



T. Senuma

次世代ホットスタンピング技術の研究開発

瀬沼 武秀*

1. 緒言

自動車車体の軽量化は喫緊の課題となっている。特にキャビン周りの安全構造部材への超高強度鋼板の使用ニーズが高まっている。しかし、高強度化に伴う成形性ならびに形状凍結性の劣化が超高強度鋼板の適用を困難にしている。この問題の解決策の一つとしてホットスタンピング技術が開発され、ヨーロッパを中心に世界に普及し始めている。ホットスタンピング技術に関しては'Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel'と題された国際会議が定期的開催されていて多くの技術・研究開発の成果が報告されている¹⁻³⁾。2011年6月の会議では現在世界にある約160のホットスタンピングラインがここ数年は毎年20~30ライン増設されるという予測が発表された。また、2013年にはホットスタンピングにより製造されている部品が3.5億個にまで広がるという予測も出されている。本レビューではまず現状のホットスタンピング技術の概要を説明し、その問題点を整理する。次に、その問題点に対応した次世代ホットスタンピング技術の研究開発の現状を概説する。

2. 現状のホットスタンピング技術の概要

図1はホットスタンピングラインの模式図を示す。鋼板を電気炉でAr3変態点以上に加熱し(通常950℃前後に加熱した炉に5分程度在炉する)、取り出してプレス成形をして、そのまま金型で抑えて水冷金型の抜熱でMs点以下まで冷却する。その後、めっきを施していない鋼板を使用する場合はショットピーニングによりスケールを除去する。必要なトリミング、ピアシングは別ラインでレーザー切断を行うか、金型によるせん断を行う。



図1 現行のホットスタンピングプロセス

ホットスタンピング材の標準成分は0.22% C-1.2%Mn-0.15%Cr-0.02%Ti-0.002%B程度を含んでいる⁴⁾。この成分設計の思想は強度レベルを1470MPa級にする

ために、マルテンサイト組織で、この強度レベルが確保できるC量として0.22%前後が添加されている。また、焼き入れ性向上のためにMn, Cr, Bが添加されている。それによって、この材料は図2に示すように30℃/s程度の冷却速度でマルテンサイト組織になり必要な強度が確保できる。Tiの微量添加は不可避的不純物であるNをTiNとして析出させることで、BNの生成を阻止して、固溶のBをオーステナイト粒界に偏析させて焼き入れ性を高めている。この30℃/sという臨界の冷速は金型接触による抜熱による冷却で確実に得られる冷速と想定して設定された。

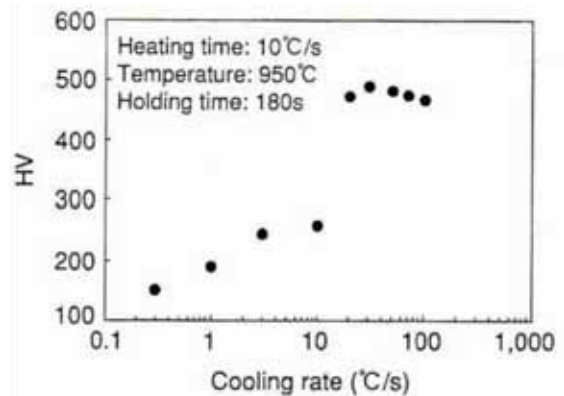


図2 硬さに及ぼす冷却速度の影響⁴⁾

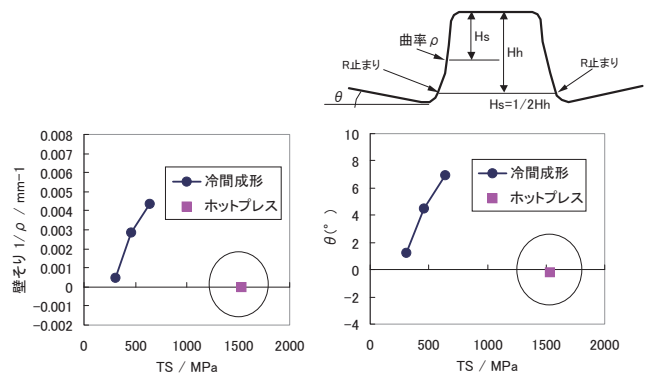


図3 ホットスタンピング材の形状凍結性 (冷間スタンピング材との比較⁵⁾)

