

短時間高周波誘導加熱におけるシミュレーションと実験の比較

Mechanism of high frequency induction heating for short time

短時間焼入れが硬化層分布に及ぼす影響

Effect of hardened depth for short time quench hardening

佐藤崇弘*・生田智章**・野嶋賢吾***・福江智輝**・馬田秀文**

Takahiro Sato, Tomoaki Ikuta, Kengo Nojima, Tomoki Fukue, Hidefumi Mada

*機械素材研究所 機械・計測制御グループ、**鳥取県金属熱処理協業組合、***企画・連携推進部 企画室

CO₂排出量削減の取り組みが急務の中、金属熱処理業界では従来の浸炭焼入れから高周波焼入れへの移行が進んでいる。その中で、従来適用されてこなかった小形部品や薄肉部品の高周波誘導加熱を行う事例が出ており、1秒未満の短時間高周波誘導加熱の硬化メカニズム解明が求められている。そこで、一般的な数秒の高周波誘導加熱と1秒未満の短時間高周波誘導加熱を実験と解析で比較することで、検証を行った。その結果、1秒未満の熱処理条件において、電源側の実測電力値を与えた解析では、解析結果と実験結果が合わなかったが、コイル側で補正した実測電流値を与えることにより、高精度な予測が可能となった。

Amid the need to reduce CO₂ emissions, the heat treatment industry is shifting from carburizing and quenching to high-frequency induction heating. There are cases of high-frequency induction heating of small parts and thin-walled parts that have never existed before. Therefore, high-frequency induction heating for several seconds and short-time high-frequency induction heating for less than one second were compared by experiment and FEM. As a result, it was found that FEM does not match the measured power value on the power supply side under the heat treatment condition of less than 1 second.

1 はじめに

国内では、「2050年カーボンニュートラル」宣言を受け、2030年度CO₂46%削減目標等の実現に向けて計画が策定され、国内の大手製造業では対応が始まっている。県内の中小企業においても、今後製品を製造する上でCO₂排出量削減に向けたさらなる取り組みが求められている。

その中で、金属製品を加熱、冷却の組み合わせで素材を硬くしたり柔らかくしたりする熱処理工程は、ガスや電気等多くのエネルギーが利用される。

様々な熱処理法の中で、高周波誘導加熱は表1に示

表1 加工方法別熱処理統計¹⁾

加工方法	重量 (t)	加工金額 (百万円)
焼ならし・焼なまし	427,774	9,883
焼入焼戻し	683,638	30,551
浸炭焼入焼戻し	235,183	33,480
高周波焼入焼戻し	243,291	14,781
窒化・軟窒化	81,046	12,454
真空熱処理等焼入焼戻し	65,970	12,761
合計	1,736,901	113,909

すとおり重量ベースで全体の14%を示す主要な熱処理方法であり、自動車部品では足回りの駆動軸、ハブ軸受け、エンジンのカムシャフト等多くの丸もの部品に適用されている。近年では、高周波熱処理は一般的な燃焼式加熱炉を用いる熱処理に比べCO₂排出量が少なく、さらに切削加工やプレス加工ライン内でのインライン熱処理が安定して行えることもあり、注目されている。

高周波誘導加熱に関する研究は、従来から数多く実施されている²⁾が、そのほとんどは丸棒や歯車といった数秒の加熱時間で処理されるものである。その中で、インライン熱処理や小形薄肉部品の需要が増えたことで、1秒未満の短時間熱処理を行う事例が出ており、短時間高周波誘導加熱の硬化メカニズム解明が求められている。井口らの研究³⁾では昇温速度に応じてA_{c3}変態温度が高温側にシフトすることを明らかにしており、その理由として拡散速度より早い昇温速度で熱処理を行うと未変態が残留したままになるため、より高温域

で変態終了するためと説明している。

本研究では、高周波誘導加熱時間が短時間とされる0.2秒(昇温速度4000°C/s)から一般的な5秒(160°C/s)までの条件において実験とシミュレーションの両面から検証を行った。数秒程度の一般的な高周波誘導加熱条件における被加熱物の温度の実測結果と解析結果の合わせこみを実施した後、シミュレーションを参照値として1秒未満の加熱時間における実験値と計算値の差異について考察することにより短時間焼入れの硬化層予測に及ぼす各種因子について明らかにした。

