

論文・解説

## 12 魂動デザインを実現する高精度高効率金型製作プロセスへの革新 Process Innovation Aimed at High-Precision, High-Efficiency Production of Mold that Embodies “KODO” Design Theme

影山 貴大<sup>\*1</sup> 廻本 章吾<sup>\*2</sup> 久保 祐貴<sup>\*3</sup>  
Takahiro Kageyama Shogo Sakomoto Yuhki Kubo  
江草 秀幸<sup>\*4</sup> 叶井 貫<sup>\*5</sup> 大田 敦史<sup>\*6</sup>  
Hideyuki Egusa Toru Kanai Atsushi Ohta

### 要 約

マツダは、お客様との間に特別な絆をもったブランドを目指している。そのお客様の期待を超えるクルマを提供していくために、金型製作部門では、特にデザイナーが想いを込めた「魂動デザイン」を量産車で実現させることを使命としてとらえている。本稿では、お客様への提供価値を高めるために、金型製作の高精度高効率化をねらった金型製作プロセス革新について紹介する。

### Summary

Mazda aims to be a brand with a special bond with its customers. In order to provide cars that exceed the expectations of our customers, we, at the mold production department, believe that it is our mission to embody the “KODO - Soul of Motion” design theme, which represents the designers’ aspiration, in the form of mass production cars. This article introduces the process innovation aimed at high-precision, high-efficiency production of molds to enhance the value offered to customers.

**Key words :** Production ・ Manufacture, Die/Mold, Press/Resin (Plastics), Machining, Measurement technology, Forming process

### 1. はじめに

マツダでは、お客様に愛され続ける Only One のメーカーになるため、現在「ブランド価値経営」を強力に推進している。

「ブランド価値経営」の実現のために、モノ造りの中核である生産技術部門では、ビジネス効率を最大化すること、すなわち「お客様への提供価値を高めつつ、量産準備段階でのムダを排除した高効率な生産プロセスを確立すること」と定義し、その実現を目指している。

お客様への提供価値の1つである魂動デザインは「生命感」を共通の思想として、ボディに反射する繊細な光の陰影で動きや美しさを表現している (Fig. 1)。このデザインに込められたデザイナーの想いを理解し、高精度かつ高効率で魂動デザインを量産車で忠実に実現させることが生産技術の使命である。

魂動の生命感を量産車で実現させるためには、マザーツールである金型の品質が非常に重要となる。キャラク



Fig. 1 “KODO Design”

ターライン重視の先々代に対して、面重視の先代では、機械加工の技術開発及び磨き技能を向上することで形状クリアランスのばらつきを50%削減した。新世代商品群では、ボディ全体での連続的な面の再現が重要であり、形状クリアランスのばらつきを更に先代比50%削減する必要があった (Fig. 2)。そのために、より高精度な金型造りに進化させた製作プロセスに変革を行った。

本稿では、CX-30のフロントバンパー射出成形金型 (以下バンパー金型) 製作を事例に、高精度高効率な金型製作プロセスへの変革に向けた取り組みを紹介する。

\*1~6 ツーリング製作部  
Tool & Die Production Dept.

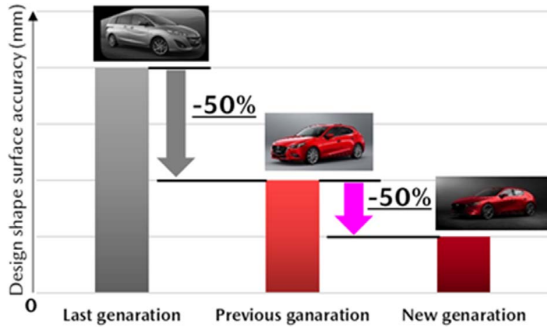


Fig. 2 Evolution of Design and the Accuracy of Requirements

## 2. 新世代商品群のデザイン実現課題

### 2.1 バンパー金型とは

バンパー金型は、凹側のキャビティ（固定側）と凸側のコア（可動側）から構成されており、キャビティとコアの間隙（形状クリアランス）に樹脂を充填して製品を成形する（Fig. 3）。そのため、バンパーのような意匠面をもつ金型では、金型形状がそのまま転写される特徴がある。バンパー部品で魂動デザインを実現するためには、キャビティとコアの単体形状の正確さだけでなく、両者の相対位置を正確に造り、ねらいの形状クリアランスを実現させることが金型製作にとって重要となる。

