

# テーマ1は3年間で何を達成したのか (短時間領域スケール予測)

川畑 拓矢 (気象研究所/気象業務支援センター)

**Thanks to: 参加者の皆さん、気象業務支援センターの皆さん**

# コンセプトは何だったのか

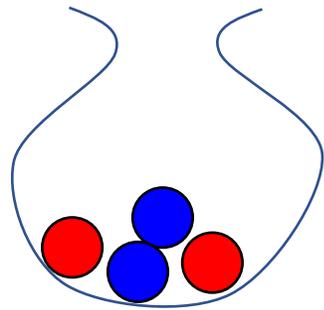
Weather forecast から Impact-based forecast へ  
(天気予報) (災害リスク予報)

気象によって人間活動は様々な影響を受ける。  
単に気象の予報をするだけでなく、その影響までを評価。

- 気象予報の精度が担保されることが大前提  
(さらなる高精度化、長時間のリードタイム)  
決定論的 -> 高解像シミュレーション、モデリング  
確率論的 -> 大アンサンブル
- } データ同化、  
機構解明
- 気象情報のユーザーを拡大  
気象現象によるどのような影響が？  
ダメージを軽減？

# リスク回避と不確実性回避

期待値 50万円



● : 100万円  
● : 0円

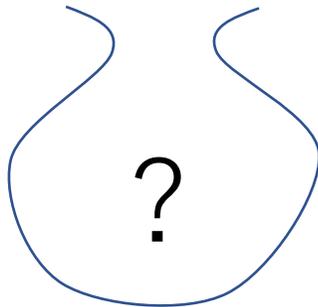


リスク回避

50万円



(主観確率による)  
期待値 50万円

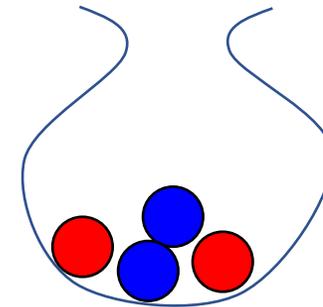


● : 100万円  
● : 0円



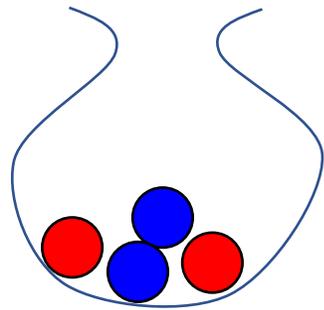
不確実性回避

期待値 50万円



# リスクプレミアムと不確実性プレミアム

期待値 50万円



● : 100万円

● : 0円

+

リスク  
プレミアム

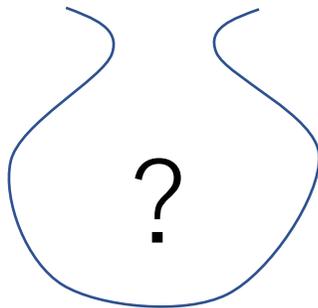


=

50万円



(主観確率による)  
期待値 50万円



● : 100万円

● : 0円

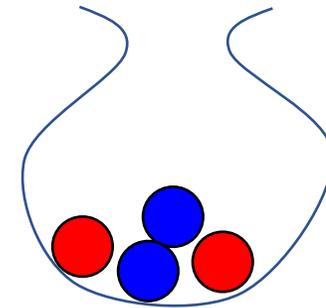
+

不確実性  
プレミアム



=

期待値 50万円



# なぜ大アンサンブルが必要か？

- **観測ビッグデータを同化するため。**  
ポスト京では観測ビッグデータを同化する技術開発を行ってきたので、いよいよ富岳で有効に利用する
- **現実を捉えるPDFの幅を確保するため。**  
リスク評価には確率情報が有効
- **確率情報を出すため。**  
1000のデータから作れる階級値はせいぜい10-15個。  
スタージェスの公式  $(1+\log_2 n)$

# モデリングに関する成果

# 次世代の数値予報に向けた気象雷モデルの開発

2021年度シンポジウム  
「富岳」× 極端気象予測  
～ 「富岳」による極端気象予測の新しい世界～  
2021/9/4 @Zoomウェビナー

佐藤陽祐 ( 北海道大学理学研究院 )

謝辞：

科研費基盤Bメンバー ( 林 修吾主任研究員、橋本明弘主任研究員 (気象庁気象研究所) )

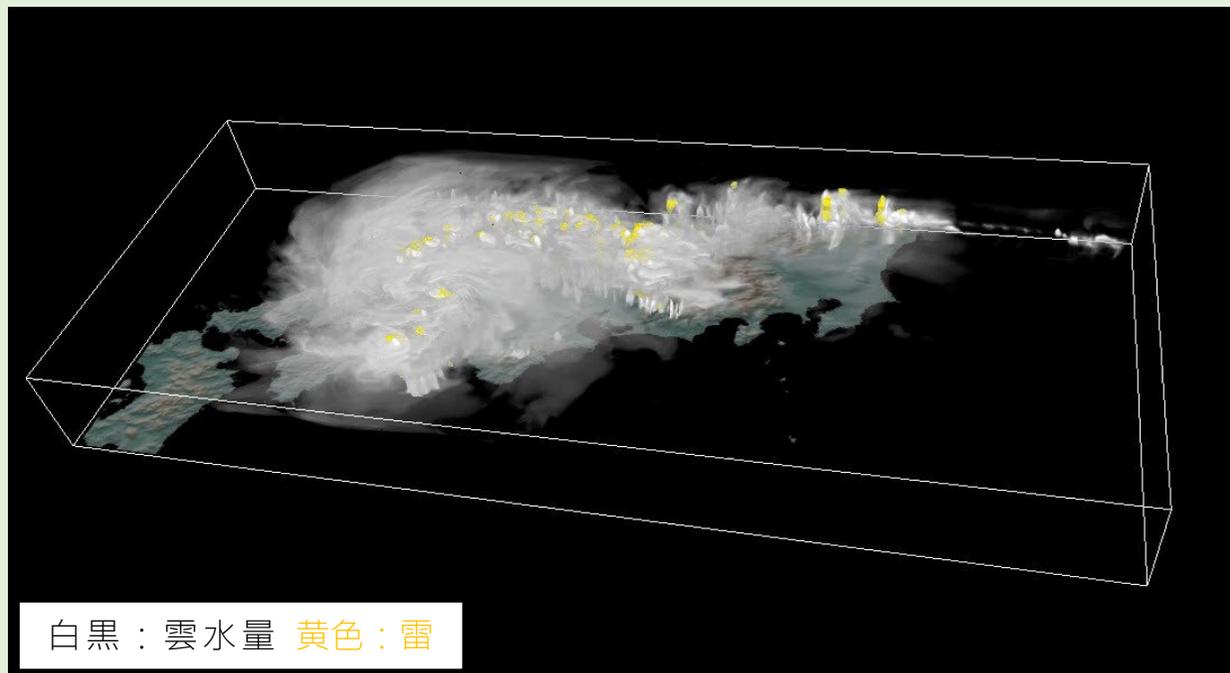
岩下武史教授 ( 北海道大学情報基盤センター )、富岡拓海 ( 北海道大学理学院 )

北海道気象技術センター (  **HowTecc** )

# 気象雷モデル

## 雷放電を物理モデルに基づいて計算するモデル

雷を入れた数値モデルで得られた計算結果の例



描画：VAPOR ([www.vapor.ucar.edu](http://www.vapor.ucar.edu))

開発の最終目的

数値予報で雷を直接予報し  
雷被害の軽減につなげたい

### 物理モデルを使うことによる利点

- 雷がどこでどのくらい鳴るかを物理モデルに基づいて計算するモデル
- 物理モデルに基づいているため、メカニズムの解明や将来環境での雷の変動などの予測に利用可能

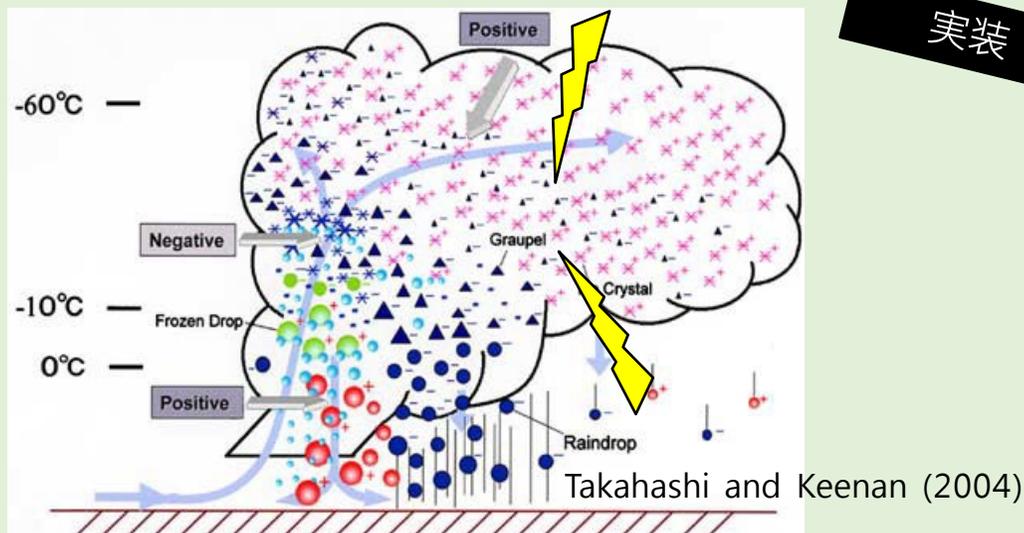
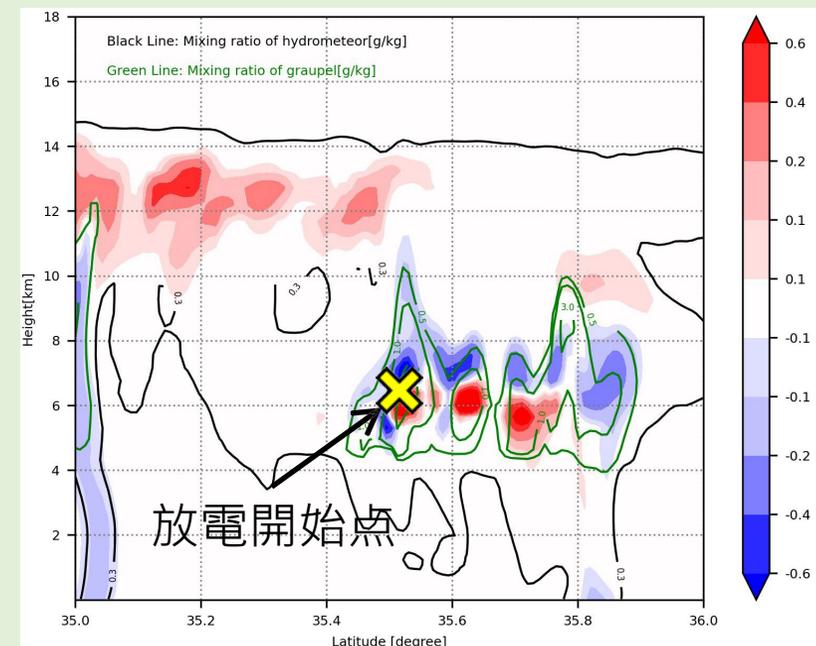
# 雷モデルの概要 (Sato et al. 2019)

雷モデルの計算例  
(コンター：雲、シェード：電荷)

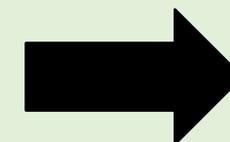
気象雷モデルの予報変数：雲を構成する水物質が持つ電荷

## 構成するコンポーネント

1. 電荷分離 ( 霰と雪/氷の衝突で分離 : Takahashi 1978 )
2. 電荷の移動 ( 水物質に伴って移動 )
3. 電場の計算 (ポアソン方程式)
4. 中和 ( Ferrio et al. 2013 )



気象モデルSCALE



気象雷モデル  
(Sato et al. 2019)

SCALE-5.4.0以降に取り込まれて理研のHPより公開：「理研 SCALEで検索」

# 雲微物理スキームの変更点

## 旧スキーム (MP2003)

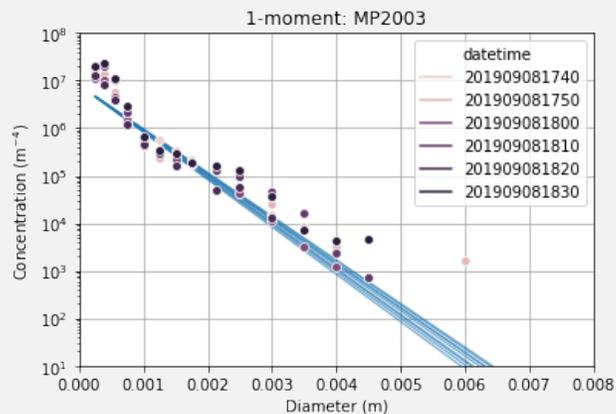
### 雪の形状

➤ スポンジ状の球

キャパシタンス (昇華効率に影響) は気温の関数(Thompson 2008)。

### 雨滴の粒径分布

粒径分布関数：逆指数分布 (Marshal-Palmer分布)



