

台風強度予報の改善に向けて 取り組むべき研究課題

嶋田 宇大

気象研究所

台風・災害気象研究部

※本発表の見解は発表者によるもので、気象庁の公式見解ではないことに注意してください。

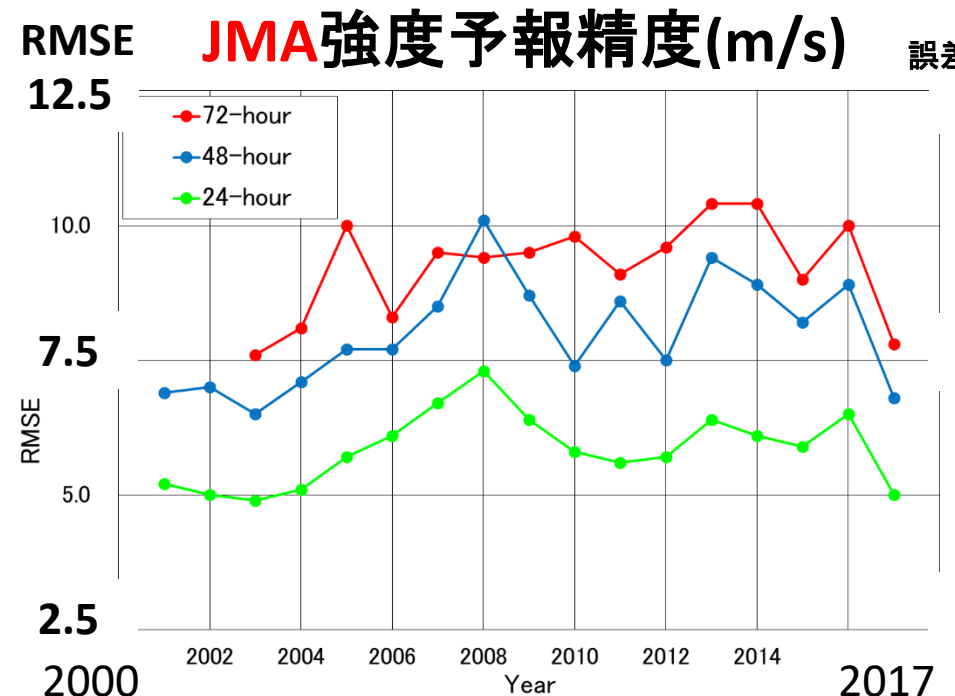
謝辞：本発表にあたり、気象庁アジア太平洋気象防災センターの方々にはデータ提供等、誠にありがとうございました。

Contents

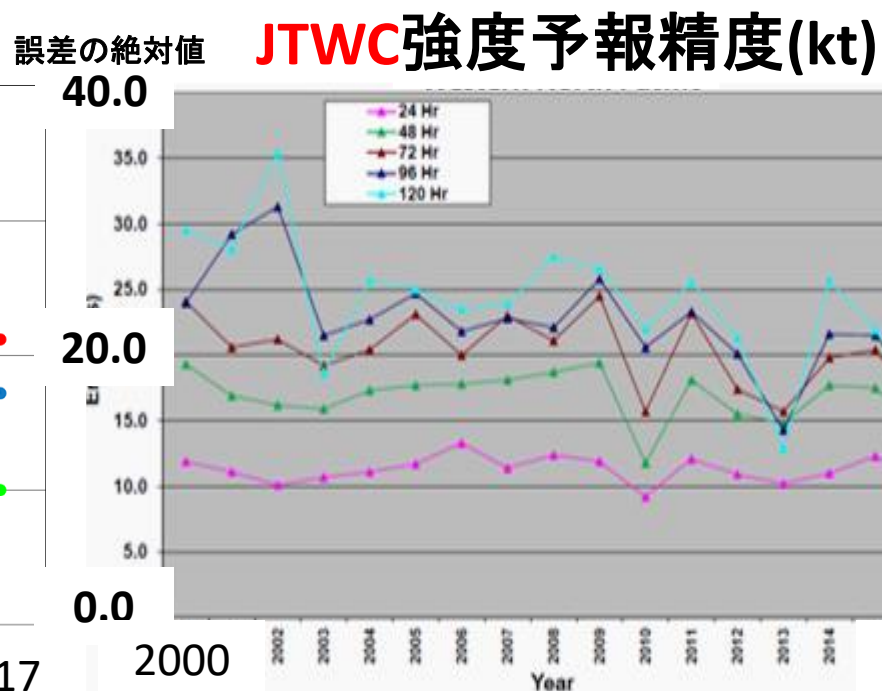
1. 強度予報の現状、手法及び改善の取組み
2. 急発達予測が大きな課題
3. 強度推定の精度向上も重要
4. 強度推定の改善策
5. 暴風の面的予測に向けて
6. 10年以上先を見据えた課題
7. まとめ

強度予報(発表予報)の現状

- ✓ 2000年以降、1-3日先までの強度予報に大きな精度改善は見られない
- ✓ ここ数年はどちらの機関でも減少傾向にある
- ✓ 急発達の頻度が多い年は精度が相対的に良くない傾向



Yamaguchi et al. (2018, SOLA)



Courtney et al. (2019, TCRR)

強度予測の手法

- ✓ **数値予報モデル**: 熱帯低気圧に特化したもの
 - 米国が運用する**HWRF**が2015年以降、最も精度が良い
 - 計算機コスト、技術開発的な問題で、種類は限られる
- ✓ **統計的手法**: 重線形回帰、ロジスティック回帰、判別関数等
 - 世界的に広く採用。**全球数値モデルの熱帯低気圧周辺の環境場予測**を利用。特に**SHIPS**と呼ばれるガイダンスモデルは2014年まで世界で最も精度よく強度を予測
 - **頻度の少ない急発達**の予測が不得手

強度予報の改善は、数値予報モデルの高度化とそれを補完する統計的手法(ガイダンスモデル)の開発によってなされるもの

気象庁の強度予測ガイダンス

- ✓ 米国の開発者からベースとなるコードを譲り受ける
- ✓ 気象研台風研究部で以下のガイダンスを開発 → 気象研技術報告第82号

- 重線形回帰モデル(SHIPS)---嶋田・大和田(2019)
- ロジスティックモデル(LGEM)---入口(2019)
- 急発達確率予測モデル(RIインデックス)---嶋田(2019)
- 簡易軸対称モデル(CHIPS)---沢田(2019)

気象研究所技術報告

第 82 号

台風予報・解析技術高度化プロジェクトチームによる

5 日先台風強度予報ガイダンスの開発

山口宗彦¹、嶋田宇大¹、沢田雅洋¹、入口武史¹、大和田浩美²

¹ 気象研究所台風研究部、² 気象庁

SHIPS: 重線形回帰モデル(気象庁のメインモデル)

Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (DeMaria & Kaplan 1994)

$$y = \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 + \dots$$

y : 予報変数(強度変化量、最大風速もしくは中心気圧)

x_1, x_2, x_3, \dots : 説明変数(プレディクター)

α, β, γ : 回帰係数

説明変数、予報変数の規格化により、各項の寄与率がわかる

Predictorの種類

SHEAR (KT)	鉛直シア(850-200 hPa)
SHEAR ADJ (KT)	鉛直シア(上記以外の層のシア)
SHEAR DIR	鉛直シアの向き
SST (C)	海面水温
POT. INT. (KT)	ポテンシャル強度
200 MB T (C)	200 hPa気温
TH_E DEV (C)	相当温位偏差
700-500 MB RH	対流圏中層の相対湿度(700-500 hPa)
MODEL VTX (KT)	モデルの850 hPa接線風
850 MB ENV VOR	850 hPaの環境場の渦度
200 MB DIV	200 hPaの発散
700-850 TADV	700-850 hPaの温度移流
STM SPEED (KT)	ストームの移動速度
HEAT CONTENT	海洋貯熱量
STEERING LEVEL	ステアリングレベル
IR TB STD DEV	輝度温度の標準偏差(50-200 km半径)
IR PIXELS < -20C	-20°C以下の輝度温度のピクセルの割合

- ✓ 回帰係数は、解析値及びベストトラックデータを用いて作成される。
- ✓ 回帰係数の作成には10年程度のデータセットが必要。
- ✓ 現在は26個の説明変数で回帰式を作成。

GSMの出力結果を利用

→統計力学モデルと呼ばれる

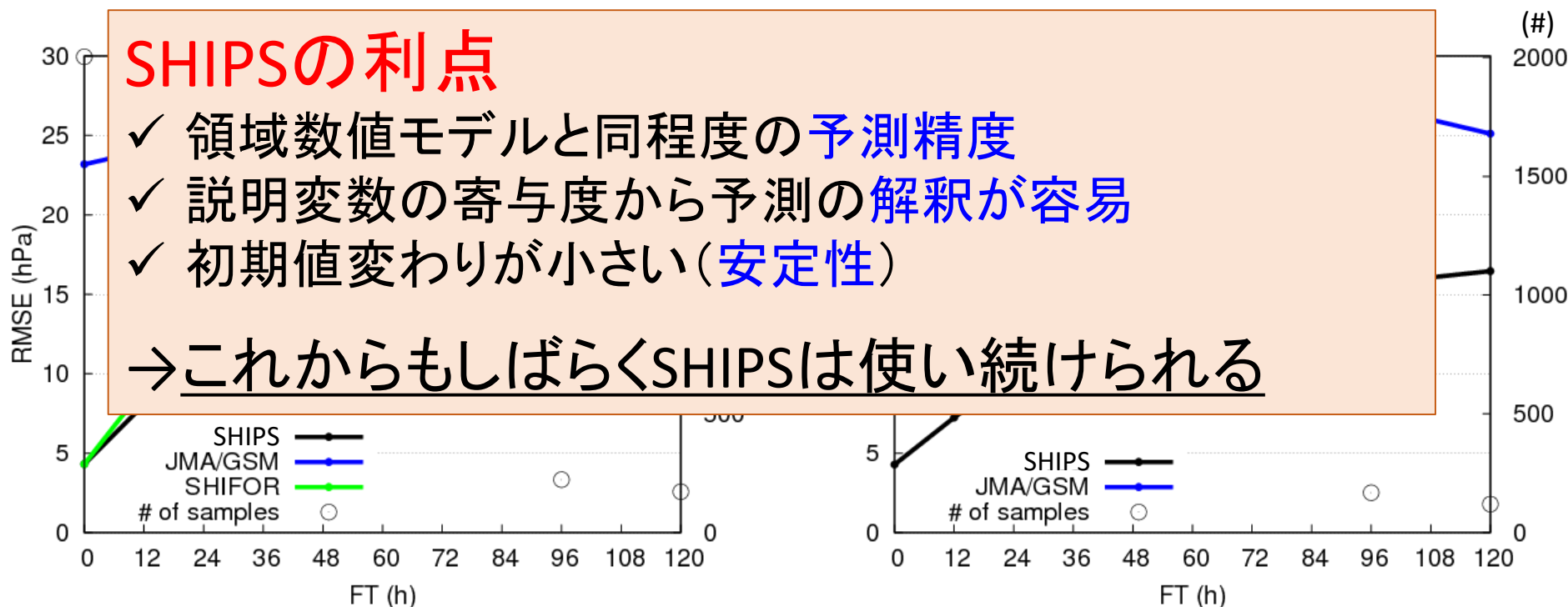
SHIPSの精度と5日予報の開始

- ✓ SHIPSが従来手法に比べ良い精度であることを確認
- ✓ 2019年3月以降の台風から、強度予報を5日先まで延長

SHIPSの利点

- ✓ 領域数値モデルと同程度の予測精度
- ✓ 説明変数の寄与度から予測の解釈が容易
- ✓ 初期値変わりが小さい(安定性)

