

# アームロボット用非接触給電のための 直列共振回路における多層円板コンデンサの提案

Multilayer disc capacitor in series resonant circuit for wireless power transmission on an arm robot

福森 康洋, 植村 渉, 粟井 郁雄

Yasuhiro FUKUMORI, Wataru UEMURA and Ikuo AWAI

龍谷大学, 株式会社リューテック

Ryukoku University, Ryu-tech

fukumori@vega.elec.ryukoku.ac.jp, wataru@rins.ryukoku.ac.jp, awai@ryutech.com

## Abstract

アームロボットの電力線が疲労切断の危険性及びケーブルによってアームの動きが障害, 制限される問題に対して, 共振回路による非接触給電法を用いる研究が成されている. アームロボットには上腕部分に近づくにつれて, 小型化していくタイプがある. この場合, アームの上腕部分の関節へ近づくほど受電装置のスペースも小さくなる. その状況下でも全体の共振周波数を保つには共振回路の素子である円板コンデンサの直径を小さくしても容量が変化しない方法, あるいはコイル側のインダクタンスを増加する方法が必要となる.

本論文は関節部に取り付けるコンデンサ及びコイルを小型化する手法について検討する. また実際にそれらを用いた共振回路を作製し, その伝送効率やアーム部分の多段化に適した回路構造についても検討していく.

## 1 はじめに

近年, アームロボットの高速度性が向上し, それに伴い, アームロボットの関節は幾度も屈曲する. その影響により, アームロボットに取り付けている電力線に負荷がかかり, 疲労断線することが危惧されている. また, アームロボットに幾本も取り付けている電力線はロボットの屈曲, 回転を障害する危険性がある. それらの問題の解決策として, 非接触給電が求められている.

従来方法では共振回路をアームロボットに組み込み, その共振回路に必要な静電容量成分であるコンデンサとして回転円板コンデンサを取り付ける. それにより, 円板コンデンサが関節部分を担う方法が提案されている[1]. しかし, アームロボットには上腕に行くほどアームが細

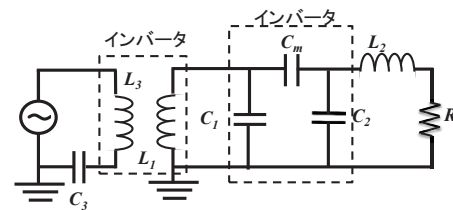


Figure 1: 従来のアームロボット用共振回路

く, 小型化するタイプも存在する. そのアームロボットに実装する場合, 共振回路の要素であるコンデンサ, コイルを小型化する必要がある. その場合静電容量はコンデンサの面積に依存するので, 容量が減少する. それに伴い, 共振周波数が変化する. この時, 全体の共振周波数を一定に保つ方法が必要になる.

また, 従来法の回路は Figure 1 のように, 不安定な対地容量を防ぐためにコンデンサを縦続に接続する[2]. その際, コンデンサはインバータを形成しインピーダンスが反転する. そのため, コイルのインバータでインピーダンスをさらに反転し, 元に戻す必要があり, 回路構造が複雑になる. さらに, Figure 1 の回路は並列共振回路を構成し, Figure 2 のように共振周波数帯近傍でのインピーダンス虚部が大きく変動する. インピーダンス虚部が 0 から遠ざかるほど伝送効率は低下していく. また, アームロボットは, 複数の関節で構成しているのでその関節ごとに共振回路が必要になる. したがって, 共振周波数を全て一致させる際には, Figure 1 のような回路を用いた多段化は, 多少の誤差が大きな伝送効率の低下へ直結する.

## 2 共振回路

### 2.1 コイル

コイルの小型化の際にはインダクタンスと Q 値も考慮しなければならない. Q 値とは, コイルの良さを表す指標

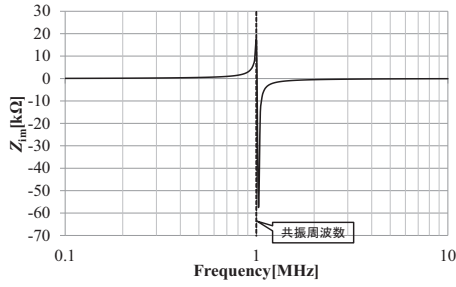


Figure 2: 並列共振時のインピーダンス虚部の変化

であり、式 1 で求めることができる [3] .

