



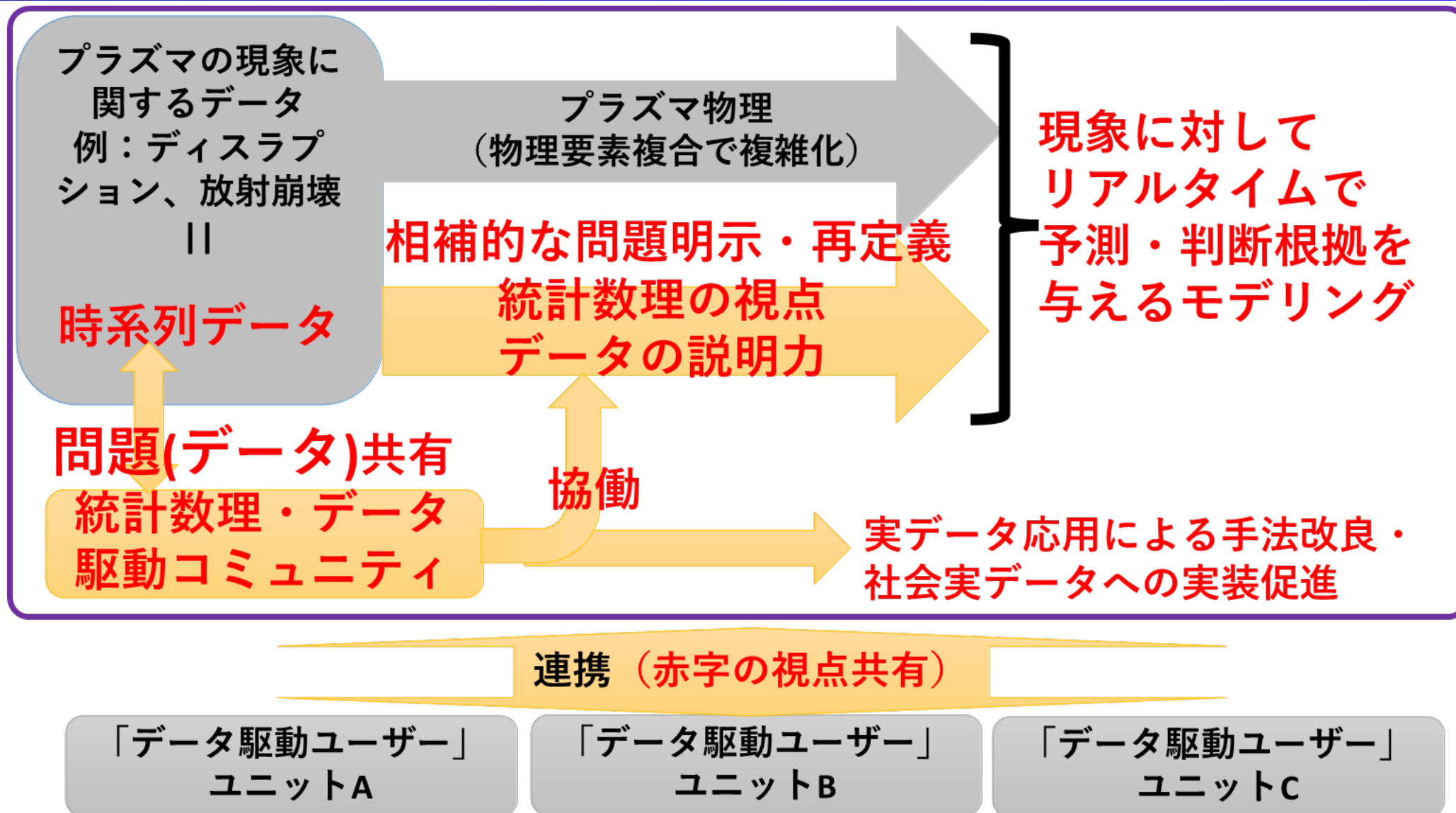
## 2.データ駆動による予測・判断志向研究を通じたサステナブルプラズマ制御への挑戦

- 核融合プラズマの諸現象を題材として、プラズマ物理での理解追究と相補的に、「データへの当てはめ」という統計数理・データ駆動の考え方を採り入れて、リアルタイムで予測・判断**根拠**に使うことができるモデリングを行う。これにより、核融合炉に求められる定常安定プラズマの実現を目指す。
- 再提案書（データ駆動予測・判断学）レビュー
  - 「予測・判断学」は、problem definitionがおかしいと考えられる。予測は（あらゆる科学がするものだから）あらゆる科学のなかで「何をどのような方法で」が問われる。一方、「判断学」は、人間の判断を対象とする学問だと思われる。それはそれでありうる学問だし、新規に開拓できる分野であろう。ただし、それは、数理科学を超えた対象や分野や方法をカバーする学問であるはずと思う。⇒**統数研共同研究集会・自然科学研究機構分野融合ワークショップでの研鑽**
  - 個人的な思いは捨て去り、大ユニットを構成し、その中で、いくつかの小グループの活動を積極的に進めるとともに、お互いのグループ間で密に情報交換をするだけの度量を持つこと
  - データ科学を「用いる」ことによって何を旨とするのか明らかにし、その目的を共有する他のユニットと連携することが適切である
  - 単独の評価は最終的なものとしてDとしたが、ユニットの構成要素としての価値は高い。



# 核融合研究における位置づけ

- 【背景】 プラズマ物理の基礎方程式やモデル、それらの複合でもデータを説明しきれていない、また、複雑すぎてリアルタイムでの予測や判断に活用することが困難と考えられる多様な問題
- 【着想】 現象にまつわるデータの説明力を高める研究軸【データ駆動】を導入
- 【展望から見た現状】 計測や制御ノブが限定される原型炉や商用炉に向けては、活用できるデータ種は現在と比して少なくなっていく。このため、**多層（固体～プラズマ、物理階層）・高次空間スケールにわたるハイレベルなデータが豊富である今（理想的なデータ駆動研究環境）**のうちに、プラズマ挙動予測や事象発生時の判断（根拠を与える）志向のモデリングという研究動向を興し、データ・変数縮減がモデルの質にどのように影響を与えるかを定量的に掴んでおく必要
- 【特長】 核融合プラズマ研究の特長は、プラズマ物理という学術基盤が構築されていることである。対象の中身がよくわからないので、制御パラメータを用いた複数モデルのデータへの当てはまりのよさ・予測性能を定量的に評価する情報量規準が生み出された状況とは異なっている。しかし、核融合研究はこの先、中身を詳細に測ることが困難な時代を迎えるので、**情報量規準のような考え方の重要性**が増すものとする。

