

論文・解説

35

## 高効率ホットスタンプ加工技術開発 Development of High-Efficiency Hot Stamping

平尾 嘉英<sup>\*1</sup> 井上 誠二<sup>\*2</sup> 大川 慧<sup>\*3</sup>  
Yoshihide Hirao Seiji Inoue Chie Okawa  
當房 勝<sup>\*4</sup> 奥村 聡志<sup>\*5</sup>  
Masaru Tobo Satoshi Okumura

### 要約

ドライバーが意図するままに操ることのできる「人馬一体」のドライブフィールと安全性を兼ね備えた車を実現するため、乗員周りの骨格部品の強度確保と、徹底的に軽量化したボディー構造の両立に向けて日々取り組みを行っている。その主要技術のひとつであるホットスタンプは、プレス成形すると同時に焼入れを行い1800MPa級等の強度をもつ製品を造ることができる。加熱することにより成形時の材料強度が低くなるため、冷間の超高張力鋼板（超ハイテン材）の加工に比べて成形性が優位となることを利用し、これまでも形状が複雑な骨格部品にこの技術を適用してボディーを高強度・軽量化してきた。更なるボディー構造の進化及び適用部品の拡大を図るため、従来工法比4倍となる高効率な『直水冷ホットスタンプ技術』の開発を行った。本稿では、人馬一体と安全性を実現するために新世代ラージ商品群で取り組んだ高効率ホットスタンプ加工技術開発について紹介する。

### Abstract

In order to realize a car that has a “Jinba Ittai” drive feel and safety, allowing a driver to experience predictable and responsive handling, Mazda has been making efforts to achieve a body structure that is thoroughly reduced in weight while ensuring the strength of the skeletal parts around an occupant. Hot stamping, which is one of the key technologies, can produce products with a strength of 1800MPa class by simultaneously press-molding and quenching the parts. Since heating lowers the material strength during molding, hot stamping has an advantage in formability compared to the process of cold forming of ultra-high tensile strength steel (ultra-high-tensile material), and it has been used for skeletal parts with complicated shapes to make the body lighter and stronger. In order to further evolve the body structure and expand the range of the applicable parts, a highly efficient “direct water-cooling hot stamping technology” that is four times as efficient as the conventional method has been developed. This paper introduces the development of high-efficiency hot stamping technology that realizes “Jinba Ittai”.

**Key words** : Materials, Production, High-Strength Steel Sheet, Forming process, Die, Stamping technology, Strength, Welding, Press, Hot stamping, Die quenching

### 1. はじめに

マツダがブランドエッセンスに掲げている「走る歓び」を体現した車をお客様にお届けするため、操縦安定性と衝突安全性はより高い次元での両立が求められている。また、地球環境への配慮にはLCA (Life Cycle Assessment) 視点でのCO<sub>2</sub> 排出量削減の取り組みが急務であり、これらの要求に応えるために自動車ボディーの更なる高強度

化と軽量化を進めている。コスト面で有利な鉄のポテンシャルを最大限に活用した上で、アルミなどの軽量材料を適材適所に採用する戦略を立てて技術開発に取り組んだ。

鋼板材料の高強度化工法の1つとしてホットスタンプがあり、マツダでもこれまで採用してきた。しかしながら、ホットスタンプ工法は冷間プレス工法と比べて生産性に課題があり、加工時のCO<sub>2</sub> 排出量削減の観点からも

\*1～5 車体技術部  
Body Production Engineering Dept.

生産性改善が求められる。そこで、日本製鉄(株)と共同で高効率ホットスタンプ技術の開発に取り組んできた。本稿では、この開発における部品構造の進化による軽量化及び生産性向上について紹介する。

## 2. ラージ商品群への適用に向けて

### 2.1 冷間プレスとホットスタンプ

高強度な材料を使用することで部品の板厚を薄くし、ボディ重量を低減する手法の適用拡大が進んでいる。MAZDA3 においては 980MPa 級以上の超ハイテン材の使用比率を約 30%と飛躍的に上げることで、衝突安全性と軽量化を両立した<sup>(1)</sup>。

ボディの高強度化を達成するための技術には主に冷間プレスとホットスタンプの 2 つの工法があり、それぞれに特徴をもっている (Fig. 1)。このように生産方法に選択肢があり、部品の機能や形状ごとに適切な工法を採用することはマツダの車造りにおいて強みとなる。それぞれの工法の優位性を活かし、改善を積み重ねることで技術を深化させる取り組みが重要となる。

