

# X線CTと「ExFact VR2.0」による 鋳造品の内部品質評価

日本ビジュアルサイエンス(株) 滝 克彦\*

## 工業分野の X 線 CT 技術

本稿では、X 線 CT (Computed Tomography) の周辺技術を実際的な見識に基づいて概説すると同時に、最新の装置とソフトウェアによって得られた画像を数多く紹介し、鋳造品の内部品質の評価手法について、読者にイメージをもってもらいやすい解説を心がける。

X 線 CT は、医療用の画像診断の技術として認識されているが、近年、工業製品全般の故障解析や樹脂、金属といった素材の可視化/評価、研究用途などで広く利用されている。X 線 CT の原理については割愛するが、1979 年にノーベル生理学・医学賞を受賞した Cormack と Hounsfield がこの技術の先駆者と語られることが多い。しかし、それより 22 年を遡る 1957 年に弘前大学の高橋信次氏がほぼ完全な X 線 CT の基礎技術に関する文献「Rotation Radiography」<sup>1),2)</sup> を発表していたことを、この業界に携わる日本人として強調しておきたい。

工業向けの X 線 CT は X 線源の管電圧により大中小、さまざまな装置が存在する。X 線 CT 撮像では、回転する試料に対して照射した X 線がどの方向にも十分に透過しないと原理上、アーチファクト (artifact) といった虚像やノイズ成分が生じ、良質な断層像が得られにくくなるため、見たいサンプルの材質、サイズ、

厚み、そして得たい分解能によって装置の適性や撮像条件が変わってくる。また、管電圧以外に X 線の焦点寸法によりミリフォーカス、マイクロフォーカスなどと X 線源は分類して俗称され、事実、得られる画像が質的に変化するため、焦点寸法の小ささこそが分解能の優秀性を示すがごとく謳われている。

X 線 CT では、試料を X 線源に近づけると影絵の要領で拡大率を高めた撮像ができ、視野と分解能は条件次第で変動する。大型の鋳造品を「そのまま、広い範囲で、できるだけ微細な構造まで」観察したいと希望するのは人情だが、X 線 CT 検査の実務では分解能を稼ぐために、あるいは X 線を透過させるために、非破壊検査と称しながらも試料を小さく裁断して撮像することも、しばしばあるのが実情である。

鋳造品の内部品質の評価は、実物の断面観察で行おうとすると時間と手間暇とコストがかかり、X 線透過装置で観察するにしても質的に限界がある。金属材料の内部構造の観察は、ほかの分析技術では代替がきかないことから、近年では X 線 CT による評価方法が一般に普及してきている。

## アルミダイカスト製品の観察事例

図 1 に、230 keV マイクロフォーカス X 線 CT 装置によるダイカスト製品の典型的な撮像例を示す。X 線 CT 装置からは断層像が連続的なデジタル画像として出力される。デジタル画像は画素 (pixel) の配列によって成り立っており、1 画素当たりの寸法が分解能 (resolution) の限界となる。この例では、高さ約 100 mm のアルミダイカスト (ADC12) 製品を表

