二輪車開発における X 線 CT 装置の活用*

Practical Implementations of X-ray Computed Tomography System in Motorcycle Development

土屋光生** 有馬健太郎*** 山口 淳† 鈴木誠也†

Mitsuo TSUCHIYA, Kentaro ARIMA, Jun YAMAGUCHI and Seiya SUZUKI

Key words

industrial X-ray computed tomography, metrology engineering, reverse engineering, motorcycle, casting

1. はじめに

日本国内における二輪車出荷台数は、近年 40 万台を下回っており¹⁾、低い水準で横ばいに推移している。二輪車の大きな市場である ASEAN 地域においても、市場成長のピークを迎えつつあり²⁾³⁾、市場にフィットした魅力的な商品開発が必要となっている。

法規的な動向としては、排ガス規制の強化、安全装備の強化や電動車へのシフトなどが挙げられ、自動車メーカーにとって、より厳しい環境性能が求められている²⁾。

加えて、自動車業界を取り巻く環境として、CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electric)、AI、IoT といったトレンドも押し寄せており、新たな技術を取り入れた効率的なもののづくりが必要とされている²⁾。

二輪車の開発においても、3D データをエンジニアリングチェーンとサプライチェーン全体で活用し、現物の状態や製造要件などを設計にフィードバックする活動に注目が集まっている。その背景には、以下の二つが挙げられる。

一つ目は、前述のように、燃費性能向上や排ガス規制への対応のため、部品の軽量薄肉化や形状の複雑化が進んでいることである。この薄肉形状や中空形状を造形する上で用いられる工法の一つに铸造が挙げられる。铸造はアルミニウムを用いることにより、自由度の高い造形と軽量化が可能であるため、アルミニウムでも強度が担保できる部品、例えば車体のメインフレームは従来の鉄製から置き換えが進みつつある。

また、铸造品は中子を用いることにより中空品が造形できるが、近年、中子を 3D プリンターで造形することによ

り、従来手法では造形が難しい複雑な中空形状の造形が可能になりつつある。

二つ目は、複雑化する部品の現物の状態を正しく把握し、製品寸法や鑄巣（内部欠陥）を制御する必要性が高まっていることである。

現物は、製造上の物理現象や製造要件が複雑に絡み合っているため、設計上の寸法値や肉厚値と乖離することがある。

これらの乖離に対し、生産準備の工程では、湯口形状の流動解析や冷却凝固解析を組み合わせ、铸造における不良を事前にシミュレーションすることで、鑄巣などの製造上の課題を制御できるようになっている。そのため、試作された現物と設計意図との乖離を素早く可視化し把握することが重要であり、計測技術の必要性が高まっている。

本稿では、3D データを中心とした開発プロセスにおける計測技術が担う役割や、具体的な事例について述べる。2 章で二輪車開発に適用されている測定機と、その精度や時間について説明し、3 章では非破壊検査の中心となる X 線 CT 装置を用いた活用事例と研究内容の紹介を行う。

2. 外観および内部の形状計測技術

机上で設計検討や CAE (Computer Aided Engineering) を行う上では、実現象に近い状態での再現性が必要であるため、計測技術を活用し、デジタルエンジニアリングの精度向上に向けた取り組みを行っている。

われわれの計測部門では、接触式三次元測定機、非接触式三次元測定機や X 線 CT 装置などを有しており、目的、大きさ、用途に合わせて測定機を使い分けながら、さまざまな現物の内外を可視化している (図 1)。

例えば、エンジン部品のように比較的小型で緻密な部品の形状や寸法の測定は、精度良く測定できる接触式測定機やカメラ式三次元測定機を用いている。二輪車の車両や船体といった数メートル規模の大型品の形状測定は、大型品を精度良く測定できるレーザー式三次元測定機を用いている。アセンブリ品や铸造品の内部観察など、外観からは把握できない内部構造の可視化は、X 線 CT 装置を用いて計

