

論文・解説

31

X線CTスキャナの導入と活用事例の紹介

Introduction of X-Rays CT Scanner and Application Examples

三宅 智史*¹ 村田 充*² 吉田 隆博*³
Tomofumi Miyake Mitsuru Murata Takahiro Yoshida
下山 英昭*⁴ 藤井 博司*⁵ 山下 耕司*⁶
Hideaki Shimoyama Hiroshi Fujii Kouji Yamashita

要 約

マツダでは、MDI (Mazda Digital Innovation) 計画の展開により、3D-CADデータに基づく商品開発が数年前から定着している。試作部門においても3D-CADデータをもとに短期間で試作部品を作り、その品質を瞬時に把握し、設計や製作工程の不良要因の特定を迅速に行うことで品質向上を図っている。

従来から試作鋳造品の品質検査は手作業による直接計測が主で、時間短縮と計測精度の向上が課題であった。また内部形状と鋳造欠陥の検査には必ず切断が必要であり、時間短縮と非破壊での内部品質の保証が大きな課題であった。これらに対し最適なツールとしてX線CT (Computed Tomography) スキャナに着目し導入した。従来から非接触非破壊で断層像を得るCTスキャナ技術はあったが、本装置の最大の特徴である高速連続撮影機能及び、製品内外部を高精度で計測し瞬時に立体画像化する機能は、業界初の技術といえる。

本装置を試作鋳造領域に活用した結果、(1)鋳造品の検査期間短縮、(2)鋳造品の確実な品質保証、を実現した。本稿ではX線CTスキャナの導入目的・装置概要・活用事例について報告する。

Summary

Mazda started to implement product development based on 3D CAD data by MDI (Mazda Digital Innovation) plan several years ago. Prototype Fabrication Dept. has been achieving quality improvement with 3D CAD data by fabricating prototype parts, grasping their quality, and diagnosing the cause of defects of an engineering or production process in a short period.

Our conventional quality inspection, which usually used manual direct measurement, had problems such as time-consuming measurement and low measurement accuracy. In particular, it was difficult to realize shorter prototype periods and positive quality assurance of proper internal shapes and no casting defects, because the quality inspection of the internal shapes of casting parts and the casting defect examination always require cutting inspection. In order to address these problems, we, having focused on X-rays CT (Computed Tomography) scanners that can take a single tomogram without destruction and contact as optimum tools have adopted the scanner this time. Our scanner is capable of high-speed serial radiography, highly precise measurement of product inside and outside, and prompt 3D image production, which has enabled us to be the first to have practicable CT scanner technology in the auto industry though the CT technology itself is previously known.

The result of the utilization of this scanner in a prototype casting area has made us achieve the following: (1) Shorter inspection period for prototype casting parts (2) Positive quality assurance of prototype casting parts. This paper makes a report of purpose of adoption and outline of the X-rays CT scanner and application examples.

*1~4, 6 試作部
Prototype Fabrication Dept.

*5 プロセスリエンジニアリング部
Process Re-Engineering Dept.

1. はじめに

マツダではMDI計画の展開により、3D-CADデータを活用した商品開発が定着している。試作鋳造工程においても3D-CADデータを活用した「試作期間短縮」と「試作品質の向上」が急務となっている。これまで製造条件設定・木型製作・鋳造の各工程では、これらを実現させるべく種々の工程革新を行ってきた。具体的には、最適な鋳造条件を効率よく得るための「鋳造CAEシステム」、また木型製作期間短縮のために「3D-CADシステム(I-DEAS)」「高速NCフライス」、鋳造品質安定化として「自動注湯マシン」がある。

一方、品質保証の要となる試作鋳造検査工程では従来からのハイトゲージを使った手作業による外観寸法検査と切断による内部品質確認を行っており、検査期間短縮と品質保証の充実が試作鋳造MDI計画の残課題であった。

