

次期再解析に関連する気象研究所の取組み： 海洋同化と大気海洋結合同化

気象研究所 全球大気海洋研究部 第五研究室

藤井 陽介

階層的な地球システムモデリングに関する研究

背景

- 近年の災害の激甚化に伴い、**気候変動予測情報の高度化**の必要性
- 「コンポーネント」の共有による現業数値予報モデルへの貢献
- スーパーコンピュータの**演算能力の見通し**に関する懸念

目標

- **地球システムの構成要素間の相互作用**を適切に扱い、様々な時間・空間スケールの現象の予測への影響を評価
- 地球システム要素を**コンポーネント化**し、**高解像度化**や**初期値化**について利用可能性を検討するとともに、**計算効率化**を図る

概要

将来の温暖化予測、将来の現業システムに資する次世代のモデル開発

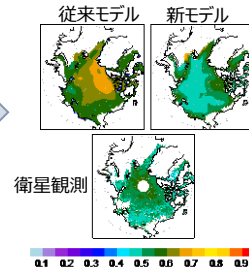
地球システムモデル

- ・ モデル気候値と過去気候変動の再現性の向上・検証および**国際モデル相互比較**
- ・ 詳細な地域気候と顕著な地球環境イベントを再現する**高解像度ESM開発**
- ・ 短期～10年規模変動を高精度に再現する**多圏間相互作用**の導入と評価



海洋モデル 大気海洋相互作用

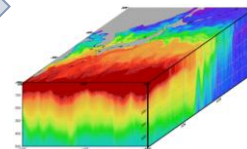
- ・ 将来の現業業務等に資する**海洋予測技術**の開発
- ・ **海洋モデル**の安定性、利便性、精度、および速度の向上（**GPU等による高速化**）
- ・ **海洋熱波等**の極端現象や長期変動の機構解明



海氷モデルの高度化

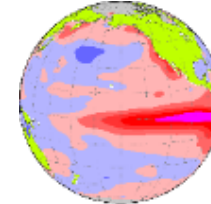
海洋同化 大気海洋結合同化

- ・ マルチスケールに対応する新たな**海洋データ同化**の開発
- ・ **大気海洋系のデータ同化**と数値予測に関する研究
- ・ **海洋観測の活用**と海洋変動のメカニズム研究
- ・ 現業海洋同化システムの共同開発



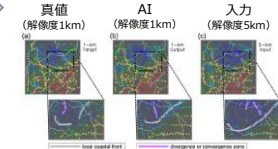
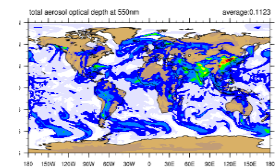
週間・季節予報モデル

- ・ **地球システム要素**を含む週間・季節予測システムの技術開発と**フィジビリティ研究**
- ・ 週間から季節スケールの**台風・極端現象の予測可能性評価**と予測改善のための開発・研究
- ・ 海洋観測・初期値の週間から季節予測への影響評価



大気化学輸送モデル 大気微量成分同化

- ・ 化学輸送モデルの精緻化（**AIの活用**）及び統合化
- ・ 大気微量成分データ同化システムの高度化
- ・ **気象と大気微量成分の相互作用**に関する研究



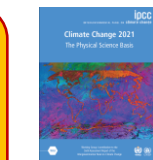
AIを用いた風速ダウンスケーリング

期待される成果

- ・ **気象から気候までのシームレスな予測**の改善
- ・ CMIP7への参加を通じたIPCC AR7への貢献
- ・ 日本周辺海況の**高精度の気候変動情報の創出**

地球温暖化

IPCC第7次報告書
温暖化適応策検討
の基礎資料（日本の
気候変動2030）



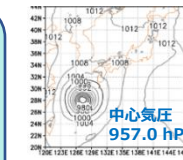
IPCC 評価報告書



海洋の温暖化予測

現業システム

全球アンサンブル予報
（台風・週間・1か月）
季節・エルニーニョ予測
海況監視予測、環境気象



海洋結合による
台風の再現性向上

M3課題「海洋及び大気海洋結合系のデータ同化に関する研究」における次期再解析に向けた取り組み

- 大気データ同化の下部境界条件としての利用を想定した海洋データ同化技術の開発・性能評価
 - 次期長期再解析の仕様の選択肢の一つとして、海洋データ同化を下部境界条件として利用することを想定し、
 - 従来のSST解析の品質との比較評価
 - 大気データ同化の下部境界条件として利用する場合の課題抽出
 - それらに基づいた海洋データ同化技術高度化のための開発・性能評価
- 将来の長期再解析での利用可能性検討のための大気海洋結合データ同化システムの開発・性能評価
 - 将来の長期再解析での利用可能性検討のため、
 - 大気海洋結合データ同化システムの開発
 - 従来のデータ同化手法との性能比較
 - 導入のための課題抽出への協力

令和6年度までの取組み

- 海洋同化における海面水温の解析精度向上のため、海面水温衛星観測データを直接同化する手法の改良を進めている。
- 新しい大気海洋結合同化システム(MRI-CDA2)の短期の再解析実験を解析し、その結果をWCRP再解析国際会議で発表するとともに、地球システムモデル技術開発室に情報提供を行った。今後も解析を進め、情報提供を継続する予定である。

