

台風進路予報改善に 資する近年の諸研究

伊藤耕介
(琉球大学)

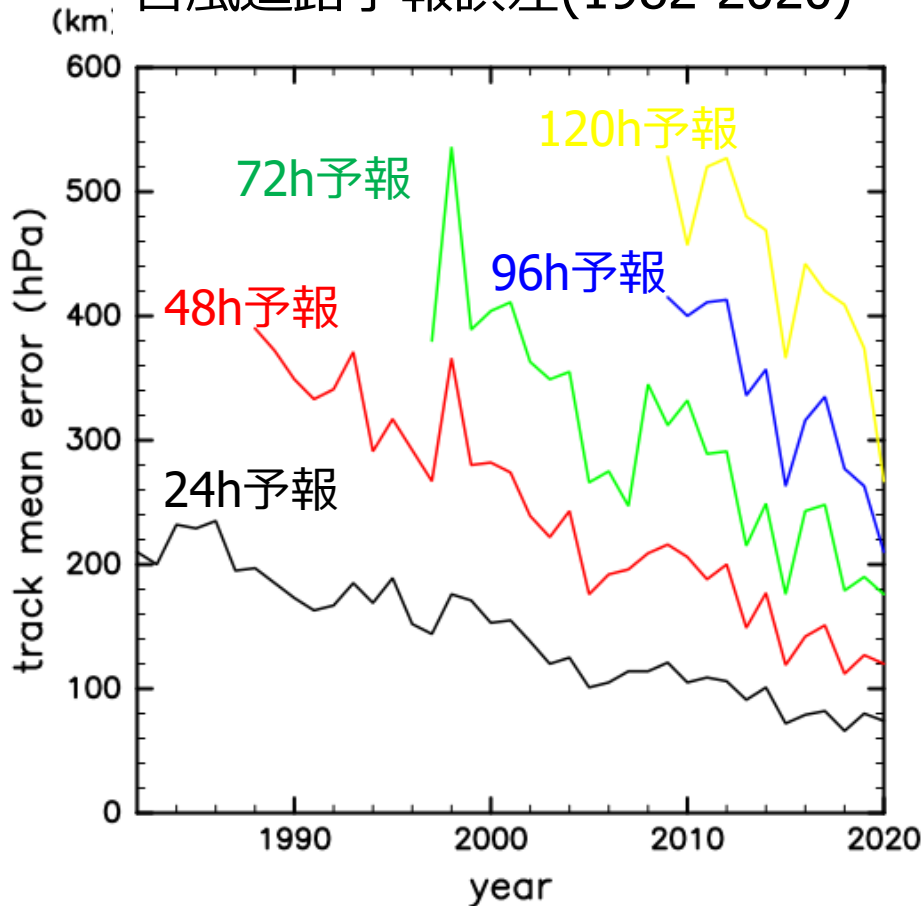
お断り

- 今日の話には、査読を経ていない、私(伊藤)個人の考えに基づく部分が多く含まれます。
- 批判的・懐疑的にご拝聴いただき、コメントをお寄せいただければ幸いです。

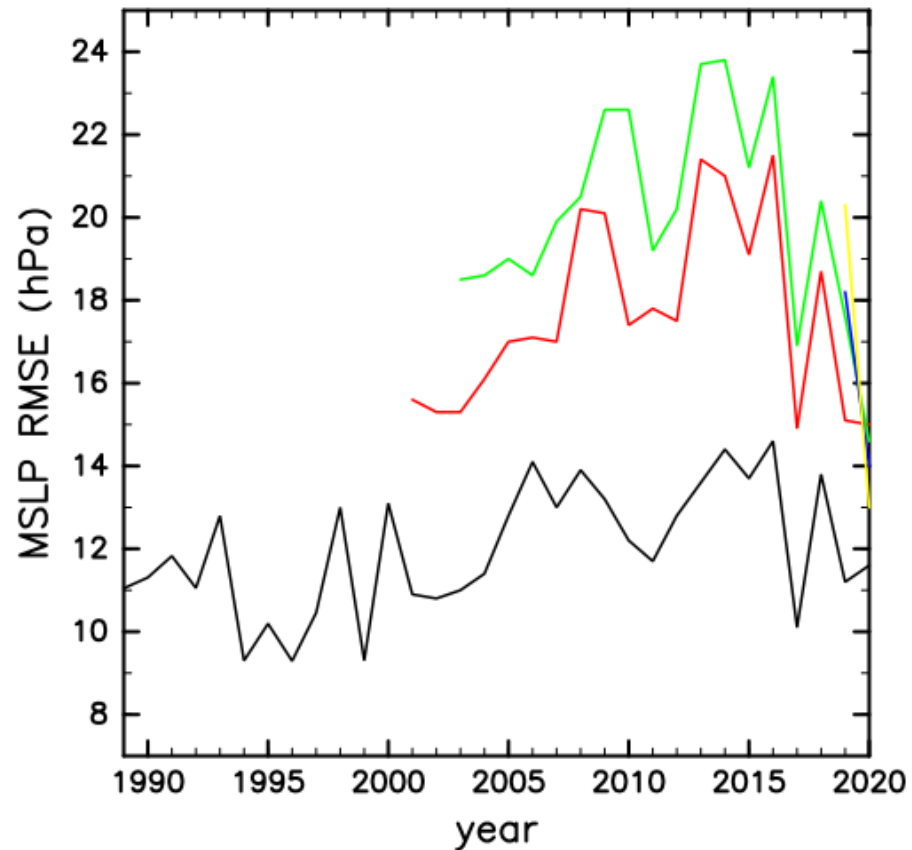
RSMC Tokyo台風予報誤差

- 進路：長期的に見ると減少傾向(FT72で200km)。
- 強度：新システムが稼働しはじめた2017年以降減少

台風進路予報誤差(1982-2020)



台風中心気圧予報誤差(1982-2020)



(Ito 2016の図を2020年まで拡張)

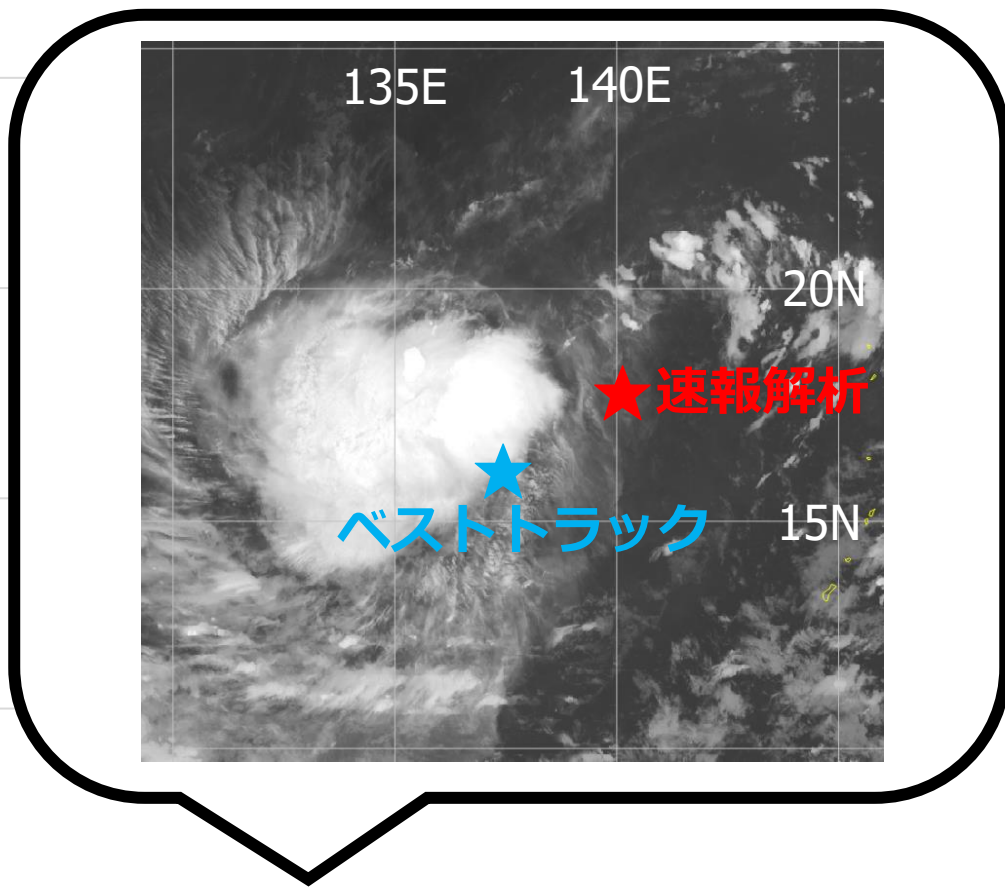
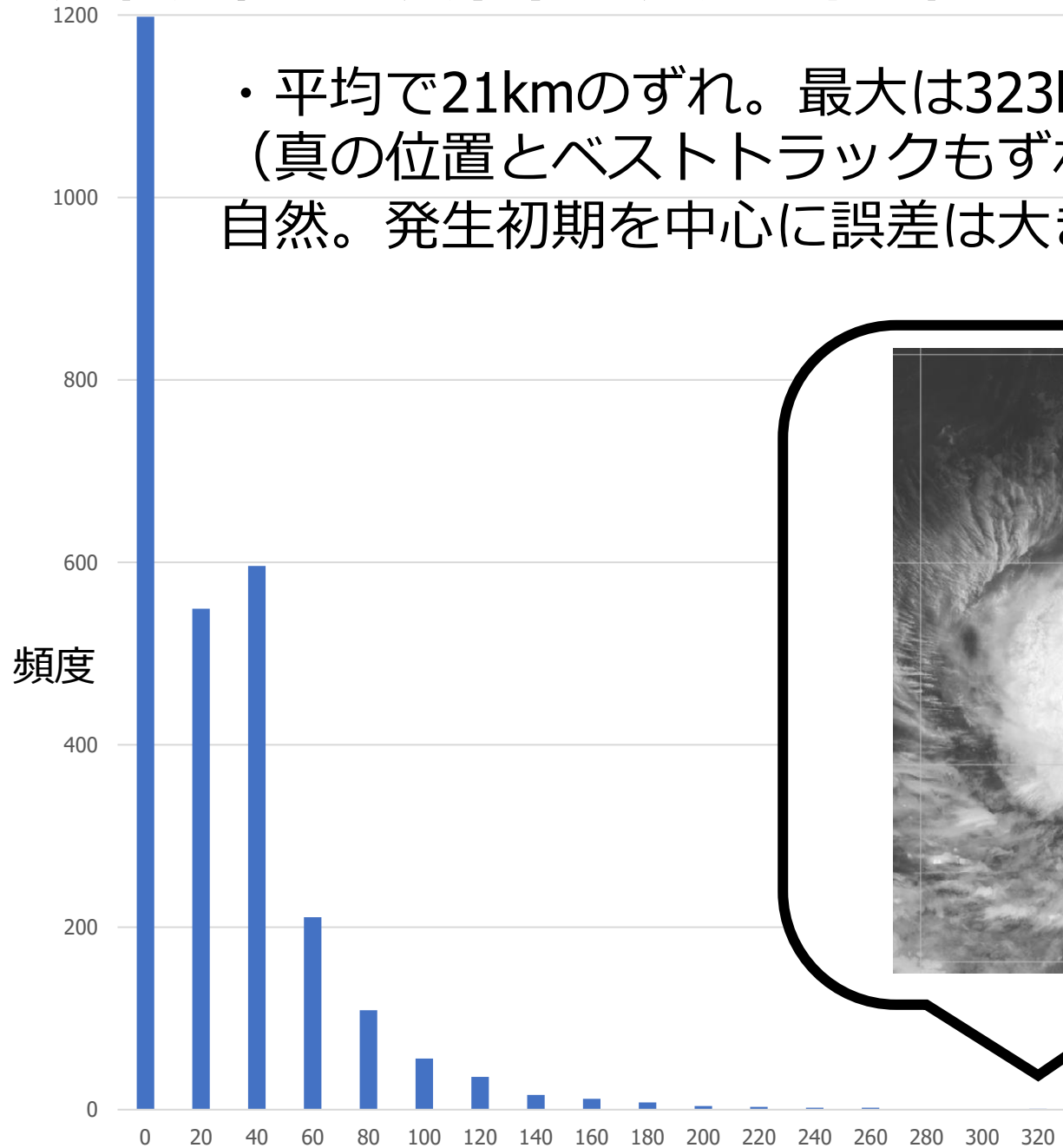
台風進路予測誤差の軽減に向けて

- 簡単な算数
 - $200\text{km} \div 72\text{時間} = 0.77\text{m/s}$
 - $100\text{km} \div 72\text{時間} = 0.39\text{m/s}$
 - 初期の位置ずれや誤差の拡大を考慮すると、要求される移動速度の誤差はかなり小さい。
 - 詳細な理解と丁寧なシステム構築が望まれる。
- 台風進路予測誤差を軽減するためには、
 - 初期時刻の中心位置推定の誤差の低減
 - データ同化の高度化
 - 数値モデルの高度化
 - 台風進路予測ガイダンスの開発(案)を行うことが例として挙げられる。

