

## 5 巻線サーチコイルを用いた金属異物検出システムの基礎検討

古川 啓太\* 日下 佳祐 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Metal-object-detection System with Five Searching Windings for WPT Systems

Keita Furukawa\*, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a metal-object-detection method with five searching windings for wireless power transfer system of electric vehicle. The proposed method detects foreign metallic objects with induced voltage of the five searching windings. Small foreign metallic objects are detected with measurement of variation of low-induced voltage and differential voltage between two pairs of searching windings. The fundamental proposed metal-object-detection method is shown with prototype of the transmitting coil and Quarter as a metallic object. As a result, the metallic object is detectable when threshold RMS value of the differential voltage is 20.9 mV.

キーワード: ワイヤレス電力伝送, 金属異物, 異物検出, 検出コイル, 差動電圧

(wireless power transfer, metallic object, metal-object-detection system, searching windings, differential voltage)

### 1. はじめに

近年、環境への配慮から走行時に CO<sub>2</sub> の排出がない電気自動車 (EV) や、CO<sub>2</sub> の排出が少ないプラグインハイブリッド車 (PHV) の普及が進んでいる<sup>(1)</sup>。EV や PHV への充電方式として、利便性の向上や感電防止の観点から、電気的接点なしで電力を供給可能な電磁誘導方式によるワイヤレス電力伝送 (IPT) が注目されている<sup>(2)(3)</sup>。

IPT システムでは、充電器 (送電) 側と車載 (受電) 側それぞれに伝送コイルを配置し、磁気的に結合させることでエネルギーを伝送する<sup>(2)(3)</sup>。電力伝送時、金属製の異物が外部から侵入すると、高周波の強磁界によって異物内部に渦電流が生じ、金属異物が過熱される<sup>(4)(7)</sup>。その結果、異物の発火・発煙やコイルの変形、システムの効率低下といった問題が懸念される<sup>(4)(13)</sup>。異物は伝送電力が大きいほど高温になり、先行研究では、鎖交磁束の 1.6~2 乗に比例して温度が上昇するという解析結果が示されている<sup>(4)</sup>。したがって、EV や PHV 向けの大容量 IPT システムには、金属異物の有無を高精度で検出可能な機能が必要である<sup>(5)(13)</sup>。

EV や PHV 向けの IPT システムにおける異物検出の方法として、光学的、物理的、電気的な側面から様々なシステムが提案されている<sup>(5)(13)</sup>。光学的な手法としてカメラ映像やレーダーによる異物の検出、物理的な手法として圧力センサや温度センサによる物体の検出が挙げられる<sup>(5)(7)</sup>。しかし、コインやクリップなど小型の金属異物を検出するために分解能を細かくすると、システムが高価になる課題がある<sup>(5)</sup>。

電気的な方法として、IPT システム入出力電力を測定し、IPT システムで生じた渦電流損の大きさから金属異物の有無を判定するものや、検出コイルを新たに追加し、検出コイルの誘起電圧の大きさと位相を基に金属異物を検出する方法が提案されている<sup>(5)(6)(8)(13)</sup>。特に、入出力電力から検出する手法は比較的安価に実現できる利点がある<sup>(5)(8)</sup>。しかし、大容量の IPT システムでは、金属異物の加熱に使われる電力に比べ伝送電力が非常に大きく、微小な電力変動を精度よく検出する方法が課題となっている<sup>(5)</sup>。一方、検出コイルを用いる方法では、送電側コイルの上に多数の小さな検出コイルを配置することで、小さな金属異物を検出することが可能となる<sup>(5)(9)</sup>。しかし、多数の検出コイルをモニタリングしなければならず、異物検出回路の複雑化、部品点数の増加が懸念される<sup>(5)</sup>。

そこで本論文では、異物検出回路の単純化とコスト削減を目的に、5 巻線構成の検出コイルを用いた金属異物検出システムを提案する。検出精度改善のために、送電側コイルに起因する誘起電圧が 0 になるよう検出コイルを配置する手法と、2 個の検出コイル間の差動電圧で金属異物の有無を検出する手法を組み合わせる<sup>(5)(11)(13)</sup>。本提案法のメリットは、検出回路が 5 個あれば、送電側コイルの大きさに関係なく、小さい金属異物を検出できる点である。

本論文は、以下の構成になっている。まず、提案する送電側コイルの外観を示したのち、等価回路の解析を通して、検出精度改善手法について説明する。次に、3D CAD モデル上で試作コイルを設計し、シミュレーションによって提案法の妥当性を確認する。その後、試作コイルを用いた異物

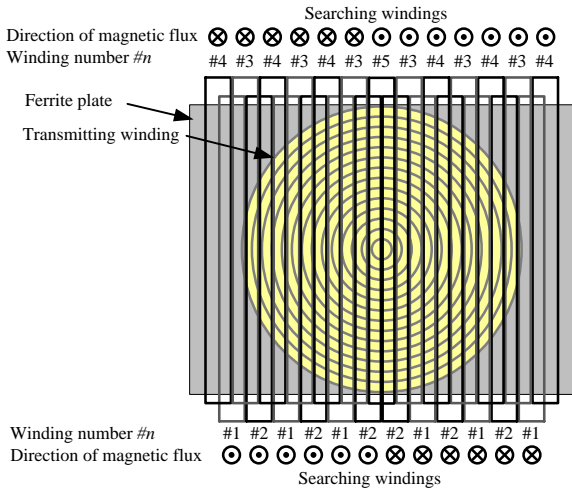


Fig. 1. Outline of transmitting coils including searching windings.

