

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04898

研究課題名(和文)埋め込まれたナノ粒子の集団的同一方向へのロッド化変形：メカニズム解明

研究課題名(英文)Clarification of the mechanism for the shape elongation of embedded nanoparticles

研究代表者

雨倉 宏 (AMEKURA, Hiroshi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究拠点・主席研究員

研究者番号：00354358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は高速重イオン照射によるナノ粒子の楕円変形現象の機構を解明することを目的とし、ひいてはその背景にある高速イオンと物質の相互作用の基礎的過程の理解を深めることを目指すものであった。主な成果は、本研究分野でそれぞれ著名なFinlandの計算シミュレーショングループ、豪州のX線小角散乱実験グループとの国際協力により、本現象に提案されている複数のメカニズムの優劣を明確にして、(まだ謎は残るものの)現時点での最良のモデルを示した。またC60イオンを用いることにより、これまで数十MeV以上の高エネルギーが必要だった本現象を数MeVで実現し、実用化への突破口を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体中に分散させた金属ナノ粒子に対してエネルギー数百MeVの高速重イオンビームを当てると全てのナノ粒子が同一方向に伸び、配向度の高い非等方的なナノ光学材料等の製造を実現する有力な手法として注目されている。本研究では同様の現象が数MeVのC60イオン照射でも起こることを明らかにした。これは単なる省エネルギー化技術ということだけではない。百MeV級の高速重イオンを発生できる施設は国内で2,3ヶ所しかないが、数MeVならば国内の多数の一般的加速器で可能である。本現象の産業化へひとつ近づいた。

研究成果の概要(英文)：This study aimed for the clarification of the mechanism of the shape elongation of embedded nanoparticles induced under swift heavy ion irradiation, and of the fundamental interactions between swift heavy ions and materials. The main results are: (i) we have carried out international collaborations with Australian team on the precise experiments of the small angle X-ray scattering and with Fin team on state-of-the-art numerical calculations. Then we have criticized models proposed for this phenomenon before and have reached the best one ever. (ii) We have demonstrated that this phenomenon, which normally requires ions of several tens MeV or more, is induced under a-few/several MeV C60 ion irradiation. This observation has an impact not only on saving energy, but on the industrialization of the phenomenon. While accelerators generating a hundred MeV ions or more are limited in two or three facilities in Japan, the accelerators generating a few MeV ions are quite many in Japan.

研究分野：イオンビームナノ材料科学

キーワード：高速重イオン ナノ粒子 照射誘起楕円変形 イオンビーム イオンシェーピング C60 クラスタイオン

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。

## 1. 研究開始当初の背景

本研究の対象とした現象は、「固体媒質に埋め込まれたナノ粒子への高速重イオン照射による楕円変形」である。英語では Shape elongation of embedded nanoparticles や Ion shaping などと呼ばれている。高速重イオンとは、高エネルギーゆえに固体中でのエネルギー損失過程が原子衝突ではなく主に電子励起によるものである。高エネルギーかつ重いイオンのため電子励起は強力なものとなる。高速重イオンを非晶質 SiO<sub>2</sub> などの酸化物中等に埋め込んだ金属ナノ粒子に照射すると、ビームと同方向(つまり全てのナノ粒子が同方向)に伸びる現象が 2003 年に発見され[1]、マクロな領域で同一方向に配向したナノロッドを形成する手法として注目を集めた。

もともとイオンビーム材料改質分野では非晶質 SiO<sub>2</sub> などに数十 keV ~ 数 MeV でイオン注入を行い、ナノ粒子を形成する研究が 1980 年代後半から 2000 年頃まで活発に行われ、我々もその一端をなしていた。しかし当該分野で高速重イオンはあまり馴染みのない手法であったこともあり、少し遅れて 2006 年頃から各国の著名な研究者たちが本現象の積極的な調査を実施し、本現象の特性を次々に明らかにしていった。メカニズムも淘汰され、その結果イオンハンマリング効果[2]は関与していると思われるが詳細は未だ議論の分かれるところであるというのが当時の学会の主流であった。2012 年に Rizza 等は湿式化学法で作製したサイズが揃ったナノ粒子を物理的手法で固体中に埋め込み、非常にきれいな系統的結果を報告した[3]。その結果、本現象の本質は全て明らかになったという間違っただけの印象が一部に受け入れられた。しかし当時の Rizza をしても具体的なメカニズムには至っておらず、ハンマリングの寄与という当時の学会の意見を繰り返すのみであった。

我々は本現象に関する研究を 2009 年頃に開始した後発であるが、楕円化の度合いを分光学的に測定する手法を開発し、ハンマリングでは本現象を説明できないことを 2011 年に示した[4]。この結果は国際学会の意見とは異なったため、なかなか評価されなかった。その後 2014 年に Helsinki 大学のグループが高速重イオン効果を模擬する分子動力学 (MD) 計算手法を開発し、ハンマリング効果が無くてもナノ粒子楕円化が起こることを示した[5]。Helsinki グループとは 2016 年にインドで開催された国際会議で意気投合し、X 線小角散乱 (SAXS) が得意な豪州国立大とも協力し、ハンマリングを仮定しない新たなメカニズムに関する論文を本研究期間中に発表した[6,7]。

