

特集記事・3

構造用金属材料の新たな挑戦  
ヘテロ構造制御に基づく新指導原理構築

# 超高強度自動車用部材製造のための ホットスタンピングプロセスにおける組織制御

Microstructural Control in Hot Stamping Processes for Producing Ultra-high Strength Automotive Steel Components

岡山大学  
工学部 自然科学研究科  
教授  
瀬沼武秀  
Takehide Senuma

岡山大学  
自然科学研究科  
竹元嘉利  
Yoshito Takemoto

岡山大学  
自然科学研究科  
清水憲一  
Kenichi Shimizu

津山工業高等専門学校  
機械工学科  
北條智彦  
Tomohiko Hojo

## 1 はじめに

日本の鉄鋼業は高級鋼の開発製造によって国際競争力を維持強化しようとする国際戦略を展開しており、その重点開発課題の一つに車体のさらなる軽量化を実現する材料開発が挙げられる。その成果として590MPa級、780MPa級、980MPa級の成形性に優れた高強度自動車用鋼板が次々に開発実用化され、最近では1180MPa級の良成形性高強度溶融亜鉛めっき鋼板の実用化も報告されている<sup>1)</sup>。しかし、この鋼板の高強度化の流れは1500MPa超級鋼板の実用化になるとロール成形などの曲げ加工主体で製造できる部材以外は、成形性、形状凍結性、耐遅れ破壊性などの諸問題で行き詰りをみている。たとえば、1500MPa超級の良成形性高強度自動車用鋼板としてはTRIP効果を用いた高延性の鋼板が提案されているが、形状凍結性の問題が残るだけでなく、ハイカーボン化に伴う溶接性の劣化や成形時に生じる加工誘起マルテンサイトが鋼板の内部に大きな引張残留応力を発生させ水素脆化感受性を高めるという欠点が指摘されている<sup>2)</sup>。

しかし、軽量化と衝突安全性の両面で1500MPa超級の高強度自動車部材のニーズは高く、ヨーロッパを中心に高級鋼の開発とは一線を画した成形技術による部品の高強度化が21世紀に入り積極的に進められてきた。それがホットスタンピング技術である。1500MPa超級の自動車部材の製造はホットスタンピングが世界の主流になっている。この技術について本執筆者の一人が本誌ですでに2005年に解説記事<sup>3)</sup>を記しており、日本でも適用が進められている。図1はホットスタンピング部材の生産量を未来予測を含めて示したもので、現状では指数関数的な伸びを示している。ある自動車メーカーの発表では現在20%弱の自動車車体部材をホットスタンピングで製造している車種もあり、将来的には最大で45%の部材を

この技術で製造することが可能と報告している<sup>4)</sup>。また、現在世界に約160あるホットスタンピングラインがここ5年間は毎年20～30ラインの勢いで増設されるという予測も報告されている<sup>5)</sup>。図2はドイツのメーカーが提案しているホットスタンピングライン<sup>6)</sup>であるが、プレスメーカーが加熱炉メーカー、金型メーカーなどと協働して、このようなターンキーラインを中国などの需要の高い市場に展開しているビジネスプランは日本の企業にはない展開で注目に値する。

本報では自動車鉄鋼部材のさらなる高強度化の対応技術であるホットスタンピング技術について現状と問題点を紹介することで表題のテーマの位置づけを明確にし、2000MPa級のホットスタンピング部材の製造プロセスにおける組織制御について概説する。

## 2 ホットスタンピング技術の開発の現状と問題点

ホットスタンピング技術は21世紀に入って急速に発展し、

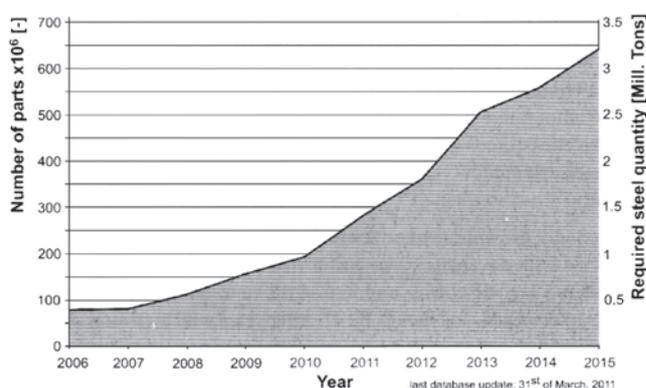


図1 ホットスタンピング部材の生産量の未来予測を含めた推移<sup>5)</sup>

実用化が進んだ。図3に本技術の利点欠点を示すが、この欠点の改善が重要な技術課題になっている。また、ホットスタンピング技術の特色を生かした部分加熱・冷却による部材内の強度の作り分け技術なども最近注目を集めている課題である。これらの課題に対する研究成果はすでに多くの報告がなされている。特に、ドイツとスウェーデンの大学が共催して2008年から継続的に行われているホットスタンピングの国際会議では注目に値する最新の技術が紹介されている<sup>7-9)</sup>。2011年に開かれた第3回の国際会議では55件の報告がなされた。最近では日本でもホットスタンピングのシンポジウム

