



第1章 基礎編

1.7.10 季節アンサンブル予報システム

季節アンサンブル予報システム

季節アンサンブル予報システム(JMA/MRI-CPS3)	
モデル	大気海洋結合モデル(第3世代)
解像度	大気: TL319L100(水平格子間隔約55km、鉛直100層(上端0.01hPa)) 海洋: 経度方向0.25度×緯度方向0.25度、鉛直60層
初期値	大気: 全球速報解析 陸面: オフライン地表面解析(*) 海洋: 4次元変分法(*) 海氷: 3次元変分法(*) * 大気強制力: 全球速報解析(速報解析)、JRA-3Q(遅延解析)
予報時間	240日
メンバー数	初期値あたり5メンバー(コントロールラン+4擾動ラン)
実行頻度(初期時刻)	1日1回(00UTC)
初期擾動作成手法	大気: 熱帯・北半球・南半球 成長モード育成(BGM)法 海洋: 海洋解析誤差擾動
モデルアンサンブル手法	確率的物理過程強制法
再予報	24初期値×5メンバー×30年(1991～2020年)
再予報初期値	大気: 気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q) 海洋: 4次元変分法(大気強制力: JRA-3Q)
モデル出力解像度	全球域1.25度、日本域0.5625度



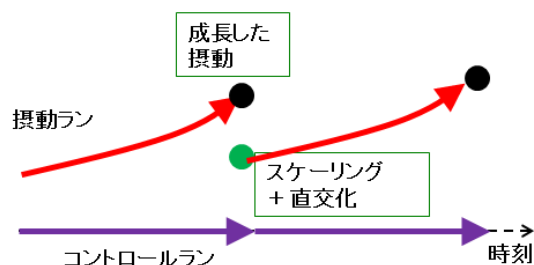
現在の季節アンサンブル予報システム(季節EPS)は、3か月予報や暖・寒候期予報、エルニーニョ監視速報など、長期予報を支援するための大気海洋結合モデルであり、2022年2月に運用を開始したシステムである。季節EPSでは、大気海洋結合モデルであるJMA/MRI-CPS3(Hirahara et al., 2023)が用いられており、海洋モデルや海氷モデル、陸面モデルを大気モデルに結合して計算するため、大気モデルに比べて多くの計算機資源を必要とする。大気部分の解像度はTL319L100(水平格子間隔約55km、鉛直100層)であり、全球アンサンブル予報システム(GEPS)の解像度(TQ479L128、TQ319L128)よりも粗くなっている。また、現業予報における大気・陸面初期値はGEPSのコントロールランと同じものを用いるが、海洋・海氷初期値は変分法を用いて作成する点がGEPSと異なる。1日1回(初期時刻は00UTC)5メンバーの計算を実施しており、予報時間は240日間である。この予報時間は、アンサンブル予報を構成するために用いる時間ずらし平均法(LAF法:説明は後述)とリードタイムを考慮しても6か月予報に十分な期間として設定されている。

季節アンサンブル予報システム

アンサンブル摂動

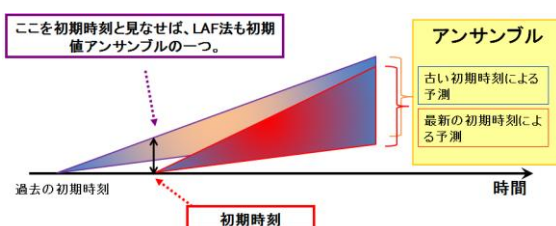
▶ 成長モード育成法 (BGM法)

- 前初期値に対して、摂動を足し込んだ予測と足し込まない予測をそれぞれ計算し、着目する初期時刻までに成長した摂動を抽出する手法
- 季節EPSでは、BGM法で抽出した摂動を大気の初期摂動として用いる



▶ 時間ずらし平均法 (LAF法)

- 最新の初期値だけでなく、古い初期値からも予報を行い、それらの結果を組み合わせるアンサンブル予報を構成する手法
- 季節EPSでは、LAF法でアンサンブル予報を構成する



季節EPSの初期値あたりの摂動は、成長モード育成 (BGM: Breeding of Growing Mode) 法 (Toth and Kalnay, 1993) で作成される。BGM法とは前初期時刻の解析値に摂動を足し込んだ予測と足し込まない予測をそれぞれ計算することで、初期時刻までに成長した摂動を抽出する手法である (左図)。予報の初期時刻以外の期間もBGMサイクルを維持する必要があるが、GEPSで用いている特異ベクトル (SV: Singular Vector) 法に比べると計算コストが小さい。初期時刻の直後から成長する摂動を作成する方法としてはSV法の方が優れているが、季節予報では週間～2週間予報よりも初期値の重要性が比較的小さいため、より計算コストの小さいBGM法を用いている。

