

**J-KAREN レーザーによるグラフェンを用いた高エネルギーイオン加速**

Energetic ion acceleration by irradiating a large-area suspended graphene with J-KAREN laser

Y. Kurmitsu<sup>1</sup>, T. Minami<sup>1</sup>, T. Hihara<sup>1</sup>, K. Sakai<sup>1</sup>, M. Takano<sup>1</sup>, T. Nishimoto<sup>1</sup>, H. Habara<sup>1</sup>,  
 W.Y. Woon<sup>2</sup>, Y.T. Liao<sup>2</sup>, Ko. Kondo<sup>3</sup>, H. Kiriyama<sup>3</sup>, Y. Sakawa<sup>4</sup>, A. Morace<sup>4</sup>, S. Egashira<sup>4</sup>,  
 M. Ota<sup>4</sup>, T. Izumi<sup>4</sup>, M. Kanasaki<sup>6</sup>, T. Nakagawa<sup>6</sup>, T. Asai<sup>6</sup>, K. Sakamoto<sup>6</sup>, K. Shimizu<sup>6</sup>,  
 M. Alkhimova<sup>1,7</sup>, T. A. Pikuz<sup>1,7</sup>, A. McIlvenny<sup>8</sup>, O. McCusker<sup>8</sup>, M. Borghesi<sup>8</sup>,  
 K. Oda<sup>6</sup>, T. Yamauchi<sup>6</sup>, S. Jinno<sup>9</sup>, and Y. Fukuda<sup>3</sup>

<sup>1</sup>)Eng. Osaka U., <sup>2</sup>)Phys. NCU, <sup>3</sup>)KPSI QST, <sup>4</sup>)ILE Osaka U., <sup>5</sup>)Eng. Sci. Kyushu U.,  
<sup>6</sup>)Maritime Sci. Kobe U., <sup>7</sup>)JIHT RAS, <sup>8</sup>)Math. & Phys. QUB, <sup>9</sup>)Eng. Tokyo U.

(概要) 両面が自由表面のグラフェン (large-area suspended graphene: LSG) [1] を世界最薄のターゲットとして使い、世界屈指の超高強度レーザーJ-KAREN を照射することで、世界最高エネルギーのイオン (>100 MeV プロトン及び>1 GeV カーボン) を生成・加速し、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。

**キーワード** : グラフェン、超高強度レーザー、イオン加速

**1. 目的**

世界屈指の超高強度レーザーJ-KAREN-P[2]をグラフェンターゲットに照射し、高エネルギーのイオン加速を行う。計測器は、これまでのトムソンパラボラ、CR-39 スタック、電子スペクトロメータに加え、X線スペクトルメータとダイヤモンドディテクタを用いる。実験は短焦点チャンバーを用い、阪大、KPSI-QST、台湾 NCU、イギリス QUB、ロシア JIHT-RAS の混成チームで行う。昨年度は、45度入射であるが、プラズマミラー無しで、4 nm 厚の LSG を用い $\sim 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> の超高強度域で高エネルギーイオンの加速に成功している。本年度は、戻り光のモニターを新たに設置し、入射角を0度に近づけていき、更に高エネルギーで高繰り返しのイオン加速を実現する。

**2. 方法**

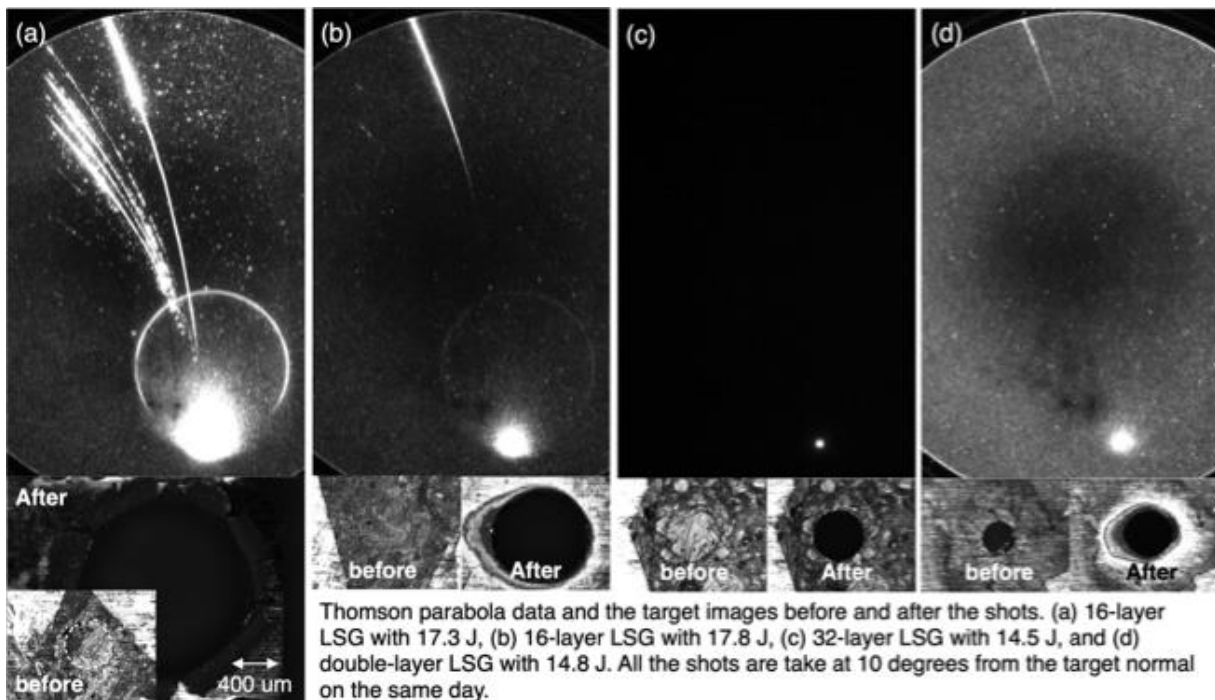
ターゲットは Large-area suspended graphene (LSG) で、枚数を重ねることで厚さの異なる (1nm - 32nm) LSG と、4-layer LSG を薄膜ターゲットのマウントとして使い、金や PMMA 等のそれ自体では nm オーダーで自立しない材料を保持する。ターゲットの作成は、申請者が以前在籍し現在も緊密な共同研究を続けている国立中央大学 (NCU、台湾) の Woon 教授のグループが行う。実験は J-KAREN-P の短焦点チャンバーで行い、LSG に対して、レーザーを 45 度照射から始めて、**戻り光モニターを見ながら**、徐々に normal incidence に近づけてゆく (最小角度 10 度)。ターゲット駆動装置、および 2 方向からのターゲット監視システムを用いて、ターゲットのアライメントを行う。計測器は、リアルタイムトムソンパラボラ、ダイヤモンドディテクタ、及び CR-39 のスタックを用いる。あらかじめアライメントした 2 種類のターゲットをそれぞれ多数個チャンバーにセットし、1 日のショットでスタックをターゲットの種類に合わせて交換する。加速過程を明らかにするために、電子スペクトロメータと X 線スペクトルメータを用いて、電子の分布関数、温度・密度・価数をそれぞれ計測する。