初期時刻における位置ずれ

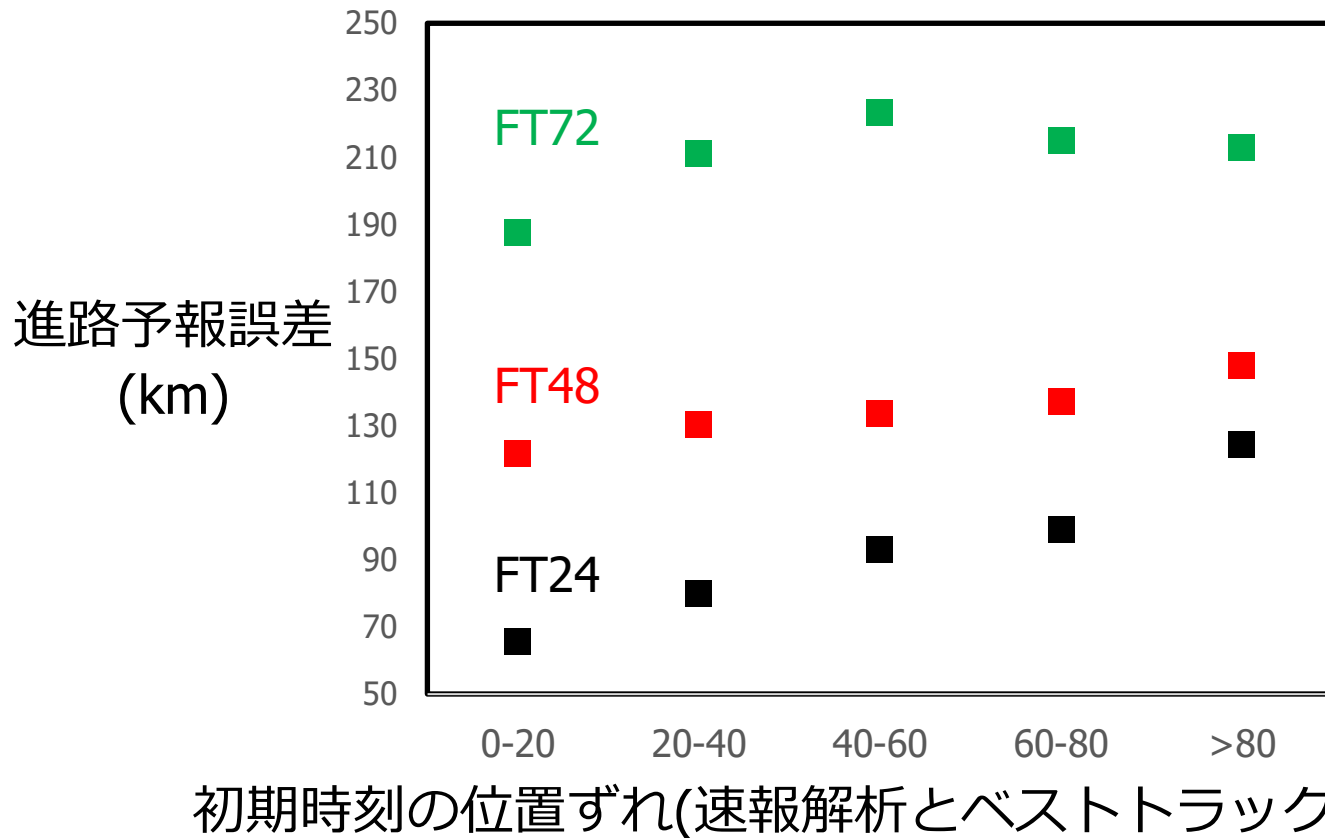
速報解析とベストトラックの中心位置のずれ(2015-2019)

- 平均で21kmのずれ。最大は323km(2015/9/22 12UTC)
(真の位置とベストトラックもずれていると考えるのが自然。発生初期を中心に誤差は大きい)



初期の位置ずれと進路予報誤差(2015-2019)

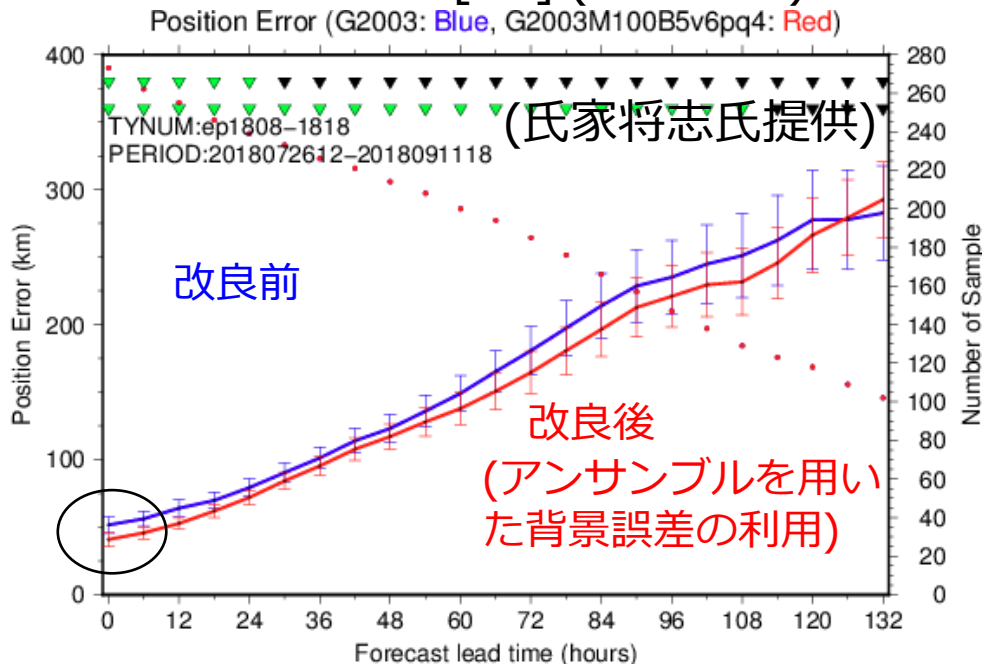
- 初期位置ずれの予報への影響は48時間予報までは顕著。
- 24時間予報に関していうと、かなりの部分が位置ずれに起因
 - 位置ずれが20km以下⇒24時間予報誤差は66km
 - 位置ずれが80km以上⇒24時間予報誤差は124km
 - 位置ずれの違いだけで24時間予報誤差は倍程度も違う



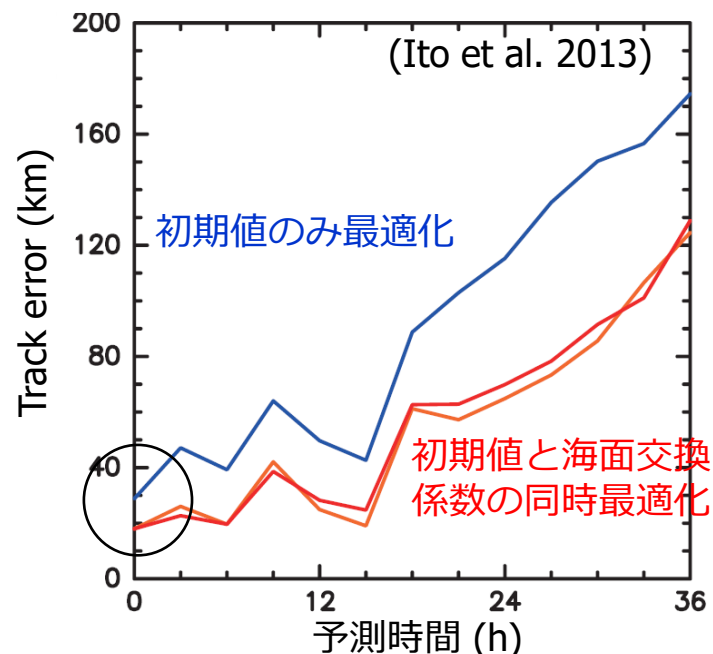
より正確な中心位置決定

- 数値モデルにおける中心位置決定を改善するためには
 - 予報現業の方が中心位置を速報解析でより正確に決定する
 - 客観解析により得られる台風中心を、現業速報解析の中心位置に近づける (現状：現業速報解析より誤差が大きい)
- 前者については、系統的なバイアスの研究や衛星画像に機械学習を用いた中心位置決定支援システムの高度化はできないか？
- 後者については、台風構造の表現の改善で良くなるか？

熱低位置誤差[km] (2018年夏)



進路予測誤差(Init.: 2010/10/28 12UTC)

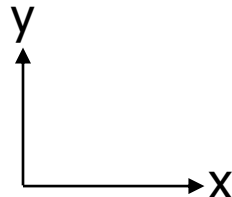
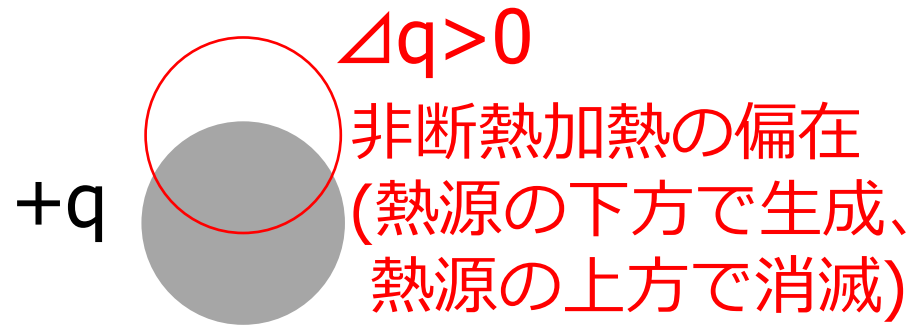
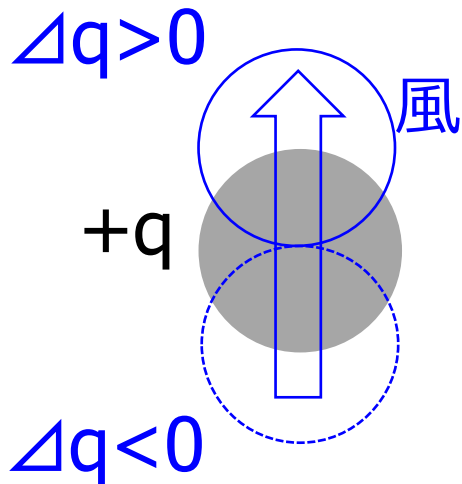


台風進路の基礎的理解

台風進路の捉え方：渦位の時間変化 (Wu and Wang, 2000)

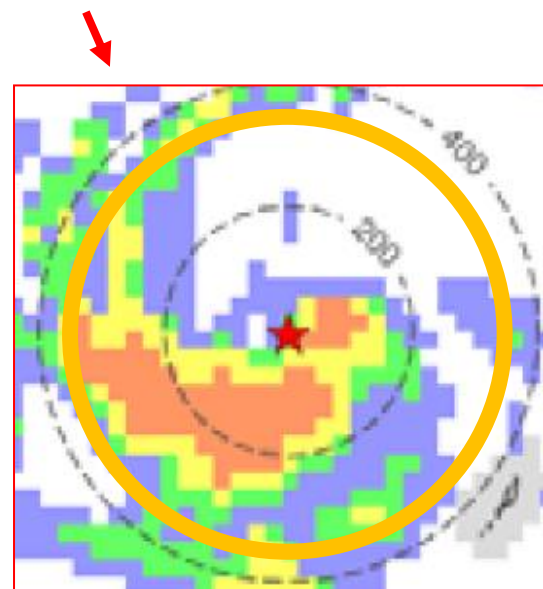
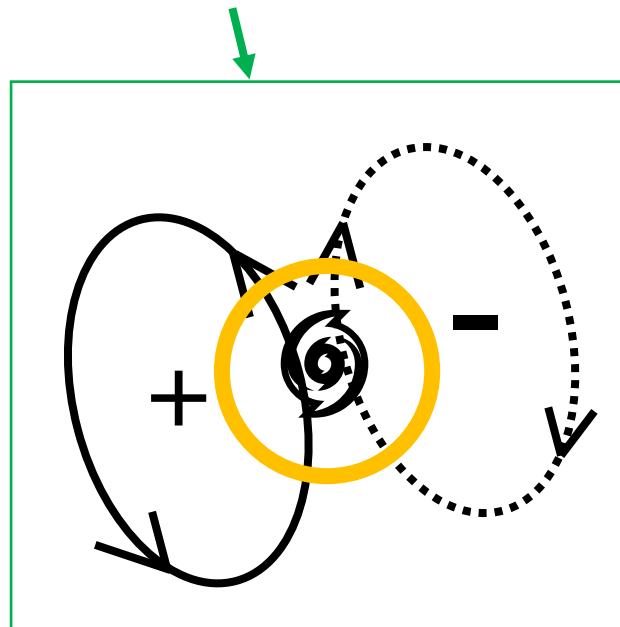
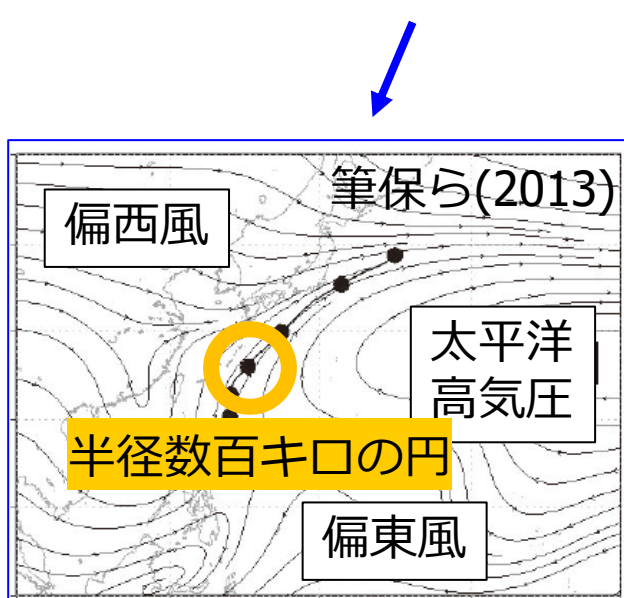
- 台風は強い渦であるため、台風の移動は渦位(または渦度)の時間変化の方位角波数1の成分とほぼ対応する。

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \underbrace{-u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y}}_{\text{水平移流項}} \underbrace{- w \frac{\partial q}{\partial z}}_{\text{鉛直移流項}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} (\zeta \cdot \nabla \dot{\theta})}_{\text{加熱微分項}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot \nabla \theta}_{\text{摩擦微分項}}$$



台風進路の基礎的理解(伊藤の考え)

- 進路 = 大規模場の風 + β ジヤイア + 非断熱加熱の偏り + その他
(大規模) (台風スケール) (内部コアスケール)



Yamada et al. (2016)

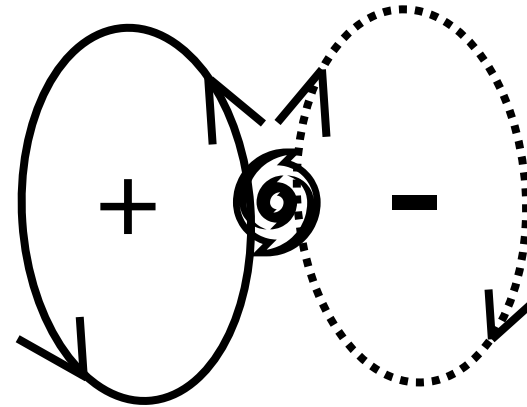
- これらはいずれも重要で、中でも大規模場が相対的に重要であろうと考えている。
- 一方で、進路に関する基礎的諸概念（上述の3つの効果や指向流）について改めて考えてみると、実際の効果は複雑であるように思われる。