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (1)$$

コイルには巻き方によりいくつかの種類が存在する . 例えば、2次元平面上で銅線を渦上に巻いたコイルをスパイラルコイルと呼ぶ . このコイルの場合、高い Q 値が得られるが、インダクタンスが小さくなる . インダクタンスは銅線の巻数を増加することで増えるが、その代わりに Q 値が下がる . また、巻数を増加することで広いスペースが必要となる . したがって、スパイラルコイルは本研究の意向に沿わない . 本研究ではこのトレードオフを考慮し、スパイラルコイルに比べ、Q 値が下がる代わりに小型で大きなインダクタンスを得ることのできるフェライトコアを用いたソレノイドコイルを共振回路のコイルとする . ソレノイドコイルは銅線を螺旋状に巻いたコイルのことである .

## 2.2 コンデンサ

コンデンサの容量  $C$  は物質の比誘電率を  $\epsilon_r$ 、空気の誘電率を  $\epsilon_0$ 、コンデンサの面積を  $S$ 、極板同士の距離を  $d$  とした時の式 2 から求められる .

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (2)$$

式 2 より、コンデンサの容量は、面積の大きさに依存するとともに、コンデンサ同士の距離にも依存することがわかる . また、コンデンサ同士の合成容量は並列に接続することでその数に比例して増加する . そこで、我々は銅貼り基板を Figure 3 のように多層に重ね合わせ互い違いに銅線を接続し、導通することで並列に接続させる . これにより、容量を増加させることが可能である . また、式 2 よりコンデンサ同士の距離が近づくほど容量は増加する . Figure 3 において、距離  $d$  とは銅貼り基板の誘電体の厚さとなる . したがって基板が薄ければ薄くなるほど容量は増加し、かつ複数枚利用に必要なスペースを縮小することができる . それに伴い、コンデンサの面積  $S$  の大きさを最小限に抑え、小型化することが可能になる . また、コンデンサは極板 2 枚一対で動作するので、 $n$  枚の円板がある場合、できるコンデンサは  $n/2$  個となる . しかし、

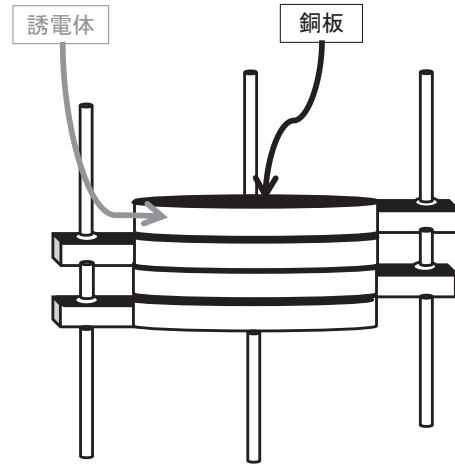


Figure 3: 誘電体多層円板コンデンサ

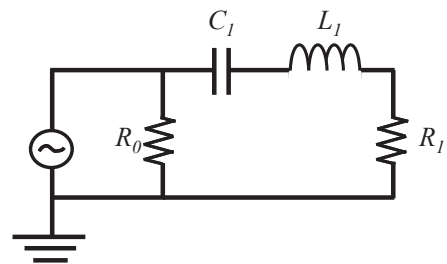


Figure 4: 直列共振回路

Figure 3 の場合、中で挟まれている円板同士もコンデンサとしての働きをするのでコンデンサは  $n - 1$  個として動作する .

## 2.3 直列共振回路

前節で述べた通り、従来法の回路では回路の多段化への対応が困難となる . したがって、本研究では対地容量を無視できるものとして Figure 4 のような直列共振回路を作製した . 直列共振回路にすることで、インバータが不要となり、かつ Figure 2 と比較すると Figure 5 のように共振周波数帯近傍でのインピーダンス虚部の変動が緩やかである . これにより、回路の多段化の際に、共振周波数を一致するのが容易となる .