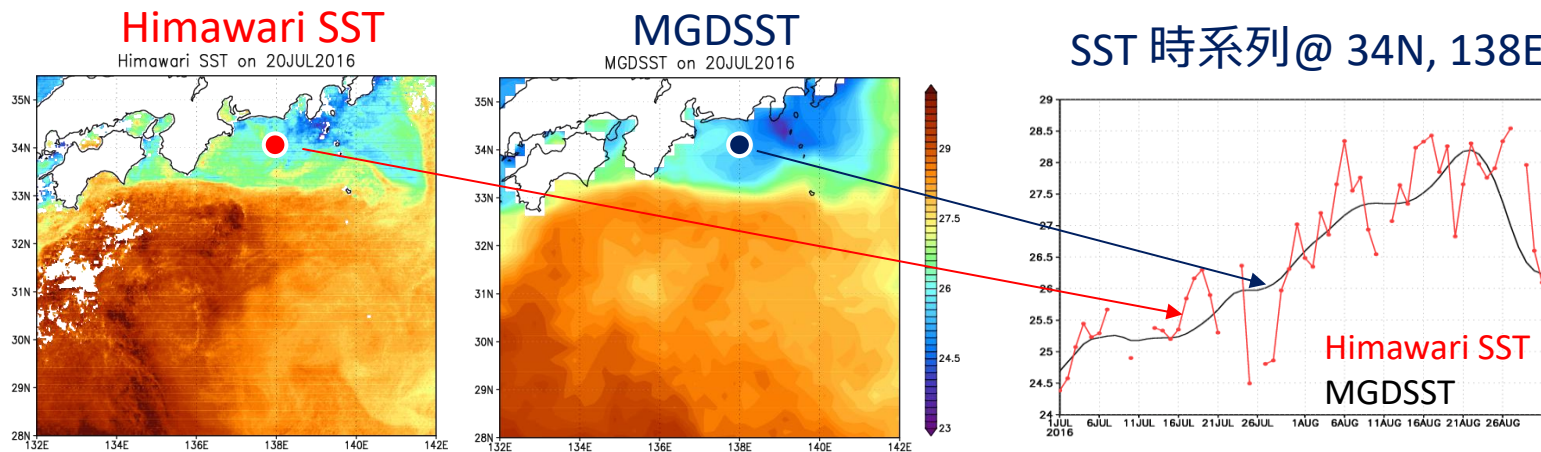
弱拘束4次元変分法を用いた海面水温解析

気象研究所 全球大気海洋研究部 第五研究室

碓氷典久

NPR-4DVARのSSTの解析精度の向上に向けて

- ▶ 現状は、7日平均のMGDSSTを1度x1度に間引いて同化
 - ▶ SSTを積極的に同化に利用しているわけではない
- ▶ 時空間的に平滑化された格子プロダクトでなく、より生に近いL2プロダクトを同化することで、短周期、小スケールの解析精度向上が期待される



NPR-4DVARのSSTの解析精度の向上に向けて

- ▶ 現状は、7日平均のMGDSSTを1度x1度に間引いて同化
 - ▶ SSTを積極的に同化に利用しているわけではない
 - ▶ 時空間的に平滑化された格子プロダクトでなく、より生に近いL2プロダクトを同化することで、短周期、小スケールの解析精度向上が期待される
 - ▶ ただし、解析手法(4D-Var)も改良する必要がある
 - ▶ 現在は初期値の水温、塩分修正量を制御変数として10日間のモデル時間発展が観測と整合するように4D-Varを実施(強拘束4D-Var)
 - ▶ 海洋内部の変動(ジェットのスラックスや100kmスケールの渦の挙動など)は上記設定で精度良く解析できるが、初期値修正のみで10日先までのSST変動を制御するのは困難
- 日々のSST修正量を制御変数に新たに追加
(弱拘束4D-Varの導入)

弱拘束4D-Varを用いてHimawari SSTの同化実験を実施

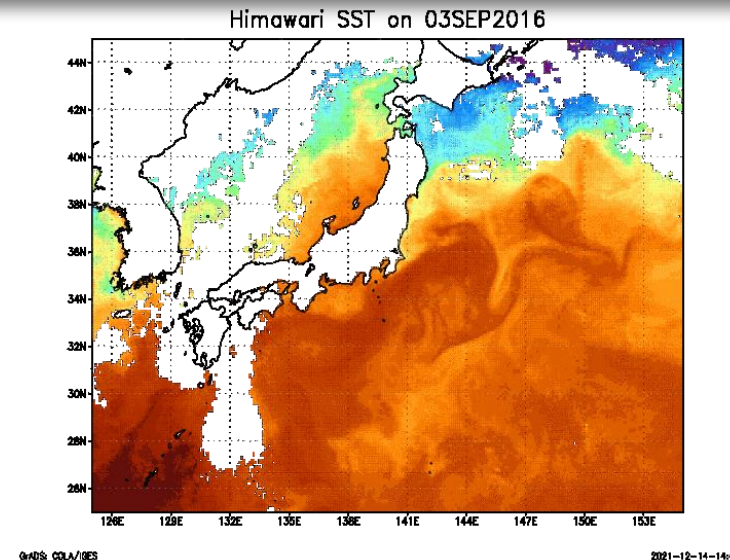
同化実験

共通設定:

- 同化システム:NPR-4DVAR
 - North Pacific, 10km
- 実験期間: 1 Jan– 9 Jul 2016
- 同化ウィンドウ: 10日
- 同化に使用した観測 (SST以外)
 - Along track SLAs (Jason-2, Cryosat-2, Altika)
 - In-situ temperature and salinity profiles

同化実験:

- “CTRL” (現業システムとほぼ同じ設定)
 - 従来版4D-Var (強拘束)
 - MGD SST (10-day average)を同化に使用
- “OLD_HIM”
 - 従来版4D-Var (強拘束)
 - Himawari SST (daily)を同化に使用
- “NEW_HIM”
 - 新しい4D-Varスキーム (SSTを弱拘束に拡張)
 - Himawari SST (daily)を同化に使用
 - SST修正量を右のプロファイルに従って混合層内に投影



