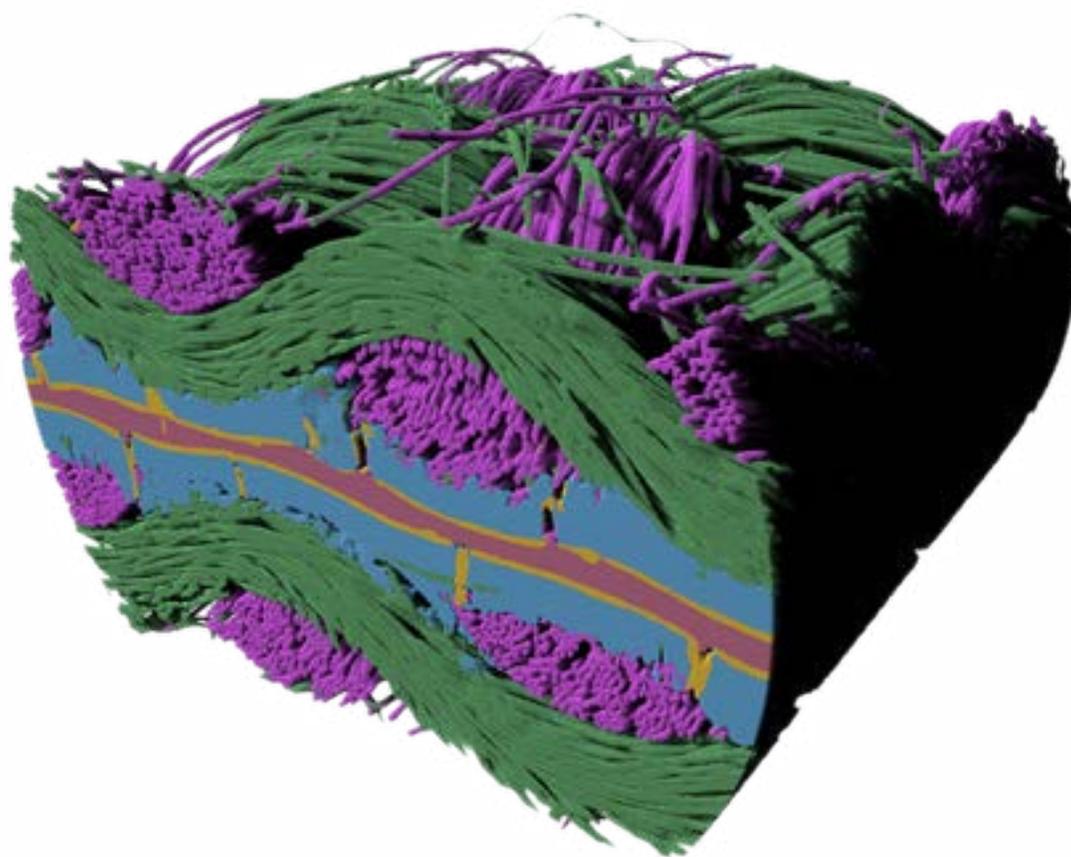


3D X線イメージングの境界線を押し広げる

ZEISS Xradia 515 Versa



Seeing beyond

著者： Stephen T. Kelly
Yanjing Yang
Ravikumar Sanapala
ZEISS リサーチ・マイクロスコピー・ソリューション

作成日： 2021 年 1 月

X線イメージングは、ヴィルヘルム・レントゲンが1895年にX線を発見および特定してから私たちが想像するしかないものを写し出してきました。2D X線イメージング(X線撮影)は医療や工業検査から空港警備までさまざまなアプリケーションに使用されています。コンピュータ断層撮影法(CT)の登場に伴い、3D X線イメージングはX線イメージングの力をさらに拡大し、対象物を物理的に切断することなく仮想的に切り開き、内部を可視化できるようになりました。この技術は医療、科学研究、工業検査など幅広い分野で活用され、その発明者達は1979年にノーベル医学賞を受賞しました。現代のコンピューティングインフラストラクチャおよびデータ処理機能の進歩により、この技術の可用性、利用、定量的な力が著しく高まりました。また、マイクロメートルサイズのスポットを生成するX線源技術の進歩から、マイクロコンピュータ断層撮影法(マイクロCT)によってさらに高分解能の画像を得られ、研究者達は高い精度で物体内部を非破壊的に見るできるようになっています。

