

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. 2019 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ド力によるものであるとの結論を得た [1].

しかしながら、磁場ガイドによる高速電子ビームの実験では、磁場の効果は十分あり、伝播に対して阻害する効果は示されていない。そこでこの結果が導かれるのはそれまでの解析で用いていた背景プラズマの電子密度が小さいのではないかと考えて、背景プラズマ密度と電子ビーム密度の比を 10 倍から 50 倍に増加させた解析を行った。しかし、プラズマが高密度になったときに考慮しなければならないのが背景電子がイオンと衝突することによる電気抵抗の効果である。そこで、2018 年度から、背景プラズマの運動方程式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ている。

この結果、興味深い結果が見出された。衝突がないプラズマより、衝突を含めたプラズマ中で起こるワイベル不安定性（横方向の 2 流体不安定性）の方が成長率が大きくなるのである。通常、エネルギー散逸効果である衝突は成長率を下げる方向に働くが、ワイベル不安定性に関しては、抵抗がある方が成長率が增大するという興味深い結果が得られたのである。

そこで、2019 年度はこの増大のメカニズムを探るため、より詳細なシミュレーション解析から計算される成長率と摂動計算から得られた分散関係の解との比較を行った。

2. 抵抗性ワイベル不安定性の成長率増大メカニズム

衝突項を導入したハイブリッドコードから計算されるワイベル不安定性の成長率の一例を図 1 に示す。図 1 は、ビームの進行方向に垂直な方向（横方

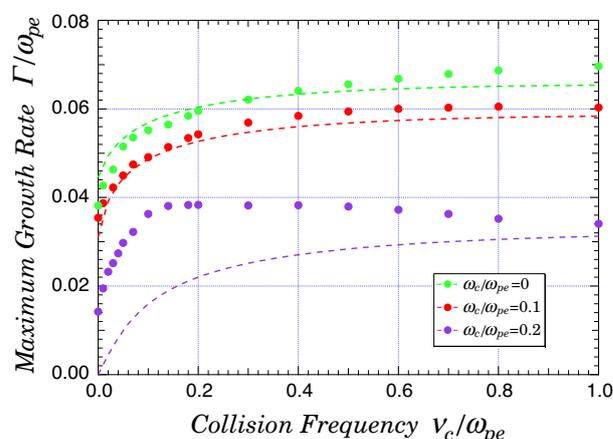


図 1. ハイブリッドコードと分散関係から得られた抵抗性ワイベル不安定性の最大成長率

向) に細長い形状のボックス中での 2 流体状態からスタートしたシミュレーション結果である。ここで、ビーム電子密度 n_h と背景プラズマ密度 n_0 の比は 1/50 にし、電子ビームの流束は $0.95c$ で背景電子はこの電流を打ち消すように初期速度を与えている。また、電子温度は 1keV である。このときに成長する横方向の摂動に対する不安定性がワイベル不安定性であるが、その成長率は、摂動の波数依存性があり、プラズマの温度が有限の場合には、ある波数で成長率が最大になる。図 1 はその最大成長率の衝突周波数 (ν_c/ω_{pe}) 依存性を示したものである。 ω_{pe} は背景プラズマ密度での電子プラズマ振動数である。ここで、緑、赤、紫の●がそれぞれ、磁場を印加したときのシミュレーション結果を示している。図を見てわかるように、成長率は磁場の強さ (ω_c/ω_{pe}) が強くなるにしたがって小さくなる。このことは、強磁場の印加がワイベル不安定性の抑制に効果的であることを示している。

一方、衝突がないときよりもあるときの方が成長率は大きく、衝突周波数が大きくなるほど成長率が増加することがわかる。そこで、この成長率の増加の物理的メカニズムを調べるため、流体近似を用いた分散関係を導出し、その有力な物理項の特定を試みた。

まず、単純に全ての流体方程式と Maxwell 方程式を摂動計算して分散関係を導出したが、強磁場中の 2 流体（電子ビーム流と背景プラズマ電子流）を解析しなければならないため、2 成分の 3 次元運動方程式が必要になる。このため、分散関係は多項式方程式ではあるが、次数が高いため、係数を書き下すのは難しい。さらに、数値計算で高次多項式の根を求めるとしても、広いパラメータ領域を計算するには、その数値計算の精度が重要になる。そこで、摂動解析から得られた行列式の展開に伴う多項式演算自体も数値計算で行い、計算は有効数字 180 桁程度の多倍長演算で行った。図 1 中の破線は、その結果から得られた最大成長率である。 $\omega_c/\omega_{pe}=0$ や 0.1 の場合には、シミュレーションと良く一致した結果が得られていることがわかる。なお、 $\omega_c/\omega_{pe}=0.2$ の場合には少し外れているが、成長率が低い場合には、シミュレーション結果からの増幅率計算の誤差が大きくなるという問題もあるため、より詳細な考察が必要である。

