

強結合共鳴による無線電力伝送デモンストレーション

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 本研究では、飛行する超小型電動ヘリコプターへ、地上に設置した送電用共振器から強結合共鳴を用いて無線で電力を供給することに挑戦している。3次元空間を移動する移動体に効率的にかつ定期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。このデモンストレーションの目的はインピーダンスマッチングを用いることの有効性を実証することと、高効率かつコンパクトで軽量な受信用共振器を開発することである。今回は送電側において自動インピーダンスマッチングシステムを導入し、ヘリコプターを自立飛行させることに成功した。

キーワード 無線電力伝送, 強結合共鳴, インピーダンスマッチング

Demonstration of Wireless Power Transmission with Strongly Coupled Resonance

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 with magnetic resonance from the transmitter resonator on the ground to an electric-powered toy helicopter in air was challenged. Impedance matching is very important for effective power transmission to an object moving in 3-D space. The objective of this demonstration is to validate the theoretical relation between transmission distance and efficiency with impedance matching. Another objective is to develop an efficient, compact, and light-weight resonator as a receiver. The relationship between the efficiency and altitude was shown for the case with impedance matching on the transmitter side. The result indicates that this one-side impedance matching is enough for the helicopter to lift up from the ground.

Keyword Wireless Power Transmission, Strongly Coupled Magnetic Resonance, impedance matching

1. まえがき

強結合共鳴を用いた無線電力伝送は、近年様々な分野において需要が高まっている。2007年MITのKaralisらによって発表されたこの無線電力伝送技術は、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ている[1][2]。この伝送方法の特徴として、共振に使うコイル径の数倍の距離(mオーダー)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伝送出来得ることが挙げられる。応用先としては電気自動車、マイクロロボット、バッテリーの無いセンサーへの給電などが研究されている。

この技術のアプリケーションを考えるに当たって、送受電コイルの位置関係が3次元空間で変化した際にどのようにして最適な共鳴状態を得るかということは、移動体に電力を供給することを考えると避けて通ることはできない。本研究では、飛行する超小型電動ヘリコプターへ、地上に設置した送電用共振器から強結合共鳴を用いて無線で電力を供給することに挑戦している。このデモンストレーションの目的はインピーダンスマッチングを用いることの有効性を実証することと、高効率かつコンパクトで軽量な受信用共振器を開発することである。

2. 伝送効率とインピーダンスマッチング

強結合共振に関する理論はキルヒホッフの第2法則より導かれる。強結合共振による無線電力伝送は図1のように電源、送受電用コイル(共振器)、負荷からなり、図2の直列共振RLC回路を用いて表すことができる。送受電コイルの共振周波数 ω_0 を一致させた共振条件下では、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。[3][4]

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

式中の無次元数は、コイルのQ値(Q_s, Q_D)、コイル間の結合係数 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は送電側, 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、このときの最大効率は式(2)で与えられる。

$$\eta_{max} = \frac{fom^2}{(1 + \sqrt{1 + fom^2})^2} \quad (2)$$

インピーダンス比が条件を満たす時(すなわちインピーダンスマッチングがとれている時)に伝送効率は最大値をとり効率の最大値は $fom (=kQ)$ によって決まる。 $fom=10$ 程度で伝送効率は80%を超えるため、共振器のサイズより伝送距離が大きく結合係数 k が低い場合でも、高いQ値(100~1000程度)のコイルを用いることで高い伝送効率を実現することができる。

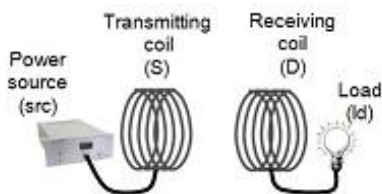


図1. 無線電力伝送システム概略図

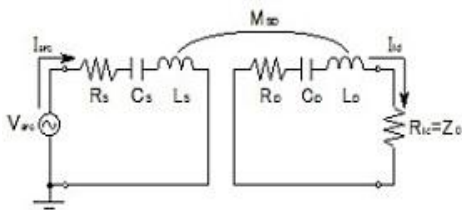


図2. 伝送システムの回路モデル

本研究のデモンストレーションにおいてはヘリコプターの高度に応じて共振器間の結合係数 k が変化し、

それに伴い伝送効率の最大値や、それを与えるインピーダンス比が変化する。このように3次元空間を移動する物体に対して高効率で電力を送るためには、伝送距離に応じて最適なインピーダンス比をとることが重要である。

