

飛翔体への無線電力伝送に使用する インピーダンスマッチングシステムに関する研究

石田 隼[†] 小泉 正剛[‡] 水野 嘉祐[‡] 小紫 公也[‡] 荒川 義博[†]

[†] 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 〒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先端エネルギー工学専攻 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

E-mail: [†] j.ishida@al.t.u-tokyo.ac.jp, [‡] komurasaki@al.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 現在注目されている磁気共振を用いた無線電力伝送のアプリケーションとして、小型電動ヘリコプターへの無線電力伝送アプリケーションを考える。このアプリケーションにおいて、ヘリコプターに搭載する受電システムは軽量、高効率化を追求し、重さを 10g 以下、電力は 9W の送電を目標にしている。また、3次元空間を移動する物体へ高効率で定常的に電力を供給するためにはインピーダンスマッチングが非常に重要となるため、送電システムには自動インピーダンスマッチング機構を導入することにより高い電力伝送効率を実現する。本研究ではデモに用いるインピーダンスマッチングの有効性を実証し、自動マッチングシステムの提案を行なった。

キーワード 無線電力伝送, 磁気共振, インピーダンスマッチング

Research about Impedance Matching Using for Wireless Power Transmission for a Flying Object

Jun ISHIDA[†] Masayoshi KOIZUMI[‡] Yoshihiro MIZUNO[‡] Kimiya KOMURASAKI[‡]
and Yoshihiro ARAKAWA[†]

[†] Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656

[‡] Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8561

E-mail: [†] j.ishida@al.t.u-tokyo.ac.jp, [‡] komurasaki@al.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract Wireless power transmission (WPT) from a transmitter resonator on the ground to an electric-powered toy helicopter was challenged as an application of WPT with magnetic resonance. In this case, power receiving system is required to weigh lower than 10 g. Because impedance matching is very important for effective power transmission to an object moving in 3D space, the impedance matching on the transmitter side is examined. The relationship between the efficiency and the altitude was shown for the case with impedance matching on the transmitter side or not. The result indicates that this one-side impedance matching is effective and an idea of automatic impedance matching system is proposed.

Keyword Wireless Power Transmission, Magnetic Resonance, impedance matching

1. まえがき

磁気共振を用いた無線電力伝送は、2つの共振するコイル間でエネルギーがやり取りされるという現象を用いた技術で、共振に使うコイル径の数倍の距離をマイクロ波伝送などの他の伝送方法に比べて格段に高い伝送効率で電力を伝送出来ることが挙げられるという特徴を持つ[1][2]。

この技術の利用形態の一つに室内でのモバイル機器への無線電力伝送が考えられる。本研究では図1左に示すようなモバイル機器の無線電力伝送モデルとして、小型ヘリコプターへの無線電力伝送システムの開

発を行なっている。モバイル機器への無線電力伝送システムを開発する上で検討しなければいけない課題は3点存在する。

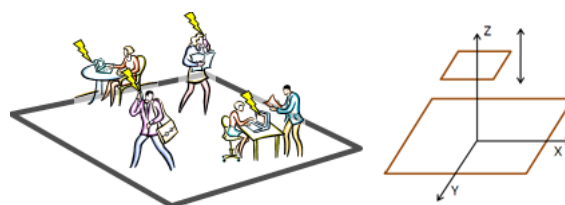


図1 モバイル機器への無線電力伝送とモデル
一点目はヘリコプターに搭載する受電システムの

軽量・コンパクト化である。本研究では単巻ループ共振器を用いて高Q値を保ったまま共振器の軽量化取り組んだ。二点目は送受電共振器サイズの非対称性が伝送効率に与える影響である。本研究では非対称共振器を用いた際の電力伝送効率の理論値と実験値の比較を行ない、理論値の妥当性を検証した。三点目は送受電共振器の位置関係が変化した場合のインピーダンスマッチングの方法である。本研究では送電側のみで伝送距離に応じて自動でインピーダンスマッチングを行うシステムの提案を行なった。また電源の反射電力の制限や共振器に用いたコンデンサの耐熱性などから送電用共振器に投入できる電力の制限がこのデモでは重要になってくるので、受電システムの重さあたりの伝送電力[W/g]を評価基準として考える。本研究ではヘリコプターの特性から 1.1W/g を目標として定めている。

