



第2章 応用編

2.5 季節アンサンブル予報システムの改良

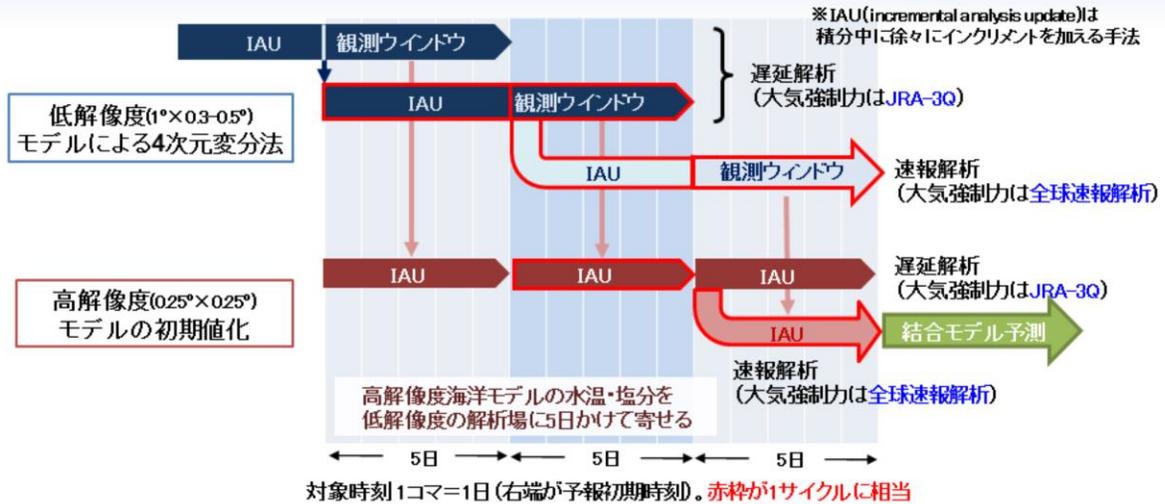
季節アンサンブル予報システムの改良

新旧システムの仕様比較

	大気海洋結合モデル(第3世代)を用いた季節アンサンブル予報システム(JMA/MRI-CPS3)	大気海洋結合モデル(第2世代)を用いた季節アンサンブル予報システム(JMA/MRI-CPS2)
運用	2022年2月～	2015年6月～2022年1月
数値モデル	大気海洋結合モデル(GSM2003C+MRI.COM v4.6)	大気海洋結合モデル(GSM1011C+MRI.COM v3.2)
水平分解能	大気:約55km 海洋:経度方向0.25度×緯度方向0.25度	大気:約110km 海洋:経度方向1.0度×緯度方向0.5-0.3度
鉛直層数	大気:100層(上端0.01hPa) 海洋:60層	大気:60層(上端0.1hPa) 海洋:52層+海底境界層
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(*) *大気強制力は、速報解析部分が全球速報解析で、遅延解析部分がJRA-3Q	大気:気象庁第2次長期再解析(JRA-55) 陸面:JRA-55 海洋:3次元変分法(大気強制力:JRA-55) 海氷:初期値化のみ
予報時間	240日	240日
メンバー数	初期値あたり5メンバー	初期値あたり13メンバー
実行頻度	1日1回	5日に1回
再予報	24初期値×5メンバー×30年(1991～2020年)	24初期値×5メンバー×41年(1979～2019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)	大気:気象庁第2次長期再解析(JRA-55) 海洋:3次元変分法(大気強制力:JRA-55)
モデル出力解像度	全球域1.25度、日本域0.5625度	全球域2.5度

