

# 数理共創非線形プラズマ研究

ユニットとして発展させたい学際的共同研究の紹介

仲田 資季

自然科学研究機構 核融合科学研究所

総合研究大学院大学

*Trefoil knot*

## Outline

1. 数理共創の発端となったこれまでの研究
2. 個別論からの脱却へ
3. 数理共創による学際共同研究

# 数理・情報・物理の融合的学際研究：TREFOIL

## プラズマ物理(天体・流体含む)



天体物理・太陽物理

高エネルギー  
密度プラズマ



etc  
アドバイザー含む

核融合  
プラズマ乱流

数理最適化

説明可能AI  
データマイニング



情報科学(Informatics)



数理統計・機械学習理論



縮約モデル  
位相的データ分析



数理科学(Mathematics)

「乱流場の構造」「磁場の構造」「高次元データの構造」に内在する”幾何学”を鍵にした、  
”数理共創”研究で領域を飛び越えた共進化を目指す。 (学際研究に興味を持つ研究者が集結)

数理共創研究の発端となったこれまでの研究

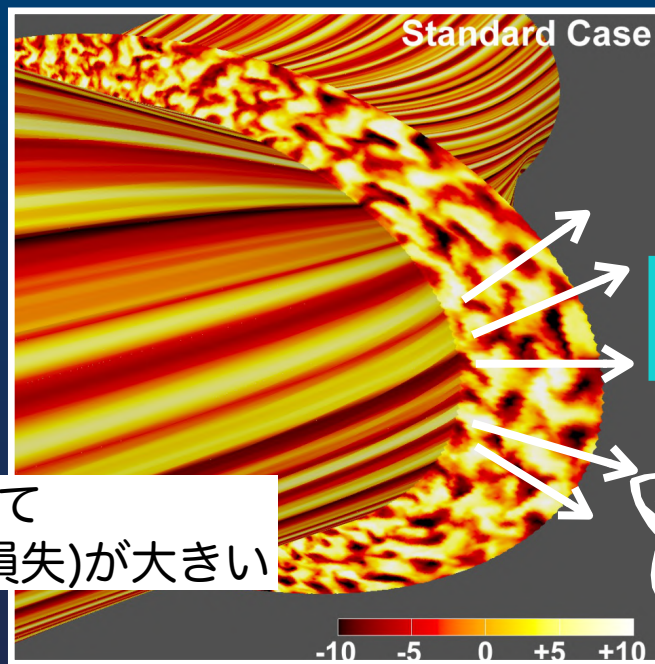
— 磁場の幾何構造による *Zonal Flow* の活性化 —



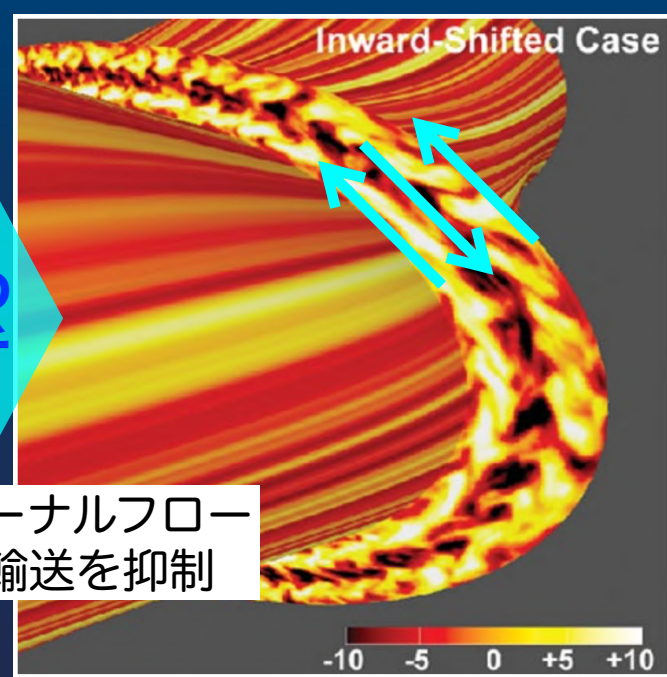
# 核融合プラズマの「乱れ」と「流れ」の問題

- 不均一性から乱流が駆動され、熱・粒子が輸送(損失)されてしまう。
  - ある条件では乱流からゾーナルフロー(ZF)が自己組織化される。
  - 乱流輸送を抑制する機能を持つため、核融合炉の実現や高効率化の鍵

乱れが発達する場合



ゾーナルフローの自発形成と輸送抑制



磁場の  
カタチ

乱流の発達によって  
エネルギー輸送(損失)が大きい

ゾーナルフロー  
が輸送を抑制

スーパーコンピュータで計算した  
LHDの中で乱流とゾーナルフロー

cf. Fujisawa PRL2004, Birkenmeier  
PRL2013, Hillesheim PRL2016, etc

ゾーナルフローの存在は観測と理論で実証された。「観測と理解」を超えて、自在に活性化(アクティベート)できれば、革新的なプラズマが創れる!

