

## 高周波焼入口ボットの研究開発

機械電子科 鈴木悠介\* 長津義之 太田幸宏 長谷川和宏  
榎本工業株式会社 川村健広 呂 明杰 杉浦佳之

### Research and development of robot for induction hardening

SUZUKI Yusuke, NAGATSU Yoshiyuki, OHTA Yukihiro, HASEGAWA Kazuhiro,  
KAWAMURA Takehiro, LU Mingchieh and SUGIURA Yoshiyuki

Induction hardening is a commonly used processing method for surface hardening to improve wear resistance and fatigue resistance. The processing is used for various metal parts, including those of transportation equipment. Currently, induction hardening is processed manually by craftsmen for parts in small quantities that are of many types and that have complex shapes. Therefore, there is a demand for the development of robots that can handle such production process. As such, in order to solve this problem, we prototyped a three-axis (X, Y and  $\theta$ ) drive robot. This report describes the results of induction hardening of cam parts using this prototype robot. The results were as follows; (1) The prototype robot was able to perform induction hardening along the shape of the cam parts using the machining program that had been created. (2) After induction hardening, the depth of hardening and hardness was uneven in the thickness direction of the cam parts. (3) The effect of induction hardening was stronger at the edge and weaker in the center.

keywords : Induction hardening, Heat treatment, Robot, Automation

高周波焼入れは、耐摩耗性、耐疲労性の向上を目的に、輸送機器をはじめ一般機械部品など様々な金属部品に対して行われる熱処理である。現在、少量多品種で複雑形状の部品に対する高周波焼入れは、熟練工による手作業でしか対応できないことから、この様な生産に対応できるロボットが求められている。そこで、本研究では少量多品種で複雑形状の部品の高周波焼入れを自動化できる高周波焼入口ボットの開発に取り組み、X、Y、 $\theta$  の 3 軸駆動のロボットを試作した。本報告では、試作したロボットを用いて複雑形状のカム部品に対する高周波焼入れを行うための加工プログラムの検証及び加工後のカム部品の焼入れ品質として全硬化層深さ及び硬度を評価した結果について示す。その結果として、作成した加工プログラムにより、カム全周にわたりロボットによる高周波焼入れ加工を施すことができた。一方、今回、ロボットにより、試験加工を施したカム部品を評価した結果、厚み方向において全硬化層深さ及び硬度が不均一であり、端部ほど高周波焼入れの効果が強く、中央部ほど効果が弱いことがわかった。

キーワード：高周波焼入れ、熱処理、ロボット、自動化

#### 1 はじめに

高周波焼入れは、耐摩耗性、耐疲労性の向上を目的に、カムや歯車、シャフトなど多種多様な機械部品に利用されている表面熱処理手法である。高周波焼入れは、短時間で加工が可能であること、交流電流の周波数の調整により焼入れ深さを調整できること、部分的に必要な箇所のみを焼入硬化さ

せることができる、といったメリットがある。一方、被加工物が複雑形状部品の場合、電流が一定に流れないので、加工が非常に難しいといったデメリットがある。そのため、複雑形状部品に対して高周波焼入れを行うためには、形状に適した誘導加熱コイルを設計、作製する必要が生じる。また、少量生産部品に対しては、自動化が進んでい

\* 現 工業技術研究所 機械電子科

ないため、熟練工による手作業により加工が行われている。これらの工程には、熟練工の知識と経験が重要であり、工期や費用を要することや作業者により品質が変化するといった課題が生じている。

本研究では、誘導加熱コイルと被加工物との間隔、加工速度をNC制御により精確に数値制御することで少量多品種、複雑形状部品の高周波焼入れに対応できるロボットの開発を目指し、令和3年度より研究開発を開始した。本報告では、令和3年度に試作した高周波焼入れロボットを用いて、現在、手作業により高周波焼入れが行われている複雑形状のカム部品に対し、加工を行うための加工プログラムの検証及び加工後の品質について評価した結果を報告する。

