

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04772

研究課題名(和文) 接触加熱を用いた時効硬化アルミニウム合金板の溶体化レスホットスタンピングの開発

研究課題名(英文) Development of hot stamping of age-hardened aluminium alloy sheet using contact heating without solution heat treatment

研究代表者

前野 智美 (Maeno, Tomoyoshi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80505397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：時効硬化している7000系アルミニウム合金の自動車プレス部品への適用を目的に、プレス成形後の溶体化処理および時効処理を省略する短時間接触加熱ホットスタンピングを開発した。A7075-T6材の成形前の加熱条件と成形後の硬さの関係を明らかにした。200℃の短時間加熱における成形性を調査した。円筒深絞りにおいて、絞り比1.4の冷間成形において割れが生じていたが、200℃の加熱によって限界絞り比が1.8に向上した。短時間加熱された材料の引張強さ、伸び、曲げ疲労強度はT6材と同等となった。成形後のスプリングバックおよび残留応力低減を目的にT4材およびT7材のホットスタンピングも開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アルミニウム合金の中でも強度の高い7000系アルミニウム合金において、生産性の高いホットスタンピングが提案された。高比強度材の中でもマグネシウム合金やCFRPなどに比べ材料コストの低いアルミニウム合金は利用範囲が広く、炭素排出量低減のために必要となる自動車の軽量化において利用が期待されており、提案プロセスの社会的意義は高い。また、熱処理型アルミニウム合金の時効強化後の加熱プロセスや1分よりも短い短時間の加熱が機械的強度に及ぼす影響の研究は少なく、本研究で示した学術的意義は高い。

研究成果の概要(英文)：Hot stamping of age-hardened aluminum alloy using short-time heating was developed to apply 7xxx series aluminum alloy for automobile stamping products. The solution and age heat treatment were omitted. For the A7075-T6 aluminum sheet, the relationship between heating conditions and the hardness of formed products was obtained. The formability of contact heated aluminum alloy of 200 °C was investigated. The cylindrical cup of 1.8 in drawing ratio was successfully formed by short-time heating of 200 °C, even though fractured for 1.4 in drawing ratio in cold forming. The tensile strength, elongation, and fatigue bending strength of hot-stamped parts of 200 °C were equal to the as-received T6 sheet. In addition, hot stamping using T4 and T7 blank sheets was developed to decrease the springback and residual stress of formed products.

研究分野：金属成形

キーワード：アルミニウム合金 ホットスタンピング 溶体化処理 人口時効 接触加熱

1. 研究開始当初の背景

自動車の燃費向上のために軽量化が重要となっている。超高張力鋼板による薄肉化を中心に軽量化が進んでいるが、板厚は剛性に指数的に影響するため、部品剛性の確保が難しく限界がある。アルミニウム合金は比強度が高いだけでなく比重も軽いため、板厚を確保して軽量化ができる。特に 7000 系アルミニウム合金は最も強度が高く有効である。しかしながら時効硬化後は延性が低く、ほとんど冷間プレス成形が行えない[1]。航空機では予備成形後に熱処理を実施しておりコストが高く自動車部品には適用できない。自動車においては時効硬化後も冷間成形の可能な自然時効材(T4 材)に利用が限られている[2]。鋼板ではプレス成形と同時に金型焼入れを実施するホットスタンピングが自動車骨格部材に適用されている。ホットスタンピングでは引張強さ 1.5GPa の部材が得られ、スプリングバックも生じない[3]。ホットスタンピングを熱処理型アルミニウム合金に適用した方法として HOT FORM QUENCH (HFQ) が開発され、一部で自動車に適用されている[4]。ブランクを溶体化温度に加熱し、成形と同時に金型の急冷により溶体化処理を行う。成形後に人工時効処理を施すことによって高い強度を得ることができる。ブランクは加熱により延性が高く成形性が向上される。しかしながら、アルミニウムの加熱は放射率が低いため加熱速度が遅く生産性に問題が生じる。また、加熱温度が 500°C 程度になり、焼付きの発生や赤熱脆性による割れが問題となる[5, 6]。さらに人口時効処理が必要となるため、全体の生産性は冷間成形に比べ大きく低下する。

