

第40回 日本金属学会技術開発賞受賞 低熱処理変形高強度肌焼鋼ECOMAX4の開発

The 40th Technical Development Award (The Japan Institute of Metals and Materials)
Development of high strength carburizing steel, ECOMAX4, with improved heat treatment
distortion and dimensional change

藤松 威史*¹ 丸山 貴史*² 中崎 盛彦*³

Takeshi FUJIMATSU, Takashi MARUYAMA and Morihiko NAKASAKI

1. はじめに

当社は、公益社団法人日本金属学会より、「低熱処理変形高強度肌焼鋼ECOMAX4の開発」に対して、第40回 技術開発賞を受賞した。同賞は、創意あふれる開発研究を推奨する目的で、金属工学ならびにこれに関連する新技術・新製品などの独創的な技術開発に携わった技術者に対し、授与される賞である。以下では、その受賞技術について紹介する。



日本金属学会技術開発賞牌

2. 開発の背景

ECOMAX4は自動車、産業機械におけるギヤ、シャフト等に代表される駆動系部品への適用を想定して開発した浸炭用鋼である。その開発にあたっては、駆動系部品におけるトータルコストダウンや燃費向上のための小型・軽量化のニーズを考慮し、高強度化、部品製造過程における熱処理・加工コストの低減や環境負荷物質の排出抑制、ならびに駆動ノイズ低減による静粛性・快適性向上に対する具体

的寄与を念頭に置いている。駆動系部品で高強度が必要とされる場合、JIS規格のクロムモリブデン鋼やニッケルクロムモリブデン鋼、もしくはさらにニッケルやモリブデンを増量添加した開発鋼が使われるが、希少な合金元素の添加は鋼材コストを上昇させ、また加工性を低下させる懸念があるため、ニッケル・モリブデンフリーの高強度鋼が望まれている。部品加工方法の観点では、熱間鍛造工法に比べてCO₂排出量削減ならびにニヤネットシェイプ化による歩留まり向上に有利な冷間鍛造工法への適合が求められる。ただし、汎用鋼を冷間鍛造後に焼ならしを施さずに浸炭するとオーステナイトの異常粒成長が起こりやすいという課題があり、それを防止できる鋼が必要となる。また、浸炭部品を焼入れする際には、熱処理変形が不可避免的に生じる。この変形度合いが大きければ、部品の矯正や形状修正に時間を要する、ひいては不良率が増大するといった問題が発生し、例えば変形が小さくてもギヤ噛み合い時のノイズの増大につながるため、熱処理変形の抑制は重要な課題である。このような背景のもと、当社では、部品の製造過程における工程省略・簡略化、部品の高精度化、部品の高強度化に寄与する優れた熱処理変形特性、耐結晶粒粗大化特性、耐ピッチング性を有するニッケル・モリブデンフリーのECOMAX4の開発に成功し、商品化している。

3. ECOMAX4の代表的な鋼種特性

ECOMAX4は、JIS規格にラインナップされる汎用鋼SCM420に比べて高C-高Si-低Mn-高Cr組成に成分設計され、かつ少量のNbを含有する。これにより、ECOMAX4の特長である優れた熱処理変形特性、耐結晶粒粗大化特性、耐ピッチング性が発揮される。以下では開発にあたり、これらの代表的な鋼種特性の向上のために行った方策を概説し、その特性について紹介する。

*1 研究・開発センター 基盤研究室 材料研究グループ長,博士 (工学)
*2 軸受営業部 軸受CS室
*3 研究・開発センター 新商品・技術開発室長,博士 (工学)

