

共振を用いた磁界結合回路における電力伝送と磁束の関係

正員 居村 岳広*

Relation between Power Transfer and Magnetic Flux in Magnetic Coupling Circuit Using Resonance

Takehiro Imura*, Member

Magnetic resonant coupling is one of the conditions for electromagnetic induction using a circuit topology. On the other hand, the relation between the main magnetic flux and the near magnetic field has not been sufficiently discussed in the discussion of the circuit topology, even though the main magnetic flux is used for energy transfer in wireless power transfer. The full explanation of the contribution of the main magnetic flux was not proposed with regard to a comparison between the magnetic resonant coupling and the other topologies. Therefore, in this paper, a series of explanations from the main magnetic flux to circuit topologies is presented, and the mechanism of magnetic resonant coupling is proposed with regard to circuit theory and electromagnetism. The proposed theory is validated through an electromagnetic field analysis and experiment.

キーワード：ワイヤレス電力伝送，電磁誘導，磁界共振結合，磁束

Keywords : wireless power transfer, electromagnetic inductance, magnetic resonant coupling, magnetic field

1 はじめに

近年、磁界共振結合（磁界共鳴）方式によるワイヤレス電力伝送（WPT: Wireless Power Transfer）に対する期待が高まっている^{(1) - (4)}。この技術は、大きな伝送距離と位置ずれ⁽⁵⁾を許容でき、高効率の電力伝送を可能とする技術である。これまでに、音叉による説明、現象の解明⁽³⁾や、等価回路化の提案⁽⁴⁾、^{(6) - (8)}やバンドパス理論を用いた解釈⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾、 kQ 積による解釈⁽¹¹⁾、⁽¹²⁾、効率最大化の提案⁽¹³⁾動作周波数の拡大⁽¹⁴⁾、中継コイル⁽¹⁵⁾、⁽¹⁶⁾、複数負荷への給電^{(17) - (22)}など多くの発表がある。この技術は、様々な応用が期待され、電気自動車へのワイヤレス給電⁽²³⁾、⁽²⁴⁾や走行中の電気自動車へのワイヤレス給電⁽²⁵⁾、家庭内の家電へのワイヤレス給電⁽²⁶⁾等、様々な検討がされている。近年、磁界共振結合方式は電磁誘導現象を利用したワイヤレス電力伝送の一方式であり、共振条件を上手に利用した方式であることが回路トポロジーの比較によって示された⁽²⁷⁾。

しかしながら、磁界結合タイプのワイヤレス電力伝送は磁束で行われているので、本質的には磁束の振る舞いは無視できない現象である。磁界共振結合方式に関しては、磁束の振る舞いについての報告はあるが、どれもただ磁界分布を示しただけであったり⁽²⁾、⁽⁸⁾、⁽²⁸⁾、⁽²⁹⁾、力学モデルからのアナロジーで説明したり⁽³⁰⁾、ポインティングベクトルで

の議論となっている⁽³¹⁾。いずれにせよ、回路トポロジーの比較という観点での提示はされていないので磁束の強弱と回路トポロジーとの関係が明確で無く、理解は深まっていない。また、電磁界解析で得られた磁束分布を示すに留まっているため、主磁束 Φ_m と漏れ磁束が一様に扱われてしまっており、ワイヤレス電力伝送に寄与している磁束の正体が不明瞭になっている⁽²⁾、⁽⁸⁾、^{(28) - (30)}。さらに、主磁束 Φ_m の一部を構成し、かつ、誘導起電力を構成する磁束 Φ_{21} の役割への着目がなく、現象の理解は深まっていない。つまり、回路理論としての視点と電磁気学としての視点が乖離しており、コイル近傍磁束の振る舞いと、磁界共振結合方式との関係の説明が必要とされている。

このような現状において、これまで電流で考察されることなどが一般であった相互誘導回路をもとにしたワイヤレス電力伝送の4つの回路トポロジーについて、磁束は電流に比例することから、磁束を用いた考察が有用であるといえる。そこで、本稿では、各々に大きな特徴を持つ4つの回路トポロジーは、どの様な磁束の振る舞いになっているのか、そして、その様な磁束の振る舞いになる理由は何の様に説明できるのかなどについて明らかにする。

2章では、磁界の結合によるWPTの分類を示す。3章では、磁束からみた回路トポロジーの比較を行なう。4章で、実証実験を行う。5章で磁界共振結合方式における2つの共振周波数における主磁束のふるまいについて検討する。6章でまとめを述べる。

*東京大学大学院 工学系研究科
〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8561

2 磁界の結合による WPT の分類

磁界の結合で電力伝送を行う場合の回路トポロジーの等価回路を Fig. 1 に示す。ここでは、回路に入る向きに電流 I_1 と I_2 を定義する。1 次側の電流と 2 次側の電流によって磁束を強め合う和動結合を想定するので、相互インダクタンスは正($+L_m$)とする。磁界で結合し、ワイヤレス電力伝送を行う場合、結合部分に関しては、電磁誘導の原理で電力伝送が行われる。一方で、回路トポロジーを工夫し、共振現象を送電側と受電側で生じさせることで、大きな伝送距離においても高効率かつ大電力で電力伝送できる磁界共振結合方式がある。磁界共振結合方式は高効率かつ大電力を達成でき、その他の回路トポロジーでは効率が低いもしくは電力が小さいという違いから、両者は全く別の技術や現象と思われていたが、結合の形態としては、電磁誘導の現象を利用していることは同じであり、共振の生じさせ方の違いのみで違いが生じたことであることが報告されている⁽²⁷⁾。また、共振の起こし方によっては、送電側のみ直列に共振コンデンサを入れ、1 次側の自己インダクタンス L_1 を相殺させるタイプ (S-N: Series-Non-resonant)⁽²⁷⁾ や、受電側のみ共振コンデンサを入れ、2 次側の自己インダクタンス L_2 を相殺させる事により、2 次側回路の入力力率を 1 にするタイプ (N-S)⁽²⁷⁾ などもある。結合係数 k が 0.1 程度になる大きな伝送距離において、各々の効率と電力は以下ようになる。送電側のみ共振コンデンサを入れた S-N タイプの場合、効率は低く、共振コンデンサが全くないタイプの N-N タイプと同じ値になるが、電力が大きくなる。N-N タイプは効率も低く、電力も小さい。一方で、受電側に共振コンデンサを入れる N-S タイプは、効率は高く、磁界共振結合方式のときの値と同じになるが、電力が小さい。送電側と受電側に共振コンデンサを入れ、2 次側回路の入力力率を 1 にした上で、1 次側回路の入力力率を 1 にする磁界共振結合方式のみが高効率かつ大電力を実現できる⁽²⁷⁾。

