

スーパーコンピュータ「富岳」 による台風に伴う 竜巻の数値シミュレーション

吉田 龍二

横浜国立大学

環境情報研究院 自然環境と情報部門 / 都市科学部 環境リスク共生学科 /

総合学術高等研究院 台風科学技術研究センター

* この研究は富士通SRLにおいて、富士通株式会社と横浜国立大学が共同で実施した結果です。

台風写真提供：坪木氏

静止気象衛星ひまわりの可視画像

この映像だけでも様々なものが同時進行的に進んでいることが見てとれるかと思います。

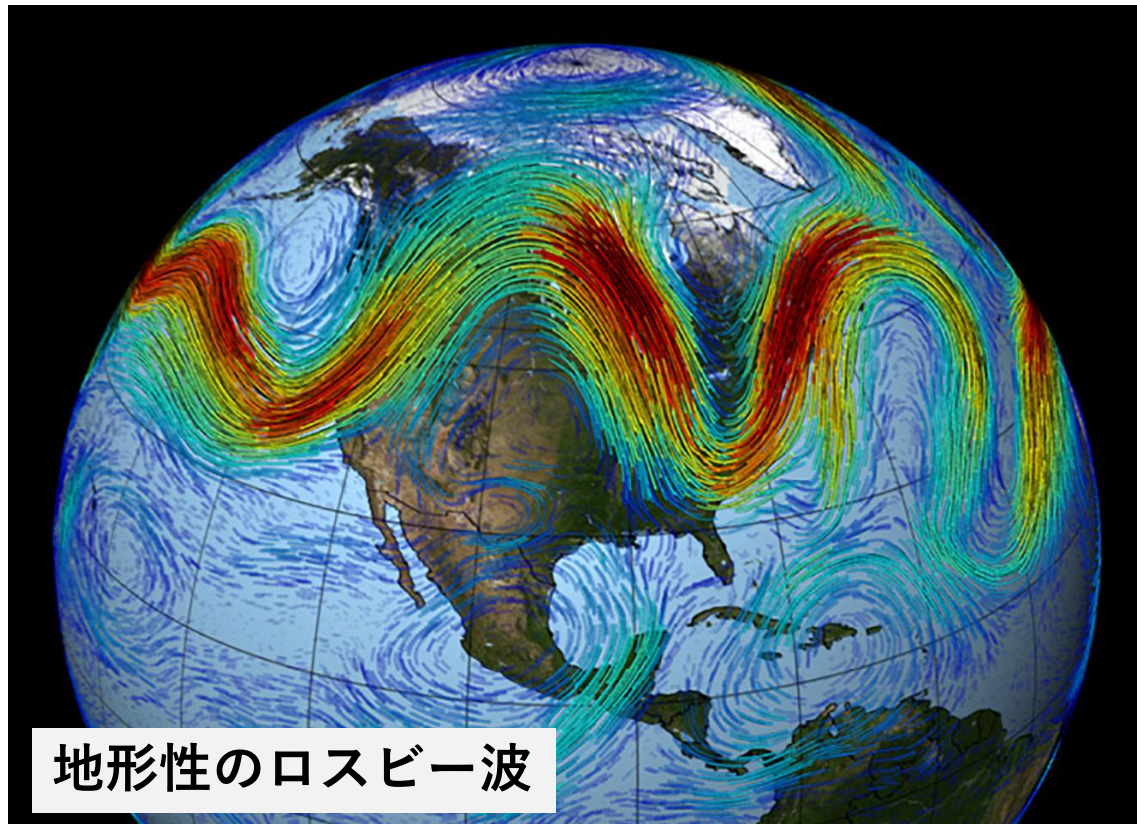
この中から、固有モードとモード間の相互作用を見つけること、そして理解することが気象学における主な目的だと思います。

固有モードの例：

- 温帯低気圧、台風、熱帯の雲集合体、など
- 偏西風、貿易風、など
- 海と陸、昼と夜、など

出典：CEReS NICT JMA HIMAWARI Visualization Team, 千葉大学
https://www.youtube.com/watch?v=GvQD_gb7EqU&list=PLRVS6aeyzZTpcc_1jw1XnP_4CVvtl1Fc8&index=42

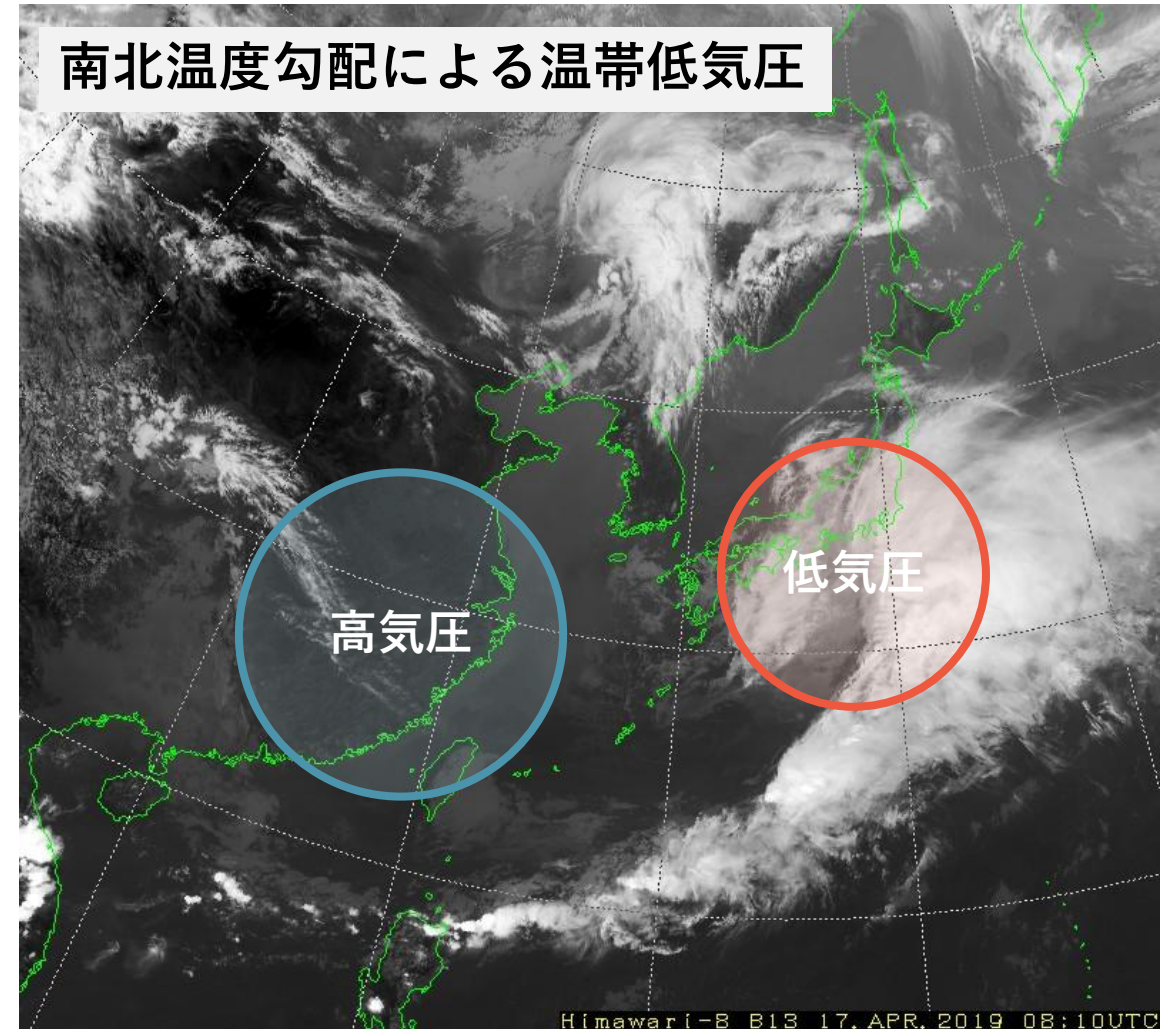
20150516 01:40:00(UTC) CEReS / Chiba University



出典：NOAA

<https://oceanservice.noaa.gov/facts/rossby-wave.html>

地球規模の条件設定が要因となって、大規模な波や温帯低気圧などの現象（固有モード）が生み出される。



出典：気象庁

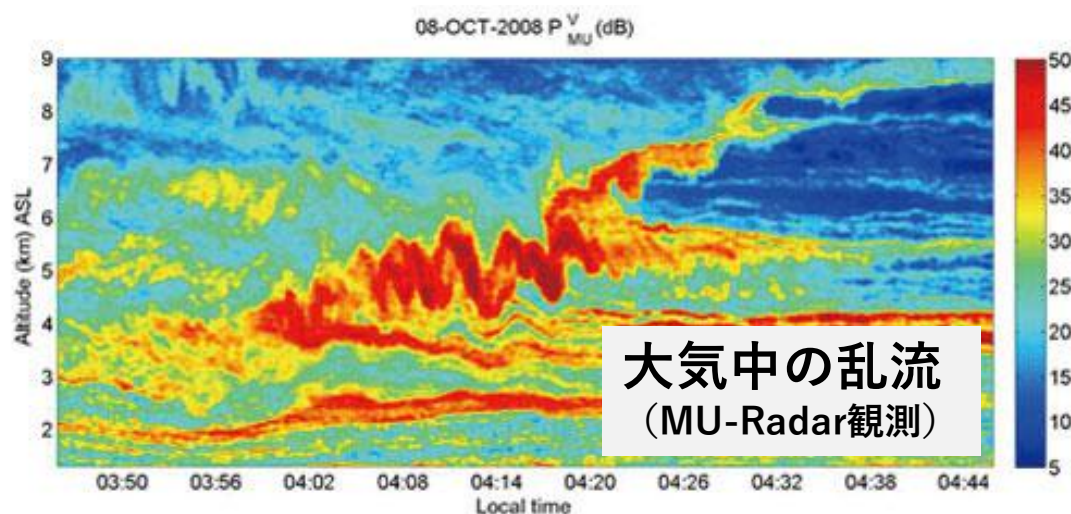
https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/obsimg/image_lowp.html

