

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630471

研究課題名(和文) パーンシュタイン波による波動加熱・電流駆動の自己無撞着な解析

研究課題名(英文) Self-consistent analysis of wave heating and current drive using Bernstein waves

研究代表者

福山 淳 (Fukuyama, Atsushi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：60116499

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)：トカマクの高密度領域における電子サイクロトロン波加熱・電流駆動を解析するために、不均一プラズマにおける運動論的效果を取り入れた波動光学的伝播解析に必要な積分形誘電率テンソルの定式化を行った。得られた積分形誘電率テンソルを1次元波動伝播解析に適用し、非磁化プラズマ、磁気ミラー配位、有限ラーモア半径効果等の広い範囲にわたって有用であることが示された。この手法をトカマクにおける電子パーンシュタイン波へのモード変換の定量的な解析に適用し、波動電界や吸収パワー密度分布を求めるとともに、アンテナ負荷抵抗等のパラメータ依存性を調べ、解析的評価とよく一致することを確かめた。

研究成果の概要(英文)：In order to analyze electron cyclotron heating and current drive in high-density regime of tokamak plasmas, integral-form of dielectric tensors required for kinetic full wave analyses in inhomogeneous plasmas was formulated. The obtained formula were applied to one-dimensional full wave analyses in unmagnetized plasmas, magnetic mirror configuration, and hot plasmas with finite gyro radius effects to show their wide applicabilities. This scheme was applied to the quantitative analysis of mode conversion to the electron Bernstein waves in tokamaks. Profiles of wave electric field and power deposition density were obtained and it was confirmed that the parameter dependence of antenna loading resistance is consistent with analytic estimation.

研究分野：核融合理論・シミュレーション

キーワード：プラズマ・核融合 計算物理

1. 研究開始当初の背景

電子サイクロトロン周波数帯の波動は、周波数は高いが、面積あたりのパワー密度を高くでき、プラズマ周辺部の真空領域を減衰なしに伝播できる特性を備えている。そのため、トカマクプラズマの波動加熱・電流駆動に広く用いられており、核融合炉においてもプラズマの生成、電流立ち上げ、分布制御を含む広い用途に活用が期待されている。

通常はこの周波数帯の正常波(O波)あるいは異常波(X波)が用いられているが、トラス外側の弱磁場側から入射した場合には、波の遮断によってプラズマ中心部の高密度領域に波が伝播できなくなる場合がある。特に球状トカマクにおいてはトロイダル磁場が弱く、周波数が低いため、遮断の影響を受けやすい。このため、高密度領域に伝播することができる電子バーンシュタイン波を利用して、プラズマ中心部の加熱・電流駆動を行う手法が提案されている。特に弱磁場側から入射するO-X-Bモード変換は実現が容易で、注目を集めている。この手法では、ある特定の角度でO波を入射することにより、遮断されることなくX波にモード変換し、さらに高域混成共鳴においてX波が電子バーンシュタイン波にモード変換する。この手法を用いた実験により、高密度領域への伝播が確認されている。

しかしながら、この手法では最適入射角から少しでも外れた電磁波成分はO波遮断点とX波遮断点の間の遮断領域を透過する必要がある。通常のO波やX波の伝播解析に用いられている光線追跡法のような幾何光学近似は遮断領域には適用できず、透過後の伝播開始条件を与えることができない。このため、現実的なトカマク配位において、O-X-Bモード変換の定量的解析は困難であった。

遮断領域を含めて伝播解析を行うために、周波数の低いイオンサイクロトロン周波数帯においては、マクスウェル方程式の境界値問題を解く波動光学的手法が用いられている。しかしながら、電子サイクロトロン周波数帯の波動は波長が短いため、空間格子を細かくする必要があり、その解析には大きな計算資源を必要とする。特に電子バーンシュタイン波は波長が非常に短く、かつ有限ラーモア半径効果を取り入れるために通常は波動電界のフーリエ変換を行い、波数を導入する必要がある。ところがフーリエ変換においてはすべてのモードが互いに結合するため、解析に必要な計算資源が極端に大きくなり、現実的な解析手法ではなかった。

2. 研究の目的

本研究においては、電子バーンシュタイン波の伝播・吸収を定量的に解析するため、積分形の誘電率テンソルを導入する。フーリエ変換が必要な波数を導入することなく運動論的解析を実現するこの手法によって、

遮断領域の透過や電子バーンシュタイン波へのモード変換を含めた波動伝播解析を少ない計算資源で実現する。さらに、積分形の準線形拡散を導入することによって、速度分布関数の時間発展解析を行い、電子バーンシュタインによる波動加熱・電流駆動の定量的解析を行うとともに、効率向上のための励起条件最適化を行う。

