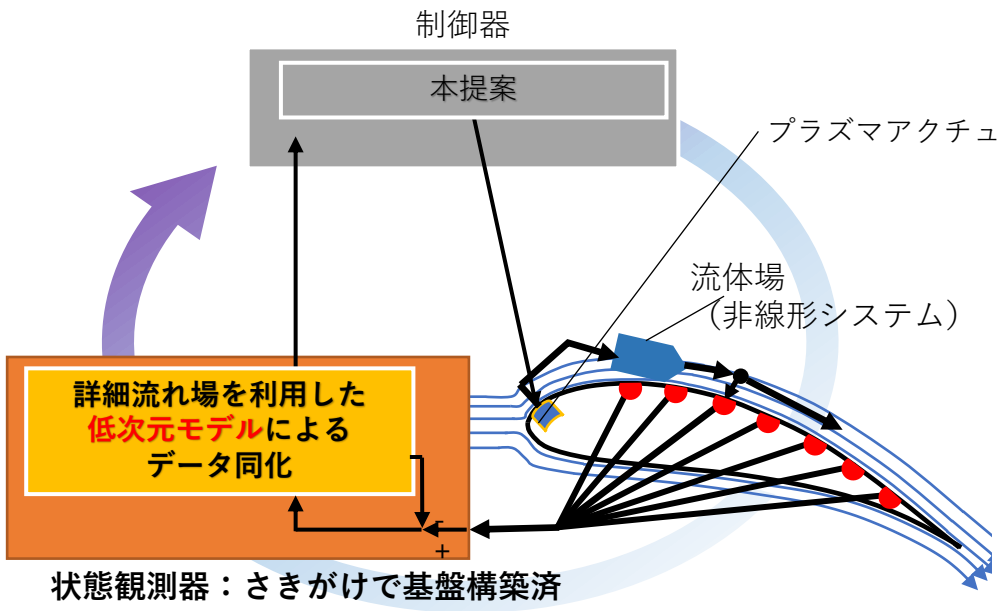
ムーンショット型研究開発事業　要素プロジェクト

大規模自由度場の
アクチュエータ位置最適化

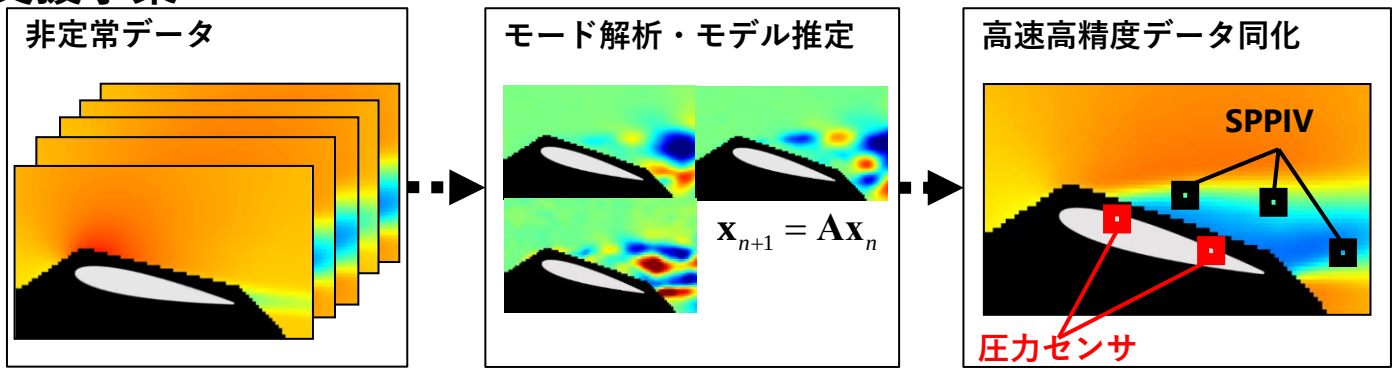
東北大学大学院工学研究科
航空宇宙工学専攻
野々村拓

PMの大規模自由度場の観測・制御の研究成果

□ JSTさきがけ情報計測領域，JST創発的研究支援事業



状態観測器：さきがけで基盤構築済



世界的な研究動向

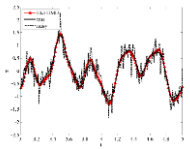
- 動的モード分解
  - Schmid 2010 JFM
  - Tu et al, 2014 JCD
  - Deem, 2020 JFM
- SINDy
  - Brunton et al, 2017 PNAS

