

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「物質現象の解明と応用に資する新しい
計測・分析基盤技術」
研究課題「0.5 Å分解能物質解析電子顕微鏡基盤
技術の研究」

研究終了報告書

研究期間 平成16年10月～平成22年3月

研究代表者：高柳 邦夫
東京工業大学大学院理工学研究科、教授

§ 1 研究実施の概要

チームとしてまとめた研究実施内容と経緯

欧米で 1930 年代から続けられていた球面収差補正の研究が最近急速に進歩して実用化技術にまで進んだ。この基礎技術をもとにして、欧米においては、高分解能収差補正電子顕微鏡の開発と先端研究拠点づくりを目指す国家レベルの大型プロジェクトが立ち上がった。一方、わが国においては、収差補正の国産技術がなく、物質解析に資する顕微鏡装置開発ができていなかった。

「0.5 Å 分解能物質解析電子顕微鏡の基盤技術の研究」について、物質構造の解析に資する研究基盤として、国産の球面収差補正技術ならびに 0.05 nm (= 0.5 Å = 50 pm) 以下の分解能をもつ高分解能電子顕微鏡の開発を目標として、以下の課題を実施した。

- ① 0.05 nm 分解能物質解析電子顕微鏡 (R005) の開発
国産球面収差補正技術の獲得として、異なる強さと形状をもつ非対称型の 12 極子による収差補正装置を開発し、また、0.05 nm 分解能を実現可能な 300 kV 電子顕微鏡装置の開発を進めた。高分解能とその場観察を両立できる高性能ワイドギャップの対物レンズを開発した。
- ② 自動収差補正システムの開発
従来、STEM 装置の球面収差補正は外国特許であるため、あらたな補正原理を工夫した SRAM (Segmental-Ronchigram-Autocorrelation-Function Matrix) を開発し、収差を高速・高精度で計測し、自動補正するシステムを構築した。
- ③ 安定な冷陰極電界放射電子銃の開発
0.05 nm 分解能で物質解析・分析を進めるために不可欠な、安定で明るい新型冷陰極電界放射電子銃 (cold-field-emission gun, CFEG) の開発を実施した。その結果、8 時間エミッション電流が一定に保たれる画期的 CFEG 電子銃を得た。
- ④ ナノスペースラボ技術を構築
その場観察(ガス導入、加熱、冷却)に不可欠な高解像度・高 S/N カメラを開発した。
- ⑤ 0.05 nm 分解能の検証と 0.05 nm 分解能による物質現象の観察
半導体結晶の STEM 観察を行い、GaN 結晶を用いて 0.063 nm (= 63 pm) の分解能を得た。次に、ゲルマニウム結晶の 0.047 nm (= 47 pm) 離れた原子列の分離が観察できることから、0.05 nm 分解能の達成を確認した。単原子やリチウム含物質の観察を実施し、半導体ドーパント、グラフィン膜構造、金触媒などで物質解析を実施した。
- ⑥ 連携研究の推進
国内外の研究者に対し、R005 装置の連携使用を図った。

得られた成果の研究全体概要

- (a) 開発した電子顕微鏡(R005 顕微鏡)の分解能 0.047 nm が実証され、世界最高分解能を達成した。
 - (b) 本研究で開発した収差を空間周波数 0.05 nm 相当までゼロに補正できる非対称型 12 極子収差補正 (特許) 技術により、レンズ収差補正の基盤技術を確立した。
 - (c) 長時間(8 時間)安定に一定電流を供給できる新型冷陰極型電界放射電子銃は、CFEG の抱えた根本問題を解決したもので、市販 CFEG にも革新的変化を与えた(※)。
 - (d) 軽元素単原子の観察では、(A)シリコン基板中のヒ素ドーパント原子の個別検出、(B) グラフィン膜の構造、金チタニア触媒界面の酸素原子欠損などを、0.05 nm 分解能で初めて明らかにした。
- (※) 開発した新型冷陰極型電界放射電子銃は実用化される見通しである。

§ 2. 研究計画に対する成果

(1)当初の研究構想

日本の電子顕微鏡技術は世界的に最高レベルにあり、我が国における物質・材料・ナノテク研究を育て支えてきた。分解能の向上は久しく停滞していたが、欧米で続けられていた球面収差補正の研究が急速に進歩したため、欧米においては、この基礎技術をもとにしたサブÅ分解能を目指すプロジェクトや 0.5Åを目指すプロジェクトなど、高分解能収差補正電子顕微鏡の開発と先端研究拠点づくりを目指す国家レベルの大型プロジェクトが立ち上がっていた。研究開始当時、わが国には物質解析に求められる独自の収差補正技術（特許）はできていなかった。

本研究では、物質構造の解析に必要な研究基盤である国産の球面収差補正技術を構築し、0.05 nm 以下の分解能をもつ高分解能電子顕微鏡を開発する研究計画を立案した。

事業推進計画は、第 1, 2 年次に R005 装置の開発 I として、球面収差補正装置、自動収差補正システム、冷陰極電界放射電子銃を開発するとともに、新設計した顕微鏡試作機について第 1 次システム評価を行い、第 3 年次から R005 の開発 II を進めて 0.05 nm 分解能の達成と物質解析に必要な技術整備を行ったのち、第 2 次システム評価において 0.05 nm 分解能の実証を行うとした。一方、その場観察動画像記録用カメラや画像解析ソフトウェアなどの開発を進めて、多様な材料・ナノ物質の研究に資する基盤技術(ナノスペースラボ)を確立して、分解能の実証後、軽元素観察を推進することを立案した。最終年次においては連携研究に R005 装置を供することを立案した。

事業計画に対して、①収差を空間周波数 0.05 nm 相当までゼロに補正できる非対称型 12 極子球面収差補正装置を開発（特許）、②長時間(8 時間)安定に一定電流を供給可能でエネルギー幅が狭い(0.3 eV) 300 kV 加速の新型冷陰極電界放射電子銃の開発、③収差を計測する新理論を考案し(特許)、自動的に収差を計測し、補正するシステム (SRAM) の開発、④ナノスペースラボの開発、⑤世界最高の 0.047 nm (= 47 pm) の分解能の達成など、収差補正電子顕微鏡の基盤技術が獲得されたことを実証できた。0.05 nm 分解能を利用した物質解析では、孤立単原子観察、リチウム含結晶観察、シリコンデバイス内ヒ素ドーパント原子の濃度・分布解析など、分解能向上に伴う成果が得られた。さらに、グラフィン膜の変調構造など新たな発見もあり、期待された性能が発揮されつつある。

(2)新たに追加・修正など変更した研究構想

第 1 次システム評価において、物質解析(単原子レベルの定量分析)にとって電子ビーム強度が長時間一定であることが生命線であることが示された。R005 装置の開発 I で試作した電子銃を評価して、電子光学系、真空排気システムを再設計した改良型 CFEG を試作し、高性能の新型 CFEG を開発した。その結果、従来の CFEG では考えられなかった長時間のビーム強度安定性 (8 時間連続使用で 10%以下の強度減衰) が達成された。冷陰極型電界放射電子銃のショットキー型電界放射電子銃に対する大きな欠点とされた「電子強度の不安定」を克服し、「電子状態スペクトルや顕微鏡像強度の定量分析など物質解析に不可欠な基盤技術」を獲得した。

§3 研究実施体制

(○：研究代表者または主たる共同研究者)

(1)「高柳邦夫」グループ

① 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	高柳 邦夫	東京工業大学 大学院理工学研究科	教授	H16.10～
	谷城 康眞	東京工業大学 大学院理工学研究科	助教	H16.10～
	大島 義文	東京工業大学 大学院理工学研究科	助教	H16.10～
	山本 直紀	東京工業大学 大学院理工学研究科	准教授	H16.10～
	田中 崇之	東京工業大学 大学院理工学研究科	助教	H18.4～
	箕田 弘喜	東京農工大学 工学部	准教授	H16.10～
	森 登美子	東京工業大学 大学院理工学研究科	研究補助員	H16.12～ H21.12.5

② 研究項目

- ・ 0.5 Å 分解能物質解析電子顕微鏡装置の全体設計
- ・ ナノスペースラボの開発
(その場観察用高感度・高分解能・TVカメラ、動画像解析システム)
- ・ 冷陰極電界放射電子銃(新型)の真空排気系設計 (予定変更)
- ・ 0.05 nm 分解能の検証実験
 - * GaN 結晶による 0.063 nm 分解能の検証
 - * 冷陰極型電界放射電子銃による Ge 結晶を使った 0.047 nm 分解能の検証
- ・ 0.05 nm 分解能による物質解析
 - * 単原子像の観察
 - * 半導体デバイス材料中のドーパント原子の観察
 - * 金 TiO₂ 触媒の酸素原子観察
 - * グラフィン膜の炭素原子観察
 - * リチウム含結晶の観察
- ・ 連携研究
 - * 物質材料研究所, Oxford University,

(2)「近藤行人」グループ

① 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	近藤 行人	日本電子株式会社 電子光学機器本部 EMG	グループ長	H16.10～
	富田 健	日本電子テクノサービス	日本電子 EMG へ 派遣	H17.4～
	岡本 公治	日本電子株式会社 電子光学機器本部 EMG	主任研究員	H16.10～H17.3
	金山 俊克	日本電子株式会社	チームリーダー	H16.10～

		電子光学機器本部 EMG		
	細川 史生	日本電子株式会社 電子光学機器本部 EMG	主幹研究員	H16.10～
	沢田 英敬	日本電子株式会社 電子光学機器本部 EMG	研究員	H16.10～
	三宮 工	日本電子株式会社 電子光学機器本部 EMG	研究員	H16.10～H18.9
	奥西 栄治	日本電子株式会社 電子光学機器本部 応用研究グループ	研究員	H20.4～

② 研究項目

- ・ 0.5 Å 分解能TEM/STEM装置の開発、設計と製作
 - * 顕微鏡装置の新規設計と製作
 - * 電子光学系の設計
 - * 電機系の設計
 - * 機械系の設計
- ・ 球面収差補正装置の開発、設計と製作
- ・ 収差係数計測法の開発と自動補正システムの設計と製作
- ・ 0.05 nm分解能の検証実験
 - * GaN 結晶による 0.063 nm 分解能の検証
 - * 冷陰極型電界放射電子銃による Ge 結晶を使った 0.047 nm 分解能の検証
 - * リチウム含結晶の観察
- ・ 冷陰極型電界放射型電子銃(改良型)(新型)の電子光学系の設計と製作 (予定変更)

§ 4 研究実施内容及び成果

4.1 0.05 nm分解能物質解析電子顕微鏡 (R005) の開発

(東京工業大学 高柳グループ、日本電子 近藤グループ)

(1) 研究実施内容および成果

本研究では、物質解析に資するための sub-0.5 Å 分解能をもつ球面収差補正電子顕微鏡の装置開発を行った。開発された基盤技術の中核は、異なる強さと形状をもつ 12 極を組み合わせた非対称型収差補正装置 (特許) と長時間安定な冷陰極型電界放射電子銃 (Cold-FEG)、色収差の小さいワイドギャップ対物レンズであり、世界最高の 0.047 nm 分解能が得られた (図 1.1)。

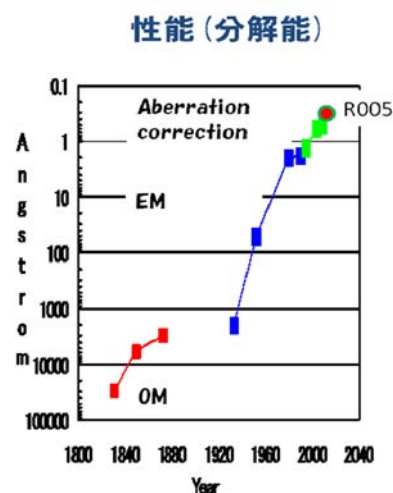


図 1.1 R005 装置の分解能

(類似な研究)

収差補正技術は H. Rose と M. Haider によって開発された 6 極子場を使ったレンズ (1990 年, 1995 年) と O. L. Krivanek による 8 極子場を使ったレンズ (1999 年) の 2 種類がある。アメリカの TEAM プロジェクトは Rose-Haider 型、イギリスの super-STEM プロジェクト、フランスの 200 kV-STEM 収差補正プロジェクトは Krivanek 型を採用して、世界最高分解能 0.5 Å を目指した装置開発をしている。TEAM プロジェクトは、ショットキー型電界放射電子銃にモノクロメータを併用して 0.05 nm 分解能を達成した。

(2) 研究成果の今後期待される効果

収差補正の基盤技術が培われた。収差補正装置と自動補正システム、冷陰極型電界放射銃は市販装置に適用されて sub-Å 観察が平易になるので、高度な物質観察が可能となる。とりわけ、正確な収差情報のもとに行われる計測 STEM/TEM 顕微鏡が画期的に成長すると期待される。

以下、§ 4.1 に開発した 0.5 Å 分解能収差補正電子顕微鏡の概要を記載する。さらに、顕微鏡装置の本体、収差補正、冷陰極型電界放射電子銃、機械・電子制御系、周辺装置開発など多岐にわたる開発実施内容を § 4.2-§ 4.7 に記す。§ 4.8-§ 4.9 に分解能の実証と成果を記す。

4.1.1 開発指針と装置構成

0.5 Å 分解能電子顕微鏡装置は、全て新設計で開発した。収差補正透過型顕微鏡像 (TEM) と走査型透過型顕微鏡像 (STEM) が得られる構成をもつ (図 1.2)。装置の外観を図 1.3 に示す。開発した顕微鏡装置の詳細は § 4.2 を参照。

0.5 Å分解能電子顕微鏡装置の基本構成

冷陰極電界放射電子銃(CFEG)、照射系、結像系球面収差補正機、を新規に独自開発

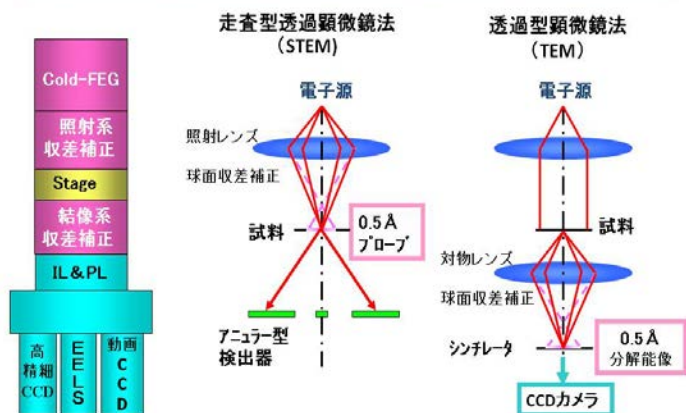


図 1.2 0.5 Å 分解能電子顕微鏡の構成

装置の全体図

0.5 Å 分解能物質解析電子顕微鏡

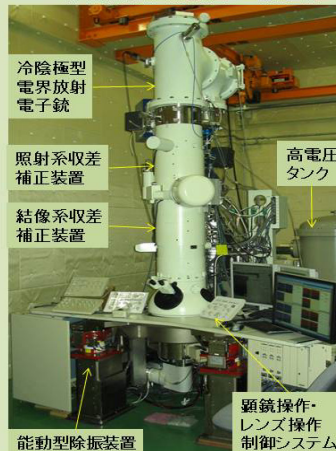


図 1.3 装置の外観写真

A. 収差補正装置の概要

収差補正装置は、外国特許の方式は使わず、プロジェクト独自の方式を採用した。本研究では、非対称型 12 極子収差補正装置を設計して、収差計測の新方式 (SRAM 法)、自動収差補正システムを開発した。非対称型 12 極子収差補正装置により、対物レンズの色収差を小さく抑えるだけでなく、寄生収差を小さく抑えることができ、0.05 nm 分解能が達成できた。開発した非対称型収差補正装置の詳細は § 4.3 に、新しい収差計測ならびに自動収差補正システムの詳細は § 4.4 に記載した。

B. 冷陰極型電界放射電子銃の概要

冷陰極型電界放射電子銃 (Cold-FEG : CFEG) として、電子源のエネルギー幅が 0.3 eV、高電圧安定度が優れ、安定で明るいエミッション電流が長時間保たれる装置を開発した。

CFEG は、(1)輝度が高い、(2)光源が小さい、(3)電子波の干渉性が高い (エネルギー幅が狭い) という利点がある。その一方で、(i) トータルのビーム電流がショットキー型電界放射電子銃 (Thermal-FEG : TFEG) に比べて小さい、(ii) 光源の強度が不安定で、チップのフラッシュ・クリーニングが頻繁に必要という問題がある。CFEG の開発にあたっては、検鏡途中での flashing が必要なく、ショットキー型 FEG と同様に安定な強度が得られる技術の開発を最重要視し、明るい光源でビーム電流が得られる電子源の開発を目指した。本研究では、試作機、改良機を経て、常時 (連続使用時間 6-8 時間) 安定な電子ビームを供給できる新型 CFEG を開発した。開発の詳細は § 4.5 を参照。

(注) TEAM プロジェクトでは、TFEG とモノクロメータ併用で 0.05 nm 分解能を得ている。

C. 到達分解能

(i) STEM 分解能

加速電圧が 300 keV でエネルギー幅が 0.3 eV の電子銃によるプローブサイズを色収差 ($C_c=1.65$ mm)、電子銃のエネルギー幅 ΔE の効果を考慮に入れて、STEM プローブ形状を正確にシミュレーションした(図 1.4)。プローブ直径は、冷陰極電子源の大きさ (Gauss サイズ) を 10 μm と仮定したとき、約 40 μm である。

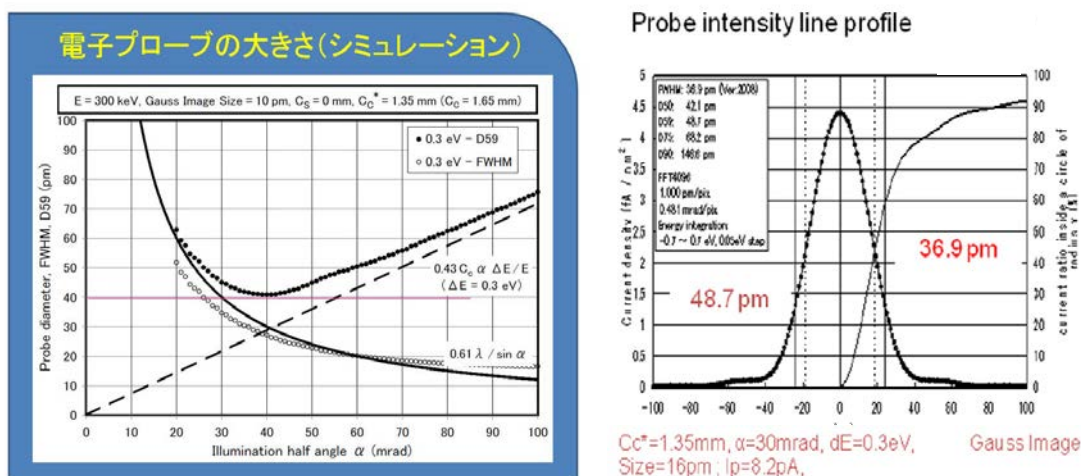


図 1.4 STEM プローブのシミュレーション。左図は、冷陰極電子源の大きさ (Gauss サイズ) を 10 μm と仮定したときの、照射角 (半角) とプローブ直径の関係を示している。照射角が 40 mrad のときに最小プローブ直径 40 μm が得られる。ここに、プローブ直径は、プローブの全電流量の 59% が含まれる直径 (D59) として定義している。右図にプローブの強度プロファイルを示した。照射角を 30 mrad、冷陰極電子源の大きさを 16 μm と仮定した。プローブ直径 (D59) は 48.7 μm 、半値全幅は 36.9 μm となっている。

STEM プローブ :

回折効果 (diffraction)、球面収差 (spherical aberration)、色収差 (chromatic aberration) によって分解能は制限される。電子ビームの角度広がりを α とすると、それぞれ

$$d_{\text{diff}} = 0.61 \lambda / \alpha \quad (1)$$

$$d_{\text{cs}} = C_s \alpha^3 \quad (2)$$

$$d_{\text{cc}} = C_c (\Delta E / E) \alpha \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 C_s 、 C_c はそれぞれ球面収差係数、色収差係数である。 λ は電子線ドブロイ波長、 E は加速電圧、 ΔE はエネルギー幅である。球面収差が補正された ($C_s=0$) と

$$d_{\text{min}}^2 = 0.61 C_c (\Delta E / E) \lambda \quad (4)$$

$$\alpha_{\text{optimum}} = 0.61 \lambda / d_{\text{min}} \quad (5)$$

で与えられる。

(ii) TEM 分解能

透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscopy) の分解能は、対物レンズの球面収差係数 (C_s) と色収差係数 (C_c) に依存する。球面収差は補正により任意の値をとれるので、色収差の小さい対物レンズの開発 (§ 4.6 を参照) を行った。

図 1.5 は色収差の効果を重畳した位相コントラスト伝達関数と空間周波数の関係である。位相コントラスト伝達関数は、分解能や像コントラストの評価に用いられる。 $\Delta E = 0.8 \text{ eV}$ (ショットキー型電界放出電子銃: T-FEG) の場合には分解能は約 0.67 \AA に留まる。一方、 $\Delta E = 0.3 \text{ eV}$ の CFEG 電子源を用いると 0.5 \AA 分解能が達成される。CFEG 電子源で単原子を観察したときに予想される TEM 像の強度プロファイルを図 1.6 に示した。透過電子の強度を 1 としたとき、炭素原子は約 0.1、酸素原子は約 0.3、金原子は約 0.7 だけ強度が減じた黒い像として TEM 像に観察される。

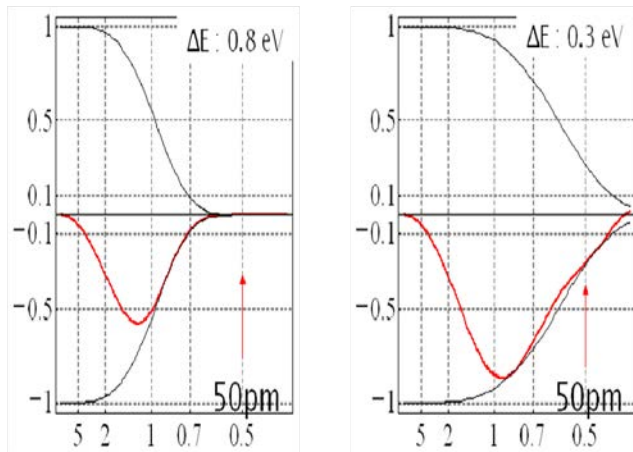


図 1.5 位相コントラスト伝達関数 (T-FEG と C-FEG の違い) と 孤立原子の TEM 像の強度プロファイル (シミュレーション)。左図の赤線は、位相コントラスト伝達関数 ($\sin \chi$) に、電子源のエネルギー幅 ΔE によるエンベロープ関数を乗じた値の変化を示す。横軸は分解可能な格子間隔 (\AA 単位) である。計算は、対物レンズの色収差係数 $C_c = 1.55 \text{ mm}$ (収差補正による ΔC_c を含めた実測値)、球面収差係数 $C_s = 2 \mu\text{m}$ 、焦点ズレ -2.29 nm としている。 $\Delta E = 0.8 \text{ eV}$ の場合 (左図)、赤線は 0.67 \AA から右側でゼロなので、 0.67 \AA より詳細な情報は得られない。一方、 $\Delta E = 0.3 \text{ eV}$ の場合 (右図)、赤線は 0.5 \AA よりも右側まで有限値をもち、分解能が 0.5 \AA より高いことを示している。

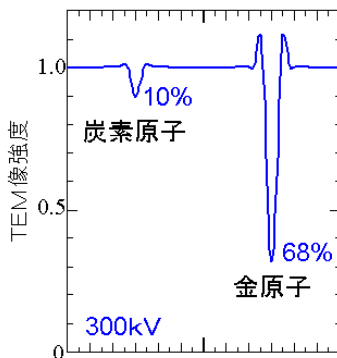


図 1.6 孤立した炭素原子と金原子の TEM 像の強度プロファイル。縦軸に示した電子強度は、入射波の強度を 1 としている。横軸のスケールは最小目盛りを 50 pm としている。強度プロファイルでは、炭素、金原子の位置で強度が減少しているのが、原子が黒く見える。像コントラスト (入射波の強度を 1 としたときの、強度変化の割合) は、炭素原子では 10%、金では $\sim 70\%$ である。

透過電子顕微鏡の理論分解能:

電子線の波長を λ ($\lambda = 0.00197 \text{ nm}$ @ 300 kV) とすると、球面収差で決められる分解能 d_s は、

$$d_s = 0.65 C_s^{1/4} \lambda^{3/4} \quad (6)$$

で与えられる。 C_s 補正装置が組み込まれれば、 C_s はほぼゼロに設定できるので、TEM の分解能は色収差に依存する分解能で決められる。

(1.3) 式にしたがうと、色収差による分解能 d_c は次式で表される。

$$d_c = C_c (\Delta E/E) \alpha \quad (7)$$

ここに、 ΔE は電子のエネルギー広がり、 E は電子のエネルギーである。

現在、 C_c を補正するレンズは加速電圧 300 kV では製作が困難である。 C_s 補正装置による対物レンズの色収差増加を抑えるような設計が必要となる。

4.2 0.5 Å 分解能物質解析電子顕微鏡の設計と製作 (JEOL 近藤グループ)

4.2.1. 鏡体の構成

顕微鏡本体 (R005) を新規に設計開発した。装置の外観写真とイラスト図面を示す。

鏡筒は図 2.1 に示すように、冷陰極電界放射型電子銃、照射系レンズ、照射系 C_s 補正レンズ、試料ステージ (ナノスペースラボ)、対物レンズ、結像系 C_s 補正レンズ、結像系レンズ、画像検出系 (カメラ、Annular Detector) で構成される。顕微鏡本体を支える架台、レンズ電流や高電圧を供給する電源も新規設計した。

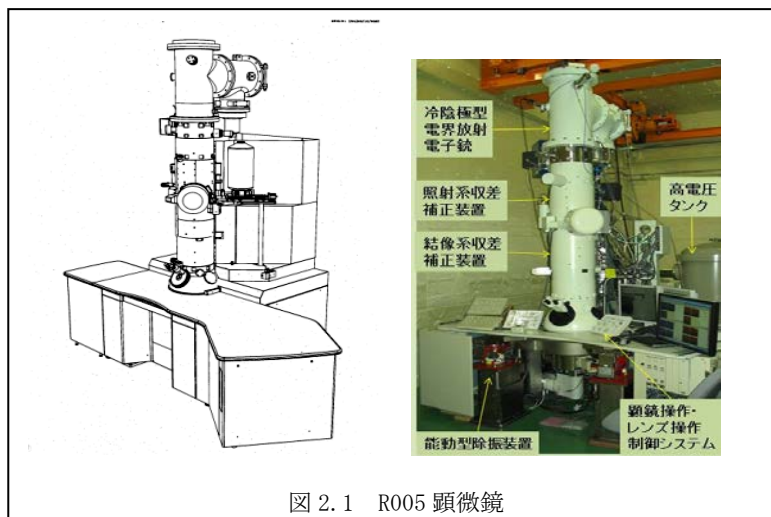


図 2.1 R005 顕微鏡

4.2.2. 電子光学系の構成

A. 照射系

レンズ構成は 4 段で CL1, CL2, CM1, CM2 の各レンズで構成されている。これに図 3.1 に示すように C_s コレクターが加わる。可動絞りはモーター駆動方式で、駆動部はメタルベローズで真空シールした。

B. 結像系

レンズは高倍率用と低倍率用の OL, OM の 2 段で構成されている。試料ステージはサイドエントリー方式とした。試料汚染を低減するために試料汚染防止装置を組込んだ。ワイドギャップで色収差係数の低い対物レンズを開発した。

試料移動はモーター駆動で、移動範囲は x と y 方向は ± 1 mm、 z 方向は ± 0.4 mm で、1 nm 精度で位置設定ができる。また、 piezo 素子によって ± 1.2 μ m の領域の微細移動が 0.04 nm 精度で可能である。また、結晶性試料を観察するための試料傾斜機構は、 x , y 共に ± 25 度までの傾斜が可能である。

拡大レンズは IL1, IL2, IL3, PL の 4 段構成とした。最大 215 万倍まで拡大できる。拡大された 0.05 nm 間隔は、静止画像撮影に使用している CCD の画素サイズ (14 μ m) の約 8 倍となる。

C. 偏向系と STEM ビーム走査系

STEM 像を得るために用いる対物レンズ直上の走査コイルに高倍率用と低倍率用を用意した。低倍率ではビームの走査領域が広いので、大きな偏向力をもつコイルが必要である。小さな偏向力しか必要としない高倍率では、専用走査コイルを設けて電源ノイズの影響を避け、高精度かつ高速なビーム走査を可能とした。走査コイル以外の偏向系は、照射系レンズでビーム径が縮小される際に偏向量も縮小されるため、STEM 分解能への影響は少ない。

D. 像記録・観察系、信号検出系

STEM 像用の検出器は暗視野用と明視野用の 2 系統を設けた。明視野では通常の TEM 像と同様のコントラストが得られるため、原子番号が大きく異なる元素を同時に STEM 像上で確認しやすい。それに対して、高角度に散乱した電子を集めて像にする円環型暗視野像検出器による像（暗視野）では、薄い膜上の単原子等の像をコントラスト良く得ることができる。

TEM 像の記録には CCD カメラを使用するので、フィルムカメラは装備しない。CCD カメラは画素数が $2\text{ k} \times 2\text{ k}$ の高分解能市販カメラと動画像観察用高感度 CCD カメラを用いる。動画像記録 (30~60 frame/s (fps)) には、高分解能・高 S/N の EM-CCD と明るい YAG シンチレータを大口径レンズで光学結合したカメラシステムを開発した (§ 4.7)。

4.2.3. 軽い冷陰極電界放射電子銃の開発

冷陰極電子銃と高圧タンクとが分離した軽い構造の CFEG プロトタイプを新規に開発した。軽量な電子銃だけを鏡筒に載せた鏡体構造とし、機械的安定度を得た。冷陰極電界放射型電子銃の詳細については後節(改良型 CFEG の開発)で説明する。CFEG プロトタイプ完成までは、300 kV 電子顕微鏡 (JEOL 社) 用の Schottky 型電界放射電子銃を使用して、収差補正レンズの動作テストに使用した。

CFEG を搭載したときの基本構成(図 2.2)は、①電子銃、②電子銃各電極の電源部、③300 kV を発生する高電圧発生タンク、電子銃排気系、コントローラーおよびこれらに電源を供給する電源コンソールからなる。電子銃電源と高電圧発生タンクとはフレキシブルな高電圧ケーブルで接続している。

