

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：57103

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K19314

研究課題名（和文）テープヒータ電力線を利用した園芸農業無線センサデバイス用非接触給電システム

研究課題名（英文）Electromagnetic Induction Element for Contactless Power Transfer System using Tape-Heater Power Line

研究代表者

山田 健仁（Yamada, Takehito）

北九州工業高等専門学校・生産デザイン工学科・嘱託教授

研究者番号：40280458

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はテープヒータの加温用低周波電力に高周波微小電力を重畳して送電し、その高周波微小電力を受電することで、それを省電力センサデバイスへの供給電力とすることを特徴としている。受電するための電磁誘導素子構造と受電用電子回路の設計手法とその性能評価を確立することが重要な研究要素となる。研究では有限要素法による電磁誘導素子構造の設計指針の検討や試作実験による動作検証を行った。有限要素法による妥当な物理モデルの目途はたったが、電磁誘導素子の性能改善の確立には至らなかった。電磁誘導素子の性能向上や受電用回路に関する問題についての改善法の考案に至らず目的を達成することはできなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究対象の受電機構はファラデーの電磁誘導の法則を基本とする単純なものであるが、小形・高効率という課題を解決するには、従来と異なった観点からの非接触給電機構を提案するものとなる。本研究によりテープヒータ利用等による電力供給とICT農業に対応したセンサデバイス等への電力供給がテープヒータの敷設一本で可能となり、施設農業の省エネ化とIoT化を同時に推し進めるシステムを提供することになる。これらの研究が成功すれば、従来の電池電源デバイスに代わり、電源メンテナンスフリーの無線計測デバイスを農場、工場など様々な領域で普及させることが可能となり、汎用計測システムを実装する手法として重要な技術になる。

研究成果の概要（英文）：The feature of this research is that high-frequency minute power is superimposed on the low-frequency power for heating of the tape heater and transmitted, and the high-frequency minute power is received to use it as the power supplied to the sensor device. It is an important research issue to establish the structure of the electromagnetic induction element for receiving power and the design method of the power receiving circuit. In this study, the design guideline of the electromagnetic induction element structure by the finite element method was examined, and the operation was verified by the prototype experiment. Although a valid physical model by the finite element method has become clear, it has not been possible to establish an improvement in the performance of the electromagnetic induction device. The purpose could not be achieved because we could not improve the performance of the electromagnetic induction element and problems related to the power receiving circuit.

研究分野：制御工学

キーワード：電磁誘導 電磁界解析 非接触給電 有限要素法 変流器

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

ICT やロボット技術をベースとした省力・高品質生産を目指すスマート農業を実現する技術開発が推進されている。これに関連して研究者らは、ステンレス箔をテープ状に成形し、絶縁体で被覆することで、イチゴの株元を局所的に加温することによりイチゴに最適な生育状態を維持することが出来るテープ状の発熱体（局所加温テープヒータ）の開発を行い、製品化するに至った[1]。局所加温テープヒータは、イチゴの株元部分の8cm程度を局所的に加温する構造になっており、ビニールハウス内の温度全体を上げる必要がなくなるため、暖房コストを40%以上削減できることを実証している[2]。

ICT 農業の更なる高度化には、イチゴなど作物の生育状態に適した施設内環境の温湿度、水分、日照、栄養等をより適正に維持管理する必要があり、これらをより精密に計測することが重要である[3]。そのためには温度等を計測するセンサデバイスを適切に多数配置する必要があり、その際に個々のセンサデバイスを駆動するための電源を安定的に確保することが問題となる。

通常のセンサデバイスは、電池を電源とするものが多く、多数のデバイスの電源を維持管理するには実用上問題がある。また、電力供給のために電線を敷設するには費用負担等の問題がある。そこで、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同時に利用することで、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て、無線計測センサデバイスへの非接触での電源供給としてテープヒータの通電機構を利用することを着想した。従来の非接触電力供給技術は、主に大電力・連続供給を目標としており、送電や電力回収の効率を考えると多くの課題が残っている。しかしながら、本研究課題のような、微小電力で、センサの無線通信時利用だけの間欠給電を想定した農業用センサデバイスへの検討例は報告されていないため、本研究が ICT 農業に必要とされる非接触給電技術の応用、展開の端緒になると考えた。

