走査電子顕微鏡の像シャープネス評価法のISO標準化

佐藤 貢†

キーワード：走査電子顕微鏡，SEM，分解能，像シャープネス，FT法，DR法

1. ま え が き

ミクロの世界を観察する顕微鏡にとって、観察限界を意味する分解能は最も重要な性能指標の一つである。光の代わりに電子を用いる走査電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）も同じである。光学顕微鏡の分解能はサブミクロンのオーダーであるのに対して、SEMの分解能は数10nmから高性能機では1nm以下と極めて高い。一方、SEMの分解能を精度よく評価するのは容易ではなく、精度の高い分解能評価法はSEMメーカ各社にとって長年の課題であり、ユーザからもその実現を強く望まれている。こうした背景を踏まえ、SEMの国際標準化委員会（ISO/TC202/SC4）では、2005年から高精度な分解能評価を目指したアルゴリズムの開発とその規格化に取り組んでいるが、まだ国際規格（ISO）になっていない。この標準化現場ノートは、技術が確立して標準化されたものを掲載するのが通例のようだが、今回はこのように難産なSEMの分解能評価法の標準化の現場を紹介させていただけることになった。

2. SEMの分解能評価法に対する標準化の必要性

SEMの観察倍率を上げていくと、あるところから画像のぼけが顕在化して微細な形態が識別できなくなる。これが分解能の限界である。SEMの分解能を評価するには、図1に示すように、細かい粒子が散らばっている試料（これを分解能評価試料という）を用いて、ぼけが顕在化する程度に倍率を上げたSEM像を取得する。図2は、図1の○印の領域（分解能計測部）をさらに拡大した像であるが、図2に示すように最も接近している粒子間の隙間を測り、これをSEMの分解能とする。この図より、ぼけた画像で粒子の境界を判定して隙間を測る作業には任意性のあることがわ

図1 分解能評価用のSEM像

図2 分解能計測部の拡大像

かる。そこで、このような粒子の隙間を人間が測るのではなく、像のぼけそのものを評価する画像処理アルゴリズムを開発すれば、精度の高い分解能評価法となり得る。そして、このアルゴリズムを規格化することでユーザに精度の高い分解能評価法を提供でき、装置導入時の性能検証や装

† 株式会社日立ハイテクノロジーズ

"International Standardization of Evaluation Methods of Image Sharpness for Scanning Electron Microscope" by Mitsugu Sato (Hitachi High-Technologies Corporation, Ibaraki)

置導入後の性能管理など、産業界に大きな効果が期待できる。当初は分解能評価法という名称で標準化を始めたが、各国の委員が集まる総会で、評価するのは「像のぼけ」であり直接的な分解能ではないとの意見が出され、標準化は「像シャープネス評価法 (Methods of Evaluating Image Sharpness)」の名称で進められることになった。

3. 像シャープネス評価法の概要

SEM像のシャープネスを評価するアルゴリズムを開発するにあたり、まず、可能性のある4種類のアプローチ (ACF (Auto-correlation Function) 法, CG (Contrast-to-Gradient) 法, FT (Fourier Transform) 法, DR (Derivative) 法) がSEMメーカー各社から提案され、それらの実用性を評価しながら各アルゴリズムの改良が進められた。その結果、ACF法を除く三つの方法 (CG法, FT法, DR法) が規格になり得ると判断して、規格のドラフトを作成した。しかし、規格化の最終段階 (FDIS: Final Draft International Standard) の投票でこのドラフトが否認された。否認の主な理由は、多様なSEM像に対してアルゴリズムの検証が充分とは言えないことである。そして、2011年6月にこのドラフトは Technical Specification¹⁾ として発行され、ISOとしてのプロジェクトは一旦終了した。今にして思えば、この判断は正しかったと考えている。その後、さまざまなSEM像を用いたアルゴリズムの評価が進み、CG法が規格候補から外れてFT法とDR法のみが残った。FT法はSEM像のフーリエ変換から像シャープネスを評価するアルゴリズムで、DR法は粒子エッジ部の画像の明るさ変化から像シャープネスを評価するアルゴリズムである。図3に、DR法のアルゴリズムで設定されたシャープネス計測ラインを示す。粒子エッジを横切る髭のような線が計測ラインである。DR法では、これらのラインに沿った明るさ変化に誤差関数をフィッティングして像シャープネスを評価する。

