

# 部品製造工程を革新する冷間鍛造用 肌焼鋼 JECF<sup>®</sup> の開発

今浪 祐太<sup>1)</sup> 岩本 隆<sup>1)</sup> 西村 公宏<sup>2)</sup>

## 1. 緒 言

自動車用歯車等の高疲労強度を要する機械部品では、鋼を熱間鍛造または冷間鍛造した後、浸炭熱処理を経て製造されるケースが多い。冷間鍛造は寸法精度に優れるため、鍛造後の切削量低減による生産性向上を可能にする。一般的な冷間鍛造部品の製造プロセスを図1に示す。冷間鍛造に際しては、軟化焼鈍(以下、焼鈍)により、変形抵抗の低減を図ることが一般的である。また、浸炭熱処理時のオーステナイト(以下、 $\gamma$ )異常粒成長防止のため、浸炭前焼準(以下、焼ならし)も広く実施される。近年、部品価格競争は激化しており、焼鈍や焼ならし等の熱処理を省略可能な付加価値の高い鋼のニーズが高まっている。

そこで、著者らは、浸炭時の異常粒成長に及ぼす冷間鍛造プロセスの影響を検討し、焼鈍省略自体が $\gamma$ 異常粒成長の抑制に寄与することに注目、この機構を解明して、開発コンセプトとして活用した。その結果、冷間鍛造前の焼鈍と浸炭前の焼ならしを同時に省略可能な肌焼鋼 JECF<sup>®</sup>(JFE-Easy-Cold-Forging)を開発した。本稿では JECF<sup>®</sup>の特徴ならびに性能を紹介する。

## 2. 冷間鍛造後浸炭時の $\gamma$ 異常粒成長

浸炭時の $\gamma$ 異常粒成長は疲労特性の低下要因<sup>(1)</sup>や、熱処理ひずみの増大要因とされており、これの防止が重要である。

### (1) 従来知見

結晶粒の成長駆動力と析出粒子によるピン止め力の関係か

ら、異常粒成長の臨界条件が提唱されている<sup>(2)</sup>。これによると、析出粒子体積率の上昇、または、析出粒子の微細化により、ピン止め力が増大し異常粒成長は抑制される。一方、 $\gamma$ 粒の微細化によって粒成長駆動力が増大し異常粒成長は発生しやすくなる。一般に、異常粒成長の抑制方法として Nb 析出粒子等による $\gamma$ 粒界ピン止め効果を活用する方法がよく知られている<sup>(3)</sup>。本開発でも基地のピン止め力向上のため、圧延加熱制御によるナノ析出粒子微細分散を検討した。

また、異常粒成長には鍛造条件も大きく影響する。特に冷間鍛造では、せん断ひずみが高い領域で異常粒成長が発生しやすい<sup>(4)</sup>。

このように、浸炭時の異常粒成長に関して数多く研究されてきたが、依然として実部品製造において $\gamma$ 粒の異常粒成長はしばしば認められ、課題とされている。実際に、SCM420等汎用肌焼鋼では、 $\gamma$ 異常粒成長防止のため、浸炭前焼ならしの追加を余儀なくされている。

### (2) $\gamma$ 異常粒成長に及ぼす球状化焼鈍の影響

著者らは、冷間鍛造前に焼鈍を施した場合、浸炭時の $\gamma$ 異常粒成長が発生しやすくなる現象に着目した。焼鈍を施した鋼と焼鈍を施していない鋼を据込率70%にて冷間鍛造後、浸炭温度で3時間保持後の旧 $\gamma$ 粒観察結果を図2に示す。焼鈍を施した場合、顕著な異常粒成長が認められる。焼鈍材における加熱時の金属組織変化を詳細に調査した結果を図3に示す。焼鈍材を浸炭温度に加熱した直後には、球状セメンタイトが存在し、これらは加熱保持に伴い減少していく様子が明らかとなった。一般に、浸炭加熱温度は900℃以上と、肌焼鋼では $\gamma$ 单相域だが、焼鈍を施す場合、セメンタイトへのCrの濃化が著しく、これによりセメンタイトの熱力学的安定性が上昇する結果、浸炭加熱の初期に未溶解のセメンタイトが残存し、それらが加熱保持とともに溶解する。このような、球状セメンタイトの溶解が局所的かつ不均一なピン止め力の低下を招き、焼鈍材の異常粒成長を促進させたと考えられる(図4)。一方、未焼鈍鋼のパーライトを構成するセメンタイトでは上述したようなCrの濃化がないため、浸炭加

