

季節予報の展望

前田修平（気象庁気候情報課）

1. はじめに

交通政策審議会気象分科会は、2018 年 8 月 20 日に気象庁に対して「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）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、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。本報告ではこの提言の背景となった、数値予報による季節予報技術の現状と今後の展望について述べる。

2. 気象庁における季節予報技術の現状

気象庁では 1 か月予報には 1996 年に、3 か月予報と暖・寒候期予報には 2003 年に、それぞれ数値予報を導入した。その後、数値予報システムの改善に伴い、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表 1 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、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

図 1 は、数値予報による 1 か月予報の精度を示す。1981～2010 年の 30 年間の過去の予報実験（ハインドキャスト）による北日本域における予報 3～4 週目（予報 17～30 日目までの 14 日平均）の地上気温偏差のアンサンブル平均予測と実況との相関係数である（アンサンブル数は 5）。2014 年までのモデルに比べ、2018 年から利用している現在の現業モデルでは、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。筆者は、予報 3～4 週目は大気の初期値問題としての予測可能性が小さく確度の高い予報を出すことはできないのではないかと長年推察してきたが、その推察は間違っていたようである。一方、夏期の予測精度はほとんど改善していない。

冬期、春期については、顕著現象の予測精度も向上した。図 2 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、日本の平均気温が過去 70 年で最も低く日本海側では大雪となった。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を設置するきっかけにもなった。図に示すよう

表 1 気象庁の現業数値予報モデル、2018 年 7 月現在。
赤枠内が季節予報関連。

数値予報モデル (略称)	水平 分解能	鉛直層数 (最上層)	予報期間 (初期値の時刻 または実行頻度)	データ同 化 ¹
局地モデル(LFM)	2km	58層 (約20km)	9時間(毎時)	3DVar
メソモデル(MSM)	5km	76層 (約22km)	39時間(00,03,06,09,12, 15,18,21UTC、毎日)	4DVar
全球モデル(GSM)	約20km	100層 (0.01hPa)	84時間(00,06,18UTC、 毎日) 264時間(12UTC、毎日)	4DVar
全球アンサンブル 予報システム	約40km	100層 (0.01hPa)	5.5日間、27メンバー (06,18UTC) 11日間、27メンバー(00,12UTC、 毎日) 18日間、13メンバー (00,12UTC、毎日) 34日間、13メンバー (00,12UTC、火・水曜日)	4DVar
季節アンサンブル 予報システム	大気 約110km 海洋 約50～100km	大気60層 (0.1hPa) 海洋52層 +海底境界層	7か月間、 計51メンバー (00UTC、毎月)	4DVar

¹ 3DVarは三次元変分法、4DVarは四次元変分法をそれぞれ示す。² 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実行される。

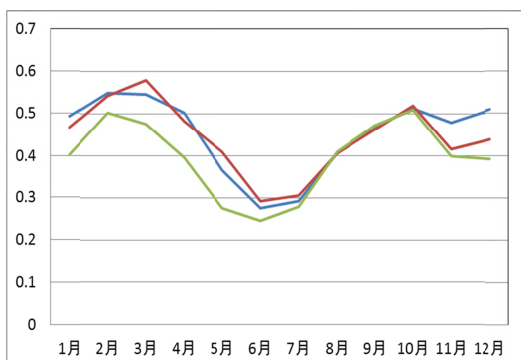


図1 北日本域 (37.5-45N, 140-145E) の予報 3~4 週目 (予報 17~30 日目) の地上気温偏差の予測精度 (5 メンバーアンサンブル平均と解析との相関係数)。1981~2010 年の 30 年間の過去の予報実験で比較。緑: 2011~14 年の現業モデル (水平約 110km, 鉛直 60 層)、赤: 2014~17 年の現業モデル (水平約 55km, 鉛直 60 層)、青: 2018 年現在の現業モデル (水平約 55km, 鉛直 100 層)。横軸は予報初期値の月 (前 3 ヶ月平均)。

