

社会的意思決定を支援する気象－社会結合系の制御理論



澤田洋平
東京大学

南出将志, 橋本和宗, 鈴木健太郎, 山崎大,
田島芳満, 小谷仁務, 藤見俊夫, 松山桃世, 石川雅也, 生方俊

2024/12/6 ムーンショット目標8 シンポジウム

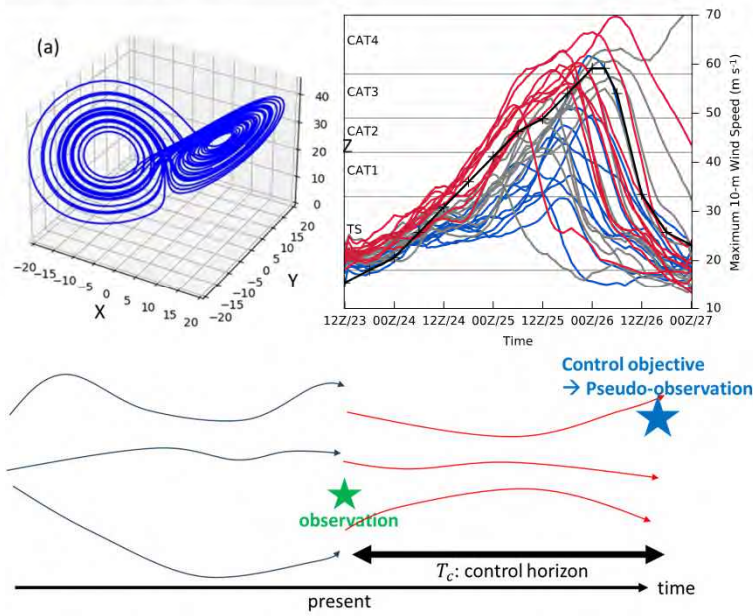
1. ビジョンと挑戦

Grand Vision:

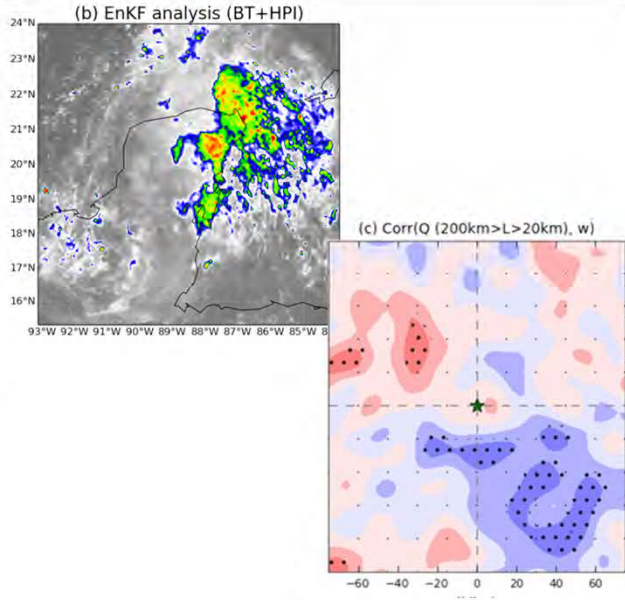
民主的な社会的意思決定に基づく気象－社会結合系の制御により、水文気象災害の恐怖から解放された社会を目指す

挑戦

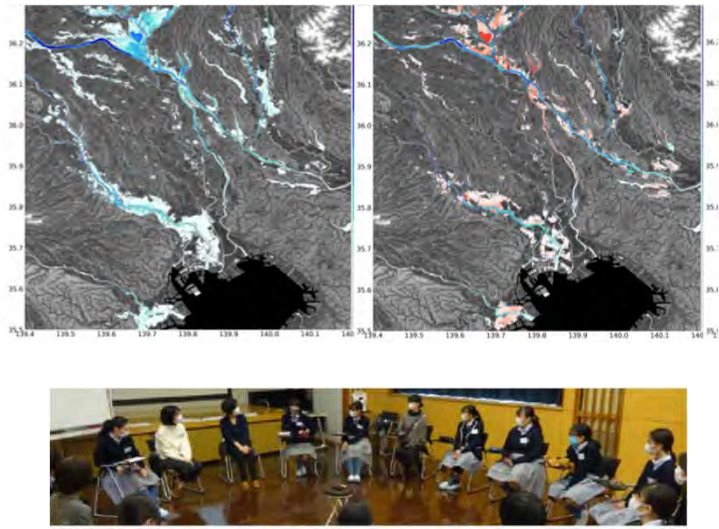
カオス性を有効活用できる
制御数理



介入効果を最大化する
気象理論



社会に受け入れられる
気象制御のデザイン



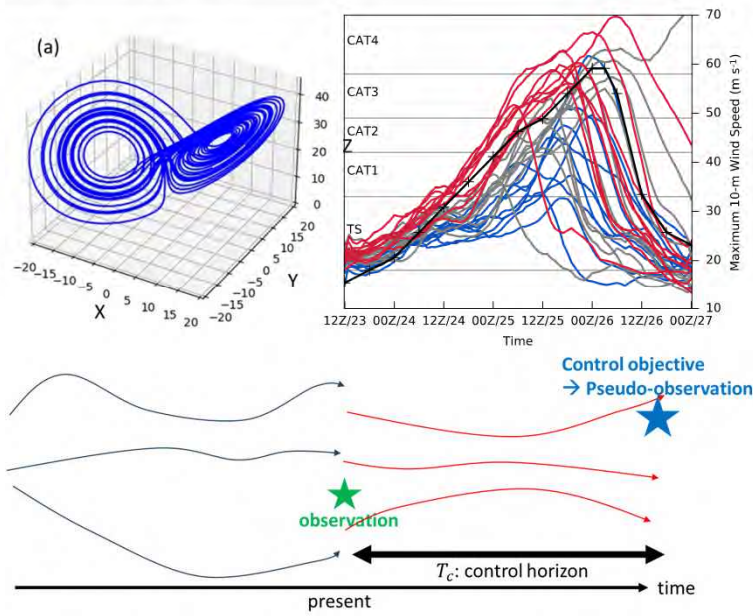
2. 気象学的カオス制御理論

Grand Vision:

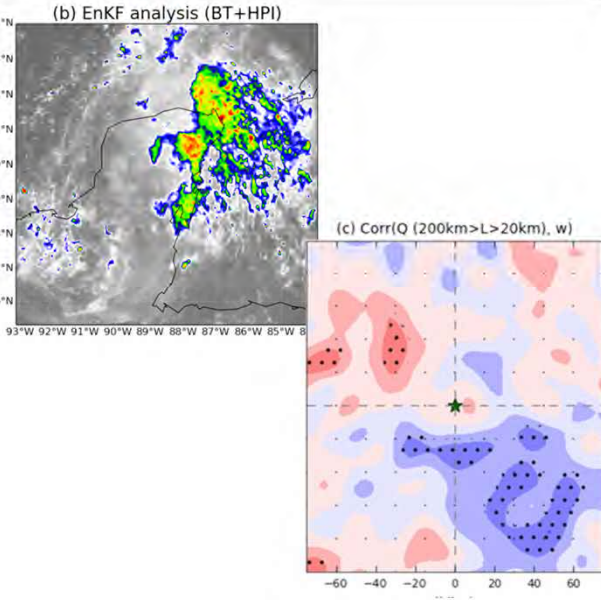
民主的な社会的意思決定に基づく気象－社会結合系の制御により、水文気象災害の恐怖から解放された社会を目指す

