

# 給電方向制御可能なワイヤレス電力伝送の構築と クレーンカメラ給電への適用

山根 俊博 古川 慧  
(技術研究所) (技術戦略室)

## Development of Feed Efficiency Adaptive Control for Wireless Power Transfer

Toshihiro Yamane and Kei Furukawa

本論文は、給電方向制御を目的とした磁界結合方式のワイヤレス電力伝送について述べる。送受電に各2本のアンテナを接続し、整合用コンデンサの容量を調整することにより給電方向や給電距離を制御する。ループアンテナによる位置ずれの影響に関する実験では、位置ずれ距離ごとにコンデンサ容量を設計することにより、位置ずれ時の伝送特性 S21 の低下を 0.3 から 0.6 に改善可能であるという結果が得られた。伝送距離の長距離化の検討では、適切な形状のヘリカルアンテナを用いることにより、伝送距離 100~1000mm においてワイヤレス電力伝送が可能であることを示した。さらに本方式をクレーンカメラへの給電に適用し、実際のクレーンカメラへのワイヤレス電力伝送を実証した。

This paper describes about new Wireless Power Transfer to be able to adapt feed efficiency. The WPT system consists of two antennas and a matching circuit in the transmission unit and reception unit, respectively. The feed direction and distance are controlled by adjusting capacitance of matching capacitor. The experimental result indicates that the transmission characteristics S21 can be improved by controlling the capacitance for each misalignment distance. In the experiment using helical antennas, it was shown that WPT is possible at the distance of 100 to 1000mm by control the capacitance properly. Furthermore, the WPT to actual crane camera was demonstrated.

### 1. はじめに

近年、スマートフォンに代表される二次電池を利用した情報通信端末が急速に普及している。通信は無線化された一方、充電についてはケーブル接続が一般的である。ワイヤレス電力伝送により、将来的には建物内の給電エリア内のスマートフォンなどの機器を有線接続することなく自動的に充電することが可能となる(図-1 参照)。

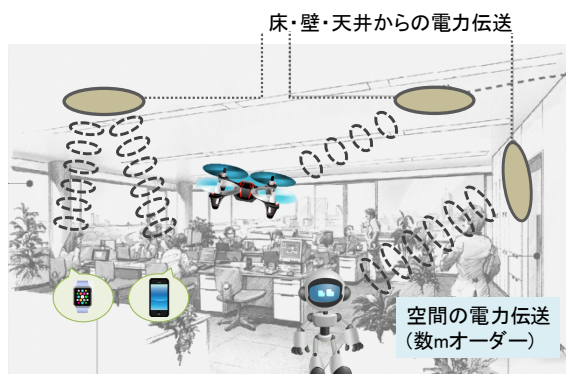


図-1 ワイヤレス電力伝送の将来イメージ

ワイヤレス電力伝送は、伝送する電力や距離に応じていくつかの方式が提案されている(図-2 参照)。比較的長距離(数 cm~数m)な電力伝送が可能な磁界結合方式は、MIT 発表<sup>1)</sup>以来、各所で研究が進められている。同方式では送電装置と受電装置の位置ずれにより伝送効率が著しく低下するため、送受電装置の位置合わせが必要となる。