が開かれるようになり<sup>10)</sup>、国内学会でも本技術の注目度が高まってきている。

本章では、これらの最近の報告を中心に本技術の開発動向と今後の課題を紹介することで、本特集記事で対象にしている「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」の技術テーマとの関係を示したい。

図4に既存のホットスタンピングプロセスの模式図を示す。ホットスタンピング技術の普及の最大の障害になっているのが、生産性の低さによる部材のコスト高の問題である。その原因はプレス金型内の冷却に時間を要することと成形後に

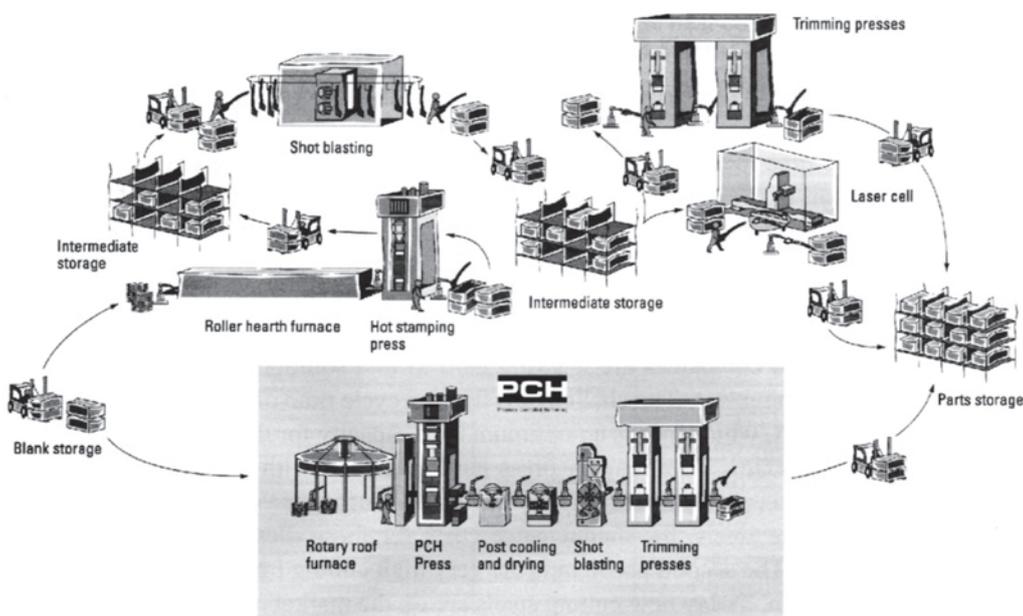


図2 ドイツのメーカーが提案しているホットスタンピングライン<sup>6)</sup>

<p>Advantages</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Excellent shape fixability</li> <li>• Low press load → Downsizing of press machine</li> <li>• One body press of large size parts → Reduction of patchwork</li> <li>• Good formability</li> <li>• Decrease in modifying correction of dices for gauge accuracy</li> <li>• Global availability of steels</li> <li>• Proper combination with Tailored blank</li> </ul> <p>Disadvantages</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investment of additional facilities such as heating furnace, shot pinning, etc.</li> <li>• Low productivity.</li> <li>• Thermal energy consumption</li> </ul>
--

図3 ホットスタンピング技術の利点欠点

別工程でレーザーを用いたピアシングやトリミングをしなければならないことである。

水冷金型の抜熱による金型冷却ではMs点以下まで冷却するのに通常10数秒かかる。その冷却時間を短縮するのに金型の材質を変えることが効果的であるという報告もあるが<sup>11)</sup>、石森らが提案している金型内への水の直接噴射が最も効果的と思われる。この場合、冷却時間は1～2秒となる<sup>12)</sup>。

西畑ら<sup>13)</sup>は冷却パターンと強度の関係に注目し、ホットスタンピング部材の強度のパラッキは各部のMs点以下の温度域での冷却速度の相違に伴うオートテンパリングの度合いの違いが原因であることを報告している。金型内への水の直接噴射はこの冷却パラッキの問題を解決している。今までのホットスタンピング材は多かれ少なかれオートテンパリングされているのに対し、直接水冷型の部材は焼き入れままの状態なので、強度以外の特性が通常ホットスタンピング材より劣位である可能性がある。後述するように、当該プロジェクトではこの点にも注目して研究を進めている。

