

## 解説

## 技術開発賞 中小企業 受賞解説



T. ISHIZAKI

N. SHINOMIYA

M. MORIMOTO



T. AIKAWA

K. MIYAZAKI

N. SHIRAKAWA

局所加熱コイルによる高周波誘導加熱  
を利用した高速温間絞り工法の開発Development of Highly Productive  
Warm Drawing Using High  
Frequency Induction Heating  
with Ring Shaped Heating Coils石崎 泰造\* 四宮 徳章\*\* 森本 貢\*  
相川 孝史\* 宮崎 浩司\* 白川 信彦\*\*

## 1. はじめに

深い容器形状を成形する場合、絞り加工では多工程を経て徐々に深く成形している。一方、温間絞り工法は、絞り変形の大きいフランジ部のみを加熱し、フランジ部の流入抵抗を下げることで、一工程で深い成形品を得られる工法である<sup>1)</sup>。渡部は、SUS304の温間絞りを行っており、90℃で限界絞り比3.0と大幅な成形限界の向上を達成している<sup>2)</sup>。また、Kotkundeらは、オーステナイト系ステンレス(ASS)の温間絞りを行っており、ASS-304およびASS-316とも温間絞りを行うことで限界絞り比を向上できている<sup>3)</sup>。非鉄金属では、チタン合金Ti-6Al-4V、マグネシウム合金AZ31、アルミニウム合金A5052およびA5182の温間絞りが行われており、いずれも限界絞り比の向上に成功している<sup>4)~6)</sup>。

このように、温間絞り工法はさまざまな材料の限界絞り比の向上に有効な加工法である。しかし、例えばオーステナイト系ステンレスの温間絞り工法では、1個当たり10~20秒の低い生産性であるため、プレス1機当たり月産100万個といった大量生産が求められる製品には適用させがたい。

これに対し当社では、2015年度~2017年度に実施した戦略的基盤技術高度化支援事業において開発した高速温間絞り工法で1.2秒/個の連続生産を実現した。本工法は、従来工法を生産性をはるかに凌駕し、さらに、オーステナイト系ステンレスの絞り加工だけでなく、他の材料での絞りや曲げ、張出し、高張力鋼板のホットスタンピングにも適用できる技術だと考える。本技術から、特許第6531265号、第6531266号を取得した。本報では、開発した高速温間絞り工法について説明する。

## 2. 開発の狙いとその背景

オーステナイト系ステンレスは、高強度、高耐食性の特性から幅広いニーズがあり、その深絞り加工品は、電子部品、自動車関連部品等、様々な製品で使用されている。また、最近では車載システム用電池筐体の材料としても検討されている。

しかし、オーステナイト系ステンレスは、加工硬化が大きいので、深絞り加工ではフランジ部の変形抵抗の増大が問題となる。そのため、多工程の深絞り加工の場合、通常の冷間加工では非常に多くの工程数を要する。さらに、場合によっては中間焼鈍の工程が設けられることから、生産性が落ち、生産コストが増大する。一方で、従来から用いられている温間絞り工法では、成形性が向上するので、工程数が少なくなり、中間焼鈍も不要となるが、1個当たり10~20秒もの時間を加工に要するため生産性が低い。そこで、オーステナイト系ステンレスの多工程深絞り加工に対して高い生産性を達成できる温間絞り工法を開発の狙いとしたりした。

従来の温間絞り工法の概念図を図1に示す。この工法は、縮みフランジ変形によって加工硬化するフランジ部を、カートリッジヒータなどで加熱された金型からの熱伝達によ

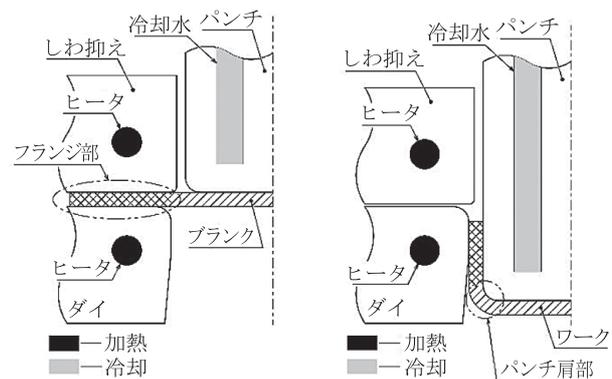


図1 従来の温間絞り工法 (左:加工前, 右:加工後)