丸印：LPM観測  
実線：シミュレーション

## 新スキーム (MPNEW)

### 雪の形状



➤ タイプ1：球

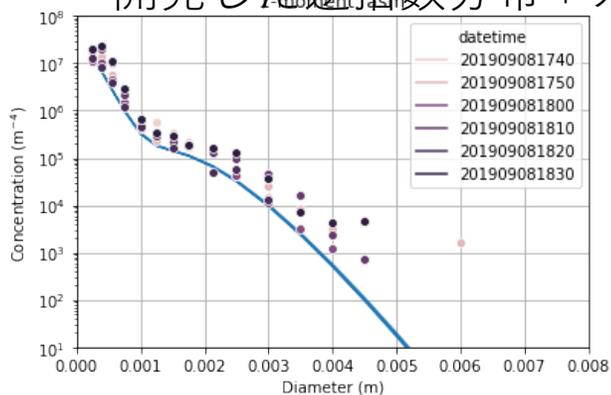
➤ タイプ2：樹枝状結晶

➤ タイム3：凝集雪片

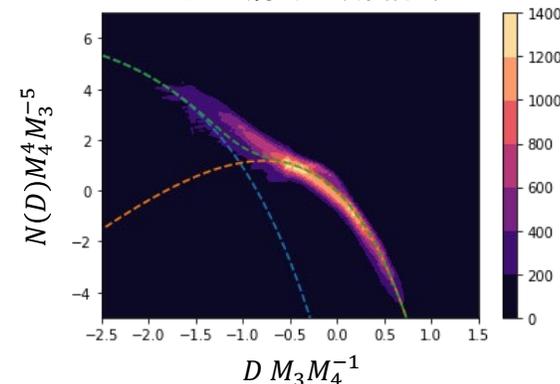
キャパシタンス、落下速度と衝突併合に3種類の形状を仮定した。それぞれの割合はTerzi et al. (2022)の偏波レーダーの解析をベースに気温に依存。アスペクト比はMatsui et al. (2019)、落下速度はLocatelli and Hobbs (1974); Brandes et al.(2008)に基づく。

### 雨滴の粒径分布

本研究で光学式ディストロメータLPM観測を基に開発した逆指数分布+ガンマ分布



LPM観測の頻度分布

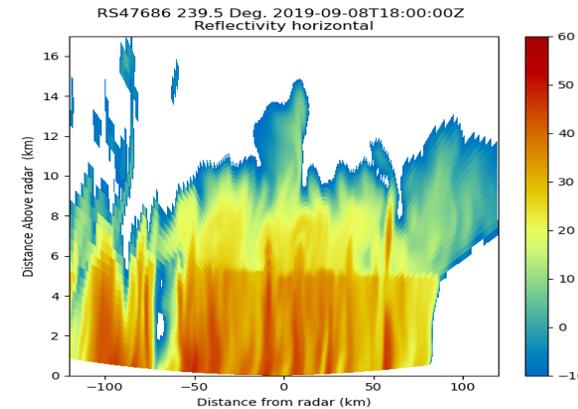
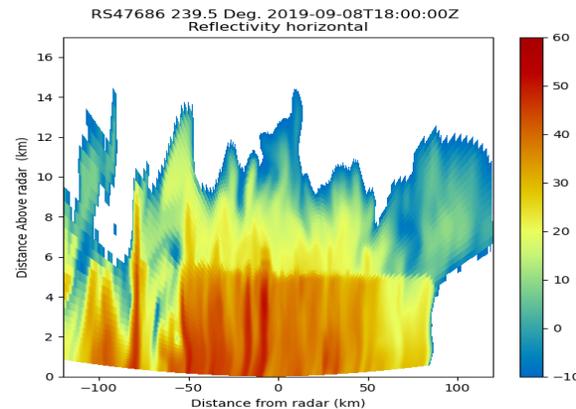
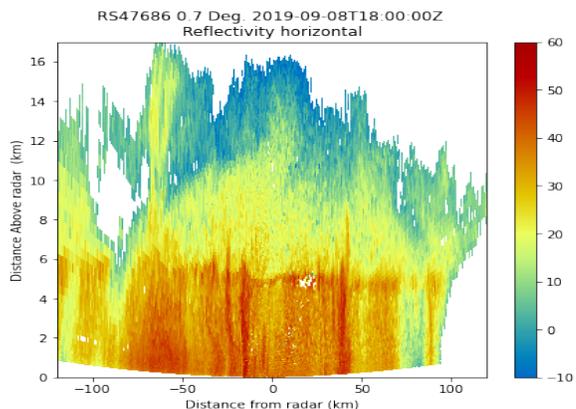


# 観測

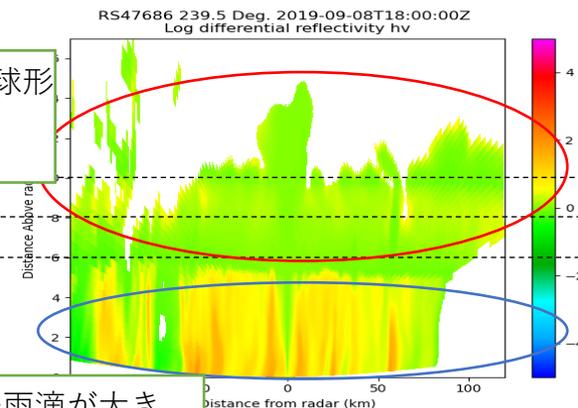
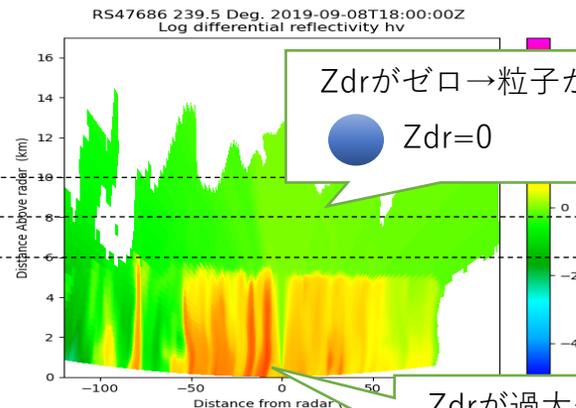
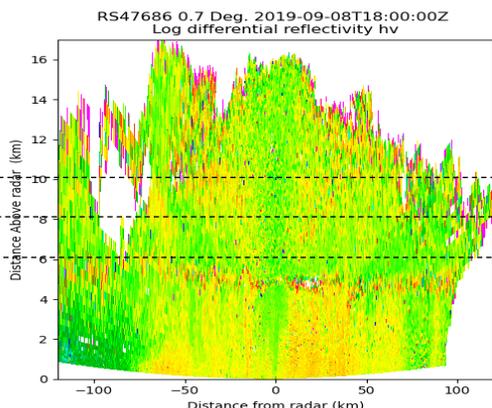
# 旧スキーム (MP2003)

# 新スキーム (MPNEW)

Z<sub>HH</sub>



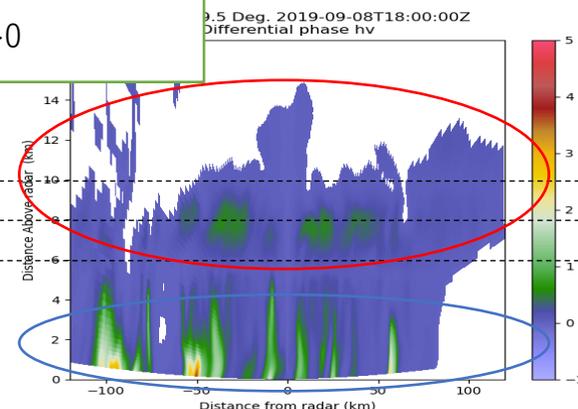
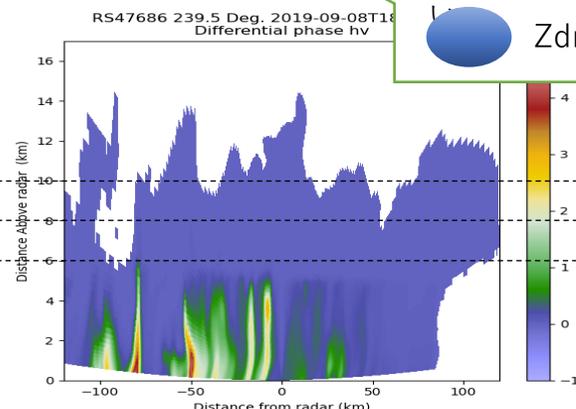
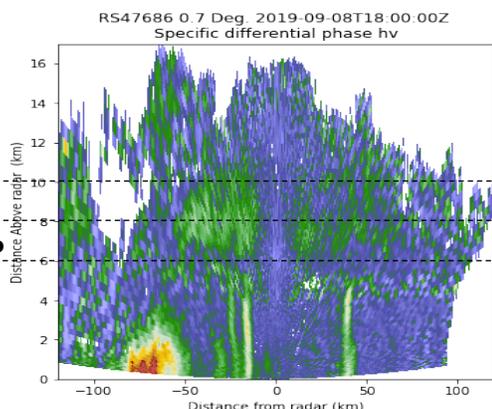
Z<sub>DR</sub>



固体降水の偏波パラメータの再現に成功

下層の過剰なZDRの抑制に成功

K<sub>DP</sub>



固体降水の偏波パラメータの再現に成功

下層の過剰なKDPの抑制に成功

Z<sub>dr</sub>がゼロ→粒子が球形  
● Z<sub>dr</sub>=0

Z<sub>dr</sub>が過大→雨滴が大きい  
● Z<sub>dr</sub>>0

高解像度シミュレーション

# 冬季の南関東で発生する晴天乱気流の 高解像シミュレーションおよび 飛行中の旅客機への影響解析

「富岳」成果創出加速プログラム 2021年度成果発表会

2022年3月11日 13:25~13:45

吉村 僚一<sup>1,2</sup>, 伊藤 純至<sup>3</sup>, 鈴木 健斗<sup>4</sup>, Patrick Antonio Schittenhelm<sup>5</sup>,  
焼野 藍子<sup>1</sup>, 大林 茂<sup>1</sup>

1. 東北大学 流体科学研究所

2. 東北大学大学院 工学研究科航空宇宙工学専攻

3. 東北大学大学院 理学研究科

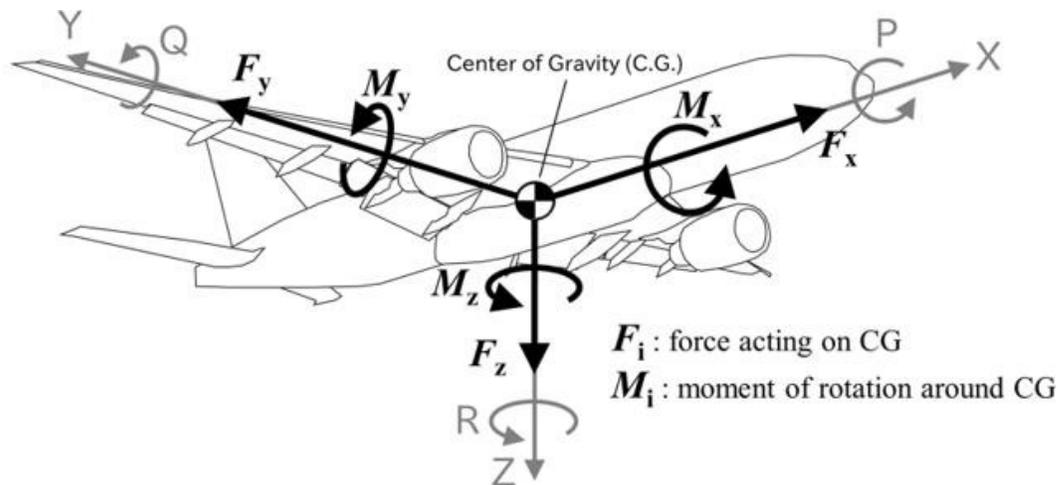
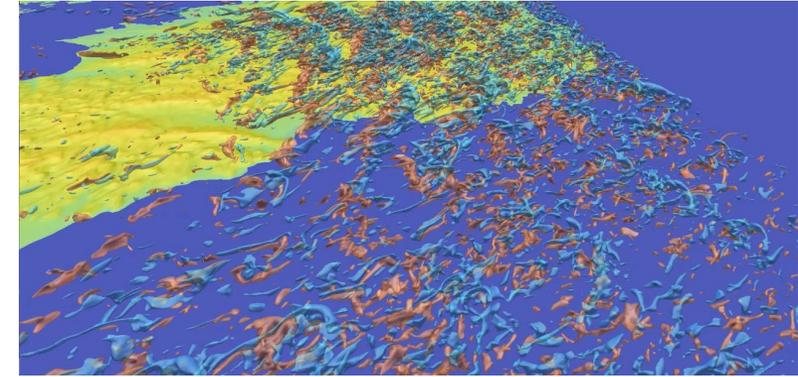
4. 気象庁情報基盤部

