



台風進路予報における数値予報の課題

気象庁予報部数値予報課 米原 仁

はじめに

台風進路予報における数値予報の課題について、全球モデルを中心に、近年の状況及び今後の開発の方向性と課題を紹介

○目次

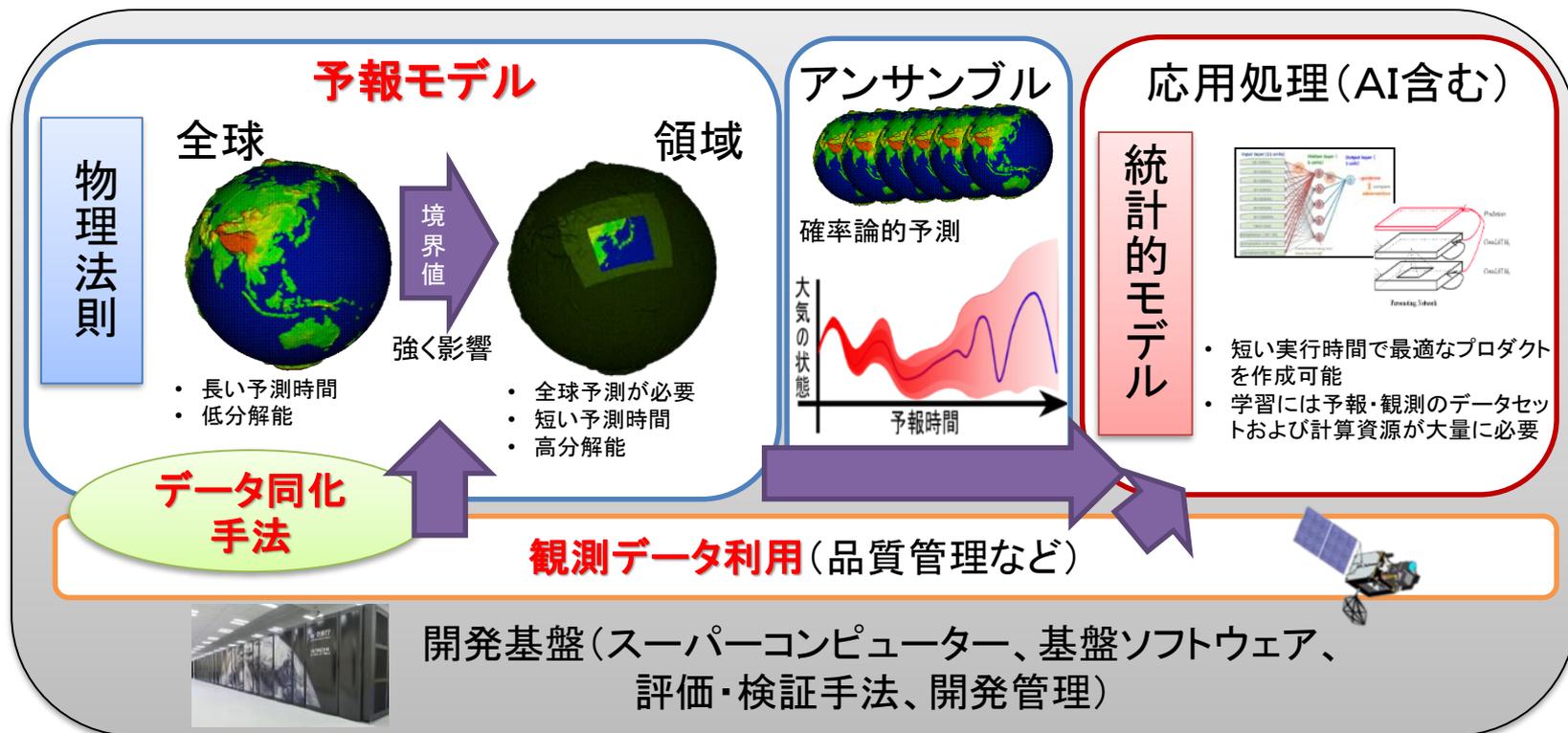
- 数値予報モデル開発の背景
- 全球モデルにおける近年の開発と台風進路予測の誤差
- 台風進路予測の改善に向けた今後の開発の方向性と課題
- おわりに

台風予測の精度向上は重要な課題であり、過去の本研究会でも関連した講演多数 <http://pfi.kishou.go.jp/>

数値予報モデル開発の背景

現業数値予報の運用と開発

- 様々な解像度と予測時間を持つ数値予報モデルを運用している
- 応用処理含め、ニーズと科学的合理性の両面で役割を効率よく分担
- 開発は、各構成要素の役割と特徴を踏まえ、精緻化・高度化していくことが基本
- 達成すべき目標に応じた**開発項目の優先度**や**モデルの役割**設定が重要



交通政策審議会気象分科会

「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」

○提言で示された技術開発に関する「2030年における目標」の一つ

- 数日前からの大規模災害に備えた広域避難に資するため、台風の3日先の進路予測誤差を100km程度にまで改善

【参考】観測・予測精度向上に向けた技術開発に関する5つの目標(気象・気候)

目標③ 数日前からの大規模災害に備えた広域避難に資する台風・集中豪雨などの予測精度向上

- ◎ 台風の予測精度や雨量予測を大幅に向上させ、台風や梅雨前線の停滞等に伴う3日先までの雨量予測や、高潮等の予測を精度良く提供。これにより、3日程度前から河川流域の雨量や高潮等の見通しを把握することが可能となり、的確な広域避難オペレーションに貢献。
 - 概ね3年後： 台風が日本に接近する可能性がある場合等には、メソモデルによる雨量予測を39時間先から78時間先まで延長し、3日先までの総雨量予測情報の提供を行う。次世代高潮モデルを運用し、より長期かつ高精度な予測の提供。
 - 2030年： 数値予報技術の大幅な高度化により、台風の3日先の進路予測誤差を100km程度（現在の1日先の誤差程度）にまで改善し、雨量や高潮予測の精度を大幅に改善。加えて、3日先までの時間・地域別の雨量予測情報の提供等を開始。



https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/20a/bunkakai_rep.html

2030年に向けた数値予報技術開発重点計画

- 気象分科会提言(平成30年8月)を踏まえて計画を作成(平成30年10月)
- 数値予報モデル開発懇談会でもご議論いただいた

3. 2030年における重点目標

自然災害や社会情勢の変化と科学技術の発展を踏まえ、ビジョンの実現に向けて重点目標を掲げる

① 豪雨防災

集中豪雨発生前に、明るいうちからの避難等、早期の警戒・避難を実現

② 台風防災

大規模災害に備えた広域避難・対応を可能にする数日先予測の高精度化

③ 社会経済活動への貢献

生産・流通計画の最適化等に役立つ高精度な気象・気候予測を実現

④ 温暖化への適応策

「わが町」の地球温暖化予測により、国や自治体等の適応策策定に貢献

4. 技術革新の推進

重点目標の達成に向け、鍵となる技術革新を重点的に推進

- ① 次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用
- ② 日本の気象を世界最高の精度と解像度でシミュレーション
- ③ 確率予測とAI技術の融合による意思決定支援

5. 開発マネジメントの強化

技術革新の実現には開発マネジメントの強化が必須

① 幅広い連携の推進

-産学官オールジャパンの連携を実現するとともに、国際的連携も強化し、数値予報に関する研究と開発を力強く推進

② 開発者の育成と確保

③ 研究・開発基盤の整備

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/suuchi_model_kondankai/part3/gaiyou.html

https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_181004.html

開発の基本的な方向性(重点計画)