原稿受付 2020年7月21日

\* 石崎プレス工業㈱ 〒664-0842 伊丹市森本1-98-2

E-mail: Taizo.I@ispress.co.jp

\*\* (地独)大阪産業技術研究所 和泉センター

〒594-1157 和泉市あゆみ野2-7-1

って昇温させて変形抵抗を下げつつ、割れの危険があるパンチ肩部の冷却により強度を保ち、成形性を向上させる工法である。搬送炉による板材の全体加熱ではなく、加熱された金型からの熱伝達によって板材の一部を昇温させることが一般的である。

しかし、このような従来の温間絞り工法では、金型からの熱伝達による間接加熱であるため、オーステナイト系ステンレスのような低熱伝導率の素材では加熱時間を長く設定する必要がある。それゆえ、非常に低速なプレス加工になっていた。これらのことから、金型からの熱伝達を用いた加熱では生産性の向上に限界があると判断し、新しい加熱方法を採用した技術開発を行った。

### 3. 高速温間絞り工法の開発

#### 3.1 開発の方向性

被加工材に対する加熱方法として、従来の金型加熱による間接加熱では、目指す水準の生産性の実現は難しいため、直接加熱による方法を検討した。直接的に被加工材を加熱する方法のひとつとしては通電加熱があり、近年ホットスタンピングでの使用例が報告されている<sup>7)</sup>。しかし、この通電加熱は電極間の板材全域を加熱する方法であるため、深絞り加工では、荷重負担部であるパンチ肩部も加熱により板材強度が低下し成形性が損なわれる。よって、フランジ部だけの局所加熱を可能にする加熱法の開発に取り組んだ。

さらに、生産性の向上には連続自動生産が求められることから、被加工材の加熱は、コイル材から切断した被加工材1枚ごとに行うのではなく、コイル材の被加工部に相当する領域の加熱とコイル材の自動送りを同期する方法を目指した。

この2つの条件を満たす方法として、高周波誘導加熱を選定し、被加工材となるコイル材をリング状に加熱する方法を検討した。通常、高周波誘導加熱で用いられるトンネル型あるいはチャンネル型<sup>8)</sup>では薄板の加熱が難しいこと、ならびに、部分的な加熱に向かないことから、トランスバ

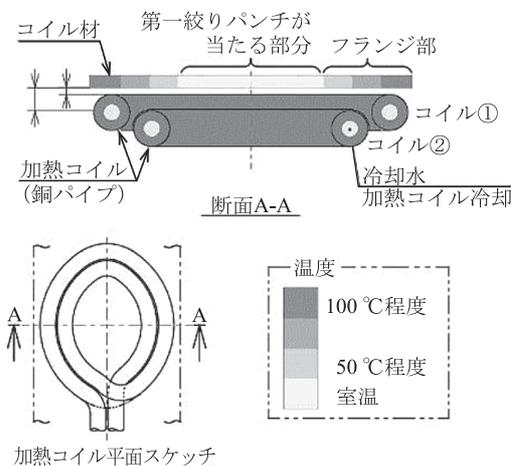


図2 被加工材の局所加熱方法

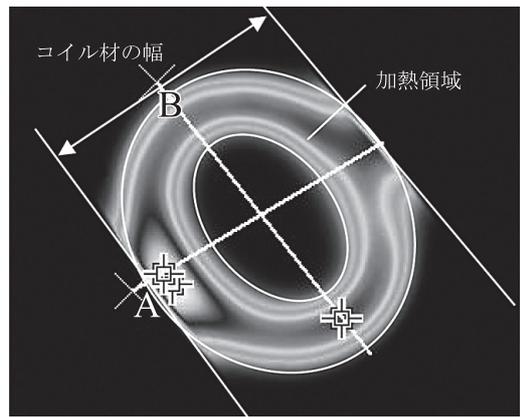


図3 コイル材の加熱実験結果 (サーモグラフィ画像)

