

# 小型化した単層薄膜磁気インピーダンス素子の変化率

谷井雅, 菊池弘昭

(岩手大学)

Impedance change ratio of miniaturized single layer thin film MI element

M. Tanii, H. Kikuchi

(Iwate Univ.)

## 1. はじめに

磁気インピーダンス素子は、高透磁率磁性体に高周波電流を通電した場合に外部磁場により、その透磁率が変化し、それに伴い表皮効果、強磁性共鳴を介してインピーダンスが変化する現象であり、磁気センサに応用されている。生体磁気応用を見据えた高感度化の検討が中心的であるが、局所的な非破壊評価応用等への展開を見据えて、我々は小型化を目指して磁性薄膜による研究を行ってきた<sup>1)</sup>。これまで大きなインピーダンス変化が報告されている薄膜素子は 2-10 mm の素子長で多層構造である。本研究では薄膜で単純構造の単層を用いて、これまで報告例の少ない 1 mm 以下の磁気インピーダンス素子において数 100% の変化率の実現について検討した。

## 2. 実験方法

薄膜磁気インピーダンス素子には  $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$  アモルファス薄膜を用いた。膜厚 1-5  $\mu\text{m}$  の薄膜をスパッタ・リフトオフ法により素子長 1 mm, 素子幅 10-80  $\mu\text{m}$  の矩形素子に微細加工した。成膜後に磁性体部は磁界中熱処理を行い、各素子の容易軸を幅方向に制御した。1 MHz から 3 GHz の周波数範囲において素子のインピーダンスをネットワークアナライザにより測定した。測定の際にはヘルムホルツコイルを用いて外部磁界を素子の長手方向に印加した。

## 3. 実験結果

Fig. 1 は幅 40  $\mu\text{m}$ , 厚さ 5  $\mu\text{m}$  の素子におけるインピーダンスの周波数依存性を示した図である。この素子は全長 1.4 mm の矩形素子であり、反磁界分布低減のため中央 1mm の部分に通電を行っている。印加磁界 0 でのインピーダンスは約 8  $\Omega$  一定で、100 MHz 以上で表皮効果によりわずかに増加する。外部磁界を印加した場合、数 100 MHz 帯域でのインピーダンス変化の増大が顕著になり、1 GHz 付近でピークを取る。Fig. 2 は同一素子における 1~1.5 GHz でのインピーダンスの外部磁界依存性を示した図である。周波数 1.1 GHz でのインピーダンス変化率は 400% が得られており、一連の検討の中で最大の変化率となっている。センサの動作原理としては 100 MHz 低周波から側で数 100 MHz 領域においては表皮効果による抵抗増加があり、GHz 帯付近では強磁性共鳴が関与している。バイアス磁化率の理論やマクスウェルの方程式に基づくインピーダンスの計算の結果、膜厚が大きくなるにつれてインピーダンス変化は大きくなるが、ピークをとる周波数は共鳴周波数に依存して膜厚による変化しない結果が得られた。実験においても素子幅、膜厚によらずインピーダンスのピークはおよそ 1 GHz 付近で得られており、強磁性共鳴の寄与が支配的となり最大変化率が得られていると考えられる。解析結果も含めて詳細は会議にて報告する。

## 参考文献

1) H. Kikuchi, et. al., IEEE Magnetics Letters, vol. 10, #8107205, pp. 1-5, 2019.

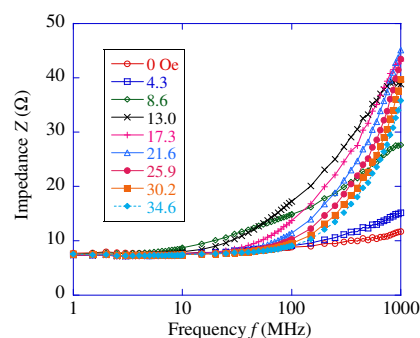


Fig. 1 Frequency dependence of impedance  $Z$  for 40  $\mu\text{m}$  wide and 5  $\mu\text{m}$  thickness element.