5. Aerospace Engineering, University of Stuttgart

# 数値計算設定

- 使用モデル 気象庁非静力学モデルasuca
- 初期境界データ 気象庁MSM解析 (モデル面)
- 計算期間・解像度 期間: D04 : 12/30 06 - 12 UTC  
ターゲット時刻 10 UTC  
解像度: dx=35m, dz~35m

- 計算時間、資源  
富岳 382ノード (計4週間) 程度



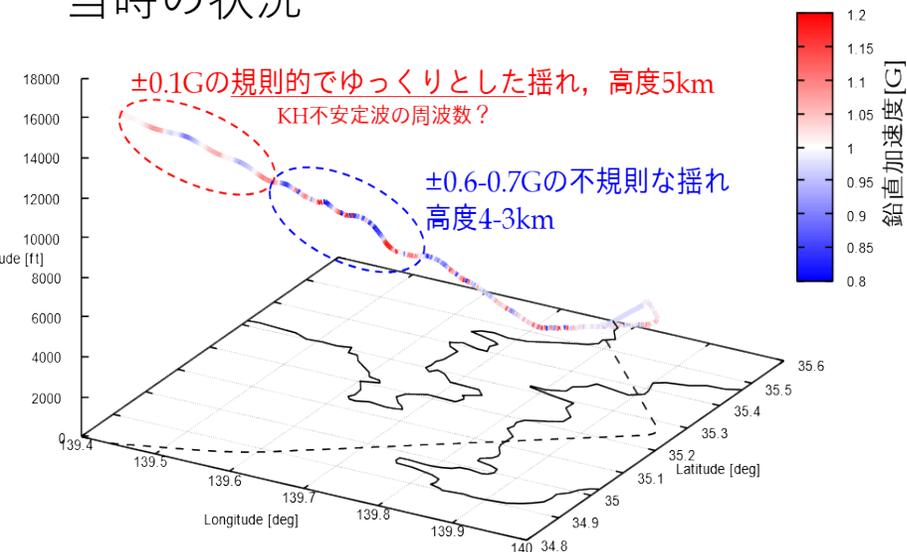
## 飛行機の重心に関する運動方程式を解く

- 並進3方向 :  $u$ (x方向),  $v$ (y方向),  $w$ (z方向)
- 回転3方向 :  $p$ (ロール),  $q$ (ピッチ),  $r$ (ヨー)  
→鉛直運動のみ( $w, q$ )を解くように式を単純化
- 乱気流による外力を考慮
- 自動機体制御は実装しない
- 着陸直前のB787-9を想定した飛行条件

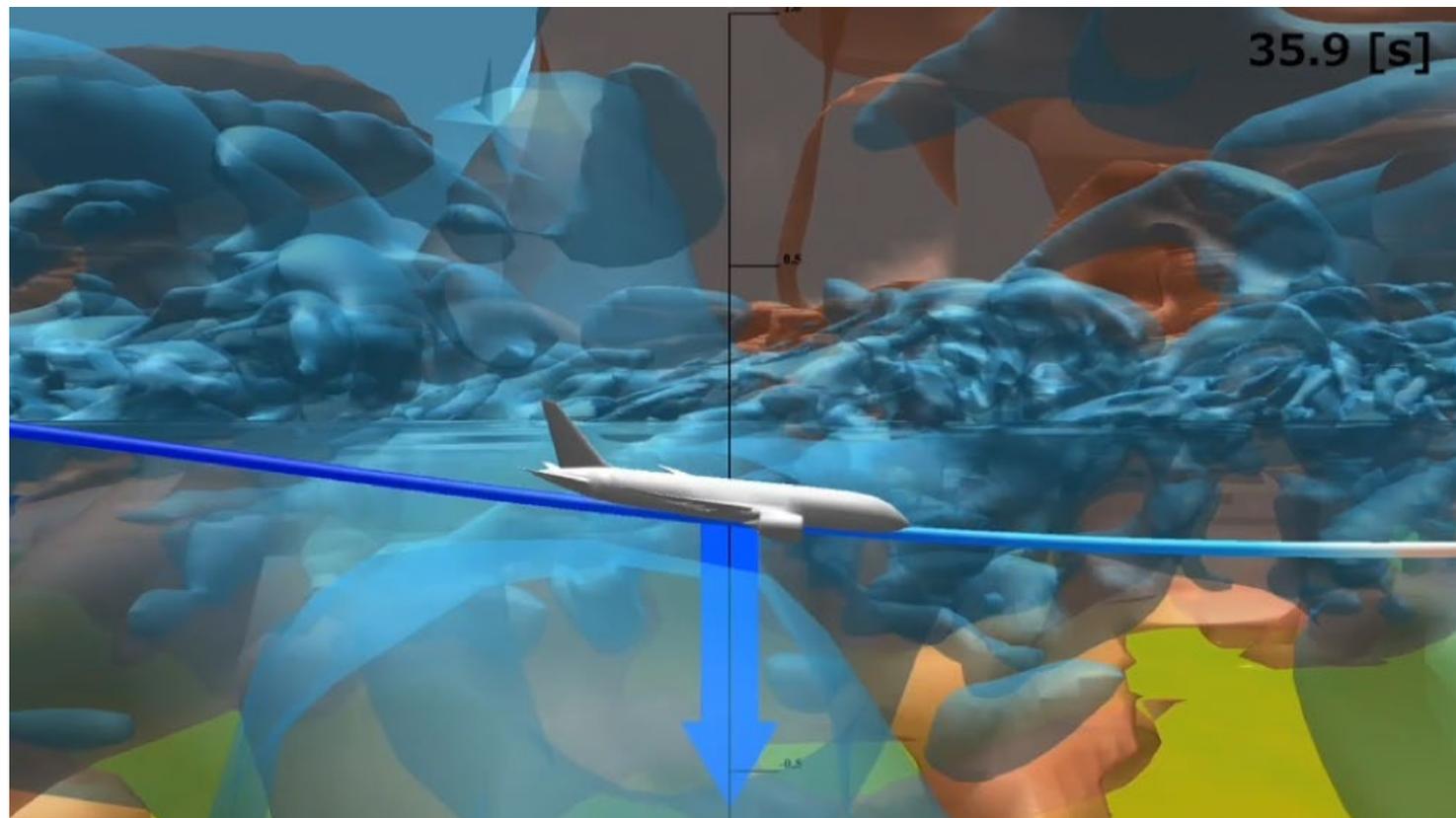
# 実際のフライトデータで精度検証された 晴天乱気流遭遇のデジタルツイン

世界初！

フライトデータから見る  
当時の状況



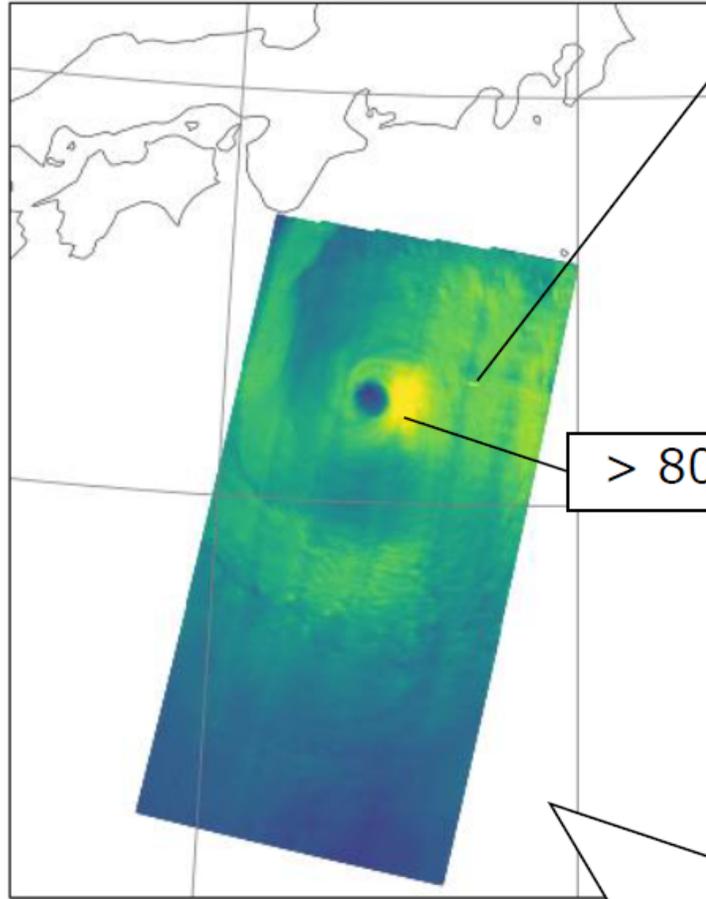
フライトシミュレーションで再現した状況



# データ同化の成果

### SARの海上風

wind\_speed



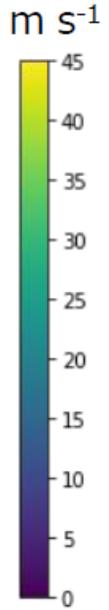
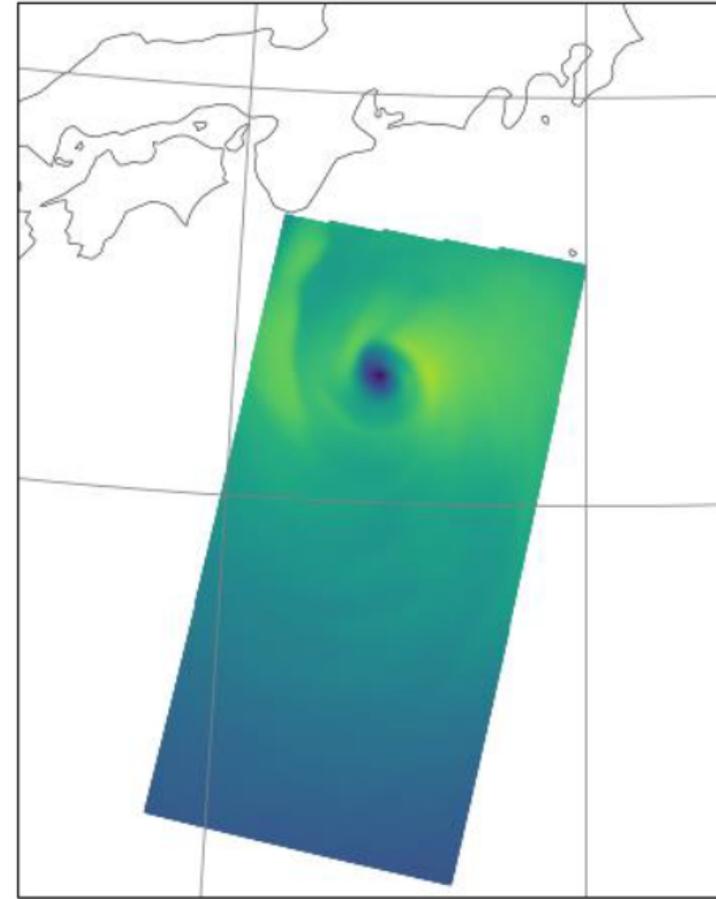
> 70 m s<sup>-1</sup>

