

1. 電子線結晶構造解析の最先端

Sub-Å 電子ビームによる高分解能 STEM

物質・材料研究機構 材料研究所 阿部英司

オークリッジ国立研究所 Stephen J. Pennycook

Eiji ABE and S. J. Pennycook: Ultrahigh-resolution Scanning Transmission Electron Microscopy with Sub-Ångstrom-Sized Electron Beams

The scanning transmission electron microscope (STEM) with an annular dark-field (ADF) detector provides atomic-resolution *incoherent* images, whose resolution is dominated, to a good approximation, by the size of convergent electron beams. Improving a spherical aberration of microscope objective lenses has been successful in converging the beam into sub-Å scale, promising a remarkably higher resolution for STEM. Here we describe the performance of aberration-corrected 300kV-STEM - the world-best STEM available today. The results clearly demonstrate that a sub-Ångstrom resolution has been indeed achieved for not only simple structures but also structurally complex systems (quasicrystals).

1. はじめに

近年、高干渉性の電子ビームを放出する電界放射型電子銃の普及に伴い、原子分解能の走査型透過電子顕微鏡法 (STEM) の研究が基礎・応用の両面から盛んになってきている。特に環状の検出器と組み合わせた暗視野 STEM (ADF-STEM) 法¹⁾は、従来の多波干渉型とは原理的にまったく異なる結像プロセスで原子像を形成するため、これまでに取得困難であった局所構造情報を引き出し得る手法として注目度が非常に高い。その詳細は本特集のほかの解説を参照していただくとして、ここでは ADF-STEM 法の分解能に限定してその特徴を述べる。

薄膜化された試料を散乱・透過した電子を用いて結像する透過電子顕微鏡法において、得られる強度マップ (像コントラスト) は三次元的な原子位置が平面上に投影された構造を反映するものである。投影構造中には、実際の最隣接原子間距離よりも近い原子位置が無限近に現れ得るため、顕微鏡構造解析においては2点を識別する分解能 (点分解能) が高ければ高いほどよい。後述するように、STEM 像の分解能は走査収束電子ビームのサイズによってほぼ決定される。ごく最近、より細くビームを絞り込むためのレンズ球面収差 (Cs) 補正機の開発²⁾により、STEM の分解能に格段の向上がみられた。³⁾⁴⁾ 本稿では、STEM における Cs 補正の意義と、その分解能改善の実際を簡単に紹介する。

2. ADF-STEM の分解能

2.1 非干渉型原子像 (incoherent imaging)

原子分解能 ADF-STEM 法では、微小収束電子プローブ

($< \sim 2 \text{ \AA}$) を試料上走査し、各々のプローブ位置から透過・散乱されて環状検出器上に到達する電子強度をマッピングすることによって走査像を得る (図1左)。適度な厚さの薄膜試料 ($\sim 10 \text{ nm}$) の晶帯軸方向から入射した収束電子は、強い動力的回折効果により原子コラム (電子入射方向に沿って縦に並んだ原子列) 近傍に局在したフラックスを生じる。これを電子チャネリング効果と呼ぶ*。このとき、走査プローブが原子コラム直上にあるとき検出器上のシグナル強度が極大となり、あたかもコラム1つ1つが独立に照射されるとする近似が成り立つ。すなわち、ADF-STEM 法における原子分解能像は、試料中の個々の原子コラムからの (高角) 散乱強度を独立に測定した結果として解釈できる。その観察像強度は、試料の投影ポテンシャル $O(\mathbf{R})$ と収束電子ビームの強度分布を表す関数 $P(\mathbf{R})$ とのコンボリューションで与えられる。¹⁾

$$I(\mathbf{R}) = O(\mathbf{R}) \otimes P(\mathbf{R}) \quad (1)$$

式 (1) より、観察像が2つの独立な強度分布関数同士の単純な演算で記述でき (図1右)、投影原子位置が常に輝点として表れることが保証されることがわかる。従来の多波干渉型位相コントラスト TEM 像が、試料の下側の結像レンズで付加される位相変化に対応して多様なコントラ