\*Katsuhiko Taki : 代表取締役  
〒160-0022 東京都新宿区新宿 6-26-2  
TEL(03)5155-5561

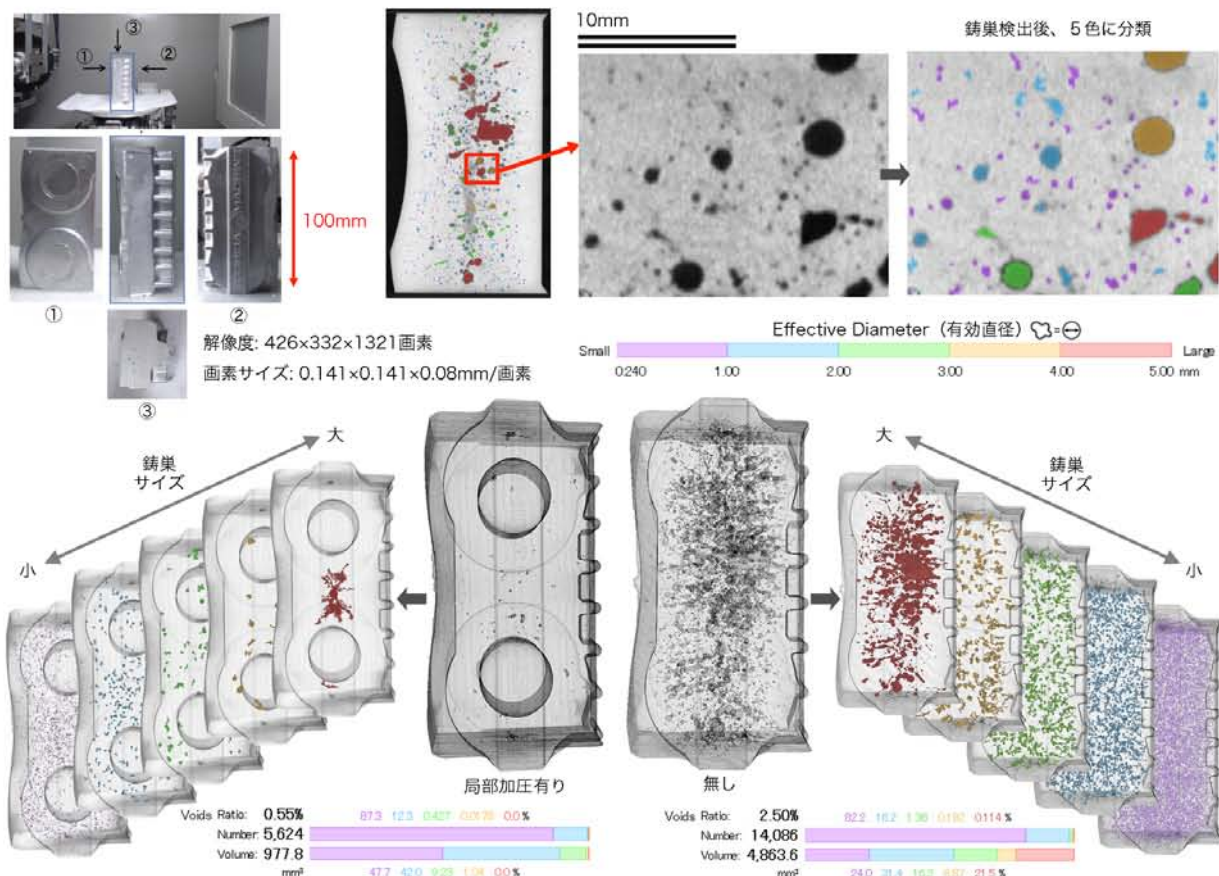


図1 マイクロフォーカスX線CTによるダイカスト製品の撮像例

記の条件で撮像したところ、画素サイズは $0.141 \times 0.141 \times 0.08 \text{ mm}$ となり、この条件下において3画素分、つまり有効直径 $0.24 \text{ mm}$ 以上の鑄巣を検出すべく、ソフトウェアによる処理を行った。実際にはこれより小さい鑄巣も存在するわけだが、分解能を超える構造を安定的に観察できないのは、X線CTとデジタル画像処理の限界に由来する<sup>3)</sup>。

鑄巣は不定形をしているため、同じ体積をもった球に置き換えて、その直径で5段階に分類し、色分けしてある。Effective Diameter (有効直径) と称し、材料工学の業界で一般的に用いられる概念である。あえて体積で分類しないのは、体積は3乗された数値であるため、人が直感的に大きさを理解しにくくなり、なおかつ不自然に偏って色分けされてしまうためである。こうして色分けした鑄巣を切り替えて表示してみると、大きな巣が中心線ひけ巣を形成していること、また小さな鑄巣ほど場所の依存性がなくなり、万遍なく分布していることがわかる。

このようにX線CTを用いて鑄巣の「量的な」評価を行うことは、鑄造品の内部品質を評価するうえで有用性が高く、実際に多くの企業の品証、試作、生産技術などの部署で日常業務として実施されていることと思う。

