

次世代ホットスタンピング技術の研究開発

岡山大学大学院 自然科学研究科

教授 瀬沼 武秀

(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008007)

キーワード：ホットスタンピング、超高強度部品、衝突安全、軽量化、鉄鋼材料、高生産性

1. 緒言

著者の一人は 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¹⁾。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，国内では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おり，2008 年には 1 億個以上の部品がホットスタンピングにより製造されている。2013 年にはそれが 3.5 億部品にまで広がるという予測も出されている。また，ドイツの有力な自動車会社では現行のプレス部品の約 50% をホットスタンピング技術で製造するという将来構想を打ち上げ，その実現のためには現行の Direct Hot Stamping だけではなく，冷間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 などの技術開発が進められている。

優れた形状凍結性を示すホットスタンピング技術が超高強度部品の製造に適していることは認められているものの，一部品当たりの高い製造費が普及の妨げになっている。高コスト化の原因としては新たな設備投資と本技術の生産性の低さが挙げられる。大きな設備投資としては大規模な加熱炉ならびにホットスタンピング後に行われるトリミングや穴あけなどに用いるレーザー切断装置が挙げられる。また，生産性を劣化させる要因としては，本技術の特徴であるマルテンサイト変態を金型内で起こさせるための金型での抜熱に時間を要することとトリミングや穴あけ作業を別工程で行わなければならないことが挙げられる。

そこで，著者は加熱工程を除き，できるだけ現行のコールドプレスの工程でホットスタンピング部品を製造するビジョンを構築し，それを実現するためのコンセプトを本助成研究で提案することにした。

2. 次世代ホットスタンピング技術のイメージ

図 1 は次世代ホットスタンピング技術の概要を示す。この図が示すように，スタンピングは従来方式の油圧プレスによる下死点保持を 10 秒前後行う 1 段の加工ではなく，トランスファープレスなどを用いた多段スタンピングで形状の形成，ピアシング，トリミング，穴広げなどを連続的に行うという構想である。これにより，1 部品当たりの製造時間は従来のコールドスタンピングと大きな相違はなくなる。また，トリミングなども連続して行うことができるた

め，レーザー切断のような別工程での作業が簡省略できるため，生産性の向上だけではなく，設備投資費の低減にもつながる。

スタンピング工程の生産性向上に伴い加熱工程の生産性も上げる必要がある。従来の炉加熱では炉長を延ばすことが必要となるが，場所的な制限で支障が生じることが多い。そこで，本技術では急速加熱である通電加熱を導入する。通電加熱の利点は熱電効率の良い加熱方法であることと通電方向の断面積が一定の場合，加熱が均一に短時間で行えることである。一方，断面積が異なると温度分布が生じるので，部品取りの方法などを工夫して歩留まりの向上を図る必要がある。理想的な加熱方法としてはプレス機の入り口で 1 ペアの通電ロールを置き，それに通電して加熱したコイルをプレス機に供給する方法である。

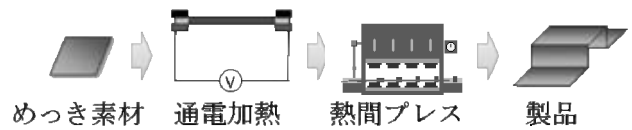


図 1 新ホットスタンピングプロセス

3. 形状凍結性に及ぼす下死点保持時間の影響

既報²⁾において，SUS420J2 を用いて形状凍結性に及ぼす成形温度，成形速度，金型ギャップ，試料の大きさなどの影響について検討した。その際に形状凍結性に及ぼす下死点保持時間の影響についても検討し，図 2 の結果を得た。縦軸の金型と成形品のフランジ部の開き角とは，図 3 に示す角度を意味する。