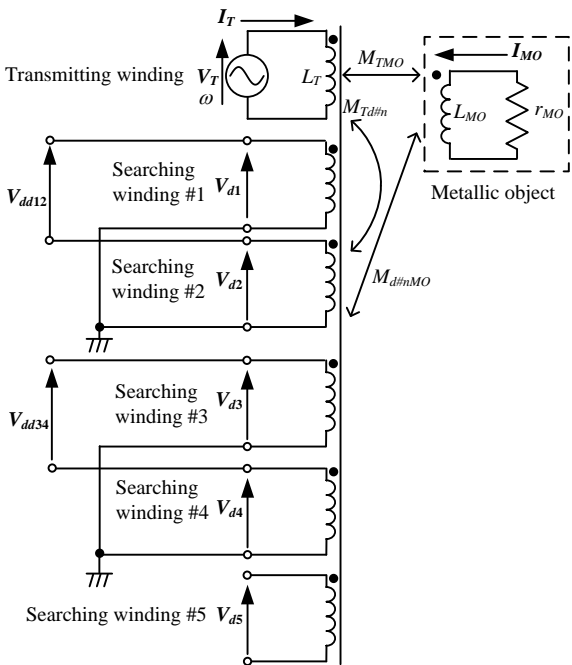


Fig. 2. Equivalent circuit of developed MOD system.

検出試験を実施し、誘起電圧のばらつきに起因する検出精度悪化の課題の提示と、補正方法について考察する。最後に、補正方法を適用した場合の有用性を確認し、検出コイル間の差動電圧実効値に対して 20.9mV のスレッシュド電圧を設けることにより、送電コイル上の 25 セントコインを検出可能であることを確認したため報告する。

## 2. 異物検出の原理

(2-1) モデル概要 図 1 に検出コイルを含めた送電側コイルモデルを示す。スパイラル状の送電側コイルの上に、デッドスペースを作らないよう異物検出用コイルが配置されている。送電コイル電流によって検出コイルに誘起される電圧の大きさから、金属異物の有無を判断する。図 1

に示された複数の矩形コイルを直列接続することで、検出コイル 1～検出コイル 5 としている。なお、検出コイルの結線は、図 1 中の矢の向きに相当しており、紙面に向かって奥から手前のとき誘起電圧は正、手前から奥のとき誘起電圧は負である。

提案法では、金属異物がない場合の検出コイルの誘起電圧が 0 になるよう、巻線配置および結線方法を工夫する。加えて、更なる検出精度向上のため、検出コイル 1 と検出コイル 2、検出コイル 3 と検出コイル 4 をそれぞれ対とし、各コイルの誘起電圧の差を取ることで検出精度を向上させる。図 1 のモデルの場合、送電側コイルに起因する磁束密度分布の対称性を利用し、フェライトコア右側と左側に結線方向が異なる検出コイルを対称に配置することで、誘起電圧をキャンセルしている。しかし、検出コイル 1 から検出コイル 4 だけでは、フェライトコア中央の金属異物を検出できない。そこで、中央に配置された検出コイル 5 の誘起電圧変動も観測することで、デッドゾーンをなくす。

(2-2) 等価回路と検出精度改善原理 図 2 に、金属異物の影響を考慮した、図 1 の等価回路を示す。検出コイルは全て開放状態とする。送電コイルと検出コイル、金属異物の多重磁気結合回路で表され、送電コイル電流  $I_T$  が流れているときの金属異物に流れる電流  $I_{MO}$  および各巻線の誘起電圧は、(1)式から(3)式で表される。

$$\dot{I}_{MO} = -\frac{j\omega M_{TMO}}{r_{MO} + j\omega L_{MO}} \dot{I}_T \dots\dots\dots(1)$$

$$\dot{V}_T = j\omega L_T \dot{I}_T + \frac{\omega^2 M_{d2MO} M_{TMO}}{r_{MO} + j\omega L_{MO}} \dot{I}_T \dots\dots\dots(2)$$

$$\dot{V}_{d\#n} = j\omega M_{Td\#n} \dot{I}_T + \frac{\omega^2 M_{d\#nMO} M_{TMO}}{r_{MO} + j\omega L_{MO}} \dot{I}_T \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $V_T$ 、 $V_{d\#n}$  はそれぞれ送電コイルと検出コイル #n ( $\#n = 1, 2, 3, 4, 5$ ) の誘起電圧である。また、 $L_T$ 、 $L_{MO}$  はそれぞれ送電側コイル、異物の等価的な自己インダクタンス、 $\omega$  は交流電流の角周波数、 $r_{MO}$  は異物の等価直列抵抗である。さらに、 $M_{Td\#n}$  は送電コイルと検出コイル #n 間の、 $M_{TMO}$  は送電コイルと金属異物間の、 $M_{d\#nMO}$  は検出コイル #n と金属異物間の相互インダクタンスをそれぞれあらわしている。

