

超高周波加熱による高速精密熱処理システムの開発

八代 浩二・鈴木 大介・清水 誠司・佐野 正明・米山 陽*¹
杉田 良雄*²・齋藤 基樹*³・久保田勝彦*⁴

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

Koji YATSUSHIRO, Daisuke SUZUKI, Seiji SHIMIZU, Masaki SANÔ, Akira YONEYAMA
Yoshio SUGITA, Motoki SAITOU, Katsuhiko KUBOTA

要 約

高速で精密な熱処理技術の開発を目的に、高周波誘導加熱装置を用いて熱処理装置の開発を行った。試作した装置で処理層深さの低減化を目的とした焼入実験を行い、試験片の断面観察、硬さ測定で評価を行った。その結果、6φ試験片で最高硬さ700HV、処理深さ0.25mm、3φ試験片で最高硬さ627HV、処理深さ0.09mmの安定した硬化層が得られた。

Abstract

To develop high-speed and precision heat treatment technology, heat treatment equipment with high-frequency induction heating device was developed. The measurement of specimen that made quenching experiment by prototype cross-section observation and hardness. As a result, stable hardened layer which maximum hardness was 700HV and the depth was 0.25mm was obtained at 6mm diameter specimen. Also, at 3mm diameter specimen, the maximum hardness was 627HV and the depth was 0.09mm.

1. 緒 言

近年、工業製品の生産が海外での生産へ急激に移行しつつある中で、日本国内での生産形態は、精密加工、微細加工、小物加工、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。このような状況を踏まえ、地場中小企業の競争力を高めるとともに、新規技術を創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環境にさらされることによる製品の熱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。

熱処理にはバルク焼入、表面焼入があり、表面焼入は局所加熱であるから、所要熱量が小さく、熱効率が高く、冷却速度が大きいため、質量効果を見逃できる利点がある。

その中でも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、表皮効果による表面加熱、適切な加熱コイルの選択による部分加熱という優れた特徴を利用している。この焼入方法は、耐磨耗性、疲れ強さ、じん性の向上を目的とした鋼の表面硬化法として広く活用されている。¹⁾

しかし、既存の高周波熱処理装置では渦電流が深く侵入するため、小径部品では中心部まで加熱が及び、変形が発生する問題があった。また、ワークへのエネルギー伝送効率が悪いため、設備が大掛かりになる問題もあった。

このような背景から、本研究は、高速で精密な熱処理技術を開発し、開発装置の利用による県内企業の競争力向上を図ると共に、装置製造・販売の新規事業化を目指すものである。

平成16年度は、高周波誘導加熱装置を用いて熱処理装置を開発した。試作装置には、一般の市販装置より周波数の高い電源を用いた。これにより加熱深さが浅くなり、硬化層深さが浅くなり、変形が抑えられる。また、エネルギー伝送効率が大きくなることで、小径部品への焼入も可能になる。

本研究では、試作装置を用いて機械構造用炭素鋼の6φ試験片と3φ試験片の焼入実験を行い、評価を行った。評

* 1 山梨県工業技術センター
* 2 ワイエス電子工業株式会社
* 3 浅川熱処理株式会社
* 4 有限会社丸真熱処理工業

価は断面観察と、断面写真から硬化層ののばらつき評価、硬さ測定を行った。

試験片素材として、一般に高周波焼入に用いられる代表的な鋼材である機械構造用炭素鋼（S45C）を用い、実験を行った。

2. 実験方法

試験片形状は長さL=100mm、直径D=3mmおよび6mmの丸棒である（以下、それぞれを3φ試験片、6φ試験片と称する）。これらを両端に旋盤でセンタ穴加工を施したものをを用いた。

焼入コイルは試験片直径に合わせ穴径7.1mm（6φ試験片用）、穴径6mm（3φ試験片用）を作製し、使用した。また、試験片に焼入する長さは70mmである。

組織観察は試料切断後、3%硝酸アルコール液で腐食して行った。6φ試験片は金属顕微鏡、3φ試験片ではビデオマイクロ装置を用いて観察を行った。

焼入条件は表1に示すとおりである。

表1 各試験片における焼入条件

	6φ試験片	3φ試験片
電源電圧 (V)	230~265	230~260
試験片送り速度 (mm/s)	20.8~50.0	43.8~70.0
試験片回転数 (r/s)	15	30
冷却方法	水冷（水道水）	

