

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05368

研究課題名(和文) 高速点火レーザー核融合における高エネルギー粒子輸送の物理解明

研究課題名(英文) Numerical modeling on transport of high energy particles in the fast ignition scheme

研究代表者

砂原 淳 (SUNAHARA, ATSUSHI)

大阪大学・レーザー科学研究所・招へい准教授

研究者番号：00370213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は高速点火レーザー核融合における加熱効率向上を目指すことを主目的としている。本研究では2次元の爆縮流体コードを開発し、レーザー照射不均一を考慮した爆縮コア生成計算を可能にした。また、Warm Dense Matter(WDM)領域の金の導電率を計算し、超高強度レーザー導入用金コーンターゲットへの磁場の拡散、及び渦電流によるプリプラズマ発生を計算した。爆縮、磁場、プレプラズマの精度の高い知見が得られ、加熱効率向上に向けた包括的なシミュレーションが可能になった。

研究成果の概要(英文)：This research is aimed at the increase of the heating efficiency for the fast ignition scheme of inertial confinement fusion. The fast ignition scheme has large potential to reduce the ignition energy required for thermonuclear burn. However, the heating efficiency of ultra-intense laser to the compressed core is not enough yet to initiate the thermonuclear burn efficiently. In order to increase the heating efficiency, we developed the two-dimensional radiation hydrodynamic simulation code to calculate the implosion with laser non-uniformity. Also, we calculate the electrical conductivity to simulate the diffusion of external magnetic field into the cone target and generation of pre-plasmas due the Joule-heating of eddy current driven by the temporal change of the magnetic fields. Now, we can simulate the improvement of heating efficiency of fast ignition based on these progresses of numerical modeling.

研究分野：レーザープラズマシミュレーション

キーワード：高速点火レーザー核融合 爆縮 磁場拡散 電磁波と物質の相互作用 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

高速点火レーザー核融合は従来の中心点火方式に比べ、点火に必要なエネルギーを格段に低減できるという特徴があり、日本を中心として精力的に研究が展開されてきた。しかし、エネルギーキャリアである高速電子を効率よく発生させ、高密度爆縮コアに当てるのが依然として難しく、高速電子の大きな発散角のため、発生した高速電子の多くがコアに当らなかったり、プレプラズマの存在のため、発生した高速電子のエネルギーが大きくなりすぎ、コアに当たっても素通りしてしまうという問題にぶつかり、加熱効率が数%程度に留まっていた。これに対して、画期的なアイデアが提案された。1キロテスラに匹敵する高強度磁場の発生が可能になり、これを用いて高速電子を外部磁場で爆縮コアまでガイディングするというアイデアである(図1)。

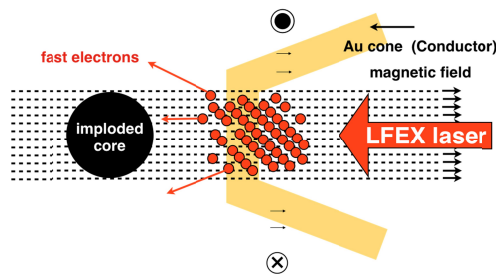


図1 磁場による高速電子ガイディングを用いた高速点火の概念図

磁化プラズマを用いた高速点火レーザー核融合は新規の概念であり、プラズマ物理、物質と電磁波との相互作用の物理の観点からも興味深いテーマである。理論・シミュレーション手法による物理モデリング研究を進め、高速点火レーザー核融合の加熱効率を向上させる突破口を見出すべく、磁場が存在する状況下での高速点火の物理をシミュレートするコード開発、物理モデリングの進展が求められた。

2. 研究の目的

本研究は高速点火レーザー核融合における加熱効率を向上させるため、高強度レーザーとプラズマとの相互作用、外部磁場によるプラズマの磁化、超高強度レーザー相互作用で重要となる初期プリプラズマの特性を調べることで高速点火レーザー核融合における加熱効率向上を図ると共に、高強度レーザーと物質の相互作用の物理解明に寄与することが目的である。特に、近年実現された1キロテスラに匹敵する外部磁場、レーザー照射によ

