



# 現業数値予報システムによる 進路予測の現状と誤差の分析

令和4年12月12日

気象庁 情報基盤部 数値予報課

数値予報モデル基盤技術開発室

予報官 太田 行哉

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

- 台風進路予測の精度向上を目指すにあたって
  - 予報の大外し事例や定常的なスコア検証等を通して、モデルの問題を認識、誤差の特徴を理解(検証)
  - そのモデル誤差がどのようにもたらされているのか、その性質を把握(分析)
  - モデルの予測値の最終的な誤差から素過程レベルでの定式化の誤差を解明(診断)
  - 診断の結果をきっかけにして、モデル改善に取り組む(次講演で詳しく紹介)

という一連のプロセスを通し、改良を重ねていく必要がある

- この講演ではこのプロセスの内、検証・分析の観点から近年の取り組み及び課題について紹介する

# 目次

1. はじめに
2. 全球数値モデルの進路予測誤差の検証
  - WGNE熱帯低気圧検証
3. 気象庁全球モデルの進路予測誤差の分析
  - GSMの台風進路予測誤差の特性
  - 進路予測誤差特性に関する近年の調査
  - 最適指向流分析・台風の構造分析による調査
    - 事例: 2021年台風第19号
4. まとめ
  - 進路予測誤差の診断に向けて

# 全球数値モデルの 進路予測誤差の検証



# WGNE熱帯低気圧検証

- 各国現業数値予報センターの全球予報での熱帯低気圧に対する検証を1991年より気象庁が継続的に実施

(Yamaguchi et al. 2017)

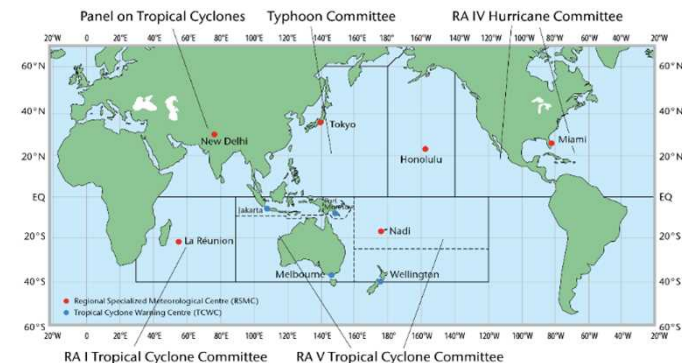
- 熱帯域の全球モデルの検証や、長年にわたる数値予報システムの発展の評価に貢献

- 主な検証項目

- 進路予測誤差
- 転向前後で層別化した系統誤差
- 強度予測誤差

- 検証結果は毎年開催されるWGNE会合で報告している

- 今年度は11月9日に2021年の検証結果を報告



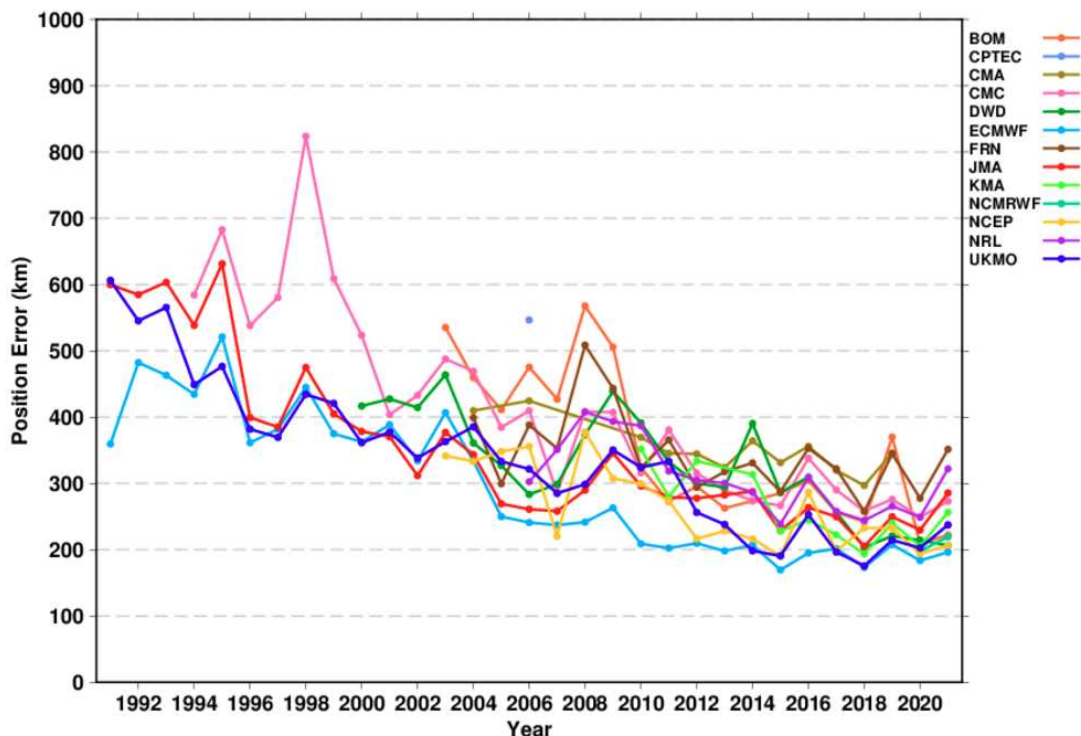
熱帯低気圧プログラムに参画するRSMC(赤丸)及びTCWC(青丸)の所在

WGNE:世界気象機関研究評議会の数値実験作業部会

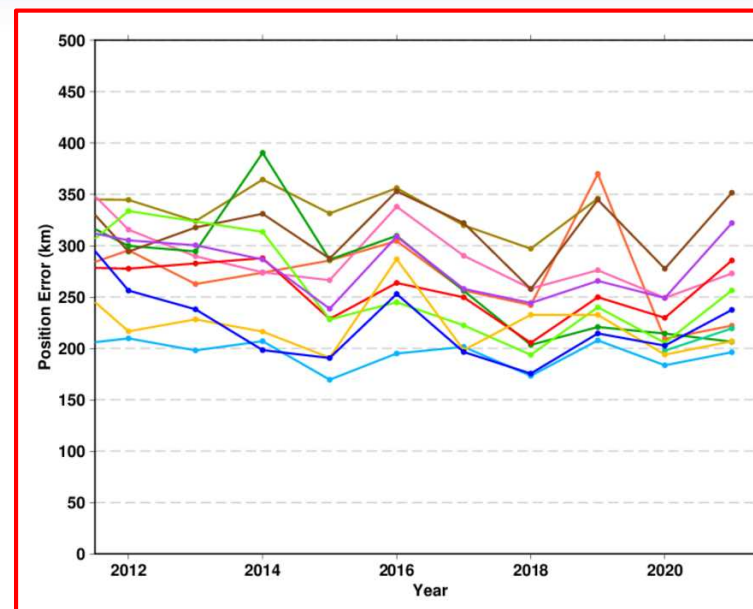
RSMC:地域特別気象中枢

TCWC:熱帯低気圧警報センター

# 進路予測誤差経年変化(T+72)



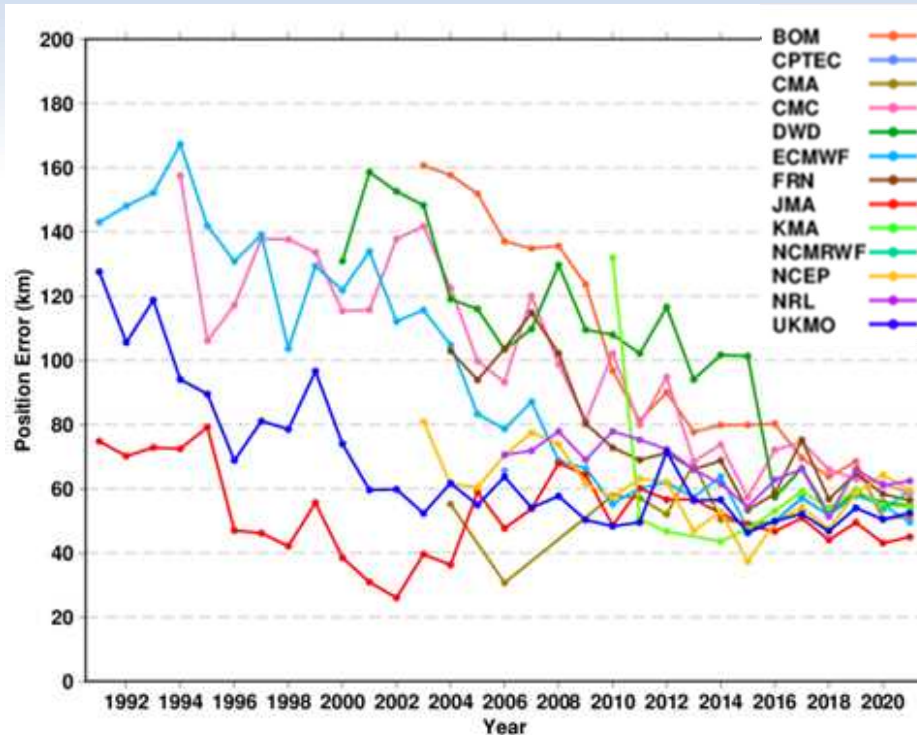
72時間予報の平均進路予測誤差経年変化(非共通サンプル)



