

特集：MAZDA CX-90

08

高品質パネル取得に向けた金型製作領域の取組

High-Quality Panel Initiatives in the Tooling Department

守田 雄一^{*1} 安楽 健次^{*2} 長澄 徹侍^{*3}
 Yuichi Morita Kenji Anraku Tetsuji Nagazumi
 村上 義典^{*4} 吉川 速人^{*5} 玉置 周平^{*6}
 Yoshinori Murakami Hayato Yoshikawa Shuhei Tamaki

要約

まるで命が宿っているような、美しい表情を放つ、それが「魂動デザイン」。私たちはお客様に、このデザインが発する生命感から、愛馬と騎手のような特別な絆を感じていただきたいと考えている。ラージ商品群の第2弾となるCX-90ではクルマに光が当たった際のリフレクションによる連続した陰影表現を高品質な状態で実現することが必要となる。そこで本稿ではCX-90でプレミアム品質の量産化をプレス成形部品で実現するために、金型の製作とプレス成形工程の最適化を行った取組について紹介する。

Abstract

The “KODO Design” emits a beautiful expression as if it is filled with life. We want our customers to feel the special bond shared between a beloved horse and rider through the sense of life that this design emits. The CX-90, the second in our large product line, is expected to achieve a high-quality expression of continuous shading by reflection when the car is illuminated by light. This paper describes our efforts to optimize the die fabrication and stamping process to achieve premium quality mass production of press-formed parts for the CX-90.

Key words : Draw molding, Bending forming, Press forming CAE, 3D shape measurement, Quality engineering

1. はじめに

マツダは「魂動デザイン」により、見る人の心を揺さぶるような、命あるモノとしたクルマ造りを目指している。「魂動デザイン」を実現するために、開発から生産領域まで強いこだわりをもち、日々技術開発に取り組んでいる。私たちプレス金型製作部門も、「魂動デザイン」の忠実な再現に注力した取組を継続的に行っている。「魂動デザイン」は生き物が見せる一瞬の動きや美しさを究極の姿と考え、連続した面の流れやキャラクターラインにより、その生命感を表現したものである (Fig. 1)。ラージ商品群においては光のリフレクションによる連続した陰影表現をより高品質な状態で実現することが必要となる。そのためには滑らかに連続した面の流れをプレス成形で量産化する必要があり、要求される品質も高まっている。

デザイナーの意図とおりの製品パネルを量産するには、



Fig. 1 “KODO Design”

金型自体を高精度に造り、その金型形状とおりに成形する必要がある。そのため、プレス金型製作部門の課題は大きく分けると次の3点である。

- 1) 金型単体精度の向上 (機械加工精度, 手仕上げ精度)
- 2) 金型相対精度の向上 (組付け, 上下合わせ)
- 3) プレス成形時における金型の挙動制御

CX-90のプレミアム品質実現に向けて技術的な課題を洗い出した。1) 金型単体精度向上では、魂動削り (切削加工時の工具への負荷軽減による加工精度向上) / 魂動磨き (連続した面を崩さないための砥石や磨き手法の開

*1~6 ツーリング製作部

Tool & Die Production Dept.

発)をはじめとする金型製作革新の取組により効果を出してきた。しかし、2) 金型相対精度と絞り成形、曲げ成形における3) 成形時の挙動制御技術を向上させる必要があり、これらの技術課題について、CX-90のサイドフレームで取り組んだ事例を紹介する。

2. 金型相対精度向上の取組

機械加工及び磨きの高品質化により、金型上下型単品での形状精度は向上してきた。一方で、金型は上下型一対で構成されるため、上下型構造部の誤差の累積が形状精度に影響する。そのため、金型組付け後の上下型の相対精度保証も単体精度同様に重要である。この上下型の相対精度を保証する際、デジタル上で金型の位置合わせを行い、実型での調整量を算出するベストフィットという手法を用いている。現物での確認、調整ではなくデジタル上で行うことで大幅な工数減を実現している⁽¹⁾。