改良型 CFEG、新型 CFEG は、電子銃と真空系を改めたものを開発している。

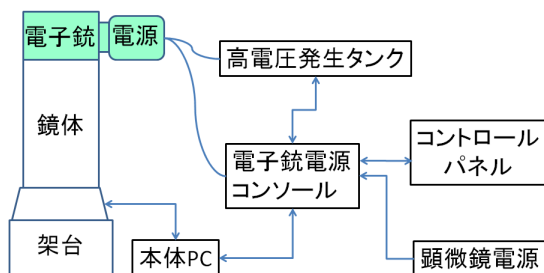


図 2.2 一体化された電子銃と電子銃電源、分離された高電圧タンクの構成図

(注) 市販型の冷陰極型電子銃

透過型電子顕微鏡で sub-0.5 Å 分解能を得るためには、電子源の加速電圧が 300 kV では、電子線のエネルギー幅 0.3 eV が必要である。ショットキー型電界放射型電子顕微鏡 (TFEG) のエネルギー幅は 0.8 eV 程度ある (JEOL 社)。引き出し電圧を下げて、ティップ先端の大きさを大きくすると 0.55 eV ~ 0.6 eV のエネルギー幅が得られる (FEI 社)。一方、冷陰極電界放射型電子顕微鏡 (CFEG) であれば、エネルギー幅が室温使用時に 0.3 eV が得られる (日立製作所)。JEOL 社では冷陰極型電界放射電子銃は未開発であった。

	W 冷陰極	ZrO/W Schottky	LaB ₆
エミッター仕事関数 [eV]	4.5	2.7	2.7
輝度 [A/cm ² /str]	10 ⁸ –10 ⁹	10 ⁸	10 ⁵ –10 ⁶
エネルギー巾 [eV]	0.3	0.8	1.5

表 2.1 W 冷陰極型、Schottky 型、LaB₆ 電子源の仕事関数、輝度、エネルギー幅

4.2.4. 機械的安定な鏡体の開発

A. 鏡筒の開発

鏡筒の外径をφ330 mmとした。鏡筒径がφ250 mmの200 kV 電子顕微鏡で0.1 nm分解能の機械的強度が得られていること、材料強度が外径の4乗に比例することを考慮した。走査光学系及び、結像系における外乱磁場を防ぐために鏡筒は軟磁性の材料（パーマロイ）で囲った。

B. 顕微鏡架台の開発

鏡筒を支えるベース架台を設計した（図2.1参照）。小型（1 m³ほどの矩形）で曲げモーメントが小さく剛性の高い構造とし、固有振動数を48.6 Hz にまで高めた。アクティブ除振を採用した。

4.2.5. 安定電源系の開発

A. レンズ電源の安定度

対物レンズの電源安定度を高めた。対物レンズでの倍率が100倍程度とすると、対物レンズ用以外のレンズ電源のノイズは問題とならない。図2.3に電源安定度の実測例を示す。変動幅(Pk-pk: peak-to-peak:は0.18 ppmで、従来の2 ppmより一桁安定度が向上している。0.2 ppmの安定度を ΔE に換算すると、0.06 eVに相当する。冷陰極電界放射電子銃の電子源は $\Delta E=0.3$ eVあるので、§4.1.1の(4)式に基づいて判断する限り、レンズの電源安定度は0.5 Å 分解能の達成に十分なレベルに達した。

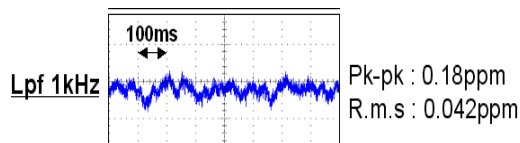


図 2.3 レンズ電源の電圧安定性

B. 高電圧電源の安定度

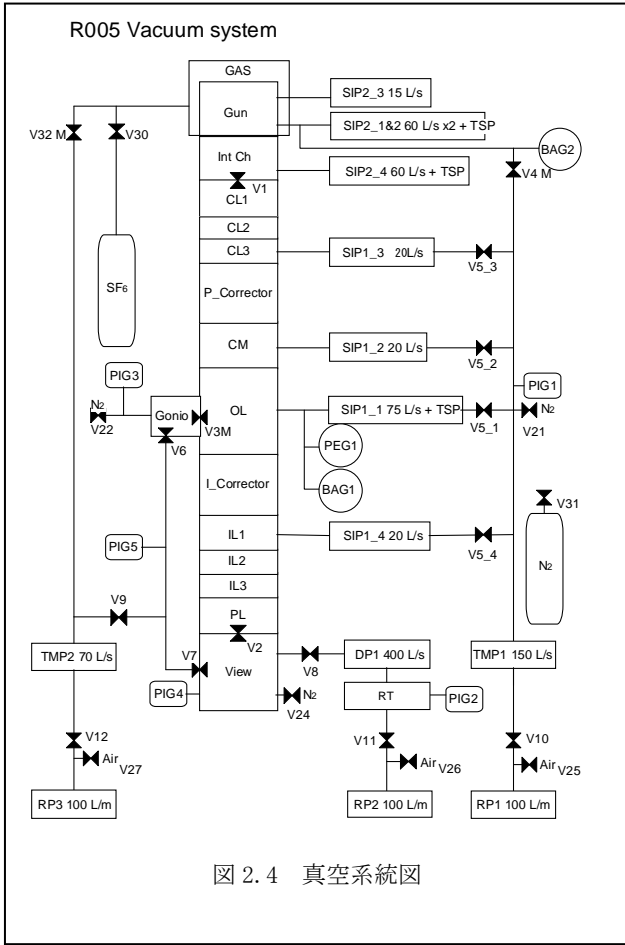
冷陰極電界放射電子銃の0.3 eVのエネルギー幅を得るための高安定度($\delta U/E \leq 4 \times 10^{-7}$)の電源開発を実施した。

4.2.6. 真空排気系の開発

R005 顕微鏡の真空系統図を図2.4に示す。鏡筒を電子銃、照射レンズ、対物レンズ、拡大レンズ、像検出チャンバの5つの部分にオリフィスで仕切る。それぞれのチャンバを個別の真空ポンプで排気する差働排気系を採用した。これによって試料近傍の真空度を格段に高め、試料汚染に低減することができる。現在、試料付近での到達真空度は 6×10^{-6} Paを得ている。

試料を鏡筒内に入れるための予備排気室の真空排気は、試料汚染を避けるためTMP(ターボモレキュラー・ポンプ)で行う。高分解能像観察時には不必要なTMPを完全に止める排気シーケンスを作成した。

冷陰極型電界放射電子銃の真空排気はイオンポンプで行った(§4.5に記載の「改良型CFEGの開発と評価」を参照)。



4.3 球面収差補正レンズの開発

球面収差補正装置には非対称のトランスファー光学系を採用した。本方式は1990年に提案されたRose型の対称型8fレンズに比べて、色収差を縮小できる方式となっている。非対称型にすることによって、対物レンズの球面収差を補正すると同時に、i) 色収差の増加を抑える、ii) 電子プローブを縮小する、iii) 像歪みなどを与える高次の寄生収差を圧縮するなど利点をもつことが明らかとなった。

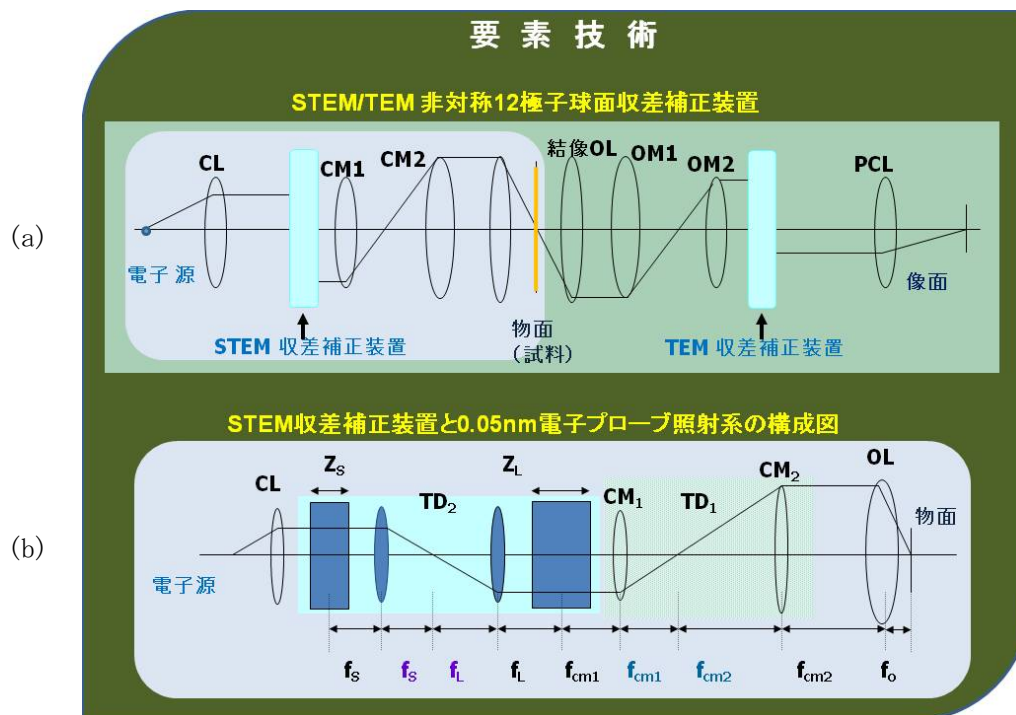


図 3.1 TEM/STEM 収差補正光学系の全体構成 (a) と 非対称照射系収差補正光学系 (b) 収差補正レンズは5枚組レンズ (Z_s - TD_2 - Z_L) で構成されている。 TD_2 レンズの中に6極子場を回転するミニレンズが配置されている (図中省略)。



図 3.2 非対称型12極子収差補正のレンズ(図の Z_s)の写真

STEM用の収差補正装置で、収差が補正される最大照射角度 α は、図3.3に示したように、Ronchigram図形のなかで一様なコントラストをもつ円形領域の半径で測られる。収差補正なしの300 kV電子顕微鏡で $\alpha = 11$ mradであるとき、本収差補正装置を使った後では、 $\alpha = 50$ mradになった。収差補正機がつくる6回非点(円の外側の6角形)が、補正限界を決める。6回非点を小さくする技術開発を試みた。

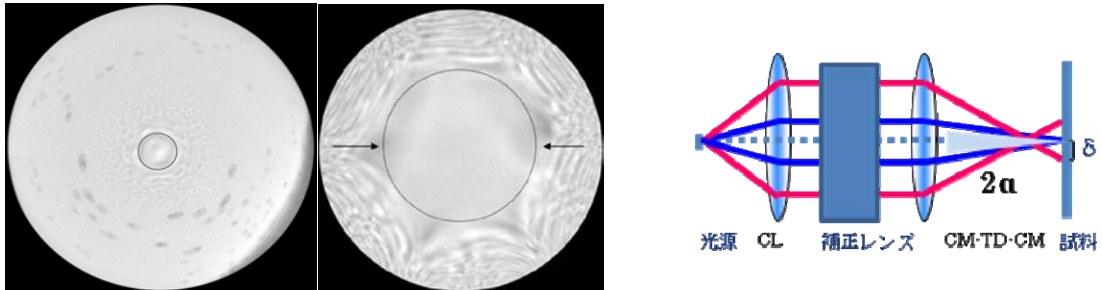


図 3.3 球面収差補正前(左図)と補正後(右図)の Ronchigram、および STEM 光線図

【6 極子場を使った Rose-Haidler 型(対称型)球面収差補正レンズの構成と問題点】

市販されている C_s コレクターの原理は 2 つある。ひとつは 4 極子を 4 段にして補正する方法である。他方は、6 極子を 2 段使い、その間に凸レンズ 2 枚で構成される転送光学系(トランスファーダブレット)が配置されている方法である。図 3.4 に後者の 6 極子型補正装置の原理を示す。

図 3.4 で、A と B が 6 極子、TL1 と TL2 の組がトランスファーダブレット(TD)である。Rose-Haidler の補正装置では TL1 と TL2 は同じ焦点距離をもっている。したがって、A と B 間の転送倍率が 1 となる。言い換えると、TD レンズの焦点距離が TL1, TL2 と同じ f である。6 極子がつくる 3 回対称場はマイナスの C_s と 3 回対称の非点収差を作る。マイナスの C_s のみを残すために、A と B の 3 回場がキャンセルするように A に対して B が 60 度回転した 3 回対称磁場を発生させる。

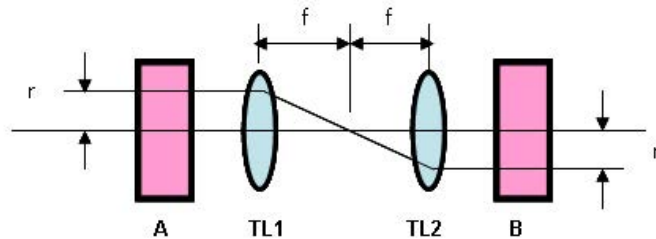


図 3.4 対称 6 極子型球面補正装置の原理

Rose の研究報告(1990)によると、6 極子場レンズは図 3.4 に示すように、結像系の収差補正レンズとして対物レンズの下側に入れられた。対物レンズの後ろに 2 つの TD レンズ、その後ろに図 3.4 の球面収差補正レンズが配置されている。2 つの 6 極子場レンズと 2 組の TD レンズが全て同じ焦点距離を持つため、Rose の収差補正レンズは $8f$ レンズとも言われる。

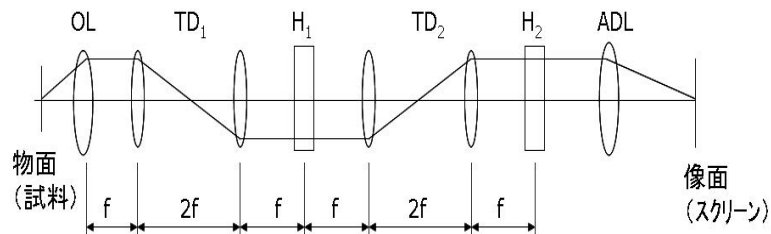


図 3.5 Rose が提案した $8f$ レンズ

8f レンズは、対物レンズの球面収差を補正 ($C_s=0$) することができるが、その一方で色収差を増大させる。増分 ΔC_c は、対物レンズの焦点距離 f_0 と 8f レンズの焦点距離 f との相対比が決める。

$$\Delta C_c \sim 4 f_0^2 / f \quad (1)$$

Rose の論文では、300 kV 加速の電子顕微鏡の場合、 ΔC_c が 0.6 mm 程度と報じている。標準的な対物レンズの色収差係数 ($C_{c0} \sim 1.6$ mm) に加わるので、補正機をつけたときの色収差係数 C_c は、

$$C_c = C_{c0} + \Delta C_c \sim 2.2 \text{ mm} \quad (2)$$

$C_c = 2.2$ mm で 0.5 \AA 分解能を得るためには、電子源のエネルギー幅を ~ 0.3 eV 以下に抑える必要がある。これには、電子源のエネルギー幅を狭める (単色化) モノクロメータ装置の開発が必要である。モノクロメータでは電子源の強度が失われるので高分解能観察にはデメリットが多い。

4.3.1 非対称 12 極子による球面収差補正装置の特徴

CREST プロジェクトの収差補正装置 (C_s コレクター) は、多極子の収差補正レンズとトランスファーダブレットを組み合わせた方式をとる。図 3.1(a) に TEM/STEM 装置に収差補正装置を組み込んだ電子光学系を示す。電子源を出た電子は、照射系レンズ (CL) を通り、照射系 C_s コレクターを通過後、CM1-CM2-照射 OL (OL 前磁場) を通って試料に入射する。一方、試料を出射した電子は、結像 OL (OL 後磁場) -OM1-OM2 を通過後に結像系 C_s コレクターを通過後、倍率調整レンズを通過後に SA 絞り面に試料の像を結ぶ。電子光学系は、試料を挟んで照射側と結像側が対称である (光源が SA に対応)。照射系と結像系 C_s コレクターは対称な構造をもつ。

照射系 C_s コレクターのレンズ構成の詳細を図 3.1(b) に示す。 C_s コレクターレンズは破線内部で、S と L はそれぞれ 12 極子レンズ、TD2 (3 枚のレンズ群、TL1-TL3-TL2 で構成) はトランスファーダブレットである。本装置は、

- ① 12 極子レンズ S と L の厚みが異なる。
- ② トランスファーダブレットの転送倍率が 1 より大きい。

という特徴をもつ。12 極子を採用することにより、

- (a) 6 極子場の方向を回転させて、1 段目 12 極子 (S) と 2 段目 12 極子 (L) の場の方向を合わせ、6 極子場で発生する 3 回対称の非点を正確にキャンセルすることができる。
- (b) 6 極子で発生する寄生収差 (2 回非点、コマ収差、スター収差、4 回非点収差) を打ち消すように偏向場、4 極子場、8 極子場を重畳できる。

ことができた。トランスファーダブレットの転送倍率を 1 より大きくすることにより、

- (c) 12 極子で発生する寄生収差を圧縮して、分解能を向上させる。

ことができた (後述)。

4.3.2 球面収差補正装置の設計

球面収差補正装置 (C_s コレクター) は照射系と結像系にあるが、全く対称なレンズ構成をもつので、以下には照射系 C_s コレクターについて設計経過を述べる。

収差補正装置の設計で配慮した要素は以下の点である。

- A. 収差補正力 (補正可能な最大の球面収差係数) の設定
- B. 寄生収差 (実際の装置で生じる C_s 以外の収差) の圧縮
- C. 対物レンズ以外のレンズ系によって付加される色収差の圧縮
- D. 短い電子光学系をもった機械振動に強い装置

A. 収差補正力の設定

収差補正装置は、対物レンズがもつ球面収差をゼロにするだけでなく、マイナス収差も作り出す。必要な収差を補正する能力 (収差補正力) は次式で与えられる。

$$C_s (\text{max}) = (6 f_o^4 Z_s^3 \mu_o^2 N I^2) / (a^4 R^2 b^6 M_L^4) \quad (\text{mm})$$

ここに、

f_o : 対物レンズ焦点距離 (mm),

Z_s : 12 極子 S の光軸沿いの長さ (mm),

NI : 12 極場先端起磁力 (A・turn),

$a = f_{1b} / f_{1a}$: トランスファータブレット (コレクター内転送光学系) の各レンズの焦点距離の比,

b : 12 極子のボア半径 (mm)

$M_L = f_{CM2} / f_{CM1}$: CM1 と CM2 の焦点距離の比 (多極子 L の作用倍率, CM1 - CM2 転送系の倍率),

μ_o : 真空透磁率,

$R = p/e = (2MU^*/e)^{1/2} = h / (\lambda e)$: 電子磁気剛性*

* 300 kV の電子磁気剛性 $R = 2.10 \times 10^{-6}$ (H/m) or (m kg s⁻² A⁻²)

CREST 収差補正装置では、300 kV 電子顕微鏡の対物レンズの焦点距離を $f_o = 2.5$ mm と想定した。補正が必要な球面収差の最大値を、予備テストを参考にして、

$$C_s (\text{max}) = 5.8 \text{ mm}$$

と設定した。次に、 μ_o , R は定数なので、 Z_s , a , b , NI, M_L を最適化していった。ここでは電子の軌道計算は実施せず、通例行われる方法にしたがって、以下のように決めた。

- (1) CM1 と CM2 の焦点距離の比 M_L は 1 より大きい数値とし、寄生収差や色収差を圧縮した (後述)。最終的に $M_L = 2.33$ とした。
- (2) a は寄生収差圧縮のため 1 より大きくした。製作可能な形状を考え 1.2 とした。
- (3) b は小さい方が効率が良くなるが、磁極ボア半径を小さくすると高い機械的加工精度が要求される。加工の信頼性限界により決定した。
- (4) Z_s と NI は、 Z_s を大きくすると NI も大きくなる関係にある。NI を大きくできれば、 b も大きくできるので、12 極子の機械加工は容易になる。ところが、NI は磁気飽和によって制限される。すなわち、いくらコイルの電流を増やしても飽和磁束密度を超えて NI は増加しない。12 極子の b , Z_s を様々な形状に設計し、3次元有限要素法を用いて必要な NI を求めた。

B. 寄生収差の圧縮

- ① CM1-CM2 転送光学系の採用による STEM プローブの縮小

照射系収差補正装置は、図 3.1(a) のように、CM1-CM2 レンズと組み合わせて照射光学系に使われる。CM1 と CM2 の焦点距離の比 (12 極子 L の作用倍率、あるいは転送倍率) を $M_L = f_{CM2} / f_{CM1}$ とすれば、電子プローブは収差補正装置を出た後、 $1/M_L$ に縮小される。小さい STEM 電子プローブを作るために縮小系を採用した (注 1)。CREST プロジェクト

では、

$$M_L = 2.33$$

とした。

② CM1-CM2 転送光学系による寄生収差の圧縮

収差補正装置では、 C_s を補正すると同時に、3次までの寄生収差が発生してしまう。それらの収差はCM1-CM2を通して対物レンズ側に圧縮されて転送される(表3.1)。たとえば、図3.1(a)でCM1-CM2の転送倍率は M_L である。すると、CM1に近い12極子Lで発生する寄生収差 χ は、球面収差に相対的に、 $1/M_L$ のベキ乗で圧縮される。

高次の収差係数 χ/C_s	4回非点/ C_s	スター/ C_s	コマ/ C_s
倍率Mの転送光学系での相対圧縮比	$1 / M^2$	$1 / M^2$	$1 / M$

表3.1 転送光学系の転送倍率Mと高次の収差係数 χ の圧縮率

③ 12極子内トランスファーダブレット転送光学系による寄生収差の圧縮

収差補正装置内の12極子Sに対しても同様に、転送光学系の倍率 M_S は

$$M_S = a M_L$$

で与えられる。ここに、 $a = f_{1b}/f_{1a}$ は図3.1(b)で収差補正レンズ内のトランスファーダブレット(TL1-TL3-TL2)の焦点距離比(12極子SからLへの転送倍率)である。したがって、 C_s 補正装置内トランスファーダブレットによる転送倍率 a を1より大きな値に設定することによって、12極子Sで生まれる寄生収差が圧縮される。CRESTでは、12極子レンズSとLの厚みを変えて、

$$a = 1.2$$

を実現した(注2)。これにより、 $M_S=2.8$ が得られ、STEMプローブの縮小と同時に高次の寄生収差の圧縮が達成された。

(注1) STEMでは、寄生収差を縮小するため照射系光学系は縮小系の転送光学系が使われる。一方、対称配置のTEMの結像系光学系は、拡大系の転送光学系となるよう設計される。

(注2) 12極子レンズSとLは異なる厚みをもつ。非対称な厚みの12極子がCREST収差補正装置の特徴である。通常は $a=1$ で設計されている。 $a>1$ では、12極子に強励磁が要請されるので、最適化の設計が難しい。特許申請。

C. 色収差の圧縮

球面収差補正装置内のレンズ(TL1, TL2)ならびにCM1-CM2レンズは色収差を持つため、それらが対物レンズの色収差に ΔC_c だけ付加される。したがって、対物レンズの色収差に付加される色収差増分 ΔC_c を小さく抑える(0.2 mm以下)球面収差補正装置の設計が必要である。

色収差を小さくする方策は、対物レンズでの縮小率を大きくして、収差をできるだけ圧縮するしかない。図3.1(a)に示されるように、CM2と照射系OLの焦点距離の比を

$$M_0 = f_{CM2} / f_0$$

とすると、縮小率は $1 / M_0$ 、色収差の圧縮率は $1 / M_0^2$ となる。

CREST装置では対物レンズの焦点距離が $f_0 = 2.5$ mmである。CM2レンズ(TEMの場合にはOM1レンズ)の焦点距離 f_{CM2} を大きくとれば、それだけ圧縮できる。しかし、それだけ鏡筒が長くなり機械振動による分解能の損失など不利な問題が発生する。また、圧縮率を稼いでいくと、実現困難なほどの収差補正力が12極子に必要となってくる。鏡筒長さや収差補正力の適正値を検討して、 $M_0 = 28$ とした。

具体的には、

$$\Delta C_c = (1/M_0)^2 \{ C_{CM2} + C_{CM1} + (C_{TL2} + C_{TL1}) (f_{CM1} / f_{1b})^2 \}$$

の関係式を用いた。式中 C_{CM2} などはレンズの色収差係数を意味する。CM2-CM1-TL2-TL1各レンズの色収差係数と焦点距離を、様々な磁極形状と励磁に対して、2次元の有限要素法で計算した。そして $M_0 = f_{CM2} / f_0 = 28$ としたとき、 $\Delta C_c < 0.2$ mmとなるようにレンズ

条件を求めた。その結果、最終的に開発したワイドギャップ対物レンズでは $\Delta C_c = 0.16 \text{ mm}$ を得て、対物レンズの実効色収差係数 C_c (effective) の設計値は、本研究で開発したワイドギャップ対物磁極の色収差係数を基にすると、

$$C_c \text{ (effective)} = 1.54 \text{ mm} \quad (\text{TEM})$$

$$C_c \text{ (effective)} = 1.65 \text{ mm} \quad (\text{STEM})$$

となった。この設計値にもとづくと、TEM/STEM 分解能は 0.5 \AA 以下となる。

D. 短い (コンパクト) 電子光学系の設計

電子顕微鏡の重心を下げ、機械的振動特性を向上させる必要がある。200 kV 用の収差補正光学系で現在実現されている収差補正光学系 (STEM 用) は全長 300 mm である。CREST 開発の 300 kV の収差補正光学系 (TEM/STEM の両方の系) では 200 mm の長さになるように、図 3.1(b) のレンズ焦点距離 f_{1a} や f_{1b} 、12 極子の光軸方向の長さ Z_s , Z_L を設計した。

4.4 収差計測法と収差自動収差補正装置の開発 (JEOL 近藤グループ)

STEM 装置の球面収差補正方式が外国特許 (CEOS と NION 社の特許) であり、さらに収差計測法も特許となっている。本研究では、Segmental-Ronchigram-Autocorrelation function-Matrix (SRAM) 法を考案した (特許) (文献 [I12])。TEM については、一般的に用いられる Zemlin-Tableau を基本とする方式を採用した。

4.4.1 照射系球面収差補正

A. STEM 収差計測用に開発した SRAM 法

SRAM (Segmental Ronchigram Auto-correlation Function Matrix) 法は、Ronchigram 図形から照射系収差を測定する新方法である。STEM 実験の Ronchigram 図形 (電子ビームを試料面から離れた位置にフォーカスさせて得られる回折図形) には、照射系の収差に依存した強度変化が現れる。SRAM では、Ronchigram を縦横 $n \times n$ ($n=3, 5, 7, 9$) 領域に分割し、領域ごとに自己相関関数 (auto-correlation function) をつくと、それぞれの局所自己相関 (Segmental-Autocorrelation) には幾何収差係数の次数と対称性に依存した 2 次関数曲線が現れるので、 $n \times n$ 個の 2 次曲線解析から幾何収差を求められることが明らかとなった。

収差係数には、defocus (O2)、2 回非点 (A2)、3 次と 5 次球面収差 (O4, O6)、2 次と 4 次 Axial-comma (P3, P5)、Three-Lobe (R5)、4 回、5 回、6 回非点収差 (A4, A5, A6) などがある。それらの収差係数を C_{nm} と表記すると、波面収差 χ は、
$$\eta = \sum_{nm} C_{nm} \Omega^n \bar{\Omega}^m$$
 の実部で与えられ、幾何収差 G は位相収差の角度微分で定義される。そこで、決定すべき収差係数 C_{nm} が N 個あるときには、 N より十分多く Segment の数 ($n \times n$) をとれば精度よく収差係

幾何収差次数	円筒対称	1回対称	2回対称	3回対称	4回対称	5回対称	6回対称
1次	焦点ズレ $\text{Re}\{1/2 \cdot C_2 \omega \bar{\omega}\}$		2回非点 $\text{Re}\{1/2 \cdot A_2 \bar{\omega}^2\}$				
2次		軸上コマ収差 $\text{Re}\{1/3 P_3 \omega^2 \bar{\omega}\}$		3回非点 $\text{Re}\{1/3 \cdot A_3 \bar{\omega}^3\}$			
3次	球面収差 $\text{Re}\{1/4 \cdot O_4 \omega^3 \bar{\omega}^2\}$		スター収差 $\text{Re}\{C_4 \omega^3 \bar{\omega}\}$		4回非点 $\text{Re}\{1/4 \cdot A_4 \bar{\omega}^4\}$		
4次		4次軸上コマ収差 $\text{Re}\{1/5 P_5 \omega^4 \bar{\omega}^2\}$		Three lobe $\text{Re}\{1/5 R_5 \omega^4 \bar{\omega}\}$		5回非点 $\text{Re}\{1/5 \cdot A_5 \bar{\omega}^5\}$	
5次	5次球面収差 $\text{Re}\{1/6 \cdot O_6 \omega^5 \bar{\omega}^3\}$		5次二回対称収差 $\text{Re}\{1/6 \cdot C_6 \omega^5 \bar{\omega}^2\}$		5次四回対称収差 $\text{Re}\{1/6 \cdot S_6 \omega^5 \bar{\omega}^3\}$		6回非点 $\text{Re}\{1/6 \cdot A_6 \bar{\omega}^6\}$

表 4.1 種々の収差の次数と対称性

数決定ができる。詳細は文献[I12]を参照。

表 4.1 に収差係数 C_{nm} を次数と対称性によって整理した。各 C_{nm} と Ronchigram 図形の関係を図 4.1(a) に、Ronchigram を 4×4 の Segment に分割して得られる Auto-correlation 関数を図 4.1(b) に、それぞれ示した。Auto-correlation 図形は C_{nm} によって異なる。ここでは 4×4 で示したが実際の測定には $n=5, 7$ などの多くの Auto-correlation 図形から収差は計算されている。

