

省資源型高強度肌焼鋼

ECOMAX（エコマックス）シリーズ

1. はじめに

近年、環境問題への意識が高まっている中、国際的には「2050年のカーボンニュートラル実現」を目指した環境負荷の少ない製品やサービスの開発・提供が求められている。当社製品である特殊鋼の分野においても、特殊鋼製造時のCO₂排出量削減を目指したエコプロセスが求められるだけでなく、鋼材を出荷した後の顧客における製造工程中、さらには、最終製品使用中のCO₂排出量削減に寄与するエコプロダクトも期待されている。

特殊鋼の代表顧客である自動車業界を念頭に、今後も必要とされるパワートレイン部品に着目したCO₂排出量削減への取組みに対するニーズを表1に示す。まず、自動車ニーズの筆頭に挙げられるのが電動化である。電動車(EV)では、ガソリン車やディーゼルエンジン車のようなエンジン音が無いために自動車走行時の静粛化が進み、相対的に部品から発生するメカニカルノイズがクローズアップされる。その一つとして歯車の噛み合わせ音があり、歯車寸法の高精度化によるNV特性（騒音、振動）の改善が求められる。通常、歯車部品に施される浸炭処理は、高温からの焼入れによって変態を伴う硬化処理であるため熱処理歪みが発生しやすく、NV特性を重要視する部品には仕上げ研磨が施されている。もし、熱処理変形を小さく抑える鋼材があれば、仕上げ研磨を省略でき製造コストダウンに繋がる。

一方、従来の内燃機関車（ICE）はもちろん、ハイブリッド車（HEV）、そしてピュア電動車（バッテリーEV、FCV）においても、動力損失低減による燃費・電費改善を目的に潤滑油の低粘度化が指向されている。その結

果、歯車の噛み合い時に金属同士が直接接触して摩耗や焼付きなどが発生し易くなることから、素材には面疲労強度（耐ピッチング強度）の向上が要求される。

従来からの永遠のニーズである部品の小型・軽量化は、当然ながらCO₂排出量削減に繋がる燃費・電費向上に直接影響する。部品を小型化した場合、それに掛かる全体の負荷が同じでも、それをより小さな部品で動力伝達すると考えると、結果的には高出力化と同様に対象部品には高負荷が掛かり、鋼材には高強度化が求められる。歯車を想定すると、適用部品の破損モードに応じて耐ピッチング強度、歯元曲げ疲労強度、衝撃強度の向上が求められ、その中でも耐ピッチング強度については、上述のように潤滑油の低粘度化の進行と相俟って、今後も要求レベルは高まっていくと見られる。

また、部品製造時のCO₂排出量削減も自動車業界にとっての重要課題である。その方策として、従来は熱間鍛造後に機械加工を施していた部品に対して、冷間鍛造を適用することが挙げられる。この場合、工程短縮や材料歩留り向上によるコストダウンも期待できる。最近では、冷間鍛造だけで必要な部品形状や精度を得て、その後の切削や研削を省略する、より高度なニアネットシェイプ化が益々進んでおり、それに対応可能な冷間加工性に優れる鋼材が求められている。ただし、冷間鍛造した鋼材に対して、その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が粗大化し易くなることが知られており¹⁾、これが部品の強度低下や、部品の寸法精度低下に繋がる熱処理ひずみの原因となり得る。結晶粒粗大化を防止するために、例えば、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るが、当然、CO₂排出量削減の観点でも、製造コストダウンの観点でも逆方向の対策であるこ

表1 自動車パワートレイン部品におけるCO₂排出量削減に対するニーズ

自動車のニーズ	パワートレイン部品のニーズ	鋼材（合金肌焼鋼）へのニーズ
電動化	・静粛性重視（高精度化）	・熱処理変形の低減
燃費（ICE、HEV）※、 電費（EV）の向上	・潤滑油の低粘度化による 動力損失低減（貧潤滑環境） ・小型・軽量化	・高強度化 （曲げ疲労、耐ピッチング、衝撃）
部品製造段階でのCO ₂ 排出量削減	・熱鍛の冷鍛化 ・熱処理省略、短縮（高温熱処理） ・工程短縮（矯正工程の簡略化）	・冷間加工性改善 ・結晶粒粗大化防止 ・熱処理変形の低減

