

論文・解説

29

デザイン忠実再現に向けた金型設計プロセスの革新

Innovating the Mold Design Process for Faithful Reproduction of the Design

吉川 速人^{*1} 山下 剛史^{*2} 山口 大輔^{*3}
Hayato Yoshikawa Tsuyoshi Yamashita Daisuke Yamaguchi
近藤 剛志^{*4}
Tsuayoshi Kondo

要約

電動化時代においてもクルマのもつ普遍的な価値である「デザインの忠実再現」「人馬一体」「衝突安全・環境性能」の実現を、最小コストとCO₂排出量で達成することでビジネス効率の最大化を目指し、「走る喜び」を実感できる細部まで造りにこだわったボディーの進化に挑戦している。その中でもマツダのデザインは、生き物が見せる一瞬の動きや美しさを究極の姿と考え、連続した面の流れにより、その生命感を表現している。

このデザインを忠実に再現するためには、光のリフレクション及び連続した陰影表現をより高品質な状態で実現する必要があり、滑らかに連続した面の流れをプレス成形で量産化することが不可欠である。この課題を解決するため、マツダでは金型のたわみを加味した上で、パネルの成形挙動と品質を机上で評価できる解析手法を新たに開発した。本稿では、この新たに開発した解析手法と、その手法を用いた金型設計プロセスの革新について紹介する。

Abstract

We are taking on the challenge of evolving car bodies with meticulous attention to detail. Our goal is to ensure that people can feel the “joy of driving” while maximizing business efficiency. We aim to achieve the universal values of cars, such as “faithful reproduction of design,” “unity of man and horse,” and “collision safety and environmental performance,” at the lowest cost and CO₂ emissions, even in the era of electrification. Among them, Mazda’s design considers the momentary movement and beauty of living things as the ultimate form, expressing the sense of life through a continuous flow of surfaces. In order to faithfully reproduce this design, it is necessary to realize light reflection and continuous shading in a higher quality state. Additionally, it is essential to mass-produce a smooth, continuous flow of surfaces through press molding. To achieve this challenge, we have developed a new analysis method that allows us to evaluate the molding behavior and quality of panels on a desk, taking into account the deflection of the mold. In this paper, we will introduce this newly developed analysis method and the innovations in the mold design process using this method.

Key words : Draw molding, Press forming CAE, Quality engineering

1. はじめに

マツダでは、変化の激しい外部環境の中でも、前向きに今日を生きる人の輪を広げることを社会的な存在意義とし、「走る喜び」を進化させ続け、お客さまの「生きる喜び」を通じて社会に貢献することを目指している。

電動化時代においてもクルマのもつ普遍的な価値である「デザインの忠実再現」「人馬一体」「衝突安全・環境

性能」の実現を、最小コストとCO₂排出量で達成することでビジネス効率の最大化を目指し、「走る喜び」を実感できる細部まで造りにこだわったボディーの進化に挑戦している。その中でもマツダのデザインは、光のリフレクションで生命感ある造形を表現している (Fig. 1)。

このデザインの忠実再現に向け、映り込む光の流れや陰影を再現するデザイン面の流れを向上させることが不可欠となる。その取り組みの一環として、プレス金型設

*1~4 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

計時に金型構造解析を適用し、金型の強度保証及び剛性向上と、成形時の動的な金型制御技術の引き上げに取り組んでいる。



Fig. 1 “KODO Design”

本稿では、普遍的価値追求の一つである、デザインの忠実再現に向けた金型設計領域の取り組みについて紹介する。

2. 現状と課題

2.1 デザインの進化とプレス成形の重要性

マツダのデザインは、生き物が見せる一瞬の動きや美しさを究極の姿と考え、連続した面の流れにより、その生命感を表現している。そのためには光のリフレクション及び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であり、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る (Fig. 2)。

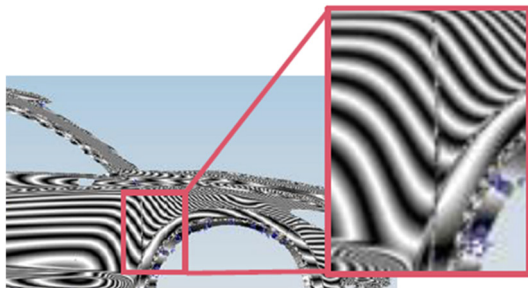


Fig. 2 Light Reflection

プレス成形によって量産される製品パネルは、複数の工程を経て完成する (Fig. 3)。その中でも、初工程である絞り工程は、品質のベースとなる工程であり、デザインの忠実再現において非常に重要である。