尚、本研究期間中の 2020 年に中国人研究者 2 名とともに書籍(全 290 ページ)[8]を執筆した。第 5 章において本現象の発見から最近の研究に至るまでのレビュー(全 65 ページ)をまとめたので、興味のある方は参考にさせていただきたい。

## 2. 研究の目的

本研究の究極的な目的(問い)は、ナノ粒子の楕円変形現象はどのようなメカニズムによるものなのかを明らかにするものであるが、これはなかなか簡単ではない。そこで 2 つの補助的な目的(問い)を設定した。第一は「高速重イオン (~100 MeV 級)とは異なって低速だが、同程度の高密度励起を実現できる数 MeV の C<sub>60</sub> クラスタイオンの照射によってもナノ粒子は楕円変形するかどうか?」というものである。これを明らかにすることにより、変形の本質が高速度なのか、高密度励起なのか分かる。また数 MeV の C<sub>60</sub> イオン照射で同様の変形が実現できれば、応用上のインパクトは大きい。100 MeV 級の静電加速器は国内に 2, 3 ヶ所しかないため使用が非常に制限されるが、数 MeV でよければ至るところの加速器が使用できる。

第二は「これまで提案されているハンマリングや熱圧力モデルのどちらが正しいのか、それとも両方とも不適合なのか?」というこれまで提案されたメカニズムを、非常に精密な実験(直線偏光二色性分光、X 線小角散乱)と高速重イオン照射効果解析用の分子動力学計算(二温度 MD 法)の国際協力による実験・計算を組み合わせたメカニズムの再検討である。

## 3. 研究の方法

実験試料は主に非晶質 SiO<sub>2</sub> 中に形成した Zn ナノ粒子と Au ナノ粒子である。前者は Zn イオンを 60 keV で SiO<sub>2</sub> に高線量  $1 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> まで注入し形成した。熱処理は行っていない。後者は SiO<sub>2</sub> 基板の上に厚さ 3 nm の Au 薄膜を形成した後、急速熱処理によりナノ粒子を形成させ、その上に SiO<sub>2</sub> 膜をマグネトロンスパッタリング法で堆積させナノ粒子を埋め込んだ。C<sub>60</sub> イオン照射は量研機構高崎量子応用研究所の 3 MV タンデム加速器、高速重イオン照射は主に日本原子力研究開発機構東海のタンデム加速器を用いて行った。

ナノ粒子の楕円変形の評価は、直線二色性分光法[4]を用いて評価した後、そのうちいくつかの試料については断面透過電子顕微鏡(TEM)観察を行った。断面 TEM 試料の作製には 30 keV Ga イオン FIB 装置を用いた。高速重イオン照射により SiO<sub>2</sub> 中に形成されるコア・シェル型のイオントラックの精密測定は豪州国立大学に協力してもらった。また高速重イオン照射によるコア・シェル型トラックの形成の MD シミュレーションは Helsinki 大学に協力してもらった。

#### 4. 研究成果

##### (1) MeV C<sub>60</sub> クラスターイオン照射によるナノ粒子の楕円変形

200 MeV Xe イオンは高速重イオンであり、非晶質 SiO<sub>2</sub> 中に埋め込まれた金属ナノ粒子を楕円変形させることができる。非晶質 SiO<sub>2</sub> 中での電子的阻止能  $S_e$  は 15.0 keV/nm である。一方、6

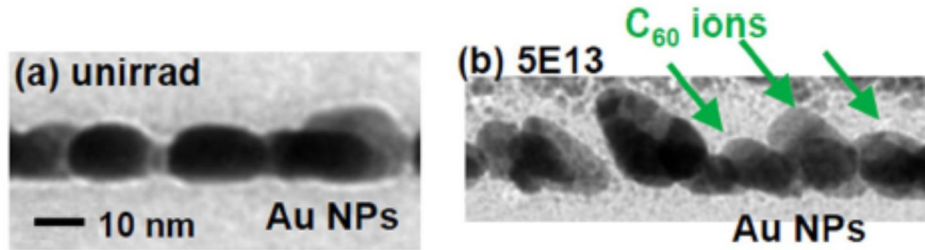


図 1. 非晶質 SiO<sub>2</sub> 中に埋め込まれた Au ナノ粒子の断面透過電子顕微鏡像。(a)は照射前、(b)は 4 MeV C<sub>60</sub> イオンを  $5 \times 10^{13}$  C<sub>60</sub>/cm<sup>2</sup> まで照射した後である。図の矢印で示されるようにイオン照射は 45 度方向から行った [9]。

MeV C<sub>60</sub> イオンの  $S_e$  はよく使われる近似を用いると 15.5 keV/nm であり、ほぼ 200 MeV Xe イオンと同じである。そこで 6 MeV の C<sub>60</sub> イオンでも同様にナノ粒子の楕円変形が起こるかどうかなを実験により確かめた。実はこの実験は、ここ数年前に初めて可能になったことを強調しておきたい。実はナノ粒子の楕円変形には高い  $S_e$  値だけではなく、明瞭な変形を観測するには  $10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup> 以上の高い照射量も必要であった。この照射量は高速重イオンでは充分実現可能な値であるが、C<sub>60</sub> イオンに関してはつい最近まで実現困難な値であった。今回この実験が実現できたのは、QST 高崎研で大電流の C<sub>60</sub> 負イオン源が最近開発されたおかげである [10]。

