



気象庁全球数値予報システムの 台風進路予測改善に向けた取り組み

気象庁情報基盤部数値予報課
氏家将志

紹介する図表類の多くは、数値予報課の各開発チームによる開発成果、大学等研究機関の研究者の方々の研究成果やご知見に基づきます。

はじめに

- 前の講演では、気象庁の全球数値予報システムによる台風進路予測の特性や、誤差の特徴について紹介した。
- この講演では、台風進路予測誤差の減少に向けた取り組みや経験について、データ同化システムの改良、物理過程改良の観点から紹介する。

概要

- データ同化システムの改良
 - 台風周辺の観測情報の引き出し
- モデルの改良
 - 非断熱加熱の表現の改善
 - 大規模循環
 - 台風周辺の非断熱加熱の非軸対称性の表現
- モデル・データ同化改善のリンク
 - 観測データ品質管理情報のモデル開発への還元
 - 系統誤差の少ないモデルによる第一推定値作成

概要

- データ同化システムの改良
 - 台風周辺の観測情報の引き出し
- モデルの改良
 - 非断熱加熱の表現の改善
 - 大規模循環
 - 台風周辺の非断熱加熱の非軸対称性の表現
- モデル・データ同化改善のリンク
 - 観測データ品質管理情報のモデル開発への還元
 - 系統誤差の少ないモデルによる第一推定値作成

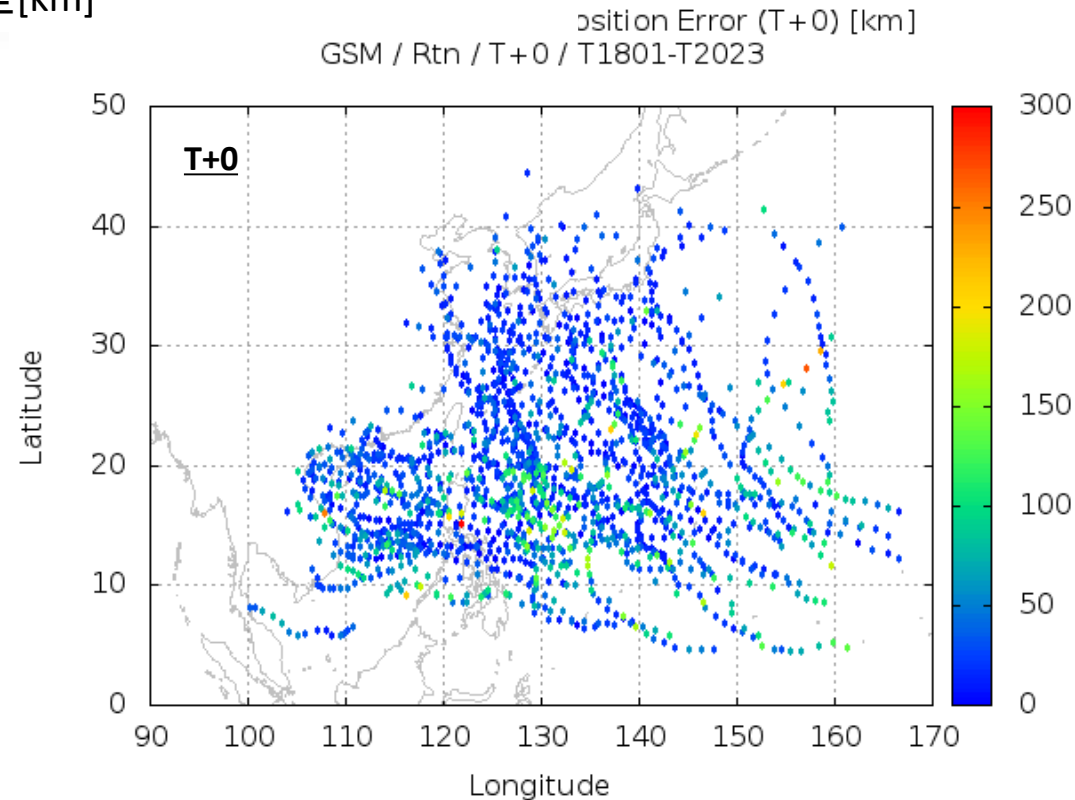
台風周辺の観測情報の引き出し

- 台風(熱帯擾乱も含む)周辺の初期値改良は、台風の初期位置誤差の軽減、台風の構造改善や予報初期の環境場の誤差軽減を通じ、台風進路予測誤差減少に寄与する。
 - 弱い台風(e.g. 低緯度など)については、初期時刻の段階から進路誤差が大きい傾向があるのは、前の太田の講演でも示した通り。
- 台風周辺の観測情報を引き出すには、以下が重要
 - 台風周辺を観測しているが、データ同化で使われていない(品質管理で除去している)観測データの利用
 - 上記を可能にするデータ同化手法
 - 最近の改善例としては、2019年12月, 2021年3月の全球解析の改良がある。

台風の初期の位置誤差

地点: 対象時刻におけるベストトラック中心位置,
色: 進路予測誤差[km]

2018年-2020年の統計



- T+0では進路予測誤差が大きい事例が低緯度に多い
- (台風ボーガスである程度補完されている部分もある)
- 特に、弱い台風、発達前の台風で初期値の位置誤差が大きい事例が目立つ(前の太田の講演参照)

2019年12月, 2021年3月の全球解析改良

※台風や北西太平洋以外の熱帯低気圧予測に特にインパクトのあった改良を記述

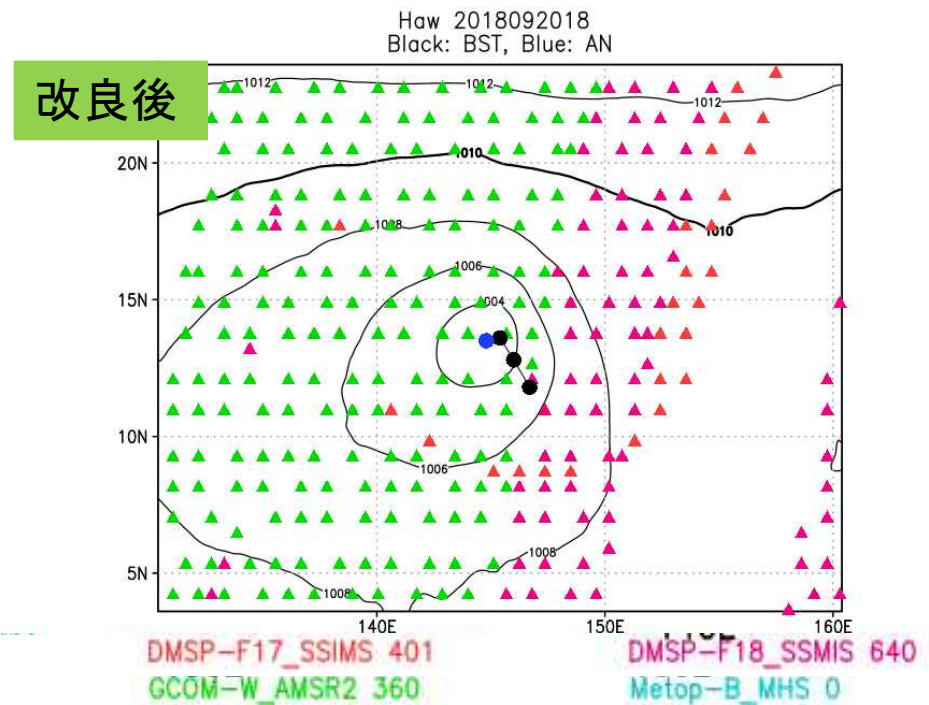
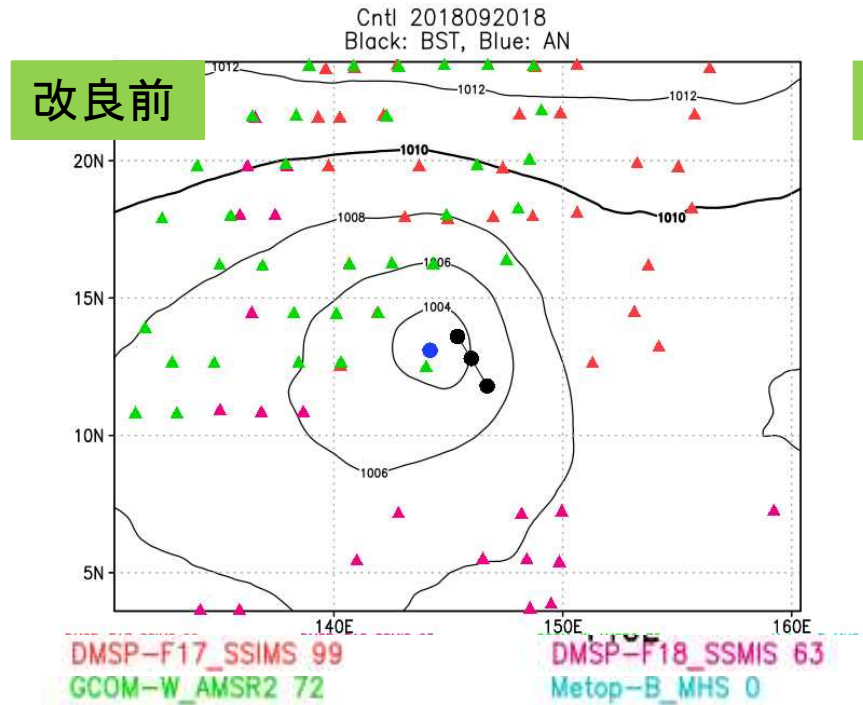
- 2019年12月 (台風進路予測にインパクト)
 - 4DVar-LETKFハイブリッド同化の導入:背景誤差を改善して初期値精度を向上
 - 気候学的な背景誤差共分散に加えて、局所変換アンサンブルカルマンフィルタ(LETKF)による摂動を利用した背景誤差共分散を利用
 - 背景誤差の重みは、(気候値由来):(アンサンブル由来)=85%:15%
 - マイクロ波水蒸気サウンダ・イメージャの全天候利用とアウトーループ(解析途中での第一推定値更新)の導入:水蒸気場の予測精度向上
 - 雲・降水域での気温や水蒸気の情報が多く取り込まれる。(雲・降水を解析するわけではない)
 - ただし、氷雲の影響を強く受ける89GHz帯のチャンネルはモデルのバイアスの影響が大きいため利用を停止した。
- 2021年3月:ハイブリッド同化の改良 (他海域の熱低進路予測にインパクト)
 - LETKFと4DVarにおけるアンサンブル予報由来の背景誤差(Be)作成のためのメンバー数を50→100メンバーに増強:サンプリング誤差の低減
 - アンサンブル由来の背景誤差の割合を15%→50%に増強して流れ依存性をより考慮する