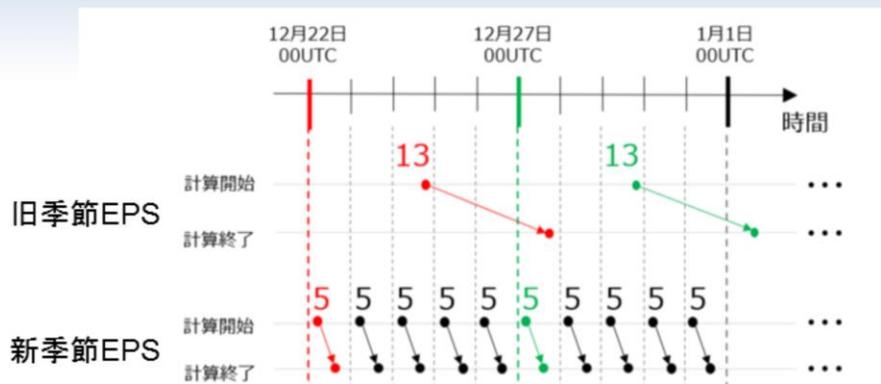
表は新旧の季節アンサンブル予報システム(季節EPS)の仕様比較を示している。新しい季節EPSで使用する数値モデルは、大気と海洋の水平解像度を向上させ、鉛直層数も増強した季節予報に用いるものとしては第3世代となる大気海洋結合モデルに更新した。初期値についても、大気と陸面の初期値を全球モデル(GSM)や全球アンサンブル予報システム(GEPS)と同一の全球速報解析とオフライン地表面解析に変更し、海洋の初期値を作成する手法に4次元変分法を導入、海氷について3次元変分法による初期値作成を開始するといった変更を実施した。また、メンバー数や実行頻度も変更したほか(後述)、モデルの予測結果の出力解像度も2.5度から1.25度に高解像度化し、0.5625度の日本域出力も追加した。

季節アンサンブル予報システムの改良 海洋同化システム(海洋初期値作成手法)の改良



海洋同化は、5日の観測ウィンドウを必要とするため、大気海洋結合モデル(第2世代)までは5日に1回の運用であったが、海洋同化の1ストリーム(上図)を、1日ずつズラして5ストリームを実行することで、海洋初期値を毎日作成できるようになった。低解像度モデルによる4次元変分法は10日の解析ウィンドウをもち、前半5日に与えるインクリメントを最適化することで後半5日の観測にフィットさせる。4次元変分法は10日の解析ウィンドウを使うが、次の解析にはウィンドウ中央の状態量を引き継ぐため(紺色部分からの下向き矢印)、4DVARもIAUも一回の解析で5日進むことになる。これを1日ずつズラして5ストリーム実行することで、海洋同化の毎日実行を実現した。なお、速報解析は即日、遅延解析は4日遅れで動作する。遅延解析はサイクルし、速報解析は毎回、遅延解析サイクルから初期値を引き継ぐ。IAUとは、徐々に(Incremental)解析場(Analysis)を更新(Update)する手法であり、予測計算開始時に発生する不自然な計算(初期ショック)を緩和する効果がある。

季節アンサンブル予報システムの改良 運用方式の変更



旧季節EPS
5日に1回、13メンバーの予測計算を行う



新季節EPS
毎日5メンバーの予測計算を行う

メリット

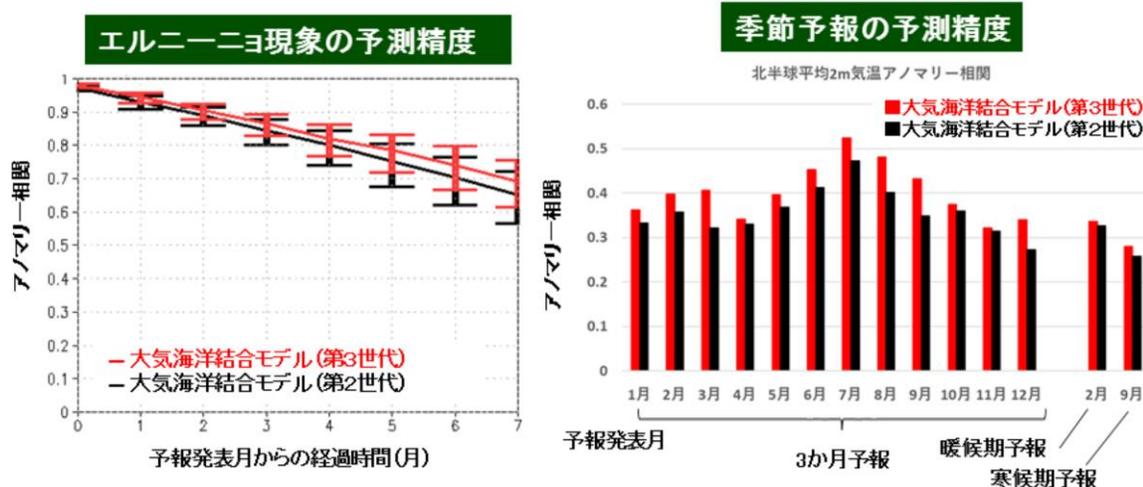
- 5日間隔の制約に縛られずに予報を利用できる
- 1か月予報や2週間予報に使われる全球アンサンブルの下部境界条件として、より新しい予報に基づく海面水温を提供できる

