

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400532

研究課題名(和文) レーザープラズマによる超高強度磁場形成とその応用に関するシミュレーション

研究課題名(英文) Simulation of formation of high intense magnetic field using laser plasma and its application

研究代表者

長友 英夫 (Nagatomo, Hideo)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授

研究者番号：10283813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：レーザープラズマにおいて、磁場の流体運動への影響を調べるための2次元抵抗性電磁輻射流体シミュレーションコードを開発した。このコードを用いた解析で、レーザープラズマによる強磁場の発生、およびその磁場を爆縮等で圧縮させ、極めて高い磁場が形成されることをシミュレーションで検証した。磁場による電子熱伝導係数による非等方性を考慮していることから、外部磁場に起因する流体力学的不安定性の影響を受けること発見し、その回避方法として中実球爆縮を用いることによって安定な高強度磁場を形成できることを示した。形成された強い磁場によって、メガ電子ボルトと比較的高いエネルギーを持つ高い電子も制御できることが示された。

研究成果の概要(英文)：We have developed a two-dimensional resistive electromagnetic radiation hydrodynamic simulation code for laser plasma to investigate the influence of magnetic field on hydrodynamics and application of strong magnetic field. We have verified that generation of strong magnetic and its compression using laser driven implosion. Furthermore, we found that due to the anisotropy of electron heat conduction in strong magnetic field, hydrodynamic instability was induced, and it was not compressed properly in shell implosion. We proposed the spherical solid target instead of shell target. Some numerical examples were shown to demonstrate the application of laser-produced strong magnetic field. For example, control of the high energy electron beam is demonstrated using hybrid simulation, which is important for fast ignition of laser fusion.

研究分野：計算プラズマ物理

キーワード：レーザープラズマ 輻射流体力学 電磁流体力学 高エネルギー密度科学 高速点火 レーザー核融合

1. 研究開始当初の背景

1巻コイルとレーザー駆動によって発生する瞬時の大電流によって1キロテスラと極めて強い磁場を発生させることに成功していた。これは、地上で作り出せる磁場としては最大レベルであり、これを利用した研究展開が期待されていた。さらに、磁場を爆縮用ターゲットに印加させると同時に、レーザー爆縮による圧縮をさせれば、さらに数十倍の極めて高い磁場を発生させ得ることも示唆されていた。

これまでに開発済の爆縮を扱える2次元輻射流体シミュレーションコードに、磁場の発展方程式を同時に解けるよう拡張し、予備的な計算を行ったところ10キロテスラ(108ガウス(G))を超える超高強度磁場の形成が可能であることが明らかになっていた。

このような高強度磁場の発生、およびその圧縮によって超高強度磁場を形成することが実現すると様々な分野で新しい活用が期待されている。例えば、レーザー核融合の高速点火では、適切な磁場配置によって高速電子ビームをガイドして加熱効率向上に寄与する。また、宇宙物理や物性科学でも強磁場下でのプラズマ、粒子の振る舞い、物性への影響など興味深い応用が考えられる。ただし、このような極限状態は十分把握できておらず、また実験も大がかりなため、理論・シミュレーション研究による詳細なプロセスの解明と実験設計の役割が極めて重要になっていた。

2. 研究の目的

(1) 高強度磁場発生

図1.に示した概略図で発生する磁場を正確に予測する。2枚の円盤間に流れる電流は、高強度レーザー照射によって生じるプラズマ流によって決まる。固体からアブレーションまでの5桁程度の密度変化を正確に捕えられないといけな。特に、比較的低温領域、固体密度近傍での電離や状態方程式が結果に大きく影響するため、物性を理解した上で、

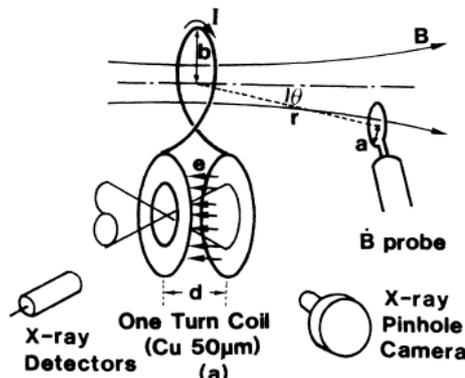


図1. レーザープラズマによる高強度磁場発生機構[H. Daido *Phys. Rev. Lett.* 56 846, (1986)]

適切なモデルとシミュレーション手法を確立させる。レーザープラズマによる大電流発生メカニズムを完全なMHDシミュレーションによって解明し、高効率化ための知見を得る。

