

磁束と磁界共振結合の関係

居村 岳広[†]

[†] 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
E-mail: [†] imura@hori.k.u-tokyo.ac.jp

あらまし 磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送に対する期待が高まっている。近年、磁界共振結合は電磁誘導の一条件であることが回路トポロジーの比較によって示された。しかしながら、磁束の強弱と回路トポロジーとの関係が明確で無く、それ故に、正確な理解がされていない。磁界共振結合は共振しているから大きな磁束となり、高効率かつ大電力になるとひとまとめに説明されることが多く、効率と電力が一色単に扱われている現状がある。ただ単に共振させたり、磁束を大きくしたりすれば、効率が高くなる訳でも、電力が大きくなる訳ではなく、1次側の磁束の大きさと2次側の磁束の大きさは別々の意味を持つので、正確に回路トポロジー毎の特徴を示す必要がある。そこで、本稿では、磁束からみた回路トポロジーの比較を行い、磁束からみた磁界共振結合と他回路トポロジーとの特徴についてまとめ、電力と効率と磁束の関係を示すことを行った。電磁界解析と実験を持って理論の妥当性を示した。

キーワード 電磁誘導, 磁界共振結合, ワイヤレス電力伝送, 磁束

Relation between Magnetic Flux and Magnetic Resonant Coupling

Takehiro IMURA[†]

[†] Graduate School of Engineering, The University of Tokyo,
Kashiwanoha 5-1-5, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8561, Japan
E-mail: [†] imura@hori.k.u-tokyo.ac.jp

Abstract Nowadays, the expectations for wireless power transfer via magnetic resonant coupling are increasing. Recently, the conditions of magnetic resonant coupling via electromagnetic induction have been shown by comparison of circuit topologies. However, the relationship between magnetic flux and circuit topologies is still unclear and consequently an accurate understanding is yet to be achieved. Currently, efficiency and power are considered and handled together merely because the magnetic resonant coupling generates large magnetic flux by resonance. However, simply producing a large magnetic flux does not always provide high efficiency and high power. The meanings of primary side magnetic flux and secondary side magnetic flux are distinctly separate, therefore accurately showing the characteristics of each circuit topology is necessary. In this paper, considering the point of view of magnetic flux, the comparison of circuit topologies and the characteristics between magnetic resonant coupling and other circuit topologies are summarized. Moreover, the relationship between power, efficiency and magnetic flux is proposed. Theoretical validation is achieved through electromagnetic field analysis and experiment.

Keywords Electromagnetic Induction, Magnetic Resonant Coupling, Wireless Power Transfer, Magnetic Flux

1. はじめに

近年、磁界共振結合（磁界共鳴）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]-[3]}。この技術は、大きなエアギャップと位置ずれ^[4]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、等価回路化の提案^{[5]-[7]}、バンドパス理論を用いた解釈^{[8]-[9]}、効率最大化の

提案^[7]、動作周波数の拡大^[10]、中継コイルなどの発表^[11]がなされている。この技術は、様々なところに適応できるとされ、電気自動車へのワイヤレス給電^[12]や走行中の電気自動車へのワイヤレス給電^[13]、家庭内の家電へのワイヤレス給電^[14]など、様々な検討がされている。近年、磁界共振結合は電磁誘導の一条件であることが回路トポロジーの比較によって示された^[15]。

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。磁界共振結合のみに関しては、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],[7]}、ポインティングベクトルでの議論となっている^[16]。

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い。それ故に、正確な理解がされておらず、磁界共振結合は共振しているから大きな磁束となり、高効率かつ大電力になるとひとまとめに説明されることもあり、効率と電力が一色単に扱われている現状がある。ただ単に共振させたり、磁束を大きくしたりすれば、効率が上がる訳でも、電力が大きくなる訳ではなく、1次側の磁束の大きさと2次側の磁束の大きさは別々の意味を持つので、正確に回路トポロジー毎の特徴を示す必要がある。

そこで、本稿では、磁束からみた回路トポロジーの比較を行い、磁束からみた磁界共振結合と他回路トポロジーとの特徴についてまとめる。2章では、磁界共振結合の特徴を述べる。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章でまとめを述べる。

1. 磁界共振結合の特徴

磁界共振結合は非放射型かつ結合型の電力伝送であり、コイルとコンデンサの共振状態において磁界によって結合し（共鳴し）電力伝送を行なう。高効率、大エアギャップ、位置ずれに対するロバスト性の高さを示した一例を Fig. 1 に示す。大きなエアギャップかつ位置ずれが生じた際も、高効率の電力伝送が可能である。磁界共振結合方式は LC 共振を積極的に利用しており、共振周波数を送信コイルと受信コイルで同じにし、インピーダンスを最適化した状態で動作させることにより、結合係数が非常に小さくても高効率の電力伝送が可能となる。



