

計測自動制御学会制御部門  
「低次元モデルに基づく先進的流体制御調査研究会」  
第二回研究会 現状報告

---

主査 野々村拓（東北大）

副主査 椿野大輔（名大）

# はじめに：流体力学とデータ駆動科学

## 流体力学の特徴

- 大規模自由度場
  - 理論的な研究の限界
  - 実験・数値解析の困難さ
- 特徴的なパターンが現れる
  - ✓大規模渦列
  - ✓乱流の統計的性質

## データ駆動科学からみた流体力学の困難

- 大規模自由度の取り扱いの困難（本質的に4次元）
- 時系列データ

このようなデータ解析がここ10年くらいで可能になってきた

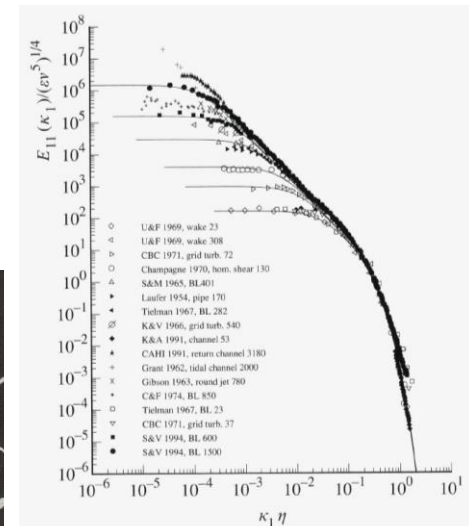
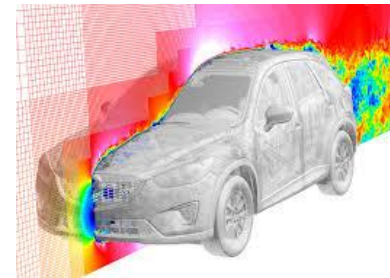
## 流体力学とデータ駆動科学

### 演繹的なアプローチ

- 支配方程式の解析
  - 解析リソースの限界
  - 境界条件の設定の困難

### 帰納的なアプローチ

- データ駆動科学
- 機械学習





## 総論：特集

制御理論とデータ駆動科学で挑む流体制御・流体観測

## 流体制御・観測への制御理論とデータ駆動科学からのアプローチ

野々村 拓\*・椿野 大輔\*\*

\* 東北大学大学院工学研究科 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-1

\*\* 名古屋大学大学院工学研究科 愛知県名古屋市中区千代田 不老町

\* Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-1 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, Japan

\*\* Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, Japan

\* E-mail: nonomura@astro.mech.tohoku.ac.jp

キーワード：流体制御 (Flow control), データ駆動 (Data-driven).

ISSN: 0013-788X (Print) / ISSN: 1347-8816 (Online)

### 1. はじめに

流体現象は身近な現象であり、理学的にも工学的にも多くの分野で研究の対象となる。たとえば機械システムであれば航空機や自動車などの移動体の周りの流れはその性能に直結するため、現象理解のための流体観測技術と流れを整えるための流体制御技術の発展が期待されてきた。一方で制御の分野では、流体制御に携わる研究者の数は多くなく、洗練された制御理論を積極的に用いて流体制御を行う気運はむしろ制御の分野以外のほうが高い。これは、流体制御におけるモデルである Navier-Stokes 方程式が非線形偏微分方程式であることや、境界条件やレイノルズ数などのパラメータの違いが流れ場の大きな変化につながることから、包括的・構造的な制御系設計論の構築が困難なことが理由として挙げられる。

流体現象に演繹的な制御理論を用いた研究は 1990 年代ごろから見られる。この背景には流体のシミュレーション技術や Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 技術の発展により、モデル化および観測可能な流体の物理量が広がったことや流体への能動的なアクチュエーションが可能となったことがある。たとえば文献 [1] では、Navier-Stokes 方程式に対して、変分法から導かれる随伴方程式に基づいた最適制御が展開されている。また、現在ではその立場を確立した制御手法であるモデル予測制御を用いた流体制御が 2001 年の時点で報告されている<sup>①</sup>。応用数学の分野では、Navier-Stokes 方程式やその線形化方程式の抽象的な安定化問題が、関数解析学に基づき継続的に研究されている<sup>②</sup>。