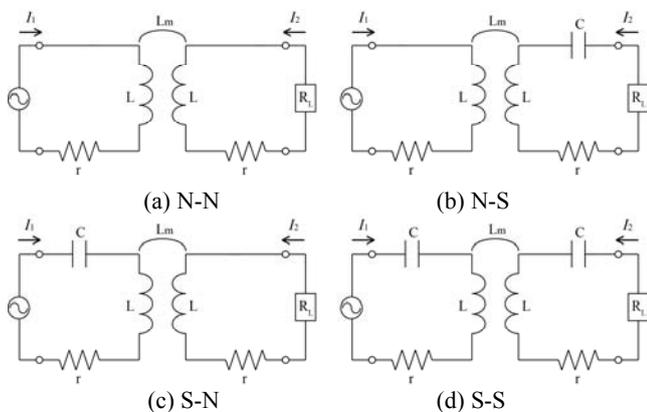


Fig. 1 Circuit topologies using magnetic coupling

3 磁束からみた WPT

本章では、ワイヤレス電力伝送での、コイルに発生する電圧と磁束とインダクタンスの関係式を示す。全体の磁束を Fig. 2 に示す。ここでは、1 次側のコイルの巻かれている向きと 1 次側の電流向きによって作り出される磁束 ϕ_{21} と、2 次側のコイルの巻かれている向きと 2 次側の電流が作り出す磁束の向き ϕ_{12} が強め合う和動結合となっている。そのため、Fig. 1 で示した回路と同様に、相互インダクタンスは正($+L_m$)となる。

コンデンサ以外は、どの回路トポロジーでも共通である。この磁束を元に検討を行なう。

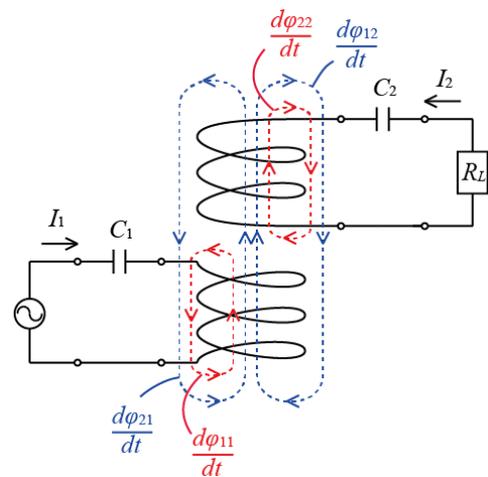


Fig. 2. Main magnetic flux and leakage magnetic flux

鎖交磁束数は鎖交磁束とコイルの巻き数の積であるが、ここでは、鎖交磁束数を ϕ の記号で表す。厳密には、磁束数と述べるべきところもあるが、以後、慣例に従い、磁束数も磁束と述べる。磁束の振幅を Φ とし、電源電圧との位相差を θ とし、式(1)で表す。 i は 11, 12, 21, 22 の 4 通りである。

$$\phi_i = \Phi_i \sin \theta_i \quad (1)$$

1 次側に流れる電流で 1 次側に発生する磁束と電圧の関係を式(2)に、2 次側の電流で 1 次側に誘起する電圧、つまり、電圧降下を式(3)に、2 次側に流れる電流で発生する 2 次側の磁束と電圧の関係を式(4)に、1 次側の電流で 2 次側に誘起する電圧と磁束の関係を式(5)に示す。主磁束 ϕ_m との関係を示す式(6)に示す。一般に、主磁束 ϕ_m の内訳は示されないが、ここでは、起因する電流によって ϕ_{12} と ϕ_{21} とに明確に分ける。

1 次側の自己インダクタンス L_1 は漏れ磁束 ϕ_{11} と主磁束の一部 ϕ_{21} で形成される。電流としては 1 次側の電流がかかっている。1 次側に発生する電圧 V_{Lm1} は 2 次側の電流によって形成され、相互インダクタンス L_m に比例する値で定義される。この磁束は主磁束 ϕ_m の一部 ϕ_{12} によって生じる。

2 次側の自己インダクタンス L_2 は漏れ磁束 ϕ_{22} と主磁束の一部 ϕ_{12} で形成される。電流としては 2 次側の電流がかかっている。2 次側に発生する電圧、誘導起電力 V_{Lm2} は 1 次