る自己生成磁場を積極的に利用し、高速点火研究の新展開を目指し、これらの解析に必要な数値計算コードの開発が重点課題である。

3. 研究の方法

まず第一の課題は加熱される側の高密度爆縮コアプラズマ生成のモデリングツールである爆縮シミュレーションコードを中心としたシミュレーション環境の構築である。レーザー光線追跡、Arbitrary Lagrangian Eulrian (ALE)手法を導入した2次元輻射流体コードを開発し、レーザーの非一様性を考慮した爆縮計算(2次元軸対称系)を可能にした。流体の基礎的な数値計算スキームには磁気流体力学(MHD)に対応するHLLDへの発展の基礎となるよう、非磁気流体版であるHLLCスキームを採用し、MHD化への拡張性を模索すると同時に、一般の状態方程式に対応したロバストな爆縮計算を可能とした。図2は非均一レーザー照射の例として、両側からの対向照射時の爆縮コア生成計算例を示す。非球状の爆縮コア生成が見取れる。

続いての課題は磁場の取り扱いである。外部磁場のターゲットへの拡散をモデルするため、主に1eV以下の固体領域の金の導電率を求めた。具体的にはサハ方程式から密度、温度に応じた電離度を求め、中性、イオンのそれぞれの衝突を計算し、導電率を求めた。それをMaxwell方程式におけるプラズマ伝導電流項に導入することで、時間変動する外部磁場の時間空間的な発展を解くコードを開発した。図3は計算例であり、中心水平軸が対称軸となるシリンダー内部への外部磁場の拡散が計算が見取れる。これにより、外部磁場を印加したときの磁場の拡散、渦電流、渦電流によるジュール加熱、プリプラズマ生成の計算を可能にした。以上の爆縮コア生成及び外部磁場をモデリングするコードの開発をベースに、従来の高速点火核融合の

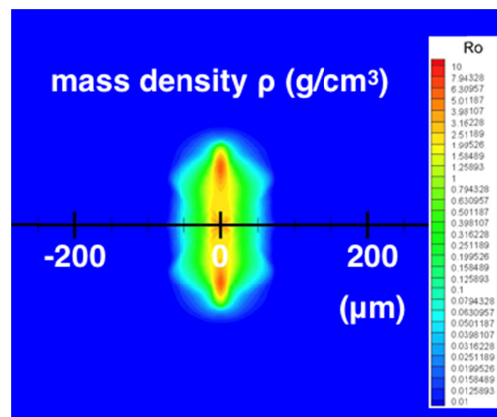


図2 非均一レーザー照射による爆縮コア生成の計算例

モデリングと結合し、磁化された条件における高速点火のモデリングを可能とした。

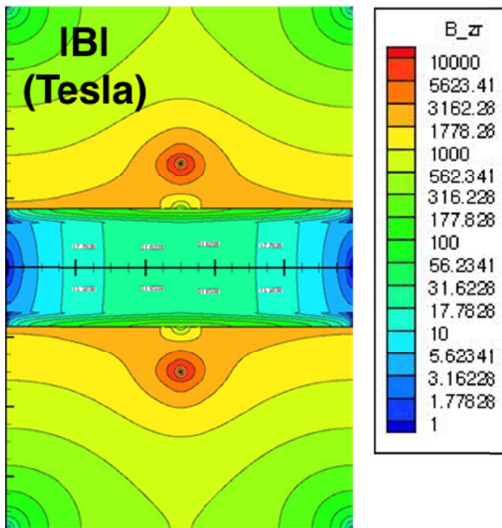


図3 水平軸を対称軸とした金シリンダー状ターゲットへ外部磁場を印加した時の磁場の拡散。

これらの開発、進化したツールを用いて、超高強度レーザー照射による高速電子、イオンの発生から輸送、爆縮コア加熱に至るシミュレーションを再度見直し、物理モデリングを行い、高速点火加熱効率の向上を図る。

4. 研究成果

図2の計算例に示した通り、非一様なレーザー照射による爆縮コア生成を計算できるようになり、加熱される側の高密度圧縮プラズマコア状態を定量的により深く解析できるようになった。また、図3に示したように、外部磁場をターゲットに印加した時の磁場の拡散を計算できるようになった。また、時間変化する外部磁場を印加するために、金ターゲットに渦電流が流れ、外部磁場のターゲット内部への拡散をうち消そうとするだけでなく、金コートをジュール加熱するため、金ターゲット内外に、プリプラズマを生成する可能性があることが見出された。プリプラズマの存在は超高強度レーザー照射時の高速電子の発生に多大な影響をあたえる非常に重要なものである。現在までの解析から、磁場ガイディングを導入した高速点火の数値モデリングが進展した。現在、加熱効率の向上に向けた最適解を見出すべく、個々の素過程の計算精度向上と多くの過程の統合について試みているところである。これらの成果は実際の大阪大学レーザー科学研究所で行なっている高速点火実験に生かされようとしている。また、浜松の光産業創成大学院大学を中心とした対向爆縮型高速点火のデザインにも活かされている。

