

Title	レーザー核融合における大規模シミュレーション特性と3次元レイリー・テイラー不安定性シミュレーション
Author(s)	堀越, 将司
Citation	大阪大学, 2006, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/47000">https://hdl.handle.net/11094/47000</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について〈/a〉をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	堀越 将司
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 20338 号
学位授与年月日	平成 18 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科電子情報エネルギー工学専攻
学位論文名	レーザー核融合における大規模シミュレーション特性と 3 次元レイリー・テイラー不安定性シミュレーション
論文審査委員	(主査) 教授 西原 功修  (副査) 教授 三間 罔興 教授 田中 和夫 自然科学研究機構核融合科学研究所教授 坂上 仁志 教授 飯田 敏行 教授 西川 雅弘 教授 朝日 一 教授 児玉 了祐

## 論文内容の要旨

本論文は、著者が大阪大学大学院工学研究科電子情報エネルギー工学専攻博士課程において行った“レーザー核融合における大規模シミュレーション特性と 3 次元レイリー・テイラー不安定性シミュレーション”に関する研究成果をまとめたものである。本論文は、以下の 6 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、レーザー核融合の原理、レーザー爆縮過程において誘発される流体力学的不安定性、多階層プラズマシミュレーションシステム  $FI^3$  について略述した。その中でも特に、レイリー・テイラー (RT) 不安定性の重要性と本研究の目的について述べた。

第 2 章では、レーザー核融合のシミュレーション研究に用いられる種々の計算コードの計算手法と計算特性を把握するために、多階層プラズマシミュレーションシステムを構成する各コードの擬似カーネルを作成し、各コードの計算手法と計算特性を解析し、各コードに最適な計算機の選択についての評価を行った。

第 3 章では、超並列スカラー型計算機システムで生じるパフォーマンスの低下について解析を行い、その改善手法を提案した。すなわち MPI 版の流体コードを用いてベンチマークテストを行い、ノード内のすべてのプロセッサを使用した場合に通信パフォーマンスが著しく低下し、またパフォーマンスの揺れが増大することを観測し、その要因を明らかにするとともにそれを大幅に改善する新しい手法の有効性を実証した。

第 4 章では、3 次元流体シミュレーションにより、RT 不安定性の界面のダイナミクスには渦度が本質的な働きを示すことを示し、渦と界面のダイナミクスの関連性を明らかにした。2 つのモードの初期位相を適切に選択することにより異なる非線形成長速度を有する 3 つのバブルを励起することが可能であることを示し、バブル界面の長時間非線形発展を明らかにした。3 次元 RT 不安定性では、2 次元 RT 不安定性と異なり、鞍部が存在するが、この鞍部の存在により重力方向の縦渦が生じることを初めて明らかにした。また縦渦の相互作用により、界面のダイナミクスが決定されることを見出した。すなわち縦渦の相互作用によってバブル入り口の境界面が変形し、その結果バブルへ流入する質量フラックスが変化することによりバブルの非線形成長速度の増大、あるいは抑制が生じ、非線形成長速度

の異なるバブルが形成されることを示した。

第5章では、物質の平均分子量が一定でない場合には熱伝導によって RT 不安定性が誘起されるが、この RT 不安定性について、線形理論を構築し粘性の影響を解析的に明らかにした。なお、通常の RT 不安定性では、熱伝導によって RT 不安定性は抑制される。この新しい RT 不安定性における粘性による安定化は、平均分子量勾配と重力加速度の向きに依存すること、また粘性による安定化領域と不安定性の抑制についてプランドル数依存性などを明らかにした。

第6章は結論であり、以上の研究で得られた成果をまとめて、本論文の総括を行った。

### 論文審査の結果の要旨

レーザー核融合の爆縮過程、点火過程の計算機シミュレーション研究は、計算機の能力向上に伴い、2次元から3次元爆縮シミュレーションへ、また高速点火に重要な高エネルギー電子の輸送などを含むシームレスな多階層シミュレーションへと発展しつつある。計算機の能力向上は、並列計算、キャッシュメモリ、あるいはベクトルパイプラインなどいろいろな方式で実現されているが、レーザー核融合のように種々の物理過程が相互に関連する複合過程では、それぞれの過程を計算する各計算手法に適した演算プロセッサ方式の選択が重要であり、またそのことによって大規模なシミュレーションが可能となる。本論文では、レーザー核融合の大規模多階層シミュレーションの計算特性と計算機の能力を引き出すための計算手法について研究を行うとともに、大規模3次元流体シミュレーションによってレイリー・テイラー不安定性の非線形発展に関する研究を行い、以下の結果を得ている。

- (1) 多階層シミュレーション、すなわちレーザー核融合プラズマの爆縮過程、超高強度レーザーによる高エネルギー電子生成過程、高エネルギー電子のエネルギー輸送と緩和過程について、それぞれの計算手法の特性を解析し、各計算手法に適した演算プロセッサの評価を行っている。
- (2) 超並列計算機を用いた大規模シミュレーションにおいては、メモリ帯域、システムプロセスの存在、システム割り込み頻度などの要因のため必ずしも計算機の性能をフルに生かすことは容易ではないが、システム割り込み影響の除去、および階層的な並列手法の採用により計算機の能力に比例する性能を引き出すことを提案し、その有効性を実証している。
- (3) 大規模3次元レイリー・テイラー不安定性シミュレーションを行い、3次元の不安定性に特有な重力方向の縦渦の生成機構を鞍部での流れの淀みにより生じることを明らかにするとともに、縦渦の相互作用によりバブル入り口の変形が引き起こされること、またそのことによってバブルの非線形成長速度の増大、あるいは抑制が生じることを明らかにしている。
- (4) 物質の平均分子量が一定でない場合には熱伝導によってレイリー・テイラー不安定性が誘起されるが、この不安定性について粘性の影響を調べ、粘性による安定化が平均分子量勾配と重力加速度の向きに依存すること、また粘性による安定化領域と不安定性の抑制についてプランドル数依存性などを明らかにしている。

以上のように、本論文はレーザー核融合研究に用いる大規模多階層シミュレーションの特性に適した新しい計算手法を提案し、さらに大規模3次元レイリー・テイラー不安定性シミュレーションを行い、非線形発展での縦渦生成とバブル競合過程の関係を明らかにしている。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。