これまで5日に1回の実行であった海洋初期値を作成する海洋同化が毎日運用になったことで、大気海洋結合モデルの毎日実行も可能となった。このため、旧季節EPSでは5日かけて13メンバーの予測計算を実行する運用であったが、新しい季節EPSでは毎日5メンバーの予測計算を実行する運用とした。5日あたりのアンサンブルメンバー数で比較すると、旧季節EPSは13メンバー、新しい季節EPSは5メンバー×5日=25メンバーで、アンサンブルメンバー数も約2倍に増強となっている。この運用方式の変更により、より新しい初期値による計算結果が予報に利用できるようになっただけでなく、大気海洋結合モデルによる予測結果を1か月予報より短い予報に導入していくことも可能となった。2022年3月に更新した全球EPSでは、新しい季節EPSで毎日予測される海面水温を1か月予報や2週間予報の計算に利用するように改良し、予測精度を向上している。

季節アンサンブル予報システムの改良

エルニーニョ現象・季節予報の予測精度

30年間 (1991-2020)の再予報による検証結果



左図は新旧の大気海洋結合モデルによるエルニーニョ現象の予測精度について比較したものである。5～6か月目のエルニーニョ現象の予測精度を見ると、大気海洋結合モデル(第3世代)では、大気海洋結合モデル(第2世代)の5か月予報と同等の精度で6か月予報が可能となっていることが分かる。また、右図は新旧の大気海洋結合モデルによる3か月予報と暖・寒候期予報の予測精度を比較したものである。大気海洋結合モデルでは、年間を通して全ての予測の精度が改善したことが分かる。

季節アンサンブル予報システムの改良 その他の要素の予測精度

アノマリー相関(系統誤差補正無し)による評価結果

1 月末初期値

ACOR (CPS3) init:0131 reg:GLB ref:JRA-3Q/GPCV2.3/MGDSST without bias-cor

	TS	T850	PSEA	Z500	U850	U200	CHI2	PSI2	PSI8	RAIN	SSTMG
0-2month	0.309	0.346	0.294	0.339	0.350	0.480	0.575	0.504	0.352	0.383	0.553
1-3month	0.205	0.233	0.174	0.222	0.229	0.340	0.491	0.432	0.243	0.295	0.415
2-4month	0.164	0.178	0.144	0.176	0.164	0.244	0.362	0.309	0.174	0.214	0.311
3-5month	0.137	0.153	0.156	0.171	0.162	0.218	0.337	0.260	0.163	0.166	0.231
4-6month	0.111	0.133	0.130	0.168	0.137	0.182	0.242	0.244	0.140	0.119	0.175

4 月末初期値

ACOR (CPS3) init:0426 reg:GLB ref:JRA-3Q/GPCV2.3/MGDSST without bias-cor

	TS	T850	PSEA	Z500	U850	U200	CHI2	PSI2	PSI8	RAIN	SSTMG
0-2month	0.205	0.211	0.187	0.256	0.245	0.347	0.535	0.419	0.256	0.287	0.423
1-3month	0.150	0.166	0.160	0.216	0.202	0.260	0.454	0.378	0.233	0.217	0.287
2-4month	0.129	0.165	0.166	0.201	0.200	0.266	0.449	0.354	0.284	0.189	0.234
3-5month	0.141	0.172	0.159	0.194	0.201	0.271	0.375	0.320	0.283	0.167	0.219
4-6month	0.162	0.159	0.133	0.172	0.185	0.237	0.256	0.231	0.233	0.150	0.223