この課題に対する最適な検査装置としてX線CTスキャナを導入し検査工程の革新に取り組んだ。以下にその概要と活用事例を報告する。

2. X線CTスキャナの導入目的

2.1 検査工程の革新

(1) 従来工程の課題

鋳造品の検査は、木型及び製造条件が図面要求を満足しているかを検証するトライアル鋳造検査と本生産時の払い出し検査となっている。

エンジンの中でも代表的な鋳造部品であるシリンダブロックを例に説明する。検査項目の主なものとして形状寸法・鋳造欠陥・機械的性質・気密性等があるが、中でも特に重要な内外形状と鋳造欠陥の検査について述べる。

Fig.1にトライアル鋳造検査の手順を示す。

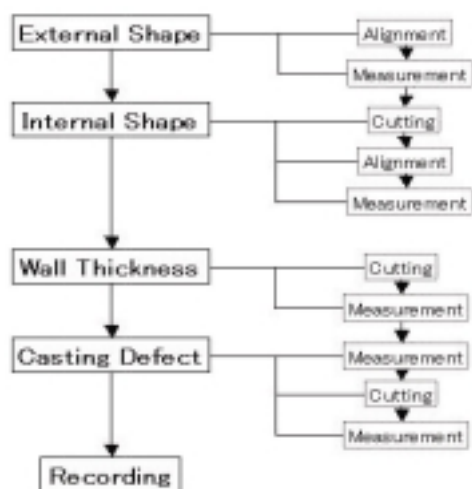


Fig.1 Inspection Process

シリンダブロックの検査部位は外部から目視できる外観形状と切断しないと目視できない内部形状に分けられる

(Fig.2)。検査手順は最初に外観形状検査を行い、次に内部を切断しながら形状・肉厚と鋳造欠陥の検査を行う。

また、払い出し検査では、図面要求の基本的な管理特性を全数検査し、内部鋳造欠陥については抜き取りによる切断検査を行う。以下に具体的な検査作業と課題を述べる。

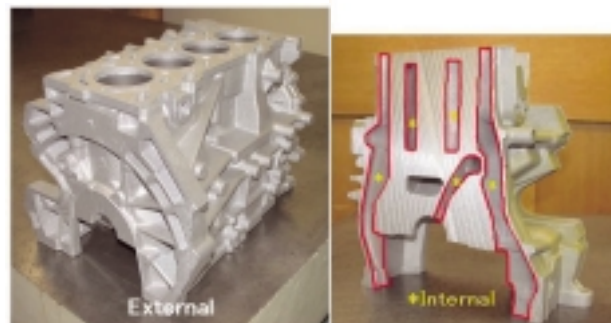


Fig.2 Shape of Block-Cylinder

1) 形状検査

二次元図面又は3D設計データからボス・リブ・フランジ等の形状要素と寸法値を読み取り、定盤とハイトゲージを用いて外観形状の検査（以下、野書）を行う。

次に内部形状は、設計図面に指示してある断面に従って切断し外観形状と同様の野書作業を行う（Fig.3）。しかし、鋳造品には凝固収縮時に残留応力を発生していることが多く、切断と同時に応力が開放され断面形状が変形し切断前の形状どおりに検査できない問題があり、非破壊検査の実現が課題であった。また設計図面の寸法読み取りから野書作業までの全てを手作業で行っているため、検査時間が非常に長く、ヒューマンエラーによる誤検査もあり、検査の自動化が課題であった。