図 1 は多重膜堆積と熱処理によって形成した SiO<sub>2</sub> に埋め込まれた Au ナノ粒子の断面像である。(a)は照射前の形状で、この図には示していないが角度を変えた測定からパンケーキ型のナノ粒子が形成されていることが分かる。このナノ粒子に対して 4 MeV C<sub>60</sub> イオンを 45 度方向から照射すると、図 1(b)に示すようにビームと同方向にナノ粒子が伸びて葉巻型のナノ粒子に変形した。以上から、C<sub>60</sub> イオンでは 4 MeV という比較的低エネルギーでも、百 MeV 級の高速重イオンに相当する楕円変形を引き起こすことが確認された。繰り返しになるが、この結果は本現象の産業利用に道を開くかもしれない。百 MeV 級の静電加速器は国内でも 2, 3 ヶ所しかなく、産業応用に利用するには難しい。一方、C<sub>60</sub> イオンを用いれば本現象は 4 MeV やそれ以下でも引き起こすことができる。MeV 程度のイオンを発生させる加速器は日本国内には多数あるので、産業利用への道が開かれた。

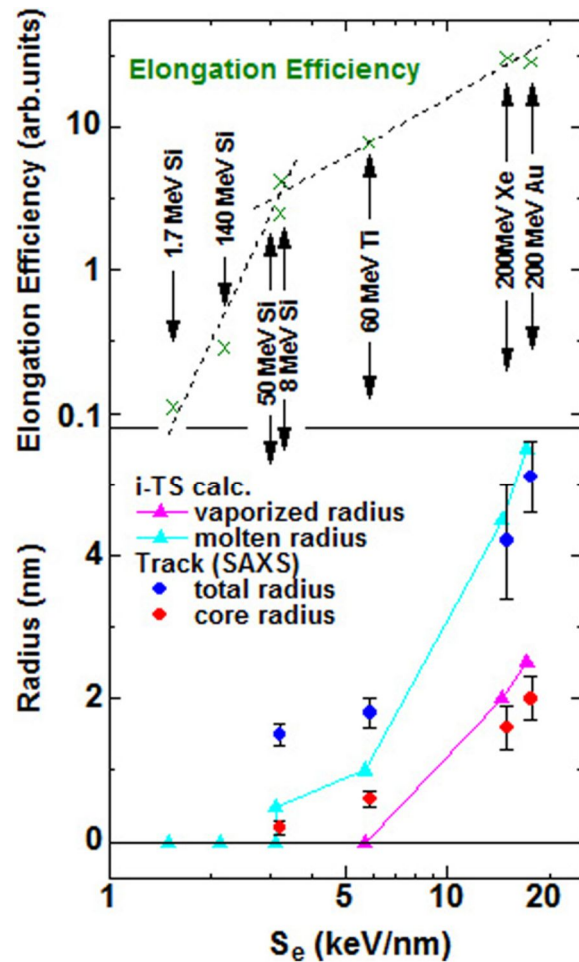


図 2. (上) 各種イオンに対する SiO<sub>2</sub> 中の Zn ナノ粒子の楕円変形効率の  $S_e$  依存性。(下) 非弾性熱スパイクモデルから計算された融解領域・気化領域の半径 (実線) および X 線小角散乱法で決定したトラックのコア半径と全体半径の比較 [6]。

##### (2) これまで提案された主要な楕円変形メカニズムの再検討

まず本現象が発見された直後に提案されたイオンハンマリングモデルについて言及する。非晶質 SiO<sub>2</sub> の場合、低線量では密度化が起こり、その後、線量の増加とともにハンマリング変形が起こる。しかし直線二色性分光により低線量での楕円変形の度合いを評価したところ、照射量

と良い直線関係にあり[4]、密度化からハンマリングに変わるクロスオーバーに起因する挙動は一切観測されなかった[11]。また楕円変形の照射温度依存性は、ハンマリングのそれと異なるものであった。さらに Helsinki 大学グループの MD 計算[5]によれば、ハンマリング効果が無くても楕円変形は起こることが示されている。

彼らはむしろ熱スパイク効果でナノ粒子を構成する金属が液化し、 $\text{SiO}_2$  中に形成されたコア・シェル型のイオントラック、特に低密度のコア領域を通して移動し楕円化すると考えている。しかしこれが正しいとすると、従来の  $\text{SiO}_2$  におけるコア・シェル型イオントラックの形成モデルと矛盾が生じる。従来のモデルではイオンの通過した部分に非弾性熱スパイク効果により強力な加熱が起こり、中央部に  $\text{SiO}_2$  が気化した領域、その周辺部に融解した領域が形成される。そしてそれらの領域が急冷されて、気化領域は低密度のトラックコア領域、融解領域は気化領域から圧縮され高密度のシェル領域に変わると信じられてきた[12]。