側の電流によって形成され、相互インダクタンス L_m に比例する値で定義される。この磁束は主磁束 ϕ_m の一部 ϕ_{21} によって生じる。つまり、2次側の誘導起電力の元となる ϕ_{21} はワイヤレス電力伝送にとっては重要なパラメータであることがわかる。

$$v_{L11} = -\left(\frac{d\phi_{11}}{dt} + \frac{d\phi_{21}}{dt}\right) = L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (2)$$

$$v_{Lm1} = -\frac{d\phi_{12}}{dt} = -\frac{d\phi_{12}}{di_2} \frac{di_2}{dt} = L_{12} \frac{di_2}{dt} = L_m \frac{di_2}{dt} \quad (3)$$

$$v_{L22} = -\left(\frac{d\phi_{22}}{dt} + \frac{d\phi_{12}}{dt}\right) = L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (4)$$

$$v_{Lm2} = -\frac{d\phi_{21}}{dt} = -\frac{d\phi_{21}}{di_1} \frac{di_1}{dt} = L_{21} \frac{di_1}{dt} = L_m \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

$$\phi_m = \phi_{21} + \phi_{12} \quad (6)$$

よって、1次側のコイルに生じる電圧 v_{L1} は式(2)、式(3)より、式(7)となる。

$$v_{L1} = v_{L11} + v_{Lm1} = -\left(\frac{d\phi_{11}}{dt} + \frac{d\phi_{21}}{dt} + \frac{d\phi_{12}}{dt}\right) = L_1 \frac{di_1}{dt} + L_m \frac{di_2}{dt} \quad (7)$$

同様に、2次側のコイルに生じる電圧 v_{L2} は式(4)、式(5)より、式(8)となる。

$$v_{L2} = v_{L22} + v_{Lm2} = -\left(\frac{d\phi_{22}}{dt} + \frac{d\phi_{12}}{dt} + \frac{d\phi_{21}}{dt}\right) = L_2 \frac{di_2}{dt} + L_m \frac{di_1}{dt} \quad (8)$$

共振コンデンサがある場合、1次側と2次側の各々の自己インダクタンス分を1次側と2次側の各々の共振コンデンサで相殺するために使われるので、1次側は式(9)、2次側は式(10)となる。

$$v_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1} I_1 = v_{L11} \quad (9)$$

$$v_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2} I_2 = v_{L22} \quad (10)$$

このとき、各々、下記式(11)、式(12)を満たす。

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (11)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (12)$$

共振条件適応前の S-S 回路から考えると、 C_1 を無限大にした場合、1次側にコンデンサはないことになり、つまり、導通状態になり N-S に等しくなる。同様に、 C_2 を無限大にした場合、2次側にコンデンサはないことになり、S-N になる。 C_1 と C_2 同時に無限大にすると、N-N になる。よって、S-S の電流の式から考える⁽²⁷⁾。

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}{\left\{r_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)\right\} \left\{r_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)\right\} + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (13)$$

$$I_2 = -\frac{j\omega L_m}{\left\{r_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)\right\} \left\{r_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)\right\} + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (14)$$

また、 I_1 と I_2 の比率は式(15)で表される。電流比においては、1次側の共振コンデンサ C_1 は関与しない。

$$\frac{I_1}{-I_2} = \frac{r_2 + R_L + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}{j\omega L_m} \quad (15)$$

これに、共振条件を適応すると、S-S での電流の式は式(16)と式(17)になる。

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L}{r_1(r_2 + R_L) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (16)$$

$$I_2 = -\frac{j\omega L_m}{r_1(r_2 + R_L) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (17)$$

同様に、S-N での電流の式は式(18)と式(19)に、N-S では、式(20)と式(21)に、N-N では、式(22)と式(23)になる。

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L + j\omega L_2}{r_1(r_2 + R_L + j\omega L_2) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (18)$$

$$I_2 = -\frac{j\omega L_m}{r_1(r_2 + R_L + j\omega L_2) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (19)$$

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L}{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + R_L) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (20)$$

$$I_2 = -\frac{j\omega L_m}{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + R_L) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (21)$$

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L + j\omega L_2}{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + R_L + j\omega L_2) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (22)$$

$$I_2 = -\frac{j\omega L_m}{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + R_L + j\omega L_2) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (23)$$

1次側電流と2次側電流の比は、S-S と N-S は式(24)となり、S-N と N-N は式(25)となる。

$$\frac{I_1}{-I_2} = \frac{r_2 + R_L}{j\omega L_m} \quad (24)$$

$$\frac{I_1}{-I_2} = \frac{r_2 + R_L + j\omega L_2}{j\omega L_m} \quad (25)$$

また、 $\Phi = LI$ なので、式(2)～式(5)の関係より、各々の磁束とインダクタンスと電流の関係は式(26)～式(29)となる。

$$\Phi_{11} + \Phi_{21} = L_1 I_1 \quad (26)$$

$$\Phi_{12} = L_m I_2 \quad (27)$$

$$\Phi_{22} + \Phi_{12} = L_2 I_2 \quad (28)$$

$$\Phi_{21} = L_m I_1 \quad (29)$$

よって、 Φ_{11} と Φ_{22} は式(30)と式(31)で求まる。

$$\Phi_{11} = L_1 I_1 - L_m I_2 \quad (30)$$

$$\Phi_{22} = L_2 I_2 - L_m I_1 \quad (31)$$

以上より、各々の回路トポロジーにおける各コイルに生じる磁束と電流と電圧の関係を計算するとTable 1のようにまとめられる。この際、各回路トポロジーにおいて最大効率となる最適負荷 R_{Lopt} を使用する。計算には、Table 2のCal.の回路パラメータの値を使用した。Table 2は比較のため実験で使用した値も記載する。

式(7)より、1次側の磁束の増加は1次側のコイルの電圧 v_{L1} で確認でき、また、電流としては、1次側の電流の増加が支配的であり、2次側の電流の増加による寄与は L_m に比例して加算される。式(8)より、2次側の磁束の増加は2次側のコイルの電圧 v_{L2} で確認することができ、また、電流としては、2次側の電流の増加が支配的であり、1次側の電流の増加による寄与は L_m に比例して加算される。

