

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14563

研究課題名（和文）固体飛跡検出器を用いた高強度レーザーによるイオン加速メカニズムの解明

研究課題名（英文）Elucidation of the mechanism of laser-driven ion acceleration using solid state nuclear track detectors

研究代表者

金崎 真聡（Kanasaki, Masato）

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：90767336

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）：高強度レーザーと物質の相互作用を利用したレーザー駆動イオン加速では、信頼性の高いイオン検出器として固体飛跡検出器CR-39が用いられてきた。エッチピットを一つ一つ解析することで、イオンの入射エネルギーや核種を明らかにすることが可能であるが、その解析には膨大な時間と手間がかかっていた。本研究では、エッチピット解析を自動化・高効率化し、レーザー加速イオンの加速メカニズムが議論可能なレベルのデータを、これまでより迅速に得ることが可能なアプリケーションとプログラムの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において開発したアプリケーション及びプログラムは、固体飛跡検出器を用いたイオン計測の高効率化だけでなく、系統誤差を減らすことができるという点において、高精度化にも寄与している。より正確な計測結果をより素早くレーザー駆動イオン加速実験にフィードバックすることが可能になったことにより、実験全体の高効率化、ひいては、様々な応用が期待されるレーザー駆動イオン加速研究の進展につながる。

研究成果の概要（英文）：CR-39 track detectors has been widely used as the ion detector in laser-driven ion acceleration experiments. CR-39 can reveal the incident energies and species of ions precisely, but the analysis of etch pit has been enormously time-consuming. In the present study, an application and a program to automate and improve the process of etch pit analysis has been developed, which enables us to obtain the data more quickly than before to discuss the acceleration mechanism of laser-accelerated ions.

研究分野：放射線計測学

キーワード：固体飛跡検出器 レーザー駆動イオン加速 イオン計測 エッチピット CR-39

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、高強度レーザー光と物質の相互作用によるレーザー駆動イオン加速は、目覚ましい発展を遂げ、100 MeV に迫るプロトンの加速に成功している[1]。また、理論研究においてもサブ GeV 級のイオン加速が可能な新たなイオン加速メカニズムが提唱されている[2]。レーザーの高強度化や新しいターゲットの開発とともに、加速されるイオンの高エネルギー化が進められることで、例えば、高周波加速器に比べて小型の加速器開発など応用も期待できる。

このような状況下、より高エネルギーで高品質なイオンを発生させるためには、より最適なレーザー光のパラメータなど実験条件を探し出すことが必要となるが、そのためには、実験において加速されたイオンの特性から、複雑に組み合わされた加速メカニズムの詳細を把握することが最重要課題である。即ち、加速されたイオンの空間分布に加え、核種や入射エネルギーを正確に計測することが求められており、イオン計測の結果を理論研究の結果と比較する必要がある。固体飛跡検出器は、エッチングによりイオンの飛跡を光学顕微鏡下で観察可能なエッチピットに拡大して計測を行うため、二次元的にイオンを検出することが可能であり、かつ、エネルギー分解能が高く、レーザー加速イオン計測に十分な精度を有する[3]。しかしながら、イオンの正確な入射エネルギーや核種等の情報を得るためにはエッチピットを一つ一つ解析する必要があり、大面積の情報を短時間に得ることは困難である。レーザーの高繰り返し化によりイオン加速実験の繰り返し効率が改善される中で、固体飛跡検出器を用いて加速メカニズムを議論するためには、解析の高速化が求められている。

### 2. 研究の目的

固体飛跡検出器を用いたレーザー加速イオン計測において、エッチピットの解析を高速化することで、イオンの加速メカニズムが議論可能なレベルのデータをこれまでよりも迅速に得ることを本研究課題の目的とした。具体的には、光学顕微鏡によるエッチピット観察において、エッチピットの自動識別が可能なアプリケーション開発を行った。また、エッチピットの成長挙動を自動的に追跡するプログラムの開発を行った。

### 3. 研究の方法

固体飛跡検出器は、イオン照射後に水酸化カリウム等の強アルカリ溶液にて化学エッチング処理をすることで、イオンの飛跡が光学顕微鏡下で観察可能なマイクロメートルオーダーのエッチピットとして観察される。その中でも、CR-39 は陽子線に対しても感度を持ち、レーザー加速イオン計測においても信頼性が高く、広く用いられている検出器である。本研究では、CR-39 を利用し、(1)エッチピットの自動識別アプリケーションおよび(2)成長挙動追跡プログラムの開発を行った。

