

# 体内埋め込み型医療機器に向けた

## 磁場共鳴型無線電力伝送回路の設計及び同調方法の検討

生体計測工学研究室 2181201 青木 大二郎

(主査：島谷 祐一 准教授 副査：桃沢 愛 准教授, 小林 千尋 講師)

### 1. はじめに

近年、心臓ペースメーカー等体内埋め込み機器が多く開発されている。体内埋め込み機器の多くは電力源に一次電池を用いるため、電池の寿命が来たら開胸手術を行い、電池交換をしなければならぬという問題がある<sup>[1]</sup>。これは使用者にとって非常に大きな負担となるため、体外から無線で電力供給を行う研究が進められている。伝送方法の一つに磁界共鳴型無線電力伝送が挙げられる<sup>[2]</sup>。この方法長距離かつ高効率での電力伝送が可能となり、コイルの位置ずれにも強いいため体内埋め込み機器への電力伝送に適していると考えられる。磁界共鳴方式で高効率での伝送を行うためには、送受信回路の共振周波数を正確に一致させる必要がある。しかし、皮下などに埋め込む薄膜受信コイルでは、比較的低い周波数帯で線間容量による自己共振が起こってしまい、送受信回路の共振周波数がずれ、伝送効率が著しく低下する問題点があった<sup>[3]</sup>。そこで本研究では、自己共振より高い周波数帯域ではコイルがコンデンサとして機能することに注目し、コイルと直列にチップコイルを繋ぐことで、自己共振以上の周波数帯域で共振する先行研究で考案された新規受信回路の性能評価を行なった。

### 2. 理論

#### 2.1 磁界共鳴型無線電力伝送

磁界共鳴型無線電力伝送では、送受信回路にコンデンサを接続し、同じ共振周波数になるように RLC 共振回路を構成する。共振周波数の一致した送受信回路を用いることで伝送距離を長くすることができ、送受信コイルの位置ずれが生じても高効率で伝送できるため、体内深部に埋め込まれた受信コイルへの電力伝送に適する。この方式の回路モデルを Fig.1 に示す。また共振周波数  $f_0$  は式(1)で与えられる[5]。

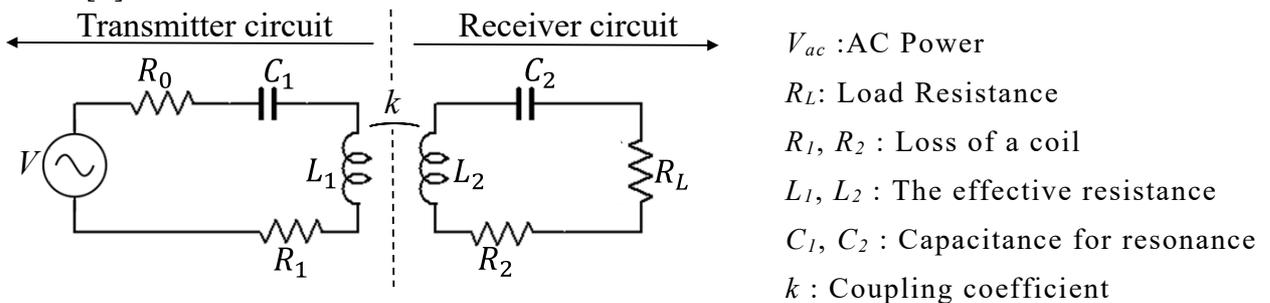


Fig1. Equivalent circuit for the resonance coupling wireless power transfer

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (1)$$

## 2.2 生体内環境における受信側等価回路

体液のような電解質溶液中では，コイルの交流抵抗  $R_{ac}$  と寄生容量  $C_{self}$  の値が増大すると考えられる．このため体内に埋め込まれた受信回路は，Fig.2 に示す等価回路に置き換えて考える必要がある．コイルの実効インダクタンス  $L_{eff}$  および実効損失  $R_{eff}$  は，自己インダクタンス  $L_{self}$  と  $R_{ac}$ ,  $C_{self}$  による等価回路で表すことができる．このとき  $L_{eff}$  および  $R_{eff}$  は式(2)，(3)で表される[6]．

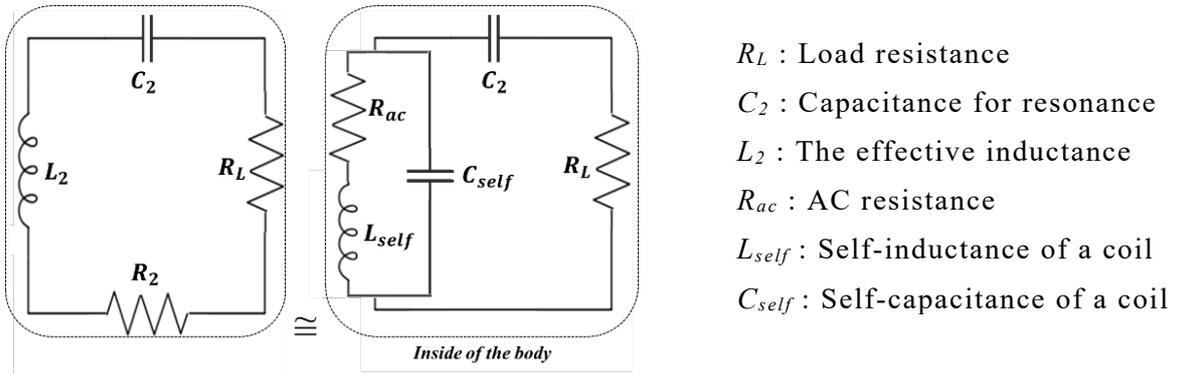


Fig.2 Equivalent circuits of the receiver circuit in electrolyte of body fluid and tissue

