

4-1

マイクロ・ナノトモグラフィー技術の現状と展望

Current Status and Future Prospects of Micro- and Nano-Tomography Techniques

X線マイクロナノトモグラフィー研究会

X-ray Micro-and Nano-Tomography Research Group

戸田裕之, 豊橋技術科学大学

上杉健太郎, 高輝度光科学研究センター/SPring-8

Hiroyuki Toda, Toyohashi University of Technology

Kentaro Uesugi, JASRI / SPring-8

1. マイクロ・ナノトモグラフィーを現在利用できるビームラインとその状況

現在、SPring-8におけるマイクロ・ナノトモグラフィー(μ/n -CT)実験は、主としてBL20B2、BL20XU、BL47XUで行われている。BL20B2では、大面積X線検出器を利用した実験など、ユニークな実験が行われている。X線CT撮影で到達可能な空間分解能は10 μm 程度であるが、幅20mm以上におよぶ高画質なCT像を得ることが可能である。BL20XUでは、1 μm 程度の分解能を持つ投影型 μ -CTが活発に利用されている。そのほか、集光光学素子の開発・評価、位相コントラストCT、X線ホログラフィー法の開発などが行われている。BL47XUは、現在、1 μm 程度の分解能を持つ投影型 μ -CTと共に、フレネルゾーンプレートを利用した結像型高分解能CT(n-CT)装置が開発され活用されている。現在の μ -CT技術の現状は、1 μm 程度の分解能を持つ投影型 μ -CTで撮像時間20~30min、試料サイズ900 μm 程度となっている。また、n-CTでは、分解能200nm程度、試料サイズ50 μm 程度が利用されている。

これらの μ/n -CT技術は、大学、研究所、企業いずれからの課題でも活用されている。研究分野も、医学・生物学、材料科学・材料工学、惑星科学、化石、産業利用、撮像・再構成技法開発など多岐にわたる。以下、いくつかの分野の特徴的な最近の研究を紹介する。

まず、医学利用分野では、冠・腎微小血管構造など血管の3D観察、生体軟組織イメージング、骨欠損部の治癒挙動観察など、様々な器官のイメージングが行われている。特に、*in-vivo*観察技法の開発による生体の高分解能観察・高精度計測と、細気管支内流体シミュレーションに代表される3D画像を用いた各種定量解析やシミュレーションが特徴的な研究である。

材料科学・材料工学分野では、セラミックスや金属など各種構造機能材料のマイクロナノ構造や変形、破壊、損傷、疲労破壊などの各種挙動の3D観察が行われている。前者では、セラミックスの細孔の可視化や金属材料中の水素マイクロポアの熱処理中の成長挙動観察、後者では、はんだ接合部熱疲労特性評価や亀裂の進展挙動のその場観察などが代表例である。また、3D画像内の数百~数万点の粒子を追跡することによる材料内部の応力、歪み、亀裂進展駆動力などの3D可視化手法開発、EBSD(Electron Backscatter Diffraction)の3D版ともいえる結晶粒の3D変形挙動可視化など、応用技術

開発も積極的に行われている。

2. マイクロ・ナノトモグラフィーの課題と将来展望

ここ数年、様々な研究分野で3D・4Dイメージングの活用が始まっている。これには、主に中性子やX線、電子線（透過型電子顕微鏡）を用いたトモグラフィーが用いられる。しかし、現行の3Dイメージング技術ではカバーできない分解能 Gap が存在する(図1)。X線CTの高分解能化は放射光の利用によって長足の進歩を遂げたが、多くの物理・化学現象や生体構造の鍵となる数10～数100nmの範囲にはアプローチできていない。また、動的現象の過渡段階を観察するには、現行の3Dイメージング技術はあまりに時間を要しすぎる。これ以上は観察が追従できないという限界であるタイムスケール Cliff (図2) を乗り越え、あと数桁高速化できれば、多くの研究分野で様々な動的現象が4D観察でき、そのダイナミクスにダイレクトにアプローチできる。

これらの分解能 Gap とタイムスケール Cliff が克服できれば、3Dイメージング技術が単なるツール（見える顕微鏡）のレベルを越え、様々な物質生命の機能を解明できるアプローチ（わかる顕微鏡）となり得る。現在の3Dイメージング技術にある分解能 Gap とタイムスケール Cliff を克服できる可能性があるのは、mm以上の試料サイズが可能なX線による3D計測以外にはない。さらに、3D・4D画像の様々な再構成手法とその科学的取り扱い、画像解析手法、データベース化技術、表現技術など、必要な各種要素研究と合わせて体系化することで、幅広い既存学術の下地となる、新しい総合的な新学術領域が創成できる。これは、3D・4D科学と呼んでもよい一つの新しい研究分野である。