大気境界層

出典：日本気象協会(tenki.jp)
2022年7月25日午後2時50分頃



<https://topics.smt.docomo.ne.jp/article/tenkijp/nation/tenkijp-18591>



竜巻



出典：NOAA NWS <https://www.weather.gov/safety/tornado>

流体である大気にとって固定端である陸面や海面による摩擦が熱が要因となって、乱流や熱対流が生み出される。

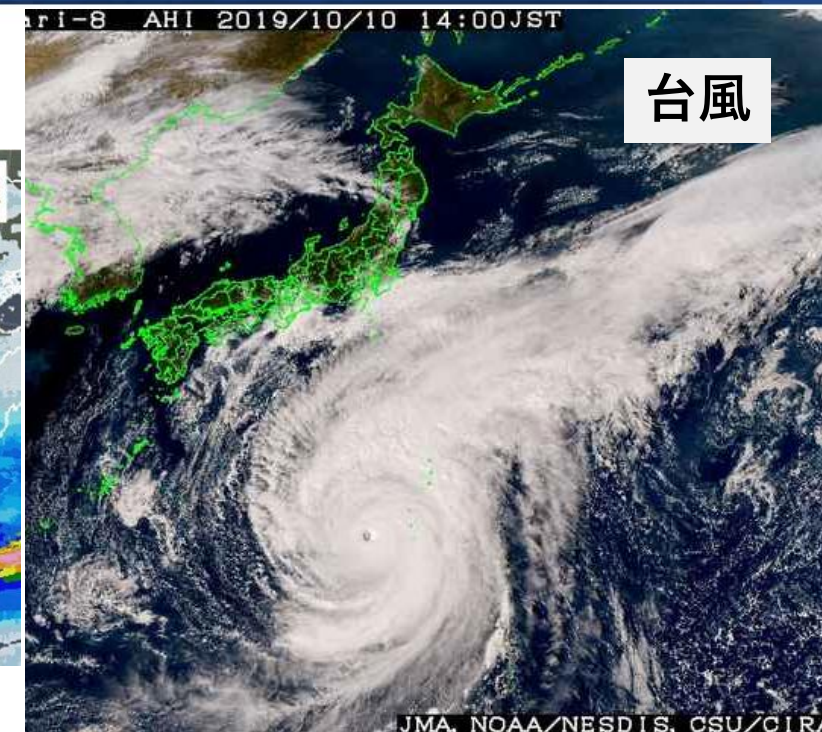
出典：京都大学生存圏研究所
<https://www.kyoto-u.ac.jp/cutting-edge/environment/page13.html>

メソスケール：中間規模の現象

大きなスケールと小さなスケールの間のスケールをメソスケールと呼んでいます。

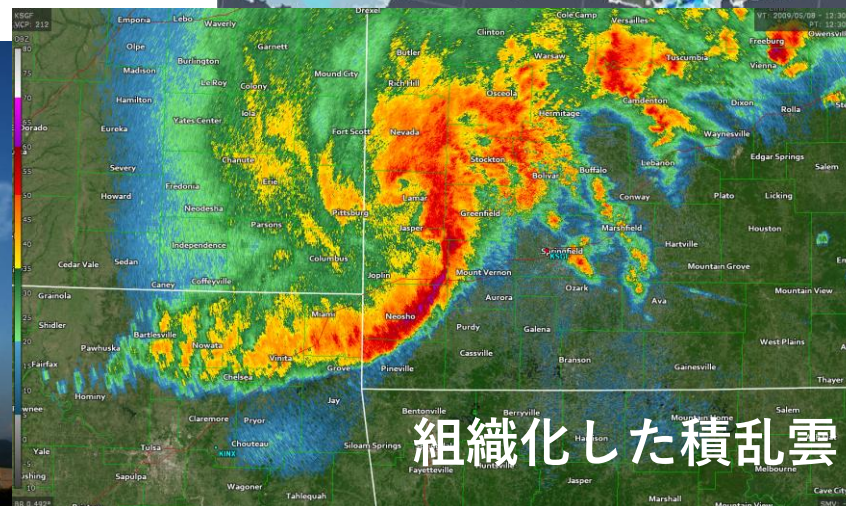
上下スケールの影響を受けて、間欠的に発生し、散逸していく現象が多くを占めます。

<https://tenki.jp/forecaster/deskpart/2022/05/25/17565.html>



https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/obsimg/image_typh.html

積乱雲



<http://www.damweather.com/2019/06/summer-is-squall-line-season-in-united.html>

日々の生活にも影響を及ぼす雲や雨の一部はメソスケールの現象です。

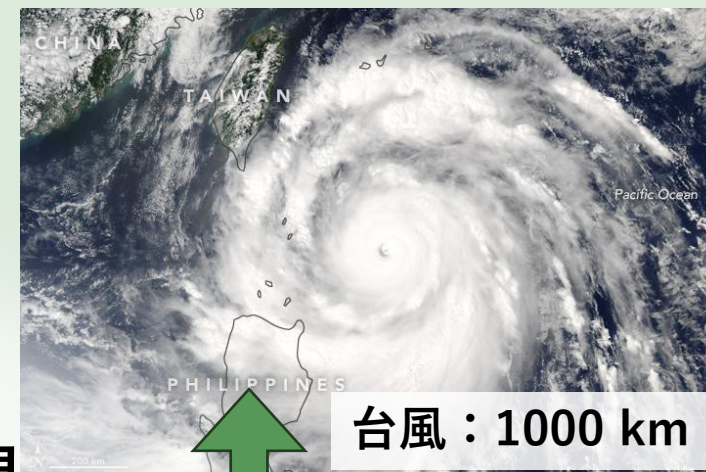
出典：気象庁、日本気象協会(tenki.jp)、DAMWeather.com



大雨・強風といった防災上
重要な現象をより正確に表現
するため、関連するスケール
全てを包含して予測したい。



<http://www.hazardlab.jp/know/topics/detail/1/0/10982.html>



<https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=88749>



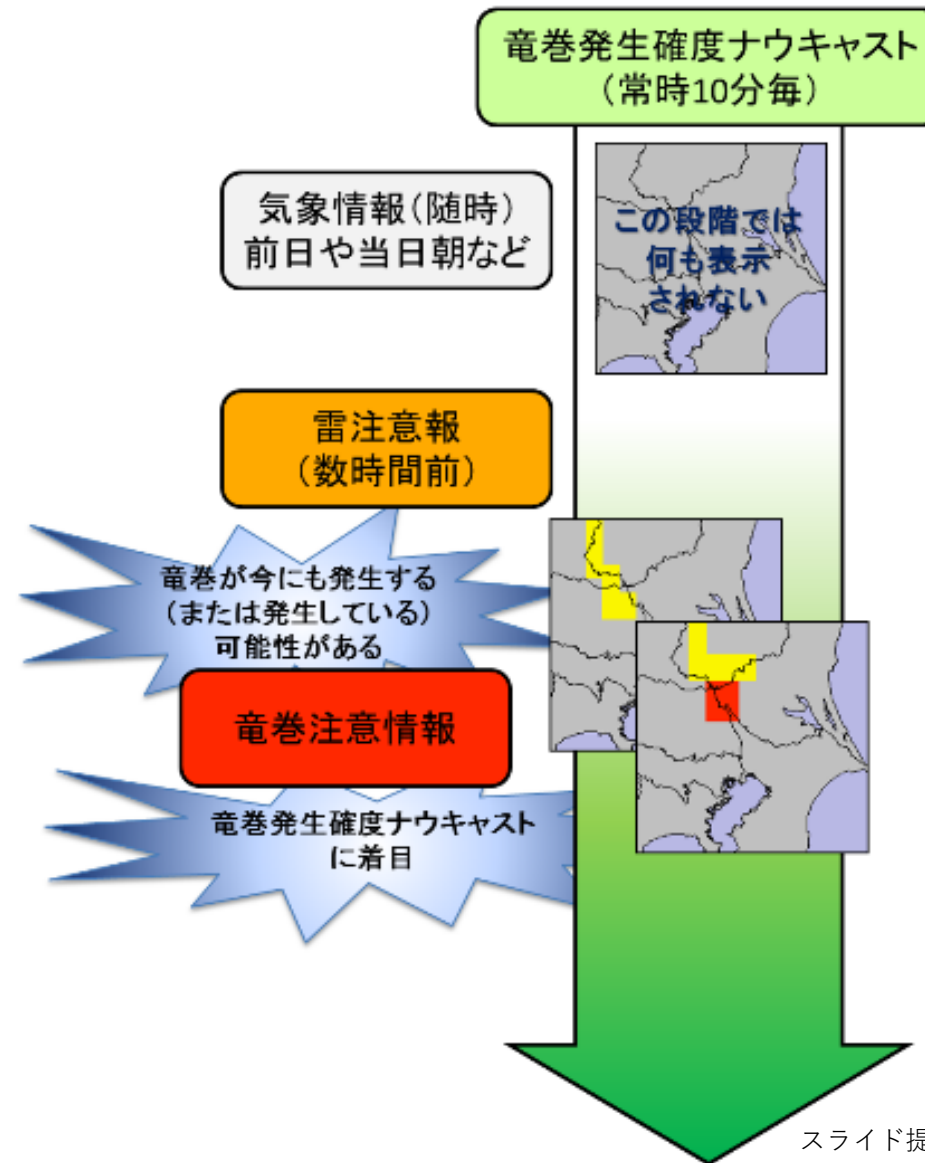
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/tenki_chuui/tenki_chuui_p2.html

竜巻注意情報：気象庁による防災情報の例

2008年3月26日運用開始

背景：2005年12月の庄内平野の突風、2006年9月の延岡、11月佐呂間町の竜巻などで、社会的関心が高まったことから、開発され、発表されるようになった。

手法：竜巻注意情報は、数値予報で予測された風や気温等の分布から算出される突風関連指数、気象ドップラーレーダーの観測、ナウキャストシステム等を組み合わせて今後竜巻等の突風が発生しやすい地域に発表される。



各段階での基本的な対応

【半日から1日後に竜巻等が発生する可能性がある】

- ・ 行動計画の点検、危険回避行動などを検討する。
- ・ 今後の気象情報(雷注意報など)に注意する。

【数時間以内に竜巻等が発生する可能性がある】

- ・ 安全対策に時間を要する場合は、もしものときの危険回避行動を確認する。
- ・ 周辺の気象状況の変化や今後の気象情報(竜巻発生確度ナウキャストなど)に注意する。

