

核融合研究におけるデータ駆動アプローチから 「統計数理核融合学」へ(提案)

横山 雅之



自然科学研究機構 核融合科学研究所 六ヶ所研究センター

SOKE NDAI

総合研究大学院大学 物理科学研究科 核融合科学専攻



統計数理研究所 統計思考院 客員

QST原型炉研究開発共同研究

「核融合の大規模データを活用するデータ駆動型モデリング手法の研究」(2020年度～)

情報・システム研究機構第4期戦略的研究プロジェクト

「プラズマ物理と相補的なプラズマデータに対する統計数理モデリング」(2022年度～)



「大規模熱輸送解析データベースを活用した核融合プラズマの熱輸送モデリング」
(2019～2021年度+2年延長)

「情報量規準を用いた核融合プラズマデータの情報抽出とプラズマ物理との相補性」
(2022～2024年度)

自己紹介

横山 雅之 yokoyama@nifs.ac.jp
自然科学研究機構 核融合科学研究所
六ヶ所研究センター センター長・教授

新潟市出身

高校 物理の授業：「核融合炉ができたならノーベル賞」
京都大学ヘリオトロン核融合研究センターを知り、京大への進学を決意

1992.3 京都大学工学部 原子核工学科 卒業
1996.6 京都大学大学院 工学研究科原子核工学専攻 博士課程修了
1996.7 (当時) 文部省 核融合科学研究所 助手採用

* シミュレーションが主であったが、実験グループリーダーとなってLHD制御室に詰めたりするようになって、シミュレーションが現実とはかけ離れている面も多々あることを実感
(例: プラズマ対向壁をきれいに(放電洗浄)することで、同様の加熱条件でも到達温度が1000万度以上高くなったりする。)

* 核融合データの豊富さを意識するとともに、活用しきっていないのでは？という思いも

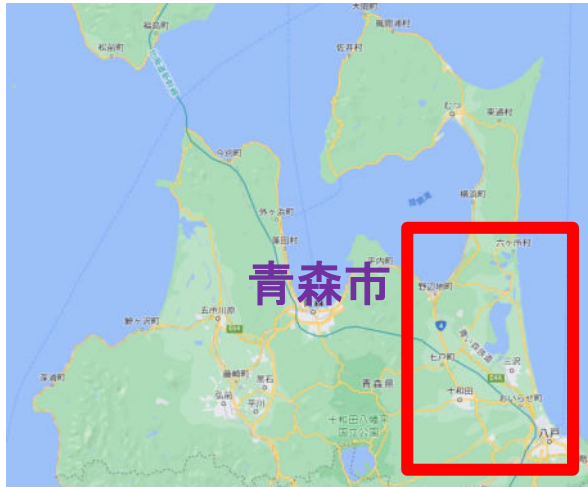
* データを基盤とした研究動向で核融合研究を加速できるのではないか、仲間を増やせるのではないか、という考え

2019.10-2020.3 統計数理研究所外来研究員

2022.4- 統計数理研究所客員教授



核融合科学研究所 六ヶ所研究センター





QST六ヶ所研究所全景写真(手前左側の建物の3階に
NIFS六ヶ所研究センターがあります。)
所在地:六ヶ所村尾駁(おぶち)

六ヶ所研究センターHP

<https://www.nifs.ac.jp/about/rrc.html>

六ヶ所研究センター

NIFSについて

2023.4.1

六ヶ所研究センター（2007年5月設置）は、ITER計画と並行して取り組まれている幅広いアプローチ（Broader Approach, BA）活動との連携・共同研究の推進、核融合原型炉開発の技術基盤構築に関し、学術的な立場から、核融合科学研究所や大学等の共同研究者の参画を支援する活動を展開しています。さらに、核融合研究の課題の学際的展開を推進するべく、研究課題の発信、学際会合の誘致、学際的な共同取り組みの推進などに力を入れています。その一例として、情報・システム研究機構の第4期戦略プロジェクト「プラズマ物理と相補的なプラズマデータに対する統計数理モデリング」の核融合分野側の拠点として、統計数理、データサイエンス関連コミュニティとのつながりを深めています。また、総合研究大学院大学（総研大）を基盤とする人材育成にも、近隣教育機関との連携を立ち上げ、また、深化させつつ、積極的に取り組んでいます。

トピックス

2023/10/16 [核融合科学研究所六ヶ所研究センターが「生涯学習フェア2023（青森市）」に出展しました](#)

2023/7/3 [核融合科学研究所六ヶ所研究センター主催 イブニングセミナー 実施のご案内（8月25日（金））](#)

2023/5/16 [核融合科学研究所が「あおもり県民カレッジ」の連携機関に参画しました](#)

2023/5/12 [核融合科学研究所六ヶ所研究センター主催 村民学術講演会in六ヶ所村を開催](#)

2023/4/14 [核融合科学研究所六ヶ所研究センター主催 村民学術講演会in六ヶ所村 実施のご案内](#)

2023/4/10 [情報・システム研究機構第4期戦略プロジェクト会合を青森県にて開催](#)

2022/10/12 [六ヶ所村の写真入りクリアファイルを作成](#)

今日のお話の内容

- “データを基盤とした”研究アプローチの大きな可能性
(演繹と帰納の話から)
- 特に、リアルタイム制御、そのための予測や判断が必要とされる課題への挑戦
- 大きな研究動向として興したい⇒「統計数理核融合学」へ
 - ✓ プラズマ・核融合学会誌記事(2023年1月)
 - ✓ 科研費 学術変革(A)申請

演繹と帰納

演繹: 法則やルール、知識に基づいて結論を導き出す

帰納: 複数の事実や事例から一般論となり得る結論を導き出す

演繹の例:

前提から事業案を膨らませる

(前提、知識) 人口が多い都市の方が一般的に平均所得が高い

⇒ (事実) A地区は人口100万人、B地区は人口10万人

⇒ (結論) 新規店舗予定地をA地区付近とする

時代遅れの前提のまましていると失敗する、、、

帰納の例:

カスタマーサービスの向上

(複数の事実、事例) クレームや不満が多く寄せられる

⇒ 共通項を探す(例: 売り場配置、従業員対応、、、)

⇒ 優先順位をつけた対応で効果的な改善

他店舗では役立たないことも、、、

科学研究における演繹と帰納

教科書の目次、基礎方程式、モデル、、、

プラズマ物理学
多階層複雑系

?

演繹

データから導き出せる知見は何？

多様な現象

帰納

合う、合わない？
合わないなら何が足りない？
⇒モデルの改良、さらに精緻な計算、
さらに計測が必要？他のケースでは
どう？、、、

現象にまつわるデータ

多分野からの参入敷居
を大いに下げる

Let the data speak!

データ駆動
データサイエンス

「データへのあてはめ」
統計数理学との協働

核融合プラズマ研究の変革期

- 核融合炉に近づくにつれて、詳細なデータは計測できなくなる
⇒「精緻な知識」が活かせない
- (プラズマ物理で)現象を全部理解・説明できないとだめ？
⇒全ての現象を説明するにはあとどれくらいの時間が必要？
- 核融合炉で制御すべき事象は？そのために測る(測れる)ものは？
⇒「核融合炉で計測できるデータに特化した研究」も重要
- 計測が充実している今のうちに、「推定」「尤度」「時系列変化」など
統計数理視点での研究を強化
⇒統計数理モデルの妥当性確認・汎化性検証
⇒物理研究とともに、リアルタイム制御研究の強化