すでに述べたとおり、Navier-Stokes 方程式では、非線形性と無限次元性から理論的かつ構造的な制御系設計は困難である。また、空間離散化により有限次元システムで近似したとしても、十分な精度で現象を解像するためには、非常に多くの格子点数が必要となり、システムの次元が莫大なものとなる。すなわち、モデルに基づいて制御系設計を行うことを考えると、元の方程式のままでも、離散化して集中定数系として考えても、いずれも困難さを伴う。このような問題を解決する一つの鍵が、実験・数値解析データの援用にあると考えられる。

流体力学の支配方程式に基づく演繹的な手法に対して、一般にデータ駆動科学と呼ばれる帰納的な方法論も流体力学の理解や本論で議論する流体制御の応用のために適用され始めた。流体力学分野では固有直交分解<sup>③</sup>と呼ばれる主成分分析はデータを最も良く表現する基底を用いてデータを再構成する方法論で、流体力学分野でも 1970 年代からその利用が認識されてきた。しかしながら、このようなアプローチは自由度が非常に多い流体力学のようなアプリケーションでは理想的な数値解析や実験などの限られた対象への適用に留まってきた。2000 年代以降、主成分分析のような解析が流体のような多自由度な系に対して特に困難を伴わずに利用可能になったことに加え、Schmid<sup>④</sup> の提案する動的モード分解のような近似された線形ダイナミクスを表現する方法論が提案され始め、流体力学の低次元モデルが大きく着目されてきた。さらにはネットワークに基づくクラスタ低次元モデルの提案や、非線形のダイナミクスを線形近似する拡張動的モード分解や圧縮センシングで非線形ダイナミクスの内重要な項のみを取り出す Sparse Identification of Nonlinear Dynamics (SINDy) のようなアルゴリズムも提案されており、帰納的なモデリングが大いに進んでいる<sup>⑤</sup>。また、人工知能研究の発展からニューラルネットワークや深層学習などによる流体力学の低次元化や制御のためのアルゴリズムの開発も大きく進んできた。

このように、現状では流体力学の制御・観測に向けて、制御理論およびデータ駆動科学の道具が揃いつつある状況にあるといえる。本特集ではこれらの最新の技術を用いて流体制御・流体観測に挑む研究例を紹介する。

まずは東京大学の長谷川洋介先生に最適制御理論を

### 【総論】流体制御・観測への制御理論とデータ駆動科学からのアプローチ

野々村 拓 (東北大), 椿野 大輔 (名古屋大)

### 【解説】熱流体システムへの最適制御理論の応用

長谷川 洋介, 亀谷 幸憲, 中倉 満帆, 伊藤 宗嵩 (東京大)

### 【解説】遅延フィードバック制御法による流れ場制御

小河原 加久治 (山口大)

### 【解説】ビッグデータ同化：気象学における先端データ同化研究

三好 建正 (理化学研)

### 【解説】モデル予測制御と回帰分析に基づく流体場のフィードバック制御器設計

佐々木 康雄, 椿野 大輔 (名古屋大)

### 【解説】画像データを用いたスロッシングのフィードバック制御

酒井 悟, 宇城 友貴 (信州大)

### 【解説】データ駆動型スパースセンシングのためのセンサ位置最適化

齋藤 勇士, 野々村 拓, 浅井 圭介 (東北大)

### 【解説】流れの最適制御のための強化学習

久保 晃, 成川 航祐, 清水 雅樹 (大阪大)

### 【解説】機械学習を用いた乱流ビッグデータ解析に向けて

深湯 康二, 深見 開 (慶應大)

# これまでの活動

- ホームページの作成
- 2022/3/19 第一回研究会（オンライン）
- 2022/9/16 第一回チュートリアル「流体力学の最適制御・モデル予測制御チュートリアル」
- 2022/11/13 第65回自動制御連合講演会オーガナイズドセッション「低次元モデルに基づく先進的流体計測・制御」