→ これからもしばらくSHIPSは使い続けられる



※2013-2015の予測サンプルで検証

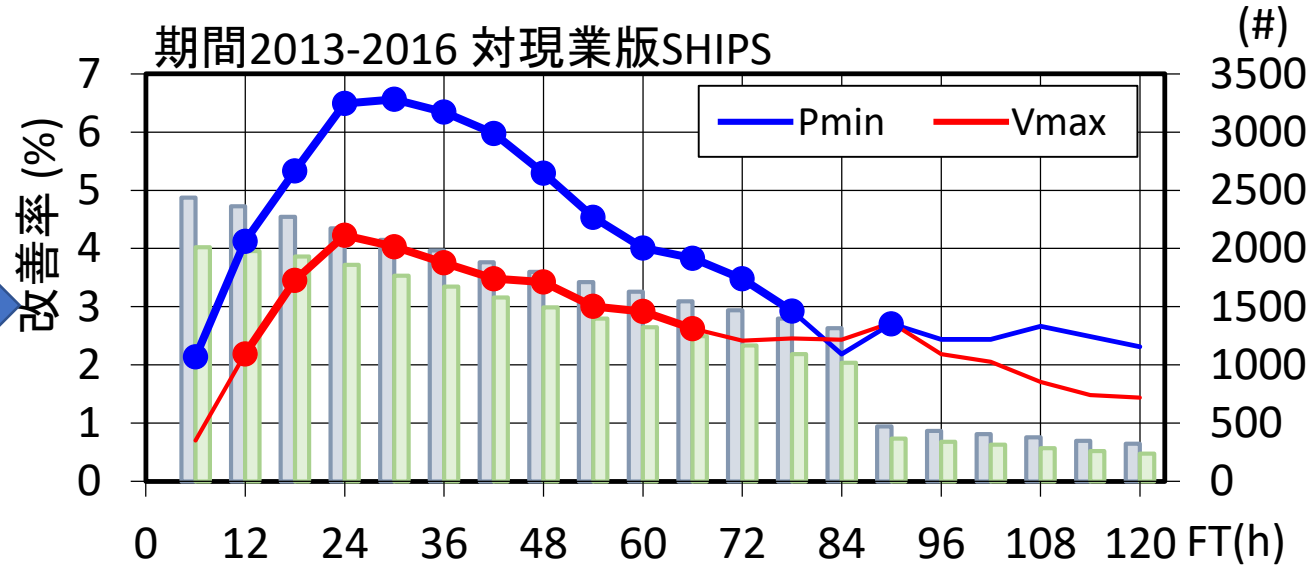
SHIPSの精度改善

SHIPSに新規変数追加

台風内部構造情報

- ・ 軸対称度
- ・ 降水域比率
- ・ 最大降水半径
- ・ 積算降水量
- ・ ロスビー数

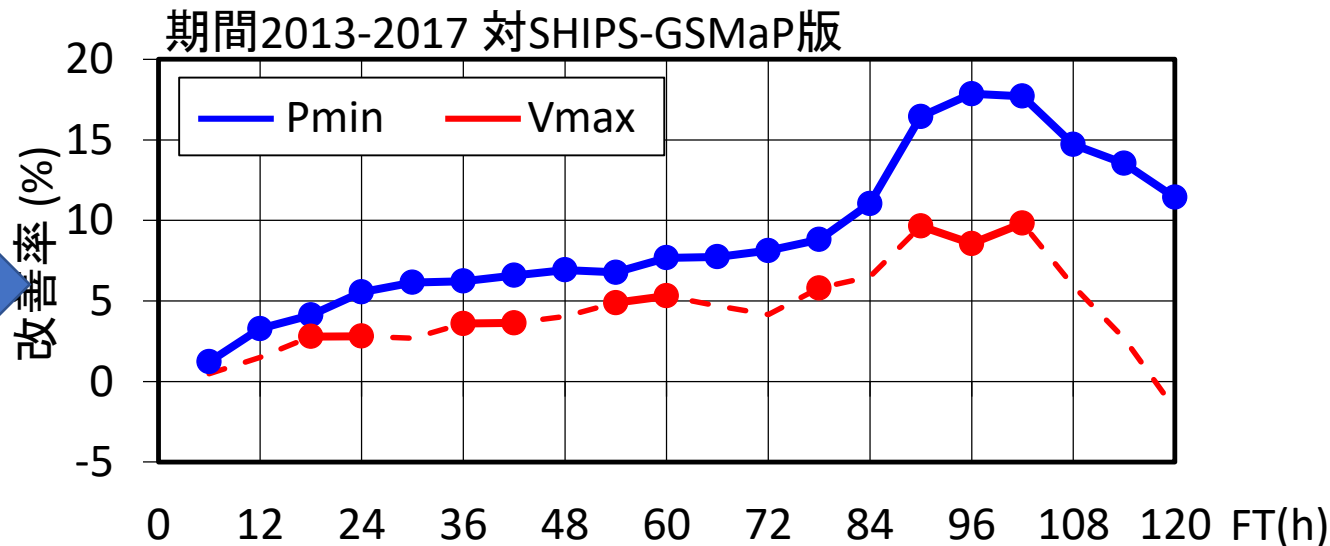
(Shimada et al. 2018 WAF)



※太線は統計的有意

ランダムフォレストによる分類をSHIPSに追加

- ✓ 発達・定常・衰弱に対応した3つのSHIPSを構築
- ✓ どのモデル予測をどの割合で利用するかは、ランダムフォレストによる予測で決定

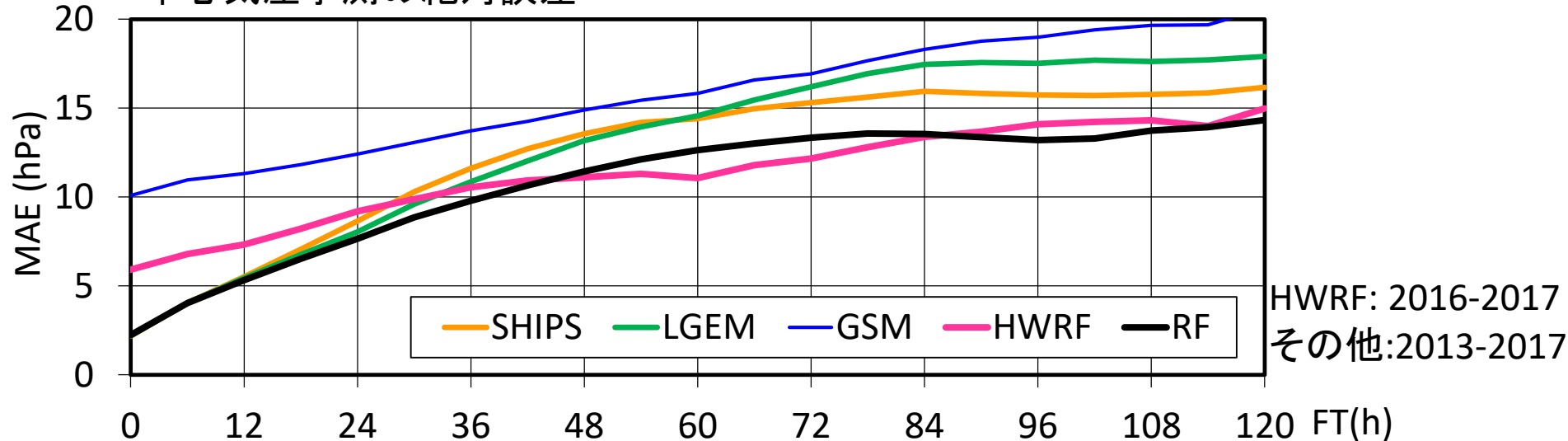


(Shimada 2018 秋学会)

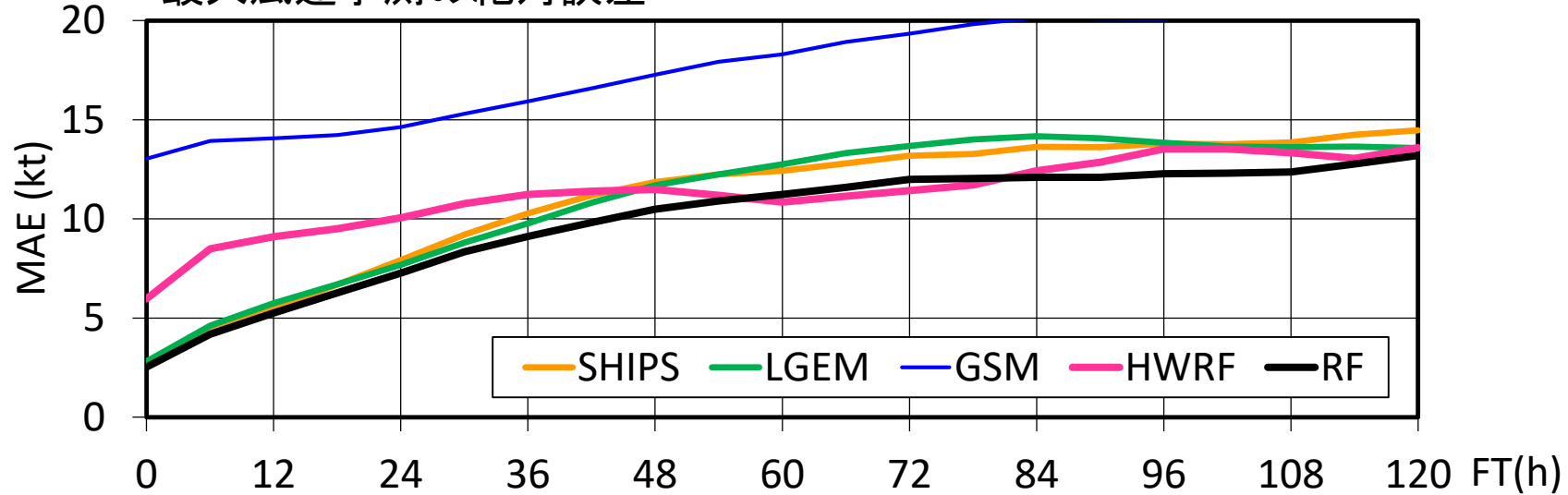
予測モデル間の精度比較

※サンプルがモデル間で異なる

中心気圧予測の絶対誤差



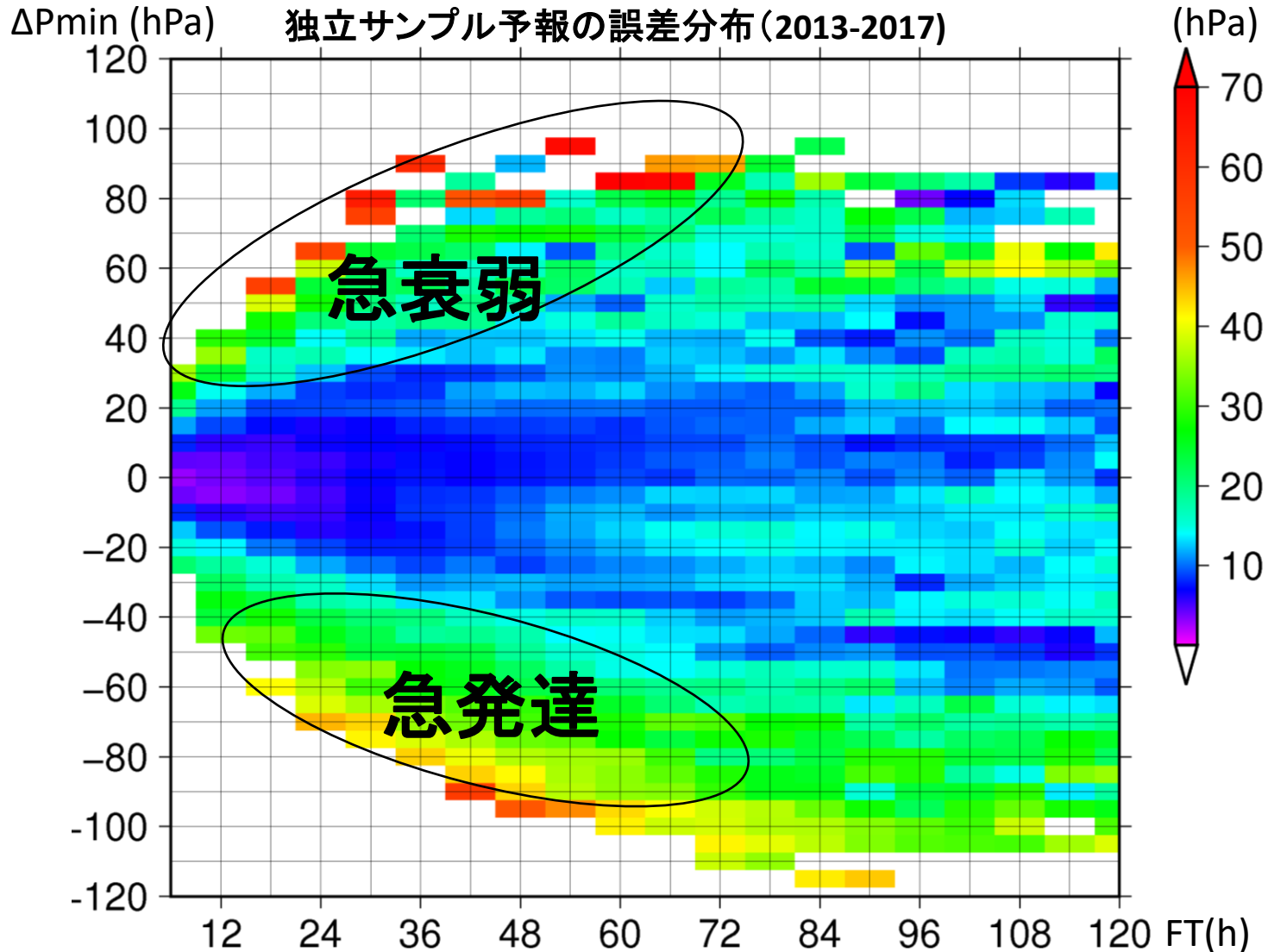
最大風速予測の絶対誤差



絶対誤差分布 (ランダムフォレスト手法)