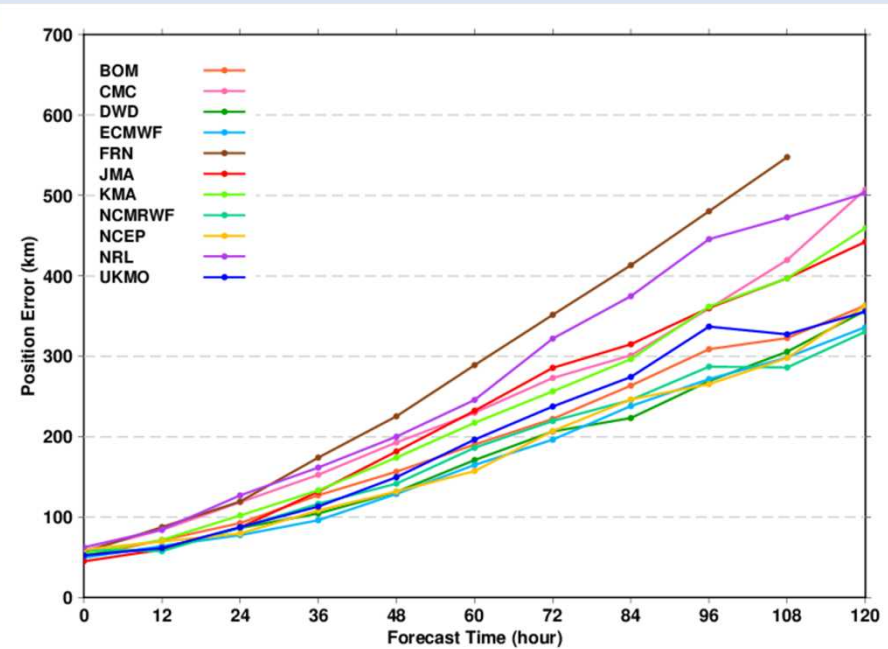
近年10年だけ抜粋(スケールが違うことに留意)

- 2021年はほとんどのセンターで精度が悪化(予測の難しい年だったか)
- トップセンターの進路予測の精度向上はここ10年停滞傾向
- 進路予測に関する**ブレークスルー**が望まれる状況もここ数年変わらず

# 進路予測誤差経年変化 (T+0)



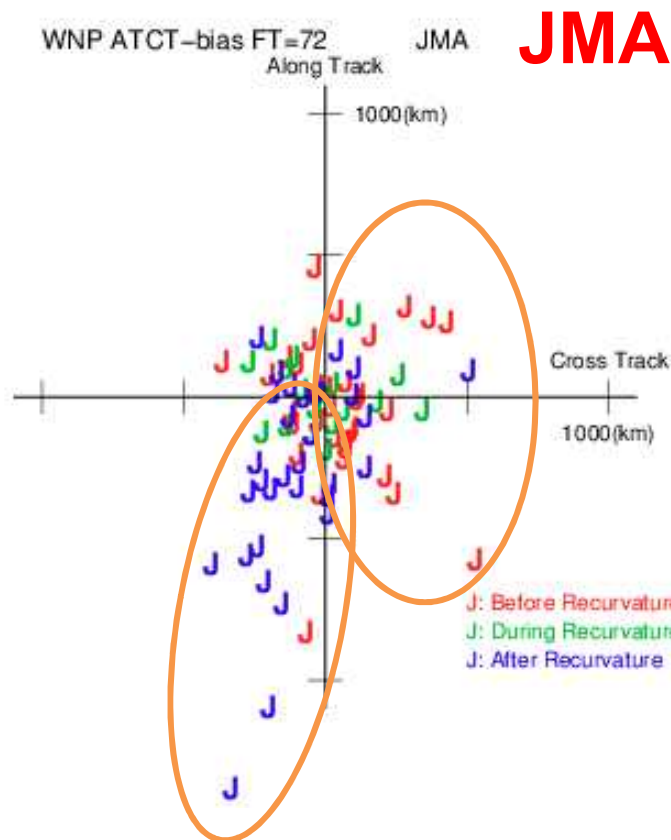
解析 (T+0) における平均進路予測誤差経年変化 (非共通サンプル)



予測時間ごとの平均進路予測誤差経年変化 (非共通サンプル)

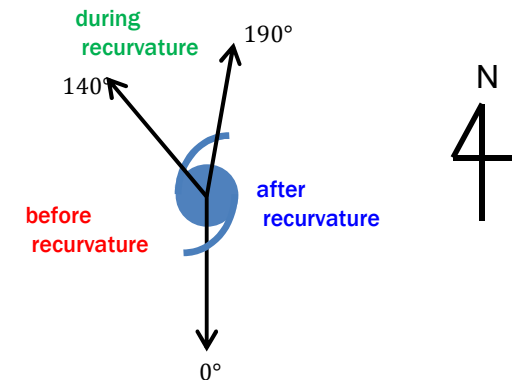
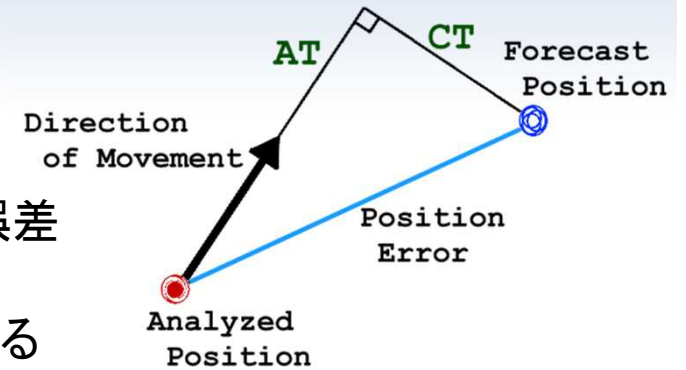
- 解析誤差については、気象庁がここ数年1位
- 対自分解析に近い検証になっていることと、台風ボーガスの利用が主要因か  
← ただし、1日予報あたりから他センターとの差が開く結果に
- 台風ボーガスによる悪影響が考えられるが、ボーガスの利用がなければ再現されない台風があったりするなど、現業的に廃止は難しい

