

解説 2

X線CT法について

中央技術研究所 試験分析グループ さとう 瑠栄
佐藤 瑠栄



1. はじめに

X線は1895年にドイツのWilhelm Conrad Röntgen博士によって発見された。Röntgen博士はノーベル賞を受賞したがX線に関する一切の特許を取得せず、X線に関する技術は広く一般に知れ渡り後に α 線、 β 線、 γ 線、中性子線が発見された。現在ではそれらをひとまとめに放射線と呼称されている(表1)。その中でも特にX線を撮影技術へ応用する理由の一つに、X線の透過力がある。図1のようにX線は紙などの樹脂繊維、コンクリート、薄い金属板であれば透過可能であり、この性質を利用して物質の内部を透かして見るという使い方である。一般的なX線による撮影装置にはレントゲンがあるが、こちらは奥行き情報のみの二次元の透過像を得るものである。従来X線による撮影といえばこうした影絵のような透過像を撮影するものであったが、コンピュータ技術の発達に伴い、多方向から撮影した画像をコンピュータ上で計算、再構築することにより三次元像を撮影できるようになった。X線で撮影した画像をコンピュータ処理によって解析する技術はX線CT(Computed Tomography)と呼称される。X線を用いた画像の撮影装置は、近年身近な技術となってきた。本稿ではその中でもX線CT装置と、同装置を用いた分析・解析手法について紹介する。

表1 X線の歴史

1895年	X線の発見(人工的な発生)
1896年	ウラン鉱から放射線を発見(自然的な発生)
1898年	ポロニウム、ラジウムを発見 (後に物質が放射線を出す能力を放射能と名付けた)
1932年	中性子の発見
1973年	X線CT技術の発明

【放射線の種類】

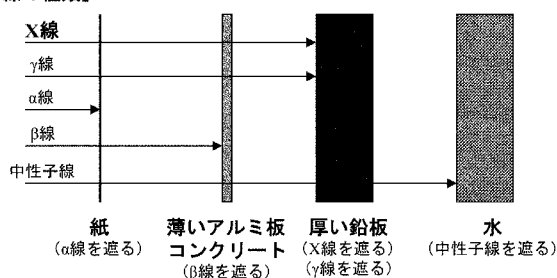


図1 放射線の透過力

X線CTの特徴の一つに、非破壊で試料を撮影できるという点がある。試料の内部構造を知ることは、材料工学的に大変重要な意味を持っている。試料の物理性能には試料に使用される素材の種類や外見的形状のほかに、試料の内部に存在する添加物や空隙といった内部構造が関係している。例えばコンクリートの内部にひび割れなどの空隙があった場合、圧縮やせん断などの外部応力に対してコンクリート本来の強度を発揮できず、理論値より遥かに低い応力によって破壊されてしまう。そこで、X線CT装置を用いた内部構造の撮影を利用して、内部構造の観察を行う。

本稿で紹介するX線CT法とは、『物質の内部構造をX線CT装置によって撮影し、取得した画像をデータ上で定量的解析をする技術』のことである。物質の内部構造を把握することで物理性能に影響する脆弱部を予測でき、そこから物質の品質検査や擬似的な性能確認が可能となる。

2. X線CT法

(a) X線CT法の原理

X線CT法は大きく分けて次の三つの手順からなる(図2)。

- | | |
|----------------------|------------------------------|
| (1) X線CTによる試料の断層像の撮影 | } 装置による測定
コンピュータ
による処理 |
| (2) 断層像から三次元のCT像を再構築 | |
| (3) 得られたCT像の画像解析 | |

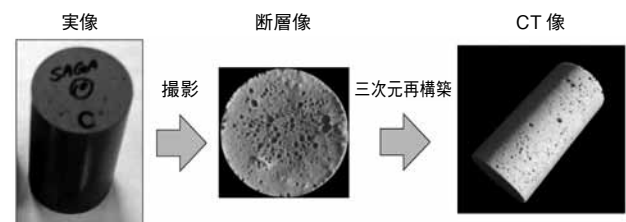


図2 X線CT法の手順

まずはX線CTにおける断層像撮影の原理を説明する。図3はX線が試料を透過する際のX線強度減衰の模式図である。X線は多様な試料を透過するが、X線の全てが通過するわけではない。試料の組成によってX線の透過しやすさ(=減弱率)は異なるが、どんな試料でも透過

