

# 高感度電子線ホログラフィーによる 触媒ナノ粒子の電荷量の計測

麻生亮太郎<sup>1</sup>\* 村上恭和<sup>2</sup>\* 谷垣俊明<sup>\*\*</sup>

## 1. はじめに

金属ナノ粒子触媒は、排ガス触媒や化成品製造など、産業的に広く利用されている重要な材料である<sup>(1)</sup>。例えば、カーボンニュートラルの実現を促す水素の合成・利用や二酸化炭素の有用物質への変換、食料増産に不可欠なアンモニアの合成、一酸化炭素や窒素酸化物といった有害ガスの無害化など、様々な化学反応を促す触媒として使用される。高効率・長寿命な触媒の開発を目指して、世界中の研究者がしのぎを削っている熾烈な研究分野である。

金属ナノ粒子触媒は、担体と呼ばれる金属酸化物や炭素材料の表面に、様々な金属のナノ粒子が担持(付着)している構造をもつ。金属ナノ粒子触媒の特性に影響を与える因子として、金属ナノ粒子の種類や形状(粒子サイズや露出結晶面など)、担体の種類や表面結晶面、さらに、金属ナノ粒子と担体との間の電荷移動が知られている<sup>(2)(3)</sup>。この電荷移動とは、ナノ粒子と担体の界面において、担体からナノ粒子へ、またはナノ粒子から担体へ電子がわずかに移動することを意味する。これは、ナノ粒子の帯電状態に変化をもたらし、結果的に触媒活性に大きく影響する。

このように、触媒反応に寄与する金属ナノ粒子の帯電状態の様子を明らかにすることは、触媒材料の研究開発において重要な課題である。これまで、X線光電子分光法やプローブ顕微鏡法など、様々な手法で金属ナノ粒子の電荷計測が試みられてきた<sup>(4)(5)</sup>。しかし、想定される金属ナノ粒子の電荷量は非常に小さく、ナノ粒子1個1個に対して電荷計測と構造観察を同時に行うことは実験的に困難であった。この課題に対して、透過電子顕微鏡法(TEM: Transmission Elec-

tron Microscopy)の一種であり、物質の微細な電位分布を観察できる「電子線ホログラフィー」が重要視されている。電子線ホログラフィーは、試料を透過した電子波面の変化(位相)、つまり波である電子の進み具合の変化を計測することで、ナノスケールの局所領域の電場や磁場の分布を観察することができる。

本稿では、著者らが最近発表した、電子線ホログラフィーの高感度化による触媒ナノ粒子の電荷状態の計測の成果を解説する<sup>(6)</sup>。代表的な金属ナノ粒子触媒として、酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)上に担持した白金(Pt)ナノ粒子(Pt/TiO<sub>2</sub>触媒)に注目し、その電荷状態の解析を進めた。

## 2. 電子線ホログラフィーの高感度化

電子は、光やX線と同じように、波としての性質をもっている。電子線ホログラフィーは、試料を透過した電子の波の位相の変化、つまり波である電子の進み具合の変化を計測することで、触媒をはじめとする試料の電場や磁場の分布を明らかにできる。試料を透過した波と、試料のない真空領域を通過した波を重ね合わせることで、ホログラムと呼ばれる電子の干渉縞パターンを得ることができ、このホログラムから位相像を再生することで、電場や磁場の情報を観察することができる。

日本は日立製作所・外村等のパイオニア的な研究以来、電子線ホログラフィーについて、世界的なリーダーシップを発揮してきた。2014年に日立製作所は「最先端研究開発支援プログラム(FIRST)」の助成により、加速電圧1.2 MV(120万ボルト)の「原子分解能・ホログラフィー電子顕微鏡」を開発した(図1)<sup>(7)</sup>。本装置は、世界で唯一、超高压電子顕微

\*九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門；1)准教授 2)主幹教授(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

\*\*株式会社日立製作所研究開発グループ；主任研究員

Charge Analysis in a Catalytic Nanoparticle Using High Sensitivity Electron Holography; Ryotaro Aso\*, Yasukazu Murakami\* and Toshiaki Tanigaki\*\* (\*Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University; Fukuoka. \*\*Research and Development Group, Hitachi, Ltd., Hatoyama, Saitama)

Keywords: *electron holography, transmission electron microscopy, nanoparticle catalysts, charges, metal-support interaction, denoising*

2023年11月6日受理[doi:10.2320/materia.63.95]



図1 1.2 MV 原子分解能・ホログラフィー電子顕微鏡<sup>(7)</sup>.  
(オンラインカラー)

鏡に収差補正器を搭載した電子顕微鏡であり、ホログラムの像質に深く関係する「電子波の平行性」について世界最高峰の性能を有している。2015年には、世界最高分解能の43 pm を達成し、GaN 中の Ga と Ga が 44 pm で並ぶ様子を捉え<sup>(8)</sup>、2017年には磁性多層膜の磁場を世界で初めて1 nm 以下となる0.67 nm の分解能で観察することに成功している<sup>(9)</sup>。

このように、電子線ホログラフィーは、量子力学・基礎物理学に関わる重要な効果の究明のほか、電池、磁石、半導体デバイスにおける電場・磁場の観察など、材料工学への応用展開も進んでいる。化学の分野でも、触媒ナノ粒子をはじめとした様々な機能性ナノ材料への技術展開に期待が持たれていた<sup>(10)–(12)</sup>。しかし、触媒ナノ粒子が示す極微弱な電位分布・帯電を計測するためには、電子線ホログラフィーの位相計測精度を従来よりも1桁高めるといふ、技術上の大きな飛躍が必要であった。