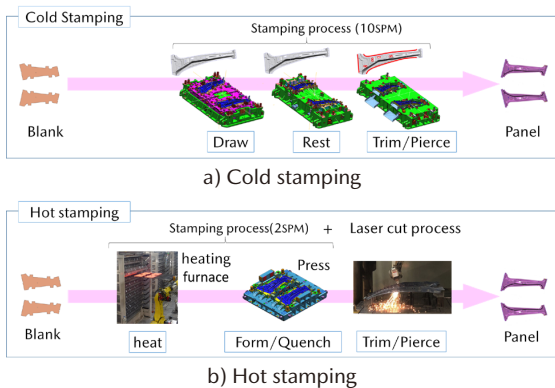


Fig. 1 Comparison of Cold Stamping and Hot Stamping

冷間プレスは鋼板の成形や穴あけ (以下、ピアス)、外形の切断 (以下、トリム) などを 3 工程程度に分けて加工している。また、Table1 に示すように生産性が非常に高い。MAZDA3 のボディでは 1310MPa 級超ハイテン材の量産化に世界で初めて成功しており<sup>(2)</sup>、更に今回のラージ商品群に向けては 1470MPa 級の量産導入を実現した。

一方でホットスタンプは、加熱炉で約 900℃まで熱した軟らかい状態の材料をプレス成形するため、複雑な形状にも対応できる成形性の良さをもつ。また、冷間プレス部品では成形した製品を金型から取り出すと、曲げた状態から元に戻ろうとするスプリングバックが発生するが、ホットスタンプではこの現象がないため形状凍結性に優れている。成形直後に金型内でパネルを急冷して焼入れを行うことで 1300MPa、1500MPa 及び 1800MPa 級の高強度を得ることができる。

Table 1 Characteristics of Stamping Method

	Strength (MPa)	Productivity	Formability	Shape fixability	Press machine capability
Cold	~1470	○	△	×	High
Hot	~1800	×	○	○	Low

### 2.2 ラージ商品群ボディ構造の進化

ラージ商品群では操縦安定性と衝突安全性の更なる向上を目指した。衝突性能においては各部品の受けもつ荷重配分が増えるため、従来ボディ構造のままでは性能を満足するには補強部品を追加し、製品の板厚を厚くするなどして重量が増加してしまう。そこで「性能」と「軽量化」を両立するため、開発部門との共創により材料の高強度化と部品の小型化を推進し、新たなボディ構造を造り込んだ。

Fig. 2 はラージ商品群の CX-60 における内製ホットスタンプ部品である。今回は B ピラーレイフォースメント (以下、B ピラーレイン) を例に説明する。この部品の衝突における要件は、上段部は乗員生存空間を確保するために変形させず、下段部は衝突エネルギーを吸収するために積極的に変形させることが必要である。これらを具現化する技術として、上段部へ稜線補強構造 (以下、パッチワーク構造)、下段部へテーラード構造を採用した (Fig. 3)。

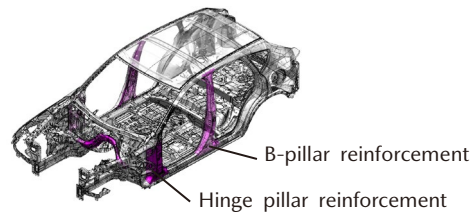


Fig. 2 In-house Hot Stamping Parts in CX-60

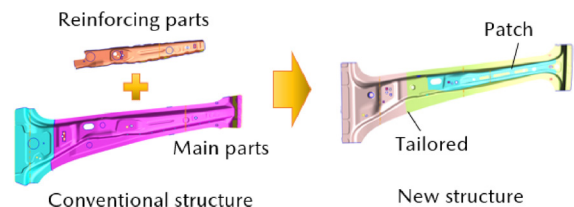


Fig. 3 Structure of B-pillar

これまでの上段部の稜線補強は、それぞれ成形された本体部品と別部品を SW 溶接することで対処してきた。これに対して Fig. 4 のパッチワーク構造は、材料段階でスポット溶接した後に成形することで溶接機の干渉等による制約を回避し、部品を小型化した (Fig. 5)。