もしこの説が正しいならば、気化領域が発生する条件より  $S_e$  を下げていくと、ついには気化が発生せず融解だけが起こる条件に遭遇するはずである。気化が起こらない場合、コア・シェル型でないようなトラックが形成するのであるだろうか？ ナノ粒子の楕円変形は起こらなくなるのか？ このような疑問から、イオン種とエネルギーを変え、7種の  $S_e$  値におけるナノ粒子の楕円変形効率、SAXS で評価したトラックのコア径と全体の径、そして熱スパイク効果から計算される融解領域と気化領域の径を比較したのが図2である。

図2の上半分から  $S_e$  の減少に従い 3 keV/nm までは楕円変形効率は緩やかに減少するが、それ以下では急激な減少を示すことが分かる。一方、熱スパイクモデルから計算された気化領域が 6 keV/nm ではゼロになってしまう。従来のモデルでは、気化領域がコア・シェル型のコア領域に対応し、コア領域を介してナノ粒子の楕円変形が起こると考えられてきたので、6 keV/nm 以下では楕円化が起こらなくなりそうだが、実験結果では楕円化が起こっている。

また、SAXS 法で評価したコア径は熱スパイク計算の低  $S_e$  側の結果とは一致せず、3 keV/nm までコアは存在し続けた。3 keV/nm までは効率的なナノ粒子の楕円変形が起こることが実験により確かめられているので、この SAXS の結果(3 keV/nm でのトラックコアの存在)と楕円化(3 keV/nm でのコアを介してのナノ粒子の楕円化)の実験結果は矛盾しない。つまりコア部分を介してナノ粒子の楕円変形が起こるといふ MD の結果は実験とも矛盾しない。むしろ修正しなければならないのは、従来から広く信じられていたトラックコアは気化転移で形成されるといふ説の方である。実験・MD の両方から得られた正しい描像は、気化転移が起こらない比較的低い  $S_e$  値でも(理由はわからないが)コア・シェルトラックは形成され、コア部を介してナノ粒子の楕円変形が起こるといふものである[6]。

### (3) 予期しなかった成果：トラック形成閾値の遙か下でも形成された Si 結晶中のトラック

ナノ粒子の楕円変形においてイオントラックが重要な役割を担うため、 $\text{SiO}_2$  のトラックについて実験を行ったが、対照として結晶 Si についても同様の実験を行った。結晶 Si はイオントラックの形成されにくい物質と知られており、安定単原子イオン中で一番重いウランを数 GeV まで加速してもトラックが形成されない[13]。より大きな電子阻止能  $S_e$  が得られる  $\text{C}_{60}$  イオンでも 20 MeV 以上に加速して初めてトラックが形成されると報告されている[14,16]。

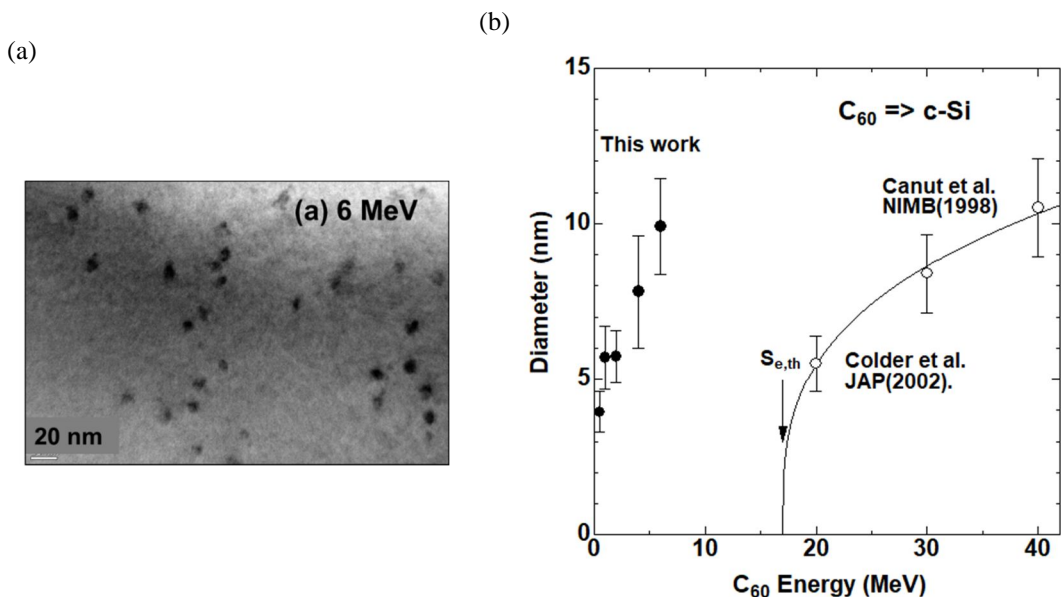


図3. (a) 結晶 Si への 6 MeV  $\text{C}_{60}$  イオン照射で形成したイオントラックの電子顕微鏡明視野像。(b) 結晶 Si への  $\text{C}_{60}$  イオン照射で形成されたイオントラック径のエネルギー依存性。白丸は過去の高エネルギーでの結果で、黒丸は本研究結果[15]。曲線は式(i)によるフィットの結果である。