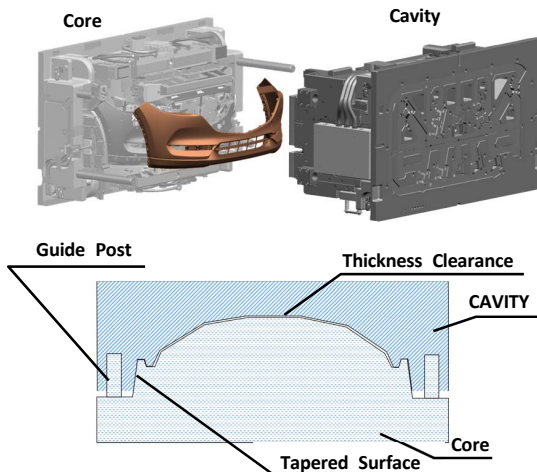


Fig. 3 Bumper Face Mold

### 2.2 バンパー金型の製作プロセス

バンパー金型の製作プロセスは、Fig. 4 上のように、機械加工、精度確認測定、形状磨き、組付け、型合わせによって金型を完成させる。その後、射出成形機に金型を取り付けてバンパーを成形し、デザイン再現性など製品品質を確認している。

これまで、形状磨きや型合わせでは、微小な段差などの機械加工精度のばらつきに対して技能者が砥石を使って多大な工数をかけながら精度修正を行っていた。しかし、砥石を使用した精度修正はねらいの精度を崩す結果となり、型合わせで繰り返し形状クリアランスを調整す

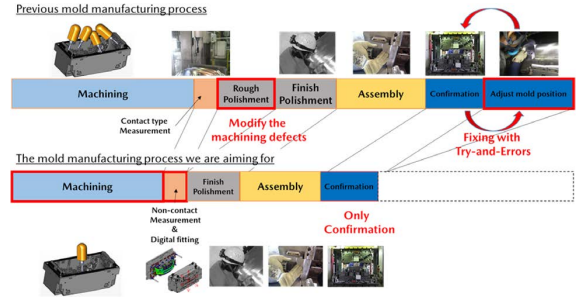


Fig. 4 Mold Manufacturing Process

る要因になっていた。結果、この形状クリアランスのばらつきにより、不均一な熱収縮による意匠面の曲率変化が起り、デザイン再現に重要な左右の見栄えに影響を与えていた（Fig. 5）。

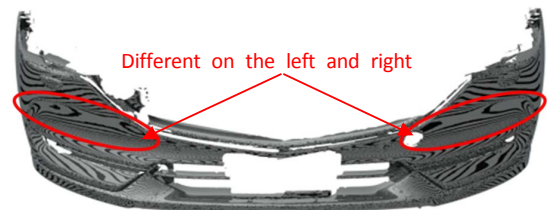


Fig. 5 Zebra Pattern on Front Bumper

従って、砥石修正が不要な単体加工精度への向上と、単体加工精度を活かし、相対位置精度を保証する技術によって、技能者による不要な調整作業を極小化できる、高精度かつ高効率な金型製作プロセスへの変革を目指した（Fig. 4 下）。

## 3. 単体加工精度向上の取り組み

### 3.1 単体加工精度向上の技術課題

比較的大きいバンパー金型では、大型門型5軸マシンングセンターで機械加工を行う。機械加工は、マシンングセンターの主軸先端にセットした切削工具を回転させて素材を削るが、切削工具の剛性は、工具長の3乗に比例して低下する。そのため、切削工具の剛性低下に伴う加工精度の低下を排除するため、従来は、Fig. 6 に示すとおり切削工具をB軸（Y軸を回転中心）とC軸（Z軸を回転中心）で回転させた状態の固定5軸加工を採用し、工具長を極力短くしてきた。