X線顕微鏡

技術的進歩はマイクロCTだけでなく、独自の機能とマイクロCTより高い分解能を誇るいわゆるX線顕微鏡(XRM)の発展を生み出しました。もともとシンクロトロンビームラインで開発された、(X線を可視光に変換する)シンチレーターと従来の光学顕微鏡の対物レンズとの組み合わせは、2000年代半ばにラボ向けの装置に採用され、最先端のZEISS Xradia Versa X線顕微鏡製品群へと進化しました。XRMと従来のマイクロCTとの違いは何かを理解するため、リンゴの内部をイメージングする例を見てみましょう。

図1に示すマイクロCTの標準セットアップでは、試料をマイクロフォーカスX線源と比較的大きなフラットパネルX線検出器との間に置きます。円錐形のX線ビームにより透過像を検出器上に拡大します。このプロセスは幾何学的拡大と呼ばれます。試料を光源に近付けると拡大率が上がり、検出器に近付けると拡大率が下がり実視野の広い画像が得られます。

シンプルさの中に力強さのあるこの手法ですが、高分解能イメージングにおいては限界が存在します。例えばリンゴの例で、種の高分解能の画像が必要な場合、リンゴは可能な限りX線源に近付けるべきです。しかしそのうちリンゴのサイズが原因となり拡大率を上げることができなくなります。リンゴの種をX線源に近付けて高分解能のイメージングを得るには、リンゴを切って開き、種を取り、リンゴから離して配置し撮像しなければなりません。

高分解能で種を撮像するためにリンゴを開くのであれば良いかもしれませんが、多くの用途や試料の種類によっては、高分解能イメージングのために試料を切り開き、中の物を取り出すことは望まない、またはそうすることができない場合もあります。この典型的な例がバッテリー分野の研究です。バッテリーは内部の材料の配置が性能に強く影響する自己完結型の装置です。バッテリーを開くと装置の機能性が損なわれ、複雑な内部構造を壊すリスクを有し、研究者の健康と安全に重大な危険を及ぼします。

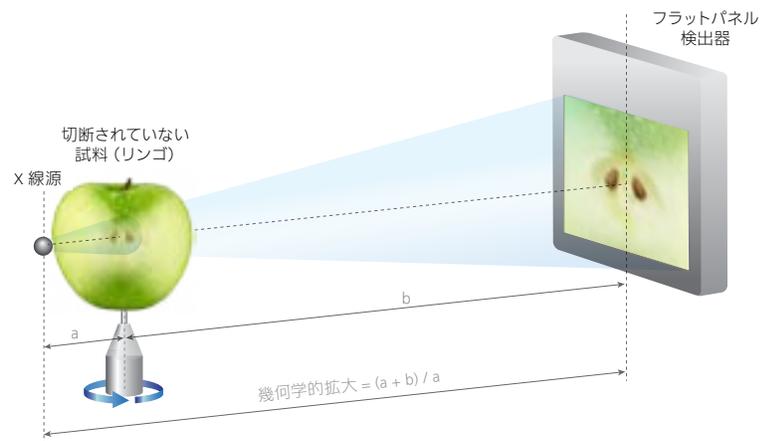


図1：一般的なマイクロCTのイメージング構成：マイクロフォーカスX線源、試料、比較的大きなピクセル型フラットパネルX線検出器。

XRM は、図 2 に示すような二段階拡大プロセスを用いて分解能と試料サイズとの間の障壁をなくします。幾何学的拡大の後、二つ目の光学的拡大ステップで透過 X 線はシンチレーターにより可視光に変換され、ZEISS 独自の光学系により拡大されます。光学倍率を変えることで、この二段階拡大は試料の内部構造（ここではリンゴの種）の非常に高分解能の画像を、試料を切ることなく収集することを可能にします。この機能は Resolution at a Distance (RaaD) として知られています。RaaD は極めて強力な機能で、以下のことができます。

- 連続切削などの破壊的な試料調製の必要性をなくす
- 物体の内部構造をサブミクロンの分解能で明らかにする
- 多様な種類とサイズの試料から高分解能画像を収集する
- 変化する条件の下で経時的に微細構造を調査する (in situ など)
- 試料の切断、再固定、あるいは操作を行う必要がなく、全体像からサブミクロンの詳細にシームレスに移行する

