

高強度と冷間加工性を両立した肌焼鋼 ECOMAX5（エコマックス5）

“ECOMAX5” advanced carburizing steel with excellent balance of strength and cold formability

1. はじめに

特殊鋼の代表的な使用先である自動車業界において、世界各国の環境規制強化に伴い、燃費向上やCO₂排出量の削減が進められている。その手段の一つとしての電動化は、自動車の構造をも変化させようとしている。その中で構造最適化を考えると、部品の小型・軽量化に対するニーズは、益々高まっていくと予想される。それに伴い駆動系部品の主要素材である機械構造用合金肌焼鋼にも、更なる高強度化が求められることとなる。特に、歯車についてみれば破損モードに基づき、歯面疲労強度、歯元曲げ疲労強度/衝撃強度の向上が求められる。中でも、歯面疲労に関しては、昨今の燃費向上ニーズに対する潤滑油の低粘度化が指向されており、より負荷が高まるとみられる。潤滑油の低粘度化による負荷増大の理由は、油膜厚さが減少し、摩耗や焼き付きなどが発生し易くなることにある。

更に、冒頭に述べた電動化に注目すると、自動車全体の静粛化が進むことにより、歯車ユニットのノイズが相対的に高まりノイズ低減が求められると考えられる。その対策としての部品の高精度化の重要性が増している。歯車に高精度が求められる場合、近年の歯車加工技術の進歩により、硬化熱処理後に仕上げ研削を追加することで対応可能である。しかしながら工程追加は、製造コストアップにつながる。

そこで、今後、冷間鍛造によるネットシェイプ化が益々注目されると考える。冷間鍛造による素形材加工は、従来からニアネットシェイプによる材料歩留りの向上などの観点において適用が拡大してきた。最近では、冷間鍛造だけで必要な形状や精度を得て、後加工の切削や研削を省略しようとする、より高度なネットシェイプ化が目指されている。この動向から、鋼材に対しては、冷間鍛造（加工）性を高めることが必要である。他方で、冷間鍛造により浸炭焼入れ時のオーステナイト結晶粒粗大化を誘発し易くなることが知られ、部品精度低下の要因となる熱処理ひずみの増加の懸念が生じる。したがって、耐結晶粒粗大化特性を高めることがいっそう重視されると予想する。なお、冷間鍛造前後に焼ならしを追加することでも対策は可能であるが、工程追加となり製造コストアップにつながる。

以上で述べたとおり、今後の動向を考慮すると、高強度と冷間加工性が両立できる鋼のニーズが高まると考える。従来、高強度が要求される部品には、NiやMoを増量した開

発鋼が指向されてきた。しかし、これら元素の添加は、加工性劣化による生産性の阻害、生産条件の制約、鋼材コストの上昇を招き、また冷鍛性も低下させる。

近年の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、当社は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鋼ECOMAXシリーズの開発を進めてきた。この鋼は、NiやMoに頼ることなくSiやMn、Crを主体として、その量を最適化している。高強度と冷間加工性の両立に対し、ECOMAXシリーズの成分コンセプトは合致するものとなっている。本報では、高強度と冷間加工性を両立する鋼として、同シリーズ鋼として新たにECOMAX5を開発したので、以下に諸特性を紹介する。

2. ECOMAX鋼シリーズ

現在、当社ではECOMAXシリーズとして3種類の鋼をラインナップし、商品展開している。ECOMAXシリーズの化学成分は、JIS規格鋼であるSCM420に比べて、高Si-低Mn-高Cr組成とし、かつ少量のNb添加を基本としている。この成分設計に至った主な理由は、昨今の歯車用鋼として特に求められている耐ピッチング性と耐結晶粒粗大化特性を向上させるためである。更にECOMAXシリーズの3鋼種は、それぞれ以下に示す特徴も兼ね備える。焼入れ性は、SCM420HのJIS規格レベル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。