ース型<sup>9)</sup>での加熱を採用した。図2で示すように、フランジ部の範囲に合わせたリング形状に加熱コイルを形成し、コイル材に平行に設置した。板厚0.15 mmのSUS316を用いて加熱実験を行った。結果を図3に示す。白く映っている部分の温度は130~150℃程度である。図より、被加工部外周のフランジ部に相当する領域に限定して加熱できることを確認した。

#### 3.2 開発技術の概要

開発した高速温間絞り工法を図4に示す。プレス機は連続生産が可能なトランスファプレスを用いた。第一工程の二ピッチ前で高周波誘導加熱を行う仕様とした。第二絞り以降の絞り工程では、絞り加工によって材料に生じる熱をフランジ部の昇温に積極的に活用するため、ダイの素材に熱伝導率の低いサーメタルCT510 (ダイジェット工業製)を用いた。これにより、加工時の発熱が金型へ放熱することを抑制した<sup>10)</sup>。

プレス機に加熱コイルを取り付けたようすを図5および図6に示す。加熱は、プレスの第一工程の前に行うことから、第一工程のダイホルダ前面のコイル材直下に加熱コイルを取り付けた。加熱による温度分布のバラツキを抑えるには、加熱コイルとコイル材の間隔を一定に保つことが重要である。この間隔を1 mmで維持するために、コイル材の加熱位置の前後左右4箇所を、駆動源にエアシリンダを

