

自動車骨格部品向けSTAFプロセスの開発

Development of STAF Process for Automotive Frame Parts

●野 際 公 宏*
Kimihiro NOGIWA

上 野 紀 条**
Norieda UENO

糸 野 宏 之***
Hiroyuki KUMENO

閑 浩 之***
Hiroyuki KAN



STAF 装置外観
Appearance of STAF equipment

自動車骨格部品においては、エネルギー消費量やCO₂排出量削減の観点に加え、EV化により増加した車両重量の軽量化要求が高まっている。その一方で、衝突安全性に求められる水準の高まりや乗り心地、走行安定性の面から高強度・高剛性化を満足することが課題となっている。このような相反する要求に対して当社ではフランジ付き連続異形閉断面を有するチューブフォーミング技術「STAF (Steel Tube Air Forming)」を開発した。本報では、その概要と特長について報告する。

For automotive frame parts, there is a growing demand for weight reduction from the perspective of energy consumption reduction, CO₂ emission reduction, and vehicle weight increase due to EVs, while at the same time, there is a challenge to satisfy high strength and high rigidity from the perspective of increased collision safety requirements, ride comfort, and driving stability. In response to these conflicting requirements, Sumitomo Heavy Industries, Ltd. has developed STAF (Steel Tube Air Forming), a tube forming technology with a continuous deformed closed section with a flange. This paper describes the outline and features of STAF.

1 まえがき

エネルギー消費量や、CO₂排出量に対する規制が年々厳しくなっている昨今、自動車ボディの軽量化技術はその対応策として必須となっている⁽¹⁾。同じく環境負荷低減の観点で、ガソリン車から電気自動車へのシフトが近年加速しているが、電気自動車に必須のバッテリーはガソリンエンジンよりも重いことから、車体重量はむしろ増加しており、ボディ軽量化はますます必須の課題となっている⁽²⁾。一方で、衝突安全に求められる水準に加え、乗り心地や走行安定性などへの要求も年々高まっており、自動車骨格部品を軽くしつつ、高強度・高剛性化への要求を満足する技術開発の重要性が増し、種々の材料開発や成形加工プロセス開発が進められてい

る^{(3)~(7)}。このような背景のもと、当社は部材の軽量化および高強度・高剛性化の両立が可能な成形加工プロセスとして、熱間エアブローによるフランジ付き連続異形閉断面を有するチューブフォーミング技術「STAF」を開発した^{(8)~(10)}。本加工技術では、鋼管を対象に熱間で高圧エアを内部に注入しながら金型に這わせて成形することで、図1に示すような、長手方向に断面形状の異なる閉断面構造を有した剛性の高い部品を成形することができる。また、材料にホットスタンプ工法と同じ素材で、焼入れ性が高く金型焼入れが可能なMn-B鋼を用いることにより1500 MPa級の材料強度が得られる。その結果、部品点数の削減および部材の薄板化が実現し、軽量化に貢献することができる。本報では、STAFプロセスの概要とその特長について報告する。