水蒸気サウンダ・イメージャの利用数変化

2018年9月20日18UTC(のちに台風第24号になる熱帯擾乱)の解析値

等値線: 海面更正気圧[hPa]

●: 解析値の熱低位置、●: ベストトラック、△: 利用された水蒸気サウンダ・イメージャ



※: Metop-Bは通過していない時間帯

- 台風周辺で数倍近くの衛星観測データが利用されるようになる。
- 初期値から台風(台風になる前の熱帯擾乱含む)の位置誤差やその後の進路予測を改善
- 全天同化だけでもインパクトがあるが、ハイブリッド同化の併用により、台風周辺の背景誤差の表現向上に伴い、改善が上乘せされる。

2021年3月の改良による北東太平洋における熱帯低気圧進路予測誤差減少

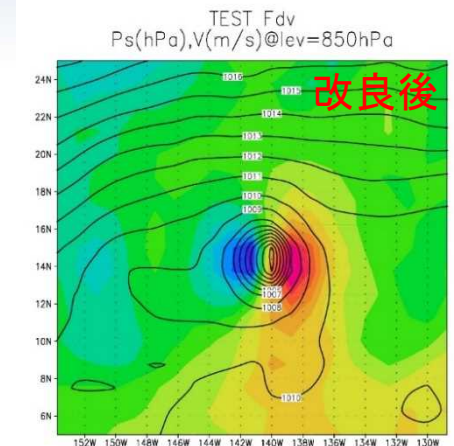
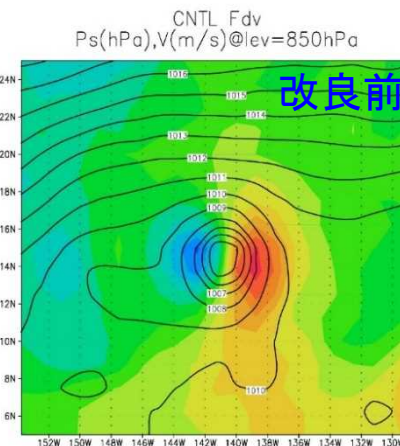
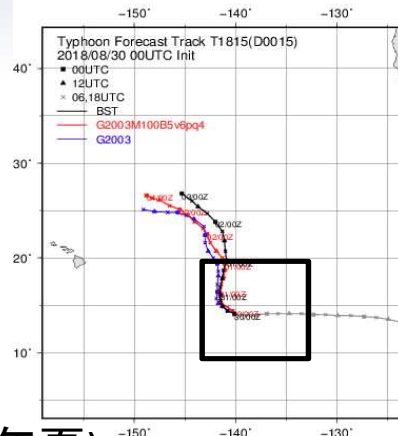
ハリケーン Miriam (2018) の構造

(2018年8月30日00UTC解析値)

等値線: 地上気圧[hPa], カラー: 南北風 [m/s]

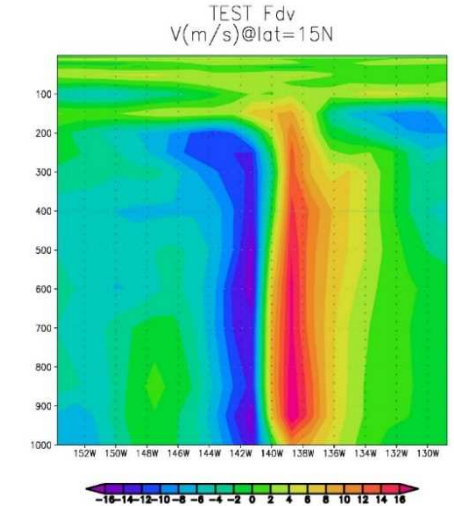
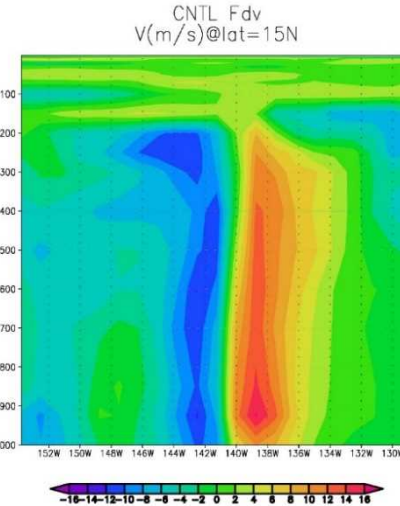
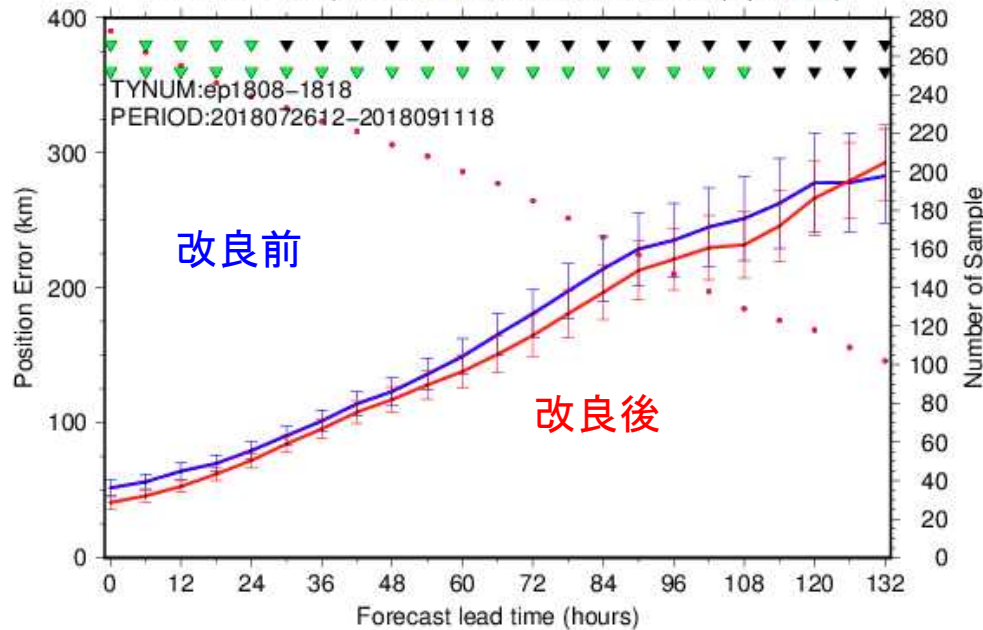
- アンサンブル起源の背景誤差の扱いの改善により、(スプレッドの大きい)台風周辺で、解析値がより観測に近づくよう寄与

T1815(D0015) Typhoon Forecast and Analysis (Track)