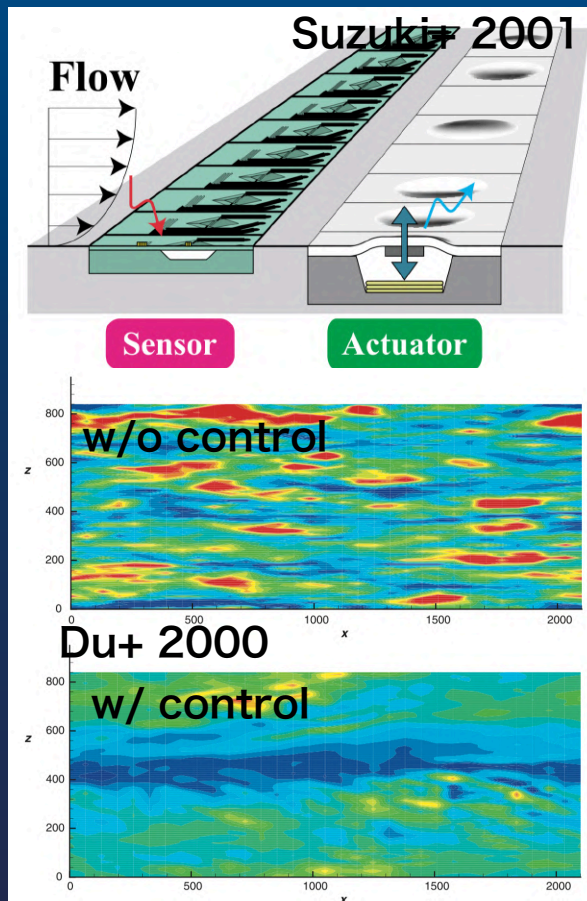
# 乱流や流れの自在制御は現代科学の夢のひとつ

- 乱流の解明・予測も難問だが、その自在制御へ向けた挑戦も長年続く。

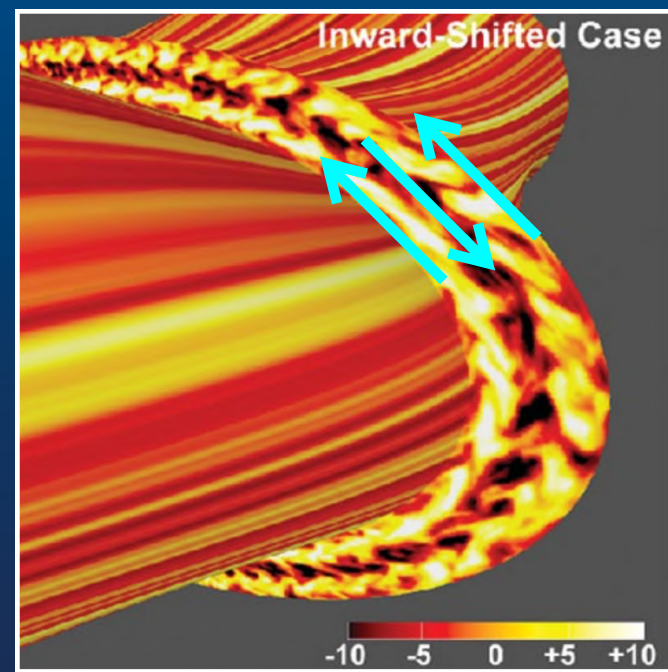
大気乱流(e.g., 積乱雲)



壁乱流 (e.g., 翼や管内)



プラズマ乱流 (e.g., 核融合炉)



電磁場との相互作用を介して、  
乱流の”大域的な”抑制・制御  
が可能 (のはず！)

