

# 磁束密度制御治具を活用した選択的高周波誘導加熱法の開発

Development of selective high-frequency induction heating using magnetic flux density control tool

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・無機材料グループ、\*\*鳥取県金属熱処理協業組合、\*\*\*企画・連携推進部 企画室

脱炭素及びSDGsの達成を求められる中で、自動車業界等の製造業では、製造工程における環境負荷・エネルギー消費量の低減が課題となっている。その中で、自動車の動力伝達用部品では、熱処理工程をガスや電気等多くのエネルギーを消費する従来の浸炭焼入れから環境負荷の小さい高周波焼入れに転換する動きが出ている。そのような中、起伏の大きく薄い部品については、磁束密度分布の関係で熱処理ができない（温度が上昇しにくい）部品形状が存在する。そこで、磁束密度を制御する治具を考案し、複雑形状部品に選択的に高周波焼入れ可能な方法を開発した。

In the manufacturing industry, reducing the environmental load and energy consumption in the manufacturing process is an issue for decarbonization and responding to the SDGs. For automotive power transmission parts, the heat treatment process has been changed from carburizing and quenching, which consumes a lot of energy such as gas and electricity, to induction quenching, which has less environmental impact. However, in laminated parts with large unevenness, there are parts that cannot be induction hardened due to the magnetic flux density distribution. Therefore, we devised a tool that controls the magnetic flux density and developed a method that enables selective induction hardening of parts with complex shapes.

## 1 はじめに

機械要素部品（歯車、シャフトなど）には、軽量化・高強度化のため表面硬化処理が必須である。機械要素部品の表面硬化処理では「浸炭焼入れ」が一般的だが、最近ではエネルギー消費量の少ない「高周波焼入れ」への転換が進められている。特に、小形・薄肉部品（寸法が数mm以下）に高周波焼入れを適用することへの要望が高く、複雑形状部品の輪郭に沿って、精密な厚さ（0.1～0.2mm程度）の硬化層を、部品の必要箇所みに付与する技術に期待が寄せられている。

高周波焼入れで用いられる「誘導加熱」では、周波数、電流、加熱時間、加熱コイル形状など、設定条件が多く、製造現場では、部品ごとに試行錯誤で対応せざるを得ないのが現状である。さらに前述のとおり、最近では部品が小形・薄肉化しているため、従来では考慮する必要がなかった焼入れ治具の形状・寸法（熱容量、接触面積）や材質（比透磁率、熱伝導率）の影響をも考慮した高度な処理が求められる。

さらに、高周波焼入れでは小形・薄肉部品になると1

秒未満の短時間の現象となるため、現場での試行錯誤にも限界がある。そこで本研究では、所望の箇所のみ熱処理を行うため、製品とは別に磁束密度を制御する目的で製品の上からセッティングする治具（以下、磁束密度制御治具とする）を使用する方法を開発した。磁束密度制御治具は、その材質及び形状を選択することにより、被熱処理品の特定の箇所を選択的に温度上昇させる目的で利用した。

## 2 解析方法

### 2.1 製品形状

本研究で対象とする製品形状は、図1に示すような薄板円盤を複数枚軸方向に積層し、外周面に凹凸のある製品（以下、薄板円盤とする）である。

高周波誘導加熱する際は、移動加熱方式により、ワーク側を移動させることで全体に熱処理を行うが、本研究では解析時間短縮を目的に静止焼入れにより解析を行った。

図2(a)に被熱処理品とコイルの上面図を、図2(b)

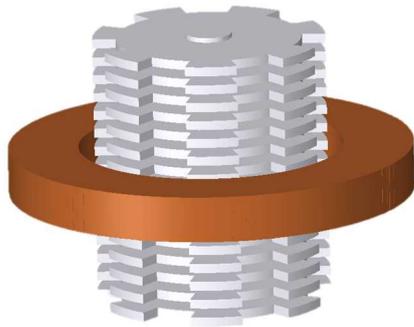


図1 被熱処理品とコイルの斜視図

に被熱処理品とコイルのカット断面図を示す。被熱処理品及びコイル寸法は図中に示すとおりとした。なお、被熱処理品の形状については、本形状を基本形状とし、その中で各設定値を変更し、検証を行った。

