

# 鉄鋼材料表層における相変態誘起ナノ組織制御による 転動疲労高特性化

豊橋技術科学大学 機械工学系

戸高 義一

## 1. はじめに

自動車をはじめとする工業製品には、長期間すべり・転がり接触を受ける歯車や軸受などの転動部品が多数使われている。これらの転動部品では、転動面直下において亀裂の発生・進展・剥離（転動疲労）が生じることがある。自動車の電動化などにより、その使用環境の過酷さが増していることから、その対策が急がれている。転動疲労高特性化のための有効な手段の一つに、摩擦係数（ $\mu$ ）の低減が挙げられる。<sup>1),2)</sup> 転動疲労環境下におけるせん断応力分布に及ぼす $\mu$ の影響について調査し、低 $\mu$ 化が平均応力の減少をもたらすことで転動疲労の高寿命化に寄与することなどが明らかとなった。<sup>1),2)</sup>

著者らは近年、鉄鋼材料のナノ組織制御（組織微細化）に基づき、油潤滑環境下において低 $\mu$ 化できることを明らかにした。<sup>3-7)</sup> これは、組織微細化に伴う結晶粒界や転位などの格子欠陥導入により結晶性が低下して原子変位の自由度が増すことで、潤滑油・添加剤分子の鉄鋼材料表面への吸着の促進が起源の一つと考えられる。<sup>8),9)</sup>

組織微細化の方法として、強ひずみ加工の他に、鉄鋼材料においては相変態（マルテンサイト変態）を活用した熱処理による方法が挙げられる。Grange<sup>10),11)</sup> は、急速加熱と焼入れを繰り返すことにより、マルテンサイト組織が微細化することを報告した。マルテンサイト相を昇温してオーステナイト相へ変態させると、マルテンサイト組織における多数の核生成サイトから拡散型変態によって微細なオーステナイト粒が形成し、その後の焼入れにより微細なマルテンサイト組織となる。<sup>12)</sup> この熱処理による組織微細化に伴う力学的高機能化を目的として、これまで多くの研究が行なわれ、工業的応用も進んでいる。

本研究では、高周波焼入れ（IHQ, Induction Heating and Quenching）処理を活用し、鉄鋼材料にける相変態（マルテンサイト変態）誘起のナノ組織制御（組織微細化）により、潤滑油分子の鉄鋼材料表層への吸着性・反応性を促進させることで、低 $\mu$ 化とそれに伴う転動疲労の高特性化を目的とする。

## 2. 実験方法

供試材として、機械構造用鋼 S55C, SCM440H を使用した。IHQ 処理条件の調整により、オーステナイト（ $\gamma$ ）組織およびマルテンサイト（ $\alpha'$ ）組織を制御した。光学顕微鏡（OM）、SEM（二次電子、反射電子（BSE）、EBSD）により組織観察を、SEM-EDX, XRF により組成分析を、XRD により転位密度測定を行なった。硬さ測定にはビッカース硬さ（HV）試験機を用いた。摺動特性はリング・オン・リング型トラクション（Tr）試験により、また、転動疲労特性はローラー・ピッチング（RP）試験により評価した。両試験は、相手材（大リング）：JIS SCM420H（浸炭処理材、表面硬さ：HV 7.5 GPa）、回転速度：1500 rpm、滑り率：- 40 %、潤滑油：Nissan Automatic Fluid D、油温：80 °C の条件で行なった。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 摺動特性

摺動特性に及ぼす格子欠陥種の影響を調査するため、S55C 鋼に対して IHQ 処理および焼戻し処理を施した。IHQ 処理後に 160°C で焼戻し処理を行なうことで  $\alpha'$  組織を安定化させ、また、500°C で焼戻し処理を行なうことで  $\alpha'$  組織の大きさ・形態（結晶粒界密度）を変えずに転位密度のみを変化させた。図 1 に、それらの試料における SEM 組織を示す。1 回のみ IHQ 処理を行なった粗粒材に比べ、4 回繰返し IHQ 処理した細粒材では微細な  $\alpha'$  組織が観察された。160°C 焼戻し処理した試料において、旧  $\gamma$  粒径 ( $d_\gamma$ ) は粗粒材: 41  $\mu\text{m}$ 、細粒材: 2.6  $\mu\text{m}$  であった。また、転位密度 ( $\rho$ ) および表面のビッカース硬さ (HV) は両試料とも等しく、それぞれ  $\rho$   $4.8 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 、HV 7.7 GPa であった。（転位密度測定には、転位の回復が生じない 350°C 焼戻し処理した試料を用いた。）500°C で焼戻し処理した試料では、160°C 焼戻し材と比べて  $\alpha'$  組織の著しい変化は認められず、微細な焼戻しセメンタイトの析出が観られる程度の組織変化であった。転位密度については、一桁程度の低下が確認された。また、ビッカース硬さは HV 4 GPa 程度にまで低下した。