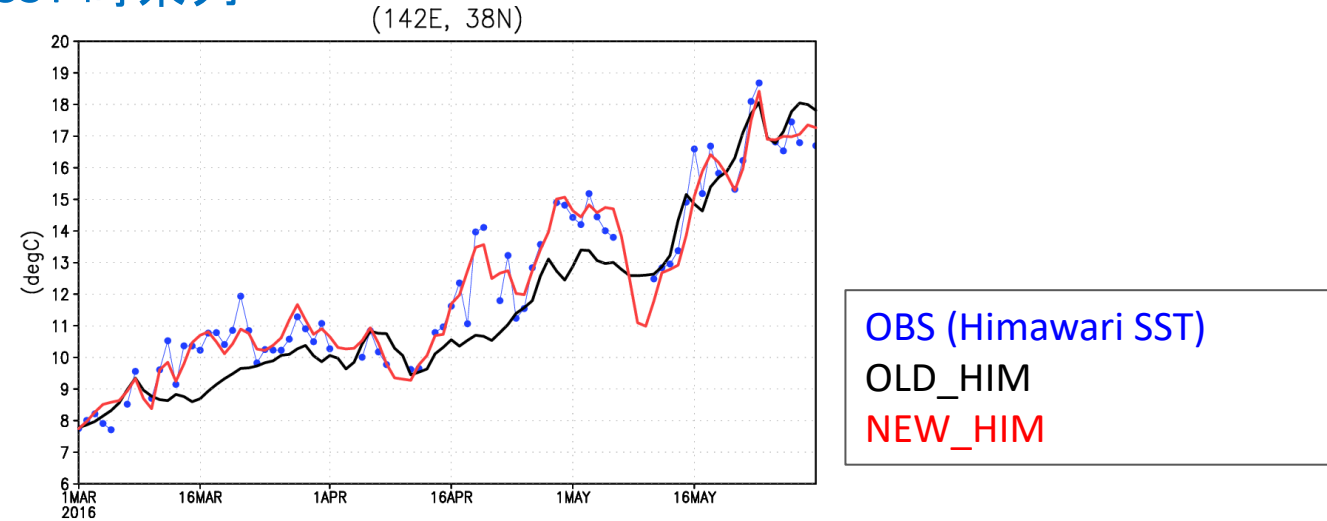
水深

混合層深度→

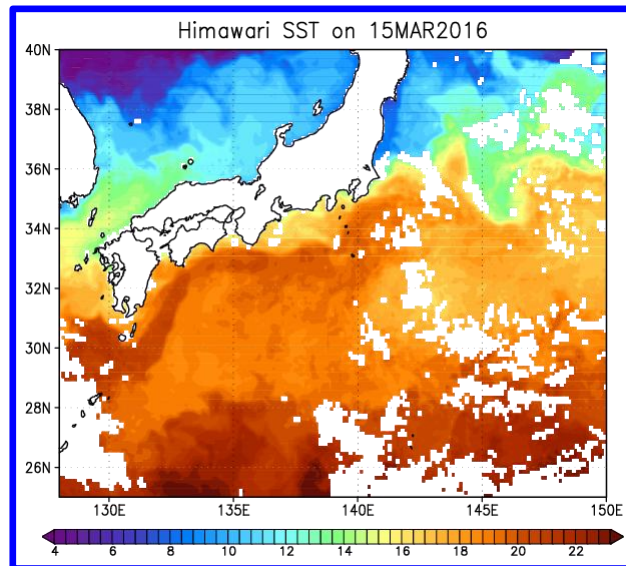
SSTインクリメントの鉛直投影係数

同化手法改良の効果 OLD-HIM vs NEW-HIM

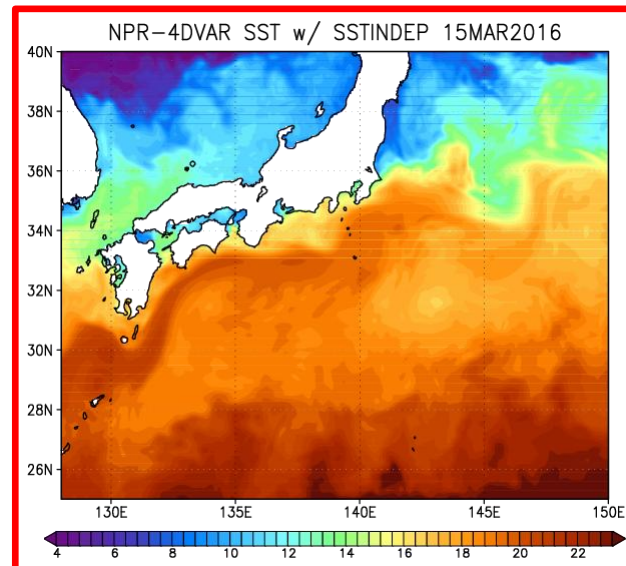
SST 時系列



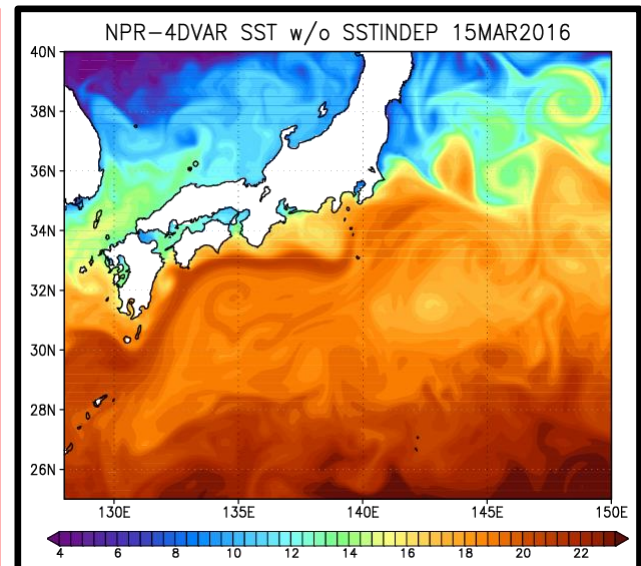
OBS (Himawari SST)



NEW_HIM



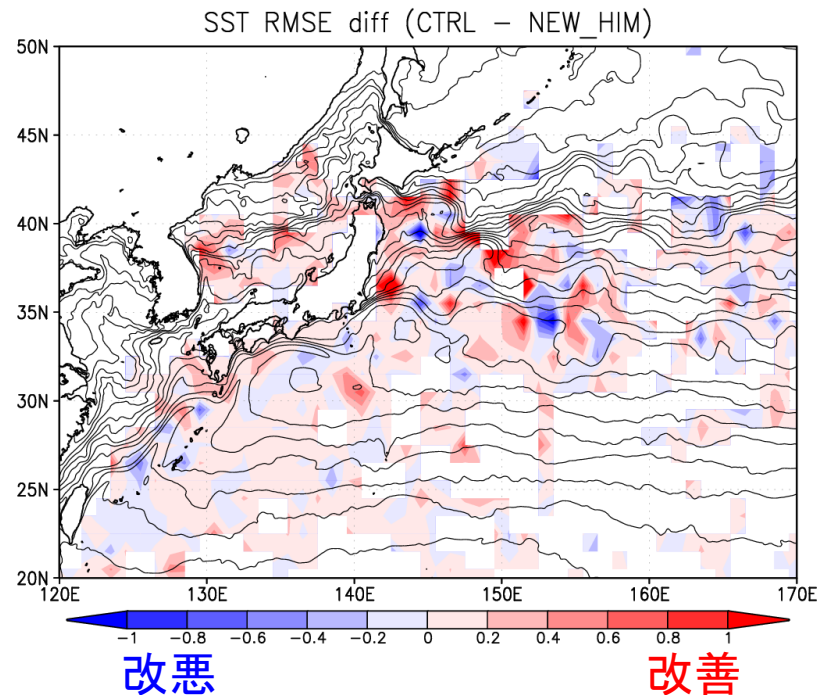
OLD_HIM



SST誤差の低減: CTRL - NEW_HIM

- ▶ 第一推定値(直前のサイクルを初期値とする予測) の誤差(RMSE)を現場観測を用いて評価
- ▶ SST前線域でRMSEが比較的大きい(図略)
- ▶ NEW_HIMのRMSEは北西太平洋の広い範囲で改善している

RMSE の差
(CTRL - NEW_HIM)

