電波放射型非接触電力伝送における

縫込みフラクタルアンテナ

電気・化学専攻　医用工学領域　　2281215　　大石健人

（主査：桐生　昭吾　教授 副査：京相　雅樹　教授、森　晃　教授）

1　はじめに

現在、非接触電力伝送を用いた給電が様々な界隈で注目を浴びている。その中の一つに人工心臓がある。人工心臓は重症心不全患者の治療の一つとして使用されている。人工心臓は人工的に作られた機械式のポンプ電源血流を生み出すものであり、近年は小型化され体内に埋め込まれるようになった。人工心臓の消費電力は、ペースメーカーなどの他の植込み医療機器に比べ、3～20[W]と大きく、エネルギーの供給方法が問題となっている。現在、実用化されている人工心臓へのエネルギー供給方法は、体外から体内にケーブルを貫通させて直接エネルギーを送っている[1]。これは、ケーブルの皮膚貫通部で起こる感染症や体外のエネルギー源と常に接続されることによる Quality of life(QOL)の低下による問題を引き起こす原因になっている。この問題を解決する方法として非接触電力伝送が期待されている[2]。ワイヤレスで電力の供給を行うことができるので皮膚貫通部による感染症を防ぐ、エネルギー源と接続されていない時間を過ごすことができるようになることによる QOL の向上が見込まれている。人工心臓を充電するために Fig.1 のような 1 辺数メートルの空間内において、アレイシステムを利用した送信アンテナ、電波を収束させ続ける中継アンテナ、体内にある受信アンテナの三つに分けることによっておおよそ 3W の電力を伝送し、充電を行うことを最終目的として想定する。このとき長い距離でも比較的安定して充電できることから電波放射型の非接触電力伝送を採用する。

また、先行研究からリッツ線を布に縫い込んだ縫込みコイルが、植込み機器への給電に対して有用性が示されている[3]。高周波においてコイルをアンテナとして扱うことから、この縫い込みコイルを縫い込みアンテナとして中継部分に使用する。本報告では、フラクタル形状の縫込みアンテナを提案する

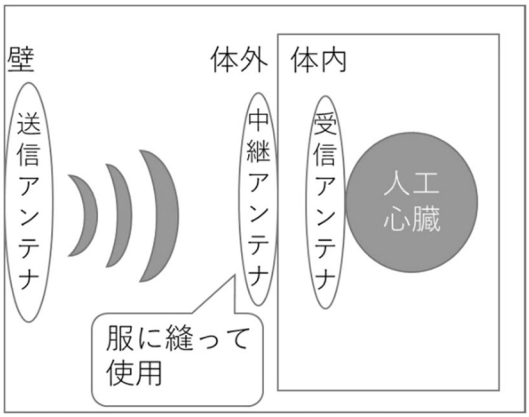


Fig.1　想定している給電システム

2　フリスの伝達公式

電波放射型非接触電力伝送は通信と同じ仕組みであり、フリスの伝達公式に従う伝送になる[4]。効率の良いアンテナの形状を研究するにあたり、アンテナの伝送効率を求めることができるフリスの伝達公式、アンテナの動作利得についての式、アンテナの実行面積と動作利得の関係式をそれぞれ式(1)、(2)、(3)を以下に示す。

$$\boldsymbol{P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_t G_r P_t} \tag{1}$$

$$G = \eta_r \eta_m D \tag{2}$$

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} pG \tag{3}$$

式(1)、(2)、(3)の記号はそれぞれ受信電力 P_r、電波の波長 λ、伝搬距離 d、送信アンテナの動作利得 G_t、受信アンテナの動作利得 G_r、送信電力 P_t、アンテナの動作利得 G、アンテナの放射効率 η_r、インピーダンス整合効率 η_m、アンテナの指向性利得 D、実行面積 A_e、偏波整合度 p を表している。式(1)は遠方界における送信アンテナと受信アンテナの関係を式で表している。この式から受信電力が送信電力と送信アンテナの動作利得、受信アンテナの動作利得、電波の波長、によって値が変化することがわかる。この時、アンテナの動作利得は送信時と受信時で変化しない。また、アンテナの動作利得は式(2)のようになり、アンテナの指向性利得とアンテナの放射効率とインピーダンス整合効率から求めることができる。加えてアンテナの動作利得には式(3)が成り立っており、アンテナの効率を上げ、受け取る受信電力を増やすには、アンテナの実行面積を増やし、偏波、インピーダンスの整合度、放射効率を上げる必要がある。これらの条件を踏まえてアンテナを設計、作製する。

