

台風の予測精度向上に資する 先端的研究の現状

伊藤耕介（琉球大学）

謝辞：北西太平洋全域台風予測実験に当たっては、気象研究所の沢田雅洋博士と山口宗彦博士の協力を得ました。本研究は文部科学省HPCI戦略プログラム分野3「超高精度メソスケール気象予測の実証」、およびフラッグシップ2020プロジェクト（ポスト「京」の開発）「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題」における重点課題1「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境予測の高度化」の支援を受け、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです。また、科研費18H01283, 17H01703, 16H06311からも支援を受けております。

地球上の熱帯低気圧の分布 (過去150年分)

(D'Asaro et al., 2011)

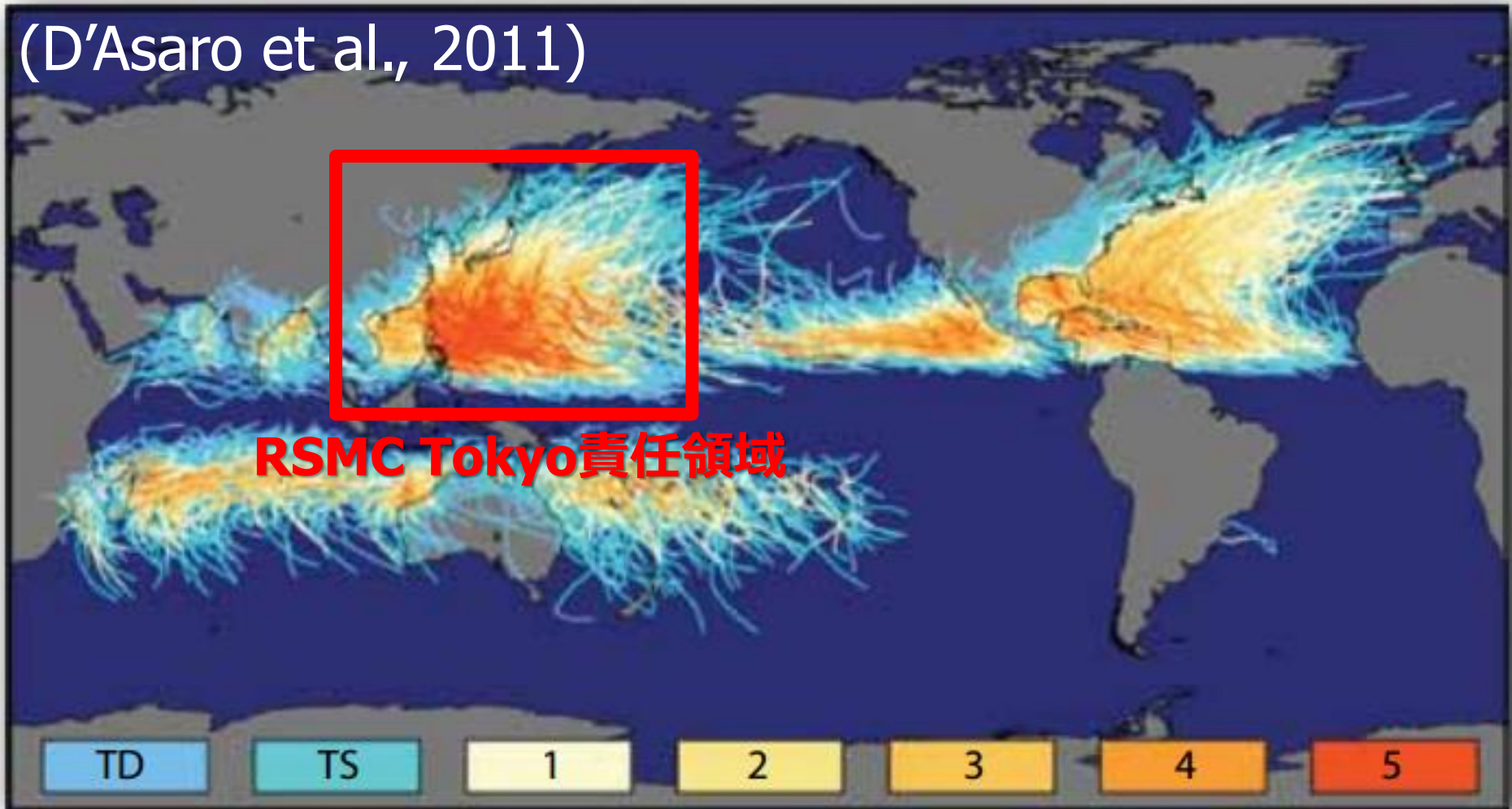


Figure 1. Worldwide tropical cyclone tracks through 2006 from the National Hurricane Center and the Joint Typhoon Warning Center, spanning nearly 150 years. Each track is colored by storm intensity using the Saffir-Simpson storm categories (Tropical Depression, Tropical Storm, and Tropical Cyclone categories 1 [wind $33\text{--}42\text{ m s}^{-1}$] to 5 [wind $> 70\text{ m s}^{-1}$]). The tracks show that the regions of most frequent and intense storms are in the western North Pacific. Image courtesy of NASA Earth Observatory

豪雨



豪雨により橋が崩落
2016年台風9号@北海道・日高

暴風



最大瞬間風速=81.1m/s
2015年台風21号@与那国島

高潮



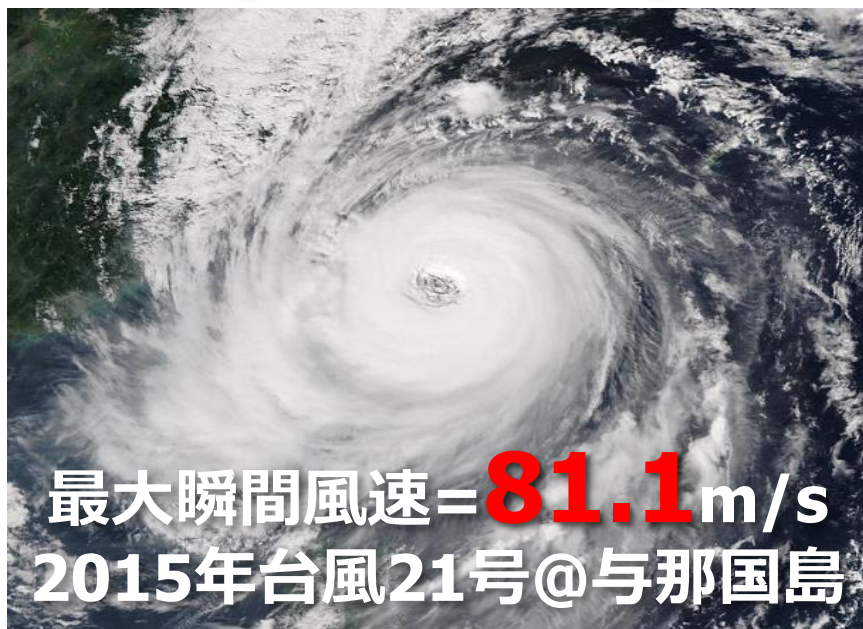
高潮による甚大な災害
2013年台風30号@フィリピン

高波



岸壁に押し寄せる高波
2015年台風10号@石巻

危機的な自然現象 (ハザード)



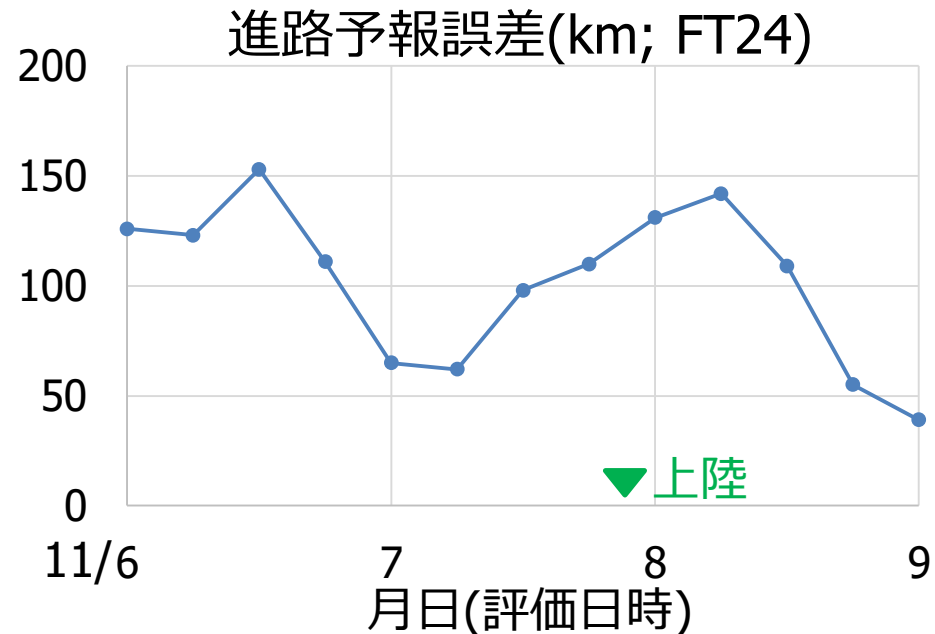
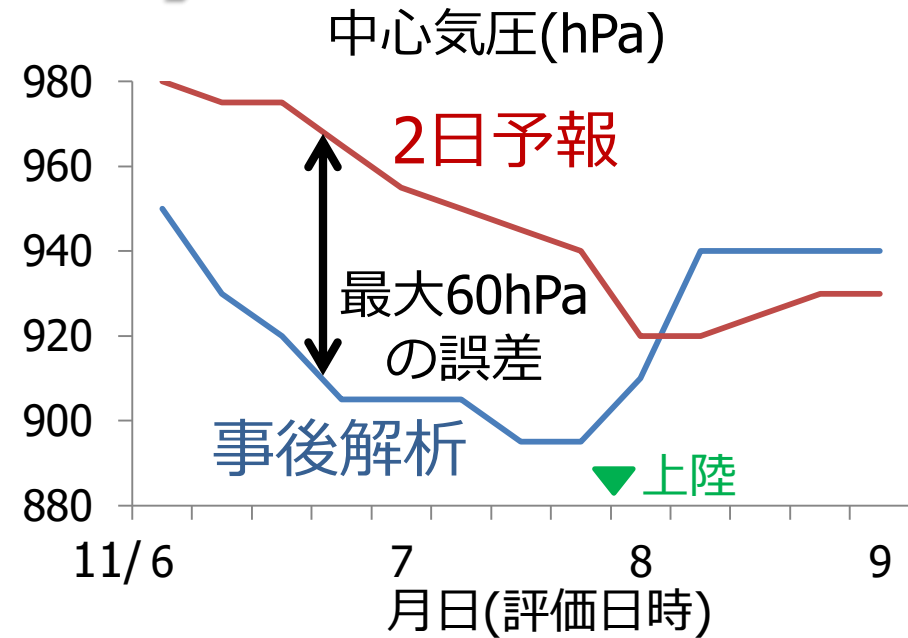
災害 (ディザスター)



強い台風が接近すると聞き
役場の人間が接近前夜から
必死に避難を呼び掛けた

台風Haiyan(T1330)の発表予報

- 強度を弱めに見積もっていた。
- 進路予報誤差は100km前後
(避難・高潮予報のためには半分以上にしたい)



台風とは何か？（伊藤の考え）

- 非断熱加熱に駆動され、内部コア領域で力学と熱力学が協調的に役割を果たすシステム。
- 台風は「**三二気象学**」である
 - 研究テーマのスペクトルがとにかく広い。
進路・強度・発生・降水・構造・サイズ、
力学＋熱力学＋放射、乱流～10年規模変動、
大気海洋波浪陸面相互作用、
理論・観測・数値実験・予測・防災
 - 地球規模の大気場と同様に、台風の中の構造として「傾圧性」や「ロスビー波」が存在している。

独力で全体像をつかむのは難しい。
連携と情報共有が大変重要である。

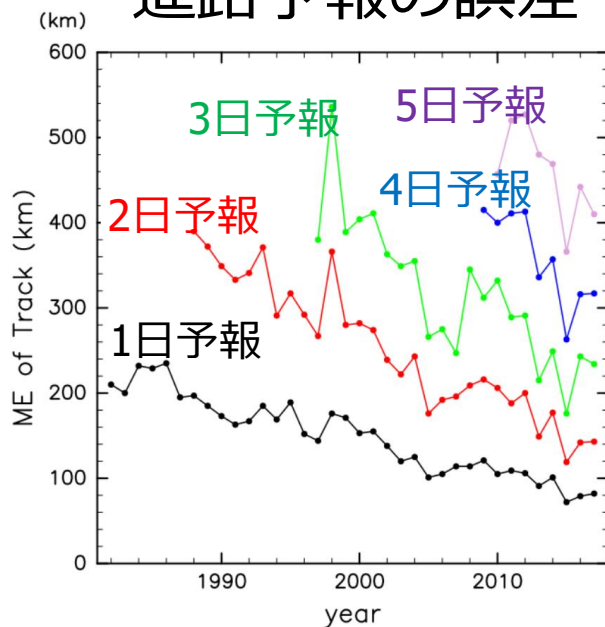
有用な情報源

- 日本気象学会台風研究連絡会
 - 毎年、台風セミナーでLeading scientistを招待し、長時間講演(6時間の場合が多い)を依頼
 - 公開可能な全ての資料 & 動画をHPで公開
 - 例 : Vijay Tallapragada氏講演(NCEP; 2016/1)
 - Improved global tropical cyclone forecasts from NOAA: Lessons learned and path forward
 - Global modeling plans at NCEP
- AMS conference on Hurricanes and tropical meteorology (通称ハリケーンカンファレンス)
 - 隔年で開催。800件以上の研究発表
 - 多くの発表が音声付プレゼンで公開されている
 - 必要なテーマの最先端の知識が容易に入手可能

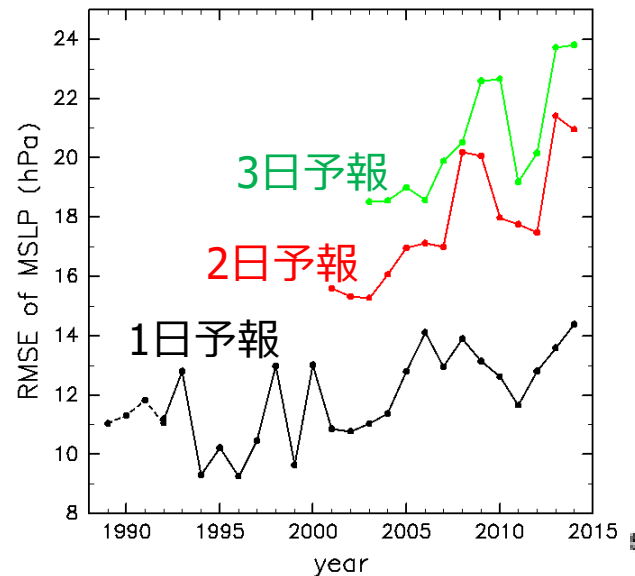
RSMC Tokyoの予報精度(2014年まで)

- 進路予報：過去30年で誤差は半減した
→誤差は100km以下(FT24)
→避難につながる情報、まだ大外しも。
- 強度予報：予報誤差は近年増加傾向だった
→急発達する台風が増えているためか？

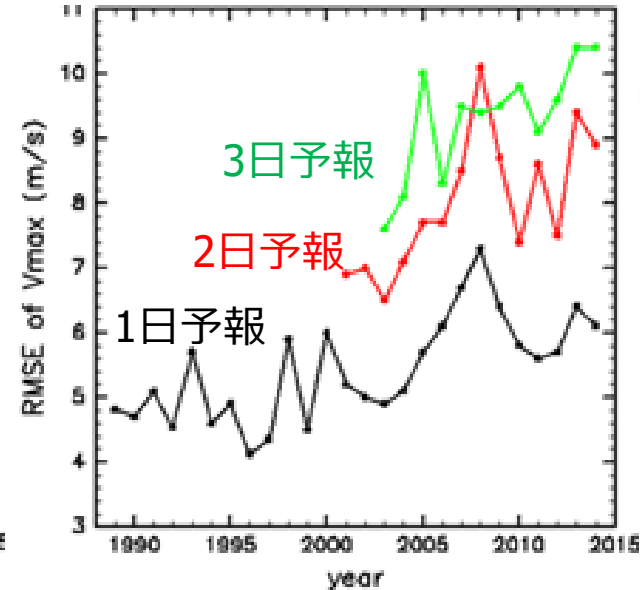
進路予報の誤差



中心気圧予報の誤差



最大風速予報の誤差



(Ito, 2016, SOLA)