7 月末初期値

ACOR (CPS3) init:0730 reg:GLB ref:JRA-3Q/GPCV2.3/MGDSST without bias-cor

	TS	T850	PSEA	Z500	U850	U200	CHI2	PSI2	PSI8	RAIN	SSTMG
0-2month	0.248	0.263	0.311	0.338	0.326	0.401	0.567	0.431	0.442	0.270	0.459
1-3month	0.215	0.210	0.221	0.259	0.287	0.356	0.581	0.363	0.381	0.244	0.372
2-4month	0.200	0.205	0.207	0.245	0.280	0.316	0.474	0.275	0.275	0.236	0.327
3-5month	0.180	0.185	0.163	0.205	0.224	0.260	0.394	0.216	0.178	0.231	0.296
4-6month	0.175	0.184	0.153	0.186	0.198	0.246	0.346	0.202	0.162	0.219	0.258

10 月末初期値

ACOR (CPS3) init:1028 reg:GLB ref:JRA-3Q/GPCV2.3/MGDSST without bias-cor

	TS	T850	PSEA	Z500	U850	U200	CHI2	PSI2	PSI8	RAIN	SSTMG
0-2month	0.242	0.266	0.270	0.292	0.325	0.375	0.524	0.324	0.252	0.349	0.503
1-3month	0.207	0.229	0.219	0.246	0.268	0.325	0.438	0.296	0.212	0.325	0.375
2-4month	0.182	0.209	0.200	0.242	0.236	0.330	0.410	0.321	0.212	0.295	0.299
3-5month	0.160	0.192	0.177	0.219	0.204	0.302	0.357	0.271	0.202	0.229	0.252
4-6month	0.132	0.166	0.153	0.180	0.156	0.216	0.296	0.241	0.151	0.178	0.224

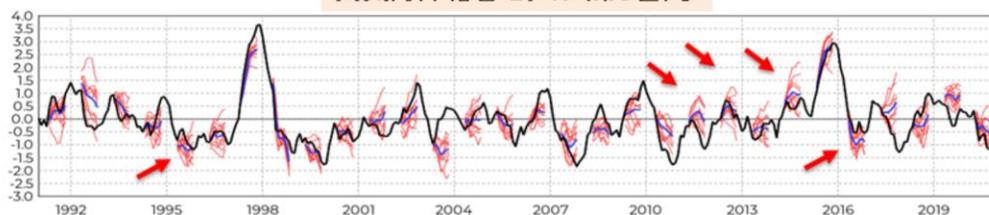
 有意に改善 有意に改悪

表は、地上気温(TS)、850hPa気温(T850)、海面更正気圧(PSEA)、850hPa東西風(U850)、200hPa東西風(U200)、200hPa速度ポテンシャル(CHI2)、200hPa流線関数(PSI2)、850hPa流線関数(PSI8)、降水量(RAIN)、海面水温(SSTMG)について、大気海洋結合モデル(第3世代)のリードタイム別の予測精度(アノマリー相関)を示しており、大気海洋結合モデル(第2世代)から有意に改善したものを黄色、改悪したものを灰色で色付けしたものである。有意に改悪した要素は無く、多くの要素において予測精度が有意に改善したことが確認できる。

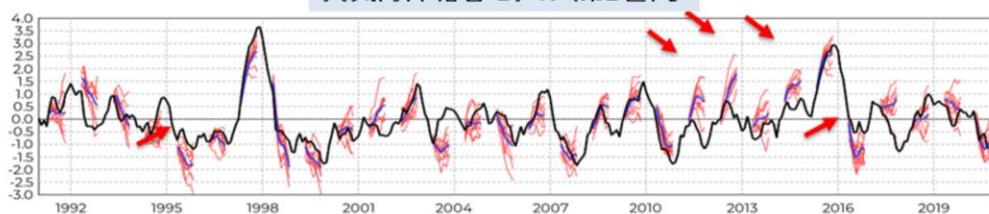
季節アンサンブル予報システムの改良 海洋変動の予測精度

エルニーニョ監視指数(NINO3)の予測精度

大気海洋結合モデル(第3世代)