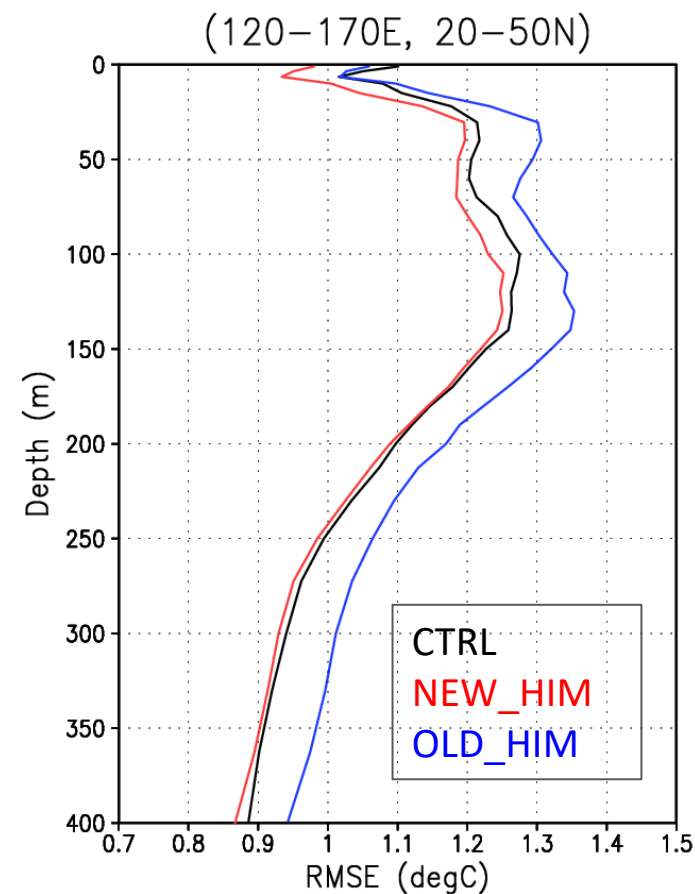


陰影: RMSE の差
等値線: 平均 SST

NEW_HIMがCTRLに比べて

亜表層水温に対するインパクト

- ▶ NEW_HIMでは約150mまでの深さに改善が見られる。
- ▶ OLD_HIMでは亜表層水温がCTRLに比べて悪化している。
- ▶ OLD_HIMにおいて評価関数の収束の遅いことが、解析結果の品質低下に関係している可能性がある。



まとめ(海面水温解析)

- ▶ 海洋4D-VarシステムのSST解析精度向上のため弱拘束4D-Varを導入
 - ▶ 短周期のSST変動の解析を目的として、日々のSSTインクリメントを新たに制御変数に追加
- ▶ 弱拘束4D-Varを用いてHimawari SSTの同化実験を実施
 - ▶ バイアステーブルに基づいた補正Himawari SSTを同化に使用
 - ▶ 弱拘束4D-Varが短周期SST変動の再現に有効に機能することを確認
 - ▶ 従来設定（7日平均MGDSSTを強拘束4D-Varで同化）に比べてSSTのみならず、150m程度までの水温場の解析・予報精度が向上
- ▶ 今後の課題
 - ▶ オンラインバイアス補正
 - ▶ SSTに関する同化パラメータのチューニング
 - 背景誤差（共分散行列）
 - 観測誤差
 - SSTインクリメントの鉛直投影係数
 - ▶ 3DVAR併用スキームへの対応
 - ▶ 格子変換に対応して、全球システムでも利用可能とする
 - ▶ Himawari以外の衛星SST（マイクロ波も含む）の導入

WCRP 第6回再解析国際会議における藤井らの発表資料より

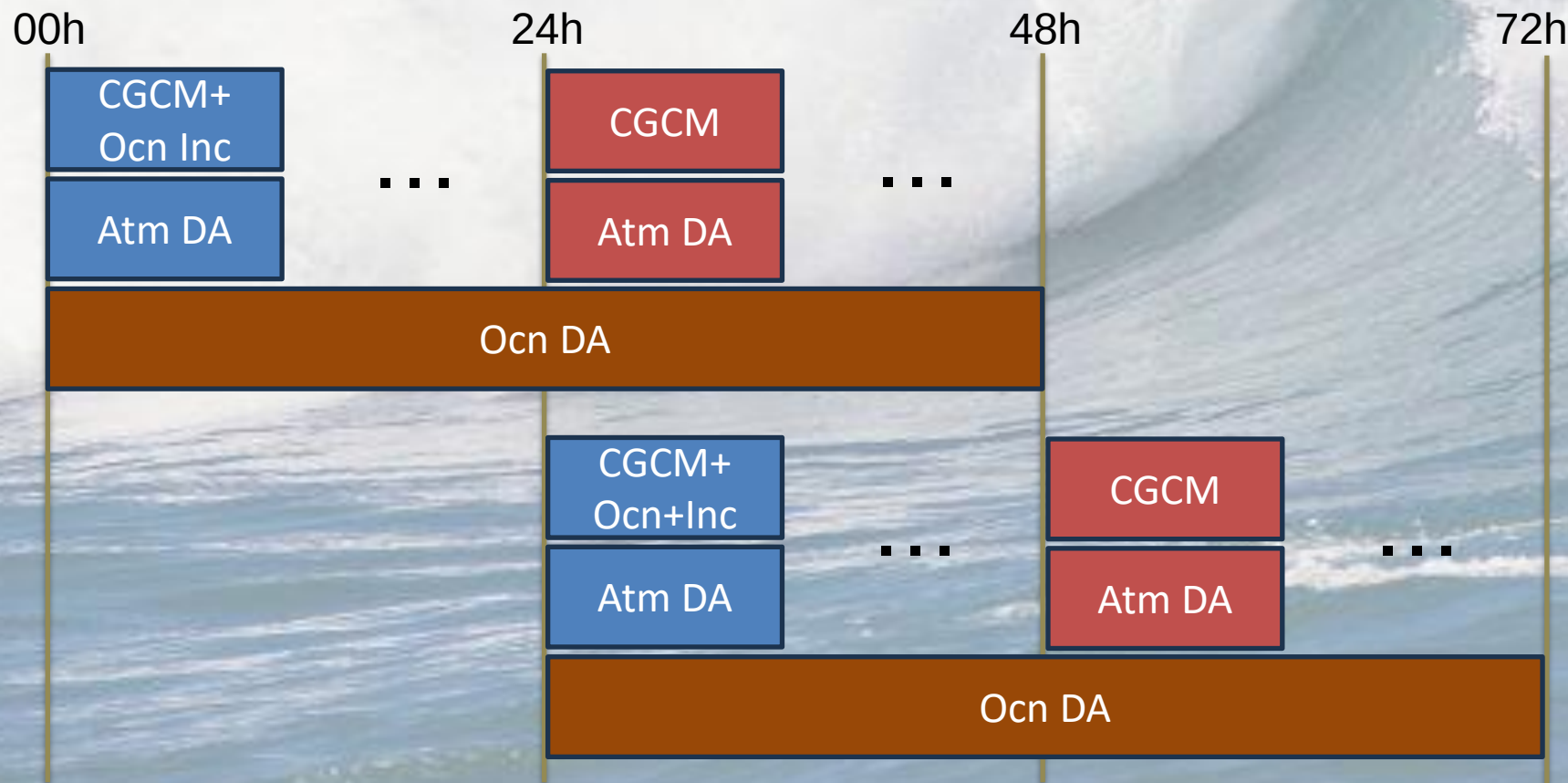
気象研究所の新しい大気海洋結合同化システムの 試験的な1年解析

藤井陽介, 小林ちあき, 石橋俊之, 石川一郎
(気象庁気象研究所)

