

令和 3 年 4 月 16 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21965

研究課題名（和文）高速な磁化反転を示す磁性線を受電コイルのコアに用いたワイヤレス給電の実現

研究課題名（英文）Wireless power transfer using receiving core-coil with magnetic wire of fast magnetization reversal

研究代表者

竹村 泰司（Takemura, Yasushi）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30251763

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：ワイヤレス給電の新しい手法を提案し、その実現性を検証するという挑戦的な研究課題を実施した。ワイヤレス給電では、送電側からコイルにより交流磁界を発生させ、受電側のコイルに生じる電磁誘導起電力を電力として利用する。通常は受電コイルに鎖交する磁束を増大させるためにフェライトなど高透磁率の磁性体をコアとして用いる。本研究では、このコアとして特殊な磁性ワイヤを使用することが特徴である。この磁性ワイヤは受電コイルに周波数に依存しないパルス電圧を生じさせることができる。このパルス電圧から得られる電力を定量評価し、ワイヤレス給電への応用に利点があることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイヤレス給電は、身の回りに限ってもコードレス電話子機や電動歯ブラシなどに加え、スマートフォンの充電に使われるようになっている実用性の高い技術である。ワイヤレス給電は電磁誘導を原理とする。電磁誘導では交流磁界の時間変化率、即ち周波数に比例する電圧が得られるために、交流磁界の周波数を低減することは困難である。

本研究では印加磁界の時間変化率に依存せずに、高速な磁化反転を示す特殊な磁性ワイヤに着目し、その磁化特性を明らかにしたことは学術的に意義がある。また受電コイルのコアに使用することにより、ワイヤレス給電における交流磁界の周波数低減を可能にしたことは新規応用につながる社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：We performed a challenging research subject of proposing a new technical method of wireless power transmission, and examined its feasibility. In wireless power transmission, an alternating magnetic field is applied from the transmitting coil, and the electromotive force induced in the receiving coil is used as electric power source. A magnetic material, normally high permeability ferrite, is used as the coil-core in order to enhance the magnetic flux in the receiving coil. We propose the use of a magnetic wire whose magnetic property is quite unique as a coil-core material in this research subject. This magnetic wire generates a pulse voltage and its voltage value does not depend on the frequency of the applied magnetic field. We have found that the wire is advantageous in application to wireless power supply.

研究分野：磁気工学

キーワード：Wiegandワイヤ FeCoVワイヤ ワイヤレス給電

1. 研究開始当初の背景

ワイヤレス給電のなかでも交流磁界を媒介とする方式に着眼した。送電側のコイルからは交流磁界を発生させ、受電側のコイルにその磁界を鎖交させる。そのためにこれらのコイルはできるだけ近接させ、またコイル面が互いに対向するような配置が望まれる。身の回りにあるワイヤレス給電では、このように送電側と受電側の両コイルが近接できる機器が多い。他方、例えば体内で駆動させる小型機器へのワイヤレス給電では、体外の送電コイルと体内の受電コイルに距離がある。さらに診断治療機能を有する体内ロボットのような医療機器は将来的に血管内のサイズになることが望まれよう。このとき受電コイルのサイズは 1 mm^2 径 $\times 10 \text{ mm}$ 長程度以下となり、体外から印加する交流磁界の鎖交磁束には限界がある。そこで本研究では 1 mm 径程度の受電コイルを用いて高効率なワイヤレス給電を目指した。

2. 研究の目的

Wiegand ワイヤは、FeCoV からなる合金が一般的に用いられている磁性線であり、 4 kA/m ($5 \text{ mT}/\mu_0$) 程度の印加磁界において急峻な磁化反転をすることが特徴である。そのために印加する磁界の時間変化率に無依存な一定のパルス電圧を誘起することができる。この Wiegand ワイヤをワイヤレス給電における受電コイルのコアとして用いて、伝送される電力を定量評価すること、及び体内インプラントへのワイヤレス給電を実現することを研究目的とした。

