

高周波焼入れシミュレーションの パラメータ値設定の検討

谷内大世* 藤井要* 舟木克之*

高周波焼入れにおいて、所定の硬度や硬化深さを得るためには、誘導コイルの送り速度や入力電力等の条件決定が必要である。これら条件は、経験やノウハウを基に試行錯誤によって決定されている。現在、条件決定を効率化するため、シミュレーションの適用が試みられているが、実用化には至っていない。その理由として、製造現場で用いられる制御パラメータをシミュレーションの入力パラメータへ変換設定する作業が複雑であること、また予測結果の信頼性が低いためと考えられる。本報告では、実作業の条件を基にしたシミュレーションの信頼性向上を目的に予測結果と実際の熱処理品の測定値の比較から、設定パラメータの妥当性を検証した。その結果、入力パラメータである加熱時の大気と被加熱物間の熱伝達率は、試験片の表面温度に対して影響が無いことと、予測される硬さ分布は、硬化深さが浅く見積もられることを示した。

キーワード：高周波熱処理シミュレーション、発熱率、発熱領域、硬さ分布

Study of the Setting of Simulation Parameters values in the Induction Hardening

Taisei YACHI, Kaname FUJII and Katsuyuki FUNAKI

Concern to the induction hardening, it is important to determine the heating conditions such as an input power or a moving speed of induction coil. These conditions are decided through trial and error based on one's respective knowledge and experience. Recently, in order to effective determination of the condition, some applications of the induction heating simulation are studied but they haven't been implemented yet. There are two reasons for the above. One is a difference of using parameters between the simulation and manufacturing site. The other is a poor reliability of simulation results from actual measurement values. In this report, for the purpose to raise reliability of simulation analysis using manufacturing site parameters (heating condition), the validity of simulation parameters was verified from the comparison between simulation results and measurements of hardening products. As the results, the obtained heat transfer coefficient between air and specimen during induction heating was no influence to the surface temperature of specimen. And the simulated hardness distribution was shallower than the measurements.

Keywords : induction hardening simulation, heating efficiency, heating areas, hardness distribution

1. 緒 言

鋼の焼入れとは、焼入れ温度まで加熱し、急冷させることで鋼を硬くし、耐摩耗性や疲労強度、機械的性質などを向上させる熱処理である。熱処理のうち、素材の表面だけを焼入れする手法の一つに高周波焼入れがある。高周波焼入れは、誘導加熱によって被加熱物表面に生じるジュール熱により、焼入れ温度にまで加熱し、その後急冷する熱処理である。高周波焼入れは、

必要な部位を直接加熱するため効率が良く、短時間加熱であるため素材表面の酸化が少ない。さらに、処理条件の調整によって硬化深さを自由に選定できることから、多くの機械部品に適用されている。

製造現場における機械部品の高周波焼入れでは、製品指示の表面硬度や硬化深さを得るため、誘導コイルの送り速度や入力電力等の製造条件の決定が必要である。これらの条件は、経験やノウハウを基に試験的に行う熱処理から、試作製品を切断した後、断面の硬さ分布測定までの工程を繰り返し評価することによって

*機械金属部

決定している。

現在、このような試行回数を削減し、効率的な製造を可能にするため、シミュレーションの適用が試みられているが、普及には至っていない¹⁾。その理由として、シミュレーション解析に使用するパラメータは、焼入装置の制御パラメータと異なるため、制御に用いる値をシミュレーションに入力可能な値に変換する必要があり、解析のための準備に手間がかかる。さらに、解析結果の信頼性が低いためと考えられる。

本報告では、生産現場で実際に使用している焼入れ条件項目である装置の電源出力と周波数、誘導コイルの送り速度から、被加熱物の発熱領域や発熱率、加熱冷却時間を算出し、高周波焼入れシミュレーションに使用可能な値へ変換して解析を行った。さらに、解析結果と実際の熱処理品の測定値の比較から、変換したパラメータの妥当性を検証した。

2. 実験方法

2.1 高周波焼入れ条件

高周波焼入れは、日本電興(株)製の真空管式高周波電源装置を用いて、表1に示す焼入れ条件で行った。なお、硬化層深さの変化を確認するため、誘導コイル移動速度を10, 11, 12mm/secの3水準とした。試験片は、表2に示す化学成分の炭素鋼S45Cを用い、φ20mm×高さ35mmの円柱形状とした。なお、実験では焼戻しを行わずに焼入れのみを行った。硬化層深さは、JIS G 0559に準じて、試験荷重2.942Nで測定した。