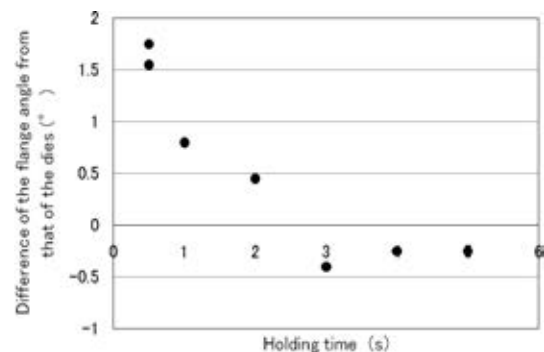


図 2 形状凍結性に及ぼす下死点保持時間の影響 (SUS420J2)

この結果は下死点保持時間を長くすることで、優れた形状凍結性が得られることを示している。この結果は SUS420J を用いた実験の結果である。その後、より安価な 0.22%C-3%Mn をベース成分にもつ炭素鋼 (SA~SD) で同様の実験を行った結果を図 4 に示す。

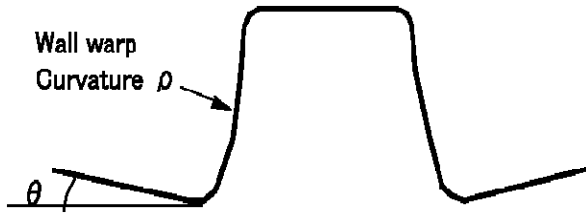


図 3 ハット型成形部材の形状凍結性の指標

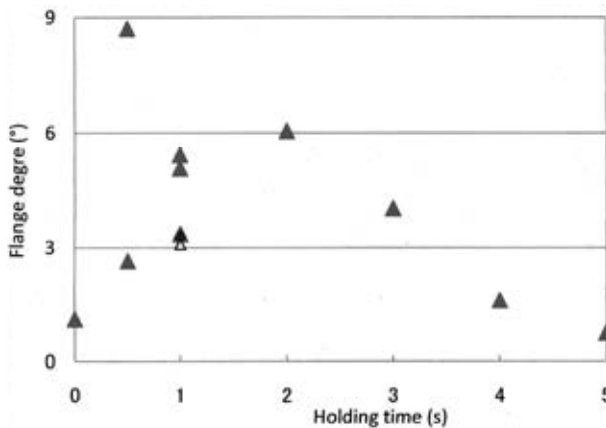


図 4 形状凍結性に及ぼす下死点保持時間の影響 (炭素鋼)

この結果は SUS420J の結果と大きく異なり、短時間の下死点保持では優れた形状凍結性は確保できないことを示す。

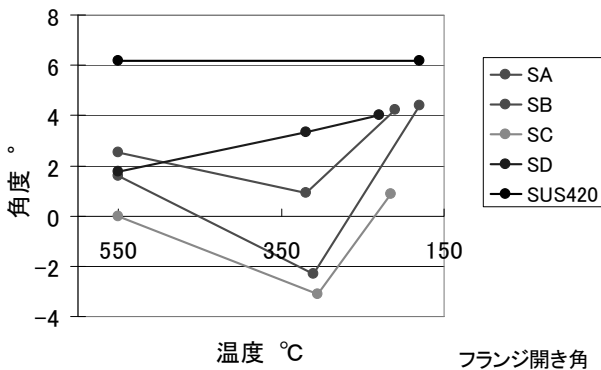


図 5 冷却途中のフランジ開き角の変化 (SA-SD:炭素鋼)

図 5 はハット型部材を空冷した時の各温度におけるフランジ開き角を測定した結果である。このように炭素鋼は変態時に形状の大きな変化が起こり、変態時の形状の変化を抑制する処置を講じないと変態後の形状は金型形状から大きく逸脱する可能性があることが明らかになった。しかし、この変態時の生じる応力は小さく、簡易的な治具で抑えるだけで形状を凍結できる可能性がある。そこで、図 6 に示す、簡易的な治具 (上部の治具がハット型の形状をしており、下部の治具とクランプ方式で締め付ける仕組み) を用