3. インピーダンスマッチングの効果(共振器)

図3に3つの理論値(インピーダンスの整合を取らない場合、送信側か受信側の何れか一方だけで整合を取る場合、両方で整合を取る場合)の伝送効率の伝送距離依存性と2つの実測値を示す。なお横軸はコイル径で伝送距離を無次元化している。このグラフでは初期インピーダンス比を $Z=0.1[m]$ ($Z/l=約0.8$)のときに最適になるようインピーダンス比を設定している。このとき $Z/l=0.8$ 周辺の距離では高効率を維持できるが、インピーダンスマッチングをせずに伝送距離を短くすると急激に効率が低下する。このときインピーダンスマッチングを行えば、距離の短い場所での効率が大幅に改善されることがわかる。そこで本研究では5章で詳しく述べる自動インピーダンスマッチングシステムを開発し導入した。

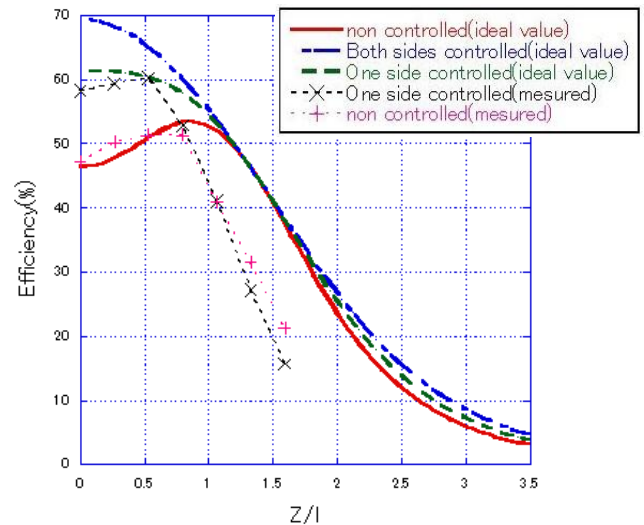


図3. インピーダンスマッチングの効果

4. デモンストレーションシステム

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を自立飛行させるためには受信用共振器は高Q値かつ軽量でコンパクトである必要がある。今回のデモンストレーションでは共振器をできるだけ軽量で薄くするために、正方形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。

表1に共振器の詳細が書かれている。共振器の辺長やマイカコンデンサの容量は共振器の共振周波数が電源周波数と同じ40.68MHzになるように決定した。さ

らに、理論式より各共振器での損失と Q 値を導出し、表 1 に示した。各損失の内訳についても放射損失を R_{rad} 、オーム損失を R_{ohm} 、誘電損失を R_{cap} 、として表した。送受電両方の共振器ともマイカコンデンサによる誘電損失が支配的である。受信側共振器ではオーム損も大きくなっている。これは共振器を中空にしたことによって断面積が減少したからであると考えられる。

	送信側共振器	受信側共振器
辺長 [mm]	201	113
容量 [F]	1.00E-11	5.10E-11
$R_{rad}[\Omega]$	2.68E-03	2.45E-04
$R_{ohm}[\Omega]$	0.240	0.580
$R_{cap}[\Omega]$	0.763	0.337
Q 値	80.9	238
重さ [g]	-	3.77

表 1. 共振器寸法,抵抗内訳,Q 値比較

図 4 にデモシステムの受信側写真を示す。電動ヘリコプターのおもちゃに受信共振器、ピックアップコイル、整流回路を搭載し、共振器は外側の径が 4mm の中空になるよう銅はくを用いて作成した。ピックアップコイルには軽量化と空気抵抗をへらすため銅はくをそのまま使い、このピックアップコイルを 4 つのショットキーダイオードを (1N5818, ST micro : Fuji Electric) 用いたブリッジ回路を挟みモーターに接続した。このダイオードは高周波に対応していて、順電圧が低い ($V_f=0.550[V]$) という特徴をもつ。また複数のブリッジ回路を並列化することで必要な電力を整流できるよう工夫している。