〈ECOMAX1とECOMAX2〉

SCM420に比べて低CかつB添加しており、特に強靱性を重視する対象に適している¹⁾。また、冷間加工性にも優れる。その一方でB添加鋼は、B非添加鋼と比べて熱処理ひずみの挙動に変化が生じることが、明らかとなってきた。従って、高精度化を求める場合には、熱処理ひずみ挙動の変化を考慮する必要がある。なお、ECOMAX1とECOMAX2との違いは、Cr量にある。

〈ECOMAX4〉

浸炭焼入れ後の熱処理変形の軽減を狙った従来にはない

鋼である²⁾。熱処理変形を軽減するためにC量を高めている。その影響で冷間鍛造前の軟化焼鈍条件によっては、冷間鍛造時の荷重が高くなる場合がある。

続いて紹介する新規開発鋼であるECOMAX5は、既存の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、更に適用拡大が期待される部品の高精度化とコストを両立できる冷間鍛造後の部品を、そのまま直接的に浸炭する部品製造工程においても、各種部品品質を満足することを狙って開発した。

3. ECOMAX5の特徴

3.1. 化学成分と焼入れ性

ECOMAX5の化学成分は、他のECOMAX鋼と同様に、高Si-低Mn-高Cr組成とし、かつ少量のNbを添加している。なおBは添加していない。それぞれの元素の調整理由は、以下の通りである。Siの増量は耐ピッチング特性を向上させるため、Mnの低減は結晶粒度特性の向上³⁾や加工性を改善させるため、Crの増量はSiと同じく焼戻軟化抵抗を向上させることに加え、冷間鍛造前の球状化焼きなまし組織を均質化させるためである。Nb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。

図1にECOMAX5の狙い成分でのジョミニー焼入性曲線を示す。ECOMAX5の焼入性曲線は、水冷端からの距離30mm付近まで、SCM420HのJIS規定のジョミニー幅のほぼ中央に、SCr420Hの上限付近に位置することから、SCM420HやSCr420Hを使用していた部品への適用が期待できる。

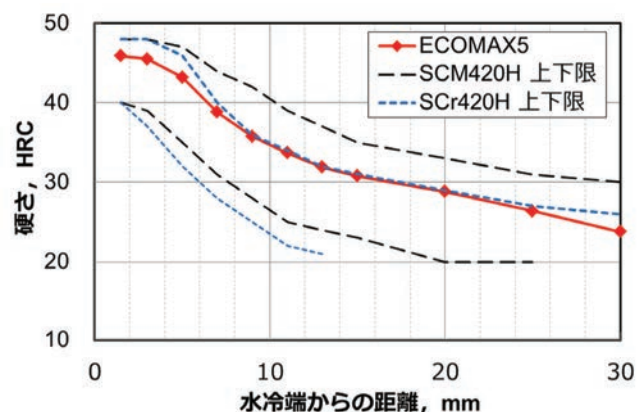


図1 ECOMAX5の狙い成分でのジョミニー焼入性曲線

3.2. 耐ピッチング特性

自動車用をはじめとする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。それに伴い、歯面における耐ピッチング特性の向上が必要となっており、鋼材に対する期待も大きい。図2にECOMAX5の耐

ピッチング特性を示す。ECOMAX5は、従来のECOMAX鋼の代表としてのECOMAX4と並び、SCM420に比べて長寿命が得られる。50%累積破損確率寿命で見ると、ECOMAX5はSCM420に比べて約4倍もの寿命を示した。なお、評価には、図3に概略図を示すローラーピッチング試験を用いた。試験片となる小ローラーは試験片粗加工後に浸炭焼戻しを行い、摺り部のみ仕上げ加工を施した。従って、大ローラーとの接触部は、浸炭ままの肌で試験に供したことになる。寿命は、小ローラーの表面にはく離が生じるまでの応力繰返し数にて評価した。