2. 研究の目的

本研究では、7000 系熱処理型アルミニウム合金板を自動車パネル部品に適用するために、高生産性、低コストの熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピングの開発を目的とする。時効硬化材をブランクにし、接触短時間加熱を用いて時効硬化している状態に大きな変化が生じる前に成形を行い、成形後も成形前と同等の強度を保ち溶体化処理および人口時効処理を省略する。提案のホットスタンピングでは図 1 に示すように前述の溶体化処理で問題となった生産性および成形性に関する問題が解決される。詳細な目的として、A7075-T6 材において成形後の人工時効を必要としないホットスタンピングを開発するために、加熱温度と加熱時間がホットスタンピング後の硬さに与える影響を明かにする。また、ハット曲げ、V 曲げ成形および深絞り成形において成形性を明かにする。さらに、成形性に影響の大きい摩擦特性についての特徴を得る。加えて、A7075-T6 材は応力腐食割れ(SCC)を起こしやすい材料であるため、過時効材(以下 T7 材)および自然時効材(以下 T4 材)を初期材としたホットスタンピングの検討を行う。

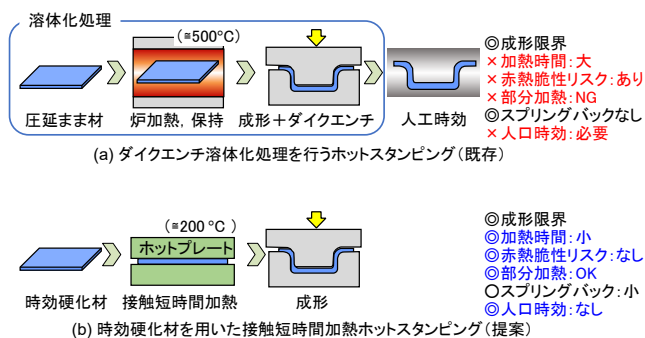


図 1 溶体化処理を行うホットスタンピングと時効硬化剤を用いた接触短時間加熱ホットスタンピングの比較

3. 研究の方法

(1)A7075-T6 供試材

本研究において板厚 2 mm の A7075-T6 アルミニウム合金材を用いた。受入れ材の硬さは 185 HV5 であり、渦電流測定器で測定した電気伝導度は 31.86 %IACS である。

(2) ホットスタンピングを模擬したホットプレートおよびオイルバスを用いた加熱冷却実験方法

接触加熱を用いたホットスタンピングにおいて、温度履歴が材料の機械的特性に与える影響を調査するため成形なしでホットスタンピングおよびオイルバスを用いて $T = 140 - 475\text{ }^{\circ}\text{C}$ の加熱、冷却を施し硬さを測定した。加熱保持を $t_{\text{dwell}} = 0 - 1000\text{ s}$ とし、加熱保持を行う場合はオイルバスを用いた。

(3)成形性評価実験方法

①ハット曲げ成形

図 2 に接触加熱を用いたハット曲げ成形に用いた金型を示す。また、実験条件を表 2 に示す。150 × 20 × 2 mm の A7075-T6 をホットプレートで $T = 200 - 475\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで加熱し、保持なしで金型へと 4 s 程度で搬送し、成形した。ブランクの温度低下を抑制しフランジ部と板押さえの抵抗を少なくするためにダイスと板押さえの間にブランクよりも厚いスペーサーを挟むことによってブランクが直接挟まれることを防止している。

