

特別講演

□浅田賞受賞記念

鉄鋼部品の変身術としての高周波熱処理

Induction Hardening and Tempering as a Metamorphosing Technique of Steel Products

川寄一博

高周波熱錬(株) 技術本部 取締役本部長

Kazuhiro Kawasaki



*脚注に略歴

1 緒言

高周波誘導加熱は、図1に示すように、急速短時間加熱、部分加熱、表面加熱を生かして、鉄鋼製機械部品の高周波焼入れ(IHQ)や高周波焼戻し(IHT)に使用されており、代表的な表面硬化法である高周波表面焼入れでは、高硬さ、高圧縮残留応力が得られ、機械部品での優れた耐摩耗性、疲労強

度の確保に役立っている¹⁾。IHQは、約60年前に米国から日本に導入されたが、当時の目的は、時代背景もあり、鉱物資源の乏しい日本では合金鋼の製造が難しかったために、炭素鋼を表面IHQにより変身させて合金鋼以上の高特性を得ることにあった。その後、“鉄鋼部品の変身術”として、適用対象や目的を拡大しながら大きく発展し、IHQ・IHTは、ともに高強靱化のための組織制御技術としても利用されている。また、日本に導入当時と同じ変身目的が、鋼材リサイクルによる資源の有効利用に平和的に生かされ、電気加熱ゆえにCO₂排出量が少なく、設備稼働が効率的なため“W-Eco (Ecological & Economical) 熱処理”としても注目されている²⁾。さらに、図2に概念を示す“W-ティ(定・低)変形”³⁾を実現することにより、部品の精度向上やコスト・工数削減にも役立っている。

他の手法も含めた熱処理自体が鉄鋼材料の変身術であるが、高周波熱処理には、より大きな変身が期待できそうで、以下で、弊社での変身術の概要を紹介する。

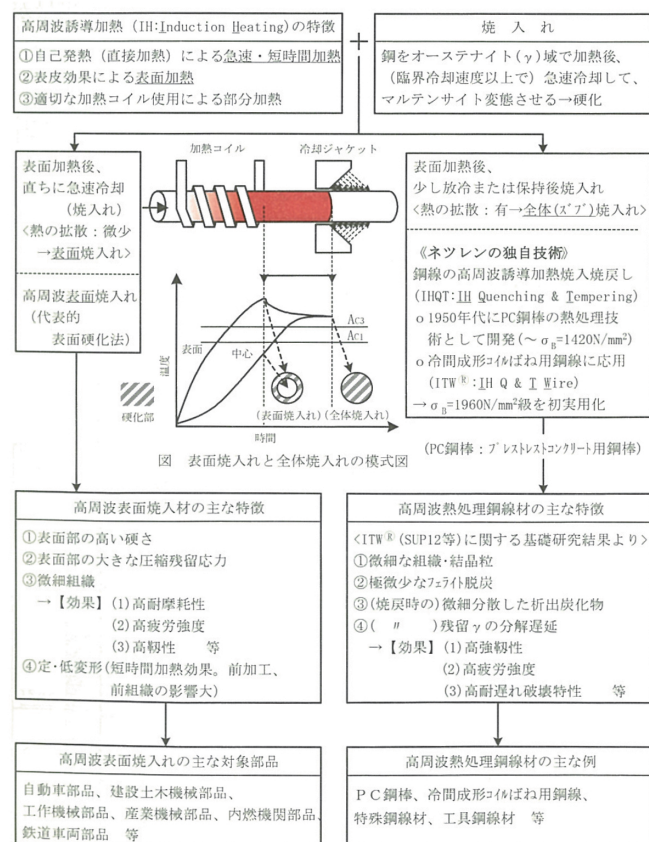
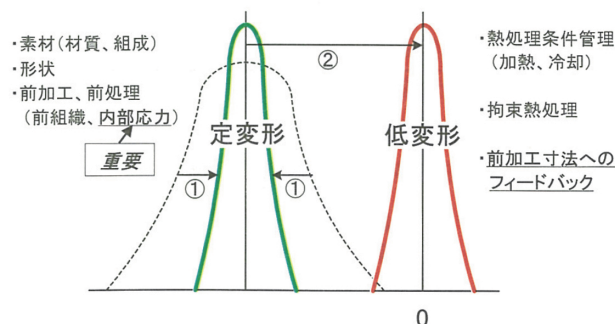