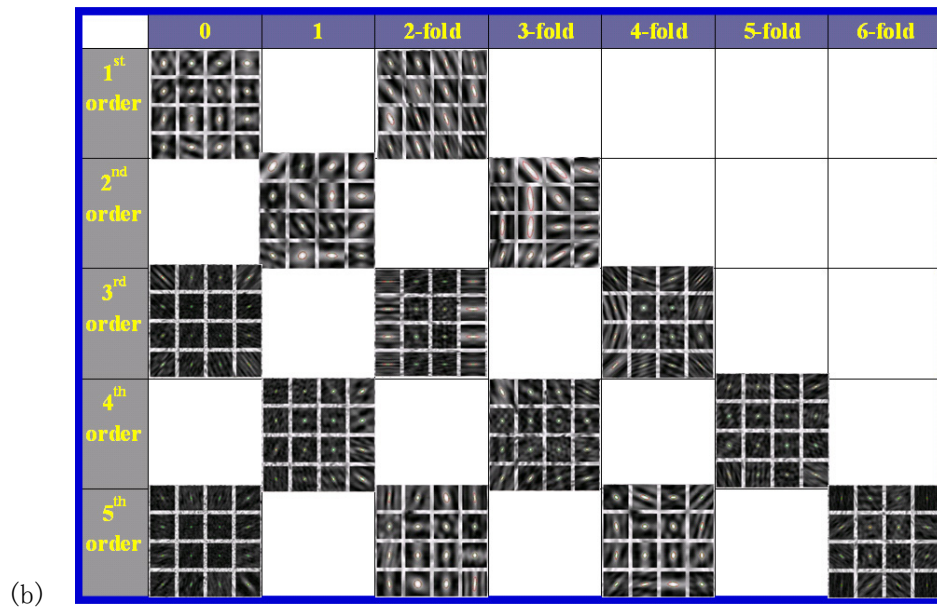
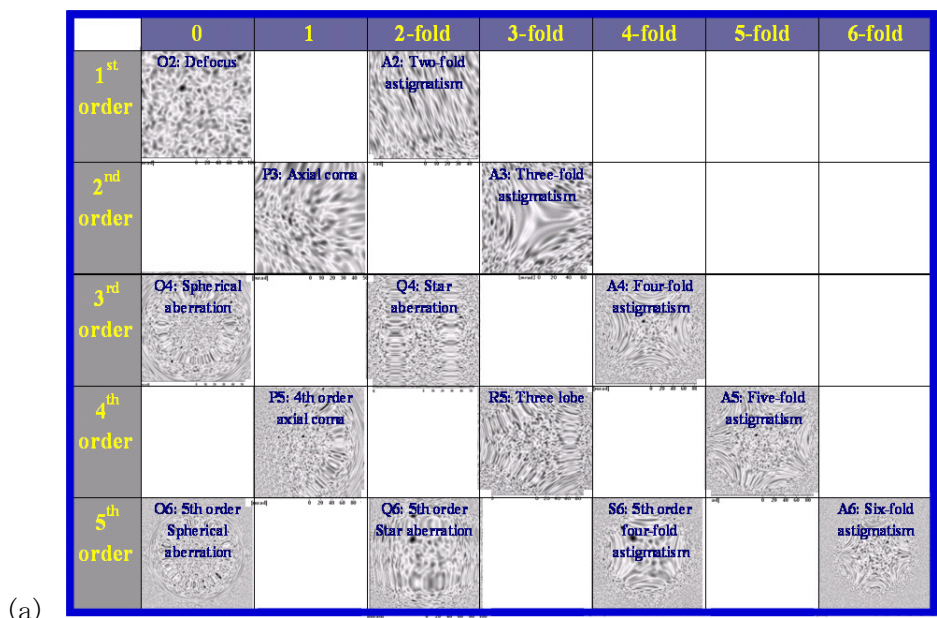


図 4.1 (a) STEM の Ronchigram 計算図形。完全レンズにゼロでない収差 C_{nm} を加えて、Ronchigram をコンピュータ画像作製した。 C_{nm} に対する Ronchigram 図形を表の n 行 m 列のマス目に示す。(b) Ronchigram を 4×4 に分割して得られる Segmental-Auto-correlation 図形。各 Segment の Auto-correlation 図形には収差 C_{nm} に特有の 2 次曲線図形が現れる。2 次曲線の解析から収差係数 C_{nm} が求められる。

B. 収差自動補正システム

SRAM 法で収差係数を求め、収差を最小化する照射系収差の自動補正システムを開発し、0.5Å 分解能を得られる STEM ビームを作る収差係数自動補正システムを作成した。計測は、図 4.2 にまとめたように進める。Ronchigram を $n \times n$ 分割したそれぞれについて Auto-correlation (AC) 図形を作成後、各 AC 図形に現れる楕円図形について長径、短径、XY 軸からの回転角度を計測した 2(フォーカス変化) \times 3(長径、短径、回転角) \times ($n \times n$) 組のデータから $N=12$ 個の収差係数を決定する。本方式は次の特徴をもつ。(1) 観察する試料の一部に非晶質膜があれば良い(2) 焦点の異なる 2 枚の Ronchigram を撮影するだけで良い(3) $n \times n$ を増やすだけで、計測できる収差係数の数と精度が上がる。Segment の選択は、任意の場所で良い。特定の標準試料がいらす、従来法(※)に比べて、迅速、正確な計測ができる有利さがある。

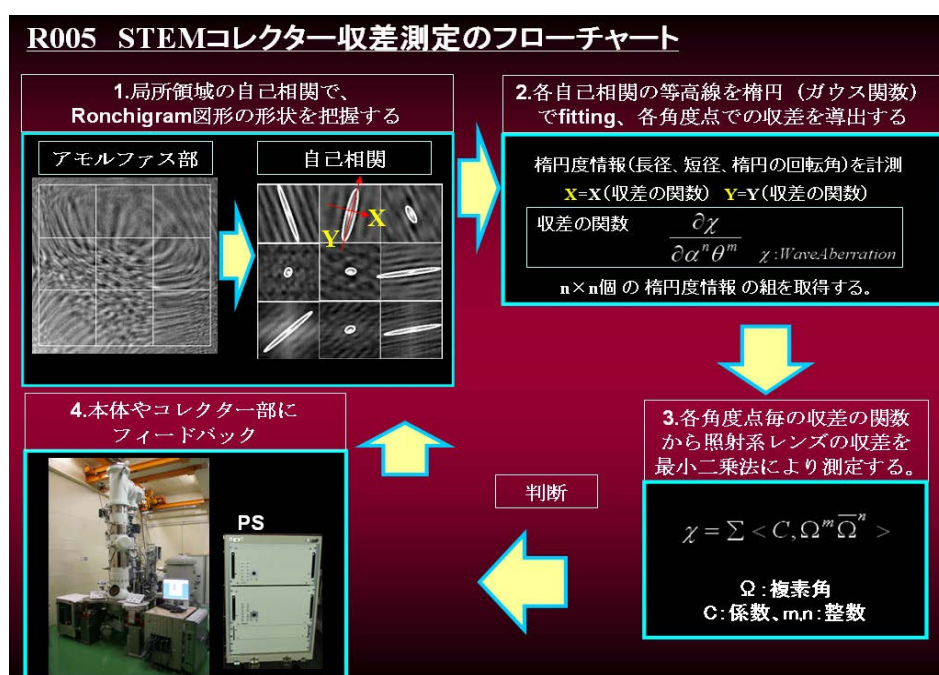


図 4.2 SRAM による STEM 自動収差補正システム

(※) 従来の照射系収差係数測定法

照射系球面収差補正機を用いた走査透過電子顕微鏡像 (Scanning Transmission Electron Microscopy: STEM 像) 観察を行う際には、プローブを小さく絞るために、収差を最適な状態に設定する必要がある。そのためには、収差値の測定法が必要である。Haider らは、暗視野 STEM 像 (DFI: Dark Field Image) を用いた収差測定法で自動補正システムを構築している。この方法では、正焦点 (Just focus) と不足焦点 (Under focus) あるいは過焦点 (Over focus) の DFI 像を用いて、Deconvolution 法によりプローブ形状を計算している。電子線を傾斜させた像からも Deconvolution 法によりプローブを計算し、これらの組から照射系の収差を計算している。一方、Ronchigram 図形を用いた収差測定法も提案されている。Cowley らが言及しているように、Ronchigram 図形の形状変化から照射系の収差を把握することができる。Lin らは、格子を含んだ Ronchigram 図形の幾つかのフォーカスの組から収差が計算できることを実証している。Ronchigram 図形からの収差測定を球面収差補正装置に適用した例もある (Dellby ら)。彼らは、電子線を試料上で移動させ、その移動が生み出す Ronchigram 上での目標物の移動量から照射系の収差を計算し、各レンズ系にフィードバックするシステムを構築している。

C. SRAM 法による収差補正

本研究で得た Ronchigram 理論式によって Ronchigram 図形を計算し、実験と比較した。計算にはアモルファス像を試料関数として用いた。収差補正装置を用いて得られた Ronchigram 図形を図 4.3(a)に示す。図 4.3(b)には、三次の球面収差 $-7 \mu\text{m}$ 、五次の球面収差 1.7 mm 、六回非点 0.4 mm を導入して計算した Ronchigram を示す。双方が良く一致していることから、実験において四次までの収差は補正されており、実験 Ronchigram の六角形の外形は六回非点が起源であることが分かる。

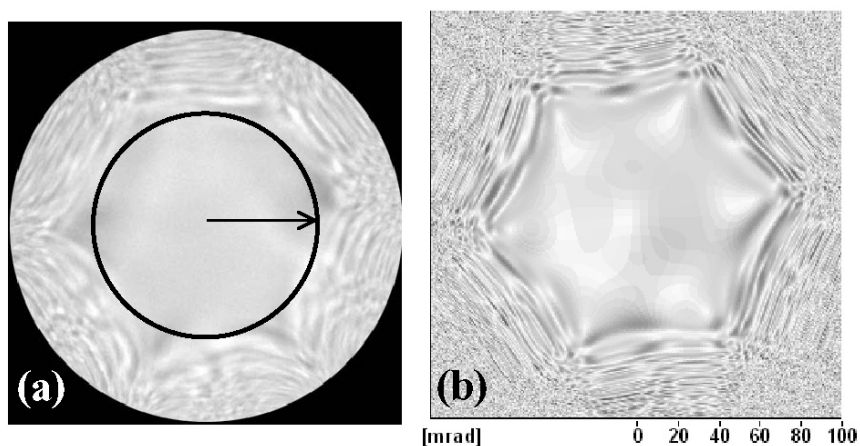


図 4.3 (a) 実験で得られた Ronchigram 図形、(b) 計算 Ronchigram 図形.

図 4.4 は、新しく開発した照射系収差補正器搭載時における収差補正前後の Ronchigram を Gatan Ultra-scan $2\text{k} \times 2\text{k}$ CCD camera で取得したものである。Ronchigram 図形の中央付近でコントラストがフラットに見える領域がある。この領域は「倍率が無限拡大の領域」であり、収差が補正されている入射電子の照射角度範囲を示す。このコントラストがフラットな領域の半径が、収差補正前は 11 mrad (半角) ほどであるのに対し、収差補正後は 50 mrad (半角) まで広がった (図 4.4(a), (b))。照射角度と実空間格子の関係は、 40 mrad が 0.5 \AA に相当する (§ 4.1.1 C(i) STEM 分解能の節を参照)。

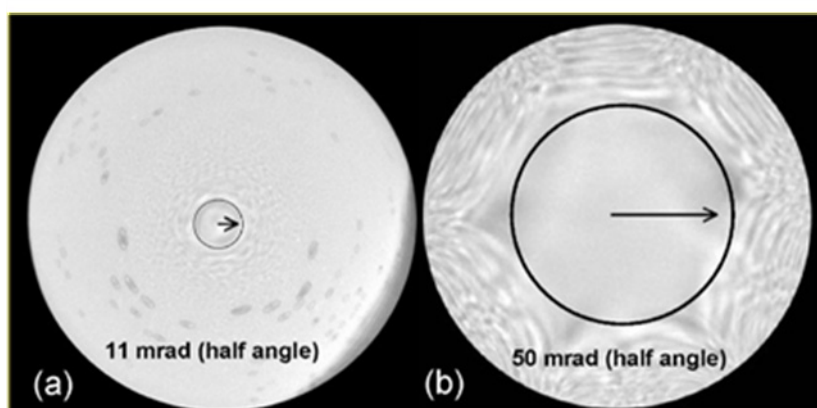


図 4.4 アモルファス部からの Ronchigram 図形 (a) 収差補正前、(b) STEM Corrector で収差補正後.

4.4.2 結像系球面収差補正

A. Diffractogram Tableauによる収差補正法

TEMの収差測定にはDiffractogram Tableau法を用いた。この方法は、入射ビームを光学軸から傾けて非結晶質膜の高分解能像を得たのち、フーリエ変換して得たDiffractogramを用いる。10 nmほどのアモルファス領域があれば、収差を測定できるといった汎用性があるほか、後述するように波面収差の二回微分に相当する項を測定していることになるため、収差の変化に対する感度が高く、精度が高いと言える方法である。R005では、42 mradまで収差補正された(図4.5(d))。

B. 各種収差を導入した場合のDiffractogram図形

Ronchigram式(文献[I12])を用いて、収差がある場合のDiffractogramを計算した。図4.5(a)~(c)に各種収差を導入した例を示す。球面収差が存在する場合、入射電子線角度を大きく振るほど二回非点とフォーカスが円筒対称に導入される(図4.5(a))。スター収差を導入した場合は、高角の領域で二回非点とフォーカスが導入される(図4.5(b))。三回非点が入力された場合は、フォーカスは変化せず、三回対称に二回非点が入力される様子が分かる(図4.5(c))。このように、収差の種類に応じてDiffractogram Tableauの形が変化する。

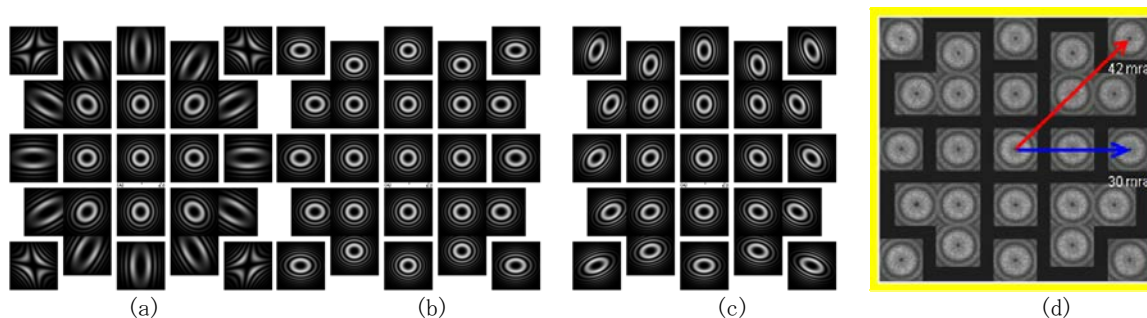


図4.5 (a)三次球面収差($100\mu\text{m}$)を導入したDiffractogramのシミュレーション. フォーカスは -300nm 、(b)スター収差($40\mu\text{m}$)を導入したDiffractogramのシミュレーション. フォーカスは -300nm 、(c)三回非点収差(2000nm)を導入したDiffractogramのシミュレーション. フォーカスは -300nm 。(d)収差補正後TEMのDiffractogram Tableau.

C. 結像系球面収差補正装置で補正後の収差の実測

新しく開発した結像系球面収差補正装置で、収差を補正した後のDiffractogramを図4.5(d)に示す。上記の計算図形と異なり全角度領域におけるDiffractogramが、フォーカス量を示す第一ゼロ点と、二回非点を示す楕円形状に関し同様の形状を示し、収差が補正されていることが分かる。三次の球面収差は、 $-1\mu\text{m}$ 程に補正されており、五次の球面収差も1 mm以下で十分に小さい。結像系収差補正が正しく行われていることが示された。

(※) 従来の結像系収差測定

アモルファスの像をフーリエ変換したDiffractogramは、結像系のフォーカスや二回非点等の収差を把握するために、古くから用いられている。F. Zemlinは、ビームを傾斜させ取得したDiffractogramの組、いわゆるTableauを用いた結像系の収差計算を提案している。この方法は、精度良く測定できることから、いくつかのグループで用いられ、自動収差補正にも発展されている。他の方法として、意図的に傾斜した入射電子線が生み出す、像の移動を用いて収差を計算する方法もあり(Beam-tilt-induced Image displacement法)、両者を組み合わせた方法も行われている。

4.5 改良型 CFEG の開発と評価 (日本電子 近藤グループ、東京工業大学 高柳グループ)

改良型 CFEG では、電子源(Tip)近傍で、安定に電界放射が継続する 1×10^{-9} Pa の超高真空を得るため、真空設計を改良した。電子源と加速管の構造を変え、電子源近傍の排気ポンプとして非蒸発型吸着ポンプ(NEG: Non-Evaporable Getter pump)を採用した。その結果、 $1 \sim 2 \times 10^9$ A/cm²/str という輝度で、「エミッション電流が長時間(8時間)、一定(変動幅10%以内)に保たれる」という、CFEG の通念を打ち破る、安定な電子源が実現した。

A. 冷陰極型電界放射電子銃の真空排気系設計

冷陰極型電界放射電子銃で安定な電子ビーム強度を得るためには、表面科学の分野で確立している電界放出顕微鏡(FEM)や電界イオン顕微鏡(FIM)で使われる 10^{-9} Pa の真空が必要である。CFEG 試作機の構造から見積もったコンダクタンスを基に、各部の真空度を見積もり、実測値と比較した。その結果、①Tip 近傍の真空度不良、②加速管のコンダクタンス不足、③加速管表面の脱ガス不足などが明らかとなった。これらの結果を踏まえて、①Tip 近傍を局所排気する大排気速度のポンプの採用、②加速管の再設計、③脱ガス処理の強化を再検討して、新規に CFEG 開発を進めた。

新規開発の CFEG の構成を図 5.1 に示す。また、電子ビームの安定性を計測した結果を図 5.2 に示す。さらに、Tip から出射する電子ビームのエネルギースペクトルを図 5.2 に示した。エネルギー幅として 0.32 eV を得ている。新設計 CFEG の Tip 位置に 1,000 L/s 程の超高排気速度のポンプを配置することで 10^{-9} Pa の真空度が得られることが、シミュレーションの結果から導かれた。所要の排気速度を得るため NEG ポンプを採用して、予想以上の良好な結果を得た。NEG を使用した CFEG では、常時ビームを出しておくことも可能で、ショットキー型 FEG と同レベルでのビーム安定性、汎用性が得られたと言える。NEG ポンプ排気方式は JEOL 社の市販 200 kV 用 CFEG にも応用でき、汎用性が極めて高い。

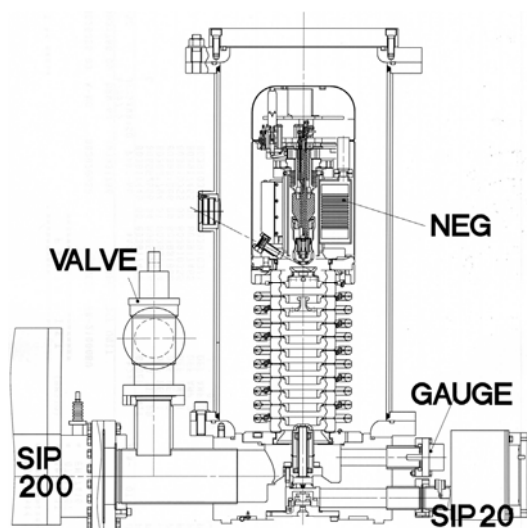


図 5.1 CFEG の構造

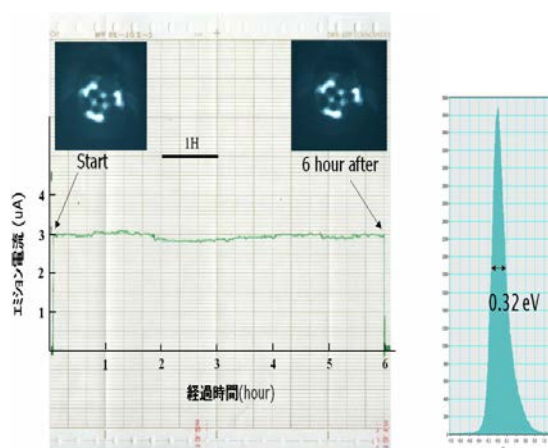


図 5.2 ビームの安定性とエミッターのエネルギー幅

B. 新 CFEG の開発 (日本電子 近藤グループ)

改良 CFEG の評価結果に基づき、NEG ポンプを加速管下部の排気、ならびに電子銃(Tip)近傍の排気を強化して、0.5 Å 分解能での定量分析・計測顕微鏡に必要な電子源の安定化を図った。

4.6 R005 開発 II (マルチステージ) (日本電子 近藤グループ)

”その場観察”試料ホルダーは広い試料スペースを必要とするため、ワイドギャップで高性能(磁極のギャップが4 mm 近い間隔で、球面収差補正後の色収差係数が1.5 mm 程度となる)の対物磁極を開発した。一般的には、対物レンズポールピースのギャップが広がると色収差係数 C_c は大きくなるというのが通説であるが、レンズシミュレーションにより、市販 300 kV 電子顕微鏡用の対物レンズよりも広いギャップ (4 mm 程度) でありながら、 C_c は小さくなるという画期的なレンズ設計ができた。ワイドギャップ対物レンズを組み込んだステージで多様な、“その場観察”機能(ガス導入、蒸着) が利用できるようになった。

4.7 ナノスペースラボ (東京工業大学 高柳グループ)

電子顕微鏡での“その場”観察(NSL: nano-space lab. system)を構築した。TEM 観察用に”TV レート” (30 fps) で S/N 比の良好な高感度かつ高分解能で動画を記録するカメラシステム(IRS: image recording system)、ならびに、動画像記録解析システム(DAS: data acquisition system)を開発した。

A. 画像記録カメラシステム

シンチレーター上での電子流密度が 30 pA/cm^2 の条件下で、約 $60 \mu\text{m}$ 間隔の縞 (電子顕微鏡の倍率が120 万倍で、試料上の 0.05 nm 間隔の縞を観察することに相当) を TV レート (30 fps) で記録可能なカメラシステムを構築した (図 7.1)。

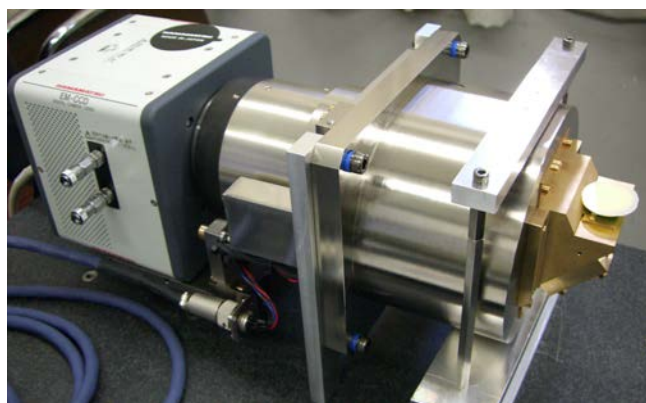


図 7.1 動画像記録カメラシステム

右端黄色円盤状カバー (電子顕微鏡組み込み時には取り外す) の直下にある YAG シンチレーターの発光像が、その下部にある折り曲げミラー、図の中央部にある大口径レンズを通り、左部の EM-CCD カメラに等倍結像される。

高空間分解能と高速読み出しを実現するために、EM-CCD (電子増倍型 CCD) カメラ (浜松ホトニクス C9100-02) を採用した。視野サイズ $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 、 1000×1000 画素、14 bit 階調である。

TV レート記録では読み取りノイズを低減化することが重要である。同カメラは、CCD 上で電子増倍機能を有し、読み出しノイズを増やすことなく信号を増倍できる。また、CCD を $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ に冷却することにより、高い電子増倍率に加え、低ノイズ特性が実現されている。CCD のペルチエ冷却に伴って発生する熱は、電子顕微鏡レンズの循環冷却水で冷却する。

図 7.2 に示すように、YAG シンチレーターを用いて電子顕微鏡像を光学像に変換し、それを EM-CCD カメラで記録するが、CCD チップは冷却されているので、レンズ結合型のカメラシステムとした。高分解能動画記録のためには、明るいシンチレーター、開口数の大きなレンズ、それに対応した EM-CCD カメラが必要である。以下、要点を記す。

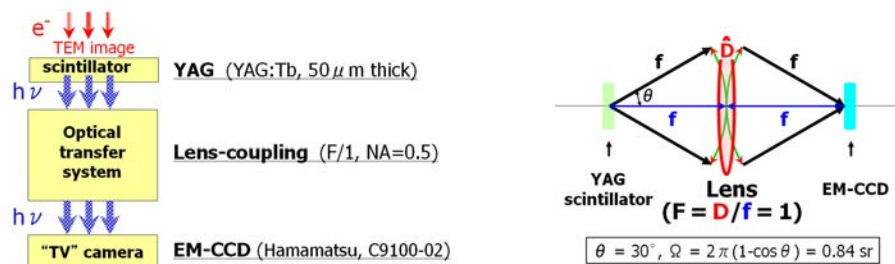


図 7.2 レンズ結合型カメラシステムの構成図

(1) シンチレーター

高い発光効率を有する Tb 添加 YAG 板 (厚さ $50 \mu\text{m}$) を採用した。残光時間が 1ms と、通常の YAG (70ns) に比べて長い、TV レート記録にはまったく問題ない。

(2) レンズ結合光学系

シンチレーターから発せられる光子を多く取り込むために、開口数の大きなレンズを用いた。本プロジェクトでは、まず、 200kV 電子顕微鏡に、開口数 $\text{NA}=0.5$ 、分解能 20lp/mm (mm 当たりの line pair、 $50 \mu\text{m}$ 周期) のテストレンズを用いて、予備調査を行った。その結果、1 電子当たり 80 個の光子を EM-CCD カメラに取り込めること、シンチレーター上 $63 \mu\text{m}$ 周期の縞模様を画像として記録できることが確かめられた。

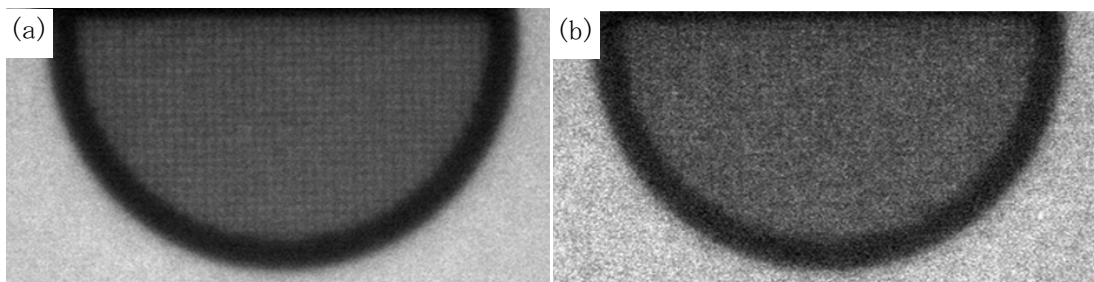


図 7.3 テストカメラシステムの性能評価。 $63 \mu\text{m}$ 間隔の grid の TEM 像。TV レート記録 (30ms/frame) から切り出した 1 フレーム画像。YAG 上の電子流密度、EM-CCD の電子増倍率は、それぞれ、(a) 200pA/cm^2 、6 倍、(b) 30pA/cm^2 、40 倍である。

これは、従来の市販動画記録 CCD カメラシステム (GATAN 社、Tiez 社) に比べて約 2 倍高い分解能である。ただし、周辺での光量低下 (中央の 55%程度)、電子顕微鏡から EM-CCD カメラへの X 線漏洩が課題であった。また、光学レンズ系の分解能を 1.5~2 倍程度向上させると、縞模様の強度分布のより正確な記録が可能になる。そこで、「視野の全面にわたり、 40lp/mm ($25 \mu\text{m}$ 周期) の分解能を有し、周辺光量の低下を中央の 80%までに抑える」レンズ結合型カメラシステムを設計、製作した。その外観写真を図 7.1 に示した。具体的には、

- ・ 開口数 : $\text{NA}=0.5$ (実効 F 値=1)、レンズ径 : 約 100mm 、ワーキングディスタンス : 約 80mm 、9 群 12 枚構成の組み合わせレンズを設計。
- ・ シンチレーターと光学レンズの間に、帯電防止コーティング、無反射コーティングを施した鉛ガラスを配置。
- ・ 光学系に含まれる平板ガラス (鉛ガラス 1 枚、透明石英ガラス 2 枚) の作る収差の影響を取り除くレンズ設計を行うとともに、YAG:Tb からの複数の発光波長 (549nm の主ピークその他、 $490, 590, 630 \text{nm}$ にピーク) に合わせた色収差補正を実施。

- ・モーターによるフォーカス調整機構の組み込み。
- ・光学レンズ内に光量調節用絞りを組み込み。
- ・EM-CCD のカメラマウントを、C マウントから、M38 ネジマウントに大型化。

本システムを R005 装置に組み込み、TEM 画像の観察、記録に使用している。1 電子当たり、EM-CCD カメラに取り込まれる光子の数は、約 130 個である。本カメラシステムを用いると、YAG シンチレーター上の電子顕微鏡像の強度分布を、S/N を劣化させずにデジタル記録することができる。

B. 動画像記録解析システム

開発したカメラからの画像（1000×1000 ピクセル、14 bit）を 30 fps、16 bit 階調で記録するシステム（LabVIEW）を構築した。動画像記録と並行して、輝度コントラストを調整した 8 bit 画像の表示、あるいは、FFT パターンの表示を行える。フレームレートは可変であるので、電子顕微鏡像の時間変化がゆっくりであり、画像が暗い場合には、動画記録のフレームレートを 30 fps 以下に落とすことができる。あるいは、ビンニングを行い、画像のピクセル数を 500×500 に減じると、より高速に、60 fps で画像記録をすることが可能である。R005 装置による TEM 像の記録に使用している。動画像と電子計測データなど、その他のデータを同期記録・解析するソフトも構築した（図 7.4）。

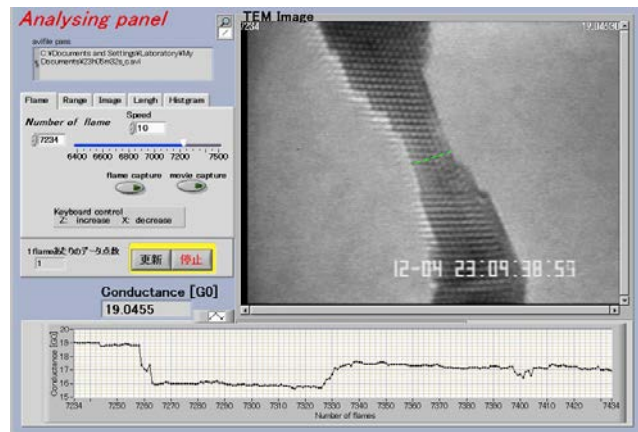


図 7.4 動画像記録・解析システム

4.8 0.05 nm 分解能の実証 (JEOL 近藤グループ、東工大 高柳グループ)

