

人体内における無線通信に伴う信号減衰の改善に関する研究

草野, 美奈 / KUSANO, Mina

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030742>

人体内における無線通信に伴う 信号減衰の改善に関する研究

RESEARCH ON IMPROVEMENT OF SIGNAL ATTENUATION ASSOCIATED
WITH WIRELESS COMMUNICATION IN THE HUMAN BODY

草野美奈

Mina KUSANO

指導教員 品川満

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

We are researching wireless communication in the human body. Physically disabled people cannot live alone. Brain-machine interfaces can be used to regain movement in crippled limbs. However, there are a lot of cables, and the equipment is heavy. In this paper, we report on the possibility of realizing wireless communication using the human body as a transmission path.

Key Words : brain-machine interfaces, human body, buffer layer, resonant circuit

1. 序論

高齢化社会を迎えている日本において、高齢者や身体障害者の介護問題は重要な課題となっている。特に要介護者に対する介護者の不足は著しく、大変大きな課題となっている。身体障害者の内訳において、肢体不自由者が占める割合は 5 割以上を占めている。肢体不自由者はひとりで生活することは難しく、車いすや介助者が必要になる場合が多い。さらに、肢体不自由者が再び不自由となった自身の手足を動かせるようになることは極めて難しい。そこで、肢体不自由者が介助者なしに活動する方法のひとつとして、ブレインマシンインターフェース [1]がある。

ブレインマシンインターフェースとは脳波や血流量などから情報を読み取り解析し、利用することにより人間の脳と機械をつなぐ技術である。手や足に取り付けた義肢型機器に信号を送って手足を動かす非侵襲式と頭部に電極を埋め込む侵襲式に分けられる [1]。本研究では、肢体不自由者が多くのケーブルや重い機器を利用せずに手足を動かすことができるようなブレインマシンインターフェースを行うために侵襲式を想定し、人体内を伝送路とした無線通信で行うブレインマシンインターフェースの可能性について論じていく。

2. 体内通信について

(1) 通信方法とバッファ層について

本研究では人体内を伝送媒質とするため、空気を伝送媒質とする一般的な通信とは異なる通信特性があると考

えられる。そこで、体内の大部分を占める成分である生理食塩水と似た海中での通信に着目した。海中での無線通信には音響通信、光通信、電波通信がある。人体内で無線通信を行う上で最も適しているのは電波通信であると考えられるが、海中において電波通信は通信距離が非常に短く、信号の減衰も非常に大きい。そこで、海中において電波による無線通信をバッファ層 [2] と呼ばれる技術を用いることで通信距離の改善を試みている先行研究に着目した。

バッファ層とは、送受信機と伝送媒質の間に入れる伝送媒質とは電気的な性質の異なる層である。このバッファ層を用いることで海中においても電波による無線通信の信号の減衰が抑えられたことが先行研究で報告されている。海中においてバッファ層が信号減衰に与える効果を図 1 に示す。

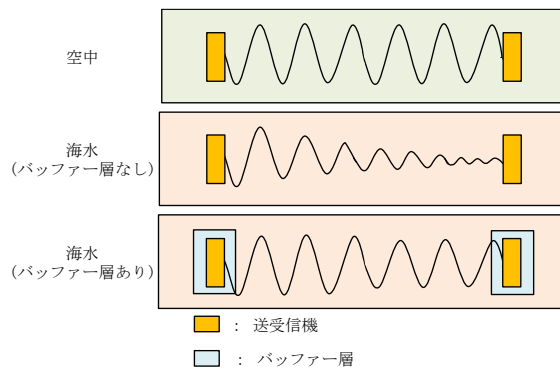


図 1 バッファ層が信号減衰に与える効果

バッファ層を用いることで人体内においても信号の減衰を抑えることができると考え、本研究に導入した。

(2) 電波防護指針

本研究では人体内に電磁波を通すことを想定しているため、電磁波が人体に与える影響について考慮しなければいけない。電磁波が人体に与える影響は、主に熱作用と刺激作用の2種類である[3]。熱作用は熱に敏感な眼球やその周辺組織などに熱的損傷が発生する可能性があり、刺激作用は不快感やめまい、頭痛などの症状を引き起こすだけでなく頭部の中樞神経系や四肢の末梢神経系に刺激を与える可能性がある。これらの作用が発生しないよう、国で電波防護指針[3]が定められている。本研究では、この電波防護指針に則ってシミュレーションを行った。