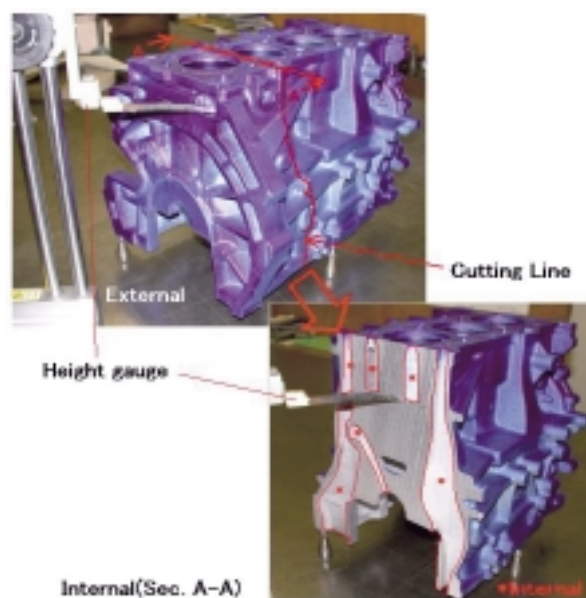


Fig.3 Inspection of Block-Cylinder

2) 鋳造欠陥検査

鋳造品を切断し、断面を目視することで鋳造欠陥検査を行っていた。しかし、この方法では全ての部位の確認には時間がかかり過ぎるため、代表的な断面しか検査することができず、全部位の内部品質保証を行うことが課題であった。Fig.4に同一鋳造品の切断断面を更に2mm削ることで鋳造欠陥が出現した例を示す。また、払い出し検査では抜き取りの切断検査であったため、後工程である機械加工後に鋳造欠陥が発見され不良品が発生する問題もあった。

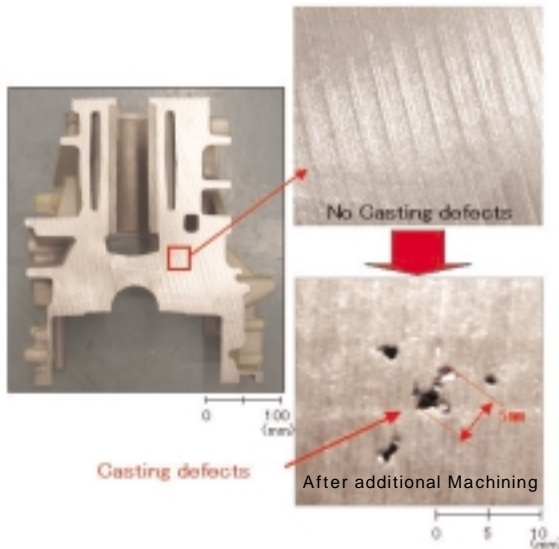


Fig.4 Casting Defect

以上のことから、従来の検査工程の問題点をまとめると次の2点となる。

- ① 検査期間が長い
- ② 品質保証範囲が不十分

(2) 革新工程とツール

検査工程の革新として検査期間を短縮するとともに、後工程に不良品を流出させないように確実な品質保証を行うことを目標とした。そのための具体的な要件は以下の5つである。

- ① 手作業野書及び切断作業を廃止し3Dデータをフル活用した検査の自動化の実現
- ② 砂型造型などの工程ごとの品質保証の強化
- ③ トライアル鋳造段階での品質ばらつきも加味した品質保証と作りこみ
- ④ 非破壊によって内部品質を保証した上での後工程払い出しの実現
- ⑤ 検査結果をデジタルデータとして管理し関係者閲覧を可能にする

これらを受けて、測定機に求められる要件を検討した結果以下の3つとなった。

- ① 非破壊での形状計測が可能
- ② 自動機による高速形状計測が可能
- ③ 3D-CADデータを用いた検査が可能

その最適なツールとして「X線CTスキャナ」を選択した。

2.2 試作鋳造検査への適用

トライアル鋳造段階では意図的に製造条件を変化させた鋳造品を作り、品質のばらつきも考慮した品質保証を行う。また払い出し検査ではトライアル鋳造段階の品質結果を加味して寸法や鋳造欠陥検査を実施し、確実な品質保証を実現させる。そのためには従来に比べ検査ボリュームは増加するが、CTスキャナの高速撮影能力により大幅に短い期間で品質保証を実現させることができた。

2.3 試作鋳造工程への適用

鋳造品完成までには木型・砂型・鋳造品と数回の形状転写工程があり、そのたびに転写誤差が発生している。従来は最終の鋳造品検査工程のみで良否判定を行っており、工程ごとの品質把握が不足していたため、不具合の起因工程を特定できなかった。特に砂型造型工程やそれを組み合わせるアッセンブリ工程では外部からの計測が困難であり、工程内の品質把握が課題であった。

そこでX線CTスキャナを活用し、従来未保証の項目を工程内で品質把握できるように変革した。具体的には砂型では寸法・内部充填率、アッセンブリ工程では組み合わせ寸法を管理し、完成した鋳造品と製造工程との因果関係を解明することで、品質向上とコストダウンを実現した。