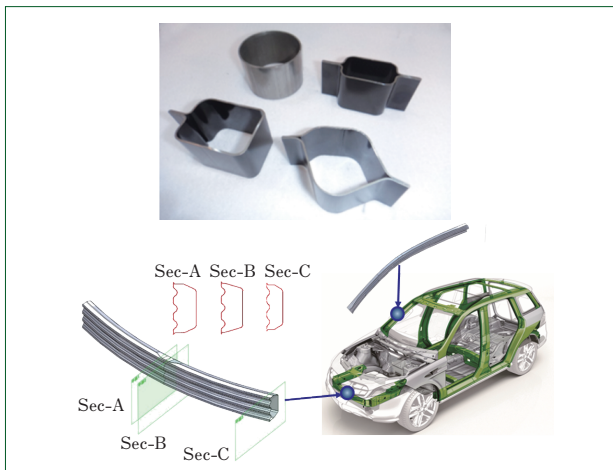


図1 STAF 適用部品例
Example of STAF applied part

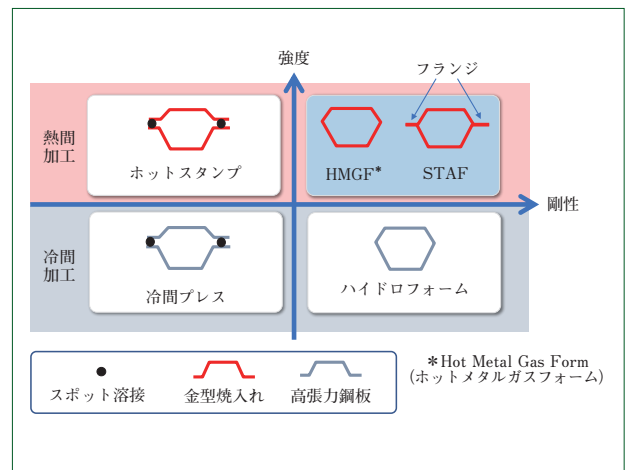


図3 他工法と比較した STAF プロセスの位置付け
Classification of STAF process compared to other processes

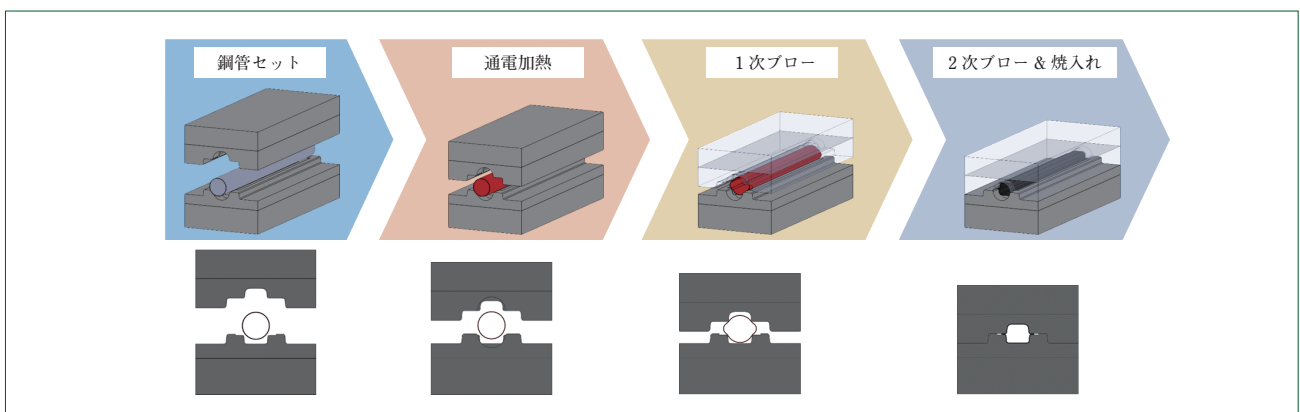


図2 STAFプロセス
STAF process

2 STAF プロセスの概要

図2に、STAFプロセスの概要を示す。STAFでは、加熱から成形、焼入れまでのすべてをプレス金型内で完了するワンパック加工が可能である。まず金型内において、電極で鋼管を把持し、直流通電加熱により所定温度まで加熱を行う。通电完了後、上下金型とパイプを接触させ、金型が半開きの状態でパイプ両端から数MPa程度の高圧ガスを注入し、フランジ部に相当する部分を張り出させる。最終的には完全に金型を閉じて、さらに高圧の20～30 MPa程度のガスを注入する。このように鋼管を拡張させて金型と密着させることで目的の形状に成形していき、同時に金型を冷却することで焼入れの完了した成形部品を得ることができる。

図3に、強度・剛性の点から見たSTAFの既存工法に対する位置付けを示す。通常の冷間プレス板成形に対しホットスタンプでは、金型焼入れを利用することにより材料強度の高い部材を成形することが可能である。このことから、板厚を薄くして軽量化できるというメリットがある。一方で、ハイドロフォームなどの鋼管から部材成形した場合は、スポット溶接で接合された部材とは異なり、連続閉断面を有することから剛性の高い部材を成形することが可能である。ホットスタンプとハイドロフォームのメリットを両立させた工法として焼入れ鋼管を熱間ガスブロー成形する工

法(ホットメタルガスフォーム：HMGF)があり、すでに実用化例がある。このHMGFに対しSTAFでは、他部品との接合や強度・剛性向上のためのフランジを一体で成形できるという特長を持つ。

図4に、Aピラーのケースを対象として材料強度、部品構成、断面図およびプロセスをSTAFと既存工法で比較した結果を示す。ホットスタンプが2枚の板材を貼り合わせた構造であるのに対し、STAFでは鋼管から成形することにより部品点数が削減できる。また、2つの金型を必要とするホットスタンプ対して、STAFでは1つの金型、1回の成形で済むことから、溶接組立てのプロセスも削減できる。一方、STAFと同様に鋼管から成形する工法としてハイドロフォームやホットガスメタルフォームが挙げられるが、断面図に示されるように、外板などの他部品との接合のための部品を設ける必要があり、STAFと比較して部品点数が多く、溶接組立ても必要になることが分かる。

