課題番号　2024A-K03
(2023A-K04)

ナノレイヤー２次元物質を用いたレーザーイオン加速におけるエネルギーフロンティアの開拓

Energy frontier in laser-driven ion acceleration with nanolayer 2D materials

蔵満 康浩[1,2,3], 玉城 直也[1], 南 卓海[1,2,4], 安部 勇輝[1], 境 健太郎[5], 二階堂 颯佳[1], 倉本 恭誓[1], 安井 稔遥[1],草野 颯斗[1], 江嵜 大和[1], 内藤 佳輝[1],北村 力丸[1], 岩佐 健生[1], 黒地 柊太郎[1], 田實 太陽[1], 山中 敬太[1], 加藤 光[1], 中村 豊[1], 飯田 海地[1], Tatiana Pikuz[1], Chu Che-Men[6], Woon Wei-Yen[6], Liu Yao-Li[7], Jao Chun-Sung[7], 太田 雅人[5], 時安 敦史[8], 大西 直文[8], 郡 英輝[9], 小平 聡[10], 楠本 多聞[10], 金崎 真聡[11], 鍛治 賢志[11], 田邉 寛之[11], 井上 千裕[11],望月 政一郎[11], 尾崎 玲於奈[11],豊永 啓太[11], 前川 馨[11], 諫山 翔伍[12], 森田 太智[12],田中 周太[13], 池田 暁彦[14], 松田 康弘[15],今 亮[2], 近藤 康太郎[2], 早川 岳人[2], 桐山 博光[2], 福田 祐仁[2],

[1] 大阪大学工, [2] QST/KPSI, [3] 大阪大学レーザー研, [4] 大阪大学情報, [5] NIFS, [6] 国立中央大学, [7] 国立成功大学, [8] 東北大学, [9] 大阪大学核物, [10] QST 放医研, [11] 神戸大海事, [12] 九州大学, [13] 青山学院大学, [14] 電気通信大, [15] 東京大

Yasuhiro Kuramitsu[1,2,3], Naoya Tamaki[1], Takumi Minami[1,2,4], Yuki Abe[1], Kentaro Sakai[4], Fuka Nikaido[1], Kiyochika Kuramoto[1], Toshiharu Yasui[1], Hayato Kusano[1], Yamato Esaki[1], Yoshiki Naito[1], Rikimaru Kitamura[1], Kensei Iwasa[1], Shutaro Kurochi[1], Taiyo Tajitsu[1], Keita Yamanaka[1], Hikaru Kato[1], Yutaka Nakamura[1], Tatiana Pikuz[1], Che-Men Chu[6], Wei-Yen Woon[6], Yao-Li Liu[7], Chun-Sung Jao[7], Masato Ota[5], Atsushi Tokiyasu[8], Naofumi Ohnishi[8], Hideki Kohri[9], Satoshi Kodaira[10], Tamon Kusumoto[10], Masato Kanasaki[11], Takafumi Asai[11], Kenji Kaji[11], Hiroyuki Tanabe[11], Chihiro Inoue[11], Seiichiro Mochizuki[11], Reona Ozaki[11], Keita Toyonaga[11], Hajime Maekawa[11], Shogo Isayama[12], Taichi Morita[12], Shuta Tanaka[13], Akihiko Ikeda[14], Yasuhiro Matsuda[15], Akira Kon[2], Kotaro Kondo[2], Hiromitsu Kiriyama[2], Yuji Fukuda[2]

[1] Eng., Osaka Univ., [2] KPSI, QST, [3] ILE, Osaka Univ., [4] Inf. Sci., Osaka Univ., [5] NIFS, [6] National Central Univ., [7] National Cheng Kung Univ., [8] Tohoku Univ., [9] RCNP, Osaka Univ., [10] NIRS, QST [11] Kobe Univ., [12] Kyushu Univ., [13] Aoyamagakuin Univ., [14] UEC, [15] Univ. Tokyo

（概要）
グラフェンに代表される２次元物質を組み合わせることで、新たな機能を持たせたターゲットとして用い、国内最高強度のレーザーJ-KAREN と新たに整備されたプラズマミラーを用いて照射することで、世界最高エネルギーのイオンを生成するとともに、レーザーイオン加速とその応用の新たなフロンティアを開拓する。

キーワード：グラフェン、2 次元物質、超高強度レーザー、イオン加速

１．目的

両面が自由表面のグラフェン[1,2]をターゲットとして用い、国内最高強度のレーザーJ-KAREN[3]をプラズマミラー[4]を用いて照射することで、高エネルギーのイオンを生成し、レーザーイオン加速とその応用の新たなフロンティアを開拓する。J-KAREN のアップグレード後のエネルギーフロンティア開拓をみすえた、LSG と金などの複合ナノレイヤーターゲットやグラフェンディスパージョンを用いたグラフェンフォームターゲットなど、新規ターゲットの試験照射も行う。

