

テープヒータ電力線を利用した 非接触給電システムの電磁誘導素子

山田 健仁*¹ 岩木 海成*²

Electromagnetic Induction Element for Contactless Power Transfer System using Tape-Heater Power Line

Takehito YAMADA*¹ and Kaisei IWAKI*²

Abstract

In order to realize smart agriculture, it is usually necessary to have many sensor devices which can measure temperature, humidity, sunshine situation and so on. In this case, supplying power to the sensor devices is an important elemental technology. Accordingly, we have developed an electromagnetic induction element for a contactless power transfer system using a tape-heater power line. The tape-heater is made from stainless steel foil and used for heating the crown of strawberry plants. The stainless-steel foil for the heater element is a very thin film. Therefore, the electromagnetic induction element, which is called a current transformer, needs a special mechanical structure. In this paper, the basic structural designs of the electromagnetic induction element are discussed using FEM simulation and electronic circuit simulation.

Key Words: Tape-heater, Contactless power transfer, Electromagnetic induction element, FEM

1. はじめに

ICT 農業の高度化を実現するには、作物の生育状態に応じて施設内環境の温度、湿度、培土水分、日照、栄養等を適正に維持管理する必要があり、これらの環境要因を精密に計測することが重要である。そのためには ICT 農業やスマートアグリに対応したセンサデバイスを適切にかつ多数配置する必要がある。その際、重要な課題となるのが、個々のセンサデバイスを駆動するための電源を安定に確保することである。通常使用されているセンサデバイスでは、電池を電源とするものが多く、広範囲に配置した多数のデバイスの電源を維持管理することは運用上問題となる。また、商用 AC 電源から電力を供給する場合、電力供給のための電線を敷設する為の費用負担やセンサデバイスの配置制約等の問題が生じる¹⁾。

一方、筆者らのグループでは、ステンレス箔をテープ状に成形し、更に局所打ち抜き加工を施して絶縁体で被覆したテープ状の発熱体であるテープヒータを開発し、製品化に至っている²⁾。このテープヒータに通電すること



写真1 局所加温テープヒータのイチゴクラウンへの適用例

で、イチゴの株元を局所的に加温することができ、これによりイチゴに最適な生育状態を維持することができる(写真 1)。また、山口県農林総合技術センターと共同し、この技術によって暖房コストを大幅に削減できる省エネルギー効果を実証している³⁾。

そこで、このテープヒータ自体をセンサデバイスへの電力供給線としても利用することで、テープヒータによる加温システムと温度計測・制御を一体化したシステムの実現を目指し、非接触での無線計測センサデバイスへの電源供給法としてテープヒータの通電機構(電力線)を直接利用することを考えた。これにより温湿度などの無

*¹ 情報電子工学科

*² 東ソー情報システム株式会社

線計測センサデバイスを電源メンテナンスフリーとすることが可能となり、農業施設での実用的な広域・多点温湿度計測が実現でき、スマート農業の普及推進に寄与することができるものとする。

金属接点やコネクタなどを介さずに電力を伝送する技術としては、既にコードレス電話や電動歯ブラシなどの給電システムとして電磁誘導型の非接触給電が普及しているが^{4), 5)}、本研究の非接触給電システムは、テープヒータ電力線、すなわち加温用デバイスからセンサデバイス用の電力を非接触で取得することに特徴がある。また、この非接触給電システムで使用する電磁誘導素子は、本質的には変流器ではあるが、テープヒータが極薄で幅広のステンレス箔であることから電磁誘導素子部の構造は特殊な形状となり、その設計手法を確立する必要がある。