2 実験方法及び解析方法

2.1 高周波誘導加熱条件と評価方法

2.1.1 高周波誘導加熱条件

検証に用いた被加熱物の形状は丸棒とし、図1に被加熱物とコイルの断面寸法を示す。 r_1 は被加熱物の半径、 r_2 および r_3 はそれぞれコイルの内側および外側の半径を示す。 t はコイルの板厚を、 L は被加熱物の長さを示している。高周波誘導加熱条件は、周波数200kHz一定とし、焼入れ時間は0.2、0.5、1、3、5sの5条件比被加熱物で材質S45Cに対して静止焼入れを行った。なお、解析では相変態まで計算することができないため、解析の温度分布と実験の硬化層分布を比較した。

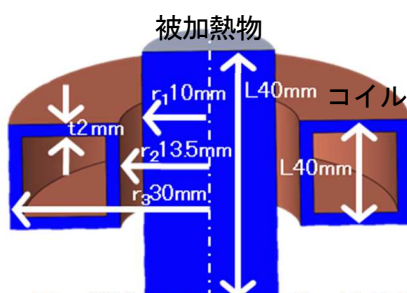


図1 検証した被加熱物およびコイルの寸法

2.1.2 評価方法

解析で求めた硬化層分布を評価するため、高周波誘導加熱実験で焼入れした丸棒を図2に示すようにワイヤーカット放電加工機で中央をカットし、放電加工の影響が及ばない範囲まで耐水サンドペーパー、ダイヤモンド砥粒を使い研磨を行った後、(株)ミットヨ製のマイクロビッカース硬度計(型式:HM-220D)でマトリックス状に硬さ試験を行った。さらに、研磨面をナイ

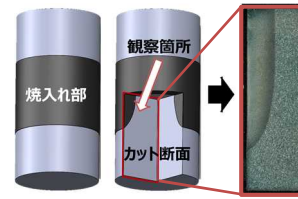


図2 被加熱物の評価方法

タール(3%硝酸アルコール)で腐食させることでマクロ組織観察した。

2.2 実験方法

2.2.1 実験装置

高周波誘導加熱実験は、電気興業(株)製(型式:CTG-30/200-150II)を利用して行った。加熱温度の実験結果と解析結果の比較検証は、被加熱物コイル中央付近を(株)ジャパンセンサー製ファイバ型放射温度計(型式:FTKX-TNE0240)でポイント測定し、被加熱物全体をフリアーシステムズジャパン(株)製サーモグラフィ(型式:A655sc)でリアルタイム計測することにより行った。

解析の条件設定に利用する熱処理中の電力値は、高周波誘導加熱装置の制御装置のモニタに表示される電源側の電流値と電圧値の積を用いた。また、コイルに流れる電流値の測定については、コイル中心付近に電流プローブをセットするとプローブそのものが加熱さ