挑戦

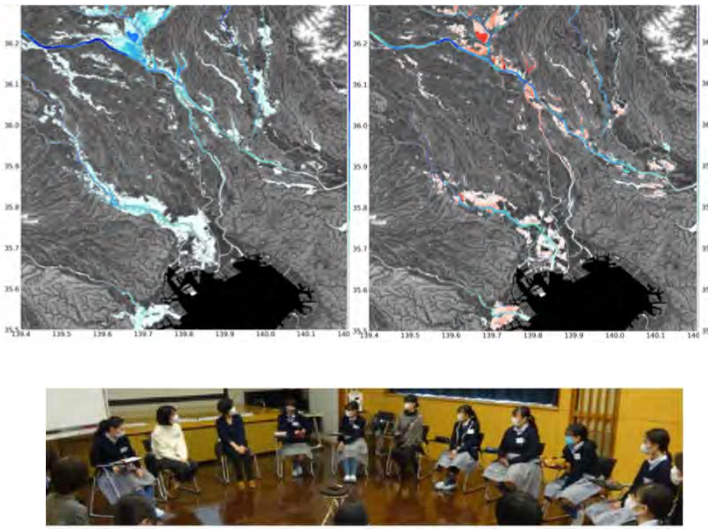
カオス性を有効活用できる
制御数理



介入効果を最大化する
気象理論



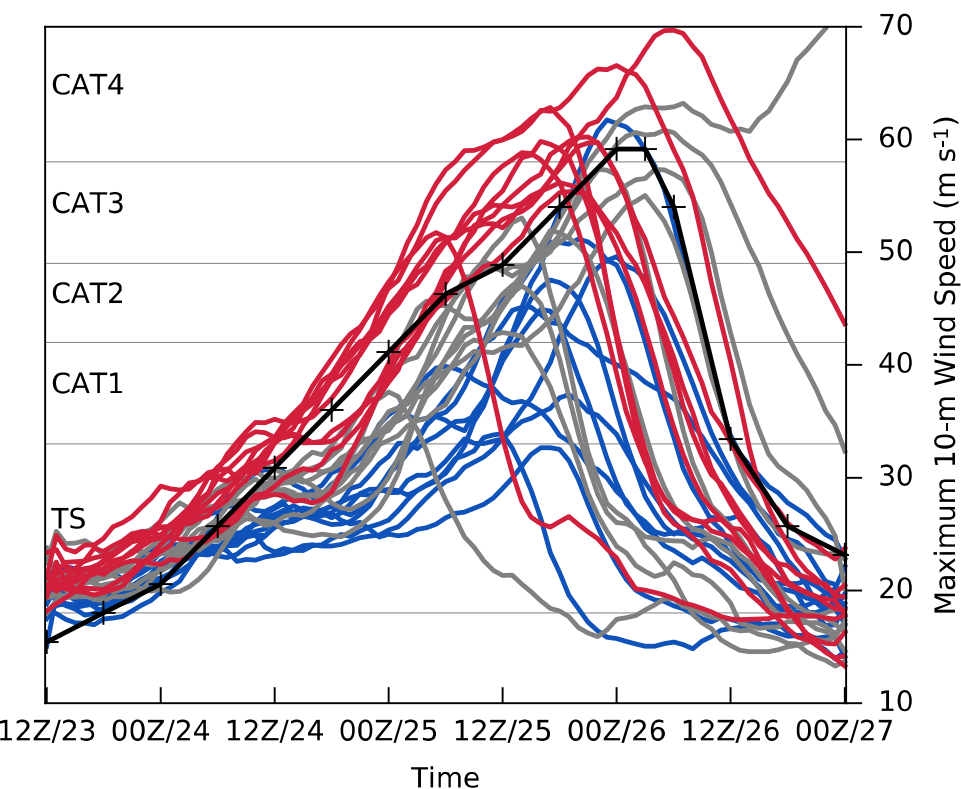
社会に受け入れられる
気象制御のデザイン



2024/12/6 ムーンショット目標8 シンポジウム

2.1. カオス制御って？

台風Harveyの強度予報 [Minamide et al. 2020]



僅かな初期値
の差

Control
perturbation

僅かなシミュレーション
の設定の差

気象モデル

time

モデル選択
(物理過程パラメタリゼーション選択)

モデルパラメータ選択

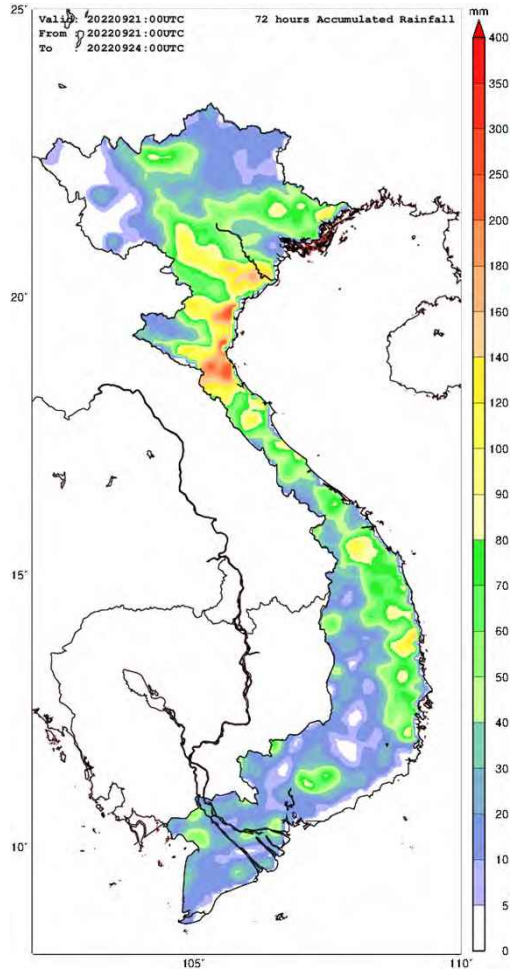
カオス性＝わずかな初期状態の差が未来に大きな変化をもたらす
カオス性を使えば小さな介入で大きな変化をもたらせるかも？

しかし、まずシミュレーション設定の差と真のカオス性をちゃんと区別しないといけない・・・

2024/12/6 ムーンショット目標8 シンポジウム

2.2. シミュレーション設定の不確実性を考慮した新しい気象予測

ベトナム水文気象庁現業アンサンブル予測に応用→**現実の気象予測性能向上に貢献！**

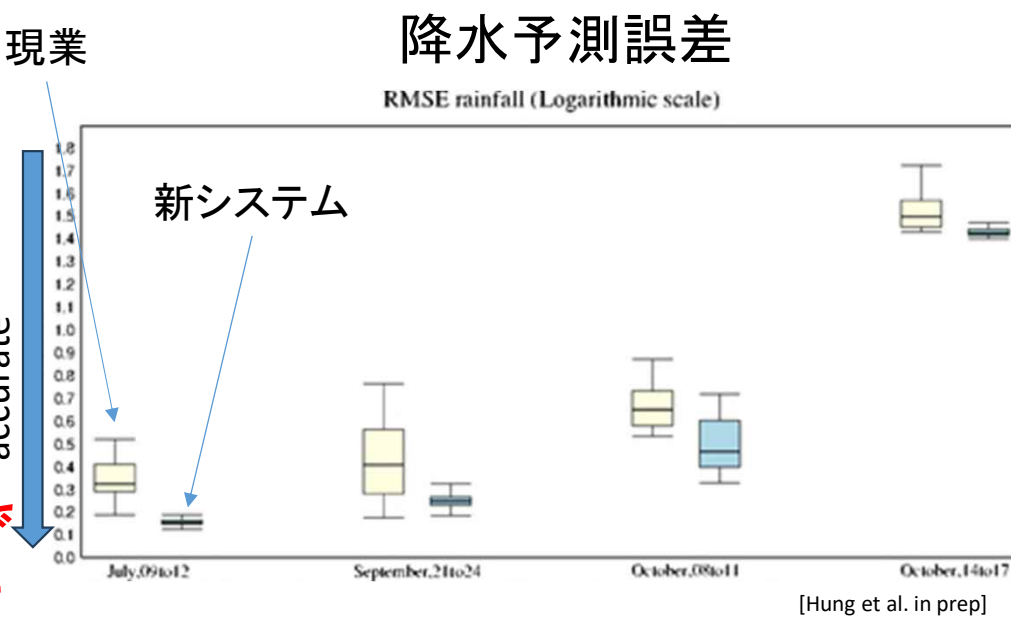


32通りのシミュレーション設定で
現在は運用

- Cumulus: KF or Tiedke
- Cloud: WSM6 or Lin
- Boundary: SH or YSU
- Short wave: Budhia or Goddard SW
- Long wave: RRTM or Goddard LW



