

FUJITSUとYNU共同記者発表

富士通と横浜国立大学、スーパーコンピュータ「富岳」を利用して、台風に伴う竜巻の予測を可能にする気象シミュレーションを世界で初めて実現

2025年2月12日

国立大学法人横浜国立大学

台風科学技術研究センター 副センター長

坪木 和久

富士通株式会社

コンピューティング研究所 所長

中島 耕太



センター長: 筆保 弘徳教授
副センター長: 坪木和久教授・佐藤正樹教授
森信人教授・満行泰河准教授

活動支援チーム
リーダー: 山室 孝文
○山室 孝文 IAS客員研究員
他11名

**台風観測研究
ラボ**



ラボ長:
名古屋大学/YNU
坪木和久教授

**台風予測研究
ラボ**



ラボ長:
東京大学/YNU
佐藤正樹教授

**台風発電開発
ラボ**



ラボ長:
YNU
満行泰河准教授

**社会実装推進
ラボ**



ラボ長:
YNU
真鍋誠司教授

**地域防災研究
ラボ**



ラボ長:
京都大/YNU
森 信人教授

**台風データ
サイエンスラボ**



ラボ長:
YNU
吉田龍二准教授

国際アドバイザー

- Prof. Kerry A. Emanuel(MIT)
- Prof. Yuqing Wang(UH)
- Prof. Chun-Chieh Wu(NTU)
- Prof. Roger K. Smith (LMU)
- Prof. Johnny Chan
(City-U; AP-TCRC)
- Prof. David Nolan (UM)

- 名古屋大
- JAMSTEC
- 北海道大
- ★川崎重工業
- JAXA
- 防災科研
- OIST

- YNU
- 東京大
- 京都大
- 気象研究所
- JAMSTEC
- 慶応大
- 東北大
- CMA
- UCAR

- YNU
- JAMSTEC
- NEDO
- 北海道大

- YNU
- ★デロイト・トーマツ
- ★東京海上研究所
- ★川崎重工業

- YNU
- 京都大
- 千葉大
- ★あいおいニッセイ同和
- ★東京海上研究所
- ★三井住友海上
- 海上・港湾・航空技術研究所
- お茶の水女子大

- YNU
- JAMSTEC
- 情報・システム研究機構
- ★富士通研究所

○YNU特色分野の研究者
●日本中の台風研究者
★企業の研究者

TRC総勢**83名**
11大学 7研究所
6企業 2国外機関

竜巻とは何か

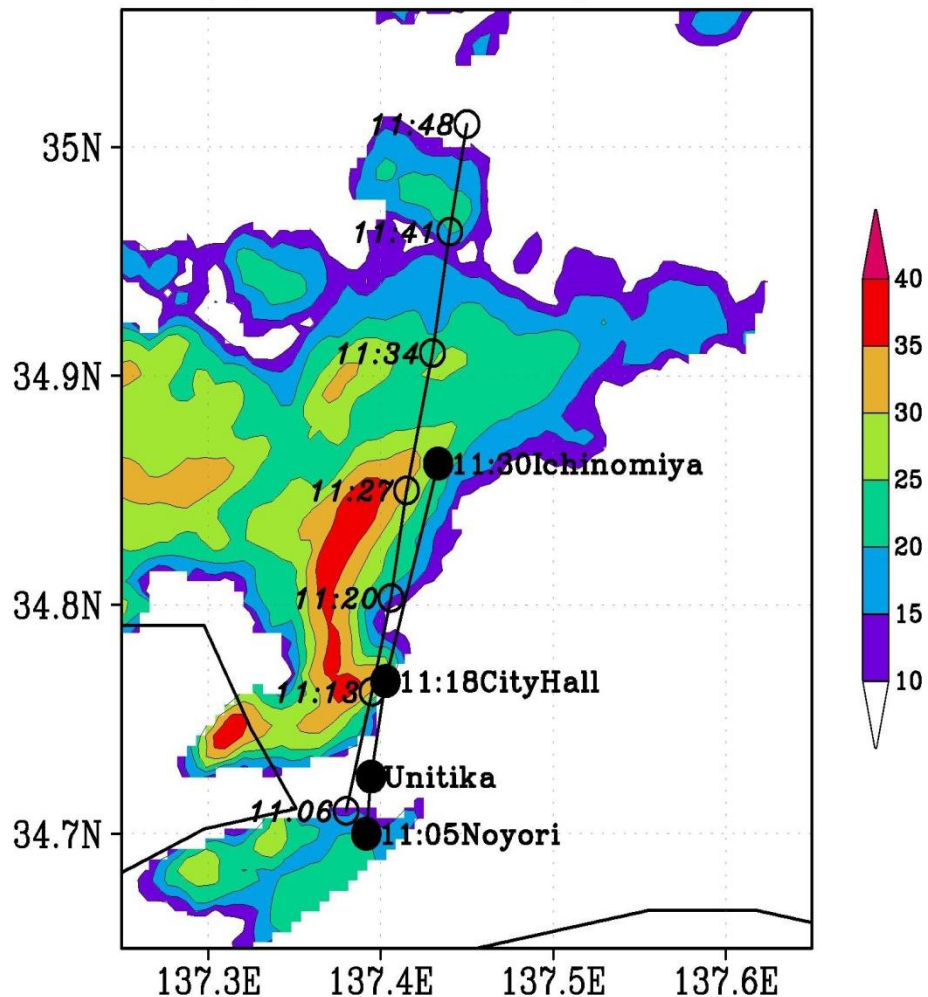
- 定義:「竜巻は積雲、積乱雲などの対流雲に伴って発生する鉛直軸まわりの激しい渦で、しばしば漏斗状や柱状の雲を伴う。」(気象庁、1988)
- 竜巻にはスーパーセルに伴うものとそれ以外の積乱雲によって発生するものに分けられる。一般に強い竜巻はスーパーセル型である。
- 竜巻とは「遠心力と気圧傾度力のバランス、すなわち旋衡風バランスが極めて高い精度で成立している大気の渦」。
- 渦度は0.1～1/s程度になる。(スーパーセルは0.01/s、温帯低気圧は0.00001/s程度)

竜巻予測の難しさ

- 竜巻は観測できないほど小規模であるが、その破壊力は大気擾乱の中でも最強。しかも竜巻は忽然と発生する(台風のように遠くからやってくるものではない)。
- 日本国内およびその周辺地域では、どこにでも、どの季節にも発生する(多い少ないはある)。単位面積あたりにすると日本の竜巻の数は米国のトルネードの数とほぼ同じ。
- 竜巻は直接観測がほとんどできない。
- シミュレーションも困難で、数値予報モデルによる予報は行われていない。