図 2 に、Tr 試験（試験荷重: 300 N）の結果を示す。160°C、500°C 焼戻し材どちらにおいても、細粒材のトラクション係数（摩擦係数  $\mu$ ）が低いことが分かる。160°C 焼戻し処理材では、細粒材は粗粒材に比べて、試験時間（摺動距離）の増加に伴う  $\mu$  の低下が大きく、試験時間 60min 後には粗粒材に比べ 10% 超の  $\mu$  低下が認められた。500°C 焼戻し材では、試験開始直後において  $\mu$  低下が粗粒材に比べて細粒材で大きかった。

図 3 に、Tr 試験した 160°C 焼戻し材の摺動面における組成分析の結果を示す。SEM-BSE（反射電子）観察において、コントラストは原子番号に依存し、軽い元素は暗く、重い元素は明るく観察される。粗粒材、細粒材の非摺動面において BSE 像に違いはないが、摺動面においては細粒材で濃灰色の領域が広範囲に観られた。この濃灰色の領域は、SEM-EDX において酸素 (O) 濃度が高くリン (P) も検出された。これらのことから、組織微細化により潤滑油・添加剤分子の吸着・反応が促進され、リン酸鉄 (Fe-O-P) 系化合物が試料表面に形成し、試料表面を保護することで低  $\mu$  化したと考えられる。

細粒材において、500°C 焼戻し処理により低  $\mu$  化の程度が小さくなっていることから、高転位密度化も結晶粒界密度の増加と同様に、潤滑油・添加剤分子の試料表面への吸着・反応促進と、それに伴う低  $\mu$  化への寄与が大きいことが分かる。ここで、硬さの影響についても注意が必要である。160°C、500°C で焼戻しした粗粒材、細粒材の硬さはほぼ同じであったことから、細粒材における低  $\mu$  化の起源は、硬さの影響は小さく、組織微細化（格子欠陥密度の増加）であることが分かる。

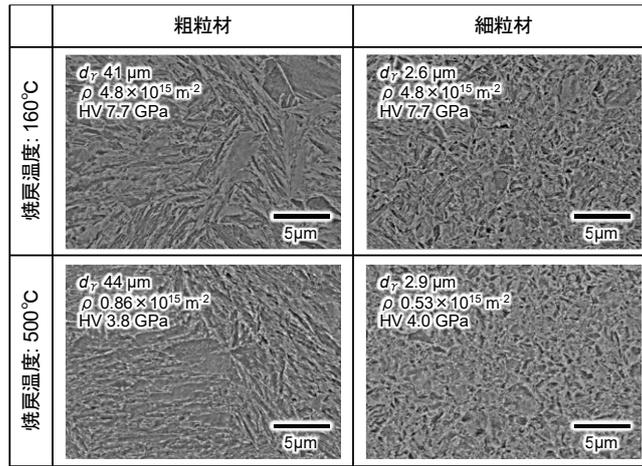


図 1. IHQ・焼戻し処理した S55C 鋼の SEM 組織 (ナイトール腐食)

