

Investigations of Computational Physics on Inertial Confinement Fusion and High Energy Density Plasmas

著者	SHIROTO TAKASHI
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	甲第18070号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00125188

氏名	しろ と たか し 白 戸 高 志
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻
学位論文題目	慣性核融合および高エネルギー密度プラズマにおける計算物理の研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 大西 直文 東北大学教授 澤田 恵介 東北大学教授 服部 裕司 東北大学准教授 河合 宗司 東北大学准教授 米村 茂

論文内容要約

本論文は、慣性核融合に関する計算物理的研究を実施し、慣性核融合の爆縮過程における流体力学的不安定性の抑制手法を多次元輻射流体シミュレーションにより確立し、また高エネルギー密度プラズマの支配方程式である1流体2温度モデルや相対論的 Vlasov–Maxwell 系に対する精緻な数値計算手法を確立するものである。

慣性核融合の一種であるレーザー核融合では、燃料球にレーザーを照射することで生じるアブレーションの反作用により爆縮運動を駆動するが、レイリー・テイラー不安定性が爆縮の球対称性を崩すことで熱核反応の点火を阻害することがよく知られている。アブレーションを伴うレイリー・テイラー不安定性の線形安定性解析により、アブレーションは成長率を低下させることが明らかとなっている。この目的を達成するためにプラスチックに原子番号の大きい元素を添加する high-Z doping が提案されており、平板ターゲット実験においてレイリー・テイラー不安定性が抑制されることが確認されている。その一方で、点火スケールの高強度レーザーを用いた爆縮シミュレーションでは平均原子番号の大きい mid-Z ターゲットを用いても流体不安定性は抑制できないと報告されており、high-Z doping の工学的有用性に結論が出ていないのが現状である。

また、高エネルギー密度プラズマの数値計算では、保存則が数値的に破られ長時間の数値シミュレーションが困難となる問題がある。高密度で流体近似が成立する場合には、1流体2温度流体方程式と輻射輸送方程式から構成される輻射流体モデルが用いられる。1流体2温度モデルはエネルギーについて非保存形で記述されるため、方程式を離散化する際にエネルギー保存則が数値的に破られ、特に強い衝撃波の伝搬速度が正しく求まらないという問題がある。流体近似が成立しない場合にはプラズマの運動論的記述が必要となり、相対論的 Vlasov 方程式と Maxwell 方程式が用いられる。このモデルは運動量とエネルギーに関して非保存形で記述されるため、離散化の際にこれらの保存則が数値的に破られる。相対論的 Vlasov–Maxwell 系の計算手法の一つである particle-in-cell 法でも数値加熱と呼ばれる同様の現象が見られ、マクロスケールのプラズマを解析することが困難であるというのが現状である。

このような観点から、筆者は輻射流体シミュレーションにより点火スケール爆縮における流体不安定性の抑制効果を明らかにすること、そして高エネルギー密度プラズマに対する保存型数値計算法の構築を目的として研究を行なった。

まず、high-Z doping による流体不安定性の抑制効果を輻射流体計算により調査した。原子番号の大きな物質は温度が高くなると X 線を放射するため、プラスチックに high-Z をドーピングするとアブレーションが促進されると考えられているが、議論の妥当性は放射率を決定する原子物理モデルに強く依存する。そこで、平板ターゲット実験により得られた X 線ストリーク画像を参照して原子物理モデルの妥当性を検証した。比較には、平均的な電子配位のみを考慮する平均イオンモデルと、多様なイオン化状態・電子配位を考慮する detailed configuration accounting (DCA)モデルを使用し、衝突輻射平衡を仮定した輻射輸送係数データベースを使用した。その結果、DCA モデルの方が X 線の放射が大きく見積もられ、平板ターゲット実験におけるターゲット軌跡をよく再現することがわかった。このことは、高原子番号元素を含む輻射流体シミュレーションでは、精緻な原子物理モデルを用いなければマクロな流体現象を再現できないことを示唆しており、点火スケール爆縮計算では DCA モデルにより構築した輻射輸送係数テーブルを使用した。爆縮計算ではアブレータとしてポリスチレンと 0.05% ドープ臭素化ポリスチレンの 2 種類を用意し、最も不安定なモード付近の擾乱を加えて議論を行なった。その結果、臭素化ポリスチレンは流体不安定性を抑制し、慣性核融合の点火条件を記述する密度半径積をポリスチレンに対して最大 2 倍に改善することが数値的に示された。擾乱の成長を詳細に解析すると、擾乱がターゲットに刻印される初期段階やレーザー強度がピークに達する時刻では不安定性は抑制されず、 10^{14} W/cm² 程度の比較的lowめの強度域で効果が顕著であることがわかった。この結果は、高強度域でレイリー・テイラー不安定性を抑制できないとする数値的研究と矛盾せず、それにも関わらず平板ターゲット実験と同等の低強度域で不安定性を抑制することで高密度爆縮が可能であることを示している。