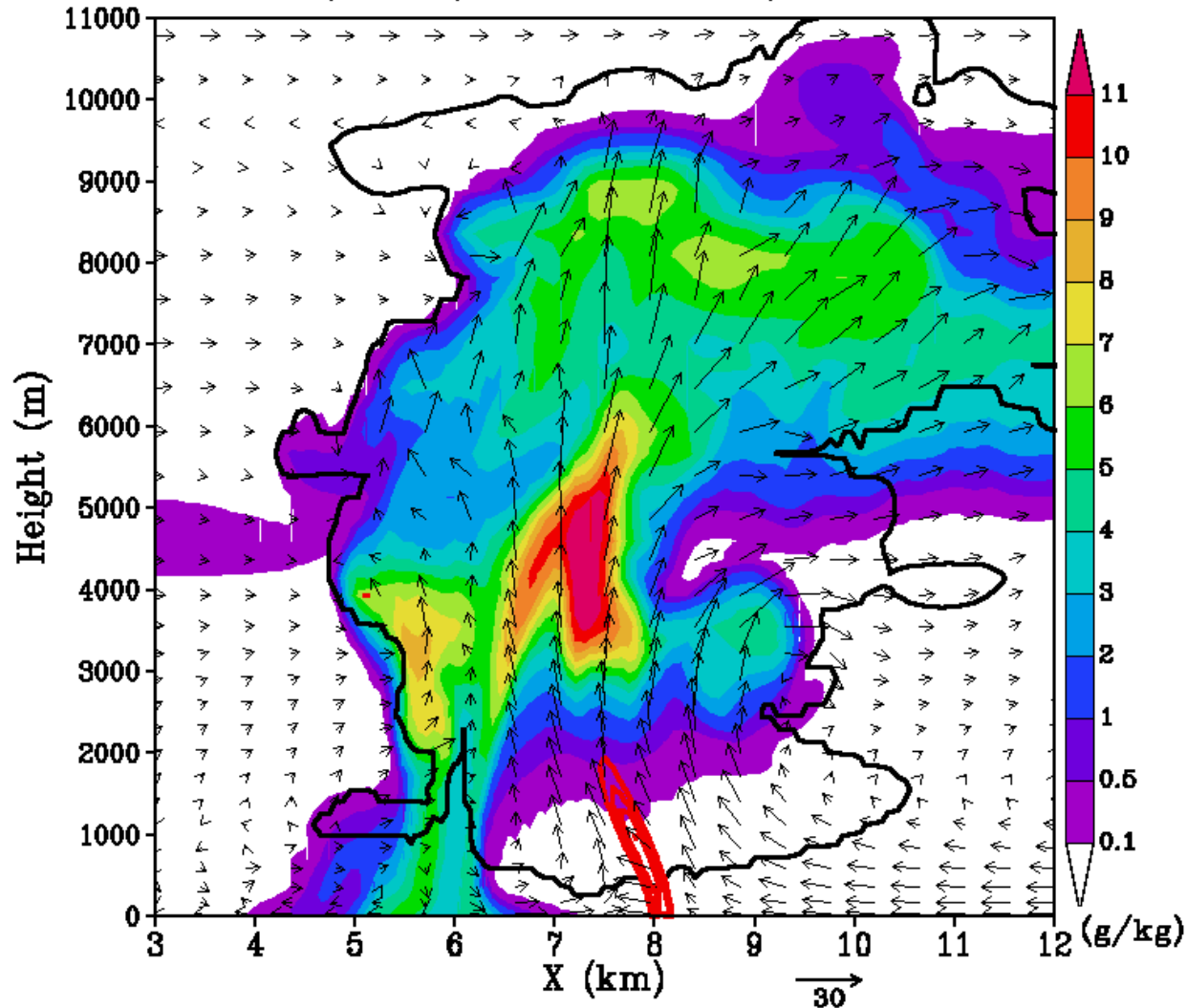
スーパーセル積乱雲に伴う竜巻

(a) 11:19JST 24 Sept 1999



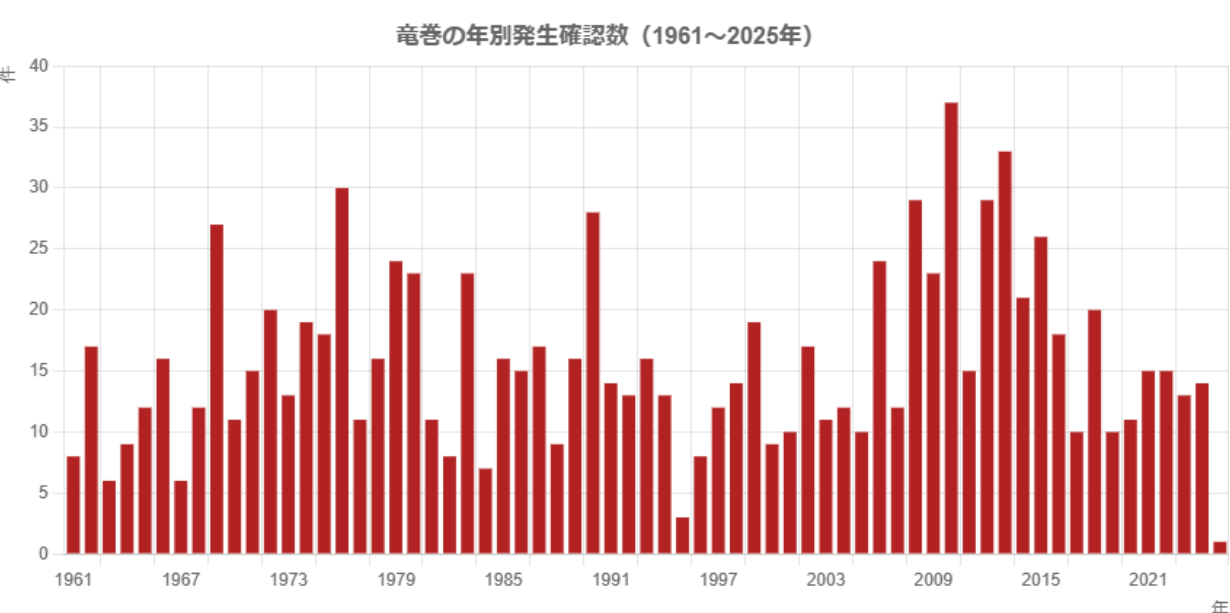
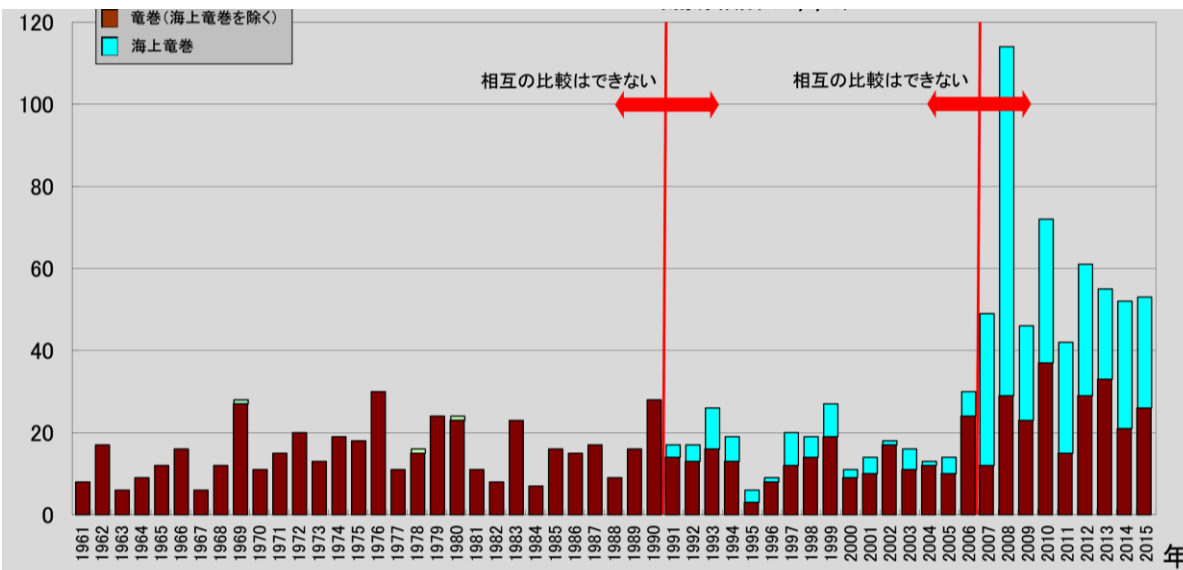
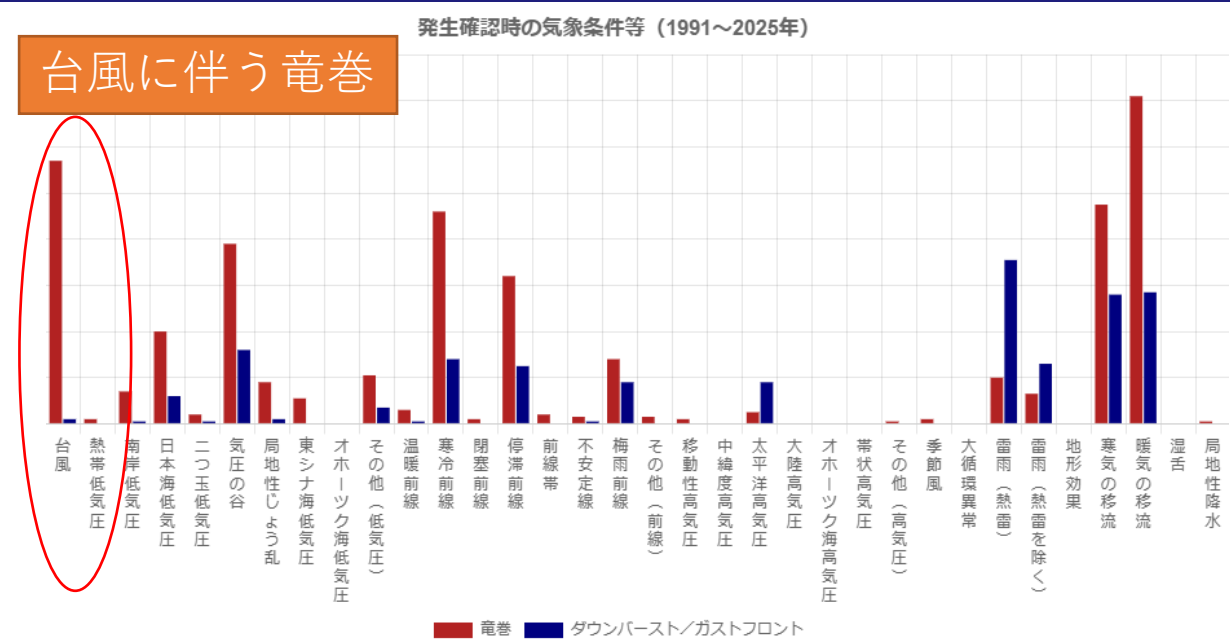
レーダで観測されたスーパーセル積乱雲の水平断面図。白丸はメソサイクロン、黒丸は竜巻の位置。

cloud, rain, T= 9780 sec, Y= 7 km



シミュレーションされたスーパーセル積乱雲の鉛直断面図。カラーは降水、赤等値線は渦度。

日本の竜巻(突風)の分布・発生数・気象条件



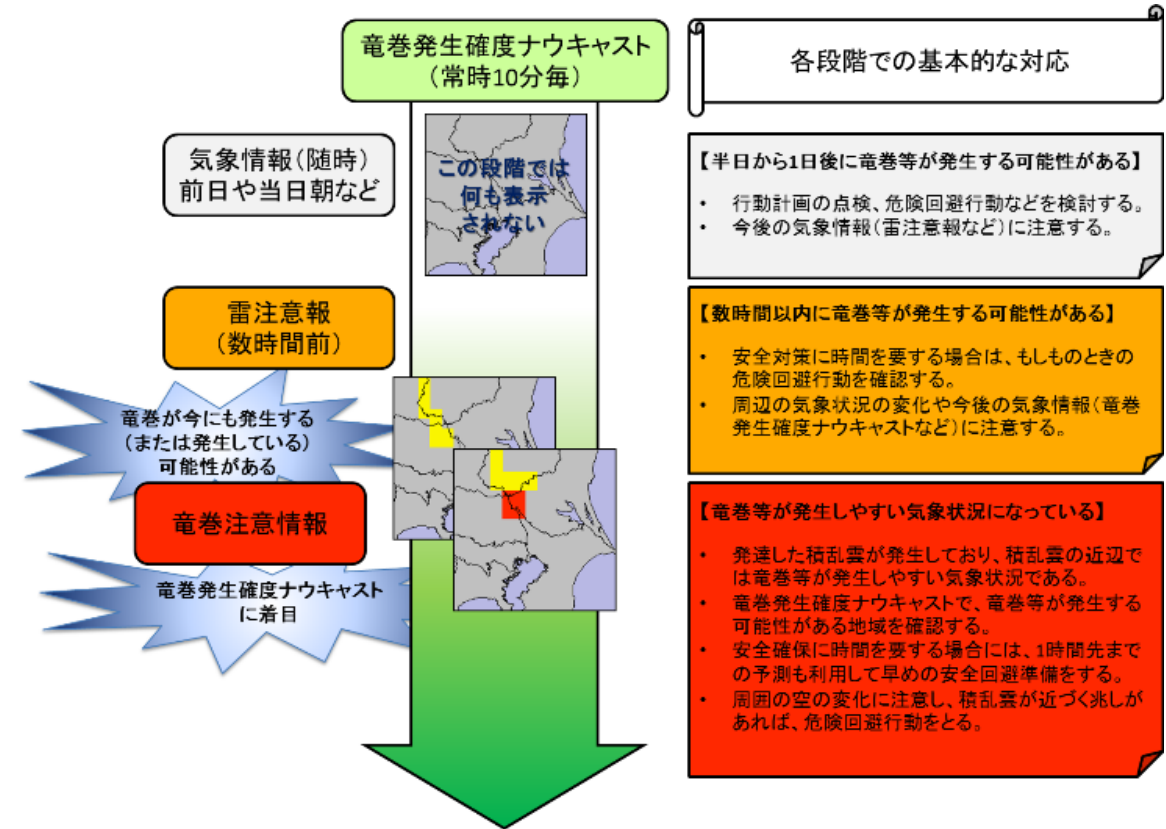
出典: 気象庁ホームページ

- ・ **竜巻注意情報**は、2008年3月26日から運用開始
- ・ **竜巻注意情報が発表されるようになった理由**は？

2005年12月25日の庄内平野での突風、2006年9月の延岡、11月佐呂間町の竜巻などで、竜巻に関する社会的関心が高まったから。

- ・ **竜巻注意情報は、どんな時に発表されるのか？**

1. 数値予報で予測された上空の風や気温などの分布から、竜巻などの激しい突風の発生に関連の深いさまざまな指数(「**突風関連指数**」)を計算。
2. 数値予報による**突風関連指数**と気象レーダーの観測データから、今の時刻(気象レーダーの観測時刻)における突風発生の可能性を推定する「**突風危険指数**」という指数を計算。
3. **突風危険指数**は、気象ドップラーレーダー観測によるメソサイクロンの検出と組み合わせて、**竜巻発生確度ナウキャスト**における、「**現在、竜巻が発生している、または今すぐにでも発生しそう**」という状況を予測。
4. **竜巻注意情報**は、**竜巻発生確度ナウキャスト**で20分後の予測までに発生確度2がかかる地域(県など)に発表。