ZEISS Xradia Versa X 線顕微鏡では複数の光学系が使用でき、直径サブミリメートルから 300 ミリメートルまで、あらゆるサイズの試料に対して最適化された分解能とコントラストを提供します。

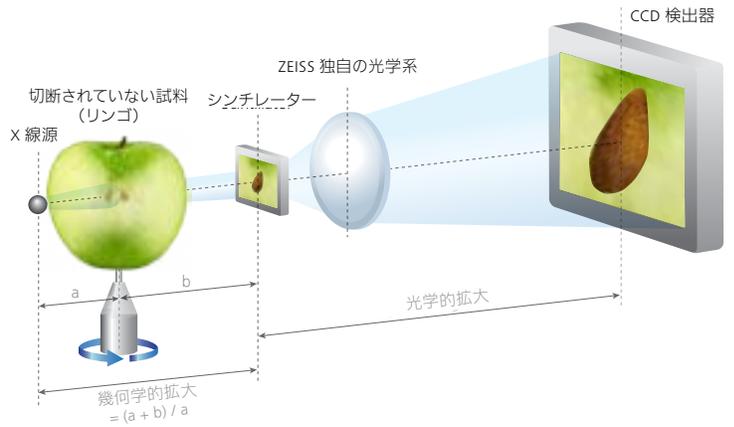


図 2: ZEISS Xradia Versa の X 線顕微鏡のイメージング構成。二段階拡大により Resolution at a Distance (RaaD) を実現。幾何学的拡大に加えて、ZEISS 独自の光学系はシンチレーターで形成された可視光画像を CCD 検出器上に拡大する。

図 3 は、人気のスマートウォッチなどで使用されるパウチセルバッテリーを ZEISS Xradia Versa でイメージングした例です。RaaD は機器の中のさまざまな検出器によって機能し、0.4x 検出器を使用してバッテリーの高コントラストな全体像のイメージングを、さらに 4x および 20x 検出器を使用して、負極層と正極層を形成する内部粒子の高分解能イメージングを実現します。

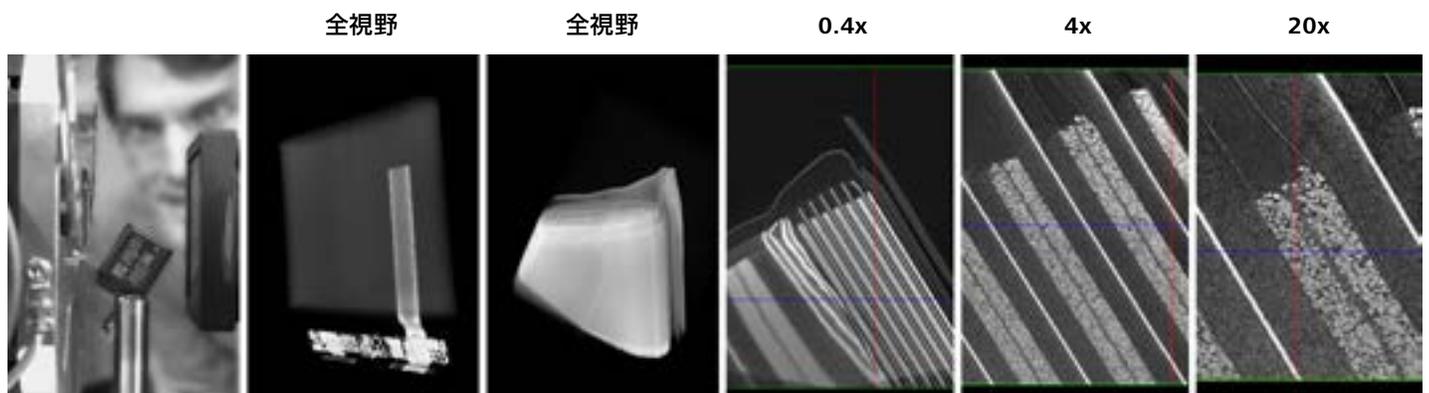
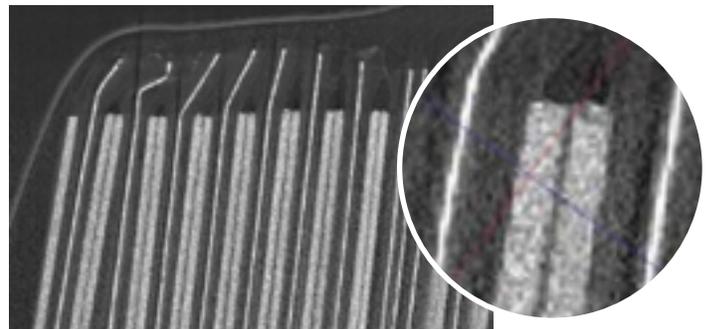