【竜巻等が発生しやすい気象状況になっている】

- ・ 発達した積乱雲が発生しており、積乱雲の近辺では竜巻等が発生しやすい気象状況である。
- ・ 竜巻発生確度ナウキャストで、竜巻等が発生する可能性がある地域を確認する。
- ・ 安全確保に時間を要する場合には、1時間先までの予測も利用して早めの安全回避準備をする。
- ・ 周囲の空の変化に注意し、積乱雲が近づく兆しがあれば、危険回避行動をとる。

スライド提供：坪木氏@TRC/YNU 出典：気象庁ホームページ

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 20年	平成 21年	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	9% (23%)	5% (30%)	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	24% [31%]	21% [67%]	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	172	128	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	70 [13]	34 [6]	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 https://www.data.jma.go.jp/tatsumaki/tatsumaki_hyoka_top.html

スライド提供：坪木氏@TRC/YNU

現状、竜巻等の突風予測はなかなか難しいという技術であることがうかがえる。

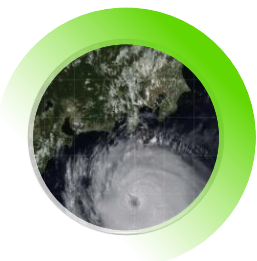
*ただし、評価方法や注意情報の発表方法にもよるため、一概に予測精度が低いとはいえない。



富士通-横国大台風リサーチ ラボの研究例

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

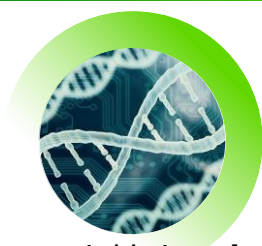
ほとんど予測できていない竜巻発生の高精度予測により、被害軽減を実現

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



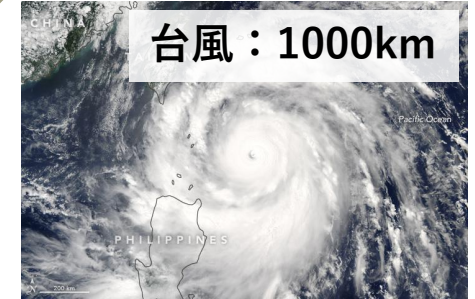
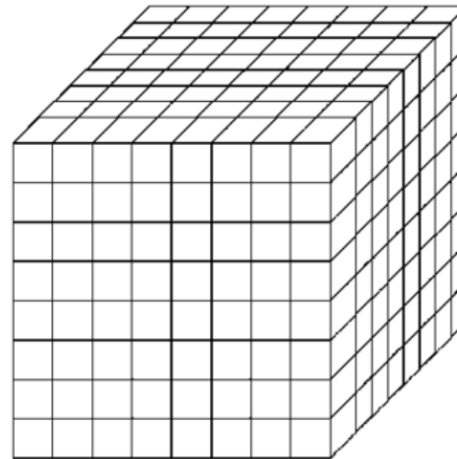
TRC
Typhoon Science and Technology Research Center

「研究力」

目的：台風による竜巻を気象モデルで
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格子間隔で、鉛
直層も含め約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



積乱雲：10-100km



竜巻：数10-数100m



Capability Computing: 高解像度かつ広領域の計算

「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

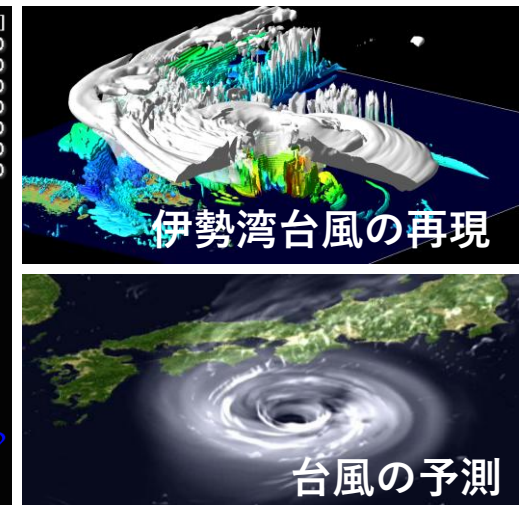
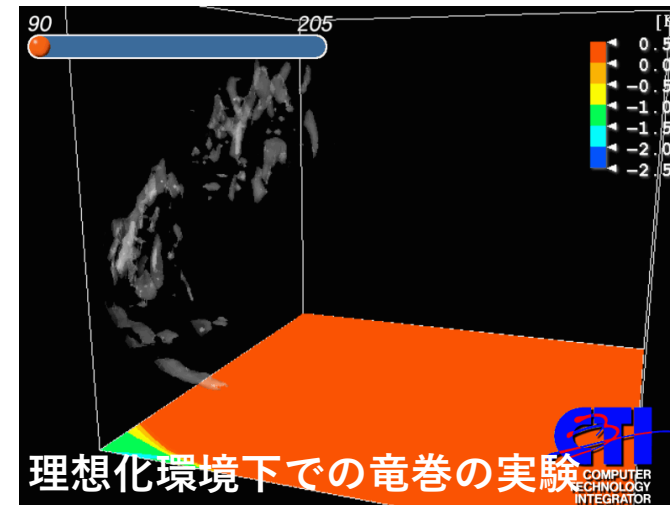
1. 雲スケール（50m～2000m）からメソスケール（2km～2000km）までを扱える雲解像モデルに基づく、高精度な気象シミュレーターである。
2. 竜巻を発生させるスーパーセル積乱雲の発生・発達をシミュレートできるが、複雑な物理方程式を扱うために計算量の膨大さ課題である。
3. ラップトップからスパコンまで多様な計算機で実行可能で、国内外で多数の利用実績がある。

参考文献：Tsuboki and Sakakibara, 2002; Tsuboki, 2023
* CReSS: Cloud Resolving Storm Simulator

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



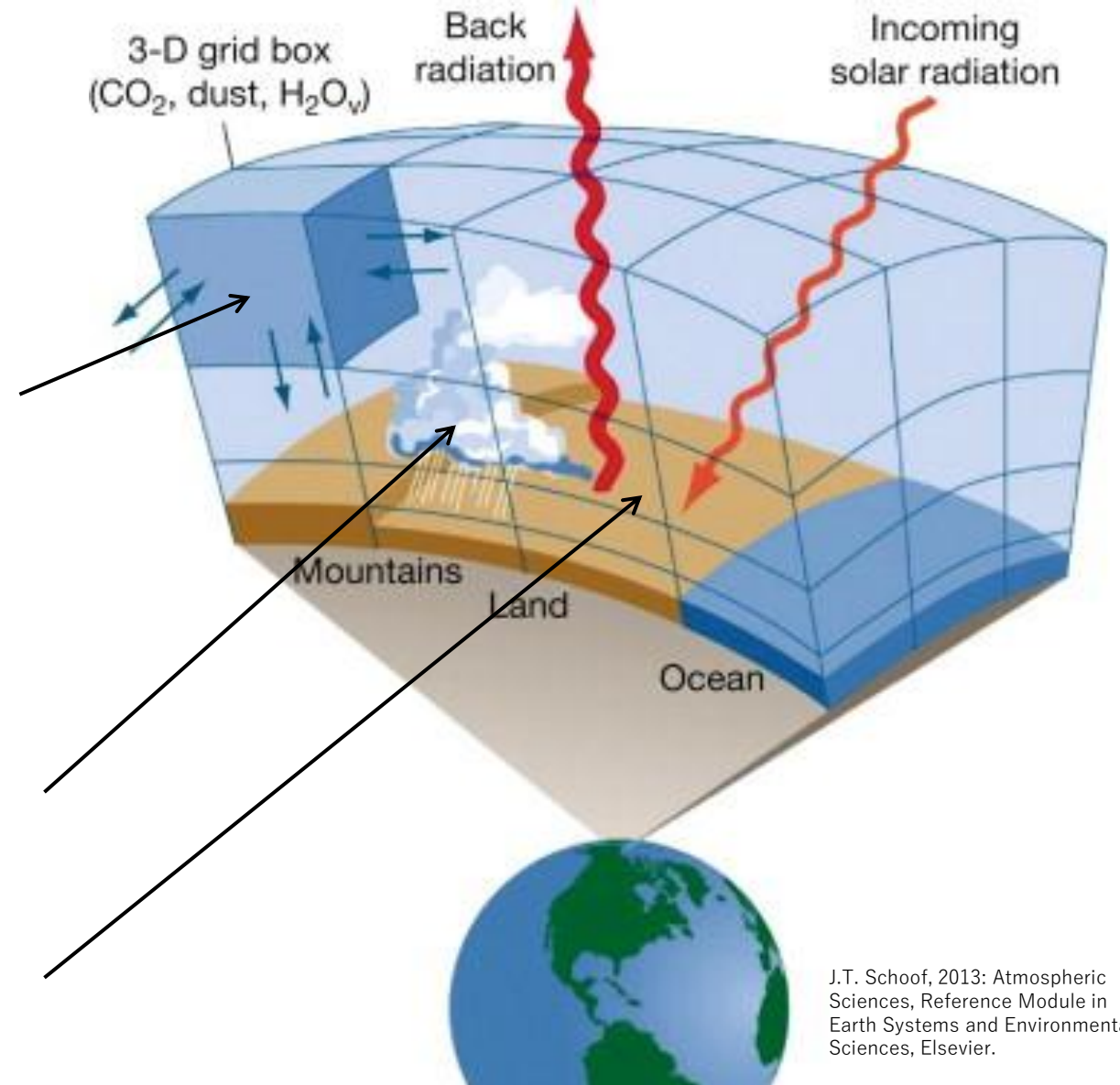
基本的には、流体力学の方程式を有限体積法などで解くステンシル計算アプリケーション

各コントロールボリュームに対して、3次元の気圧勾配、温度や物質量の3次元勾配等を計算し、面を通過するフラックスを計算して、移流を解く。

質量保存に関連する速度と気圧のバランス式は、波数展開して解くか、陽解法+陰解放で解くため、実装によっては毎ステップ全通信が発生する。

雲は水の相変化を計算する。臨界値を判断させるためにIF文が多量に入っており、最適化がかかりにくい。

格子内の雲の有無によって、雲微物理過程（相変化等）や放射過程の計算量に大きな差がうまれるため、ノードインバランスがおきやすい。



J.T. Schoof, 2013: Atmospheric Sciences, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier.