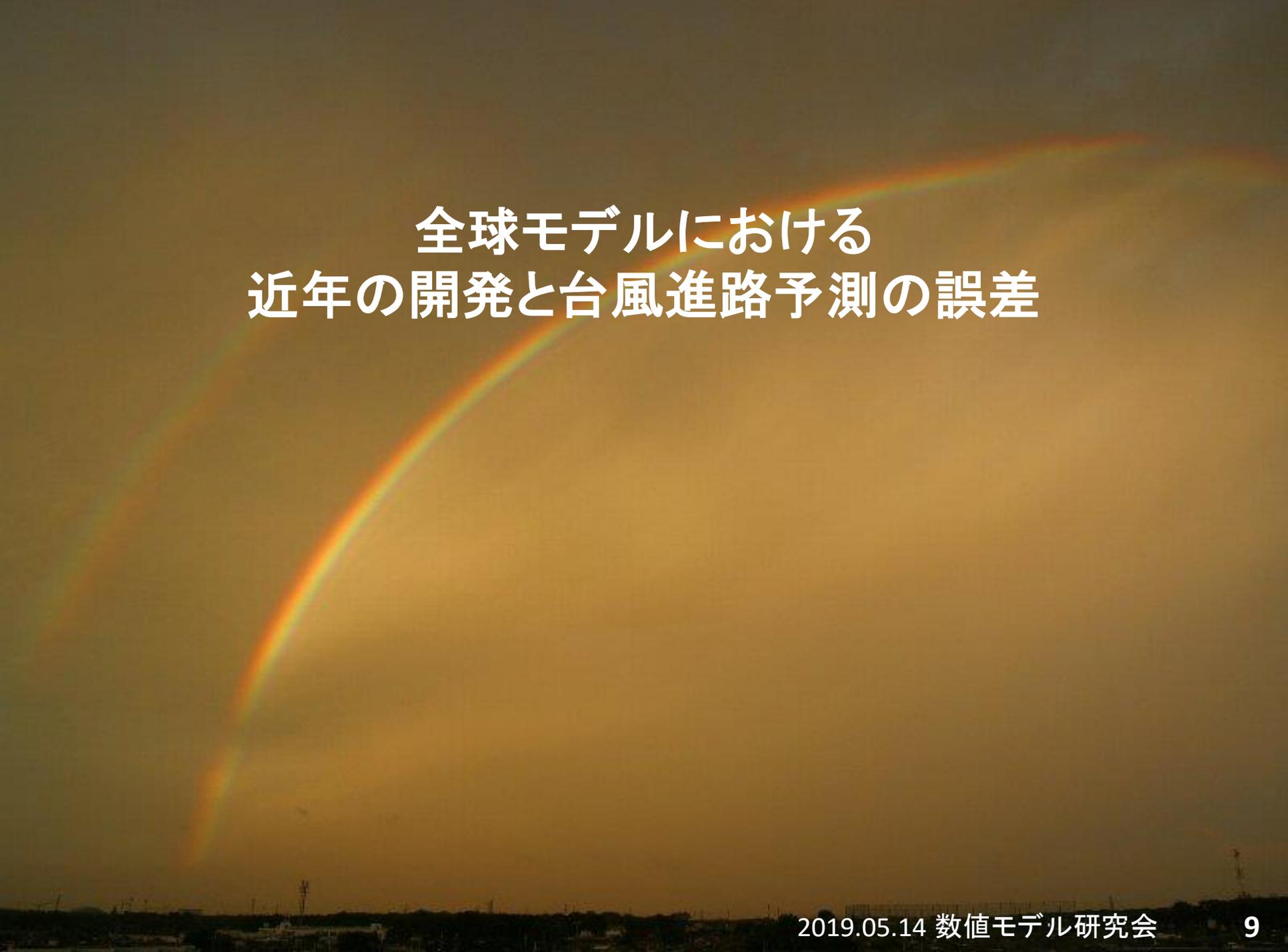
- 各モデルが担う役割を明確化して、最適な組み合わせで階層的に用いる
 - 全球モデルの台風進路予測の精度を大幅に向上。その上で、メソ(領域)モデルを用いて台風構造(地上気圧、雨、風)を精緻に表現
 - その開発では、開発基盤等で共通の開発フレームワークを用い、効率化を進めて改善を加速
- 予報モデル(全球)
 - 物理過程の抜本的な改良、力学過程含む相互の関係性の見直し
 - 計算機性能の向上に応じて、水平格子間隔を10kmよりも高解像度化
- データ同化
 - ハイブリッド同化、全天候でのデータ利用、変分法QC、高解像度海面水温データの利用など最新技術の導入
 - 新規観測データの利用に加え、すでに利用している観測データについても、さらに利用を高度化

全球モデルの開発に求められるもの

- **3日先の台風の進路予測精度を改善する (重点目標)**
 - 台風に伴う雨や高潮の予測は、進路予測が外れると価値を失うため、まずは進路予測の精度を改善することが最も重要

また、以下のことを前提とする

- **信頼性を保つ**
 - 安定に運用され、提供時間を守り、また予測精度が保たれていること
 - 運用と開発のコストを適切に保つ
- **メソモデルにより適切な境界値を提供する**
 - メソモデルの降水・風・地上気圧から作成した情報が中心的に利用されると想定される



全球モデルにおける 近年の開発と台風進路予測の誤差

気象庁全球モデル・全球解析・全球EPSの概要

GSM: Global Spectral Model(全球モデル)

解像度: TL959(20km) / 100層(モデルトップ0.01hPa)

132時間予報(00, 06, 18UTC初期値)、 264時間予報(12UTC初期値)

GA: Global Analysis (全球解析、4D-Var)

水平解像度: アウターモデル: TL959(20km)、インナーモデル: TL319(約55km)

データ入電打ち切り時間

速報解析: +2時間20分、サイクル解析: +11時間50分(00,12UTC), 7時間50分(06,18UTC)

同化ウィンドウ: -3時間~+3時間

GEPS: Global Ensemble Prediction System(全球アンサンブル予測システム)

解像度: TL479(約40km) / 100層(モデルトップ0.01hPa) *(11日予測までの部分について)

台風が存在する場合、1日4回 各初期時刻27メンバーで運用

初期摂動作成手法: SV法、LETKF摂動の両者を利用

詳細は数値予報課報告 別冊第65号や62号等に記載があります。

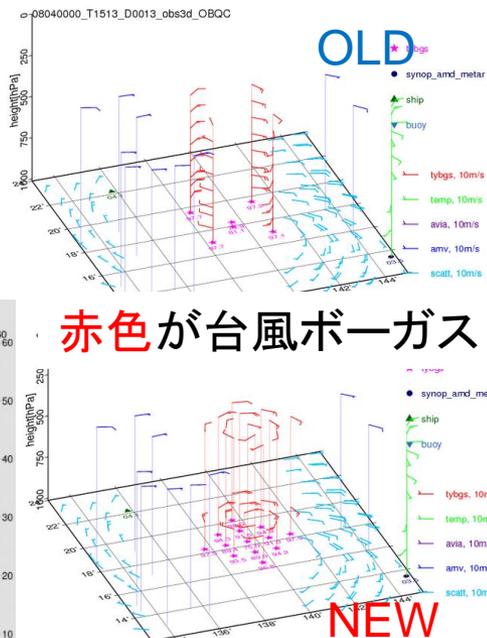
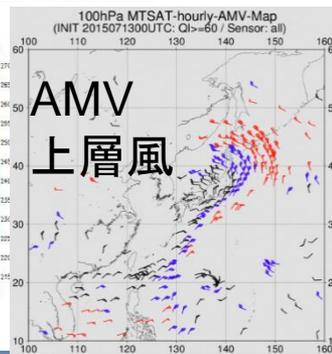
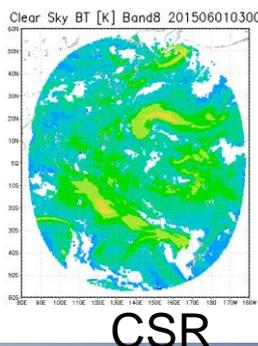
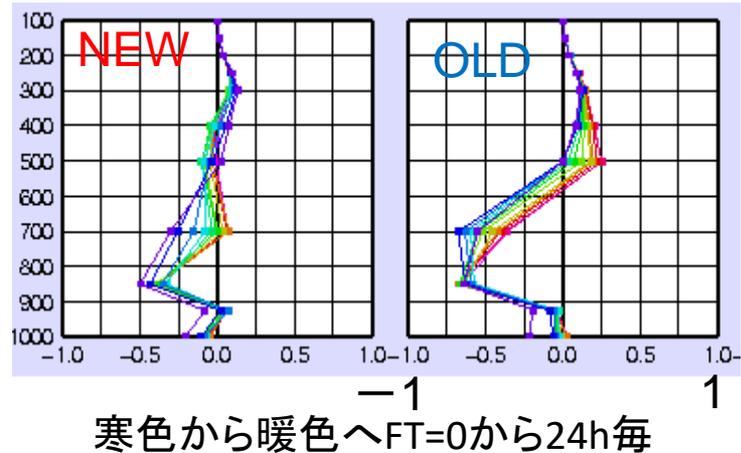
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/nwpreport.html>