電波防護指針は基礎指針と管理指針から構成されており、さらに管理指針は電波を職業的に扱う人を対象とした管理環境と、電波を職業的に扱うことのない一般の人を対象とした一般環境に分けて規定されている。管理指針は単位質量あたりの組織に単位時間あたりに吸収されるエネルギー量である比吸収率(SAR: Specific Absorption Rate)を評価量として用いている。 σ を導電率、 E を電場、 m_d を密度とし、SARの算出式を式(1)に示す。

$$\text{SAR [W/kg]} = \frac{\sigma \times |E^2|}{m_d} \quad (1)$$

一般環境下では管理環境下よりも電波の使用環境の管理状況が不十分である可能性を考慮し、厳しく規定されている。そのため本研究では、一般環境下での管理指針である SAR:0.08 W/kg 以下を基準として用いた。

3. バッファ層の最適化

(1) 解析手法

解析は、3D フルウェーブ電磁界解析シミュレータ EMPro(Keysight Technologies 製)を用いて行った。また、電磁界解析方法として有限要素法(FEM 法)を用いた。

評価指標としては、 S パラメータ[4]を用いた。 S パラメータは反射損失である $S[1, 1]$ と $S[2, 2]$ 、挿入損失である $S[2, 1]$ と $S[1, 2]$ があるが、本研究では挿入損失である $S[2, 1]$ を評価指標とした。 $S[2, 1]$ を求める式を式(2)に示す。

$$S[2, 1] [\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (2)$$

$S[2, 1]$ は挿入損失であるため、 $S[2, 1]$ の値が大きいほど損失無く通信が行われていると言える。

(2) 人体通信に使用される送受信機を用いた解析

a) シミュレーションモデルと設定

バッファ層にはどのようなものが最適であるかの傾向を調査するため、人体通信でよく使用される送受信機のモデルを用いて解析を行った。シミュレーションモデル1を図2に示す。

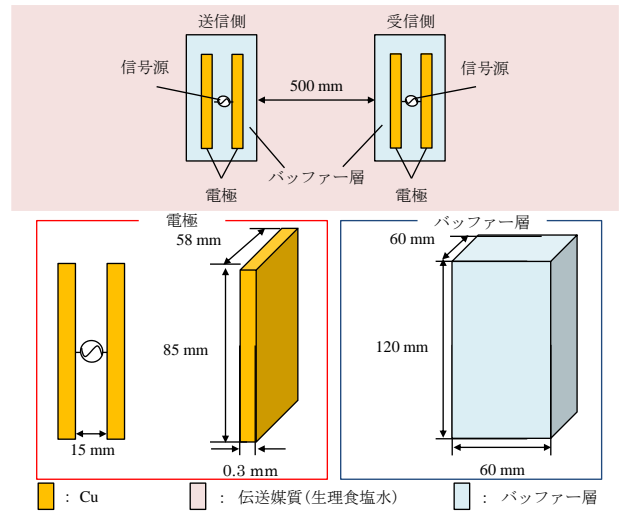


図2 シミュレーションモデル1

送受信機の電極部には銅、伝送媒質には人体の主成分である生理食塩水を用いた。送受信機の間隔は500 mmとし、頭部から腕までの距離を模している。送受信機の電極は、それぞれ高さ85 mm、幅0.3 mm、奥行58 mmとし、電極間は15 mmとした。また、バッファ層は高さ120 mm、幅60 mm、奥行60 mmとした。