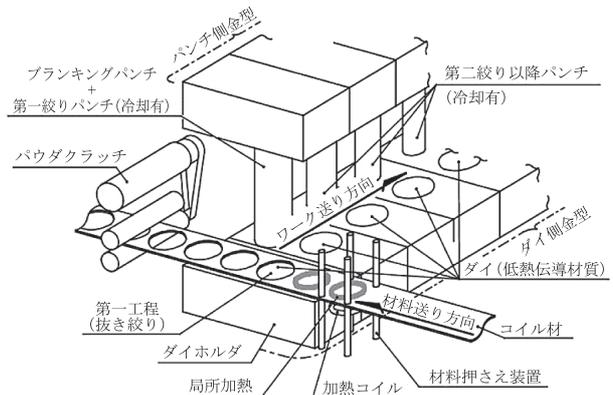


図4 高速温間絞り工法の概念図

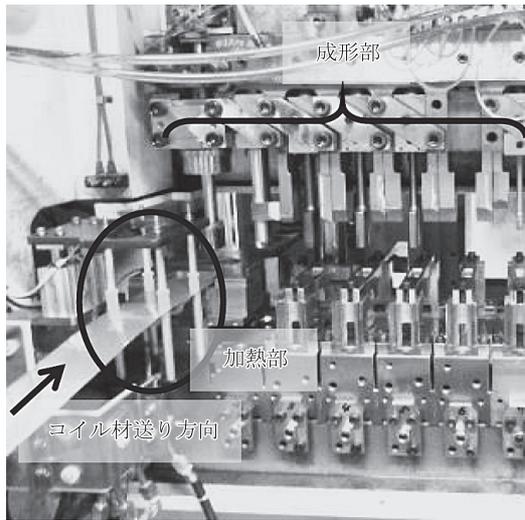


図5 プレス機に高周波誘導加熱コイルを取り付けた状態

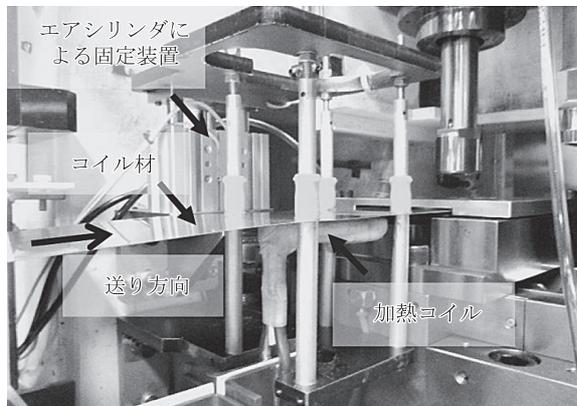


図6 加熱部拡大図

用いた装置で固定した。加熱位置の上方には加熱温度とその分布状態をモニタ確認できるサーモグラフィを設置した。

高速で連続生産するには、加熱されるコイル材は自動送りでプレス機に供給されることが求められる。コイル材の自動送りに対しては、送り精度が確保される必要がある。トランスファプレスでは、パイロットピンによるピッチずれの防止を行えないことから、送り装置の送り精度を抜き絞り工程まで確実に維持する技術が必要となる。この送り精度維持に対しては、送り装置から抜き絞り工程間のコイル材の張力を一定に保つパウダクラッチの取り付けなど、図7に示すライン構成によって実現した。

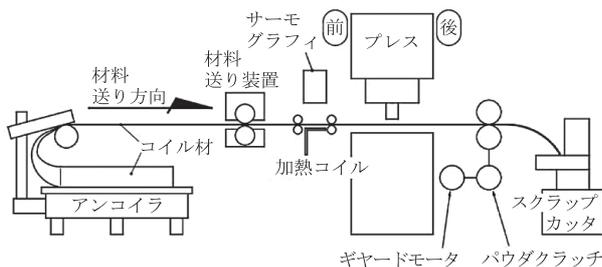


図7 自動送り材の送り精度を確保するライン構成

### 3.3 試作品の成形

試作品としては、顧客から開発要求があった高アスペクト比の角缶 (SUS316L, 素材板厚 0.5 mm, 外形 10 mm×40 mm, 深さ 50 mm) を選定した。

まず、SUS316L の引張強度の温度依存性を測定した。結果を図8に示す。室温から温度が上昇するほど、耐力が低下し、100℃付近では12%程度の耐力の低下が確認できた。この結果から、上記試作品の成形に本開発技術を適用できると判断した。

リング状の加熱コイルは、当初、被加工材のフランジ部に相当する外周全域を加熱する形状に設計した。しかし、成形シミュレーションおよび実験では、成形性向上の明確な効果を確認できなかった。要因を調べたところ、第一絞りは板厚方向に圧縮するしごきを含む変形様式であり、そのしごきがあることによって成形性の向上が見込めないことがわかった。そこで、しごきを含む角絞りの成形性向上が見込める温度分布を、成形シミュレーションを用いて検討した。

温度分布を検討するにあたり、第一絞りは複数の曲率を組み合わせた楕円に近い形状となるため、短辺側と長辺側で絞り率の異なる成形様式であることに注目した。短辺側では絞り変形が大きいいため、板厚が厚くなり、図9に示すように結果的にしごきが大きくなる。そこで、長辺側のみ加熱して、短辺側はあえて加熱しないという加熱方法により、長辺側の変形抵抗を低下させ、短辺側の絞り変形を長