オリジナリティ

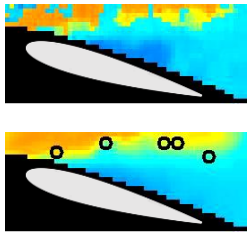
実験での利用

- ノイズ対策
- リアルタイム性

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n$$
$$\mathbf{y}_n = \mathbf{x}_n + \mathbf{w}_n$$



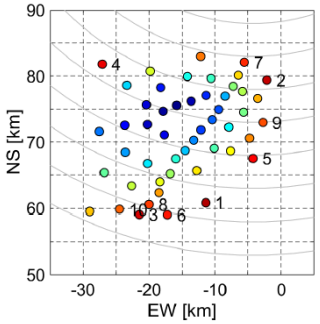
拡張カルマンフィルタ
動的モード分解
Nonomura 2019 PLOSone



スパース
プロセッシング
PIV()

□ JSTクレスト情報計測領域

「次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析」主たる共同研究者

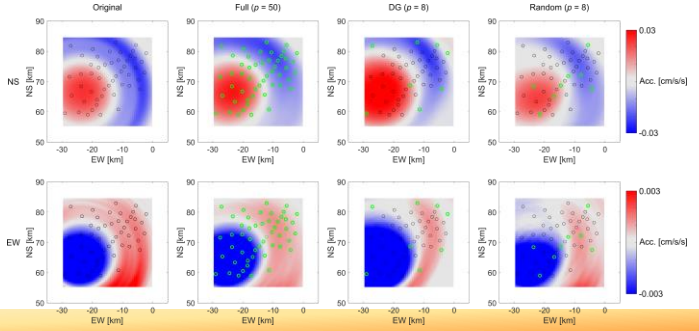


地震パラメタの
推定に感度の
良い点を
演繹的に選択

パラメタの微小な推定誤差による
各観測点における観測値の誤差

各パラメタの微小な相対推定誤差
（p：パラメタ）

$$\begin{bmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_2 \\ \vdots \\ \delta y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \frac{\partial y_1}{\partial p_1} & \tilde{p}_2 \frac{\partial y_1}{\partial p_2} & \cdots & \tilde{p}_{12} \frac{\partial y_1}{\partial p_{12}} \\ \tilde{p}_1 \frac{\partial y_2}{\partial p_1} & \tilde{p}_2 \frac{\partial y_2}{\partial p_2} & \cdots & \tilde{p}_{12} \frac{\partial y_2}{\partial p_{12}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{p}_1 \frac{\partial y_n}{\partial p_1} & \tilde{p}_2 \frac{\partial y_n}{\partial p_2} & \cdots & \tilde{p}_{12} \frac{\partial y_n}{\partial p_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\delta p_1}{\tilde{p}_1} \\ \frac{\delta p_2}{\tilde{p}_2} \\ \vdots \\ \frac{\delta p_{12}}{\tilde{p}_{12}} \end{bmatrix}$$

