

超高周波加熱による高速精密熱処理システムの開発 (第2報)

—炭素鋼丸棒の変形と残留応力挙動—

八代 浩二・鈴木 大介・清水 誠司・杉田 良雄^{*1}・齋藤 基樹^{*2}・久保田 勝彦^{*3}

Development of High-speed and Precision Heat Treatment System by Ultra High-frequency Induction Heating

—Residual stress and deformation behavior in carbon steel round bar—

Koji YATSUSHIRO, Daisuke SUZUKI, Seiji SHIMIZU, Yoshio SUGITA¹, Motoki SAITOU² and Katsuhiko KUBOTA³

要 約

超高周波誘導加熱装置を利用した熱処理装置を試作して熱処理実験を行い、試験片の変形と残留応力について解析した。その結果、変形は硬化層が浅いほど少ないことが判明した。また、軸方向の残留応力は硬化層が厚いほど深く強く付与されることが判明した。

Abstract

Heat treatment was examined by prototyped device using ultra-high frequency induction heating unit. Then deformation and residual stress were analyzed. As a result, thin hardened layer specimen have small deformation. Also, thick hardened layer specimen have deep and large compressive longitudinal residual stress.

1. 緒 言

近年、工業製品の生産が急激に海外へ移行しつつある中で、日本国内での生産は、精密・微細加工や多品種少量生産に特化してきている。一方、生産を行う上では低コスト、短納期、低環境負荷の要求は高まるばかりであり、中長期的にはこれらの生産形態に適応した企業のみが生き残るものと考えられる。この様な状況を踏まえ、地場中小企業の競争力を高めるとともに、新規技術を開出して事業化することは極めて重要な課題である。

熱処理技術は、材料の特性を引き出す重要な技術であるが、処理に時間がかかる点や高温にさらされることによる製品の変形が問題となっている。また、処理設備が大がかりなため、膨大なエネルギーを消費している。

高周波誘導加熱を利用した高周波焼入は、直接加熱(自己発熱)による急速短時間加熱や表皮効果による表面加熱、ワークに対し適切なコイルを用いることで部分加熱が可能で消費エネルギーが少ないなどの優れた特徴を有している。この焼入方法は耐磨耗性、疲れ強さ、じん性の向上を目的に広く用いられているが、小径部品に対して既存の高周波熱処理装置では大きな変形の発生やエネルギー伝送効率の低さなどの問題から、活用されず

にいた。

このような背景から、平成16年度は超高周波誘導加熱装置を用いて熱処理装置を試作した。試作装置にて焼入れ実験を行った結果、直径6mmの機械構造用炭素鋼試験片で表面近傍の最高硬さ700HV、約0.25mmの硬化層を得ることができた²⁾。本年度は電源出力と送り速度を変化させて焼入れ実験を行い、試験片の残留応力挙動と変形量について従来熱処理方法との比較評価を行った。

2. 実験方法

2-1 試験片

表1に試験片一覧を、表2に高周波焼入共通条件を示す。

表1 試験片一覧

試験片	熱処理方法	焼入条件
(a)	高周波熱処理	265V-20.6mm/s
(b)		265V-31.8mm/s
(c)		265V-38.9mm/s
(d)		265V-50.0mm/s
(e)		230V-20.6mm/s
(f)	ずぶ焼入れ	焼入れ:860℃×120分 焼戻し:180℃×120分
(g)	焼なまし処理	600℃-2H (窒素雰囲気・炉冷)
(h)	未処理	—

*1 ワイエス電子工業株式会社

*2 浅川熱処理株式会社

*3 有限会社丸真熱処理工業

表2 高周波熱処理共通条件

試験片回転数(r/s)	30
冷却方法	水道水による水冷
焼入れ長さ(mm)	70

実験に用いた素材は、一般に高周波焼入れに用いられる機械構造用炭素鋼 (S45C) で直径は6 mmである。試験片として長さ100mmに切断し、両端に旋盤でセンタ穴加工を施したものをを用いた。焼入方法はワークを送る移動焼入れであり、コイルの穴径は7.1mmである。

焼入れ後の試験片は切断後3%硝酸アルコール溶液で腐食し、断面観察と硬さ測定を行った。

2-2 変形量測定

本手法による熱処理と一般的な全体熱処理における変形量を比較するために、熱処理後の試験片について試験片長、直径、振れ量を測定した。また、焼なまし処理、熱処理前の試験片についても同様に測定を行い、各々比較した。熱処理前後の試験片の全長は90度毎回転させ4点測定し、直径は試験片中央とその両側25mmの位置において0度、90度方向において6点測定し、それぞれの平均値を算出した。測定は各条件につき10本ずつマイクロメータを用いて行った。