ベストフィットでは、上型/下型をそれぞれ個別に計測し、その座標データをPCに取り込み、上下型の形状クリアランスが最適となる相対位置を算出する。この座標計測にこれまでは接触式3次元測定機を使用してきた。しかし、接触式3次元測定機は離散的な点測定であり、形状面の連続的な素性が把握できない (Fig. 2)。そのため、現場作業による切削調整が必要な箇所が生じ、高精度に仕上げた形状面を一部崩していた。よって、上下型の形状クリアランス精度のばらつきが発生しない金型合わせの手法に変える必要があった。

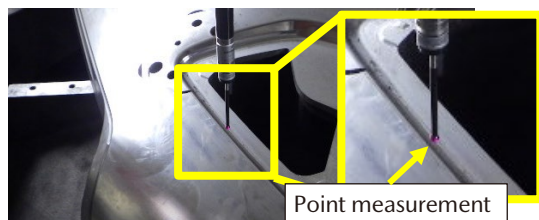


Fig. 2 DEA Measurement Issues

そこで非接触式3次元測定機を活用することにした。非接触式3次元測定機は形状面全体を連続して測定することが可能な一方で、撮影時の環境などの外乱により測定精度のばらつきが生じるため、魂動デザイン表現に求められる金型精度に対して測定精度が不足していた。上下型の相対位置を高精度に予測するためには、測定精度ばらつきを抑制し外乱に左右されない測定条件の設定が必要であった。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があると考えられるパラメータを抽出し寄与度の評価を行った。寄与度の大きかった対象物との距離やシャッタースピード、ハレーション防止剤の塗布適正化により測定精度を42%向上させ、要求精度を満足させた。これらの取組により、形状面全体を踏まえたベストフィットが可能となった。結果として、ねらい

となるCADデータに対して、魂動デザイン再現に必要な上下型の相対精度が実現できた (Fig. 3)。

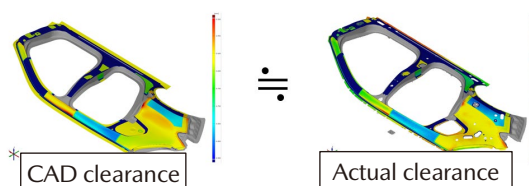


Fig. 3 Examples of Application of Countermeasures

3. 絞り工程における成形挙動制御の取組

3.1 絞り工程とその課題

プレス成形の絞り工程の成形過程を (Fig. 4) に示す。まず、①パネルをblankホルダーにセットし上型を降下、②クッションパッドからの成形荷重によって上型とblankホルダーにてパネルをホールドして張力を加える。③その状態で上型、blankホルダーとも降下しパネルを下型に押し当てて下死点で成形完了となる。上述のパネルは、ホールド状態による圧力によってパネルの流入をコントロールして張力を発生させる。この状態で成形Rによる曲げ応力が加わることにより塑性変形し形状が定まる。