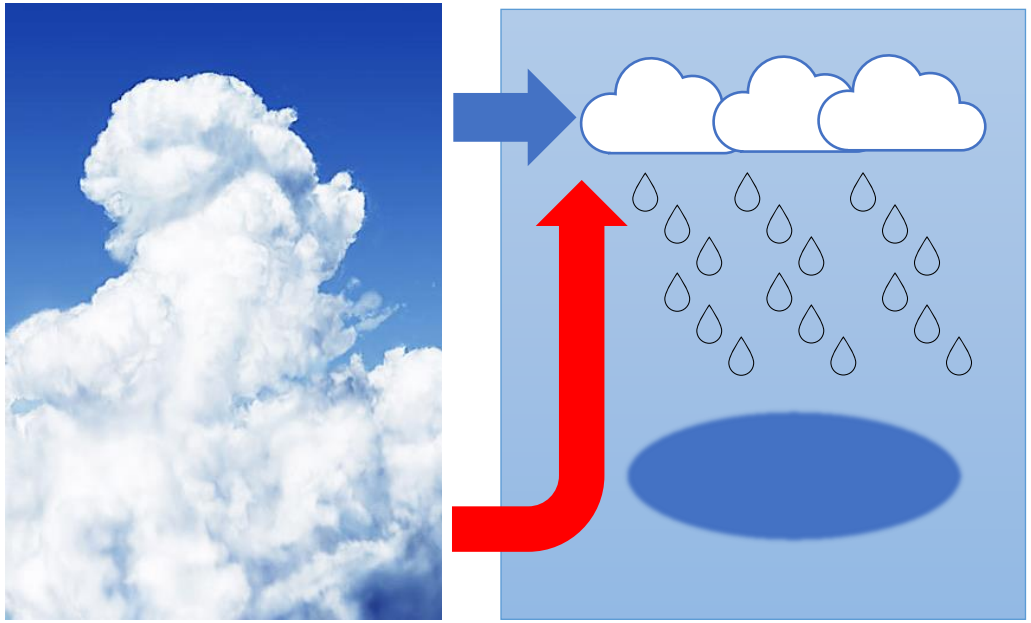


帰納的な
低次元モデルに
よる地震波動場の
再構成

背景：気象制御の困難さと制御理論の発展による解決

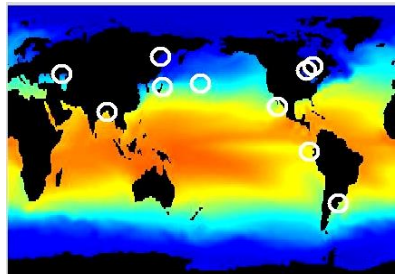
■制御方法とその困難さ

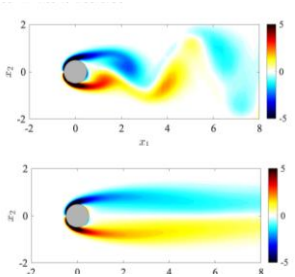
- ✓ 熱を操作する
- ✓ 運動量を操作する
- ✓ 相転移を操作する
  - **<u>これらの気象制御効果を大幅に向上する必要</u>**