$$L_{eff} = \frac{L_{self}(1 - \omega^2 L_{self} C_{self}) - C_{self} R_{ac}^2}{(1 - \omega^2 L_{self} C_{self})^2 + \omega^2 C_{self}^2 R_{ac}^2} \quad (2)$$

$$R_{eff} = \frac{R_{ac}}{(1 - \omega^2 L_{self} C_{self})^2 + \omega^2 C_{self}^2 R_{ac}^2} \quad (3)$$

## 2.3 使用した新規受信回路<sup>[6]</sup>

体内環境のような電解質溶液中では，受信コイルは等価回路に置き換えて考慮される．皮下などに埋め込む薄膜受信コイルでは，比較的低い周波数帯で線間容量  $C_{self}$  による自己共振が発生し，伝送効率が著しく低下する問題点があった．本研究では，体内環境下において自己共振より高い周波数帯域では受信コイルがコンデンサとして機能することに注目し，受信コイルと直列にチップコイル  $L_3$  を繋ぐことで，自己共振以上の周波数帯域で共振する新規受信回路を使用した．ラット腹腔内における受信コイルの  $L_{eff}$  の測定結果をFig.3に示す．また，使用した受信回路をFig.4に示す．この例では，ラット腹腔内に埋め込まれた受信コイルは周波数2000kHz付近で自己共振を起こしており，自己共振周波数よりも高い周波数3000kHz付近（Fig.3の矢印）で共振する受信回路を使用した．

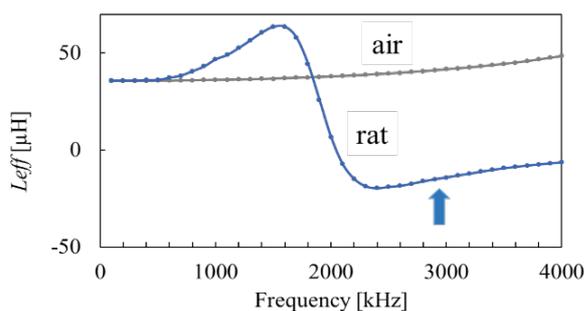


Fig.3 Result of  $L_{eff}$  in a rat

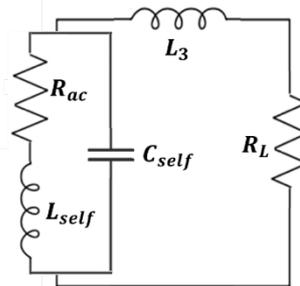


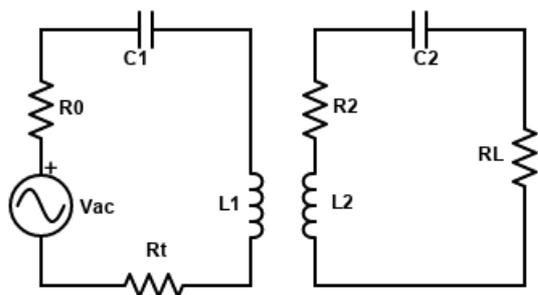
Fig.4 New receiver circuit

### 3. 実験方法

#### 3.1 新規回路 (3MHz共振回路)における性能評価

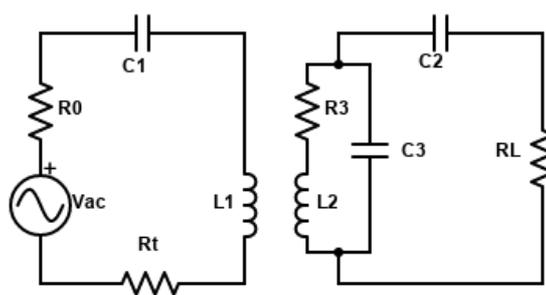
磁界共鳴型無線電力伝送における受信コイル自己共振後の高い周波数帯域で再共振する新規回路の有効性を検討していくため, 生体を模擬して生理食塩水中及び鶏肉中において伝送実験を行なった. 新規回路の有効性の評価方法は出力電力と伝送効率の2つのパラメータにより評価した.