出典: 気象庁ホームページ

竜巻注意情報の精度について

平成20年3月26日から令和6年12月31日までの精度の推移（令和7年1月15日更新）

	平成 22年	平成 23年	平成 24年	平成 25年	平成 26年	平成 27年	平成 28年	平成 29年	平成 30年	令和元 年	令和2 年	令和3 年	令和4 年	令和5 年	令和6 年*
適中率 (括弧内)は 最大瞬間風速20m/s以上の 事例を含めた適中率	5% (26%)	1% (18%)	3% (25%)	4% (24%)	2% (22%)	4% (24%)	4% (25%)	2% (18%)	3% (25%)	4% (29%)	4% (32%)	4% (27%)	2% (24%)	6% (22%)	2% (16%)
捕捉率 [括弧内]はJEF1以上の捕捉率	34% [67%]	21% [20%]	32% [40%]	42% [38%]	27% [33%]	35% [78%]	39% [50%]	41% [36%]	48% [42%]	37% [56%]	38% [22%]	44% [57%]	17% [13%]	55% [53%]	47% [54%]
発表数	490	589	597	606	604	402	372	909	648	331	349	427	319	591	561
突風回数 [括弧内]はJEF1以上の回数	67 [6]	39 [5]	50 [10]	59 [21]	37 [6]	48 [9]	41 [14]	46 [11]	48 [12]	41 [9]	40 [9]	43 [7]	36 [8]	62 [17]	30 [13]

出典:気象庁ホームページ

- 現状では、竜巻そのものは予測も観測による検知もほとんどできない。竜巻は積乱雲によってもたらされるので、親となる積乱雲の特性を理解することが必要。=>竜巻の親雲の理解が重要
- ドップラーレーダーで特徴的積乱雲(スーパーセル)を観測する方法。ただし、すべての竜巻がスーパーセルによるわけではない。未知の積乱雲がある。またこの方法では、予測は10分前程度が限界。
- 雲解像モデルによる積乱雲のシミュレーション。数時間前から竜巻の発生するポテンシャルを予測することができる。=>雲解像モデルを「富岳」などの大規模計算機での利用が期待される。

対象による分類

- 全球モデル
- 気候モデル
- 領域モデル(メソスケールモデル)
- 領域気候モデル
- 雲解像モデル
- 雲モデル

方程式系による分類

- 運動方程式
 - 静力学モデル
 - 非静力学モデル
- 大気の圧縮性
 - ブシネスクモデル
 - 非弾性モデル
 - 弾性モデル

世界の類似モデル

- Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (**MM5**) (Grell et al. 1994)
- Weather Research and Forecasting (**WRF**) (Skamarock et al. 2008)
- Japan Meteorological Agency Non-Hydrostatic Model (**JMA-NHM**) (Saito et al. 2006, 2007)
- GRAPE-Mesoscale Atmospheric Regional Model for South China with 3 km (**MARS3KM**) (Zhang et al. 2016)
- Cloud Resolving Storm Simulator (**CReSS**) (Tsuboki and Sakakibara 2002)
- France

竜巻の予測に利用できる数値モデルは左の分類の赤枠で囲む特性を持つ数値予報モデル

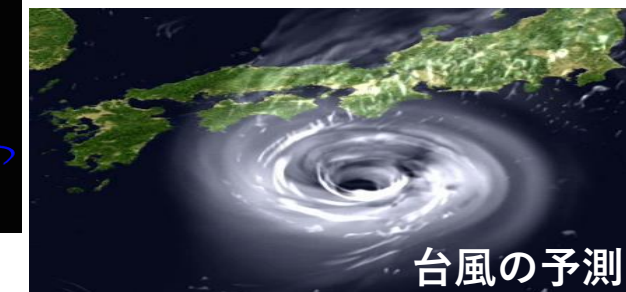
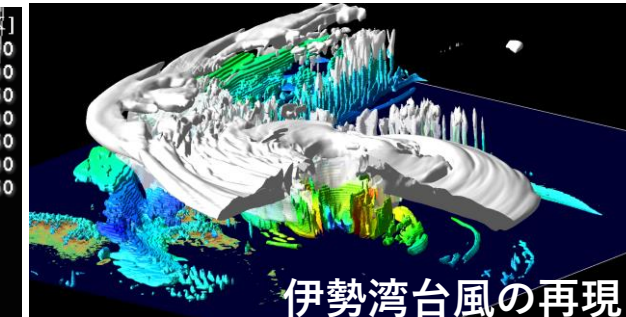
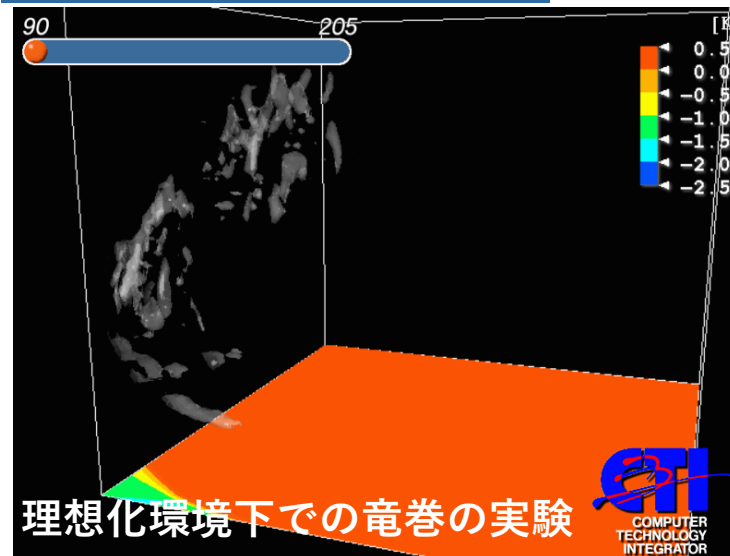
CReSSの特長

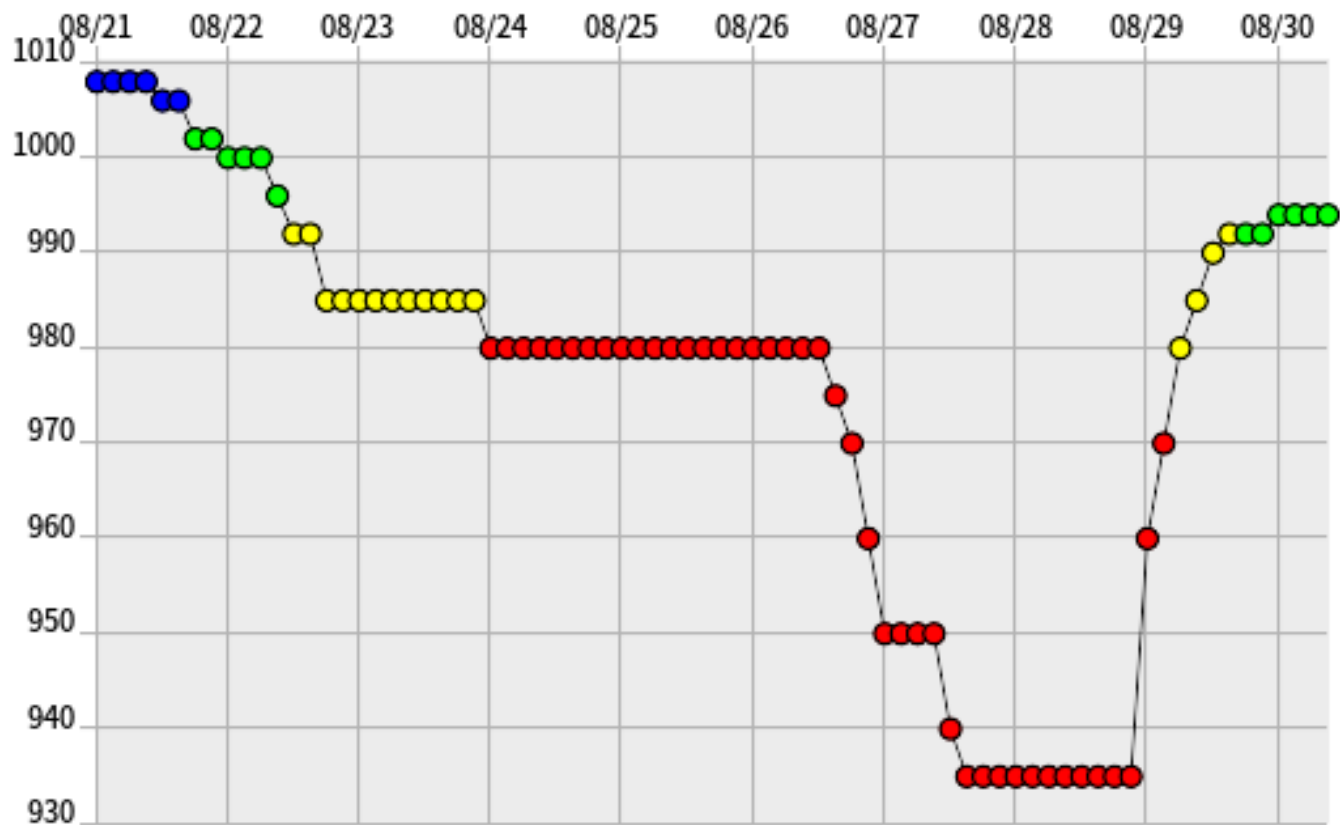
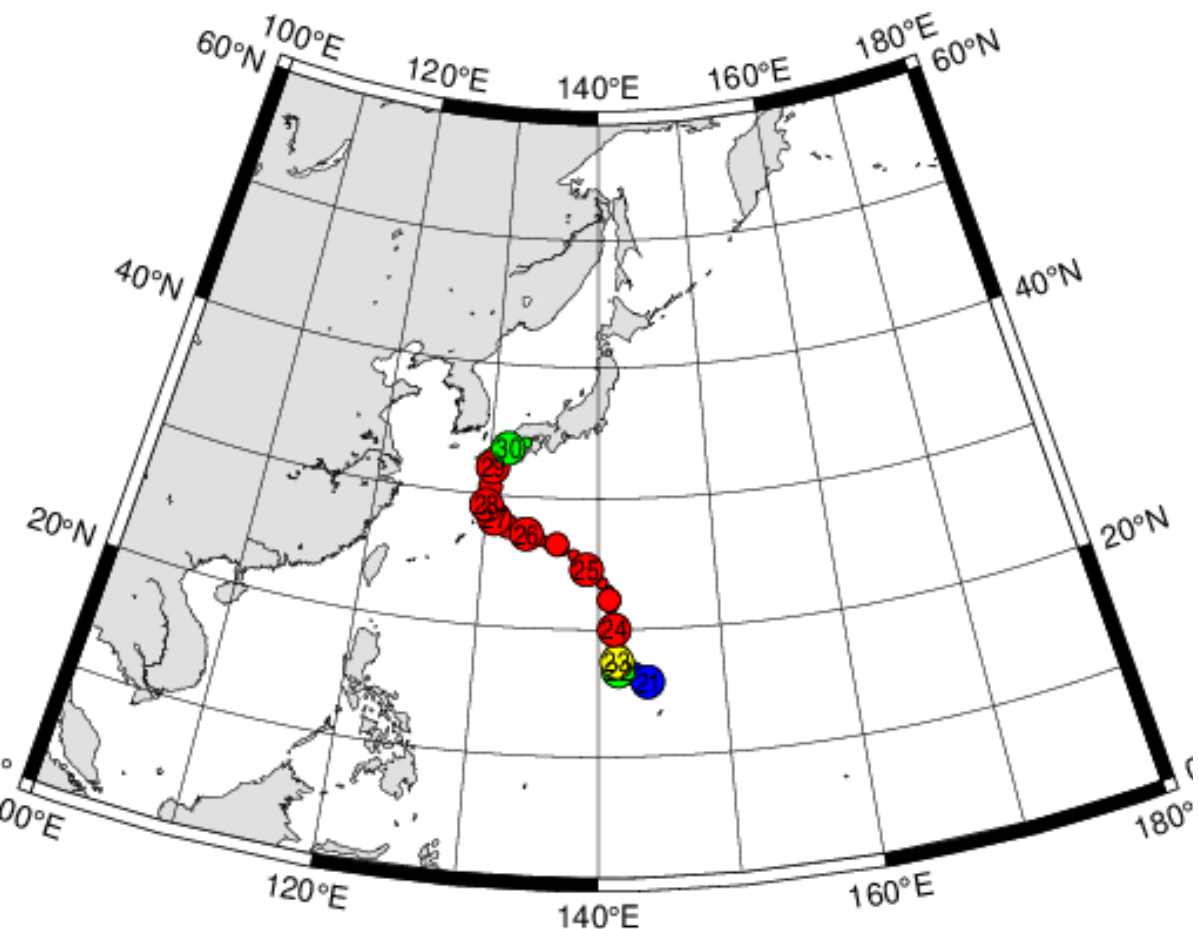
1. 雲スケール (50m~2,000m) からメソスケール (2km~2,000km) までを扱える、雲解像モデルに基づく高精度な気象シミュレーター
2. 竜巻を発生させるスーパーセル積乱雲の発生や発達を高解像度かつ正確にシミュレートできるが、複雑な物理方程式を扱うための計算量が課題
3. ノートPCからスパコンまでの様々な計算機で実行可能、国内外で多数の利用実績