コメント1： β ジヤイア効果とは何か？



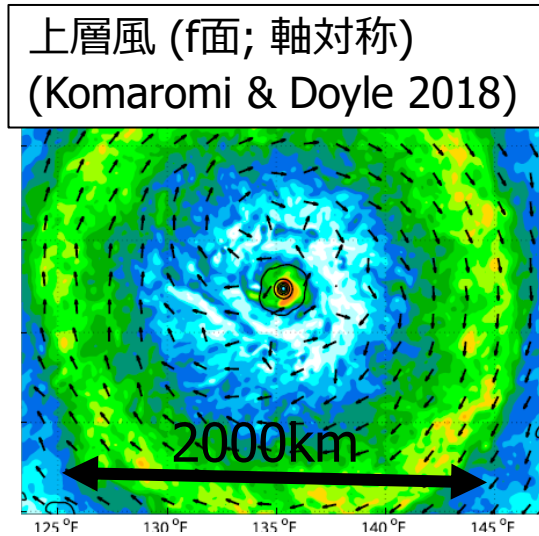
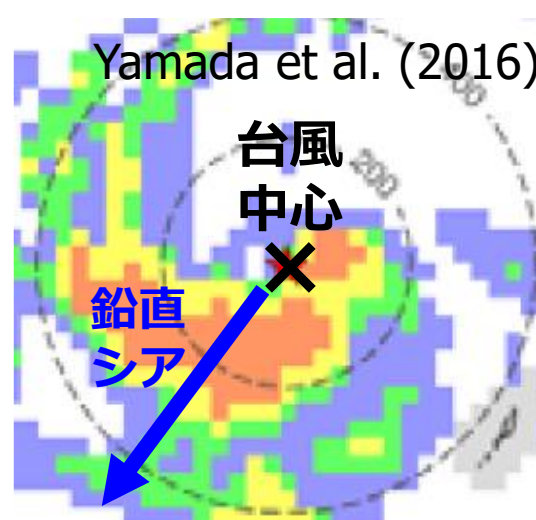
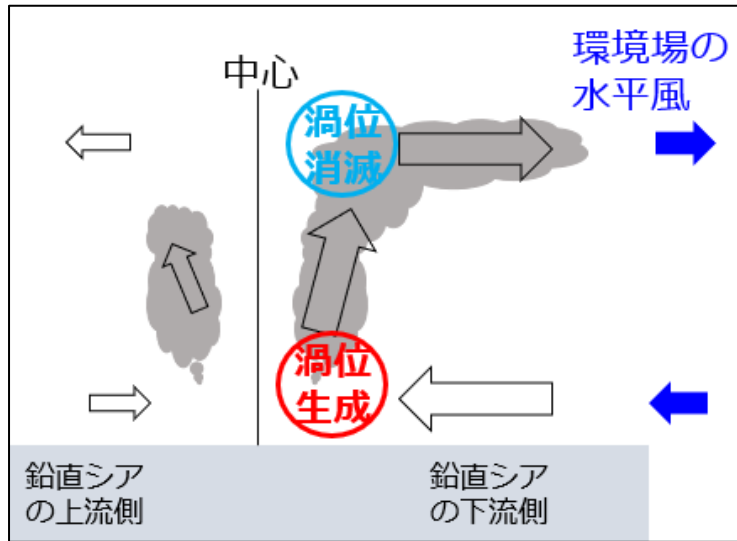
正渦度偏差

負渦度偏差



- 北や中心ほど絶対渦度は大 & 絶対渦度は保存性が高い
⇒ 低気圧に伴う移流で渦度は西に正偏差、東に負偏差
- 台風の移動に関わる部分は2つに分けられる。
 - 渦度偏差生成に伴うロスビー波的な移動（図では西向き）
 - 有限振幅の風が吹くことによる移流（図では北向き）
- 指向流を「半径数百キロ以内の風」と定義すると、このうち移流の部分はその中に含まれるであろう。

コメント2：非断熱加熱の偏りの効果



- 環境場の水平風の鉛直シアで対流が下流～下流左側に偏在。
⇒下層では渦位生成が起こり、渦位方程式で移動に効く。
⇒生成された渦位は循環を伴うため移流を引き起こす。これも渦位方程式を通じて台風の移動に効く。
⇒（対流の深さが象限によって異なることも移流に影響）
- 先ほどと同様、指向流を「半径数百キロ以内の風」と定義すると、移流の部分はその中に含まれるであろう。
- 数日オーダーの時間が経過すると、熱源応答として、ロスビーの変形半径のオーダー(～2000km)の循環場を修正。

コメント3: 渦位方程式と現象との対応

- 渦位方程式の加熱微分項はスナップショットでの加熱の直接的な影響に対応するが、加熱の偏りがある場合には、風速場にも非対称性があり、生成された渦位による移流も生じる。
- β ज्याイアや加熱の偏りに伴う風も $O(1000\text{km})$ で分離は困難？
- 指向流の定義が「数百キロ以内の平均」であれば、全ての効果に伴う移流をまとめたものを見ていることになる。

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \underbrace{-u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y}}_{\text{水平移流項}} \underbrace{- w \frac{\partial q}{\partial z}}_{\text{鉛直移流項}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} (\zeta \cdot \nabla \dot{\theta})}_{\text{加熱微分項}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot \nabla \theta}_{\text{摩擦微分項}}$$

大規模場の風

β ज्याイア

非断熱加熱の偏り

その他

コメント4: 指向流とは何か？

- “指向流”を「中心から半径数百キロ以内の単純な平均風」と定義した場合、 β ジャイアに伴う風や加熱の偏りに伴って生じる移流を含むだろう
(加熱の偏りに伴う直接的な渦位生成の効果は含まれない)
- “指向流”を「空間フィルタで大規模場を取り出したあと、中心から半径数百キロ以内の平均風」と定義した場合、大規模場の風による移流の寄与分が多いだろうが、スケールがそれなりに大きな β ジャイア効果や加熱の偏りに伴う移流の一部も含んでしまうだろう。
- Galarneau and Davis (2013)の“最適指向流”は「台風進路を風だけで説明できる」という前提のもとで最適な水平・鉛直範囲を探索している。加熱の偏りの直接的な効果が大きい場合などは、それを無理やり風に押し付けて説明することになってはいないだろうか。

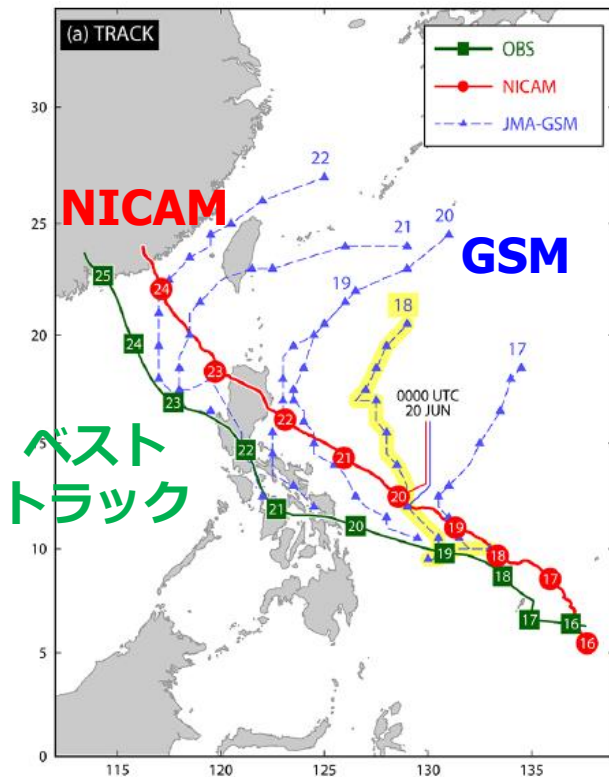
とはいえ、指向流は大事

- 進路にとって大規模場がとても重要であることは言うまでもない。ロスビー波や非断熱加熱の渦位生成による移動速度成分は1~2m/s程度だろう。
- ゆえに指向流が有用な量であることに異論はない(榎本先生と吉野先生からも話題提供があるはず)
- 但し、要求される移動速度の誤差($<0.5\text{m/s}$)に鑑みれば、モデル改善につながる緻密な議論のため、渦位方程式や渦度方程式を用いて高度別に定量的な分析を行い、進路を深く理解することも(特に加熱等の影響が示唆される場合には)必要ではないか。
- 以後、私からは、加熱の偏りに注目した研究を中心に、いくつかの話題について紹介する。

台風進路予測に関する 近年の話題

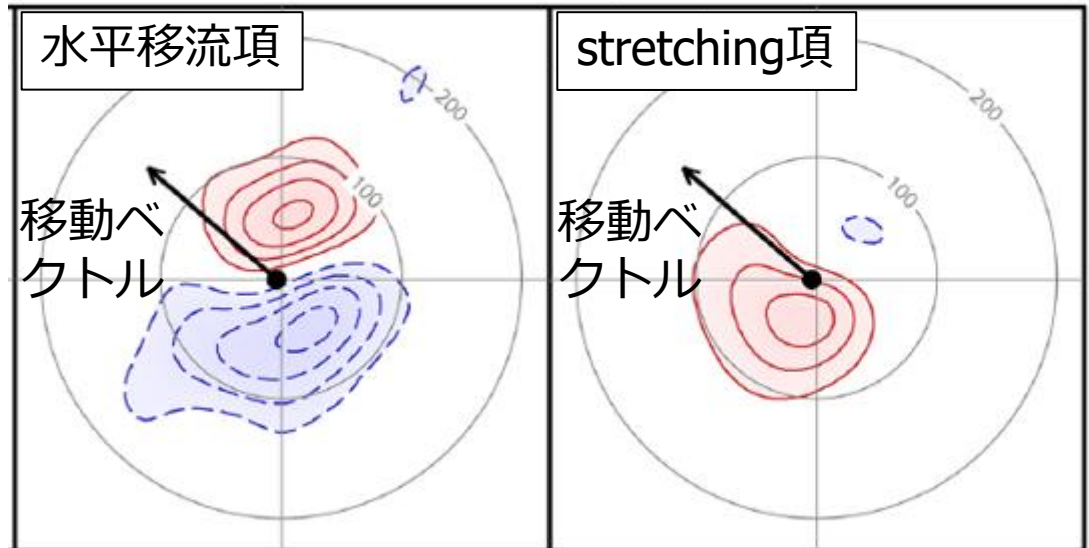
台風Fengshen(2006)の北進バイアス

- 水平移流項はほぼ北向きであるにもかかわらず台風の移動ベクトルは北西向き
- 南西向きのシアベクトルがあるために、南西側からその南側にかけて対流活動に偏りがあった。
⇒台風の移動方向は指向流の向きからずれていた



NICAM(z=1.6km)

[CONTOUR INTERVAL: $3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$]

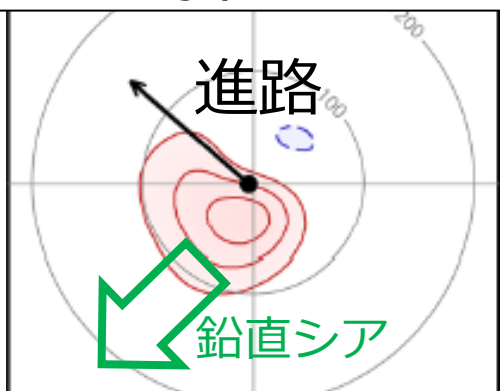


(Yamada et al. 2016)

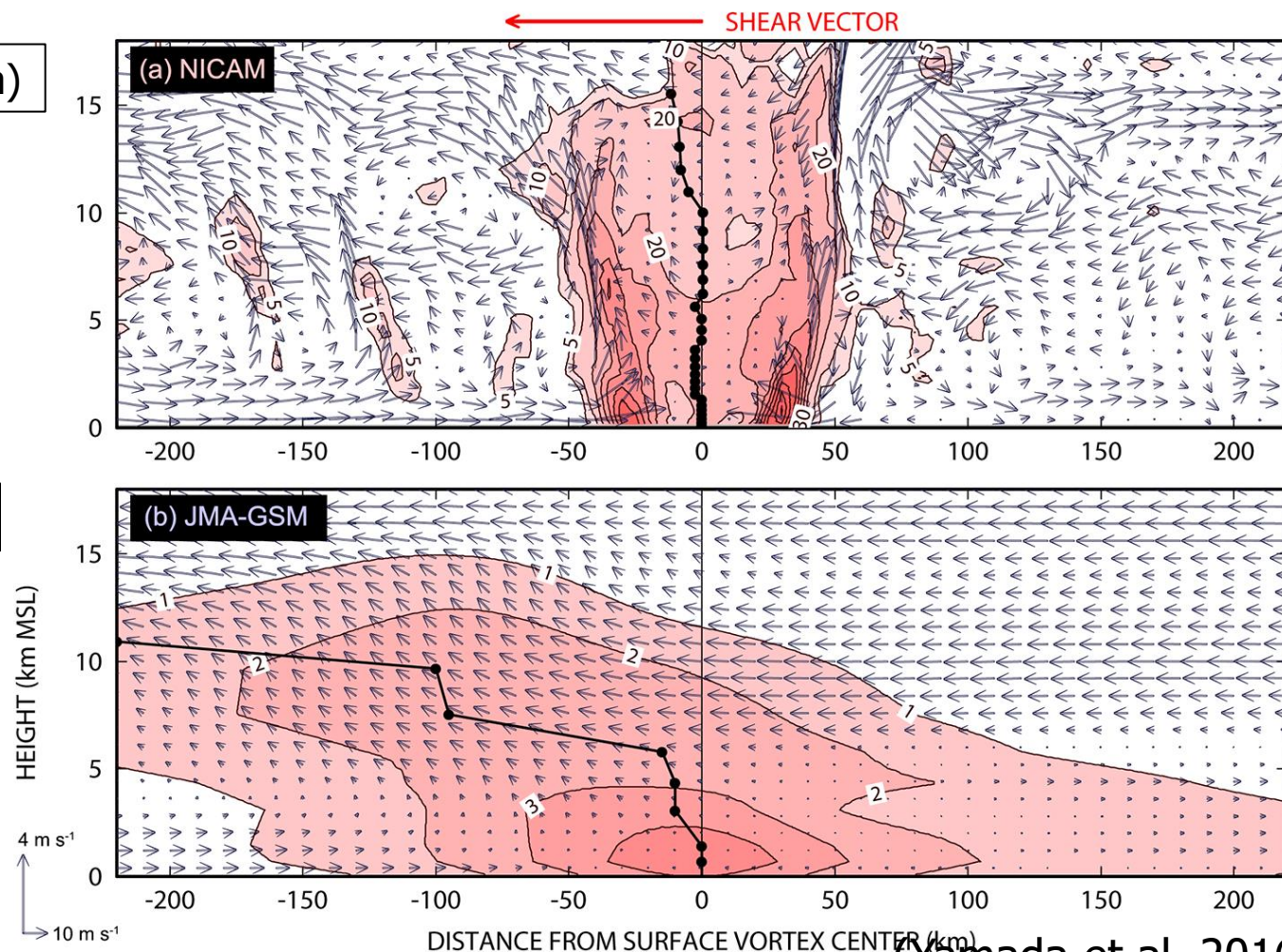
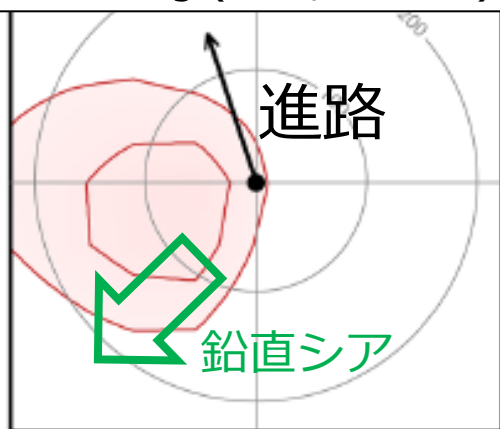
GSMとNICAMにおけるstretching項と構造

