

**"Anatomy of plasma turbulence ( プラズマ乱流の解剖 )" の Nature Physics ( online 版 ) への掲載について****概 要**

九州大学応用力学研究所の伊藤早苗教授の研究グループは、磁場で閉じこめられたプラズマの乱流を研究し、プラズマ乱流の複雑な動きの中に働く仕組みを実験で観測することに成功しました。核融合研究でのプラズマ閉じ込め性能の改良や、宇宙プラズマの理解に役立つものと考えられます。複雑な乱流の時間変動の中から、波動モード成分、多数の高調波、「しぶき」のような寿命の短い成分を分解抽出しました。これらの中に「親」となる3つの成分を見つけ、他を次々に生み出していることを確認しました。特に、プラズマ乱流が、波の伝わる方向にバンチする「ストリーマー構造」<sup>注1)</sup>を発見し、乱流が塊を作ることを突き止めました。プラズマ乱流が「帯状流」<sup>注2)</sup>という流れに転化したり、ストリーマーという塊になったりする様子を測ることに成功したものです。

本研究成果は、Nature Physics (online 版)に平成 20 年 7 月 27 日付で掲載され広く一般公開されました。

(URL: <http://www.nature.com/nphys/journal/vaop/ncurrent/index.html>)

本研究は、科学研究費特別推進研究「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究」(研究代表者：伊藤早苗)の一環として行われました。

**背 景**

プラズマ乱流は自然界に満ちていて、私たちの生活や自然の理解に深く関わっています。

例えば太陽のプラズマ乱流はダイナモ磁場を作り出したり、太陽表面上空で超高温プラズマを生み出したりしています。それらは太陽風として地球に降り注ぐ高速粒子をもたらす、人工衛星や通信、生命や遺伝子の活動に影響を及ぼしています。そうした効果を理解すべく宇宙天気予報という様な試みも生まれています。地上のプラズマの例をとれば、磁場で高温プラズマを閉じこめ、核融合反応を起こし、核融合エネルギーを取り出す研究が行われています。代表的なものは ITER (国際熱核融合実験炉)<sup>注3)</sup>です。ITER での核融合燃焼を実現するためには、プラズマ乱流を正しく理解し抑制することが必要だと考えられています。こうした多方面の動機から、世界中でプラズマ乱流の研究が追求されています。特に、どのような機構によって、プラズマ乱流がどのように発展し飽和するのか、実際に観測し解明する研究が強く求められています。

**研究成果**

今回、本研究グループは、プラズマ乱流では何がどのように動いているのか、何が起きているのか精密に観測し、分析し、その非線型機構を解明することに成功しました。

精密な観測をするため、円筒状の長いプラズマを作ります。(図1に九州大学の乱流実験装置を示します。)軸方向に磁場を加え、プラズマ粒子が磁場に巻き付く性質を利用し、プラズマが磁場を横切って半径方向に逃げる事を難しくしてあります。中心部(軸付近)では密度が高く、周辺では低密度です。この不均一性のため、中心付近の高密度プラズマと周辺の低密度プラズマを混ぜ合わせるような渦運動が生まれます。こうして生まれた乱流を詳細に観測します。複雑な乱流の時間変動から、波動モード成分、多数の高調波成分、「しぶき」のような寿命の短い成分、とるように、多種の成分を分解抽出しました(図2)。これらの中に「親」となる3つの成分を見つけ、その3つが他を次々に生み出していることを確認しました。特に、プラズマ乱流が、波の伝わる方向にバンチする(寄り集まる)「ストリーマー構造」を発見し、乱流が塊を作ることを突き止めました(図3)。円柱の切り口断面の観測(図4)が示すように、ストリーマー構造は周回方向に塊となり、中心から外へと延びています。揺動が塊にな

るのは、プラズマの非線形性であることも実証しました。

プラズマ乱流が帯状流という流れに転化したり、ストリーマーという塊になったりする様を測ることに成功したものです。

### 今後の展開

乱流が生まれエネルギーをやり取りする機構や、自ら寄り集まって塊を作り出す様子を突き止めたことで、乱流の発展や飽和機構に確固たる実験的基礎を作ることに成功しました。更に、乱流が「帯状流」という木星の縞模様のような構造の流れに転化し、乱流レベルを下げることも見つけています。波が塊になればそこからプラズマが吹き出し閉じ込めを悪くさせます。流れに転ずれば(乱流レベルが下がり)プラズマの閉じ込めは良くなります。こうした乱流の姿の違いを「乱流構造」として捉えることを謳って研究を進めており、乱流構造の選択によって、プラズマ乱流輸送が変化すると考えています(図5)。

