

ホットスタンプにおけるプレス成形性と成形解析技術

Formability and FEM Simulation of Steel Sheets in Hot Stamping Process

楠 見 和 久* 野 村 成 彦 真 木 純
 Kazuhisa KUSUMI Naruhiko NOMURA Jun MAKI

抄 録

オーステナイト域の温度に加熱した鋼板をプレス成形すると同時に焼入れを行うホットスタンプ技術の適用が拡大している。この方法により高強度で形状凍結性に優れた自動車部品が製造でき、車体軽量化に寄与することができる。ホットスタンプについて、基礎的なプレス成形性と成形解析技術について報告した。併せて、ホットスタンプ用Alめっき鋼板の成形後の耐食性についても示した。

Abstract

Production of parts by means of hot stamping process has increased. Applications of hot stamping contribute to the weight reduction of automobiles by the production of parts with both high strength and good shape fixability. In this report, basic formability and FEM analysis of hot stamping were presented. In addition, the corrosion resistance of hot stamped aluminized steels was discussed.

1. 緒 言

近年、自動車軽量化の手段の一つとして、ホットスタンプ部品の適用が拡大している。図1にホットスタンプの概要を示す。本工法は焼入れにより鋼板強度を高めるために鋼板はオーステナイト域の温度 (A_{c3} 以上) まで加熱される。炉から取り出された鋼板はプレス機まで搬送され水冷金型でプレス成形、焼入れが行われる¹⁾。ホットスタンプ用材料としてはMn, Bなどを添加したボロン鋼が用いられる²⁾。表1に代表的な鋼成分を示す。本鋼板を用いるこ

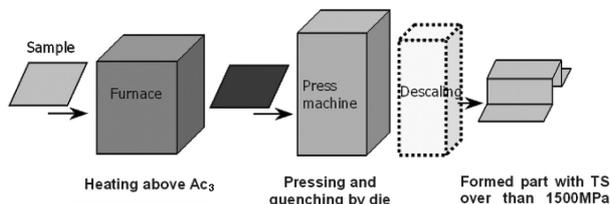


図1 ホットスタンプの模式図
 Schematic diagram of hot stamping process

表1 ホットスタンプ用鋼板の化学成分の例³⁾
 Chemical composition of hot stamped steel sheet

C	Mn	Cr	B
0.22	1.2	0.2	0.002

とにより引張強度が1500MPa程度の部品が製造できる。ホットスタンプでは、超強度鋼を用いた冷間プレスでの大きな課題である形状凍結性が非常に良好なことが大きな特徴である。ホットスタンプを用いることにより高強度で形状精度が高い部品を製造することが可能となる。

この様な高温での成形性についての知見としては、工具を加熱する温間成形における成形性については知見があるものの^{3,4)}、ホットスタンプのような高温域でかつ工具が常温である様な場合のプレス成形性についての知見は十分でなかった。そこで基礎的なプレス成形性の検討を進めるとともに、より複雑な実部材の成形性を検討するために熱-塑性加工の連成となる成形解析技術についても開発を進めた。併せて、ホットスタンプ用Alめっき鋼板を用いた場合のプレス成型品の耐食性についても検討した。

2. ホットスタンプにおけるプレス成形性

2.1 曲げ成形における形状凍結性^{5,6)}

鋼板を成形した場合には成形力に応じた弾性回復が生じる。そのため、高強度鋼板を用いた場合には弾性回復量が増加し、それに伴いスプリングバックが増加し形状凍結性が低下する。それに対して、ホットスタンプでは部品強度は高く、良好な形状凍結性が得られることが特徴である。そこで、まず各種強度鋼材の冷間プレス後とホットスタン

* 鉄鋼研究所 研究企画グループ マネジャー 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

プ後の形状を比較した。図2, 3にそれぞれ成形後の外観とスプリングバック量と材料強度との関係を示す。冷間プレスでは材料強度が増加するとスプリングバック量は増大する。一方ホットスタンプではスプリングバックはほぼ無くなり、冷間プレスと比較して顕著に良好な形状凍結性を示すことが分かった。

しかしホットスタンプの場合でも成形力が発生しており、それに応じたスプリングバックが生じる可能性も考えられる。また、ホットスタンプではプレス成形後の下死点保持の際にマルテンサイト変態が生じるため、これらが成形時に導入された応力に影響を及ぼす可能性も考えられる。そこで、マルテンサイト変態の形状凍結性に及ぼす影響を検討した。

供試材としてホットスタンプ用AIめっき鋼板(図表中では0.2%C鋼)を用い、比較材として変態挙動の異なる270MPa級IF鋼(以下IF鋼)とSUS304を用いた。これらの鋼板を950℃に加熱したのち、成形開始温度を加熱後の空冷にて400~800℃と変化させた。ホットスタンプ用鋼板は空冷では550℃以下でベイナイト変態するため、成形開始温度600~800℃ではオーステナイトであり、成形後の下死点保持にてマルテンサイト変態する。成形開始温度が500℃以下では加工前にベイナイト変態するため、成形後の下死点保持にてマルテンサイト変態は生じない。一方、IF鋼とSUS304はこの温度範囲では、それぞれフェライトとオーステナイトであり、成形中、下死点保持を通じて変態は生じない。各鋼種の各成形開始温度での状態を表2に示す。

