

高分解能X線マイクロCTによる非破壊評価技術

病院などでX線や超音波などの「断層写真(CT像)」を用いた体内検査・観察を経験された方は多いと思うが、近年では各種工業製品の内部検査にも多く利用されるようになってきている。

非破壊検査のメリットは、通常目にすることができない内部の情報を視覚的にとらえることができることにあり、欠陥位置の確認や寸法・形状測定、さらに数値解析への展開など、さまざまな用途で利用されつつある。

本稿では、微小部のCT観察に適したX線マイクロCTの技術と利用例について紹介する。

D-1

X線CTとは

CT (Computed Tomography) のTOMOとはギリシャ語でSliceを意味し、一次元投影像から二次元平面像(断層像)を再構成する方法である。現在のCTではコンピュータ上の空間に物体を再現することができ、内部構造や断層像などの情報を得ることができる。

近年ではマイクロフォーカスX線とコンピュータの発展により、医療・食品といった生活に密接した分野をはじめ、電子部品や精密機械部品、さらに各種材料分野においても広く活用されている^{1)~3)}。

X線によるイメージング技術は1895年にレントゲンによりはじめて発見された。これは一方向から観察物体に照射したX線の透過像を観察する方法である。

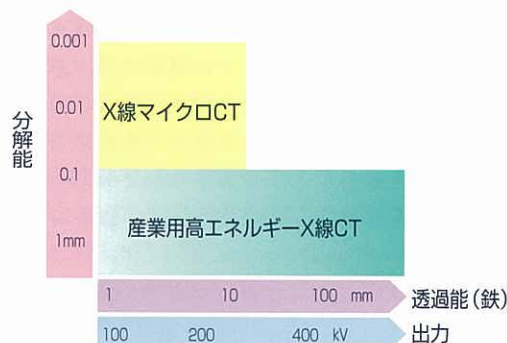
これに対しX線CTは多方面からX線を照射し、これらの透過像をもちいて数学的に断層像を再構成する。この計算は100年ほど前にラドン変換として証明された方法がもとになっている。

実際のX線CTではコンピュータ処理に適した計算アルゴリズムが提案され、フィルター補正逆投影法(Filtered back-projection algorithm)などが広く利用されている。

透過像を数学的に処理して断層像へと再構成するため、コンピュータの進化なくして本技術は成しえなかったといえる。医療用、工業用も基本的な考え方は同様だが、観察物体に応じてX線の出力や分解能を選択する必要がある。

第1図にX線出力と分解能の概念図を示す。

分解能にはさまざまな定義があるが、ここでは



第1図 X線出力と分解能の概念

最終的に認識できるおよその最小寸法とした。

一般的にX線の出力の増加に伴い透過像の分解能は低くなる。これは分解能がX線源の焦点径に大きく依存するためと言われており、出力が大きくなれば焦点を絞り込むことが難しくなり、結果的に透過像の分解能は低下するためである。出力が400kV以上のX線を用いた場合、数100mmの金属も透過することが可能だが、機種によっては0.1mm程度の形状判別能力になってしまう。

一方マイクロCTとよばれるものは出力が100~250kV程度であり、数mm程度の金属しか透過できないが、条件によっては1 μ m~10 μ mの形状判別が可能である。

分解能は装置設計技術力の見せ所であるが、ユーザ側は観察対象や評価目的に応じた必要分解能や機種選択おこなうことが肝要である。

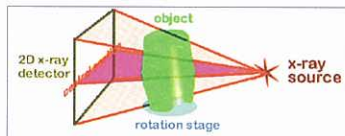
D-2

当社導入のX線マイクロCT

4) http://www.skyscan.be/next/spec_1172.htm

主な仕様

X線源 : 密封型マイクロフォーカスX線
20~100kV(max10W)
観察視野範囲 : 20mm
試料寸法 : 約5cm立方以下
最大倍率時 : 1.6 μ m/1画素



第2図 装置外観と仕様

当社ではSKYSCAN社(ベルギー)製1172型高分解能X線マイクロCT⁴⁾(日本代理店:株式会社東陽テクニカ)を保有している。

主要な仕様と装置外観を第2図に示した。

前述のとおり観察対象を考慮した機種選定が重要であるが、当社では汎用性・利便性と分解能を考慮し100kV型のマイクロCTを選択した。透過能は観察物体の材質や形状に依存するが、目安としては鉄で約2~3mm、アルミニウムで約6~7mm程度となる。