大気海洋結合同化システム (MRI-CDA2)の構成

構成要素	MRI-CDA1	MRI-CDA2
結合モデル	大気: TL159 (～110km) 海洋: 0.5° x 1°	大気: TL959 (～20km) 海洋: 0.25° x 0.25°
大気同化	4DVAR (6時間ごと) Inner: TL159 (～110km)	4DVAR (6時間ごと) Inner: TL319 (～60km)
海洋同化	3DVAR (10日ごと) Inner: 0.5° x 1°	4DVAR (1日ごと) Inner: 0.5° x 1°

解析フロー



- ◆ モデルとデータ同化システムを更新
- ◆ 高解像度化
- ◆ 海洋に4DVARを導入
- ◆ 海洋解析を高頻度化
- ◆ 海洋同化の前後に大気同化を2回実行する



- ◆ 準強結合同化？

実験設定

◆ 結合同化による1年再解析(CRA)

- MRI-CDA2の結合モードを用いた再解析実験
- 期間: 2019年12月2日～2021年1月1日

◆ 非結合同化による1年再解析 (UCPL)

- MRI-CDA2の非結合モードを用いた再解析実験
- 期間: CRAと同じ

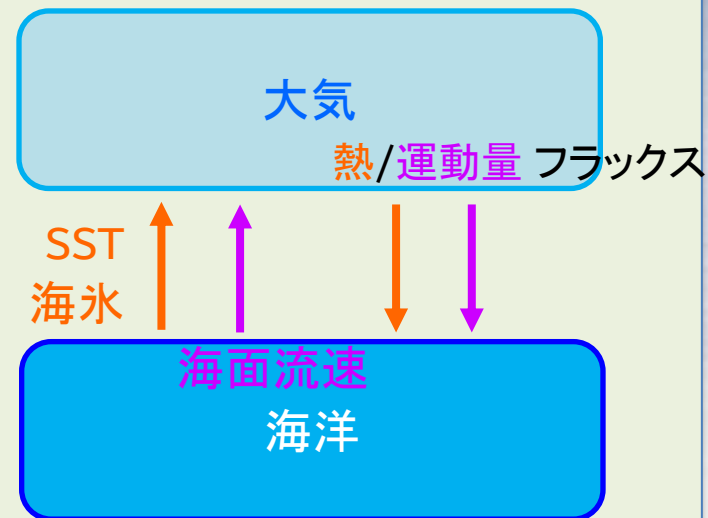
◆ 結合モデルによる数値天気予報(NWP)実験 (CPLP)

- CRAを初期値とする結合モデルによる5日予報実験
- 期間: 2020年6月11日～2020年7月11日 (00 および 12UTC初期値)

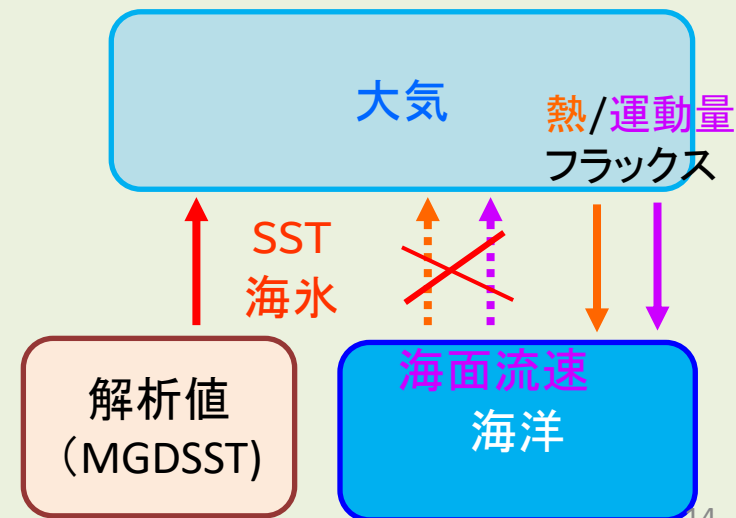
◆ 非結合大気モデルによる数値天気予報(NWP) 実験(ATMP)

- 気象庁の現業NWPシステム(非結合大気モデルと非結合大気データ同化システム)を用いた5日予報実験、解像度はCPLPと同じ
- 期間: CPLPと同じ

CDAの結合モデル



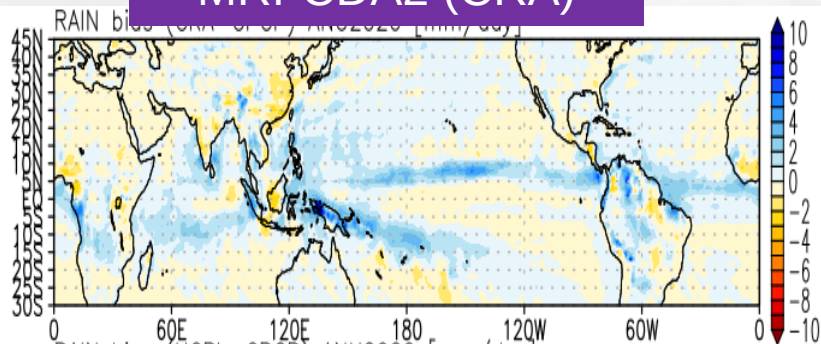
UCPLの結合モデル



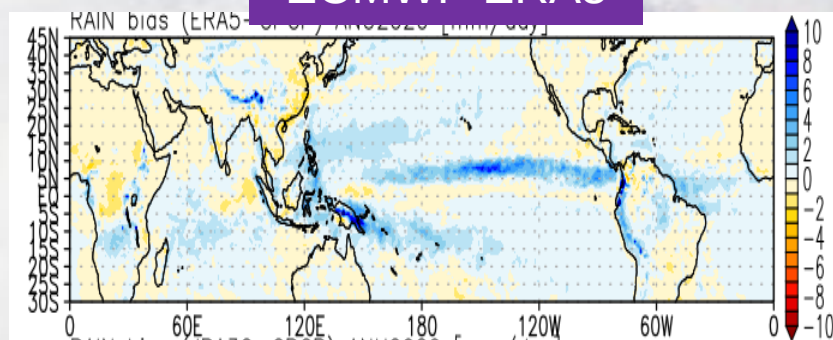
2020年の年平均降水量 (mm/day)