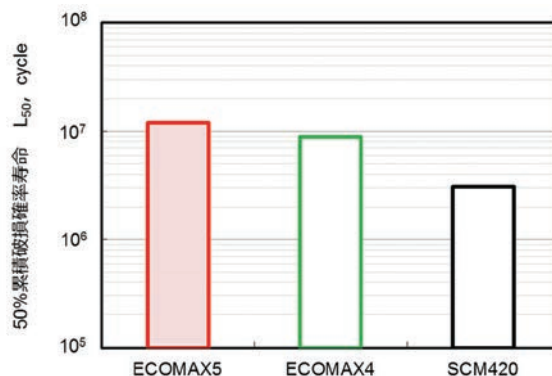


図2 ECOMAX5の耐ピッチング特性

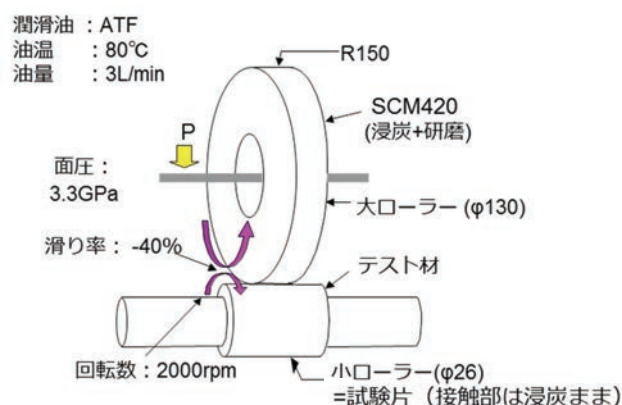


図3 ローラーピッチング試験の概略図

ECOMAX5の耐ピッチング特性がSCM420に比べて向上した理由は、従来のECOMAX鋼と同様に、SiやCrの増量により焼戻軟化抵抗がSCM420に比べて優れることと、浸炭最表面に母地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って形成した不完全焼入れ組織）が図4に示すように浅く、かつ表面全体に均一に広がることにある。特に後者の状態は、粒界酸化を起点とするき裂長さの短縮化、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⁴⁾。

3.3. 低サイクル疲労特性と耐衝撃特性

自動車に用いられる歯車の中には、差動装置用歯車のよ

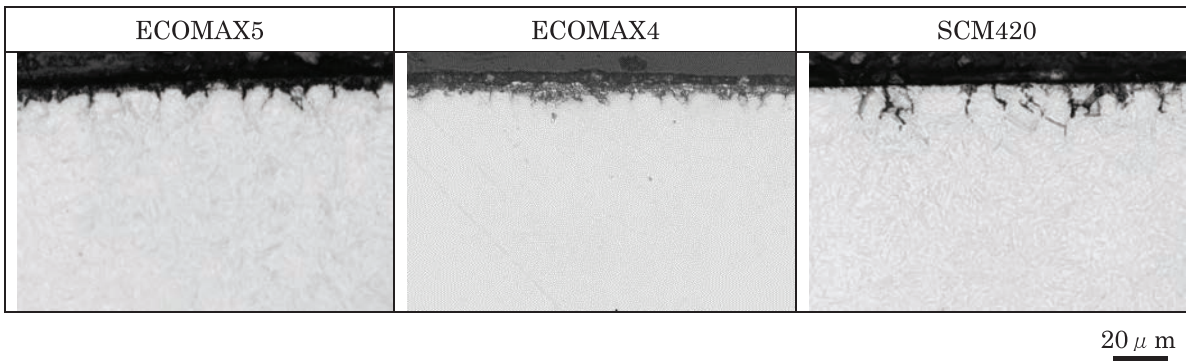


図4 ECOMAX5のガス浸炭後の浸炭異常層

うに、歯元曲げ疲労や衝撃強度が重視される場合がある。エンジントルクの増大にともない、歯車にかかる負荷は高まる。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した低サイクル域（～10⁴サイクル）での疲労強度の向上が必要となる。図5にECOMAX5の低サイクル疲労特性を示す。ECOMAX5の低サイクル疲労特性は、SCM420よりも優れ、更に低サイクル疲労特性に有効であるBを添加したECOMAX鋼¹⁾に比べても同等以上である。試験片ならびに低サイクル（曲げ）疲労試験の概略図を図6に示す。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残存させた。評価は、破断までのサイクル数を測定することで行った。