横軸: 予測時間

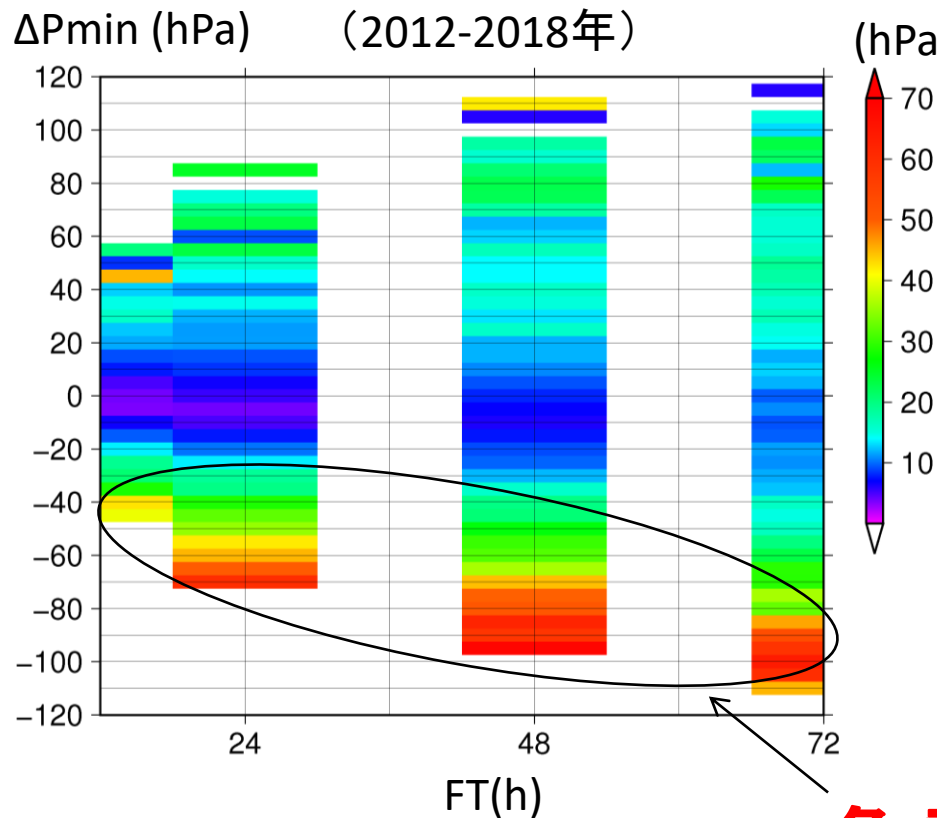
縦軸: 初期時刻からの強度変化量(ベストトラックから算出)



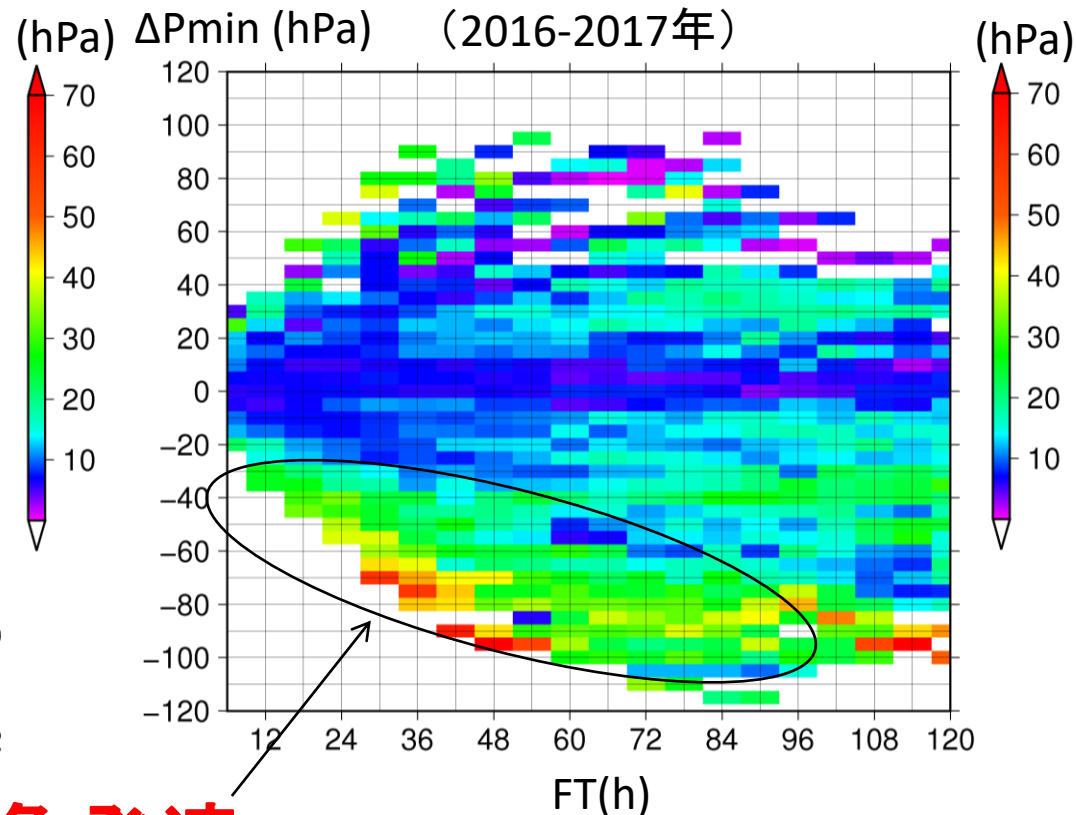
急発達予測が大きな課題

- ✓気象庁の発表予報、HWRPも、急発達の予測ができていない
- ✓HWRPは急衰弱の予測が良くてきている時がある

JMA中心気圧発表予報の絶対誤差分布



HWRP中心気圧予測の絶対誤差分布



急発達

IWTC勧告(2018年): 強度予報

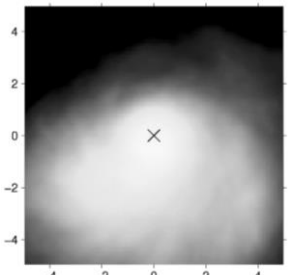
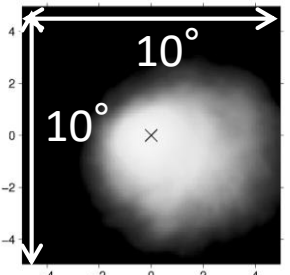
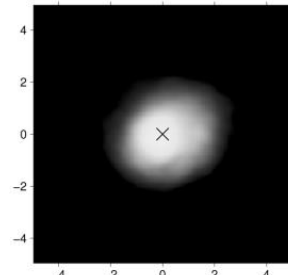
WMOの世界気象研究計画(WWRP)及び熱帯低気圧計画(TCP)がおおよそ4年に1回開催する会合。熱帯低気圧の様々な分野の研究者及び各国の予報業務担当者が一同に集い、各分野の現状や問題点を報告し、今後の研究開発と国際協力の方方向性について勧告を行う。

- ✓(研究者向け) 熱帯低気圧の強度変化につながる条件、前兆現象及びプロセスの理解を改善する研究を継続すること。特に急発達開始、継続期間及び強度変化率に関する研究に注力すること。
- ✓(研究者向け) 第二壁雲形成と眼の壁雲交換、及びそれらに関連する構造・強度変化に関する研究を継続すること。現業予報官に第二壁雲形成と眼の壁雲交換に関する可能性情報(どんな風速場の変化が起こるか、眼の壁雲交換が完了するかどうかなど)をガイドできるようにすること。
- ✓(研究者及び現業機関向け) 診断的ツール(特に鉛直シアー)、数値予報モデル、統計力学モデル、機械学習手法、及び確率予測のためのアンサンブルなど、強度予報ガイダンスの開発、可視化、及び現業センターへの導入を進めること。
- ✓(WMO向け) 予報の大外し事例の理解を深めることを目的に、アンサンブル感度解析など様々な診断手法に関する相互比較プロジェクトを調整すること。

急発達予測の改善に向けて

- ✓ 急発達事例の構造的特徴別に環境場条件を調査
- ✓ 小型の急発達台風は、環境場条件が他事例と大きく異なる
→急発達条件をより詳細に理解できれば、急発達の診断的予測が可能に