生理食塩水中においては比較対象として従来回路での実験結果と比較し, 鶏肉中においては生理食塩水中において従来回路よりも新規回路の方が有効であることは確認できたので, 比較対象として回路シミュレーションソフト LT Spice を用いて鶏肉中を想定した新規回路における等価回路のシミュレーション結果と実測値の比較を行った. 使用した回路の各環境下での等価回路を Fig.5~Fig.9, 計測条件を Table1, 回路素子の値を Table2 に示す.



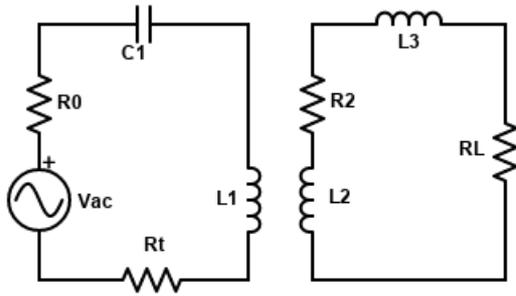
$V_{ac}$  : AC Power  
 $R_0, R_2$  : Loss of a coil  
 $C_1, C_2$  : Capacitance  
 $R_t, R_L$  : Load resistance  
 $L_1, L_2$  : Inductance

Fig.5 Old circuit(air)



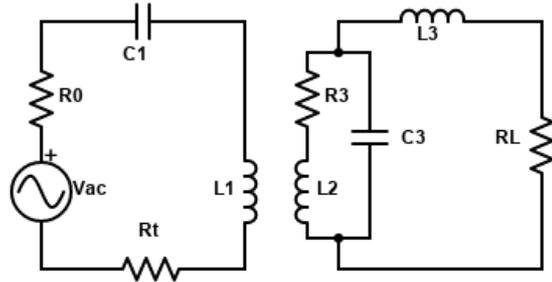
$V_{ac}$  : AC Power  
 $R_0, R_3$  : Loss of a coil  
 $C_1, C_2, C_3$  : Capacitance  
 $R_t, R_L$  : Load resistance  
 $L_1, L_2$  : Inductance

Fig.6 Old circuit(saline)



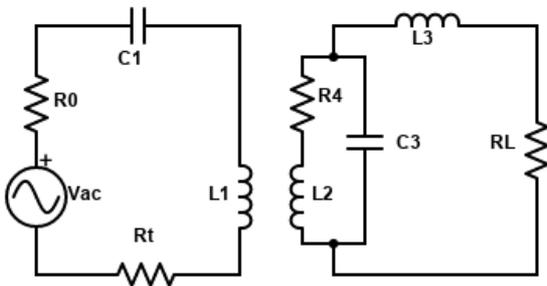
$V_{ac}$  : AC Power  
 $R_0, R_2$  : Loss of a coil  
 $C_1$  : Capacitance  
 $R_t, R_L$  : Load resistance  
 $L_1, L_2, L_3$  : Inductance

Fig.7 New circuit(air)



$V_{ac}$  : AC Power  
 $R_0, R_3$  : Loss of a coil  
 $C_1, C_3$  : Capacitance  
 $R_t, R_L$  : Load resistance  
 $L_1, L_2, L_3$  : Inductance

Fig.8 New circuit(saline)



$V_{ac}$  : AC Power  
 $R_0, R_4$  : Loss of a coil  
 $C_1, C_3$  : Capacitance  
 $R_t, R_L$  : Load resistance  
 $L_1, L_2, L_3$  : Inductance

Fig.9 New circuit(chicken)

Table 1 Measurement condition

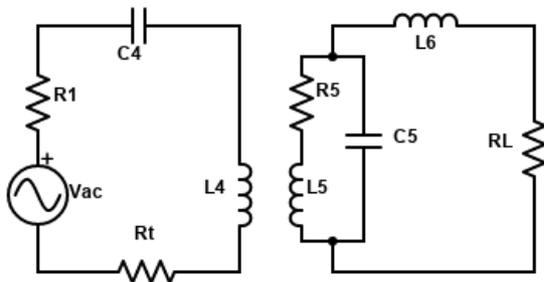
Resonance frequency [kHz]	3000
Measurement frequency[kHz]	2450~3450
Measurement interval[kHz]	50
Measurement distance[mm]	5, 10, 15

Table 2 Circuit and Each device parameter

$V_{ac}$	5V	$R_0$	50 $\Omega$	$L_1$	26 $\mu$ H
$L_2$	35.7 $\mu$ H	$C_1$	108pF	$R_2$	13 $\Omega$
$R_L$	100 $\Omega$	$C_3$	192pF	$L_3$	22 $\mu$ H
$R_t$	0.1 $\Omega$	$R_3$	42 $\Omega$	$R_4$	25 $\Omega$

### 3.2 新規回路 (5MHz共振回路) における性能評価

3.1 で扱った新規回路は受信コイルの自己共振周波数 2MHz と比較的近い共振周波数である 3MHz の共振回路であった.この条件下では L が自己共振後の周波数帯域では C として機能する点に着目して設計しているものの,C 以外の抵抗成分も含まれている事も想定されるため,受信コイルの自己共振周波数 2MHz よりもさらに高い周波数である 5MHz で共振する回路の設計を行い,回路シミュレーションソフト LT Spice を用いて Fig.10 に示した生理食塩水中を想定した等価回路を用いてシミュレーションにより性能評価した.計測条件を Table3, 回路素子の値を Table4 に示す.