3. 装置試作

3-1 装置構成

本試作装置の構成を図1、2、3に示す。

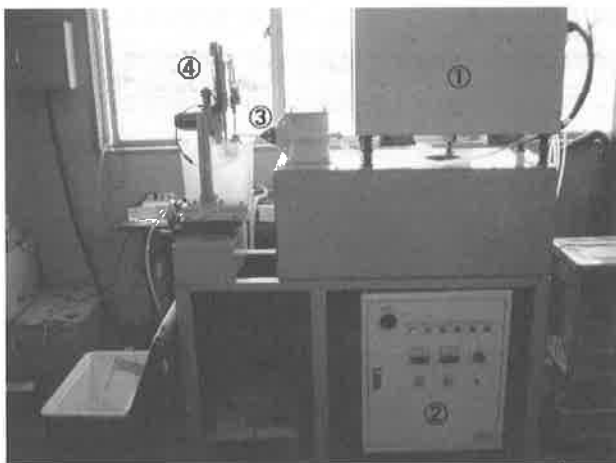


図1 試作装置全構成

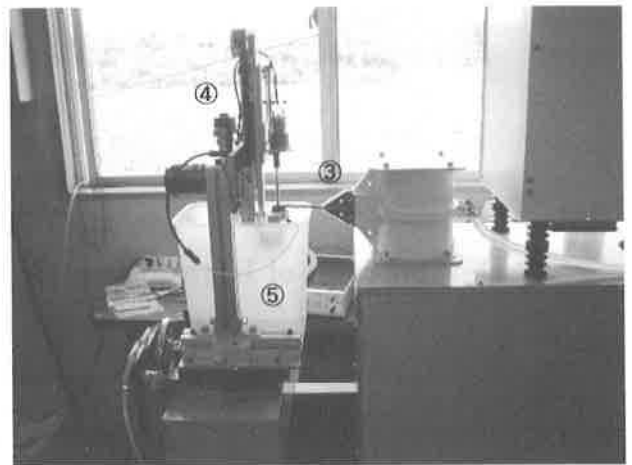


図2 コイル、保持・送り機構部



図3 コイル-冷却ジャケット

試作装置は高周波電源部（図中①）、電源制御部（図中②）、コイル部（図中③）、保持・送り機構部（図中④）、から成る。

本装置の特徴は、現在市販されている高周波熱処理装置の電源周波数が10kHz~400kHzに対して、2MHzと高いことである。高周波焼入において発熱の大部分は（1）式で表される電流浸透深さdの範囲内で起こり、電源周波数が高ければ表皮効果により発熱層が浅くなる。²⁾

$$d = 5.03 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_s}} \quad (\text{mm}) \quad \dots(1)$$

f: 電源周波数 (Hz) ρ: 金属の固有抵抗値 (μΩ・cm)

μ_s: 比透磁率

一般的な鉄鋼材料の場合、（2）式により近似することができる。³⁾

$$\text{焼入深さ} = \frac{500}{\sqrt{\text{周波数}}} \quad (\text{mm}) \quad \dots(2)$$

これによると、例えば従来の400kHzの高周波電源では約0.8mm、2MHzの高周波電源では約0.35mmとなり、理論上約2分の1以下の発熱層深さとなるため、ごく浅い熱処理が可能になることが推測できる。

焼入方法は移動焼入である。ワークは縦下方向に移動し、均一加熱のために回転させている。

3-2 冷却方法

冷却方法は試作当初、加熱コイル直下に水槽(図2中⑤)を設置し、加熱後水中に浸漬して冷却する方法をとっていたが、目的とする硬化層を得ることが出来なかった。これは冷却開始時間が遅いためと考えられたため、新たに加熱直後に冷却可能な冷却ジャケットを作製することにした。また、ワークの回転が安定して行われにくかったため、回転保持機構の改良も行った。

