

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14439

研究課題名（和文）高強度レーザー光のエネルギー注入下でのプラズマ構造形成過程と粒子加速機構の解明

研究課題名（英文）Study of plasma formation and particle acceleration under strong laser light irradiation

研究代表者

岩田 夏弥（Iwata, Natsumi）

大阪大学・高等共創研究院・准教授

研究者番号：70814086

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：近年、ペタワット級出力の高強度レーザーにより生成されるプラズマの研究が世界的に進められている。本研究では、レーザー光照射下で起こるミクロな光吸収・電子加速過程から、イオンを含めたプラズマ全体のマクロな運動までの統合的理解を目指した理論・シミュレーション研究を行った。ピコ秒を超える光照射下では、電子運動の統計的性質と自己生成電磁場の発展によって、イオンの最大エネルギーとレーザー光から高速イオンへのエネルギー変換率が高くなることを解明した。本成果は光量子ビーム生成や制御核融合などの応用技術につながる知見を提供するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、「高強度の光からのエネルギー注入がある系で、プラズマがどのような定常状態へと構造発展するのか」という学術的問いに答えるものであり、非平衡開放系としてのプラズマの物理の一端を解明したという学術的意義がある。また、本研究で得られた知見は、レーザー生成プラズマを利用した光量子ビーム源とプラズマ計測や非破壊検査、医療への応用、さらには制御核融合の実現など様々な技術発展の基礎として、社会に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：Petawatt-class high intensity lasers enable creation of high energy density plasmas in laboratory. In this research, we conducted theoretical and simulation studies to understand the plasma dynamics under the intense laser light, especially focusing on the connection between microscopic laser absorption/electron acceleration processes and macroscopic motion of the plasma including ions. We clarified that under over-picosecond laser irradiation, a statistical nature of electron motion affects the development of self-generated electromagnetic field in the plasma, and as a result, ion maximum energy and energy conversion efficiency from laser to fast ions are enhanced. This result provides basic understanding of physics related to applications such as particle beam generation and nuclear fusion.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：プラズマ物理 高強度レーザー 高エネルギー密度科学 プラズマ粒子加速

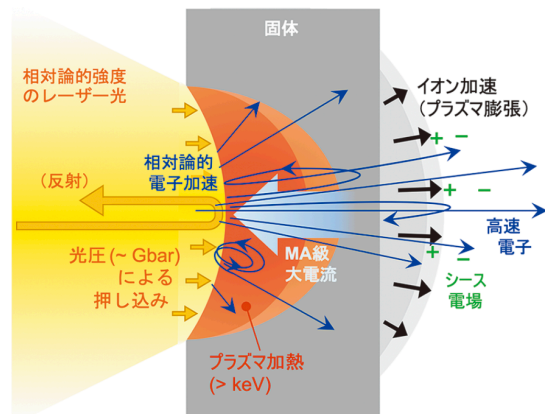
## 1. 研究開始当初の背景

近年、大型ペタワットレーザーの開発が世界的に進み、ピコ ( $10^{-12}$ ) 秒を超える長時間にわたって相対論的高強度光を物質に照射することが可能となっている。光照射によって物質は瞬時に電離しプラズマとなり、自然では宇宙や星内部でしか見られない特異な物性を示す。申請者が属する大阪大学レーザー科学研究所や、米国ローレンスリバモア国立研究所などが所有するピコ秒以上のパルス長をもつペタワットレーザー装置では基礎実験が開始され、従来の短パルス高強度レーザー (パルス長数十～数百フェムト ( $10^{-15}$ ) 秒、スポット径数ミクロン) を対象とした理論では説明できない高エネルギーの電子加速・イオン加速が報告されている。