* 動力的回折効果を入射平面波のプロッホ波成分への分岐で記述したとき、原子サイト極近傍の 1s 成分が効果的に励起されることに対応する (本特集渡辺氏の解説を参照)。ほかのプロッホ波成分一例えば 2s 成分などが強く励起されるケースもあるが、これらは高角散乱側にほとんど寄与しない。⁵⁾ 晶帯軸入射時の 1s 成分の励起と、高角散乱環状検出器による high-pass filtering との2つの効果により、ADF-STEM が原子コラムごとの散乱強度を独立に測定しているとする解釈 (非干渉近似) がよく成立する。

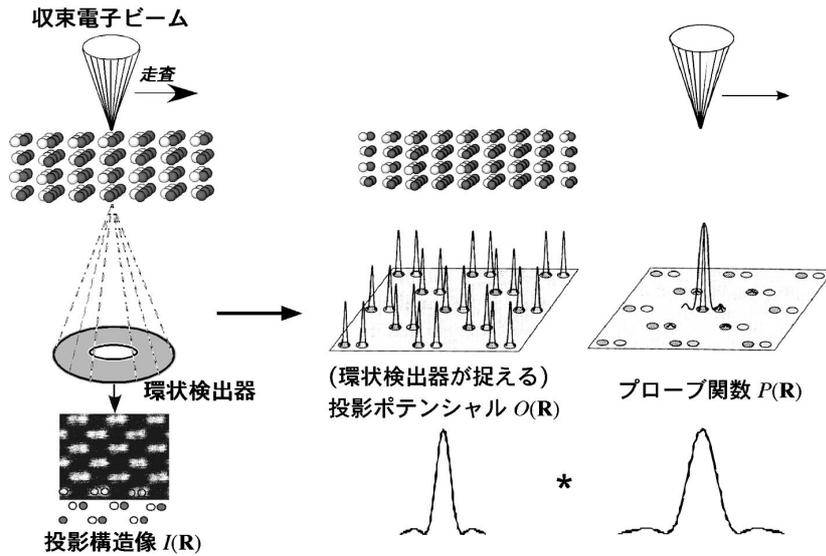


図1 ADF-STEM法における非干渉結像の模式図。(Schematic illustration of incoherent imaging in ADF-STEM.) 結像過程を、試料投影ポテンシャルと装置定数である収束電子ビームとに分離して記述することができる。その分解能は走査ビーム径に直接依存する。

ストー原子位置が白にも黒にもなり得る一を呈する現象と対照的である。基本結像過程が式(1)のように記述できるADF-STEM像は、非干渉像(incoherent image)と呼ばれる。

$O(\mathbf{R})$ は、検出器上の散乱強度へ寄与するポテンシャル(散乱断面積)を考慮する。ここではその詳細は省略するが(文献1, 6)を参照, 十分な高角散乱側に検出器を設定すると, 原子サイトに鋭いピークをもつ局在したポテンシャルを捉えることに対応する。その形状半値幅は, 例えばSiで $\sim 0.5 \text{ \AA}$ 前後であると考えられており, 理想的にはこれが分解能の限界を規定する。以上から, ADF-STEM非干渉像の点分解能は原理的に 1 \AA を切る事が可能であり, 装置としてプローブのサイズ($P(\mathbf{R})$)により決定されると言える。

2.2 収束電子プローブ形状へのCs補正効果

電界放射型電子銃において, 先鋭化された陰極エミッタに強い電界(高い電圧)をかけてその先端数nm領域から放出される電子は, 単色性および干渉性が高い(図2)。このような高干渉電子源から供給される波(波束)は, 平面波の集まりとみなせる。これら平面波を, 図2に模式的に示すように対物レンズ(の前方磁界)で試料表面上に収束することで微小電子プローブを形成する。このとき試料表面上の波動場 $\psi(\mathbf{r})$ は, 収束角 α 内の種々の方向から入射される平面波(kn_1, kn_2, \dots)の, 試料表面に平行な成分($k_{||}$)を重畳することで記述できる。Csのまったくない理想的なレンズであれば, α を数百mradまで取り込める十分大きな絞りをを用いることで, 波長(加速電圧300kVで $\lambda \sim 0.02 \text{ \AA}$)のオーダーにまでビームを絞り込むことができよう(分解能 \propto 波長/絞り: Abbeの回折限界)。実

