

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18772

研究課題名(和文)3次元ミリ波イメージングを用いた局所再結合の研究

研究課題名(英文) Investigation of the localized reconnection by using the 3D millimeter imaging diagnostics

研究代表者

長山 好夫(NAGAYAMA, Yoshio)

日本大学・理工学部・特任教授

研究者番号：10126138

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文):マイクロ波イメージング反射計(MIR)を球状トカマク(ST)TST-2に設置した。照射マイクロ波周波数は23-32GHzである。プラズマからの散乱波はホーン型ミリ波画像検出器(HMID)にテフロンレンズ、誘電体板と楕円面鏡からなる光学系で結像する。散乱波のパワーと位相は0.5 μ s毎にサンプルし、核融合ネットワーク(SNET)経由で核融合研のLABCOMシステムでデータ収集した。散乱波のパワーは5 μ s間に千倍も変化する。内部再結合現象(IRE)での位相変動から、位相の打ち消し合いによりパワー変動が起きることが分かった。しかし、IREでは磁気再結合そのものの証拠が得られなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合プラズマ閉じ込めを支配する乱流には満足な観測方法がなかったが、乱流を高速で可視化できる唯一の計測器としてMIRが期待されている。しかし観測データには多くの謎が含まれており、解釈は容易ではない。今回、計測装置の試験が容易で、観測対象がシンプルなSTプラズマのIREを対象としたことで、観測データの解釈が大きく進歩した。特に、迷光が位相測定妨害になること、MIR信号変動は位相の打ち消し合いで発生することが分かった。MIR測定による乱流観測データには従来の他の観測とは異次元の情報が含まれており、プラズマ乱流観測および核融合プラズマ閉じ込め物理を大きく進化させる基礎として有意義である。

研究成果の概要(英文):An 0-mode microwave imaging reflectometry (0-MIR) system has been installed in a Spherical Tokamak (ST) named TST-2. The illumination wave frequency is 23-32 GHz. The microwave image of the scattered wave is formed on an imaging detector named Horn-antenna Millimeter-wave Imaging Detector (HMID) by the imaging optics that consist of an ellipsoidal aluminum mirror, a Teflon lens and a dielectric plate. The data of power and phase of the scattered wave are sampled every 0.5 micro-sec and are stored by the LABCOM system at NIFS via a private network named SNET. The scattered wave fluctuates quickly (~5 micro-sec) and largely (1000 times) in amplitude. From the time evolution of the phase at the Internal Reconnection Event (IRE), it is inferred that the reduction of amplitude may be due to the phase mixing of scattered wave in each detector channel. No evidence of reconnection has been observed.

研究分野：イメージング計測、プラズマ計測、核融合炉

キーワード：マイクロ波イメージング反射計 乱流可視化 迷光 位相の打ち消し合い 核融合プラズマ閉じ込め IRE

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

最も有望とされる核融合プラズマ閉じ込め方式であるトカマクには鋸歯状波崩壊現象がある。これはプラズマ中心部 $q=1$ 面内側から外側へ熱と粒子が急速に移動し、中心部の温度分布が平坦になる現象である。核融合炉ではプラズマ温度が 10keV 以上必要であるが、鋸歯状波崩壊があると困難であるので、これは重要な物理課題である。熱・粒子の高速移動機構としては $q=1$ 面内側と外側の磁力線の再結合としか考えられない。しかし、図 1(b) に示すように、 $q=1$ 面全体での再結合ならば当然起こるべき $q<1$ から $q>1$ への磁力線のトポロジー変化が観測されないというパラドックスがある。磁力線の再結合は核融合プラズマだけでなく宇宙プラズマでも重要な物理機構であるので、この鋸歯状波パラドックスの解決は重要である。このパラドックスを解決する一つの仮説が、本研究代表者が提唱する「局所再結合モデル」である。これは、図 1(c) に示すように、 $q=1$ 面の一部だけで磁力線の再結合が発生し、全域に伝播しないというモデルである。これならば、磁力線のトポロジー変化なしに熱と粒子の急速移動が可能となる。しかし、局所再結合モデルはまだ実験的に検証されていない。

