

2.45GHz 帯マイクロ波無線電力伝送における距離減衰

著者名 安中 悠祐

要旨

本研究では 2.45GHz 帯のレクテナにおいてマグネトロンとレクテナの距離を変数に発電電圧の距離減衰を調べ、数式化した。その結果発電電圧、電流、電力全てが距離に対し指数関数的に減少することがわかった。

キーワード：rectifying antenna, wireless power transfer, マイクロ波, 距離減衰

I. はじめに

1.1 レクテナの概要

レクテナは rectifying antenna の略称であり直訳すると「直流にするアンテナ」という意味である。通常アンテナは受信した電波を交流で出力するがレクテナは整流回路と組み合わせることで直流で出力することができる。そのため、空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム (WPT) への応用を研究されている。これはスマホのワイヤレス充電等に用いられている電磁誘導方式とは異なり、マイクロ波を使用するため中・遠距離からの電力伝送を可能にする。

1.2 本研究の背景と目的

先行研究では災害時などに使用されるような大型ドローンや工場のロボット、トラック、バスといったものへの給電の研究が多い。これらの研究では機械にアレーアンテナという複数のアンテナ素子を並べた身につけるには大きいアンテナが使用されている。またウェアラブル端末への実装を目的とした小型レクテナの研究ではソフトバンクのワイヤレス電力伝送ラボが 2024 年に公開した首掛け型・ストラップ型の受電装置や、田中勇氣 (2022) の研究がある。しかしどちらも周波数が 920MHz と電波法により定められた WPT に使用できる周波数の中で最も低い周波数での受電装置であった。これは周波数が高くなるほど効率下がっていく傾向にあることが示されている (T.-W.Yoo and K.Chang, 2002) ためだ。しかしアンテナの大きさは波長の長さに依存するため、小

型化するのにも限界がある。そのため本研究では同じく電磁波法にて認可されているより小型化が可能である点と、電子レンジや Wi-Fi, Bluetooth など様々な場所で使用されているため基地局がなくてもそれらの電波を利用して給電できる可能性があるのではないかと考え 2.45GHz でレクテナを作成し、研究することにした。しかし 1 年という短い期間の中で高効率化の研究をすることは難しいと考え、距離減衰についての先行研究を見つけられなかったことから、マイクロ波の発生源とレクテナの間の距離を変数として発電電圧の距離減衰を調べた。

1.3 仮説

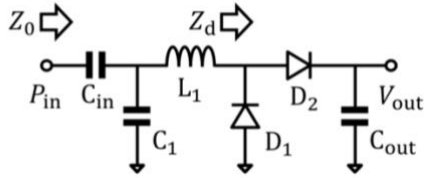
電磁波の距離減衰は電波の強度が距離の 2 乗に反比例して減少することがわかっている。また同じ電磁波である光を利用して発電する太陽光発電でも発電量は距離の 2 乗に反比例する。そのためレクテナの発電電圧も同様に距離の 2 乗に反比例して減少するのではないかというのが本研究での仮説である。

II. 手法

2.1 倍電圧整流回路の作成

田中勇氣 (2022) で使用されている図 1 の倍電圧整流回路を用いた。

図 1 倍電圧整流回路の回路図と仕様



項目	仕様
D1,D2	1SS154
C_{in}, C_{out}	RDE5C1H680J0K1H03B
C_1	NC
L1	MLG0603P33NHT00

図 2 試作した倍電圧整流回路(表)

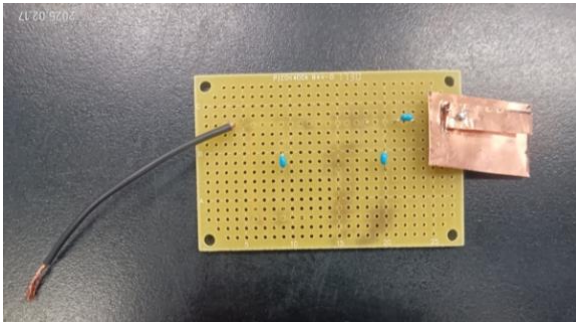
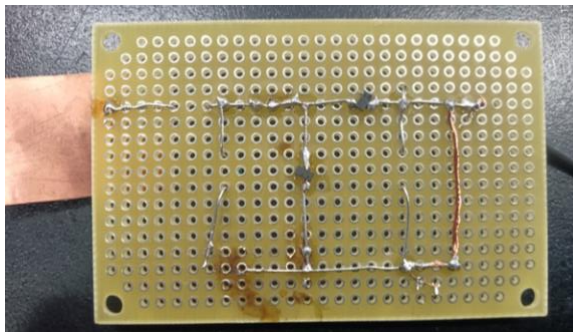