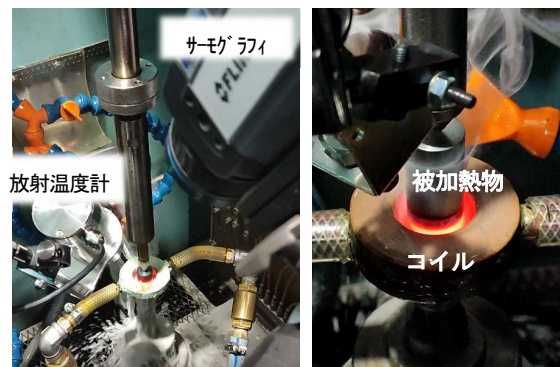


図3 高周波誘導加熱実験の様子

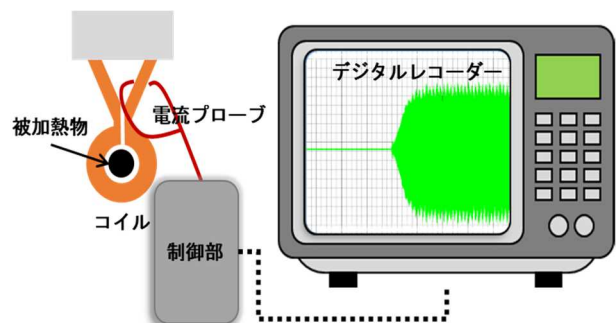


図4 コイル部の電流値測定方法

れてしまうため、図4に示すように岩崎通信機(株)製の電流プローブ(SS-628M)をコイル根元にセットし、電流プローブ制御部で電圧変換した。電圧変換された交流波形を(株)日置電機製デジタルレコーダー(8860)で200nsのサンプリング周波数で取得し、時間軸の電流変化として換算した上で記録した。

2.3 解析方法

2.3.1 使用した解析ソルバー及び材料定数

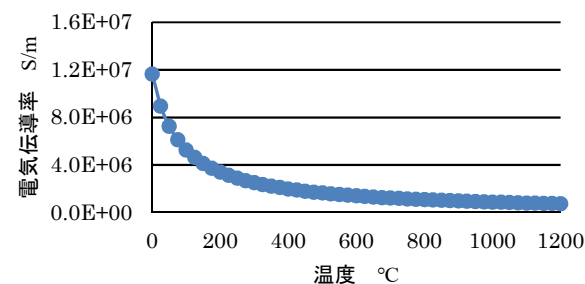
本研究では、(株)JSOL社製のJMAG-Designer20.1を解析に用いた。JMAGは、有限要素法を用いた電磁界解析と非定常熱伝導解析の連成解析を行うことで、被加熱物の温度分布の時間変化を得ることができる。

なお、電磁界解析は、磁界 $H(A/m)$ 、電流密度 $J(A/m^2)$ 、電気伝導率 $\sigma(S/m)$ 、ジュール損失密度 $Q(W/m^3)$ とした場合、式(1)のMaxwellの方程式を解く。

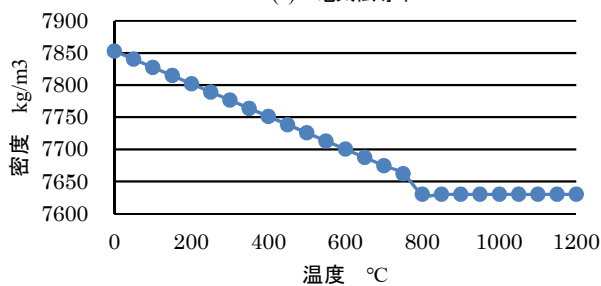
$$\left. \begin{aligned} \nabla \times H &= J \\ Q &= \frac{J^2}{\sigma} \end{aligned} \right\} \dots \text{式 (1)}$$

そして、式(1)で得られたジュール損失密度を利用して、温度 $T(^{\circ}C)$ 、密度 $\rho(kg/m^3)$ 、比熱 $C(J/kg^{\circ}C)$ 、熱伝導率 $K(W/m^{\circ}C)$ 、熱量 $Q(W/m^3)$ とした場合、式(2)の

温度依存性の材料定数は、参考文献の実験データ³⁾⁴⁾



(b) 電気伝導率



(d) 密度

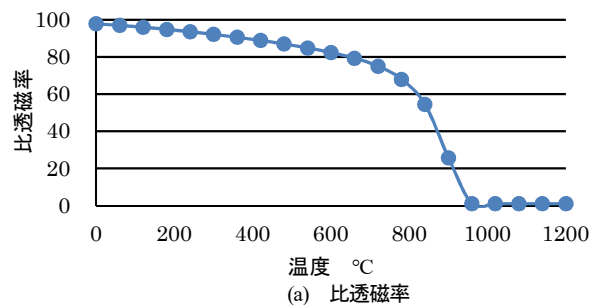
熱伝導方程式を解く。なお、ヒステリシス損失は発熱に寄与しないと仮定し、ジュール損失熱を全熱量としている。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \dots \text{式 (2)}$$