- プラズマ状態変化の記述
- ディスラプション・放射崩壊回避
- プラズマ性能・向上

プラズマ状態変化の記述：データ同化

Courtesy of 森下侑哉氏(京大助教)ほか

データ同化手法の導入による新視点での研究展開

データ同化: 気象や海洋分野で成功を収めている当たり前の手法

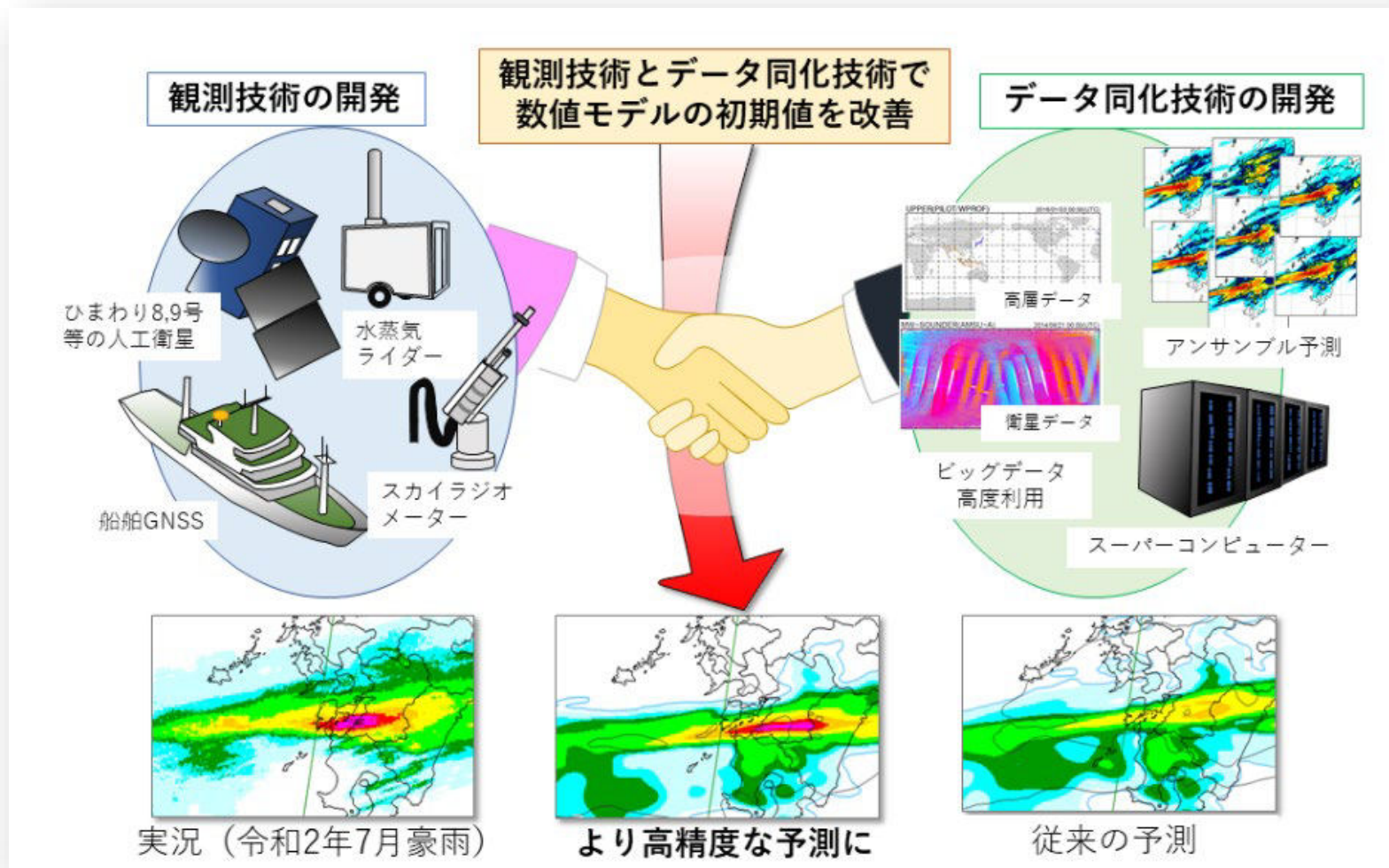
さらに進んで、データ同化「制御」アルゴリズムの構築

(データ同化コミュニティにおいても先駆的な研究: 制御を必要とする核融合分野のオリジナリティ)

熱輸送の問題への適用例を示すが、対象とする問題に関する(物理)変数を「状態変数」としてデータ同化の枠組みに組み込むことで、対象とする問題は拡張できる

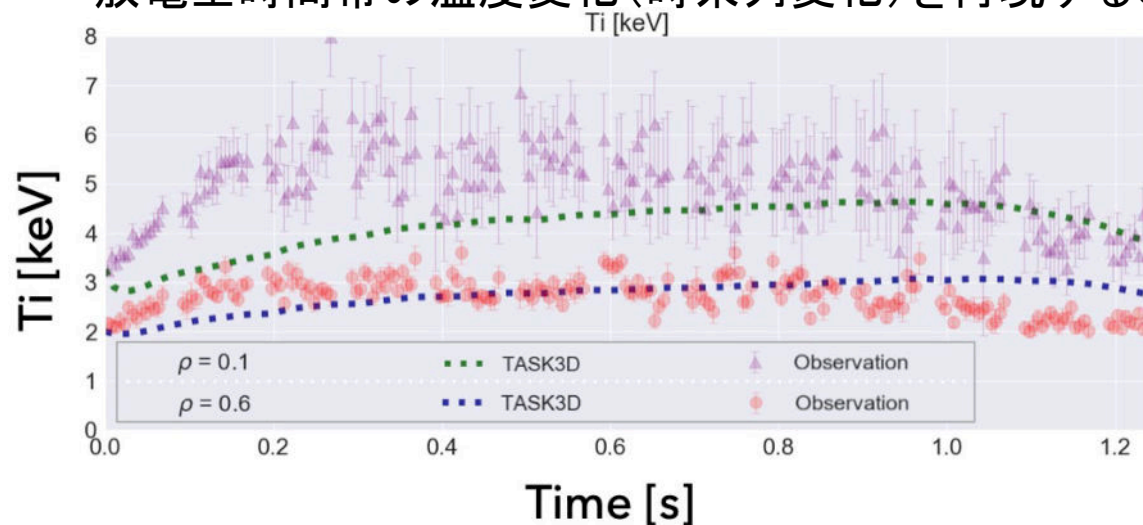
データ同化とは？

シミュレーションは現実世界をモデル化して行われるので、その結果と現実世界の間にはどうしてもずれが出てきます。そこで、シミュレーションを実際の観測データとつぎあわせ、シミュレーションの軌道(意訳:結果)を修正して「確からしさ」を高めることが行われています。これが「データ同化」です。(株式会社理研数理HP)