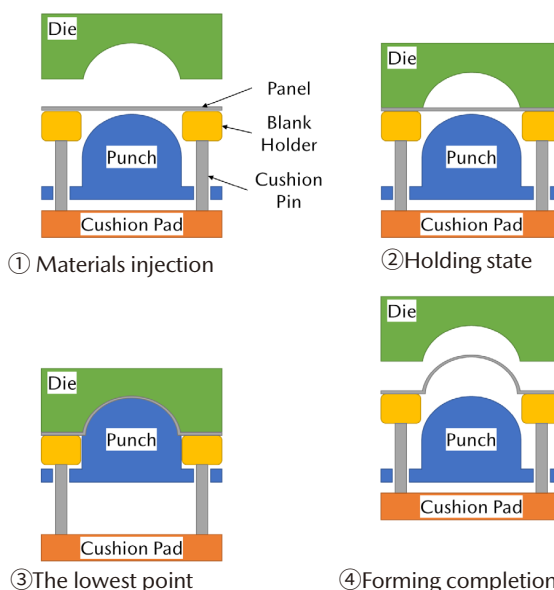


Fig. 4 Forming Process of a Drawing Mold

しかし、現状の絞り工程では、金型改善段階においてパネルデザイン形状に対して意図しない凹凸 (以下、シワと記載) が頻発している。このシワによって光のリフレクションが急激に変化してしまい、魂動デザインの面の塊感 (連続) を損なうため、金型の改善が必要となる。シワの発生状態はパネル形状などの特性によって車種ごとに発生仕方が異なっており、匠作業でも複数回の改善によって品質を造り込む高難易度の作業である。

そこで、CAEを活用して匠の作業者の改善におけるノ

ノウハウを技術として手の内化し、高品質なパネルを量産可能な金型改善を一発で完了させるプロセスが必要であると考えた。そこで求める外観品質を一発で実現するためのプロセス実現のために成形CAEの予測精度向上に取り組んだ事例について紹介する⁽²⁾。

3.2 成形CAE精度の問題

CX-90の絞り工程の実パネルと成形CAEによる解析結果を比較した結果、成形CAEでは成形過程で引き延ばされてシワが抑制されており(Fig. 5)、実パネルでは成形初期に発生したシワが引き延ばされず残留している。これらについて調査した結果、下記の問題があることが判明した。
 (1) CAEと実パネルにおける材料流入量の違い
 (2) CAEでのシワ発生量/範囲の違い

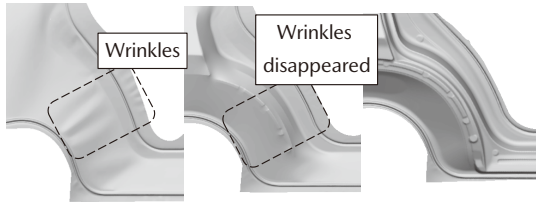


Fig. 5 Wrinkle Generation in the Molding Process

3.3 成形実態に合わせた解析条件と外観評価

シワの発生する大きな要因の一つとして、ホールド状態での張力不足があげられる。成形過程での張力状態によって変化する材料流入量が実パネルと大きく乖離しており、その一致率は30.3%しかない状態であった(Fig. 6)。現状のCAE精度ではシワの発生を正確に予測できないため、材料流入量を一致させることが最優先課題と考え、材料流入量±3mm以内、一致率80%以上を目標とした。

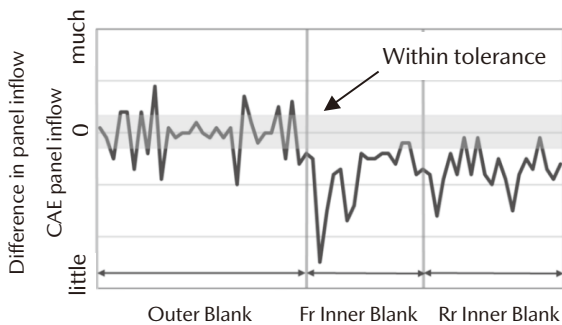


Fig. 6 Difference between CAE and Actual Panel Inflow

マツダの金型製作部門において金型改善で使用するプレス機で検証を行い、成形CAEとの予実差の要因を調査した。プレス成形の計測結果よりホールドから下死点までの間、プレス設備における左右のクッションパッドの中央が沈みV字に傾いていることが判明した。このクッションパッドの傾きにより blanksホルダーにかかるクッション圧が部位ごとで不均一となっていた(Fig. 7)。しかし、成形CAEでは1パッド構造を模した均圧条件の