図1 弊社が携わる高周波熱処理技術・製品の概要



- ① まず、バラツキを減らして「定」変形を目指す。
- ② ①が実現し、前加工寸法調整可能なら、前寸法を②分、変更し、高精度＝「低」変形を目指す。

図2 W-ティ(定・低)変形の概念

* 昭和48年に京大を卒業後、高周波熱錬(株)にて高周波熱処理ばね鋼線の開発と強靱化機構の研究を行い、62年に京大工学博士号を取得。歯車の輪郭焼入れ等の新たな高周波焼入れ技術開発等を主管し、平成13年取締役技術部長、15年技術本部長に就任。

2 高強靱性への変身術

高強度高靱性の両立（高強靱性）を特徴とする全体加熱 IHQ/IHT 鋼線材を独自開発し製品化している^{4,5)}。PC 鋼棒（線径 $d=7-31$ mm）は、パイル（基礎杭）、ポール（電柱等）、鉄道枕木、橋脚、橋梁等の Pre-stressed Concrete 構造物の強化に用いられ、冷間成形ばね用鋼線 ITW[®]（線径 $d=6-14$ mm）は、2 輪・4 輪自動車サスペンションやシャッタ等に用いられている。標準引張強さは、PC 鋼棒が 1420 MPa、ITW[®] が 1960 MPa（最大 2160 MPa）で、2003 年度の生産量は、PC 鋼棒が国内で 10 万トン弱、ITW[®] が日本および独、米、ブラジルの関連会社を含めて世界で 10 万トン弱である。これらの製品で生かされている高強靱性は、著者が Si-Cr 鋼（SUP12 / SAE 9254）を用いた基礎研究において⁶⁻¹¹⁾、“IHQ による $10\ \mu\text{m}$ 程度への微細結晶粒化の術”^{8,9)}と、“IHT（773K 前後）過程での炭化物の粒内微細分散析出と粒界析出量少の術”^{10,11)}により得られることを明らかにした。

2.1 “準超”微細結晶粒化の術

まず、SUP12 での IHQ に関する研究^{8,9)}では、図3に示すように、急速短時間加熱オーステナイト（ γ ）化効果により微細結晶粒が得られ、サブミクロンまでは行かないものの、1 回 IHQ で約 $10\ \mu\text{m}$ 、2 回くり返し IHQ で約 $6\ \mu\text{m}$ 、3 回くり返し IHQ で約 $4\ \mu\text{m}$ が実用的に得られることがわかった。これは加熱時間が短く、 γ 粒成長途中で焼入れされるためと考えられ、 γ 化十分を前提にさらに低温 γ 化することにより、約 $5\ \mu\text{m}$ まで微細化することも示した¹²⁾。そして、結晶粒径が異なる IHQ 材を同じ条件で IHT して種々の機械的性質を求めた結果、結晶粒が微細なほど、延性、靱性、耐遅れ破壊特性、疲労強度が高くなることを系統的に明らかにし、微細結晶粒が高強靱化に有効なことを示した。図4に IHQ での結

