

企画にあたって

田辺 栄司¹ 佐々木 秀顕² 川西 咲子³
鈴木 賢紀⁴ 竹田 修⁵ 永井 崇⁶

三次元解析技術は、近年のXeプラズマFIB-SEMの登場と、TEMのオプションとして普及した電子線トモグラフィによって、幅広いサイズ・分解能の領域を連続的にカバーすることが可能になり(図1)、単なる非破壊検査の一手法から、密度・組成・結晶構造といった多岐にわたる三次元情報を可視化する組織解析の重要なツールにまで発展した。その一方、医学系を除けば系統的な解説書が少なく、ユーザの立場からはブラックボックスとして利用せざるをえない現状がある。本特集では各手法の開発をけん引されている研究者に加えて、ハード・ソフトウェアメーカーの開発担当者にも執筆していただき、より利用者の立場にたった解説になることを目指した。また、分野間の連携の試みとして、原理・撮影・解析手法を中心とした前編を6分野が、金属・材料科学での応用を中心とした後編を3分野が担当した。本編についても著者への依頼、構成、編集等について徳永透子先生(名古屋工業大学)、木口賢紀先生(東北大学(現 熊本大学))をはじめとする3分野の先生方に多大なご協力をいただいた。

まず、総説としてトモグラフィ研究の第一人者の工藤博幸教授(筑波大学)に、「トモグラフィ画像再構成の基礎とトレンド：解析的再構成法から圧縮センシングを経て深層学習まで」と題して、投影データから断層像を再構成するアルゴリズムの歴史的発展から最新の高ノイズかつ少数データから再構成する手法までを解説していただいた。また、世界を席卷する海外ソフトメーカーの製品群に対抗し、三次元データの可視化・解析ソフトを開発されている滝克彦氏(日本ビジュアルサイエンス(株))には、「ポスト3Dイメージングのアプリケーション」と題して、三次元データを、客観的に数値化する手法をご紹介いただいた。

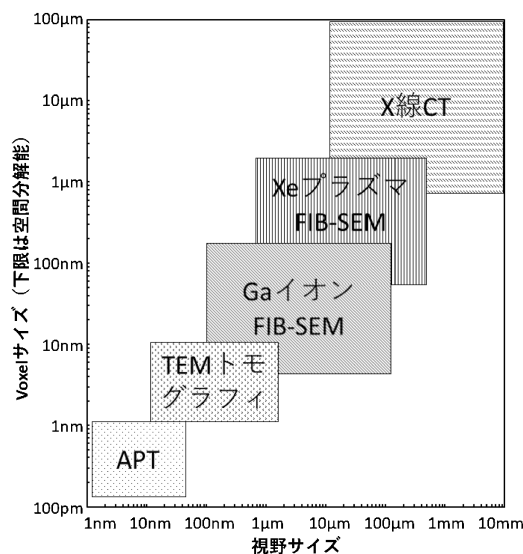


図1 三次元形態・組織観察手法の視野サイズとVoxelサイズの概念図。文献(1)に筆者の経験を加味して作成した。大半のシステムは空間分解能より細かいVoxelサイズを設定できるため、縦軸の下限は実用空間分解能とした。また、Ga及びXeプラズマFIB-SEMはスライス厚の実用下限を表示した。三次元アトムプローブトモグラフィ(APT)は後編に掲載予定である。

各撮影手法については、FIB-SEMメーカーの立場から仲野靖孝氏(株)日立ハイテック)に、「FIB-SEMによる3次元構造解析」と題して、FIBとSEMそれぞれの原理から3D-EBSDへの応用に至る解説をいただいた。次に黎明期からEBSDを国内に紹介されてきたことで知られるは鈴木清一氏(株)TSLソリューションズ)に、「TEMを用いた結晶方位マッピングの原理と応用」と題して電子回折を利用した高分

¹ 広島県立総合技術研究所 西部工業技術センター(〒739-0046 東広島市鏡山3-13-26)

² 愛媛大学大学院理工学研究科

³ 東北大学多元物質科学研究所

⁴ 大阪大学大学院工学研究科

⁵ 東北大学大学院工学研究科

⁶ 千葉工業大学工学部

Preface to Special Issue on “New Trends of 3D Imaging and Analysis (3D Observation, Reconstruction and Analysis)”; Eishi Tanabe¹, Hideaki Sasaki², Sakiko Kawanishi³, Masanori Suzuki⁴, Osamu Takeda⁵ and Takashi Nagai⁶

Keywords: tomography, FIB-SEM, EBSD, TEM, electron diffraction, ASTAR

2021年11月22日受理[doi:10.2320/materia.61.5]

