



特集記事・6

鉄鋼材料を活かすナノ組織制御技術

高周波熱処理による組織微細化のメタラジー

Metallurgy in Microstructure-refining of Steels by Induction Heat-treating

越智達朗
Tatsuro Ochi

新日本製鐵(株) 技術開発本部
室蘭技術研究部長

1 はじめに

高周波熱処理は、高周波誘導加熱（コイルに高周波電流を流して交番磁束を発生させると、コイル中の鋼材が非接触で自己発熱する現象）を利用した熱処理であり、急速加熱、表面加熱および部分加熱が可能である点が他の熱処理方法と比較して特徴的である。工業的な適用事例としては、スルーハード部品と表面硬化部品に大別される。後者は、高周波誘導電流の表皮効果による表面加熱の特徴を活用し、表面のみが焼入れ硬化される部品である。前者の代表的な事例として懸架ばね、弁ばねが、後者の代表的な事例として等速ジョイント部品、歯車等が挙げられる¹⁻⁴⁾。いずれの場合も熱処理部は焼戻しマルテンサイト組織であり、焼入れのみに高周波加熱が適用されている場合と、焼入れー焼戻しの両過程ともに適用されている場合がある。

高周波熱処理の最大の特徴は、急速加熱であり、「高周波焼入れー焼戻し」は、「急速加熱焼入れー焼戻し」と言い換えてもよい。高周波熱処理は、焼入れー焼戻し過程に「急速加熱」という条件を織り込むことにより、炭化物・析出物を微細分散、粒界偏析・粒界析出を制御し、組織の微細化と高強度化を実現するという、非常に合理的なプロセスである。また、「マルテンサイト変態ー焼戻し炭化物反応」は歴史のある技術領域ではあるが、「急速加熱」という新たな概念が付け加わることで、特徴的な冶金現象が発現してきており、高周波熱処理は新たな展開性に富んだ技術分野となっている。

表1に組織制御の視点から高周波熱処理の特徴と留意点を示す。高周波焼入れ時の急速加熱による組織の微細化が最大の特徴であり、高周波焼入れ条件の適性化を図れば、粒度番号12番（粒径約5 μ m）程度の細粒オーステナイト粒組織が、繰り返し処理をしなくとも、一回の高周波焼入れ処理において得られる。但し、これは留意点の「炭化物の未固溶」と裏腹の関係にあり、鋼材、プロセス等により、その都度高周波

表1 組織制御の視点から高周波熱処理の特徴と留意点

	特徴	留意点
高周波焼入れ	細粒化	・セメンタイトの未固溶 ・前組織：セメンタイトの安定性、 初析フェライトサイズ(巾)
高周波焼戻し	・粒界セメンタイト低減 ・粒内セメンタイト微細分散	

焼入れ条件の最適化を図っていく必要がある。また、焼戻し時の急速加熱による炭化物の微細分散手法としても、近年高周波熱処理の活用が注目されている。

本報告では、機械構造用特殊鋼を例に挙げて、スルーハード部品と表面硬化部品の両者で取り組まれている現状のオーステナイト粒・炭化物の微細化技術の一端を紹介する。

2 高周波焼入れによるオーステナイト粒細粒化

高周波焼入れによるオーステナイト粒の細粒化効果については、川寄^{5,6)}が加熱速度と保持時間の効果を分離した詳細な検討を行っている。川寄によると、急速加熱と短時間加熱の両者が細粒化に寄与しており、急速加熱の効果は、変態温度の高温側へのシフトによる核生成速度の増加の効果が成長速度の増加の影響を上回るためであるとしている。

急速加熱にともなう逆変態オーステナイト組織の生成には、セメンタイトの分散状態、旧オーステナイト粒組織、逆変態前組織の有効結晶粒径、回復・再結晶・粒成長挙動等の影響も顕著に受ける⁷⁾。つまり、逆変態オーステナイト組織は、急速加熱過程におけるセメンタイトの分解、マトリックス組織の粒成長・逆変態等の速度論的な競合現象の結果として得られる組織であり、前組織はいうまでもなくセメンタイトの安定性や一貫での製造履歴等が大きく影響する。