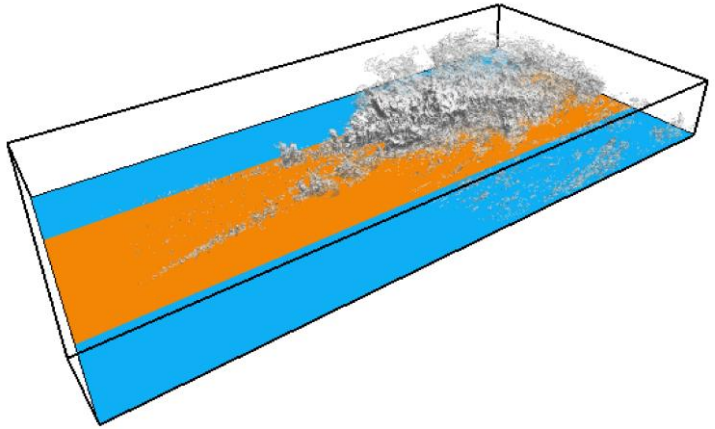


■ **アクチュエータ位置の最適化手法を整理・評価・開発し、気象制御効果を大幅に向上する必要がある.**

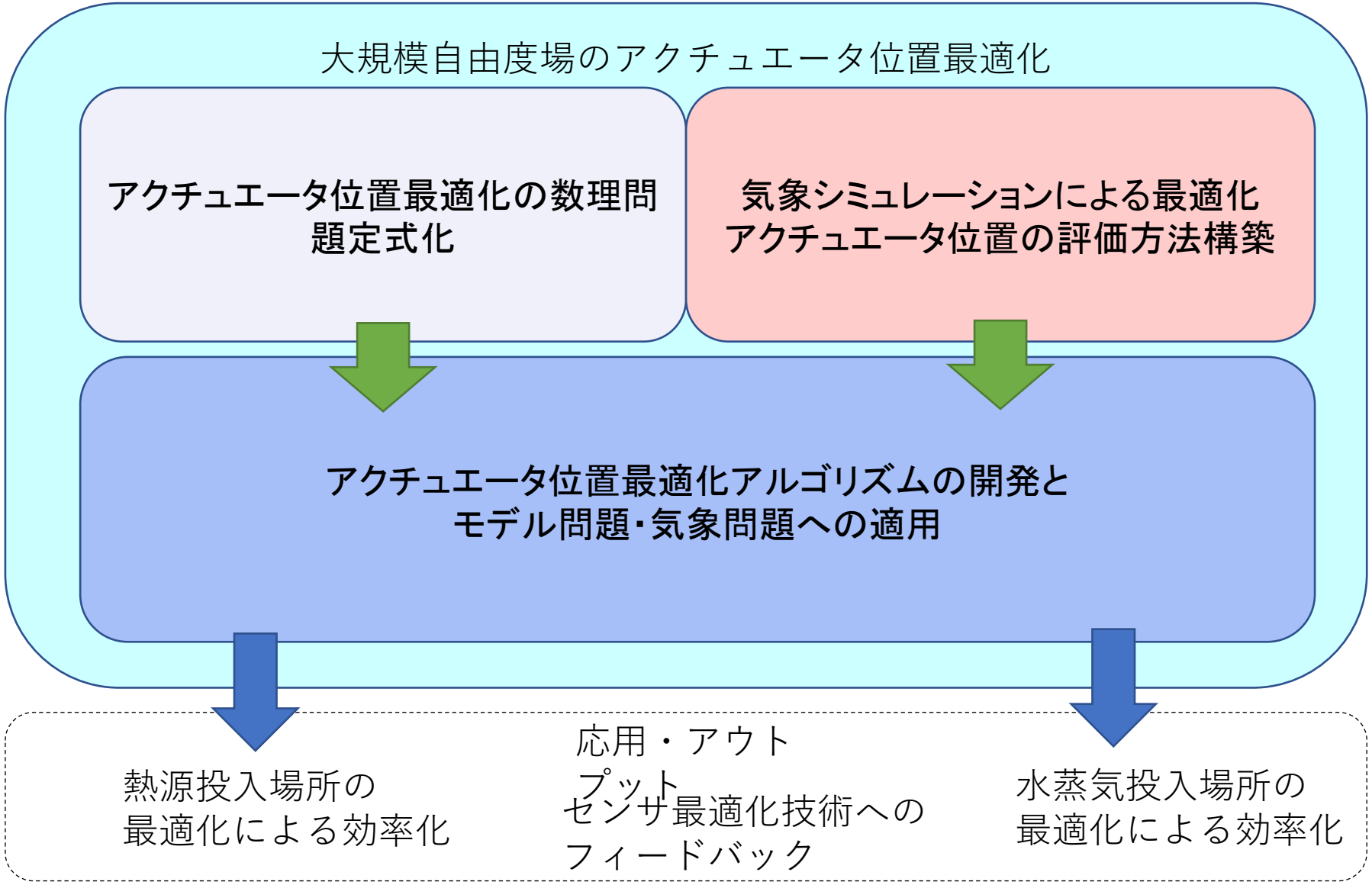
- ✓ →熱源や水蒸気をどこに入れるべきかの指標
  - **適切な制御入力点で入力の効果を大幅に向上し，高い気象制御効果につなげる**





