

低熱処理変形高強度はだ焼用鋼 ECOMAX4 (エコマックス)

“ECOMAX4” improvement for heat treatment distortion and high strength carburizing steel

1. はじめに

昨今、CO₂排出量削減に繋がる燃費向上を目的として自動車部品の小型・軽量化の市場ニーズが高まっており、駆動系部品の主要素材である肌焼鋼にも高強度化が強く求められている。高強度の実現によってギヤ・シャフトのダウンサイジングによる軽量化だけでなく、動力伝達装置の高出力化による負荷増に対して形状変更を行わなくても対応が可能が期待される。

従来、高強度が要求されるギヤ・シャフトには、部品の大きさ（鋼材の焼入性と関係）や要求される強度レベルを考慮してJIS鋼のSCMやSNM、更にはNi、Moを増量した開発鋼が使用されてきた。しかし、NiやMoを添加した鋼種を使用した場合には加工性の低下や鋼材コストの上昇を招いてしまい、高強度化とトレードオフの関係になってしまうことが問題であった。近年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問題になっており、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て高強度化を図ることが望ましい。またギヤ・シャフトの部品精度向上や最終加工時の負荷低減、特にギヤの場合では噛合い時のノイズ低減のため浸炭焼入れ時の熱処理変形低減も望まれている。更には部品製造時の熱処理工程の省略・簡略化によってCO₂排出量削減や製造コスト低減も期待されている。

このような背景の中、当社ではNiやMoに頼ることなくSiやMn、Crを主体とする成分設計によって、高強度で且つ結晶粒度特性や加工性にも優れたECOMAXシリーズを開発してきた。本報では更に低熱処理変形に重点を置いた高強度はだ焼鋼ECOMAX4を開発したので以下にその諸特性を紹介する。

2. ECOMAX4の特徴

2.1. 化学成分ならびに焼入性

ECOMAX4の化学成分はSCM420Hに比べて熱処理変形特性改善のためC増量、耐ピッチング特性向上のためSiを増量¹⁻⁸⁾、Mnは結晶粒度特性の向上や加工性確保の観点から低減⁹⁾、Siと同じく軟化抵抗向上や焼入性確保のためCrを増量している。また以前よりラインアップしている省合金型高強度はだ焼鋼ECOMAX (エコマックス)¹⁰⁾ の考え方

を踏襲してNiやMoを添加していない。またNb炭窒化物のピンニング粒子形成による結晶粒度特性改善のためNbを添加している。

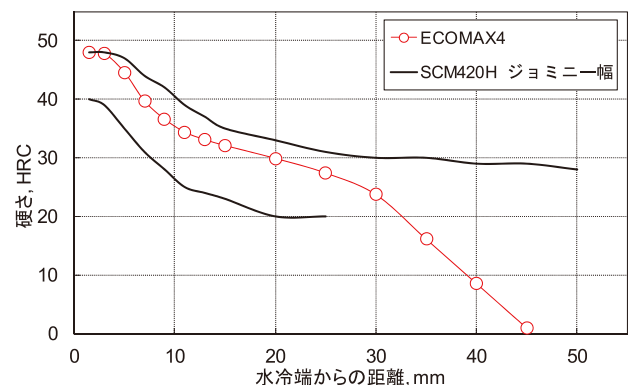
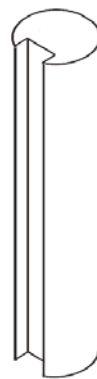


図1 ECOMAX4のジョミニー曲線

図1にECOMAX4の狙い成分でのジョミニー曲線ならびにSCM420Hのジョミニー幅を示す。ECOMAX4の曲線は水冷端からの距離30mm付近までSCM420Hのジョミニー幅内に位置することから、SCM420Hを使用していた部品サイズに概ね適用可能である。

2.2. 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。一般的な油焼入れでは、不可避免的な不均一冷却によって部品内に温度差を生じて冷却が進行するが、ECOMAX4の熱処理変形抑制に対する主たる考え