3 STAF プロセスの特長

3.1 通电加熱方式による消費エネルギー削減効果

STAFは、プレス内に設けられた電極でパイプを把持して通电加熱を行うことができる構造とし、通电加熱からエアブロー成形までをプレス内で行うワンパック成形機構となっている。したがって、このような直接通电加熱方式を採用する

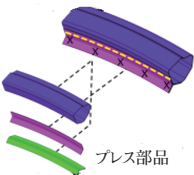
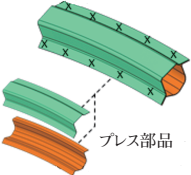
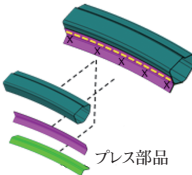
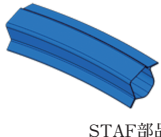
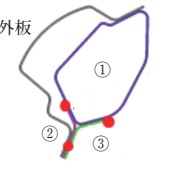
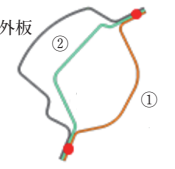
	ハイドロフォーム	ホットスタンプ	ホットメタルガスフォーム	STAF
材料強度	～980 MPa	1500 MPa	1500 MPa～	1500 MPa～
部品構成	 プレス部品	 プレス部品	 プレス部品	 STAF部品
断面図	2～3 部品	2 部品	2～3 部品	1 部品
				
プロセス	5 工程	5 工程	6 工程	3 工程
	・プリフォーム ・ハイドロフォーム (3000 t～) ・レーザカット ・プレス加工 ・溶接組立て	・ブランキング ・炉加熱 ・ホットスタンプ ・レーザカット ・溶接組立て	・プリフォーム ・炉加熱 ・ガスフォーム ・レーザカット ・プレス加工 ・溶接組立て	・プリフォーム ・STAF (800 t～) ・レーザカット

図4 既存工法と STAFの比較
Comparison with existing construction processes

ことで工場内のフットプリントを削減することができ、加熱に必要な電力は原理上ほぼ鋼管のみを加熱することに消費されるので、エネルギー消費量の削減が可能である。このように環境負荷低減効果の観点から非常に魅力的な方式ではあるが、著者らの知る範囲ではホットスタンプにおいて量産に適用された事例は少なく、通常は炉加熱が用いられている。この理由の一つに、酸化スケール対策としてAlSiめっき鋼板を採用していることが挙げられる。金型焼入れプロセスでは、加熱時にオーステナイト相に完全に変態させることを目的としているので、900℃以上まで加熱する必要がある。その際に、部材表面に酸化スケールが発生するが、その対策としてAlSiめっき鋼板が適用されている。アルミニウムの融点は660℃であることから、通常、AlSiめっき鋼板を900℃以上に加熱する場合は加熱過程でのめっき層の溶融が問題となる。ところが、加熱速度をたとえば10℃/s前後に制御することにより、加熱過程において母材の鉄をめっき層に拡散する時間が確保でき、より融点の高い鉄-アルミニウム合金層が形成され、めっき層の溶融を防止している^{11)～13)}。ただし、AlSiめっき鋼板に通電加熱を採用した場合、急速加熱過程において融点の高い鉄-アルミニウム合金層を形成する前にめっき層は溶融状態となる。溶融されるのみであれば、通電加熱の場合は端部の電極において板材を保持し、加熱炉のように送りロールなどと接触することはないので、大きな支障とはならないと考えられる。しかし、実際は板材を流れる電流により板材周辺には磁界が発生し、この磁界と溶融しためっき層を流れる電流との間で、フレミングの左手の法則によるローレンツ力が溶融めっき層に作用し、板材表面で溶融めっきが流動してめっき厚差が生じる「寄る」という特異現象が発生する。こうした事情から、AlSiめっき鋼板を用いたホットスタンプでは、通