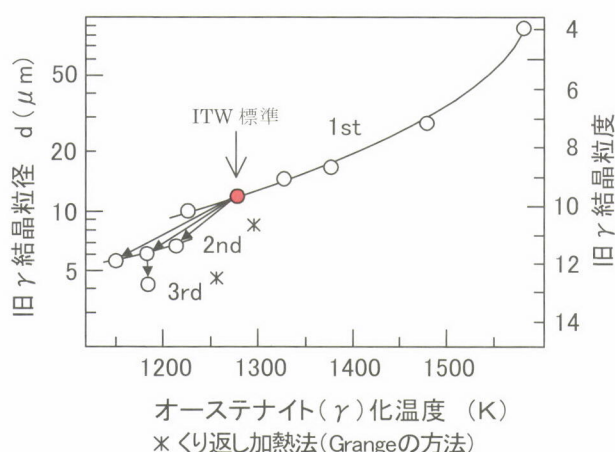


図3 IH γ 化温度およびくり返し IHQ 回数と結晶粒径

晶粒微細化による低温焼戻脆化の抑制効果を示す。近年、IHQ は、種々の結晶粒のサブミクロン化手法での粒成長抑制に利用される例も見られる¹³⁾。

2.2 焼戻時の炭化物微細分散化の術

次に SUP12 での IHT に関する研究^{10,11)}では、同じ焼入材（IHQ 材または炉加熱焼入れ = FHQ 材）を、同硬さに全体加熱 IHT または炉加熱焼戻し（FHT）して機械的性質を比較した。その結果、延性、靱性、破壊靱性、耐遅れ破壊性、疲労強度が、IHT 材でより優れ、IHT が単独で強靱化効果を示すことを明らかにした。図5に靱性（衝撃値）での IHT の強靱化効果を示す。その理由として、IHT 材では、炭化物が粒内でより微細分散析出し、粒界での析出量が少ないことを推察し、後に、この炭化物の析出状態を図6に示す「イス取りゲーム説」で模式的に表し¹⁵⁾、SEM・TEM 観察により裏付けられている¹⁶⁻¹⁸⁾。著者は¹⁸⁾、日本鉄鋼協会／析出制御メタラジー研究会のご指導により、図7に示す同硬さ（600HV）の IHT 材と FHT 材の TEM 像で観察されたセメントタイト幅を計測し、図8に示すように、IHT 材のセメントタイトがより微細なことを明らかにした。また、図9に示す同硬さ材の衝撃破面の SEM 像で、IHT 材の粒界が FHT 材より不明瞭なことから、IHT 材の粒界でのセメントタイトの析出量がより少ないことを推察した。

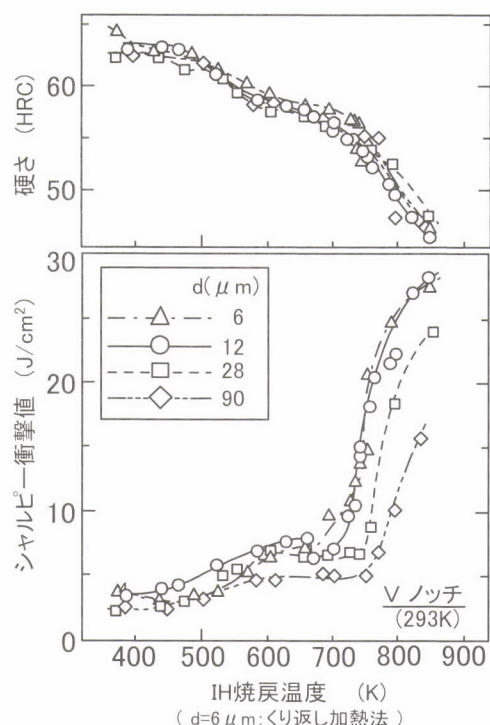


図4 IHQ での結晶粒微細化による低温焼戻脆化の抑制効果

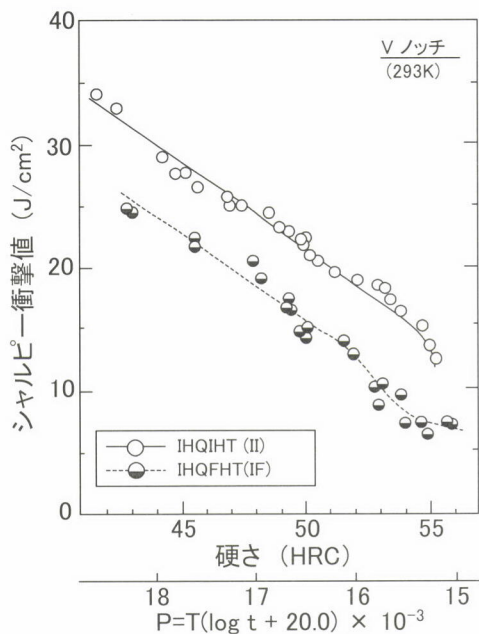


図5 IHTによる強靱化効果（衝撃値の向上）

- ①短時間加熱：笛が早々に鳴ったら、まだ小柄な炭化物が近くのイス（析出サイト）に座る。→炭化物が微細分散析出。粒界析出量は少ない。（粒界に辿り着く量が少ない）
- ②長時間加熱：笛が鳴るまでの間、炭化物はどんどん（合体？）成長するし、移動もする。→炭化物が粗大化。粒界析出量は増加。

