

論文・解説

# 10 SKYACTIV-X を実現するシリンダーヘッド寸法の高精度化

## Improving Accuracy of Cylinder Head Dimension to Realize Skyactiv-X

梅原 美友<sup>\*1</sup> 米澤 英樹<sup>\*2</sup> 丸尾 幸治<sup>\*3</sup>  
Yoshitomo Umehara Hideki Yonezawa Koji Maruo  
末永 啓太<sup>\*4</sup>  
Keita Suenaga

### 要約

マツダのブランドエッセンスである「走る歓び」を実現するために、エンジン性能に寄与する複雑な製品形状を高精度に成形することは極めて重要である。しかし、シリンダーヘッド素形材（アルミ casting で成形した铸件）の casting に用いる薄肉砂型は熱影響による変形が大きく、製品形状成形の難易度が高い。素形材の寸法精度を高めるためには、この変形を抑制し、最低限の変形を見込んだ寸法であらかじめ金型を補正しておく必要があるが、そのためには変形を精度よく予測する技術が必要である。そこで、砂型熱変形の発生メカニズムを明らかにし、実態計測に基づく変形モデルの深化により、高精度な変形予測技術を確立した。

今回、この技術を用いて、製品開発初期段階において、砂型の熱変形を抑制する鑄型構造及び寸法補正を設計するモデルベース開発プロセスを構築した。SKYACTIV-X シリンダーヘッドの量産準備（生産技術領域での量産に向けた、製品機能と生産性を向上させるために、製品形状や生産条件の検討・最適化、及び設備や金型を準備）にこれを適用することで、製品機能と生産性の両立を果たしたので、本稿ではこの取り組みについて報告する。

### Summary

For the realization of “Celebrate Driving”, Mazda’s brand essence, it is extremely important to perform high-precision molding of the complicated product shape which contributes to engine performance. Molding the product shape precisely, however, is not easy because a thin sand mold which is used for casting the cylinder head material is easily deformed by heat. To improve dimensional accuracy of the material, we need to suppress deformation and prepare a modified die with the expected dimension including minimum deformation. To achieve that, a technique to measure deformation precisely is required. Then we revealed an outbreak mechanism of heat deformation in the sand mold, improved the deformed model based on measured values and established a high-precision deformation prediction technology.

We established a mold structure to suppress deformation by the heat and a model base development process which designs dimension correction in the initial stage of product development by using this technology. We achieved both functionality and productivity by adopting them to production preparation of Skyactiv-X cylinder head. This paper reports our activities.

**Key words :** production • manufacture, formed and fabricated materials, casting/forging/assembly/painting/rig/trim, die/mold, design/prototyping, APMC, MBD, In-Process-Out, CAE

### 1. はじめに

技術本部では、モノ造り革新を圧倒的に進化させ、お客様の期待を超える価値をミニマムコストで提供し、ビ

ジネス効率を最大化することを、部門方針に掲げている。新開発した SKYACTIV-X のシリンダーヘッド（以下 C/H）における、成形難易度の高いウォータージャケット（以下 W/J）について、製品機能（=お客様価値）を高効率

\*1~4 パワートレイン技術部

Powertrain Production Engineering Dept.

(=ミニマムコスト) で実現するために、新規のモデルベース開発 (以下 MBD (Model Based Development)) 技術を開発し、適用した。

## 2. SKYACTIV-X 実現の重要課題

走る歓びと環境性能を両立する上でエンジンの役割は大きく、出力特性と燃費を高い次元で両立することが求められる。

Fig. 1 に示すように、C/H は燃焼時の火炎伝ばを制御する燃焼室や吸排気の空気の流れを制御するポート、燃焼熱を冷却する水流れを制御する W/J を組み込んでおり、動力性能や燃費に大きく寄与するエンジンの主要部品である。