各巻線の誘起電圧は、送電コイルで生じた磁束に起因する誘起電圧と、 $I_{MO}$  によって打ち消された磁束に起因する電圧の差で表され、金属異物の影響で  $V_{d\#n}$  の大きさが変動する。アルミ缶や鉄板など大きなサイズの場合、打ち消す磁束の割合が大きいため、誘起電圧の低下を直接観測することで金属異物の検出が可能である。しかし、コインやクリップなどサイズが小さい金属異物では、打ち消す磁束の割合が小さい ( $M_{Td\#n} \gg M_{TMO}, M_{d\#nMO}$ )。すなわち、サイズの大きい送電コイルや検出コイルでは、誘起電圧の変化がパラメータ変動やノイズに埋もれてしまうため、検出精度が悪化する。そこで、以下の 2 つの精度改善手法を採用する<sup>(11)-(13)</sup>。

- 手法 1.  $M_{Td\#n} = 0$  ( $\#n = 5$  を除く)
  - 手法 2. 検出コイル間の差動電圧変動で判定
- まず、手法 1 の条件を(3)式に代入することで、 $V_{d\#n}$  は(4)

式で表される。

$$\dot{V}_{d\#n} \Big|_{M_{Td\#n}=0} = \frac{\omega^2 M_{d\#nMO} M_{TMO}}{r_{MO} + j\omega L_{MO}} \dot{I}_T \dots\dots\dots (4)$$

(3)式の右辺第一項が0になるため、検出コイルは金属異物がある場合のみ誘起電圧が生じるようになり、送電コイル電流による過大な誘起電圧を考慮する必要がなくなる。すなわち、金属異物に起因する電圧変動を基に検出回路を設計すればよいため、精度が改善する。サーキュラコイルのように面対称な磁束密度分布を持つコイル構造の場合、図1に示す通り面対称を崩さないように検出コイルを配置し、対称面の左右で誘起電圧の極性が逆になるよう配置すればよい。なお、検出コイル5は矩形コイル1個で構成されているため、例外的に  $M_{Td\#n} \neq 0$  である。

また、手法2を併用することで金属異物に起因する電圧変動幅を増加させ、検出精度の更なる改善が期待できる。検出コイル1と検出コイル2、および検出コイル3と検出コイル4の差動電圧  $V_{dd12}$  と  $V_{dd34}$  は、それぞれ(5)式と(6)式で表される。

$$\dot{V}_{dd12} = \dot{V}_{d1} \Big|_{M_{Td1}=0} - \dot{V}_{d2} \Big|_{M_{Td2}=0} = \frac{\omega^2 M_{TMO} (M_{d1MO} - M_{d2MO})}{r_{MO} + j\omega L_{MO}} \dot{I}_T \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{V}_{dd34} = \dot{V}_{d3} \Big|_{M_{Td3}=0} - \dot{V}_{d4} \Big|_{M_{Td4}=0} = \frac{\omega^2 M_{TMO} (M_{d3MO} - M_{d4MO})}{r_{MO} + j\omega L_{MO}} \dot{I}_T \dots\dots\dots (6)$$

(5)式より、 $V_{dd12}$  の大きさは、 $M_{d1MO}$  と  $M_{d2MO}$  の差に比例する。図1のような送電側コイル構造の場合、サイズの小さい異物は検出コイル1または検出コイル2どちらかの上に存在する確率が高いため、 $M_{d1MO}$  と  $M_{d2MO}$  の差が生じやすい。

図3に金属異物周辺の磁束に関するイメージ図を示す。金属異物中の渦電流（起磁力）によって生じた磁束は、金属異物に鎖交する磁束を打ち消す方向に生じる。一方、磁束に関するガウスの法則より、磁束線は連続でなければな

らないため、金属異物周囲に復路の磁路が生じ、金属異物周囲では局所的に磁束密度が大きくなる。その結果、図3中の検出コイル1では誘起電圧が減少するが、隣接する検出コイル2では復路の磁束によって誘起電圧が増加する。すなわち、検出コイル2と金属異物間の相互インダクタンスが負となる。