- 加熱の偏りは鉛直シアの下流側～下流左側に期待される。
- NICAMではstretching項がシア下流側に生成され進路は北西。
- GSMではstretching項がシア下流**右側**に生成され進路は北北西。

Stretching (NICAM; 850hPa)

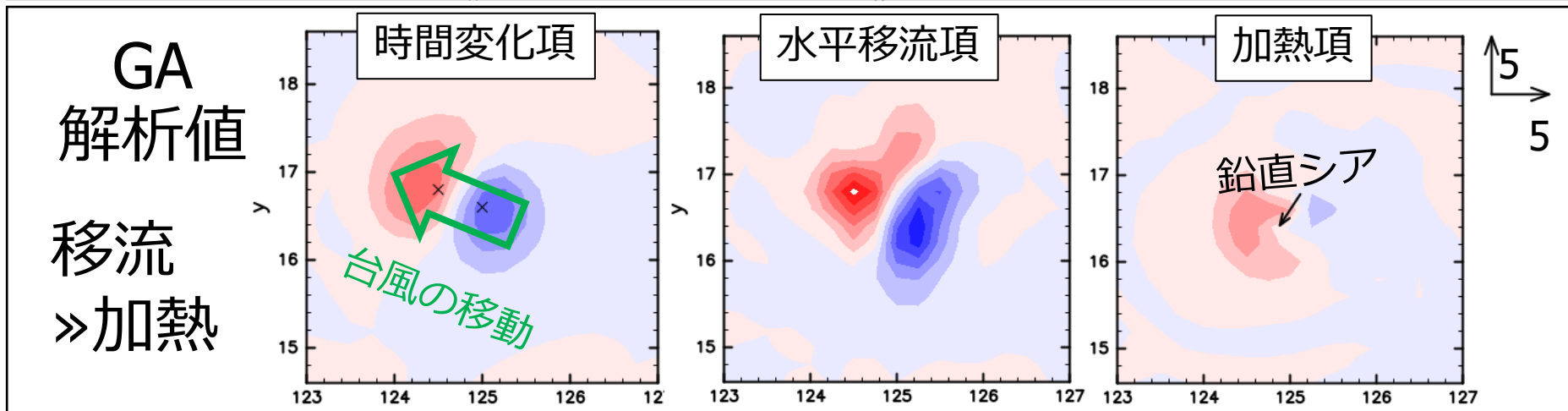
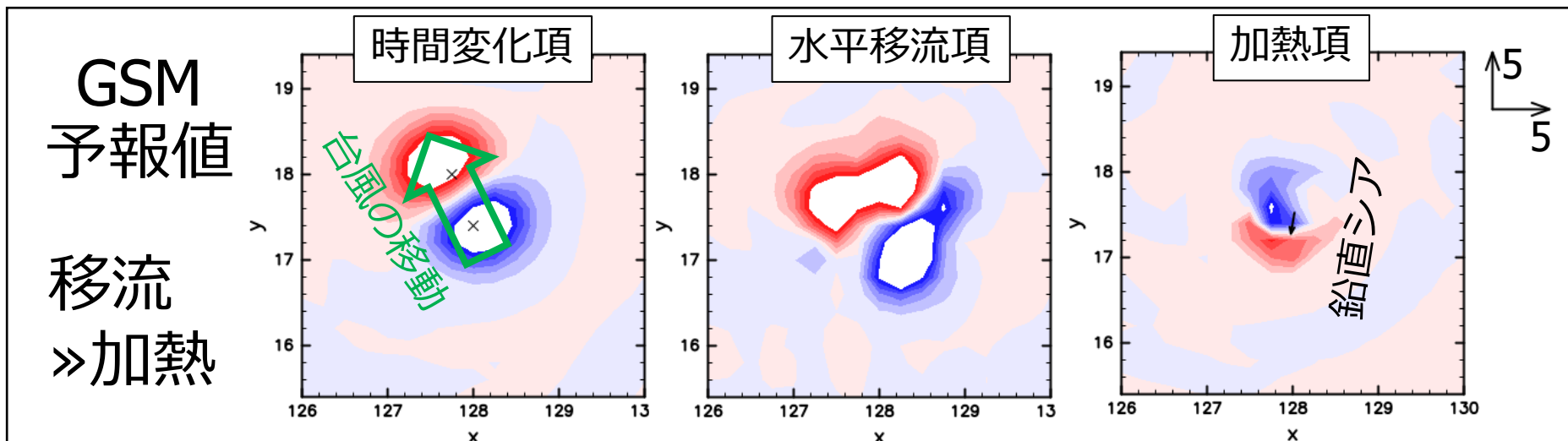


Stretching (GSM; 850hPa)



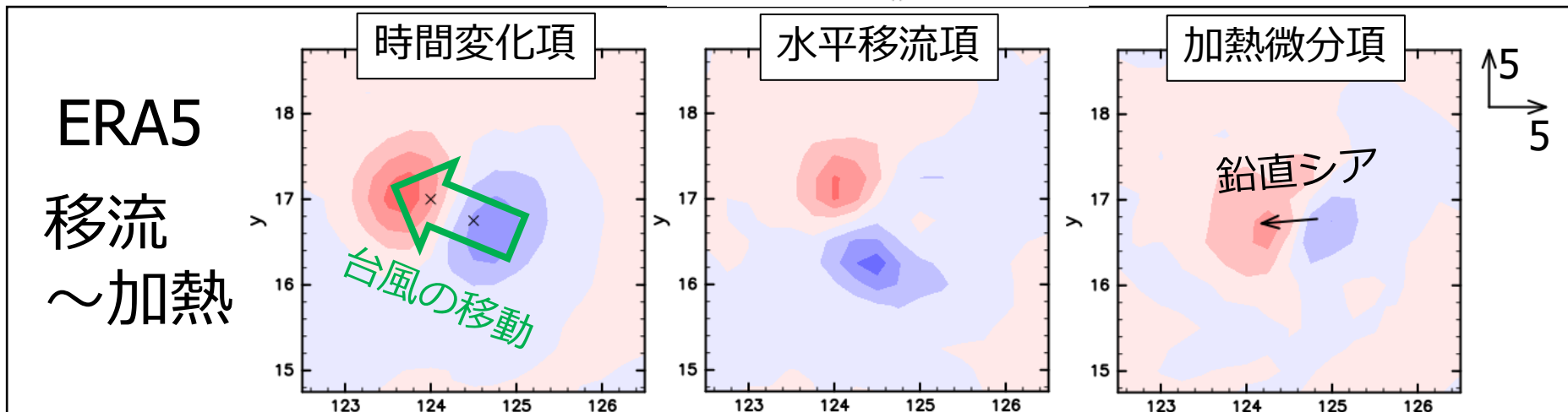
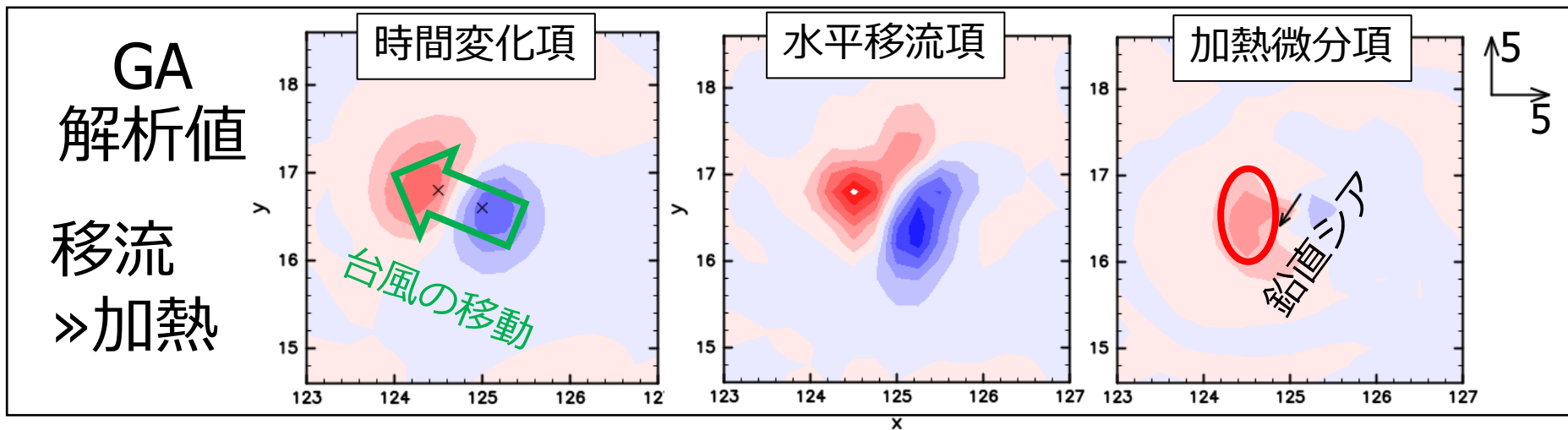
解析が正しいとは限らない

- 北進バイアスで予報を外した事例(2021年台風第14号)。
- GSM予報値でもGAでも水平移流が卓越しており、GSMで水平移流が誤った向きに予報されたことが原因かのように見える



しかし、GAとERA5を比べてみると

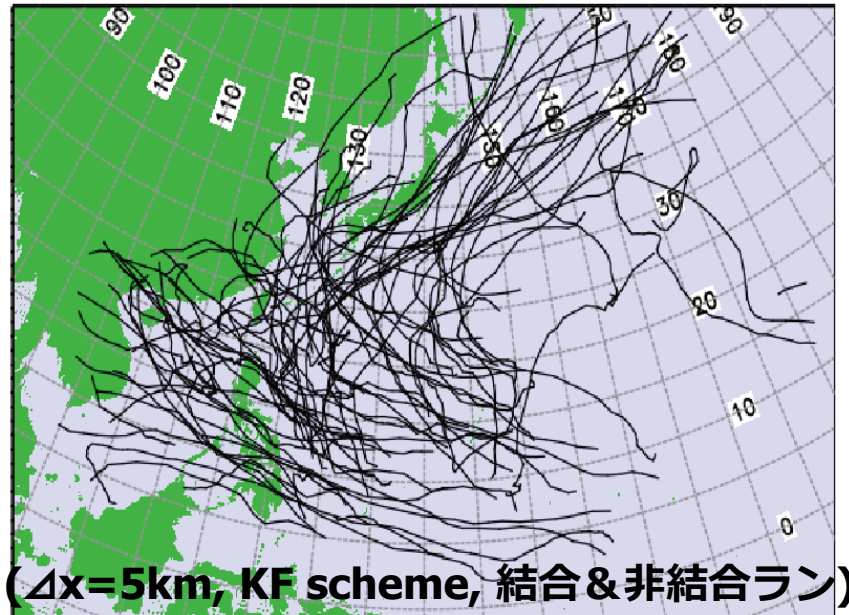
- GA: 水平移流項が卓越, ERA5: 水平移流項と加熱微分項が同等程度
- このときECMWFの進路予測は北進バイアスを示していなかった
- 解析値はモデルの特性を反映する。GSMやそれを基礎とするGAはともに鉛直シアの下流**右側**に加熱の偏りを作っている。



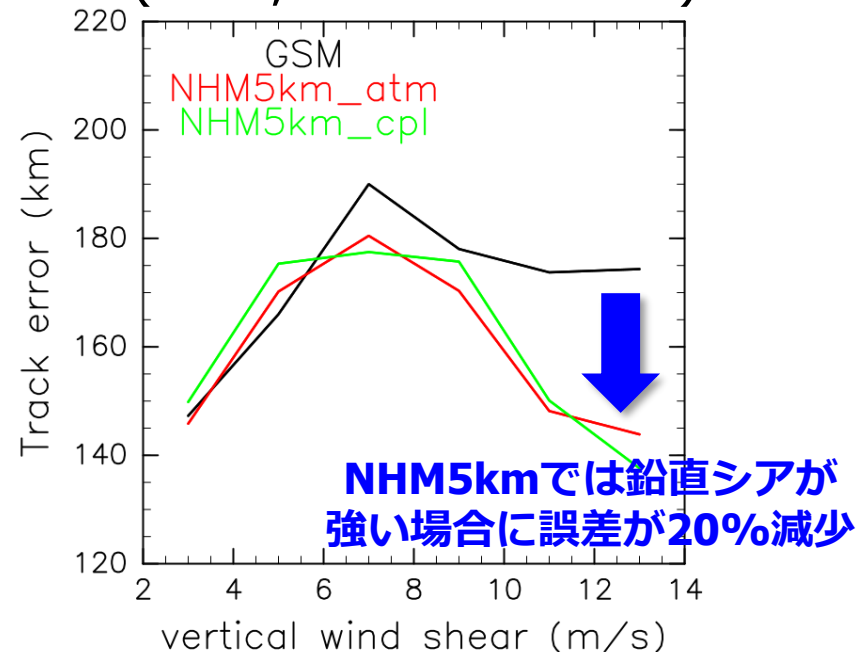
北西太平洋全域高解像度数値実験

- 2012-2014の417事例で台風進路予測精度を比較 (現業GSM, NHM5km, 海洋結合版NHM5km)
- 全体としてはNHM5kmで少しの進路予測改善にとどまったが、鉛直シアが強いときは顕著な改善が見られた
→非断熱加熱の再現性の違いが影響している可能性がある。

