

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01830

研究課題名（和文）金ナノロッドの形状と局所原子変位に関する先端電子顕微鏡解析

研究課題名（英文）Advanced electron microscopy of local atomic displacements depending on the outer shape in gold nanorods

研究代表者

松村 晶（Matsumura, Syo）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：60150520

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：様々な光学機能素子としての応用が期待されている金ナノロッドの原子配列構造を最先端の走査透過電子顕微鏡法と分子動力学理論計算の両面から解明した。その結果、ナノ粒子の内部には形状に依存して局所的な歪みが生じており、その歪みは表面曲率の局所的に変化で説明できることが明らかになった。さらに近赤外光のレーザーパルス照射による金ナノロッドの変形と内部の原子配列変化は、吸収エネルギーの熱化によって理解できることを実験的に初めて明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属ナノ粒子の内部に局所的に不均質な格子歪みが発生することを実験的に明らかにし、それが粒子表面の局所的な曲率とその変化で理解できることを示したことは、様々な機能素子としての応用が期待されている金属ナノ粒子の機能を格子歪みによって制御する可能性を拓くことに繋がる。さらにレーザー光照射による構造相転移の基本的な機構も明らかになり、光照射による金属ナノ粒子の状態と機能制御の可能性も示した。

研究成果の概要（英文）：Advanced atomic-resolution electron microscopy including Gaussian process regression for statistical noise reduction has disclosed quantitatively local strain inherent in gold nanoparticles depending on the shape with an improved accuracy about 0.2%. Rod-shaped nanoparticles involve characteristic expansion strain $\sim +1.0\%$ along the long axis within capped tip portions, in addition to surface contraction skin generally existing in nanoparticles. The shape depending inherent local strain has been evidenced by molecular dynamics simulations, and has been attributed to curvature-dependent surface contraction stress. The present results bring hints to nanoscale engineering to optimize the interior strain in nanoparticles by shape control. In addition, the structural and shape transformation of gold nanorods under near-infrared laser illumination has been explained well experimentally in terms of abrupt heating due to the absorbed energy.

研究分野：ナノ材料物性

キーワード：高分解能電子顕微鏡 ナノ粒子 原子変位 格子歪 プラズモニクス レーザー光照射

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 大きさがナノメートルスケールで棒状の形態をした金ナノロッドは、球状の金ナノ粒子が示すような波長 λ が500 nm 付近の可視光域での光吸収に加えて、人体に対して透明な近赤外域($\lambda > 700$ nm)にも強い吸収バンドをもち、後者のピーク波長はロッド形状のアスペクト比($AR = \text{長さ}/\text{径}$)に依存する [1]。さらに、強いレーザー光を照射すると、励起エネルギーの熱化により粒子形状が変化することも知られている。このような特徴的な光学特性や光励起挙動により、ナノロッドは高感度な光計測や記録媒体、生体内での近赤外プローブやがん治療などの機能性素子など様々な分野での応用が期待されている [2]。我々は先の科研費研究によって、九州大学の超高圧電子顕微鏡(HVEM)において、パルスレーザー光($\lambda = 1064, 532$ nm)による励起過程をその場観察するための実験技術開発を進め、個々の金ナノロッドのパルスレーザー光照射による変形過程をその場観察することに成功し、パルス照射毎の個々の粒子の変形挙動を明らかにした [3]。金ナノロッドの変形過程は幾つかの素因子が複雑に関わっていると考えられる。レーザー光照射によるナノロッドの変形挙動については、実験に加えて分子動力学(MD)計算による理論検討も進められて原子レベルでの挙動が理論的に予測されている [4]。しかし、これらの理論計算では全体的なエネルギー付与を仮定し、かつ扱える時間が光励起の初期過程に限られるため、残念ながら実験で観察されるような構造変化や挙動の理解を導くまでに至っていなかった。