$V_{ac}$  : AC Power  
 $R_1, R_5$  : Loss of a coil  
 $C_3, C_5$  : Capacitance  
 $R_t, R_L$  : Load resistance  
 $L_4, L_5, L_6$  : Inductance

Fig.10 New circuit(saline)

Table 3 Measurement condition

Resonance frequency [kHz]	5000
Measurement frequency[kHz]	4450~5450
Measurement interval[kHz]	50
Coupling coefficient	0.1,0.2,0.3

Table 4 Circuit and Each device parameter

$V_{ac}$	5V	$R_1$	110 $\Omega$	$R_5$	31 $\Omega$
$L_4$	23 $\mu$ H	$L_5$	41.2 $\mu$ H	$C_4$	44pF
$C_5$	166pF	$R_L$	100 $\Omega$	$L_6$	6 $\mu$ H
$R_t$	0.1 $\Omega$				

#### 4. 実験結果・考察

##### 4.1 新規回路(3MHz共振回路)における性能評価

##### 4.1.1 生理食塩水中の性能評価

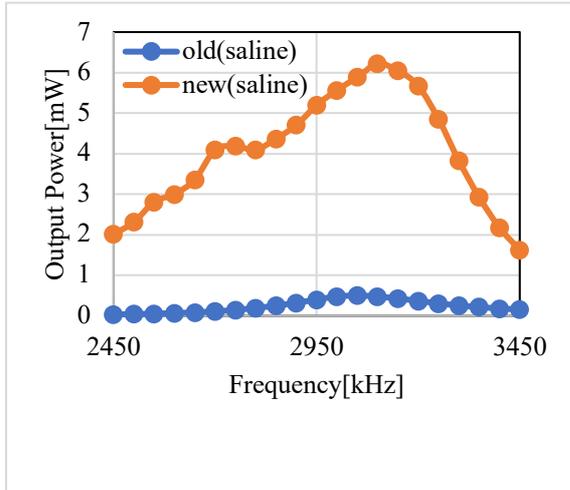


Fig.11 Output power of measurement in saline(5mm)

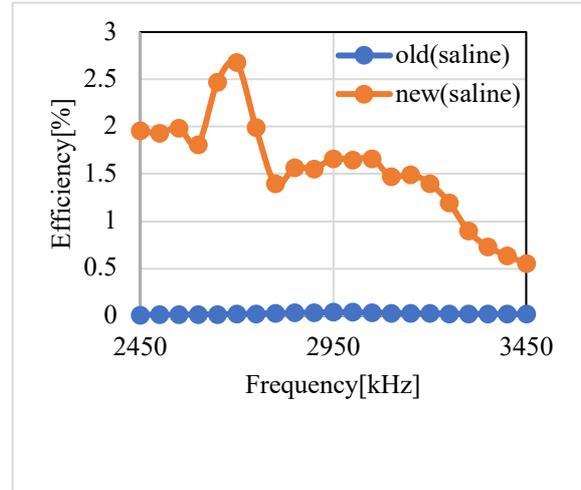


Fig.12 Efficiency of measurement in saline(5mm)

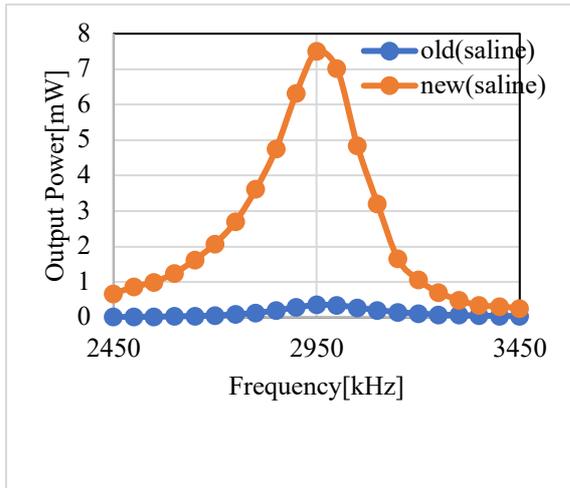


Fig.13 Output power of measurement in saline(10mm)

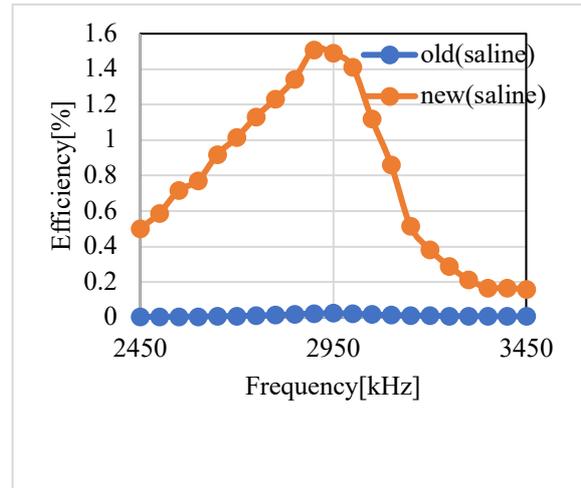


Fig.14 Efficiency of measurement in saline(10mm)