2012-2014のほぼ全事例(417回)で予測実験



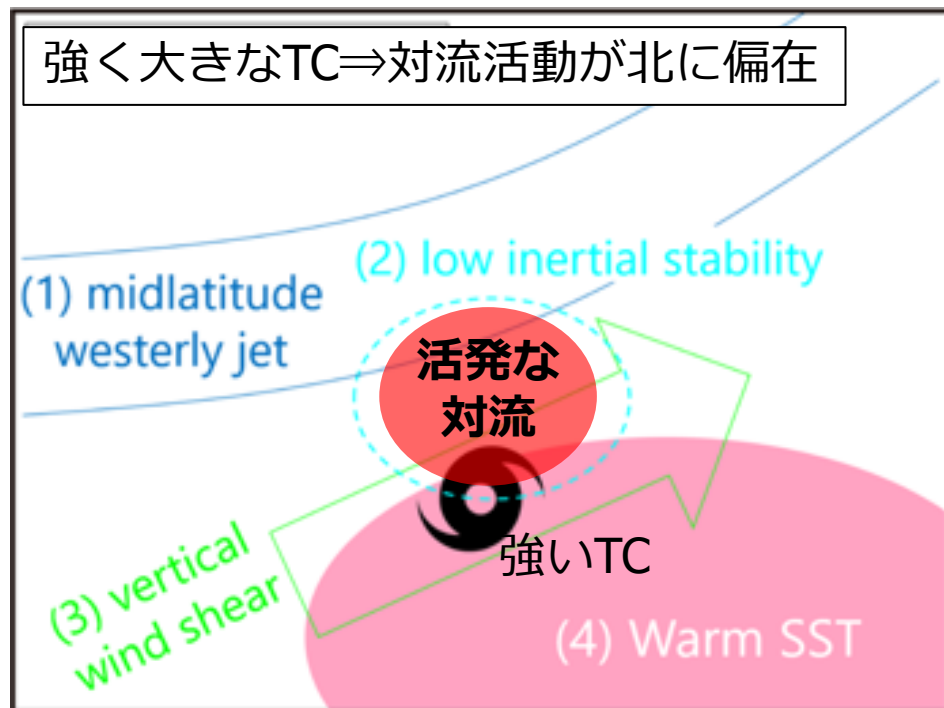
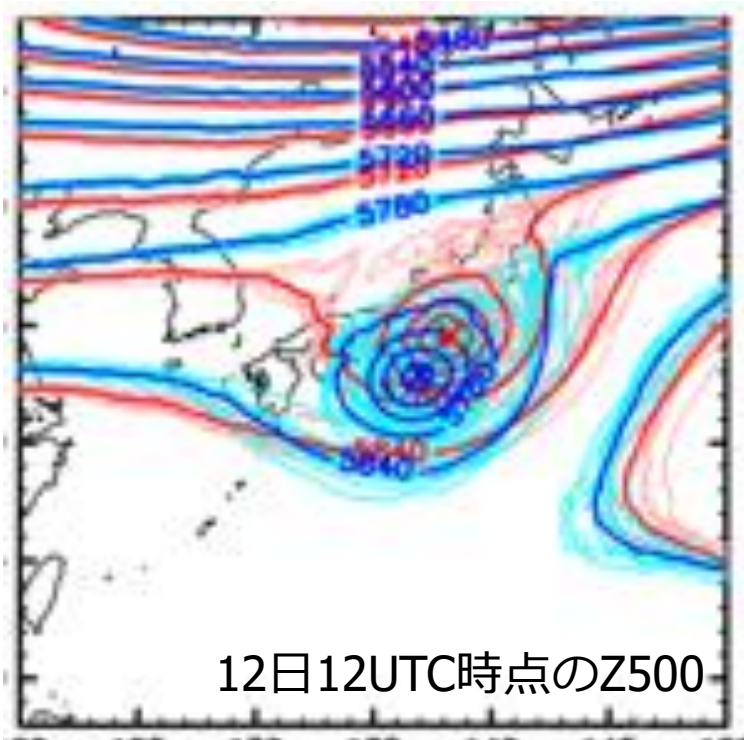
進路予測誤差
(FT48; 鉛直シアで分類)



(伊藤ら, 2018)

強く大きな台風ほど偏西風に乗りやすい

- 東日本台風(Hagibis)の発生海域では平年に比べSST高め。
- アンサンブルで標準実験(WARM)と平年値SSTのCOLD実験。
- WARM実験の台風は統計的に有意に偏西風に乗りやすく、13日00UTC時点で400kmも速く北東進。
- 偏西風帯に近づくと、鉛直シアの影響で北側で対流活動が活発⇒偏りが強いWARM実験の台風は速く北進し偏西風に乗る。

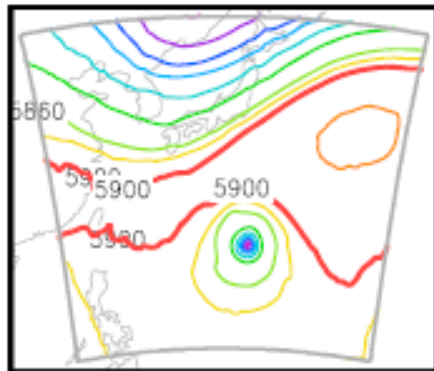


(Ito and Ichikawa, 2021)

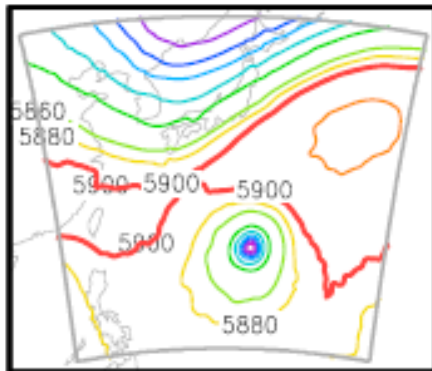
強く大きい台風は太平洋高気圧の南側の東風を割って北上する

- 太平洋高気圧の南側にある東風に流されて西進する台風については、海面水温を上げた実験では北上しやすくなる。
- 台風自身の循環が太平洋高気圧の場を変えてしまう。

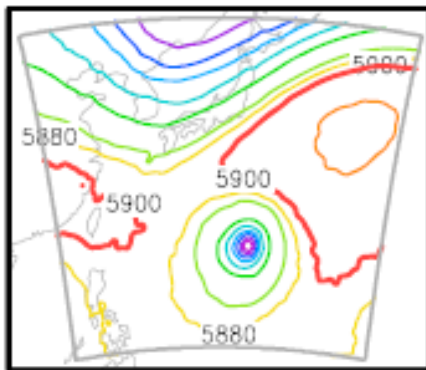
(b) Z_{500} (CTRL)



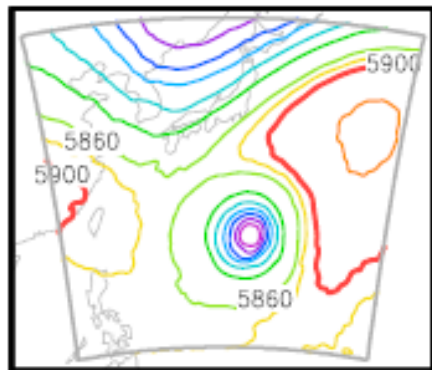
(c) Z_{500} (Eall+1)



(d) Z_{500} (Eall+2)



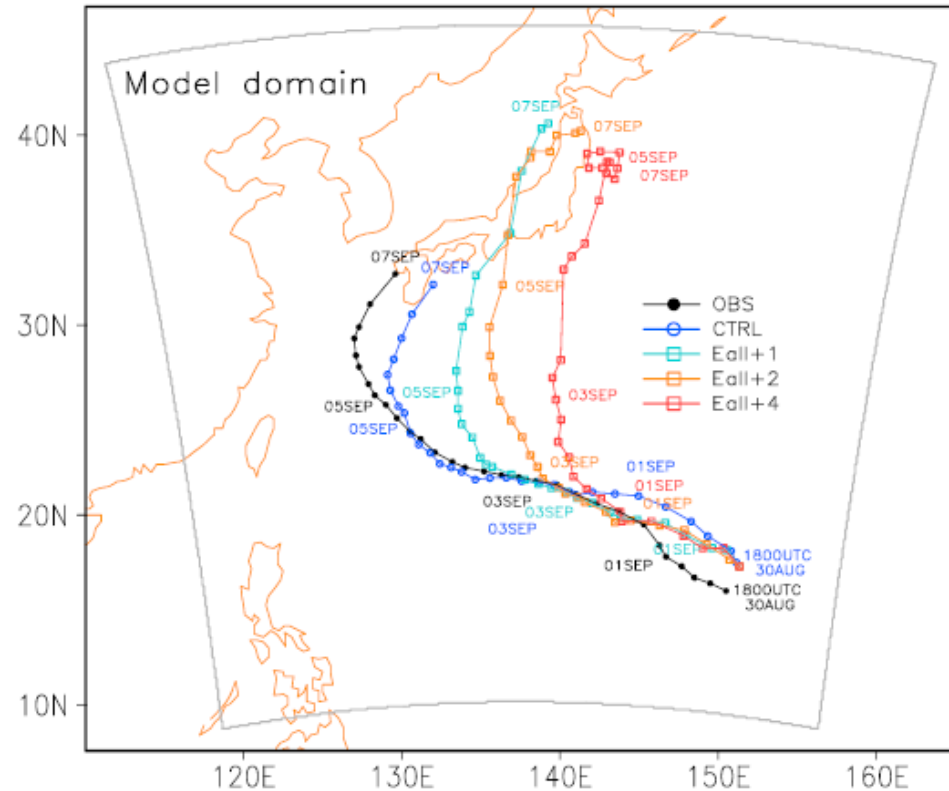
(e) Z_{500} (Eall+4)



120E 130E 140E 150E 160E

120E 130E 140E 150E 160E

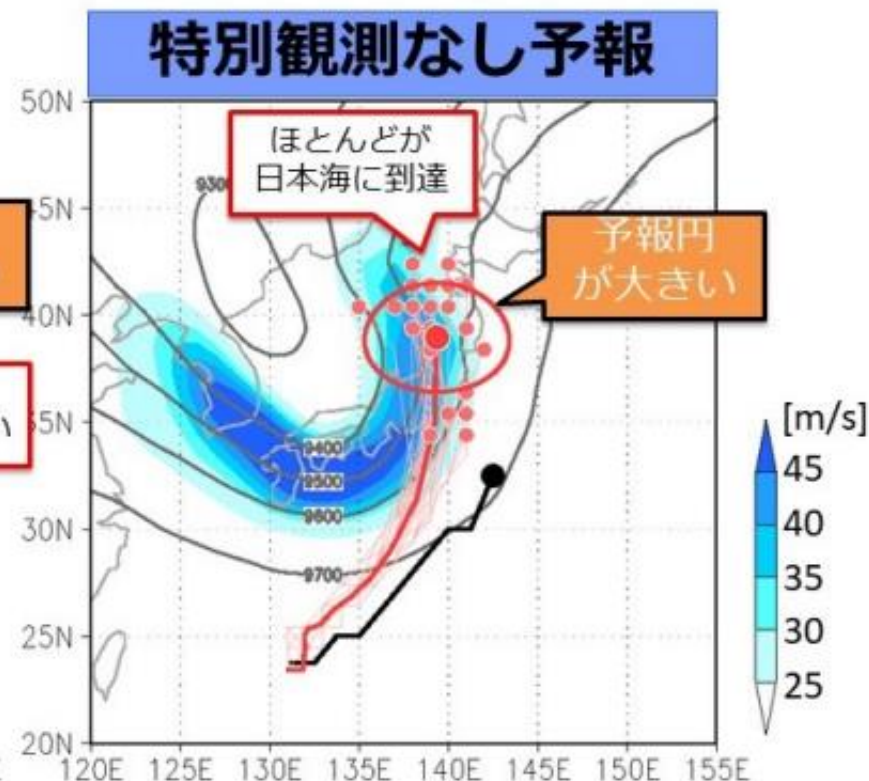
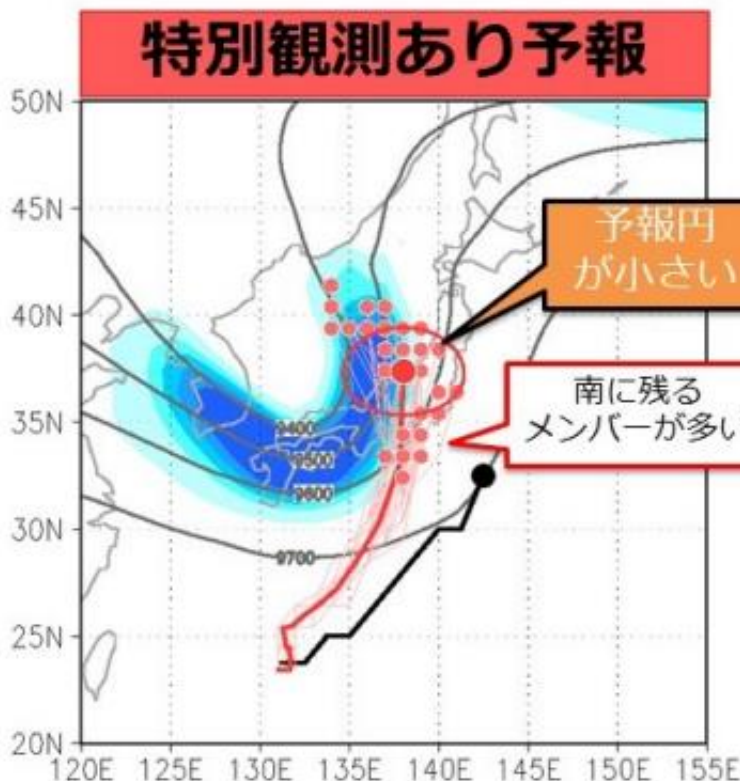
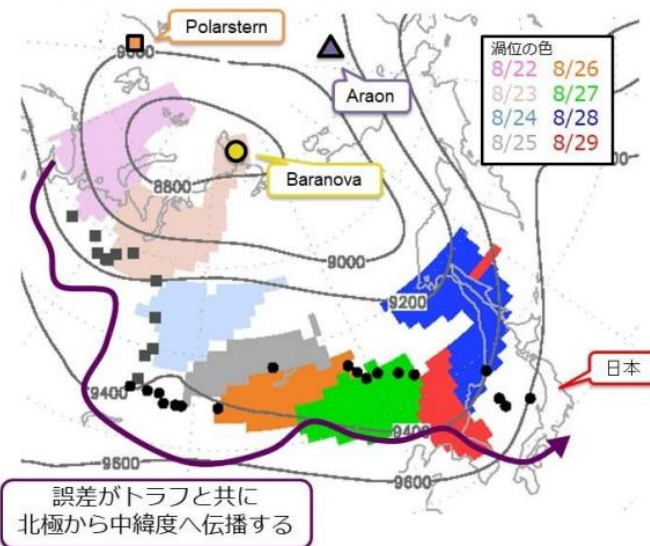
(a) Simulations in Songda (2004) case



