

技術論文

部材高機能化のためのホットスタンプ技術

Development of Hot Stamping Technology for High Performance Automotive Parts

野 村 成 彦*
Naruhiko NOMURA久 保 雅 寛
Masahiro KUBO福 地 弘
Hiroshi FUKUCHI中 田 匡 浩
Masahiro NAKATA

抄 録

自動車の軽量化に適した高強度部材の成形工法としてホットスタンプ技術の適用が拡大している。現在、1500MPa 級材料の実部材適用は一般的になっており、更なる高強度化、高機能化の動きも活発である。一方、加熱、冷却に伴う生産性の低下が工法上の課題であり、高機能化で複雑な熱処理に対応可能な生産性向上技術への関心も高い。そこで、高機能化手法の一つであるテーラードプロパティ工法のうち部分加熱金型による強度差付与試験結果、高生産性技術である直水冷工法の特徴を紹介するとともに、これらを活用した部材設計および評価のために開発した相変態 CAE 手法の部材適用の事例を示した。

Abstract

Application of hot stamping method is expanding as a method of forming high strength parts suitable for weight saving of automotive parts. At present, hot stamped parts using steel strength of 1500 MPa are general, and developments of stronger and highly functional parts are desired. Since A decline of the productivity by heating and cooling process is also a problem in hot stamping, interests in technique for high productivity adopted to complicated thermal process are rising. Therefore, experimental results of hot stamping by partial heated tool as one of the tailored property methods and of hot stamping with direct water quench system for high productivity by short quench time are presented. Furthermore, an example of phase transformation CAE method developed for design and estimation of high-performance automotive parts is referred.

1. 緒 言

ホットスタンプ技術は、高強度特性と形状凍結性を両立する工法として 2000 年前後頃から自動車軽量化の手段の一つとして適用が拡大し続けている。図 1 にホットスタンプの概要を示す。一般に、焼入れにより鋼板強度を高めるために鋼板は加熱炉でオーステナイト域の温度 (A_{c3} 以上) に加熱された後に、プレス機に搬送される。鋼板は焼入れ開始までに成形が完了するようプレス成形され、金型による抜熱により急冷され、焼入れが行われる。現在、主として 1500MPa 級の材料が普及しているが、さらに高強度の 1800MPa 級の材料の実部材適用も進みつつある²⁾。今後も冷間での高強度鋼板成形技術の進歩を背景に、ホットスタンプにおいても更なる高強度化が進む可能性がある。

ただし、自動車部品の性能は材料強度のみで決まるわけではなく、必要性能に応じて部材構造による高機能化を追求する技術も発展している。代表例として冷間成形での

テーラードウェルドブランク技術の適用が挙げられ、異種・異厚材の複合による高機能部材の成形を可能としている。ホットスタンプの場合は工程内に加熱、冷却過程を含むので、熱処理プロセスの自由度を活用して熱処理条件の異なる異強度部位を作り分ける技術が提案され、異種・異厚ブランク適用との複合を含めたテーラードプロパティ工法と称される技術群を形成している³⁾。

一方、熱プロセスを含むため加熱、搬送、冷却の各々に

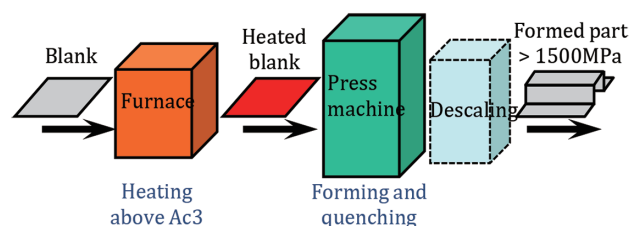


図 1 ホットスタンプ工程の概要
Outline of hot stamping process

* 鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部 主幹研究員 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8 〒660-0891

時間制約があり、冷間プレスに比べ生産性が低いことが課題である。この対策として、従来はプレス工程での冷却時間の短縮対策が一般的であったが、テーラードプロパティ工法では冷却速度を遅くする部位もあり、生産性の課題が残されている。さらにプレス後の温度分布や特性差の影響を加味した部材形状精度の確保などの量産課題への対応も必要になると考えられる。

