

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：53901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06329

研究課題名（和文）偏波面の情報とGPS測位情報を共有する高効率なミリ波ワイヤレス給電システムの開発

研究課題名（英文）Study on wireless power transmission considering polarization and position

研究代表者

安藤 浩哉（Andoh, Hiroya）

豊田工業高等専門学校・情報工学科・教授

研究者番号：30212674

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：高効率なワイヤレス給電システムの実現には、偏波面を合わせるなどして送り手側と受け手側の双方の電磁界の結合を考慮し、電力の伝送効率を高めることが大切である。本研究では、磁界を介して結合している直列共振回路のS行列と電界を介して結合している並列共振回路のS行列が本質的に同じ形をしており、それぞれが3つの本質的な回路パラメータで構成されていることを見出した。また、送り手側での整合条件、受け手側での整合条件、電力伝送効率を最大化させるための条件が、これらの本質的な回路パラメータから求められることを明らかにした。定規とコンパスを用いた作図でkQ積から整合条件や最大電力伝送効率を求める方法も明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁界結合型直列共振回路のS行列が「kQ積」と「送電側でのポートインピーダンスと共振回路内の抵抗の比」と「受電側でのポートインピーダンスと共振回路内の抵抗の比」で構成され、電界結合型並列共振回路のS行列が「kQ積」と「送電側でのポートアドミタンスと共振回路内のコンダクタンスの比」と「受電側でのポートアドミタンスと共振回路内のコンダクタンスの比」で構成され、送電側での整合条件、受電側での整合条件、電力伝送効率を最大化させるための条件がこれらの量を用いて求められるという知見を得た。また、定規とコンパスを用いて、作図により、kQ積から整合条件や最大電力伝送効率を求めることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to obtain high efficiency for wireless power system, it is important to consider the coupling of the electromagnetic fields on the transmitter and the receiver, match the planes of polarization, and improve the transfer efficiency. The S-matrix of a pair of series resonant circuits coupled via a magnetic field and the S-matrix of a pair of parallel resonant circuits coupled via an electric field are essentially the same, including three essential parameters. These important circuit parameters have also been shown to provide matching conditions on the transmitter, matching conditions on the receiver, and conditions for maximizing transmission efficiency. We also clarified how to obtain matching conditions and maximum power transfer efficiency from kQ-products by drawing a diagram with a ruler and compass.

研究分野：電波工学，信号処理

キーワード：ワイヤレス電力伝送 偏波 電界結合 磁界結合 S行列 位相 kQ積 最大電力伝送効率

1. 研究開始当初の背景

指向性のあるアンテナで受電場所や給電場所の方向を限定できるミリ波帯の電磁波を利用することで、強い電磁波に人体が曝露させることがない安全で、小型・高効率な電力伝送システムを構築できる。特に、電力信号に、GPS 位置情報や偏波面に関する情報を重畳させることで、送電側と受電側（制御対象物）とが1対1に結び付けられた効率の良い電力伝送システムの実現が望まれていた。

2. 研究の目的

高効率なワイヤレス給電システムの実現には、偏波面を合わせるなどして送り手側と受け手側の双方の電磁界の結合を考慮し、電力の伝送効率を高めることが大切である。本研究では、ガウシアン光学に基づいた電力伝送系を、偏波面や電磁界結合という観点から考察して、電力の伝送効率を最大化するための条件を求め、理論限界に迫る電力伝送を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

ガウシアンビームには、次式で示されるように、ビーム伝搬方向の位置  $z$  によってビーム半径  $w$  と波面の曲率半径  $R$  が変化するという性質がある。ここで、 $w_0$  をビームウエスト半径、 $z_c$  を共焦点距離という。

$$\frac{w}{w_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_c}\right)^2}, \quad \frac{R}{z_c} = \frac{z}{z_c} + \frac{z_c}{z} \quad (z_c = \frac{\pi w_0^2}{\lambda})$$