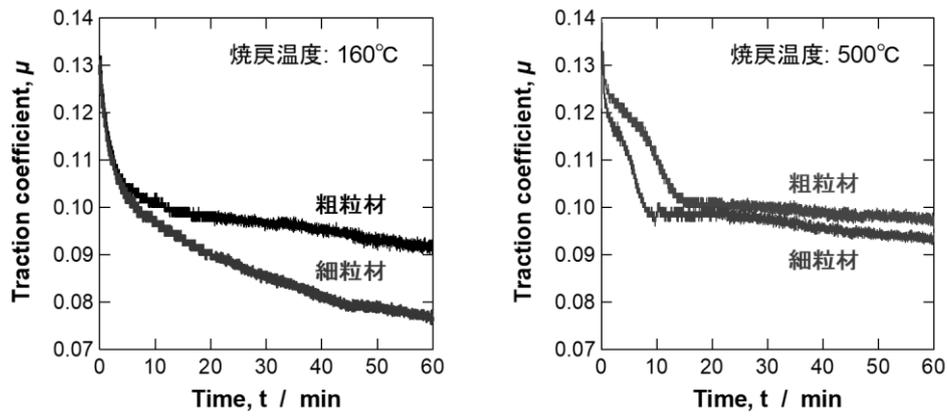


図 2. IHQ・焼戻し処理した S55C 鋼の Tr 試験結果

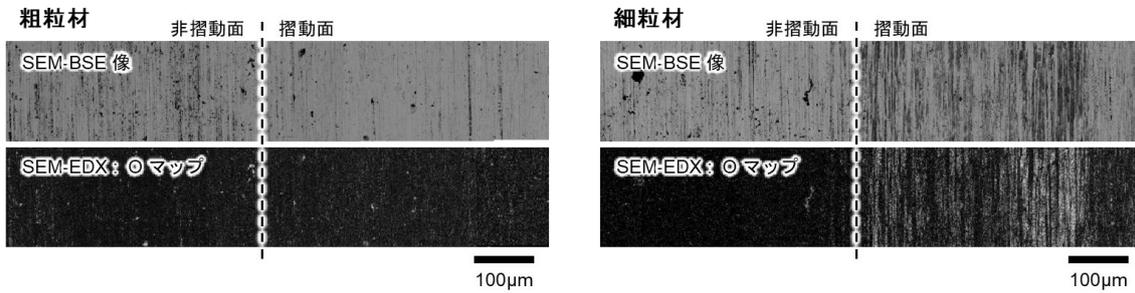


図 3. Tr 試験した 160°C 焼戻し材の摺動面における組成分析結果

### 3. 2 転動疲労特性

転動疲労特性に及ぼすナノ組織化（組織微細化）の影響を調査するため、SCM440H 鋼に対して IHQ 処理および焼戻し処理を施した。IHQ 処理温度などの条件を適切に設定することで、 $\gamma$  組織および  $\alpha'$  組織の大きさを制御した。IHQ 処理温度を比較的高く設定して粗粒材を、また、低く設定して細粒材を作製した。IHQ 処理後に 160°C 焼戻し処理を行ない、 $\alpha'$  組織を安定化させた。図 4 に、IHQ・焼戻し処理した試料における  $\alpha'$  組織および旧  $\gamma$  粒組織を示す。SEM-EBSD 観察により、粗粒材に比べ細粒材において  $\alpha'$  組織が十分に微細化していることが分かった。また、OM 観察の結果、 $d_\gamma$  は粗粒材: 28  $\mu\text{m}$ 、細粒材: 3  $\mu\text{m}$  であった。また、表面のビッカース硬さは両試料とも概ね等しく、それぞれ HV 6.4 GPa, HV 6.5 GPa であった。

図 5 に、RP 試験の結果を示す。最大ヘルツ応力 ( $\sigma_{\text{max}}$ ): 3000 MPa における両試料の疲労寿命に大差はなかったが、 $\sigma_{\text{max}}$ : 2000, 2200, 2500 MPa では細粒材は粗粒材と比べて長寿命化した。XRF による組成分析の結果、転動疲労面において P のピークを検出した。Tr 試験の結果を踏まえて考察すると、比較的低い  $\sigma_{\text{max}}$ : 2000, 2200, 2500 MPa の試験条件では、組織微細化により形成が促進した Fe-O-P 系化合物による試料表面の保護と低  $\mu$  化に起因して長寿命化したと考えられる。 $\sigma_{\text{max}}$ : 3000 MPa にて RP 試験した転動疲労面においても、XRF 分析により P のピークが検出された。また、硫黄 (S) のピークも検出された。これらのことから、Fe-O-P 系化合物とともに、硫化鉄 (Fe-S) 系化合物も形成したことが示唆された。このように、 $\sigma_{\text{max}}$ : 3000 MPa の条件においても化合物の形成が認められるものの、転動疲労の長寿命化への組織微細化の寄与は大きくなかった。この理由として、試験荷重が大きいことで、表面起因の破壊から内部起因の破壊へ変化したことが考えられるため、引き続き調査を継続する。

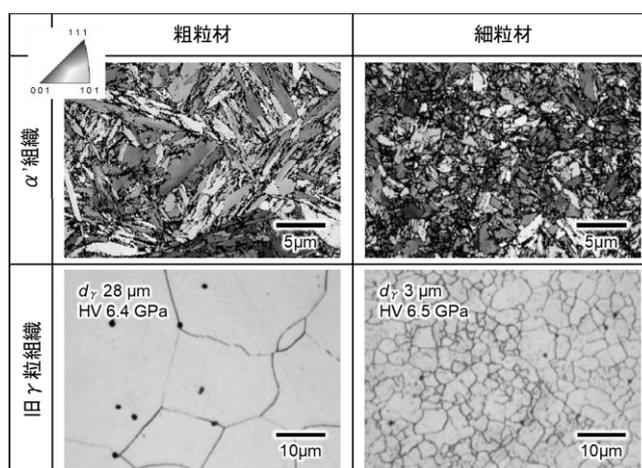


図 4. IHQ・焼戻し処理した SCM440H 鋼の  $\alpha'$  組織 (SEM-EBSD, ナイタール腐食) および旧  $\gamma$  粒組織 (OM, ピクリン酸腐食)