(2) 一方、電磁レンズの球面収差補正機能が実用化されて電子顕微鏡の空間分解能が飛躍的に向上し、現在では走査透過電子顕微鏡(STEM)法による原子構造の直接的な観察・解析が広く行われている。我々は、STEM像取得中の試料ドリフトや電子ビーム走査の不安定性に伴う画像の歪みを抑える画像取得法を整備して、高角度散乱環状暗視野(HAADF)像からナノ粒子の原子位置を ± 3 pmの高精度で決定する手法を確立し、表面やナノ粒子内部の微小な原子変位の定量解析に成功した [5]。その結果、金ナノロッドの先端部に長軸方向に外向きの原子変位が生じていることを明らかにしたが、その原因や機構の理解は今後の課題として残されていた。

2. 研究の目的

本研究では、最先端のHAADF-STEM高分解能観察法を駆使して、金ナノロッドの内部原子構造と3次元形態を解析することにより、局所原子変位の発生機構と、パルスレーザー光照射によって励起される原子の動的挙動を明らかにすることを目的とした。具体的には、HAADF-STEM高分解能観察とともにMD計算を併用して、金ナノロッドの形態と内部の原子配列の関係を明らかにする。さらに、 $\lambda = 1064$ nmの近赤外域パルスレーザー光を金ナノロッドに照射して、HAADF-STEM高分解能観察によりその前後での原子構造と3次元形態の変化を明らかにして、レーザー照射に伴う原子挙動を解明する。

3. 研究の方法

(1) 収差補正高分解能電子顕微鏡(JEM-ARM200F ACCELARM)により、金ナノロッドの[100]あるいは $[1\bar{1}0]$ 結晶方位からHAADF-STEM原子分解能像観察を行う。得られたHAADF像中の各原子カラムの像強度に対して、隣接ピークの重なりを考慮した上で二次元ガウス関数をフィッティングすることにより画像のピクセルサイズ未満のサブピクセル精度でもって原子コラム位置を決定する [6]。形状が異なる金ナノロッドについてこのような観察解析を行うことで、原子構造(局所変位、局所格子歪み)と形状の関係を実験的に明らかにする。

(2) (1)の実験解析を行った金ナノロッドと同形のモデル系について、経験的原子間(EAM)ポテンシャル[7]を用いた分子動力学(MD)計算 [8]を行い、平衡状態での原子位置を求める。得られた構造について、まず(1)の実験投影方向の原子コラム平均位置を求めて(1)の実験結果と比較する。さらにロッド径やアスペクト比(AR)、形状を変数として同様のMD計算を行い、局所原子変位の支配因子を解明する。

(3) (1)と同様にして[100]あるいは $[1\bar{1}0]$ 方位から金ナノロッドの原子構造観察を行った後に、一旦電子顕微鏡から試料を外してパルスレーザー光($\lambda = 1064$ nm)を1パルス照射して再度電子顕微鏡内に戻し、同じ金ナノロッドに着目して照射後の観察を行う。ここでは観察時の試料傾斜角度を記録して、レーザー光照射に伴う結晶方位の変化を明らかにする。粒子の立体形状の再構築するために、 $-70 \sim 70$ 度の角度範囲にわたり2~5度ステップで試料傾斜シリーズを撮影し、3次元立体形状を再構築する。

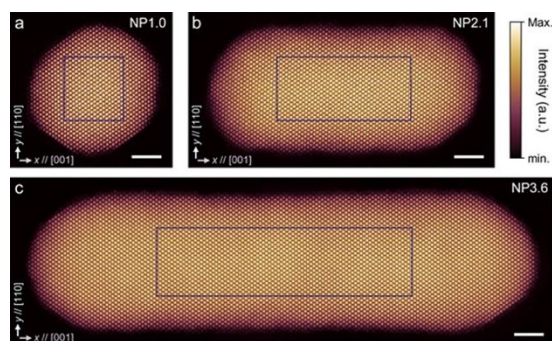


図1: 金ナノ粒子の $[1\bar{1}0]$ 原子分解能HAADF-STEM像。(a) $AR = 1.0$, (b) $AR = 2.1$, (c) $AR = 3.6$ 。右下のスケールは2 nm。

