

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14283

研究課題名(和文)乱流揺動波数スペクトルの時間発展計測

研究課題名(英文) Measurement of temporal evolution of wavenumber spectrum of plasma turbulence

研究代表者

稲垣 滋 (INAGAKI, SHIGERU)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：60300729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁化プラズマにおける乱流揺動の波数スペクトルの時間発展を観測するために、マイクロ波周波数コムを用いた散乱計測を開発し、九州大学の直線乱流プラズマ装置の密度揺動計測に適用した。本研究では波数領域の多チャンネル化を従来のフィルターバンク方式ではなく、超高速デジタルストレージオシロスコープによる信号取得とデジタルフーリエ変換を組み合わせることで実現した。本手法により、波数分解した散乱波の時間発展を観測することに成功した。今後、散乱計、干渉計、反射計等の種々のプラズマのマイクロ波診断技術に本研究の成果が適用されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We have developed a microwave frequency comb scattering measurement to observe temporal behavior of wavenumber spectrum of turbulent fluctuation in magnetized plasma. We have applied this method to density fluctuation measurement in the linear magnetized plasma device (PANTA) in Kyushu University. Here multi-wavenumber measurement is realized by using ultra-fast digital storage oscilloscope and digital Fourier transform technique instead of the frequency filter-bank. We have succeeded to observe a temporal evolution of wave-number resolved scattered signal in PANTA. This method is expected to be applied in various microwave sensing techniques for plasma diagnostics.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：プラズマ乱流 マイクロ波工学 リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

将来のエネルギー問題の解決に向けて、磁場閉じ込め核融合炉の開発が世界的に行なわれている。核融合炉の実現にはプラズマの輸送を抑制し、高温のプラズマを十分長く閉じ込める必要がある。磁化プラズマの輸送を制御するためにはプラズマ乱流の理解が不可欠である。従来、勾配によって励起されたマイクロスケールの乱流が輸送を駆動しプラズマが損失する、という乱流輸送像のもと研究が進められてきたが、近年、Zonal 流や長距離相関揺動が発見されたことで [1]、プラズマ中にはメゾ・マクロスケール揺動が共存し、お互いが相互作用する事で乱流状態が決まる、という多スケール結合乱流という新たな描像が生まれた。このような多スケール乱流を考慮した大規模シミュレーションが行われ、乱流輸送の波数依存性等が予言されている [2]。このような乱流の波数空間における分布及びその動的振る舞いを実験的に検証する事が急務の課題である。

2. 研究の目的

マイクロ波周波数コム散乱計を用いて、九州大学の直線プラズマ乱流装置 (PANTA) にて密度乱流揺動の多波数同時計測を実証する。更に波数スペクトルの動的応答を観測する事で、突発的現象における波数空間でのエネルギー移送の向きを観測可能である事を示す。

3. 研究の方法

(1) 九州大学直線乱流プラズマ装置(PANTA) 本研究では PANTA での実験を中心に研究を進める。PANTA は 7MHz の RF (3-6 kW) で励起するヘリコン波によって直径 10cm、長さ 4m の円柱アルゴンプラズマを生成する。軸方向磁場(0.09 T)によってプラズマを閉じ込め、径方向密度勾配によってドリフト波を励起する。中心電子密度、電子及びイオン温度は $1-10 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 1-3 eV, 0.1-0.3 eV である。アルゴンイオンのラーマ半径は 3 mm 程度であり、イオンの音速で評価したラーマ半径は 1 cm 程度となる。

(2) マイクロ波周波数コム散乱計

本研究に用いたマイクロ波周波数コム散乱計の概要(後方散乱の例)を図 1 に示す。中心密度が $3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 以下の低密度 PANTA プラズマをターゲットとする。散乱波の帯域として K 帯 (18-26 GHz) を選択した。コムの周波数間隔は 0.5 GHz であり、波数分解能は $\Delta k_n/k_n = 1-4 \%$ となる。従来、多波数同時計測ではフィルターバンクを用いる手法が用いられていたが、フィルター周波数が固定されてしまう、部品点数が増加する、等の課題があった。本研究では、散乱波は 80 Gs/s の超高速デジタルストレージオシロスコープを用いて直接デジタル化する。取得信号データにデジタルフーリエ変換を適用する事で波数

