



大規模自由度場の アクチュエータ位置最適化

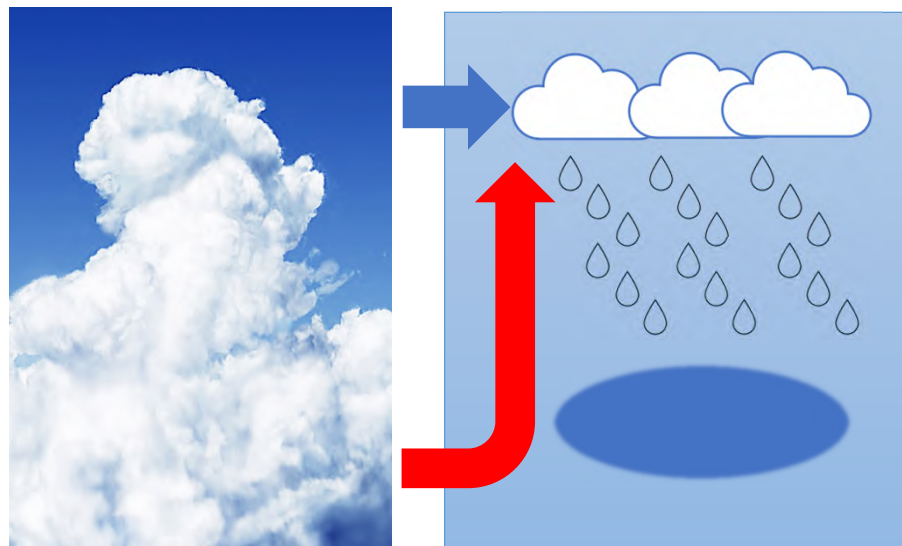


名古屋大学大学院工学研究科
航空宇宙工学専攻
野々村拓

プロジェクト背景：気象制御の困難さと制御理論の発展

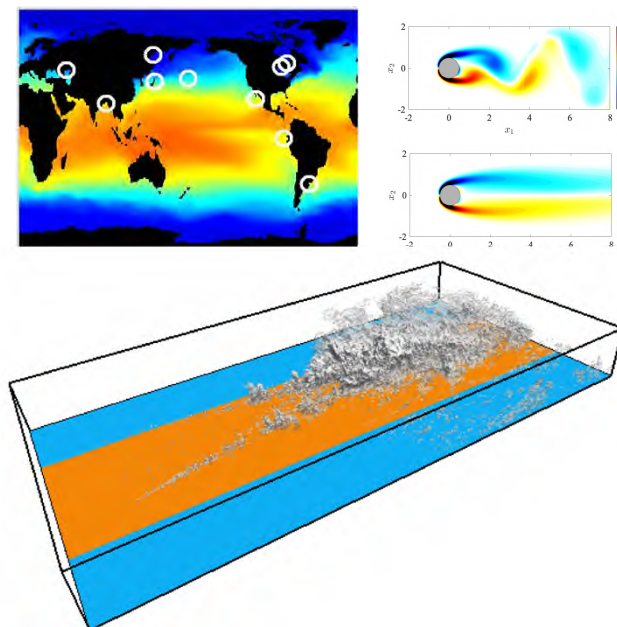
◆ 制御方法とその困難さ

- ✓ 熱を操作する
- ✓ 運動量を操作する
- ✓ 相転移を操作する
 - これらの気象制御効果を大幅に向上する必要



◆ アクチュエータ位置の最適化手法を整理・評価・開発し、気象制御効果を大幅に向上する必要がある。

- ✓ → 熱源や水蒸気をどこに入れるべきかの指標
 - 適切な制御入力点で入力効果を大幅に向上し、高い気象制御効果につなげる



研究体制とアウトリーチ



大規模自由度場のアクチュエータ位置最適化
名古屋大学 野々村拓

◆ ホームページ



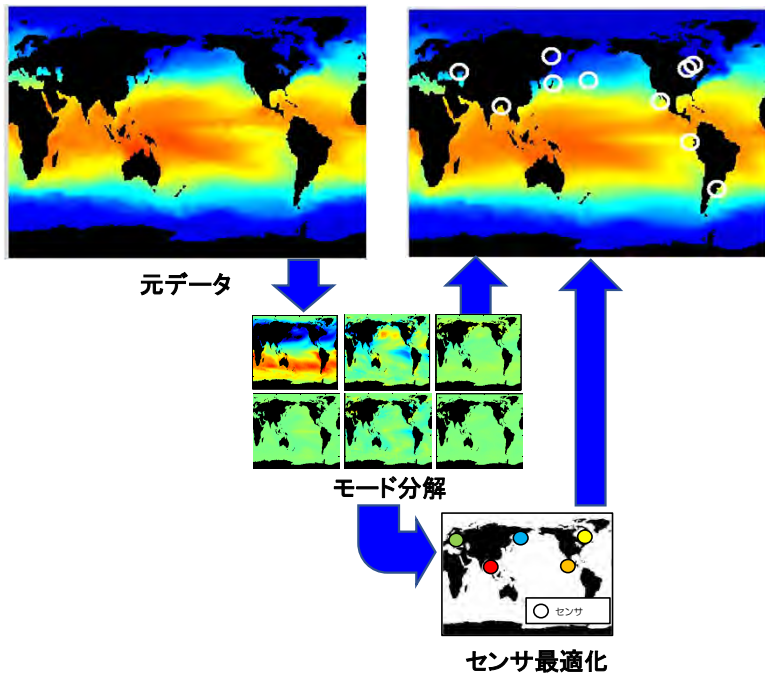
◆ シンポジウム・学会での活動

- ✓ 国際学会IFACでのオーガナイズドセッション
- ✓ 自動制御連合講演会におけるオーガナイズドセッション

センサ最適化(双対問題としてアクチュエータ位置最適化に利用可能)