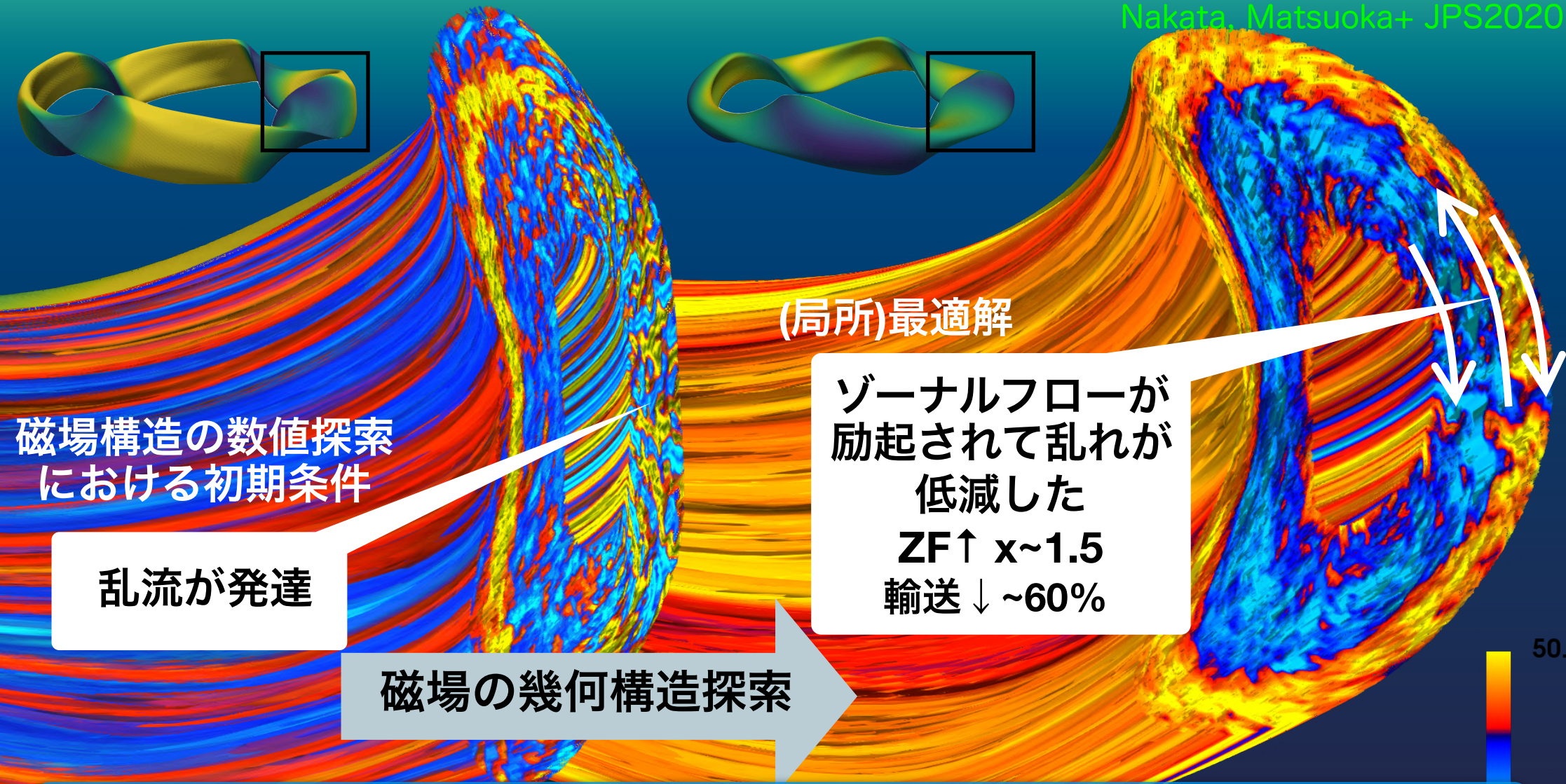
理解や予測は進歩しているが、  
コントロールは不可能に近い

アクチュエータと接する壁面  
近傍の局所制御は可能 (添加剤による制御も)