バッファ層には生理食塩水の導電率と比誘電率をそれぞれ変化させたものを用いた。生理食塩水とバッファ層に用いた導電率と比誘電率を表1に示す。

表1 生理食塩水とバッファ層の導電率と比誘電率

	導電率 [S/m]	比誘電率
生理食塩水	1.6	80
バッファ層①	16	800
バッファ層②	0.16	8

比誘電率を80で固定し導電率を変化させた場合と、導電率を1.6 S/mで固定し比誘電率を変化させた場合に分けて比較した。

電源には、内部インピーダンス50 Ω 、インダクタンスは0 H、キャパシタンスは0 F、入力電圧1 V、位相シフトは0°のものを用いた。

以上の設定で1 MHzから30 MHzを1 MHzおきに解析した。また、ターゲット周波数は人体通信やICカードで使用される周波数である13.56 MHzとした。

b) シミュレーション結果

生理食塩水を伝送媒質、生理食塩水の導電率を10倍と0.1倍にそれぞれ変更したものをバッファ層とした結果の比較について図3に示す。

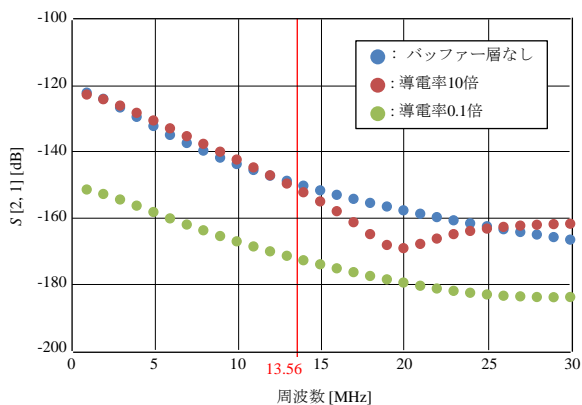


図3 バッファ層の導電率変化による $S[2, 1]$ 比較

図3より、導電率を高くした場合 13.56 MHz 付近では $S[2, 1]$ の値に大きな変化は見られなかったが、導電率を低くした場合、 $S[2, 1]$ の値が小さくなった。

生理食塩水を伝送媒質、生理食塩水の比誘電率を 10 倍と 0.1 倍にそれぞれ変更した媒質をバッファ層とした結果の比較について図4に示す。

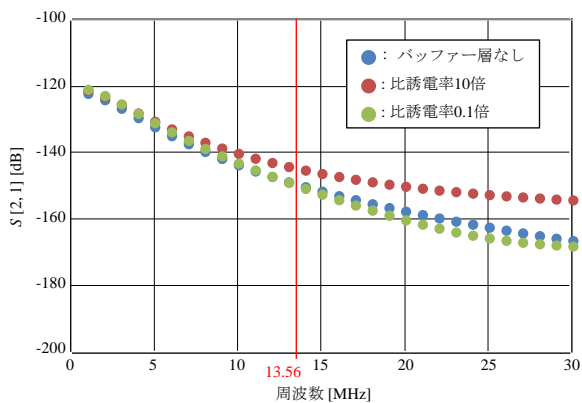


図4 バッファ層の比誘電率変化による $S[2, 1]$ 比較

図4より、比誘電率を小さくした場合 13.56 MHz 付近では $S[2, 1]$ の値に大きな変化は見られなかったが、比誘電率 10 倍の場合、 $S[2, 1]$ の値が大きくなった。

以上の結果より、バッファ層には伝送媒質である生理食塩水と同じ程度の導電率と高い比誘電率を持つものが適していると考えられる。

(3) 人体内で使用可能サイズの送受信機を用いた解析

a) シミュレーションモデルと設定

シミュレーションモデル 1 は人体内で用いる場合としては送受信機のサイズが大きく、体内で使用することは現実的でないため、人体内で使用可能な送受信機のサイズとしてシミュレーションモデル 1 を 10 分の 1 のサイズに変更して解析を行った。さらに、バッファ層を入れる厚さ 1 mm のケースをモデルに組み込んだ。ケースの材質は、電磁波の減衰度の小ささ、強度と耐水性の高さ、加工の容易さといった特徴を併せ持つアクリル樹脂とした。シミュレーションモデル 2 を図5に示す。