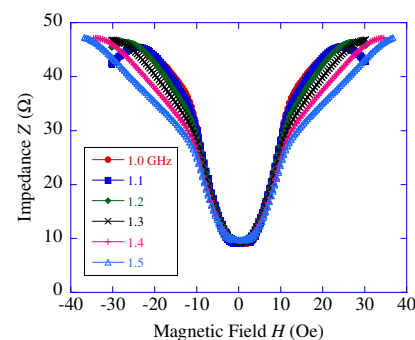


Fig. 2 Field dependence of impedance  $Z$  from 1.0 GHz to 1.5 GHz.

# 高安定 MI センサによる車両通行計測と車種推定アルゴリズムの検討

姚睿軒、内山剛  
(名古屋大学)

Vehicle Traffic Measurement and Vehicle Type Estimation Algorithm Using Highly Stable MI Sensor  
R. Yao, T. Uchiyama  
(Nagoya University)

## はじめに

5年一回実施している一般交通量調査は、全国の道路の交通量などの基礎資料を得ることを目的に実施したものである。調査方法については、主に交通量常時観測装置、簡易型トラフィックカウンタ、人手により観測する方法などである。磁気センサを用いた車両通行計測装置は、設置しやすい、低消費電力、即時で計測できるなどの利点があるため、コストの削減、作業サイクルの短縮などに役立つ。さらに、最も一般的な計測方法—画像処理法と比べて、厳しい気象条件での検出が可能であり高精度に電気自動車を検知することも期待できる。我々はこれまでに、MI センサを道路横に設置した車両通行計測実験により、車両の台数、速度の計測が可能であることを報告している。今回は、直流磁界から安定に磁界を計測できる MI センサを用いた車両通行計測装置の性能評価と車種推定アルゴリズムについて検討した結果を報告する。

## 実験方法

電池(単電源 0~5V)で動作する MI センサ(動作周波数 DC~500Hz)を試作し、計測装置として性能を評価するために、感度、環境ノイズ、フィルタについて調べた。実際の道路に計測装置を設置し、対照として、スピードガン、カメラによる速度測定を同時に行って、得たデータを処理してセンサの性能を評価した。また、理論モデルに基づいたシミュレーションにより車種推定アルゴリズムに関して検討を行った。

## 実験結果

試作センサは、 $\pm 20 \mu\text{T}$  の範囲内は優秀なリニアリティ(線性度)を示した。また、車両通過に伴う変動磁場の計測結果により、車両通行計測に必要な周波数帯域は 0.1~10Hz で、磁場変動は、 $\mu\text{T}$  レベルであることを確認した。さらに、実験環境で測定した  $\sigma$  ノイズは約 10nT (DC~500Hz)、信号雑音比(SNR)は 59.04dB である。帯域を制限するために、カットオフ周波数 26.1Hz のローパスフィルタを利用すると、 $3\sigma$  磁場は 4.94nT となり、ノイズが正規分布している場合、それ以上の信号の検出確率は 99.7%となる。

Fig.1 は、車両通行に伴う変動磁場分布を車種別にまとめた結果を示す。変動磁場の大きさは 0.1~数  $10 \mu\text{T}$  の範囲であった。各車種で測定した変動磁場分布は概ね同じ範囲内で、車体が大きいほど変動磁場が大きくなる傾向はみられなかった。

Fig.2 は大型車両(トラック)の波形例を示す。大型車両の波形には多ピークを発見した。これは大型車両の特徴的な波形であると考えられる。

波形の最初と最後のピーク間の時間を  $T_{pp}$  として定義する。車長と  $T_{pp}$  の関係を検証のため、車両通行の理論モデルを分析し、シミュレーションした。車両通過に伴う変動磁場波形が、対称の場合のみを分析した。Fig.3 は、バス及び普通乗用車の実測した波形とシミュレーションによる計算値である。普通乗用車の実測波形と計算波形は類似しており、 $T_{pp}$  と車長は線形関係であることが検証できる。つまり、車体上の磁化分布が単純な場合は、 $T_{pp}$  だけでも小型車両と大型車両を分けられる。実際には磁化分布が複雑な車両が含まれるため、小型車両と大型車両の車種を判別するためには、変動磁場の波形と  $T_{pp}$  の条件を組み合わせるアルゴリズムを考える必要がある。