(1) 研究実施内容および成果

開発している装置が 0.5 Å 分解能をもつことを検証するための実験を進め、STEM 像で 0.047 nm の構造が分離して観察でき、世界最高の分解能が得られた。得られた分解能は、アメリカの TEAM プロジェクトの報告値と同じであるが、その他のプロジェクト (super-STEM など) を凌いでいる。

(2) 研究成果の今後期待される効果

0.5 Å 分解能が特別のものではなく物質観察の基本性能となった。そのため、さらに、高性能な技術開発が進み、物質現象の解明が進展していく効果が期待される。

研究実施内容の詳細と成果を STEM, TEM それぞれについて記す。

4.8.1 STEM 分解能

IV 族、III-V 族半導体を [110]、[112]、[114] 結晶軸方向から観察して、分解能を調べた。GaN 結晶で 63 pm 分解能を、Ge 結晶で 47 pm 分解能を確認した。

A. GaN 結晶 HAADF-STEM 像

GaN 結晶 (六方格子) を [211] 方向から観察したときの HAADF-STEM 像を図 8.1 に示す。

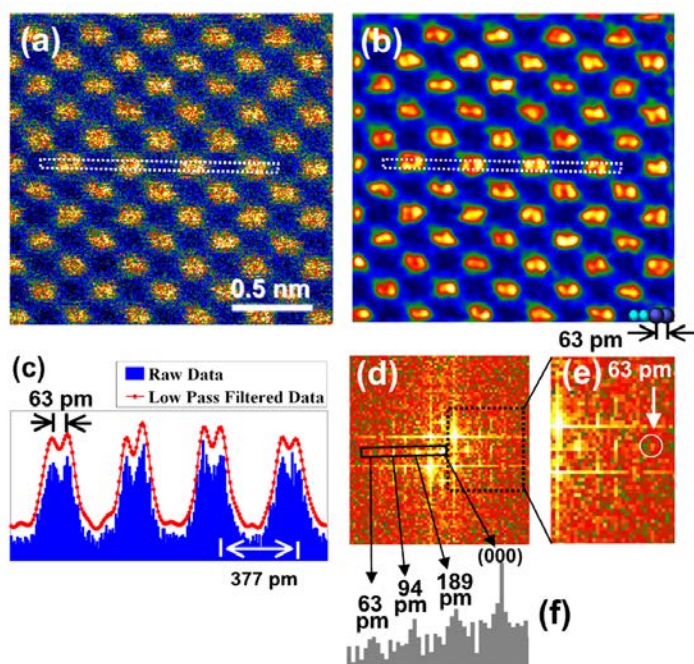


図 8.1 GaN [211] の HAADF 観察像. (a) わかりやすいように色を付けた Raw image、(b) Low pass filtered image、(c) (a)からの強度プロファイル (6 pixel 幅)、(d) (a)からのフーリエ変換図形、(e) (d)の拡大図形、(f) (d)の強度プロファイル (2 pixel 幅). 63 pm の FFT スポットが強度をもって明瞭に認識できる。

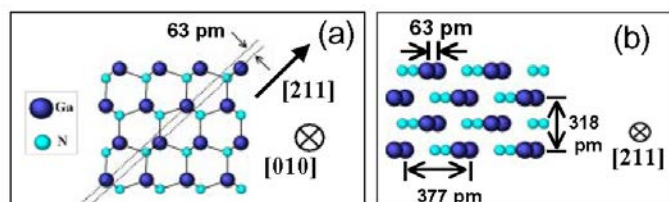


図 8.2 GaN 結晶構造の模式図. 濃い青丸が Ga 原子、薄い青が窒素原子を表す。[211] 方向に Ga 原子が並んだ原子列は、互いに 63 pm 離れている。同様に、窒素原子列も 63 pm 間隔で Ga 原子列の傍にある。

GaN 結晶の [211] 方向は [010] 方向と垂直の関係にあり、図 8.2 に示すように、この方向から観察すると、Ga-Ga 原子列の間隔は 0.063 nm (63 pm) である。また、この Ga-Ga 原子列に近接して、63 pm 間隔の N-N 原子カラムもある。HAADF の検出角度は 81~180 mrad と設定した。図 8.1 において、二つの輝点からなる水平方向に伸びたコントラストは、Ga-Ga 原子列位置に相当する。63 pm の距離は、水平方向の単位長さ (377 pm) を参照して長さを校正、計測した。(c) の強度プロファイルから分かるように、Ga-Ga 原子列間隔 63 pm を実空間で分離することができた。63 pm の分解能を最初に達成した (文献 [I10])。

B. GaN 結晶 明視野 STEM 像

軽元素 (N : 窒素) を観察する目的で、GaN[110] の明視野観察を行った。Under focus では、Ga の原子位置は黒く、N の原子位置はやや薄い像強度 (像コントラスト) として結像されている (図 8.3(a))。一方、Over focus では、原子位置が白く結像されている (図 8.3(b))。Ga 原子位置は強い像コントラストで、N 原子位置は淡い像コントラストとして結像されている (図 8.3(b))。0.113 nm の Ga-N 原子間隔も分離して結像できており (図 8.3(d))、軽元素の撮影も可能であることが示された。

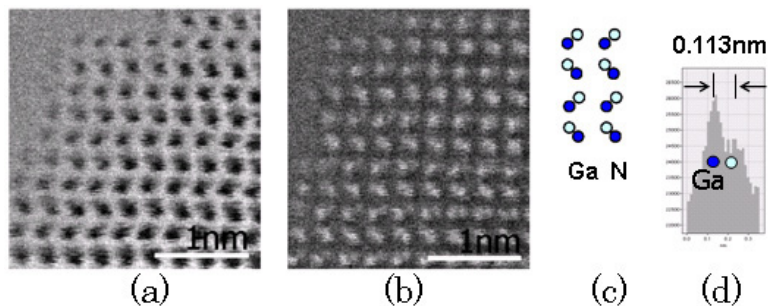


図 8.3 GaN 結晶の明視野 STEM 像。(a) under-focus 像、(b) over-focus 像 (c) [100] 入射軸から見た Ga 原子列と N 原子列の配置。Ga-N 原子間距離は 0.113 nm。(d) STEM 像から得た Ga-N の強度プロファイル。N 原子列が Ga と分離して見える。

C. Ge 結晶 HAADF-STEM 像

Ge 結晶 [114] 方向から観察した HAADF-STEM 像 (図 8.4) において、47 pm の原子列間隔を分離観察することができた (文献 [I15])。STEM 像のフーリエ変換像には 47 pm の周期に相当する $(\frac{8}{8} \frac{8}{4})$ フーリエスポットが表れている。像のプロファイルと実験条件に基づいて Multi-slice シミュレーションした結果と比較した (図 8.4 挿入図)。47 pm 間隔のコントラスト ($C \equiv$ 最大強度と最小強度の差を平均強度で除した値) は 10% ほどで、STEM プローブサイズから期待されるコントラストに比べて小さい。

Si[110]、Ge[112]、GaN[211]、Ge[114] の HAADF-STEM 像、あるいは、AlN 結晶の STEM 観察も実施した。図 8.5 に示すように、Si[114]、ダイヤモンド[114] の STEM 像を除いて原子列の分離観察ができた。

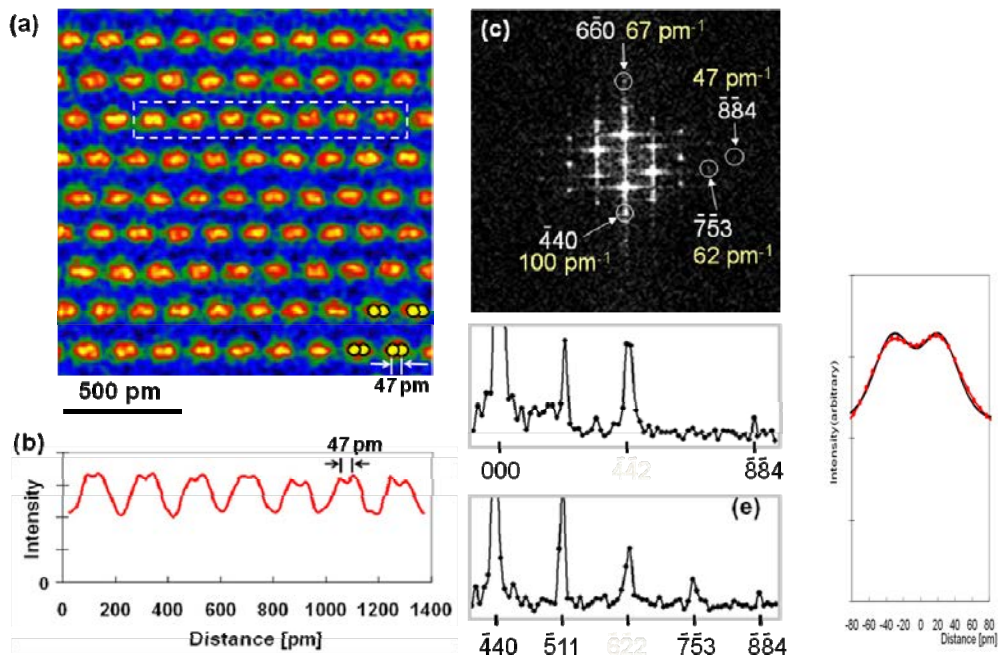


図 8.4 Ge 結晶の HAADF-STEM 観察像。(a)Ge 結晶を[114]軸から観察した HAADF-STEM 像。(b)像の強度プロファイル、(c)フーリエ変換像、(d)そのラインプロファイル図。47 pm の間隔は、 $(\bar{8}\bar{8}4)$ ミラー指数面に相当する。(挿入図：右端) Ge[114]結晶の HAADF-STEM 像ラインプロファイル (赤線) と Multi-slice シミュレーション (黒線)。

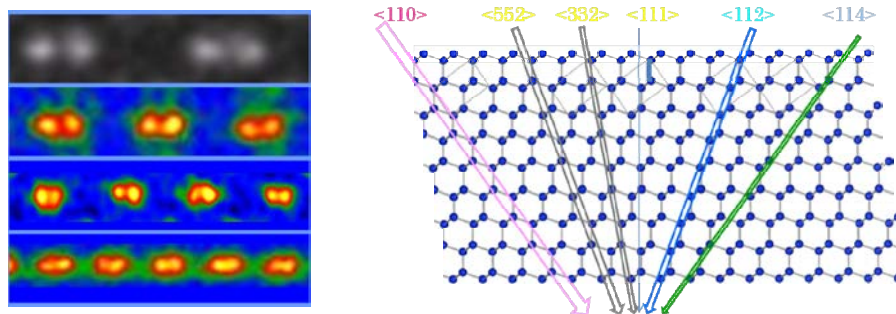


図 8.5 Si[110]、Ge[112]、GaN[211]、Ge[114]の HAADF-STEM 像の部分拡大図 (左図)。それぞれの原子列カラムの間隔は、上側の Si から下側の Ge 向かって、136 pm、82 pm、63 pm、47 pm である。Si[110]と Ge[114]では、3 倍近いカラム間隔の差がある。(右図) Si, Ge 結晶 (面心立方構造) を<110>方向からみた原子配列の模式図。[110]、[112]、[114]方向の原子列を示す。GaN 結晶 (六方格子) の[211]原子配列は図 8.2 を参照。

4.8.2 TEM 分解能

A. ヤングフリンジ

非晶質カーボン膜上に金を真空蒸着した試料の TEM 像を、微小距離移動して重ね合わせて撮影した TEM 写真をフーリエ変換して得られる Diffractogram (ヤングフリンジ図形) から分解能を評価した (図 8.6)。50 pm の実空間距離に相当する周波数成分が Diffractogram にあるので、50 pm 周期の変調が TEM 像に記録されていることが分かる。

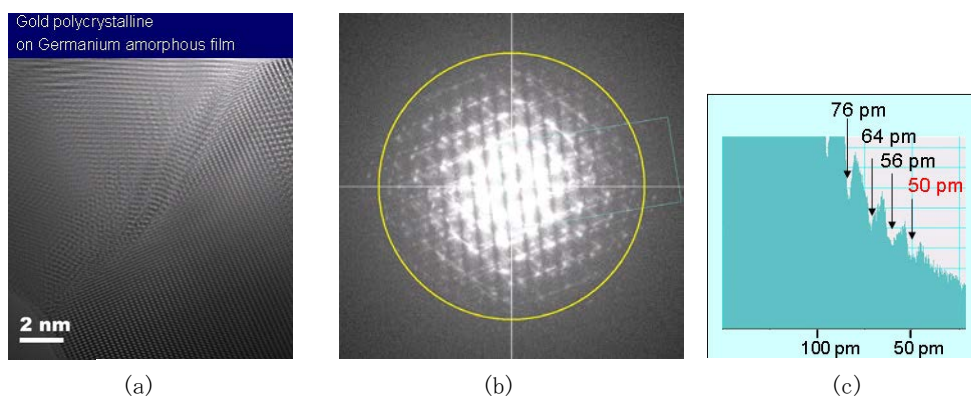


図 8.6 ヤングフリンジ実験によって得られた (a) Diffractogram、(b) TEM 像、(c) Diffractogram のプロファイル。

B. 単原子像

グラフィン膜上に金微粒子を蒸着した試料の TEM 像 (図 8.7) では、粒子の縁部分に単原子像が観察できる。炭素と金の単原子のシミュレーション像 (図 8.8) のコントラスト比は約 7 倍である。原子番号比 (炭素は 6、金は 79 なので 13 倍) と比べると、軽元素の像コントラストは相対的に強い。

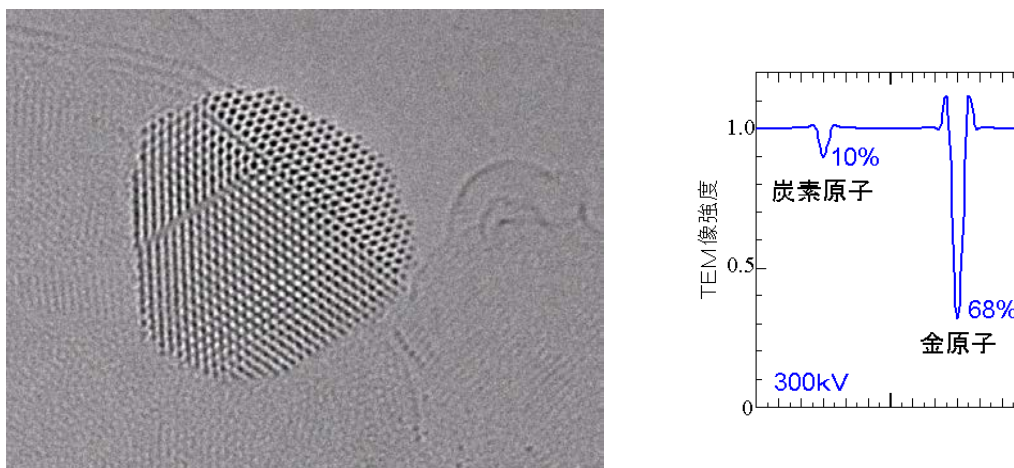


図 8.7 グラフェン膜上の金粒子。
粒子の縁に見える黒点は、金単原子の像。金原子が 2 個重なっている箇所は、像強度 (の変化量) が単原子の 2 倍。

図 8.8 炭素と金原子の TEM 像コントラストシミュレーション。原子像の強度プロファイル。

4.8.3 微粒子、ナノワイヤ

Au 微粒子の TEM 像において、粒界や表面に現れる収差の影響の低減の確認を行った。収差補正前の像には、金の微粒子内にある粒界部や表面部において球面収差によるコントラストの染み出しが見える (図 8.9(a))。一方、補正後の像では、粒界や表面における情報の染み出しが大幅に低減されている (図 8.9(b))。

Au 薄膜に強い電子線を照射することにより、Au ナノワイヤを作製し、結像系収差補正装置を用いて高分解能観察を行った (図 8.10)。支持結晶部やナノワイヤと真空との境界に、球面収差による像の染み出しが無く、原子配列の微細構造が明瞭に写し出されている。

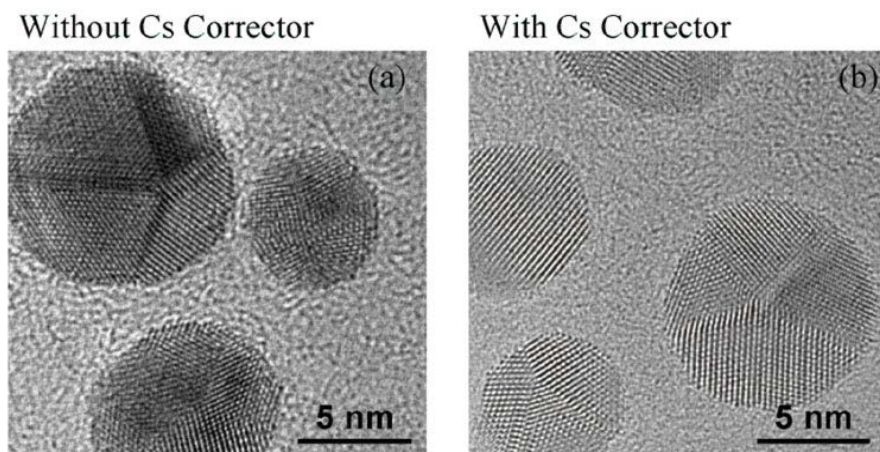


図 8.9 金微粒子 (Ge アモルファス上) の高分解能像. (a) 補正前、(b)補正後.

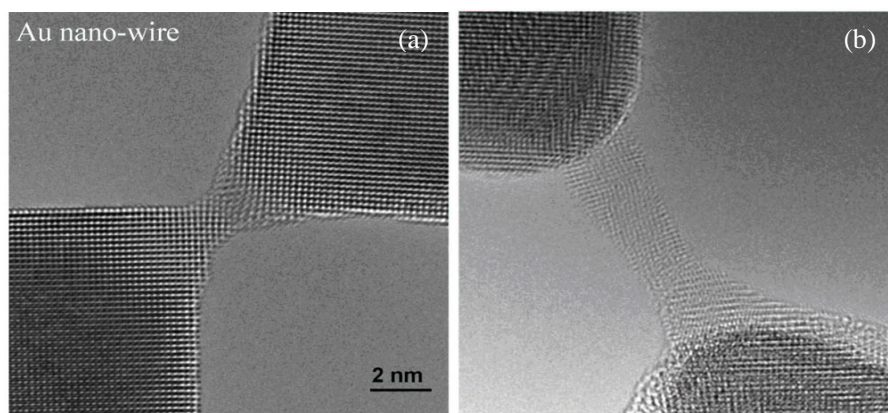


図 8.10 金ナノワイヤの観察例. (a)支持結晶と配向性を保っている例、(b)支持結晶と配向性がなくなった例.

4.9 0.05 nm 分解能による物質現象の観察 (東京工業大学 高柳グループ)

単原子の観察をすすめ、物質現象で重要な役割を果たす軽元素の観察の可能性を STEM 法あるいは TEM 法で探った。下記に実施内容と成果、今後期待される効果を列挙する。

A. 半導体デバイス材料中のドーパント原子の観察

(1) 研究実施内容および成果

開発した R005 装置によって、シリコン(Si)結晶中のヒ素ドーパント原子の観察を試みた。試料はヒ素を打ち込んだシリコン結晶を SIMS で分析後、表面層を除去してヒ素濃度が 1.2%ほどの部分を 10 nm~20 nm の厚みで取り出して、HAADF-STEM で観察した。ヒ素を打ち込んだ領域を局所的に作製して、非打ち込み (non-doped) 領域と比較できるように工夫した。観察条件は、入射ビームの照射角度が 30 mrad、HAADF 検出角度は 60 mrad-160 mrad とした。STEM 像は試料の [001] 方向から観察した。[001] 方向に沿って Si カラムは、0.27 nm 間隔で並び、隣接したカラムは 0.2 nm 離れている。

観察結果をまとめると、シリコンだけの結晶部分で撮影した STEM 像中の non-doped カラムは、ほぼ一定な像強度を示した(図 9.1(a))。カラムの強度 I と頻度 $N(I)$ の関係(強度ヒストグラム)は概ねガウス分布であり、中心強度 I_0 の周りに強度揺らぎがあった。一方、ヒ素ドーパした領域の STEM 像では、non-doped 試料では見られなかった明るい強度のカラムが現れた(図 9.1(b))。それらの明るいカラムは、ヒ素ドーパントによることが計算機シミュレーションでも確認され、ヒ素ドーパントの観察に世界で初めて成功した(文献[I16])。

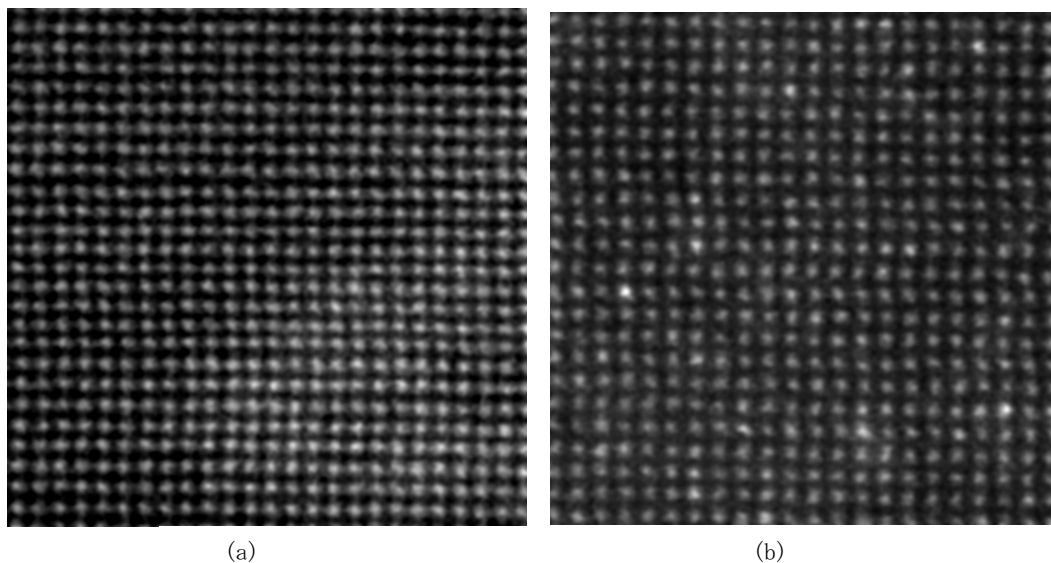


図 9.1 (a) non-doped シリコン結晶の HAADF-STEM 像と、(b) ヒ素 doped シリコン結晶の HAADF-STEM 像。白い点が原子カラム像。(a)では、全ての原子カラムが一定の明るさで見える。一方、(b)では、特に明るい原子カラムがある。それらは、As 原子が Si サイトを置換している。As 原子は Si 原子より原子番号 (As:33, Si:14) が大きいため、より明るい白点となる。

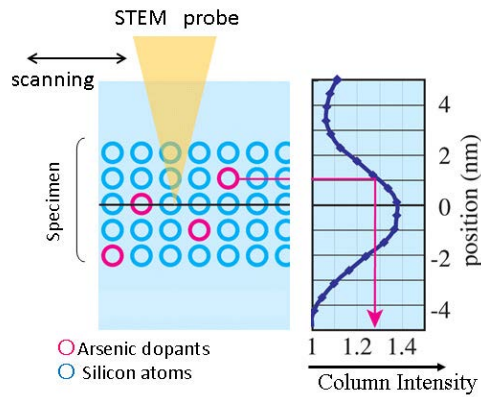


図 9.2 シリコン原子列中に置換した1個の砒素ドーパント原子によるSTEM像強度変化.
 試料中央に置かれた砒素ドーパント原子に、STEMプローブがフォーカスされている位置を基準とし、フォーカスのズレに対するカラムのSTEM像強度を求めた。ヒ素ドーパントを含んだカラムは、最大、non-dopedカラムの1.38倍明るい。焦点が合っているヒ素原子が最大強度を与え、焦点が±1.35 nm以上ズレた位置にいるヒ素ドーパントは強度が下がる。

次に、ヒ素ドーパントの密度や分布をSTEM像から求める課題を検討した。シミュレーションに従うと、STEM像のなかで、強度がnon-dopedの1.3倍以上のカラムはSTEMの焦点面を挟んで2.7 nm厚さのスライス内にヒ素原子が入っているカラムであることが示される(図9.2)。あるいは、焦点深度2.7 nmで、ヒ素ドーパントを観察していることになる(図9.3)。このことから、明るいカラムの相対的配置から、スライス内のヒ素ドーパントの密度や相対位置相関についての知見が得られるので、活性・不活性クラスター観察の有力な方法となることが示された。

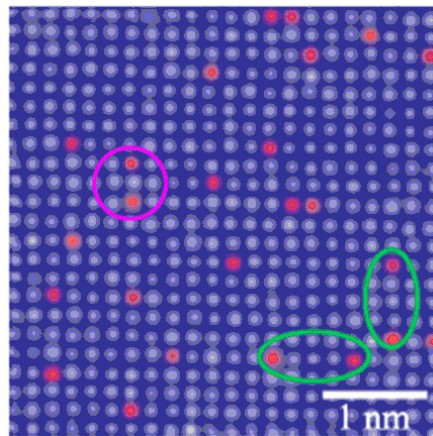


図 9.3 2.7nm スライス内にヒ素ドーパントがあるときのSTEM強度をもつカラムを赤色で示した。赤色カラムは、non-dopedカラムの1.3倍以上の明るさをもつカラムを表示している。STEM視野中のカラムのうち23個が強度1.3以上明るく、試料のドーパント濃度とも合致する。ピンク色のサークルで囲んだ2つの赤色カラム、あるいは緑色サークルで囲った2つの赤色カラムの相対配置に注意。図9.5のドーパントのクラスター構造を参照。

(類似研究との比較)

シリコン半導体中のドーパント原子(あるいは結晶中の不純物原子)の観察は、参考文献[1,2]などで、多数報じられている。観察されているドーパントは、Sb, Auなど原子番号の大きな元素であって、ヒ素原子の観察は報告されていない。従来のHAADF-STEM

観察では 10 mrad 程度の入射プローブ照射角を使用していたが、本研究では 30 mrad である。照射角が大きいほどスライス厚さは薄くなると言われているので（スライス厚さは、照射角の二乗に反比例）、50 pm 分解能電子顕微鏡であれば、試料を薄くすることなく内部のドーパント分布を知ることができる。

[参考文献]

[1] P. M. Voyles, D. A. Muller, J. L. Grazul, P. H. Citrin and H. J. L. Gossmann, Nature 416, 826 (2002).

[2] S. Ho Oh, K. van Benthem, S. I. Molina et al., Nano Lett. 8 (2008) 1016.

