

# マイルド浸炭用鋼 MSB20 の開発

大林 巧治<sup>1)</sup> 岡田 一晃<sup>2)</sup> 笠井 大介<sup>3)</sup>  
 安達 裕司<sup>4)</sup> 佐藤 裕和<sup>5)</sup> 杉浦 孝佳<sup>6)</sup>  
 伊藤 誠司<sup>7)</sup>\*\* 小澤 修司<sup>8)</sup>\*\* 小山 達也<sup>9)</sup>\*\*

## 1. はじめに

近年、CO<sub>2</sub>排出量を低減するため、自動車産業では自動車の燃費向上が最重要課題となっている。燃費向上を実現するためには、自動車用部品の高強度化を図り小型軽量化する必要がある。歯車は自動車の動力伝達や変速に使用される部品の一つであり、JIS SCM420 を代表とする Cr や Mo を添加した合金鋼に浸炭焼入れして製造される場合が大半である。一方、合金元素の価格高騰や将来的な資源枯渇問題が急激に顕在化しており、新たなニーズとしてコスト変動が小さく供給不安の少ない省合金型の鋼材設計が強く望まれている。こうした省合金型鋼材を用い、かつ歯車の高強度化を同時実現するためには、従来の浸炭焼入れとは異なる新たな製造プロセスとそれに適した鋼材開発が必要である。

新たな製造プロセスとして、アイシン・エイ・ダブリュ株は、短時間で処理でき、省エネルギーかつクリーンな「高周波焼入れ」にこだわり、その弱点を補うべく「真空浸炭」を組合せた2ヒートの複合熱処理であるマイルド浸炭プロセス<sup>(1)</sup>(以下、マイルド浸炭と称す。)を開発し、2006年より量産している。著者らは、マイルド浸炭の特徴を最大限発揮できるように、鋼材の成分最適化を図り、歯車の高強度化と鋼材成分の省合金化を可能とするマイルド浸炭用鋼 MSB20 を開発した。本報では、MSB20 について開発の考え方と諸特性を紹介する。

## 2. マイルド浸炭用鋼 MSB20 のコンセプト

### (1) マイルド浸炭の特徴

本報の開発対象プロセスであるマイルド浸炭は、真空浸炭装置と高周波焼入れ装置から構成(図1)され、加熱後に減圧下で浸炭し、次いで室温まで徐冷した後、高周波誘導加熱後に水焼入れを行う表面硬化処理プロセスであり、真空浸炭と高周波焼入れそれぞれの特徴を上手く活用している。

真空浸炭の特徴は、炭化水素ガスの分解反応により浸炭することであり、CO/CO<sub>2</sub>ガスの平衡反応で浸炭するガス浸炭とは異なり粒界酸化が抑制されることである。またガス浸炭では Si 濃度が高いと酸化被膜を形成し、浸炭されない<sup>(2)</sup>が、真空浸炭は浸炭中に酸化被膜を形成しないため、素材 Si 濃度を制約する必要がなく、Si 濃度の成分設計自由度が大きくなる。

高周波焼入れの特徴は、短時間加熱、焼入れのため結晶粒を微細化できることであり、例えばガス浸炭焼入れで用いられる Nb, Ti 等のマイクロアロイ元素添加による結晶粒粗大化抑制対策は必要ない。加えて高周波焼入れでは水を冷媒とすることができるため、ガス浸炭焼入れで一般的に採用される油冷却に比べ冷却速度が速い。この急速冷却の採用により、浸炭量は、ガス浸炭の表面炭素濃度0.8%に対して、マイルド浸炭では0.6%まで軽浸炭化が可能となり、鋼材の焼入れ性は必要最低限にすることができる。つまり焼入性向上元素の添加量を低減できる。

