

機関番号：74417

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540489

研究課題名（和文） 高速点火における高密度爆縮物理の解明

研究課題名（英文） High dense implosion for fast ignition

研究代表者

砂原 淳 (SUNAHARA ATSUSHI)

財団法人レーザー技術総合研究所 理論・シミュレーションチーム 研究員

研究者番号：00370213

研究成果の概要（和文）：高速点火レーザー核融合において高密度爆縮を達成し、効率よく追加熱を実施するため、1次元、2次元の放射流体シミュレーションコードを開発し高密度爆縮のモデリングを行った。また、高速点火独自のコーンターゲットの特性評価を行った。これにより高密度爆縮及びコーンターゲット内部状態の理解が進んだ。

研究成果の概要（英文）：In order to achieve the high dense plasma core and efficient heating in the fast ignition scheme of inertial confinement fusion, I have developed one- or two-dimensional radiation hydro simulation codes. I have investigated the high dense implosion and cone target physics, including the condition of interior of cone target.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：プラズマ科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

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

レーザー核融合研究は米仏が間接照射による中心点火爆縮方式で点火を目前にしているのに対し、日本は大阪大学を中心として、よりコンパクトで高効率の核融合炉につながる可能性のある高速点火方式で独自に点火を目指している。この高速点火方式は予め爆縮により高密度プラズマを生成し、これを高強度短パルスレーザーで発生させた高速電子流で追加熱して核融合点火させるものである。従来を中心点火方式に比べ中心部に高温点火部分を作る必要がないため、レーザーの照射一様性など、爆縮の対称性に対する条件を緩和できると期待されている。しかし

一方で、高速電子流による加熱を効率よく行ない、且つ高燃焼率を得るために高密度の爆縮プラズマコアを形成する必要がある。そのため、高密度爆縮の流体物理と電子熱輸送、輻射輸送等のエネルギー輸送の物理解明が急務である。

2. 研究の目的

我が国独自の高速点火方式レーザー核融合で点火を目指すため、高密度爆縮を指向した爆縮条件の確立、電子熱輸送、輻射輸送等のエネルギー輸送の物理解明を行う。1次元及び2次元の爆縮計算コードを開発し、高速点火の高密度爆縮に必要な条件を明らかにすると共に、大阪大学 FIREX-I 高速点火原理実

証実験に直接的に貢献する。高密度爆縮に関する物理研究を推進しつつ、我が国の高速点火レーザー核融合を成功に導くことを目的とする。

3. 研究の方法

1次元及び2次元統合爆縮コードを開発し、高速点火核融合における高密度爆縮及び高速加熱に関するシミュレーション研究を行う。コード開発は物理要素、即ち、流体、電子熱伝導、輻射輸送、レーザー光線追跡、状態方程式、原子過程の要素ごとの計算手法を確立し、統合化に向けて精度テストを行う。

4. 研究成果

本研究は高速点火レーザー核融合の爆縮過程を数値シミュレーション手法により解析するものであり、まずシミュレーションコードの開発を行った。その結果、一次元及び2次元の放射流体コードを完成させ、レーザー爆縮を高精度に解析することが可能になった。レーザープラズマでは流体運動とプラズマ中のエネルギー輸送が密に結合しているため、エネルギー輸送計算の高精度化が全体の計算精度に大きく影響する。特に電子熱伝導は非局所性を示し、局所的な温度勾配のみでは熱流束が決まらない。また、電子速度分布関数がマクスウエル分布からずれるため、運動論的な取り扱いが必要になる。このため、フォッカープランク方程式に基づき電子の熱流束を運動論的に計算するコードを開発した。また、コードの計算精度確認に当たっては米国ロチェスター大学との共同研究を行い、米国側で詳細にベンチマークテストされた爆縮流体コードと開発したフォッカープランクコードを接続し、実際の爆縮実験の条件で解析を行ない、米国側の実験結果との比較を行った。その結果、計算が実験結果を再現することを確認し、非局所電子熱輸送モデルの有効性を確認した。さらに高強度パルス実験及びクライオ爆縮実験について解析を行ない、強い非局所特性を見出した。これらの解析により、レーザー核融合爆縮過程の定量的評価及び非局所電子熱輸送の定量的モデリングが格段に進歩した。図1は計算結果の一例であり、従来より用いられて来た熱束制限スピッツァーモデル(SH)に比べ爆縮速度やシェル密度が異なり、非局所性の導入が重要であることを示している。また、一次元のフォッカープランクコード開発と平行して2次元のフォッカープランク方程式に基づく数値計算解法についても安定かつ高精度に計算可能な手法について考察し、プログラム開発を行った。