※ICE：内燃機関車、HEV：ハイブリッド車

とから、焼ならしを追加しなくても浸炭中にオーステナイト結晶粒が粗大化しない鋼材が望まれる。

ここまで述べてきたように、パワートレイン部品の今後の動向を考慮すると、高強度化と優れた製造性を両立できる表1の鋼材ニーズが益々高まると考えられる。当社では、合金元素の価格の不安定性や将来的な資源枯渇などが大きな問題として取り上げられたことを踏まえて、価格変動が少なく供給不安や調達リスクの少ない合金元素を選択し、成分設計した高強度肌焼鋼ECOMAXシリーズの開発を進めてきた。このシリーズは、NiやMoに頼ることなくSiやMn、Crを最適化することで、高強度と優れた製造性の両立を目指したものである。

本稿では、高強度肌焼鋼ECOMAXシリーズの各鋼種の狙いと、カーボンニュートラル実現に向けて有効と見られる代表特性とを紹介する。

2. ECOMAX鋼シリーズのコンセプトと特徴

現在、当社ではECOMAXシリーズとしてECOMAX1, 2, 4, 5の4鋼種をラインナップしている。化学組成のシリーズ共通の基本コンセプトは、JIS規格鋼であるSCM420に比べて、高Si-低Mn-高Cr-Mo非添加-少量Nb添加である²⁾。Siの増量は焼戻軟化抵抗の上昇と、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、Mnの低減は耐結晶粒粗大化特性の向上³⁾や加工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を向上させることに加え、冷間鍛造前の球状化焼まし組織の均質化により冷間加工性を向上させるためである。Nbの少量添加はNb炭窒化物を鋼中に形成させて結晶粒度特性を向上させるためである。

ECOMAXシリーズの各鋼種の特徴を以下に示す。

1) ECOMAX1、ECOMAX2

ECOMAX1とECOMAX2との違いは、Cr量で焼入性を2パターンに変化させていることである。両鋼種ともにJIS SCM420に比べて低CかつB添加していることが特徴で（ECOMAX4, 5はB非添加）、浸炭部品の中でも特に強靱性を重視する場合に適している^{2,4)}。また、比較の変形抵抗が低く冷間加工性にも優れる。その一方で、これら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が明らかとなってきた。したがって、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。

2) ECOMAX4

浸炭焼入れによる熱処理変形の軽減を目的に、強制的な不均一冷却焼入実験とCAE解析による裏付け⁵⁾との組合せによって鋼材成分から開発した従来に無い高強度肌焼鋼が

ECOMAX4である^{6,7)}。ただし、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軟化焼まし条件によっては、SCM420など従来鋼よりも硬さが高くなる場合がある。

3) ECOMAX5

シリーズ中では新規開発鋼であるECOMAX5は⁸⁾、既存ECOMAXシリーズ鋼の優れた耐ピッチング特性を活かしながら、今後重要視されると考えられる部品の高精度化や冷鍛性、耐結晶粒度粗大化特性など、製造コスト低減とともにCO₂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。

3. ECOMAXシリーズの代表特性

3.1 焼入性

各鋼種のジョミニー焼入性試験結果を図1に示す。ECOMAXシリーズの焼入性は、SCr420HのJIS規格ハンドの上限付近、SCM420Hの中央付近に位置することから、これらのJIS鋼を使用している部品サイズに概ね適用可能である。