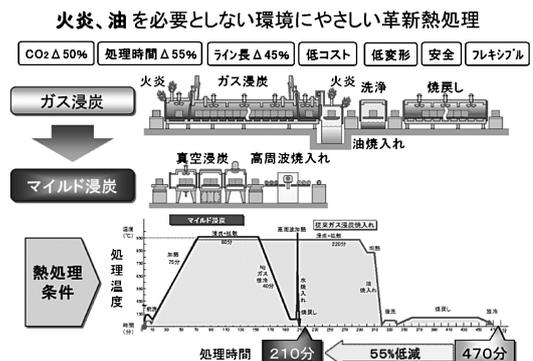


図1 マイルド浸炭の構成。

\* アイシン・エイ・ダブリュ株式会社；  
 1) 執行役員 2) 主任研究員 3) GM  
 \*\* 愛知製鋼株式会社；4) 主査 5) 一般 6) 一般  
 \*\*\* 新日鐵住金株式会社；7) 室長 8) 主幹 9) 主任研究員  
 Development of Gear Steel MSB20 for the Hybrid Process of Vacuum Carburizing with Induction Hardening; Koji Obayashi\*, Kazuaki Okada\*, Daisuke Kasai\*, Yuji Adachi\*\*, Hirokazu Sato\*, Takayoshi Sugiura\*\*, Seiji Ito\*\*\*, Shuji Kozawa\*\*\* and Tatsuya Koyama\*\*\*(\*AISIN AW CO., LTD.. \*\*Aichi Steel Corporation. \*\*\*NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION.)  
 2017年10月31日受理[doi:10.2320/materia.57.72]

マイルド浸炭は、真空浸炭と高周波焼入れの特徴を上手く複合し活用した独創的なプロセスであり、またマイルド浸炭を活用することで従来の成分制約にとらわれない自由度の高い鋼材設計が可能となる。

## (2) 歯車に求められる強度特性と鋼材成分の考え方

上述したマイルド浸炭の特徴を活かして歯車の歯面疲労強度と歯元疲労強度を共に向上可能な鋼材成分を検討した。

歯面疲労破壊の代表的な損傷であるピッチングは、駆動中に歯面同士の摩擦発熱により歯面温度が300°C程度まで上昇し、焼戻され硬さが低下することによって起きる破壊である。そのため、歯面疲労強度と300°C焼戻し硬さには良い相関関係が成り立つ<sup>(3)</sup>。300°C焼戻し硬さを高めるにはSiが有効であることが知られている<sup>(4)</sup>。マイルド浸炭は真空浸炭を行うため、酸化被膜形成による浸炭性の低下が生じないことから、従来の肌焼鋼に比べて素材Si濃度を高めた設計を行った。

歯元曲げ疲労破壊は、応力集中部となる歯元近傍で発生する破壊であり、表層硬さ、粒界強度、圧縮残留応力が支配因子である<sup>(5)(6)</sup>。

歯元部の表層硬さは、焼入れてマルテンサイト組織が得られればC濃度で一義的に決まり、C濃度は浸炭工程で調整できる。従ってマルテンサイト組織を得るために必要な鋼材の焼入性を考慮した成分設計を行う必要がある。マイルド浸炭では、高周波誘導加熱後に水焼入れを行うため、ガス浸炭焼入れに比べて格段に速い冷却速度となり、必要な鋼材の焼入性もガス浸炭に比べて低減できる。従ってMn、Cr、Mo等の焼入性向上元素の添加量は必要最小限に留めた設計を行った。

粒界強度は、粒界での粗大 $\theta$ (セメントイト)の析出やPなどの脆化元素の偏析によって低下する。そのため粒界での $\theta$ 析出を抑制し、脆化元素の偏析を抑制できる成分設計を行う必要がある。真空浸炭では、黒鉛と平衡する相が $\gamma$ (オーステナイト)と $\theta$ の二相となる場合に粒界に $\theta$ が析出しやすい<sup>(7)</sup>ことから、鋼材の成分によっては浸炭中の粒界 $\theta$ の析出を抑制できない。素材のCr濃度の低下やSi濃度の上昇により黒鉛と平衡する炭素濃度が低下し、鉄炭素系状態図の $\theta$ 相が存在する領域が小さくなる<sup>(8)</sup>ことが知られている。これらの知見に基づき、粒界での $\theta$ 析出を抑制するためSi、Crに着目し、熱力学的に $\gamma$ と $\theta$ の二相領域が存在しない成分バランスを検討した。真空浸炭中の粒界 $\theta$ の析出を抑制可能なSi、Crバランスを検討し、開発鋼の成分をCr未添加(不純物レベル)、0.8%Siとした。脆化元素Pの粒界偏析対策としてはBを活用した。鋼中のBは、サイトコンペティション効果による粒界P濃度の低減による粒界強化と、B自体の粒界強化により疲労き裂の伝ばが遅延する効果<sup>(9)</sup>が期待できるからである。

## (3) MSB20の化学成分

上記の考え方に基づき、疲労強度向上に加え、経済合理性の観点で、可能な限りレアメタルを低減する鋼材成分を検討し、MSB20を開発した。開発鋼MSB20とSCM420について

表1 化学成分[mass%].