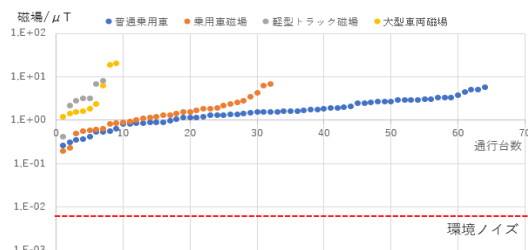


Fig.1 Magnetic field distribution of different types of vehicles

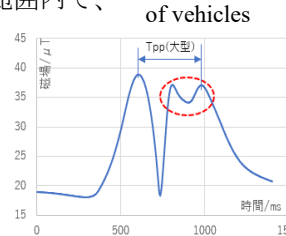


Fig.2 Measured waveforms of large vehicles (truck)

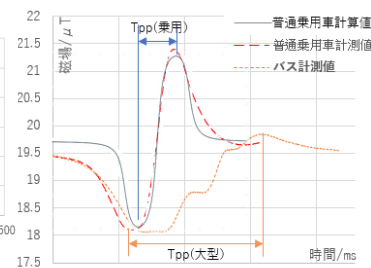


Fig.3 Measured waveforms of small and large cars and simulation calculation values

## コプレーナ型薄膜磁界センサの電磁界解析

石原 知弥, 植竹 宏明\*, 岩崎 千里, 藪上 信, 山口 正洋  
(東北大学, \*電磁材料研究所)

Analysis of coplanar line type thin film magnetic field sensor by electromagnetic field simulation

Tomoya Ishihara, Hiroaki Uetake\*, Chisato Iwasaki, Shin Yabukami, Masahiro Yamaguchi  
(Tohoku University, \*Research Institute for Electric and Magnetic Material)

### 1. はじめに

筆者らは、伝送線路と磁性薄膜を一体化した薄膜磁界センサ<sup>1)</sup>を研究してきた。このセンサについて電磁界解析を行い、バイアス磁界による  $S$  パラメータの変化の傾向が実測値とおおむね対応したため報告する。

### 2. 実験方法および計算方法

Fig. 1 にセンサ素子の写真を示す。センサ素子はガラス基板(25 mm×25 mm, 1 mm 厚)上にアモルファス CoNbZr 薄膜(1 mm×1.15 mm, 1 μm 厚)を RF マグネトロンスパッタにより成膜し、回転磁界中処理(300 °C, 2 時間, 0.3 T)の後、静磁界中熱処理(200 °C, 1 時間)を施して、コプレーナの幅方向へ磁気異方性を付与した。次に、SrTiO 薄膜(膜厚 3 μm)を基板加熱しながら成膜し、最上層には Cu 薄膜によるコプレーナ線路(450 μm 幅, ギャップ 32 μm, 膜厚 1.6 μm)をリフトオフにより作成した。これは導体のみで特性インピーダンスがほぼ 50 Ω となる寸法である。コプレーナ線路には高周波キャリアが通電され、キャリアに CoNbZr 薄膜の磁化容易軸方向の透磁率が反映される。センサの測定はネットワークアナライザ(HP8722ES)の透過法測定により  $S_{21}$  のゲインと位相の周波数特性を求めた。ネットワークアナライザの周波数範囲は 50 MHz-40.05 GHz(801 点)とし、バンド幅は 1 kHz, 平均化回数は 16 回とした。センサへの接続には GSG プローブを使用し、バイアス磁界の印加には電磁石を用いた。解析には ANSYS Electronics Desktop 2020 R1(ANSYS 社)の三次元有限要素法電磁界解析ソフト HFSS を用いた。CoNbZr にはシールドドループコイル法<sup>2)</sup>により測定した複素透磁率を解析周波数ごとに入力した。導電率は  $8 \times 10^5$  siemens/m とした。SrTiO の比誘電率は 7 とした。各解析周波数でメッシュの最適化を行った。

