

特集：MAZDA CX-60

25

長尺アルミクラッチドラムの塑性加工、 及び異種材結合技術の獲得

Development of Plastic Forming and Clinching Dissimilar Material Technology for Long Aluminum Clutch Drum

野畑 俊也^{*1} 河野 弘和^{*2} 田中 雄幸^{*3}
Toshiya Nobata Hirokazu Kouno Takeyuki Tanaka
長野 隼門^{*4} 椎野 和幸^{*5} 新家 泰平^{*6}
Hayato Nagano Kazuyuki Shiino Taihei Shinke

要 約

マツダのブランドエッセンスである“人馬一体”の走りを実現するため、後輪駆動（以下、FR）用オートマチックトランスミッション（以下、AT）には“理想のペダルワークスペース”の実現、NVH性能向上、優れた環境性能の実現が求められる。そのためには、ATユニットの細長化、軽量化及び変速機構の直列配置化が求められ、変速機能をもつATユニット内クラッチドラムを長尺化、軽量化していかなければならない。その手段として、クラッチドラムを鉄材からアルミニウム材（以下、アルミ）への材料置換を適用した。このアルミ化に対し、環境負荷を抑えることを狙った塑性加工技術開発を行い、金型形状、工法選定を最適化し、良品条件を確立した。加えて、アルミ塑性加工時のネッキングを机上で判定できる評価手法・指標を確立した。クラッチドラムは別の構成部品（鉄）と結合しAT内に組み込むが、その結合工法については精度確保のため、“絞り方式により母材同士を直接結合するカシメ結合”を選定した。これは、動力伝達機構領域で初採用となる工法のため、基礎実験から、車のさまざまな使用条件に対する耐久信頼性を評価し成立させた。本稿ではこの取り組みについて報告する。

Abstract

To achieve an ideal pedal-work-space and improved NVH with lower inertia, leading to improvement in driving pleasure as well as environment performance, AT for FR requires a lighter, long clutch drum with a large-diameter. With a purpose of replacing the steel drum with aluminum one that is lighter weight, we have developed aluminum plastic forming technology to realize environmentally-friendly products having Jinba Ittai driving feel (oneness feeling of horse and rider) as well. In the course of the development, we have established quality conditions by optimizing the die shape and production process, and achieved virtual evaluation index for aluminum forming. We applied clinching for joining the clutch drum with steel parts as an AT component for precision. As adopting the clinching joint in a drivetrain unit was unprecedented, we have started the development from the fundamental experiments. Through the co-creative efforts with the Testing and Research Group, our initiative succeeded in significant weight reduction of the AT unit. This report introduces our activities.

Key words : Automatic transmission, NVH, Plastic forming, Clinching dissimilar material, Clutch drum

1. はじめに

“人馬一体”の走りを実現する要素の1つとして、理想のドライビングポジションがあり、“理想のペダルワークスペース”の実現が必要である。そのためには、FR用AT筐体の幅を極小化することが求められ、AT内の変速機構

を直列に配置する必要があり、クラッチドラムは長尺形状となる。ここで、クラッチドラムにアルミを使用することを検討した。生産工程的にダイキャスト後に、機械加工を行うことが一般的であるが、この工法では歩留まりが低く、生産時の環境負荷が大きく、生産コストが高い。そこで、高い歩留まりと高速生産を実現できる塑性

*1～6 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

加工技術による環境負荷低減 ($\Delta 2.7\text{kg-CO}_2/\text{unit}$) 及び低コスト化を目指し、業界初のアルミ材を用いたクラッチドラム (Fig. 1) の塑性加工技術開発を行った。アルミは従来クラッチドラムに使用している熱間圧延鋼板 (以下、鉄) に比べ、ネッキング、割れ (以下、ネッキング) という局所的な板厚減少が発生しやすい。また、今回の長尺アルミクラッチドラムでは、従来の前輪駆動 (以下、FF) 用 AT 向けクラッチドラムと比較して L/D で 2 倍以上の絞り深さを必要とし (Fig. 2)、成形時に発生するネッキングを抑制するために緻密に工程設計を行う必要があった。そこで今回、高い成形難易度に対する塑性加工技術開発と、融点の異なるアルミクラッチドラムと鉄系材料の構成部品の異材結合技術開発を行った。