する際には必ずX線の強度は減衰される。当然、透過する距離が長ければ長いほど減衰する量も大きくなる。このときX線源から照射されるX線強度を I_0 、物質固有のX線の減弱率を μ とすると厚さ X の物質を透過して検出されるX線強度 I は以下の式で表される。

$$I = I_0 \exp^{-\mu X}$$

得られた I の値をコンピュータに取り込み、試料の位置ごとにおける I の相対値をグレースケール化するのが、X線CTの基本原理となる。デフォルトではX線吸収量の多い部分が明るく、吸収量の少ない部分を暗く表示する。一方向からの撮影のみでは図3のように一次元のグラデーションがつくだけなので、この撮影を試料の360度方向から行う。そうすることで試料の断面を示す断層像が得られる(図4)。図に示すように、試料を構成する材料に比べて空気の方がX線を透過しやすいため断層像中では試料内部の空隙が暗く表示される。続いて、得られた断層像を積算し三次元のCT像を再構築する。作業はコンピュータ上で専用のソフトを使って行うが、およそ10センチメートル四方の試料を測定すると、断層像の枚数は1000枚近くに達する。最後に再構築されたCT像を画像解析して空隙などの長さや体積といった数値データを得る。

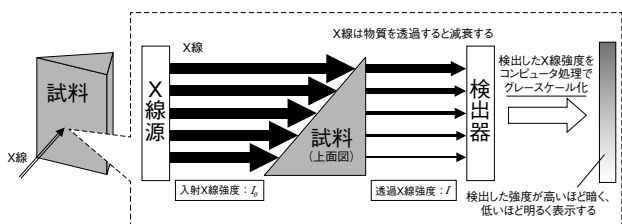


図3 透過によるX線強度の減衰

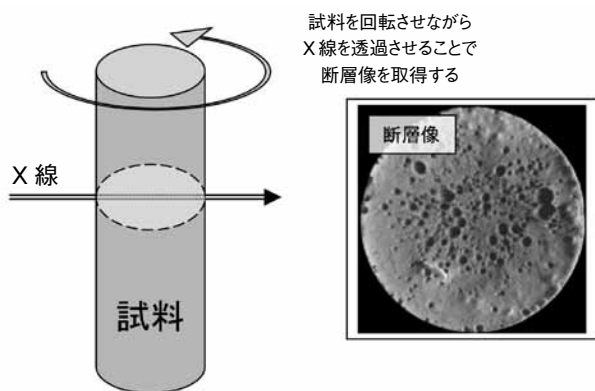


図4 断層像の取得

ここでなぜ画像データから数値データが取得できるのかについて触れる。

異なる2種類のデータを比較する際には基準となる単位が必要となるが、長さや重さに単位が存在するのと同様、デジタルの画像にも単位が存在する。これが一般にピクセル、ボクセルと呼称される概念である。

図5に示すとおり、デジタル画像というのは拡大していくと単色の四角いボックスから構成されていることが分かる。どれだけ精巧な画像でも、拡大率を上げればいずれこのボックスに辿り着く。これこそ画像の最小単位であり、二次元のデジタル画像においてピクセルと呼称されるものである。携帯電話やテレビなどのスペックにおいて画素と呼ばれるのはピクセルの個数であり、100万画素とは1つの画像が100万個のピクセルで構築されているという意味である。ここで注目すべきは、ピクセル数が増えれば画像全体のサイズは巨大化するが、ピクセルそのもののサイズは変動しないことである。この特性から、1ピクセルあたりの長さを規定(図5中の x, y)すれば画像中の任意の点間の長さを計算できる。さらにX線CTで得られる断層像には、図6に示すとおり厚み方向の長さも規定される。これにより三次元の画像が構築可能となる。長さ情報は二次元画像のピクセル同様、三次元画像の最小単位であるボクセルあたりの数値として格納される(図6)。このため、構築されたCT像のボクセル数をカウントして指定された長さ情報を代入することで、実際の試料の寸法を計算できる。このように画像データ自体が長さ情報を内包しているため、測定者はコンピュータ上で画像を測長することで、実際の長さや体積といった数値データを取り出せる。