# 数理計画計算によるZF活性化プラズマの探索

Nakata, Matsuoka+ JPS2020



磁場構造の数値探索  
における初期条件

乱流が発達

磁場の幾何構造探索

(局所)最適解

ゾーナルフローが  
励起されて乱れが  
低減した  
ZF↑ x~1.5  
輸送↓ ~60%

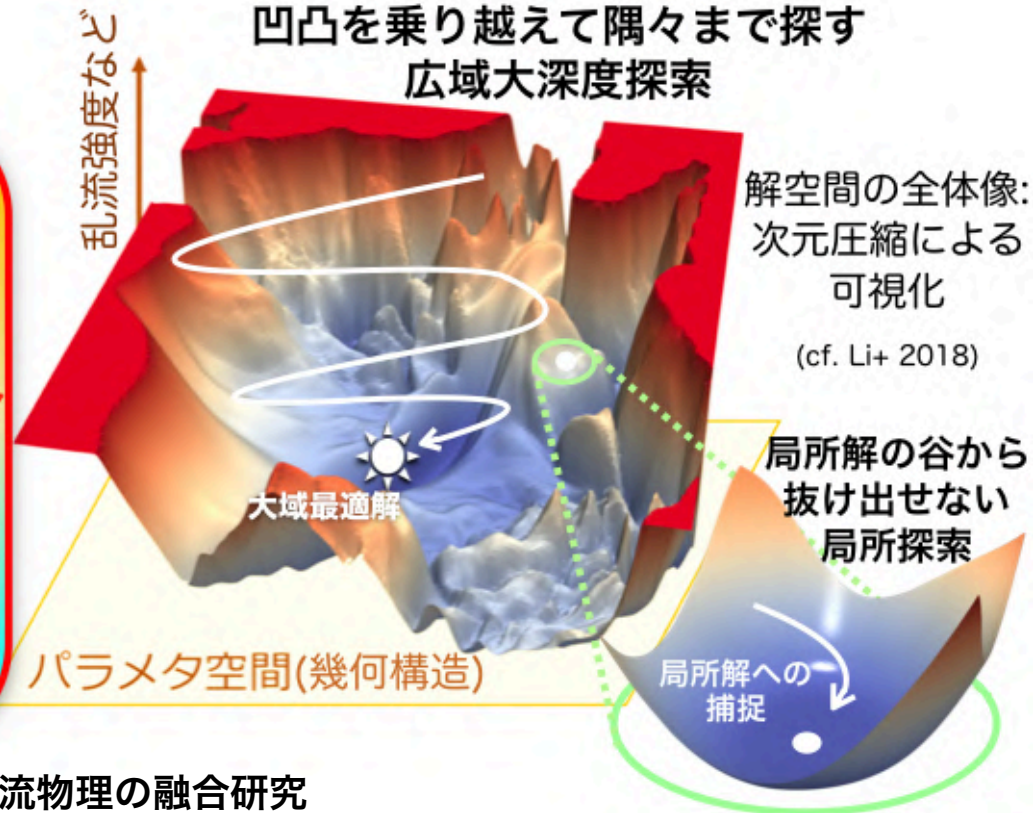
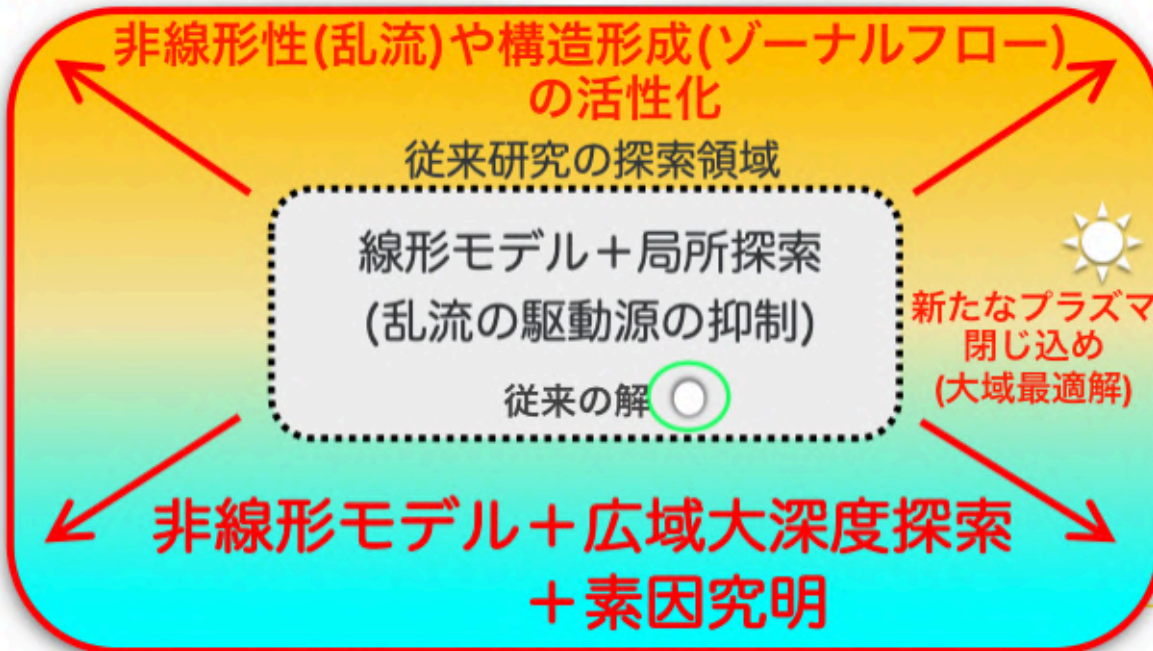
高次元極値問題として機能創発を促す新たなプラズマの探索の可能性を示唆



# 数理・情報・物理の融合&共創の不可欠性

- 「高次元(~100次元)の極値探索問題」として、特質を引き出す解(構造)を探索するには…
  - 物理の役割：大規模計算を活用した非線形モデリングでディスカバリスペースを広げる
  - 数学の役割：広く深く探索するアルゴリズムの構築、磁場・乱流場の幾何学解析
  - 情報の役割：高次元データ解析で解空間構造のトポグラフィー/ランドスケープを可視化