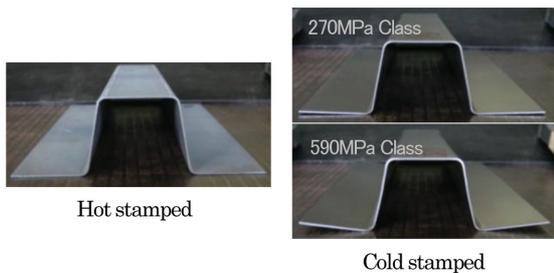


図2 ホットスタンプと冷間プレスの外観の比較
Comparison of shape fixability between cold and hot stamped parts

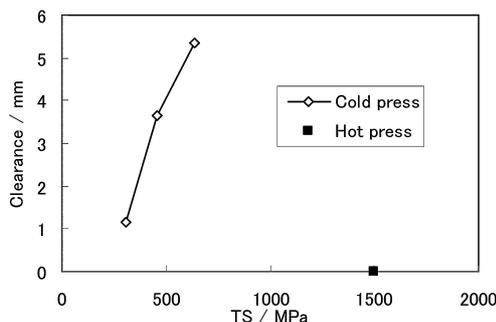


図3 スプリングバック量と材料強度との関係
Relation between spring-back and tensile stress of steel sheet

図4に各鋼種の形状凍結性に及ぼす成形温度の影響を示す。ホットスタンプ用鋼板では成形温度が成形開始温度550~800℃と高温で成形後にマルテンサイト変態する場合には形状凍結性は良好であるが、成形開始温度がベイナイト変態が開始している500℃以下で形状が急激に悪化した。これに対して、変態が生じないIF鋼, SUS304は、800℃成形でもスプリングバックが存在し、成形温度が低下すると連続的に劣化した。これは加工温度の低下とともに変形抵抗が増加して形状凍結性が劣化したものと考えられる。しかし、ホットスタンプ用鋼板では加工後にマルテンサイト変態する高い成形温度ではスプリングバックが顕著に小さくなるが、ベイナイト変態後の成形温度ではスプリングバックが生じており、形状凍結性にマルテンサイト変態が影響することがわかる。

図5に、形状凍結性と熱間引張強度の関係を示す。成形後にマルテンサイト変態が生じないIF鋼, SUS304と400℃で成形したホットスタンプ用鋼板については、形状凍結性は熱間引張強度で整理できる。一方、600, 700, 800℃のオーステナイト域で成形し、成形後にマルテンサイト変態したホットスタンプ用鋼板では、形状凍結性は熱間強度に関わらず、顕著に小さい値を示した。以上より、成形後にマルテンサイト変態が生じる場合には、熱間強度に関わらず、良好な形状凍結性を示すといえる。

表2 各成形温度における状態
Phases of the each type of steels at the forming start temperature

Forming temperature (°C)	0.2%C steel	IF steel	SUS304
800	γ	α	γ
700	γ	α	γ
600	γ	α	γ
550	γ	-	-
500	B	α	γ
450	B	-	-
400	B	α	γ

γ : austenite α : ferrite B : bainite

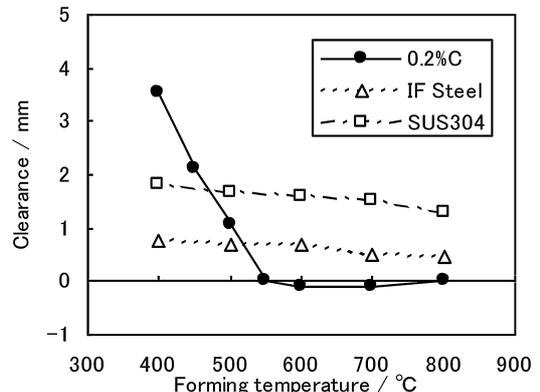


図4 形状凍結性に及ぼす成形開始温度の影響
Dependence of shape fixability on forming temperature

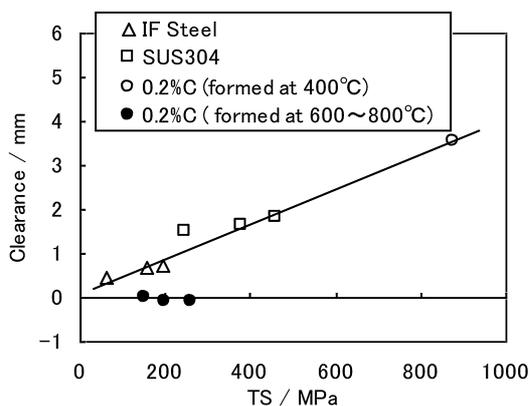


図5 形状凍結性と熱間強度の関係
Dependence of shape fixability on hot tensile strength

以上の結果より、成形後にマルテンサイト変態が生じる場合には、著しく良好な形状凍結性を示すことがわかった。その理由については以下が考えられる。成形時には変形抵抗に応じた応力が鋼板中に導入されると考えられる。成形後にマルテンサイト変態を生じない場合には、成形で導入された応力は冷却後も残存し、離型時に開放されてスプリングバックが生じたと考えられる。一方、成形後にマルテンサイト変態する場合には、成形で導入された応力はマルテンサイト変態により緩和して、スプリングバックが顕著に小さくなった可能性が考えられる。マルテンサイト変態により応力が緩和する機構としては、変態の際に応力が緩和する方向に変態塑性^{7,8)}が生じたためと考えられる。