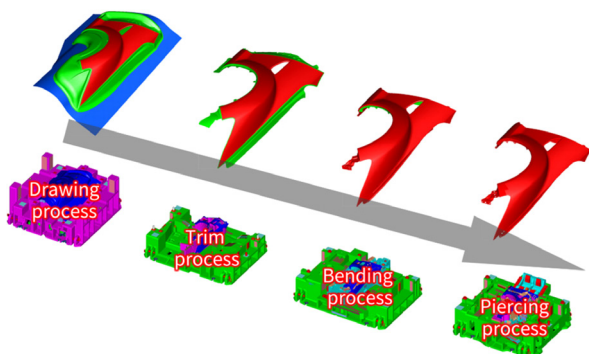


Fig. 3 Flow of the Stamping Process

そのため、机上でデザイン面の品質を保証し、これを実機で忠実に再現する必要がある。机上でのデザイン面の品質保証に関しては、成形シミュレーションを活用し机上で要求品質を満足する成形方案を造り込んでいる。実機での再現に関しては、(1) プレス金型を高精度に造り上げることと、(2) プレス成形時の金型挙動を制御することが重要となる。(1) では、機械加工や手仕上げ、組付け等の金型造り込みによる精度向上の取り組みを行い、静的状態における要求精度に対して効果を出してきた⁽¹⁾。(2) では、金型設計時に CAE を適用し、金型構造を工夫することで、金型の強度保証及び剛性向上を行ってきた⁽²⁾。

これらの取り組みで下死点における上下型の適正クリアランスの実現などに効果を出してきたが、一方で成形過程における動的な金型挙動制御には課題があった。

2.2 絞り工程の成形過程

具体的な絞り工程の成形過程を以下に示す (Fig. 4)。
①まず、材料をblankホルダーにセットし、上型を降下させる。②クッションパッドからの圧力源によって、上型とblankホルダーにて材料をホールドして張力を加える。③その状態で上型とblankホルダーを更に降下させ、下死点にて材料を上型と下型の製品形状で強く挟み込むことで成形が完了する。④その後、上型が上死点に戻る。

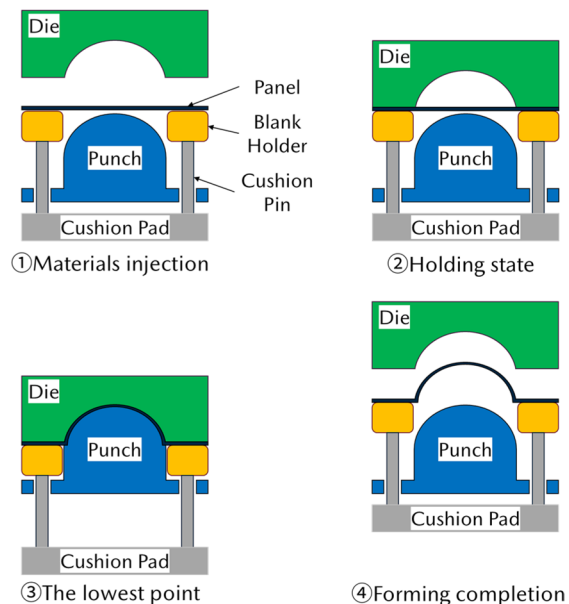


Fig. 4 Forming Process of a Drawing Mold

2.3 絞り工程における材料流入の制御技術

材料ホールドから下死点にかけてのプレス成形の過程において、材料が金型内部へ引き込まれる現象、すなわち材料流入が発生する。絞り工程の要求品質を満足するには、この材料流入の量が非常に重要である。絞り工程

では材料をホールドした際、ドロービードと呼ばれる形状を成形し、流入抵抗を付与することで材料流入量を制御しようとしている (Fig. 5)。しかし、現状はこの材料流入量が机上予測と一致せず、デザインの忠実再現のためには、熟練作業者による手修正の対応を余儀なくされていた。