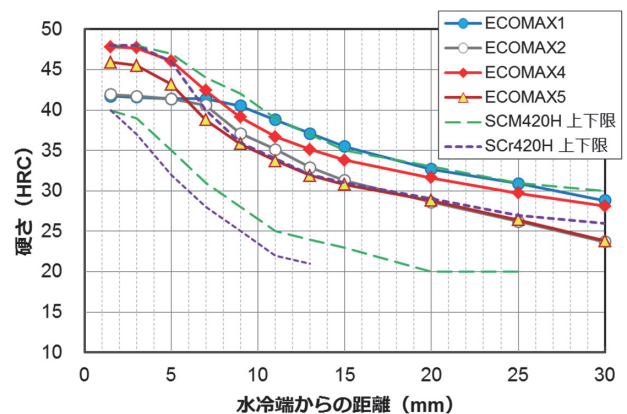


図1 ECOMAXシリーズのジョミニー焼入性試験結果

3.2 耐ピッチング特性

前述のように、歯車ユニットにおいて使用する潤滑油は、燃費向上を図るために低粘度指向にある。それに伴って歯面の耐ピッチング特性向上が必要となっており、ECOMAXシリーズ開発における強度の中でも特に重要視している特性である。

ローラーピッチング寿命試験によって得られたECOMAX1のピッチング寿命を図2に示す。歯車の研磨仕上げを想定した本試験において、ECOMAX1はSCM420に対して2倍程度に向上している。耐ピッチング特性向上の理由として、図3に示すようにECOMAX1はSi、Cr増量の効果によって焼戻し軟化抵抗がSCM420に比べて上昇しており、試験中に温度上昇しても軟化し難かったことが挙げられる。この効果はECOMAXシリーズ共通であり、ECOMAXの他の鋼種においても同様の特性を示す。

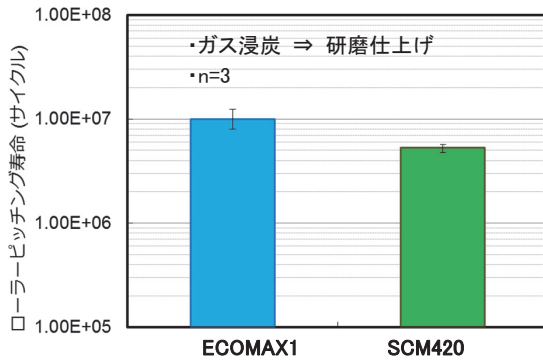


図2 ECOMAX1とSCM420のローラーピッチング試験結果 (浸炭後研磨仕上げ材)

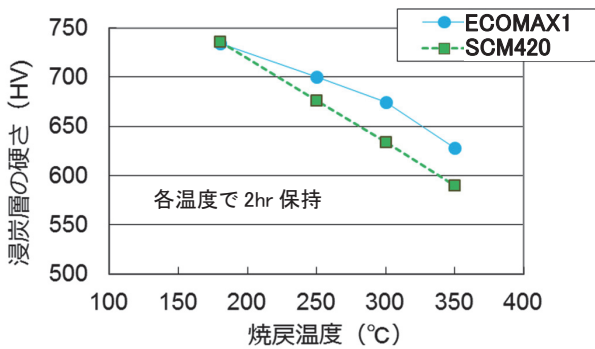
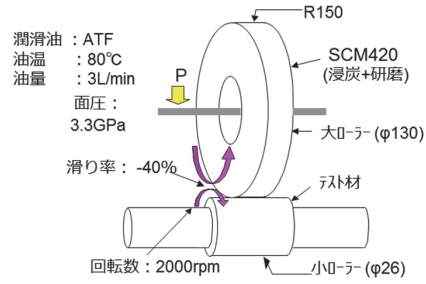


図3 ECOMAX1とSCM420の焼戻し後の浸炭層硬さ

なお、歯車製造時において、ガス浸炭後に研磨仕上げをしない工程を想定したローラーピッチング試験では、ECOMAXシリーズはSCM420に対して4~5倍の寿命が得られている⁸⁾。この理由は、ガス浸炭後の最表面に母相組織に比べて軟質な浸炭異常層（粒界酸化と、合金元素の欠乏により形成した不完全焼入組織で構成）が浅く、且つ表層に均一に存在するためと考えられ、この浸炭異常層の特徴によって、粒界酸化を起点とするき裂を短く、あるいはき裂生成自体の抑制をもたらすと推定している⁹⁾。