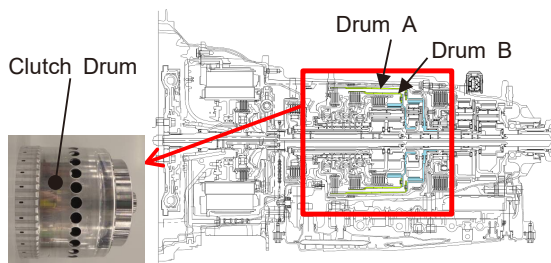


Fig. 1 Cross Section of AT for FR and Target Part

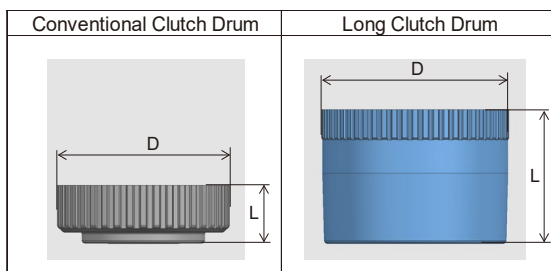


Fig. 2 Clutch Drum (Conventional, Long)

次章以降、具体的な取り組みについて述べる。

2. 長尺アルミクラッチドラムの課題

AT 内部には、クラッチプレートの締結、切離しを行い、動力を伝達、遮断するためのスプラインをもつ部品が多く組み込まれている。クラッチドラムはその代表的な部品である。従来クラッチドラムに使用している鉄の主な製造工程は、円板材からプレス加工、スプライン転造という塑性加工の後、別の構成部品 (鉄) と抵抗溶接により接合する生産性の高い工法の採用が一般的である。長尺アルミクラッチドラムは、従来品の鉄と鉄の接合から鉄とアルミの接合という機械的性質が異なることから、生産性の悪化や適用不可能な場合が予測された。

アルミ適用時の課題と解決のための視点を 3 つ挙げる。

(1) ネッキング予測技術の確立

成形性に大きく影響するのは「延性」である。鉄の伸び率約 40% に対しアルミは約 20% 程度で半減し、同一

形状の成形を行った場合、アルミの方がネッキングを起こしやすい。

(2) スプリングバック制御技術の確立

塑性変形後のスプリングバックに影響する「ヤング率」に着目した。スプリングバックとは、曲げ加工後に荷重を除荷すると、元の形にある程度戻る現象のことである。鉄のヤング率 (約 206GPa) に対しアルミは約 70GPa で、鉄と比べアルミの方がスプリングバックは大きくなる。スプリングバックが増加すると、製品形状の寸法バラツキが大きくなるのが分かっている。

(3) 異材結合工法選定プロセスの確立

接合に影響を及ぼす「融点」に着目した。鉄 1538°C に対しアルミ 660°C である。従来、鉄同士の動力伝達部品の接合にマツダが標準工程として採用している「抵抗溶接工法」は、塑性流動によるアンカー効果による高い接合強度を確保する工法である。しかし今回、アルミクラッチドラムと鉄の構成部品では、アルミが先に融点に達しアンカー効果を確保することができないため、抵抗溶接を成立させることが非常に難しい。代替工法の選定とプロセスの確立が必要であった。

長尺アルミクラッチドラムの塑性加工化実現には、これら 3 つの課題を解決する技術の確立が必要であった。

3. 課題解決にむけた取り組み

3.1 プレス成形時のネッキング予測技術の確立

(1) ネッキングを予測する評価指標としきい値

延性の低いアルミのプレス深絞り成形を手戻りなく実現するため、机上で工程設計、金型形状を評価し、最適な工程を導出することが有効である。

まず、アルミがネッキングを起こす条件を基礎実験 (右バンク) で検証する。基礎実験は、局所的な延性の評価ができる VDA 曲げ試験 (ドイツ自動車工業規格の板曲げ試験)⁽¹⁾ とし、Fig. 3 に示す曲げ型で試験を行う。ネッキング発生の判断は、パンチストローク中の荷重低下が発生した位置とした。Fig. 4 は試験中の変位 - 荷重曲線であるが、荷重低下発生位置でのネッキング発生が確認できた。また、パンチストロークを徐々に短くしたところ、ネッキング発生位置を基準として -2mm 付近でネッキング発生がなくなる状態を確認した (Fig. 5)。

次に、基礎実験の曲げ試験結果を CAE 上で再現させ、ネッキングの評価指標としきい値を決定した。ネッキングは、材料が引張により延性の限界に近づいたときに発生するものであるため、評価指標を「最大主歪」とした。このコンター図を Fig. 5 の CAE 結果に示す。実験と CAE の結果より、アルミのネッキングは最大主歪で評価可能であることを確認し、かつネッキングのしきい値を明確化した。

