

ライフタイムアンクルバンドへの利用における 電波防護指針以下でワイヤレス電力伝送する際に最適な周波数の検討

並木 紘乃[†] 居村 岳広[†] 堀 洋一[†]

[†]東京理科大学理工学部 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

あらまし 足首に巻きバイタルサインの測定を行い、ワイヤレス電力伝送により電力を得るシステムとしてライフタイムアンクルバンドを提案する。本研究では検討するコイル構造の特徴として送電コイルと受電コイルのサイズ差が大きいという点や人体の近くでの使用するため電波防護指針に準拠する必要があるという点が挙げられる。そこで、コイル構造から磁界と電力を求める計算式を導出し、磁界と電力の関係式から磁界が電波防護指針値以下でより大きな電力を伝送するために重要なパラメータについて検討した。さらに、周波数と磁界の関係を導出し最適な周波数は 30 kHz であることを示した。また、解析結果と比較することで計算結果の信用性を示した。

キーワード ワイヤレス電力伝送, 磁界共振結合, ライフタイムアンクルバンド

Investigating the Optimum Frequencies Using Wireless Power Transmission below Radio Protection Guidelines Its Application to Lifetime Ankle Band

Hirono NAMIKI[†] Takehiro IMURA[†] and Yoichi HORI[†]

[†] Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science 2641 Yamzaki, Noda-shi, Chiba, 278-8510 Japan

Abstract This paper proposed a Life Ankle Band as a system that is wrapped around the ankle to measure vital signs and obtains power through wireless power transfer. The coil structure under consideration is characterised by the large size difference between the transmitting and receiving coils and the need to comply with radio wave protection guidelines because it is used close to the human body. Therefore, formulas for calculating the magnetic field and power are derived from the coil structure, and the important parameters for transmitting more power when the magnetic field is less than the radio protection guideline value are examined from the relationship between the magnetic field and power. Furthermore, the relationship between frequency and magnetic field is derived and the optimum frequency is shown. The reliability of the calculation results is demonstrated by comparing them with the analytical results.

Keywords Wireless Power Transfer : WPT, Inductive Power Transfer, Lifetime Ankle Band

1. はじめに

国民の高齢化率が約 3 割となり、核家族化が進んでいる現代日本において、高齢者の普段の生活におけるサポートや孤独死を防ぐため、いかに高齢者を守るかが大きな課題となっている。そこで、遠隔でバイタルサインを測定できるようなシステムが求められる。さらに、乳幼児突然死亡症候群の防止やコロナ禍で問題となった自宅療養患者の健康状態把握のためにもバイタルサイン測定システムの利用が期待されている。

一方で、そのようなシステムにはバッテリーの大きさによる制限や充電時の取り外しによりデータが連続的でなくなるといった課題が挙げられる。前述の課題は、ワイヤレス電力伝送(Wireless Power Transfer : WPT)により解決することができる。生体サインを測定するシステムへの WPT としてリング型の血圧測定

システムへの WPT^[1]やドライバーの眠気を検出するシステムへの WPT が提案されている^[2]。本研究では寝ている間にワイヤレス電力伝送(Wireless Power Transfer : WPT)を行い足首に装着する形でバイタルサインを測定できる“ライフタイムアンクルバンド”を提案する。(図 1)

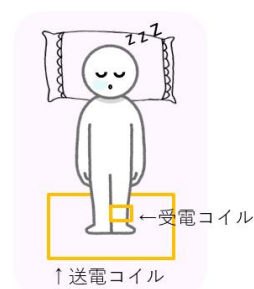


図 1 ライフタイムアンクルバンドのイメージ

ライフタイムアンクルバンドの利用によって、防水加工により入浴時の取り外しや、WPTで充電時の取り外しの機会をなくすことで常に測定を行い異常を逸早く知ることができる。

本研究では、検討するコイル構造や送電コイルと受電コイルのサイズ差が大きく、電波防護指針^[3]に準拠する範囲での使用という制限がある。そこで、コイル構造から磁界と電力を求める計算式を導出し、磁界と電力の関係式から磁界が電波防護指針値以下でより大きな電力を得るために重要なパラメータについて検討を行う。