5. 主な発表論文等

Abe Y., Law K. F. F., Korneev Ph., Fujioka S., Kojima S., Lee S.-H., Sakata S., Matsuo K., Oshima A., Morace A., Arikawa Y., Yogo A., Nakai M., Norimatsu T., d'Humi?res E., Santos J.

J., Kondo ., Sunahara A., Gus'kov S., Tikhonchuk V., "Whispering gallery effect in relativistic optics", JETP Letters 15 (2018) 1-5.

Abe Y., Sunahara A., Lee S., Yanagawa T., Zhang Z., Arikawa Y., Morace A., Nagai T., Ikenouchi T., Tosaki S., Kojima S., Sakata S., Satoh N., Watari T., Nishihara K., Kawashima T., Yogo A., Sakagami H., Shiraga H., Nishimura H., Mima K., Azechi H., Norimatsu T., Nakai M., Fujioka S., "Production of intense, pulsed, and point-like neutron source from deuterated plastic cavity by mono-directional kilo-joule laser irradiation", Applied Physics Letters 111 (2017) pp. 233506-233506~233506.

Tomita K., Sato Y., Tsukiyama S., Eguchi T., Uchino K., Kouge K., Tomuro H., Yanagida T., Wada Y., Kunishima M., Soumagne G., Kodama T., Mizoguchi H., Sunahara A., Nishihara K., "Time-resolved two-dimensional profiles of electron density and temperature of laser-produced tin plasmas for extreme-ultraviolet lithography light sources", Scientific Reports 7 (2017) 12328-1-7.

Sunahara A. and Hassanein A., "ペーパーシールディングによる熱負荷散逸効果に対する幅射輸送の影響", Journal of plasma and fusion research 93 (2017) 366-370.

Morita T., Edamoto M., Miura S., Sunahara A., Saito N., Itadani Y., Kojima T., Mori Y., Johzaki T., Kajimura Y., Fujioka S., Yogo., Nishimura H., Nakashima H., Yamamoto N., "Control of unsteady laser-produced plasma-flow with a multiple-coil magnetic nozzle", Scientific Reports 7 (2017) 8910-1-7. 57

Nagatomo H., Johzaki T., Asahina T., Hata M., Matsuo K., Lee S., Sunahara A., Sakagami H., Mima K., Iwano K., Fujioka ., Shiraga H., Azechi H., "Compression and electron beam heating of solid target under the external magnetic field for fast ignition", Nuclear Fusion 57 (2017) 086009~086009.

Mori Y., Nishimura Y., Hanayama R., Nakayama S., Ishii K., Kitagawa Y., Sekine T., Takeuchi Y., Kurita T., Satoh N., Kawashima T., Komeda O., Nishi T., Azuma H., Hioki T., Motohiro T., Sunahara A., Sentoku Y., Miura E., "Fast heating of fuel assembled in a spherical deuterated polystyrene shell target by counter-irradiating tailored laser pulses delivered by a HAMA 1 Hz ICF driver", Nuclear Fusion 57 (2017) 116031~116031.

Kitagawa Y., Mori Y., Ishii K., Hanayama R.,
Nishimura Y., Okihara S., Nakayama S., Sekine
T., Takagi M., Watari T., Satoh N., Kawashima
T., Komeda O., Hioki T., Motohiro T., Azuma H.,
Sunahara A., Sentoku Y., Arikawa Y., Abe Y.,
Miura E., Ozaki T., "Direct heating of a
laser-imploded core using ultraintense laser
LFEX", Nuclear Fusion 57
(2017) 076030~076030.

〔雑誌論文〕(計 9 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究代表者 砂原淳(SUNAHARA Atsushi)
大阪大学・レーザー科学研究所
招へい准教授 研究者番号：00370213

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者

城崎知至(JOHZAKI Tomoyuki)
広島大学・工学研究院 准教授
研究者番号：10397680

藤岡慎介(FUJIOKA Shinsuke)
大阪大学・レーザー科学研究所 教授
研究者番号：40372635