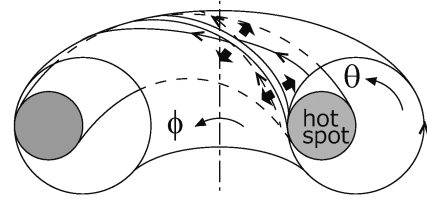
局所再結合モデルを実証するためには、局所的計測装置が必要である。本研究代表者は、核融合科学研究所(核融合研)において 3 次元電子密度揺動分布計測のためにマイクロ波イメージング反射計(MIR)を開発してきた。最近、高感度で使いやすい 2 次元マイクロ波検出器(HMID)の開発に成功し、MIR 計測がコンパクトになり小型プラズマ実験にも応用可能となった。MIR を用いて懸案の局所再結合モデルの実験的検証を行うのは自然な流れである。

MIR はわずかな電子密度揺動でも超高速(毎秒 200 万フレーム)で撮像できるため、電磁流体力学的(MHD)不安定性でも、乱流でも観測可能な最先端の計測器である。ところが、核融合研の大型ヘリカル装置(LHD)に MIR を取り付けて乱流計測したところ、予想もしない観測結果となった。「第一に位相変化が見られないこと、第二に散乱マイクロ波像が示す乱流と思われる微小揺動構造が、理論的予想とは全く異なっていることである。」特に、静電的不安定性なら磁力線上では、同電位であるため同じ振る舞いをするはずだが、MIR 観測ではそのような像は得られない。理論と実験の齟齬なのか、計測の解釈が間違っているのか、LHD のようなねじれた反射面からの信号では判断が困難である。

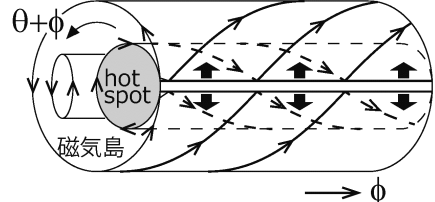
球状トカマク(ST)プラズマでは鋸歯状波崩壊は起こらないが、類似の現象として「内部再結合現象(IRE)」がある。これは、図 2 に示すようにプラズマ中心部の温度は変化しないが、電子温度分布の中間部にリング上の平らな部分が発生するものである。これも、リングの中心の磁気面において内外の磁力線が結合して起こるとされている。しかし、全再結合ならば、図 2(a) に示すように磁気島が広がるだけで、平坦なリングは発生しない。この場合でも、局所再結合モデルが有効である。したがって、ST プラズマにおいて、MIR を用いて IRE を観測することで、局所再結合の観測が可能と思われる。

また、ST プラズマは非円形断面であり、MIR 計測を行う外側では磁気面がほぼ垂直に立っているため、反射面がほぼ平面鏡のようである。そこでの散乱マイクロ波の振幅変動や位相変動の解釈は LHD に比べてはるかに容易である。したがって、ST プラズマにおいて IRE を MIR で観測することは、磁気再結合の物理を理解する上でも、MIR 計測データの解釈を確立する上でも大変に有用である。

(a) 磁力線再結合 (トーラス)



(b) 全再結合モデル (2次元)



(c) 局所再結合モデル (3次元)

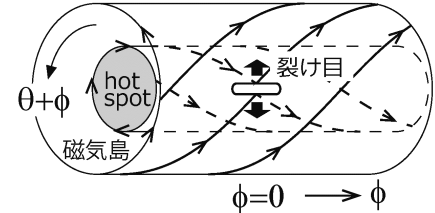
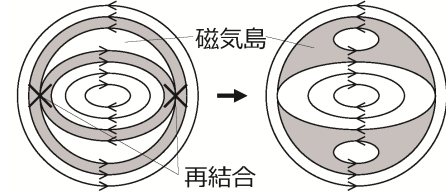


図 1 . 鋸歯状波崩壊での磁力線再結合。(a) トーラスでの全再結合の立体視、(b) ヘリカル座標系での全再結合モデル、(c) ヘリカル座標系での局所再結合モデル。矢印は磁力線方向。実線は外側磁気面、破線はホットスポットの磁力線を示す。

(a) 全再結合モデル (2次元)



(b) 局所再結合モデル (3次元)

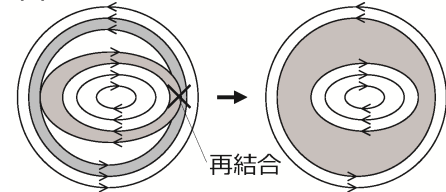


図 2 . IRE における $m=2$ 磁気島の再結合。(a) 2 次元的全再結合モデル、(b) 3 次元局所再結合モデル。

2. 研究の目的

本研究の第一の目的は局所再結合モデルの実験的検証である。だがその前に MIR 計測データの解釈を確立することが大事である。そのために明確な物理現象である IRE を MIR により、何が起きているかを観測する。