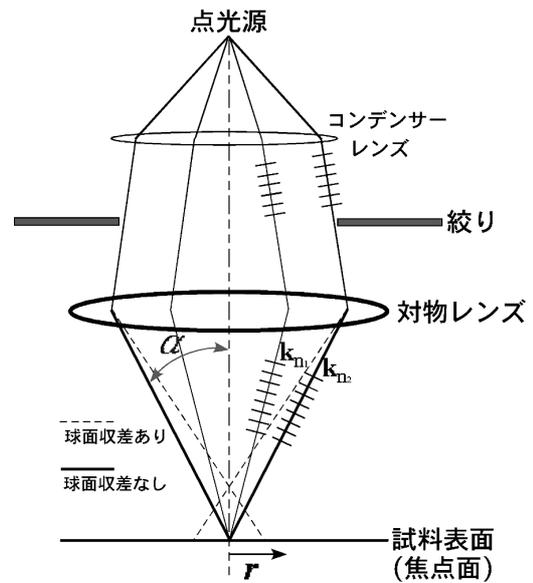


図2 対物レンズによる収束電子ビーム形成。(Formation of convergent electron beams through an objective lens.) STEMにおいては, 対物レンズから光源側に球面収差(Cs)補正機が組み込まれ, 理想的に一点に収束したより細いビームを得ることが可能となる。

際の電子顕微鏡における対物レンズのCsは十分に大きい。そのため, 平面波がレンズを通過する際, α に依存して付加される位相変化量を加味しなければならない^{7,8)}したがって $\psi(\mathbf{r})$ は,

$$\psi(\mathbf{r}) = \int_{\text{aperture}} \exp(-i\mathbf{k}_{||}\mathbf{r}) \cdot \exp(-i\chi(\mathbf{k}_{||})) d\mathbf{k}_{||} \quad (2)$$

のように表される。 $\mathbf{r} = 0$ は光軸(図2中の2点鎖線)に対

応する。積分は絞り (aperture) によって選択された範囲で行う。 $\chi(\mathbf{k}_{//})$ はレンズで受ける位相変化を考慮した波面収差関数であり、

$$\chi(\mathbf{k}_{//}) = \pi\lambda\mathbf{k}_{//}^2(Cs\lambda^2\mathbf{k}_{//}^2/2 - \Delta f) \quad (3)$$

と書ける。 Δf は焦点外れ量である。これらの式より、収束ビーム形状を決定する主要パラメータが、絞り径 (= 収束角 α)、 Cs 、そして Δf であることがわかる。 Cs 固定値の下での最適な α と Δf は、波面収差変化を波長の 1/4 以下に抑えるとする Rayleigh の 1/4 波長則⁹⁾ と、その範囲を最も高周波領域で与える Scherzer 条件⁷⁾ とを満足させることにより導くことができる。このとき、 $r=0$ 周辺のメインピークの半値幅が最小となる。ただし、図 2 中に点線で示したように、レンズの外側を通過する波は収差の影響が大きく、メインピークから外れた位置にサブピーク強度をもたらす点に注意したい。