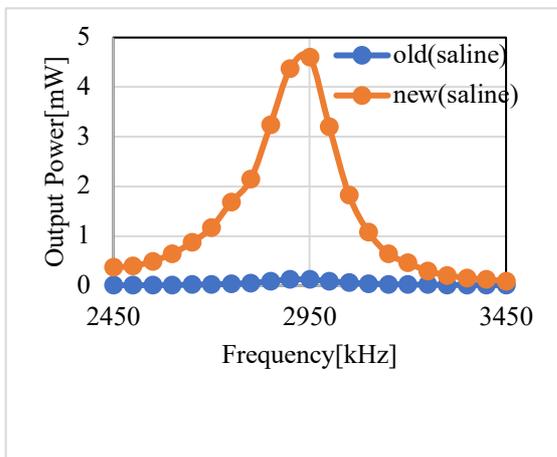


Fig.15 Output power of measurement in saline(15mm)

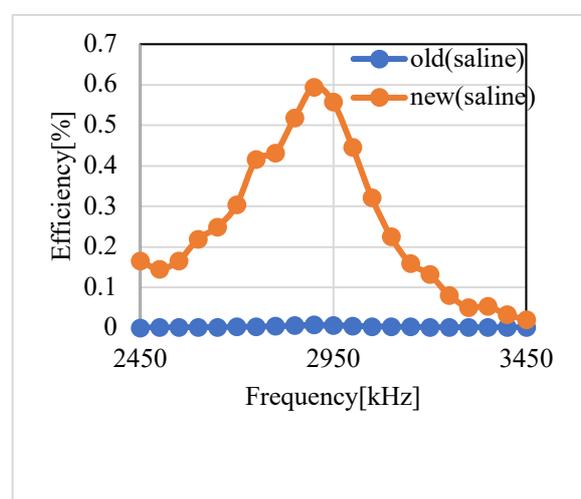


Fig.16 Efficiency of measurement in saline(15mm)

Fig.11, 13, 15 のように従来回路と比較して新規回路において,どの伝送距離においても高い出力電力が得られた.伝送距離が 5mm の時最大電力 6.2mW,10mm の時最大電力 7.5mW,15mm の時最大電力 4.6mW を得ることができた.また,Fig.12, 14, 16 のように出力電力と同様に従来回路と比較して新規回路において,どの伝送距離においても高い伝送効率が得られた.伝送距離が 5mm の時最高効率 2.7%, 10mm の時最高効率 1.5%,15mm の時最高効率 0.59%を得ることができた.出力電力において,従来回路と比較すると高い出力電力を示したが,ペースメーカー等の医療機器の充電に必要な電力には足りない状況であるので最適な伝送距離の検討や新規回路では L の高周波帯域における性質を利用しており,本実験では 3MHz を目的の共振周波数に設定したがこの周波数帯域では L の自己共振周波数 2MHz と近い周波数であり L が C としての役割を担いきれていない可能性もあるので最適な共振周波数の検討が必要であることが示唆された.伝送効率において,出力電力と同様に従来回路と比較すれば高い伝送効率を示したが,90%以上の電力は磁束の漏れ等で逃げてしまっていると言えるので,実験の際の送受信コイルの設置の仕方の工夫も引き続き検討が必要であることが示唆された.

#### 4. 1. 2 鶏肉中の性能評価

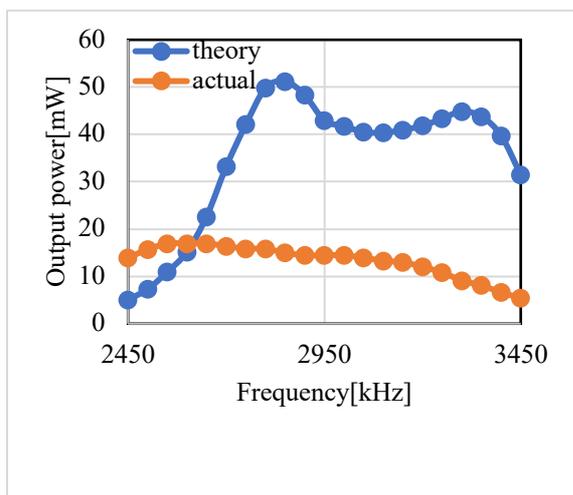


Fig.17 Output power of measurement in chicken(5mm)