近年の改良(予報モデル・観測データ利用)

- スーパーコンピュータシステムの性能向上に合わせ、鉛直層数を増強するなどの仕様向上や、力学過程・物理過程の各過程についての改良を実施
 - ほぼすべての物理過程に全体的な改良が加えられた
 - 詳細は数値予報課報告・別冊第65号に記載
- 新規データの利用開始をはじめ、観測データ利用を継続的に高度化
 - ひまわり8号観測データの利用開始(大気追跡風や晴天輝度温度)
 - 台風ボーガスの改良(観測誤差設定や地点配置等)、など

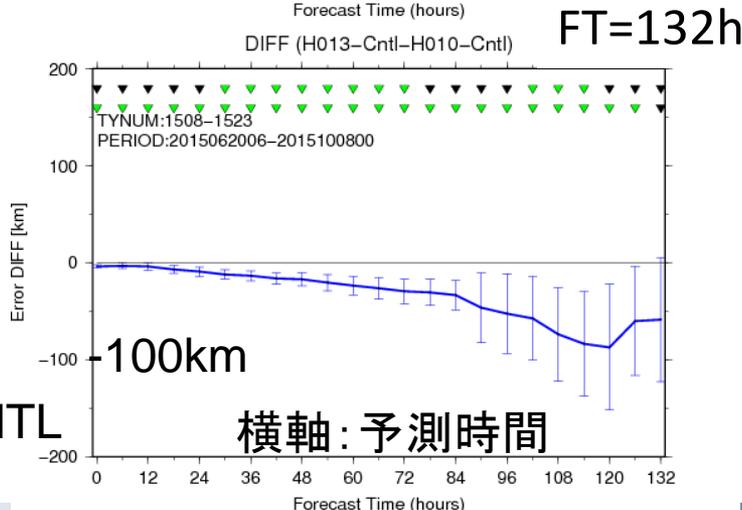
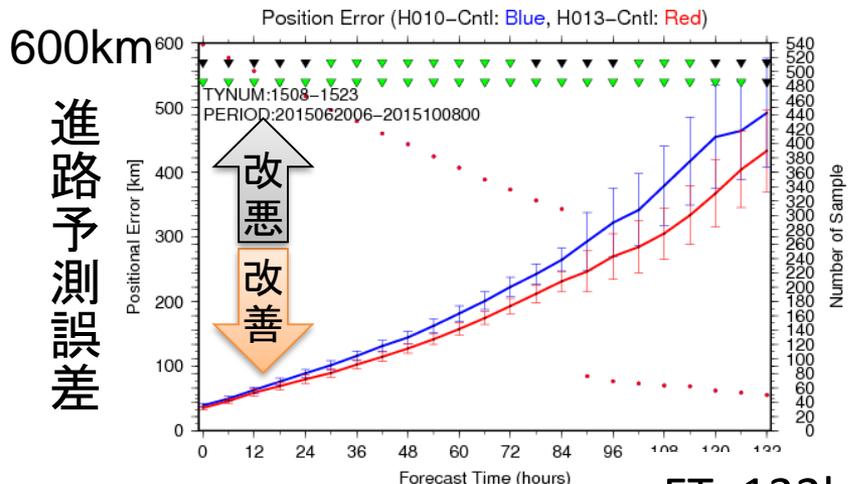
物理過程改良で乾燥バイアス等が改善

対ゾンデ/比湿[g/kg]/月平均ME/熱帯域



近年の台風進路予報誤差の改善

台風進路誤差は近年の数値予報システム改良により改善している



2015年10月の現業運用システム
vs 2017年5月の現業運用システム
(2015年夏4ヶ月半の期間で比較)

○主な改良項目

- 物理過程の改良
- ひまわり8号データの利用開始
- 台風ボーガス改良

試験概要

現業運用準拠、データ同化サイクル+予報

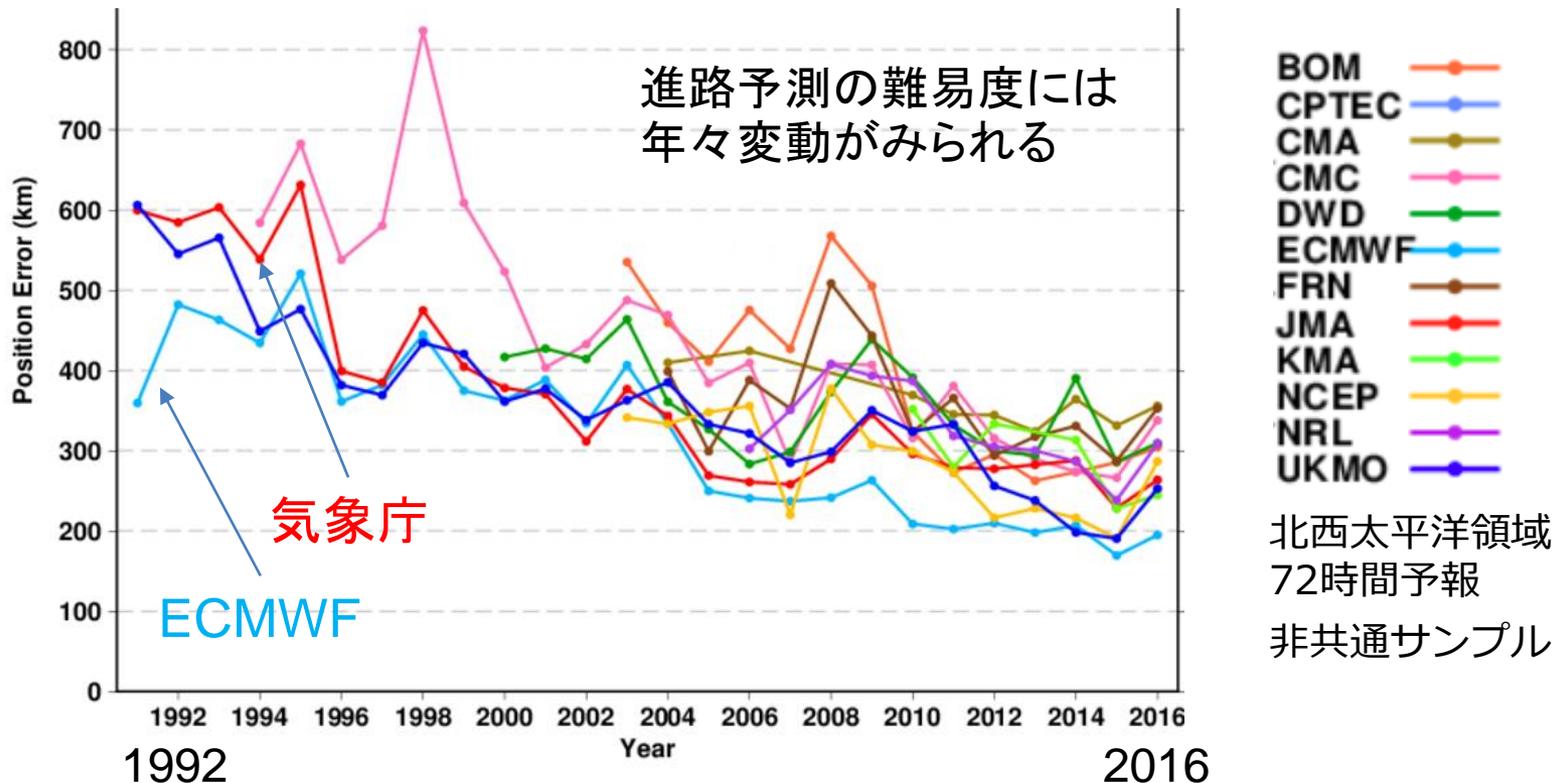
データ同化サイクル助走期間前10日

検証のリファレンスは気象庁ベストトラックによる解析

各図の上部の三角は差の有意性を示すもので、上段が時間方向の相関を考慮、下段が独立仮定で計算した有意判定結果を示し、緑色は有意、黒色は有意でないことを示す

台風進路予測の精度(国際比較)