(2) 研究成果の今後期待される効果

半導体デバイスの微細化に伴い、ドーパント濃度の局所的揺らぎがデバイス性能に影響を与えることは良く知られ、製造技術ならびに分析技術の両側面からの研究が進められている。微細ソース近傍のハロー領域（図 9.4）においては、低いドーパント濃度や濃度変化や揺らぎを局所的に調べる方法が求められている。

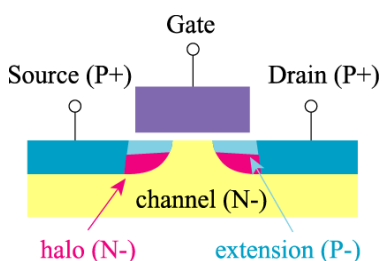


図 9.4 半導体デバイスのハロー領域

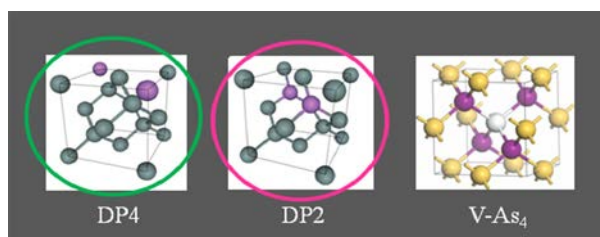


図 9.5 不活性クラスター

実用デバイスで重要な As ドーパントの観察は、この課題に応えるものである。さらに、ドーパント原子の凝集によってクラスター構造が生成され、中には電氣的に不活性になるもののあることが指摘されているが、個々のクラスター構造は観察されていない（図 9.5）。この課題に対し、クラスター構造を同定し、その電氣的な性質との対応を明らかにできる可能性があることから、今後の半導体デバイス・プロセス技術の向上に貢献すると期待できる。

また、ボロンなどシリコンより軽元素の P 型ドーパントの検出も期待されている。

B. 孤立単原子の観察

(1) 研究実施方法および成果

単原子を非晶質カーボン薄膜 (2 - 5 nm 厚) 上につけて、ADF-STEM 観察した。Au (Z=79)、W (Z=72)、Ag (Z=47)、Ge (Z=32)、Cu (Z=29)、Cr (Z=24)、Si (Z=14) を、抵抗加熱蒸着、あるいは、スパッタリング蒸着して、カーボン薄膜上にクラスターや単原子を分散させた。元素記号の後に括弧に入れて記した数字は各元素の原子番号である。

図 9.6 に、Au、Ag、Ge、Cu、Si の単原子の STEM 像を示す。入射電子の収束半角は 30mrad、ADF-STEM 検出器の検出角度範囲は 40 - 100mrad とした。図 9.6 の下段に、上段の四角で囲んだ領域の拡大像を示した。図 9.6 中、赤い矢印で示すように、5 種類の単原子を明るい輝点として観察できた。（本報告書では割愛したが、W、Cr の単原子の観察にも成功している。）これまで、重元素の単原子観察の報告はあるが、Ge、Cu、Si 等の軽元素の単原子観察は初めてである。

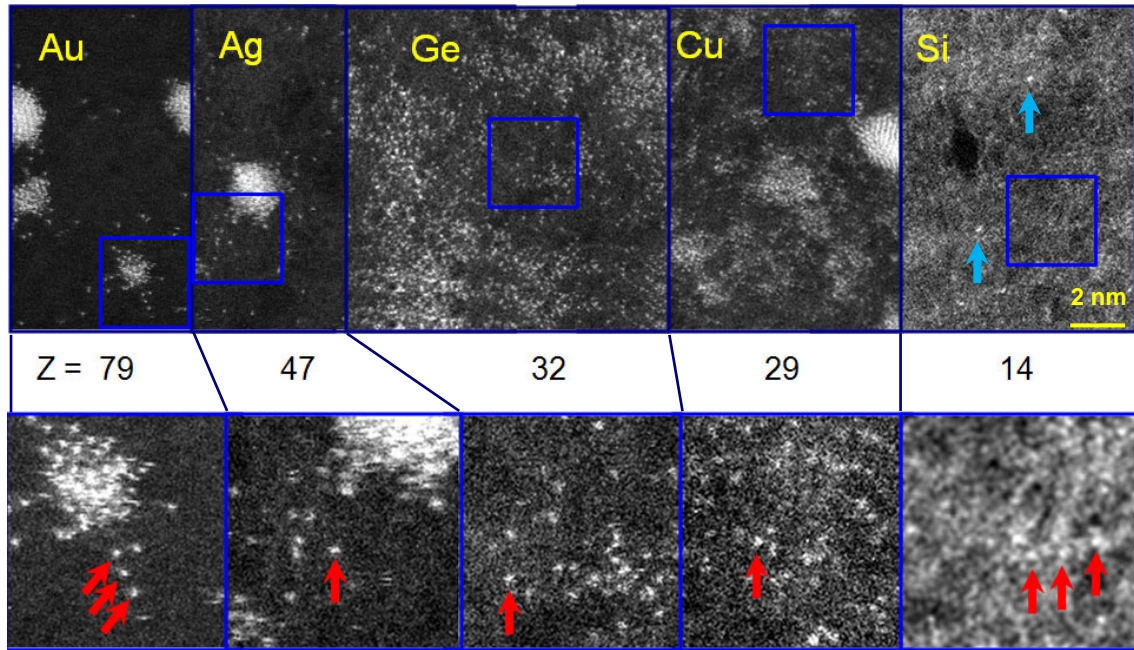


図 9.6 単原子の ADF-STEM 像 下段は上段の像の青い枠部分の拡大図である。単原子の像の輝点を赤い矢印で示した。Au, Ag, Ge, Cu, Si の単原子を輝点として観察できた。Si 試料の上段図中に青い矢印で示した輝点は不純物原子の像である (本文参照)。

(世界における位置づけ、類似研究との比較)

ADF-STEM による単原子観察は、1970 年、Crewe らによって始められた。ただし、その対象は、主に、U ($Z=92$)、Au などの重元素であった。その後、Batson らが、球面収差補正 STEM を利用して、Au 単原子の動的な観察を行っている。また、試料中の単原子の観察も行われているが、いずれも、対象は重元素単原子に限られていた。本研究は、観察可能な単原子の原子番号の下限を、従来の $1/3$ 程度にまで広げた。

(2) 研究成果の今後期待される効果

図 9.6 の Si 試料の像中に青い矢印で示した輝点は、その明るさ (Z -contrast) から、原子番号が $40\sim 45$ 程度の元素の単原子の像と推定される。この輝点は、Si 等を蒸着する前のカーボン薄膜にも見られることから、カーボン薄膜の作製過程において混入した不純物原子であると推定されるが、EDS 等では検出できなかった。STEM による単原子観察法は超高感度での不純物検出に応用できる。今後、低ノイズ、かつ、測定強度範囲の広い ADF 検出器系 (電子回路) の開発を進めると、重元素から軽元素に至る広い範囲で、より精細な元素選別に役立つであろう。また、STEM 画像の走査範囲を制限し、高速で走査を行うと、単原子の動きを観察できることから、結晶成長に関する分野への応用が期待できる。

C. バナジウム酸リチウム結晶の観察

(1) 研究実施内容および成果

バナジウム酸リチウム (LiV_2O_4) 結晶 (空間群: $Fd\bar{3}m$) 中のリチウム原子の可視化を試みた。図 9.8 に示すように、バナジウム酸リチウムを $[110]$ 方位から観察すると、リチウム、バナジウム、酸素原子列を観察することができる。リチウム原子列は、 $[001]$ 方向に沿ってバナジウムや酸素原子列とともに周期的に現れるため、 $[001]$ 方向に沿った強度ブ

ロファイルから判断することができる。近接した酸素とリチウム原子列間の距離は、0.1 nm 以上あることから、R005 で十分に観察可能である。環状暗視野 STEM 観察と同時に、軽元素のコントラストが現れやすい環状明視野 STEM 観察も行った。観察は、入射電子線の収束角 30mrad、環状明視野の検出角度 10-30 mrad、環状明視野の検出角度 75-200 mrad の条件で行った。また、プローブ電流は、10 pA とした。

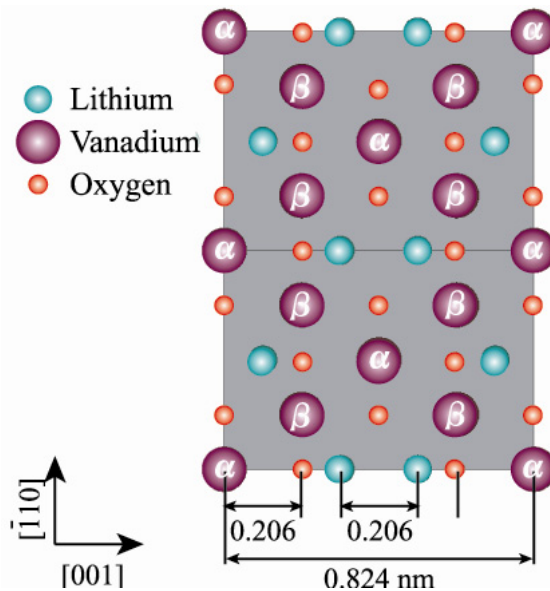


図 9.8 バナジウム酸リチウム (LiV_2O_4) 結晶を [110] 方位から観察した場合の構造図 (単位胞)

環状明視野 STEM 像 (図 9.9) において、原子列は黒いコントラストで観察された。写真の上側でコントラストが低くなっており、かなり薄い試料であることがわかる。このような薄い試料において、リチウム原子列を観察することができた。同時観察した環状暗視野 STEM 像 (原子列は白いコントラストで観察される) とともに、強いコントラストを示す原子列像から構成される三角格子を見ることができる。この強いコントラストを示すピークは、面心格子位置サイト (図中 α と示した) にあるバナジウム原子列に相当する。バナジウム原子列には図 9.8 において α と β で区別したように、 α サイトと β サイトの 2 種類がある。 α サイトが強いコントラストをもつのは、面心格子位置サイト (α) にあるバナジウム原子列を構成する原子数は、それ以外のサイト (β) にあるそれに比べ 2 倍であることによる。左下に環状暗視野 STEM 像のフーリエ回折パターンを挿入した。黄色で示す a, b スポットの指数は、 $(4\bar{4}0)$, (004) であり、黄色矢印のスポットは、 $(4\bar{4}8)$ である。 $(4\bar{4}8)$ 格子の面間隔は、0.084 nm であることから、この環状暗視野 STEM 像は、リチウム原子列を識別できるだけの分解能があることが確認できる。

リチウム原子列を確認するため、環状明視野 STEM 像の一部を拡大して図 9.10(a) に示した。また、[001] 方向に沿った強度プロファイルを示した。図 9.10(b) は、(a) に示した生の環状暗視野 STEM 像に、Radial Wiener Filter 法を施した像である。この方法は、周期構造の情報を失うことなく、信号/ノイズ比を向上できる。面心格子位置サイト (α) を結ぶ [001] 方向に沿ったライン (矢印で示す) 上の強度プロファイルより、隣り合う 2 つの面心格子位置サイト (α) に相当するピーク間に酸素原子列に相当するピークとさらにその間にリチウム原子列に相当する 2 つのピークを確認できる。(c) は、動力学的効果を含んだ計算シミュレーション像である。試料の厚さは 7.5 nm で、リチウム原子列に含まれる原子数は 13 個である。シミュレーション結果は、ほぼ実験結果の強度プロファイルを再現しており、リチウム原子列が観測できていることを証明した (文献 [I17])。

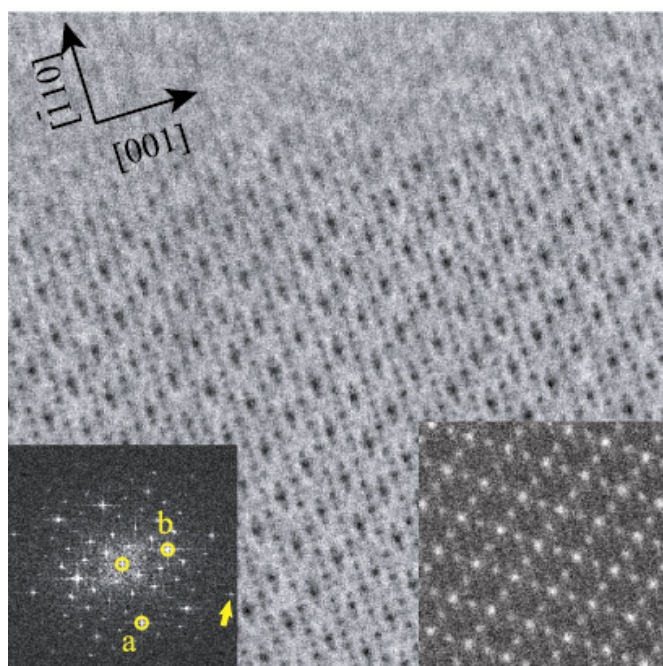


図 9.9 パナジウム酸リチウム (LiV_2O_4) 結晶を $[110]$ 方位から観察した環状明視野 STEM 像。右下：環状暗視野 STEM 像、明視野 STEM 像と単位格子の位置合わせをして、挿入してある。左下：明視野 STEM 像のフーリエ回折パターン。

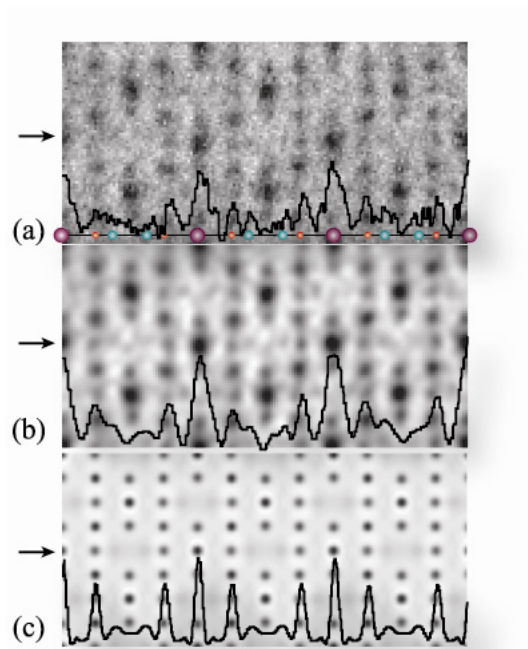


図 9.10 (a) 生の環状暗視野 STEM 像、(b) Radial Wiener Filterer 像、(c) 計算シミュレーション像。図中に示したグラフは、矢印で示したライン上に沿った強度プロファイルである。矢印方向に沿って、バナジウム (α)、酸素、リチウム、リチウム、酸素、バナジウム (α) の周期で、3 周期、原子列が並んでいる。

(類似研究との比較)

これまでに、コバルト酸リチウム(LiCoO_2)結晶およびアルミリチウム(Al_3Li)結晶のリチウム原子列が観察されている。いずれの結果も、高分解能透過型電子顕微鏡観察において異なる焦点はずれ量で得られた 20 枚程度の顕微鏡像から再生させた位相像によってである。しかし、位相像は、結晶内における電子回折の動力学効果により試料の厚さによって大きくコントラストが変化するため、解釈の真偽が問題となる可能性がある。一方、今回のような STEM 観察の場合、顕微鏡のコントラストは、原子が存在するかどうかによって決まるため、リチウム原子列の観察に疑問の余地がない点で優位性がある。

(2) 研究成果の今後期待される効果

燃料電池の正極材料として、バナジウム酸リチウム (LiV_2O_4) 結晶のようなスピネル構造をもつ酸化物は大変有望視されている。これは、スピネル構造には、リチウム原子が入り出す経路が 3 次的に存在するからである。しかしながら、スピネル構造の正極材料は、電荷蓄積-放出サイクル寿命が向上しないこと、そして、蓄積電荷量があまり大きくないことが課題となっている。今回、リチウム原子を観察できたことは、母相材料であるスピネル構造内におけるリチウム原子のダイナミクス解明に道を開くものである。したがって、本研究は、今後、燃料電池の材料開発に新たな知見を与え、新たな正極材料の創生に貢献することが期待される。

D. グラフィン膜の炭素原子観察

(1) 研究実施内容および成果

本研究では、開放端をもつセルフサポートなグラフィン膜を作って、単層、2層、複層グラフィン膜について、TEM像コントラストならびにR005電子顕微鏡付属のEELSで研究した。炭素原子の直接観察、欠陥構造の観察、構造ダイナミクスを調べた。その結果、Diffraction Tableau法によって収差係数が正確に計測できたので、炭素原子ひとつが6%コントラストで観察されることが定量的に示された。そのことによって、空孔欠陥やStone-Wales(5-7員環)欠陥、ならびにon-top siteへの吸着炭素原子など、従来報告されていた欠陥構造を追認した [図9.11-9.12, unpublished]。

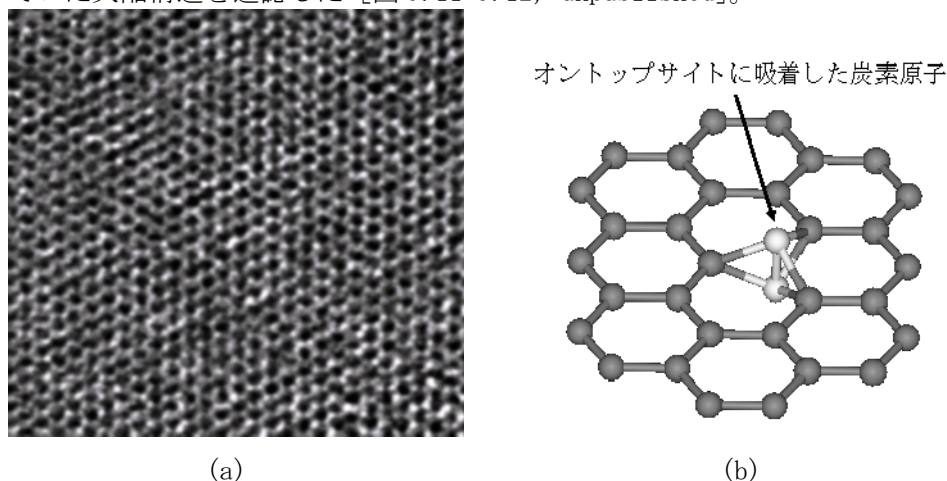


図9.11 (a) 室温観察したグラフィンのTEM写真。アダトムや原子空孔が観察された。EELS吸収端からは、それらがC以外の吸着元素であるとは考えにくい。欠陥のなかで、特に、C原子のon-topサイトに吸着したとみられるC原子(写真のなかで、特に明るい点)が多数見られる。蜂の巣が規則的な場所と歪んでいる場所が見られる。(b) 報告に基づいて描いたon-topサイトに吸着したC原子の構造モデル [Y. Uramoto, et al., *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* **6**, 269 (2008)]。

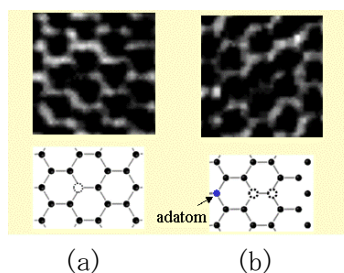


図9.12 室温で観察される欠陥のTEM像とモデル図

- (a) 1-vacancy and on-top site adatom,
- (b) 2-vacancy and on-top site adatom.

(世界の位置づけ、類似研究との比較)

グラフィンの欠陥が電気特性に与える影響に関する興味は大きく、多くの報告がある。本研究のように点欠陥の生成・消滅や存否を直接観察することができるレベルの装置技術はTEAMプロジェクトを除いては無い。Bridge siteに吸着した原子を直接見分けることができる分解能は、他に例がない(注1)。

また、本研究で観察したグラフィンは開放端(open edge)のセルフサポート膜であり、基板結晶の上にサポートされた膜(注2)ではない点に特徴がある。

(注1) 従来、電子顕微鏡による欠陥構造研究については、Super STEMグループが先鞭をつけた。STEM像に加えて、プラズモン損失エネルギーから単層膜を判断している[下記参考文献1]。グラフィン膜は平坦でなく凹凸に反って安定化しているとの報告[同文献2]、2層膜は先端でCNTのように閉じてしまい、2枚のグラフィンシートはAA積層となるという報告

[同文献 3]、点欠陥(1-vacancy、2-vacancy、5-7 員環、on-top-site アダトム)[同文献 1, 3-4]があるという報告がなされている。

[1] M.H. Gass et al., *Nature Nanotechnology*, **3**, 676 (2008). [2] J. C. Meyer et al., *Nature* **446**, 60 (2007). [3] Zheng Liu, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 015501 (2009). [4] J. C. Meyer et al., *Nano Lett.*, **8**, 3582 (2008).

(注 2) グラファイト結晶の表面から、薄いグラファイト層をへき開したとき、その膜端にある数十 nm ほどの幅のグラフィン膜を観察している。室温から 450°C の範囲で観察した。導入される欠陥や膜構造を調べた。従来、グラフィン膜は、SiO₂ 膜などの基板上にグラファイト結晶から機械的剥離する形で保持されたり、グラファイト結晶を化学処理したのちに単離されたり、CNT から酸化処理やプラズマ処理などで作られている。基板に支えられたグラフィンの構造や電子状態などは STM や分光で調べられている。電子顕微鏡によると、点欠陥構造が観察され、アダトムや空孔、5-7 員環などが報告されている。

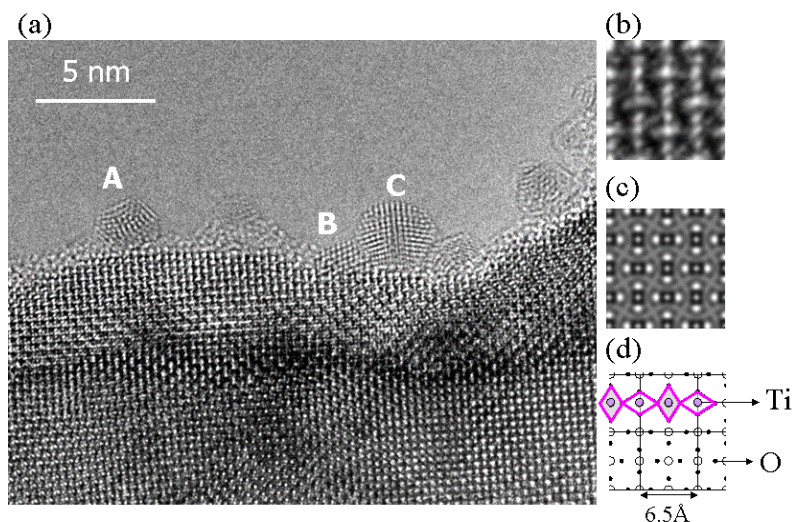
(2) 研究成果の今後期待される効果

従来、graphene は単位胞に 2 個の炭素原子をもつ特徴から、その物性 (QHE, high-mobility) が注目され、graphene ribbon を使ったデバイス特性の研究など、様々な応用研究が進展している。そうした電気特性と構造との関係は興味を持たれている。1 層だけでなく 2 層膜の電気特性も、最近、注目されている。グラファイト結晶は、通例、六方晶系で AB 積層しているが、積層欠陥もある。2 層や 3 層では、層間の相互作用が構造と物性に影響を及ぼすと考えられ、既に、その方面の物性研究も始まっている。本研究の目指すように、開放端をもつセルフサポート膜による膜構造の変調といった成果は、今後、1 層、2 層膜のナノデバイス開発を支える効果が見込まれる。

E. 金 TiO₂ 触媒の酸素原子観察

(1) 研究実施内容および成果

本研究では、金と TiO₂ の界面の構造や電子状態を TEM/STEM と EELS で研究した。金ナノ粒子を担持した TiO₂ 結晶は、CO ガスの低温酸化触媒として春田らが見出したもので、金ナノ粒子の大きさが 2 nm 以下で触媒活性が高くなること、反応速度が平均粒径の二乗に反比例して増加するため、CO ガスとの反応は粒子と TiO₂ 基板の界面で起こると説明されている。



金 TiO₂(110) 界面の構造で、TiO₂ 終端が酸素かチタン原子かを決定する問題については、酸素の像コントラストが低いことから、電子顕微鏡像から終端面を直接判定することは非常に困難であった。50 pm 分解能の TEM 観察をおこなって、金と TiO₂(110) 界面には、酸素が見えないこと、金が Ti 終端面に付着していることを明らかにした。

図 9.13(a) 金ナノ粒子と TiO₂ 基板の TEM 写真、電子線の入射方向は TiO₂[110]、(b) TiO₂ の拡大図、(c) シミュレーション、(d) モデル図

(世界における位置づけ、類似研究との比較)

TiO₂(110)面に付着する金ナノ粒子の接合面は Cosandey らによって Au(111)あるいは Au(112)面であることが報告されている[下記参考文献 1]。金・TiO₂触媒研究は膨大な数にのぼるが、電子顕微鏡研究では、単結晶粒子エピタクシャル成長方位、ガス導入による酸化・還元時粒子形状変化などが主である。(110)方位のエピタクシャル Au 粒子について、柴田らは、粒径 2 nm 以下では格子整合して、以上では格子不整合になると報告している[同文献 2]。本研究では、Au(211)エピタクシャル粒子が Ti 終端面に付着していることを明らかにしている。

[1] F. Cosandey, et al., *Surf. Rev. Lett.*, **8**, 73 (2001).

[2] N. Shibata, et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 136105 (2009).

(2)研究成果の今後期待される効果

金ナノ粒子の触媒機構を決定する上で、酸素を含む界面構造の決定は重要である。例えば、低温で金ナノ粒子触媒の活性が高い説明として、Zhi-Pan Liu らは Au/TiO₂(110)の界面周縁部の Au-O₂-Ti の結合が重要であると主張しているのに対し、M. S. Chen らは界面の Au-Ti の直接結合を重視している。一方、TiO₂表面の構造や Stoichiometry は環境の酸素濃度によって変わりやすいと言われる。酸素や CO ガスを導入した“その場観察法”に今後の期待が集まっている。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 7件、国際(欧文)誌 17件)

- [I1] H.Minoda^{1,2} and N. Yamamoto^{2,3} (¹Tokyo University of Agriculture and Technology, ²Japan Science and Technology Agency, CREST, ³Tokyo Institute of Technology) :Anomalous Enhancement of Light by Au Adsorption on a Si(001)Vicinal Surface;Journal of the Physical Society of Japan Vol.74 No.7,July,2005 pp.1914-1917(2005)
- [I2] M.Yoshida¹, Y.Oshima^{1,2}, and K.Takayanagi^{1,2} (¹Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST):Nonlinear current-voltage curves of gold quantum point contacts;Appl.Phys.Lett.87,103104(2005)
- [I3] M.Yoshida¹, Y.Oshima^{1,2}, and K. Takayanagi^{1,2} (¹Tokyo Institute of Technology, ²Japan Science and Technology Agency, CREST):Nonlinear Current-Voltages Curves of Nobel Metal Quantum Point Contacts;Japanese Journal of Applied Physics Vol.44,No.37,2005 pp.L1178-L1180(2005)
- [I4] D.Nakaji¹, V.Grillo¹, N.Yamamoto^{1,3} and T.Mukai² (¹Tokyo Institute of Technology, ²Nichia Chemical Industries, Ltd., ³Japan Science and Technology Agency, CREST) :Contrast analysis of dislocation images in TEM-cathodoluminescence technique;Journal of Electron Microscopy 2005 (MS:dfi026) pages 223-230(2005)
- [I5] Y.Oshima^{1,2}, K. Mouri¹, H. Hirayama^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Quantized electrical conductance of gold helical multi-shell nanowires; J. Phys. Soc. Japan 75[5], 53705 (4 pages) (2006)
- [I6] H. Minoda^{1,2} and N. Yamamoto^{2,3} (¹Tokyo University of Agriculture and Technology, ²Japan Science and Technology Agency, CREST, ³Tokyo Institute of Technology) : Study on the origin of the anisotropic dielectric properties of the Au adsorbed Si(001) vicinal surface; Surface and Interface Analysis 38, 1666-1669 (2006)
- [I7] N. Yamamoto^{1,2}, M. Nakano¹ and T. Suzuki¹ (¹Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Light emission by surface plasmon on nano-structures of metal surfaces induced by high energy electron beam; Surface and Interface Analysis 38, 1725-1730 (2006)
- [I8] N. Yamamoto^{1,2}, S. Bhunia³ and Y. Watanabe³ (¹Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ NTT Basic Research Laboratories): Polarized Cathodoluminescence Study of InP Nanowires by Transmission Electron Microscopy; Appl. Phys. Lett. 88, 153106 (2006)
- [I9] M. Yoshida¹, Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, and K.Takayanagi^{1,2} (¹Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): *In-Situ* Observation of the Fabrication Process of a Single Shell Carbon Fullerene Nano-Contact Using Transmission Electron Microscope-Scanning Tunneling Microscope; Jpn. J. Appl. Phys. 46[3], L67-L69 (2007)
- [I10] H. Sawada^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3}, T. Ishizawa³, M. Terao³, M. Kawazoe³, T. Sannomiya^{2,3}, T. Tomita^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, T. Tanaka^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2}, N. Yamamoto^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹Tokyo Institute of Technology, ²Japan Science and Technology Agency, CREST, ³JEOL Ltd.): Achieving 63 pm Resolution in Scanning Transmission Electron Microscope with Spherical Aberration Corrector; Jpn.J.Appl.Phys. 46 [2,3] (2007) L568-L570.
- [I11] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, and K. Takayanagi^{1,2} (¹Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): One-by-One Evolution of

- Conductance Channel in Gold [110] Nanowires; J. Phys. Soc. Japan 76 (2007) 123601.
- [I12] H. Sawada^{2,3}, T. Sannomiya^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Nakamichi^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3}, T. Tomita^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, T. Tanaka^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST, 3 JEOL Ltd.): Measurement Method of Aberration from Ronchigram by Autocorrelation Function; Ultramicroscopy 108, 1467-1475(2008)
- [I13] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): Integer conductance quantization of gold atomic sheets; Phys. Rev. B 77, 161403R (2008)
- [I14] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): Conductance quantization and dequantization in gold nanowires due to multiple reflection at the interface; Phys. Rev. B 79, 165414 (2009)
- [I15] H. Sawada^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,3}, N. Ohashi³, T. Tomita^{1,2}, F. Hosokawa^{1,2}, T. Kaneyama^{1,2}, Y. Kondo^{1,2}, and K. Takayanagi^{1,3} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST, 2 JEOL Ltd., 3 Tokyo Institute of Technology): STEM imaging of 47-pm-separated atomic columns by a spherical aberration corrected electron microscope with a 300-kV cold field emission gun; J. Electron Microsc., 58: 357 - 361. (2009)
- [I16] Y. Oshima^{1,2}, Y. Hashimoto², Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2}, H. Sawada^{1,3}, T. Kaneyama^{1,3}, Y. Kondo^{1,3}, N. Hashikawa⁴ and K. Asayama⁴ (1 Japan Science and Technology Agency, CREST, 2 Tokyo Institute of Technology, 3 JEOL Ltd., 4 Renesas Technology Corp.): Detection of arsenic dopant atoms in a silicon crystal using a spherical aberration corrected scanning transmission electron microscope; Phys. Rev. B 81, 035317 (2010)
- [I17] Y. Oshima^{1,2}, H. Sawada^{1,3}, F. Hosokawa^{1,3}, E. Okunishi^{1,3}, T. Kaneyama^{1,3}, Y. Kondo^{1,3}, S. Niitaka⁴, H. Takagi⁴, Y. Tanishiro^{1,2} and Kunio Takayanagi^{1,2} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST, 2 Tokyo Institute of Technology, 3 JEOL Ltd., 4 Magnetic Materials Laboratory, RIKEN): Direct Imaging of Lithium Atoms in LiV₂O₄ by Spherical Aberration Corrected Electron Microscopy; to be published in J. Electron. Microsc. (2010)
- [D1] 大島義文^{2,3}、谷城 康眞^{1,2}、近藤 行人^{1,4}、高柳 邦夫^{1,2} (1東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST、3 東工大院総理工、4JEOL Ltd.): ナノ現象の顕微研究; 応用物理 75[3], 309-313 (2006)
- [D2] 山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST): 量子構造の局所発光解析; 応用物理 75[1], 41-48 (2006)
- [D3] 山本直紀^{1,2}、鈴木喬博³、塩川未久¹ (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST、3 東工大院総理工): TEM/CL法による表面プラズモンの解析; 顕微鏡 41[2], 138-141 (2006)
- [D4] 大島 義文^{2,3}、吉田 誠¹、久留井 慶彦¹ (1 東京工業大学院理工、2 東京工業大学院総理工、3 JST-CREST) ギャップ間における単一カーボンフラーレン分子の形状変化; 表面科学 28 [8] 428-432 (2007)
- [D5] 大島 義文^{2,3}、久留井 慶彦¹、高柳 邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、2 東工大院総理工、3 Japan Science and Technology Agency, CREST): 透過型電子顕微鏡による金ナノワイヤの電気伝導の研究; J. Vac. Soc. Jpn. Vol. 51, No.7, 460-464 (2008)
- [D6] 谷城 康眞^{1,2}、近藤 行人^{2,3}、高柳 邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST, 3 JEOL Ltd.): 国産球面収差補正電子顕微鏡 R005 の開発; J. Vac. Soc. Jpn. Vol.51, No.11, 714-718 (2008)

[D7] 高柳邦夫^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): 収差補正装置の現状と将来; J. Vac. Soc. Jpn. Vol.51, No.11, 691-694 (2008)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