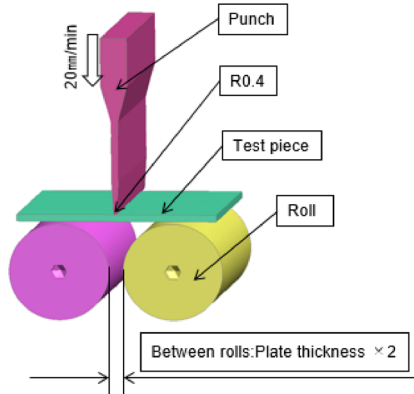


Fig. 3 Bending Test

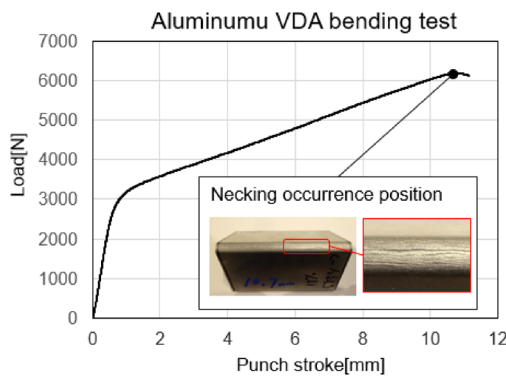


Fig. 4 Displacement and Load

Stroke	Aluminum(thickness 2.6mm)	
	Actual	CAE
necking occurrence position		
2 mm before the necking occurrence position		
4 mm before the necking occurrence position		
6 mm before the necking occurrence position		

Fig. 5 Bending Test Result

(2) ネッキングの評価指標としきい値の妥当性確認

Fig. 6 に示すアルミクラッチドラムの試作品でネッキングの評価指標としきい値の妥当性確認を行った。評価対象は、成形圧の高いフランジしごきの根本部とした。成形解析上で、成形に使用するパンチ R を R1 から徐々に大きく変化したときの製品の根本 R 部の最大主歪の値は、パンチ R が大きくなるにつれ局所的な延性が低減され、値が下がる傾向を確認できた。

また、パンチ R6 以上であればネッキングが発生しないことを確認した。机上検証結果から、パンチ R1, R3,

Measurement position	Punch R	CAE	Actual
	R1	Mesurmet position > X 	necking
	R3	Mesurmet position > X 	necking
	R6	Mesurmet position < X 	No necking

Fig. 6 Necking Evaluation Index/Validity Evaluation Result

R6 の成形パンチを製作し、実機確認を行った (Fig. 6 の実機結果参照)。この結果、机上で最大主歪のしきい値 (X) を越えるパンチ R1, R3 で成形した製品の根本 R 部はネッキングが発生し、しきい値以下のパンチ R6 ではネッキングが発生しないことを確認した。

以上により、今回導出したアルミ材のプレス成形時のネッキングの評価指標としきい値が妥当であることを確認した。また、同様のアルミ製品成形時の机上検証ツールとして、将来的にも幅広く活用できる目途を立てた。

3.2 スプライン転造時のスプリングバック抑制技術の確立

クラッチドラムのスプライン部成形工法は複数あるが、マツダでは成形精度とフレキシブル性を高次元で両立するスプライン転造を標準工法として採用している。スプライン転造とは、スプライン形状をもつマンドレルにお椀状のワークを設置し、マンドレルとワークを回転させて徐々に送りながら、マンドレルの回転に同期して回転する転造ローラーによってワーク外径から逐次的にワークを押し込み、ねらいのスプライン形状に成形していく回転塑性加工である (Fig. 7)。

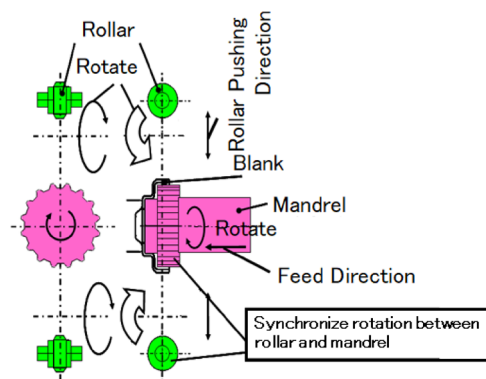


Fig. 7 Overview of Spline Forming

従来工法ではアルミは鉄に比べヤング率が小さく、スプリングバック量が約 1.5 倍大きい。スプリングバック量を抑制するためには、一般的に送り速度を下げる、あ

るいは転造量を減らすという対応がある。前者は生産性が落ち、ただし後者は、ねらいのスプライン形状が成形できないというデメリットがある。

今回、スプリングバック量を鉄と同等以下にするとともに、生産性と歯型成形性を高次元で成立させるため、転造時の塑性流動を従来工法以上に制御できる新工法開発に取り組んだ。