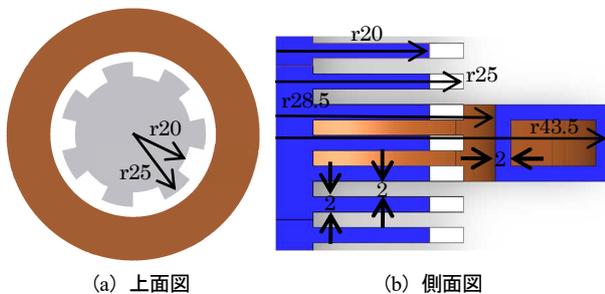


図2 被熱処理品とコイル

## 2.2 解析モデル

解析モデルは、図3(a)に示すように、解析時間短縮を目的とし、回転方向を1/7軸対象モデルとした。なお、境界部には軸対象性を加味できる対象条件を設定した。空気領域の範囲は、発熱量の誤差が1%以下となるモデル長の4倍以上とした。

使用した解析ソルバーは、(株)JSOL社製のJMAG-Designer20.1を用いた。JMAGにより、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をさせて解くことで、図2(b)に示すような被加熱物の温度分布を計算した。

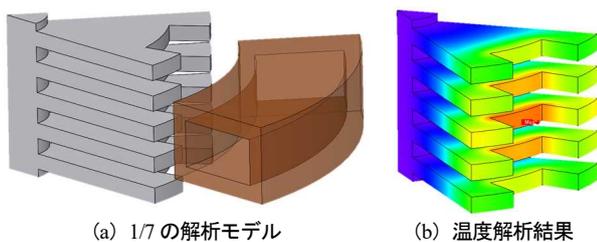


図3 検証した被加熱物およびコイルの寸法

## 2.3 解析条件

加熱条件は、熱処理現場で利用される条件とし、その設定値を表1に示す。

表1 加熱条件

項目	設定値
電力値	45kW
周波数	30kHz
被熱処理部材	S45C
熱処理時間	3s

解析では、加熱コイルに流れる電流を電力値に基づき設定する方法と電流値で設定する方法がある。熱処理現場では、コイル側の電流値を把握することができないため、電源側の電力値で管理されており、本研究では基本は電力値で解析を行った。

## 3 結果と考察

### 3.1 解析結果と考察

#### 3.1.1 製品形状が温度分布に及ぼす影響

本研究で対象としている薄板円盤の誘導加熱は、企業現場において、図3(b)に示すように凹部の方が温度上昇しやすく凸部の方が温度上昇しにくい現象が発生していた。そこで、その現象を確認するため、凹部と凸部の径が異なるモデルを作成し、シミュレーションで温度分布を計算した後、凹部中央付近及び凸部中央付近の最高温度を図4に示した。

この図から、凸部に対する凹部の径の寸法比が90%近くなると最高温度は同等になるが、それ以下の寸法比では、熱処理現場で発生している状況と同様に凹部の方が温度上昇している。