2. 伝送効率とインピーダンスマッチング

磁気共振に関する理論はキルヒホッフの法則より導かれる。図2に示すように磁気共振による無線電力伝送は電源、送受電用共振器、トランスコイル(励起コイル、ピックアップコイル)、負荷からなり、直列RLC共振回路を用いて表すことができ、等価回路を解くことで、送受電間の効率に関する関係式(1)を導出することができる。またインピーダンスマッチングを送電側だけ行った場合の伝送効率 η_{one} 、送受電側の両方でインピーダンスマッチングを行った際の伝送効率 η_{both} の理論式は式(2)(3)のように表される[3][4]。

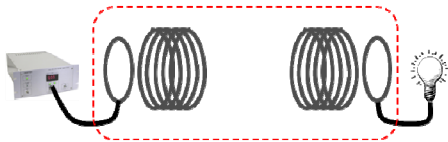


図2 入出力トランスを用いた無線電力伝送システム

$$\eta = \frac{4k^2 r_s r_D}{Q_S Q_D} \frac{1}{\left[k^2 - 4 \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2 + \frac{1+r_s}{Q_S} \frac{1+r_D}{Q_D} \right]^2 + 4 \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2 \left(\frac{1+r_s}{Q_S} + \frac{1+r_D}{Q_D} \right)^2} \quad (1)$$

$$\eta_{both} = \frac{k^2 Q_S Q_D}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_S Q_D})^2} \quad (2)$$

$$\eta_{one} = \frac{r_D k^2 Q_S Q_D}{(1 + r_D) (1 + r_D + k^2 Q_S Q_D)} \quad (3)$$

式中の無次元数は、共振器のQ値 (Q_S , Q_D)、共振器間結合係数 k 、インピーダンス比 r ($r_s = Z_0/R_S$, $r_D = Z_0/R_D$) である(添え字 S は送電, D は受電側)。効率が最大となるのは $\omega = \omega_0$, $r_s = r_D = \sqrt{1 + k^2 Q_S Q_D}$ のときで、こ

のときの効率は式(2)で与えられる。

本研究ではヘリコプターに搭載する受電システムを軽量でコンパクトに抑えるために、送電側のみインピーダンスマッチングを行う。インピーダンスマッチングはインピーダンス比 r を調整することにより行う。

ヘリコプターを飛行させるためには約 10W の電力をヘリコプターに供給する必要がある。このために必要な投入電力を式(1),(2),(3)の理論効率より算出した。グラフより、送電側のみインピーダンスマッチングでも大幅な伝送効率改善が見込め、投入電力を大幅に減らすことが可能である。

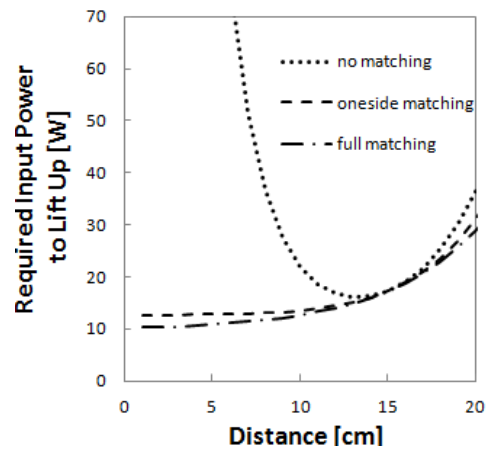


図3 インピーダンスマッチングの有無による、ヘリコプター飛行のための必要投入電力(送受電コイルは $Q=200$ とする)

3. デモンストレーション用共振器

高い伝送効率を得るためには式(1)で示したように高Q値の共振器が必要である。さらにヘリコプターに搭載し自立飛行させるためには受信用共振器は高Q値かつ 10 g 以下で 10 cm 四方程度に抑える必要がある。本研究ではコイルサイズを抑えるために比較的周波数の高い 40.68 MHz を用い、また受電用共振器には軽量化を考え中空の単巻ループコイルにマイカコンデンサを取り付けたものを使用した。

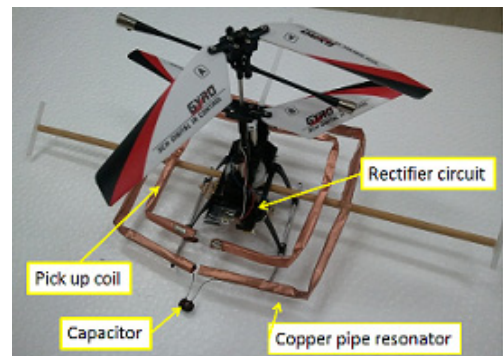


図4 ヘリコプターと共振器、ピックアップコイル、整流回路

送電用共振器については重量やサイズの制約は存在しない。そこで一般的にもよく用いられているスパイラルコイルなどの高Q値が期待できる送電用共振器を用いることも検討したが、本研究では他の研究と異なり高い周波数での無線電力伝送を考えていたため、スパイラルコイルの銅線長では放射損が大きくなった。また、銅線を覆う絶縁体による誘電損失も大きくなり、Q値が低くなるという結果に終わった。表1に詳細を示す。

