km、鉛直 60 層)、青:2017 年 3 月～2020 年 3 月の現業モデル (予測 18 日まで水平約 40km、18 日以降は水平約 55km、鉛直 100 層)。横軸は予測初期値の月 (前 3 か月平均)。



第 4.2-2 図 2005 年 12 月の異常低温の予測

初期値は 11 月 30 日。上:2005 年当時の現業モデルによる東日本域 (35-37.5N,135-140E) の 7 日移動平均 850hPa 気温偏差 (°C)。太い実線が解析 (11/30 まで) とアンサンブル平均予測。細い線が各メンバーの予測。中:同上、ただし 2018 年時点の現業モデルによる予測。赤線が解析、黒線がアンサンブル平均予測、青線が各メンバーの予測。下:2018 年時点の現業モデルによる海面気圧の予測で、左) 予測 3～30 日目の 28 日平均場 右) 同期間の解析。等値線が海面気圧で陰影が年平均偏差 (hPa)。

ユーシャン低気圧とシベリア高気圧がともに強い冬型の気圧配置の持続をよく予測できた。

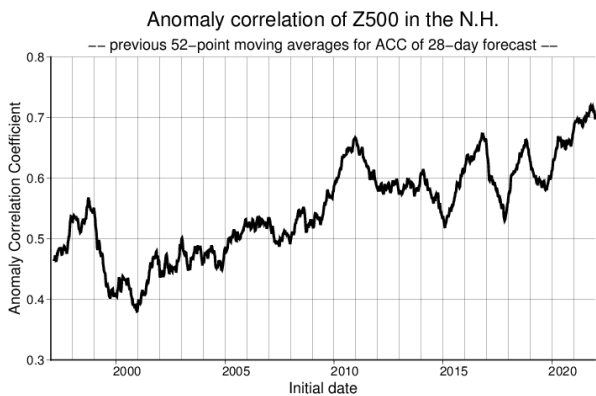
この冬は、雪害による死者が 152 人と、非常に多かったが、現在の精度で予報すれば、極端な低温の持続と大雪への万全の警戒 (自治体等による除雪計画の見直し、マスコミによる除雪作業の注意喚起等) を、早い段階で呼び掛けることができ、雪害を軽減することが出来たと考えられる。

その後、予測モデル本体の改良に加えて、2020 年に 2 段階 SST 法 (高倉・小森, 2020) が全球 EPS に導入された。この手法では、予測の途中から、季節 EPS で予測された海面水温 (SST) を全球 EPS の下部境界として利用しており、1 か月予報に重要なマッデンジュリアン振動 (MJO) の予測精度向上にも大きく貢献した。2 段階 SST 法の導入に伴い、季節 EPS の更新 (後述) によっても、1 か月予報の精度改善への効果が得られることとなった。第 4.2-3 図を見ると、年々変動はあるものの、北半球 500hPa 高度に対する 1 か月予報のアノマリー相関係数は改善傾向であり、2021 年には初めて 0.7 を超えたことが分かる。

第 4.2-4 図は、現在の現業モデルによる予測の例である。2022 年 9 月は、北・東・西日本で高温となった。特に 9 月中旬に一部で猛暑日となるなど、残暑が厳しかった。この時、現業モデルは、まだ実況が平年並であった 9 月初めから、その後高温に転じ、3～4 週目にかけて高温が持続することを予測できていた。これは、日本～日本の東のジェット気流が平年より北偏し、持続することを予測できていたことが関係している。日付変更線付近でジェット気流が平年より南に蛇行し、次々に切離した上層寒冷低気圧が亜熱帯域を西進、日本の南で対流活動が活発化し、日本～日本の東で高気圧が強まり、ジェット気流がさらに北偏、ということも、ある程度表現されていた (図略)。