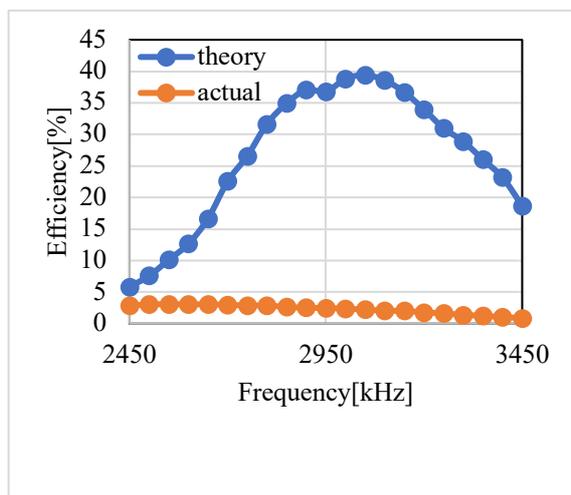


Fig.18 Efficiency of measurement in chicken(5mm)

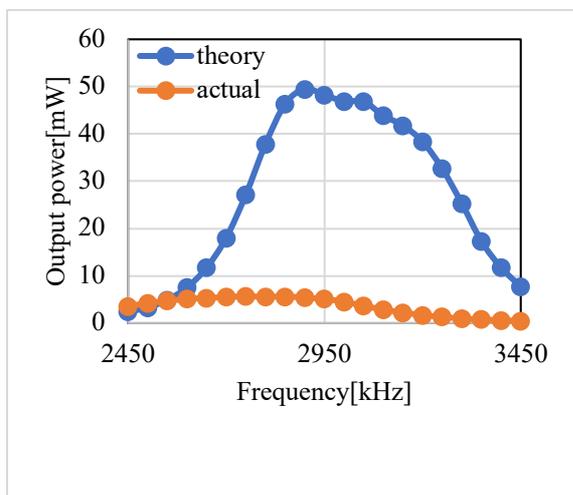


Fig.19 Output power of measurement in chicken(10mm)

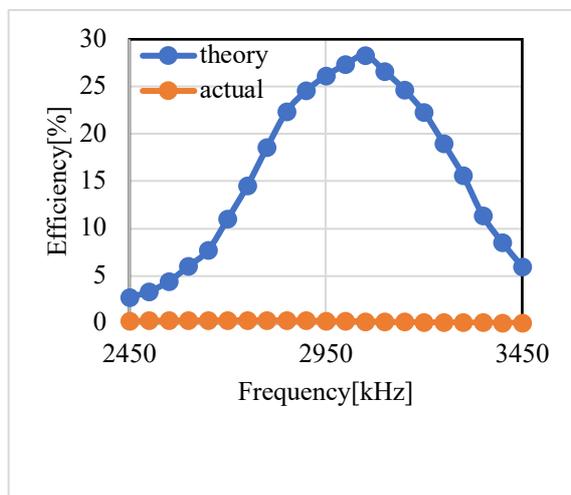


Fig.20 Efficiency of measurement in chicken(10mm)

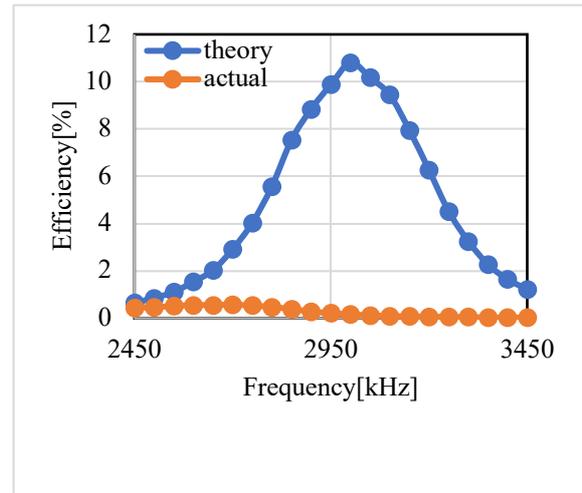
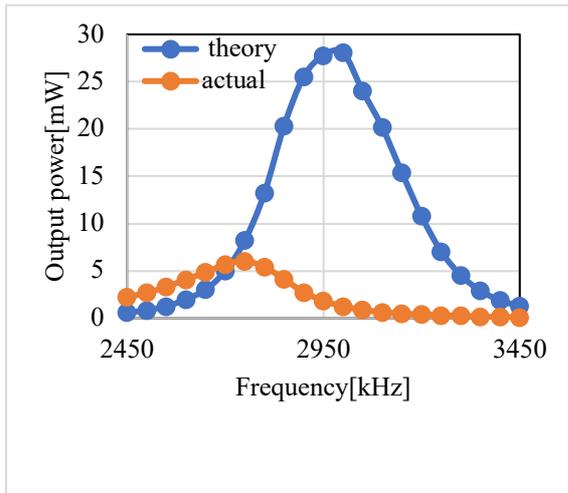


Fig.21 Output power of measurement in chicken(15mm)      Fig.22 Efficiency of measurement in chicken(15mm)

