

## 熱処理省略を可能とする冷間鍛造用高周波焼入れ用鋼

## New Steel Product for Induction Hardening which Enables Omission of Heat Treatment in Cold Forging Process

## 1. はじめに

自動車用軸部品では、**図 1** に示すように、機械構造用炭素鋼（以下、SC 材）を素材とし軟化焼鈍後に冷間鍛造成形を施した後、焼入れ焼戻し（QT）の調質処理を経て高周波焼入れ焼もどし（以下、高周波熱処理）を施す場合がある。軟化焼鈍は鋼の冷間鍛造を行ううえで必要な処理であるが、近年、カーボンニュートラル（CN）に向けて、特に工程省略、CO<sub>2</sub> 低減のニーズが強い。これを受け、焼鈍熱処理を省略可能な高周波焼入れ用鋼を開発した。本稿では、開発鋼の特徴および特性について紹介する。

## 2. 開発鋼について

## 2.1 合金設計

**表 1** に示すとおり、SC 材は比較的合金添加量が少なく、熱間圧延後空冷された場合のマイクロ組織はフェライトおよびパーライトの複合組織を示す。一方、QT や高周波熱処理では加熱後のオーステナイトが急冷されることで、マルテンサイト組織へと変態する。合金設計にあたっては、このような組織変化を考慮する必要がある。すなわち、焼鈍省略のため、圧延まま組織（フェライトおよびパーライト）の変形抵抗を十分低減させるとともに、焼入れ時（オーステナイトの急冷時）にはマルテンサイト変態を生じる程度の焼入れ性を併せ持つことが重要である。なお、マルテンサイト組織の強度は主として C 濃度に依存するため、代替対象の SC 材と同程度の C 添加が必要である。

上記設計思想に基づき、開発鋼では各種合金元素の添加量を変更した。例えば、Si はフェライトの固溶強化<sup>1)</sup>を通じて変形抵抗を上昇させる合金元素であり、また、Mn はパー

ライト分率の増大およびラメラ微細化<sup>2)</sup>を通じて変形抵抗を上昇させる合金元素である。そこで、開発鋼では Si および Mn を低減させることによる変形抵抗の低減を志向した。これにより低下した焼入れ性は、Mo、Ti および微量 B の添加により補填調整する設計とした。これらにより合金元素の添加量を適正化し、変形抵抗の低下と焼入れ性の確保を両立した。

以下では、C 濃度 0.38% で設計した開発鋼について、焼鈍省略の可能性および高周波熱処理後の特性評価結果について紹介する。

## 2.2 焼鈍省略の検討

比較評価用の S38C および開発鋼について、高周波真空溶解でインゴットとした後、熱間鍛伸により直径 50 mm の丸棒に成形し、焼ならしを施して供試鋼とした。さらに S38C についてのみ軟化焼鈍を追加で施した。**写真 1** に S38C 焼鈍材および開発鋼未焼鈍材のマイクロ組織を示す。S38C と比較して、開発鋼ではパーライト分率が低下している様子が認められる。同写真の右上に、ビッカース硬度の測定結果を併記した。S38C 焼鈍材と開発鋼未焼鈍材は同等の硬度である。開発鋼は軟化焼鈍を省略しても十分に軟質であり、軟化焼鈍の省略が可能であると考えられる。

表 1 合金組成 (mass%)

Table 1 Chemical compositions

	C	Si	Mn	Others
Carbon steel	Various	0.15~0.35	0.30~0.90	-
Developed steel	〃	Reduced	Reduced	Mo, Ti, B

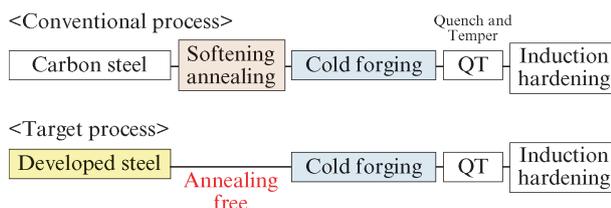
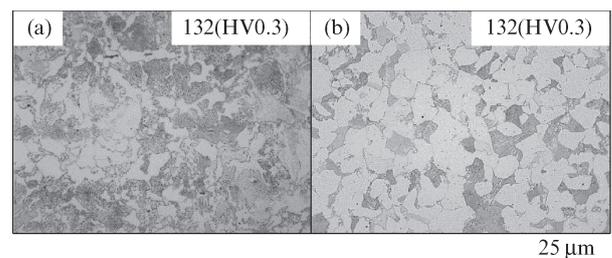


図 1 従来および開発目標の部品製造工程

Fig. 1 Conventional process and target process

写真 1 冷間鍛造前のマイクロ組織  
(a) S38C 焼鈍材 (b) 開発鋼 未焼鈍材Photo 1 Microstructures before cold forging  
(a) Annealed S38C (b) Developed steel without annealing