表1 高周波焼入れ条件

プレート電圧 [kV]	10.0
プレート電流 [A]	12.4
周波数 [kHz]	120
誘導コイル移動速度 [mm/sec]	10, 11, 12
回転速度 [rpm]	300
冷却剤	ポリマー水溶液
冷却剤温度 [°C]	27

表2 試験片の化学成分 [%]

成分 材料	C	Si	Mn
S45C	0.44	0.21	0.72

2.2 高周波焼入れシミュレーション

シミュレーションソフトにクオリカ(株)社製GRANTASを用い、表層付近の温度分布および硬さ分布の予測を行った。実際の高周波熱処理は、被加熱体に対して誘導コイルが移動する移動焼入れであるが、シミュレーションでは、加熱体の一部が、幅を持ったコイルの移動速度に応じた時間だけ加熱され、コイルの通過と冷却剤の噴霧により冷却が行われることとして実施した。図1に二次元モデルを示す。モデル寸法は、試験片φ20mmの半径分10mm、実際の高周波焼入れでは6mmの加熱帯が生じるため、高さは6mmとした。試験片はY軸回転体であるため、中心軸をX軸拘束し、上下面もY軸拘束に設定した。また、加熱・冷却される表面を熱境界面に設定した。S45Cの材料物性条件は、熱処理シミュレーションのデータベース内に採用されているデータと文献²⁾からS45Cのジョミニ曲線データを用いた。また、試験片への熱伝達率は、高周波焼入れにおける水噴射冷却の文献³⁾を参考にして設定した。なお、シミュレーションソフトの入力パラメータでは、表1に示したプレート電圧、プレート電流および周波数の各値をそのまま入力することができず、誘導加熱による被加熱物の内部発熱領域、発熱率を設定しなければならない。そのため、これらの値は表1の条件値から算出した。

2.2.1 内部発熱領域の算出

高周波焼入れでは、誘導加熱によって被加熱物の表層付近に渦電流が流れ、被加熱物が持つ電気抵抗によりジュール熱が発生し発熱する。表層付近に流れる電流は、周波数に依存するため、以下の式(1)より電流透過深さδが算出される⁴⁾。

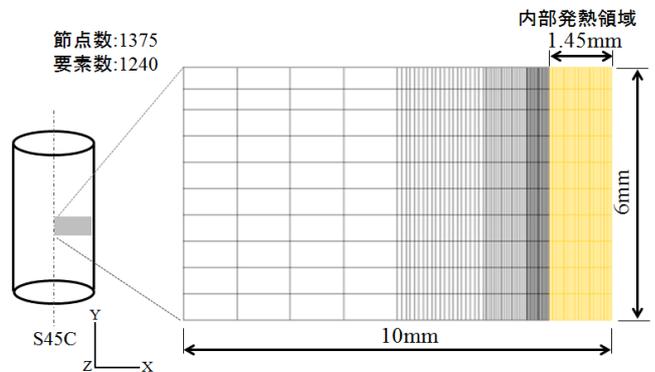


図1 シミュレーション二次元モデル

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad [\text{m}] \quad (1)$$

- ・ ρ :被加熱物の抵抗率 $[\Omega \cdot \text{m}]$
(高温での平均値として 100×10^{-8})
- ・ μ :被加熱物の比透磁率(高温では1)
- ・ f :周波数 $[\text{Hz}]$

式(1)より、電流透過深さ δ は1.45mmであるため、図1に示すように内部発熱領域を表面から深さ1.45mmの範囲として設定した。

2. 2. 2 発熱率の算出

発熱率 H は、誘導加熱が生じている部分における単位体積あたりの熱発生量であり、式(2)より算出できる。外径 $\phi 20\text{mm}$ の本試験片を高周波焼入れした際、試験片には6mmの加熱帯が生じる。また、電流透過深さ δ は式(1)より1.45mmであるため、本試験片が誘導加熱されている部分の体積 V_{ih} は、 $5.46 \times 10^{-7} \text{m}^3$ である。また、式(3)より電源からの出力電力 P は74400Wと計算される。これらの値と式(2)より、発熱率 H は、 $1.36 \times 10^{11} \text{W/m}^3$ である。ただし、算出した発熱率 H は誘導コイル等で生じる損失を考慮せずに、100%被加熱物の発熱に使われた場合の値である。そのため、式(4)よりシミュレーションで入力すべき発熱率 H' を算出するには、発熱効率 $\eta_{\text{efficiency}}$ を定める必要がある。

$$H = \frac{P}{V_{ih}} \quad [\text{W/m}^3] \quad (2)$$

$$P = V_{\text{plate}} \times I_{\text{plate}} \times \eta_{\text{power}} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