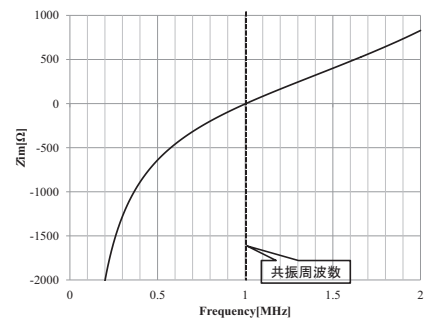


Figure 5: 直列共振時のインピーダンス虚部の変化

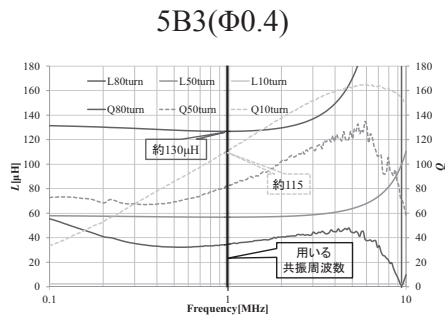


Figure 6: コイルのインダクタンスと Q 値 ( $\phi 0.4$ )

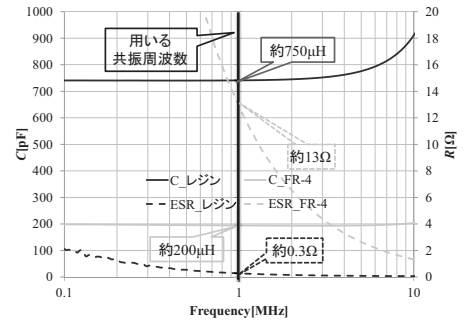


Figure 8: コンデンサの容量と等価直列抵抗

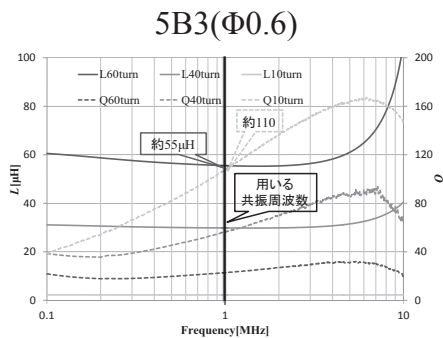


Figure 7: コイルのインダクタンスと Q 値 ( $\phi 0.6$ )

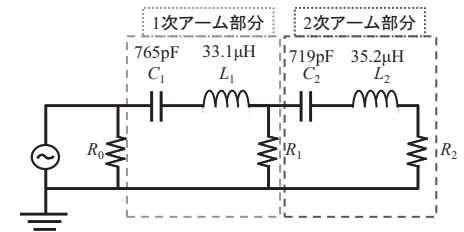


Figure 9: 2 段直列共振回路

### 3 検証実験

#### 3.1 ソレノイドコイル

本研究では共振周波数を 1MHz とする．本節では，用いるフェライトコアの最も高い Q 値を得ることができる周波数帯を調べ，ソレノイドコイルとして用いる際に 1MHz 帯での使用に適しているかを検証する．直径 6.15mm のトミタ電機製 Ni-Zn フェライトコア 5B3 に対し，銅線 0.4mm, 0.6mm ( $\phi 0.4, \phi 0.6$ ) を 1 重の均等巻きにし，Vector Network Analyzer (VNA) を用いて巻数をパラメータとした周波数に対するインダクタンス，Q 値を測定した．結果はそれぞれ Figure 6, Figure 7 となった．結果より， $\phi 0.4, \phi 0.6$  ともに，Q 値が最も高くなる周波数帯域は 5 ~ 6MHz 近傍となった．しかし，巻数が増加し，インダクタンスが増加していくと，5MHz 近傍でコイルが自己共振を始めている．これより，1 重巻きで大きいインダクタンスが必要な場合，最も Q 値が高くなる 5MHz 帯よりも 1 ~ 3MHz 帯での使用が適している．