原則

1) 良いものを作ろう
という意識

2) 良くなるべくして
良くなるように作る

3) 「良くなるはず」が
期待外れなら理由を考える

台風進路と強度

- **進路：指向流に流される**

- 強い台風ほど中～上層を指向流と感じやすくなる
- 鉛直シアが強い場合、対流の偏りが進路に影響
- 誤差成長には外側の負の渦度領域が関わる可能性
- 移動速度の遅さが、顕著豪雨をもたらす

海洋表層水温(ざっくり言って0-100m平均水温)

- **強度：~~海面水温~~が高いときに強くなる**

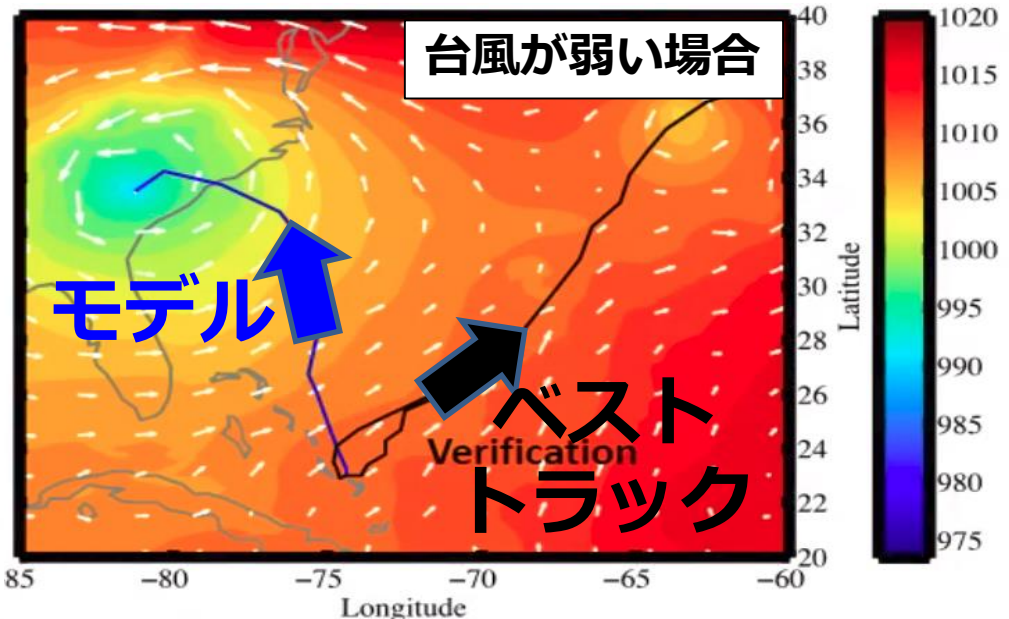
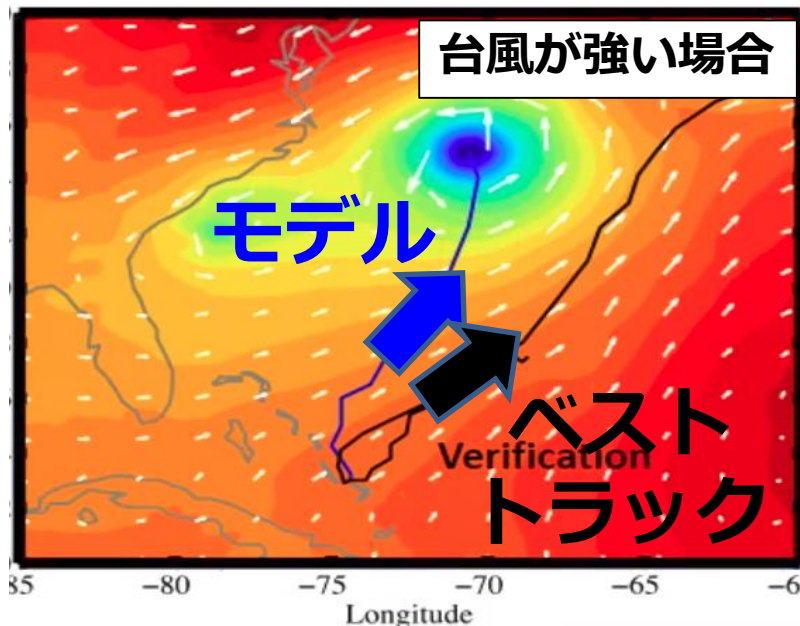
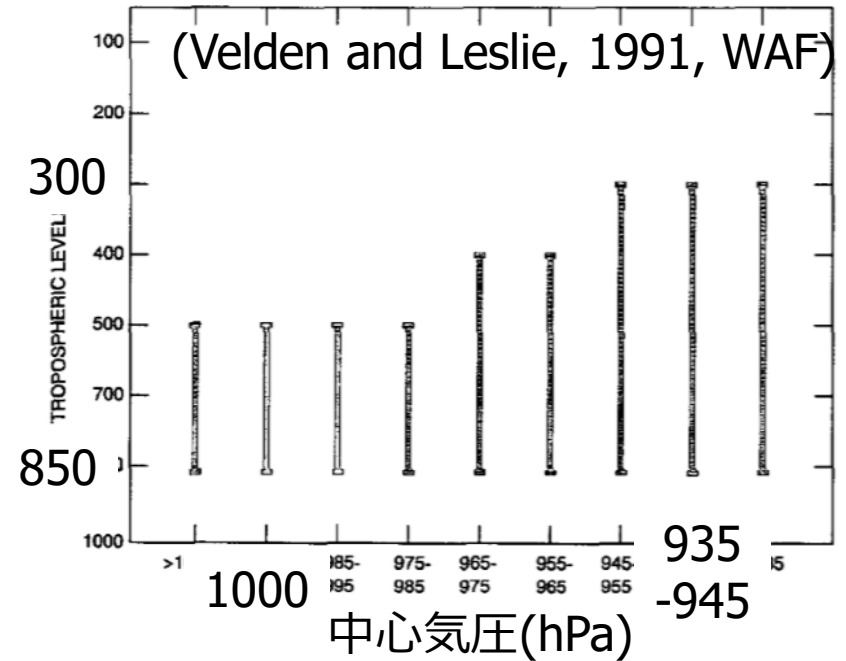
- WISHE理論に基づくMPIやOC_PIがよい指標
- 海洋表層水温が高く、鉛直シアが弱く、対流圏上層が冷たい、CAPEが大きいときに強くなる
- 解析の不確実性が大きく、予測精度評価にも影響

台風の進路

指向流とは？

- 深い(強い)台風ほど中層から上層の風を感じやすい。
- ハリケーンJoaquinの強さを弱めると上層風の影響が弱まり、予測が大きく外れた。

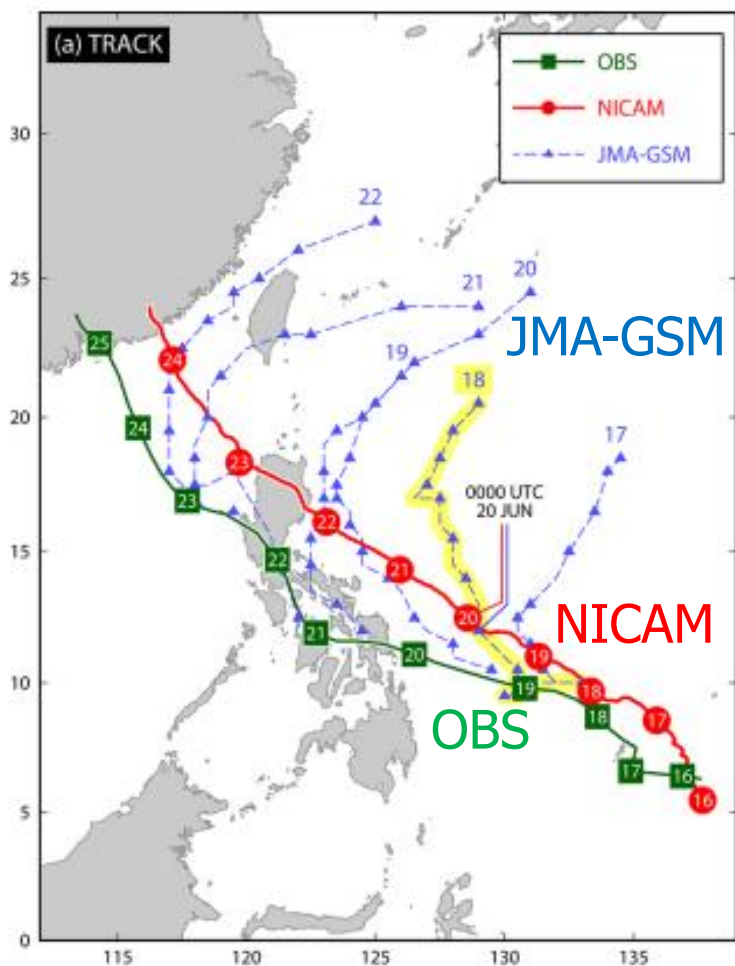
風が指向流となる気圧面



(Doyle et al. 2018, 33rd Hurricane Conference)

水平風の鉛直シア→非断熱加熱の偏在→台風進路

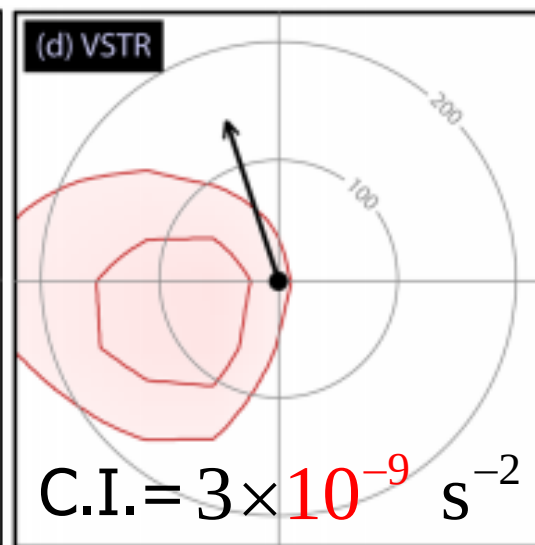
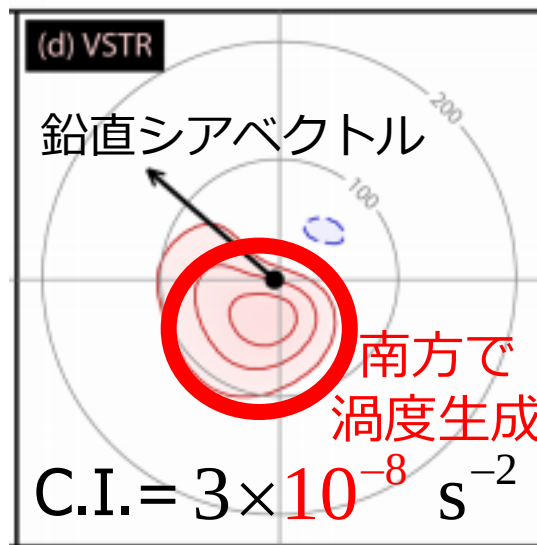
- 水平風の鉛直シアの前方～左側で非断熱加熱が偏在
- GSMに見られた北進バイアスがNICAMでは消えた
- NICAMの場合、台風の南側で顕著な渦度生成



渦度方程式の伸び縮み項
(～非断熱加熱による渦の生成)

NICAM

JMA-GSM

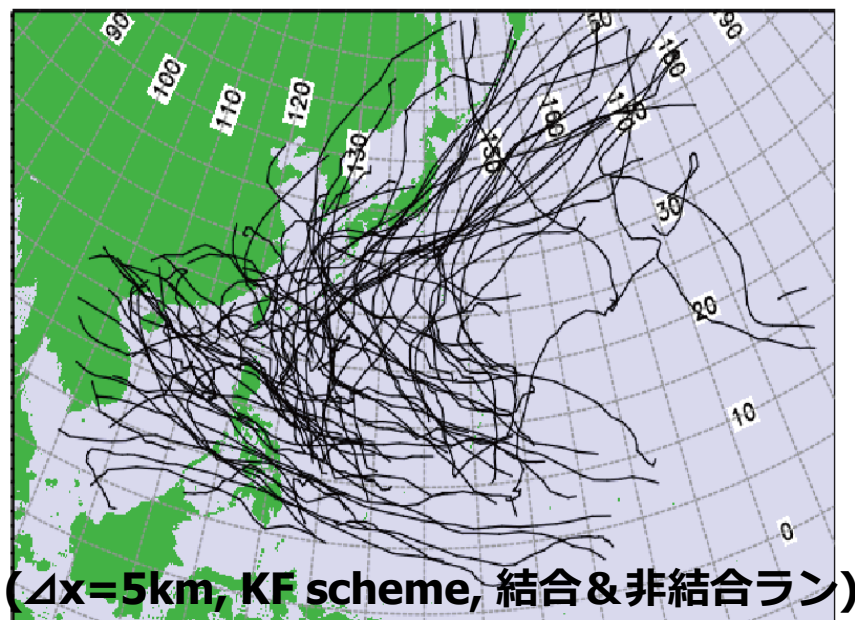


(Yamada et al., 2016, SOLA)

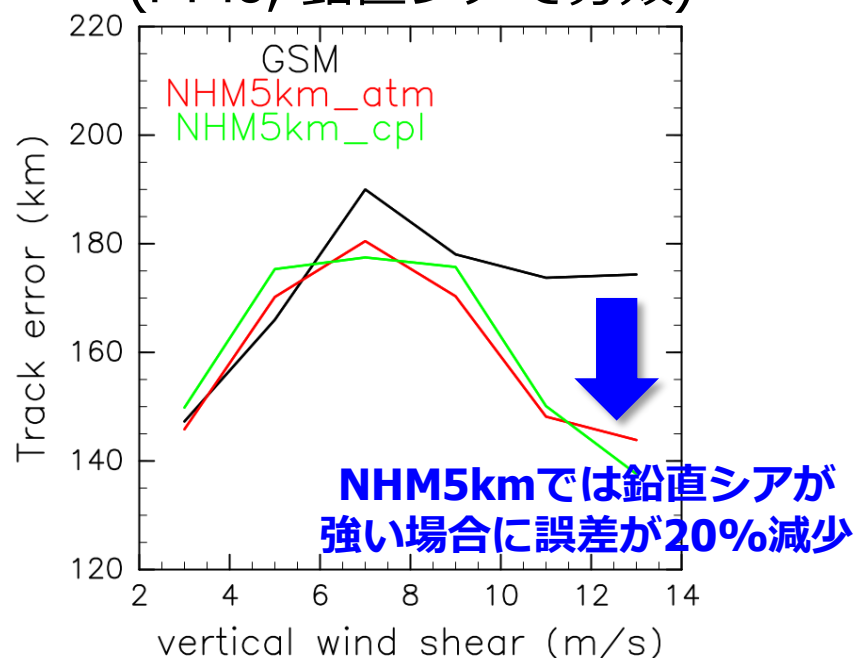
高解像度大気海洋結合計算(北西太平洋全域)

- 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)

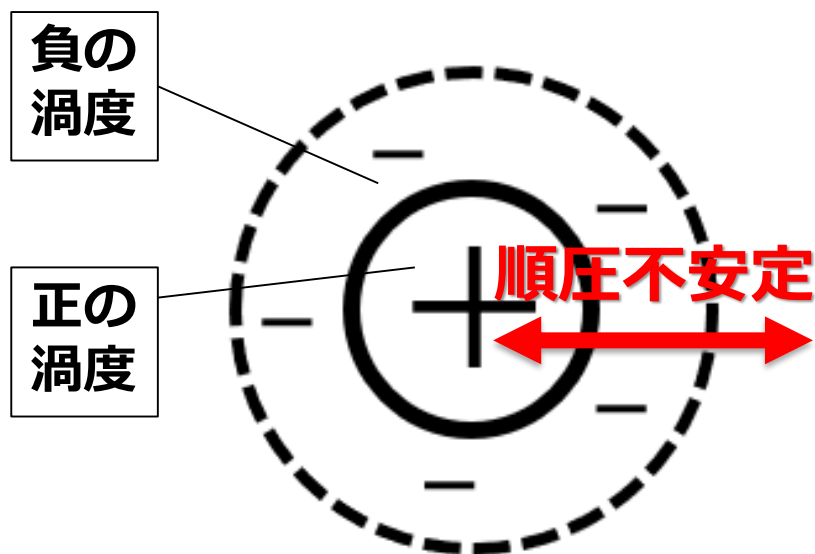


(伊藤ら, 印刷中, 気象研究所研究報告)