冷却ジャケットの概略を図4に示す。

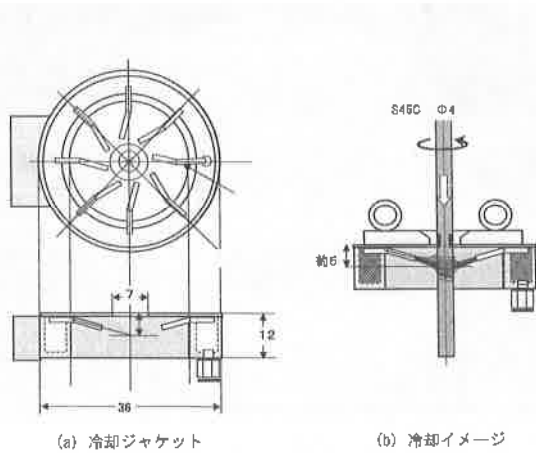


図4 冷却ジャケット概略図

水冷ジャケットは径の小さいノズルとケースから構成されている。ノズル先端は加熱部よりやや下に配置し、ワーク回転軸中心ではなく若干回転方向に向けられている。これにより、加熱直後の試験片を効率よく、迅速に冷却できると考えられる。実際にこの冷却ジャケットを用いて焼入実験を行ったところ、後述のように浅く、均一な硬化層を得ることが可能になった。

4. 実験結果および考察

4-1 6φ試験片

図5に各処理条件において得られた組織写真を示す。

試験片送り速度を一定とした場合、電源電圧の増加とともに硬化層深さは増大する傾向を示した。また、電圧を装置上限の265Vと一定にした場合、送り速度の増加とともに硬化層深さは減少する傾向を示した。

図6に試験片送り速度と硬化層深さとの関係を示す。送り速度が20.6mm/sで硬化層深さは約0.7mmであった。送り速度の増加とともに硬化層深さはほぼ直線的に減少し、31.8mm/sで約0.35mmとなり、70mm/sになると図5に示したように硬化層は認められなくなった。

図7は電源の電圧と硬化層深さとの関係を示したものである。電圧の増加とともに硬化層深さはほぼ直線的に増加し、265Vで約0.7mmとなった。

V	200	220	230	240	265
mm/s					
17.1					
20.6					
25.0					
31.8					
70.0					

図5 各処理条件における組織写真

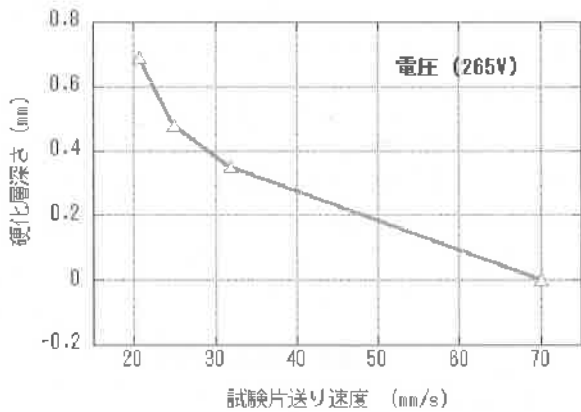


図6 試験片送り速度と硬化層深さとの関係

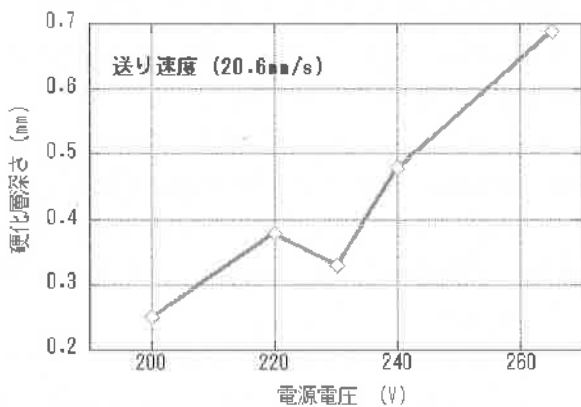


図7 電源電圧と硬化層深さとの関係

このように、今回試作した装置で高周波焼入が可能であることが分かった。また電圧、送り速度を変化させることで硬化層深さは直線的に増減する傾向のあることが分かった。

この実験では、薄い硬化層が得られた条件において回転軸に対し硬化層のばらつき度合いが大きかった。この現象は低電圧、大きい送り速度の条件で顕著に現れ、その逆の条件では現れにくかった。これは、試験片を固定する治具の精度および大きい送り速度に対する試験片の回転数不足と考えられた。よって、これらを解消するべく装置改良を行った。