3　研究方法

3.1　縫込みアンテナの設計

作製するアンテナの形状は布に縫い込んで作製することから、線状アンテナであるループアンテナを基準に作製していく。また、アンテナのサイズを服に縫える大きさにする必要があるため、比較的小型化が可能なフラクタル図形と呼ばれる形状を用いたアンテナを作製する[5]。この形状は線状で布に縫い込むことができアンテナのサイズ調整が容易であることから採用した。よって、ループアンテナとフラクタルアンテナをまずシミュレーションを行うことによりアンテナ形状を検討した。アンテナはリッツ線で作製する。

今回、伝送システムから縫込みアンテナを中継アンテナとして利用することが想定されている。アンテナの伝送効率は実行面積の大きさが支配的である。そのため、アンテナは人間の胸部に収まる大きさで作製する必要がある。また、大きさが変わるとアンテナの共振周波数が変化する。この条件を満たすアマチュア周波数帯である 144MHz 帯でアンテナの設計を行った。

3.2　アンテナの計測

作製したアンテナはベクトルネットワークアナライザで計測する[6]。100MHz から 200MHz の間で反射損失と伝送効率を計測し、作製したアンテナを比較して評価する。反射損失、伝送効率の計測方法はそれぞれ Fig2、Fig3 に示す。フラクタルアンテナはリッツ線を使用して作製することからリッツ線太さごとの比較を行った。この時、銅線とリッツ線の比較のために銅線を使用したフラクタルアンテナとも比較した。フラクタルの次数は 2 次に統一して計測する。次にフラクタル次数ごとの比較を行った。1 次から 3 次まで次数ごとにフラクタルアンテナを作製し比較した。実際に作製した 1 次から 3 次までのフラクタルアンテナを Fig4 に示す。この時、リッツ線の太さを 0.07mm×7 本に統一して計測する。フラクタルアンテナは中継アンテナとして人体近傍での使用が想定されることから、人体に巻き付けた状態とそうでない広げた状態を計測し比較した。この時、誘電体である人体の影響と曲げたことによる影響の二つを比較するために、人体と似た形状で非誘電体であるクッションとの比較も行った。伝送効率を計測する時、送信アンテナは市販で買うことができるホイップアンテナを採用した。また、電波暗室で伝送効率と指向性を計測した。電波暗室では送信アンテナとして ETS-Lindgren の対数周期ダイポールアレイアンテナ model3144 を使用した。