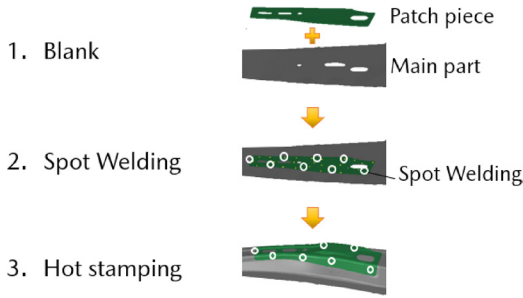


Fig. 4 Patched Hot Formed Steel

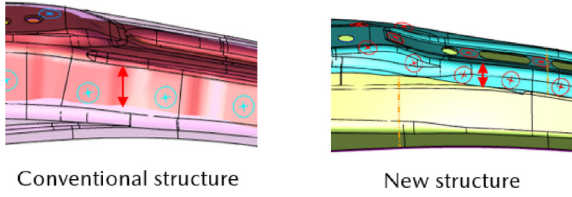
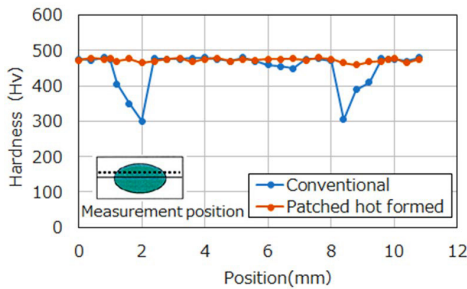
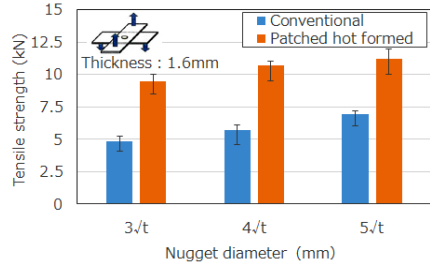


Fig. 5 Minimization of Reinforcing Parts

更に、パッチワーク構造のスポット溶接部については強度向上で性能に貢献した。一般的に、溶接する際の入熱により Fig. 6-a のような材料が部分的に軟化する現象が発生する (HAZ 軟化)。しかし、ホットスタンプ加工による再焼入れで組織が均一に変化し、HAZ 軟化がリセットされる。そのためパッチワーク溶接部の硬度は均一となり、強度が向上した (Fig. 6-b)。



a) Hardness distribution of nugget



b) Cross tensile strength of spot welds

Fig. 6 Prevent of Heat-affected Softening Zone

下段部のテーラード構造は、製品の上側と下側で強度レベルや板厚の異なる材料をレーザー溶接で繋いだテーラードウェルドブランクを用いたものである。これにより、衝突時におけるエネルギー吸収のための変形を制御した。

これらパッチワークとテーラード構造を採用すること

で、ホットスタンプの B ピラーレインでは衝突性能を向上しつつ、従来構造比 34%の軽量化を達成した。実際の量産化に向けては「工程集約による生産効率向上」と「直水冷方式採用による生産タクト向上」に重点を置いて、ホットスタンプの高効率化に取り組んできた。次章以降でこれらの課題と取り組みについて紹介する。

### 3. 工程集約の課題と取り組み

#### 3.1 プレス・車体領域の工程集約

生産効率向上のため、プレス・車体領域において工程の廃止や集約に取り組んだ。パッチワーク構造は、前章の Fig. 4 で述べたように補強部品を材料段階で本体と一体化し、それをホットスタンプ成形する。この構造を採用し、車体領域の溶接工程をプレス領域に集約することにより、通常なら 4 工程で成形する補強部品のプレス工程を完全に廃止した。また、Fig. 7 に示すように一般的に後工程でレーザーカットしている製品のトリムやピースをホットスタンプ工程に取り込み、B ピラーレインで完全レーザーカットレスを目指した。次にパッチワーク構造採用とレーザーカットレスの工程集約における具体的な内容を説明する。