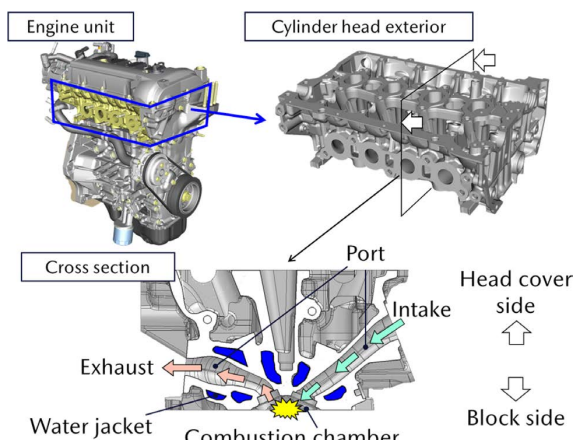


Fig. 1 Outline of Cylinder Head

SKYACTIV-X は、火花点火制御圧縮着火：Spark Controlled Compression Ignition (SPCCI) により、ガソリンエンジンとして世界で初めて圧縮着火を採用することで、走る歓びと環境性能を両立した。圧縮着火を安定的に行う上で重要な要素の 1 つが燃焼室内の緻密な温度制御であり、Fig. 2 に示すように、SKYACTIV-X の W/J はこれまでにない狭小かつ複雑な形状となっている。SKYACTIV-X を実現するためには、この複雑な W/J を高い寸法精度で成形することが極めて重要な課題であった。

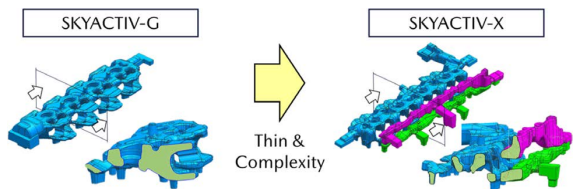


Fig. 2 Water Jacket Sand Mold

## 3. SKYACTIV-X を実現するプロセス革新

従来、モノ造り (製品開発) の進め方は Fig. 3 に示すように、実機を中心とした摺合せ型の開発であり、自部門のアウトプットが後工程部門のインプットになるような、バトンリレー式の直列フローが一般的である。この

方式は確実に進めれば無駄が発生しにくいですが、最終的な不具合は大きな手戻りを生じる。

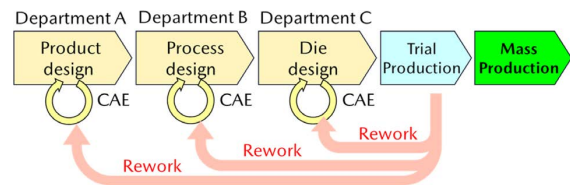


Fig. 3 Conventional Manufacturing Flow

そこで、製品設計の初期段階から関係する全ての部門が「モデル」による摺合せ開発を行う方法を目指している (Fig. 4)。例えば、残留応力モデルによる生産性の CAE 検証により、工程や金型を同時に最適化しながら、その CAE 結果を開発部門と共有して製品機能の CAE 検証にも活用し、予想されるさまざまな問題を未然に防止するやり方である。ここでいう「モデル」とは机上で再現したい現象を IPO (Input-Process-Output) や相関式で明確化して机上検証可能なツール化したものをいい、いわゆる CAD で使う 3D モデルとは一線を画すものである。また、複雑なモデルの計算は、システム化した CAE ツールで解く。

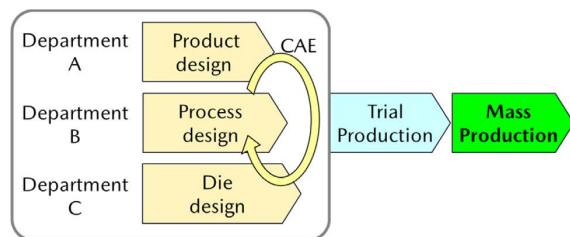


Fig. 4 Manufacturing Flow with a Focus on MBD

この机上検証を基軸として従来の限界を突破しようとする「モノ造り」を MBD と定義して、全社的に展開しようとしている。

## 4. シリンダーヘッド寸法のモデルベース開発

弊社では C/H を Advanced Precision Mazda Casting (以下 APMC) 工法で鋳造している (Fig. 5)。この工法は、全ての鋳型を砂型 (以下中子) で構成した製品形状自由度の高い、コスワース鋳造法を発展させたものである。その特徴はコスワース鋳造法に加え、中子の一部を金型化することで急冷凝固による緻密な鋳造組織を得るとともに、シャワー冷却による焼き入れ効果を取り入れて熱処理レスを実現している点にある。これにより、機械的性質を向上しながら薄肉形状を成形可能としている。

APMC 工法における MBD 技術マップを Fig. 6 に示す。これはモデル化すべき道筋を、長期的な商品動向をも見据えてまとめたものである。実用化したものを青色、開発中のものを黄色、開発予定のものを赤色で示している。

