

磁場共振結合を用いた金属閉空間内への無線電力伝送

山川 将人[†] 水野 嘉祐[‡] 石田 隼[†] 小泉 宏之[†] 小紫 公也[‡]

[†] 東京大学工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

[‡] 東京大学新領域創成科学研究科 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

E-mail: [†] m.yamakawa@al.t.u-tokyo.ac.jp, [‡] yosu.mizuno@gmail.com

あらまし 金属配管内・金属パイプ内などのセンサ、もしくは周囲に金属がある環境で電気機器にワイヤレスに高効率で電力を供給する手段として、共振周波数が 50Hz の磁場共振結合を利用した無線電力伝送システムを提案し、デモンストレーションを行った。デモでは 1~10 mm のステンレスの壁を挟んで、3 W の LED 照明を伝送距離 12 cm、伝送効率約 40% で点灯させ、磁場共振結合伝送方式の新たな応用の可能性を示した。

キーワード 無線電力伝送, 磁場共振結合, 金属配管, 50Hz 交流

1. はじめに

1.1. 金属閉空間内への無線電力伝送

世界各国で、老朽化したインフラ設備による事故が問題となっており、これらのインフラ設備の点検の自動化・コスト低減に、ワイヤレス技術を応用することが検討されている。電力供給の観点では、黒田ら[1]が電磁誘導の応用例の一つとして発電所の配管内の検査ロボットへの無線電力伝送を提案している。そこで本論文では、金属配管内センサ・デバイスへの無線給電などを想定して、図 1 に示すような金属閉空間内への磁場共振結合方式を利用した無線電力伝送について述べる。

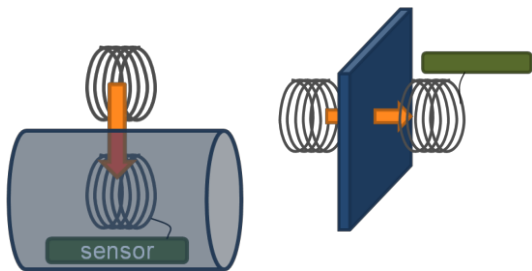


図 1 アプリケーションイメージ

1.2. 磁場共振結合

磁場共振結合は、送受電コイル間の距離が離れていて相互結合が弱くても、補償コンデンサを付加して共振回路を形成し、共振回路内で電力を保存することで、高効率の伝送効率と電力効率を得られる無線電力伝送の一つの方式である。伝送効率は結合係数 k と共振器 Q 値の積に依存する。 Q 値は共振器に保存されるエネルギーとジュール損等の損失との比を表しており、共振周波数に比例する。そのため、磁場共振結合方式では通常、数百 kHz や MHz とした周波数の交流電流を用いて数百程度の Q 値を得ることが多い。 $kQ=10$ で

得られる最大の伝送効率は約 80% となる。結合係数 k はコイル間の距離の他、配置、幾何形状によって決まる。用途によってコイルの大きさ、重量の制約がある。

2. 金属による磁場の遮蔽

共振周波数と電源の周波数が高くなると、金属に誘導される渦電流は大きくなる。すなわち、図 2 のような電力伝送は、管に流れる周方向の誘導電流によって、反磁場が生じてコイルの磁場を遮蔽し、コイル間の結合が打ち消されて行ってしまうことができない。

ただし、金属管に軸方向のスリット（周方向に絶縁されている状態）があると、スリット上に流れる軸方向電流によって、管が中継コイルの役割を果たし、金属管を介して電力伝送を行うことができる[2]。これはスリットがある場合は有効だが、スリットがない場合でも電力伝送ができると、より応用範囲の拡大が期待できる。

そこで本研究では、共振周波数を 50Hz に下げた磁場の金属への浸透深さを大きくすることで、金属閉空間内への無線電力伝送を試みた。Zangl らの研究[3]では、50Hz の電磁誘導で金属管内への情報伝達と無線伝送を試みているが、伝送効率には着目していない。本研究では共振を用いることで高効率での金属管内への伝送を試みた。