本研究では、電子線ホログラフィーの位相計測精度が、画像データであるホログラムの像質に強く依存すること<sup>(13)</sup>に注目し、その像質改善と微弱情報の抽出を究めた。ホログラムの像質改善により、位相計測精度を1桁高めることは、長年にわたる挑戦的な課題であった。例えば、測定時間(電子線の照射量)に注目した場合、位相計測精度を1桁高めるためには、照射時間を従来よりも100倍長くする必要がある。しかし、長時間の電子線照射は試料の変質・損傷を招くため(電子線照射効果)、観察に使用可能な電子数には限界があり、目標とする位相計測精度の達成には至らなかった。

この位相計測精度の限界を突破するため、筆者らは、JST CREST(情報計測領域)の研究プロジェクトの支援のもと、

「電子線ホログラフィー」と「情報科学・データ科学」の融合により、様々な基盤技術を整備した<sup>(14)</sup>。具体的には、ホログラムの像質向上のために、複数画像データの積算平均化処理技術を開発した。また、画像データにおける微弱な信号を除くことなくノイズを低減するため、ウェーブレット隠れマルコフモデルという統計数理的な手法を開発した。「ウェーブレット隠れマルコフモデルを用いた電子線ホログラムのノイズ除去技術」の詳細については、Microscopy 誌に発表したオリジナル論文<sup>(15)</sup>や顕微鏡誌における解説記事<sup>(16)</sup>を参照していただきたい。また、ノイズ除去のコードも公開されている<sup>(17)</sup>。

本研究では、上述した要素基盤技術の開発をもとに、ホログラムの像質に深く関係する「電子波の干渉性・平行性」について世界最高峰の性能を有する日立製作所の1.2 MV 原子分解能・ホログラフィー電子顕微鏡を用いるとともに、複数画像データの積算平均化処理技術、ならびにウェーブレット隠れマルコフモデルに基づいた新開発のノイズ除去技術によるノイズと微弱信号の正確な分離など、新たな情報科学的手法を活用した。このような計測と情報の先端技術を融合することで、ハードウェアの開発・活用に基づく従来のアプローチでは到達できなかった超高感度、すなわち「電子線ホログラフィーの位相計測精度を従来よりも1桁高める」という技術目標が初めて達成された。次節から、開発したこれらの基盤技術を実際の金属ナノ粒子触媒の観察に適用した結果を示していく。

### 3. 電子線ホログラフィーによる電荷計測

本研究では、代表的な金属ナノ粒子触媒である、酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )上に担持した白金(Pt)ナノ粒子(Pt/ $\text{TiO}_2$ 触媒)を観測対象試料として採用した。Pt/ $\text{TiO}_2$ 触媒試料は、光還元法により、Ptナノ粒子を $\text{TiO}_2$ (110)面に担持させて作製した<sup>(18)</sup>。Ptナノ粒子の粒子サイズや結晶構造、担持された界面構造などは、高分解能走査型透過電子顕微鏡法(STEM: Scanning Transmission Electron Microscopy)を用いて評価した。図2に示すように、明視野(BF: Bright-Field)像、ならびに高角度環状暗視野(HAADF: High-angle annular dark-field)像から、結晶性のPtナノ粒子が $\text{TiO}_2$ の(110)面に担持されている様子が確認できる。Ptナノ粒子のサイズは、直径10 nm程度であり、単独で $\text{TiO}_2$ の淵に担持されているものを観測対象領域として選択した。

金属ナノ粒子触媒に対する電子線ホログラフィー実験の模式図を図3に示す。酸化物担体の淵で真空部分に突き出した金属ナノ粒子を用いることで、試料を透過した波(物体波)と真空を通過した波(参照波)を干渉させてホログラムを取得することができる。このホログラムから位相像を再生することで、位相変化の原因となる電位の分布を観察することができる。本研究では、ナノ粒子の帯電の様子を最も直接的に評価できる、粒子の外側、つまり真空領域の位相変化を観察した。粒子の内部では、ナノ粒子の帯電とは直接関係のない付

加的位相変化(電子回折に伴う幾何学的な位相変化等)が重畳しデータ解析が複雑となるが、真空領域では、ナノ粒子の帯電に関わる純粋な位相成分を観察できる。これも、超高感度な解析を達成するための工夫である。