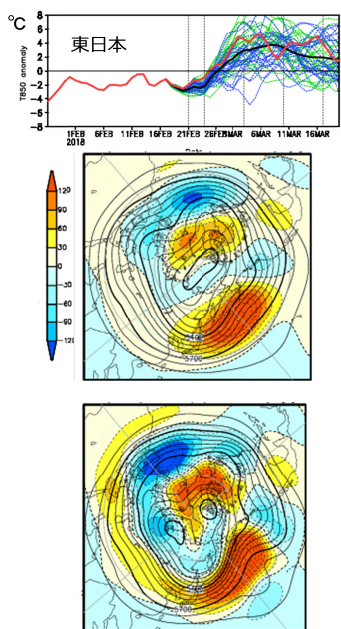
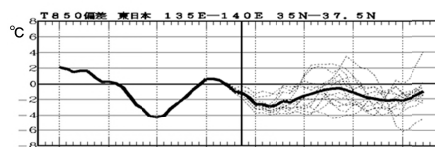


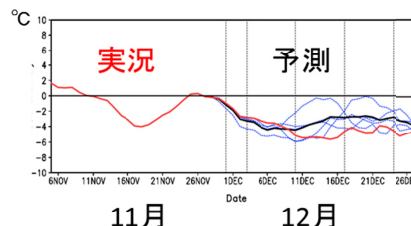
図3 2018 年 2 月 21 日初期値の予報。上: 現業モデルによる東日本域 (35-37.5N, 135-140E) の 7 日移動平均 850hPa 気温偏差。赤線が実況、黒線がアンサンブル平均、青・緑線が各メンバーの予報。中: 500hPa 高度場のアンサンブル平均予報で、予報 3~30 日の 28 日平均場。等値線が高度、陰影が平年偏差 (m)。下: 中と同じで対応する解析。

に、当時の現業モデルでは、予報初期に近い 12 月上旬の低温は予測できたが、中旬には

東日本の850hPa気温平年偏差予測、7日平均



(2005年当時の予測資料)



2005/11/30初期値の12月(12/3-30)の予報
海面気圧(等値線)と平年偏差(色) hPa
予報(最新現業モデル) 実況

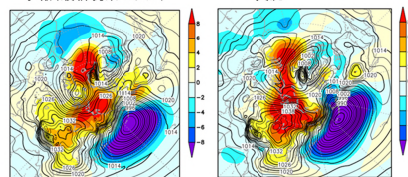


図2 2005 年 12 月の異常低温の予測。初期値は 11 月 30 日。上: 2005 年当時の現業モデルによる東日本域 (35-37.5N, 135-140E) の 7 日移動平均 850hPa 気温偏差。太い実線が実況 (11/30 まで) とアンサンブル平均予報。細い線が各メンバーの予報。中: 同上、ただし 2018 年の現業モデルによる予報。赤線が実況、黒線がアンサンブル平均予報、青線が各メンバーの予報。下: 2018 年の現業モデルによる海面気圧の予報で、左) 予報 3~30 日の 28 日平均場 右) 解析。等値線が海面気圧で陰影が平年偏差 (hPa)。

平年並みに戻ってしまった。一方、現在の現業モデルでは、12 月下旬までの低温の持続を予測できている。アリュ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、過去 30 年間で最も多かったが、現在の技術を用いれば、強い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。図 3 は、昨年（2018 年）3 月の現業モデルの予測の例である。2018 年 3 月は、全国 153 の気象官署等のうち 60 地点で 3 月として 1 位の高温となるなど、2 月の低温から一転して記録的な高温となった。現業モデルは、まだ実況が低温であった 2 月 21 日の段階で、3 月初めから高温に転じ、3～4 週目にかけて顕著な高温が持続することを予測していた。これは、太平洋側のジェット気流が平年より北偏し、持続することを予測出来ていたことが関係している。この異常高温は、果樹の開花の早まりなど、農業を中心に社会経済活動に大きな影響を与えたが、この予測を悪影響のリスク軽減に生かした事例もいくつかあった。

(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 年に数値予報を使い始めた。当初は、エルニーニョ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、大気モデルによる予測を用いていた。2010 年には、大気海洋結合モデルを直接利用しはじめ、2015 年にはそれを更新した (Takaya et al., 2017)。図 4 に示すように、システムの更新の度に着実に予測精度が向上している。

図 5 は、記録的な高温となった 2018 年 7 月を対象とする 5 月初期値の予測 (500hPa) である。振幅は小さいものの、日本の南で負偏差、日本を含む中緯度帯で正偏差といったパターンがよく予測されており、アノマリー相関係数は、北半球域で 0.66、日本付近 (20-60 N, 100-170E) では 0.90 と高い。

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、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

用のためには不十分であり、更なる精度向上が必要である。例えば、エルニーニョ現象の予測でも大きな改善が見られているが、そのパターン再現性は不十分で、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も不十分となっている。