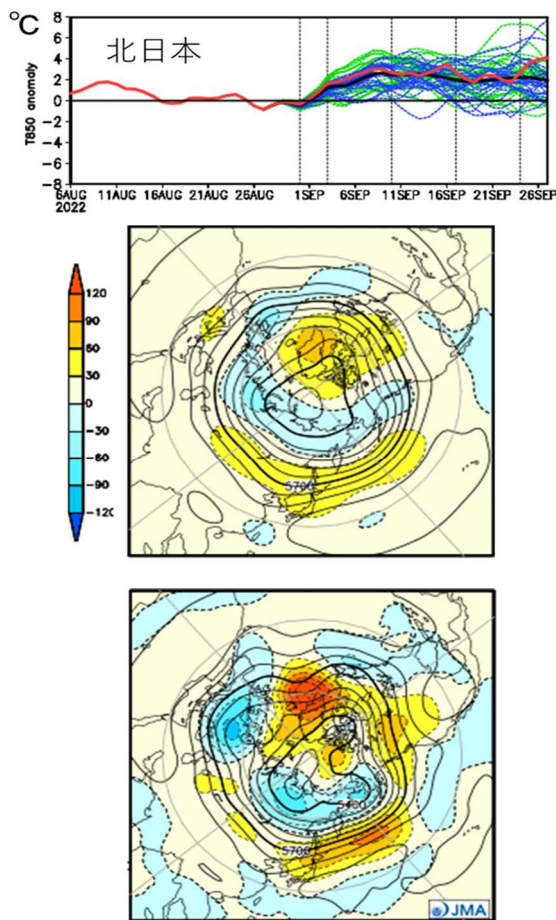
(2) 3 か月予報、暖・寒候期予報

3 か月予報、暖・寒候期予報には、2003 年に数値予報システムを使い始めた。当初は、エルニーニョ/ラニーニャ現象の予測のための大気海洋結合モデルによる海面水温予測を統計的に加工した値を下部境界条件とする (2 段階 SST 法)、大気モデルによる予測を



第 4.2-3 図 北半球 500hPa 高度に対する 1 か月予測精度

毎週の予測 3~30 日の 28 日平均に対して、前 1 年間で移動平均した解析に対するアノマリー相関係数。



第 4.2-4 図 現業の全球 EPS による 2022 年 8 月 31 日初期値の予測

上: 現業モデルによる北日本域 (37.5-45N, 140-145E) の 7 日移動平均 850hPa 気温偏差(°C)。赤線が気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q、気象庁, 2021)、黒線がアンサンブル平均、青・緑線が各メンバーの予測。中: 500hPa 高度場のアンサンブル平均予測で、予測 3~30 日の 28 日平均場。等値線が高度、陰影が平年偏差(m)。下: 中と同じで対応する解析。

用いていた。2010 年には、大気海洋結合モデルを3 か月予報、暖・寒候期予報のために導入し、第 4.2-5 図に示すように、システム更新の度に着実に予測精度が向上している。

そして更に、2022 年 2 月に現在の季節 EPS (JMA/MRI-CPS3) (Hirahara et al., 2023) が現業化されたことで、エルニーニョ/ラニーニャ現象、MJO (後述)、ブロッキング高気圧などの現象の予測や、季節

予報の主要予測指標である 2m 気温の予測など、多くの予測精度が大幅に向上した(気象庁, 2022)。第 4.2-6 図に、2022 年 9 月を初期値とした 2022 年 12 月の予測結果を示す。この時、東・西日本が低温で、12 月中旬から下旬にかけて全国の日本海側を中心に広い範囲で

大雪となり、新潟県で車両の立ち往生も発生した。500hPa 高度場は、日本付近で負偏差、南アジア付近で正偏差、といったパターンがよく予測されており、ラニーニャ現象に伴う亜熱帯ジェット気流の蛇行がよく表現されていたと考えられる。

このように予測精度が着実に向上し、よく予測できる事例もあるものの、本節冒頭で述べた 2030 年に向けた提言の実現や産業分野から強く求められている生産計画策定等での活用のためにはまだ十分ではなく、更なる精度向上が必要である。例えば、エルニーニョ/ラニーニャ現象の予測は大きな改善が見られているが、熱帯域の多様な大気海洋変動の再現に改善の余地があり、そのことなどにより、日本付近へのテレコネクションによる影響予測が難しい場合がある。

4.3 季節予報技術に関わる国際的な動向

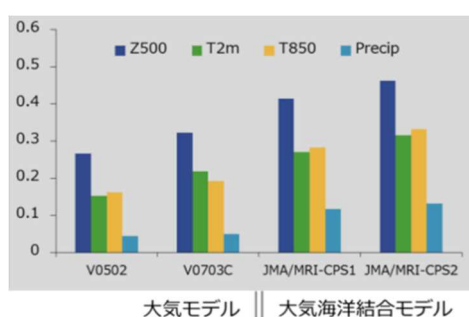
(1) 二つのブレイクスルー

これまで、季節内~年々変動の予測に関して二つのブレイクスルーがあった。一つ目は MJO、二つ目は北極振動/北大西洋振動 (AO/NAO)、という季節予報にとって重要な現象の予測に関するものである。