次は同じ試料の細部を拡大し、3次的に可視化した画像に着目してみる。図2から以下のようなことがわかる。

- ・気泡が固まってできた巻込み巣は、滑らかな丸い形状をしている。
- ・金属組織の凝固によってできたひけ巣は不定形状をしている。
- ・鑄巣が連鎖した構造、表面にリークしている状態、湯流れが関係していると思われる鑄巣の構造が観察できる。

前述のようにX線CT装置を導入すると、とかく鑄巣が多い／少ないといったレベルの議論に終始しがちだが、この例のように、あえてシンプルなレンダリング (描画) を行い、細部に着目することによって、鑄巣の形状や分布について、高度に考察することができる。色がついたり、数値が出力されたりといった平易な解釈にはならないが、鑄造方案をよく知り、鑄造技術に長けた技術者がこうしたデータを多面的に見ることによって、多くの知見をもたらし、不良原因の追求や対策につながるであろうことを示唆しておきたい。

さらに今回の撮像で観察された特徴的な構造を説明する。

図3(a)は断面で見るとリング状、3次元にすると



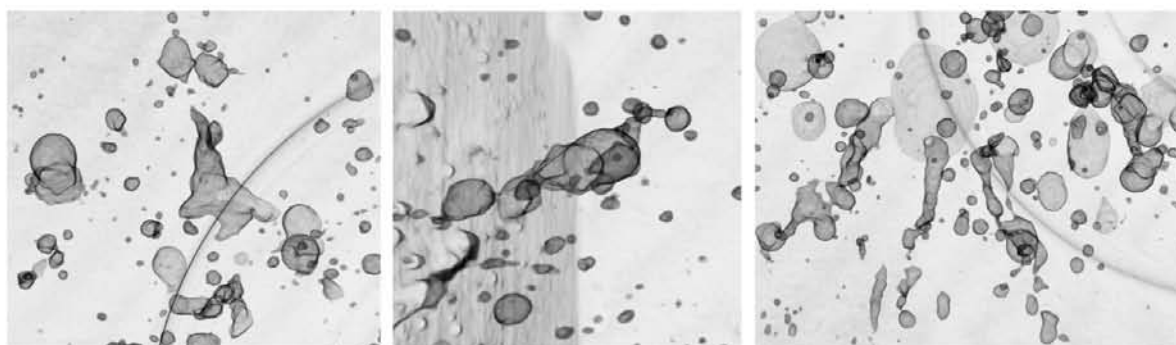
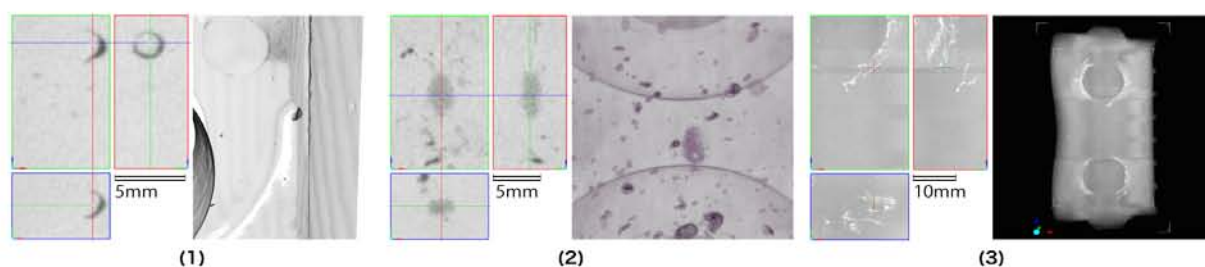