### 3. 結果

Fig. 2 は  $S_{21}$  の実数部および虚数部を実測値と理論値と比較したものである。それぞれの  $S_{21}$  はレファレンス( $\mu_r \approx 1$  に相当)に対する相対的な変化分として表記した。印加磁界は 25 Oe とした。 $S_{21}$  の実数部は約 2.5 GHz で実測値, 解析値ともに極小値をとるという傾向でおおむね対応した。これは、約 2.5 GHz で強磁性共鳴により、複素透磁率の虚数部が最大となり損失が増大したためと考えられる。また、 $S_{21}$  の虚数部は約 2.5 GHz で実測値, 解析値ともに 0 に近づき、約 2.5 GHz 以降は増大する傾向となった。これは、約 2.5 GHz で強磁性共鳴により複素透磁率

の実数部が急峻に減少して負になるためと考えられる。この結果から、複素透磁率の変化による  $S_{21}$  の変化を解析可能であると考えられる。よって、複素透磁率の測定値と三次元有限要素法電磁界解析を用いてセンサ動作の解析が可能であることを示した。

### 謝辞

電磁界解析にご支援いただいた東北大学学術研究員宮澤安範様に感謝いたします。本研究の一部は科研費(16H04378), JSPS「二国間交流事業共同研究」(JPJSBP120197704), 総務省電波資源拡大のための研究開発「不要電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発」(JPJ000254)の研究成果である。

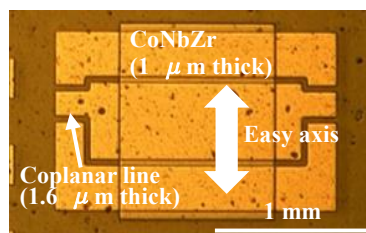
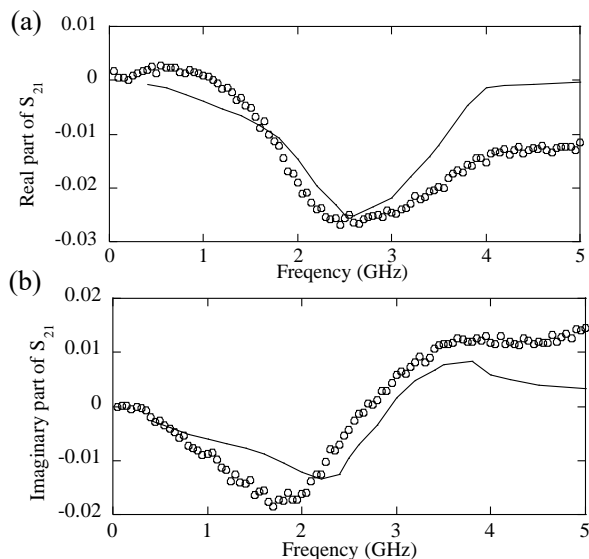


Fig.1. Schematic view of sensor.



(a) Real part of  $S_{21}$  (b) Imaginary part of  $S_{21}$   
Fig.2. Frequency dependency of  $S_{21}$ .

### 参考文献

- 1) H. Kudo, H. Uetake, H. Onodera, L. Tonthat, K. Okita, S. Yabukami, J. Hayasaka, K. I. Arai, *T. Magn. Soc. Jpn.*, 4, 32-36(2020).
- 2) M. Yamaguchi, S. Yabukami, K. I. Arai, *IEEE Trans. Magn.*, 32, 4941-4943(1996).

# アモルファスワイヤを用いた磁気センサにおいて励磁パルス電流の立下り時間が出力電圧に及ぼす影響

金子陽美, 赤城文子  
(工学院大)

Effects of fall time of excitation pulse current on output voltage for magnetic sensor with amorphous wire

T.Kaneko, F.Akagi  
(Kogakuin Univ.)

## はじめに

近年、磁気センサは生体磁気信号検出などの目的から、超高感度化とマイクロサイズ化が求められている。アモルファス磁性ワイヤを用いた磁気センサ（磁気インピーダンスセンサ）は、高周波パルス電流をワイヤに通電することで、ワイヤに巻いたピックアップコイルに生じる誘導起電力を出力電圧として磁界を検出する。本研究では、マイクロマグネティクスシミュレーションにより、FeCoSiB アモルファスワイヤを用いた磁気センサに GHz オーダーのパルス電流を流した時の出力電圧の外部磁界依存性と、センサ内部の磁化挙動を検討したのでその結果について報告する。