この問題を解決するために、材料流入量制御技術を構築した。

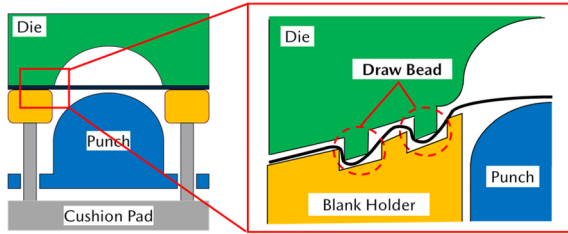


Fig. 5 Draw Bead Molding

3. 金型たわみを加味した解析手法構築

3.1 予実差の原因調査

実機パネルの計測結果、流入量の予実差は、流入量を制御するドロービードの形状がねらいの形状から僅かに崩れていることが原因であることが判明した (Fig. 6)。ドロービードはその形状によって、材料流入量を制御する流入抵抗を発生させる。ドロービードの形状が崩れることで、本来必要な流入抵抗力が変化し、材料流入量に予実差が生じている。

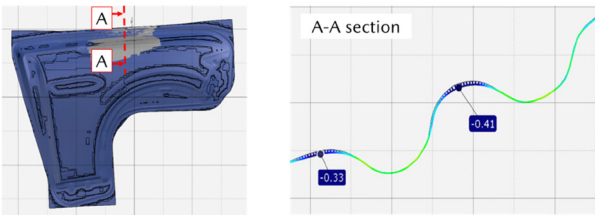


Fig. 6 Difference between CAE and Actual Bead Shape

次に従来の CAE プロセスを以下に示す (Fig. 7)。成形シミュレーションでは、プレス成形の初期段階での方案検討、成形性評価において重要な役割を果たしてきた。しかし、この成形シミュレーションは金型を剛体と仮定して計算している。そのため、実機の成形過程で発生する成形反力による金型の変形が考慮されていない。その結果、机上と実機の成形パネルに差異が生じていると考えられる。

更に、金型変形を評価する金型剛性解析では、成形シミュレーションで計算された成形反力の値をインプットとしている。そのため、金型強度やたわみは評価できるが、金型の変形によるパネル形状の品質を評価することができない。また、成形過程のあるストロークにおける

静的な状態を評価しているため、成形過程で逐次発生する動的な荷重変化による金型の変形を評価することができない。

そこで、これらの問題を解決するために、金型を弾性体としながら、動的にパネル成形性を評価出来る強連成解析手法を活用することにした。

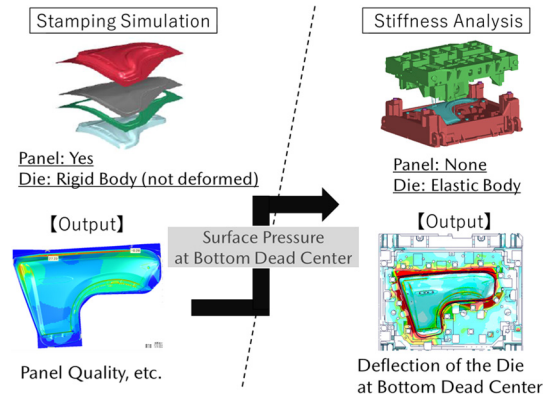


Fig. 7 Conventional CAE Process

3.2 強連成解析の導入とその有効性

強連成解析とは、金型を弾性体として成形シミュレーションを行う技術である (Fig. 8)。この技術のメリットは、プレス成形の過程で逐次発生する成形反力の大きさや向きを適宜金型の変形へ反映させながら、パネル成形性の評価が行える点にある。これにより、特に絞り成形においては、より実機に近いシミュレーション結果を得ることが期待できる。

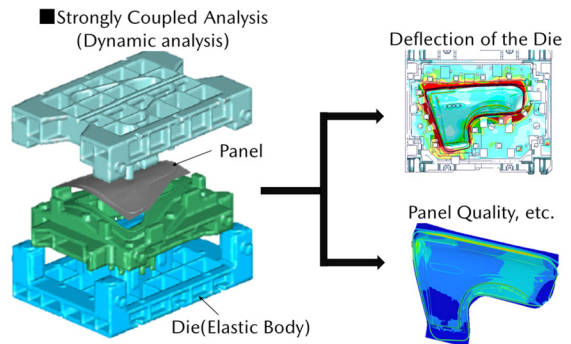


Fig. 8 Strongly Coupled Analysis

この技術の有効性を検証するため、机上と実機の流入量を比較検証した (Fig. 9)。絞り成形時の金型の逐次変形により、ドロービードの形状が実機と同じように変化することを再現できた。その結果、従来の成形シミュレーションと比較して、材料流入量の予測精度が向上した。これにより、強連成解析が実機に近い結果を提供する有効な手法であることが確認された。

