

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：54601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21760222

研究課題名（和文）誘導加熱用電源システムの高周波化に関する研究

研究課題名（英文）A Study on High-Frequency Drive System for Induction Heating

研究代表者

石飛 学（ISHITOBI MANABU）

奈良工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号：60390481

研究成果の概要（和文）：

本研究では、高効率な誘導加熱システムを実現するため、まず被加熱物体の磁気特性に依存する磁束分布および渦電流分布を明らかにした。またこの解析結果をもとにモデリングを行い、加熱が難しい非磁性被加熱物体に適した加熱方法や駆動波形を導出した。さらに、加熱に適した駆動波形を出力するインバータ方式についても検討を行ったところ、コイルの巻線やソフトスイッチングについて、これまでのやり方では解決できない問題を抱えていることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

It is expected for an IH cooker to heat all metal pans with high efficiency. However it was implemented in using pans made of the aluminum and copper. Therefore, it has to develop the high efficiency IH cooking heater for those metals. The purpose of this study is to clear up the relationship between the magnetic characteristic of heated objects and the eddy current distribution on an induction-heated (IH) cooker. From the results of measurement on the magnetic flux and eddy current distribution, it was revealed that the magnetic characteristic and the eddy current distribution have the close relationship. A skin effect of the eddy current within a heated object was discussed with the experimentation using the optimized search coil and a thermograph. In addition, we could get a method to heat aluminum in high efficiency.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：誘導加熱、スイッチング電源、磁界解析

## 1. 研究開始当初の背景

IH クッキングヒータは、オールメタル対応モデルの登場とオール電化住宅の波に乗り、近年身近な家電製品へと成長した。しかし、現在世に出ているものはアルミニウム、

銅や非磁性ステンレスを材質とした被加熱物に対して加熱効率が低く、本来の特性を發揮できていない。これらの材質は熱伝導率が高く、またアルミニウムにおいては軽くて加工が容易な上錆びにくいといった特徴をも

つことから鍋やフライパンに非常に適しており、IH システムの高効率化が待望されている。

この課題に対し、発生磁束を高周波化して加熱効率を上げる方法が提案されているが、これまで非磁性を示す被加熱物も磁性体と同様に扱われていたため、十分な結果は得られていなかった。このため IH 用インバータの出力に求められる要求も明確にならず、その結果、IH を応用した各種アプリケーションの進化を妨げていた。この点にアプローチした報告が数件あるが、解析にあたりモデリングを要する磁界シミュレータを用いており、モデリングの是非も含めて詳細まで明らかにできていない。

## 2. 研究の目的

誘導加熱と相性が高い強磁性材料だけでなく、広い応用が期待されるアルミニウムや非磁性ステンレスといった常磁性材料及び銅などの反磁性材料の高効率加熱を目的としている。この実現には、まず各材質の被加熱物体における磁束分布および渦電流分布の違いを検討し、それぞれの加熱原理を明らかにしなければならない。ここで実際の現象をそのまま捉えるため、敢えて電磁界シミュレータに頼らず、実測をベースとした解析を行う。加熱状態は駆動条件によって左右されるため、各種駆動側パラメータに対する IH 負荷特性を明らかにし、最適条件を見出す必要がある。

さらに、上記解析結果を活かした IH 用高周波インバータを実現させるため、新しいソフトスイッチング方式を検討する。これはスイッチング損失及びノイズを抑制する 1 手法で、数台のインバータの組み合わせによる問題の解決を試みている。

## 3. 研究の方法

(1) 様々な材質・形状の被加熱物体における磁束分布及び渦電流分布を解析する。できるだけ生のデータから判断するため、解析に電磁界シミュレータを用いず、最適化した手製のサーチコイルから得られる情報をオシロスコープで観測する。観測波形をもとに磁束分布及び渦電流分布をビジュアル化し、材質等の違いを導出する。また発熱分布も観測し、加熱に適した磁束の供給方法を検討する。

(2) 磁束分布及び渦電流分布の解析結果をもとに電磁氣的視点で数式化を行い、その後、設計に繋げるため、実用上問題ないレベルまで簡素化する。この数式化した IH 負荷の特性から最適な駆動波形の形状や周波数等を導出し、非磁性の被加熱物体でも加熱可能な方法を提案及び評価する。