# 転向前後で層別化した系統誤差



縦軸: AT-bias  
進行方向の位置誤差  
横軸: CT-bias  
進行方向と直交する  
位置誤差

転向前  
転向中  
転向後

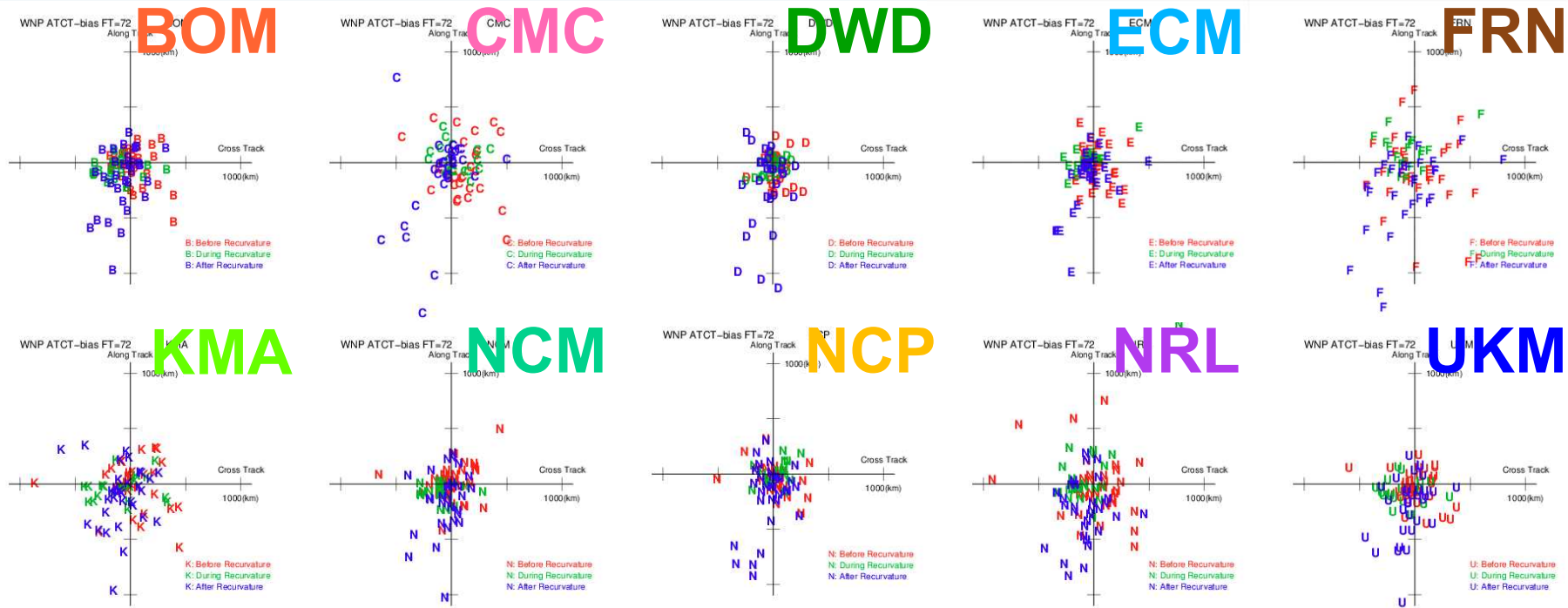


72時間予報の進路予測誤差分布図

- 転向後の負のAT-bias(スローバイアス)が目立つ
  - 転向前の正のCT-bias(西進時の北上バイアス)もやや目立つ
- ⇒ 以前から指摘されていたこれらのバイアスは依然として認められる



# 転向前後で層別化した系統誤差

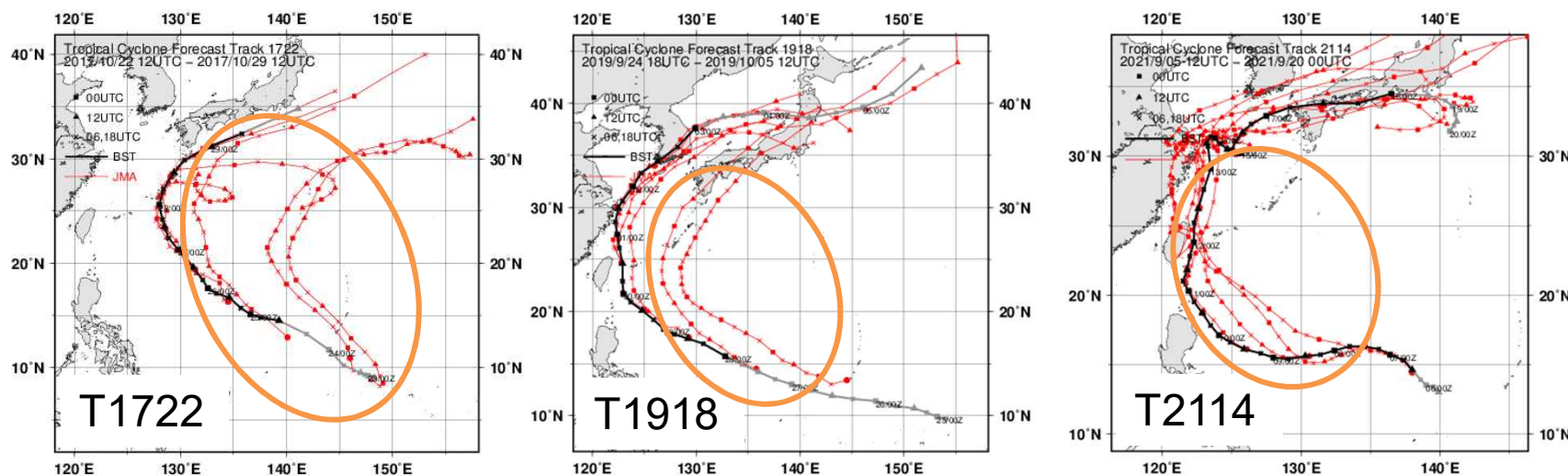


- どのセンターでも転向後のスローバイアスが比較的明瞭に出ている  
⇒ **スローバイアスは現業全球数値モデルに共通した課題点**

# 気象庁全球モデル(GSM)の 進路予測誤差の分析

# GSM台風進路予測誤差の特性

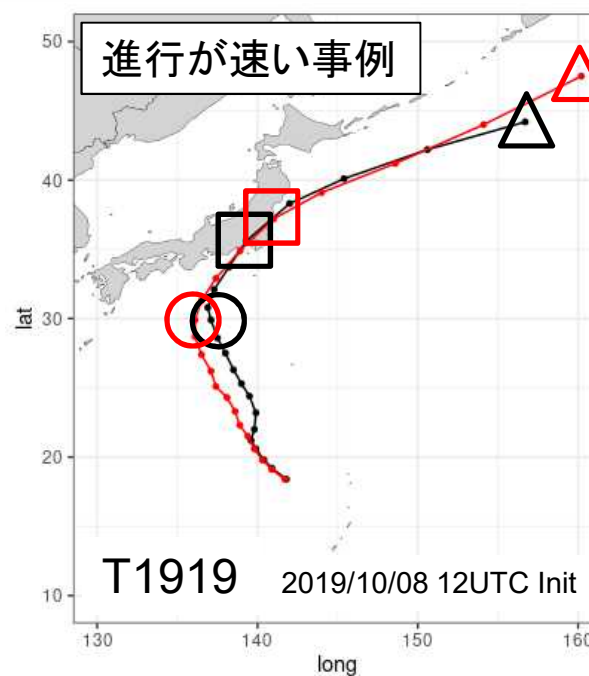
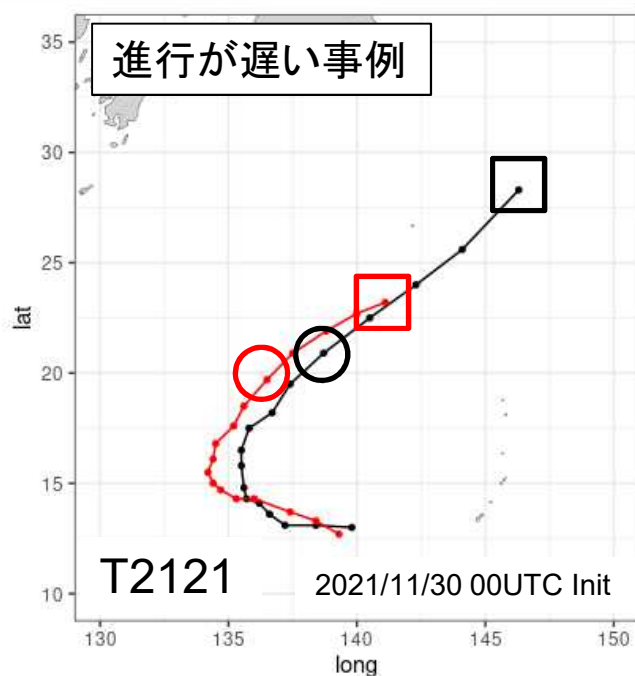
- 特有の系統誤差①: 北上バイアス



- 転向前の西進時に北上傾向が見える事例が多い
- 北上バイアスをもたらす要因について考えるべき要素が多く、原因の切り分けが難しい
  - 環境場: 亜熱帯高気圧の勢力、水平風の鉛直シアの表現
  - 台風自身の構造: 初期値の誤差、台風構造・対流活動の偏在の表現
  - 複合的な要因: 台風が感じる指向流の強さ・向き・高度

# GSM台風進路予測誤差の特性

- 特有の系統誤差②: スローバイアス



○ □ △はそれぞれ72時間、96時間、120時間予測の位置を示す  
黒色の図形はそれぞれの予測に対するベストトラックの位置を示す

- 転向後に実況よりも台風の進行速度が遅くなる事例がある一方で、事例によっては予測が早めとなることもある(例: 令和元年東日本台風 T1919)