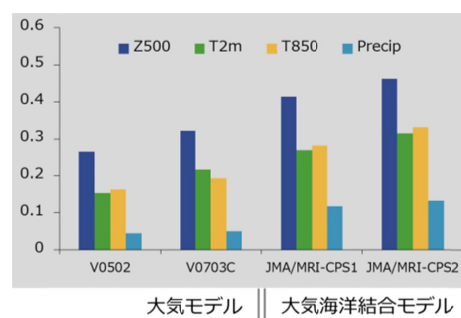


図 4 気象庁の季節予報システムの予測精度の変遷。アノマリー相関平均の全球平均。紺：500hPa 高度、緑：2m 気温、橙：850hPa 気温、水色：降水量。2 月初期値の 6～8 月の 3 ヶ月平均場、全球。それぞれハインドキャストの結果から (ハインドキャストの仕様はシステムによって異なる)。それぞれの運用開始の時期は以下のとおり；V0502 (2006), V0703C (2007), JMA/MRI-CPS1 (2010), JMA/MRI-CPS2 (2015)。

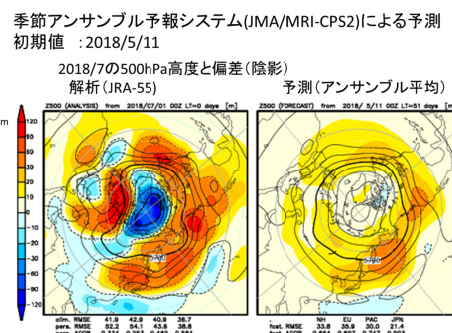


図 5 現業の季節アンサンブル予報システムによる 2018 年 7 月の予測。2018 年 5 月 11 日初期値。500hPa 高度 (等値線) と平年偏差 (陰影)。左：解析、右：アンサンブル平均予測。

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

近年、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。一つ目は熱帯

の季節内変動 (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、1 か月予報の後半、2 か月目の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、十数年前までは「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、MJO を主な予報精度の評価指標としていない現業機関による予測精度も向上してきた。図 6 は、気象現業・研究機関による MJO の予測精度である (Vitart, 2017)。15 日ごろまでは 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、予報約 30 日まで 0.6 を超えることである。MJO の予測はもはや「悪夢」ではなく、1 か月予報の後半にとって予測可能なソースとなってきた。気象庁の予測精度は

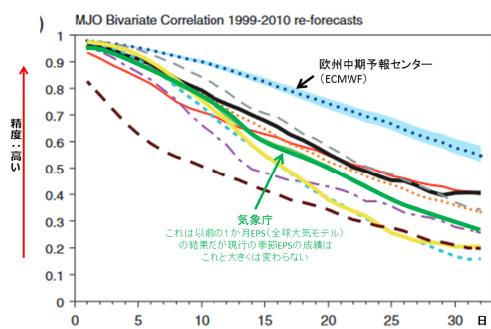


図 6 熱帯の季節内変動 (MJO) の予測精度の相互比較。1999~2010 年のハインドキャストの結果。Vitart (2017) の Fig. 1 に加筆。横軸は予報日数。図中、水色が ECMWF、緑が気象庁 (2017 年までの現業モデル)。

ECMWF のそれとは大きな差があるが、逆に言えば今後のモデル改良で精度が向上するはずであり、「伸びしろが大きい」と言える。

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氾濫に関係しており、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、近年、イギリス気象局 (UKMO) の季節予報システム (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

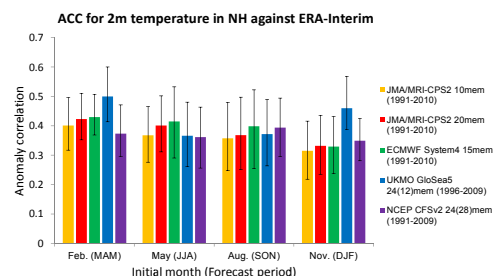


図 7 各国現業機関の季節予報システム (2016 年現在) の予測精度。ハインドキャストによる評価。3 か月平均北半球 2m 気温のアノマリー相関係数。左から、春 (2 月初期値の 3~5 月)、夏 (5 月初期値の 6~8 月)、秋 (8 月初期値の 9~11 月)、冬 (11 月初期値の 12~2 月)。気象機関 (アンサンブル数、ハインドキャスト期間) は、橙: 気象庁 (10、1991~2010 年)、赤: 気象庁 (20、1991~2010 年)、緑: ECMWF (15、1991~2010 年)、青: UKMO (5 月と 11 月初期値が 24 で他が 12、1996~2009 年)、紫: NOAA (11 月初期値が 28 で他が 24、1991~2009 年)。ひげはブートストラップ法による 95% 信頼区間。