4. 研究成果

(1) 図1に直径が9 nmでアスペクト比 AR が異なる ($AR=1.0, 2.1, 3.6$) 3個の金ナノロッドを $[1\bar{1}0]$ 方位から観察した原子分解能 HAADF-STEM 像を示す。3個ともに内部の全域にわたって明るい点で観察される投影方向の原子コラムが整列しており、長軸が $[001]$ 方向を向いた単結晶状態である。四角で囲んだ中心付近の原子コラム間隔は、バルク状態の金の格子定数 $a=407.84$ pm から求められる値 $d_{[001]}=a, d_{[110]}=288.4$ pm と実験誤差範囲内で一致していた。以下では図の水平方向 $[001]$ を x , 垂直方向 $[110]$ を y とする。

(2) 上記(1)で求めた平均コラム間隔を格子定数とする基準格子点からのずれをそれぞれの原子コラムの変位 $u(x, y)$ として見積もった。これらの値に含まれる実験測定精度内の揺らぎ成分はガウス過程回帰法(GPR) [9] を用いて除去した。得られた $u(x, y)$ の y 方向成分 $u_y(x, y)$ と x 方向成分 $u_x(x, y)$ のマップを図2に示す。ほぼ球状の $AR=1.0$ の粒子では、表面付近のごく薄い領域で u_x, u_y ともに負の変位が生じている。図2(a)を見ると、ロッド ($AR=2.1, 3.6$) の u_y の分布は、上側の領域で $u_y < 0$ 、一方下側では $u_y > 0$ となっており、 y 方向には圧縮傾向の変位が生じている。一方、(b)の2つのロッドの左端の先端部で $u_x < 0$ 、一方右端では $u_x > 0$ の変位が生じている。すなわちロッドの先端部では長軸方向の外向きに原子が変位している。

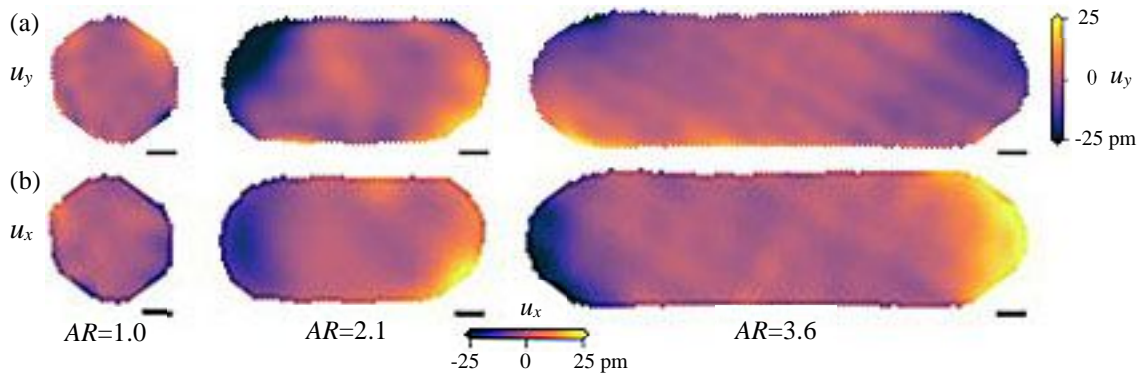


図2: 金ナノ粒子の変位場 u . (a) y 方向成分 u_y , (b) x 方向成分 u_x . 右下のスケールは 2 nm.

(3) 上記(2)で求めた各原子コラムの変位場 $u_x(x, y), u_y(x, y)$ を x, y で微分して局所歪み e_{xx}, e_{yy} を求めた。その結果を図3に示す。図3(a)の e_{yy} を見ると、各粒子ともに上下の最表面付近に負の歪みが生じている。すなわち、 y 方向にはナノ粒子の一般的性質として知られているように、表面での収縮歪みが発生している。一方、図3(b)の e_{xx} では球状に近い $AR=1.0$ の粒子ではほぼ収縮歪みのみであるが、2つのロッドでは先端部の内側に $e_{xx} > 0$ の膨張歪み領域が現れている。