Fig. 1 磁界共振結合による電球点灯実験の様子

2. 回路トポロジーと磁束

磁界の結合で電力伝送を行う場合の回路トポロジーを Fig. 2 に示す。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、大きなエアギャップ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。効率と電力の差から、両者は全く別の技術とされていたが、共振のさせ方の違いのみで生じたことであることが報告されている^[15]。また、共振の取り方によっては、送電側のみ直列に共振コンデンサを入れるタイプ（S-N: Series-Non-resonant）や、受電側のみ共振を入れるタイプ（N-S）などもある。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、共振のないタイプの電磁誘導、N-N タイプと同じであるが、電力は大きくなる。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、磁界共振結合のときの値と同じになるが、電力が小さい。磁界共振結合のみが高効率かつ大電力を実現できる^[15]。共振のさせ方は、直列以外にも並列に入れることも可能であるが、煩雑になるため、本稿では、直列共振のみを扱う。そのため、磁界共振結合は S-S タイプを取り扱う。

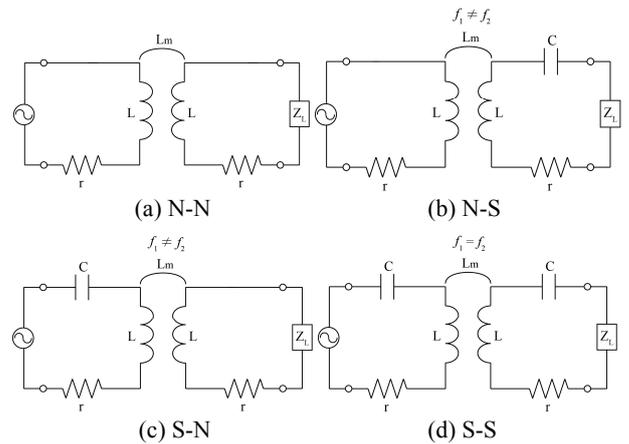


Fig. 2 磁界を用いた非接触給電と共振のタイプ

各回路トポロジーと電流の式を示す^[15]。S-S の電流の式は式(1)と式(2)に、S-N では式(3)と式(4)に、N-S では、式(5)と式(6)に、N-N では、式(7)と式(8)になる。

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L}{r_1(r_2 + R_L) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (1)$$

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

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L + j\omega L_2}{r_1(r_2 + R_L + j\omega L_2) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{j\omega L_m}{r_1(r_2 + R_L + j\omega L_2) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (4)$$

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L}{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + R_L) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{j\omega L_m}{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + R_L) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (6)$$

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L + j\omega L_2}{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + R_L + j\omega L_2) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{j\omega L_m}{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + R_L + j\omega L_2) + \omega^2 L_m^2} V_1 \quad (8)$$

また、 $\Phi = LI$ なので、各々の磁束とインダクタンスと電流の関係は式(9)～式(12)となる。

$$\Phi_{11} + \Phi_{21} = L_1 I_1 \quad (9)$$

$$\Phi_{12} = L_m I_2 \quad (10)$$

$$\Phi_{22} + \Phi_{12} = L_2 I_2 \quad (11)$$

$$\Phi_{21} = L_m I_1 \quad (12)$$

よって、 Φ_{11} と Φ_{22} は式(13)と式(14)で求まる。

$$\Phi_{11} = L_1 I_1 - L_m I_2 \quad (13)$$

$$\Phi_{22} = L_2 I_2 - L_m I_1 \quad (14)$$

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 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。この磁束は主磁束の一部 Φ_{21} によって生じる。

1次側の磁束の増加は1次側のコイルの電圧で確認でき、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。2次側の磁束の増加は2次側のコイルの電圧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。

これら事実共振現象で生じる電流の増加を考慮すると、以下の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、1次側と2次側のコイルに発生する磁界が小さい。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、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、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 に対して大きくなる。ただし、最適負荷の時には、 $I_1 \approx I_2$ なので^[15]、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。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。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。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、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、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、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なり、振幅も大きくなるはずである。

3. 電磁界解析と実験による検証

前章の理論を証明するために、電磁界解析と実験を行う。実験において得られた電流とそこから得られた磁束について、Table 1 にまとめて示す。計算には、Table 2 の回路パラメータの値を使用する。計算値と実験値では多少の誤差は確認できるが、ほぼ一致しており、前章で述べたことが実験を通して得ることができた。更に、電磁界解析で得られた磁束を Fig.3 に示す。最大の磁束の強さは N-N では 8.3[A/m]、S-N では 844.5[A/m]、N-S では 8.2[A/m]、S-S では 96.6[A/m]であり、各々その値で最大値を規格化されている。Fig.3 からも、磁束密度の強弱がこれまで述べてきた通りであることがわかる。

つまり、N-N は磁束が小さく、かつ、1次側の磁束が大きい。S-N は磁束が大きく、かつ、1次側の磁束が大きい。N-S は磁束が小さく、かつ、1次側と2次側がほぼ等しい。S-S は磁束が大きく、かつ、1次側と2次側がほぼ等しい。