### 2. 研究の目的

農業施設用の加温システムであるテープヒータへの通電システムを利用して、非接触で無線計測センサデバイスへ電力供給することは、低消費電力、間欠給電、小容量充電といった技術により可能性が広がる。このことから、従来の大電力・連続供給を目的とした非接触給電の技術目標とは異なった観点から、微小電力、間欠給電の非接触電力供給の課題を、以下の2点に絞り研究目的とした。

(1) テープヒータの加温用電力に高周波微小電力を重畳し、微小電力の高周波成分を電磁誘導により非接触で回収して無線計測センサデバイスへ供給する給電機構を電磁界解析と回路解析の両面から理論的に検討して、設計手法を明らかにする。

(2) 上記の給電機構を無線計測センサデバイスに結合実装し、実証実験を通して本方式の実用性を検証する。

以上より温湿度等の無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で、農業施設での実用的な広域・多点温湿度計測を実現し、スマート農業の推進へ寄与する。

### 3. 研究の方法

以下の項目を研究の重要な要素技術として考えた。

- ・電磁誘導素子の小形化とテープヒータ線との非接触結合構造
- ・電磁誘導型微小電力回収用の受電回路の小形化、低コスト化
- ・受電回路における蓄電方式の高効率化と消費電力の低減化

研究は、以下の二段階で実施することとした。

(1) 第一段階（平成29年度）：テープヒータの電力に重畳した高周波微小電力を効率よく回収するための電磁誘導素子の構造、及び受電用電子回路に関して、電磁界解析と回路解析の両面から理論的検討を行い、試作実験を通して設計手法を確立する。

(2) 第二段階（平成30年度以降）：第一段階で設計した、電磁誘導素子の構造と受電用電子回路を無線計測デバイスに結合実装し、ビニールハウス等の農業施設環境での実証実験を通して、本方式の実用性を検証する。

### 4. 研究成果

研究成果の概要に記載したように、有限要素法による電磁誘導素子構造の設計指針の検討や試作実験による動作検証を行ってきたが、電磁誘導素子の性能向上が見込めず、また、受電用回路との適合性にも問題があることが分かった。残念ながら改善法の考案に至らず、本研究の目的を達成することはできなかった。ここでは、微小電力の非接触給電分野における研究の進展の一助となることを願い、研究の経緯と明らかとなった問題点を述べる。

#### (1) システム概要

図1に本研究で対象とする非接触給電システムを示す。テープヒータ加温用電力に高周波微小電力を重畳させ、テープヒータに送電し、その微小電力の高周波成分を電磁誘導により非接触

で回収する構成となっている。受電回路で回収した電流を整流・蓄電した後、無線センサデバイスへ供給する。後述する回路方式での受電回路の入力抵抗が  $500\Omega$  であることと、商用となっている小型無線センサデバイスでの消費電力等から、要求される最低限の電磁誘導能力として、誘導起電力  $4V$ 、誘導電流  $8mA$  を設定した。

図2に電磁誘導素子として試作した変流器の外観を、図3にその基本構造図を示す。テープヒータを電力供給線として、電磁誘導を利用して高効率の非接触給電システムを実現する。これを構成する上で、より多くの電力を効率よく得るために、変流器である電磁誘導素子の最適化を図る必要がある。電磁誘導素子の構造は、一次側にテープヒータ、二次側にコイル、磁性体にフェライト製のコア（以下 磁気コア）を使用した。PVC（塩化ビニル）で包まれているテープヒータを挟める磁気コア（横幅  $33mm$ 、高さ  $9.6mm$ 、奥行  $12mm$ ）を使用し、それに二次側巻き線（直径  $0.08mm$ ）を巻き付ける構造となっている。