(2) 高強度磁場の圧縮による超高強度化

(1)で発生した磁場をレーザー爆縮で圧縮させることによって、さらに高い磁場を形成させるプロセスである。通常、爆縮では固体密度の100倍以上に圧縮させることが可能であるが、実際の実験では極限的な状態を正確に把握することは困難である。また、移流だけでなく、磁場の拡散や初期磁場分布など、シミュレーションによる正確な予測が不可欠である。一方、爆縮では低温、低電離の状態から高エネルギー密度状態を伴いながら最大圧縮に到達するが、現存する磁場の拡散係数や熱伝導に関する数値モデルは、これらの幅広いレンジの現象を網羅するには不十分である。これらを改善するとともに、シミュレーションによる実験の再現、および磁場形状の最適化手法を明示する。なお、これらの数値モデルについては宇宙プラズマ物理分野でも盛んに研究されてきた。それらは、本研究にも応用可能な部分もあることから積極的に取り込み、できる限り先進的な物理モデルを考慮したコードを完成させる。

(3) 超高強度磁場の検証と応用

キロテスラから未踏領域である10キロテスラを超える高強度磁場について、その存在を確認する手法について追求する。特に、人類未踏の経験したことのないレベルの磁場であるだけでなく、空間的・時間的にも極限状態であり、その検出、定量的評価には困難を伴うことが予想される。ここでは、電子、あるいはプロトンビームを用いてその存在確認だけでなく、強度、存在時間など定量的な計測に結びつく手法を提案し、シミュレーションでその妥当性を示す。さらに、それら物理的知見を基に、新たな実験提案、応用のための高強度磁場制御、計測技術開発についても道筋を示す。

3. 研究の方法

本研究実施に必要なレーザープラズマに関する主なシミュレーションコードの主要部分は開発済であるが、電離、状態方程式、電気抵抗度など問題に対して適切な数値モデルを新たに構築する必要がある。初年度は、主にそのための物性のモデル化や数値解析手法を新たに開発する。次年度以降は、それらを組み込んだシミュレーションコードで数値解析を実施し、高強度磁場発生、および磁場圧縮の機構解明を行う。さらに、超高強度磁場の最適化、計測、応用につながるシミュレーションを実施する。最終的には、磁場発生で得られた高強度磁場を圧縮させ、形成される超高強度磁場を正確に予測可能にす

る。実際の実験が行われた場合に超高強度磁場の定量的な特性を検出するために必要な条件設定をシミュレーションによって明らかにしその有効性を示す。

#### 4. 研究成果

##### (1) MHD 輻射流体コード開発

これまでに開発してきた MHD 化した 2 次元輻射流体シミュレーションコードに磁場の拡散項、磁気圧項、さらには磁場が電子熱伝導に与える影響を考慮したコードで広い計算領域、長時間の解析が出来るように仕上げた。数値モデル精度向上に関しては、流体コードで用いられる電子熱伝導モデルについて、磁場中では電子熱伝導係数が非等方性になることが知られている。一般的には、Braginskii モデルが広く用いられてきたが、アブレーションのように比較的高い密度領域でサイクロトロン周波数と衝突周波数が同程度になる場合にはその妥当性が明確でなかった。通常は計算資源の制約のため、フォッカー・プランク方程式を解く問題に対して、大規模な電磁粒子コードによるシミュレーションを実施し、Braginskii 方程式では最大 30%程度のがずれが生じることを示すとともに流体コードの改良に繋がった。詳細は雑誌論文 で発表した。

レーザーの強度が高くなると非局所電子熱伝導の影響も無視できなくなる。新たに非局所電子熱伝導モデルを導入し、磁場中の非局所電子熱伝導を考慮したモデル構築のベースとなるコードに組み上げた。今後は、磁場を考慮した非局所電子熱伝導のシミュレーションにも応用する予定である。

##### (2) 磁場発生シミュレーション

マクスウェル方程式をベースとして、アブレーションによって生じる電子流を仮定することによって、磁場発生、成長の時間発展を解析するコードを開発した。しかしながら、ここで求められていた解析では、比較的高密度・低温プラズマでの抵抗率などの物性値に依存することから、信頼性の高い物性値が得られたら、高い精度の解析結果が得られる見通しがついた。

##### (3) 磁場の圧縮による高強度磁場の形成

MHD 化した 2 次元輻射流体コードを用いて高強度磁場下でプラスチックシェルターゲットをレーザー駆動の爆縮シミュレーションを行い、外部磁場の有無による爆縮への影響を調べた。その結果、磁気の拡散などを考慮しても、シェル内側の磁場が爆縮によって大きく圧縮され 10 テスラを超える超高強度磁場が形成されることが示された。その一方で、熱伝導係数が磁力線とアブレーション面のなす角に依存した非等方性によって爆縮の球対称性が崩れることも明らかにした(論文)。なお、本課題には含まれていなかった。

