

# 部品製造における工程省略・簡略化に寄与する 高強度肌焼鋼 ECOMAX® シリーズ

## 1. はじめに

近年、カーボンニュートラル推進への対応が求められており、特殊鋼分野の代表顧客である自動車や産業機械業界では、内燃機関の燃費向上や電動化に向けた技術開発が世界的に進んでいる。さらに今後は、最終製品の使用時だけでなく、「素材製造－部品製造－最終製品製造－使用－メンテナンス－廃棄」といったライフサイクル全体でのCO<sub>2</sub>排出量の低減を図るため、部品製造時のCO<sub>2</sub>排出削減がますます重視されていくと考えられる。

通常、ギヤやシャフトなどの高強度が要求される駆動系部品は、肌焼鋼に浸炭を施して使用される。その部品製造工程としては、加工コストや歩留に優れる冷間鍛造が選択される場合が多い。一方、この製造工程では、冷間鍛造性や寸法精度、最終部品の強度を確保するために必要となる熱処理や機械加工が、CO<sub>2</sub>排出の要因となっている。したがって、部品の素材である肌焼鋼において、これらの工程を省略・簡略化しても製造性や部品性能を損なわない優れた特性が求められている。

冷間鍛造は常温に近い温度域での工法であり、熱間鍛造と比べて成形品の寸法精度に優れる。近年ではニアネットシェイプ化（高精度の冷間鍛造だけで必要な部品形状を得ること）による機械加工を簡略化するニーズがあり、それに対応可能な冷間鍛造性に優れる鋼材が求められている。また冷間鍛造性を確保するために、鍛造の前に材料軟化を目的とした球状化焼なまし（以下、SA）が通常実施されるが、従来鋼のSAは処理に長時間を要するのが一般的である。したがって、SAを省略あるいは処理時間を短縮化しても十分な成形性を確保できる鋼材を適用することが、工程簡略化につながる。一方で、冷間鍛造後に浸炭焼入れを施すと、浸炭温度保持中にオーステナイト結晶粒の

局所的な粗大化（混粒）が発生しやすいことが知られており<sup>1)</sup>、これが部品の強度低下や寸法精度悪化の原因となり得る。混粒を抑制するために、一般的には冷間鍛造後に焼ならし工程を追加してその影響を排除する方策がなされているが、その場合は当然、コスト面だけでなくCO<sub>2</sub>排出削減の点からも不利となる。そこで、焼ならし工程の省略のためには、冷間鍛造後にそのまま浸炭した場合においても、オーステナイト結晶粒が粗大化しない鋼材特性（耐結晶粒粗大化特性）が望まれる。

以上のように、部品製造時のCO<sub>2</sub>排出削減に向けて、鋼材への要求特性はますます厳しくなっている。このような背景のもと、当社では部品製造における工程の省略・簡略化を通してカーボンニュートラル推進を目指した高強度肌焼鋼 ECOMAX® シリーズの開発を進めてきた。本報では、当該シリーズの各鋼種の狙いと、工程省略・簡略化に寄与し得る代表特性を紹介する。

## 2. ECOMAX® シリーズのコンセプトと特徴

ECOMAX® シリーズの鋼材コンセプトは、Ni, Mo に頼ることなく、その他合金成分を最適化することで、ギヤ部品等の高強度化（特に耐ピッチング強度の向上）と、部品製造時の工程負荷軽減を両立させることである。これを実現するため、シリーズ共通の化学組成の特徴として、JIS SCM420 に比べて、高 Si－低 Mn－高 Cr－Mo 非添加－Nb 添加<sup>2,3)</sup>としている [表 1]。その理由として、Si の増量は焼炭軟化抵抗の上昇と、浸炭時の表面異常層の改質とで耐ピッチング特性を向上させるため<sup>2,4)</sup>、Mn の低減は冷間鍛造性を改善させるため、Cr の増量は Si と同じく耐ピッチング特性の向上に加え、冷間鍛造前の SA 組織の均質化により冷間鍛造性や耐結晶粒粗大化特性を向上さ