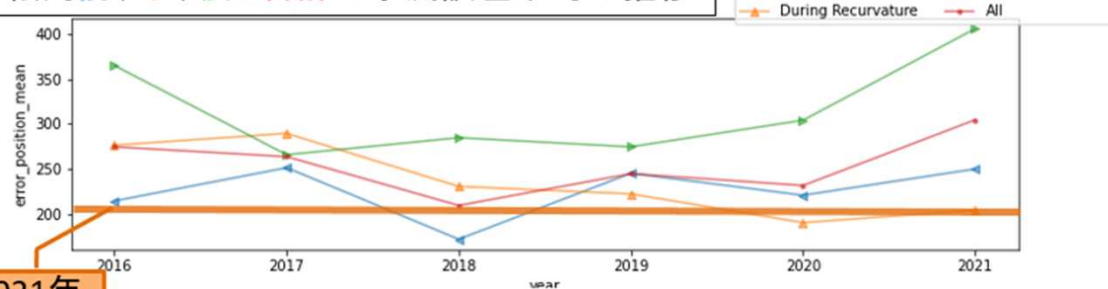
# 台風進路方向ごとの誤差統計調査



■ 転向前 ■ 転向中 ■ 転向後

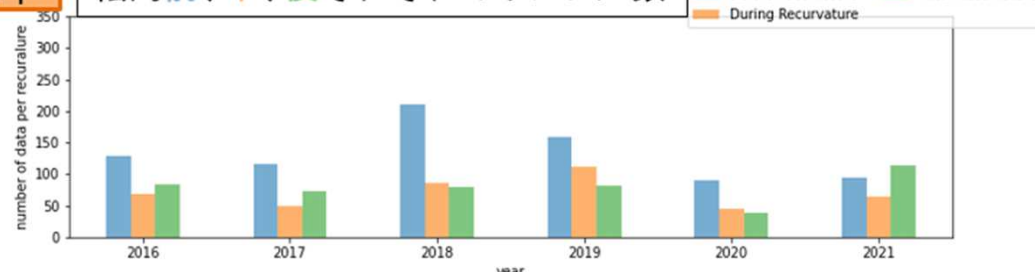
## 2016年から2021年にかけて、3日予測の予測誤差平均とサンプル数の推移

転向前、中、後と合計の予測誤差平均の推移



2021年  
転向中

転向前、中、後それぞれのサンプル数

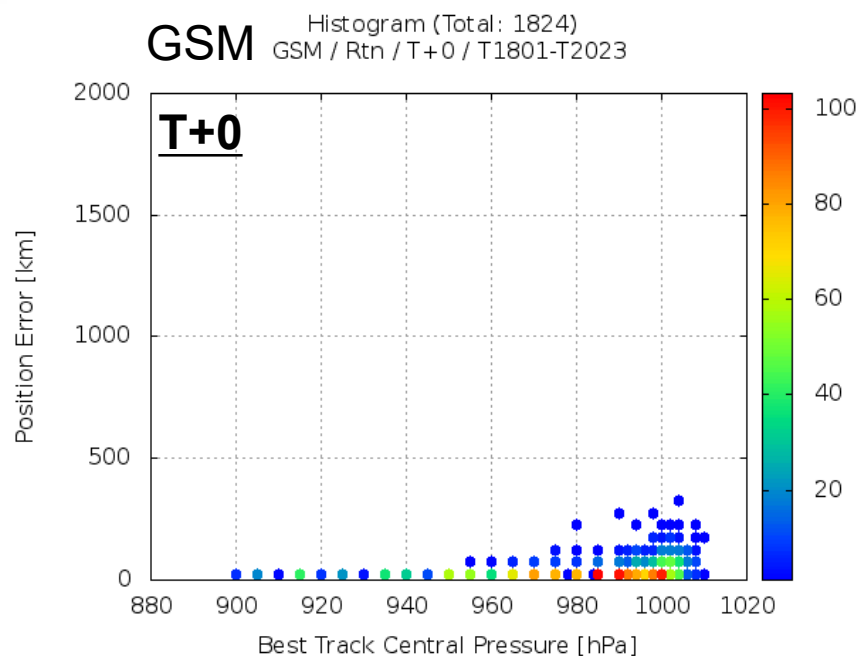


3日予測は2日予測に比べてより**転向後**の予測誤差平均が大きくなっており、傾向がはっきりと出ている。**転向前**の予測誤差平均は2016年から2021年にかけて大きな差はなく、**転向中**はむしろ誤差は減少傾向(2020よりは悪化しているが)。

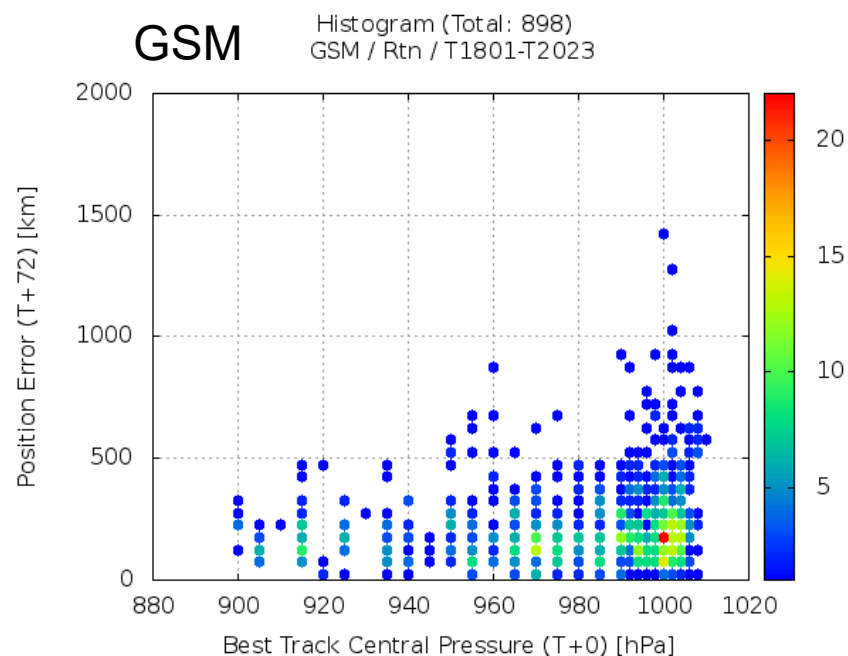
2021年の台風は北上する台風が多く、また北上する台風の予測誤差自体が大きいことが、2021年の台風予測誤差平均の悪化に寄与

# 発達強弱と進路予測誤差の関係

## ベストトラック中心気圧と進路予測誤差の度数分布 / T1801-T2023



(T+0のベストトラック中心気圧とT+0の進路予測誤差)



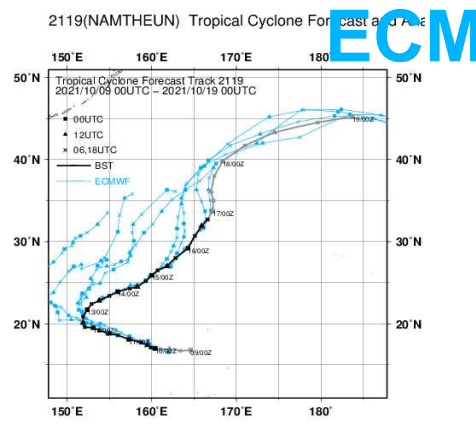
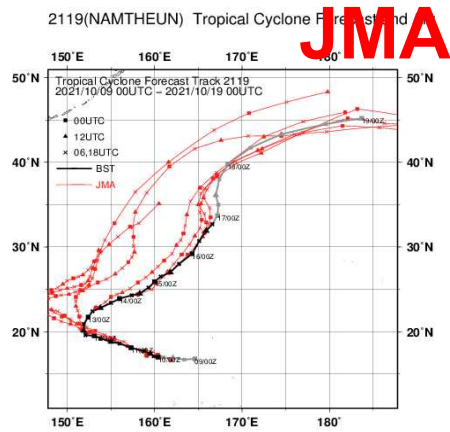
(T+0のベストトラック中心気圧とT+72の進路予測誤差)