GPCPとの差

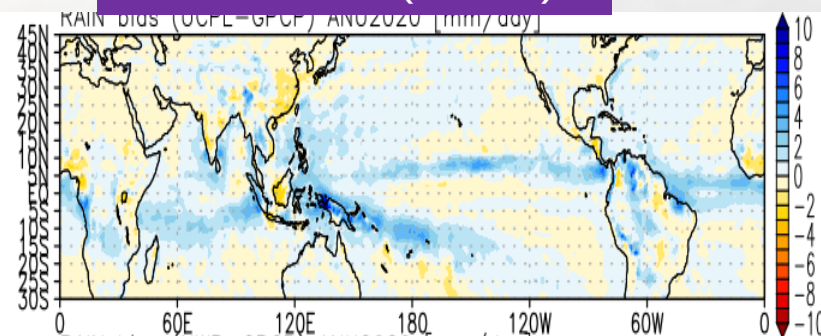
MRI-CDA2 (CRA)



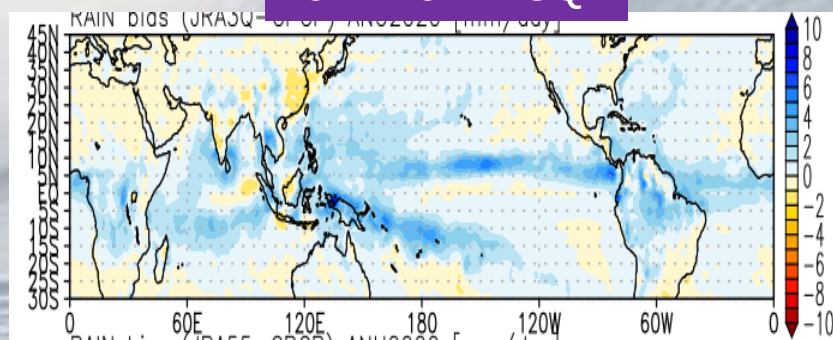
ECMWF-ERA5



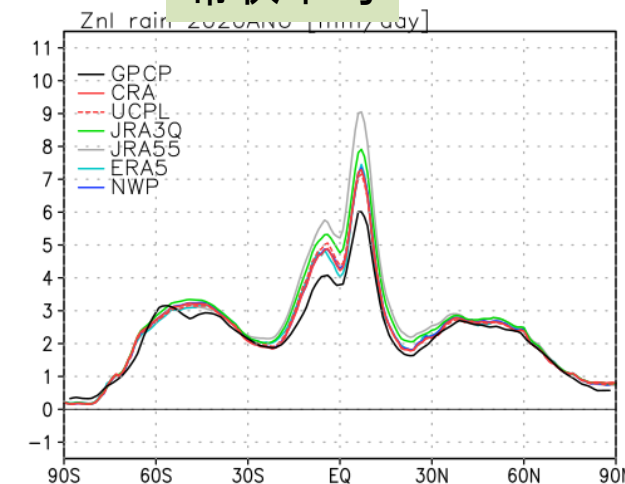
MRI-CDA2 (UCPL)



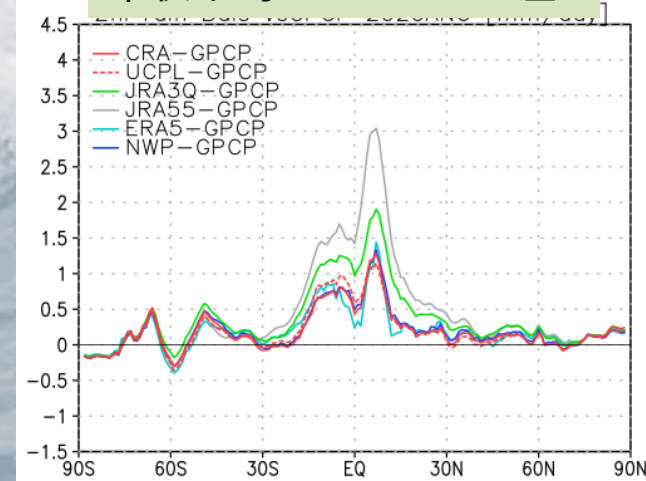
JMA-JRA-3Q



帯状平均



帯状平均のGPCPとの差



- ✓ JRA-55とJRA-3Qの降水過多のバイアスはCRAでは低減して、ERA5と同程度である。
- ✓ CRAではUCPLに比べて南半球の熱帯域で若干のバイアス低減が見られるが、それ以外では両者がよく似ており、結合同化のインパクトはそれほど明瞭ではない。

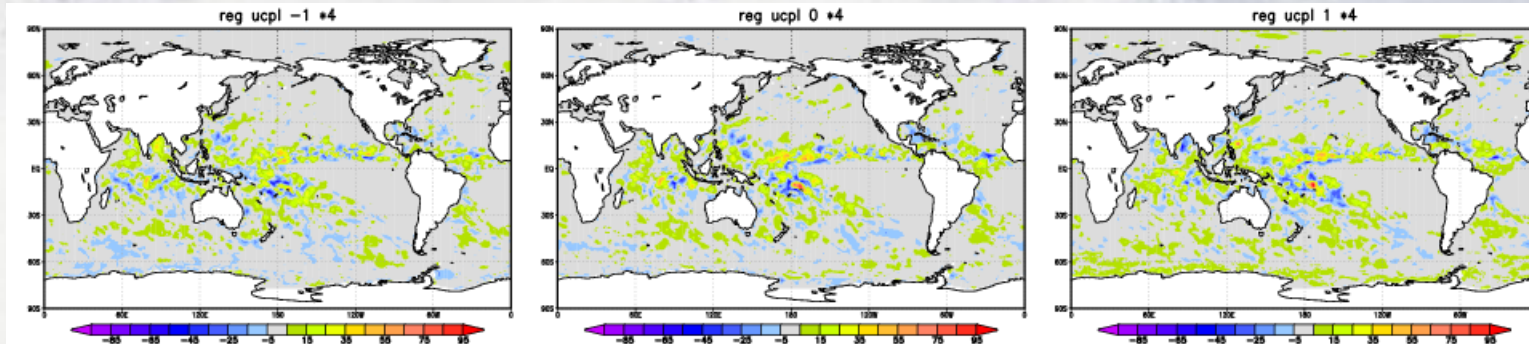
降水量のSSTに対するラグ回帰の分布 (日々スケール)