上式から導出できる、下の関係式を利用することで、ガウシアン光学に基づいた電力伝送系で電力の伝送効率を最大化するための条件を求めることを考えた。

$$w_0(w, R) = \frac{w}{\sqrt{\left(\frac{\pi w^2}{\lambda R}\right)^2 + 1}}, \quad z(w, R) = \frac{R}{\left(\frac{\lambda R}{\pi w^2}\right)^2 + 1}$$

$$w_0(z, w) = \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + \frac{\lambda z}{2\pi}} \pm \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 - \frac{\lambda z}{2\pi}}, \quad R(z, w) = \frac{\pi^2 w^2}{2\lambda^2 z} \left( \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + \frac{\lambda z}{2\pi}} \pm \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 - \frac{\lambda z}{2\pi}} \right)$$

$$w_0(z, R) = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{z(R-z)}}, \quad w(z, R) = \sqrt{\frac{R\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{z}{R-z}}}$$

$$z(w_0, R) = \frac{R}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 - \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda}\right)^2}, \quad w(w_0, R) = \frac{\sqrt{R\lambda(R\lambda + \sqrt{R^2\lambda^2 - 4\pi^2 w_0^4})}}{\sqrt{2\pi w_0}}$$

$$z(w_0, w) = \frac{\pi w_0 \sqrt{w^2 - w_0^2}}{\lambda}, \quad R(w_0, w) = \frac{\pi w_0 w^2}{\lambda \sqrt{w^2 - w_0^2}}$$

しかしながら、偏波面や電磁界結合という観点からの考察をおこなうためには、この手法よりも、磁界を介して結合している直列共振回路の S 行列と電界を介して結合している並列共振回路の S 行列を詳細に考察して電力の伝送効率を最大化するための条件を求めた方が適切であると考えて、電磁界によって結合している共振回路の S 行列を考えることで高効率な電力伝送を実現することを目的とした。

4. 研究成果

(1) 磁界結合回路での本質的なパラメータ 図1のような磁界結合した2つの共振回路からなる回路全体のインピーダンス行列は

$$\begin{pmatrix} R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} & j\omega k\sqrt{L_1 L_2} \\ j\omega k\sqrt{L_1 L_2} & R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \end{pmatrix}$$

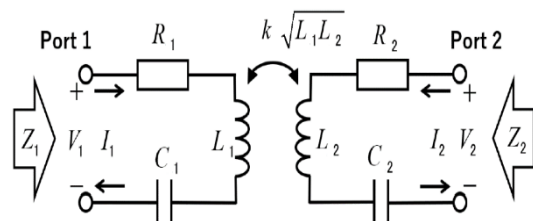


図1. 磁界結合共振回路

であり、特に共振周波数で散乱行列Sを求めると、

$$S = \begin{pmatrix} \frac{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 - \left(\frac{Z_1}{R_1} - 1\right)\left(\frac{Z_2}{R_2} + 1\right)}{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 + \left(\frac{Z_1}{R_1} + 1\right)\left(\frac{Z_2}{R_2} + 1\right)} & \frac{2jk\sqrt{Q_1Q_2}\sqrt{\frac{Z_1Z_2}{R_1R_2}}}{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 + \left(\frac{Z_1}{R_1} + 1\right)\left(\frac{Z_2}{R_2} + 1\right)} \\ \frac{2jk\sqrt{Q_1Q_2}\sqrt{\frac{Z_1Z_2}{R_1R_2}}}{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 + \left(\frac{Z_1}{R_1} + 1\right)\left(\frac{Z_2}{R_2} + 1\right)} & \frac{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 - \left(\frac{Z_1}{R_1} + 1\right)\left(\frac{Z_2}{R_2} - 1\right)}{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 + \left(\frac{Z_1}{R_1} + 1\right)\left(\frac{Z_2}{R_2} + 1\right)} \end{pmatrix}$$