したがって、検出コイル間の差動電圧を検出することで、検出コイル1単体の場合よりも電圧の変動が大きくなり、サイズの小さい異物の検出精度を改善できる。これは、検出コイル3と検出コイル4についても同様である。

以上より、 $M_{Td\#n}$  のキャンセルと効果的な差動電圧検出を両立した結果、図1の送電側コイル構造となった。

### 3. 試作コイルと検出システム

〈3・1〉 試作コイルと検出異物 図4に試作コイルの3D CADモデルを、図5に3D CADモデルを基に作成した試作コイルと検出対象の金属異物として使用した25セントコインを示す。縦200mm、横280mm、厚さ17mmの板状のフェライトコア(PC40)を厚さ5mmの亚克力ケースに収め、その上に送電コイルと検出コイルを配置した。送電コイルは外径210mm、内径4mm、29巻のスパイラルコイルであり、フェライトコア中央に配置した。加えて、厚さ2mmの亚克力板表面に、エナメル線で作成した矩形コイルを25個配置し、図1を基に検出コイル毎に直列に結線した。なお、図5(a)のコア中央より左側の矩形コイルは誘起電圧が負、右

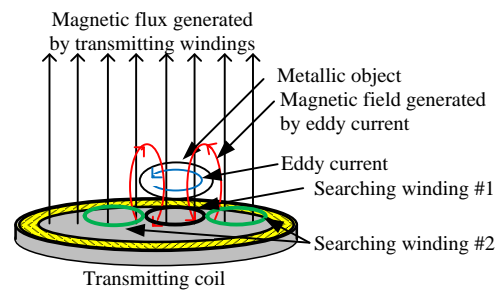
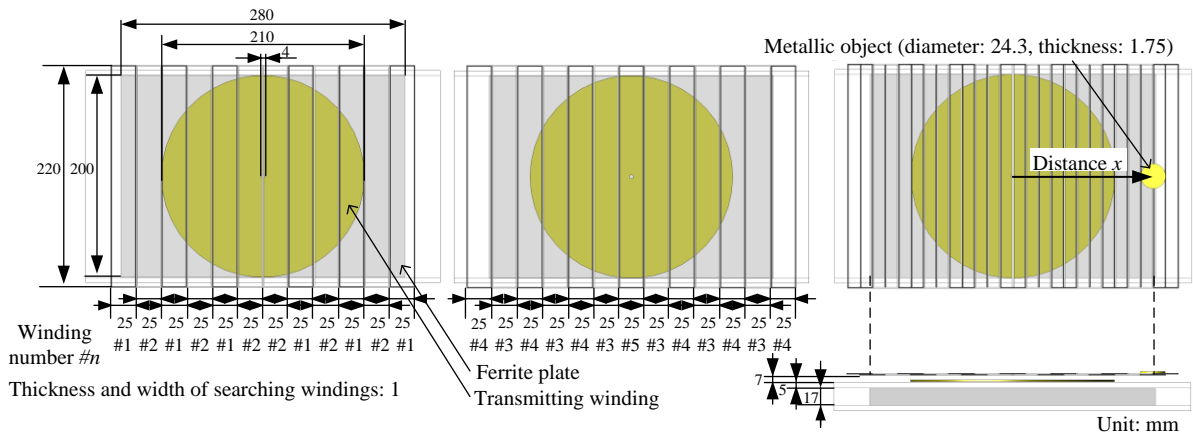


Fig. 3. Magnetic flux and searching windings above transmitting coils.



(a) Searching winding #1 and #2. (b) Searching winding #3, #4 and #5. (c) Top and side view.

Fig. 4. Size of transmitting coils with searching windings.

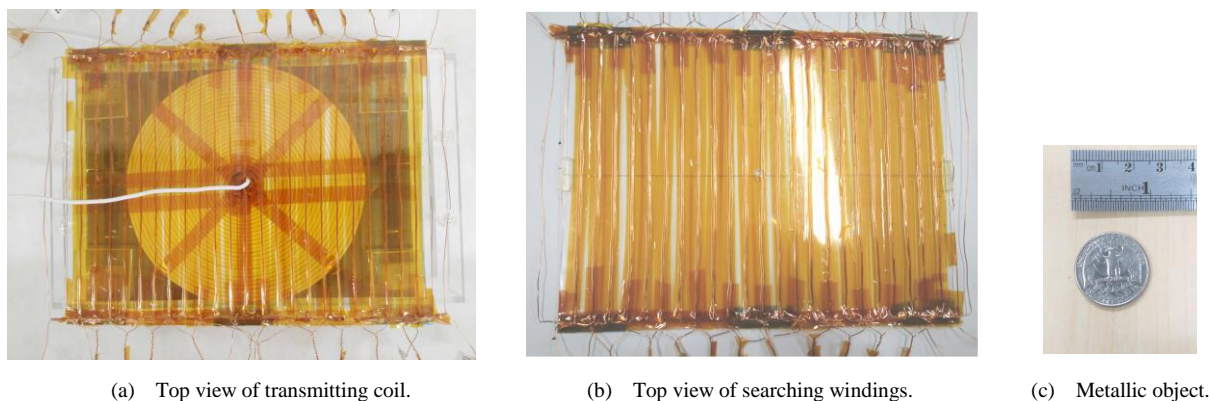


Fig. 5. Prototype of transmitting coil and metallic object.