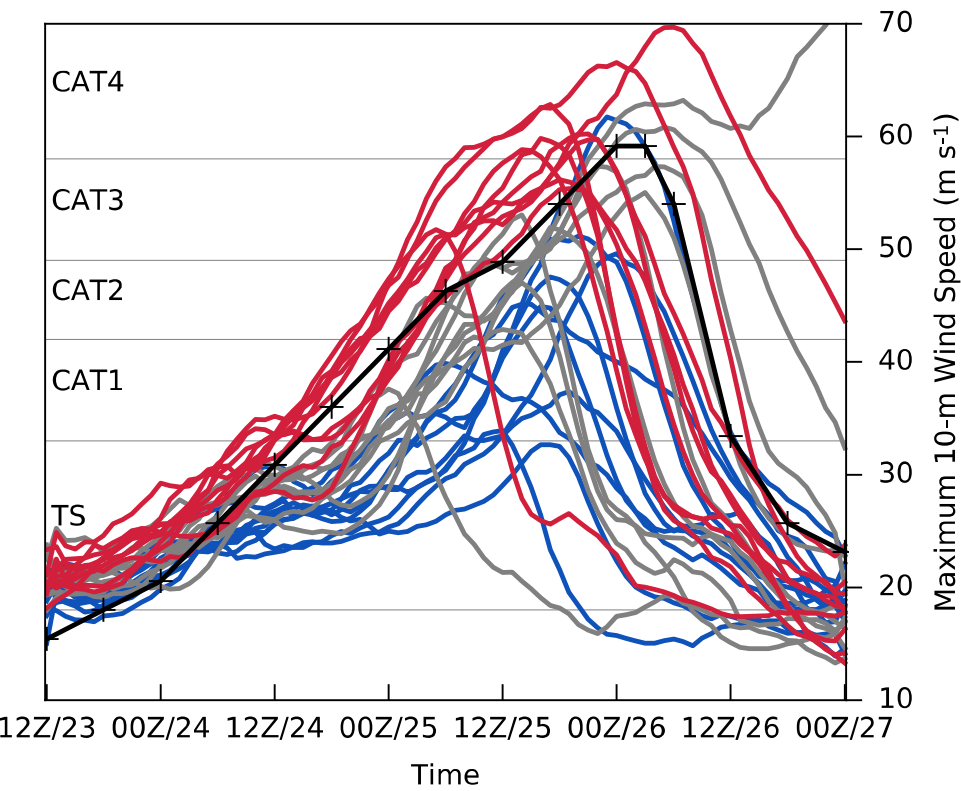
各設定をとびとびに選ぶのではなく、設定の混ぜ合わせを作り、さらに降水量観測に基づいてこの設定を最適化！



→降水予測性能の飛躍的な向上
→シミュレーション設定の不確実性を陽に考慮でき、真のカオス性と弁別できる

2.3. OK, ではカオスを使って制御しよう、でもどうやって？

台風Harveyの強度予報 [Minamide et al. 2020]



僅かな初期値の差

Control perturbation

気象モデル

time

モデル選択
(物理過程パラメタリゼーション選択)

モデルパラメータ選択

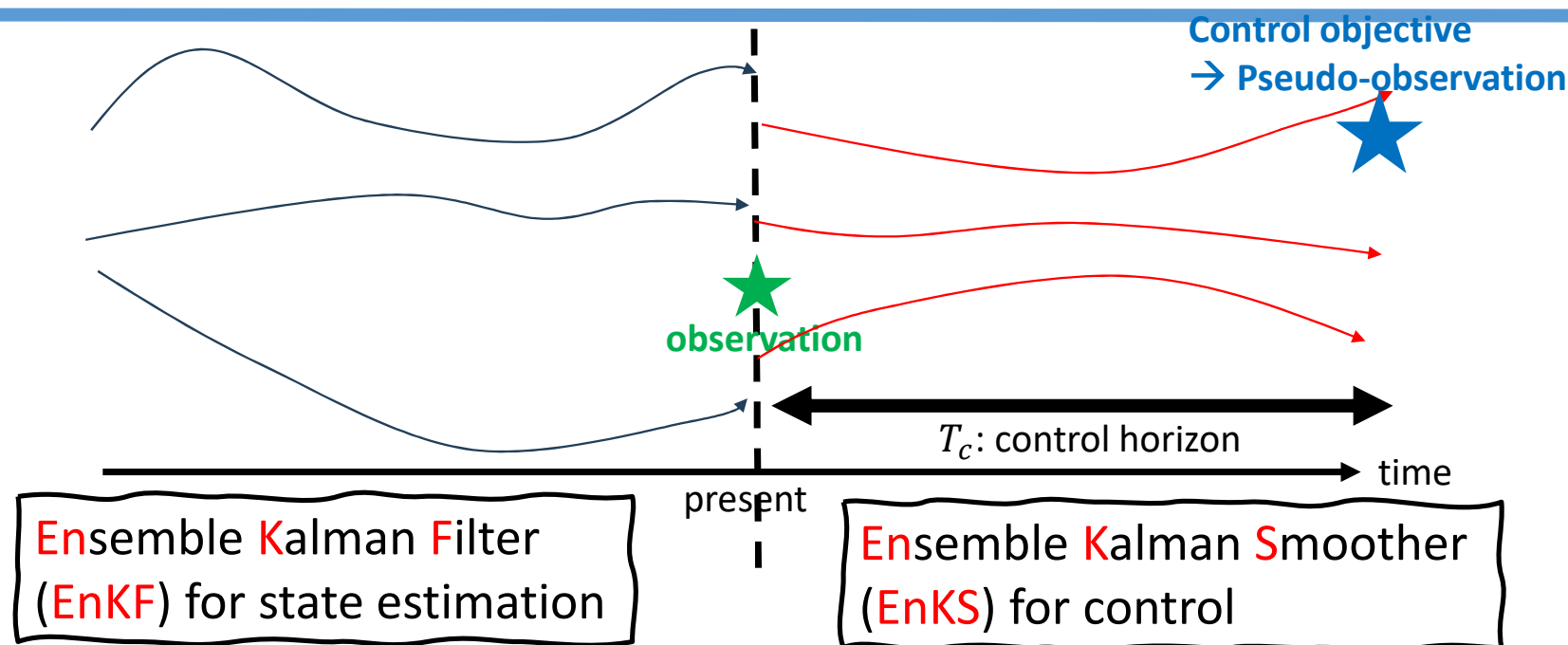
解決！

僅かな設定のバリエーション

カオス性＝わずかな初期状態の差が未来に大きな変化をもたらす
カオス性を使えば小さな介入で大きな変化をもたらせるかも？

しかし、極めて巨大なシステムである気象でいかに効率よくうまい制御方法を見つけるか？

2.4. Ensemble Kalman Control (EnKC) — アンサンブルカルマン制御 —



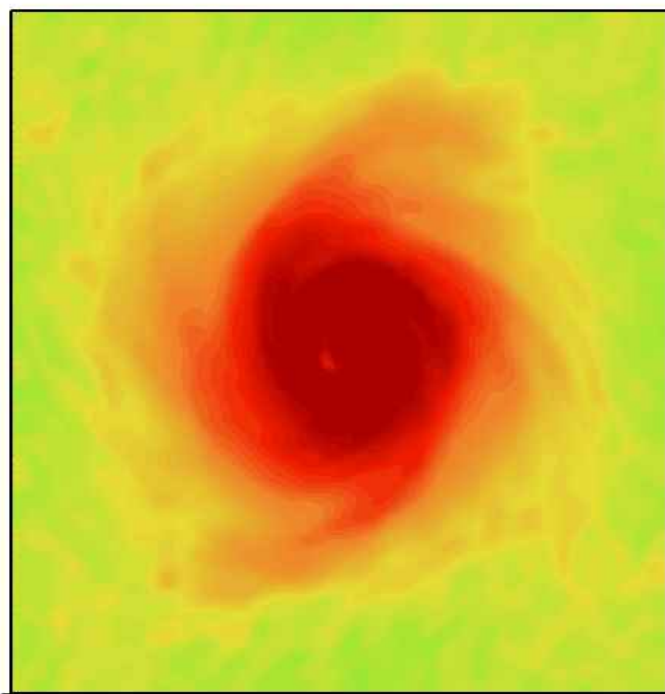
[Sawada, SOLA, in press]