大気海洋結合モデル(第2世代)



エルニーニョ監視海域の海面水温偏差
各メンバー予測(赤)、アンサンブル平均予測(青)、実況(黒)

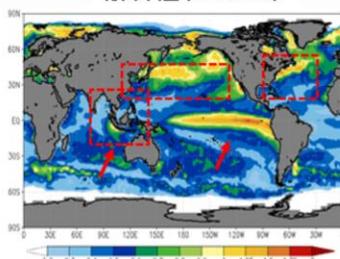
図はエルニーニョ監視指数(NINO3)に関して大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)を比較したものである。大気海洋結合モデル(第2世代)で実況がアンサンブルスプレッドの範囲外(大外し)となっていた幾つかの事例において、アンサンブルスプレッドの範囲内に収まるように改善していることが分かる。

季節アンサンブル予報システムの改良 海洋変動の予測精度

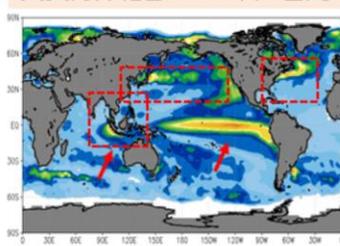
海面水温標準偏差の比較

図は、7月31日初期値の
9~11月予報の標準偏差

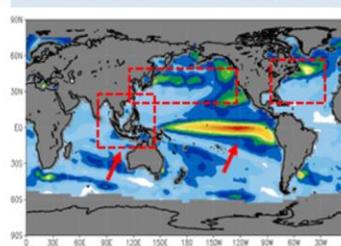
解析値(JRA-3Q)



大気海洋結合モデル(第3世代)



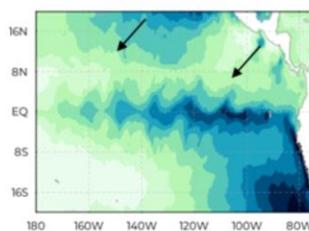
大気海洋結合モデル(第2世代)



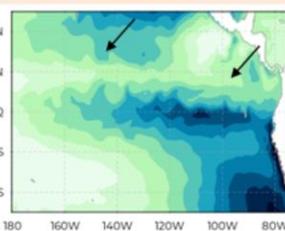
熱帯太平洋域の海面水温分布の比較

図は、1999年12月12日00UTC初期値
から10~14日予報の海面水温予測値

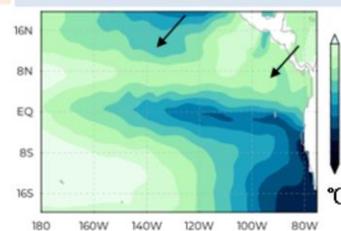
ESA SST CCI* Level4
(0.05度解像度 衛星観測利用解析値)