ここで、スプライン転造工程におけるスプリングバックの発生メカニズムは、転造時に材料が転造ローラーの回転方向ではなく周方向へ塑性流動することであると考えた。そのため、塑性流動の抑制を強化できる転造ローラーを検討・設計した。詳細設計のため、転造ローラーの軌跡を3D CADにより再現し、実際の転造中の現象と問題点を机上で再現した。

更に、転造ローラー回転方向への塑性流動と歯型成形性を両立できるローラー形状の検討を行い形状を決定した。具体的には、転造ローラー回転方向への塑性流動を強化するための材料押さえ構造を追加した。加えて、転造ローラーの軌跡を緻密に検討し、転造時に圧痕を発生させない押さえ構造とした (Fig. 8)。最終的に、新構造のローラーを採用することによって、アルミに対しても、鉄と同等以下のスプリングバック量と成形性向上の両立を確認した。併せて、机上検証の確からしさも確認した (Fig. 9)。更に本工法は材質に制約なく従来材料である鉄にも適用できる。

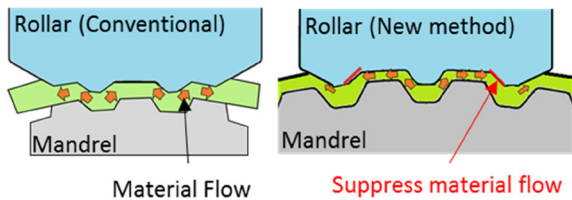


Fig. 8 Consideration of Material Flow

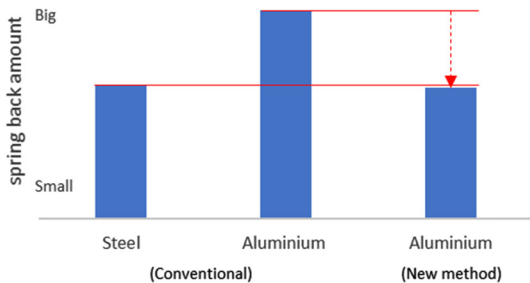


Fig. 9 Result of Spring Back

3.3 異材結合工法選定プロセスの確立

(1) 工法選定

アルミクラッチドラムにはATユニット上で動力伝達を行う機能が求められるため、クラッチドラムと高強度が要求されるスプライン、ギヤ等をもつ鉄の別の構成部

品と結合させる必要がある。従来工法の抵抗溶接は、上述のとおり、アルミ、鉄異材間には適用できない。

これに基づき、動力伝達機構として世界初採用となる“絞り方式により母材同士を直接結合するカシメ結合”の適用に挑戦した。カシメ結合は、実現難易度は高いものの、他工法に比べて生産性向上と低コストの実現可能性が高い。そこでまず、カシメ結合の形状をAT内のわずかなスペースへレイアウトできるようにするため、開発部門とのコンカレント活動を行った。

まず、工法選定にあたり、動力伝達機構以外にも視野を拡大した。薄板の異材結合工法としては、拡散結合、溶融結合、メカニカル結合及び接着が候補工法として挙げられた。

次に、これら候補工法の採否検討にあたり、動力伝達に必要な結合強度が求められるだけではなく、走る歓びへの貢献に向け、高精度な重量バランス達成のために必要な同軸度、軸長、外径 Min. 化によるユニットコンパクト化を高次元で両立させなければならない。要求機能と合わせて生産性やコスト、実現性も含めて候補工法に対して重みづけ評価を行い、カシメ結合を選定した (Fig. 10)。