一方、生産性の低下のもう一つの原因になっているレーザーによる切断の代わりに、機械的なせん断を可能にする技術開発が進められている。図2のホットスタンピング設備も機械的せん断装置を提案している。ヨーロッパでレーザーせん断を採用している理由は遅れ破壊への懸念からではなく、せん断刃の寿命があまりに短いとされている。それゆえ、金型寿命を延ばす刃の材質、クリアランス、歯の形状などが検討されているが<sup>14)</sup>、2000MPa超級の部材になると現在の技術の延長では刃の長寿命化は難しい。そこで、提案されているのがホットトリミング、ホットピアシングである。Ms点以上の温度域でのせん断ではせん断部の引張の残留応力も低く水素脆化感受性も低くなることが報告されてい

る<sup>15)</sup>。ただし、この場合冷却、変態に伴う寸法変化を見込んでせん断が必要となり、形状予測シミュレーション技術の精度に負うところが大きい。見込みの精度が悪い場合は冷却後に再度微調整の切断が必要になるが、すべての作業を冷却後に行う場合に比べると大幅な作業時間の減少が期待できる。

生産性向上の一手段としてホットスタンピングをタンデムあるいはトランスファープレスを用いた多段成形で行うことが提案され、ホットトリミングなども行える<sup>15)</sup>。また、成形後に部品を簡単な治具で抑えて冷却すれば金型内で冷却しなくても良好な形状凍結性が確保できることが確認されているので、スタンピング後に治具に固定して連続して冷却すれば、冷間プレスとほぼ同等の生産性が期待できる。多段成形においては部材の温度低下が懸念されるため焼き入れ性向上を図った成分設計も提案されている<sup>16)</sup>。

スタンピング工程の生産性が向上されると、加熱工程の生産性も向上させる必要がある。現状の加熱条件を維持して生産速度を上げるには炉長を延ばすか、加熱ラインの並列化を行わなければならないが、場所的な制約もあり実現が難しい。そこで、加熱速度を高める検討が数多くなされている。矩形の素材については通電加熱が適用され数100°C/sの加熱速度が試行されている。その他にも誘導加熱、遠赤外線加熱なども検討され、加熱速度の高速化が図られている<sup>17)</sup>。

その他にも部材の加熱温度あるいは冷却速度を部位によって変化させることで、部位に強度分布を持たせるTailored Hot Stamping技術<sup>18-21)</sup>や張出性、深絞り性、穴広げ性などの成形性に及ぼすホットスタンピング条件の影響<sup>22-24)</sup>などを検討した研究成果が数多く報告されている。また、温度と連成した成形シミュレーションモデルも数多く開発され、実際と比較的良好一致が得られていることが報告されている。こ

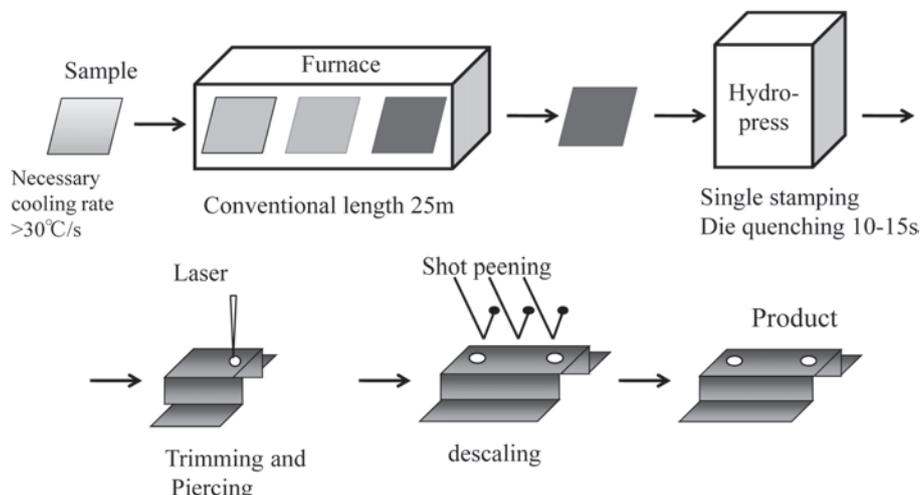


図4 既存のホットスタンピングプロセスの模式図

これらの結果については本報の本題とは直接関係がないので、既報の解説<sup>25-29)</sup>や学会のプロシーディング<sup>7-9)</sup>などを参照されたい。