本論文では、位置ずれによる伝送効率低下を防止するため、給電方向制御を目的とした磁界結合方式のワイヤレス電力伝送(以下、「本方式」)について述べる。

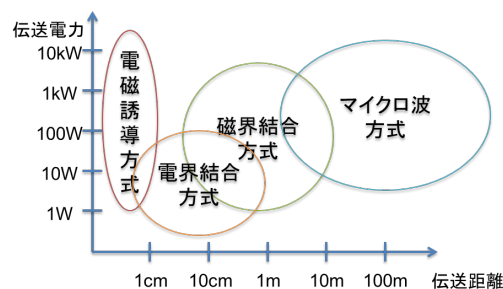


図-2 ワイヤレス電力伝送の方式

## 2. 回路設計

### 2.1 回路構成

本方式の回路構成を図-3 に示す。同図左半分が送電側、右半分が受電側の2端子対回路であり、送電アンテナと受電アンテナを各2本並列に接続している (ANT<sub>1</sub> ~ ANT<sub>4</sub>)。V<sub>in</sub> は電源 (内部抵抗 R<sub>0</sub>)、R<sub>L</sub> は負荷抵抗であり、L<sub>ij</sub> は自己インダクタンス (i = j の場合)、もしくは相互インダクタンス (i ≠ j の場合) である。各アンテナと電源、負荷に整合用のリアクタンス素子を直列に接続している。送電回路と受電回路の物理的な位置関係に応じてリアクタンス X<sub>0</sub> ~ X<sub>5</sub> を調整することで、回路の整合をとる。

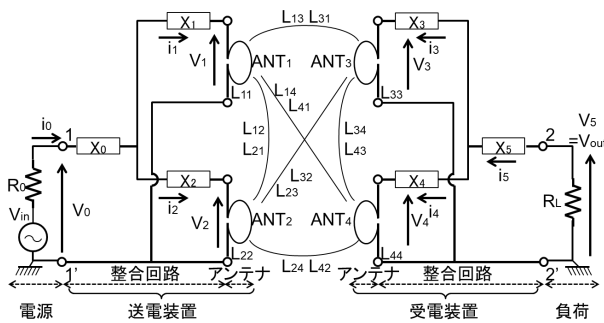


図-3 本方式の回路構成

## 2.2 設計計算方法

### 2.2.1 設計ロジック

図-3 の入力ポート 1、出力ポート 2 からそれぞれ電源側、負荷側を見込んだインピーダンス 50Ω を仮定し、S パラメータの伝送特性 S<sub>21</sub> が最大となるように X<sub>0</sub> ~ X<sub>5</sub> を決定した。具体的には、MATLAB の fminsearch アルゴリズム (シプレックス法) により式(1)の最適化計算を行った

$$\text{最小化: } f(X_0 \sim X_5) = -2 \times V_5 \div V_{in} = -S_{21}$$

制約式:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -jX_0 & -jX_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -jX_0 & 0 & -jX_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j\omega L_{11} & j\omega L_{12} & j\omega L_{13} & j\omega L_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & j\omega L_{21} & j\omega L_{22} & j\omega L_{23} & j\omega L_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & j\omega L_{31} & j\omega L_{32} & j\omega L_{33} & j\omega L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & j\omega L_{41} & j\omega L_{42} & j\omega L_{43} & j\omega L_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -jX_3 & 0 & -jX_5 & 0 & -jX_5 & 0 & -jX_5 & 0 & -jX_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -jX_4 & -jX_5 & 0 & -jX_5 & 0 & -jX_5 & 0 & -jX_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ i_0 \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 2.2.2 最適化計算の変数範囲の制限

式(1)の最適化計算では、設計パラメータ X<sub>0</sub> ~ X<sub>5</sub> を実際のコンデンサやインダクタなどの回路素子で実現可能な値とする必要がある。制約付き最適化計算の制約条件として上限値と下限値を設定すると計

算が収束しにくくなるため、極力制約なしの最適化計算を行うことが望ましい。

X<sub>0</sub> ~ X<sub>5</sub> をそれぞれ x<sub>0</sub> ~ x<sub>5</sub> の関数とし、X<sub>n</sub>(x<sub>n</sub>) を下式とすることにより、X<sub>0</sub> ~ X<sub>5</sub> を任意の範囲に制限することが可能となる。ここで、最適化の変数は x<sub>n</sub>、制限範囲は a < X<sub>n</sub> < b である。

$$X_n = a + (b - a) \frac{1 + \tanh x_n}{2} \quad (2)$$

### 2.2.3 ケーブル長と寄生成分の組み込み

図-3 の回路において、アンテナ設置の都合上、アンテナ ANT<sub>1</sub> ~ ANT<sub>4</sub> と整合回路を有限長のケーブルで接続する必要がある。ケーブル長を考慮しない場合、ケーブル部分の位相回転により設計計算に誤差が生じる。ケーブル長を設計計算に組み込む方法を以下に述べる。