ジャイアの水温、バレンツ-カラ海など北極海の海水、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ている。図7には、2016年時点における各国気象機関の現業季節予報システムの予測精度を示す。冬期と春期にはUKMOの予測精度が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-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、季節予報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S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-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-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-フィードバック」、「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。

最近、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水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。北極海の海水影響が弱いことも、シグナル-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. 展望と今後の課題

気象庁は、2.で示したように数値予報の導入後、その改善を行い、季節予報の精度を着実に向上させてきた。また、3.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ークスルーがあり、また、現在の季節予報システム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)こと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。現在の季節予報システムは、これらの多様な変動と其中・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度程度の解像度が必要である。現在の季節予報システムでは解像度が粗く、海洋大循環の重要な要素である中規模渦を再現できておらず、その大規模場への影響をパラメタライズしている。敢えて言えば、大気大循環モデルにおいて傾圧不安定波による熱輸送や運動量輸送をパラメタライズしているようなものである。

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。現在の季節予報システムでは、このような火山噴火時には対応出来ない。オゾンとの相互作用も考慮できていない。

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たし、これら

のデータを生かす海洋データ手法も改善されてきた。しかし、予報開始後に初期ショックで海洋の物理場が大きく変化するという問題がある。また、海水に関するデータは同化できていない。

気象庁では、これらの課題の解決に向けて現在精力的に開発を進めており、2021 年度には、季節予報システムを更新する予定である。更新の主なポイントは、①大気モデルの水平・鉛直の高解像度化とモデルトップの引き上げ、各種物理過程の改良、②海洋モデルの高解像度化、③海洋データ同化への四次元変分法の導入・海水データ同化の導入、である。①の高解像度化とモデルトップの引き上げで、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。また、積雲スキーム等の改良による MJO の再現性向上、積雲対流起源の重力波抵抗スキームの導入による QBO の再現性と其中・高緯度大気への影響の改善が期待される。②では、海洋モデルの解像度を 0.25 度（渦許容モデル）とすることで、熱帯の不安定波動の再現性向上とそれによるバイアスの軽減や ENSO のパターンの予測の改善を狙う。また、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を狙う。③では、観測データの有効活用と力学的にバランスのとれた海洋初期値の作成、海水予測の改善を狙う。現業システムに比べて大幅なバージョンアップであるため開発に苦戦しているが、気象研究所と共同で、なんとか更新を実現させたい。

その上で将来的に、海洋の中緯度における渦の再現性向上を目指した海洋モデルの更なる高解像度化や、大気の再現性を目指した大気モデルの高解像度化、大気と海洋の初期値精度向上を目指した大気海洋結合同化シ

システムの導入、オゾンやエアロゾル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との相互作用を導入するための開発等を行い、季節予報の明るい未来を実現したい。そのためには、計算機資源の確保はもちろんのこと、季節予報システムに限らず、メソ〜温暖化予測まで、気象研究所を含めた庁内の開発・研究体制を見直しつつ、大学・研究機関の協力も得ながら数値予報の開発・研究をこれまでよりも強力に推進する必要がある。

謝辞

本報告の作成に当たり、気象庁気候情報課と気象研究所の関係者の協力を得た。また、本研究集会への参加に当たり、科学研究費補助金基盤研究 B「熱帯太平洋観測システム効率化への成長擾乱・時空間変動特性の利用に関する研究」(15H03727)の支援を受けた。

参考文献

- 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 reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling. *Nat. Clim. Change*, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0379-3>.
- 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 Atom. Sci.* (2018) 28.
- Takaya, Y., S. Hirahara, T. Yasuda, S. Matsueda, T. Toyoda, Y. Fujii, H. Sugimoto, C. Matsukawa, I. Ishikawa, H. Mori, R. Nagasawa, Y. Kubo, N. Adachi, G. Yamanaka, T. Kuragano, A. Shimo, S. Maeda, and T. Ose, 2017: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 2 (JMA/MRI-CPS2): Atmosphere-land-ocean-sea ice coupled prediction system. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-017-3638-5.
- Vitart, F., 2017: Madden-Julian Oscillation prediction and teleconnections in the S2S database. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 143, 2210-2220.