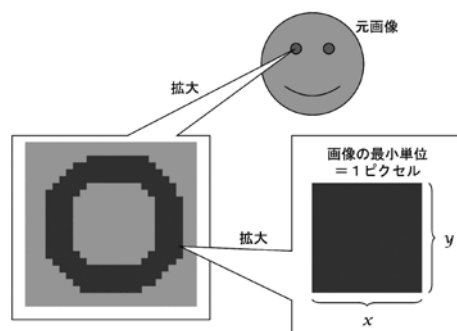


図5 デジタル画像の単位

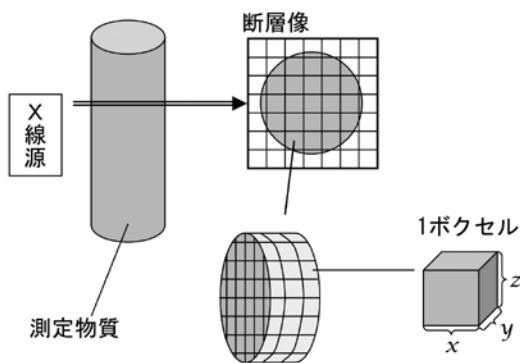


図6 断層像が内包する三軸方向の長さデータ

(b) X線CT法の特徴

X線CT法が一般の画像撮影と大きく異なる点に以下が挙げられる。

- ・断層像として、試料の内部撮影が可能であること。
- ・断層像から三次元の立体像が得られること。
- ・装置に投入した試料は非破壊で観察できること。
- ・得られるデータが画像のみでなく、数値もあること。

X線CT法によって得られる数値データには主に①試料の寸法、②体積、③試料内部の空隙および添加物の位置分布、④試料内部の空隙および添加物の体積分布、といったものがある。

これらの特徴は工業の分野でも特に検査目的で活かされる。工業用の機器、材料というのは規定された規格に基づいて製造、使用されるため、定められた性能を一定の期間満たし続ける必要がある。そのため完成時に性能試験を行わなければならない。例えば溶接などの接着加工では気泡の影響で接着部に空隙が発生していた場合、極端に接着強度が下がる。しかしこれら一つ一つを剥がして空隙が発生していないか確かめたのでは意味がない。そこで使用されるのがX線CT装置を用いた内部構造の撮影である。X線CT装置は投入した試料を破壊することなく測定でき、かつ試料全体の内部情報が得られるため非常に有効である。さらにX線CT装置で得られるデータから試料内部の空隙率（空隙の充填率）や体積分布を定量することも可能である。

上記の通り外部から試料の内部構造を把握、かつそれらを定量可能なX線CT法であるが、いくつか注意すべき点はある。CT像の分解能は測定する試料の体積に反比例するため、微細箇所の高分解能測定が必要な場合は試料の切り出しを推奨する。また、極端に形状の複雑な試料、縦横の厚みに大きな差がある板状試料、X線を透過しにくい素材の試料など、測定の困難な試料も存在する。その他、CT像はX線の吸収量によってコントラストを得るため原子番号の近い添加物や測定中に流動する試料を分析するのは難しい。

しかし、これらの点にさえ気をつければ、X線CT法は試料の内部構造を把握する上で大変有用な手法となりうる。

3. 分析事例

実際にX線CT法を用い、試料の分析を行った例を以下に示す。また、使用した装置およびソフトを表2に示す。

表2 X線CT法の使用装置・ソフト

【測定装置】	
メーカー	: 東芝 IT コントロールシステム
装置型番	: TOSCANER-32251 μ hd
最大管電圧	: 225kV
最小焦点	: 4 μ m
最大試料サイズ	: 200mm ϕ ×300mm
【解析・再構築ソフト】	
メーカー	: 日本ビジュアルサイエンス
ソフト型番	: VGStudio MAX2.0