- ・ V_{plate} :プレート電圧 $[\text{V}]$
- ・ I_{plate} :プレート電流 $[\text{A}]$
- ・ η_{power} :変換効率 $[\%]$ (文献⁵⁾より60%と仮定)

$$H' = H \times \eta_{\text{efficiency}} \quad [\text{W/m}^3] \quad (4)$$

- ・ H' :シミュレーションに設定する発熱率 $[\text{W/m}^3]$
- ・ H :損失を考慮してない発熱率 $[\text{W/m}^3]$
- ・ $\eta_{\text{efficiency}}$:発熱効率 $[\%]$

3. 実験結果と考察

3. 1 発熱率および発熱効率の検討

式(3)によって電源電力の値から発熱率を算出したが、

シミュレーションに必要な発熱率は、被加熱物内に生じる値である。そこで、式(3)から算出した値にコイル等で生じる損失分を考慮した発熱効率を検討した。実際に高周波焼入れ時の表面温度は、加熱された試験片の火色から推定すると 1000°C を超えていない。そこで、表面加熱温度を最大 1000°C と仮定し、発熱効率を変化させた際の表面温度を図2に示す。なお、加熱時は大気中と試験片間の熱伝達率の影響があるため、シミュレーションソフト内にある10水準の既存熱伝達率変動データから温度依存性が最大、最小、中間の3水準の熱伝達率変動カーブをそれぞれ加熱時に設定した場合の表面温度について解析を行った。

図2の結果から、加熱時に設定した3水準の熱伝達率の影響は最大 5°C であり、大気と試験片間の熱伝達率の影響は小さいことが示された。そのため、温度依存性が中間のデータを選定した。また、発熱率は、図中の直線から $2.14 \times 10^{10} \text{W/m}^3$ と求められる。この値は、式(3)の電源電力から算出した発熱率 $H:1.36 \times 10^{11} \text{W/m}^3$ の15.8%であり、被加熱物の発熱効率である。

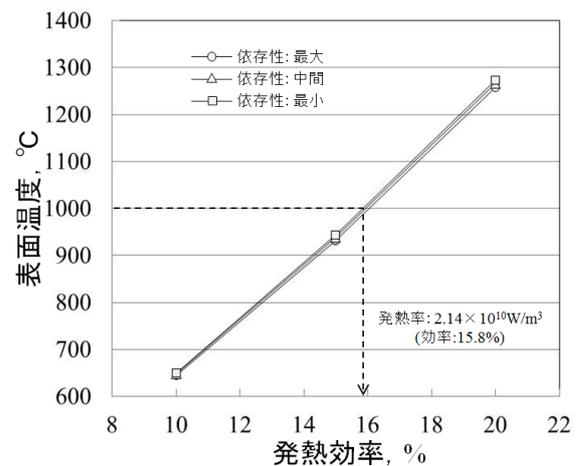


図2 温度依存性が異なる熱伝達率3水準および電源電力効率に対する表面温度の変化

3. 2 硬さ分布との比較

解析結果と実際の熱処理品の測定値との比較から、今回行った高周波焼入れシミュレーションの妥当性を検証する。図3に実際に焼入れした試験片の実測値とシミュレーション予測した硬さ分布の結果を、図4に予測された加熱温度分布を示す。なお、解析の硬さ分布結果は、硬さが減少し始める深さから素地硬さ間の硬さ値を計算することができないため、被加熱物が A_1

温度(750°C)まで加熱された深さまでを点線で結んだ。
この範囲(HV650以下)の硬さ値が得られなかった原因は、図4で示すようにA₃温度(830°C)以上に加熱されていないことによる。

まず表面硬さについて検証する。一般に炭素量0.44%の鋼の焼入れ最高硬さは60HRC(約HV690)である⁶⁾。しかし、実物の表面硬さはHV740程度であり、文献値に比べ約HV50高い。高周波焼入れは焼入れによる硬化に加えて、表面の圧縮残留応力の効果により一般焼入れよりも硬さが高くなったものと考えられる。