CReSSの基本方程式

- 運動方程式 (流体方程式+地球回転)
- 熱力学第1法則 (エネルギー保存則)
- 気圧方程式
- 水蒸気保存則
- 乱流の時間発展方程式
- 水物質 (雲、雨、雪) 混合比の時間発展方程式
- 水物質の数濃度の時間発展方程式

CReSSの利用実績





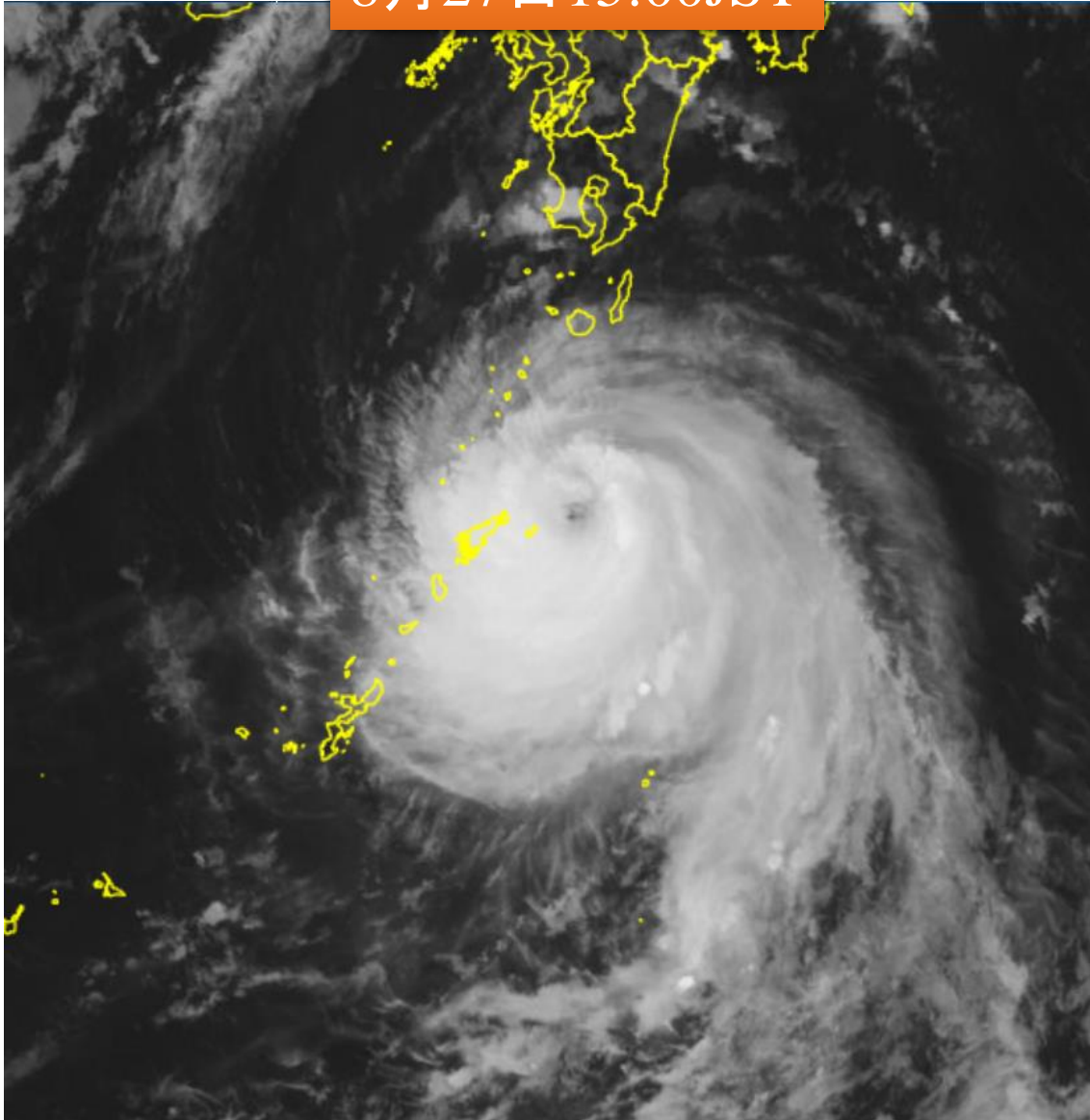
出典: デジタル台風 (北本朝展、国立情報学研究所)

8月22日にマリアナ諸島で発生した台風第10号は、日本付近で動きが遅くなり、27日に非常に強い勢力となって奄美地方に接近した。その後、進路を北に変えて非常に強い勢力のまま九州南部に接近し、強い勢力で29日08時頃に鹿児島県薩摩川内市付近に上陸した。

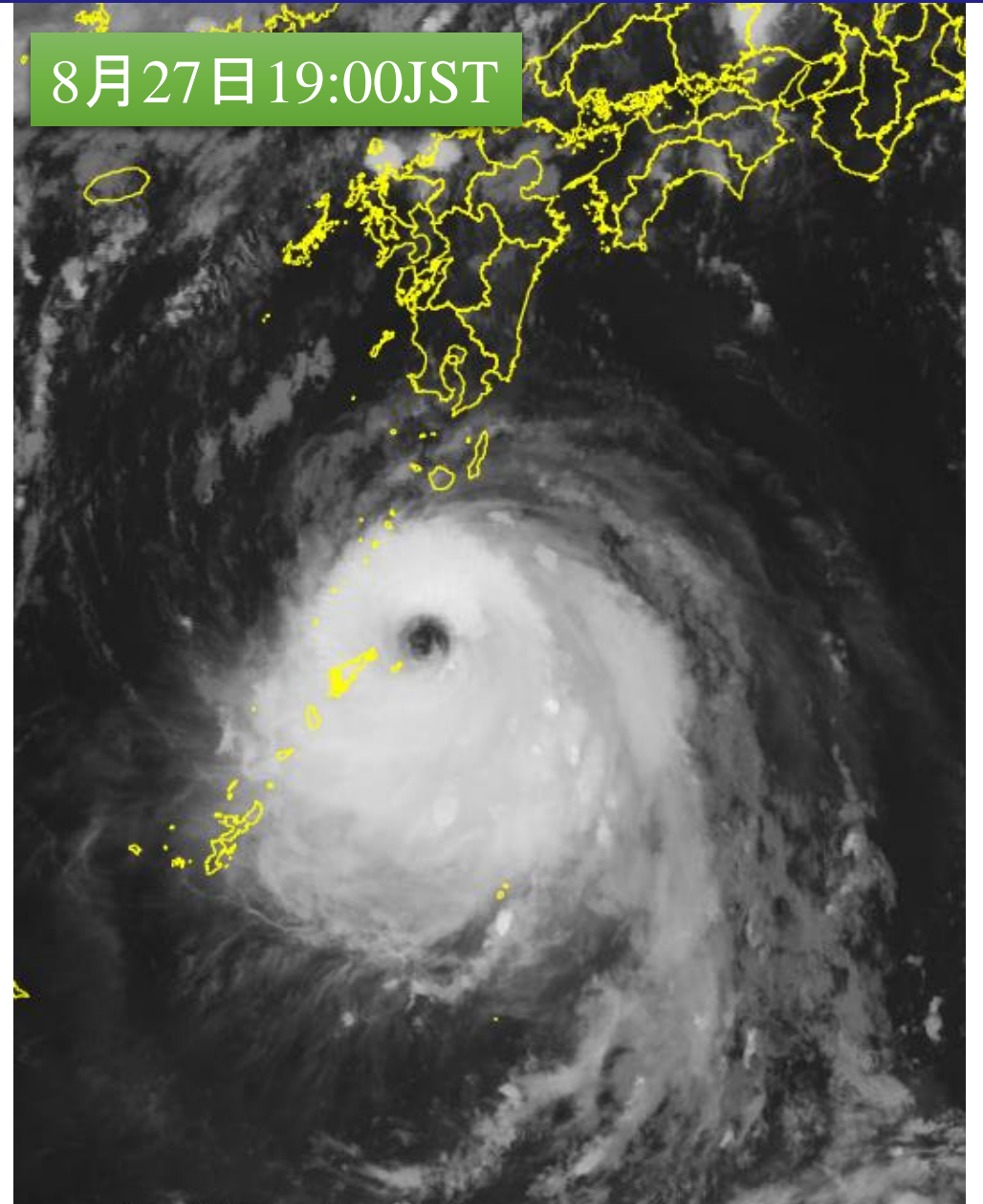
西日本から東日本にかけて大気の状態が非常に不安定であったため、発達した積乱雲により、突風の被害が発生した所があった。特に宮崎県では、28日から29日にかけて複数の市町で竜巻とみられる突風の被害が発生した。