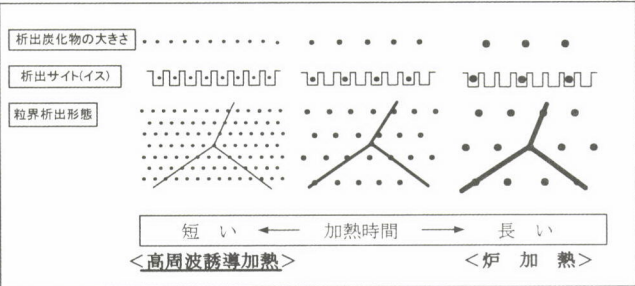


図6 IHTとFHTでの炭化物析出挙動の模式図「イス取りゲーム説」

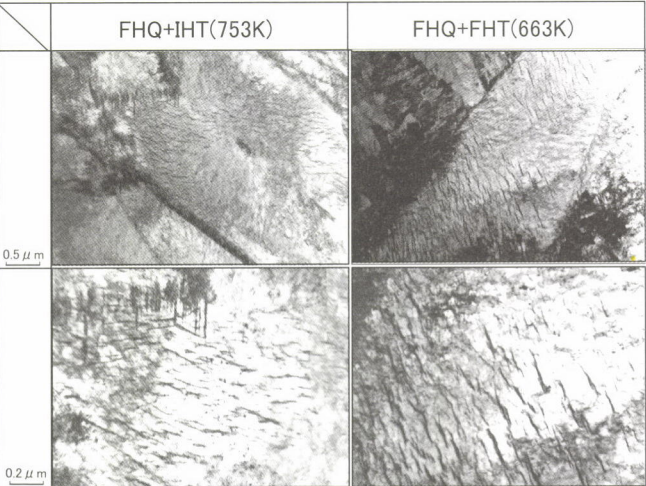


図7 同硬さ（600HV）のIHT材とFHT材のTEM像

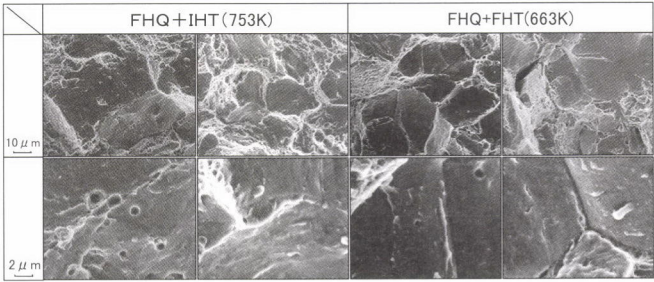


図8 同硬さ（600HV）のIHT材とFHT材の衝撃破面のSEM像

	視野数	測定数	平均幅 (nm)
FHQ+IHT(753K)	各2視野	1367	7.9
FHQ+FHT(663K)		1470	10.2

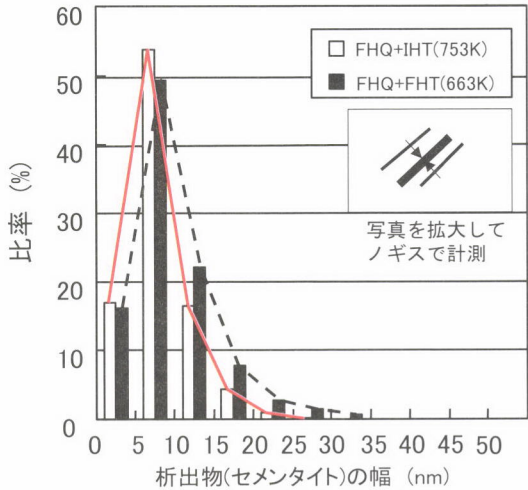


図9 図7のTEM像で観察されたセメンタイト幅の計測結果

3 高疲労強度部材への変身 by “高硬化の術+高圧縮残留応力化の術+結晶粒微細化の術”