これらの粒子加速機構の解明のため、ピコ秒領域の相対論的レーザープラズマ相互作用の理論・シミュレーション研究が進められている。ピコ秒領域では、粒子的 (運動論的) 相互作用であるレーザー光吸収と電子加速の過程を長時間にわたって解く必要があるため、数値シミュレーションを行うことが容易ではない。そのため、ミクロな光吸収過程を運動論モデルで計算し、イオンを含めたプラズマ全体のマクロな運動を流体モデルで計算するハイブリッド手法などを用いて、実験を検証するための大規模シミュレーションが行われている。ところが、光吸収 (電子加速) とプラズマ膨張 (イオン加速) が同時進行するピコ秒領域の現象を十分に捉えることはできていない。理論研究としては、高エネルギー電子・イオン加速機構がいくつか提唱されているが、いずれも特定の条件を仮定した理論に停まっている。

## 2. 研究の目的

本研究は、ピコ秒領域の相対論的高強度レーザーと固体密度プラズマとの相互作用における、ミクロな光吸収からマクロなプラズマ膨張過程までを包括的に記述する理論を構築することを目的とする。図1に示すように、この領域ではミクロな過程である光による電子加速と、マクロな過程であるプラズマ膨張 (イオン加速)、さらには電子が駆動する大電流に起因するプラズマ加熱が同時進行する。プラズマ粒子シミュレーションを活用し、継続的な光エネルギー注入下でのプラズマの実空間・エネルギー空間での構造発展、およびプラズマが自己生成する電磁場の構造発展を解析することで、プラズマ中のエネルギー輸送・変換過程を解明する。現象を定式化し、時間発展や定常状態の解を導くことで、ピコ秒領域での粒子加速に関する基礎理論構築に貢献する。



## 3. 研究の方法

本研究では、数値シミュレーションを活用した理論研究を行う。シミュレーションは、研究代表者の所属研究室で開発しているプラズマ粒子 (particle-in-cell, PIC) コードを利用し、クラスター計算機を用いた大規模並列計算を行う。このコードでは電離、衝突、輻射過程を取り入れることができるため、プラズマ形成、加熱、輻射冷却を考慮した計算を行うことが可能であり、専門家である研究協力者 (大阪大学・千徳教授)、および大学院生と協力して解析を行う。理論構築は、申請者のこれまでの研究で得た知見を基礎とし、大阪大学レーザー科学研究所、米国ローレンスリバモア国立研究所をはじめとする国内外の研究機関に所属の共同研究者と議論を行いながら進める。なお、新型コロナウイルス感染症拡大の影響により研究期間の1年目と2年目は海外に出張して直接議論を行うことができなかったため、オンライン会議を活用し研究を進めた。

図1: 本研究が対象とするピコ秒を超える時間スケールの相対論的高強度レーザー光と固体ターゲットとの相互作用の模式図。(岩田、日本物理学会誌 75, 746 (2020)の図3を転載)

## 4. 研究成果

本研究で、高強度レーザー光によるエネルギー注入下でのプラズマ構造形成過程と粒子加速機構の解明のため理論・シミュレーション研究を行った。その結果として、ミクロな電子加速から電磁場構造形成、さらにイオンへのエネルギー変換率までの統合的理解につなげることがで