出典: 気象庁ホームページ

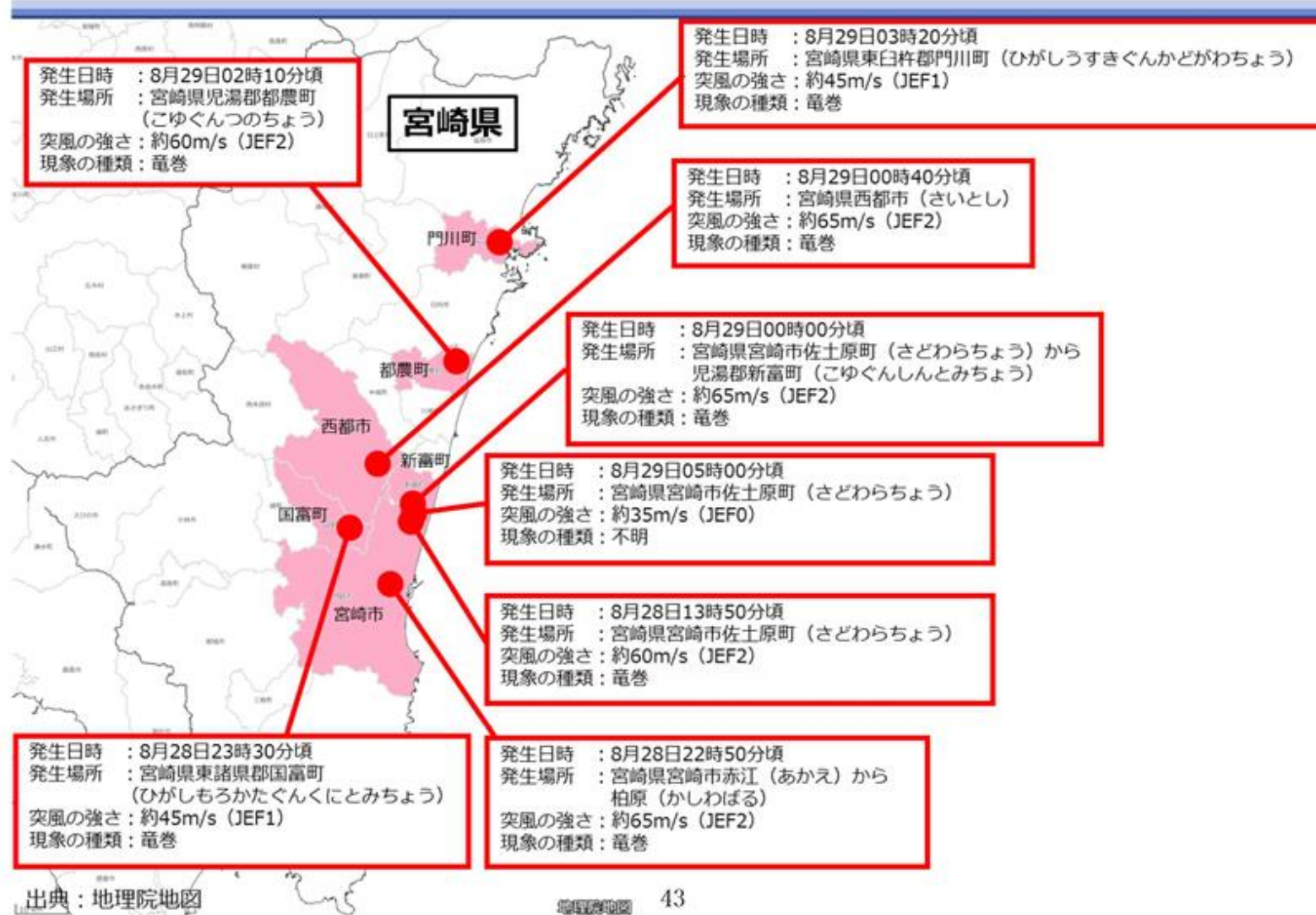
8月27日 15:00JST



8月27日 19:00JST



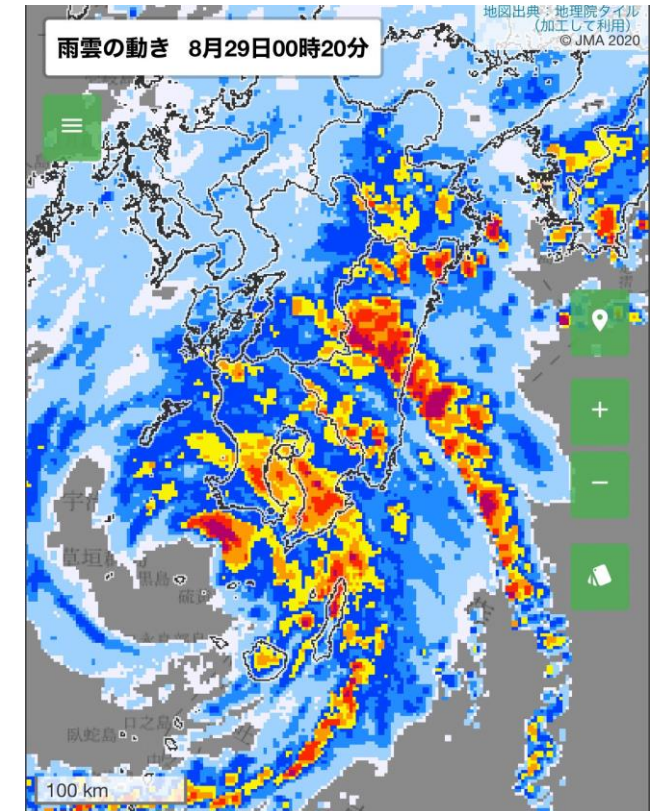
(参考) 竜巻等突風の発生状況 (8月27日~31日)



宮崎県内で8件の突風被害発生、うち JEF2(約60-65 m/s) 竜巻5件

人的・住居被害(宮崎県発表、2024年9月9日現在)負傷者 : 39名 (うち重傷1名)

住居 : 半壊 : 23棟 一部破損 1149棟



突風発生当時の気象庁降水ナウキャスト
(<https://www.jma.go.jp/bosai/nowc/>)

出典 : 気象庁資料「令和6年台風第10号による大雨、暴風及び突風 令和6年(2024年)8月27日~9月1日」

- 雲解像モデルを用いて、台風とともに竜巻そのもののシミュレーションが、共通の格子系を用いた計算で可能となった。
- 「富岳」を用いることで、大規模計算領域の高解像度のシミュレーションを高速に行うことが可能となった。これにより竜巻をリードタイムを持ってリアルタイム予測することが可能であることが示された。
- しかしながら、現状では時間と場所に誤差があり、竜巻発生ポテンシャルを予測できるようになったと解釈すべき。今後、時間と場所をどこまで高精度に予測できるのかを、またその精度を上げるために何が必要かを検討すべき。
- 竜巻を発生させる台風と発生させない台風がある。これらを識別して、台風に伴う竜巻を精度よく予測できるようにすることが課題。
- 今回の実験は「富岳」の1/20の資源を用いている。このことは同時に20メンバーのアンサンブル予測が可能であることを意味する。竜巻のアンサンブル予測への発展が望まれる。
- 台風以外の親システムに伴う竜巻についても同様に予測可能にすることが重要な課題。

FUJITSUとYNU共同記者発表

富士通と横浜国立大学、スーパーコンピュータ「富岳」を利用して、台風に伴う竜巻の予測を可能にする気象シミュレーションを世界で初めて実現

2025年2月12日

国立大学法人横浜国立大学

台風科学技術研究センター 副センター長

坪木 和久

富士通株式会社

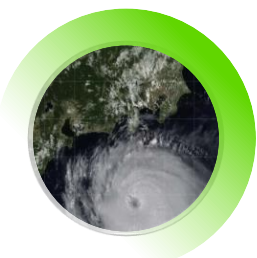
コンピューティング研究所 所長

中島 耕太

コンピューティングにより目指すイノベーション

気象災害の予測や被害軽減を目的に、日本有数の台風研究者が多数所属する横浜国立大学とスモールリサーチラボを設立、イノベーション実現を目指す

気象災害の予測と被害軽減



イノベーションの限界を突破

台風全域と竜巻というスケールが異なる現象を同時に再現できる気象シミュレーションが鍵

目指すイノベーションと目標

ほとんど予測できていない竜巻発生の高精度予測により、被害軽減を実現

ゼロエミッション材料の発見



反応エネルギーを解明する技術を実現し、画期的な新材料を発見

オーダーメイド医療



世界最高精度の病原性推定技術で、患者毎に合う薬剤を選択可能に

富士通-横浜国立大学台風リサーチ・ラボ

設立時期：2022年11月

キーテクノロジー：コンピューティング、AI

「技術力」 **FUJITSU**

台風力学の解明や予測
の **高度化・高速化**



TRC
Typhoon Science and Technology Research Center

「研究力」

CReSSの大規模並列化：課題

目的：台風による竜巻をCReSSで実時間以上の速度で予測する

- **台風全域を竜巻を再現できる解像度でシミュレーション**
水平約600km四方を80m解像度で、鉛直方向も含め約30億地点に離散化
- **約30億地点の風速、風向、雨量などを時刻順に計算・保存**
「富岳」により膨大な計算量、データ量を高速に処理