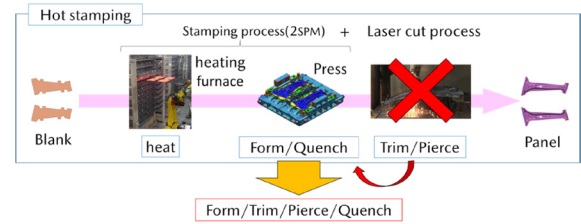


Fig. 7 Process Integration of Hot Stamping

#### 3.2 工程集約におけるパッチワークの課題と取り組み

製品の性能確保と軽量化を達成し、工程集約を実現できるパッチワーク構造の採用には工程設計や CAE 解析手法に課題があった。

材料本体と補強部品をスポット溶接した後にホットスタンプ加工するため、成形時の板ズレ方向においてスポット溶接部にズレが発生する (Fig. 8-a)。これではねらいの溶接強度を得ることができず、衝突性能等を満足することができない。よって、スポット溶接部のズレを抑制することが工程設計時の課題であった。これに対しては性能を担保し、生産性を満足する適切なスポット溶接位置を開発部門との共創により決定した。成形で材料が引っ張られて溶接部に高応力が掛かる箇所を見極めることに加え、周りを変形させて溶接部への応力自体を減らす形状を織り込んだ。これらの取り組みにより、スポット溶接部のズレを抑制した (Fig. 8-b)。



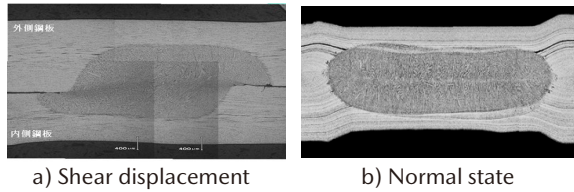


Fig. 8 Spot Welding

また、材料が2枚重なったパッチワーク状態で成形する際の製品のワレやしわ、外郭ラインの寸法精度、パッチワークスポット溶接部の位置精度の評価方法についても検討した。CO<sub>2</sub>削減の観点から、実機を製作してのトライ&エラーではなくCAE解析を活用した机上評価は必須である。そこで、解析モデルや解析条件の検討を行い実際の成形をCAE解析に置き換える方法を確立することで、量産準備における各項目の評価を実施した (Fig. 9)。

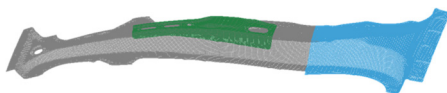


Fig. 9 Simulation of Patched Hot Formed Steel

### 3.3 工程集約した金型構造の課題と取り組み

レーザーカットレス実現に向けた課題は、成形工程とトリム・ピアス工程を集約した金型構造を実現することである。ホットスタンプ型では成形工程に加え、製品及び金型を冷却するための複雑な冷却水用配管などを金型内部に設定する必要がある。更にトリム・ピアス工程も1型に集約することで、レイアウトの成立性に加え、金型を破損させないための強度・剛性確保を両立する金型設計の難易度は大幅に上がった (Fig. 10)。そこで、主に2つのアプローチで金型構造を成立させた。

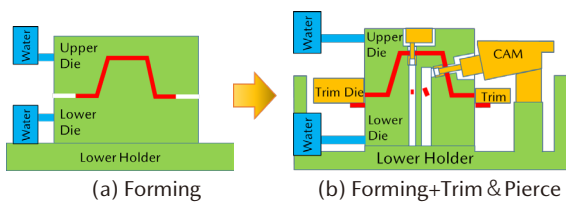


Fig. 10 Development of Hot Stamping Methods

1つ目は金型内での材料の位置決め性を向上させることである。金型での切断加工を減らすために、材料の段階で事前に切断しておくが、成形時にズレが生じると製品の寸法精度を満足できない。このズレを抑制するために位置決めを確実に行う必要がある。具体的には製品形状内に設けた穴に対して、金型側にはピンを設定して位置決めを行った。しかし、ホットスタンプの場合は材料の熱膨張と収縮により穴径及び穴ピッチが常に変化する。更に、成形時に位置決め穴とピンが接触することにより穴変形(メクレ)を発生させてしまうと、赤熱したパネルが接触するためピンへのダメージが大きい。これらを

考慮し、製品形状及び金型構造で対策を講じた。

2つ目は金型剛性解析を活用した検討である。冷間プレスでの金型設計においてはこれまで積極的に工程を短縮しており、型強度等に懸念がある場合、CAE解析を行って金型強度を評価していた。ホットスタンプの金型設計では、更に成形解析の結果を用いた連成解析を行い (Fig. 11)、金型の強度・剛性不足箇所を漏れなく抽出した。この結果に対し、構成部品や金型材質の選定など金型構造を見直した。