前述の輻射流体シミュレーションは電荷中性を仮定しながらイオンと電子の熱非平衡性を考慮するために、エネルギーについて非保存の 1 流体 2 温度モデルを使用して解析を行なった。しかしながら、レーザープラズマに特有の強い衝撃波の現れる状況では、数値的なエネルギー保存の破れが深刻となる可能性が否定できない。そこで、1 流体 2 温度モデルに対する構造保存型数値計算法の開発を行なった。このモデルを構成する質量保存則、運動量保存則、およびイオンと電子の内部エネルギー方程式に対して積の微分法則と商の微分法則を作用させることで、エネルギー保存則を数学的に証明することができる。そこで、離散化によりエネルギー保存則が数値的に破られる原因は積の微分法則と商の微分法則が破綻することが原因であると仮説を立て、離散化レベルでこれらの数学公式を詳細に満たす構造保存オペレータを開発した。また、1 流体 2 温度モデルは中性粒子が 2 つの内部自由度を持つと仮定したモデルであるため、質量・運動量・エネルギー保存則に加えてエネルギー等分配則を要請することでイオンと電子の離散型内部エネルギー方程式を得た。開発した数値計算法の妥当性を検証するために、1 流体 2 温度モデルの衝撃波管問題の数値解と厳密解を比較した。1 流体 2 温度モデルの支配方程式は非保存形でありながら双曲型であるので、固有構造を持つ。イオンと電子の内部エネルギー比はエントロピー波をまたいだ時のみ変化できることを利用して、厳密解を導くことが可能である。数値実験の結果、新たに開発した構造保存スキームと従来型の手法のうち保存スキームは、エネルギー保存則の誤差を丸め誤差レベルに抑制でき

ることがわかった。また、構造保存スキームは従来型のスキームとは異なり、衝撃波と接触不連続面の間で厳密解と良い一致を示すことがわかった。従来型の手法のうち、非保存スキームはエネルギー保存則を、保存スキームはエネルギー等分配則をそれぞれ破ることから、これらの物理法則を同時に満たす構造保存スキームのみが厳密解を再現すると考えられる。新たに開発した構造保存スキームは積の微分法則・商の微分法則の詳細な取り扱いに基づくことから、多次元問題に容易に拡張することができる。さらに、エントロピー波の線形移流問題をとくことにより、構造保存スキームの精度を検証した。本手法を構築する際には質量・運動量・エネルギー保存則の3本を離散化し、エネルギー等分配則を用いてイオンと電子の内部エネルギーを分離した。それにも関わらず、フォーマルな空間精度で誤差が減少することを数値実験により確認した。

弱結合プラズマの第一原理シミュレーションでは相対論的 Vlasov–Maxwell 系が用いられるが、方程式を離散化する際に運動量・エネルギー保存則を数値的に破ってしまうという問題がある。このことから、物理的に妥当なシミュレーションを行うには格子点間距離を非常に小さくする必要があり、マクロスケールの現象を議論することが困難であると認識されてきた。クランク・ニコルソン法とスペクトル法に基づく完全保存スキームはすでに提案されているが、空間の周期性を仮定しており議論できる物理に大きな制約が課せられるという問題がある。そこで、圧縮性流体シミュレーションでしばしば用いられる自乗量保存スキームを応用して、相対論的 Vlasov–Maxwell 系に対する電荷・運動量・エネルギー保存スキームを開発した。相対論的 Vlasov 方程式から運動量・エネルギーを求めるには部分積分、Maxwell 方程式から運動量・エネルギーを求めるには積の微分法則、そしてガウスの法則と磁場のソレノイダル条件を求めるには微分演算子の交換法則がそれぞれ必要である。したがって、相対論的 Vlasov–Maxwell 系に対する保存型の計算スキームを構築するには、これらの数学公式を離散化レベルで厳密に満たす必要があると考えられる。新たに開発した自乗量保存スキームは、時間についてクランク・ニコルソン法、空間・運動量について中心差分により離散化される。開発した自乗量保存スキームを数学的に変形することにより、電荷・運動量・エネルギー保存則、ガウスの法則、磁場のソレノイダル条件を数学的に示すことが可能であると確認した。開発した自乗量保存スキームの妥当性を検証するために、相対論的2流体不安定性および相対論的 Weibel 不安定性による数値実験を行なった。電磁場のエネルギーの時間発展は線形理論による予測をよく再現しており、場のエネルギー増幅が飽和する非線形段階に移行しても計算が安定して行われることを確認した。また、電荷・運動量・エネルギー保存則は非線形段階移行後も丸め誤差レベルで厳密に満たされることを確認した。したがって、任意の境界条件に対して適用可能な相対論的 Vlasov–Maxwell 系に対する完全保存スキームの原理実証に成功した。ただし、相対論的 Vlasov–Maxwell 系は双曲型であるにも関わらず中心差分により離散化する必要があるため、数値分散により分布関数が負になる場合がある。自乗量保存スキームを構築する際に差分オペレータが数値散逸を含むことは許されないため、本手法を相対論的 Vlasov–Fokker–Planck–Maxwell 系に拡張し、物理的ないしは人工的な衝突項を加えることでこの問題を克服可能であると予想される。