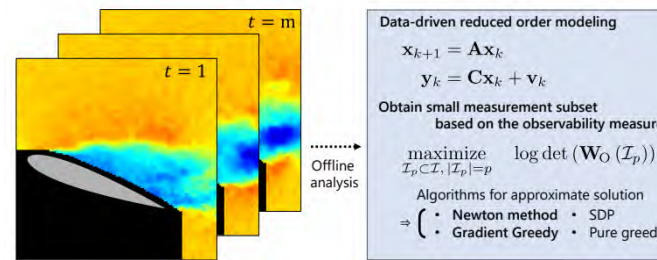
◆ センサ最適化技術

- ✓ 感度の高いセンサ点を選ぶことで少ないセンサ点と事前情報から全体場を復元できる技術＝本研究グループの強み
- ✓ アクチュエータ最適化技術の発展のため基盤としてさらなる拡張



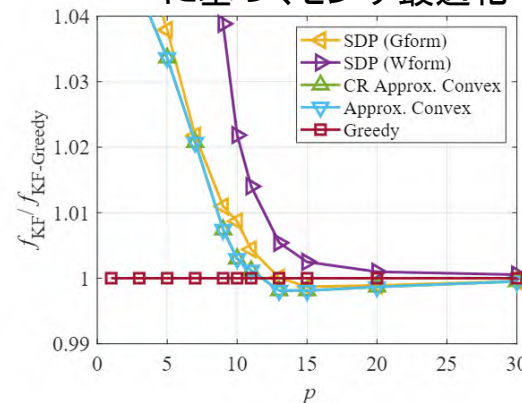
◆ プロジェクトの成果

- ✓ 可観測グラミアンに基づくセンサ最適化



Yamada et al. Sensors2023

- ✓ カルマンフィルタの誤差共分散に基づくセンサ最適化



Nagata et al. IEEE Sens J 2024

大規模自由度場のアクチュエータ位置最適化
名古屋大学 野々村拓

- ✓ 動的システムにおけるセンサ最適化の指標比較

- ▶ フィッシャー情報行列
- ▶ 可観測グラミアン
- ▶ カルマンフィルタ

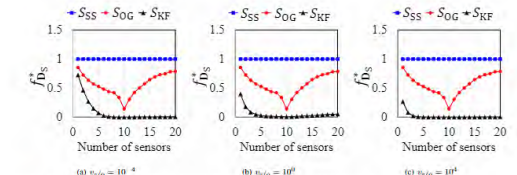


FIGURE 1. Normalized objective functions $f_{D_S}^*$ with respect to the selected number of sensors in a random system.