硬化深さは、実測結果と解析結果が一致せず、解析結果は実物に比べて硬化層深さが浅い結果となった。この原因については、図4に示すように素材内部がA₃温度以上に加熱されている深さが浅いためである。

以上の結果から、算出した発熱率および内部発熱領域は適切な値ではなかった。発熱率をこれ以上とした場合、内部温度は上昇するが表面温度も上がる。また、内部発熱領域に対しては、試験片と誘導コイルのギャップの影響が考えられるが、電流透過深さ δ は周波数に依存するため、算出した以上の値にはならない。

4. 結 言

製造現場で用いる制御パラメータである電源出力と周波数、誘導コイルの送り速度から、被加熱物の発熱領域や発熱率、加熱冷却時間を算出し、高周波焼入れのシミュレーションに入力可能なパラメータへの変換と解析を行い、解析結果と実測値との比較から、高周波焼入れシミュレーションの妥当性を検証した。その結果は以下のとおりである。

- (1) 焼入れ制御パラメータをシミュレーションに入力できる値へ換算できる。
- (2) 高周波焼入れは誘導加熱による急速加熱であるため、シミュレーションパラメータの一つである加熱時の大気と被加熱物間の熱伝達率は、表面温度に対して影響が無い。
- (3) 予測された硬さ分布曲線は、実測した結果と比較して、硬化深さが浅く見積もられており、硬さ分布も一致しない。これは、被加熱物内における発熱率の設定値が小さく見積もったためと考える。シミュレーションの信頼性を高めるため、さらなる検討が必要である。

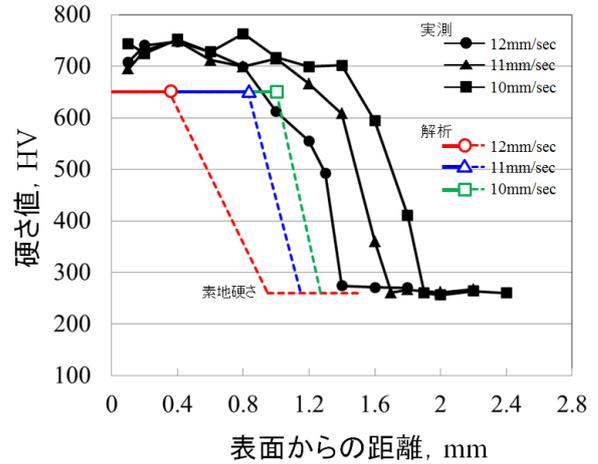


図3 硬さ分布の比較

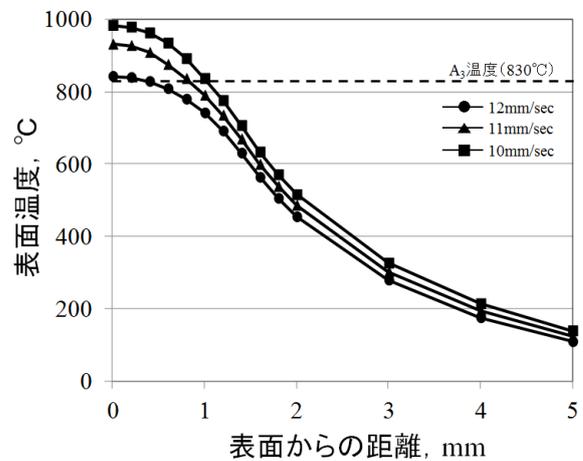


図4 予測された温度分布

参考文献

- 1) 岡村一男.“材料データベース研究分科会 <http://sosei.jsms.jp/datab/datab.html>, (2010).
- 2) ATLAS ZUR WARMEBEHANDLUNG DER STAHL. Berichtiger Nachdruck, 1961, p.83-84
- 3) 堀野孝, 生田文昭. 高周波焼入れシミュレーションにおける水噴射冷却の特性. 日本熱処理技術協会第67回(平成21年春季)講演大会概要集. 東京, 2009-5-18/19, 2009, p. 55-56.
- 4) (社)日本熱処理技術協会. 熱処理技術便覧. 日刊工業新聞社, 2000, p.790
- 5) (社)日本熱処理技術協会. 全面改訂・熱処理技術入門. 日刊工業新聞社, 2000, p.276
- 6) (社)日本熱処理技術協会. 熱処理技術便覧. 日刊工業新聞社, 2000, p.61