次に、急速加熱焼入れ材のオーステナイト粒度、硬さと加

熱温度の関係を図1にスキマティックに示す。適正な加熱温度範囲が存在し、加熱温度が低すぎると顕著な細粒組織が得られるものの炭素量に見合った所定の硬さが得られないこと、一方、加熱温度が高すぎると混粒組織となることがわかる。加熱温度が低すぎると炭素量に見合った所定の硬さが得られないのは、言うまでもなく、セメンタイトが未固溶のためである。

ここで、定常粒成長における結晶粒半径とピン止め粒子との関係は(1)式で表され($\beta=4/3$ のとき、Zenerの関係)⁸⁾、ピン止め粒子を多量微細分散することにより、細粒化が可能である。

$$R = \beta r / f \dots\dots\dots (1)$$

R：結晶粒半径、r：析出物半径、f：析出物の体積分率

焼入れ処理は、オーステナイト温度域(例えば、 A_3 点+約50℃)に一旦加熱・保定し、完全に溶体化(オーステナイト化)することが基本であるが、高周波焼入れにおいては、図1における「加熱温度が低すぎる」場合は勿論であるが、「適正な加熱温度範囲」においても、厳密には完全に溶体化(オーステナイト化)しておらず、後述するように微細な炭化物が溶け残り、ピン止め粒子として粒制御に寄与している。つまり、高周波焼入れは、短時間加熱の非平衡なオーステナイト化状態から焼入れする熱処理であり、高周波焼入れによる細粒化効果の一つの要因として、微細な炭化物の溶け残りが重要な役割を果たしている。そのため、鋼材毎に加熱条件(加熱速度、最高到達温度)の適性範囲を設定することが必要である。

前組織を適切に制御することに加えて、一貫工程において炭窒化物を積極的に制御することにより⁹⁾、一層の細粒化が

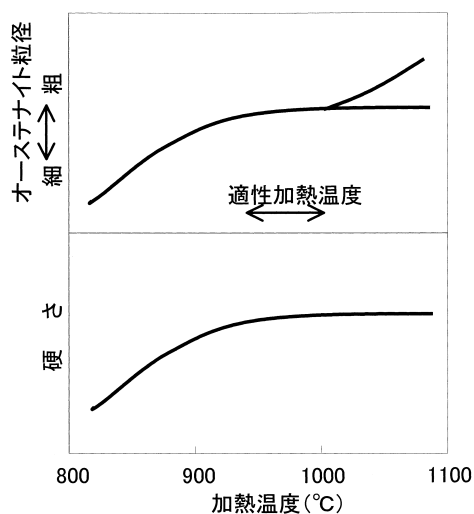


図1 急速加熱焼入れにおけるオーステナイト粒径、硬さと加熱温度の関係(概念図)

可能である。例えば、オーステナイト粒の粒度番号14番(粒径約2.5 μ m)程度までの細粒化が、繰り返し処理ではなく一回の高周波焼入れ処理において達成されている。

③ 急速・短時間加熱における留意点

高周波焼入れによる細粒化効果は上記のとおり微細な炭化物の溶け残り現象が重要な役割を果たしているが、炭化物が過剰に未溶解の状態では、「過ぎたるは及ばざるが如し」であり、硬さムラを生じたり、本来の硬さが得られなくなる。図2にS40C、S45Cの加熱時の変態温度に及ぼす加熱速度の影響を示す。図2より、①急速加熱により、 A_{C1} 点と A_{C3} 点の温度範囲が広がること、つまりオーステナイト化が開始してから完全に終了するまでに時間を要すること、②炭素量が低いほど、つまり初析フェライトの巾が大きいほどその挙動が顕著であることがわかる。これは、急速加熱時のオーステナイト化が、セメンタイトの溶解と初析フェライト領域の縮退によるオーステナイト領域の成長(炭素の拡散律速)に支配されるためである。