非線形モデリングで拡大される探索領域と新たな解

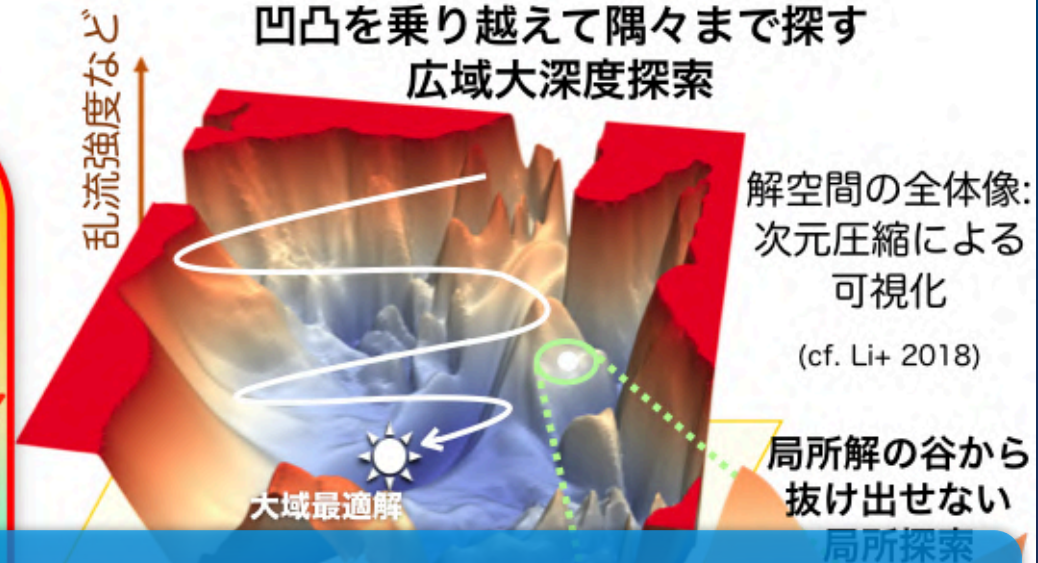
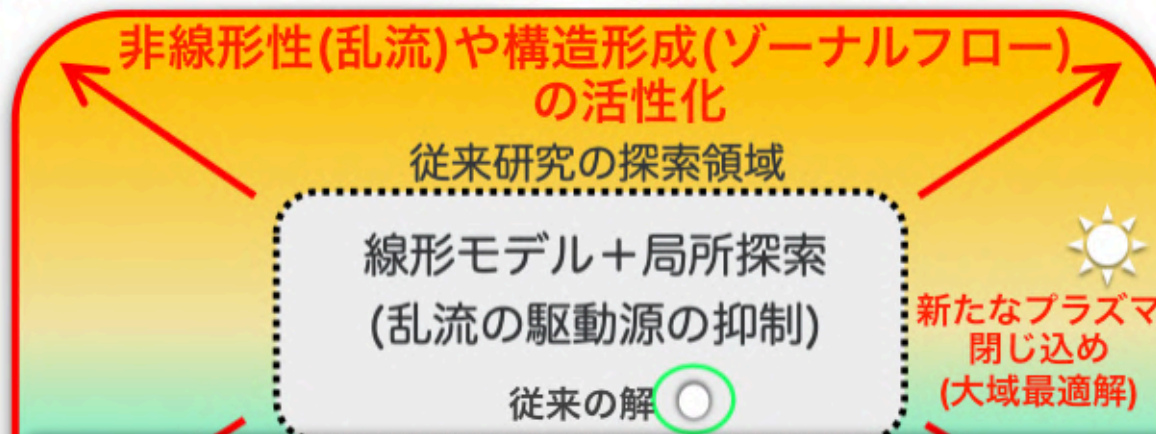


数理科学+情報科学+乱流物理の融合研究

# 数理・情報・物理の融合&共創の不可欠性

- 「高次元(~100次元)の極値探索問題」として、特質を引き出す解(構造)を探索するには…
  - 物理の役割：大規模計算を活用した非線形モデリングでディスカバリスペースを広げる
  - 数学の役割：広く深く探索するアルゴリズムの構築、磁場・乱流場の幾何学解析
  - 情報の役割：高次元データ解析で解空間構造のトポグラフィー/ランドスケープを可視化

## 非線形モデリングで拡大される探索領域と新たな解



良い解を探すだけでなく、なぜそこに解があったか？その乱流場や磁場の構造の特徴は何か？  
といった物理的素因や重要因子も究明する方法論の確立を目指せる (融合研究にしかできない)

(なるべく速い)最適点の探索 → 最適点の探索 + ランドスケープ捕捉

数理科学+情報科学+乱流物理の融合研究



個別論からの脱却へ

# 核融合プラズマというエンタランス

「ZFの活性化による乱流抑制プラズマの創成」という核融合研究の中の”個別論”からの脱却

上記を含み、諸科学を巻き込みながら共進化できる、より広い学際研究をどう構築する？

核融合プラズマの特徴を見つめ直し、エネルギー開発という出口に尽きることなく、  
難題の下に研究者が集まる「エンタランス」としての魅力をアピールできないものか？

## 核融合プラズマの特徴(の一部)

- ・ 熱的・物質的に非平衡開放系
- ・ 粒子と場の結合性・不可分性 (流体だけ粒子だけの記述は不十分)
- ・ 非線形相互作用の宝庫 (渦-流れの相互作用、粒子-波動の相互作用)
- ・ 磁場・電場という外から制御可能な場との結合 (環境との相互作用をコントロール)
- ・ 多彩な理論モデル・シミュレーション・要素検証実験・データ科学手法を包含