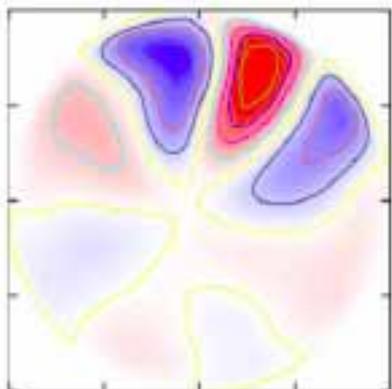
この研究によって、プラズマ乱流の中で起きているプロセスを実験で直接観測する道が示されました。理論とシミュレーションによって乱流構造の選択が研究されてきましたが、実験も統合することで確固として理解が得られると考えています。特に、この理解をトカマク装置のプラズマ乱流に拡張していくことで、国際熱核融合実験炉での核融合燃焼プラズマの実現がより確実なものになると期待されます。

#### 【お問い合わせ】

応用力学研究所 准教授 稲垣 滋  
092-583-7722

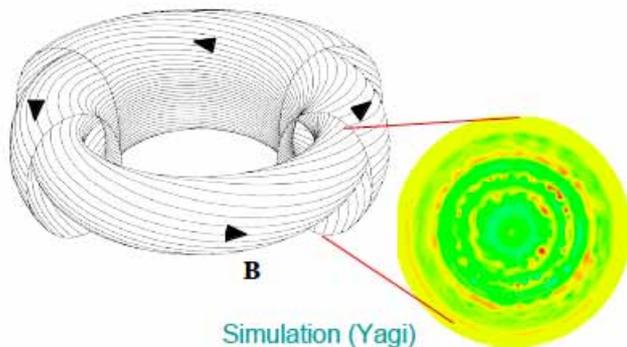
### 用語解説

注1) ストリーマー構造



円柱プラズマの断面図。波(赤青で正負を示す)が一カ所に寄り集まって塊となり、さらに周方向に廻る。

注2) 帯状流

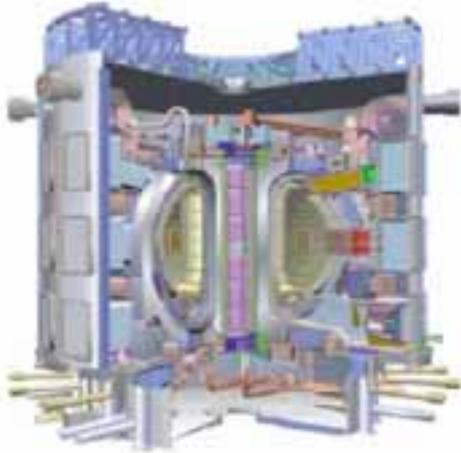


プラズマ内部での乱流をシミュレーションによって描いたもの(矢木による。)中心を取り囲む同心円状の(帯状の)構造が現れている。この流れは乱流から生み出されるものとされ、乱流輸送を抑制する。本グループは理論研究を進めると共に、核融合科学研究所と協力し実験観測にも世界で初めて成功している。

参考文献は[伊藤：核融合学会誌第81巻第12号 p972 (2005)]

注3) ITER (国際熱核融合実験炉)

世界各極(日、欧、米、露、中、韓、印)の共同事業としてフランスに建設中のトカマク装置。核融合熱出力 500 MW を予定し、エネルギー増倍率 10 倍以上を実証する事を等、核融合開発の中核計画。



参考文献[池田：核融合学会誌第 84 巻第 1 号 p3 (2008)]

図1：九州大学 乱流プラズマ実験装置と、プラズマの写真



図2：プラズマ乱流に現れる複雑な時空変動パターン（左）。この揺動を少数の波動モード（A,B,C）と多数の高調波、そして寿命の短い「しぶき」のような成分に分解した。（右）  
 三つの成分(A, B, C)が親になって、他の成分を非線型過程によって次々と生み出していることが実測された。