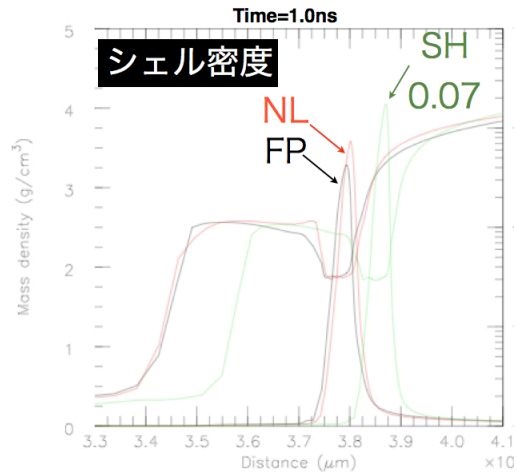


図1 フォッカープランク方程式に基づく非局所電子熱輸送を考慮した爆縮シェル密度。(FP:フォッカープランク、NL:非局所輸送モデル、SH:熱束制限スピッツァーモデル)

また、高速点火爆縮では爆縮と追加加熱の同期が重要であり、爆縮タイミング予測の高精度化を行った。図2に計算例を示す。

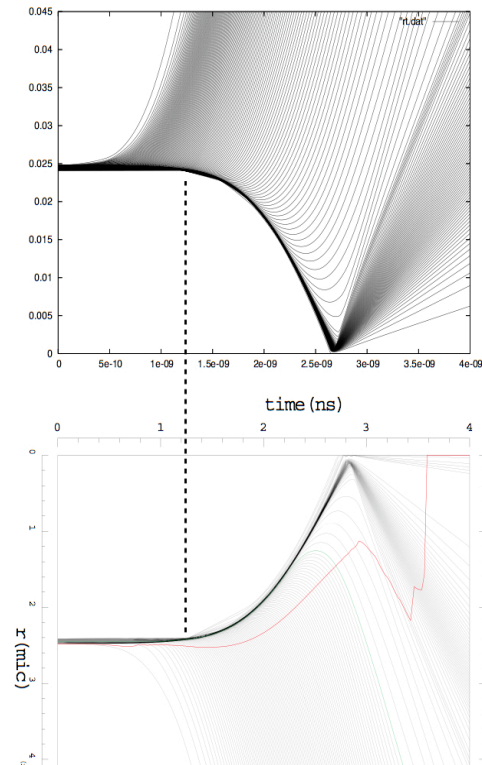


図2 レーザー吸収および状態方程式の改良、高精度化による爆縮タイミングの違い (上: 開発したコード、下: 従来の計算)

電子熱輸送、輻射輸送等のエネルギー輸送のみならず、レーザー吸収、状態方程式の物理モデル改良を行った結果、従来の爆縮計算よりも爆縮時刻が 200ps 程度早まることを示した。また、一次元と同様の物理過程に基づく 2次元放射流体コードを開発した。開発した爆縮計算コードを用いて大阪大学で開始された高密度爆縮プラズマを点火温度 5keV まで加熱する実験 (FIREX-I 高速点火原理実証実験フェーズ I) の実験条件設計、点火実証実験 (FIREX-II 高速点火原理実証実験フェーズ II) の実験デザインに貢献した。3次元流体コードに関しては Smoothed Particle Hydrodynamics 手法を用いてコードを構築し、従来 2次元スキームとの比較、電子熱伝導、輻射輸送との結合により、統合爆縮流体計算環境を完成させた。開発したコードを用いて高速点火を解析し、爆縮がコーンターゲット先端を破壊し、コーン内部にプリプラズマを生成させることで高効率な追加熱を妨げている可能性を見だし、コーン形状、及び物質の最適化、将来的な点火を見越したコーンターゲットの設計を行った。さらに高速点火実験 (FIREX-I) において追加熱レーザーのプリパルスに起因するプリプラズマ生成を評価、解析し、プリプラズマの抑制手法についても提案を行った。図 3 に大阪大学の高速点火原理実証実験においてコーン内部のプリプラズマ生成を 2次元