観察物体を第2図中のローテーションステージに確実に固定する。ステージを前後（同時にCCDカメラ位置も最適化）させることで観察倍率を決定する。ステージは0~180°（あるいは360°）回転し、それぞれの方向から得られた透過像はCCDカメラを通してコンピュータに蓄積される。

得られた数百枚の透過像を再構成することにより、任意の断面像を観察することができる。

ここで、観察物質の大きさは数cm立方程度ま

で可能であるが、倍率を高くして観察することになれば、CCDカメラ視野から観察物体が外れてしまうため、実用的には数mm立方程度の視野内におさまる小さなものが望ましい。

得られた再構成後のCT像は、画像処理ソフト⁵⁾（VGStudio MAX：日本ビジュアルサイエンス株式会社）により、寸法・形状測定などさまざまな解析が可能となる。

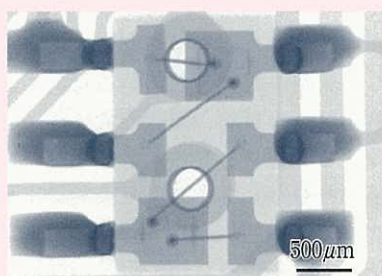
5) <http://www.nvs.co.jp/>

観察例

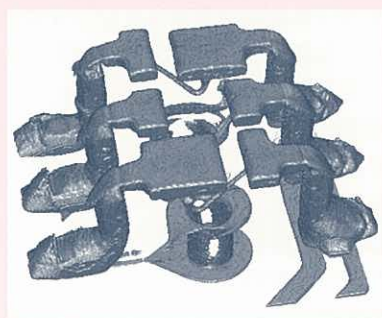
観察のみならず、その結果を他の分析解析手法や数値計算と融合させた評価や、変形試験中の透過像観察などのオーダメイド実験まで展開し、総合的な評価・解析への活用が本装置には期待できる。次にいくつかの観察例を示す。

エレクトロニクス分野での利用

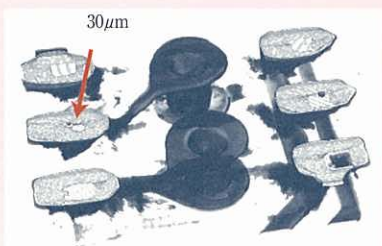
第3図は市販電子部品のはんだ接合部をX線マイクロCTにより観察した例である。



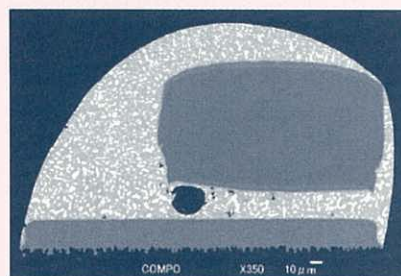
(a)透過像



(b)3D像



(c)3D任意断面像



(d)SEMによる観察結果

第3図 はんだ接合部の観察例

(a)の透過像では基板内の配線状態やはんだ接合位置を鮮明に確認することができる。

(b)はCT像を再構成し、さらに三次元的に構造を再現したものである。配線が立体構造をもち、それぞれの線がどこの位置に接合されているのかが一目瞭然となる。

さらに(c)で、はんだ接合部の断面を切り出した像である。はんだ接合部に表面観察では見ることのできない10~30μmの内部欠陥が確認できた。

(d)にX線で確認した同じ位置を断面観察した結果を示した。当然であるが断面観察で同欠陥の存在が確認された。断面観察した試料は欠陥位置が特定されるため、欠陥部の表面分析、元素分析や状態分析などさまざまな調査が効率よく行えることになる。

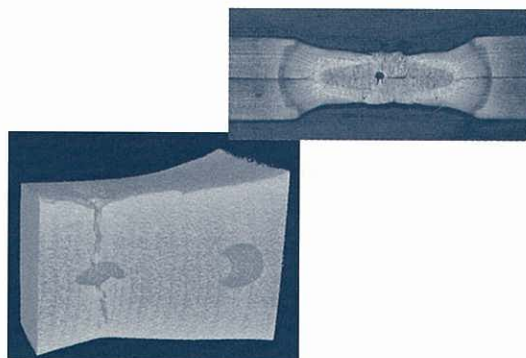
実装電子部品では、振動や衝撃による断線や接続不良の発見が課題であり、はんだ接合部の欠陥や割れの状態を非破壊で観察することが非常に重要な技術として期待されている。