## 計算手法と計算モデル及び計算条件

磁性体の磁化挙動は、渦電流の効果を取り込んだ Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を用いて計算した。計算モデルは Fig.1 に示す、ワイヤ径  $10\ \mu\text{m}$ 、長さ  $200\ \mu\text{m}$ （ただし、実際のワイヤ長は mm オーダーとして軸方向の静磁界は 0 と仮定した）、セルサイズ  $0.2 \times 0.2 \times 100\ \mu\text{m}$  の円柱モデルとした。磁気特性は、飽和磁化  $1.0\ \text{T}$ 、異方性定数  $250\ \text{J/m}^3$ 、セル間の交換定数は面内  $1.0 \times 10^{-11}\ \text{J/m}$ 、z 軸方向  $2.0 \times 10^{-11}\ \text{J/m}$  とした。出力電圧は、励磁パルス電流の立下り時におけるピーク電圧とした。FeCoSiB ワイヤは、作製過程で超急冷されることにより、圧縮応力が発生するため、表層部は円周方向に磁気異方性がつく [1]。従って、表層  $0.75\ \mu\text{m}$  の領域は面内、それ以外の領域では軸方向に磁化容易軸を仮定した。

## 計算結果

Fig.2 に、立下り出力の外部磁界依存性を示す。この結果は、立下り時間  $1.0\ \text{ns}$  において実測と同様の傾向を示している。立下り時間によらず、ある磁界強度をピークに出力は減少し、立下り時間が短いほど出力がピークとなる外部磁界強度は高くなる。また、外部磁界が高くなるにつれ、立下り時間が短いほど出力が高くなる。立下り時間が短いほど、外部磁界への応答が速くなるため、出力が高くなると考えられる。

立下り出力時の磁化挙動を確認したところ、立下り時間  $0.385\ \text{ns}$  ではワイヤ表層の磁化回転のみ、立下り時間  $5.0\ \text{ns}$  ではワイヤ表層の磁化回転に加えてワイヤ内部の磁壁移動が生じていた。今回検討したセンサはワイヤ表層の高速な磁化回転により高出力が得られるが、立下り時間が長いと磁壁移動も生じるため出力が低下すると考えられる。

## 参考文献

1) 川島克裕 他, アモルファス磁性ワイヤの Matteucci 効果の発生機構, 日本応用磁気学会誌, 16, p.560-565

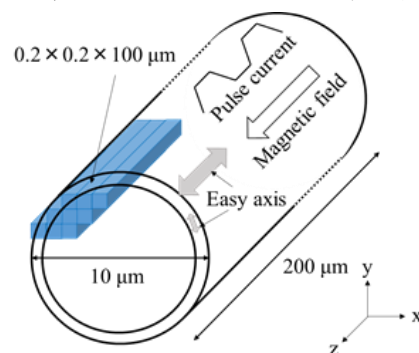


Fig.1 Model of magnetic sensor with amorphous wire

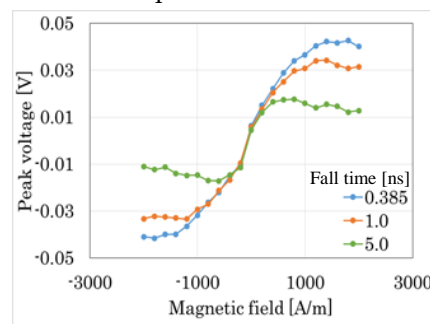


Fig.2 Relationship between peak voltage and magnetic field when the fall time is used as a parameter

# 高周波磁界により励磁した Wiegand ワイヤのパルス出力特性

衛藤風馬, 山田努, 竹村泰司  
(横浜国立大学)

Output pulse voltage of Wiegand wire excited by AC magnetic field at high frequency

Fuma Eto, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura  
(Yokohama National Univ)

## はじめに

熱ひねり加工を施した Wiegand ワイヤは、高速な磁壁移動によって大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる急峻な磁化反転を生じ、この周りに検出コイルを設置することでこの磁化反転に伴う誘導起電力が得られる。これは、Wiegand 効果と呼ばれる<sup>1)</sup>。Wiegand 効果の特徴は、低速で変化する磁界に対してその変化速度にほぼ無依存なパルスを出力することであり、実用的に有用なものである。他方、高速で変化する磁界に対して、パルス出力がどのように変化するかは明らかにされていなかった。本稿では、周波数を 50 Hz から 50 kHz と変化させたときに、パルス出力がどのように変化するかについて測定及び考察をしたので報告する。

