

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760597

研究課題名(和文) 高温不均一磁化プラズマにおける乱流の時空間構造解析

研究課題名(英文) Spatiotemporal structure analysis of turbulence in a high-temperature heterogeneous magnetized plasma

研究代表者

山田 琢磨 (YAMADA TAKUMA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：90437773

研究成果の概要：周方向静電プローブアレーを用い、高密度直線プラズマの電子密度揺動を測定した。直線プラズマの乱流構造を解析することで、核融合プラズマ内に起きる輸送の増加・抑制の理解に貢献することが出来る。本研究により、プラズマ内のマイクロな乱流がそれより大きい構造を組織するという現象が観測できた。この構造は理論的には予測されていたが、直線プラズマにおいて実測されたのは初めてである。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	0	2,500,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	240,000	3,540,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ閉込め・安定性

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの研究において異常輸送は中心的な問題であり、その制御のためには、乱流の物理解明と乱流コントロールが最重要課題である。異常輸送に対し最近急速な理解が展開している。近年の理論研究によって、高温不均一磁化プラズマでは、短波長ドリフト波乱流とメゾスケール構造(ゾナルフローやストリーマー)が非線形結合しながら同時に存在するという描像(ドリフト波乱流-メゾスケールシステムの描像)が明らかにされつつある[P. H. Diamond *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **47**, R35 (2005)]。

すなわち、メゾスケール揺動へのドリフト波の結合係数や、メゾスケール揺動の減衰率が乱流レベルや乱流輸送の大きさに決定的な影響力を持つとされている。並行して、メゾスケール揺動へのドリフト波の結合係数やメゾスケール揺動の減衰率が乱流レベルにどのように影響しているか、実験的な研究の重要性が高まっている。実験技法としても、揺動間の非線形過程の実測が可能になりつつあり[Y. Nagashima *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 095002 (2005)]、核融合プラズマの異常輸送の研究において新たな展開が生まれている。しかし、従来の実験研究は空間

点が限られた時系列データの高次相関関数を求めることに止まっている点で不十分である。ドリフト波乱流 - メゾスケールシステムに重要な3波過程では、空間波数のマッチング条件を満たした3波の組が結合するので、波数のマッチング条件を満たしながら非線形結合係数を実測する研究が強く求められている。

2. 研究の目的

本研究では、九州大学応用力学研究所伊藤早苗研究室において実験が行われている高密度直線乱流プラズマ装置と、このプラズマ装置に設置されている周方向64チャンネル静電プローブを用い、プラズマの電子密度・ポテンシャル揺動(ドリフト周波数帯)の時空間構造を求め、周波数だけでなく周方向波数のマッチング条件を満たした揺動成分間の非線形相互作用を実測することを目的とする。具体的には、この周方向64チャンネル静電プローブを用いて多点同時計測された揺動の時系列データを対象に、2次元スペクトル解析により波数分解されたスペクトルを得る。それによって各波数成分ごとに中心周波数やバンド幅を求める。波数分解されたフーリエスペクトルが求められた後に、周波数・波数のマッチング条件を満たす3波に対して3波相関解析(バイスペクトル解析)を適用し、揺動成分間の非線形結合度を実測するという、世界初の研究成果を目指す。また、非線形相互作用によりドリフト波乱流から生じるメゾスケール構造(ストリーマー、ゾナルフロー等)の実測とその詳細な構造の観測も目指す。乱流の中でスケールの異なる(マイクロスケール/メゾスケール)揺動の結合がバイスペクトルの性質に如何に反映するのか理論的な評価が極最近与えられているので[K. Itoh *et al.*, Phys. Plasmas 12, 102301 (2005)], 理論との比較を行うことが出来る。メゾスケール構造の詳細については、同装置に設置されている周方向48チャンネル静電プローブや2次元駆動プローブ等のサポートを得て解明を目指す。

3. 研究の方法

(1) 周方向64チャンネル静電プローブ

周方向64チャンネル静電プローブを直線プラズマ装置に実装し、測定を行う。各プローブの電極部は径0.8mmのタンゲステン棒でできており、測定領域長さ3mmを残して径2mmのアルミナチューブで覆われている。全てのプローブ電極はステンレスの穴の空いた板に径40mmの位置に精度よく固定されている。すなわち、径方向の測定位置は $r_p = 40$ mmとなる。この64チャンネルプローブで