2. ライフタイムアンクルバンド

提案するライフタイムアンクルバンドを使用する上で考慮すべき点について述べる。

2.1. 電波防護指針

人体の近くで電子機器を扱う上で、近接する電磁波が引き起こす生物学的な危険性の考慮が必要である。そこで、総務省が健全な電波利用の発展を測るため規定している電波防護指針に準拠した範囲での使用が必須である。WPTシステムの磁界共振結合型では磁界の影響が大きいため、本研究では磁界の電波防護指針を規制値として扱っている。

電波防護指針で定められている周波数と磁界の指針値について表 1、図 2 に示す。

表 1 周波数と磁界の指針値

周波数 f	磁界強度の実効値 H [A/m]
10 kHz - 30 kHz	72.8
30 kHz - 3 MHz	$2.18f(\text{MHz})^{-1}$ (72.8-0.728)
3 MHz - 30 MHz	$2.18f(\text{MHz})^{-1}$ (0.728-0.0728)
30 MHz - 300 MHz	0.0728
300 MHz - 1.5 GHz	$f(\text{MHz})^{1/2}/237.8$ (0.0728-0.163)
1.5 GHz - 300 GHz	0.163

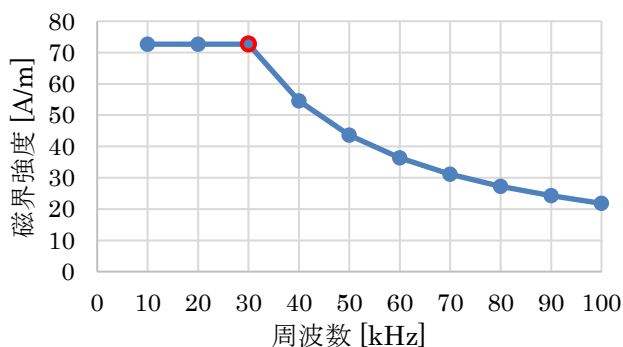


図 2 磁界強度指針

2.2. 必要電力の計算

バイタルサインを測定できるようなシステムの例として、前述したようなリング型の血圧測定システムが提案されている。また、すでに製品化されているものの例としてリング O2^[3], fitbit^[4], Apple Watch^[5]が挙げられる。睡眠中に WPT を行うことを想定し、6 時間充電で 24 時間動作するための電力を計算すると表 2 のようになる。

表 2 より脈拍を測るためには 0.026 W ほど必要であり、1 W を超えると Apple Watch のように GPS やディスプレイ操作などさまざまな機能を搭載したシステムへ給電ができることがわかる。

表 2 システムと必要電力

製品	必要電力 [W]
健康追跡リング	0.026
リング O2	0.192
fitbit	0.468
Apple Watch	1.267

2.3. ライフタイムアンクルバンドの基本条件

ライフタイムアンクルバンドの想定として、送電コイルを脚の下に敷き、受電コイルを足首に巻くことで睡眠中に給電できるシステムとしている。したがって、送電コイルは受電コイルの位置ずれに対応できる程度、受電コイルは足首に巻くことができる程度の大きさとする。よって、送受電コイル間のサイズ差が大きいという特徴があるため、結合が小さい WPT システムにおいて人体防護指針に準拠した範囲で適当な電力を得るための設計が必要である。

3. コイル構造から磁界の値を求める計算式

3.1. 磁界共鳴方式

本研究では、効率よく伝送するため磁界共鳴方式の S-S 回路としている。S-S 回路（図 3）の電流 I_1, I_2 、最適負荷 R_L は (1)-(3) 式で表される。^[6]

