

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2022

課題番号：20K22329

研究課題名(和文)境界層を介したレーザー駆動準1次元衝撃波形成と新高エネルギー粒子加速法の開拓

研究課題名(英文)Development of laser-driven quasi-one-dimensional shock wave formation and new high-energy particle acceleration method via boundary layer

研究代表者

松井 隆太郎(Matsui, Ryutaro)

京都大学・エネルギー科学研究科・助教

研究者番号：70870476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：集光強度が $10^{20}$ – $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> 領域の極短パルス(フェムト秒)高強度レーザーを固体水素に照射する粒子シミュレーションを実施した。その結果、レーザーのパルス幅と集光強度を調整することで、固体水素の表面近傍に生成した衝撃波は、固体水素内部に伝播する過程で初期の固体水素密度の20倍近くまで増幅される。この増幅された衝撃波は、自身が作り出す200TV/mに達する超強電場により相対論的速度でロケット様に分裂し、前方に押し出された成分が上流のプロトンをサブGeV領域にまで加速することを見いだした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザープラズマイオン加速手法でイオンを100 MeV/u超領域にまで加速させる試みは、国内外で精力的に行われている一方、100 MeV/uのイオンは国内では現状未達成であり、世界的に見ても一部で150 MeVを出した報告があるものの、ほとんど達成例はない。

本研究により見いだした、円柱状ターゲットを用いた新アプローチで200 MeV超の準単色陽子線の生成機構が実験により実証できれば、粒子線がん治療装置の小型化を目指した応用研究が大きく進展する可能性があるばかりでなく、高エネルギー宇宙線の生成起源の解明に代表される未踏の極限領域の開拓に繋がること期待される。

研究成果の概要(英文)：A particle-in-cell (PIC) simulation was performed concerning an interaction between an ultrashort pulse (femtosecond) high-intensity laser in the region of  $10^{20}$ – $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> and solid hydrogen target. As a result, by adjusting the pulse width and laser intensity, the shock wave generated near the surface of the solid hydrogen is amplified to nearly 20 times the initial density in the process of propagating inside the solid hydrogen. This shock structure splits into two components like a rocket due to an electric field reaching 200 TV/m. The component pushed forward accelerates the upstream proton up to the sub-GeV regime.

研究分野：レーザー生成プラズマ物理

キーワード：高強度レーザー プラズマ イオン加速 無衝突衝撃波 粒子線がん治療

### 1. 研究開始当初の背景

レーザー技術の進展により集光強度  $10^{19-21}$  W/cm<sup>2</sup> のフェムト秒オーダの極短パルス高強度レーザーが実現し、現在では  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> 領域も視野に入りつつある。このようなレーザーを物質(ターゲット)に照射すると、物質は瞬時に電離して高エネルギー密度のプラズマ状態になるとともに、ターゲットの物質種や構造に依存して生成されるプラズマ中には  $10^{12}$  V/m の強電場が現出する。これは、レーザー場によって相対論領域まで加速される電子と加速されにくいイオンの運動の差異に起因する。この電場強度は従来の大型加速器に比べて3桁以上も大きいことから、これにより目的とするイオンを単位核子当たり 200 MeV (メガ電子ボルト) を上回るエネルギーまで短距離で加速できれば、これまで少数の大型施設でしか提供できなかった粒子線癌治療などの高度医療に新たな展開をもたらすことができる。

一方、このようなコンパクトなイオン加速器を実現するには、生成されるイオンビームの高エネルギー化と共に、エネルギーの単色性(エネルギー幅が小さい)や指向性および粒子束に特徴付けられるイオンビームの高品質化を同時達成する必要がある。これらを評価指標として、レーザーを照射するターゲットに固体薄膜を使用することで、(1)プラズマの表面に発生するシース電場による加速(TNSA)、(2)プラズマの内部に発生する無衝突衝撃波の電場による加速(CSA)、(3)レーザーの輻射圧による電場による加速(RPA) また、ターゲットにマイクロメートルオーダの粒状固体物質(クラスター)を使用することで、(4)クラスター内部に生成される求心衝撃波による加速(CSBA: R. Matsui, Y. Fukuda and Y. Kishimoto, Phys. Rev. Lett. 122, 014804 (2019)、図1参照)など、様々な加速機構が提案されてきた。しかし、(1)TNSAは最大 100 MeV 程度の陽子加速の実績はあるものの、エネルギーの単色性が低く高品質化には至らず、(2)CSAはエネルギー幅 5%程度と単色性の点では高品質であるもののエネルギーは最大 40 MeV 程度に留まっている。また(3)RPAは現在達成できないレーザー強度領域である( $10^{23-24}$  W/cm<sup>2</sup>)。唯一(4)CSBAが現在可能な集光強度で高エネルギー化(最大エネルギー: 300 MeV)と共に高単色性(エネルギー幅: 5%)・高指向性(発散角:  $10^\circ$ )が達成可能であるが、クラスターの生成は確率的であり、高粒子束を得るには更なる技術開発が求められる。