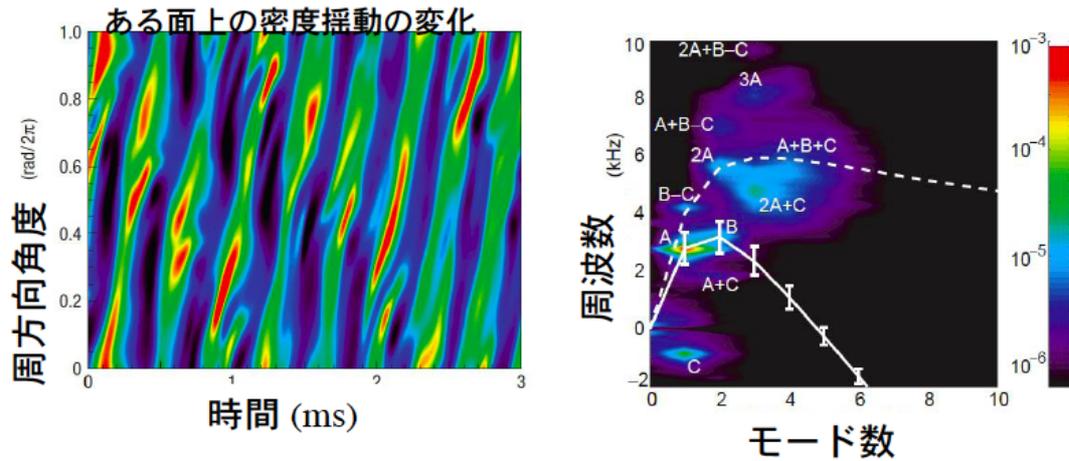


図3：乱流が塊になる「ストリーマー」。波が伝わっていく方向に、波が塊となっている。シミュレーションを行ない、ストリーマーがどのように見えるかを予想し（上）適した観測法を整えた。実際に「ストリーマー」を観測することに成功。（真ん中）。下の図は、中央の図で、一つの観測点でのデータの時間変化を抜き出した。信号の大きなところが波の塊を示しており、次々と塊が通過している事が分かる。