図 3: 市販スマートウォッチのパウチセルバッテリーの XRM イメージング。0.4x 検出器を使用した高コントラストな全体像のイメージングにより、4x および 20x 検出器を使用したさらなる高分解能イメージングを行うための内部関心領域の特定が可能に。

これによりバッテリーの詳細な内部微細構造を、組み立てられた、機能する状態のまま調査し、エージングプロセスにおいてサイクル長期化に伴う微細構造変化の研究が可能となります。

比較すると、図4の通り従来のマイクロCTイメージングはXRMと同水準の拡大を行うことができません。負極層と正極層は見えますが、その内部微細構造は解像できず、マイクロCTで得られる情報は著しく制限されます。図5に光源から試料までの作動距離（試料半径と同等）に対する達成可能な分解能を、XRMとマイクロCTそれぞれについて示します。試料サイズや作動距離が増すにつれ、マイクロCTで達成可能な分解能は急激に下がる一方、XRMは多様な作動距離と試料サイズに対して高分解能イメージング機能を維持します。

従来の X 線マイクロ CT



ZEISS Xradia Versa

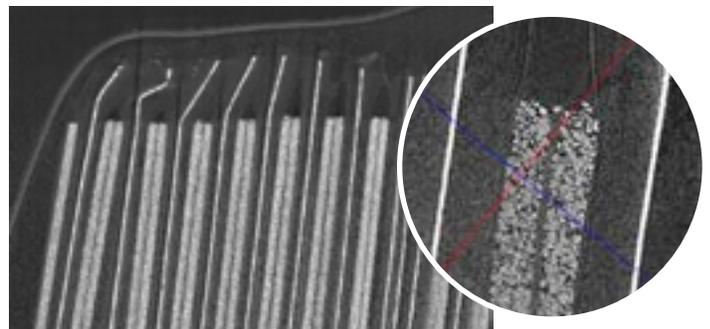


図4: マイクロCTとXRMで拡大した、市販スマートウォッチのバッテリーの詳細の比較。

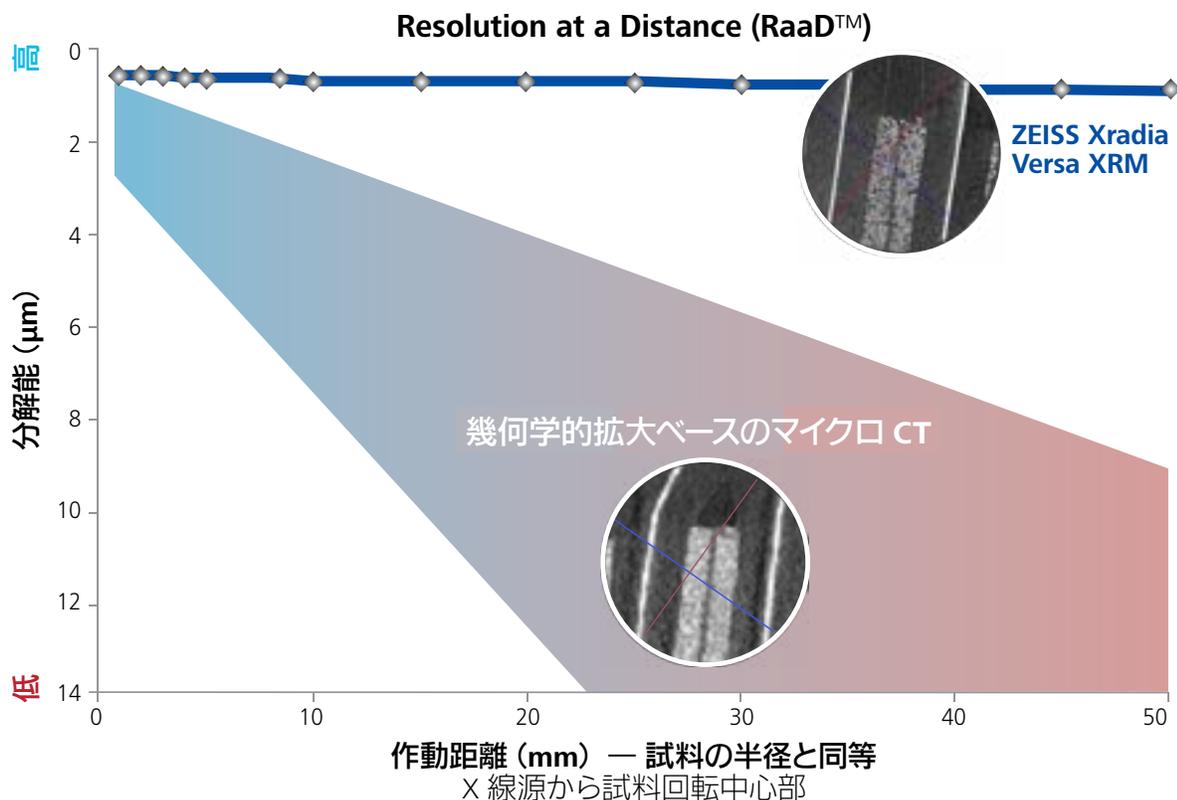
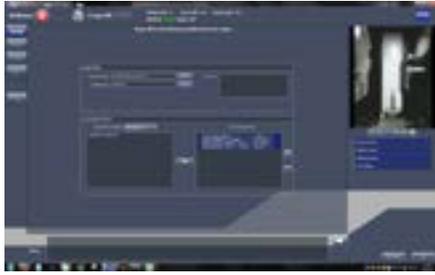


図5: XRMと幾何学的拡大式マイクロCT機器における、光源から試料までの作動距離に対して達成可能な分解能。XRMは多様な試料サイズで高分解能イメージング機能を維持するが、マイクロCTで達成可能な分解能は試料サイズが増すと急激に下がる。

直感的な、使いやすいワークフローインターフェース

1) 試料の詳細を入力する



2) 試料をロードし中央に配置する



3) 関心領域を位置決めする



4) 照射パラメーターを設定する



5) イメージングを実行し測定する