2.2 張り出し成形性⁹⁾

図6に球頭張り出し成形試験における限界張り出し高さを示す。この試験ではパンチR50mm、ダイR20mm、5mmの工具を用いた。これより本実験ではホットスタンプは270~440MPa級程度の成形限界を示し、1470MPa級の冷間プレスよりも顕著に優れることが分かった。

図7にネッキングが発生したサンプルの板厚分布と断面硬度分布を示す。フランジ部とパンチ中央部では硬度が400~500程度となり、焼入れされていた。その間で鋼板が工具と非接触であったと考えられる部分の硬度は低下していた。なお通常、金型は鋼板に接触するように設計されるため、このような硬度低下は避けられる。板厚はパンチ中央部から離れるに従い減少していき、工具と鋼板が離れる部位の近傍にて最小値を示した。

図8に板厚分布の冷間成形と熱間成形の比較を示す。ホットスタンプではパンチ接触部の板厚減少が冷間プレスと比較して小さく、冷間成形と比較して歪みが不均一で破断危険部に集中することがわかった。

工具が接触して充分面圧が生じたと考えられるパンチ中央部とフランジ部については、焼入れ硬度が得られている。このような部位では金型への抜熱により成形中の温度低下が大きいとされ、変形抵抗も大きく増加すること

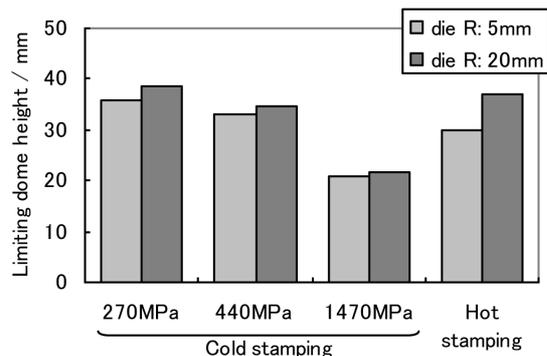


図6 ホットスタンプと冷間プレスの限界張り出し高さの比較
Comparison of limiting dome heights by hot and cold stamping

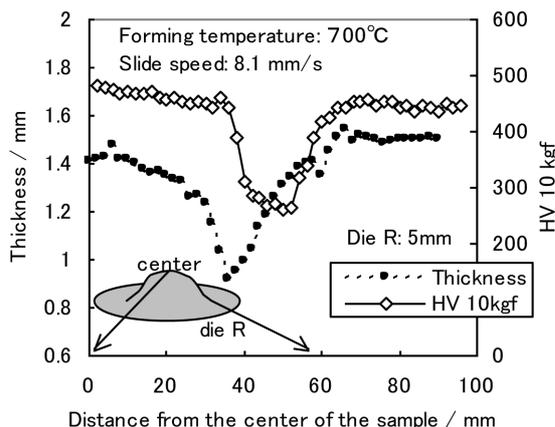


図7 張り出し成形での板厚・硬度分布
Distribution of thickness and hardness of hot stamped parts

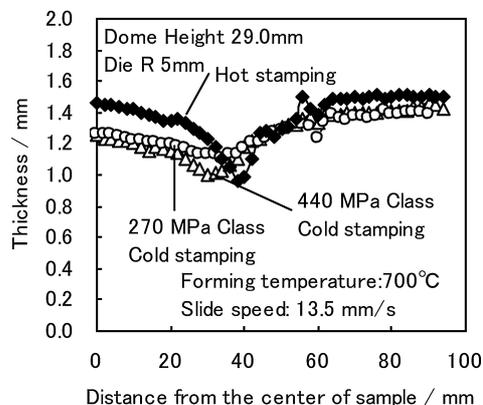


図8 ホットスタンプ・冷間プレスでの板厚分布の比較
Comparison of thickness distributions by hot and cold stamping

が考えられる。一方、工具と非接触の部位では、抜熱は板面方向と表面での空冷により行われるため、工具接触部と比較して成形中の温度低下が小さく、変形抵抗も小さいと考えられる。その結果として工具と鋼板が非接触部で歪みの高いパンチ中央に近い部位に変形が集中する。そのため、図7に見られるような部位にくびれが生じて破断に至るものと考えられる。

通常の張り出し成形においては、工具（部品）の形状、工具と材料の摩擦係数、材料のn値が変形の一様性に影響を及ぼす。ホットスタンプの場合は上記に加え、工具との

接触による抜熱で材料中に温度変化が生じ、それに伴う材料特性の不均一性が変形の一様性に影響を与え、成形限界を支配するものと考えられる。

2.3 ドローバンド成形性¹⁰⁾

深絞り成形性の基礎検討として、フランジ部での変形の無いドローバンド成形の成形限界について検討した。この試験では1.4mm×100mm×400mmの短冊型試験片を用い、図9に示す絞り曲げ工具を用いて、破断限界に及ぼす成形速度としわ押さえ力の影響について検討した。