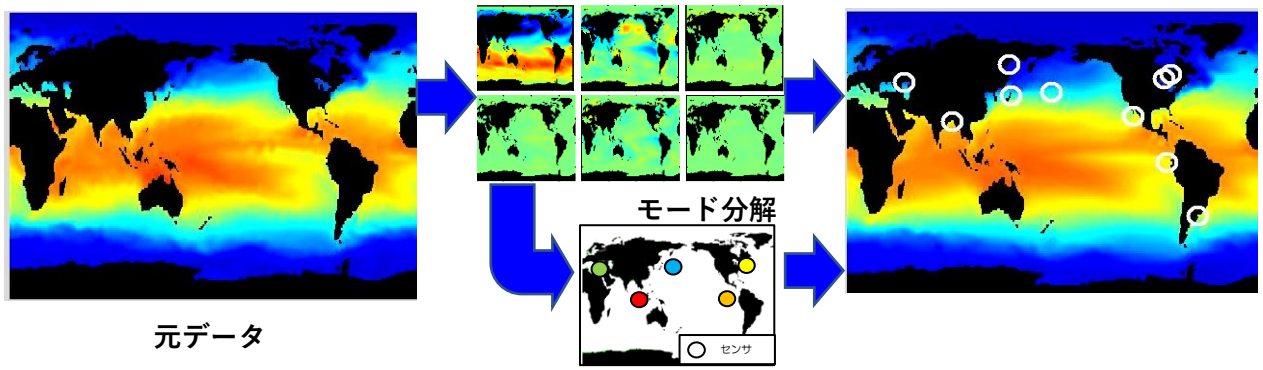


研究構想


大規模自由度場のアクチュエータ位置最適化
アクチュエータ位置最適化の数理問題定式化
気象シミュレーションによる最適化
アクチュエータ位置の評価方法構築
アクチュエータ位置最適化アルゴリズムの開発と
モデル問題・気象問題への適用
熱源投入場所の
最適化による効率化
応用・アウトプット
センサ最適化技術への
フィードバック
水蒸気投入場所の
最適化による効率化

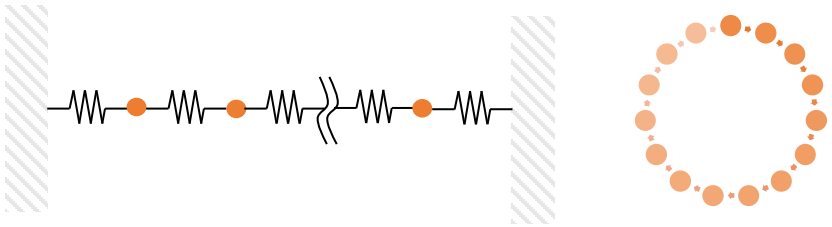
研究項目1:アクチュエータ位置最適化アルゴリズムの開発と モデル問題・気象問題への適用

アクチュエータ位置最適化アルゴリズムの開発



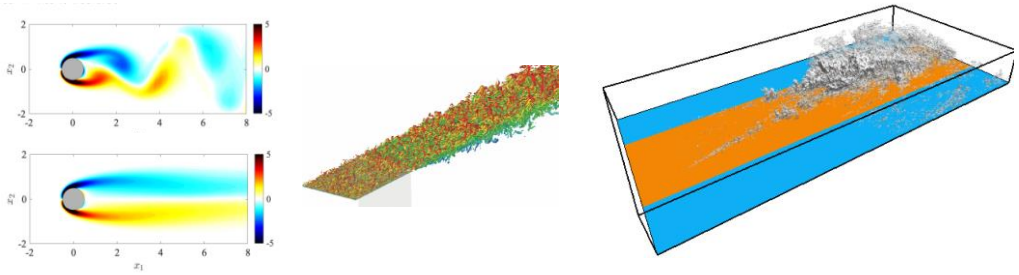
- PI(兼PM)は**低次元モデルの流体実験への適用**および**センサ最適化の研究分野**では**世界トップクラスの業績**
  - ✓ 流体実験への応用：Physics of Fluids 2021, Trans. JSASS 2021, Applied Science 2021.
  - ✓ センサ最適化：Mech. Sys. Sig. Proc. 2021. IEEE Sensor Journal 2021, IEEE Access 2021, IEEE Sig. Proc. Lett. 2021
- この経験・知見を生かして，アクチュエータ位置最適化を実現する