Pt/TiO<sub>2</sub> 触媒に対する電子線ホログラフィーの結果を図 4

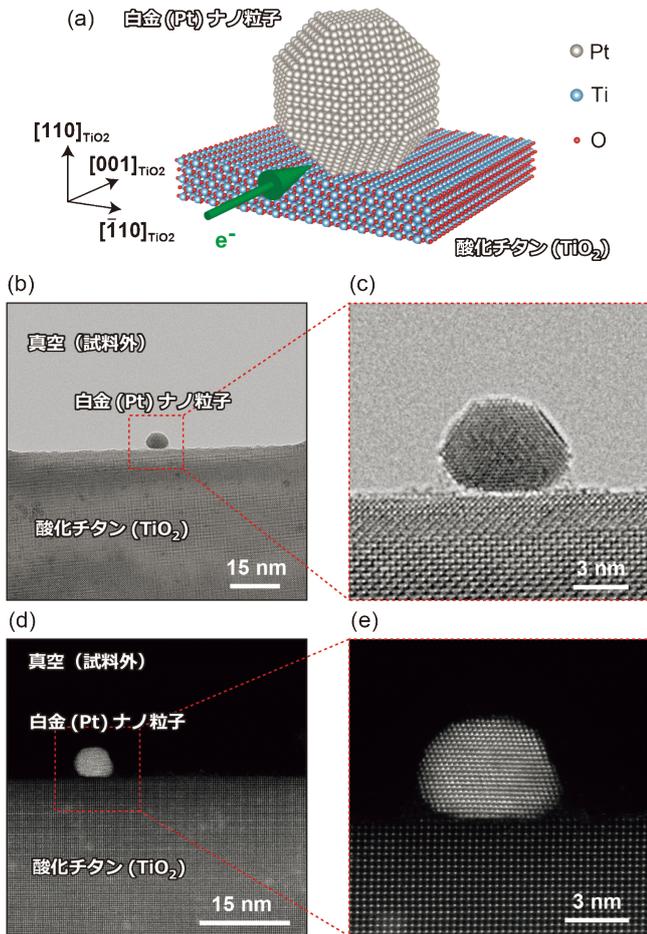


図 2 Pt/TiO<sub>2</sub> 触媒の結晶構造<sup>(6)</sup>. (a) 結晶構造模式図. (b), (c) BF-STEM 像. (d), (e) HAADF-STEM 像. (オンラインカラー)

に示す。生データであるホログラム画像中では明瞭な干渉縞が観察されている。干渉縞の幅は 0.048 nm であり、位相解析における空間分解能は 0.16 nm となり、同時に原子配列構造の観察も可能となる。このホログラム画像をもとに位相像を再生する際に、Pt ナノ粒子の微弱な電位を反映するナノ粒子周りの位相分布を可視化するために、真空領域の階調を強調して表示している。しかし、図 4(b)の従来の汎用的な手法で再生した位相像はノイズが大きく不明瞭であり、真空領域での位相変化の解析が困難であった。そこで、図 4(c)のように、連続で取得したホログラム画像を積算して信号強度の向上を図り、さらにホログラム取得時に生じる画像の歪みを除去した。さらに、ウェーブレット隠れマルコフモデルを用いて、画像データにおける微弱な信号を除くことなくノイズを低減した。この高感度化された電子線ホログラフィー技術を用いることで、図 4(d)のように、真空領域での位相変化の様子が明瞭になった。ここでは、位相の増減を色の変化で表しており、位相が大きいと明るく、小さいと暗く表示されている。このデータでは、真空領域で、白金ナノ粒子に近づくほど位相変化量がマイナス側に変化していく。これは、この白金ナノ粒子が負に帯電していることを意味している。

この高感度化した電子線ホログラフィーを用いて、ナノ粒子 1 個 1 個に対して位相計測を行った。ここでは、代表的な 2 つの異なる粒子の計測結果を示す。図 5 は、ホログラムから再生した振幅像と位相像を示している。振幅像は TEM 像に対応しており、Pt ナノ粒子の結晶構造が確認できる。位相像の真空領域を見てみると、図 5(b)では負の位相変化が観察され、Pt ナノ粒子が負に帯電していることを示している。

ここで、Pt ナノ粒子の電荷量を見積もるために、金属ナノ粒子中心に点電荷  $Q$  があると仮定して、ナノ粒子周囲の電位分布を理論式を用いて計算した<sup>(19)</sup>。実験で得られたナノ粒子周囲の電位分布を理論式でフィッティングすることで、数値解析的に電荷量  $Q$  を見積もった。素電荷を  $q_e$  として、ナノ粒子-担体界面に対して  $-45$  度、 $0$  度、 $+45$  度の計

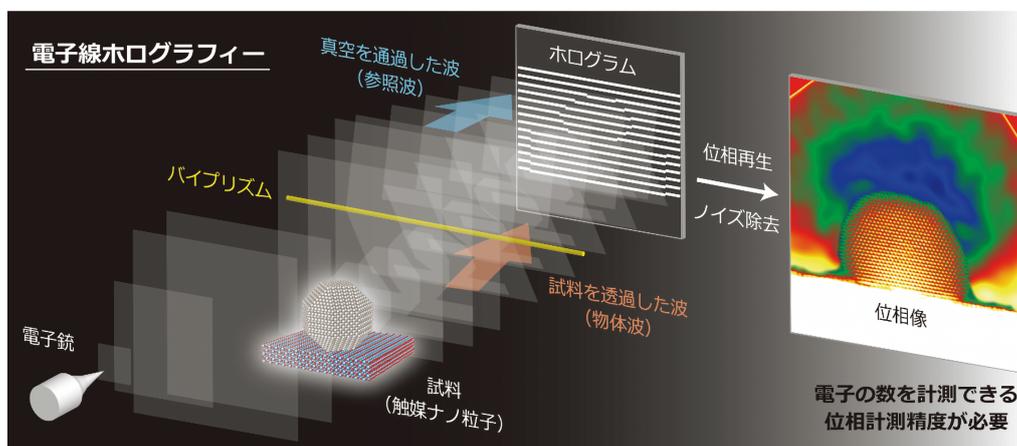


図 3 触媒ナノ粒子に対する電子線ホログラフィー実験の模式図<sup>(6)</sup>. (オンラインカラー)