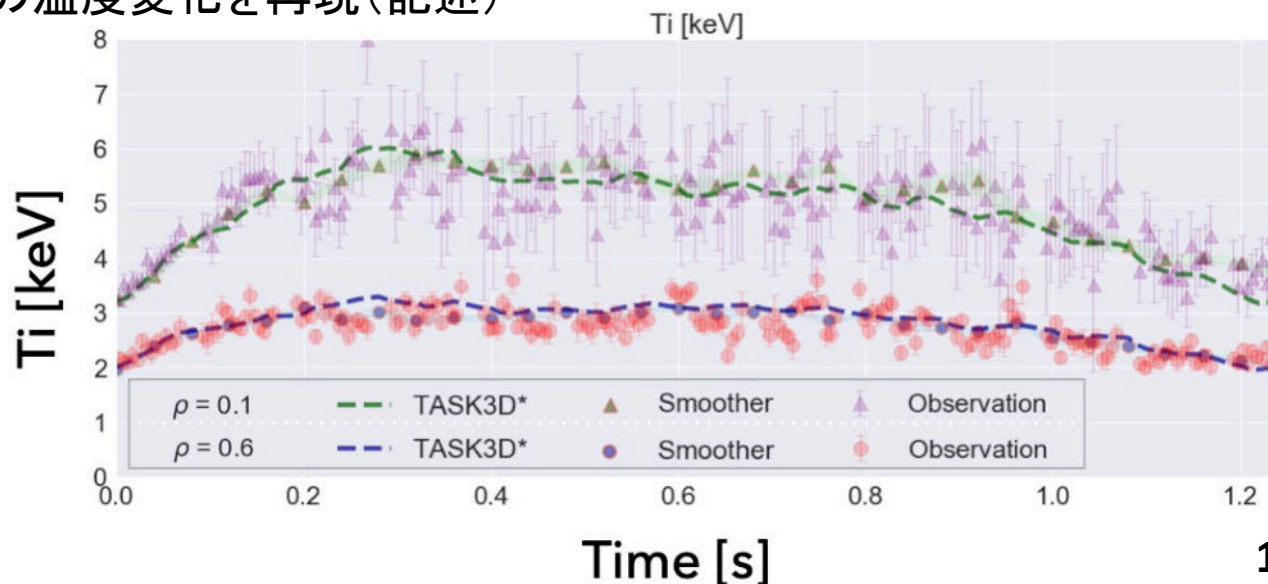


プラズマ状態：温度の時間変化

従来：何らかの熱輸送モデルや「新古典＋乱流」(大規模)輸送シミュレーション
⇒ 放電全時間帯の温度変化(時系列変化)を再現するのは困難



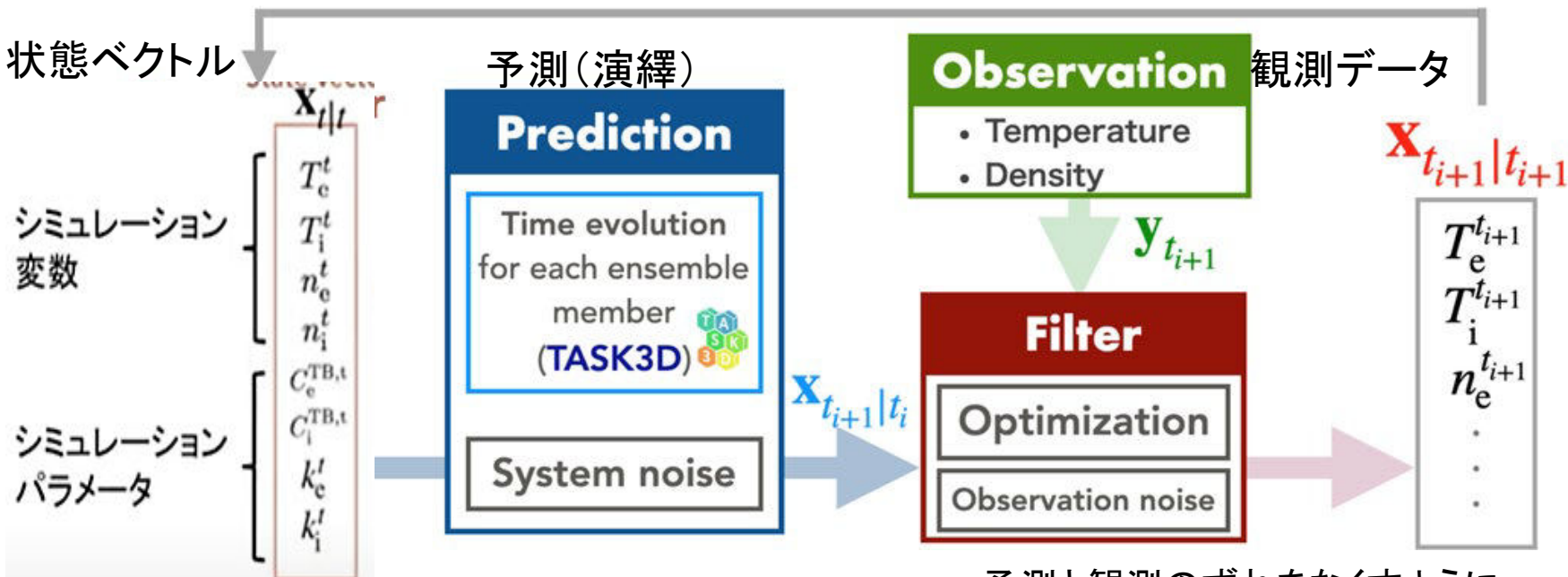
データ同化：観測データを用いた輸送モデルの“最適化(妥当化)”：“データに当てはまる”
モデル⇒放電全時間帯の温度変化を再現(記述)



核融合研究へのデータ同化手法の導入

2022年度ROIS-DS成果報告会動画

<https://www.youtube.com/watch?v=-v9k3JCHwEc>



予測と観測のずれをなくすように
モデル(Ce、Ci)を修正(妥当化)
注: 物理的に理解が深まることは全く別

しかし、この積み上げによって、次に同じような条件で実験を行った際に、すでに妥当なモデルが手元にあり、結果として予測精度が上がる

TASK3D solves the following heat transport equation.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_s T_s V^{5/3} \right) = -V^{5/3} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ V' \langle |\nabla \rho| \rangle \left(V_{K_s} + \frac{3}{2} V_s \right) n_s T_s - V' \langle |\nabla \rho|^2 \rangle \left(\frac{3}{2} D_s T_s \frac{\partial n_s}{\partial \rho} - n_s \chi_s \frac{T_s}{\partial \rho} \right) \right\} + P_s V^{5/3}$$

Turbulent model

Electron (gyroBohm) $\chi_e^{TB} = C_e \left(\frac{T_e}{eB} \right) \left(\frac{\rho_e}{a} \right)$

Ion (gyroBohm+gradT) $\chi_i^{TB} = C_i \left(\frac{T_i}{eB} \right) \left(\frac{\rho_i}{a} \right) \left(\frac{a T_i'}{T_i} \right)$

$\chi_s = \chi_s^{NC} + \chi_s^{TB}$

データ同化の流れ

状態変数の分布(確率密度)

ここで、すでに決定論的でない

ある(物理的)輸送モデル

例: $\chi = C * \text{Model}$ で

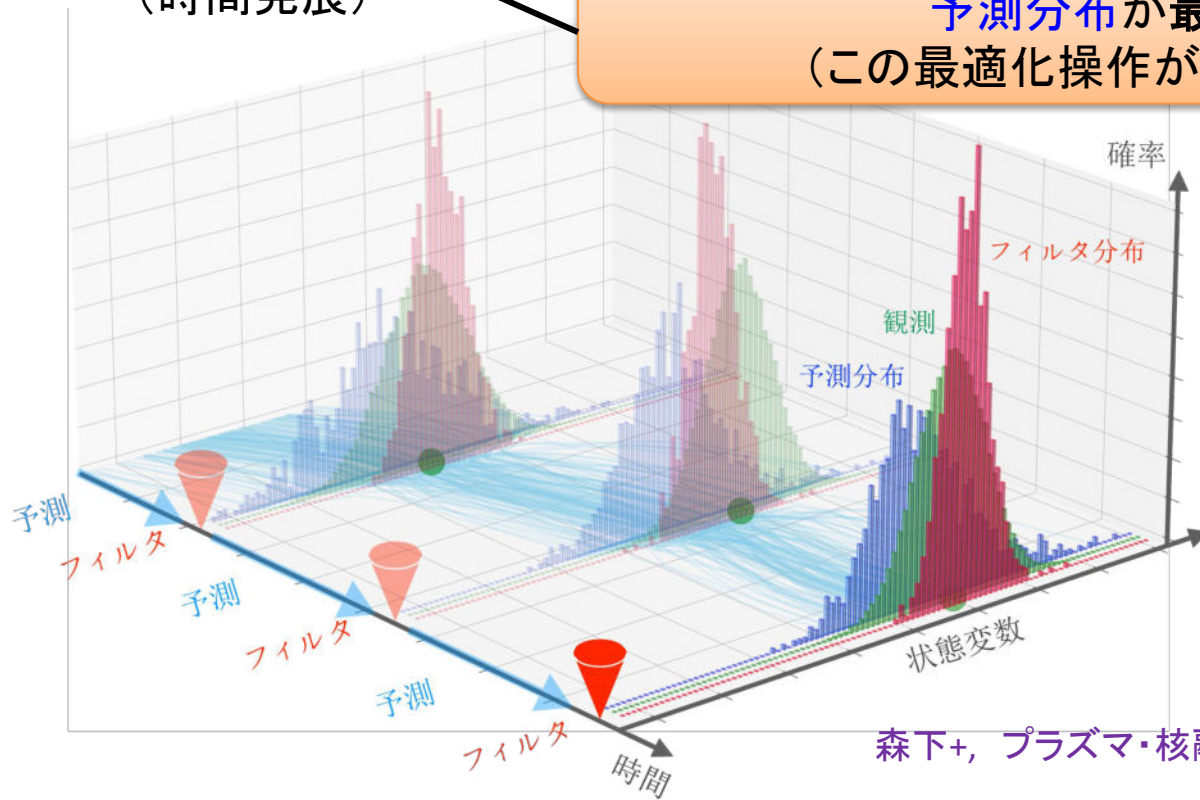
ある時刻先のアンサンブル作成: 予測分布

その時刻での“観測データ”の分布

(計測誤差のほかに、モデルが表現しきれない要素も含む)