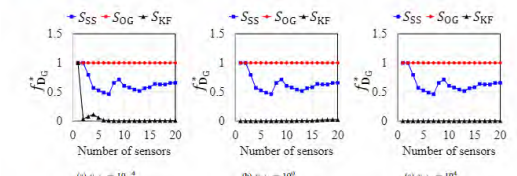


FIGURE 2. Normalized functions of $f_{D_S}^*$ for the selected number of sensors in a random system.

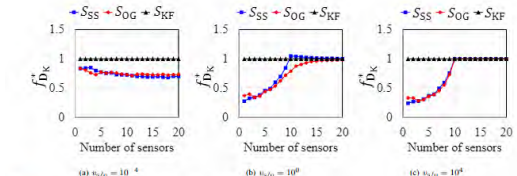


FIGURE 3. Normalized functions of $f_{D_K}^*$ for the selected number of sensors in a random system.

Takahashi et al. IEEE Access 2023

線形化Ginzburg-Landau方程式でのアクチュエータ最適化

$$\frac{\partial q}{\partial t}(x, t) = Lq(x, t) + \exp\left(-\frac{(x - x_a)^2}{2\sigma^2}\right)u(t) + d(x, t)$$

線形オペレータ

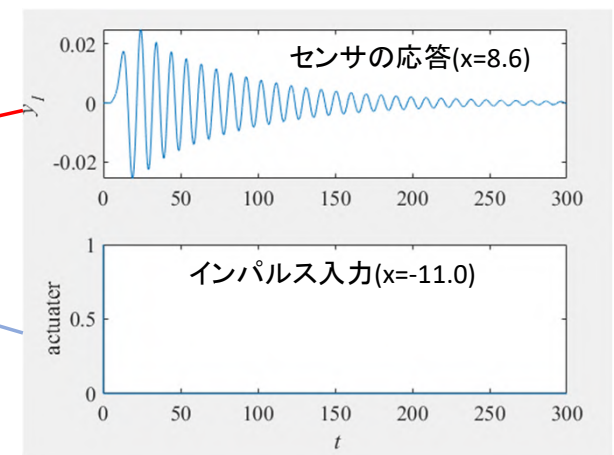
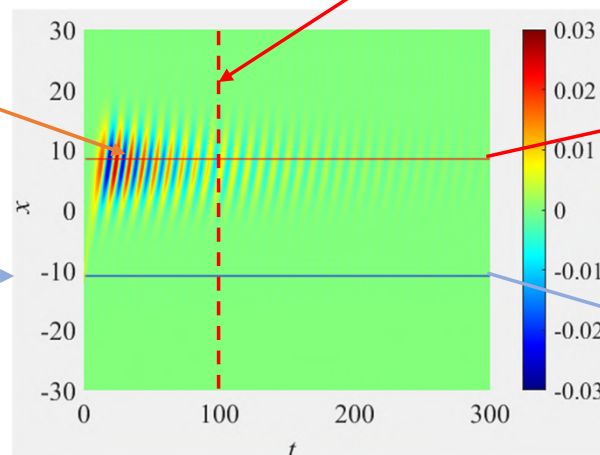
緩和δ関数

$t=100$ で最大の変動をもつインパルス入力的位置 x_a を決定したい

$t = 100$ でのノルムを最大化

インパルス応答

$t = 0$ でのインパルス入力的位置



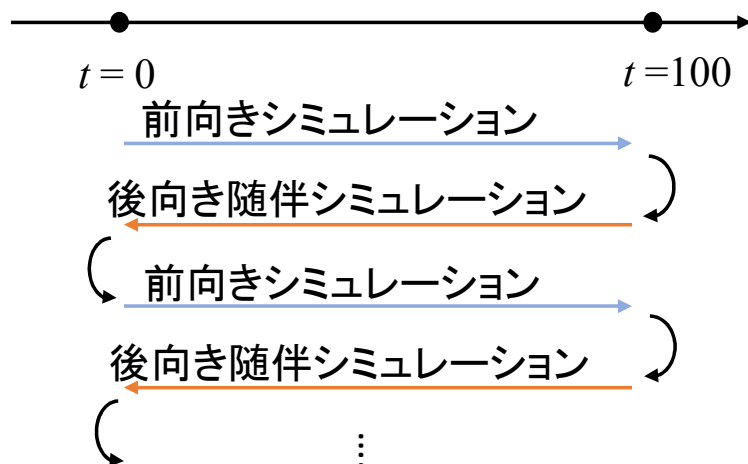
ブルートフォースサーチでは
1次元問題でも100 から1000 の試行が必要

大規模自由度場のアクチュエータ位置最適化
名古屋大学 野々村拓

線形化 GL 方程式に対する特異ベクトル法(最適攪乱)