(3) 導出した最適波形を出力する誘導加熱用高周波インバータの回路方式について検討する。まずはハードスイッチング状態で回路方式とパルス変調方式の検討を行い、その後、導いた回路方式の特性を損ねずかつノイズやスイッチング損失の抑制を実現させるため、新しいソフトスイッチング方式及びパルス変調方式の検討を行う。

(4) 導出した回路方式をベースに、数台のインバータを組み合わせたインバータシステムの検討を行う。相互補助を行うソフトスイッチング方式を中心に、検討及び評価を行う。

## 4. 研究成果

(1) 被加熱物体内部の磁束を直接測定することができないため、鍋底を模した材質の異なる金属円盤を用意し、この円盤を貫通する磁束を観測することで内部の様子を調べた。構築した測定系は図 1 の通りで、自作パンケーキ形コイルに交流電流源を接続して金属円盤を加熱し、最適化した手製のサーチコイルとオシロスコープを用いて磁束密度の測定を行った。

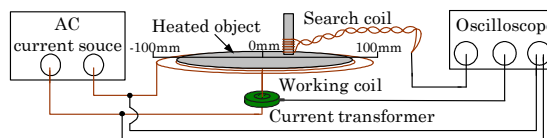


図 1 磁束分布の測定方法

入力電流の周波数が 0.5kHz と 20kHz のときの測定結果をもとにベクトル表示したものを図 2 に示す。0.5kHz は測定可能な範囲で限りなく低い周波数で、20kHz は可聴域を超える周波数として選択している。

図 2(b)のアルミニウム製の場合を見ると、低周波ではほとんどの磁束が貫通し、何も置いていない図 2(a)の状態に近く、高周波では円盤を貫いた磁束が激減していることが確認できる。図 2(c)の鉄製の場合、低周波でも円盤を貫く磁束が少なく、アルミニウム製ほどではないが、高周波で貫通磁束が減っていることがわかる。

この違いは磁束の屈折と表皮効果によって説明できる。鉄の場合屈折率が大きく、金属円盤下部から入射した磁束は大きく屈折して円盤側面へ向かい、被加熱物体上部へ貫通する磁束が少なくなる。このとき磁束は円盤下部に偏り、鉛直方向（円盤下部から上部に貫く方向）に表皮効果が起きる。アルミニウムの場合、屈折率が小さいため磁束が被加熱物体上部へ貫通しようとするが、高周波であるほど大きな渦電流が誘導され、貫通磁束を打ち消すと考えられる。このとき磁束は円盤端に偏り、半径方向（円盤中心から円盤端

に向かう方向) に表皮効果が生じる。また図 2(b), (c)において円盤内側に傾いた磁束が確認できる。この現象は高周波化により偏った渦電流が増し、2 次的な磁束が発生したものと考えられる。