いてハット型成形部材を抑えた場合と自由に空冷した場合のフランジ開き角に及ぼす加工温度の影響を図 7 に示す。

この結果はトランスファープレスなどで冷間プレスと同様に連続的にプレス加工をしたのちに簡易治具に挟んで冷却すれば優れた形状凍結性を確保しながら高い生産性で製品を製造できることを意味する。

もちろん、このような簡易治具ではなく、金型内に直接冷却水を噴射して短時間で変態を終了する金型を多段スタンピングの最終段に採用することも一案である³⁾。

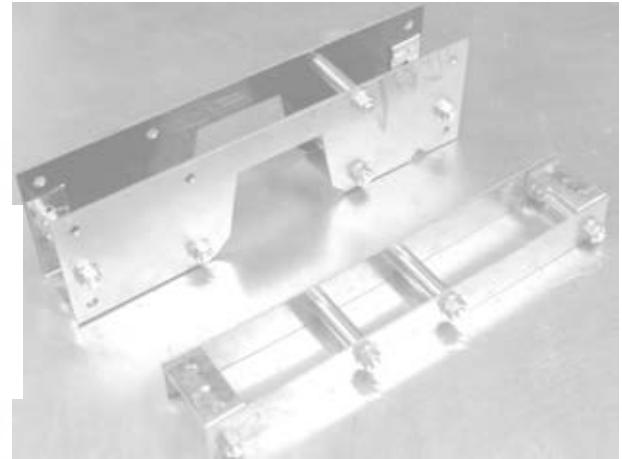


図 6 : 形状凍結簡易治具

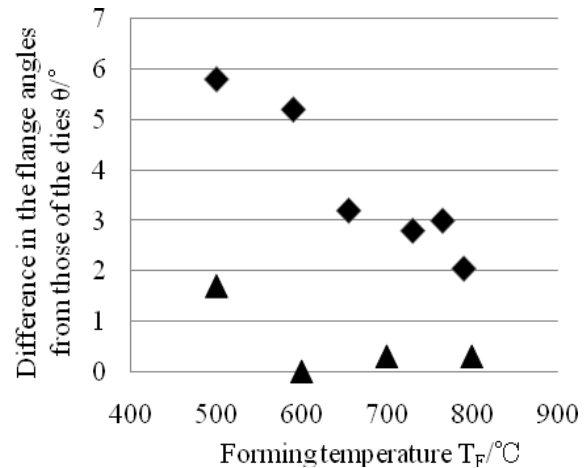


図 7 : ハット型部材の開き角に及ぼす成形温度の影響と簡易治具使用の効果 (◆:治具なし, ▲:治具あり)

4. 打ち抜き部の遅れ破壊性に及ぼす加工温度の影響

打ち抜き部の遅れ破壊感受性を検討するために、1.4×40×40 の試料を 950°C で 5 分間加熱した後に、ポンチ径 19.58mm、ダイス径 20mm として、試料が 800°C、700°C、600°C、500°C、400°C、200°C になった時点で 50spm の速度で打ち抜き実験を行った。図 8 に各温度で打ち抜き加工された試料を冷却後、PH1 の溶液に漬け、その試料にきれつが観察されたときの時間を示す。矢印は 75 時間の浸漬でもきれつが発生しなかったことを意味する。この結果が示すように室温、200°C、400°C で打ち抜かれた試料ではきれつが観察されたが、500°C 以上で打ち抜かれた材料では 75 時間の浸漬にもかかわらずきれつは見られなかった。遅れ破

壊の発生には引張応力の作用が不可欠であるので、外部負荷を与えていない浸漬実験で遅れ破壊が起こったことは、打ち抜き加工により引張の残留応力が生じたことを示唆する。そこで、残留応力の測定を行った。