*岡山大学大学院自然科学研究科 教授

図3はホットスタンピングによって成形されたハット型部品と通常の冷間プレスで成形された部品の強度と形状凍結性の関係を示す。超高強度にも拘らず、完璧に近い形状凍結性を示すことがホットスタンピングの特長になっている。

Kusumi ら⁶⁾は0.2%炭素鋼とオーステナイト系ステンレスのSUS304を用いて、ハット型部品の形状凍結性を調べたところ、たとえ高温で成形しても、変態時に金型で固定しなければ、優れた形状凍結性が得られないことを示した。すなわち、変態をしないSUS304ではスプリングバックは回避できない。

図4は950℃で5分間加熱した材料を空冷して、所定の温度になった時に球頭張出しをした実験結果で、張出し高さに及ぼす成形温度の影響を示す⁷⁾。SAは0.22%C-3%Mn鋼、SUS420J2はマルテンサイト系ステンレスである。ここでは金型抜熱を軽減するためにポンチを紙で覆った実験(insulated)の結果も示す。本実験ではスタンピング速度を50spmに設定し、1パス加工をした。あらかじめストロークを決めておき成形により割れが生じない場合、0.5mmずつストロークを増やしていき、破断が生じる一つ前の張出し高さを限界張出し高さとした。この図が示すように限界張出し高さは成形温度の低下に伴い上昇する。また、金型からの抜熱を紙で覆って抑制すると張出し性は向上する。破断部は冷間張出しの時とは異なり、球頭部ではなく、金型の接触部と非接触部の境界近傍で起こる。これは他の研究者の報告とも一致する^{5), 8)}。

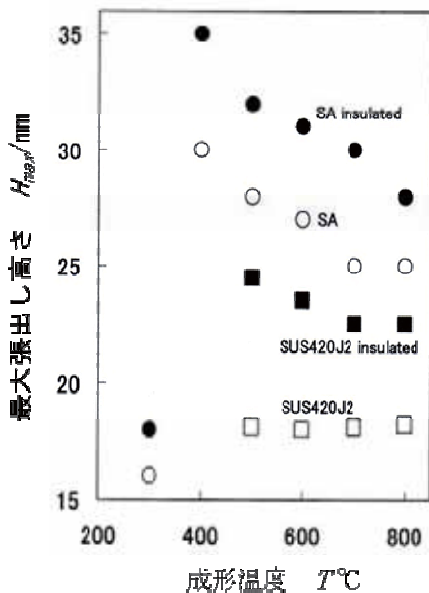


図4 張り出し高さに及ぼす成形温度の影響

図5は球頭部の温度低下を抑制した試料と金型に直接接して抜熱が著しかった試料の成形後の断面形状を比較して示す。張出し性の良かった材料は球頭部が伸ばされていることが分かる。成形時の球頭部での抜熱がないと仮定した場合、すぐれた張出し性が得られるとする広瀬ら⁹⁾の成形シミュレーション結果も今回の結果を支持し

ている。この結果は、プレス速度が速くなると張出し性が向上することを示唆する。このように、ホットスタンピングでは部品が超高強度を示すにも拘らず、軟鋼並の張り出し成形が可能である。