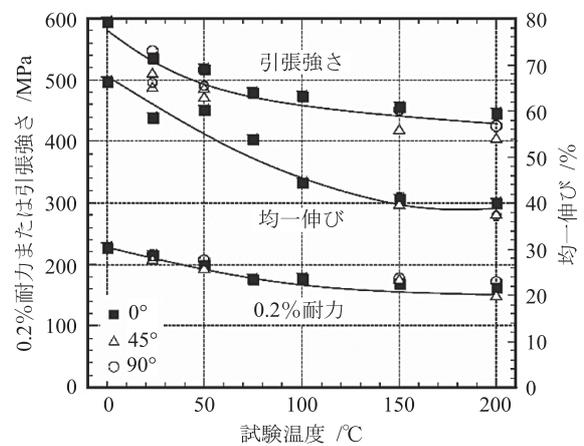


図8 SUS316L 機械的性質の温度依存性測定

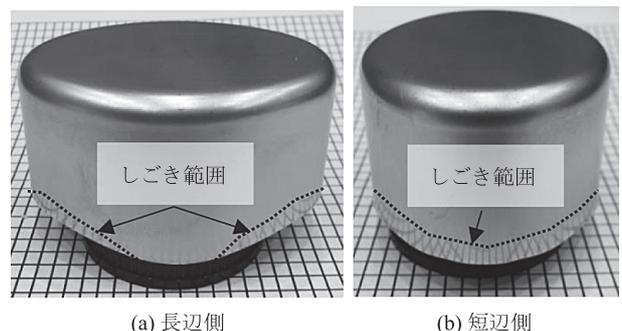


図9 長辺と短辺における絞り率の違い

辺側にある程度負担させる部分加熱を考えた。図10に、成形品の最小板厚に及ぼす長辺側の加熱範囲の影響について、成形シミュレーションを用いて検討した結果を示す。なお、成形シミュレーションには、Simufact Forming (MSC社製)を用いた。加熱範囲をパンチ外径からいずれの距離とした場合でも、加熱範囲の角度が70°の条件で板厚が最も厚くなった。つまり、加熱範囲を適切に設定することで、縮み変形の大きい短辺側をあえて加熱しない方法で縮み変形を抑制し、成形性を向上できることを見出した<sup>11)</sup>。この温度分布を生成するために、図11に示すように短辺側の加熱コイルと被加工材の距離を大きくする形状を考案した。図12には、得られた温度分布を、また、図13には加熱実験時の被加工材の温度上昇を示す。図より、加熱開始1秒後には所定の温度まで上昇し、成形が開始となる3秒後ま



図12 サーモグラフィにより撮影した部分加熱時の素材の温度分布

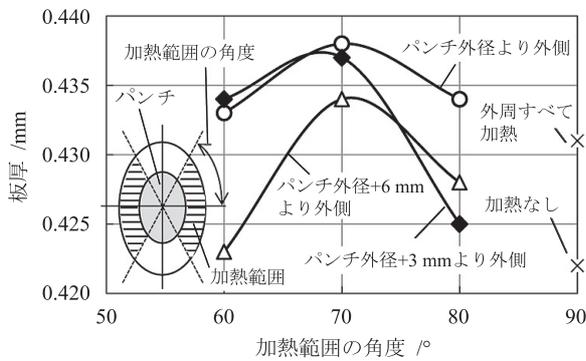
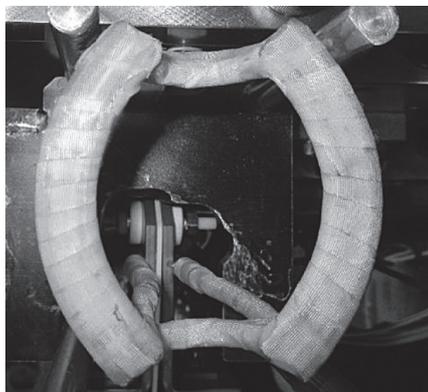
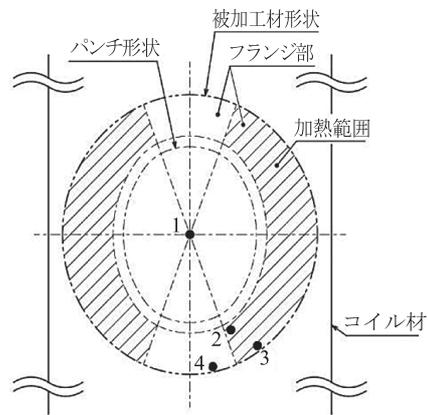
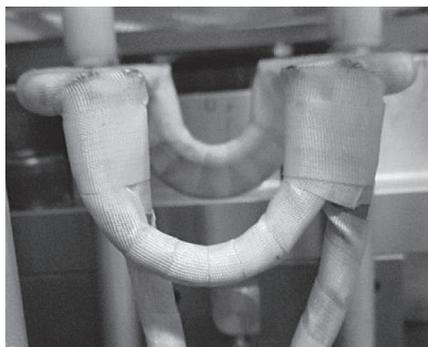