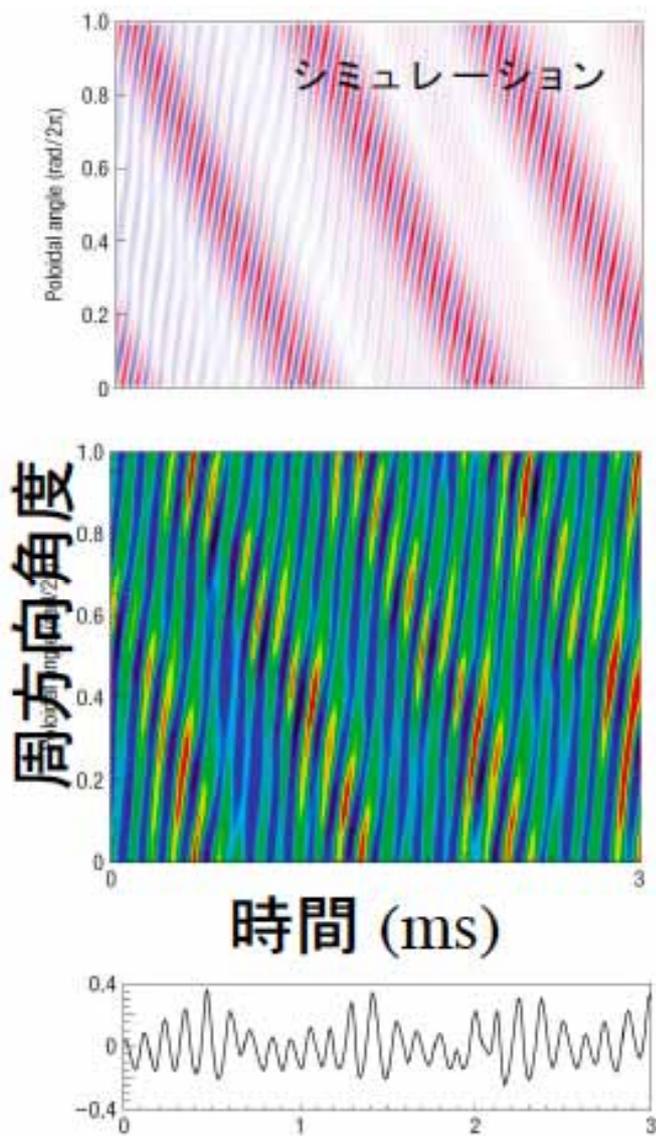


図4：ストリーマーの断面図。波の塊は内側から外側まで延びている。

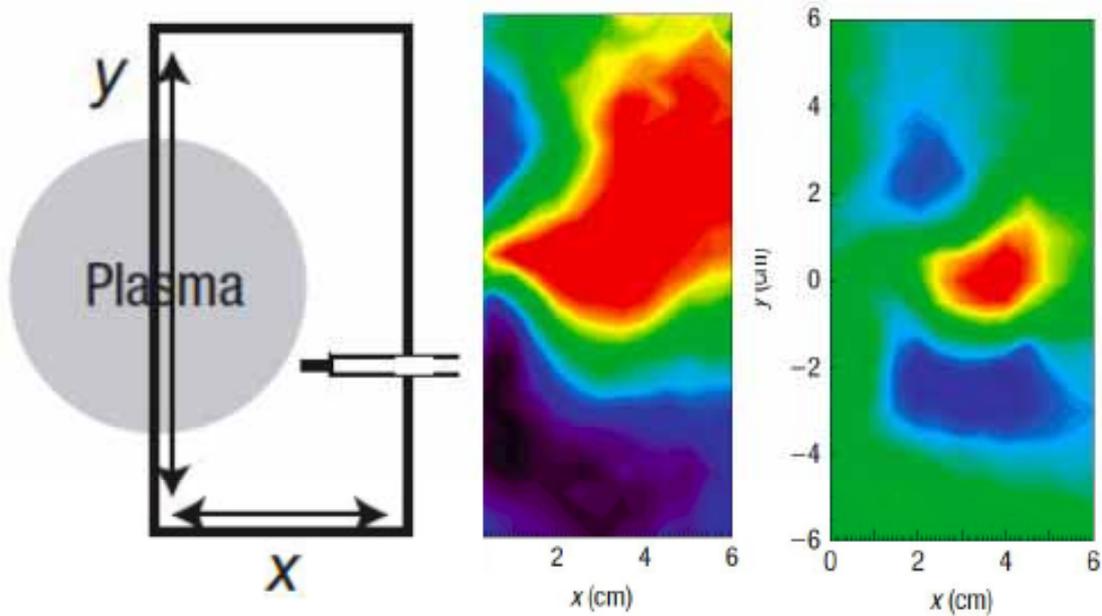
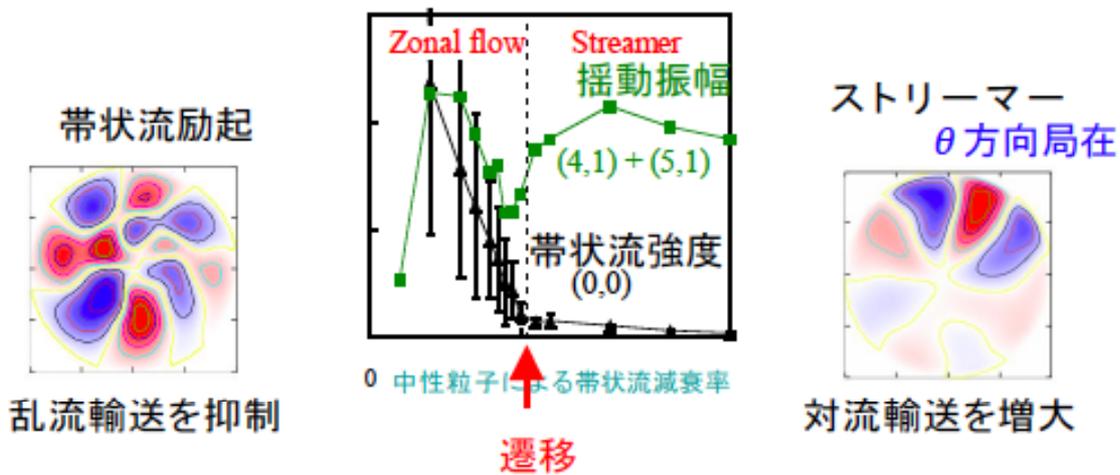


図5：乱流構造の遷移と選択

## 乱流と乱流輸送の制御

メソスケール構造の減衰率の大小によって形成される構造が分岐



带状流とストリーマーの選択則を解明

2008年8月1日  
九州大学

# プラズマ乱流を解剖する

九州大学 応用力学研究所  
磁場核融合国際共同研究所(LIA336)

伊藤早苗

LETTERS

## Anatomy of plasma turbulence

TAKUMA YAMADA<sup>1\*</sup>, SANAE-I. ITOH<sup>1</sup>, TAKASHI MARUTA<sup>2</sup>, NAOHIRO KASUYA<sup>3</sup>, YOSHIHIKO NAGASHIMA<sup>1</sup>,  
SHUNJIRO SHINOHARA<sup>2</sup>, KENICHIRO TERASAKA<sup>2</sup>, MASATOSHI YAGI<sup>1</sup>, SHIGERU INAGAKI<sup>1</sup>,  
YOSHINOBU KAWAI<sup>1</sup>, AKIHIDE FUJISAWA<sup>3</sup> AND KIMITAKA ITOH<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan

<sup>2</sup>Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan

<sup>3</sup>National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki, Gifu 509-5292, Japan

\*e-mail: takuma@riam.kyushu-u.ac.jp

Published online: 27 July 2008; doi:10.1038/nphys1029

nature physics | ADVANCE ONLINE PUBLICATION | [www.nature.com/naturephysics](http://www.nature.com/naturephysics)

# 人類が探求する 自然界の謎

QuickTimey Ç²  
TIFFÅiLZWÅj êLí£ÉvĚçÉOÉâÉÄ  
Ç™Ç±ÇÃÉsÉNE`ÉÉÇ¾ã©ÇÈÇžÇ½Ç...ÇÖïKónÇ-ÇÅB