#### (1)エッチピットの自動識別アプリケーション

強アルカリ溶液によるエッチング後の固体飛跡検出器表面は、表面荒れや水垢等によるノイズをエッチピットと誤認識する場合がある。そこで、エッチピット開口部形状が円または楕円形状であるという特徴をとらえて認識させるプログラムを開発した。具体的には、オープンソースのコンピュータビジョン向けライブラリである OpenCV で、Hough 変換による画像処理で円を認識させることにより、エッチピットとノイズを識別可能で、且つ、エッチピット開口部の位置や半径を取得可能なプログラムを作成した。また、光学顕微鏡に接続されたカメラから取り込まれる映像に対して、Python で作成したプログラムをループさせることで、コンパクトデジタルカメラにおける顔認識機能のように、エッチピットをリアルタイムに認識・追跡可能なプログラムとした。さらには、開発したプログラムを、ユーザーインターフェースを備えたアプリケーションとすることで、エッチピットの解析経験が少ない研究者でもエッチピット解析に必要な情報を瞬時に得られるようにした。

#### (2)成長挙動追跡プログラム

固体飛跡検出器上に形成されたエッチピットから入射エネルギーや核種の情報を正確に得る解析方法として、エッチングと顕微鏡観察を繰り返し行い、エッチピットの成長挙動を明らかにする多段階エッチング法がある。多段階エッチング法では、エッチング前後で同じエッチピットに対して開口部半径を計測する必要があるが、数 cm 角程度の検出器上に形成されたマイクロメートルオーダーのエッチピットを光学顕微鏡下で探し出す作業には膨大な手間と時間を要する。加えて大量に入射したエッチピット全てに対して成長挙動を得ることは、手動では不可能であった。そこで、広領域画像取得顕微鏡を使用し、エッチング前後に取得した検出器表面の画像からエッチピットの成長挙動を追跡するプログラムの開発を開発した。本プログラムの開発にあたり、エッチング時間ごとにエッチピット半径が大きくなるため、エッチング前後の画像に対して既存の物体追跡プログラムを適用できないことが課題として浮上した。また、光学顕微鏡のステージ上にマイクロメートルオーダーの精度でサンプルを設置することは困難であるため、エ

エッチング前後で視野内の全てのエッチピットを追跡できないことが二つ目の課題となった。本研究では、解析の自動化のために、まず、エッチピットの検出及び位置と半径の計測を(1)と同様に Hough 変換を用いて行った。次に、上述の課題を解決するために、エッチング前後のエッチピットを対応させるアルゴリズムを開発した。具体的には、検出されたエッチピットの位置を二次元マッピングした画像を作成し、その画像に対して位相限定相関法を用いたテンプレートマッチングを行うことでアフィン変換行列を求めた。この工夫により、比較したい画像を平行移動及び平面内回転することで、エッチング前後のエッチピット追跡を可能にした。

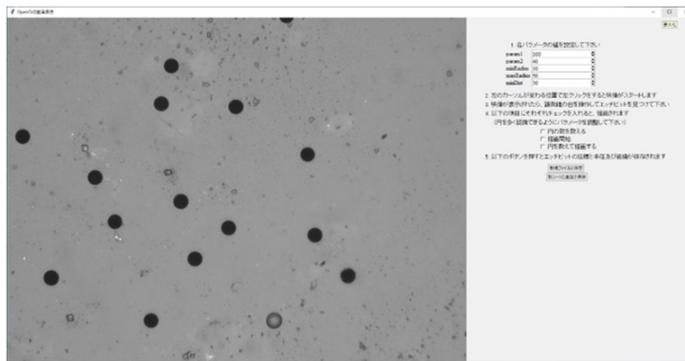


図1 エッチピット自動識別アプリケーションのフロントウインドウ

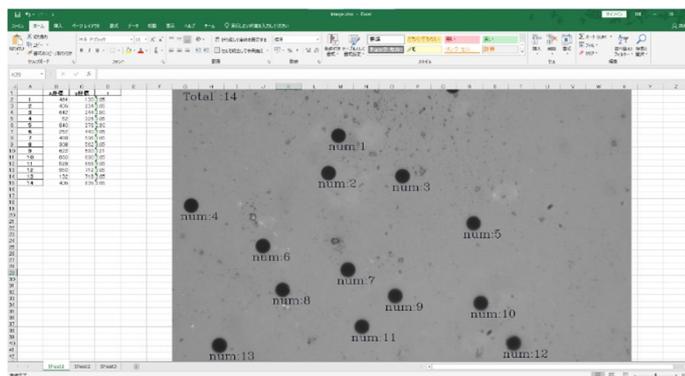


図2 識別結果保存後のエクセルワークシート

#### 4. 研究成果

##### (1) エッチピットの自動識別アプリケーション

図1に開発したアプリケーションのウインドウを示す。ウインドウの左側にはリアルタイムで取り込まれるカメラの映像が表示されており、それを確認しながら右側のパラメータを調整しエッチピットを識別する。画像認識をループさせたプログラムであるため、パラメータ設定後は、顕微鏡のステージを動かしてもエッチピットを追従するように、リアルタイムでエッチピットの情報を得ることができる。エッチピットの半径等の情報は、図2に示すようにエクセルのワークシートに保存することができる。表面荒れや水垢がある画像においてもエッチピットのみを正確に識別し、それらの半径等の情報が得られている。本アプリケーションでは、エッチピット半径を自動計測するため、手動計測のように測定者に依存する系統誤差が発生しない。また、一画面に複数のエッチピットが存在する場合に、解析時間の大幅な短縮ができた。