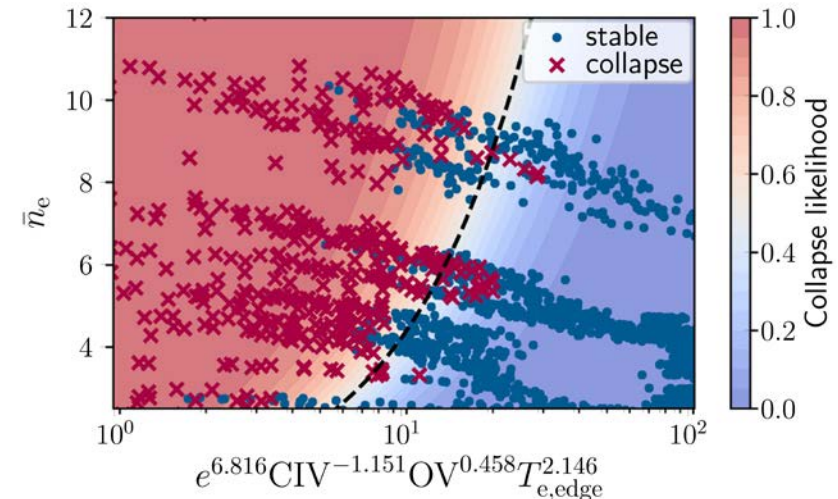
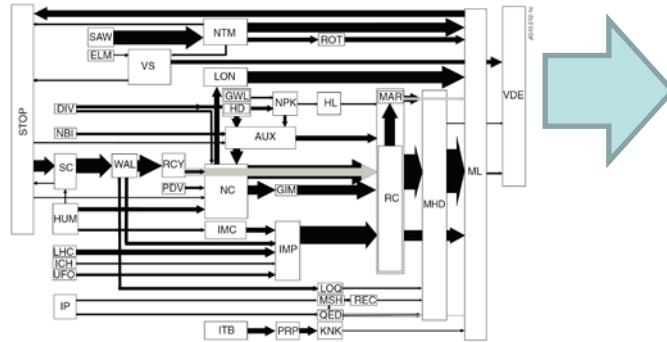


## ■ 【放射崩壊予知（さらに制御実証へ進展）】

東大大学院生・横山氏らの研究

➤ 学際的着想、学際的議論

P.C.deVries+, NF 51 (2011) 053018.  
JETにおけるディスラプションに至る過程(統計)

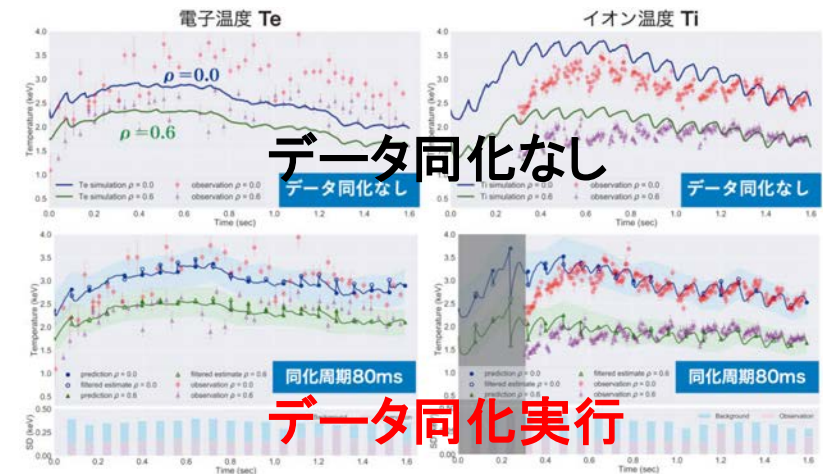


T. Yokoyama+, J. Fusion Energy, 39 (2020) 500.  
スパースモデリングに基づく「分類」問題

## ■ 【データ同化（制御アルゴリズムの先駆け）】

京大大学院生・森下氏らの研究

➤ 学際的着想、気象庁・理研・統数研などの研究者で構成されるデータ同化ワークショップでの招待講演：すでに学際化

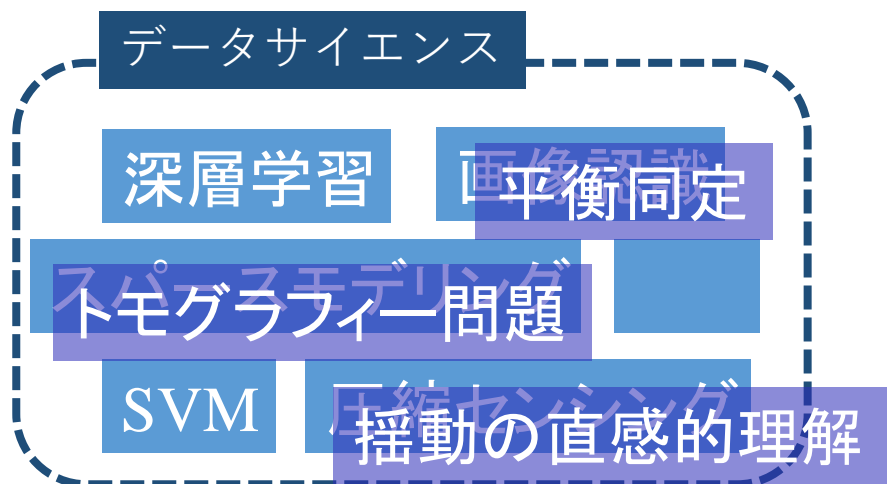
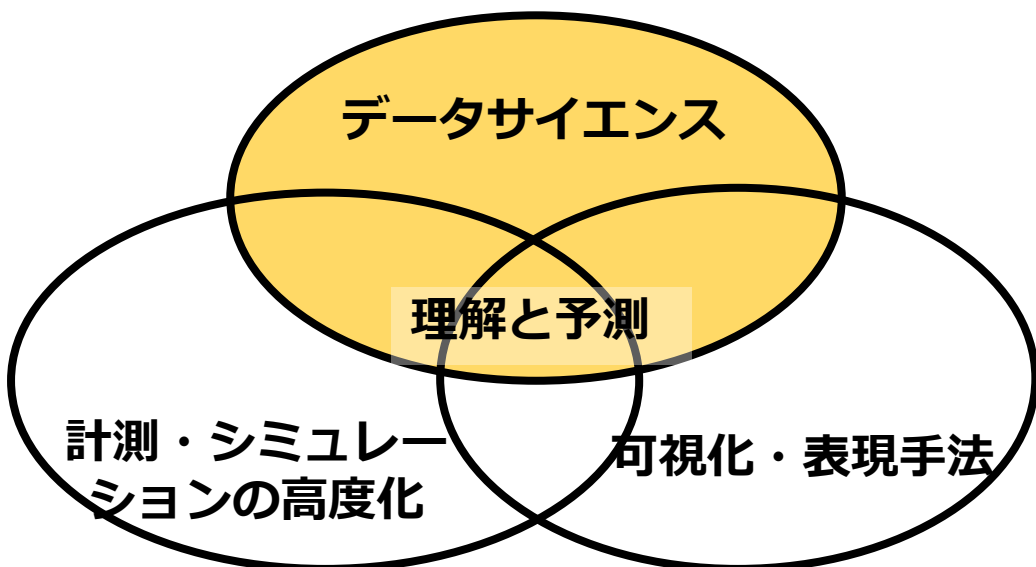