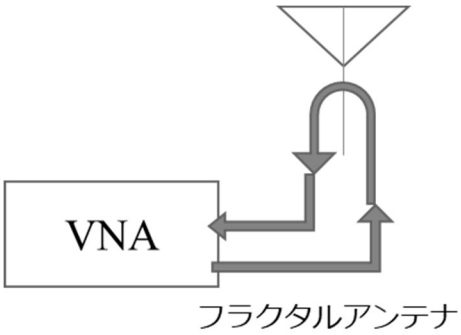


Fig.2 反射損失の計測方法

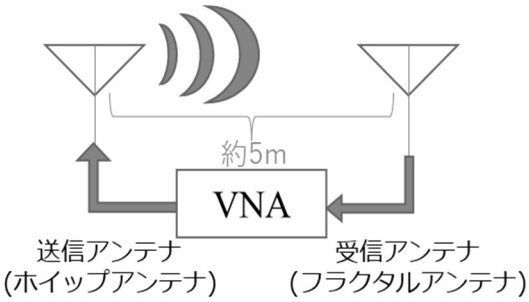


Fig.3 伝送効率の計測方法

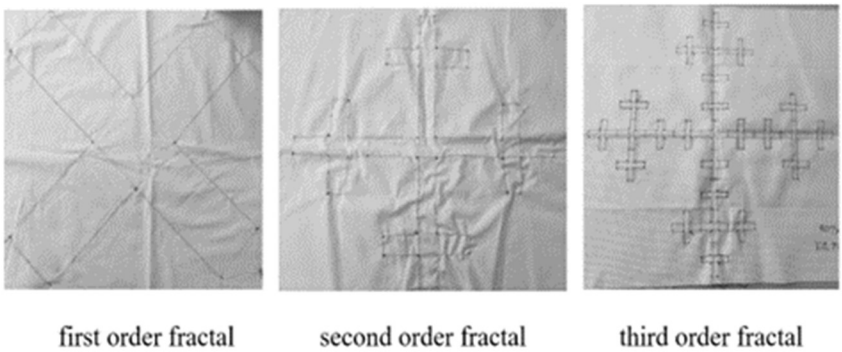


Fig.4　次数ごとのフラクタルアンテナ

4　実験結果と考察

4.1　シミュレーションによるアンテナの選定

シミュレーションによって 1 波長ループアンテナと、コッホ曲線を利用したフラクタルアンテナ、Vicsek fractal を利用した Vicsek フラクタルアンテナを比較した。アンテナはシミュ

レーション内にリッツ線が無いことから代わりとなる銅線を想定し、144MHz で最も整合効率が良くなるようにシミュレーションした。それぞれの形状は Fig. 5 のようになっている。シミュレーション結果によるアンテナの反射損失は Fig. 6 のようになった。Fig. 6 から、Vicsek フラクタルアンテナが約 22dB と Vicsek フラクタルアンテナの値が最も良いものとなった。また、144MHz で共振するような大きさで作製したところ、アンテナのサイズは Vicsek フラクタルアンテナが 36×36cm と最も小さく服に縫いやすい大きさになった。そのため、サイズが小さく反射損失が最も低かった Vicsek フラクタルアンテナの実機を作製した。