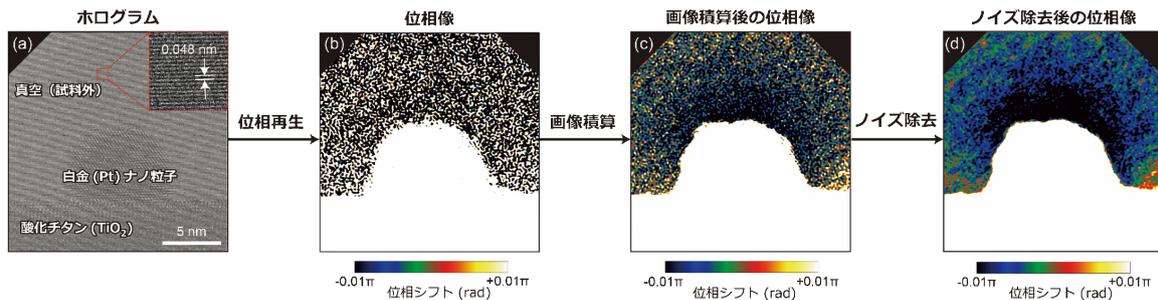


図4 Pt/TiO<sub>2</sub>触媒に対する電子線ホログラフィーの解析結果<sup>(6)</sup>. (a) ホログラム画像. (b) ホログラム画像から再生された位相像. (c) 積算した後の位相像. (d) ノイズ除去後の位相像.

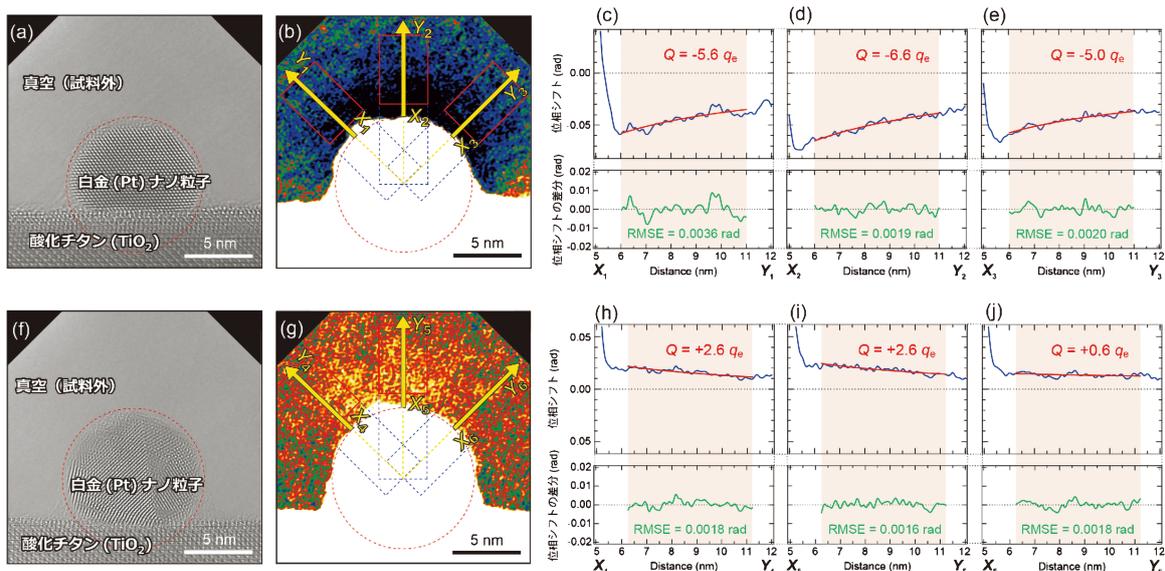


図5 Pt ナノ粒子の電荷量計測<sup>(6)</sup>. (a) 再生された振幅像. (b) ノイズ除去後の位相像. (c), (d), (e) (b)における  $X_1$ - $Y_1$ ,  $X_2$ - $Y_2$ ,  $X_3$ - $Y_3$  に沿った位相シフトの変化とフィッティングによる最小二乗平均誤差. (f) 再生された振幅像. (g) ノイズ除去後の位相像. (h), (i), (j) (g)における  $X_1$ - $Y_1$ ,  $X_2$ - $Y_2$ ,  $X_3$ - $Y_3$  に沿った位相シフトの変化とフィッティングによる最小二乗平均誤差.

3方向に対して電荷量を見積もると、それぞれ  $-5.6 q_e$ ,  $-6.6 q_e$ ,  $-5.0 q_e$  となり、平均  $-5.7 q_e$  の電荷量が算出された。フィッティングにおける二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Squared Error) は、 $3.6 \times 10^{-3}$  rad 以下となり、十分な位相計測精度を達成できている。

図5(g)についても同様の解析を行うと、電荷量はそれぞれ  $+2.6 q_e$ ,  $+2.6 q_e$ ,  $+0.6 q_e$  となり、平均  $+1.9 q_e$  の電荷量が算出された。このように、同じ TiO<sub>2</sub> 担体に担持されている Pt ナノ粒子において、粒子によって正にも負にも帯電し得ることがわかった。TiO<sub>2</sub> に担持した Pt ナノ粒子の電荷量を、電子6個の負電荷、電子2個の正電荷に相当するなど、まさに注目するナノ粒子1個1個に対して電荷量を決めることができた。