Fig.17, 19, 21 のように新規回路において,伝送距離 5mm の時最大電力 16.9mW, 10mm の時最大電力 5.7mW, 15mm の時最大電力 6.1mW を得ることができた.また, Fig.18, 20, 22 のように伝送効率は伝送距離 5mm の時最高効率 3.1%, 10mm の時最高効率 0.31%, 15mm の時最高効率 0.57%を得ることができた.伝送距離が 5mm の場合の出力電力は生理食塩水中の伝送距離が 5mm の場合と比較しておよそ 3 倍の値を示し,これはペースメーカ等の医療機器の充電に必要な電力に近い値であり新規回路の有効性が示された.しかし,それ以外の伝送距離においては生理食塩水中の出力電力と大きく変わらなかったため,ラットを用いてより生体に近い状態で実験を行った際にはどちらの傾向に類似するのか今後の研究で明らかにしていく必要がある.さらに、理論値と比較するといずれの伝送距離においても出力電力,伝送効率ともに随分小さい値を示した.これは、理論的にはコイルは体内環境下において Fig.2 に示した等価回路のように表現されているが鶏肉中ではこの等価回路に示した抵抗成分以外にも出力電力と伝送効率を阻害する要素が含まれている事が考えられているので,先行研究において明らかにされた生理食塩水中では溶液抵抗が存在するのと同様に鶏肉中ではどのような抵抗成分が存在するのか今後の研究で明らかにする必要があるようだ.

#### 4.2 新規回路 (5MHz共振回路) における性能評価

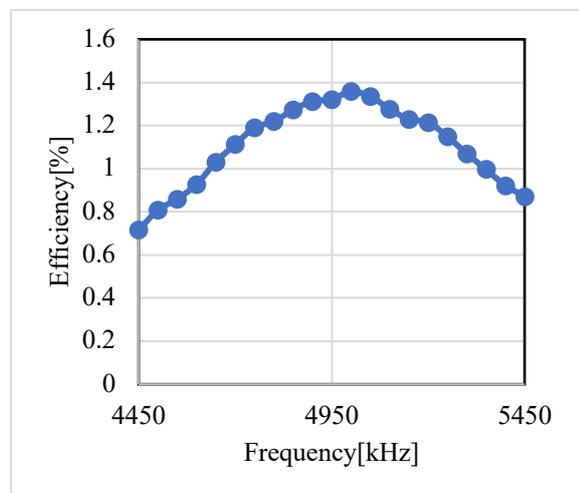
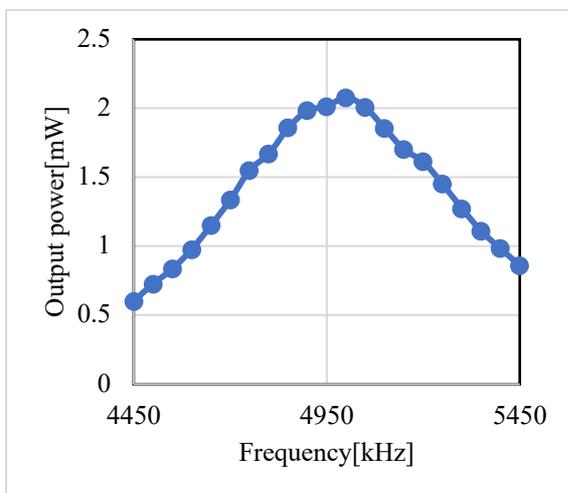


Fig.23 Output power of simulation in saline( $k=0.1$ )

Fig.24 Efficiency of simulation in saline( $k=0.1$ )

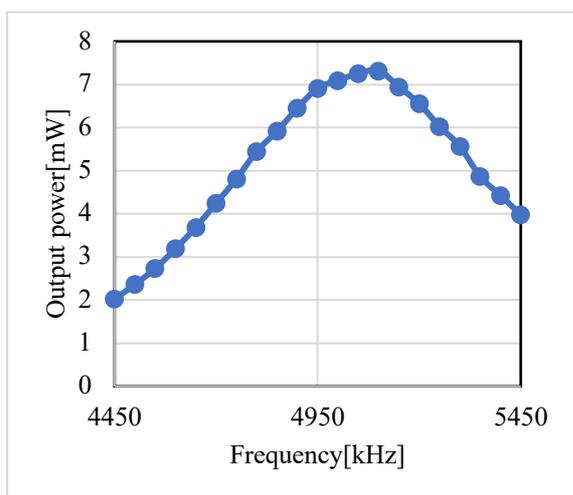


Fig.25 Output power of simulation in saline( $k=0.2$ )

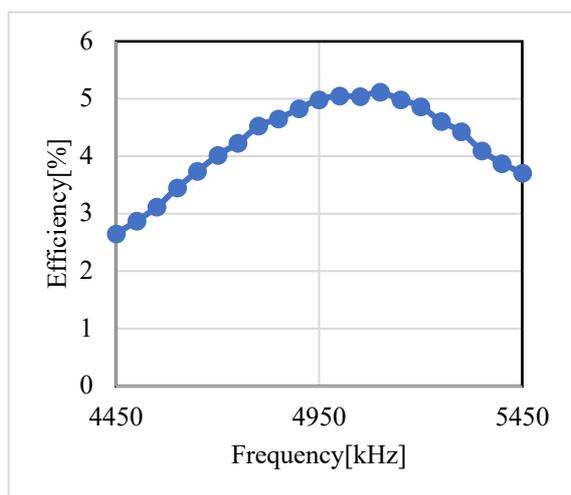


Fig.26 Efficiency of simulation in saline( $k=0.2$ )