高周波表面焼入れにより、高い硬さと圧縮残留応力が付与でき、疲労強度が向上することは周知であるが、近年、200kHzで1000kWの大出力を精密制御できるトランジスタインバータ式電源を用いて、加熱速度3,000～10,000K/s程度、総加熱時間0.5秒以内の安定した超急速短時間加熱焼入れ（SRIQ：Super Rapid Induction Heating and Quenching）技術を研究開発し¹⁹⁻²²⁾、より高い硬さと圧縮残留応力を付与できることを明らかにした。図10に歯車のSRIQプロセスを示す。そして、小型・中型歯車の輪郭焼入れを可能にし、図11に示すように浸炭焼入歯車や秒単位の高周波焼入歯車より高い歯元疲労強度が得られ、焼戻軟化抵抗性の高い元素（Si等）の添加により歯面のピッチング疲労強度も向上することを明らかにした。また、加熱および冷却条件の工夫と高精度管理によりW-ティ変形が実現することも示し、

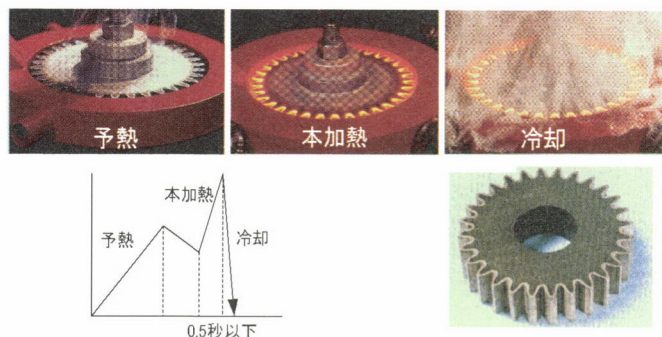


図10 歯車の超急速短時間加熱焼入れ (SRIQ) プロセス

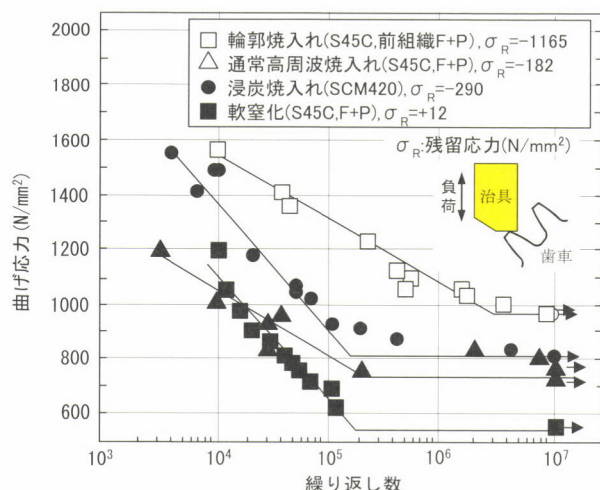


図11 SRIQした輪郭焼入歯車の歯元疲労強度

小型歯車の高強度化、軽量化、コスト低減に役立っている。

4 変身術の展開

高周波焼入れは、多種多様な鉄鋼製機械部品に適用されている。図12は、超大型パイプロールの移動IHQによる処理状況で、移動加熱が可能な高周波熱処理の特徴を生かして最大で直径1,350 mm、長さ9,200 mm、肉厚200 mm、重量約50トンの製紙用超大型ロール (SUJ2) を3kHz、1200 kWの大型電源を用いてIHQしている²³⁾。また、対象鋼材も拡大しており、マルテンサイト系ステンレス鋼²⁴⁾、合金工具鋼 (SKD11、SKD61²⁵⁾、SKH51²⁶⁾等)、さらに焼結合金や球状黒鉛鋳鉄 (FCD)²⁷⁾のような多孔質材料にも適用している。図13は、自社での成形加工+IHQにより製造した中空ラックバーで、工程間コラボレーションが熱処理部品の品質安定化・向上、コスト低減に有効なことを示す事例である。