*原稿受付 令和 2 年 2 月 18 日

**正 会 員 ヤマハ発動機(株) モビリティ技術本部デジタル開発統括部 デジタルエンジニアリング部エンジニアリングシステムグループ (静岡県磐田市新貝 2500)

***ヤマハ発動機(株) モビリティ技術本部デジタル開発統括部 デジタルエンジニアリング部エンジニアリングシステムグループ (静岡県磐田市新貝 2500)

†ヤマハ発動機株式会社 生産技術本部 生産技術部プロセス技術グループ (静岡県磐田市新貝 2500)

装置	接触式	非接触式		マイクロフォーカス X線 CT 装置	産業用 X線 CT 装置	大型 X線 CT 装置
測定事例						
	穴ピッチ	形状	車両、船体	小型部品	中型部品	アセンブリ品
時間	40 分 /100 カ所	30 分 /1 部品	2 時間 /1 車両	20 分 /1000 断面 (20 (cm))	18 時間 /1000 断面 (50 (cm))	3 時間 /1000 断面 (50 (cm))
精度	±1 (μm)	±100 (μm)	±100 (μm)	±100 (μm)	±300 (μm)	±300 (μm)

図 1 各種測定機の使い分け

測を行い、検査や設計へのフィードバックを行っている。

3. X 線 CT 装置の活用

自動車の製造における工法は、鋳造、鍛造、プレス、樹脂成形、機械加工など多岐にわたる。二輪車の製造において、鋳造はエンジン部品のみならず、フレーム、ホイールなどに広く適用されている。

さまざまな測定機の中でも、X 線 CT 装置は、X 線が十分に透過するワークに対してであれば、接触式測定機のプローブが入らない部分や、非接触式測定機のレーザーや可視光の入らない奥まった部分の測定も可能という大きなアドバンテージをもっている⁴⁾。

一方、電動車用のモーターやエンジンアセンブリ、鉄が入っているワークは、管電圧が 450 kV 程度の中規模な産業用 X 線 CT 装置では X 線が透過しない。このようなものを計測する必要がある場合は、社外の数メガボルト級の高エネルギー X 線 CT 装置を利用することもある⁵⁾。

本章では、アルミ鋳造品を測定対象とした X 線 CT 装置の主な活用事例について、三つのケースを説明する。

3.1 鋳造品の品質検査

二輪車の部品に多く使われる鋳造品は、車両の機能や安全性に関わる重要な部品であるため、高い品質が求められている。また、これらの部品は外部に露出しているため、見た目の美しさも要求される。

鋳造は工法上、空気の巻き込みや収縮による、鑄巣と呼ばれる内部欠陥が発生する。この鑄巣を X 線 CT 装置により非破壊で検査することで、位置や体積を定量的に評価(図 2)することが可能となる。

これらの検査結果から、鋳造条件の調整や、金型の修正検討を行うことで、不良率の低減につなげることができ、品質向上やコスト低減に貢献している。また、CAE との合わせ込みを行うことにより、フロントローディングによる試作回数低減と、それによる大幅なコスト削減にも貢献している。

3.2 肉厚検査

(1) 課題

近年、CAE 技術や生産技術の向上により、要求性能を満たしつつ、製品を軽く、薄く設計し、製造する技術が確立しつつある。しかし、それらを正確に測定し、結果を評価する仕組みにいくつかの課題があった⁶⁾。

図 2 X 線 CT 装置による鑄巣の断面画像と 3D 表示

図 3 製品肉厚をキャリパーゲージで測定している様子

従来、製品の肉厚を評価する際には、塩酸が入った水槽に製品を漬け、穴が開いた部分を NG と評価したり、キャリパーゲージを用いて測定(図 3)を行い、OK/NG の判定を行っていたりしていた。また、キャリパーゲージで測定できない箇所はワークを切断し、内部の測定を行っていた。

この手法では、測定箇所が離散的であること、切断による変形を含んでいること、全体を測定するのに約 2 週間かかり測定リードタイムが長いことが大きな課題であった。

(2) X 線 CT 評価による適切な閾値

X 線 CT 装置から得られた断面画像から、外表面抽出をするために、空気と試料の境界を定義する。その方法は、測定対象の特定の断面に対して輝度をグラフ化し、空気の輝度と試料の輝度の中央値を境界として決定する(図 4)。