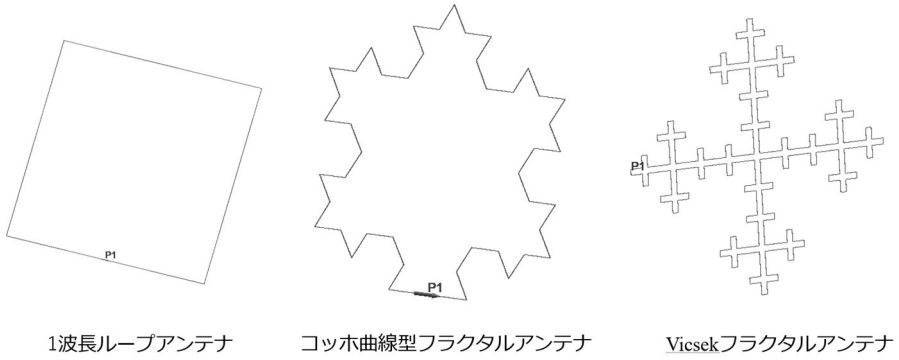


Fig.5 シミュレーションするアンテナの形状

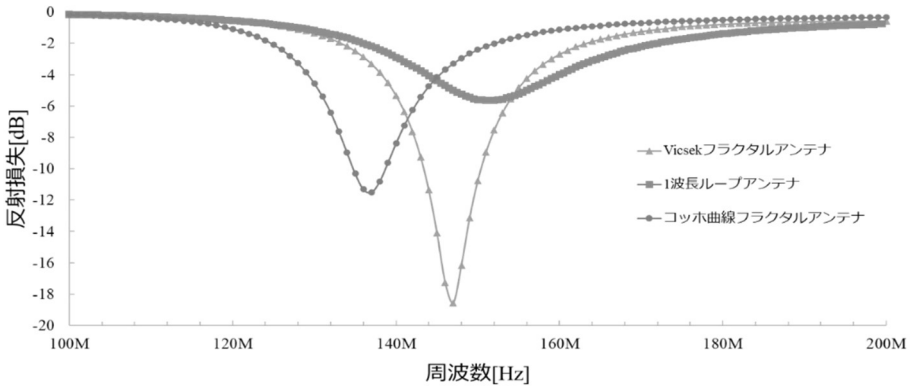
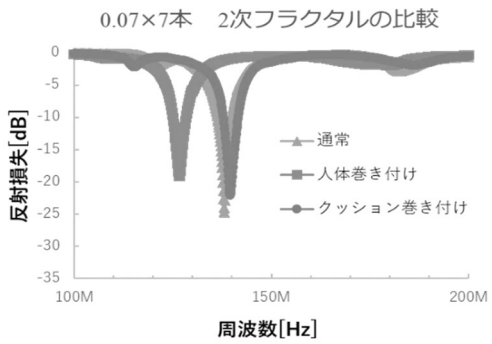


Fig.6 シミュレーションしたアンテナの反射損失

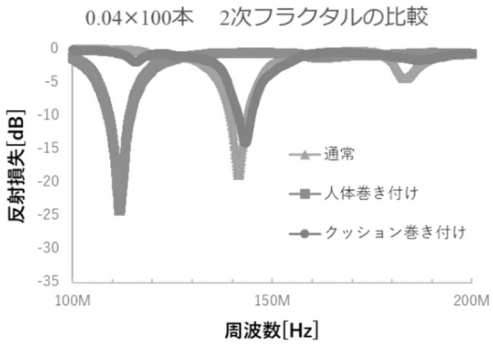
4.2 反射損失

リッツ線の太さごとに Vicsek フラクタルアンテナを作製し比較した時に、人体に巻き付けた状態とそうでない状態、クッションに巻き付け状態を計測した時 Fig.7(a)、(b)、(c)、(d)のようになった。また、共振周波数でのインピーダンスは Table.1 になった。同じ形状ではリッツ線が太いほど共振周波数が高い傾向が得られた。1 次から 3 次まで次数ごとに Vicsek フラクタルアンテナを作製し比較した時に人体に巻き付けた状態とそうでない状態、クッションに巻き付け状態を計測した時、Fig.8(a)、(b)、(c)のようになった。また、共振周波数でのインピーダンスは Table.2 になった。フラクタル次数が上がるとアンテナのサイズが小さくなり、インピーダンスが減少する傾向が見られた。また、人体に近づくと共振周波数に影響を及ぼし、巻き付けるとインピーダンスが下がる、人体に近づけるとインピーダンスが上がるという変化が見られた。広げた状態のアンテナでは-26dB と 2 次フラクタルが最も反射損

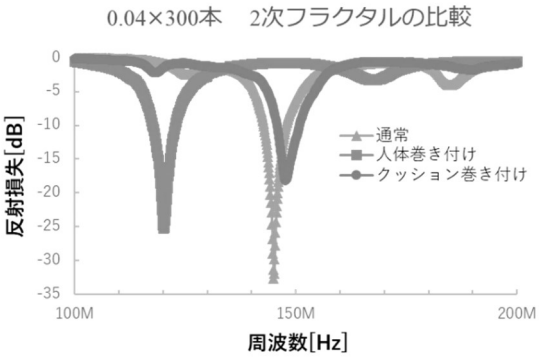
失が低かったが、人体近くではインピーダンスが変化し、3 次フラクタルが最も反射損失が低い-28dB となり中継アンテナとしては 3 次フラクタルが適していると考えられる。