**3. 結果及び考察**

結果の前に、実験後に行ったコントラスト計測から、今回行った実験では、レーザーの主パルスの数十 ps 前にわたり  $10^{-7}$  程度の強度を有するプレパルスがあることがわかっている。それを踏まえて結果を解釈する必要がある。下図は、トムソンパラボラの生データとターゲットの照射前と後の顕微鏡写真で詳細は現在解

析中であるが、それぞれ実験の最終日に取られたデータで、全て 10 度入射のショットである。(a)と(b)は、レーザーエネルギーが最大で、同じ 16 layer LSG を用いている。(a)は今回の実験で最高のエネルギーが出たショットで、 $\sim 30$  MeV のプロトンのエネルギーが出ており、カーボンの加速も見られる。昨年度の 45 度入射の 8L LSG では、12 MeV 程度だったことを考えると、入射角を小さくすることと、LSG の積層数を増やすことで、最大エネルギーが増えるという狙い通りの結果が得られたと言える。ところが、20 $\sim$ 30 MeV の高エネルギーショットは、実験期間を通して 2 ショットしかなかった。また、レーザーエネルギーがわずかに大きい(b)のショットでは、プロトンのエネルギーも低く、カーボンの加速もわずかにみられるだけである。何より、ショット後のターゲットの焼け跡が大きく異なる。(a)では、同じ倍率では何も映らないので倍率を下げて撮ったもので、基板まで大きく穴が広がっていることがわかる。さらに、(c)のショットでは、(a)で戻り光が大きかったためにレーザーエネルギーを落としているが、それでも 14.5 J のエネルギーが入ったとは思えないほど基板が全く焼けておらず、グラフェンがなくなっているだけで、トムソンパラボラには全くイオンが写っていない。今回の実験では、(b)のようにプロトンが少し加速されるだけというショットが多く、(c)のように全くイオンが見えないショットもしばしばであった。昨年度は、ベストフォーカスから約 170  $\mu\text{m}$  デフォーカスしたショットも多数行ったが、全てのショットでプロトンとカーボンの加速がみられていた。また、この最終日のショットに関しては、今回新しく設置した数  $\mu\text{m}$  の空間分解のあるターゲットモニターだけでなく、レーザーのアライメントに用いる対物レンズを用いてターゲットをアライメントした。昨年度の状況も合わせても、ターゲットのアライメントでイオンが出なくなることは考えにくい。今回の実験では  $10^{-7}$  程度のプレパルスによりショットによってグラフェンがメインのピークが到達する前に破壊されていた可能性が考えられる。しかし、(d)では  $10^{-7}$  のプレパルスがあるにも関わらず、double-layer LSG (厚さが 2 nm) からプラズマミラーなしで、J-KAREN の超高強度領域でイオンが実際に加速されたことは、LSG の驚異的な耐性を示している。

結論として、今回の実験のハイライトは、2つ考えられる。1つは、レーザーの入射角度を normal incidence に近づけるということと、LSG の積層枚数を増やすことで、昨年度を大きく上回るイオン加速を実現したこと。もう1つは、J-KAREN の世界屈指の超高強度領域においても、プラズマミラーなしで 2 nm という超極薄のターゲットを用いてイオン加速に成功したことである。これらは、それぞれについて見れば大きな成果であると言える。また、double-layer LSG を用いたイオン加速では、プレパルスによる加速も考慮する必要がある。プレパルスを積極的に使って、LSG とカーボンナノチューブを用いた 2 段階加速も、現在、理論・数値計算を用いて研究しており、J-KAREN のパラメータで 1 GeV に迫る加速が予測されている。今回の高プレパルス実験の結果を、2パルス、2ターゲットの多段加速実験に繋げ前人未到の相対論的プロトン加速を今後実現したい。



4. 引用(参照)文献等

- [1] Khasanah + Kuramitsu, High Power Laser Sci. Eng., 5, e18, 2017
- [2] H. Kiriya et al., Opt. Lett. 43, 2595, 2018