EnKCのいいところ:

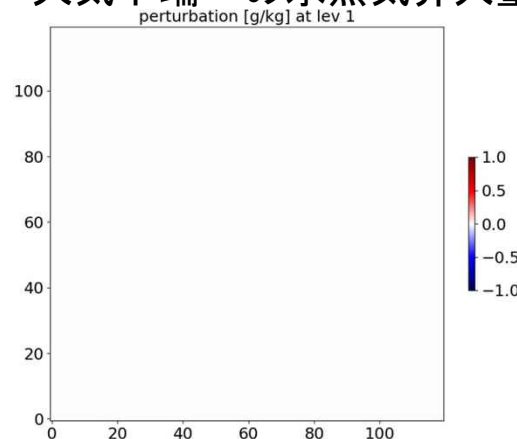
- 地球科学で既にうまくいっている予測手法であるデータ同化の知識がそのまま使える
 - 大規模で非線形なシステムに適用可能
 - モデルや観測データの誤差を陽に扱うことができる
- 現実的な設定で制御介入シミュレーションが実行可能

2.5. EnKCを使って台風を制御する小さな外力を見つける実験を実行中……

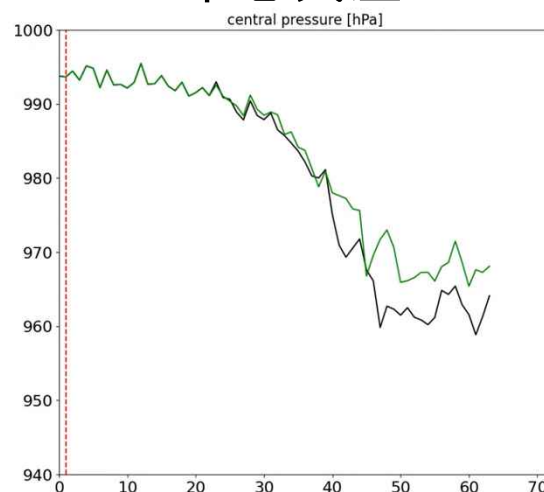
台風事例におけるEnKC 気象制御介入シミュレーション



赤点線で示した時刻における
大気下端への水蒸気介入量



中心気圧



- アルゴリズムが自動でリアルタイムに適切な介入の量と場所を見つける
- アルゴリズムは「真の」大気状態を知らない現実的な問題設定
- 台風を弱化させるツボを客観的に探索したい

緑: 介入あり

黒: 介入なし

[Sawada, in prep]

2024/12/6 ムーンショット目標8 シンポジウム

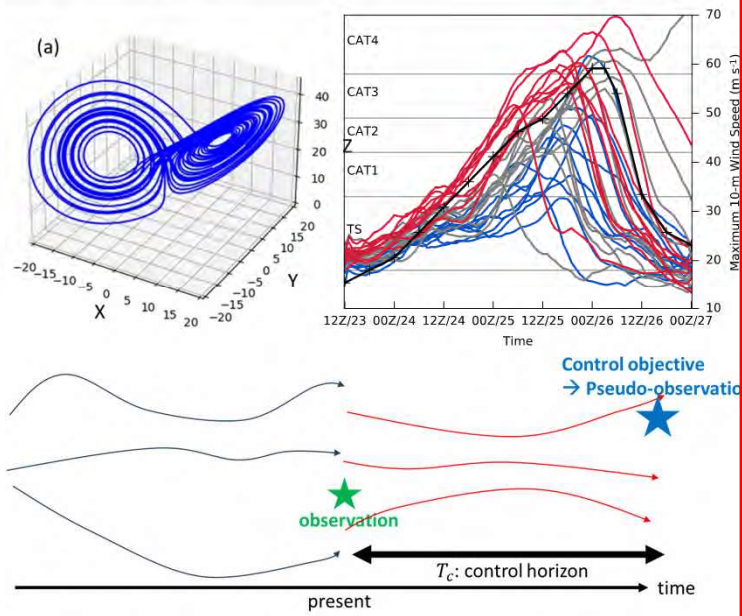
3. 巨人に挑む：小さな外力が大きな変化につながる現象とはなにか？

Grand Vision:

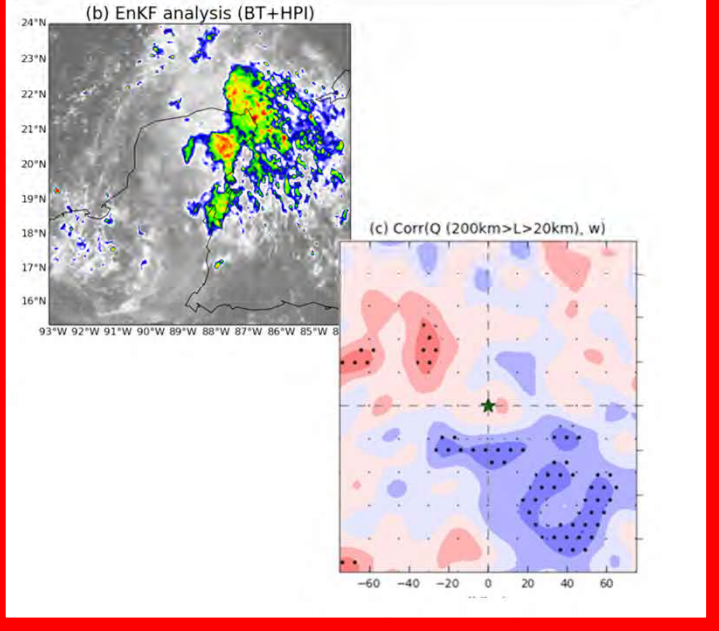
民主的な社会的意思決定に基づく気象－社会結合系の制御により、水文気象災害の恐怖から解放された社会を目指す