る。

高崎研のタンデム加速器では+1 価の  $C_{60}$  イオンを最大 6 MeV までしか加速できないので、トラック形成は無理だと思われたが、試しにやってみたところ、図 3(a)に示すようにトラックが観測された[15]。さらにエネルギーを下げてトラックは観測され続け、1 MeV でもトラック径は小さいが辛うじて観測できた[15]。(1 MeV 以下は未だ実験していない。)

$C_{60}$  イオン照射した Si におけるトラック径のイオンエネルギー依存性を図 3(b)に示す。白丸が過去の結果であり、曲線は半導体で確認されている経験則であるトラックの断面積が電子的阻止能  $S_e$  に比例するという関係

$$R^2 \propto S_e - S_{e,th} \quad (i)$$

からデータをフィットしたものである。ただし、 $R$  はトラックの半径、 $S_{e,th}$  はトラック形成の電子的阻止能の閾値である。閾値に相当するエネルギーは 17 MeV で、通常はそれより低エネルギーの照射ではトラックは形成されないはずである。また 6 MeV で形成されるトラック径の方がより高エネルギーである 20 MeV で形成されるトラック径より大きい点も不思議である。憶測であるが、両者のエネルギー域で異なるメカニズムによりトラックが形成されている可能性がある。より詳しい検討は今後の課題である。

#### < 引用文献 >

- [1] C. D'Orleans, J.P. Stoquert, C. Estournès, C. Cerruti, J.J. Grob, J.L. Guille, F. Haas, D. Muller, and M. Richard-Plouet, Phys. Rev. B **67**, 220101 (2003).
- [2] S. Klaumunzer, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **225**, 136 (2004).
- [3] G. Rizza, P.E. Coulon, V. Khomenkov, C. Dufour, I. Monnet, M. Toulemonde, S. Perruchas, T. Gacoin, D. Mailly, X. Lafosse, et al., Phys. Rev. B **86**, 035450 (2012).
- [4] H. Amekura, N. Ishikawa, N. Okubo, M.C. Ridgway, R. Giulian, K. Mitsuishi, Y. Nakayama, Ch. Buchal, S. Mantl, and N. Kishimoto, Phys. Rev. B **83**, 205401 (2011).
- [5] A.A. Leino, O.H. Pakarinen, F. Djurabekova, K. Nordlund, P. Kluth, and M.C. Ridgway, Materials Research Letters **2**, 37 (2014).
- [6] H. Amekura, P. Kluth, P. Mota-Santiago, I. Sahlberg, V. Jantunen, A.A. Leino, H. Vazquez, K. Nordlund, F. Djurabekova, N. Okubo, et al., Phys. Rev. Mater. **2**, 096001 (2018).
- [7] H. Amekura, P. Kluth, P. Mota-Santiago, I. Sahlberg, V. Jantunen, A.A. Leino, H. Vazquez, K. Nordlund, and F. Djurabekova, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **475**, 44 (2020).
- [8] F. Chen, H. Amekura, and Y. Jia, *Ion Irradiation of Dielectrics for Photonic Applications*, (Springer, Singapore, 2020).
- [9] H. Amekura, K. Narumi, A. Chiba, Y. Hirano, K. Yamada, D. Tsuya, S. Yamamoto, N. Okubo, N. Ishikawa, and Y. Saitoh, Scientific Reports **9**, 14980 (2019).
- [10] A. Chiba, A. Usui, Y. Hirano, K. Yamada, K. Narumi, and Y. Saitoh, Quantum Beam Science **4**, 13 (2020).
- [11] H. Amekura, N. Okubo, D. Tsuya, and N. Ishikawa, AIP Advances **7**, 085304 (2017).
- [12] P. Kluth, C.S. Schnohr, O.H. Pakarinen, F. Djurabekova, D.J. Sprouster, R. Giulian, M.C. Ridgway, A.P. Byrne, C. Trautmann, D.J. Cookson, et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 175503 (2008).
- [13] P. Mary, P. Bogdanski, M. Toulemonde, R. Spohr, and J. Vetter, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **62**, 391 (1992).
- [14] B. Canut, N. Bonardi, S.M.M. Ramos, and S. Della-Negra, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **146**, 296 (1998).
- [15] H. Amekura, M. Toulemonde, K. Narumi, R. Li, A. Chiba, Y. Hirano, K. Yamada, S. Yamamoto, N. Ishikawa, N. Okubo, and Y. Saitoh, Scientific Reports **11**, 185 (2021).
- [16] A. Colder, B. Canut, M. Levalois, P. Marie, X. Portier, and S.M.M. Ramos, Journal of Applied Physics **91**, 5853 (2002).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 10件／うちオープンアクセス 4件）