表1 ECOMAX®シリーズ共通の化学成分コンセプトと工程簡略化への寄与（SCM420比）

成分	コンセプト	鋼材特性	工程簡略化への寄与
Si増量	・焼炭軟化抵抗の上昇 ・浸炭異常層の改質	・耐ピッチング特性の向上	
Mn低減	・素材硬さの低減 ・焼入性の調整	・冷間鍛造性の向上	・ニアネットシェイプ化
Cr増量	・SA組織の均質化 ・焼入性の調整 ・焼炭軟化抵抗の上昇	・冷間鍛造性の向上 ・短時間SAでの軟化特性 ・耐結晶粒粗大化特性の向上 ・耐ピッチング特性の向上	・ニアネットシェイプ化 ・冷間鍛造前のSA簡略化 ・冷間鍛造後（浸炭前）の焼ならし省略
Mo非添加	・素材硬さの低減 ・コスト低減	・冷間鍛造性の向上	・ニアネットシェイプ化
Nb添加	・ピンニング粒子の確保	・耐結晶粒粗大化特性の向上	・冷間鍛造後（浸炭前）の焼ならし省略

せるためである<sup>5)</sup>。さらに、Crの増量はSAの処理時間短縮化にも寄与する<sup>6)</sup>。Mo非添加は、コスト削減に加え、素材硬さ低減により冷間鍛造性の向上につながる。Nbの添加はNb炭窒化物を鋼中に形成させて耐結晶粒粗大化特性を向上させるためである。これらの特性のうち、代表的なものを3章にて詳しく紹介する。

高強度肌焼鋼 ECOMAX® シリーズの各鋼種の特徴を以下に示す。

### 1) ECOMAX®1, ECOMAX®2

ECOMAX®1, ECOMAX®2 はシリーズの中で低C且つB添加としており、特に靱性を重視する部品に適する<sup>2,7)</sup>。また、低CとしたことでSA材は変形抵抗が低く、冷間加工性にも優れる。その一方で、B添加鋼は、一般的な合金肌焼鋼を含むB非添加鋼と比べて特異な熱処理変形挙動を示すことから、浸炭焼入れ後の部品寸法の高精度化を求める場合には、熱処理変形挙動の変化を考慮する必要がある。なお、ECOMAX®1とECOMAX®2の違いは、Cr量によって焼入性を2パターン設定していることであり、ECOMAX®1の方が焼入性は高くなっている。

### 2) ECOMAX®4

浸炭焼入れによる熱処理変形の軽減を目的に、鋼材成分から開発した従来に無い高強度肌焼鋼が ECOMAX®4 である<sup>8,9)</sup>。開発過程においては、強制的な不均一冷却焼入れ実験とCAE解析によって、化学成分と熱処理変形との関係を明確化し、強度とのバランスも考慮して適正な成分を見出した。但し、肌焼鋼の中では高C成分としているために冷間鍛造前のSA条件によっては、SCM420等の従来鋼よりも冷鍛荷重が高くなる場合がある。

### 3) ECOMAX®5

ECOMAX®5は、シリーズ中では最も新しい開発鋼である。当該鋼は既存 ECOMAX® シリーズの優れた耐ピッチング特性を活かしつつ、部品の高精度化や冷間鍛造性、耐結晶粒粗大化特性など、製造コスト低減とともにCO<sub>2</sub>削減にも寄与する特性をバランス良く併せ持つ高強度鋼である<sup>10)</sup>。

## 3. 部品製造工程の簡略化に寄与する鋼種特性

### 1) ニアネットシェイブ化に寄与する「冷間鍛造性」

材料に熱を加えずに加工する冷間鍛造では、熱間に比べて加工時の硬さが高いため材料の変形能は低い。また近年では、冷間鍛造後の切削や研削を簡略化する高度なニアネットシェイブ化が進んでおり、高強度鋼においても優れた冷間鍛造性が求められる。

図1に ECOMAX® シリーズと比較鋼として試験したSCM420のSA材での冷間変形抵抗を示す。本供試

材における ECOMAX®5 のSA材の硬さは79HRBでSCM420と近く、その冷間変形抵抗もSCM420と同等である。ECOMAX® シリーズ間で比較すると、C量の違いにより、変形抵抗は ECOMAX®1 (図には無いが ECOMAX®2 も同等) で最も低く、ECOMAX®5, ECOMAX®4 の順に高くなる。図2に ECOMAX® シリーズとSCM420のSA材での限界据込率を示す。SCM420では据込率が高くなると割れが発生するが、ECOMAX® シリーズはいずれも限界割れが発生し難く、本試験最大の据込率75%まで加工しても割れが発生しない。