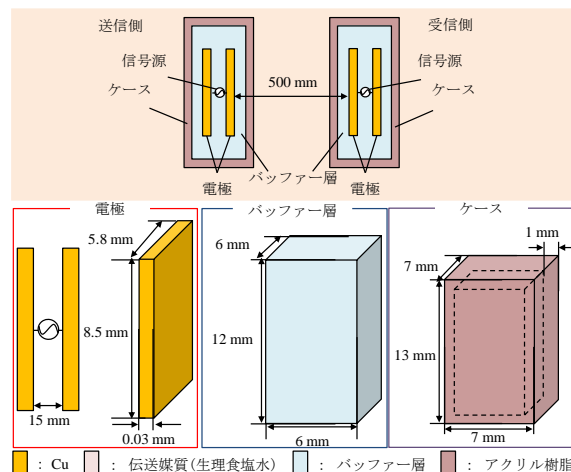


図5 シミュレーションモデル 2

送受信機の電極部と伝送媒質にはシミュレーションモデル 1 と同様の材質を用いた。アクリル樹脂のケースは高さ 13 mm、幅 7 mm、奥行 7 mm、厚さ 1 mm とした。

バッファ層に用いる媒質も体内で使用するにあたり現実的のものに変更した。食塩水は塩分濃度によって導電率が変化することが分かっており、生理食塩水の塩分濃度は 0.9% で導電率は 1.6 S/m である。バッファ層には、塩分濃度 2.0% で導電率 3.3 S/m のものと、塩分濃度 0.1% で導電率 0.2 S/m のもの、さらに水中通信におけるバッファ層によく用いられる純水を用いた。純水の導電率は 0.00001 S/m、比誘電率は 80 である。

電源もシミュレーションモデル 1 と同様のものを用いた。

以上の設定で 1 MHz から 30 MHz を 1 MHz おきに解析した。また、ターゲット周波数は人体通信や IC カードで使用される周波数である 13.56 MHz とした。

b) シミュレーション結果

バッファ層の導電率を塩分濃度によって変化させた場合の比較を図6に示す。

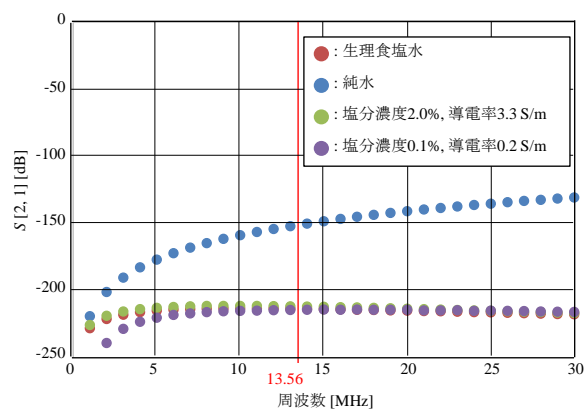


図6 塩分濃度によるバッファ層変化の比較

図6より、バッファ層を純水にした場合の $S[2, 1]$ が最も大きい結果となった。

純水のバッファ層が一番良い結果となった理由は、純水の導電率が他 2 パターンのバッファ層よりも導電率が低いためであると考えられる。

以上の結果より、バッファ層は純水を用いることが最適であると考え、本研究では今後バッファ層には純水を用いることとした。

4. 共振型送受信機の導入

(1) 共振型送受信機

3 章では $S[2, 1]$ を用いて評価を行ったが、全体的に $S[2, 1]$ の値が小さく、信号の受信パワーは非常に小さいと考えられる。そこで、送受信機に共振回路の導入を検討した。

共振回路には直列共振回路と並列共振回路があるが、ターゲット周波数の信号のみを抽出可能である並列共振回路を用いることとした。

共振は回路の合成インピーダンス Z が抵抗成分のみの場合、すなわちインピーダンスの虚数部であるリアクタンス成分が打ち消されて 0 になる場合に起こる現象であり、その時の周波数を共振周波数と呼ぶ。回路のコイル成分を L 、コンデンサ成分を C としたときの共振周波数 f を式(3)に示す。

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (3)$$

式(3)より、 L と C の積が大きいほど共振周波数は低くなり、 L と C の積が小さいほど共振周波数は高くなる。これを利用してターゲット周波数である 13.56 MHz で共振するように共振回路の素子値を調整した。