3.1 レコサル

当社では環境に親和性の高いコンクリート材料であるレコサールの開発を行っている。レコサルは形成の作業工程上、内部に気泡を取り込んでしまうことは既知であるが、これが冷え固まったレコサールの内部空隙となり、試料の強度へ影響を及ぼしていると考えられている。またレコサルには碎石を混ぜ合わせることがあり、この添加物も試料強度を決定する要因であると考えられる。レコサールの内部構造を把握するために電子顕微鏡による分析の検討を行ったが、レコサルのような試料は硬質であり、加工が難しい。そこで、試料の加工が不要なX線CT法を用いることとした。結果、レコサル中の空隙を判別できたうえ、添加された碎石も確認することができた(図7:空隙は暗い部分、碎石は最も明るい部分)。さらに画像を解析することで空隙率と曲げ強度の相関を確認した(図8)。

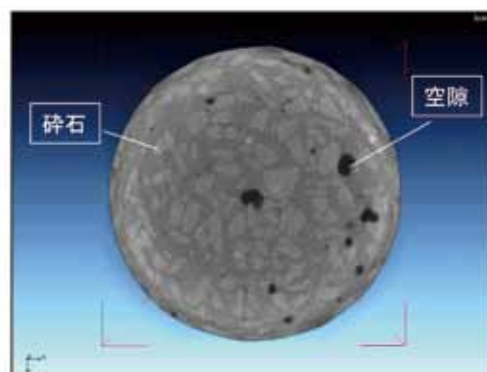


図7 X線CT法によるレコサールの断層像

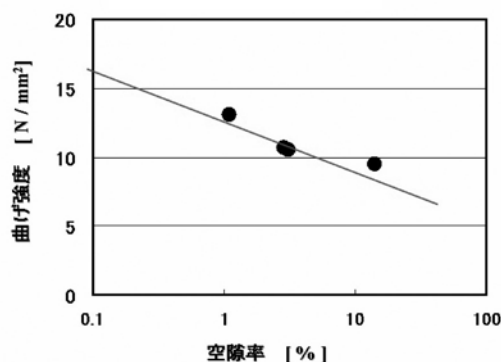


図8 レコサールの曲げ強度と空隙率の関係

3.2 水素貯蔵容器

当社で開発している水素を貯蔵するための容器もレコサル同様、作製する作業の工程上で内部に気泡が存在しやすい。試料形成時にこれらが空隙となり、試料の強度に影響を及ぼすと考えられた。そこでX線CT法による分析を試みたところ、良好なCT像を取得できた。図9に示すとおり水素貯蔵容器の内部にある空隙は、箇所によって偏析があることがわかる。さらに空隙の平均的な分

散・偏析状態を数値化することが可能である。このことから、水素貯蔵容器の更なる強度向上に寄与できると考えられる。

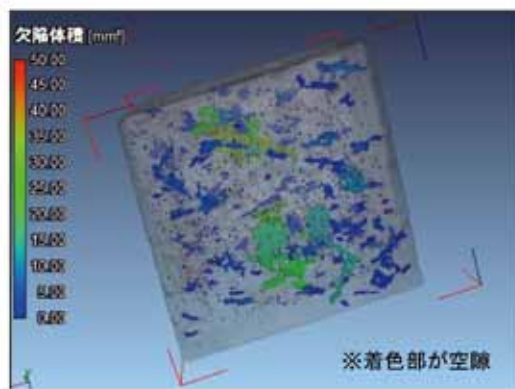


図9 X線CT法による水素貯蔵容器の分析

4. まとめ

X線CT法は試料の内部構造を把握するための、X線を応用した手法であり、得られる結果には画像と数値の二種類がある。

- ①画像からは内部構造の偏析を視覚的に判定することが可能である。
- ②数値からは内部に存在する添加物や空隙の体積や分布を計算することが可能である。

X線CT法を活用して試料の内部構造を正確に定量化することにより、試料物性の良し悪しと定量値の相関を得て、試料の処理や作製条件の最適化が期待されている。その他、破壊の必要な実試験を実施せずとも試料の物性を予測できる可能性がある。

－ 参考文献 －

- ・宮城 伸 ENEOS Technical Review, 47, 2, 20 (2005)
- ・村田 潔 X線CT法による特殊構造材料の内部構造の解明 X線分析の進歩, 41, 171-176 (2010)
- ・滝克 彦 X線CTによる繊維配行観察とシミュレーション プラスチック成形加工学会誌「成形加工」, Vol20, No.4, pp237-241 (2008)
- ・堀井 秀之, 森弘 敏夫 ENEOS technical review 52(1), 29-32, (2010)