さまざまなSEM像の評価から、FT法とDR法の結果が一致する画像と一致しない画像が出てきた。例えば、図4のSEM像では、FT法とDR法の像シャープネス評価値がそれぞれ4.27画素と4.48画素となって両者がよく一致する。しかし、図5のSEM像では、FT法が3.06画素、DR法が4.53画素となり両者は大きく食い違う。この場合、SEM像のシャープネスの真値がわからないため、どちらの値が信用できるか判断できない。そこで、像シャープネスの真値 (理論値) が既知の人工画像を作り、FT法とDR法の評価を進めた。例えば、図5のSEM像には、粒子の表面や周りに細かな構造コントラストがある。この特徴を模擬して、図6に示すように、背景に細かい構造コントラストを伴う人口画像 (像シャープネス理論値が3.00画素) を作って像シャープネスを評価した。結果は、FT法が2.54画素、DR法が3.10画素となり、図5の結果と同じ傾向を示した。これより、現状のFT法では、粒子以外の構造コントラスト

図3 DR法で設定された計測ライン
(粒子エッジを横切るライン)

図4 FT法とDR法の評価値が良く一致する
SEM像の例

図5 FT法とDR法の評価値の差が大きいSEM
像の例

が画像に含まれると、像シャープネスが真値よりも小さく評価されることがわかった。つまり、試料によっては本当の像シャープネスよりも良いシャープネスが表示されることになり、産業界に混乱を招きかねない。このようにアル

図6 背景に構造コントラストを有する人工画像

ゴリズムの課題を発見するためのさまざまな人工画像を作り、アルゴリズムの評価を進めた。その結果、いずれのアルゴリズムも100点満点とは言い難いが、DR法は比較的信頼性が高く現実的な制約のもとで実用になると認識されてきた。一方、FT法はさらなる改善が不可欠との判断で、現在アルゴリズムの改良作業が進められている。

4. 規格化の行方

2012年度のISO/TC202の総会が、10月に中国の桂林で行われた。これまでの経緯を踏まえ、私はこの総会で新たな提案をした。FT法とDR法を一つの規格に収めようとするそれまでの方針をやめて、比較的完成度の高いDR法を単独で規格にする提案である。現在、改良が進められているFT法がDR法を凌ぐアルゴリズムとして誕生した時点で、さらにFT法を単独で規格にするシナリオも提案した。総会では、この提案に対する意見を2012年12月末までに出すことが議決された。特に反対意見がなければ、DR法単独のドラフトを作り、新規格提案(New Work Item Proposal)から改めて規格化を進めることになる。像シャープネスについてはこれまで長期間にわたる議論を経ているので、本提案に対する合意が得られれば、この後の規格化はスムーズに進むと期待している。

5. む す び

現実のSEM像ではさまざまなコントラストが現れる。こうした画像のバリエーションに対して常に正しい像シャープネスを担保できるアルゴリズムは、当初予想した以上にハードルの高いものであった。現在もまだ進行形であるが、この標準化に参加している世界各国のメンバおよびSEMメーカー各社の技術者と協力して、ぜひ実用的なアルゴリズムを標準化して世の中に提供したいと考えている。SEMの像シャープネス評価法の標準化に携わって特に感じたこ

図7 2012年度ISO/TC202総会

図8 総会会場となったホテルからの桂林の山々

とは、メーカーの立場ではなくユーザの立場を優先して標準化を進めることの重要性であった。像シャープネスは観察装置としてのSEMのスペックに影響を与え、SEMメーカーの利害が絡む。したがって、規格が成立したときに産業界がどのように反応するかも予測して、ユーザに利益をもたらす規格にすることを常に意識することが大切と考える。

今回の総会が行われた桂林は、山水画で有名な神秘的な山々が連なる美しい土地であり、総会会場となったホテルからの眺めが印象に残っている(図7、図8)。ISOの総会は、メンバ国が持ち回りで開催されるため、世界各地に足を運んでメーカーとユーザの垣根を越えて技術者間の交流ができる。これも標準化の現場のもう一つの側面として付記したい。

(2012年11月20日受付)

〔文 献〕

- 1) Technical Specification ISO/TS 24597, Microbeam analysis - Scanning electron microscopy - Methods of evaluating image sharpness (2011)

佐藤 貢 1982年、豊橋技術科学大学大学院情報工学修士課程修了。同年、(株)日立製作所に入社。那珂工場(現、(株)日立ハイテクノロジーズ)にて、電界放出形走査電子顕微鏡(FE-SEM)の開発に従事。現在、同社研究開発本部主管技師長、工学博士。