スペクトルの同時計測が可能となる。また、PANTA では周方向 64ch プローブアレイによって、 $k_n \rho_i = 0.1-0.5$ 程度のイオン飽和電流揺動の波数スペクトルが観測されている [3]。本研究の散乱計測の対象波数領域とは相補的となり、広範な波数領域での乱流計測が可能となる。また、前方散乱計測であれば $k_n \rho_i < 1$ の領域にアクセスできるので、プローブ計測との比較から散乱計測の検証が可能となる。

$$K_n = 2 k_n \sin(\theta/2) = 2(\omega/c) \sin(\theta/2)$$

k_n : 密度揺動の波数
 k_i : 入射マイクロ波の波数
 ρ_i : イオンラーマ半径

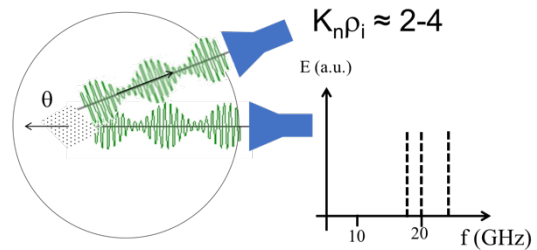


図1 マイクロ波コム散乱計の概要

4. 研究成果

(1) マイクロ波周波数コム発生器と受信器

今回の研究で用いたマイクロ波周波数コム散乱計は主にコム発生器と超高速オシロスコープから構成される。図 2 に入射波と散乱波の時間発展及び、その周波数スペクトルを示す。入射した周波数コムの信号を時間領域で見ると図 2(a)で示したように搬送波をパルス状に振幅変調した波形となる。変調周期 2ns はコム周波数間隔 0.5 GHz に対応する。プラズマからの散乱波も振幅変調されているが、各周波数成分の寄与が異なるためパルスが時間軸方向に伸ばされた波形となる(図 2(b))。入射周波数コムのパワースペクトルは時系列信号にフーリエ変換を行うと、図 2(c)のように 12-26 GHz までの楕状のパワースペクトルが得られる。本研究ではプラズマ中にカットオフを持たない 18-26 GHz に着目した。実際散乱波の強度は図 2(d)に示すように反射波の領域(12-18 GHz)より 18-26 GHz の領域で小さくなっている(図 2(d))。

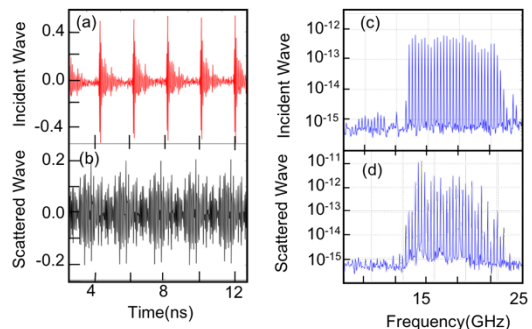


図2 オシロスコープにて取得した入射波(a)、散乱波(b)の時間発展波形及びそのフーリエスペクトル(c)(d)

(2) 散乱波計測の検証

散乱波計測で問題となるのは散乱波に混入する不要なマイクロ波の除去である。不要なマイクロ波の発生源は真空容器壁での反射が考えられる。特に PANTA は円柱型真空容器の直径が約 50cm と非常に小さいため反射波対策は必須である。本研究ではマイクロ波入射アンテナの対向ポートを石英窓にし、大気側にマイクロ波吸収体を設置した。この配置にて反射波の効果を検証した。アンテナを後方散乱の配置にし、散乱波のドップラーシフトを観測した。受信したマイクロ波が壁からの反射由来であればマイクロ波はドップラーシフトしていないが、後方散乱波であればプラズマの運動によりドップラーシフトする。このドップラーシフトによりプラズマ由来の成分とプラズマ以外からの寄与を弁別可能である。図 3 は同一のプラズマをターゲットとしてアンテナの入射角を変化させ、ドップラーシフトを計測した結果を示している。ここで 0 度は垂直入射を示しており、ドップラーシフトは観測されない。図 3 に示すように入射角を変化させていくとドップラーシフトが観測される。入射角を正負反転させるとドップラーシフトも正負反転する事からこのドップラーシフトはプラズマの運動(周方向回転)によるものと確認出来る。このドップラーシフトから周方向回転を評価した場合、入射角には依存せずほぼ同一の周方向回転速度が評価できる。この事から本研究では壁からの反射波は無視できると考えられる。