3. 研究の方法

(1) 測定原理

プラズマは電磁波をカットオフし、カットオフ周波数以下の周波数の電磁波を反射する。高周波電場がプラズマ閉じ込め磁場と平行な O モード波でのカットオフ周波数 (f_{pe}) は、電子密度 (n_e) の関数として、以下の(1)式で表される。

$$f_{pe}[\text{GHz}] = 28.4\sqrt{n_e[10^{19}\text{m}^{-3}]} \quad (1)$$

MIR はプラズマに一定の周波数の電磁波（マイクロ波）を入射する。プラズマ中に波が発生すると、等電子密度面すなわち MIR 周波数に対応する反射面が波を打つ。波打つカットオフ面は入射電磁波を散乱するので、散乱波パワーが変動する。また、反射面の位置が反射波の位相に対応するので、逆に位相変動から反射面の位置の変動を知ることができる。

(2) 実験装置

本研究では、LHD の O モード MIR (O-MIR) の電子回路を改造し、TST-2 に設置した。TST-2 での空間的設置条件は、本研究代表者が最初に MIR 実験を行った産業総合研究所の逆転磁場ピンチ (RFP) 装置 TPE-RX と類似している。今回の実験では TPE-RX の MIR 架台・光学系を改造して用いた。TST-2 における MIR 実験システム概念図を図 3 に示す。照射マイクロ波は 3 つの波源 (Syn: シンセサイザ、VCO: 電圧制御発振器、REF: 水晶発振器) をアップコンバータで周波数加算され、さらに逡倍器で所要のマイクロ波周波数 (ω_{RF}) にする。シンセサイザ周波数はコンピュータで所要の値に設定する。VCO は 2 種類あり、2 つの異なる電子密度で反射される。

照射波と反射波は同軸であるが、照射ビームは平行ビーム (平面波) であり、散乱波は球面波である。散乱波は楕円面鏡で 2 次元マイクロ波受信器 (HMID) に結像され、受信される。HMID ではシンセサイザからのマイクロ波と周波数引き算 ($\omega_{RF} - \omega_{REF}$) されて出力される。さらに周波数分離器で VCO の周波数 (ω_{RFj}) を引き算され、バンドパスフィルタで分離されて、REF の周波数 (ω_{REF}) の中間周波数 (IF) 信号となる。REF は低い周波数 (110MHz) 固定であり、IF 信号はすべて同一仕様の狭帯域 (± 1 MHz) IF アンプで増幅され、直交復調器により水晶発振器との位相差 (ϕ) について、直交信号 ($I \sim \cos\phi$, $Q \sim \sin\phi$) を検出する。散乱波のパワー信号および位相信号は PXI デジタイザでデジタル化され、全日本仮想研究所 (SNET) 経由で、核融合研の LHD データ収集システム (LABCOM) へ送られる。