$$q(T) = \Phi q(0)$$

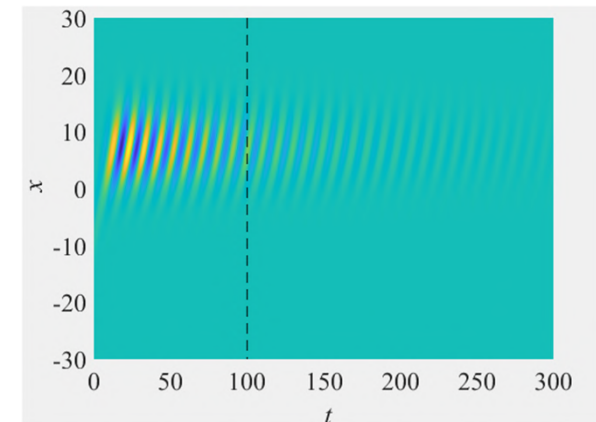
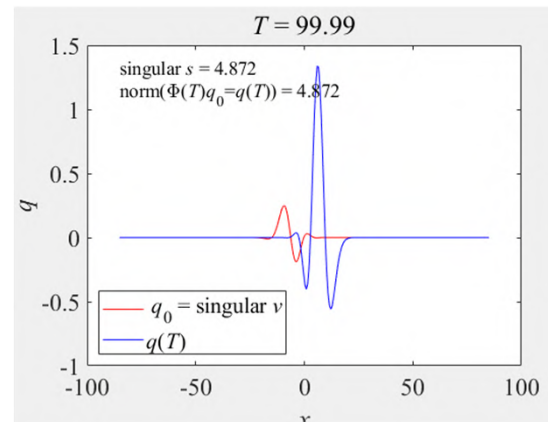
$$q(0) = \Phi^* q(T)$$



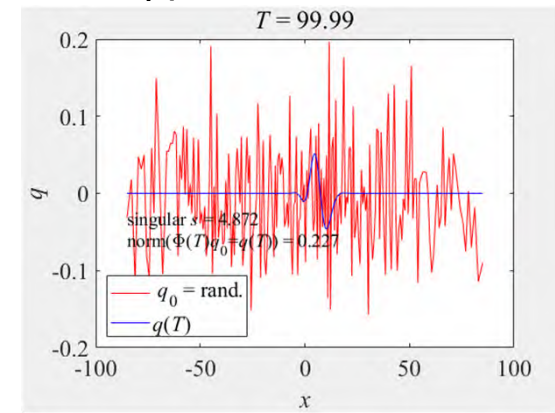
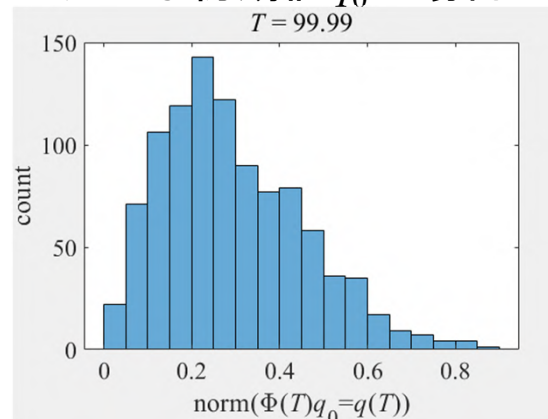
$$\Phi \approx U_r \Sigma_r V_r^*$$