②V 曲げ成形

スプリングバック特性および最小曲げ半径の評価を行うため

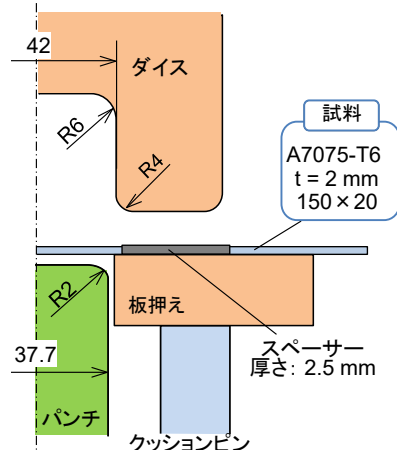


図 2 ハット曲げ金型

に、V 曲げ成形を実施した。また、加熱温度が V 曲げ試験片の残留応力に与える影響についても同時に評価した。スプリングバック・残留応力の評価には、先端半径 9 mm のパンチを使用し、逃がしのない下型を用いた。最小曲げ半径の評価には先端半径 0, 1, 2 mm のパンチを用いた。

③円筒深絞り

深絞り性を検討するために円筒深絞り成形を実施した。直径 48mm のパンチを用い、直径が $D = 70 - 100$ mm の円形ブランクを円筒に成形した。しわ押えはハット曲げと同様にスペーサーを挿入しブランクが直接挟まれないようにした。また、潤滑剤には二硫化モリブデンを用いた。

(4) 通電加熱板材引抜きによる摩擦測定

アルミニウム合金のホットスタンピングでは、成形時の焼付きや摩擦が問題となる。そこで、温間時の材料と金型間の摩擦特性を調査するために、通電加熱を用いた板材引抜きによる摩擦測定を行った。実験装置構成および外観を図 3 に示す。加熱温度は 200°C とした。通電加熱により 30 秒程度で急速に加熱を行い 200°C に達したところで電流を止め、引抜きを行った。摩擦係数 μ はクーロン摩擦として求めた。シューには SKD11 の焼入れ焼き戻し材を用い、コーティングなしと DLC コーティングを施した 2 種類を用い比較した。

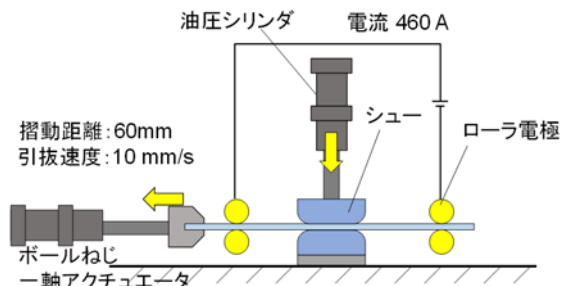


図 3 通電加熱を用いた板材引抜き摩擦測定

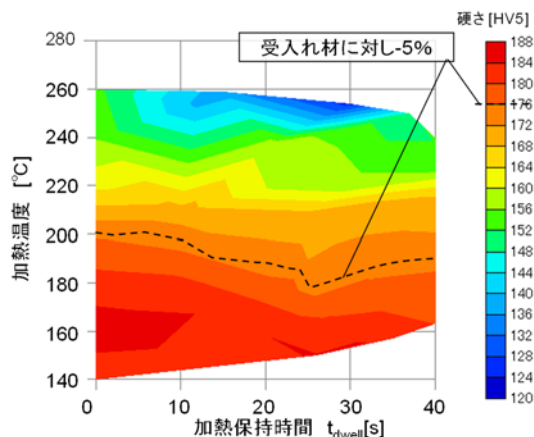


図 4 A7075-T6 材における加熱条件と直後のビッカース硬さとの関係

4. 研究成果

(1) ホットスタンピングを模擬した加熱冷却実験結果

接触加熱、加熱保持なしにおいて加熱温度が硬さと電気伝導率に与える影響を調査した。加熱温度の上昇とともに硬さの低下が生じたが、 $T = 200^{\circ}\text{C}$ 以下においては硬さの低下はほとんど見られなく $T = 250^{\circ}\text{C}$ での硬さの低下はわずかとなった。 $T = 200, 250^{\circ}\text{C}$ においては時効前でも T6 材相当の硬さが得られており、人工時効処理の省略が可能である。図 4 にオイルバスの実験から得られた A7075-T6 材における加熱条件とビッカース硬さの関係を示す。このグラフに基づいて加熱条件を決定することでホットスタンピング後の製品強度を決定することができる。例えば、受け入れ材に対し-5%の硬さを得る場合、200 度程度の加熱を 10s に抑える必要がある。