## 2 方法

試作した高周波焼入口ボットの概要を図1及び写真1に示す。試作したロボットは汎用焼入口ボットとして設計された高周波電源と誘導加熱コイルを有しており、多様な被加工物の形状に対応できるよう、X、Y、θの3軸の加工軸による移動制御及び加工速度制御 (mm/min) が可能である。試作した高周波焼入口ボットを用いて写真2に示すカム部品（材質：球状黒鉛鋳鉄FCD600）に対する加工をテストケースとし、高周波焼入口ボットの動作確認及び加工後のカム部品の高周波焼入れ品質の評価を行った。

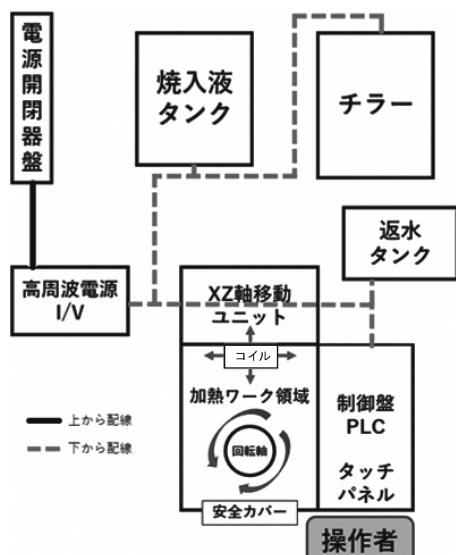


図1 高周波焼入口ボットの構成

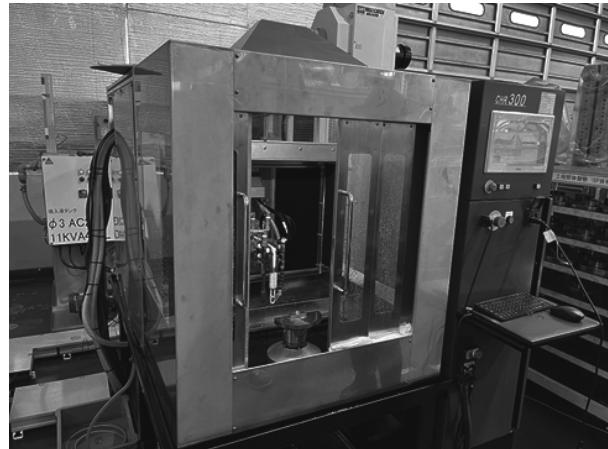


写真1 試作した高周波焼入口ボット

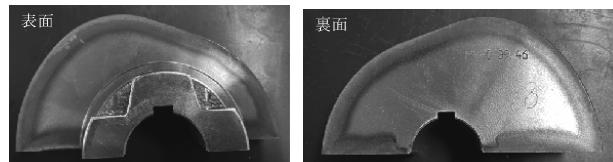


写真2 高周波焼入れテスト加工用カム部品

(160mm×90mm×40mm\*)

※焼入加工部は厚さ15mm

## 2.1 高周波焼入口ボットの動作確認

## (1) NCプログラムの検証

今回開発した高周波焼入口ボットのNCプログラム作成法では、エッジ部を除き、カム部品の輪郭線に対して外側に一定量オフセットしたものを軌道とすることでコイルとカム部品間にクリアランスを与えており、一方、エッジ部は、過加熱されやすく、また、計算上加熱時にカム回転角度 $\theta$ が急激に変化し、運動精度の確保が難しいため、図2のように、カム部品の輪郭に仮想のR面を加え、さらにオフセット量を増加させたものを軌道とした。今回の軌道のオフセット量は1mmで、エッジ部のみ3mmとし、その際に追加する仮想Rを1mmとした。なお、NCプログラムでは、全体のコイル軌道を、最大長さ2mmの直線の集合で構築した。

以上により作成したNCプログラムによる軌道の確認のため、コイル軌道をシミュレートした。

プログラムのコードからX、Y及び $\theta$ の指令値を抽出し、それらの値より予想されるコイル軌道を算定し、2DCADデータ化した。2DCADソフトウェアは、フリーソフトウェアのJw\_CADを用いた。その2DCADデータと目標軌道のデータを対象とし、両者の輪郭間の距離を計測することによって、比較を行った。距離測定は、Jw\_CADの点間距離測定機能により実施した。