- 各数値予報モデルの結果を収集し、気象庁で追跡と検証を実施
- 気象庁は1996年以降、世界トップクラスの精度を維持している
- 最近はやや水をあげられている



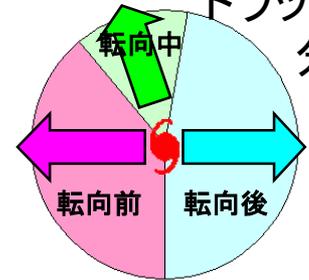
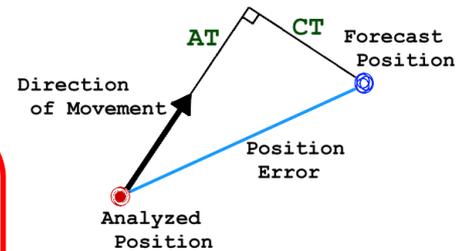
進行方向で分解した位置誤差

GSMの予測には進行が遅い誤差傾向がみられる(特に**転向後**が顕著)

AT (along-track) bias : 進行方向の位置誤差
 CT (cross-track) bias : 進行方向に直交する方向の位置誤差

転向前
 転向中
 転向後

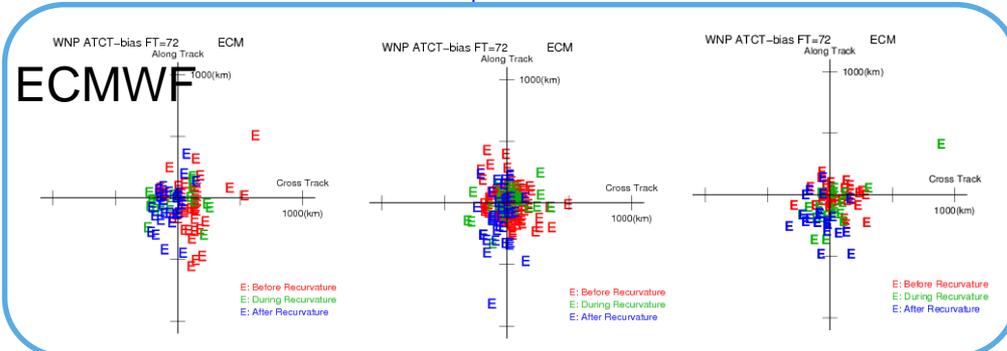
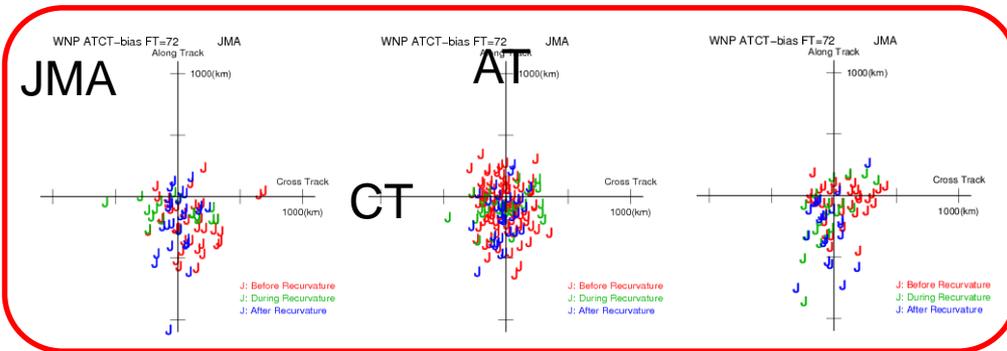
ベスト
 トラックで
 分類



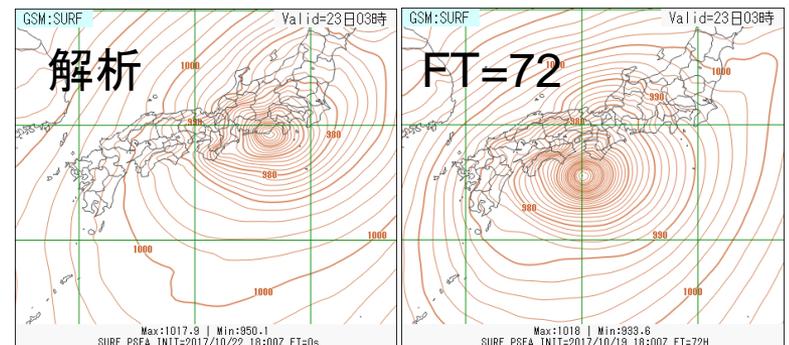
2014

2015

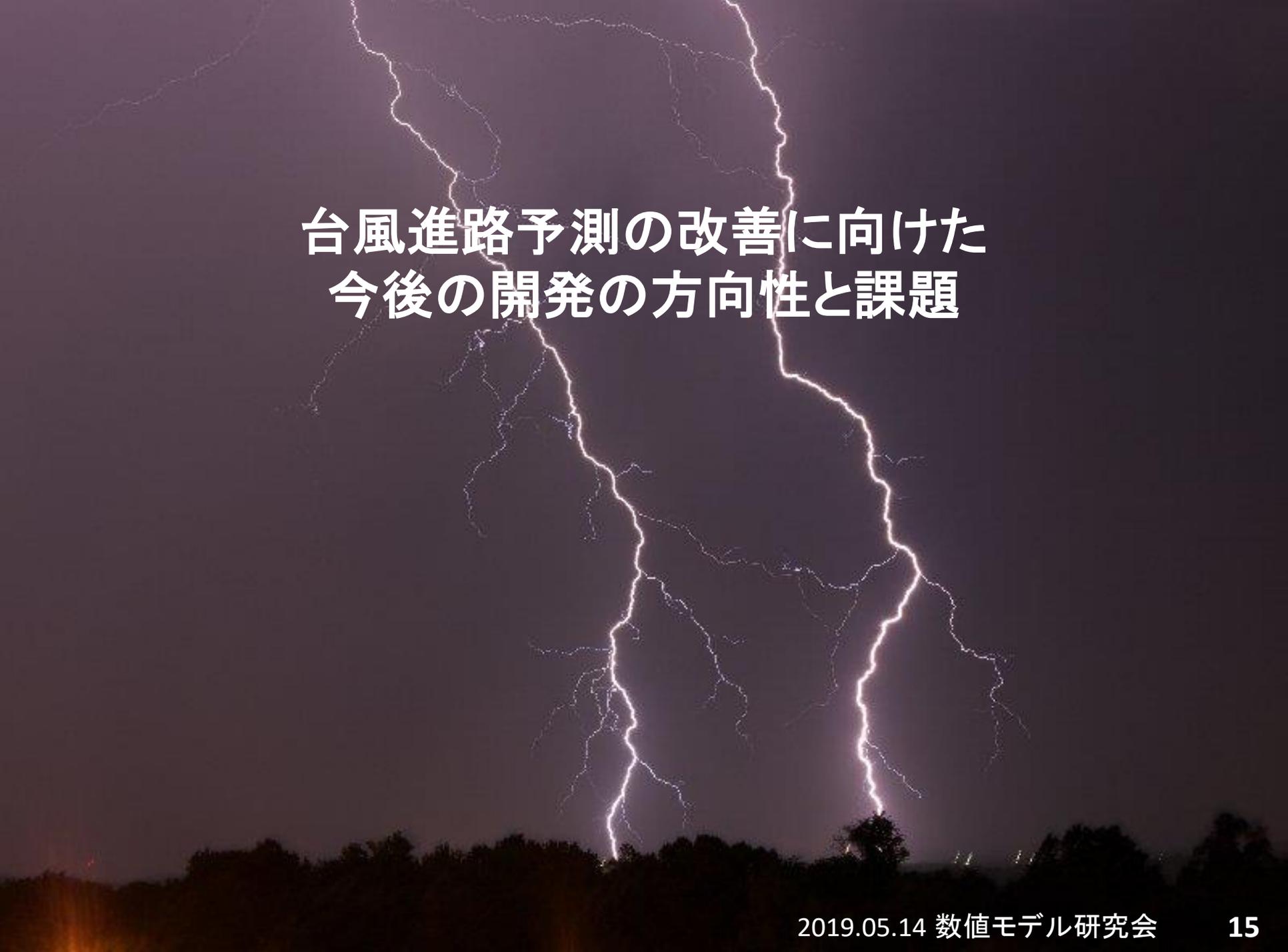
2016



FT=72で約480kmの誤差であった例



平成29年台風第21号(Lan)