これら事実に共振現象で生じる電流の増加を考慮すると、以下ようになるはずである。

N-N は I_1 も I_2 もともに小さく、 v_{L1} も v_{L2} も小さく、1次側と2次側のコイルに発生する磁界が小さい。また、式(25)に示した比を保持するので、1次側の方が電流も磁束も大きくなる。1次側の電力が大きく、2次側の電力が小さく、効率は低い。

S-N は I_1 も I_2 も大きくなり、 v_{L1} も v_{L2} も大きくなり、1次側と2次側のコイルに発生する磁界が大きくなる。しかし、式(25)に示した比を保持したままなので、N-Nと同様に1次側の方が電流も磁束も大きくなる。それ故に、1次側の電力が大きく、2次側の電力が小さく、効率は低いままである。

N-S はN-Nと比べると2次側での共振があるために、N-Nの時に比べ2次側での電流が増える。N-Nの時に比べると、 I_2 の値が I_1 に対して大きくなり、 v_{L2} も v_{L1} に対して大きくなる。ただし、式(24)に示した比を保持し、最適負荷の時には、 $I_1 \approx I_2$ なので⁽²⁷⁾、1次側と2次側の電流がほぼ等しい状況まで増えるという表現が正しい。 v_{L2} も v_{L1} とほぼ等しくなる。よって、2次側コイルの磁束も増え、1次側コイルの磁束と同じくらいまでになる。効率は高いが、そもそも電流が1次側も2次側もほとんど流れないので、受電電力は小さい。

S-S はN-Nと比べると、2次側と1次側の共振があり、1次側に流れる電流も2次側に流れる電流も大きくなる。その比は、式(24)に示した比を保持し、N-Sと同様に、最適負荷の時には、 $I_1 \approx I_2$ なので、1次側と2次側の電流がほぼ等しい状況まで増える。 v_{L2} も v_{L1} とほぼ等しくなる。よって、2次側コイルの磁束も増え、1次側コイルの磁束と同じくらいまでになる。効率は高く、受電電力も大きい。

以上を踏まえ、磁束の分布についてまとめると、N-Nは1次側の磁束が大きく、2次側の磁束はわずかとなる。また、他トポロジーに比べ磁束自体の振幅も小さい。N-Sは1次側と2次側の磁束が同じくらいになるが、他トポロジーに比べ磁束自体の振幅は小さくなる。S-Nは1次側と2次側の磁

束はともに大きくなるが、1次側の方が大きくなり、他トポロジーに比べ磁束自体の振幅も大きくなる。S-Sは1次側と2次側の磁束が同じくらいになり、他トポロジーに比べ磁束自体の振幅も大きくなるはずである。これらのことは、Table 1の計算結果と一致する。

Table 1 N-N, S-N, N-S and S-S

(a) N-N					(b) S-N				
	Re.	Im.	ABS	θ		Re	Im	ABS	θ
I_1 [A]	0.0	-1.0	1.0	271.0	I_1 [A]	51.1	13.8	53.0	15.1
I_2 [A]	-0.1	0.0	0.1	136.6	I_2 [A]	-1.8	-3.2	3.7	240.6
V_{L11} [V]	100.5	1.8	100.5	1.0	V_{L11} [V]	-1377.5	5114.9	5297.2	105.1
V_{r1} [V]	0.0	-1.3	1.3	271.0	V_{r1} [V]	1377.5	-5114.9	5297.2	285.1
V_{Lm1} [V]	-0.5	-0.5	0.7	226.6	V_{r1} [V]	67.7	18.2	70.1	15.1
V_{Lm2} [V]	10.0	0.2	10.0	1.0	V_{Lm1} [V]	32.3	-18.2	37.1	330.6
V_{L22} [V]	-4.8	-5.1	7.0	226.6	V_{Lm2} [V]	-137.8	511.5	529.7	105.1
V_{r2} [V]	-0.1	0.1	0.1	136.6	V_{L22} [V]	323.3	-182.2	371.2	330.6
V_2 [V]	5.1	-4.9	7.1	316.6	V_{r2} [V]	-2.4	-4.3	4.9	240.6
Φ_{11} [uWb]	2.6	-143.9	143.9	271.0	V_2 [V]	183.2	325.0	373.0	60.6
Φ_{21} [uWb]	0.3	-16.0	16.0	271.0	Φ_{11} [uWb]	7326.6	1973.2	7587.6	15.1
Φ_{12} [uWb]	-7.3	6.9	10.1	136.6	Φ_{21} [uWb]	814.1	219.2	843.1	15.1
Φ_{22} [uWb]	-0.8	0.8	1.1	136.6	Φ_{22} [uWb]	-261.0	-463.1	531.6	240.6
Φ_m [uWb]	-0.5	-15.2	15.2	268.0	Φ_{12} [uWb]	-29.0	-51.5	59.1	240.6
P_1 [W]	1.8	100.5	100.5	89.0	Φ_m [uWb]	785.1	167.8	802.8	12.1
P_2 [W]	0.5	η [%]		27.1	P_1 [W]	5114.9	1377.5	5297.2	15.1
P_{r1} [W]	1.3	R_{Lopt} [Ω]		100.5	P_2 [W]	1384.5	η [%]		27.1
P_{r2} [W]	0.0				P_{r1} [W]	3712.1	R_{Lopt} [Ω]		100.5
					P_{r2} [W]	18.2			