モデル問題の構築と 最適化アクチュエータ位置の評価



東北大学
野々村拓

カルマン渦流れ　境界層:平行平板間流れ　気象問題



ランダム配置されたアクチュエータ位置よりも，99%以上の確率で性能のよいアクチュエータ位置であることを示し，アクチュエータ位置最適化の効果を実証する

研究項目2：アクチュエータ位置最適化の数理問題定式化

アルゴリズムで最適化する目的関数を数理問題として定式化する：
特にこれまで考えられてきた指標を中心に，大規模非線形問題での評価方法も含めて検討する．

- 入力アファイン非線形システム

$$\dot{x} = f(x) + Gu$$

入力がシステムへどのように作用するかを定める行列

- 入力に関する係数行列

$$G = BH^\top$$

※非常に**縦長**

アクチュエータ位置を定める（設計可能）

各位置作用するアクチュエータの状態量への影響を決める（物理で決まる．設計不可）

- 最適化問題のイメージ

$$\max_{H} \quad \textbf{評価指標}$$
$$\text{s.t.} \quad \dot{x} = f(x) + BH^\top u$$

これを明確にする

- 線形化した場合

$$\dot{x} = f(x) + BH^\top u$$

線形化

$$x = x_r + \xi$$

$$\dot{\xi} = A\xi + BH^\top u$$

- 候補となる指標

可制御グラミアン

$$W_c := \int_0^\infty e^{A\tau} BH^\top HB^\top e^{A^\top \tau} d\tau$$

逆行列が，ある状態を達成するために必要な入力の最小エネルギを与える

Riccati 方程式の安定化解

$$PA + A^\top P - PBH^\top R^{-1} HB^\top P + Q = 0$$

状態と入力の 2 乗積分からなる評価関数に関する最適制御問題において最適入力とその際の評価関数の最小値を与える

これらのトレース・行列式・最大固有値などのスカラ量が指標とする

双対となる問題

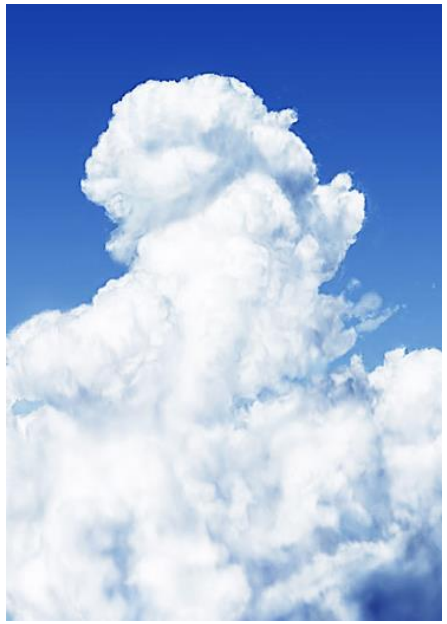
双対

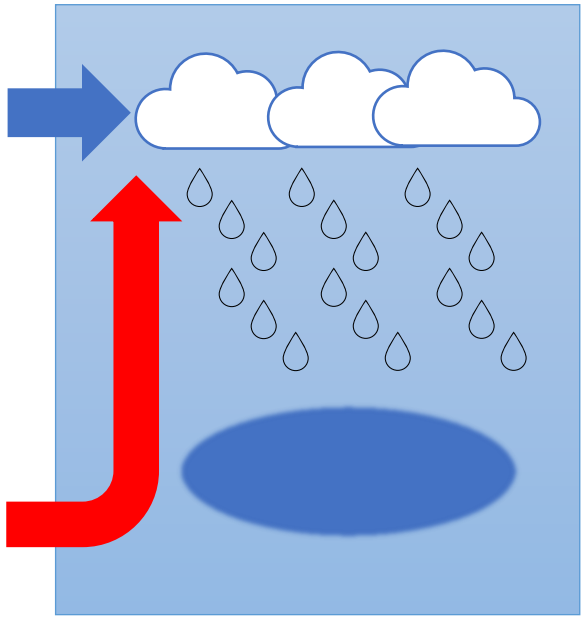
$$\begin{cases} \dot{\zeta} = A^\top \zeta \\ y = HB^\top \zeta \end{cases}$$