- [I1] H. Sawada^{2,3}, T. Sannomiya^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Method to Measure Aberrations from Ronchigram by Auto-Correlation Function; Proc. The 16th International Microscopy Congress, Sep.3-8 2006, Sapporo, Japan
- [I2] T.Kaneyama^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Sannomiya^{2,3}, H. Sawada^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, Y. Tanishiro^{1,2}, N. Yamamoto^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Design and Development of 300 kV High Resolution FETEM R005; Proc. The 16th International Microscopy Congress, Sep.3-8 2006, Sapporo, Japan
- [I3] F.Hosokawa^{2,3}, H.Sawada^{2,3}, T.Sannomiya^{2,3}, T.Kaneyama^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, M. Hori^{2,3}, S. Yuasa^{2,3}, M. Kawazoe^{2,3}, T. Nakamichi^{2,3}, Y. Tanishiro^{1,2} N. Yamamoto^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Design and Development of Cs corrector for a 300 kV TEM and STEM; Proc. The 16th International Microscopy Congress, Sep.3-8 2006, Sapporo, Japan
- [I4] T. Tanaka^{1,2}, K. Sano¹ M. Ando¹, H. Sawada^{1,3}, F. Hosokawa^{1,3}, E. Okunishi^{1,3}, Y.Kondo^{1,3}, Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST³ JEOL Ltd.): In-situ observation of Au/TiO₂ catalyst in Oxygen-Gas Environments, Microsc. Microanal. 15 (Suppl. 2), 692 (2009)
- [I5] T. Tanaka^{1,2}, Y. Abe¹, H. Sawada^{1,3}, E. Okunishi^{1,3}, Y. Kondo^{1,3}, Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Adatom on Graphene, Directly Imaged by Aberration Corrected TEM at 300 kV; Microsc. Microanal. 15 (Suppl. 2), 1476 (2009)
- [I6] Y. Abe¹, T. Tanaka^{1,2}, H. Sawada^{2,3}, E. Okunishi^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Electron Energy Loss Spectroscopy of Graphene Identified by Aberration Corrected TEM at 300 kV ; Microsc. Microanal. 15 (Suppl. 2), 1484 (2009)
- [I7] T. Tomita^{2,3}, Y. Tanishiro^{1,2} T. Miyata^{2,3}, H. Sawada^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, T. Tanaka^{1,2}, Y. Ohshima^{1,2}, N. Yamamoto^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Highly Stable 300 kV Cold Field Emission Gun for 50 pm Resolution Electron Microscopy; Microsc. Microanal. 15 (Suppl. 2), 1084 (2009)

[D1] 大島 義文^{2,3}、高柳 邦夫^{1,3} (¹ 東工大院理工、² 東工大院総理工、³ Japan Science and Technology Agency, CREST) 金属ナノ・マイクロ粒子の形状・構造制御技術 第4章 3節 「らせん構造をもつ金ナノワイヤー」、シーエムシー出版、p. 63-71、2009年4月

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 45件、国際会議 34件)

[I1] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Helical nanowires and nanoparticles, the 5th

- France-Japan Workshop on Nanomaterials (Bordeaux, France), Oct. 11, 2004
- [I2] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): In-Situ UHV Electron Microscopy of Nanowires and Nanocontact with SPM(STM,SFM), the fifth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (Beijing International Convention Center, Beijing, China), Nov. 4, 2004
- [I3] K. Takayanagi ^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Conductance Quantization of Metal Nanowire: Dynamics of conductance and structure, NanoPHYS'05 (Tokyo Institute of Technology, Tokyo), Jan. 26, 2005
- [I4] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): TEM-SPM for Materials Science: Towards 4D analysis at very high resolution, International Conference for Young Scientists (Toray Human Resource Development Center, Mishima, Shizuoka), Mar. 4, 2005
- [I5] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): TEM-STM for Quantum Conductance on Metal Nanowires: Conductance quantization, the 10th International Symposium on Advanced Physical Field (National Institute for Materials Science, Sengen site in Tsukuba), Mar. 9, 2005
- [I6] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Structure and Electronic Conductance of Metal Nanowires, XIXth International Winter School Euroconference on Electronic Properties of Novel Materials (Tirol Hotel Sonnalps, Kirchberg, Austria), Mar. 14, 2005
- [I7] K. Takayanagi ^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST):Recent progress in surface physics; I.T.C. International Tribology Conference 2005 Kobe, (The International Conference Center Kobe), Mar.31, 2005
- [I8] N. Yamamoto^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST):Light Emission by Surface Plasmon on Metal Nanostructures Induced by High Energy Electrons; Workshop on Metamaterials in San Sebastian, Spain, (The Miramar Palace in San Sebastian) July.18, 2005
- [I9] K. Takayanagi ^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST):TEM/STM System for Study of Nanowires and Nanoparticles: How is it Important to Obtain 4D Information of Nanomaterials; M&M 2005 Microscopy & Microanalysis 2005, (Hawaii Convention Center Hitachi Booth), Aug.2, 2005
- [I10] K. Takayanagi ^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Electron Microscopy for Post-Nanotechnology; BCEIA Beijing Conference and Exhibition on International Analysis,(The Beijing Exhibition Center in Beijing), Oct.21, 2005
- [I11] K. Takayanagi^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Sannomiya^{2,3}, H. Sawada^{2,3} and Y. Kondo^{2,3} (¹Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST ³JEOL Ltd.):Future Direction of 4D-Electron Microscopy by TEM-STEM:Development of the probe-forming Cs corrector for Ultra-high vacuum-TEM:APAMS Asia-Pacific Advanced Microscopy Simposium,(Hotel Bellevista Hau – Lien Taiwan), Nov.17, 2005
- [I12] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST):Linear and Non-linear Conductance for Metal Nanowire: STM combined Electron microscope study;The 6th France-Japan Workshop on Nanomaterials,(Gateaux Kingdom SAPPORO), Mar.6, 2006

- [I13] K. Takayanagi^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹, M. Yoshida¹ and Y. Tanishiro^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Transmission Electron Microscopy on Atomic Chains and Nanowires at Quantum Contact From Metal Bridge to Molecular Bridge; 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006, 7C1_a2)
- [I14] Y. Tanishiro^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Development of Image Recording System for In-situ High-resolution TEM Observation Lens-coupling Electron Multiplier CCD (EM-CCD) System; 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006, SP4_a1)
- [I15] N. Yamamoto^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): TEM-Cathodoluminescence of Quantum dots and quantum wires; The International Workshop on Nanoscale Spectroscopy and Nanotechnology (Rathen, Sept.17-21, 2006)
- [I16] K. Takayanagi^{1,2}, M. Yoshida¹, Y. Kurui¹ and Y. Oshima^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): TEM-STM study on Quantum Nano-contact Atomic chain to Fullerene; GRI SYMPOSIUM IONCLUSTER SCIENCE Breakthrough Advances in Cluster Science (Nagoya, Nov.9, 2006)
- [I17] K. Takayanagi^{1,2}, M. Yoshida^{1,2}, Y. Kurui^{1,2}, Y. Oshima^{1,2} and Y. Tanishiro^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Quantum Nano-Contact: Toward 50 pm resolution analysis of Atomic chain and Molecules nanowire ; nanoPHYS '07 (The international symposium on nanometer-scale quantum physics) (Tokyo, Jan.25, 2007)
- [I18] K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Development of a 0.5 Å Resolution Microscope for Science; OIST Work shop(Okinawa, Mar.28, 2007)
- [I19] K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Studies on nanowire and fullerene conductance using an UHV electron microscope filled with a STM; European Materials Research Society Spring Meeting 2007 (Strasbourg, France, May 28- June 1, 2007)
- [I20] K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): 50 pm Resolution Microscopy in Nanoscience and Materials Technology; The NIMS Conference 2007 on Recent Breakthrough in Materials Science and Technology (Tsukuba, Japan, July 11-13, 2007)
- [I21] K. Takayanagi^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2}, T. Tanaka^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, M. Yoshida¹, N. Yamamoto^{1,2}, H. Sawada^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Tomita^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3} and Y. Kondo^{2,3} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST ³JEOL Ltd.): Development of 0.5 Å resolution electron microscope for nanomaterials; The 7th France-Japan Workshop on Nanosciences and Nanomaterials (Strasbourg, France, October 24-26, 2007)
- [I22] T. Tanaka^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, M. Yoshida¹, N. Yamamoto^{1,2}, H. Sawada^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Tomita^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3} and Y. Kondo^{2,3} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST ³JEOL Ltd.): Development of 0.5 Å resolution electron microscope for nanomaterials; Symposium on Surface and Nano Science (Iwate, Japan, January 22-25, 2008)
- [I23] Y. Oshima^{1,2} and Y. Kurui¹ (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): TEM observation of jump-to-contact for an ellipsoidal fullerene; International carbon nanotube Conference in NU. (Nagoya University, Feb. 14 and 15, 2008)

- [124] Y. Kondo^{2,3}, H. Sawada^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Sannomiya^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3}, T. Tomita^{2,3}, T. Tanaka^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Imaging Results from the CREST Project R005 Instrument; Premeeting Congress of Microscopy & Microanalysis 2008, Albuquerque, USA, Aug 3, 2008
- [125] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Spheric- Aberration Corrected 50 pm Electron Microscopy; APMC9, Jeju International Conference, Korea, November 3, 2008
- [126] T. Tanaka^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, N. Yamamoto^{1,2}, H. Sawada^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Tomita^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3}, Y. Kondo^{2,3} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Development of 50 pm resolution electron microscope for nanomaterials analysis; IUCr 2008 Satellite Meeting at Nagoya Univ., Nagoya, Japan, September 12, 2008
- [127] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Aberration Corrected Microscopy and Spectroscopy for Pico-meter Characterization of Device Materials; SSDM2008 (International Conference on Solid State Devices and Materials), Tsukuba International Convention Center, Japan, September 24, 2008
- [128] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): High Resolution Electron Microscopy: How atomic behavior can directly be resolved in nano-materials' phases; nanoPHYS'09 (International Symposium on Nanoscience and Quantum Physics), The International House of Japan, Tokyo, February 23-25, 2009
- [129] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Nano-Materials Phases and Aberration Corrected 50 pm Electron Microscopy; WPI-AIMR (Tentative program of the March Annual Workshop 2009), Royal Hall, Miyagi-Zao Royal Hotels, March 2-6, 2009
- [130] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Nanowires and Fullerenes: Conductance Quantization / Dequantization Studied by Electron Microscopy; IITC (International Interconnect Technology Conference) Sapporo, Japan 6/13, 2009
- [131] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Pico-Material Characterization by Aberration Corrected Electron Imaging; The 8th Japan-France Workshop on Nanomaterials, NIMS (National Institute of Materials Science), 6/15-17, 2009
- [132] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Transfer of a Single Carbon Fullerene at Small Nano-Gap; The 8th Japan-France Workshop on Nanomaterials, NIMS (National Institute of Materials Science), 6/15-17, 2009
- [133] K. Takayanagi^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, T. Tanaka^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2}, H. Sawada^{2,3} and Y. Kondo^{2,3} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): 50 pm resolution TEM/STEM by an aberration corrected 300 kV-R005 microscope with cold-field emission gun; FEMMS2009 The Twelfth Frontiers of Electron Microscopy in Materials Science, Huis Ten Bosch Nagasaki Japan 9/27-10/2, 2009
- [134] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): 50 pm resolution electron microscope, performance and application Workshop on Advanced Application of Aberration Correction TEM; NSRRC (National Synchrotron Radiation Research Center,

Taiwan) Japan, 11/22-24 2009

- [D1] 高柳邦夫 ^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):超高真空電子顕微鏡の開発位相と振幅情報を求めて、JST 異文化フォーラム(伊豆大仁ホテル)、2005年1月14日
- [D2] 高柳邦夫 ^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):電子顕微鏡でナノ物性を観る、ナノ格子新技術開発研究センター第3回シンポジウム(豊田工業大学)、2005年2月4日
- [D3] 高柳邦夫 ^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):ナノフィジックス:ナノ構造・状態・性質、ナノサイエンス第2回物質系セミナー(東京大学柏キャンパス基盤棟大講義室)、2005年3月5日
- [D4] 大島義文 ^{1,2} (1 東工大院総理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):高分解能窒素冷却ホルダーの開発と金単層ナノチューブの発見;「第21回分析電子顕微鏡討論会」、(幕張メッセ 国際会議場) 2005年8月30日
- [D5] 大島義文 ^{1,2} (1 東工大院総理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):金属ナノチューブ・ナノワイヤの物性;日本物理学会 2005年秋季大会(同志社大学京田辺キャンパス)2005年9月19日~22日
- [D6] 大島義文 ^{1,2} (1 東工大院総理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):金属ナノチューブの物理;21世紀COE「究極と統合の新しい基礎科学」セミナー、(大阪大学豊中キャンパス)、2005年12月12日
- [D7] 大島義文 ^{1,2} (1 東工大院総理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):高分解能電顕で作る新材料創生:金属ナノチューブ・単原子鎖のキャラクタリゼーション;第30回日本顕微鏡学会関東支部講演会、(東京工業大学大岡山キャンパス)、2005年3月4日
- [D8] 山本直紀 ^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):電子ナノプローブを用いた局所発光解析;第13回エレクトロニクス基礎研究所公開シンポジウム 原子・分子レベルの材料創製とキャラクタリゼーション「ナノ領域でのイメージング技術の進展」、(大阪電気通信大学 エレクトロニクス基礎研究所)、2006年3月15日
- [D9] 高柳邦夫 ^{1,2} (1 東工大院総理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):清浄表面とナノ構造観察;日立技術研修講座「材料表面の解析・評価技術」(日立愛宕別館)、2006年4月20日
- [D10] 高柳邦夫 ^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):量子ナノ物理:ナノワイヤを創る・観る・測る;東北大学大学院理学研究科 2006年度前期 物理化学の最前線(東北大学大学院理学研究科物理教室)2006年6月2日
- [D11] 山本直紀 ^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):量子細線・量子ドットの局所発光解析;第34回薄膜・表面物性セミナー、ナノエレクトロニクスに向けた技術展開(東京大学)、2006年7月20日-21日
- [D12] 高柳邦夫 ^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):電子顕微鏡の色分散の補償;応用物理学会微小光学研究会第101回研究会(日本女子大学)2006年7月25日
- [D13] 高柳邦夫 ^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):50 pm プローブをもつ次世代電子顕微鏡が拓く物質分析;東京コンファレンス2006(幕張メッセ)2006年8月31日
- [D14] 高柳邦夫 ^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):0.5 Å 分解能電子顕微鏡とSTMによる量子ナノ科学;茅コンファレンス(裏磐梯ロイヤルホテル)、2006年9月10日
- [D15] 大島義文 ^{1,2} (1 東工大院総理工、² Japan Science and Technology Agency,

- CREST):透過型電子顕微鏡を用いた金ナノワイヤの物性研究;NIMS ナノテクノロジー総合支援セミナー(NIMS)、2006年10月17日
- [D16] 高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):50 pm 分解能物質解析電子顕微鏡と表面研究;第26回表面科学講演大会(大阪大学コンベンションセンター)、2006年11月9日
- [D17] 谷城康真^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):応力印加による金ナノワイヤの変形:TEM-AFM による研究;日本顕微鏡学会超分解能電子顕微鏡分科会 第二回講演会 (熱海ニューフジヤホテル)、2007年2月22日
- [D18] 沢田英敬^{1,2}, 細川史生^{1,2}, 三宮工^{1,2}, 富田健^{1,2}, 金山俊克^{1,2} 近藤行人^{1,2}, 田中崇之^{1,3}, 大島義文^{1,4}, 谷城康真^{1,3}, 高柳邦夫^{1,3}(¹Japan Science and Technology Agency, CREST、²日本電子(株)、³東工大院理工、⁴東工大院総理工):収差補正装置搭載電子顕微鏡の収差評価と実験結果;日本顕微鏡学会 超分解能電子顕微鏡分科会第二回講演会 (熱海ニューフジヤホテル)、2007年2月22日
- [D19] 高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):荷電ビームと表面科学;日本表面科学会東北・北海道支部講演会(岩手大学)、2007年3月14日
- [D20] 高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):50 pm 超高分解能電子顕微鏡;日本顕微鏡学会第31回関東支部講演会(東京工業大学)、2007年3月17日
- [D21] 高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):収差補正顕微鏡と0.5Å物質解析;日本物理学会 2007年春季大会(鹿児島大学)2007年3月19日
- [D22] 高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 収差補正電子顕微鏡による50 pm 分解能の実現;日本学術振興会第167委員会(ナノプローブテクノロジー)第50回研究会(日本学術振興会)、2008年4月24日
- [D23] 高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 超分解能電子顕微鏡とナノ物質の顕微科学;日本顕微鏡学会第64回学術講演会、特別講演(国立京都国際会館)、2008年5月22日
- [D24] 大島 義文^{1,2}(¹東工大院総理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): TEM-STM 法による金ナノワイヤ量子化コンダクタンスの実証;日本顕微鏡学会第64回学術講演会(国立京都国際会館)、2008年5月22日
- [D25] 高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 超分解能電子顕微鏡とナノ物質の顕微科学ー世界ーからイノベーションへ;JST シンポジウム(CREST12)(東京国際フォーラム)、2008年7月30日
- [D26] 高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 計測顕微科学ことはじめ;(日立中央研究所)、2008年7月30日
- [D27] 大島 義文^{1,2}(¹東工大院総理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 金アトミックシートの電気伝導その場観察;日本顕微鏡学会、分析電子顕微鏡分科会第24回分析電子顕微鏡討論会;(幕張メッセ国際会議場)、2008年9月2日
- [D28] 谷城康真^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 50 pm 分解能・球面収差補正電子顕微鏡(R005)による単原子観察;日本顕微鏡学会第52回シンポジウム(千葉大学けやき会館)、2008年10月18日
- [D29] 大島 義文^{1,2}(¹東工大院総理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 金属電極ファセット・エッジ局所電子状態の顕微観察;日本顕微鏡学会第52回シンポジウム(千葉大学けやき会館)、008年10月18日
- [D30] K.Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and

- Technology Agency, CREST): Nano-materials phases: structure, quantization, carrier transport; NIMS MANA セミナー、ゲストスピーカー、(NIMS)2008年10月31日
- [D31] 高柳邦夫 ^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 量子ナノワイヤ最前線; 物理学会九州支部例会(福岡工業大学)、2008年12月6日
- [D32] 高柳邦夫 ^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 清浄表面とナノ構造観察、最新顕微鏡技術の生かし方; 日立製作所総合教育センター「材料表面の分析」講座(日立製作所総合教育センター)、2009年2月25日
- [D33] 高柳邦夫 ^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 表面・ナノ物質の科学 創る・観る・測る; 日本物理学会第64回年次大会レビューセッション(立教大学池袋キャンパス)、2009年3月29日
- [D34] 高柳邦夫 ^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 収差補正が拓く荷電粒子研究の新展開: 第14回エレクトロニクス基礎研究所公開シンポジウム原子・分子レベルの材料創製とキャラクタリゼーション「先端計測分析技術の展望」;(大阪電気通信大学・エレクトロニクス基礎研究所)、2007年1月16-17日
- [D35] 高柳邦夫 ^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 物質ナノ機能を観る、測る、創る; 横浜国立大学・横浜市立大学ナノテク交流シンポジウム(横浜市立大学金沢八景キャンパスシーガルセンター)、2007年3月8日
- [D36] 谷城康真 ^{1,2}(¹東京工業大学院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 応力印加による金ナノワイヤの変形: TEM-AFMによる研究; 日本顕微鏡学会第63回学術講演会(新潟・朱鷺メッセ)、2007年5月20日
- [D37] 大島義文 ^{1,2}(¹東京工業大学院総理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): ナノ構造電気伝導の顕微研究; 日本顕微鏡学会第63回学術講演会(新潟・朱鷺メッセ)、2007年5月22日
- [D38] 谷城康真 ^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 50 pm プローブをもつ次世代電子顕微鏡が拓く物質分析; 先端計測分析技術・機器開発事業シンポジウム(幕張メッセ国際会議場)、2007年8月30日
- [D39] 近藤行人 ^{1,2}(¹Japan Science and Technology Agency, CREST、²JEOL Ltd.): 超高分解能 TEMR005 の開発; 日本顕微鏡学会・超分解能電子顕微鏡分科会・第3回研究会(オフィス東京)、2007年12月14日
- [D40] 大島義文 ^{1,2}(¹東工大院総理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): フラワー単分子や金シート構造の電気伝導計測; 第32回日本顕微鏡学会関東支部講演会(東京工業大学大岡山キャンパス)、2008年3月8日
- [D41] 高柳邦夫 ^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 冠ワークショップ「財団法人 風戸研究奨励会 受賞講演会」特別講演, 日本顕微鏡学会第65回学術講演会(仙台国際センター)、2009年5月26日・29日
- [D42] 高柳邦夫 ^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 0.05 nm 分解能物質解析電子顕微鏡の開発 <軽元素の微細配列を見る>; 分析機器展 CREST ナノ計測・分析基盤技術のフロンティア-電顕、NMR、X線、MS、SPM、アトムプローブ- (幕張メッセ国際会議場)、2009年9月12日
- [D43] 高柳邦夫 ^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 50 pm 分解能が拓く顕微科学; 日本顕微鏡学会第53回シンポジウム(東京工業大学デジタル多目的ホール)、2009年10月30-31日
- [D44] 大島 義文 ^{1,2}(¹東工大院総理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 透過型電子顕微鏡による金属量子接点の観察; 東北大学 多元研・計測センターシンポジウム(東北大学)、2009年11月16日
- [D45] 高柳邦夫 ^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST): 0.5 Å分解能物質解析電子顕微鏡基盤技術の研究; CREST「物質現象の

解明と応用に資する新しい計測・分析技術」における研究 特別講演、独立行政法人科学技術振興機構 さきがけ「構造機能と計測分析」領域研究報告会(東京ガーデンパレス)、2009年12月14日

② 口頭発表 (国内会議 126 件、国際会議 43 件)

- [I1] M. Yoshida¹, Y. Oshima^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): “The transformation of point contact causes the non-linear voltage character”, the 12th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (Atagawa, Izu), Dec. 9, 2004
- [I2] M. Yoshida¹, Y. Oshima^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): “Non-linear Current-Voltages Character of Au Quantum Point Contact”, APS March Meeting 2005 (Los Angeles Convention Center, LA, USA), Mar. 25, 2005
- [I3] M. Yoshida¹, Y. Oshima^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): Origin of Non-linear Current-voltage curves of Gold Point contact; The 8th International Conference on the Structure of Surfaces (the University of Munich 18-22 July 2005
- [I4] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹ and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): Direct observation of atom transfer at nano-gap using TEM-STMs system; 23rd European Conference on Surface Science, September 4-9, 2005, Berlin (Germany) SySTM23, Abstracts p.323.
- [I5] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹, M. Yoshida¹, K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): Nonlinear phenomenon of gold nanowire-electrode contact at high bias voltage; International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, P2-30, Abstracts p.248, November 14-17 (2005) Omiya.
- [I6] Y. Oshima^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): Resistance at an incommensurate interface between a helical-multi shell nanowire and FCC electrode, International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, Tu-B4, Abstracts p.201, November 14-17 (2005) Omiya.
- [I7] M. Yoshida¹, Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): The non-linear current voltage (I-V) curves depend on the dynamic behavior of gold quantum point contact; International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, P1-54, Abstracts p.95, November 14-17 (2005) Omiya.
- [I8] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): Estimation of quantized conductance of well-defined gold nanowire; International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, P1-63, Abstracts p.104, November 14-17 (2005) Omiya.
- [I9] K. Ogawa¹, R. Ito¹, Y. Tanishiro^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): Structure and Conductance of Silver Nanowires Studied by TEM-STM; International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, P1-63, Abstracts p.104, November 14-17 (2005) Omiya.
- [I10] S. Miwa¹, C. Akahori¹, Y. Tanishiro^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST): Deformation and Fracture of Gold Nanowires Studied by TEM-AFM; International

- Symposium on Surface Science and Nanotechnology,P1-63, Abstracts p.104, November 14-17 (2005) Omiya.
- [I11] N. Yamamoto^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST):Light Emission by Surface Plasmon on Metal Particle Arrays Induced by High Energy Electrons;ALC'05 5th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (Outrigger Keauhou Beach Resort, The Big-Island Hawaii December 4~9 2005)
- [I12] K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST):Electronic Conductance of Nanowires and Nanotubes studied by TEM – STM;Nanoscience and Quantum Physics University of California , Berkeley and Tokyo Institute of Technology Interdepartment Symposium (University of California Berkeley, Jan.5-7 2006)
- [I13] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, K.Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Electrical conductance for gold nanowire with the axis of [110] direction; 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sep.3-8,2006)
- [I14] T. Kaneyama^{1,2}, T. Tomita^{1,2}, F. Hosokawa^{1,2}, H. Sawada^{1,2}, T. Sannomiya^{1,2}, S. Deguchi¹, M. Kawazoe¹, T. Miyata¹, E. Kobayashi¹, Y.Kondo^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,3} and K.Takayanagi^{1,3} (¹ Japan Science and Technology Agency, CREST, ² JEOL Ltd., ³ Tokyo Institute of Technology): Design and Development of 300 kV Super-High Resolution FETEM “R005” ; 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006, 5C1_a4)
- [I15] F. Hosokawa^{1,2}, H. Sawada^{1,2}, T. Sannomiya^{1,2}, T. Kaneyama^{1,2}, Y. Kondo^{1,2}, M. Hori¹, S. Yuasa¹, M. Kawazoe¹, T.Nakamichi¹, Y. Tanishiro^{1,3}, N. Yamamoto^{1,3} and K. Takayanagi^{1,3} (¹ Japan Science and Technology Agency, CREST, ² JEOL Ltd., ³ Tokyo Institute of Technology): Design and Development of Cs Corrector for a 300 kV TEM and STEM; 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006, 6J_a2)
- [I16] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹, M. Yoshida¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Electrical conductance of carbon fullerene suspended between gold electrodes; The 16th International Microscopy Congress, (Sapporo, Sep.3-8, 2006, 6C1_a3)
- [I17] H. Imada¹, A. Chiba¹, M. Yokoya¹ and N. Yamamoto^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): STM Light Emission from Si (111) 7×7 Surface: Atomic Scale Electromagnetic Interaction;The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I18] H. Minoda^{1,2} K. Hatano¹ and T. Ikeda¹ (¹ Tokyo University of Agriculture and Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Development of a Surface Conductivity Measurement System for UHV-TEM; 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I19] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹, M. Yoshida¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Elongation of carbon fullerene in high-electric field; ISSP10 (Kashiwa, Oct.9-13, 2006)
- [I20] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹, M. Yoshida¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Elongation of Carbon Fullerene in High-electric Field; Material Research Society 2006 MRS Fall Meeting (Boston, Nov.27-Dec.2, 2006, KK6.7)
- [I21] Y. Oshima ^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Conductance Measurement of Carbon Fullerene using TEM-STM; Symposium on Surface and Nano Science 2007(SSNS'07),

- H-3, (Iwate Hotel Appi Grand, January 23-26 2007)
- [I22] M. Yoshida¹, Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): The structure dependence of the electrical conductance in the single carbon fullerene; American Physics Society (Denver, USA, March 5-9.2007)
- [I23] M. Yoshida¹, Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): In-situ observation of the transformation process into the nano-contact of single shell carbon fullerene using TEM-STM; American Physics Society (Denver, USA, March 5-9.2007)
- [I24] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Transfer of a single carbon fullerene at nano gap; The 17th International Vacuum Congress (Stockholm, Sweden, July 2-6, 2007)
- [I25] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, M. Okamoto³, and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.): Integral Quantization of Multiplied Gold Atomic Chains; 1st NIMS Conference on Recent Breakthroughs in Materials Science and Technology (Tsukuba, Japan, July 11-13, 2007)
- [I26] M. Yoshida¹, Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): In situ observation of the electrical conductance of the bridged single fullerene using TEM-STM; Microscopy & Microanalysis 2007 Meeting (Fort Lauderdale, Florida, USA, August 5-9.2007)
- [I27] Y. Kurui¹, Y. Oshima¹, and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Development of Mechanically Controllable Break-junction Combined with Transmission Electron Microscopy for Single-Atom Contact; Microscopy and Microanalysis 2007 (Fort Lauderdale, Florida, USA, August 5-9, 2007)
- [I28] H. Sawada^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Sannomiya^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3}, T. Tomita^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, T. Tanaka^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST ³ JEOL Ltd.): Development of Spherical Aberration Corrected 300 kV FETEM; Microscopy and Microanalysis 2007 (Fort Lauderdale, Florida, USA, August 5-9, 2007)
- [I29] H. Sawada^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3}, T. Tomita^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, T. Tanaka^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2}, N. Yamamoto^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST ³ JEOL Ltd.): 50 pm Resolution Aberration-Corrected 300 kV Microscope with Cold FEG; FEMMS2007 (Sonoma Double Tree Hotel California, USA, September 23-28, 2007)
- [I30] S. Kim¹, Y. Tanishiro^{1,2}, and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Development of microscopic system equipping with transmission electron microscope and scanning tunneling microscope; The six Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (Jeju, Korea, November 5-9, 2007)
- [I31] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Transfer of a Single Carbon Fullerene at Small Nano-Gap; 2008 APS March Meeting, S24.8 (Fullerenes (not nanotube) (New Orleans, USA, March 10-14, 2008)
- [I32] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology,

- ² Japan Science and Technology Agency, CREST): 47. Evolution of Integer Quantized Conductance in Gold Nanowires; 2008 APS March Meeting, L30.7 (Metallic and Semiconducting Nanotubes)(New Orleans, USA, March 10–14 2008)
- [I33] H.Sawada^{2,3}, F.Hosokawa^{2,3}, T. Kaneyama^{2,3}, T. Tomita^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, T. Tanaka^{1,2}, Y. Oshima^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,2}, N. Yamamoto^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ²Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Auto-Adjustment of Aberration Correction and Experimental Evaluation of R005 Microscope; Microscopy & Microanalysis 2008 Meeting, Albuquerque, USA, Aug 7, 2008
- [I34] S. Kim¹, Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Development of TEM-STM system for In-situ Investigation of properties of semiconductors; The 9th Asia-Pacific Microscopy Conference (APMC9) (Jeju International Conference, Korea, Nov.2-7, 2008)
- [I35] T. Tanaka^{1,2}, K. Sano¹, M. Ando¹, H. Sawada^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, E. Okunishi^{2,3}, Y. Kondo^{2,3} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Interfacial Structure in Catalyst of Au Nanoparticle on Rutile-TiO₂ by combination of aberration- corrected TEM and Gas Inlet TEM Holder; The 9th Asia-Pacific Microscopy Conference (APMC9) (Jeju International Conference, Korea, Nov.2-7, 2008)
- [I36] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): TEM Observation of Transfer of a Single Carbon Fullerene; The 9th Asia-Pacific Microscopy Conference (APMC9) (Jeju International Conference, Korea, Nov.2-7, 2008)
- [I37] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Reduction of Barrier Height at Close Proximity between two Gold (111) facets; International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, (Waseda Univ., November 9-13 2008)
- [I38] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Bias Dependence of Conductance Curve in Approaching a Tip to a Single Carbon Fullerene; International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, (Waseda Univ., November 9-13, 2008)
- [I39] Y.Oshima^{1,2} and Y. Kurui¹ (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Reduction of Barrier Height at Close Proximity between two Gold (111) surfaces; 2009 APS March Meeting (Pittsburgh, Pennsylvania U.S.A., March 16-20, 2009)
- [I40] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, M. Okamoto³, and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ Hitachi Ltd): Ballistic Transport in Gold[110]Nanowire; 2009 APS March Meeting (Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A., March 16-20, 2009)
- [I41] T. Tanaka^{1,2}, K. Sano¹, M. Ando¹, H. Sawada^{1,3}, F. Hosokawa^{1,3}, E. Okunishi^{1,3}, Y.Kondo^{1,3}, Y Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST³ JEOL Ltd.): In-situ observation of Au/TiO₂ catalyst in Oxygen-Gas Environments; Microscopy and Microanalysis 2009 Meeting, Richmond Virginia, USA, July 26-30, 2009
- [I42] T. Tanaka^{1,2}, Y. Abe¹, H. Sawada^{1,3}, E. Okunishi^{1,3}, Y. Kondo^{1,3}, Y Tanishiro^{1,2}, Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST Agency, ³ JEOL Ltd.): Adatom on Graphene, Directly Imaged by Aberration Corrected TEM at 300 kV; Microscopy and