MJO は、大規模な対流活動とカップルした赤道波が 30~60 日の周期で東進する現象で、中・高緯度にも影響を与え、季節内から季節を対象とする予報にとって重要な現象である。予測が難しく、その誤差が中・高緯度大気にとっては偽の強制になることなどから、

15年ほど前までは「モデラーにとって MJO は悪夢」とも呼ばれていた。しかし、Miura et al. (2007)によるシミュレーションの成功の頃から予測可能な現象であると認識され、現業機関による予測精度も向上してきた。

Vitart(2017)によれば、Wheeler and Hendon (2004)に基づいて計算した MJO Index の相関係数が予測 15 日ごろまで 0.6 を超える機関が多い。顕著な特徴は、他の機関に比べヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の予測精度がよく、予測約 30 日まで 0.6 を超えることであった。2014 年 3 月～2017 年 3 月に気

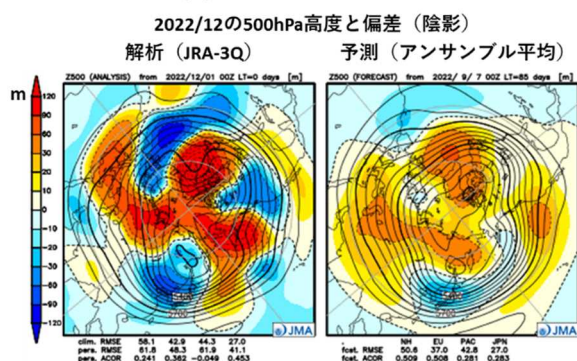


第 4.2-5 図 気象庁の季節予測システムの予測精度の変遷

アノマリー相関係数の全球平均。紺: 500hPa 高度、緑: 2m 気温、橙: 850hPa 気温、水色: 降水量。2 月初期値の 6～8 月の 3 か月平均場。それぞれハインドキャストの結果から算出した値(ハインドキャストの仕様はシステムによって異なる)。それぞれの運用開始の時期は以下のとおり:

V0502(2006), V0703C(2007), JMA/MRI-CPS1(2010), JMA/MRI-CPS2(2015)。

季節アンサンブル予報システム (JMA/MRI-CPS3) による予測
初期値 : 2022/9/7

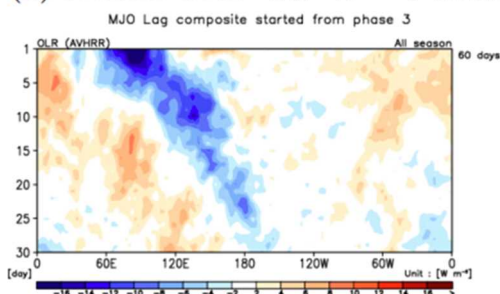


第 4.2-6 図 現業の季節 EPS による 2022 年 12 月の予測、2022 年 9 月 7 日初期値

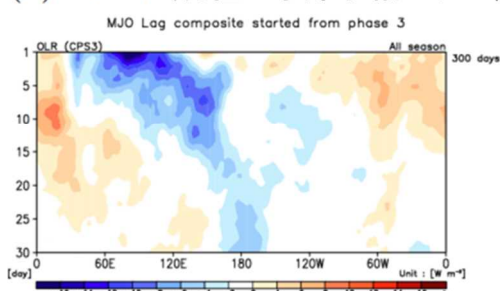
500hPa 高度(等値線)と平年偏差(陰影)。左:解析、右:アンサンブル平均予測。

象庁で運用していた現業の 1 か月予報モデルの MJO 予測精度は ECMWF と比べて大きな差があったが、2020 年の 2 段階 SST 法導入によって改善した。さらに 2022 年の季節 EPS 更新は、2 段階 SST 法を通じて全球 EPS に MJO を含む予測精度改善をもたらした。これはモデル更新によって、季節 EPS の MJO 予測精度などが明瞭に改善したことが大きい(第 4.3-1 図)。MJO はもはや「悪夢」ではなく、1 か月予報の後半にとって予測可能性のソースとなっている。