物質の究極の構成要素の探求

万物流転の法則の探求

**その鍵を握るのはプラズマ乱流**

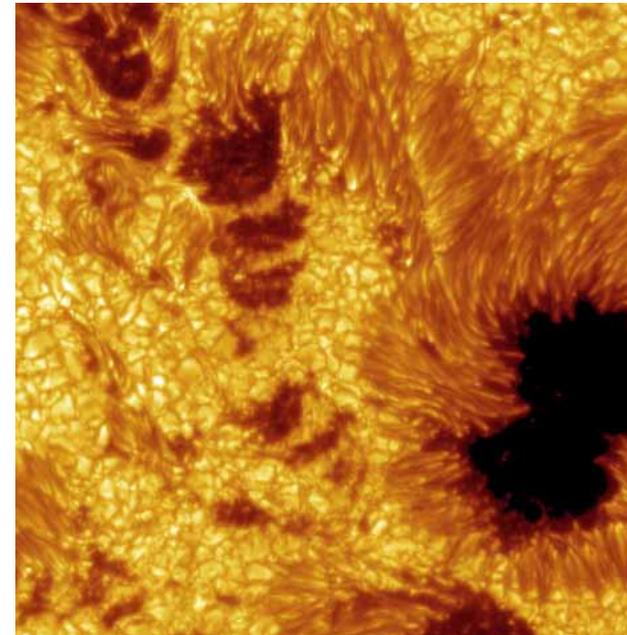
プラズマ乱流はどんな働きをしているか

自然界のプラズマ

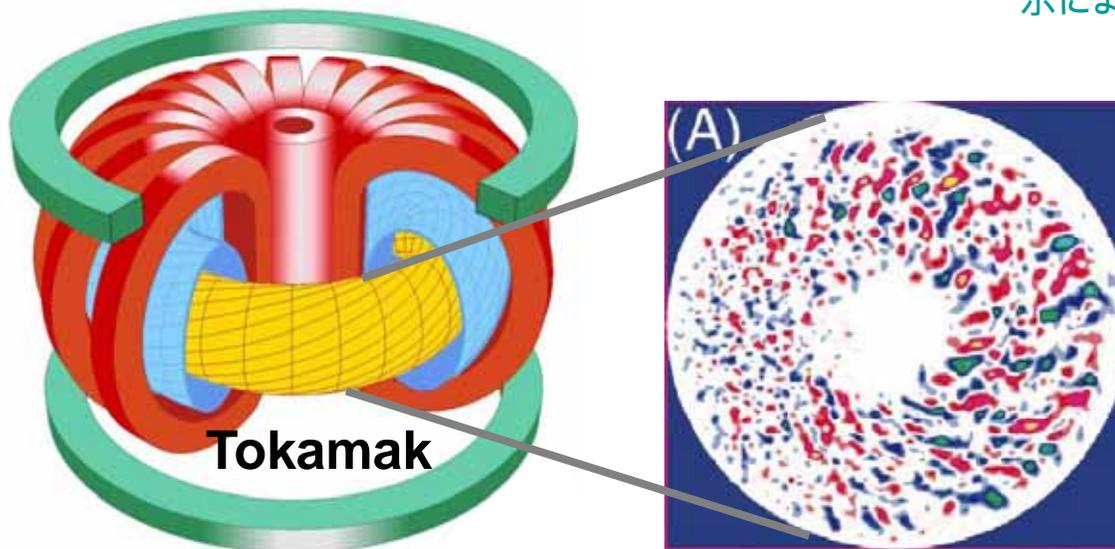
太陽磁場やジェット、フレア  
ダイナモ……  
宇宙天気予報……

核融合プラズマ

乱流によるプラズマの吐き出し  
核融合達成の障壁

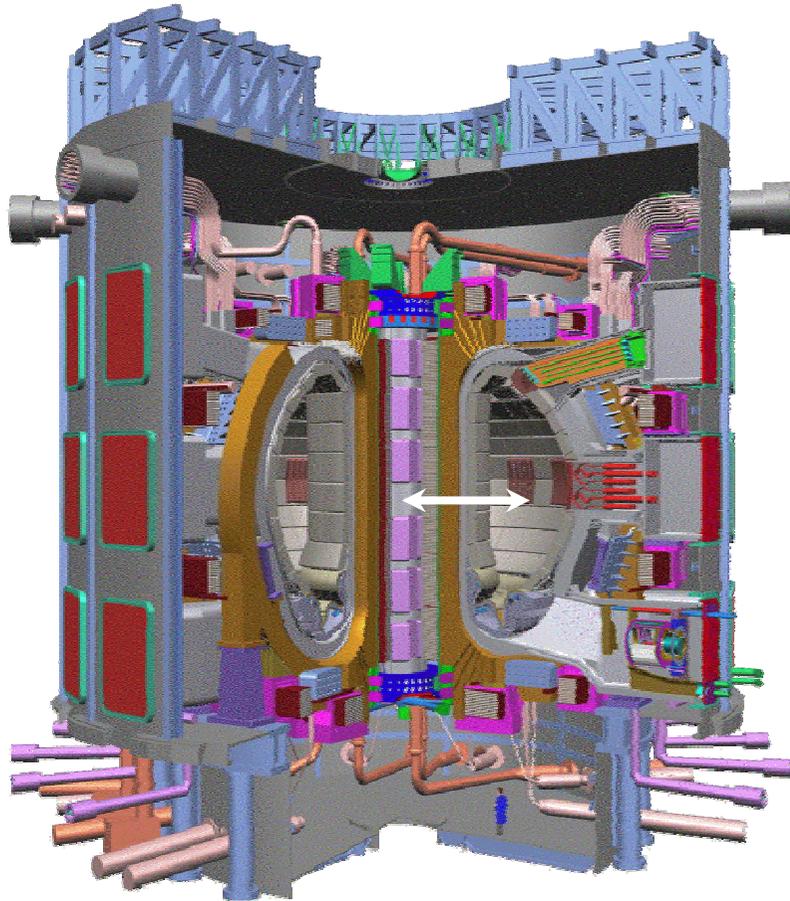


太陽黒点の周辺の乱流(Royal Swedish Academy of Science: 東大柴橋教授のご教示による)