本論文では、提案する非接触給電システムの主要な要素技術となる電磁誘導素子部の基本設計とシミュレーションによる解析と試作実験の結果に関して述べる。

2. 非接触給電システムの概要

テープヒータに通電する加温用の電力は、基本的には商用電源からの電力を設定温度に応じて制御する閉ループ制御の下で供給される。制御方式にはON/OFF制御やサイリスタ等を利用したPID制御を使用している。従って、テープヒータ自体は制御対象であるとともに通電用の電力線ともなっている。図1のテープヒータ電力線を使用した非接触給電システムの構成図の送電側部分で示すように、テープヒータの加温用電力に高周波微小電力を重ねさせることでセンサ用の電力を送電することになる。この重畳方式には、コンセントLAN (PLC) で使用されている回路方式⁶⁾を採用した。その回路方式の機能検証のために使用した電子回路シミュレーション用の回路図を図2に示す。なお、テープヒータ部は50Ωの純抵抗としてモデル化している。また、電磁誘導による微小電力回収用の電磁誘導素子部の電流センサ（以下 CT : Current Transformer）を等価なトランスとしてモデル化した。

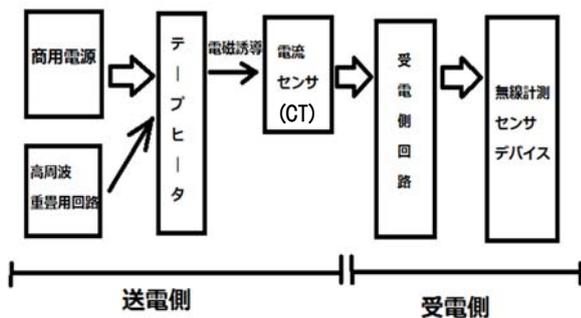


図1 テープヒータ電力線を使用した非接触給電システムの構成図

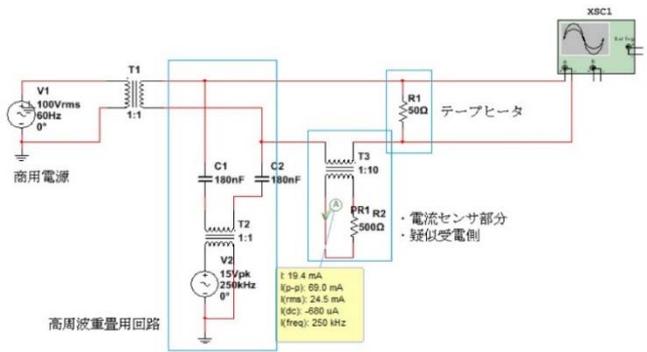


図2 高周波微小電力重畳回路

図1の受電側に示すように、電力の回収には電磁誘導による方式を使用する。すなわち受電側は、微小電力の高周波成分をCTの電磁誘導により非接触で回収し、受電側回路で整流・蓄電した後、低電圧DC定電圧源として無線計測センサデバイスへ電力を供給することになる。

提案する非接触給電システムにおける主要素子であるCTの基本構造を図3に示す。CTはFaradayの電磁誘導の法則を適用したもので、対象導体（本研究の場合はテープヒータ）に流れる交流電流により磁気コア内に磁束が発生し、この磁束を打ち消すように二次側の巻線に巻数比に応じた交流電流が流れる。式(1)は、この時二次側負荷に印可される出力電圧を示す。

$$v_o = K \frac{i}{N} R_L \quad (1)$$

v_o : 出力電圧, K : 結合係数, i : テープヒータ交流電流, R_L : 負荷抵抗, N : 二次側巻線の巻数

式(1)より、 $K = 1$ の時に理想CTとなることが分かる。励磁電流・漏洩電流・透磁率の変化などによりCTの結合度、すなわち結合係数 K は変化する。また、負荷抵抗 R_L は小さいほど二次側の誘導電流を大きくできる。なお、磁気コア中の磁束密度は周波数に比例するため、CTとしての特性は低周波数域では低下し、高周波数域では良くなる。このため送電側（一次側）の重畳電流は高周波数であることが望ましいが、テープヒータがアンテナとなり得るため電磁波放射に注意する必要がある。