2.4 試作鋳造工程以外への適用

X線CTスキャナの特徴として、非破壊・非接触による立体形状計測と内部密度計測がある。この機能を活かし、開発領域では熱・応力等の解析用3Dモデルの作成や市場不具合品・実験評価品の内部調査に適用する。また生産領域では試作鋳造と同様に量産準備段階の鋳造品育成に適用し、業務効率と品質向上を目指す。

3. X線CTスキャナの概要

3.1 X線CTスキャナの原理

X線CTスキャナは、X線が物質を透過する性質を利用して被検体を透過したX線透過量の差異を検出することで密度分布を計測する技術である。透過量は、X線の強度・物質の構成元素・密度・透過厚さにより異なる。導入したX線CTスキャナは、X線を発生させるX線源装置と透過量を検出するX線検出装置の間に測定物を回転させるスキャナ装置が配置され、測定物が360°回転した際の透過量データに画像処理演算を施すことで断層像が生成される。実際の断層像ではX線が通りにくい鉄のような部位は白くX線が通りやすい空気などは黒く表示される。システム図をFig.5、ターボチャージャの断層画像をFig.6に示す。

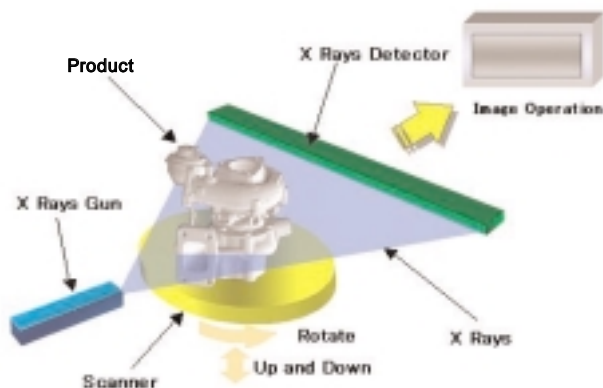


Fig.5 Principle of CT Scanning Machine

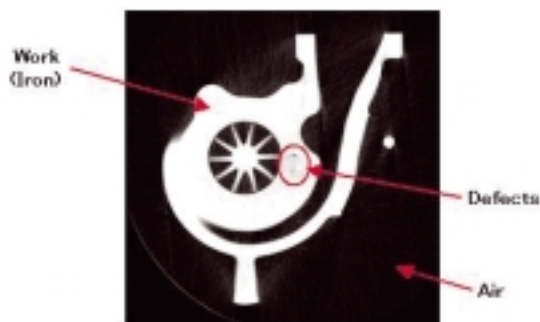


Fig.6 CT Image for Section

3.2 各装置と仕様

X線CTスキャナは、5つの装置から構成されており、各機能を以下に述べる。X線遮蔽コンテナの扉側からの外観をFig.7に示す。

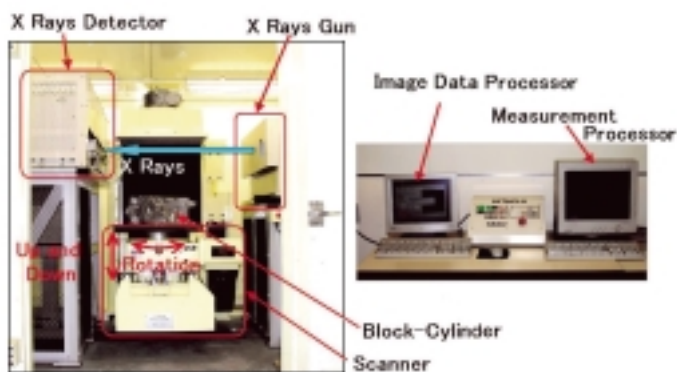


Fig.7 Outside View of CT Scanning Machine

(1) X線源装置 (X Rays Gun)

鮮明な画像を得るために、高出力X線源として電子線形加速器を使用しており、X線形状広がり 40° の扇状ビームである。

(2) X線検出装置 (X Rays Detector)

測定物を通過したX線透過強度を数百個のセンサーで検出する。

(3) スキャナ装置 (Scanner)