図-4 に示すように、例えば ANT<sub>1</sub> と整合回路を接続するケーブルを長さ L の伝送線路としてモデル化する。ここで、a と b はそれぞれ x 軸正方向と負方向に伝搬する波である。x = 0, L における境界条件により、下式が得られる。

$$\begin{cases} V'_1 + V_1 = (a + b)(1 + e^{-j\beta L}) \\ V'_1 - V_1 = (a - b)(1 - e^{-j\beta L}) \\ i'_1 = \frac{1}{Z_c}(a - be^{-j\beta L}) \\ i_1 = \frac{1}{Z_c}(ae^{-j\beta L} - b) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)から a と b を消去すると下式が得られる。

$$\begin{cases} (1 - e^{-j\beta L})(V'_1 + V_1) = Z_c(1 + e^{-j\beta L})(i'_1 - i_1) \\ (1 + e^{-j\beta L})(V'_1 - V_1) = Z_c(1 - e^{-j\beta L})(i'_1 + i_1) \end{cases} \quad (4)$$

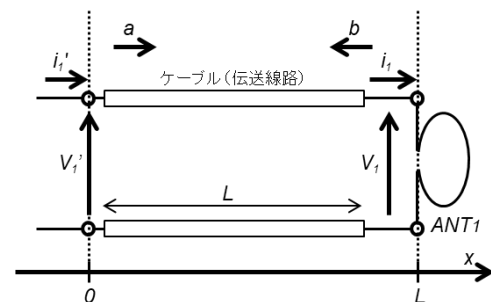


図-4 ケーブル部の計算モデル

同様にアンテナ ANT<sub>2</sub> ~ ANT<sub>4</sub> に接続するケーブルについても関係式を求め、式(1)の変数に V'<sub>i</sub> ~ V<sub>i</sub>

と  $i_i \sim i_i$  を追加して上記関係式を組み込むことにより、ケーブル部分の位相回転の影響を考慮した。

回路素子や配線部分の寄生抵抗、容量とインダクタンスについては、実測値を式(1)の回路方程式に組み込んだ。

### 3. 基礎特性実験

本章では、本方式の距離特性と角度特性を把握するため、送受電アンテナとして最も単純な形状の一つである単巻ループアンテナを用いた場合の伝送特性  $S_{21}$  の測定結果を示す。

#### 3.1 距離特性

##### 3.1.1 測定方法

本方式の距離特性を把握するため、VNA(Agilent Technology 8753ET)により伝送特性  $S_{21}$  を測定した。測定システムの構成を図-5 に示す。送受電の単巻ループアンテナは、内半径 100mm、 $\phi 1.2$ mm の銅線を円盤状の発泡ポリスチレンに巻いたものを使用した。送受電アンテナ間距離  $d_0$  については、20、50、100mm の3通りについて測定した。

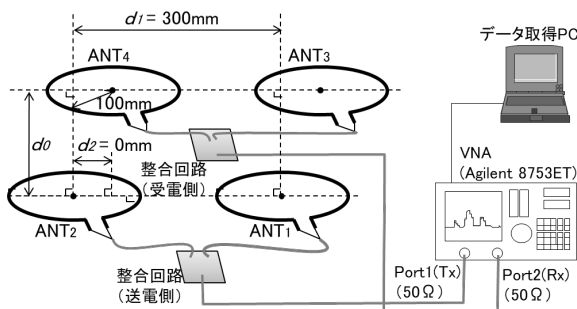


図-5 測定システム

##### 3.1.2 設計結果

設計周波数  $f_0 = 13.56$  MHz とし、 $X_0 \sim X_5$  を設計した結果を表-1 に示す。リアクタンス素子はコンデンサとし、 $f_0$  での容量で表示している。