大気や海洋のモデルは、流体アプリとしては少し変わっているかもしれない。

- 現象の時間発展やスケール間相互作用をみるため、常に計算途中の情報を保存しておきたい。
- 計算終了時や統計値1枚を見て、ああこんな形ね…ではなく、アニメを見て、ああこんな風に、これが原因で発達するのか…にもっと興味がある。

初期値



結果

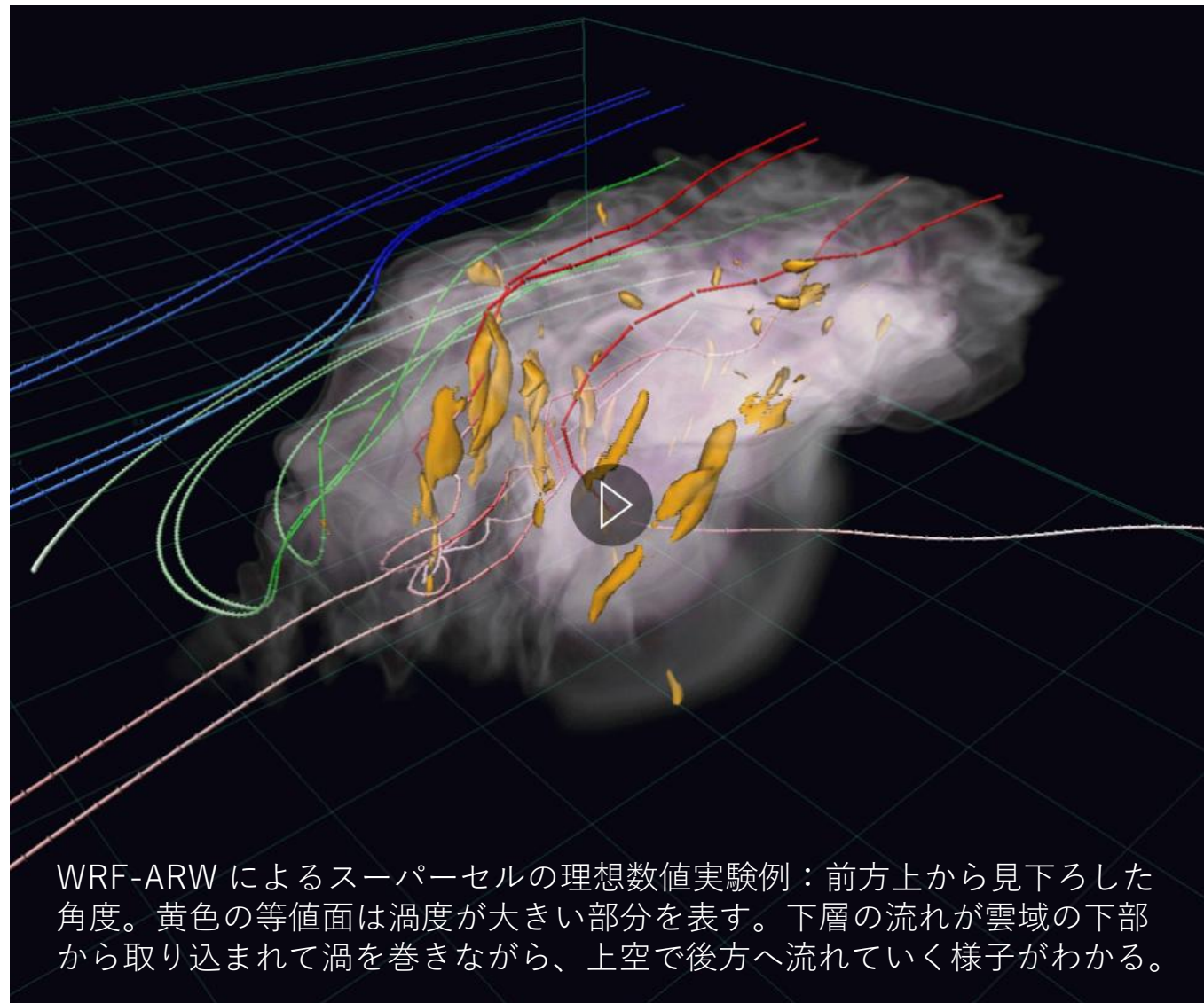
初期値

途中1

途中2

途中3

終時刻



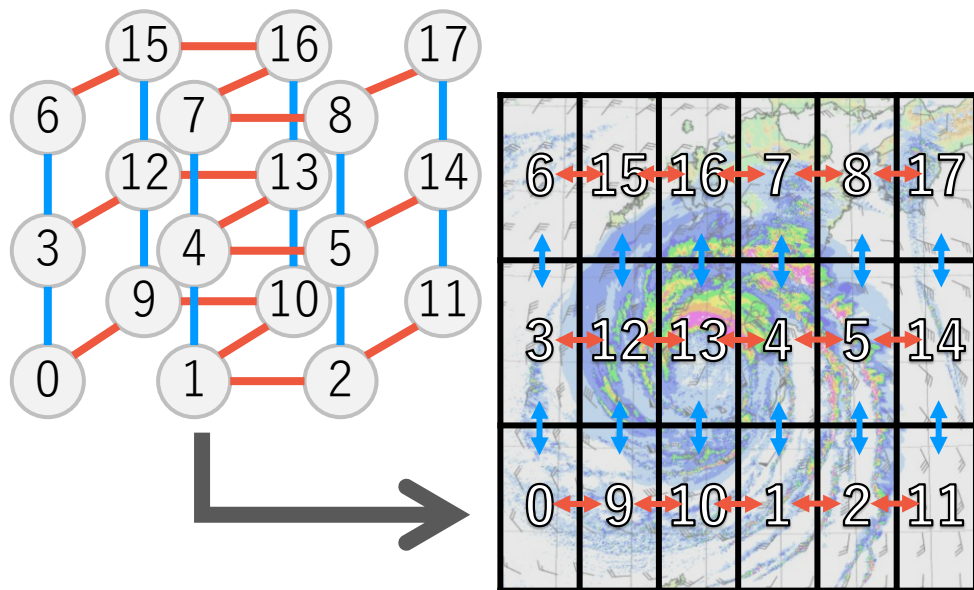
WRF-ARW によるスーパーセルの理想数値実験例：前方上から見下ろした角度。黄色の等値面は渦度が大きい部分を表す。下層の流れが雲域の下部から取り込まれて渦を巻きながら、上空で後方へ流れていく様子がわかる。

最適化対象はソルバーだけではない！

通信最適化：

高い並列効果で計算を高速化

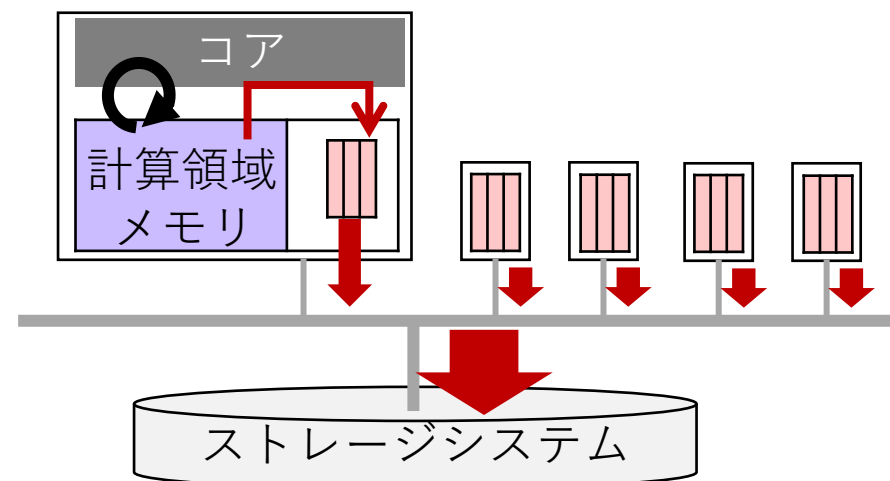
- 6次元メッシュ/トーラス構造へ最適に計算プロセスを配置
- 冗長な通信経路の排除