測定することの出来る周方向波数 k は、周方向モード数 m と $m = r_p k$ の関係にあり、 m は-32から32である。64チャンネルプローブで観測する物理量は主に、電極に-90V程度の電圧をかけることで得られるイオン飽和電流と、電極に電流を流さない状態で得られる浮遊電位である。イオン飽和電流・浮遊電位から、電子温度を評価することで電子密度・プラズマポテンシャルを測定することができ、これらの揺動成分を算出することができる。得られた2次元測定データ $z(r, t)$ を用い、データ解析を行う(r は周方向位置、 t は時間)。 $z(r, t)$ から、周方向波数と周波数に分離したフーリエ変換データ $Z(m, f)$ を求める(f は周波数)。ここで、フーリエスペクトル $S(m, f)$ は、 $S(m, f) = |Z(m, f)|^2$ の関係がある。さらに、 $Z(m, f)$ から2次元バイスペクトル $B = \langle Z_1 Z_2 Z_3^* \rangle$ を求める。(Z_1, Z_2, Z_3 は、 $m_1 + m_2 = m_3$, $f_1 + f_2 = f_3$ という、波数・周波数両空間でのマッチング条件を満たす。)このバイスペクトルを用いて非線形結合の検証を行うが、具体的な手法としては、バイコヒーレンス $|B| / (\langle |Z_1|^2 \rangle \langle |Z_2|^2 \rangle)$ やバイフェーズ $\arctan(\text{Im}B/\text{Re}B)$ を求め、非線形結合係数の度合いを探る。また、得られた非線形結合の強い揺動の組み合わせから、スケールの異なる(マイクロスケール/メゾスケール)揺動間の結合の同定、生存時間の算出などを旨とする。

(2) 直線乱流プラズマ装置

測定対象の直線乱流プラズマ装置について説明する。この装置は九州大学応用力学研究所伊藤早苗研究室に設置されており、Large Mirror Device Upgrade (LMD-U)と呼ばれる。真空容器は内径445mm、軸方向の全長が3740mmである。先端に銅のヘリコンアンテナが巻きついた径100mm、長さ400mmのガラス管が設置されており、Radio Frequency (7 MHz, 3 kW)によりプラズマを生成する。ガラス管内にはアルゴンガス(圧力0.2-0.8 Pa)が充填されている。プラズマは真空容器内の軸方向磁場(0.01-0.15 T)に沿って直径約100mmの大きさで真空容器内を伝わる。プラズマの電子密度の径方向分布は中心軸で極大となり($\sim 6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$)、軸方向に進むほど小さくなる。電子温度はプラズマ内においてほぼ一様で、約3 eVである。64チャンネルプローブは、軸方向 $z = 1885$ mmの位置に設置されている。その他に、周方向48チャンネル静電プローブ(3チャンネルごとのモジュールに分かれており、径方向に移動可能)が $z = 1625$ mm、2次元駆動プローブ(r -方向に移動可能)が $z = 1375$ mmに設置されている。

4. 研究成果

精度よく周方向に配置された 64 チャンネルプローブにより、LMD-U の直線プラズマの電子密度・ポテンシャル揺動（ドリフト周波数帯）の時空間構造を測定し、正確かつ詳細な揺動の 2 次元フーリエスペクトル（周方向波数・周波数）を得ることが出来た。図 1 は 64 チャンネルプローブで測定した電子密度揺動の時空間構造とフーリエスペクトルを表している。放電条件は、アルゴン圧力が 0.27 Pa、軸方向磁場が 0.09 T である。解析により主に 2 つの結果、(1)非線形結合による準揺動と(2)ストリーマー構造の観測に成功した。