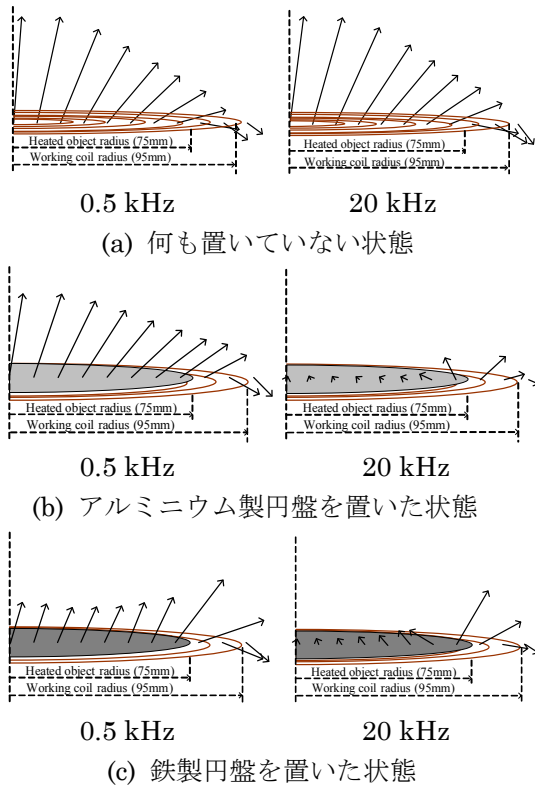


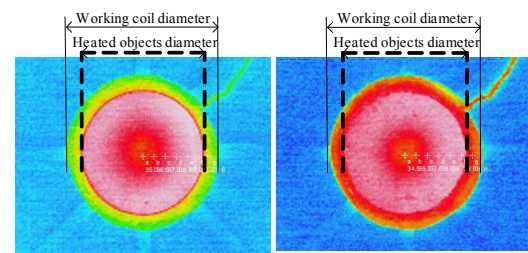
図 2 金属円盤を貫く磁束ベクトル

(2) 被加熱物体内に流れる渦電流の分布を確認するため、サーモグラフィを用いて表面温度を測定した。IH クッキングヒータの熱源は渦電流であるため、最高温を示す箇所に多くの渦電流が流れており、温度分布から渦電流路を調べることが可能である。

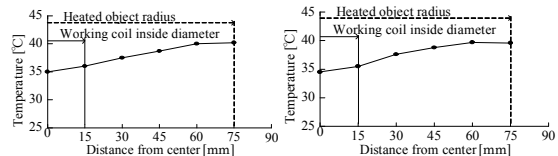
撮影した温度分布画像の一例を図 3(a)に示す。これは直径 150 mm のアルミニウム製と鉄製の円盤を 0.5 kHz で加熱したときのものであるが、視覚的に同様に材質による分布の違いを判断できない。そこで、中心からの距離に対する温度分布をグラフ化したものを図 3(b)に示す。図 3(b)からも両者の明確な違いは確認できず、低周波時の渦電流分布(半径方向)に磁性の違いがほとんどみられないことがわかる。

次に同円盤の高周波印加時における温度グラフを図 3(c)に示す。両者を比較すると最大温度を示す箇所が異なり、鉄製の場合は低周波時と変わらず(中心から 60 mm)、アルミニウム製の場合は円盤端に偏る。さらに、鉄製円盤における中心付近の温度が低周波時より高い。この結果は、高周波であるほどアルミニウム製円盤の端に渦電流が偏ることを示しており、磁束の半径方向における表皮

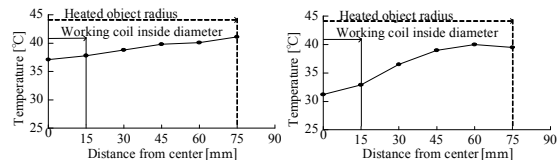
効果を裏付けている。円盤中心付近の渦電流がほとんどなくてもアルミニウム製円盤全体が加熱されるのは、アルミニウムの高い熱伝導率に起因すると考えられる。一方、鉄製では渦電流密度の高いポイントが周波数に依存せず、半径方向の表皮効果が現れない。また鉛直方向の表皮効果により高周波ほど底面に渦電流が偏ったと考え、鉄の熱伝導率の低さも合わせて、コイルの内径以下の温度が高周波印加時に低くなることも説明できる。したがって鉄製円盤を加熱する場合、コイルの外径が円盤より大きく、内径は可能な限り小さい方が適しているといえる。また、鉄は強磁性体であるため磁束を引き込もうとする性質があり、その結果、半径方向外側に少し引張られたような磁束が現れる。



(a) 温度分布画像 : 0.5 kHz (直径 150 mm)



(b) 温度グラフ : 0.5 kHz (直径 150 mm)



(c) 温度グラフ : 20 kHz (直径 150 mm)

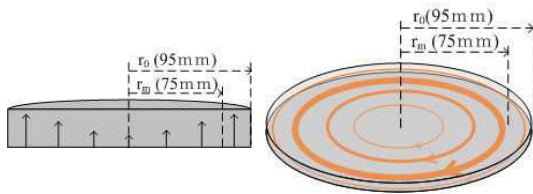
図 3 金属円盤の温度分布

(3) 磁束分布および渦電流分布の解析から、アルミニウム製円盤内部の磁束は、図 4(a)に示した半径方向の表皮効果をもつ鉛直方向の磁束として近似できることがわかった。また、渦電流は図 4(b)のように流れていることもわかった。図 4(a), (b)では磁束密度と渦電流密度をそれぞれ矢印の長ささと太さで示している。