のように見通しよく整理できることが分かった。ここで、 $Q_1 = \sqrt{L_1/C_1}/R_1 = \omega_0 L_1/R_1 = 1/\omega_0 C_1 R_1$ 、 $Q_2 = \sqrt{L_2/C_2}/R_2 = \omega_0 L_2/R_2 = 1/\omega_0 C_2 R_2$  であり、 $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$  は2つの共振回路の角共振周波数であ

る。散乱行列 $S$ が $k\sqrt{Q_1Q_2}$ 、 $Z_1/R_1$ 、 $Z_2/R_2$ という3つの本質的なパラメータで表現できることが分かった。

(2) 伝送効率の考察 散乱行列 $S$ の要素の中で $\eta = |S_{21}|^2$ は伝送効率であり、特に $k\sqrt{Q_1Q_2} = 10$ という場合の $10 \log_{10} \eta = 20 \log_{10} |S_{21}|$ をグラフにすると図2のようになる。図2では、高さ方向に伝送効率の、ポート1のインピーダンスとポート2のインピーダンスに対する依存性が分かるようになっている。図2から点 $(Z_1/R_1, Z_2/R_2) = (10, 10)$ 付近に伝送効率が最大値 $\eta_{\max}$ をとる点が存在することが分かった。

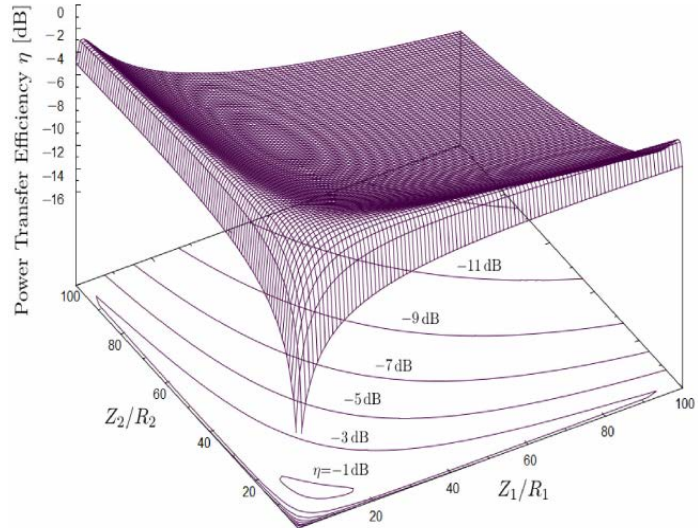


図2. 伝送効率のポートインピーダンス依存性

(3) 整合条件 (最大伝送効率を与える条件) の考察 前述の散乱行列 $S$ から、ポート1側、ポート2側の整合条件が、それぞれ、

$$\left(\frac{Z_1}{R_1} - 1\right)\left(\frac{Z_2}{R_2} + 1\right) = (k\sqrt{Q_1Q_2})^2$$

$$(S_{11} = 0),$$

$$\left(\frac{Z_1}{R_1} + 1\right)\left(\frac{Z_2}{R_2} - 1\right) = (k\sqrt{Q_1Q_2})^2$$

$$(S_{22} = 0)$$

であることが分かった。これらをグラフにすると、図3のようになる。図3で、実線がポート1側の整合条件、破線がポート2側の整合条件を示している。両側のポートの整合条件を同時に満たすの

$$\text{は } Z_{1opt}/R_1 = Z_{2opt}/R_2 = \sqrt{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 + 1}$$