大気海洋結合モデル(第3世代)
大気T1319- 海洋0.25x0.25°



大気海洋結合モデル(第2世代)
大気T1159- 海洋1x0.3-0.5°

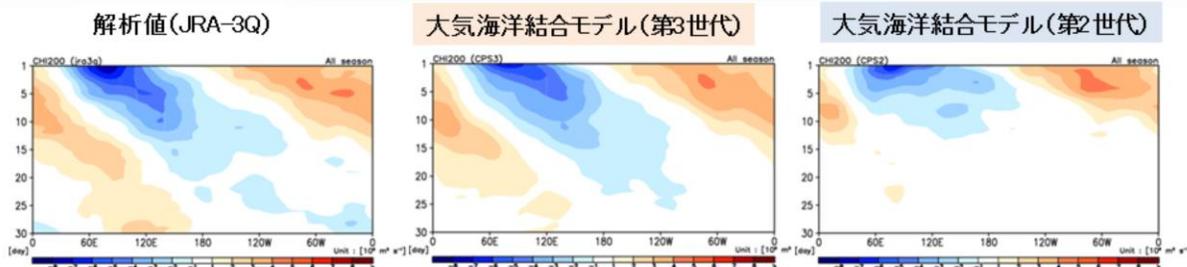


上図は海面水温の標準偏差について、大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)を比較したものである。大気海洋結合モデル(第2世代)の課題であった熱帯太平洋域の変動が過大な傾向は、大気海洋結合モデル(第3世代)では解析値に近づいた。また、インド洋ダイポールモード現象(IOD)において東極となるスマトラ島西岸の海面水温変動量の過少な傾向も同様に、解析値に近づいている。これらは、下図に示すように、海洋モデル部分の解像度を、熱帯における海洋の渦を十分に解像することが可能な渦許容(0.25度)と呼ばれる解像度まで高解像度化したことが主な要因と考えられる。一方、黒潮続流域やメキシコ湾流域等の中緯度では、熱帯よりも海洋の渦が細かいため、変動量が解析値の変動に近づいているものの依然として過少な傾向である。この中緯度の細かい海洋の渦を適切に表現するためには、海洋モデル部分の更なる高解像度化が必要である。

季節アンサンブル予報システムの改良

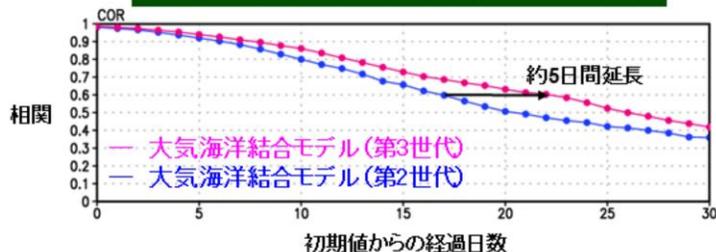
赤道季節内振動(MJO)の予測精度

200hPa速度ポテンシャルのホフメラー図の比較



図は、インド洋域にMJOの対流活発位相がある時(Phase3)のCH200合成図(全季節)

200hPa速度ポテンシャルの解析値との相関



- 大気海洋結合モデル(第3世代)では、赤道季節内振動(MJO)の強い振幅が維持されつつ東進がより明瞭に見られるようになった。
- 相関0.6以上で予測できる期間が17日から22日まで、約5日間延長

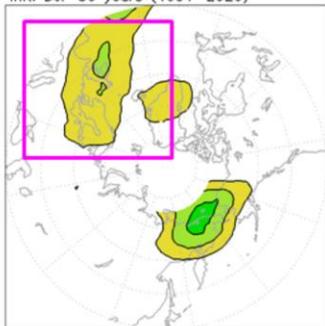
上図は、赤道季節内振動(MJO)の監視に良く利用される200hPa速度ポテンシャルのホフメラー図について、大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)を比較したものである。大気海洋結合モデル(第3世代)では、対流活発位相(寒色系)の東進が明瞭となり、解析値に近づいていることが分かる。下図は、その200hPaについて解析値との相関を示しているが、相関0.6以上の高い精度で予測が可能な期間は大気海洋結合モデル(第2世代)では約17日であったところ、大気海洋結合モデル(第3世代)では約22日となり、約5日間延長している。なお、これは単純に同一条件で比較した結果であるため、旧季節アンサンブル予報システムが5日に1回の運用であったところ、新しい季節アンサンブル予報システムで毎日運用となり、より新しい初期値が利用可能になった点も考慮すると、さらに改善しているものと考えられる。

季節アンサンブル予報システムの改良 ブロッキング現象の予測精度

冬季(12~2月)を対象とした4~27日予報の
ブロッキング高気圧の出現頻度の比較

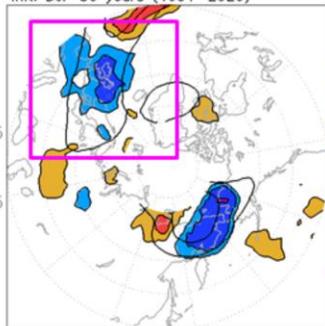
解析値(JRA-3Q)

<analname>
ft=04-27dy mean:07dy
init: DJF 30 years (1991-2020)



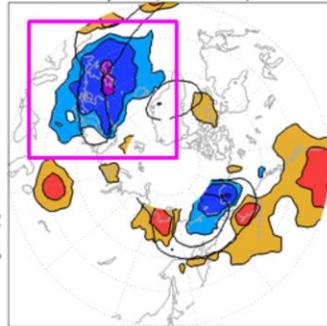
大気海洋結合モデル(第3世代)