表-1  $X_0 \sim X_5$  の設計結果

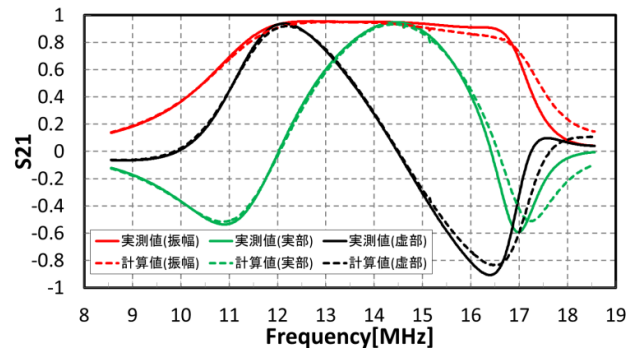
$d_0$ [mm]	$X_0$ [pF]	$X_1$ [pF]	$X_2$ [pF]	$X_3$ [pF]	$X_4$ [pF]	$X_5$ [pF]
20	203	290	30	208	33	423
50	161	276	46	368	41	124
100	84	185	71	158	24	450

##### 3.1.3 測定結果

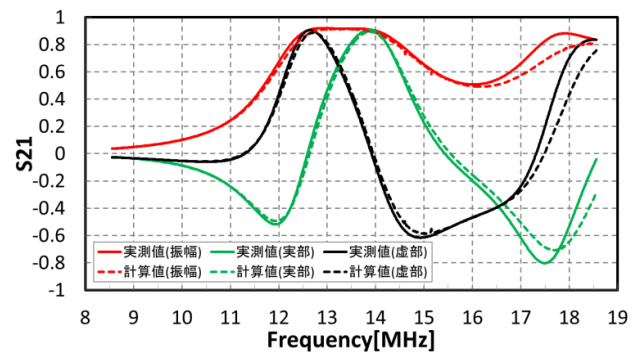
前節で設計した回路について、伝送特性  $S_{21}$  を測定した。測定の様子を図-6 に示す。送受電アンテナの配置には、発泡ポリスチレンを利用した。送受電の整合回路はユニバーサル基板上に実装した。



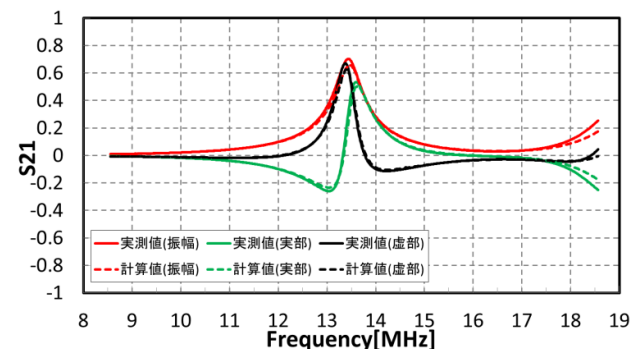
図-6 測定風景



(a)  $d_0 = 20$  mm



(b)  $d_0 = 50$  mm



(c)  $d_0 = 100$  mm

図-7 測定結果

図-7に伝送特性  $S_{21}$  の測定結果を示す。併せて、式(1)の制約式として示した回路方程式により周波数特性を計算した結果も示している。3 ケースの測定結果とともに、設計周波数  $f_0$  にて振幅がほぼ最大となっている。さらに計算値と実測値は良好に一致しており、本方式の設計方法の妥当性が確認された。

### 3.2 角度特性

#### 3.2.1 測定方法

本方式の角度特性を把握するため、前節と同様な測定システムと送受電のアンテナにて VNA により伝送特性 S21 を測定した。送受電アンテナ間距離  $d_0$  については 100mm 固定とし、送受電システムの位置ずれ  $d_2$  は 0、100、200、300mm の 4 通りとした。

#### 3.2.2 設計結果

設計周波数  $f_0 = 13.56\text{MHz}$  とし、 $X_0 \sim X_5$  を設計した結果を表-2 に示す。設計条件等は前節と同様である。

表-2  $X_0 \sim X_5$  の設計結果

$d_2$ [mm]	$X_0$ [pF]	$X_1$ [pF]	$X_2$ [pF]	$X_3$ [pF]	$X_4$ [pF]	$X_5$ [pF]
0	162	190	65	192	64	157
100	84	233	62	159	78	175
200	115	168	75	82	150	175
300	304	149	80	66	195	127