低次元モデルに基づく先進的流体制御調査研究会

Home Member Activity

## 低次元モデルに基づく先進的流体制御調査研究会

Research committee on advanced fluid control based on reduced-order modeling

### 研究会の担当分野と目的

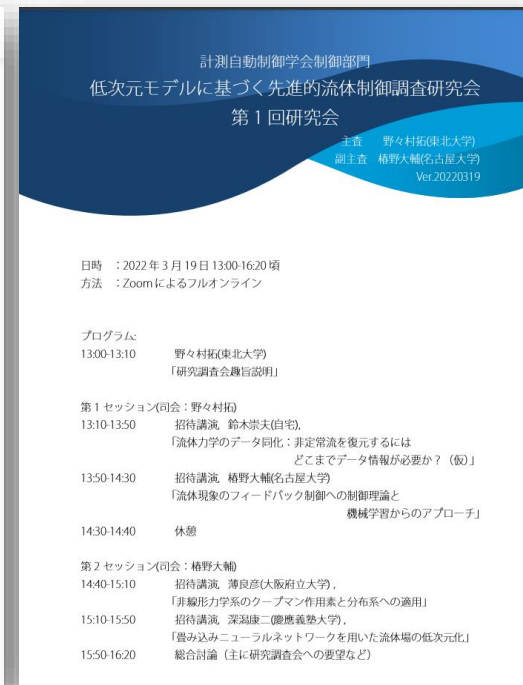
複雑流動現象に対するフィードバック制御や観測値に基づく流れ場の状態推定の実現に向けて主に以下のアプローチから理論的・実験的に調査研究を行う

- データに基づく流体場の低次元モデルの構築と低次元モデルに基づく観測・制御
  - 固有直文分解、動的モード分解、クープマンモード分解や機械学習などのデータ駆動科学のアプローチや、平衡実現などの制御理論的アプローチについて調査・研究を行う。
- 流体制御に適したモデル予測制御
  - 計算コストの削減のため、機械学習によるモデル予測制御の近似や流体の構造を利用した低コストな適用手法について調査・研究を行う。
- アクチュエータ・センサ最適化問題
  - 可制御・可観測グラムなど制御理論的な尺度とデータ駆動科学のアプローチを組み合わせた手法について調査・研究を行う。
- 能動的流体制御アクチュエータのモデル化
  - プラズマアクチュエータやシンセティックジェットアクチュエータなど、能動的流体制御デバイスの制御原理や制御系設計のためのモデル化について調査・研究を行う。

複雑流動現象の制御は、モデルがNavier-Stokes方程式であることから、制御理論分野では研究が進んでいない対象であった。一方、流体分野で固有直文分解と呼ばれる統計学的手法の一つである主成分分析により、実験や数値シミュレーションデータから支配的なモードを抽出し、得られたモードに基づくNavier-Stokes方程式の低次元化が行われてきた。近年では、データ駆動科学・機械学習の急速な発展により、動的モード分解、クープマンモード分解、深層学習を用いてデータから直接低次元モデルを得ることができるようになった。本調査研究会設置の目的は、このような流体現象の低次元モデリング技術を積極的に活用した制御系設計や状態推定技術について調査・研究を行うことである。特に、制御への応用を念頭に、流れ場の再構築にとどまらない制御に適した低次元化手法や、流体の低次元モデルに現れる特徴的な構造を抽出とその構造を有効に適用した制御手法を明らかにしたい。流体分野、計測制御分野、データサイエンス分野の学際的な連携に基づき、最先端の流体制御技術の構築を目指す。