以上のように、テーラードプロパティ工法を主とする今後のホットスタンプ部材の高機能化を進めるためには、生産性向上技術および形状精度の確保対策が重要と考えられる。そこで、本報ではホットスタンプの高機能化に関してテーラードプロパティの一工法である部分加熱金型による成形試験を、生産性向上に関して直水冷金型による成形試験を行った結果について述べる。またこれら技術適用時の最終形状や機能予測に向け開発した相変態 CAE 手法の実部材規模への適用事例を紹介する。

2. 高機能化の試行（テーラードプロパティ）

2.1 試験方法

ホットスタンプ部材高機能化のための多岐にわたるテーラードプロパティ工法のうち、熱処理のみによる、部分加熱金型を用いた強度差付与工法を題材として効果の確認試験を行った。試験装置を図2に示す。試験装置はプレス機と加熱金型（上側パンチ）、およびヒーター制御ユニットで構成される。試験金型として幅 80mm、高さ 60mm、長さ 700mm のハット型部材成形用の金型を使用した。上側パンチの断面内にはカートリッジヒーターおよび熱電対が組み込まれており、パンチの長手方向に3分割されたブロック間を断熱することでブロック毎の部分加熱を可能としている。ヒーター制御配線等は金型の背面を通して制御ユニットに接続される。また、金型素材はホットスタンプ用として一般的な SKD61 をベースとした。

試験材は板厚 1.6mm の 1500MPa 級のホットスタンプ用

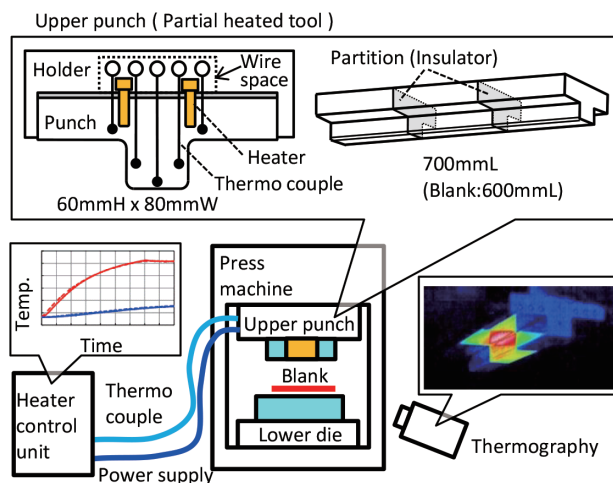


図2 金型加熱試験装置
Partial heating tool for tailored property parts

亜鉛めっき鋼板を使用した。ブランクサイズは成形後のフランジ幅が 15mm となる 226mm 幅×700mm 長とした。

部分加熱の温度条件は、焼入れ時の残留オーステナイトを増加させて軟化部を作成することを狙い、中央ブロックの金型温度を 280℃ まで加熱した状態で成形し、30 秒間保持する条件とした。また、部材形状と硬度を比較するため、金型加熱を行わない 15 秒保持による通常のホットスタンプ工法による試作も実施した。試験中の金型温度は、金型内に組み込んだ熱電対により計測、金型表面および成形品の温度状態はプレス機側面の熱画像カメラにより計測した。

2.2 試験結果

加熱炉でブランクを 950℃ まで加熱し、プレス機への搬送を経て約 700℃ でプレス成形し、部分加熱金型内で保持し離型した直後の成形品の温度分布状況を図3に示す。加熱金型部分の縦壁部は概ね 200～250℃ 程度で、非加熱金型部分とは明確に異なる温度状態を付与できている。

図4に縦壁の中央部の長手方向の硬度分布を示す。金型加熱なしの条件では 1500MPa 級材料のホットスタンプで一般的な硬度 450HV がほぼ均一に得られている。一方、中央部を加熱した金型で保持した場合は、中央部の硬度が 350HV 前後まで低下し、高温保持による特性差が明確に認められた。なお、加熱部と非加熱部の境界の硬度遷移域は境界から非加熱部側に 50mm 程度となった。