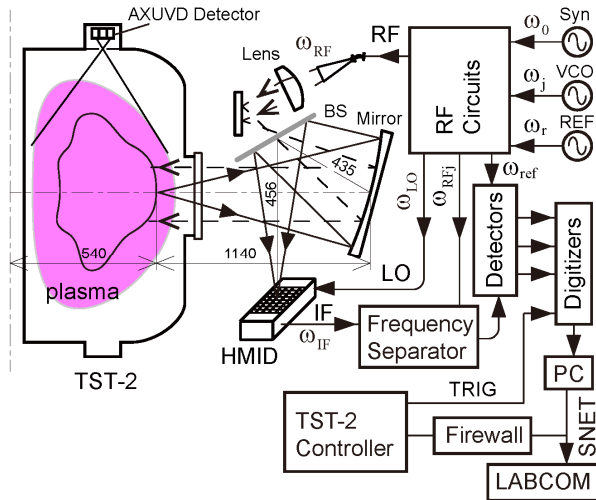


図 3. TST-2 における MIR 実験システム概念図

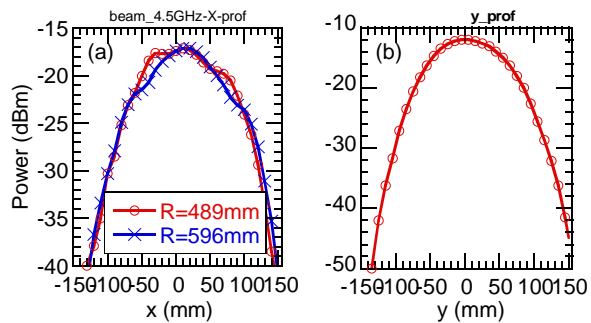


図 4. MIR 照射ビーム分布。(a) 水平方向、(b) 垂直方向。

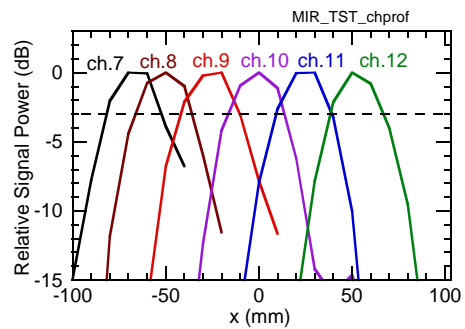


図 5. 受信チャンネル毎の規格化信号強度 (分解能)。

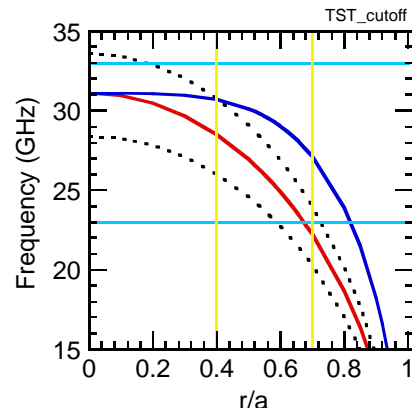


図 6. 典型的な TST-2 プラズマのカットオフ周波数と MIR 周波数。

によってデータ収集され、管理される。

図4に示すように、MIR照射ビーム分布は水平方向、垂直方向ともビーム幅160mmであり、ビーム進行方向に100mm異なっても同一幅であるので平行ビーム(平面波)と見なして良い。図5に、観測位置に直径40mmのアルミ棒受信チャンネル毎の規格化信号強度を示す。分解能は-3dBでの空間幅である。球面鏡の幅は $D=400\text{mm}$ 、球面鏡から観測位置までの距離は $L_1=1140\text{mm}$ であるから、開口数は $F=L_1/D=2.85$ となる。マイクロ波波長は $\lambda=11.5\text{mm}$ であるから、結像光学系による分解能は $\delta \sim F\lambda=33\text{mm}$ であり、図5の-3dB幅 $\sim 30\text{mm}$ とほぼ同一である。また、HMIDのチャンネル間隔は $h=20\text{mm}$ 、球面鏡からHMIDまでの距離は $L_2=891\text{mm}$ であるから、観測位置でのチャンネル間隔(d)は、 $d=h \times (L_1/L_2)=25.6\text{mm}$ となる。これも図5に示すチャンネル間隔と矛盾しない。

(3) 実験方法

トムソン散乱によりTST-2オーミック(OH)プラズマの電子密度を測定したところ、中心密度 $1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の放物線分布であった。このデータを用いて図6に典型的なTST-2プラズマのOモードマイクロ波カットオフ周波数の半径分布を示す。これまでの実験では、IREはプラズマ端部半径($a=250\text{mm}$)で規格化した半径(r/a)で、 $r/a=0.4 \sim 0.7$ 付近で発生する。したがって、MIR周波数は23~29GHzが適当である。LHDのMIRでは、26~32GHzのOモードミリ波を用いるので、バンドパスフィルタの交換などの改造を行ったが、HMIDの感度限界により23GHz以下は測定できなかった。

異なる電子密度面の測定のために2つのVCOを用いているが、そのマイクロ波周波数差は1.4GHzであるため、図6から測定規格化半径差はわずかに0.04(10mm)であることがわかる。IRE発生位置が分からないので、ショット毎に周波数を変え、IRE観測を目指した。

4. 研究成果

(1) 位相変化の謎の解明

LHDのO-MIR実験において、機器はすべて単独試験では正常なのに、位相変化が無いという謎の現象があった。LHDでは主鏡(大型楕円面鏡)が真空容器内にあるため、テーブルトップ実験ができないため、本格的究明ができなかった。本研究では、MIR光学系がコンパクトな筐体内に収まっているのでテーブルトップ実験を行った。その結果、ビームスプリッタでの散乱が迷光となっていることがわかった。迷光は一定であるため、位相変動が起きない。一方、LHDでも散乱波のパワー変動は見られたが、迷光は一定であるため、変動分の観測は可能であることが理由である。MIRは全く新しい計測であるため、このようなプリミティブなことすら分かっていなかった。なお、ビームスプリッタをアクリル板に交換し、迷光を大幅削減した。