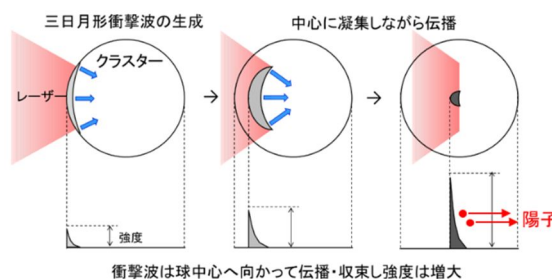


図1. 求心衝撃波による陽子加速。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、高強度レーザーと物質との相互作用において、現在達成可能なレーザー集光強度で医療応用可能な高エネルギー化(200 MeV以上)と高品質化(準単色・高指向性・高粒子束)を同時に満たすイオンビームの生成とそれを可能にするターゲットを実現するとともに、その学術基盤を構築することが本研究の目的である。「1. 研究開始当初の背景」の考察から、共に衝撃波が主要な役割を果たし、高エネルギー性・高単色性・高指向性に優れた(4)CSBAと、エネルギーは劣るが高品質性を示す(2)CSAが、イオンの高エネルギー化と高品質化の同時達成を実現する重要な要素であるとの着想に至り、両者を支配する物理過程を合体・融合する方法論を開拓・提案する。この着想は、衝撃波がコヒーレントな構造を保ちつつ超音速で伝播する特性が加速粒子の高エネルギー性と高品質性に関係しているとの考察に基づいている。

具体的には、最新の半導体製造技術で精緻な設計と作製が可能な、直径がサブマイクロメートルサイズで高さが数10マイクロメートルの円柱状固体(ロッド)に、直径がナノメートルオーダの繊維状炭素の集合体であるカーボンナノチューブ(CNT)を導入した上で、それらの境界層に注目し、そこで生じる準1次元衝撃波によりイオンを持続的に加速するという新しいメカニズムの構築を目指す。加えて、このメカニズムによる高エネルギーイオン生成と宇宙で現出する超新星爆発時に生成される可能性のある高エネルギー粒子加速・生成の類似性について探究し、宇宙現象を地上で再現する実験研究を追求する学術研究を推進する。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、研究代表者らが開発・整備を進めている相対論的電磁粒子コード EPIC3D (Extended Particle based Integrated Code) を用いて、大規模シミュレーションのための並列化処理を含む粒子コードの改良を行い、(1)現在の技術で作製可能な平板状固体水素や直径がマイクロメートルサイズの円柱状固体水素をターゲットとして、これとパルス幅が数10フェムト秒オーダで集光強度が  $10^{21-22}$  W/cm<sup>2</sup> 領域の極短パルス高強度レーザーとの相互作用を模擬する2次元シミュレーションを行い、高エネルギー陽子線の生成メカニズムと陽子の最大エネルギーについて調べた。合わせて、(2)高アスペクト比(高さ/直径~100)のロッド集合体の作製を実施するとともに、(3)作製したロッド集合体およびカーボンナノチューブ(CNT)を用いたレーザー