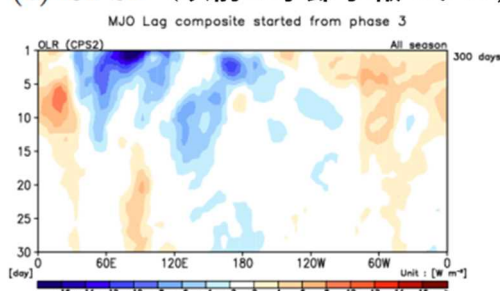
(a) NOAA OLR (衛星データ解析)



(b) CPS3 (現在の季節予報モデル)



(c) CPS2 (以前の季節予報モデル)

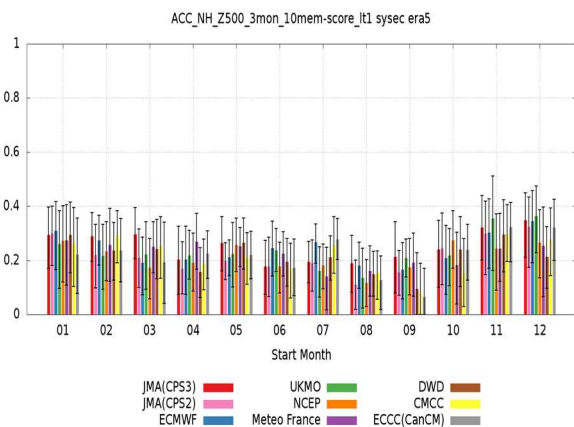


第 4.3-1 図 インド洋域 (Phase-3) に MJO の対流活発域の初期位相があるときの大気上端外向き長波放射量 (OLR) 時間合成図(全季節)

横軸は経度、縦軸は予測時間 [日]。位相 (Phase) の定義は、Wheeler and Hendon (2004) に従う。

二つ目は、AO/NAO の予測である。AO/NAO は、極域の寒気の中緯度への放出に関係しており、季節予報にとって重要な現象である。しかしながら、大気の内変動動的な性質が強く、季節予報の時間スケールでは予測可能性の小さい現象であることが関係者の常識であった。気象庁でも発表する寒候期予報の解説資料に「冬の天候に影響の大きい北極振動の予測は難しく、現時点では考慮できていない。」と明示している。ところが、イギリス気象局(UKMO)の季節予測システム(GloSea5)でAO/NAOが予測出来るようになったと報告され(Scaife et al., 2014)、関係者に衝撃を与えた。予測が可能となった明確な理由は示されていないが、AO/NAOの予測可能性のソースと考えられる過程、例えばENSO、北大西洋の亜寒帯ジャイアの水温、バレンツ-カラ海など北極海の海氷、成層圏の準2年振動(QBO)、がよく予測されていることが寄与しているのではないかと述べられている。

第4.3-2図に、各国気象機関の現業季節予測システムの北半球500hPa高度場の予測精度を示す。気象庁(JMA)の予測精度を見ると、2022年の季節EPS



第4.3-2図 C3S参加機関の再予報の1~3か月目の3か月平均500hPa高度の北半球における解析値とのアノマリー相関

エラーバーは試行回数1000回のbootstrap法による95%信頼区間。アンサンブルメンバー数は全ての機関でそれぞれ10。対解析値としてECMWF長期再解析ERA5(Hersbach et al. 2020)を使用。平年値期間は1993-2016年。

※C3S:欧州委員会が主導する地球観測計画であるコペルニクス計画の計画要素の一つである、コペルニクス気候変動サービス。

の更新により、予測精度が向上していることが分かる。また、UKMOの予測精度は特に冬期(11~12月)に他の機関に比べて高いが、これにはAO/NAOの予測の成功が関係していると考えられる。