図10に破断が生じた部品外観を示す。破断はパンチ肩Rとダイス肩Rの中間部位で生じたことが分かる。どの成形条件においても破断が生じる場合には、図2と同様の破断形態を示した。

図11に成形開始温度800℃、しわ押え力が2.3, 3.7, 5.7 tonfの場合の成形可否に及ぼす成形高さ、成形速度、しわ押え力の影響を示す。これより、成形速度が大きい場合、しわ押え力が大きい場合に破断が生じやすいことが分かる。

上記の結果と成形開始温度700℃の結果から、割れ発生する最低成形速度としわ押え力の関係を図12に示す。これらの直線より低速側が成形可能領域となる。これより、ホットスタンプのドローバンド成形ではしわ押え力が小さく、成形開始温度が低く、成形速度が小さいほど、成形性が良好となることがわかる。

破断危険部は工具と非接触のため温度が高くなり変形抵抗が低下すると考えられる。成形速度が遅く、また成形開始温度が低い場合には破断危険部であるパンチ肩とダイス肩の中間部位の変形抵抗が高くなり、破断が生じにくくなるものと考えられる。そのため、成形初期の側壁中央部の温度がホットスタンプのドローバンド成形性の支配因子と考えられた。

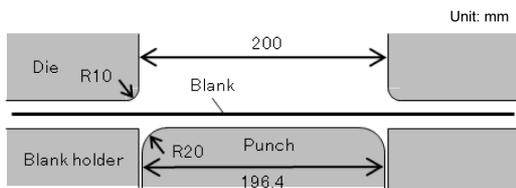


図9 工具断面形状
Cross-sectional profiles of tool

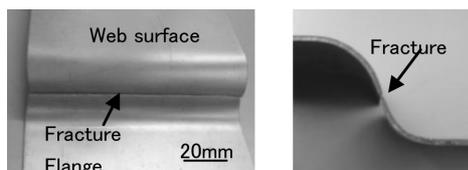


図10 破断部の外観(成形温度800℃、成形速度12.7mm/s、しわ押え力2.3ton、成形高さ30mm)
Aspects of fracture part (formed under a temperature of 800℃, at a rate of 12.7mm/s, with a blank holder force of 2.3 tonf and to a height of 30mm)

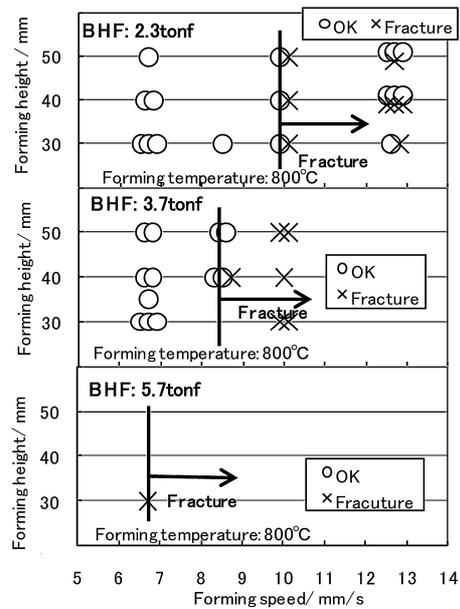


図11 成形可否に及ぼす成形高さ、成形速度、しわ押え力の影響(成形開始温度800℃)

Effects of forming heights, forming speeds and blank holder forces affecting formability (under a temperature of 800℃ at the start of forming)

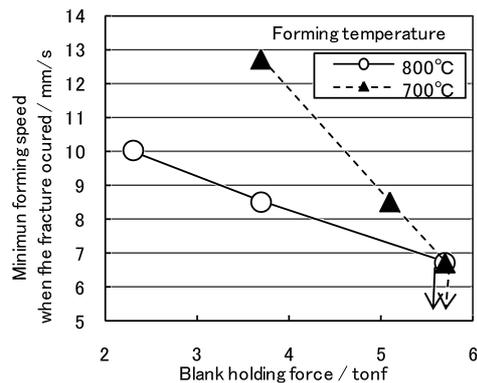


図12 割れ発生する最低の成形速度としわ押え力の関係
Relation between minimum forming speeds and blank holder forces when fracture occurred

2.4 ホットスタンプ用Alめっき鋼板のプレス成形後の耐食性

Alめっき鋼板(付着量両面160g/m²)を用いたホットスタンプ材の耐食性は通常の防錆鋼板である合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA)あるいは溶融亜鉛めっき鋼板(GI)と同等であることが報告されている^{2,11,12)}。またホットスタンプ工程で加熱を受けた後に、図13に示すように層状の組織を呈することも報告されている¹²⁾。表面からa, b, c, d, e層と名づけると、a, c層は約50%のAlを含有し、Fe₂Al₃を主体とする推定される。一方b, d層中のAl濃度は約30%でよりFe-richな相である。最も鋼板に近いe層はAlを固溶したα-FeでAl量は10%以下である。