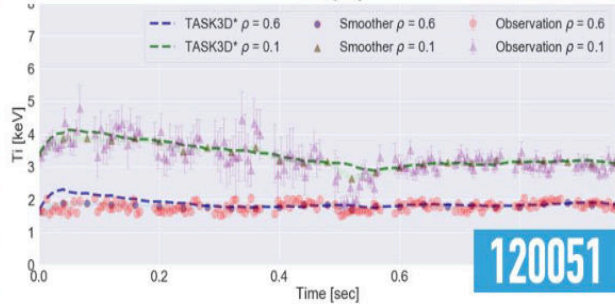
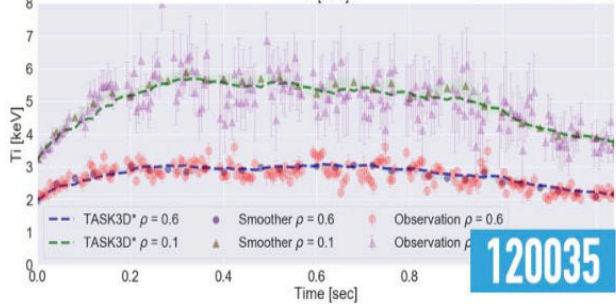
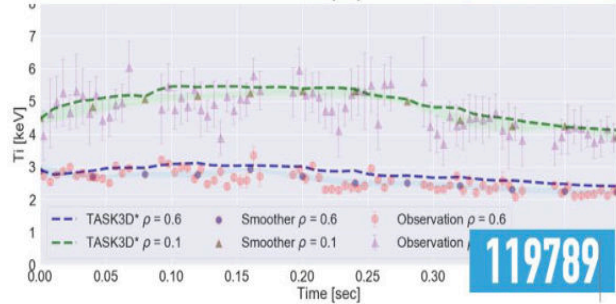
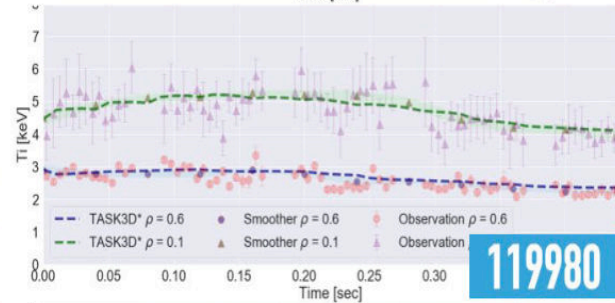
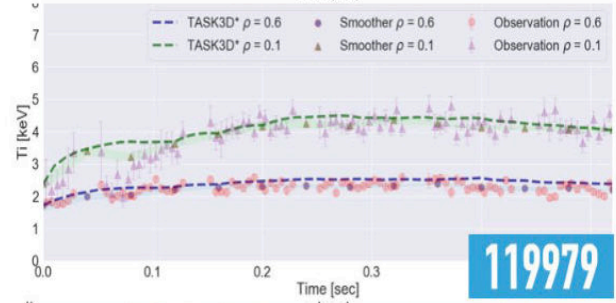
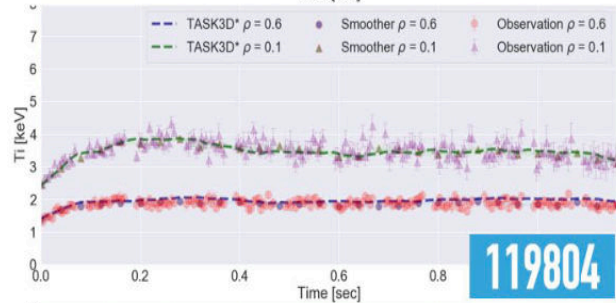
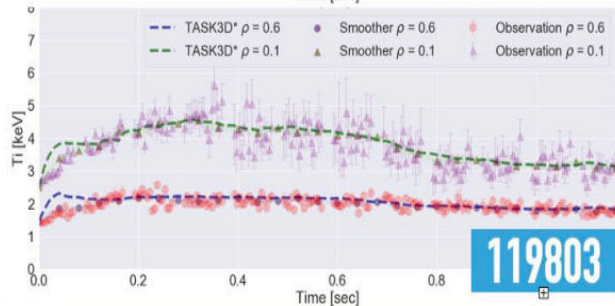
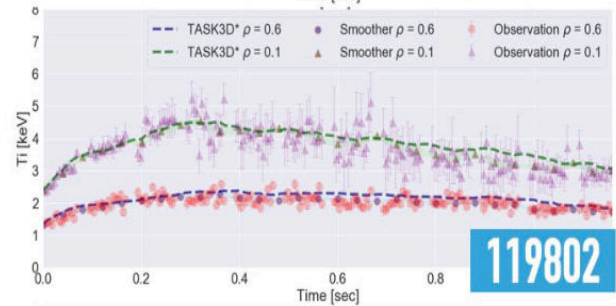
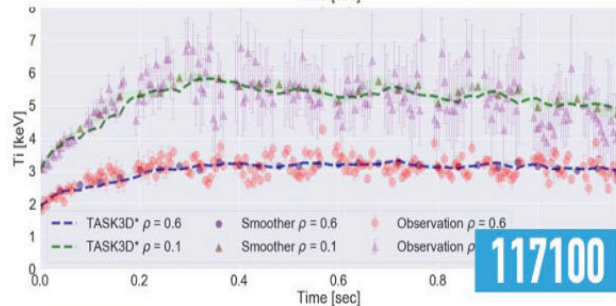
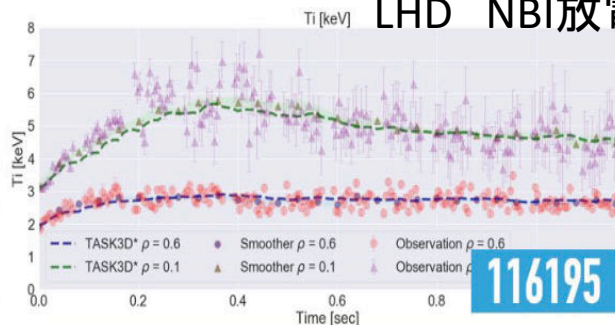
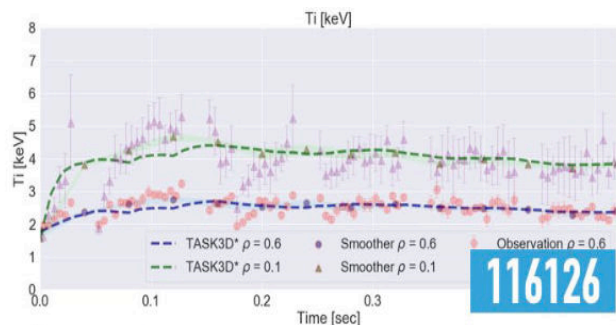
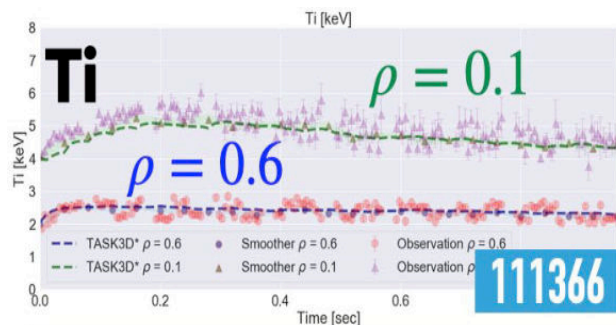
繰り返し
(時間発展)

フィルタ分布: 観測分布から評価される尤もらしさ(尤度)を基に、
予測分布が最適化されたもの
(この最適化操作が(逐次)ベイズフィルタ)



データ同化による多数放電の時間変化再現

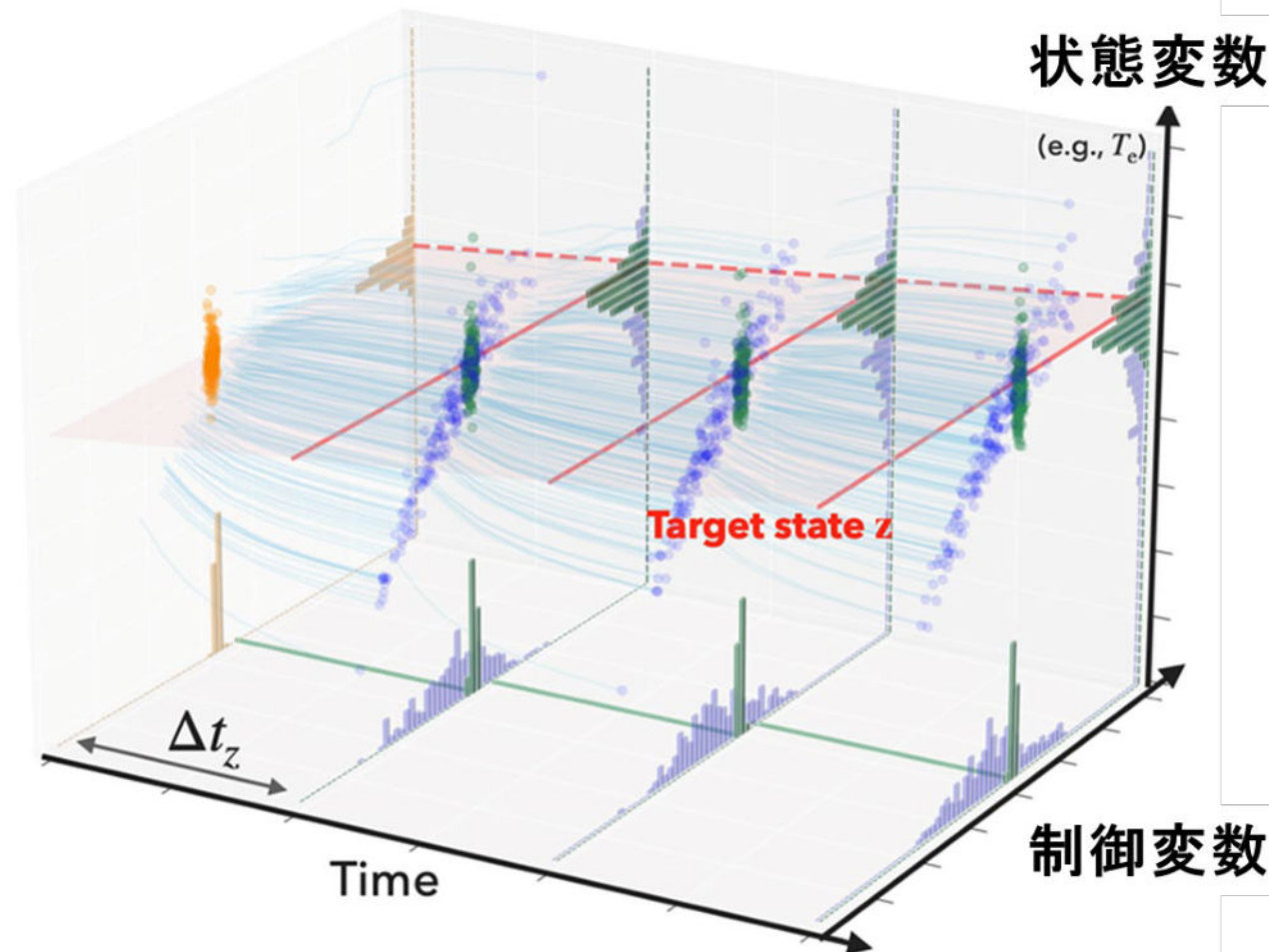
LHD NBI放電



さらに、データ同化「制御」へ

気象や海洋におけるデータ同化研究にはない「制御」の視点:核融合分野のオリジナリティ

「データ同化の流れ」に「制御変数」の次元を追加
⇒「制御済み予測分布」の導入



アルゴリズムのエッセンス: Y. Morishita+, "Data Assimilation and Control System for Adaptive Model Predictive Control", Journal of Computational Science 72 (2023) 102079.