(2) シミュレーションモデルと設定

シミュレーションモデルには人型のモデルを使用した。シミュレーションモデルの概略図を図 7 に示す。

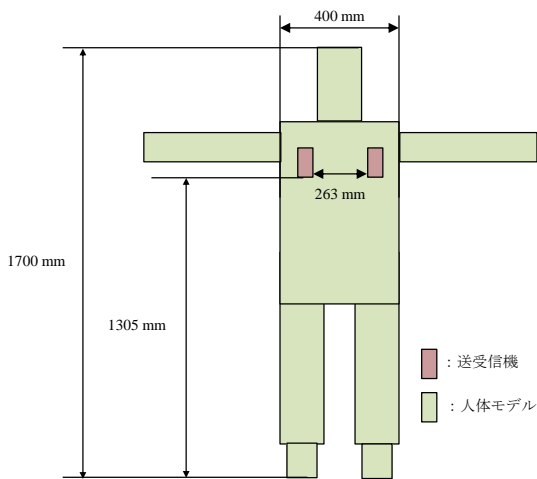


図 7 人型シミュレーションモデルの概略図

人体モデルは身長 170 cm を想定し、送受信機は胸の高さ辺りに設置した。送受信機の詳細を図 8 に示す。

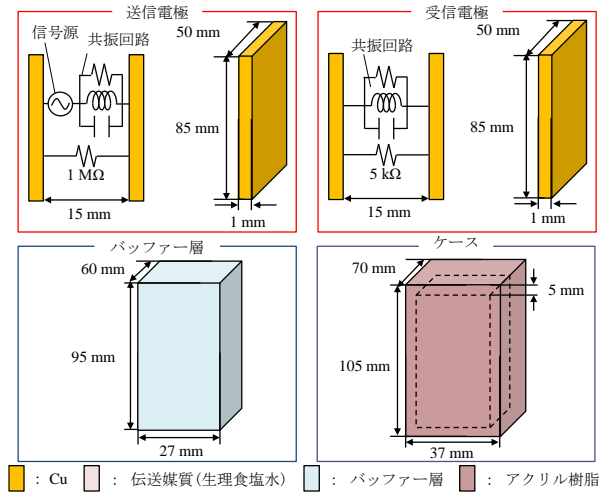


図 8 送受信機の詳細

バッファ層は、純水とした。

電源の設定は、内部インピーダンス 76Ω 、インダクタンスは 0 H 、キャパシタンスは 0 F 、入力電圧 1 V 、位相シフトは 0° の電源を用いた。

共振回路は送信機と受信機両方に設置した。素子の初期値は人体通信によく用いられる値とした。素子の初期値を表 2 に示す。

表 2 共振回路の素子の初期値

	送信機	受信機
R	10 k Ω	1 M Ω
L	6.8 μH	6.8 μH
C	10 pF	14 pF

以上のシミュレーションモデルと設定を用いて、バッファ層と共振回路による受信パワーの向上および共振周波数 13.56 MHz への調整を行った。

(3) シミュレーション結果

送受信機に共振回路がある場合とない場合の受信パワーを比較した。共振回路の素子値は表 2 のとおりである。共振回路の有無による受信パワーの比較を図 9 に示す。

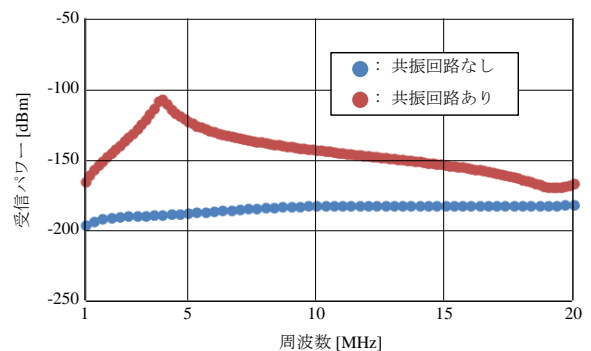


図 9 共振回路の有無による受信パワーの比較

図9より、送受信機に共振回路を使用することによって受信パワーが改善することを確認できた。

共振回路を使用することによって受信パワー改善の確認が取れたため、共振周波数を 13.56 MHz に調節した。使用した共振回路の素子の値を表3に示す。

表3 使用した共振回路の素子の値

	送信機		受信機	
	L [μ H]	C [pF]	L [μ H]	C [pF]
1 (初期値)	6.8	10	6.8	14
2	3.4	20	3.4	20
3	1.3	20	1.3	20
4	1.175	20	1.175	20