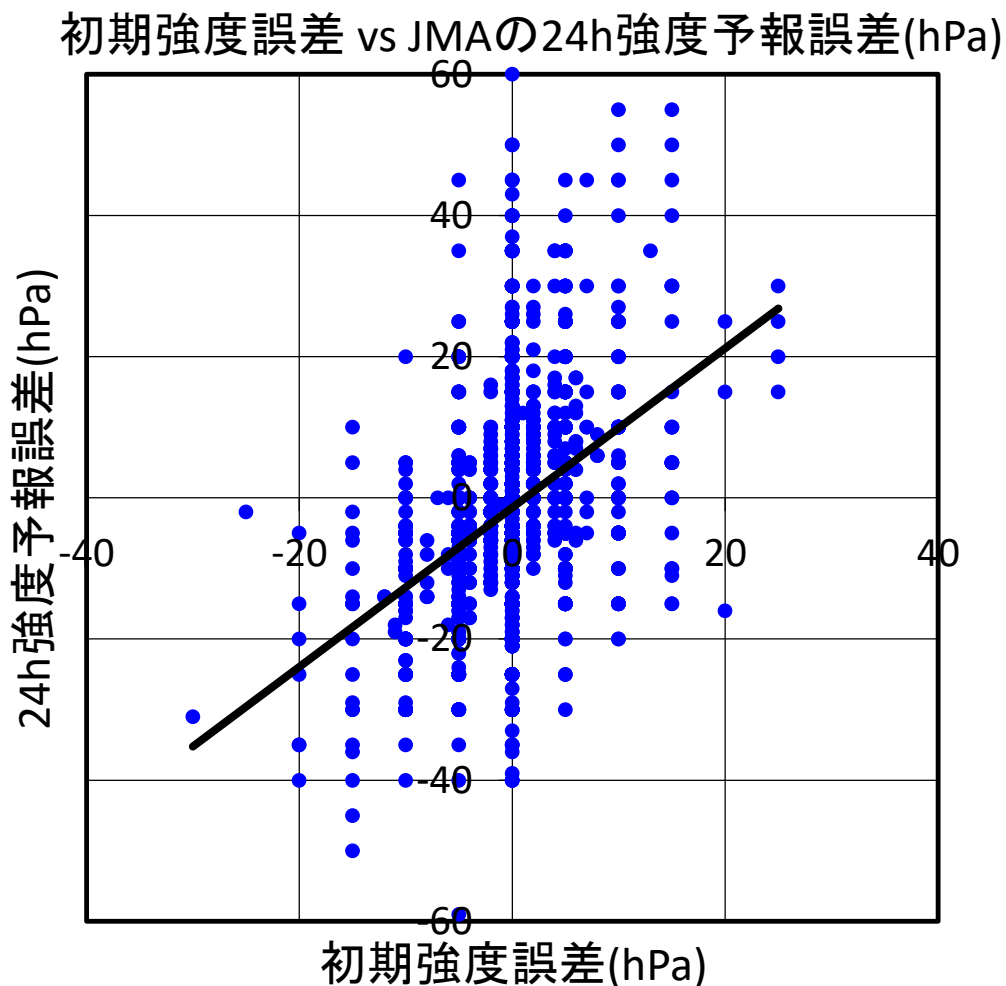
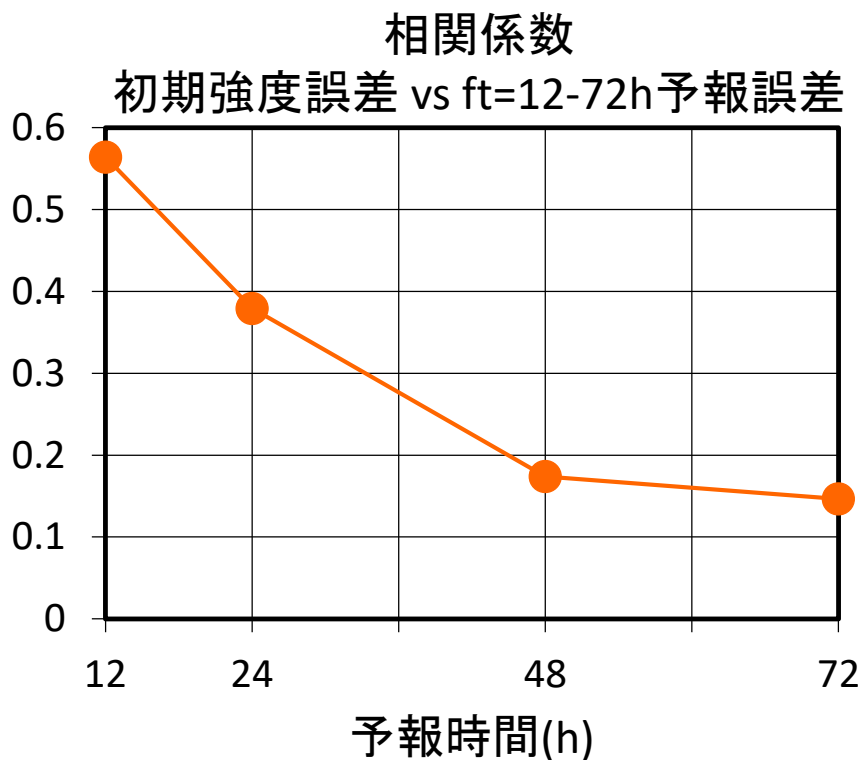
詳しくは5月18日午後「熱帯大気・台風II」セッションB462で

サイズ	大型(N=85)	中型(N=90)	小型(N=28)	平均
構造	非対称	非対称	軸対称	
雲頂温度(°C)	-75 °C	-70 ~ -75 °C	-65 °C	
レインバンド	有	有	無	
鉛直シアー(m/s)	5.2±2.7	5.1±2.4	3.1±1.7	4.9
SST(°C)	29.4±0.5	29.4±0.5	29.2±0.7	29.4
OHC (kJ/cm ²)	95±37	89±33	69±40	88.8
200hPa発散 (s ⁻¹ × 10 ⁷)	89±29	55 ±28	17±21	63.8
100hPa気温(°C)	-81±2	-80±2	-77±3	-80
合成雲画像				

強度推定誤差と強度予測誤差の関係

✓ 2012年から2018年の事例で検証

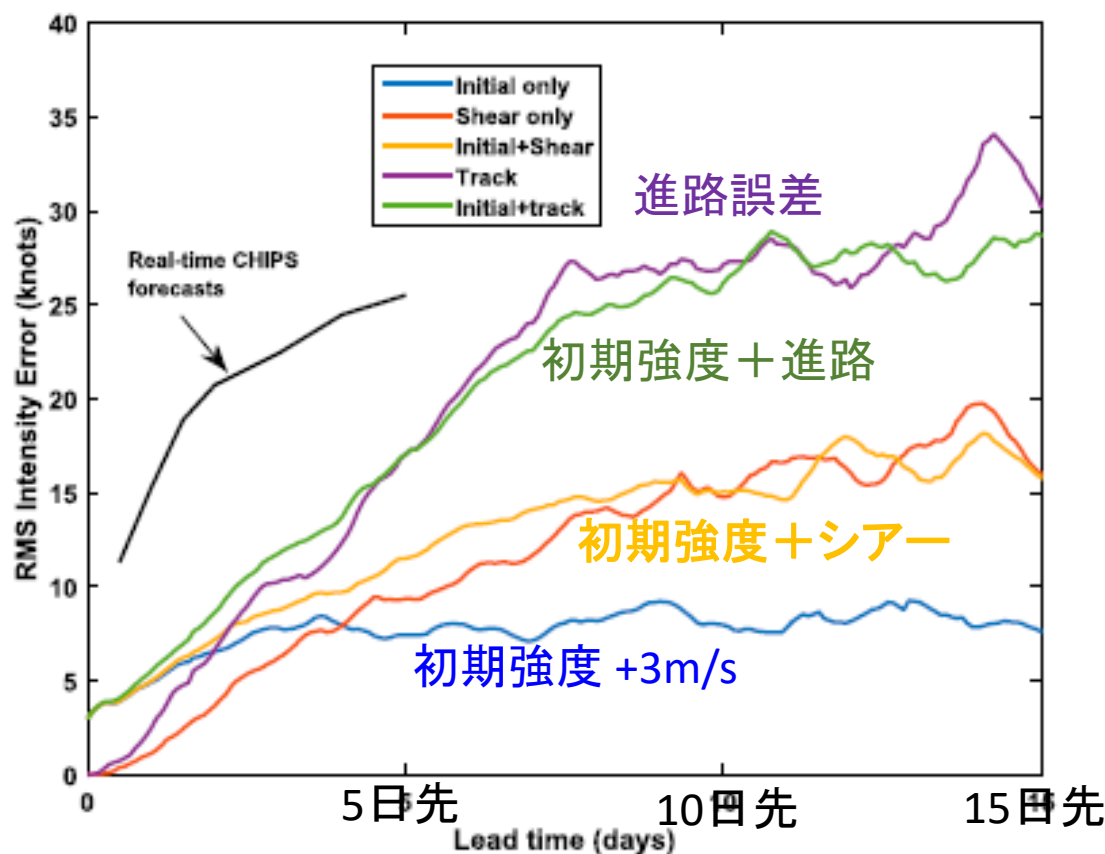
✓ 24時間予測までは初期誤差の影響が大きい→強度推定の精度も重要



強度推定誤差と強度予測誤差の関係

Emanuel and Zhang (2016)のCHIPSを用いた研究:

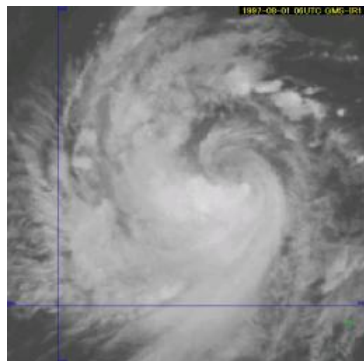
- ✓ CTL実験をパーフェクトモデルと見なし、初期強度、進路、鉛直シアーの誤差が強度予測に与える影響を調査
- ✓ 初期強度誤差は2-4日以内の予測に大きく影響.



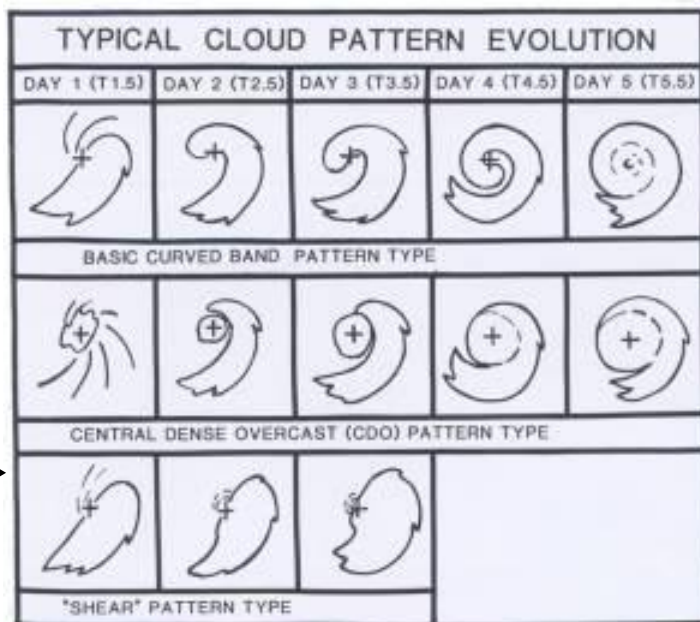
強度推定手法：ドボラック法

- 衛星雲パターンから経験的に強度を推定する手法
- 発生後5日間程度で成熟期に達するような強度変化を想定した手法(日変化はノイズと見なす=手法上の限界)
- とはいえ、**まだ改善の余地がある**

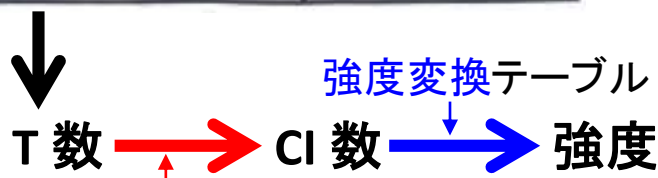
ドボラック法の概要
衛星センター(2004)