原理的に凸レンズしか作製できない電磁レンズでは、通常の光学系が用いる凹凸レンズのシンプルな組み合わせによる Cs 補正が不可能である。近年に至って、多極子レンズを複数組み合わせ、ビームの変形/修正を逐次行うことで Cs を補正する複合レンズ機器が開発され^{2),10)} 電子顕微鏡の高分解能化に大きなブレークスルーをもたらされている。図 3 に、加速電圧 300 kV の STEM における、 Cs 補正前後でシミュレーションしたプローブ強度分布を示す。プローブの強度分布は基本的に $|\psi(\mathbf{r})|^2$ で与えられるが、計算には高圧変動 (ΔE) による波長ゆらぎに起因する収差 (色収差) の影響を扱うダンピング関数も考慮してある。(色収差は多波干渉 TEM 法の分解能へ大きな影響を与えるが、ADF-STEM 法のそれに対する影響は格段に小さい¹¹⁾ したがって、 Cs 補正のみによる高分解能化は STEM においてより有効であると言える) Cs 補正によるプローブ形状の改善が一目瞭然であろう。 Cs 補正前にはおよそ 1.3 Å であったメインピークの半値幅 (FWHM) が、 Cs 補正後にはおよそ 0.5 Å にまで達し、非常に鋭い形状のプローブが実現される。 Cs 補正の効果としてさらにもう一点重要なのは、補正前に見られる半径約 2 Å のドーナツ状のサブピーク強度分布 (図 3 左) が補正後には消失し、鋭い中心ピークのテールにわずかな強度が付加される程度に留まる (図 3 右) ことである。ADF-STEM における非干渉結像 (図 1) を思い起こせば、メインピークが原子コラム直上にあるとき、サブピーク強度は実際には原子の存在しない位置に「虚像」を生じ得る。もしくは、余分なバックグラウンドを与える原因ともなる。メインピークの先鋭化による高分解能化のみならず、サブピーク強度を顕著に抑えるという Cs 補正の効果は、像解釈をより正確にするものとして高く評価できる。図 3 に示したプローブはそれぞれ全電流値が等しくなるように規格化されているが、実際の装置での Cs 補正後はより大き

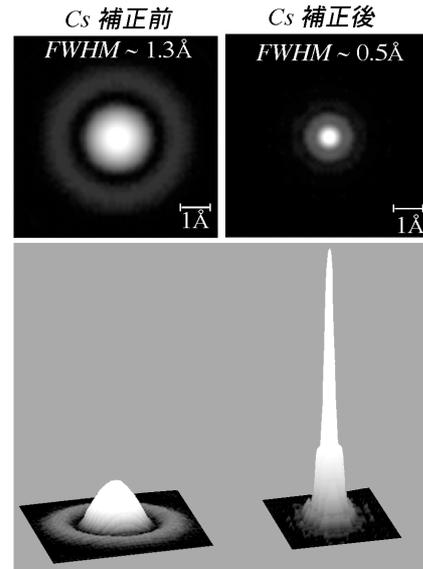


図 3 Cs 補正前 (左) と後 (右) での 300kV-STEM 機プローブ形状のシミュレーション。(Calculated probe-intensity distributions before (left) and after (right) aberration correction for the 300kV-STEM.) これらは全電流値が等しくなるように規格化されて表示してある。計算に用いられた主なパラメータは補正前: $\alpha = 10$ mrad, $\Delta f = -45$ nm, $Cs = 1.0$ mm, $\Delta E = 0.5$ eV, 補正後: $\alpha = 25$ mrad, $\Delta f = 4$ nm, $Cs = -50$ m ($C_s = 0.1$ m), $\Delta E = 0.5$ eV である。

な絞り (α) を挿入できるため、補正前よりも一桁明るい ($> \sim 100$ pA) プローブとなる。像強度分布のシグナル/ノイズ (S/N) 比の大幅な改善が期待できる。

以上小括すると、収束電子プローブ形状への対物レンズの Cs 補正主要効果は、1) メインピークの先鋭化、2) サブピークの消失、そして 3) 電流値の顕著な上昇、の 3 点が挙げられる。

3. Cs 補正 STEM による超高分解能観察

現在、アメリカおよびヨーロッパ諸国の主要電子顕微鏡研究室において、 Cs 補正による超高分解能化がそれぞれの国家プロジェクトの一環として進められている。¹²⁾ なかでもオークリッジ国立研究所 (アメリカ) にある、Nion 社製の Cs 補正機を組み込んだ 300kV-STEM 機 (VG-HB603U) が現時点で世界最高の STEM 分解能を誇る。⁴⁾ 以下、そのデータを基に、 Cs 補正による分解能改善の実際を示す。