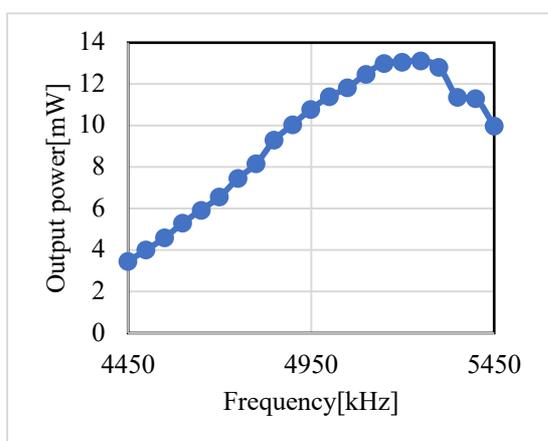


Fig.27 Output power of simulation in saline( $k=0.3$ )

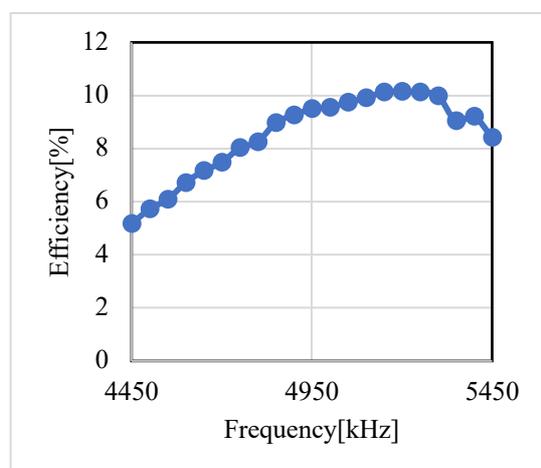


Fig.28 Efficiency of simulation in saline( $k=0.3$ )

Fig.23, Fig.25, Fig.27 のように 結合係数が大きくなると出力電力が大きくなった.結合係数が 0.1 の時最大電力 2.1mW, 0.2 の時最大電力 7.3mW, 0.3 の時最大電力 13.1mW を得ることができた.5MHz 共振回路においては 3MHz 共振回路の時に起きていた結合係数が高まると反共振の影響が大きくなり出力電力が低下するという現象は起きなかった.また, Fig.24, Fig.26, Fig.28 のように伝送効率も出力電力同様に結合係数が大きくなると伝送効率が高くなった.結合係数が 0.1 の時最高効率 1.4%, 0.2 の時最高効率 5.1%, 0.3 の時最高効率 10.1%得ることができた.3MHz 共振回路の場合のシミュレーション結果と今回は比較することが出来ないが,実測値はシミュレーションの値よりも低下することが考えられるため,それを踏まえ前述した 3MHz 共振回路の生理食塩水中における実測値と比較すると 5MHz 共振回路における値は高い値ではないので,このことから共振周波数の設定値は 3MHz が妥当だと現時点では考えられる.

## 5. まとめ

今回の研究では磁界共鳴型無線電力伝送における受信コイル自己共振後の高い周波数帯域で再共振する新規受信回路の有効性を確認するため,生体を模擬して生理食塩水中,鶏肉中で伝送実験を行い出力電力,伝送効率の観点から新規受信回路の性能評価を行なった.その結果,従来回路と比較して新規回路の有効性は確認できたが,出力電力や伝送効率のさらなる改善が必要であることも同時に確認された.そのため,目的とする共振周波数の見直し等を行いさらなる改善に取り組んでいきたいと考えている.

#### 参考文献

- [1] 柴健二 : バイオエンジニアリング (電気と人工臓器) . 人工臓器 40 巻 3 号, pp207-210, 2011.
- [2] A.Kurs, A.Karalis, R.Moffatt, J.D.Joannopoulos, P. Fisher, M.Soljagic : Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. Science, Vol.317, No5834, pp.84-86, 2007.
- [3] D.Matsui, S.Oga, M.Kyoso, S.Kiryu, Y.Shimatani : Effects of saline solution on the electrical characteristics of spiral coils for implantable wireless power transfer. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016.
- [4] 居村岳広 : 磁界共振結合における効率と磁束. 日本 AEM 学会誌 Vol.24,No.4 pp.317-322 2016.
- [5] A.Kumar.Ram-Rakhyani, S.Mirabbasi, M.Chiao: Design and Optimization of Resonance-Based Efficient Wireless Power Delivery Systems for Biomedical Implants. IEEE Trans. Biomed. Eng., 5(1), pp.48-63, 2011.
- [6] 星颯太郎, ”自己共振高周波領域を利用した磁界共鳴型無線電力伝送回路の設計”, 東京都市大学修士論文,2021.