ZEISS Xradia Versa が Python API に対応

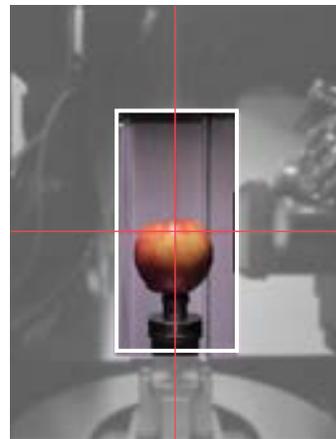
複雑な画像取得のスク립ト記述、独自のスキャン方法、メタデータと機器の状態へのアクセス、高度で自動化された in situ 実験に。

図 6: Scout-and-Scan 制御システムにより、ユーザーはワークフローに基づいた直感的なアプローチで ZEISS Xradia Versa X 線顕微鏡をすばやく簡単にセットアップできる。新たに追加された Python API により、複雑な実験でも顕微鏡の機能拡張と高度なアクセスが簡単に。

Raad の活用 - ZEISS Xradia 515 Versa

Raad は ZEISS Xradia Versa X 線顕微鏡の中核となるもので、ZEISS Xradia 515 Versa はこの技術を研究に役立つ XRM という形で具現化します。吸収 / 位相コントラストによるイメージングが可能で、500 nm の空間分解能を誇る ZEISS Xradia 515 Versa は、比類なき非破壊 3D イメージング機能を誇るトップクラスの XRM です。ZEISS Xradia 5XX シリーズ機器の高い評価を基に、ZEISS Xradia プラットフォームの安定性と汎用性を、最先端の分解能および最新のソフトウェア、ならびに長年の X 線顕微鏡開発により改善された使いやすさと組み合わせて作られています。すべての ZEISS Xradia 機器を動かす、ワークフローに基づいた直感的な ZEISS Scout-and-Scan 制御システム (図 6) が ZEISS SmartShield 自動保護システム (図 7) を搭載し、ユーザーは自信を持って試料と機器のコンポーネントを配置できるようになります。さらに、新たな Python API が機器の機能を拡張し、カスタムできる外部スクリプトとプログラムでユーザーによる操作とデータ処理を可能にすることで、新たな種類の自動化と in situ 測定などのセットアップを実現します。