\* JFE スチール株式会社  
スチール研究所 棒鋼・線材研究部; 1)主任研究員 2)部長  
Development of Case Hardening Steel for Cold Forging  
“JECF<sup>®</sup>” Which Innovates Parts Manufacturing Process; Yuta  
Imanami, Takashi Iwamoto and Kimihiro Nishimura (JFE Steel  
Corporation)  
2018年10月29日受理[doi:10.2320/materia.58.108]

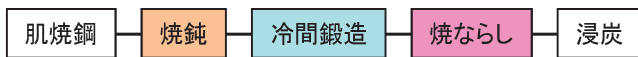


図1 冷間鍛造後浸炭される部品の一般的な製造工程。

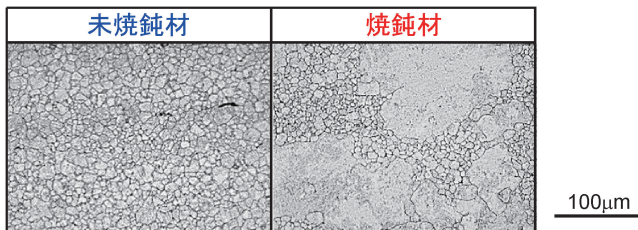


図2 未焼鈍材および焼鈍材を冷間鍛造後浸炭した際のγ粒。

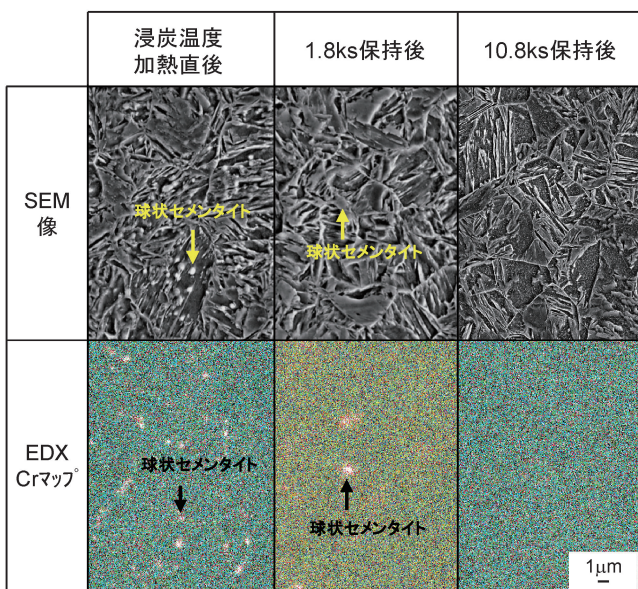


図3 浸炭過程における焼鈍材のセメンタイト溶解挙動。

熱後の初期に未溶解のセメンタイトが残存せず、局所的なピン止め力の低下は生じない。

以上の検討結果を翻ってみると、冷間鍛造前の焼鈍省略は、高Cr濃度の球状セメンタイトの生成を回避し、浸炭時のγ異常粒成長を抑制する作用があるといえる。従って、焼鈍省略が可能になれば、浸炭前焼ならしの省略も期待できる。

### 3. 材料設計

#### (1) 冷間鍛造時の変形抵抗低減

冷間鍛造前の焼鈍を省略するには、圧延ままで低変形抵抗の鋼を開発する必要がある。一方、浸炭焼入れ焼戻し後には高強度を示すことも必要であり、すなわち、圧延材低硬化化と十分な焼入れ性の両立が重要である。そこで、圧延材の硬度と焼入れ性に及ぼす合金元素の影響を調査し、最適化を図った。CrはSiやMnと比較して、圧延材硬度を上昇させず、焼入れ性を向上させる。これより、開発鋼では、Si、Mnを低減し、Crを増加させる設計を採用した。ここで、Siは浸炭後表層の粒界酸化を抑制し疲労特性を向上させる点からも