(2) 接触加熱を用いたハット曲げ成形結果

図 5 に接触加熱を用いたハット曲げ成形品を示す。冷間においては加工初期で割れが発生しているが、 $T = 200^{\circ}\text{C}$ において割れはなく、成形性が向上された。

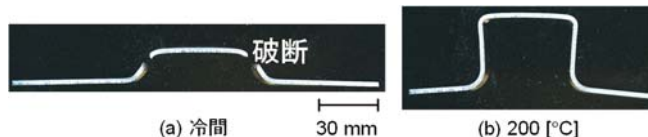


図 5 接触加熱を用いたハット曲げ成形品

$T = 200, 475^{\circ}\text{C}$ とし、潤滑あり、なしの条件において 10 回連続の加工を行った(図 6)。 $T = 200^{\circ}\text{C}$ においては潤滑有無に関係なく顕著な焼付きは確認されなかった。一方、溶体化処理するホットスタンピングに相当する $T = 475^{\circ}\text{C}$ においてはどちらの潤滑条件においても焼付きが発生した。 $T = 200^{\circ}\text{C}$ でのホットスタンピングは焼付きに対し有利であることが示された。また同じ $T = 200^{\circ}\text{C}$ でも炉加熱では焼付きが顕著であり、興味深い結果が得られた。

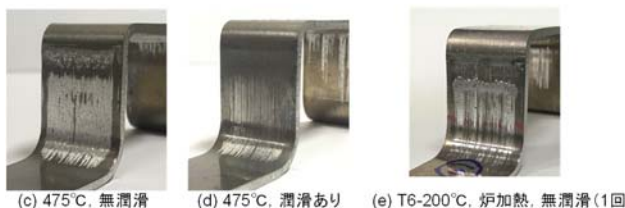
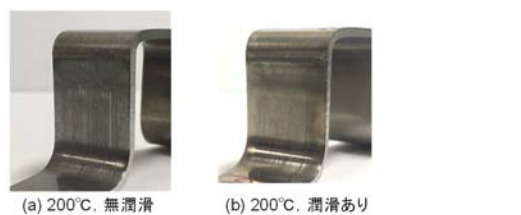


図 6 各条件におけるハット曲げ 10 回成形後の成形品外観接触加熱を用いたハット曲げ成形品

(3) V 曲げ成形結果

冷間成形において 6° 程度のスプリングバックが生じ、 $T = 150^{\circ}\text{C}$ 以上において加熱温度の上昇に伴って減少し、 $T = 200^{\circ}\text{C}$ 以上ではほぼゼロとなった。また、冷間において残留応力は 182 MPa 程度生じているが、スプリングバック量の挙動と同様に加熱温度の上昇に伴って減少し、 $T = 200^{\circ}\text{C}$ では冷間と比較して 7 割程度減少し、 $T = 250^{\circ}\text{C}$ 以上ではほぼゼロとなった。

人口時効処理が省略できる $T = 200^{\circ}\text{C}$ 付近の温度域における最小曲げ半径を調査するために、先

端半径 $R = 2, 1, 0 \text{ mm}$ のパンチを用い、加熱温度を $T = 150, 200, 250^\circ\text{C}$ として実験を行った。 $T = 150, 200, 250^\circ\text{C}$ の加熱範囲における最小曲げ半径は $R_{\min} = 0.6$ 程度であった。

(4) 深絞り成形結果

図7に冷間および $T = 200^\circ\text{C}$ で成形された容器、図8に接触短時間加熱ホットスタンピングにおける加熱温度および潤滑有無が限界絞り比に及ぼす影響をそれぞれ示す。冷間における限界絞り比は1.46未満であったが、 200°C 加熱により1.9まで向上した。また、潤滑剤の有無にかかわらず限界絞り比は変わらなかった。