赤外画像



1-8まで
0.5単位



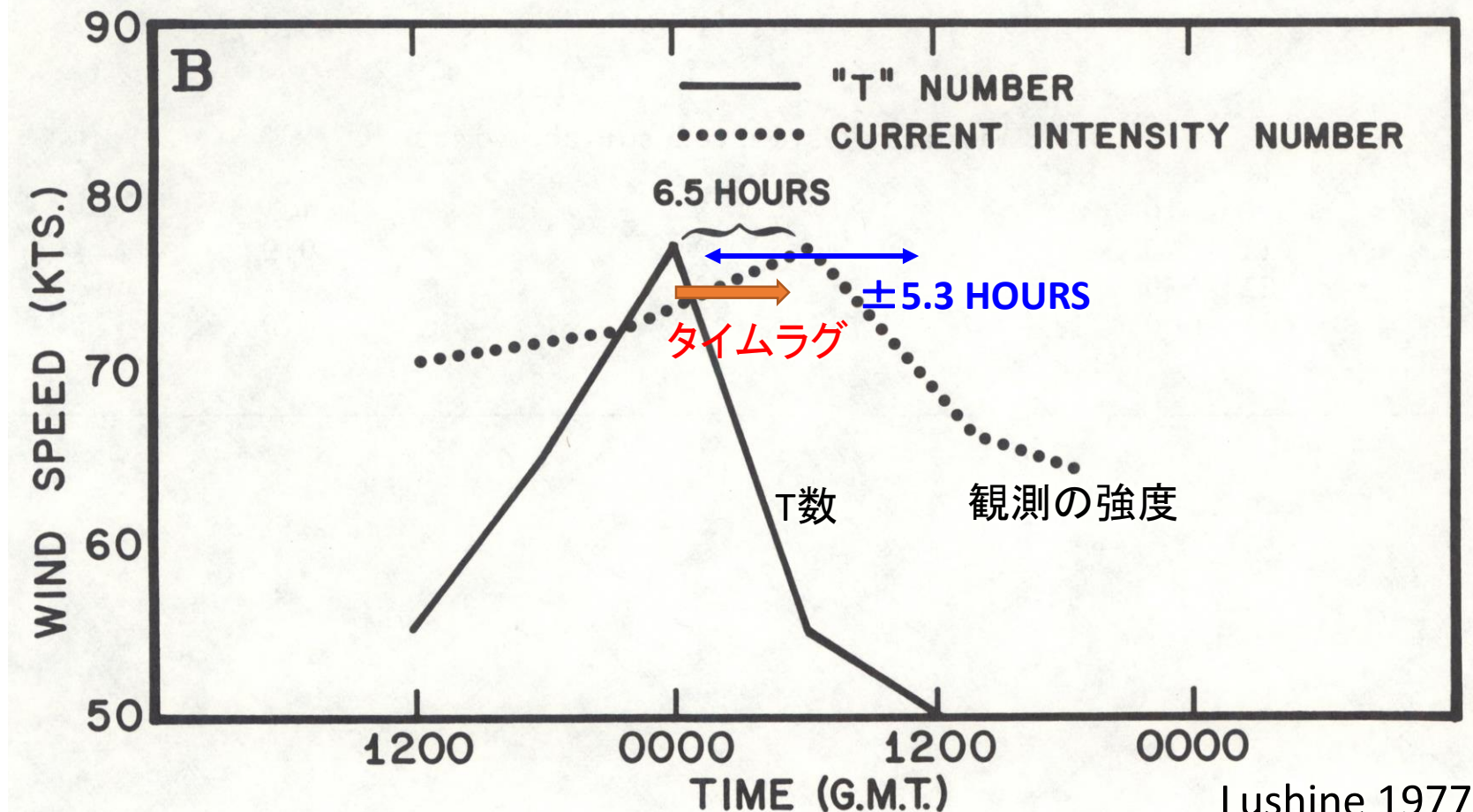
衰弱開始時に12時間のタイムラグ

強度変換テーブル

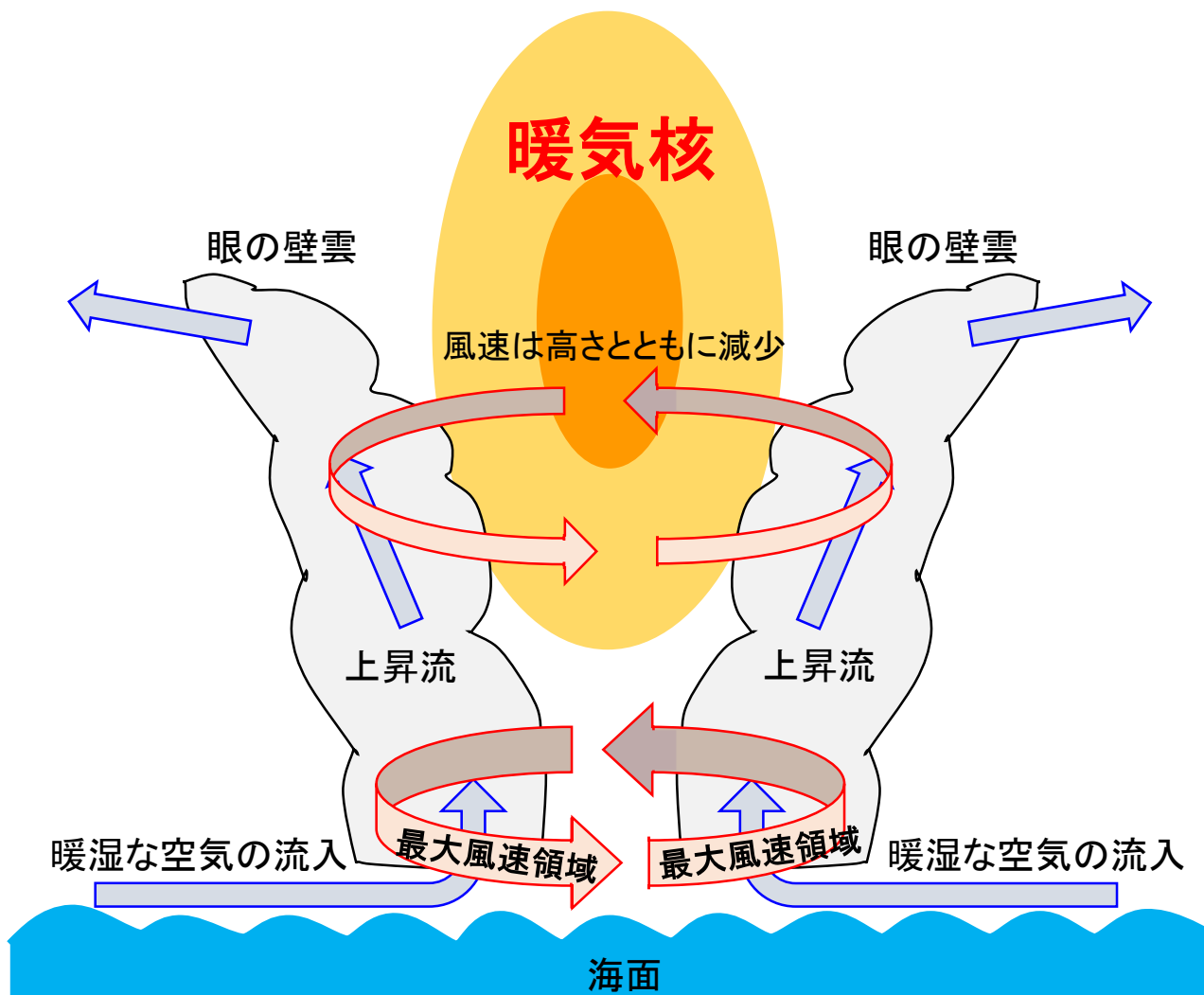
CI数	最大風速 (10分平均 風速、ノット)	中心気圧 (hPa)
0	--	--
0.5	--	--
1	22	1005
1.5	29	1002
2	36	998
2.5	43	993
3	50	987
3.5	57	981
4	64	973
4.5	71	965
5	78	956
5.5	85	947
6	93	937
6.5	100	926
7	107	914
7.5	115	901
8	122	888

T数とCI数のタイムラグルール

- Lushine (1977)が「雲パターンの衰弱開始と推定強度のラグは12時間にすべし」と勧告したルール。
- 発達期はT数とCI数が等しいが、衰弱期は雲パターンが強度に先行して衰弱するので、T数が減少し始めて12時間後にCI数が減少する関係にある。

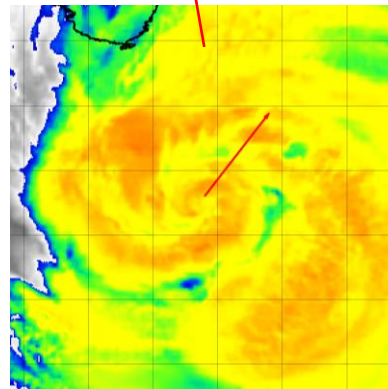
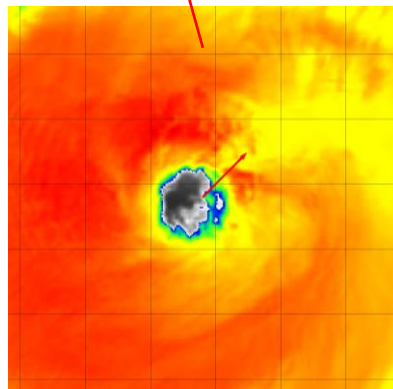
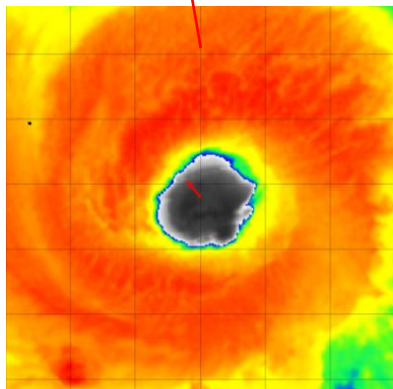
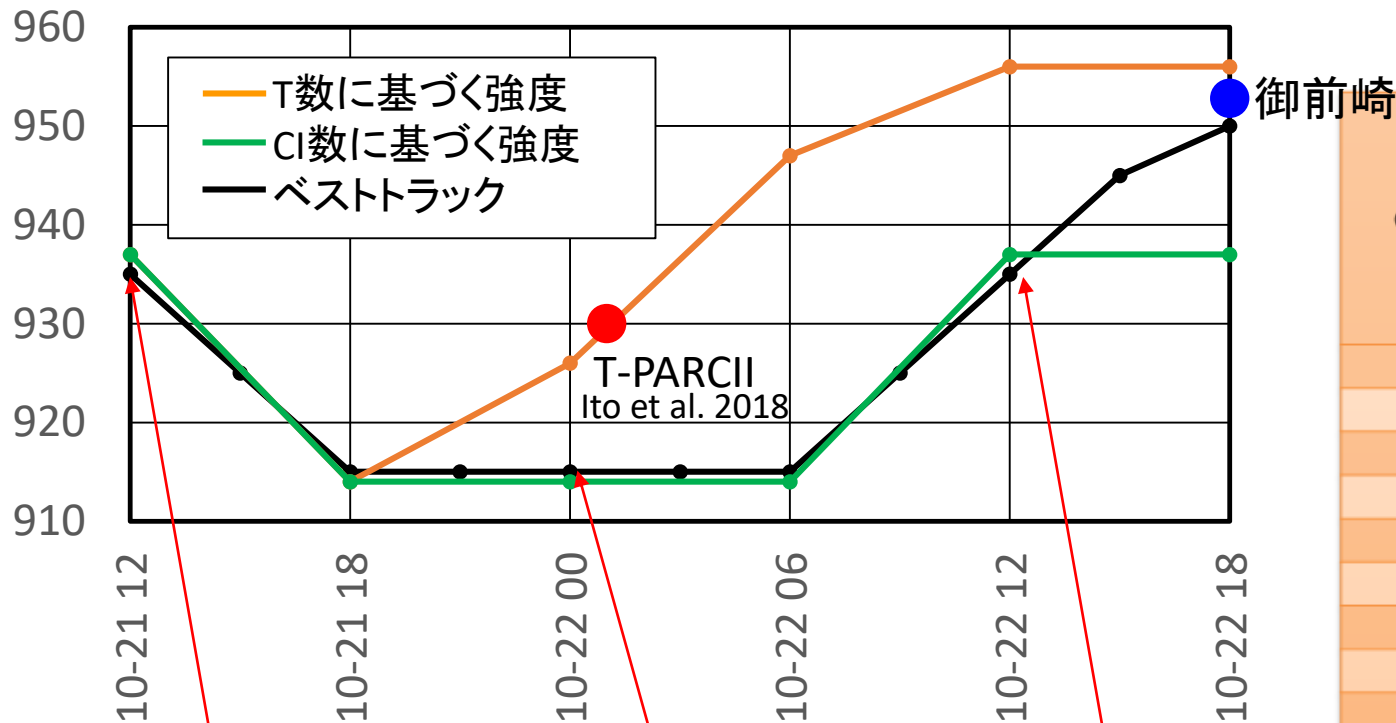