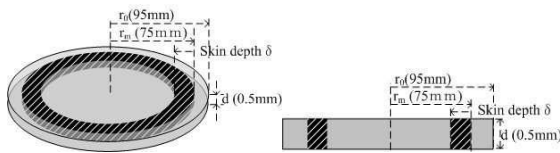
図 4 のモデルをもとに渦電流密度を定式化したところ、円周方向の渦電流を表す以下の式を得た。

$$J_{\phi}(r, t) = -\frac{1}{\mu \delta} \cdot B_0 e^{-\frac{1}{\delta}(r_m - |r|)} \sin \omega t$$

上式から渦電流も半径方向に対する指数関数となり、磁束が折り返すラインで最大値を示すことがわかる。つまり、アルミニウム製円盤における渦電流は、図 4(c)に示す厚さ  $d$ 、幅  $\delta$  の円管中を円周方向に流れる電流として近似することができる。また浸透深さ  $\delta$  が円盤半径  $r_0$  に対して十分小さいとき、円管中の磁束密度及び渦電流密度は一様であると考えると差し支えなく、この渦電流モデルにより渦電流損失の概算等が可能である。



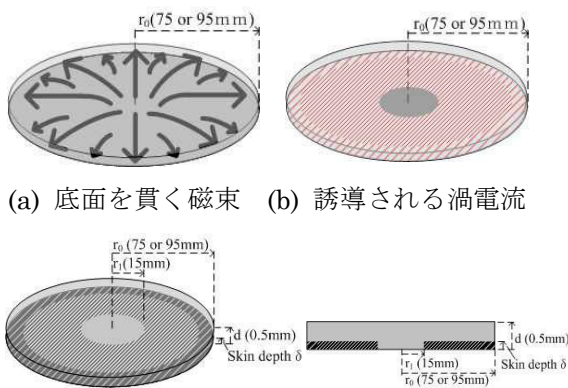
(a) 断面を貫く磁束 (b) 誘導される渦電流



全体像 断面図  
(c) 渦電流モデル

図 4 渦電流モデル (アルミニウム製)

(4) 磁束分布および渦電流分布の解析から、鉄製円盤内部の磁束は、図 5(a)に示した鉛直方向の表皮効果をもつ半径方向の磁束として近似でき、また渦電流は図 5(b)のように底面に偏って円周方向に流れることがわかった。図 5(a), (b)では渦電流の密度を斜線の濃さで示している。



(a) 底面を貫く磁束 (b) 誘導される渦電流  
(c) 渦電流モデル (断面図)

図 5 渦電流モデル (鉄製)

図 5 のモデルをもとに渦電流密度を定式化したところ、円周方向の渦電流を表す以下の式を得た。

$$J_{\phi}(z, t) = -\frac{1}{\mu \delta} \cdot B_r(r) e^{-\frac{1}{\delta} z} \sin \omega t$$

上式から渦電流は鉛直方向に対する指数関数となり円盤底面で最大値を示すことがわかる。つまり、鉄製円盤における渦電流は、図 5(c)に示す厚さ  $\delta$  のドーナツ状円盤を円周方向に流れる電流として近似することができる。

(5) 渦電流密度  $J[\text{A}/\text{m}^2]$  と渦電流損失  $P[\text{W}]$  の関係は体積要素  $dV[\text{m}^3]$  を用いると次式で表すことができる。ここで  $T[\text{s}]$  は正弦波の周期を表している。また体積積分の範囲を表 1 に示す。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \int_V \rho J(t)^2 dV \right) dt$$

表 1 積分区間

	半径方向 (r)	円周方向 ( $\phi$ )	鉛直方向 (z)
アルミニウム	$r_m - \delta \sim r_m$	$0 \sim 2\pi$	$0 \sim d$
鉄	$r_1 \sim r_0$	$0 \sim 2\pi$	$0 \sim \delta$

これは各渦電流モデルにおける電流範囲である。上式に各被加熱物体における渦電流式を代入することで、渦電流損失が導出できる。

アルミニウムを代表とする常磁性金属における損失式を次式に示す。

$$P = \frac{d\pi\rho}{2\mu^2} \left\{ \left( \frac{3}{2} - \frac{r_m}{\delta} \right) e^{-2} + \frac{r_m}{\delta} - \frac{1}{2} \right\} B_0^2$$