3.3 低サイクル疲労特性と耐衝撃特性

自動車の電動化が進んでも必要な部品として、例えばデファレンシャルがあり、その歯車は歯元曲げ疲労や耐衝撃特性が重要視される。特に、急発進による高負荷が繰返し入力されることを想定すると、低サイクル域（ $\sim 10^4$ サイクル）での疲労強度向上が必要となる。図4にECOMAX5とECOMAX1、およびSCM420の低サイクル疲労試験結果を示す⁸⁾。ECOMAX5の低サイクル疲労特性はSCM420よりも優れており、さらにBを添加したECOMAX1と比べても同等以上であることが特徴である。

続いて、図5に衝撃試験結果を示す⁸⁾。ECOMAX5の耐衝撃特性は、低サイクル疲労特性と同様に、SCM420よりも優れ、ECOMAX1と比べても同等以上である。

一般的に、低サイクル疲労特性や耐衝撃特性を向上させる方策として、B添加による粒界強化、すなわち粒界破面率低減が有効であることが知られている^{10,11)}。当社では、ECOMAX5においてもSCM420と比較して粒界破面が抑制されていることを確認しており⁸⁾、ECOMAX5は高Si-高Cr等その成分バランスによりB非添加であるにもかかわらず優れた靱性を示すと考えられる。

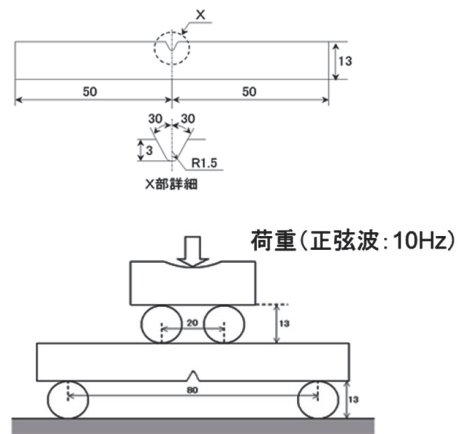
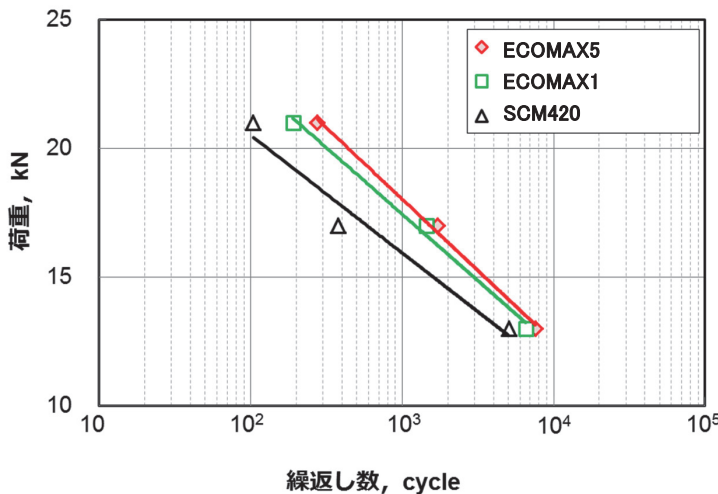


図4 ECOMAX5, ECOMAX1およびSCM420の低サイクル疲労試験結果と試験の概略図 (ガス浸炭材)

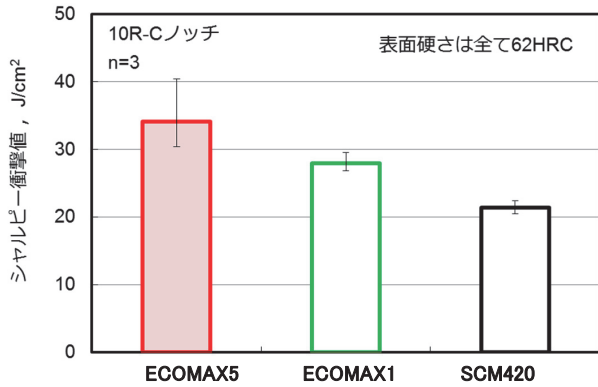


図5 ECOMAX5, ECOMAX1およびSCM420のシャルピー試験結果 (ガス浸炭材)