これによりシステムの線形化低ランク近似が得られる:ここでは例として1-rank近似の結果を示す

初期値 $q_0 = v$ (最大の右特異ベクトル) は $t = 100$ において q の最大のノルムを与える



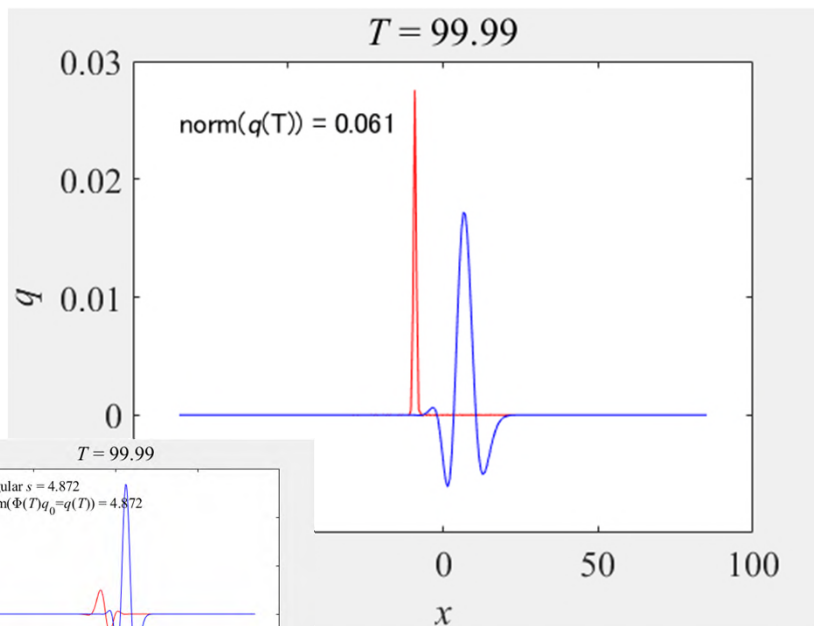
ランダムな初期値 q_0 の場合の $t = 100$ での応答



特異ベクトルに基づくアクチュエータの位置最適化

提案するアプローチ:

特異ベクトル分布のピークとなる $x = -9.09$ にアクチュエータを配置

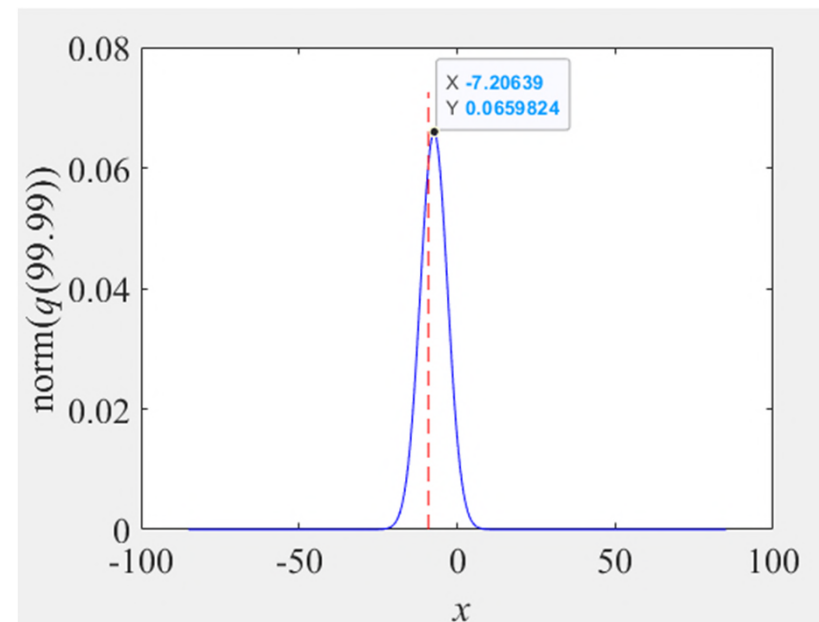


準最適化されたアクチュエータ位置とその応答

ブルートフォースサーチ

アクチュエータの位置を変えながら応答を確認

結果 $x = -7.21$ にアクチュエータを置くと最大ノルム(q) 0.066が得られる



アクチュエータ位置を変えた場合に得られるノルム

気象制御問題への適用

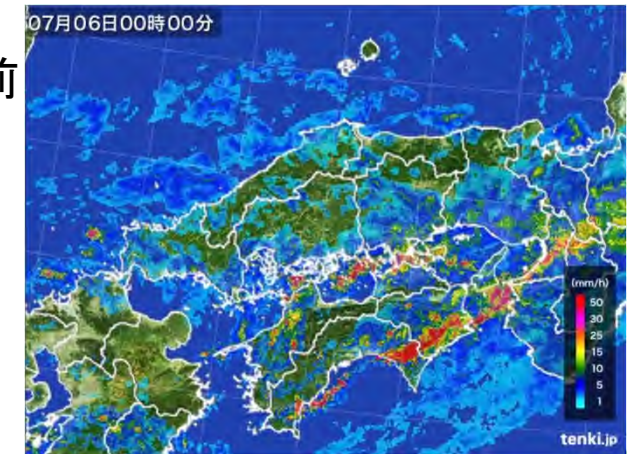
◆ 2018年6月28日－7月8日西日本豪雨

- 7月5日6 p.m. (UTC) から6時間の解析, 7月6日の最大降水量の直前
- 初期条件におけるアクチュエータ位置での水蒸気量の減少
- 制御決定のための目的関数: 最大降水量の最小化

$$\min \left(\max(y_T + y_{\text{base},T}) \right)$$

◆ 気象シミュレーション

- WRFPLUS V3.9.1.1
 - アメリカ海洋大気庁Aeronomy Research Laboratoryを中心に開発
 - 様々な物理モデルの利用可能
 - 接線形モデルと随伴モデルが利用可能
- 計算条件
 - 水平格子解像度: 10 km
 - 格子点数: 水平方向50 x 50 鉛直方向 31 vertical
 - 時間刻み 60 s



特異(感度)ベクトルとセンサ・アクチュエータ位置

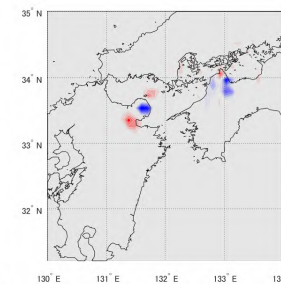
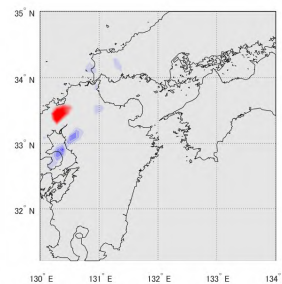
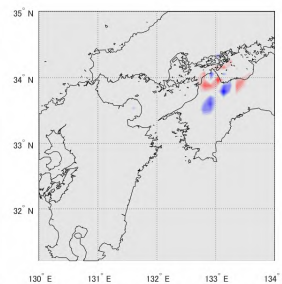
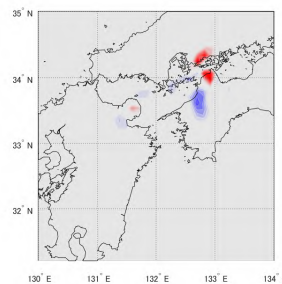
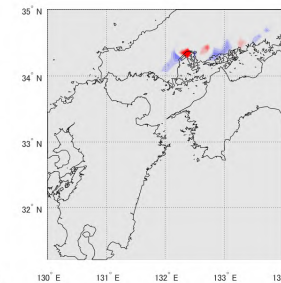
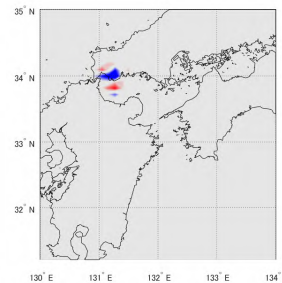
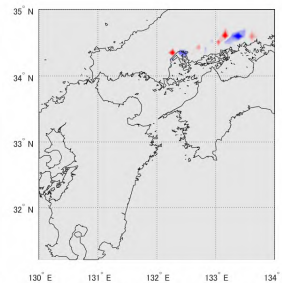
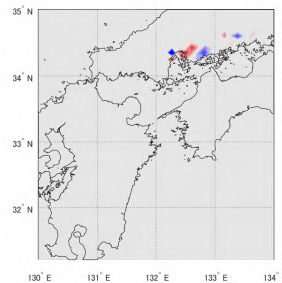
開発した乱択特異ベクトルで計算した特異(感度)ベクトル
($k = 32, m = 32$)