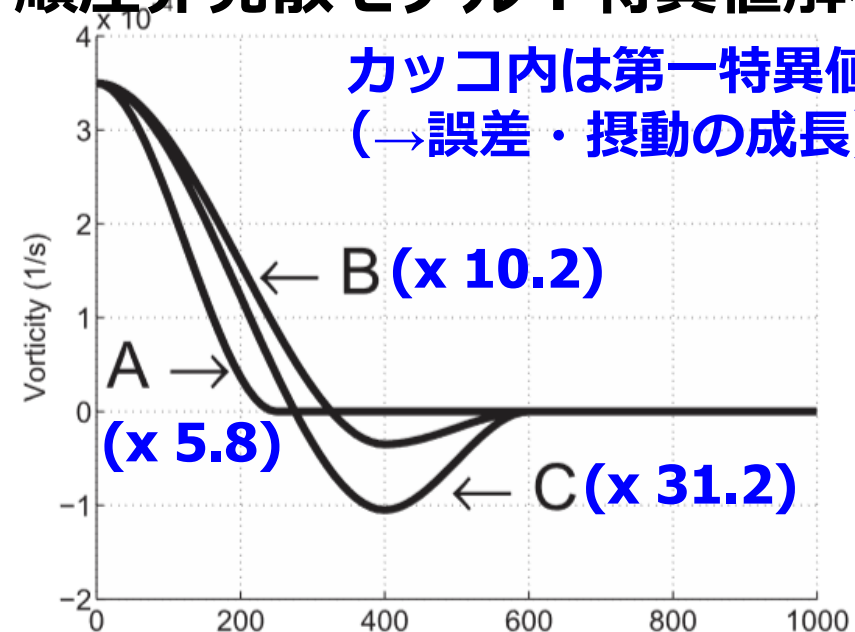
台風は正と負の渦度領域のペア→進路予測に重要

- 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



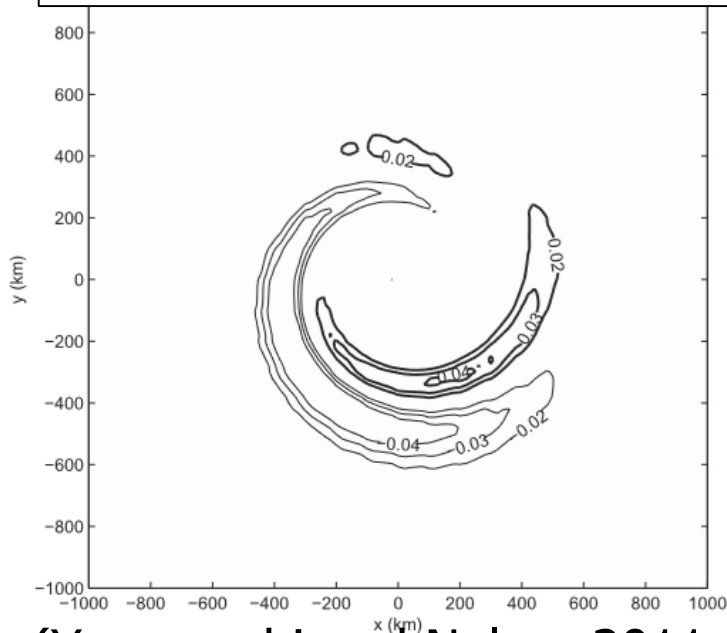
台風中心からの距離(km)

(Yamaguchi and Nolan, 2011, JAS)

台風進路の渦度場に対する感度

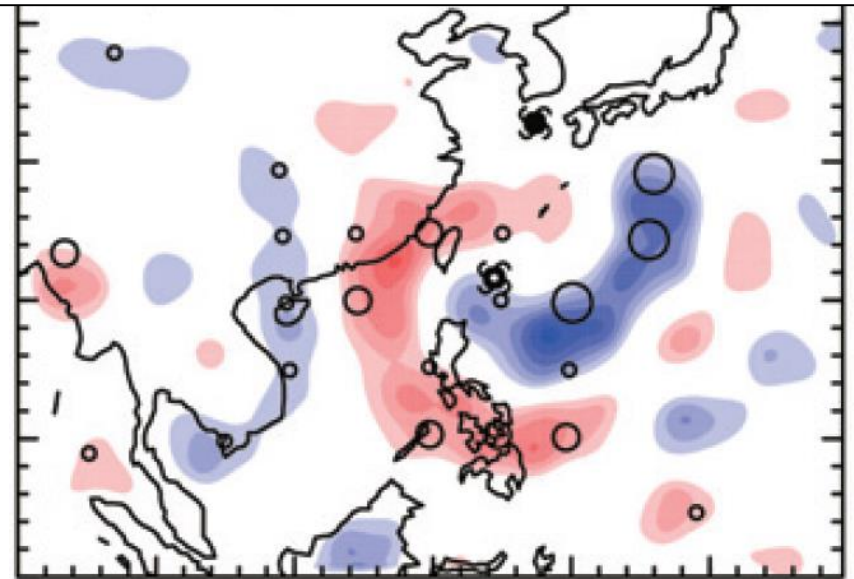
- 理想化実験で外側の負の渦度領域を想定した場合の感度場は、現実的な感度解析の結果に類似していた。
→ボーガス等でも外側の負の渦度を丁寧に見るべき。
- ここでは単一の単純な台風渦を考えているが、上層にトラフがあってもロバストな構造である。

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)

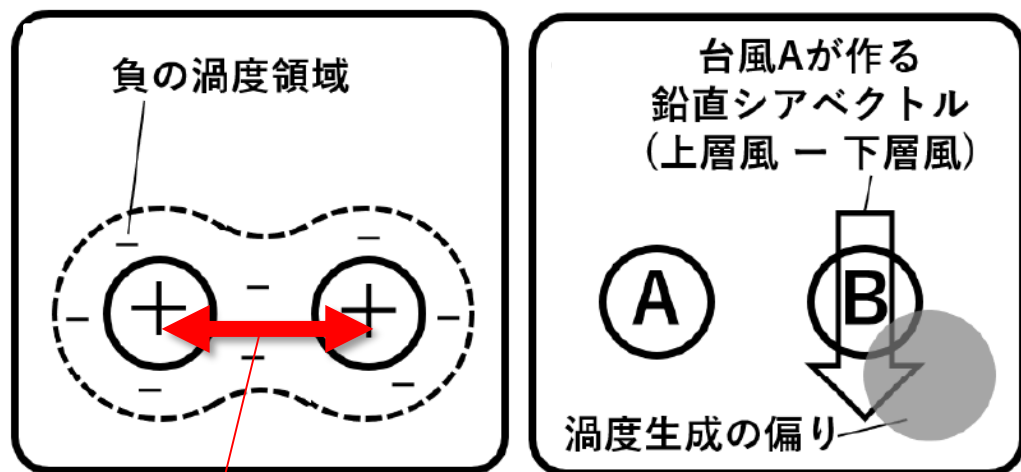


(Ito and Wu, 2013, JAS)

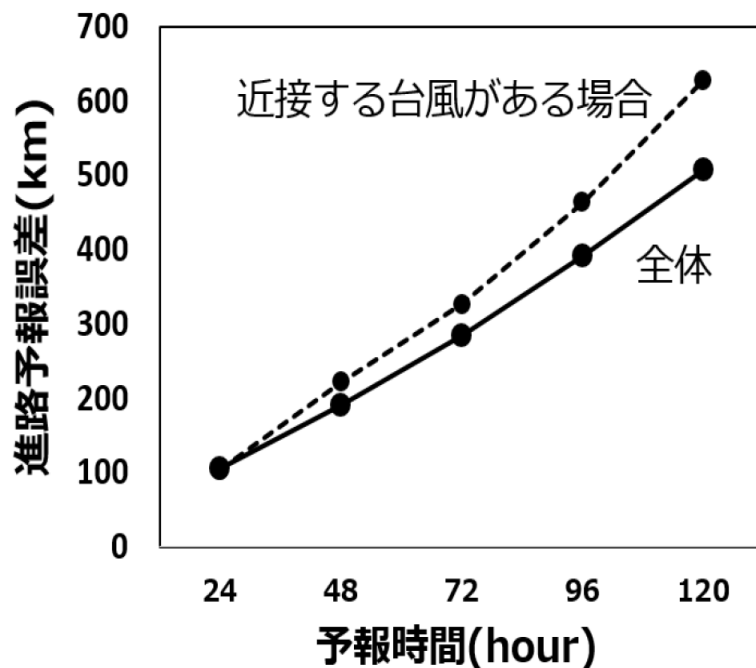
将来展望：藤原効果の「再考」

- 渦力学の理論：同極の渦は互いを回転・近接させる
⇔現実の台風ではそうなることは少ない。なぜ？
外側の負の渦度領域、または鉛直シアの影響？
- 近接する台風がある場合、進路予報が外れやすい。
⇒進路予報の大外しパターンの一つとなっている。
⇒科研費の枠組みで協同的に解決できれば。

いくつかの作業仮説

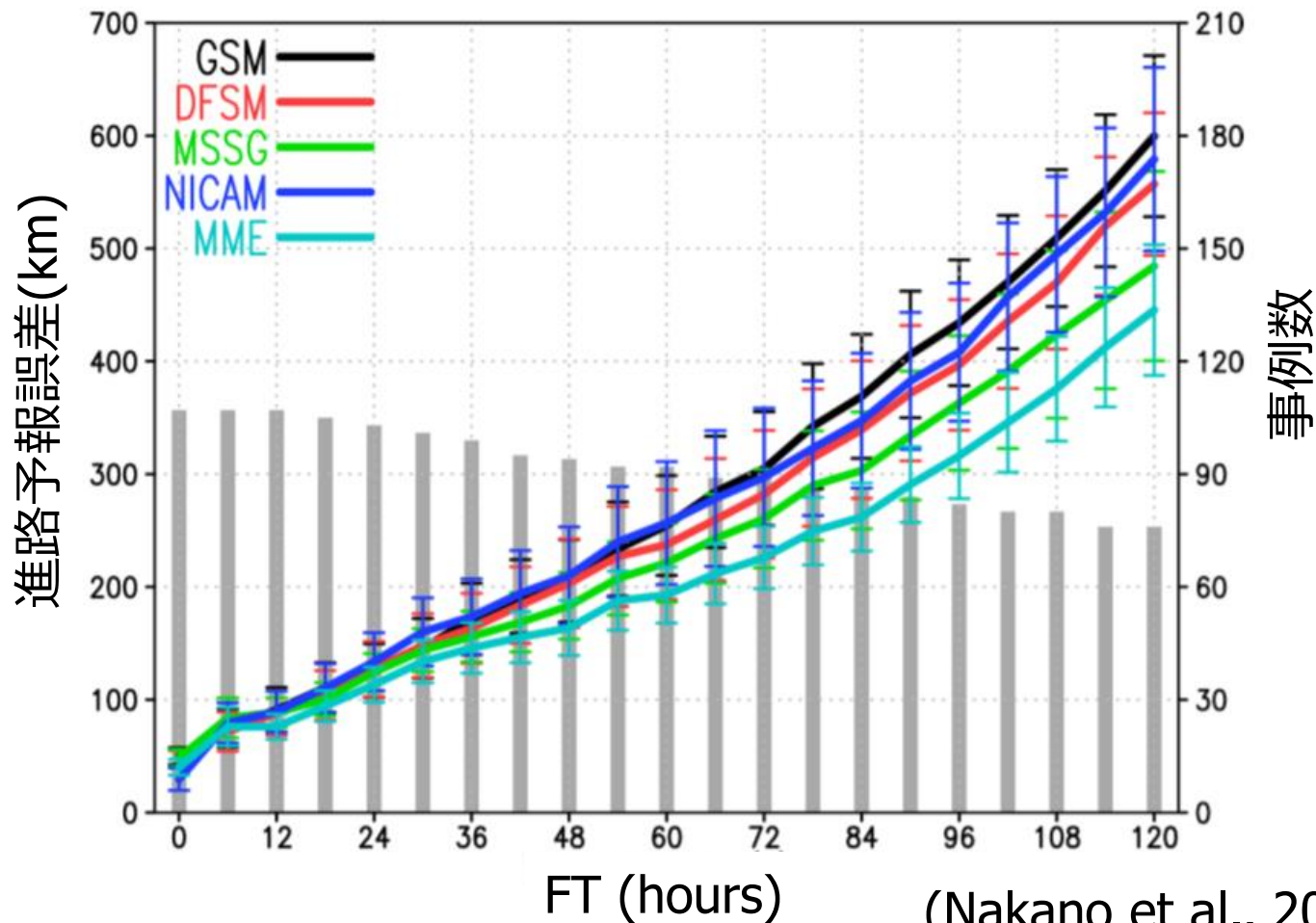


**強い順圧不安定
で誤差拡大？**



TYMIP-G7による台風進路予報精度

- 100事例以上で7kmメッシュの全球非静力学モデル (NICAM, DFSM, MSSG)による台風進路予測
- マルチモデルアンサンブル(MME)を使うと大きな改善。



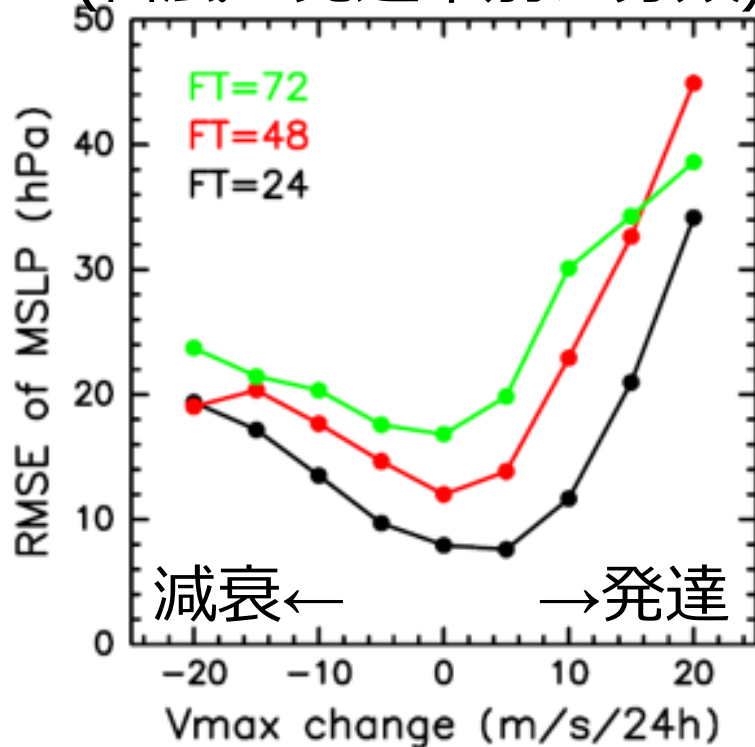
(Nakano et al., 2017, GMD)

台風**の**強度

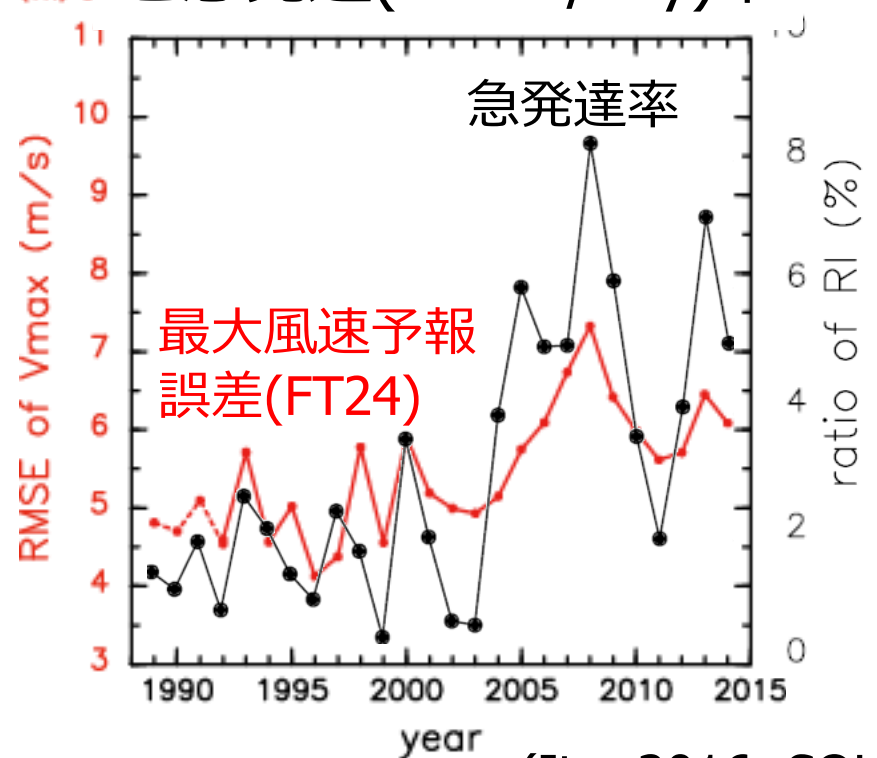
強度予報の増加傾向

- 急発達や急減衰が起こると強度予報誤差は大きくなる
- 近年、台風の急発達率が増加し、予報は難化している
← 海洋表層水温上昇に関係？ (筆保ら, 投稿済)