φ20もしくはφ27×200L

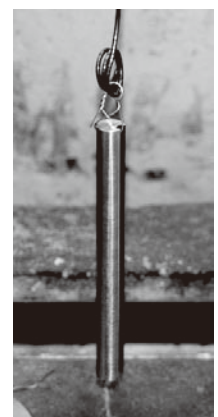


図2 キー溝付試験片の形状ならびに焼入れ時の試験片の固定状況

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¹¹⁾。

焼入れ時に不均一冷却を強制的に引き起こすよう図2に示すキー溝付試験片を用いて、図3に示すパターンで大気雰囲気にて浸炭模擬熱処理を行い、焼入れ前後の曲り（振れ量）や寸法変化（長さ変化量）を比較した結果を図4に示す。ECOMAX4はSCM420Hに比べて曲りが小さいだけでなく、寸法変化も小さいことから部品の精度向上や仕上げ工程の負荷低減、更には浸炭焼入れ後のひずみ矯正の省略も期待できる。

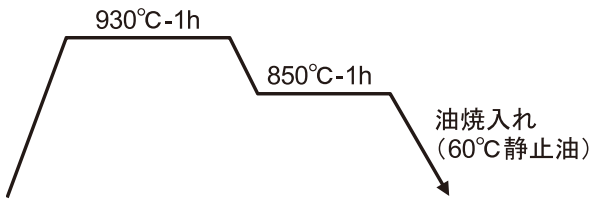


図3 浸炭熱処理を模擬した実験炉での熱処理条件

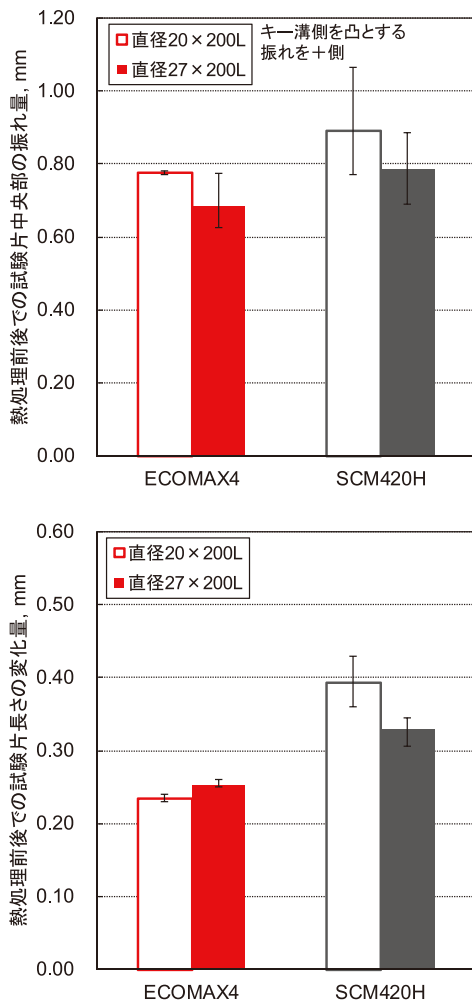


図4 熱処理前後での振れ量ならびに長さ変化量測定結果

2.3. 耐ピッチング特性

最近、自動車用をはじめとするギヤユニットでは、燃費向上を図るために低粘度潤滑油が用いられる傾向がある。この背景の下、ギヤ歯面での耐ピッチング性の向上は材料熱処理課題として特に重視されている。図5にECOMAX4とSCM420Hのローラーピッチング試験結果を示す。試験片となる小ローラーは試験片加工後に浸炭焼入れ・焼戻しを行い、摺り部のみ仕上げ加工を施して試験に供した。ピッチング寿命は小ローラーの表面がはく離するまでの応力繰返し数にて評価している。ECOMAX4のはく離に至るまでのサイクル数はSCM420Hに比べて約5倍も向上している。