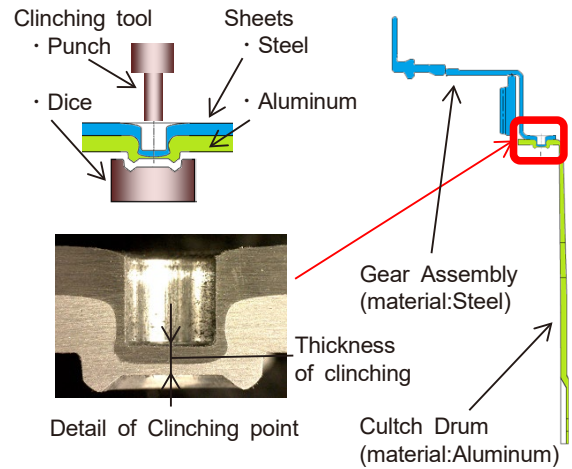


Fig. 10 Overview of Clinching and Cultch Drum

(2) 機能成立性の検証

カシメ結合部に求められる機能は、入力された動力をロスなく出力させることであり、変速時に動力のON・OFFが繰り返される耐久力も必要である。そのため、まず角材での単打点基礎実験 (Fig. 11) により、アルミと鉄の板厚、カシメツール径、押し込み量及びカシメ後厚み (Fig. 10) と結合強度 (抜き、せん断) との関係のデータベース化を行った。まず、実際のカシメレイアウトを模擬したテストピースでの一定のP.C.D.での多打点実験を行い、打点数と強度が比例関係にあることを確認した (Fig. 12)。その上で、基礎データをベースにツール径、打点ピッチ円径、打点数等に基づき、ユニット内レ

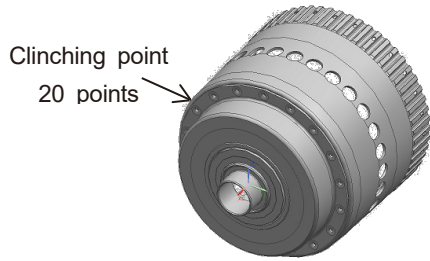


Fig. 11 Image of Multiple Point

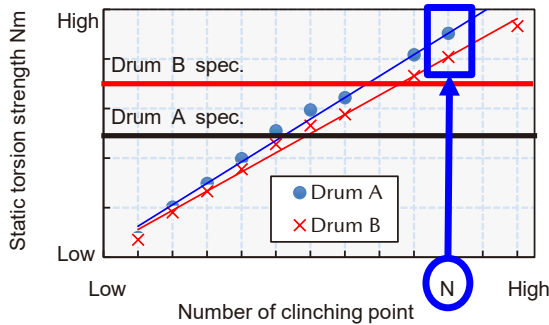


Fig. 12 Number of Clinching Point and Static Torsional Strength

アウト成立性と要求強度を満足できるかを並行検討した。

生産性を考慮した上で、安定して必要な強度を確保できるように、アルミと鉄のカシメ前板厚とカシメ後厚みに対して、量産での想定バラツキ幅以上のふらしテストを行い、鉄とアルミの板厚と公差、カシメツール径、カシメ後厚み、打点ピッチ円径及び打点数を決定した。これにより、最終ユニットレイアウトで静ねじり要求強度、静抜き要求強度を十分満足し、機能成立の目途がたった (Fig. 12)。

(3) 量産性を考慮した実機信頼性の獲得

実機形状での信頼性確保のためには、静的ねじり強度とねじり疲労強度の2特性を評価指標とした。

(3)-1 静ねじり強度

カシメ結合工程の原理原則から、制御因子、誤差因子を抽出し、実験の結果から、寄与率の高いカシメ後厚み、アルミと鉄のカシメ前板厚について、設定した管理幅以上の水準ふらしを量産設備でテスト加工を行い、静ねじり強度を実測した。寄与率の高い制御因子の振れ幅を考慮しても、ドラムA・Bいずれも規格を十分満足する結果が得られた (Fig. 13)。

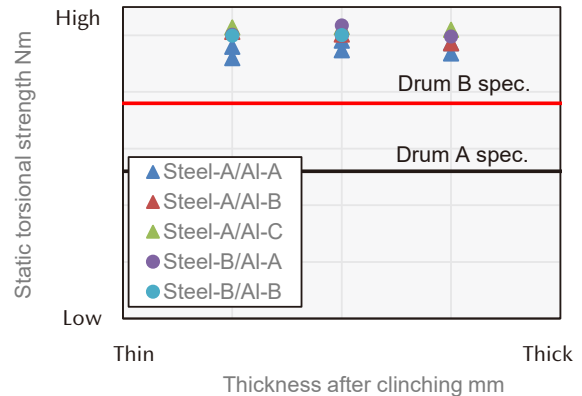


Fig. 13 Actual Result of Static Torsional Strength

(3)-2 ねじり疲労強度

カシメ部周辺でのアルミ、鉄各部材の発生応力を解析し、平均応力と応力振幅の関係式を導出し、テスト結果が疲労限度線以下であることを確認した (Fig. 13)。まず解析モデル上でカシメ断面の全ての形状寸法 (Fig. 14) について、各寸法の規格中央値を基準としてふらし応力解析を行い (Fig. 15)、発生応力と相関の高いカシメ断面主要特性を抽出した上で、カシメ負荷面高さ H、カシメ負荷面外径 D、及び応力集中部 R に絞り込んだ。