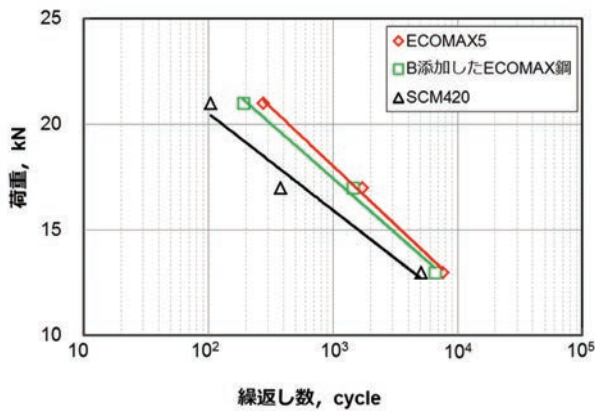


図5 ECOMAX5の低サイクル疲労特性

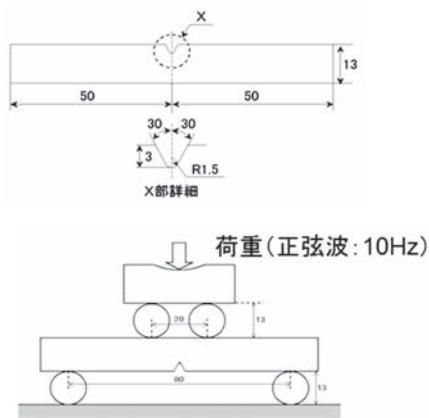


図6 低サイクル（曲げ）疲労試験の概略図

続いて図7にECOMAX5の耐衝撃特性を示す。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、Bを添加したECOMAX鋼¹⁾に比べても同等以上である。なお試験には10RCノッチを付与し、ノッチ面のみ浸炭層を残存させた試験片を用いた。

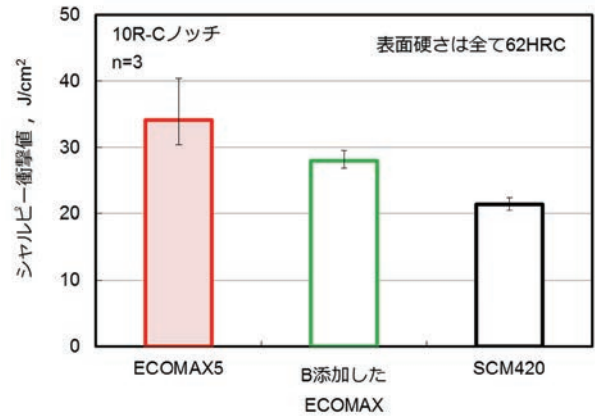


図7 ECOMAX5の耐衝撃特性

低サイクル疲労特性や耐衝撃特性を向上させる上で、粒界強化による粒界破面率低減が有効であり、その方策の一つとしてB添加があげられている^{1)・5)}。図8にECOMAX5のシャルピー衝撃試験片における起点部破面を示す。ECOMAX5は、B無添加でありながらB添加鋼と同様にSCM420に比べて粒界破面が抑制されている特長を有している。

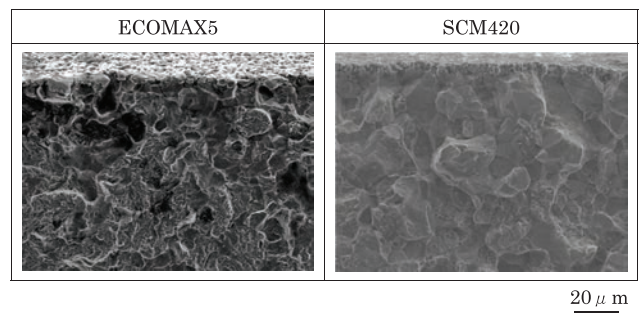


図8 シャルピー衝撃試験片の破壊起点部破面

3.4. 冷間加工性と被削性

上述したとおり、今後、高強度化と冷間加工性を両立した鋼の必要性がますます増すと考える。図9にECOMAX5の球状化焼なまし材における冷間変形抵抗特性を示す。なおECOMAX5の球状化焼なまし後の硬さは79HRBであり、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。図10にECOMAX5の冷間加工における限界据込み率を示す。ECOMAX5の限界据込み率は、SCM420に比べて高く、据込み前との高さ比で75%まで据え込んでも割れが発生しなかった。したがってECOMAX5は、高い加工度での冷間鍛造においても、割れが発生し難いといえる。なお、これらの冷間加工性に関する試験条件は図9に示すとおりであり、円柱状の試験片を室温で据込んでいる。また、変形抵抗は、各据込み率毎に測定した。限界据込み率とは、4個の試験片をそれぞれ割れ発生まで据込んだ実験結果に基づく、各冷間据込み率における割れ個数比率である。