ピッチング寿命向上の理由として、ECOMAX4はSi、Cr増量の効果によって焼戻し軟化抵抗がSCM420Hに比べて優れること、また図6に示すように最表面の浸炭異常層（粒界酸化+合金元素の欠乏によって形成した不完全焼入

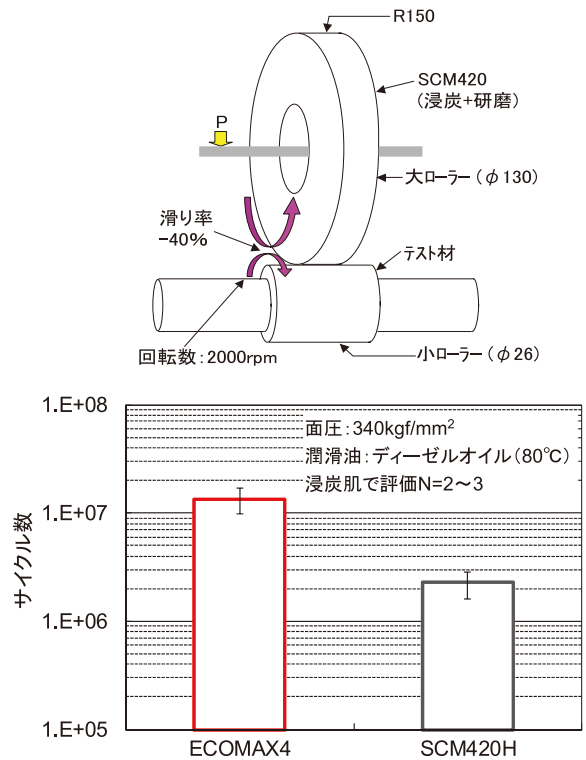


図5 ECOMAX4とSCM420Hのローラーピッチング試験結果

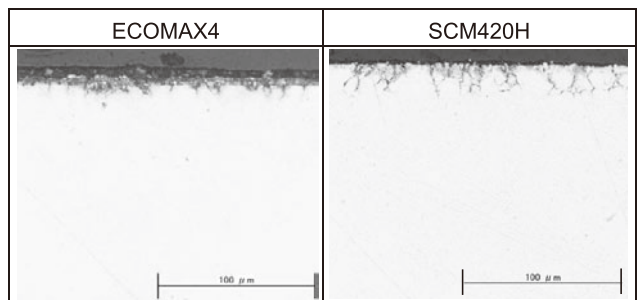


図6 ECOMAX4とSCM420Hのガス浸炭後の浸炭異常層の光学顕微鏡観察結果

れ組織)が浅く、且つ表面全体に均一に広がり基地組織に比べて軟質な浸炭異常層が早期に摩耗することによって、粒界酸化起点のき裂が抑制されるため寿命向上をもたらしたと推定している¹²⁾。

2.4. 低サイクル疲労特性ならびに衝撃特性

ギヤ部品には、前述の歯面における耐ピッチング特性以外に歯元強度として曲げ疲労と耐衝撃特性が求められる。曲げ疲労として、最近ではエンジントルクの増大によってギヤにかかる負荷が高まっており、急発進による繰返しの高負荷を想定した低サイクル域(～10⁴サイクル)での強度が重視されている。図7にECOMAX4とSCM420Hの浸炭焼入れ・焼戻し状態での4点曲げ疲労試験結果を示す。試験片にはVノッチを付与し、ノッチ面とその裏面のみ浸炭層を存在させ、各荷重において破断するまでのサイクル数で評価した。ECOMAX4の低サイクル疲労強度はSCM420Hに比べて優れていることを確認した。この理由として、ECOMAX4はC増量によってSCM420Hに比べて芯部(非浸炭層)の硬さが高かったこと、またSi増量による粒界強化作用が低サイクル疲労強度向上の一因になったと考えられる。