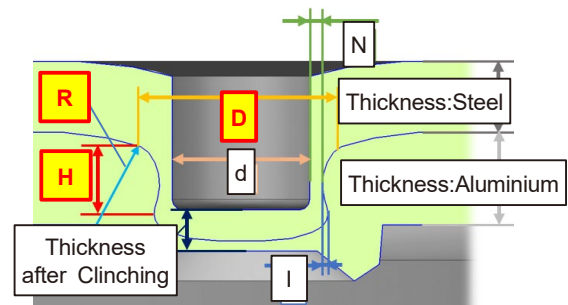


Fig. 14 Characteristic of Clinching Cross Section

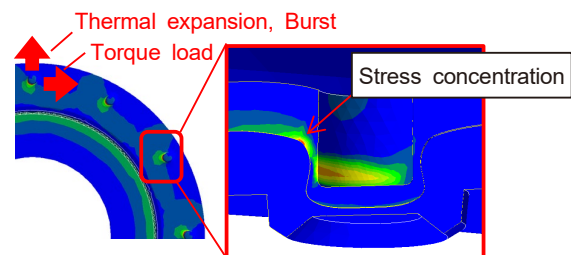


Fig. 15 Analysis Model and Generated Stress

全ての基礎実験で断面形状主要3特性を測定した結果を、データベース化し、これを基にモデル化と応力解析を行った。

その結果、疲労限度線以下であることが机上で確認できた。

実機疲労試験においても開発基準サイクル数をクリアしたことから、疲労限度線以下であることが実機でも実

証できた (Fig. 16)。これにより、お客様のあらゆる車の使用方法に対する機能保証ができていることが確認でき、同時に本取り組みにより動力伝達部品へ適用可能な結合工法の手の内化と、信頼性保証プロセスを構築できた。

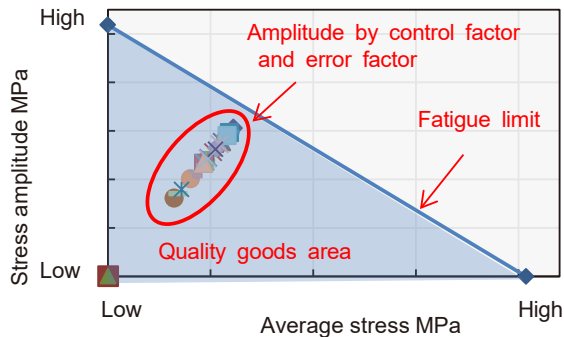


Fig. 16 Clinching Point Fatigue Strength at 10^7 Cycles

4. おわりに

以上の取り組みから、長尺アルミクラッチドラム Assy において、環境負荷 ($\Delta 2.7\text{kg-CO}_2/\text{unit}$) を抑えたものづくりに挑戦し、量産を実現した。これらの活動の成果により、“理想のペダルワークスペース” や NVH 性能向上による走る喜び、優れた環境性能の向上に貢献できた。今後も、カーボンニュートラルへの貢献と、“人馬一体”の走りを提供し続けるため、更なる技術革新への挑戦を続けていく。

アルミクラッチドラムに対する、アルミ合金材の材質選定、評価、試験方法に関して、ご協力いただいた (株) 神戸製鋼所様、及びカシメ結合のツール選定、条件設定、基礎評価実施に関して、ご協力、ご支援いただいたトックスプレソテック (株) 様に謝意を表する。

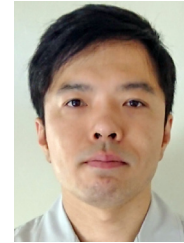
参考文献

- (1) 内藤純也ほか：ホットスタンプ部品の曲げ圧壊挙動と鋼材の機械的特性との相関，神戸製鋼技報，Vol.66, No.2, pp.69-75 (2017)

■ 著 者 ■



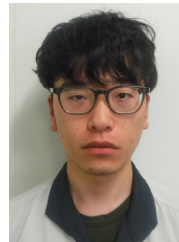
野畑 俊也



河野 弘和



田中 雄幸



長野 隼門



椎野 和幸



新家 泰平