> 80 m s<sup>-1</sup>



### MSMの海上風速

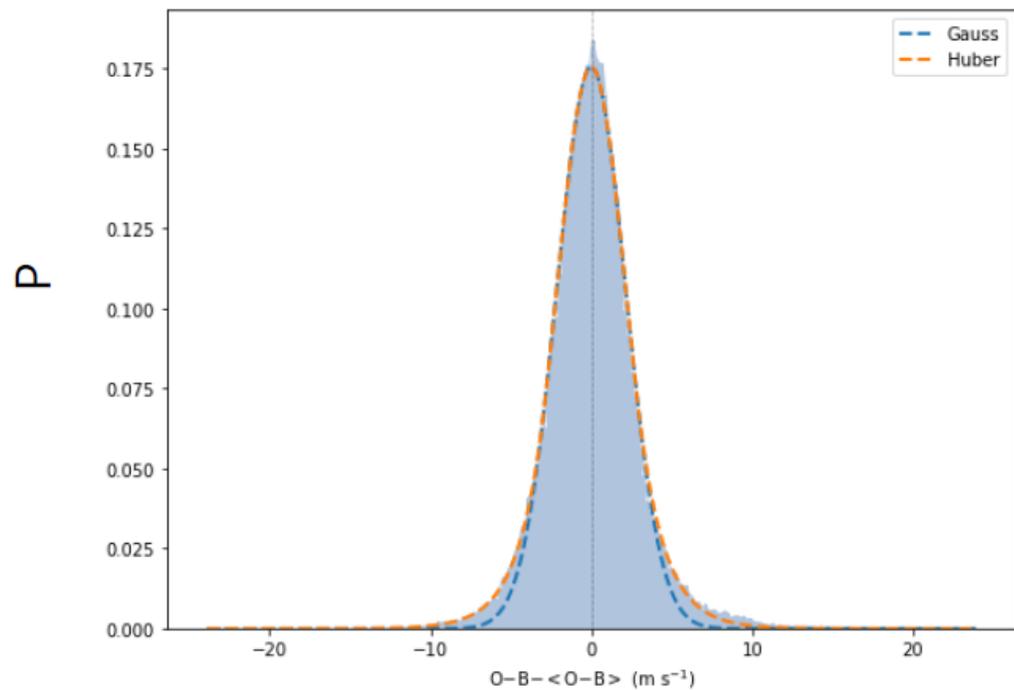
ges



モデルで再現不能な細かい構造、  
スキャンに依存する縞模様、異常に大きな値  
→いずれも同化にとって不要

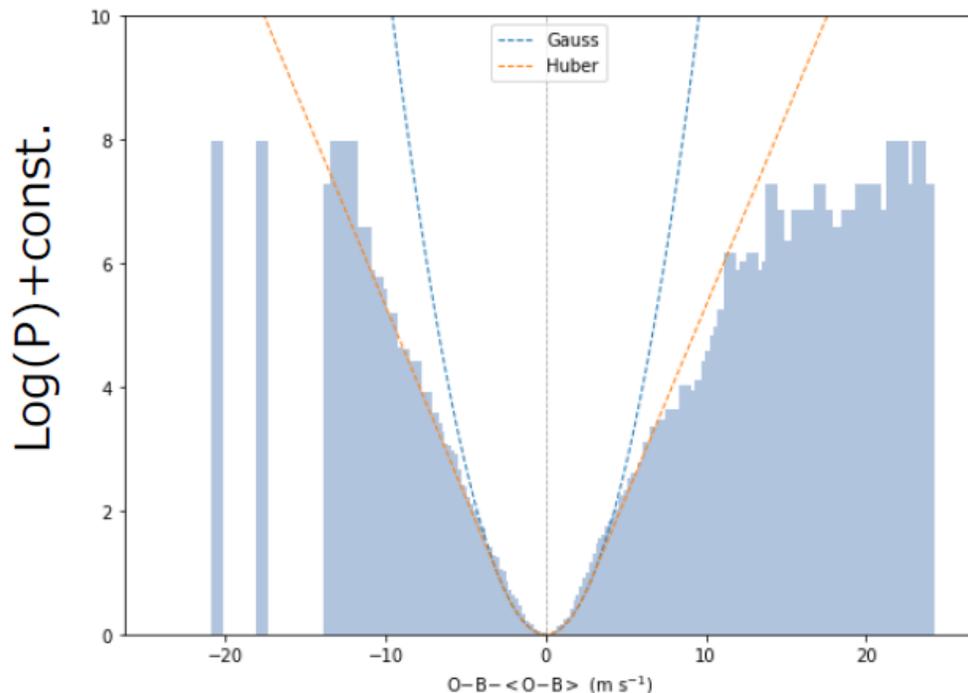
# Huber norm e.g. Tavolato and Isaksen (2014)

観測誤差分布をHuber normで定義。O-Bをリジェクト条件として使わない。



$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-J)$$

$$J^{\text{Gauss}} = \frac{1}{2} \left( \frac{x}{\sigma} \right)^2$$



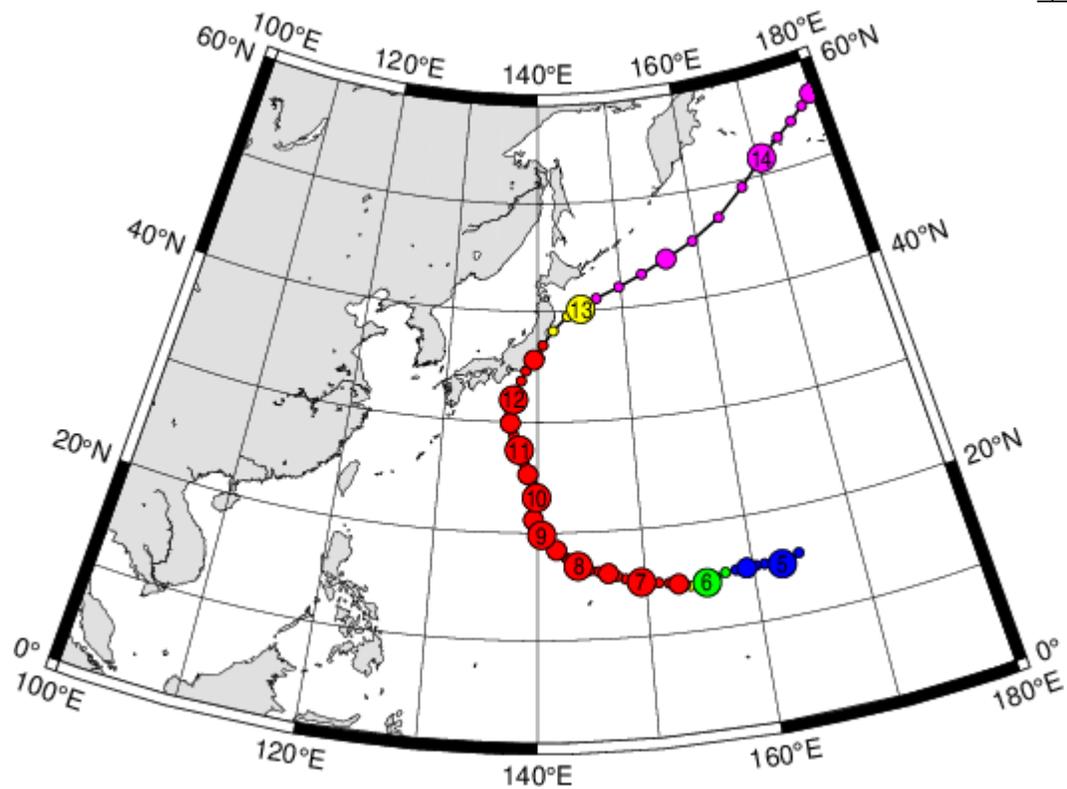
$$J^{\text{Huber}} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \frac{x}{\sigma} \right)^2, & |x| < c \\ \frac{c|x| - c^2/2}{\sigma^2}, & |x| \geq c \end{cases}$$

$$\nabla J^{\text{Huber}} = \nabla J^{\text{Gauss}} \cdot W^{\text{Huber}}$$

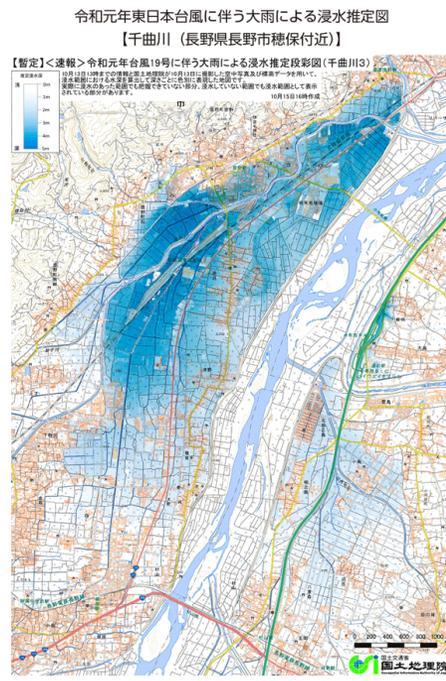
# Impact-based forecastの成果

# 令和元年東日本台風

浸水害や土砂災害が広い範囲で発生し、死者91名、住宅被害として、全壊3,273棟、浸水29,556棟（消防庁）



2019年10月5日～14日（デジタル台風）



出典：国土地理院資料

千曲川浸水推定図  
（国土地理院）



長野市（内閣府資料）



郡山市（内閣府資料）

# 令和元年東日本台風

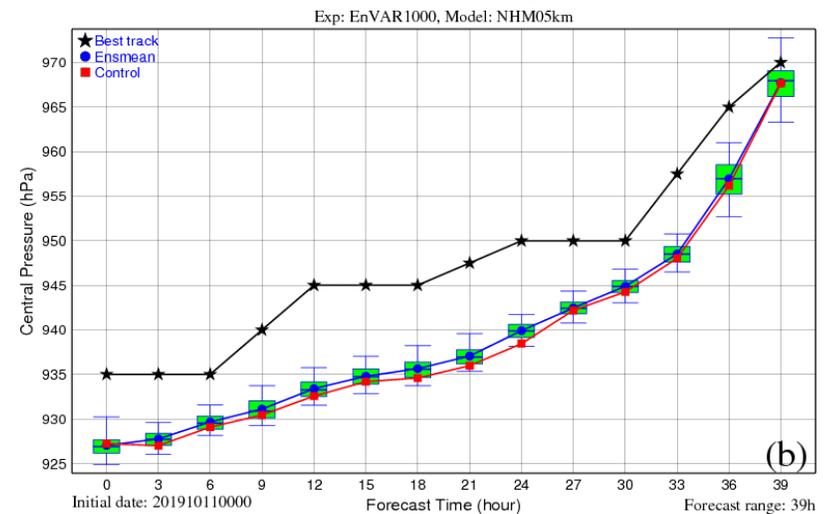
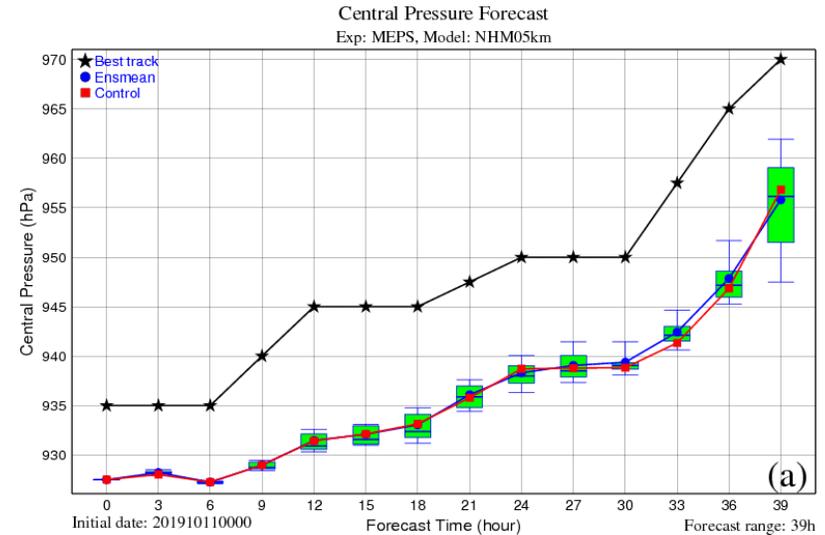
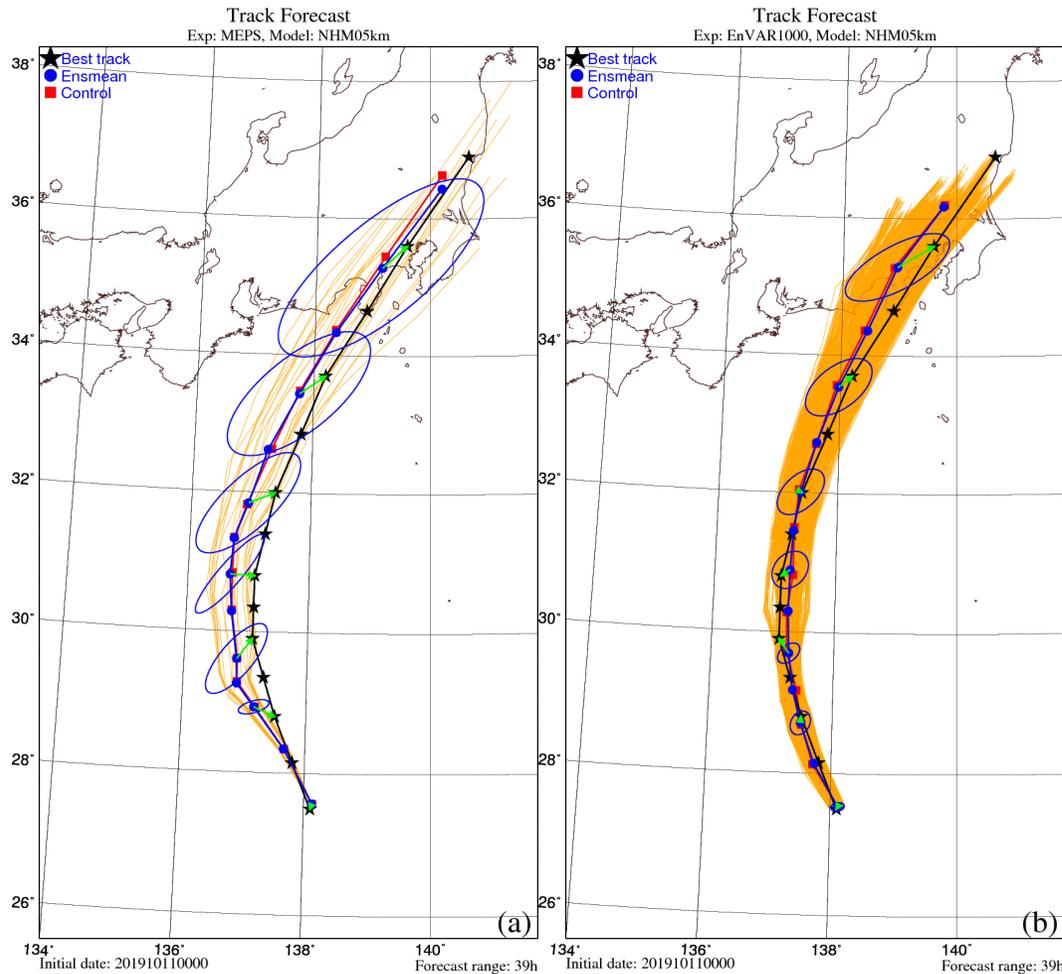
## 1000アンサンブルによる進路・強度