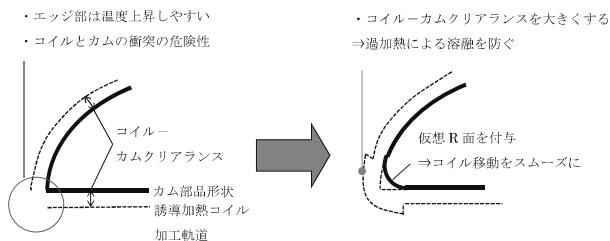


図2 エッジ部の加工制御

## (2) 高周波焼入口ボットの軌道計測

作成したNCプログラムを入力した際のロボットの運動をDIC（デジタル画像相関法）によって計測した。なお、誘導加熱コイルの電流はなしで加熱を行わず、移動のみとした。カメラはDIC用3Dカメラ（ATOSCore185、GOM社、写真3）を用い、誘導加熱コイル及びカム部品の表面に貼付したポイントマーカーから、コイルのX方向、Y方向及びカムの回転角度 $\theta$ の変位を計算した。変位計算はDICソフトウェア（ARAMISPro2018、GOM社）を用いた。カメラ撮影は毎秒2フレームの取り込みとした。

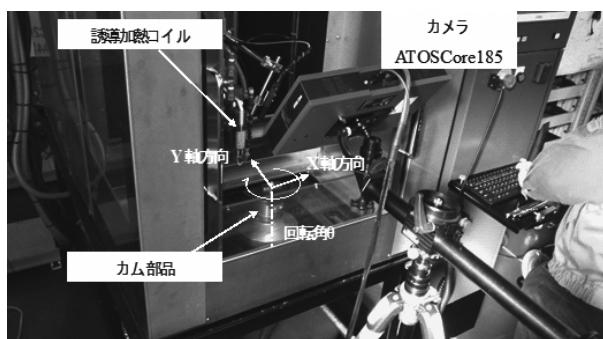


写真3 焼入口ボット運動計測の様子

## 2.2 高周波焼入れ品質の評価

高周波焼入口ボットにより全周に高周波焼入れ加工を施したカム部品に対して高周波焼入れ品質を評価した。焼入れ品質は、JIS G 0559（鋼の炎焼入及び高周波焼入硬化層深さ測定法）に準じたマクロ組織試験による全硬化層深さの測定1)及びJIS Z 2244（ビックカース硬さ試験）に準じた硬度測定2)により評価した。

試作したカム部品を図3に示す①～⑤の位置で加熱面に対し垂直に評価試料（断面）を切り出した。試料の切断面を観察面として樹脂で包埋した。観察面を耐水研磨紙#320、#400、#600、#800、#1200で粗研磨した後、ダイヤモンドペースト（オイルベース）1 μm、アルミナ砥粒0.3 μm、0.05 μmを用いて研磨を行い、仕上げた。

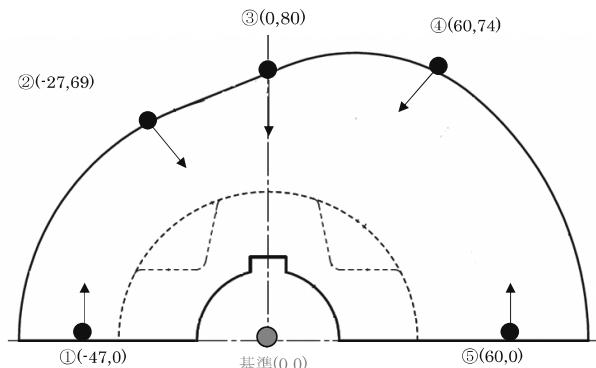


図3 評価用試料（断面）切り出し位置

## (1) マクロ組織試験

マクロ組織試験は、観察面を5%ナイタール液で明瞭な着色状態となるよう腐食させ、金属顕微鏡（GX71、オリンパス株）を用いて金属組織を観察した。焼入硬化層は、全硬化層深さにて評価した。全硬化層深さは、カム部品の高周波焼入れ時の加熱面からマルテンサイト組織とパーライト組織の境界までの距離である。金属顕微鏡で得られた画像を用いて、カム部品の表面側から2mm間隔で全硬化層焼入深さを計測した。