側の矩形コイルは誘起電圧が正になるよう調整した。また、矩形コイルの幅 (25mm) は、検出精度向上の観点から、検出対象である 25 セントコインの直径 (24.3mm) を基に決定した。

#### 4. 実験結果

##### 〈4・1〉シミュレーションによる手法の有用性検証

3.2 節の手法の有用性を検証するため、金属異物の有無、および金属異物の配置を変更した時の検出コイル電圧特性を電磁界解析にて確認する。提案法による検出精度改善効果を示すため、 $M_{Td\#n} \neq 0$  における  $V_{d\#n}$  の実効値特性、および  $V_{d\#n}$  の変動から、検出コイルと 1 から検出コイル 4 の  $M_{Td\#n}$  を 0 にする重要性も検討する。電磁界解析には JMAG (JSOL) を用いた。 $I_r$  の大きさは 4Arms, 周波数  $f=85$  kHz とした。また、金属異物 (Metallic object) は、25 セントコインと同じ形状 (直径 24.3mm, 厚さ 1.75mm) の銅製の円柱とし、表皮効果を考慮して解析した。

はじめに、検出コイルの巻く向きを考慮せず、 $M_{Td\#n} \neq 0$  とした場合の問題点を明らかにする。一例として、検出コイルの誘起電圧が全て正になるよう、矩形コイル電流の向きを揃えた場合と、図 1 の結線を採用し  $M_{Td\#n}$  を 0 にした場合の影響をそれぞれ検証する。

図 6 と図 7 に、金属異物を送電側コイル中央から  $x$  mm 離れた場所に置いたときの  $V_{d\#n}$  の実効値特性を示す。図 6 は、検出コイルの誘起電圧が全て正になるよう電流の向きを揃えた場合の特性、図 7 は、図 1 の結線方法を採用した場合の特性である。グラフの最も右側のプロット点は、金属異物がない場合の電圧実効値を示している。図 7 では、電圧実効値の最大値を用いて金属異物の有無を判定するため、電圧実効値の最大値も黒丸と黒線で明示している。また、検出コイル 5 は構造上  $M_{Td5}$  を 0 にできないため、金属異物がない時の電圧実効値と金属異物があるときの電圧実効値の差  $V_{dd5}$  を基に判断する。

図 6 より、 $M_{Td\#n} \neq 0$  の場合、金属異物の有無にかかわらず数 Vrms の誘起電圧が生じており、金属異物の影響に起因する電圧変動は 100mVrms 前後であることが確認できる。し

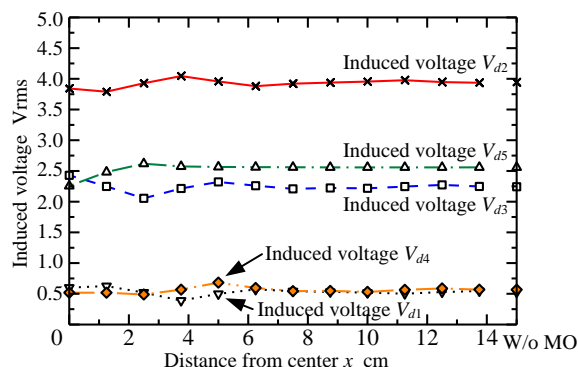


Fig. 6. Induced voltage of searching windings when all induced voltage of rectangular windings is positive.

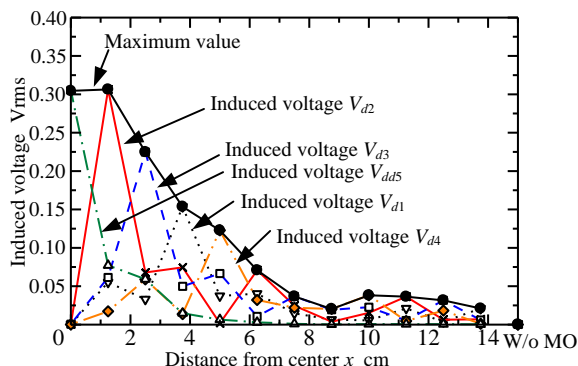


Fig. 7. Induced voltage of searching windings at  $M_{Td\#n} = 0$ .