Example of simulation (Lin, Science 98)

# 国際熱核融合実験炉ITER



核融合熱出力 500MW

プラズマの主半径6.2m  
磁場強度 5.3T

乱流輸送を抑制する事で  
核融合燃焼状態を実現する。

乱流揺動を決める機構(非線形過程)を直接観測したい。(そして制御法の原理を作り出したい。)

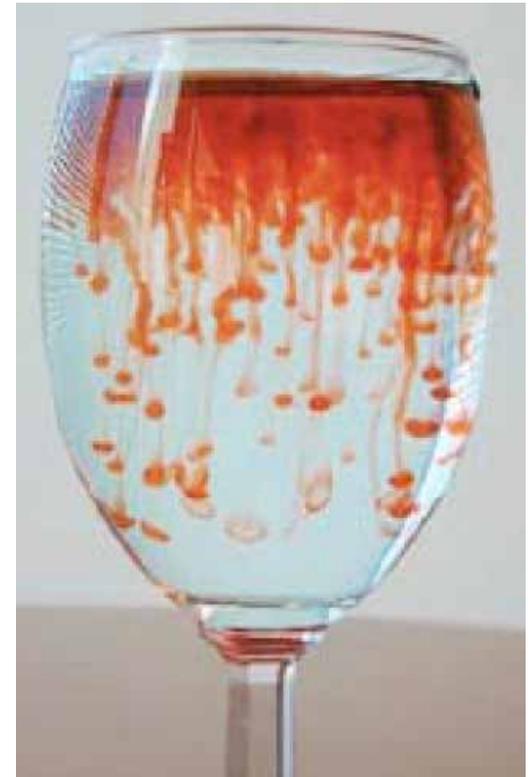
## 乱流はなぜ生まれるか

不安定性：  
重い冷たい水が軽い熱い水  
の上に乗ると……

乱れはどのように飽和するか？

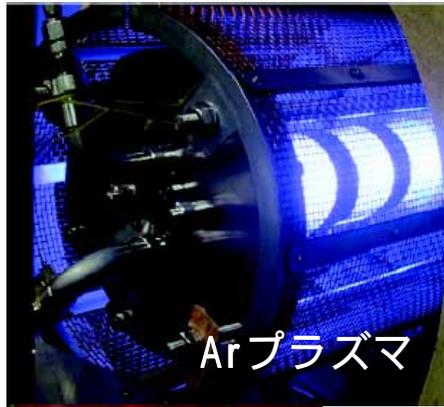
細かい変動になって……  
巨視的な流れに変わる……

プラズマで精密計測し、  
乱流に起きている非線形  
過程を実測。



# 直線プラズマ乱流実験装置（九州大学）

長さ: 3.7 m 最大磁場: 1500 Gauss



48系統/64系統  
プローブ系



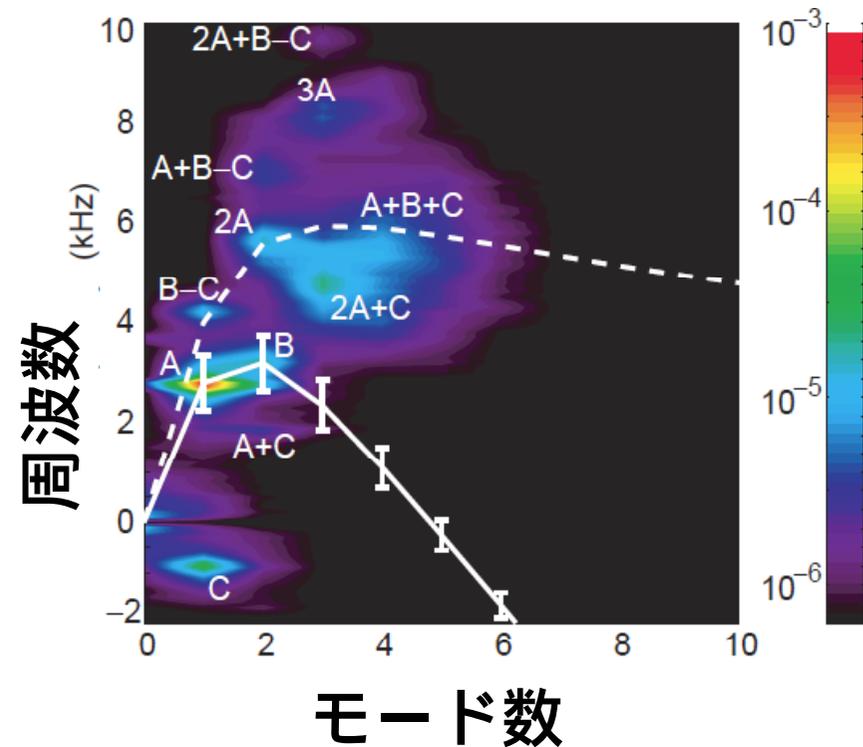
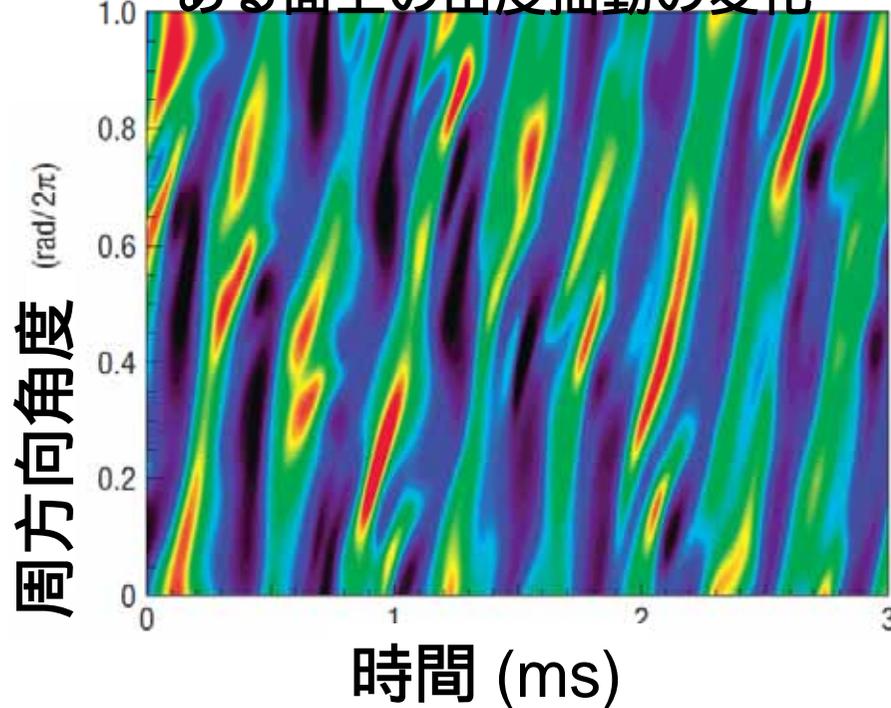
データ収集