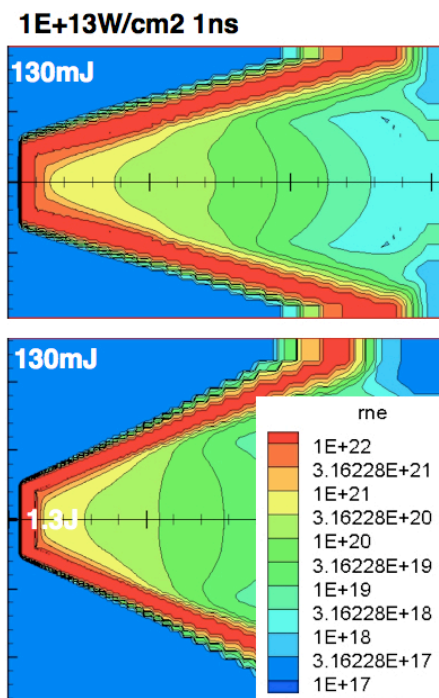


図3 コーンターゲット内部のプリプラズマ生成の2次元放射流体計算例

放射流体計算により見積もった結果の一例を示す。コーンターゲット内部に超高強度レーザーのプリパルス及び爆縮プラズマからの衝撃波伝搬により生成されたプリプラズマが充満し、超高強度レーザー入射時、高速電子の発生に影響を与える。現在の実験におけるプリプラズマレベルを定量的に推定し、超高強度レーザーとプリプラズマとの相互作用計算を行うことで、プリプラズマの高速点火に及ぼす影響を定量的に評価した。

図4には爆縮プラズマからの衝撃波によりコーンターゲット内部にプリプラズマが生成されるのを抑制するために考案された円錐先端形状を持つコーンターゲットの計算例を示す。ターゲット材質及び形状をさらに最適化することにより、衝撃波伝搬制御だけでなく、自己磁場生成による高速電子の制御も可能であることを示し、高速点火実験で問題となっている超高強度レーザーによる爆縮レーザーの加熱効率改善の可能性が見いだされた。

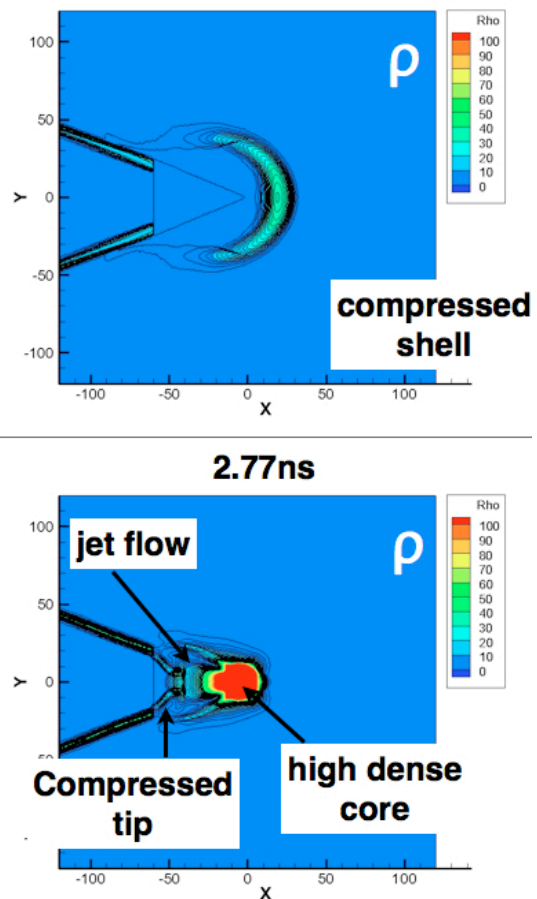


図4 円錐コーン先端形状と爆縮との相互作用の計算例 (上: 初期密度、下: 最大圧縮時の密度分布)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

①A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo, K. Mima, "EFFECTS OF PRE-FORMED PLASMA INSIDE A GUIDING CONE IN FAST IGNITION SCHEME", 審査有, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 244, Part 2 (2010) 022079-1-5.