Duc et al. 2021

気象庁メソアンサンブル

気象庁メソアンサンブル

1000-アンサンブル



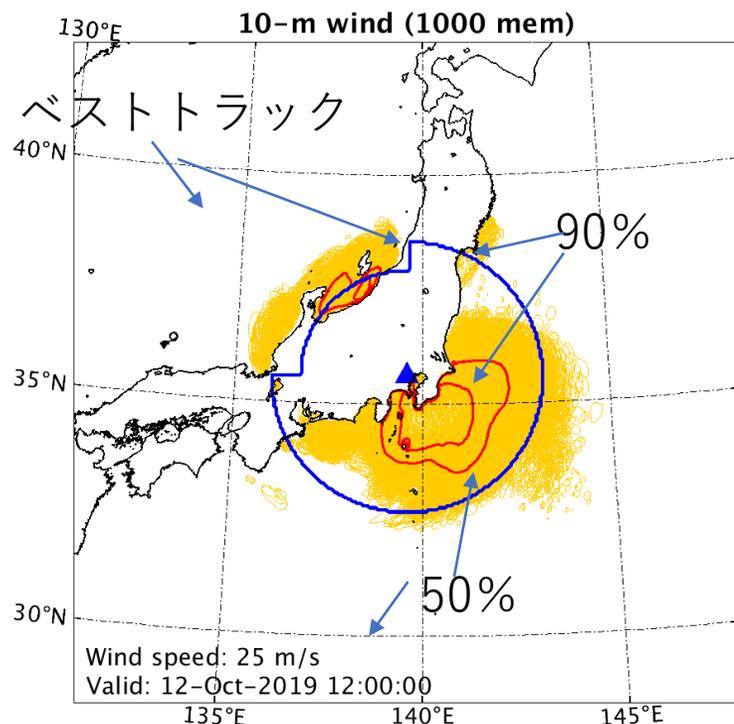
1000-アンサンブル

# 令和元年東日本台風

## 1000アンサンブルによる強風確率

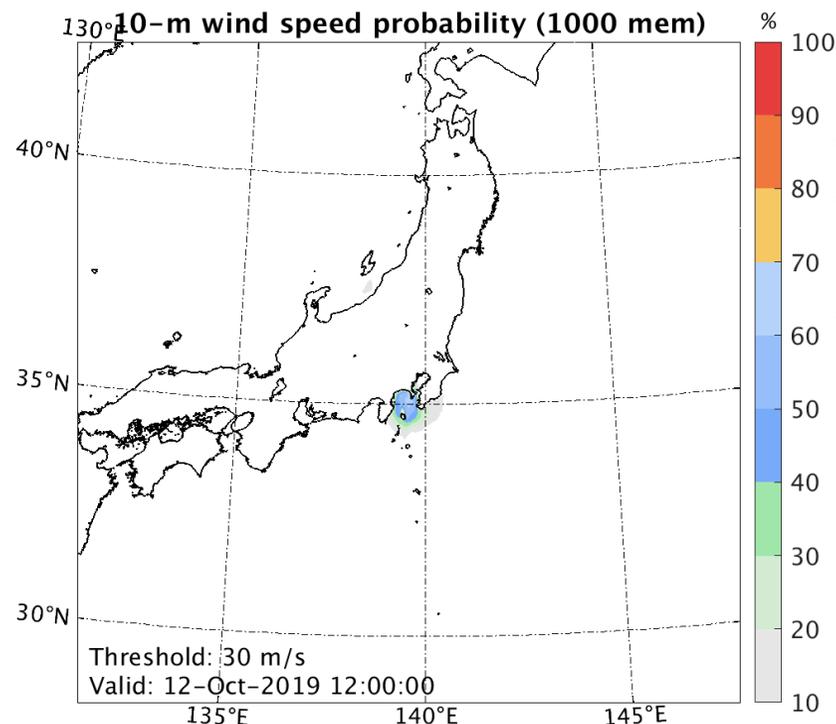
by courtesy of P.-Y.- Wu

暴風域 (25m/s)  
暴風半径 (ベストトラック)



等風速線 (コンター) の  
スパゲッティダイアグラム

風速 30m/s 確率



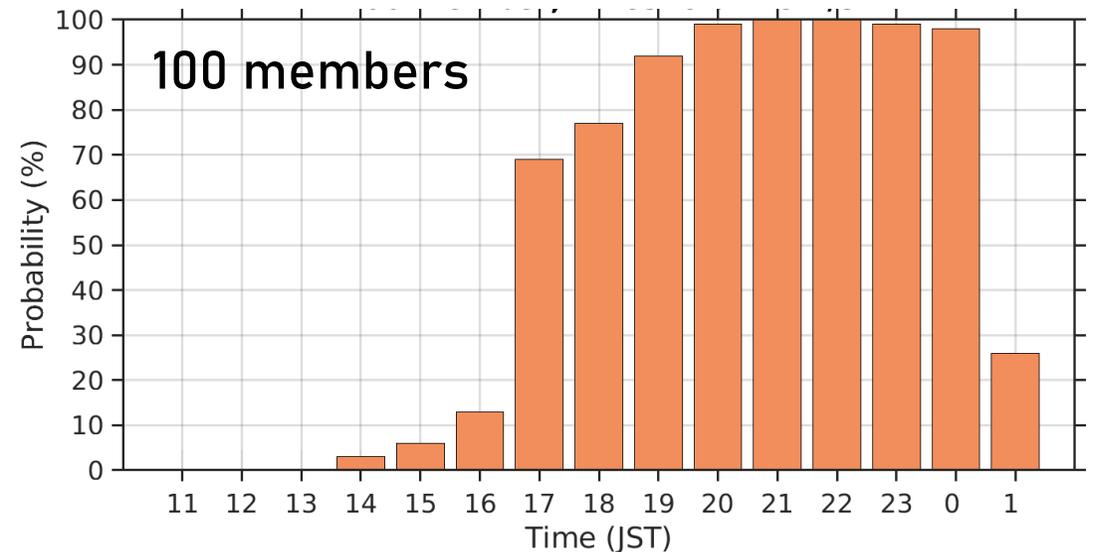
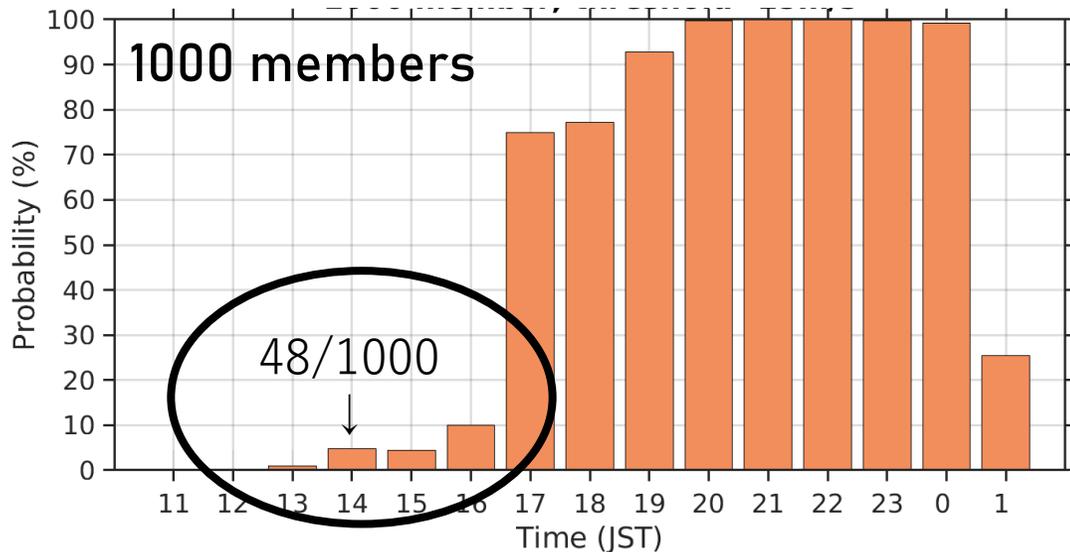
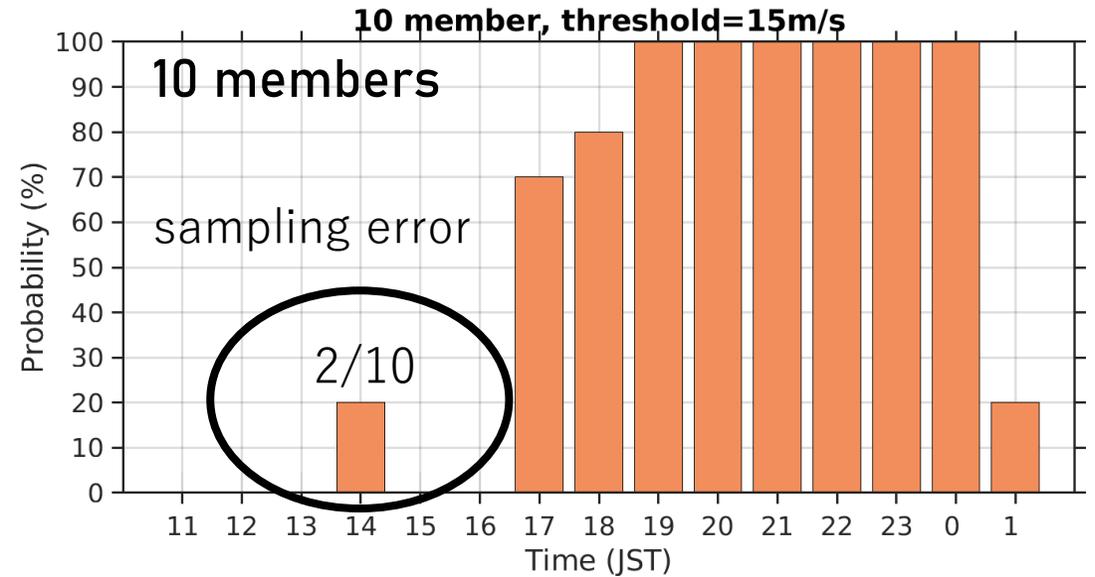
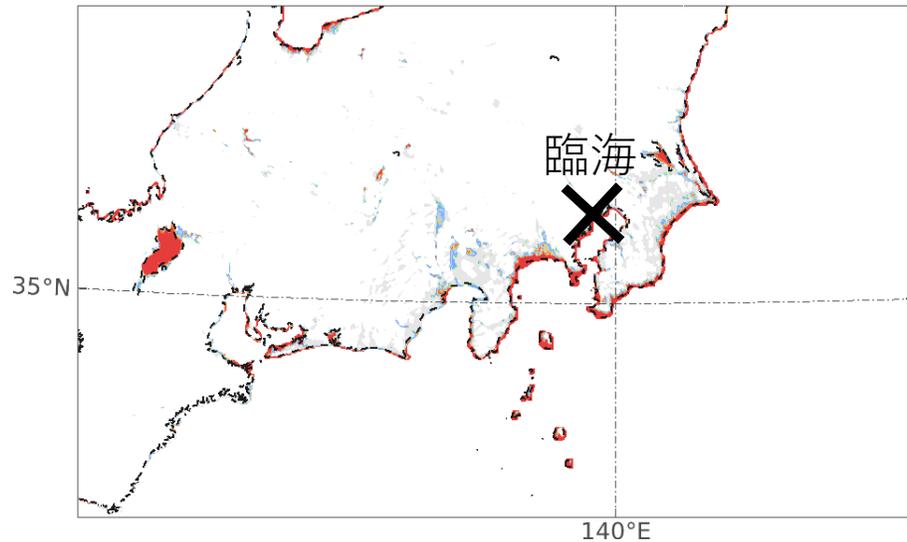
風速に対する確率分布