詳解: 森下+, 「統計数理」71 (2023) 47.

ディスラプション・放射崩壊回避

Courtesy of 横山達也氏 (QST那珂研博士研究員) ほか

ディスラプション・放射崩壊: 発電停止・長期メンテナンスに直結する、
克服すべき重要な課題

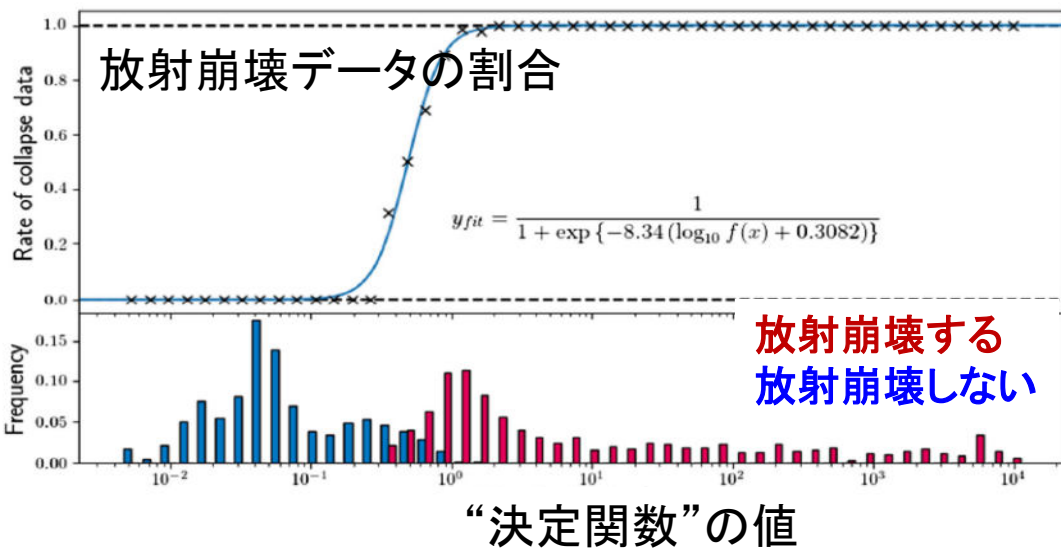
新視点での研究展開: スパースモデリングの適用

放射崩壊回避の実証

放射崩壊発生の有無を「分類問題」として見る

T. Yokoyama et al., Journal of Fusion Energy 39 (2020) 500.

放射崩壊尤度 (Collapse likelihood) の評価と発生有無を分ける境界面

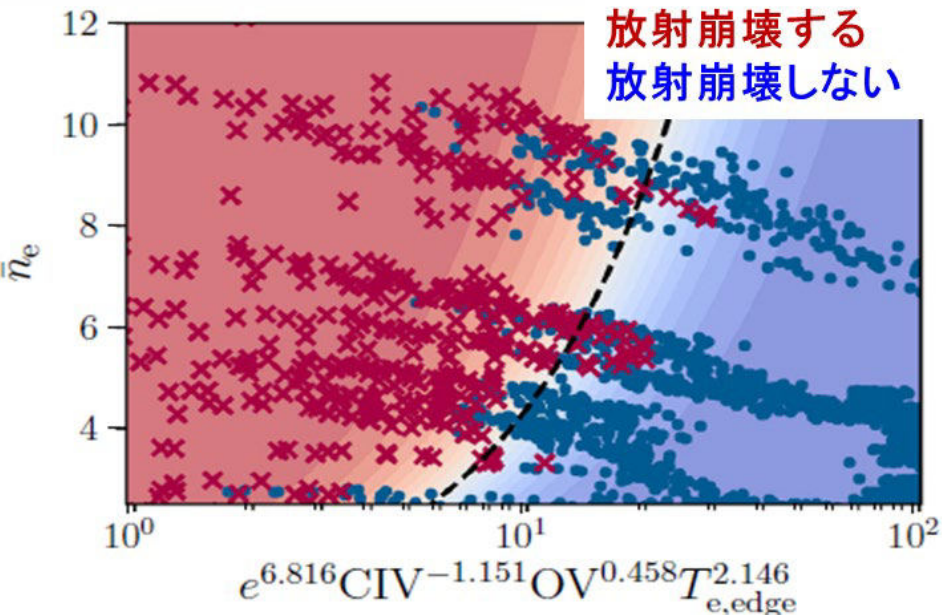
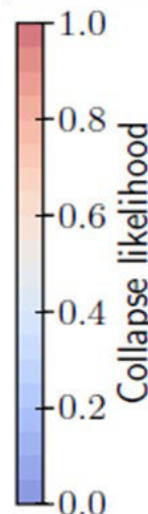


準備変数群

- \bar{n}_e
- B
- P_{rad}/P_{abs}
- P_{abs}
- β_{dia}
- Δ_{sh}
- a_{99}
- CIII
- CIV
- OV
- OVI
- FeXVI
- $I_{sat}^{(7L)}$
- $D/(H + D)$
- $T_{e,edge}$

← 全状態探索

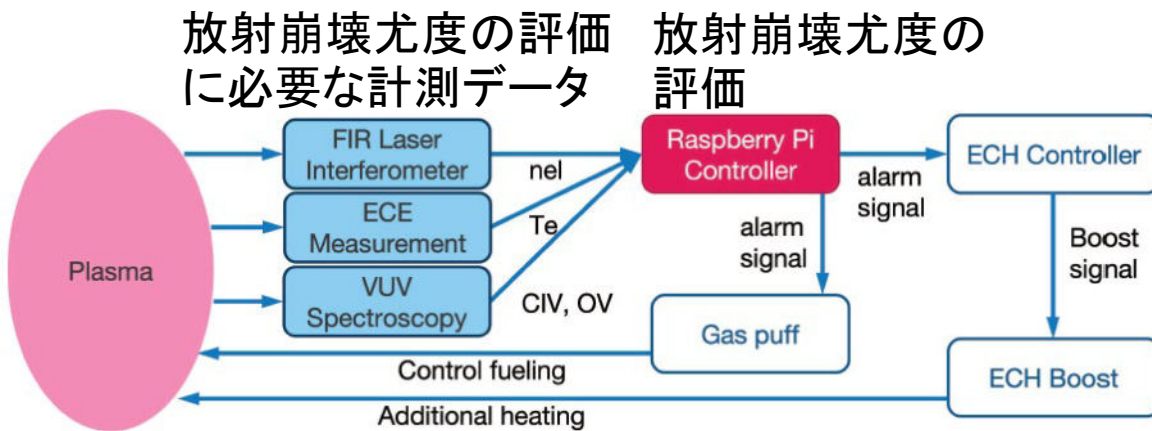
発生有無を分類する上で寄与度の高い変数を統計的に選択
⇒それらを用いた放射崩壊尤度の表式



$$\bar{n}_e (\text{Likelihood}) \propto CIV^{-1.15} OV^{0.458} T_{e,edge}^{2.15}$$