季節EPSの初期値あたりのコントロールメンバーと、BGM法による摂動メンバーを合わせると5メンバーのみであり、季節予報における不確実性を表現するには不十分である。このため、古い初期値からの予報も摂動の1つと考えて組み合わせることで、季節予報の不確実性を評価するために十分なメンバー数を確保し、アンサンブル予報を構成する。この手法は、時間ずらし平均 (LAF: Lagged Average Forecasting) 法 (Hoffman and Kalnay, 1983) と呼ばれる (右図)。LAF法は単純な手法であり、計算機資源を複数の日に分散できるという利点もあるが、古い初期時刻の予報精度は一般的に最新の初期時刻よりも低いため、予報精度が低下するという欠点がある。しかし、初期値の重要性が比較的小さい季節予報では、古い初期値を利用することによる予報精度の低下は僅かであることから、LAF法を用いている。

季節アンサンブル予報システム 再予報

◆ 再予報(過去予報)

英語では、**Re-forecast (Hindcast)**とよぶため、
日本語でも、**ハインドキャスト**と呼ばれることもある。

Hindcastは、**Behind + Forecast**の造語である。

運用するモデルを用いて行う過去事例の予報実験

➤ 再予報の目的

- 予測精度の評価
- モデル統計値(気候値・平年値)や系統誤差の計算

➤ 再予報の期間

- エルニーニョ・ラニーニャ現象等による変動の影響を除去するため、最低20年間以上は必要。平年値と同じ30年間が望ましい。

➤ 問題点

- 多くの過去事例について計算するため、大量の計算機資源を必要とする。

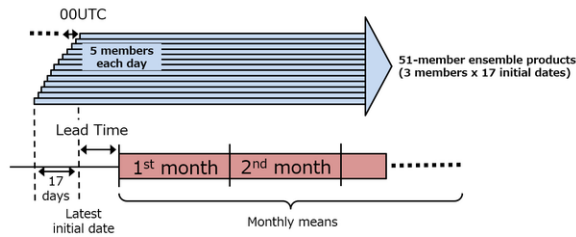
(気象庁では計算機資源の制約のため、運用モデルに比べて計算頻度を減らしている。)

季節予報を目的とした数値予報システムでは、予測精度の評価や、モデル統計値(気候値・平年値)・系統誤差の計算を目的として、再予報(Re-forecast, Hindcast)を行うことが一般的であり、気象庁だけでなく季節予報を実施している世界各国の数値予報センターでも実施されている。再予報の期間は、エルニーニョ・ラニーニャ現象等の数年周期の変動の影響を除去するため最低20年以上は必要で、平年値と同じ30年間が望ましい。しかし、多くの過去事例について再予報をするためには大量の計算機資源を必要とすることから、気象庁では計算機資源の制約のため、運用モデルに比べて再予報の計算頻度を減らしている。

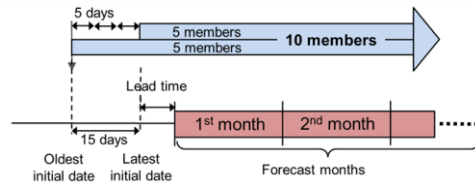
季節アンサンブル予報システム

現業予報と再予報の比較

■ 現業予報



■ 再予報



- 再予報は現業予報と完全に同一のモデルを用いて行う必要がある。
- 計算機資源制約のため、再予報を実施する初期値は、月2日と少ない。
- 再予報の計算期間は、平年値と同じ1991～2020年の30年間である。

初期月	LAF初期日構成
1月	12/27, 12/12
2月	1/31, 1/16
3月	2/25, 2/10
4月	3/27, 3/12
5月	4/26, 4/11
6月	5/31, 5/16
7月	6/30, 6/15
8月	7/30, 7/15
9月	8/29, 8/14
10月	9/28, 9/13
11月	10/28, 10/13
12月	11/27, 11/12

図は再予報と現業予報の仕様を比較したものである。再予報の結果は系統誤差補正に利用するため、再予報は現業予報と完全に同一のモデルを用いて行う必要がある。現業予報では、毎日5メンバーの予報を行い、うち3メンバーを利用する17初期日のLAF法により、51メンバーのアンサンブル予報を構成して予報を行う(左図)。一方、再予報では15日間隔の月2日の初期値でそれぞれ5メンバーの予報を行い、LAF法で10メンバーのアンサンブル予報を構成する(右図)。なお、再予報の計算期間は平年値と同じ1991～2020年の30年間である。