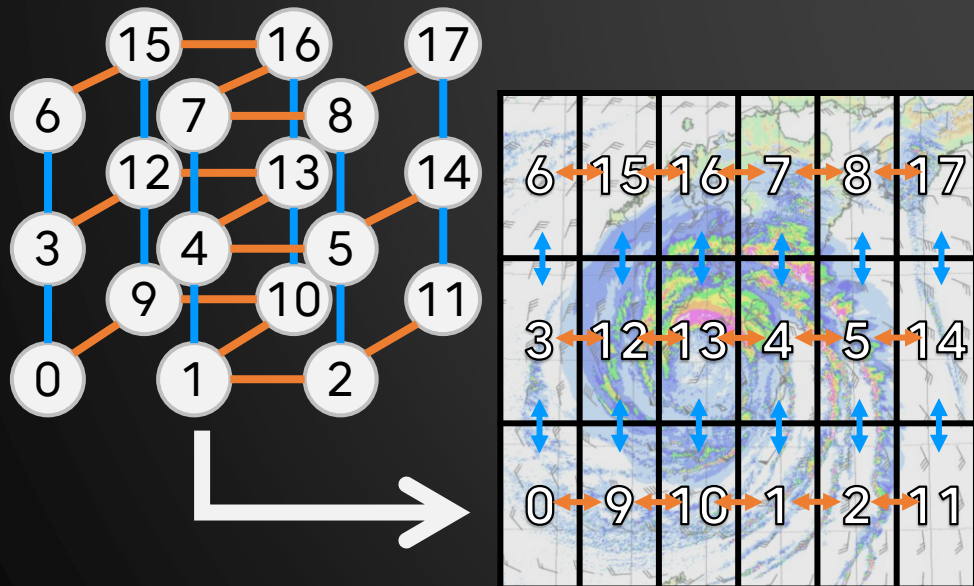
「富岳」の膨大な計算資源をフル活用する大規模並列処理技術が必須

CReSSの大規模並列化：技術

通信最適化：

高い並列効果で計算を高速化

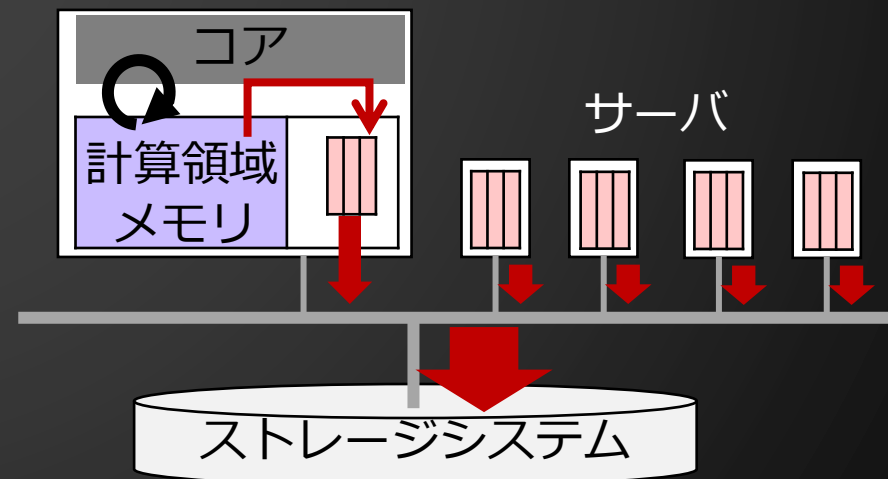
- 6次元メッシュ/トーラス構造へ最適に計算プロセスを配置
- 冗長な通信経路の排除



ファイルアクセス最適化：

30億点のデータ保存を高速化

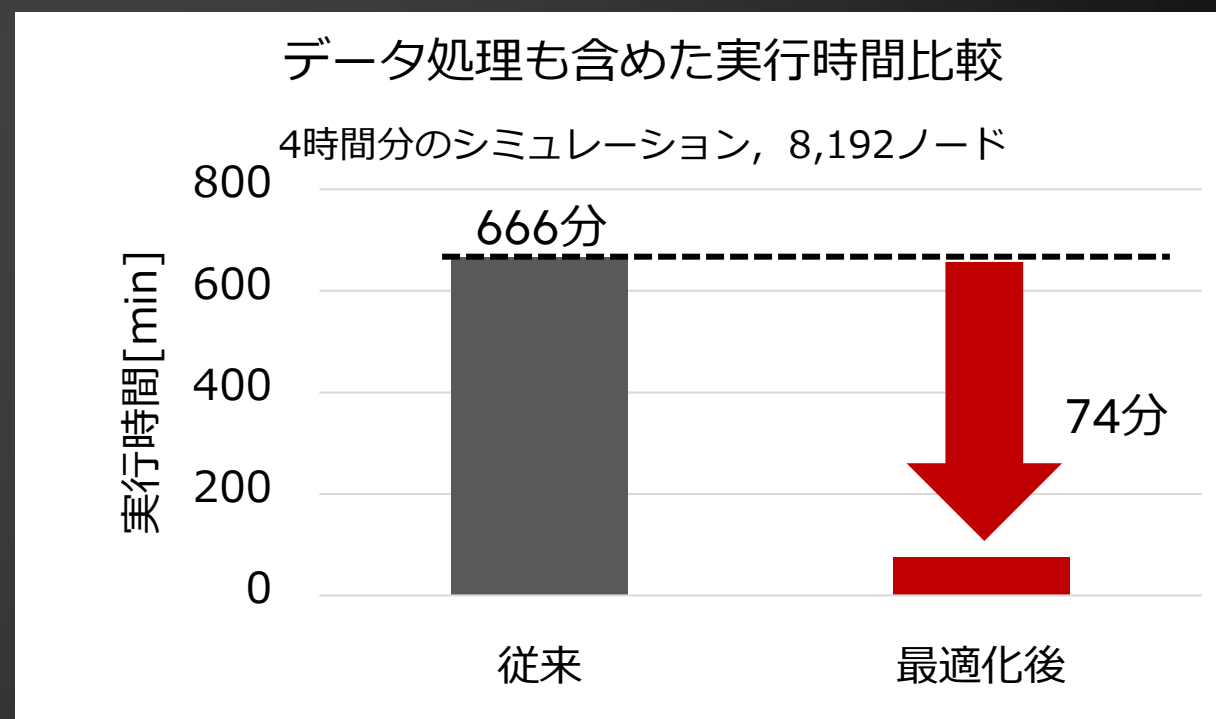
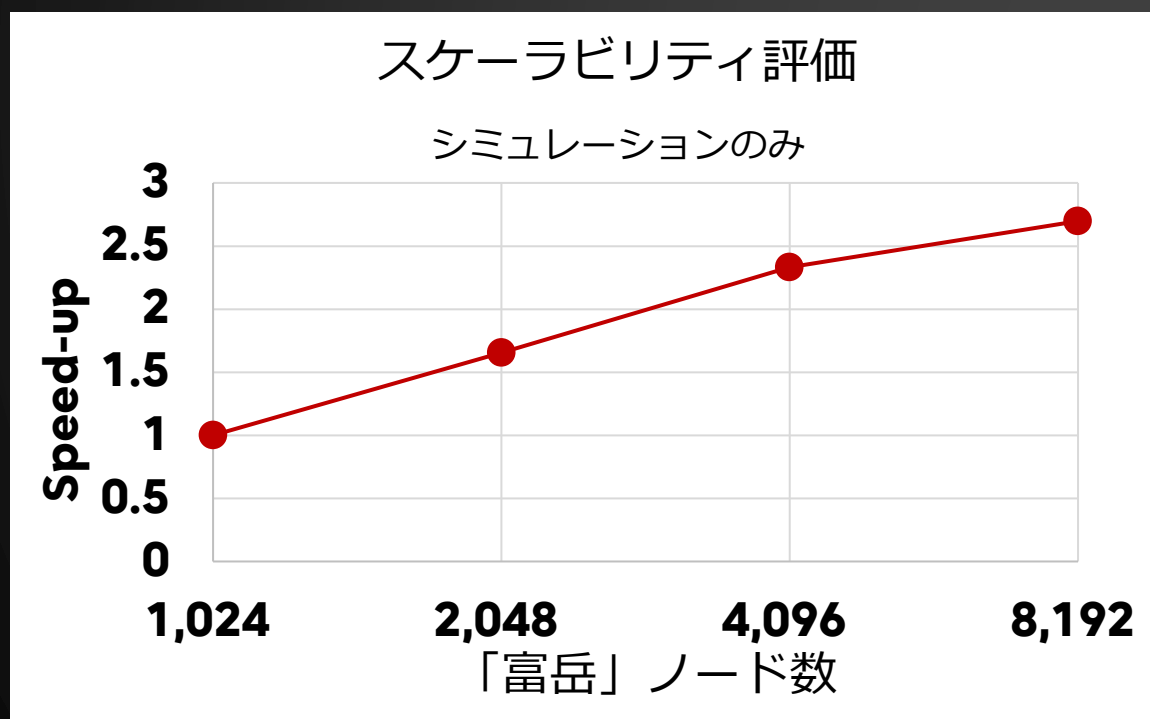
- メモリ上のデータ結合による書込コスト削減
- ファイル出力を演算とオーバーラップ