中心気圧予報誤差
(台風の発達率別に分類)



最大風速予報誤差
と急発達(>30kt/day)率

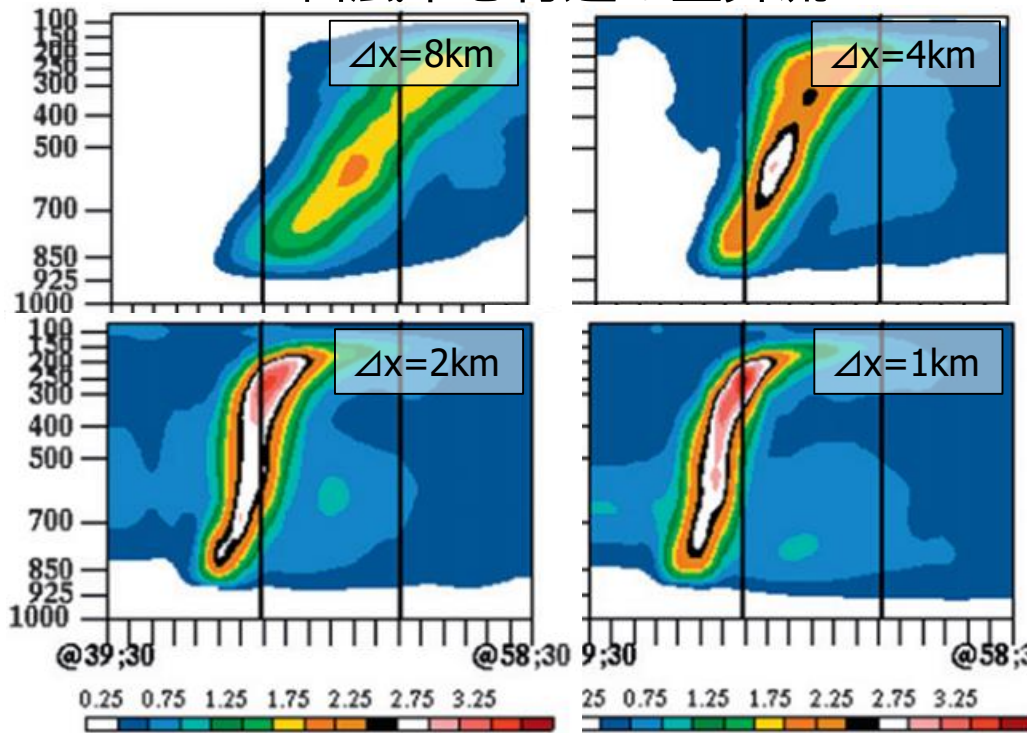


(Ito, 2016, SOLA)

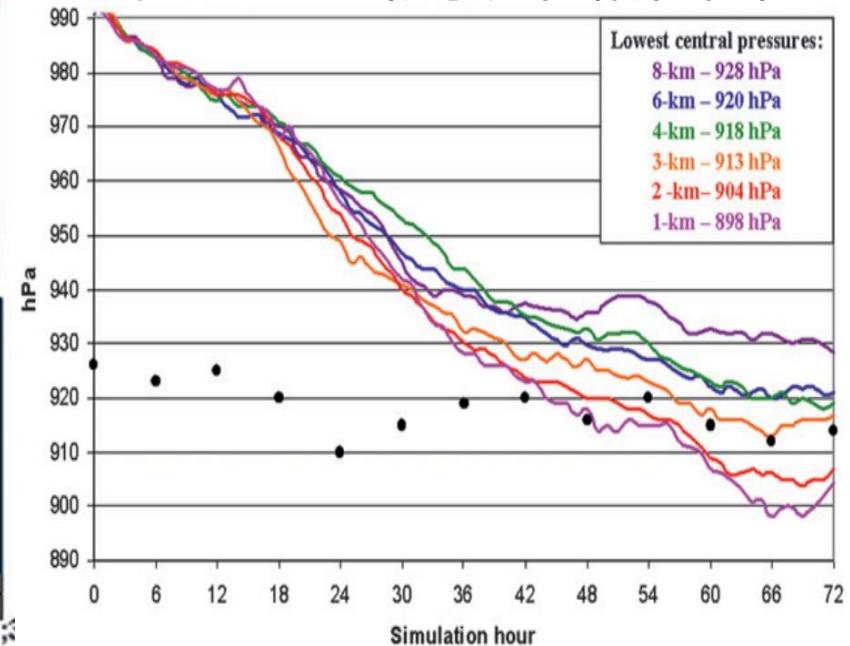
台風強度モデリング

- ・ 台風強度を陽に再現しようと思うと内部コアダイナミクスを再現する必要がある。
- ・ 台風の壁雲は典型的には厚さ10kmほど。
- ・ 台風強度は通常の台風なら $\Delta x \leq 5\text{km}$ 、猛烈な台風ならば $\Delta x \leq 2\text{km}$ で再現できそうである。

台風中心付近の上昇流



中心気圧の格子点間隔依存性



(Gentry and Lackmann, 2010)

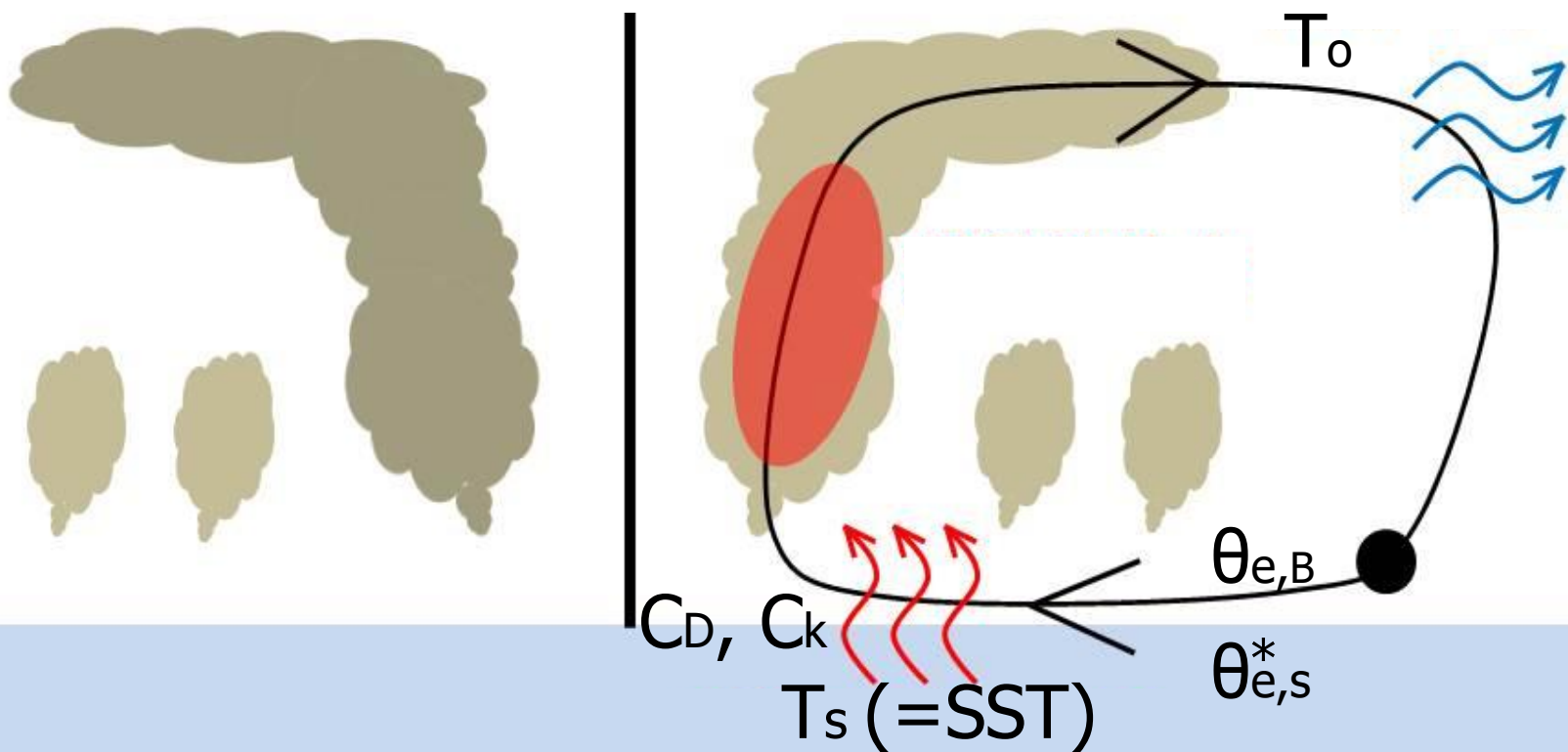
WISHEに基づく台風強度の理論解(MPI)

中立成層、傾度風・静水圧平衡、SST一定、定常軸対称渦の場合

最大風速

$$V_{\max}^2 = \frac{T_s - T_o}{T_o} \frac{C_k}{C_D} C_p T_s (\ln \theta_{e,s}^* - \ln \theta_{e,B})$$

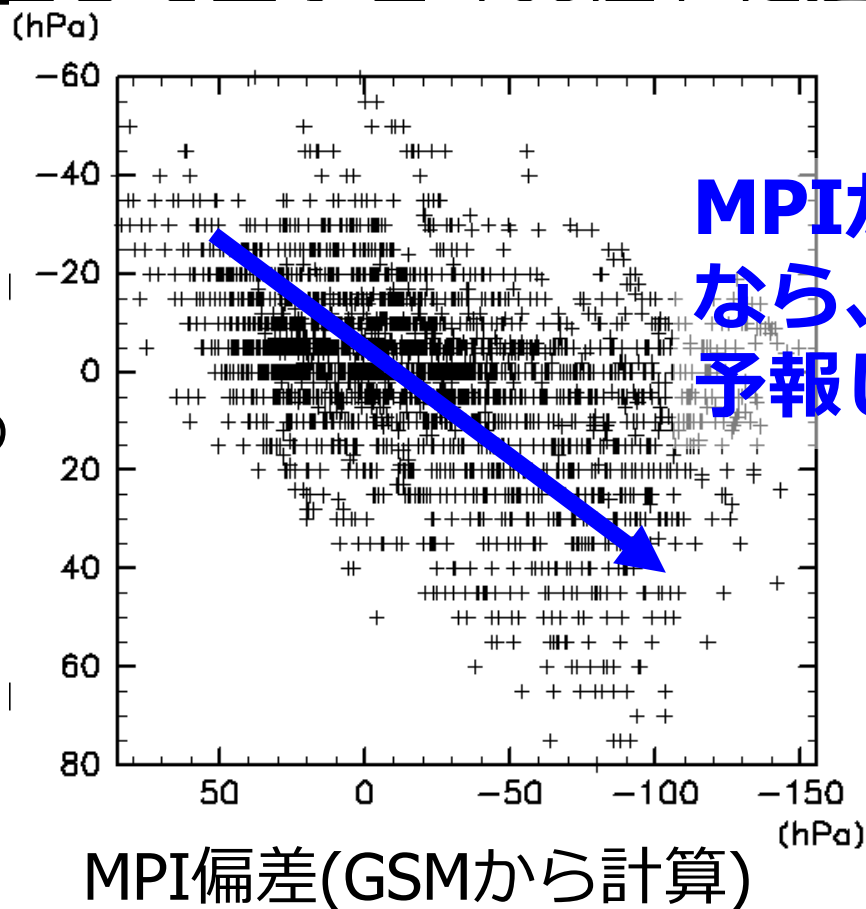
台風の到達可能強度は環境場(SST, 湿度, 外出流の気温, 海面交換係数)のみに依存⇒これはGSMでも見積もれる



強度予報の増加傾向と環境場を用いた改善

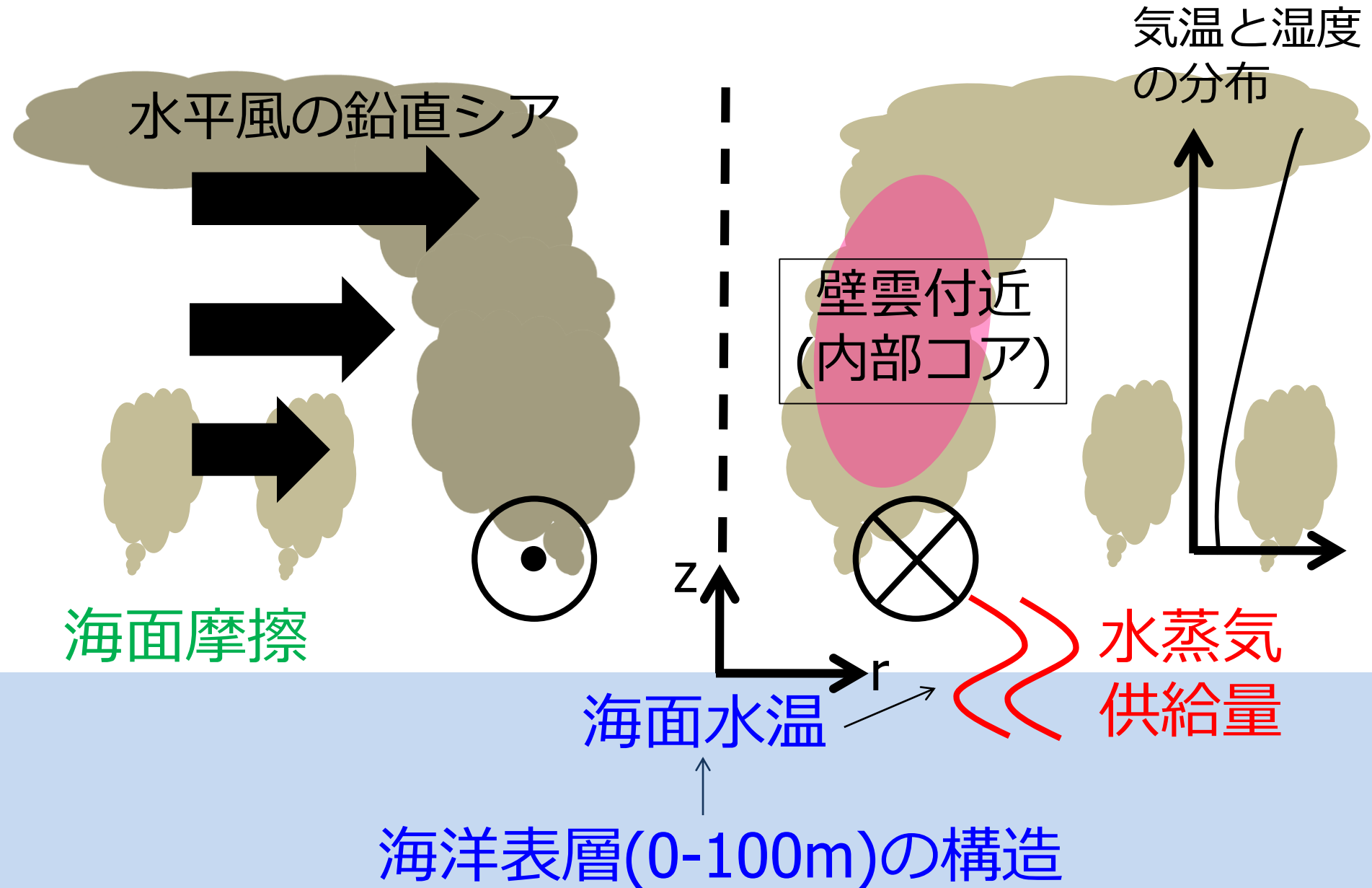
- 2008-2014年の発表予報に対し、MPI偏差と発表予報のバイアスの関係を調べた
⇒MPI偏差で強く予想される場合には、発表予報を強めに修正して出すと「真値」に近くなる。