また、鉄を代表とする強磁性金属における損失式を次式に示す。

$$P = \frac{\pi\rho}{4\delta\mu^2} (r_0^2 - r_1^2) (1 - e^{-2}) B_r(r)^2$$

それぞれの式に対し、磁束密度  $B(t)$  の周波数  $f$ 、金属円盤の抵抗率  $\rho$  及び比透磁率  $\mu_r$  を変数としたときの特性を図 6, 7 に示す。ここで、磁束密度の振幅  $B_0[\text{T}]$  はコイルと被加熱物体の形状、励磁電流の周波数、被加熱物体および周囲を構成する部分の抵抗率と透磁率など様々な要素が絡み合って決まるため、安易に扱うことができないパラメータである。したがって、 $B_0$  に対する渦電流損失の特性を表す  $P/B_0^2$  を図 6, 7 の縦軸にとっている。このとき円盤の厚さ  $d=0.5[\text{mm}]$ 、円盤の半径  $r_0=75[\text{mm}]$  及びワークコイルの内径  $r_1=15[\text{mm}]$  とし、それぞれ測定に用いた円盤の値を代入している。また抵抗率や透磁率の値を固定するとき、各磁性材料の代表である

アルミニウムと鉄の値を用いて計算を行っている。

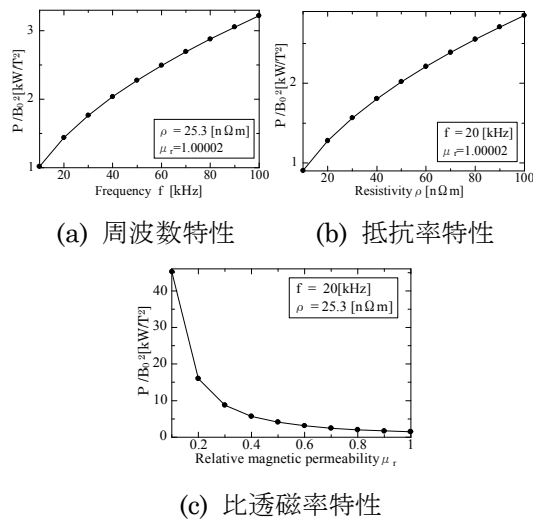


図 6 渦電流損失の特性 (常磁性材料)

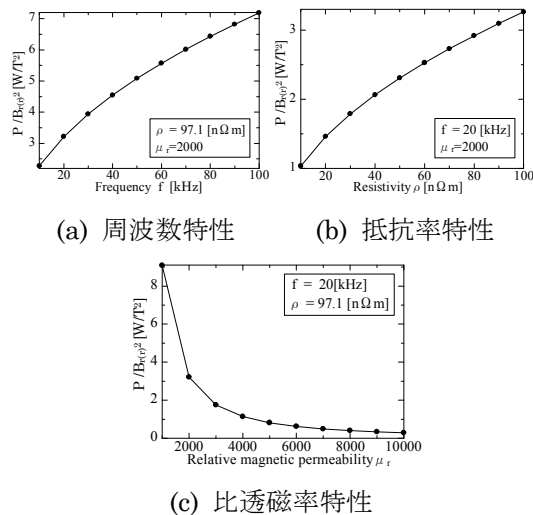


図 7 渦電流損失の特性 (強磁性材料)

図 6 に示した常磁性材料における特性から、周波数と抵抗率の増加に伴いまた比透磁率の減少に伴い渦電流損失が単調に増加することがわかる。特に図 6(c) は報告の前例がない特性である。次に図 7 に示した強磁性材料における特性を見ると、常磁性材料のときと同様の傾向を示していることがわかる。さらに反磁性を示す銅製の被加熱物体においても常磁性材料のときと同様の傾向を示すことを確認している。

これらの結果から、常磁性被加熱物体の場合、円盤よりワークコイルを小さくし、比熱の高さを利用した局所加熱を行うことで高効率加熱が可能であるとわかった。一方で強磁性被加熱物体の場合は、円盤に接するワークコイルの面積が大きいほどつまり内径が小さく外径が大きいほど加熱に適している。