挑戦

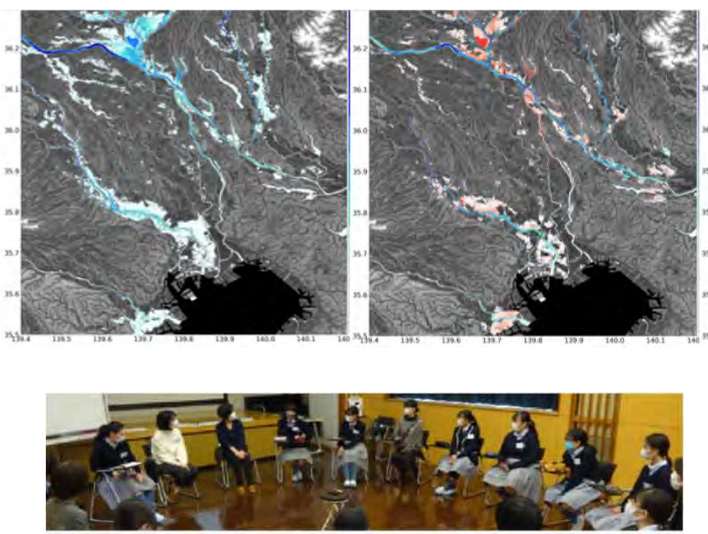
カオス性を有効活用できる
制御数理



介入効果を最大化する
気象理論



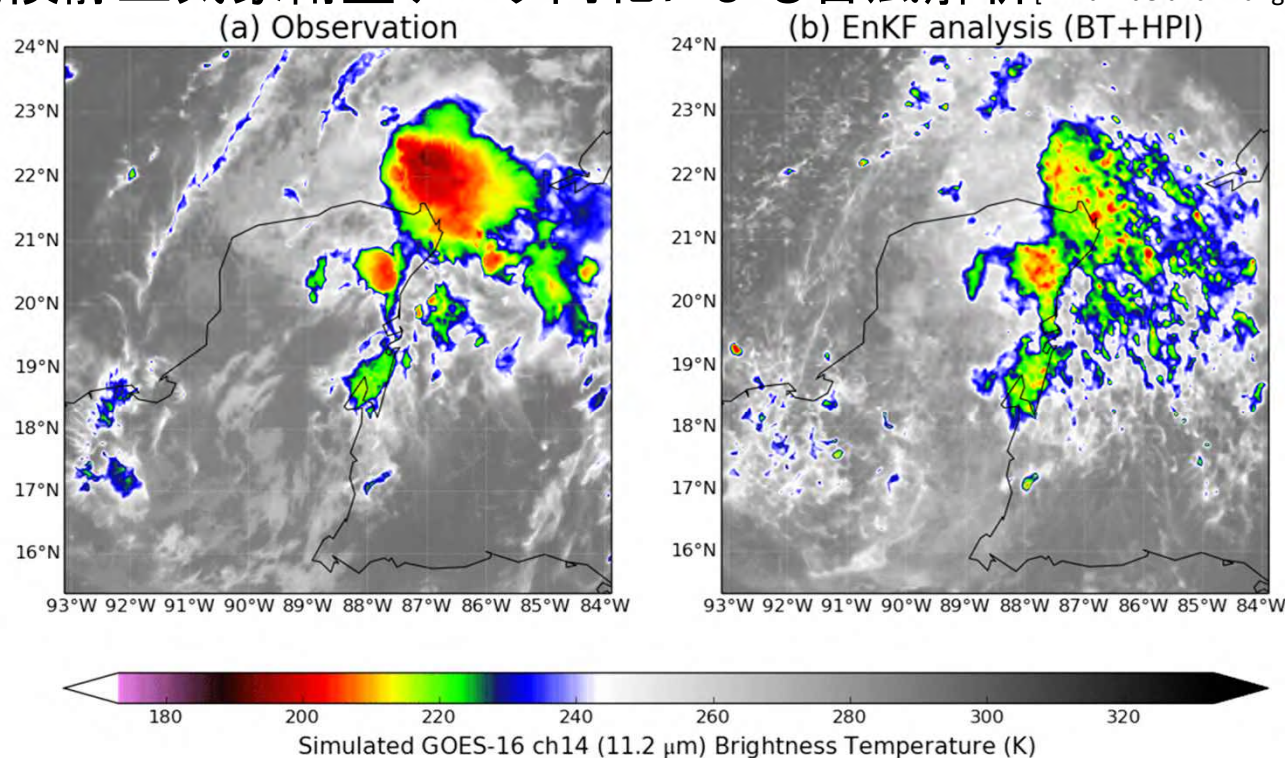
社会に受け入れられる
気象制御のデザイン



3.1. 対流を正確に解像する台風のシミュレーションが可能に

台風のような大きなスケールの現象と、人間が介入できる小さなスケールの間にどんな関係があるかを理解することが気象制御の鍵に

全天候静止気象衛星データ同化による台風解析 [Minamide and Zhang 2018]

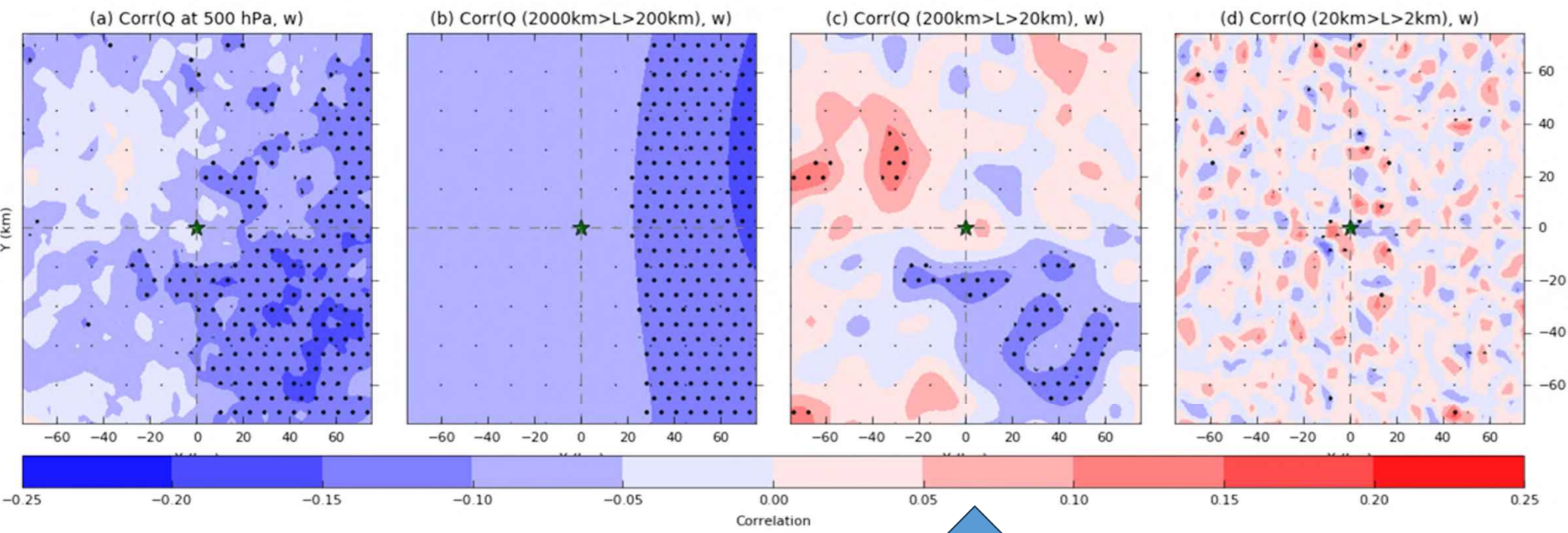


[2017-08-22_12:00]