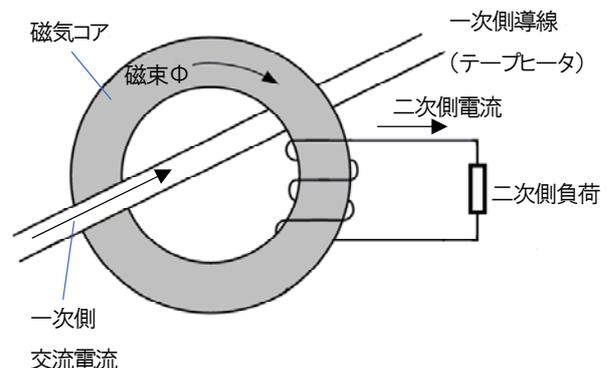


図3 CTの基本構造図

3. CT の FEM による解析

本研究で開発するCTは電力回収を目的としているため、通常の計測用電流センサを目的としたCTとはその設計指針は異なるものとなる。図3に示すCTの基本構造より、CTを設計するにあたり以下の事項を中心に検討した。

- ・一次側線（テープヒータ）の重畳用電流量と周波数
- ・磁気結合用フェライトコアの形状とサイズ
- ・二次側銅線の巻き線数

これらの事項に関する基本動作や主要パラメータを明らかにするために、FEM (Finite Element Method) の解析ソフト (PHOTO-Series EDDYj ω) を用いてシミュレーションを行い、特にCT方式により回収できる電流密度を中心に解析した。シミュレーションでは、テープヒータの電流量とその周波数、またCTの巻き線数を変化させ電流密度が一定値に収束する点を求めた。図4はFEMシミュレーションに使用したCTモデルの一例である。

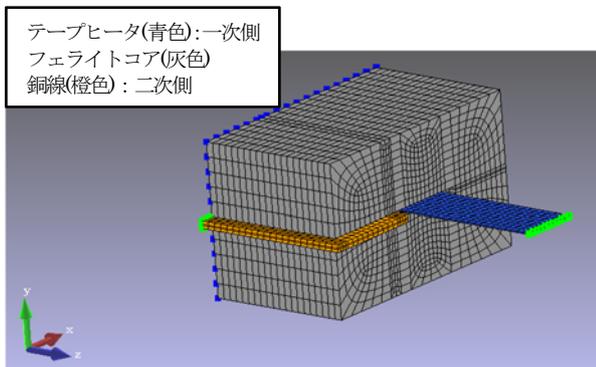


図4 FEMシミュレーションに使用したCTモデル

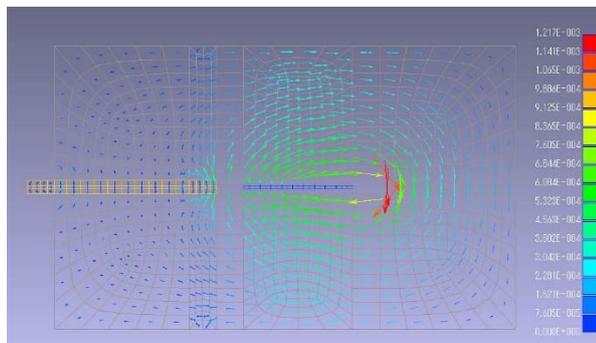


図5 フェライトコア中の磁束密度ベクトル

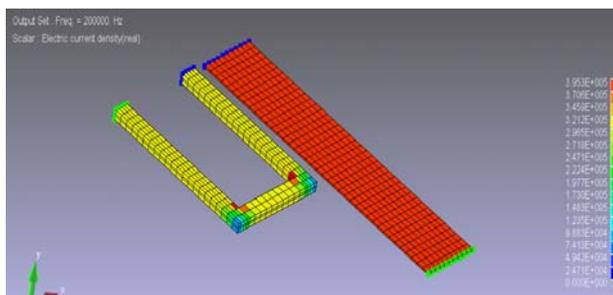


図6 シミュレーション結果例 (コア部を非表示)
(一次側電流: 150mA/150kHz, 二次側銅線: 5 ターン)