図2 同試料 細部の3次元可視化画像



(a) 巻き込み巣に溶湯が流れ込んでできた鑄巣 (b) 多孔質構造をもつポロシティ (c) 加圧により析出してきた銅合金

図3 同試料 観察された特徴的な構造

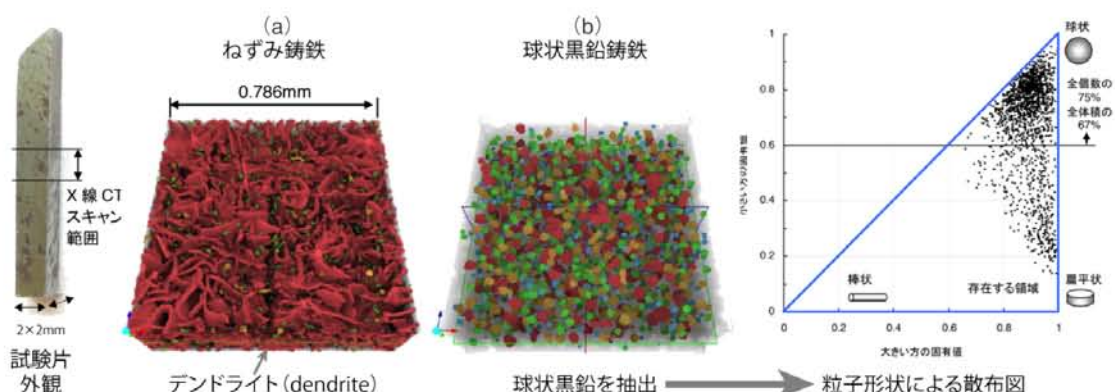


図4 鋳鉄黒鉛組織の微細構造

半球状をしている鑄巣である。これは丸い巻き込み巣に加圧が行われた際に溶湯が流れ込み、固まってできた構造と考えられる。加圧鋳造された試料についてのみ、観察された。

図3(b)はポロシティと呼ばれる、数十ミクロンオーダーの極小の巣が集まって、多孔質を形成している材料の構造である。ある程度のサイズをもつ鑄巣と異なり、X線CTでは分解能の制約上、輝度値が周囲より暗くなることにより表現される。

図3(c)は加圧されたことにより、析出してきた銅合金が白っぽく撮像された様子である。母材であるアルミニウムに対して、比重が大きい銅合金はより高い

CT値が返るため、見やすいコントラストを与えて半透明にレンダリングすることで、この例のように可視化できる。

### 鋳鉄組織の微細構造の観察

筆者らは鋳鉄の微細構造をX線CTで撮像し、黒鉛の3次元構造を可視化し、画像解析を試みた。

図4(a)は、ねずみ鋳鉄の片状黒鉛の花弁状の構造を表している。3次元画像を回転させて見ると鉄の断層状の組織、すなわちデンドライトが観察でき、片状黒鉛はそのほとんどが繋がった3次元構造を形成していることがわかった。また、球状黒鉛に関しては、