次に、本題と直接関係するさらなる高強度化を目的に進められている材料開発について紹介する。Graffら<sup>30)</sup>は単純にC量を増加して、高強度化を目指した研究を行い、従来のホットスタンピング条件では1700MPa級の強度を得るにはC量を0.28%、1900MPa級の強度を得るには0.34%に設定する必要があると報告している。また、西畑ら<sup>31)</sup>は0.3%C鋼にNbを添加することで1800MPa級の強度が得られ、Nb添加の効果で組織が微細になることで1500MPa級の材料と同等の靱性が得られることを報告している。

### 3 2000MPa 超級の ホットスタンピング部材の 実用化への挑戦

自動車業界の車体の超高強度化のニーズはさらに高まり、2000MPa 超級の部材の開発が期待されている。2000MPa 超級の部材になるとロール成形でも製造が難しくなり、ホットスタンピング技術への期待が大きい。2000MPa 超級のホットスタンピング部材の実用化を果たすには、靱性、耐遅れ破壊性に対する懸念を払しょくする必要がある。1500MPa 級のホットスタンピング部材は実用化されているので、2000MPa 超級のホットスタンピング部材の研究課題は靱性ならびに耐遅れ破壊性を1500MPa 級部材に近づけることである。また、2000MPa 超級のホットスタンピング部材の製造においても、前述した生産性向上を実現する技術は積極的に取り入れる方向で検討する。

これらの課題解決に取り組むに当たり、折よく科学技術振興機構 (JST) より研究成果展開事業 (産学共創基礎基盤研究プログラム) の技術テーマ「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」の新規研究課題の公募があった。このJSTプログラムの技術課題は「今まで難しいとされていた、相反する複数機能を満足する材料をヘテロ構造制御によって創成することで我が国の技術競争力を強化することを目標にする」というもので、私たちが目指していた強度-靱性バランスならびに強度-耐遅れ破壊性バランスに優れた超強度部材の製造を可能にする組織制御の学術的基盤の構築は、この技術課題に正面から取り組むものであったため、提案した研究テーマ「超微細組織マルテンサイト相を母相としたヘテロ組織の創成とその特性」は支援を受けることになった。次章では、その研究の取り組みについて紹介する。

## 4 超微細組織マルテンサイト相を 母相としたヘテロ組織の創成と その特性

本研究の課題解決の考え方は、優れた強度-靱性バランスを得るためのマルテンサイト組織の超微細化、優れた強度-耐遅れ破壊性バランスを得るヘテロ組織制御による有効な水素のトラップサイトの創成を果たすことである。

### 4.1 マルテンサイト組織の超微細化

靱性が組織の微細化により顕著に向上することはよく知られており、著者らもホットスタンピング材でマルテンサイト粒径を15 $\mu\text{m}$ から4 $\mu\text{m}$ に微細化することでシャルピー試験の衝撃吸収エネルギーが大きく増加することを確認した<sup>32)</sup>。マルテンサイト組織の超微細化のチャンピオン値は飴山らが報告している。彼らは0.4%C-3%Mn-1%Cr-1%Mo鋼を1000 $^{\circ}\text{C}$ に加熱後、焼き入れてマルテンサイト変態させ、次いで、650 $^{\circ}\text{C}$ で焼戻し処理をした後に、80%の冷間圧延し、それを820 $^{\circ}\text{C}$ に再加熱して水冷することで、平均粒径0.9 $\mu\text{m}$ の極微細なマルテンサイト粒組織を得ている<sup>33)</sup>。しかし、0.4%C鋼は溶接性で問題があり、高価なMoを使用することや熱延後にコイルを焼き戻す熱処理を付加することはコスト的な負担も大きいので、彼らも言及しているように彼らの提案した条件をそのまま実用化に採用することは難しい。

従来のホットスタンピング工程で得られているマルテンサイト粒径は30~40 $\mu\text{m}$ 程度であるが、本研究では組織微細化に及ぼす諸因子の影響を明確にして、実操業で製造可能な条件で平均マルテンサイト組織を1~2 $\mu\text{m}$ にする数値目標を設定した。

本研究は昨年度から開始したため、実験結果の論文による公開が本記事以降になるため、オリジナリティー、2重投稿などの問題で詳細を開示することができないので、ここでは研究実施計画を中心に紹介する。すでに公開しているデータについては一部紹介するが、研究の主要な部分については今後発表を予定している論文を参照して頂きたい。