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Amekura H., Narumi K., Chiba A., Hirano Y., Yamada K., Tsuya D., Yamamoto S., Okubo N.,<br>Ishikawa N., Saitoh Y.  | 4. 巻<br>9                   |
| 2. 論文標題<br>C60 ions of 1 MeV are slow but elongate nanoparticles like swift heavy ions of hundreds MeV   | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports   | 6. 最初と最後の頁<br>14980-1 ~ 10  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-019-49645-5   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>Pang Chi, Li Rang, Li Ziqi, Dong Ningning, Amekura Hiroshi, Wang Shixiang, Yu Haohai, Wang<br>Jun, Ren Feng, Ishikawa Norito, Okubo Nariaki, Chen Feng                       | 4. 巻<br>2                   |
| 2. 論文標題<br>Copper Nanoparticles Embedded in Lithium Tantalate Crystals for Multi-GHz Lasers  | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>ACS Applied Nano Materials   | 6. 最初と最後の頁<br>5871 ~ 5877   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acsnm.9b01321  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                |
| 1. 著者名<br>Li Rang, Pang Chi, Li Ziqi, Yang Ming, Amekura Hiroshi, Dong Ningning, Wang Jun, Ren Feng, Wu<br>Qiang, Chen Feng  | 4. 巻<br>14                  |
| 2. 論文標題<br>Fused Silica with Embedded 2D Like Ag Nanoparticle Monolayer: Tunable Saturable Absorbers by<br>Interparticle Spacing Manipulation  | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>Laser & Photonics Reviews  | 6. 最初と最後の頁<br>1900302-1 ~ 7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/lpor.201900302   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                |
| 1. 著者名<br>Li Rang, Narumi Kazumasa, Chiba Atsuya, Hirano Yoshimi, Tsuya Daiju, Yamamoto Shunya, Saitoh<br>Yuichi, Okubo Nariaki, Ishikawa Norito, Pang Chi, Chen Feng, Amekura Hiroshi | 4. 巻<br>31                  |
| 2. 論文標題<br>Matrix-material dependence on the elongation of embedded gold nanoparticles induced by 4 MeV<br>C60 and 200 MeV Xe Ion irradiation  | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>Nanotechnology   | 6. 最初と最後の頁<br>265606-1 ~ 9  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1361-6528/ab7e70   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Amekura H., Kluth P., Mota-Santiago P., Sahlberg I., Jantunen V., Leino A. A., Vazquez H., Nordlund K., Djurabekova F., Okubo N., Ishikawa N. | 4. 巻<br>2                  |
| 2. 論文標題<br>Vaporlike phase of amorphous SiO <sub>2</sub> is not a prerequisite for the core/shell ion tracks or ion shaping                             | 5. 発行年<br>2018年            |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Materials   | 6. 最初と最後の頁<br>096001-1--10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevMaterials.2.096001   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する               |

|  |                          |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Amekura H., Okubo N., Ren F., Ishikawa N.  | 4. 巻<br>124              |
| 2. 論文標題<br>Swift heavy ion irradiation to ZnO nanoparticles: Steep degradation at low fluences and stable tolerance at high fluences | 5. 発行年<br>2018年          |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Applied Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>145901-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5050080  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する             |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Li Rang, Pang Chi, Amekura Hiro, Ren Feng, Hubner Rene, Zhou Shengqiang, Ishikawa Norito, Okubo Nariaki, Chen Feng                               | 4. 巻<br>29                |
| 2. 論文標題<br>Ag nanoparticles embedded in Nd:YAG crystals irradiated with tilted beam of 200 MeV Xe ions: optical dichroism correlated to particle reshaping | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>Nanotechnology   | 6. 最初と最後の頁<br>424001-1-8) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1361-6528/aad75b   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

|  |                        |
|--|------------------------|
| 1. 著者名<br>Amekura H., Toulemonde M., Narumi K., Li R., Chiba A., Hirano Y., Yamada K., Yamamoto S., Ishikawa N., Okubo N., Saitoh Y. | 4. 巻<br>11             |
| 2. 論文標題<br>Ion tracks in silicon formed by much lower energy deposition than the track formation threshold                           | 5. 発行年<br>2021年        |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports   | 6. 最初と最後の頁<br>185-1-11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-020-80360-8   | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する           |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Amekura Hiroshi, Li Rang, Okubo Nariaki, Ishikawa Norito, Chen Feng                   | 4. 巻<br>4             |
| 2. 論文標題<br>Irradiation Effects of Swift Heavy Ions Detected by Refractive Index Depth Profiling | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>Quantum Beam Science  | 6. 最初と最後の頁<br>39-1~11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/qubs4040039   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Amekura H., Kluth P., Mota-Santiago P., Sahlberg I., Jantunen V., Leino A.A., Vazquez H., Nordlund K., Djurabekova F. | 4. 巻<br>475           |
| 2. 論文標題<br>On the mechanism of the shape elongation of embedded nanoparticles   | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms             | 6. 最初と最後の頁<br>44 ~ 48 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.nimb.2020.04.038  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Amekura H., Li R., Okubo N., Ishikawa N., Chen F.   | 4. 巻<br>474           |
| 2. 論文標題<br>Swift heavy ion irradiation to non-amorphizable CaF2 and amorphizable Y3Al5O12 (YAG) crystals            | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms | 6. 最初と最後の頁<br>78 ~ 82 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.nimb.2020.04.023  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Yamada Tomoko, Fukuda Kengo, Semboshi Satoshi, Saitoh Yuichi, Amekura Hiroshi, Iwase Akihiro, Hori Fuminobu | 4. 巻<br>31                |
| 2. 論文標題<br>Control of optical absorption of silica glass by Ag ion implantation and subsequent heavy ion irradiation  | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Nanotechnology  | 6. 最初と最後の頁<br>455706-1-12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1361-6528/abaadf  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |



〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 12件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>H. Amekura   |
| 2. 発表標題<br>Shape Elongation of Embedded Nanoparticles Induced by MeV C60 Ion Irradiation                  |
| 3. 学会等名<br>International Workshop on Radiation Effects of Materials and Devices (REMD-2020) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>雨倉 宏                                |
| 2. 発表標題<br>高速重イオンの代替ビームとしてのMeV C60クラスターイオンビーム  |
| 3. 学会等名<br>日本学術振興会荷電粒子ビームの工業への応用第132委員会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>H. Amekura, T. Aoki, K. Baba, F. Chen, P.K. Chu, W. Ensinger, D. Ila, H. Itoh, N. Kishimoto, T. Kobayashi, S. Nakao, H. Nishikawa, K. Yasuda |
| 2. 発表標題<br>Ion Beam Materials Research in MRS-Japan for Recent Thirty Years   |
| 3. 学会等名<br>日本MRS創立30周年記念特別シンポジウム (招待講演)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>H. Amekura, P. Kluth, P. Mota, I. Sahlberg, V. Jantunen, A. A. Leino, H. Vazquez, K. Nordlund, F. Djurabekova, N. Okubo, N. Ishikawa |
| 2. 発表標題<br>Core/Shell Track Formation and Nanoparticle Elongation in SiO <sub>2</sub> under Swift Heavy Ion Irradiation                         |
| 3. 学会等名<br>20th International Conference on Radiation Effects in Insulators (REI-2019) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>H. Amekura, Rang Li, N. Okubo, N. Ishikawa, and Feng Chen   |
| 2. 発表標題<br>Is a Non-Amorphizable Crystal Better for Optical Applications than an Amorphizable Crystal under Swift Heavy Ion Irradiation? |
| 3. 学会等名<br>23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (IISC-23) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Rang Li, H. Amekura, K. Narumi, A. Chiba, Y. Hirano, D. Tsuya, S. Yamamoto, Feng Chen, N. Okubo, N. Ishikawa, Y. Saitoh |
| 2. 発表標題<br>Matrix-Material Dependence of the Elongation of Embedded Nanoparticles Induced by 4 MeV C60 Ion Irradiation             |
| 3. 学会等名<br>23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (IISC-23) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>H. Amekura, K. Narumi, A. Chiba, Y. Hirano, K. Yamada, D. Tsuya, S. Yamamoto, Rang Li, N. Okubo, N. Ishikawa, Y. Saitoh |
| 2. 発表標題<br>Elongation of Embedded Metal Nanoparticles by MeV C60 Ion Irradiation   |
| 3. 学会等名<br>第29回 日本MRS年次大会 (国際シンポジウム) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>雨倉 宏、Rang Li、鳴海一雅、千葉敦也、平野貴美、山本春也、斎藤勇一 |
| 2. 発表標題<br>MeV C60クラスターイオン照射によるナノ粒子の楕円化          |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2019年秋季大会                       |
| 4. 発表年<br>2019年                                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>雨倉 宏、鳴海一雅、千葉敦也、平野貴美、山本春也、Rang Li、斎藤勇一 |
| 2. 発表標題<br>MeV C60クラスターイオン照射によるナノ粒子の楕円化II        |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2020年年次大会                       |
| 4. 発表年<br>2020年                                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>雨倉 宏、鳴海一雅、千葉敦也、平野貴美、Rang Li、山田圭介、山本春也、斎藤勇一 |
| 2. 発表標題<br>MeV C60+クラスターイオンビームによるナノ粒子の楕円変形            |
| 3. 学会等名<br>高崎サイエンスフェスタ                                |
| 4. 発表年<br>2019年                                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>H. Amekura, Rang Li, Feng Chen, N. Okubo, N. Ishikawa  |
| 2. 発表標題<br>A new type of refractive index modification in YAG crystals induced by swift heavy ion irradiation                               |
| 3. 学会等名<br>10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SWIFT HEAVY IONS IN MATTER & 28TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATOMIC COLLISIONS IN SOLIDS (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K. Fukuda, A. Iwase, F. Hori, Y. Saitoh, S. Semboshi, and H. Amekura   |
| 2. 発表標題<br>Appearance of a new optical absorption peak around 600 nm in silica glass implanted with energetic Ag ions                       |
| 3. 学会等名<br>10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SWIFT HEAVY IONS IN MATTER & 28TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATOMIC COLLISIONS IN SOLIDS (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|         |  |
|---------|--|
| 1. 発表者名 | M. Khoualed, F.Z. Boutebakh, S. Ghemid, H. Amekura, N. Ishikawa, M.S. Aida, N. Attaf, A. Chettah                                 |
| 2. 発表標題 | SWIFT HEAVY IONS EFFECT ON THE OPTICAL, ELECTRICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF CU <sub>2</sub> ZNSNS <sub>2</sub> THIN FILMS    |
| 3. 学会等名 | 10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SWIFT HEAVY IONS IN MATTER & 28TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATOMIC COLLISIONS IN SOLIDS (国際学会) |
| 4. 発表年  | 2018年  |