3.4 冷間加工性

高強度鋼においても、ニアネットシェイプ化を進めるためには優れた冷間加工性が求められる。図6に、ECOMAX5の球状化焼なまし材での冷間変形特性を示す⁸⁾。ECOMAX5の球状化焼なまし後の硬さは79HRBで、比較材であるSCM420の77HRBと同等であり、その冷間変形抵抗もSCM420と同等である。さらに、図7にECOMAX5の球状化焼なまし材での限界据込み率を示す。ECOMAX5はSCM420と比較して据込みによる割れが発生し難く、本試験最大の高さ比で75%まで据込んで割れが発生しなかった。

ECOMAX5は高強度鋼であるにもかかわらずSCM420と比較して冷間加工時の割れを抑制できる理由は、球状化

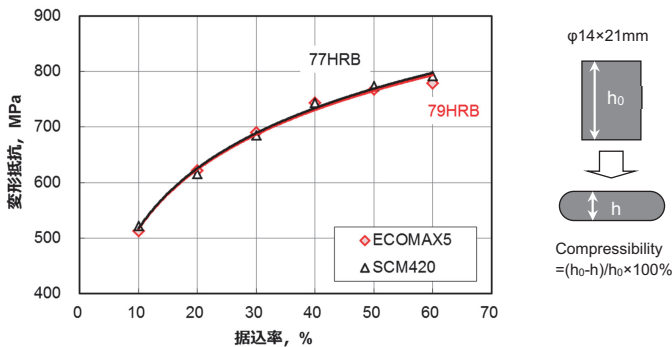


図6 ECOMAX5とSCM420の冷間変形抵抗試験結果 (球状化焼なまし材)

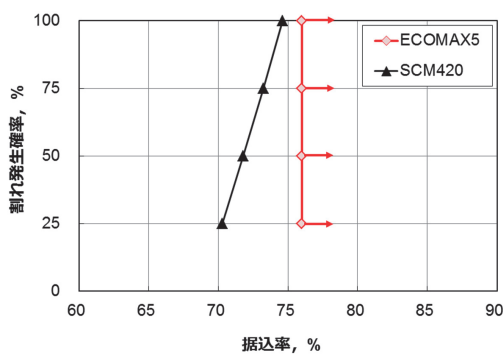


図7 ECOMAX5とSCM420の限界据込試験結果 (球状化焼なまし材)

焼なまし後のマイクロ組織の違いと考えられる。このマイクロ組織光学顕微鏡写真を図8に示すように⁸⁾、SCM420では不均一な球状炭化物和ラメラ炭化物が分散しているのに対し、ECOMAX5ではCrを増量していることにより球状炭化物が均一に分散した組織が得られる。そのために、冷間加工時に不均一変形が抑制されて割れが発生し難くなると考えられる¹²⁾。

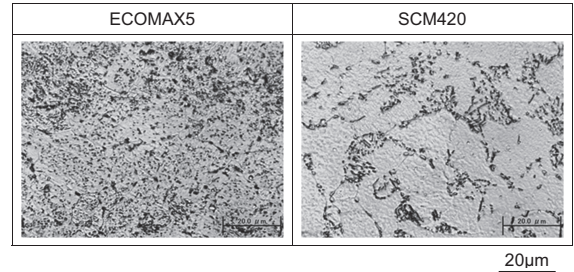


図8 ECOMAX5とSCM420の球状化焼なまし後のマイクロ組織光学顕微鏡写真

なお、ECOMAXシリーズ間の比較では、球状化焼なまし後のマイクロ組織はいずれの鋼種も均一であり限界割れ特性が優れている。一方、冷間変形抵抗については、焼なまし後の硬さに依存するためにECOMAX1, 2が低C組成としていることからSCM420よりも有利であり、逆にECOMAX4は高C組成としているために不利であり、球状化焼なまし条件によっては冷間鍛造時の荷重が高くなる場合がある。