試料



試料のエンベロープ

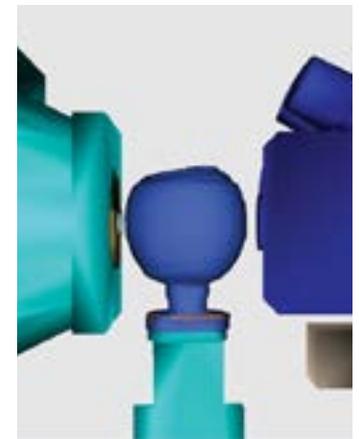


図 7: ZEISS SmartShield 保護システムにより追加の保護層が提供されるため、ユーザーは ZEISS Xradia Versa X 線顕微鏡を安心してセットアップできる。

XRM の革新 - Xradia Versa 6XX シリーズ

RaD および ZEISS Xradia 5XX Versa X 線顕微鏡シリーズは、試料サイズによる分解能の制限という障壁を取り除きました。一方で、最新の ZEISS Xradia 6XX Versa X 線顕微鏡は、これらの機能を基にさらなるブレイクスルーを遂げました。スループットやスキャン時間による分解能の制限という課題です。従来のマイクロ CT では、分解能とスキャン速度は X 線源により生成される X 線のスポットサイズに連動していました。図 8 で示す通り、ハイスループットなアプリケーションの場合は高出力が必要となり、スポットサイズは大きくなっていました。反対に、マイクロ CT で高分解能を得るために必要なのは、低出力でのみ生成される非常に小さなスポットサイズであり、結果スループットは低くなります。

このように、従来のマイクロ CT ユーザーは、高分解能の低速イメージングか、低分解能の高速イメージングのどちらかを選ばなくてはなりません。XRM アーキテクチャはこのトレードオフを解消し、ZEISS Xradia 6XX Versa X 線顕微鏡では、ZEISS Xradia Versa の特徴として定評のある業界最先端の分解能を維持しつつ、ZEISS Xradia 5XX Versa の 2 倍のスキャンスピードを実現しました。このブレイクスルーは、高出力 (25W) の X 線源技術の革新、熱管理および光源制御システムの改善、検出器の機能の強化により得られたものです。

この機能はさまざまな方法で利用できます。例えば、不良解析 (FA) を行う産業ラボや中核的な学術施設は、サービス収益を最大化し、多くのユーザーに対応するため、1 日により多くの試料や部品を撮像することができます。複雑な in situ 実験で試験ポイントを増やすことで、実験の正確さと成功率を高められるのです。

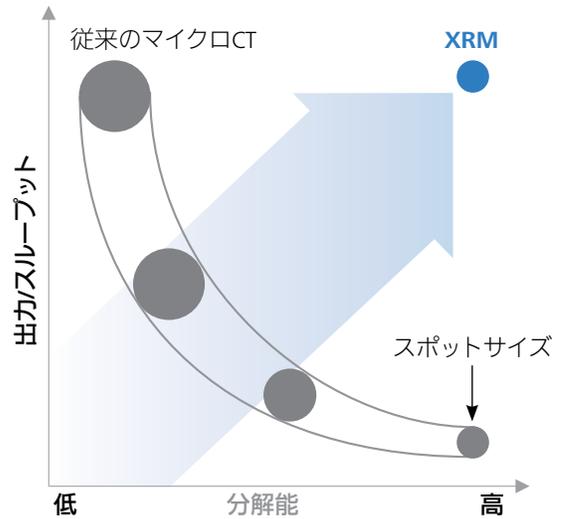


図 8: X 線源の出力またはスループットと機器の分解能の関係を示した、XRM とマイクロ CT の比較。マイクロ CT では高スループットが高分解能のいずれかを選ばなければならないが、ZEISS Xradia 6XX Versa XRM はその境界線をなくし、業界をリードする高分解能機能を維持しながらスループットの向上を実現。