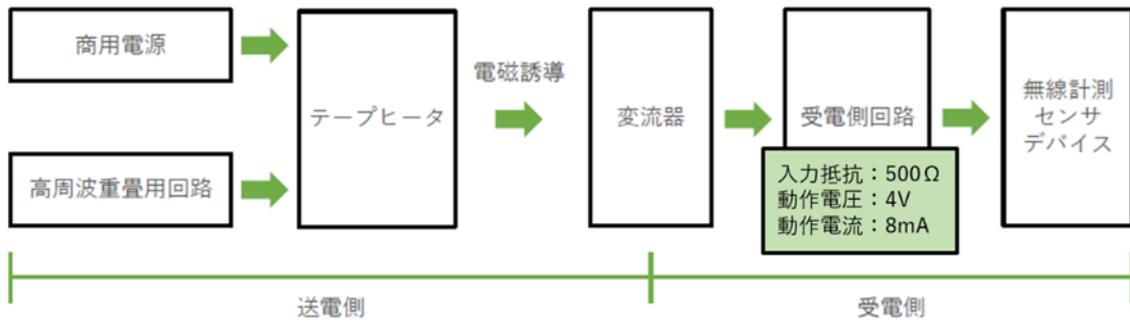


図1 非接触給電システムの構成図

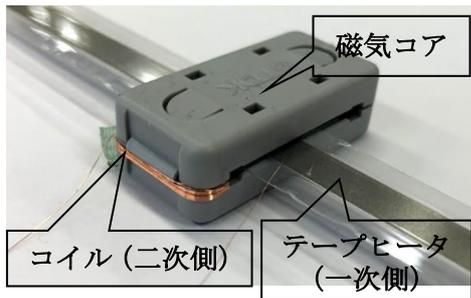


図2 電磁誘導素子 変流器 (試作)

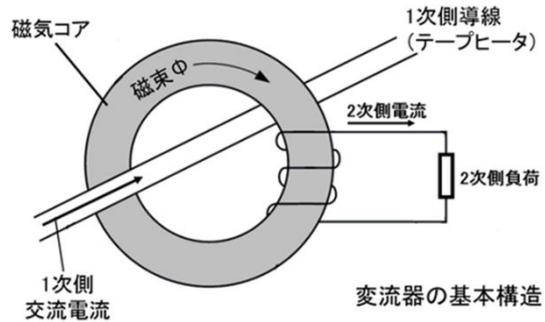


図3 電磁誘導素子 (変流器) の基本構造

## (2) FEM (有限要素法) による解析

電磁誘導素子における磁気コアのサイズと二次側で回収できる誘導電流の関係を調べるために FEM (Finite Element Method) の解析ソフト PHOTO-Series EDDYj $\omega$  を用いてシミュレーションを行った。主にテープヒータ長手方向の磁気コアの長さが、二次側コイルの電流密度にどのように影響するのかを調べた。図4に電磁誘導素子のシミュレーションモデルを示す。

図5は FEM 解析の一例で、テープヒータ (一次側) に高周波微小電流を通電した場合の磁気コア内及びその周囲の磁束密度とコイル (二次側) に誘起された二次側誘導電流をベクトル図で表示したものである。

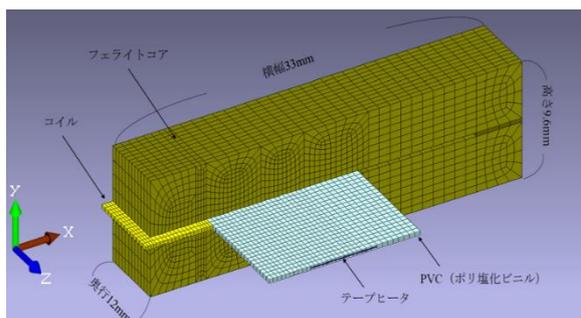


図4 電磁誘導素子の FEM モデル

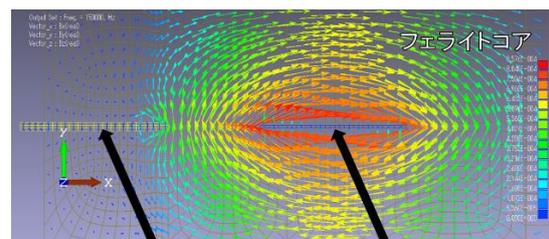


図5 FEM 解析例 (一次側電流による磁気コア内の磁束の状態)