発表予報の
バイアス



**MPIが強く予報される
なら、もっと台風を強く
予報した方がよいよ**

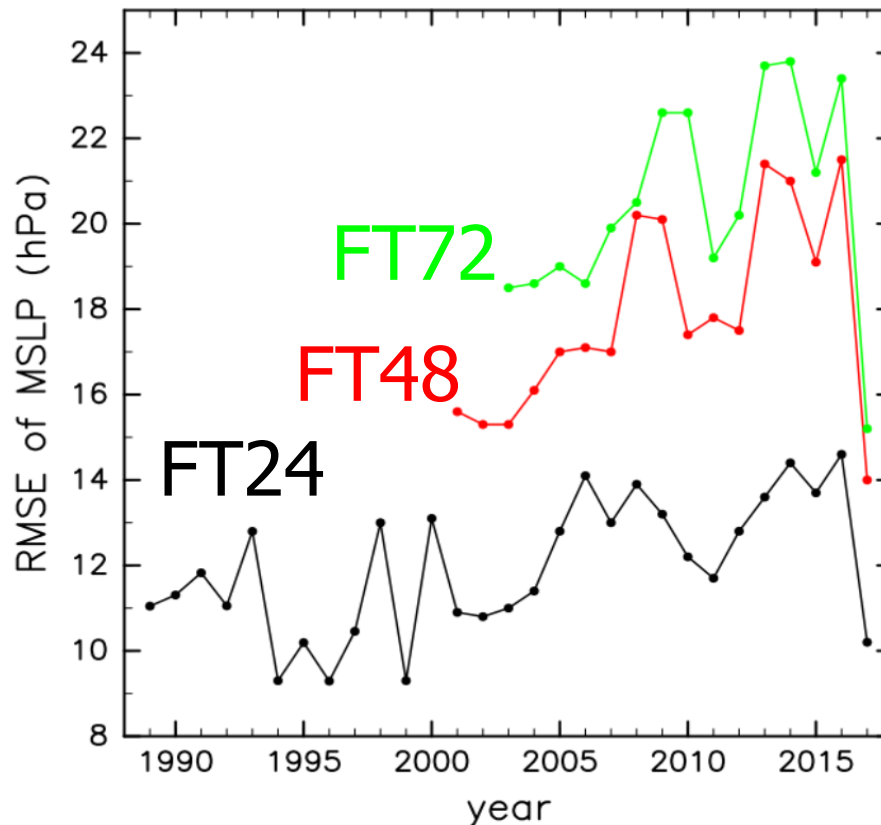
台風強度にとって重要とされる量



SHIPSの導入等による強度予報改善

- 強度に対し重要な環境場のパラメータ(鉛直シア・CAPE・MPIなど) に対するバイアスが存在
- SHIPS試験運用(2017)等で発表予報が大きく改善

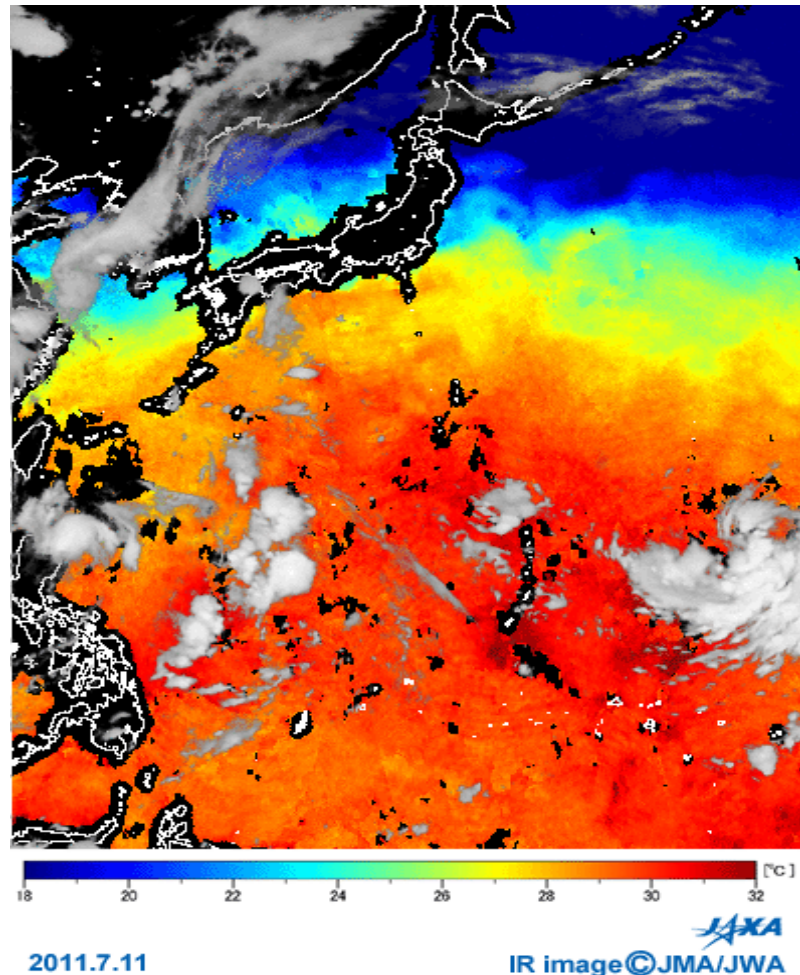
中心気圧予報の誤差(1989-2017; 発表予報)



2016年まではRSMC Tokyoの
年報を参照し、2017年は
伊藤が独自に集計したもの

オーシャン・フィードバック

- ・ 台風通過時に海洋混合を引き起こし、海面水温が低下⇒台風が弱められる作用



赤外画像に基づく
台風通過時の海面水温

大気海洋結合モデルの仕組み

JMA-NHM (Saito et al. 2006)

dt=24s

雲物理：Kain-Frischスキーム
6-カテゴリーバルク雲微物理

海面風速
海面交換係数
短波・長波放射
潜熱・顕熱

Coupling
Interval
=600s

SST

リチャードソン数などに
応じたエントレインメント

鉛直 1 次元海洋混合層モデル (Price et al. 1986)

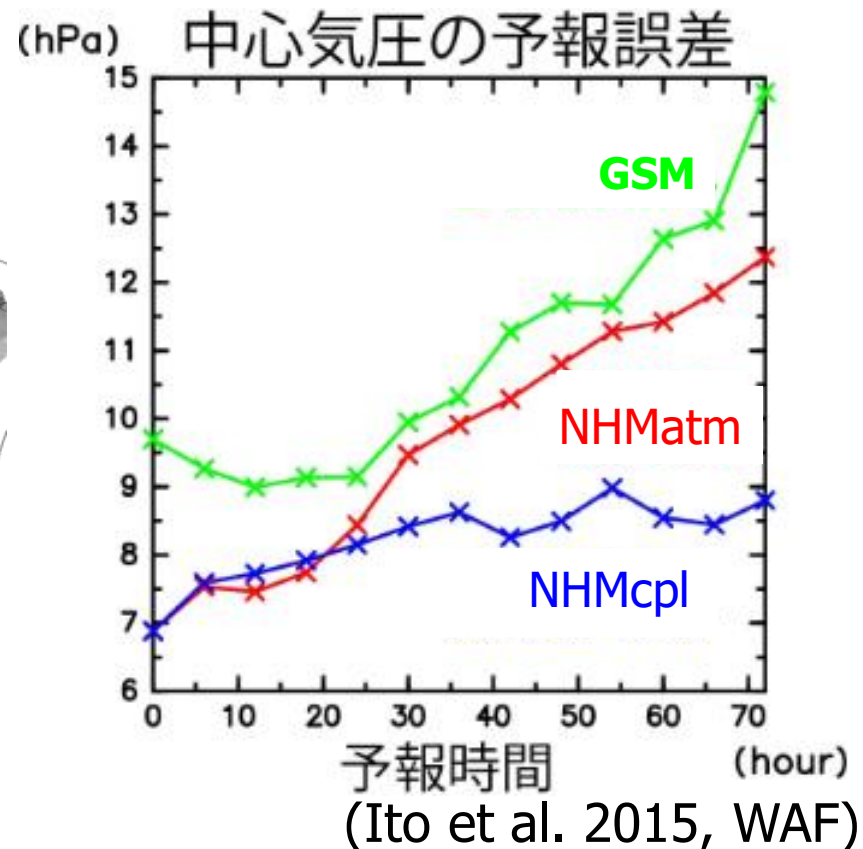
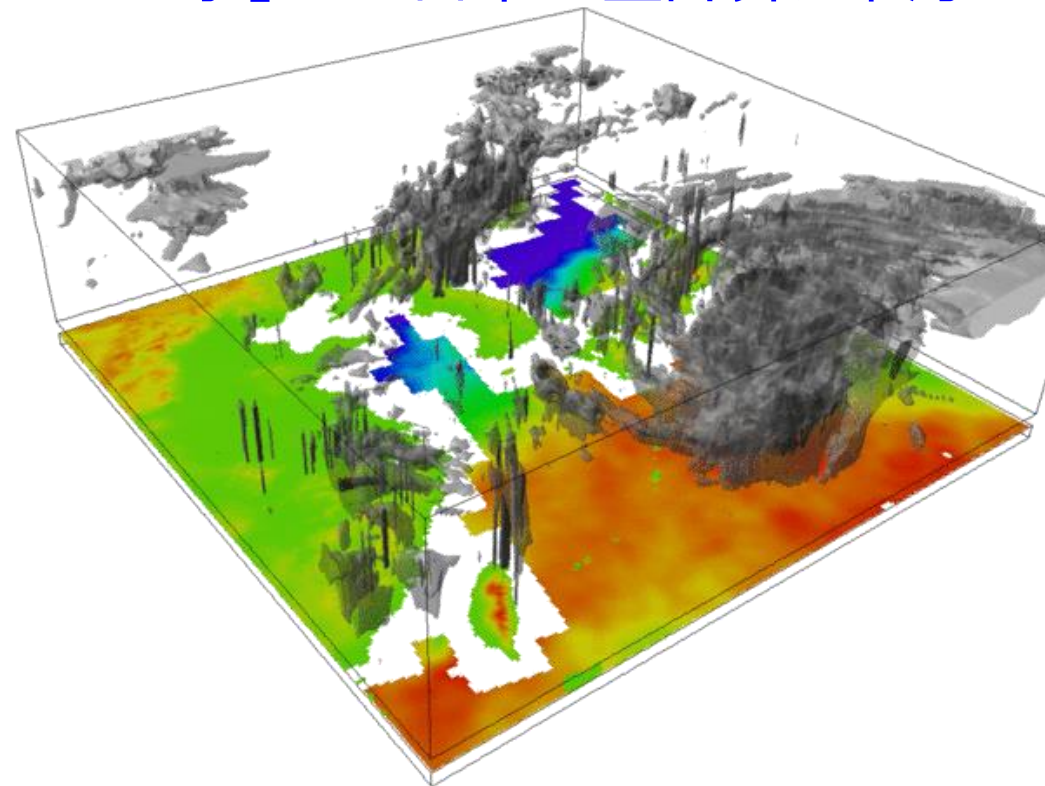
dt=600s

水温
塩分
水平流速

海洋側の計算コスト
は全体の1%程度

高解像度大気海洋結合計算(メソ領域)

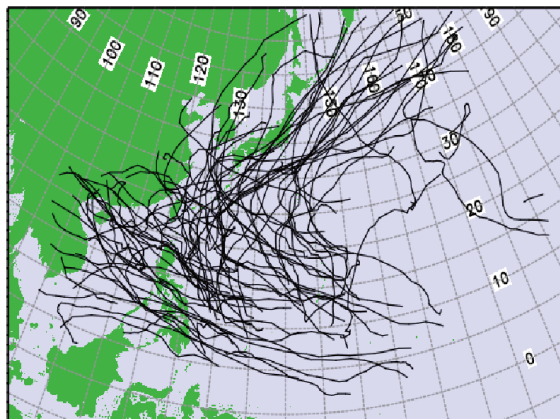
- 中心付近の構造を高精細に再現する必要がある
⇒高解像度なシミュレーションシステム
- 大気海洋結合モデル(海洋の計算負荷は全体の約1%)
- メソ領域で281回に及ぶ計算⇒最大**40%**の改善
「京」で1日半で全計算が終了



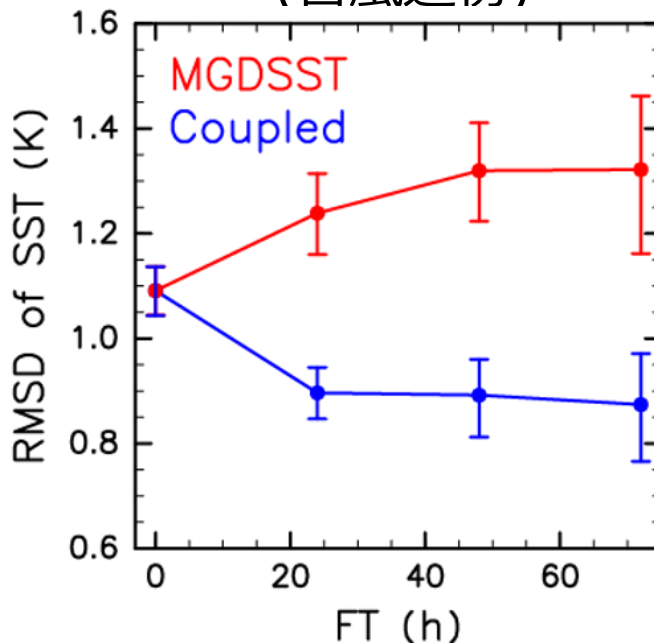
高解像度大気海洋結合計算(北西太平洋全域)

- 北西太平洋全域で2012-2014年のほぼ全台風事例に対して予報実験(417事例)
- MGD SSTよりも結合モデルの出力するSSTはArgoフロートへの整合性が高く、 $0.3\text{-}0.4^{\circ}\text{C}$ の改善。
- 台風近傍だけでなく台風から十分に離れた地域でも。

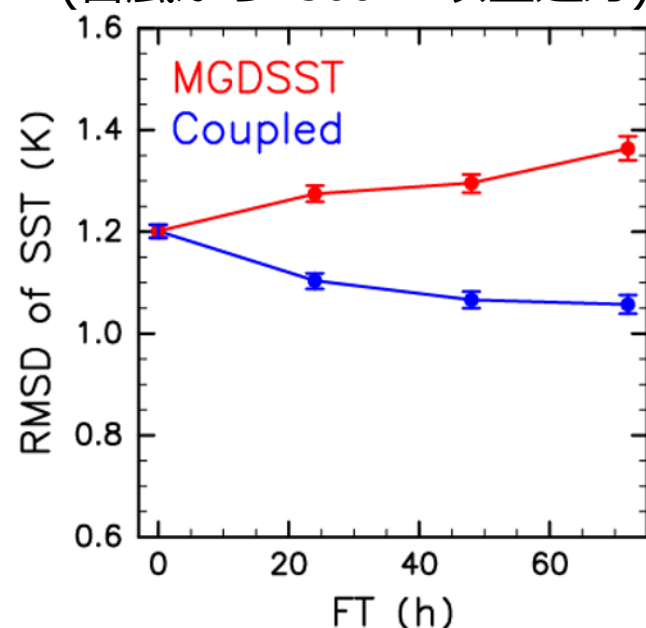
計算領域・計算事例



SST予測誤差(対Argo)
(台風近傍)



SST予測誤差(対Argo)
(台風から1500km以上遠方)

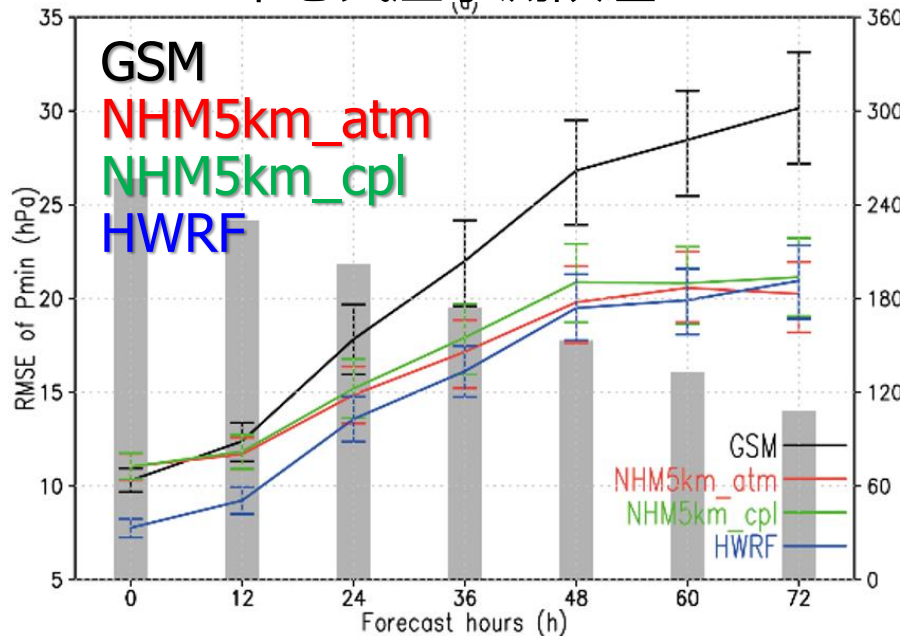


(伊藤ら, 2018, 気象研究所研究報告)