## (2) 硬度測定

硬度測定は、マクロ試験に供した試料の観察面をアルミナ砥粒1 μm、0.3 μm、0.05 μmで再研磨した後、ビックカース硬さ試験機（AVK 株ア

カシ) で試験力30kgfにより硬さ推移曲線を作成した。硬さ推移曲線は、カム部品の加熱面から焼入れ深さ方向に0.5mm、0.8mm、1.0mm、1.5mm、2.0mmの位置を、カム部品の厚さ方向に表面から2 mmを空け、隣合う圧痕が重ならないよう1 m mずつずらしながら測定した。

### 3 結果

#### 3.1 高周波焼入口ボットの動作確認

##### (1) NCプログラムの検証

図4は、開発した手法で作成したNCプログラムによる高周波焼入口ボットの加工軌道をシミュレートした結果である。エッジ部にR面が付加され、クリアランスが増加し、スムーズな軌道となる指令が出力されたことが示された。目標軌道と生成したNCプログラムの軌道シミュレーションとの差は0.093mm以下であった。この差の要因として、NCプログラムの軌道は最大2 mmの直線で構成されており、それらの直線の形状偏差と推測される。

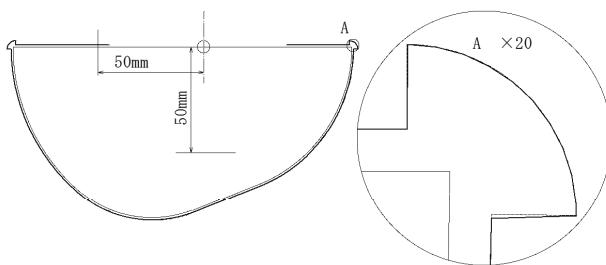


図4 作成したNCプログラムの軌道シミュレーション

—:カム部品形状(設計)、---:目標軌道(設計)、—:生成したNCプログラムの軌道。

##### (2) 高周波焼入口ボットの軌道計測

(1)で検証したNCプログラムを用いて高周波焼入口ボットを制御し、その際の加工軌道を測定した結果を図5に示す。実測データの抜けは、運転中に誘導加熱コイルもしくはカム部品の一部がカメラのフレーム外に移動したために発生した。指令と実測の軌道の差は最大で0.364mmであった。この差は、回転角 $\theta$ が大きく変動するエッジ部付近をコイルが通過する際に増大している。その誤差には、制御系の位置決め誤差も含まれるが、誘導加熱コイル初期位置のずれ(マーカーシールの

貼付のずれ)による座標変形の計算誤差の方がより影響が大きいと推測される。

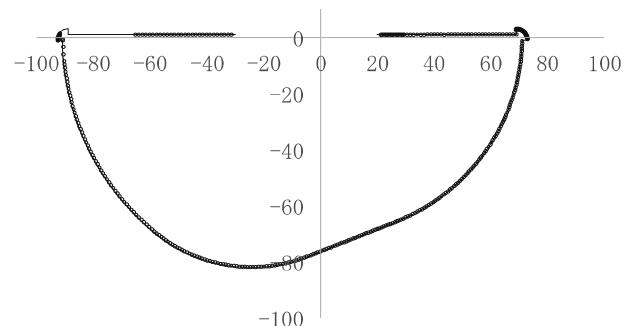


図5 高周波焼入口ボットの加工軌道の確認  
○:実測した軌道、—:生成したNCプログラムの軌道。

#### 3.2 高周波焼入れ品質の評価

##### (1) マクロ組織試験

高周波焼入口ボットで高周波焼入れしたカム部品の金属組織の観察結果を図6に示す。高周波焼入れ加工により、パーライト組織はマルテンサイト組織に変化したことが確認できた。各評価試料の金属組織の観察画像から計測したカム部品の厚み方向における全硬化層深さの推移を図7に示す。