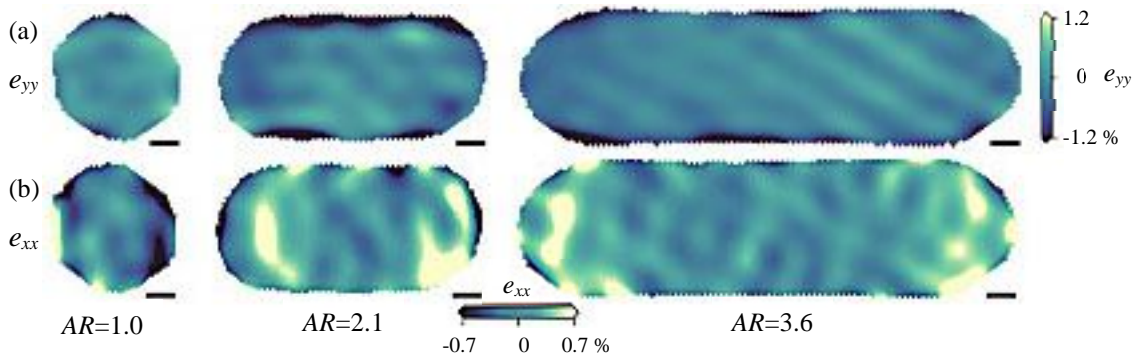


図3: 金ナノ粒子の歪み場 e . (a) y 方向成分 e_{yy} , (b) x 方向成分 e_{xx} . 右下のスケールは 2 nm.

(4) 両端先端部の長軸方向に膨張歪みの成因を解明するために、実験で用いた粒子と同じサイズと形状のモデル粒子と、比較のために同じアスペクト比の回転楕円体形状の粒子について MD 計算によって平衡状態での原子位置を求め、そこから u_y, e_{yy}, u_x, e_{xx} を求めた。 y 方向の変位 u_y, e_{yy} では、ロッド形状、回転楕円体のどちらも図2(a), 図3(a)に見られたように、上部と下部の表面付近に粒子内向きの変位とそれに対応する収縮歪みが発生していた。一方、長軸(x)方向については、図4が示すように、ロッド形状の粒子においてロッド先端部に外向き変位場と膨張歪み場が現れており、実験結果が再現されている。一方、回転楕円体形状の左右先端部には、ロッドとは逆に内向きへの変位と収縮歪みが発生している。この結果からナノ粒子内部の局所歪みが外形に依存することがわかる。

(5) そこで、MD 計算の結果から様々なアスペクト比のロッドの左右の先端半球部のみを切り出して、そこでの歪み場 e_{xx}, e_{yy} を図5で比較する。ここに切り出した箇所の表面は等しい曲率の球