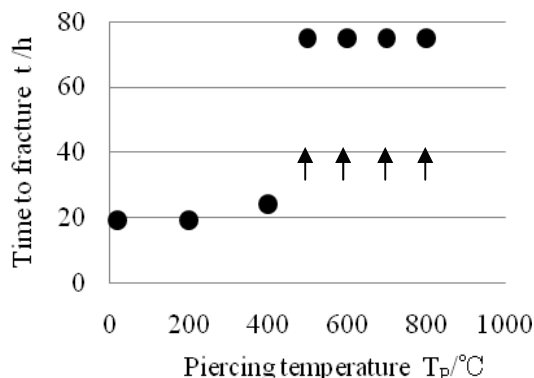


図 8 1 PH の希塩酸水に浸漬した試料が遅れ破壊を起こるまでの時間に及ぼす加工温度の影響

図 9 は X 線回折の解析結果による各温度で打ち抜いた材料の円周方向の残留応力を示す。その結果、500°C以上の加工では引張の残留応力は 600MPa 以下を示したが、400°C加工

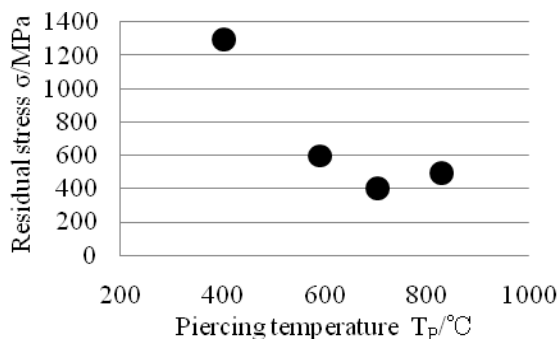


図 9 打ち抜き面の円周方向の残留応力に及ぼす打ち抜き温度の影響

工では 1300MPa と引張強度に近い高い値を示した。これは打ち抜き加工時にポンチが接触したことで試料は急冷されマルテンサイト変態が起り、その後のせん断加工により大きな引張の残留応力が生じたものと思われる。

この打ち抜き面近傍の残留応力が引張であることは、力のつり合いより内部には圧縮の残留応力が作用することを意味し、たとえ、表面に遅れ破壊によるきれつが発生したとしても、その部位に外部より大きな引張応力が掛り、トータルとして引張の応力が作用しなければきれつの進展は抑制されると推測される。この残留の圧縮応力の存在が 10 年以上も使用されているホットスタンピング材で遅れ破壊による部品の破断が報告されない理由と思われる。

5. 穴広げ性に及ぼすホットスタンピング条件の影響

1500MPa 級の鋼板の穴広げ性は著しく悪く、ほとんど穴広げ作業に供されることはない。しかし、ホットスタンピングにおける穴広げのデータは皆無であるので、穴広げ実験を行った。