## 実験方法

1 mm 長、200 turn の検出コイルを作製し、11 mm 長の Wiegand ワイヤ中央の外周部に設置した。ソレノイドコイルによりワイヤ長に対してほぼ様な交流磁界を印加した。以下では励磁磁界の強度を  $8.0 \text{ mT}/\mu_0$ 、周波数を 50~50 kHz としたときに、Wiegand ワイヤに誘起されるパルス出力（開放電圧）を測定した。

## 実験結果

Fig.1 には、 $f = 50 \text{ Hz}$  の交流磁界で励磁させたときの検出コイルに誘起されるパルス電圧波形を示す。Fig.2 には、 $f = 50 \text{ Hz}$ 、500 Hz、5 kHz、50 kHz と変化させたときのパルス電圧波形を示す。Fig.2 は、パルスの正の半周期のみを周波数ごとに重ねて表示しており、縦軸はパルス電圧の波高値で規格化している。Fig.2 を見ると、 $f = 50 \text{ Hz} \sim 5 \text{ kHz}$  のときのパルス波形は半値幅が  $10 \mu\text{s}$  程度と殆ど変化が見られないが、 $f = 50 \text{ kHz}$  のときのパルス出力は、他周波数での出力に対して幅が狭くなった。このとき交流磁界の半周期は  $10 \mu\text{s}$  とパルス幅と同程度になり、またワイヤ内部の磁壁移動速度は  $500 \text{ m/s}$  程度と考えられており、半周期で磁壁はワイヤ長より短い  $5 \text{ mm}$  移動することになる。詳細なデータや考察について当日、報告する。

## 参考文献

- 1) Wiegand and Velinsky, U.S. Patent 3, 820, 090, 1974.
- 2) Takemura *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **53**, 4002706, 2017.

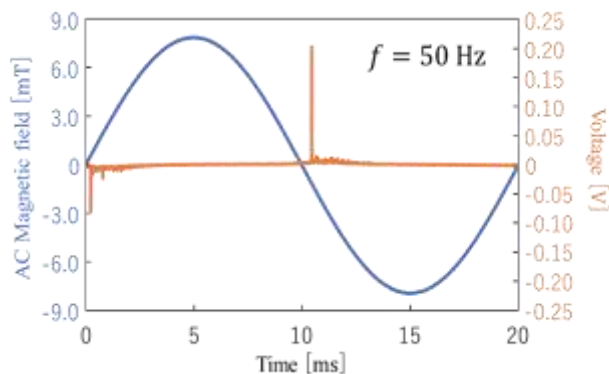


Fig. 1 Waveforms of excitation AC magnetic field and output voltage from Wiegand wire ( $f = 50 \text{ Hz}$ ).

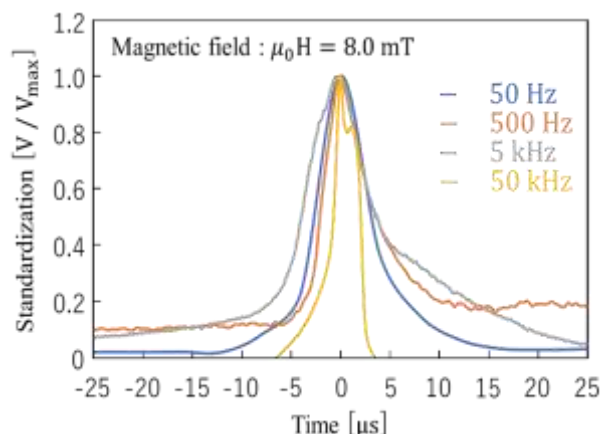


Fig. 2 Output waveforms of Wiegand wire under excitation AC magnetic field of various frequency.