台風進路予測の改善に向けた 今後の開発の方向性と課題

台風

- 台風は総合的な現象

- 力学、熱力学、放射、相転移と多くの物理が関連
- 対象システム(系)は大気・海洋・波浪・陸面、それらの間の相互作用を含む
- 時空間規模も乱流から10年規模変動と広い

- 研究分野も広い

- 発生・進路・強度・構造・大規模場・情報利用など多様
- 手法も理論・観測・数値実験・予測・防災など

- 基本的な移動メカニズムの理解は進んでいる

- Steering flow, β -gyre, diabatic heating ...
- 多くの現象・要素が関係する！
 - 偏西風、亜熱帯高気圧、モンスーン、対流圏上層の低気圧、TUTT、地形、MJO&QBW、地表面粗度、鉛直シアー、SST勾配、台風の大きさや構造、雲物理に関する加熱・冷却、TC間・TCと他の擾乱間の相互作用、など
- 第一近似的には周囲の風に流される
 - Steering flowが 0.1m/s のMEを持つだけで72時間で約26kmずれる

台風進路予測の精度向上に向けた 開発の方向性

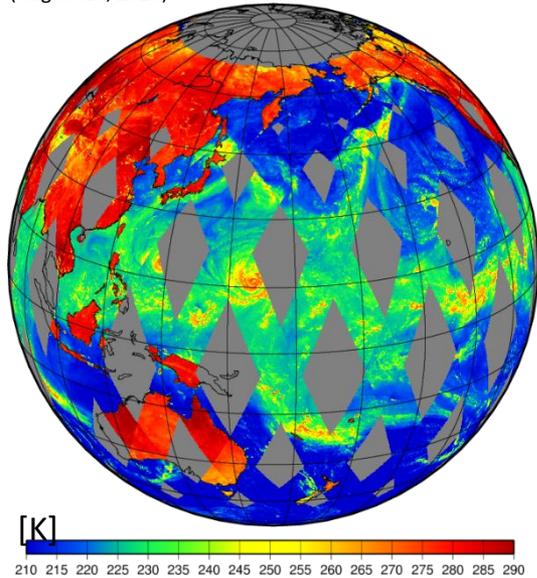
⇒ 予報モデルとデータ同化システムの総合力が問われる

- Steering flowの改善に有効な改良を地道に積み重ねる
- 台風構造の改善にも分解能の限界を見極めつつ取り組む
- 必要な効果はある程度取込み済み、何かが大きく欠けているわけではない
- 開発項目はより細かくなっていくため、更なる改善には開発の効率化が重要
 - 開発項目の優先度、改善を確認するメトリック、R2O/O2R
- 開発の2つの側面をしっかりと
 - 先行する研究開発の取込み、先進的な研究への取組み
- 進路予測誤差の面では、系統誤差と大外しを少なくすることが重要
 - 進行が遅れる、進路が北にずれるなど、事例ごとに特徴的な誤差を持つ
 - 特に誤差が大きい事例が存在する (M. Yamaguchi, 2017)

全天マイクロ波輝度温度同化の導入(予定)

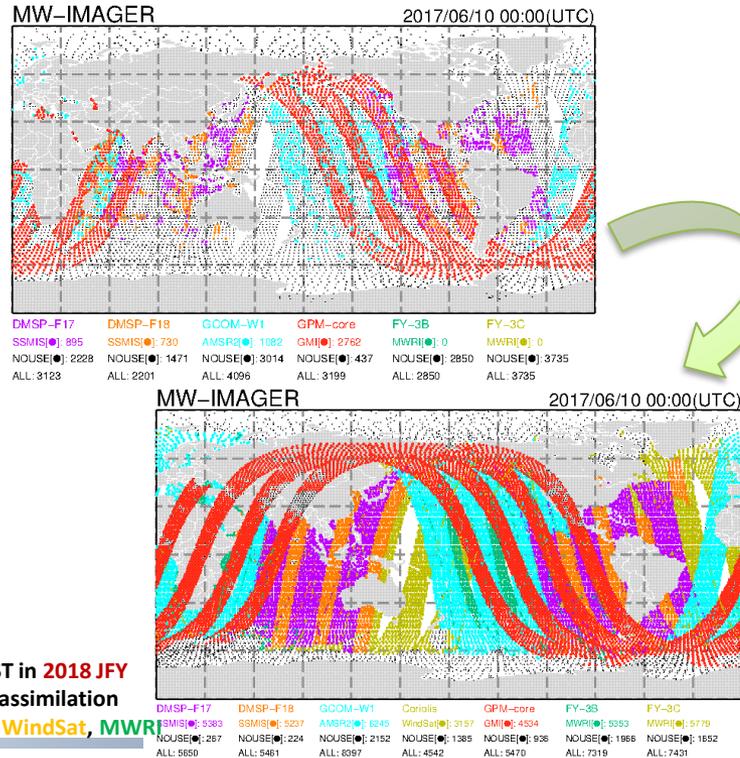
- 雲・降水域を含む衛星観測マイクロ波輝度温度データの同化(全天同化)及びアウターループの導入
- マイクロ波の持っている気温や水蒸気量、雲等の情報を、雲域でも利用する
 - A. J. Geer et al. (2018) QJRMS など
- MW-Imagers (AMSR2, GMI, SSMIS, Windsat, MWRI) + MW Sounders (MHS, GMI) + α

GPM/GMI 37GHz V-pol.
Brightness Temperature (Tb)
(August 18, 2015)

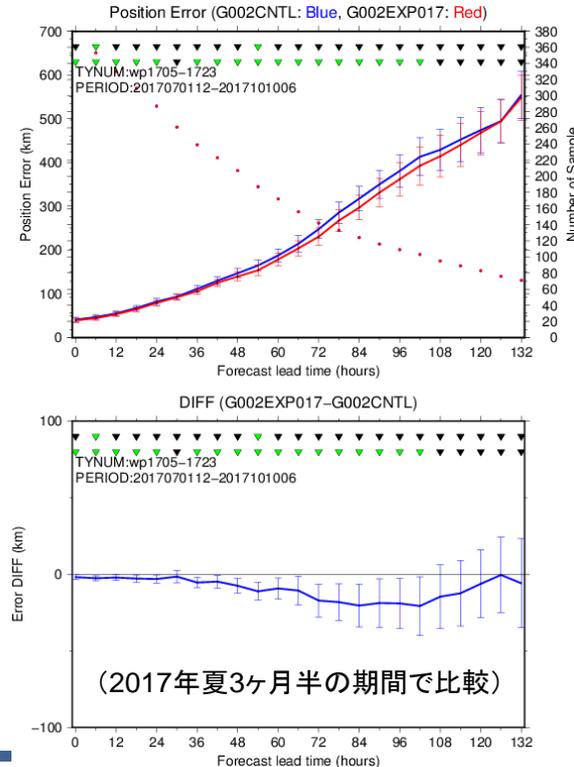


(上) CNTL (JMA operational)
Clear-sky assimilation
(下) TEST in 2018 JFY
All-sky assimilation
Addition of WindSat, MWR

データ利用地点(黒が入電有未使用)



台風進路予測の改善(青→赤)



ハイブリッドデータ同化の導入(予定)