しかしながら、干渉回避のために数種類の加工軸方向で加工エリアを変えながらバンパー形状全体を切削するため、機械の変位や加工軸の旋回誤差によって加工精度にばらつきが生じ、加工エリアの境界に十数μmの微小な段差（境界段差）が発生する（Fig. 7）。樹脂部品は境界段差が製品に転写されるため、通常は研削量が多い粗目の砥石で、境界段差がなくなるまで形状面を磨き補正しており、結果、金型単体精度のばらつきを更に大きくしている。しかも、CX-30のバンパー金型は、成形中の樹脂圧による金型の挙動を抑制するために、Fig. 6の構

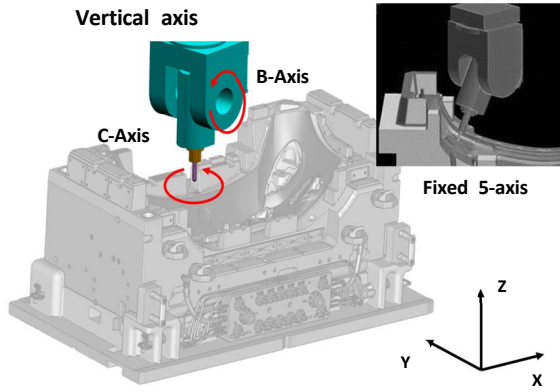


Fig. 6 Tilted Tool Axis

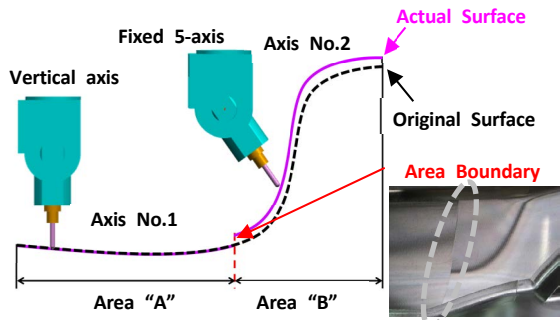


Fig. 7 Example for Cutting Area Boundary

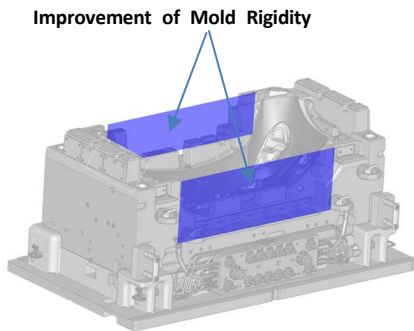


Fig. 8 Mold Structure in CX-30

造から、キャビティ全体を縦壁でつないだ金型構造を採用している (Fig. 8)。そのため、干渉回避のために加工エリアをこれまで以上に細分化する必要があり、境界段差による磨き調整作業が多発する恐れがあった。

そこで、加工精度のばらつき起因となる加工エリアの分割がなく、形状面を縦軸のみで連続加工する 1 エリア 1 方向加工の技術開発に取り組んだ。

### 3.2 1 エリア 1 方向加工実現の取り組み<sup>(1)</sup>

1 エリア 1 方向加工を実現するためには、バンパーの深い形状に対応する従来比 2.8 倍の長い工具でも、工具撓みを少なくできる安定低負荷切削と、剛性低下がなく全ての形状を干渉回避できる切削工具把持ホルダー (以下、ホルダー) の開発が課題であった。