3. 研究の方法

FeCoV 磁性線にひねり熱処理を施すと、より強い応力がかかる外周部は保磁力が低くなる。ひねり処理による影響が少ない内周部は高い保磁力のままであり、その結果、外周部と内周部で保磁力が異なる磁気的な2層構造を形成するに至る。Wiegand ワイヤは、このような磁気的な複合構造を有する。磁気的性質から外周部をソフト層、内周部をハード層と呼ぶ(図1)。ソフト層は急峻な磁化反転を示すことから、Wiegand ワイヤの周囲に巻いた検出コイルにはパルス電圧が誘導起電力として生じる。ソフト層の磁化反転は印加する磁界の時間変化率に依存しないために、得られるパルス電圧は、その波高値と幅が常に一定の時間波形となる。

本研究で使用した Wiegand ワイヤは、線径 0.25 mm 、 $10\text{-}13 \text{ mm}$ 長の FeCoV 合金線である。ワイヤ周囲に $2,000$ ターン若しくは $3,000$ ターンの検出コイル(受電コイル)を設置した。ソフト層が磁化反転する際に検出コイルには $5\text{-}10 \text{ V}$ のパルス電圧が生じる(図2)。Wiegand ワイヤの励磁には永久磁石またはコイルを用いた。

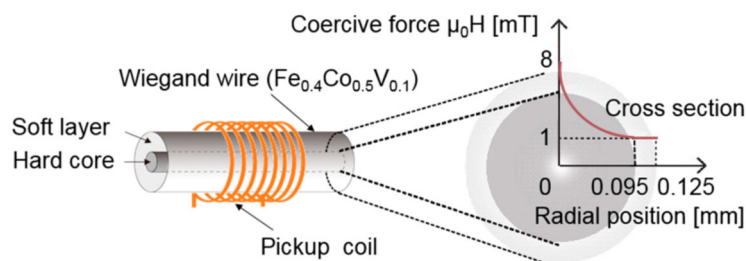


図1 Wiegand ワイヤの磁気的2層構造と保磁力の径方向分布の模式図(左図には検出コイル)

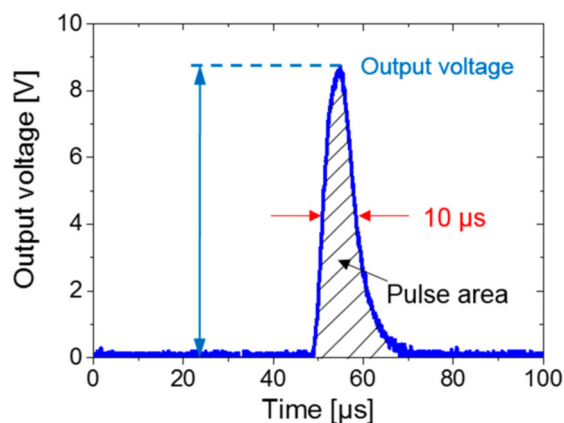


図2 Wiegand ワイヤの磁化反転に伴い検出コイルに誘導されるパルス電圧

4. 研究成果

(1) Wiegand ワイヤを用いた測定

実用上、Wiegand ワイヤに磁界を印加するためには励磁用マグネットを用いる。このとき Wiegand ワイヤの全体に均一な磁界強度が印加されず、ワイヤ線長方向に強度の空間分布のある磁界が印加される。そこで部分励磁した Wiegand ワイヤの磁化過程評価を行い、その磁化反転の起点及び磁壁移動を明らかにすることができた。図 3 に示したように様々な励磁用マグネットと Wiegand ワイヤの相対位置・角度について詳細な実験も行った。さらに Wiegand ワイヤの両端にフェライトビーズ (円筒状の中空部材) を magnetic field flux concentrator として設置し、励磁用マグネットから印加される磁束を集約する効果を検証した。図 4 に励磁用マグネットと Wiegand ワイヤの距離を変化させ、印加される磁界強度に依存する出力パルスの波高値 [V] とエネルギー [V・s] を測定した結果を示す。出力パルスの面積、電圧×時間はエネルギーに相当する指標となる。波高値、エネルギーとも磁束集約の効果が確認できた。(C. Yang, T. Sakai, T. Yamada, Z. Song, Y. Takemura, “Improvement of pulse voltage generated by Wiegand sensor through magnetic-flux guidance”, Sensors, Vol. 20, Iss. 5, 1408, 2020. DOI: 10.3390/s20051408 にて報告)