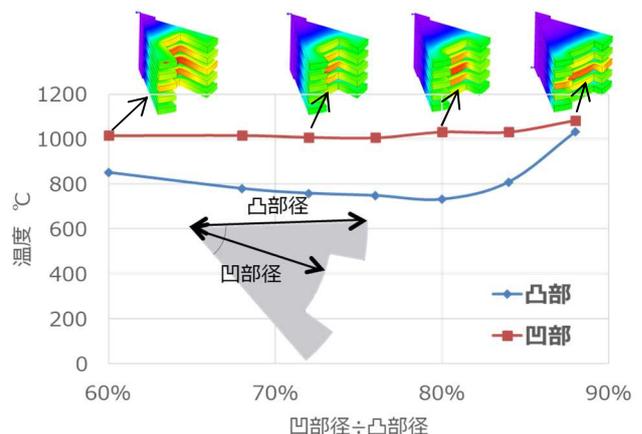


図4 凹部径と凸部径が温度分布に及ぼす影響

そこで、半径方向に凹凸のある薄板円盤を高周波誘導加熱する場合の温度ムラを系統的に調査するため、被熱処理品の板厚、凸部半径、凹部半径を設計因子にし、凸部温度から凹部温度を除いた値を評価した。図5において横軸は薄肉円盤の厚みの寸法比、縦軸は凸部に対する凹部の半径の寸法比（以下、凹凸比という）とし、凸部に対する凹部の温度の比をバルブ表示形式で示す。図中に記載のとおり、横軸が大きくなるほど薄板円盤の隙間が小さく（狭く）なり、縦軸が大きくなるほど凸部と凹部の寸法差が大きくなる形状である。図の結果から、薄板円盤の隙間及び薄板円盤の半径の凹凸差が小さくなる、いわゆる円筒に近づけば凸部と凹部の温度差はなくなる。一方で、隙間が大きく、凹凸差が大きいと凹部の方が温度上昇しやすい。

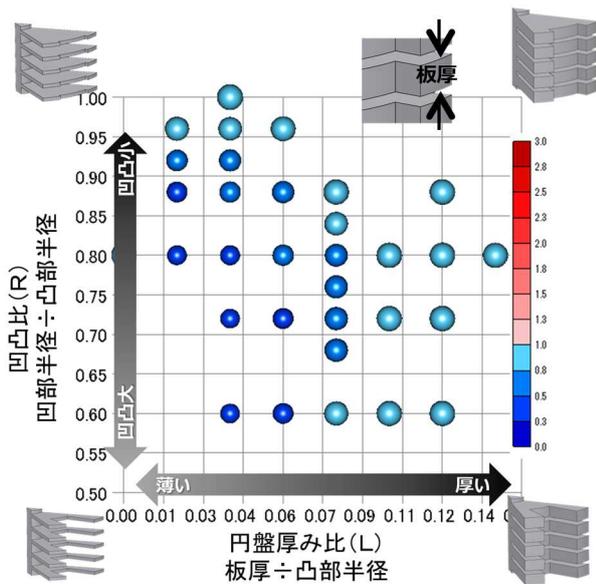


図5 薄肉円盤の凹凸形状が温度分布に及ぼす影響

### 3.1.2 磁束密度分布が温度分布に及ぼす影響

高周波誘導加熱は、コイルに電流を流すとコイル周辺に磁束が発生し、被熱処理物の電気抵抗により表面に渦電流が発生する。その抵抗により発熱する原理である。そのため、コイルから発生する磁束密度分布が温度分布を左右する。

そこで、凹凸のある薄板円盤の磁束密度分布をシミュレーションで可視化した結果を図6に示す。なお、図中の右上に斜視図を図中はカット断面の磁束密度分布を赤線で示している。この図から、凸部近傍は磁束

密度が低く、凹部近傍で磁束密度が高くなっている。

この要因は、コイルで発生した磁束密度分布は、被熱処理物の表面形状により方向性を持つが、薄板円盤の場合、図7に示すように磁束ベクトルが相殺される方向に発生するため、凸部では磁束密度が高くない。一方で凹部では、一方方向のみの磁束ベクトルとなるため相殺されず、温度上昇しやすくなるためと考えられる。