横軸: ベストトラック中心気圧 [hPa] 縦軸: 進路予測誤差 [km] (ビン幅は50km) 色: サンプル数

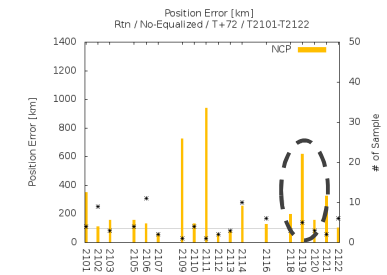
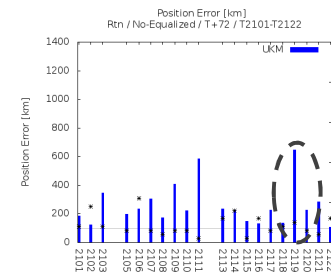
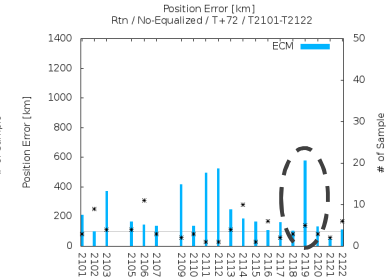
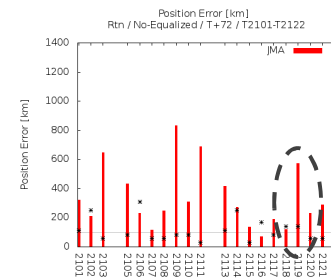
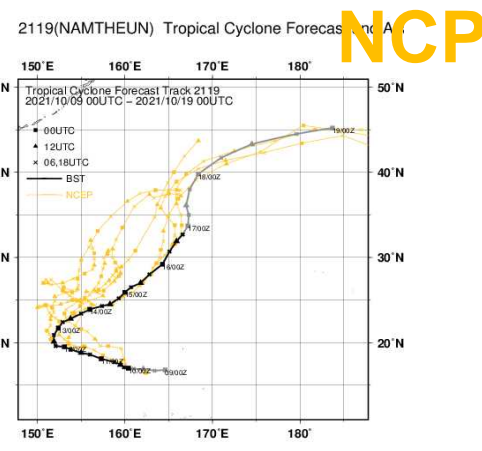
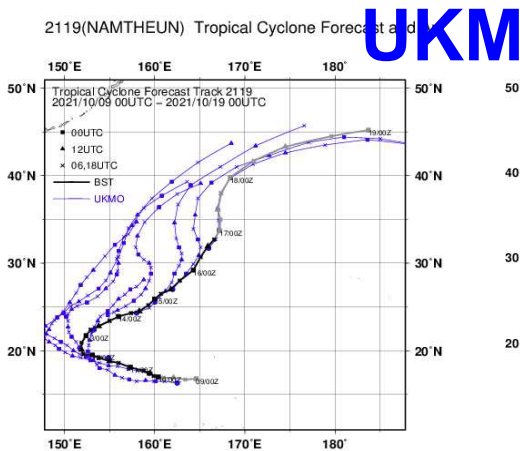
大外し事例はベストトラック中心気圧が高い(=発達が弱い)傾向にあり、  
発達が弱い台風の進路予測に課題がある

# 系統誤差の分析に向けて

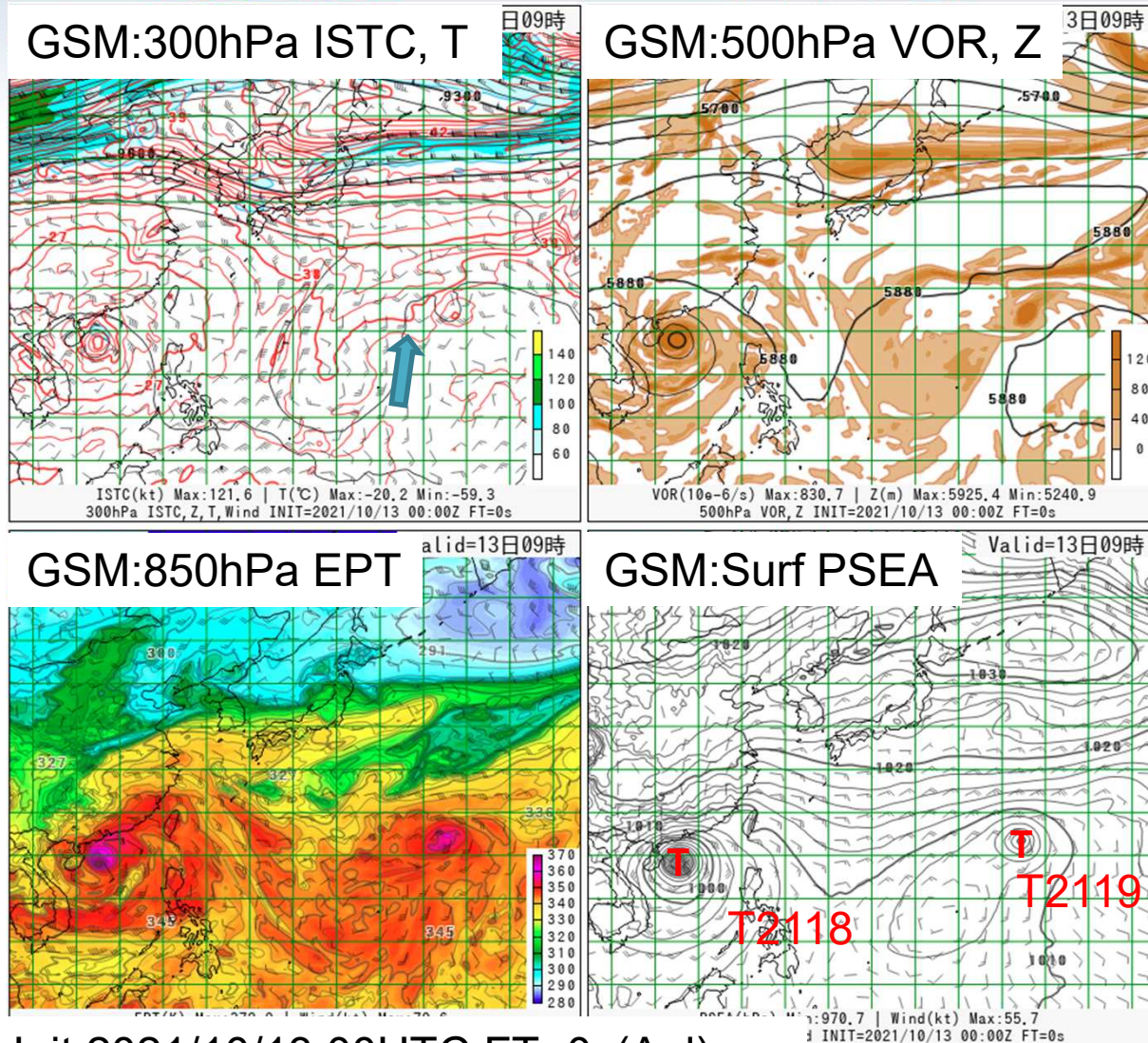
- 今回は北上する台風(転向後の台風)の1事例(T2119)に着目



- 2021年の台風事例で、どのセンターも比較的進路予測誤差が大きかった事例



# T2119: 環境場



Init:2021/10/13 00UTC FT=0s(Anl)

- T2119は500hPaの5880mのコンターに挟まれるような場
  - 300hPaのT2119近傍の風を見ると、上層擾乱の東側に位置する場であり、北向きの風となっていた
- ⇒ これらの環境場が進路予測に与えた影響を、近年導入した最適指向流及び台風構造解析の観点から分析する



# Galarneau and Davis (2013): 最適指向流分析

## GD13の手法(1)

- 台風の渦を除いた風を環境場の風とする。
  - Galarneau and Davis (2013) は台風周辺(半径 $r_0$ 以内)の渦度と発散から非発散・非回転風を求める
  - 今回は Miller and Zhang (2019) に従い、台風を中心とした円筒座標系に変換した後、方位角方向・動径方向に平均して求める
  - 予測場のGPVまたは解析場のGPVから
- 「実際の台風の数値」を、前後12時間の台風中心位置の差で決める。
  - 予測の追跡結果またはベストトラックから( $V_m$ ,  $V_o$ とする)
- 環境場の風を様々な半径・深さ(下端は850hPaで固定)で平均し、実際の台風の数値と最もよく整合する風とその時の半径・上端を、最適な指向流・半径・上端とする。

$$\mathbf{v}_o(p) = \frac{1}{\pi r_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_o} \mathbf{v}_{\text{obs}}(x, y, p) r dr \quad \mathbf{V}_o = \frac{1}{P_b - P_{t,o}} \int_{P_{t,o}}^{P_b} \mathbf{v}_o(p) dp$$

- 半径は、100~1000kmの範囲で100kmごとに試す
  - 上端は、800~200hPaの範囲で50hPaごとに試す
  - 残差は環境場の風や台風の数値の計算、非断熱加熱の非対称性などにより生じると考えられる
- 予報と解析それぞれについて最適な指向流を求め、差の要因を調べる。