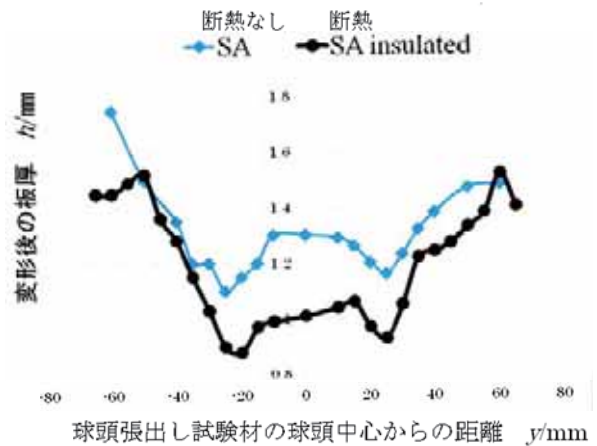


図5 板厚変化に及ぼす金型からの抜熱の相違の影響

図6は穴広げ率に及ぼす成形温度の影響を示す¹⁰⁾。800℃、700℃、600℃、500℃で打ち抜いた試料を100℃低い温度、700℃、600℃、500℃、400℃になった時点で、円錐ポンチを用いて、設定した移動距離だけポンチを50spmの速度で1ストローク動かし、割れが確認されるまでポンチ距離を増やしていき、穴広げ限界を明らかにした結果である。図中には円錐ポンチの側面を紙で覆いポンチの抜熱による冷却を緩和した実験と同様な効果を狙ったセラミックポンチを用いた実用化を念頭においた実験の結果も示す。

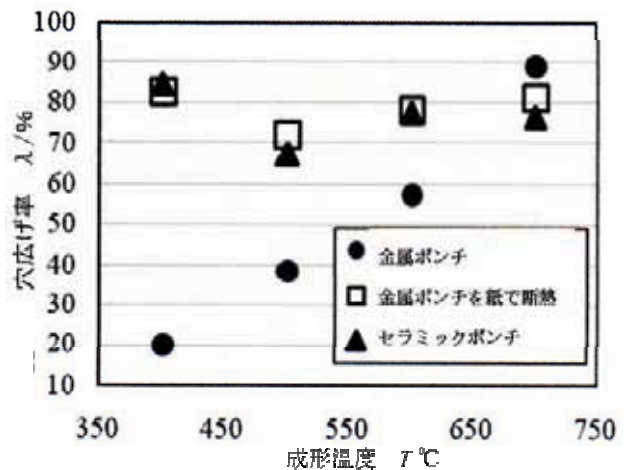


図6 穴広げ性に及ぼす成形温度の影響

通常金属ポンチを用いた実験では穴広げ率は加工温度が低くなるに伴い低くなる。これは穴広げ部が金型の抜熱により温度低下を起こし、接触部でマルテンサイト変態が起こるタイミングに関連すると推測される。穴広げ部の温度低下を緩和する措置を施すことで温度依存性がほとんど見られなくなった。対策本実験結果により、成形条件を適正化することで、穴広げ比70%以上という

1500MPa級の部品では従来考えられない優れた穴広げ性をホットスタンピングでは得られることが確認できた。

また、き裂が見られなかった限界の穴広げ比を有する試料をPH1の希塩酸溶液に浸漬して遅れ破壊感受性を調べたが、500℃以上で穴広げを行った試料は75時間の浸漬でもき裂は発生しなかった¹¹⁾。

高い耐食性が要求される部位にはホットスタンピングにおいても溶融亜鉛あるいはアルミめっき鋼板が用いられる。現行のホットスタンピング工程では溶融亜鉛めっきより溶融アルミめっきの方が加熱条件のウインドウが広いとされている。図7は溶融アルミめっき鋼板のめっき相の成分分析結果であるが、鉄とアルミの割合が異なる様々な鉄-アルミ合金が形成されている。表面が粗くなることで塗料がアンカー効果で密着するため、溶融亜鉛めっき鋼板は化成処理性は悪いにもかかわらず塗装後耐食性は優れている。

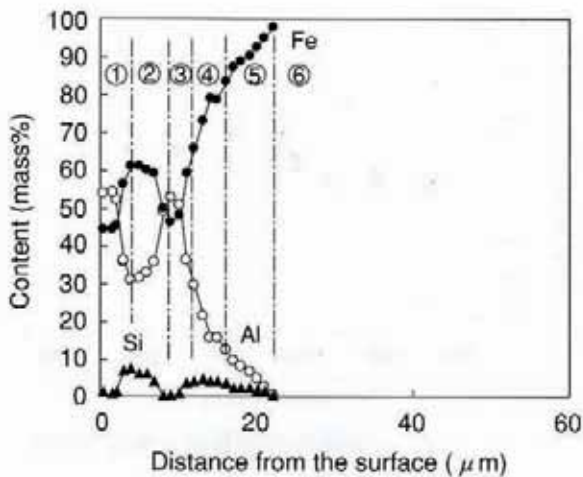


図7 アルミめっき相の成分分布⁴⁾

スポット溶接性については比較的広い適正溶接電流地帯が確認されており、通常アルミめっき鋼板の弱点である連続溶接性もアルミめっき相での鉄の合金化の影響で比較的良好なことが示されている⁴⁾。