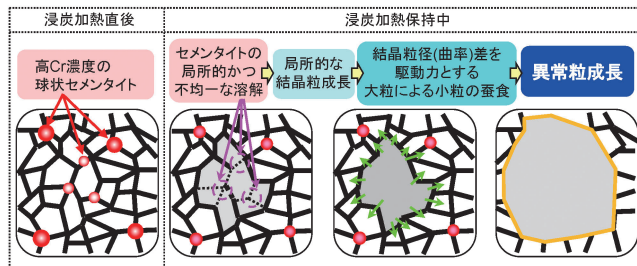


図4 焼鈍材の異常粒成長発現機構。

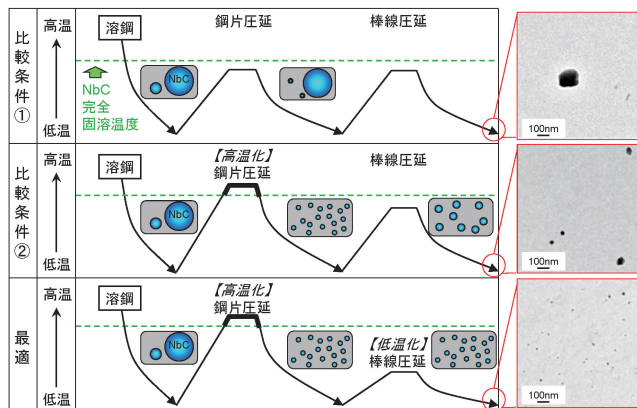


図5 NbCの微細析出分散制御法。

低減が好ましく<sup>(5)</sup>、また、Crは焼戻軟化抵抗の上昇を通して面疲労強度を向上させる作用を有する<sup>(6)</sup>。

更に圧延材硬度を低下させるため、圧延温度の低温化を指向した。圧延終了後の空冷中に、γからフェライトおよびパーライトへの変態が生じるが、圧延温度の低温化は、γを微細化させフェライトの核生成サイトを増大させる作用を通じフェライト分率の上昇に寄与する。フェライトはその他の組織と比較して軟質なため、その分率上昇は、低硬化化に寄与する。

また、冷間鍛造時の加工発熱により、鋼中固溶Nに起因する動的ひずみ時効が加工硬化を増大させ<sup>(7)</sup>、変形抵抗へ影響する。そこで、鋼のN添加量を低減するとともに、窒化物形成元素を添加し固溶Nを析出物として固定した。

#### (2) ナノ析出粒子微細分散によるピン止め力の向上

冷間鍛造前の焼鈍省略がγ異常粒成長抑制に有効である点は既に述べた。加えて、ナノ析出物の微細分散による基地のピン止め力向上も重要である。浸炭温度でのオストワルド成長が比較的緩やかで、かつ、圧延加熱温度の制御により析出物分散制御が可能なNb析出物をピン止め粒子として選定した。Nb析出物の分散制御のため、NbC溶解度積からNbC完全固溶温度を求め、これを基に圧延加熱温度を最適化した(図5)。連続铸造後空冷して得られる铸片には粗大なNb析出物が含まれる。この粗大Nb析出物を第一段階目の圧延である鋼片圧延の加熱時に一旦固溶消失させることで、その後、固溶したNbは鋼片圧延後の空冷時にNbCとして微細に析出する。更に、NbC粒子成長抑制の点で、第二段階目の圧延である棒線圧延の加熱温度は低温ほど望ましい。本制

表 1 成分組成 (mass%).

	C	Si	Mn	Cr	Mo	N	Others
SCM420	0.2	0.2	0.8	1.1	0.2	0.01	
開発鋼	0.2	≤0.1	≤0.7	≥1.3	—	Reduced and Fixed	Nb

御により NbC 析出物は著しく微細化した(図 5 の‘最適’).  
 なお、棒線圧延温度の低温化は、前節で述べたように変形抵抗低減のためのフェライト分率向上のためにも好都合であり、両技術は適合している。

#### 4. JECF® の特性

上述の結果に基づいて、合金設計および最適熱間圧延条件を決定し JECF® の実機製造を行った。表 1 に JECF® の化学組成を示す。Si および Mn 量を減少させ、Cr 量を増加させた。また、Mo を無添加として合金コストを削減した。加えて、固溶 N の低減および Nb の添加を行った。以下では、JECF® の性能を SCM420 と比較評価した。