CReSSの大規模並列化：効果

- 「富岳」上での数千ノードでの並列実行でも高い並列効果を実現
- 最適化により約9倍の高速化、4時間先のシミュレーションを74分で実行

 竜巻の予測を可能に

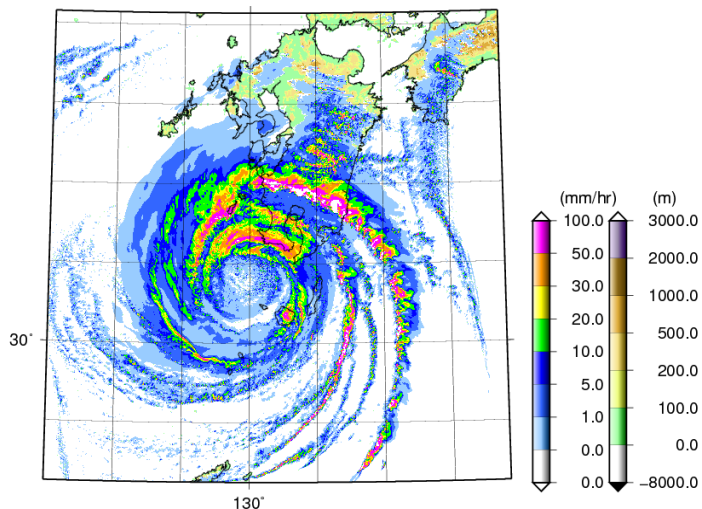


2024年台風10号に伴う竜巻の再現：概要

1. 観測データとシミュレーションの比較
2. 台風全域から渦状の強風の発生を検出
3. 九州南部で発生・発達する竜巻を再現

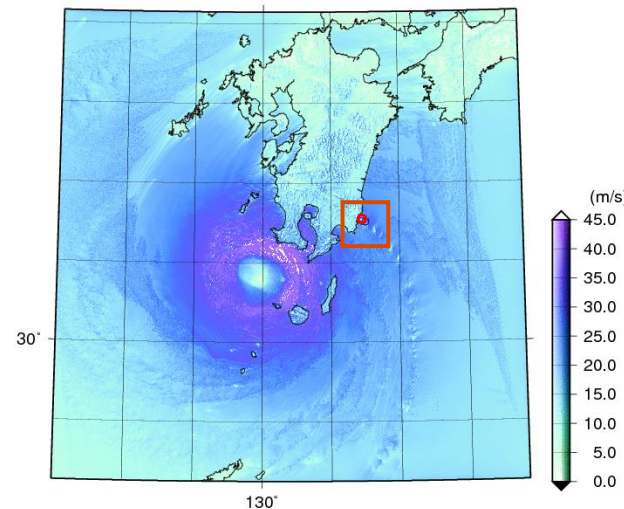
台風全域の水平80m高解像度シミュレーションで初めて実現

CReSS RAINFALL
22:20 JST 28 AUG 2024

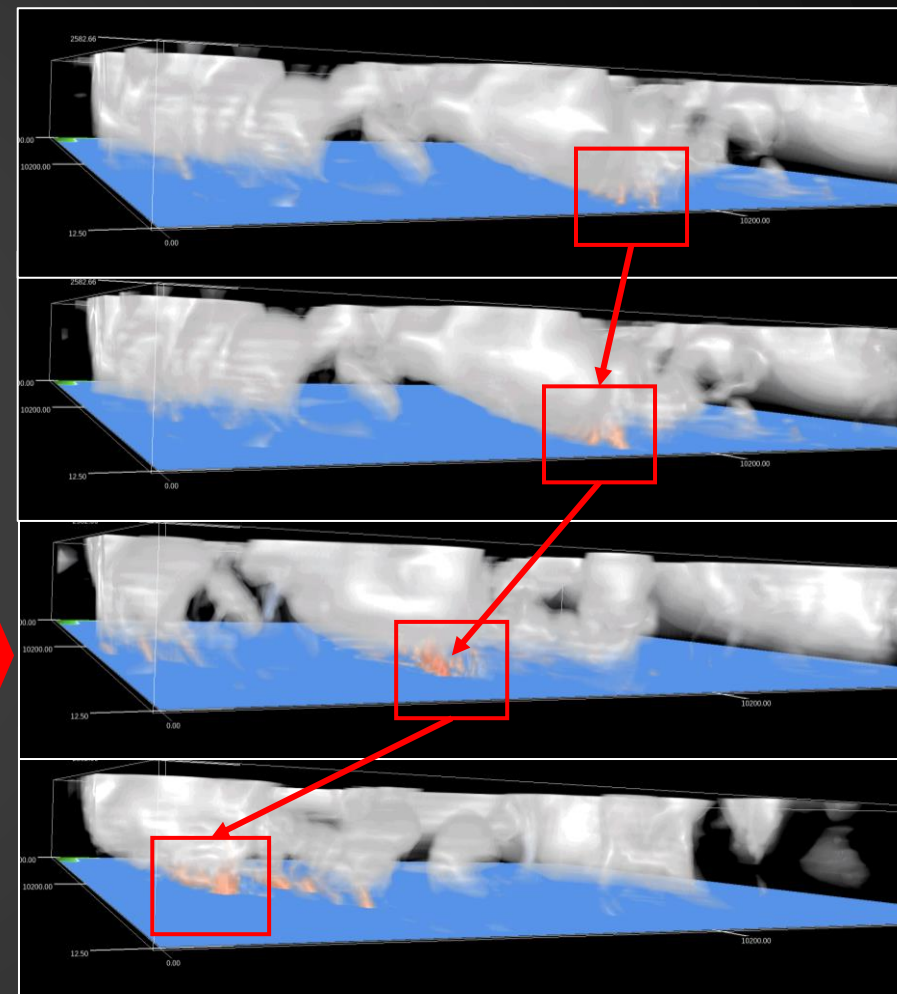


1. 台風全域で観測データと比較

SURFACE WIND
22:20 JST 28 AUG 2024



2. 渦状の強風の発生（拡大図）

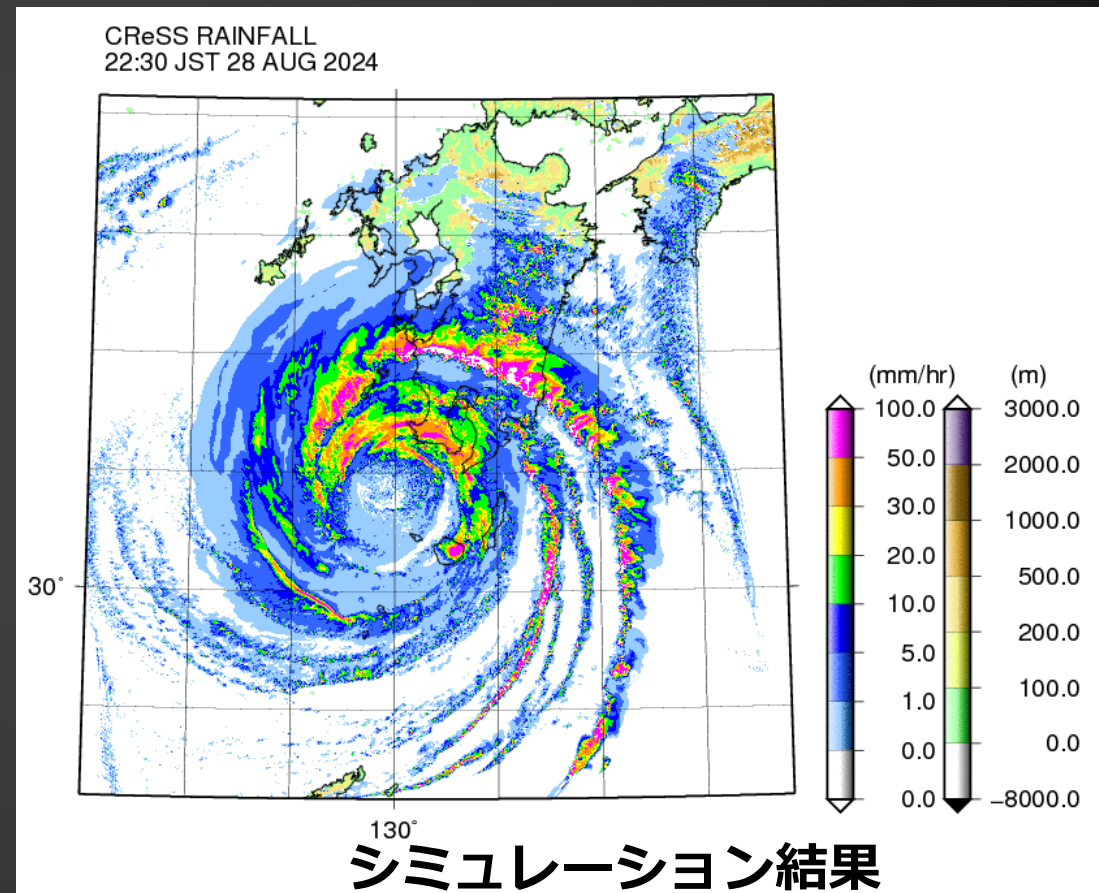
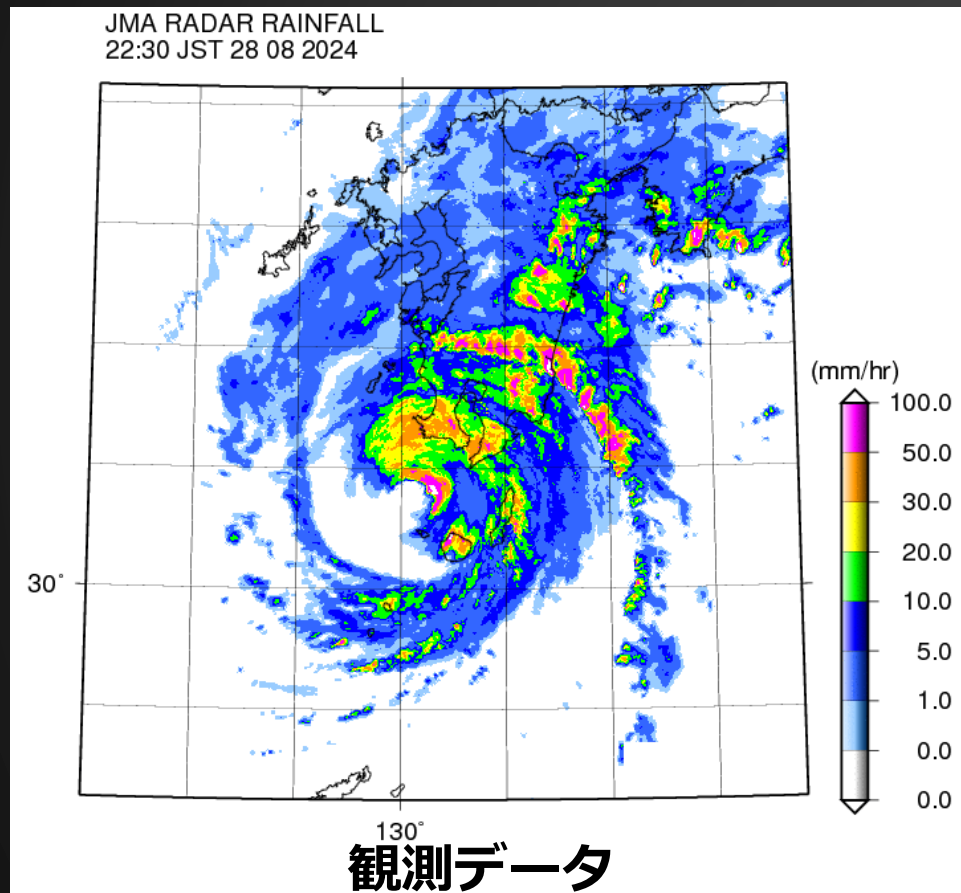