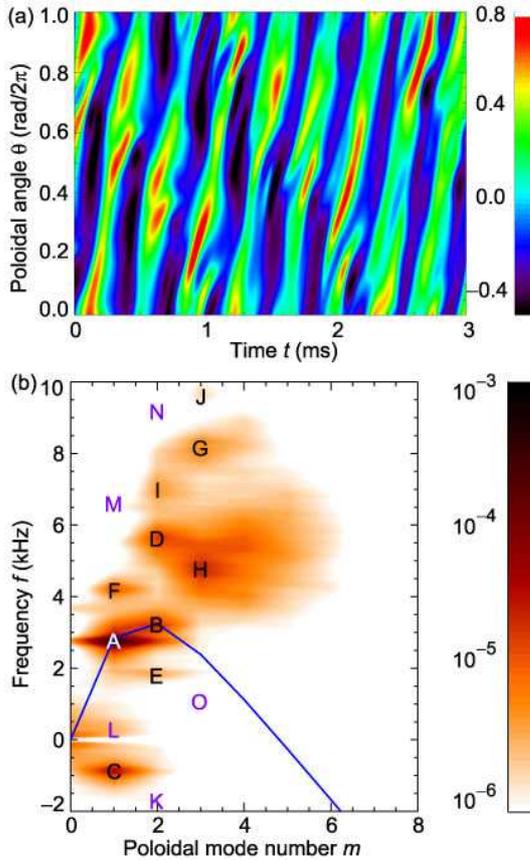


図 1. 64 チャンネルプローブにより測定した LMD-U プラズマの電子密度の (a) 時空間揺動と、(b) 2 次元スペクトル。スペクトル中には、非常に強い揺動ピーク A の他に、揺動ピーク B - J、またこの図から確認は難しいが揺動ピーク K - O が観測された。(b) 中の青い線は、シミュレーション計算によるドリフト波の分散関係である。

(1) 準揺動の観測

図 1(b) 内に現れた十数個の揺動ピークは、それぞれ周方向波数・周波数のマッチング条件 ($m_1 + m_2 = m_3$ および $f_1 + f_2 = f_3$) を満たすことが分かる。例えば、($A + C = E$), ($C +$

$F = B$), ($A + D = G$), ($C + D = H$) などである。そこでパイスペクトル解析を適用し、それぞれの式で表される非線形結合が実在することを確認した。図 2 にその例を示す。その結果、波数 - 周波数平面内に十数個ある揺動は全て数個（例の場合は 3 個）の基本揺動から非線形結合を繰り返すことで波数・周波数のマッチング条件を同時に満たす位置に準揺動として次々に発生していることが分かった。準揺動が親となる 2 つの揺動の非線形結合を通じて強制励起されていること（3 波の非線形結合）は、周方向波数・周波数のマッチング条件を同時に考慮したパイスペクトル解析という今まで行われたことのない解析手法によって確認された。2 次元の 3 波相関解析は多チャンネルプローブアレーを用いないと実行できないため、世界でもあまり行われていない新規的解析方法である。

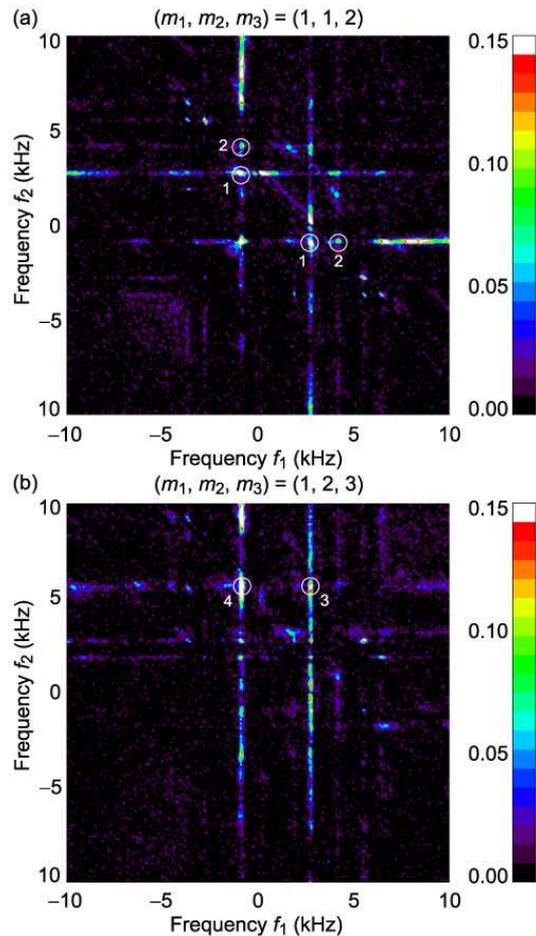


図 2. 波数のマッチング条件 (m_1, m_2, m_3) を (a) (1, 1, 2)、(b) (1, 2, 3) に固定した時の $f_1 - f_2$ 平面内の 2 乗バイコヒーレンス。 $f_3 = f_1 + f_2$ となる。値が 0.003 以上ならば 3 波の間に非線形結合が存在する。数字で表される丸はそれぞれ (1: $A + C = E$), (2: $C + F = B$), (3: $A + D = G$), (4: $C + D = H$) の結合を示している。