図4において電力を供給する一次側線（テープヒータ）を青色で示しており、電力供給線であるテープヒータは、厚さ $50\mu\text{m}$ 、幅 6mm である。二次側巻き線は橙色で、磁気結合用のフェライトコアは灰色で表示している。また、端面の水色と緑色の部分は境界条件を設定した状態表示である。なお、解析領域は水色で示す端面（図4のZ軸が原点となるX-Y平面）を境に対象となっており、計算量軽減のため磁気コア半分の領域を数値解析している。

図5は、フェライトコアの断面方向でみた磁束密度ベクトルのシミュレーション結果である。コア内の一番外側の磁束密度は約 $2.3 \times 10^{-4} [\text{Wb}/\text{m}^2]$ 以下で、実用範囲で磁束はコア内で閉じていると考えられる。なお磁気コアの外側は空気の層を仮定してシミュレーションしている。この設計例の磁気コアの厚さは 10mm (上下 5mm) であり、今回の目的にはこのコア厚以下で十分であることが分かった。また、磁束の流れについては、レンツの法則に従って一次側電流による磁束とそれを打ち消すように二次側巻き線に誘導される電流により磁束が発生するため、ミクロに見ると巻き線形状や磁気コア形状の影響で、図5右半面と比較し、巻き線のある左半面では磁束密度が減少していることがわかる。このことはテープヒータを挟んだ磁気コアの左右に巻き線を施すことで回収電力を増加させることは単純には達成できないことが予測される。従って、電力回収の効率化を図るためには磁束を巻き線に集中させる機械形状の最適化が必要と考えられる。物理現象としてはMaxwellの方程式で表される古典的で単純なものではあるが、工学的な課題としては磁気コアや巻き線形状の設計に工夫が必要な興味ある現象である。

図6は、磁気コア部を非表示としたときの一次側電流（励磁電流）と二次側電流（誘導電流）のシミュレーション結果の例である。一次側の電流（赤色）により二次側の巻き線に電流（黄色）が誘起されることが分かる。このFEM解析では、フェライトコアの厚さやテープヒータ長手方向の長さなどの機械形状、一次側電流の大きさ・周波数、二次側銅線の巻き数を設定できる。これらのCT設計に重要となるパラメータを変化させることで、機械形状の影響を詳細に組み入れることができる。

今回のシミュレーション結果から銅線の巻き方については、図4に示すように一次側のテープヒータ部（青色）と銅線（橙色）を平行に巻く事で、図5に示すように強く磁束と交わせることができると考えられ、薄板形状であるテープヒータを一次側導線としたときのCT構造としてこの構成が妥当といえる。

図7は二次側銅線の巻き線数を変化させたときの電流密度をFEMシミュレーションで求め、その関係を一次側電流の周波数を横軸としてグラフに整理したものである。

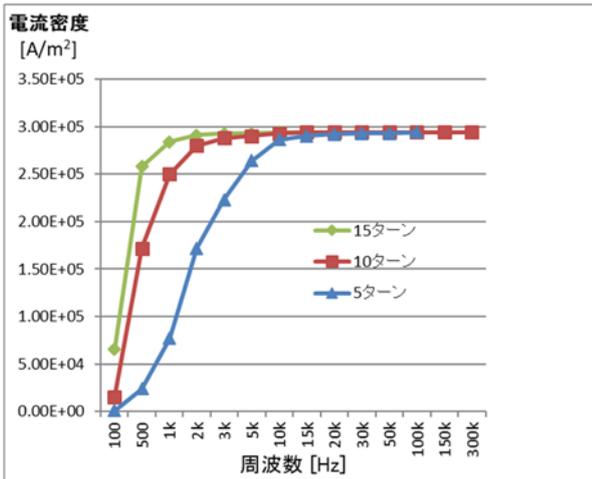


図7 二次側銅線の巻き線数と電流密度の周波数特性
FEM シミュレーション (一次側電流：150mA_{p-p})