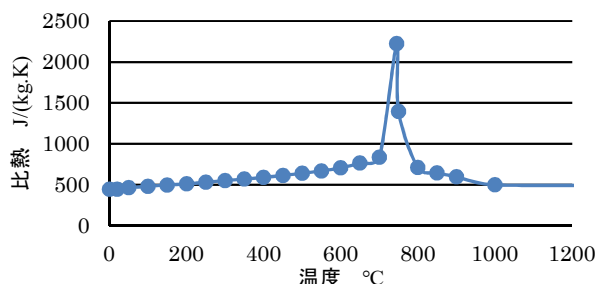
を参照して解析結果との合わせこみを行った結果、図5(a)に比透磁率、図5(b)に電気伝導率 $\sigma(S/m)$ 、図5(c)に比熱 $C(J/kg^{\circ}C)$ 、図5(d)に密度 $\rho(kg/m^3)$ 、図5(e)に熱伝導率 $K(W/m^{\circ}C)$ とした。なお、それ以外は定数としてJMAGのサンプルデータを活用して計算した。

2.3.2 解析モデル

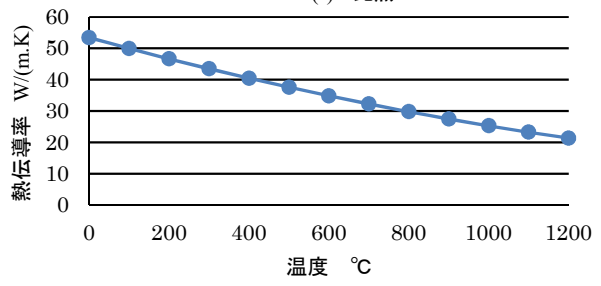
コイルと被加熱部のメッシュ形状を図6(a)に、空気領域を含む全メッシュ形状を図6(b)に示す。なお、解析モデルは、解析時間短縮を目的に回転方向に1/36した10°分割モデルとし、境界部には軸対称性を加味できる対称面定義を設定した。一般的に発熱量の誤差が1%以下となる空気領域の範囲はモデル長の4倍とさ



(a) 比透磁率



(c) 比熱



(e) 熱伝導率

図5 解析に用いた材料定数

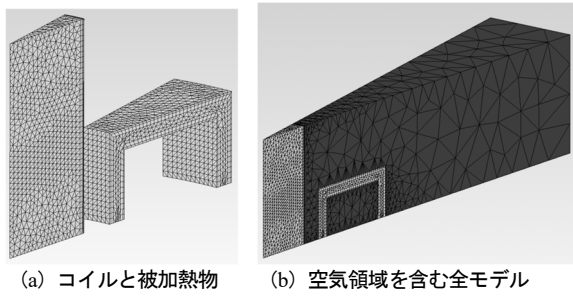


図6 解析モデル

れているため、その範囲は、モデル長の5倍とした。

高周波誘導加熱では、高周波の変動場に被加熱物がさらされるとその表面に偏って渦電流が発生する。この偏りを表現するため、被加熱物表層のメッシュ（以下、表皮メッシュ）を細かく分割する必要がある。そこで、表皮メッシュを5分割し、1分割目を0.02mm、2分割目以降を0.05mmとした。

3 結果と考察

3.1 実験結果と考察

3.1.1 温度測定結果

高周波誘導加熱時の被加熱物中央付近（最も温度が高くなる箇所）における時間による温度変化を図7に示す。時間軸の差で見ると700°C付近まで急激に温度上昇した後、800°Cに向けて徐々に昇温している。この傾向は、短時間になる程小さくなっている。これは、図5(a)で示した比透磁率が700°C付近から急激に小さくなることで、式(1)で示したとおり磁束密度が小さくなり温度上昇しにくくなるためである。

3.1.2 電力値及び電流値測定結果

図4に示した電流プローブを使って、1秒未満の電流値の時間変化を図8(a)に、表面温度の時間変化を図8(b)に示す。この図から、電流値上昇速度は、短時間であっても同様であるが、温度上昇においては加熱時間で異なる。