3.1 熱処理変形特性

部品の浸炭焼入れにおいて、高温に加熱された部品が冷媒（油や水）中に投入されて急速に冷却される過程で、部品各部位の冷却の速さの違いやそれによる相変態のタイミングのずれ等に起因して熱処理変形（形状のゆがみや曲り）が起こる。後工程の部品の矯正・修正加工の軽減や、部品精度を通じた自動車等の静粛性・快適性の向上のため、熱処理変形は極力小さいことが望まれる。熱処理変形改善のためには、部品をできる限り均一に冷却して変態開始時期のずれを少なくする必要があり、ECOMAX4は鋼の成分設計を通じてその実現を図っている。部品の油焼入れ時の冷却過程に注目すると、まず高温の部品周辺に蒸気の膜が形成されて油と部品とが接触できずに緩冷却となる段階（蒸気膜段階）を経て、部品周辺の油が沸騰して部品が急冷される段階（沸騰段階）となり、続いて沸騰が静まると油の対流のみが起こり緩冷却となる段階（対流段階）となる。ECOMAX4は、部品が緩冷却となる対流段階付近で相変態させることで焼入れ中の部品内の相変態開始時期の差を小さくすることを狙い、汎用鋼に比べてCを増量した成分設計としている。その有効性は、既存の研究¹⁾を参考にして考案した図1²⁾のキー溝付き試験片を用いて確認を行った。この試験片は直径φ20mmもしくはφ27mmで長さ200mmのシャフト状部品を想定した形状であり、一方の側面にキー溝を設けることで焼入れ時に強制的に不均一冷却状態をつくり、焼き曲りを生じやすくしている。図2 (a)^{2) 3)}に、浸炭を想定した加熱（一段目は930℃、続く2段目は850℃）を加えたのち、静止油浴に垂直に焼入れしたキー溝付き試験片の振れ量（振れ量が大きいほど焼き曲り大）を示す。ECOMAX4は汎用のSCM420に対して振れ量が小さく、熱処理変形が抑制されている。また、熱処理寸法変化（長さ変化）の度合いは、鋼材のジョミニー焼入れ性と関連性が強く^{2) 4)}、その知見をもとに適正な焼入れ性になるように成分設計したECOMAX4は、図2 (b)^{2) 3)}の通り、SCM420に比べて長さ変化が小さいという特長を示す。なお、ECOMAX4はSCM420Hが使用される部品サイズに概ね適用可能な焼入れ性を有している。以上のように、