(Sun et al. 2017)

北極圏観測の進路予測への影響

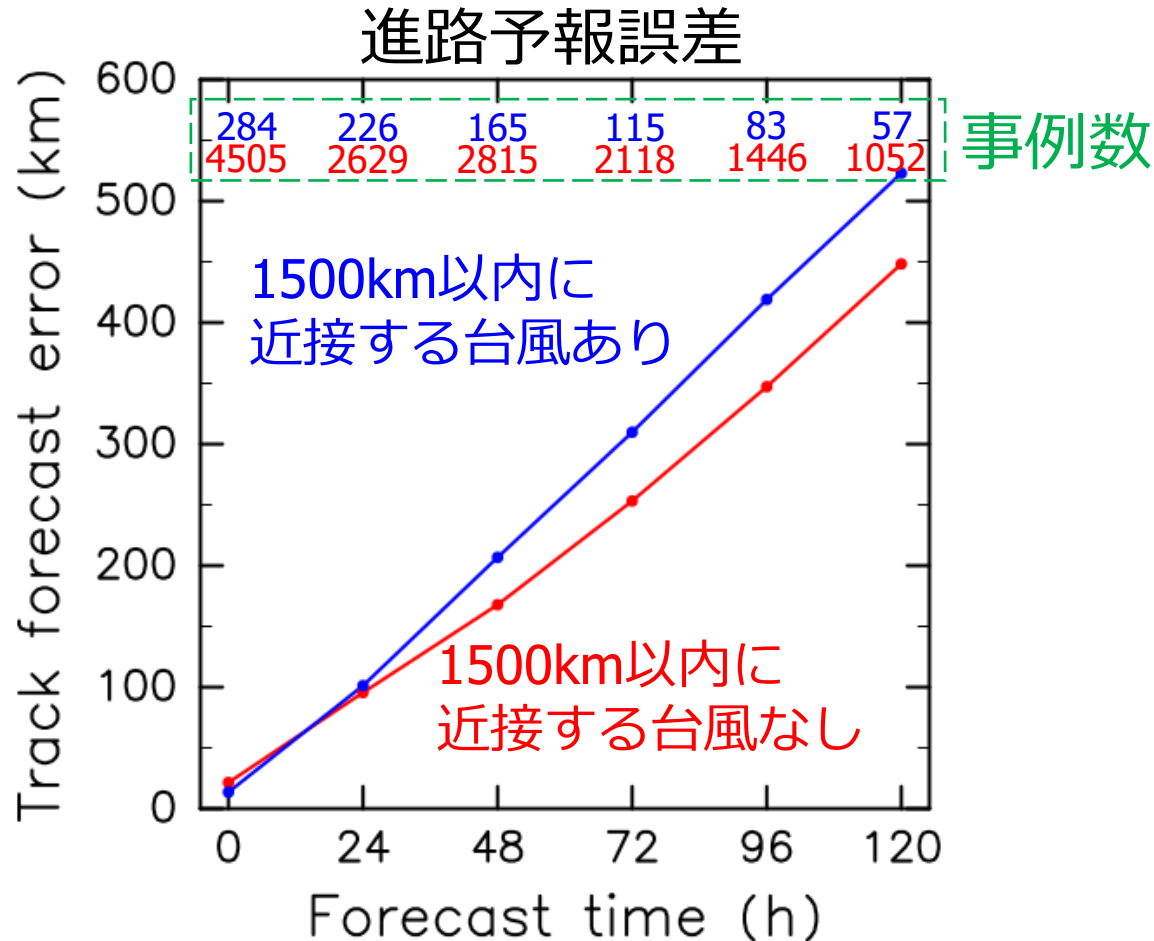
- 北西太平洋トラフの振幅や速度は北極圏に影響を受ける
- 北極圏の特別観測を加えるとアンサンブル平均で100kmの予測誤差減少。



(Sato et al., 2018)

近接台風の有無と進路発表予報誤差(2008-2017)

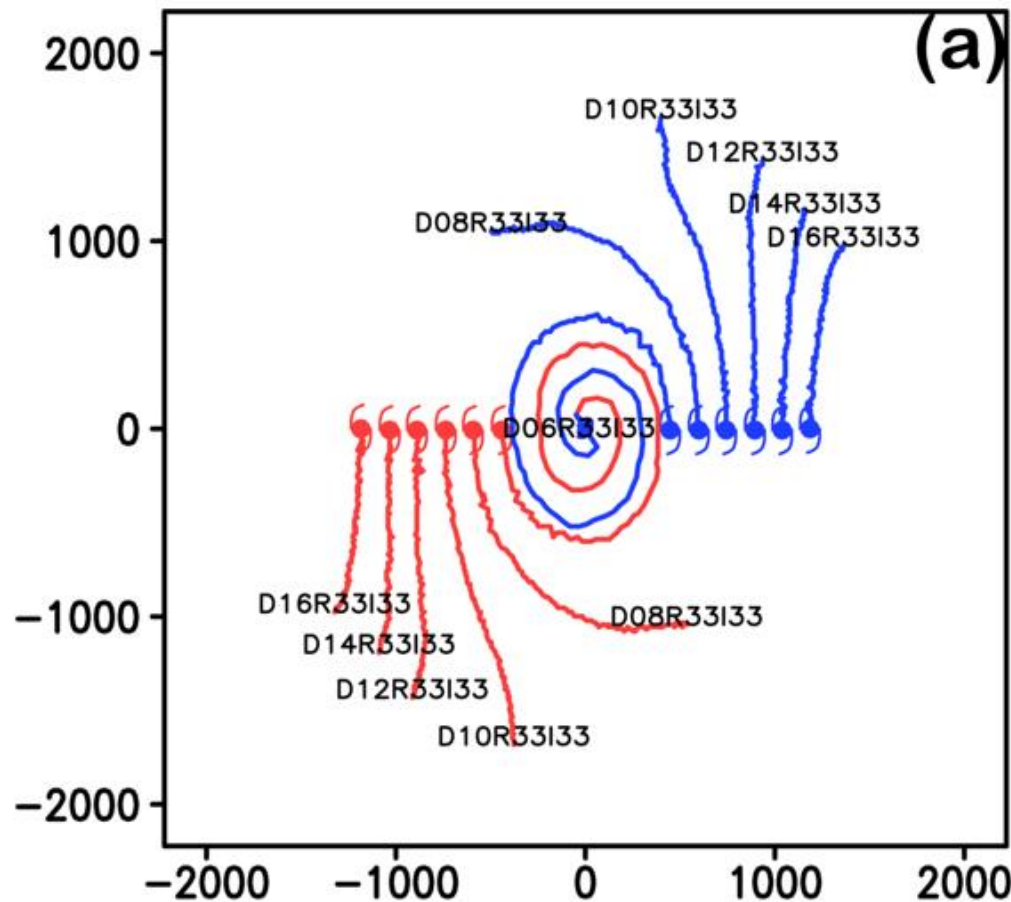
- 近接台風あり⇒進路予報誤差が20%大きい
- 「藤原効果」についてまだ理解されていないことがあるのでは？



(台風予報誤差データベース Ito (2016)に基づく)

f面における2つの台風

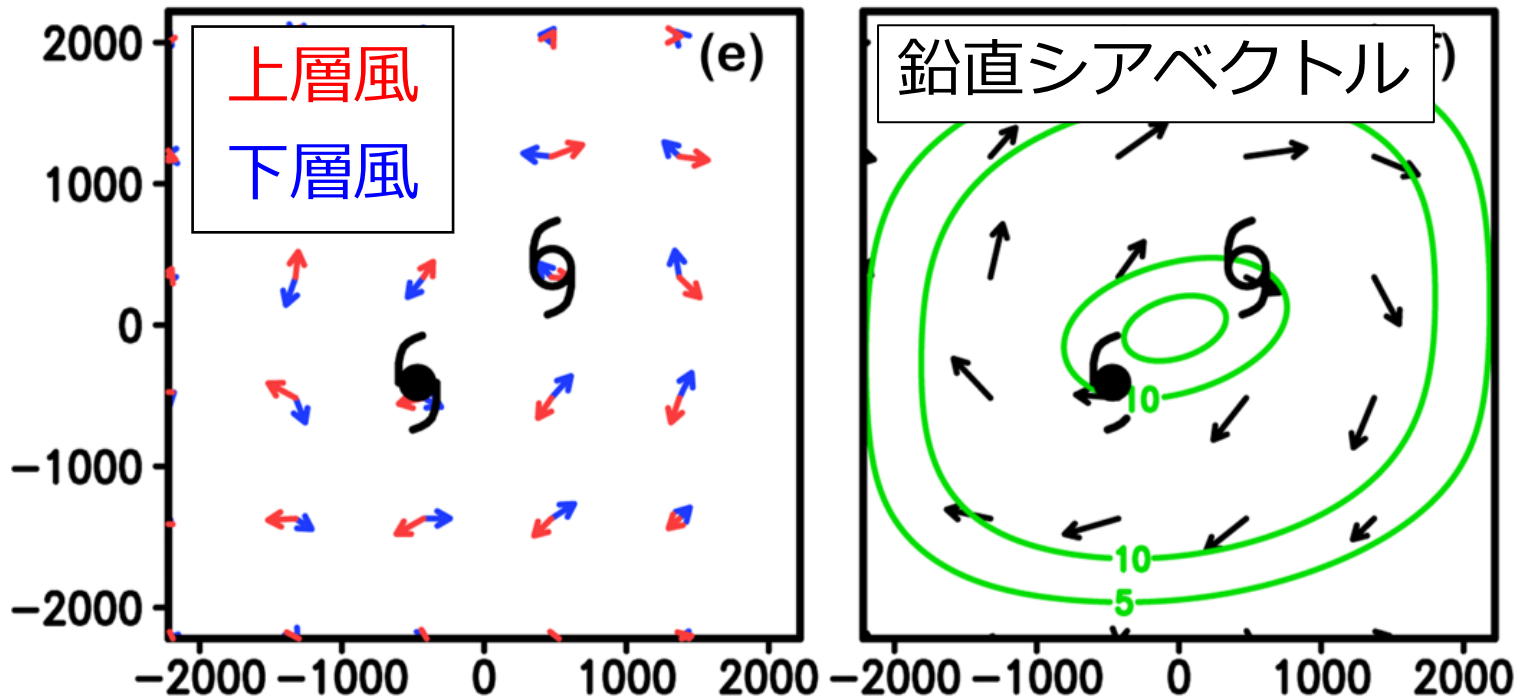
- 初期位置が近いと反時計回りの回転と接近する傾向は順圧モデルと同じだが、遠い場合には離開成分が顕著に。
- 初期位置を16度(～1500km)離れた場合でも、2つの台風が反時計回りに回転し徐々に離れていく。



(Lee et al., in revision)

3次元的な藤原効果：鉛直シアの形成

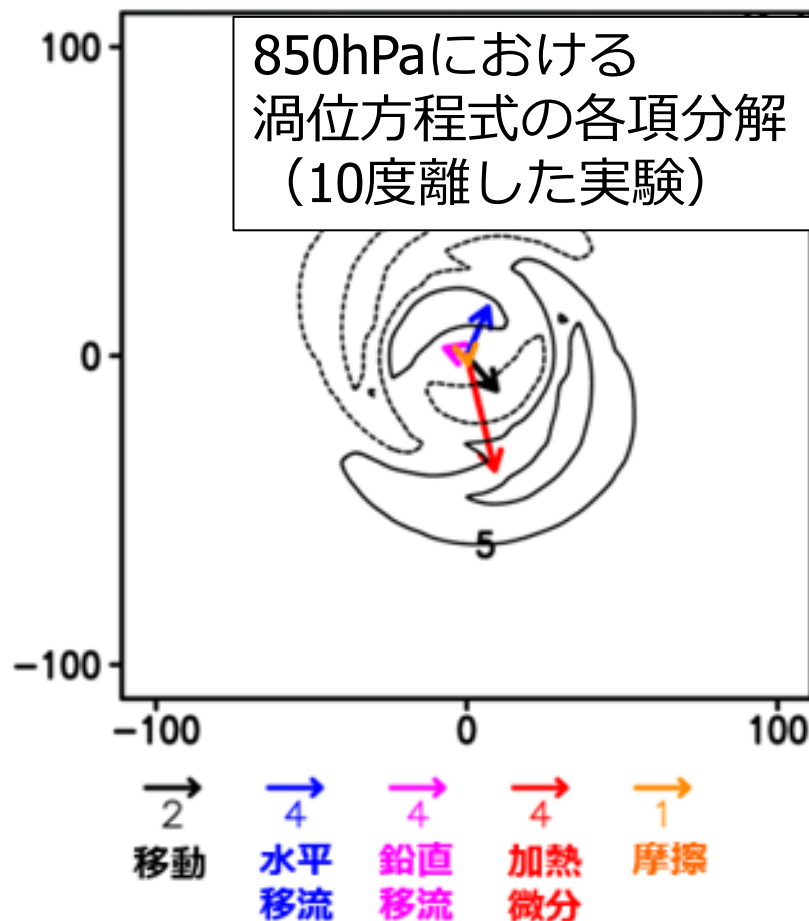
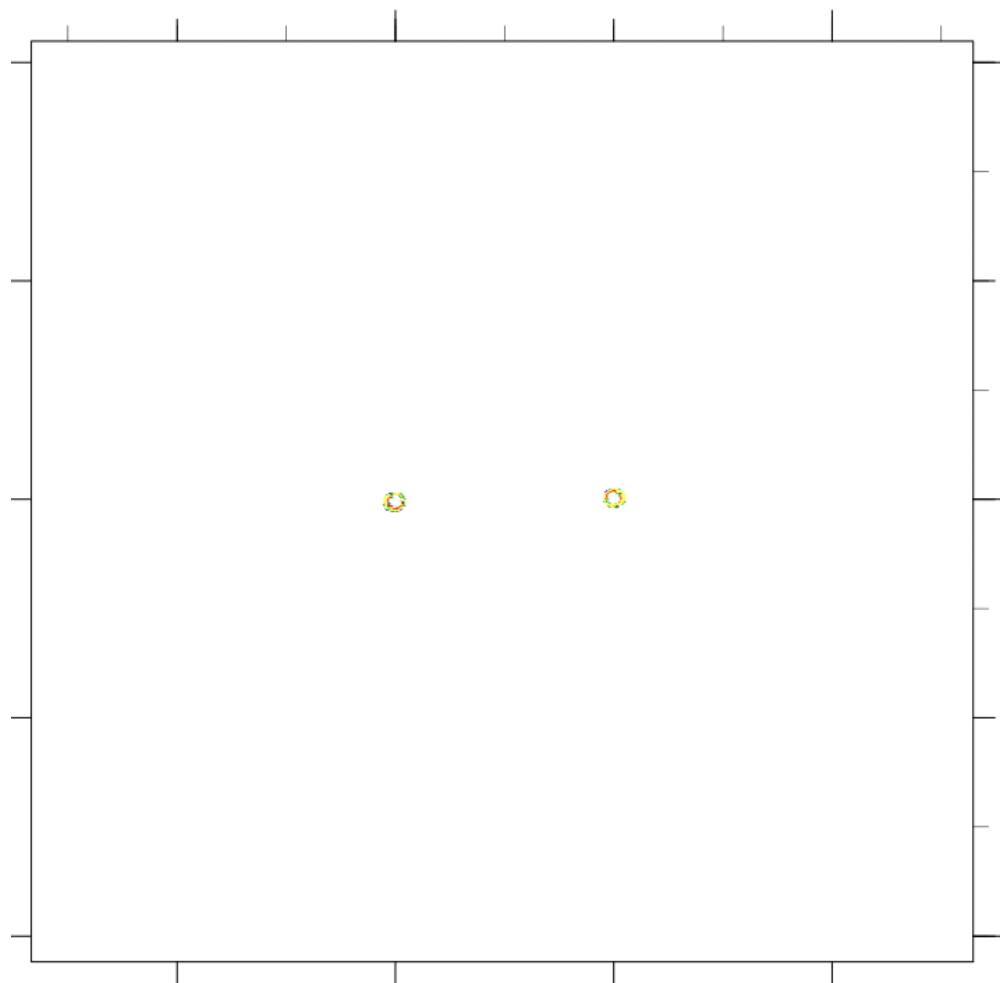
- 上層では2つの台風からの吹き出しにより数千キロスケールの高気圧性循環をなす。
- 下層では低気圧性循環
- 結果として、高気圧性の鉛直シアベクトルができる