という時であり、前述の $Z_1/R_1$ と $Z_2/R_2$ を2変数とする関数(伝送効率)を最大にする条件でもあることが分かった。

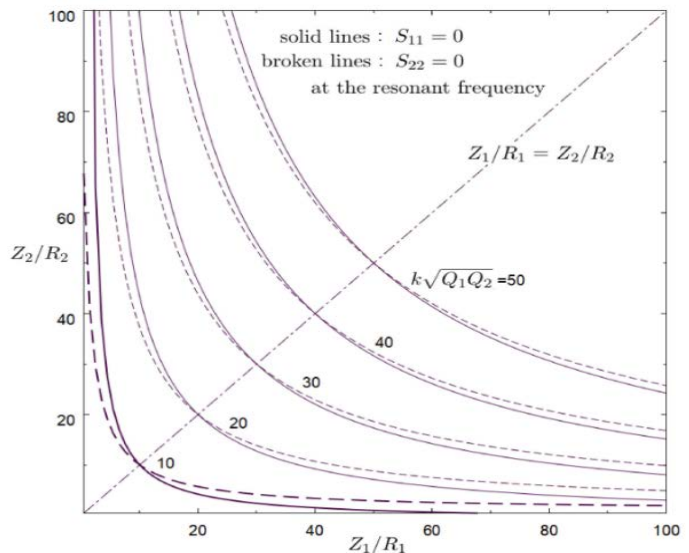


図3. ポートインピーダンスの整合条件

要するに、 $k\sqrt{Q_1Q_2}$  (kQ 積) を決めると整合条件と伝送効率が最大になる条件が決まり、最大伝送効率 $\eta_{\max}$ が決まる。最大伝送効率 $\eta_{\max}$ と $k\sqrt{Q_1Q_2}$  (kQ 積) の関係式は、

$$\eta_{\max} = \frac{\sqrt{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 + 1} - 1}{\sqrt{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 + 1} + 1}$$

あるいは、

$$k\sqrt{Q_1Q_2} = 2 \frac{\sqrt{\eta_{\max}}}{1 - \eta_{\max}}$$

で表わすことができることが確認できた。最大伝送効率 $\eta_{\max}$ と $k\sqrt{Q_1Q_2}$  (kQ 積) の関係のグラフは図4のようになる。

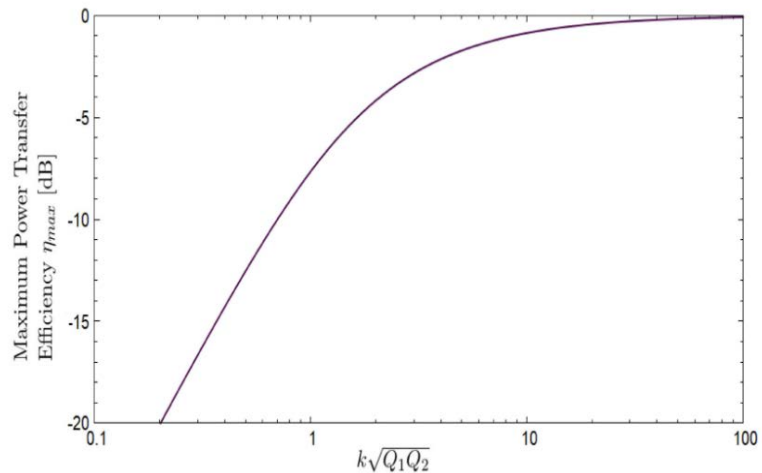


図4. kQ 積と最大伝送効率の関係

(4) 作図による条件の求め方  $k\sqrt{Q_1Q_2}$  (kQ 積) から最大伝送効率 $\eta_{\max}$ を定規とコンパスによって作図で求める方法を見出した。図5を用いて説明する。

- ① 長さが1 (正規化の基準となる長さ) の正方形 ABCD を描く
- ② 底辺を BC とする高さが $k\sqrt{Q_1Q_2}$  (kQ 積) の直角三角形 A' BC を描く
- ③ 正方形 ABCD の中に角 BCD (90 度) を中心角とする半径が1の扇形を描く
- ④ 扇形と辺 A' C の交点を点 X とする
- ⑤ 辺 BC を底辺とし、点 B と点 X を通る線を斜辺とする直角三角形 BCD' を描く
- ⑥ 斜辺 BD' と辺 AD の交点を点 E とする
- ⑦ 辺 AE を一辺とする正方形を正方形 ABCD の中に描く
- ⑧ 斜辺 A' C の長さが $Z_{1opt}/R_1, Z_{2opt}/R_2$  の大きさである
- ⑨ 辺 AE の長さが $|S_{21}|_{\max}$  (伝送効率が最大になる時の $|S_{21}|$ ) の大きさである
- ⑩ 辺 AE を一辺とする正方形の面積が $\eta_{\max}$  の大きさである