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



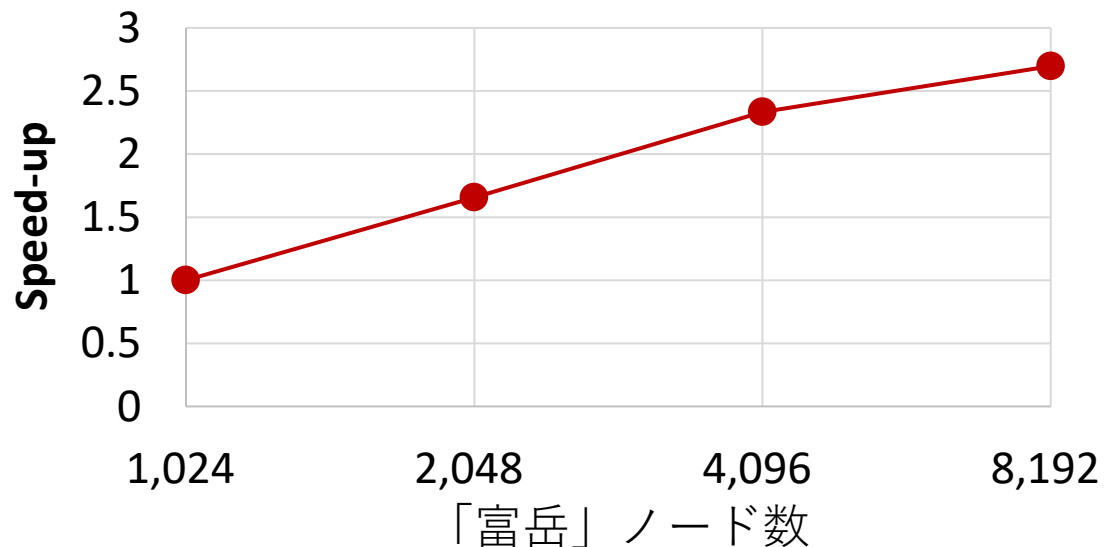
提供：富士通 真島様、本田様、湯上様

「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

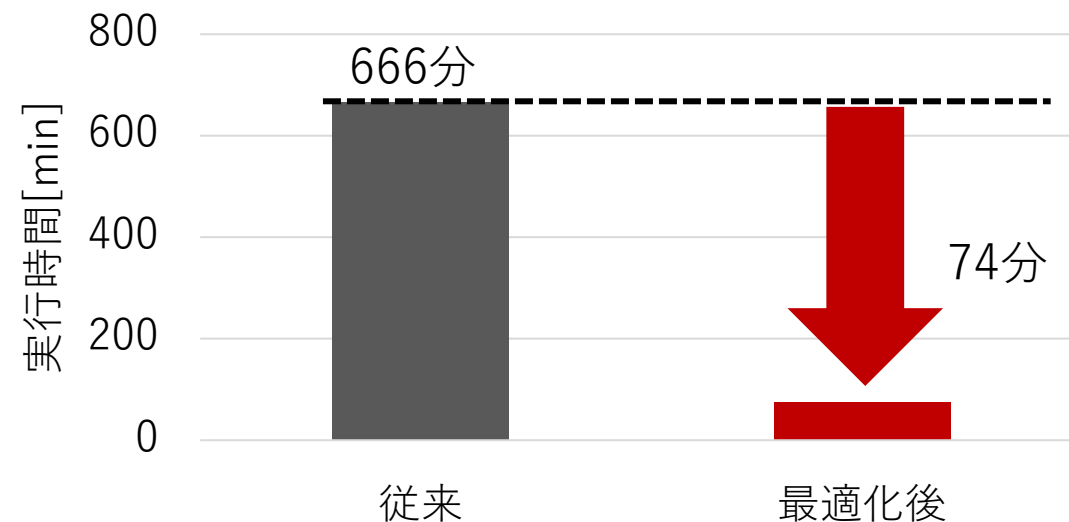
- 最適化により約9倍の高速化、4時間先のシミュレーションを74分で実行

➡ 竜巻の予測が可能になる計算速度域に到達した。

スケーラビリティ評価
シミュレーションのみ



データ処理も含めた実行時間比較
4時間分のシミュレーション, 8,192ノード



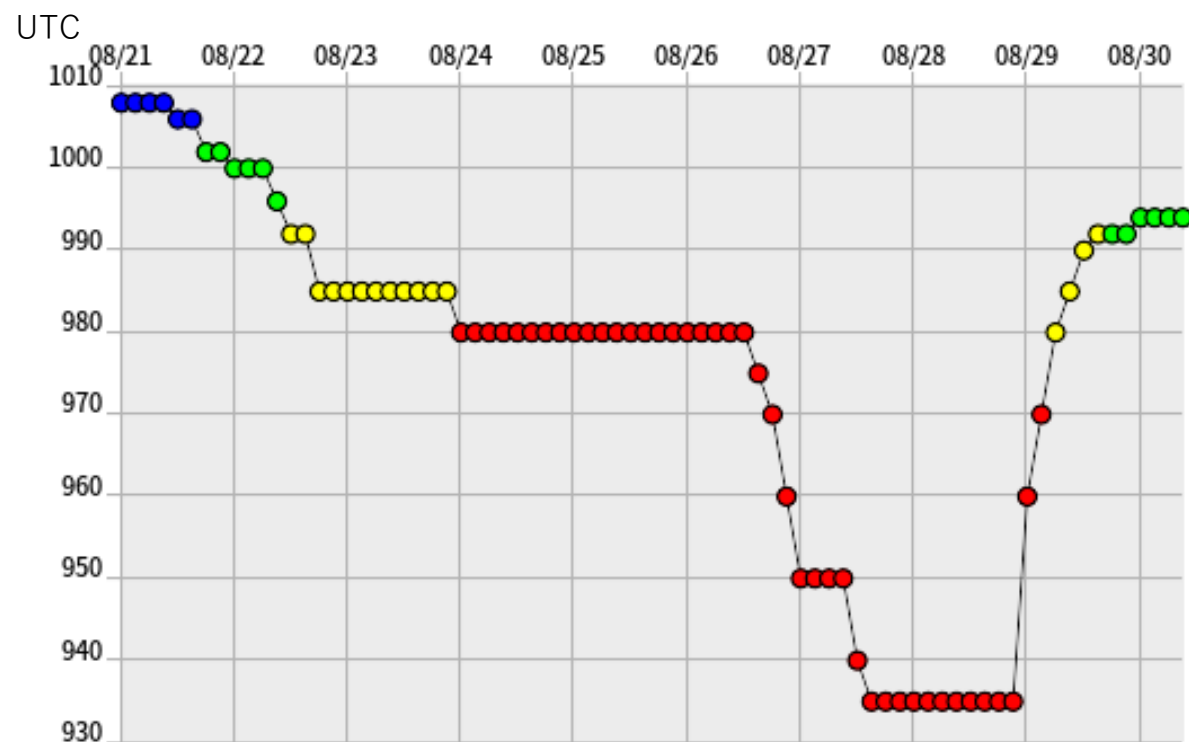
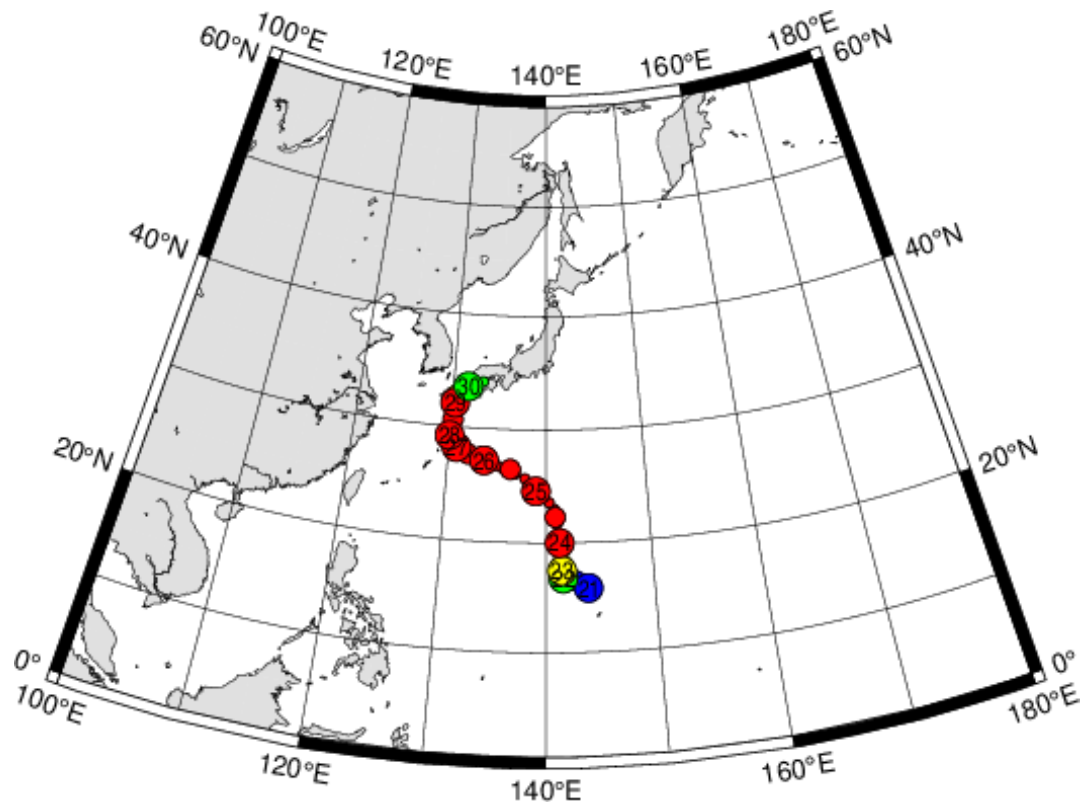
提供：富士通 真島様、本田様、湯上様