ホットスタンピング技術の多様性として、冷間スタンピングによる深絞り加工などを施した部品をホットスタンピングする Indirect Hot Stamping や加熱、冷却条件を故意に一部品内で変化させた Tailored Hot Stamping などの技術が開発されている^{2,3)}。

現行のホットスタンピング技術についてはより詳細なレビューペーパーがあるので、参照ください。^{12,13)}

3. 現状のホットスタンピング技術の問題点

著者は2005年に「ホットスタンピング、自動車車体軽量化の切り札」と題して解説記事を書いた¹³⁾。そのときの将来展望は我が国においても超高強度部品の製造にはホットスタンピングが大きな役割を果たすと述べたが、期待したほどの急速な展開は見られなかった。一方、世界の情勢をみると順調に使用量が伸びている。この差異は日本の自動車ならびにプレスメーカーのコスト意識と

冷間のスタンピングの技術力の高さに由来すると考えられる。サーボプレスの導入などにより冷間スタンピングによる高強度部品の製造は1200MPa級にまで展開されようとしている。しかし今後の製造のグローバル化を考えるとホットスタンピング技術に軸足を移さざるを得ない。しかしそのためにはコスト低減が最大の課題になる。

ホットスタンピング部品のコスト高の要因はプロセスの低生産性と設備費の高さにある。低生産性は金型冷却に要する時間が長いことと、冷間スタンピングでは多段加工で行えたトリミングやピアシングを別工程でのレーザー切断によって行わなければならないことが大きくかかわっている。また、付加的な設備費としては加熱装置とレーザー切断装置が大きな負担となっている。ただし、プレス機は低負荷になることで設備費としては低減が図れる。

現行のプロセスを前提にした生産性向上を狙ったスタンピング時間の短縮技術として①部品の多数取り、②その際に各部品での接触圧力を均等化して冷却速度を増すようにクッションの配置を工夫する技術¹⁴⁾、②金型の材質を変えて熱伝導率を高める技術¹⁵⁾、③金型内に直接、水を噴射する技術¹⁶⁾などが紹介されている。これらの技術により、金型による冷却時間は6秒～10秒から1秒～4秒程度に短縮することができると報告されている。

レーザーによる切断が行われる理由として1500MPa級の材料をシャーで切断すると刃の寿命が極めて短いことが挙げられている。この寿命を延長するために、トリミング条件の検討がなされ、たとえば、トリミング金型の歯の角度とクリアランスを変化させることで、刃内に生じる応力を下げることで切断金型の長寿命化を果たしている¹⁷⁾。この結果をもとにレーザー切断を用いず、金型切断設備をプレス機に直列につなげたホットスタンピングラインが提案されている¹⁸⁾。ただし、シャーによる切断面には大きな引張の残留応力が存在するので、遅れ破壊の懸念や疲労強度の低下なども招く可能性があるため、基本的に大きな引張残留応力はかからない切断方法が好ましい。

もう一つの問題点は現在の世界標準となっているホットスタンピング用材料の成分設計にある。現状の成分では焼き入れ性が不十分なために30℃/s以上の冷却が必要になるため、多段加工などを行う場合、放冷中にフェライトなどの軟らかい相が生成する可能性があり特性のバラツキが生じる。いずれにしてもプレス工程におけるハンドリングに制約が課せられる。

4. 次世代ホットスタンピング技術の研究開発の現状と今後の展開

ここでは既存のホットスタンピング技術から逸脱して、以上の問題点の解決を念頭に著者らが提案している高生産性次世代ホットスタンピング技術を紹介する。図8にそのプロセスの模式図を示す。