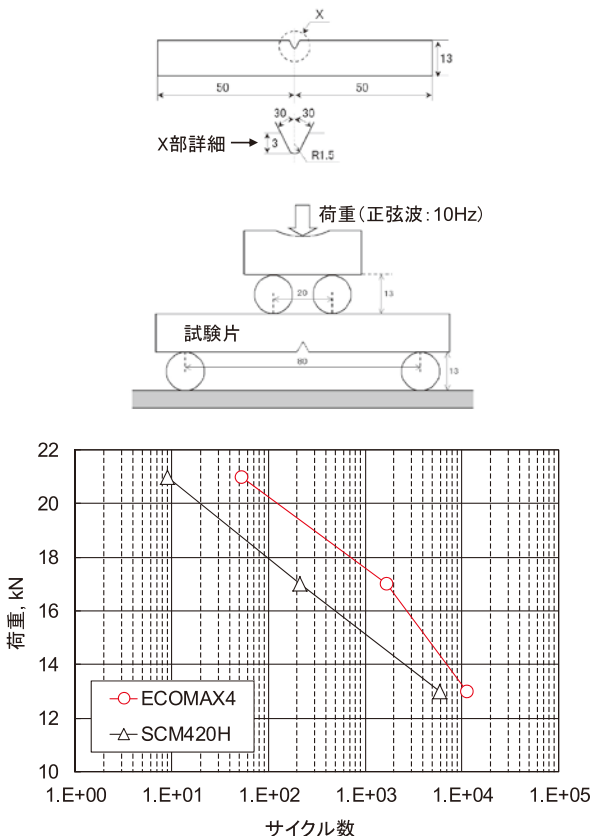


図7 ECOMAX4とSCM420Hの低サイクル疲労試験結果

耐衝撃強度はトランスミッションに対し低速・高トルクでの入力想定されるディファレンシャルギヤ等に要求される特性である。図8にECOMAX4とSCM420Hの浸炭焼

入れ・焼戻し状態でのシャルピー衝撃試験結果を示す。試験片は10RCノッチ試験片を用いて、ノッチ面のみ浸炭層を残して試験に供した。ECOMAX4はSCM420Hに比べてCを増量しているにも関わらず、衝撃値は同等であった。この理由として、ECOMAX4はSi増量による粒界強化作用、またピンニング粒子として寄与するNb炭窒化物が形成されることによって整細粒化したためであると見られる。

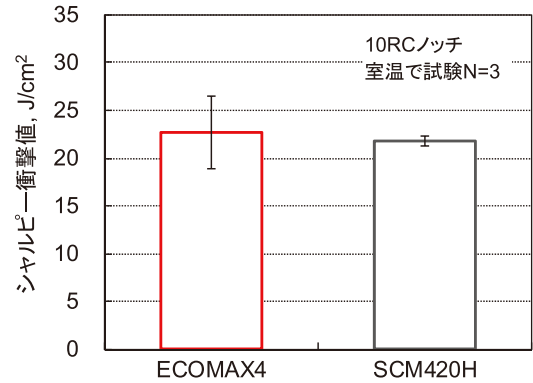


図8 ECOMAX4とSCM420Hのシャルピー衝撃試験結果

2.5. 結晶粒度特性

軟化焼なましを施した部品を冷間鍛造後に浸炭熱処理を行った場合、昇温時に再結晶フェライト粒を経ることで微細なオーステナイト粒を形成し、粒の合体・成長を駆動力にして結晶粒粗大化を引き起こし易くなる。結晶粒が粗大化すると部品強度の低下や熱処理ひずみの増加を招くことから粗大化抑制は重要である。そこで、冷間鍛造後に導入された加工ひずみを解消させる目的で焼ならしが行われるのが一般的である。