3.1 Si [112] 投影構造

従来、電子顕微鏡の分解能チェックには、Si を [110] 方向から投影したとき約 1.3 Å 間隔で現れるペアの原子位置—ダンベル構造と呼ばれる—がしばしば用いられてきた。 Cs 補正により 1 Å を切る超高分解能観察が目標となった今、別方向から投影した際に現れるさらに間隔の狭い

ダンベル構造からその分解能を検討すべきである。¹³⁾ 図4はSi[112]方向から撮影されたSTEM像であり、この投影方向で得られる間隔0.78 Åのダンベル構造が明瞭に分解されている。⁴⁾ Cs補正STEMが、実際にSub-Åの分解能を達成し得ることを明確に示した最初の実験データであると言える。この像のフーリエ変換パターンから、およそ0.6 Åの相関距離にまで情報限界が伸びていることが示され、理論的に予測されるプローブ(図3右)がほぼ実現されていることが伺える。(STEM専用機は実際の収束プローブ像を直接投影するためのレンズをもたないため、その形状を実験的に測定することができない) STEM専用機に

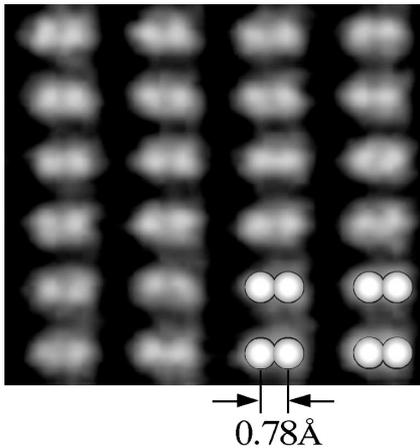


図4 Cs補正した300kV-STEMにより撮影した、Si結晶[112]方向からの投影構造像⁴⁾(ADF image of a Si crystal along [112] direction obtained by an aberration-corrected 300kV-STEM. (VG-HB603U at Oak Ridge National Laboratory)) 0.76 Å間隔のSiダンベル構造が明瞭に分解されている。

おけるプローブ形状の実験的検討^{2),3)}としては、弱位相物体とみなせるカーボンの非晶質膜から得られる集束電子ビームの分散パターン(ロンチグラム¹⁴⁾と呼ばれる)から、 $\alpha \sim 25$ mradまで位相が揃って収束されていることが確認されている。すなわち、装置として図3右に示したプローブを形成するための条件が実現されていると結論できる。

図4のSTEM像撮影時に、非常に高い角度($> \sim 90$ mrad : $s (= \sin\theta/\lambda)$ で 2.25 \AA^{-1} 以上の高角散乱に相当)に散乱された電子を用いている点⁴⁾は特筆すべきである。前述したように、高角散乱ほどより原子サイト近傍に局在したポテンシャルを捉えるため、原理的に高い分解能が期待される。しかし、電子回折における高角散乱強度は、原子形状因子が非常に小さくなるために急激に弱くなり、検出器上で十分なシグナルを得ることが難しくなる。今回、非常に高角散乱であるにもかかわらず結像に十分な強度を得ていることは、プローブ電流値が著しく増加したことによるS/N比改善の効果も大きいと考えられる。

3.2 Al₇₂Ni₂₀Co₈準結晶

非周期的な原子配列からなる準結晶構造は回折法のみでユニークに決定することが困難であることから、電子顕微鏡による直接観察が相補的に不可欠である。特に最近、ADF-STEM法は準結晶構造研究に大きな進展をもたらしており、そのよい適用例の1つと認識されている(本特集斎藤氏の解説、および文献15)を参照)。図5に、Al₇₂Ni₂₀Co₈二次元準結晶から得たCs補正機取り付け以前と以後のSTEM像と、これら像強度のフーリエ変換パターンを示す。Cs補正による分解能の向上が明瞭である。Cs補正後の像では、投影原子コラムを表す輝点がCs補正前のそれと比較してシャープになっているとともに、そのコントラストに顕著なS/N比の改善が見られる。実際、フ