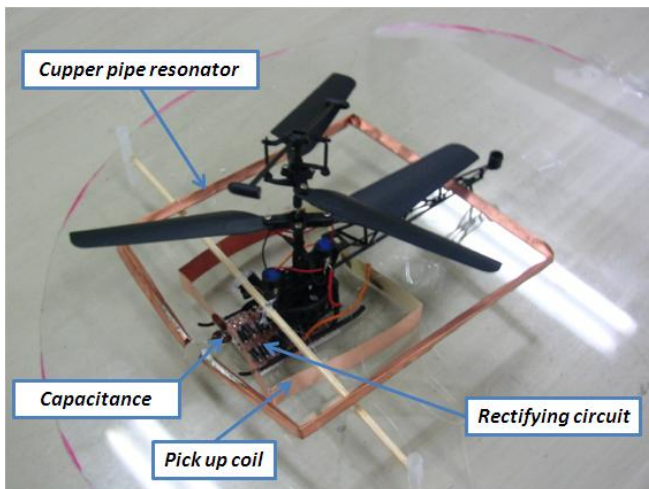


図 4. デモンストレーション機体

5. 自動インピーダンスマッチング

Q 値を高く保ったままインピーダンスマッチングを行うには、図 5 に示すように入出力に変成器 (入出力トランス) を用いる。変成器は、励起コイルと共振コ

イル、あるいは共振コイルとピックアップコイルを比較的高い k で結合させつつ、その k を変化させることによって、コイルから見た電源や負荷のインピーダンスを自由に制御することができるのである。

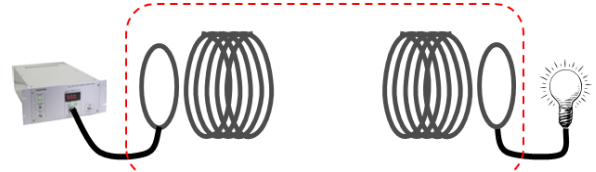


図 5. デモンストレーションシステム図

先に述べたように送信側のインピーダンス比は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 6 の ideal impedance ratio は伝送距離とその距離における最適なインピーダンス比を表している。Ideal distance from center of resonator to center of excitation coil 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プロットしたものである。このグラフによると伝送距離が短い場合は共振コイルと励起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。

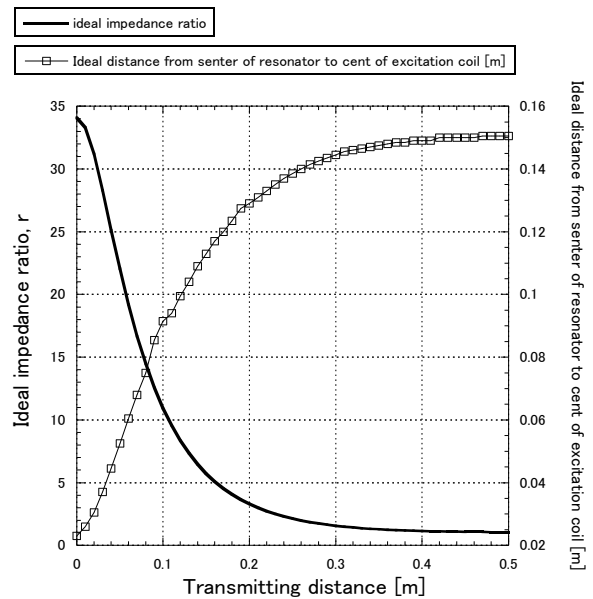


図 6. 伝送距離と最適インピーダンス比の関係

以上より、結合係数 k が常に変化する状況で高い伝送効率を維持するためにはインピーダンスマッチングが必要である。そこで今回私たちは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。

強結合共鳴による無線電力伝送の特徴の 1 つにどれだけの電力が送電できているかが送信側で計測できる点にある。図 1 に示したモデルを考えると、電源から送信器に入射する入射波の電圧及び反射波、透過波の

電圧は式(3)で表される。

$$\begin{aligned} V_i &= (V_{src} + Z_0 I_{src}) / 2 \\ V_r &= (V_{src} - Z_0 I_{src}) / 2 \\ V_t &= Z_0 I_{td} \end{aligned} \quad (3)$$

また、励起コイルに流れる電流は入射波 I_i と反射波

I_r からなる。これらの数式から入射波と反射波は計算することができ、式(5)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} I_i &= V_i / Z_0 \\ I_r &= V_r / Z_0 \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、添え字 i は入射波、r は反射波、t は透過波を示す。