(2) シグナルーノイズパラドックス

UKMOにおけるAO/NAO予測の成功は関係者に衝撃を与えた一方、その予測精度はアンサンブル平均とスプレッドで求められるシグナル(S)/ノイズ(N)比から推察される予測可能性の限界を大きく超えており、予測事例の不足やアンサンブル予測システムの問題を指摘する論文も発表される(例えば、Saito et al., 2017)など論争を巻き起こした。これに対して、Scaife and Smith(2018)は、AO/NAOの予測の他にいくつかの事例を挙げ、季節あるいは気候予測の分野では、中・高緯度においてアンサンブル平均で推定されるシグナルが小さすぎて、「モデルのコントロールランとアンサンブル平均との相関よりも解析値とアンサンブル平均との相関の方が高い」、つまり、モデルによるモデルの振る舞いの予測よりも、モデルによる現実世界の振る舞いの予測の方が精度が高い、というパラドックスがよく見られると主張し、このことを「シグナルーノイズパラドックス」と名付けた。彼らが挙げた事例は、解析の海面水温を与えた大気モデルによるNAOの変動、QBOに対する中・高緯度大気の応答、火山噴火、太陽活動、オゾン減少といった外部強制に対する大気応答、などである。彼らはシグナルーノイズパラドックスの要因は証明できていないとしつつ、その候補として「中緯度における大気海洋相互作用の欠如」、「モデル解像度が粗いことによる弱いエディーフードバック」、「テレコネクションの誤差」、「積雲対流などのパラメタリゼーションの誤差」を挙げている。

Mori et al. (2019)は、7つの大気モデルを用いたマルチモデルアンサンブルデータと解析との比較から、大気モデルで見積もられる、バレンツ-カラ海を中心とする北極海の海氷が強制するシグナルが、解析に比べて小さすぎることを示した。北極海の海氷影響が弱いことも、シグナルーノイズパラドックスの要因の一つとなっている可能性がある。

シグナル・ノイズパラドックスは、アンサンブル予測システムがきちんと変動を再現していないことを意味しているが、これまで考えられていたよりも、中・高緯度における季節予報の可能性が高いことも示唆している。解かねばならないパラドックスである一方、季節予報関係者としては勇気づけられるパラドックスでもある。

4.4 季節予報技術の展望と今後の課題

気象庁は、4.2 節で示したように数値予報システムの導入後、その改善を行い、季節予報のための予測精度を着実に向上させてきた。また、4.3 節で示したように、近年、世界的には MJO と AO/NAO の予測の成功という、季節予報に関する二つのブレイクスルーがあり、さらに、現在の季節 EPS が予測のシグナルを過小評価している(シグナル・ノイズパラドックス)可能性を示す研究もいくつか現れてきた。これらのことは、季節予報の明るい将来を示しているが、その実現には課題が多い。

ENSO は気候システムの年々変動として最も顕著な現象であるが、各々の ENSO の時空間構造は多様である。また、エルニーニョもどき、インド洋ダイポールモード、カリフォルニアニーニョ、太平洋・大西洋の南北モードなど、年々以上の時間スケールを持ち、季節予報のシグナルとなる熱帯域の大気海洋変動が多く発見されている。現在の季節 EPS は、これらの多様な空間・時間スケールの変動とその中・高緯度への多様なテレコネクションが十分に再現・予測出来ているとは言えない。

これまで、季節予報の時間スケールでは、中緯度の海洋は大気の影響を受けて変動すると考えられてきたが、最近の研究では太平洋、大西洋の海洋前線帯を中心に大気と海洋が相互に作用して変動することが知られてきた。中緯度における海洋前線帯の形成・維持や大気海洋相互作用には、傾圧不安定性等で発達する海洋の中規模渦が本質的な役割を果たしている。ロスビー変形半径を考慮すると、海洋モデルで中緯度の中規模渦を表現するためには 0.1 度程度の水平解像度が必要である。現在の季節 EPS では解像度が粗く、海洋大循環の重要な要素である中規模渦を

再現できていないため、その大規模場への影響に改善の余地がある。

海洋初期値について考えると、アルゴ計画により、2000 年以降には海洋内部の観測データが充実してきている。これらのデータを生かす海洋データ同化手法も改善され、現在の季節予測システムでは海洋に対して 4 次元変分法が、海氷に対しては 3 次元変分法が採用されている。しかし、データ同化期間中の大気強制力と結合モデルの大気場は整合していないため、予測開始直後の初期ショックに伴って海洋混合層が大きく変化して予測に影響を与えるという課題がある。