この素材の腐食挙動を把握するために、a~eの各層の5%塩水環境下における腐食電位が測定されている¹¹⁾。溶液はpH7に調整され、参照電極は飽和カロメル電極であ

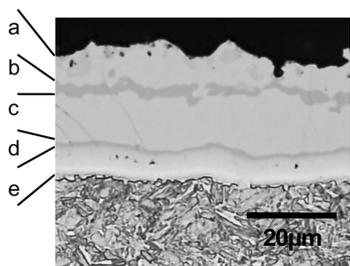


図13 900°Cで2分間保定した試料の断面組織
Cross-section of the surface layer after holding at 900°C for 2 minutes

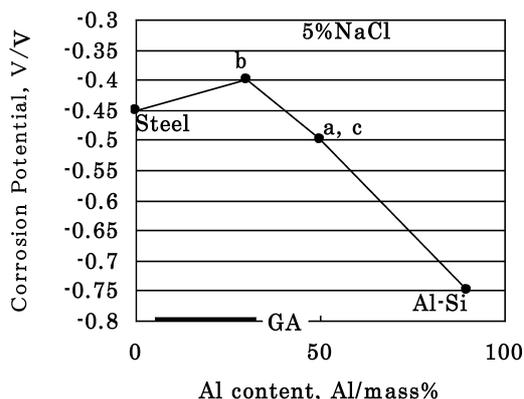


図14 5%塩水環境における腐食電位へのAl濃度の影響
Influence of Al content on the corrosion potential of materials in the 5% NaCl solution

る。比較としてAlめっき鋼板、冷間圧延鋼板、GAも測定し、Al濃度に対して腐食電位を整理した結果を図14に示す。塩害環境においてa, c層は鋼板よりも卑な電位を有し、一方b層は鋼板よりも若干貴な電位を有する。しかしa~cのいずれも合金化しないAl-Siよりは貴な電位を示す。腐食電位はb層を除き、Al濃度に対応し、高Al濃度の層ほどAlの電位に近くなっている。この腐食電位の測定結果より、b層に比べて相対的に卑な電位を有するa, c層は優先的に腐食するものと考えられる。

図14に示すように、この素材は塩害環境下で鋼板よりも卑な電位を有している。しかしその電位差はZn系の素材と比較すると小さいため、めっきに疵やクラックが入ったときの耐食性を確認する必要がある。図2に示すハット成形品を用いて縦壁部、フランジ部の耐食性を評価した。化成処理、電着塗装は通常の自動車用のものを使用し、標準的な条件で行った。電着塗装の膜厚は20 μmを狙いとした。試料の塗膜に疵を付与し、JASO法CCT(JASO-M610-92)を150サイクル(50日)行い、試験後の塗膜膨れ幅、鋼素地の腐食深さを測定した。

加熱条件は950°Cで、保定期間を0(950°C到達後直ちに冷却)から4分とした。JASO-CCT試験後の塗膜膨れ幅の測定結果を図15に示す。成形程度の小さい平板部については、保定期間が長くなるにつれて塗膜膨れが進行する結果となっているが、これに対して縦壁部は全般に塗膜膨

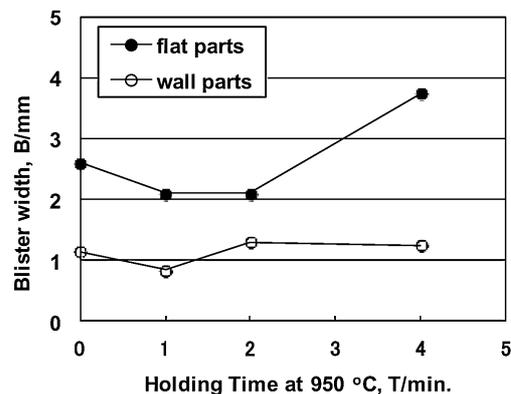


図15 ハット成形品のフランジ部と縦壁部における塗膜膨れ幅
Comparison of blister width between flat parts and wall parts

れが小さく、平板部の半分程度しか膨れが進行していない。また鋼素地の腐食深さは全ての条件においてGAよりも小さかった。

成形品の縦壁部を観察すると、めっき層にはクラックが生じていた。しかしクラックの底部には化成処理皮膜が生成していた。縦壁部の表面の一部にも化成処理皮膜が認められた。従来ホットスタンプ材のような合金化したAlめっき表面には化成処理皮膜が附着しないとされていた²⁾。化成処理反応は化成処理液によるエッチング作用が必要であるが、Al-Fe表面に生成する酸化皮膜は化成処理液によるエッチング作用を受け難いためと考えられる。

しかし縦壁部等で強く摺動を受ける部位は酸化皮膜が破壊され、局部的に化成処理皮膜が形成したものと推察される。通常の亜鉛系表面処理鋼板において、化成処理皮膜が生成することで塗料密着性が大幅に向上すること、塗膜下腐食において化成処理皮膜はpH緩衝作用を有することが知られており¹³⁾、Al-Fe表面においても同様の作用が働いて塗膜の防錆効果がより有効に作用したと考えられる。つまり成形部においては、めっきにクラックが入るが、その一方化成処理皮膜による防錆効果が働き、後者の影響の方がより強く働くため、成形部の耐食性が向上するものと推察している。なおここではAlめっき材の耐食性を述べたが、Zn系めっき素材の適用も最近進みつつある。