きた。以下に得られた成果をまとめる。

継続的な高強度レーザー照射下では、光に加速された電子の運動において統計的性質が重要となり、短時間相互作用とは異なる定常的な電子の空間分布およびエネルギー分布が形成されることを見出した（学会発表：日本物理学会第76回年次大会（2021）他）。この統計的性質は、プラズマが自己生成する電磁場（図2(e))によって電子がランダム散乱を受けることで発現する。特に、ピコ秒を超えて光を照射する場合、電子がプラズマ中で何度も電磁散乱を受ける（図2(c))ことで実効的にレーザースポット内に閉じ込められる。結果としてスポット外へのエネルギー流出が抑えられ、プラズマ内部にエネルギーが効率的に蓄積されることがわかった（N. Iwata et al., Phys. Rev. Research 3, 023193 (2021)）。図2(d)は、電子閉じ込め効果により薄膜プラズマ中に10ギガバルに及ぶエネルギー密度が実現していることを示す。このシミュレーションで照射している光のエネルギー密度はおよそ1ギガバルであるため、光のエネルギー密度が高効率に蓄積されたことがわかる。この電子閉じ込め効果は、レーザースポット半径 $r$ とターゲット薄膜の厚さ $L$ の比が大きいほど強く現れることを理論的に導き、シミュレーションで確認した（図3(a)）。さらにこの効果により、プラズマ膨張とともに加速されるイオンの最大エネルギー（図3(b))およびレーザー光から高エネルギーイオンへのエネルギー変換効率（図3(c))が高くなることが明らかになった（学会発表：64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (APS-DPP2022), NIF and JLF User Group Meeting 2023 他）。さらに、ピコ秒領域での固体密度プラズマの加熱特性（N. Higashi et al., Phys. Rev. E 105, 055202 (2022)）および加熱されたプラズマからのX線輻射特性（K. Sugimoto et al., Plasma Phys. Control. Fusion 64, 035004 (2022)）の解明に貢献した。研究期間中に解説記事、共著を含む計9編の論文発表に貢献し、計20件の学会発表を行った。

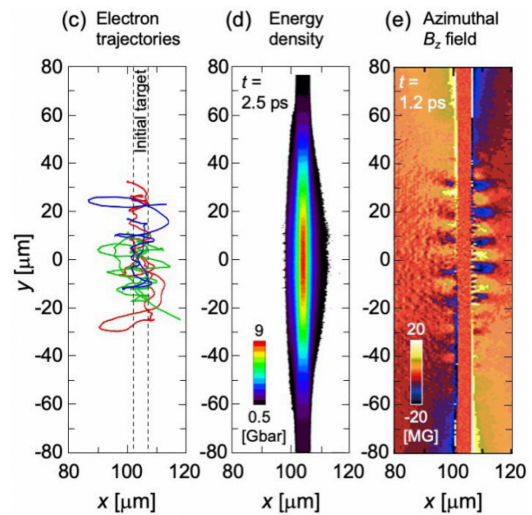


図2: 相対論的強度でスポット半径35ミクロンのレーザーと厚さ5ミクロンの固体密度薄膜プラズマとの相互作用の2次元プラズマ粒子シミュレーション。プラズマは完全電離重水素、レーザーは図の左から一定の強度( $2.7 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ )で照射している。(c)シミュレーション上の3つの電子の軌道。(d)レーザー照射開始後2.5ピコ秒における電子エネルギー密度。(e)レーザー照射開始後1.2ピコ秒におけるプラズマの自己生成磁場(レーザー周期平均したz方向の磁場)。(N. Iwata et al., Phys. Rev. Research 3, 023193 (2021)の図1より抜粋)

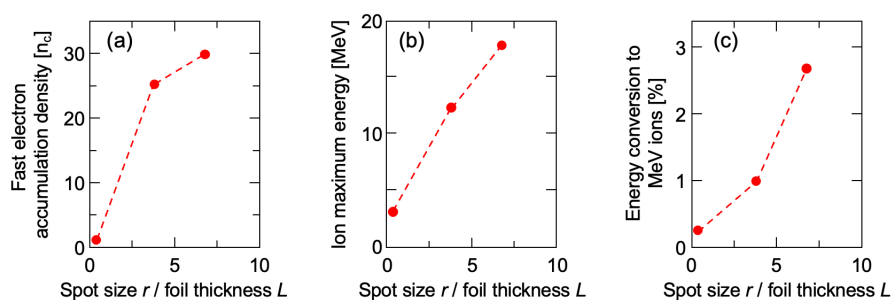


図3: 図2と同じレーザープラズマ相互作用でスポット半径 $r$ を変化させた時の(a)高速電子の薄膜中での蓄積密度、(b)プラズマ防潮により加速されたイオンの最大エネルギー、(c)レーザーから高エネルギーイオンへのエネルギー変換効率のシミュレーション結果。高エネルギーイオンは1MeV以上のエネルギーを持ち薄膜の後方に放出されたイオンとして定義。図の横軸はレーザースポット半径 $r$ と薄膜厚 $L$ ( $=5 \mu\text{m}$ )との比を表す。(学会発表資料 (N. Iwata et al., 米国物理学会プラズマ分科会 APS-DPP2022)より抜粋)