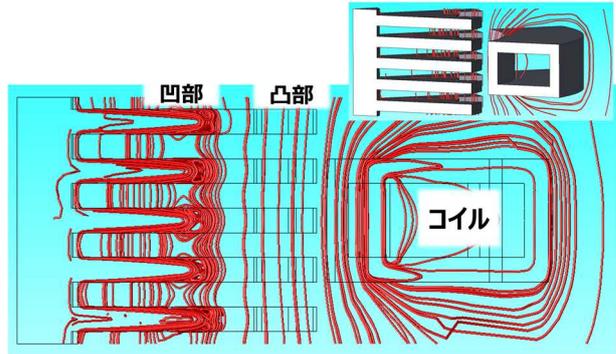


図6 凹凸のある薄板円盤の磁束密度分布

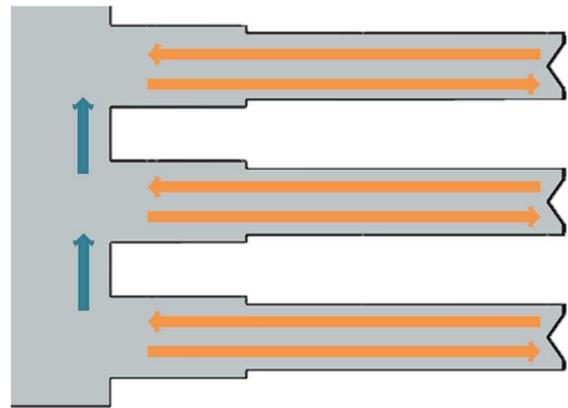


図7 磁束密度ベクトル

### 3.1.3 磁束密度制御治具の形状が及ぼす影響

図7で示した磁束密度を制御する目的で図8(a)と(b)の磁束密度制御治具2案を検討した。治具の形は、図8で示した磁束ベクトルの相殺を防ぐため、凸部周辺で磁束密度が高くなるよう設計し、材質は製造現場で用いられる被熱処理品と同様のS45Cとした。治具の効果を確かめるため、磁束密度制御治具を設置した場合の温度シミュレーションを行い、凹部及び凸部の最高温度を治具なし、治具A及びBで比較した結果を図9に示す。また、治具A及び治具Bにおける磁束密度分布と温度分布を図10に示す。両図より、治具Aでは凸部の方が凹部より温度上昇しており、磁束密度分

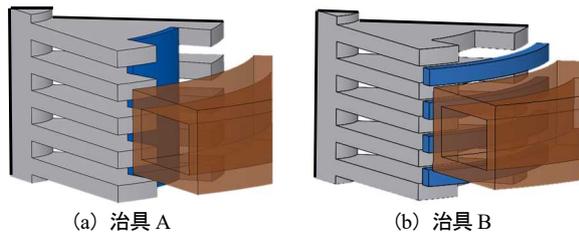


図8 考案した磁束密度制御治具

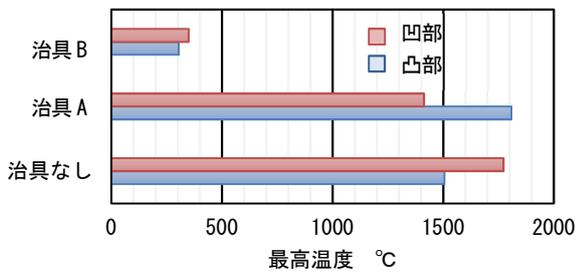
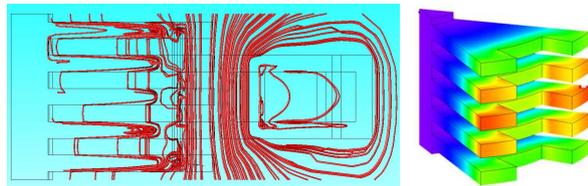
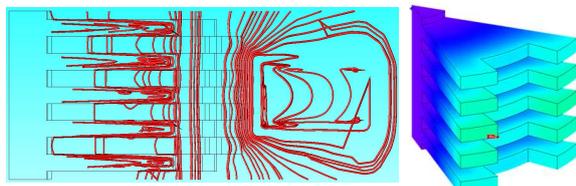


図9 治具形状が各部温度に及ぼす影響



(a) 治具 A の磁束密度分布及び温度分布



(b) 治具 B の磁束密度分布及び温度分布

図10 治具形状が磁束密度及び温度分布に及ぼす影響

布も凸部で高くなっている。一方で治具 B については、磁束密度分布が治具自体に集中しており、治具が温度上昇している。このことから、治具 A の形状を中心に検討を行うこととした。

### 3.1.3 磁束密度制御治具の材質が及ぼす影響

治具 A の材質が磁束に及ぼす影響について評価するため、治具の比透磁率が異なる 2 つの材質として強磁性体である S45C と非磁性体である SUS304 で調べた。なお、図 11 に 2 つの材質の温度と比透磁率の関係を示す。強磁性体である S45C は 700°C 付近から急激に比透磁率が下がる。一方で非磁性体である SUS304 は、どの温度帯においても 1 となる。