これらの準揺動はドリフト波の線形分散関係とは外れた位置にカスケードしていることが、シミュレーション結果と照らし合わせることで理解できた。図1(b)内の青い線はシミュレーション結果であり、主揺動ピークであるAが分散関係に合うようにプラズマの一樣回転が仮定されている。一樣回転の速度を正確に測定することは今後の課題である。この仮定により、Aがドリフト波であるならば、Bもドリフト波である可能性が高い。また、Cの揺動は48チャンネルプローブの結果により、径方向には中心とエッジ付近で揺動レベルが強く、ドリフト波や準揺動ではないモードと思われる。そのため、A, B, Cが準揺動の親となる基本揺動であると考えられる。この推測は、揺動のエンベロップ間の相互相関を計算することで揺動の時間発展の時間差を調べる Amplitude Correlation Technique を適用することで、より確かなものとなった。

その他に、揺動ピークが波数 - 周波数平面の広い範囲と非線形結合をすることで、ブロードバンド揺動が現れることも同時に確認できた。また、2つの軸方向に離れ、径方向位置が同じ周方向プローブ(64チャンネルプローブと48チャンネルプローブ)により、揺動の2次元軸方向相関(周方向波数・周波数)を求めることにも成功した。軸方向相関は、揺動ピーク、準揺動、ブロードバンド揺動のいずれも高い値を示した。

(2) ストリーマー構造の観測

非線形結合を通じてドリフト波揺動が周方向に自己収束し、メソスケール構造の1つであるストリーマー構造を形成する現象が観測された。ストリーマー構造は理論的には予測されていたが、直線プラズマで実測されたのは世界で初めてである。図1(a)の電子密度の時空間揺動を見ると、 f が正の方向に伝播する波は図1(b)では f が正で表現されているので、おおまかに $m = 1$, $f \sim 3$ kHzで伝播している波は主揺動のAである。その他にも十数個の揺動ピークが存在するため、時空間構造は複雑なものになっている。時空間構造をよく見ると、周方向において揺動レベルが強い領域と弱い領域が存在し、それらの領域が時間と共に f が負の方向に $m = 1$, $f \sim -1$ kHzでゆるやかに伝播していることが分かる。この伝播の波数・周波数はドリフト波ではないCの揺動と値が一致する。即ち、AやD等のドリフト波・準揺動がCと非線形結合することでEやH等の準揺動を生成し、全体としてCと同期したエンベロップが生じることになる。Cとエンベロップの位相差はバイスペクトル解析のバイフェーズと一致する。解析では、Cが広い範囲の揺動と同じバイフェーズ値で結合していることが分かり、

その結果ドリフト波乱流が周方向に自己収束し、メソスケールであるストリーマー構造を形成することが分かった。つまりストリーマー構造の形成にはCの波が重要な役割を果たしている。図3は、ある揺動がCと非線形結合することで別の揺動が発生している様子を表している。図3のプラズマは図1,2と放電条件が異なるので現れる揺動の周波数に違いがあるが、(a), (b), (c)はそれぞれD ($m = 2$), H ($m = 3$), C ($m = 1$)の揺動の時間発展を表している。Cの揺動は時間的・周波数的に安定であるのに対し、D, Hの揺動は生存時間が10 ms程度と短く、周波数も様々に変化しながら生成・消滅を繰り返す。ところが、DとHの現れるタイミングは一致し、差周波数は時間的に一定である。このことから、DとHはCとの非線形結合を介してどちらから他方が生成されていることがよく分かる。

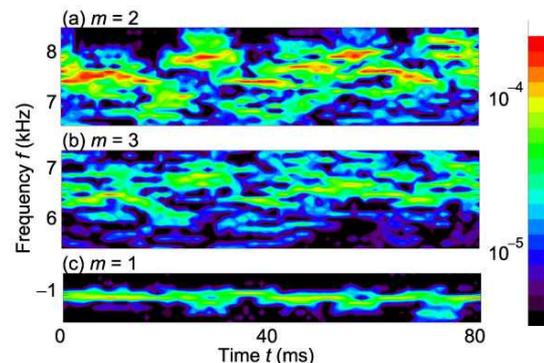


図3. ショートタイムフーリエ変換により求めた、スペクトルの時間発展。各周方向モード数は、(a) 2, (b) 3, (c) 1である。放電条件は、アルゴン圧力0.20 Pa、軸方向磁場0.09 Tである。3者は非線形結合しているため、(a)と(b)は同時刻に存在し、差周波数は(c)と一致する。