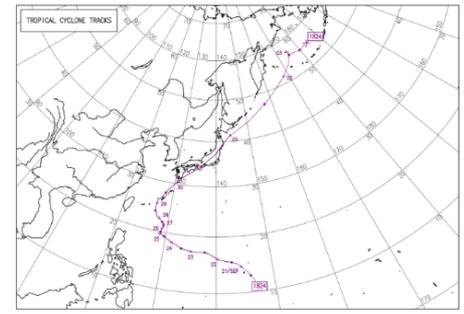
4次元変分法で使用する背景誤差として、気候値とアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)の情報を混ぜたものを利用

$$J = \frac{1}{2} \Delta x_{cli}^T B_{cli}^{-1} \Delta x_{cli} + \frac{1}{2} \Delta x_{en}^T B_{en}^{-1} \Delta x_{en} + J_o(\Delta x) + J_c(\Delta x)$$

$$\Delta x = \beta_{cli} \circ \Delta x_{cli} + \beta_{en} \circ \Delta x_{en}$$

cliは気候値、enはEnKF

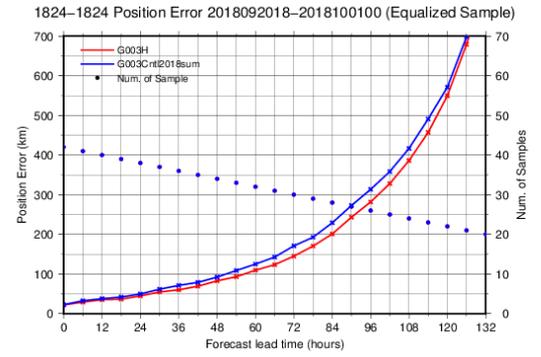
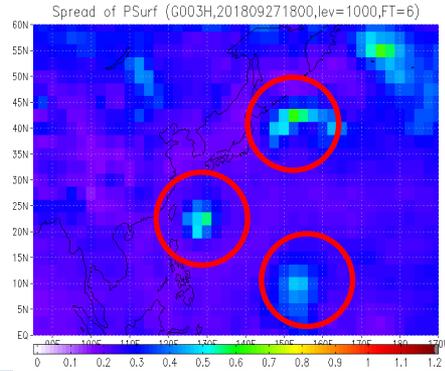
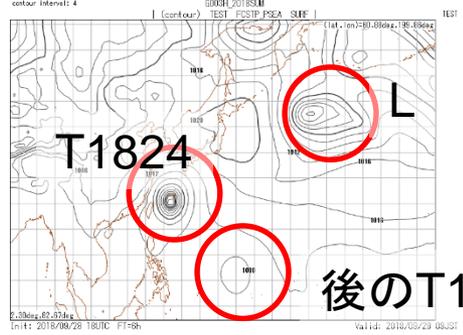
T1824 TRAMI
チャーミー 経路図



不確実性の大きさを従来より考慮した上で観測データの情報を取り込むことができる

擾乱の周辺は一般的に第一推定値の不確実性が大きい(FT=6h)

EnKFで不確実性をとらえる(地上Pスプレッド) T1824進路予測誤差(青→赤)



予報モデルの改良に向けた課題

- 積雲対流・雲・乱流輸送等に関する過程の改良
 - 物理過程の改良は、観測データの更なる利用のためにも必須
 - 高解像度化とそのポテンシャルを引き出す力学過程・物理過程の高度化
- これらの改良等により環境指向流・台風構造の両面から予測表現を改善

ECMWFは高解像度化(40 km から 25 km)と積雲過程を中心とした物理過程改良(P. Bechtold et al., 2008)により大きく改善

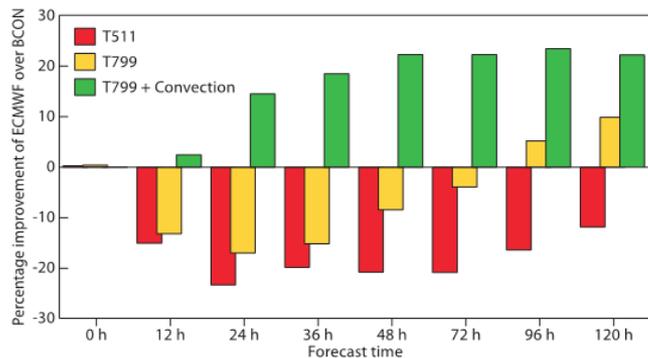
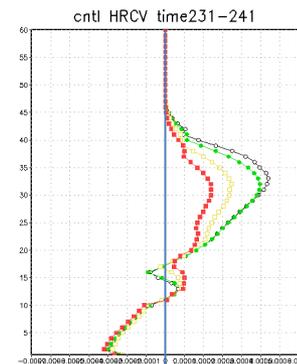


Figure 8 Percentage gain or improvement in 72-hour mean forecast error of ECMWF versus BCON for all TCs globally for T511 (red bars), T799 (yellow bars) and T799 plus cumulus convection change (green bars).

ECMWF Newsletter
Number 118 – Winter
2008/09

GSM積雲対流過程の基礎調査

同様の効果を狙い、乾燥した状態で深い対流が立ちすぎる問題を改善するための改良を検討



赤: 相対湿度25%
黒: 相対湿度90%

積雲対流過程の相対湿度依存性の調査(図は加熱率のプロファイル)
(Derbyshire et al. 2004の理想試験に基づく)

加熱率

検証の課題

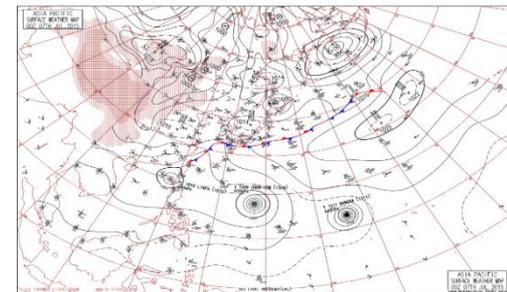
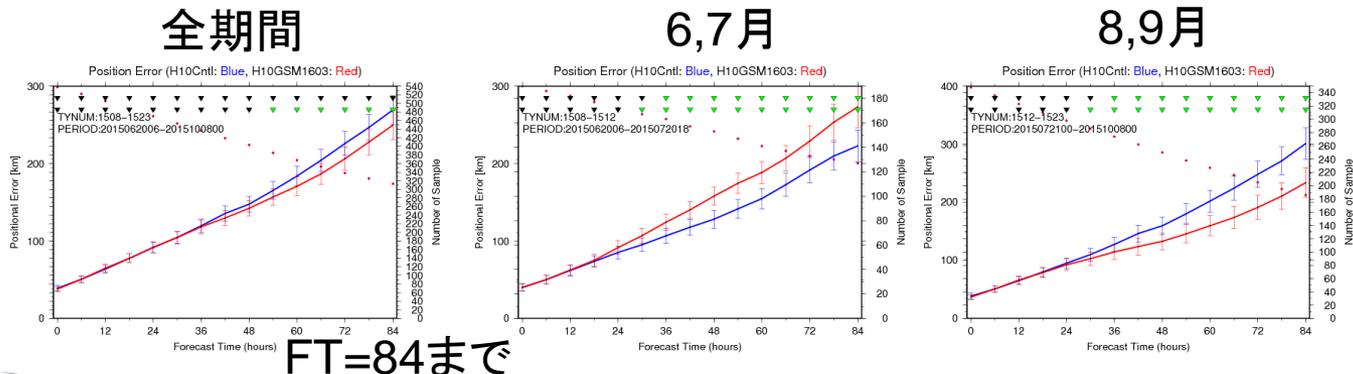
「適切な評価のメトリック」は継続的な改善に必須

台風進路誤差には、「誤差の事例依存性が大きい」、「改良内容と変化の関係性が複雑」、「揺らぎが大きい」といった特徴がある

⇒別アプローチが欲しい

- 「誤差発生メカニズム分析」+「誤差発生原因ごとの検証手法」
- 「台風が存在する領域の風の検証手法」+「台風の構造の検証手法」等

【例】改良に際し、3つ連続したT1509～T1511でのみ大きな悪化がみられた
→検証期間に含まれる事例によって、改良の効果の判断が分かれる

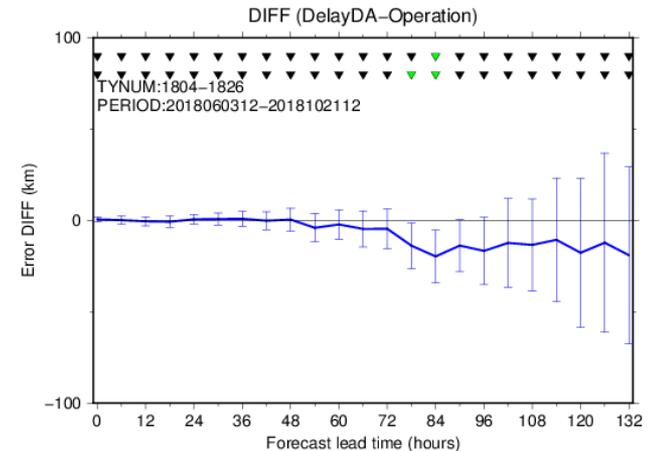
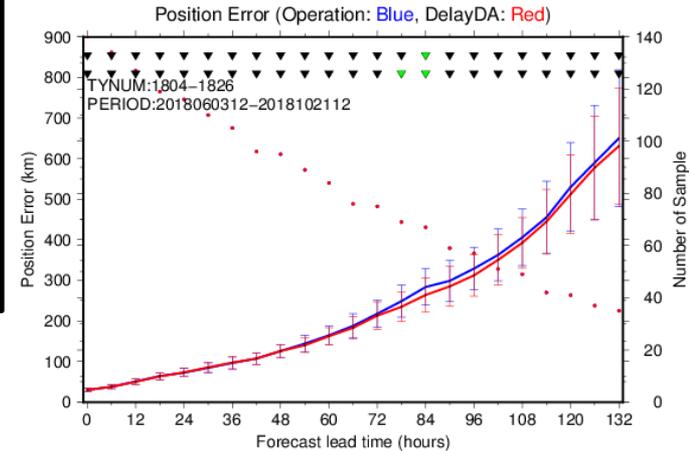