3. 研究の方法

(1) 不均一プラズマ中の波動伝播を、運動論的効果を取り入れて波動光学的に解析するために、積分形の誘電率テンソルを定式化する。磁場のない不均一プラズマ、磁力線方向に不均一なプラズマ、磁力線に垂直な方向に不均一なプラズマのそれぞれについて、マクスウェル速度分布をもつプラズマの応答を、積分形誘電率テンソルとして記述する。

(2) 1次元波動伝播解析コード(TASK/W1)に積分形誘電率テンソルを導入し、有限要素法を用いて境界値問題を解き、波動伝播を解析する。具体的には、磁場のないプラズマにおけるレーザー・プラズマ共鳴相互作用、磁力線方向に磁場強度が変化する磁気ミラー配位における磁気ビーチ加熱、有限ラーモア半径効果を取り入れたバーンシュタイン波伝播に適用する。

(3) トカマクプラズマにおける電子バーンシュタイン波の励起・伝播・吸収の1次元解析を行う。マクスウェル速度分布をもつプラズマに対して、弱磁場側からのO-X-Bモード変換、強磁場側からのX-Bモード変換および電子サイクロトロン共鳴における吸収の解析を行い、モード変換効率の励起条件やプラズマ条件に対するパラメータ依存性を明らかにし、解析的評価との比較を行う。

(4) トカマクプラズマにおけるO-X-Bモード変換の2次元波動伝播解析を行う。まず、磁力線方向に均一となるトラス赤道面での2次元解析(TASK/W1)を行い、O波からX波へのモード変換、O波のままの反射、電子サイクロトロン共鳴における吸収等のパラメータ依存性を調べ、最適励起条件を検討する。次に磁力線に沿って磁場強度が変化するポロイダル断面での2次元解析を行うため、有限要素法による2次元波動伝播解析コード(TASK/WF2D)に積分形の誘電率テンソルを組み込む。そして波動ビームの有限幅の効果や不均一サイクロトロン共鳴における吸収の定量的解析を行うとともに、フーリエ変換を用いた従来の波動伝播解析(TASK/WM)とのベンチマークテストを行う。

(5) 任意の速度分布関数に対する積分形的誘電率テンソルを導出すると共に、同様の手法を用いて積分形の準線形速度拡散係数の定式化を行う。速度分布関数解析コード(TASK/FP)に積分形準線形拡散項を導入し、波動の吸収に伴う速度分布関数の変形を記述する。電子バーンシュタイン波の運動論的伝播解析と電

子の速度分布関数解析を組み合わせ、球状トカマクにおける電子バーンシュタイン波による電流駆動の解析を行い、トカマクにおける電流駆動の最適化を検討する。

(6) イオンサイクロトロン周波数領域に解析対象を拡張し、イオンバーンシュタイン波の励起条件について検討するとともに、ドリフト波周波数領域の波動に対する積分形運動論的誘電率テンソルの適用を検討する。

4. 研究成果

(1) 積分形誘電率テンソルの定式化

不均一プラズマ中の波動伝播の波動光学的解析においては、マクスウェル方程式の境界値問題を解く必要があり、波数空間におけるフーリエ変換あるいは実空間における有限差分法/有限要素法が用いられている。有限温度効果を取り入れた運動論的解析を行うために、フーリエ変換による手法では波数の関数として表された運動論的誘電率テンソルがしばしば用いられている。しかしながら、不均一方向には本来フーリエ変換を用いることができない、粒子軌道が正確ではない、すべてのフーリエ成分が結合するため係数行列が密行列となり、必要とする計算資源が大きくなる等の問題点があった。

これらの問題点を解決するため、波数を含まない積分形誘電率テンソルを導出した。波動電界によって誘起される電流密度は、速度分布関数の速度モーメントを速度積分することによって求められるが、正確な粒子軌道を用いて速度積分を実空間積分に変換することにより、積分形の誘電率を求めることができる。均一なプラズマにおいては、積分核関数はプラズマ分散関数や変形ベッセル関数のフーリエ変換として表すことができる。

(2) 積分形誘電率テンソルの1次元波動伝播解析への適用

まず、磁場のないプラズマに適用し、密度勾配をもつプラズマに電磁波が入射する際のレーザー・プラズマ共鳴相互作用を解析した。その結果、斜め入射の場合には吸収率は従来の衝突減衰による解析とほぼ一致するが、吸収パワーの空間分布が正しく求められることを示した。さらに垂直入射の場合にも吸収が生じることを明らかにし、遮断点に形成される定在波による統計加熱であることを示した。