ため、実際に型へかかっている圧力と乖離が生じていた。そこで対策としてクッションパッドの傾きによる不均一な成形圧力を再現させるために、圧力条件を部位ごとに数値設定できるように3分割制御とした。次に分割した部位ごとの圧力値を設定するため、ピンのレイアウト情報よりピン1本当たりの荷重を元に入力圧力を決定した。

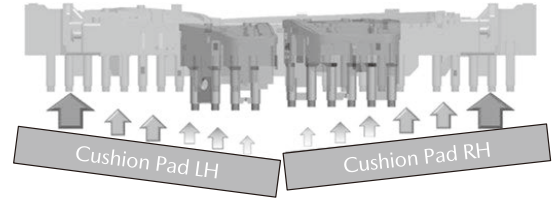


Fig. 7 Cushion Pad Tilt Phenomenon

3.4 CAEでのシワ発生量/範囲の課題解決

実パネルと成形CAEを比較した結果、実パネルで発生しているシワが成形CAEでは確認できなかった。これはCAEモデルの形状を表現するためのメッシュとシワの形状との乖離(以下、メッシュ誤差と記載)によってモデル上で正確にシワ形状を表現できない(Fig. 8)。そこで成形CAEモデルのメッシュ誤差を調べたところ±50μmとなるため、50μm以下のシワについては表現できないことが判明した(Fig. 9)。そこで、メッシュ誤差±15μm以下を表現できることを目標とした。

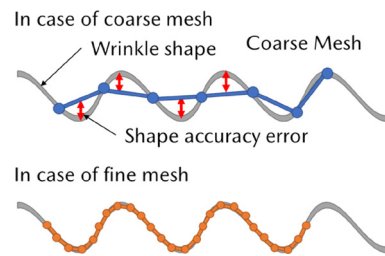


Fig. 8 Shape Error due to Mesh Quality

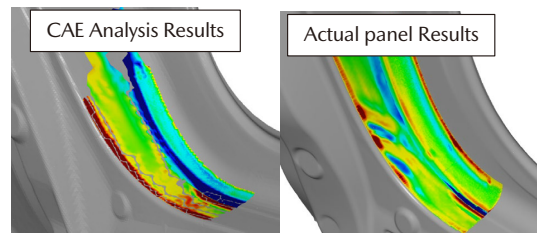


Fig. 9 Difference of Wrinkles between CAE and Actual Panel

成形CAEの3次元モデルを調査した結果、シワの形状を表現するにはモデルの形状を構成するメッシュのサイズが過大であると判明した。これは成形CAEにおいて計算実行時にメッシュのサイズを自動変更するシステムが組み込まれていることが要因と判明した。成形CAEでは成形過程において下型とパネルが接触し、パネルの曲げ成形が発生した際に、曲げ角度に応じてメッシュサイズが細分化

される。今回のシワの発生箇所は下死点に至るまで形状に接触しないため (Fig. 10), メッシュサイズは粗い状態を維持するため, メッシュ誤差が大きいままであった。

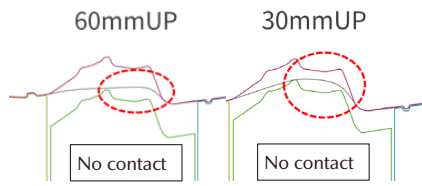


Fig. 10 Panel and Mold Cross Section in the Molding Process

そこで対策としてシワ発生箇所のメッシュサイズを細かくした結果, メッシュ誤差 $\pm 15\mu\text{m}$ 以下を満足させた上で, 成形過程から下死点に至るまでシワの発生を確認した (Fig. 11)。