図10 最小板厚に及ぼす加熱範囲の影響



(a) 平面方向



(b) 側面方向

図11 部分加熱の加熱コイル形状

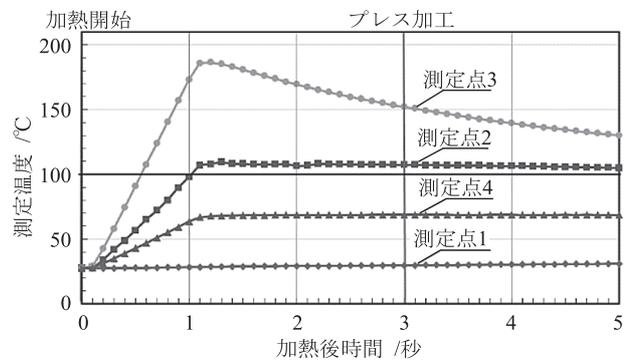
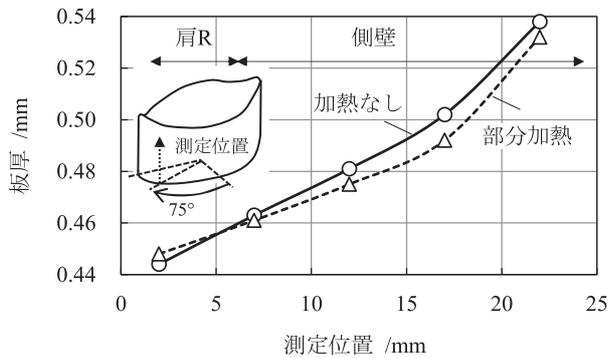
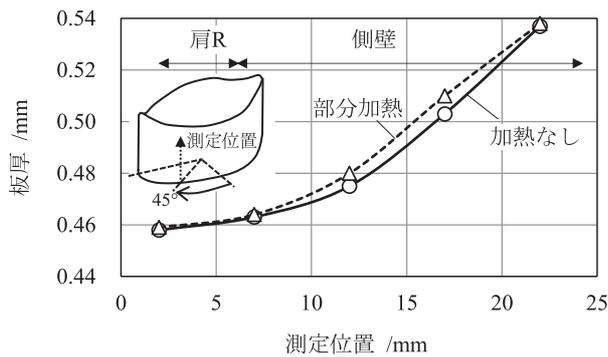


図13 加熱時の温度変化

で、成形性向上に必要と考える100℃以上に温度が維持されていることがわかる。次に成形性向上効果を確認するため、温間絞り加工の試作を行った。加熱範囲の角度は70°とした。比較のため、加熱なしについても成形を行った。第一工程成形品の板厚測定結果を図14に示す。両条件とも、肩Rから側壁縁にかけて板厚が増加することがわかる。両条件を比較すると、75°方向を測定した板厚分布では、部分加熱の側壁部の板厚が薄かった。また、45°方向を測定した板厚分布では、部分加熱の側壁部の板厚が厚かった。つまり部分加熱では、75°方向については絞り変形にともなう増肉が小さく、45°方向については絞り変形にともな



(a) 75°方向



(b) 45°方向

図14 成形品の板厚分布 (第一工程)

う増肉が大きいと考えられる。これらは、意図したとおり短辺側の絞り変形を長辺側にある程度負担させることができた結果と推察される。短辺側の絞り変形およびしごき変形は長辺側より大きくなるため、角絞りでの成形性低下を招くが、部分加熱により短辺側側壁部の絞り変形にともなう増肉を抑制できるため、後工程での絞りおよびしごき変形を小さくでき、成形性の向上が期待できる。