ー照射実験を実施した。

#### 4. 研究成果

##### (1) サブ GeV 領域の陽子線生成手法の発見

固体水素（平板 / 円柱）への高強度レーザー照射により、固体水素の表面近傍に正の単極電場を伴う非線形波（衝撃波）が生成し内部に伝播する。この過程で、レーザー光圧と電子圧力の大小関係の動的な変化に対応して非線形波が形成する電場構造も変化する。この電場による加速を受けて、非線形波のイオン密度は指数関数的（爆発的）な増大を示し、200 TV/m に達する正負の両極電場を伴うソリトン様構造が形成される。この構造は両極電場により相対論的速度でロケット様に分裂し、前方に押し出された成分が上流の陽子をサブ GeV 領域にまで加速することを見いだした。本メカニズムは、固体水素の厚みに依らず発現するロバスタな現象であり、液体ヘリウムや重水素など、質量電荷比が 1 以外の物質では発現せず、水素に特有の現象であることが明らかとなった。本成果は現在論文投稿に向けて準備中であり (R. Matsui and Y. Kishimoto, in preparation for submission to Nat. Phys.(2023) )、2023 年 9 月に開催される国際学会 ( PLASMA2023 ) において口頭発表を行う予定である。

##### (2) 高アスペクト比のロッド集合体の作製手法の確立

(1) の成果と関連して、ロッドの背景に CNT を導入することで、ロッドと CNT との境界層に着目した新たなイオン加速手法の開拓を目指して、ロッド集合体の作製を実施した。高強度レーザーの照射実験においては、使用を予定しているレーザーの集光径が数マイクロメートルであること、および、レーザービームの安定性（ポインティングスタビリティ）が 10 マイクロメートル程度のオーダであることを考慮して、直径（サブマイクロメートル）に対して高さが数 10 マイクロメートルの高アスペクト比（高さ / 直径 ~ 50-100）のロッドを作製する必要がある。研究代表者のグループは、これまでに高アスペクト比のロッド集合体の作製に成功した実績を有しており、これを踏まえて、作製時における諸工程（金属蒸着時の金属膜厚・レジスト膜厚、電子線リソグラフィー時の電圧、プラズマエッチング時のサイクル数と電圧）を調整することで、高アスペクト比のロッド集合体を安定して作製する手法を確立した。図 2 は、本研究において我々が作製したターゲットの電子顕微鏡写真であり、これにより安定したレーザー照射実験が可能となった。本成果は国内外を含む複数の学会（例えば R. Matsui et al., “Generation of HED plasma regulated by magnetic field from structured medium -Simulation and experimental study-”, peer-reviewed oral, International Conference on High Energy Density Sciences 2022, April 21, 2022, Yokohama. 等）で発表済みであり、精緻なターゲット作製手法として国内外の研究者から高い評価を得ている。