ここで、高周波焼入れにおいては、通常焼入れに比較して、焼入れ性に及ぼすCrの寄与が相対的に小さくなる。図3に0.9%Cr添加鋼の高周波焼入れ材の抽出レプリカTEM写真を示す。未溶解のセメンタイトが多数存在し、一部はラメラ

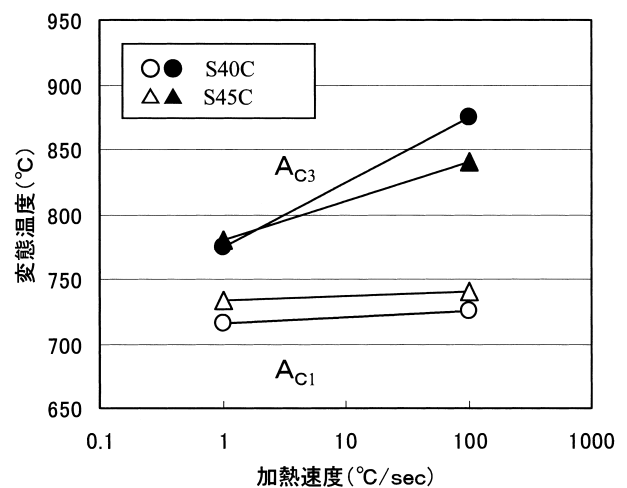


図2 加熱時の変態温度に及ぼす加熱速度の影響

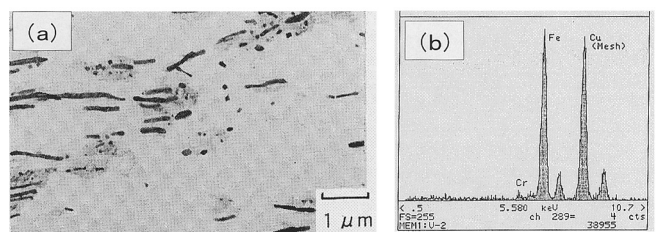


図3 高周波焼入れ材で観察された未固溶炭化物：(a) 抽出レプリカTEM像、(b) 炭化物のEDS分析結果

状を呈している。EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 分析の結果、セメンタイトからはCrが検出される。Crはセメンタイト中に固溶しセメンタイトを安定化する元素であり¹⁰⁾、そのため、急速加熱過程でセメンタイトの溶解を阻害する。

次に、図4にS45Cの前熱処理と高周波焼入れ材の硬さの関係を示す。硬さのバラツキは焼準材で小さく、球状化焼鈍材で最も大きい。初析フェライトの中(パーライト組織の間隔)は、球状化焼鈍材>焼鈍材>焼準材の順番であり、硬さのバラツキが初析フェライトの中が小さいほど小さくなることがわかる。なお、球状化焼鈍材では、セメンタイトが過度に安定化することによる悪影響も重畳している¹¹⁾。

以上のように、硬さムラを防止し、適性な硬さを得るためには、鋼材組成と組織の適性化が必要である。近年、浸炭歯車の代替として、高周波輪郭焼入れ用歯車のニーズが高まっているが、高周波輪郭焼入れにおいては、超急速加熱による均一溶体化が必須であり、これに適した鋼材が開発されている¹²⁾。

4 細粒化による粒界強化および短時間加熱による粒界性状の改善

構造用部材におけるオーステナイト粒細粒化の狙いは多くの場合、粒界強化にある。高周波焼入れによって製造される製品は、スルーハード材も表面硬化材とともに熱処理部は焼戻しマルテンサイト組織を有しており、衝撃試験、静的試験、疲労試験、遅れ破壊試験等においてオーステナイト粒界が破壊の単位になる場合が多い^{13, 14)}。一例として、高周波焼入れシャフトの静的破壊破面を図5に示す。従って、これらの部品では、粒界強化を図って粒界割れを防止すること、或いは粒界割れのままの場合でも、粒界強化そのものが部品の高強度化に直結する。

