

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14529

研究課題名(和文)アダプティブアレイ解析に基づく電子サイクロトロン輻射画像計測

研究課題名(英文)Electron Cyclotron Emission Image Diagnostics based on Adaptive-array Analysis

研究代表者

出射 浩(Idei, Hiroshi)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：70260049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：非コヒーレント波をパッシブ受信にて位相情報を正しく検出し、アダプティブアレイ解析で画像計測ができるかを検証した。まず受信IF信号を「スナップショット計測」で切り出して行い、高時間分解能データストリーミング計測をソフトウェア無線機を用いて行った。模擬非コヒーレント波源(広帯域熱ノイズ源)を用いた輻射源位置の同定試験では、コヒーレント波解析と同等の精度で、非コヒーレント波源位置が同定できることを明らかにした。ビームフォーミング法に加え、カポン法で解析し、受信ローブ範囲を劇的に減少させることに成功した。より詳細な位置同定を行うために微小ループアンテナの位相配列を検討し、初期実験・解析を進めた。

研究成果の概要(英文)：It is confirmed that propagating phases of non-coherent waves are properly analyzed in image diagnostics with adaptive-array technique. First the wave propagation was detected in snap-shot measurements, and then was done using a software-defined radio system with data streaming in high time resolution. The receiving lobe of the non-coherent wave could be analyzed with similar spatial resolution of the coherent-wave radiation lobe. Here a broadband thermal noise source was used as a non-coherent emission source. A Capon method remarkably reduces the receiving lobe area, compared to that with the normal beam-forming method. A looped antenna has been considered as a phased-array receiver to find the emitting position precisely. A number of the looped antennae could be prepared in the limited space, taking advantages for the precise position finding.

研究分野：プラズマ工学、核融合学

キーワード：電子サイクロトロン輻射 アダプティブアレイ解析 位相配列アンテナ

### 1. 研究開始当初の背景

近年、ウィンドプロファイラなどの大気観測では、散乱波のアクティブ受信で、アダプティブアレイ解析を用いた画像計測が行われている。プラズマ中電子の温度分布計測する輻射波観測では、非コヒーレント波のパッシブ受信となり、位相測定・整合を用いるアダプティブアレイ解析による画像計測は困難であるが、アダプティブアレイ解析は、観測視野を固定することなく、広範囲な観測を高い空間分解能を持って行える点で優位である。

高周波を用いてプラズマを加熱し、プラズマ電流を駆動する際、高密度プラズマでは、入射高周波がプラズマで遮断されて伝搬できず、有効な加熱・電流駆動が行えなくなる問題がある。ただし、磁場に一定の角度を持って伝搬する波は、プラズマでその伝搬が遮断されない。この現象は、プラズマ内の遮断層より高密度側の輻射波に対しても起こるため、遮断層があるプラズマでは、特殊な伝搬角条件を満たす輻射波のみが受信できる。そのため、輻射波の画像計測を用いれば、伝搬の選択条件【窓】を探査することができ、遮断層のあるプラズマで有効なプラズマ加熱・電流駆動を行う入射条件を実験的に示すことができる。そのため、画像計測から輻射源位置を同定することは、高密度プラズマの加熱・電流駆動を行う上で極めて重要であり、輻射波計測による【窓】探査は、有効な加熱・電流駆動を目指す先駆的で挑戦的な課題である。

### 2. 研究の目的

(1) 非コヒーレント波のパッシブ受信で、位相測定・整合が必要なアダプティブアレイ解析による画像計測法を確立する。これまでにに行われてきたスナップショット計測では、受信強度の見かけ上の揺動成分が観測される。一部、始められているソフトウェア受信機を用いた高時間分解能データストリーミングによる計測手法を確立する。

(2) 画像計測から詳細な輻射源位置を同定するための挑戦的なアプローチを試み、その手法を確立する。これまでのビームフォーミング法によるアダプティブアレイ解析に加え、カポン法などにより、より詳細な輻射源位置の同定を目指す。また、多素子化で詳細な輻射源位置の同定が可能となる。多素子化が容易なストリップライン回路を用いたアンテナの検討を進める。