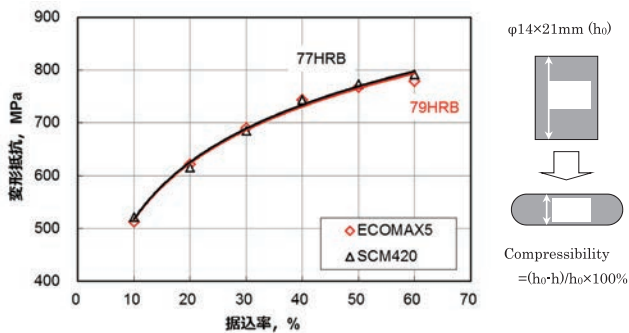


図9 ECOMAX5球状化焼きなまし材の冷間変形抵抗特性

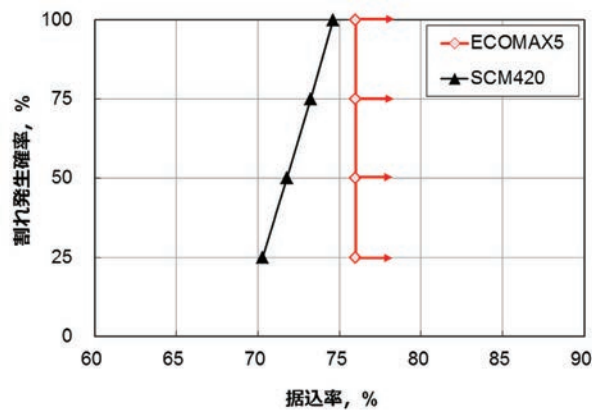


図10 ECOMAX5球状化焼きなまし材の限界据込み率

ECOMAX5がSCM420に比べて割れを抑制できる理由は、球状化焼なまし後のミクロ組織の違いにある。図11に、ECOMAX5のミクロ組織を示す。SCM420ではフェライトに球状化炭化物が不均一に分散し、かつ球状化焼なまし後であるにもかかわらずラメラ炭化物も生成している。対して、ECOMAX5ではCrを増量していることにより球状炭

化物が均一分散した組織が得られる。そのために不均一変形が抑制され、冷間加工性が向上すると考えられる⁶⁾。

また、図12にECOMAX5焼ならし材の被削性について示す。被削性の指標として各旋削時間でのチップ横逃げ面摩耗幅を測定した。ECOMAX5でのチップ摩耗幅は、SCM420と同等であり、被削性に大きな違いは生じない。