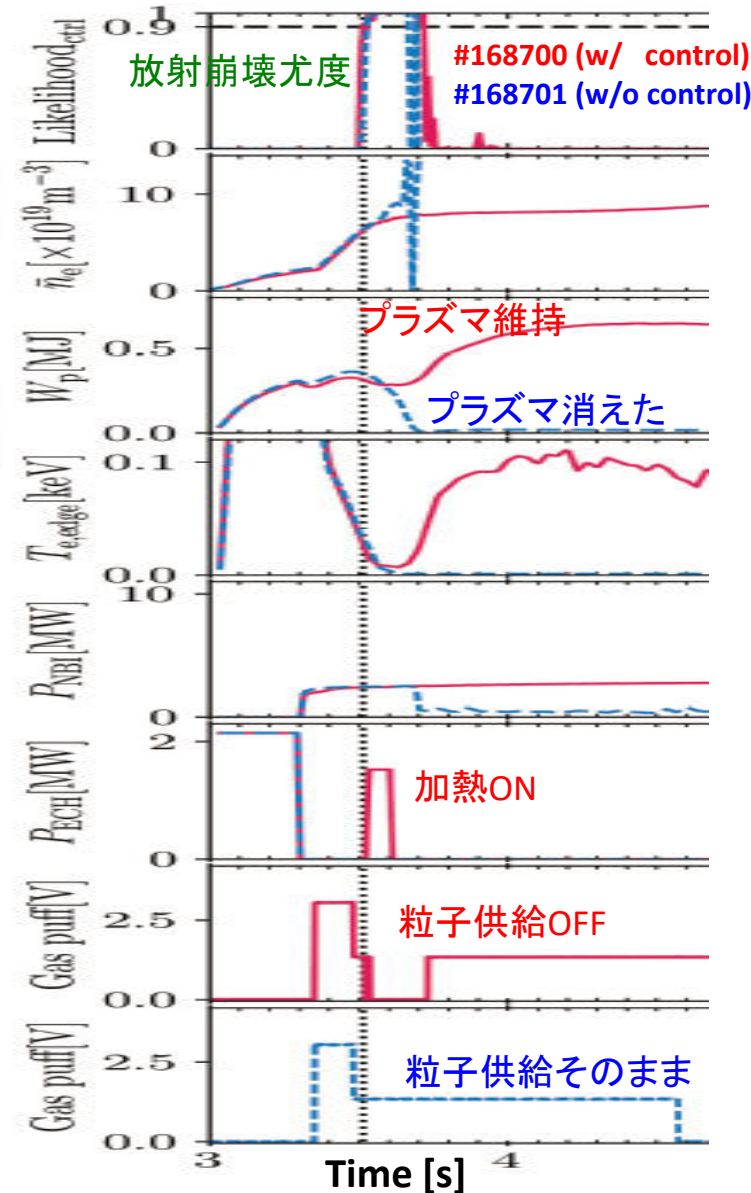
リアルタイムでの放射崩壊回避の実証

T. Yokoyama+, Plasma and Fusion Research 17 (2022) 2402042.



- 放射崩壊尤度の閾値:0.9にセット
- 閾値超えて、加熱On、粒子供給Off
- 放射崩壊回避に成功

放射崩壊尤度の計算のみでアラーム信号を出し、制御を実行⇒回避実証

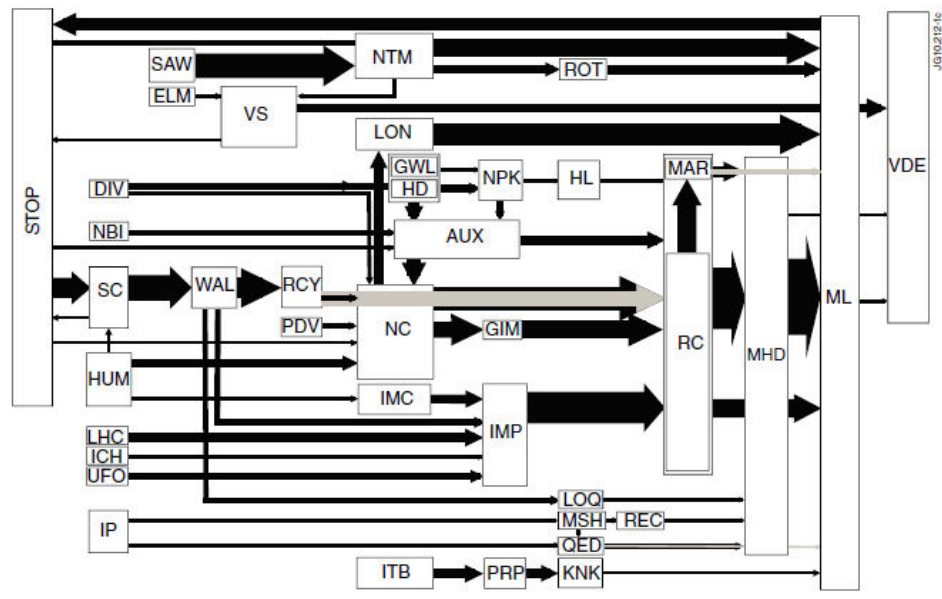


問題の捉え方の転換

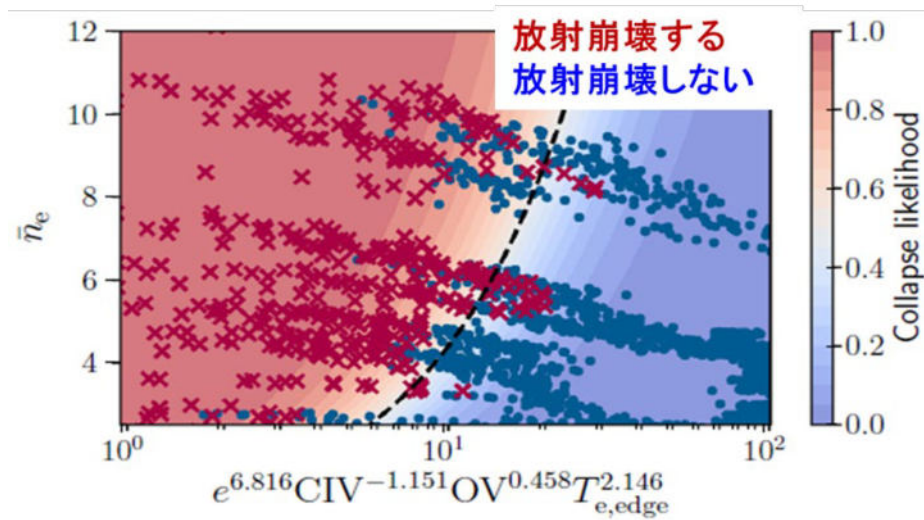
【物理階層・要素積み上げ】

JETにおいて10年間に発生したディスラプションの原因(要素相関)をまとめた図(四角で囲まれた各要素を繋ぐ線の太さでそのシーケンスの生起頻度を表現)

P. de Vries, Nuclear Fusion 51 (2011) 053018 Figure 4



【分類問題】



即時判断、リアルタイム制御への高い親和性

→周辺プラズマシミュレーションを用いて、物理理解への挑戦も(炭素不純物による放射増加)

T. Yokoyama+, Plasma and Fusion Research 16 (2021) 2402010.

学術基盤のある核融合分野の強み

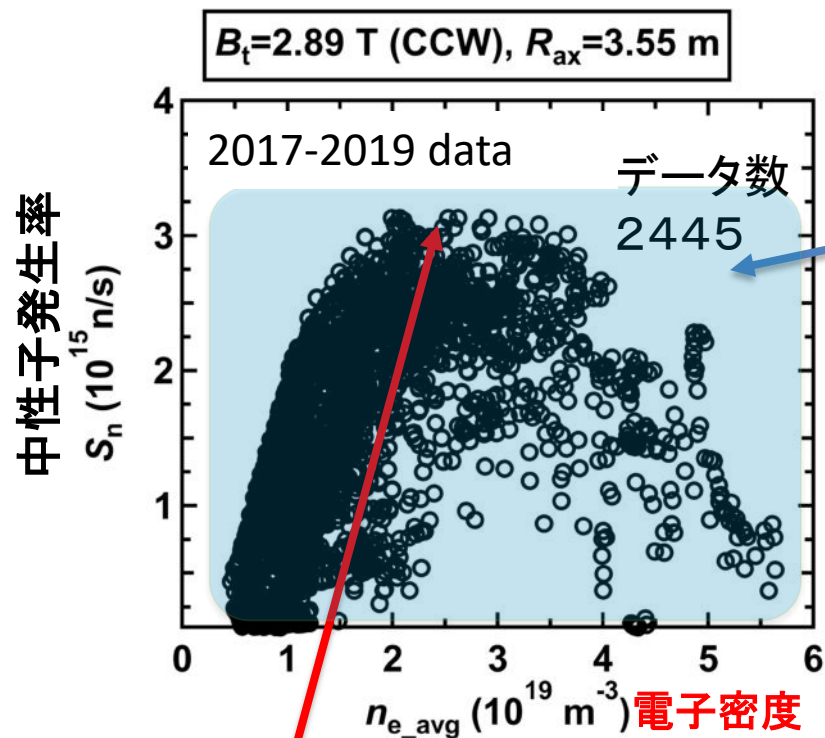
Courtesy of 小川国大氏 (NIFS) ほか

中性子発生率 (S_n): 核融合出力制御に直結する計測データ、
プラズマ性能の重要指標

蓄積データを回帰表現

記録更新 ~ データベースからの外挿性の検証

中性子発生率：計測データ群をいかに見るか？



データに当てはめる(統計数理的見方)

データ群に当てはまるモデルを創ろう

- トレンドがわかる
- こうすればこうなるという「プラズマ応答」を記述できる
- ⇒データ群に基づいた制御手法にもなる【適応型実験計画】

プラズマ物理

データの値の定量理解、再現をしたい

- MHD平衡
- 5次元分布関数計算(加熱吸収パワー評価、高エネルギー粒子挙動)
- 核融合反応計算⇒ S_n 見積値
- 計測と合っているか？合わせるにはモデルをどう改良したらいいか？

教科書の目次、基礎方程式、モデル、...