マルテンサイト粒の微細化、すなわち加熱工程で形成されるオーステナイト粒を微細にするには2つの方法がある。一つは方位の異なるオーステナイトを数多く加熱時に生成させること。もう一つは、生成した粒の成長を極力抑えることである。図5に模式図で示すように、オーステナイトはパーライトならびにセメンタイトを核にして生成するが、生成核の方位が同じ方位を持つ場合は生成した粒は合体して、微細粒として留まらない。それゆえ、冷延率を高めてこれらの第2相近傍の結晶方位の回転を助長して、図中に示すように様々な方位の結晶粒を生成させる必要がある。本研究ではマルテ

ンサイトの微細化と冷延率の関係を検討し、冷延率の増加に伴いマルテンサイト粒径が微細化する傾向を確認している。また、セメンタイトの分散状態も核生成に大きな影響を及ぼす可能性が高いので、熱延の巻取温度を600℃と400℃と変化させてセメンタイトの分散状態を変えた試料を冷延、加熱した実験を行い、セメンタイトが微細分散している400℃巻取り材の方がマルテンサイト組織の微細化には有利であることを確認した。一方、マルテンサイト組織の材料を200℃から500℃まで100℃ごとの各温度で30分間の時効処理してセメンタイトの分散状態を変えた試料をつくり、それを200℃/sで800℃に加熱し、すぐに水冷してマルテンサイト単相組織を得たがセメンタイトが微細なほど、マルテンサイトが微細になるという結果にはならなかった。これは加工が加わらない熱処理のために同じ粒内のセメンタイトから生じたオーステナイトの方位は同一のため容易に合体してマルテンサイトの微細化にほとんど影響を及ぼさなかったためと推測される。

図6は逆変態が起こった初期の組織で、主に粒界から核生成が起きていることが分かる。そこで、粒界面積を増やすために熱延鋼板の組織の微細化をNb、Ti、Vなどのマイクロアロイ成分を添加して図った。その結果、ホットスタンピング部材のマルテンサイト粒径が微細化することを確認した。

ホットスタンピング部材のマルテンサイト粒径を微細にするには核生成頻度を増やすことのほかに、その後の成長を抑制

することが重要である。加熱速度の増加は過熱度を大きくし、オーステナイトの核生成エネルギーを高めて核生成頻度を増加させる可能性があるが一方、高温になると成長も速くなるので、微細化に及ぼす加熱速度の効果は自明ではない。そこで、マルテンサイト粒径に及ぼす加熱速度の影響を検討した。図7は表1に成分を示す鋼を10℃/sならびに200℃/sで各温度に加熱した後に水冷した試料のマルテンサイト粒径を示す。組織は100%マルテンサイト組織を示す。素材は真空溶解材を1200℃に1時間加熱した後に、900℃で仕上圧延を行い、その後600℃の炉で1時間の保持後に炉冷し、それを50%冷延して作製した。この図が示すように200℃/s加熱材の方が若干微細組織を示す。温度上昇に伴う粒成長が10℃/sの方が若干速いのは熱処理時間の差に起因する。この結果が示すように加熱温度の低温化は組織微細化に寄与する。すなわち、オーステナイトに100%変態する温度Ac3を下げる元素の添加が有効なことを意味する。そのため、ここではMnを3%添加した材料を用いたことで800℃の加熱温度でも完全オーステナイト化を果たしている。Mnの添加は焼き入れ性も高めるために、多段成形時に試料の温度が低下しても、スタンピング工程においてフェライトなどの軟質相の生成を抑制することができる。

マルテンサイト組織の微細化に及ぼすTi、Nb、Vの添加の効果については熱延鋼板の組織の微細化の観点だけでなく、ホットスタンピング工程でのオーステナイト温度域の結晶粒の成長に及ぼすピンニングならびにソリュートドラッグの効果の影響からも検討している。現在のところ0.28%C-3%Mn-0.3%V-0.025%Nb添加鋼を900℃で仕上熱延し、400℃で1時間の巻取シミュレーションをした後に、50%の冷延を施した試料を800℃に200℃/sで加熱後にすぐに水冷することで、平均粒径1.5μmの微細マルテンサイト組織を得ることに成功している。