$$I_1 = \frac{r_2 + R_L}{(\omega_0 L_m)^2 + r_1(r_2 + R_L)} V_1 \quad (1)$$

$$I_2 = -\frac{\omega_0 L_m}{(\omega_0 L_m)^2 + r_1(r_2 + R_L)} V_1 \quad (2)$$

$$R_L = \sqrt{r_2^2 + \frac{r_2(\omega_0 L_m)^2}{r_1}} \quad (3)$$

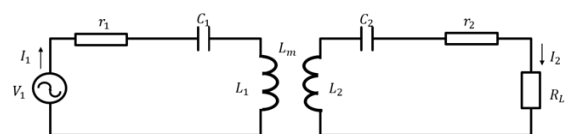


図 3：磁界共鳴方式 S-S 回路

表 3 磁界計算のための計算式

	R	$\cos\theta_1$	$\cos\theta_2$	φ
①	$\sqrt{(a-x)^2+z^2}$	$-\frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2+R^2}}$	$\frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2+R^2}}$	$\frac{a-x}{R}$
②	$\sqrt{(b-y)^2+z^2}$	$-\frac{a+x}{\sqrt{(a+x)^2+R^2}}$	$\frac{a-x}{\sqrt{(a-x)^2+R^2}}$	$\frac{b-y}{R}$
③	$\sqrt{(a+x)^2+z^2}$	$-\frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2+R^2}}$	$\frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2+R^2}}$	$\frac{a+x}{R}$
④	$\sqrt{(b+y)^2+z^2}$	$-\frac{a-x}{\sqrt{(a-x)^2+R^2}}$	$\frac{a+x}{\sqrt{(a+x)^2+R^2}}$	$\frac{b+y}{R}$

3.2. 矩形コイルの磁界を求める計算式

送受電コイルのサイズ差が大きいという特徴を踏まえて、コイル構造を決定することで任意の点の磁界と受電電力を求められるような計算式を導出する。

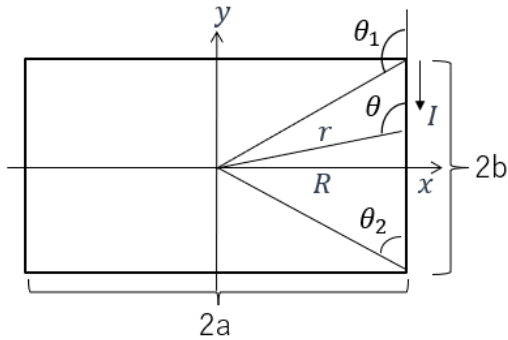


図 4 長方形コイルと各パラメータ

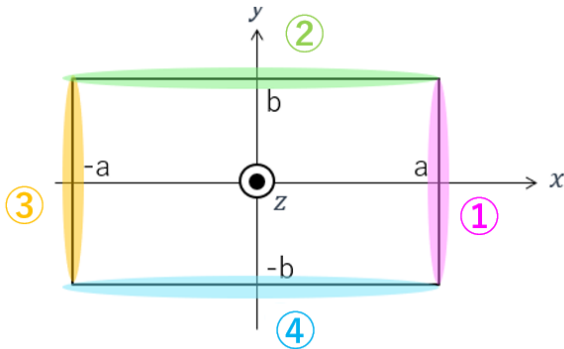


図 5 長方形コイルの任意の点の磁界

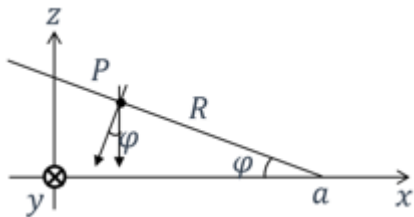


図 6 磁界と z 軸が為す角

ビオ・サバルの法則より一辺がつくる磁界を求めると(4)式のようなになる。

$$H = \frac{1}{4\pi R} (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) \times I \quad (4)$$

長方形コイルでは1ループで4つの辺による磁界を考慮する必要がある、図4に示すような

$R, \cos\theta_1, \cos\theta_2$ を求めることでコイルに電流 I が流れるときの磁界を求められる。図5のようにそれぞれの辺を①~④として $R, \cos\theta_1, \cos\theta_2$ を計算するとそれぞれ表3のようなになる。ここで図6の φ は磁界をz軸方向に直すためのパラメータである。また、 x, y, z はコイル内部の任意の点である。