3. ホットスタンプ成形解析技術

3.1 ホットスタンプ成形解析の必要性

先述のように、ホットスタンプ工程では、鋼板を900°C以上まで加熱した後、800°C前後の高温で鋼板が軟質な状態で成形を行い、継続して150°C以下程度の金型で急冷することで鋼板を高強度化する。特に成形中は鋼板と金型の接触部分と非接触部分に顕著な温度差を生じ、鋼板内の強度特性が変化するため、ホットスタンプでは冷間と異なり、温度条件等で複雑に変化する成形性を示す。従って、成形状態の解明、実部材の複雑形状での成形性予測のためには成形と熱を連成させた解析が必須である。最近ではこ

こうした成形-熱連成解析機能は、プレス成形用に発展した汎用構造解析プログラムに装備されている。しかしながら高温特性の計測や成形状態把握が困難であり、解析条件設定、結果評価には課題が残されている。このため新日本製鐵では主にLS-DYNAによる解析手法の構築を進めている。

3.2 熱計算用パラメータの同定

成形解析との連成で不可欠と考えられる高温機械特性、摩擦係数、熱伝達率について実験により数値を求めた。

3.2.1 高温機械特性

高温の応力-ひずみ特性は、ホットスタンプ用Alめっき鋼板の高温強度試験結果に基づき図16に示すような温度・ひずみ速度依存性を考慮した特性を定義した。

3.2.2 摩擦係数

ホットスタンプは通常は潤滑なしの成形であり摩擦係数は高いと推定されるが、高温域での知見は少ない。そこで図17に示す冷間ビード引抜試験機に高温試験片を適用し摩擦係数を確認した。得られた結果より、解析での摩擦係数は0.5~0.6とした。なお、これは最近の報告例¹⁴⁾と同等の値となっている。

3.2.3 熱伝達率

解析の境界条件として最も重要となる熱伝達率は、図18に示す成形・計測試験装置により採取した。図示したドロー成形の金型構成の他、フォーム成形での試験も行った。得られた熱画像を図19に示す。この成形前後の熱画

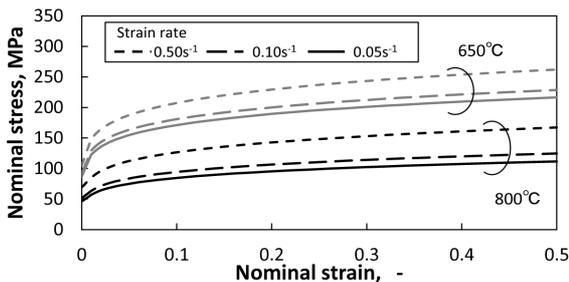


図16 高温機械特性の設定例

Basic pattern of stress-strain curve at high temperature

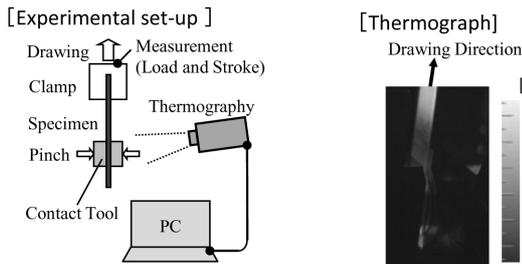


図17 ビード引抜試験機による高温摩擦係数測定

Measurement of friction coefficient by drawing test on high temperature

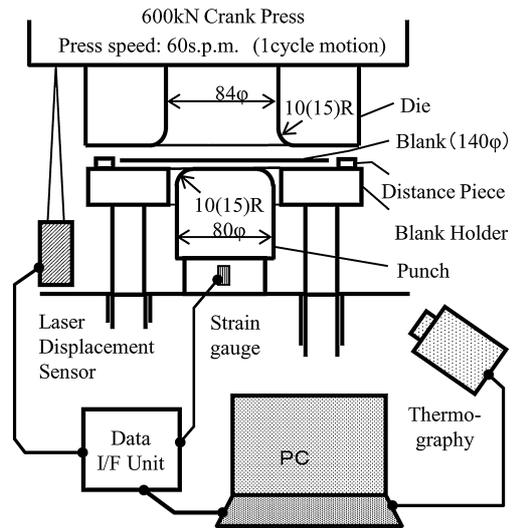


図18 熱間成形性・温度計測試験装置

Experimental set-up for hot stamping and thermal measurement

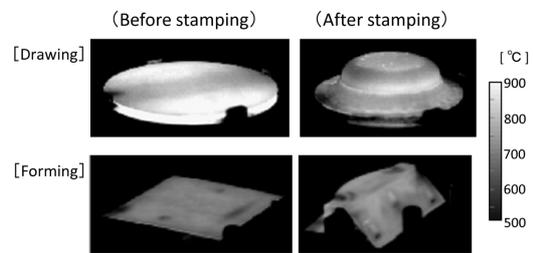


図19 成形前後の熱画像

Temperature distribution before and after hot stamping

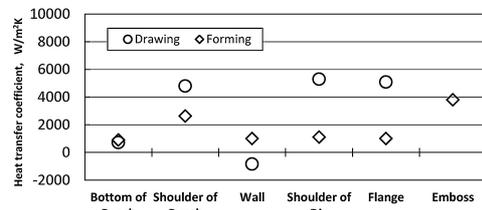


図20 熱伝達率の算定結果の一例

Heat transfer coefficients between surfaces of blank and tool calculated from temperature histories