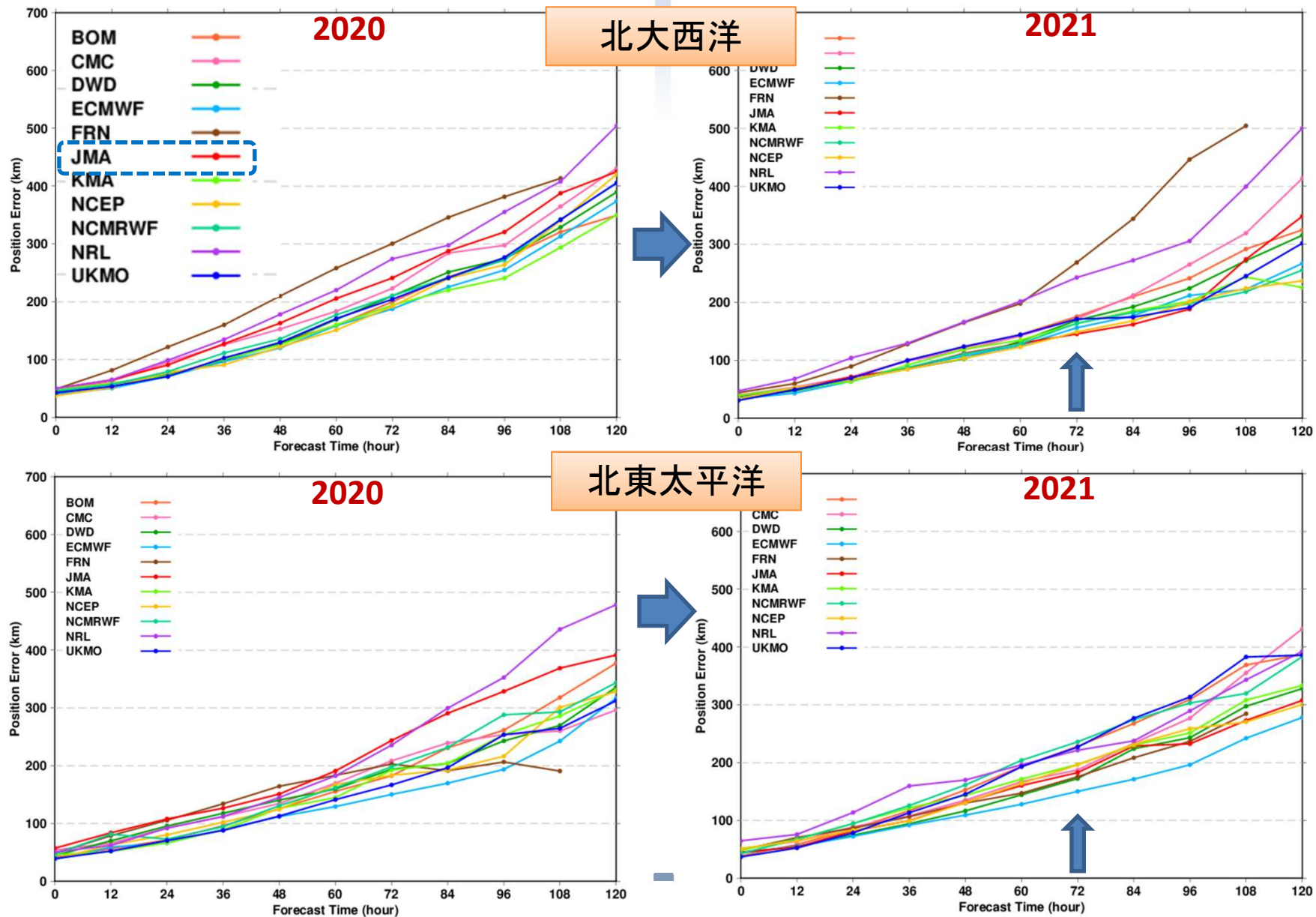
熱低位置誤差[km] (2018年夏)

Position Error (G2003: Blue, G2003M100B5v6pq4: Red)



熱低が鉛直方向に深い構造を持つようになり steering flow を感じる高さが変わったことが改善に寄与したか

気象庁が熱低ボーガスを使っていない海域での熱低 進路予測誤差 (WGNE熱低検証から)



他海域の熱帯低気圧進路予測改善から 得られる示唆

- 気象庁の全球数値予報システムでボーガスを使っていない海域（北西太平洋域以外）では、衛星観測の全天利用やハイブリッド同化改良の熱低進路予測への影響がより大きい。
- 北西太平洋域は、台風進路予測精度維持の上でボーガスが必要な状態だが、熱低周辺の場の衛星観測情報を引き出す（熱低に特化しない）データ同化手法の改良によりボーガスへの依存度を段階的に下げられる可能性を示唆。

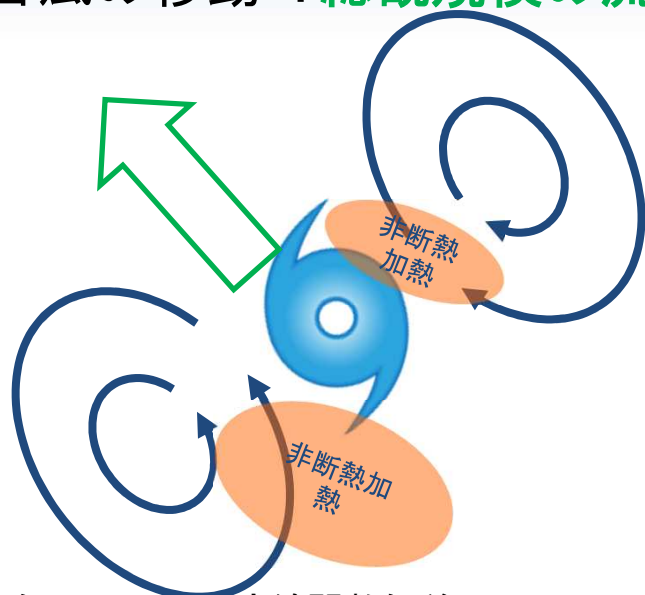
概要

- データ同化システムの改良
 - 台風周辺の観測情報の引き出し
- モデルの改良
 - 非断熱加熱の表現の改善
 - 大規模循環
 - 台風周辺の非断熱加熱の非軸対称性の表現
- モデル・データ同化改善のリンク
 - 観測データ品質管理情報のモデル開発への還元
 - 系統誤差の少ないモデルによる第一推定値作成

台風移動の考え方

台風移動 = 総観規模の流れ + ベータジャイア + 非断熱加熱 (の偏り)

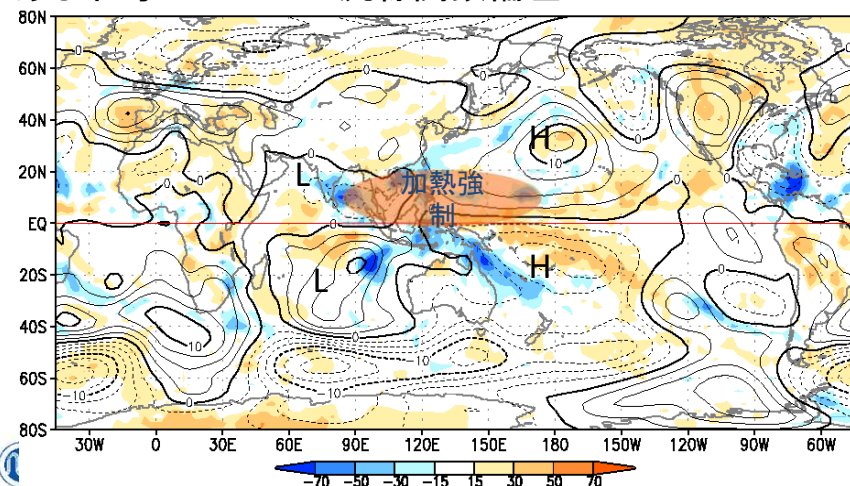
Ito et al. (2020)



- 台風移動を渦位の時間変化と見たとき、その変化は移流と非断熱加熱、及び摩擦によって規定される

- 移流:
 - どの高さの環境場の流れが台風移動に寄与するか → 最適指向流の考え方 (前の太田の講演参照)
- 非断熱加熱:
 - 環境場を作る大規模な循環を作る
 - 台風周辺の分布の偏りにより台風周辺の渦位の変化を作る

ある半旬での850hPa流線関数偏差



熱帯循環の系統誤差の変遷

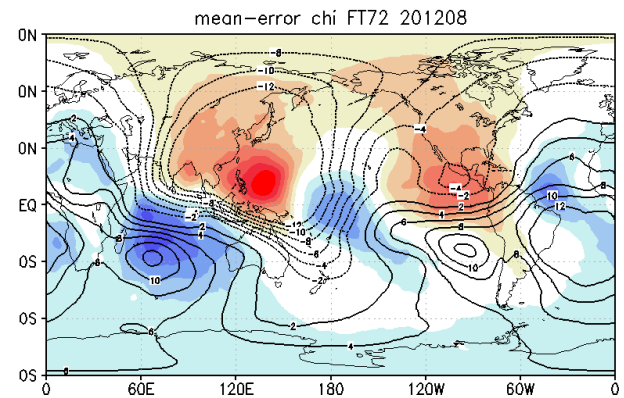
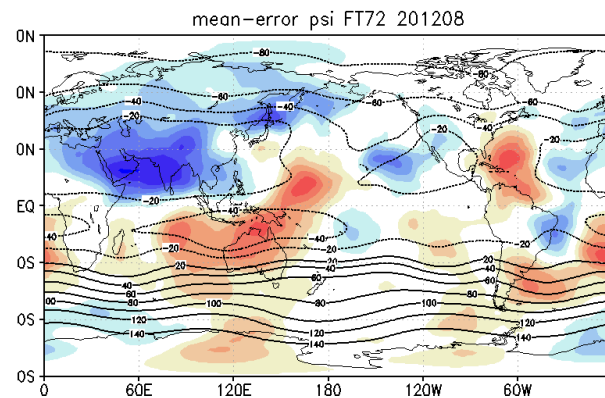
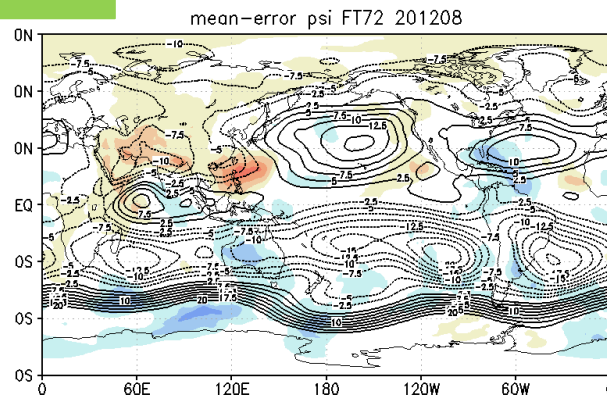
8月平均72時間予測値(等値線)と誤差(カラー)