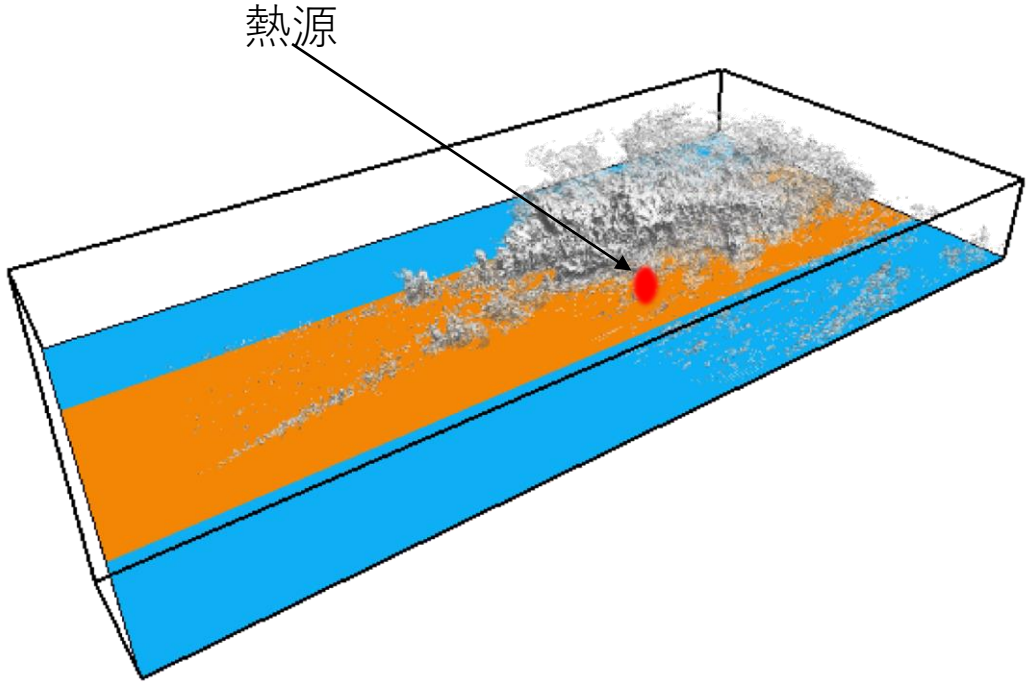
このシステムに対するセンサ位置最適化問題 PM のグループで既に多くの実績有

名古屋大学
椿野大輔

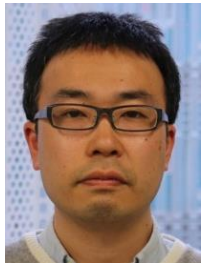
研究項目3:　気象シミュレーションによる最適化アクチュエータ位置の評価方法構築







線状降水帯の
局所（領域）気象シミュレーション



東北大学
伊藤純至

- アクチュエータの最適化位置を検証するためのシミュレーションを設計する
  - 九州北部の線状降水帯(数10km規模)をターゲットに局所(領域)気象シミュレーションを実施し，熱を加える制御により，局所最大降水量を下げる制御を検討する

✓アクチュエータ位置の評価

研究体制

PD
他プロジェクト
との議論

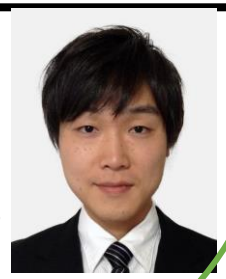
東北大学

工学研究科
野々村拓
研究員2名
大学院生
アクチュエータ
位置最適化

理学研究科
伊藤純至
大学院生
局地/
極端気象への
適用

名古屋大学

工学研究科
椿野大輔
大学院生



数理問題
定式化

国際共同研究者

US-Japan
ワークショップ
オーガナイズド
セッション
低次元モデル・
スパースセンサ
最適化の高度化

国内共同研究者

計測自動制御学会
「低次元モデルに基づく先進的流体制御研究調査会」