第1モード

第2モード

第3モード

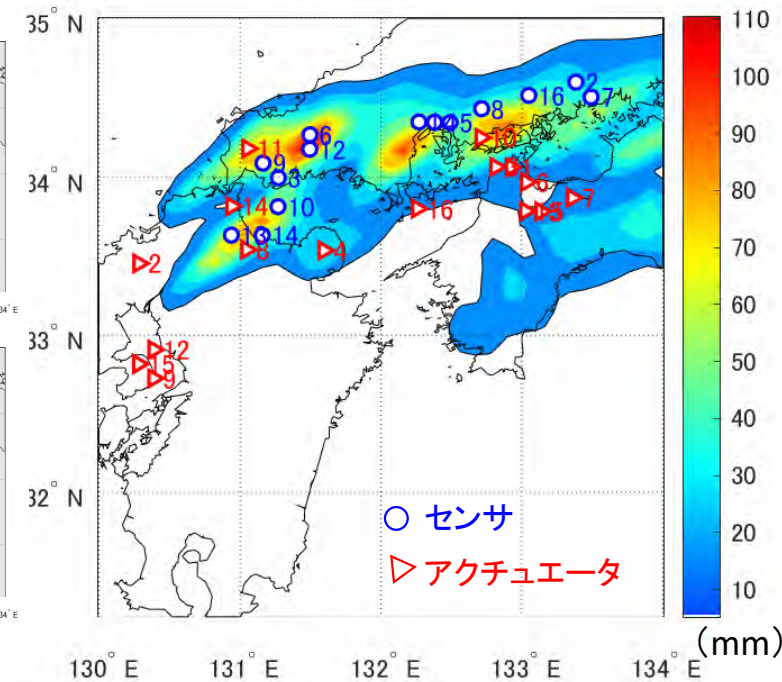
第4モード



応答モード
(積算降水量)

感度モード
(地表での水蒸気)

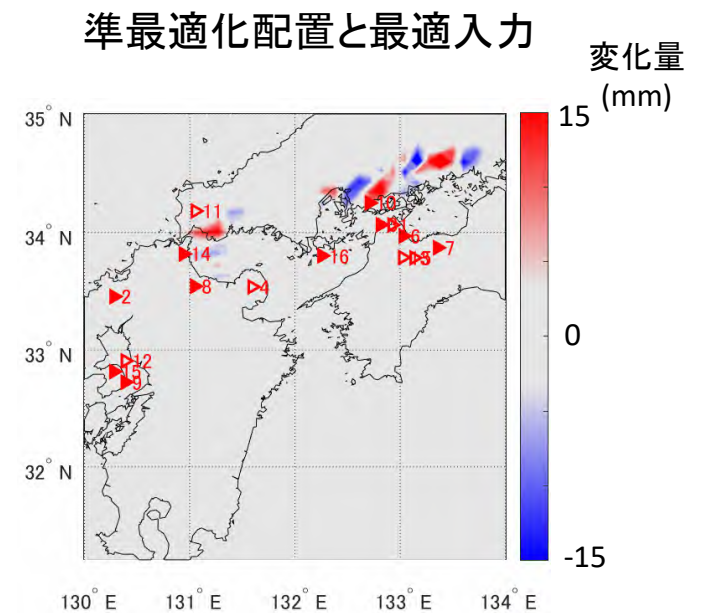
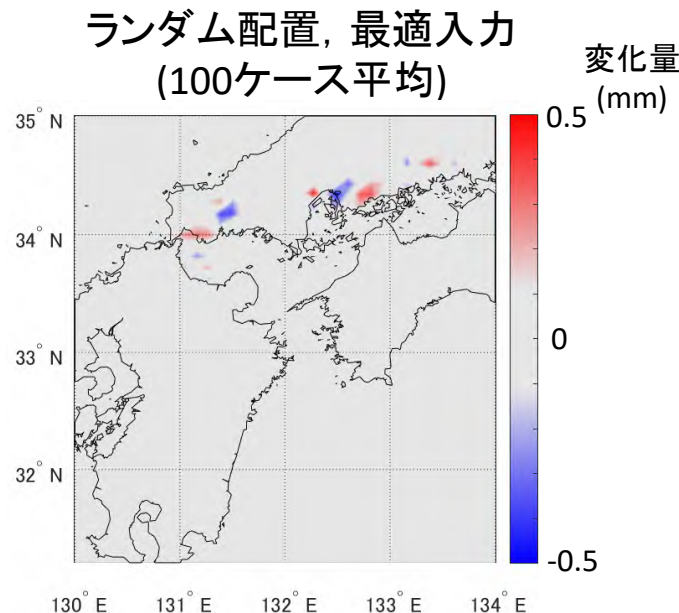
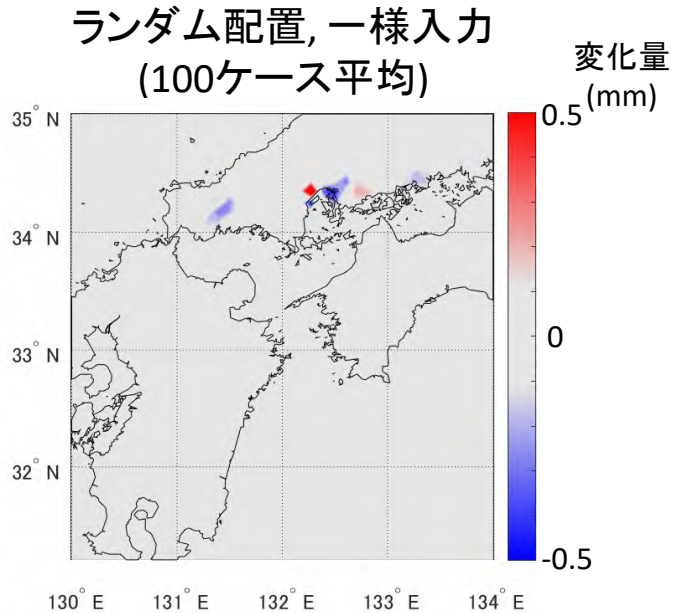
降水量と
最適化したセンサ・アクチュエータ位置($r = 16$)