	演繹的手法	帰納的手法
ヒト	理論 (原理の構築)	実験/観測 (検証と探求)
計算機	シミュレーション (原理から予測)	データ科学 (法則や相関を発掘)

核融合プラズマ(or基礎プラズマ)をしばしば形容する「非線形・非平衡開放系」

→ 全くその通り。しかし、もっと身近にも非線形系や非平衡開放系は溢れかえっている。

e.g., ベナール熱対流・BZ反応・神経細胞 etc. (シャーレの中で実験観測が可能)

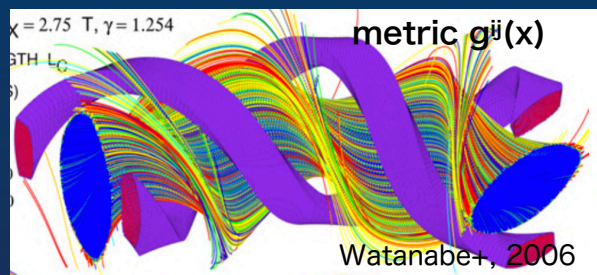
→ 十分に含まれる特徴ではあるが、”核融合プラズマならではの”の著しい特質を強調したい



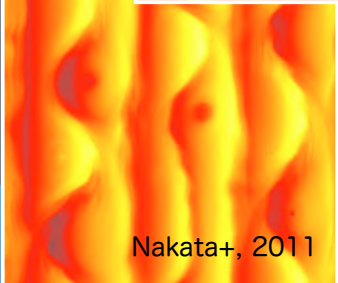
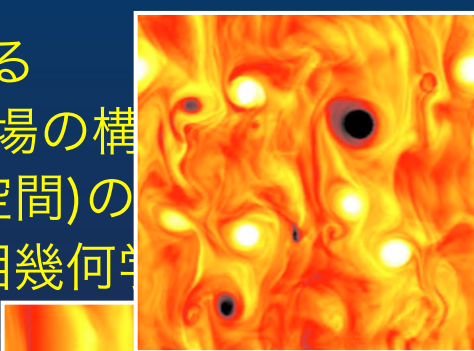
# 知的創造/数理共創の媒体としての核融合プラズマ<sup>8</sup>

■ 核燃焼プラズマへの挑戦（より熱く）と、そこに根付く学術的な魅力は何か？

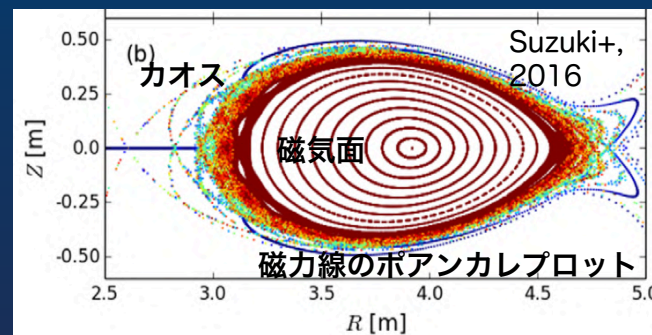
1. 場で閉じ込めることによって実現される超不均一系 e.g., 温度勾配は太陽の2万倍超  
 → 極限的な不均一性を支えるエントロピー生成・散逸を観測&シミュレート可能
2. 非線形・非平衡・非ガウス・カオス・分岐・乱流・自己組織化などの”創発現象”の坩堝  
 → 連鎖・複合・相互関連を調べられる cf. 基礎プラズマ・応用プラズマとも一定の共通性



曲がった磁場構造の幾何学

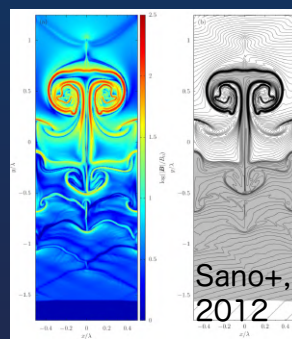
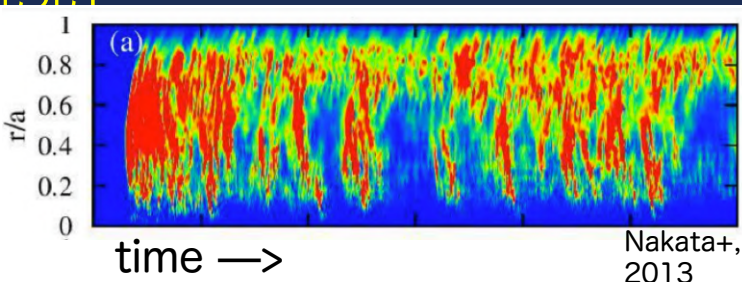