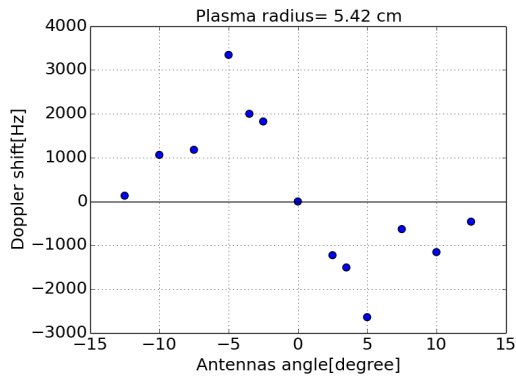


図 3 受信マイクロ波周波数のドップラーシフト。入射角を変えて測定。

(3) 散乱波の時間発展計測

散乱波信号を入射信号とデジタル的にミキシングする事で特定の波数 k_n を持つ密度揺動成分を抜き出す事が出来る。得られた密度揺動の時間発展とその周波数スペクトルを図 4 に示す。時間発展の時間分解能はフーリエ解析の時間窓に依存し、振幅の精度とトレードオフになるが、通常 $1 \mu\text{s}$ 以下である。揺動スペクトルには 10 kHz 程度にピークが観測される。2 倍高調波の存在も確認された。同時に行ったイオン飽和電流計測にもこの

成分が検出されている。プローブ計測からこの揺動の波数を推定すると $k_r \rho_i \sim 2$, $k_\theta \rho_i = 0.4$ であり、本散乱計測範囲内である事が確認できた。これらから散乱波の時間発展が観測できたといえる。周波数コム各成分に関して同様な解析を行うことで複数の k_n に対する周波数スペクトルが得られる。ここから揺動の分散関係 (k - ω relation) が得られる。

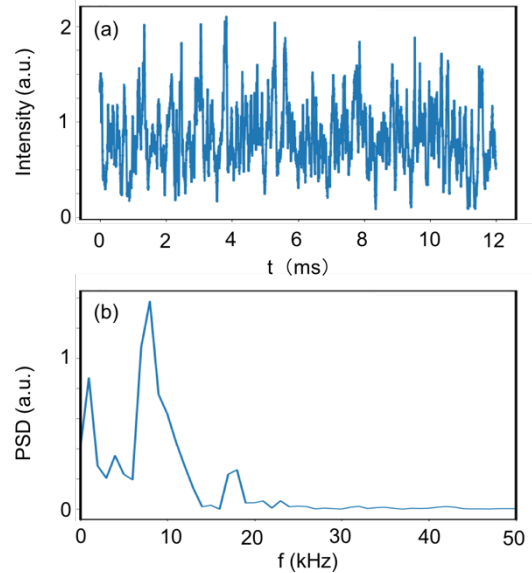


図 4 入射マイクロ波の 23 GHz 成分の散乱波の振幅(実効値)の時間変化(a), 及びそのフーリエスペクトル(b).