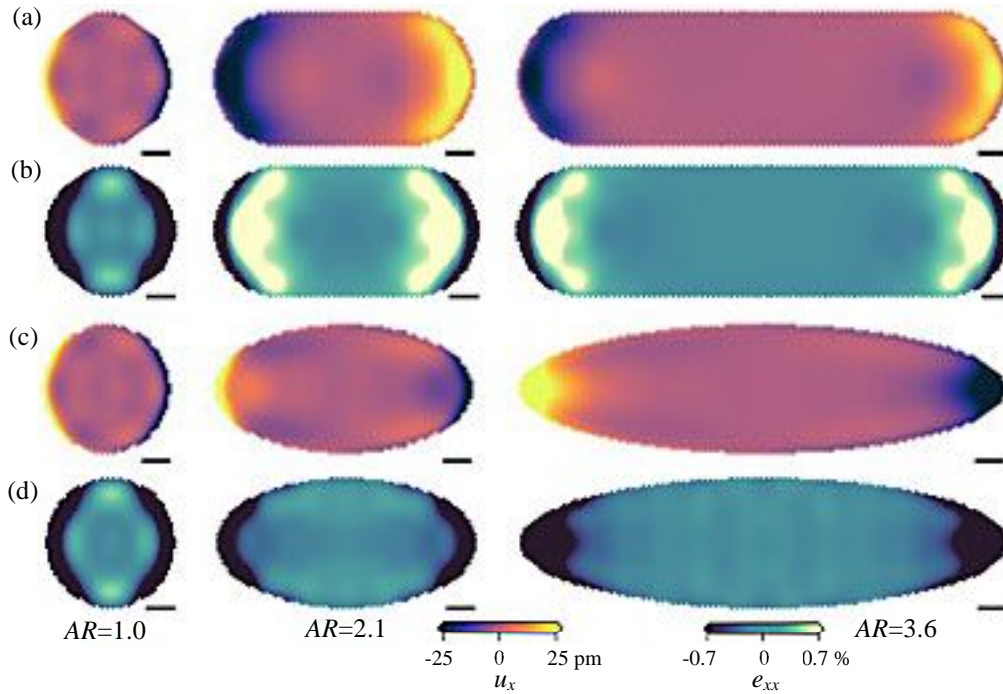


図4： MD 計算で求めたモデル系 (AR=1.0, 2.1, 3.6) の u_x (a, c) と e_{xx} (b, d) .
 ロッド形状(a, b)と回転楕円体形状 (c, d). 右下のスケールは 2 nm.

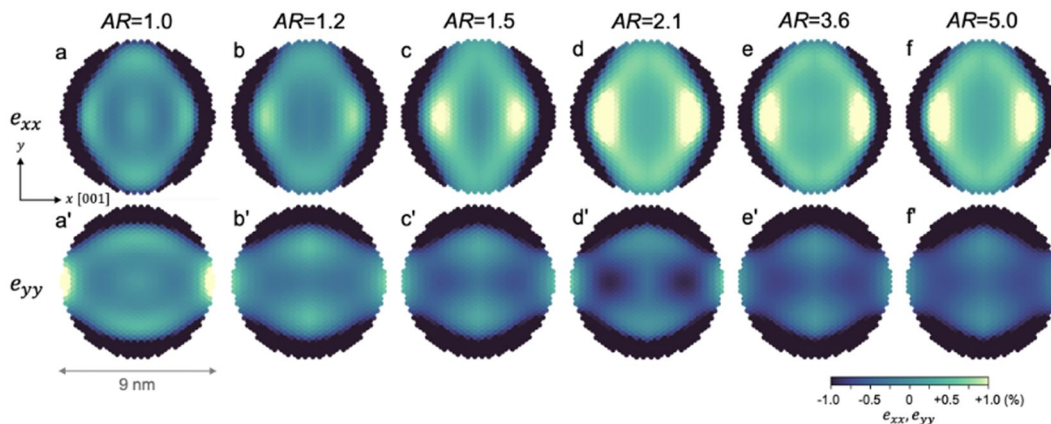


図5： MD 計算で見積もられた金ナノロッドの先端半球部の局所歪み分布の
 アスペクト比 (AR) 依存性 . 上段 : e_{xx} , 下段 : e_{yy} .

面状であり、表面では全てにおいてほぼ均一に等しい圧縮応力がかかっている。均一な圧縮応力が作用した球状 (AR=1.0) の等方弾性体では、内部に均質な圧縮歪みが発生することが知られている。しかし図5のAR=1.0の球では、表面の圧縮歪み場のすぐ内側に弱いながら膨張場が発生している。これは計算に用いたモデル系が結晶対称性を反映した立方対称の非等方弾性を有するために、表面での収縮歪みによってそれと垂直方向に発生した膨張ポアソン歪みである。ARの増加とともに、最先端内部の e_{xx} 膨張場は強くなるとともに拡大して、AR=2.1で最大となった後はほとんど変化しないかわずかに弱くなっている。AR>1のロッドでは左右先端部の半球の間に円筒状の胴体が存在している。円筒部では表面から胴径方向のみに圧縮応力が生じており、x方向にはそのポアソン応力しか発生しない。そのため、ARが1から増加して対面する半球部が離れていくと、そこから直接作用していたx方向の圧縮応力が徐々に弱くなって e_{xx} 膨張場が拡大する。しかし、胴体部がある程度伸長するとそこからのポアソン圧縮応力が僅かながら大きくなるために、 e_{xx} 膨張場はAR=2.1付近で最大となり、それ以上ARが増加すると e_{xx} 膨張場は徐々に弱くなっていくものと考えられる。