# Galarneau and Davis (2013): 最適指向流分析

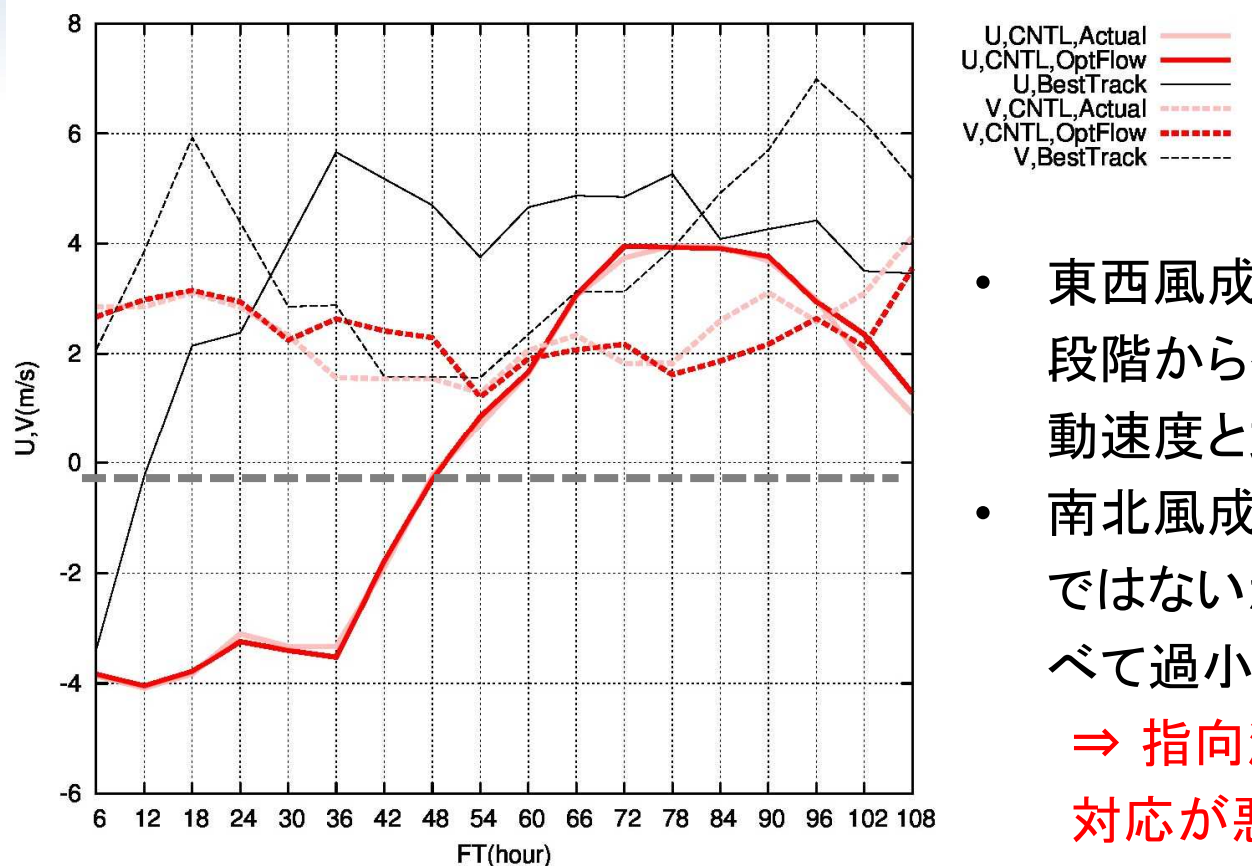
## GD13の手法(2)

- $\mathbf{V}_m$ ,  $\mathbf{V}_o$  の差、即ち台風移動速度の誤差は、以下のように4つの項に分解できる(GD13のeq.10)。

$$\underbrace{\mathbf{V}_m - \mathbf{V}_o}_{\text{storm motion error}} = \underbrace{\frac{1}{p_b - p_{t,o}} \int_{p_{t,o}}^{p_b} (\hat{\mathbf{v}}_m - \mathbf{v}_o) dp}_{\text{environment wind error}} + \underbrace{\frac{1}{p_b - p_{t,m}} \int_{p_{t,m}}^{p_b} -(\hat{\mathbf{v}}_m - \mathbf{v}_m) dp}_{\text{TC removal radius error}} \\
 + \underbrace{\frac{1}{p_b - p_{t,m}} \left[ \int_{p_{t,o}}^{p_b} \left( \frac{p_{t,m} - p_{t,o}}{p_b - p_{t,o}} \right) \hat{\mathbf{v}}_m dp + \int_{p_{t,m}}^{p_{t,o}} \hat{\mathbf{v}}_m dp \right]}_{\text{TC steering depth error}} + \text{residual term.}$$

- ただし  $b$  は平均の下端(850hPaに固定)、 $t$  は最適な上端、 $v$  は中心から最適な半径までで平均した環境風で、 $m$  はモデルの予測、 $o$  は解析を表す。また  $\hat{\mathbf{v}}_m$  はモデルの環境風を、解析の最適な半径まで平均した風。
- 適切に分解できるためには、いくつか制約があると考えられる。
  - 残差が小さい
  - 予報と解析の台風中心位置がそれほど離れていない→FT=24に限定して適用
  - ...など

# T2119: 最適指向流分析



- 東西風成分について、予報初期の段階からベストトラックの台風の移動速度と大きく乖離してしまっている
- 南北風成分についても、東西風ほどではないが、ベストトラックの値に比べて過小となっている

⇒ 指向流とT2119の移動速度の対応が悪い

2021/10/12 00UTC初期値予報のT2119の最適指向流(U,V)

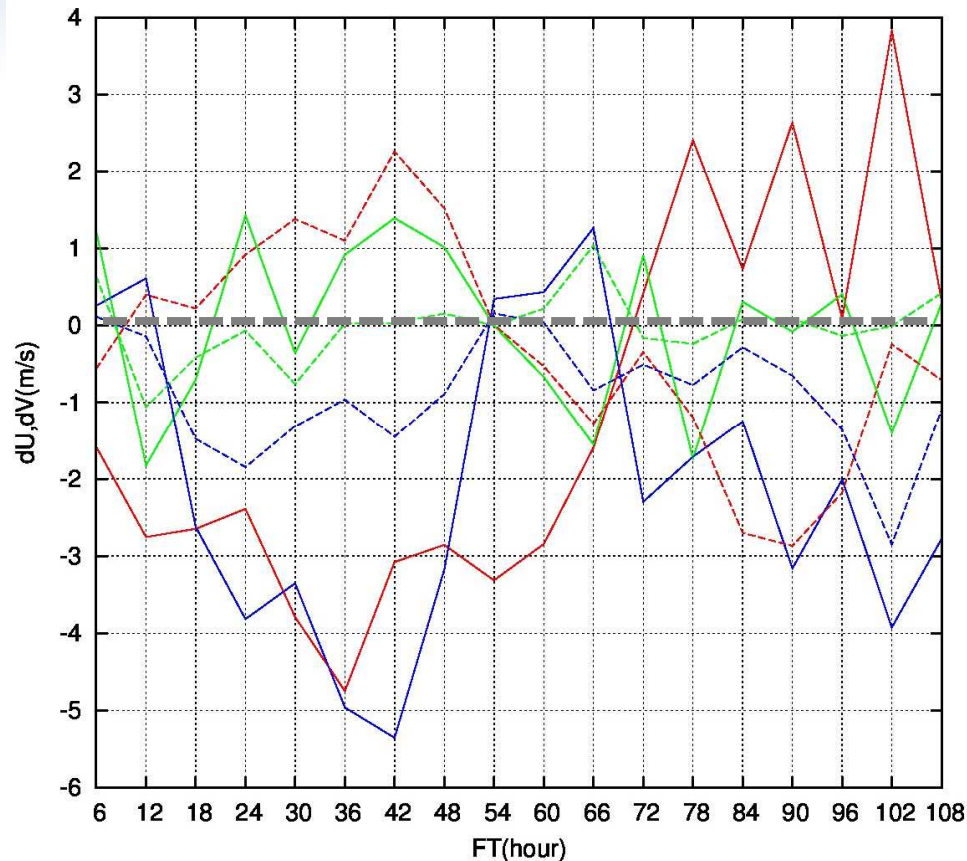
赤系: GSMの台風移動速度(桃色)と最適指向流(赤色)