|         |   |
|---------|---|
| 1. 発表者名 | 雨倉 宏, 石川法人, 大久保成彰                                     |
| 2. 発表標題 | 高速重イオン照射による非晶質SiO <sub>2</sub> への コア/シェル型イオントラックの形成機構 |
| 3. 学会等名 | 日本物理学会2018年秋季大会                                       |
| 4. 発表年  | 2018年   |

|         |   |
|---------|---|
| 1. 発表者名 | H. Amekura, P. Kluth, P. Mota-Santiago, I. Sahlberg, V. Jantunen, A. A. Leino, H. Vazquez, K. Nordlund, F. Djurabekova, N. Okubo, N. Ishikawa |
| 2. 発表標題 | Formation of Core/Shell Ion Tracks in Amorphous SiO <sub>2</sub> under Swift Heavy Ion Irradiation  |
| 3. 学会等名 | 第28回日本MRS年次大会 (国際シンポジウム) (国際学会)   |
| 4. 発表年  | 2018年   |

|         |   |
|---------|---|
| 1. 発表者名 | R. Li, H. Amekura, N. Ishikawa, F. Chen   |
| 2. 発表標題 | Reshaping of Embedded Ag Nanoparticles in Nd:YAG Crystal by Swift Heavy Ion Irradiation |
| 3. 学会等名 | 第28回日本MRS年次大会 (国際シンポジウム) (国際学会)   |
| 4. 発表年  | 2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>M. Khoualed, A. Chettah, S. Ghemid, F.Z. Boutebakh, H. Amekura, N. Ishikawa, M.S.Aida, N. Attaf   |
| 2. 発表標題<br>X-ray diffraction and thermal spike model study of damage induced in Cu <sub>2</sub> ZnSnS <sub>2</sub> thin films irradiated with swift heavy ions |
| 3. 学会等名<br>第28回日本MRS年次大会(国際シンポジウム)(国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>雨倉 宏, 石川法人, 大久保成彰, P. Kluth, F. Djurabekova, K. Nordlund |
| 2. 発表標題<br>高速重イオン照射によるコア・シェル型イオントラックの形成と ナノ粒子の楕円化                   |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2019年年次大会  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>雨倉 宏                                  |
| 2. 発表標題<br>MeV C60イオンビーム照射によるナノ粒子の楕円変形           |
| 3. 学会等名<br>第21回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会(招待講演) |
| 4. 発表年<br>2020年                                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>H. Amekura, R. Li, N. Okubo, N. Ishikawa, F. Chen  |
| 2. 発表標題<br>Swift heavy ion irradiation to non-amorphizable CaF <sub>2</sub> and amorphizable YAG crystals |
| 3. 学会等名<br>30th Annual Meetings of MRS-Japan(国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>雨倉 宏、大久保成彰、石川法人、鳴海一雅、千葉敦也、平野貴美、山田圭介、山本春也、斎藤勇一 |
| 2. 発表標題<br>YAG(Y3Al5O12)およびCaF2結晶の光透過特性への高速重イオン照射効果      |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2020年秋季大会                               |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>雨倉 宏、鳴海一雅、Rang Li、千葉敦也、平野貴美、山田圭介、山本春也、斎藤勇一 |
| 2. 発表標題<br>MeV C60+クラスターイオン照射によるナノ粒子の楕円変形             |
| 3. 学会等名<br>高崎サイエンスフェスタ2020                            |
| 4. 発表年<br>2020年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>雨倉 宏、鳴海一雅、Rang Li、千葉敦也、平野貴美、山田圭介、山本春也、石川法人、大久保成彰、斎藤勇一 |
| 2. 発表標題<br>イオントラック形成閾値よりもだいぶ低いエネルギー付与でのトラック形成                    |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2021年年次大会                                       |
| 4. 発表年<br>2021年  |

〔図書〕 計1件

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>F. Chen, H. Amekura, Y. Jia                             | 4. 発行年<br>2020年 |
| 2. 出版社<br>Springer  | 5. 総ページ数<br>290 |
| 3. 書名<br>Ion Irradiation of Dielectrics for Photonic Applications |                 |

〔産業財産権〕

〔その他〕

NIMS研究者総覧(SAMURAI)  
[http://samurai.nims.go.jp/AMEKURA\\_Hiroshi-e.html](http://samurai.nims.go.jp/AMEKURA_Hiroshi-e.html)

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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                        |                      |  |  |
|---------|--------------------------------|----------------------|--|--|
| オーストラリア | Australian National University |                      |  |  |
| フィンランド  | University of Helsinki         |                      |  |  |
| 中国      | 山東大学                           | 武漢大学                 |  |  |
| アルジェリア  | Universite 20 Aout 1955        |                      |  |  |
| フランス    | CIMAP-GANIL                    | Normandie University |  |  |