<CPS3(5mem)-analname>
ft=04-27dy mean:07dy
init: DJF 30 years (1991-2020)



大気海洋結合モデル(第2世代)

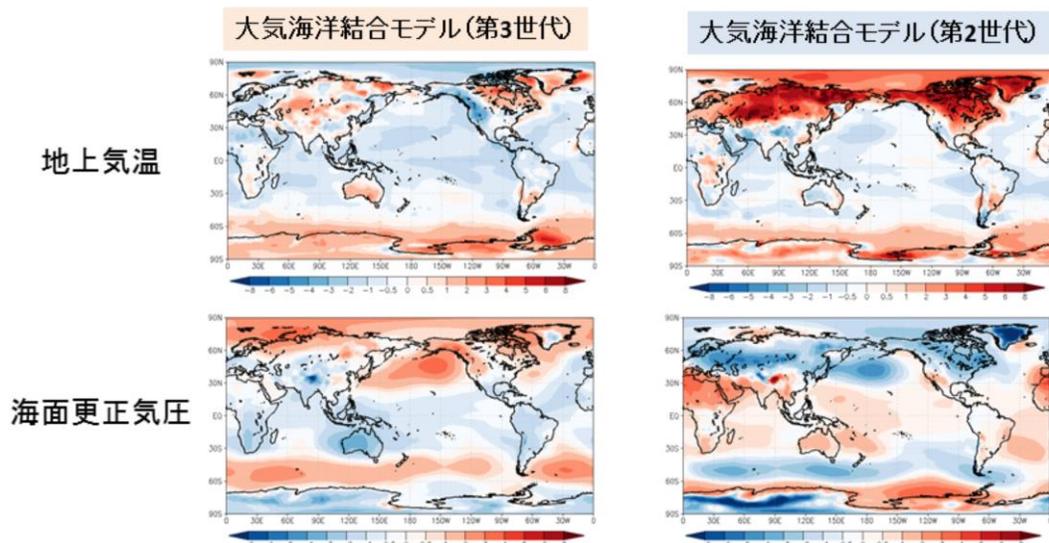
<CPS2(5mem)-analname>
ft=04-27dy mean:07dy
init: DJF 30 years (1991-2020)



左図は解析値におけるブロッキング高気圧の出現頻度、中央図と右図はそれぞれ大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)のブロッキング高気圧出現頻度のバイアスを示している。大気海洋結合モデル(第3世代)では、大西洋におけるブロッキングの過少バイアスが大きく改善した。エルニーニョ現象やラニーニャ現象からのテレコネクションの影響が大きい領域であるため、エルニーニョ現象やラニーニャ現象の予測精度が改善したことと関係している可能性がある。

季節アンサンブル予報システムの改良 系統誤差特性の変化

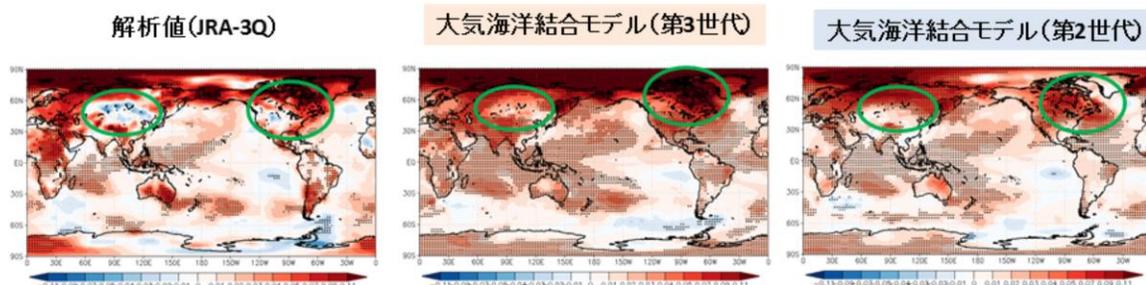
11月27日を初期値とする冬期間(12~2月)の系統誤差比較



図は大気海洋結合モデル(第2世代)から大気海洋結合モデル(第3世代)への変更において、特に変化の大きかった冬期間(12~2月)の系統誤差の比較を示している。地上気温を見ると、大気海洋結合モデル(第2世代)の課題であった冬季北ユーラシアの大きな高温バイアスは解消している。一方、海面更正気圧を見ると、冬季シベリア高気圧が弱いバイアスは改善し、アリューシャン低気圧の強いバイアスは反転したことが分かる。