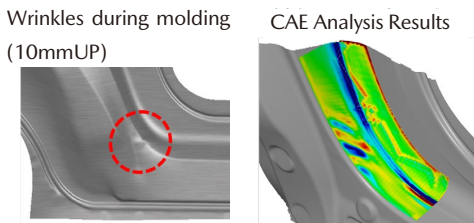


Fig. 11 Results of Application of Countermeasure Contents

3.5 成形 CAE による一発改善方案の策定

上述した施策を適用した CAE 最適条件による解析を実施した。結果として, 材料流入量は一致率 84%を実現しこれにより外観不具合の発生部位と量も一致率 85%を実現した。次に, 本施策を CX-90 におけるサイドフレームで再度検証を行った。結果, CAE 解析で導きだした改善方案でシワの発生量を 85%抑制し, 一発で要求品質を実現することができた (Fig. 12)。

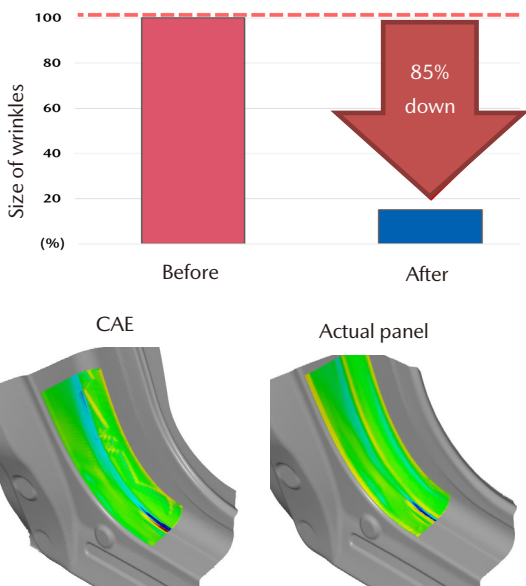


Fig. 12 Mold Modification Process Application Results

4. 曲げ工程における成形挙動制御の取組

4.1 曲げ工程とその課題

曲げ工程とは絞り工程で成形したパネルに曲げ加工を行い, パネルの稜線を成形する工程である。プレス成形における曲げ工程の成形過程を (Fig. 13) に示す。まず①絞り工程を終えたパネルを金型にセット, ②上型及びパッドを降下させ, 金型内部につけられたガススプリングの荷重でパッドと下型にてパネルを保持, ③上型が下死点まで降下し曲げ成形完了となる。

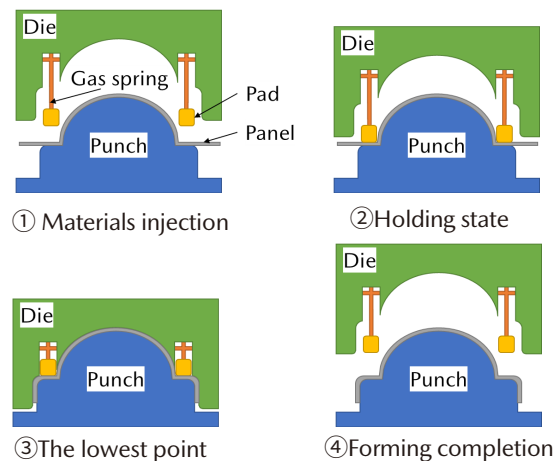


Fig. 13 Forming Process of a Bending Mold

成形中のパネルは, パッドからの保持圧がかかった状態で成形 R 部に曲げ応力が加わることで塑性変形し製品形状が定まる。この際パネルの成形 R 部に意図しない極小の凸 (以下, シャクレと記載) が発生することがある (Fig. 14a)。CAD データに比べ数十 μm の乖離ではあるが, これにより美しい光のリフレクションが部品間で寸断され, プレミアム品質実現に要求される繊細な光の陰影が表現できないことが判明した (Fig. 14b)。デザイナーの求める光のリフレクションを実現するには, 現状から 70%のシャクレ量の抑制が必要であった。

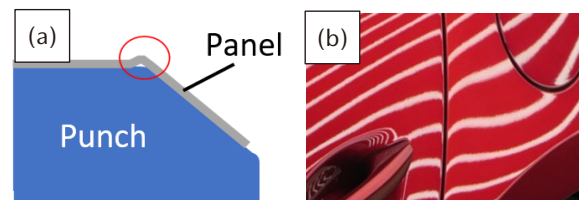


Fig. 14 Panel Malfunction (a) and Light Reflection (b)