他の代表的なアルミニウム合金の成形方法として、溶体化処理直後に成形する W-Temper、および 475°C の溶体化処理をする HFQ における深絞り成形と比較をした。W-Temper および HFQ の絞り比は無潤滑の条件で1.5未満であり、 200°C の短時間加熱ホットスタンピングが最も優れた限界絞り比となった。W-Temper および HFQ の無潤滑で成形されたブランクには強い焼付き傷が確認された。W-Temper および HFQ は成形時におけるブランクの硬さが低く焼付きを生じやすい。 $T = 200^\circ\text{C}$ の短時間加熱ホットスタンピングは焼付きが生じにくく、潤滑条件を問わず冷間に対して著しく成形性が向上した。HFQ において問題となる摩擦において優位性があり、 $T = 200^\circ\text{C}$ の短時間加熱ホットスタンピングの有用性は高い。



(a) 冷間 絞り比1.46 ($D = 70 \text{ mm}$) (b) $T = 200^\circ\text{C}$ 絞り比1.88 ($D = 90 \text{ mm}$)
図7 冷間および $T = 200^\circ\text{C}$ の無潤滑で深絞り加工された容器

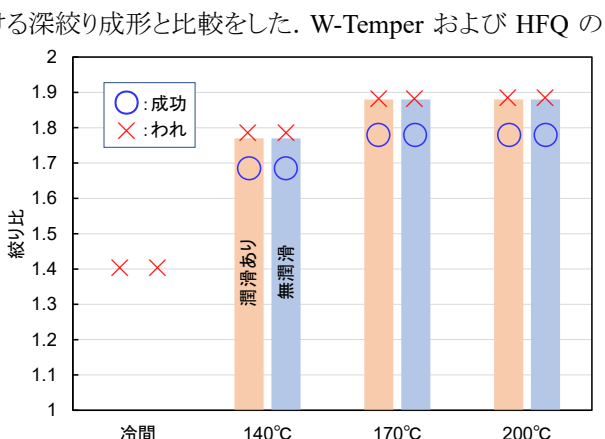


図8 加熱温度および潤滑有無が限界絞り比に及ぼす影響

(5) ホットスタンピング後の機械的強度評価

ホットスタンピング後の製品における機械的強度を調べるために、短時間接触加熱 V 曲げ成形された板材の平面部から試験片を切り出し、引張試験を実施した。 $T = 200^\circ\text{C}$ でホットスタンピングした板材は受け入れ材に対し、5%程度の降伏応力、引張強さの低下がみられ、延性はほとんど変化がなかった。 $T = 200^\circ\text{C}$ の短時間加熱ホットスタンピングでは強度低下がほとんど生じなく、成形後の熱処理を省略しても T6 相当の強度が保たれた。

ホットスタンピング後の成形品の疲労特性を調査するために、平面曲げ疲労試験を行った。くびれ部の幅 15 mm の JIS2275 1号試験片を作成し、短時間加熱ホットスタンピングを模擬してホットプレートで $T = 200^\circ\text{C}$, $T_{\text{dwell}} = 0 \text{ s}$ にて加熱し、平面の金属圧盤で挟んで冷却した。繰り返し数が 10^7 回に達したときの応力を疲労強度とした。T6 材の疲労強度に対し10%の低下が見られた。わずかながらに生じている硬さの低下と同様の結果であり、短時間加熱ホットスタンピングが疲労強度に特別大きな影響は及ぼさないことが分かった。