観測待ち受け時間に関するシステムの最適化

- データ取得には時間が必要、**速報性と解析精度はトレードオフの関係**
- データ入電をより待つことにより精度は改善
- 解析自体にも時間をかけることにより精度は改善
 - アウトーループなど

⇒最適なシステム構成については議論の余地あり

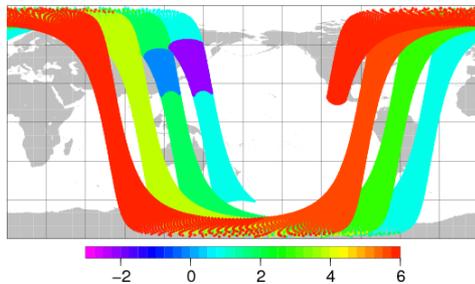
速報とサイクル解析の進路予測誤差



データ入電打ち切り時間

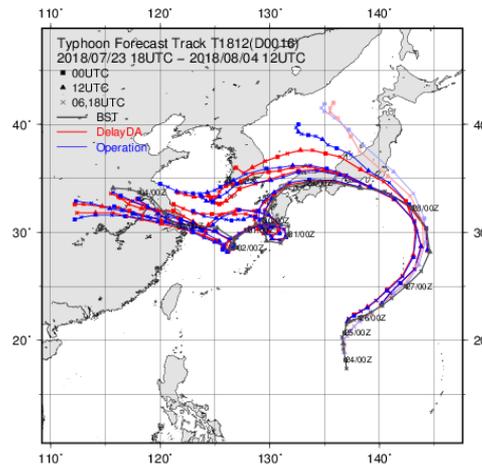
速報解析: +2時間20分

サイクル解析: +11時間50分(00,12),
+7時間50分(06,18)



ある衛星の同化対象データの入電時間
(黄緑～赤は速報解析に間に合わない)
(Aqua/AMSR-E, 2011/03/01 06UTC)

T1812(D0016) Typhoon Forecast and Analysis

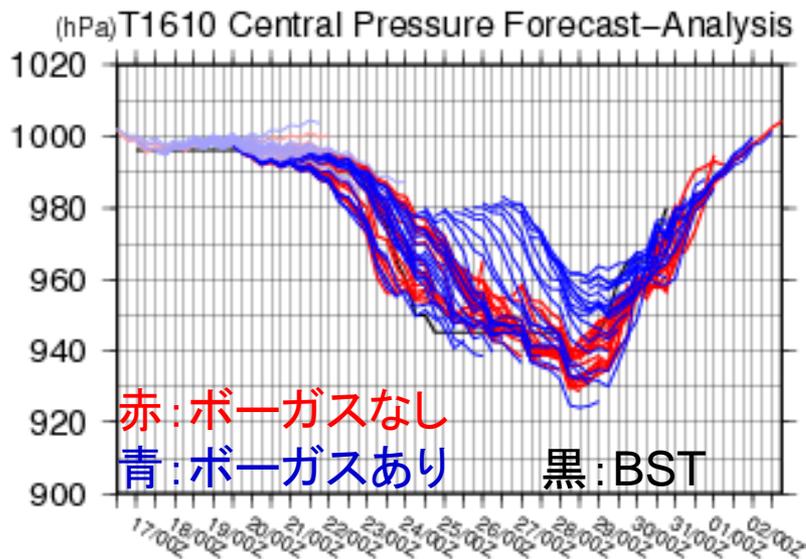


T1812の例

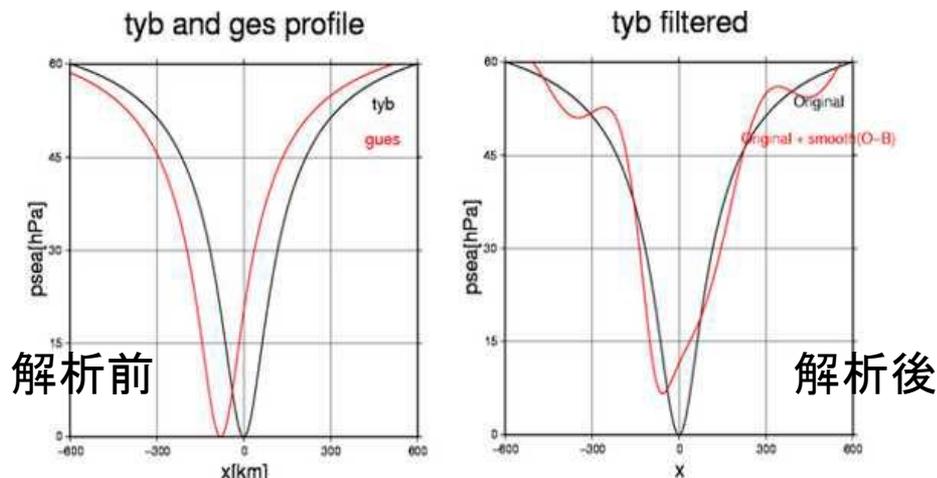
台風ボーガスの利用と課題

予測初期を中心に統計的に進路予測を改善。しかし、発達期に強度を弱体化

T1610の中心気圧予測の例



⇒モデル表現よりも浅いボーガスは必須
インナーモデルは低解像度であり、強い急斜な台風の位置を正確にずらせない



左図: 第一推定値と理想値(黒線)、右図: 解析値(H22研修テキストより)

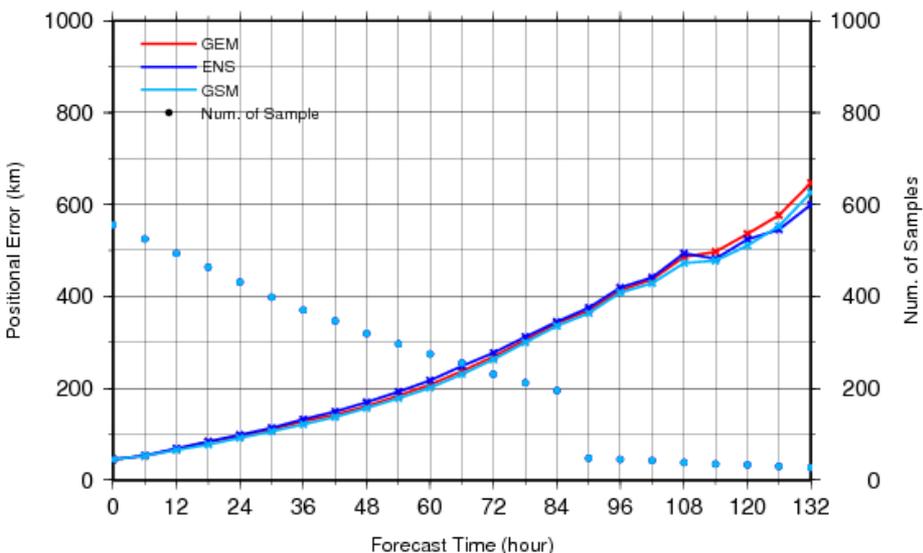
他の課題(台風の解析に関する一般的な話も)

- 背景誤差相関を通じて、台風の位置をずらすことによる不自然な温度構造
- 非軸対象成分を第一推定値から得る妥当性
- ボーガスプロファイル(Fujita 1952 の実験式)の妥当性、台風解析の精度