4.2 曲げ工程における押さえ面圧の目標値決定

シャクレを抑制するには, 成形時における曲げ応力がデザイン面に伝搬するのを防ぐための十分な押さえ面圧でパネルを保持する必要がある。そのため, まず押さえ面圧の目標値の決定に取り組んだ。パネルを切り出した

CAEを用いて、押さえ面圧を変化させた際のシャクレ量をプロットした。魂動デザインを再現できるシャクレ量目標値及び形状や成形条件から押さえ面圧の目標値を決定した。

4.3 押さえ面圧の目標達成に向けた検証

実型で押さえ面圧を計測した結果、シャクレ発生部位に関して目標値に対して不足していることが判明した。押さえ面圧を増やすには伝達荷重のインプットとなるガススプリングの総荷重を増加させることが効果的だが、それではガススプリング費が上がってしまう。また、総荷重が増加すると金型破損を防止するため金型剛性を高める必要があり、鋳物重量UPに伴い鋳物費も上がる。そのため対策方針として、ガススプリング総荷重を維持したまま、必要な箇所に必要なだけ押さえ面圧を負荷することを理想とした。この考え方の基、ガススプリングからパネル押さえ部までの荷重伝達経路を整理した (Fig. 15)。

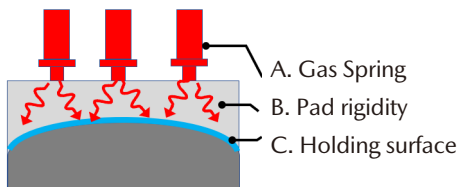


Fig. 15 Load Path from Gas Spring to Holding Surface

上記とエキスパート及び現場作業者の知見、ノウハウをもとに、特に影響の高い因子を抽出して品質工学を活用し取り組んだ。実験はサイドフレームの金型構造を模した簡易モデルを作成し、CAEにて行った (Fig. 16)。CAEを用いた理由は、制御因子に設計要素を取り入れた際に、実験ごとに異なる金型構造が必要となり、膨大な実験費用及び工数が必要となるためである。詳細モデルではなく簡易モデルを用いた理由は、金型の詳細構造によらない寄与度の大きい重要因子を絞り込むことを目的とし、計算の安定性/効率を考慮したためである。

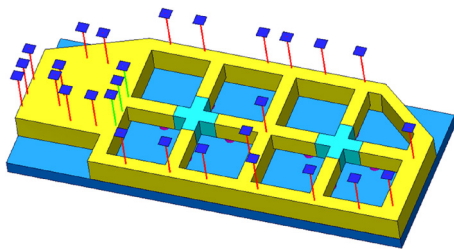


Fig. 16 CAE Model

検証の結果、パッドの高さ、パネルを押さえるパッドの押さえ面幅が特に寄与度の大きい重要因子であることが判明した。まず、パッド高さについては、高さが低い方が口バストかつ重要部位の押さえ面圧が高くなる結果

となった。これは高さが低いほど曲げ剛性が低くなるため、公差内で製作ばらつきが生じたとしても金型形状に沿いやすく、また荷重伝達ロスが少ないためと考えられる。またパッドの押さえ面幅については、狭い方が押さえ面圧が高くなり、選定した因子の中で最も寄与度が高いという結果になった。これは幅を狭くすることで押さえ面積が小さくなり、押さえ面近傍における圧力の分散がMin化されたためと考えられる。以上の結果から最適条件を決定し、CAE解析による再実験を行った結果、130%の押さえ面圧向上を見込めることが判明した (Fig. 17)。