- 強風に対して高確率域が小さい
- 強風域より暴風域の方が相対的にばらついている。
- ベストトラックの暴風半径はアンサンブル平均よりかなり大きい。

# 10 vs. 1000 members (1KM)

by courtesy of P.-Y.- Wu

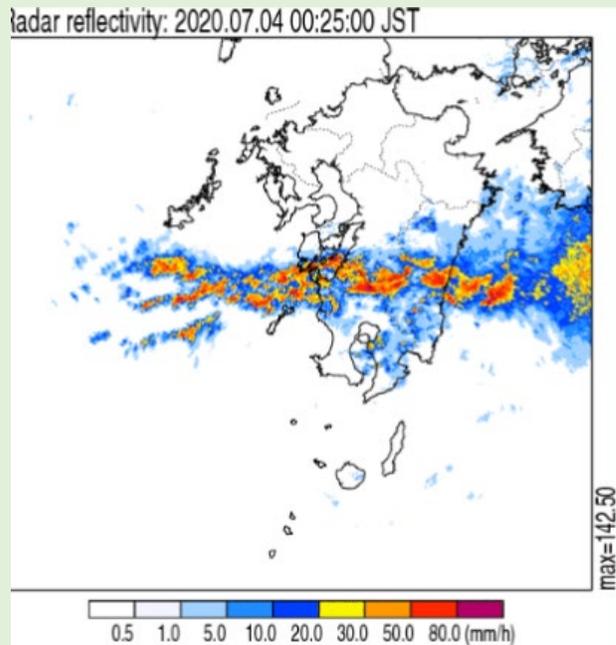
## Evolution of probability predictions (15 m/s) at Rinkai



# 令和2年7月豪雨

～球磨川の氾濫～

- 線状降水帯による集中豪雨により、7月4日早朝、熊本県球磨川が氾濫。
- 7月31日まで日本各地に被害をもたらした一連の大雨は「令和2年7月豪雨」と名称が定められた。
- 死者84名（令和2年11月2日14時時点内閣府とりまとめ）。
- **線状降水帯の発生数は2009年以降で最多**（Hirockawa et al. 2020）



球磨川浸水状況（7月4日）  
国土交通省九州地方整備局

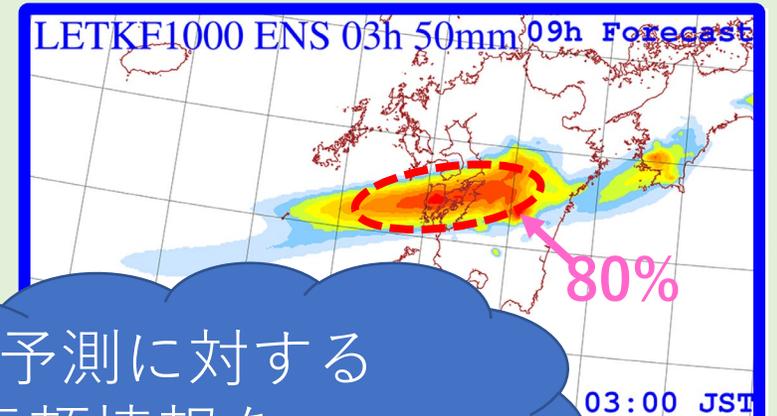
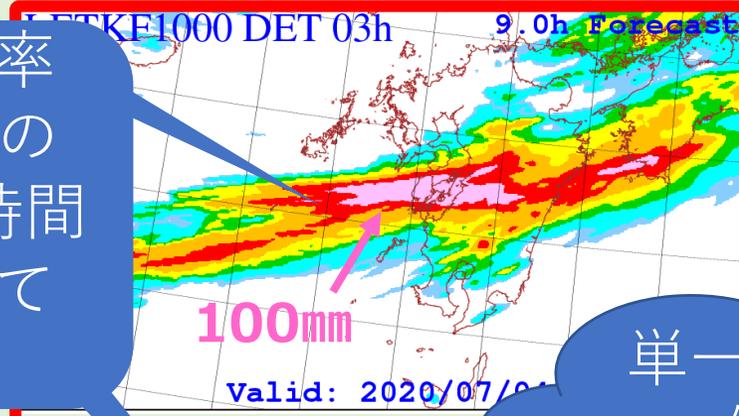
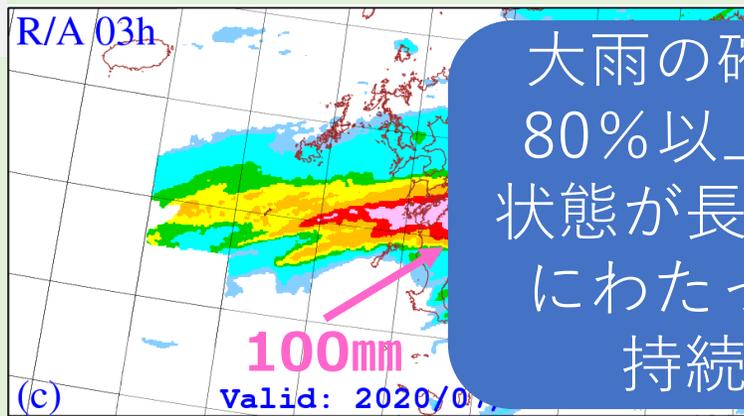
# 1000メンバーアンサンブルで確率予測

観測された線状降水帯  
(解析雨量)

単一の予測

確率予測 (50mm/3h)

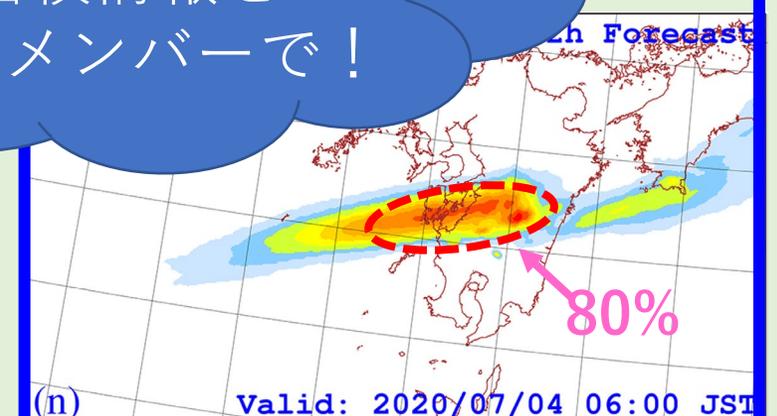
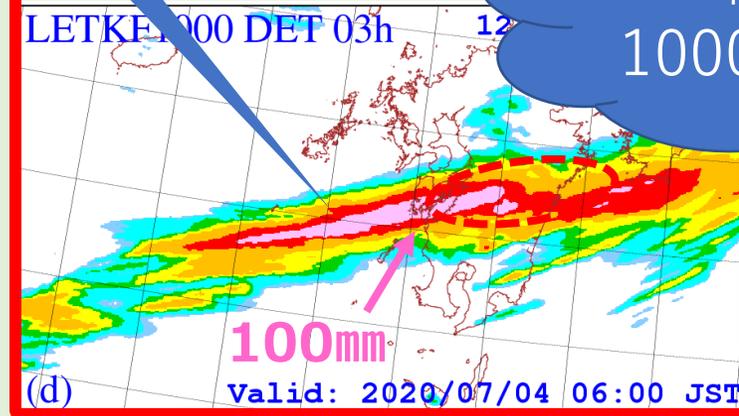
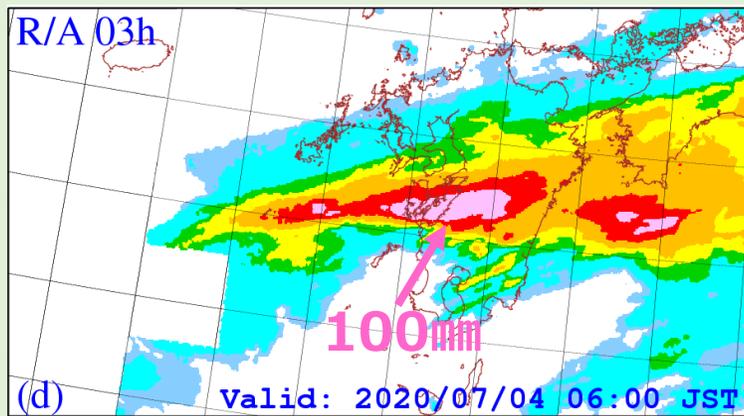
7/4  
0時