たがって、誘起電圧の大きさに対して 10~100 分の 1 の電圧変動を検出しなければならず、パラメータ変動や検出ゲイン変動を加味すると実装が難しいと考えられる。

一方図 7 では、金属異物がない場合  $V_{d\#n}$  の電圧実効値は非常に小さい。加えて、金属異物に起因する誘起電圧変動が顕著に表れている。したがって、理論上検出コイルの誘起電圧の有無を検出するだけで、金属異物の有無が判別できる。

以上より、 $M_{Td\#n} = 0$  になるようコイルを実装することで、送電コイル電流に起因する大きな誘起電圧がキャンセルでき、検出精度向上が期待できる。しかし、金属異物の鎖交磁束減少に伴い、 $x$  が大きいほど  $V_{d\#n}$  の実効値が相対的に小

さくなる。そこで、更なる検出精度改善を目的として、差動電圧を用いる手法を導入する。

図 8 に、金属異物を送電側コイル中央から  $x$  mm 離れた場所に置いたときの、 $V_{d45}$  および、 $V_{d12}$  と  $V_{d34}$  の電圧実効値特性を示す。なお、グラフの最も右側のプロット点は、金属異物がない場合の電圧実効値を示している。送電コイル上面に金属異物がある場合、 $V_{d12}$  と  $V_{d34}$ 、 $V_{d45}$  の電圧実効値変動によって異物検出が可能である。さらに、図 6 と図 7 の電圧実効値の最大値特性に着目すると、差動電圧を判定基準に使うことで、全ての  $x$  で最大値が増加することが示された。

以上より、図 4 の 3D CAD モデルと同様に検出コイルを配置し、検出コイル間の差動電圧を測定することで、コインのような小さな金属異物を精度良く検出できることが確認された。

**〈4・2〉 試作コイルにおける異物検出動作** 図 2 の回路構成にて、図 5 の試作コイルを用いた際の 25 セントコインの検出試験を実施する。送電コイルに 85kHz、4Arms の正弦波電流を流して励磁し、25 セントコインの置き場所を変更した時の、 $V_{d12}$  と  $V_{d34}$ 、 $V_{d45}$  波形の観測と、 $V_{d12}$  と  $V_{d34}$ 、 $V_{d45}$  の電圧実効値の測定をおこなう。

図 9 に送電コイル電流  $i_L$ 、差動電圧  $v_{d12}$ 、 $v_{d34}$ 、検出コイル 5 の誘起電圧  $v_{d45}$  波形を示す。代表例として、金属異物がない場合と、25 セントコインが  $x = 5$ cm の位置に置かれた場合の波形をそれぞれ示している。25 セントコインの有無によって差動電圧  $v_{d34}$  の波形が変化している。したがって、提案した検出コイル構成により、金属異物が誘起電圧へ与える影響を大きくできることが確認できる。しかし、図 9(a) より、金属異物がない場合でも  $v_{d12}$ 、 $v_{d34}$  の実効値が 0 になっていない。

図 10 に、金属異物がない場合、および 25 セントコインが送電側コイル中央から  $x$  cm 離れた場所に置かれたときの、 $V_{d45}$  と  $V_{d12}$ 、 $V_{d34}$  の電圧実効値特性を示す。 $V_{d45}$  と  $V_{d34}$  の実効値は、 $x$  が増加する (25 セントコインが送電側コイル中央から離れる) ほど小さくなる一方、 $V_{d12}$  の実効値は増加し、金属異物がない場合でも 0.359V 誘起される結果になった。一方、 $V_{d34}$  の実効値も 0.071V を中心に振動的となり、金属異物がない場合でも誘起電圧が検出コイルに生じている。

以上より、各検出コイルの  $V_{d\#n}$  から直接  $V_{d12}$  と  $V_{d34}$  を計算し、電圧変動を観測するだけでは金属異物の有無の判定が困難であるといえる。次節では、金属異物がない場合に生じる電圧実効値の原因、および補正方法について考察する。

**〈4・3〉 差動電圧補正方法** 2.2 節の(3)式にて、 $V_{d\#n}$  は送電コイルで生じた磁束と  $I_{MO}$  によって打ち消された磁束に起因する誘起電圧の差で表現されることが分かっている。また、2.2 節以降は検出精度改善の観点から、 $\#n = 5$  以外  $M_{T\#n} = 0$  の前提で解析、設計をおこなった。しかし、実際の伝送コイルでは、コイルの位置ずれや構造体の寸法誤差、

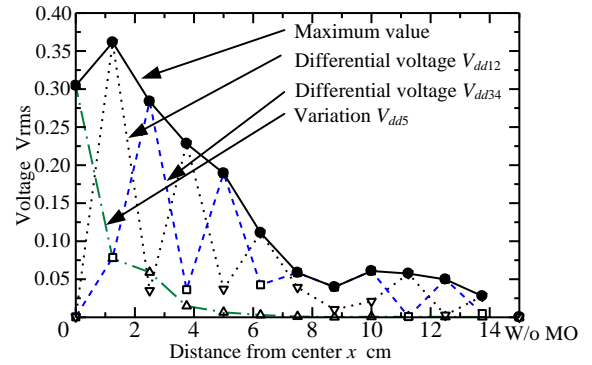


Fig. 8. Variation of induced and differential voltage with simulation.