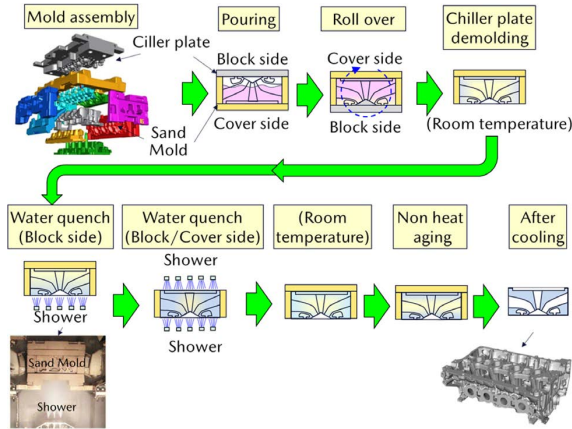


Fig. 5 APMC Process Flow

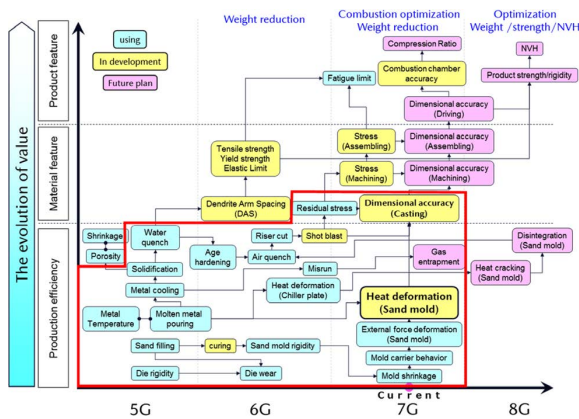


Fig. 6 Technology Roadmap for MBD (APMC)

これまで、生産効率を高める項目から着実にモデル化・実用化し、手戻りのない量産準備を行っている。将来的には、製品機能モデルなどに生産モデルを組み合わせて、更なる製品機能向上までを視野に入れて活動を進めていく。その中でC/H 素材寸法モデルは Fig. 6 の赤枠内の右上に位置し、中子熱変形モデルやアルミ残留応力モデルなどつながっている。

Fig. 7 は、C/H 素材寸法モデルを簡略した IPO で整理したものである。最終的な C/H 寸法を CAE で正確に予測するためには、各工程の寸法を正しく計算し、つないでいく必要がある。本稿では、赤枠で示す中子熱変形モデルの事例を報告する。

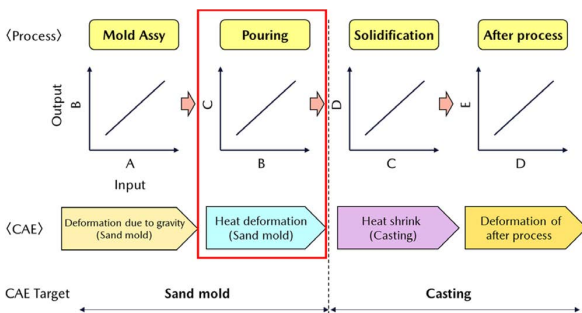


Fig. 7 Cylinder Head Casting Dimension In-Process-Out

### 5. シリンダーヘッド素材寸法の課題

中子熱変形とは高温の溶湯の熱影響により中子が局部的に大きく変形する現象である。素材の寸法精度を高めるには、この熱変形の方法や量を予測し、その結果を基にまず変形を抑制し、抑制しきれない変形量のみ金型を補正する必要がある。従来は、類似機種の実績を参考に変形を見込んだ補正を金型に織込んでいた。そして、試作铸造した結果を基に寸法規格外れ、あるいは工程能力を満足しない懸念があると判断した箇所に補正を追加していた。これらの結果、金型修正にかかる費用や期間のロスが発生していた。そのため、SKYACTIV-X のような全く新しい形状の場合、類似の変形が見込めず寸法規格外れ箇所が増加し、金型修正ロスが膨大になる。また、そもそも変形を抑制する方法を見出せないため、過大な変形を金型補正だけでは対応できず製品形状を成形できないといった、2つの大きな問題が発生する。これらの問題を回避するためには、製品設計の初期段階において、生産モデルを用いた机上検証で変形予測と抑制効果確認を行い、それらの結果を金型へ織込む、つまり MBD へと量産準備のやり方を進化させる必要がある。