(c) N-S					(d) S-S				
	Re	Im	ABS	θ		Re	Im	ABS	θ
I_1 [A]	0.1	-1.0	1.0	275.8	I_1 [A]	9.9	0.0	9.9	0.0
I_2 [A]	-0.9	-0.1	0.9	185.8	I_2 [A]	0.0	-8.7	8.7	270.0
V_{L11} [V]	99.0	10.0	99.5	5.8	V_{L11} [V]	0.0	991.4	991.4	90.0
V_{r1} [V]	0.1	-1.3	1.3	275.8	V_{r1} [V]	0.0	-991.4	991.4	270.0
V_{Lm1} [V]	0.9	-8.7	8.7	275.8	V_{r1} [V]	13.1	0.0	13.1	0.0
V_{Lm2} [V]	9.9	1.0	9.9	5.8	V_{Lm1} [V]	86.9	0.0	86.9	0.0
V_{L22} [V]	8.8	-86.8	87.2	275.8	V_{Lm2} [V]	0.0	99.1	99.1	90.0
V_{r2} [V]	-8.8	86.8	87.2	95.8	V_{L22} [V]	868.8	0.0	868.8	0.0
V_2 [V]	-1.1	-0.1	1.2	185.8	V_{r2} [V]	-868.8	0.0	868.8	180.0
V_2 [V]	8.8	0.9	8.8	5.8	V_{r2} [V]	0.0	-11.5	11.5	270.0
Φ_{11} [uWb]	14.3	-141.8	142.5	275.8	V_2 [V]	0.0	87.6	87.6	90.0
Φ_{21} [uWb]	1.6	-15.8	15.8	275.8	Φ_{11} [uWb]	1420.0	0.0	1420.0	0.0
Φ_{22} [uWb]	-124.3	-12.5	124.9	185.8	Φ_{21} [uWb]	157.8	0.0	157.8	0.0
Φ_{12} [uWb]	-13.8	-1.4	13.9	185.8	Φ_{22} [uWb]	0.0	-1244.5	1244.5	270.0
Φ_{22} [uWb]	-12.2	-17.1	21.1	234.5	Φ_{12} [uWb]	0.0	-138.3	138.3	270.0
P_1 [W]	10.0	99.0	99.5	84.2	Φ_m [uWb]	157.8	-138.3	209.8	318.8
P_2 [W]	7.7	η [%]		76.8	P_1 [W]	991.4	0.0	991.4	0.0
P_{r1} [W]	1.3	R_{Lopt} [Ω]		10.1	P_2 [W]	761.5	η [%]		76.8
P_{r2} [W]	1.0				P_{r1} [W]	130.0	R_{Lopt} [Ω]		10.1
					P_{r2} [W]	99.9			

Table 2 Circuit parameters

	Cal.	Exp.		Cal.	Exp.
f [kHz]	100.0	100.0	C_1 [nF]	15.9	15.9
L_1 [uH]	159.2	158.7	C_2 [nF]	15.9	15.9
L_2 [uH]	159.2	159.2	r_1 [Ω]	1.3	1.4
L_m [uH]	15.9	15.9	r_2 [Ω]	1.3	1.3
k [-]	0.10	0.10	Q_1 [-]	75.6	72.6
			Q_2 [-]	75.6	78.7

4 電磁界解析と実験による検証

前章までは理論計算を示したが、妥当性を検証するために、実験をもって検証を行う。ただし、3次元的に存在する高周波の磁束を直接観測することは困難である。そこで、磁束分布に関しては、電磁界解析ソフトで示し、実験においては、観測できる値である I_1, I_2 から磁束の検証を行う。

回路パラメータはTable 2の通りである。コイルの寸法をTable 3に示す。 a は導線の太さ、 s は導線間の距離である。Fig. 3に送受電コイル写真と実験構成を示す。実測より伝送

る磁束 Φ_{21} である。この磁束は1次側の電流を流すことによって生じる。当然ながら2次側の負荷に電流が流れ、つまり、電力が送られると Φ_{12} によって、1次側の電圧降下が生じるため、 Φ_{12} も同時に確認する。

そこで、本章では、ワイヤレス電力伝送においては、主磁束 Φ_m ではなく、主磁束の一部であり、かつ、誘導起電力の元となる磁束 Φ_{21} に着目することの重要性について、特徴的な2つの周波数に着目することでより明瞭に示すことを行う。

磁界共振結合方式においては、結合が強い領域では、コイル単体の共振周波数 f_0 を中心に両側に2つの電力ピークの周波数 f_m と f_e ($f_m \leq f_e$) が存在する⁽⁶⁾。各々のピーク周波数において、磁気壁と電気壁を生じ、各々偶モード (Even mode)、奇モード (Odd mode) と呼ばれる。また、単体の共振周波数より低い周波数では電流が同位相に近づいていき、高い周波数では電流が逆位相に近づいていく (Fig.5)。この時の磁束分布は低いピーク周波数 f_m に関しては、電流が同位相に近いので、磁束が中央にあつまり対称面に対し垂直に磁束が向く磁気壁に近い状態となり、高いピーク周波数 f_e においては、磁束が端にあつまり対称面に対して水平に磁束が向く電気壁に近い状態となる (Fig.6)。一見、 f_m では主磁束が存在するが、 f_e では磁束が存在しないように見える。そのため、 f_e では電力伝送ができないようにみえるが、近傍磁束分布はほぼ漏れ磁束 Φ_{11} と Φ_{22} が支配的であり、主磁束 Φ_m の占める割合はFig.7(a)に示すように小さく、確認が困難であるだけのことであることがわかる。また、その主磁束 Φ_m も f_m の時のほうが大きく、 f_e の時は小さいが、Fig.5からわかるように、効率や電力に関して、主磁束に比例して影響を及ぼしておらず、むしろ Φ_{12} と Φ_{21} や Φ_{11} と Φ_{22} に比例して電力などに影響を与えていることがわかる。つまり、主磁束は、 Φ_{12} と Φ_{21} の位相が一致しているか否かの違いを読み取るものとしては使えるが、 Φ_{12} と Φ_{21} の合算となったあとではそれ自体は重要な意味を電力伝送などに対しては持たない。これらのことは、式(6)、式(27)、式(29)からもいえる。つまり、電力伝送に重要なパラメータは、主磁束 Φ_m を構成している Φ_{12} と Φ_{21} であるといえる。 Φ_{12} の役割がわかる極端な例としては、負荷 R_L が繋がっていない場合、 $I_2=0$ なので、式(27)より、 Φ_{12} は0となる。 I_2 が流れ始めると、 Φ_{12} が発生し、電力伝送が行なわれたことになる。その中でも特に、式(5)で示したように、2次側に誘導起電力を生じさせている Φ_{21} が重要といえる。これは、2次側に生じた誘導起電力が2次側の電源となり、2次側に電力を供給する源になるからである。