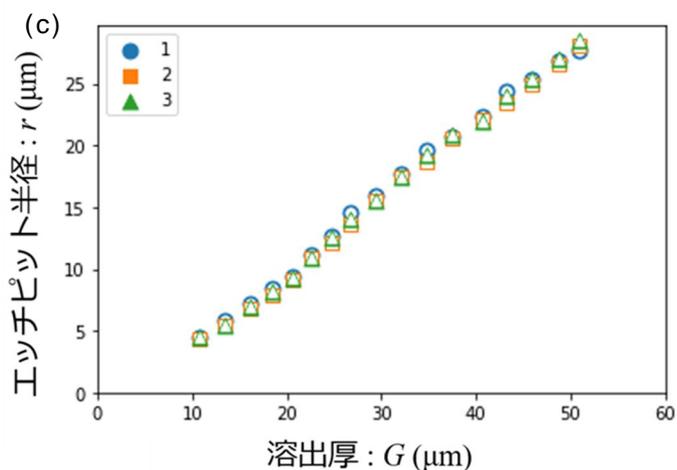
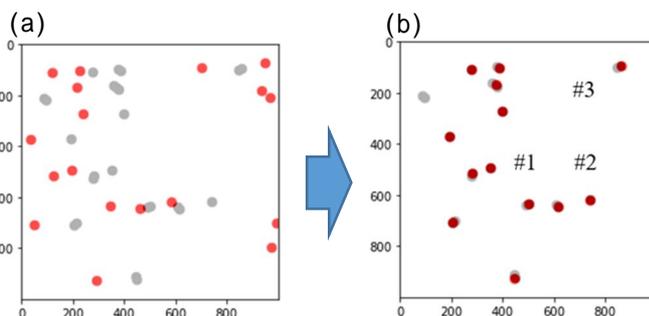


図3 成長挙動プログラムによる画像マッチング (a)(b)およびエッチピット成長挙動(c)

##### (2) 成長挙動追跡プログラム

図3(a)(b)に位相限定相関法による画像マッチングの結果を示す。各プロットはエッチピットの位置を示しており、グレーと赤のプロットはそれぞれエッチング時間ごとのエッチピットの位置を示している。マッチング前の画像では、エッチング時間ごとに相対的な位置関係は崩れていないが、光学顕微鏡のステージ上に試料を置く際の位置ずれが反映されていることがわかる。マッチング処理を施すと、ほぼすべてのエッチピットが重なっている。同様の処理を複数のエッチング時間に対して行うと図3(c)に示すようなエッチピット成長曲線が得られた。本プログラムにより、エッチングと広領域画像取得顕微鏡による撮像を繰り返し行うだけで、エッチピットの成長挙動を明らかにすることができ、エッチピット解析時間を大幅に短縮することができた。