(Lee et al., in revision)

3次元的な藤原効果：対流活動の偏り

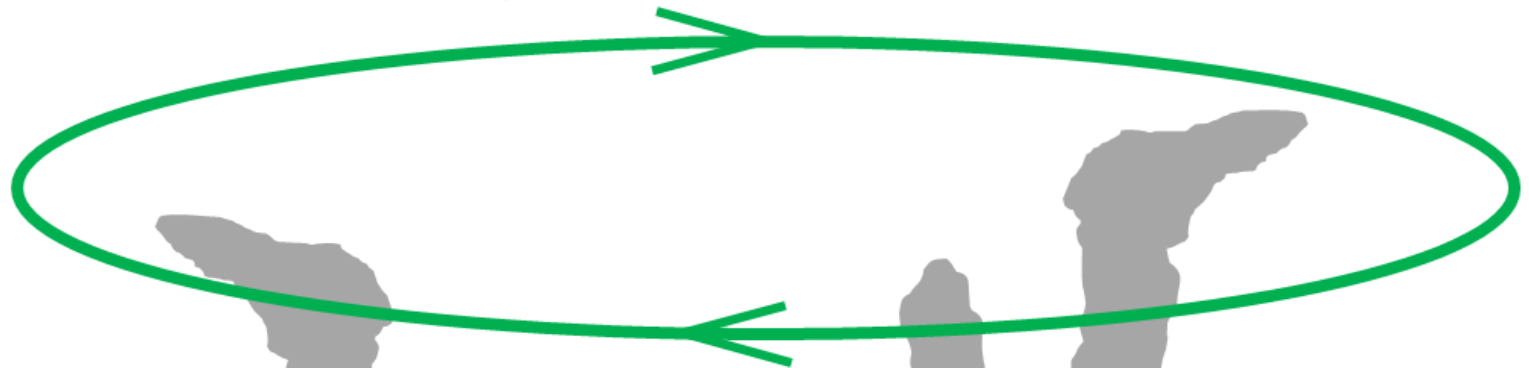
- 相手の台風から離れた側で対流活動が活発。
- Wu & Wangの方法で各項分解。850hPaでは加熱微分項が卓越



(Lee et al., in revision)

3次元的な藤原効果の模式図

(1) Upper-level anticyclonic circulation due to TC outflow

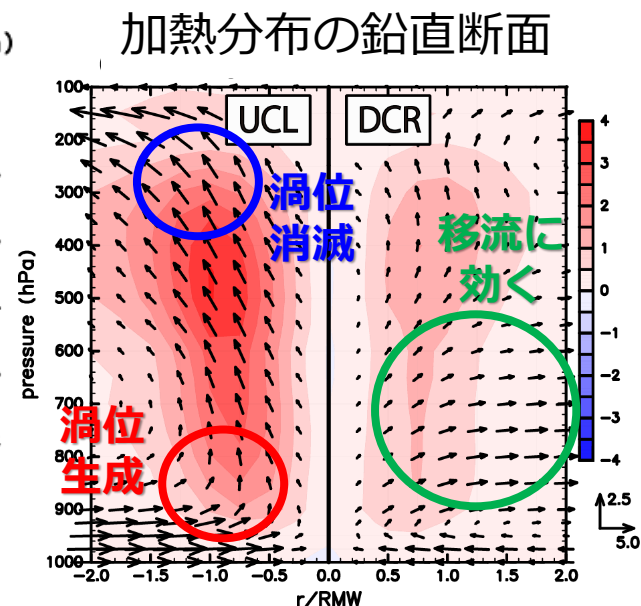
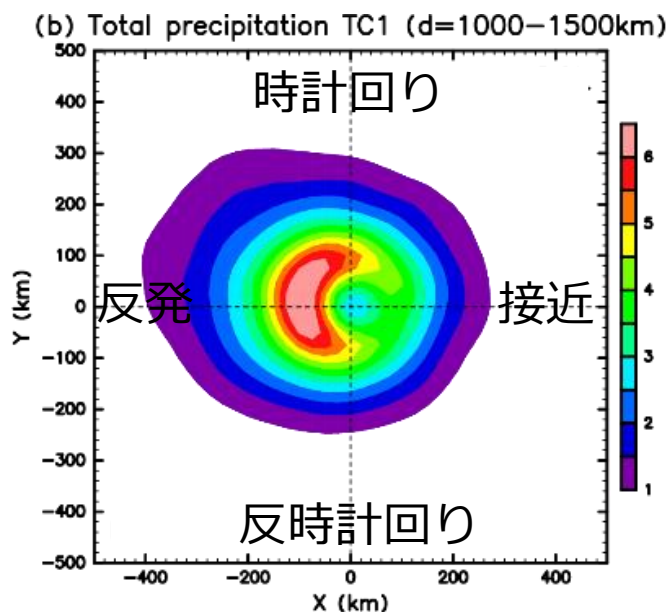
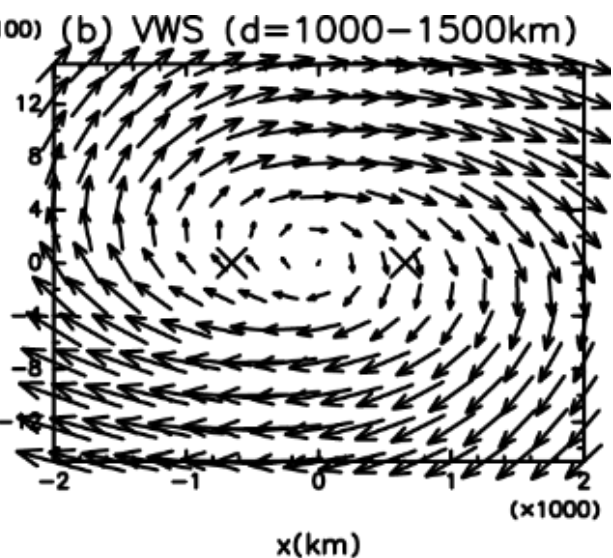


(2) Shear-induced asymmetric heating

(3) Modifying TC track

北西太平洋における3次元的な藤原効果

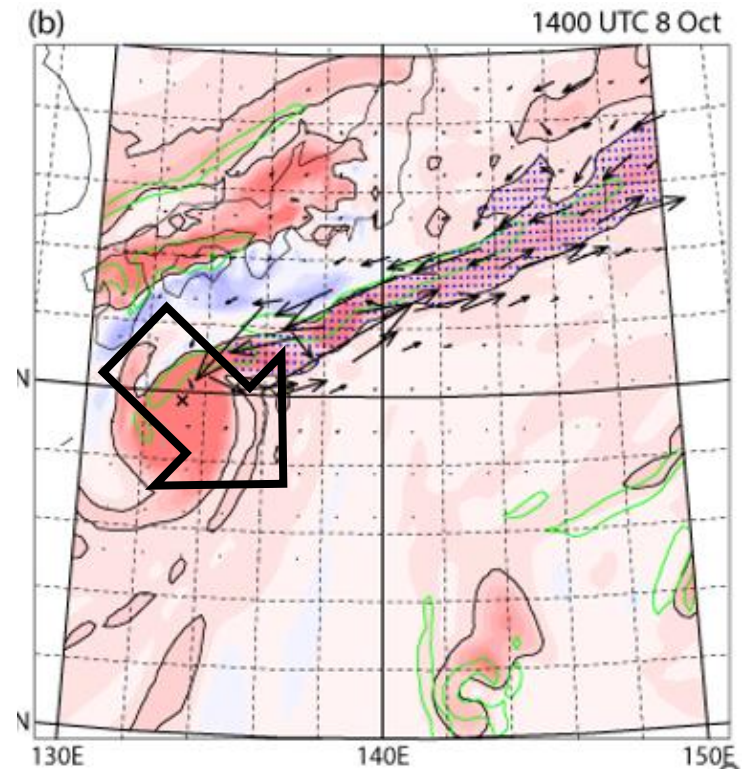
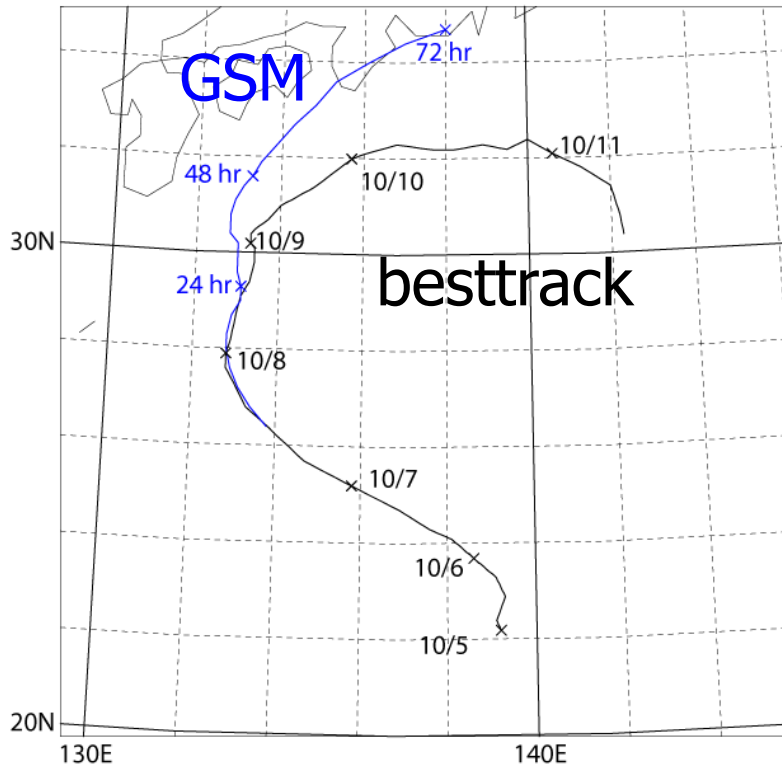
- ERA5を用いて、現実の藤原効果について確認。
 - 1000-1500km離れた台風：接近も反発も無く、ゆっくりとした反時計回り。内訳をみると水平移流と加熱微分項が打ち消し合っている。
 - 鉛直シアは高気圧性（うち半分が台風由来と推定される）
 - モデル結果と整合的に、相手から離れた側で対流が活発
 - 加熱の偏りに起因する加熱微分項は水平移流項の約半分
 - 対流の深さの非一様性も、水平移流に寄与している



(Ito et al., in revision)

台風と前線の相互作用

- 本州に接近する台風には北東側に停滞前線が存在する場合があります。前線は下層に強い渦度を伴い、台風を動かし得る。
- ERA5では、台風を南東側3日間で50km程度動かす風に。
- 系統的に調べてはいないが、このパターンが現れると、GSMによる進路予測は北西にずれ、前線に伴う下層の渦をより強く再現しているMSMの方が良い傾向を示している気がする。

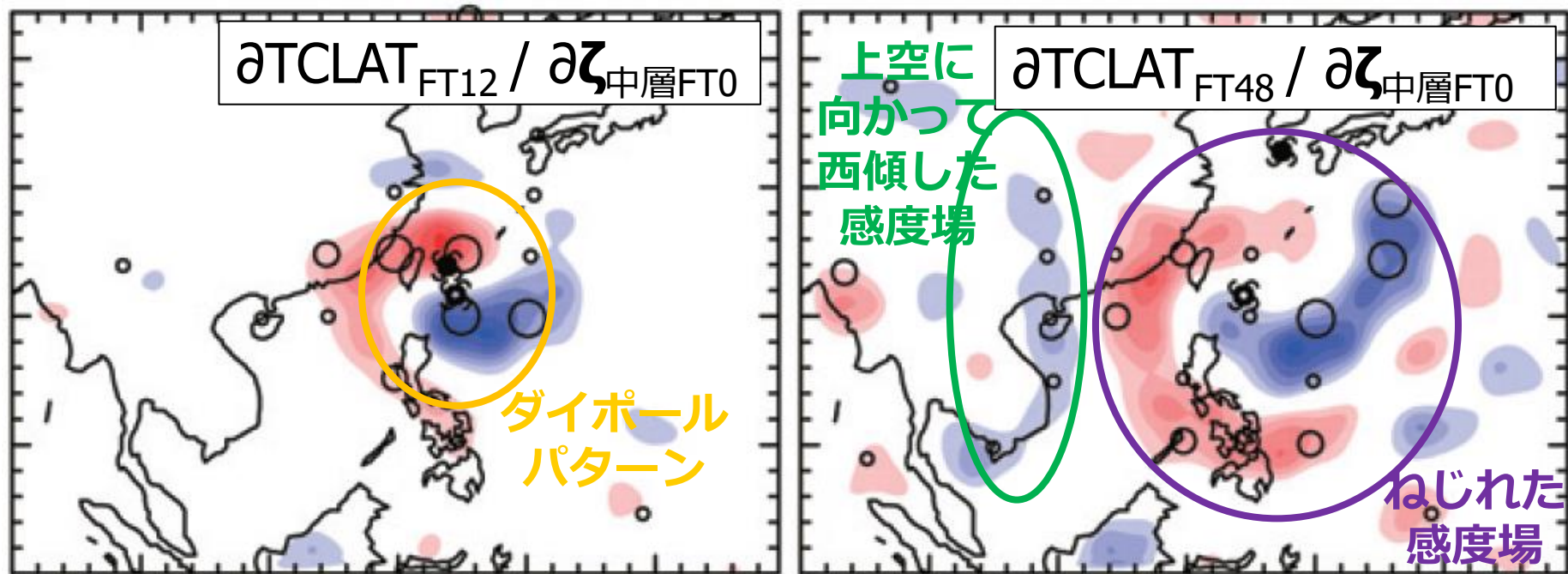


(Hirano et al., in prep.)