電加熱プロセスの実用化は進んでいない^{12)～14)}。

前記の背景を踏まえ、AlSiめっき鋼板を通電加熱した際に、鋼管でも溶融しためっきが流動する現象が発生するか検証を行った¹⁵⁾。図5は、板材および管材に直流電流を流した場合について、フレミングの左手の法則により、それぞれの材料に作用するローレンツ力を導出した結果である。板材では板材中央に向かってローレンツ力が作用し、その大きさは端部ほど大きい。このローレンツ力はめっきにも作用することから、めっき層が溶融し板材中央部に流動して「寄る」ことへの説明がつく。管材においては、ローレンツ力は管材中央方向に作用し、円周方向には作用しない。したがって加熱中にめっきが溶融しても板材のように特定の箇所に流動するなどの現象は起こらない。図6に、実際にAlSiめっき鋼板および鋼管を通電加熱した後の表面状態を比較した結果を示す。鋼管は、比較に用いた鋼板から造管し、断面積も同等になるようにそれぞれの板幅と周長をそろえたものを用意した。図6に示すように、AlSiめっき鋼板では中央付近に溶融しためっきが集まり、めっき厚が厚くなっている様子が観察されるが、鋼管ではこういった現象が発生しないことが確認された。このように、AlSiめっき鋼板を材料とするホットスタンプでは困難とされてきた通電加熱は、AlSiめっき鋼管を材料とする場合では溶融しためっき層が流動するという問題は回避され、適用が可能であることが確認された。実際のエネルギーおよびCO₂排出量に関する詳細な削減効果は評価中であるが、立上げやアイドル時の電力消費も考慮すると、通電加熱はガス加熱炉や赤外線加熱炉と比較して消費エネルギーを1/10以下に抑えられるという試算が得られている。

3.2 フランジ付き閉断面構造による部品削減・軽量化効果

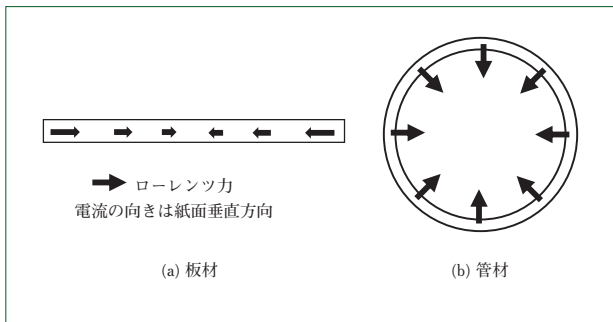


図5 板材およびパイプ材を通電加熱した場合に作用するローレンツ力分布
Lorentz force distribution acting on plate and pipe materials when heated by electric current

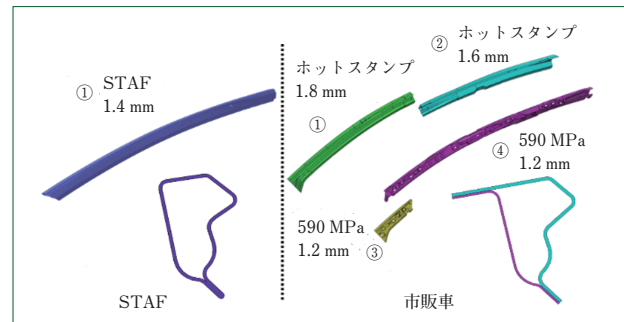


図7 STAFによる部品点数削減および軽量化効果
Reduction in number of parts and weight

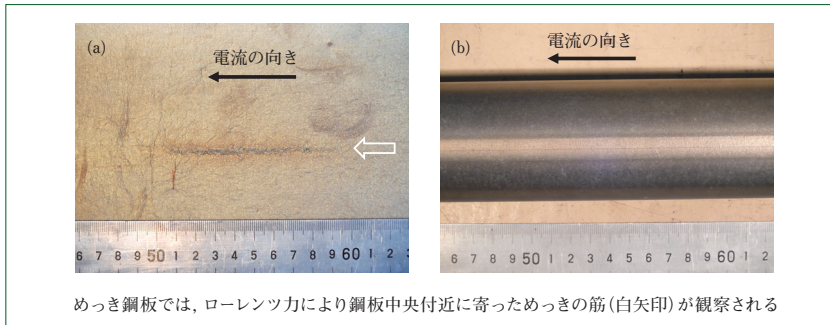


図6 通電加熱後の表面外観観察結果 (a) AISi めっき鋼板 (b) AISi めっき鋼管
Observation of surface appearance after electric current heating (a) AISi plated steel sheet (b) AISi plated steel pipe