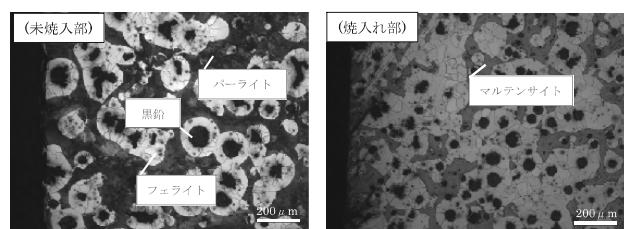


図6 焼入れによる金属組織の変化(×100観察)

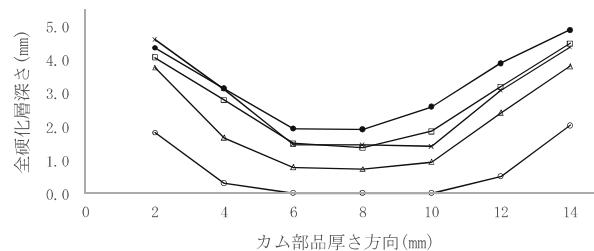


図7 カム部品厚さ方向における全硬化層深さの推移  
○:断面①、×:断面②、△:断面③、□:断面④、●:断面⑤。

全硬化層深さは、カム部品中央部で1.5~2.5mm程度、表面及び裏面近傍では4.0~4.5mm程度と全硬化層深さが深くなつておる、厚さ方向にバラツキが大きいことがわかつた。

## (2) 硬度測定

測定した硬さ推移曲線を図8、図9に示す。図8は評価試料内の同じ焼入れ深さ位置で測定したビッカース硬さの平均値をY軸、焼入れ深さ方向がX軸を示している。図9は、評価試料内の同じ厚さ位置で測定したビッカース硬度の平均値をY軸、カム部品の厚さ方向がX軸を示している。

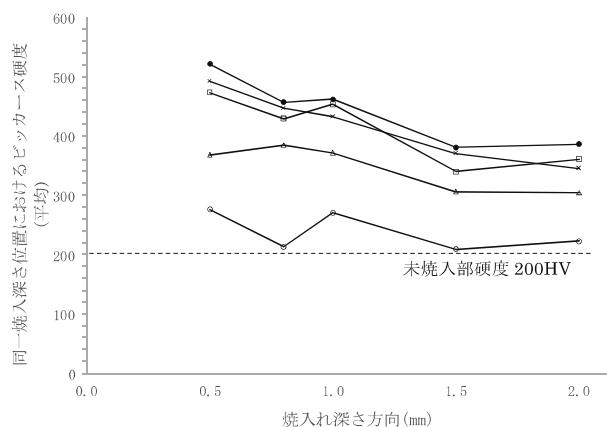


図8 焼入れ深さ方向におけるビッカース硬度の推移  
○ 断面①、× 断面②、△ 断面③、□ 断面④、● 断面⑤。

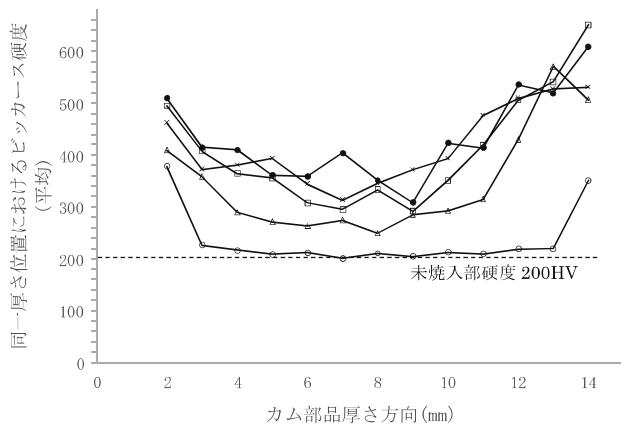


図9 カム部品厚さ方向におけるビッカース硬度の推移  
○ 断面①、× 断面②、△ 断面③、□ 断面④、● 断面⑤。

図8より、硬度は加熱面近傍が最も高く、焼入れ深さ方向に内部に行くほど低下する。本カム部品で目標とした高周波焼入れ後の硬度は450~500 HVであり、断面②、断面④、断面⑤においては