3.3. コイル構造から電流を求める計算式

次にコイルに流れる電流 I について、コイル構造により表すことを考える。(1)-(3)式より式を構成する r_1, r_2, L_m をコイル構成パラメータで表すことを考える。内部抵抗 r_1, r_2 については導体の抵抗

$$r = \frac{\rho l}{S} = \frac{2\rho n(a+b)}{\pi d^2} \quad (5)$$

より求められる。相互インダクタンス L_m については鎖交磁束よりもとめられ、(6)式のようなになる。

$$L_m = \frac{\Phi_{21}}{I_1} = \frac{\mu_0 n_1 n_2 S_2}{4\pi R} (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) \quad (6)$$

ここで、想定するシステムにおいて受電コイルは小さいため、鎖交磁束については受電コイル中心の値が受電コイル内で一様であるとして計算している。

3.4. 磁界と電力の関係

磁界は位相ずれを考慮して、送電コイルにより発生する磁界と受電コイルにより発生する磁界の和は(7)式のような形で表すことができる。

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} = \sqrt{(K_1 I_1)^2 + (K_2 I_2)^2} \quad (7)$$

ここで K_n は計算式を簡略化するため(8)式で置いた。

$H_1 = K_1 I_1$ は送電コイルにより発生する磁界、 $H_2 = K_2 I_2$ は受電コイルにより発生する磁界である。

$$K = \frac{n}{4\pi R}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (8)$$

S-S 回路の電流 I_1, I_2 は(1)(2)式のように表すことができるため代入して整理すると(9)式ようになる。

$$H = \frac{V_1}{(\omega_0 L_m)^2 + r_1(r_2 + R_L)} \sqrt{K_1^2(r_2 + R_L)^2 + K_2^2(\omega_0 L_m)^2} \quad (9)$$

一方、受電電力 P_2 は

$$P_2 = I_2 V_2 = \left\{ \frac{\omega_0 L_m}{(\omega_0 L_m)^2 + r_1(r_2 + R_L)} \right\}^2 R_L V_1^2 \quad (10)$$

より V_1 について整理すると

$$V_1 = \frac{(\omega_0 L_m)^2 + r_1(r_2 + R_L)}{\omega_0 L_m} \sqrt{\frac{P_2}{R_L}} \quad (11)$$

であるから(11)式を(10)式に代入して磁界と受電電力の関係式は(12)式ようになる。

$$P_2 = \frac{(\omega_0 L_m)^2 R_L}{K_1(r_2 + R_L)^2 + K_2(\omega_0 L_m)^2} H^2 \quad (12)$$

(4)-(7)式と(12)式より磁界と受電電力の関係式は共振角周波数 ω_0 とコイルの構成パラメータで表すことができた。以上より、(12)式を用いて、磁界の値を固定値としてコイルの各パラメータ変化によりどの程度受電電力が変化するか検討を行う。

4. 計算結果と解析結果の比較

コイル構造から磁界を求める計算式の信用性を示すため、計算結果と解析結果の比較を行った。

4.1. 使用するコイル構造

使用したコイル構造と各値について図7と表4に示した。

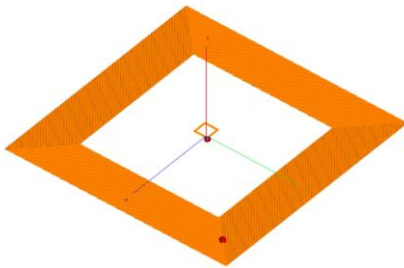


図7 解析用コイル

表4 解析用コイルの各値

	送電コイル	受電コイル
大きさ [mm]	500×500	50×50
線径 [mm]	3	2
巻き数 [回]	30	5
インダクタンス [μH]	698.27	1.69
内部抵抗 [mΩ]	271.31	7.40
Q 値	485.12	43.15