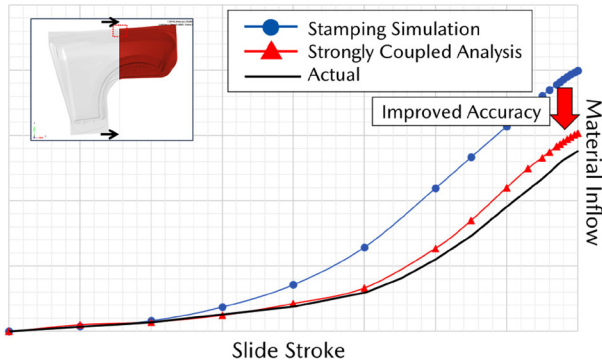


Fig. 9 Comparison of Material Inflow

この強連成解析を活用し、金型のたわみが材料流入量を変化させるメカニズムの解明に着手した。

4. プロセス革新に向けた取り組み内容

4.1 メカニズム解明

強連成解析手法を活用し、従来の成形シミュレーションと結果を比較しながら流入量に予実差が生じるメカニズム分析を行った。強連成の解析結果を分析した結果、材料ホルド時にドローステッドを成形した際に、成形反力によってブランクホルダーが内倒れ変形を起こしていることが確認できた。これに伴い、ドローステッドの形状もブランクホルダーのたわみ量とほぼ同程度、ねらいの形状から崩れていることが確認できた (Fig. 10)。

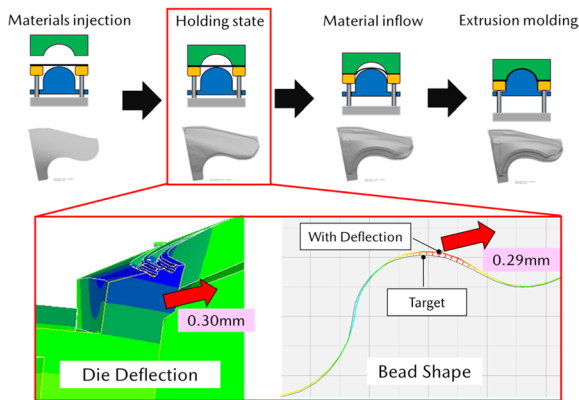


Fig. 10 Relationship between Die Deflection and Bead Shape

次に流入抵抗を分析した結果を以下に示す (Fig. 11)。ドローステッドの形状がねらいから外れて形状が変化することで、従来の成形シミュレーションと比較して流入抵抗が約 1.2 倍大きくなっていることが分かった。

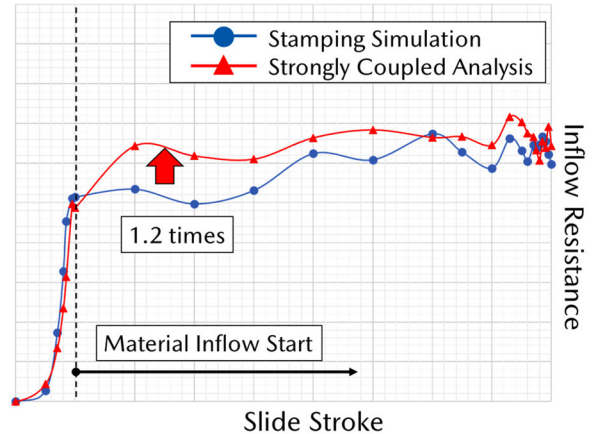


Fig. 11 Difference in Inflow Resistance

以上の結果から、金型がたわむことでドローステッドの形状がねらいから外れ、流入抵抗が変化することで流入量に予実差が生じるという一連のメカニズムを解明することができた。この分析結果から、流入量の予実差要因となる材料ホルド時の金型たわみ量の最小化に取り組んだ。