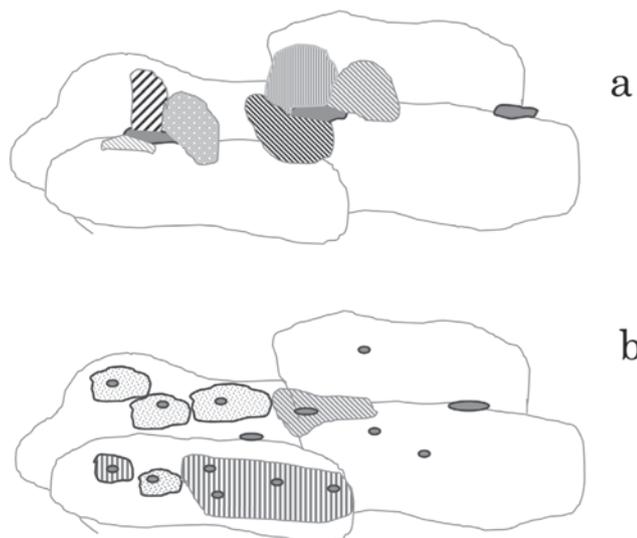


図5 パーライトならびにセメンタイトから核生成したオーステナイト粒の結晶方位の模式図  
a: フェライト+パーライト組織を冷延し、急速に加熱して逆変態を起こした場合で加工が加わることで第2相近傍のマトリックスに複雑な結晶回転が起こり、多様な方位のオーステナイトが生成する。b: 溶融めっき処理などで再結晶フェライトにパーライトが球状化セメンタイトとフェライトに分解した場合で、セメンタイトに接して生成したオーステナイトは同じ方位を有し、合体するため微細化に繋がらない。

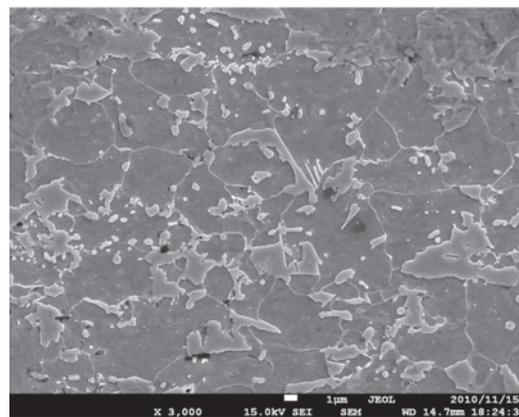


図6 逆変態初期の試料を水冷した材料の組織写真 (200℃/s加熱、771℃から水冷)

#### 4.2 ヘテロ組織創成による機械的性質の改善

2000MPa級ホットスタンピング部材の実用化を果たすには、安全保安部材の観点から優れた靱性と耐遅れ破壊性が要請される。一つの目標値としてすでに実用化されている1500MPa級の部材が有する値に近い値が挙げられる。

これらの目標値を達成する手段としてヘテロ構造組織による組織制御を試みる。2000MPa級ホットスタンピング部材で検討するヘテロ組織は母相を微細マルテンサイト組織として第2相を①フェライト、②セメンタイト、③オーステナイト、④微細析出物とする組織である。

靱性に関しては①のフェライトとのヘテロ組織は従来知見よりマルテンサイト単相組織鋼より劣化する可能性が高いが、耐遅れ破壊性に関しては若干のフェライトの存在の影響が明確になっていないので検討することにした。また、②のセメンタイトとのヘテロ組織はマルテンサイトの焼き戻し条件により様々な状態を作ることができる。適切な焼き戻し処理は靱性の大幅な改善が期待されるだけでなく、耐遅れ破壊性の改善にもつながるとの報告<sup>34)</sup>もあるので、優れた強度-靱性-耐遅れ破壊性バランスが得られる条件を検討する。③の残留オーステナイトとのヘテロ組織についてはSi添加材を用いてQ&P (Quench and Partitioning) 処理<sup>35)</sup>なども視野に入れて残留 $\gamma$ 量と靱性ならびに耐遅れ破壊性の関係を明らかにする。④の微細析出物とのヘテロ組織では、整合析出した析出物界面が水素のトラップサイトとして働き、耐遅れ破壊性を向上させることが知られているので、特に遅れ破

壊性の改善を狙った。しかし、ホットスタンピングプロセスでは熱延時に微細に析出させた整合析出物も一度オーステナイト域に再加熱されるので、析出物と母相の界面の整合性は崩される。このような状態での微細析出物の水素のトラップ能力については未知な点が多いので、このプロジェクトで検討することになっている。

図8は表1で示した材料を素材に熱処理条件を変えて組織を変化させた時の-40℃の試験温度でのシャルピーの衝撃吸収エネルギー値を示す。熱処理前の素材は前述と同様の処理で作製した。加熱速度は10℃/sで、740℃ WQ材はフェライトが7%残存する組織を呈し、800℃ WQならびに1050℃ WQ材はマルテンサイト100%の組織で粒径が3 $\mu$ mならびに15 $\mu$ mである。ここで、WQは水冷、ACは空冷を意味する。800℃ WQ、200℃、30秒は800℃から水冷した試料を200℃に10℃/sで再加熱して、30秒保持した後に水冷したことを意味する。このように衝撃吸収エネルギー値はフェライトを含むヘテロ組織材が最も低く、マルテンサイト単相材では組織の微細化ならびに低温焼き戻しにより向上する。800℃ AC材はオートテンパリングにより800℃ WQ材を200℃で30秒時効処理した試料以上に焼き戻されていた。表2に以上の試料の引張試験結果を示す。焼き戻しにより強度が低下し、2000MPaに達していない。今後、組織の微細化、析出強化の付加、焼き戻し条件の最適化などを検討して、さらなる強度-靱性バランスの向上を図る。