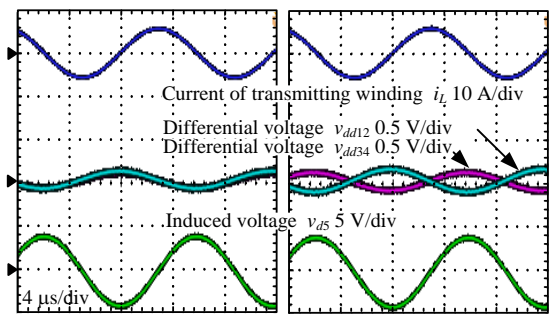


Fig. 9. Operation waveforms.

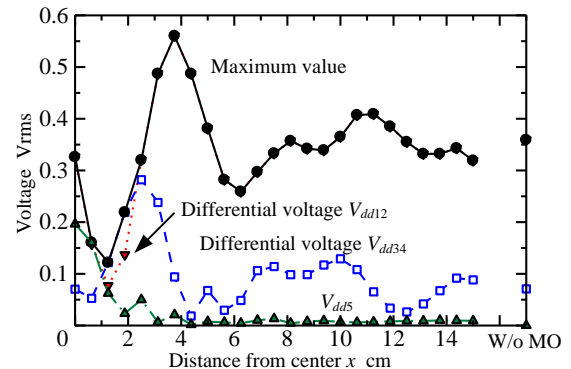


Fig. 10. Variation of induced and differential voltage without correction of mutual inductance.

局所的な磁気飽和などの影響で磁束密度分布を完全な面対称にできない。言い換えれば、図 5 の試作コイルでは、 $V_{d\#n}$  における  $M_{T\#n}$  の影響を  $M_{d\#nMO}$  と同程度までしか抑制できないため、追加の補償が必要である。

そこで、 $M_{T\#n}$  の影響について考察する。 $M_{T\#n} \neq 0$  としたときの検出コイル 1 と検出コイル 2、および検出コイル 3 と検出コイル 4 の差動電圧  $V_{d12}'$ 、 $V_{d34}'$  は、それぞれ(7)式と(8)式で表される。

$$\dot{V}_{d12}' = j\omega(M_{Td1} - M_{Td2})\dot{I}_T + \frac{\omega^2 M_{TMO}(M_{d1MO} - M_{d2MO})}{r_{MO} + j\omega L_{MO}}\dot{I}_T \quad (7)$$

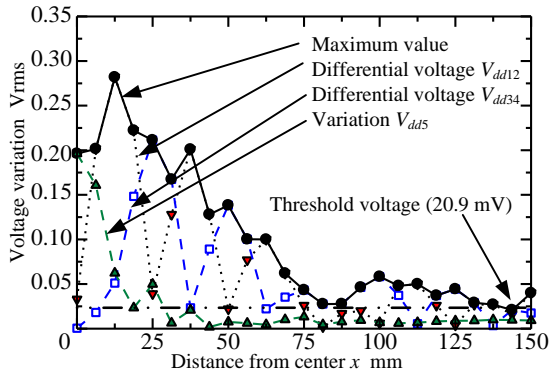


Fig. 11. Variation of induced and differential voltage with correction of mutual inductance.

$$\dot{V}_{dd34}' = j\omega(M_{Td3} - M_{Td4})\dot{I}_T + \frac{\omega^2 M_{TMO}(M_{d3MO} - M_{d4MO})}{r_{MO} + j\omega L_{MO}} \dot{I}_T \quad (8)$$

右辺第1項より、 $M_{Tdn}$ に比例した誘起電圧が金属異物の有無に関係なく生じる。相互インダクタンスは一般的に、2巻線間の物理的な位置関係や巻線周囲の磁性材料の特性で決まる。つまり、送電側コイル構造が変わらない限り、常に同じ大きさと位相になる。したがって、金属異物がない場合の $V_{dd12}'$ と $V_{dd34}'$ を予め測定しておき、異物検出動作時に得られた $V_{dd12}$ と $V_{dd34}$ から $V_{dd12}'$ と $V_{dd34}'$ をそれぞれ引けば、金属異物に起因する誘起電圧変動情報のみ得られる。

〈4・4〉差動電圧補正を考慮した実験結果 図11に $V_{dd12}$ と $V_{dd34}$ の値を金属異物がない場合の電圧で補正した場合の、 $x$ に対する差動電圧特性を示す。本来は電圧検出回路のゲインを調節することで補正をおこなうが、簡単化のため、図10から金属異物がない場合の差動電圧実効値を、図9(a)および金属異物有の動作波形から電圧位相情報をそれぞれ読み取り、(7)式と(8)式に適用した。なお、補償方法を含めた提案法の妥当性を評価するため、 $V_{dd5}$ の実効値と電圧実効値最大値も併せて示す。