話は少し変わるが、ここで電子顕微鏡観察において重要となる電子線照射効果について実験的に対処した内容を紹介する。試料に電子線が照射されると、二次電子が放出される。前節でも述べたが、位相計測精度を高めるために照射時間を長くする場合、この二次電子放出や試料変質といったアーテ

ィファクトが生じてしまう。ここで、電子線照射の影響を調査し、電子線照射の影響を最小限にするためにホログラムの取得手順を工夫した。

まず、本研究におけるホログラムデータの取得手順を図6に示す。1枚当たり1秒間電子線照射して連続40枚のホログラム画像を取得し、その後に試料のない領域で参照ホログラムを30枚取得する。これを4回繰り返して電子線照射時間に関する4つのホログラムデータを得た。それぞれから位相像を再生して、Ptナノ粒子直上の真空領域の位相変化を追跡した。図7(a)は正帯電したPtナノ粒子、図7(f)は負帯電したPtナノ粒子の位相変化を示している。どちらの粒子においても、電子線照射時間が増えるにつれて位相が正方向へ変化していく様子がわかる。これは、TiO<sub>2</sub> 結晶の変質(平均内部ポテンシャルの変化)が主要な要因と考えられる。実際に、図7(k)はTiO<sub>2</sub> のみの位相シフトを表しているが、電子線照射時間が増えるにつれて位相が負方向へ変化しており、確かに平均内部ポテンシャル(静電ポテンシャル)が減少していることを確認できる。電子線照射に対する位相変化量は、

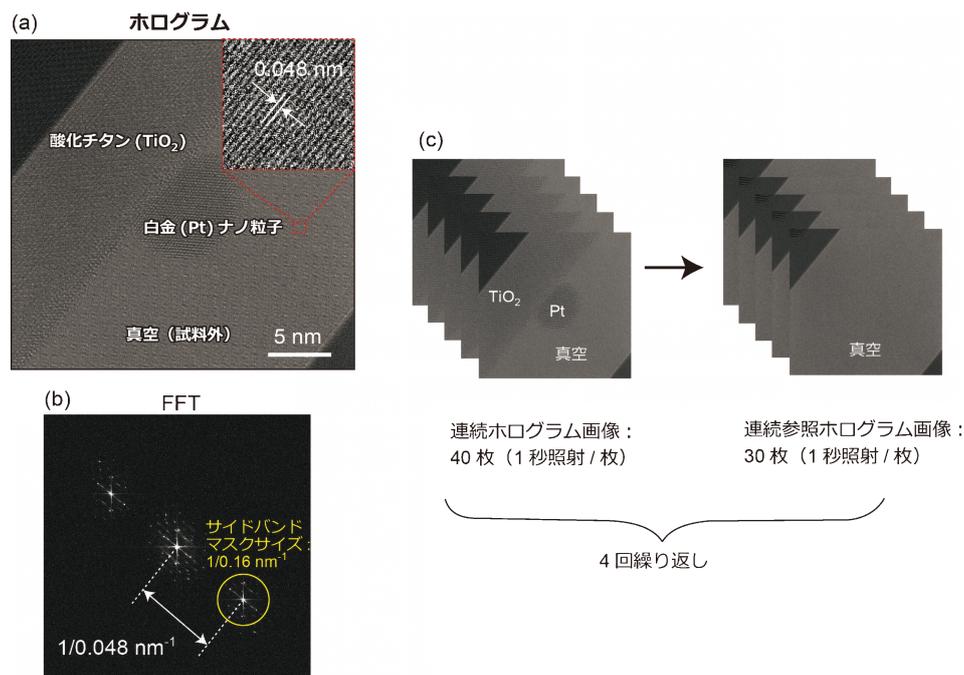


図6 電子線ホログラムの取得方法<sup>(6)</sup>. (a) ホログラム画像. (b) 高速フーリエ変換像. (c) 連続ホログラム画像データの取得手順.