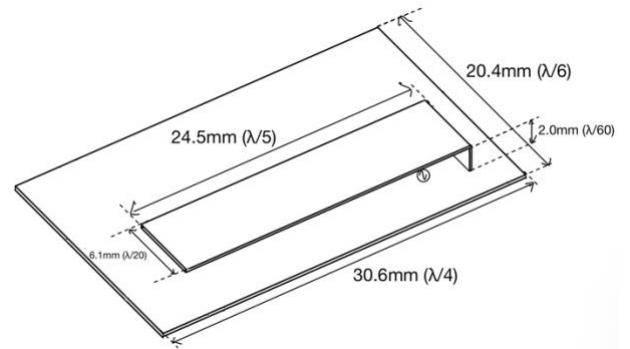
図 3 試作した倍電圧整流回路(裏)



2.2 アンテナの作成

設計の柔軟性と小型化の容易さから現在携帯電話などに使用されている図 4 のような逆 F アンテナを作成した。

図 4 アンテナの形状



2.3 レクテナの作成

アンテナの給電点と整流回路の P_{in} を繋げた。また、アンテナを整流回路に取り付ける際コードが長いとコード自体がアンテナになってしまうため整流回路に直接取り付けた。以後この整流回路とアンテナを繋げたものをレクテナと表記する。

2.4 実験器具

誘導コイル,レクテナ,簡易光学台,マグネトロン(2M219),テスター,缶,撮影用のスマホやカメラ等

2.5 実験手順

実験にあたって,以下の手順を行った。

1. マグネトロンのアンテナ部に缶を取り付け,各端子を誘導コイルの円盤と針にそれぞれ繋げた。
2. レクテナの V_{out} からテスターを通してコンセントのアースに繋げた。
3. 誘導コイルの周波数と出力を最大にし電源をつけた。
4. 簡易光学台の 0mm をマグネトロンの取り付け缶の先端に合わせ 10 秒間撮影し, 0 秒,1 秒,2 秒...,10 秒での数値の平均を取った。
5. 3.を 5mm ずつマグネトロンから 500mm まで離しながら計測をした。

図6 実験の様子

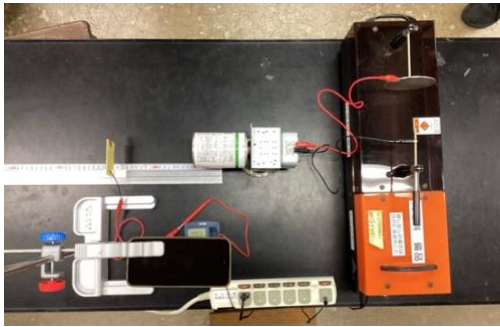
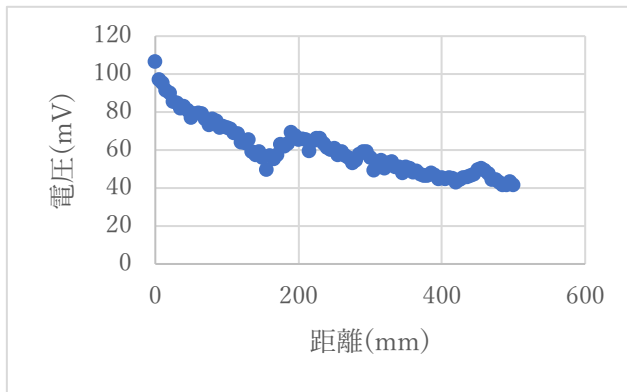