図6は、高周波焼入れ—低温焼戻し材において、細粒化に

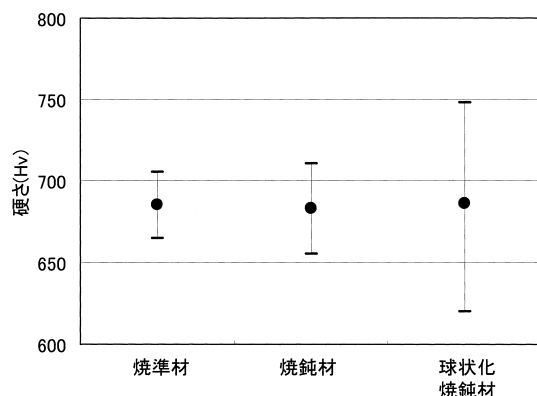


図4 前熱処理と高周波焼入れ後の硬さの関係 (S45C)

よりPの粒界偏析量 (AES (Auger Electron Spectroscopy) により計測) が低減された結果を示す。これは、偏析サイトである粒界面積が増加することにより、Pの偏析量が薄められたこと (溶質原子の粒界への平衡偏析濃度は粒径に比例する) が主要な原因である。なお、B添加は粒界強化の基本的手法として、種々の高周波焼入れ部品で着目されているが、これは図7のAES解析に示したように、旧オーステナイト粒界において、BとPのサイトコンペティションにより、実質的にPの粒界偏析量が低減した効果による¹⁵⁾。

次に、上記のオーステナイト粒界へのPの偏析は、高周波加熱時に起こしたものである。従って、上記の細粒化効果に加えて、高周波加熱によりオーステナイト域での加熱時間が短時間となった分、通常加熱焼入れに比較してPの粒界偏析が軽減されることが期待される。短時間加熱によるオーステナイト粒界へのPの粒界偏析軽減効果について、McLeanの式¹⁶⁾を用いて机上検討を行った。1000℃におけるPの粒界偏析量 (粒界偏析量と平衡偏析量の比) の経時変化を計算した結果を図8に示す¹⁵⁾。図8より、Pの粒界偏析は極めて短時間で進行するものの、例えば1秒以下の短時間加熱では、

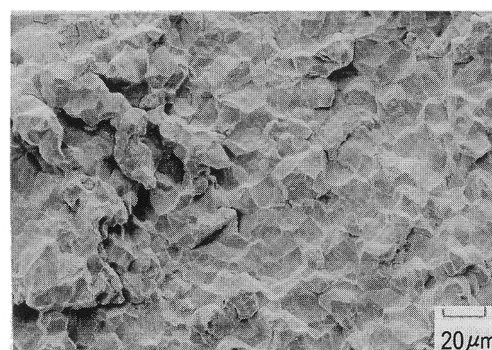


図5 高周波焼入れ材の静的破壊時に観察される粒界割れ破面

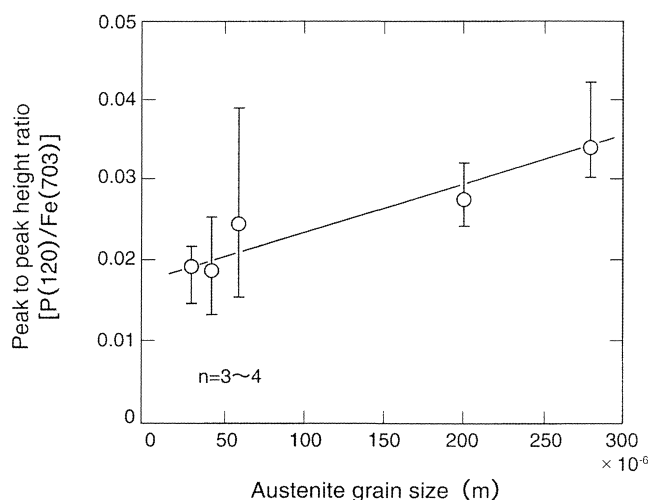


図6 オーステナイト粒界における粒界Pの偏析量と γ 粒径の関係 (AES)