### お知らせ

- 調査研究会参加希望の方は主催野々村まで (nonomura at tohoku.ac.jp, at を @にしてください)ご連絡ください



計測自動制御学会制御部門  
低次元モデルに基づく先進的流体制御調査研究会  
第1回研究会

主催 野々村拓(東北大)  
副主催 植野大輔(名古屋大)  
Ver.20220319

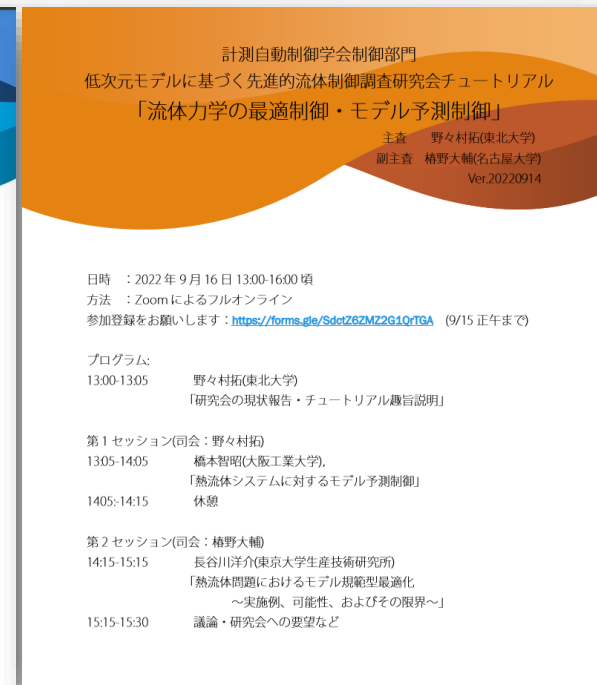
日時 : 2022年3月19日 13:00-16:20頃  
方法 : Zoomによるフルオンライン

プログラム  
13:00-13:10 野々村拓(東北大)  
「研究調査会趣旨説明」

第1セッション(司会:野々村拓)  
13:10-13:50 招待講演 鈴木崇夫(自宅)  
「流体力学のデータ同化: 非定常流を復元するにはどこまでデータ情報が必要か? (仮)」  
13:50-14:30 招待講演 植野大輔(名古屋大)  
「流体現象のフィードバック制御への制御理論と機械学習からのアプローチ」

14:30-14:40 休憩

第2セッション(司会:植野大輔)  
14:40-15:10 招待講演 薄良彦(大阪府立大).  
「非線形力学系のクープマン作用素と分布系への適用」  
15:10-15:50 招待講演 深淵康二(慶應義塾大).  
「畳み込みニューラルネットワークを用いた流体場の低次元化」  
15:50-16:20 総合討論 (主に研究調査会への要望など)



計測自動制御学会制御部門  
低次元モデルに基づく先進的流体制御調査研究会チュートリアル  
「流体力学の最適制御・モデル予測制御」

主催 野々村拓(東北大)  
副主催 植野大輔(名古屋大)  
Ver.20220914

日時 : 2022年9月16日 13:00-16:00頃  
方法 : Zoomによるフルオンライン  
参加登録をお願いします: <https://forms.gle/SdctZ6ZM2G1QrtGA> (9/15 正午まで)

プログラム:  
13:00-13:05 野々村拓(東北大)  
「研究会の現状報告・チュートリアル趣旨説明」

第1セッション(司会:野々村拓)  
13:05-14:05 橋本智昭(大阪工業大).  
「熱流体システムに対するモデル予測制御」  
14:05-14:15 休憩

第2セッション(司会:植野大輔)  
14:15-15:15 長谷川洋介(東京大学生産技術研究所)  
「熱流体問題におけるモデル規範型最適化～実施例、可能性、およびその境界～」  
15:15-15:30 議論・研究会への要望など

# 調査研究会主査・副主査

## □ 主査 野々村拓



- 2003 名古屋大学卒業工学部機械航空工学科
- 2008 東京大学大学院工学系研究科  
航空宇宙工学専攻博士課程修了
- 2009 JAXAプロジェクト研究員
- 2011 JAXA宇宙科学研究所  
宇宙飛翔工学研究系助教  
(東京大学大学院助教併任)
- 2016 東北大学大学院工学研究科  
航空宇宙工学専攻 准教授 (現職)  
(ディスティングイッシュドリサーチャー)

## □ 副主査 椿野大輔



- 2005 名古屋大学卒業工学部機械航空工学科
- 2007 東京大学大学院工学系研究科  
航空宇宙工学専攻修士課程修了
- 2009 東京大学大学院工学系研究科  
情報理工学系研究科システム情報学専攻
- 2011 北海道大学大学院情報科学研究科  
システム情報科学専攻 助教
- 2015 名古屋大学大学院工学研究科  
航空宇宙工学専攻 講師
- 2022 同 准教授 (現職)