成形部品の形状測定を行い設計形状との差異を比較した

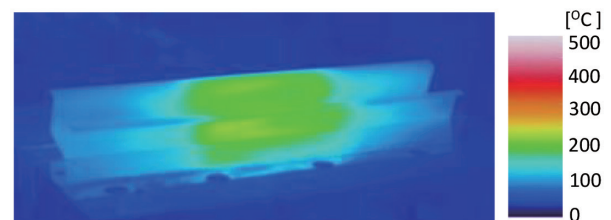


図3 離型後の温度分布状態
Temperature distribution after holding

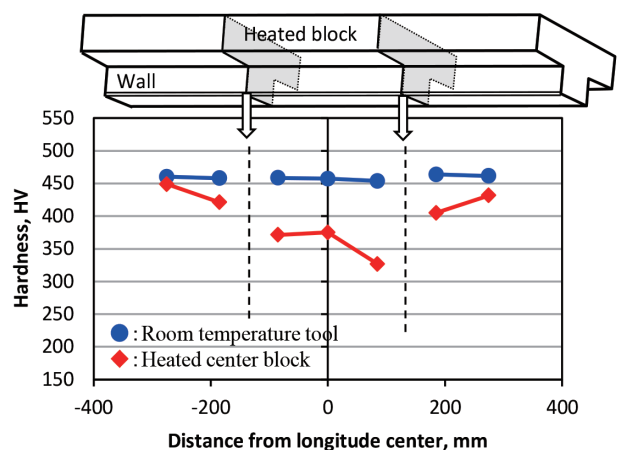


図4 縦壁の硬度分布測定結果
Hardness profile on the wall of parts

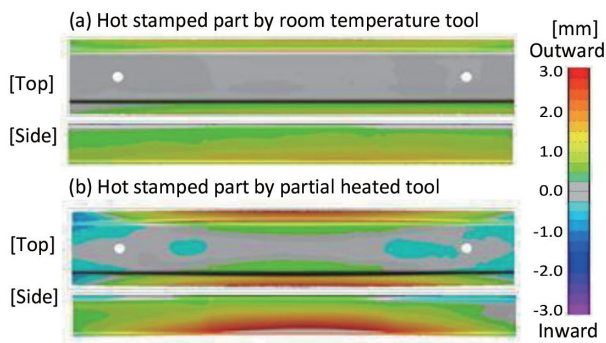


図5 成形品形状と設計形状の差異
Difference between formed and designed shape

結果を図5に示す。上段(a)は金型加熱なしの15秒保持の金型焼入れ部品、下段(b)は部分加熱金型の30秒保持による部品の結果で、各々平面(天板、フランジ面)と側面(縦壁面)を示す。金型加熱なしの場合は、概ね0～0.5mmの誤差範囲に収まっているが、加熱金型の場合、縦壁中央が膨れた様相であり、特に膨れの大きい壁の下部では3mm程度の誤差となっている。また、天板やフランジは両端部分が垂れた状態となった。このように部分的に温度履歴が異なるような工法において部品形状精度を確保するためには、温度分布、冷却履歴に起因する形状変化の予測技術、部材断面構造や金型構造の設計技術の構築が必須であると考えられる。

3. 高生産性技術の評価(直水冷金型)

3.1 直水冷金型冷却システム

ホットスタンプ工法の特徴である金型内での焼入れは高温の成形品表面と内部水冷された金型表面との間の接触熱伝達に依存する。しかしながら、自動車部品のような複雑な形状面で形成される部材では、部材内に生じる板厚分布、金型製作精度等の影響により、金型と成形品表面の接触が良好な部位と、金型と成形品の間に隙間を生じ接触が不安定もしくは非接触となる部位が発生する。隙間部位では空気層による断熱のため、良好接触部に比べ冷却速度が低下し、焼入れ時間がネックとなりプレス工程を増加させてしまう。そこで、接触熱伝達のみでなく流体冷媒による伝熱形態を導入した冷却方法として、金型から直接冷却水を噴出し、成形品を冷却する直水冷工法が考案されている⁴⁾。

工法の特徴である金型構造を図6に示す。図は高温ブランクを上下金型で挟んだ状態を示す。成形品が接する金型表面にマイクロパターン(MP)と称する凹凸形状を設け、金型を閉じた状態でも冷媒の流路が確保されていることが最大の特徴である。さらに、金型の内部からMP加工面へ冷却水を導入する噴水孔、高温の成形品と冷却水の界面で発生する蒸気および余剰冷却水をMP加工面から排出する吸水孔が適正配置され、成形品表面全体をほぼ覆う冷却流路網が構成される。