以上のように、金属ナノ粒子の内部歪みは粒子形状によって変化することが実験・理論の両面から明らかとなり、その依存性は表面の曲率でほぼ説明できる。

(6)レーザー光パルス ($\lambda=1064$ nm) を照射して金ナノロッドの変形を観察した例を図6に示す。どちらも形状がロッド状から、先端が細く胴体中央部が膨らんだスピンドル状へと変形している。図6(a)(b)では変形前後でロッド内部の結晶方位とコントラストはほとんど変化しておらず単結晶状態を維持している。照射による加熱によって表面積 (表面エネルギー) を減らすように表面原子が拡散して変形したものと考察される。一方、図6(c)(d)ではロッド内部に線状の境界コント

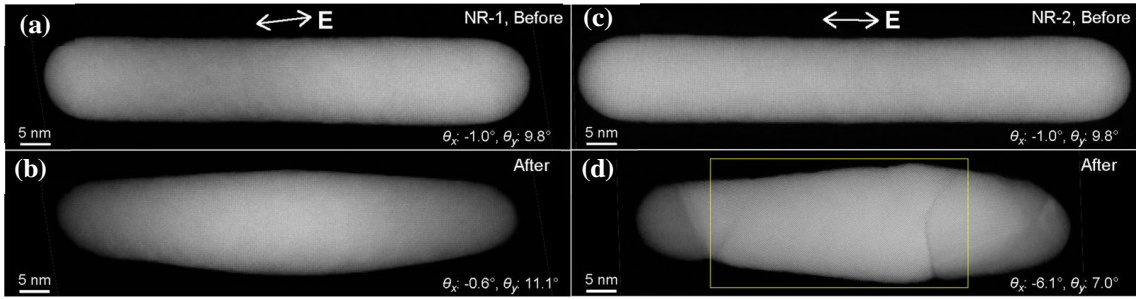


図6： レーザー光パルス照射前後の金ナノロッドのHAADF-STEM像．(a,b)と(c,d)はそれぞれ同じ粒子．各像の右下の数値は観察時のゴニオメーター傾斜角度．

ラストや暗い領域が見られ、局所的に結晶方位が異なるドメインに分割されている。(d)の粒子の各ドメインについて結晶方位を決定したところ、初期状態の方位を維持した領域は見当たらず、内部の原子は全て移動して結晶方位が変化していた。結晶方位とドメイン界面の性格を決定した結果を図7に示す。多くが $3\{111\}$ 双晶の界面で分割されており、一部は $\Sigma 9$ 、あるいは $\Sigma 11$ 界面である。ロッドの右端の領域は $\{111\}$ 5重双晶構造を形成しており、この部分は一旦溶融して再結晶したことが示唆される。

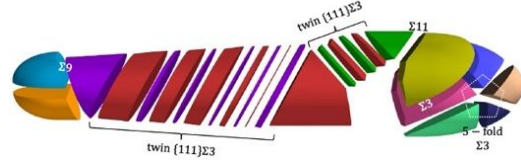


図7： 図7(d)のナノロッドの結晶方位ドメインと界面．ドメインの結晶方位を色で分類しており、同色のドメインは同じ方位にある．

(7) 同じレーザーパルス光を照射した試料の中には図8(a)(b)のように、内部が $\{111\}$ 双晶関係にある2つの領域に分割されて、外形がほぼ球状に変形したものも見られた。この粒子の立体形状を電子線トモグラフィーで解析したところ、図8(c)(d)(e)(f)からわかるように支持膜との接触面が平面化していることがわかり、レーザーパルス光を照射によって全体が溶融したことが示唆された。

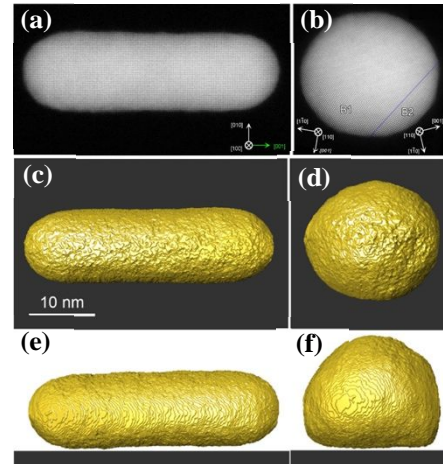


図8： レーザーパルス照射に伴う状態変化．照射前(a,c,e), 照射後(b,d,f)．HAADF-STEM像(a,b), トモグラフィー立体構築像：支持膜垂直方向(c,d), 支持膜平行方向(e,f)．