図9は同じ試料を5%の塩酸溶液に漬け1000MPaの負荷で

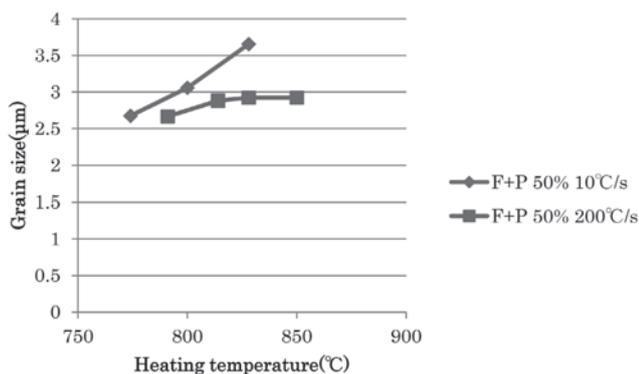


図7 表1に成分を示す鋼を10℃/sと200℃/sで完全オーステナイト域に加熱した後に水冷した試料のマルテンサイト粒径に及ぼす加熱温度の影響

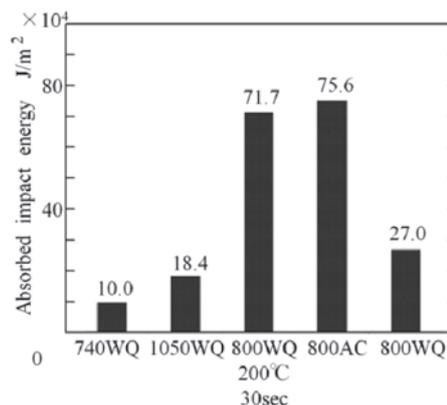


図8 表1で示した材料を熱処理条件を変えて組織を変化させた時のシャルピーの衝撃吸収エネルギー値 (加熱速度: 10℃/s)

表1 供試鋼の化学成分 (mass %)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	B	Ti	N
A	0.22	0.02	3.0	0.003	0.003	0.040	0.0020	0.015	0.0020

引張った状態で破断するまでの時間を求めた遅れ破壊試験の結果を示す。フェライトが存在した740℃ WQ材は最も時間が短かった。セメンタイトが析出した空冷材、焼戻し材は長い破断時間を示した。その理由としては試料の靱性が向上したとセメンタイトの析出により水素トラップサイトが増えたことが考えられる。また、マルテンサイト粒径の異なる800℃ WQ材と1050℃ WQ材で破断時間に顕著な差がみられず、粒径の影響を確認することはできなかった。今後、各ヘテロ組織の水素トラップ能力について鋼中水素測定装置を用いて詳細に検討していく。

ここで示したのはプロジェクト初期のデータで、その後マルテンサイト組織のさらなる微細化、ならびに析出物を適切に用いたヘテロ組織の実験データも得られている。現在検討している成分系では2000MPa級にも関わらず既存の1500MPa級に近い衝撃吸収エネルギー値ならびに遅れ破壊の破断時間が得られている。これらの結果については順次公開していく予定である。

## 5 おわりに

本研究は自動車部材のさらなる軽量化ならびに安全性向上

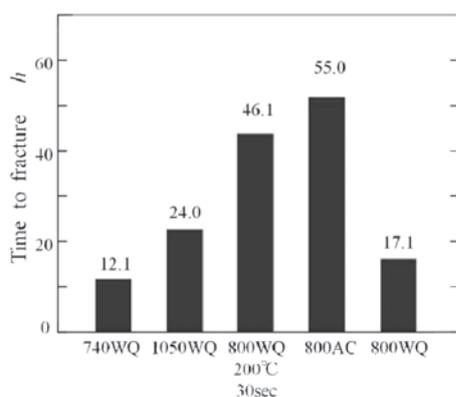


図9 図8に示した試料と同じ条件で制作した試料をPH1の溶液に漬けて1000MPaの負荷で引張った状態で測定した破断するまでの時間

を実現するためにホットスタンピングにより2000MPa級の靱性、耐遅れ破壊性に優れた部材を製造するためのヘテロ組織の創成を目指している。現在、道半ばではあるが、平均粒径は1～2μmの超微細マルテンサイト組織を母相に第2相の最適分散析出によるヘテロ組織制御で、目標に設定した強度-靱性バランスならびに強度-耐遅れ破壊性バランスに近づいている。残されたプロジェクト期間内に目標を達成するように今後鋭意研究を進める。