Y. Morishita+, プラ・核学会小特集 97 (2021) 72.など  
データ同化、輸送モデル妥当化、放電全体の温度挙動再現

- プラズマの現象を、「データ」「データ駆動的な手法」の言葉で再定義。  
統計数理やデータ駆動分野を通じて、多様な分野との学際研究を展開
  - 多次元時系列データ、データ同化、特徴抽出、情報量規準、統計的機械学習、転移学習、入力-出力応答、挙動パターン、、、
  - 「データ駆動」研究が有する「予測性・外挿性」の問題に、実証を伴いつつ挑戦  
“スケーリング則”は本当に“スケーリング”できるのか？回帰の外挿（性能向上）？など。  
統計的重要変数の選択と物理的解釈性の両面から攻めることができる
  - 精緻な実験と計測，第一原理理論シミュレーションという他の複雑系にはない有利な特長を、本ユニット軸で最大限活用し、他の複雑系研究へのインパクトをもたらす



# データサイエンスの核融合研究への応用 大舘暁



データ科学と物理学を結びつけることで新しい洞察を得て、プラズマ・核融合研究に大きな進歩をもたらすことができると考えている。

## ◆データからの法則性の発見

- 物理量間の相関をデータから発見（例えば未解明のMHD不安定性の発生条件の検出）→プラズマ物理理解の促進
- 理論と比較できるように全データから意味のある構造・データの抽出