850hPa流線関数

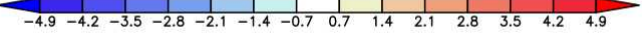
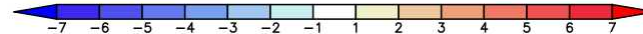
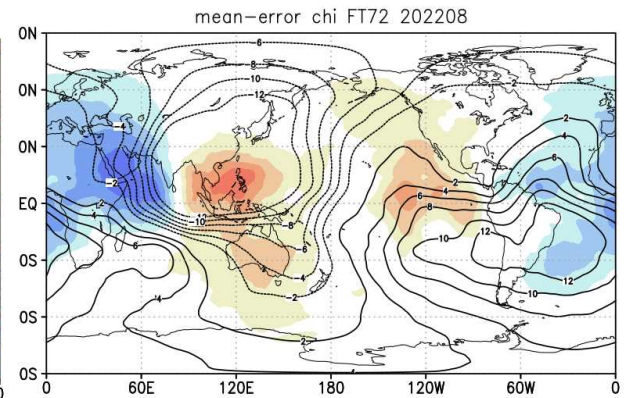
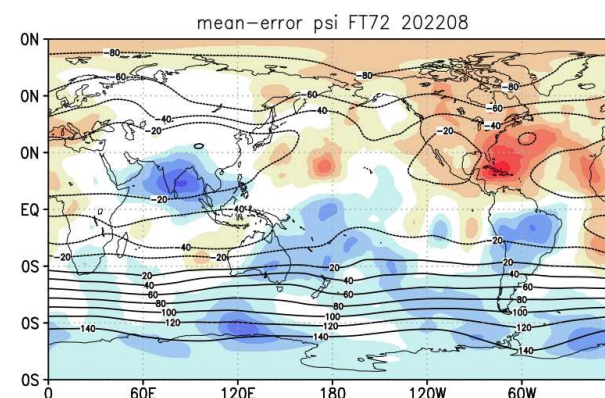
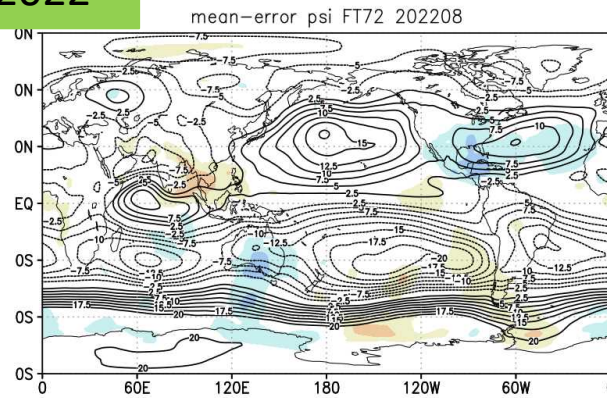
200hPa流線関数

200hPa速度ポテンシャル

2012



2022



熱帯循環の系統誤差の変遷

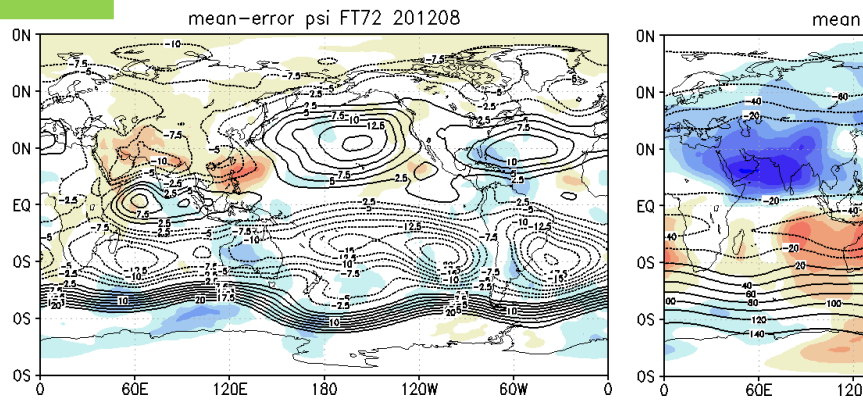
8月平均72時間予測値(等値線)と誤差(カラー)

850hPa流線関数

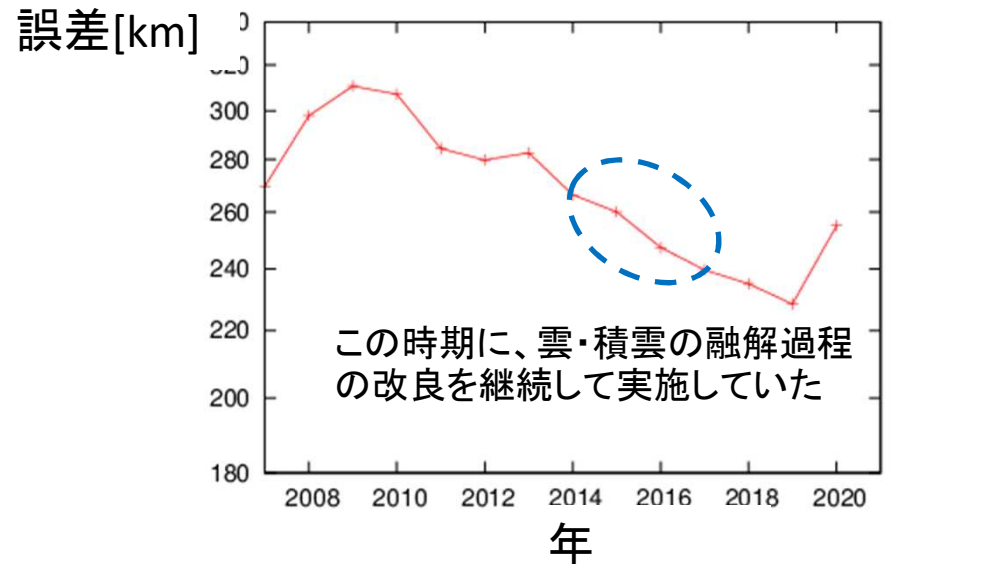
200hPa流線関数

200hPa速度ポテンシャル

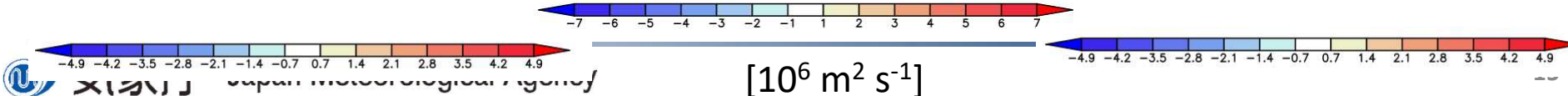
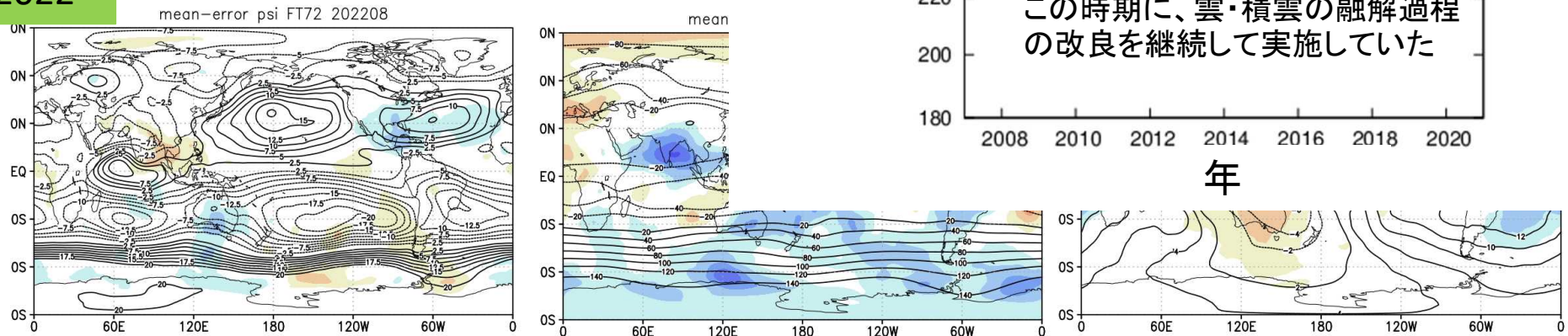
2012



2007年~2021年までの台風進路予測(T+72)誤差(3年移動平均、対数スケール)



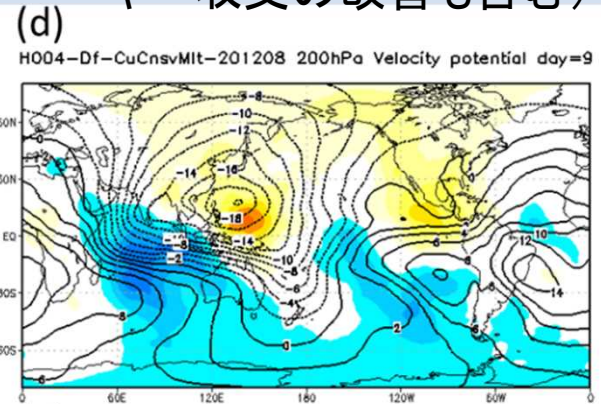
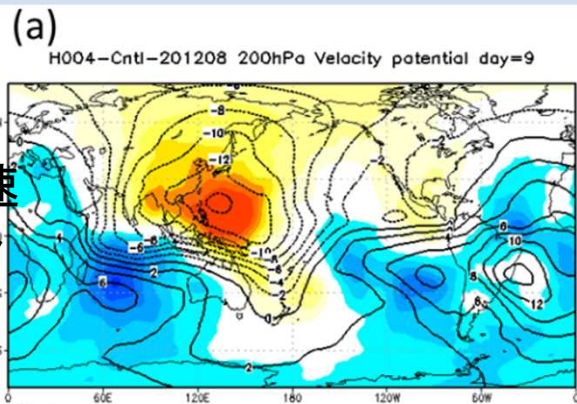
2022