まず、安定低負荷切削の実現については、切削工具の

刃先形状及び切削条件の最適化を行った。最適条件は、品質工学手法と切削シミュレーションを組み合わせ導出した。

刃先形状は、切削工程や被削材硬度など使用環境に応じて形状が異なる。今回は、形状クリアランス実現に最も影響の大きいバンパー金型の形状仕上げ加工を想定して実験した。

切削シミュレーション結果より、切削工具の刃数は従来の 2 枚刃と比べて、多刃の方が良好な結果を得られた (Fig. 9 上)。多刃にすることで、1 刃あたりにかかる切削負荷が低減でき、安定した切削を実現できたと考える。また、刃先形状は、刃先のねじれ角を従来よりも大きくする方がより良好な結果を得られた (Fig. 9 下)。これは、切削工具と被削材の接触距離が長くなることで、切削負荷が分散されたと推測する。刃先形状及び切削条件の最適解を用いた結果、切削負荷を 40% 抑制できることを確認した (Fig. 10)。

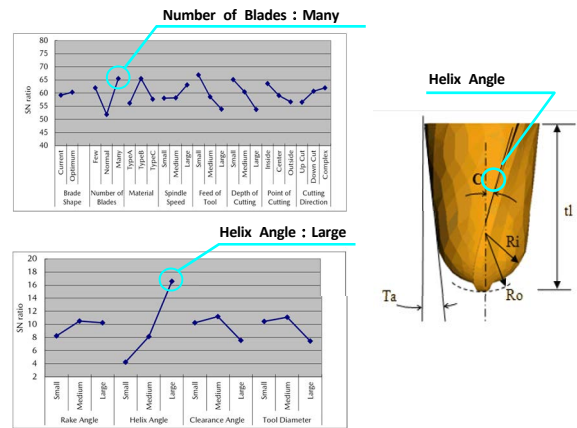


Fig. 9 Experimental Results

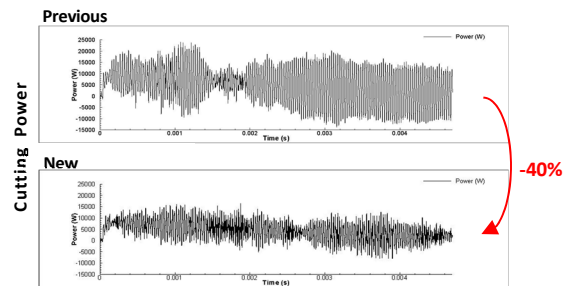


Fig. 10 Cutting Load Variation

次に、剛性低下がなく、かつ、深い形状でも干渉のないホルダーについては、テーパ形状の焼き嵌めホルダーを採用し、工具長を短くしつつ干渉のない加工ができるようになった。切削工具及びホルダー全体での撓みを従来比 73% 改善し、剛性不足が原因で発生する切削負荷のばらつきを低減した (Fig. 11)。更に、切削工具とホルダー形状を金型製造要件として金型設計に織り込むことで、1 エリア 1 方向加工を実現した。