図7より、どの巻き線数でも 20kHz を超えたあたりから電流密度が一定値となるのが分かる。また、二次側に誘導される電流密度は、一次側電流の周波数に依存すること、すなわち一次側電流により発生する磁束の時間変化に依存することが示されている。CT からの誘導電流は受電回路に接続され整流、蓄電されるため、CT の自己インダクタンスは低い(巻き線数が少ない)方が受電回路への供給電力を大きくできる。従って、高い周波数で電流密度が飽和する少ない巻き線数が望ましいことになる。しかしながら、一次側電流の周波数を高くし過ぎると 30m 以上の長さで敷設されるテープヒータ自体がアンテナとなり得るため、電磁波放射による障害発生に注意する必要がある。微弱電波局の規定⁷⁾に沿ってテープヒータ周囲の電磁波環境を測定する必要がある。しかし、テープヒータに重畳する高周波数の電流は微小であるため、その電磁波環境への影響は小さいと想定され、実使用環境下における測定・評価が妥当と考える。

4. CT の試作実験

CT を試作する上で、図1に示す受電側回路の動作入力電圧や入力インピーダンスの仕様を設定する必要がある。受電側回路の整流・蓄電回路として、実験では文献8)で提案されている倍電整流回路の構成を基本として、各素子を再設計し、電子回路シミュレータ NI Multisim14.1で動作確認した図8の回路を使用した。試作した回路で動作実験を行ったところ、CT の出力電圧 4.5V_{p-p}、周波数 240kHz の時に CT 電流が最小の 5.8mA_{p-p} で蓄電用コンデンサ C3 の電圧をセンサデバイスに供給する DC3V 以上にできることが確認できた。受電回路に関しては蓄電時間、放電時間の条件などセンサデバイスの仕様との関係があるため、最適化に関してはより詳細な検討が必要である。

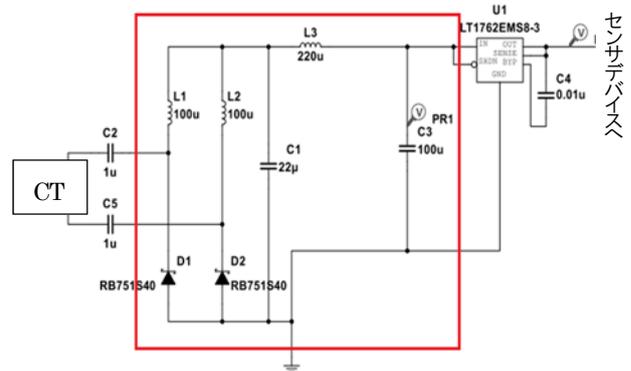


図8 受電側回路 (赤枠内が倍電流整流回路)

CT に使用する磁気コアの材質としては飽和磁束密度が大きいフェライトを選択し、テープヒータを挟み込める構造とするために、一般に電源線などのノイズ対策用に使用される分割型のフェライトコアを採用した。写真2に試作したCTを示す。フェライトコアのサイズは幅 38mm、長さ(テープヒータ長手方向) 24mm、厚さ 12 mm である。テープヒータ(ステンレス箔)は厚さ 50 μ m、幅 6mm で PET フィルムにより被覆されている。また、二次側巻き線はエナメル銅線(径 0.08mm)で、フェライトコアの左側に巻いている。

前述の試作した倍電流整流回路の入力インピーダンスを測定したところ 500 Ω であったが、負荷抵抗値が大きいと誘導電流値が小さくなりCTの静特性評価が難しくなるため、CTの二次側負荷として 51 Ω の抵抗を接続して二次側誘導電流の測定を行った。負荷抵抗の影響に関しては、後述する。電流の測定には、微小電流観測用の電流プローブ(日置電機製：CT6700)を使用した。