大雨の確率  
80%以上の  
状態が長時間  
にわたって  
持続

単一予測に対する  
信頼情報を  
1000メンバーで！

3時

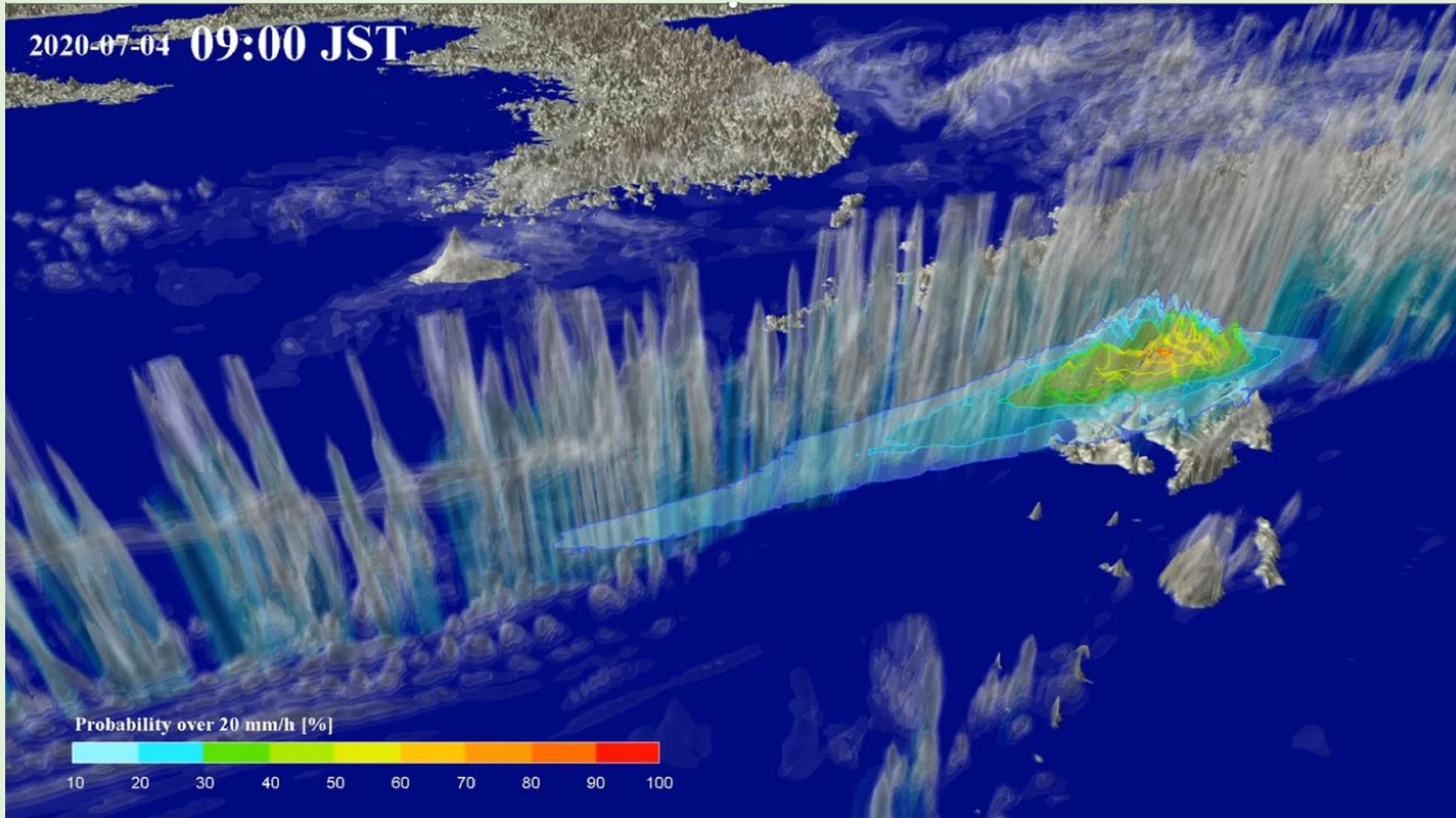


氾濫  
発生

6時



2020-07-04 09:00 JST



AIを用いた成果

# ニューラルネットワーク代理 モデルを用いた4次元変分法 データ同化

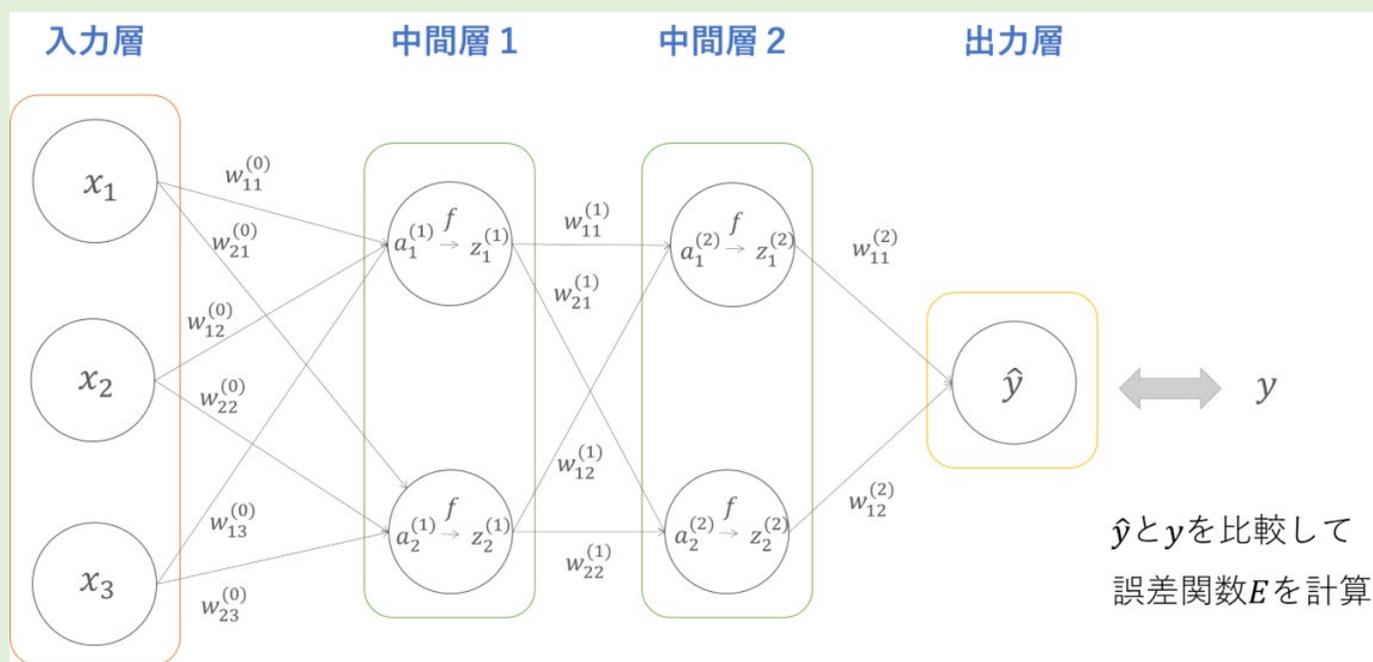
西澤誠也

理化学研究所 計算科学研究センター

# 機械学習の学習アルゴリズム

誤差  $E(\hat{y}, y)$  の重み  $w$  に関する偏微分を求める

- チェインルールで中間層の値に関する偏微分を下流から順番に計算していく (誤差逆伝搬法)

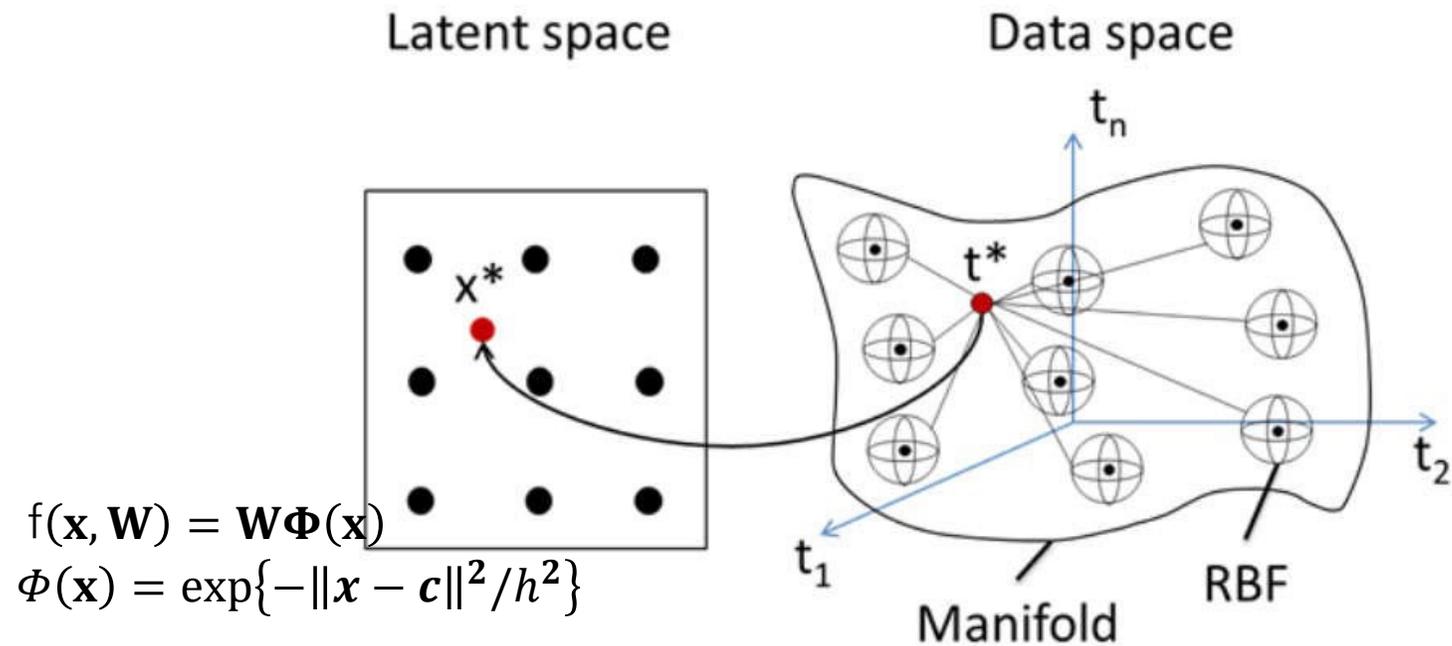


$w_{ij}$	$j$ 番目の入力から $i$ 番目の出力への重み
$a_i^{(l)} \left( = \sum wx \right)$	中間層 $l$ の $i$ 番目のニューロンに対する入力
$z_i^{(l)}$	中間層 $l$ の $i$ 番目のニューロンの出力
$f$	活性化関数

# Generative topographic maps

Duc et al. (2021)

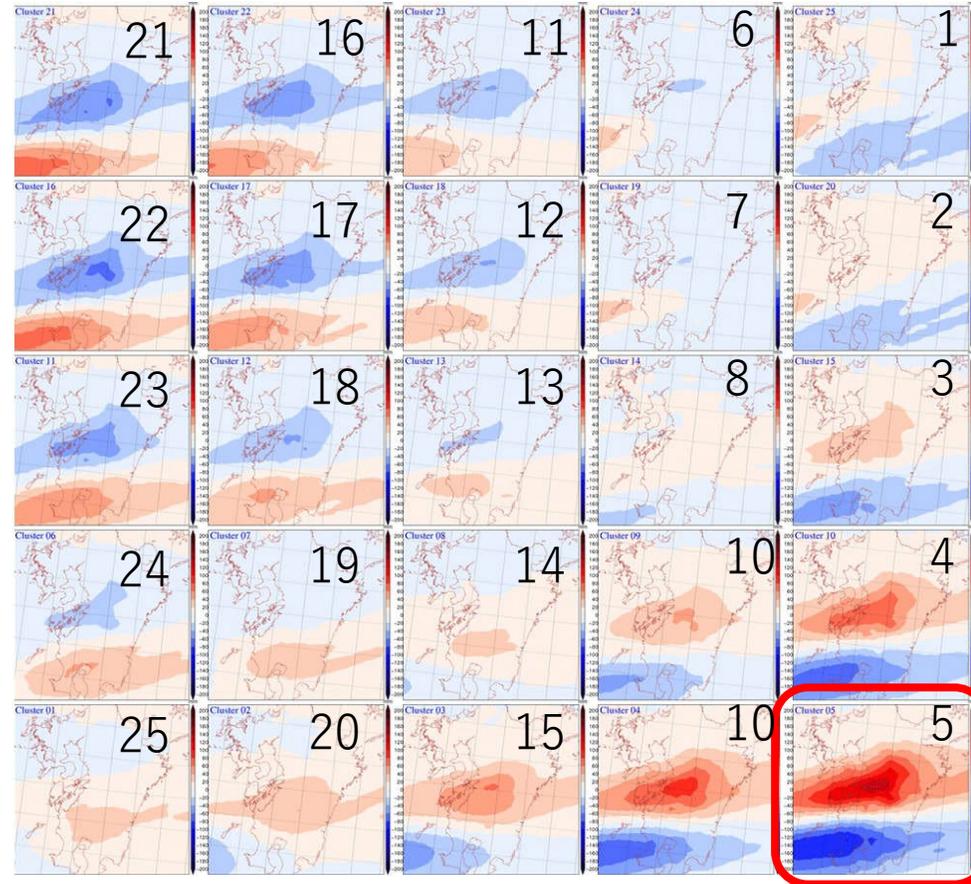
抽象空間での距離に基づいた  
クラスター解析



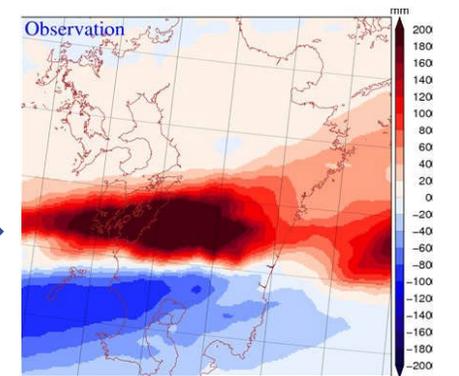
# 積算降水量偏差

(1000メンバーを25クラスターに)

クラスター毎の降水量偏差



降水量偏差 (観測)

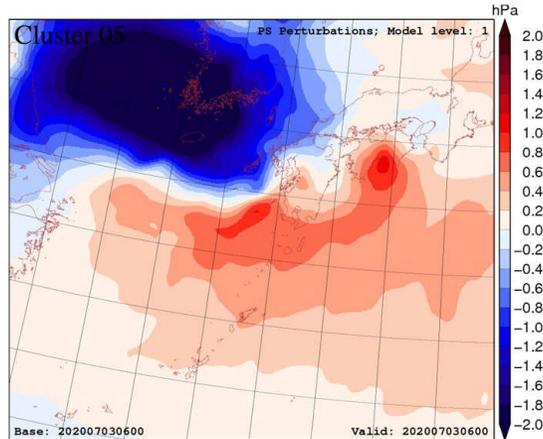


球磨川付近で降水量が多いのはクラスター5

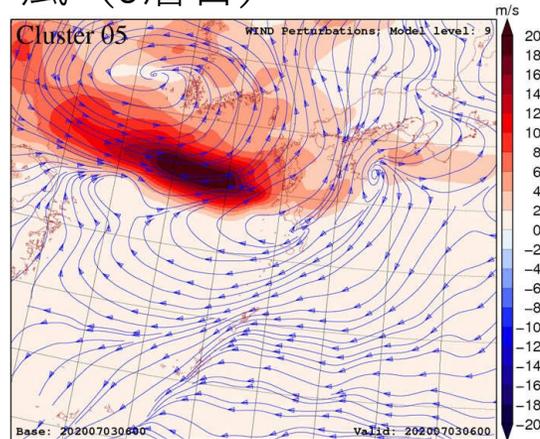
# Cluster 5

九州北西のメソ低気圧が重要

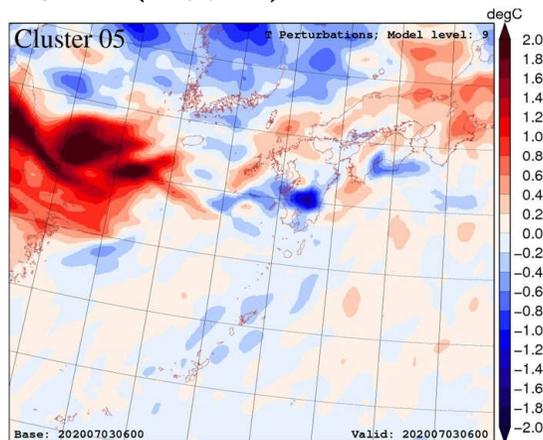
地上気圧



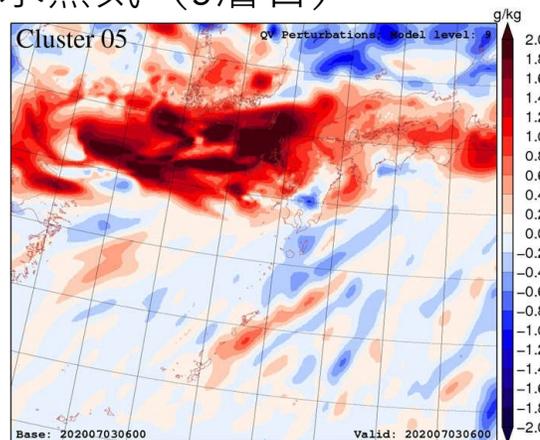
風 (9層目)