#### 3.2 誘電体多層円板コンデンサ

本節では前節で述べた誘電体多層円板コンデンサの効果を検証する．銅貼り基板の FR-4 ( $d = 1.5\text{mm}$ )，レジン基板 ( $d = 0.3\text{mm}$ ) をそれぞれ用いて円板を作製し，6 枚を重ね合わせ，Figure 3 を作製する．それぞれの容量と Equivalent Series Resistance (等価直列抵抗，ESR) を測定する．Figure 8 より，FR-4 に比べ，レジン基板は厚さが薄いため，円板同士の距離  $d$  が小さくなり，容量が 3.5

倍大きくなった．また，理想的なコンデンサは静電容量が大きいほどインピーダンスが低く，かつ周波数が高くなるほどインピーダンスが低くなるのに対して，実際のコンデンサには抵抗成分やインダクタンス成分が含まれており，この抵抗成分が等価直列抵抗である．インダクタンス成分があると周波数が高くなると静電容量とは対称的にインピーダンスが高くなる．また，コンデンサの容量とインダクタンス成分の共振周波数帯では等価直列抵抗の値がインピーダンスになる．等価直列抵抗が高くなると，発熱や，電圧低下などの問題が発生するので極力抑えることが好ましい．Figure 8 より，レジン基板は，FR-4 に比べ等価直列抵抗も約 45 倍小さくなった．

#### 3.3 直列共振回路のインピーダンス虚部と電力

本研究では直列共振回路を Figure 9 のように作製し，電源側から近い負荷抵抗を順に 0 次，1 次，2 次側負荷抵抗とし，それぞれ  $R_0, R_1, R_2$  とした．これらの負荷抵抗をアームロボットのサーボモータと想定する．サーボモータは動作開始時には大電力を必要とするが，動作安定後要求する電力は減少する．さらに，印加する電圧は一定であることからサーボモータの抵抗値は動作の状態に変動する．この動作を想定し，それぞれの負荷を独立に変動し，その際の電源から見たインピーダンス  $Z$  を VNA で測定する．他の抵抗は  $100\Omega, 390\Omega$  で固定する．Figure 9 ~ 12 の結果から 0 次から 2 次のどの負荷が変化しても，電源から見たインピーダンスの虚部は  $0\Omega$  近傍で維持することができ，多段化した際に共振周波数の調整が容易にできることがわかる．また，対地容量の影響も無視できる程度のものだと確認できた．

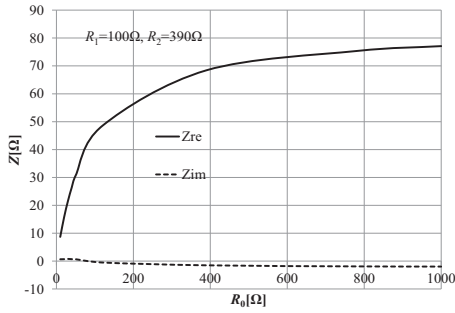


Figure 10: 0次負荷を変化させた時の電源側から見たインピーダンス

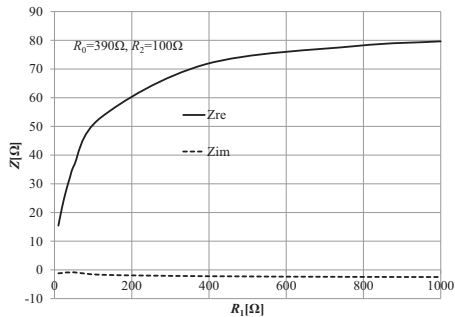


Figure 11: 1次負荷を変化させた時の電源側から見たインピーダンス

さらに、同様の条件でのそれぞれの負荷抵抗に供給される電力をオシロスコープにて確認し、オシロスコープの値より、負荷の変化量に対するその他の負荷にかかる電力を Figure 13 ~ 15 に示す。変動した負荷抵抗側では負荷抵抗の変化量に応じて電力が変化したが、それ以外の一定値の負荷抵抗側では、ほぼ一定の電力を安定して供給することができていた。これにより、多段化し、それぞれのサーボモータが独立に動作することで、負荷抵抗が変動した場合にも安定して電力を供給することができることを確認した。