#### 3.2.3 測定結果

前節で設計した回路について、伝送特性 S21 を測定した。測定の様子を図-8 に示す。送受電アンテナの配置には、塩化ビニル製のスタンドを利用した。送受電の整合回路は、前節同様ユニバーサル基板上に実装した。

S21 の測定結果を図-9 に示す。同図(a)は比較のために  $d_2 = 0\text{mm}$  において最適化した  $X_0 \sim X_5$  に固定したまま  $d_2$  を変化させた場合、同図(b)は  $d_2$  ごとに最適化した  $X_0 \sim X_5$  を用いた場合の測定結果である。同図(a)において  $d_2 = 200\text{mm}$  の場合は S21 のピーク値が 0.3 程度に低下しているが、同図(b)では 0.6 程度となっている。また同図(b)において、位置ずれが最大となる  $d_2 = 300\text{mm}$  が  $d_2 = 100\text{mm}$ 、200mm と比較して S21 のピークが大きくなっている。これは、 $d_2 = 300\text{mm}$  では ANT<sub>1</sub> と ANT<sub>4</sub> が正対しており、送受電アンテナ間の結合が大きくなっているためである。

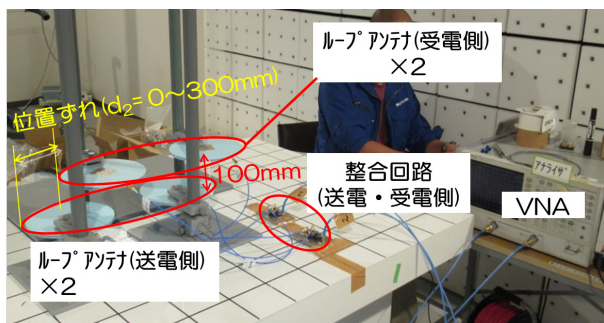
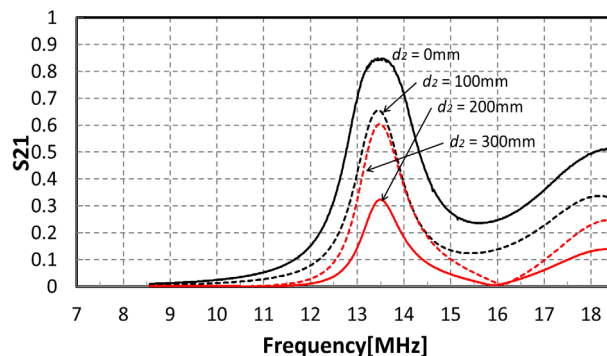
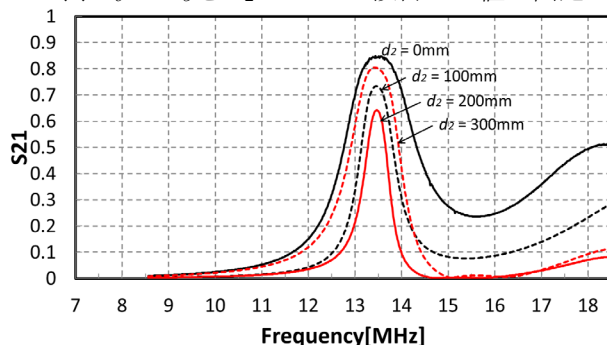


図-8 測定風景



(a)  $X_0 \sim X_5$  を  $d_2 = 0\text{mm}$  で設計した値に固定



(b)  $X_0 \sim X_5$  を  $d_2$  に合わせて設計

図-9 測定結果

## 4. 伝送距離の長距離化検討

本方式の無線電力伝送の利便性を向上するためには、長距離かつ高効率な電力伝送が求められる。本章では、送受電のアンテナとして相互インダクタンスの向上が見込まれるヘリカルアンテナを用いた場合について述べる。