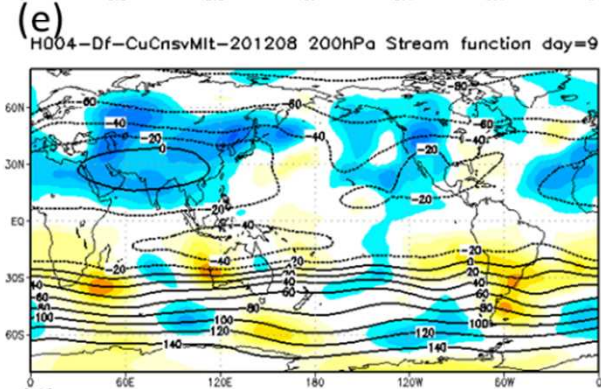
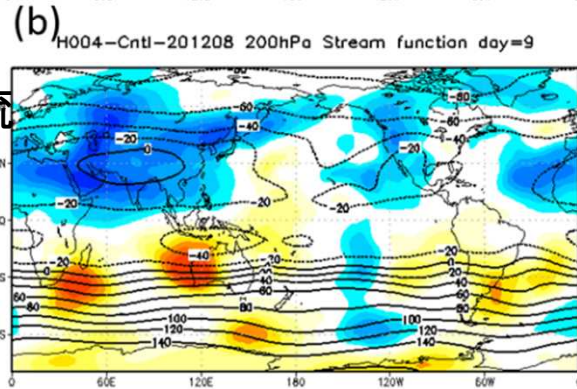
等値線: 9日予測の2012年8月平均値
 カラー: 誤差
 降水融解改良前

降水融解改良後(エネルギー収支の改善も含む)

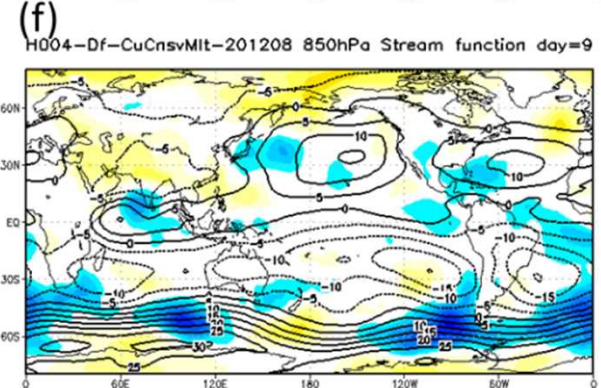
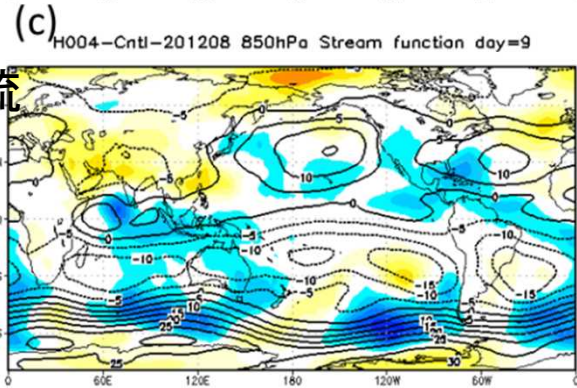
200hPa速度ポテンシャル



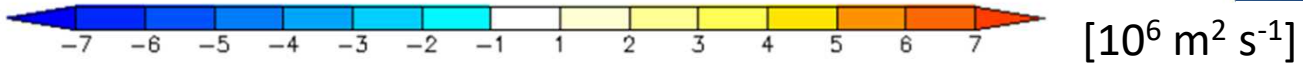
200hPa流線関数



850hPa流線関数



対流圏中層に雲頂を持つ雄大積雲の頻度が増えることを通じて北西太平洋での対流活動を活発にし、熱帯の循環場の維持に寄与。

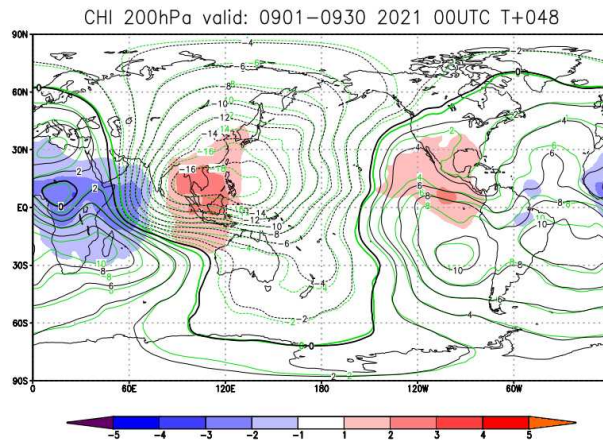


氏家・下河邊 (2019)

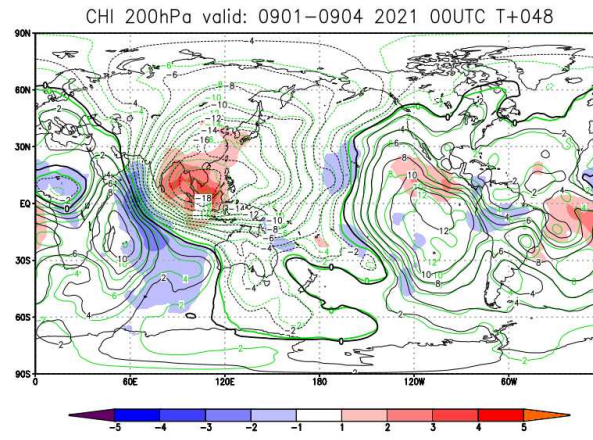
環境場の更なる改善への課題

200hPa速度ポテンシャル 48時間予測誤差

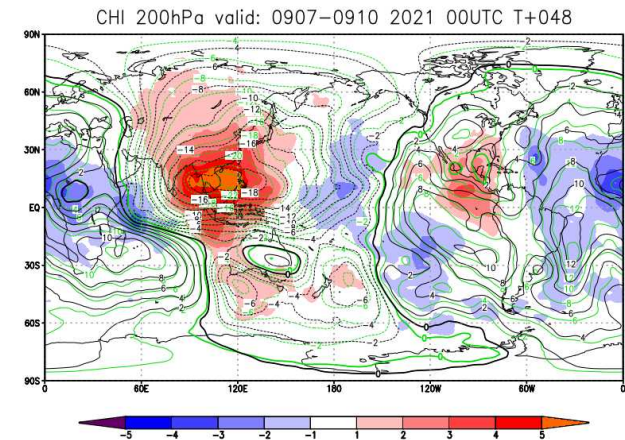
2021年9月の月平均誤差



亜熱帯高気圧の南に
台風第14号が存在しない期間
2021年9月1日～4日の平均誤差



亜熱帯高気圧の南に
台風第14号が存在する期間
2021年9月7日～10日の平均誤差



- ・予報時間が進むと循環が弱くなるバイアスは残っている。台風存在時にその傾向が顕著に見える。
- ・半日潮汐成分の表現が不十分で、06, 18UTCで北西太平洋域に高度や気圧に負バイアスが見られる。(図略)
- ・非断熱加熱の絶対値が小さいことや日変化に難がある可能性がある。
- ・**台風進路予測へのインパクトの診断と合わせて、地道に改善を進める必要がある部分**

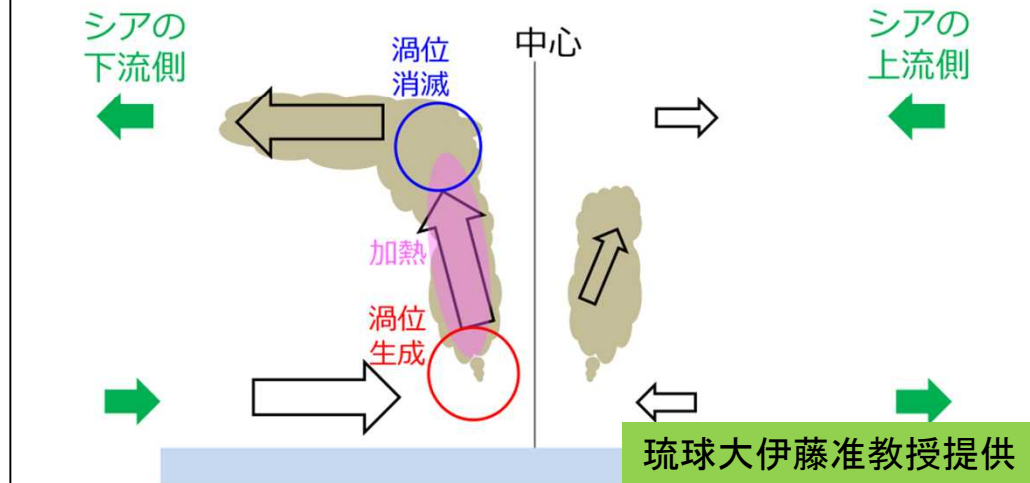
概要

- データ同化システムの改良
 - 台風周辺の観測情報の引き出し
- モデルの改良
 - 非断熱加熱の表現の改善
 - 大規模循環
 - 台風周辺の非断熱加熱の非軸対称性の表現
- モデル・データ同化改善のリンク
 - 観測データ品質管理情報のモデル開発への還元
 - 系統誤差の少ないモデルによる第一推定値作成