(2) MIR散乱波のパワー変動の発見

図7に典型的なTST-2プラズマでのMIR信号例と、 $H\alpha$ 信号および磁気信号(Bp)を示す。時刻 $t=15\text{ms}$ でプラズマが着火し、 $t=38\text{ms}$ でIREが発生し、 $t=40\text{ms}$ にプラズマが消滅する。注目すべきことは、MIR散乱波パワー信号が激しく変化することである。IRE発生時のMIR散乱波パワー信号を図8に示す。図8では図7の時刻 $t=38\text{ms}$ を $t=0\mu\text{s}$ としている。IREは、 $t=30\mu\text{s}$ で発生する。散乱波パワーはわずかに $2\mu\text{s}$ 間におよそ30dB(1000倍)も変化することがわかる。

MIR計測における第一の謎はこの激しい変化である。MIR信号は反射である。反射面が視線と垂直の時が最も反射波パワーが大きい。反射面が傾くと反射波パワーが弱い。

(3) 位相の乱れの発見

IRE発生時の散乱波パワーが大きい時(T1, T3)と小さい時(T2)について、位相を調べた。図9に直交信号を $I \sim \cos\phi$ はx軸、 $Q \sim \sin\phi$ はy軸としたリサージュ曲線を示す。これは反時計回り

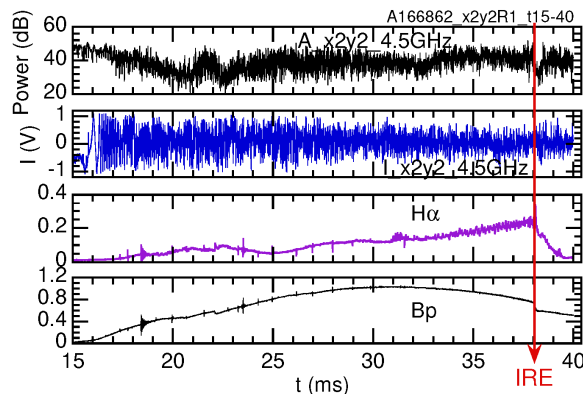


図7. TST-2プラズマでのMIR信号例と、 $H\alpha$ 信号および磁気信号(Bp)

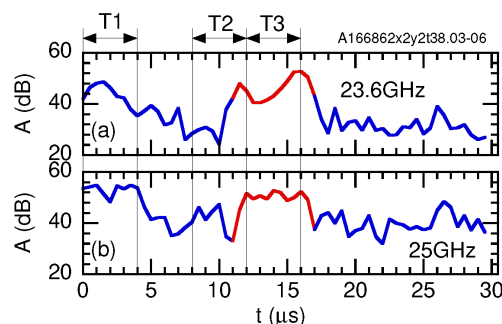


図8. IRE発生時の散乱波のパワー信号。図7の時刻 $t=38\text{ms}$ を $t=0\mu\text{s}$ とする。IREは、 $t=30\mu\text{s}$ で発生する。

ならば位相が進む、すなわち反射面が検出器から離れる、時計回りならば位相が遅れる、すなわち反射面が検出器に近づくことを示すものである。T1 ($t=0-4\mu\text{s}$) では位相が進み、T3 ($t=12-16\mu\text{s}$) では位相が遅れる。ところが、T2 ($t=8-12\mu\text{s}$) ではリサージュ曲線が潰れる、すなわち位相が定まらない。これは、反射面が傾いているため、様々な位相で反射していることを示している。分解能の幅 (30mm) の反射面が半波長 (6mm) 傾いていたら、 360° 位相が異なる反射波が HMID の 1 チャンネルに入る。この場合、位相がすべて打ち消されるので、パワー=0となる。要するに、散乱波のパワー信号が小さいときには、位相が乱れていることが分かった。