これらのアプローチにより工程集約したホットスタンプ型の構造を成立させ、完全レーザーカットレスを実現した。

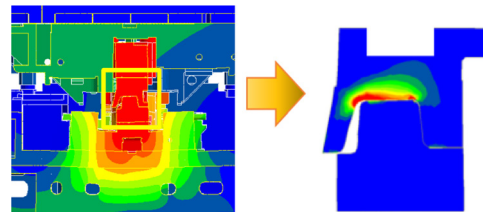


Fig. 11 Structural Analysis Results of Die

## 4. 直水冷方式採用の課題と取り組み

### 4.1 ホットスタンプの生産タクト

従来ホットスタンプ工法の課題であった生産タクトを向上するには、焼入れ冷却時間の短縮が鍵となる。パッチワーク構造の採用により、総板厚が厚くなるため冷却時間が長くなり、更なる生産タクトの悪化が想定される。そこでマツダでは、冷却性能を上げるため従来の型冷却方式ではなく直水冷方式<sup>(3)</sup>を適用すべく技術開発を行ってきた。型冷却方式とは Fig. 12-a に示すように製品を上下金型で挟み込んで抜熱する方法で、金型冷却用配管を型内に設定している。これに対して直水冷方式は直接製品に水を掛けて冷却する方法で、金型の形状面には冷却水の通り道 (以下、流路) を設定している (Fig. 12-b)。この方式を採用することにより、型冷却では冷え残っていたパッチワーク部についても時間を大幅に短縮して冷却できるため、生産性は従来工法比4倍以上の高効率を達成した (Fig. 12-a, b)。

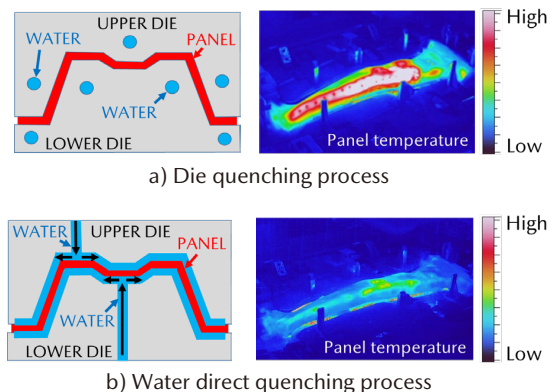


Fig. 12 Cooling Method of Hot Stamping

#### 4.2 直水冷方式採用の課題

ホットスタンプにおける冷却の課題はパネルを均一に急速冷却することであり、これが不均一になると製品の強度低下と寸法精度の悪化を招いてしまう。ラージ商品群のBピラーレインは、性能向上のためにパッチワークとテーラード構造を採用しており、同一部品内で板厚の異なる箇所が混在する。これが不均一な冷却の原因となるため、パネルのもつ熱量が板厚によって異なることを考慮した流路設計が必要となる。更に、連続生産すると金型温度が上昇し (Fig. 13)、冷却が不均一な場合と同様の影響を製品に及ぼす。そのため、流路設計では製品だけでなく金型も冷却し、温度上昇を抑制することが求められる。

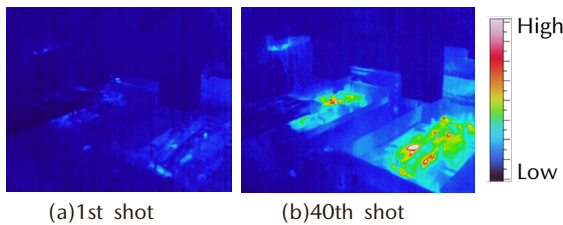


Fig. 13 Rise in Die Temperature by Production

#### 4.3 直水冷方式採用の課題に対する取り組み

4.2 で述べた冷却課題の達成と、冷却性能を机上で評価して保証することを目指し、流体解析技術の構築に着手した。流路設計にあたっての冷却の基本的な考え方は、一般式ニュートンの冷却法則 (1) にあるように熱量  $Q$  は、熱間パネル温度  $T_p$  と冷却水温度  $T_w$  の差に比例するというものである。

$$Q = Sh(T_p - T_w) \quad (1)$$

このとき、熱伝達率  $h$  と熱間パネルと冷却水の接触面積  $S$  の積が比例定数となる。ここで、熱伝達率に影響する冷却水の流速に着目し、机上での流速再現に取り組んだ。流速が遅い場合、長時間に及び熱間パネルと冷却水の間に蒸気の層が生じて冷却を阻害する (ライデンフロスト現象)。この影響を極力小さくするためには流速を一定値以上確保した上で、均一冷却を行うことが必要と考えた。