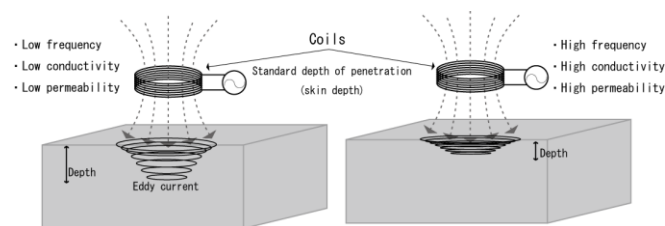


図 2 交流周波数と金属への磁場浸透深さ

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

3. 共振周波数 50Hz の共振器

3.1 共振器製作

図3のような共振周波数 50Hz の共振器を製作した。電磁鋼板をコアとし、長いソレノイドコイルにすると、空芯時に比べて数十倍のインダクタンスを得られるので、50Hz という低い周波数ながらも数十のオーダーの Q 値を得た。表 1 に諸元を示す。菊水電子の交流電源 PCR500LE を用いてコイルの巻き数を調節することで、共振周波数を 50.0Hz に合わせた。

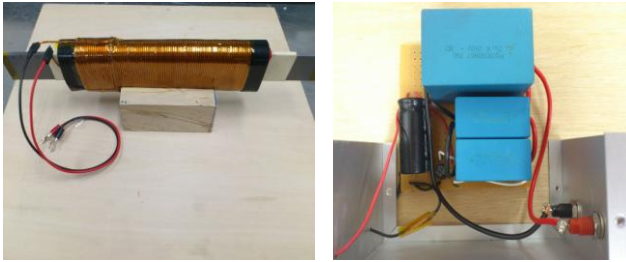


図 3 受電側共振器 (左:コイル,右:コンデンサ)

表 1 共振器諸元

	受電側	送電側
共振周波数[Hz]	50.0	50.0
インダクタンス[mH]	89.0	71.4
キャパシタンス[μ F]	114	144
コイル巻き数	595	540
	(96 \times 6層+19)	(106 \times 5層+10)
銅線	PEW ϕ 2.0	
コアサイズ[mm]	400 \times 40 \times 5	400 \times 40 \times 7
コイルサイズ[mm]	211 \times 67 \times 30	234 \times 63 \times 31
コイル質量[kg]	3	3
コンデンサ	EPCOS フィルムコンデンサ V _{ac} =250V	

製作した共振器を用いて共振器 Q 値と結合係数 k を測定した。Q 値を表 2 に示す。見積り値は、損失の主な原因となる巻き線抵抗による損失とコア損失から求めた。測定値との差異は、コアによる損失が、見積りではコア内の磁束密度を一定として見積もっていたのに対し、実際は図 5 のように分布を持つ(特にコイルから出ている部分は低い)ことにより、違いが出たためと考えられる。

表 2 共振器 Q 値

	受電側	送電側
Q 値(測定値)	35 \pm 1	28 \pm 1
Q 値(見積り値)	25	21

結合係数 k の測定結果を図 4 に示す。コイルは平行に配置して、コイル間の距離を変えて測定した。距離 125mm で $k=0.08$ であった。

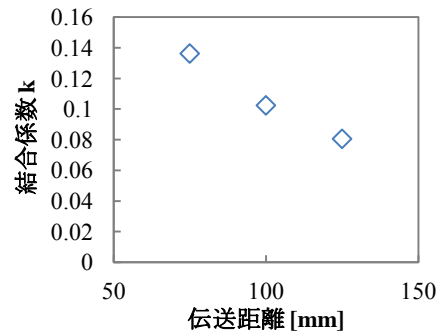


図 4 結合係数 k の測定結果

3.2 共振器 Q 値とコアの磁束飽和の関係

コアの断面積を小さくし、コイルの軸方向に長くすると大きな Q 値が得られる。反面、コアの磁束飽和密度(方向性電磁鋼板の場合 1.9T)を越えないようにするため、コイルに流せる電流は少なくなり、伝送電力が制限される。今回はより大きな電流の流れる送電側はコアの厚さを 7mm、受電側は 5mm として製作した。表 3 にそれぞれの許容電流値を示す。許容電流値は、飽和に近付きインダクタンスが減少して、共振周波数が 1%ずれる値としている。図 5 に商用電磁界シミュレータ Femtet[®]を用いたコア内の磁束密度分布計算結果を示す。