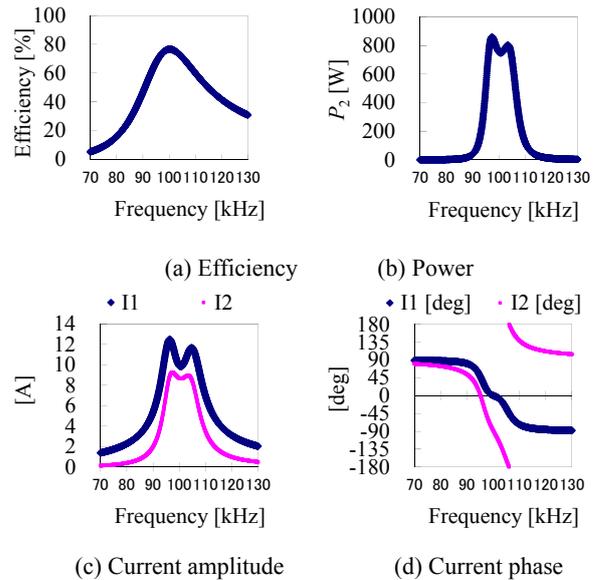


Fig.5. Efficiency, power and current, optimized load 10.1Ω, S-S (Experimental result)

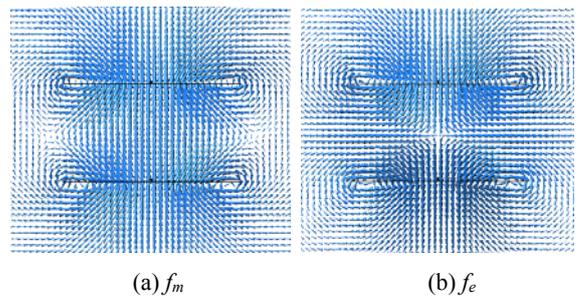


Fig.6. Magnetic flux of f_m and f_e

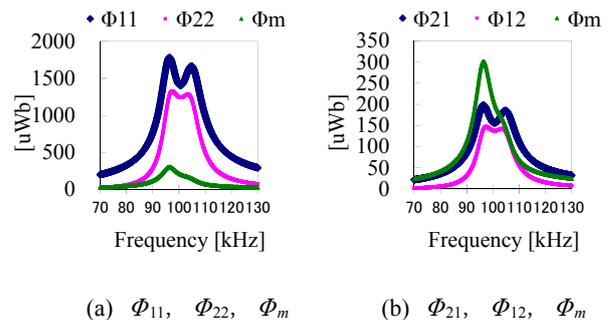


Fig.7. Magnetic flux, S-S (Experimental result)

6 まとめ

磁界共振結合方式においては、回路トポロジーによる説明により、電磁誘導現象を利用し、かつ、共振条件として、1次側と2次側各々で共振を生じさせるという条件に絞った回路トポロジーが磁界共振結合方式に相当することが報告された⁽²⁷⁾。一方で、ワイヤレス電力伝送の現象としては磁束がエネルギーの伝送に使われているのにもかかわらず、回路トポロジーの議論においては、近傍磁界との関連がしっかりと示されてこ

なかった。つまり、従来の回路トポロジーと磁界共振結合方式における回路トポロジーとの比較において、磁界共振結合方式における磁束が他のトポロジーと比べ、どのように振る舞いワイヤレス電力伝送に寄与しているのかの十分な説明がされてこなかった。そこで、本稿では、磁束の振る舞いから回路トポロジーまでを一連の流れとして説明し、回路理論と電磁気学両面から磁界共振結合方式を含む回路トポロジーにおける磁束との関係を示した。さらに、主磁束 Φ_m ではなく、主磁束を形成している2つの磁束 Φ_{21} と Φ_{12} の重要性について述べた。特に、2次側の誘導起電力の元となる磁束 Φ_{21} の重要性について述べた。これらについて、電磁界解析と実証実験を用いて、理論計算の妥当性を証明した。これにより、磁束という電磁気学からの視点でも、直感的に磁界共振結合方式を含む4つの回路トポロジーの現象に関して理解を深めることが出来る。本報告が今後のワイヤレス電力伝送にとって有用な知見となれば幸いである。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 25709020 の助成を受けたものです。