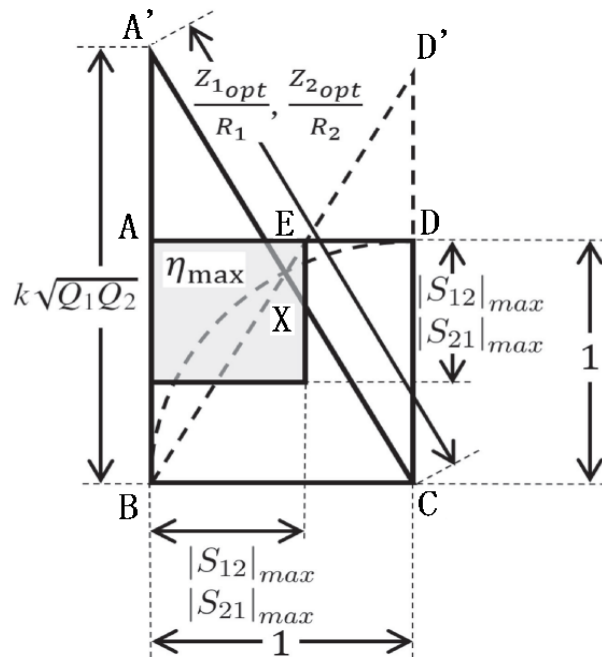


図5. 最大伝送効率を与える条件を求める図

(5) 磁界結合回路での S パラメータの大きさと位相の周波数特性 散乱行列 $S$ が $k\sqrt{Q_1Q_2}$ ,  $Z_1/R_1, Z_2/R_2$  という3つの本質的なパラメータで整理された散乱行列 $S$ からはSパラメータの大きさや位相の周波数特性が一般性を失うことなく計算できる。 $10 \log_{10} \eta_{\max} = -1\text{dB}$ を達成する

ために $kQ_1 = kQ_2 = 8.67$ とし、 $Z_1 = R_1\sqrt{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 + 1}$ ,  $Z_2 = R_2\sqrt{(k\sqrt{Q_1Q_2})^2 + 1}$  の場合で計算をすると、当然のことながら、 $k = 0.1$  と  $k = 0.05$  の場合で、 $Q_1 = Q_2 = \frac{8.67}{0.1} = 86.7$  と  $Q_1 = Q_2 = \frac{8.67}{0.05} = 173.4$  のようにQ値が変わり、図6に示すような結果が得られた。