像から温度変化を分析し金型各部の熱伝達率を算定した。ドロー成形とフォーム成形の各々での算定結果を図20に示す。熱伝達率は金型と強く接触する肩R部やエンボス部で高い値を示す。フォーム成形では非接触過程が多く温度変化が小さいので算定値は低めとなる。なお、ドロー成形の縦壁部の負の値は破断部近傍の加工発熱の影響である。試験においてドロー、フォームのいずれも、接触する部位と隙間のある部位で概ね温度域が区分されている状況を考慮し、解析での熱伝達率の設定は、図21に示す接触面間の距離の関数として与えた。

3.3 解析モデル

試験に対応する成形-熱連成解析を、汎用構造解析プロ

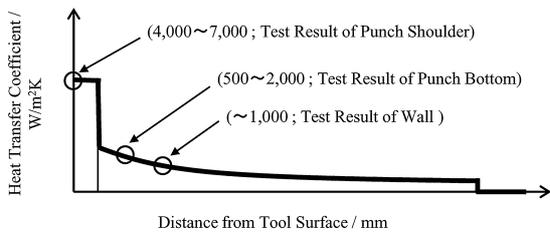


図21 熱伝達率境界条件の設定例

Boundary condition for heat transfer defined by experimental results

グラム LS-DYNA (Ver.971) により実施した。図22にモデルの構成を示す。ブランクに弾塑性体シェル要素、金型に剛体シェル要素を用いた。ブランクの要素サイズは約2mmとした。ブランク温度は実測に合わせ700~850℃の間で設定し、金型温度は初期80℃とした。金型には仮想厚みにより熱容量を持たせて伝熱状態を再現している。

計算上の問題として曲面部の熱伝達(接触)判定における要素メッシュサイズの影響があげられる。図23に示すようにメッシュサイズが小さいほど温度計算精度は向上することが分かる。しかしながら、要素の細分化により著しく計算時間が増大する問題が避けられない。

一方、試験における成形後の温度分布をよく観察すると、金型の形状特徴がある程度反映されていることが分かる。そこで、部品の幾何学形状を参照し、曲面部等のメッシュサイズ影響が予測される部分について補正する方法を考案した。この方法によるドロー型の計算結果を図24に示す。成形解析で一般的な要素サイズ約2mmを維持しながら、温度分布、成形荷重に加え、成形中の破断について

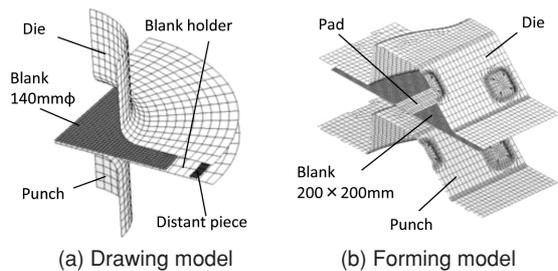
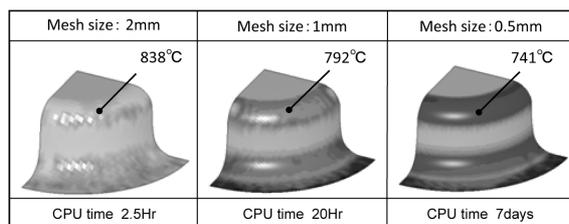


図22 解析モデル

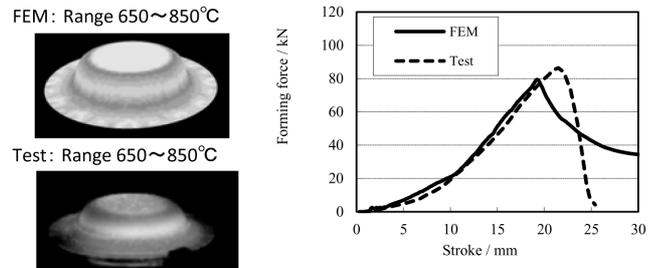
Simulation models for hot stamping



*Target temperature by tests: 730°C on shoulder of punch

図23 温度計算に対するメッシュサイズの影響

Influence on accuracy of thermal calculation with mesh size of simulation model

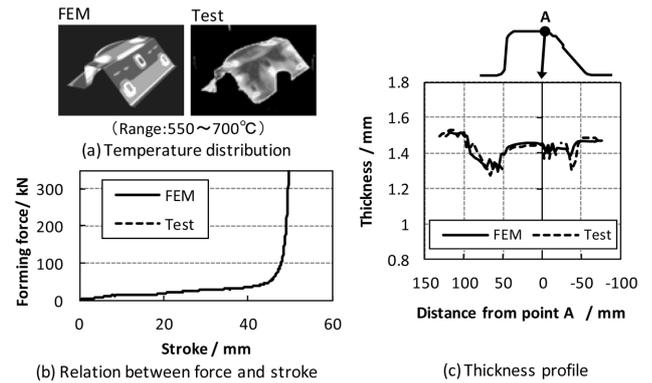


(a) Temperature distribution

(b) Relation between force and stroke

図24 計算結果(円筒深絞り)