ホットスタンピング材の場合、穴広げ実験を通常のエリクセン試験機を用いる方法で行うと試験速度が遅いために、

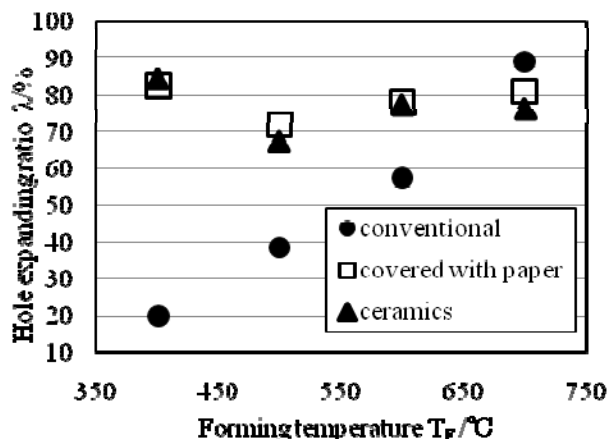


図 10 穴広げ比に及ぼす加工温度の影響

ポンチと接触する穴広げ部の温度が著しく下がるので、プレス機を用いた方法を採用した。すなわち、800°C、700°C、600°C、500°Cで打ち抜いた試料を 100°C低い温度、700°C、600°C、500°C、400°Cになった時点で、60°の先端角を有する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行って、穴広げ限界を明らかにした。試料は 1.4×80×80 の板を用いた。穴広げ性は穴部の局所的な温度低下が悪影響を及ぼす可能性があるため、円錐ポンチの接触による急激な温度低下を回避するために、円錐面を紙で覆った実験およびセラミックスポンチを用いた実験も行った。各温度で割れが確認できない限界の穴広げ率を有する試料をその後、遅れ破壊の実験に供した。

図 10 は穴広げ比に及ぼす加工温度の影響を示す。図中には円錐ポンチの側面を紙で覆い簡易的にポンチによる冷却を緩和した実験とセラミックスポンチを用いた実験の結果も示す。

SKD11 で作製した金型を用いた実験では穴広げ比は加工温度が低くなるに伴い低くなる。これはポンチとの接触部で抜熱による温度低下が穴部周辺で起こり、マルテンサイト変態を起こすことで変形能の著しい劣化を招き、破断につながるかと推察される。そこで、穴広げ部の温度低下を緩

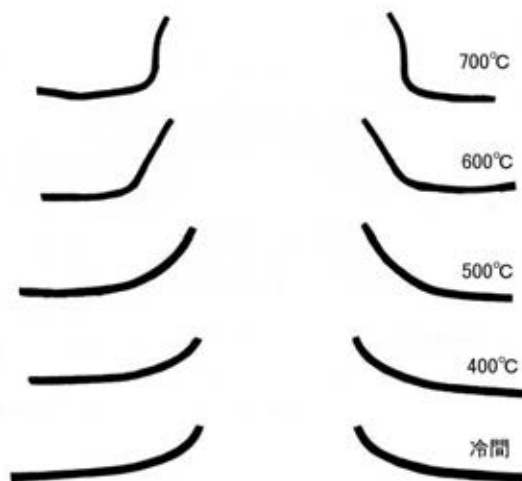


図 11 穴広げ部の形状

和する簡易的な措置として円錐ポンチの側面を紙で覆って実験をしたところ図中に示すようにほとんど温度依存性が見られなくなった。また、実用化を考えると紙で覆うという作業は問題があるため、熱伝導率の低いポンチとしてジルコニア系のセラミックスを用いた実験も行い、同様に低温域で顕著な穴広げ性の向上を得ることができた。本実験結果により、穴広げ部の温度低下を抑制することで、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得られることが確認できた。すなわち、ここで提案している多段のホットスタンピングにおいて穴広げ加工にセラミックスポンチや加熱されたポンチなどを用いて、穴広げ部の温度低下を抑制すれば1500MPa級の部品でも穴広げ加工が可能なることを示唆する。

また、きれつが見られなかった限界の穴広げ比を有する試料をPH1の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時間の浸漬でもきれつは発生しなかった。

しかし、ここで留意すべき点は図11に見られるようにホットスタンピングで成形した穴広げ部の形状は高温ほどポンチと接触していない部分の伸び変形が顕著になるため変形温度の違いで、冷間の穴広げ加工で高穴広げ比を持つ部材と形状が大きく異なることである。それゆえ、同じ70%の穴広げ率でも部品設計には注意を要する。

6. 張出し性に及ぼすホットスタンピング条件の影響

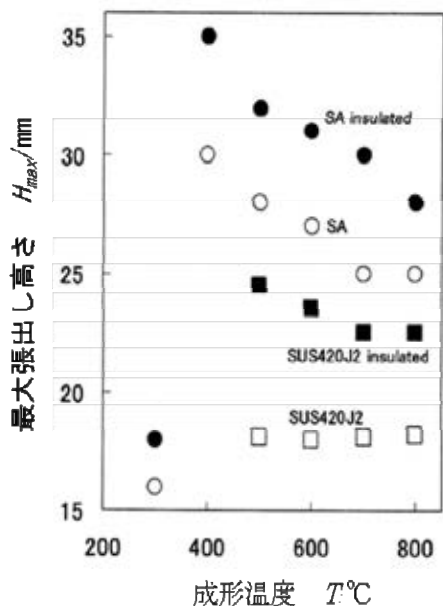


図12 張り出し高さに及ぼす成形温度の影響

図12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。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。熱間での張出し試験は金型抜熱による温度低下が大きく影響を与えるので成形速度が重要な因子になる。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。