理論上は、この手法で確からしい形状を得ることができるが、実際は測定物の厚み、アーチファクト、ビームハードニング、撮像パラメータなど X 線 CT 装置特有の影響により、実測の肉厚値と誤差が生じる。この誤差を修正するために、われわれはキャリパーゲージで測定した現物の寸法を基に、閾値の補正を行い、3D データの肉厚値が実測値に近くなるように調整を行った。調整した閾値で 3D データの再構成を行い、84 点について、キャリパーゲージの値との比較を行った結果、偏差が $\pm 0.1 (\text{mm})$ 以内に収まること(図 5)が確認できた。

(3) 肉厚計算手法

X 線 CT 装置で撮像され、データ処理により出力されたポリゴンデータは、一般的な CAD やポリゴン編集ソフトウェアで、球接触法や針刺し法による肉厚の評価が行われ

図4 形状の境界定義

図5 キャリパーゲージとの差異

ていた⁶⁾。しかし、これらの肉厚計算手法では、角部の接触球半径が小さくなるため、形状の角部が薄く計算される傾向があった。そのため、肉厚値を評価する担当者は、薄肉部と角部を選別する必要がある、見落としも生じていた。そこでわれわれは、設計者と製造担当者が共に扱いやすく、分かりやすい、内接触球計算手法を用いた肉厚評価手法を開発した。ここでは、分かりやすいように、一次要素の四辺形について説明する。

図6に示すように、計算対象要素を選択し、その中心点を P 、単位法線ベクトルを N 、接触球の半径を r とすれば、接触球中心点 C は、式(1)で表される。

$$C = rN + P \quad (1)$$

接触先が存在した場合、接触相手への接触点 $Q(u, v)$ は、中心点 C からの距離が接触球半径 r 、接触点 $Q(u, v)$ は垂線の足である式(2)を満たす必要がある。

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \mathbf{C} - \mathbf{Q}(u, v) \\ (\mathbf{V}, \mathbf{V}) = r^2 \\ \left(\mathbf{V}, \frac{\partial \mathbf{Q}(u, v)}{\partial u} \right) = 0 \\ \left(\mathbf{V}, \frac{\partial \mathbf{Q}(u, v)}{\partial v} \right) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

演算子 $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ はベクトル $\mathbf{a}$ とベクトル $\mathbf{b}$ の内積を表し、 $\mathbf{Q}(u, v)$ はパラメータ u と v で決まる要素上の点、 $\partial \mathbf{Q}(u, v) / \partial u$ と $\partial \mathbf{Q}(u, v) / \partial v$ は点 Q での接線ベクトルである。 $\angle PCQ > 90^\circ$ の条件(図7)を加えることで、鋭角要素を対象から外し、角部が薄く計算されることを回避することができる。

図8はシリンダーヘッドの設計データに対して適用した結果である。スライドコア間の肉厚値が基準値よりも薄くなっていることが分かる。これにより、この箇所は設計

図6 内接触球計算手法

図7 角部薄肉化回避手法

図8 シリンダーヘッドの設計データへの適用結果

意図を反映したモデルなのか、それともモデリングのミスなのかを俯瞰的に確認することが可能となった。

3.3 リバースエンジニアリング

現物はあるが、設計自体が古く 3D データがないケースでは、現物から外観を測定し、データ化する必要がある。

また、内部構造は切断をして確認をする必要があるが、多くの工数が必要となるとともに、切断してしまうと、変形や応力が開放されてしまうため、後から形状を再確認することが困難となる。

以下では、X 線 CT 装置を用いたリバースエンジニアリングを活用し、排ガス規制等により生産終了となったモデルを改良した事例を紹介する。

旧モデルの SR400 (図9左) は、自動車排出ガス規制により、製造販売ができなくなったため、2017 年に生産終了となった。排ガスの対策をするには、燃料と空気の混合気を燃え残りなく燃焼させるか、触媒で浄化させるかの二つの手法がある。どちらがより効率良く低コストかを検討するために、現状の燃焼状態を見極める必要がある。