このように、強磁場を含めた線形解析はシミュレーション結果を十分再現することがわかったが、上記のような全ての摂動項を含めた分散関係では、どのような物理的メカニズムが働いて成長率の増大が起こるのかを特定するのは難しい。そこで限定された条件下で無視できる項を落とした低次の分散関係を導出し、その結果からメカニズムの特定を試みた。

最も簡単なのは、衝突係数を 0 にした無衝突プラズマで、外部磁場も温度も 0 の場合である。さらに、Maxwell 方程式から高周波成分を出す変位電流項を落としたりして分散関係を求めると次式のような周波数 ω に関する式が得られる。

$$\omega^2 = -\frac{(\omega_{ph}^2 u_h^2 / \gamma_h + \omega_{pc}^2 u_c^2 / \gamma_c) k_x^2}{c^2 k_x^2 + \omega_{ph}^2 / \gamma_h^3 + \omega_{pc}^2 / \gamma_c^3} \quad (1)$$

ここで、 ω_{ph} と ω_{pc} は電子ビーム密度と背景電子密度から計算したプラズマ周波数であり、 u_h と u_c はそれぞれの初期流速である。また、 γ_h と γ_c は相対論的ローレンツ因子である。この式は、周波数の 2 乗が負であることからわかるように、絶対不安定性を導き出す。これに対し、衝突の効果を入れるには、(1) 式の ω_{pc} を次式で置き換えればよい。

$$\omega_{pc}^2 \rightarrow \frac{\omega_{pc}^2 \omega}{\omega + i\nu_c / \gamma_c} \quad (2)$$

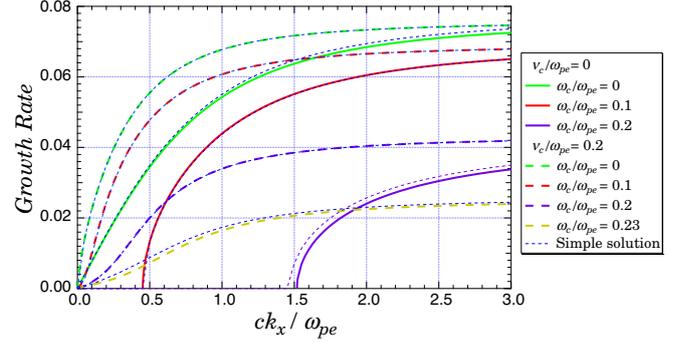


図 2. フル分散関係による成長率と簡易分散関係による成長率の比較

この置き換えにより得られる分散関係から得た成長率を示したのが図 2 である。図で実数や破線は、全ての項を含めた分散関係（フル分散関係）から多倍長計算で求めた根であり、その付近に示した点線が簡易分散関係により求めた結果である。図より、簡易分散関係から得られる成長率が、十分な精度で計算できていることがわかる。

さて、衝突周波数が大きくて $|\omega/\nu_c| \ll 1$ という近似が成り立つ場合は、(1) 式の置き換えを $\omega_{pc}^2 \rightarrow \omega_{pc}^2 \gamma_c \omega / i\nu_c$ とすることができる。 ω_{pc}^2 は背景電子密度に比例するので、衝突周波数が大きくなると、実効的な背景電子密度が下がることになる。簡易分散関係 (1) をみると、分子の ω_{pc}^2 には流速の 2 乗が掛けられているので、 ω_{pc}^2 が下がっても ω_{ph}^2 の項が優勢なのであまり値が変わらないが、分母は電子ビーム密度による ω_{ph}^2 が小さいので、 ω_{pc}^2 が下がる効果が重要となり、結果的に成長率が増加することになる。分母のプラズマ振動数は、ビーム方向の応答に関与しているため、背景プラズマのレスポンスが弱まることでワイベル不安定性の成長率を上げている原因であるという結論になる。レスポンスの低下は抵抗により背景プラズマに生じる縦電場（ビーム伝播方向の電場）が増大することによるものなので、この大きな電場の変化により発生する大きな磁場がワイベル不安定性の増強につながったと考えられる。

さらに磁場を加えたときには非線形発展による様々な構造形成が起こって電子ビーム伝播の様相も複雑化する。このあたりの詳細な解析が今後の課題である。

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