

# 超高強度レーザーと高密度プラズマの相互作用

田口 俊弘

摂南大学理工学部電気電子工学科

## 1. 2018年度の共同研究概要

2016年度までの共同研究で見出した強磁場中での電子ビーム不安定性に伴って起こる電子流のスタグネーションは、詳細な研究を進めた結果、非線形増幅された大強度ホイッスラー波のポンデラモータビリティによるものであるとの結論を得た [1].

2017年度から、この大強度ホイッスラー波が背景プラズマに及ぼす影響、特に無衝突衝撃波のような大きな構造形成や、それがコヒーレントなイオン加速に発展するかどうかについての解析を、従来用いていたハイブリッドコードから背景電子やイオンも粒子として取り扱う粒子コードに拡張することで行ったが、粒子の流出入口と場の量の開放境界を同時に成立させることが難しく、あまり長時間の計算をすることができなかった。

2018年度は、2017年度に引き続き、この開放境界を持つ粒子コードの改良を行って、無衝突衝撃波の形成とイオン加速の解析を行った。加えて、新しい課題として、背景プラズマに衝突項がある場合の電子ビーム伝播解析を行い、これまで行ってきた無衝突プラズマでのシミュレーション結果との比較を行った。

## 2. 開放境界条件を用いた電子ビーム伝播解析用粒子コードの開発とイオン加速の解析

本研究は、最近その有効性が確かめられている磁場印加型の高速点火核融合における電子ビーム伝播解析から始まっている。高速点火型レーザー核融合とは、超高強度レーザー照射により発生した高速電子が、圧縮された燃料コアを追加熱して燃焼を促すというスキームであるが、この電子ビームを強磁場印加することでガイドしながら燃料コアに到達させることで、到達率を上げて燃焼効率を向上させようとするものである。最近の実験結果によれば、磁場を印加しない場合に比べて磁場を印加した方が中性子の発生量が上がることが確認されている。

しかし、本研究の解析により示された、強磁場印加下でのビーム不安定性に伴う大強度ホイッスラー波の発生は、電子ビームガイドを期待して印加した磁場が返って電子ビームのスムーズな流れを阻止する結果となることを意味する。もちろん、印加磁場の強さや電子ビームと背景プラズマの密度比などのパラメータに依存するため、一概にうまくいかないという結論にはならないが、高速点火への応用においては、パラメータの範囲を注意深く検討しなければならないことを示唆している。しかし、強磁場下での電子ビーム伝播によりホイッスラー波のような電磁波が発生することや、スタグネーションによる大きな電子密度変動が起きることは、宇宙における問題や高速イオン発生装置開発まで、様々な方面への応用の可能性が考えられる。

本研究は、論文 [1] まででは、イオンは静止していると仮定し、背景電子は流体として取り扱うハイブリッドコードを用いていたが、大強度ホイッスラー波発生に伴う背景プラズマ中での衝撃波のような大規模構造形成からイオン加速までを解析するためには、単に流体としてのイオンの集団運動をコードに加えるだけでは不十分であり、イオンの速度分布に応じた解析、運動論効果が必要になる。このため、イオン運動も粒子化したフル粒子コードが必要となるが、電子ビーム伝播問題を解析するための粒子コードには粒子の流入を自由に行える開放境界条件が必要である。これまで用いてきたハイブリッドコードは、ビーム電子のみを粒子として取り扱っていたため、その境界における影響は限定的で、電子の流入による場への影響は小さく、境界付近での流体場や電磁場に簡単な減衰領域を設けて揺動の過度な増大を抑えるだけで十分であった。

しかし、背景プラズマも粒子として取り扱うには、粒子コードにおける開放境界条件の導入が必要となる。そこで、2017年度にはオーロラ発生の起源である電子ビームの突入によるダブルレイヤを解

析するための開放境界粒子コードを参考にして、背景イオンと背景電子も開放境界条件とした粒子コードを開発し、解析を行ったが、粒子の流出入に伴う不安定性が思うように抑制できなかった。今年度も引き続き様々な抑制方法を試みて、ある程度までは抑えられることが確認できたが、ビーム密度が高く不安定性の成長率が速い場合には、境界付近での大きな密度変動を完全に抑えきれず、大きな構造形成を長時間持続するには至らなかった。この問題解決のため、引き続きコードの改良を行う予定である。