たが、シミュレーションで示された高強度磁場の形成を実験で検証するために、爆縮で形成された高強度磁場をプロトンビームで確認することも試みられた。今回は、有効な結果は得られなかったものの、今後の解析のための有益な知見が得られた。

##### (4) 高強度磁場の検証・応用

コードの妥当性検証を兼ねて、実験グループと協力してより基礎的な条件である磁場中の平板をレーザーで加速する実験を実施した。磁場なしの場合に比べ、レーザー照射方向と平行の外部磁場を与えた場合、前述した電子熱伝導の非等方性によって電子熱伝導が抑制され、圧力の高い領域が流体力学的不安定性を助長していることが確認できた。この結果をまとめて論文 で発表された。

高強度磁場の応用例として、相対論レーザープラズマ相互作用によって発生する比較的高いエネルギー(メガ電子ボルト級)を持つ電子の制御に着目した。これらの電子は広い発散角を持つことが知られており、外部磁場を印加することによる高速電子をガイドできるかを調べた。その結果、磁気ミラー比が 20 以上になるとガイド効果よりも磁気ミラーによる反射の影響が強くなることを明らかにした(論文)。

レーザー核融合の高速点火への応用に関する研究では、磁気ミラー比を抑制し、かつ電子熱伝導の非等方性に由来する流体力学的不安定性を回避するために中実球爆縮による高密度圧縮法をシミュレーションで実証するとともに、爆縮燃料に電子ビームをガイドするためには、磁場印加する際のコイル配置や、印加タイミングを調整することでビーム入射時の磁場配位を最適化する必要があることを論文 で示した。さらに、重水素、三重水素クライオをシェル内部に充填したターゲットでも同様の効果が確認された(論文)。

さらに、本コードによるシミュレーションで得られる磁気圧の妥当性を検証するため、レーザープラズマの磁気推進の研究を行っている研究グループと共同でレーザープラズマ磁気ノズルのシミュレーションコードへの展開も図り、このコードを用いて実験解析、設計を進めるに至った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Asahina, M. Hata, K. Matsuo, S. Lee, A. Sunahara, H. Sakagami, K. Mima, K. Iwano, S. Fujioka, H. Shiraga, H. Azechi, Compression and electron beam heating of solid target under the external magnetic field for fast ignition, NUCLEAR FUSION、査読有、

2017年5月25日掲載決定, 6pp.

Kazuki Matsuo, Hideo Nagatomo 以下13名, Magnetohydrodynamics of laser-produced high-energy-density plasma in a strong external magnetic field, PHYSICAL REVIEW E 査読有、95, 053204-1~6, 2017.

DOI: 10.1103/PhysRevE.95.053204

T. Asahina, H. Nagatomo, A. Sunahara, T. Johzaki, M. Hata, K. Mima, Y. Sentoku, Validation of thermal conductivity in magnetized plasmas using particle-in-cell simulations, Physics of Plasmas 査読有、24, 2017, 042117~1-6.

DOI: 10.1063/1.4981233

T. Johzaki, H. Nagatomo, A. Sunahara, Y. Sentoku, M. Hata, T. Taguchi, K. Mima, Y. Kai, D. Ajimi, T. Ishoda, T. Endo, A. Yogo, Y. Arikawa, S. Fujioka, H. Shiraga, and H. Azechi, Integrated simulation of magnetic-field-assist fast ignition laser fusion, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有、59, 014045, 2017, 8pp.

DOI: 10.1088/0741-3335/59/1/014045

H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Asahina, K. Matsuo, A. Sunahara, H. Sakagami, T. Sano, K. Mima, A. Morace, Z. Zhang, S. Fujioka, K. Shigemori, H. Shiraga, An optimum design of implosion with external magnetic field for electron beam guiding in fast ignition, Journal of Physics: Conference Series 査読有、717 012025-1~4 (2016)

doi:10.1088/1742-6596/688/1/012025

T. Johzaki, Y. Sentoku, H. Nagatomo, 以下5名, Electron beam guiding by external magnetic fields in imploded fuel plasma, Journal of Physics: Conference Series 査読有、717 012041-1~4, 2016

doi:10.1088/1742-6596/688/1/012041

A. Sunahara, T. Johzaki, H. Sakagami, H. Nagatomo, et al., Direct heating of compressed core by ultra-intense laser, Journal of Physics: Conference Series 査読有、717 012144-1~4 (2016)

doi:10.1088/1742-6596/688/1/012114

Nagatomo, H.; Johzaki, T.; Asahina, T.; Sunahara, A.; Sano, T.; Sakagami, H.; Mima, K.; Fujioka, S.; Shiraga, H.; Azechi, H, Computational study of magnetic field compression by laser-driven implosion, NUCLEAR FUSION 査読有、55, 093028 2015.