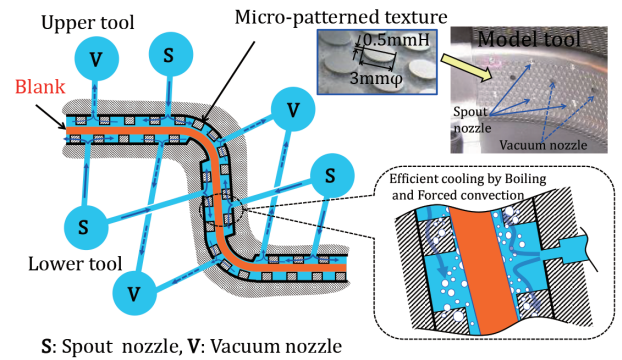


図6 直水冷金型システムの概要
Outline of direct water quench system

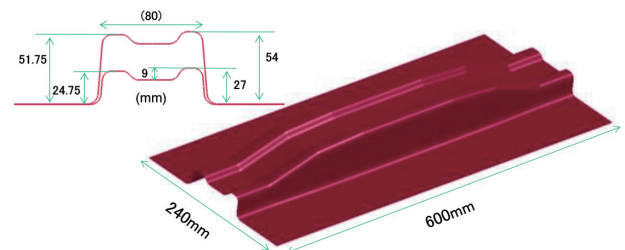


図7 部材模擬直水冷金型の形状
Direct water quench tool for a model part with actual design elements

冷却能力は、板厚1.4mmの鋼板において、従来の金型冷却で焼入れ完了(200℃以下)まで約10秒所要するのに対し常温(水温付近)まで2.5秒で冷却可能である⁵⁾。この特徴を活かした高生産性ホットスタンプ工法は既に量産部品にも適用されている。しかしながら金型の面形状によるMP加工範囲の制約、金型構造による噴水孔および吸水孔の加工位置の制約などがあるため、急速冷却は可能であるものの、必ずしも均一な温度履歴、温度分布が得られない。これは形状精度に影響する場合がある⁶⁾ので、温度分布を均一化するために冷却能力を低速側に合わせるような調整が必要な場合もある。

そこで、さらに冷却速度調整が複雑になる異厚・異強度部品の適正な冷却設計条件を検討するため、短時間冷却の難易度の高い厚手材を対象にした直水冷金型を製作し、改めて冷却特性、形状制御の方向性の確認を行った。

3.2 試験方法

部材模擬金型の形状を図7に示す。バンパー、ピラーの断面形状要素として非対称のM字断面、高さの徐変部を組み込んだ。冷却面のMP加工は3mm径の円形接触面を残し0.5mm深さの凹みをエッチング加工で付与した。なお、凸状の稜線部分は摺動、噛込み回避のためMPは施工していない。噴水孔と吸水孔はMP加工面上に各々30mmピッチで、噴水と吸水を半ピッチずらした格子状に配置される。試験材は板厚2.6mmの1500MPa級ホットスタンプ用亜鉛めっき鋼板で、ブランクは幅235mm、長さ

495 mm の矩形板とした。ブランク加熱は炉温 950℃、在炉 5 分とし、成形開始時の温度は約 750℃、成形速度 40 mm/s、成形荷重 3000 kN でプレスを行った。噴水は下死点到達と同タイミングで開始する設定とし、下死点保持中は噴水を継続する条件で試験を行った。

3.3 試験結果

3.3.1 温度分布および冷却能力

図 8 に実施条件に対する離型時の温度分布を示す。金型冷却では 5 秒保持で天板部に 300℃ 程度の高温部が広範囲に残るが、直水冷の場合は同保持時間で一般的なホットスタンプの温度指標である 200℃ 以下を満足する。図中最下段に示す片面(下)の直水冷では M 字稜線部に高温部が残るが、この部位は構造上噴水ノズルのみが設けられ、近接する吸水孔のない部位であり冷媒の滞留が原因と考えられる。流量に関しては、両面直水冷の保持時間 2 秒の温度分布から、初期の冷却範囲の広がりに変化が認められる。MP 流路内の計算上の冷却水充满時間は噴水後 0.05 秒だが、高温部では蒸気の滞留等が想定され、冷却範囲拡大に時間を要すると考えられる。