予測可能性に関する話題

台風進路の感度解析

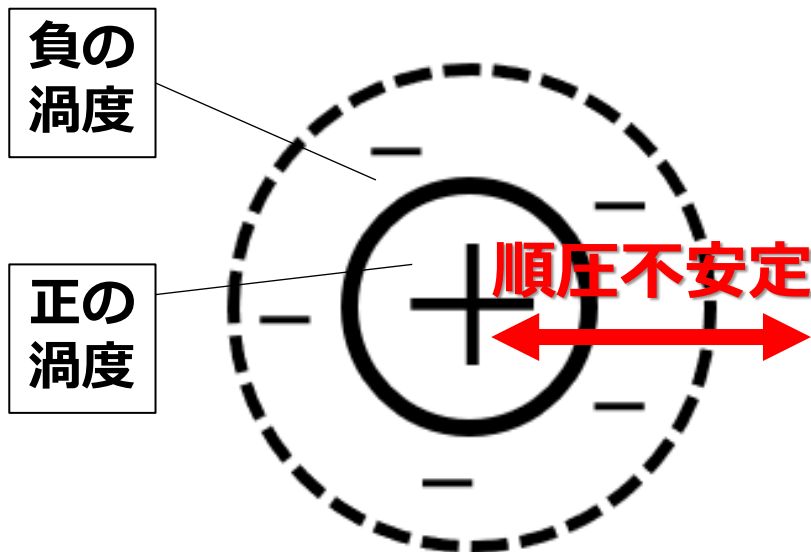
- 感度解析は台風進路に影響する要因の特定に使える。
- 初期渦度場に対する感度(評価関数=予報の台風緯度)を調べた。
 - FT12では感度場のダイポールパターン(位置ずれ)
 - FT48ではねじれた感度場、西には西傾した渦度場(トラフ)
- 評価関数を予報経度あるいは予報緯度の誤差に対応する台風中心付近の渦度場の誤差とすれば、原因がたどれる。



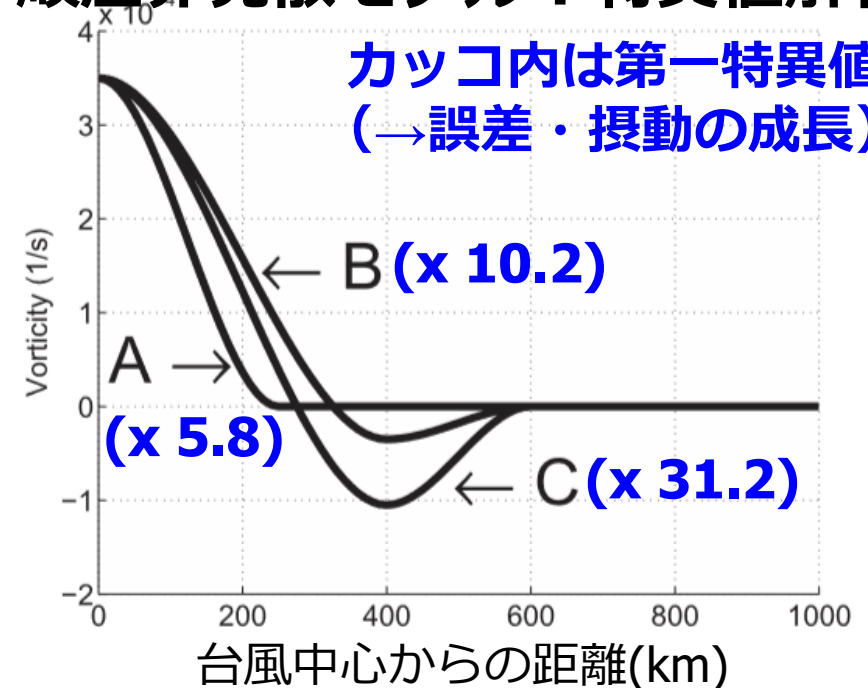
感度場の解釈

- 台風は上昇流の外側に下降流を伴う
 - 正の渦度の外側には負の渦度が存在する
 - 順圧不安定の必要条件が満たされる
 - 外側の負の渦度のある渦をモデル上で用意しないと、誤差成長が正しく見積もられない。

台風の渦度分布の模式図



順圧非発散モデル：特異値解析

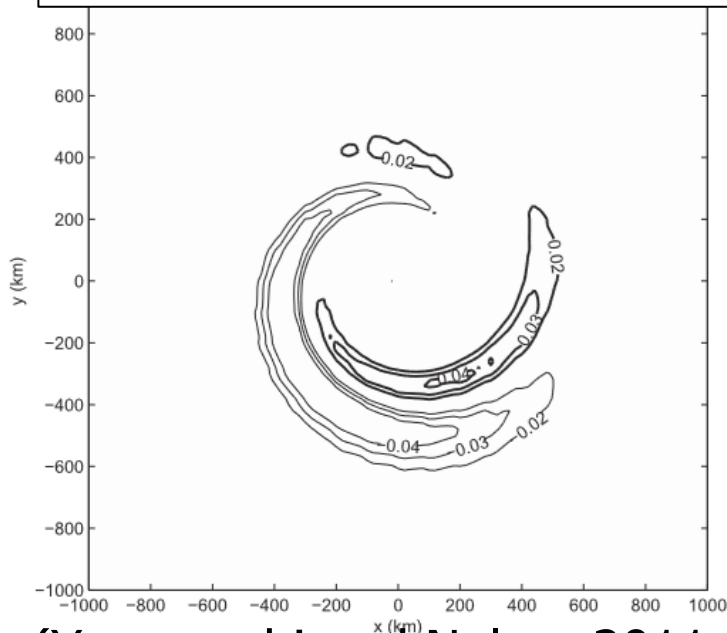


(Yamaguchi and Nolan, 2011)

台風進路の渦度場に対する感度

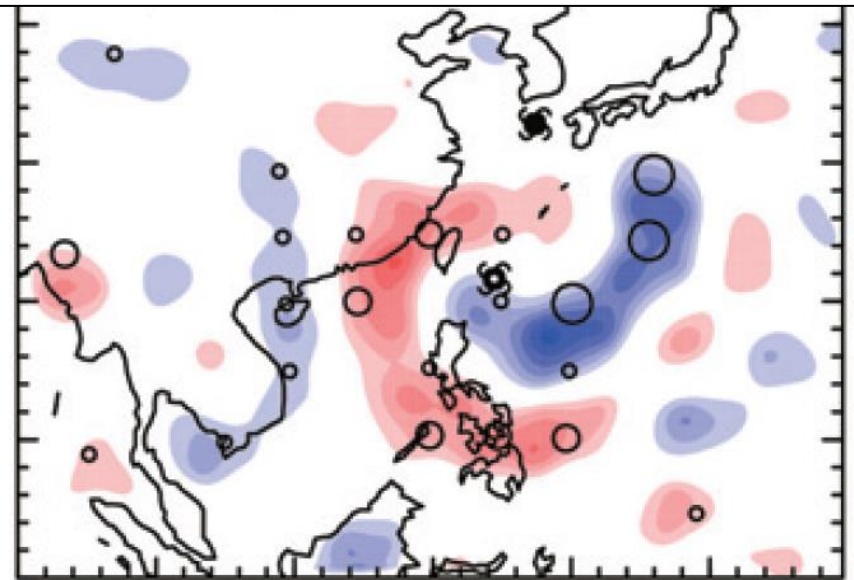
- 理想化実験で外側の負の渦度領域を想定した場合の感度場は、現実的な感度解析の結果に類似していた。
- 結果が示唆するのは、外側の負の渦度を丁寧に見る必要があり。その周囲のねじれた高感度場の領域での再現性が予測精度向上に直結するということである。

Cの渦に関する特異ベクトル
FT48の渦の変位に対応



(Yamaguchi and Nolan, 2011, JAS)

T0613の予報緯度(FT48)の初期の中層
渦度場に対する感度(WRFでの感度解析)

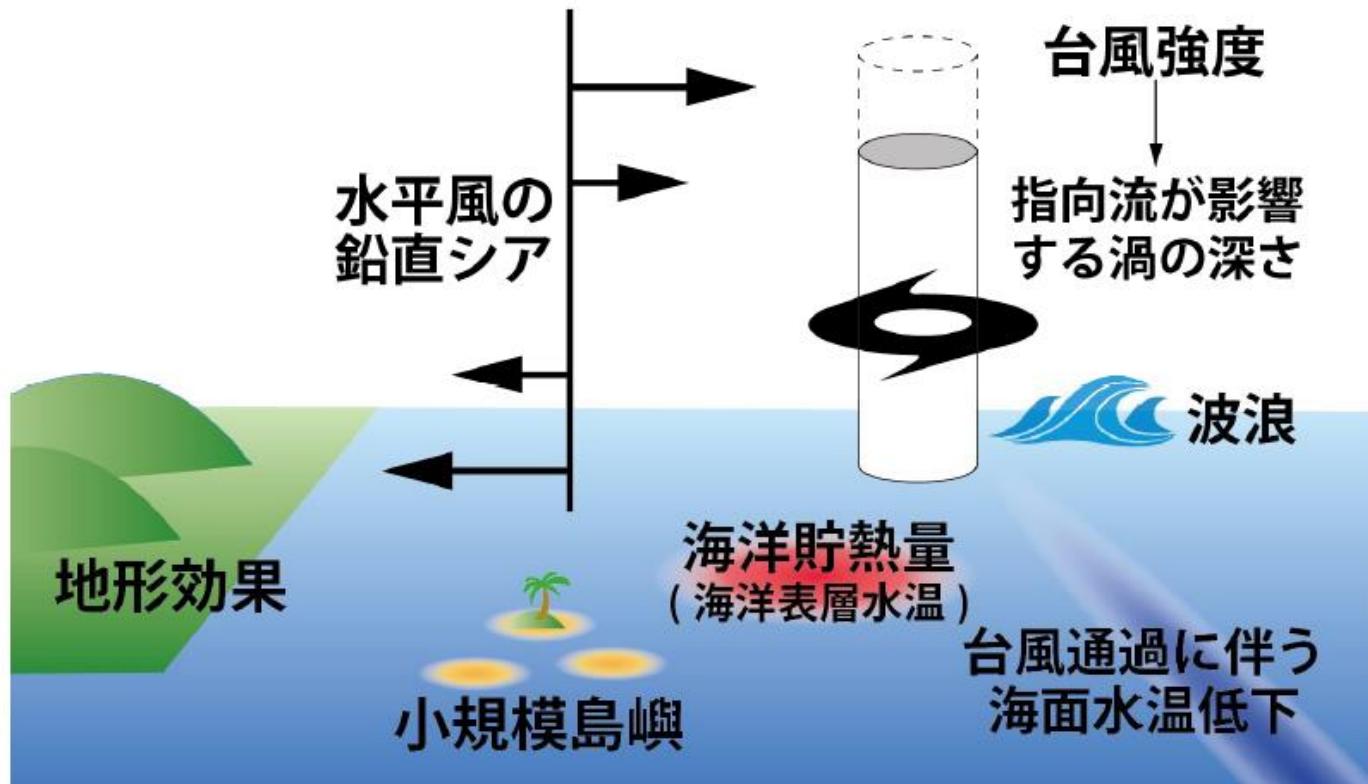


(Ito and Wu, 2013, JAS)

進路予測改善に向けた アイデア

台風進路予測ガイダンスの開発(案)

- 進路に影響を与えると考えられるが、現在のGSMに含まれない、あるいは、表現が不完全な要素がある。
- これらの諸要素に対して進路予測誤差を回帰させ、補正するガイダンスを作れば進路予測を出せるのではないか？



GSM予測 + 進路予測バイアス回帰式 → もっともらしい進路予測

積雲スキームの修正について

- クロージャー変更に関する氏家さんのコメント
 - 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
- 「定式化・離散化」「不確実性の要因」「定式化レベルでのerror compensation」などを自身・他の開発者を交えて議論し、パラメータチューニングで性能を引き出せるように。
- このうち、パラメータチューニングに関しては、グリーン関数法によるパラメータ最適化をおすすめ。
 - グリーン関数法：観測を良く説明する n 個のパラメータの組を $(n+1)$ 回の前方計算と簡単な統計処理で実現する方法。(Menemenlis, 2005)
 - 自動で数十個の最適なパラメータの組み合わせを探索。

私の考え：まとめに代えて

- 初期時刻の位置ずれ低減は短時間予報に非常に重要。系統的な誤差特性の調査や台風中心の決定手法の高度化、解析場の台風中心が少なくとも速報解析から大きく外れないようなデータ同化手法の導入が望ましい。
- 「指向流」は便利であり重要な概念だが、その意味するところと適用限界を考えて使うのがよいように思う。
- 渦位方程式、渦度方程式、PVインバージョン、感度解析といった道具は現象や誤差のふるまいの理解にとって重要である。
- あるモデルの結果が良く、あるモデルの結果が悪かった、というときには、両者を丁寧に比較することが必要ではないか。
- 古典的に台風は「大規模場に流される小さな渦」とされているが、そうとは限らない。強く大きな台風が総観スケールの変えることもあるし、内部コア領域の対流活動の偏りの影響も無視できない。GSMで鉛直シアベクトルの下流右側に対流活動の活発域が現れるようにみえるのは対応の余地があるのでは。
- 台風進路にとって積雲スキームは非常に重要と思われる。絶え間ない研究のもとに、改善が進んでいくことを期待しています。