3.5 耐結晶粒粗大化特性

浸炭時の熱処理中にオーステナイト粒の粗大化が生じると、耐衝撃特性など部品強度の低下をもたらしたり、熱処理ひずみの増加によって部品精度の悪化を引き起こしたりする可能性がある。特に冷間鍛造後に、焼ならしを行わずに、そのまま浸炭する場合には結晶粒粗大化が生じ易い。そこで、この製造工程を模擬して、ECOMAX5とSCM420の球状化焼なまし材に70%冷間据え込みを行った後、一般的な浸炭温度以上の950℃で3 h保持後に焼入れし (浸炭の熱履歴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⁸⁾。その光学顕微鏡写真を図9に示すように、SCM420は粗大粒と微細粒の両方が認められる“混粒”であるのに対して、ECOMAX5は“整細粒”であった。さらに、図9とは異なる温度での疑似浸炭処理も実施しており、SCM420では低温の900℃保持で混粒が発生したのに対して、ECOMAX5は高温の980℃でも整粒を維持することを見出している。

ECOMAX5がSCM420に比べて優れた耐結晶粒粗大化特性を有する理由として、主として次の2点が挙げられる。1点目はNbを添加していることで、結晶粒界の移動をピン止めする微細析出物 (Nb炭窒化物) を適切に分散させたことである。もう1点は、図8に示したとおり、

SCM420に比べて高Crとすることで球状化焼なまし後のミクロ組織の均質化が図られていることである。JIS合金肌焼鋼に含有される程度のCr量では、球状化焼なましを行っても、フェライトと球状炭化物が分散した組織に加えて不可避にラメラ状炭化物が生成する。このラメラ状炭化物は、結晶粒粗大化を引き起こす原因となる¹²⁾。

ECOMAXシリーズはいずれの鋼種も優れた耐結晶粒粗大化特性を示すため、冷間鍛造前後の焼ならしの省略ならびに高温浸炭の適用、すなわち製造工程中のCO₂削減が期待できる。

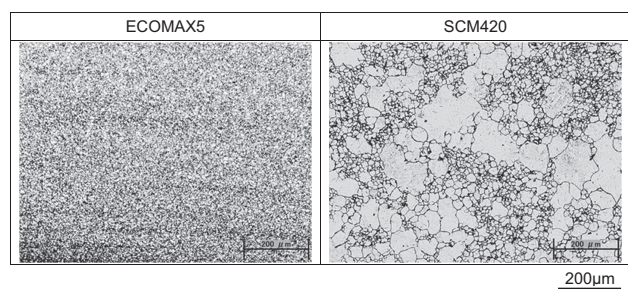


図9 ECOMAX5とSCM420の旧オーステナイト結晶粒光学顕微鏡写真 (70%冷間据込み ⇒ 950℃疑似浸炭焼入れ)

3.6 熱処理変形特性

焼入れ時の熱処理変形は主に部品の不均一冷却が原因で発生することから、冷却が不均一であっても熱処理変形が小さい鋼材が望まれる。ECOMAX4の熱処理変形抑制に対する主たる考え方として、冷却過程において部品内の温度差がなるべく小さくなる温度域でマルテンサイト変態が起こるように成分設計されている^{5,6)}。

焼入れ時に不均一冷却を強制的に引き起こすようなキー溝付き試験片を用いて、浸炭模擬熱処理 (930℃保持⇒850℃保持⇒油焼入れ) を行い、焼入前後の曲がり (振れ量) を比較した結果を図10に示す⁶⁾。ECOMAX4はSCM420と比較して曲がりが小さいことが確認でき、特にシャフト部品において精度向上や曲げ矯正などの仕上