4.2 金型たわみ量最小化の検討

金型剛性の向上を図るための最も簡便な方法は、断面構造を中実近づけることである。しかし、この方法では鋳物の重量が大幅に増加し、コスト上昇や鋳物製作時のCO₂排出量の増加を招く。したがって、従来の構造よりも軽量化を図りつつ、金型剛性を向上させることが求められる。本取り組み事例では、軽量かつ高剛性な金型構造を導出する手段としてトポロジー最適化を活用した。

トポロジー最適化とは、設計空間 (材料分布範囲) 内で最適なレイアウト (配置) を生成する手法であり、目的とする性能基準 (本稿の場合は剛性) を制約条件下 (本稿の場合は体積を 10%以下) で最大化するものである (Fig. 12)。構造解析を行い、その結果から感度解析を行い、モデル更新を実施することで基本骨格及び基本断面を導き出す。

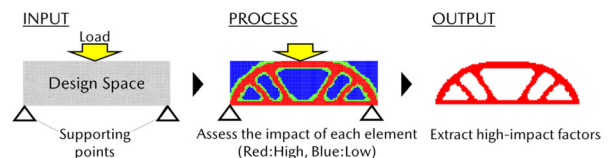


Fig. 12 Topology Optimization Calculation Flow

プレス金型の重要な骨格部分を見極めるために、このトポロジー最適化を活用してきた。トポロジー最適化により基本骨格を導出するにあたり、流入量の予実差要因となっている成形反力に対する型剛性向上を目的として、材料ホルド時のドローステッド成形における入力荷重を与えた。これにより、成形反力に対して必要な骨格形状を導出した。導出された構造部を以下に示す (Fig. 13)。

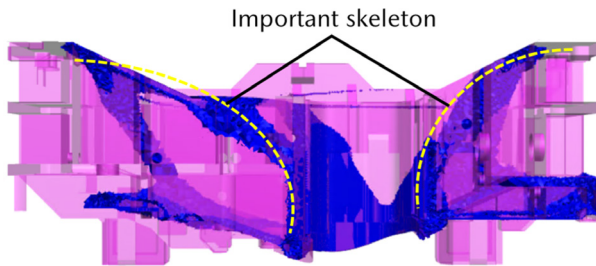


Fig. 13 Critical Skeleton Derived from Topology Optimization

この導出結果から、入力荷重（成形荷重）を与えた成形部から、固定点（プレス設備）までをアーチ状につなぐ構造が軽量、かつ高剛性なかたちであることが判明した。

このトポロジー最適化から得られた結果をヒントに、基本骨格の作成を行った。トポロジー最適化から導出された構造部は、入力条件に対して必要な要素のみを計算結果として出力するため、その他の型機能上必要な要素（金型を吊り上げるハンガー構造など）は出力結果に反映されない（Fig. 14）。更に、鋳物製作性も満足していない構造となっており、このまま基本骨格として使用するためには、モデルの修正が必要である。

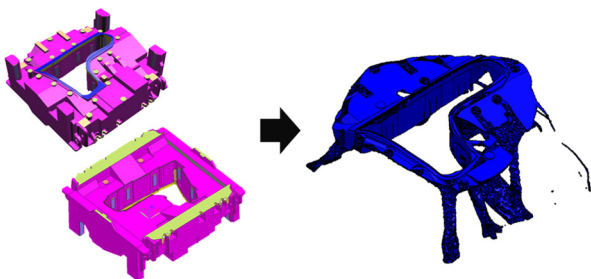


Fig. 14 Structure Derived from Topology Optimization

そのため、トポロジー最適化から導出された構造部をベースに鋳造性を考慮しながら、基本機能を満たすために必要な構造物は追加を行った（Fig. 15）。

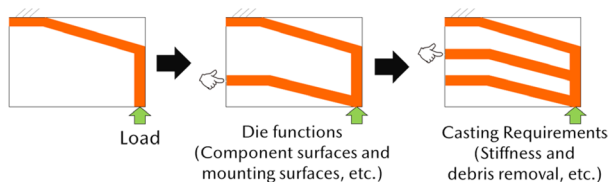


Fig. 15 The Process of Modification of the Basic Skeleton

次に部位ごとの剛性寄与度評価を行った。寄与度の評価には実験計画法を使用した。トポロジー最適化結果に修正を行った基本骨格に対して、基本断面の部位を因子に置き換え水準を設定し、各組み合わせごとの評価を行った。この評価結果に基づいて断面構造を決定し、製