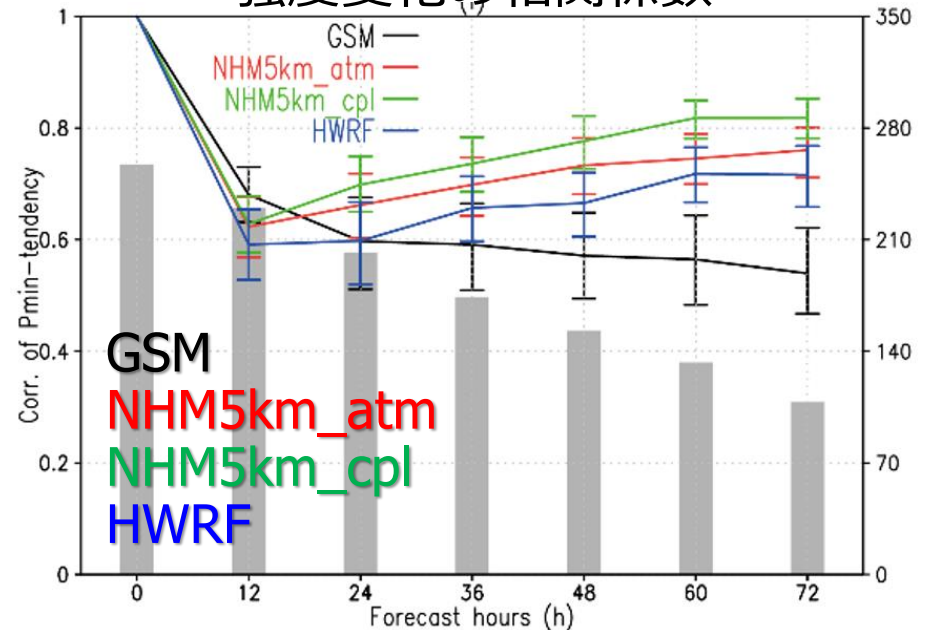
台風強度予測性能($\text{Err}_{\text{ini}} < 30 \text{ hPa}$)

- 基本的にNHM5km_atmやNHM5km_cplの強度予測性能は、GSMに比べて非常によく（特に急発達予測に優れていた）、HWRFに対しても遜色なかった。
- 結合モデルは非常に強い台風を弱めに再現するバイアスを持っていたが、強度変化の相関係数については、一番良い成績を示していた。

中心気圧予測誤差



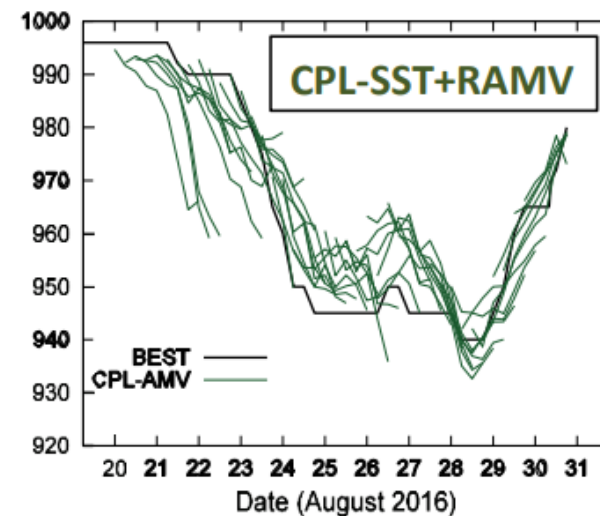
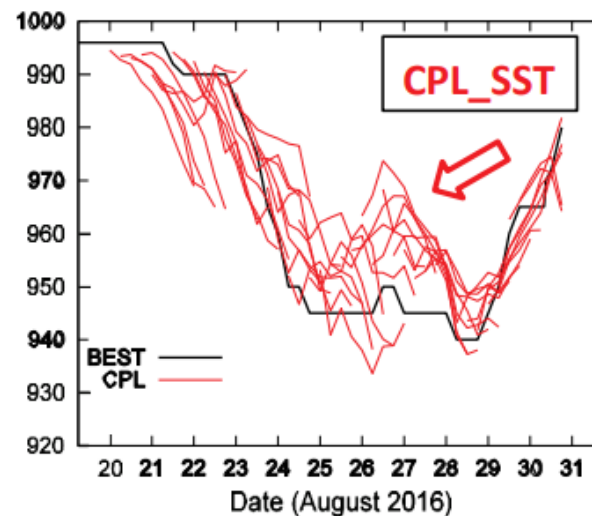
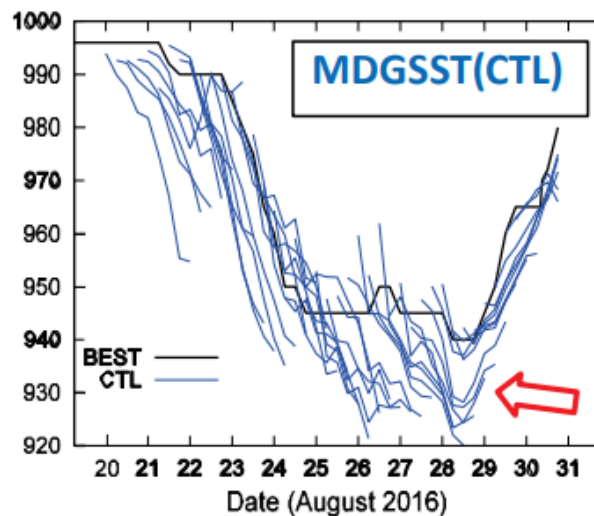
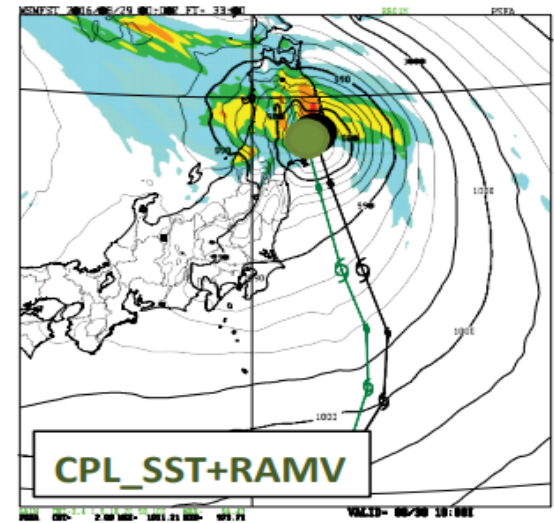
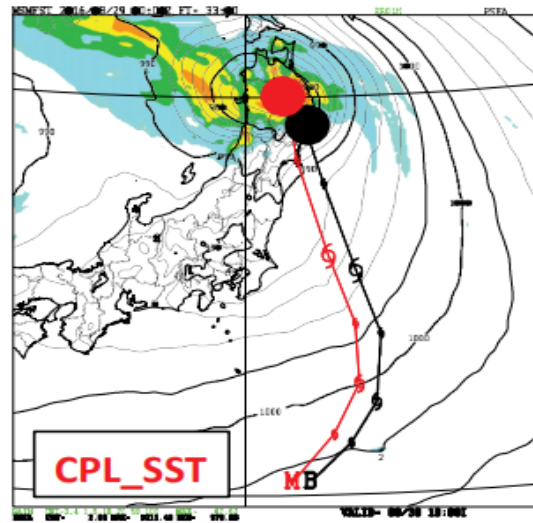
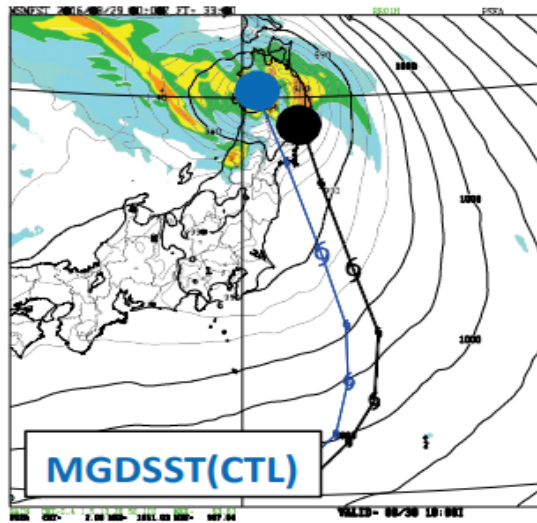
強度変化の相関係数



(伊藤ら, 印刷中, 気象研究所研究報告)

大気海洋結合データ同化システム

- 大気海洋結合データ同化システム(国井ほか)の開発



(Kunii et al. 2017; 気象研究所・琉球大学・JAMSTECによる共同プレスリリース, 2017/1)

データ同化システムの高度化

データ同化手法の比較(線形・ガウスを仮定)

- 古典的な4DVar, EnKF, Hybrid EnKF-4DVarのいずれも

$$\mathbf{x}_{a,t} - \mathbf{x}_{b,t} = \mathbf{M}\mathbf{B}\mathbf{M}^T \mathbf{H}^T \left(\mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{M}\mathbf{B}\mathbf{M}^T \mathbf{H}^T \right)^{-1} \left(\mathbf{y}_t - \mathbf{H}\mathbf{x}_{b,t} \right)$$

- 手法としての主な違いは**B**と**B**の時間発展($\mathbf{M}\mathbf{B}\mathbf{M}^T$)

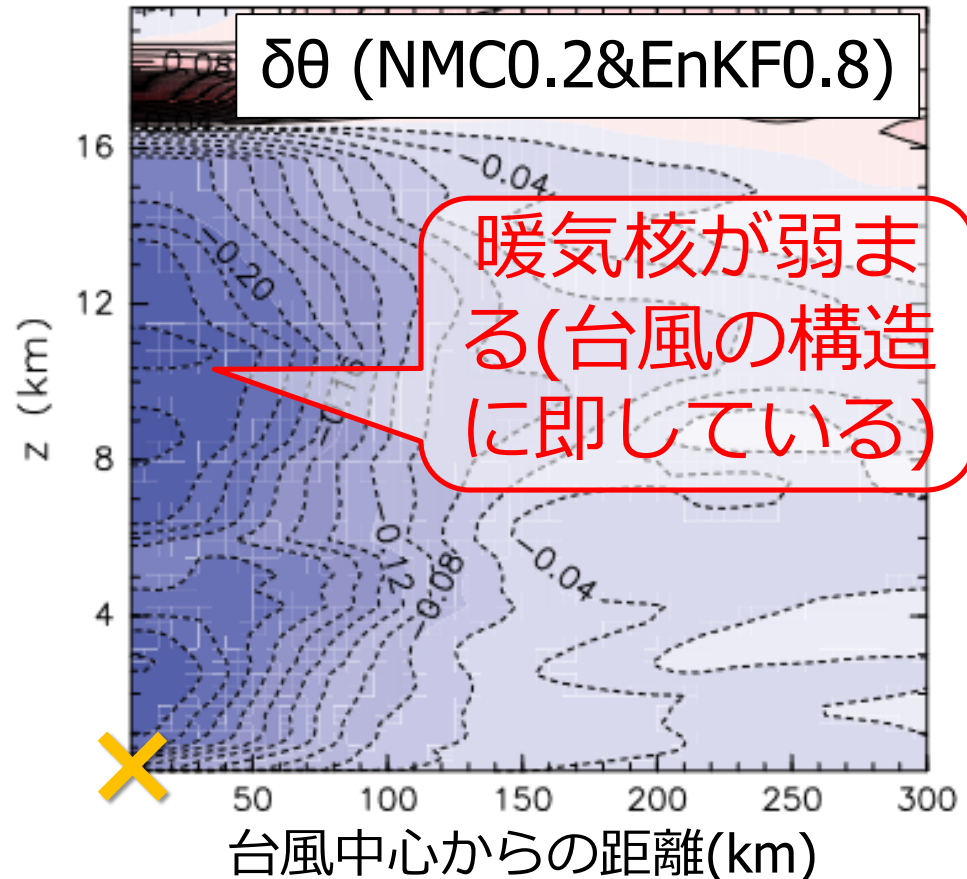
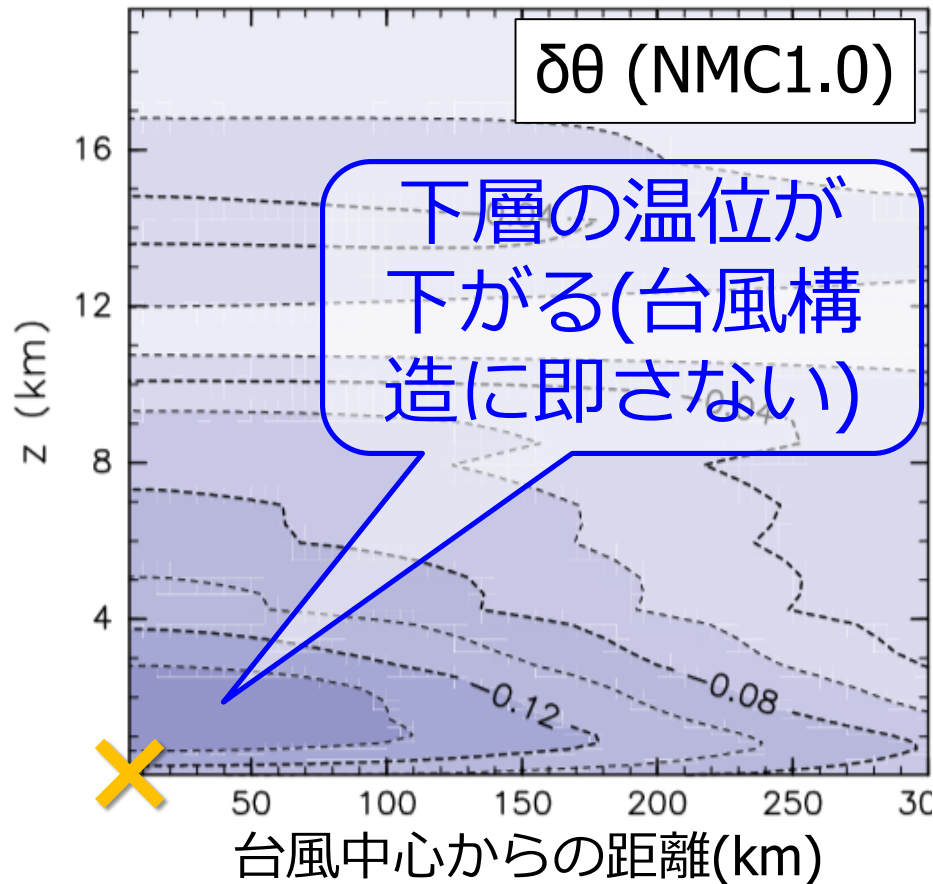
手法	B	B の時間発展(M の作用)
4D-Var(*)	気候値で近似(NMC法)	正確
EnKF	アンサンブル近似	アンサンブル近似
Hybrid(*)	アンサンブル近似	正確

* 4D-Varシステムはアジョイントベースとする

- 伊藤はアジョイントベースのHybrid EnKF-4DVarシステムが最も良いと考える。特に**B**をNMC法で全球一様で気候值的に作る場合、台風というよりも温帯低気圧の構造の主要モードが反映されやすくなる。

2011年台風第15号における1点観測同化実験

- JNoVAで海面中心気圧を上げるイノベーション(t=3h)
- t=0hにおける温位の解析インクリメントを図示

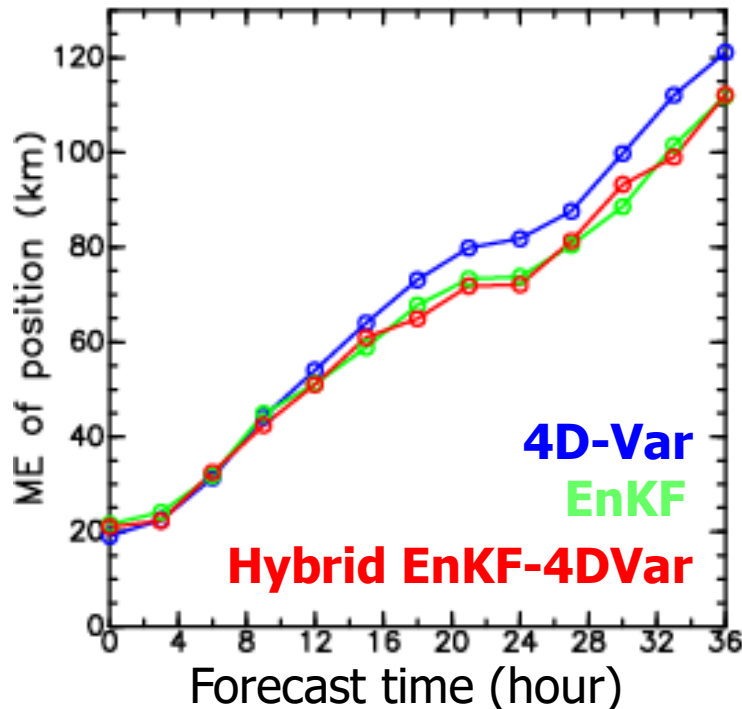


※ LETKFでは鉛直局所化のため深い構造が出ない(図は省略)
(Ito et al. 2016, MWR)