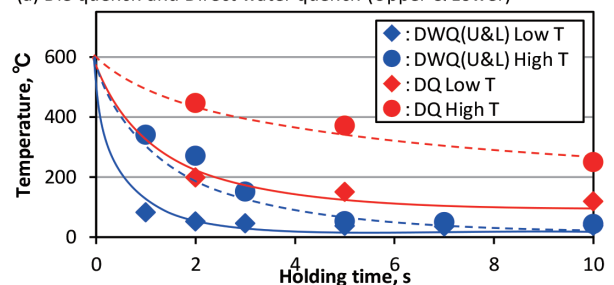
図 9 に離型時の最低温部位、最高温部位を抽出し、温度と保持時間の関係をプロットした。(a) に金型冷却と両面直水冷の比較を示す。直水冷での高温部位は金型冷却の低温部と重なる領域はあるが、板厚 2.6 mm の条件でも 3 秒で 200℃ 以下、低温部位は常温まで到達しており、直水冷の急冷効果が確認できた。(b) に両面直水冷での流量条件の比較を示す。低温部位は流量によらず同履歴で、高温部位は流量減により冷却開始点がずれる履歴を示した。この結果は、直水冷時の局所的な熱伝達特性が、冷却水の到達範囲および到達後の冷却時間の影響を受けていることを

示す。冷却水の到達範囲は噴水流速と相関するので、ある程度広い領域の平均温度の予測は、噴水流速と熱伝達係数を関連付けた計算により実施可能である⁹⁾。しかしながら、冷却水の到達時差が明確に現れる厚手材の冷却の場合は、冷却水の過渡的な拡散特性を考慮する必要があることが示唆された。

3.3.2 形状精度

図 10 に各冷却方式で 5 秒保持した成形品の形状測定結果を示す。図中最上段の金型冷却、上から 2, 3 段目の両面直水冷の条件では、天板部両端に跳ね傾向が認められるものの CAD 形状に対し ±0.5 mm 以内の精度が得られた。上

(a) Die quench and Direct water quench (Upper & Lower)