表1に軟化焼なましを施した試験片に対して70%の冷間据込みを行った後、900℃や940℃、950℃に加熱して3時間保持後に水冷した擬似浸炭(表面にはCを浸入させず浸炭時の熱処理のみ付与)時の結晶粒粗大化有無の評価結果を示す。SCM420Hは900℃でも粗大粒発生が認められたのに対して、ECOMAX4は950℃でも粗大粒は認められなかった。従って、ECOMAX4を適用することで冷間鍛造後の焼ならしを省略できる可能性があることが分かった。ECOMAX4の粒度特性向上の理由として、粗大化抑制のピンニング粒子として寄与する微細なNb炭窒化物が存在したためであると考えられる。

表1 ECOMAX4とSCM420Hの70%冷間据込み後の結晶粒粗大化有無の評価結果

	900℃	940℃	950℃
ECOMAX4	○	○	○
SCM420H	×	×	×

○: 粗大粒無し, ×: 粗大粒発生

2.6. 焼なまし材の冷間加工性ならびに被削性

従来のNiやMoを添加した高強度鋼は、一般的なJIS規格鋼と比較して高強度化が実現できても、冷間加工性や被削性を劣化させる場合があり、部品製造時のコストアップを引き起こし易いという問題があった。

図9にECOMAX4とSCM420Hの球状化焼なまし材での変形抵抗の結果を示す。円柱状の試験片を室温で据込み、各据込み率における変形抵抗を測定している。ECOMAX4の球状化焼なまし材の硬さは79HRBであり、同条件で処理したSCM420Hの78HRBと同等である。全ての据込み率においてECOMAX4の変形抵抗はSCM420Hと同等であった。またどの程度の冷間据込みを行ったら割れが発生するのか確認した限界割れ試験結果を図10に示す。ECOMAX4は75%の冷間据込みを行っても割れ発生は認められず、SCM420Hに比べて優れた。この理由として、ECOMAX4はCr増量によって炭化物の球状化が促進されているために割れが発生しにくくなったものと考えられる。

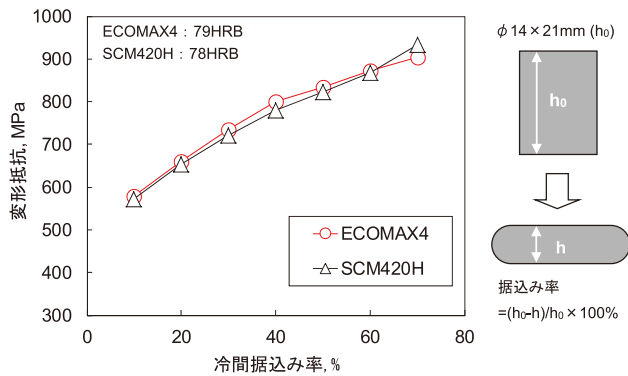


図9 ECOMAX4とSCM420Hの球状化焼なまし材の冷間据込み率と変形抵抗の関係

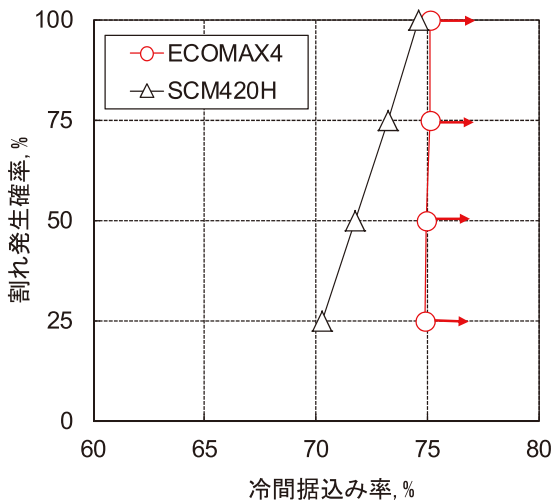


図10 ECOMAX4とSCM420Hの球状化焼なまし材の限界割れ試験結果

ECOMAX4とSCM420Hの焼なまし材での被削性試験結果を図11に示す。各旋削時間での超硬チップの逃げ面摩擦量で評価した。結果として、ECOMAX4の方がSCM420Hに比べて若干硬さが高いにもかかわらずSCM420Hと同等の被削性を示した。