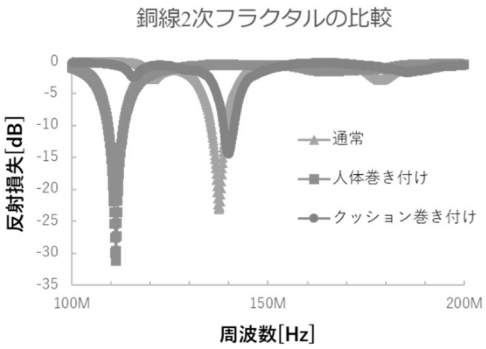
(a)0.07mm×7 本



(b)0.04mm×100 本



(c)0.04mm×300 本

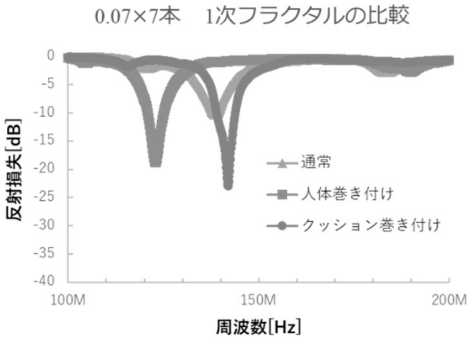


(d)銅線

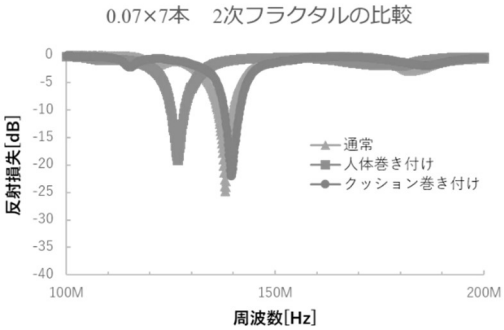
Fig.7 人体に巻き付けた状態とそうでない状態(通常)、
クッションに巻き付け状態でのリッツ線の太さごとの反射損失

Table.1 リッツ線の太さごとの共振周波数でのインピーダンス

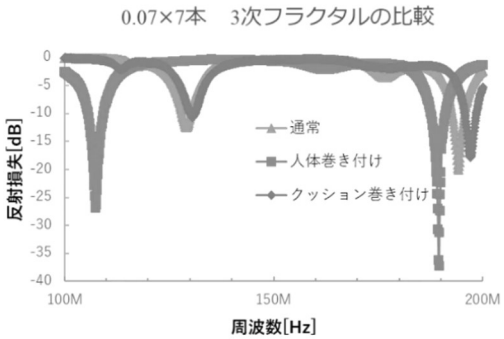
リッツ線 太さ	クッション 巻き付け時 Z[Ω]	人体巻き付け時 Z[Ω]	通常 Z[Ω]
銅線　0.28mm	40.2-j0.868	51.1+i0.180	49.3－i305
0.07mm×7 本	40.4+j0.731	42.1-i0.257	52.6-i0.782
0.04mm×100 本	42.6-j0.294	40.1-i0.524	49.0＋i0.417
0.04mm×300 本	42.2-j0.984	46.5-i0.205	50.3＋i0.517



(a) 1 次フラクタル



(b) 2 次フラクタル



(c) 3 次フラクタル

Fig.8 人体に巻き付けた状態とそうでない状態(通常)、
クッションに巻き付け状態でのフラクタル次数ごとの反射損失

Table.2 フラクタル次数ごとの共振周波数でのインピーダンス

リッツ線太さ	クッション巻き付け時 Z[Ω]	人体巻き付け時 Z[Ω]	通常 Z[Ω]	サイズ(cm)
1 次フラクタル	56.9+j0.354	63.2-i0.492	85.0＋i1.4	58×58
2 次フラクタル	40.4+j0.731	42.1-i0.257	49.6＋i1.08	45×45
3 次フラクタル	33.3+j2.1	42.3-i0.730	37.7+i1.41	36×36

4.3　伝送効率

リッツ線の太さごとに Vicsek フラクタルアンテナを比較した時、伝送効率は Fig.9 のようになった。リッツ線の太さが変わっても 144MHz で約-30dB と大きな変化は見られなかった。よってアンテナの性能は形状への依存度が高いと考えられる。次に 1 次から 3 次まで次数ごとにフラクタルアンテナを比較した時、伝送効率は Fig.10 のようになった。144MHz で次数が大きいほど伝送効率に減少傾向が見られた。これは実行面積の大きさが関係している。また、人体に巻き付けた状態で次数ごとに計測した時、伝送効率は Fig.11 のようになった。1 次は人体近くだと効率が悪くなり、2 次は人体近くの方が広い帯域で伝送効率が高く