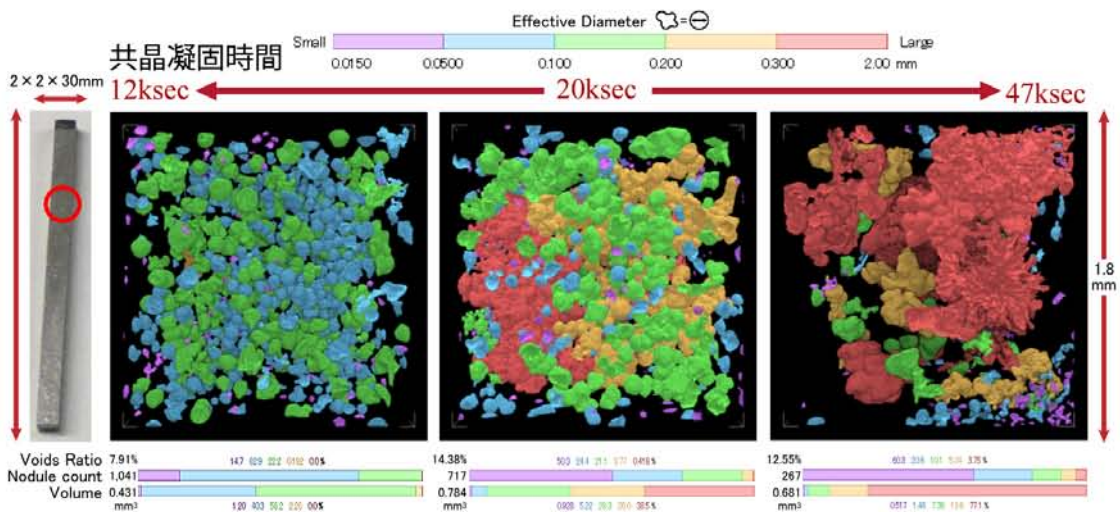


図5 凝固時間による鋳鉄黒鉛組織の変化

図4(b)のように3次元画像から黒鉛粒子の球状化率を3次的に算出する手法を確立した<sup>4)</sup>。

さらに寸法の異なる鋳鉄鋳物から3種類の試験片を準備し、黒鉛の構造を3次的に観察したところ、図5のように凝固時間が長くなるに従って、表面積が大きく、より複雑なチャンキー黒鉛が形成されることを明らかにした<sup>5)</sup>。

以上の例のように最近のX線CT装置では、試験片をうまく作製して拡大撮像を行えば、230 keVの汎用性の高い中型装置でも、高い分解能で材料の構造を3次的に観察することができる。その要因として、ここ数年のX線CT装置がフラットパネル検出器を搭載したモデルが主流になった業界の事情があげられる。従来のイメージインテンシファイヤだと、たる型補正や輝度ムラ補正を多重に加えていたX線透視像を、そのままCT再構成に持ち込めるため、空間的に、また輝度情報に関して直線性が高く理想的なデータを得られるようになった。このように工業向けのX線CTも技術革新により従来、不可能と考えられてきたレベルの観察がだんだんと行えるようになってきているのである。



鋳造は古典的な製造技術であるためか、この分野には内容が古く更新されていない文献が多い<sup>6)~8)</sup>。X線CTはおろか、検査/評価技術についてさえ、まったく触れていないものも多い。初学者が検査/分析技術を習得し、X線CTのような最新の装置を用いて、製品の品質向上を図ろうとする場合、適切な教科書や

技術標準が存在しない現状について、問題提起しておきたい。本稿は少しでもそれを補完できればと考え、執筆した次第である。

鋳造品の検査項目について、X線CTによる評価の有効性を検討したので、表に掲載する。X線CTには分解能の限界が存在すること、つまり万人が望む「広視野高分解能」は原理的に両立しないことをよく認識し、試験片の作製や観察方法、効果的に画像を表現するソフトウェアの技術やデータのみかたを習得すれば、X線CTは実に幅広い範囲で、モノづくりに応用できる評価技術であると言えよう。

なお、掲載した画像はいずれも「ExFact VR2.0」(日本ビジュアルサイエンス)を用いて制作した。同製品はX線CTから出力される断層画像一式を読み込み、示したような鮮明な可視化や画像処理を平易な操作で行える日本製のソフトウェアである。回転、断面など想定されるシーンの画像、数千枚を前もって描画、データ圧縮して動画ファイルに格納し、それをパラパラ漫画の原理で軽快に再生できる独自機能を搭載している。こうした新技術を考案したことで、時間と手間暇がかかる画像処理を一気に自動的に行うことができ、3次元画像の配布と簡単再生が実現し、高額なイメージング装置から得られたデータを社内外に配布し、波及できる特徴を有している<sup>9)</sup>。

〔謝辞〕

最後に試料やデータのご提供、X線CT撮像、共同研究において、大変お世話になりました東芝ITコントロールシステム(株)の山本輝夫氏、富澤雅美氏、大門弘典氏、東芝機械(株)の林勇人氏、藤本亮輔氏に深くお礼申し上げます。