図9は、一次側電流の周波数を変化させた時の二次側誘導電流を測定した例である。巻き線数が多いと、誘導電流値は低周波数の時には巻き線数が少ない場合より有利であるが、周波数が高くなると自己インダクタンスの影響で誘導電流が流れ難くなる。電波法上の規制も考慮して 100kHz 以上 300kHz 以下でCTを使用することを想定すると、巻き線数は 5 ターン程度が妥当といえる。

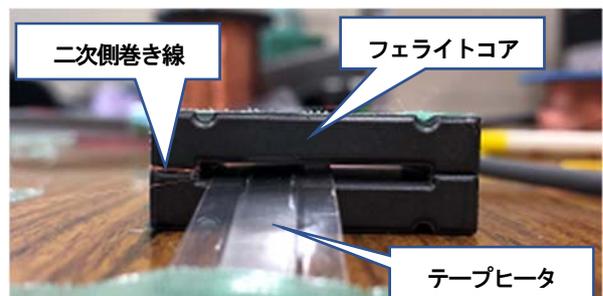


写真2 試作したCTの形状とテープヒータ
(フェライトコア幅：38mm、長さ24mm、厚さ：12mm)

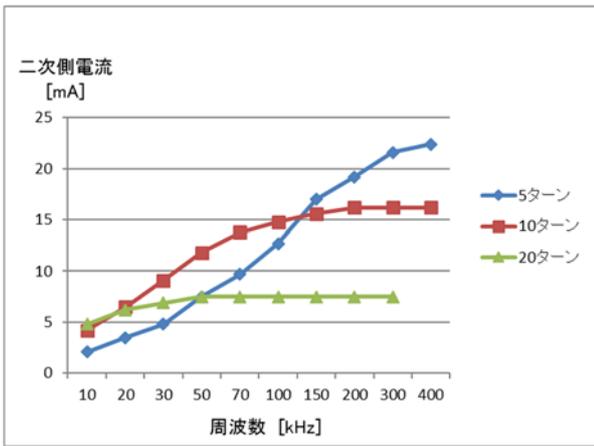


図9 二次側誘導電流の周波数特性
(一次側電流：150mA，二次側負荷抵抗：51Ω)

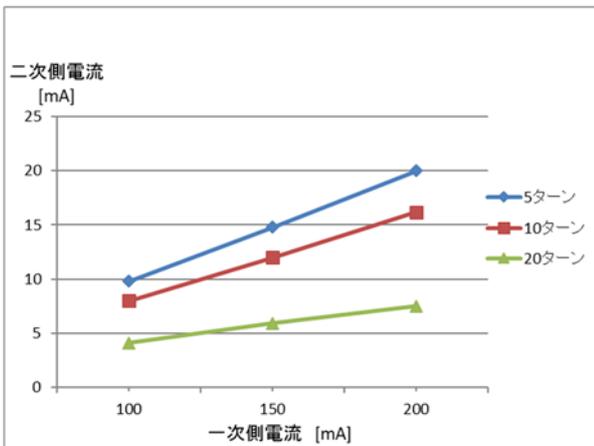


図10 一次側電流と二次側誘導電流の巻き線数特性
(一次側電流の周波数：230kHz，二次側負荷抵抗：51Ω)

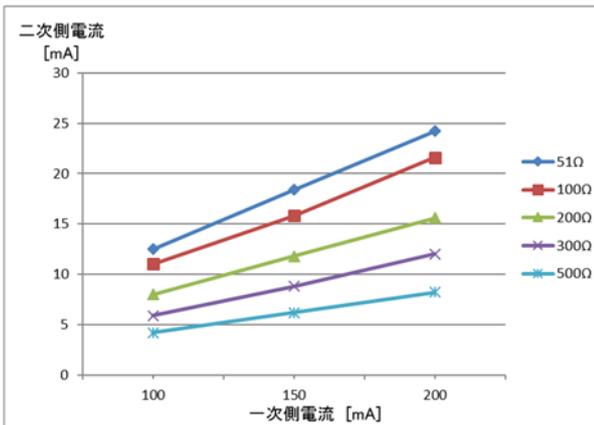


図11 負荷抵抗の二次側誘導電流への影響

図10は、二次側巻き線数を変化させた時の一次側電流に対する二次側誘導電流の変化を観測した結果である。一次側電流の増加にほぼ比例して二次側誘導電流が増加していることから、磁気コアの飽和が生じていないことがわかる。この結果から、磁気コアのサイズ、特に厚さは基本的に妥当であるといえる。なお、磁気コアの長さ（テープヒータ長手方向）は、鎖交磁束数の増加を考えると当