### 4.1 測定方法

図-5 に示した測定システムにおいて、 $d_2 = 0\text{mm}$  固定とし、 $d_0 = 100, 300, 500, 1000\text{mm}$  の 4 通りについて S21 を測定した。ここで送受電アンテナとしては、内半径 100mm、線間隔 10mm、14 巻のヘリカルアンテナ ( $\phi 1.6\text{mm}$  のリッツ線) を使用した。

### 4.2 設計結果

設計周波数  $f_0 = 13.56\text{MHz}$  とし、 $X_0 \sim X_5$  を設計した結果を表-3 に示す。設計条件等は前節と同様である。設計結果が 0pF の個所があるが、 $X_0 \sim X_5$  の最適化計算時のリアクタンスの制限範囲を  $0\Omega$  以下としており、上限値に収束したためである。

表-3  $X_0 \sim X_5$  の設計結果

$d_0$ [mm]	$X_0$ [pF]	$X_1$ [pF]	$X_2$ [pF]	$X_3$ [pF]	$X_4$ [pF]	$X_5$ [pF]
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
300	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
500	0.0	587	0	0	36	367
1000	0.0	234	0.0	0.0	44	213



### 4.3 測定結果

$d_2 = 0\text{mm}$  固定とし、 $d_0$  を変化させた場合の  $S_{21}$  の測定結果を図-10に示す。 $X_0 \sim X_5 = 0\Omega$  については、素子部を短絡した。

同図より、測定した全ての  $d_0$  においてワイヤレス電力伝送が実現可能なことが確認された。ここで  $d_0 = 500$  と  $1000\text{mm}$  では、ほぼ  $f_0$  で  $S_{21}$  がピークとなっているが、 $d_0 = 100$  と  $300\text{mm}$  ではピーク値となる周波数と  $f_0$  に差異が生じている。既述のとおり  $X_0 \sim X_5$  の最適化計算の制限範囲を  $0\Omega$  以下としているため、 $f_0$  において整合が取れなかったと考えられる。 $d_0$  が小さい、すなわち送受電システム間距離が短い場合に整合しなかった理由は、送受電アンテナ間に容量性の結合が生じたためと考えられる。ヘリカルアンテナの形状により容量成分は調整可能であるが、今後の検討課題である。

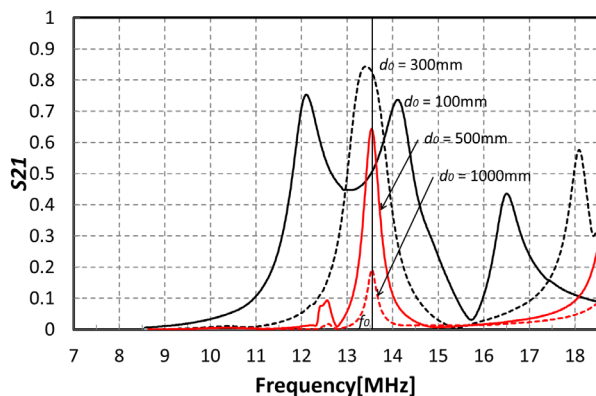


図-10 測定結果

### 5. クレーンカメラへの給電実証

クレーン作業用のクレーンカメラは、通常ジブ先端部に取り付けられており、地上での玉掛作業の視認性が悪いという課題がある。吊荷の直近となるフック部にクレーンカメラを設置すべきであるが、有線電源のクレーンカメラでは電源配線の問題、蓄電池内蔵型では電池交換の手間などの問題がある。

そこでフック部に取り付けたクレーンカメラへの給電に本システムを適用した。本章では、フック部に取り付けたクレーンカメラに対し、ワイヤレス電力伝送により給電した結果について述べる。

#### 5.1 システム構成

本システムの外観を図-11に示す。送電部はクレーンジブ先端からワイヤで吊るされており、高さは固定される。受電部はエコライザーシーブに固定され、フック部の巻上げにより上下に移動する。夜間の充電時は、巻上高さにより送受電アンテナ間距離  $d_0$  が変動する。