# Wiegand ワイヤと高透磁率材料をコアに用いる受電コイルの比較

川添駿平、川手祐理、山田努、竹村泰司  
(横浜国立大学)

Receiving coils with cores using Wiegand wire and high permeability material

Shumpei Kawazoe, Yuri Kawade, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura  
(Yokohama National University)

## はじめに

Wiegand ワイヤに外部磁界を印加すると、大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる急峻な磁化反転を生じるため、この周りに設置した検出コイルにはパルス電圧が生じる<sup>1)</sup>。この出力は外部磁界の変化速度に依存しないという特徴があり、発電型エンコーダなどに利用されている。また、体内インプラントへのワイヤレス給電のような励磁コイルと受電コイルが離れる場合には、高周波磁界を発生させることが難しい場合が想定され、Wiegand ワイヤの特性を利用した低周波のワイヤレス給電が検討されている<sup>2)</sup>。ここで、一般的なワイヤレス給電では受電コイルのコアに高透磁率フェライトが使用されているが、誘導起電力を発生させる原理および誘導される電圧波形が異なるため、それぞれの特性が優位となる条件を比較することは難しい。本研究では Wiegand ワイヤと MnZn フェライトを用いたコアコイルの比較を、後段の整流・平滑回路を含め詳細に検討した。

## 実験方法

Fig.1 に示すように、4500 turn の給電用検出コイルのコアに Wiegand ワイヤ( $\phi:0.25$  mm, length:11 mm)<sup>3)</sup>および MnZn フェライト( $\phi:0.44$  mm, length:11 mm)を使用し、正弦波交流磁界 $\mu_0H = 5$  mT で一様に励磁した。検出コイル後段には、ダイオードブリッジ整流回路及び平滑コンデンサを接続し、負荷で得られる電力を測定した。

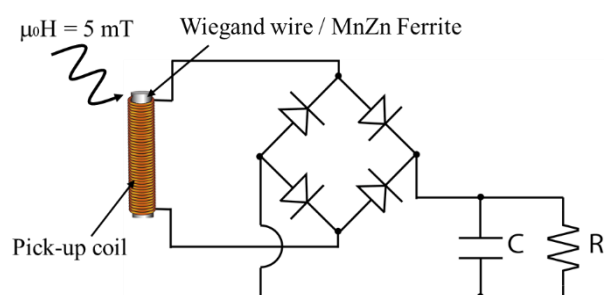


Fig. 1 Configuration of measurement.

## 実験結果

Fig. 2 に励磁周波数  $f = 100$  Hz, 1 kHz, 10 kHz とした場合に、負荷で得られる 1 周期当たりのエネルギーの負荷特性を示す。ただし、負荷電圧を各コアの断面積で規格化した値から算出した。この実験条件においては、いずれの周波数においても、Wiegand ワイヤをコアとする出力増幅が優位であることが確認できた。低周波条件下でも高い波高値をもつ Wiegand パルスやダイオードでの損失の違いが寄与していると考えられる。詳細は当日報告する。

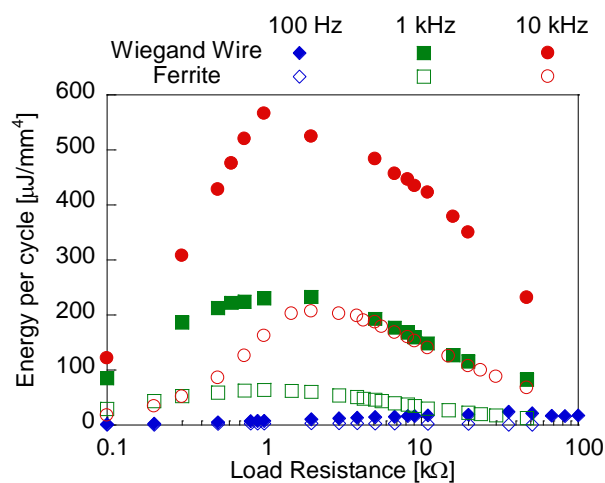


Fig. 2 Energy per cycle in the load resistance.

## 参考文献

- 1) J. R. Wiegand and M. Velinsky, U.S. Patent 3, 820, 090, 1974.
- 2) Takahashi et al., J. Mag. Soc. Jpn. 42, 49, 2018.
- 3) Takemura et al., IEEE Trans. Magn. 53, 4002706, 2017.