理論で予測されているストリーマー構造は周方向に波数を持つが、径方向には変調が弱く、径方向に伸びた構造を持つ。この特徴を確かめるために、64チャンネルプローブと同時に、48チャンネルプローブで $r_p = 20$ mmを測定し、プラズマの径方向の異なる位置で自己収束領域が同時刻では周方向のほぼ同じ位置に存在し、径方向に伸びた構造であることを確認した。2次元プローブによる測定もこれを裏付けた。

これまでにあまり観測された例がなかったストリーマー構造の観測は核融合プラズマの研究分野に大きなインパクトを与えるものであり、さらなる構造の詳細解明や、理論で予測されるように輸送の増大を引き起こすかなどの調査は世界的に興味を引くものであり、今後のLMD-J実験研究の調査テーマである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

T. Yamada, S. -I. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, S. Shinohara, T. Maruta, K. Terasaka, K. Kamataki, N. Kasuya, M. Yagi, Y. Kawai, A. Fujisawa and K. Itoh, Measurement of Nonlinear Mode Couplings in the Large Mirror Device Upgrade, J. Plasma Fusion Res. SERIES (印刷中) 掲載決定, 査読有

T. Yamada, S. -I. Itoh, T. Maruta, N. Kasuya, Y. Nagashima, S. Shinohara, K. Terasaka, M. Yagi, S. Inagaki, Y. Kawai, A. Fujisawa and K. Itoh, Anatomy of plasma turbulence, Nature Phys. **4**, 721-725 (2008), 査読有

T. Yamada, S. -I. Itoh, T. Maruta, N. Kasuya, S. Shinohara, Y. Nagashima, M. Yagi, K. Terasaka, S. Inagaki, Y. Kawai, M. Fukao, A. Fujisawa and K. Itoh, Experimental Study of Drift Wave Turbulence on Linear Plasmas, Plasma Fusion Res. **3**, 044/1-5 (2008), 査読有

T. Yamada, S. -I. Itoh, K. Terasaka, N. Kasuya, Y. Nagashima, S. Shinohara, T. Maruta, M. Yagi, S. Inagaki, Y. Kawai, A. Fujisawa and K. Itoh, Spatiotemporal Behavior of Drift Waves in LMD-U, Plasma Fusion Res. **3**, S1021/1-4 (2008), 査読有

T. Yamada, S. -I. Itoh, T. Maruta, S. Shinohara, N. Kasuya, Y. Nagashima, M. Yagi, K. Terasaka, M. Kawaguchi, S. Inagaki, Y. Kawai, M. Fukao, A. Fujisawa and K. Itoh, Detection of Cascading in Drift Wave Turbulence Using Probe Array in Linear Plasmas, Plasma Fusion Res. **2**, 051/1-3 (2007), 査読有

T. Yamada, Y. Nagashima, S. Inagaki, Y. Kawai, M. Yagi, S. -I. Itoh, T. Maruta, S. Shinohara, K. Terasaka, M. Kawaguchi, M. Fukao, A. Fujisawa and K. Itoh, Fine positioning of a poloidal probe array, Rev. Sci. Instrum. **78**, 123501/1-5 (2007), 査読有

[学会発表](計6件)

T. Yamada, Measurement of Drift Wave Turbulence in the Large Mirror Device Upgrade, Intl. Congress on Plasma Physics 2008, (Sep. 8, 2008), Fukuoka, Japan.

山田 琢磨, 直線プラズマにおけるメソスケール構造の観測, 日本物理学会第63回年次大会, (Mar. 25, 2008), 大阪.

T. Yamada, Nonlinear mode couplings in linear plasmas, The US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection 2008, (Mar. 3, 2008), Okinawa, Japan.

山田 琢磨, 直線プラズマにおけるドリフト波乱流実験, 第24回プラズマ・核融合学会年会, (Nov. 28, 2007), 兵庫.

T. Yamada, Nonlinear Coupling between Drift Waves and Streamers in LMD-U, APS 49th Annual Meeting of DPP, (Nov. 14, 2007), Florida, USA.

T. Yamada, Spatiotemporal Behavior of Drift Waves in LMD-U, 17th Intl. Toki Conference on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas, (Oct. 16, 2007), Gifu, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 琢磨 (YAMADA TAKUMA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号: 90437773