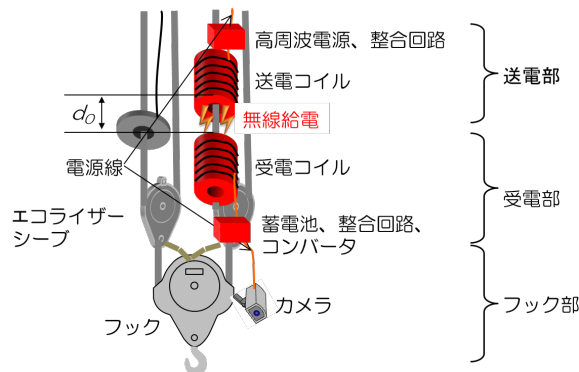


図-11 システム外観

本システムの回路構成を図-12に示す。送電部では、ACアダプタから供給されるDC24Vを高周波電源(最大出力30W)により動作周波数  $f_0 = 13.56\text{MHz}$  に変換し、整合回路を介して送電アンテナに給電する。受電部では受電した高周波電力をブリッジ回路で整流し、蓄電池に充電、もしくはカメラで利用する。

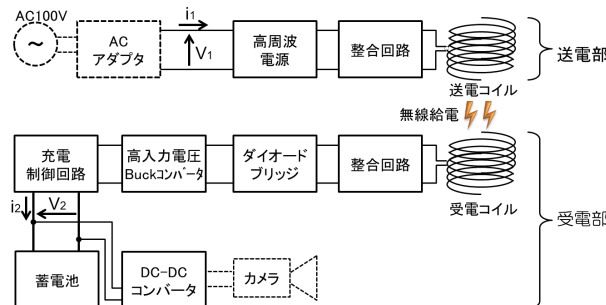


図-12 回路構成

送受電アンテナは、図-13に示すように中空円筒の亚克力を基材として用い、内半径  $100\text{mm}$ 、線間隔  $10\text{mm}$ 、16巻のヘリカルアンテナとした。アンテナの横ずれを防止するため、円筒の中心部分に塩ビ管(呼び径  $20\text{mm}$ )を設置した。送受電アンテナは各1本とし、整合回路には図-3の回路の  $ANT_2$  と  $ANT_4$  を開放、 $X_0$  と  $X_5$  を短絡したものを用了。 $X_1$  と  $X_3$  は、既述の最適化演算により設計した。送受電アンテナ間距離  $d_0$  の位置ずれへの対応のため、 $d_0$  に応じて  $X_1$  と  $X_3$  を制御する構成とした。

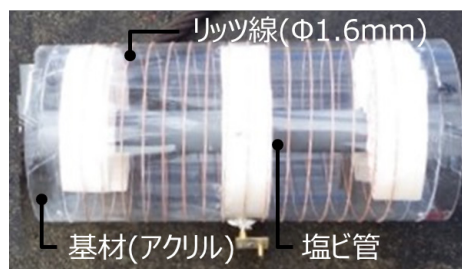


図-13 送受電アンテナ

## 5.2 システム設計

アンテナ間距離  $d_0$  は設計距離 300mm と設定し、位置ずれ  $\pm 200$ mm を想定して 100、300、500mm の 3 通りを設計した。整合回路のコンデンサ容量の設計結果を表-4 に示す。

表-4  $X_1$  と  $X_3$  の設計結果

$d_0$ [mm]	$X_1$ [pF]	$X_3$ [pF]
100	0	0
300	290	403
500	130	178

## 5.3 実験方法

本システムをラフタークレーンで揚重し、アンテナ間距離  $d_0 = 100, 300, 500$ mm の 3 通りについて、図-12 中の電圧値  $V_1, V_2$  [V]、電流値  $i_1, i_2$  [A] を測定した。測定結果から、入力電力  $P_{in}$  [W] ( $= V_1 \times i_1$ )、出力電力  $P_{out}$  [W] ( $= V_2 \times i_2$ )、伝送効率  $\eta$  [%] ( $= P_{out} \div P_{in} \times 100$ ) を求めた。実証実験の様子を図-14 に示す。