## 参考文献

- 1) N.Fujita, K.Matsumura, T.Nonaka, T.Tomokiyo and T.Miyagi: Proc. World Automotive Congress FISITA2010, Budapest/Hungary, F2010-B-008 (2010)
- 2) 山崎一正, 水山弥一郎: 鉄と鋼, 83 (1997), 754.
- 3) 瀬沼武秀, 楠見和久, 末広正芳: ふえらむ, 11 (2006), 86.
- 4) R.Johansson, M.Fermer, J.Jergeus and J.K.Larsson: Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2011), 283.
- 5) M.Schupfer and K.Steinhoff: Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2011), 271.
- 6) R.Kolleck, J.Aspacher and R.Veit: Proc. of 2nd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2009), 173.
- 7) Proc. of 1st Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2008)

表2 供試鋼の引張試験結果

	740℃ WQ	1050℃ WQ	800℃ WQ 200℃ 30s	800℃ AC	800℃
Hardness (Hv)	680	651	604	564	701
Tensile strength (MPa)	2233	2095	1937	1855	2275
Elongation (%)	8.8	8.8	9.1	10.4	9.9
Yield stress(MPa)	1571	1563	1516	1218	1625

- 8) Proc. of 2nd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2009)
- 9) Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2011)
- 10) 第279回塑性加工シンポジウム「難加工板にチャレンジするホットスタンピング技術」, Tokyo, (2012)
- 11) K.Steinhoff, N.Saba, M.Maikranz-Valentin and U.Weidig : Proc. of 2nd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2009) , 29.
- 12) 石森裕一, 嶋哲男, 福地弘 : 特許公開 2007-75834.
- 13) T.Nishihata and N.Kojima : Tetsu to Hagané, 96 (2010) , 378.
- 14) H.So, H.Hoffmann and R.Golle : Proc. of 2nd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2009) , 137.
- 15) 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 (2010-7) , 680.
- 16) T.Senuma and Y.Takemoto : Mater. Sci. Forum, 654-656 (2010) , 330.
- 17) P.Siebert, M.Alsmann and H.-J.Watermeier : Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2011) , 457.
- 18) 森謙一郎, 奥田裕也, 内田光隆, 上園俊 : 塑性と加工, 50 (2009) , 1049.
- 19) J.Banik, F.-J.Lenze, S.Sikora and R.Laurenz : Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2011) , 13.
- 20) T.Svec and M.Merklein : Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2011) , 21.
- 21) R.George, A.Bardelcik and M.J.Worswick : Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2011) 31.
- 22) 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.
- 23) K.Kusumi, S.Yamamoto, T.Takeshita and M.Abe : Proc. of 2th Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, (2009) , Lulea/Sweden, 97.
- 24) M.Nakata, Y.Ito, K.Uematsu, K.Hikita, T.Suzuki and N.Kojima : Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2011) , 123.
- 25) Karbasian, H.Tekkaya and A.E : Journal of Materials Processing Technology, 210 (2010) , 2103-2118.
- 26) 瀬沼武秀, 竹元嘉利 : 塑性と加工, 51-592 (2010-5) , 410-415.
- 27) 末広正芳, 真木純, 楠見和久, 大神正浩, 宮腰寿拓 : 新日鉄技報, (2003) , 378, 15-21.
- 28) 小嶋啓達 : 塑性と加工, 46-534 (2005) , 595-600.
- 29) 森謙一郎 : 塑性と加工, 53 (2012) , 98.
- 30) S.Graff, Th.Gerber, F.-J.Lenze and S.Sikora : Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2011) , 323.
- 31) T.Nishihata, K.Kojima, T.Ozawa and K.Nakajima : CAMP-ISIJ, 21 (2008) , 597.
- 32) T.Senuma and Y.Takemoto : Proc. of 3rd Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, ed. by M.Oldenburg, K.Steinhoff, and B.Prakash, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Germany, (2011) , 465.
- 33) 館山恵, 松村直巳, 時実正治 : 熱処理, 28 (1988) , 233.
- 34) A.Nagao, K.Hayashi, K.Oi and S.Mitao : ISIJ Int., 52 (2012) , 213.
- 35) A.J.Clark, J.G.Speer, M.K.Miller, R.E.Hackenberg, D.V.Edmonds, D.K.Matlock, F.C.Rizzo, K.D.Clark, E.De Moor : Acta Materialia, 56 (2008) , 16.

(2012年8月16日受付)