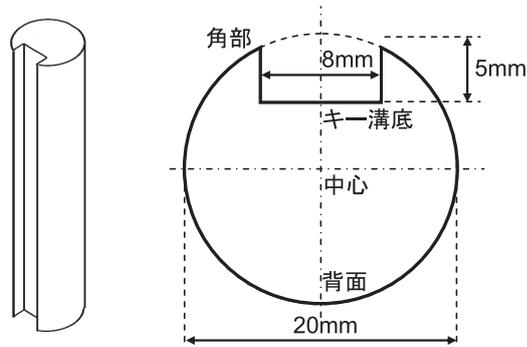


図1 キー溝付き試験片（直径20mm、長さ200mm）の形状、寸法²⁾

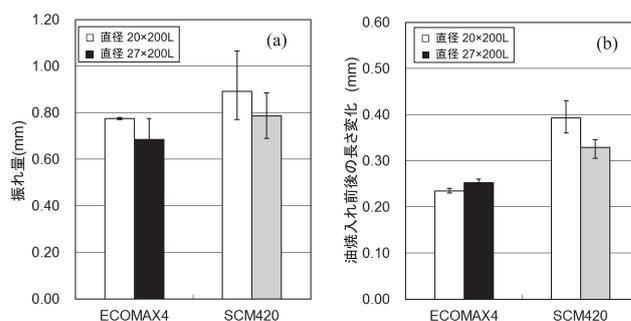


図2 キー溝付き試験片の静止油焼入れにおける(a)振れ量、(b)長さ変化^{2) 3)}
 ※直径27mm試験片のキー溝形状は直径20mm試験片と相似形状とした

ECOMAX4を適用することによって熱処理にともなう変形や寸法変化が軽減され、部品の矯正・修正の負荷軽減や、部品精度向上が大いに期待できる。

3.2 耐結晶粒粗大化特性

浸炭処理における結晶粒の粗大化回避は、部品に本来期待される高い機能を発揮させるうえで実用上重要な課題となっている。冷間鍛造で製造された駆動系部品を浸炭処理する場合、加工時に部品内に導入されたせん断ひずみを残したままで加熱が行われる。このひずみの影響により加熱過程でフェライトの再結晶が微細に形成され、それを經由することでオーステナイト粒が微細化するために浸炭中の結晶粒粗大化が起こりやすくなる⁵⁾。特に、汎用鋼の成分系では、冷間鍛造に先立つ鋼の軟化焼なまし中にラメラ状炭化物が不可避免的に生成して点在し、これが冷間鍛造後のフェライト再結晶粒の微細化をさらに促進し、結晶粒を粗大化しやすくする⁶⁾。そのため、汎用鋼においては冷間鍛造後に加工時のひずみの影響を無くし、組織を均質化する目的で焼ならしを行う必要があった。ECOMAX4では、耐結晶粒粗大化特性を大幅に向上させるために、微量Nb添加により結晶粒界をピン止めする微細析出物（炭・窒化物）を汎用鋼に比べて増量分散させるとともに、成分設計を通じて焼なまし組織の均質化を図っている。ECOMAX4は汎用鋼に対して高Cr組成であり、この成分工夫により冷間鍛造前の軟化焼なましによってラメラ状炭化物が極めて少なく、炭化物が球状分散した均質なミクロ組織が得られる（図3²⁾）。これにより耐結晶粒粗大化特性が一段と向上し、なおかつ冷間加工性（加工による割れ難さ）も良好になる。図4²⁾に、冷間鍛造-浸炭のプロセスの模擬として、70%冷間据込み後に各温度で保持した場合の結晶粒粗大化状況を示した。ECOMAX4は、一般的な浸炭温度以上となる950℃の加熱でも結晶粒が粗大化しておらず、汎用鋼に比べて耐結晶粒粗大化特性に優れている。したがって、汎用鋼において必要とされる冷間鍛造後の焼ならしの省略が可能となるため、大幅な部品製造コストダウンが実現で

きる可能性がある。また、冷間鍛造用途以外に、熱間鍛造や切削用途の部品において汎用鋼で結晶粒粗大化が発生するような場合にも、ECOMAX4の適用によって結晶粒の粗大化抑制が期待できる。

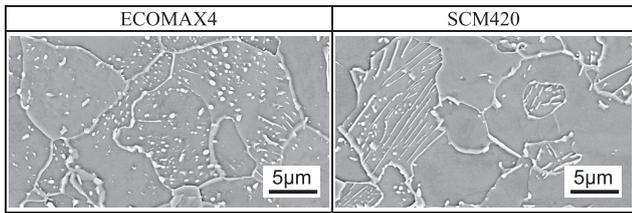


図3 軟化焼なまし後のSEM観察結果 (5%ナイトール腐食) ²⁾

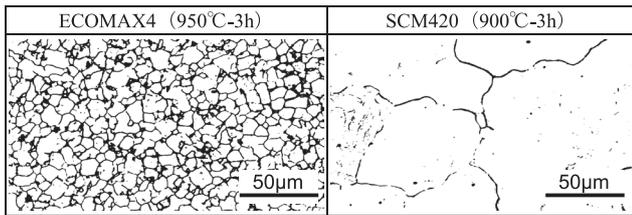


図4 70%冷間据込み材の加熱後の結晶粒粗大化状況²⁾

3.3 耐ピッチング性

ギヤ部品は、滑りを伴いながら繰り返し接触を受けることで歯面上にピッチングと呼ばれる表面起点の疲労損傷(はく離)が起こる。この歯面に対する負荷は、部品の小型・軽量化に伴って、さらに過酷化すると予想される。そこで、ECOMAX4は耐ピッチング性の改善に重点を置いた開発を行い、特にガス浸炭肌状態で耐ピッチング性に優れた合金成分設計を追求した。これは、国内でガス浸炭焼入れが多く採用され、浸炭後は歯面研削が施されずに浸炭肌に近い状態で使用される場合が多いことを考慮している。ECOMAX4は、汎用のSCM420鋼に対して高Si-高Cr組成に設計し、焼入れ性のバランスを考慮してMn量は低く抑え、なおかつMoは積極添加していない。高Si化することで、ガス浸炭中に形成される粒界酸化(表面の欠陥として作用)の深さが汎用鋼に比べて浅くなる(図5²⁾)⁷⁾。また、高Cr化によって浸炭中に表面近傍で鋼の内部酸化が促進され、Cr含有量の高い酸化物が多数形成される。これに伴って母相の合金元素が消費されることで焼入れ性が低下し、焼入れ後には不完全焼入れによる軟質層が数µm程度の厚みで形成される(図5²⁾)⁷⁾。対するSCM420の場合は、酸化反応に関与しにくいMoが焼入れ性を補うために軟質層は形成され難い。ECOMAX4における浸炭層表面の軟質層は、歯面同士の接触で摩滅しやすく、その磨滅過程で粒界酸化を同時に除去されやすくする有益な作用をもたらす⁷⁾。これにより、部品の表面損傷が遅延して耐ピッチング性が向上する。またギヤ歯面同士の接触による不可避な温度上昇に対しても、従来方策である軟化抵抗性を高める合金設計であるため、両者の複合的な効果から従来材を大きく上回る耐