高性能な気象モデルと衛星
データの統合で**マクロな台風と**
ミクロな対流を同時に解析する
ことが可能になった

3.2. 台風内部の対流の予測可能性

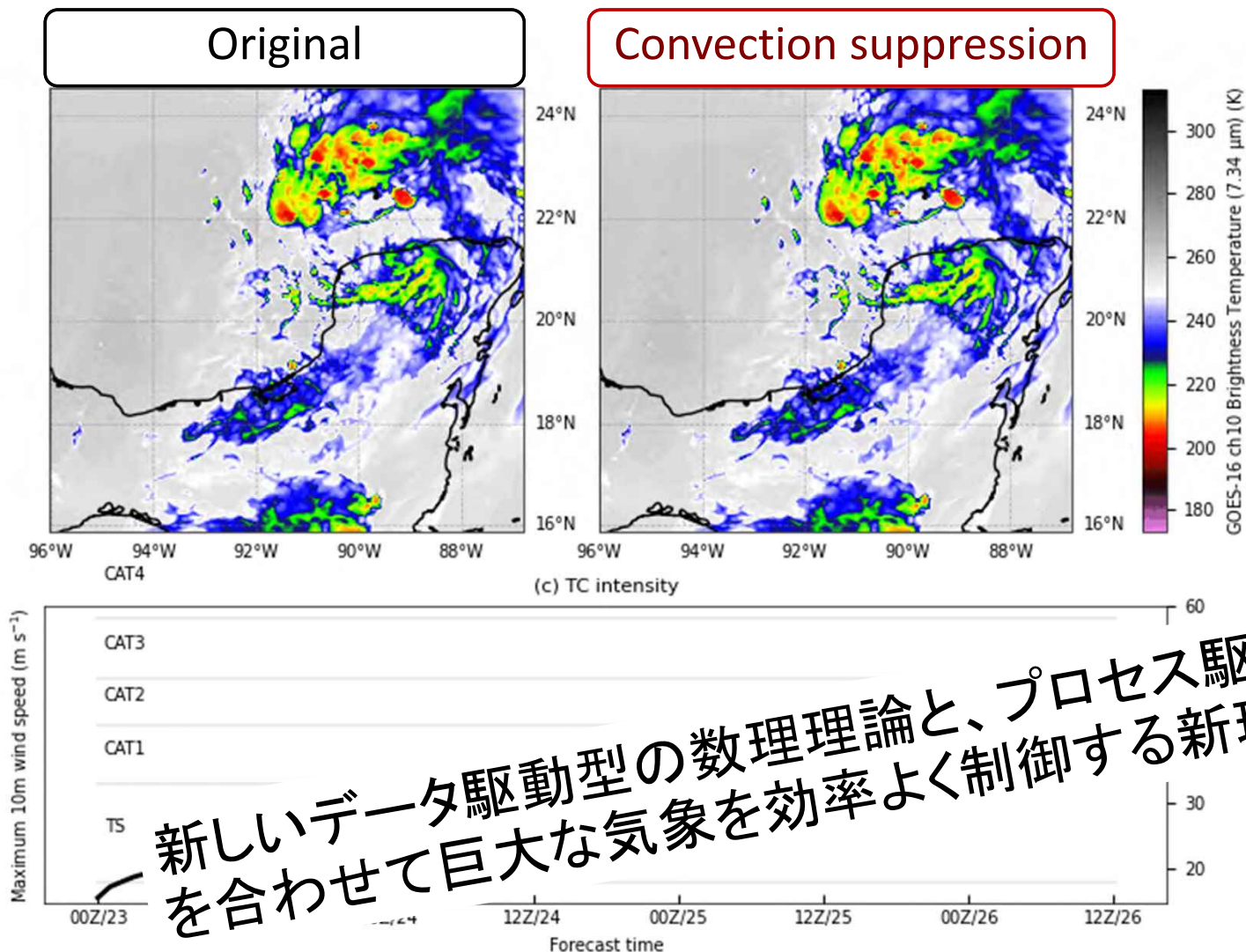
台風内部の対流のコンポジット解析から、対流が生じるシグナルを発見



[Minamide and Posselt 2022]

対流発生前にロバストに生じる水蒸気の集まりを確認
この集まりを消すとどうなる？

3.3. 台風周辺の対流活動が台風全体の急発達と密接に関連している



- 先ほど見た水蒸気の集まりを消すと、台風中心付近の対流活動は抑止できる
- たとえ全体の水蒸気量は減っていなくても、特定の場所の対流活動が抑止できると台風は発達しない

[Minamide et al, in prep]

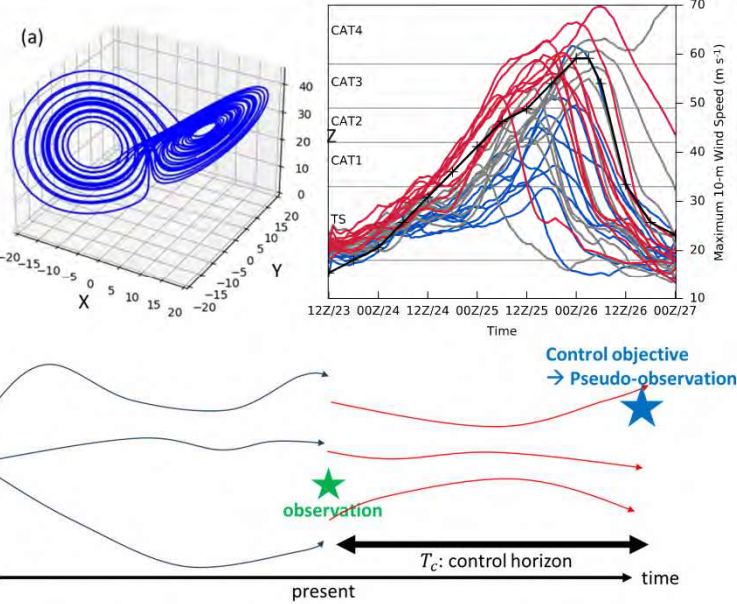
4. 社会的意思決定のための災害の社会インパクト予測

Grand Vision:

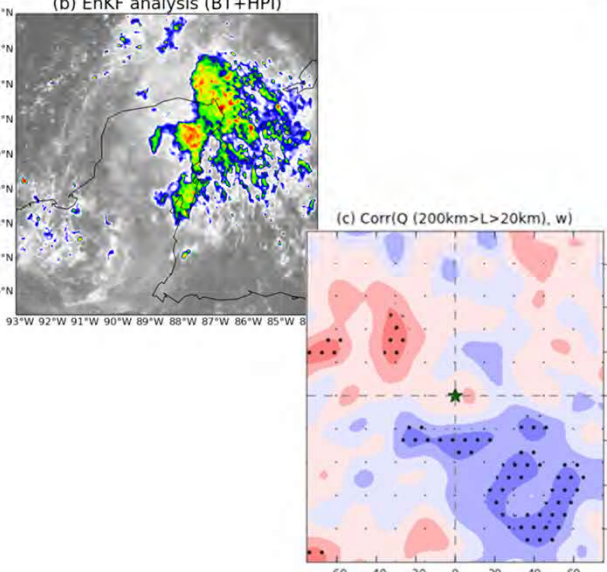
民主的な社会的意思決定に基づく気象－社会結合系の制御により、水文気象災害の恐怖から解放された社会を目指す

挑戦

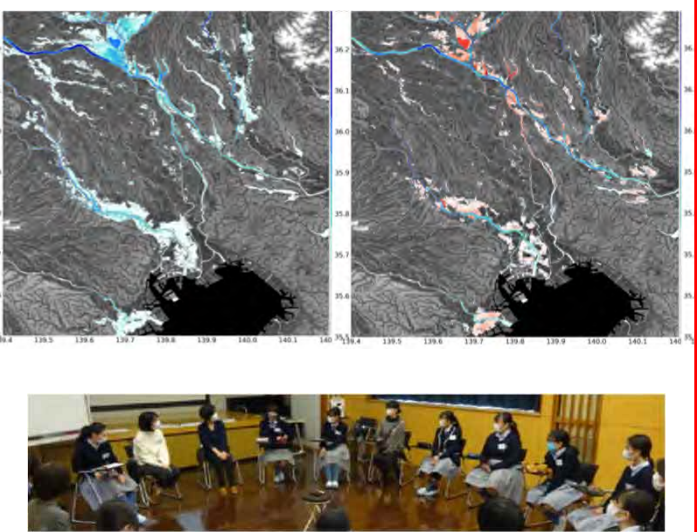
カオス性を有効活用できる
制御数理



介入効果を最大化する
気象理論



社会に受け入れられる
気象制御のデザイン



4.1. 社会的に意思決定可能な気象制御とは？

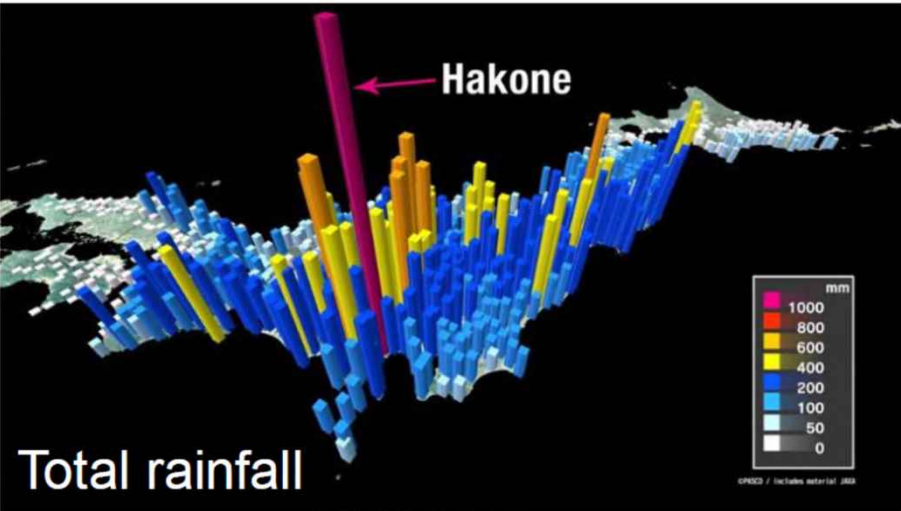
- 影響を受ける全ての人々の意思の集計結果として社会全体としてどのような気象制御を行うか/行わないかが決められるべき
- 具体的に問題になるのは、気象制御で全体としては減災になるが、一部の地域で(災害には至らないようなレベルでも)雨が制御で強くなってしまう、というような時にどうするか、ということ