このモデルは設計が古く、2D 図面を主体として設計されていたため、燃焼解析など、最新の商品開発プロセスで検討を行うための正式な 3D データが存在しない。この課

図9 旧モデルのSR400とそのシリンダーヘッド

図10 ポート燃焼室のリバースモデルと混合気流れ解析の様子

題を解決する手法として、現物をX線CT装置で撮像し、モデル化を行った。これにより、内外形状をくまなく3Dデータ化し、燃焼解析を素早く行うことができた(図10)。

その結果、デジタルツールが発達していない時代に設計されたエンジンだったが、燃焼室内の混合気均質性や燃焼安定性も良いことが分かった。金型を大幅に変更せずに触媒の対応を行うだけで、排ガス規制をクリアし、商品性を向上させたニューモデルを2018年に発売することができた。

4. 課題と今後の展望

X線CT装置活用における課題は、大きなものを素早く精度良く測定することと、複合材を高精度に撮像し、セグメンテーションを行うことである。

前者について、われわれは製造プロセスにおける品質改革に取り組んでいる。特に寸法検査は、大きな割合を占めており、X線CT装置を用いた大型エンジン部品の寸法検査の実現を目指している。具体的には、国内で製造されている主要な二輪車エンジン部品($\phi 400 \times 200$ (mm)程度)のアルミ部品を1日以内に既存の非接触三次元測定機程度の精度(± 30 (μm))で、寸法、形状、鑄巣、肉厚の検査をすることを理想としている。しかし、現時点ではハードウェアの制約上、大きさ、精度、時間、これらすべてを満足するシステムは存在しない。ハードウェアの進化と、ソフトウェアによる精度向上両面での精度向上に期待する。

後者の複合材については、昨今軽量化や高剛性化を目的

に、新素材を組み合わせる部品の研究開発が進められており、それにとまなう検査の需要も増してきている。異なる材質間の接合状況の観察は、密度の高い材質の方が輝度が高く、断面画像上は明るく写るため、分析と正しい判断が難しい。

既存技術の更なる進化と、画像処理技術の向上で、より難度の高い検査技術の開発を目指している。新たな技術が実用化されれば、世の中に魅力的な商品を早く安く提供ができ、人々に豊かな生活を提供することができるため、われわれも日々新たな技術開発に取り組んでいる。

参考文献

- 1) 公益社団法人自動車技術会：自動車技術，73, 8 (2019) 77.
- 2) FOURIN：世界自動車技術年鑑2017
- 3) 一般社団法人日本自動車工業会：世界自動車統計年報，第18集，(2019) 203.
- 4) 大竹豊：高精度三次元形状スキャンのためのX線CT利用法，非破壊検査，68, 5 (2019) 200-207.
- 5) S. Numata, T. Yashiki and N. Sadaoka: Casting Defects Analysis Making the Best Use of High-Energy X-Ray CT, IMECE2005-80781.
- 6) M. Inui, N. Umezumi, K. Wakasaki and S. Sato: Thickness and clearance visualization based on distance field of 3D objects, Journal of Computational Design and Engineering, 2, 3 (2015) 183-194.

土屋光生

1981年名古屋大学理学部数学科卒業。1981年ヤマハ発動機(株)入社。モビリティ技術本部デジタル開発統括部デジタルエンジニアリング部所属。設計、生産準備にITを活用した生産性向上業務に従事。

有馬健太郎

2013年日本大学理工学部電気工学科卒業。2013年ヤマハ発動機(株)入社。モビリティ技術本部デジタル開発統括部デジタルエンジニアリング部所属。X線CT装置を用いた非破壊検査、計測技術開発に従事。

山口 淳

1991年名古屋大学工学部機械工学科修了。1991年ヤマハ発動機(株)入社。生産技術本部生産技術部所属。製造系デジタルエンジニアリングに従事。

鈴木誠也

1993年京都大学工学部航空工学科卒業。1993年ヤマハ発動機(株)入社。生産技術本部生産技術部所属。製造系CAE技術、計測技術開発に従事。