季節アンサンブル予報システム 再予報の利用

■ 系統誤差(バイアス)

- モデル気候値(モデル平年値)と解析気候値(解析平年値)の差

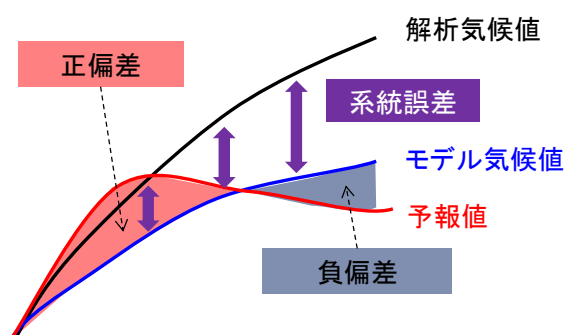
■ 偏差(平年差)

- 予報値とモデル気候値(モデル平年値)の差

⇒ 両者は同程度の系統誤差を持つため、系統誤差の影響を最小限にすることができる。

問題点

- ジェット気流の位置など、系統誤差補正が出来ない要素もある。
- このため、より系統誤差の小さい数値予報モデル開発が不可欠である。



前述のように、再予報は系統誤差補正や偏差(平年差)の算出に利用されている。ここで系統誤差とは、再予報の計算結果を平均して求めたモデル気候値(モデル平年値)と解析気候値(解析平年値)の差である。

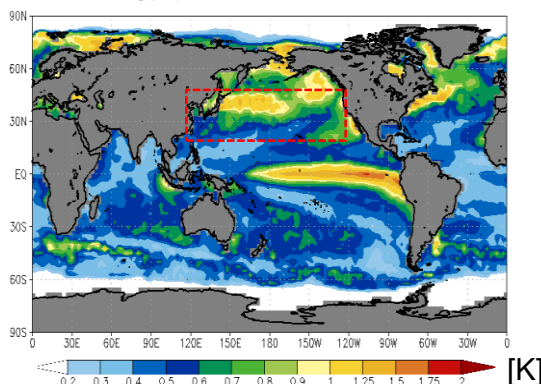
偏差(平年差)は、予報値と解析気候値(解析平年値)との差で算出する場合、系統誤差の影響を受ける。別の算出方法として予報値とモデル気候値(モデル平年値)との差で算出する方法も考えられ、この場合は系統誤差の影響を最小限にすることができる。ただし、このようにモデル気候値(モデル平年値)を用いて系統誤差の影響を補正することができるのは、気温やジオポテンシャル高度などの一部要素に限られ、ジェット気流の位置などの系統誤差は補正することができない。そのため、より系統誤差の小さい数値予報モデルを開発していくことが不可欠である。

季節アンサンブル予報システム

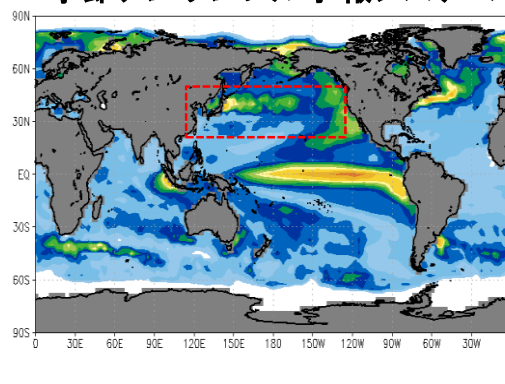
予測精度(海洋変動)

海面水温の標準偏差

解析値(MGDSST)



季節アンサンブル予報システム



- 熱帯における海洋の変動はよく再現されている
- 一方、より海洋の渦のスケールが小さい中緯度の黒潮続流域などでは海洋変動量が過小

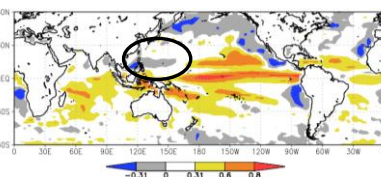
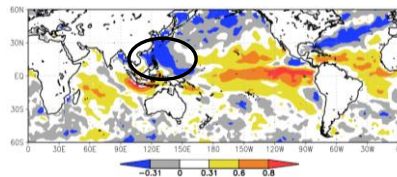
図は海面水温の標準偏差について、解析値(MGDSST(栗原ほか 2006))と季節EPSを比較したものである。季節EPSでは、熱帯付近の海洋の渦を解像できる0.25度の渦許容海洋モデルを結合しているため、熱帯における海洋の変動はよく再現されていることがわかる。一方、より海洋の渦のスケールが小さい中緯度の黒潮続流域などでは海洋変動量が過小であるため、利用の際には注意が必要である。中緯度における海洋変動の再現性を改善するには、中緯度の海洋の渦を解像できる0.1度の渦解像モデルの結合が必要である。