本研究は米国、仏国など海外の研究者との共同研究として行ったものであり、本研究により複数の国際共著論文を発表するとともに国際研究ネットワークを広げることができた。本研究成果は、レーザー生成プラズマを利用した光量子ビーム生成、制御核融合などの技術につながる基礎的な知見を提供するものであり、高エネルギー密度プラズマに関わる宇宙物理学や物質科学の発展にも貢献するものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Higashi Naoki, Iwata Natsumi, Sano Takayoshi, Mima Kunioki, Sentoku Yasuhiko	4. 巻 105
2. 論文標題 Isochoric heating of solid-density plasmas beyond keV temperature by fast thermal diffusion with relativistic picosecond laser light	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 055202-1,7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.105.055202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Arikawa Yasunobu, Morace Alessio, Abe Yuki, Iwata Natsumi 他	4. 巻 5
2. 論文標題 Demonstration of efficient relativistic electron acceleration by surface plasmonics with sequential target processing using high repetition lasers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013062-1,10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.013062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Iwata N., Kemp A. J., Wilks S. C., Mima K., Mariscal D., Ma T., Sentoku Y.	4. 巻 3
2. 論文標題 Lateral confinement of fast electrons and its impact on laser ion acceleration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023193-023193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.023193	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Takagi Yuji, Iwata Natsumi, d'Humieres Emmanuel, Sentoku Yasuhiko	4. 巻 3
2. 論文標題 Multivariate scaling of maximum proton energy in intense laser driven ion acceleration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043140-043140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043140	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sugimoto K, Iwata N, Sunahara A, Sano T, Sentoku Y	4. 巻 64
2. 論文標題 Dynamics of ultrafast heated radiative plasmas driven by petawatt laser light	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 035004-035004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac4313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 岩田 夏弥	4. 巻 75
2. 論文標題 ピコ秒超高強度レーザーにより見えてきた高エネルギー密度プラズマの多階層的特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 746 ~ 750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.75.12_746	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩田 夏弥	4. 巻 96
2. 論文標題 小特集 "短パルス高強度レーザーによる等積加熱が拓く高エネルギー密度科学" 第1章, 第6章	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 449-450, 473
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Higashi, N. Iwata, T. Sano, K. Mima, and Y. Sentoku	4. 巻 37
2. 論文標題 Transition of dominant heating process from relativistic electron beam heating to thermal diffusion in an over picoseconds relativistic laser-solid interaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100829 ~ 100829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2020.100829	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩田 夏弥、千徳 靖彦	4. 巻 96
2. 論文標題 高強度レーザープラズマ相互作用におけるプリプラズマの影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 703-705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 N. Iwata
2. 発表標題 Relativistic laser plasma interaction in statistical regime