(4) 成果の位置づけ

マイクロ波周波数コム散乱計への適用は世界的にみても例がなく初の試みであった。1 系統の送受信器とデジタルフーリエ変換を組み合わせる事で波数領域に多点の信号が得られた。デジタル処理技術により、物理チャンネルの数を大幅に縮減できる事を示せた。プラズマ研究ではマイクロ波センシング(散乱計、干渉計、反射計)が標準的な計測ツールとなっているが、周波数コムを導入する事で高度化する事ができる。核融合プラズマのような高密度プラズマでは入射周波数が高くなるがダウンコンバートすれば本研究の成果がそのまま適用可能である。高温高密度の炉心級プラズマにおける超高精度超広帯域プラズマ乱流計測の道を拓く。

(5) 今後の展望

(i)コム周波数間隔を調整することにより更なる高波数分解計測が可能である。一方で波数計測の広帯域化はマイクロ波部品の帯域で制限されている。これを解決するには異なる帯域や異なる入射角を持つような散乱計の多チャンネル化が必要となる。但し周波数コム散乱計であれば数台でカバーできると考えられる。

(ii)本研究では主に準定常な乱流揺動を計測したが、今後遷移現象などをターゲットとし

[4], イベント前後の波数スペクトルの時間変化等, 新たな乱流ダイナミクスの研究が可能である。

(iii)超高速オシロスコープで取得したバイナリーデータは非常に大きく(4GB/ch/shot), フーリエ変換には大容量メモリを持った高速の計算機が必要となる。1日に100shot実験し,入射波と散乱波と最低2chをデジタル化すると約1TB/dayとなるので, データの高速転送や大容量データ保存という問題も生じる。近年のデジタル技術の発展によりデータ量は今後益々増加すると考えられるため, FPGA の利用等も含めた巨大データの処理手法が重要になる。

<引用文献>

- ① S. Inagaki et. al., Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 1115001
- ② S. Maeyama et. al., 25th IAEA FEC, Russia (2014) TH/1-1
- ③ T. Yamada et. al., Nature Phys. **4** (2008) 721
- ④ H. Arakawa, S. Inagaki, et. al., Plasma Physics and Control. Fusion **52** (2010) 105009

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 11 件)

- ① T. Kobayashi, S. Inagaki, M. Sasaki, 他 9 名, Phenomenological Classification of Turbulence States in Linear Magnetized Plasma PANTA, Plasma Fusion Res. **12** (2017) 1401019, 査読あり DOI: 10.1585/pfr.12.1401019.
- ② F. Kin, T. Yamada, S. Inagaki, 他 10 名, Changes of Particle Flux during End-Plate Biasing Experiment in PANTA, J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 093501, 査読あり DOI: 10.7566/JPSJ.85.093501.
- ③ T. Kanzaki, Y. Nagashima, S. Inagaki, 他 10 名, Improvement of the Reynolds Stress Probe for End-Plate Biasing Experiments in a Cylindrical Laboratory Plasma, Plasma Fusion Res. **11** (2016) 1201091, 査読あり DOI: 10.1585/pfr.11.1201091.
- ④ Y. Nagashima, S. Inagaki, A. Fujisawa, 他 6 名, Observation of Parallel Force Balance for Drift Wave Fluctuation by a Fast Voltage Sweeping Method in a Linear Plasma, J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015) 063501, 査読あり DOI: 10.7566/JPSJ.84.063501.

[学会発表] (計 10 件)

- ① Z. Boyu, S. Inagaki, 他 3 名, Study of particle transport and turbulence with comb microwave reflectometer in PANTA, 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics,

Chengdu, China 2017

② Z. Boyu, S. Inagaki, Measurement of electron density profile and turbulence with comb microwave reflectometer in PANTA, 7th Asia Pacific Transport Working Group, Nagoya, Japan 2017

③ R. Minato, S. Inagaki, 他 9 名, Measurement of Azimuthal Flow Velocity with a Microwave Frequency Comb Doppler Backscattering in PANTA, 第33回プラズマ核融合学会年会, 東北大学 2016

④ S. Inagaki, Cross-Scale Coupling in Magnetized Turbulent Plasma, 日本物理学会春季年会, 東北学院大学 2016

⑤ T. Mizokami, S. Inagaki, 他 11 名, Measurement of plasma turbulence with a frequency comb reflectometer in PANTA, the 17th Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology, Kyushu Univ. 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲垣 滋 (INAGAKI Shigeru)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号: 60300729