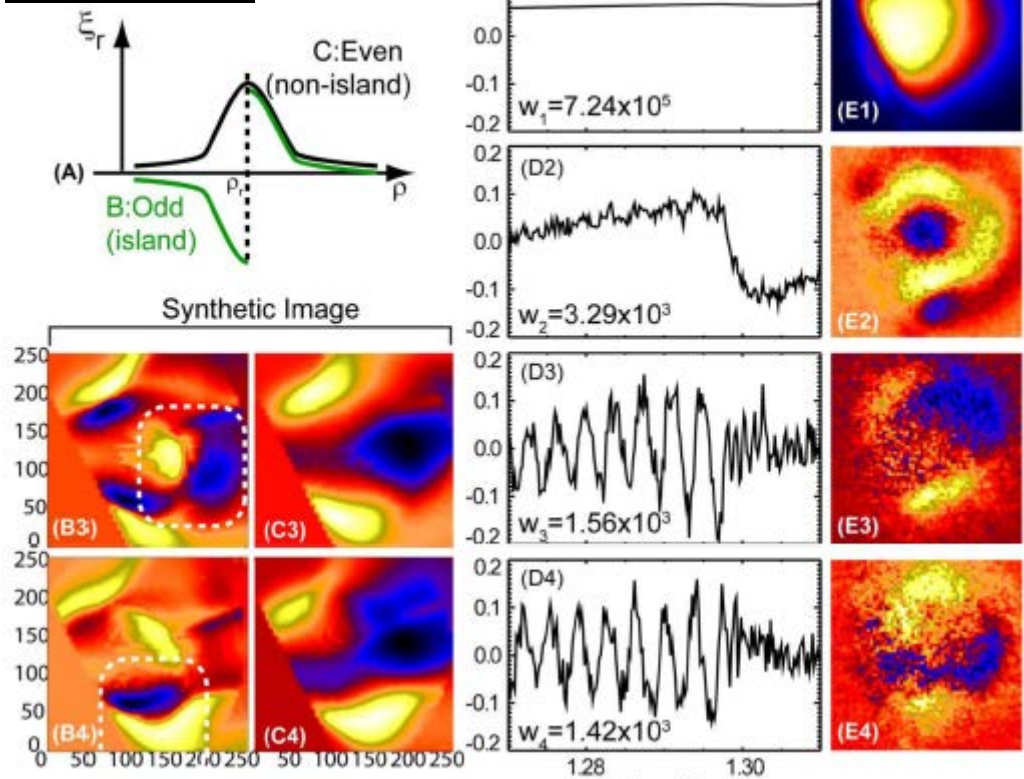
## ◆データの構造の透視と分解

- トモグラフィー計測からの内的変数の可視化
- 炉心プラズマの制御に不可欠な制御パラメータの抽出

手法の深化 ⇒ 科学としての一般化、他分野への波及

# 揺動データから意味ある構造の抽出

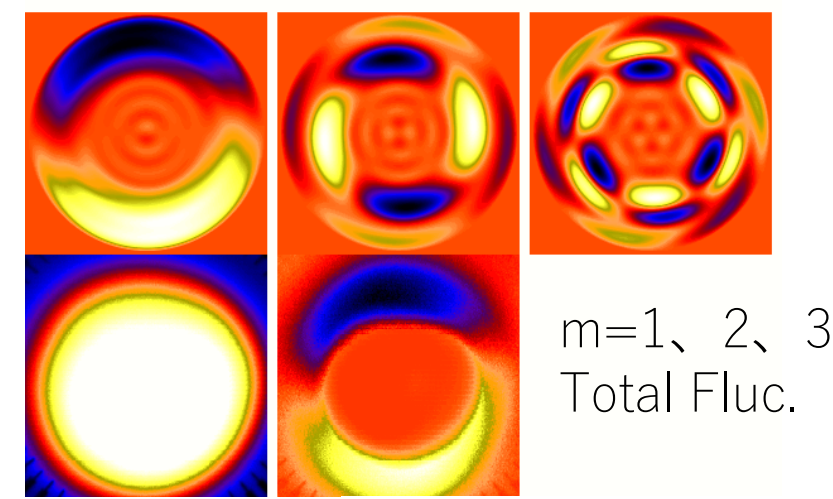
## LHD



## PANTA

線形成長率の大きなBのモード以外に多数のモードを観測。m=-1のモードが揺動をレギュレーションしている。モード間結合を実験的に観測した。

直線装置Panta  
軸方向からの観測

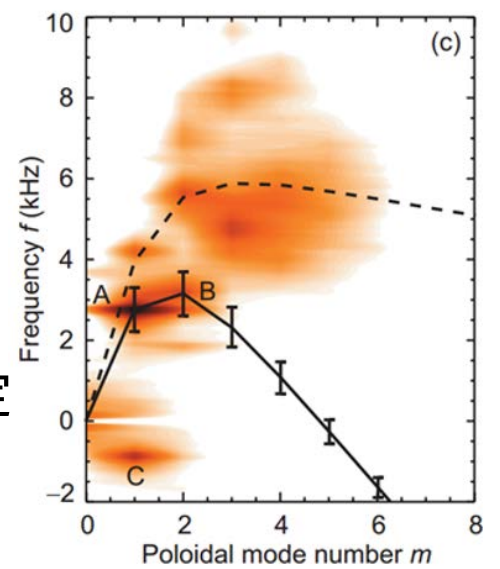


揺動の構造抽出により

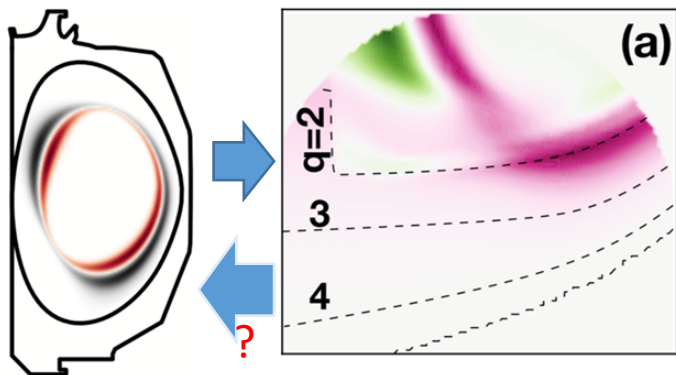
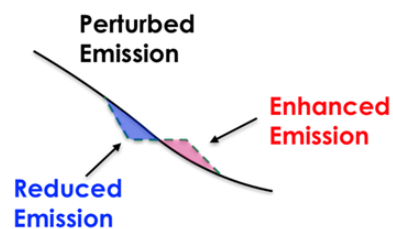
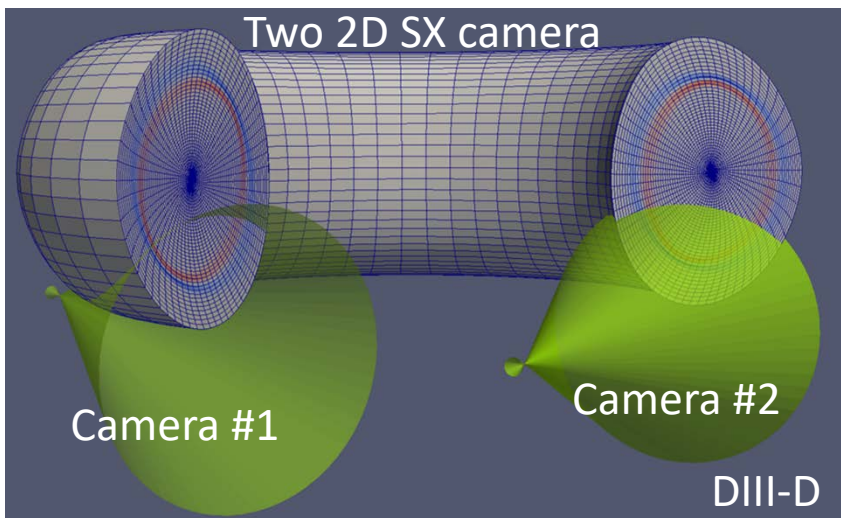
- 揺動の空間構造
- 局在化した揺動
- 波数測定
- 伝搬方向から径電場の推定等の多くのメリット

LHDで観測されるsawtooth

- 成分抽出によりプリカーサーモードの回転を確認
- モード構造との比較で交換型モード的な径方向構造

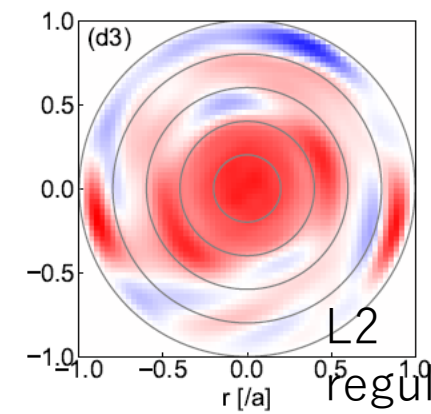
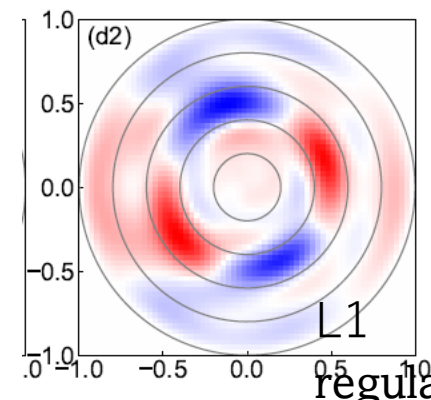
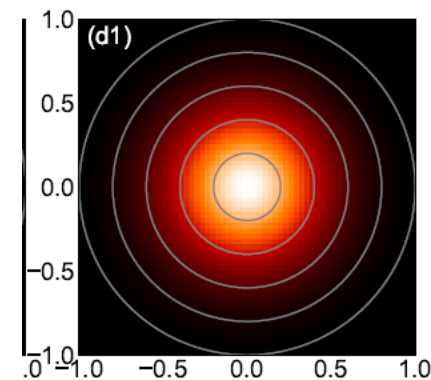
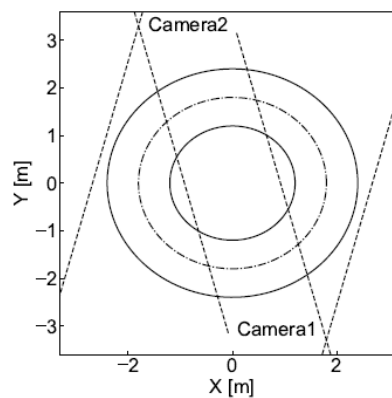
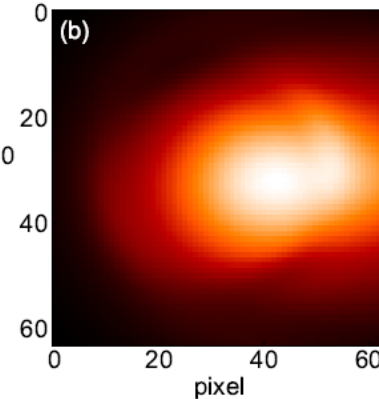
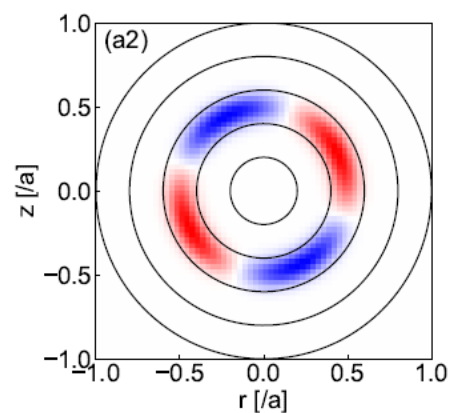
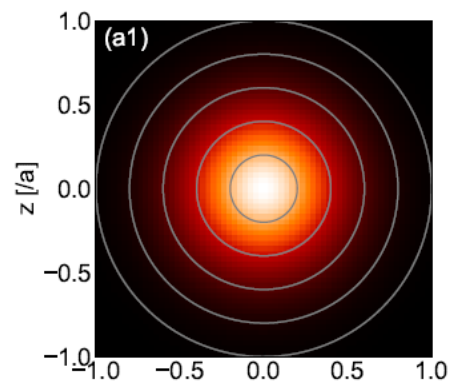