振れ量については両端をVブロックで支持し、試験片を1回転させた時の全振れをダイヤルゲージにて測定し、熱処理前の全長で除した値で評価した。

2-3 X線応力測定

表3に残留応力測定条件を示す。残留応力の測定には縞リガク製MSF-2Mを用い、平行ビームスリットを装着し、 ψ 一定法にて測定を行った。測定位置は図1に示すとおり切断面から10mmの位置において軸方向と接線方向について測定した。回折線は通常の鉄鋼材料の応力測定に用いる α Fe211回折を利用した。

深さ方向の残留応力分布は、電解研磨を逐次行って測定した。目標とする研磨量に応じて研磨時間、電圧を適宜調整し、研磨深さはマイクロメータを用いて測定を行った。

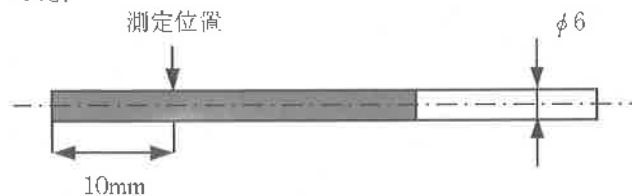


図1 残留応力測定位置

表3 残留応力測定条件

回折面	α Fe211
管球	Cr
管電圧	30kV
管電流	8mA
測定方法	ψ 一定法
X線の応力定数	-297MPa/deg

3. 実験結果および考察

図2に本手法による熱処理後の断面観察結果を示す。送り速度一定の場合、電源電圧が高いと厚い硬化層が得られた(試験片(a),(e))。また、電源電圧一定の場合、送り速度を大きくすることで浅い硬化層が得られた(試験片(b)~(d))。これは前報²⁾と一致した。