降水が1日遅れ

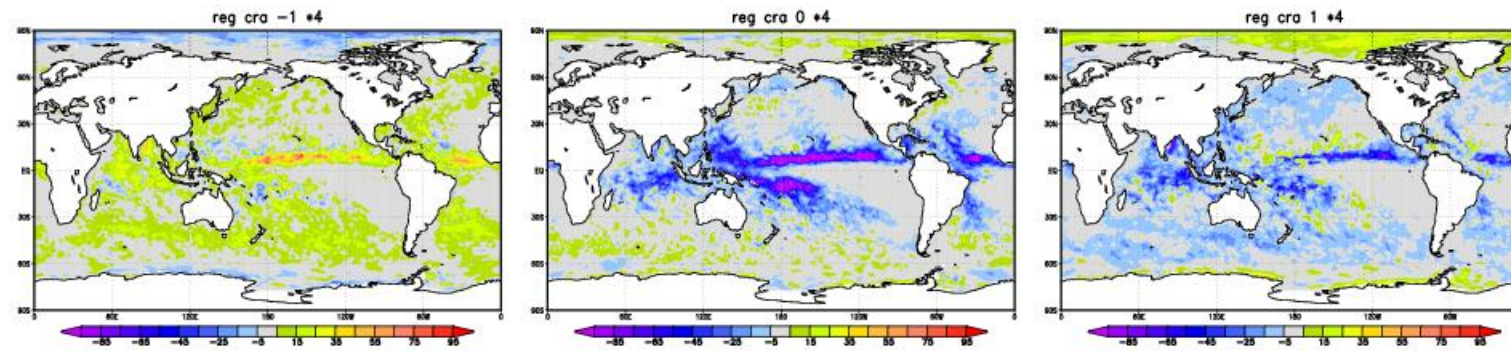
ラグゼロ

降水が1日先

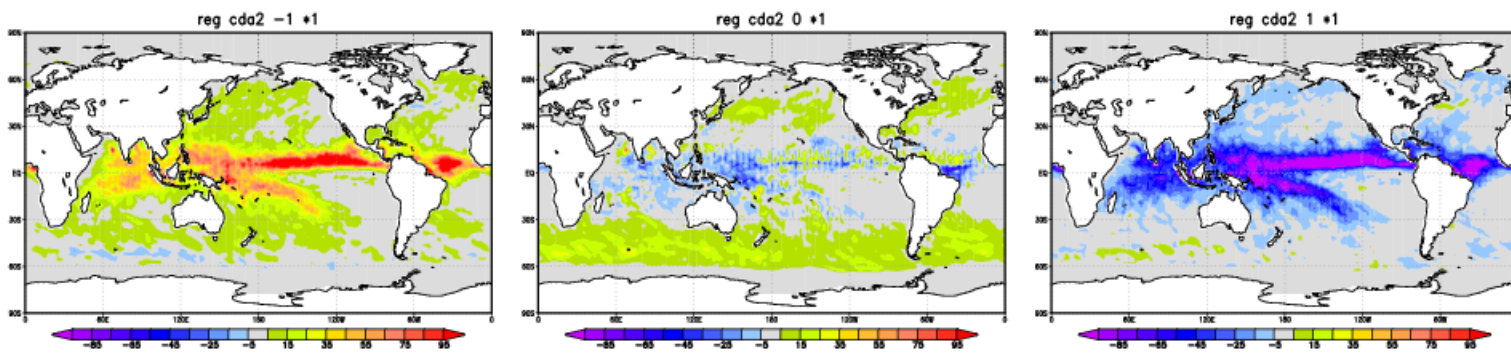
UCPL
(MRI-CDA2)



CRA
(MRI-CDA2)



CRA
(MRI-CDA1)

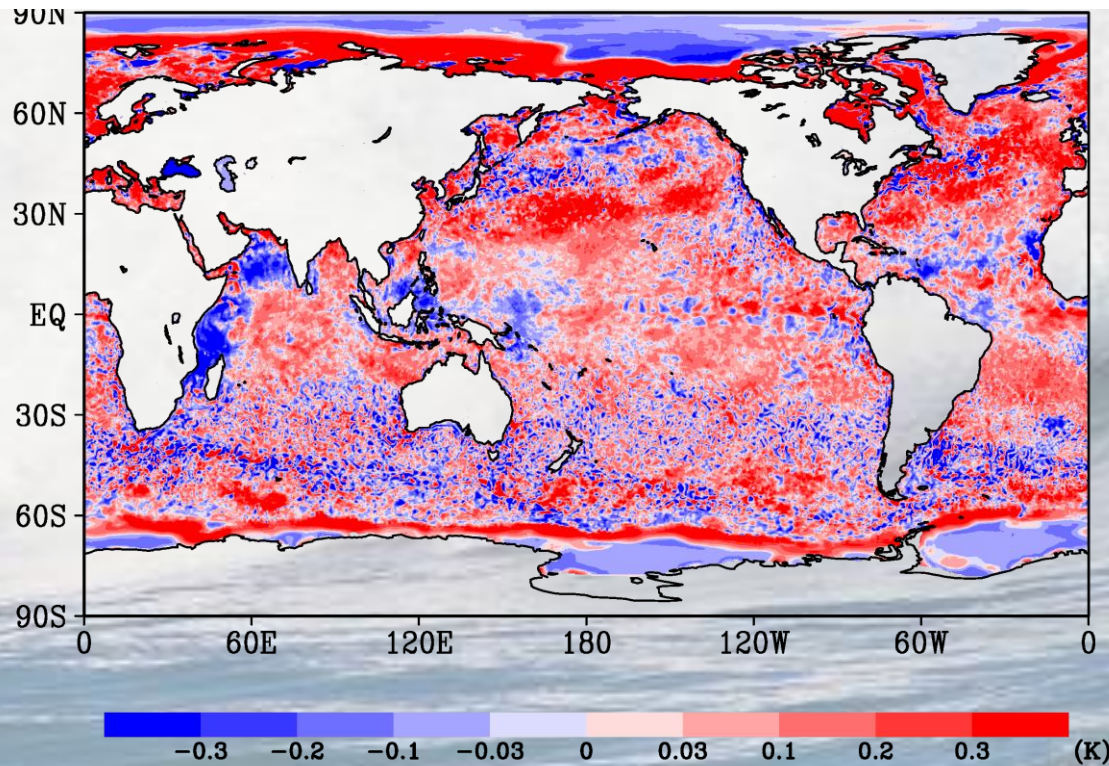


- ✓ UCPLでは降水量とSSTとの間に系統的な関係はない。
- ✓ 一方、新システムのCRAでは、熱帯の対流発域付近でSSTは降水量と負の相関関係にある。
- ✓ 降水量の増加に対するSSTの低下の遅れは1日より短い。
- ✓ 新システムのSSTと降水量の関係は旧システムと異なる(例えば、同時の負相関が強まっている)。
- ✓ 相違の要因は今後調べる必要がある。