1991 年のピナツボ火山噴火のような、成層圏にまでエアロゾルが注入される大規模な火山噴火は、その後の大気・海洋循環に年から数年のスケールで影響を与える。現在の季節 EPS では、リアルタイムで火山性エアロゾルの 3 次元構造を初期値化できないため、このような火山噴火時には対応出来ない。また、オゾン予報変数化していないため、近年、季節内から季節予報の時間スケールで地上気温などへの影響が指摘されている成層圏オゾンと放射過程の相互作用(Deushi, 2022 など)を考慮できていない。

現在、気象庁では、これらの課題の解決に向けて精力的に開発を進めている。今後の季節予測システムの改良に向けた主な方向性は、①大気モデルの水平・鉛直の高解像度化、各種物理過程の改良、②海洋モデルの水平高解像度化と鉛直ハイブリッド座標の導入、③大気海洋結合データ同化と衛星観測 SST 直接同化の導入、④大気化学と放射過程の相互作用の導入、である。①の高解像度化と物理過程の改良では、大気における波・平均流相互作用、対流圏・成層圏相互作用の改善などが期待される。②では、海洋モデルの水平解像度を 0.1 度(渦解像モデル)とすることで、中緯度の海洋前線帯の水温傾度とその影響を受ける大気擾乱の改善や海洋混合層における水温ドリフトの軽減を狙う。③では、現実的な大気海洋相互作用が反映された、予測モデルと物理的に整合した初期ショックの小さい、大気海洋初期値作成を目指す。また、時間フィルタによる位相の遅れが指摘されている全球日別海面水温解析値(MGDSST; 栗原ほか, 2006)の代わりに衛星観測 SST を直接同化する

ことで、SST 変化の位相遅れ軽減を狙う。④では、オゾン の予報変数化やエーロゾル日別解析値の利用 (現在は月別気候値) など、これまで考慮されていない地球システム構成要素と大気の放射過程との相互作用を導入・改善するための開発等を行う。

一方、システム構成について考えると、2022 年の季節 EPS 更新によって、それまで 5 日毎に計算していた予測を毎日更新できるようになり、また上述の MJO 予測精度の大幅な改善によって、季節 EPS の 1 か月予報 (特に 3~4 週目) への利用を検討できるようになった。これにより、全球 EPS を 2 週目予測までに限定することで、3~4 週目に必要だった計算機資源を大気海洋結合化に有効利用できると考えられる。

以上の課題に取り組むためには、庁内の開発・研究体制を確立しつつ、大学・研究機関の協力も得ながら数値予報システムの開発・研究をこれまでよりも強力に推進する必要がある。

4.5 季節予報のニーズ

今年 (2023 年) 1 月 24~26 日の寒波の見通しは、1 月 16 日頃から報道されていた。大雪と低温の早期天候情報を発表しており、十年に 1 回の寒波と報道されていた (早期天候情報の発表基準が、その地点・時期として 10 年に 1 度程度しか起きない現象が、確率として 30% 以上はあると見込まれる場合、としていることと、真冬の時期だったためと思われる)。早期天候情報 (2 週間先までの情報) は、防災気象情報として社会に浸透しつつあると言える。なお、この寒波では、大雪による交通障害、低温による水道管破裂のほか、強風による通行止めも発生した。

現在は、2 週間先までの発表予報を毎日提供しているのは気温のみであり、大雪、暴風の予報の追加が今後の課題であり、数値予測システムの更なる精度向上が重要となる。また、情報を受け取る人々に有効な対応をとってもらうには、2 週間予報・週間予報・短期予報、と切れ目なく、情報を発信する体制の強化が重要であり、そのためには、情報体系の整理や、気候と総観気象の知識を併せ持つ人材の育成も必要となる。

1 か月先や 3 か月先の気温の発表予報の精度向上は、極端な高温や低温の見通しを人々に提供する

ことを可能とすること以外に、産業への活用という観点でも重要である。これまで家電流通分野や清涼飲料分野など、様々な分野から精度向上の要望をいただいている。また、農業分野は、近年、スマート農業の導入が目覚ましく、気象データの利用はその中核である。水稲刈取り適期の予測等は、積算気温 (毎日の気温の積算) が重要とされ、これまで平年値が利用されていることが多かったが、1 か月予報等と相性が良い (高温や低温の詳細な時期に依存しない) といわれており、季節予報の活用が有望な分野といえる。