Pの粒界偏析は平衡偏析濃度の70%以下に軽減される。したがって、高周波焼入れによる旧オーステナイト粒界の粒界強化に対しては、上記の細粒化効果に加えて、短時間加熱自体による粒界性状改善効果も重畳していると言える。なお、図8にはBの粒界偏析量の経時変化もあわせて示したが、Bの粒界偏析はPより早い速度で進行する。つまり、図7に示したBとPのサイトコンペティションが高周波焼入れの短時間加熱において起こり得ることが検証できたと言える。

5 高周波焼戻しによる炭化物制御

スルーハード材、表面硬化材ともに、焼戻し過程も高周波加熱で行われる場合が多い。高周波焼戻しの効果について、

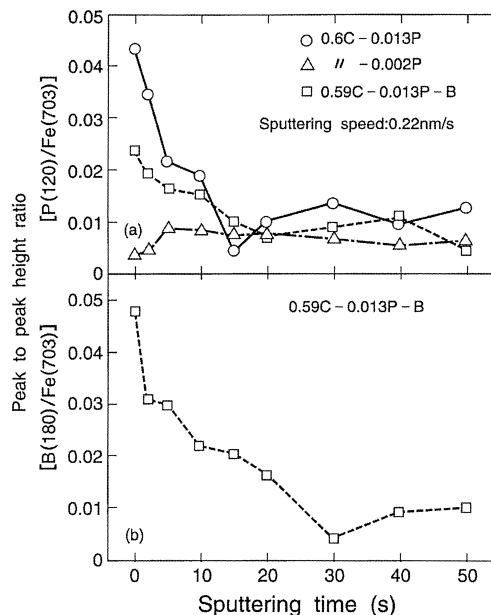


図7 オーステナイト粒界におけるP、Bの粒界偏析挙動 (AES)

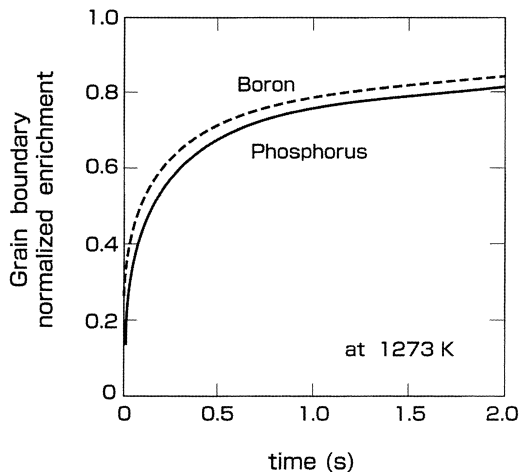


図8 オーステナイト粒界へのP、Bの粒界偏析量の経時変化の計算結果 (1000℃加熱時)

川崎^{17, 18)}が詳細な検討を行い、高周波焼戻し材 (焼戻し温度; 約500℃前後) は炉加熱焼戻し材に比較して「粒内炭化物が微細分散、粒界炭化物が減少」し、これにより優れた強靱性を示すことを明らかにしている。

図9は高周波焼入れ後、170℃で焼戻し処理した材料についてTEM観察したものであるが、旧オーステナイト粒界に沿って数10 nmのフィルム状のセメンタイトが認められる¹⁹⁾。高周波焼入れは通常水焼入れであり、焼入れ過程でセメンタイトが析出することはなく、この粒界セメンタイトは低温焼戻し過程で析出したものである。つまり、高周波焼戻しの効果は、焼戻し温度 (約500℃) へ急速加熱することにより、結果的に粒界セメンタイトの析出温度域を短時間で通過することになり、粒界フィルム状のセメンタイトの生成が抑制されたものと推察される。