測定物を回転及び昇降させて断層位置と位相を制御する。

(4) 画像処理装置 (Image Data Processor)

検出器からの出力データにスキャナ装置の回転角度を加味して画像処理演算を施し、断層像を生成する。

(5) 形状計測装置 (Measurement Processor)

断層像を多数積層することで3Dデータを生成し、設計3Dデータを変換したSTL (Stereo Lithography) データと比較することで、内外部の形状と鑄造欠陥を自動計測する。X線CTスキャナの仕様をTable 1に示す。

また本設備の特徴として測定物のセット方法はターンテーブルの任意の位置に載せてクランプするだけで容易に行えるものであり、非常に短時間でセットが可能である。

Table1 Specification of CT Scanning Machine

Max. Work Size	$\phi 600 \times 600$ Height mm 250kg
Precision of Dimension	± 0.2 mm
Detective Capacity of Casting Defect	$\phi 1.5$ mm (Min.)---Automatic
Max. Size of X Ray Penetration	Iron: 130mm Aluminum: 340mm Plastic: 750mm
Measurement Time	20sec./ 1 section

4. 活用事例

4.1 鑄造品の形状検査

外観形状はもちろんのこと、計測した3Dデータを任意の位置でスライスすることで、内部形状の計測も非破壊で非常に容易かつ短期間で行うことができた。シリンダブロックでの形状検査の出力結果をFig.8に示す。

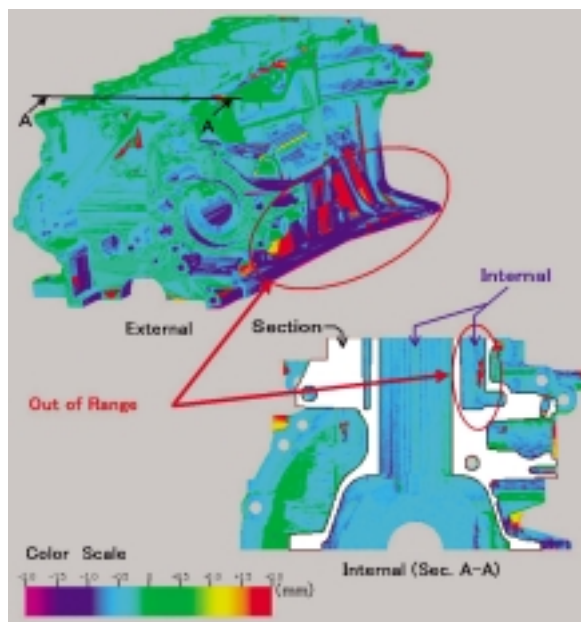


Fig.8 3D Measurement

立体形状全体で視覚的に表示できるため、形状不良の傾向が容易に把握でき、各工程関係者による不具合原因究明や対策決定の業務効率が大幅に向上した。また計測作業のほとんどが自動運転であり、他の検査との並行作業も可能となった。計測時間は従来法の約1/10であり、目標の検査期間短縮を達成した。外観計測の結果 (Fig.8) を見ると、右側下部がマイナス傾向になっており、右外側の砂鋳型が内側へ倒れる変形をしていることが分かる。また、断面A-A部でのCTデータのスライス結果も部分的に内部形状が砂型変形等により公差外れになっていることが分かる。

4.2 鋳造品の内部欠陥検出

設計3DデータとCTデータの差分比較することで、内部欠陥の発生位置と大きさが視覚的かつ容易に把握できるようになり業務効率も大幅に向上した。また鋳造方案の部位 (ゲート・押し湯等) も含めた計測も可能であり、鋳造方案と内部欠陥の関係も非破壊で把握できる。

排気マニホールドの内部欠陥検査の出力結果をFig.9に示す。内部欠陥の発生部位と大きさはCT立体像に赤色で表示されるため、部位と大きさが容易に把握できるようになった。また、欠陥部位のCT立体像をスライスすることで欠陥の内部状況も確認できる。実体品の同一断面を切断すると、同等の欠陥があることが分かる。