(6) ホットスタンピング後の組織変化調査

A7075-T6 材を用いた時効レスホットスタンピングにおいて、加熱前後で材料の析出状態に変化が無いのが望ましい。そこで、材料の析出状態について調べるために示差走査熱量測定 (Differential scanning calorimetry :DSC 測定) および透過型電子顕微鏡 (TEM) による組織観察を行った (図9)。DSC 測定から得られた曲線は $T = 200^\circ\text{C} - 10 \text{ s}$ の接触加熱材と T6 受入れ材はほとんど同じ履歴をたどっており、析出効果の状態にほとんど変化がないこと示された。一方、 $200^\circ\text{C} - 10 \text{ min}$ の炉加熱の結果は受入れ材に対して曲線が大きく変化しており、大きな組織変化が示唆された。TEM による組織観察の結果、受入材においては全体的に多量の微細な析出物が存在していることが確認され、 $T = 200^\circ\text{C}$, $t_{\text{dwell}} = 0 \text{ s}$ 加熱においては受入材と比較すると析出物がわずかながら粗大化しているが顕著な差は生じていない。 $T = 200^\circ\text{C}$, $t_{\text{dwell}} = 900 \text{ s}$ においては他の条件と比較して析出物が大きく数も少ない。これらの観察結果から加熱時間が長いほど析出物が粗大化、減少してしまうために硬さが低下したことがわかった。この結果は DSC 測定で示された結果と一致した。

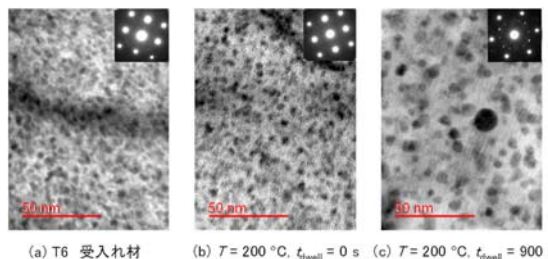


図9 各加熱された板材の TEM 観察組織

(7) 通電加熱を用いた板材引抜きによる摩擦測定

室温においても 200°C においてもコーティングなしシューを用いた引抜き試験では、摩擦係数はおおよそ $0.35 \sim 0.4$ であり温度による影響は小さかった。一方、DLC コーティングシューを用いた場合の摩擦係数は 0.2 以下となった。コーティングなしにおいては試料に焼付き傷が確認された。DLC コーティングシューにおいて焼付き傷は生じなかった。

(8)T7 材および T4 材を用いた接触短時間加熱ホットスタンピング

① T7 材を初期材としたホットスタンピング

SCC 感受性が T6 材に比べ比較的低い T7 材を初期材とするホットスタンピングを検討した。T7 材は T6 材を 160 °C, 10 h で時効処理して強度が T6 材よりも 10%低下するようにしたものを用意した。10～15 秒の接触加熱で所定の温度に加熱し温度保持なしに冷却した試験片の硬さを調査した結果、260 °C 以下の加熱では初期 T7 材からの硬さの低下が無く、260 °C 以下の範囲でホットスタンピングが適用可能であることが分かった。

T6 材および T7 材の DSC 測定を実施した。T7 材の GP ゾーン固溶開始温度および GP ゾーン固溶ピーク温度は T6 材と比べて 30 °C 程度高くなった。そのため、T7 材においては加熱温度を少し高温にしても強度低下が小さくなったと考えられる。また、DSC 測定における固溶開始温度よりも低い温度においては比較的長時間の加熱をしても強度があまり低下しなく、T6 材および T7 材のどちらにおいても GP ゾーン固溶ピーク温度と急激な強度低下の生じる温度は一致している。DSC 測定による吸熱反応を観察すれば、それぞれの調質材の短時間加熱ホットスタンピングに適用可能な温度条件を見積ることができる。

T7 材を用いた深絞り限界は、無潤滑においては冷間と $T = 140 \sim 260$ °C の加熱に変化はなかった。潤滑剤ありでは、加熱によって限界絞り比が向上し、1.9 程度となった。T7 材は初期硬さが T6 に比べて小さく、焼付きが生じやすい。従って、潤滑剤無しの条件では大きな摩擦が生じ、深絞り性が低下したと考えられる。T7 材を用いて V 曲げ成形を行い、曲げ部内側の残留応力を調査した。加熱温度の上昇とともに残留応力とスプリングバックが小さくなり、 $T = 260$ °C では無応力状態となった。

② T4 材を初期材としたホットスタンピング

成形後の残留応力を小さくするために自然時効材である T4 材のホットスタンピングを検討した。T4 材は T6 材に比べ強度が低く残留応力を低減できる。成形後に人工時効を施し、T6 材相当まで強度が上昇すれば、時効処理は必要となるが成形後の溶体化処理を省略できる。