上記の各種ハード・ソフト技術開発のうち、特にSPring-8の施設に大きくかかわるのは、高分解能化と高速化の二つの方向性を持つ装置技術開発である。まず、高速化に関しては、現状の計測時間（約30min）を1s単位の時間に短縮し、ユーザーが開発する様々な *in-situ*・*in-vivo* 観察技術との組み合わせにより、時間発展・時間分解が可能な4D観察法に進化させることが必要となる。また、撮像領域や投影数の制限をすれば1s以下の撮像も可能になり、医学分野等のニーズを満たすことも出来る。さらに、2D像の短時間露光(ms)によるストロボ撮影型の時間分解CT技術（Pump-Probe/Trigger法）も有望な応用技術である。

次に、高分解能化に関しては、高分解能結像顕微鏡とCT技術を組み合わせることで、3D計測の空間分解能をnmレベルまで向上させることが可能となる。これは、これまでの技術開発のように結像素子だけの改良では実現できるものではなく、たとえば鏡筒長が数10mとこれまでにない長い結像顕微鏡を構成して倍率を稼ぐような施設の改良が不可欠となる。また、高分解能・高速撮像技術を組み合わせることにより、高空間分解能・時間分解の3D計測が可能となる。これにより、欧米の他施設を寄せ付けられない高度な供用技術が実現し、SPring-8のX線を最大限に活用することが可能となる。

3. 新しいマイクロ・ナノトモグラフィー技術が拓く応用研究の展望

(1) 高分解能 3D 観察による高度機能イメージング

惑星科学の分野では、太陽系始原物質である微小隕石や宇宙塵等の観察による太陽系進化過程の解明も、 μ/n -CT の高度化なくして達成できない。この分野では、NASA の Stardust 計画で、人類史上初めて地球に持ち帰られた彗星塵の 3D 内部観察で SR-CT が活用され注目を浴びた。SPring-8 での μ/n -CT 観察は、高分解能 3D イメージングの威力を示す先駆的な応用例と言える。また、構造機能材料の分野では、稀少元素に頼らず 3D ミクロ組織制御で高性能化を達成することによる社会貢献も期待される。一方、高分子材料では階層構造 3D 可視化により、未解明の構造－物性関係を明らかにできるという学術的成果が期待される。

(2) 4D イメージングによる機能ダイナミクス解析の新展開

物質・材料の破壊現象において、これまで実現できなかった破壊力学の 3D・4D 直接検証が可能となり、より安心安全な社会の構築に貢献できるものと期待される。材料の凝固プロセスの観察ではこれまでも大きな成果を挙げてきたが、複雑多様な液相中の結晶成長過程の初めての 4D 観察が有望な応用研究として挙げられる。また、火山爆発の研究で噴火メカニズム解明につながるマグマ発泡過程の直接観察もきわめて興味深い応用研究と言える。薬理効果の劇的向上を目指した高度同期計測による血管・気管支の形態観察とイメージベース解析、骨粗鬆症治療を可能にする骨折治癒の促進効果評価のための *in-vivo* 観察、超音波 4D-CT 等では評価できない心臓の弁立体構造情報取得など、医学生命分野でも様々な応用研究の発展が期待される。図 2 には、SPring-8 での 3D イメージング技術高速化により実現できる応用研究の例も加えてある。

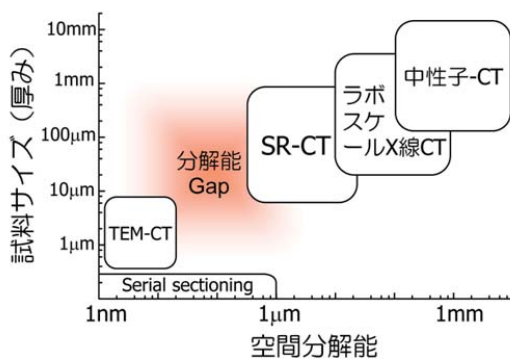


図1 現行の各種 3D イメージング技術がカバーする範囲とその狭間に存在する分解能 Gap

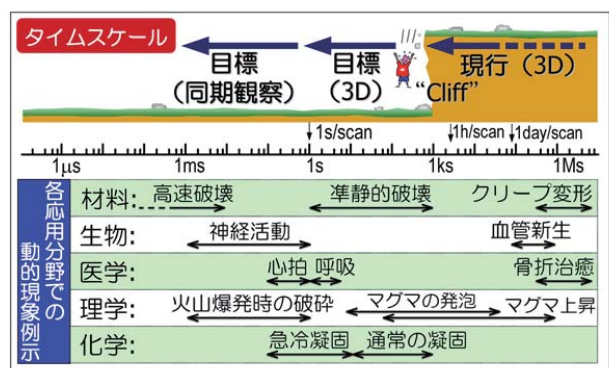


図2 現行の X 線 3D イメージング技術の高速撮影の限界であるタイムスケール Cliff の存在、それを克服することで実現する各応用研究の例