目標硬度を達成しており、狙い通りの加工ができたことがわかつた。一方、断面①及び断面③は硬度の上昇が不十分であり、位置による加工品質にバラツキがあることがわかつた。

また、図9より、硬度は(1)マクロ組織試験による全硬化層深さの計測結果と同様に、表面及び裏面近傍で高く、中央部は低いことがわかつた。今回の高周波焼入口ボットによる加工では、カム部品の厚み方向に大きく不均一であることがわかつた。

## 4 考察

開発中の高周波焼入口ボットにより複雑形状のカム部品の周間に高周波焼入れ加工を行い、全硬化層焼入深さと硬度を測定し、高周波焼入れ加工の品質の評価を実施した。

位置や厚み方向に硬度や全硬化層深さにばらつきがみられたものの、全周にわたり高周波焼入れ加工を施すことができ、一部では目標とする焼入後の硬度450~500HVを達成したことが確認できた。

位置や厚み方向におけるばらつきの原因として主に材質による影響と加熱時の温度の影響が考えられる。今回、試験に供したカム部品は球状黒鉛鋳鉄であり、金属組織が不均一である。高周波焼入れにより硬度が上昇するためには、3.2.(1)のマクロ組織試験で述べたとおり、パーライトが非常に硬いマルテンサイトに変態する必要がある。しかし、球状黒鉛鋳鉄には高周波焼入れによる硬度上昇が生じないフェライト層が点在しており、測定位置におけるばらつきの要因となると考えられる。また、高周波焼入れ加工時のカム部品加熱部の温度履歴を放射温度計を用いて計測した結果を図10に示す。今回、加工したカム部品において放射温度計による測定温度が950°Cにて高周波焼入れを行った際に目標硬度となることが分かっている。図10より、加熱時の温度に関しては振れ幅が大きく安定していない。この加熱温度の差が焼入れ後の硬度に影響を及ぼしていると考えれる。

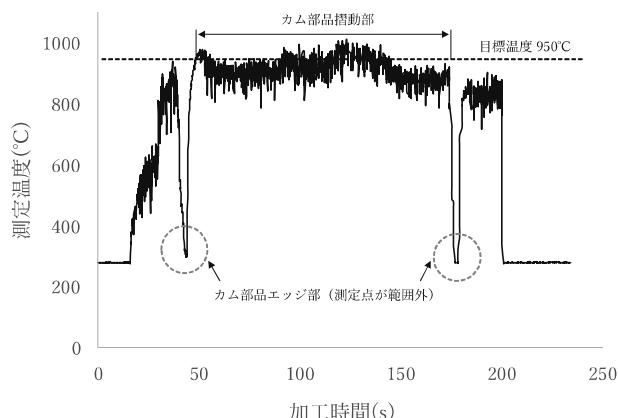


図10 加工時の温度履歴

## 5 まとめ

高周波焼入口ボットにより、複雑形状のカム部品に対し高周波焼入れを行うことができた。現状、位置により焼入れ品質が不均一であった。今後は、

加工時のロボットの設定条件の最適化を進めるほか、放射温度計で測定した加熱時の温度を基に加工条件にフィードバック制御をかけるなど品質の改善を進めていく予定である。

## 謝辞

本研究は（公財）静岡県産業振興財團の令和3～4年度新成長産業戦略的育成事業産学官連携研究開発助成事業の一環として実施しました。

## 参考文献

- 1) JIS G 0559 : 2019 鋼の炎焼及び高周波焼入硬化層深さ測定方法、財團法人日本規格協会.
- 2) JIS Z 2244-1 : 2020 ビックアース硬さ試験— 第1部：試験方法、財團法人日本規格協会.