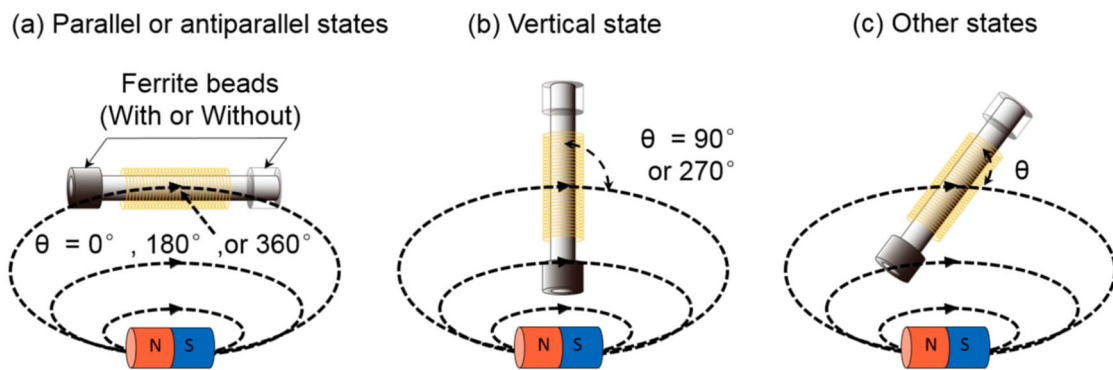


図 3 Wiegand ワイヤを励磁するマグネットの相対位置・角度の依存

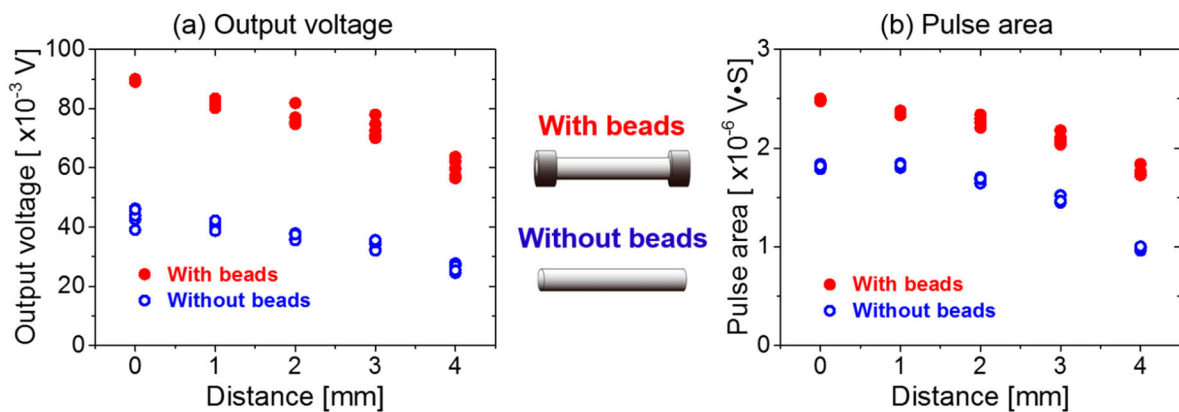


図 4 Wiegand ワイヤの両端に設置するフェライトビーズの効果
Wiegand ワイヤからのパルス出力の波高値(左)とエネルギー(右)

(2) Wiegand ワイヤを用いたワイヤレス給電

ワイヤレス給電については、体内インプラントを想定した Wiegand ワイヤ及び受電コイルを試作し、また体外から体内深部へ交流磁界を印加することを前提とした磁界強度・周波数の制限内で実験を行った。受電コイルに従来用いられている高透磁率フェライトをコアとした場合と比較することにより Wiegand ワイヤの特徴、利点を顕在化させることができた。特に Wiegand ワイヤにおけるヒステリシス損失を初めて定量評価することに成功し、ワイヤレス給電における発電効率を明らかにした。これらの研究を通じて、Wiegand ワイヤを利用することにより、受電コイルの仕様次第では、1 kHz という低周波でも 100 μ W 級の小型ワイヤレス給電が可能であることを実証した。