(8) 図6, 8に示した3個の金ナノロッドが吸収したエネルギーを、照射レーザー光の偏光方向とロッドの向きとの関係並びにARを考慮して見積り[10]、熱平衡での温度上昇[11]と比較した結果を図10に示す。図6(a)のナノロッドは融点より低い700 K程度までしか加熱されていないことが示され、単結晶状態が維持されたことが理解できる。一方、図6(c)と図8(a)の粒子は、融点を超えてそれぞれ2700 K, 3500 K以上まで瞬間的に加熱されて溶融した可能性があり、変形とともに内部の原子配置が全て変化したことも説明できる。

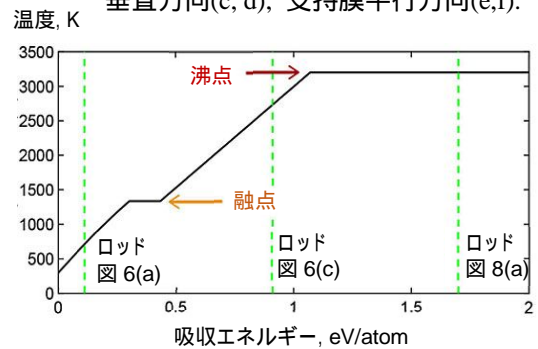


図10： ナノロッドの吸収エネルギーと平衡温度曲線．

<参考文献>

- [1] S. Link, M.B. Mohamed, M.A. El-Sayed, *J. Phys. Chem. B*, **103**, 3073-3077 (1999).
- [2] P.K. Jain, X. Huang, I.H. El-Sayed, M.A. El-Sayed, *Acc. Chem. Res.*, **41**, 1578-1586 (2008).
- [3] N. Sumimoto, K. Nakao, T. Yamamoto, K. Yasuda, S. Matsumura, Y. Niidome, *Microscopy*, **63**, 261-268 (2014).
- [4] Y. Gan, S. Jiang, *J. Appl. Phys.*, **113**, 073507-1-5, (2013).
- [5] K. Aso, K. Shigematsu, T. Yamamoto, S. Matsumura, *Microscopy*, **65**, 391-399 (2016).
- [6] A. de Backer, K.H.W. van den Bos, W. van den Broek, J. Sijbers, S. van Aert, *Ultramicroscopy*, **171**, 104-116 (2016).
- [7] G. P. P. Pun, unpublished work (the EAM Potential Is Available on the Website of Interatomic Potentials Repository)
- [8] S. Plimpton, *J. Comput. Phys.*, **117**, 1-19 (1995).
- [9] C. E. Rasmussen, C. K. I. Williams, *Gaussian Processes for Machine Learning*. Vol. 14 (2004).
- [10] Y. Mansour, Y. Battie, A. En Naciri, N. Chaoui, *Nanoscale*, **11**, 11679-11686, (2019).
- [11] J.W. Arblaster, *J. Phase Equilibria Diffus.*, **37**, 229-245 (2016).