3.おわりに

低熱処理変形高強度はだ焼鋼ECOMAX4は熱処理ひずみ低減をキーテクノロジーとして、耐ピッチング強度や低サイクル曲げ疲労強度に優れ、且つ結晶粒度特性や加工性にも優れた鋼である。ECOMAX4を駆動系部品に適用することで、部品精度の向上や高強度化による小型・軽量化の実現、工程省略・簡略化が期待できる。

今後も部品メーカーや自動車・産機メーカーとの連携強化を図ることで、省資源で且つ高機能化やトータルコストダウンが可能な鋼材開発へと繋げていきたい。

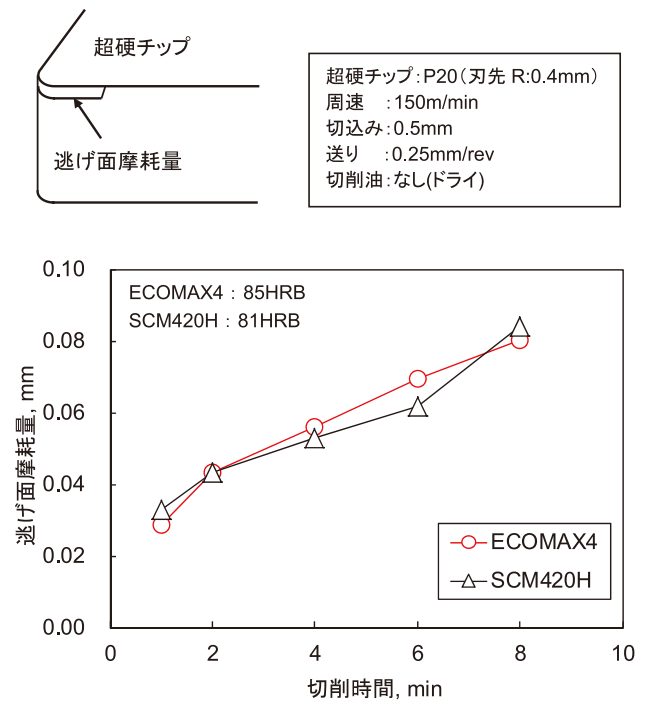


図11 ECOMAX4とSCM420Hの焼なまし材の旋削時間と逃げ面摩擦量との関係

参考文献

- 1) 坂本和夫, 福住達夫, 上野英生: 三菱製鋼技報, 30 (1996), 1.
- 2) 羽生田智紀, 中村貞行: 電気製鋼, 71 (2000), 59.
- 3) 羽生田智紀, 紅林豊: 電気製鋼, 73 (2002), 73.
- 4) 安達裕司, 福田康弘, 笠松千尋, 住田庸: 愛知製鋼技報, 22 (2004), 19.
- 5) 永濱睦久, 岩崎克浩, 安部聡: 神戸製鋼技報, 56 (2006), 53.
- 6) 西川元裕: 熱処理, Vol.48, 3, 2008, 140.
- 7) 中名悟, 後藤洋昭, 西川元裕, 常陰典正: 山陽特殊製鋼技報, Vol.19, 1, 2012, 38.
- 8) 中名悟, 常陰典正: 素形材, Vol.54, 7, 2013, 10.
- 9) 藤松威史, 橋本和弥: 山陽特殊製鋼技報, Vol.17, 1, 2010, 48.
- 10) 山陽特殊製鋼技報, Vol.22, 1, 2015, 54.
- 11) 藤松威史, 中崎盛彦: 山陽特殊製鋼技報, Vol.21, 1, 2014, 28.
- 12) 丸山貴史, 藤松威史, 常陰典正: 山陽特殊製鋼技報, Vol.22, 1, 2015, 21.