3. 竜巻が九州南部で次々に発生・発達

シミュレーション結果を気象向け可視化ツールVAPORを使い横浜国立大学で可視化： VAPOR : <https://www.vapor.ucar.edu>

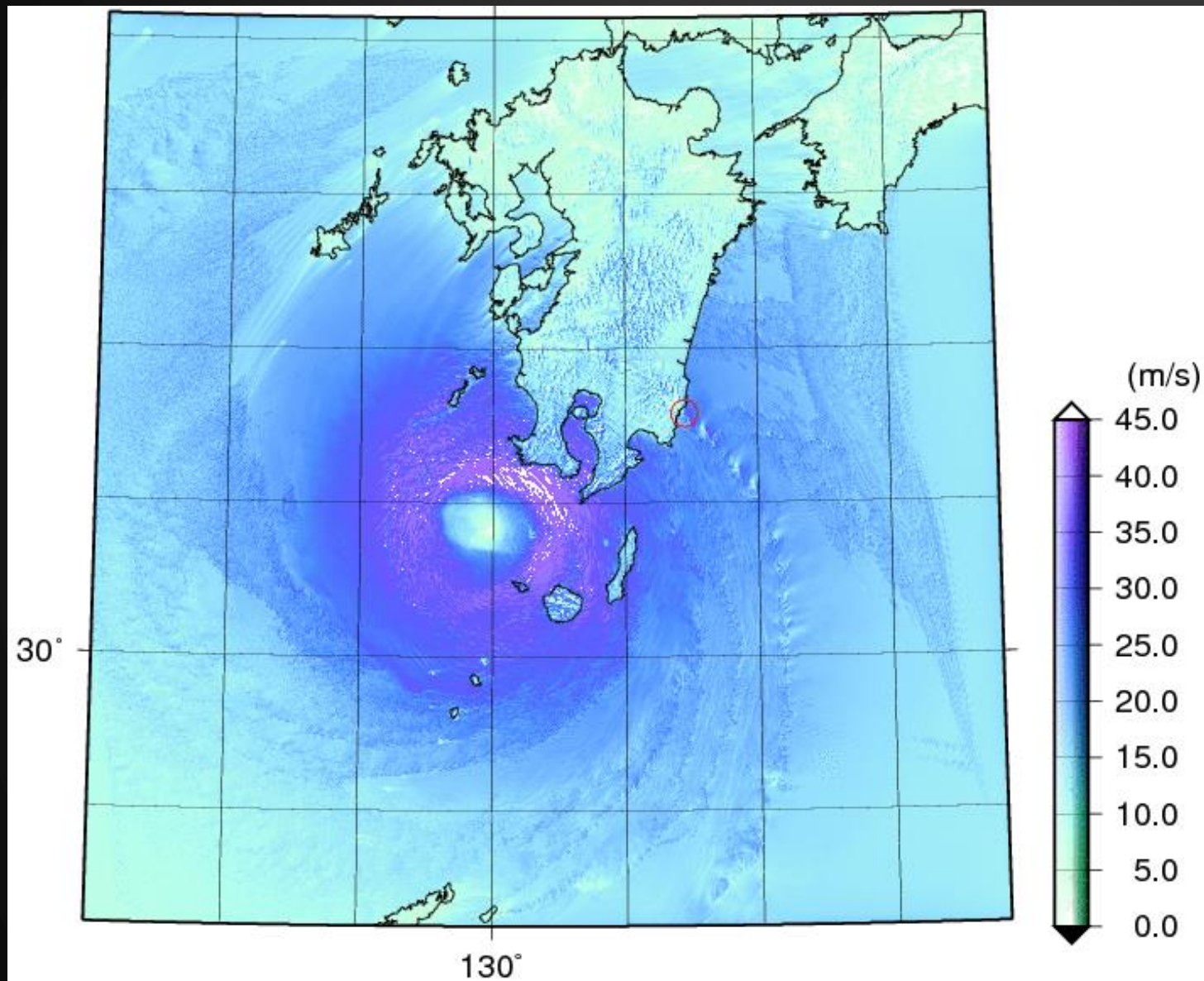
2024年台風10号に伴う竜巻の再現：台風全域

九州に接近・上陸する際の雨量：観測データ（左）、シミュレーション（右）



気象庁全国合成レーダー-GPVをもとに作成
<https://www.jmbc.or.jp/jp/online/file/f-online30110.html>

2024年台風10号に伴う竜巻の再現：渦度の高い地点の検出

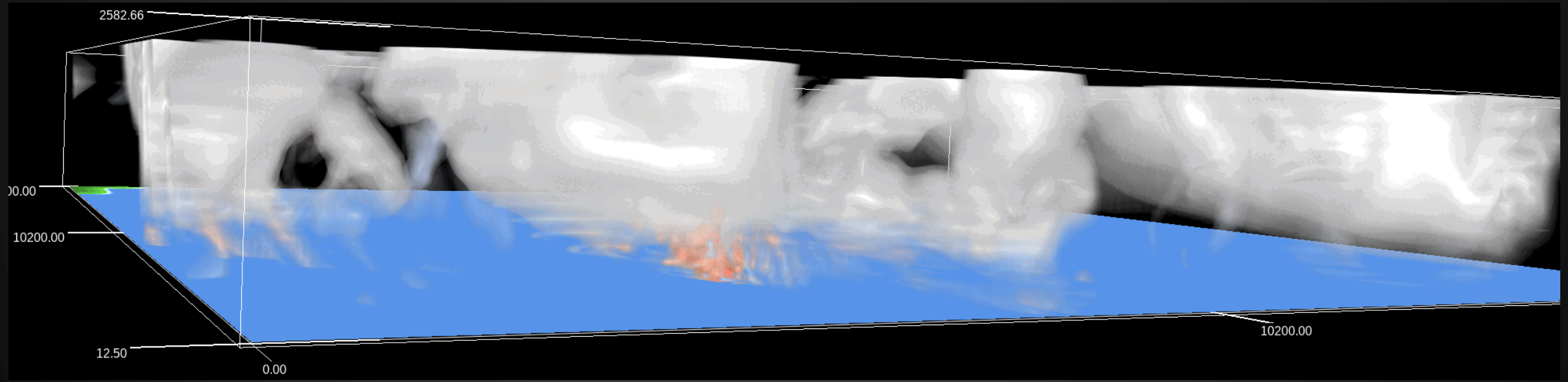


シミュレーション結果：台風全域の風速

地表での風速と渦度から竜巻の可能性の
高い箇所「○」を検出

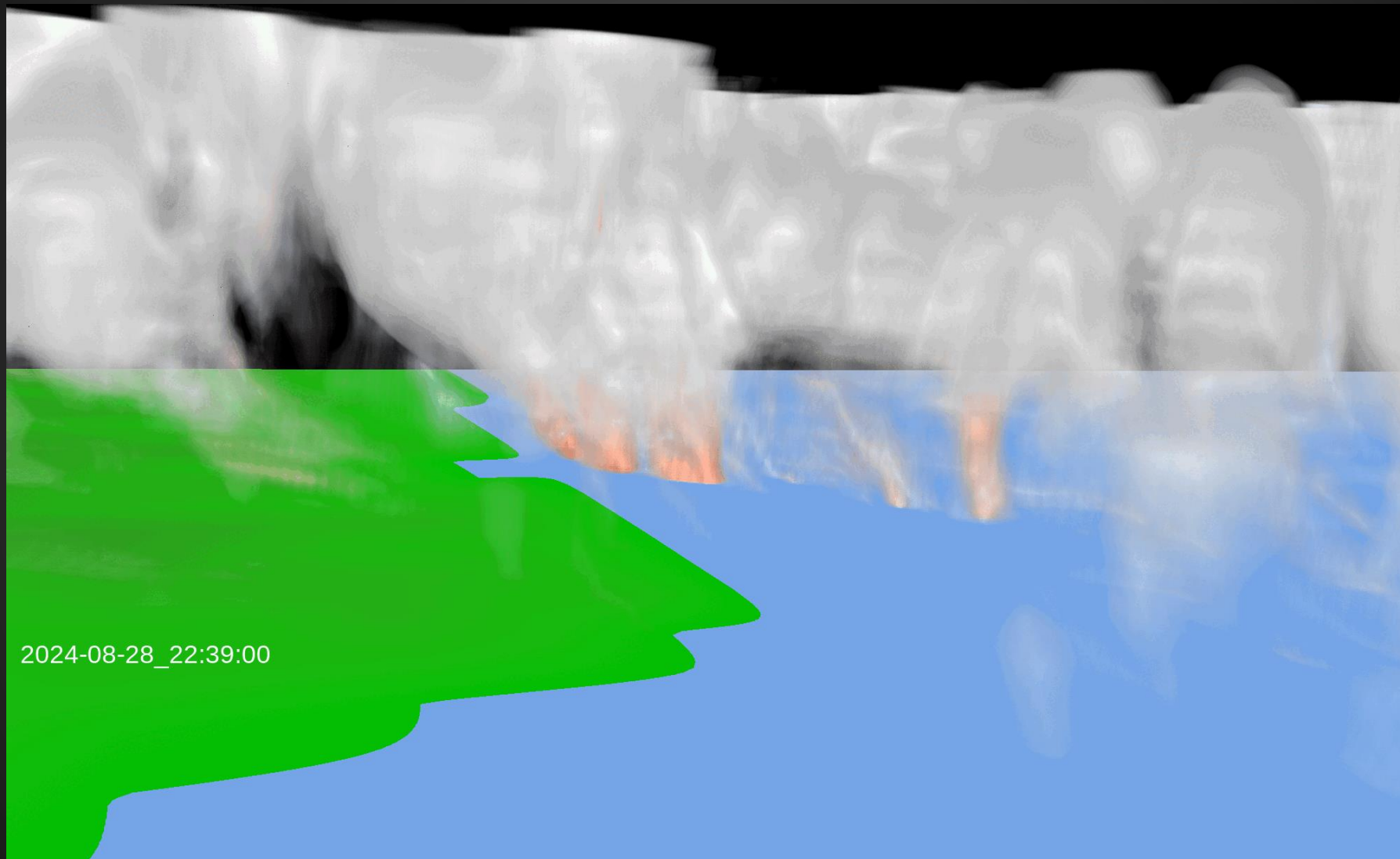
2024年台風10号に伴う竜巻の再現：竜巻が発生した領域を拡大

竜巻が次々発生し九州（左方向）に移動しながら発達していく様子を再現



シミュレーション結果を気象向け可視化ツールVAPORを使い横浜国立大学で可視化
VAPOR : <https://www.vapor.ucar.edu>

2024年台風10号に伴う竜巻の再現：竜巻周辺を拡大



シミュレーション結果を気象向け可視化ツールVAPORを使い横浜国立大学で可視化
VAPOR : <https://www.vapor.ucar.edu>

今後：地球環境問題解決への貢献に向けて

- 「富岳」版CReSSの公開

- 今回開発した大規模並列処理可能なCReSSを、2025年3月までに研究コミュニティ向けに公開予定、本成果のより幅広い評価・活用を目指す

- 地球環境問題解決への貢献

- 今回の成果をもとに、AI技術も活用し、より一層の精度向上や高速化等、台風に伴う竜巻等の強風・大雨を予測しその被害を減らすための研究を両者で推進
- 富士通のマテリアリティの一つである地球環境問題の解決への貢献を目指す

The text "Thank you" in a large, white, sans-serif font, centered on the left side of the slide.

Thank you