doi:10.1088/0029-5515/55/9/093028

Johzaki, T.; Taguchi, T.; Sentoku, Y.; Sunahara, A.; Nagatomo, H.; Sakagami, H.; Mima, K.; Fujioka, S.; Shiraga, H, Control of an electron beam using strong magnetic field for efficient core heating in fast ignition, NUCLEAR FUSION、査読有、55, 053022, 2015, 7pp.

doi:10.1088/0029-5515/55/5/053022

〔学会発表〕(計17件)

Hideo NAGATOMO, Simulation study of magnetic-field-assisted fast ignition for FIREX, (invited), 13th Direct-Drive & Fast Ignition Workshop, March 22-24 2017, Salamanca, Spain

H. Nagatomo, Effect of non-local electron conduction in compression of solid ball target for fast ignition, 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, October 31, 2016, San Jose, California, USA.

H. Nagatomo, Compression and Electron Beam Heating of Solid Target under the External Magnetic Field for Fast Ignition, 26th Fusion Energy Conference, International Atomic Energy Agency (IAEA/FEC), IFE/P5-12, October 17, 2016, Kyoto Japan.

Hideo Nagatomo, Solid Target Compression Under the Strong Magnetic Field for Fast Ignition (invited), 14th International workshop on fast ignition and high field physics with high power lasers, CLES2016 in OPIC2016, May 18, 2016, Yokohama, Japan.

H. Nagatomo, "Hydrodynamics under the strong magnetic field for fast ignition," US-Japan Workshop on High Energy Density Physics, August 31, 2015, University of California San Diego, USA.

H. Nagatomo, An Optimum Design of Implosion with External Magnetic Field for Electron Beam Guiding in Fast Ignition International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, Th.Po.66, September 24, 2015, Hyatt Regency Bellevue on Seattle's Eastside, Bellevue, USA.

H. Nagatomo, "Radiative-MHD simulations with strong magnetic field," International Symposium on Status and Prospects of High Energy Density Science by Giant Lasers, September 30, 2015, Lawrence Livermore National Laboratory, USA.

Hideo NAGATOMO, Laser ablation and target acceleration under the strong magnetic field, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 20, 2015, Savannah, Georgia, USA.

長友英夫、レーザー核融合の爆縮シミュレーションにおける非局所電子熱伝導モデルの影響、日本物理学会 第72回年次大会、2017年3月17日、大阪大学豊中キャンパス

長友英夫、外部磁場の影響下の非局所電子熱伝導を考慮したレーザープラズマの輻射流体シミュレーション、第30回数値流体力学シンポジウム、2016年12月13日、タワーホール船堀(東京都江戸川区船堀)

長友英夫、輻射-電磁流体コードへの非局所電子熱伝導モデルの導入、プラズマ・核融合学会第33回年会、2016年12月1日、東北大学青葉山キャンパス

長友英夫、中実球の高密度圧縮における高

速電子の影響の評価, 日本物理学会 2016 年  
秋季大会, 2016 年 9 月 13 日, 金沢大学角間キ  
ャンパス

長友英夫、高速点火のため外部磁場中の燃  
料球圧縮、第 11 回核融合エネルギー連合講  
演会、2016 年 7 月 14 日 九州大学伊都キ  
ャンパス椎木講堂

長友英夫、外部強磁場下におけるレーザー  
アブレーション駆動加速への磁気圧の影響、  
プラズマ・核融合学会 第 31 回年会、2015 年  
11 月 25 日、名古屋大学

長友英夫、高速点火のための密度半径積と  
圧縮磁場配位の最適化、2015 年日本物理学会  
秋季大会、2015 年 9 月 18 日、関西大学

長友英夫、高速点火のための爆縮による外  
部磁場制御、第 70 回日本物理学会年次大会、  
2015 年 3 月 24 日、早稲田大学

長友英夫、レーザー核融合爆縮における高  
強度磁場、第 10 回核融合エネルギー連合講  
演会、2014 年 6 月 19 日、つくば市・つくば  
国際会議場

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.ile.osaka-u.ac.jp/jp/groups/  
groups/pif.html](http://www.ile.osaka-u.ac.jp/jp/groups/groups/pif.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長友 英夫 (NAGATOMO, Hideo)

大阪大学・レーザーエネルギー研究センタ  
ー・准教授

研究者番号：10283813

### (2) 研究分担者

砂原 淳 (SUNAHARA, Atsushi)

レーザー技術総合研究所・理論・シミュレ  
ーションチーム・副主任研究員

研究者番号：00370213

### (3) 研究分担者

城崎 知至 (JOHZAKI, Tomoyuki)

広島大学・工学研究院・准教授

研究者番号：10397680