ピッチング性を示す。一例として、図6³⁾に示すように、ガス浸炭肌状態で評価においてECOMAX4は汎用高強度鋼比で5倍以上となる優れたピッチング寿命を実現している。

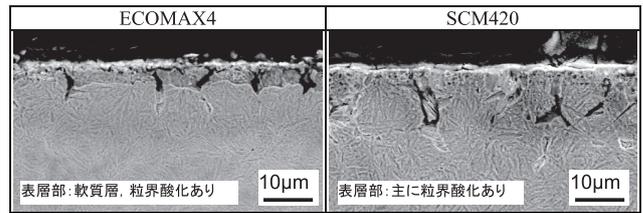


図5 ガス浸炭後の断面SEM観察結果 (0.5%ナイトール腐食) ²⁾

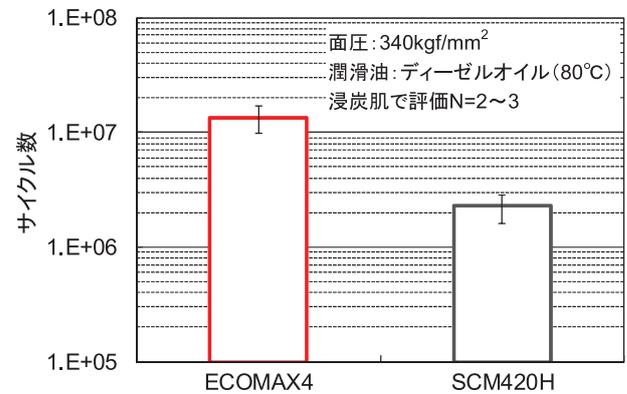
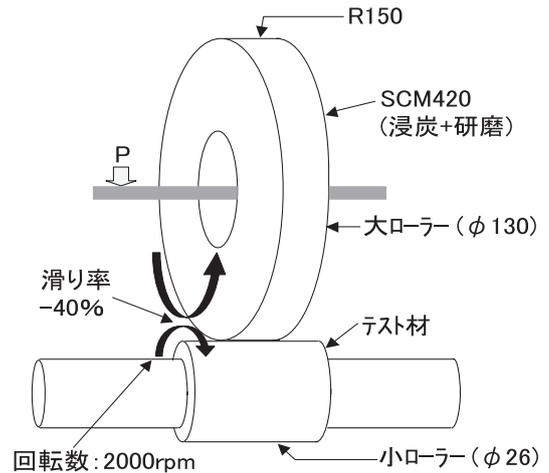


図6 ローラーピッチング試験寿命³⁾

4. まとめ

ニッケル・モリブデンフリーの開発鋼ECOMAX4は、浸炭ギヤ・シャフト等の駆動系部品への適用を想定して産み出された鋼であり、優れた熱処理変形特性、耐結晶粒粗大化特性、耐ピッチング性を兼ね備える。ECOMAX4の適用により、部品製造過程における工程省略・簡略化によるトータルコストダウンの実現、部品形状の高精度化による静粛性・快適性の向上への貢献、および部品の高強度化による小型・軽量化への寄与が期待される。既に一部の需要家においてECOMAX4の適用部品の量産化が開始しており、今後もさらなる需要の拡大が見込まれる。

参考文献

- 1) 有本享三, 奈良崎道治:熱処理, 42 (2002), 346-352.
- 2) 藤松威史, 丸山貴史、中崎盛彦:まてりあ, 56, 2 (2017), 79-81.
- 3) 山陽特殊製鋼技報, 23 (2016), 74-78.
- 4) 藤松威史, 中崎盛彦:山陽特殊製鋼技報, 21 (2014), 28-37.
- 5) 藤松威史, 中崎盛彦, 福本信次, 山本厚之:鉄と鋼, 95 (2009), 161-168.
- 6) 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), 169-175.
- 7) 丸山貴史, 藤松威史, 常陰典正:山陽特殊製鋼技報, 22 (2015), 21-28.