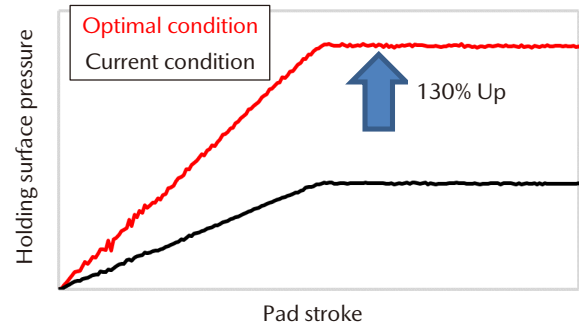


Fig. 17 Comparison of Holding Surface Pressure between Optimal Condition and Current Condition

4.4 CX-90での織り込み施策と効果確認

以上の結果を踏まえ、以下の二つの施策を織り込んだ。
 施策①：曲げ成形が行われる製品R部近傍にスロープを設定し、押さえ幅を狭めた (Fig. 18)。
 施策②：押さえ面圧不要部の上下型クリアランスを板厚クリアランスよりわずかに広めることで総押さえ面積を減らした。

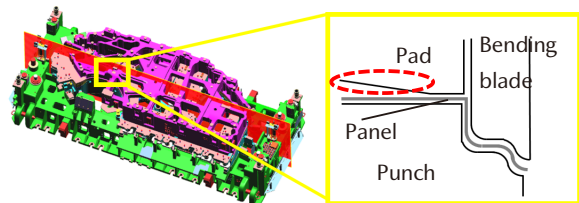


Fig. 18 Reducing Width of Holding Surface

これら二つの施策効果をCX-90の製品パネルにて効果確認、評価を行った。押さえ面圧を計測した結果、過去車種と比較して大きく増加し、目標値を満足していることを確認した。

また、シャクレ量も目標としていた70%改善を大きく上回る90%の改善を確認した。結果として、非常に良好な光のリフレクションを実現した製品パネルを得ることができた (Fig. 19)。

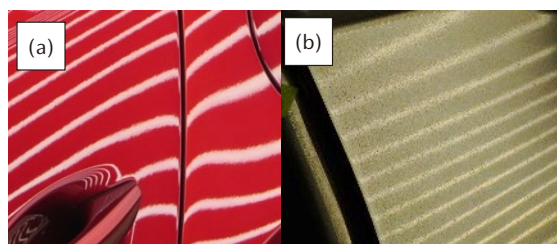


Fig. 19 Light Reflection (a) Old (b) CX-90

5. まとめ

本取組によって次の3点を達成した。

- ① 金型の静的な相対精度においてねらいとなるCADデータに対して、非常に良好な上下型の相対精度の保証が可能となった。
- ② 絞り工程において成形CAEの圧力条件を再現して、モデルの形状精度を $\pm 15\mu\text{m}$ 以下を実現することで、効率的なシワ改善プロセスを実現し、85%のシワ抑制を実現した。
- ③ 押さえ面圧の制御によってシャクレ量を90%改善し、良好な部品間の光のリフレクションを実現し、高品質な製品パネルを実現した。

今後もプレス金型製作部門として金型精度や成形技術の向上にこだわりをもって取り組んでいく。そして、進化し続ける「魂動デザイン」に込められた想いを、更に色濃く具現化し、お客様の人生の輝きにつながるクルマを提供していきたい。

参考文献

- (1) 影山貴大ほか：魂動デザイン再現に向けた金型製作部門の取組みと技術の深化，型技術，8月号，pp.22-25 (2023)
- (2) 玉置周平ほか：現場ノウハウを活用した新成形CAE解析の構築，型技術者会議2023講演論文集，No.108，pp.172-173 (2023)

■ 著 者 ■



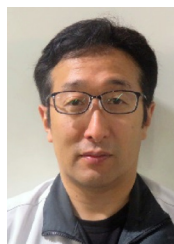
守田 雄一



安楽 健次



長澄 徹侍



村上 義典



吉川 速人



玉置 周平