黒: ベストトラックによる実際の台風の移動速度

実線: 東西風(U)成分

破線: 南北風(V)成分

# T2119: 最適指向流分析



U,CNTL,Env ———  
 U,CNTL,Rad ———  
 U,CNTL,Depth ———  
 V,CNTL,Env - - - -  
 V,CNTL,Rad - - - -  
 V,CNTL,Depth - - - -

- 目先 (FT=18~24) に絞って確認すると、東西風成分の環境風の誤差と台風の深さの誤差の寄与が目立つ  
 ⇒ 台風近傍の環境場及び台風の構造が現実から離れてしまっていることを示唆しているか

2021/10/12 00UTC初期値予報のT2119の台風移動速度の誤差

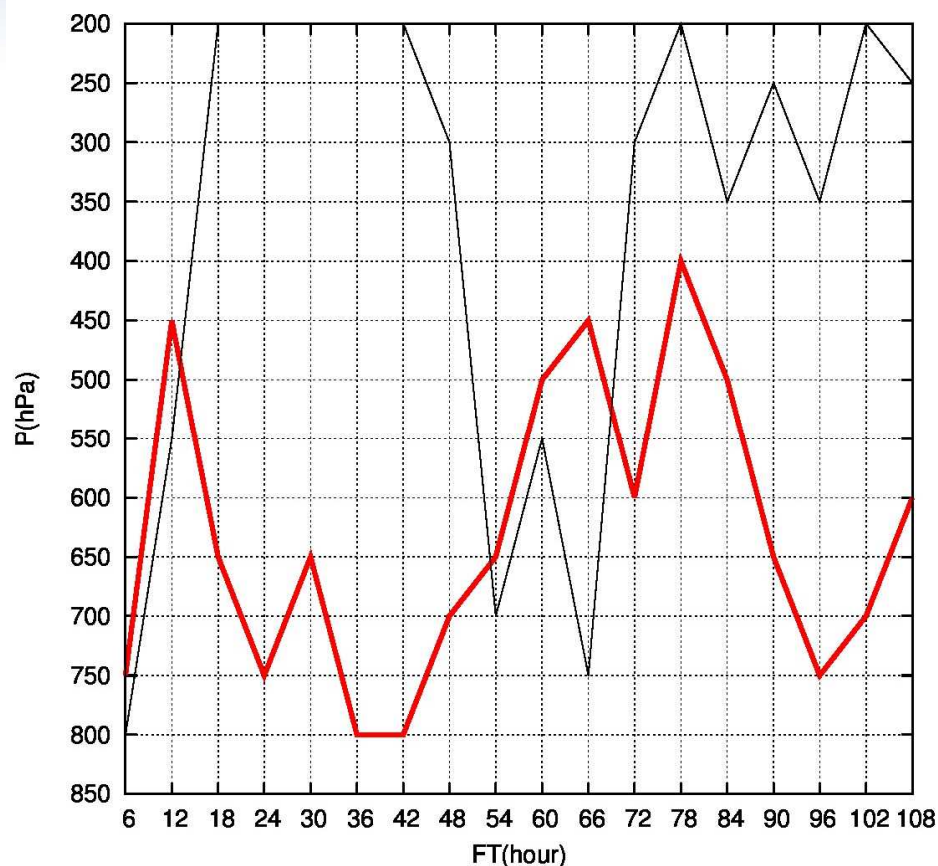
赤: 環境風による誤差

緑: 台風半径の差による誤差

青: 台風の(指向流に感度を持つ)深さの差による誤差

実線: 東西風(U)成分 破線: 南北風(V)成分

# T2119: 最適指向流分析



OptP,CNTL — (Red line)  
OptP,CNTL(anl) — (Black line)

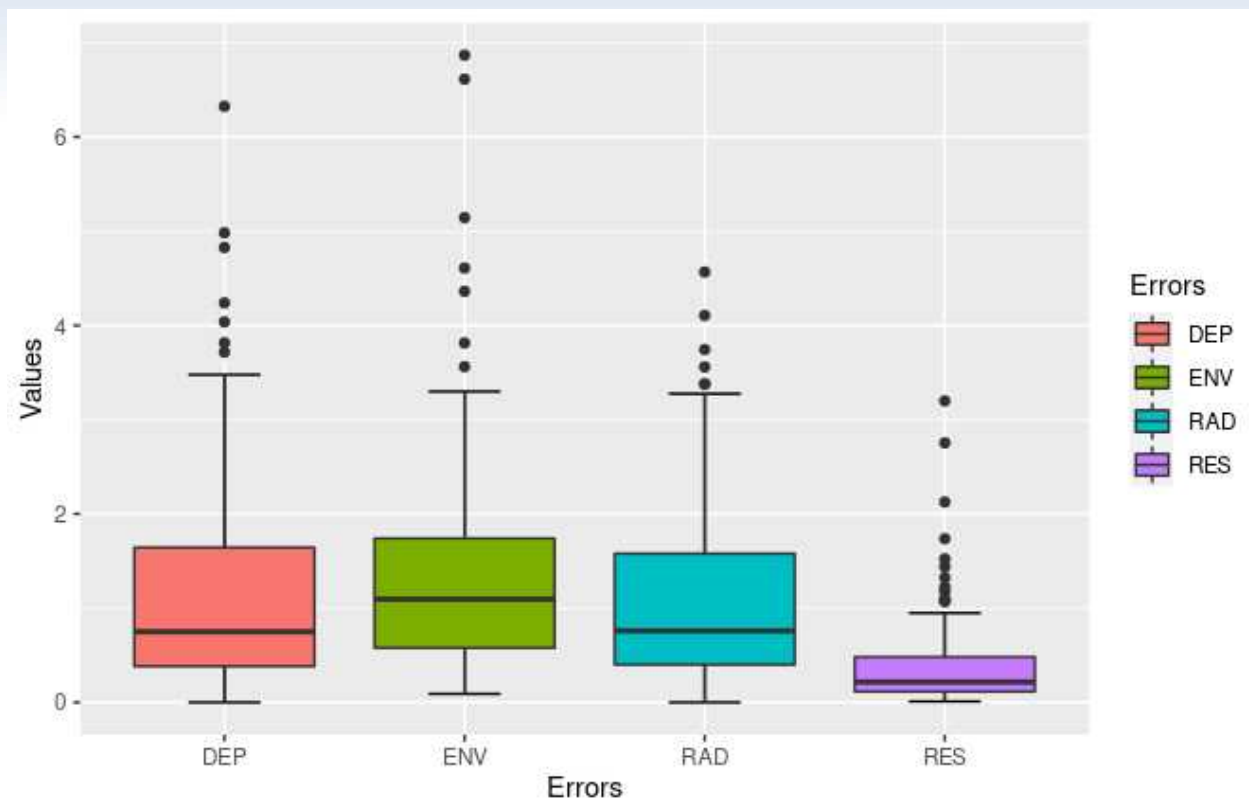
- 最適指向流計算による最適な上端の気圧を確認すると、目先(FT=18~24)において、予報値では比較的深さが浅くなっている(上層の流れに感度がない)
- 一方で、解析値では200hPaが上端となっていることが台風の深さによる誤差の寄与に繋がっていたか
- ただし、気象庁の解析では台風ボアガスを導入しており、その影響で解析値の上端の値が高くなっている可能性もある

2021/10/12 00UTC初期値予報のT2119の最適指向流計算の上端の気圧(予報と同時刻の解析で計算)