次に、磁力線方向に磁場強度が変化する磁気ミラー配位において、磁力線に沿って伝播する円偏波電磁波の電子サイクロトロン共鳴吸収を解析した。強磁場側から入射した右回り円偏波は、電子サイクロトロン共鳴に近づくにつれて波長が短くなるともに、減衰が大きくなる。従来の解析では衝突減衰によって解析されることが多かったが、運動論的解析により電子サイクロトロン共鳴減衰による吸収パワー分布が求められた。強磁場側からの入射の場合は光線追跡法によっても解析可能であり、両者はよく一致する。一方、弱磁場側

からの入射では、遮断領域の透過を記述するため波動光学的解析が必要である。しかしながら、現在の所、電子サイクロトロン共鳴における数値誤差のために、透過・吸収の正確な解析は今後の課題となっている。

磁場を横切って伝播する波動に対しては、荷電粒子のサイクロトロン運動に伴う有限ラーモア半径効果を積分形誘電率テンソルにより記述することができる。以前に高エネルギーイオンが存在する場合のイオンサイクロトロン波の伝播と吸収の解析に適用していたが、本研究ではより短波長の現象を記述できるように拡張し、電子バーンシュタイン波の記述ができるようになった。

(3) トカマクプラズマにおける0-X-Bモード変換の解析

有限ラーモア半径効果を取り入れた積分形誘電率テンソルを用いた TASK/W1 コードにより、小型球状トカマク LATE のパラメータ ($R_0=0.22$ m, $B_0=0.08$ T, $n_{e0}=10^{17}$ m⁻³, $T_{e0}=500$ eV) で0-X-Bモード変換の解析を行った。

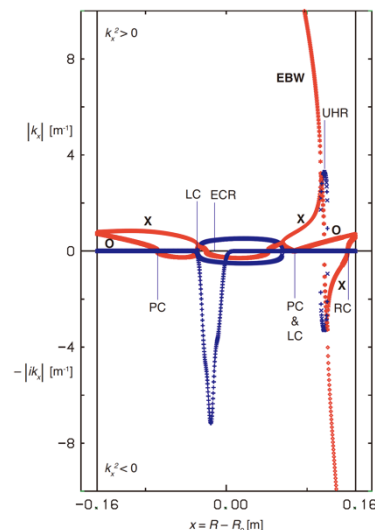


図1 電子サイクロトロン波の分散関係. 垂直波数の主半径方向依存性. 上半面は伝播領域における波数, 下半面は遮断領域における減衰率を示し, 赤はその実数部, 青は虚数部

周波数 2.45 GHz の波動の最適入射角 ($k_{\theta}=32$ m⁻¹) に対する分散関係 (垂直波数の主半径依存性) を図1に示す. 弱磁場側 (右) では X 波はすぐに遮断となるが, 0 波はプラズマ内部に伝播し, 0 波遮断点 (PC) で X 波に変換する. 最適入射角であるので PC と X 波遮断点 (LC) は一致し, 遮断領域はない. X 波としてさらに強磁場側に伝播したのち後進波となって反転し, 高域混成共鳴 (UHR) 近傍で電子バーンシュタイン波 (EBW) となって再び反転する. EBW は強磁場側に伝播し, プラズマ中心付近の電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 近傍で吸収されることになる。

積分形誘電率テンソルを含むマクスウェル方程式の境界値問題を解くために, 有限要素法を用いた. 通常の微分方程式の有限要素法

では、隣接する要素内の積分として微分演算子項を表すことができるが、積分演算子項からは離れた要素との結合が現れる。その広がりにはラーモア半径の数倍程度である。

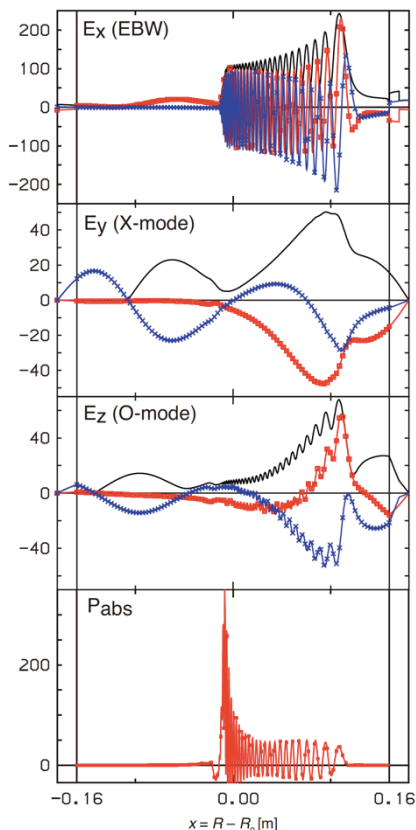


図2 波動電界と吸収パワー密度の主半径方向依存性. 電界の赤線は実部, 青線は虚部, 黒線は絶対値を表す.