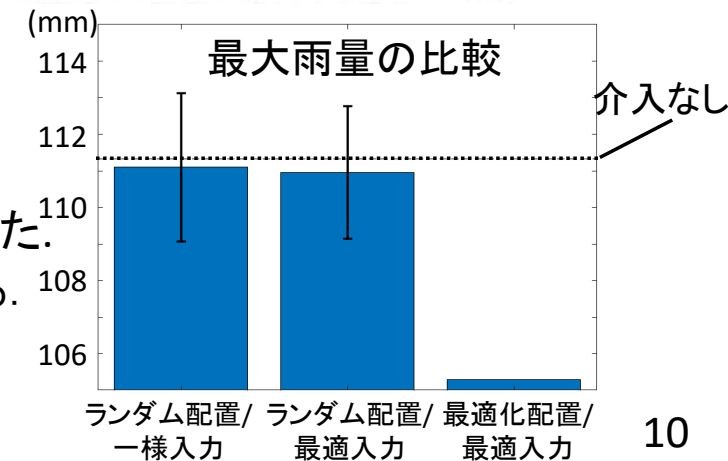
- ✓ 単純に全域に雨量を増加・減少させるモードはない
- ✓ アクチュエータ位置は、降水の位置の上流側が選択される。

大規模自由度場のアクチュエータ位置最適化
名古屋大学 野々村拓

接線形モデルを利用した制御実験 ($p=16$, 最大降水量の最小化)



- 準最適化入力是最小の最大降水量を達成した
 - ・ ランダム配置における入力の最大化は最大降水量にはほとんど変化を及ぼさなかった.
- 最大降水量でない場所のうち, 降水量が 10 mm/6h 増える場所があった.
 - ・ 降水による被害を最小化する観点で, 注意深く目的関数を選ぶ必要がある.



大規模自由度場のアクチュエータ位置最適化
名古屋大学 野々村拓

まとめ

- ◆ 研究背景を示した
- ◆ 研究体制, 広報・アウトリーチ活動を示した
- ◆ アクチュエータ最適化の単純な例と現状での応用を説明した