計算結果の紹介

2024年台風10号に伴う竜巻：台風の概要

スライド提供：坪木氏@TRC/YNU



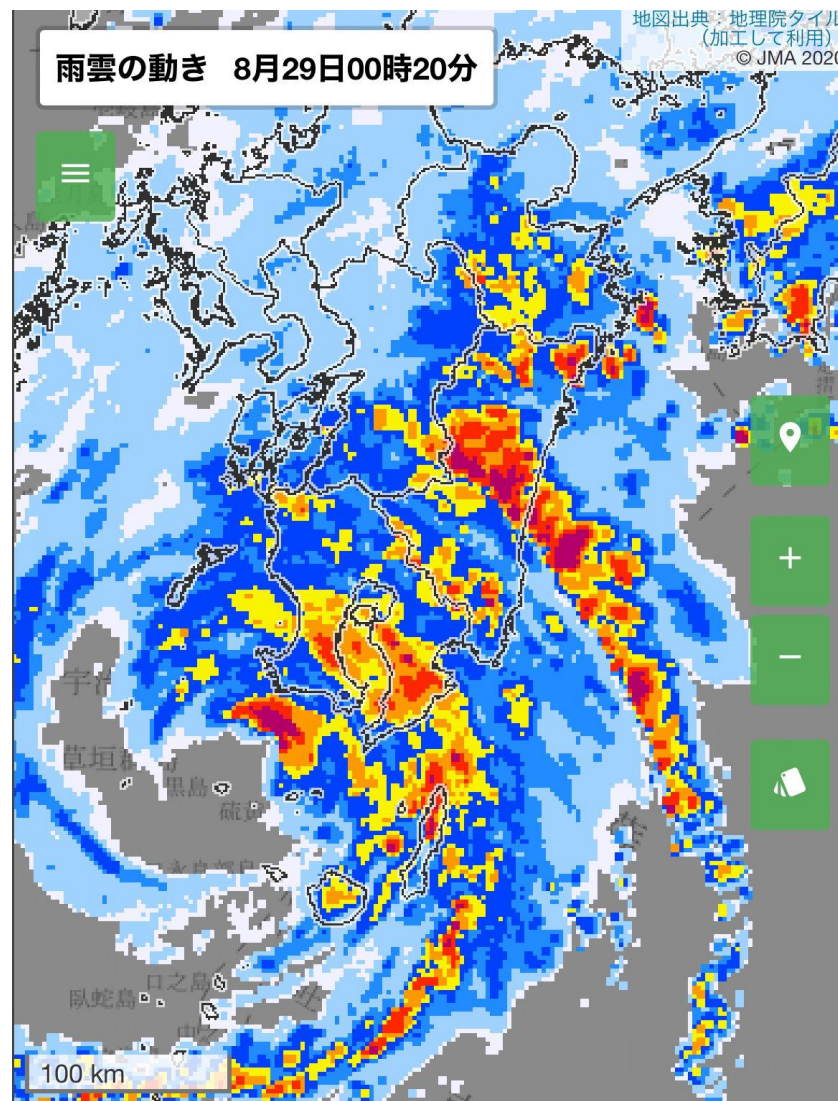
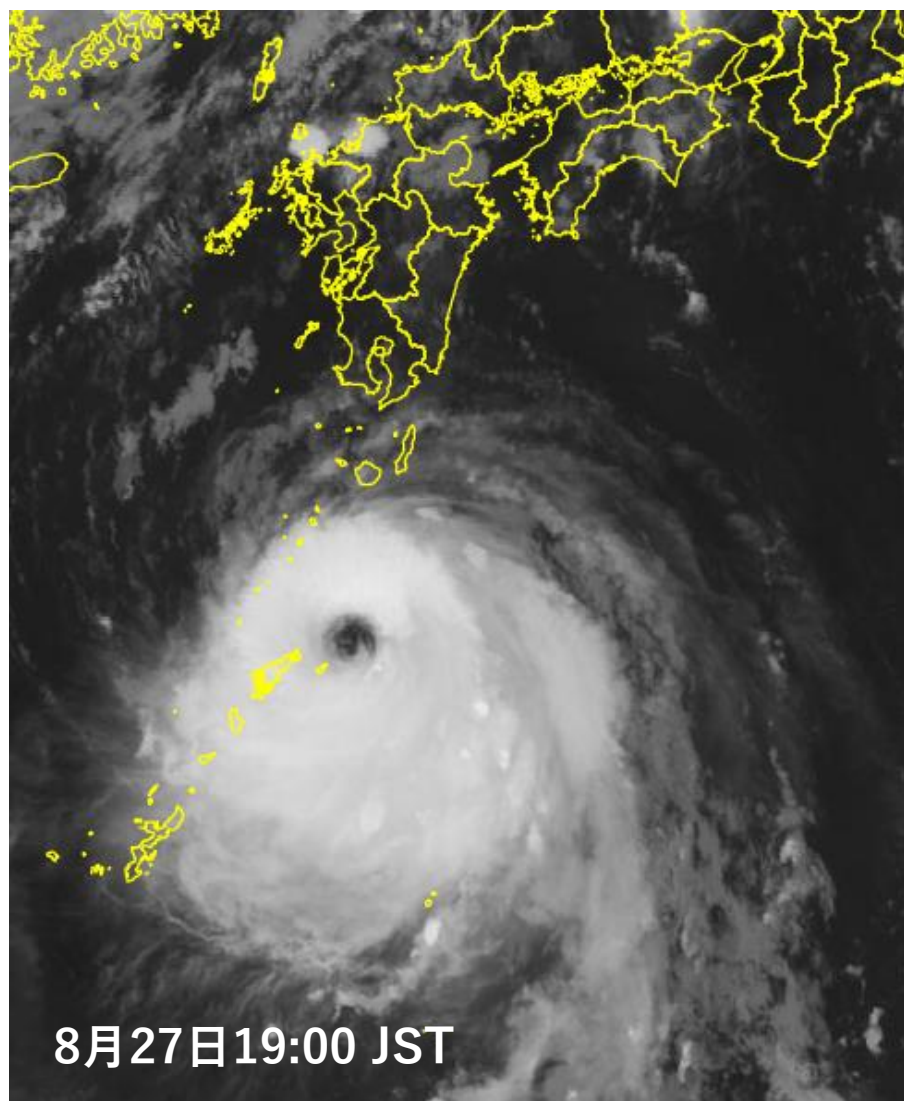
出典：デジタル台風（北本朝展、国立情報学研究所）

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

2024年台風10号に伴う竜巻：台風の概要

スライド提供：坪木氏@TRC/YNU



はっきりした大きな眼をもち、九州に接近時は複数のレインバンドを伴っていた。

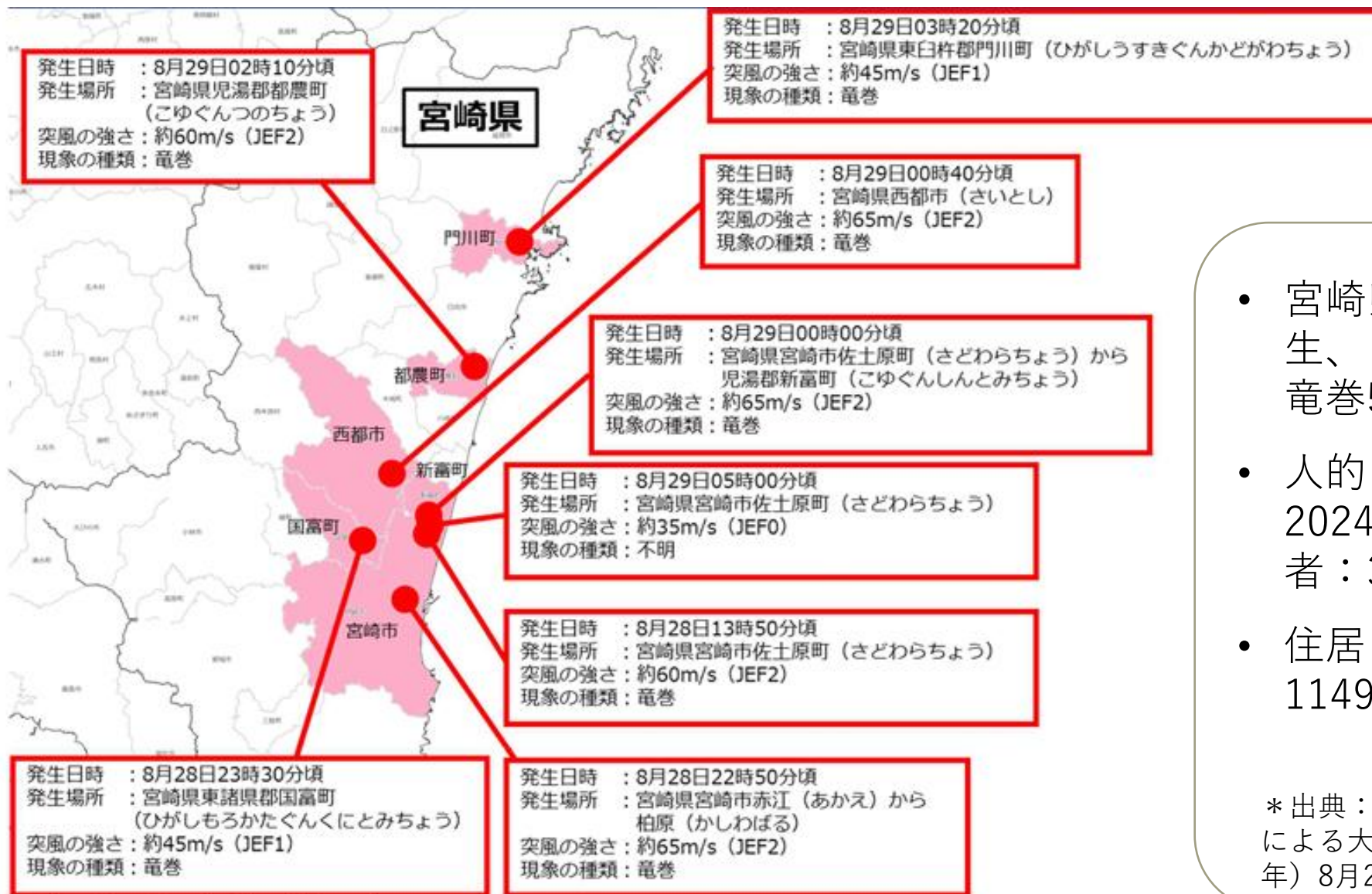
左：2024/08/27 19 JSTの気象衛星ひまわりの観測

右：2024/08/29 00:20 JST 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/>)

2024年台風10号に伴う竜巻：事例報告等

スライド提供：坪木氏@TRC/YNU

参考：竜巻等突風の発生状況 (2024年8月27日～31日)

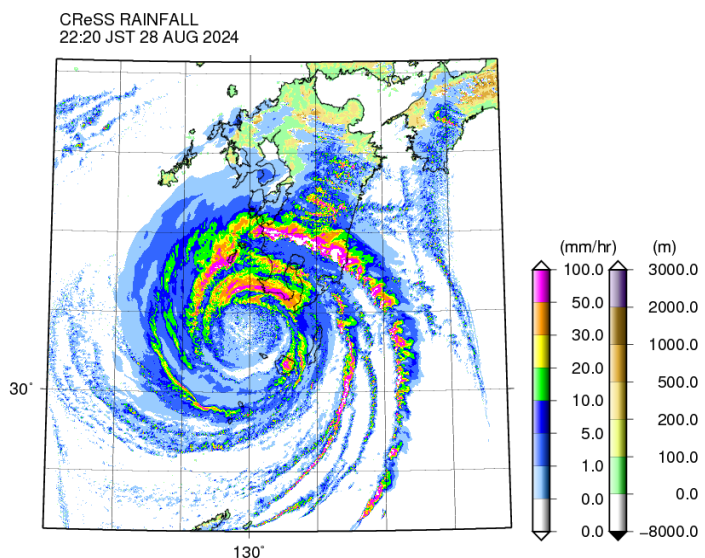


- 宮崎県内で8件の突風被害発生、うちJEF2 (約60-65 m/s) 竜巻5件
- 人的・住居被害 (宮崎県発表、2024年9月9日現在) 負傷者：39名 (うち重傷1名)
- 住居：半壊 23 棟、一部破損 1149棟

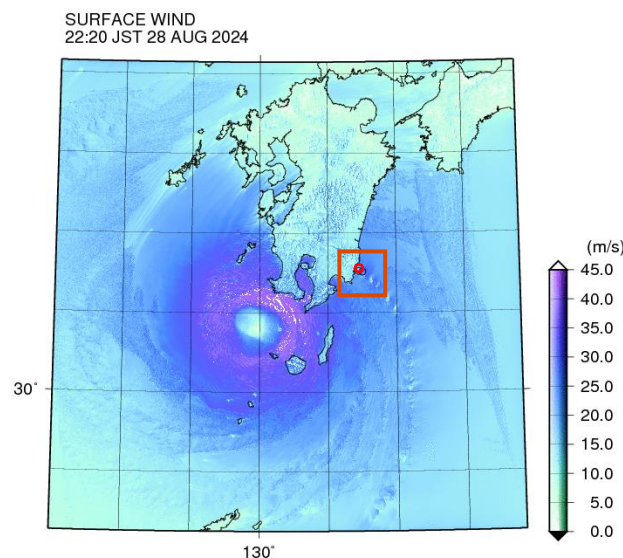
* 出典：気象庁資料「令和6年台風第10号による大雨、暴風及び突風 令和6年 (2024年) 8月27日～9月1日」