乱流の自己組織化



磁場の層構造とカオス

突発的/間欠的輸送 (非ガウスPDF)



磁場の生成と増幅



持つ  
 構造形成と創発のダイナミクス

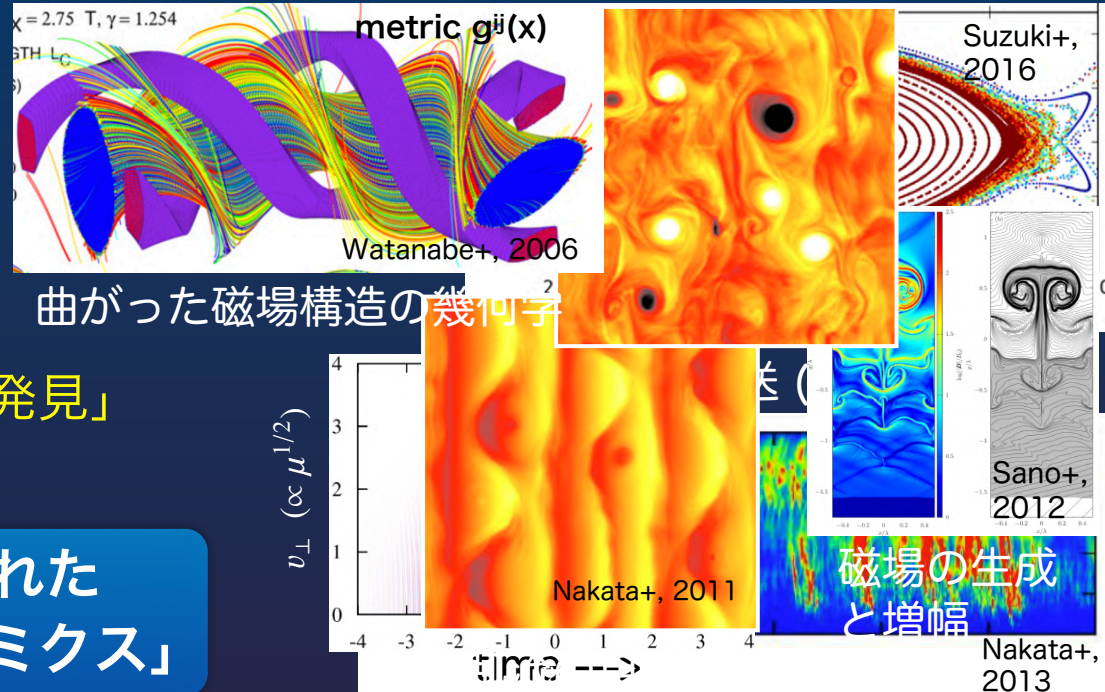
# 知的創造/数理共創の媒体としての核融合プラズマ<sup>8</sup>

- 核燃焼プラズマへの挑戦（より熱く）と、そこに根付く学術的な魅力は何か？
  - 場で閉じ込めることによって実現される超不均一系 e.g., 温度勾配は太陽の2万倍超  
→ 極限的な不均一性を支えるエントロピー生成・散逸を観測&シミュレート可能
  - 非線形・非平衡・非ガウス・カオス・分岐・乱流・自己組織化などの”創発現象”の坩堝  
→ 連鎖・複合・相互関連を調べられる cf. 基礎プラズマ・応用プラズマとも一定の共通性

様々な”幾何学”が内在する

- 乱流場の構造、磁場の構造、高次元データ(解空間)の構造
- 数理科学(微分/位相幾何学, etc) 情報科学(高次元データ分析, etc.)との融合で新しい「目・言葉・道具と発見」を共創する。

「高い自由度を持つ幾何的な場におかれた揺らぎの中の構造形成と創発のダイナミクス」





数理共創による学際共同研究へ

# 数理共創の学際共同研究: *TREFOIL*

間欠性・突発性

ダイナモ・黒点形成

乱流抑制・制御

近可積分系としての磁場構造

**プラズマ物理(Nonlinear Physics)**

第一原理計算・実験・モデリング

(場やデータの生成源)

核融合プラズマの乱流  
輸送現象(入口/動機)

プラズマの閉じ込め改善機構  
や性能予測(出口/目標)



# 数理共創の学際共同研究: TREFOIL

間欠性・突発性

ダイナモ・黒点形成

乱流抑制・制御

近可積分系としての磁場構造

「磁場の構造」

「乱流場の構造」

「高次元データの構造」

それらの幾何学で紡ぐ

Trefoil-knot(三葉結び目)

**プラズマ物理(Nonlinear Physics)**

第一原理計算・実験・モデリング  
(場やデータの生成源)

**情報科学(Informatics)**

高次元データ可視化、情報幾何  
(次元圧縮、特徴量選択・抽出)

**数理学(Mathematics)**

幾何学、非線形数理計画  
(微分・位相幾何学、数理最適化)