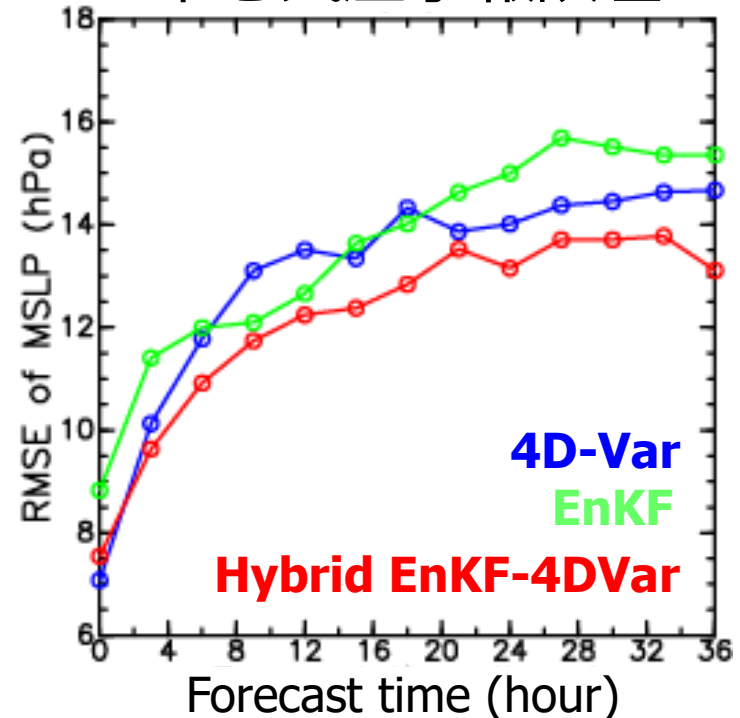
予測精度評価

- メソ解析領域で62回にわたり同化＆予報実験
- 進路予報に関してはHybrid ~ EnKF > 4D-Var
- 強度予報に関してはHybrid > EnKF ~ 4D-Var
- HybridとEnKFの指向流は似ていたが内部コアが違った

進路予報誤差



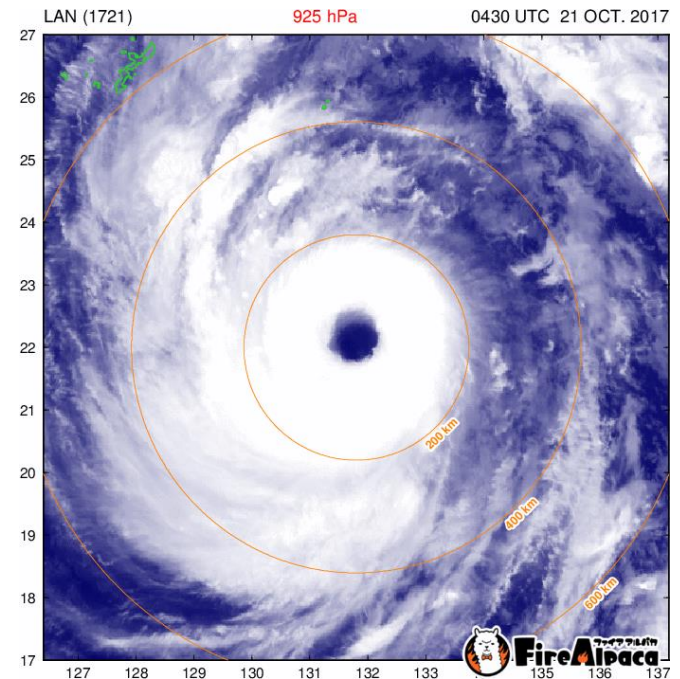
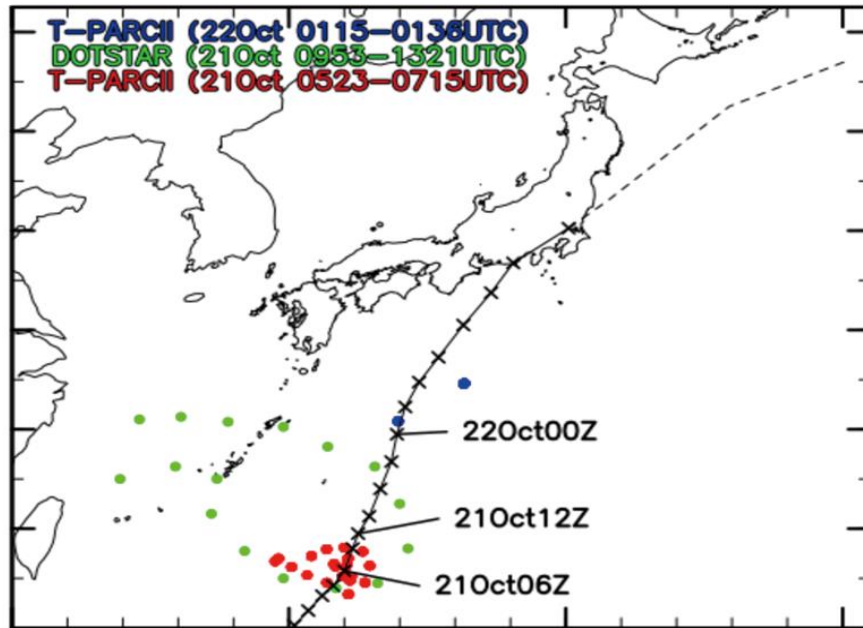
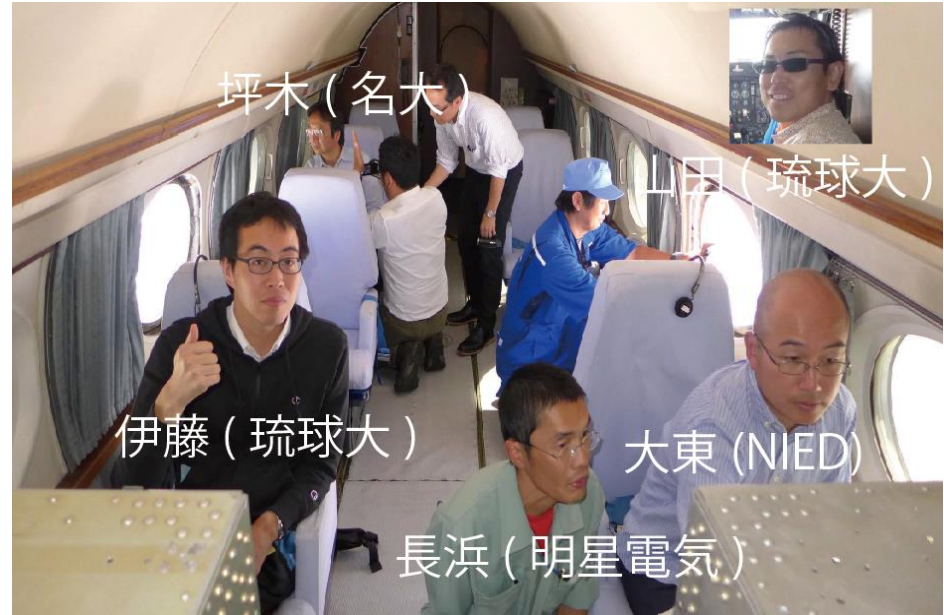
中心気圧予報誤差



(Ito et al. 2016, MWR)

航空機観測

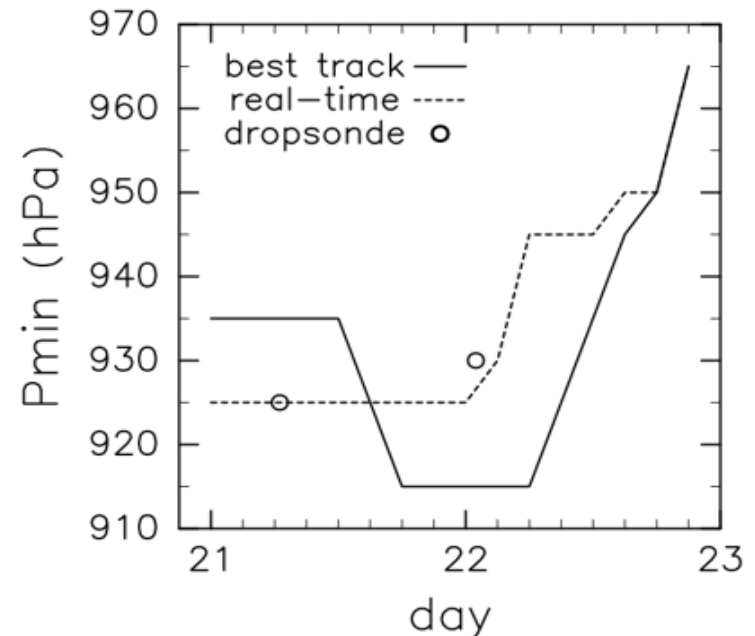
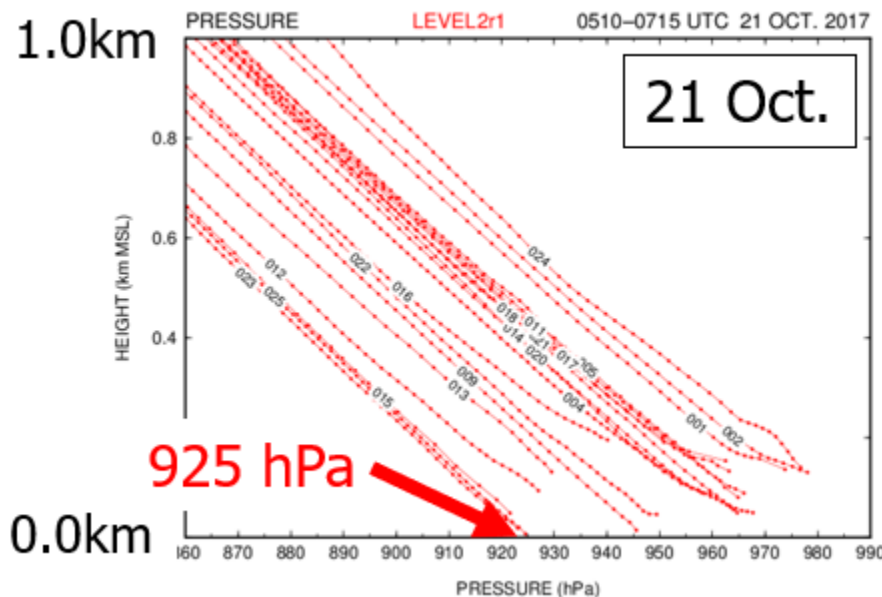
2017年台風第21号航空機観測(2017/10/21)



台風強度解析

- 中心付近で空間的に密な観測値が得られた
- 中心気圧：21日は925hPa, 22日は930hPaと推定
- ドロップゾンデによる推定値は速報解析にはよく一致していたが、ベストトラックでは大きく異なった。
- ドロップゾンデのLevel2データはベストトラック発表後に完成。ベストトラックはDvorak解析ベース？

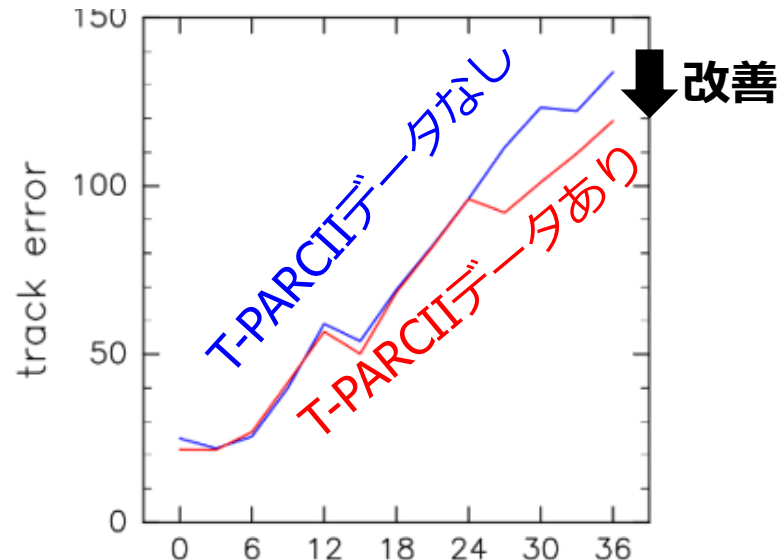
ドロップゾンデによる気圧観測



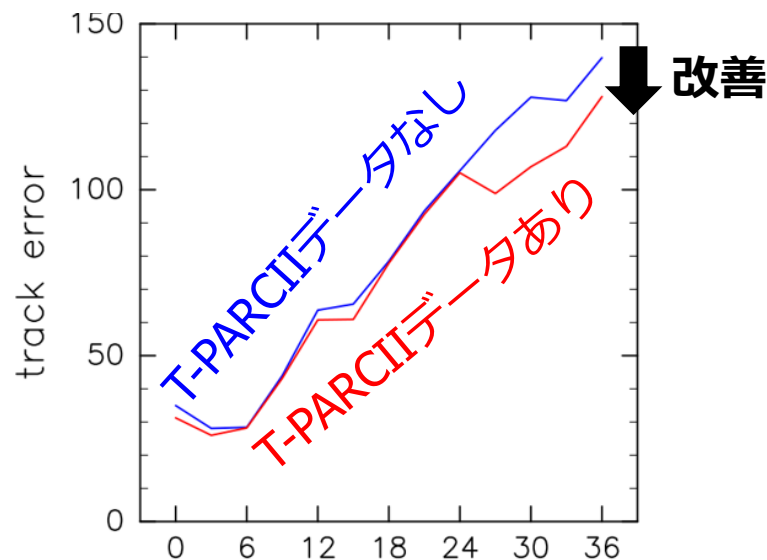
(Ito et al. 2018, submitted to SOLA)

同化&予報実験(JNoVA+NHM; 12サイクル・12予報)

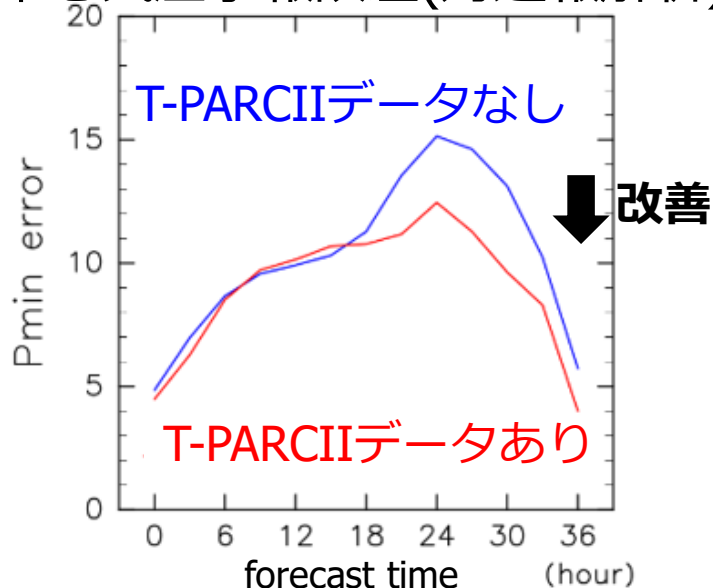
進路予報誤差(対速報解析)



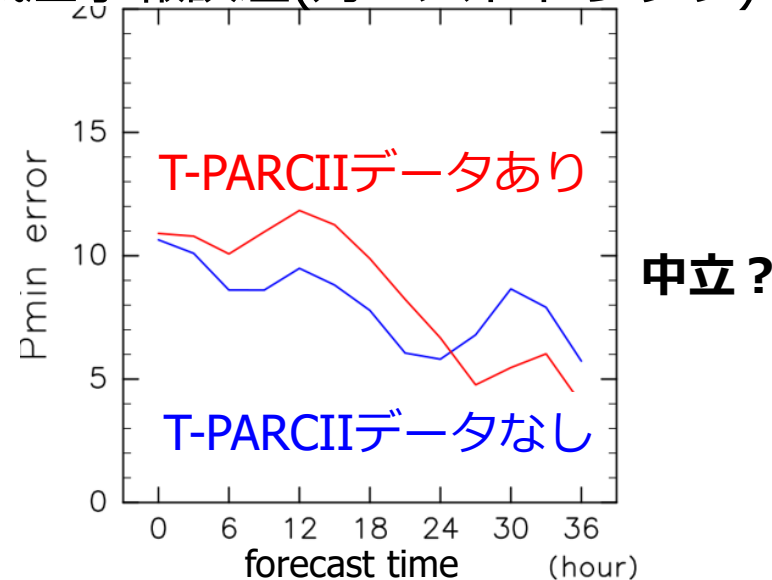
進路予報誤差(対ベストトラック)