### 3. 抵抗性ワイベル不安定性の解析

上記のように、強磁場下では電子ビーム不安定性に伴って、大強度のホイッスラー波が発生して、電子ビーム流が停滞することがわかったが、実際の実験では高速点火核融合での磁場ガイド効果が有効で、燃焼率の向上が報告されている。本研究での解析と実際の実験を比較したときの一つの問題は、背景プラズマの密度である。これまでの研究では、ビーム電子密度と背景プラズマ密度の比を10%としていて、ビーム電子密度が比較的高い。これに対し、高速点火核融合では、金コーンのような密度の高い領域を電子ビームが通り抜けていくため、密度比が小さい解析が必要となる。

ところが、背景プラズマの密度が上がると別の問題が出てくる。背景プラズマ中での衝突効果である。背景プラズマが金のような高Z物質の場合、イオンによる背景電子の散乱が大きくなって無視できなくなる。そこで今年度は、新たに背景電子の運動に衝突項を加えた高速電子伝播解析を行った。

衝突項を導入したときの重要な課題の一つは、背景プラズマに電気抵抗が存在するために、「抵抗性」ワイベル不安定性が起こることである。ワイベル不安定性とは、ビームの進行方向に垂直な電磁場が成長する横方向の2流体不安定性のことであるが、衝突がある方が成長率が增大することがわかっている。例えば、流体解析で得られた成長率と、運動論効果を入れて得られた成長率を比較すると、運動論効果を入れた方がランダウ減衰の効果で成長率が高い。これはシミュレーションでも確認されている。背景プラズマに衝突項を導入することは、成長率増大の効果を陽に加えることになるが、これは抵

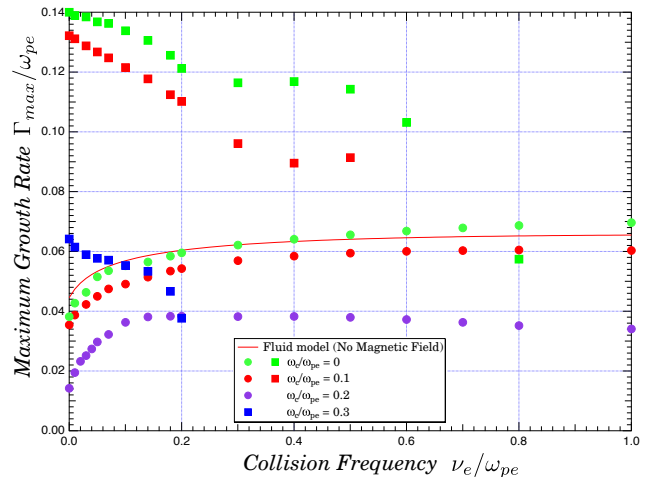


図1. ハイブリッドコード解析により得られた抵抗性ワイベル不安定性の最大成長率

抗の効果を入れた流体解析でも裏付けられている。そこで今年度は、流体として取り扱っている背景電子の運動方程式に衝突項を導入したハイブリッドコードを用いて、ワイベル不安定性の成長の様子から増幅率を計算した。結果を図1に示す。ここで、ビームと背景電子の温度は共に1keVとし、ビーム電子と背景電子密度の比は2%である。図1には、簡単のために背景電子密度のプラズマ周波数( $\omega_{pe}$ )で規格化した衝突周波数を一つのパラメータとして変化させ、フーリエ変換したモード解析から得られた最も成長が速いモードの成長率を示している。

図1で、●で示したモードは計算の初期から成長する線形成長モードであり、■で示したモードはある程度時間が経過してから成長する2次成長モードである。図1よりわかるように、外部磁場の値(規格化値 $\omega_c/\omega_{pe}$ )が大きくなるほど成長率が下がることがわかる。また、抵抗の効果は2次成長に対して顕著であり、抵抗の存在により、様々な非線形効果が抑制されることがわかる。加えて磁場を印加すれば、さらに不安定モードを抑えることもわかる。

この他、電子ビーム入射型のハイブリッドコードを用いて衝突項を含めたビーム伝播解析を行い、磁場を加えることでワイベル不安定性も含めた2流体不安定性が完全に抑制されることなどを確認したが、2次不安定性の成長や抑制のメカニズムなども含め、より詳しい解析は今後の課題である。

[1] T. Taguchi, T. M. Antonsen, Jr. and K. Mima, J. Plasma Phys., 83, 905830204, (2017).