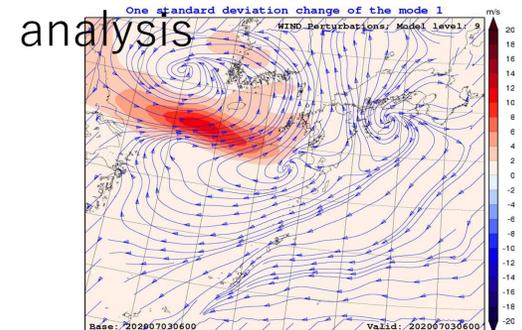
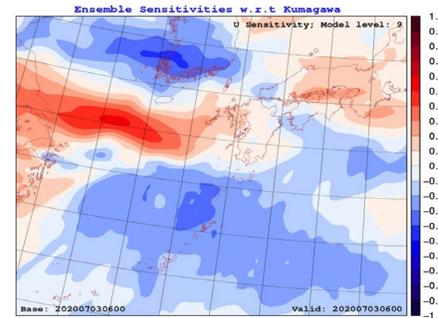
気温 (9層目)



水蒸気 (9層目)



そのほかの線形解析 (Duc et al. 2021)  
Ensemble sensitivity analysis  
Canonical correlation analysis



# 成果の数字

- 参加者 50名->90名に
- 研究会 20回
- プロジェクト全体でのシンポジウム（年1回 x 3）、  
成果報告会（年1回 x 3）
- 査読つき論文 31本（2020、21年度）
- 受賞 6件（2020、21年度）

# 3時間先はどうなる？ 危険度分布が示す切迫度

いま、自分の近くの川はどれくらい危険なのか  
集中豪雨が発生したとき、全国の中小河川の氾濫の切迫度を予測する  
「危険度分布」の運用が始まった

- 日経サイエンス（2020年10月号）「洪水災害を予測する」
- 自民党スパコン議連総会（2020年12月1日）「球磨川氾濫を引き起こした線状降水帯の確率予測研究」
- NHK（2020年11月3日）「スパコン「富岳」高い確率で「線状降水帯」予測 気象庁が解析」
- 読売新聞（2020年11月3日）「線状降水帯 半日前に予測…気象研 10年後メドに実用化」
- 時事通信（2020年11月2日）「水蒸気観測やスパコンで向上 豪雨予測精度一気象研」
- 日経産業新聞（2021年2月19日）「集中豪雨、数日前に高精度予測 災害リスク予報発信へ」

読者会員

本登録のご案内が届いたら

読売新聞

オンライン

登録情報

ニュース > 科学・IT

線状降水帯 半日前に予測…気象研 10年後メドに実用化

水蒸気観測やスパコンで向上 豪雨予測精度一気象研

2020年11月02日15時35分

集中豪雨、数日前に高精度予測

先端技術

# 報道

- Le Duc, 大泉伝, 西日本版に球磨川線状降水帯, 読売新聞, 2021年4月2日
- 大泉伝, RCCテレビ特別番組 集中豪雨から命を守る【2021GWスペシャル】, 中国放送, 2021年5月5日
- 川畑拓矢, 大泉伝, Le Duc「半日前予測 気象庁が挑む」日本経済新聞, 2021年6月30日
- 佐藤陽祐, 林修吾, 橋本明弘「豪雨なのに, 雷が頻繁に鳴ったり鳴らなかったりするのなぜ? ~豪雨に伴う雷頻度の違いを数値シミュレーションで再現することに初めて成功~」北海道大学 プレスリリース, 2021年9月6日
- 佐藤陽祐, 林修吾, 橋本明弘, スパコン「富岳」活用\_\_雷頻度の違い解明, 日刊工業新聞, 2021年9月9日
- 川畑拓矢, 台風の進路予測 誤差半分に, 読売新聞, 2021年9月16日
- 佐藤陽祐「スパコン「富岳」が豪雨なのに雷が鳴ったり鳴らなかったりする理由を解明!」ナゾロジー, 2021年9月18日

- 川畑拓矢, かんさい情報ネットten. 「不可能を可能に...同じ場所に長時間大雨が降り続く「線状降水帯」 予測の現在地と課題」, 読売テレビ, 2022年6月28日
- 川畑拓矢, ウェークアップ「進歩・データで「線状降水帯」予測「富岳」で精度向上」, 日本テレビ, 2022年7月2日
- 川畑拓矢, 情報ライブ ミヤネ屋「独自・線状降水帯“大気の流れ”影響・気象庁の「観測・予測体制」は」, 日本テレビ, 2022年7月5日
- NHK-8K プロジェクト、広島豪雨事例について125m解像度、10,000x8,000格子のシミュレーションを8Kで可視化

- SCALE-LETKFを用いた30秒更新リアルタイム実験（雨宮、本田）
- NICAM-LETKFによる令和2年7月豪雨実験（寺崎）
- ペナルティ項による過飽和制約（澤田）、時空間相関する観測データ同化（藤田）
- 船舶GNSS同化、ハイブリッド同化（幾田）
- 深層学習とアンサンブル同化（露木）
- 令和2年7月豪雨に関する1000メンバーアンサンブル実験（Duc）
- 台風に伴うPRE（斉藤）
- 局所粒子フィルタ（小槻）、非ガウス同化（近藤）
- 台風時の実都市の強風評価（川口）、竜巻・季節風シミュレーション（伊藤）、次世代モデリング（西澤、河合）
- 雷-SCALE（モデリング（佐藤）、データ同化（前島））
- 不確実性下の意思決定モデル（藤見）
- **気象庁連携**：海面水温と台風予測の関係（伊藤）、SCALE-asuca連携（西澤）、危険度確率（大泉）、局地アンサンブル（川畑）

## 災害リスク

- 大泉伝「令和2年7月球磨川の豪雨事例を対象としたキキクルを用いたImpact based forecastの試み」
- 小林健一郎（神戸大学）「霞堤による洪水抑制メカニズムの分析 - 多数降雨アンサンブルによる影響評価に向けて -」
- 澤田洋平（東大）「社会気象学：社会ダイナミクスを考慮した新しい天気予報と水害警報に向けた試論」
- 藤見俊夫（京大）「不確実性下の意思決定モデルの発展と防災・減災への応用」
- 藤見俊夫 不確実性下の意思決定モデルの発展と防災・減災への応用
- 澤田洋平 巨大マルチモデルアンサンブル降雨－流出解析～44個の水文モデルで583流域を解く～
- 筆保弘徳（横国大）「台風経路アンサンブルシミュレーションを用いた台風リスクの定量化」
- 大泉伝（気象業務支援センター）「1000メンバーアンサンブル予報結果を用いた洪水危険度の予測実験」

## シミュレーション

- 齊藤和雄「台風に伴う北向き非地衡風のPREへのインパクト -雲解像モデル実験-」
- 吉村僚一（東北大学）「冬季の南関東で発生する晴天乱気流の高解像シミュレーションおよび飛行中の旅客機への影響解析」
- 伊藤純至（東北大）発達台風全域全期間LES
- 川畑拓矢（気象研）富岳におけるasuca利用について
- 吉村僚一（東北大） 冬季の南関東中下層で発生する晴天乱気流の数値計算結果に基づく飛行機の揺動評価
- 川口真晴（東工大） 気象モデル・工学LESハイブリッド解析-東京都心をターゲットとする台風時の強風特性再現と風圧評価-
- Pin-Ying Wu（京大） The impacts of mountain topography and environmental flow conditions on the predictability of thunderstorms and the associated error growth in a diurnal cycle
- 平野創一郎（琉球大学）「大気海洋結合モデルで再現された2018年台風第24号の眼の中の深い対流雲」

## データ同化

- 澤田 謙     メソ同化システムにおける過飽和制約の効果について
- 前島康光「令和2年7月豪雨を対象とした高密度PAWRの観測システムシミュレーション実験」
- 幾田泰醇（気象研） 台風の2次循環の構造
- 藤田匡（気象研究所） 「変分法によるドップラー速度のスケール依存同化の検討」
- 大石俊（理化学研究所） 「高頻度海洋アンサンブルデータ同化システムにおける適応型観測誤差膨張の有効性」
- Ting-Chi Wu（理化学研究所） 「Examining the sensitivity of ensemble size to the accuracy of EFSO」
- James Taylor（理化学研究所） 「Convective-Scale Imbalance Induced by 30-Second Update Radar Data Assimilation」
- 雨宮新（理化学研究所） 「富岳を用いた2021年夏の30秒更新リアルタイム降水予報実験」
- 小槻 峻司   Implementing Hybrid Background Error Covariance into the LETKF with Attenuation-based Localization
- 前島 康光   令和2年7月豪雨を対象とした高密度PAWRの観測システムシミュレーション実験
- 大石 俊     アンサンブルカルマンフィルタを用いた海洋データ同化システムの開発：AOEIによる塩分構造の改善
- 小槻 峻司   スパースセンサ最適化を用いた観測位置決定手法の調査
- 幾田 泰醇   SAR同化について
- 雨宮 新     2021年夏の1000メンバー30秒更新リアルタイム降水予報実験の事後解析

## アンサンブル

- 大泉伝     令和3年8月に九州北部で発生した豪雨の高解像度アンサンブル予報実験
- 瀬古弘（気象研究所） 「メソアンサンブルと1km-asucaを用いた豪雨解析」
- 小野耕介   メソアンサンブルを用いた複数降水予測シナリオの作成

## 機械学習

- Le Duc (東大) 「Ensemble sensitivity analysis of the July 2020 Kyushu heavy rain. Part 2: Nonlinear analysis」
- 小槻峻司 データ同化と機械学習を用いた洪水氾濫予測の高度化
- Le Duc Parameter estimation using Stein variational gradient descent
- 澤田 洋平 時間変化するモデルパラメータの効率的な推定について
- 西澤 誠也 ニューラルネットワーク代理モデルを用いた4次元変分法データ同化
- 露木 義 深層学習アンサンブルカルマンフィルタの研究
- 富澤 風翔 極端水文気象現象の数値予測に対する不確実性推定

他、多数！

- 小野耕介（気象研）降水予報へのアンサンブル次元の利用
- 井野川七虹（神戸大学）避難モデルの現況と防災分野での応用について
- James Taylor(理研) Convective-Scale Imbalance in an Ensemble-Filter Numerical Weather Prediction System
- 雨宮新(理研) SCALEへの局所粒子フィルタ(SCALE-LPF)の導入
- 澤田洋平(東大) 不確実性定量化による極端水文気象予測の性能改善
- 大石俊(理研) LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA)の精度評価
- 幾田泰醇（気象研）台風境界層シミュレーション
- 伊藤純至（東北大）急発達する台風の全期間・全域LES
- 小原涼太（東北大）CADに伴う大雨に対する内陸地形の影響
- 河合英徳（お茶大）2018年猛暑日における東京市街地での弱風・温熱場 \* オンライン
- 伊藤純至（東北大）台風全域・全期間LESの途中経過
- 佐藤陽佑（北大）並列計算に対応した3次元放射伝達モデルの気象モデルへの実装
- 田上雅浩(気象研) NICAM-WISOの開発とそれを用いたデータ同化の初期解析結果
- 露木義(気象研) 摂動観測を用いたLETKF
- 雨宮新(理研) 領域気象モデルSCALE-RMへの局所粒子フィルタの導入
- 呉 品穎（気象業務支援センター） High Wind Probability Prediction of Typhoon Hagibis Using High-resolution Large-size Ensemble
- 南出 将志（東京大学） Using Ensemble Data Assimilation to Explore the Environmental Controls on the Initiation and Predictability of Moist Convection
- Fahim Islam (given by Le Duc: 東京大学) Harnessing large ensemble forecasts for storm surge risk informed decision making
- 小林 健一郎（神戸大学） 3次元スキャナ及びカメラによる地表面標高の計測と富岳による高解像度洪水シミュレーションへの応用

# 富岳によって災害リスク予報を実現！

- Impact-based forecastとして、半日前からの洪水予測に成功  
熱波、台風、高潮など気象災害を直接計算
- 超高解像度計算によって航空機の揺動を陽にシミュレーション
- 雷防災に貢献する雷モデルの開発

## 気象学会春季大会専門分科会

### 「Impact-Based Forecasting による防災の未来」

澤田洋平（東京大学），川畑拓矢（気象庁気象研究所），小林健一郎（神戸大学），藤見俊夫（京都大学），小谷仁務（京都大学），小槻峻司（千葉大学），太田琢磨（気象庁気象研究所），清水慎吾（防災科学技術研究所）

ジャーナル特集号：

**The Frontier of Atmospheric Science with High Performance Computing**

in *Journal of the Meteorological Society of Japan (JMSJ)*  
and *Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)*