これは経験則から作られるワークコイルが大型化していることと一致している。

(6) 様々な形状、周波数の波形を試作 IH システムに供給し比較したところ、波形による違いより周波数による違いが顕著に表れた。そこで、周波数の異なる正弦波を入力して詳細に測定したところ、どの材質でも最も加熱効率の高いポイントが見られた。アルミニウムの場合 5kHz 程度、鉄の場合 20kHz 程度で最大効率を示し、これまで言われてきた“加熱効率を上げるためには高周波化”に反する結果であった。この結果をこれまでの解析結果と照合したところ、被加熱物体における加熱効率は周波数が高いほど良いが、高周波になるとワークコイルの導通損失が顕著になりトレードオフすることがわかった。以上より最適なインバータ出力波形は最大効率周波数における (高調波成分をもたない) 正弦波であり、ワークコイルにおける導通損失の抑制が効率改善に最も効果的であることが見い出せた。

(7) リッツ線の各線に流す電流を変化させ、表皮効果の抑制を試みたが、どのパターンも発生磁束を抑制させ、リッツ線単体で対処できないことがわかった。そこで磁性材料を近接させて傾向を調べたところ、表皮効果に影響を与えることができた。どのような構造の磁性材料が効果的か、より深い検討を要する。

(8) これまでの結果から正弦波を出力するインバータが適しており、回路の共振点において動作するものが良いとわかった。そこで共振点におけるソフトスイッチングインバータを調査したところ、過去 2 件の報告があった。しかしながら、スイッチングデバイスの寄生成分の影響で、高い周波数で動作させるほど相性が悪いことがわかった。一方で数台のインバータをリンクさせて相互補助を行うソフトスイッチングも試みたが、メイン動作に悪影響を与え、補助スイッチを用いてリンクを切るモードが必要であることがわかった。ただし、この方式は補助スイッチを増加させてしまうため有効とは言い難い。デューティサイクル一定でリンク部の働く期間が固定されると補助スイッチを削減できることがわかったが、IH には適していない。以上のように、回路方式については今後も検討が必要である。

(9) 入力平滑フィルタを小さくし (値を小さくして電解キャパシタからフィルムキャパシタに交換)、パルス変調制御に輸入電圧の変動に対応するブロックを追加させたところ、高調波の抑制及び力率改善とインバータの安定動作を同時に実現できた。

(10) 部分的に改善されたもの IH 負荷が要求する最適波形を出力するには、今回提案してきたインバータ方式では不十分であることがわかった。高周波に対応するコイルの提案が鍵となるため、今回見いだせた磁性材料の利用を今後も検討していく必要がある。これまでの結果をまとめ、2 本目の論文の投稿準備を進めている。

(11) 今回得られた各種データや見解は、誘導加熱を応用した各種アプリケーションに適応でき、今後の誘導加熱負荷形状及び材質や IH 用回路に関する研究・開発を大きく推進させるものとする。また今回行ったサーチコイルによる磁束分布解析は、シミュレーション解析ではない実際の現象を詳細に捉えることができる有効な手法として、非接触給電をはじめとする各種磁気応用の世界で活用できると考える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

① 米田昇平、石飛 学、高効率加熱を目的とした IH 負荷の磁気特性解析とモデリング、パワーエレクトロニクス学会誌 Vol.37、2012、pp.115-121

〔学会発表〕(計 5 件)

① 米田昇平、宮田雅仁、石飛 学、高効率加熱を目的とした IH 負荷の解析、パワーエレクトロニクス学会、2009

② 米田昇平、河村美希、石飛 学、高効率加熱を目的とした IH 負荷の解析、電気学会、2010

③ 米田昇平、河村美希、石飛 学、IH 負荷のモデリングを目的とした磁気特性の解析、パワーエレクトロニクス学会、2010

④ 米田昇平、石飛 学、高効率加熱を目的とした IH 負荷の磁気特性解析とモデリング、パワーエレクトロニクス学会 6 月定例会、2011

⑤ 米田昇平、石飛 学、IH 負荷の磁気特性解析を基にした駆動方法の検討、パワーエレクトロニクス学会 12 月定例会、2011

※ 米田昇平、河村美希、宮田雅仁：補助学生

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石飛 学 (ISHITOBI MANABU)

奈良工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号：60390481