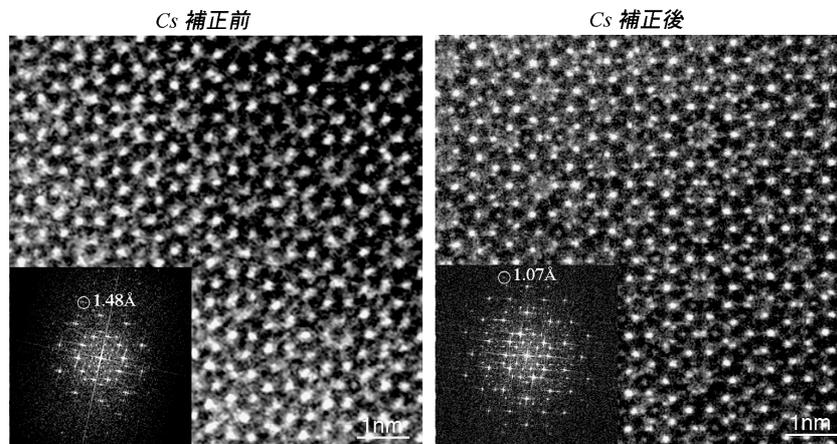


図5 Cs補正機取り付け前後の300kV-STEMを用いて撮影されたAl₇₂Ni₂₀Co₈準結晶のADF-STEM像と、対応するフーリエ変換パターン。(ADF images of an Al₇₂Ni₂₀Co₈ quasicrystal taken by a 300kV-STEM (VG-HB603U) before (left) and after (right) the aberration-correction. The corresponding Fourier transform patterns are inserted.) 環状検出器は、50 mrad以上の高角散乱電子を捕獲するように設定された。

ーリエパターンを比較すると、補正前には面間隔 1.48 Å に対応する反射までしか現れていないが、補正後には面間隔およそ 1 Å の反射にまで伸びている。

高角散乱域では、異種原子間の散乱振幅の(相対的な)差が著しく強調されるため、ADF-STEM 像は原子番号 Z の違いに敏感なコントラスト-Zコントラストを呈する。図 5 の像において、強い輝点が遷移金属 (Ni もしくは Co. 以下 TM と略す) の位置に相当する。Cs 補正後の像では、強度の弱い輝点も多数現れている点は特筆すべきである。本試料は Al-Ni-Co 化合物であるから、これらの弱い輝点は相対的に Z の小さい Al 原子の位置を捉えていることになる。振幅強調された Z コントラスト STEM 法では、相対的に軽い原子からの情報が得難くなってしまうことが従来の問題点の 1 つであったが、Cs 補正によるプローブ形状の尖鋭化およびバックグラウンドノイズの著しい低減により、異種原子の同時観察という点もかなり改善できていることがわかる。

式 (1) で表される非干渉像は、プローブ形状 $P(\mathbf{R})$ によるデコンボリューション処理により、原子構造 $O(\mathbf{R})$ を直接的に求めることができる。本質的にノイズ成分を多く含む ADF-STEM 像に対しては、マキシマムエントロピー法 (MEM) と組み合わせて効果的にノイズ除去を行うことで、より正確な原子構造を求めていく試みが有効である。^{16,17)} 図 6a は、図 5 の Cs 補正像に対して MEM-デコンボリューション処理を施したマップである。強度の弱い多数の輝点まで含めた詳細構造が、より鮮明に浮かび上がってくる。図中、点線で示したのは $\text{Al}_{72}\text{Ni}_{20}\text{Co}_8$ 準結晶の構造単位と考えられる直径約 2 nm の正 10 角柱原子クラスター¹⁶⁾ である。クラスターの辺上には、約 1.3 Å 間隔の投影 TM サイトが明瞭に分解されている。さらにクラスター中央近傍では、強度の弱い約 ~ 0.95 Å 間隔のサイトまでもが分解されている点に着目したい。図中に示した X-Y に沿った強度プロファイルから、これらのサイトが占有率の低い Al のサイトであることが直接示唆される。このようなサイトは、準結晶構造に本質的な点欠陥構造 (フェイゾン欠陥¹⁵⁾) を捉えたものとして、物理的に矛盾なく解釈できる。その詳細は原論文¹⁸⁾ を参照いただくとして、今やこのような局所詳細構造情報までも直接観察により取得可能となったことは特筆すべきであろう。