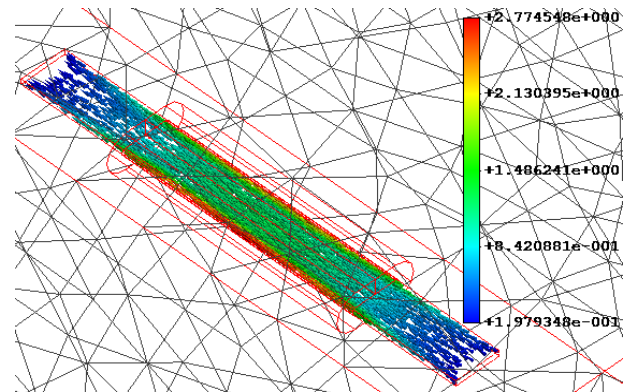


図 5 コア内磁束密度計算結果
(受電側コイル,電流 1.8A,単位[T])

表 2 共振器 Q 値

	受電側	送電側
許容電流値(測定値)[A]	1.7	2.2

3.3 共振回路構成

共振回路の構成は図 6 のような、送電側直列共振、受電側並列共振を用いた。比較的消費電力の小さいセ

ンサ類を想定した場合、負荷抵抗は大きいので、伝送効率が最大を取れる負荷抵抗値が大きくなる、並列共振を受電側に用いた。また並列共振の場合、負荷端に掛かる電圧が大きくなるので、ダイオードを用いて整流を行う場合、ダイオードの電圧降下による損失が小さくなる。この回路の共振時の伝送効率 η_{tran} は式(1)で表せる。 Q_t は送電側共振器Q値、 Q_r は受電側共振器Q値、 r_r は負荷抵抗 Z_{old} と受電側共振器内抵抗 R_r との比(インピーダンス比: $r_r=Z_{old}/R_r$)である。図7に直列/直列と直列/並列の場合のインピーダンス比と伝送効率の関係を示す。

$$\eta_{tran} = \frac{k^2 Q_t Q_r r_r}{2 + \frac{2}{r_r} + \frac{r_r}{Q_r^2} + \frac{(1+Q_r^2)r_r}{r_r^2 + Q_r^2} + k^2 Q_t Q_r \left(1 + \frac{1}{r_r} + \frac{r_r}{Q_r^2}\right)} \quad (1)$$

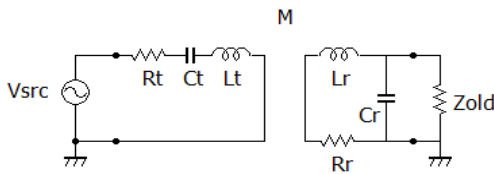


図6 共振回路構成

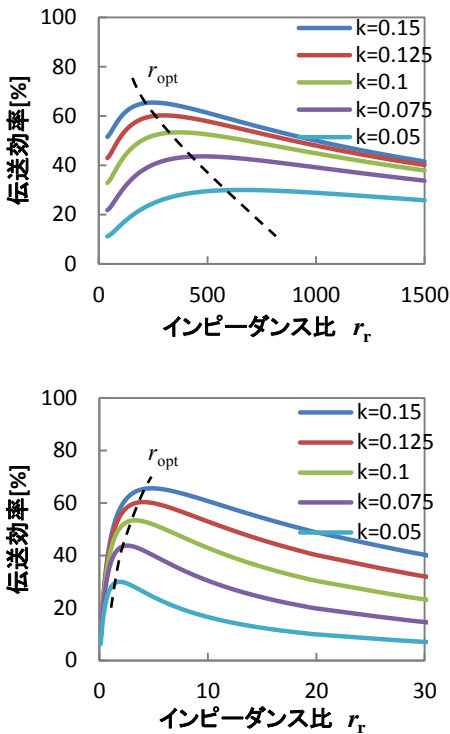


図7 インピーダンス比と伝送効率. 上:直列/並列,下:直列/直列, r_{opt} は最適インピーダンス比)

4. 金属閉空間内への無線電力伝送デモ

製作した共振器を用いて、図8のような金属閉空間内への無線電力伝送デモンストレーションを行った。

左は1mm厚のSUS304の板で箱状の金属閉空間を模擬し、伝送距離120mm、電力効率43%、負荷消費電力3W(インピーダンス比260)の伝送を行っている。右は5mm厚のSUS304Lの金属管を使用して、伝送距離100mm、電力効率10%、負荷消費電力1.2W(インピーダンス比470)の伝送を行っている。