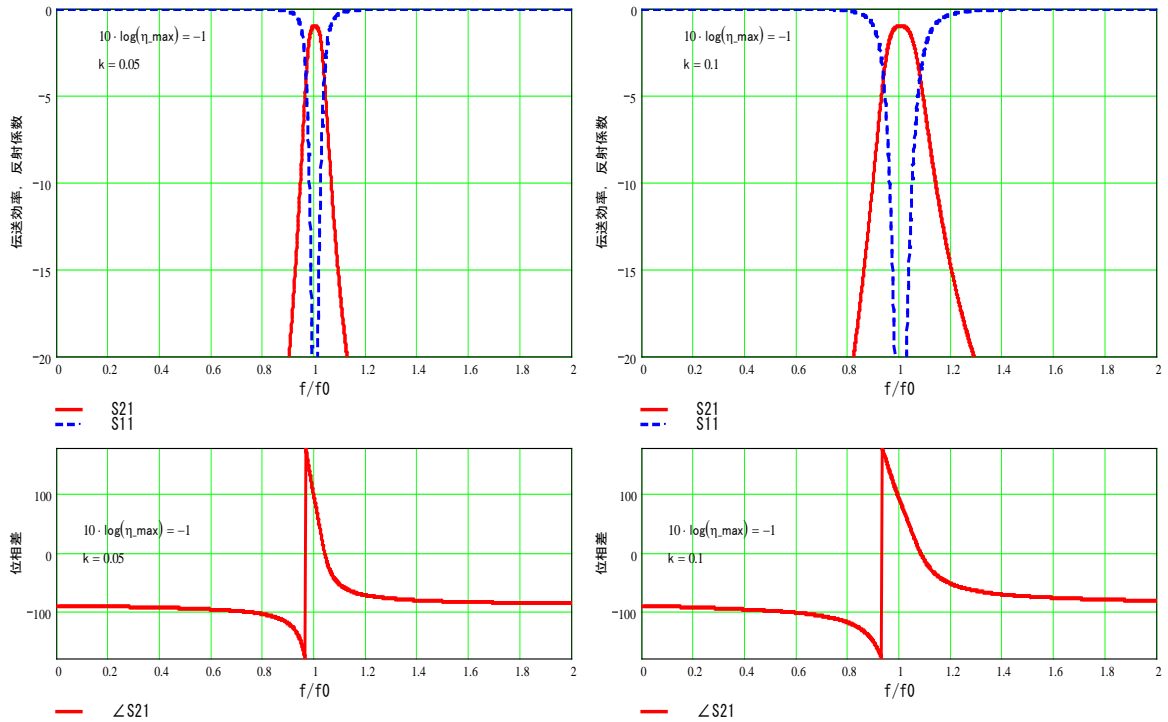


図 6. 磁界結合共振回路の S パラメータ ( $S_{22}, S_{21}$ ) の大きさと位相の周波数特性

(6) 電界結合回路での本質的なパラメータ 図 7  
 のような電界結合した 2 つの共振回路からなる回路全体のアドミタンス行列は

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{j\omega L_1} + j\omega C_1 & j\omega k\sqrt{C_1 C_2} \\ j\omega k\sqrt{C_1 C_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega L_2} + j\omega C_2 \end{pmatrix}$$

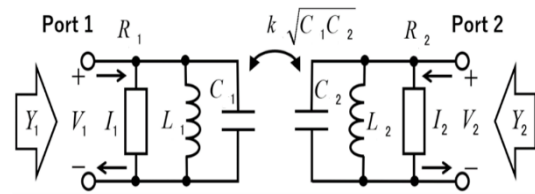


図 7. 電界結合共振回路

であり、特に共振周波数で散乱行列  $S$  を求めると、磁界結合共振回路と同様に、

$$S = \begin{pmatrix} \frac{(k\sqrt{Q_1 Q_2})^2 - \left(\frac{Y_1}{1/R_1} - 1\right)\left(\frac{Y_2}{1/R_2} + 1\right)}{(k\sqrt{Q_1 Q_2})^2 + \left(\frac{Y_1}{1/R_1} + 1\right)\left(\frac{Y_2}{1/R_2} + 1\right)} & \frac{2jk\sqrt{Q_1 Q_2} \sqrt{\frac{Y_1}{1/R_1} \frac{Y_2}{1/R_2}}}{(k\sqrt{Q_1 Q_2})^2 + \left(\frac{Y_1}{1/R_1} + 1\right)\left(\frac{Y_2}{1/R_2} + 1\right)} \\ \frac{2jk\sqrt{Q_1 Q_2} \sqrt{\frac{Y_1}{1/R_1} \frac{Y_2}{1/R_2}}}{(k\sqrt{Q_1 Q_2})^2 + \left(\frac{Y_1}{1/R_1} + 1\right)\left(\frac{Y_2}{1/R_2} + 1\right)} & \frac{(k\sqrt{Q_1 Q_2})^2 - \left(\frac{Y_1}{1/R_1} + 1\right)\left(\frac{Y_2}{1/R_2} - 1\right)}{(k\sqrt{Q_1 Q_2})^2 + \left(\frac{Y_1}{1/R_1} + 1\right)\left(\frac{Y_2}{1/R_2} + 1\right)} \end{pmatrix}$$