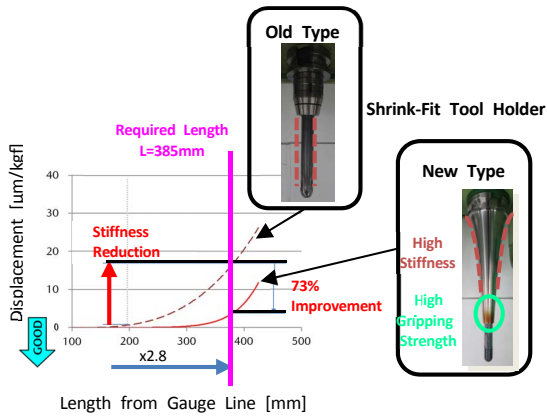


Fig. 11 Relationship between Stiffness and Tool Length

以上の対策をCX-30のフロントバンパー金型製作に織り込んだ結果、単体加工精度のばらつきを50%改善できた (Fig. 12)。

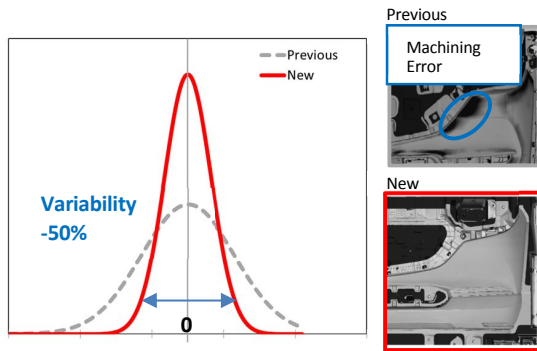


Fig. 12 Cavity Machining Result

#### 4. 相対位置精度向上の取り組み

##### 4.1 相対位置精度向上の技術課題

ねらいの形状クリアランスを実現するために、単体加工精度を活かした相対位置精度保証技術の開発に取り組んだ。前述3章のとおり、単体加工精度のばらつきを削減できたが、機械設備などの誤差によって、数µmの加工誤差は存在し、また単品部品の積み上げ誤差は存在する。ねらいの形状クリアランスを正確に実現する相対位置精度保証のためには、キャビティ及びコアの機械加工面を正確に把握し、両者を組み合わせた状態から誤差をキャンセルする相対位置補正技術が必要となる。

従来、バンパー金型のキャビティとコアの相対位置は、機械加工後にダイスポッティングプレス機で上下にキャビティとコアをセットし、ガイドポストと称する位置決め基準を介して重ね合わせた状態で確認する。この型合わせでは、機械加工面を接触式3次元測定器で測定し、測定結果から形状クリアランスが適正になるようにガイドポストの位置を調整していた。しかし、従来の接触式3次元測定器による測定は、離散的な点測定であり加工面の連続性が把握できない。そのため、測定結果から金

型の状態が正確に把握できず、ダイスポッティングプレス機で現物確認と調整を繰り返しながら形状クリアランスを補正していた。

そこで、この問題を解決するために、Fig. 13のように点測定から面測定に変えて金型全体を連続的に把握し、測定結果からねらいの形状クリアランスになるキャビティとコアの相対位置を予測することにし、以下2点の技術を開発した。

- ①高精度面測定技術の開発
- ②測定結果から相対位置精度を予測するデジタル型合わせ技術の開発

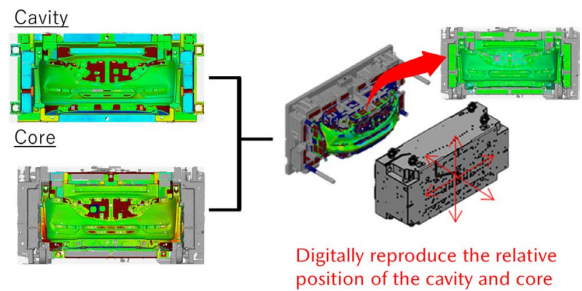


Fig. 13 Digital Relative Position Prediction

##### 4.2 高精度面測定技術の開発<sup>(2)</sup>

機械加工面を連続して測定するために、非接触式3次元測定機を活用した。非接触式3次元測定機の測定手順は、一般的に、①金型にマーカーを貼り付け、②マーカーの空間座標及び位置関係を定義する。次に、③非接触式3次元測定機のデジタルカメラで金型を撮影し、取得した画像データを空間座標に沿って貼り合わせていく、④測定対象物の全体形状を撮影し測定結果を取得する (Fig. 14)。

非接触式3次元測定は、カメラ撮影画像等の情報を介して測定結果を取得するため、撮影時の環境などの外乱により測定精度のばらつきが発生してしまう。機械加工面を高精度にデジタル上で再現させるには、現状に対して測定精度のばらつきを40%改善する必要があった。そこで、キャビティとコアの相対位置を高精度に予測するために、外乱に左右されない測定条件の適正化を行った。