中心気圧予報誤差(対速報解析)



中心気圧予報誤差(対ベストトラック)

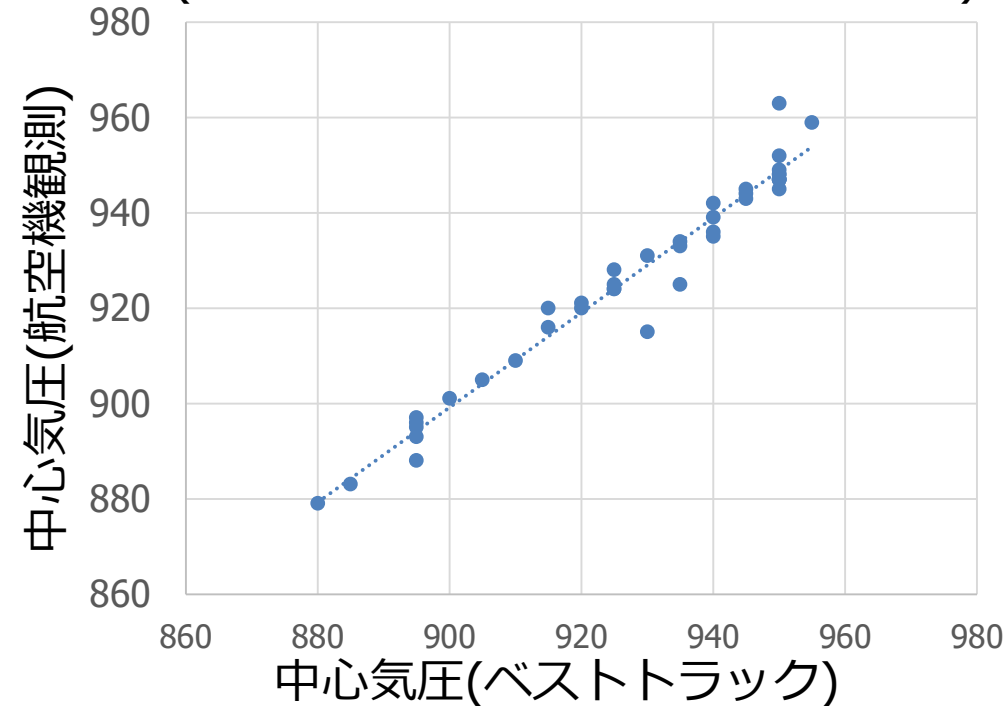


(Ito et al., submitted to SOLA)

Dvorak解析の不確実性と航空機観測時代

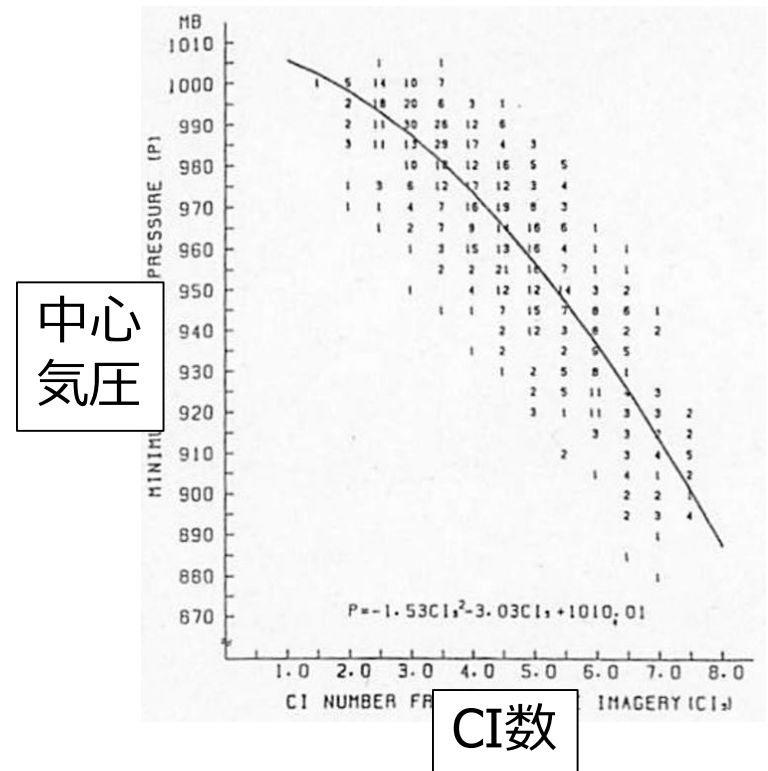
- 航空機観測(1981-1985)とベストトラックの差: 4.3hPa
→航空機観測がある場合はこれに大きく依拠していた
- Dvorak解析: 木場ら(1990)に基づき、衛星からCI数を決め中心気圧等を決定→近似曲線からの残差が13.0hPa

1981-1985年における中心気圧
(ベストトラックと航空機観測の対応)



北畠ら(2018, 研究時報)のデータに基づき作成

CI数と中心気圧の対応(数字は事例数)



(木場ら 1990)

改善のための 実験デザインに関する 一般的なことから

物理モデルの更新⇒チューニング

- パラメータの誤りは別のパラメータに押し付けられていた可能性⇒モデル更新はチューニングとセット
- 人的資源の省力化のため、可能な限り自動化すべき
お薦め：グリーン関数法(Menemenlis et al., 2005, MWR)
⇒高々n個の物理パラメータの最適化をするためには、n+1個の予測計算を実施し統計処理すればよい。

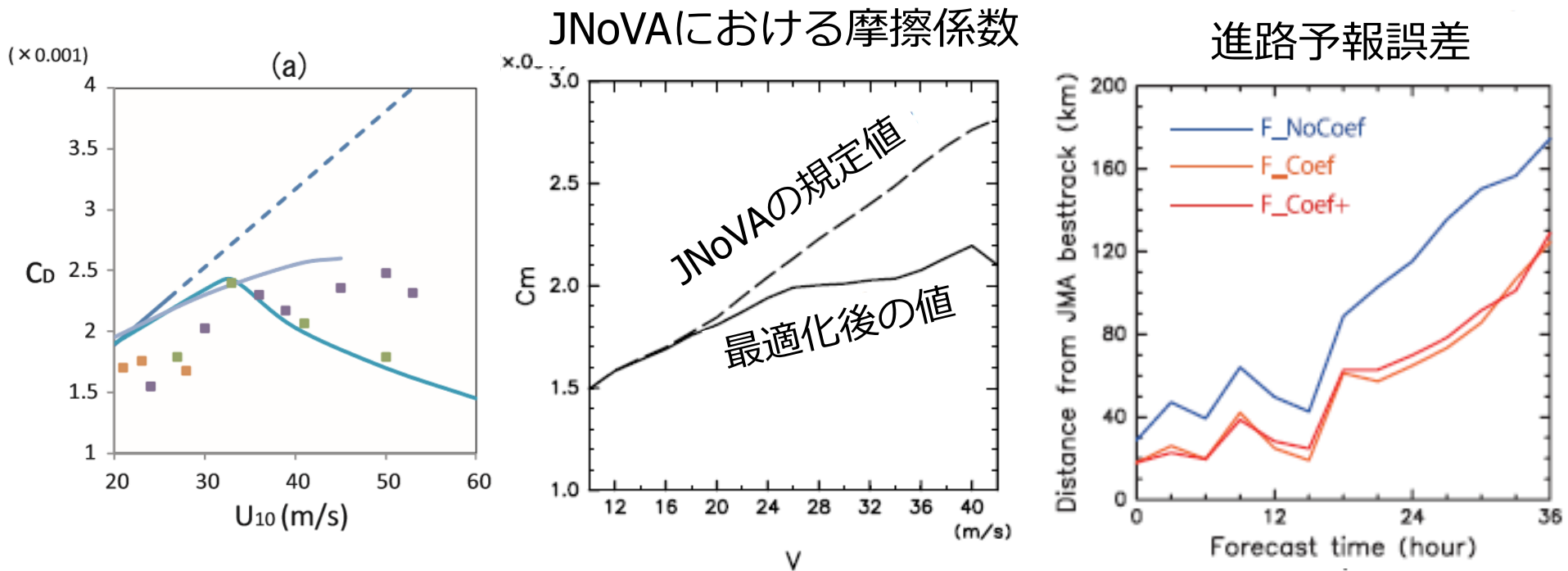
Parameter	Default	Perturbed	Cost function
Default values	All	None	4903.37
Barotropic velocity at open boundary (%)	100	80	4936.82
Scaling of wind stress (%)	80	100	5298.56
Bulk transfer coefficient ($\times 10^{-3}$)	1.35	1.40	4512.09
Coastal precipitation range ($\times 10^3$ m)	100	85	4668.77
TKE dependence on Ri (α)	120	115	4807.30
Background vertical viscosity ($\times 10^{-4}$ m ² s ⁻¹)	1.0	2.0	4830.75
Background vertical diffusion ($\times 10^{-4}$ m ² s ⁻¹)	0.1	0.09	4749.22
Biharmonic viscosity coef. ($\times 10^8$ m ⁴ s ⁻¹)	200	250	4819.11
Harmonic viscosity coef. (m ² s ⁻¹)	100	80	4863.24
Isopycnal diffusion coef. (m ² s ⁻¹)	50	100	4926.62
Thickness diffusion coef. (m ² s ⁻¹)	25	30	4622.52
Horizontal diffusion coef. (m ² s ⁻¹)	25	20	4876.38
Bottom drag coefficient ($\times 10^{-3}$)	2.6	2.5	5016.54
Bottom TKE flux ($\times 10^{-6}$ m ³ s ⁻³)	8.944	12.500	4932.03
Initial condition (years since 1977)	0	18	4462.25

15個の予測計算
+ 誤差統計処理
⇒14パラメータ
の同時最適化
⇒Jは20%減少

(Hirose, 2011, JO)

大規模なパラメータ最適化

- 海面摩擦係数は風速に応じ増加するようにモデル化されているが、近年の観測研究はこれを支持しない。
- JNoVAを用いて、各格子点の海面交換係数を制御変数に加えたところ、強風状況下で摩擦係数は飽和。
- この修正により進路予報精度も改善(但し2事例のみ)

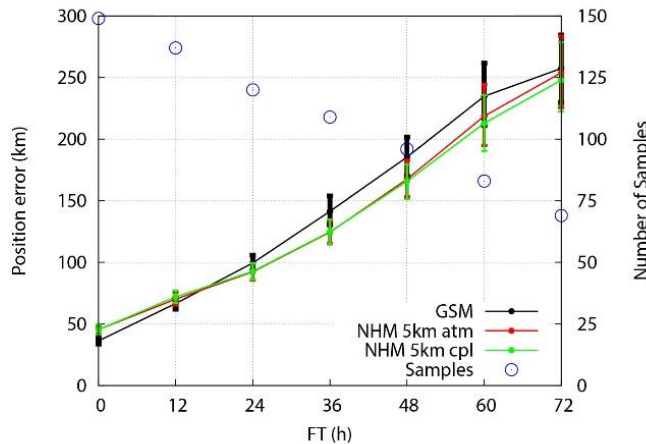


(Ito et al., 2013, JMSJ)

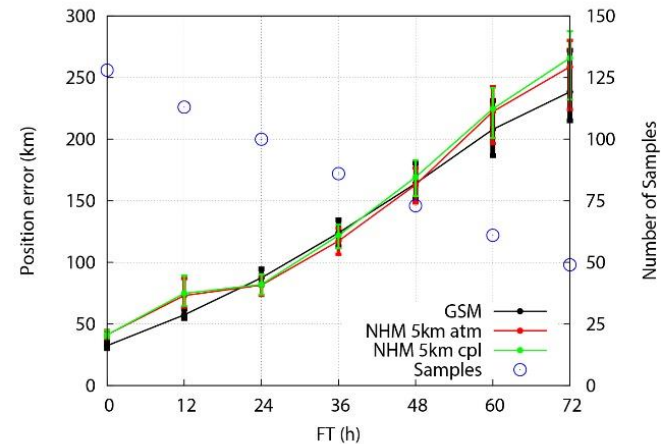
検証サンプル数の問題

- サンプルは1年分でも足りない可能性(ENSO等がある)
- 1週間おきの初期時刻を採用すると統計的にましになる

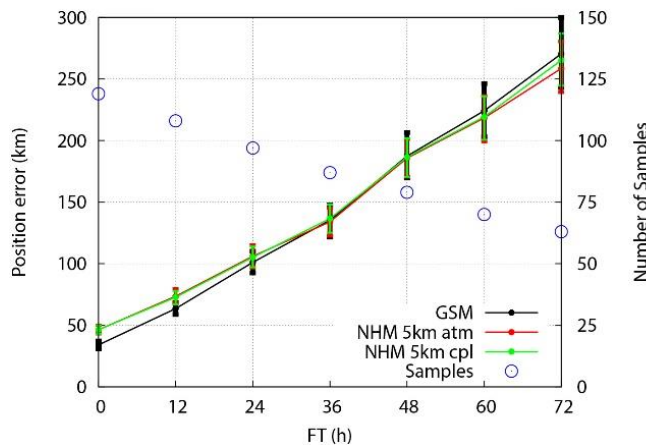
2012(154事例)



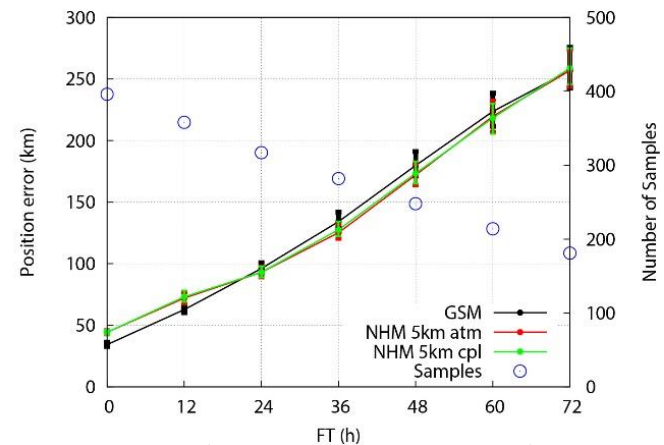
2013(137事例)



2014(126事例)



2012-2014(417事例)



(伊藤ら, 2018, 気象研究所研究報告)

良いものとは何か？

- 予測精度
- 安定性・信頼性
- 計算や処理の高速性
- 防災のための情報伝達
- 立場によって重要性が異なる
- 気象庁と大学・研究機関はWin-Winの関係になり得る
- HFIP:NOAAが予報改善のために組織

NHMやJNoVAを用いた研究

- 伊藤は共同研究・貸与等の仕組みでNHM, JNoVAを使う機会に恵まれ、研究・教育を行ってきた。

伊藤が著者として関わった研究（主な論文）

- 台風状況下の海面交換係数の最適化(Ito et al. 2013)
- NHM-4DVarの高度化(Kawabata et al. 2014)
- 大気海洋結合モデルでの台風強度予測(Ito et al., 2016, 2018)
- Hybrid EnKF-4DVarの開発(Ito et al. 2016)
- Neighboring ensembleアプローチ(Aonashi et al. 2016)
- 大気海洋結合同化システム(Kunii et al. 2017)
- 航空機観測データの同化(Ito et al., submitted)

伊藤の指導学生による卒業研究・修士論文研究

- ソロモン諸島で発生する台風について(Maru and Ito, 2017)
- 2016年台風18号に対する乾燥気塊の影響(村上・伊藤, 2018)
- 「かたぶい」の再現に対する解像度依存性(比嘉・伊藤, 2018)
- 梅雨前線帯の変動に対する外部強制の影響(前川・伊藤, 2018)

まとめに代えて

- 伊藤の台風予報に対する基本的考え
 - 台風物理学の基礎を大事にしたい
 - ⇒ やみくもにやって良くなった、というのは、将来にわたって積み上げが効かない。
 - ⇒ チューニングも重要だが省力化を目指すべき
 - サイエンスは本来楽しいものなので、興味を持って取り組める。それで仕事がはかどる。
 - 気象庁の皆さんに何らかの形で貢献でき、ひいては社会に役立つならば嬉しいことである。