仮に送信側共振器と励起コイルの相対位置が正しくなければ(インピーダンスマッチングがされていなければ)伝送効率が低下し、式(4)で表される励起コイルに流れる反射波が大きくなる。すなわち励起コイルに流れる反射波を測定すればインピーダンスマッチングが成されているかどうか分かる。ここで励起コイルに流れる電流を測定するためのコイルをスイッチングピックアップコイルと呼ぶ。

図8に示すように切り替え回路はスイッチングピックアップコイル、整流回路、トランジスタ、パワーリレーからなる。切り替え回路に流れる電力が増加したとき、パワーリレーはアクチュエータを動かすようにスイッチが入る。このアクチュエータは励起コイルと共振コイルの相対位置を調整するため励起コイルを水平方向に動かす。こうしてアクチュエータは励起コイルと共振コイルの相対位置を最適な位置に自動的に調整し、インピーダンスマッチングを行うという仕組みになっている。

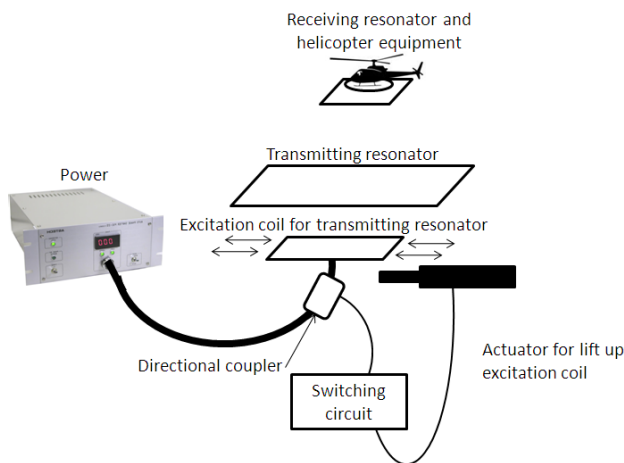


図7. 自動インピーダンスマッチングシステム

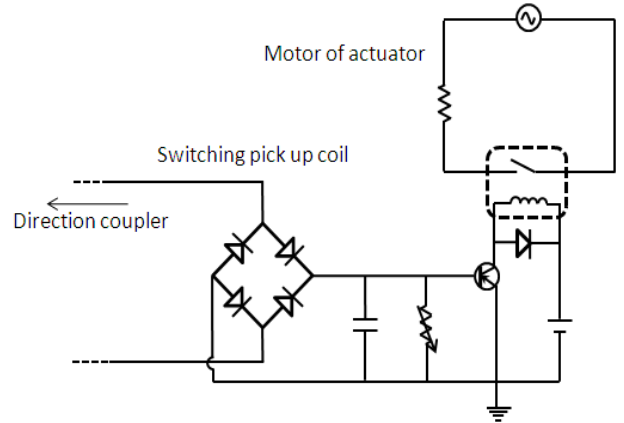


図8. 切り替え回路

6. まとめ

- Q 値はオーム損、放射損失、コンデンサの誘電損失から算出することができる。特に共振器の Q 値に与える影響としてはコンデンサの誘電損失が支配的である。
- インピーダンスマッチングの有無による伝送距離と伝送効率の関係を算出し実測値と比較した。その結果特に短い距離においてインピーダンスマッチングによる効率改善の効果が高いことが示された。
- 軽量の受信用共振器及び自動インピーダンスマッチングシステムの開発によりヘリコプターを自立飛行させることに成功した。

文 献

- [1] A. Kurs, J.D. Joannopoulos, and M. Soljagic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, Vol. 323, Issue 1, pp. 34-48 2008.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R.Moffatt, J.D. Joannopoulos, P Fisher, and M. Soljagic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonance," *Science Magazine*, Vol. 317, No. 5834, pp.83-86, 2007
- [3] 小丸 堯, 小泉正剛, 小紫公也, 荒川義博, 柴田貴行, 加納一彦, "高 Q 値アンテナによる強結合共鳴を用いた無線電力伝送", 電気学会産業応用部門大会講演論文集 2, pp.363-pp.364, 2009.
- [4] T.Komaru, K.Komurasaki, M.Koizumi, T.Shibata, K.Kano, "Parametric Evaluation of Mid-range Wireless Power Transmission", *IEEE, ICIT 2010, Chile*, pp.789-792.