4.2. 相互インダクタンスにおける結果の比較

x 軸方向に受電コイルの位置を送電コイルの中心($x = 0$ mm)から送電コイルと重ならない程度の位置($x = 120$ mm)まで変化させたときの相互インダクタンスの計算・解析結果について図8に示した。ここでは電源電圧は1 V一定、周波数30 kHzとしている。計算は(9)式より求め、解析は電磁界解析ソフト「FEKO」を使用している。FEKOは波長と比較して非常に短いメッシュに分割して解析を行うモーメント法による解析を行っており、(6)式では受電コイルを貫く磁界を同様として考えているため、図8の結果を比較した際に見られるわずかな差は手法の差によるものである。

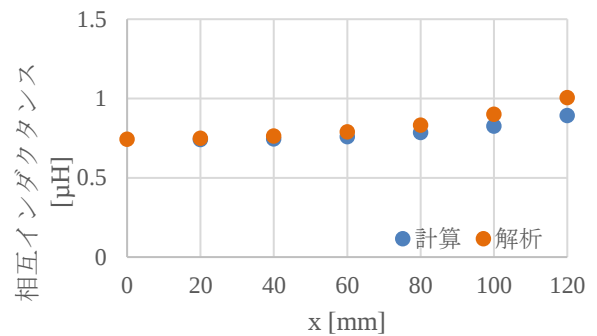


図8 x 軸方向の相互インダクタンス変化

4.3. 電力伝送における結果の比較

x 軸方向に受電コイルの位置を変化させ電力伝送を行った結果を図9に示した。

図9, 10より受電電力と磁界の位置ずれにおいて、値の変化の傾向が同じであり、いずれも近い値をとっていることから、計算結果が妥当であることがわかった。

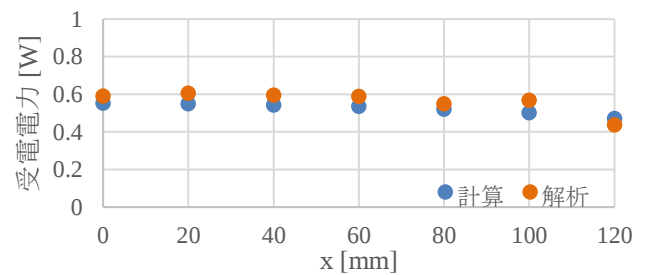


図9 x 軸方向の受電電力変化

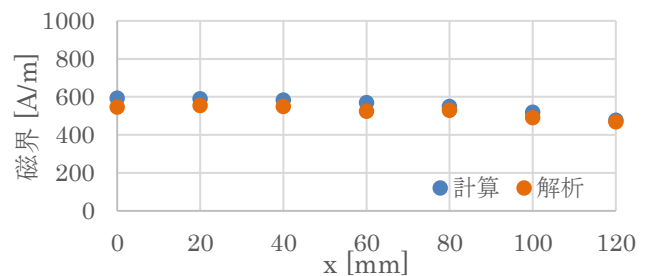


図10 x 軸方向の磁界変化

5. 最適周波数の検討

コイル構造から磁界を求める計算式から、まず、最適な共振周波数を示すため、表 1 の電波防護指針の磁界値より(12)式の磁界 H に周波数による値と表 5 のコイル構成パラメータの値を代入して、指針値以下で得られる受電電力と共振周波数の関係を図 11 に示した。また、代表的な周波数を共振周波数とした際に磁界指針値以下で得られる受電電力について計算した結果を表 6 に示した。

表 5 コイル構成パラメータ

送電コイルの一边の長さ l_1 [mm]	500
受電コイルの一边の長さ l_2 [mm]	50
送電コイルの線径 d_1 [mm]	3
受電コイルの線径 d_2 [mm]	2
送電コイルの巻き数 n_1 [回]	30
受電コイルの巻き数 n_2 [回]	5