3. 学会等名 Japan-US workshop on Theory and simulation on the high field and high energy density physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Iwata, A. J. Kemp, S. C. Wilks, D. A. Mariscal, T. Ma, K. Mima, Y. Sentoku
2. 発表標題 Lateral confinement of fast electrons and its impact on laser ion acceleration
3. 学会等名 64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Iwata, D. Mariscal, A. J. Kemp, S. C. Wilks, D. Rusby, A. Morace, G. Cochran, T. Ma, S. Fujioka, Y. Sentoku
2. 発表標題 Efficient proton acceleration with electron confinement in a foil plasma heated by kJ petawatt laser light
3. 学会等名 NIF and JLF User Group Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩田夏弥, 東直樹, 杉本馨, 澤田寛, 城崎知至, 高木悠司, 佐野孝好, Morace Alessio, 余語覚文, 有川安信, 藤岡慎介, 三間囿興, 千徳靖彦, 兒玉了祐
2. 発表標題 高速点火レーザー核融合プラズマにおけるメソスケールエネルギー輸送と加熱物理
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩田夏弥
2. 発表標題 高強度レーザー光によるエネルギー注入下のプラズマ中の動的構造形成と機能創発
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩田夏弥, A. J. Kemp, S. C. Wilks, 千徳靖彦
2. 発表標題 kJ級ベタワットレーザー照射下での大スケールな非平衡プラズマ膨張とイオン加速
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩田夏弥, A. J. Kemp, S. C. Wilks, 三間囿興, 千徳靖彦
2. 発表標題 相対論的レーザー生成プラズマにおける電子の統計的振る舞いの理論モデル
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩田夏弥, 千徳靖彦
2. 発表標題 kJ級ベタワットレーザー光照射下の開放系プラズマの膨張構造とイオン加速
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 N. Iwata, A. J. Kemp, S. C. Wilks, K. Mima, and Y. Sentoku
2. 発表標題 Efficient plasma heating by kilojoule petawatt lasers with a lateral confinement of fast electrons
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Iwata
2. 発表標題 Enhanced Proton Acceleration by Electron Confinement on the ARC laser
3. 学会等名 NIF and JLF User Group Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩田夏弥, 林美里, 三間園興, 千徳靖彦
2. 発表標題 高強度レーザー光照射下の薄膜プラズマにおける統計的電子加速の特性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 岩田夏弥
2. 発表標題 高強度レーザーが生成する非平衡高エネルギー密度プラズマ中での粒子加速に関する理論研究
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会（学術奨励賞受賞記念講演）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩田夏弥, A. J. Kemp, S. C. Wilks, 林美里, 三間囃興, 千徳靖彦
2. 発表標題 高強度レーザー照射下で突発的プラズマ膨張にトリガーされる高速電子の位相空間分布発展
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩田夏弥, A. J. Kemp, S. C. Wilks, 三間囃興, D. Mariscal, T. Ma, 千徳靖彦
2. 発表標題 大集光径の相対論的レーザーと薄膜との相互作用における高速電子の閉じ込め機構の理論
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩田夏弥, A. J. Kemp, S. C. Wilks, 三間囃興, 千徳靖彦
2. 発表標題 高強度レーザー集光領域での高速電子の閉じ込めと高効率イオン加速
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木悠司, 岩田夏弥, 千徳靖彦
2. 発表標題 重回帰分析による高強度レーザー駆動イオン加速の最大エネルギー予測式の導出
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林美里, 岩田夏弥, 千徳靖彦
2. 発表標題 超高強度レーザー照射下の固体密度プラズマにおける電子エネルギー分布形成
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本馨, 砂原淳, 岩田夏弥, 佐野孝好, 千徳靖彦
2. 発表標題 高強度レーザーによる重金属薄膜の等積加熱における硬X線輻射の影響
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東直樹, 岩田夏弥, 佐野孝好, 三間園興, 千徳靖彦
2. 発表標題 相対論的ピコ秒レーザーによる固体プラズマの熱拡散的加熱
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩田夏弥, 林美里, 三間園興, 千徳靖彦
2. 発表標題 超高強度レーザー生成プラズマの運動論的相互作用における統計的性質の発現
3. 学会等名 STEシミュレーション研究会・KDKシンポジウム合同研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	千徳 靖彦  (Sentoku Yasuhiko)	大阪大学・レーザー科学研究所・教授	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Lawrence Livermore National Laboratory	University of California, San Diego	Purdue University
フランス	University of Bordeaux		