X 線フラックスが増えると、ZEISS Xradia 5XX Versa などの機器と比較して同等のスキャン時間で多くの信号を収集でき、画像品質が向上します。

応用可能な一連のアプリケーションと、ZEISS Xradia 6XX Versa によりもたらされるスループットの向上度合いとの関係を図 9 に示します。

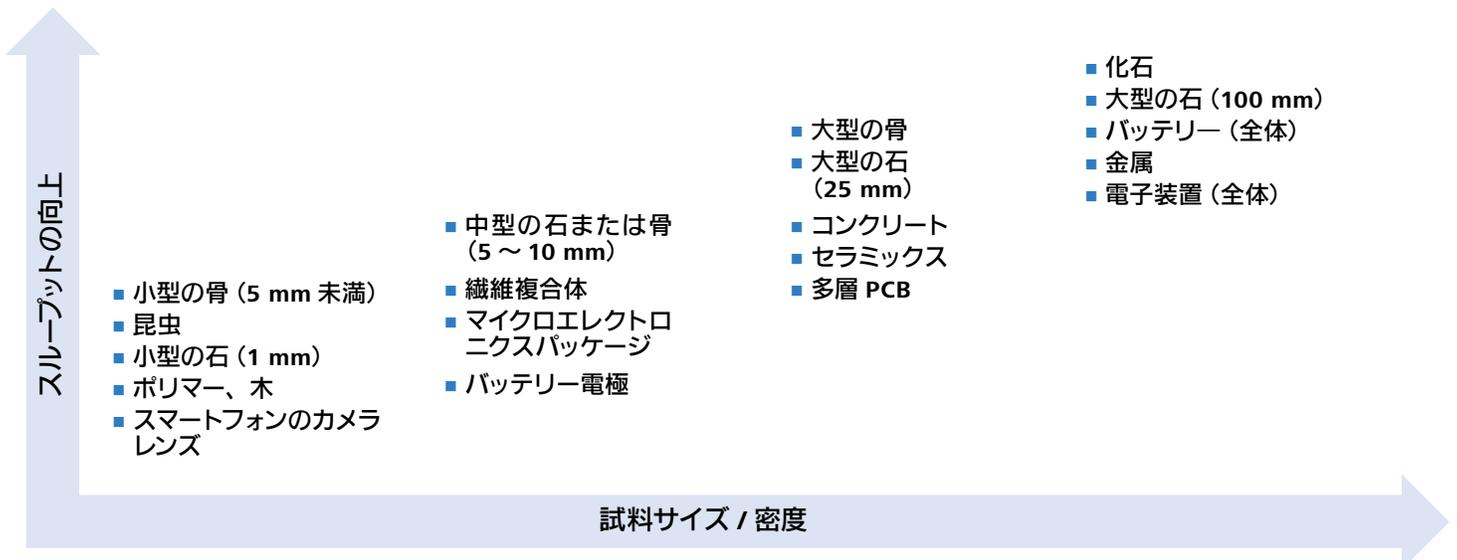


図 9: 多様な種類とサイズの試料に対して、ZEISS Xradia 6XX Versa X 線顕微鏡の次世代の XRM 技術がもたらすスループットの向上。

こうしたスループットの劇的な向上に加えて、ZEISS Xradia 6XX Versa は他にも強化された次世代の機能を提供します。設計信頼性が高まることで、所有コストが下がり、機器の稼働時間が最大化されます。また、X線源の瞬時起動により作業の効率が上がるため、試料をすぐにセットアップし、オペレーターの貴重な時間を確保できます。さらに、ZEISS Xradia 6XX Versa 機器にはデュアル GPU ワークステーションが搭載されており、高速なハイコンピューティング 3D 再構築を可能にして結果取得にかかる時間を全体的に短縮します。これは、中核的な学術施設や FA を行う産業ラボなどの重要な領域において、機器の生産性を上げ、質の高い結果をより確実に出し、投資収益率を最大化できることを意味します。