# トモグラフィーによる内部構造推定



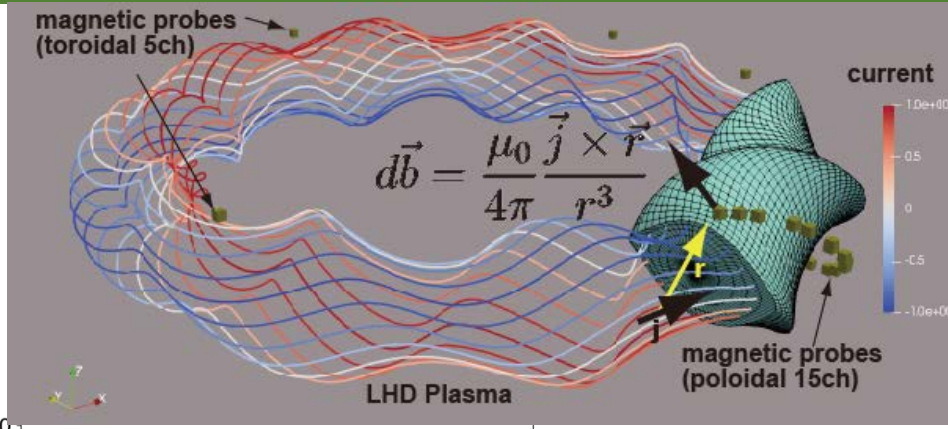
DIII-D の磁気島検出用に開発中

- ◆ 直交関数分解と正規化の組み合わせ。
- ◆ Sparse Modeling (L1)により有効な再構成手法の可能性が出てきた。



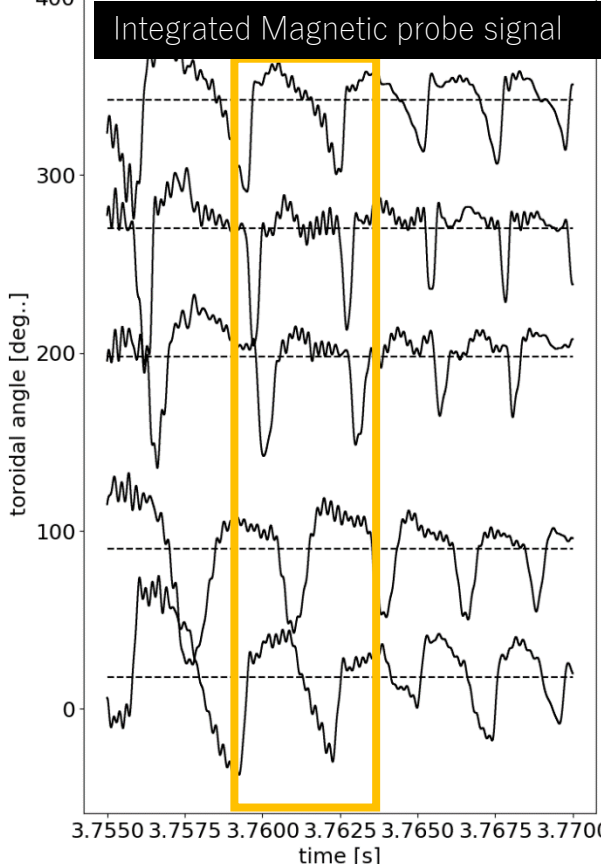


# 核融合プラズマ計測はトモグラフィー問題の宝庫

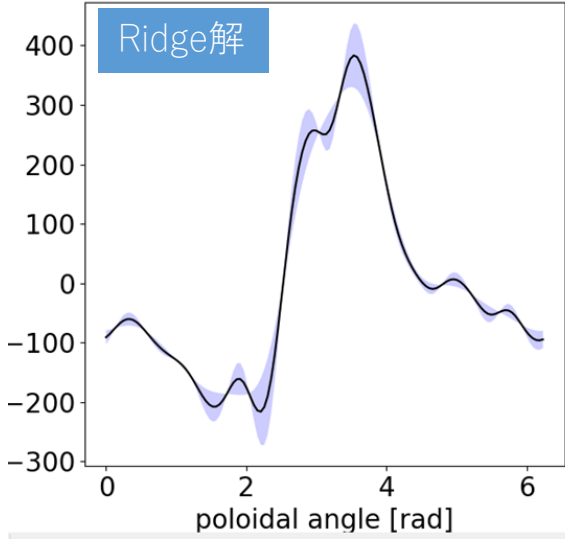


◆ プラズマの外部からの計測で内部情報を推定する必要がある。データサイエンスの手法の良い応用例

◆ イメージング以外にもプラズマの内部構造を推定する必要は高い。(揺動電流推定の例)