解能・高速結晶方位解析技術の背景と製品化された ASTAR の原理と応用事例をご紹介いただいた。最後に、20年以上にわたって TEM の自動制御による連続傾斜像撮影から再構成・可視化に至るソフトを一貫して開発されてきた古河弘光氏(株式会社システムインフロンティア)には、「TEM トモグラフィ」と題して、具体的に三次元再構成に適した試料作りやグリッドの選択、撮影・再構成の上での注意事項・問題点等について解説いただいた。

なお、執筆者の方々には無理を承知で「過度に数式が多くならないように」依頼している。予めご了承ください。また、三次元空間の解説を二次元の誌面に掲載しているため、グレースケール印刷では理解が難しい図があるかと思われる。オンライン版(<https://www.jim.or.jp/journal/m/>)にはカラーで掲載されているので、併せてご覧いただきたい。

本特集が、三次元データの背景にある撮影・解析技術への理解、また、データの妥当性への判断の一助となれば幸甚である。

文 献

- (1) T. L. Burnett, R. Kelley, B. Winiarski, L. Contreras, M. Daly, A. Gholinia, M. G. Burke and P. J. Withers: *Ultramicroscopy*, **161** (2016), 119-129.



田辺栄司 佐々木秀顕 川西咲子 鈴木賢紀 竹田 修 永井 崇

三次元解析に関する用語説明

三次元解析手法を使う上で頻出する用語を、ユーザの立場から簡単に説明する。定義の省略や、個人研究が含まれているので予めご了承ください。

voxel : 三次元での画素、二次元の pixel を三次元化したもの。X線・TEM トモグラフィでは一般に立方体であるが、FIB-SEM の場合は SEM 像の pixel サイズと FIB 加工のスライス厚が異なるため、正四角柱となる。

連続断面 SEM 像・連続スライスイメージング・Auto Slice & View : いずれも FIB-SEM の FIB 加工と SEM 観察の繰り返して画像データを得る手法の名称で、詳しくは「FIB-SEM による 3 次元構造解析」をご覧いただきたい。装置メーカーの登録商標も含まれるため、本特集でも、滝らは「断層像」、仲野は「連続断面 SEM 像」、古河は「アレイ(Array)・トモグラフィや FIB-SEM トモグラフィ」と呼んでおり、表現の苦心がうかがえる。

断層像 : 一般に X 線トモグラフィで得られる回転軸に垂直な 2 次元の断面像。医療用 CT の主な表示方法。ただし、FIB-SEM や生物・ソフトマテリアル向けのウルトラミクローム連続切片でも使用する場合がある。「ポスト 3D イメージングのアプリケーション」にあるように、慣習的に「Axial」と表示される。

ボリュームレンダリング(VR: Volume Rendering)⁽¹⁾ : 半透明で奥行きのある三次元可視化手法。X 線トモグラフィではヒストグラムから大気散乱由来のピークだけを取り除くと、トポグラフィ的な表面像になり、更に低密度成分を取り除いていくとより立体感のある表現となる(図 1)。当たり前の機能のように思われているが、断層像からボリュームレンダリングを作成する可視化ソフトは高価で、CPU・GPU パワーを猛烈に消費する。

- 文 献 (1) R. A. Drebin, L. Carpenter and P. Hanrahan: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, **22-4**(1988), 65-74.
(2) A. Namiki, Y. Tanaka and T. Yokoyama: *Earth, Planets and Space*, **70**(2018), 147.

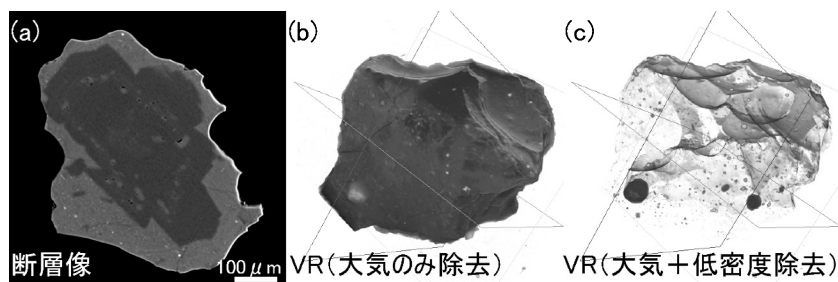


図 1 阿蘇山中岳から採取された火山灰(名古屋大学大学院並木敦子准教授ご提供⁽²⁾)のマイクロフォーカス X 線 CT データの可視化例 (a)中央付近の断層像, 明るいものが高密度, (b)ヒストグラムから大気由来の成分を除去し, 各軸を 45° 傾斜させた VR 像, (a)とは明暗が反転し, 暗いものが高密度, (c) (b)から更に低密度物質由来の成分を除去した VR 像, 高密度, すなわち重元素を含む鉱物の三次元分布が可視化されている。