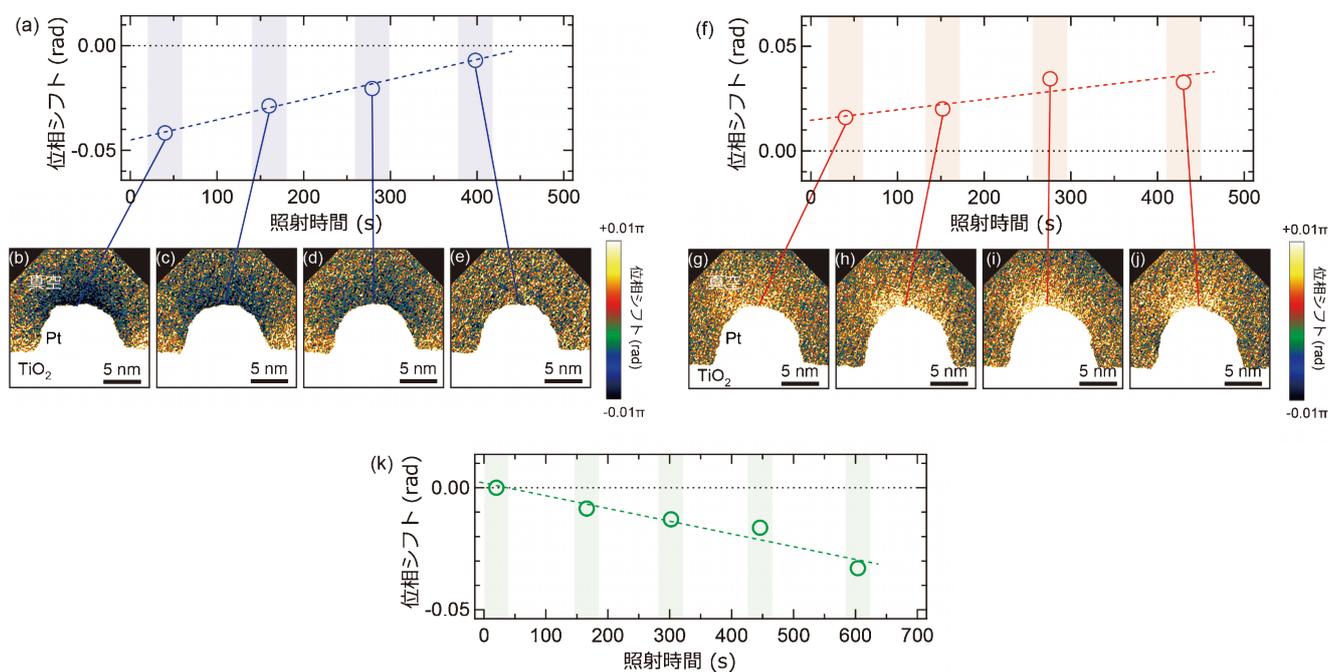


図7 電子線照射時間に対する位相変化<sup>(6)</sup>. (a) 負帯電のPtナノ粒子の位相シフト変化. (b)–(e) (a)の青丸に対応する位相像. (f) 正帯電のPtナノ粒子の位相シフト変化. (g)–(j) (f)の青丸に対応する位相像. (k) TiO<sub>2</sub>の位相シフト変化.

図7(a)で $9.4 \times 10^{-5}$  rad/s, 図7(f)で $4.9 \times 10^{-5}$  rad/sであり, はじめの40秒間の位相変化はそれぞれ0.0038 rad, 0.0020 radとなり, 本研究における測定誤差程度の位相変化である. そのため, 本研究では, はじめの40枚のホログラム画像のみを用いて電荷量計測を行うことで, 電子線照射による位相変化の影響を最小限にした.

#### 4. 電荷状態の評価

前節で示したように, TiO<sub>2</sub>上のPtナノ粒子が, ナノ粒子毎に異なる電荷の符号と電荷量を示したことは注目する結果である. この要因について, 結晶構造から検討した結果を示す. ここでは, 5つの異なるPtナノ粒子に対して, 帯

電荷量の計測を行った結果を図8に示す。ただし、すべてTiO<sub>2</sub>の(110)面上に担持されており、粒子径はおよそ10 nm程度である。図8(a)–(e)はナノ粒子の形態を表しており、色の違いは、Ptナノ粒子の結晶の歪み方、つまり、本来予想されるバルクのPtナノ粒子の構造からのズレ具合を示している。例えば、図8(b)(c)のナノ粒子は全面が緑で、バルク白金がもつ面心立方格子(fcc: face-centered cubic)構造を示している。一方で、図8(b)(d)の別のナノ粒子では、Ptの結晶が大きく歪んだ「赤い領域」が半分見られる。さらに図8(a)(e)のように、ナノ粒子の全域が大きく歪んでいるものも存在する。これらは、fccから歪んでおり、六方細密充填(hcp: hexagonal closed-packed)格子に近い構造も見られた。これらの結果は、図8(f)–(j)で示すように、ホログラムから再生された振幅像(TEM像に対応)の高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)像(電子線回折図形に対応)から同定できる。

図8(k)–(o)は、図8(a)–(e)に対応する位相像であり、真空領域の位相変化から求めたPtナノ粒子の帯電電荷量を示している。Ptナノ粒子は、正にも負にも帯電し、電荷量も電子数個単位で異なることがわかる。先ほどの歪み量と比較すると、新しい知見として、Ptナノ粒子の帯電量は、電荷の符号に関わらず、ナノ粒子の結晶の歪み具合が大きくなるほど電荷量が大きくなる傾向が見られた。これらの結果は、まさにナノ粒子1個1個に対して、結晶の歪み具合と帯電

電荷量を同時に解析して初めて明らかとなった価値ある実験データといえる。

さらに、もう一つの観点として、ナノ粒子と担体の接触界面に着目する。異なる材料の接触界面では、それらの仕事関数の差によってバンドが曲がることで、電荷移動が起こることが知られている。材料の仕事関数は、結晶面によってわずかに異なることが知られている。今回の実験系の場合、TiO<sub>2</sub>表面の結晶面はすべて(110)面で同じであるため、Ptの接触結晶面に着目する。それぞれのPtナノ粒子の場合におけるPtの接触結晶面は、Ptナノ粒子内部の原子配列構造、すなわち結晶格子間隔から判断できる。図8(a)–(e)の下部に界面を拡大した振幅像を示す。ここで、Ptの格子間隔距離である0.14, 0.20, 0.23 nmは、Ptの結晶面である(220), (002), (111)面に対応している。それぞれの仕事関数 $\phi_{Pt}$ は、{110}面の場合は5.4 eV, {100}面の場合は5.5 eV, {111}面の場合は6.0 eVである<sup>(20)</sup>。TiO<sub>2</sub>の(110)面の仕事関数は5.5–5.8 eVであるため<sup>(21)</sup>、Ptの結晶面に依存して仕事関数の大小関係が変わることが予想される。