作性、量産運用性を考慮した構造を以下に示す（Fig. 16）。

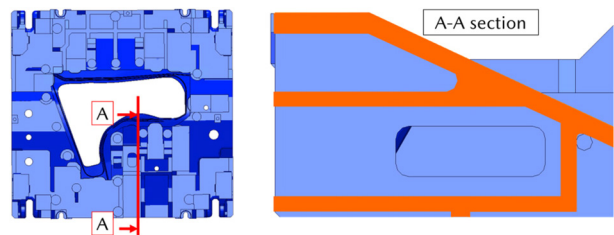


Fig. 16 Optimal Cross-Sectional Structure

この断面構造を採用することで型剛性が向上し、金型の軽量化を実現しつつ、従来よりも10%のたわみ量低減を達成した。これに加え、断面寸法と入力荷重、ドロワービード形状（荷重方向）、固定点位置をインプットすることで今回の知見を基に設定された断面構造、断面寸法を導出する構造検討手法を構築した。

4.3 金型たわみ量の補正プロセス変革

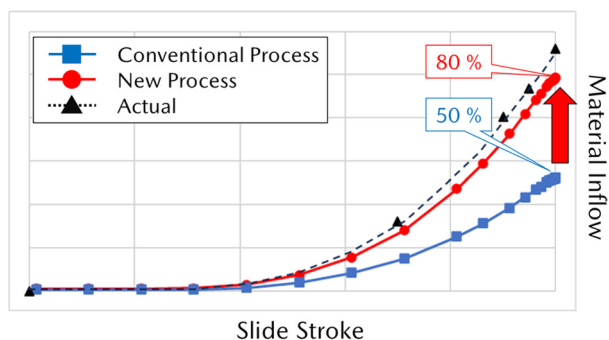
次に、金型たわみ量の補正プロセスの変革に取り組んだ。プレス金型はどれほど剛性を向上させても、剛体ではないためプレス成型時の大荷重によりわずかに変形してしまう。この変形によって上下型のクリアランスが動的に変わるため、あらかじめ金型のダイフェース面（外周押さえ面）に補正を加える必要がある。

従来の手法は、過去の金型改善の実績や設計者の経験に基づき見込んでおり、新規デザインや生産設備の違い、その他の構造的な差異によるたわみ量の違いにより、実機でのクリアランス調整が必要であった。

新プロセスでは金型構造が定まった段階で再度強連成解析を実施し、金型のたわみ量やその方向、及びパネル成形への影響を見える化し、その結果を基にダイフェース面及びドロワービードの補正量を決定するプロセスへ変更した。このプロセスへ変革したことで、見込みの効果を実機で確認していた従来のプロセスに対して、補正の効果を机上で確認し、パネル品質を保証することが可能となった。

4.4 織り込みによる効果

これらの技術、補正プロセスの導入により、従来車種では下死点での材料流入量一致度（=CAE予測値/実測値×100）が50%程度だったのに対して、一致度80%と向上させることができた（Fig. 17）。また、金型たわみ量、ドロワービード形状の予測精度も向上した。結果、調整レスで絞り成形を下死点まで完了させることができ、良好なハイライトの一致度も実現することができた。



Slide Stroke
Fig. 17 Comparison of Material Inflow

5. おわりに

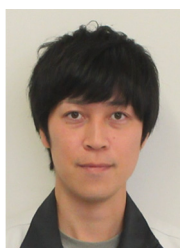
本稿では、CAEを活用した、デザイン忠実再現に向けたプレス金型設計の取り組みを説明した。新たに構築した強連成解析手法と既存技術を組み合わせることで、金型たわみ量の最小化とたわみ補正プロセスを実現し、デザインの忠実再現に貢献することができた。

今後も、プレス量産準備プロセスにおける机上予測技術を進化させることで、「走る喜び」を進化させ続け、お客さまの「生きる喜び」を通じて社会に貢献し続けていく。

参考文献

- (1) 徳留ほか：魂動デザイン再現に向けた金型磨きの進化，型技術，Vol.36，No.12，pp.036-037（2021）
- (2) 山口ほか：CAE技術を活用したプレス金型の成形面補正プロセス変革，型技術，Vol.38，No.13，pp.060-061（2023）

■著者■



吉川 速人



山下 剛史



山口 大輔



近藤 剛志