改良された装置で表1に示した試験条件について再現実験を行った。この結果、各条件において硬化層に若干のばらつきは見られたものの、改良前に比べて大幅に改善された。また、電源電圧265V、送り速度31.8mm/sの条件で焼入を行った試験片で浅く、均一な硬化層が得られた。図8に表面から内部への硬さ分布の測定結果を示す。

表面近傍の最高硬さは約700HVであり、また硬化層深さは約0.25mmであった。このように、本試作装置を用いることにより薄く、安定した硬化層を付与する高周波焼入が可能であることが分かった。

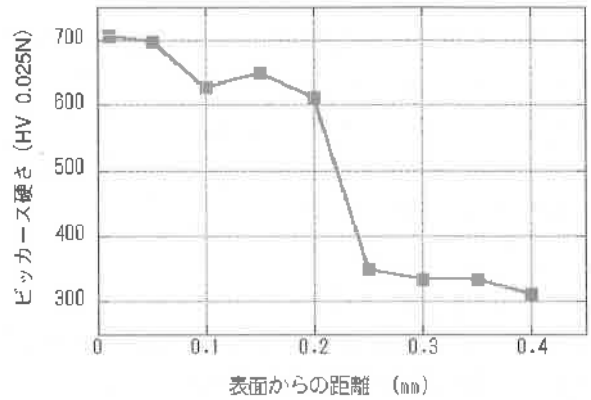


図8 6φ試験片の表面から内部への硬さ分布

4-2 3φ試験片

前節の結果を受け、更に細径である3φ試験片について実験を行った。

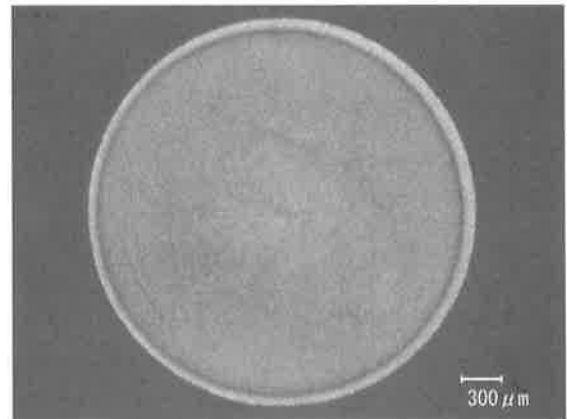


図9 3φ試験片の断面組織写真

3φ試験片では、各条件において良好な結果を得ることができた。その中でも、電源電圧240V、送り速度58.3mm/sの条件にて焼入を行った試験片が、図9に示すように均一で浅い硬化層を有していることが分かった。

図10に表面から内部への硬さ分布の測定結果を示す。

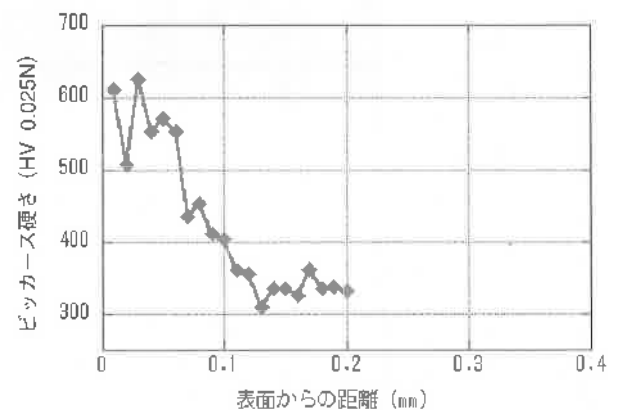


図10 3φ試験片の表面から内部への硬さ分布

表面近傍の最高硬さは約627HVであり、硬化層深さは約0.09mmであった。

試験片径が小さく、硬化層が浅くなるにつれて、試験片回転軸に対する硬化層のばらつき度合いが、均一な高周波焼入を行う上で重要になる。そこで、各焼入条件における硬化層のばらつきについて測定を行った。