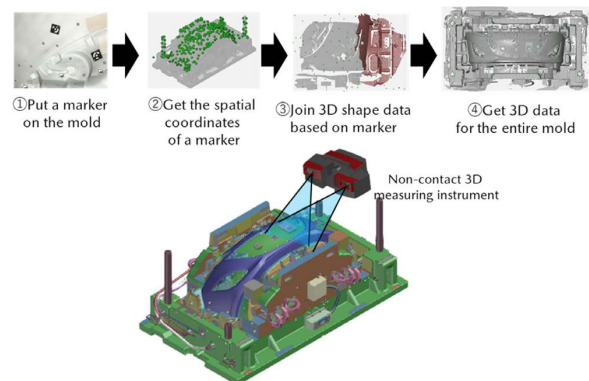


Fig. 14 Non-Contact 3D Measurement Procedure

測定条件を適正化するために、非接触式3次元測定機の測定原理から特に影響のあるパラメータを抽出して品質工学を活用し取り組んだ。検証の結果、シャッタースピードと測定対象物との距離が特に測定精度のばらつきに影響があることがわかった。シャッタースピードについては、金型測定時の光の反射（ハレーション）を防止する対策を織り込み、カメラへ入光する光を抑制する条件を設定した。また測定対象物との距離については、カメラの焦点距離の範囲内なるべく近い距離を適正な測定距離とした。上記の測定条件を適正化したことで細部の形状再現性が向上した（Fig. 15）。

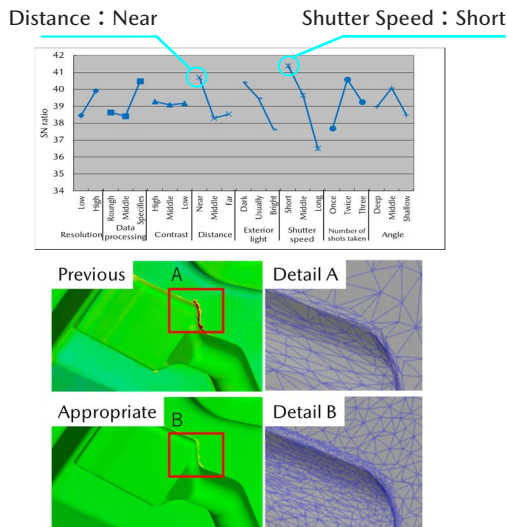


Fig. 15 Experimental Results

測定条件の適正化により、細部の形状再現性が向上したが、金型の寸法に対して測定結果がXYZ軸方向ともに数十μm大きくなっていることが分かった。基準となるガイドポストの測定では十数μmの誤差でも相対位置精度に影響がある。そのため、ガイドポストの測定誤差発生要因を追求し、測定時の温度変化の影響をつきとめた。わずか1°Cの温度変化でも3mクラスの金型では十数μmの寸法変化がある。そこで、測定時の温度変位を極力排除するために、温度補正を行った。具体的には、XYZ各軸方向の温度変化に対する寸法誤差から、補正係数を算出し測定結果に加味した。

これらの取り組みにより非接触式3次元測定機の測定精度は現状に対してばらつきを42%改善し（Fig. 16）、機械加工面をより高精度にデジタル上で再現できるようになった。

4.3 デジタル型合わせ技術の開発

機械加工面の測定結果から、デジタル上でキャビティとコアの相対位置を定量化し、形状クリアランスのばらつきの補正をデジタル上で行うデジタル型合わせ技術を開発した。具体的には、キャビティとコアの機械加工面

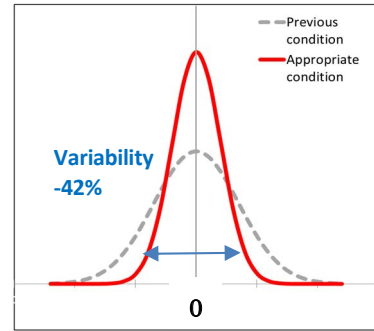


Fig. 16 Non-Contact Measurement Accuracy

の測定結果と、組付け基準のガイドポストの測定結果を比較し、均一な形状クリアランスになるガイドポストの補正値を計算できるようにした。その結果、デジタル上で設計どおりの形状クリアランスを再現させた（Fig. 17）。この補正値に基づいて金型のガイドポスト位置を調整することで、ダイスポッティングプレス機での確認、調整を極小化したデジタル型合わせができるようになった。