２．方法

層間に結合のない自由表面グラフェンターゲット（large-area suspended graphene: LSG）[1,2]や、それだけでは自立しないナノ構造体を LSG にマウントし、J-KAREN を用いて照射し高エネルギーイオンを生成する。本実験は、J-KAREN レーザーアップグレード前の最後の実験であり、アップグレード後のエネルギーフロンティア開拓を念頭に、世界最高エネルギーのイオン加速を実現するための、新規ターゲット開発とその検証を行う。LSG、LSG 積層ナノレイヤーターゲット、グラフェンフォームターゲットは、台湾国立中央大学（NCU）W.Y. Woon 教授、Che-Men Chu 博士との共同研究により、新規ターゲットの開発と作成、両面が自由表面となるマウントまで R&D を行う。実験は J-KAREN の短焦点チャンバー[3]で行い、プラズマミラー[4]を用いて LSG に対して、normal incidence で照射する。ターゲットの駆動装置とターゲットの監視システムに加えて、nm の精度で距離を測定できる Keyence 製の測距計を用いて、ターゲットのアライメントを行う。オンライン計測器として独自開発のシンチレーションカウンター[5,6]とトムソンパラボラ[7]、オフライン計測器に固体飛跡検出器のスタックを用い[8]、機械学習を用いて 100 万枚単位の顕微鏡写真を自動解析し[9,10]、最高エネルギーのイオンを探索する。また、LSG は薄いほど面積が小さいほど stiff であるということが実験的に確かめられており[2]、通常の物質とは異なる性質を持っている。プラズマミラーの導入で normal incidence での実験が可能になり、LSG の自由表面積を小さくすることが可能となった。本研究では、これを検証するため、これまでの直径 500μm の LSG から 200μm のものに変更し高エネルギープロトン加速を目指す。

３．結果及び考察

今回は、グラフェンフォーム等の新規ターゲットの検証を行い、興味深い結果が得られている。結果は、現在解析中であるが、ここでは、プロトン加速で特に大きな改善が見られた、層間の結合のない LSG についての結果を示す。図 1 は、LSG の層数に対して、トムソンパラボラ（TPS）と多層シンチレータ（MLS）で計測したこれまでのプロトンの最大エネルギーをプロットしている。TPS と MLS で近いエネルギーが得られており、信頼性の高い結果だと言える。比較のために particle-in-cell（PIC）シミュレーションの結果も点線で示している。これまで、プレパルスを考慮しない理想的な PIC に対して、ファクター2 程度実験結果が低めに出ていたが[11]、16 層まで、つまり 16 nm までの極薄膜領域においては、PIC の結果をも上回る実験結果が得られている。32 層では依然として PIC を下回っているが、32 層のターゲットは数が限られており、統計が足りていない可能性が考えられる。さらに固体飛跡検出器を用いたスタック計測の結果も現在エッチングと顕微鏡によるスキャンを進めており、機械学習を用いたエッチピット解析[9,10]を行う予定であり、TPS と MLS に相補的なデータが得られると期待している。

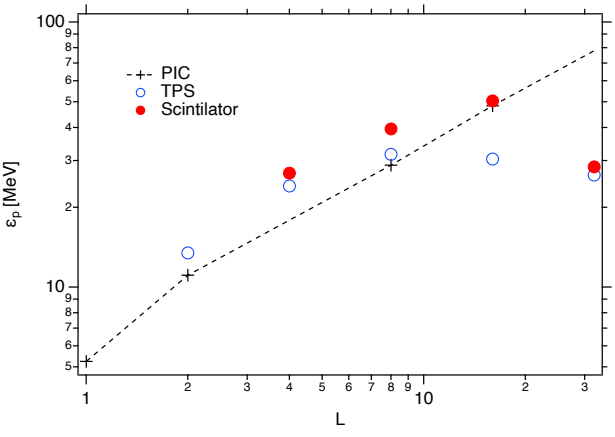

図 1 LSG の層数に対するプロトンの最大エネルギー (preliminary results)

4 層の結果はレーザーエネルギーが 12 J の時のもので、8 層については 18 J のショットであった。ここでは示さないが、4 層（4 nm）という極薄膜ターゲットでは、さらにレーザーのエネルギーを上げるとプロトンのエネルギーは下がっており、F/1.3 の集光条件では 12 J が最適なレーザーエネルギーだと考えられる。今後は、J-KAREN のアップデートに伴い、高エネルギーイオン加速が実現される最適な条件が、LSG の層数

が多い方にシフトすると考えられており、32 層に加え、64 層と 128 層の LSG の作成を行い、レーザーイオン加速のプロトンおよびカーボンの世界記録を狙っていく。今回のプロトンエネルギーの増大が、LSG の基板の条件によるものかは、今後の解析と、さらに小さな面積の LSG 実験等を行い確認する予定である。薄く小さいほど stiff であるという LSG の特性は、PIC 等の古典計算には含まれておらず、イオン加速に最適な条件がどう決まるのかも今後の重要な研究課題となる。

４．引用(参照)文献等

[1] N. Khasanah et al., High Power Laser Sci. Eng., 5, e18 (2017)
[2] Y.-T. Liao, et al., Nanosale. 14, 42 (2022)
[3] H. Kiriyama et al., Opt. Lett. 43, 2595 (2018)
[4] A. Kon et al., High Power Laser Sci. Eng. 10, e25 (2022)
[5] Y. Abe et al., Rev. Sci. Inst. 93, 063502 (2022)
[6] T. Minami et al., Rev. Sci. Inst. 93, 113530 (2022)
[7] T. Hihara et al., Sci. Rep. 11, 16283 (2021)
[8] Y. Kuramitsu et al., Sci, Rep. 12, 2346 (2022).
[9] T. Taguchi et al., Rev. Sci. Inst. 95, 033301 (2024)
[10] Y. Kuramitsu et al., Phys. Plasmas 31, 053108 (2024)
[11] T. Minami et al., High Energy Density Phys. 55, 101195 (2025)