非軸対称な加熱と渦の生成

鉛直シア⇒対流の偏り⇒渦位の生成

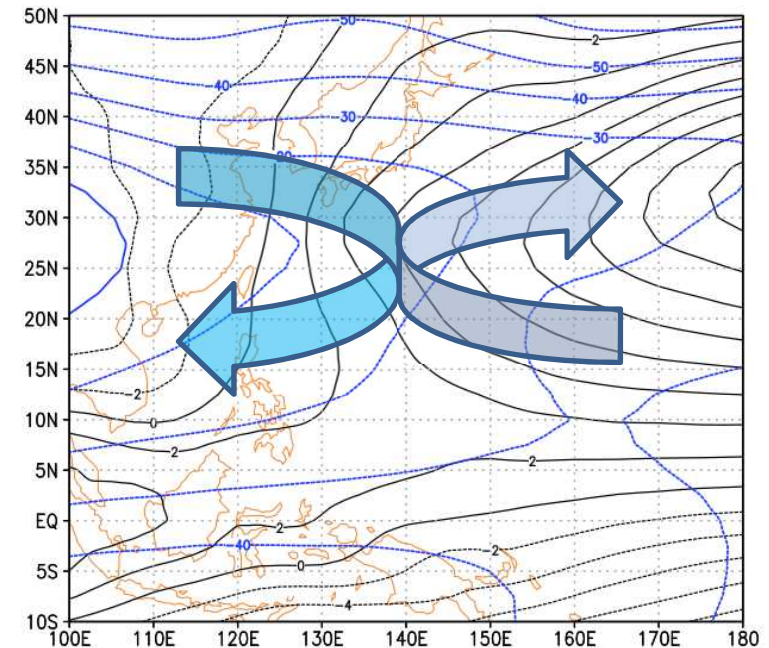
- 鉛直シア下流側で吹込みと吹出しが強く対流が偏在。
- 一般には、台風は反時計回りの風を伴うため、シアの下流側～その左側で対流活動が活発になる。
- 活発な対流活動⇒加熱分布に応じた渦位生成。



$$\frac{d}{dt} (PV) \sim \frac{(\zeta_a)^z}{\rho} \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial z}$$

PV : エルテルの渦位 ζ_c : 絶対渦度 ρ : 大気密度
 $\dot{\theta}$: 非断熱加熱率

2021年JJA平均 850hPa流線関数(黒)
200hPa流線関数(青)

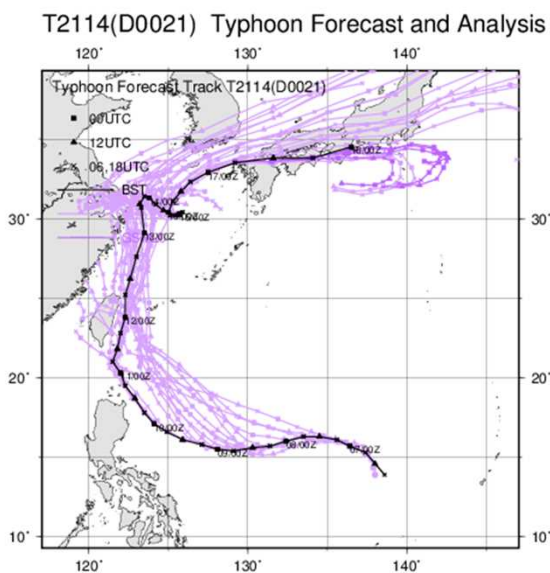
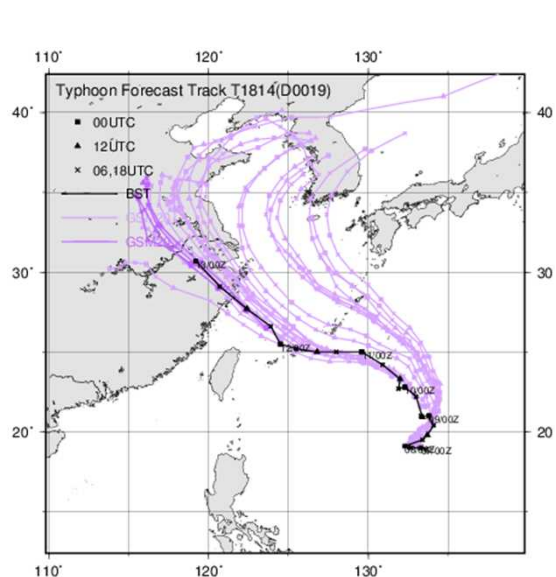


夏の北西太平洋は、下層では太平洋高気圧の西縁、上層ではチベット高気圧の東縁にあたるので、シアベクトルとしては南向きになりやすい

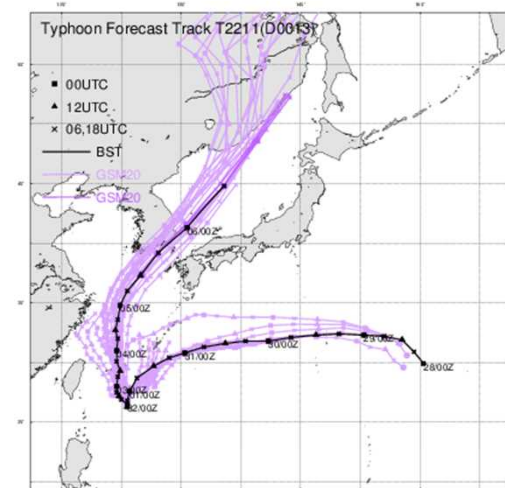
北進バイアスと非断熱加熱の非軸対称成分の関係？

日本の南海上で西進する台風について、北進誤差が目立つ事例は今も多い
大なり小なり、多くのセンターの全球モデルで見られる。

e.g. 2018年第14号、2021年第14号、2022年第11号etc

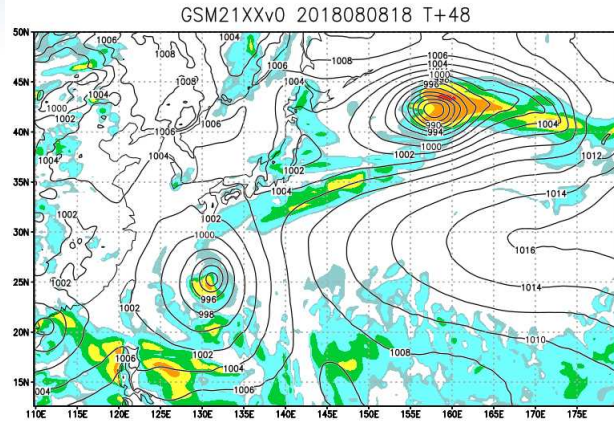


T2211(D0013) Typhoon Forecast and Analysis

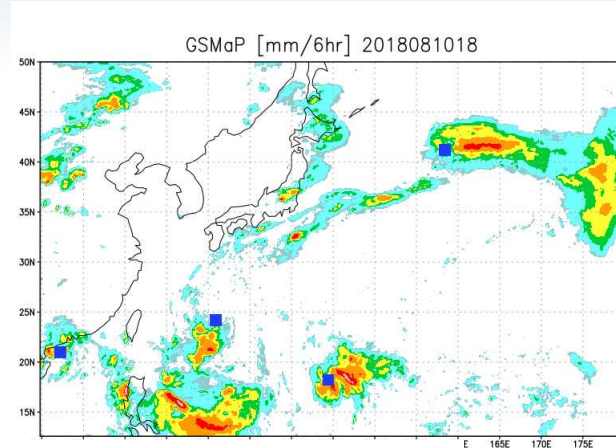


2018年台風第14号(8月10日18UTCを対象)

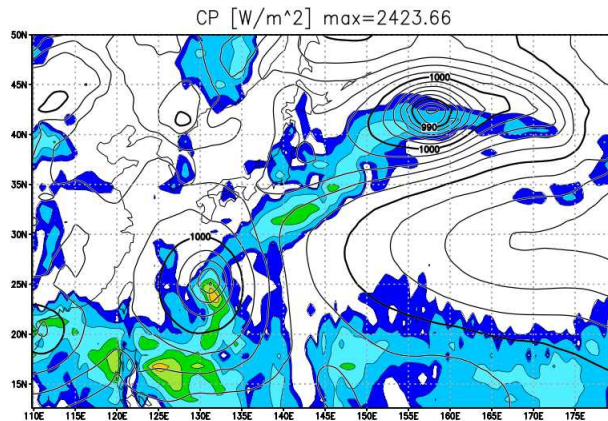
GSM T+48hr
6時間降水量[mm](カラー)
海面更正気圧[hPa](等値線)



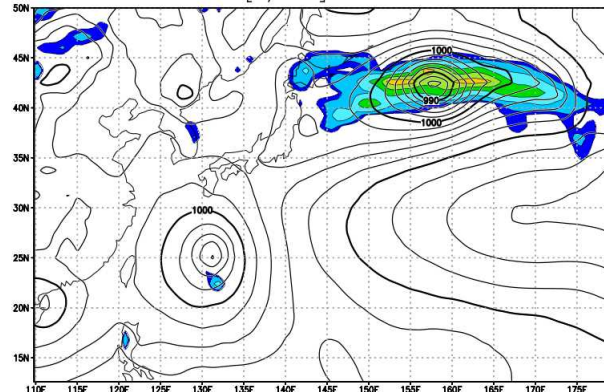
衛星降水プロダクト(GSMaP)による6時間降水量 [mm] ■・・・気象庁ベストトラック