台風強度と暖気核



T1721の場合

✓雲パターンの変化(T数)に対して実際の強度変化が忠実だったように見える

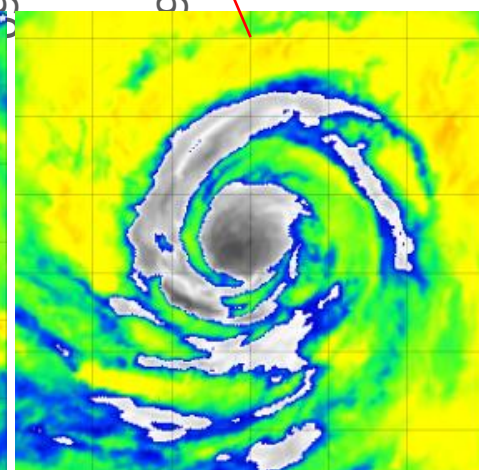
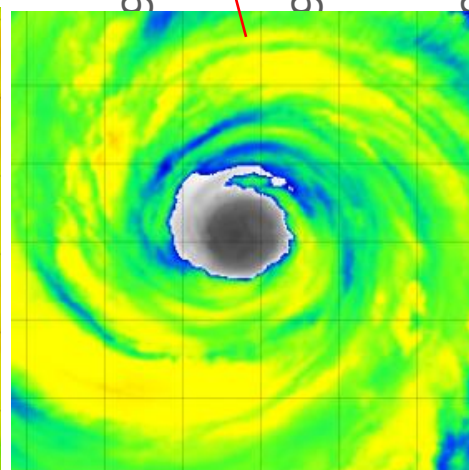
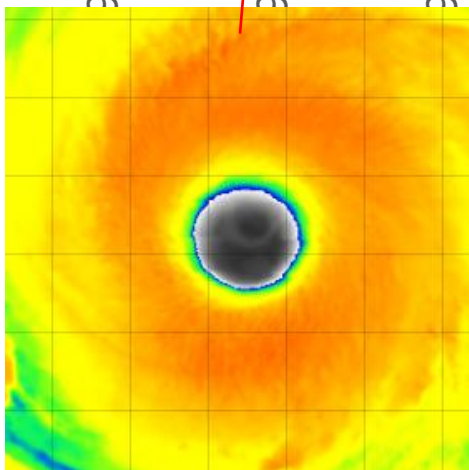
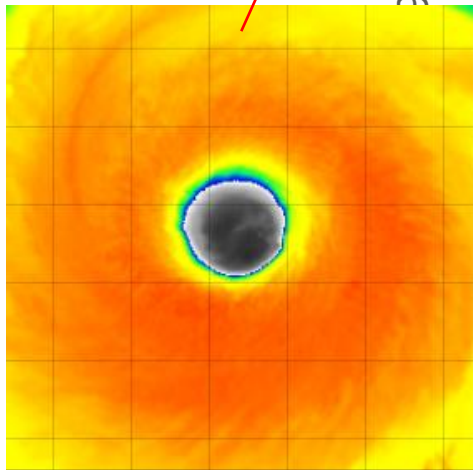
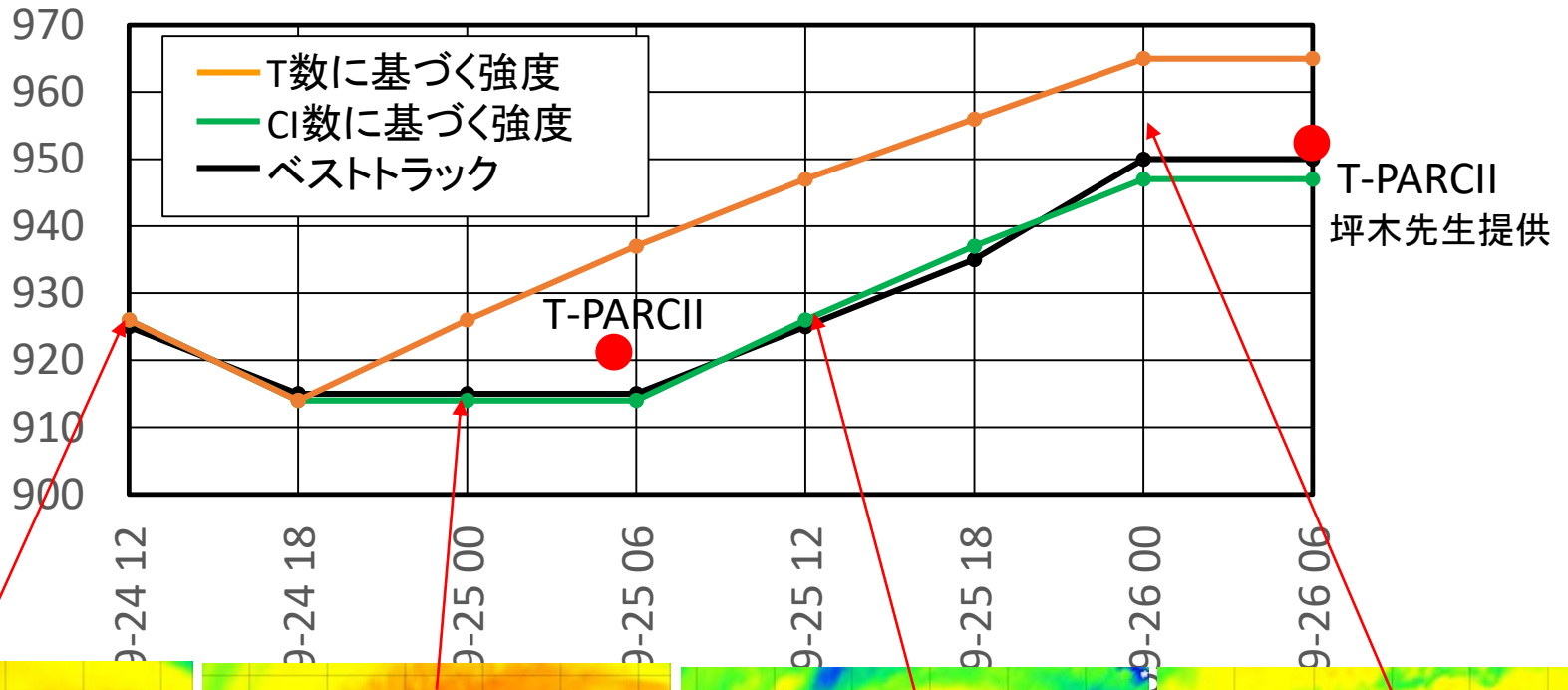


CI数	気象庁(木場ほか、1990)	
	最大風速 (10分平均 風速、ノット)	中心気圧 (hPa)
0	--	--
0.5	--	--
1	22	1005
1.5	29	1002
2	36	998
2.5	43	993
3	50	987
3.5	57	981
4	64	973
4.5	71	965
5	78	956
5.5	85	947
6	93	937
6.5	100	926
7	107	914
7.5	115	901
8	122	888

気象研HPより

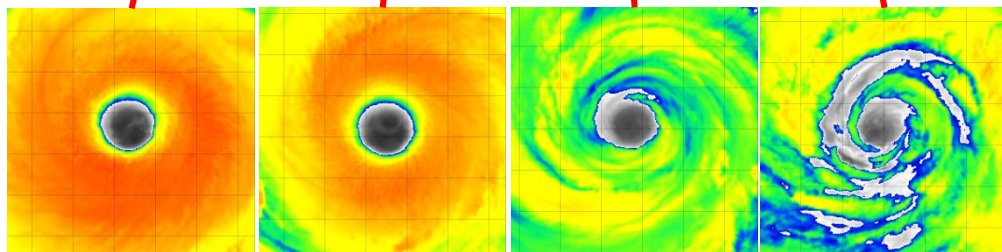
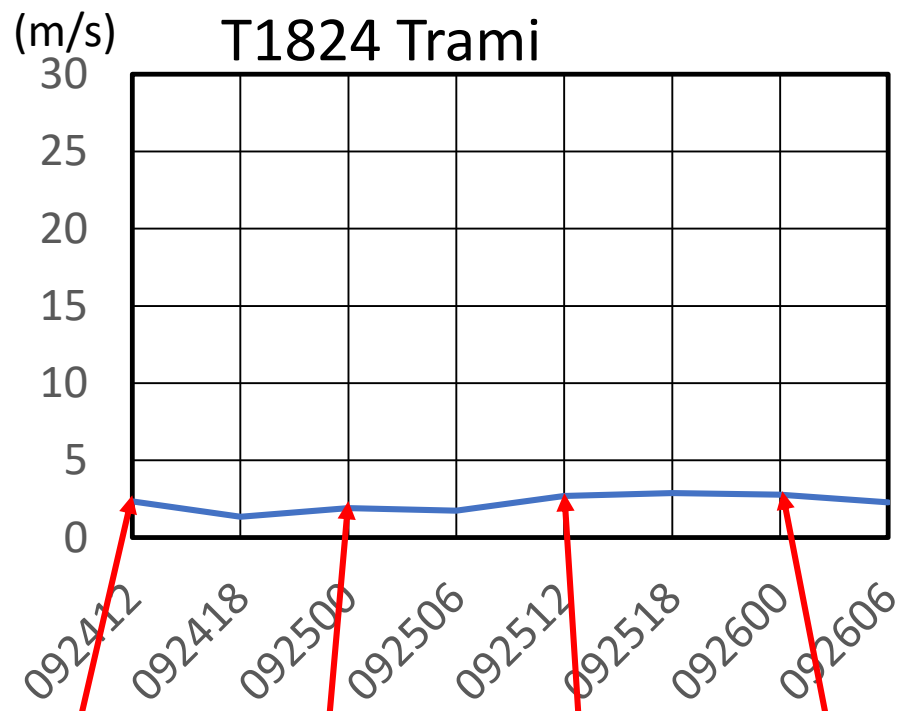
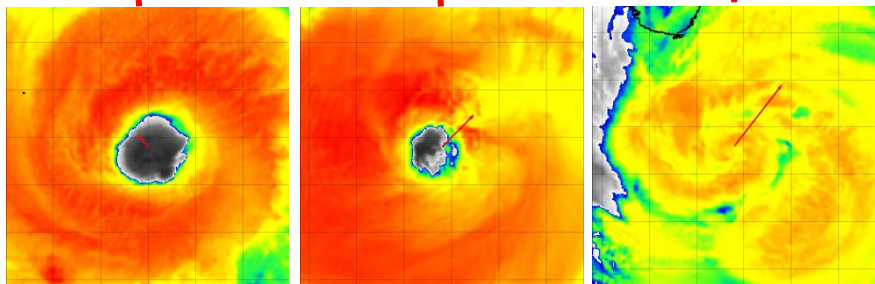
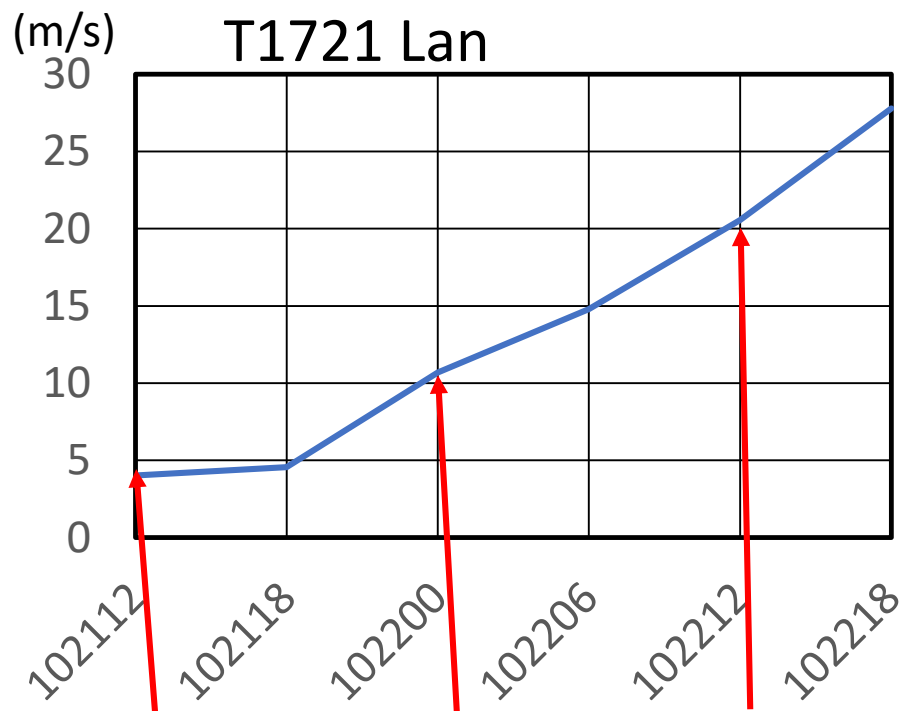
T1824の場合

✓雲パターンではなく、**CI数に対して**実際の強度変化が忠実だったように見える



T1721とT1824で何が違ったのか(仮説)