表1 単巻ループコイルとスパイラルコイル比較

	単巻	スパイラル
辺長 [mm]	201	200
放射損 (理論) [Ω]	1.72E-02	0.70
オーム損 (理論) [Ω]	0.14	0.30
誘電損失 (測定) [Ω]	1.2	0.69
Q 値 (実測値)	183	147

結果として送電用共振器も受電用共振器と同じく単巻ループ共振器を用いることが、本研究条件下では最適であるため、送電用共振器にも単巻ループ共振器を用いている。単巻ループではマイカコンデンサに流れ込む電流の大きさや長時間作動による発熱によりデモンストレーション中にコンデンサの特性が変わってしまい、共振周波数が変化してしまうことがあるため、コンデンサを並列にとりつけ、コンデンサの発熱を抑えられるよう工夫している。ここでは 22pF、誘電損失 $R_{c1}=1.2\Omega$ のコンデンサを 10.4pF、2.2 Ω のコンデンサを並列に 2 つつなぎ替えることで、誘電損失を $R_{c2}=1.1\Omega$ に減らした。

結果として同じ電力を投入した際のコンデンサ一つあたりの発熱量は $((R_{c2}/R_{all})/(R_{c1}/R_{all}))*1/2=53.8\%$ と減少し、従来の倍近くの電力を送電用共振器に投入出来るようになった。

表1に送受電用共振器の詳細を示す。

表2 共振器の性能

	送電	受電
辺長 [mm]	201	113
放射損 (理論) [Ω]	1.72E-02	1.72E-03
オーム損 (理論) [Ω]	0.14	0.078
誘電損失 (測定) [Ω]	1.1	0.27
Q 値 (計算)	155	250
Q 値 (実測値)	183	277
重さ [g]	-	3.77

4 インピーダンスマッチングの効果

先に述べたように送信側のインピーダンス比は図4の

ように励起コイルと共振コイルの相対位置を変えることで、インピーダンス比を調整することができる。

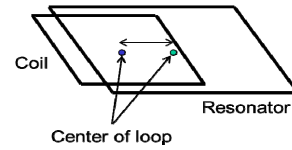


図5 励起コイルをスライドさせることによるインピーダンスマッチング

図5は伝送距離と理想的な共振コイルと励起コイルの中心間距離を示したものである。このグラフによると伝送距離が短い場合は2つのコイルの中心間距離が短いときにインピーダンスマッチングされることがわかる。

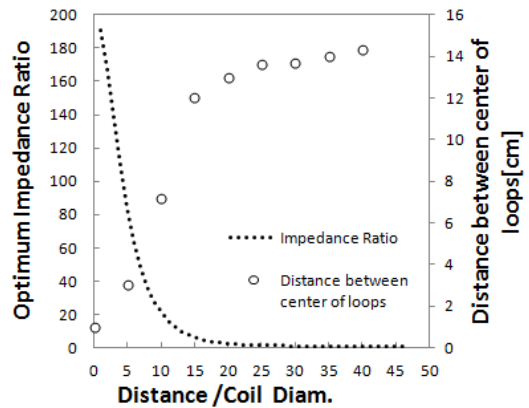


図6 伝送距離と最適インピーダンス比の関係

図5で示したように伝送距離に応じてインピーダンス比の調整を行った際の理論値と測定した伝送効率を図6に示す。横軸は伝送距離を受電用共振器の一辺の長さで規格化している。本実験では理論と同様インピーダンスマッチングによる近距離での大幅な効率改善の効果が見られた。測定データは理論値と傾向は一致したが誤差がでていた。これは結合係数やQ値の理論値と実験環境が完全に一致していないためと考えられる。理論値計算は共振器間相互インダクタンスは共振器の各辺ごとの値を積分して算出している[5]。