図7 実験の様子（横から）



III. 結果

図8 距離-電圧グラフ



電流も計測したが値が小さいためか計測できなかった。

IV. 考察

4.1 距離と出力電圧の関係の考察

得られた結果をもとに縦軸のみ、横軸のみ、両軸で自然対数をとった 3 種類のグラフを作成すると以下のようになった。

図9 $\ln(\text{距離})$ -電圧グラフ

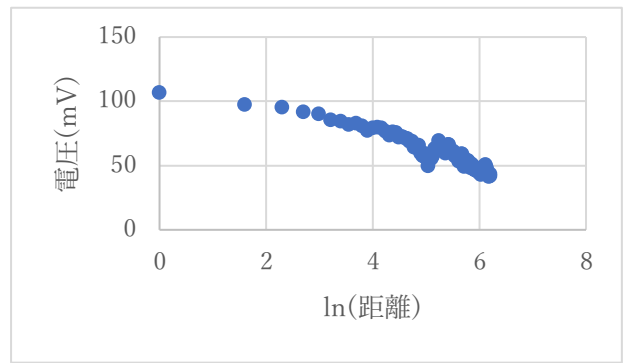


図10 距離- $\ln(\text{電圧})$ グラフ

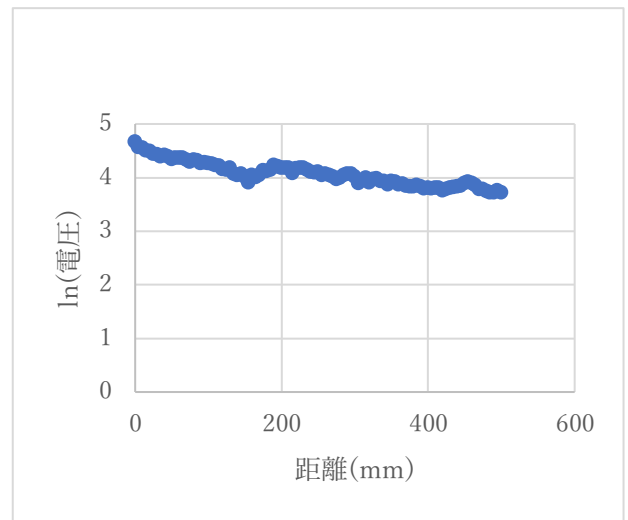
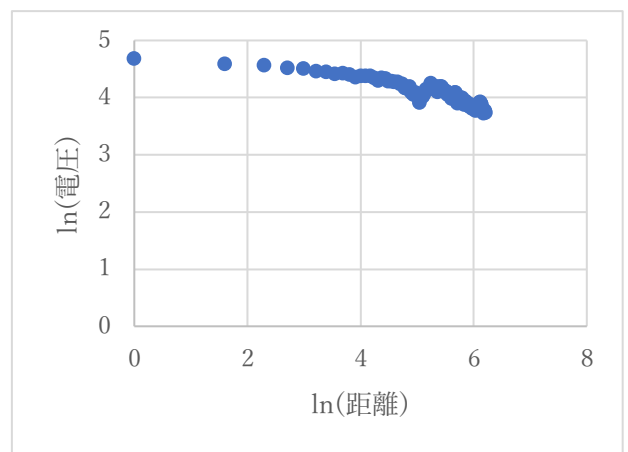
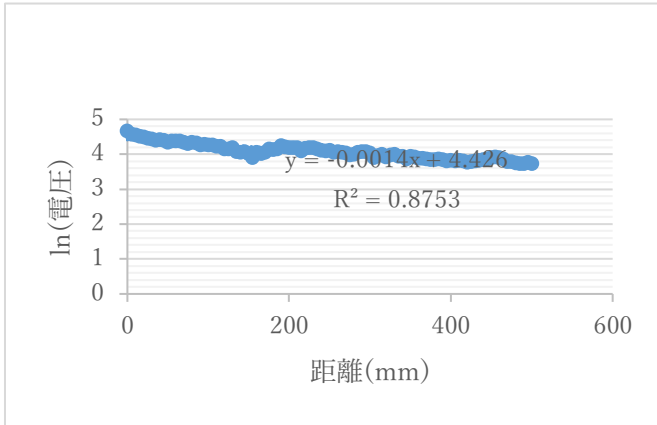