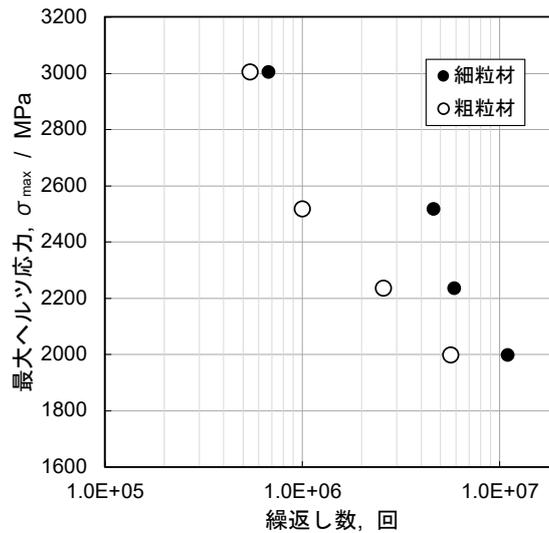


図 5. IHQ・焼戻し処理した SCM440H 鋼の RP 試験結果

#### 4. まとめ

IHQ 処理の条件を適切に設定することで、鉄鋼材料にける相変態（マルテンサイト変態）誘起のナノ組織制御（組織微細化）を行ない、摺動特性および転動疲労特性に及ぼす組織微細化の影響を調査した。

相変態を活用した組織微細化により高密度に格子欠陥（結晶粒界，転位）を導入することで，強ひずみ加工の場合と同様に，潤滑油・添加剤分子の試料表面への吸着・反応促進と，それに伴う低 $\mu$ 化および転動疲労における長寿命化を達成できた。

本研究では，一般的な熱処理である IHQ 処理により，汎用的な鋼種へ高密度に格子欠陥を導入することで，摺動・転動疲労特性を向上できることを示した。この成果は，我が国の工業技術水準の向上に寄与するものである。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり，高周波焼入れ処理およびローラーピッチング試験について高周波熱錬株式会社 塚原真宏氏，井戸原修氏から，また，転位密度測定について株式会社リガク 根津暁充氏から，多大なご支援を頂きました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) N. Adachi, Y. Todaka, T. Masaki, Y. Shiihara, T. Suzuki, M. Tsukahara, O. Idohara: ISIJ Int., 62 (2022), 2147.
- 2) 椎原良典, 梅野宜崇, 足立望, 戸高義一: 日本機械学会論文集, 86 (2020), 19-00270.
- 3) 戸高義一, 戸田健一, 堀井基弘, 梅本実: 鉄と鋼, 101 (2015), 530.

- 4) N. Hyodo, N. Adachi, M. Hino, Y. Todaka, Y. Oba: *Procedia Manuf.*, 15 (2018), 1693.
- 5) 岡田一晃, 大林巧治, 戸高義一, 足立望, 光原昌寿: *鉄と鋼*, 106 (2020), 194.
- 6) N. Adachi, Y. Matsuo, Y. Todaka, M. Fujimoto, M. Hino, M. Mitsuhara, Y. Oba, Y. Shiihara, Y. Umeno, M. Nishida: *Tribol. Int.*, 155 (2021), 106781.
- 7) 戸高義一, 足立望: *表面技術*, 71 (2020), 756.
- 8) I. Lobzenkoa, Y. Shiihara, A. Sakakibara, Y. Uchiyama, Y. Umeno, Y. Todaka: *Appl. Surf. Sci.*, 493 (2019), 1042.
- 9) I. Lobzenko, Y. Shiihara, Y. Umeno, Y. Todaka: *Appl. Surf. Sci.*, 543 (2021), 148604.
- 10) R.A. Grange: *Trans. ASM*, 59 (1966), 27.
- 11) R.A. Grange: *Metall. Trans.*, 2 (1971), 65.
- 12) T. Furuhashi, K. Kikumoto, H. Saito, T. Sekine, T. Ogawa, S. Morito, T. Maki: *ISIJ Int.*, 48 (2008), 1038.