T+24~48平均鉛直積算加熱率[W/m²]
積雲スキーム



雲スキーム
Cloud [W/m²] max=2352.17

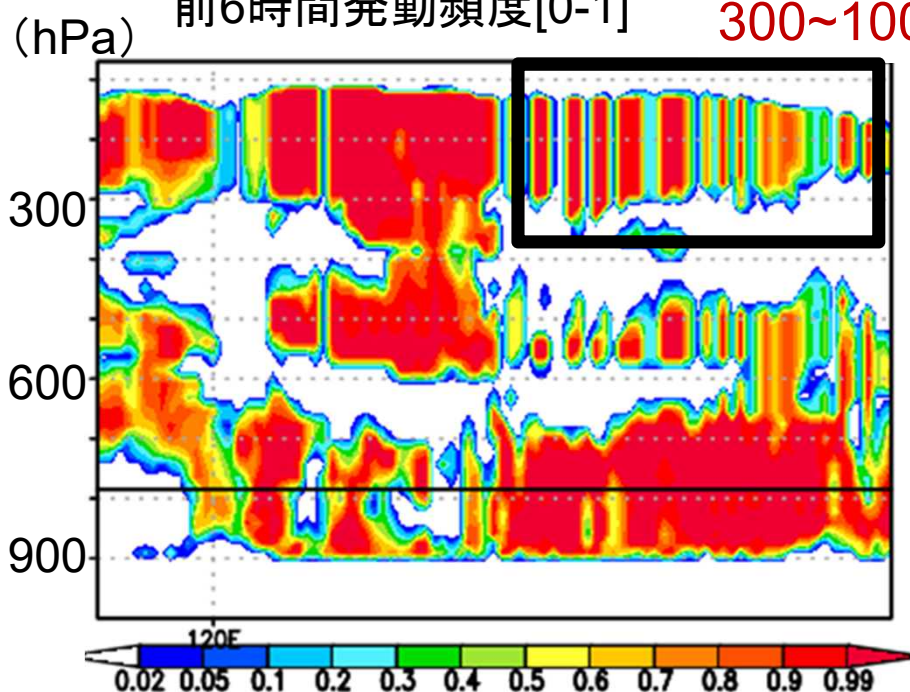


- ・GSMは非軸対称な降水分布を表現してはいるが、弱い。
- ・全体的に熱帯ではどこでも弱い降水を表現してしまっている。

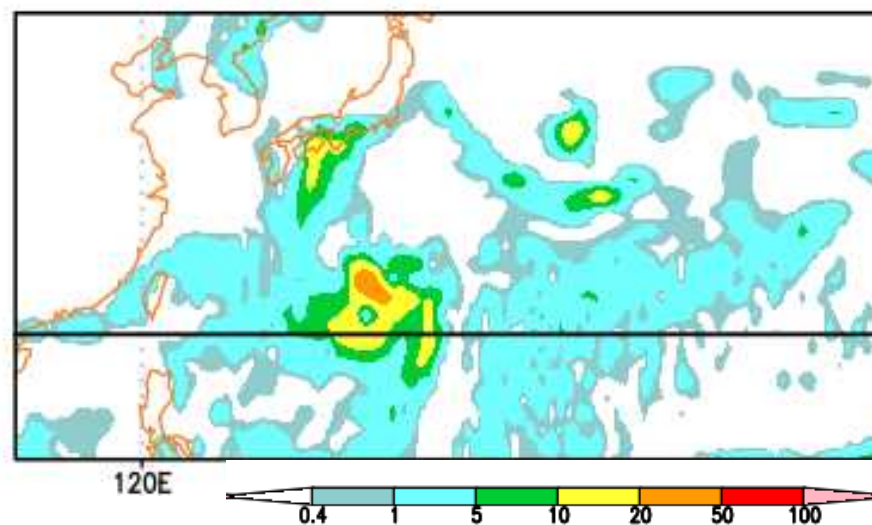
GSMの積雲対流スキームの発動状況に関する 問題意識

- 環境場に依らず積雲対流スキームによる背の高い積雲が実際よりも広範囲で立ちやすい

各層を雲頂に持つ積雲の
前6時間発動頻度[0-1] 相対湿度が低い(50%程度、図略)にもかかわらず、
300~100hPaで頻繁に積雲対流スキームが発動



積雲対流スキーム起源の降水量 [mm/6hr]
2020/8/31 12UTC init. T+60



クロージャー変更による対応

- 短期的な対応として、積雲対流の強さを決める「クロージャー」と呼ばれる部分において、背の高い積雲の強さの環境場の相対湿度への感度を高める修正を検討
 - 中長期的には、積雲モデル(※)として、環境場への感度をより柔軟かつ自然に表現できる手法(Chikira and Sugiyama 2010, Baba 2019など)の利用を検討

積雲対流スキームによる格子平均の加熱率

$$\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t}\right)_{\text{conv.}} \sim \frac{1}{C_p \rho} \sum_i M_i^u \frac{\partial}{\partial z} (C_p \bar{T} + gz) + \dots$$

対流の質量
フラックス
(密度x上昇流)

雲底の値

$$M_i^u = M_{bi} \eta_i$$

規格化フラックス

クロージャーの式

$$\frac{dM_{bi}}{dt} = F - \frac{M_{bi}}{2\tau}$$

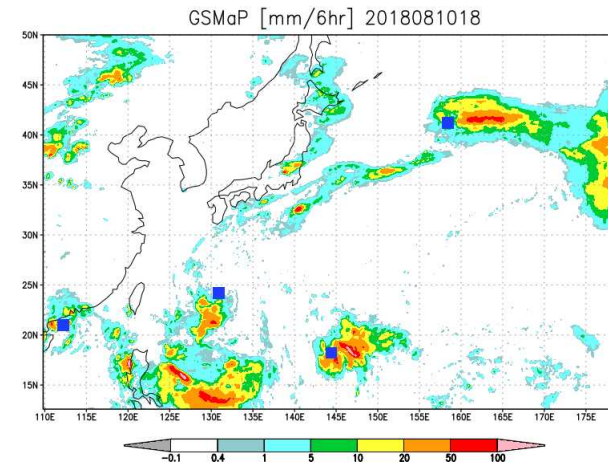
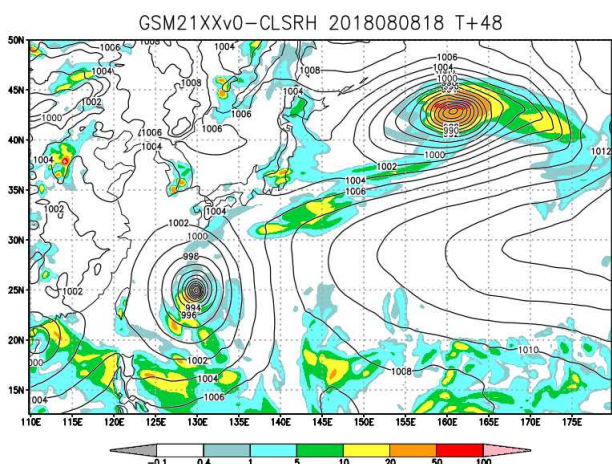
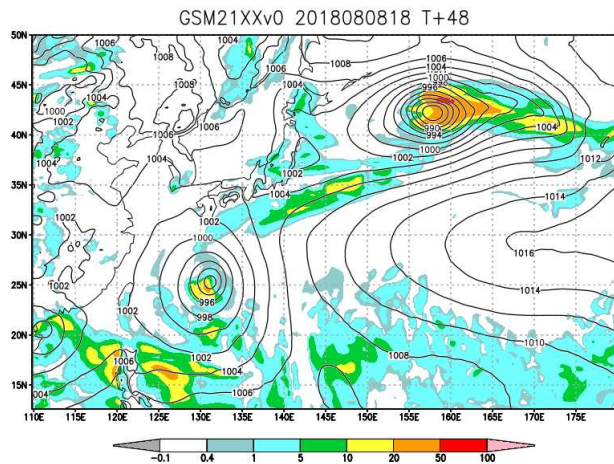
強制項(環境場の安定度等の関数)の湿度への感度を高める。

クロージャー変更後のインパクト

クロージャー修正前

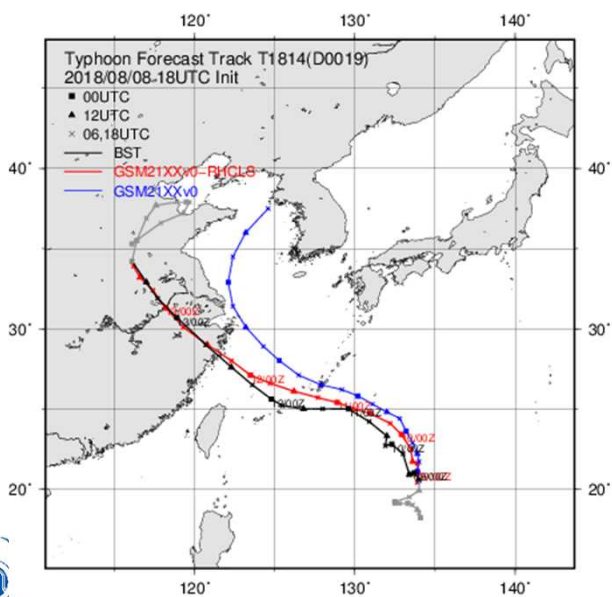
クロージャー修正後

GSMaP



T1814(D0019) Typhoon Forecast and Analysis (Track)

■ ...気象庁ベストトラック



熱帯や台風周辺の非断熱加熱やにメリハリがつくようになる。この事例では北進バイアスを軽減

・統計的にも台風進路予測を改善するが、基本場のバイアスやスコアが改悪。この修正だけでは現業利用は難しく、他の過程と組み合わせた総合的な改善が必要

概要

- データ同化システムの改良
 - 台風周辺の観測情報の引き出し
- モデルの改良
 - 非断熱加熱の表現の改善
 - 大規模循環
 - 台風周辺の非断熱加熱の非軸対称性の表現
- **モデル・データ同化改善のリンク**
 - 観測データ品質管理情報のモデル開発への還元
 - 系統誤差の少ないモデルによる第一推定値作成