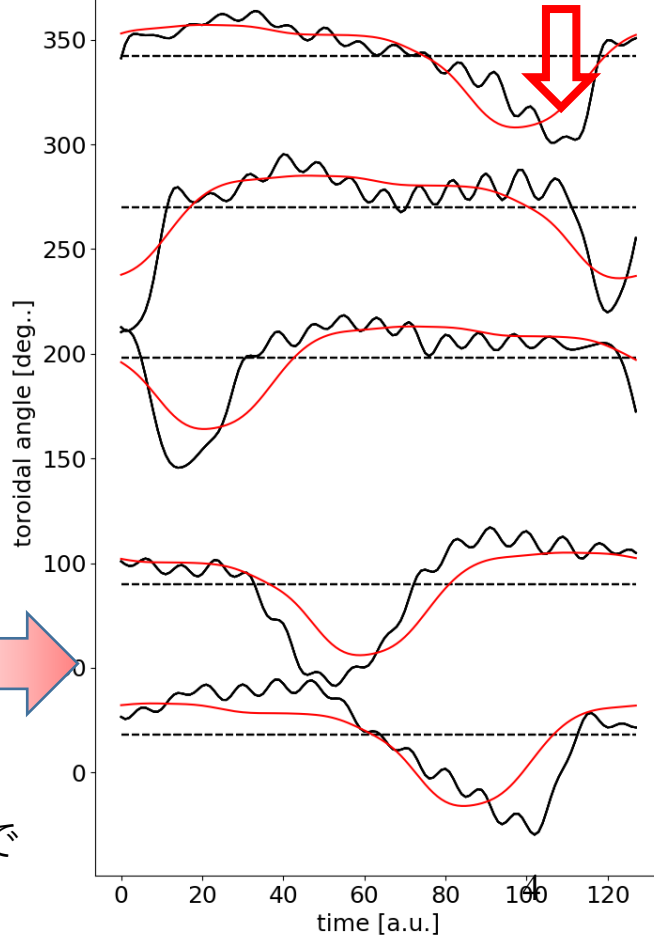


Estimated current density



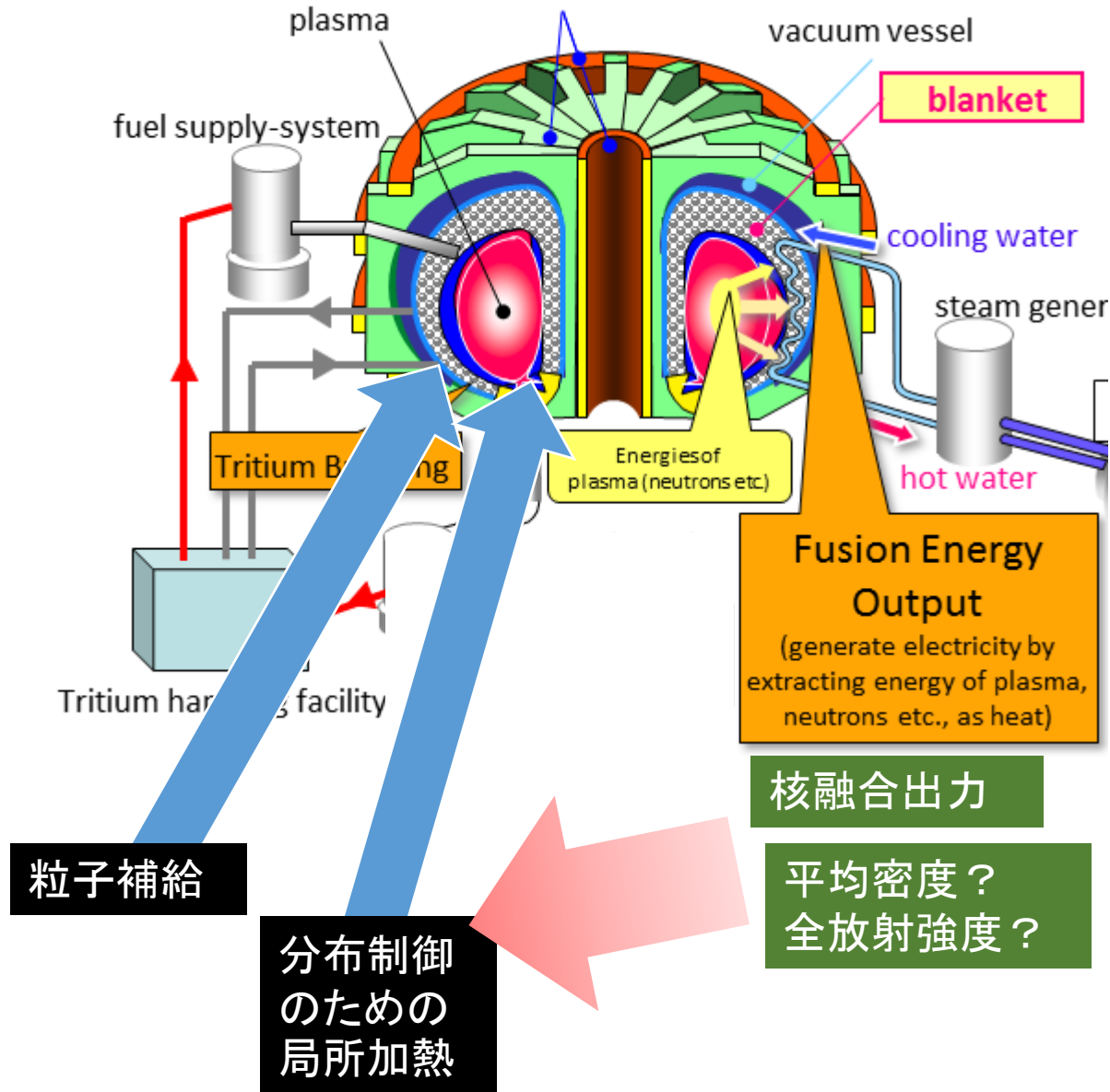
データサイエンスの手法で誤差評価を合理的に行う。

Signal assuming the current profile



◆ データサイエンスと最新計測の組み合わせは強力な枠組みとなる。

# 核融合炉における定常運転とその制御



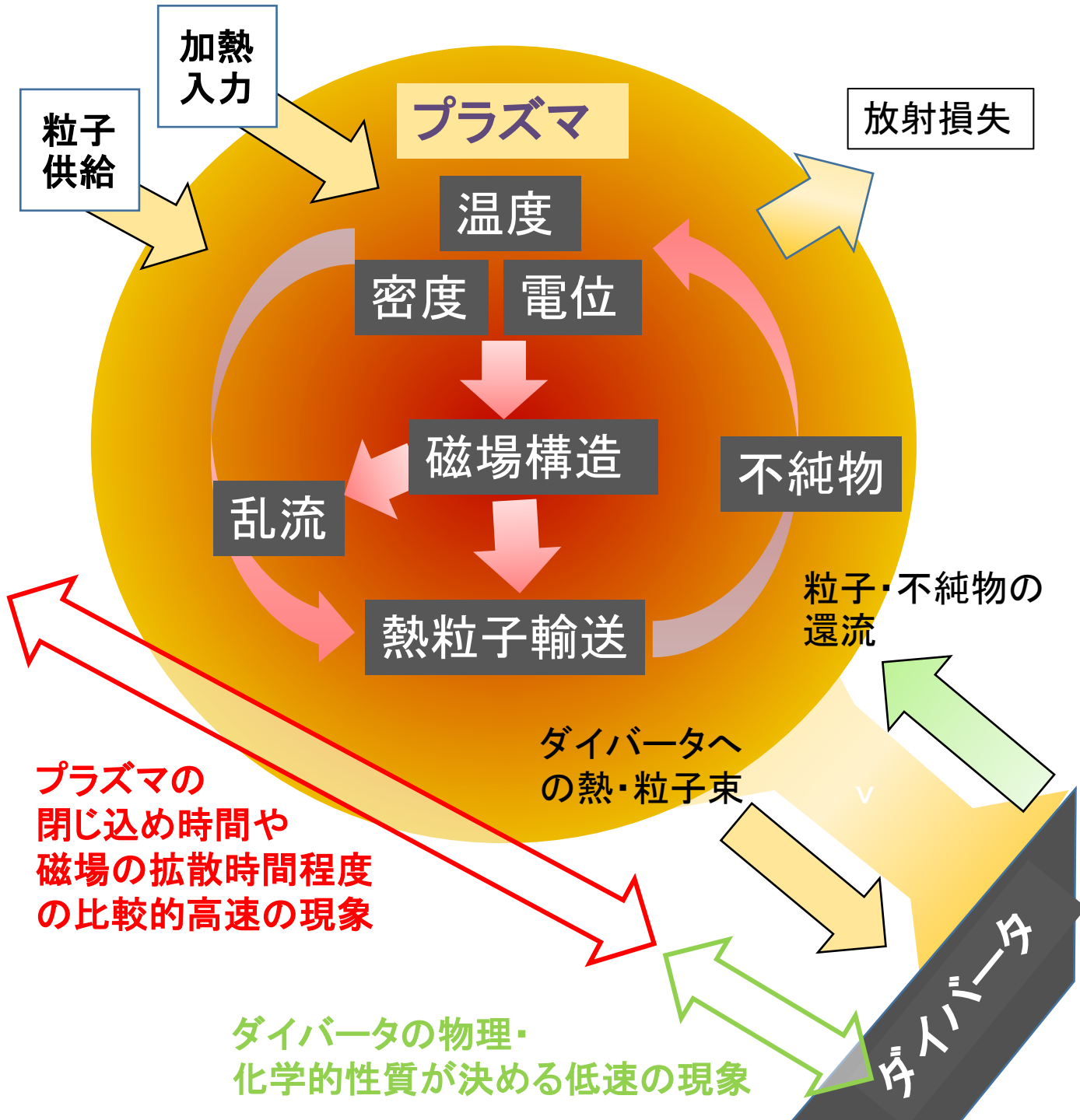
- ◆ 将来の核融合炉では非常に限られた計測手段を使って放電制御を行う必要がある。
- ◆ さらに制御を行うノブは非常に限られている。