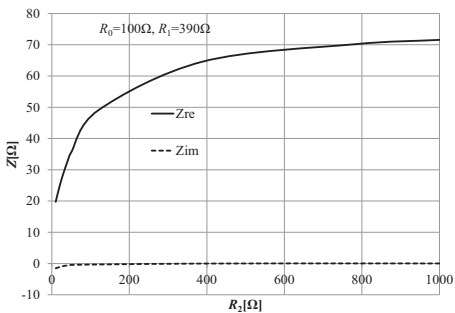


Figure 12: 2次負荷を変化させた時の電源側から見たインピーダンス

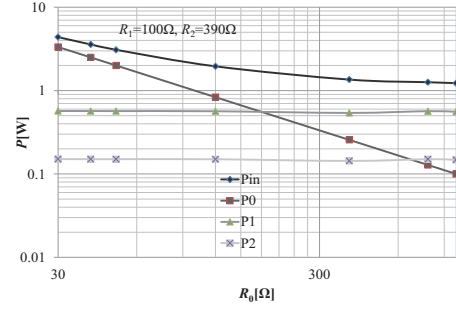


Figure 13: 0負荷を変化させた時に生じる電力

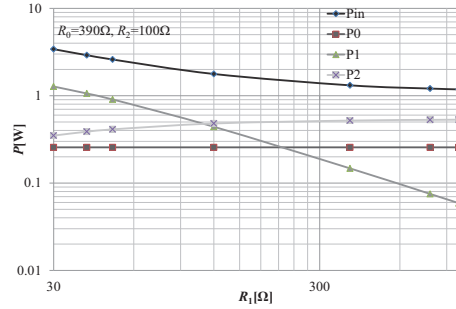


Figure 14: 1次負荷を変化させた時に生じる電力

#### 4 おわりに

アームロボットに対して円板コンデンサを用いた非接触給電方法が提案されている。それに対して、先端部分への移行に伴いアームが細くなるタイプのアームロボットには共振回路の小型化が必要となる。また、提案されていた回路では多段化する際、共振周波数を一定に保つことが困難である。これに対して、銅板を多層に重ねることで小型の複数並列接続されたコンデンサを実現した。また、コイルはインダクタンスと小型化のトレードオフを考慮し、フェライトコアを用いた。回路を直列共振回路にすることで、多段化の際にも共振周波数を一定に保つ事が容易となり安定した電力供給を可能とした。今後は、本実験で用いた材料よりもより優れた結果を出すことを確認したが、時間の都合上実装し検証することのできなかつたレジン基板、トロイダルコアをそれぞれコンデンサ、コイルとした共振回路を作製し、現回路との性能比較する必要がある。

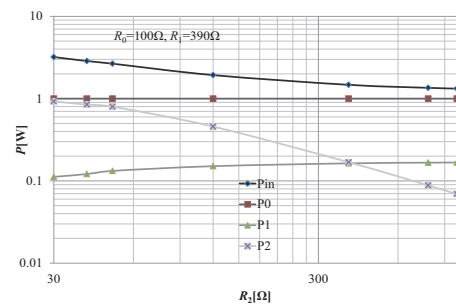


Figure 15: 2次負荷を変化させた時に生じる電力

## 参考文献

- [1] 栗井郁雄, 川辺健太郎「多関節アーム・ロボット模型への非接触給電の実験」, RF ワールド, No.38, CQ 出版, pp.105 - 119, (2017).
- [2] 福森康洋, 植村渉, 栗井郁雄「アームロボットに対する誘電体多層円板コンデンサを用いた非接触給電システムの小型化」, IEEE CE ソサイエティ西日本合同チャプタ主催 1 月研究会, 2018 年 1 月 21 日.
- [3] 栗井郁雄「とことん基礎から理解する磁界共鳴型ワイヤレス給電」, 日経エレクトロニクス第 2 回, No. 1069, pp. 100 - 108, (2011).