治具 A の形状に対して 2 つの材質を適用した場合の凹部と凸部の最高温度と温度分布を図 12 に示す。図よ

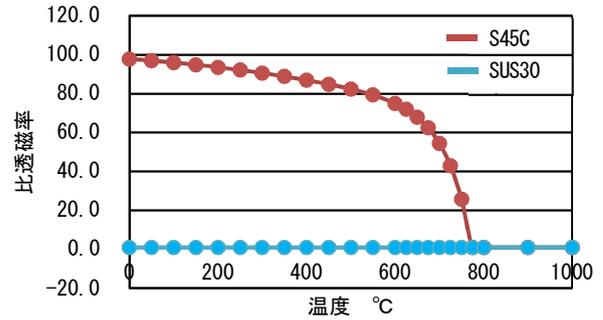


図11 材質と比透磁率の関係

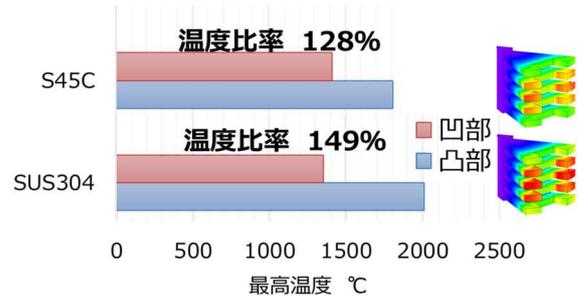
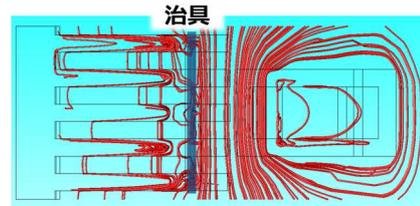
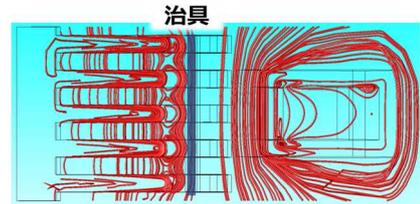


図12 治具材質が温度分布に及ぼす影響



(a) S45C



(b) SUS304

図13 治具材質が磁束密度分布に及ぼす影響

り、どちらの材質でも凸部の方が高い温度となるが、SUS304の方がより顕著に凸部温度が高くなっている。その要因を調査するため、材質と磁束密度分布の関係を調べた結果を図 13 に示す。両材質とも凸部において磁束密度分布が高くなっているが、S45C と比較して SUS304 方がより凸部のみに磁束密度分布が集中している。これは、強磁性体である S45C の治具は 700°C 付近までは透磁率が高いため、磁束密度が治具に集中するが、非磁性体である SUS304 は、すべての温度域で比透磁率が低いため、治具近傍には磁束密度が集中しないためと考えられる。

図 5 で示した薄板円盤に対して、S45C 及び SUS304

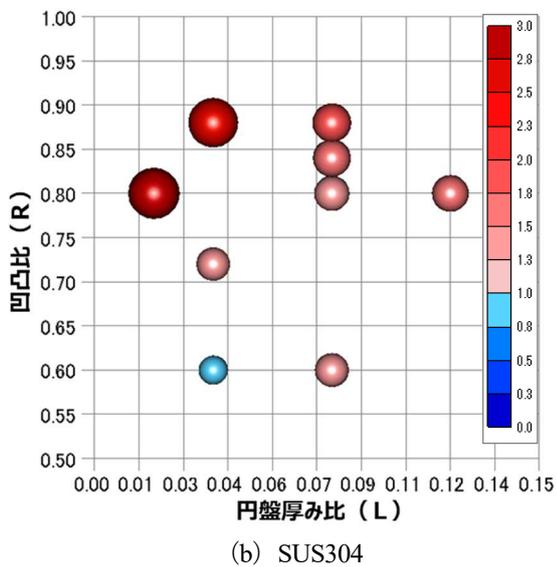
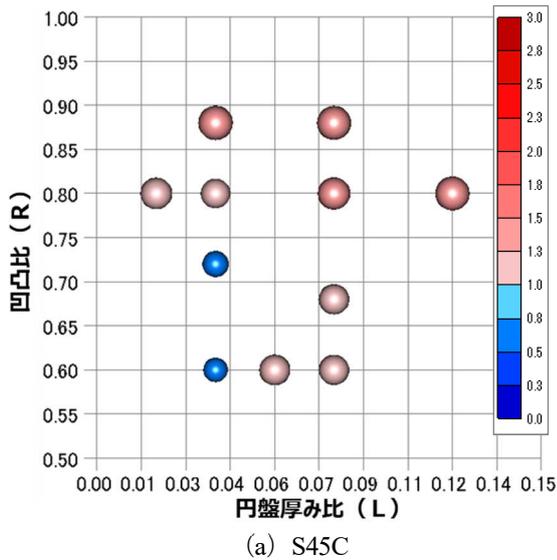