- ◆ 計測データを使った直接のフィードバック制御はおそらくうまくいかない。
- ◆ 限られた計測手段からプラズマの状態（分布）がどうなっているかを推測し、ある制御手法がどのようにプラズマを変化させるかを予測しつつ制御をかける必要がある。（難易度極めて高い）

プラズマの放電は、時定数の異なるさまざまな物理的、工学的過程を内包し、しかも自律性を有する複雑な現象であり、制御ノブに対するプラズマの応答を完全に理論的に予想することは難しい。

機械学習を使って、単純化したプラズマモデル、例えば、

コアプラズマ + 周辺プラズマ + ダイバータープラズマ

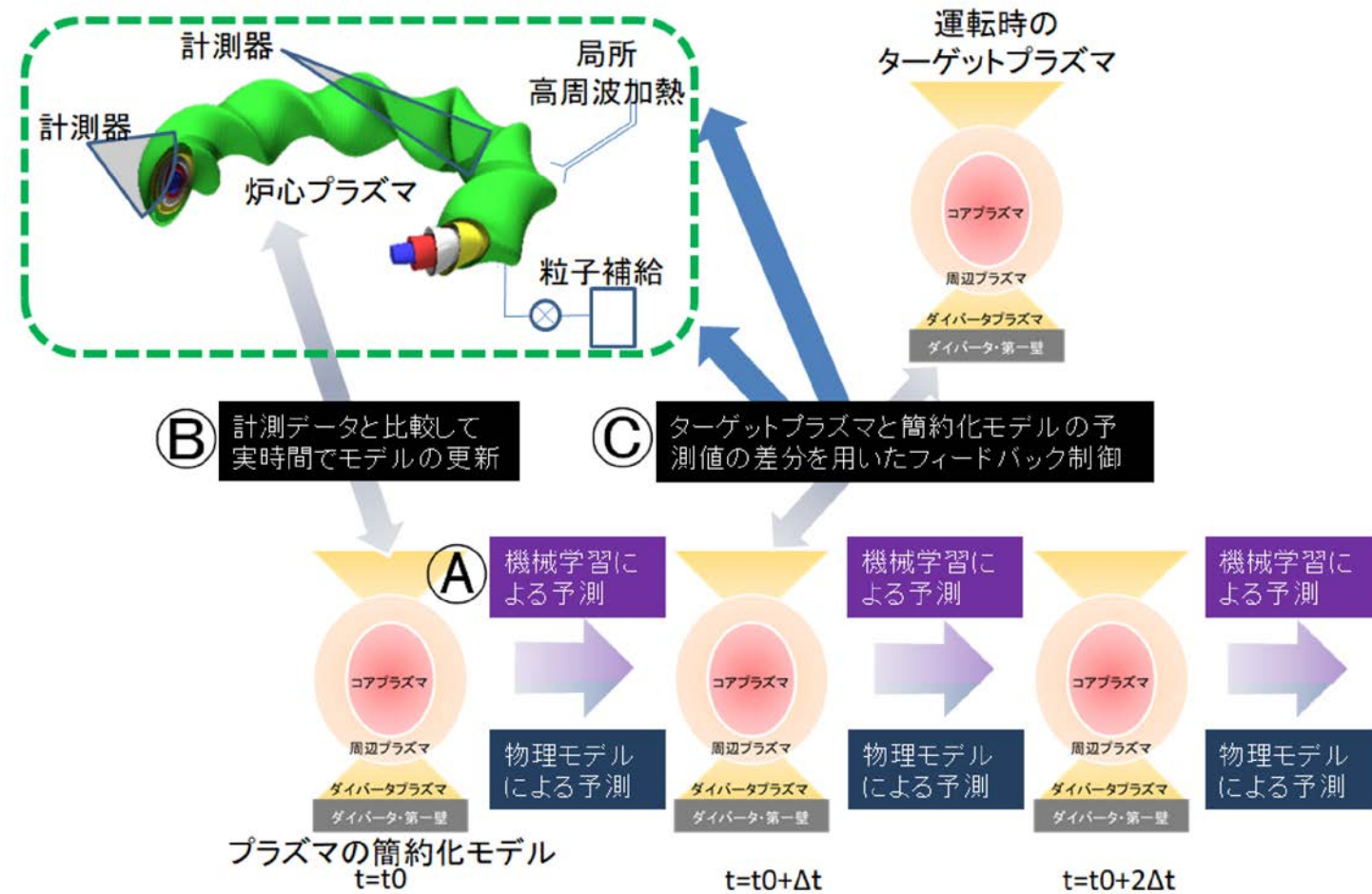
といったモデルで近似して外部制御のノブへの応答をこれまでのプラズマ実験データを学習させる。