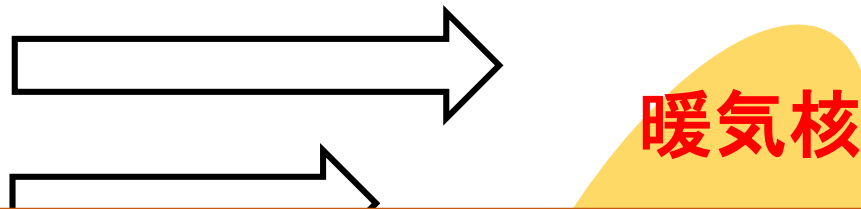
- ✓ 台風周辺の鉛直シアー(850-200hPa)が大きく異なる
- ✓ 雲パターンに変化をもたらす要因が異なる



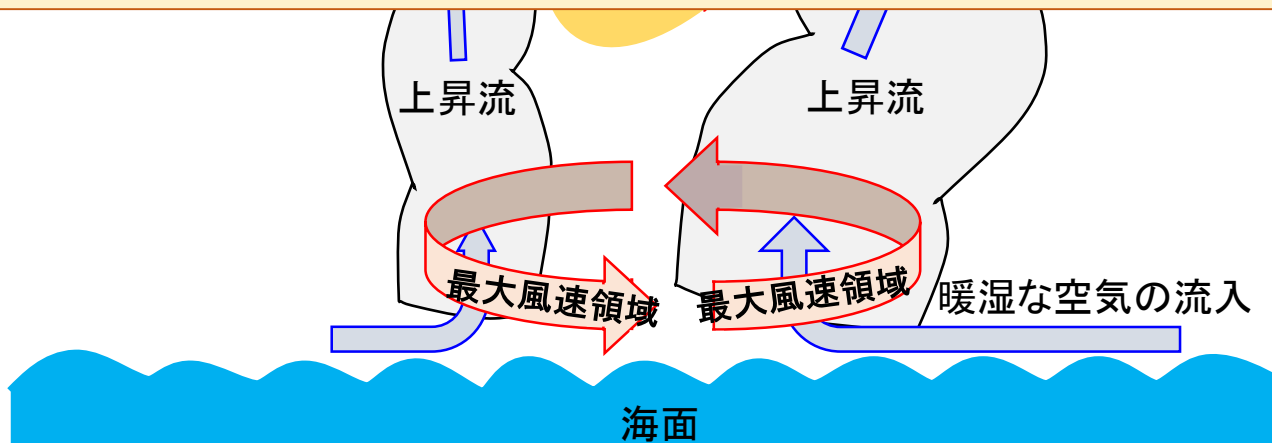
鉛直シアー状況下の台風

Frank & Ritchie (1999)の説明:

台風の上層暖気核が強い鉛直シアーで喚起され、中心気圧が上昇する



T-PARCIの観測データから得られた仮説:
鉛直シアーの効果や雲パターンの変化要因を考慮したCI数のルールが設定できれば、ドボラック法の推定精度をさらに向上させられるのではないかと



台風に特化したAMVの開発と 強度推定手法の開発

基盤A「新世代気象衛星の台風高頻度観測による高精度風プロダクト開発と台風の変動過程の解明」研究代表：堀之内武北大准教授

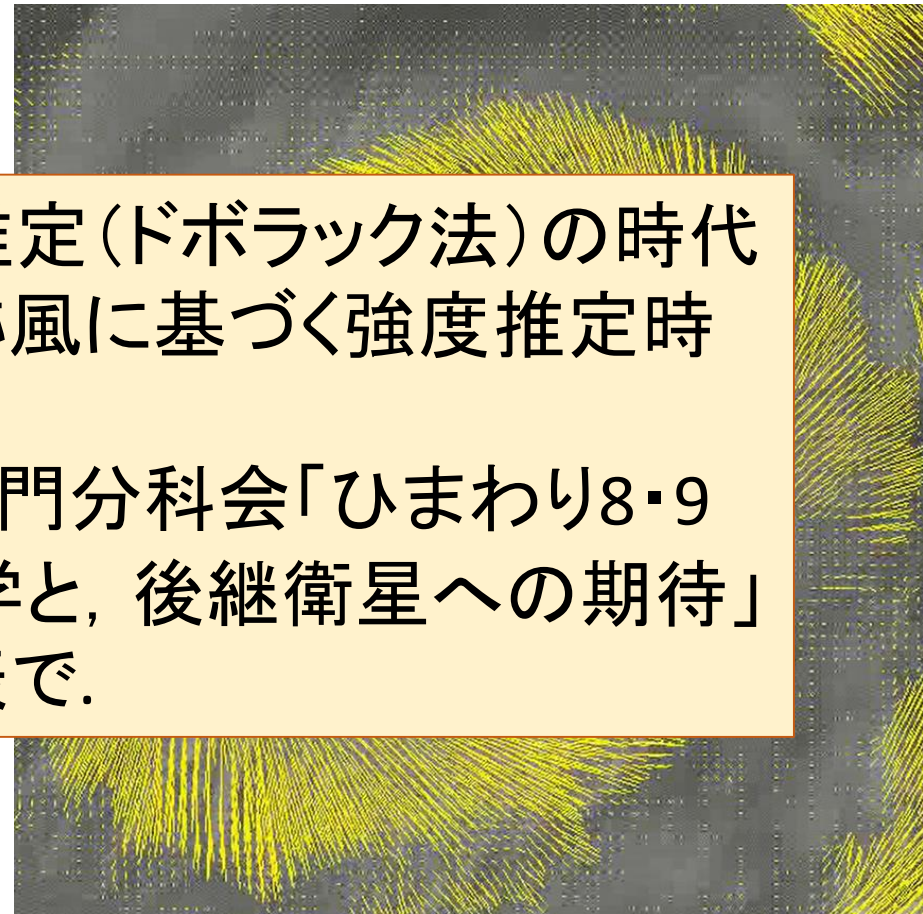
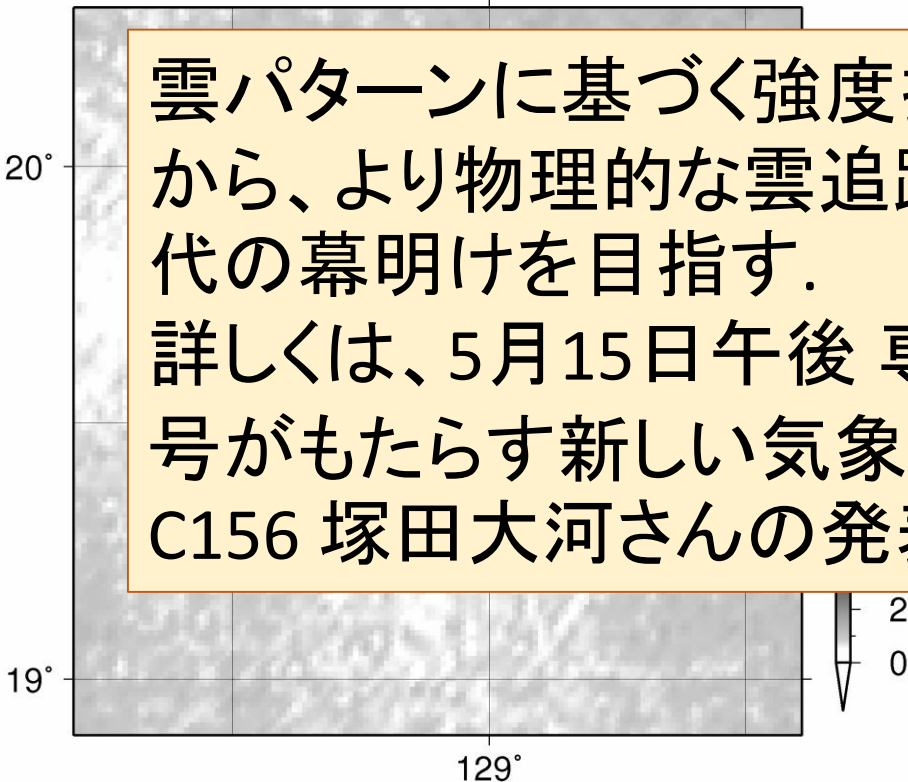
高時間分解能の面的な風速分布

スプリット画像(B13-B15)

2018/09/24 2100UTC Pmin=915.0 Vmax=54.0

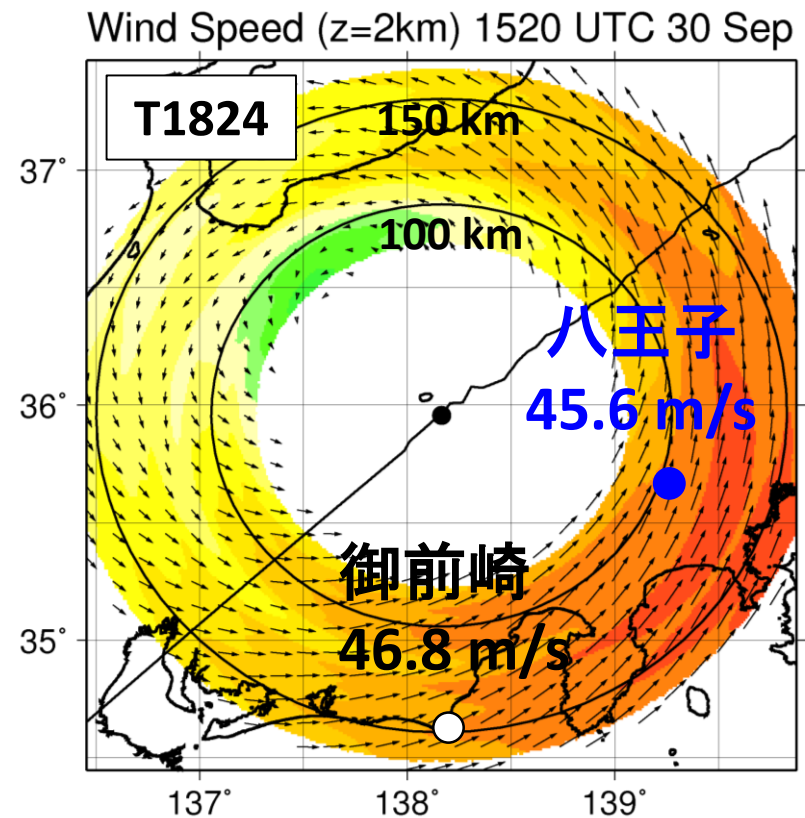
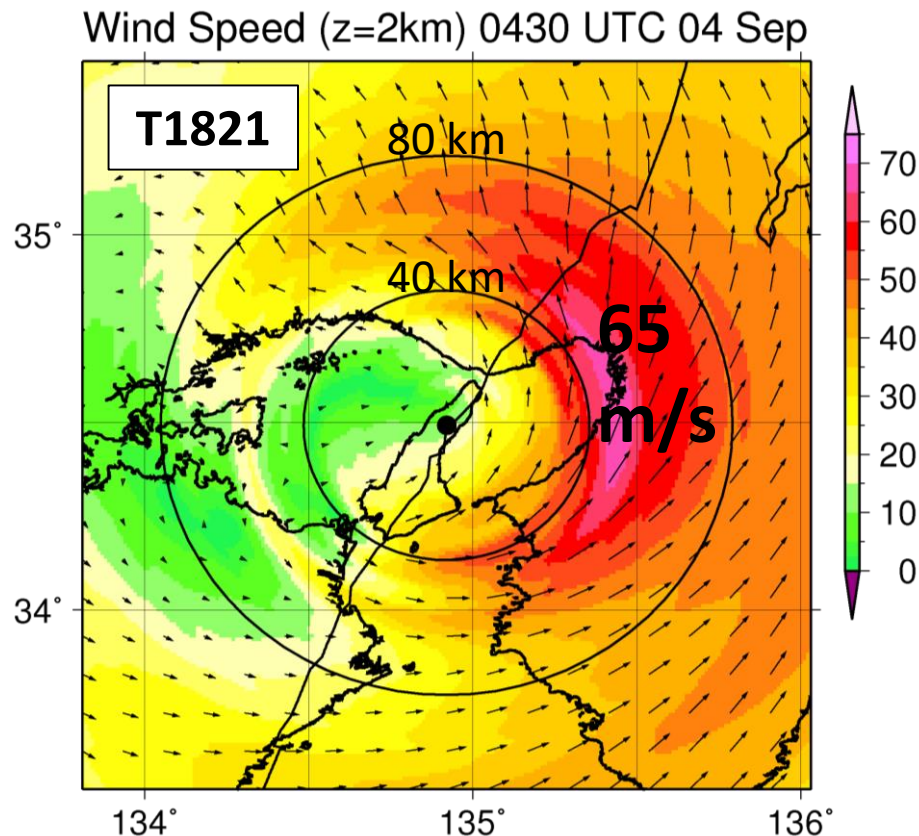
雲パターンに基づく強度推定(ドボラック法)の時代から、より物理的な雲追跡風に基づく強度推定時代の幕明けを目指す。