### 3. 研究の方法

(1) 先行研究で行われてきたスナップショット計測のヘテロダイン検波で、得られた中間周波数帯信号(輻射波)受信を確認する。輻射波は、非コヒーレント波であり、既に一部始められている高時間分解能のデータストリーミング計測を確立する。

(2) ビームフォーミング法で解析された受信波データを、新たにカポン法等に基づく解析プログラムを開発し、より詳細な輻射源

位置が同定できるかを検証する。

(3) ループアンテナでの計測を開始する。輻射波計測結果を、受信ローブの解析解、3次元電磁界によるシミュレーション解を基に検討し、ループアンテナの特性評価、位相配列受信時の問題点の洗い出しを行う。

(4) 多素子化が可能なストリップライン回路に基づくアンテナの動作を3次元電磁界シミュレーターで検討し、製作を試みる。

### 4. 研究成果

図1に代表的な実験セットアップを示す。

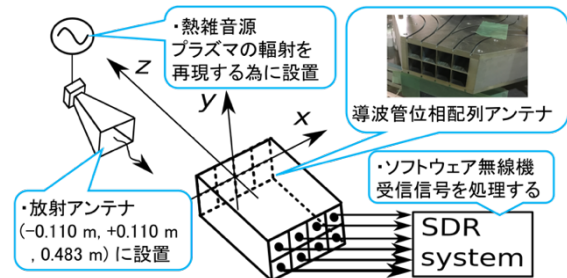


図1：実験セットアップ

実験はプラズマからの輻射を模擬するために、広帯域熱雑音源を用いた連続スペクトラム輻射波を用いる。ここでは放射アンテナからの輻射を4x2の位相配列アンテナでソフトウェア無線機(SDR)を用いて受信する。8.5 GHz スペクトラム成分をヘテロダイン検波し、70 MHz の中間周波数帯(IF)成分をSDRで受信する。図2にSDRで受信されたIF成分のI/Q信号を示す。SDRではFPGA技術を用い

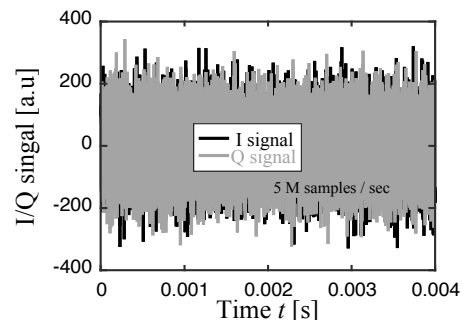


図2：ソフトウェア受信機で検出された輻射波 I/Q 信号

た I/Q 信号検出後に、データストリーミングするため、データ転送量を圧縮することができ、5M サンプル/秒の高時間分解能計測が可能である。得られた I/Q 信号は70 MHz 周りの周波数の白色雑音的な非コヒーレント波スペクトラムとなる。スナップショット計測では、周波数が近く位相がランダムなスペクトラム成分間で位相干渉し、見かけ上の揺動成分が観測されてしまう。SDR計測では、白色雑音スペクトラムの時間変化が高時間分解能で受信されており、サンプル分解能で決まるナイキスト周波数まで、スペクトラム分解が可能である。図3にはスペクトラム分解した後、得られた周波数成分を平均化した振幅、位相の時間変化を示す。広帯域熱雑音源から