実際の市販車を対象に、STAFに置き換えた場合の部品削減および軽量化効果について検討した事例を紹介する。図7は、ホットスタンプおよび冷間プレスで成形された市販車のAピラーを対象に、部材としての強度・剛性を維持しつつSTAFで置き換えた場合の部品削減効果を示したものである。板プレス加工における接合では両側にフランジを設ける必要があるが、STAFでは両側フランジおよびフランジなしのほか、鋼管から成形しているので片側フランジの成形も可能である。部品数については、市販車は4部品で構成されていたのに対してSTAFでは1部品に削減可能であった。部品点数削減や板厚を薄くすることにより質量も5.5kgから3.8kgに減少し約30%の軽量化が可能であるという検討結果が得られた。

4 むすび

- (1) 自動車骨格ボディ部品の軽量化および高強度・高剛性化の両立が可能な成形加工プロセス技術として、熱間エアブローによるフランジ付き連続異形閉断面を有するチューブフォーミング技術「STAF」を開発した。
- (2) STAFでは通電加熱方式を採用することにより、通常の炉加熱方式よりもエネルギー効率が高く、またフットプリントを削減できることを特長としている。ホットスタンプでは困難であった酸化スケール抑制を目的とするAISiめっき材の通電加熱適用について、鋼管を対象としているSTAFでは適用可能であることを実証した。
- (3) 市販車のAピラーをSTAFに置き換えた場合の軽量化効果を検討した結果、約30%の軽量化効果が見込まれることが示された。

(参考文献)

- (1) 小松隆, CFRPによる自動車軽量化設計入門, (2017), 2-9, 日刊工業新聞社。

- (2) 水野慎也, HEV, EV化で鋳物はどうなる・・・学会・大学への期待, 鋳造工学, 82-7 (2010), 420-426.
- (3) Karbasian, H., Tekkaya, A.E., A review on hot stamping, J. Mater. Process. Technol., 210 (2010), 2103-2118.
- (4) Mori, K., Bariani, P.E., Behrens, B.A., Brosius, A., Bruschi, S., Maeno, T., Merklein, M., Yanagimoto, J., Hot stamping of ultra-high strength steel parts, CIRP Ann. 66 (2017), 209-212.
- (5) Hikida, K., Nishibata, T., Kikuchi, H., Suzuki, T. and Nakayama, N., Properties of New TS 1800 MPa Grade Hot Stamping Steel and Application for Bumper Beam, Proc. 4th International conference Hot sheet metal forming of high-performance steel, (2013), 127-134.
- (6) 水村正昭他, ハイドロフォーミングの新加工技術の開発, 新日鉄技報, 393 (2012), 39-46.
- (7) 櫻井建夫, 自動車軽量化技術の10年-まとめと将来技術-, 軽金属, 71-12 (2021), 569-573.
- (8) 野際公宏, 熱間エアブロー成形技術 (STAF: Steel Tube Air Forming), 第335回塑性加工シンポジウムテキスト, (2019), 17-24.
- (9) Ishizuka, M., Nogiwa, K., Ide, A., Kan, H., Ueno, N., Development of STAF (Steel Tube Air Forming) Process, Proceedings of 7th International conference on Hot Sheet metal forming of High-performance steel, (2019), 431-438.
- (10) 野際公宏, 鋼管のフランジ付き熱間エアブロー成形技術, ぶらすとす, 29-3 (2020), 263-267.
- (11) 末広正芳, 真木純, 楠見和久, 大神正浩, 宮腰寿拓, ホットプレス用アルミニウムめっき鋼管の諸特性, 新日鉄技法, 378 (2003), 15-20.
- (12) 瀬沼武秀, プレス技術者のためのホットスタンピングのメタロジー, 塑性と加工 58-682 (2017), 1021-1026.
- (13) Fan, D.W. and Cooman, B.C.D., State-of-the-Knowledge on Coating Systems for Hot Stamped Parts, Steel Res. Int., 83-5 (2012), 412-433.
- (14) Lee, C.W., Choi, W.S., Cho, Y.R. and Cooman, B.C.D., Direct Resistance Joule Heating of Al-10 pct Si-Coated Press Hardening Steel, Metall. Mater. Trans. A, 47A (2016), 2875-2884.
- (15) 野際公宏, 鋼管のフランジ付き熱間エアブロー成形技術の開発, ぶらすとす, 55-5 (2022), 448-452.

※「STAF」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。