Microanalysis 2009 Meeting, Richmond Virginia, USA, July 26-30, 2009

- [I43] T. Tomita^{1,3}, Y. Tanishiro^{1,2}, T. Miyata^{1,3}, H. Sawada^{1,3}, F. Hosokawa^{1,3}, T. Kaneyama^{1,3}, Y. Kondo^{1,3}, T. Tanaka^{1,2}, Y. Ohshima^{1,2}, N. Yamamoto^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, 2 Japan Science and Technology Agency, CREST, 3 JEOL Ltd.): Highly Stable 300 kV Cold Field Emission Gun for 50 pm Resolution Electron Microscopy; Microscopy and Microanalysis 2009 Meeting, Richmond Virginia, USA, July 26-30, 2009
- [D1] 谷城康真^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST):高分解能電子顕微鏡観察における検出器の問題—ナノ構造の“その場”観察、検出器研究部会・高分解能電子顕微鏡分科会合同研究会(北海道大学)、2005年3月17日
- [D2] 吉田誠¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST、3 東工大院総理工):コンタクトの非線形性コンダクタンス、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月24日
- [D3] 大島義文^{2,3}、平山博之³、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST、3 東工大院総理工):金多層ヘリカルナノワイヤのコンダクタンス計測、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月24日
- [D4] 小宮山英明¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST、3 東工大院総理工):MCBJ機構を用いた金属原子鎖の直接観察法の開発、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月24日
- [D5] 伊藤亮治¹、小川慶太¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST):TEM-STMを用いた銀ナノワイヤの構造とコンダクタンスの研究II、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月24日
- [D6] 渡部学¹、高柳邦夫^{1,2}、箕田弘喜^{2,3} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST、3 東京農工大院):Contact mode AFMによって作製したナノワイヤの電気伝導計測II、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月24日
- [D7] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST、3 東工大院総理工):TEM/STMによる金ナノワイヤの動的挙動とコンダクタンスの関係、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月24日
- [D8] 三輪哲史¹、赤堀千明¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST):TEM-AFMによるAuナノワイヤの力計測と構造観察II、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月24日
- [D9] 宮岡豊¹、山本直紀^{1,2}、秩父重秀³、向井孝志³ (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST、3 日亜化学):InGaN成長膜中の転位と発光分布、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月27日
- [D10] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST):1次元金属フォトニック構造の表面プラズモンII、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月27日
- [D11] 坪内洋¹、今田裕¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology Agency, CREST):半導体表面上の金属ナノ構造からのSTM発光、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月24日
- [D12] 塩川未久¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、2 Japan Science and Technology

- Agency, CREST):配列した金属微粒子表面からの表面プラズモン発光IV、日本物理学会第60回年次大会(東京理科大学野田キャンパス)、2005年3月24日
- [D13] 高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):ナノ構造材料のTEM,SPM観察;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場)2005年6月13日
- [D14] 山本直紀^{1,2}、塩川未久¹(¹東工大院理工、²J Japan Science and Technology Agency, CREST):TEM-Cl法を用いた表面プラズモンの直接観察;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場)2005年6月13日
- [D15] 谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):広域STM観察が可能なTEM-STHホルダーの開発;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場)2005年6月13日
- [D16] 大島義文^{2,3}、久留井慶彦¹、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東工大院総理工):金ナノワイヤの原子挙動によるコンダクタンスの変化;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場)2005年6月13日
- [D17] 大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):高分解能液体窒素冷却ホルダーの開発;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場)2005年6月13日
- [D18] 吉田誠¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東工大院総理工):ナノコンタクト形状に依存した非線形性コンダクタンス;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場)2005年6月13日
- [D19] 久留井慶彦³、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東工大院総理工):TEM-STH同期計測システムの向上;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場)2005年6月13日
- [D20] 鈴木喬博³、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東工大院総理工):金属1次元周期構造からのプラズモン発光;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場)2005年6月13日
- [D21] 高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):原子を見る;2005年度日本物理学会科学セミナー「21世紀物理の挑戦—世界物理年から未来へ—」(牛込算筈区民ホール)2005年8月26-27日
- [D22] 大島義文^{1,2}(¹東工大院総理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):高分解能用窒素冷却ホルダーの高分解能用窒素冷却ホルダーの開発と金単層ナノチューブの発見;第21回分析電子顕微鏡討論会(幕張メッセ 国際会議場)2005年8月30-31日
- [D23] 山本直紀^{1,2}、塩川未久¹(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):Ag微粒子金属フォトニック結晶からの表面プラズモン発光の周期依存性;第65回応用物理学会学術講演会(徳島大学常三島キャンパス)2005年9月7-11日
- [D24] 鈴木喬博³、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東工大院総理工):1次元金属フォトニック結晶のプラズモン発光;第65回応用物理学会学術講演会(徳島大学常三島キャンパス)2005年9月7-11日
- [D25] 石川要¹、山本直紀^{1,2}、舘野功太³、渡辺義夫⁴(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³NTT物性基礎研、⁴NTT-AT):「TEM-CL法」によるGaAsナノワイヤの偏光特性評価;第65回応用物理学会学術講演会(徳島大学常三島キャンパス)2005年9月7-11日
- [D26] 宮岡豊³、山本直紀^{1,2}、秩父重英³、向井孝志⁴(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³筑波大工、⁴日亜化学):InGaN量子井戸の偏光カソードルミネッセンス;第65回応用物理学会学術講演会(徳島大学常三島キャンパス)

2005年9月7-11日

- [D27] 久留井慶彦³, 大島義文^{2,3}, 高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ 東工大院総理工): 金ナノワイヤの構造とコンダクタンスの同期計測 II; 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) 2005 年 9 月 19-22 日
- [D28] 吉田誠¹, 久留井慶彦³, 大島義文^{2,3}, 谷城康真^{1,2}, 高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ 東工大院総理工): 金属ナノコンタクトに見られる非線形電流-電圧特性: 電極は接近する。; 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) 2005 年 9 月 19-22 日
- [D29] 小川慶太¹, 伊藤亮治¹, 谷城康真^{1,2}, 高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ 東工大院総理工): TEM-STM による Ag ナノワイヤの構造観察及び電気計測 II; 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) 2005 年 9 月 19-22 日
- [D30] 三輪哲史¹, 赤堀千明¹, 谷城康真^{1,2}, 高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ 東工大院総理工): TEM-AFM による金ナノワイヤの力学特性と構造; 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) 2005 年 9 月 19-22 日
- [D31] 鈴木喬博³, 山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ 東工大院総理工): 1次元金属フォトニック構造の表面プラズモン III; 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) 2005 年 9 月 19-22 日
- [D32] 塩川未久¹, 山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): 二次元配列した金属微粒子の表面プラズモンの日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) 2005 年 9 月 19-22 日
- [D33] 今田裕¹, 千葉綾子³, 山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ 東工大院総理工): 半導体表面上の金属ナノ構造からの STM 発光 II; 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) 2005 年 9 月 19-22 日
- [D34] 箕田弘喜^{2,3}, 山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST³ 東京農工大院): 金属吸着 Si 微斜面からの電子線励起発光の研究; 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) 2005 年 9 月 19-22 日
- [D35] 山本直紀^{1,2}, 塩川未久¹ (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): 金属フォトニック構造における表面プラズモンのバンド構造; 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) 2005 年 9 月 19-22 日
- [D36] 宮岡豊¹, 山本直紀^{1,2}, 秩父重英³, 向井孝志⁴ (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ 筑波大工, ⁴ 日亜化学): InGaN/GaN 量子井戸構造中の In 組成揺らぎとキャリアダイナミクス; 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス) 2005 年 9 月 19-22 日
- [D37] 山本直紀^{1,2}, 塩川未久¹, 鈴木喬博³ (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ 東工大院総理工): 電子線励起発光顕微法による表面プラズモンポラトリンの直接観察; 53 回応用物理学関係連合講演会 (武蔵工業大学) 2006 年 3 月 22 日-26 日
- [D38] 吉田 誠¹, 久留井慶彦³, 大島義文^{2,3}, 高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ 東工大院総理工): 電極との結合状態によるカーボンフラーレン電気伝導変化のその場観察; 53 回応用物理学関係連合講演会 (武蔵工業大学) 2006 年 3 月 22 日-26 日
- [D39] 鈴木喬博³, 山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ 東工大院総理工): 1次元プラズモニック結晶における表面プラズモ

- ンパターン;53 回応用物理学関係連合講演会 (武蔵工業大学 2006 年 3 月 22 日-26 日)
- [D40] 久留井慶彦³、大島義文^{2,3}、吉田 誠¹、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):TEM-STM 法による電極間に挟まれたフラーレン分子の電気伝導測定;53 回応用物理学関係連合講演会 (武蔵工業大学) 2006 年 3 月 22 日-26 日)
- [D41] 猪野直之¹、山本直紀^{1,2}、向井孝志³ (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 日亜化学):GaN 成長膜中の転位近傍におけるキャリアの拡散過程;53 回応用物理学関係連合講演会 (武蔵工業大学) 2006 年 3 月 22 日-26 日
- [D42] 千葉綾子³、今田裕¹、横谷真樹¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):Si 表面に形成されたナノ構造からの STM 発光;53 回応用物理学関係連合講演会 (武蔵工業大学) 2006 年 3 月 22 日-26 日
- [D43] 吉田誠¹、久留井慶彦³、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):透過型電子顕微鏡によるカーボンフラーレン・オニオンの構造と電気伝導性の同時計測;日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D44] 大島義文^{2,3}、久留井慶彦³、吉田誠¹、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):金ナノワイヤのエレクトロマイグレーション;日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D45] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):積層欠陥による金ナノワイヤのコンダクタンス変化;日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D46] 大島義文^{2,3}、久留井慶彦³、吉田誠¹、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):金ナノワイヤのエレクトロマイグレーション;日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D47] 小川慶太¹、服部司¹、寺口聡¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):TEM-STM による Ag ナノワイヤの構造観察および電気計測Ⅲ;日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D48] 赤堀千明¹、三輪哲史¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):応力変化に伴う金ナノワイヤの構造変化;日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D49] 鈴木喬博³、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):1 次元周期構造をもつ金属表面のプラズモニックバンド;日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D50] 塩川未久¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):二次元配列した金属微粒子の表面プラズモンⅡ;日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D51] 宮岡豊³、山本直紀^{1,2}、秩父重英⁴、向井孝志⁵ (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工、⁴ 筑波大物工、⁵ 日亜化学):InGaN/GaN 量子井戸構造の局所発光とキャリアダイナミクス;日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D52] 箕田弘喜^{2,3}、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東京農工大院工):金属吸着 Si 微斜面からの電子線励起発光の研究Ⅱ;日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D53] 今田裕¹、千葉綾子³、横谷真樹¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science

- and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):Si(111)7x7 再構成表面の STM 発光;日本物理学会第 61 回年次大会(愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D54] 山本直紀¹、鈴木喬博³、塩川未久¹ (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):電子線励起発光顕微法による表面プラズモンポラリトンの直接観察;日本物理学会第 61 回年次大会(愛媛大学) 2006 年 3 月 27-30 日
- [D55] 赤堀千明¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):応力変化に伴う金ナノワイヤの構造変化 II;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)2006 年 9 月 23-26 日
- [D56] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):金[110]ナノワイヤの断面構造とコンダクタンスの関係;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)2006 年 9 月 26 日
- [D57] 大島義文^{2,3}、久留井慶彦¹、吉田誠¹、高柳邦夫^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):電極間に置かれたカーボンフラーレンのダイナミクス;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)2006 年 9 月 26 日
- [D58] 今田裕¹、千葉綾子³、横谷真樹¹、山本直紀^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):Si(111)7×7 再構成表面の STM 発光;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)2006 年 9 月 26 日
- [D59] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):1 次元矩形構造のプラズモンモード;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)、2006 年 9 月 26 日
- [D60] 山本直紀^{1,2}、鈴木喬博¹、塩川未久¹ (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):電子線励起発光顕微法による表面プラズモンポラリトンの直接観察 II;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)2006 年 9 月 26 日
- [D61] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):1 次元プラズモニック結晶のバンドギャップ;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)、2006 年 9 月 26 日
- [D62] 塩川未久¹、山本直紀^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):二次元配列した金属微粒子の表面プラズモン;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)2006 年 9 月 26 日
- [D63] 大島義文^{2,3}、久留井慶彦¹、吉田誠¹ (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):電極間におけるカーボンフラーレン・トランスファー;第 26 回表面科学講演大会(大阪大学) 2006 年 11 月 6-9 日
- [D64] 田中崇之^{1,2}、安藤雅文¹、佐野健太郎¹、細川史生^{2,3}、近藤行人^{2,3}、山本直紀^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 日本電子(株)):収差補正電子顕微鏡とガス導入ホルダによる金ナノ粒子触媒の活性サイトの解明;日本顕微鏡学会 超分解能電子顕微鏡分科会 第 2 回講演会(熱海ニューフジヤホテル)2007 年 2 月 22 日
- [D65] 金秀鉉¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):広域観察可能な TEM-STM の開発;日本顕微鏡学会 超分解能電子顕微鏡分科会 第 2 回講演会(熱海ニューフジヤホテル)2007 年 2 月 22 日
- [D66] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):TEM 組み込み型 MCBJ-holder の開発;日本顕微鏡学会 超分解能電子顕微鏡分科会 第 2 回講演会(熱海ニューフジヤホテル)2007 年 2 月 22 日
- [D67] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、岡本正邦⁴、高柳邦夫^{1,2} (¹ 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工、⁴ 日立機械研):金[110]

- ナノワイヤのコンダクタンス定量解析;日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学) 2007 年 3 月 20 日
- [D68] 大島義文^{2,3}、久留井慶彦¹、吉田誠¹、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):フラールン振動による電気伝導の直接観察;日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学)2007 年 3 月 20 日
- [D69] 赤堀千明¹、大橋宣宏¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):応力変化に伴う金ナノワイヤの構造変化;日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学)2007 年 3 月 21 日
- [D70] 山本直紀^{1,2}、鈴木喬博¹ (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):電子線励起発光顕微法による表面プラズモンポラリトンの直接観察 III;日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学)2007 年 3 月 19 日
- [D71] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):1 次元矩形構造のプラズモンモード II;日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学)2007 年 3 月 19 日
- [D72] 横谷真樹¹、千葉綾子³、今田裕¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):Si(111)表面上の In ナノ構造からの STM 発光;日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学)2007 年 3 月 19 日
- [D73] 野々山裕介¹、鈴木喬博¹、塩川未久³、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):六方格子プラズモンニック結晶からの表面プラズモン発光 II;日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学) 2007 年 3 月 21 日
- [D74] 塩川未久³、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):二次元配列した金属微粒子の表面プラズモン II;日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学)2007 年 3 月 21 日
- [D75] 田中崇之^{1,2}、安藤雅文¹、佐野健太郎¹、細川史生^{2,3}、沢田英敬^{2,3}、近藤行人^{2,3}、山本直紀^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 日本電子):ルチル型 TiO₂ 上の金ナノ粒子触媒の活性点TEM観察;第 54 回応用物理学関係連合講演会(青山学院大学)2007 年 3 月 27-30 日
- [D76] 吉田誠¹、久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):TEM-STM による単一分子フラールンの生成および電気伝導のその場観察;第 54 回応用物理学関係連合講演会(青山学院大学)2007 年 3 月 28 日
- [D77] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,3} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST、² 東工大院理工、³ 東工大院総理工):金ナノワイヤの断面構造と電気伝導の定量評価;日本顕微鏡学会第 31 回関東支部講演会(東京工業大学)2007 年 3 月 17 日
- [D78] 高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):50 pm 超分解能顕微鏡法;日本顕微鏡学会第 63 回学術講演会(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター)、2007 年 5 月 20-22 日
- [D79] 金山俊克^{1,2}、沢田英敬^{1,2}、細川史生^{1,2}、富田健^{1,2}、近藤行人^{1,2}、谷城康真^{1,3}、高柳邦夫^{1,3} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工、):300 kV 超高分解能 FETEM“R005”の開発;日本顕微鏡学会第 63 回学術講演会(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター) 2007 年 5 月 20-22 日
- [D80] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,3} (1 東工大院理工、² 東工大院総理工、³ Japan Science and Technology Agency, CREST):HRTEM 組み込み用 MCBJ ホルダーの開発;日本顕微鏡学会第 63 回学術講演会(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター) 2007 年 5 月 20-22 日
- [D81] 金秀鉉¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and

- Technology Agency, CREST):広領域観察可能なTEM-STMホルダーの開発;日本顕微鏡学会第 63 回学術講演会(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター) 2007 年 5 月 20-22 日
- [D82] 田中崇之^{1,3}、安藤雅文³、佐野健太郎³、細川史生^{1,2}、近藤行人^{1,2}、山本直紀^{1,3}、高柳邦夫^{1,3}(¹Japan Science and Technology Agency, CREST、²日本電子(株)、³東工大院理工、):透過電子顕微鏡法による金ナノ粒子触媒の活性サイトの解明;日本顕微鏡学会第 63 回学術講演会(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター) 2007 年 5 月 20-22 日
- [D83] 箕田弘喜^{1,2}、旻野慶佑¹、矢澤博之¹(¹東京農工大院、²Japan Science and Technology Agency, CREST):超高真空電子顕微鏡を用いた電気伝導その場計測;日本顕微鏡学会第 63 回学術講演会(朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター) 2007 年 5 月 20-22 日
- [D84] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):電子線励起発光による 1 次元プラズモニク結晶の観察;第 23 回分析電子顕微鏡討論会(幕張メッセ) 2007 年 8 月 28 日-29 日
- [D85] 大谷信³、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東工大院総理工):金属微粒子の局在表面プラズモン;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学) 2007 年 9 月 21-24 日
- [D86] 今田裕¹、横谷真樹¹、菊島史恵¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):Si(111)-7×7 の原子分解能 STM 発光;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学) 2007 年 9 月 21-24 日
- [D87] 横谷真樹¹、今田裕¹、菊島史恵¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):Si(111)表面上の In ナノ構造からの STM 発光;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学) 2007 年 9 月 21-24 日
- [D88] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):電子線励起発光による 1 次元プラズモニク結晶の観察;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学) 2007 年 9 月 21-24 日
- [D89] 山本直紀^{1,2}、鈴木喬博¹(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):プラズモニク結晶からの電子線励起発光機構;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学) 2007 年 9 月 21-24 日
- [D90] 久留井慶彦¹、大島義文^{1,3}、岡本政邦⁴、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東工大院総理工、⁴日立製作所機械研究所):金複数原子鎖における整数量子化;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学) 2007 年 9 月 21-24 日
- [D91] 田中崇之^{1,3}、佐野健太郎³、安藤雅文³、沢田英敬^{1,2}、細川史生^{1,2}、近藤行人^{1,2}、高柳邦夫^{1,3}(¹Japan Science and Technology Agency, CREST、²日本電子(株)、³東工大院理工、⁴東工大院総理工):金ナノ粒子/ルチル界面の酸素原子カラムの観察;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学) 2007 年 9 月 21-24 日
- [D92] 金秀鉉¹、谷城康眞^{1,2}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):広域観察の TEM-STM 開発;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学) 2007 年 9 月 21-24 日
- [D93] 佐野健太郎¹、田中崇之^{1,2}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):TEM 及び Cs 補正 STEM による Au/TiO₂ 表面構造の観察 II;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学) 2007 年 9 月 21-24 日
- [D94] 久留井慶彦¹、大島義文^{1,3}、岡本政邦⁴、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東工大院総理工、⁴日立製作所機械研究所):多重金原子鎖の構造とコンダクタンス;日本結晶学会 2007 年度年会(東京工業大学) 2007 年 12 月 12 日
- [D95] 金秀鉉¹、谷城康眞^{1,2}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and

- Technology Agency, CREST):広領域観察可能な TEM-STM システム開発;日本結晶学会 2007 年度年会(東京工業大学) 2007 年 12 月 12 日
- [D96] 佐野健太郎¹、田中崇之^{1,2}、安藤雅文¹、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):TEM 及び Cs 補正 STEM による Au/TiO₂ 表面構造の観察;日本結晶学会 2007 年度年会(東京工業大学) 2007 年 12 月 12 日
- [D97] 高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):量子ナノコンタクト;東京工業大学 21 世紀 COE プログラム「量子ナノ物理学」第 3 回公開シンポジウム(五反田ゆうぼうと) 2007 年 12 月 20-21 日
- [D98] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、岡本政邦⁴、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東工大院総理工、⁴日立製作所機械研究所):金原子鎖の構造と量子化コンダクタンス;東京工業大学 21 世紀 COE プログラム「量子ナノ物理学」第 3 回公開シンポジウム(五反田ゆうぼうと) 2007 年 12 月 20-21 日
- [D99] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東工大院総理工):応力印加による、金ナノワイヤの歪とコンダクタンス変化;日本物理学会 第 63 回年次大会(近畿大学) 2008 年 3 月 22-26 日
- [D100] 田中崇之^{1,3}、安藤雅文³、佐野健太郎³、細川史生^{1,2}、沢田英敬^{1,2}、近藤行人^{1,2}、高柳邦夫^{1,3}(¹Japan Science and Technology Agency, CREST、²日本電子(株)、³東工大院理工.):収差補正 TEM 法による酸素原子を含む金ナノ粒子/ルチルの界面構造の観察;日本物理学会第 63 回年次大会;(近畿大学)2008 年 3 月 22-26 日
- [D101] 佐野健太郎¹、田中崇之^{1,2}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):TEM 及び Cs 補正 STEM による Au/TiO₂ 表面構造の観察 II;日本物理学会第 63 回年次大会;(近畿大学) 2008 年 3 月 22-26 日
- [D102] 金秀鉉¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):広領域観察可能な TEM-STM システム開発と半導体物性の研究;日本物理学会第 63 回年次大会(近畿大学)2008 年 3 月 22-26 日
- [D103] 山本直紀^{1,2}、鈴木喬博¹(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):電子線励起発光法による表面プラズモン分散の測定;日本物理学会第 63 回年次大会(近畿大学) 2008 年 3 月 22-26 日
- [D104] 大谷信³、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST、³東京工業大学院総理工):電子線励起による金属微粒子からの発光;日本物理学会第 63 回年次大会(近畿大学) 2008 年 3 月 22-26 日
- [D105] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):1 次元プラズモニック結晶のバンド構造;日本物理学会第 63 回年次大会(近畿大学) 2008 年 3 月 22-26 日
- [D106] 今田裕¹、太田将志¹、横谷真樹¹、菊島史恵¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):Si(111)7×7 再構成表面の STM 発光 III;日本物理学会第 63 回年次大会(近畿大学) 2008 年 3 月 22-26 日
- [D107] 箕田弘喜^{1,2}、旻野慶佑¹、矢澤博之¹(¹東京農工大院、²Japan Science and Technology Agency, CREST):REM-M4PP による表面原子ステップの電気伝導度の研究;日本物理学会第 63 回年次大会(近畿大学)2008 年 3 月 22-26 日
- [D108] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):1 次元プラズモニック結晶による表面プラズモン-光変換の角度分解測定;第 55 回応用物理学関係連合講演会(日本大学) 3 月 27-30 日
- [D109] 菊島史恵¹、横谷真樹¹、今田裕¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology Agency, CREST):Si(111)上の In 吸着構造からの TEM 発光;第 55 回応用物理学関係連合講演会(日本大学) 3 月 27-30 日
- [D110] 沢田英敬^{1,2}、細川史生^{1,2}、中道智寛^{1,2}、富田健^{1,2}、金山俊克^{1,2}、近藤行人^{1,2}、

- 田中崇之^{1,3}、大島義文^{1,4}、谷城康眞^{1,3}、高柳邦夫^{1,3}(¹ Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工、⁴ 東工大院総理工): 球面収差自動補正 System の開発および 47 pm 分解能の達成; 日本顕微鏡学会第 65 回学術講演会 (仙台国際センター) 2009 年 5 月 26-29 日
- [D111] 近藤行人^{1,2}、沢田英敬^{1,2}、細川史生^{1,2}、富田健^{1,2}、金山俊克^{1,2}、大島義文^{1,4}、田中崇之^{1,3}、山本直紀^{1,3}、谷城康眞^{1,3}、高柳邦夫^{1,3}(¹ Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工、⁴ 東工大院総理工): 分解能 50 pm の超高分解能顕微鏡の開発; 日本顕微鏡学会第 65 回学術講演会 (仙台国際センター) 2009 年 5 月 26-29 日
- [D112] 富田健^{1,2}、谷城康眞^{1,3}、細川史生^{1,2}、近藤行人^{1,2}、金山俊克^{1,2}、大島義文^{1,4}、田中崇之^{1,3}、山本直記^{1,3}、沢田英敬^{1,2}、高柳邦夫^{1,3}(¹ 日本電子(株)、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院理工、⁴ 東工大院総理工): 分解能 50 pm 顕微鏡用高安定 300 kV 冷陰極電子銃の開発; 日本顕微鏡学会第 65 回学術講演会 (仙台国際センター) 2009 年 5 月 27 日
- [D113] 田中崇之^{1,3}、安部悠介³、沢田英敬^{1,2}、奥西栄治^{1,2}、近藤行人^{1,2}、谷城康眞、高柳邦夫^{1,3}(¹ Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工): 収差補正電子顕微鏡 R005 によるグラフェンの高分解能 TEM 観察; 日本顕微鏡学会第 65 回学術講演会 (仙台国際センター) 2009 年 5 月 26-29 日
- [D114] 富田健^{1,2}、谷城康眞^{1,3}、細川史生^{1,2}、近藤行人^{1,2}、金山俊克^{1,2}、大島義文^{1,4}、田中崇之^{1,3}、山本直紀^{1,3}、沢田英敬^{1,2}、高柳邦夫^{1,3}(¹ Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工、⁴ 東工大院総理工): 分解能 50 pm 顕微鏡用高安定 300 kV 冷陰極電子銃の開発; 日本顕微鏡学会第 65 回学術講演会 (仙台国際センター) 2009 年 5 月 26 日-29 日
- [D115] 大島義文^{1,4}、橋本豊⁴、沢田英敬^{1,2}、橋川直人⁵、朝山匡一郎⁵、近藤行人^{1,2}、谷城康眞^{1,3}、高柳邦夫^{1,3}(¹ Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工、⁴ 東工大院総理工、⁵ (株)ルネサス小平セミコン): 収差補正走査型透過電子顕微鏡法によるシリコン結晶中のヒ素ドーパント原子の観察; 日本顕微鏡学会第 65 回学術講演会 (仙台国際センター) 2009 年 5 月 26 日
- [D116] 田中崇之^{1,3}、佐野健太郎³、安藤雅文³、沢田英敬^{1,2}、細川史生^{1,2}、奥西栄治^{1,2}、近藤行人^{1,2}、谷城康眞^{1,3}、高柳邦夫^{1,3}(¹ Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工): ガス雰囲気その場観察 TEM 法による Au/TiO₂ 触媒機構の研究; 日本顕微鏡学会第 65 回学術講演会 (仙台国際センター) 2009 年 5 月 27 日
- [D117] 大島義文^{1,3}、久留井慶彦²、高柳邦夫^{1,2}(¹ Japan Science and Technology Agency, CREST、² 東工大院理工、³ 東工大院総理工): 引っ張り過程における金<111>、<100>コンタクトの構造とコンダクタンス; 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本大学) 2009 年 9 月 25-28 日
- [D118] 大島義文(¹ Japan Science and Technology Agency, CREST、² 東工大院総理工): 金(111)面および(110)面のトンネルからコンタクトへの遷移のその場観察; 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本大学) 2009 年 9 月 25-28 日
- [D119] 大島義文^{1,4}、橋本豊⁴、澤田英敬^{1,2}、橋川直人^{1,5}、朝山匡一郎^{1,5}、近藤行人^{1,2}、谷城康眞^{1,3}、高柳邦夫^{1,3}(¹ Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工、⁴ 東工大院総理工、⁵ (株)ルネサス小平セミコン): 収差補正走査型透過電子顕微鏡法によるシリコン結晶中ヒ素ドーパントの検出; 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本大学) 2009 年 9 月 25-28 日
- [D120] 田中崇之^{1,3}、佐野健太郎²、安藤雅文²、沢田英敬^{1,2}、細川史生^{1,2}、奥西栄治^{1,2}、近藤行人^{1,2}、高柳邦夫^{1,3}(¹ Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工): 酸素導入による金ナノ粒子/ルチルの界面の状態変化”; 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本大学黒髪キャンパス) 2009 年 9 月 25 日

- [D121] 安部悠介², 田中崇之^{1,2}, 高柳邦夫^{1,2} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST, ²東工大院理工): 球面収差補正 TEM 法によるグラフェン単原子直接観察; 日本物理学会 2009 年秋季大会(熊本大学黒髪キャンパス) 2009 年 9 月 28 日
- [D122] 神保雄², 谷城康真^{1,2}, 高柳邦夫^{1,2}, 沢田英敬^{1,3}, 奥西栄治^{1,3} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST, ²東工大院理工, ³日本電子(株)): 収差補正 STEM による Z コントラストイメージング; 日本物理学会 2009 年秋季大会(熊本大学黒髪キャンパス) 2009 年 9 月 28 日
- [D123] 高柳邦夫^{1,2}, 金秀鉉¹, 安部悠介¹, 大島義文^{2,3}, 田中崇之^{1,2}, 谷城康真^{1,2} (1 東工大院理工, ²Japan Science and Technology Agency, CREST, ³東工大院総理工): ナノ構造の 50 pm 電子顕微鏡観察; 東京工業大学物理学グローバル COE 公開シンポジウム 2009(東工大蔵前会館) 2009 年 12 月 8-9 日
- [D124] 神保雄², 谷城康真^{1,2}, 高柳邦夫^{1,2}, 沢田英敬^{1,3} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST, ²東工大院理工, ³日本電子(株)): 収差補正 STEM による単原子観察と Z コントラストイメージング; 日本物理学会第 65 回年次大会(岡山大学津島キャンパス) 2010 年 3 月 20 日
- [D125] 安部悠介², 田中崇之^{1,2}, 高柳邦夫^{1,2} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST, ²東工大院理工): 宙づりにした単層及び二層グラフェンの超格子構造直接観察; 日本物理学会第 65 回年次大会(岡山大学津島キャンパス) 2010 年 3 月 21 日
- [D126] 田中崇之^{1,2}, 炭屋亜美², 佐野健太郎², 安藤雅文², 沢田英敬^{1,3}, 細川史生^{1,3}, 奥西栄治^{1,3}, 近藤行人^{1,3}, 高柳邦夫^{1,2} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST, ²東工大院理工, ³日本電子(株)): 電子線非照射下のガス導入による金ナノ粒子/ルチルの構造変化の観察; 日本物理学会第 65 回年次大会(岡山大学津島キャンパス) 2010 年 3 月 23 日