図 6b は、図 6a に対して Cs 補正前のプローブ (図 3 左) を用いてコンボリューション処理を行い、原子構造 $O(\mathbf{R})$ をばかした結果である。図 5 左に示した Cs 補正前の像の特徴がほぼ再現されるとともに、もはや弱い輝点の詳細情報は失われてしまっていることがわかる。Cs 補正の有効性が改めて確認されよう。また、Cs 補正前の像データに MEM-デコンボリューション処理をしても、図 6a に見られるような非常に弱い多数の輝点を再現することはできない¹⁷⁾ (このとき、TM 原子位置を表す強い輝点の半値幅

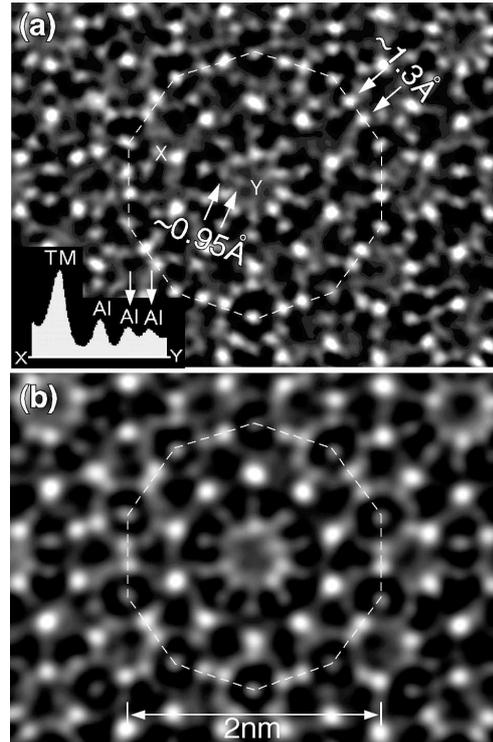


図 6 Cs 補正 STEM で得た $\text{Al}_{72}\text{Ni}_{20}\text{Co}_8$ 準結晶構造像 (図 5 右) への画像処理結果. (Image processing on the Cs-corrected ADF-STEM image of an $\text{Al}_{72}\text{Ni}_{20}\text{Co}_8$ quasicrystal.) (a) 図 3 右に示したプローブ形状を用いた MEM-デコンボリューション処理により得たマップ. (b) (a) に、図 3 左に示したプローブ形状を用いてコンボリューション処理して得たマップ.

が狭くなることに起因して、そのフーリエ変換の高周波限界で見積もられる「見かけ上の分解能」⁴⁾ は向上する)。すなわち、もともと S/N 比が十分ではないデータにいくら MEM 処理を施しても、強い強度をもつサイト周辺の弱い強度は再現しきれないのである。Cs 補正による STEM 像の高分解能化は、プローブ径がより細くなるという直接的な要素だけでなく、前節に小括したそのほかの効果も含めた S/N 比の顕著な改善を通して達成されていると結論できる。

4. まとめ

本稿では、対物レンズの球面収差 (Cs) 補正機を装着した 300kV-STEM の分解能が、確実に Sub-Å に達していることを実際の実験データを基に紹介した。Si のような比較的シンプルな構造だけでなく、多元複雑化合物である準結晶構造に対しても従来を顕著に凌ぐ分解能が達成されており、今後さらに多種多様な物質・材料の局所構造解析へと幅広い応用展開がおおいに期待される。

原子分解能 ADF-STEM 法において、原子コラムごとの散乱強度を独立に測定しているとする非干渉近似 (図 1)