プラズマ物理学
多階層複雑系

多分野からの参入敷居
を大いに下げる

?

データから導き出せる知見は何？

「データへのあてはめ」
統計数学との協働
Let the data speak!
Data-oriented
データ駆動
データサイエンス

帰納

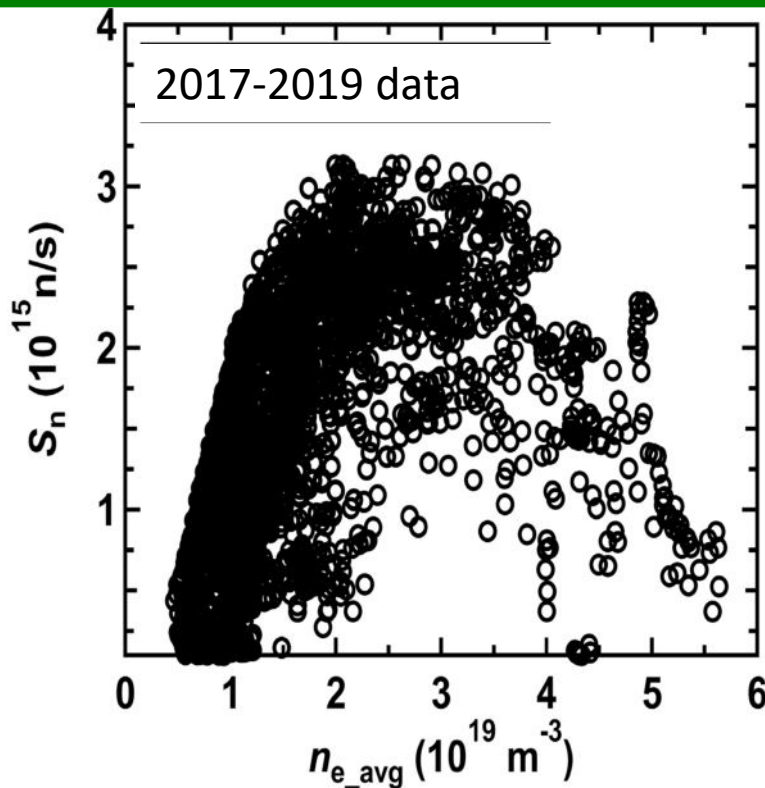
帰納

多様な現象

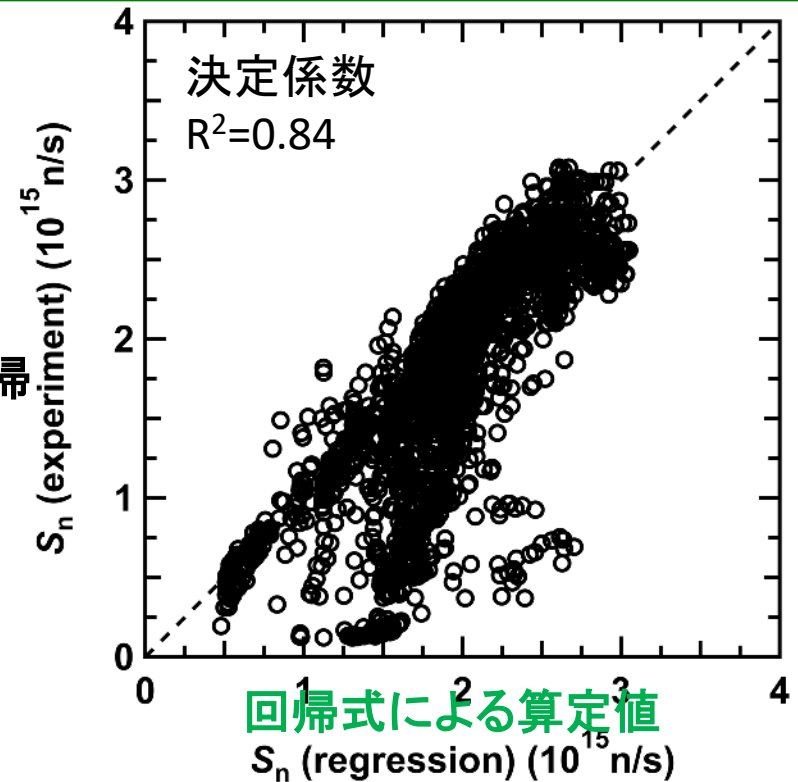
合う、合わない？
合わないなら何が足りない？
⇒モデルの改良、さらに精緻な計算、
さらに計測が必要？他のケースでは
どう？...

現象にまつわるデータ

回帰モデリング (統計の初歩の初歩)



Log線形回帰



(核融合炉を想定して)少変数・外部制御パラメータのみでLog線形回帰

$$S_n = 10^{14.25} \times n_{e_avg}^{0.52} \times P_{N-NB}^{0.69} \times P_{P-NB}^{0.37}$$

平均電子密度 接線NBIパワー 垂直NBIパワー

K. Ogawa+, Plasma and Fusion Research 15 (2020) 1202087.
2020実験開始前に投稿・出版

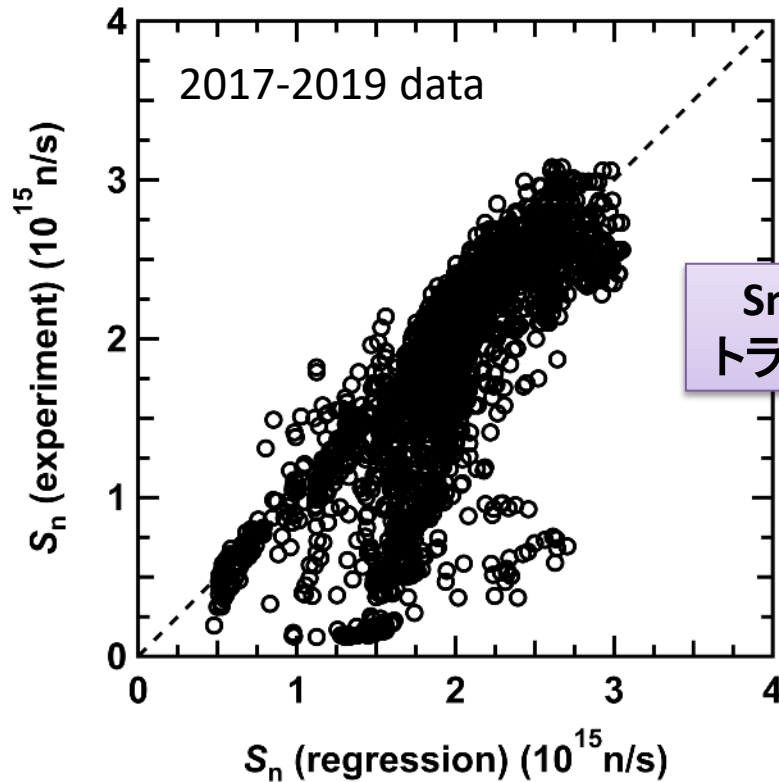
注)

- 回帰に用いる変数は「≠0」
- NBIパワーはポートスルー値(吸収パワーの解析不要)

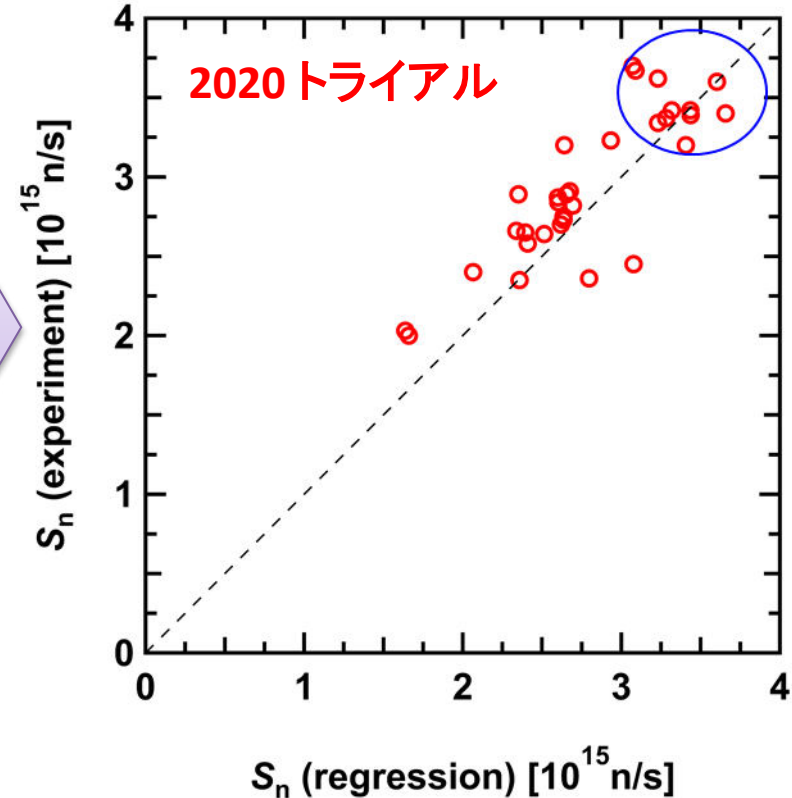
- 接線NBIのパワーが高い時に S_n 更新挑戦しよう!
- S_n の予測値も事前算出可能となった