そこで第六工程での成形品の板厚を調べた。短辺側での板厚測定結果を図15に示す。両条件とも肩R部から側壁部にかけて板厚が増加し、測定位置15mm以降でしごき変形が加えられ板厚がおおむね一定になることがわかる。肩R部付近では両条件とも板厚が薄く、板厚減少が確認で

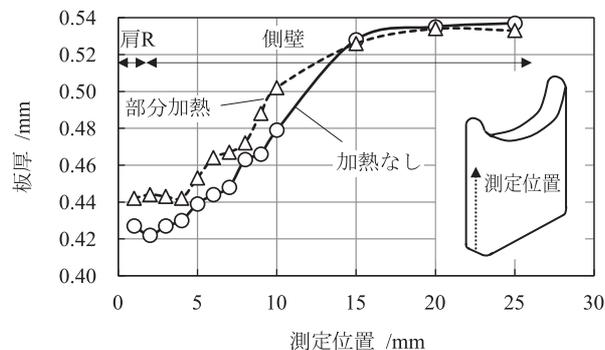


図15 成形品の板厚分布 (第六工程)

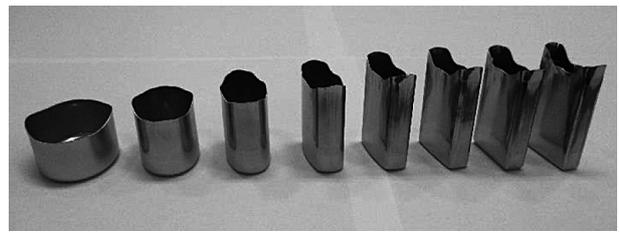


図16 50 spm で連続生産した各工程成形品

きるが、部分加熱では加熱をしない場合と比較して板厚減少を大きく抑えられており、本工法の有効性が確認できた。

### 3.4 生産実績

本技術は、加熱時間1秒の設定で図16に示すような八工程(内、絞り七工程)の角絞りを50 spm (shots per minute)で連続生産することに成功しており、高速温間絞り工法を確立している。なお、加熱時間1秒に対して加工速度が50 spmになるのは、連続生産時にはコイル材の送り動作の所要時間0.1秒と高周波誘導加熱のON、OFF切替の間、加熱停止が必要になるためである。

## 4. おわりに

高周波誘導加熱を用いた高速温間絞り工法について説明した。開発した高速温間絞りにより1.2秒/個の温間絞りの連続生産を実現している。本工法により、従来の1個当たり10~20秒もの時間を要していた温間絞り工法の生産性を飛躍的に向上させた。高周波誘導加熱の加熱能力を上げれば、さらなる高速化も可能である。

また本技術は、絞り加工のみならず、曲げ加工、張出し加工等にも適用可能である。さらに、近年注目されている高張力鋼板のホットスタンピングにも適用が期待できるため、その生産性向上に及ぼす効果は大きい。

## 参考文献

- 1) 日本塑性加工学会：わかりやすいプレス加工，(2000)，86-87，日刊工業新聞社。
- 2) 渡部豊臣：塑性と加工，**33**-375 (1992)，396-403。
- 3) Kotkunde, N., Krishnamurthy, H.N., Singh, S.K. & Jella, G.: High Temp. Mater. Process., **37** (2018), 873-888。
- 4) 奥出裕亮・岩岡拓・中村勲・片桐嵩：塑性と加工，**61**-714 (2020)，159-164。
- 5) 真鍋健一・下村修：軽金属，**56**-10 (2006)，521-526。
- 6) 大上哲郎・高田健・佐賀誠・菊池正夫：軽金属，**50**-9 (2000)，451-455。
- 7) 森謙一郎：ホットスタンピング入門，(2015)，132-162，日刊工業新聞社。
- 8) Tekkaya, A.E.: ぶらすとず，**1**-1 (2018)，8-13。
- 9) 鈴木聡史・石間勉：特許第5269943号。
- 10) 石崎泰造・四宮徳章・白川信彦・中本貴之：特許第5994055号。
- 11) 四宮徳章・石崎泰造・白川信彦・相川孝史：特許第6531266号。