なった。3 次はどちらの伝送効率も似た形状になった。どの結果からも数%の伝送効率を持つことがわかった。計測結果から送信アンテナであるホイップアンテナの反射損失が低い部分で伝送効率が高いため、ホイップアンテナの反射損失の影響が大きく、フラクタルアンテナの反射損失の影響が小さいと考える。電波暗室内で計測した次数ごとのフラクタルアンテナの指向性を Fig.12 に示す。方位角の指向性において、全ての次数で八の字のような指向性になった。また、Fig.13 に Fig.12 からフリスの伝達公式である式(1)を使って算出した動作利得を示す。結果としては、アンテナのサイズが大きい順に動作利得が大きくなった。次数ごとのフラクタルアンテナは動作利得の最大値がそれぞれ一次フラクタルアンテナの動作利得は 4.79dBi、二次フラクタルアンテナの動作利得は 3.59dBi、三次フラクタルアンテナの動作利得は 1.26dBi となった。

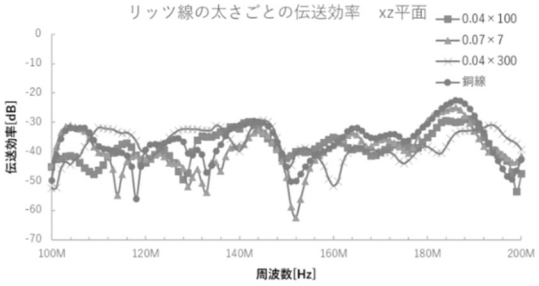


Fig.9 リッツ線の太さごとの伝送効率

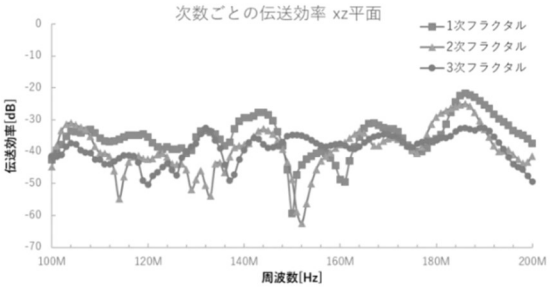


Fig.10 フラクタル次数ごとの伝送効率

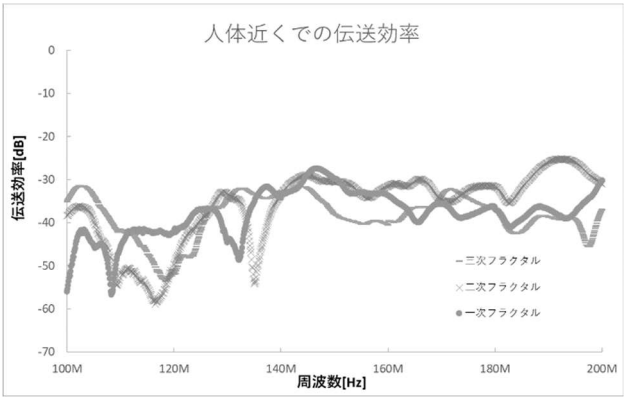


Fig.11 人体近くにおけるフラクタル次数ごとの伝送効率

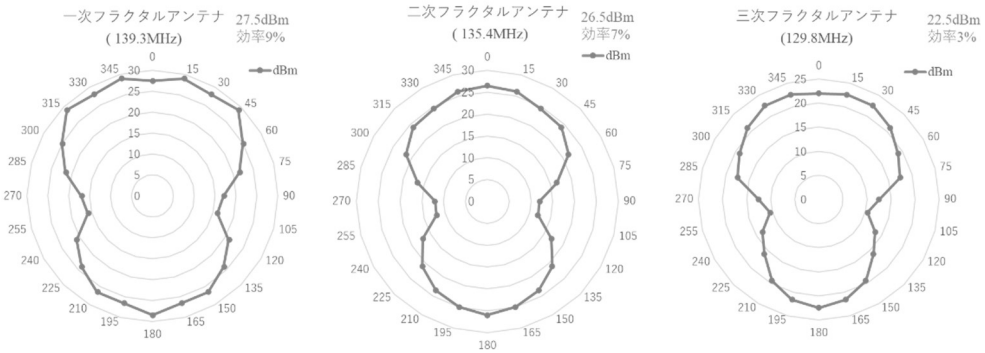


Fig.12 フラクタル次数ごとの指向性

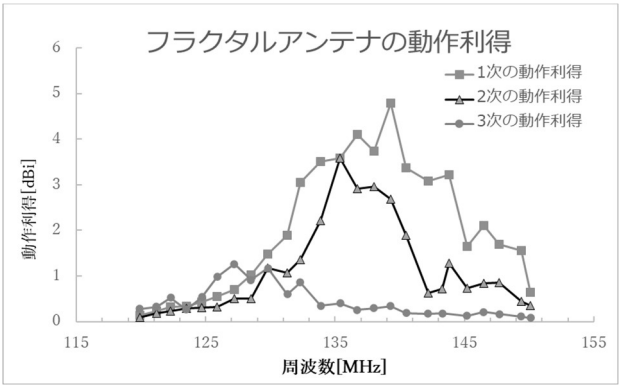


Fig.13 フラクタル次数ごとの指向性

5　まとめ

リッツ線を布に縫い込んで作製する縫込みフラクタルアンテナを提案した。シミュレーションによって整合効率の良いアンテナ形状を選定した後、実際にアンテナを作製して計測を行った。反射損失は広げた状態では 2 次フラクタルの損失が少なく良い値だったが、人体近くでは 3 次フラクタルの方が反射損失は低かった。