→ そもそもそういうことはどのくらい起こりえるだろうか？ 仮想的なシミュレーションで見てみよう



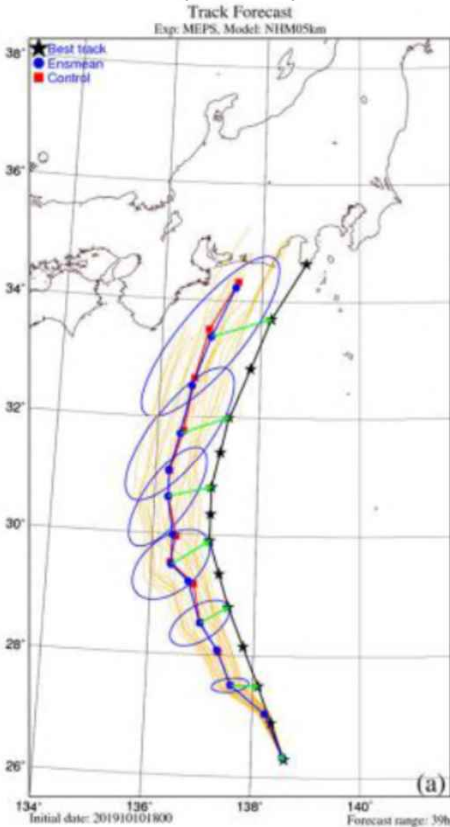
4.2. アンサンブル予測を使って制御がもたらしうるトレードオフを探る

2019年東日本台風事例

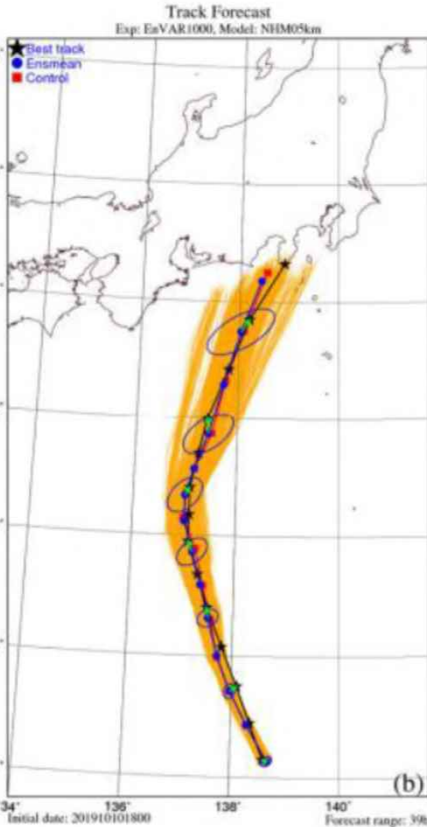


1000個の予測が「制御で実現しうる未来」だと仮想的に見立てて、「誰しもにとって良い未来」が簡単に選べるかを見てみよう

気象庁メソアンサンブル
(MEPS)



本研究

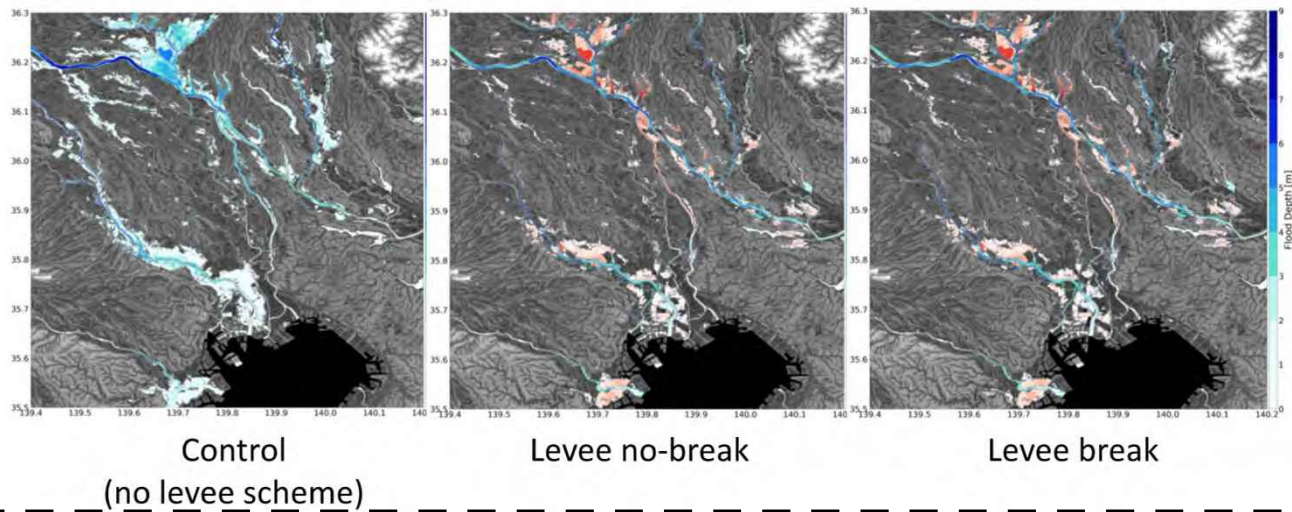


Trajectory forecasts

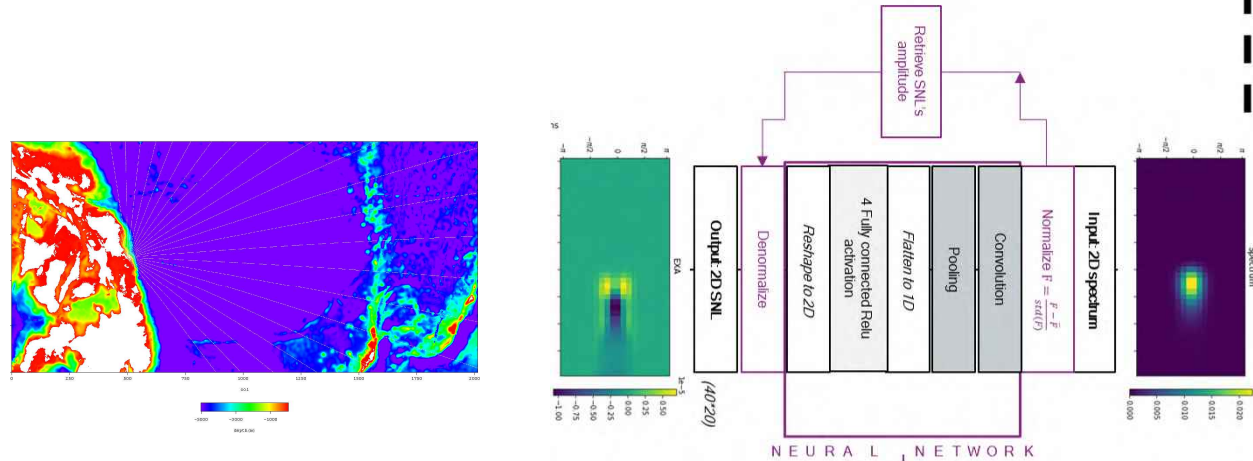
[Islam et al. 2023]