一次元波動伝播解析コード TASK/W1 による積分形誘電率テンソルを用いた解析例を図2に示す. 波動電界と吸収パワー密度分布の主半径方向依存性を, 実部 (赤), 虚部 (青), 絶対値 (黒) として表す. 主半径方向成分 E_x は静電的であるバーンシュタイン波 (EBW) が, ポロイダル方向成分 E_y は異常波 (X 波) が, トロイダル方向成分 E_z は正常波 (O 波) が支配的である. 斜め伝播であるため E_z は B 波や X 波の成分も含んでいる.

トカマクの弱磁場側 (右側) からループアンテナで励起された O 波は遮断点で X 波にモード変換し, 高密度側で伝搬方向が反転し, さらに高域混成共鳴近傍で電子バーンシュタイン波にモード変換してプラズマ中心部まで到達し, 電子サイクロトロン共鳴で吸収されている. 一部の X 波は遮断領域を透過し, 強磁場側 (左) の壁で反射されている.

吸収パワー密度は $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ の時間平均として計算されているため, 運動論的エネルギー束の空間微分を含んでおり, 振動している. 常に非負となる吸収パワー密度の表式を導出することは今後の課題である.

図2は O 波と X 波の遮断点が一致する最適入射角 ($k_\phi = 32 \text{ m}^{-1}$) の場合を示すが, 最適入

射角から外れると O 波と X 波の伝播領域の間に遮断領域が現れ, X 波へのモード変換が低下し, 吸収パワーも減少する.

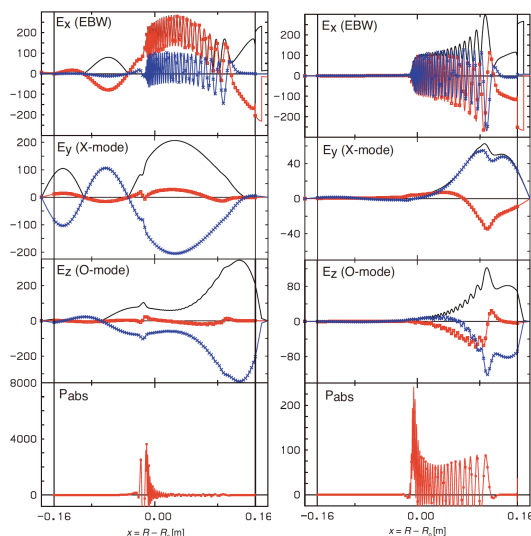


図3 最適入射角から外れた場合の波動電界と吸収パワー密度. 左: $k_\phi = 24 \text{ m}^{-1}$, 右: $k_\phi = 40 \text{ m}^{-1}$

図3に示すように, k_ϕ が小さいと X 波の遮断点が強磁場側にずれ, 逆に k_ϕ が大きいと O 波の遮断点が弱磁場側にずれ, いずれの場合も遮断領域の幅が広がり, X 波へのモード変換は減少する. なお, アンテナ電流を一定にして入射角を変化させているため, 図に表示されている電界振幅の大きさはアンテナでの結合に依存している. $k_\phi = 24 \text{ m}^{-1}$ の場合 (左側) には電界振幅が大きくなっているが, バーンシュタイン波の励起は弱く, 全吸収パワーは小さい.

現在のループアンテナ励起モデルは, 静電的な励起を含んでおり, 電磁的に励起される O 波の吸収エネルギーはアンテナの負荷抵抗として評価することができる (アンテナ電流は一定). アンテナ負荷抵抗の入射角依存性 (トロイダル波数依存性) を図3に示す.

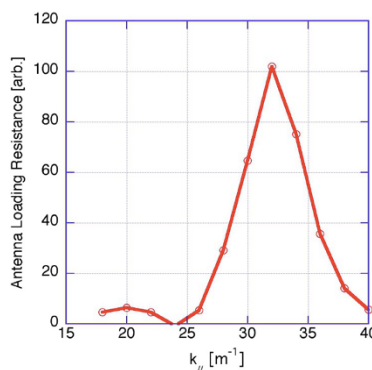


図4 アンテナ負荷抵抗のトロイダル波数依存性

O 波と X 波の遮断点が一致する最適入射角 ($k_\phi = 32 \text{ m}^{-1}$) 付近で負荷抵抗が最大となり,

最適入射角から外れて 0 波と X 波の伝播領域の間に遮断領域が現れると、0 波の反射が大きくなり負荷抵抗は減少している。密度勾配から評価される遮断領域の幅から求められる透過率の解析的評価とよく一致することが確かめられた。