磁気コア長（テープヒータ長手方向）の長さを変化させた場合の二次側誘導電流についてFEMでシミュレーションした。テープヒータのサイズから妥当な磁気コア長は12mm程度と考えられるので、12mmを基準として磁気コア長3mmから48mmの条件でシミュレーションモデルを作成した。テープヒータに流す電流は200mA<sub>p-p</sub>、周波数は150kHzに設定した。図6に磁気コア長による二次側誘導電流密度の変化を示す。図6より磁気コア長を長くすると二次側コイルに誘起される電流密度が増加することが分かる。なお、磁気コアの幅を変化させても、二次側誘導電流密度の変化はほとんどなかった。これは磁気コア幅方向の磁束の飽和によるものと考えられる。

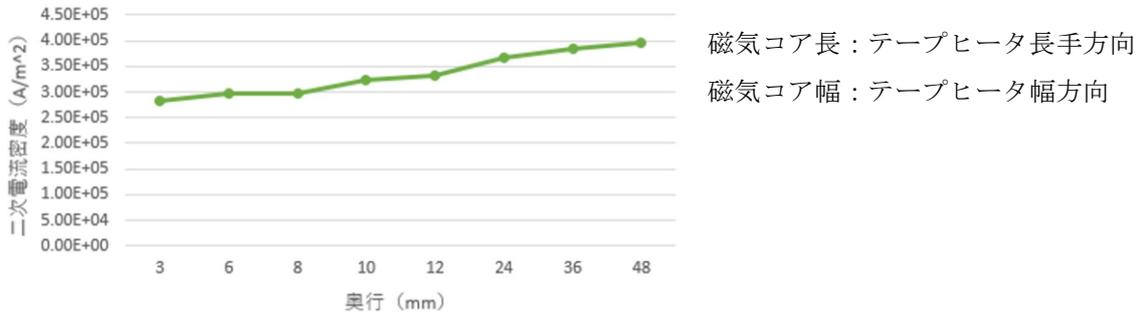


図6 二次側誘導電流の磁気コア長依存性（シミュレーション）

### (3) 電磁誘導素子の試作実験

シミュレーションの結果をもとに、電磁誘導素子を製作して誘導電流回収の実験を行った。高周波信号源を使用してテープヒータに微小電流を流す。二次側コイルとした銅線を巻き付けた磁気コアでテープヒータを挟み、巻き付けた銅線の両端に受電回路の等価インピーダンスとして負荷抵抗を接続し、電流プローブにより二次側誘導電流の測定を行った。

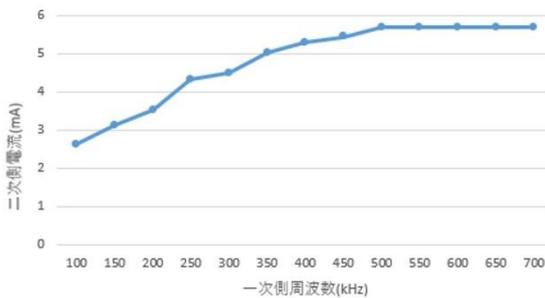


図7 一次側供給電流の周波数による二次側誘導電流の変化

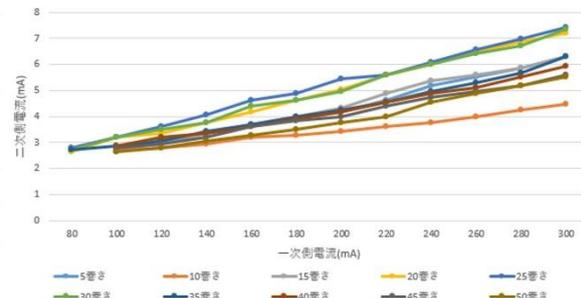


図8 巻き線数による二次側誘導電流の変化

図7は一次側供給電流の周波数を変えた場合の二次側誘導電流の変化を測定した結果である。二次側巻き線数25、一次側電流200mAの条件で一次側供給電流の周波数を変化させて二次側誘導電流を測定した。周波数が高くなるほど誘導電流は大きくなるが500kHz以上で飽和した。