基本的な発想は現在行われている冷間での連続スタンピングを熱間でも行おうというものである。スタンピングを多段で行うことで、トリミングや穴あけ・穴広げも

連続で行え、別工程でのレーザー切断を簡省略できる。

多段連続加工に伴う温度低下が起こってもフェライトなどの軟らかい相が生成しないように、使用する材料には必要に応じて焼き入れ性を向上させる合金を添加する。焼き入れ性を向上させる廉価な合金元素として Mn が挙げられるが、過剰な添加は靱性、耐遅れ破壊性などを低下させるので注意を有する。また、スタンピングの生産性が向上すると加熱工程がネックになるため、本提案では急速加熱による加熱時間の短縮を提案している。急速加熱には 100°C/s を優に超える誘導加熱、通電加熱などがあるが、複雑形状の素材を均一に加熱するのは難しい。30°C/s 程度の加熱速度ならば加熱バーナーの最適化や遠赤外線加熱を利用することで実現できる¹⁹⁾。この場合、素材の形状の制限はなくなる。

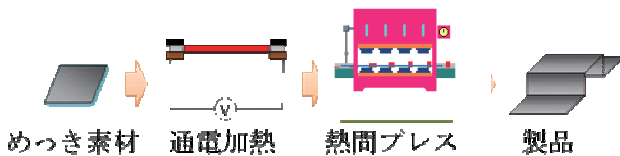


図 8 新ホットスタンピングプロセス

優れた形状凍結性を得るには金型内で変態させることが重要であることを述べたが、必ずしもプレス金型である必要はなく、変態の時に生ずる変形を抑えることができれば十分である。著者らは変態時の変形を図 9 に示す簡単な治具で拘束するだけで優れた形状凍結性を確保できることを確認している²⁰⁾。すなわち、薄板のスタンピング材はスタンピング後に簡単な治具で部品を抑えて、水冷すれば大きな形状の崩れは起きない。このようにすればスタンピングと冷却を分離ができるためにプレス機の稼働率を大幅に高めることができる。

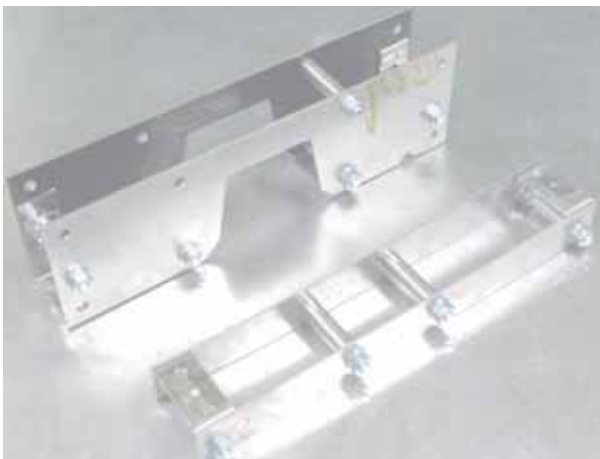


図 9 ハット型部材を挟む簡易治具

これまでに紹介してきたホットスタンピング技術を適切に組み合わせると低コストで今まで不可能と思われていた形状を持つ超高強度部品の製造が可能になる。たとえば、1 段目の加工で全体の形状を作り込むと共に（その際、厳しい張り出し成形をする場合は球頭部を加熱した金型を用いる）穴の打ち抜き加工を行い、2 段目の加

工で穴広げとトリミングを行う。プレス機から出てきた部品はロボットで形状凍結治具に装着され、水槽で冷却される。ここで行われたホットトリミングでは表層部の残留の引張応力は大幅に低減される。このような一連の流れ作業により通常の冷間プレスと同様に毎分 20 部品の製造も夢ではなくなる。

現在、著者らは短時間急速低温加熱と加熱前の組織制御を駆使することで、直径 1~2 μm のマルテンサイト組織を得る研究を推進中で、靱性、耐遅れ破壊性に優れた 2000MPa 超級のホットスタンピング部品の創成を進めている。著者らが既に報告している 1500MPa 級の材料のマルテンサイトの結晶粒径を従来のホットスタンピング工程で得られる約 20 μm から組織制御により 5 μm にすることでシャルピー試験の吸収エネルギーが 3 倍になった²¹⁾ことを考えると 2000MPa 超級のホットスタンピング部品の実用化も夢ではないと思われる。