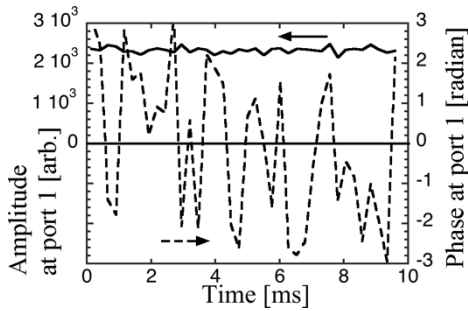


図3：広帯域熱雑音輻射のスペクトラム解析の平均処理された振幅・位相の時間変化

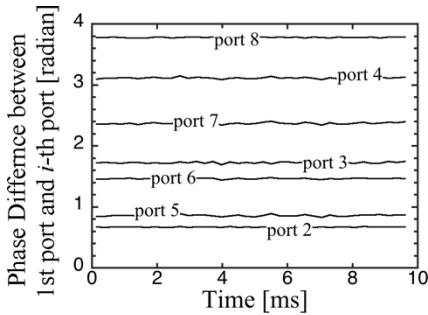


図4：アンテナポート間の位相差時間変化

のほぼ一定の振幅ながら、位相がランダムである非コヒーレント輻射波が捉えられている。図4に4x2アンテナポート間の位相差時間変化を示す。アンテナポート間では一定の位相遅延が受信できており、アダプティブアレイ解析が可能である。

得られた輻射波信号をビームフォーミング法で解析し、輻射源の同定を行った。図5に受信輻射波画像を示す。熱雑音源位置(+)まわりの輻射波画像が得られており、輻射源位置の同定が行えている。ただし、アンテナ素子数が鉛直方向に2、平行方向に4であることから、素子数が少ない鉛直方向の分解能が低い。より詳細な輻射源位置の同定に向け、新たな解析法を試みた。観測をメインローブに絞るとともに、他の方向からの寄与を最小化するアルゴリズムであるカポン法を採用した。得られるビーム到来方向解析で、角度分解能が上がることから、より詳細な輻射源位置の同定が行えると期待される。図5にはビームフォーミング法に加え、カポン法の解析結果が示されている。受信ローブ範囲が劇的に減少し、角度分解能が改善して、より詳細な輻射源位置の特定が可能であることが明らかとなった。

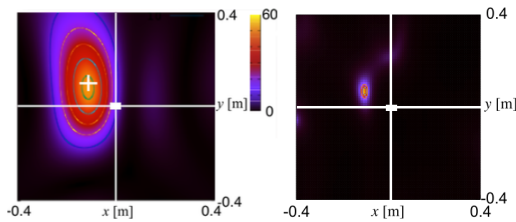


図5 (a): ビームフォーミング法、及び (b): カポン法による輻射画像

詳細な輻射源位置の同定に向け、多素子アンテナの検討を進めた。図5に示されるように、アンテナ素子数が多いほど、より詳細なビーム到来方向解析が可能である。電子バージョン変換では偏波面が重要であり、多素子化が比較的容易で、偏波面分離が可能な微小ループアンテナを候補とした。図6に同軸タイプのループアンテナの写真を示す。ループアンテナは微小ループ面を貫く磁束に感度があり、微小ループ面の法線ベクトルをz軸とった極座標 $(R, \theta, \phi)$ の方位角方向電界・放射ローブは、



図6：微小ループアンテナ

$$E_{\phi} = \frac{\omega \mu I S e^{-jkR}}{4\pi} \left( -\frac{j}{R^2} + \frac{k}{R} \right) \sin\theta \quad (1)$$

と表される。ここで $I$ はアンテナに流れる電流、 $S$ は微小ループ面積である。 $\theta = \pi/2$ のx-y面が微小ループ面で、z方向、もしくは $\theta$ 方向( $z=0$ )の磁束に感度があり、方位角方向電界は最大となる。

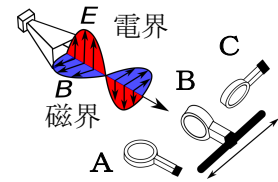


図7：試験の様子

微小ループアンテナの動作を低電力試験で確認した。図7に試験の様子を示す。ホーンアンテナから放射された電磁波をループ面A,B,Cと変えて計測する。図8に各ループ面で計測された強度、位相の放射角分布を示す。図には(1)式で評価される放射角分布を破線で、3次元電磁界シミュレータで評価された放射角分布を実線で示している。図9に3次元電磁界シミュレータでの同軸タイプのループアンテナモデルを示す。ループ面Bは、放射磁界を交差磁束として捉えることができ、信号強度が強く、位相分布も放物線分布となる。ループ面Aで基本的にループ面の交差磁束は発生しないが、解析・シミュレーション分布では、ループ面のミスマイメントを考慮して評価し、実験と比較した。ループ面Cでは放射アンテナ正面で交差磁束がないが、放射角が大きくなるほど、伝搬方向に直交する磁界がループ面を交差する。この際、交差の位相が放射角に対して非