強多項式時間アルゴリズムの存在

保存則抽出

多パラメータ

Persistent Homology

敵対的サンプル

二重降下問題

説明可能なAI

TREFOILで目指すもの

超不均一系としての核融合プラズマを知的創造の媒体とした、数理学・情報科学・物理学の共創研究の展開。「乱流と磁場の幾何学」の視座から非線形現象や構造形成、創発のダイナミクスを探究する。

→ 手法の輸出入を超えて「異なる視点で同じ問題 or 共通の視点で異なる問題に取り組む」  
「互いの分野の共進化」「諸科学への展開・一般化」に重点を置く。

# 数理共創の学際共同研究: TREFOIL

それぞれの学問領域を飛び越え、  
共進化することを目指す研究

**プラズマ物理(Nonlinear Physics)**  
第一原理計算・実験・モデリング  
(場やデータの生成源)

「磁場の構造」  
「乱流場の構造」  
「高次元データの構造」  
それらの幾何学で紡ぐ  
Trefoil-knot(三葉結び目)

**数理学(Mathematics)**  
幾何学、非線形数理計画  
(微分・位相幾何学、数理最適化)

**情報科学(Informatics)**  
高次元データ可視化、情報幾何  
(次元圧縮、特徴量選択・抽出)

ベクトル場(閉・開・カオス磁場)やスカラー場  
(温度・密度ゆらぎ)の乱流の数理解析

乱流最適化から誘導される高次元トポグラフィー/  
ランドスケープの分析手法

**構造形成(cf.ゾーナルフロー)と機能創発の活性化**

量子計算機での大規模アニーリング計算への展開

非線形・非ガウス現象(突発・間欠)の  
理解・制御・最適化

**順問題 & 逆問題**

深層学習・データ同化による実時間解析・  
制御モデルの構築

自己点火燃焼核融合プラズマの開拓

天体プラズマ・高密度エネルギープラズマへの展開

最適化技術やデータ解析手法を通じた産学連携も

# 研究課題の具体化が進展中

- 全員でそれぞれの課題に取り組む必要はなく、共通部分や相互関連性が定義できる幾つかの研究テーマでTREFOIL全体を被覆的に構成する。

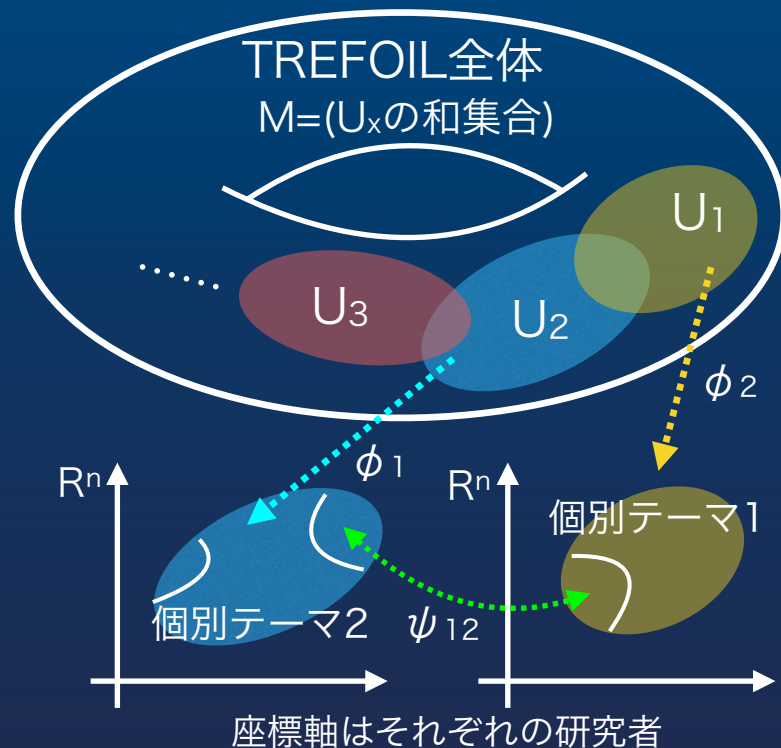
cf. 多様体における局所座標近傍(Chart)と(極大)座標近傍系(Atlas)のイメージ

- 指針の下に相互関連し合う個別テーマ(Chart)で全体を被覆

$U_1$ : プラズマ構造形成の非線形最適化とランドスケープ解析

$U_2$ : 乱流場の位相構造と相互作用解析への応用

などなど、自由な発想でテーマを設定



## 数理共創非線形プラズマ研究

「高い自由度を持つ幾何的な場におかれた  
揺らぎの中の構造形成と創発のダイナミクス」

\*\*すべて同時並列的に取り掛かるわけではないし、適度に生成消滅しながら複数の課題が絡み合う構造が望ましい

(理論に限らず) 興味がある方一緒に議論しましょう! Yammer / mail などでご連絡ください。