表3に示した共振回路を用いて行ったシミュレーション結果を図10に示す。

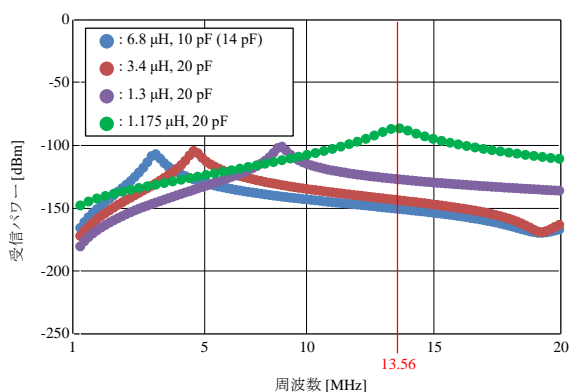


図10 共振回路を用いて行ったシミュレーション結果

図10より、共振周波数を 13.56 MHz に調節することができた。

以上の結果より、バッファ層を純水、送受信機の共振回路のコイル成分を 1.175 μ H、コンデンサ成分を 20 pF とした場合、受信パワーの向上および共振周波数 13.56 MHz を確認することができた。よって、バッファ層および共振回路を搭載した送受信機を用いることによって、人体内を信号の伝送路としたブレインマシンインターフェースを実現できる可能性はあると考えられる。

5. 結論と今後の展望

人口減少や高齢化社会を迎え、介護者不足が危ぶまれる中、身体障害者の中でも人の手助けを必要とする場合の多い肢体不自由者が自身の手足を再び動かす方法のひとつとして、ブレインマシンインターフェースがある。本研究では、このブレインマシンインターフェースを、人体内を伝送路とした無線通信で行う方法の提案とその

効果の調査を目的とした。

バッファ層の最適化を行ったシミュレーションにて、バッファ層には純水を用いることが最適であると確認した。さらに送受信機に共振回路を導入したシミュレーションにて、バッファ層および共振回路を用いた場合、受信パワーを改善可能であることを確認した。さらに、共振回路は共振周波数を調節可能であるため、通信に用いる信号の周波数が変更になった場合にも対応できる。そのため、共振回路の汎用性と有用性も分かった。しかし、送受信機のサイズや人体内での位置依存が課題として残っているため、今後は人体内および脳付近で使用可能な送受信機モデルへの変更や、送受信機の位置による受信パワーの変化の調査を行う必要があると考えられる。

人体内を伝送路とした無線通信でブレインマシンインターフェースが実現した場合、肢体不自由者は他者の介助無しに自由に生活可能となり介助者不足も軽減する。

謝辞：本論文を執筆するにあたり、研究に対しての姿勢や技術的な知識だけでなく、人と接する上での立ち居振る舞いや大切にすべき礼儀、社会に出るためのスキルなど、多大なるご指導とご教授をいただきました法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻 品川満教授に心より感謝申し上げます。本研究を進めるにあたり、シミュレーション結果やその扱いについてご意見下さいました、法政大学工学部応用情報工学科4年の松本夏輝氏、大澤真子氏に感謝いたします。また、苦楽を共にした同期である法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士2年の遠藤裕大氏、上村遼香氏、神原ヒロ氏、橋本守正氏、早見青剛氏、後輩である法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士1年の大内一歩氏、大貫裕紀氏、小笠原健氏、小野愛恵氏、川合由紀氏、岸葉七氏、笹木駿平氏、森田力樹氏のおかげで、研究室で過ごす時間だけでなく日頃の生活も有意義で充実したものにできました。感謝申し上げます。最後に、著者をここまで不自由の無いよう、金銭面、精神面など様々な面で支えてくれた父正明、母幸江に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) William Armstrong, Katina Michael, "The Implications of Neuralink and Brain Machine Interface Technologies," 2020 IEEE International Symposium on Technology and Society (ISTAS), IEEE, 28 June 2021.
- 2) Y Liu and J Chen, "Electro-thermal field analysis and simulated ablation experiments for the water-blocking buffer layer in high voltage XLPE cable," Proceedings of the CSEE, vol. 42, pp. 1260-1271, 2022.
- 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」, 1990.
- 4) 市川 古都美, 市川 裕一, "高周波回路設計のための S パラメータ詳解," CQ 出版社, 2008.