図8は、一次側周波数を350kHzとし一次側電流値を変化させて、二次側巻き線数を5巻きから50巻きまで変えた場合の二次側誘導電流の変化を観測した結果である。これより、僅かではあるが二次側巻き線数が25巻きの時が二次側誘導電流が最も大きくなることが分かった。

これらの結果から、今回設定した電磁誘導素子構造では、一次側供給電流周波数は400kHz以上必要であることが分かった。しかしながら、一次側供給電流がこの周波数では50m程度となるテープヒータから発生する電磁波が電波障害を起こすと考えられる[4]。この問題を回避する設計パラメータや電磁誘導素子の構造を検討したが解決には至らなかった。

### (4) 給電・受電回路の検討

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微小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を想定した。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9に示す。

電磁誘導素子を試作する上で、図1に示す受電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。受電回路の整流・蓄電回路として、実験では文献[5]で提案されている倍電流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 で動作確認し図 1 0 に示す回路を使用した。試作した回路で動作実験を行ったところ、電磁誘導素子の出力電圧 4.5Vp-p、周波数 240kHz の時に誘導電流が最小の 5.8mA<sub>p-p</sub> 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。しかしながら、この値はセンサデバイスを駆動する最低条件であり、また、一次側供給電流の周波数としては高すぎる。この方式の可能性は示せたと考えられるが、電磁誘導素子の誘導起電力の増強が必要であり、また、受電回路としては、電磁誘導素子とのインピーダンス整合や、蓄電時間、放電時間などのセンサ駆動条件などを考慮したより詳細な検討が必要である。

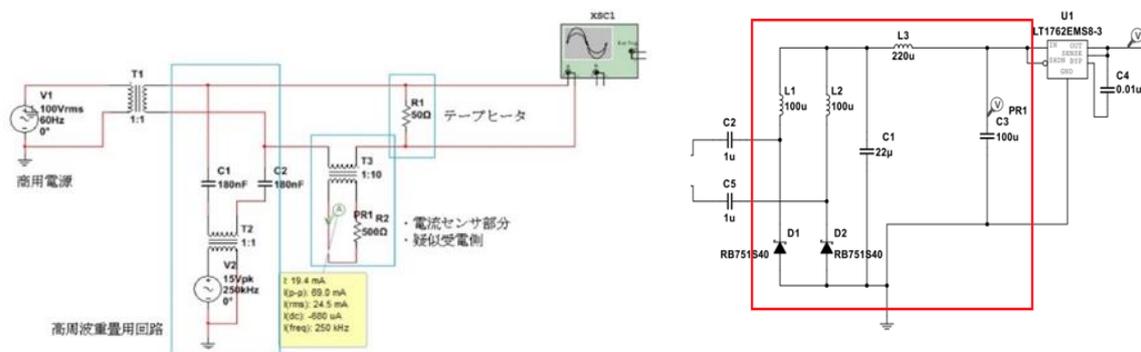


図 9 高周波微小電力重畳用回路

図 1 0 受電回路（赤枠内が倍電流整流回路）

以上、本研究の実施概要を述べた。残念ながら以下の課題を解決できなかったため、研究成果として学会誌論文等に公表するに至らなかった。

- ① 一次側供給電流を微小にするためには、高周波電流を必要とするが、テープヒータのように長い線路に高周波電流を流すことは、電波障害（雑音源）になる可能性が高い。
- ② 二次側誘導電流を効率よく回収するには、磁気コアのサイズや材質、巻き線などの最適化条件を見つけ出すか、新たな構造を考案する必要がある。
- ③ 受電回路の入力インピーダンスと電磁誘導素子とのインピーダンス整合は重要な課題と考えられ、受電回路方式の改良が必要である。

<引用文献>

[1]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)

[2]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

[3]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)

[4]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/>

[5]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)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 山田 健仁、岩木 海成	4. 巻 第42号
2. 論文標題 テーパー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	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 徳山工業高等専門学校 研究紀要 ISSN 2432-5627	6. 最初と最後の頁 5~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------