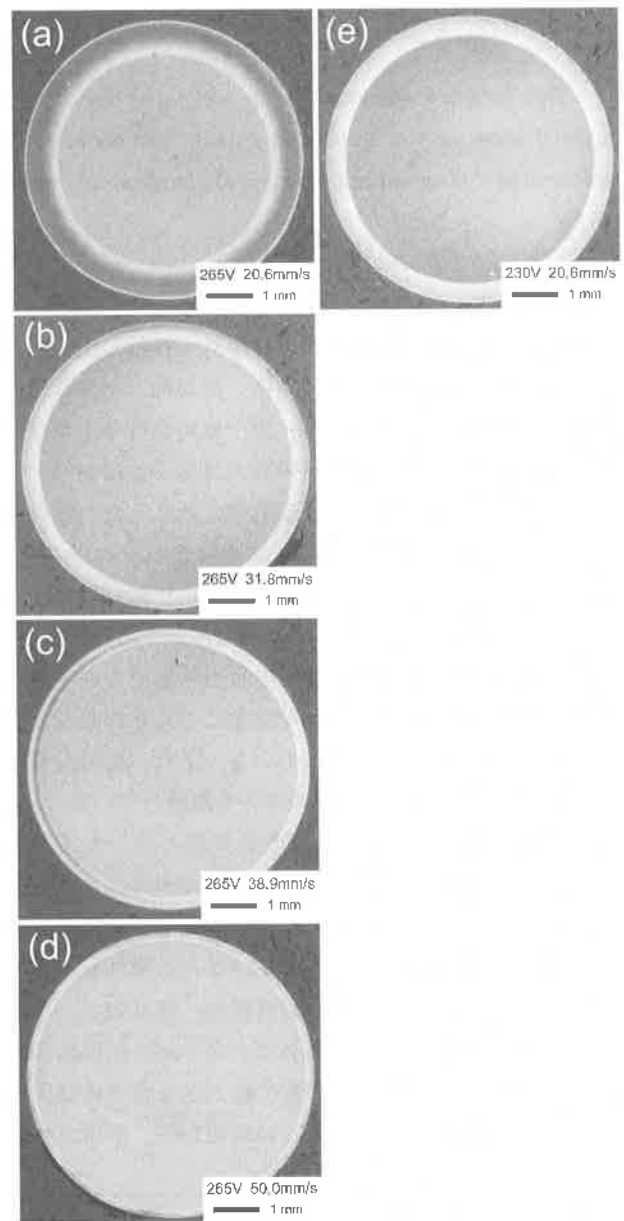


図2 断面観察結果

図3は断面観察後の硬さ測定結果を示したものである。試験片(a)の条件では表面近傍の硬さは600HVであり、断面観察写真から測定した硬化層深さは約0.7mmであった。また、試験片(b)の条件では硬化層厚さと硬さが同一条件で処理を行った前報²⁾のデータと異なる結果を示した。これは、試験片の素材ロットの違い、焼入コイルおよび冷却ジャケットの着脱による位置ずれ、冷却水の水温と水量の違い、試料切断位置の影響等が考えられ、電源出力、送り速度の設定以外に処理層の形成状況を左右する要因の存在が判明した。今後はこれらの点に留意し、処理を行う必要があると思われる。

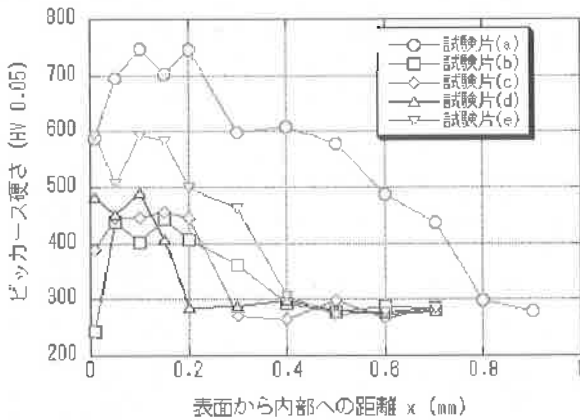


表3 表面から内部への硬さ分布

3-2 変形量

各条件における寸法変化について図4に長さ、図5に直径を各々示す。ここでの全長変化量 ϵ_l 、直径変化量 ϵ_d は以下の式(1)、(2)により求めたものである。

$$\epsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \dots \text{式(1)}$$

l_1 : 熱処理後全長, l_0 : 熱処理前全長

$$\epsilon_d = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \dots \text{式(2)}$$

d_1 : 熱処理後直径, d_0 : 熱処理前直径

試験片(f)は全長、直径ともにプラス側に変化し、試験片(g)は全長変化量がわずかにマイナスとなり、直径もマイナス側に変化した。これは、前者がマルテンサイト変態に伴う体積膨張によるもので、後者が引抜き加工時に形成した残留応力の緩和によるものである。また、硬化層厚さが大きい試験片(a)では全長、直径ともにプ

ラス側に変化し、試験片(f)に近い値を示した。また、硬化層厚さが比較的小さい試験片(c)、(e)では直径の変化量はゼロに近く、全長の変化量は試験片(g)に近い低い値を示した。

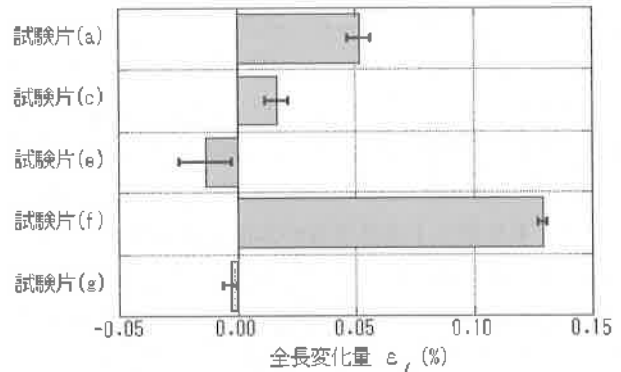


図4 各試験片の熱処理前後における全長変化量

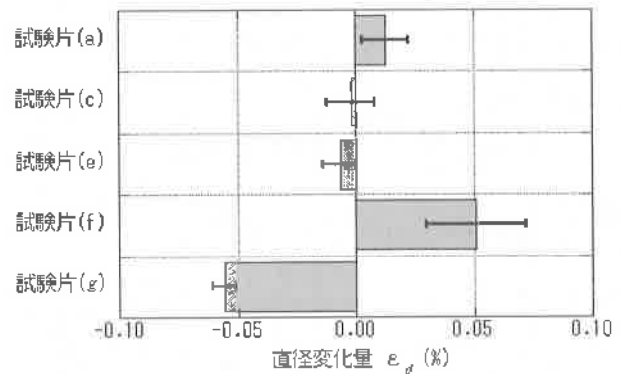


図5 各試験片の熱処理前後における直径変化量

図6に熱処理前後の試験片振れ量を示す。処理前の試験片(h)では振れ量は小さいが、焼なまし処理後(試験片(g))はやや増加を示した。また、ずぶ焼入れ処理(試験片(f))は処理前に比べ 4.93×10^{-4} (約25倍)と非常に大きくなった。硬化層厚さが大きい試験片(a)はずぶ焼入れ(試験片(f))に近い傾向を示し、硬化層厚さが小さい試験片(c)、(e)は焼鈍し(試験片(g))に近い傾向を示すことが判明した。