次に加熱における高周波誘導加熱装置の電源側の電流値、電圧値及び電力値を表2に示す。また、コイル側の電流プローブで測定した電流値の時間変化を表3に示す。なお、電流プローブで測定した値は実効値に変換済みのものである。

高周波誘導加熱を現場で実施する場合、表2で示し

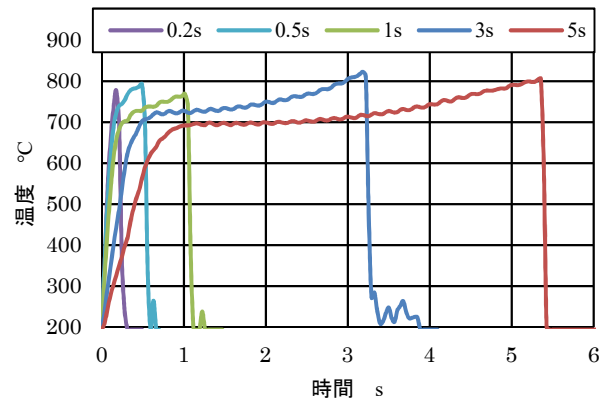


図7 被加熱物表面温度推移

表2 各焼入れ時間における電力値

焼入れ時間(s)	電流(A)	電圧(V)	電力(kW)
0.2	282	387	109,1
0.5	266	320	85,1
1	235	265	62,3
3	174	187	32,5
5	143	153	21,9

表3 各焼入れ時間におけるコイル側電流値

焼入れ時間(s)	電流(A)
0.2	3,796
0.5	3,655
1	3,236
3	2,340
5	1,856

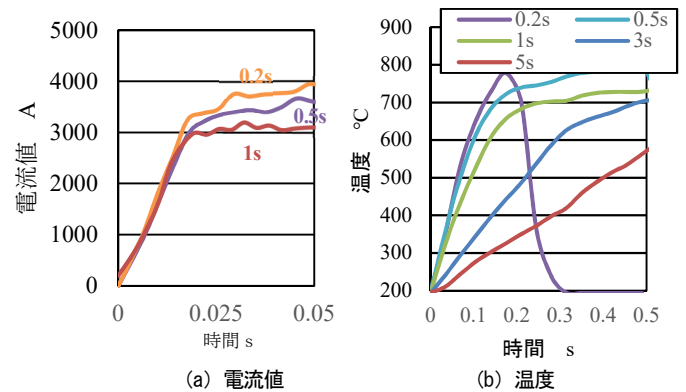


図8 電流値と温度の時間変化

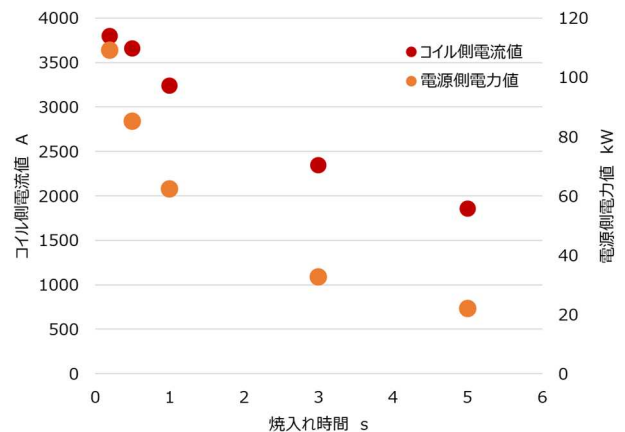


図9 実測した電流値と電力値の関係

た電力値を指標に加熱温度を試算する方法が一般的である。そこで、電源側電力値とコイル側電流値の関係を調査するため、図9に2つのデータを比較した。この図から、電力値と電流値は比例関係になく、短時間になる程、電源側の電力値の方が、コイル側の電流値よりも上昇することがわかる。また、コイル側電流値は時間軸に対して線形で変化している。一方で電源側電力値は、2次曲線で変化している。これは、電力値の上昇に伴い、電源側の損失が大きくなったためと考えられる。