げ工程の負荷軽減が期待できる。また、本鋼種を冷鍛リングギヤに適用し、真円度が改善された報告もある¹³⁾。

このような鋼材成分による積極的な熱処理変形特性の改善コンセプトを持つ肌焼鋼は過去に例が見当たらず、ECOMAXシリーズの中でもECOMAX4のみである。

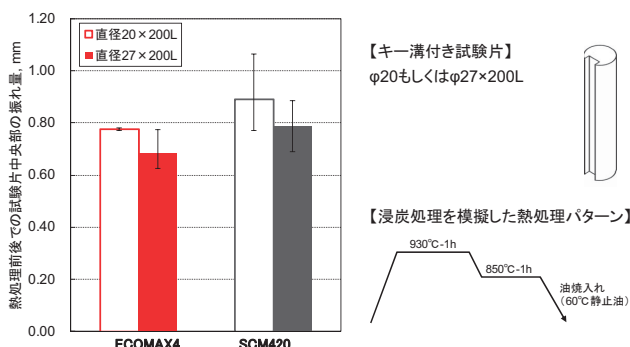


図10 ECOMAX4とSCM420の熱処理前後での振れ量測定結果

4. おわりに

ECOMAXシリーズは、カーボンニュートラルを目指したこれからのニーズに合致した高強度肌焼鋼であり、耐ピッチング特性や低サイクル疲労特性に優れるとともに、部品製造性においても良好な耐結晶粒粗大化特性を兼ね備える。また、表2に示すようにシリーズ内の適切なコンセプトのECOMAXを選択することで、さらに優れた耐衝撃特性、冷間加工性、あるいは熱処理変形特性を付与することが可能となり、これらの特性によって、部品の製造工程省略・簡略化によるトータルコストダウンや部品形状の高精度化による静粛性の向上、部品高強度化による小型・軽量化をもたらすことが期待される。

表2 ECOMAXシリーズの特徴と特性比較

	成分の特徴	コンセプト、特長	ターゲット、アプリケーション
シリーズ共通	SCM420と比較して、高 Si、低 Mn、高 Cr、Nb 添加 (Ni、Mo 非添加)	耐ピッチング特性、低サイクル疲労強度、耐結晶粒粗大化特性に優れる 球状化焼なまし組織均一化による冷間加工性 (限界割れ性) に優れる	合金肌焼鋼が使用される、減速機ギヤ、シャフト類 全般 (トランスミッションギヤ、デフギヤ、CVJ、精機部品 等)
ECOMAX1	低 C、B 添加	耐衝撃特性、冷間加工性 (変形抵抗) に優れる	冷鍛用途部品
ECOMAX2	同上 (低 Jominy)	同上	冷鍛用途部品
ECOMAX4	高 C (B 非添加)	熱処理変形特性に優れる	高精度ギヤ、シャフト
ECOMAX5	(B 非添加)	トータルバランス (特に、耐衝撃特性、耐結晶粒度特性) に優れる	熱鍛 & 冷鍛用途部品

参考文献

- 1) 藤松威史, 橋本和弥 : 山陽特製鋼技報, 17(2010)1, 48.
- 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) 藤松威史, 橋本和弥, 平岡和彦, 福本信次, 山本厚之 : 鉄と鋼, 93(2007)10, 649.
- 4) 山陽特殊製鋼技報, 22(2015)1, 54.
- 5) 藤松威史, 中崎盛彦 : 山陽特殊製鋼技報, 21(2014)1, 28.
- 6) 山陽特殊製鋼技報, 23(2016)1, 74.
- 7) 藤松威史, 丸山貴史, 中崎盛彦 : まてりあ, 56(2017)2, 79.
- 8) 山陽特殊製鋼技報, 26(2019)1, 65.
- 9) 丸山貴史, 藤松威史, 常陰典正 : 山陽特殊製鋼技報, 22(2015)1, 21.
- 10) 中村貞行, 秦野敦臣 : 電気製鋼, 67(1996)1, 4.
- 11) 田中高志 : 山陽特殊製鋼技報, 10(2003)1, 53.
- 12) 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)2, 169.
- 13) Katsuhiro Ito, Katsufumi Hida, Yasushi Haruna and Norimasa Tsunekage : New Developments in Forging Technology 2015, Institute for Metal Forming Technology, 59.