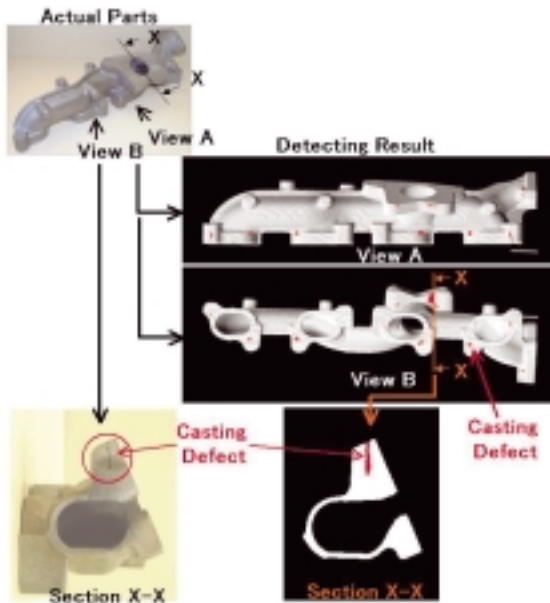


Fig.9 Detection of Casting Defects

4.3 試作鋳造工程内の品質確認

(1) 砂鋳型充填率

鋳造品質に影響する砂型の充填率把握は砂型から試験片を切り出しその重量で評価していた。そのため、測定部位が限定されることと、測定時間が長くなる問題があった。しかし、X線CTスキャナによる密度評価機能を用いると、断層像をカラーマッピングすることで、従来法の約1/10

の時間で砂型全体の密度分布を色分けして視覚的に把握できる。また、密度評価後はその砂型を鋳造に使用可能であり、前もって砂型品質を把握した上で鋳造品の評価を行うことが可能となった。ディスクプレート砂型の充填率評価に適用した事例をFig.10に示す。緑色から青色へ変化するに従い低充填率であることを示しており、充填不良部位を容易に把握できる。この測定データは砂型造型CAEの条件設定と鋳造品質向上に活用している。

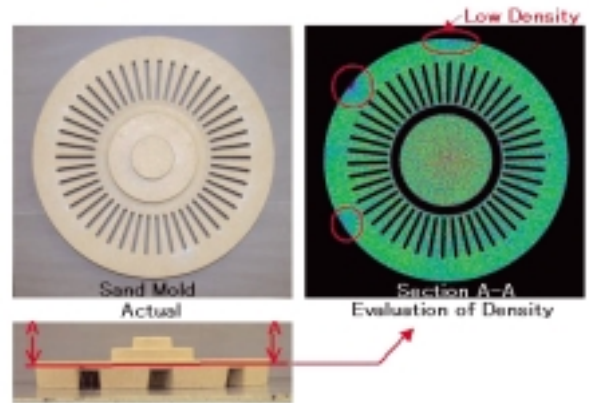


Fig.10 Density Inspection of Sand Mold

(2) 砂型のアッセンブリ状態確認

試作鋳造工程では、砂型を組み合わせその中に溶けた金属を流し込む鋳造工法を用いている。しかし、砂型は変形しやすい性質があり、組み合わせた時の内部クリアランスの保証が課題となっていた。主にトライアル鋳造段階では砂型を組み合わせた後の内部クリアランスを確認することで、確実な寸法品質の作りこみを実現させた。

シリンダヘッドの砂型アッセンブリ状態を評価した事例をFig.11に示す。8つの砂型から構成されており、製品の肉厚になる部位や砂型を固定する部位の寸法を確認した結果、A部分には隙間が生じ砂型の押さえ状態が悪くなっていることが容易に分かり、原因究明と修正を行った上で注湯工程へ流すことが可能となった。

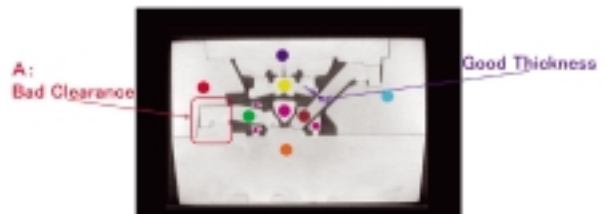


Fig.11 Clearance Inspection of Sand Package

4.4 解析用3Dモデルの作成 (試作以外への適用)