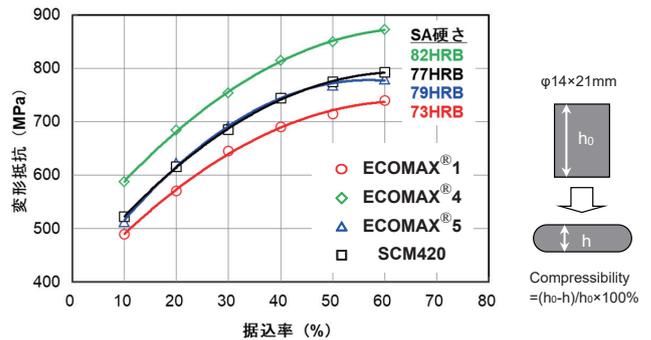


図1 SA材の据込率と冷間変形抵抗との関係 (初期ひずみ速度：0.008/sec)

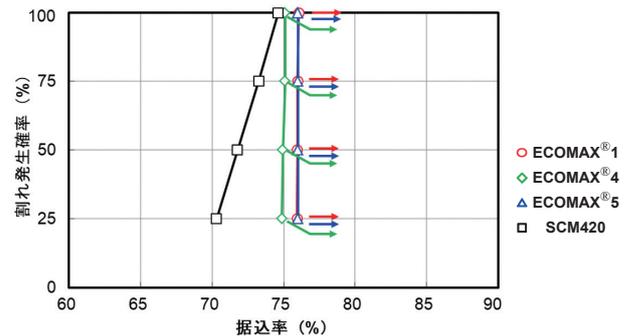


図2 SA材の限界据込率と割れ発生率との関係

ECOMAX® シリーズがSCM420に対して冷間鍛造時の割れを抑制できる理由は、SA後のミクロ組織の均一さにあると考えられる。ECOMAX®5とSCM420のミクロ組織を図3に示す。SCM420のミクロ組織は球状炭化物と層状炭化物が不均一に分散しているのに対し、ECOMAX®5ではCrを増量していることにより、層状炭化物は見られず、球状炭化物のみが比較的均一分散した

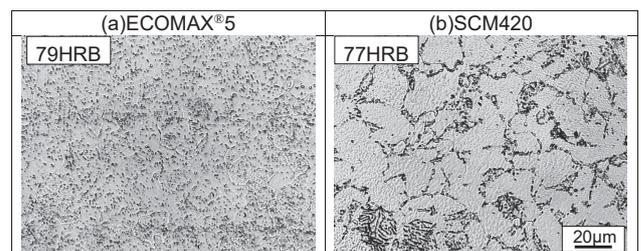


図3 SA材のミクロ組織の光学顕微鏡写真と硬さ (ピクルル腐食)

組織が得られている。これにより、ECOMAX®5では炭化物の分散状態に起因する冷間鍛造時の不均一ひずみが抑制され、割れが発生し難くなると考えられる<sup>5)</sup>。なお、このようなミクロ組織はECOMAX®シリーズ全般で得られる。

## 2) SAの簡略化に寄与する「短時間の熱処理で炭化物の球状化を促進する特性」

冷間鍛造の前に通常実施されるSAに関し、SCM420等の一般的な肌焼鋼の条件（以下、通常SA）では、 $A_1 \sim A_3$ 変態点のフェライト+オーステナイト組織となる領域まで加熱したのち、長時間を要する徐冷を経て、炭化物を球状に析出させることで材料を軟化させる工程を取る。そのため、部品によっては12~24時間程度の長時間処理が必要となる[図4(a)]。一方、ECOMAX®シリーズでは、オーステナイトが生成しない $A_1$ 変態点以下での保持のみで、徐冷を経ずに、例えば従来方法に対して1/2程度の処理時間でも炭化物が球状化して軟化する[図4(b)]。

図5にECOMAX®5に対して上述の短時間条件のSA(以下、短時間SA)を実施したときのミクロ組織と硬さを示す。その組織は、球状化炭化物が均一分散した状態であり、通常SAに近い硬さにまで軟化していた。また、図6に示すように、ECOMAX®5の短時間SA材と通常SA材を冷間で据込みした際の応力-ひずみ曲線はほぼ重なっており、冷間鍛造性は同等といえる。