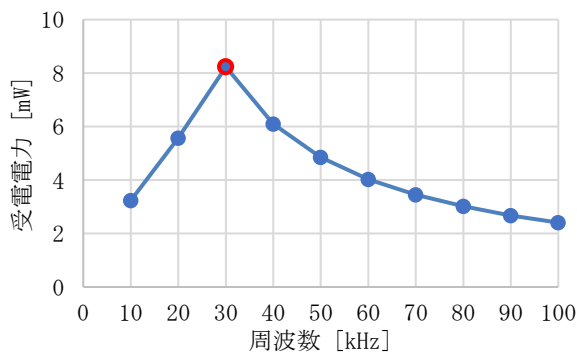


図 11 周波数と受電電力の関係

表 6 代表的な周波数と電力

周波数	受電電力 [mW]
30 kHz	8.26
85 kHz	2.84
6.78 MHz	0.04
13.56 MHz	0.02

図 11 より共振周波数 30 kHz が磁界指針値以下で電力を伝送する際に最も大きな電力を得られるということがわかる。さらに、表 6 より MHz を超える周波数と比較しても 30 kHz が最適であることがわかる。

6. 影響が大きいコイル構成パラメータの検討

次に、電波防護指針で定められている磁界の指針値以下で WPT を行う際に、影響が大きいコイル構成パラメータについて検討するため表 5 の値を基準として 0.1 倍~2 倍まで変化させ、どの程度受電電力が変化するか検討を行った。ここでは、周波数 30 kHz の磁界の制約値 72 A/m を守るため、磁界 $H = 72$ A/m 一定として電源電圧を逆算して導出している。

6.1. コイルの線形・巻き数と得られる電力の関係

送受電コイルの線径と巻き数を変化させたときの受電電力の大きさとの関係式について図 12 に示す。図 12 は表 5 の値を固定値として、1 つのパラメータのみをそれぞれ変化させたときの結果である。図 12 より送電コイルの巻き数、線径 n_1, d_1 に比べて受電コイルの巻き数、線径 n_2, d_2 の変化影響が大きいということがわかる。特に受電コイルの線径 d_2 の影響が大きく特定の値で最大値をとっていることがわかる。

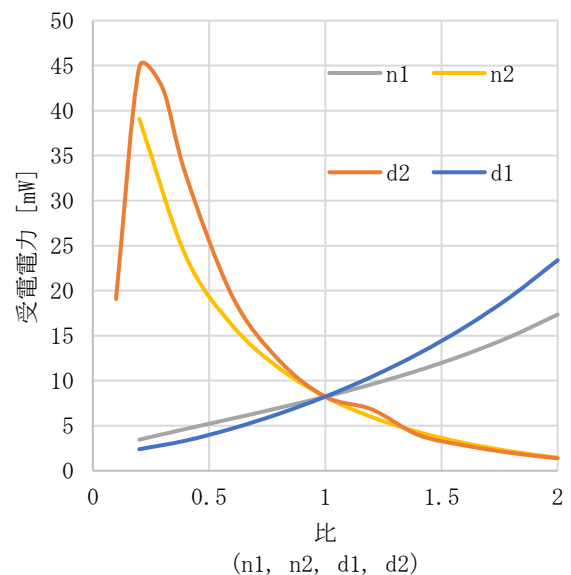


図 12 コイルの各パラメータと受電電力の関係

6.2. 受電コイルの位置変化と得られる電力の関係

表 5 に示したパラメータのコイルにおいて、受電コイルを x 方向と z 方向、横と高さ方向に位置を変化させたときの電力を計算した結果を図 13, 14 に示した。図 13, 14 より送電コイルと受電コイルの距離が近づくほど受電電力が大きくなっている。したがって、コイルとの距離が近づくことによる中心磁界値の上昇に対して、結合係数による受電電力の上昇の影響が大きいことがわかる。