図 14 薄板円盤の凹凸形状及び治具材質が温度分布に及ぼす影響

の治具 A を適用し、薄板円盤の凸部と凹部の温度に及ぼす影響について調査した結果を、図 14 に示す。図 5 の結果と比較すると、治具を使うことで図中のバルブ色が赤色（凹部よりも凸部の方が温度が高い）となっている。さらに、治具の材質が S45C と SUS304 の場合を比較すると SUS304 の方が凸部の温度がより高くなった。また、図中で青色となっている円盤厚み比 0.036、凹凸比 0.60 がある。この部分についても SUS304 の方が赤色となっている。このことから、治具の活用及び治具材質の変更により、凹部及び凸部の温度制御が可能となる。

### 3.1.4 磁束密度制御治具と被熱処理品との隙間が温度分布に及ぼす影響

磁束密度制御治具と被熱処理品との隙間が凹部と凸部の温度分布に及ぼす影響を調べ、その結果を図 15 に示す。なお、検証した被熱処理品の形状は図 14 (a) 及び (b) において青色となっていた円盤厚み比 0.036、凹凸比 0.60 のもので治具材質は S45C の場合で検証した。図より、隙間が大きくなる程凹部と比較して凸部の温度が高くなる。しかし、図中の温度分布をみると治具そのものが温度上昇していることがわかる。

そこで、隙間がある場合に治具材質が温度分布に及ぼす影響を調べた。隙間 6mm の場合における温度分布の結果を図 16 に示す。図より治具そのものの温度上昇は治具材質を SUS304 にすることで抑えることができ、かつ凸部と凹部の温度も図 15 同様に顕著に差をつけることが可能となった。

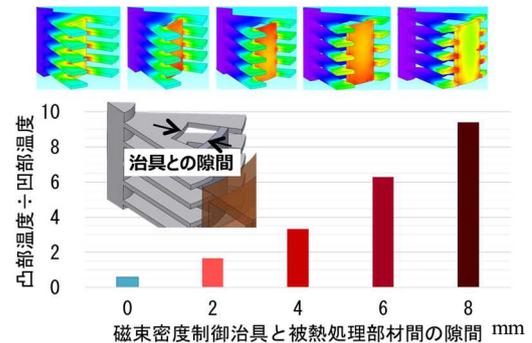


図 15 治具と被熱処理品との隙間が温度分布に及ぼす影響

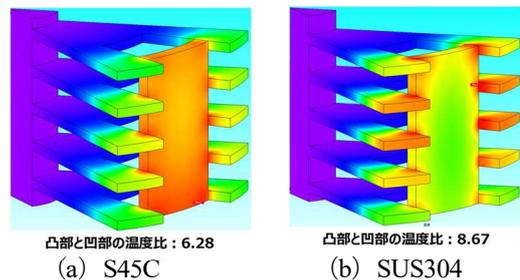


図 16 隙間(6mm)がある場合の治具材質が温度分布に及ぼす影響

## 3.2 実験結果と考察

### 3.2.1 被熱処理品及び現場実装を想定した治具の形状

3.1 で述べたシミュレーション上の検証結果について妥当性を確認する目的で高周波誘導加熱装置（電気興業(株)製 型式:CTG-30/200-150 II）で熱処理実験を行