ECOMAX®シリーズが短時間SAで球状化炭化物が均一分散して軟化する理由は、現在も調査中であるが、汎用JIS肌焼鋼に対してCrを増量したことで、 $A_1$ 変態点以下での炭化物の固溶や析出挙動に影響を及ぼしたためと推定している<sup>6)</sup>。

## 3) 冷間鍛造 - 浸炭プロセスでの焼ならし省略に寄与する「耐結晶粒粗大化特性」

冷間鍛造後に焼ならしを行わずに浸炭する場合、浸炭時の熱処理中にオーステナイト粒の粗大化が生じやすく、こ

れによって混粒状態となった部品は衝撃特性などの部品強度の低下をもたらしたり、熱処理ひずみのバラツキによって部品精度が悪化したりすることが知られている。そこで、この工程を模擬して、ECOMAX®5とSCM420のSA材に70%冷間据込みを行った後、敢えて混粒組織となり易いように、一般的な浸炭温度の中でもやや高めとなる950℃で3hr保持後に焼入れし（浸炭の熱履歴のみを模擬した擬似浸炭処理）、旧オーステナイト結晶粒の観察を行った結果を図7に示す。SCM420は混粒組織であるのに対し、ECOMAX®5は均一な細粒組織であることが分かる<sup>10)</sup>。さらにECOMAX®5は980℃の高温擬似浸炭で同様の実験を実施した場合でも整細粒を維持できることを確認している。

ECOMAX®シリーズがSCM420と比べて耐結晶粒粗大化特性に優れる要因は、主に2点ある。1点目は、Nbを適量添加することで、結晶粒界の移動をピン止めするNb炭窒化物を微細に分散させたことである。2点目は、高Cr成分とすることで、図3に示すようにSA材での層状炭化物の形成を抑制したことである。この組織に起因し

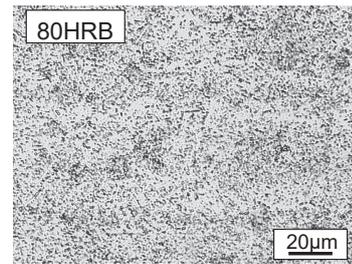


図5 ECOMAX®5短時間SA材のミクロ組織の光学顕微鏡写真と硬さ(ピクラル腐食)

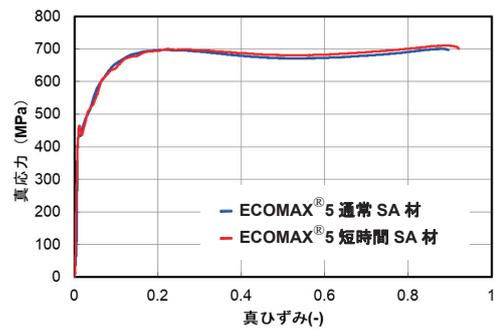


図6 冷間据込みによる真応力-真ひずみ曲線(φ8×12L, ひずみ速度10/sec)

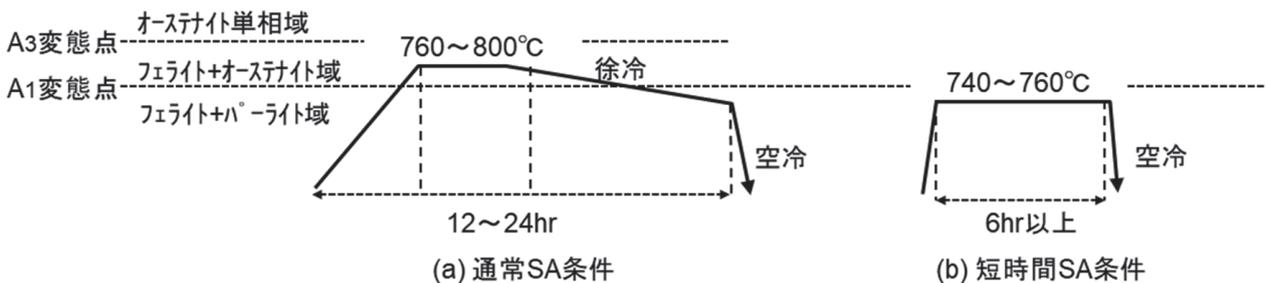


図4 SA熱処理パターン例

て、冷間鍛造時に不均一ひずみが抑えられることで、浸炭昇温中にフェライト再結晶粒が均一となり、その後の逆変態オーステナイトの粒径も均一となることで、混粒が生じにくくなる<sup>5)</sup>。