まず、実際の金型の型締め状態における冷却水の流れを可視化するため、製品を透明パネルに置き換えて金型に押し当て、冷間状態を模擬した流速の測定を試みた。水の中に粒子を添加し、時間ごとの粒子の挙動を測定することで流れを可視化した。この測定結果を基に実機と流体解析結果の合わせ込みを実施し、その過程においてメッシュサイズや壁面抵抗の影響を考慮した。これにより、流速が速い箇所と遅い箇所の傾向を机上で見極めることが可能となった (Fig. 14)。

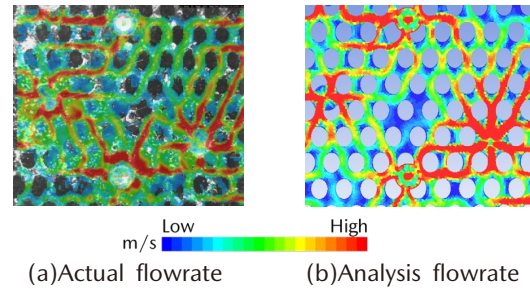


Fig. 14 Comparison of Flowrate

この流体解析技術を用いて冷却を制御するための検討を行い、流路レイアウトなどを改良した。流路内で水がぶつかり合うと流速が遅くなり、流速差が発生する。そこで、流速を妨げない流路レイアウトのパターンをいくつか構築した (Fig. 15)。パッチワークやテーラード構造の採用で板厚が異なる箇所については、それぞれに有効なレイアウトパターンを組み合わせ、更に流路間ピッチを最適化し、課題であった均一な冷却を達成した (Fig. 16)。

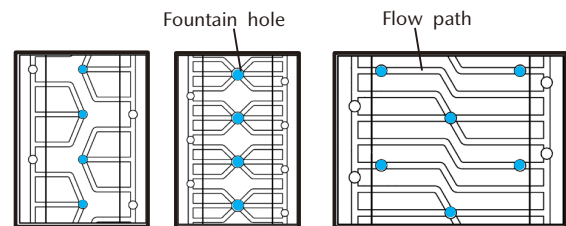


Fig. 15 Flow Path Layout

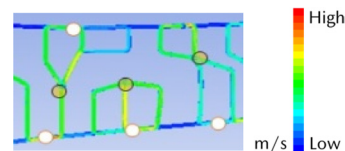


Fig. 16 Flow Velocity by Fluid Analysis

更に、連続生産時の製品強度と寸法精度を保証するため、金型表層部に仕込んだ熱電対とサーモカメラで実際的な金型温度を測定し、ねらいの温度以下で生産できることを確認した。

上記技術を用いて関連部門と共創し、金型設計前の製品形状検討段階において机上で均一に急速冷却するための評価を行った。そしてこの流路設計を量産金型に織り込むことで、ラージ商品群のBピラーレインに求められる製品強度と寸法精度を実現した。

## 5. おわりに

人馬一体と衝突安全性をより高い次元で両立した車をお客様にお届けするため、高効率ホットスタンプ加工技術の開発を行ってきた。この技術を織り込んだ製品をラージ商品群で採用できたのは、生産技術部門だけでな

く開発・工場部門と共創活動した成果である。今後も製品の性能向上や品質向上を目標に机上検証のレベルアップを図り、ホットスタンプ技術を深化させる挑戦を続け、お客様に喜んで頂ける商品を造っていく。

最後に、本技術開発は日本製鉄(株)との共同開発によるものであり、関係された皆様に感謝の意を表す。

### 参考文献

- (1) 佐藤ほか：新型 MAZDA3 の軽量・高剛性ボディ開発，[マツダ技報，No.36，pp.78-82 \(2019\)](#)
- (2) 酒井ほか：1310MPa 級高張力鋼板冷間プレス部品の開発，[マツダ技報，No.36，pp.192-198 \(2019\)](#)
- (3) 野村ほか：部材高機能化のためのホットスタンプ技術，日本製鉄技報，No.412，pp.21-27 (2019)

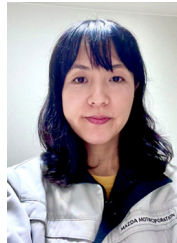
### ■著者■



平尾 嘉英



井上 誠二



大川 慧



當房 勝



奥村 聡志