APMC 工法における中子熱変形のメカニズムを Fig. 8 に示す。中子は、製品形状を成形する部位（以下形状部）と各中子の位置決め構造（以下中木）で構成されている。アルミ溶湯を充填すると、形状部が溶湯からの熱を受けて W/J 中子全体の温度が上昇する。そして、W/J 中子は温度上昇に伴い熱膨張するとともに強度低下を生じる。W/J 中子は中木で拘束されるため、自由膨張することが出来ず、熱膨張により生じた反力や浮力の影響を受けて変形する。特に薄肉 W/J 中子は断面積に対して表面積が大きいいため、内部まで高温となる。このため、熱膨張量が大きく、大きな変形を生じる。

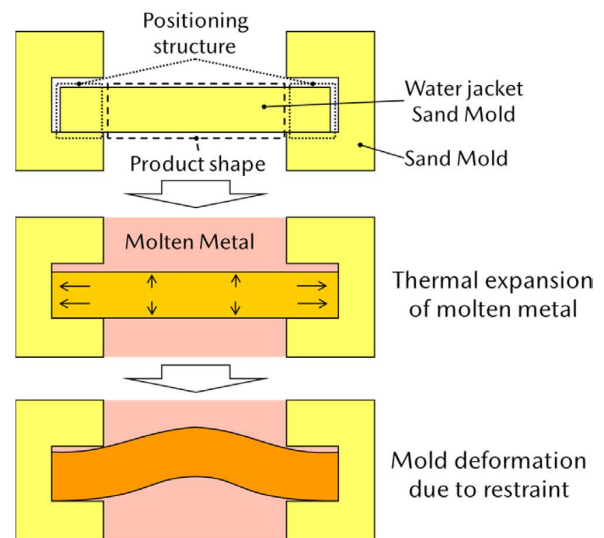


Fig. 8 Mechanism of Sand Mold Heat Deformation

## 6. 実態計測に基づいたモデルの深化

中子熱変形モデルの構築に向け、実態計測に基づいたメカニズム解明から、熱変形の制御因子（物性値、中子拘束などの境界条件等）と誤差因子（雰囲気温度、中子初期温度等）を鑄造の工程ごとに網羅的に洗い出し、IPOとともに整理した。

CAEは、この制御因子や誤差因子のパラメータを計算しながら、実際の生産と同様に、各工程の計算結果を次工程の初期値につないで最終結果を得る。中子熱変形モデルのCAEは、上述のメカニズムから、中子各部位の熱膨張と反力を正確に計算するためのパラメータ設定が重要である。

中子熱変形モデルの深化に向け、以下の2点に注力した。

### 6.1 実態に則した物性値の取得

1つ目は実態に則した各種物性値の取得である。中子熱変形において特に重要な物性値は、熱伝導率と各温度域の強度である。従来のCAEにおいて、中子の熱伝導率は重量比で98%以上を占める砂単体の熱伝導率を採用していた。しかしながら、中子は結合剤に包まれた砂の集合体であり、砂単体の熱伝導率とは相違している。すなわち、砂単体では内部熱伝導現象のみを扱えばよいのに対し、中子は砂粒間の結合剤を介した熱伝達を伴う伝熱特性として把握する必要がある。そこで、中子の熱伝導率を測定した結果、従来採用していた砂単体の値に対して、大幅に小さいことが分かった。これは、上述したように砂単体での熱伝導現象に対し、中子では砂粒間の結合剤を介した点接触による熱伝達現象であるため、見かけの熱伝導率としては非常に小さな値となったと考えられる。

中子の各温度域の強度測定において、外注した中子単体の計測方法では200℃以上になると結合剤が軟化して中子が崩壊するため、測定できない問題が発生した。しかし、量産で鑄造した後の中子を調査すると強度が残っていることがわかった。そこで、結合剤である樹脂の温度による状態変化を調査したところ、酸素と反応して発生した水による軟化やその蒸発による硬化、及び分子結合の分断による崩壊と、温度域によって変化することを突き止めた。また、W/J中子は鑄造時にアルミ溶湯で鑄包まれるため、酸素供給が少ないことから、鑄造状態を再現したFig. 9に示す実験計測方法を考案した。その結果、常温から500℃まで50℃ごとの強度を取得するとともに、結合剤樹脂の各温度域の状態により強度が増減する特性も確認できた。