流体力学



制御工学

# 調査研究会メンバー(2023/4/24)

- 57名(メーリングリスト\*\*名)
- 大学43名
- 企業5名
- 研究機関9名

青野光	信州大学
浅田健吾	東京理科大学
阿部圭晃	東北大学
犬伏正信	東京理科大学
岩本薫	東京農工大学
大島逸平	東北大学
大西領	東京工業大学
大林茂	東北大学
岡林希依	大阪大学
小河原加久治	山口大学
亀谷幸憲	明治大学
河原吉伸	大阪大学／理化学研究所
姜東赫	埼玉大学
菊地亮太	京都大学
倉谷尚志	(株) 本田技術研究所
後藤晋	大阪大学
齋藤勇士	東北大学
酒井悟	信州大学
坂上貴之	京都大学
坂本登	南山大学
佐藤允	工学院大学
薄良彦	大阪府立大学

関本 敦	岡山大学
田坂裕司	北海道大学
塚原隆裕	東京理科大学
椿野大輔	名古屋大学
中井拳吾	岡山大学
中澤嵩	大阪大学
中野直人	京都大学
中村和幸	明治大学
西田豪	日本大学
西田浩之	東京農工大学
野々村拓	東北大学
橋本智昭	大阪工業大学
長谷川洋介	東京大学
服部裕司	東北大学
深淵康二	慶應義塾大学
藤井孝藏	東京理科大学
松田佑	早稲田大学
守裕也	電気通信大学
村井祐一	北海道大学
村松鋭一	山形大学
焼野藍子	東北大学

安炳辰	荏原製作所
加藤宏基	株式会社SUBARU
倉谷尚志	(株) 本田技術研究所
峰岸聖	株式会社朝日 F R 研究所
村瀬太郎	株式会社荏原製作所

尾亦範泰	宇宙航空研究開発機構
杉岡洋介	宇宙航空研究開発機構
瀬川武彦	産業技術総合研究所
高橋俊	東海大学
中井公美	産業技術総合研究所
松岡大祐	海洋研究開発機構
三坂孝志	産業技術総合研究所
松沼孝幸	産業技術総合研究所
三好建正	理化学研究所

# 今後の活動予定

---

- 研究会（春） 3月頃を予定
- 研究会（夏） 8月頃を予定
- 自動制御連合講演会@東北大, オーガナイズドセッション 10/7-8
  
- チュートリアル（平衡実現？）
- 研究会における学生の発表の有無（？）
- 招待講演はより長いほうがよい（？） 議論の時間をもっと取ったほうが良い？
- 企業の方からの要望？より企業の方に参加してもらうには？
- 平日？土日？

# 本日のプログラム (13:00-開始します)

- 13:00-13:10 野々村拓(東北大学) 「研究調査会状況説明」
- 第1セッション(司会：野々村拓)
  - 13:10-13:50 招待講演, 犬伏正信(東京理科大学), 「データ駆動型手法による流体乱流の低次元化  
～力学系理論の枠組みで考える限界と可能性～」
  - 13:50-14:30 招待講演, 河野佑(広島大学), 「微分平衡実現に基づく非線形制御モデルの低次元化」
- 14:30-14:40 休憩
- 第2セッション(司会：椿野大輔)
  - 14:45-15:25 招待講演, 河原吉伸(大阪大学), 「クープマン作用素を介した動力学のデータ解析と機械学習」
  - 15:25-16:05 招待講演, 佐々木康雄(東北大学), 「流れ場に対するモデル予測制御と機械学習を活用した制御系設計」
  - 16:05-16:25 総合討論 (主に研究調査会への要望など)
- 名字名前(所属略称)としてください
- 質問はチャット欄への書き込みか挙手ボタンでお願いします。
- 発表者以外は基本カメラオフでお願いします。
- **12:55分くらいまでBreakout Roomに談話室(3部屋)を開いています。ご自由に利用ください**