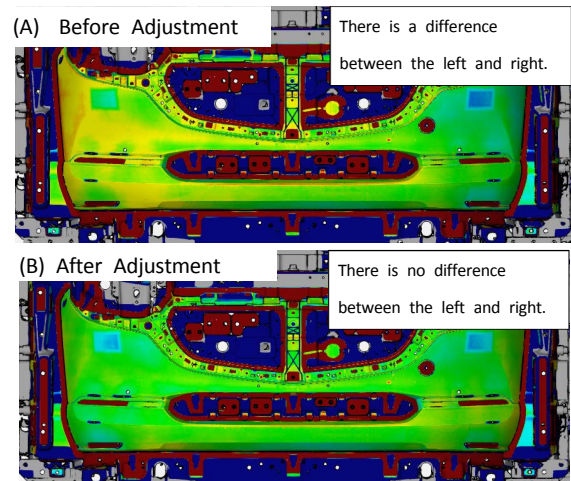


Fig. 17 Digital Relative Position Prediction

5. 金型製作プロセス革新の効果

従来は各工程内で、技能者が精度修正するプロセスであったが、1エリア1方向加工で高精度に加工し、デジタル型合わせで相対位置を調整するというシンプルかつ形状クリアランスの精度ばらつきを抑制したプロセスを実現した。

Fig. 18に先代とCX-30の形状クリアランスのばらつきを示す。先代に対して形状クリアランスのばらつきを50%削減した。Fig. 19に金型完成後の初期段階で取得したCX-30のフロントバンパーの見栄えを示す。魂動デザインの再現性を確認するためにゼブラ表示を行ったものであるが、左右の見栄えの違和感がなくなり、面の連続性もある製品品質にできた。また、単体加工及び相対位置精度を向上したことで、バンパー金型製作工数を24%削減できた。

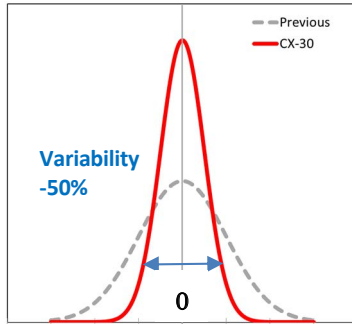


Fig. 18 Shape Clearance Variations

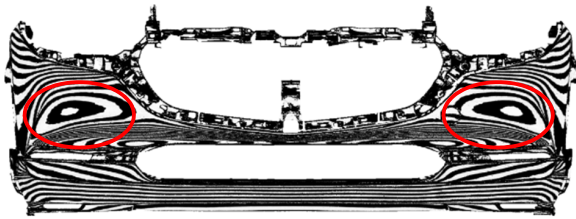


Fig. 19 Initial Panel Quality

## ■ 著 者 ■



影山 貴大



廻本 章吾



久保 祐貴



江草 秀幸



叶井 貫



大田 敦史

## 6. おわりに

高精度機械加工とデジタル型合わせを実現できたが、成形加圧時の金型及び射出成形機の変形による微細な調整の排除が今後の課題となる。加圧を加味した変形挙動の検証をできるようにし、更に形状クリアランスのばらつきを削減していく。そして、これからも深化し続ける「魂動デザイン」を量産車で実現し、お客様の期待を超えるクルマを造り続けていく。現状に満足せず更に高いレベルのモノ造りを追求し、高精度高効率な金型製作に愚直に取り組んでいく。

## 参考文献

- (1) 廻本章吾ほか：樹脂金型の意匠面仕上げ加工における切削工具及び条件の最適化，第25回品質工学研究発表大会（2018），pp.66-69
- (2) 影山貴大ほか：非接触測定精度向上の取り組み，第27回品質工学研究発表大会（2019），pp.176-179