更に、保険分野を含む様々な産業分野から、6 か月予報、1 年予報の要望もある。1 年の計画の初期から、気象予測を活用したい、という要望である。一方、国際的には、近未来予測研究が進行中である。これは、1 年から十年程度の予測を目的としたもので、予測スキルの向上などが議論されている (Cassou et al., 2018)。こうした知見も吸収しつつ、将来的な予測期間の延長を視野にいれたい。

4.6 おわりに

本稿では、継続的な数値予報システムの改善について、季節予報の未来は明るい、ということを含めて述べた。とはいえ、大気のカオスの性質に起因する予測可能性の限界はあり、また、予測モデル自体の不完全性に起因する誤差は完全に無くなりはないであろう。

季節予報は、本来、予報要素の確率分布に基づいて作成されるべきであり、不完全な予測システムの出力を補正して適切な確率分布を作成するガイダンスの開発が必要である。予測モデルの系統誤差補正や確率予報の精度改善には、過去の多数の事例を予測する“再予報”の充実も必要である。また、予測システムの出力とガイダンス、気象・気候の変動のメカニズムとその予測可能性に関する知見、さらにはその社会的影響や対策に関する知識を適切に用いて発表予報や情報を作成・提供・解説する、予報担当者の能力開発も必要である (そのための体制構築も必要である)。改善される予測システムによる予測を最大限活かして、より社会に活用される季節予報を提供していきたい。

謝辞

本報告の作成に当たり、気象庁情報基盤部数値予報課と気象研究所の関係者の協力を得た。

参考文献

Cassou, C., Y. Kushnir, E. Hawkins, A. Pirani, F. Kucharski, I. Kang and N. Caltabiano, 2018: Decadal Climate Variability and Predictability: Challenges and Opportunities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, 479 – 490, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0286.1>.

Deushi, 2022: Climate Impacts: Impacts of Ozone on Southern Hemisphere Climate. *Handbook of Air Quality and Climate Change*. Springer, 1-25.

Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Hornyi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. De Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hlm, M. Janiskov, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, de P. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J.-N. Thpaut, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049.

Hirahara, S., Y. Kubo, T. Yoshida, T. Komori, J. Chiba, T. Takakura, T. Kanehama, R. Sekiguchi, K. Ochi, H. Sugimoto, Y. Adachi, I. Ishikawa, and Y. Fujii, 2023: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System Version 3 (JMA/MRI-CPS3). *J. Meteor. Soc. Japan*, accepted. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-009>.

気象庁, 2021: 気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)の本計算進捗. 気象庁数値予報開発センター年報(令和2年), 115-124.

気象庁, 2022: 季節アンサンブル予報システムの改良. 気象庁数値予報開発センター年報(令和3年), 122-132.

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 特別号, 気象庁, S1-S18.

Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda, K. Oouchi, 2007: A Madden-Julian Oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model. *Science*, **318**, 1763-1765.

Mori, M., Y. Kosaka, M. Watanabe, H. Nakamura, and M. Kimoto, 2019: A re-evaluated estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling. *Nat. Clim. Change*, **9**, 123–129.

Saito, N., S. Maeda, T. Nakaegawa, Y. Takaya, Y. Imada, and C. Matsukawa, 2017: Seasonal predictability of the North Atlantic Oscillation and zonal mean fields associated with stratospheric influence in JMA/MRI-CPS2. *SOLA*, **13**, 209-213.

Scaife, A. A., A. Arribas, E. Blockley, A. Brookshaw, R. T. Clark, N. Dunstone, R. Eade, D. Fereday, C. K. Folland, M. Gordon, L. Hermanson, J. R. Knight, D. J. Lea, C. MacLachlan, A. Maidens, M. Martin, A. K. Peterson, D. Smith, M. Vellinga, E. Wallace, J. Waters, and A. Williams, 2014: Skillful long-range prediction of European and North American winters. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 2514-2519.

Scaife, A., and D. Smith, 2018: A signal-to-noise paradox in climate science. *Npj Clim. and Atmos. Sci.* (2018) 28.

高倉寿成, 小森拓也, 2020: 2段階 SST 法の詳細と導入事例紹介. 令和2年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 2-8.

Vitart, F., 2017: Madden-Julian Oscillation prediction and teleconnections in the S2S database. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **143**, 2210-2220.

Wheeler, M. C. and H. H. Hendon, 2004: An allseason real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1917–1932.