季節アンサンブル予報システム

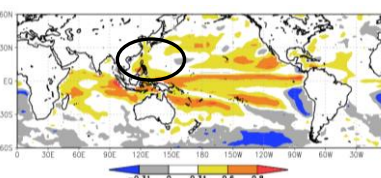
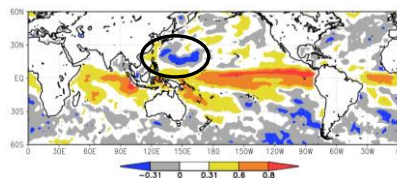
予測精度(海面水温と降水量の相関)

解析値(MGDSST/GPCP) 季節アンサンブル予報システム

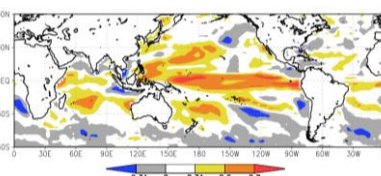
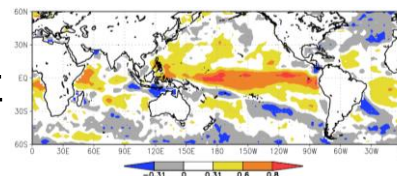
4月初期値



8月初期値



11月初期値



・解析値では日本の南の海上で海面水温と降水量が負相関

・一方、季節EPSでは負相関となっていない。

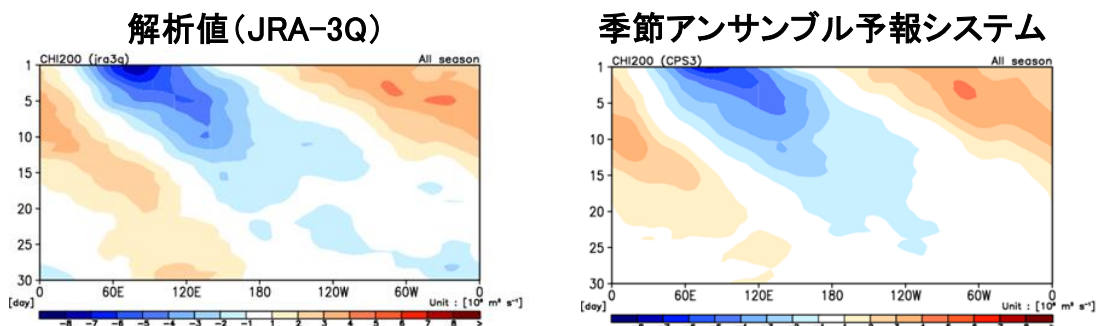
各初期月からの3か月予報における海面水温と降水量の相関

季節EPSで用いている大気海洋結合モデルは、海面水温と降水量の過剰な正相関を抑制して、熱帯海洋変動に関連した大気海洋相互作用の再現性を向上する。しかしながら、4～8月の暖候期において、解析値では日本の南の海上に海面水温と降水量の負相関が見られるが、季節EPSでは負相関となっていない。その要因として、現在の季節EPSでは大気の解像度が粗く、熱帯低気圧による海面水温の急激な変化を十分に再現できていないこと等が考えられる。

季節アンサンブル予報システム

予測精度(赤道季節内振動(MJO))

200hPa速度ポテンシャルのホフメラー図



インド洋域にMJOの対流活発位相がある時(Phase3)の CHI200合成図(全季節)

- MJOに伴う対流活発位相や対流不活発位相の東進がよく再現されている

季節EPSは、大気海洋結合モデルを用いているため、大気モデルに比べて大気と海洋の相互作用の再現性が高い。図は、赤道季節内振動(MJO)について、熱帯域の200hPa速度ポテンシャルの解析値と季節EPSの予測を比較したものである。MJOに伴う対流活発位相や対流不活発位相の東進がよく再現されていることが分かる。

参考文献

- 気象庁, 2022: 季節アンサンブル予報システムの改良. 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 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**, S1-S18.
- 高谷祐平, 2012: 再予報・ハインドキャスト. 天気, **59**, 493-495.
- 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, 2013: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System Version 3 (JMA/MRI-CPS3). J. Meteor. Soc. Japan, **101**, 149-169.
- Hoffman, R. N. and E. Kalnay, 1983: Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus A*, **35A**, 100-118.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1993: Ensemble Forecasting at NMC: The Generation of Perturbations. *Bull. Amer. Met. Soc.*, **74**, 12, 2317-2330.