(b) Difference in flow condition of direct water quench

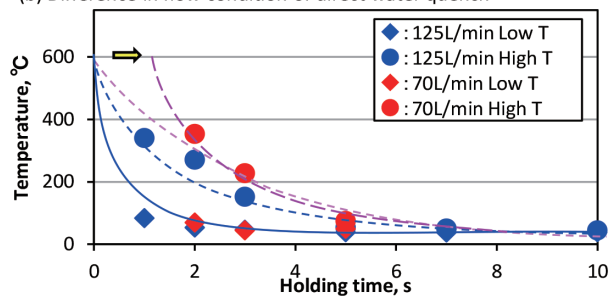


図 9 冷却時間と離型温度の関係

Relationship between holding time and max. and min. temperature of parts

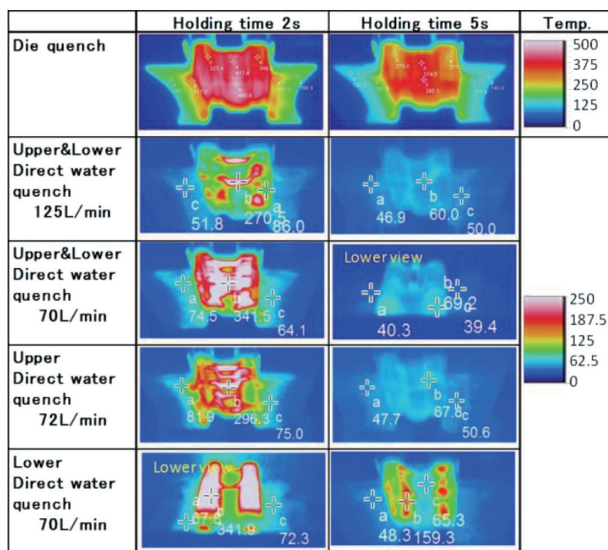


図 8 直水冷条件と離型時温度分布

Temperature distribution of formed parts with direct water quench tool

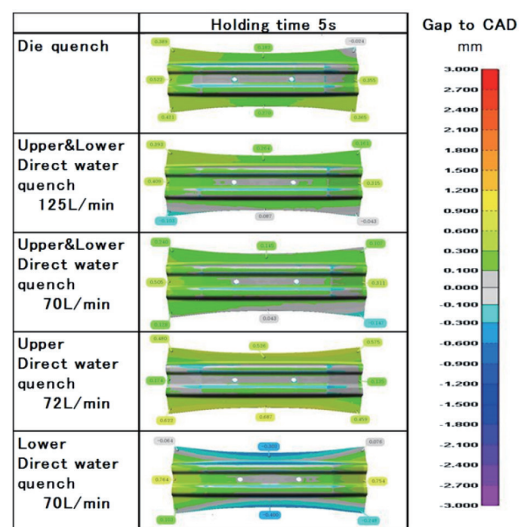


図 10 噴水形態による形状変化の確認結果
Result of trial on shape change by spout system

から4段目の片面(上)の直水冷ではフランジは跳ね上がる傾向、最下段の片面(下)の直水冷では逆にフランジが垂れ下がる傾向が顕著で、精度はいずれもCAD形状に対し $\pm 0.5 \sim 1\text{mm}$ 程度に拡大した。この形状変化の起点は部材断面の稜線R付近であり、壁部に反りは認められないことから、上下面で異なるMP加工範囲に起因する平板部と稜線部の温度履歴差が形状に影響したと推定される。従って形状精度の点では温度履歴差が軽減される両面の直水冷が優位である。

今後、厚手部材の急速冷却時の形状設計、異厚部材に対応した部分直水冷後の形状予測、金型設計のためには温度履歴差による熱収縮および相変態挙動を再現する CAE 技術が必須と考えられる。また、この技術は先述のテーラードプロパティ部品の形状予測にも共通する。

4. 相変態CAE手法の適用検討

4.1 ホットスタンプ工法と CAE 技術

ホットスタンプ工法では加工温度が高いため、加工荷重が低いのが特徴であるが、成形途中の金型接触による温度分布の影響を受けるため必ずしも成形性は高くない⁷⁾。このため、伝熱と成形を連成させた成形 CAE 手法が検討されており、汎用解析ソルバーへのホットスタンプ成形計算機能の実装も進んでいる⁸⁾。また、焼入れ後の性能に関しても、CCT 線図や相変態計算に基づく硬度予測を行う汎用解析ツールも実用化されている⁹⁾。

しかしながら形状精度予測に関しては、形状凍結性が良いことを特徴として普及が進んだホットスタンプでは殆ど検討されていないのが現状である。実際のホットスタンプ部材では、成形から冷却にかけての部材内の温度履歴の違いにより形状精度が変化しており⁹⁾、さらに先述のテーラードプロパティ工法、直水冷工法ではより極端な温度履歴差が発生するため、形状精度予測のための相変態考慮 CAE 技術の確立が必要な状況である。そこで、実験による相変態に関する詳細な材料物性データを取得し、それらを精度よく反映する材料モデルを実装した独自開発の解析手法による熱間成形後の形状精度予測の検証を進めている¹⁰⁾。

ホットスタンブ相変態 CAE の概念図を図 11 に示す。従来の成形 CAE は、過冷オーステナイトのひずみ、応力と温度との連成に留まっていたが、これに金属組織変化との連成を付加するため、汎用ソルバー LS-DYNA に相変態挙動を高精度に考慮できる構造材料 (umat) および熱物性 (thumat) のサブルーチンを日本製鉄(株)独自で開発し実装した。umat では相変態に伴う密度、体積変化、変態塑性ひずみを考慮し、材料の応力・ひずみ状態が計算される。thumat においては各相の熱物性に基づき、相変態に伴う発熱と熱物性の変化が考慮される。