季節アンサンブル予報システムの改良 地球温暖化トレンド再現性の向上

11月27日を初期値とする冬期間(12~2月)の
地上気温の地球温暖化トレンドの比較

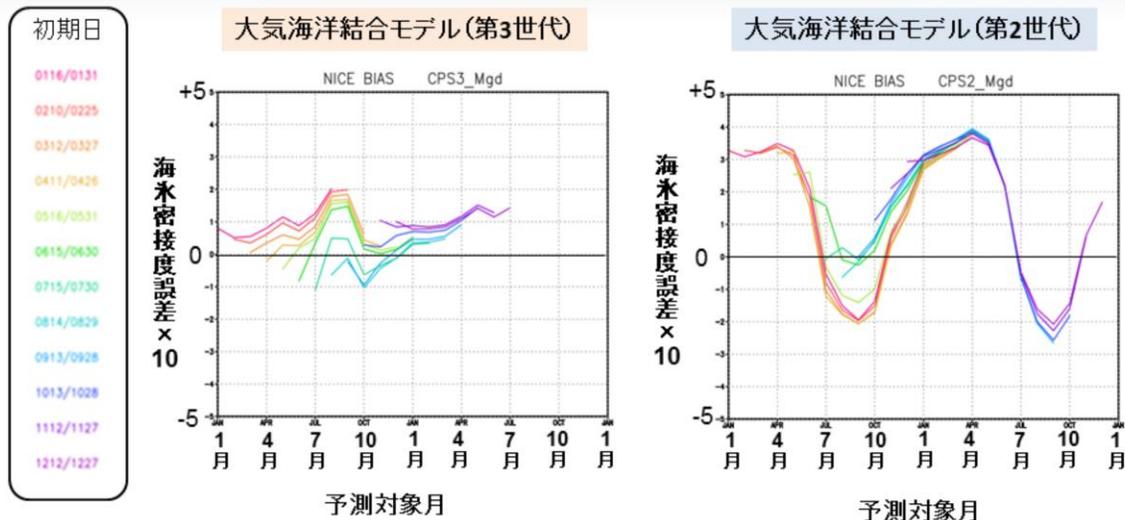


※ハッチをかけた領域は有意な上昇・下降トレンドであることを示している。

冬季のユーラシア大陸の内陸部は、有意ではないものの全球的な地球温暖化傾向に反して寒冷化傾向が観測されている。このメカニズムについては諸説あり、世界の数値予報モデルにおいて再現することが難しい現象の1つとなっている。図は、この冬季ユーラシア大陸内陸部の寒冷化について、大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)の再現性を比較したものである。大気海洋結合モデル(第3世代)では、ユーラシア大陸中部の冬季寒冷化トレンドの位置などが改善傾向であるものの、寒冷化のトレンドは依然として過小な傾向である。なお、カナダ北東部等では地球温暖化トレンド過小傾向の改善が確認できる。

季節アンサンブル予報システムの改良 北極海氷の系統誤差の低減

北極海における海水密度の系統誤差の比較



- 海水密度の初期値化により、初期値での過大バイアスが改善
- 予報の過小バイアスも改善

図は北極海における海水密度の系統誤差について、大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)を比較したものである。大気海洋結合モデル(第3世代)では、海氷の初期値化が導入されたことにより初期値における海氷の過大な傾向が大幅に改善した。加えて、予報期間に過小となる傾向も改善しているが、これは物理過程の改良により、北極海における放射収支等が改善したためと考えられる。

参考文献

- 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. Shimpo, S. Maeda, and T. Ose, 2018: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System version 2 (JMA/MRICPS2): atmosphere-land-ocean-sea ice coupled prediction system for operational seasonal forecasting. *Clim. Dyn.*, **50**, 751–765.
- 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.