図13は張出し性の良かった試料と悪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³⁾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。また、黒鉛系の熱間潤滑剤を用いた実験も行ったが、潤滑の影響は熱間張出しの場合ほとんどないことが明らかになった。

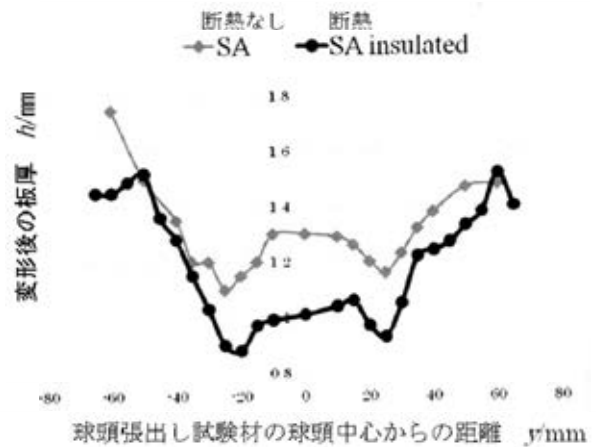


図13 板厚変化に及ぼす金型からの抜熱の相違の影響

7. 結言

本研究では生産性を抜本的に向上させる新ホットスタンピング技術の実現のために必要な基盤研究を行った。以下に、その結果をまとめる。

1. 打ち抜き部の遅れ破壊感受性は500℃以上の加工温度で良好になる。これは引張の残留応力が低減されたことに起因するものと推察される。
2. 穴広げ性は温度低下に伴い劣化するが、ポンチの抜熱による温度低下を抑制することにより、加工温度が低い場合も優れた穴広げ性を確保することができる。すなわち、多段連続ホットスタンピング時に穴広げ加工を後段で行うことは支障がない。
3. 1500MPa級の強度の部品でも70%程度の穴広げ比が期待できる。
4. 張出し性は加工温度が低い方が良好になる。ただし、高温成形でもポンチの接触部の温度低下を抑制することで張出し性を向上することは可能である。
5. 実験結果に基づき、生産性を抜本的に改善可能な新ホットスタンピング技術を提案した。その要旨は空冷でもマルテンサイト変態を起こす焼き入れ性の優れた材料を用い、急速加熱装置で加熱の設備の小型化を果たし、多段のプレス成形で張出成形、穴あけ、穴広げ

加工，トリミングなどを連続的に行い，変態時に簡易治具で固定することで形状凍結性を確保することができるというものである。

日本の成形技術は多くの分野で世界をリードする実績を上げているが，ホットスタンピング技術に関してはヨーロッパ勢の勢いが目立つ。ホットスタンピング技術が超高強度部材の製造の中核技術になる可能性は高く，我が国においても国際競争力の強化のために産学連携課題としてさらなる研究開発の深化が期待される。

謝辞

本研究は、平成 20 年度天田金属加工機械技術振興財団研究開発助成において実施いたしました。ご支援をいただいた同財団に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 瀬沼武秀・楠見和久・末広正芳：ふえらむ，**11-2** (2006)，86-91.
- 2) 瀬沼武秀・馬込英明・田邊章宏・竹元嘉利：同上，**49-567** (2008)，321-325.
- 3) 石森裕一・嶋 哲男・福地 弘：特許公開 2007-75834
- 4) 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.