$V_{dd12}$ と $V_{dd34}$ の値を補正した結果、電圧変動が0.3V以下に収まり、図8と電圧最大値の傾向が一致した。特に、送電側コイル中心付近( $x < 75$  mm)における $V_{dd12}$ と $V_{dd34}$ の変動は、図8のシミュレーション結果とも傾向が一致した。図11の最大電圧値の最小値より、金属異物の有無を判定するスレッシュホールド電圧を20.9mVrmsに設計すれば、送電コイル上の25セントコインを検出することができる。以上のことから、補償方法の有用性を確認した。

## 5. おわりに

本論文では、異物検出回路の簡単化とコスト削減を目的に、5巻線構成の検出コイルを用いた金属異物検出システムを提案した。送電側コイルに起因する誘起電圧が0になるよう検出コイルを配置する手法と、2個の検出コイル間の差動電圧で金属異物の有無を検出する手法を組み合わせる方

法を提案し、検出精度改善を達成した。本提案法のメリットは、検出回路が5個あれば、送電側コイルの大きさに関係なく、小さい金属異物を検出できる点である。

電磁界解析を用いた金属異物検出のシミュレーションをおこない、最大0.361Vrmsの差動電圧実効値の変動によって25セントコインを検出可能であることを確認した。さらに、実機試験を通して、送電コイルと検出コイル間の相互インダクタンスの影響を補正すれば、精度よく金属異物を検出できることを確認した。特に、差動電圧のスレッシュホールド電圧を20.9mVrmsに設計すれば、送電コイル上の25セントコインを検出できることを示した。

今後は、補正方法の更なる検討と、電力伝送中の異物検出動作および検出時の電力伝送停止シーケンスの実装を予定している。

## 文 献

- (1) 一般社団法人日本自動車工業会, 一般社団法人日本自動車車体工業会: 「自動車製造業における地球温暖化対策の取り組み」、産構審自動車WG資料, (2018)
- (2) D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi and P. T. Balsara, "Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges", IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 4, No. 1, pp. 3-37, (2018)
- (3) K. Kusaka and J. Itoh: "Development Trends of Inductive Power Transfer Systems Utilizing Electromagnetic Induction with Focus on Transmission Frequency and Transmission Power", IEEE Journal of Industry Applications, Vol. 137, No. 5, pp. 328-339 (2017)
- (4) 橋本 俊哉: 「非接触充電における金属異物の発熱量の最大値に関する研究」、自動車技術会論文集, Vol. 50, No. 2, pp. 359-364 (2019)
- (5) Y. Zhang, Z. Yan, J. Zhu, S. Li and C. Mi: "A review of foreign object detection (FOD) for inductive power transfer systems", IEEE Access, pp. 1-10 (2019)
- (6) J. Jeong, S. Ryu, B. Lee and H. Kim: "Tech tree study on foreign object detection technology in wireless charging system for electric vehicles", 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference, pp. 1-4 (2015)
- (7) T. Sonnenberg, A. Stevens, A. Dayerizadeh, and S. Lukic: "Combined Foreign Object Detection and Live Object Protection in Wireless Power Transfer Systems via Real-Time Thermal Camera Analysis", The Applied Power Electronics Conference and Exposition 2019, pp. 1547-1552 (2019)
- (8) 駒崎 伸也, 金子 裕良, 阿部 茂, 保田 富夫, 鈴木 明: 「電気自動車用非接触給電装置のギャップ中の異物検知法」、平成24年電気学会産業応用部門大会, No. 4, pp. 115-120 (2012)
- (9) Roy AM, Katz N, Atnafu NE. Foreign object detection in wireless energy transfer systems. Nov. 12, 2015. U.S. Patent 2015/0323694 A1.
- (10) S. Y. Jeong, V. X. Thai, J. H. Park and C. T. Rim: "Self-Inductance-Based Metal Object Detection With Mistuned Resonant Circuits and Nullifying Induced Voltage for Wireless EV Chargers", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 1, pp. 748-758 (2019)
- (11) B. Zhou, Z. Z. Liu, H. X. Chen, H. Zeng and T. Hei: "A new metal detection method based on balanced coil for mobile phone wireless charging system", 2016 International Conference on New Energy and Future Energy System, pp. 1-10 (2016)
- (12) L. Xiang, Z. Zhu, J. Tian and Y. Tian: "Foreign Object Detection in a Wireless Power Transfer System Using Symmetrical Coil Sets", IEEE Access, Vol. 7, pp. 44622-44631 (2019)
- (13) S. Y. Jeong, H. G. Kwak, G. C. Jang, S. Y. Choi, and C. T. Rim: "Dual-Purpose Nonoverlapping Coil Sets as Metal Object and Vehicle Position Detections for Wireless Stationary EV Chargers", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 9, pp. 7387-7397 (2018)