アンサンブル予測の課題

決定論的な利用や、高解像度との使い分けはどうあるべきか？

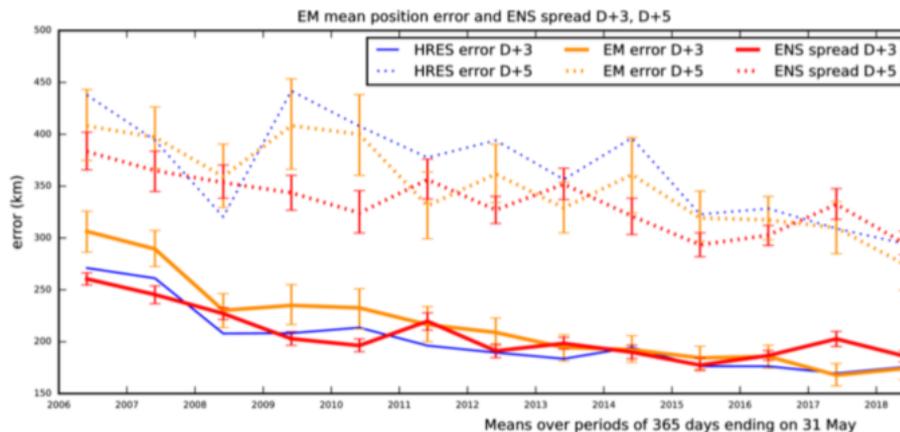
T1701_T1727 Position Error 2017 (Equalized Sample)



2017年のJMA数値予報の結果

GSM/コントロールラン/アンサンブル平均

⇒近年は、GSMとGEPSアンサンブル平均の差は縮小している

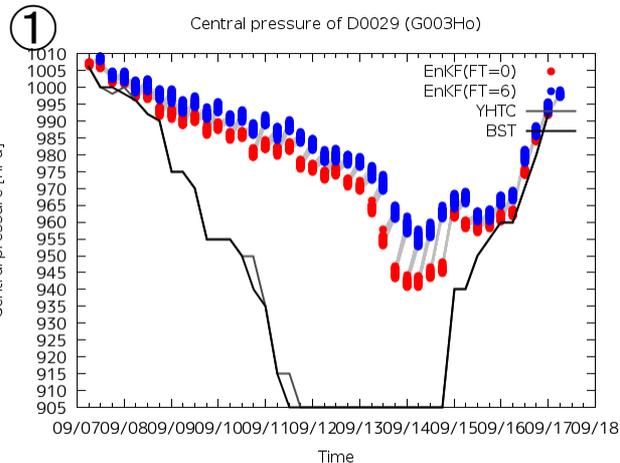


ECMWFの熱帯低気圧位置誤差(経年変化)
HRES/EM, spread, 2006年から2018年まで
T. Haiden et al. (2018) ECMWF Tech. Memo Fig.32

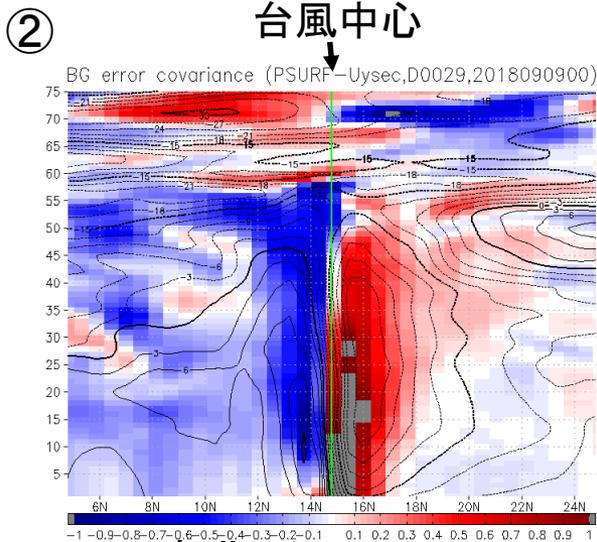
⇒以前は高解像度予測がアンサンブル平均より良かったが、近年はD+3では両者の精度はほぼ同じ

高解像度予測は、同一の初期値・物理過程では改善幅が小さい？
アンサンブル平均のさらなる改善に向けて、初期摂動作成手法の課題は？

アンサンブルデータ同化の課題



LETKFアンサンブルのT1822の中心気圧 赤:FT=0, 青:FT=6、黒:BST



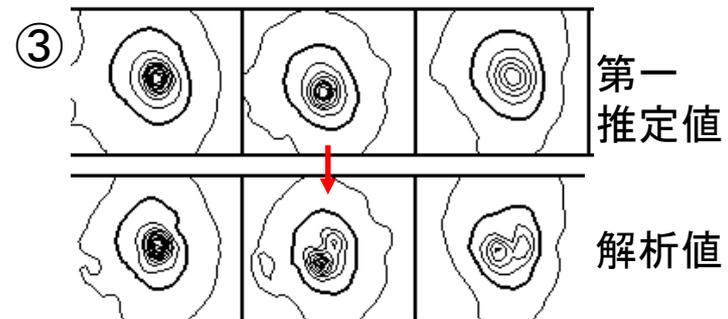
台風中心

対流圏界面

台風中心の地上気圧に対する東西風のアンサンブル摂動の相関南北断面 (T1822, 2018/9/9 00UTC)

U南北断面

- ① LETKFのアンサンブル平均解析値(TL319)を4DVarの解析値(TL959)から乖離しないように毎回置き換えている
→ 台風構造表現の差により深い台風で**スピンドاون**
- ② 台風中心付近では対流圏全体(場合によっては下部成層圏)に及ぶ誤差相関が卓越
→ **鉛直局所化がこの誤差相関を破壊**
- ③ 本来的に非線形性の強い現象に対して摂動の線形結合により解析値を得ることの問題
→ **解析される台風の構造を大きく歪めてしまうこともありうる(特にoutlierなメンバーがいる時)**



NCEPのEnKFにおける台風解析の例(一部のメンバーを抜粋)

台風進路の予測精度向上に向けて(1/2)

- 積雲対流をはじめ、パラメタリゼーション改良は‘Key Issues’
 - 2030年に雲解像全球モデルを現業運用している可能性は低い
 - 運用可能な格子間隔で高い予測精度を出すことが必須
 - パラメーターの不確実性をどう小さくしていくか？
- 観測データの更なる利用
 - 観測データのポテンシャルをさらに引き出す
 - 第一推定値の精度、現象の表現性能も重要
 - 精度向上のために必要な観測とは何か？
 - (台風ボーガス含む)台風周辺を適切に捉えるデータ同化手法とは？
- 水平格子間隔を10kmよりも高解像度化
 - TYMIP (Nakano et al., 2017, GMD)は高解像度化(7km)の効果を示唆
 - 高解像度化により起こる諸問題(グレーゾーン問題)への取組みが必要

台風進路の予測精度向上に向けて(2/2)

• 海面の(相互)作用

- 高解像度SST解析の利用、SST解析の高度化
- バルク式、粗度、波浪結合
- 大気海洋結合は進路予測改善にどの程度有効か？
 - 計算コストは増加する、優先度は？(Ito et al., 2015, 2018)など

• 評価・検証の手法、メカニズムの理解の進展など

- モデル開発で利用できる「検証値」が必要(台風構造や台風を流す海上の風解析)
- 誤差が生じる原因の分析 (Yamada et al., 2016, SOLA など)
- 進路予測誤差の改善可能性を測るメトリックが欲しい
- 予測可能性の研究
- 台風追跡技術

先進的なフィージビリティスタディや誤差解析を実施いただき、大変ありがとうございます
台風に関連する全体を理解し、改善につなげていくのは大変で、連携が大切と考えます

おわりに

- 数日前からの大規模災害に備えた広域避難に資する台風・集中豪雨などの予測精度向上が求められている
 - 全球数値予報システムの重点目標は、台風の3日先の進路予測誤差を100km程度(現在の1日先誤差程度)まで飛躍的に改善すること
- 台風は総合的な現象であり、進路予測の精度改善にはモデル、観測、データ同化を全体的に地道に改善していくことが必須
 - 先行する開発成果を素早く取り込んでいく。現在のスーパーコンピュータにおいて、高解像度化、物理過程改良、全天同化開始、ハイブリッド同化導入を計画
 - 目標の達成には、先進的な研究開発の推進も必要
- 防災・減災に更に資する予測情報の作成に向けて、国内外において幅広い連携をいただけると嬉しい
 - 気象庁の力だけでは非常に困難、多くの方に連携頂きつつ進むことが必須