然のことながら長い方が二次側誘導電流を増やすことができる。しかし、コスト増加やCT全体のサイズが大きくなることを考えると、今回試作したものの2倍程度が現実的であろう。

図11は、二次側負荷抵抗の影響を測定した例である。この図から負荷抵抗が小さいほど二次側誘導電流を大きくできることがわかる。今回の充電側回路の入力インピーダンスは500Ωであったが、200Ωまで小さくできれば、一次側電流は50mA程度にまで低減でき、テープヒータでの消費電力を下げること、電磁波放射の影響を小さくできることなど多くの利点が得られる。このことから、本研究で目指すテープヒータ電力線を利用した非接触給電システムの実現には、CTの開発とともに、より小さな入力インピーダンスを持つ受電回路の開発が重要であることが明確になった。

5. まとめ

本研究では、植物加温用に開発されたテープヒータを加温電力を消費するデバイスとして使用するだけでなく、無線センサデバイスに駆動電力を非接触で供給するための電力線として利用する新しい形態の非接触給電システムを提案する。

特に、本論文では、テープヒータから受電するための主要な機能を実現する電磁誘導素子であるCTの基本構造を明らかにし、実験により検証した。また、本システムに適した受電回路の要件に関して、実験を通し明らかにした。今後は、各素子、電子回路の最適化を図るために、実使用環境を想定し、詳細な設計・解析を進める。

本研究が、ICT 農業を普及させる上でハードウェア上のキーとなるセンサデバイスに電力を供給する手法の一つとして検討され、非接触給電技術の応用、展開の一助となると幸いである。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP17K19314 の助成を受けたものです。

文献

- 1) 山田健仁, 岡林拓矢, 鶴山浄真, 御旗寛, 局所加温ステンレス箔テープヒータの管理運用に適したセンサネットワークシステム, 徳山工業高等専門研究紀要, pp. 7-11, No. 40 (2016)
- 2) 竹本優太, 山田健仁, 木宮康雄, 鶴山浄真, 日高輝雄, 御旗寛, ステンレス箔テープヒータによる植物体加温制御システムの検討, 徳山工業高等専門研究紀要, pp. 59-64, No. 35 (2012)

- 3) 鶴山浄真, 日高輝雄, 木宮康雄, 岡田豊, 山田健仁, イチゴ局所加温用テープヒータの開発と実用化に関する研究(第 2 報)局所加温がイチゴ栽培の収量性に及ぼす影響, 園芸学会平成 23 年度秋季大会
- 4) クライソン トロンナムチャイ, 廣田幸嗣, ワイヤレス給電技術入門, 日刊工業新聞社 (2017)
- 5) 篠原真毅, 電界磁界結合型ワイヤレス給電技術 -電磁誘導・共鳴送電の理論と応用-, 科学情報出版 (2014)
- 6) 片山正昭, 電力線通信, 計測と制御, pp. 378-383, 第 44 巻 第 6 号 (2005)
- 7) 微弱電波局の規定, 総務省 電波利用ホームページ, <http://www.tele.soumu.go.jp/j/ref/material/rule/>
- 8) 工藤, 遠井, 金子, 阿部. 非接触給電システムに用いる倍電流整流回路のリアクトルの電流リップル, 平成 25 年電気学会全国大会, 第 4 分冊 pp. 55-56, 4-032 (2013)

(2018. 9. 5 受理)