データ同化とモデルの関係

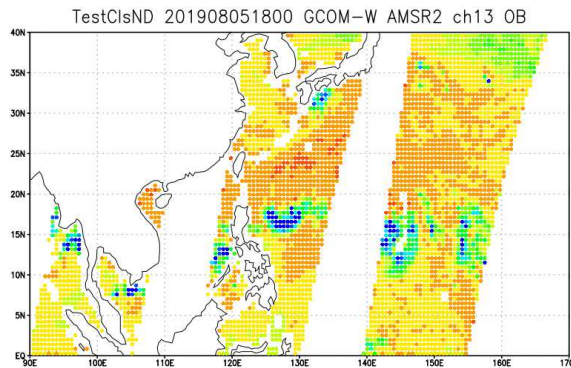
- Q: データ同化改良とモデル改良は独立？
 - A: **NO.** 両者が高度化するほど密接に関連する。
 - (弱拘束とかでない) データ同化システムでは、観測値や第一推定値にバイアスがないことを仮定している。
 - 観測値と第一推定値があまりに離れているとその観測を利用するのは困難
 - 前述のマイクロ波輝度温度全天同化も、GSM物理過程改良が土台になった。

氷雲の影響を受ける周波数での輝度温度第一推定値のバイアス

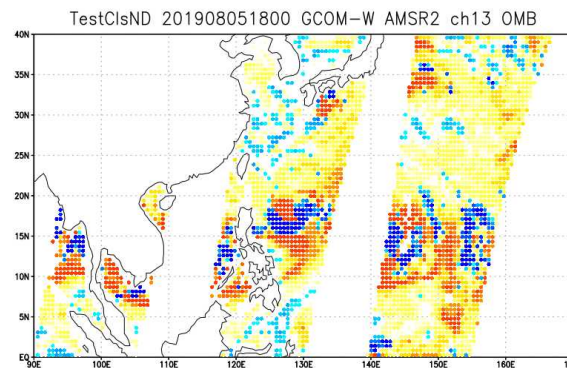
GCOM-W AMSR2 ch13 (89GHz 垂直偏波)の輝度温度(2019年8月5日18UTC)

※全天でO-Bを計算しているが、同化では使っていない。O-B確認用に間引き間隔を150kmから40kmに変更

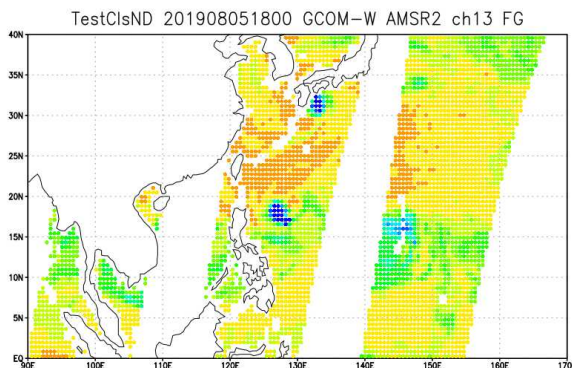
観測輝度温度



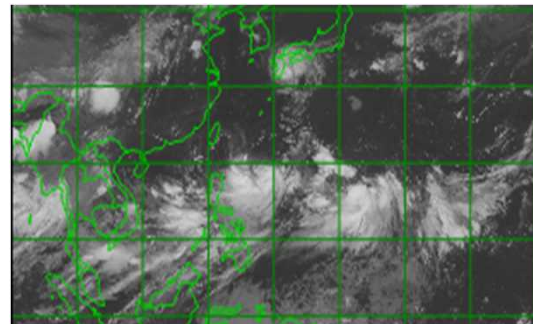
観測-第一推定値



第一推定値



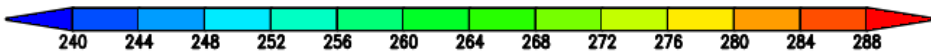
ひまわり赤外画像



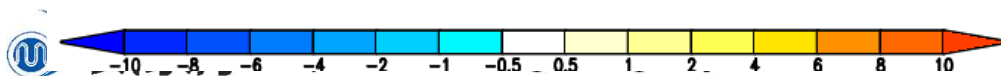
・観測輝度温度が低い(氷雲の影響を受けている)ときにO-Bの負バイアス(第一推定値の方が高い)が顕著→モデルの雲氷過少

・現在の全球数値予報システムでは、マイクロ波全天同化の代償として、89GHz帯の輝度温度データを利用停止している。

・今後、高周波(氷雲の影響を受けやすい)のチャンネル利用を考えると、雲氷関連のモデルバイアス軽減は衛星データ同化の高度化の観点でも喫緊の課題となる。



[K]



Error compensation の解消

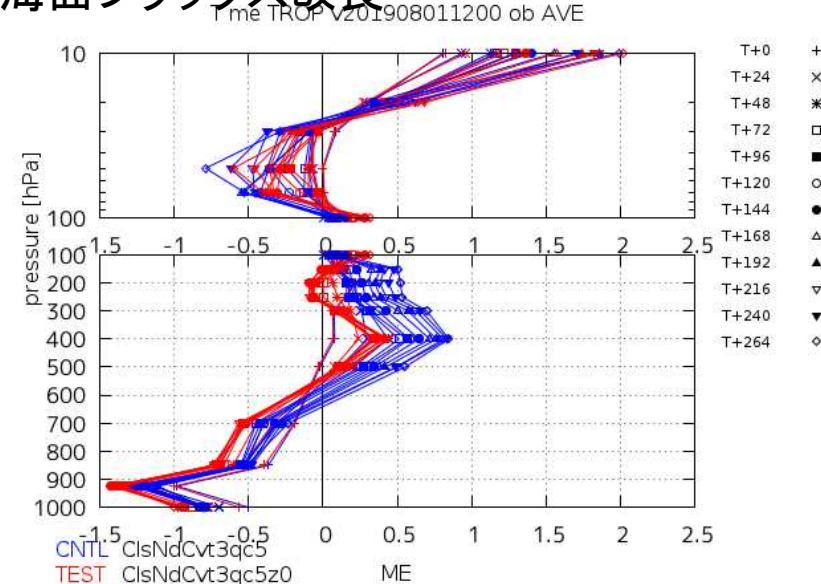
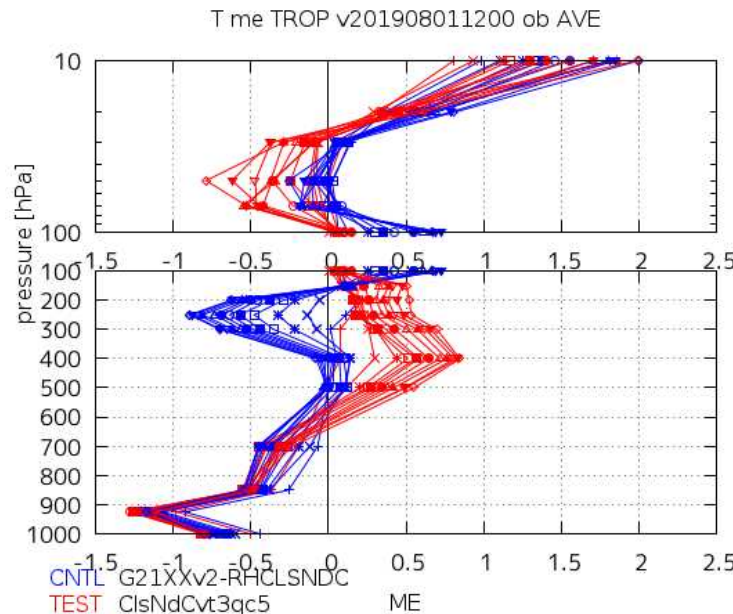
熱帯(20S-20N)対ラジオゾンデ気温平均誤差[K]

青: 標準計算

赤: 標準計算 + 雲氷を増やす変更

CNTL: 標準計算 + 雲氷を増やす変更

TEST: 標準計算 + 雲氷を増やす変更
+ 海面フラックス改良



- 単純に雲氷を増やすと、対流圏が高温化する。
 - 短波放射の雲の吸収による加熱増、雲の温室効果による長波放射の冷却減。
- 海面フラックスの過剰傾向が放射の誤差を補償(error compensation)してるため、雲氷分布改良は海面フラックス改良と同時に行う必要がある。
- モデルの中で何が起きているのかを詳しく理解し、系統誤差の解きほぐしが重要。

まとめ

- 台風進路予測誤差の減少に向けた取り組みや経験について、データ同化システムの改良、物理過程改良の観点から紹介した。
 - データ同化システム：台風周辺の観測情報の引き出し
 - 全天域での観測データ利用やそれを可能にするハイブリッド同化
 - これらは熱低ボーガス等人工的な観測への依存度を下げることに寄与
 - 物理過程：非断熱加熱の表現の改善
 - 環境場の系統誤差軽減に本質的で、ここ数年のGSM改良で改善されてきた部分。
 - 最近の開発では、台風周辺の非軸対称成分表現向上が日本の南海上の進路予測に見られる北進バイアスに影響することを示唆
 - モデル・データ同化改善のリンク
 - 衛星からの情報の更なる引き出しのために、雲・放射関連のバイアス軽減が重要
 - 過程間の相互作用も含めた総合的な開発