また、伝送効率においてもアンテナを広げた状態では面積の広い一次フラクタルの効率が良かったが、人体近くでは次数ごとの効率に大きな差は見られず、どのアンテナも伝送効率は数%だった。電波暗室内での伝送効率は 1 次が 9%、2 次が 7%、3 次が 3%の伝送効率を持つことが分かった。指向性は全ての次数で八の字で計測でき、xz 平面方向に強い指向性を持つことが分かった。動作利得は 1 次が 4.79dBi、2 次が 3.59dBi、3 次が 1.26dBi になった。全てのアンテナで動作利得はプラスになった。これらの結果から現状ではアンテナのサイズ的には 3 次が最もよい、他の次数は大きすぎるため。また、Vicsek fractal の形状を少し改善することであまり変わらないサイズのまま面積を増やせる可能性があるからである。そのため 144MHz では 3 次フラクタルが適していると考えるまた、想定しているシステムにて中継アンテナとしての役割を果たせるかどうかという点で確認が取れていない。そのため生体ファントムを利用し、中継アンテナの有無によって伝送効率がどのように変化するか計測することが課題となる。

参考文献

[1] 柴、“人工心臓の完全埋込み化技術”人工臓器 43 巻 1 号、 pp.86-88、 2014.
[2] 柴、 加藤、 鈴木、 名児耶、 補助人工心臓用ワイヤレス電力伝送トランスフォーマの試作、 ライフサポート、 Vol. 25、 No.3、 90-100、 2013.
[3] 諏訪原良平、 裁縫技術を用いたコイルの試作と電気的特性および非接触電力伝送への応用、 日本 AEM 学会誌、 Vol.25、 No.2、 pp.168-173、 2017.
[4]唐沢好男、“フリスの伝達公式への温故知新、”信学技報、A.P2015-173、pp.33-36、2016.01.
[5] 電子情報通信学会(編)、 アンテナ工学ハンドブック(第 2 版)、オーム社、pp.29-59、2008
[6]石井望.アンテナ基本測定法.コロナ社、2011、230p.