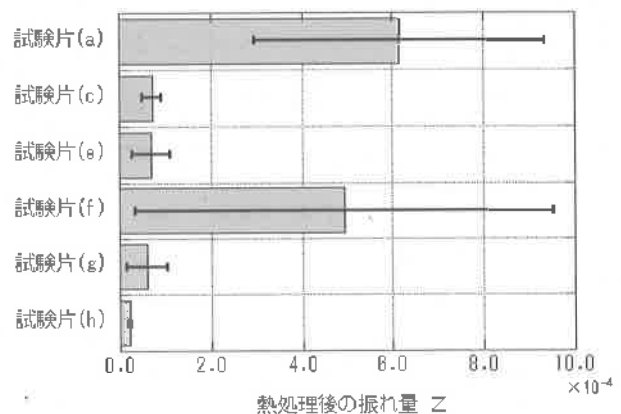


図6 熱処理後の振れ量

3-2 残留応力測定結果

図7, 図8に軸, 接線方向の内部への残留応力分布測定結果を示す。

軸方向では残留応力は硬化層厚さの大きい試験片(a), (e)で試験片最表面において約-400MPaであり, 表面から内部へ向かうに伴い緩やかに残留応力が低下していくのに対し, 硬化層厚さの小さい試験片(b), (c), (d)では試験片最表面において約-200MPaで, 硬化層の母材境界部付近で引張応力へ転じていることが判明した。硬化層厚さの大きい試験片で圧縮残留応力が形成したのは, マルテンサイト変態による処理層の体積膨張が原因である。一方, 硬化層厚さの小さい試験片の内部で引張残留応力に転じたのは, 試験片内部が熱処理により焼なまされていないため, 引抜き加工時の引張応力が残存しているためと考えられる。これは, 図4, 5で示した寸法変化の結果からも読み取ることができる。