$\phi_{Pt} > \phi_{TiO_2}$ の場合、TiO<sub>2</sub>担体からPtナノ粒子へ電子が移動するため、Ptナノ粒子が負に帯電する。一方、 $\phi_{Pt} < \phi_{TiO_2}$ の場合、Ptナノ粒子からTiO<sub>2</sub>担体へ電子が移動するため、Ptナノ粒子が正に帯電する。実際に、 $\phi_{Pt} > \phi_{TiO_2}$ となる図8(a)–(c)の場合、Ptナノ粒子が負に帯電している。また $\phi_{Pt} < \phi_{TiO_2}$ となる図8(d)(e)の場合、Ptナノ粒子が正に帯電し

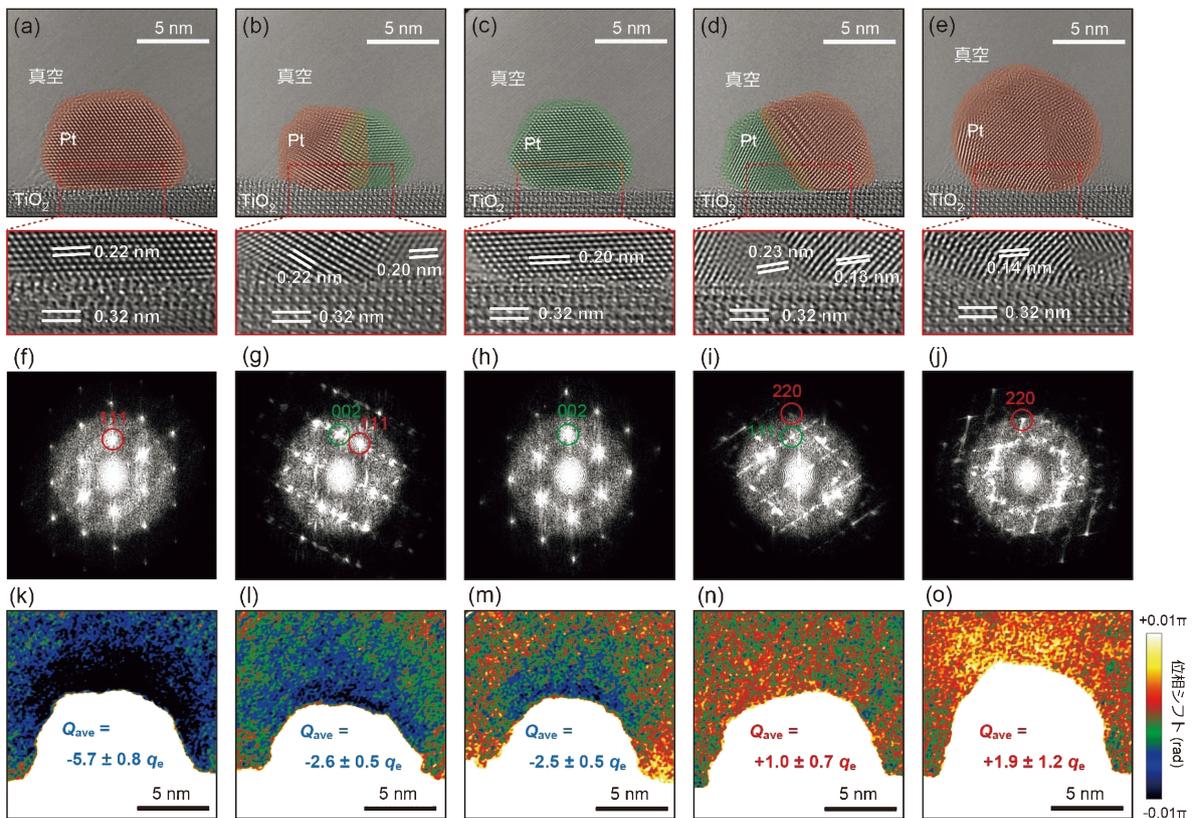


図8 Ptナノ粒子の帯電状態の結晶学的評価<sup>(6)</sup>。(a)–(e)再生された振幅像。各下部は界面の拡大像。(f)–(j)(a)–(e)の振幅像の高速フーリエ変換像。(k)–(o)再生された位相像。見積もられた帯電電荷量を内部に表示。