図 12 に相変態予測精度の検証結果例を示す。実測した温度変化を熱境界条件として与え、温度変化に伴うひずみ

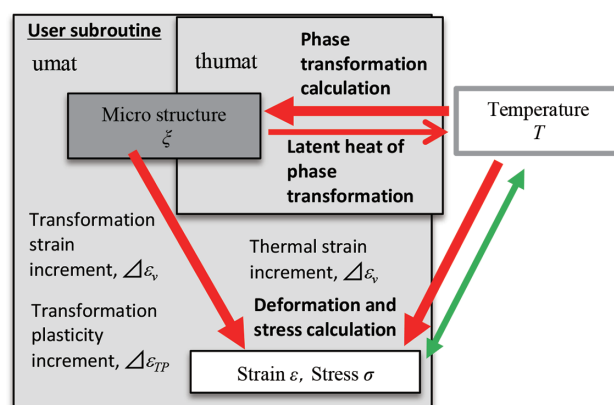


図 11 相変態解析の概要
Outline of phase transformation CAE

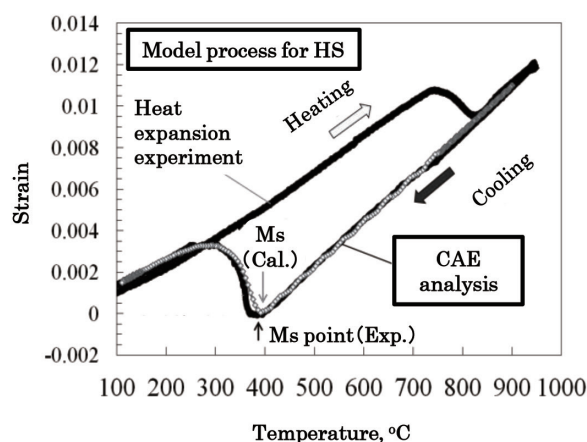


図 12 温度-ひずみ関係の実験と解析の比較
Comparison of temperature-strain relation of experiment and analysis

変化を計算したが、ひずみに加えて、Ms 点の予測についても概ね実験値と一致し、ホットスタンプ時の相変態挙動を精度良く予測できている。

4.2 部材解析の試行例

上述の相変態計算手法を用いた U 曲げ試験を対象とした形状予測の検証を経て、実際のホットスタンプの現象再現も可能であることが確認されている¹⁰⁾。そこで、高機能化により複雑な熱履歴を辿るホットスタンプ部材に対する計算適用を試み、実部材規模で得られる計算精度、適用課題等の抽出を行った。

計算対象として、2項で述べた部分加熱金型によるハット形状のテーラードプロパティ部材を選定した。計算モデルを図13に示す。モデルは分割された上型（パンチ）、矩形のブランク、パッド、下型（ダイ）で構成される。ブランクは変形体シェル要素、金型は剛体シェル要素の一般的なホットスタンプ成形解析用のモデルを使用した。

温度条件は試験の実測温度に基づき、ブランクの初期温度を 700℃、パンチの中央加熱部を 330℃固定、両側非加熱部の初期温度を 120℃、下型部分の初期温度を 60℃とし

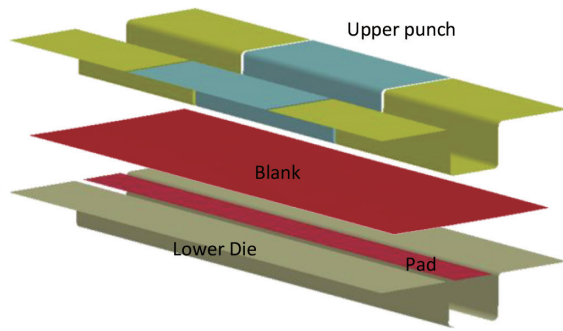


図 13 テーラードプロパティ部材の計算モデル
Simulation model for tailored property HS

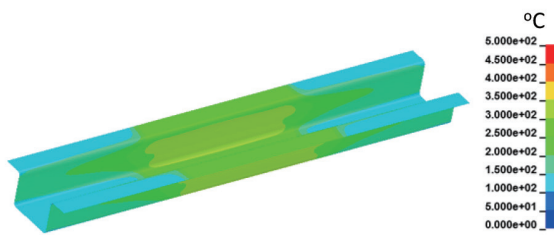


図 14 冷却および加熱保持後の温度分布計算
Temperature distribution after holding with quenching and heating by CAE

た。計算は、成形、冷却および加熱保持、空冷の3工程に分けて実施した。成形工程の成形速度は40mm/s（成形時間1.5秒）とした。冷却および加熱保持工程は金型を閉じた状態で30秒間保持とし、その後20℃まで空冷する計算を行った。空冷までの計算を相変態考慮で実行後、温度考慮なしのスプリングバック解析で最終形状を求めた。

図14に冷却および加熱保持後の温度分布の計算結果を示す。従来の成形解析からの知見に基づく伝熱設定により概ね図3の試験と同様の温度分布が得られている。縦壁の硬度分布を図15に示す。金型の非加熱部と加熱部の長手中央付近の硬度は概ね再現できることが確認できた。金型ブロックの境界付近の温度変化、硬度変化挙動は複雑であり適用評価を継続中である。このような温度境界部分の計算では、金型間、ブランク内の熱移動と系外への抜熱のバランスの影響が大きいようであり、CAEにおける伝熱特性、熱伝達境界条件設定の更なる改善が必要と考えられる。