Steel grade	C	Si	Mn	Cr	Mo	B
MSB20	0.20	0.80	0.80	未添加	未添加	添加
SCM420	0.20	0.24	0.80	1.12	0.16	未添加

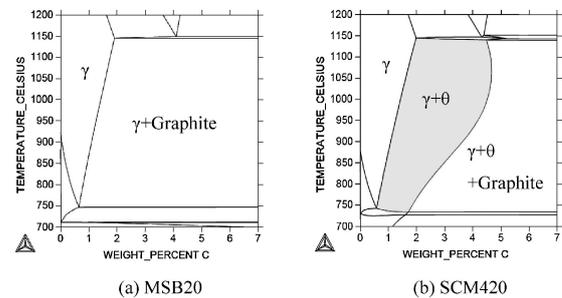


図2 MSB20とSCM420の鉄炭素系状態図。

て、表1に化学成分を、図2に熱力学平衡計算による鉄炭素系状態図を示す。

SCM420には、Agra.線の低炭素側に $\gamma$ と $\theta$ の共存相が存在するため、真空浸炭中に粒界 $\theta$ を析出する可能性があるが、開発鋼MSB20には $\gamma$ と $\theta$ の共存相が存在しないため粒界 $\theta$ の析出を抑制できる。

本開発鋼の特徴はSi、CrおよびBである。Siは焼戻し軟化抵抗向上の観点から高濃度を指向し0.8%Siとした。Crは真空浸炭時の粒界 $\theta$ 抑制の観点から未添加とした。更に脆化元素の粒界偏析抑制としてP濃度は可能な限り低下させ、且つ微量B添加による強化を図っている。

## 3. マイルド浸炭用鋼MSB20の性能

開発したMSB20の歯面疲労強度、曲げ疲労強度について、一般的にガス浸炭焼入れに用いられるSCM420と比較評価した。

ローラーピッチング試験結果を図3に示す。ローラーピッチング試験で発生した損傷は、全て歯面疲労を代表するピッチング損傷であった。歯面疲労強度を比較するとマイルド浸炭したMSB20の $10^7$ 回耐久面圧は3500MPaに対してガス浸炭焼入れしたSCM420は2800MPaと、マイルド浸炭し

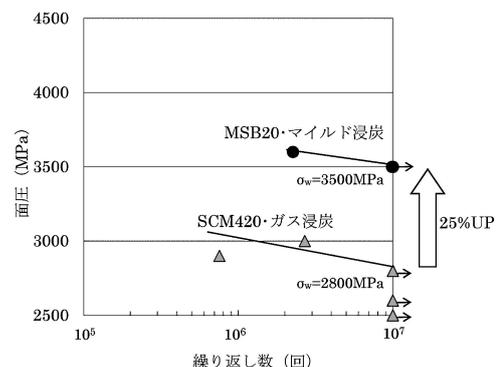


図3 ローラーピッチング試験結果。

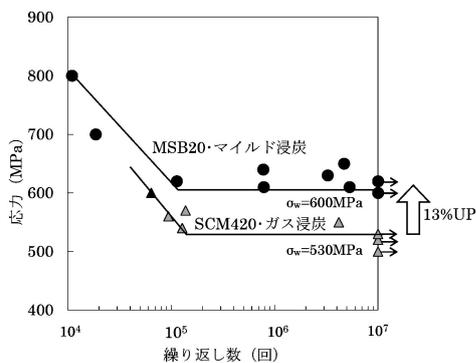


図4 小野式回転曲げ疲労試験結果.

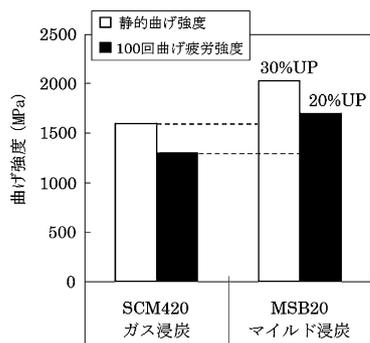


図5 静的曲げ強度および100回曲げ疲労強度結果.