まとめ

X線イメージングはその発明以来、医療、科学、技術分野で大きな進歩を遂げてきました。2D 技術として始まったものがコンピュータ断層撮影 (CT) の 3D イメージング技術に進化し、マイクロ CT によって高分解能への道が開かれました。Xradia X線顕微鏡アーキテクチャの進化は、Resolution at a Distance (RaaD) 機能の飛躍的進歩とコントラスト最適化の進展をもたらしました。そして、最近の XRM 技術の進歩により分解能を妥協することなく高速イメージングが可能になりました。ZEISS Xradia X線顕微鏡は、近年の高度な研究ソリューションを実現するこれらの機能を独自に提供します。図 10 に示す通り、ZEISS Xradia 515 Versa は最先端の分解能機能と最新ソフトウェアを備え、ZEISS Xradia XRM プラットフォームのアーキテクチャ、安定性、実績を基に作られています。ZEISS Xradia 6XX Versa は ZEISS Xradia 515 Versa の機能をさらに強化し、スループット、信頼性、ユーザー体験を向上させることで、次世代の X線顕微鏡として業界トップの性能を提供します。

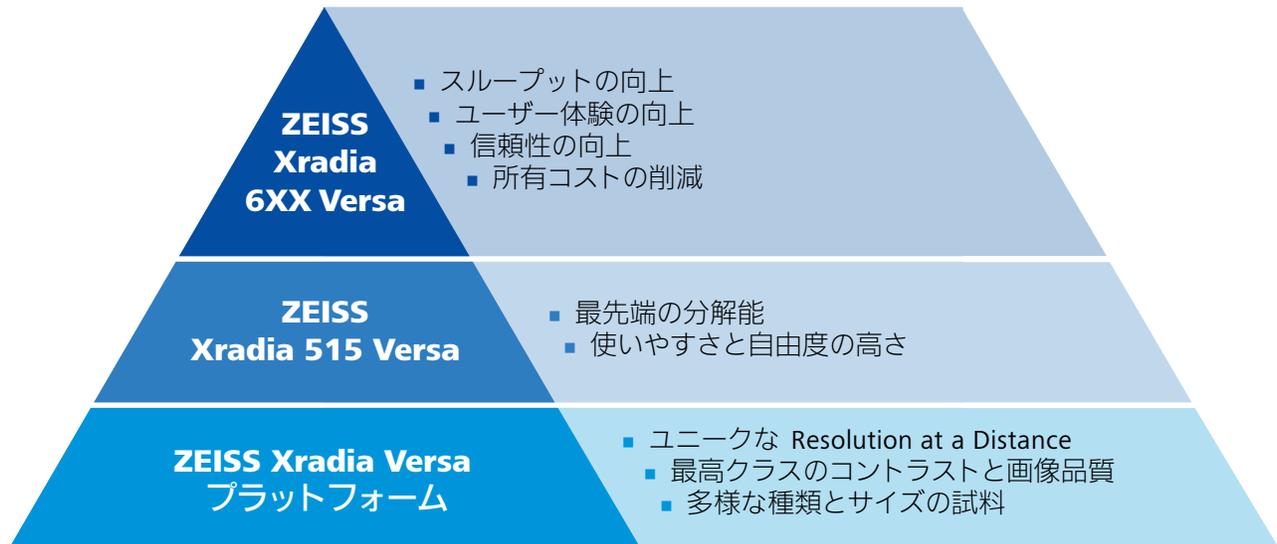


図 10: ZEISS Xradia Versa XRM ファミリーの概要。ZEISS Xradia Versa プラットフォームは多種の試料に対して RaaD 機能、最適化されたコントラスト、優れた画像品質を提供する。ZEISS Xradia 515 Versa では、このプラットフォームに最先端の分解能機能と使いやすさ、自由度の高さが加わった。ZEISS Xradia 6XX Versa はこれらの機能に加えてスループット、ユーザー体験、信頼性の向上、そして所有コストの削減を実現した、最高性能を誇る次世代の 3D X線顕微鏡である。

Carl Zeiss Microscopy GmbH
07745 Jena, Germany
microscopy@zeiss.com
www.zeiss.com/xray

カールツァイス株式会社
リサーチマイクロコピーソリューションズ
info.microscopy.jp@zeiss.com
<https://www.zeiss.co.jp/microscopy>

医療措置または診断用ではありません。一部の国で入手できない製品がありますのでご留意ください。詳細情報をご希望の方は最寄りの ZEISS 事業所にお問合せください。
JP_44_013_074 | CZ 01-2021 | 設計、お届けする製品の内容、技術的な内容は予告なく変更される場合があります。 | © Carl Zeiss Microscopy GmbH