4.3. 社会インパクトを推定するための先端研究

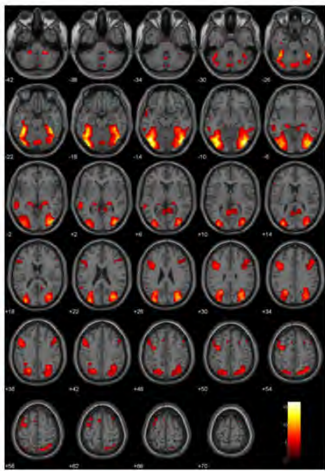
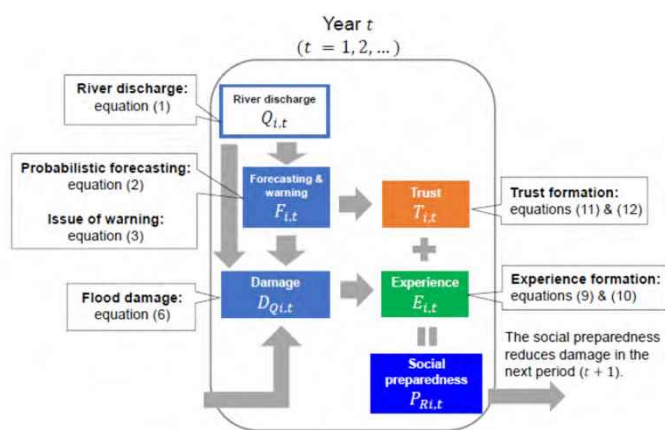
全球の河川をダムや堤防の効果も含めて高速に解く



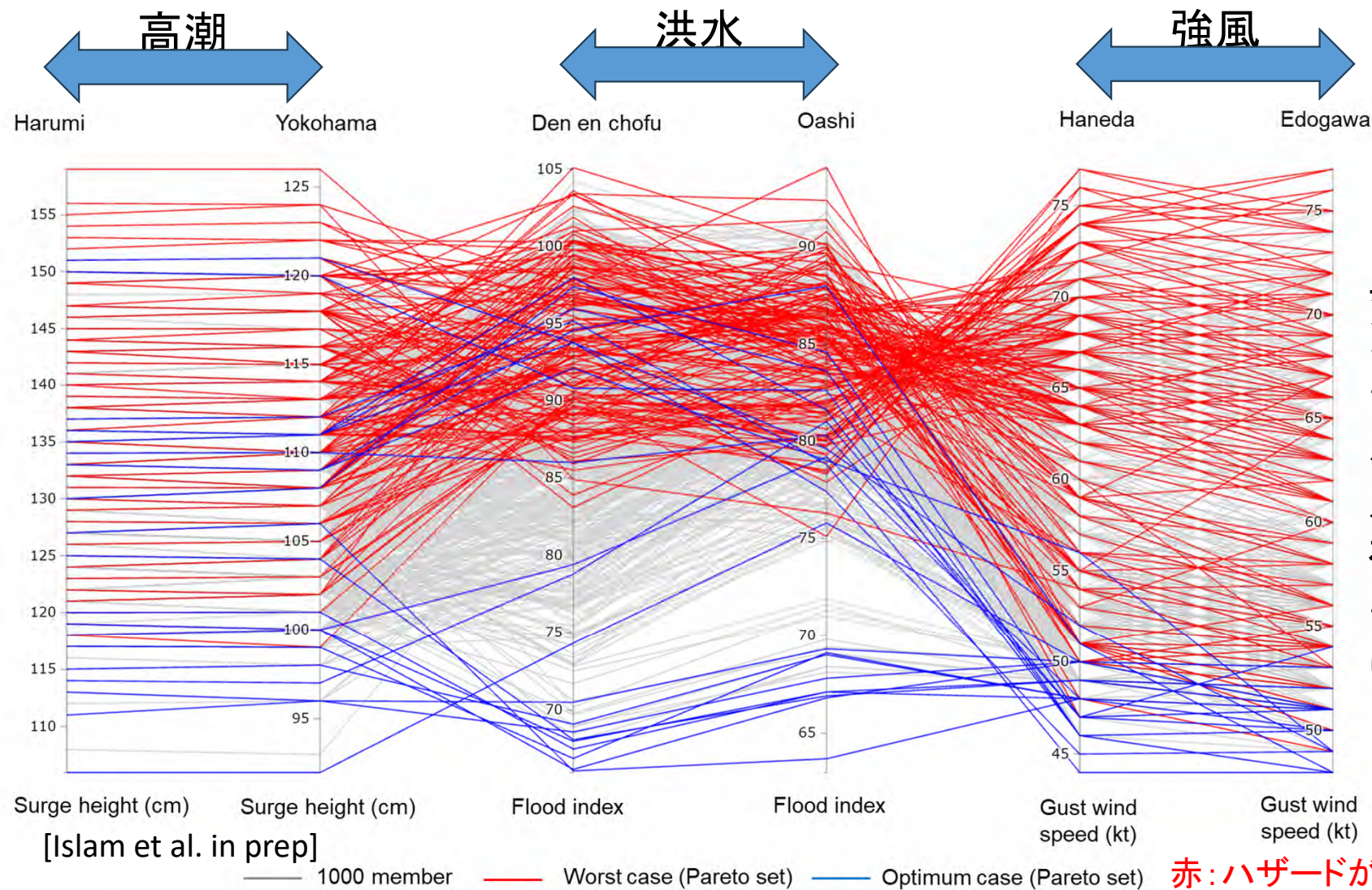
機械学習と物理則の統合で沿岸災害を超高速に解く



水害時の人の意思決定のモデリング



4.4.アンサンブル予測から見えるトレードオフ

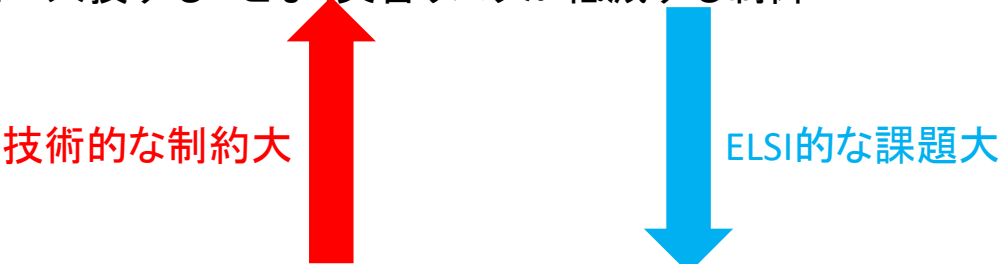


異なる台風は異なる
災害をもたらす
→異なる場所や
ハザード種別間のリ
スクの関係は非常に
複雑！
→「誰しもにとって良
い未来」を決めるの
は簡単ではない

赤:ハザードが全体として最大になる集合
青:ハザードが全体として最小になる集合

4.5. 気象制御で生じるトレードオフにいかに対処するか→責任ある研究・イノベーションへ

- どんな気象制御が望まれるだろうか？
 - 誰一人損することなく災害リスクが低減する制御



- トレードオフが生じるが、それを適切な「決め方」で利害調整可能な制御
→ 科学者だけでは研究の方向性を決められない(決めるべきでない)



市民参加型ワークショップで幅広い意見と取り入れながら研究を推進していく

高知工科大学 2022年度 第1回地域連携カフェ (特別編)
台風を操る!? 未来の技術「気象制御」は
何をもたらす?

12月8日(木)
14:00 - 16:30
(受付開始: 13:30 ~)

会場: オーテピア4階 研修室
定員: 50名 (先着順・定員になり次第締め切り)
参加費: 無料
お問合せ・お申込み: 高知工科大学 研究連携課
電話: 0887-57-2743
メール: renkai@ml.kochi-tech.ac.jp
Fax: 0887-53-9004

詳細は裏面へ



5. まとめ

Grand Vision:

民主的な社会的意思決定に基づく気象－社会結合系の制御により、水文気象災害の恐怖から解放された社会を目指す

挑戦