は、入射電子ビームが試料中を伝播する際の拡がり効果(非局在因子)が十分に小さいという仮定の基に成立する。しかし、STEMにおける入射ビームの非局在化は無視できず、ビームが細くなれば即分解能が向上するとする非干渉条件の適用を疑問視する研究グループがあることも事実である。実際にSub-Å径の収束電子ビームが実現された今、この非局在化の問題に関する実験的検討が可能となった訳である。本稿の内容も含めた最近のCs補正STEMの高分解能観察結果は、プローブ形状の先鋭化に伴い実際に格段に分解能が向上しており、おおむね非干渉近似が成立していることを支持するものであると言える。非干渉像は、比較的シンプルな画像処理(デコンボリューション)で詳細原子構造を直接的に求めることができる(図6a)。Cs補正ADF-STEM法が顕微鏡構造解析の信頼性・定量性を飛躍的に高める手法として、今後もより一層の進展が計られることに疑いの余地はない。本稿では触れなかったが、ADF-STEM法では結像と同時に、環状検出器の穴(図1)を通過してくる透過電子ビームのエネルギー損失分光分析(EELS)も行える。Cs補正によりEELSの空間分解能も飛躍的に向上しており、¹⁹⁾ ADF-STEM法は物質中の局所原子・電子構造を総合的に解析できる非常に強力な顕微鏡法であることを、回折強度法を専門とする本誌の多数の読者にもぜひ覚えておいていただきたく願う。

MEM-デコンボリューション処理に関しては、HREM社の石塚和夫氏に非常に有益な議論をしていただいた。ここに記して感謝する。

文献

- 1) S. J. Pennycook and D. E. Jesson: *Phys. Rev. Lett.* **64**, 938 (1990); *Ultramicroscopy* **37**, 14 (1991).
- 2) N. Dellby *et al.*: *J. Electron Microsc.* **50**, 177 (2001).
- 3) P. E. Batson, N. Dellby and O. L. Krivanek: *Nature* **418**, 617 (2002).
- 4) P. D. Nellist *et al.*: *Science* **305**, 1741 (2004), およびその Supporting Online Material (<http://www.science.mag.org/>).
- 5) B. Rafferty, P. D. Nellist and S. J. Pennycook: *J. Electron Microsc.*

50, 227 (2001).

- 6) K. Ishizuka: *Ultramicroscopy* **90**, 71 (2002).
- 7) O. Scherzer: *J. Appl. Phys.* **20**, 20 (1949); *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* **74**, 1154 (1970).
- 8) K. J. Hanszen: *Adv. Optical & Electron Microscopy* **4**, 1 (1971).
- 9) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford (1970).
- 10) M. Haider *et al.*: *Nature* **392**, 768 (1998).
- 11) 田中信夫, 馬場則男: 電子顕微鏡 **36**, 31 (2001).
- 12) 例えば, 第20回分析電子顕微鏡討論会予稿集の田中信夫氏の概要(p.94)に簡潔によくまとめられている。
- 13) M. O'Keefe *et al.*: *Ultramicroscopy* **89**, 215 (2001).
- 14) V. Ronchi: *Appl. Opt.* **3**, 437 (1964).
- 15) E. Abe, Y. Yan and S. J. Pennycook: *Nature Materials*, **3**, 759 (2004).
- 16) A. J. Mcgibbon, S. J. Pennycook and D. E. Jesson: *J. Microscopy* **195**, 44 (1999).
- 17) K. Ishizuka and E. Abe: Proc. of 13th European Microscopy Congress, pp.117-118, Belgian Society for Microscopy, Antwerp (2004).
- 18) E. Abe and S. J. Pennycook: 準備中
- 19) M. Varela *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **92**, 095502 (2004).

プロフィール



阿部 英司 Eiji ABE
物質・材料研究機構 材料研究所
Materials Engineering Laboratory, National Institute for Materials Science (NIMS).
〒305-0047 つくば市千現1-2-1
1-2-1 Sengen, Tsukuba 305-0047, Japan
e-mail: abe.eiji@nims.go.jp
最終学歴: 東北大学大学院工学研究科材料物性学専攻修士課程
専門分野: 電子顕微鏡
現在のテーマ: STEMによる局所構造解析



Stephen J. Pennycook
Condensed Matter Science Division, Oak Ridge National Laboratory
Oak Ridge, TN37831-6030, USA