取得した各物性値の確からしさは、簡単な形状のテストピースを用いた実験とCAEの比較結果で確認している。

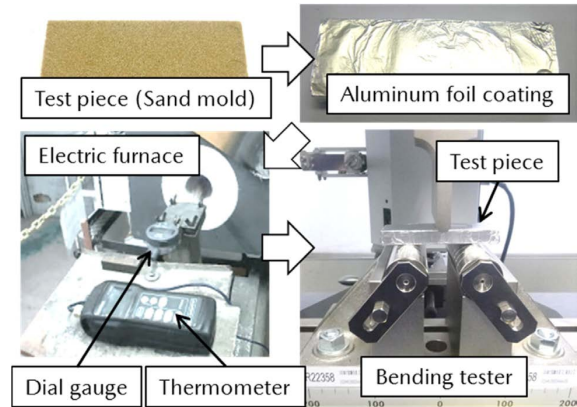


Fig. 9 Bending Test

### 6.2 実態に則した拘束条件の織り込み

2つ目は実態に則した拘束条件の織り込みである。APMC工法では複数の中子と金型を組み合わせることで鑄型を構成している（以下、中子が組み合わされた鑄型をサンドパッケージと呼称する）。サンドパッケージは複数の搬送工程を経た後、溶湯充填を行う鑄造機中で把持される。各中子間には金型製作時の製作公差や中子造形時のバラツキを考慮して、位置決めや干渉回避など、目的別のクリアランスが設けられている。そのため、鑄型に外力が加わる工程では、クリアランスに変化が生じる可能性がある。そこで、量産各工程における中子の変位を連続測定し、クリアランスの値の変化を明確にした。Fig. 10に中子変位の測定装置を示す。サンドパッケージ内部に設置したダイヤルゲージを、小型カメラで撮影することで連続的に測定している。この中子挙動の測定結果から、サンドパッケージクランプによるクリアランス変化のメカニズムを解明し、巾木部の拘束条件の変化として中子熱変形モデルに織込んだ。

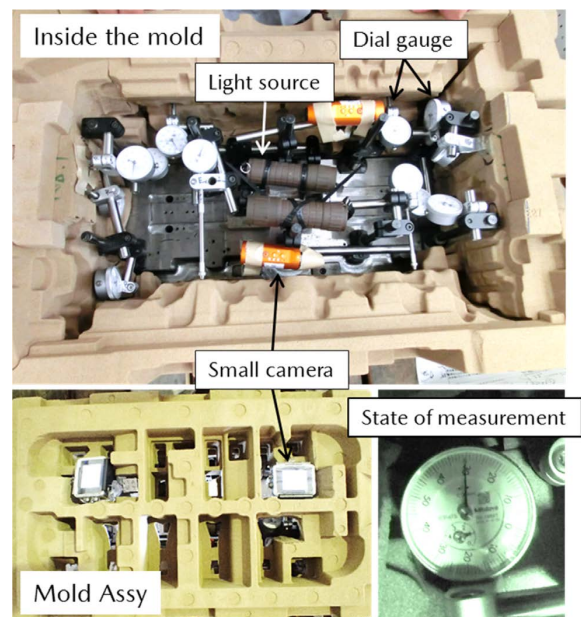


Fig. 10 Sand Mold Behavior Measurement

### 6.3 モデル改善効果

W/Jの中子熱変形解析結果と実铸造したC/HのW/J部の寸法測定結果との比較をFig. 11に示す。中子熱変形モデルの最適化には、これまで量産導入した中で一番変形が大きい機種種のW/J中子を用いた。物性値とクリアランスを織込んだ改善モデルは、実測の曲線傾向と近似しており、整合している。活動開始時の整合率21%に対し、改善の結果、整合率を80%以上に高めることができ、実用的なモデル精度を確保できた。

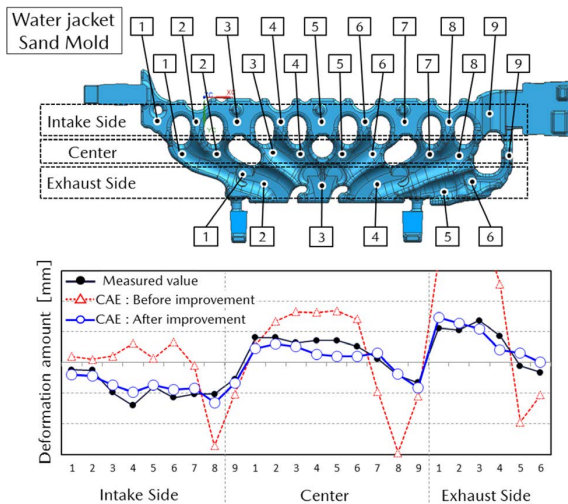


Fig. 11 Analysis Precision

なお、寸法規格の $\pm 0.8\text{mm}$ 以内に一発で収め、かつ量産での寸法変動を考慮し、予実差 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内を整合の条件と定義し、整合率80%以上を目標として設定している。