③ ポスター発表 (国内会議 54 件、国際会議 38 件)

- [I1] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST) : Direct observation of atom transfer at nano-gap; ECOS23 The 23rd European Conference on Surface Science (The Freie Universitat Berlin Sep.4-9 2005)
- [I2] T. Suzuki¹, N. Yamamoto^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Electron Beam Induced Light Emission by Surface Plasmon On One-dimensional Metal Gratings; 5th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '05 (Dec.4-9) Hawaii, USA
- [I3] H. Minoda^{2,3} and N. Yamamoto^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ Tokyo University of Agriculture and Technology) : Anomalous enhancement of light emission by Au adsorption on a Si(001) vicinal surface; 5th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '05 (Dec.4-9) Hawaii, USA (Dec. 8 05)
- [I4] T. Suzuki¹ and N. Yamamoto^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Plasmonic band of metal surface with a 1-Dimensional periodic structure; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I5] N. Ino¹, N. Yamamoto^{1,2} and T. Mukai³ (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ Nichia Corporation); Diffusion process of minority carrier around dislocations in GaN epitaxial films studied by TEM-cathodoluminescence technique; 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I6] M. Shiokawa¹ and N. Yamamoto^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan

- Science and Technology Agency, CREST): Direct Imaging of Surface Plasmon on Nanoparticle Arrays; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I7] A. Chiba¹, H. Imada¹, M. Yokoya¹ and N. Yamamoto^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): STM light emission from nano-structures on Si surface; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I8] K. Ishikawa¹, N. Yamamoto^{1,2}, K. Tateno³, Y. Watanabe⁴ (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST 3.NTT BRL 4 NTT AT) ; Characterization of individual nanowires by TEM-cathodoluminescence technique; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I9] M. Yoshida^{1,2}, Y. Kurui^{1,2}, Y. Oshima^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Formation of single and multi-shell fullerenes by a combination of an electron beam irradiation and a current flow in Transmission Electron Microscope; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I10] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Reduction of electrical conductance by bending gold nanowire; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I11] C. Akahori¹, S. Miwa¹, Y. Tanishiro^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Structure Change of Gold Nanowire Caused by Stress Change Studied by TEM-AFM; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006, P8M_89)
- [I12] Y. Tanishiro^{1,2}, K. Ogawa¹, T. Hattori¹, S. Teraguchi¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Silver and Carbon Nanowires Formed Between Silver Electrodes Studied by TEM-STM; 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006, P8M_80)
- [I13] Y. Tanishiro^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Development of TEM-STM Holder for 4D Observation; 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006, P4I_88)
- [I14] T. Tanaka^{1,2}, M. Ando¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Novel TEM-Gas inlet holder equipped with compact valves; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I15] M. Ando¹, T. Tanaka^{1,2}, and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Shape change of Au clusters dispersed on rutile TiO₂ (110) surface; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8,2006)
- [I16] Y. Oshima^{1,2}, Y. Kurui¹, M. Yoshida¹ and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Migration of gold atoms along gold nanowire during stretching; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I17] H. Minoda^{1,2} and N. Yamamoto^{2,3} (¹ Tokyo University of Agriculture and Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ Tokyo Institute of Technology); Study on the origin of the anisotropic dielectric properties of the Au adsorbed Si(001) vicinal surface; 16th International Microscopy congress (Sapporo, 3-8 Sept. 2006)
- [I18] M. Yoshida¹, Y. Kurui¹, Y. Oshima¹, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): In-situ

- observation of metallic conductance of the double multi-shell fullerenes; The 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I19] H. Sawada^{1,2}, T. Sannomiya^{1,2}, F. Hosokawa^{1,2}, T. Kaneyama^{1,2}, Y. Kondo^{1,2}, Y. Tanishiro^{1,3} and K. Takayanagi^{1,3} (¹Japan Science and Technology Agency, CREST, ²JEOL Ltd., ³Tokyo Institute of Technology): Method to Measure Aberrations from Ronchigram by Auto-Correlation Function; 16th International Microscopy Congress (Sapporo, Sept.3-8, 2006)
- [I20] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹Tokyo Institute of Technology ²Japan Science and Technology Agency, CREST): Determination of Stable Gold Nanowire using TEM – STM; ISSP-10 (10th ISSP International Symposium. on Nanoscience at Surfaces , Kashiwa, Oct.9-13, 2006)
- [I21] M. Yoshida¹, Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Synthesis and size control of a single carbon fullerene at a nano-gap; ISSP-10, Kashiwa, Oct.9-13, 2006)
- [I22] T. Tanaka^{1,2}, M. Ando¹, F. Hosokawa^{1,3}, H Sawada^{1,3}, Y. Kondo^{1,3}, N. Yamamoto^{1,2}, and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Active-Site Imaging for Au Catalyst Nanoparticles on Rutile-TiO₂ by TEM ; Material Research Society 2006 MRS Fall Meeting (Boston, Nov.27-Dec.2, 2006)
- [I23] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Size-dependent conductance behavior of [110] gold nanowire; MRS (Materials and Research Society) 2006 fall meeting (Boston Nov.28, 2006)
- [I24] M. Yoshida¹, Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): The new fabrication method of the single carbon fullerene nano-wiring using STM ; Second International symposium on Nanometer-scale Quantum Physics nano-PHYS'07 (Tokyo, Jan. 24-26, 2007)
- [I25] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Quantitative analysis of quantized conductance in gold[110]nanowire ; International symposium on Nanometer-scale Quantum Physics nano-PHYS'07 (Tokyo, Jan. 24 – 26, 2007)
- [I26] Y. Oshima. ^{1,2} Y. Kurui¹ and K.Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Transfer of a single carbon fullerene; The NIMS Conference 2007, P-27, (Tsukuba, July 11-13 2007)
- [I27] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2} and K.Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Integral Quantization of Multiplied Gold Atomic Chains; The NIMS Conference 2007, (Tsukuba, July 11-13 2007)
- [I28] T. Tanaka^{1,2}, K. Sano¹, M. Ando¹, H. Sawada^{2,3} , F. Hosokawa^{2,3}, Y. Kondo^{2,3} and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST ³JEOL Ltd.): Active-Site Imaging in Catalyst of Au Nanoparticle on Rutile-TiO₂ by combination of aberration- corrected TEM and Gas Inlet TEM Holder; Microscopy and Microanalysis 2007 (Fort Lauderdale, Florida, USA, August 6-9, 2007)
- [I29] T. Tanaka^{1,2}, K. Sano¹, M. Ando¹, H. Sawada^{2,3}, F. Hosokawa^{2,3}, Y. Kondo^{2,3} and K. Takayanagi^{1,2} (¹ Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³JEOL Ltd.): Active-Site Imaging in Catalyst of Au Nanoparticle on Rutile-TiO₂ by combination of aberration- corrected TEM and Gas Inlet TEM Holder; The 7th France-Japan Workshop on Nanosciences and Nanomaterials (Strasbourg, France, October 24-26, 2007)

- [I30] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Study of Quantized Conductance for Gold Nanowire Using TEM-STM; 9th Asia-Pacific Microscopy Conference, November 2-7 (2008), Jeju International Conference, Korea
- [I31] Y. Kurui¹, Y. Oshima^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST) :Breakdown of Quantized Conductance in <100> and <111> Gold Nanowires; ISSS5 International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, November 9-13 (2008) Waseda Univ., Japan
- [I32] S. Kim¹, Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Development of TEM-STM system for in-situ characterization of semiconductors; ISSS-5, International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, November 9-13 (2008), Waseda Univ., Japan
- [I33] T. Tanaka^{1,2}, Y. Abe¹, H. Sawada^{2,3}, E. Okunishi^{2,3}, Y. Kondo^{2,3} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): High Resolution TEM Imaging of Graphene by use of aberration-free microscope, R005; 2009 APS March Meeting (Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A., March 16-20, 2009)
- [I34] S. Kim¹, Y. Tanishiro^{1,2}, and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): In-situ TEM observation on STM tunneling gap ; 2009 APS March Meeting (Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A., March 16-20, 2009)
- [I35] K. Sano¹, T. Tanaka^{1,2}, H. Sawada^{2,3}, Y. Kondo and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): In-situ High Resolution TEM Observation of Dynamic Structural Changes of Au/TiO₂ Catalyst Exposed to Oxygen and Hydrogen; 2009 APS March Meeting (Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A., March 16-20, 2009)
- [I36] H. Imada¹, M. Ohta¹ and N. Yamamoto^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST): Surface - state Emission of Si(111)-(7x7) Induced by Scanning Tunneling Microscopy; 2009 APS March Meeting (Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A., March 16-20, 2009)
- [I37] Y. Oshima^{1,2}, Y. Hashimoto¹, H. Sawada^{2,3}, N. Hshikawa⁴, K. Asayama⁴, Y. Kondo^{1,3} and Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd. ⁴ Renesas Kodaira Semiconductor Co.,Ltd.): Detection of Arsenic Dopant Atoms in Silicon Crystal by Aberration Corrected Scanning Transmission Electron Microscopy; Microscopy & Microanalysis 2009 Meeting, July 28th, Richmond U.S.A
- [I38] Y. Abe¹, T. Tanaka^{1,2}, H. Sawada^{2,3}, E. Okunishi^{2,3}, Y. Kondo^{2,3}, Y. Tanishiro^{1,2} and K. Takayanagi^{1,2} (1 Tokyo Institute of Technology, ² Japan Science and Technology Agency, CREST, ³ JEOL Ltd.): Direct TEM Observation of Dislocations of Graphene and Bilayer Graphene; 2010 APS March Meeting (Portland, U.S.A., March 15-19, 2010)
- [D1] 箕田弘喜^{2,3}、山本直紀² (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東京農工大院): 金属吸着 Si 微斜面からの電子線励起発光の研究 II; 日本物理学会第 61 回年次大会(愛媛大学、松山大学)3 月 30 日
- [D2] 宮岡豊¹、山本直紀^{1,2}、秩父重英³、向井孝志⁴ (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 筑波大院物工、⁴ 日亜化学): InGa_N/Ga_N 量子井戸の構造中の転位と発光分布; 日本顕微鏡学会第 61 回学術講演会(つくば国際会議場)2005 年 6 月 13 日

- [D3] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):金属1次元周期構造からのプラズモン発光;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場) 2005年6月13日
- [D4] 今田裕¹、坪内洋³、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):半導体表面上の金属ナノ構造からのSTM発光;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場) 2005年6月13日
- [D5] 小川慶太¹、伊藤亮治¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):TEM-STMによるAgナノワイヤの構造観察および電気計測;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場) 2005年6月13日
- [D6] 三輪哲史¹、赤堀千明¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):TEM-AFMによるAuナノワイヤの力計測と構造観察;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場)2005年6月13日
- [D7] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):TEM-STM同期計測システムの向上;日本顕微鏡学会第61回学術講演会(つくば国際会議場) 2005年6月13日
- [D8] 赤堀千明¹、三輪哲史¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):Auナノワイヤの構造と機械的性質;日本物理学会 2005年秋季大会(同志社大学京田辺キャンパス) 9月19-22日
- [D9] 田中崇之^{1,2}、角田頼彦³ (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 早稲田大院理工):fcc鉄薄膜のフォノン状態密度;「放射光利用ナノテク最前線 2005」平成16年度放射光グループ研究成果報告会(ホテルセントノーム 京都) 2005年6月13日
- [D10] 三輪哲史¹、赤堀千明¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST):応力印加時の金ナノワイヤの変形・破断過程の構造観察;日本物理学会代61回年次大会(愛媛大学) 2006年3月27-30日
- [D11] 小川慶太¹、寺口聡¹、服部司¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CRESTand):TEM-STMを用いたAgナノワイヤの構造と電気伝導の研究;日本物理学会代61回年次大会(愛媛大学) 2006年3月27-30日
- [D12] 久留井慶彦³、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² J Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):金ナノワイヤの安定構造とコンダクタンス;量子ナノ物理学第2回公開シンポジウム(東京簡易保険会館ゆうぼうと 五反田)2006年3月17日
- [D13] 吉田誠¹、久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工):New synthesis technique of single carbon fullerene and transformation of fullerene's structure;第31回カーボンフラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(三重県総合文化センター)2006年7月11-13日
- [D14] 山本直紀^{1,2}、鈴木喬博¹ (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST);電子線励起発光顕微法による表面プラズモンポラリトンの直接観察;第67回応用物理学会(立命館大学)2006年8月29日-9月1日
- [D15] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST);1次元プラズモニック結晶のバンド構造;第67回応用物理学会(立命館大学)2006年8月29日-9月1日
- [D16] 千葉綾子³、今田裕¹、横谷真樹¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST³ 東工大院総理工);Si(111)表面上のイン

ジウムナノ構造からの STM 発光;第 67 回応用物理学会(立命館大学)2006 年 8 月 29 日-9 月 1 日

- [D17] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、岡本政邦⁴、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工、⁴ 日立製作所機械研): 金ナノワイヤのシェル構造と量子化コンダクタンスの関係;第 44 回茅コンファレンス(裏磐梯ロイヤルホテル)2006 年 9 月 9 日
- [D18] 金秀鉉¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): Development of TEM-STM holder for 4D observation;第 44 回茅コンファレンス(裏磐梯ロイヤルホテル)2006 年 9 月 9 日
- [D19] 大島義文^{2,3}、久留井慶彦¹、吉田誠¹、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工): ナノギャップ間を移動するカーボンフラーレンの観察;第44回茅コンファレンス (裏磐梯ロイヤルホテル)2006 年 9 月 9 日
- [D20] 今田裕¹、千葉綾子³、横谷真樹¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工): STM light emission from Si(111)7×7 surface: Atomic scale electromagnetic interaction;第44回茅コンファレンス (裏磐梯ロイヤルホテル)2006 年 9 月 9 日
- [D21] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): Plasmonic band of metal surface with 1-dimensional periodic structure;第44回茅コンファレンス (裏磐梯ロイヤルホテル)2006 年 9 月 9 日
- [D22] 谷城康真^{1,2}、金秀鉉¹、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): 広領域観察可能な TEM-STM の開発;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)2006 年 9 月 23 日-26 日
- [D23] 谷城康真^{1,2}、寺口聡¹、服部司¹、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): 高感度 CCD-TEM-STM によるナノワイヤ構造変化の動的観察;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)2006 年 9 月 23 日-26 日
- [D24] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、岡本政邦⁴、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工、⁴ 日立製作所機械研): 歪みによる金ナノワイヤのコンダクタンス変化;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)2006 年 9 月 23 日-26 日)
- [D25] 簗野慶佑¹、池田武嗣¹、箕田弘喜^{1,2} (1 東京農工大工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): 超高真空電子顕微鏡用電気伝導度測定装置の開発;日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学)2006 年 9 月 25 日
- [D26] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST、³ 東工大院総理工): 金ナノワイヤのシェル構造と量子化コンダクタンス;第 26 回表面科学講演大会(大阪大学)2006 年 11 月 6 日
- [D27] 金秀鉉¹、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): 広領域観察 TEM-STM ホルダーの開発;日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学)2007 年 3 月 20 日
- [D28] 簗野慶佑¹、箕田弘喜^{1,2} (1 東京農工大工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): 超高真空電子顕微鏡を用いた電気伝導その場計測;日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学)2007 年 3 月 20 日
- [D29] 野々山裕介¹、鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): 六方格子プラズモニック結晶からの表面プラズモン発光;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学)2007 年 9 月 21-24 日
- [D30] 佐野健太郎¹、田中崇之^{1,2}、安藤雅文¹、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): TEM 及び Cs 補正 STEM による Au/TiO₂ 表面構造の観察;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学)2007 年 9 月 21-24 日
- [D31] 加藤雅博¹、山本直紀^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology

- Agency, CREST):金属フォトニック結晶からの Smith-Purcell; 日本物理学会第 62 回
年次大会(北海道大学)2007 年 9 月 21-24 日
- [D32] 旣野慶佑¹、矢澤博之¹、箕田弘喜^{1,2}(¹東京農工大学、²Japan Science and
Technology Agency, CREST):REM-M4PP 法による表面・電気伝導その場計測;日本
物理学会第 62 回年次大会(北海道大学)2007 年 9 月 21-24 日
- [D33] 矢澤博之¹、箕田弘喜^{1,2}(¹東京農工大学、²Japan Science and Technology
Agency, CREST):Si(001)2×3-Ag 表面上の Ag 単結晶ワイヤー成長の電子顕微鏡観
察;日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学)2007 年 9 月 21-24 日
- [D34] 鈴木喬博¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology
Agency, CREST):電子線励起発光顕微法による 1 次元プラズモニック結晶の観察;日本
結晶学会平成 19 年度年会(東京工業大学)2007 年 12 月 12 日
- [D35] 菊島史恵¹、今田裕¹、横谷真樹¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science
and Technology Agency, CREST):III 族金属低次元吸着構造の STM 観察;日本結晶
学会平成 19 年度年会(東京工業大学)2007 年 12 月 12 日
- [D36] 大谷信³、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology
Agency, CREST、³東京工業大学院総理工):金属微粒子の局在表面プラズモン;日本
結晶学会平成 19 年度年会(東京工業大学)2007 年 12 月 12 日
- [D37] 加藤雅博¹、山本直紀^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and Technology
Agency, CREST):金属フォトニック結晶からの Smith-Purcell 放射;日本結晶
学会平成 19 年度年会(東京工業大学)2007 年 12 月 12 日
- [D38] 佐野健太郎¹、田中崇之¹、安藤雅文^{1,2}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan
Science and Technology Agency, CREST):TEM 及び Cs 補正 STEM による Au/TiO₂
表面構造の観察;日本結晶学会平成 19 年度年会(東京工業大学)2007 年 12 月 12 日
- [D39] 橋本豊³、大島義文^{2,3}、谷城康眞^{1,2}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan
Science and Technology Agency, CREST、³東京工業大学院総理工):TEM-EELS
法による金薄膜プラズモンの観察;日本物理学会 第 63 回年次大会(近畿大学)2008 年
3 月 22-26 日
- [D40] S.Kim¹, Y. Tanishiro^{1,2}, K. Takayanagi^{1,2} (¹Tokyo Institute of Technology, ²
Japan Science and Technology Agency, CREST): Development of TEM-STM
system for the study of semiconductors properties; 日本顕微鏡学会 第 64 回学
術講演会(京都国際会議場) 2008 年 5 月 21-23 日
- [D41] 田中崇之^{1,3}、佐野健太郎¹、安藤雅文¹、沢田英敬^{1,2}、細川史生^{1,2}、近藤行人^{1,2}、
高柳邦夫^{1,3}(¹Japan Science and Technology Agency, CREST、²日本電子(株)、³東
工大院理工): 収差補正 TEM 法による金ナノ粒子/ルチルの界面構造の観察;日本物
理学会 2008 年秋季大会(岩手大学) 2008 年 9 月 20 日-23 日
- [D42] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²東工大院総理工、³
Japan Science and Technology Agency, CREST): TEM-STM による金原子鎖のコ
ンダクタンス揺らぎ計測; 日本物理学会 2008 年秋季大会(岩手大学)2008 年 9 月 19
日-22 日
- [D43] 金秀鉉¹、谷城康眞^{1,2}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院総理工、²Japan Science and
Technology Agency, CREST): TEM-STM 同時観察システム開発と半導体物性の研
究; 日本物理学会 2008 年秋季大会(岩手大学)2008 年 9 月 19 日-22 日
- [D44] 神保雄¹、谷城康眞^{1,2}、沢田英敬^{2,3}、奥西栄治^{2,3}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²
Japan Science and Technology Agency, CREST、³日本電子(株)): 収差補
正 STEM による軽元素の単原子観察;日本物理学会第 64 回年次大会(立教大学)
2009 年 3 月 27-30 日
- [D45] 安部悠介¹、田中崇之^{1,2}、高柳邦夫^{1,2}(¹東工大院理工、²Japan Science and
Technology Agency, CREST): 球面収差補正 TEM 及び EELS によるグラフェンの研
究; 日本物理学会第 64 回年次大会(立教大学、2009 年 3 月 27-30 日)

- [D46] 久留井慶彦¹、大島義文^{2,3,5}、岡本政邦⁴、高柳邦夫^{1,3} (1 東工大院理工、² 東工大院総理工、³ Japan Science and Technology Agency, CREST、⁴ 日立機械研、⁵ JST-PREST): 金[110]ナノワイヤのバリスティック伝導; 日本物理学会第 64 回年次大会(立教大学)2009 年 3 月 27-30 日)
- [D47] 田中崇之^{1,3}、佐野健太郎¹、安藤雅文¹、沢田英敬^{1,2}、細川史生^{1,2}、近藤行人^{1,2}、高柳邦夫^{1,3} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工、): 収差補正 TEM 法による酸素原子を含む金ナノ粒子/ルチルの界面構造の観察 (ポスター発表); 日本顕微鏡学会第 64 回学術講演会(国立京都国際会館) 2008 年 5 月 21 日-23 日
- [D48] 佐野健太郎¹、田中崇之^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、³ Japan Science and Technology Agency, CREST); ガス導入 TEM ホルダーによる Au/TiO₂ 触媒のその場観察; 日本物理学会、2008 年秋季大会 (岩手大学) 2008 年 9 月 20 日-23 日
- [D49] 安部悠介¹、田中崇之^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): 収差補正 TEM によるグラフェンエッジ構造の観察; 日本物理学会、2008 年秋季大会 (岩手大学) 2008 年 9 月 20 日-23 日)
- [D50] 神保雄¹、谷城康真^{1,3}、沢田英敬^{2,3}、高柳邦夫^{1,3} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工): 収差補正 STEM による単原子観察; 日本物理学会、2008 年秋季大会 (岩手大学) 2008 年 9 月 19 日- 22 日
- [D51] 佐野健太郎¹、田中崇之^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 東工大院理工、² Japan Science and Technology Agency, CREST): ガス導入 TEM ホルダーによる Au/TiO₂ 触媒のその場観察 II; 日本物理学会第 64 回年次大会 (立教大学) 2009 年 3 月 27-30 日
- [D52] 安部悠介³、田中崇之^{1,3}、沢田英敬^{1,2}、細川史生^{1,2}、奥西栄治^{1,2}、近藤行人^{1,2}、谷城康真^{1,3}、高柳邦夫^{1,3} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST、² 日本電子(株)、³ 東工大院理工): 球面収差補正 TEM 法による鏡筒内加熱グラフェンの観察; 日本顕微鏡学会第 65 回学術講演会 (仙台国際センター) 2009 年 5 月 27 日
- [D53] 小柳聖²、谷城康真^{1,2}、高柳邦夫^{1,2} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST、² 東工大院理工): 球面収差補正 STEM による低温炭素膜上の金属ナノ粒子観察; 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本大学黒髪キャンパス) 2009 年 9 月 26 日
- [D54] 炭屋亜美²、田中崇之^{1,2}、佐野健太郎²、沢田英敬^{1,3}、細川史生^{1,3}、奥西栄治^{1,3}、近藤行人^{1,3}、高柳邦夫^{1,2} (1 Japan Science and Technology Agency, CREST、² 東工大院理工、³ 日本電子(株)): ガス導入 (O₂、N₂) による Au/TiO₂ の構造変化の観察; 日本物理学会第 65 回年次大会 (岡山大学津島キャンパス) 2010 年 3 月 21 日

(4)知財出願

①国内出願 (8 件)

1. 電子顕微鏡、細川史生、日本電子株式会社、2005 年 9 月 27 日、2005-279537
2. 透過電子顕微鏡、三宮工.近藤行人、日本電子株式会社、2006 年 4 月 28 日、2006-125974
3. 収差補正方法及び電子線装置、細川史生、日本電子株式会社、2006 年 8 月 31 日、2006-234924
4. 収差補正装置及び収差補正方法、沢田英敬.細川史生、2006 年 10 月 20 日、2006-287010
5. ロンチグラムを用いた収差測定及び収差補正方法及び電子顕微鏡、沢田英敬.三宮工、日本電子株式会社、2006 年 10 月 30 日、2006-293757
6. ロンチグラム中心の決定方法、三宮工、日本電子株式会社、2006 年 11 月 17 日、2006-311088
7. 走査型透過電子顕微鏡の収差補正装置及び収差補正、沢田英敬、日本電子株式会社、2008 年 3 月 10 日、2008-06266
8. 収差補正装置及び該収差補正装置を備える荷電粒子装置、沢田英敬.近藤行人、日本電子株式会社、2008 年 9 月 24 日、2008-244927

②海外出願 (7 件)

1. ELECTRON MICROSCOPE、Fumio Hosokawa、JEOL.LTD.、2006/9/25、11/526847
2. ELECTRON MICROSCOPE、Fumio Hosokawa、JEOL.LTD.、2006/9/27、62549902
3. Transmission electron microscope、Ko Sannomiya.Yukihito Kondo、JEOL.LTD.、2007/4/27、USP/11/741370
4. Method of Aberration Correction and Electron beam system、Fumio Hosokawa、JEOL.LTD.、2007/8/30、USP/11/847595
5. Method of Aberration Correction and Electron beam system、Fumio Hosokawa、JEOL.LTD.、2007/8/30、EUP/07253423.3
6. Charged-Particle Beam System、Hidetaka Sawada. Fumio Hosokawa、JEOL.LTD.、2007/10/18、USP/11/874.604
7. Charged-Particle Beam System、Hidetaka Sawada. Fumio Hosokawa、JEOL.LTD.、2007/10/17、EUP/07254112.1

③その他の知的財産権

なし

(5)受賞・報道等

①受賞

高柳邦夫: 第5回江崎玲於奈賞(2008 年 10 月 10 日)

②マスコミ(新聞・TV等)報道

・2007 年 9 月 7 日 化学工業日報

「東工大ー日本電子、分解能 0.5Å を実現 球面収差補正電顕を開発」

高柳がリーダーを務める東工大と日本電子の JST-CREST 研究開発グループが、0.5 オングストローム分解能を有する次世代電子顕微鏡を開発した。収差補正電子顕微鏡

の開発は、日米欧で激しい競争が展開されている分野であるが、非対称球面収差補正という独自技術により、世界最高の分解能を実現した。窒化ガリウムの 0.63 オングストローム間隔の原子列の分離観察や半導体技術で重要なシリコンの単原子の観察結果が示された。

・ 2007 年 1 月 21 日 日本経済新聞

「直径、原子1個分に」

金属ナノワイヤは、電気伝導(コンダクタンス)が量子化されるため高速・低消費電力のナノデバイスの部品として期待されている。久留井、大島、高柳らは、コンダクタンスが量子単位で異なる様々な太さの金ナノワイヤを電子顕微鏡内で作り出した。さらに、原子鎖が1本、2本、3本、4本で創られる極細のナノワイヤを制御して、電気伝導が本数に比例して増えることを明らかとした。

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

本研究の成果として開発された非対称型球面収差補正装置は市販の機器に展開される予定である。

次に、本プロジェクトで開発された高次の収差係数の測定技術はJST CREST 末永プロジェクトにおける収差補正装置の収差測定に展開され、本プロジェクトと同様に実用化されている。さらに、測定された収差係数に応じて顕微鏡本体を制御することで収差を補正される。この技術は、JST CREST 末永プロジェクトで開発された球面収差補正装置に展開されている。上記の2点の技術について国内及び外国特許(各 2 件)を出願しており、市販の機器に展開される予定である。

さらに、本プロジェクトで開発された冷陰極型電界放出形の電子銃(CFEG)は、非蒸発型ゲッタポンプ(NEG)を使用したユニークな真空排気系を採用した。このことにより、電子源近傍の真空度を飛躍的に向上することができ、長時間に亘って安定な光源を得ることが可能となった。この技術も上述の CREST 末永プロジェクトで開発された低加速電子銃に展開されている。この技術に関し 1 件の特許が出願された。さらに、この排気系を使った CFEG は市販の電子顕微鏡に展開されている。

②社会還元的な展開活動

- ・ 本研究成果をインターネット(URL:
<http://wwwsurf.phys.titech.ac.jp/tylab/R005/index-jp.html>,
<http://wwwsurf.phys.titech.ac.jp/tylab/R005/index.html>)
で公開し、一般に情報提供している。

§ 6 結び

本研究では、0.047 nm の分解能を実証する電子顕微鏡の基盤技術が達成された。欧米では、収差理論と補正技術は長年研究されていて、しかも、何度か開発に失敗している。そうした研究の蓄積をもとに、実用収差補正装置の開発が行われ、技術特許も取得されている。アメリカの TEAM プロジェクトでは、実用機開発者がプロジェクトに加わって、5つの研究機関が役割分担して 0.5 Å 装置複数台 (TEAM1 など、それぞれに技術開発課題の異なる装置) の開発が進められた。本プロジェクトでは、収差補正の電子光学から検討して独自の形を採用した。その結果、世界最高の分解能を得る基盤技術が獲得され、これからの物質解析研究が期待できるレベルになった。

0.05 nm 分解能の達成に、とりわけ重要な技術は、安定に一定強度をもつ新型冷陰極型電子銃の開発であった。エネルギー幅が狭く、明るく、強度不変な光源は、定量解析には欠かせない。今後、市販機にも搭載されて、定量解析が画期的に進展すると思われる。

一方、多極子を使った収差補正技術の展開と、多極子に頼らない新しい収差補正原理による方法の開発が、基盤技術として取り組む課題であろう。とくに、新原理による開発への取り組み (JST の対応) が遅れないよう、再び、欧米の基礎研究に追い越されないような努力が必要かと思われる。

本研究を総括すると、収差補正により、3次、5次の収差を除去して、電子の位相を制御して、分解能の改善や軽元素の観察が可能となった。リチウム原子、炭素原子、シリコン原子の観察、あるいは定量的な原子像強度観察などに成功し、物質現象の解明に資する基盤技術を達成することができた。