った。実験で使う被熱処理品形状を図 17 (a) に、磁束密度制御治具を図 17 (b) に示す。被熱処理品は、加工のしやすさを考慮し、丸棒、カラー、外周面に凹凸のある薄板円盤の 3 パーツを組み合わせて作成した。また、磁束密度制御治具は、手動交換のしやすさを実現するため、図 17 (b) に青色で示す治具形状とした。治具は着脱式であり、作業効率を損なわない形状とした。熱処理実験で利用した被熱処理品を図 18 (a) に、磁束密度制御治具を図 18 (b) に示す。なお、磁束密度制御治具の材質を被熱処理品と異種材料（今回の

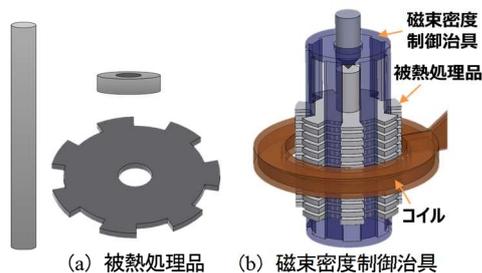


図 18 各部材の形状

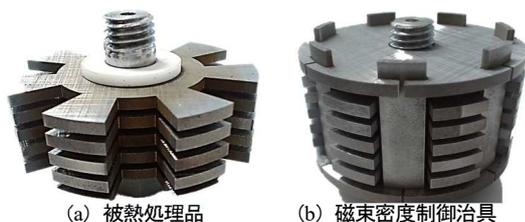


図 18 実験に利用したサンプル形状

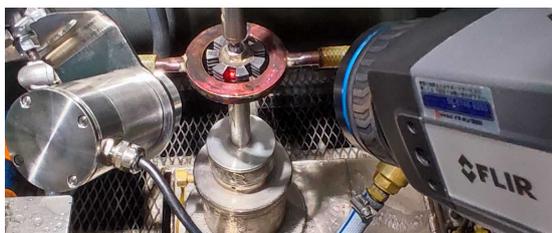
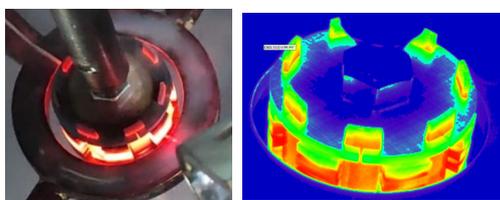
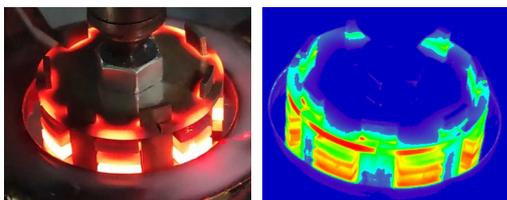


図 19 実験外観



(a) S45C



(b) SUS304

図 20 異なる治具材質における熱処理の様子と温度分布

場合 SUS304) を使う場合、異種材量間の電位差によりスパークが発生する危険性があることから、図 18 (a) に示すような絶縁体であるセラミックスカラーを取り付けた。

### 3.2.2 磁束密度制御治具による高周波誘導加熱実験

図 19 に示すように被熱処理品を高周波誘導加熱装置に取り付け、シミュレーションで検証した同条件で実験を行った。実験ではサーモグラフィと放射温度計による温度測定を行った。

図 20 (a) に治具材質 S45C における熱処理の様子と温度分布を、図 20 (b) に治具材質 SUS304 における熱処理の様子と温度分布を示す。図から、治具材質が S45C の場合は治具自体も赤熱し、温度上昇している。一方で治具材質が SUS304 の場合、治具は赤熱せず被熱処理品のみ赤熱しており、図 16 で示したシミュレーションの結果と同じ傾向であることがわかった。

## 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、高周波電源装置による加熱条件（主に電力値）、被熱処理品の形状に合わせたコイル設計により行っている。本報告では、そのような設定を行っても目的の箇所に熱処理が出来ないような製品を対象にした新しい手法を考案した。特に今回検証した外周面に凹凸のある薄板円盤の場合、磁束密度制御治具を活用することで、特定の箇所を温度上昇させることに成功した。

## 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り組む共同研究補助事業により実施した。ここに記して謝意を表す。