##### (1) 冷間鍛造性

図 6 に変形抵抗の評価結果を示す。JECF® は圧延ままだでも SCM420 焼鈍材以下の変形抵抗であり、焼鈍を省略しても冷間鍛造が可能である。JECF® の変形抵抗低減は、Si, Mn, Cr 添加バランスの最適化、N 固定による動的ひずみ時効の抑制、低温制御圧延によるフェライト分率の向上等が相乗的に作用した結果である。

##### (2) 浸炭時 $\gamma$ 異常粒成長抑制能

JECF® および SCM420 を歯車に冷間鍛造し、焼ならしを施さずに擬似浸炭後、歯底付近の旧  $\gamma$  粒を観察した結果を図 7 に示す。SCM420 では粒径 100  $\mu\text{m}$  を越える異常粒が発生したが、JECF® では異常粒は認められず微細な結晶粒分布が確認された。このように、JECF® は焼ならしを省略しても浸炭時の  $\gamma$  異常粒成長を防止できる。

##### (3) 浸炭後疲労特性

浸炭後機械的性質として回転曲げ疲労試験を行った結果を図 8 に示す。JECF® は SCM420 と比較して優れた疲労強度を示した。同図中に示した浸炭表層部の Si マッピング像より、JECF® では粒界酸化が著しく抑制されており、これにより疲労強度が向上したと考えられる。

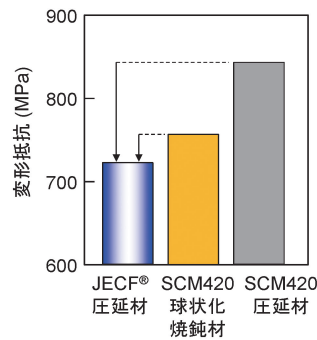


図 6 変形抵抗.

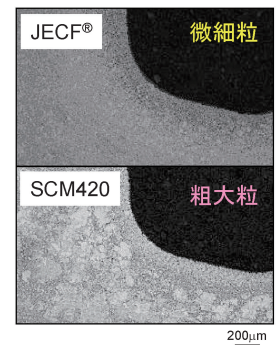


図 7 歯車鍛造後浸炭後旧  $\gamma$  粒.

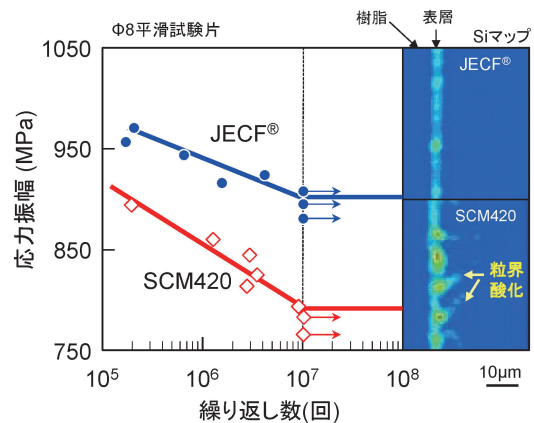


図 8 浸炭後の回転曲げ疲労特性.

#### 5. 実用化状況および今後

冷間鍛造用肌焼鋼 JECF® に関して、特許第 5790693 号、特許第 5708901 号が登録されている。また、JECF® は 2018 年に量産を開始しており、実部品適用されている。本技術は、部品コスト競争力の向上に資するとともに、熱エネルギー消費を抑制しクリーンな社会を形成する手段としても期待できる。

#### 文 献

- (1) 瓜田龍実：電気製鋼，**59**(1988)，33-41.
- (2) T. Gladman: Proc. Roy. Soc., **294**(1966)，298-309.
- (3) 例えば、村上俊夫：神戸製鋼技報，**56**(2006)，59-63.
- (4) 藤松威史：鉄と鋼，**95**(2009)，59-66
- (5) 福岡和明：JFE 技報，**23**(2009)，24-29.
- (6) 紅林豊：第 188・189 回西山記念技術講座，(2006)，83-115.
- (7) William C. Leslie：鉄鋼材料学，丸善，(1985)，98.