3.1.3 マクロ試験と硬化層分布の結果

丸棒断面の解析により求めた硬度硬化層分布とマクロ試験結果を図10に並べて示す。なお、解析結果においては、加熱後の温度がS45CのA3変態点(780°C)を超える箇所が硬化するものとし、硬化部と非硬化部の境界ラインを白線のとおり求め、マクロ組織観察結果に重ねて示した。図より、マクロ試験において黒く変色している箇所は、マルテンサイトが変態した部位となり、ピッカース硬さで550HV以上の箇所はマルテンサイトリッチの箇所、550HV以下で黒く変色していない箇所はマルテンサイトとフェライトの混合組織となる。そのため、マクロ試験による硬化層分布と解析結果から求めた硬化層の境界ラインに違いが出ているものと考えられる。

また、加熱時間の違いで比較すると、短時間では硬さ分布と境界ラインが近く、長時間の方が離れている。これは、短時間の方が素材内の温度傾斜が大きく、マルテンサイトとフェライトの混合組織部が少なくなったためと考えられる。

3.2 解析結果と考察

3.2.1 磁束密度と比透磁率の関係

熱処理時間5sにおける解析において、5sに到達するまでのカット断面における磁束密度と比透磁率分布を図11に示す。なお、磁束密度は図に赤線で示しており、コンター図が比透磁率分布である。

この図より、熱処理初期は、表層部に磁束密度が高くなり、その後時間が経過するにつれ表層部の温度が上昇し、図5(a)で示した比透磁率が下がる。その結

果、磁束密度が高くなる箇所がより材料深部に移動するため、徐々に内部の温度が上昇する。比透磁率分布のコンター図を見ると、温度上昇に伴い比透磁率1の箇所(図内の紫色)が徐々に材料深部に広がっている。

3.2.2 電源側電力値での解析結果

表1に示した電源側の電力値の条件で解析を行い、解析結果の750°C以上を硬化層とみなし、その部分を黒色表示したものを図12に示す。なお、実験結果の硬化層ラインは図中の赤線で示している。図より、5sの解析と実験の硬化層分布はよく一致しているが、短時間になるほど軸方向及び半径方向ともに乖離が大きくなっていることがわかる。これは、図10でも述べたように電源側での損失分を加味していないため、解析の硬化層分布が短時間になるほど損出が大きくなり実験との乖離部分が広がったものと考えられる。