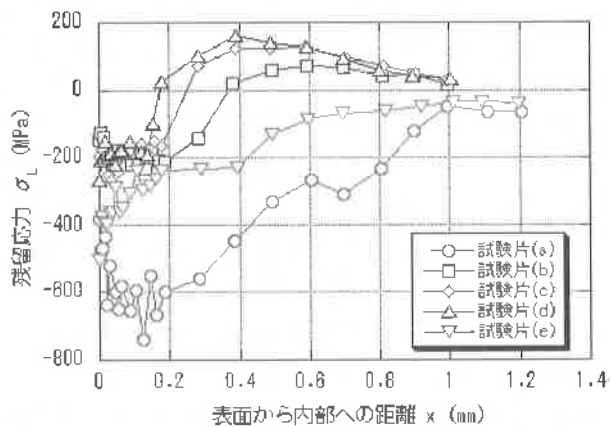


図7 軸方向の残留応力分布

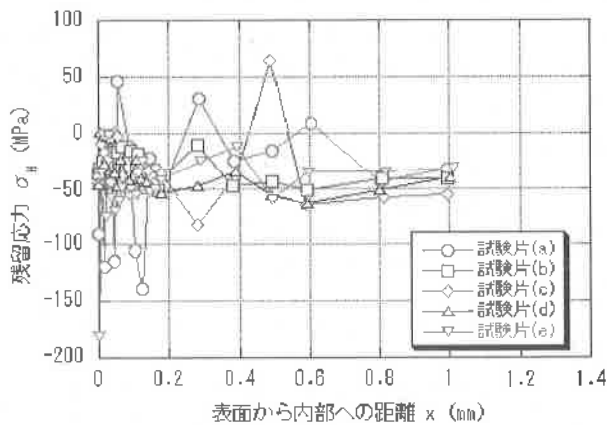


図8 接線方向の残留応力分布

また, 接線方向ではどの条件においても残留応力はあまり付与されないことが判明した。

X線応力測定における α Fe211回折の表面から内部への

半価幅分布を図9 (軸方向) および図10 (接線方向) に各々示す。

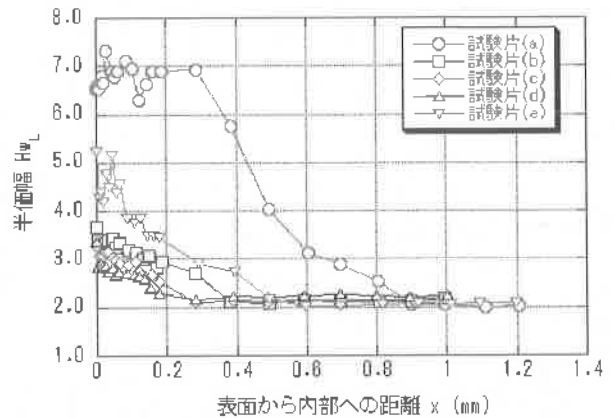


図9 軸方向の半価幅分布

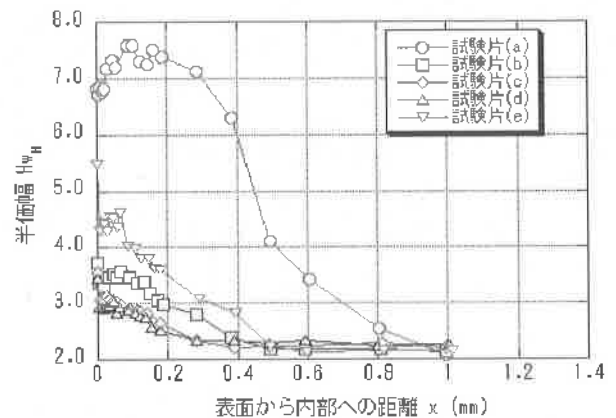


図10 接線方向の半価幅分布

半価幅は, 測定領域における個々の結晶に存在する不均一ひずみ量を相対的に示す指標であり, 今回の測定では主にマルテンサイト変態によるひずみ量としてとらえることができる。接線方向の半価幅値も軸方向と同様の傾向を示し, 値が一定となる深さはそれぞれの試験片の硬化層厚さでもあることから, 接線方向でもマルテンサイト変態をしていることが確認できる。

高周波焼入れの特徴として急速加熱により極表面部の温度上昇が内部より著しく先行するため, 加熱時には表面に圧縮, 内部に引張の熱応力が生じる。このとき, 表面層の圧縮応力が塑性変形領域まで到達すると常温まで冷却された後は表面には引張, 内部には圧縮の残留応力が生じる²⁾。

今回の実験では加熱領域が軸方向で約2mm, 深さ方向で約0.4mm程度であることから, 軸方向と比較すると接線方向には加熱時により大きな圧縮応力が発生する。この加熱時の熱応力とマルテンサイト変態による体積増加が相殺された結果, 熱処理後に残留応力が形成されなかったと考えられる。

この残留応力測定結果から、曲げ方向の疲労強度向上は期待できるが、ねじれ方向の疲労強度向上の効果は期待できないと考えられる。

実際に熱処理を行う場合、疲労強度が求められる部品へは厚い硬化層を付与する条件を選定し、変形・寸法変化等精度の要求が厳しく、耐磨耗性が求められる部品に対しては浅い硬化層を付与する条件を選定する必要があると考えられる。

5. 結言

従来熱処理方法と開発した熱処理装置による熱処理品の特性の違いについて比較を行うことを目的とし、熱処理に伴う変形やX線応力測定による残留応力挙動より評価を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 寸法変化、変形は硬化層が厚いほど従来用いられてきたずぶ焼入れに近くなり、硬化層が浅くなると焼なまし処理したものや処理前の試験片に近くなる傾向が示された。
- 2) 軸方向の残留応力は硬化層の厚い試験片において最表面で約 -400MPa であり、表面から内部へ向かうに伴い緩やかに低下した。それに対し、硬化層が薄い試験片では試験片最表面で約 -200MPa であり、硬化層の母材境界部付近で引張応力へ転じていることが判明した。
- 3) 接線方向ではどの条件においても残留応力があまり付与されないことが判明した。

参考文献

- 1) 不二越熱処理研究所：新・知りたい熱処理，ジャパンマシニスト社，P.214
- 2) 八代浩二，鈴木大介，清水誠司，佐野正明，米山陽，杉田良雄，齋藤基樹，久保田勝彦：山梨県工業技術センター研究報告，No.19，P.11-15 (2005)
- 3) 磯村良蔵：鋼の熱処理と残留応力—三次元的測定とその解析，アグネ技術センター，P.92
- 4) 藤木榮：機械部品の疲労破壊・破断面の見方，日刊工業新聞社，P.16