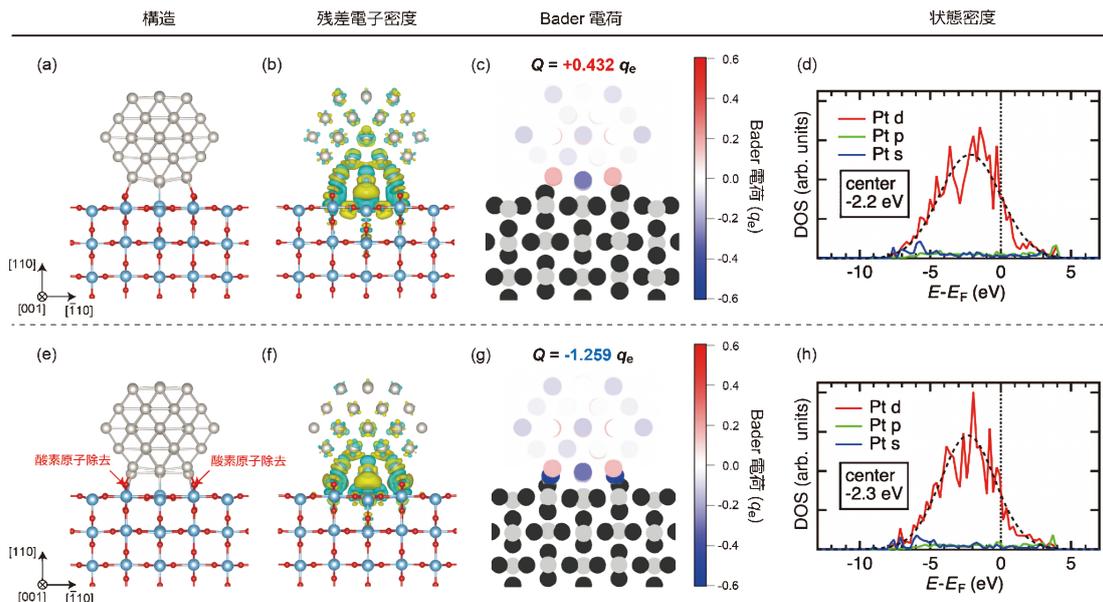


図9 DFT 計算による電荷解析<sup>(6)</sup>. (a) 化学量論組成の TiO<sub>2</sub>(110) 面上の Pt ナノ粒子の構造モデル. (b) (a) に対する残差電子密度分布. (c) (a) に対する Bader 電荷分布. (d) (a) に対する状態密度. (e) 一部酸素欠損した TiO<sub>2</sub>(110) 面上の Pt ナノ粒子の構造モデル. (f) (e) に対する残差電子密度分布. (g) (e) に対する Bader 電荷分布. (h) (e) に対する状態密度. (オンラインカラー)

ている. このように, 界面の仕事関数の大小関係によって, 界面における電荷移動方向と移動量が決まり, 結果として Pt の帯電状態である電荷の符号と電荷量が決まることを実験的に明らかとした. これは, 結晶構造と電荷量を同時に観測できる電子線ホログラフィーならではの成果といえる.

界面の電荷移動に関しては, 密度汎関数理論 (DFT: Density Functional Theory) に基づく第一原理計算によって確認している (図 9). ここでは実験データの考察につながる事例として, 化学量論組成の TiO<sub>2</sub> と一部酸素欠損した TiO<sub>2</sub> の 2 種類の表面, それぞれ粒子径 1 nm の Pt ナノ粒子が担持されたモデルを比較している. 酸素欠損が導入された TiO<sub>2</sub> の仕事関数は化学量論組成に比べてわずかに小さくなる<sup>(22)</sup>. Pt と TiO<sub>2</sub> の仕事関数は近い値を取るため, TiO<sub>2</sub> のわずかな仕事関数の変化により, 界面の電荷移動方向が変わり, Pt の帯電が正から負になることを上記のモデルから確認した. さらに, 状態密度の計算結果では, 酸素欠損 TiO<sub>2</sub> 上の Pt の d バンドセンターが低エネルギー側へシフトする傾向を確認した. すなわち, Pt ナノ粒子の帯電量の計測は, 触媒活性の説明因子である電子状態の理解にもつながる重要な結果といえる.

ナノ粒子自体の歪みが電荷状態に影響していることが明らかとなったが, 原子レベルの結晶歪み (例えば, 接触界面の格子整合や表面の構造緩和など) の影響については, いまだに明らかになっていない. ナノ粒子内部の局所的な電荷分布の解析は今後の課題である.

## 5. おわりに

本研究では, 最先端の電子顕微鏡技術と情報科学的手法

(微弱信号の抽出技術) を融合する独自の研究戦略により, 電子線ホログラフィーの位相計測精度を 1 桁向上させた. この超高感度を活かして, 触媒ナノ粒子の電荷量を「電子 1 個の精度で数える」という, 従来技術では達成できなかった未踏の計測を実現した. 触媒反応に寄与する金属ナノ粒子触媒の電位分布を観察することで, TiO<sub>2</sub> 上に担持した Pt ナノ粒子 (Pt/TiO<sub>2</sub> 触媒) が, 接合界面の素性によって正にも負にも帯電し得ることを明らかにした. さらに, 電荷量が Pt ナノ粒子の結晶の歪み具合にも影響を受けることなど, 触媒の研究開発にとって非常に重要な知見を得た.

本研究で実現した電子線ホログラフィーの高感度化により, 触媒開発を加速する強力な計測技術を獲得するに至った. 今後, 本技術の適用による触媒開発の加速が期待されるとともに, この技術をガス環境下や高温域など, 触媒が実際に利用される環境でのデータ取得につなげることで触媒の研究開発が一段と進み, 革新的な材料の創成を促すものと期待される. また本技術は, 電位・電場の解析にとどまらず, 磁場計測にも応用展開が可能である. 新規な磁気メモリや永久磁石の開発などの領域へも, 高感度化された電子線ホログラフィーの貢献が期待される.

本研究に対して多大な貢献をいただいた日立製作所の品田博之博士, 高橋由夫博士, 明石哲也博士, 市橋史朗博士, 明石工業高等専門学校の中西寛教授, 大阪大学の御堂義博特任准教授, 九州大学総合理工学研究院の永長久寛教授, 北條元准教授, 九州大学の玉岡武泰助教, 湯蓋邦夫博士, 中島宏博士 (現大阪公立大学) に謝意を表す. 本研究は, JST CREST (JPMJCR1664), 科研費 (JP18H03845, JP21H04623, JP22K18904) の支援により実施された.