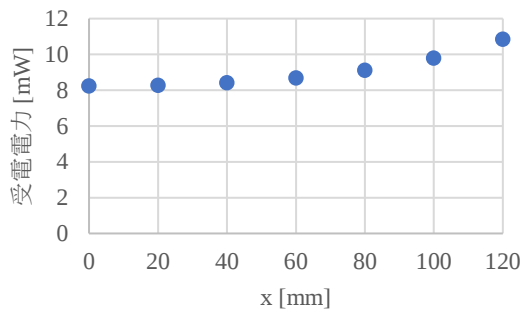


図 13 x軸方向変化と受電電力の関係

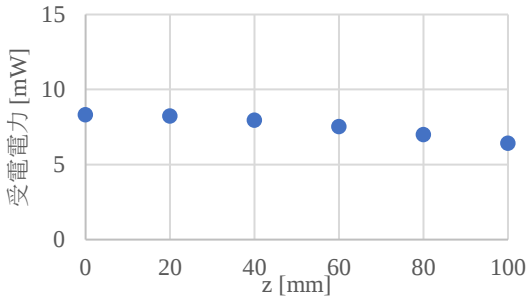


図 14 z軸方向変化と受電電力の関係

7. 最適コイル構造の決定

共振周波数 30 kHz で受電コイルの線形 0.4 mm が最大電力を得られることがわかったため Hyper Works 社の電磁界解析ソフト「FEKO」を利用して解析を行った。解析で利用したコイルのパラメータを表 7 に示した。

表 7 コイル構成最適パラメータ

	送電コイル	受電コイル
大きさ [mm]	500×500	50×50
線形 [mm]	3	0.4
巻き数 [回]	30	5
インダクタンス [μH]	698.27	3.61
内部抵抗 [mΩ]	271.31	134.39
相互インダクタンス [μH]	0.97	

表 8 解析結果

I_1 [A]	0.84
I_2 [A]	0.48
P_2 [mW]	44.09
H [A/m]	71.93

電流値、電力、磁界について得られた解析結果を表 8 に示した。

表 8 より共振周波数 30 kHz の磁界指針値 72 A/m 以下で受電電力 44 mW 程度とれることがわかった。表 2 のシステムと必要電力より脈拍を測るためのシステムとしての電力は達成していることがわかる。

8. 結言

本研究では送受電コイルの大きい WPT システムにおいて電波防護指針以下でより大きな電力を得るための検討を行った。コイルの構造と電源電圧、共振周波数を決定することで磁界・電力を計算するための計算式を導出できた。これより、共振周波数 30 kHz が最適な周波数であることがわかった。また、磁界が指針値以下でより大きな電力を伝送するためには結合係数の影響が大きいことや受電コイルの線径による影響が大きいことがわかった。さらに、それらを考慮した上でコイル構造を決定することで脈拍を測定できるシステムに必要な電力が得られることがわかった。

本研究では、コイル構造の検討をメインに行ったが、回路構成の検討やフェライトの利用により、さらに大きな電力を得ることが期待できる。また、今後は実際にライフタイムアンクルバンドの製作を行い、WPT により電力供給を行い動作が可能であることを示す。

文 献

- [1] Son Nguyen, Connie Duong, Rajeevan Amirtharajah Micropower Circuits and Systems Group, University of California, Davis, CA, USA” A Smart Health Tracking Ring Powered by Wireless Power Transfer”, 2021 IEEE MTT-S Wireless Power Transfer Conference (WPTC 2021)
- [2] Yo-Ping Huang and Nila Novita Sari Department of Electrical Engineering National Taipei University of Technology Taipei, Taiwan 10608 “Early Detection of Driver Drowsiness by WPT and FLNN Models”, 2016 IEEE International Conference on Systems Man, and Cybernetics (SMC), 2017
- [3] 総務省：電波防護指針，諮問第 38 号「電波利用における人体の防護指針」
<https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/material/dwn/guide38.pdf>
2022 年 5 月 16 日
- [4] Neuroceuticals「RingO2 SMART PULSE OXIMETER」
<http://ringo2.jp/>
2022 年 5 月 16 日
- [5] Fitbit Inc. 「Fitbit」
<https://www.fitbit.com/global/jp/home>
2022 年 5 月 16 日
- [6] Apple Inc. 「Apple Watch」
https://www.apple.com/jp/watch/?afid=p238%7CMvEnSrWo-dc_mtId_18707vxu38484&cid=aos-jp-kwyh-watch-slid--
2022 年 5 月 16 日
- [7] 居村岳広，磁界共鳴によるワイヤレス電力伝送，森北出版株式会社，2017.2.1 pp. 104