のように見通しよく整理できることが分かった。ここで、 $Q_1 = \sqrt{C_1/L_1}/1/R_1 = \omega_0 C_1 R_1 = R_1/\omega_0 L_1$ 、 $Q_2 = \sqrt{C_2/L_2}/1/R_2 = \omega_0 C_2 R_2 = R_2/\omega_0 L_2$  であり、 $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$  は 2 つの共振回路の角共振周波数である。磁界結合共振回路と同様に、散乱行列  $S$  が  $k\sqrt{Q_1 Q_2}$ 、 $Y_1/1/R_1$ 、 $Y_2/1/R_2$  という 3 つの本質的なパラメータで表現できており、整合条件 (伝送効率を最大にする条件) が、 $Y_{1,opt}/1/R_1 = Y_{2,opt}/1/R_2 = \sqrt{(k\sqrt{Q_1 Q_2})^2 + 1}$  であることも明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Koichi Maezawa, Masayuki Mori, and Hiroya Andoh	4. 巻 21
2. 論文標題 Noise Floor Reduction in Frequency Delta-Sigma Modulation Microphone Sensors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors, MDPI	6. 最初と最後の頁 3470
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s1010000	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Andoh Hiroya, Tsuzuki Keita, Oikawa Dai, Sugiura Toko, Tsukamoto Takehiko, Maezawa Koichi	4. 巻 16
2. 論文標題 Study on Impedance Matching and Maximum Wireless Power Transfer Efficiency of Circuits with Resonant Coupling Based on Simplified S-matrix	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 20190156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.16.20190156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Muroga Sho, Endo Yasushi, Takamatsu Masanari, Andoh Hiroya	4. 巻 54
2. 論文標題 T-Type Equivalent Circuit of On-Chip Microstrip Line With Magnetic Film-Type Noise Suppressor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 8001204
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2018.2818119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 H.Andoh, K.Tsuzuki, D.Oikawa, T.Sugiura, T.Tsukamoto, K.Maezawa
2. 発表標題 Impedance matching based on simplified S-matrix for maximizing wireless power transfer efficiency
3. 学会等名 International Conference on Engineering and Industrial Technology 2020, P86-T4A（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安藤浩哉、都築啓太、及川大、杉浦藤虎、塚本武彦、前澤宏一
2. 発表標題 磁界結合共鳴方式電力伝送系のSパラメータと最大伝送効率
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前澤宏一、中野大輔、森雅之、石井仁、安藤浩哉
2. 発表標題 THz帯域を目指した新構造可変位相シフト
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 室賀翔、遠藤恭、安藤浩哉、田中元志
2. 発表標題 磁性膜を配置したMSLの回路定数の計測と特性解析
3. 学会等名 電気学会全国大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安原裕登、河合祐弥、大島正彦、井上真澄、安藤浩哉
2. 発表標題 災害救助用ロボット実現に向けたマイクロ波無線電力伝送マルチコプタ中継システムの損失に関する評価
3. 学会等名 電子情報通信学会大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sho Muroga, Yasushi Endo, Masanari Takamatsu, Hiroya Andoh
2. 発表標題 T-Type Equivalent Circuit Analysis of On-Chip Lines with Magnetic Film-type Noise Suppressor
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤健吾, 安藤浩哉
2. 発表標題 分布結合方式を用いた移相器の開発
3. 学会等名 高等専門学校第3ブロック専攻科研究フォーラム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関