### 7. モデルを活用した変形対策の立案・織り込み

構築した中子熱変形モデルのCAE検証で、SKYACTIV-XのW/J変形を予測するとともに、変形を抑制する鋳型構造を開発した。その結果をFig. 12に示す。従来の鋳型構造では、XYZそれぞれの方向に大きく変形しており、最大で $1.6\text{mm}$ 変形している。変形を抑制する考え方として、熱膨張は物理現象として不可避であることから、拘束を制御する因子である中子クリアランスと中子支持位置の最適化を検討した。結果、Fig. 12のMBDに示すように製品中央部の巾木はXYZ方向を固定し、両端はYZ方向を支持してX方向にクリアランスを設け自由膨張させる仕様が、最も変形量が少なくなること導き出した。これにより、熱膨張量分を中子全体の拡縮補正で簡便に制御が可能になる。この構造によりYZ方向の変形を $0.1\text{mm}$ に抑制できた。

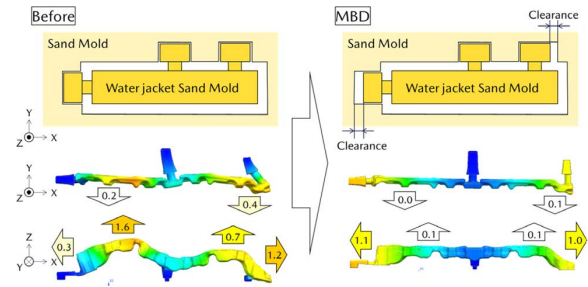


Fig. 12 Optimization of Mold Structure by MBD

## 8. 成果

これまで実機のトライ&エラーで達成していたW/J寸法を、中子熱変形MBDを適用した結果、前例のないSKYACTIV-XのW/J形状を寸法規格 $\pm 0.8\text{mm}$ 以内に対し、予実差 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内の整合率90%を達成し、実機寸法を $\pm 0.5\text{mm}$ 以内で成形できた。SKYACTIV-Xの製品機能を実現しつつ、W/J寸法の金型修正レスを達成できたことで、Fig. 13に示す金型準備期間を22%、金型投資を19%削減した。

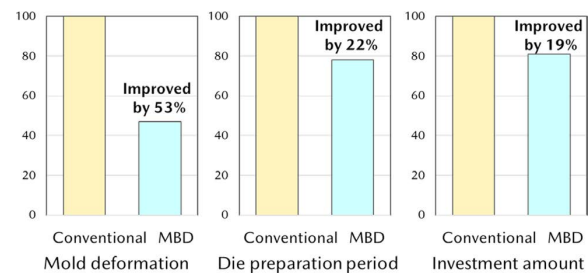


Fig. 13 Conclusion of MBD

## 9. おわりに

今回、中子熱変形を対象としたモデルベース開発プロセス構築に挑戦し、SKYACTIV-Xシリンダーヘッドでは製品機能と生産性を両立させるブレークスルーを実現できた。MBDにおいて中核をなすのは「モデル」と「CAE」であるが、モデル構築にあたっては「実現象を正確かつ詳細に把握し、整理すること」がスタートであり、最も重要であることを再認識できた。

また、素材寸法全体を予測する上で、中子熱変形後の現象である素材熱収縮変形や後処理工程のモデル化も必要であり、現在取り組んでいる。将来的には、加工・組立プロセスも含めて、製品性能をMBDで評価・最適化し、さらなる製品機能の向上を目指していく所存である。

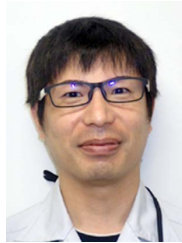
今後も、全てのステークホルダーへ笑顔を届けられるクルマ造りに向けて、技術への挑戦を続けていきます。

この論文は(株)日刊工業新聞社 型技術 2020年6月号に投稿した内容に追記・転載したものです。

■著者■



梅原 美友



米澤 英樹



丸尾 幸治



末永 啓太