材料分野での利用

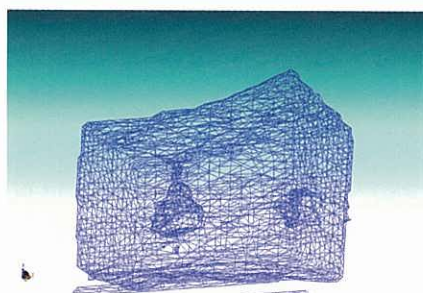
第4図(a)に冷延銅板のスポット溶接部を観察した例を示す。スポット溶接も他の溶接同様に溶接条件によって、溶接状態が大きく変化する。

特に自動車などの構造部材においては、溶接状態は構造物の強度・耐久性に大きく影響を及ぼすため、溶接部の接合状態観察は溶接条件の検討や、破損調査において重要な評価の一つとなる。

一般的に溶接状態の観察は、溶接部を切断・研磨・エッチングの試料調製を行い、光学顕微鏡や投影機などで断面を拡大観察するが、これではあ



(a)欠陥の3D像



(b)STL形式による出力例

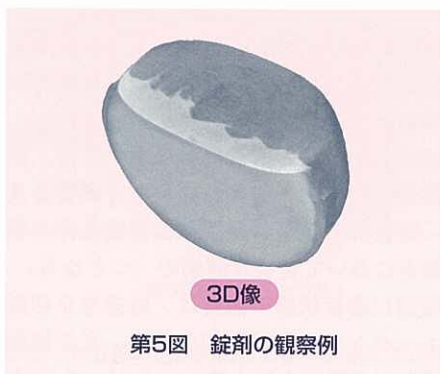
第4図 スポット溶接部の観察例

る特定断面のみの観察となり、奥行き方向の大きさや形状は判定できない。また観察試料を削り込み破壊してしまうことになる。マイクロX線CTで観察した場合、(a)に示すように三次元的に欠陥分布している様子もわかり、これまでの断面観察では評価しにくかった欠陥の三次元形状を定量的に評価することが可能となる。さらに得られた三次元像は (b)に示すようなSTL形式に変換することが可能であり、数値解析による力学計算が実部品形状を用いて行うこともできる。

医薬分野での利用

医療では体内の骨や内臓などの観察に広く用いられているが、我々が普段服用する薬の観察などにも利用できる。

第5図は市販の錠剤（タブレット）を観察した例を示した。白とグレーのコントラストが明瞭に確認できるが、これはX線吸収率が異なっているためであり、すなわち材質の違うそれぞれの層で構成されていることがわかる。

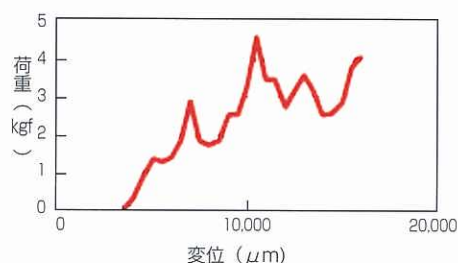


第5図 錠剤の観察例

本画像をさらに解析することで、各層の体積分率や分散状態、さらに内部に欠陥や割れがある場合にはこれらの観察・定量評価が可能となる。

実験技術としての利用

第6図に発泡アルミニウムを圧縮してゆく様子を示す。



第6図 発泡アルミニウムの変形過程（透過像）

発泡アルミニウムは衝撃吸収材として自動車部材などへの展開が期待されている材料である。発泡体の壁の厚さや形状、空孔の大きさ・分布状態が力学特性を支配するため、変形挙動を評価することが重要となる。ここでは段階的に圧縮を加えながらつぶれてゆく様子をX線で観察した透過像と、付与した荷重および高さの変化量の関係を示す。多孔質体のため、数回の座屈を繰り返しながら圧縮されている様子がわかる。

このように単純に固定された試料を観察するだけでなく、各種実験と組合せた観察・評価も可能である。

本稿ではX線マイクロCTの概要と当社での事例の一部を紹介した。

最近のリバースエンジニアリングに代表されるように、造ったものを壊さず観察・評価したいという非破壊検査への期待はますます高まりつつある⁶⁾。また、高分解能化では、観察対象位置を絞り込み、詳細な情報を的確に効率的に得たいという要求を満たすため、装置メーカー各社が努力しているところであると感じている。

一方、当社では「観る」装置を最大限に活用し、分析・解析技術への展開、あるいはお客様の要望にあった実験手法の検討など、他に類を見ない技術ソリューションサービスを展開してお客様へ貢献して行きたいと考えている。お手元に観てみたいという試料がございましたら、ご遠慮なくお申し付けください。

[加古川事業所 技術室 三宅 修吾]