詳しくは、5月15日午後 専門分科会「ひまわり8・9号がもたらす新しい気象学と、後継衛星への期待」C156 塚田大河さんの発表で。



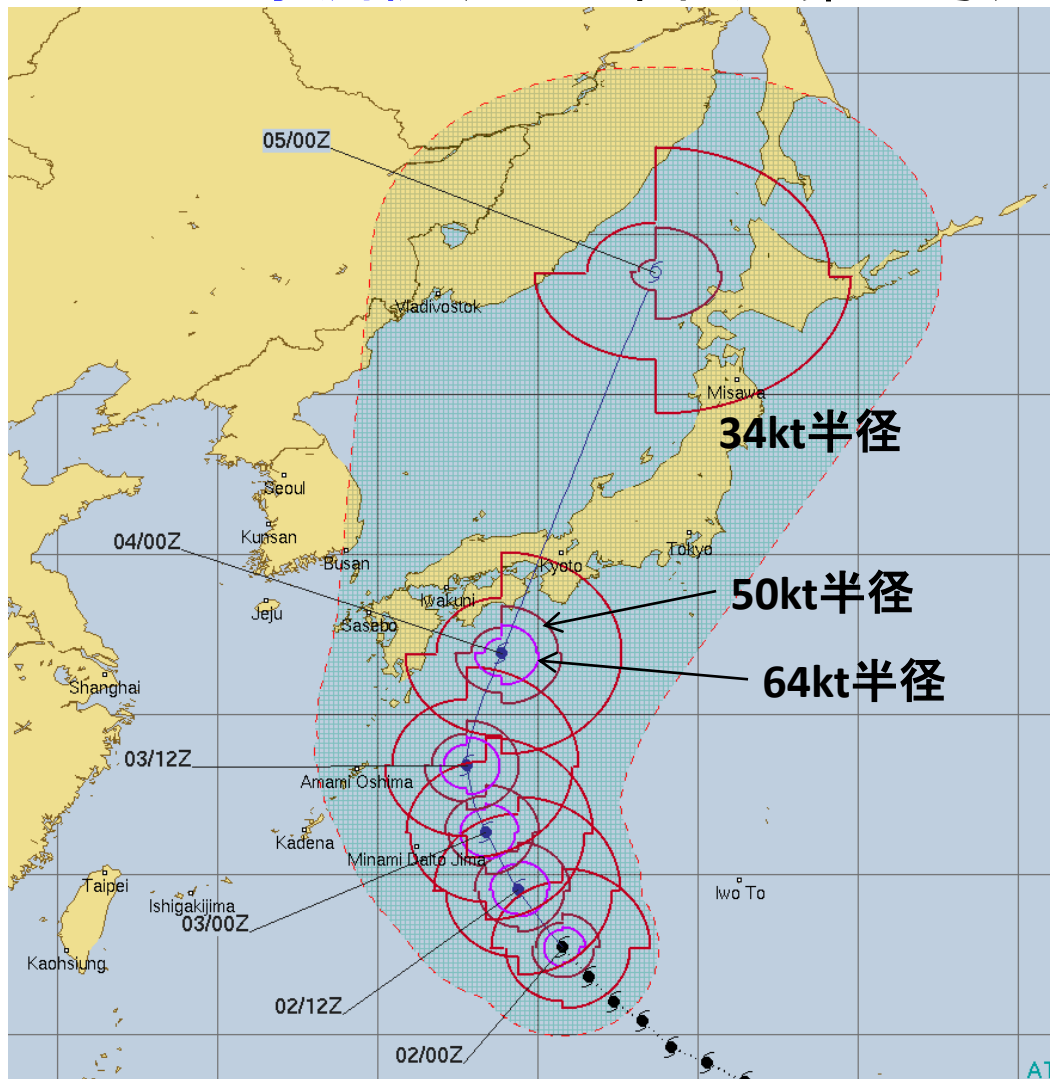
暴風の面的予測に向けて

- ✓ 台風は事例により風速分布が大きく異なる(例: 2018年台風第21号と第24号)
- ✓ 2018年台風第21号に関しては、損害保険金の支払額が国内の風水害で過去最高(平成31年3月11日現在で約9700億円)
- ✓ 鉄道の計画運休など、都市部の社会インフラ管理への暴風分布予測の重要性が増している



暴風の面的予測に向けて

JTWCの予測例(2018年台風第21号)



【主な手法】

SHIPSと同様な**統計力学手法**

(Knaff et al. 2017)

他に数値モデル等も組み合わせて

【Knaff et al. 2017 の手法】

- 赤外衛星画像と水平サイズの統計的關係

(学習サンプルと初期値で利用)

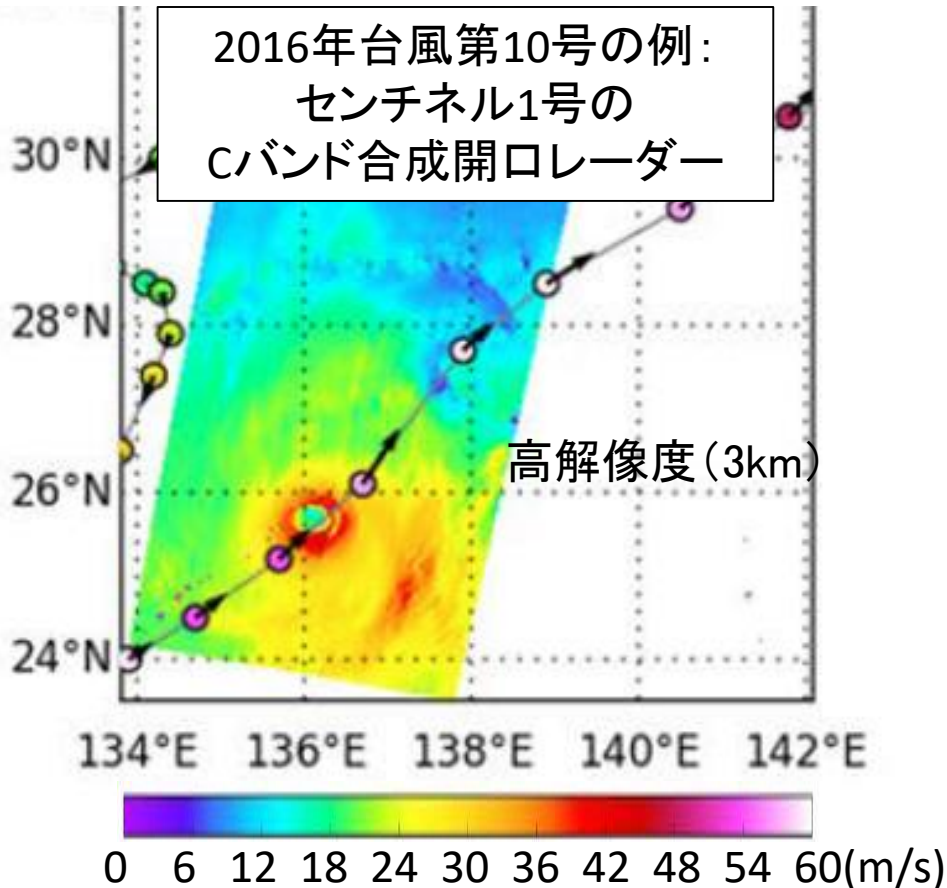
- 水平サイズ・動径構造の予測

→SHIPSに類似した重線形回帰

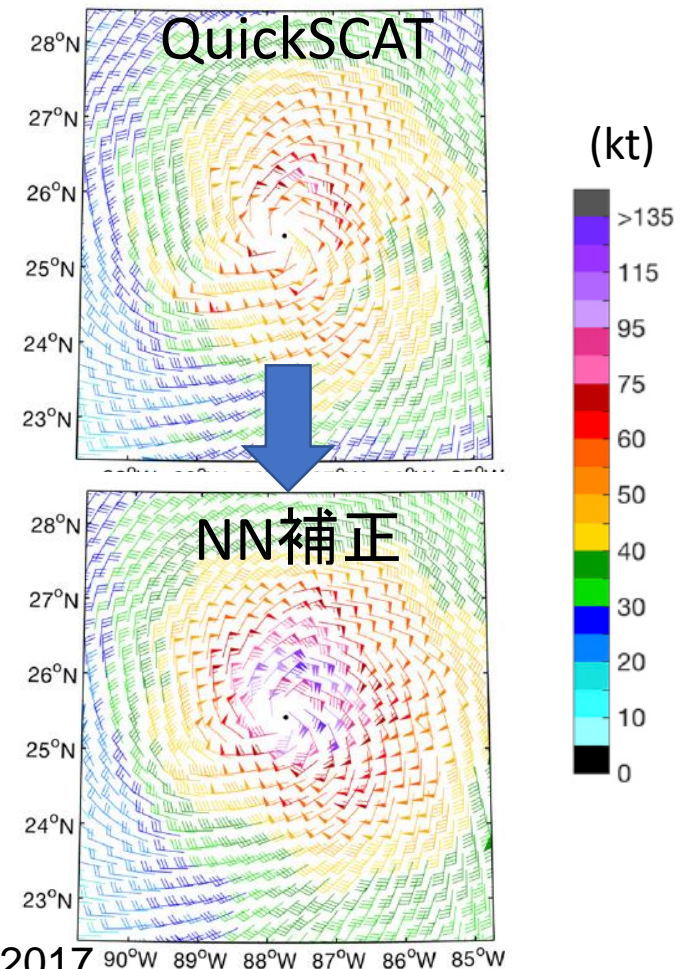
- 最後に移動方向・速度、波数1の非対称性、緯度を考慮して風速分布を決定

暴風の面的予測に向けて

- ✓ 台風内部コア域も解像可能な観測データの蓄積(レーダー、衛星海上風)
- ✓ 過去の観測に基づくニューラルネットワーク(NN)を用いた風速分布補正手法
→ 数値モデルの風速分布を適切に補正し、台風の詳細な暴風分布を予測することは技術的に可能なはず



Meissner & Ricciardulli 2018



Klotz & Jiang 2017

10年以上先を見据えて シームレスな台風解析予報サイクル

- 強度推定(強度解析)と強度予測をシームレスに統合
- あらゆる入手可能な観測データを同化
→ 毎時台風解析(未来の強度推定手法として)
- 台風解析値を初期値とした強度予測(強度予測の目指すべきところ)
- まずは研究コミュニティによるフィージビリティ研究から
- 観測、データ同化、数値モデリング、理論の全英知を結集して

全ての台風研究者の知見を集めて フィージビリティ研究から

- ✓ Honda et al. (2018)やMinamide & Zhang (2018)による有望な結果: ひまわり同化による雲パターンの再現と強度予測の改善
- ✓ 台風内部構造(眼の中、眼の壁雲、最大風速、動径構造、境界層構造など)を適切に再現できる、水平解像度1km程度の数値モデルの利用
- ✓ ひまわりを含む衛星データの高度利用: 高頻度、高密度のデータ同化
- ✓ 複数の航空機による直接観測、複数の海洋観測船(ブイ、ゾンデ、レーダー観測含む)による集中観測で、衛星ベースの解析値の再現性検証やプロセス解明を同時に
- ✓ 台風のより正確な実況把握と、急発達予測等において大外しない台風予報へ

まとめ

- 強度予報の改善は、数値モデルの高度化とそれを補完するガイダンスモデルの開発によってなされるもの
- 急発達予測が克服すべき大きな課題
- 強度推定の精度向上と強度予測の精度向上は不可分な関係
- 強度推定法の改善策
- 暴風の面的予測に向けて
- シームレスな台風解析・予報サイクル