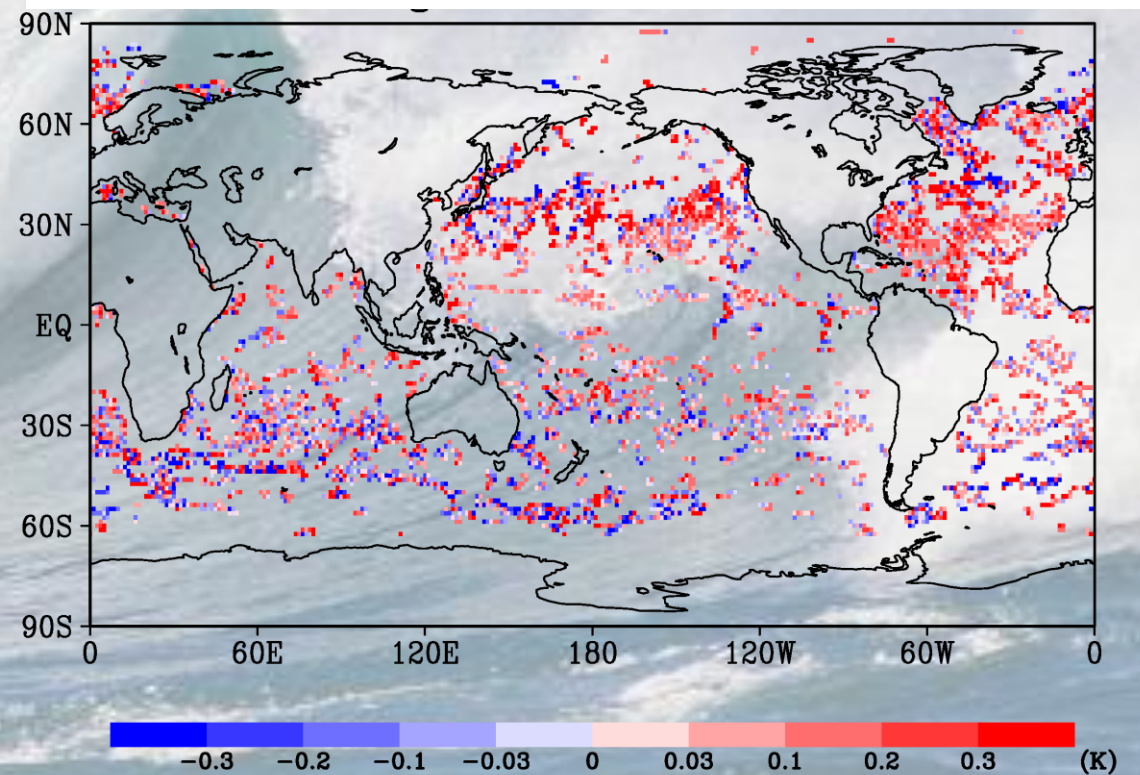
CRAのSST場の現業解析と比較した改善

- ◆ 気象庁では、現業数値予報の海洋境界条件として主に衛星データによる客観解析(MGDSST)を用いている。

ERA5を参照値とするRMSEの差 (MGDSST-CRA)



漂流ブイを参照値とするRMSEの差 (MGDSST-CRA)



- ✓ ERA5と漂流ブイに対するSST誤差の評価から、CRAのSST場がMGDSSTに比べて改善していることが示された。

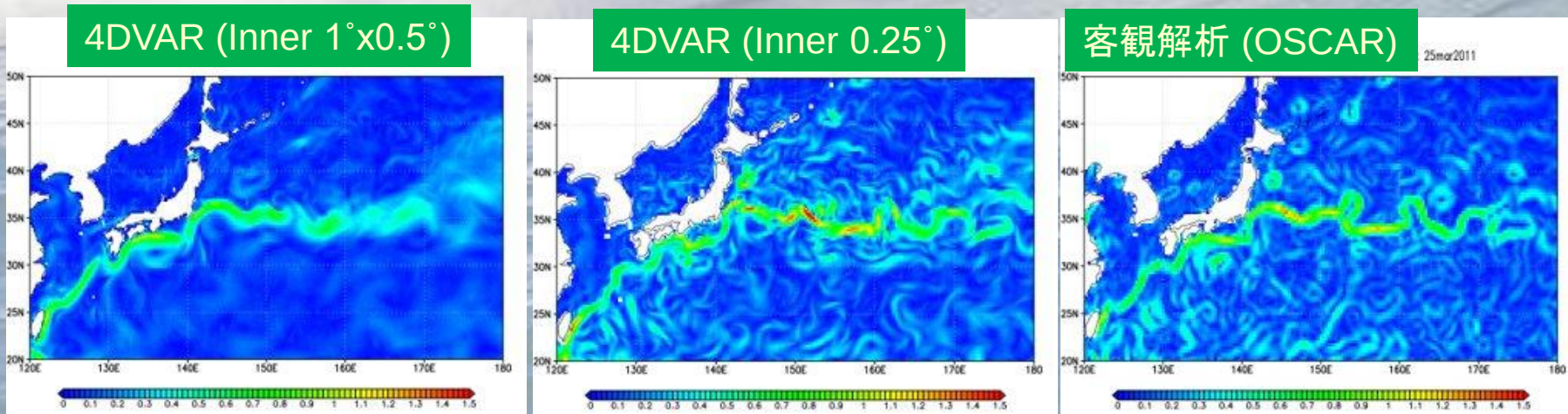
★まとめと今後の課題

まとめ

- ◆ 気象庁気象研究所は大気と海洋の現業4DVARシステムに基づく新しい結合同化システムを開発し、1年再解析実験を実施した。
- ◆ 結合再解析により、衛星データによる客観解析よりも精度の高いSST場を解析できるポテンシャルが示されたが、SST以外の解析場や予報への結合同化の明瞭なインパクトはまだ示されていない。

今後の課題

- 大気4DVARでSSTを解析する (結合大気-SST解析)
(この手法により衛星放射計のより多くのチャネルを利用することができる)
- 海洋4DVARにより高解像度(1/4度)のインナーモデルを導入する
- 海洋4DVARにおけるSST同化の改良
(MGDSSTの代わりにL2/L3データを用いる、warm layer & cool skin スキームの導入)



インナーモデルを0.25度
に高解像度化した
4DVARの同化実験。
2011年3月20日の海面
流速を示す。