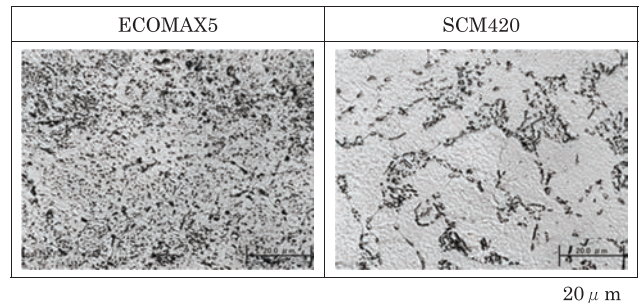


図11 ECOMAX5の球状化焼きなまし組織

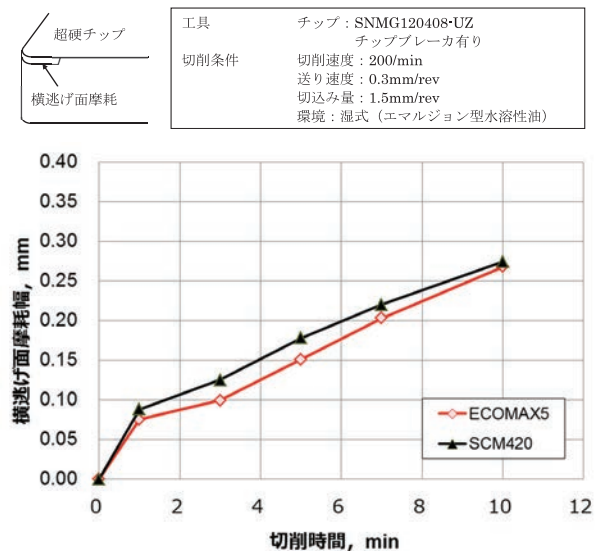


図12 ECOMAX5焼ならし材の被削性

3.5. 結晶粒度特性

浸炭焼入れ中にオーステナイト粒の粗大化が生じると、部品強度の低下や熱処理歪の増加による部品精度の悪化等を引き起こす場合がある。特に冷間鍛造で成形した部品に、焼ならしを行わずに、そのまま浸炭する場合には、昇温時変態直後のオーステナイト粒が微細化するために、引き続きの昇温やオーステナイト化温度での保持過程において結晶粒粗大化が生じ易い。図13にECOMAX5の結晶粒度特性（旧オーステナイト結晶粒粗大化抑制能）を示す。この特性を評価するために、冷間鍛造-浸炭工程を模擬し、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3h保持後に焼入れ（浸炭の熱履歴を模擬した擬似浸炭処理）を行った。ECOMAX5は、

SCM420とは異なり、結晶粒粗大化が抑制されている。なお、図13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900℃保持で図13と同様な混粒が発生したのに対して、ECOMAX5は980℃でも整粒を維持することを見出している。

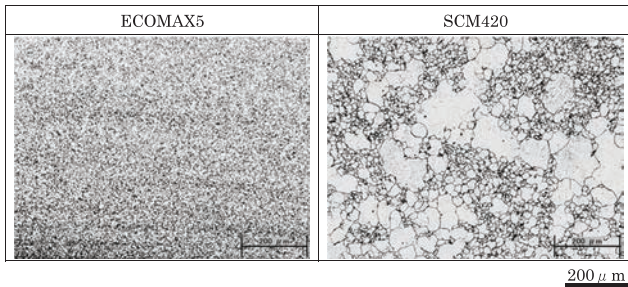


図13 ECOMAX5の結晶粒度特性
(70%冷間据込み⇒950℃疑似浸炭)

ECOMAX5がSCM420に比べて優れた結晶粒度特性を有する理由は、大きく分けて2点ある。1点目は、少量の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(炭・窒化物)を増量分散させたことにある。もう1点は、図11に示したとおり、SCM420に比べて高Crとすることで球状化焼きなまし後のミクロ組織の均質化が図られていることにある。JIS合金肌焼鋼に含有される程度のCr量では、球状化焼きなましを行っても、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し分散する。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ことを既に明らかにしている⁶⁾。以上の特徴的な成分設計により、ECOMAX5の結晶粒度特性は、他の鋼に比べて一段優れた水準に向上している。それによりECOMAX5は、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が期待できる。

4. おわりに

ECOMAX5は、優れた耐ピッチング特性を有するとともに、低サイクル疲労特性や耐衝撃特性にも優れる。また、部品製造性においても良好な耐結晶粒粗大化特性や冷間加工性を兼ね備える。これら特性が、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。

また、本報では、冷間鍛造工程への適用に焦点をあてて、ECOMAX5の各種特性を紹介したが、熱間鍛造工程や直接切削工程においても、同様に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高強度化に貢献できると考えている。今後も、顧客からのニーズを踏まえた提案を行っていききたい。

参考文献

- 1) 山陽特殊製鋼技報,22 (2015) 1,54.
- 2) 藤松威史,丸山貴史,中崎盛彦:まてりあ,56 (2017) 2,79.
- 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) 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) 田中高志:山陽特殊製鋼技報,10 (2003) 1,53.
- 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) 2,175.