文 献

- (1) André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," in Science Express on 7 June 2007, Vol. 317. no. 5834, pp. 83 – 86.
- (2) Aristeidis Karalis, J.D. Joannopoulos and Marin Soljačić, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Annals of Physics, Volume 323, Issue 1, January 2008, Pages 34-48, January Special Issue 2008.
- (3) Qiang Chen, Long Li, Kunio Sawaya, "Numerical Analysis on Transmission Efficiency of Evanescent Resonant Coupling Wireless Power Transfer System," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 5, pp. 1751-1758, May 2010.
- (4) Takehiro Imura, Yoichi Hori, "Wireless power transfer using electromagnetic resonant coupling", The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 129, No. 7, pp.414-417 (2009)
居村岳広, 堀洋一, "電磁界共振結合による伝送技術", 電気学会誌, Vol. 129, No. 7, pp.414-417 (2009).
- (5) Takehiro Imura, Hiroyuki Okabe, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, "Wireless Power Transfer during Displacement Using Electromagnetic Coupling in Resonance : Magnetic- versus Electric-Type Antennas", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 130, No. 1, pp.76-83 (2010).
居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一, "共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送", 電学論D, Vol. 130, No. 1, pp.76-83, 2010.
- (6) 居村岳広, 内田利之, 堀洋一:「近傍界用磁界アンテナの共振を利用した高効率電力伝送の解析と実験—基本特性と位置ずれ特性—」, 平成 20 年度電気学会産業応用部門大会, Vol. II, 2-62, pp.539-542 (2008.8)
Takehiro Imura, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, "Experimental Analysis of High Efficiency Power Transfer using Resonance of Magnetic Antennas for the Near Field- Geometry and Fundamental Characteristics -", IEE of Japan Industry Applications Society Conference, Vol. II, 2-62, pp.539-542 (2008.8)
- (7) 平山裕, 小澤俊之, 平岩洋介, 菊間信良, and 榊原久二男, "無線電力伝送の共鳴モードと等価回路表現", 電子情報通信学会技術研究報告. A・P, アンテナ・伝播, vol. 109, no. 183, pp. 35-40, Aug. 2009.
Hirayama Hiroshi, Ozawa Toshiyuki, Hiraiwa Yosuke, Kikuma Nobuyoshi, Sakakibara Kunio, "On a resonant mode and equivalent circuit of wireless power transmission", IEICE Technical Report AP2009-85, vol. 109, no. 183, pp. 35-40, Aug. 2009(2009-09)
- (8) Takehiro Imura, Hiroyuki Okabe, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, "Study of Magnetic and Electric Coupling for Contactless Power Transfer Using Equivalent Circuits : —Wireless Power Transfer via Electromagnetic Coupling at Resonance—", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 130-D, No. 1, pp.84-92 (2010)
居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一, "等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究", 電学論D, Vol.130, No.1, pp.84-92, 2010.
- (9) 粟井 郁雄, "共鳴型ワイヤレス電力伝送の新しい理論", 電学論C, Vol. 130, No. 6, pp.966-971 (2010).
Awai Ikuo, "New Theory for Resonant-Type Wireless Power Transfer", The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. C, A publication of Electronics, Information and System Society 130(6), 966-971, 2010-06-01
- (10) 粟井 郁雄, "磁気結合共振型ワイヤレス給電システムの BPF 理論による設計法", 電気学会論文誌. C, Vol. 130, No. 12, pp. 2192–2197, 2010.
I. Awai, "BPF Theory-Based Design Method for Wireless Power Transfer System by Use of Magnetically Coupled Resonators," IEEJ Trans. Electron. Inf. Syst., vol. 130, no. 12, pp. 2192–2197, Dec. 2010.
- (11) 居村 岳広, "電磁界共振結合", パワーエレクトロニクスハンドブック, 1 編 11 章 5.2 節, pp.195-198, オーム社, 2010.7
Takehiro Imura, "Electromagnetic Resonant Coupling", Power Electronics Handbook, pp.195-198, Ohmsha, Ltd., 2010.7
- (12) 遠井 敬大, 金子 裕良, 阿部 茂, "非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現", 電気学会論文誌, Vol. 132, No. 1, pp.123-124 (2012.1.1).
Tohi Takahiro, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe, "Maximum Efficiency of Contactless Power Transfer Systems using k and Q", The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. D, A publication of Industry Applications Society 132(1), 123-124, 2012-01-01
- (13) Takehiro Imura, Yoichi Hori, "Determination of limits on air gap and efficiency for wireless power transfer via magnetic resonant coupling by using equivalent circuit", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 130-D, No. 10, pp.1169-1174 (2010)
居村岳広, 堀洋一, "等価回路から見た磁界共振結合におけるワイヤレス電力伝送距離と効率の限界値に関する研究", 電学論D, Vol. 130, No. 10, pp.1169-1174 (2010).
- (14) Takehiro Imura, Hiroyuki Okabe, Yoichi Hori, "Proposal of Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling in kHz-MHz-GHz", Proceedings of the 2010 IEICE General Conference, BS-9-5 (2010.3)
居村岳広, 岡部浩之, 堀洋一, "kHz~MHz~GHz における磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送用アンテナの提案", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, S-24-S25, BS-9-5 (2010.3)
- (15) Takehiro Imura, "Equivalent Circuits of Repeater Antennas for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 131, No. 12, pp.1373-1382 (2011)
居村 岳広, "磁界共振結合のワイヤレス電力伝送における中継アンテナの等価回路化", 電学論D, Vol. 131, No. 12, pp.1373-1382 (2011)
- (16) Shimada, A.; Ito, Y.; Uehara, H.; Ohira, T., "Effect of hop counts on power division ratio in multi-hop power transfer via magnetic resonance," Wireless Power Transfer (WPT), 2013 IEEE, pp.179,182, 15-16 May 2013
- (17) Benjamin L. Cannon, James F. Hoburg, Daniel D. Stancil, and Seth Copen Goldstein, "Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers," IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 7, 1819-1825, JULY 2009.
- (18) 安倍 秀明, 秋山 稔博, 尾崎 保, 辻本 豊彦, 小原 弘士, 小笠原 潔, "複数の2次コイルで受電する機器のワイヤレス給電に適用可能な等価回路", 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-1-50, No.1, p.50, 2012.
Hideaki Abe, Akiyama Toshihiro, Ozaki Mamoru, Tsujimoto Toyohiko, Kohara Hiroshi, Ogasawara Kiyoshi, "Equivalent Circuit Applicable to Free Positioning Wireless Power Transmission of Apparatus Having Plural Secondary Coils", Proceedings of the 2012 IEICE Society Conference, B-1-50, No.1, p.50, 2012.
- (19) Takehiro Imura, Yoichi Hori, "Optimization using Transmitting Circuit of Multiple Receiving Antennas for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling", 4p, INTELEC.2011.10.10.
- (20) Casanova, J.J.; Zhen Ning Low; Jemshan Lin, "A Loosely Coupled Planar Wireless Power System for Multiple Receivers," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.56, no.8, pp.3060-3068, Aug. 2009
- (21) Awai, I.; Yamaguchi, K.; Ishida, T.; Ishizaki, T., "Design of a resonator-coupled WPT system with multiple loads based on measurement with a VNA instead of an oscilloscope," Microwave Conference Proceedings (APMC), 2012 Asia-Pacific, pp.824,826, 4-7 Dec. 2012
- (22) Koh Kim Ean, Beh Teck Chuan, Takehiro Imura and Yoichi Hori, Multi-receiver and Repeaters Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling - Impedance Matching and Power Division Utilizing Impedance Inverter -, The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012), 2012.
- (23) Yukio Yokoi, Akihiko Taniya, Masaki Horiuchi, Shigeru Kobayashi, "Development of kW Class Wireless Power Transmission System for EV Using Magnetic Resonant Method", 1st International Electric Vehicle Technology Conference 2011. 5
- (24) 居村岳広, 加藤昌樹, 堀洋一: "磁界共鳴によるEV用ワイヤレス給電技術", まぐね, vol.9, no. 3, pp.105-110, 2014.6
Takehiro Imura, Masaki Kato, Yoichi Hori, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle via Magnetic Resonant Coupling", Magnetics Japan, vol.9, no. 3, pp.105-110, 2014.6
- (25) 加藤昌樹, 居村岳広, 堀洋一, "走行中ワイヤレス給電用アンテナに関する受電位置と効率に関する検討", 平成 24 年電気学会産業応用部門大会, Vol. II, pp.219-222, 2012.8.23
Masaki Kato, Takehiro Imura, Yoichi Hori, "Study about Relation of Efficiency between Receiving Antenna Position and Efficiency for Wireless Power Transfer for Moving Vehicle with Relay Antenna", IEE of Japan Industry Applications Society Conference, pp. 219-222, 2012
- (26) 庄木裕樹, "ワイヤレス電力伝送の技術動向・課題と実用化に向けた取り組み", 信学技報, WPT2010-07, July (2010).
Hiroyuki Shoki, "Trends of Wireless Power Transmission Technologies and Approaches for Commercialization", IEICE Technical Report, WPT2010-07,