たMSB20はガス浸炭焼入れしたSCM420に対して歯面疲労強度が25%向上した。

小野式回転曲げ試験の結果を図4に示す。マイルド浸炭したMSB20の $10^7$ 回耐久強度は600MPaであり、ガス浸炭焼入れしたSCM420に対し13%向上する。これは、不完全焼入れ層の抑制により表面近傍の硬さが高いこと、表面の圧縮残留応力が高いことが主要因で曲げ疲労強度が向上したものと考えられる。

静的曲げ強度および100回曲げ疲労強度を図5に示す。マイルド浸炭したMSB20の静的曲げ強度および100回曲げ疲労強度は2000MPa、1700MPaであり、ガス浸炭焼入れしたSCM420に対しそれぞれ30%、20%向上する。これは、Bの効果で粒界脆化を抑制し、粒界強度が向上したためと考えられる。

#### 4. MSB20を使用した歯車部品の品質

MSB20のマイルド浸炭とSCM420のガス浸炭を行った量産中の歯車について、硬さ分布を図6に示す。ガス浸炭と同等以上の品質を有し、曲げ疲労強度向上により部品の小型、軽量化を達成した。表2にMSB20を使ったマイルド浸炭の効果のまとめを示す。疲労強度の向上に加えて、CO<sub>2</sub>排出量の低減や工場の環境・安全面の改善、部品精度の向上も同時実現を達成できている。

#### 5. マイルド浸炭用鋼MSB20の適用状況と今後

MSB20は、アイシン・エイ・ダブリュ株式会社、愛知製鋼株式会社、

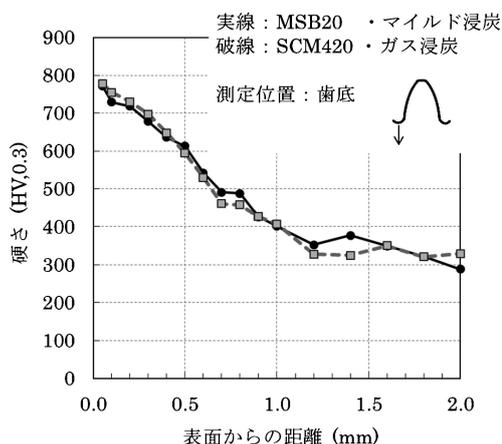


図6 歯車部品の硬さ分布.

表2 マイルド浸炭の効果.

熱処理	ガス浸炭	マイルド浸炭	効果
材料	SCM420	SCM420 MSB20	
歯面疲労強度	100%	113% 125%	25%改善
CO <sub>2</sub> 排出量	900 ton/year	450 ton/year	50%低減
変形	100%	60%	40%低減
処理時間	470 min	210 min	55%低減
ライン長	47 m	26 m	45%低減
レアメタル	Cr, Mo	Cr, Mo フリー	100%低減
安全		炎, 油 フリー	100%低減

新日鐵住金㈱で共同開発した鋼材であり、本技術を適用した歯車部品は2013年1月よりアイシン・エイ・ダブリュ㈱で量産を開始している。2017年末の時点で、年間190 tonのレアメタル削減を達成した。仮に、日本で流通するSCM420材に、本技術を適用すると、年間7,800 ton(推定)ものレアメタル削減ができる試算になる。将来、サステナブル社会の実現に向けた技術として、様々な部品のものづくりに関わるエネルギー消費の抑制および省資源化を促す方策となるMSB20とマイルド浸炭技術の展開を進めていく。

#### 6. 特 許

特許第5301728号、特許第5422045号が登録されている。

#### 文 献

- (1) 岡田一晃, 大林巧治: 熱処理, **56**(2016), 11-15.
- (2) 小山達也, 久保田 学, 吉田 卓: 鉄と鋼, **101**(2015), 252-259.
- (3) 紅林 豊: 第188・189回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, **83**(2006)
- (4) 茨木正雄, 奥村俊邦: 日本金属学会誌, **191**(1955), 223-226.
- (5) 越宗昌之, 松井勝幸, 高橋宏治, 中尾 航, 安藤 柱: ばね論文集, **54**(2009), 19-26.
- (6) 森田敏之, 松村康志, 梅本実: 電気製鋼, **79**(2008), 15-23.
- (7) 森田敏之, 井上幸一郎, 羽生田智紀: 電気製鋼, **77**(2006), 5-9.
- (8) 森田敏之, 松村康志: 電気製鋼, **81**(2010), 109-116.
- (9) 越智達朗, 間曾利治, 寺本真也, 久保田 学: ばね論文集, **57**(2012), 1-8.