2024 年 9 月 17 日受付

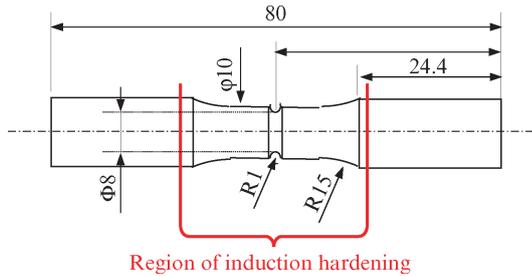


図2 回転曲げ疲労試験片

Fig. 2 Shape of rotation bending fatigue test piece

表2 高周波熱処理条件

Table 2 Test conditions of induction hardening

Quenching	Temperature (°C)	900
	Heating time (s)	1.3
	Cooling	Jet cooling with aqueous polymer solution
Tempering	Temperature (°C)	90
	Holding time (ks)	3.6
	Cooling	Air

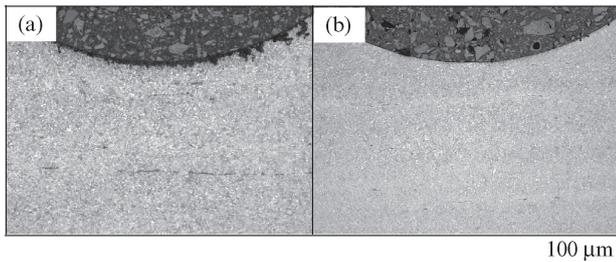


写真2 高周波熱処理後の疲労試験片ノッチ近傍マイクロ組織  
(a) S38C (b) 開発鋼

Photo 2 Microstructures near the notch of fatigue test specimen after induction hardening  
(a) S38C (b) Developed steel

### 2.3 高周波熱処理材の特性評価

高周波熱処理後の特性評価として回転曲げ疲労試験を実施した。試験片作製手順は部品製造工程を想定し、冷間伸線で冷間鍛造を模擬し、その後、調質の目的でQTを施した。

次いで、QT材より、図2に示すような半径1 mmのノッチを有する回転曲げ疲労試験片を採取した。高周波熱処理の条件は、表2のとおりとし、試験片のノッチ部を含む範囲を対象とした。

写真2に高周波熱処理後のマイクロ組織を示す。S38Cおよび開発鋼ともに均一なマルテンサイト組織を呈している。S38Cでは焼鈍材を、開発鋼では未焼鈍材を用いたが、高周波熱処理の前に施した調質(QT)により、両鋼種の組織はマルテンサイト組織に変化した。このため、続く高周波熱処理後の組織に、焼鈍有無の影響は現れないと推定される。

表3 高周波熱処理後の硬度データ

Table 3 Hardness data after induction hardening

	S38C	Developed steel
Surface hardness (HV0.3)	605	617
Hardening depth (mm)		
Distance from surface with 400 HV or higher	2.0	1.8

[Procedures of fatigue test]

S38C - Annealing - Cold drawing - QT - Induction hardening  
Dev. - [Annealing free] - Cold drawing - QT - Induction hardening

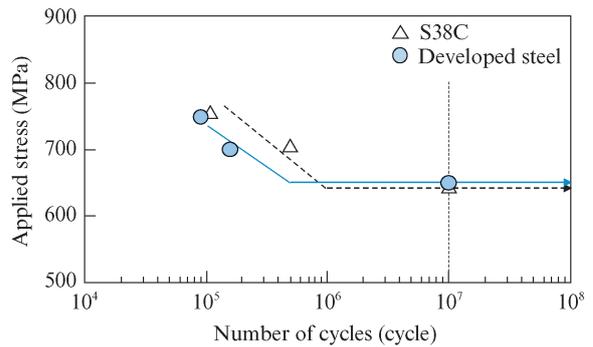


図3 回転曲げ疲労試験結果

Fig. 3 Results of rotation bending fatigue test

表3に高周波熱処理後の硬度データを示す。ここで、表面硬さは表面下0.1 mmのピッカース硬度を、硬化層深さは400以上のピッカース硬度を有する表面からの距離で評価した。S38Cおよび開発鋼は同程度の硬度および焼入れ性を示した。

図3に高周波熱処理した試験片で回転曲げ疲労試験を行った結果を示す。S38Cおよび開発鋼は同程度の疲労強度であり、写真2や表3に合致する結果が得られている。

以上より、冷間鍛造性に優れた開発鋼は、軟化焼鈍の省略を可能とし、なおかつ高周波熱処理後には従来の炭素鋼と比較して遜色ない硬度および疲労特性を有することが示された。

### 3. おわりに

今回紹介した、焼鈍熱処理を省略可能な高周波焼入れ用鋼は、お客様の部品製造工程のCN化に貢献する新材料であると期待している。この他にも、当社では浸炭焼入れ用の熱処理省略鋼JECF<sup>®</sup>を開発しており<sup>3)</sup>、今後もお客様ニーズに対応した新商品開発に取り組んでいきたい。

#### 参考文献

- 1) 竹内伸. 鉄合金の固溶強化. 鉄と鋼. 1969, vol. 55, no. 1, p. 69-83.
- 2) 田代均, 佐藤洋. 共析鋼のパーライトのラメラ間隔および配向度

及ぼす合金元素の影響. 日本金属学会誌. 1991, vol. 55, no. 10, p. 1078-1085.

- 3) 今浪祐太, 富田邦和, 西村公宏. 部品生産工程を革新する浸炭用棒鋼線材. JFE 技報. 2017, no. 39, p. 37-42.

〈問い合わせ先〉

JFE スチール スチール研究所 構造材料研究部

TEL: (086) 447-3897 FAX: (086) 447-3936