プラズマ性能の向上（外挿）

記録更新！



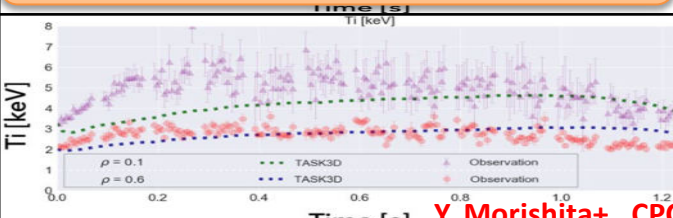
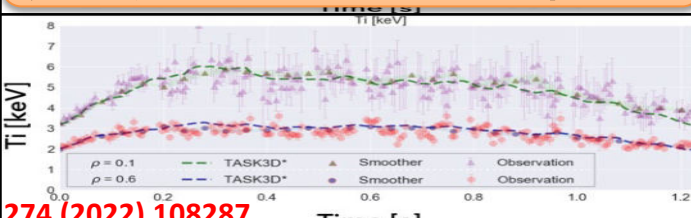
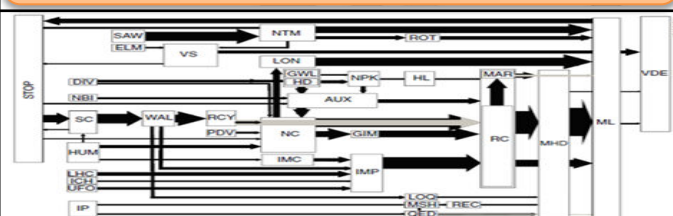
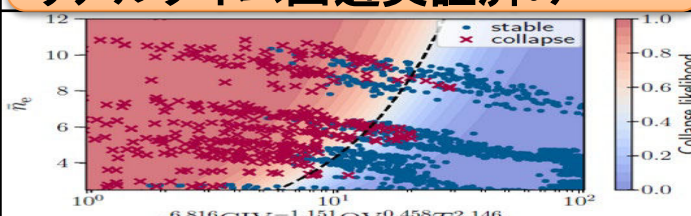
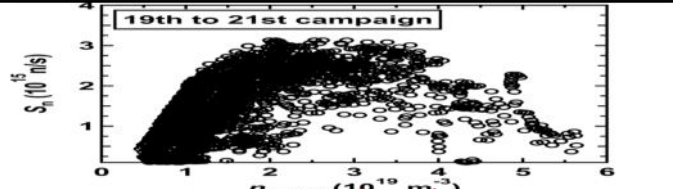
Sn更新
トライアル



K. Ogawa+, Fusion Engineering and Design, 167 (2021) 1202087.

- 回帰に用いたデータベースの範囲外だが、**外挿性(延伸性)**あり
- 統計数理モデルを試す場があることは核融合研究の強み
(\Leftrightarrow 実社会の問題: 何をもって統計数理モデルを妥当と判断するか?)

研究最前線記事で取り上げた実例3つ

<p>モデル構築の考え方</p> <p>研究トピック</p> <p>制御対象</p>	<p>データを説明・理解しようとする</p> <p>物理要素・統合</p> <p>要素還元</p>	<p>データへの当てはめ</p> <p>統計数理思考</p> <p>リアルタイム予想・判断</p> <p>制御への高い親和性</p>
<p>プラズマの状態変化の記述 (温度・熱輸送)</p>	<p>物理モデルで計測温度の時間変化が再現できない(現実とのギャップ)</p>  <p>Y. Morishita+, CPC 274 (2022) 108287.</p>	<p>データ同化⇒リアルタイム制御実証済み(データ同化“制御”)</p> 
<p>ディスラプション・放射崩壊(回避)</p>	<p>制御対象の現象を要素統合で記述しようとするが複雑極まりない(複雑現象)</p>  <p>P. de Vries, NF 51 (2011) 053018</p>	<p>現象生起の判別問題⇒リアルタイム回避実証済み</p>  <p>T. Yokoyama+, JFE 39 (2020) 500.</p>
<p>プラズマ性能向上 (中性子発生率)</p>	<p>性能向上を目指した実験結果を蓄積、さらなる性能向上への実験指針が必要</p>  <p>K. Ogawa+, PFR 15 (2020) 1202087.</p>	<p>回帰⇒性能向上実証済み</p> <p>外部制御パラメータのみでLog線形回帰</p> $S_n = 10^{14.25} \times n_{e_avg}^{0.52} \times P_{N-NB}^{0.69} \times P_{P-NB}^{0.37}$ <p>平均電子密度 接線NBIパワー 垂直NBIパワー</p> <p>K. Ogawa+, FED 167 (2021)112367.</p>

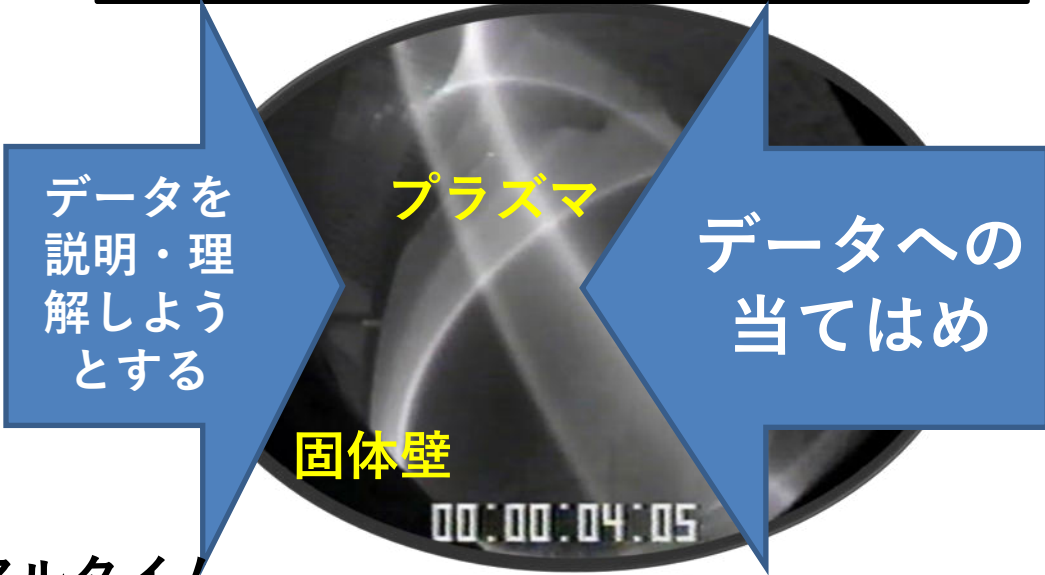
皆さんの研究：「データへの当てはめ」の可能性

【核融合の課題】	【データ・統計数理視点での捉え方】
輸送モデリング・統合モデリング	データ同化、回帰
プラズマ性能向上	適応型実験計画、外挿性、予測性
ディスラプション、放射崩壊	分類、時系列データ変化点
乱流	高次元データ、特徴量抽出
ダイバータ熱流束とプラズマ条件	入出力間の応答・相関
大規模シミュレーション	次元縮約、特徴抽出、主成分分析
原子・分子データベース	欠損データ推定、転移学習
新材料開発	少数データ、マテリアルズインフォマティクス
試料分析	パターン認識、画像特徴抽出
核融合炉システム挙動	確率システム論

統計数理核融合学

自然科学における常套手段である要素還元・要素統合による
複雑多階層系研究という従来動向からの変革

地上の人工物
核融合プラズマ



+ 統計数理思考

- 情報量規準
- データ同化“制御”
- 予測・制御
- サロゲートモデル
- 時系列データ変化点検知
- 高次元時空間データ解析
- ベイズモデル
- 最適化モデル
- パラメータ推定
- オペレーションズリサーチ
- 回帰
- 主成分分析
- 次元縮約、特徴量抽出
- 外挿性、予測性
- 入出力応答
- 適応型実験計画
- 、、、

要素還元、要素統合

- 磁場構造
- 荷電粒子軌道
- 高エネルギー粒子
- 分布関数
- 運動論的描像
- 電磁流体描像
- 平衡・不安定性
- 粒子加熱・電磁波加熱
- 熱・粒子輸送、排気
- 乱流
- 不純物
- プラズマ・壁相互作用
- 構造形成
- 電流崩壊現象
- 、、、

複雑すぎてリアルタイム
制御は見通しづらい

リアルタイム性の高い制御・挙動予測・意思決定の方法論を磨き、
国内外の実験システムを用いてそれらを実証・改良・汎化

「統計数理核融合学」の創成と実践