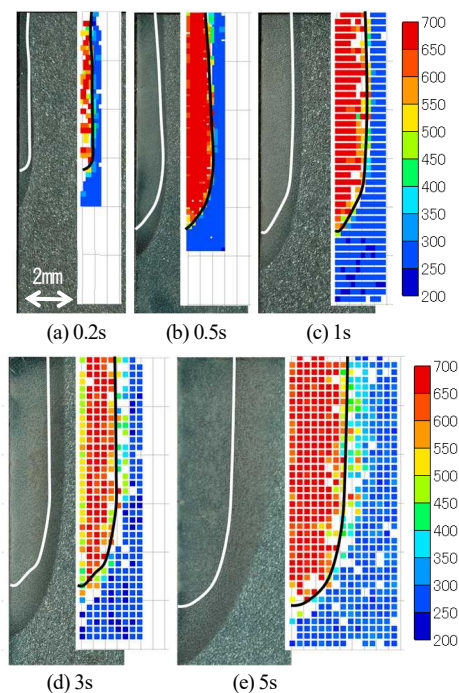


図10 マクロ観察と硬さ分布の結果

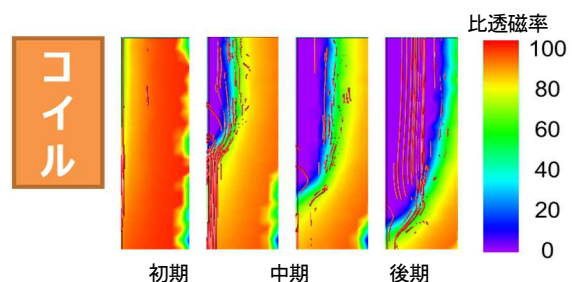


図11 熱処理中の磁束密度と比透磁率分布

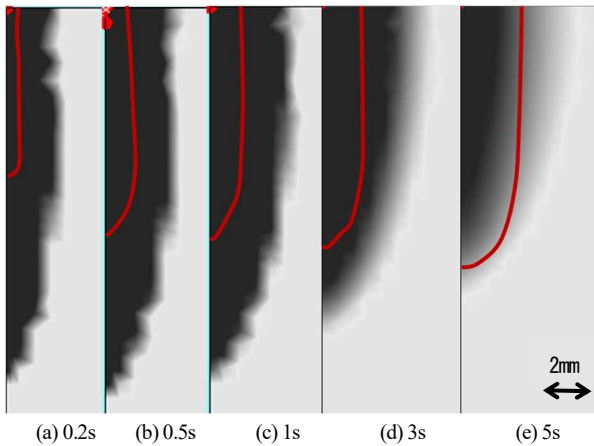


図 12 電源側電力値における硬化層

3.2.3 コイル側の電流値での解析結果

表 2 で示した電流プローブで測定した平均電流値を設定条件として解析を行い、図 12 と同様に 750°C 以上の解析結果（黒色）と実験により求めた硬化層（赤線）を比較した結果を図 13 に示す。図より、図 12 と比較して解析結果と実験結果が全体的に良く一致している。

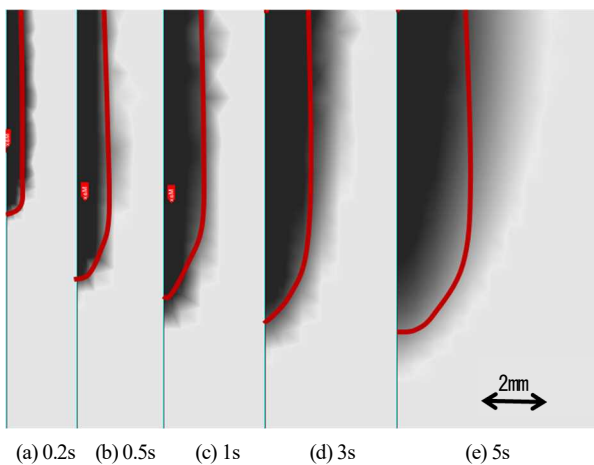


図 13 電流プローブ実測値における硬化層分布

4 おわりに

金属熱処理業者において高周波誘導加熱条件の設定は、一般的に高周波焼入れ装置のモニタに出力される電源側電力値で管理されている。本報告では、電源側電力値で管理した場合、1 秒未満の短時間熱処理では、硬化層分布がシミュレーションと実験で合わなくなることを示した。一方、本報告で示したコイル側の電流値で管理すれば、1 秒未満の短時間熱処理においてシミュレーションと実験が同じ結果となる。

熱処理現場で 1 秒未満の熱処理条件を同定する際は、高周波誘導加熱時の電流値を毎回実測するのではなく、図 9 で示した 1 秒以上の電力値の線形性と同一傾きで電流値を予測し、1 秒未満の熱処理条件を推定する手法を用いることで、高精度に硬化層分布を予測可能となる。

本報告では、電源側電力値とコイル側電流値の違いを電源側の損失分と推測したが、今後は損失の実測等を行うことでその要因を明らかにしたい。

謝 辞

本研究は、公益財団法人 JKA の 2022 年度公設工業試験研究所等が主体的に取組む共同研究補助事業により実施した。また、研究で利用したファイバ型放射温度計は(株)ジャパンセンサーより提供頂いた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) <https://www.e-stat.go.jp> (政府統計の総合窓口)
- 2) 宮近ら; 軸の高周波焼入れによる残留応力と硬化層に及ぼすコイル形状の影響, vol.66, No.652, p.4080-4086(2000)
- 3) 井口ら; 鋼の非平衡加熱状態図, 日本金属学会誌, vol.39, No.3, p.255-261(1975)
- 4) 日本機械学会; 伝熱工学資料, 改訂第 5 版(2009)