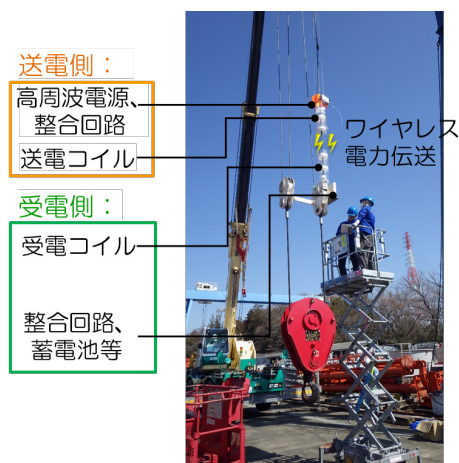
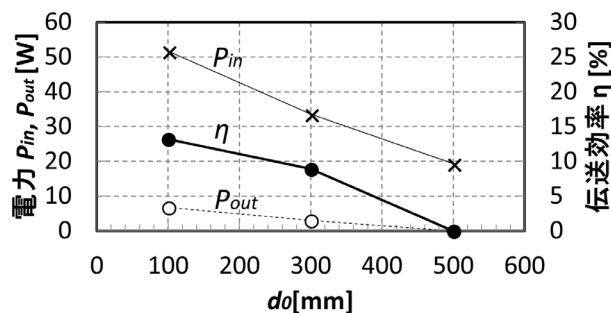


図-14 実証実験の様子

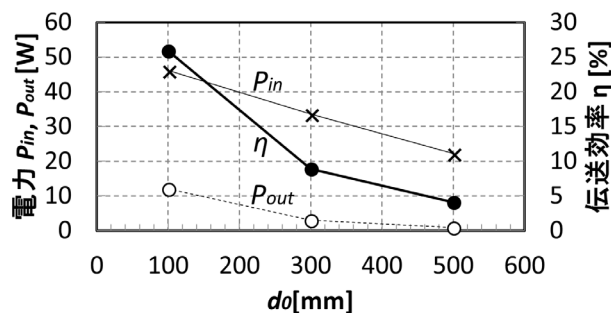
## 5.4 実験結果

電流と電圧の測定値から  $P_{in}$ 、 $P_{out}$  と  $\eta$  を求めた結果を図-15 に示す。同図 (a) は比較のために  $d_0 = 300$ mm において設計したコンデンサ容量に固定したまま  $d_0$  を変化させた場合、同図 (b) は送受電の整合回路のコンデンサ容量を表-4 に示した通り  $d_0$  ごとに制御した場合の結果である。

同図 (a) の  $d_0 = 500$ mm において、出力電力  $P_{out} = 0$ W となっている。充電制御回路への入力電圧が電圧範囲の下限値を下回り、電力が出力されなかったためである。同図 (a) と (b) を比較すると、コンデンサ容量の制御により  $d_0$  が設計距離 300mm から 100mm にずれた場合は 13.2% から 25.9% に、500mm にずれた場合は伝送効率が 0% から 4.1% に向上するという結果が得られた。



(a)  $X_0$  と  $X_3$  を  $d_2 = 300$ mm で設計した値に固



(b)  $X_0$  と  $X_3$  を  $d_2$  に合わせて設計

図-15 測定結果

## 6. まとめ

本論文では、給電方向の制御を目的とした磁界結合方式のワイヤレス電力伝送について述べた。本方式の距離特性と角度特性を測定した結果により、本方式の有効性を確認した。さらに本方式のワイヤレス電力伝送をクレーンカメラへの給電に適用し、実際のクレーンにより実証実験を行った結果を述べた。実験結果から、位置ずれ距離に応じてコンデンサ容量を適切に制御することにより、伝送効率の低下を抑制できることが明らかになった。

今後は実用化に向け、伝送特性の向上およびアンテナの小型化等について検討する。さらに電磁波の生体影響へも配慮することにより、人の居住空間へも実装可能なワイヤレス電力伝送を実現したい。

## 謝辞

本研究・開発にあたり、理論構築から実験方法に関する技術指導いただきました東京工業大学西方准教授に謝意を示します。

## <参考文献>

- 1) A.Kurs et al.: Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, Science 2007, Vol.317, No.5834, pp.83-86, 2007