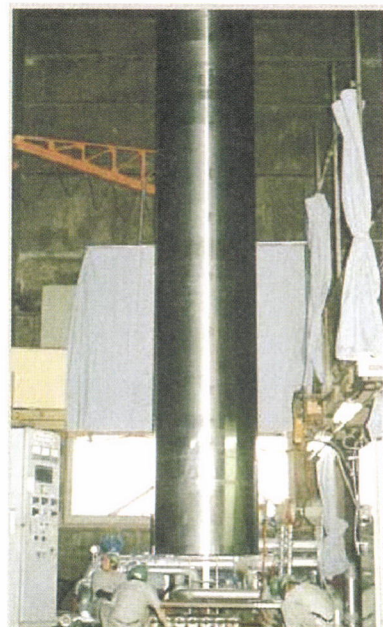


図12 超大型パイプロールの移動IHQ



左から2、4本目は、
歯型中央部が
VGR(Variable Gear Ratio)
方式の例

図13 IHQした中空ラックバー

5 変身術を支える技術

まず、業界、社内の諸先輩が長年培われてきた技能や技術が重要で、後輩に伝授いただくとともに、有形技術財産化を進めている。図14にS45C (前組織＝フェライト＋パーライト) の例を示すTTA (Time-Temperature-Austenitization) 線図は²⁸⁾、新鋼種を初めて高周波焼入れする場合に必須なデータである。また、蓄積してきた不具合事例と調査報告も貴重なデータベースとして活用している。

電源装置は、電気電子技術・コンピュータの進歩とともに大きく発展し、熱処理用としては、周波数が商用周波数から

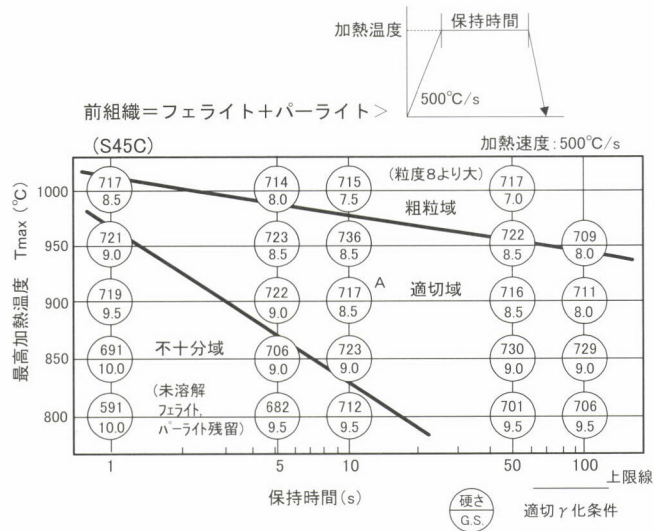


図14 S45CのTTA線図(前組織=フェライト+パーライト)



図15 IHQシミュレーション事例(マルテンサイト分布と変形/拡大表示)

400kHzまで、出力が数kWから2000kWまでのトランジスタインバータ式電源が製作しており、環境に優しい高調波抑制機能をもつ電源も実用化している。これらの電源は、従来の電動発電機(MG)式や電子管(真空管)式電源に比べて、エネルギー変換効率が90~95%と高く、同じ出力では設備が小型になり、消耗部品が無く、設置面積も少なくて済み、W-Eco熱処理に役立っている。さらに、大型電源の開発が進み、直径1,000mm以上の歯車や旋回輪の回転一発焼入れや、薄肉部品の短時間加熱焼入れが可能になり、生産性の向上、W-テイ変形化に役立っている。

電源とワークをつなぐ重要なインターフェイスである加熱コイルや冷却ジャケットの製作には、熟練と効率良い試行錯誤が必要である。近年は、硬化層(マクロパターン)の精密設計要求も高まり、弊社独自の高周波熱処理シミュレーションによる解析やサポートも進んでいる²⁹⁾。高周波熱処理シミュレーションは、熱処理シミュレーションソフトに高周波加熱特有の磁場解析ソフトを組み合わせることで連成解析できる。図15は、左側のボス部が上下非対象な歯車をSRIQした場合のマルテンサイト分布と変形(拡大表示)を解析した結果で、加熱されていないボス部が変形する傾向と変形量が実部品とシミュレーションで一致し、有効な対策検討に役立った事例である。

6 結言

鉄鋼材料は、言うまでもなく最も重要かつ実用的な産業基盤材料であり、その変身術として、まだまだ夢のある高周波熱処理に携われることは幸せである。ただ、高周波熱処理工程だけで可能な性能向上やコスト削減には限りがあり、“モ

ノ創り”の存在価値を確保し高めるには、前後工程から最終製品までを一気通貫でみた「工程間コラボレーション」による技術開発、品質安定化・向上、コスト削減が、より一層、重要と考えている。