T4 材を初期材に用いた場合の、温度履歴が材料の機械的特性に与える影響を加熱冷却によって調査した。加熱前の T4 材の硬さは 140HV であるが、160°C 以上の短時間加熱により硬さが焼鈍し材程度にまで下がることが分かった。また、加熱後の材料に人工時効を施すと 250°C 以下の温度範囲で T6 相当まで硬さが向上することが分かった。より 160°C から 250°C の範囲内では、加熱後の成形中は材料強度が低く、変形抵抗が小さい状態で成形ができ、人工時効を施すことによって T6 相当まで硬さが回復することとなる。よって、残留応力低減に有効であることが示された。

T4 材を初期材に V 曲げ成形を行い、曲げ部内側の残留応力を調査した。T6 材を初期材にしたときに対して、スプリングバック量が低減された。また、 $T = 250$ °C において成形品は無応力状態であった。時効前より時効後の方が残留応力は小さく、人工時効の加熱によって応力が解放され、残留応力が小さくなった。

A7075 アルミニウム合金は高強度であるため、適用範囲の拡大は軽量化に有効である。熱処理に関連する工程を省略できれば大幅なコスト低減が可能となり、その適用範囲は大きく広がる。接触加熱を用いた短時間加熱によるホットスタンピングは熱処理工程の省略に有効であり、成形性も著しく向上した。アルミニウム合金のプレス成形において焼付きおよび摩擦の増加は成形可否を大きく左右する。短時間加熱でのホットスタンピングでは大幅に凝着の発生等を低減する結果が得られた。加熱時間が摩擦に及ぼす影響を明かにすることは接触短時間加熱ホットスタンピングを実用化するために重要な課題となる。

<引用文献>

- [1] 軽金属協会 (1985) アルミニウム技術便覧, 軽金属出版
- [2] 櫻井健夫 (2007) 神戸製鋼技報, Vol. 57 No. 2, 45 - 50
- [3] 森 謙一郎 (2015) ホットスタンピング入門 自動車軽量化に向けた超高強度鋼 部材成形法, 日刊工業新聞社
- [4] Lin J, Dean T, Garrett R, Foster A (2008) Process for Forming Metal Alloy Sheet Components. Patent Application, WO2008059242 A2.
- [5] Wang L, Strangwood M, Balint D, Lin J, Dean TA (2011) Formability and Failure Mechanisms of AA2024 Under Hot Forming Conditions. Materials Science and Engineering A 528(6): 2648-2656.
- [6] Pujante J., Pelcastre L., Vilaseca M., Casellas D., Prakash B., (2013) Investigations into wear and galling mechanism of aluminium alloy-tool steel tribopair at different temperatures, Wear 308(1-2) 193-198.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 前野 智美
2. 発表標題 熱処理型アルミニウム合金のホットスタンピング
3. 学会等名 日本塑性加工学会 残留応力研究部会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前野智美, 齋藤拓己, 飛田夏葵, 森謙一郎, 谷口俊哉
2. 発表標題 A7075アルミニウム合金の後人口時効レスホットスタンピングにおける加熱条件が硬さと成形性に及ぼす影響
3. 学会等名 平成30年度 塑性加工春季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前野智美, 飛田夏葵, 齋藤拓己, 森謙一郎, 谷口俊哉
2. 発表標題 時効硬化されたA7075アルミニウム合金板の短時間加熱を用いた後人口時効レスホットスタンピングによるV曲げ成形
3. 学会等名 第69回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 アルミニウム合金の成形方法	発明者 前野智美, 谷口俊哉, 山田壮一,	権利者 株式会社ジーテクト
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-86393	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 アルミニウム合金の成形方法	発明者 前野智美, 谷口俊哉, 齋藤拓己, 飛田夏葵	権利者 株式会社ジーテクト
産業財産権の種類、番号 特許、6817266	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------