5. 結言

本レビューでは現行のホットスタンピング技術を概説し、その最大の問題点である低生産性を大幅に改善する次世代のホットスタンピング技術について私見を述べた。

それにより、ホットスタンピング部品の低コスト化を実現できるだけでなく、一部に存在する遅れ破壊に対する懸念も払拭することができる。

今後のホットスタンピング技術の展開で大いに期待されるのはホットスタンピングプロセスを一種の(加工)熱処理の手段と位置づけ、組織の超微細化やヘテロ組織の創成などの組織制御により今までにない高性能な超高強度部品の創出することである。

参考文献

- 1) Proc. of 1st Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by Oldenburg, M., Steinhoff, K. and Prakash, B., (2008), Grips Medis GmbH.
- 2) Proc. of 2nd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by Oldenburg, M., Steinhoff, K. and Prakash, B., (2009), Verlag Wissenschaftliche Scripten.
- 3) Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by Oldenburg, M., Steinhoff, K. and Prakash, B., (2011), Verlag Wissenschaftliche Scripten.
- 4) 末廣正芳・真木純・楠見和久・大神正浩・宮腰寿拓：新日鉄技報，378 (2003), 15-21.
- 5) 楠見和久・山本修治：第 58 回塑加連講論，(2007) 83-84
- 6) Kusumi, K., Yamamoto, S., Takeshita, T. and Abe, M.: Proc. of 2nd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by Oldenburg, M., Steinhoff, K. and Prakash, B., (2009), 97-104.
- 7) 瀬沼武秀・竹元嘉利：塑性と加工，51-592 (2010)，

- 8) 中田匡浩：第 59 回塑加連講論，(2008), 145-146.
- 9) 広瀬洋三・小嶋啓達・中田匡浩・内原正人・秋岡浩司：2009 年自動車技術会春季大会フォーラム「時代を拓く自動車用材料技術」，09FORUM-14，(2009), 12-17.
- 10) 馬込英明・瀬沼武秀・田邊章宏・竹元嘉利・清水憲一：自動車技術会，学術講演会前刷集，No. 136-08，(2008), 5-8.
- 11) Senuma, T., Magome, H., Tanabe, A. and Takemoto, Y.: Proc. of 2nd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by Oldenburg, M., Steinhoff, K. and Prakash, B., (2009), 221-228.
- 12) 小嶋啓達：塑性と加工，**46-534** (2005), 595-600.
- 13) 瀬沼武秀・楠見和久・末広正芳：ふえらむ，**11-2** (2006), 86-91.
- 14) Gerlach, L. and M. Werbs: Proc. of 2nd Int. Conf. on Steels in Cars and Trucks, ed. by Fuchsbaauer, B. and Wieland, H-J., (2008), 149-153.
- 15) Maikranz-Valentin, M.: Proc. of 2nd Int. Conf. on New Forming Technology, BIAS-Verlag, (2007), 337-350.
- 16) 石森裕一・嶋哲男・福地弘：特許公開 2007-75834
- 17) So, H., Hoffmann, H and Golle, R: Proc. of 2nd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by Oldenburg, M., Steinhoff, K. and Prakash, B., (2009), 137-145.
- 18) Kollek, R., Aspacher, J. and Veit, R.: Proc. of 2nd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by Oldenburg, M., Steinhoff, K. and Prakash, B., (2009), 173-179.
- 19) Steinhoff, K., Saba, N., Maikranz-Valentin, M. and Weidig, U.: Proc. of 2nd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by Oldenburg, M., Steinhoff, K. and Prakash, B., (2009), 29-42.
- 20) 瀬沼武秀 馬込英明 葉賀一太 藤岡尚浩 竹元嘉利 清水憲一：塑性と加工 **51-594** (2010). 680-684
- 21) T. Senuma and Y. Takemoto: Mater. Sci. Forum, 654-656 (2010), 330-334.