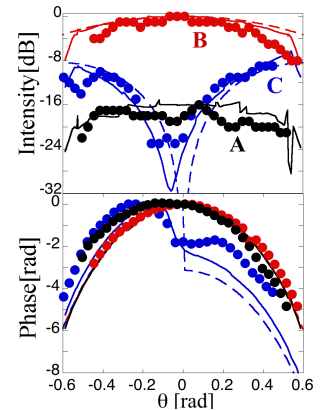


図8：ループ面をA, B, Cでの強度、位相の放射角分布

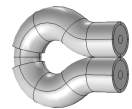


図9：シミュレーションモデル

同である。この際、交差の位相が放射角に対して非

対称となるため、放射角 $\pm$ 領域で位相符号が反転する。図10に、2つの同軸タイプ微小ループアンテナ間で計測された、伝搬距離差に対する位相遅延を示す。アンテナ間距離が近くで、干渉と思われる効果で、正しく位相遅延が計測できていない。

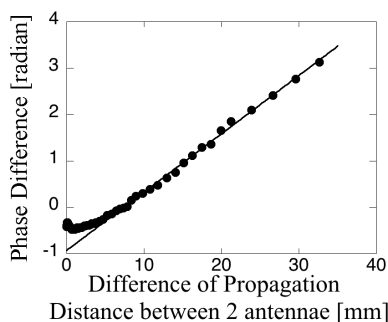


図10：2つの同軸タイプ微小ループアンテナ間で計測された伝搬距離差に対する位相遅延

多素子化の際、同軸ループアンテナより、ストリップライン回路タイプのループアンテナの方が優位である。3次元電磁界シミュレータを用いて、ストリップライン回路タイプのループアンテナを設

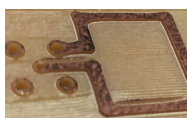


図11：試作された回路基板微小ループアンテナ

計・検討し、回路基板にループ面を形成するアンテナを試作した。図11に試作された回路基板微小ループアンテナを示す。今後、試作されたループアンテナの低電力動作試験、アンテナ間干渉等、多素子化に向けて調査する。

#### 5. 主な発表論文等 (研究代表者に下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. H. Idei, *et al.*, “Adaptive-array Electron Cyclotron Emission diagnostics using data streaming in a Software Defined Radio system”, *JINST* **11** (2016) C04010.
2. M. Fukuyama, H. Idei, *et al.*, “Adaptive-array electron cyclotron emission diagnostics using phased-array waveguide-and looped-antenna”, *Proc of the 19<sup>th</sup> Cross Straits Symposium*.

[学会発表] (計 4 件)

1. M. Fukuyama, H. Idei, *et al.*, “Adaptive-array electron cyclotron emission diagnostics using phased-array waveguide-and looped-antenna”, *The 19<sup>th</sup> Cross Straits Symposium*.
2. M. Fukuyama, H. Idei, *et al.*, “Adaptive-array electron cyclotron emission diagnostics using phased-array waveguide-and looped-antenna”, *The 19<sup>th</sup> Cross Straits Symposium*, P096, Fukuoka, Japan, Nov.29 - Dec.1 2017.
3. 福山雅治、出射浩、中村一男、柚木美羽、

- “アダプティブアレイループアンテナを用いた輻射計の開発”、プラズマ核融合学会九州・沖縄・山口支部 第21回支部大会、A-5、佐賀大学、2017年12月16-17日。
4. M. Fukuyama, H. Idei, M. Kishorea, M.K. Yamamoto, S. Kojima, M. Yunoki, “Adaptive-array Electron Cyclotron Emission diagnostics using data streaming in a software Defined Radio system”, *Plasma Conference 2017*, 24P-127, The Himeji Chamber of Commerce and Industry Nov.20 – 24 2017.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<https://www.triam.kyushu-u.ac.jp/ideiken/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

出射 浩 ( IDEI, Hiroshi )

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：70260049

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者 なし