データ  
非線形解析

プラズマ乱流  
の解剖

# 複雑な時空パターンを分解する

ある面上の密度揺動の変化



時空パターンを分解し、線形不安定モード、高次高調波、非線形ノイズを明示。少数の親(A, B, C)から残りが順次励起されている事を解明。

世界初

# 波の自己収束（ストリーマー）を発見

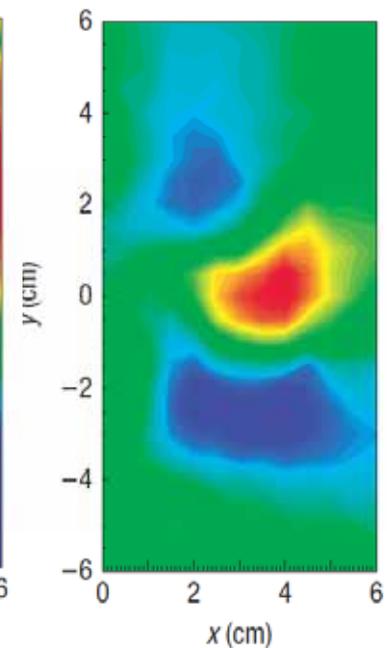
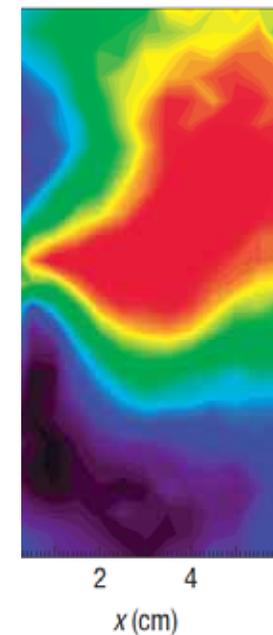
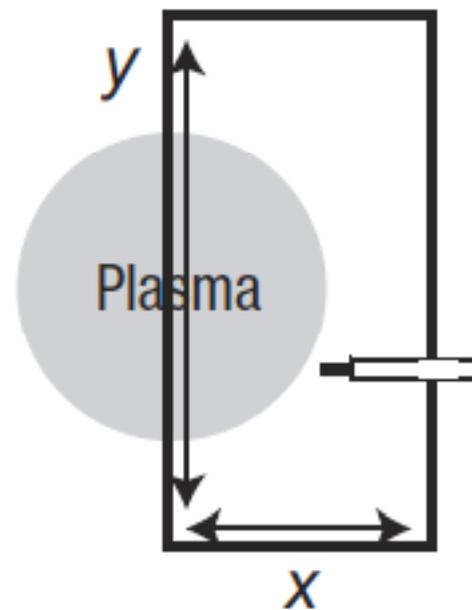
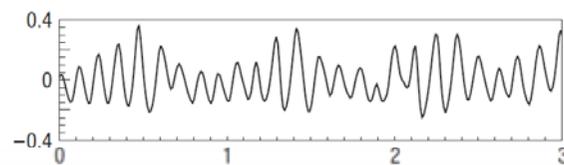
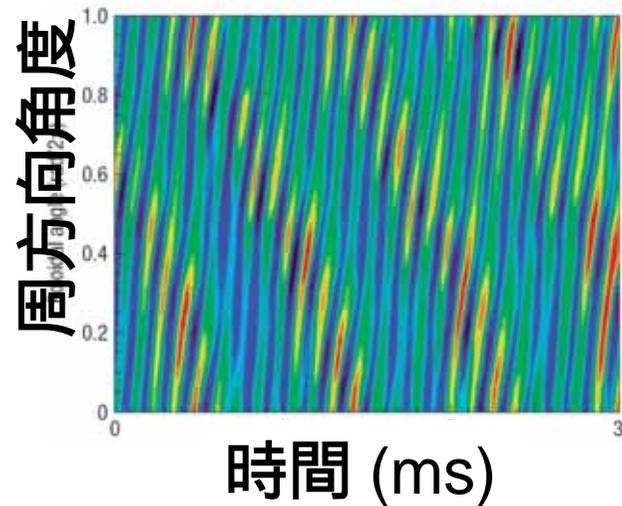


波が周方向にバンチしている。

揺動の塊は中心から外までのびる。

非線形結合でバンチしている事を見

世界初



# まとめ

プラズマ乱流の研究は、自然界のプラズマ理解と制御、核融合研究の実現等、多くの理由から世界中で進められている。

プラズマ乱流の中で起きている非線型過程を観測することに成功。

揺動の塊「ストリーマー」観測に成功、形成機構を実測。

核融合装置の中で起きている乱流機構の理解を提供。

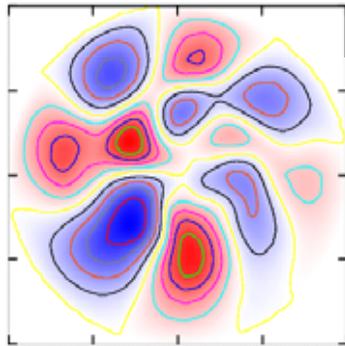
国際核融合実験炉(ITER)などにとって、信頼できる見通しを得る基盤が出来た。

更にプラズマ閉じ込め改善研究を活性化。

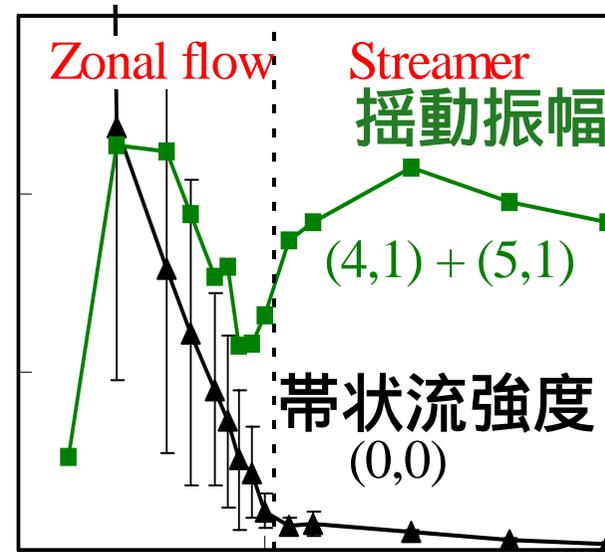
# 乱流と乱流輸送の制御

メソスケール構造の減衰率の大小によって形成される構造が分岐

帯状流励起



乱流輸送を抑制

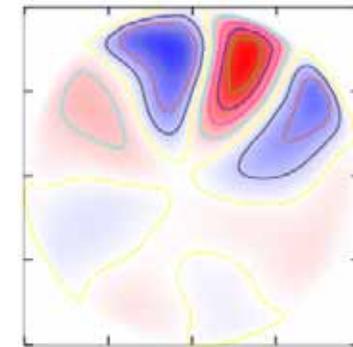


0 中性粒子による帯状流減衰率

遷移

ストリーマー

$\theta$  方向局在



対流輸送を増大

帯状流とストリーマーの選択則を解明