②K. Mima, A. Sunahara, H. Shiraga, H. Nishimura, H. Azechi, T. Nakamura, T. Johzaki, H. Nagatomo, C. Garcia and P. Velarde, "FIREX project and effects of self-generated electric and magnetic fields on electron-driven fast ignition", Plasma Phys. Control. Fusion, 審査有, 52 (2010) 124047 (6pp).

③A. Sunahara and K. A. Tanaka, "Atomic number Z dependence of dynamics of laser-ablated materials", Fusion Engineering and Design, 審査有, 85 (2010) 935-939.

④H. B. Cai, K. Mima, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo, S. Zhu and X. T. He, "Prepulse effects on the generation of high energy electrons in fast ignition scheme", Phys. Plasmas, 17, (2010) 023106-1-8.

⑤A. Sunahara, "Analysis of Laser-produced Plasma Extreme Ultra-violet Light Source", Journal of The Institute of Engineers on Electrical Discharges in Japan, 審査無, 52 (2009) 31-39.

⑥A. Sunahara, K. Nishihara and A. Sasaki, "Optimization of Extreme Ultraviolet Emission from Laser-Produced Tin Plasmas Based on Radiation Hydrodynamics Simulations", Plasma Fusion Res, 審査有, 3 (2008) 043-1-043-5.

〔学会発表〕(計10件)

①砂原淳, "高速点火におけるコーンターゲット内部のプレプラズマ抑制", 第27回プラズマ核融合学会年会、北海道大学、2010年11月30日

②A. Sunahara, "Generation and reduction of pre-plasma inside the cone target", US Japan workshop on High energy density physics, at Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 2010.11.14-18.

③A. Sunahara, "Multi-Dimensional Radiation Hydrodynamic simulation and Direct Simulation Monte Carlo on Laser ablated plumes", the International workshop on 19th Topical Meeting on the

Technology of Fusion Energy, at Riviera Hotel, Las Vegas, Nevada, 2010.11.7-11.

④A. Sunahara, "Reduction of pre-plasma inside the cone target", 2010 Japan-US Fast Ignitor and High Energy Density Physics Workshop at Wakayama Tokyu-inn, 2010.10.23-24.

⑤A. Sunahara, "Pre-plasma formation and its reduction", the China-Japan CUP Seminar on Laser Plasma Physics (CUP seminar) at Jiao Tong University, Shanghai, 2010.10.13-16.

⑥砂原淳, "高速点火コーンターゲット内のプレプラズマ生成Ⅲ", 日本物理学会、岡山大学、2010年3月20日-23日

⑦砂原淳, "高速点火用コーンターゲット内部のプラズマ生成", 日本流体力学会 数値流体シンポジウム、仙台市民会館、2009年12月16日-18日

⑧A. Sunahara, "Numerical Simulation of Pre-formed Plasma Generated by Low intensity Pre-pulse Before Main Heating Laser in Fast-Ignition", 51st American Physical Society Annual DPP meeting, 2009.11.2-6.

⑨A. Sunahara, "Effect of Pre-plasma formation on generation of fast electron in conetarget", IFSA(International Conference on Inertial confinement fusion science and applications), San Francisco, 2009.9.6-11.

⑩砂原淳, "高速点火コーンターゲット内のプレプラズマ生成", 第7回核融合エネルギー連合講演会、青森、2008年6月21日

〔図書〕(計1件)

①砂原淳、大西直文, "プラズマ原子分子過程ハンドブック", 第10章、浜口智志他編、大阪大学出版会(2011)、pp. 231-254

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 初期生成プラズマ抑制と高速荷電粒子収束を同時に達成するターゲット形状

発明者: 砂原淳、城崎知至、長友英夫

権利者: 財団法人レーザー技術総合研究所

種類: 特許

番号: 2010-241436

出願年月日: 2010.10.12

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ilt.or.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

砂原 淳 (SUNAHARA ATSUSHI)
財団法人レーザー技術総合研究所
理論・シミュレーションチーム 研究員
研究者番号：00370213