栄誉ある学術貢献賞(浅田賞)の受賞に当たり、高周波熱処理技術に目を向けて下さった(社)日本鉄鋼協会に感謝し、受賞は、高周波熱処理に接する機会を与えて下さった故田村今男先生、ご指導いただいた牧正志先生はじめ諸先生方、高周波熱錬(株)の諸先輩方と、協働いただいた関係者のご支援の賜物と感謝し、これを励みに、微力ながら高周波熱処理の熟成と開発に向けて努力を続けたい。

参考文献

- 1) 川寄一博: 熱処理技術入門 4・1章/高周波熱処理作業, 日本熱処理技術協会他編, 大河出版社, (1997), 272.
- 2) 川寄一博: 第28回熱処理研究会, 出光興産(株)主催, (2005-3), 3-1.
- 3) 古賀久喜, 川寄一博, 山崎隆雄: 熱処理, 43 (2003) 4, 259.
- 4) 水馬克久, 川寄一博: 熱処理, 27 (1987) 3, 162.
- 5) 川寄一博, 溝口茂, 村山行雄, 山下英治: ふえらむ, 5 (2000) 1, 38.
- 6) K. Kawasaki, Y. Seto, T. Yamazaki and T. Hijikata: SAE Technical Paper Series, 830656, (1983)
- 7) 川寄一博, 瀬戸芳樹, 山崎隆雄: 鉄と銅, 71 (1985) 1, 100.
- 8) 川寄一博, 千葉貴世, 高岡憲久, 山崎隆雄: 鉄と銅, 73 (1987) 16, 136.
- 9) 川寄一博, 千葉貴世, 古賀久喜, 山崎隆雄: 鉄と銅, 73 (1987) 16, 144.
- 10) 川寄一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鉄と銅, 74 (1988) 2, 128.

- 11) 川寄一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鉄と銅, 74 (1988) 2, 136.
- 12) 川寄一博: 京都大学学位論文, (1987)
- 13) 岡村司, 村山行雄, 川寄一博, 山下英治: ばね論文集, 45 (2000), 9.
- 14) 川寄一博, 山崎隆雄: 2004年度第2回熱処理技術セミナー, 日本熱処理技術協会主催, (2004), 7-1.
- 15) 川寄一博, 古賀久喜, 山崎隆雄: 材料とプロセス, 14 (2001), 1136 (討42).
- 16) たとえば, 小林勝也, 古原忠, 牧正志: 材料とプロセス, 14 (2001), 604.
- 17) 早川正夫, 寺崎聡, 原徹, 津崎兼彰, 松岡三郎: 日本金属学会誌, 66 (2002) 7, 745.
- 18) 高岡徳義, 稲葉智一, 平尾正, 川寄一博, 山崎隆雄: 第56回日本熱処理技術協会講演概要集, (2003-5), 5.
- 19) Y. Misaka, Y. Kiyosawa, K. Kawasaki and T. Yamazaki: SAE Technical Paper Series, 970971, (1997)
- 20) 川寄一博, 三阪佳孝, 清澤裕, 山崎隆雄: 熱処理, 39 (1999) 4, 142.
- 21) 三阪佳孝, 清澤裕, 川寄一博: 工業加熱, 39 (2002) 1, 54.
- 22) 三阪佳孝: 慶應義塾大学学位論文, (2005)
- 23) 村田哲之, 高村元雄, 平岩尚之, 荒川正則, 高岡憲久: 材料とプロセス, 10 (1997), 402.
- 24) 古賀久喜, 川寄一博, 山崎隆雄, 西川友章, 横田博史: 第46回日本熱処理技術協会講演概要集, (1998), 27.
- 25) 池上由洋, 三阪佳孝, 川寄一博, 山下英治: 第32回日本熱処理技術協会講演概要集, (1991), 5.
- 26) 尾崎公造, 瓜田龍実, 古賀久喜, 合屋純一: 電気製銅, 71 (2000) 2, 131.
- 27) Y. Misaka, K. Kawasaki, Jun Komotori and M. Shimizu: Materials Transactions, 45 (2004) 9, 2930.
- 28) 川寄一博, 高岡憲久, 山崎隆雄, 尾崎良二: 熱処理, 20 (1980) 6, 281.
- 29) たとえば, 生田文昭, 堀野孝: 工業加熱, 41 (2004) 5, 37.

(2005年4月4日受付)