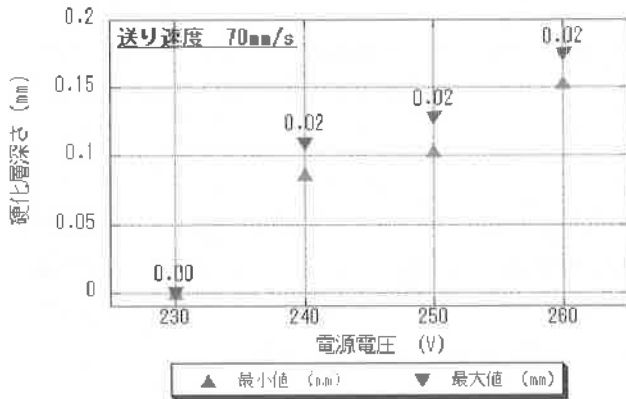


図11 電源電圧と硬化層深さとの関係

図11は送り速度を一定とし、高周波出力を変化させ焼入を行った場合の硬化層深さを示したものである。図中には、各処理条件におけるばらつきを数値で示してある。230Vでは0となっているが、この条件では焼入が行われなかったためである。その他の条件では電源電圧に関係なく約0.02mmのばらつきがあることが分かった。

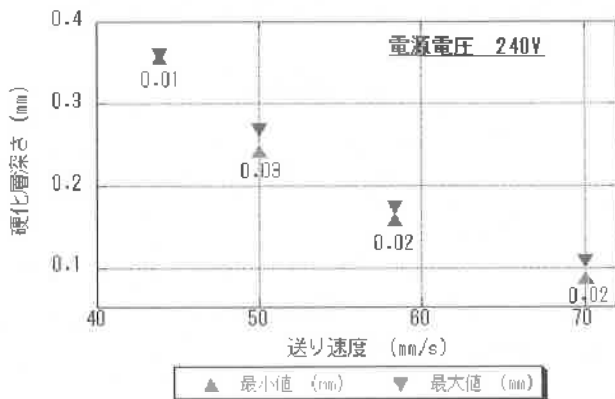


図12 試験片送り速度と硬化層深さとの関係

図12は電源電圧を一定とし、試験片送り速度を変化させ焼入を行った場合の硬化層深さを示したものである。各送り速度において0.01~0.03mmのばらつきがあった。また、送り速度とばらつきとの間には相関は認められなかった。

このように、今回試作した装置で高周波焼入を行うと、出力、送り速度にかかわらず、約0.02mmのばらつきで安定して高周波焼入が行えることが分かった。さらに均一な

処理を行うためには、回転保持機構、試験片送り機構の改良が必要である。

5. おわりに

本報告では高速で精密な熱処理装置を開発することを目的とし、各処理条件における硬さと硬化層深さを測定した。得られた結果を次に示す。

- 1) 市販されている高周波電源よりも高い周波数の電源を用い、冷却ジャケットと共に試作開発したことで、従来より浅い硬化層を付与可能な熱処理装置が得られた。
- 2) 6φ試験片の焼入において、表面近傍の最高硬さ700HV硬化層深さ約0.25mmの処理層を得ることができた。
- 3) 3φ試験片の焼入れにおいて、表面近傍の最高硬さ627HV (0.025N)、硬化層深さ約0.09mmの処理層を得ることができた。

参考文献

- 1) ジャパンマシニスト社 不二越熱処理研究会著 新・知りたい熱処理 p.214
- 2) 大河出版 (社) 日本熱処理技術協会/日本金属熱処理工業会 編集熱処理技術入門 p.274
- 3) 日本規格協会 大和久重雄著 熱処理技術マニュアル p.57