Comparison of results between hot drawing test and simulation



(a) Temperature distribution

(b) Relation between force and stroke

(c) Thickness profile

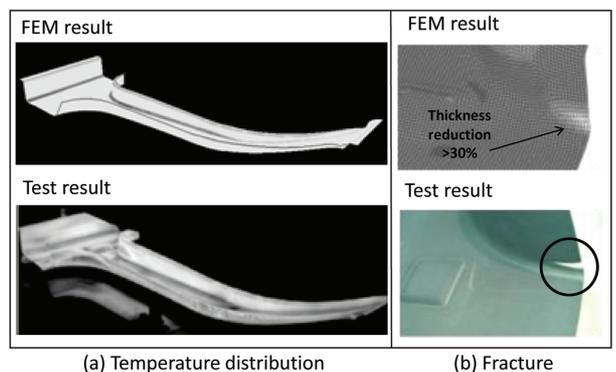
図25 計算結果(フォーム成形)

Comparison of results between hot forming test and simulation

も要素の局所変形として再現できた。図25は同手法をフォーム型に適用した結果で、温度、荷重、板厚減少率の計算結果は実測とよく合っていることを確認した。

3.4 実部材への適用

構築した解析条件補正手法を実部材規模の成形解析に適用し、試験結果と比較を行った。試験部材はBピラーを模擬したもので、クランクプレスにより運転速度30spm(成形初期速度300mm/s)でフォーム成形を行った。図26にその比較結果を示す。(a)に示す熱画像比較により、温度分布はほぼ一致することを確認した。試験では部材の縦壁の一部に破断が発生するケースがあったが、破断部は(b)



(a) Temperature distribution

(b) Fracture

図26 実部材規模の適用例

Simulation results for hot stamping of a model part of industrial B-pillar

に示すように解析結果の板厚減少率 30%以上の部分と一致した。他解析事例でも同様の状況が確認されており、板厚減少に着目することで破断予測が可能と考えられる。

4. 結 言

本報告ではホットスタンプの基礎的なプレス成形性、プレス後の部品の耐食性および成形解析技術について述べた。プレス成形性に関しては、成形後の焼入れ時のマルテンサイト変態の影響で非常に優れた形状凍結性が得られること、成形中の工具との接触により温度の不均一が生じ、それに伴う材料特性の不均一性が成形限界を支配することが明らかとなった。また、ホットスタンプ用 Al めっき鋼板は優れた耐食性を有する Al-Fe 合金皮膜を有し、さらにプレス成形により皮膜にクラックなどが生じた場合にも優れた耐食性を示し、成形部位では化成処理皮膜が生成することが示された。成形解析に関しては、高温の機械的特性、摩擦係数、熱伝達率を正確に同定し、部品幾何学形状を反映させた熱伝達モデルの考案により実部材に適用可能な解析技術を開発した。

ホットスタンプは形状凍結性の優れた高強度部品が製造可能であり、めっき鋼板を用いることにより優れた耐食性も得られる。今回報告したプレス成形性の基礎知見と成形解析技術が今後のホットスタンプの適用拡大に寄与し、車体軽量化がさらに進展することを望む。

参照文献

- 1) Bano, X., Laurent, J. P.: Proc.of 39th Mechanical Working and Steel Processing Conf. Vol. XXXV, Indianapolis, 1998, p. 673
- 2) 末広正芳, 真木 純, 楠見和久, 大神正浩, 宮腰寿拓: 新日鉄技報. (378), 15 (2003)
- 3) 大上哲郎, 武智 弘, 古野嘉邦: 塑性と加工. 28, 225 (1987)
- 4) 大上哲郎, 武智 弘, 古野嘉邦: 塑性と加工. 28, 706 (1987)
- 5) 楠見和久, 山本修治, 竹下哲郎, 中村修一, 阿部雅之, 末広正芳: CAMP-ISIJ. 18, 556 (2005)
- 6) 楠見和久, 山本修治, 竹下哲郎, 阿部雅之: 第56回塑性加工連合講演会講演論文集. 2005, p. 435
- 7) 山中 茂, 坂之上隆行, 吉井聡一, 井上達雄: 材料. 48, 733 (1999)
- 8) 大塚貴之, 若洲 豊, 井上達雄: 日本材料学会学術講演会講演論文集. 52, 111 (2003)
- 9) 楠見和久, 山本修治: 第58回塑性加工連合講演会講演論文集. 2007, p. 83
- 10) 楠見和久, 山本修治: 平成22年度塑性加工春季講演会講演論文集. 2010, p. 301
- 11) Maki, J. et. al. : The 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Chs2 2011, 2011, p. 499
- 12) Dosdat, L. et. al.: Steel Research. 82 (6), 726 (2011)
- 13) 岡田栄作 ほか: 表面技術. 55 (11), 719 (2004)
- 14) Akira, Y. et al.: CIRP Annals. 58 (1), 247 (2009)



楠見和久 Kazuhisa KUSUMI
鉄鋼研究所 研究企画グループ マネジャー
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



真木 純 Jun MAKI
八幡技術研究部 主幹研究員
博士 (エネルギー科学)



野村成彦 Naruhiko NOMURA
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター
主任研究員