以上の理由から、ECOMAX®シリーズは何れも優れた耐結晶粒粗大化特性を有するため、冷間鍛造後（浸炭前）の焼ならし省略に加えて、高温 - 迅速浸炭への適用も期待できる。

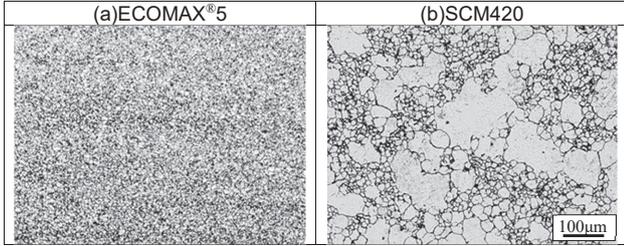


図7 ECOMAX®5とSCM420の旧オーステナイト結晶粒光学顕微鏡写真（飽和ピクリン酸腐食）

### 参考文献

- 1) 藤松威史, 中崎盛彦, 福本信次, 山本厚之: 鉄と鋼, 95 (2009), 161.
- 2) 中名悟, 後藤洋昭, 西川元裕, 常陰典正: 山陽特殊製鋼技報, 19 (2012) 1, 38.
- 3) 山陽特殊製鋼技報, 28 (2021) 1, 62.
- 4) 丸山貴史, 藤松威史, 常陰典正: 山陽特殊製鋼技報, 22 (2015) 1, 21.
- 5) 藤松威史, 橋本和弥, 平岡和彦, 福本信次, 山本厚之: 鉄と鋼, 95 (2009), 169.
- 6) 松尾健太, 常陰典正: 材料とプロセス, 34 (2021) 2, 471.
- 7) 山陽特殊製鋼技報, 22 (2015) 1, 54.
- 8) 山陽特殊製鋼技報, 23 (2016) 1, 74.
- 9) 藤松威史, 丸山貴史, 中崎盛彦: まてりあ, 56 (2017) 2, 79.
- 10) 山陽特殊製鋼技報, 26 (2019) 1, 65.

### 4. おわりに

当社が開発した肌焼鋼 ECOMAX®シリーズは、Ni, Moに頼らない省合金設計でありながら、ギヤ等、駆動系部品に要求される高強度特性と、優れた部品製造性を両立した鋼材である。こうした特長から ECOMAX®シリーズは、ニアネットシェイプによる機械加工の簡略化、冷間鍛造前SAの簡略化や冷間鍛造後の焼ならし省略、高温 - 迅速浸炭への適用といった工程負荷軽減への寄与（図8）を通して、カーボンニュートラルの推進に貢献することが期待できる鋼材と考える。

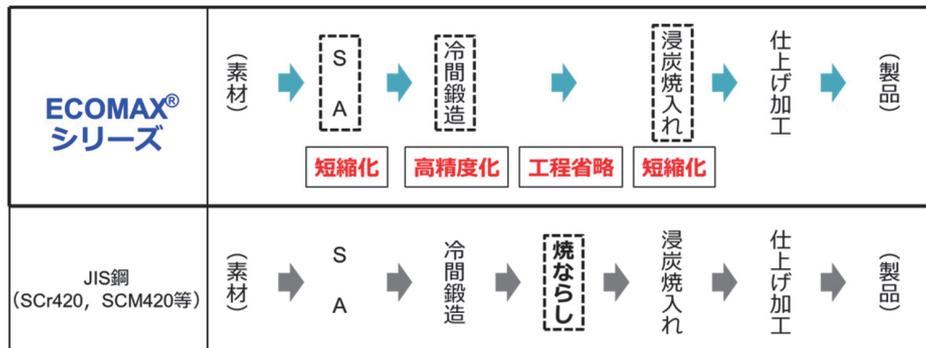


図8 ECOMAX®シリーズによるギヤ・シャフト部品の製造工程の省略・簡略化の例