なお、2項で述べたように、テーラードプロパティ工法の適用時は熱ひずみ等により形状精度が変化しており、この相変態CAE手法はその予測に有効活用できると考えられる。図16に最終形状の計算結果を示すが、加熱部、非加熱部に生じる断面の開閉、天板やフランジの反りなどの特徴は再現できている。このCAE適用試行を通し、変形量の計算精度には、成形から保持工程での相変態の影響と相変態が完了した後の熱収縮の影響のバランスの再現が不可欠であることが分かってきた。実部材規模の部品での金型温度、部材の各部の詳細な温度分布や温度履歴の差異

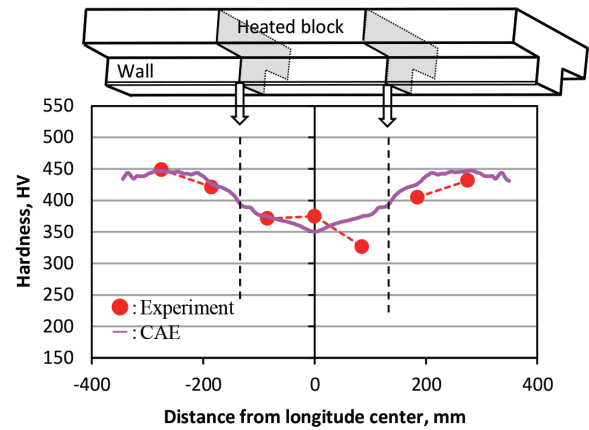


図 15 縦壁硬度分布の計算と試験の比較
Comparison of hardness on wall portion between experiment and CAE

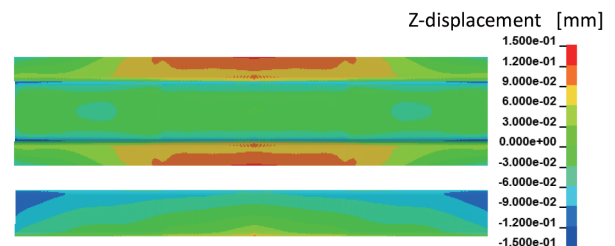


図 16 最終形状の計算結果の一例
Example of simulation result of final shape

は十分把握できていないため、今後これらの計算条件の適正化を通して精緻な温度履歴の再現条件把握を進める。

5. 結 言

今後の自動車の軽量化と安全性能確保のため、ホットスタンプ部材の高機能化は不可欠であり、テーラードプロパティ工法などの応用技術の適用はさらに進展すると考えられる。また、広く量産適用されるための高生産性技術の開発も必須であり、多様な適用形態に応じた開発を推進していく必要がある。その開発設計を支える相変態CAE技術については、材料モデルおよび要素計算手法はほぼ完成されていると考えられるが、複雑なホットスタンププロセスにおける現象再現に向けては更なる実践的なデータの採取を通し適用評価技術を確立していく必要がある。

今後、早期に高機能化ホットスタンプ部材の解析評価、設計試作技術を確立し、自動車車体の変革に臨機応変に対応したい。

参考文献

- 1) 末廣正芳 ほか：新日鉄技報. (378), 15 (2003)
- 2) 匹田和夫 ほか：素形材. 55 (12), 10 (2014)
- 3) George, R. et al.: 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel - CHS2, Kassel, 2011, CHS2
- 4) 福地弘 ほか：新日鉄住金技報. (402), 70 (2015)

- 5) 福地弘 ほか：自動車技術. 68 (2), 105 (2014)
- 6) Nomura, N. et al.: 5th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel - CHS2, Toronto, 2015, AIST
- 7) Nomura, N. et al.: steel research international. 81 (9), 904 (2010)
- 8) Skrikerud, M. et al.: 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel - CHS2, Kassel, 2011, CHS2
- 9) Ma, N. et al.: steel research international. 81 (9), 896 (2010)
- 10) 久保雅寛 ほか：平成 29 年度 塑性加工春期講演会, 岐阜, 2017, 日本塑性加工学会



野村成彦 Naruhiko NOMURA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
主幹研究員
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



久保雅寛 Masahiro KUBO
名古屋技術研究部
主任研究員 博士(エネルギー科学)



福地 弘 Hiroshi FUKUCHI
設備・保全技術センター 機械技術部
機械エンジニアリング室 主幹



中田匡浩 Masahiro NAKATA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
上席主幹研究員