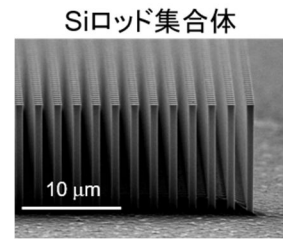


図 2. 作製したシリコンロッド集合体（電子顕微鏡写真）。

##### (3) レーザー照射実験の実施

京都大学化学研究所の高強度レーザー装置 (T<sup>6</sup> レーザー) を用いて、(2) で作製したロッド集合体への照射実験を実施した。具体的には、ターゲット周辺に鋭利なくさび型の構造物、および、サイズを正確に設計した円柱・角柱を配置することで、レーザーの集光径（数マイクロメートル）および照射位置を正確に調整した。その後、質量が一定でロッド径が異なる数種類のターゲットに対して、集光強度が  $10^{18-19}$  W/cm<sup>2</sup> 領域でパルス幅が数 10 フェムト秒の高強度レーザーを照射し、レーザー生成プラズマの状態を把握するための第一段階として、電子のエネルギーを測定した。その結果、ロッド径の違いにより電子温度が異なることを示唆する結果が得られた。また、カーボンナノチューブ (CNT) への照射実験も実施し、当初目的を踏まえてレーザー照射された CNT から生成されるプラズマの状態（電子温度）を調べた。レーザー照射実験においては、レーザーのメインパルスに先立って、ピコ秒の時間スケールで強度比がメインパルスより 4 桁-8 桁程度低いプレパルス成分が存在する。プレパルスの強度は  $10^{14-15}$  W/cm<sup>2</sup> 領域に達し、これは物質をイオン化（プラズマ化）する強度であることから、研究代表者らが作製した微細構造物（ロッド集合体 / CNT）をターゲットとする場合、プレパルスの影響を大きく受ける可能性がある。これを受けて、微細構造を持たないシリコン基板（表面は酸化洗浄処理とスピン乾燥を施している）を使用して、安定した結果が得られるかの確認を実施した。加えて、T<sup>6</sup> レーザー施設が有するプレパルスの除去機能（プラズマミラー）の検証も開始している。本結果の詳細については解析を進めている最中であり、ロッド集合体への照射実験の結果の妥当性を含めて、引き続き実験による検証を行う予定である。本結果は 2023 年 4 月実施の国際会議において発表を行い、国内外の研究者とその妥当性について議論を行った (R. Matsui et al., “Exploring high energy density plasmas with exotic character by the interaction between high intensity laser and CNT/rod assembly”, peer-reviewed oral, International Conference on High Energy Density Sciences 2023, April 20, 2023, Yokohama )。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Satoshi Jinno, Masato Kanasaki, Takafumi Asai, Ryutaro Matsui, Alexander S. Pirozhkov, Koichi Ogura, Akito Sagisaka, Yasuhiro Miyasaka, Nobuhiko Nakanii, Masaki Kando, Nobuko Kitagawa, Kunihiro Morishima, Satoshi Kodaira, Yasuaki Kishimoto, Tomoya Yamauchi, Mitsuru Uesaka, Hiromitsu Kiriyama & Yuji Fukuda	4. 巻 16
2. 論文標題 Laser-driven multi-MeV high-purity proton acceleration via anisotropic ambipolar expansion of micron-scale hydrogen clusters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16753
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-18710-x	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

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 3件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 R. Matsui, M. Ota, Y. Fukuda, Y. Sakawa and Y. Kishimoto
2. 発表標題 Generation of HED plasma regulated by magnetic field from structured medium -Simulation and experimental study-
3. 学会等名 International Conference of High Energy Density Sciences 2022 (HEDS2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Matsui, M. Ota, Y. Fukuda, Y. Sakawa and Y. Kishimoto
2. 発表標題 Generation of HED plasma regulated by magnetic field from structured medium -Simulation and experimental study-
3. 学会等名 International Conference of High Energy Density Sciences 2022 (HEDS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井隆太郎, 石原聖也, 林直仁, 岸本泰明
2. 発表標題 波長オーダーの構造的ターゲットを用いた高強度レーザーの非線形伝播・吸収特性とバルクプラズマの制御
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 松井隆太郎, 岸本泰明
2. 発表標題 高強度レーザーによる平板固体水素中での非線形波動の励起と分岐による相対論的ロケット加速
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 松井隆太郎, 上田永樹, 太田雅人, 福田祐仁, 坂和洋一, 岸本泰明
2. 発表標題 高強度レーザーと波長オーダーの構造的ターゲットとの非線形相互作用特性
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 Ryutaro Matsui, Yasuaki Kishimoto, Shunsuke Inoue, Yuhei Miyauchi, Yuki Ihara, Iori Yamada, Kazuhiro Fukami, and Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Development of low-density stacked CNT target and fundamental process of the interaction by high-intensity laser irradiation
3. 学会等名 The 12th International Symposium of Advanced Energy Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Matsui, Y. Fukuda and Y. Kishimoto
2. 発表標題 Quasimonoenergetic protons driven by CSBA (converging shock-induced blow-off acceleration) in a micron-scale hydrogen cluster
3. 学会等名 International conference on HIGH ENERGY DENSITY SCIENCES 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 松井隆太郎, 上原直希, 井原優希, 増井英陽, 深見一弘, 坂口浩司, Tatiana Pikuz, Maria Alhimova, 坂和洋一, 神野智史, 井上峻介, 金崎真聡, 太田雅人, 今寺賢志, 福田祐仁, 岸本泰明
2. 発表標題 高強度レーザーと構造的ターゲットとの相互作用による高エネルギー密度プラズマ生成とその特性 T6およびJ-KAREN-Pレーザーによる実験と解析
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 R. Matsui, Y. Fukuda and Y. Kishimoto
2. 発表標題 Study of the underlying physics of CSBA (Converging Shock-based Blow-off Acceleration) and the extension to two-dimensional rod/string configuration
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------