- July (2010).
- (27) 居村 岳広, 堀 洋一, "電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一理論", 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No.6, pp.697-710, 2015.6.1
Takehiro Imura, Yoichi Hori, "Unified Theory of Electromagnetic Induction and Magnetic Resonant Coupling", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 135-D, No. 6, pp.697-710. 2015.
- (28) 安倍秀明, 小笠原潔, 西村太, 太田智浩, 北村浩康, 鈴木真美, "共振を使う磁気結合ワイヤレス給電技術の効率について," 信学技報, WPT2011-21, Dec. 2011
Hideaki Abe, Kiyoshi Ogasawara, Futoshi Nishimura, Tomohiro Ota, Hiroyasu Kitamura, Mami Suzuki, "Efficiency of Wireless Energy Transfer System Using Resonance", IEICE Technical Report, WPT2011-21, Dec. 2011.
- (29) 平山裕, 矢満田博之, 菊間信良, 榎原久二男, "電磁界の観点から見た結合共振型無線電力伝送", 信学技報, WPT2013-17, July, 2013
Hiroshi Hirayama, Hiroyuki Yamada, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, "Coupled-resonant wireless power transfer technology from the viewpoint of electro-magnetic field", WPT2013-17, July, 2013
- (30) 山口大輝, 石飛 学, "力学的モデルを用いた磁気共鳴型非接触給電のエネルギー伝送解析", 電気学会研究会資料. SPC, 半導体電力変換研究会 2012(96), 21-26, 2012-07-30.
Daiki Yamaguchi, Manabu Ishitobi, "Analysis of Contactless Power Transmission by Using Dynamic Model", The papers of Technical Meeting on Semiconductor Power Converter, IEE Japan, 2012(96), 21-26, 2012-07-30.
- (31) 細谷達也, "電磁界共鳴フィールドを用いた直流共鳴方式 ZVS ワイヤレス給電システムと 10MHz 級実験", 電気情報通信学会, 無線電力伝送時限研究専門委員会研究会, WPT2013-07, 2013.7.
Tatsuya Hosotani, "A Novel Direct-Current-Resonance ZVS Wireless Power Transfer System with an Electromagnetic Resonance Field and a 10MHz-Class Experiment", IEICE Technical Report, WPT2013-07, July (2013).
- (32) <http://www.home.agilent.com/>

居 村 岳 広 (正員) 1980年8月11日生。2005年3月上智大学理工学部電気電子工学科卒業。2007年3月東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程修了。2010年3月同大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士後期課程卒業。同年4月同大学大学院新領域創成科学研究科客員共同研究員。同年9月より同大学大学院新領域創成科学研究科助教。2015年9月同大学大学院工学系研究科電気系工学専攻特任講師。2015年電気学会産業応用部門論文賞などを受賞。現在, 電磁界共振結合, 電磁共鳴を用いた電気自動車や電気機器へのワイヤレス電力伝送の研究に従事。電気学会, 電子情報通信学会, 自動車技術会, IEEE各会員。