<引用文献>

- [1] A. Higginson et al., Nat. Commun. 9, 724 (2018).
- [2] R. Matsui et al., Phys. Rev. Lett. 122, 014804 (2019).
- [3] M. Kanasaki et al., Progress in Ultrafast Intense Laser Science XV, Chapter 7 (2020)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3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 望月政一郎、井上千裕、尾崎玲於奈、豊永啓太、前川馨、谷池晃、山内知也、福田祐仁、金崎真聡	4. 巻 42
2. 論文標題 固体飛跡検出器CR-39に形成される陽子線と重陽子線のエッチピット識別	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ESI-NEWS	6. 最初と最後の頁 1-7
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 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 Asai Takafumi, Inoue Chihiro, Jinno Satoshi, Kitagawa Nobuko, Kodaira Satoshi, Morishima Kunihiro, Fukuda Yuji, Yamauchi Tomoya, Kanasaki Masato	4. 巻 62
2. 論文標題 Measurement method for laser-accelerated multi-hundred-MeV protons utilizing multiple Coulomb scattering in an emulsion cloud chamber	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 016506 ~ 016506
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acac59	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 金崎真聡	4. 巻 537
2. 論文標題 固体飛跡検出器を利用したレーザー加速イオンの特性評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ぶんせき	6. 最初と最後の頁 315-319
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 Hihara Takamasa, Kanasaki Masato, Asai Takafumi, Kusumoto Tamon, Kodaira Satoshi, Kiriya Hiromitsu, Oda Keiji, Yamauchi Tomoya, Woon Wei-Yen, Kuramitsu Yasuhiro, Fukuda Yuji	4. 巻 11
2. 論文標題 Discriminative detection of laser-accelerated multi-MeV carbon ions utilizing solid state nuclear track detectors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16283
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-92300-1	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16件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 望月政一郎、井上千裕、尾崎玲於奈、豊永啓太、前川馨、山内知也、福田祐仁、金崎真聡
2. 発表標題 CR-39(TechnoTrak)に形成される陽子線と重陽子線のエッチピット識別
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 毎谷有哉、井上千裕、望月政一郎、尾崎玲於奈、豊永啓太、前川馨、合原輔佑太、山内知也、福田祐仁、金崎真聡
2. 発表標題 高強度レーザーとアルゴンクラスターの相互作用領域から発生するイオンのピンホールイメージング
3. 学会等名 第36回固体飛跡検出器研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 尾崎玲於奈、井上千裕、望月誠一郎、豊永啓太、前川馨、山内知也、金崎真聡、福田祐仁
2. 発表標題 固体飛跡検出器CR-39によるレーザー加速陽子線のエネルギースペクトル計測
3. 学会等名 第36回固体飛跡検出器研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 浅井孝文、他32名
2. 発表標題 水素クラスターターゲットと高強度レーザーとの相互作用による準単色multi-MeV陽子線の繰り返し発生
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 金崎真聡、他32名
2. 発表標題 クラスターターゲットと高強度レーザーの相互作用によるMeV級イオンの繰り返し発生
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月政一郎、浅井孝文、鍛冶賢志、田邊寛之、井上千裕、山内知也、福田祐仁、金崎真聡
2. 発表標題 CR-39(TechnoTrak)に対する陽子及び重陽子の応答特性
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田邊寛之、浅井孝文、山内知也、金崎真聡
2. 発表標題 リアルタイムエッチピット判別アプリケーション開発
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ・金崎真聡、浅井孝文、鍛冶賢志、田邊寛之、井上千裕、望月政一郎、尾崎玲於奈、豊永啓太、前川馨、Sergey Ryazantsev, Tatiana Pikuz, 桐山博光、山内知也、福田祐仁
2. 発表標題 2022 年に高強度レーザーJ-KAREN-Pにて行われたイオン加速実験の概要
3. 学会等名 第35回固体飛跡検出器研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊永啓太、浅井孝文、井上千裕、鍛冶賢志、望月政一郎、尾崎玲於奈、前川馨、山内知也、金崎真聡、福田祐仁
2. 発表標題 高強度レーザーと水素クラスターの相互作用領域から発生する第二高調波のイメージング
3. 学会等名 第35回固体飛跡検出器研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前川馨、浅井孝文、鍛冶賢志、井上千裕、望月政一郎、尾崎玲於奈、豊永啓太、山内知也、福田祐仁、金崎真聡
2. 発表標題 高強度レーザーと水素クラスターの相互作用におけるレーザープレパルスが陽子線加速に及ぼす影響
3. 学会等名 第35回固体飛跡検出器研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎玲於奈、浅井孝文、鍛冶賢志、井上千裕、望月政一郎、豊永啓太、前川馨、山内知也、福田祐仁、金崎真聡
2. 発表標題 固体飛跡検出器 CR-39 によるレーザー加速高エネルギー陽子線のエネルギースペクトル計測
3. 学会等名 第35回固体飛跡検出器研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金崎真聡
2. 発表標題 高強度レーザーによる高品質・高エネルギーイオン発生のための放射線検出手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金崎真聡
2. 発表標題 レーザー駆動イオン加速研究における固体飛跡検出器の利用
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kanasaki
2. 発表標題 Measurement of Laser-Accelerated Ions from Cluster Targets using Solid State Nuclear Track Detectors
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masato Kanasaki, Takafumi Asai, Takato Nakagawa, Takashi Kaji, Hiroyuki Tanabe, Satoshi Jinno, Kunihiro Morishima, Nobuko Kitagawa, Satoshi Kodaira, Tomoya Yamauchi, Yuji Fukuda
2. 発表標題 Measurement of Laser accelerated ions using active and passive ion detector systems
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masato Kanasaki
2. 発表標題 Applications of solid state nuclear track detectors for measurements of laser-accelerated ions
3. 学会等名 HIGH ENERGY DENSITY SCIENCES 2021（招待講演）（国際学会）
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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