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 Kohei Aso, Jens Maeba, Tomokazu Yamamoto, Syo Matsumura	4. 巻 25 (Suppl.2)
2. 論文標題 Lattice tetragonality and local strain depending on shape of gold nanoparticles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 2122-2123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927619011346	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 該当する
1. 著者名 Aso Kohei, Shigematsu Koji, Yamamoto Tomokazu, Matsumura Syo	4. 巻 68
2. 論文標題 Sequential transmission electron microscopy observation of the shape change of gold nanorods under pulsed laser light irradiation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 174 ~ 180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfy136	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 -
1. 著者名 山本知一, 重松晃次, 麻生浩平, 松村 晶	4. 巻 53
2. 論文標題 ナノ粒子の電子線トモグラフィーの進展	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 顕微鏡	6. 最初と最後の頁 108 ~ 112
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 Aso Kohei, Shigematsu Koji, Yamamoto Tomokazu, Yasuda Kazuhiro, Matsumura Syo	4. 巻 42
2. 論文標題 Precise atomic structure refinement by drift-compensated HAADF-STEM	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Annual Reports of the Ultramicroscopy Research Center	6. 最初と最後の頁 12 ~ 15
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 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 麻生浩平, Jens Maebe, 山本知一, 松村 晶
2. 発表標題 金ナノ粒子の形状に由来する正方晶化と局所格子ひずみ
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第75回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松村 晶, 鳥山 誉亮, 山本 知一
2. 発表標題 新たな触媒機能開発を目指した先端電子顕微鏡状態解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第75回学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Aso, Jens Maebe, Tomokazu Yamamoto, Syo Matsumura
2. 発表標題 Lattice tetragonality and local strain depending on shape of gold nanoparticles
3. 学会等名 Microscopy and Microanalysis 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Syo Matsumura, Kohei Aso, Jens Maebe, Tomokazu Yamamoto
2. 発表標題 HAADF-STEM Study of Local Lattice Strain in Gold Nanorods
3. 学会等名 Microscopy Conference 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Syo Matsumura, Kohei Aso, Tomokazu Yamamoto
2 . 発表標題 HAADF-STEM Study of Local Lattice Strain in Gold Nanoparticles
3 . 学会等名 International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Matsumura, T. Yamamoto, X.Q. Tran, Y. Kohno, S. Yoshioka
2 . 発表標題 Atomic Characterization of Metallic Nanoparticles and Catalysts by Scanning Transmission Electron Microscopy
3 . 学会等名 Japan-Germany Joint Symposium on Advanced Catalytic Materials and Characterization (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Matsumura, K. Aso, T. Yamamoto, K. Shigematsu
2 . 発表標題 Recent Advancement in Three-dimensional Imaging of Metallic Nanoparticles by Electron Tomography
3 . 学会等名 12th Japanese-Polish Joint Seminar on Micro and Nano Analysis (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Aso, J. Maebe, T. Yamamoto and S. Matsumura
2 . 発表標題 High-precision detection of lattice strain in gold nanoparticles
3 . 学会等名 12th Japanese-Polish Joint Seminar on Micro and Nano Analysis (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Aso, J. Maebe, T. Yamamoto, K. Shigematsu, S. Matsumura
2. 発表標題 Local lattice strain in gold nanoparticles depending on their outer shapes
3. 学会等名 19th International Microscopy Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Aso, J. Maebe, T. Yamamoto and S. Matsumura
2. 発表標題 Precise measurement of lattice strain in gold nanoparticles
3. 学会等名 The 6th UK-Japan Engineering Education League Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松村 晶
2. 発表標題 収差補正高分解能電子顕微鏡の原理と触媒研究への可能性
3. 学会等名 第39回触媒学会若手会「夏の研修会」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松村 晶
2. 発表標題 金属ナノ粒子の原子状態解析の進展と新たな触媒機能の開発
3. 学会等名 Energy Week 2019, 「グリーンテクノロジーと先端計測科学の交差点」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麻生浩平、Jens Maebe、山本知一、重松晃次、松村 晶
2. 発表標題 金ナノ粒子の形状異方性に由来する局所格子ひずみの検出
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第74回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 麻生浩平、Jens Maebe、山本知一、重松晃次、松村 晶
2. 発表標題 レーザー光照射で金ナノロッド内部に形成された双晶構造の解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第74回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 麻生浩平、Jens Maebe、山本知一、重松晃次、松村 晶
2. 発表標題 金ナノ粒子の異形状に由来する格子ひずみ
3. 学会等名 第60回 日本顕微鏡学会 九州支部集会・学術講演会
4. 発表年 2018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
研究協力者	重松 晃次 (Koji Shigematsu)	九州大学・超顕微解析研究センター・学術研究員 (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	マエベ ジェンス (Maebe Jens)	ヘント大学・Faculty of Sciences・PhD candidate	
連携研究者	山本 知一 (Yamamoto Tomokazu) (60871259)	九州大学・超顕微解析研究センター・助教 (17102)	
連携研究者	麻生 浩平 (Aso Kohei) (20880008)	北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス系応用物理学領域・助教 (13302)	

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1件

国際研究集会	開催年 null年
--------	--------------

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		
ベルギー	Ghent University		