図11 $\ln(\text{距離})$ - $\ln(\text{電圧})$ グラフ



以上の中から $\ln(\text{電圧})$ -距離グラフが最も直線に近いと感じたため、このグラフを用いて距離減衰を数式化する。

図 12 $\ln(\text{電圧})$ -距離グラフの近似直線



出力される電圧を V_{out} 、距離を d とおくと近似直線から V_{out} と d の関係式は

$$\ln(V_{out}) = -0.0014d + 4.426$$

$$\Leftrightarrow V_{out} = e^{-0.0014d + 4.426}$$

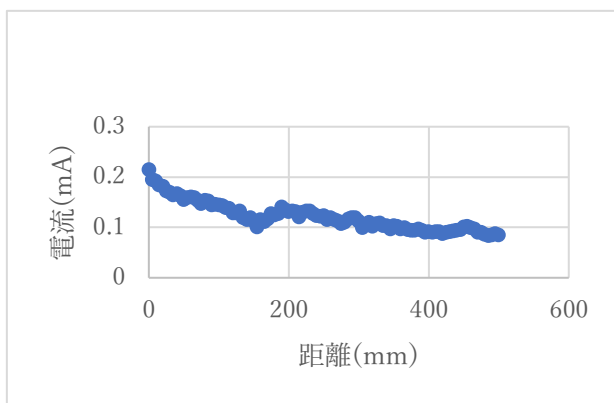
と表すことができた。誤差は $d=0$ の時に 27.5%で最大となった。

4.2 出力電流の推定

電流が計測できなかった原因が電流が小さかったためなのかを調べるため電圧と抵抗から電流を推定する。

今回使用した倍電圧整流回路のインピーダンスは導線の抵抗が無いと仮定すると Z_d の時点で 507Ω であり、計測できなかったのは電流が小さすぎたためであると考えられる。また電流値の計算においてインピーダンスは回路と周波数が同じな場合定数と見做せるためインピーダンスを 500Ω として計算した結果図のようになった。

図 13 距離-電流グラフ



電圧と同様 3 種類のグラフを作成した。

図 14 $\ln(\text{距離})$ -電流グラフ

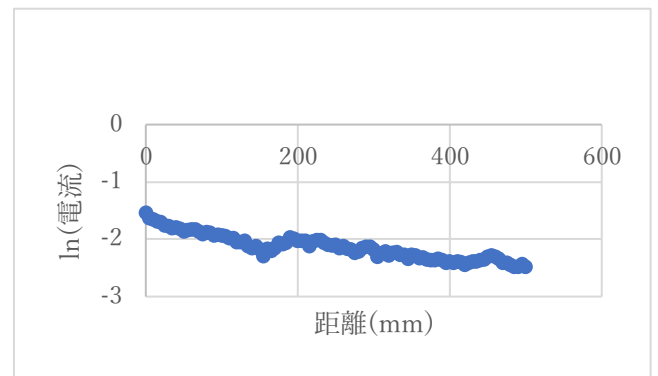
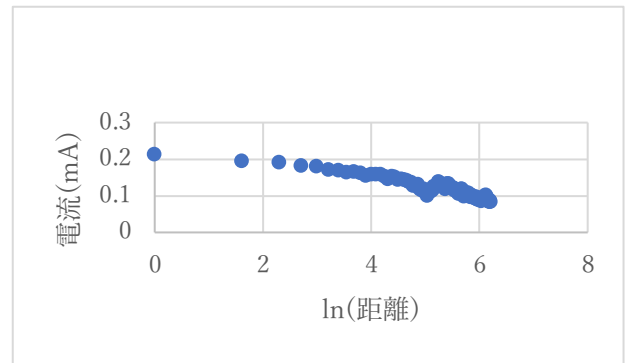


図 15 距離- $\ln(\text{電流})$ グラフ

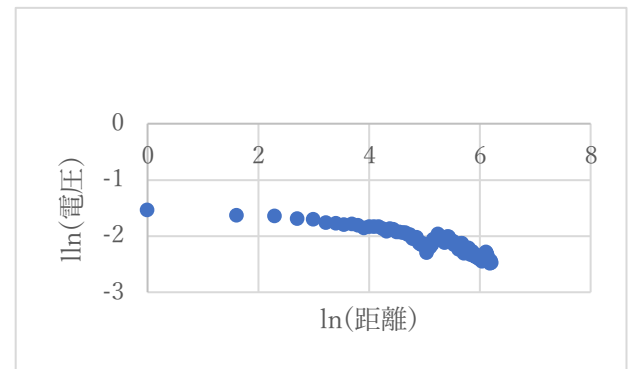
図 16 $\ln(\text{距離})$ - $\ln(\text{電流})$ グラフ