表 鋳造品の欠陥の種類とX線CTによる検査/測定の有効性

欠陥の分類	欠陥の種類	欠陥の性状	X線CT
寸法上の欠陥	寸法不良	種々の原因により鋳物が所定の寸法にならないもの	○
	はぐみ	形がずれて鋳物がはぐんだもの	○
	型逃げ・中子逃げ	型、中子が逃げて余肉となって所定の寸法にならないもの	○
	変形	鋳物が変形して所定の形状がくずれたもの	○
	余肉・欠肉	鋳物の一部の厚すぎるもの、薄すぎるものおよび一部の欠損のもの	○
	欠け込み	湯口、鋳ばり取りのとき生じた製品の一部の欠損	○
外部欠陥 (外観上の欠陥)	湯回り不良	溶湯がキャビティの一部を未充填のまま凝固したもの	△
	湯じわ	溶湯の細片が融合しないで発生した粗面、浅いしわ、湯流れ模様	△
	湯境	溶湯が合流する個所において完全に融合せず残した境目	△
	割れ	種々の原因により製品の一部に生じた割れ	○
	ひけ	溶湯の凝固時の収縮により鋳はだ上に生じた凹み	○
	ふくれ	鋳物に含まれたガスにより鋳はだ上に生じた盛り上がり	○
	かじり	金型から押し出される際、鋳物の表面に生じた引っかき傷	△
	焼き傷	金型表面に溶湯が融着してできた製品表面の欠肉や粗面	○
	型傷および ヒートチェック傷	キャビティ面に打こん、ヒートチェックを生じた金型を使用した場合に鋳はだにそれらがそのままうつされた傷	△
	型浸食傷	一部が浸食された金型を使用することにより鋳物に生じた傷	○
	ピンホール	小さな穴で、鋳物の表面に発生したもの	△
	打こん	運搬、製品取出しのときなどに生じた打ち傷	△
	湯口の巣	湯口を折ったあとに出る小さな穴	△
	傷	治工具などにより作業者が製品に傷つけた傷	△
内部欠陥	ひけ巣	溶湯充填後溶湯の収縮により鋳物内部に発生した穴	◎
	ブローホール (ガスホール)	金型内の空気、溶湯および離型剤より発生したガスが溶湯内に入り、凝固後、鋳物内に残った比較的大きな穴	○
	ポロシティ	鋳物の一部にできた粗いスポンジ状の組織	○
	肉厚中心部のピンホール	肉厚の中心部に発生する球状の小さな穴	○
材質上の欠陥	ハードスポット	鋳物中にあらわれる硬さが高く、正常な切削を妨げる粒子	○
	材質不良	鋳物が所定の化学成分範囲にないもの、また異種材質のもの	△
	酸化物	鋳物に酸化物が混入しているもの	△
その他の欠陥	物理的・化学的性質不良	強さ、耐食性などの物理的・化学的性質が規定された値から外れているもの	△
	埋金なし	埋金を入れ忘れて鋳造した製品	○
	鋳造間違いまたは異品	金型の組立間違い、型のかぶせ間違いのため起こる異なった製品、または異なった製品	○
	鋳仕上げ不良	加工の失敗、加工ミス、加工漏れなどにより完全な製品とならないもの	○

## 参 考 文 献

- Shinji Takahashi: 「Rotation Radiography」、日本学術振興会 (1957)
- 岡田光治: 「高橋信次-X線CTの先駆者」、医療科学社 (2003)
- 滝克彦、ほか: 三次元画像処理のためのソフトウェア技術の実際、日本非破壊検査協会講演大会講演概要集(2011)、pp.225-228
- 富澤雅美、大門弘典: 高分解能 X線CTによる鋳鉄の微視的分析、鋳造工学、85 (6) (2013)、pp.900-905
- 藤本亮輔、滝克彦、ほか: 高分解能 X線CTによる厚肉球状黒鉛鋳鉄の三次元組織観察、日本鋳造工学会第165回全国講演大会講演概要集 (2014)、p.97
- 菅野友信、植原寅蔵: 「ダイカスト技術入門-第2版-」、日刊工業新聞社 (1997)
- 中江秀雄: 「新版鋳造工学」、産業図書 (2008)
- 米国鋳物協会編: 「鋳物不良の原因と対策」、日本鋳物協会誌、丸善 (1955)
- 滝克彦: 表示用画像データファイル生成装置及び表示装置並びにプログラム、特許第5582584号、2013-9-30