赤実線: GSMの予報値における上端の気圧

黒実線: GSMの解析値における上端の気圧

# 最適指向流分析の誤差統計

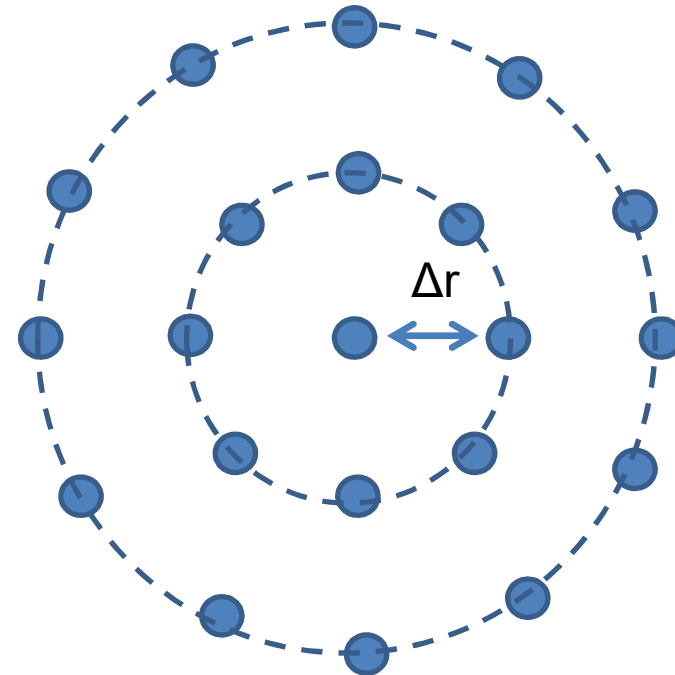
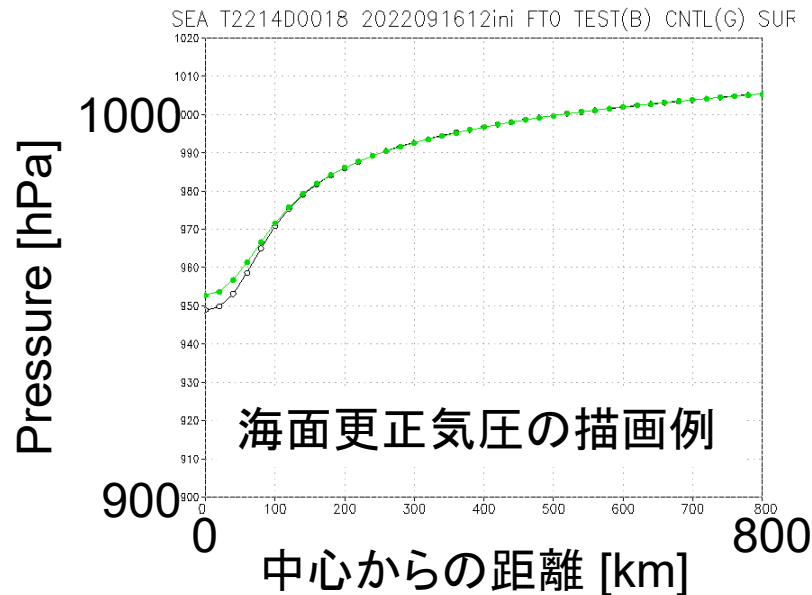


2021年の台風事例(T2101~T2122)の12UTC初期値の予測(FT=24)に対する台風移動速度の誤差への各項の寄与 [m/s]。左から深さ、環境風、半径、残差の寄与を表す。箱内の横線:中央値、箱の上(下)端:第1(3)四分位数、●:外れ値(箱の上(下)端から上(下)に箱の1.5倍だけ伸ばしたところよりも外れた値)、ひげ:外れ値を除くデータの範囲。

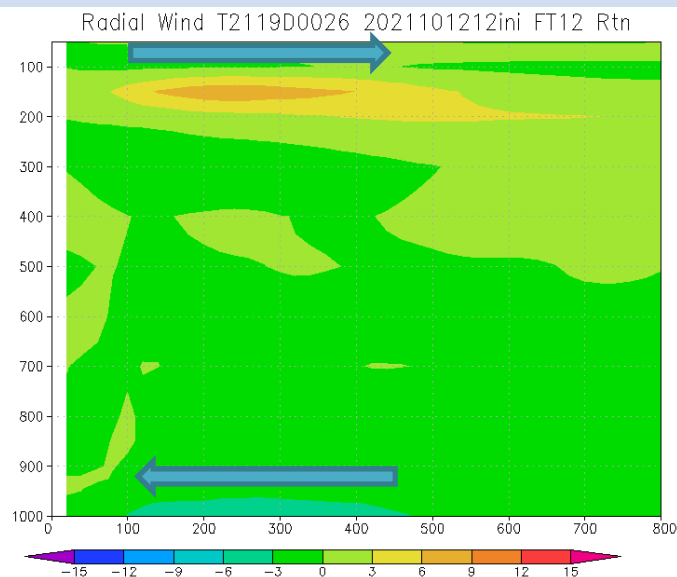
- 中央値を確認すると、環境風の寄与が最も大きい
- 一方で、半径や深さの誤差の寄与との有意な差は無く、環境風の寄与が支配的とまでは言えない
- FT=24において、どの誤差の寄与もあまり大きくない事例も少なからずあり、そこからの深掘りが難しい

# 台風構造の解析方法

- 台風の構造を接線方向に平均した形で解析
  1. 台風中心をトラックファイルから読みこむ
  2. その中心に対して右のような格子配置を考える。球面三角法を用いて、各点の lat,lon を計算する。現状  $\Delta r$  を 20km にしている。最大 800km の円まで計算
  3. 各点に対し、入力の GPV の近接 4 格子を取り出し、距離に応じて値を線形内挿
  4. 各半径ごとに平均を取って描画

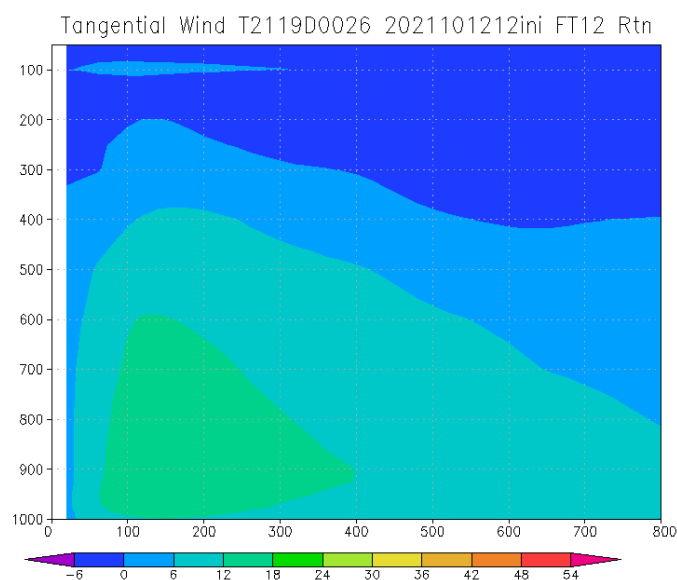


# T2119:鉛直構造



動径風  
(m/s)

- 動径風からインフローとアウトフローの構造を辛うじて確認できる
- 接線風を確認すると、台風の渦に伴う風速の分布は確認できるものの、渦の上端については判然としない



接線風  
(m/s)

- ⇒ 最適指向流で計算された最適な深さ(上端)とは何を表しているのか？
- ⇒ 他にも、最適指向流計算時の仮定に無視できない誤差が入っているのではないか(渦軸の傾きなど)

Init: 2021/10/12 12UTC FT=12h  
横軸: 台風中心からの距離 [km]  
縦軸: 気圧面 [hPa]



# まとめ

# まとめ

- 気象庁全球モデルの台風進路予測誤差の特性
  - 既知の系統誤差
    - 転向前の北上バイアス
    - 転向後のスローバイアス
  - 発達弱い台風の進路予測誤差が大きくなる傾向
- 進路予測誤差の分析の現状
  - 北上バイアスといった既知の系統誤差の要因を理解すべく、最適指向流といった手法の導入・分析を行っており、以下の点があった
    - 環境風の誤差の寄与が最も大きい傾向
  - 一方、指向流の分析だけでは説明が難しい台風事例が存在
  - 上記の分析手法については複数の問題点が残っており、分析結果の解釈を難しくしている(詳細は次スライド)

# 導入した分析手法の問題点

- 最適指向流分析の問題点

- 進路予測誤差に対する環境風の誤差の寄与が大きいと判明しても、そこからどう誤差の診断に繋げていくか知見がまだない
- 各成分の寄与が同程度であった場合には、そこから得られる情報がほとんどない
- また、結果を見る限りでは最適な深さ(渦の高さ)や半径についてかなりばらつきが大きく、その不確実性について検討が必要

- 台風の構造分析の問題点

- 気象庁全球モデルで再現されている台風の構造について、どう分析してどのように進路予測誤差の評価検証に繋げていくか
- 台風構造のリファレンスとして何を用いるべきか
  - ベストトラックのR30、SAR海上風、etc...

# 評価・検証における今後の課題

- 誤差の原因となっている問題の切り分け
  - 最適指向流分析で誤差の寄与を切り分けた後の更なる切り分け
    - 環境風、半径、深さの誤差
  - 比較実験、たすき掛け実験、アンサンブル感度解析等の実施
  - 指向流で説明できない進路予測誤差の評価・検証方法の検討
- 台風予測の改善を確認する事例選定手法の検討

【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