(4) 0-X-B モード変換の 2 次元波動伝播解析

電子バーンシュタイン波の 2 次元伝播解析を目指して、有限要素法を用いた 2 次元波動伝播解析コード (TASK/WF2D) の整備を行った。まず衝突を含めた冷たいプラズマモデルを用いて、電子サイクロトロン波の遮断層における反射、透過、高域混成共鳴層における吸収の解析 (0-X モード変換) をトカマクの赤道面上で行った。

その結果、最適入射角成分は短波長の X 波成分となって高域混成共鳴近傍で吸収されるのに対して、最適入射角から上下に外れた成分は 0 波として反射されるため、二つに分かれた波動ビームとなることが示された。

引き続き、積分形誘電率テンソルを導入するため、まず TASK/W1 を拡張して磁力線方向にはフーリエ変換を用いた解析を行った。その結果、トカマクプラズマの赤道面内において 0-X-B モード変換の空間構造を示すことができるようになった。次に、磁力線方向にも積分形誘電率テンソルを用いた定式化を行い、TASK/WF2D に組み込んだが、現在の所、数値誤差の問題から予備的解析に留まっている。

また、運動論的波動伝播・吸収の検証を行うため、新たに二次元電磁的粒子シミュレーションコードを開発し、赤道面における 0-X モード変換ならびに 0-X-B モード変換の解析が可能になった。

ポロイダル断面における二次元波動伝播解析については、磁力線方向の不均一性を取り入れた積分形誘電率テンソルと組み合わせて定式化を行った。TASK/WF2D への組み込みは今後の課題である。

(5) 運動論的準線形拡散項の定式化

任意の速度分布関数に対する運動論的誘電率テンソルの定式化を行うとともに、それに対応する積分形準線形速度拡散係数の導出を行った。そして、波動伝播解析から求められる波動電界を用いて準線形拡散係数を計算するモジュールを作成し、速度分布関数解析コード TASK/FP に組み込んだ。2 次元波動伝播解析の結果を得て、電子バーンシュタイン波による波動加熱と電流駆動の解析を行う予定である。

(6) 適用範囲の拡張

開発した積分形誘電率テンソルによる手法の適用範囲を拡張するため、イオンサイクロトロン周波数領域およびドリフト波周波数領域の波動に対する積分形運動論的誘電率テンソルの導出を検討した。

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 1 件)

① S. H. Khan, A. Fukuyama, H. Igami, H. Idei, Kinetic FullWave Analysis of Electron Cyclotron Wave Mode Conversion in Tokamak Plasmas, Plasma Fusion Research, 査読有, 14 (2016) 2403070-1-4, DOI: 10.1585/pfr.11.2403070

[学会発表] (計 11 件)

① A. Fukuyama H. Igami and H. Idei, Full wave analysis of EC wave mode conversion in tokamak plasmas, 41st. EPS Conf. on Plasma Phys., 2014/6/23-27, 国際学会

② A. Fukuyama, Kinetic full wave modelling of electromagnetic waves in plasmas, 7th Int. Conf. on Frontiers of Plasma Phys., Kochi, India, 2015/4/13-17, 招待講演

③ A. Fukuyama, S.A. Khan, T. Ikeda, H. Igami, and H. Idei, Kinetic full wave analysis of EC wave mode conversion in tokamak plasmas, 43rd EPS Conf. on Plasma Phys. KU Leuven, Belgium, 2016/7/4-8, 国際学会

④ A. Fukuyama, S.A. Khan, H. Igami, and H. Idei, Kinetic full wave analyses of 0-X-B mode conversion of EC waves in tokamak plasmas, 48th Ann. APS-DPP, San Jose, USA, 2016/10/31-11/04, 国際学会

[その他]

ホームページ: 統合コード TASK の公開:
<http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/TASK/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福山 淳 (FUKUYAMA Atsushi)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60116499

(2) 研究協力者

Shabbir Ahmad KHAN
京都大学・大学院工学研究科・外国人共同研究者 (日本学術振興会・外国人特別研究員)

Apiwat Wisitsorasak
キングモンクット工科大学トンプリ校 (タイ)・理学部・講師

伊神弘恵 (IGAMI Hiroe)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

出射 浩 (IDEI Hiroshi)
九州大学・応用力学研究所・教授

池田智英 (IKEDA Tomohide)
京都大学・大学院工学研究科・修士 2 年