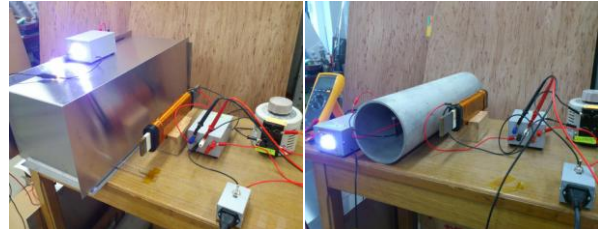


図8 デモンストレーション写真

50Hz 商用電源を変圧するだけで使うことも想定できる。デモでは、変圧用に単相単巻き変圧器、整流用にブリッジダイオード、平滑コンデンサ、負荷にLEDを用いた。

伝送距離と効率との関係を測定した結果を図9に示す。測定 kQ 値から式(1)の理論式を用いて求めた推定値と、実験の測定値はよく一致した。また図10,11に示すように、壁に平行な面の位置ずれは、±50mm程度では効率は2%以下の低下に収まるという実験結果を得た。1mm厚のSUS板を複数重ねて厚さを変えた実験では、数mm程度の厚さでは、厚さに比例して、徐々に効率が低下していく結果を得た(図12)。

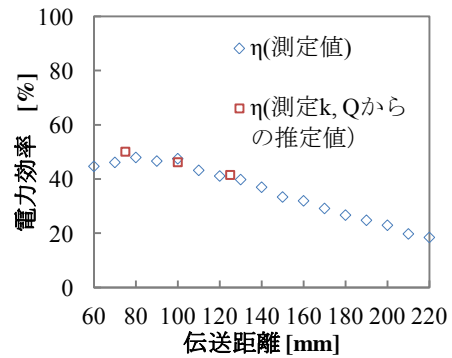


図9 伝送距離と電力効率との関係

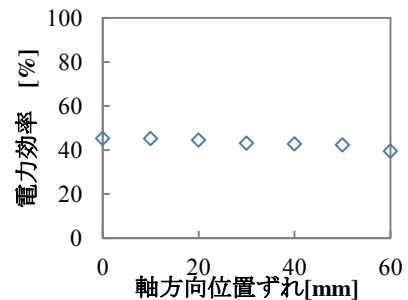


図10 軸方向位置ずれと電力効率との関係

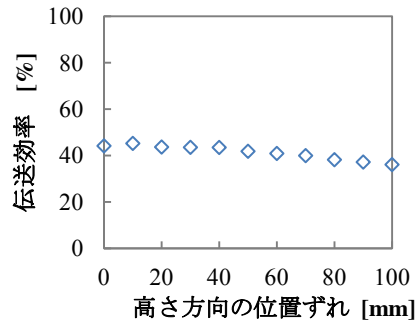


図 11 高さ方向位置ずれと電力効率との関係

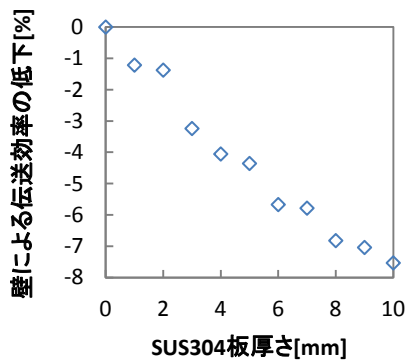


図 12 壁厚さと電力効率との関係

5. 結論

- 磁場共振結合を用いた金属閉空間内への無線電力伝送は、共振周波数を 50Hz とすると、数 mm の SUS304 の板、あるいは管を通して電力伝送を行うことができる。デモでは伝送電力:3W, 伝送距離:120mm, 伝送効率: 43% (壁:SUS304, 厚さ1mm) という実験結果を得た。
- 50Hz の共振周波数での伝送における伝送電力の上限は、コアを用いた場合、コアの飽和磁束密度に依存するコイル許容電流によって決まってくるのが分かった。

文 献

- [1] 黒田忠, "4.高性能・超低電力短距離ワイヤレス可動情報システムの創出(未来を切り拓く最先端 VLSI テクノロジー)," 情報処理, Vol. 51, No. 7, pp. 861-869, 2010.
- [2] 水野嘉祐, 小泉正剛, 小紫公也, 荒川義博, "金属に囲まれた空間内における共鳴エネルギー伝送", 無線電力伝送時限研究会, WPT2011-02(2011-07)
- [3] H. Zangl, A. Fuchs, T. Bretterkieber, "Wireless communication and power supply strategy for sensor applications within closed metal walls," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, Vol. 59, No. 6, pp. 1686-1692, 2010.