プラズマの  
閉じ込め時間や  
磁場の拡散時間程度  
の比較的高速の現象

ダイバーターの物理・  
化学的性質が決める低速の現象

# 長時間プラズマ保持のための制御

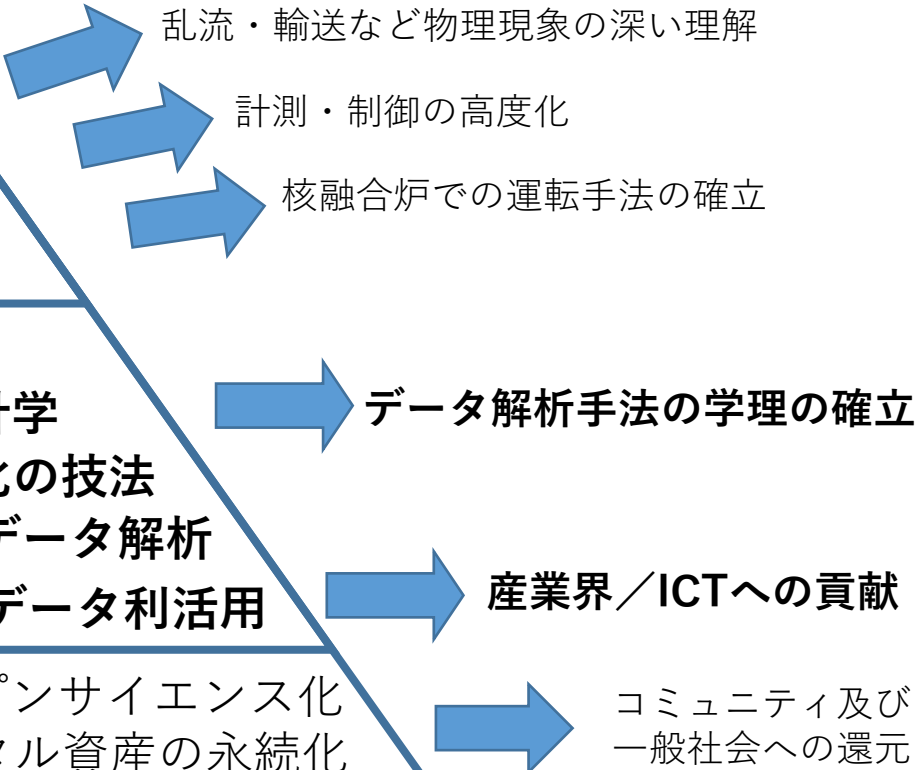
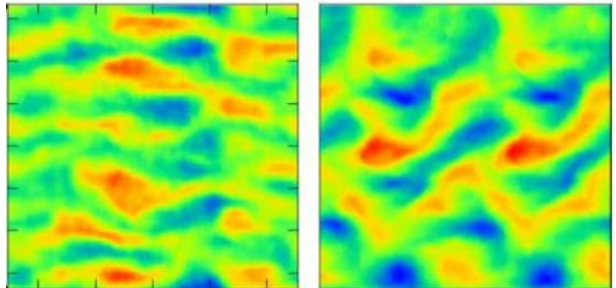


◆物理モデルと物理モデルがカバーできない領域は機械学習による過去データの学習による予測でカバーして制御を行う。

◆LHDの過去データ（電流の効果なし）でまずテストを行う。



# 革新計測と大規模データデータ科学



複雑かつ大規模なデータから人間が理解可能な構造を抽出する

- プラズマ乱流データの解析
- トモグラフィ解析
- 深層学習とディスラプション等イベント予測
- 高次元シミュレーションデータからの構造抽出
- データ同化シミュレーション etc.

## 研究を構成する学理・環境

国内のプラズマ実験の統一されたデータ提供環境

ビッグデータ・マネジメント  
データ・マイニング

## 機械学習

数理統計学  
可視化の技法  
時系列データ解析

## 超分野の大規模データ利活用

## 基盤となる技術

- ✓ データ・セマンティック
- ✓ 機械学習(解析)計算サーバ
- ✓ 分散処理システム技術
- ✓ データアクセス方式の統合
- ✓ ITER/JT-60SAデータの利用
- ✓ 高速ネットワークデータ転送

- ✓ 核融合のオープンサイエンス化とLHD等デジタル資産の永続化
- ✓ 可視化・解析ツールのコミュニティ・ベース開発と共有
- ✓ 研究データ管理 (RDM)
- ✓ 高精度時間同期・実時間処理
- ✓ 遠隔実験技術・仮想化



ITER (@フランス) から国際核融合エネルギー研究センター (@六ヶ所村) にデータ転送 ~100 PB/y

データ転送技術: 国立情報学研究所と協

量研機構 六ヶ所核融合研究所  
核融合研六ヶ所研究センター  
ITERデータ利活用を最大化

- 国内の様々な核融合実験及びITERのシームレスなデータアクセス
- データ解析・可視化手法の共同開発や共有・再利用

## 核融合クラウド

核融合データの統一フォーマット  
オープンデータ化

データ科学への貢献と  
同研究者の参入促進