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

(a) N-N

	Cal.		Exp.	
	ABS	θ	ABS	θ
I_1 [A]	1.0	271.0	1.0	271.0
I_2 [A]	0.1	136.6	0.1	136.4
Φ_{11} [uWb]	143.9	271.0	143.8	271.0
Φ_{21} [uWb]	16.0	271.0	16.0	271.0
Φ_{22} [uWb]	10.1	136.6	14.2	136.4
Φ_{12} [uWb]	1.1	136.6	1.6	136.4
Φ_m [uWb]	15.2	268.0	14.9	266.7
η [%]	27.1		27.6	

(b) S-N

	Cal.		Exp.	
	ABS	θ	ABS	θ
I_1 [A]	53.0	15.1	53.0	346.6
I_2 [A]	3.7	240.6	3.7	209.3
Φ_{11} [uWb]	7587.6	15.1	6204.1	346.6
Φ_{21} [uWb]	843.1	15.1	689.9	346.6
Φ_{22} [uWb]	531.6	240.6	508.0	209.3
Φ_{12} [uWb]	59.1	240.6	56.3	209.3
Φ_m [uWb]	802.8	12.1	649.7	343.3
η [%]	27.1		25.8	

(c) N-S

	Cal.		Exp.	
	ABS	θ	ABS	θ
I_1 [A]	1.0	275.8	1.0	275.7
I_2 [A]	0.9	185.8	0.9	187.8
Φ_{11} [uWb]	142.5	275.8	141.8	275.7
Φ_{21} [uWb]	15.8	275.8	15.8	275.7
Φ_{22} [uWb]	124.9	185.8	125.7	187.8
Φ_{12} [uWb]	13.9	185.8	13.9	187.8
Φ_m [uWb]	21.1	234.5	21.4	235.2
η [%]	76.8		77.6	

(d) S-S

	Cal.		Exp.	
	ABS	θ	ABS	θ
I_1 [A]	9.9	0.0	9.9	0.1
I_2 [A]	8.7	270.0	8.7	272.2
Φ_{11} [uWb]	1420.0	0.0	1416.2	0.1
Φ_{21} [uWb]	157.8	0.0	157.5	0.1
Φ_{22} [uWb]	1244.5	270.0	1245.4	272.2
Φ_{12} [uWb]	138.3	270.0	138.0	272.2
Φ_m [uWb]	209.8	318.8	213.1	319.8
η [%]	76.8		76.5	

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

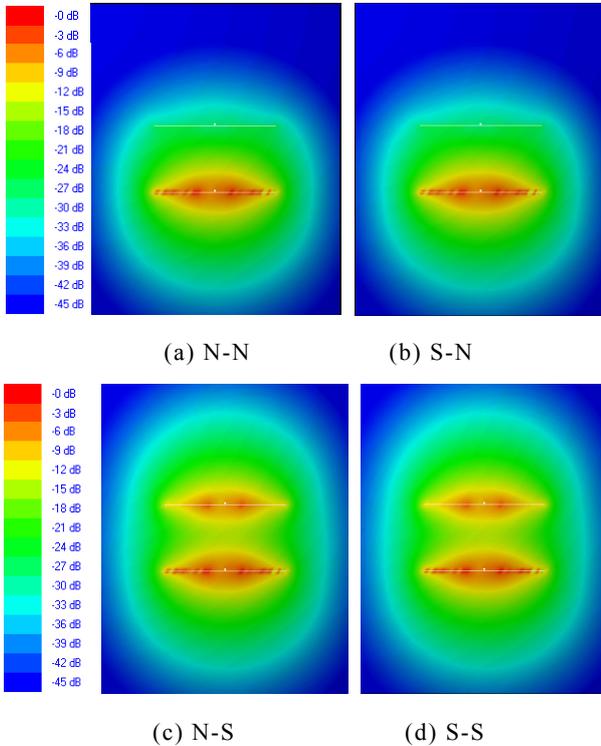


Fig.3. 近傍磁束

4. まとめ

磁界共振結合においては、回路トポロジーによる説明により、電磁誘導の一条件が磁界共振結合であることが報告された。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、従来の電磁誘導と磁界共振結合とにおいて、磁界共振結合において磁束が他のトポロジーと比べ、どのように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、磁束の振る舞いと回路トポロジーを比較し、その特徴を電磁界解析と実証実験を用いて示し、電力と効率と磁束の関係を示した。今回は、特徴をまとめた所まで示す事が出来たので、今後は、本現象のメカニズムを解明する予定である。

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] 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).
- [4] 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).
- [5] 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ー基本特性と位置ずれ特性ー」, 平 20 年度電気学会産業応用部門大会, Vol. II, 2-62, pp.539-542 (2008.8)
- [6] 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.
- [7] 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).
- [8] 栗井 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).
- [9] 栗井 郁雄, “磁気結合共振器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.
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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”, 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, WPT2010-07, 2010.7.
- [15] 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
- [16] 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.