(3)ワイヤレス給電などに活用する回路の設計・試作に向けて

Wiegand ワイヤの具体的な各応用に対してどのような整流回路と蓄電回路を利用するかは極めて重要な課題である。Wiegand ワイヤが発生するパルス電圧を回路シミュレーションで模擬するための、素子構成と等価電源を決定することができた。これにより LTspice®など汎用性の高い回路シミュレーターで回路設計をすることが可能になった。デジタルカウンタを試作し、その動作特性を測定することにより (図 5)、パルス電圧を電源とする回路の応答をシミュレーションするために設定した、等価電源や回路パラメータの有効性を明らかにすることができた。(J. Chotai, M. Thakker, Y. Takemura, “Single-bit, self-powered digital counter using a Wiegand sensor for rotary applications”, Sensors, Vol. 20, Iss. 14, 3840, 2020. DOI: 10.3390/s20143840 にて報告)

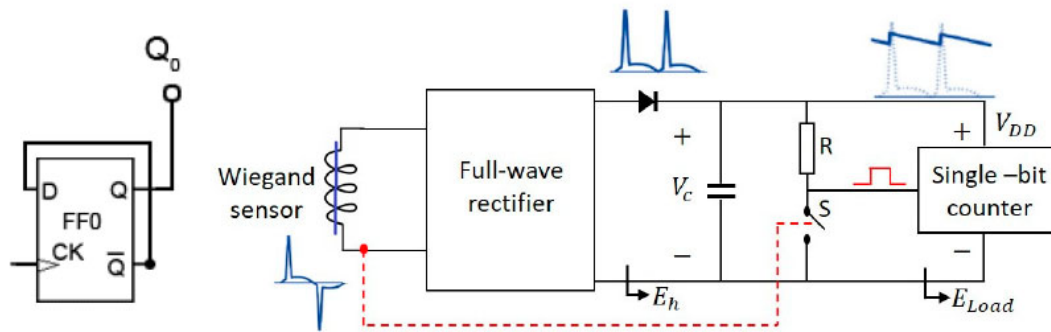


図 5 Wiegand ワイヤの出力電圧を回路シミュレーションで模擬するための素子構成と等価電源を検証する、デジタルカウンタ回路

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Chao Yang, Takafumi Sakai, Tsutomu Yamada, Zenglu Song, Yasushi Takemura	4. 巻 20(5)
2. 論文標題 Improvement of pulse voltage generated by Wiegand sensor through magnetic-flux guidance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1408
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20051408	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Janki Chotai, Manish Thakker, Yasushi Takemura	4. 巻 20(14)
2. 論文標題 Single-bit, self-powered digital counter using a Wiegand sensor for rotary applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3840
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20143840	査読の有無 有
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 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 和口修平、川添駿平、酒井貴史、山田努、竹村泰司
2. 発表標題 体内インプラントへの無線給電におけるWiegandワイヤの発電効率
3. 学会等名 第43回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井貴史、山田努、竹村泰司
2. 発表標題 部分励磁したWiegandワイヤの磁化過程評価
3. 学会等名 第43回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川添駿平、和口修平、酒井貴史、山田努、竹村泰司
2. 発表標題 Wiegandワイヤを用いた小型ワイヤレス給電
3. 学会等名 第43回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯島榛史、孫小雅、原和江、酒井貴史、山田努、竹村泰司
2. 発表標題 磁性ワイヤ・コイル分離型Wiegandセンサを用いた振動発電と等価回路解析
3. 学会等名 第43回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Takemura
2. 発表標題 Battery-less device operation and wireless power transfer for sensor networks and IoT
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Sensor Networks and Signal Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹村泰司
2. 発表標題 Wiegandセンサの基礎と応用
3. 学会等名 第201回スピニクス研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

竹村泰司（研究室ホームページ，横浜国立大学）
<http://www.takemura.ynu.ac.jp/>
竹村泰司（研究者総覧，横浜国立大学）
https://er-web.ynu.ac.jp/html/TAKEMURA_Yasushi/ja.html

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
研究分担者	山田 努 (Yamada Tsutomu) (70251767)	横浜国立大学・大学院工学研究院・助手 (12701)	

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			
中国	Nanjing Institute of Industry Technology			
インド	Gujarat Technological University	Laibhai Dalpatbhai College of Engineering		