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

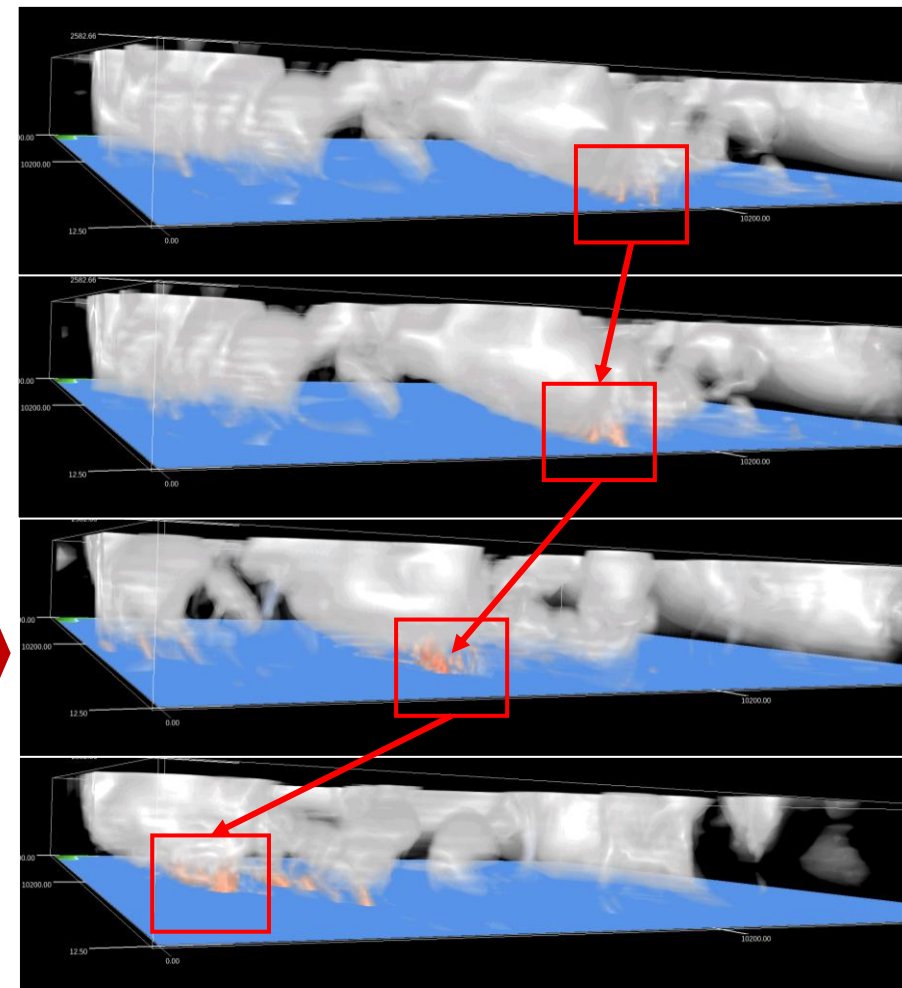
台風全域の水平80m高解像度シミュレーションで初めて実現



1. 台風全域で観測データと比較



2. 渦状の強風の発生（拡大図）



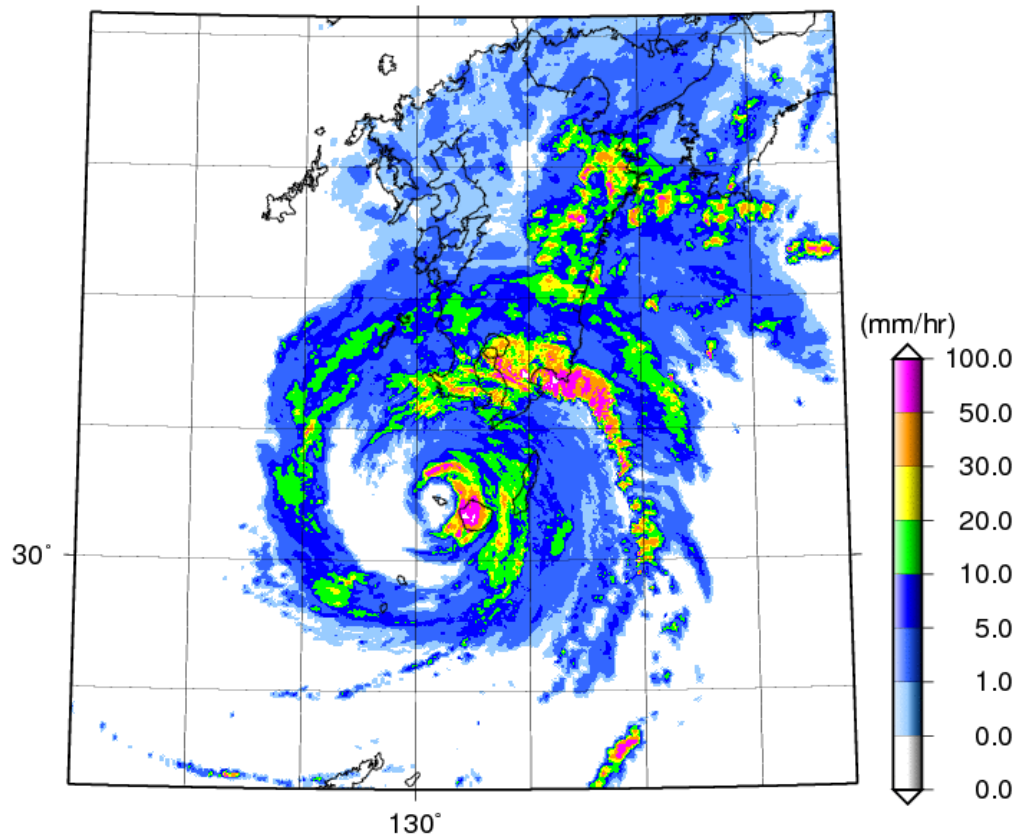
3. 竜巻が九州南部で次々に発生・発達

シミュレーション結果をVAPORを使い塚越氏@TRC/YNUが可視化:
VAPOR : <https://www.vapor.ucar.edu>

九州に接近・上陸する際の雨量

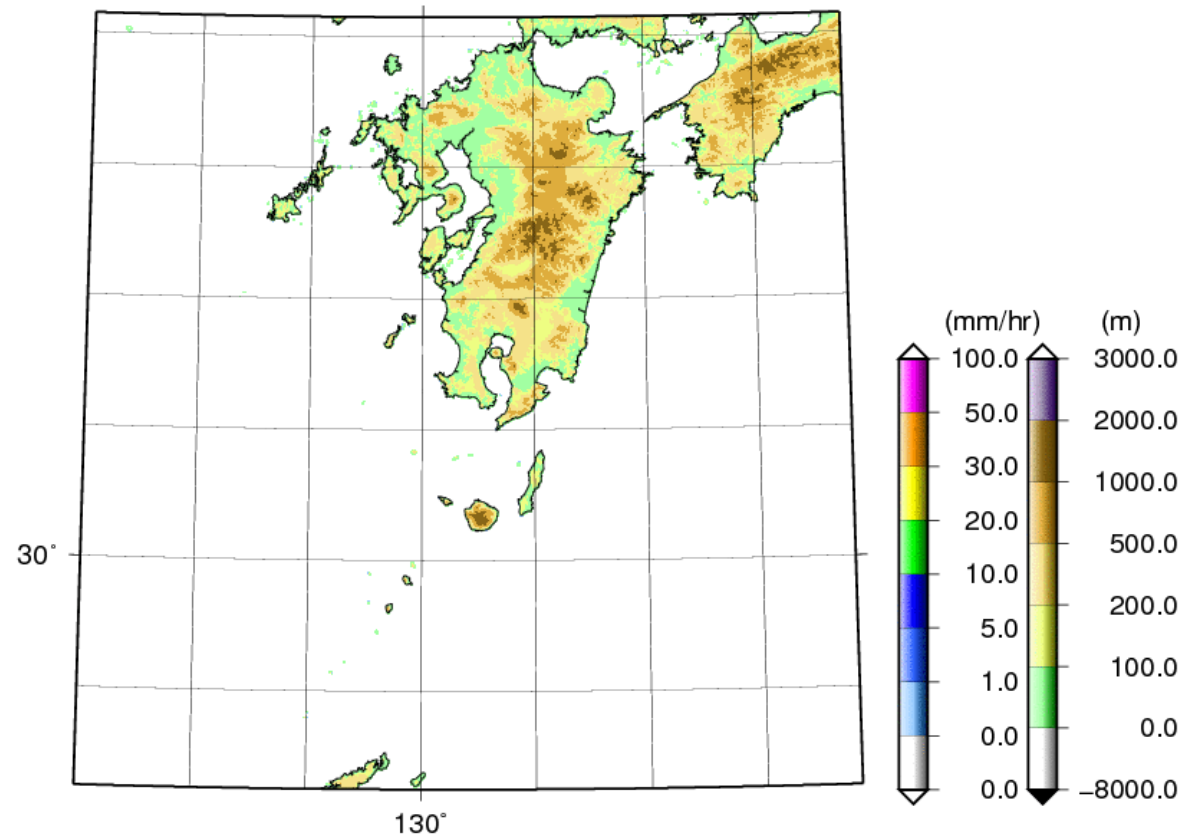
観測データ

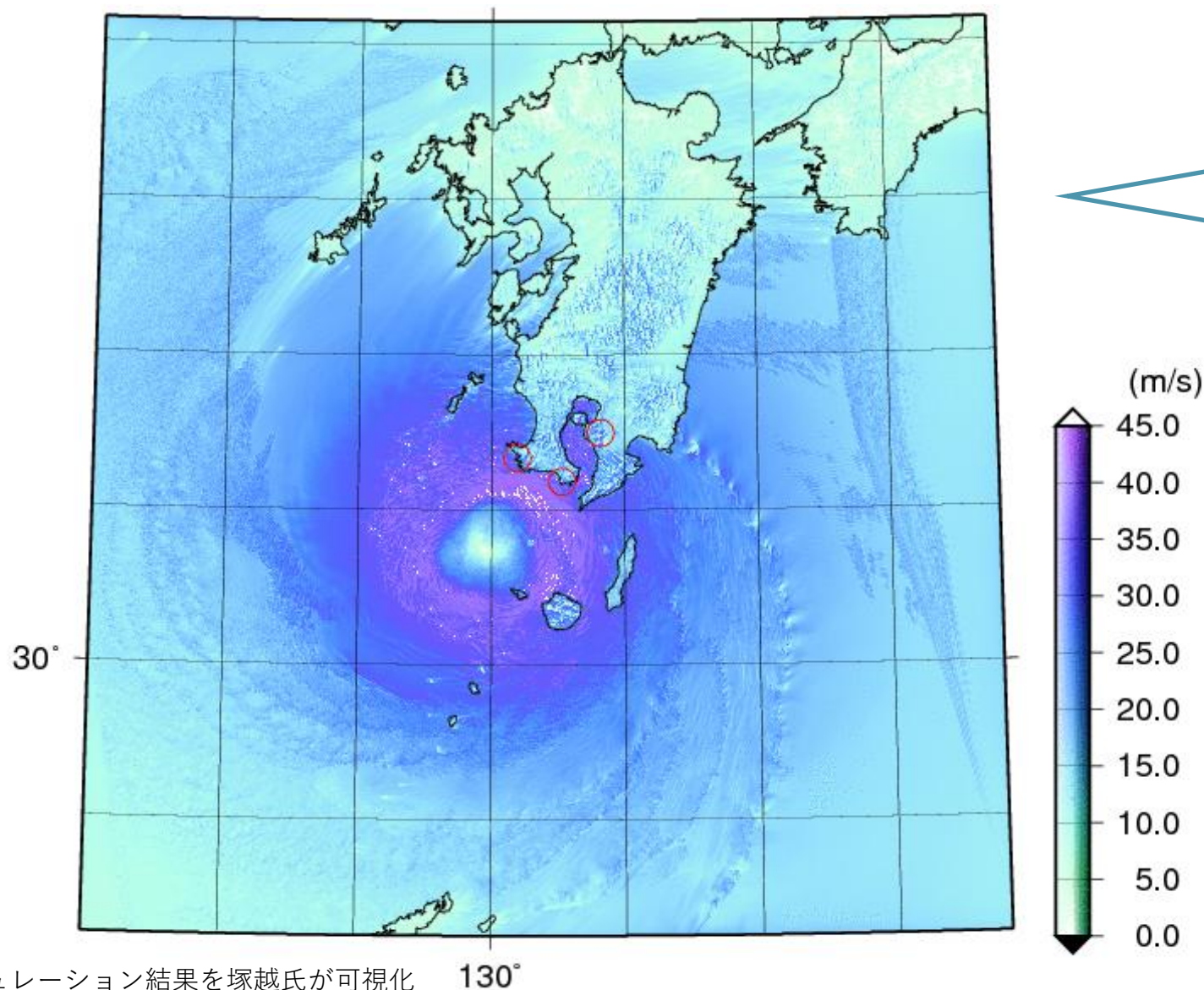
JMA RADAR RAINFALL
20:00 JST 28 08 2024



シミュレーション結果

CReSS RAINFALL
20:00 JST 28 AUG 2024



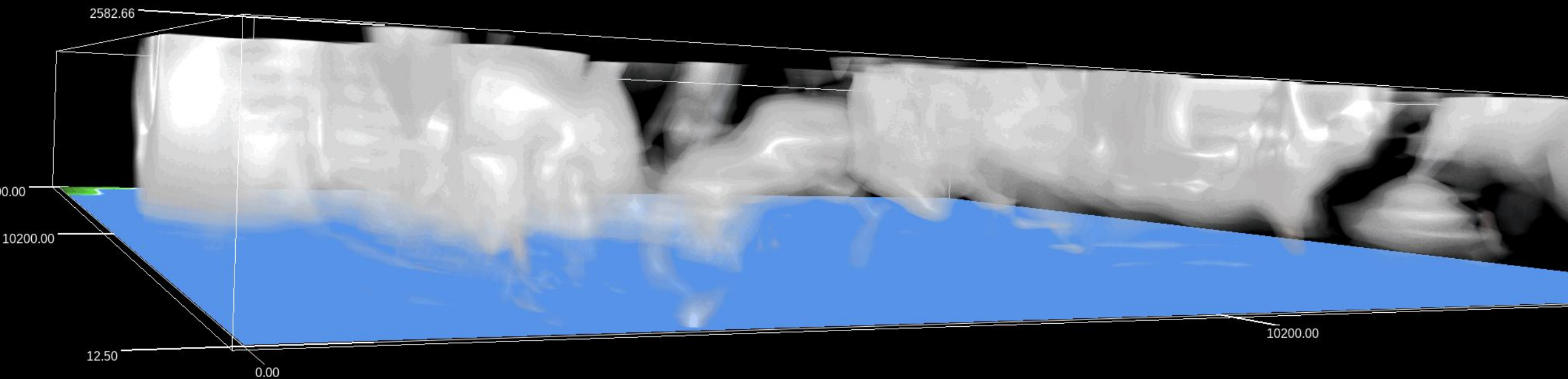


- 実は結構、可視化にも手こずります。
- 変数を同時に数種用いて可視化するのが一般的です。
- しかし、今回は格子点がおよそ7500x7500x80もある。
- メモリロードだけでも苦労。
- そもそもディスプレイの解像度が足りない・・・
- 3D描画レンダリングも大変です。今回は最初から限られた空間を限定した。