6 おわりに

高周波熱処理は組織微細化・高強度手法として近年注目されているが、高周波熱処理の特徴と留意点について、機械構造用特殊鋼を例に挙げて紹介した。「鋼材の本来持っている特性を最大限に引き出す」手段として、高周波熱処理は極めて合理的かつ有効な熱処理手法の一つである。焼入れ-焼戻し過程での粒成長、変態、炭化物・析出物の溶解・析出、転位の回復等の各挙動の速度論的な競合現象が、高周波熱処理の特徴である「急速加熱」の条件下においてどのように変化しているのか、既存知見の現象がより鮮明になっているだけなのか、或いは通常加熱に比較して律速段階が異なっているのか等、興味の尽きないところである。高周波熱処理の冶金的理解が今後も益々深化し、高周波熱処理の適用が拡大していくことを期待している。

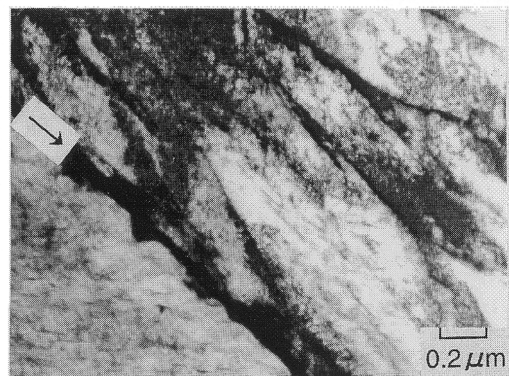


図9 オーステナイト粒界に沿って生成したセメンタイト (矢印)

参考文献

- 1) 川寄一博, 瀬戸芳樹, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 71 (1985), 100.
- 2) 鉄の未来が見える本, 新日本製鐵(株) 編, 日本実業出版社, (2007), 80.
- 3) 越智達朗, 蟹澤秀雄, 渡邊忠雄: 鉄と鋼, 85 (1999), 891.
- 4) 越智達朗, 蟹澤秀雄, 渡邊忠雄: 鉄と鋼, 85 (1999), 898.
- 5) 川寄一博, 千葉貴世, 高岡憲久, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 73 (1987), 2290.
- 6) 川寄一博, 千葉貴世, 古賀久喜, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 73 (1987), 2298.
- 7) 松田昭一, 岡村義弘: 鉄と鋼, 60 (1974), 226.
- 8) 西澤泰二: 鉄と鋼, 70 (1984), 1984.
- 9) M. Kubota and T. Ochi : NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT, 88 (2003), 81.
- 10) 佐藤知雄, 西澤泰二: 日本金属学会誌, 19 (1955), 385.
- 11) T. Ochi and Y. Koyasu : Proc. 33 rd Mechanical Working & Steel Processing Conf, (1991), 85.
- 12) 伊藤誠司, 蟹澤秀雄, 三阪義孝, 川寄一博: CAMP-ISIJ, 11 (1998), 550.
- 13) 越智達朗, 蟹澤秀雄, 渡邊忠雄: 鉄と鋼, 86 (2000), 830.
- 14) T. Ochi and Y. Koyasu : SAE Technical Paper Series., (1994), 940786.
- 15) 越智達朗, 蟹澤秀雄, 佐藤洋, 渡邊忠雄: 鉄と鋼, 83 (1997), 665.
- 16) D. McLean : Grain Boundary in Metals, Oxford University Press, London, (1957), 132.
- 17) 川寄一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 74 (1988), 334.
- 18) 川寄一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 74 (1988), 342.
- 19) 越智達朗, 蟹澤秀雄, 佐藤洋, 渡邊忠雄: 鉄と鋼, 83 (1997), 659.

(2007年9月4日受付)