これらの中で図 15 が直線に近いのでこれをもとに数式を求めると

$$I_{out} = e^{-0.0014d - 1.7886}$$

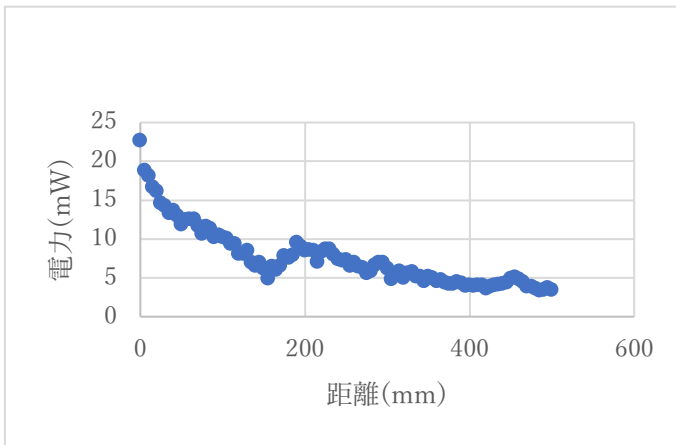
となった。

4.3 出力電力と距離の関係の考察



電圧と 4.2 で求めた電流から出力電力と距離の関係をグラフにした。

図 17 距離-電力グラフ



電圧,電流と同様に近似曲線を求めると

$$W = e^{0.0029d+2.637}$$

となった。このことから 2.45GHz でのレクテナの発電量は距離に対し指数関数的に減少することがわかった。

4.4 指数関数的に減少していく理由について

田中(年代不明)によると自由空間では電磁波の電波強度は距離の 2 乗に反比例するが,損失媒質中を進む場合反比例ではなく指数関数的に減少すると書かれている。そのため本実験で指数関数的に減少した要因の一つではないかと考えられる。しかし図のように大気の影響を受けるのは 20GHz 以上からのため,この他に何か原因がある可能性がある。

図 18 大気分子によるマイクロ波の吸収

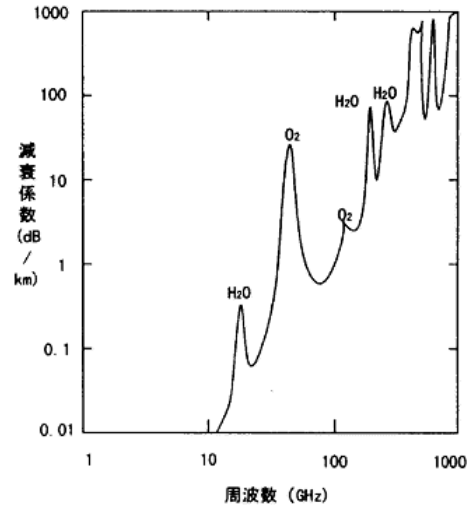


図 大気分子によるマイクロ波の吸収

5.2 今後の展望

- ・今回求めることができた式が 500mm 以降でも当てはまるかを実験し,補正することにより正確性を上げる。
- ・なぜ指数関数的に減少するのかの理由を引き続き調べる。

謝辞

本研究において倍電圧整流回路の作成を手伝ってくださった笠原瑛人氏,助言をくださった株式会社翔エンジニアリングの方々,米谷先生,中川先生,堀先生をはじめとする物理科の先生方に感謝します。

文 献

- Hubregt J. Visser(2021): Practical Implementation of Wireless Power Transfer. *International Electron Devices Meeting, san francisco, US*
- ROHM 株式会社:Tech Web Hand Book 無線通信基礎
- Softbank(2024): 「ワイヤレス電力伝送ラボ」を開設
https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2024/20240327_01/ [Cited 2024/3/27]
- T.-W.Yoo.and.K.Chang(2002):Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas

V. 結論

5.1 結論

出力電力は距離の 2 乗に反比例するという仮定とは異なり指数関数的に減少することがわかった。これは電磁波が損失媒質中を進むとき電波強度は距離に対し指数関数的に減少するためであると考えられる。しかし、大気が損失媒質として働き始めるのは 20GHz 以上の電磁波のため他の原因も考えられる。

Tanaka,Y.(2022): IoT デバイスに向けた マイクロ波無線電力伝送システムの開発. 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士論文
Tanaka J(年代不明):電波伝搬の基礎理論
日本気象協会(1998):「衛星データを用いた海水及び波浪の解析処理技術の調査研究」報告書