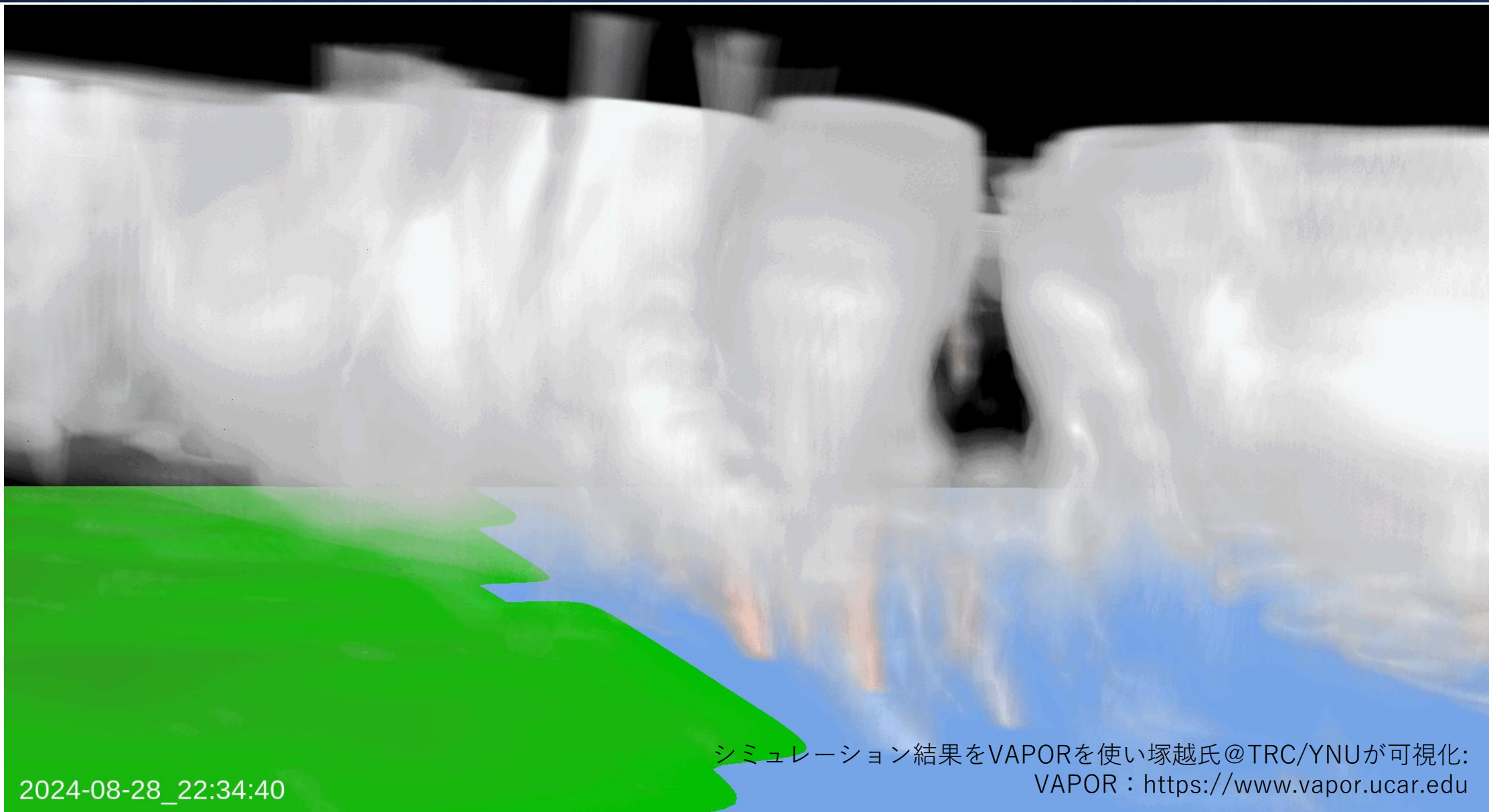
シミュレーション結果：水平風速
地表での風速と渦度から竜巻の可能性の高い箇所「○」を検出

シミュレーション結果を塚越氏が可視化 130°

竜巻が次々に発生し九州（左方向）に移動しながら発達していく様子を再現した。



シミュレーション結果をVAPORを使い塚越氏@TRC/YNUが可視化:
VAPOR : <https://www.vapor.ucar.edu>



2024-08-28_22:34:40

シミュレーション結果をVAPORを使い塚越氏@TRC/YNUが可視化:
VAPOR : <https://www.vapor.ucar.edu>

- 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」版CReSSは公開中。
- 「富岳」を用いることで、広領域・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、将来、竜巻をリードタイムを持ってリアルタイム予測できる可能性であることが示された。（現状では時間と場所に大きな差があり、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）
- 今回の成果をもとに、AI技術の活用も視野に入れ、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している。
- 富士通のマテリアリティの1つとして、また大学の産学連携・地域連携推進の1つ具現化として、地球環境問題の解決への貢献を目指す。



ご清聴ありがとうございました。