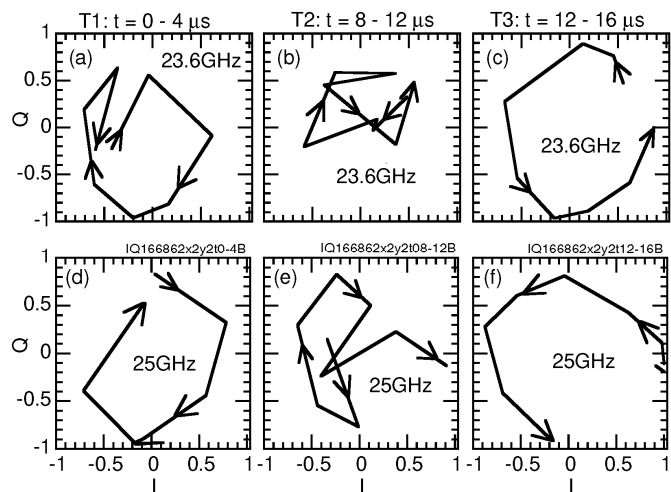


図9. 直交信号 ($I\sim\cos\phi$ 、 $Q\sim\sin\phi$) のリサージュ曲線。

(4) MIR による IRE の観測

上記のように、MIR 信号の解釈が確立されたので、MIR を用いて IRE の観測を行った。マイクロ波周波数をショット毎に変えて、2 周波数でほぼ同一信号が得られるところを探した。要するに、2 つの反射面で IRE 発生面を挟んだ。ティアリングモードが発生して磁気島ができたなら、2 周波数の振る舞いは逆位相になる。図9に、IRE 発生直前での直交信号 ($I\sim\cos\phi$ 、 $Q\sim\sin\phi$) のリサージュ曲線を示す。位相測定ができる T1 あるいは T3 では、2 周波数の位相変化は同一方向である。すなわち、ティアリングモードが発生していないことがわかる。このようにプラズマ揺動が同位相で半径方向に運動するのは理想的 MHD モード (キックモードやバルーニングモード) の特徴である。したがって、IRE 発生直前には磁気再結合をしていない。

IRE 発生直前の MIR で得られるマイクロ波像を図10に示す。y 方向 (ポロイダル方向) の幅 7cm 程度の x 軸 (トロイダル方向) に伸びる赤い帯構造が見える。トロイダル方向の局所的構造は見られない。すなわち、局所再結合の証拠は得られない。

(5) 結論

MIR は本研究代表者達が世界で最初に開発した計測器であり、データの解釈が最初の課題である。本研究では、(1) 位相変化しないという謎は迷光が原因、(2) MIR 受信パワーが千倍変わるという謎は、受信チャンネル内の位相混合が原因、との重要な謎の解明がされた。しかし、当初の内部再結合現象 (IRE) での局所再結合観測については、そもそも磁気再結合の証拠が無いことが判明し、観測できなかった。

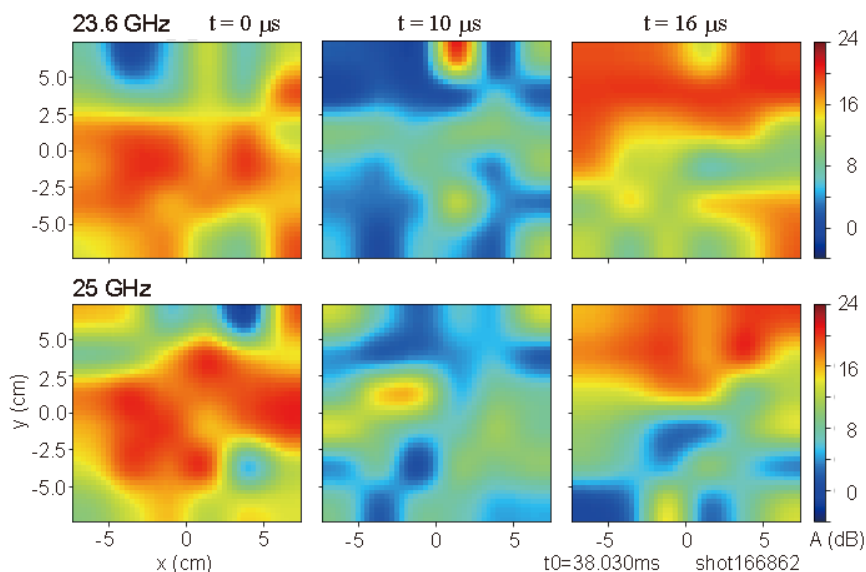


図10 照射マイクロ波周波数 23.6 GHz と 25 GHz での散乱波のパワー信号の 2 次元像。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 T. Hanashima
2. 発表標題 Experiment and FDTD Simulation of Antenna for the Microwave CT
3. 学会等名 PIERS2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長山好夫
2. 発表標題 球状トカマクTST-2でのマイクロ波イメージング反射計計測開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田勇介
2. 発表標題 TST-2球状トカマクにおけるマイクロ波イメージング反射計を用いた密度揺動計測
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高瀬 雄一 (TAKASE Yuichi) (70292828)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	土屋 隼人 (TSUCHIYA Hayato) (90509522)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	