市場不具合品や衝突実験後のCADデータのない実体品にCAE解析やラピッドプロトタイプによる擬似品製作などを行うためには3Dモデルが必要である。従来は接触式の

多点計測を膨大な時間をかけて行っていた。また切断を伴う内部形状については測定データのずれが発生し、高精度の3Dデータを得ることが困難であった。よって短期間かつ非破壊での3Dモデル生成が課題となっていた。

シリンダブロックでのCAE構造解析へ適用した事例をFig.12に示す。実体品をX線CTスキャナで計測し3D化したCTデータをSTLデータに変換し構造解析を行った。従来はシリンダブロック程度の複雑形状になるとCAE解析に使用可能なデータを作成するのに数ヶ月も要していたが、X線CTスキャナを用いると約1週間の短期間で実現することができ、開発効率を大幅に向上させた。

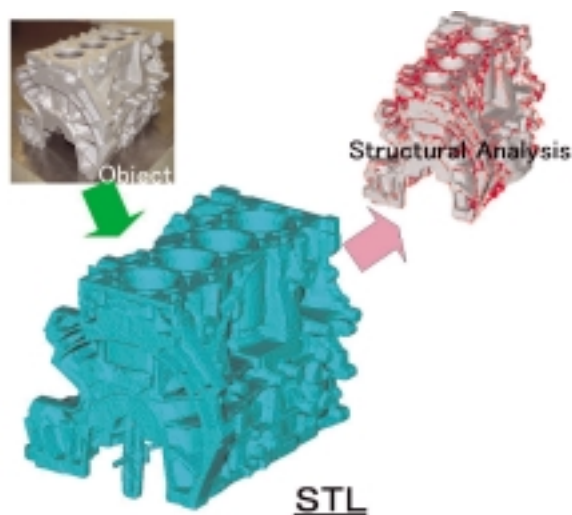


Fig.12 CAE Evaluation for Block-Cylinder

5. まとめ

以上、述べたようにX線CTスキャナを試作鋳造品の検査工程の革新に適用してきたが、以下にその効果をまとめる。

(1) 試作期間の短縮

X線CTスキャナの適用効果によりトライアル鋳造期間を従来の17日から13日に短縮することができた。本効果も含め、木型製作から鋳造品完成までのリードタイムを43日から22日に半減し、目標を達成することができた。Fig.13に試作期間短縮の内訳を示す。

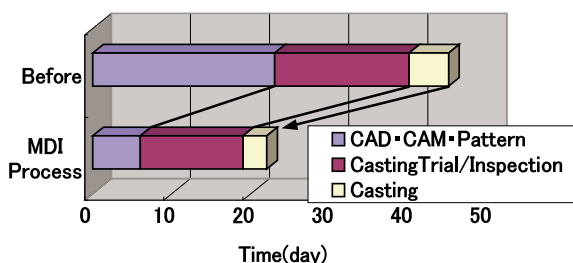


Fig.13 Innovation of Prototype Period

(2) 試作鋳造品の品質向上

鋳造工程内においてX線CTスキャナは各工程の有効な品質確認ツールとなり、それらの検査結果を冒頭で述べた鋳造CAEへフィードバックすることで、より高い精度の鋳造条件の設定ができるようになった。また、後工程への払い出し検査に活用して、後工程不良率を大幅に削減できた。

6. おわりに

鋳造業界の最大の悩みは内部品質の確認を非破壊状態で十分に行えないことであった。これを非破壊でかつ瞬時に品質確認できるようになったことはまさに、画期的なことであり、鋳造業界における品質保証革新といえる。試作鋳造領域のみならず、開発及び量産準備工程の中にもX線CTスキャナの適用を組み込み、業務効率向上に寄与させる考えである。最後に、X線CTスキャナの導入にあたりご尽力を頂いた株式会社日立製作所殿に敬意を表す。

参考文献

- (1) 原口恵次：産業用X線CTとそのデジタルエンジニアリングへの適用，日立評論，83巻，2号，p.55-56 (2001)

著者



三宅智史



村田 充



吉田隆博



下山英昭



藤井博司



山下耕司