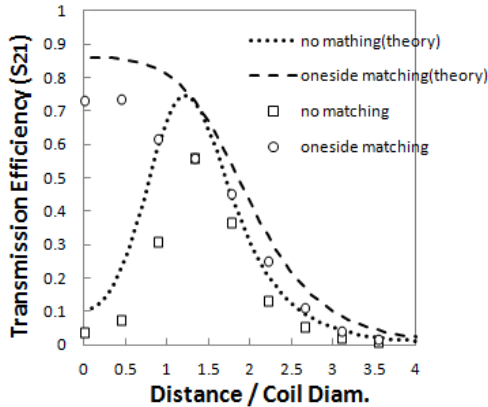


図 7 インピーダンスマッチングの有無と電力伝送効率の関係(横軸は受電用共振器の一辺の長さで規格化)

5 自動インピーダンスマッチングシステム

4 節でインピーダンスマッチングがデモの系でも効果があることを確認し、コイルの相対位置を変化させることでインピーダンスマッチングが行えることを述べた。そこで本研究において自動的にインピーダンスマッチングを行う図 7 に示すシステムを考案した。

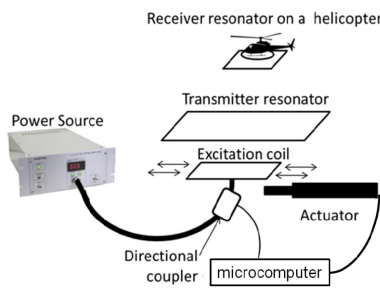


図 8 自動インピーダンスマッチングマッチングを用いた無線電力伝送

磁気共振による無線電力伝送の特徴の 1 つに伝送電力を送信側だけでモニターできる点にある。送信側で反射波を分離することにより現在の効率を測定することが可能である。図 8 に入力電力に対する伝送電力と反射電力の関係を示す。透過した電力と反射した電力の合計が 1 にならないのは、コイルによる誘電損失や熱損失が主な原因である。

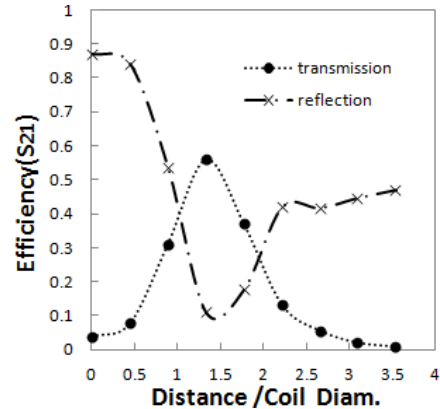


図 9 電力伝送効率(S_{21})と反射率の関係

図 8 のように測定した反射波の増減をモニターし、励起コイルの位置をマイコンとアクチュエータで微分制御することにより、反射波を常に最小に抑えることができ、インピーダンスマッチングを行うことが可能である。

6 まとめ

モバイル機器への無線電力伝送のユースケースを想定し、受電システムにはサイズや重量などの制約条件を設けた。またシステムが重くとも許容出来る地上の送電システムのみでインピーダンスマッチングマッチングを行い電力を送電するシステムを提案した。

受電用共振器は約 3.8g と軽量で 200 を超える高 Q 値のものを開発することが出来た。

送電側でのインピーダンスマッチングによる効果は理論と実験により確認された。インピーダンスマッチングを行った場合にはインピーダンスマッチングを行わない場合と比べ最大で 50% 以上の効率改善の効果が確認された。

文 献

- [1] A. Kurs, J.D. Joannopoulos, and M. Soljacic "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, Vol. 323, Issue 1, 2008.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R.Moffatt, J.D. Joannopoulos, P Fisher, and M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonance," *Science Magazine*, Vol. 317, No. 5834, pp.83-86, 2007
- [3] T. Komaru, M. Koizumi, K. Komurasaki, T. Shibata, and K. Kano, "Compact and Tunable Transmitter and Receiver for Magnetic Resonance Power Transmission to Mobile Objects," *Wireless Energy Transfer Based on Electromagnetic Resonance: Principles and Engineering Explorations*, edited by K. Y. Kim, ISBN 979-953-307-152-6, InTech, 2011.
- [4] M. Koizumi, K. Komurasaki, Y. Mizuno, and Y. Arakawa, "Wireless Power Feeding with Strongly Coupled Magnetic Resonance for a Flying Object," *Wireless Engineering and Technology*, Vol.3, 2012.
- [5] F. W. Grover, "Inductance Calculations Working Formulas and Tables", Dover Publications, Inc.