

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420361

研究課題名(和文) 近傍界利得によるMHz帯液剤中ループアンテナの電磁界強度の距離特性推定

研究課題名(英文) Estimation of distance property of field intensity produced by loop antenna operated in MHz band and immersed in liquid in terms of near-field gain

研究代表者

石井 望 (ISHII, Nozomu)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：50232236

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：MHz帯における比吸収率(SAR)評価法の一つである、組織等価液剤中にプローブを挿入する方法を実現するために必要となる基準アンテナを利用したプローブの校正方法の実現可能性について検討した。基準アンテナであるシールドループアンテナ(SLA)の近傍界利得が一定となるようにSLAの大きさを適切に選択することにより、基準アンテナから放射する電界強度を推定することが可能となり、MHz帯においてもSAR評価液剤内でプローブ校正を実現することができることを数値シミュレーションおよび実験により確認した。

研究成果の概要(英文)：It was examined the feasibility of the calibration method of the probe using a reference antenna which is required for implementing the method of inserting the probe into the tissue equivalent liquid, which is one of the methods for SAR (specific absorption rate) evaluation in MHz band. By appropriately selecting the size of a shielded loop antenna (SLA), which is a reference antenna, as its near-field gain is constant, it is possible to estimate the electric field intensity radiated from the reference antenna, and it was confirmed that it is possible to realize the probe calibration in tissue-equivalent liquid for SAR evaluation in MHz band.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：近傍界利得 距離特性 電界強度 シールドループアンテナ MHz液剤

1. 研究開始当初の背景

(1) 無線電力伝送 (WPT) 技術がにわかには脚光を浴びており、電気自動車のバッテリー充電に対しては百数十 KHz の周波数において、室内の家電・情報機器の電力供給・充電に対しては数～十数 MHz の周波数において、各メーカーにおける WPT 技術の開発あるいは国内外の各種業界団体における技術仕様に関する標準化活動が盛んに行われている。

(2) WPT 技術を実用化する際のハードルとして安全性確保がある。人体に及ぼす影響については、国内では電波防護指針を満たす必要がある。電波防護指針は携帯電話の普及に伴って整備された経緯があり、300MHz～3GHz の周波数においては、比吸収率 (SAR) がある基準値を下回ることを確認するための SAR 標準測定法および測定装置が存在しており、国内外において広く利用されている。しかしながら、WPT において利用が検討されている kHz 帯および MHz 帯においては、防護指針値を下回ることを確認するための測定システムについての検討が端緒に就いたばかりであり、IEC などの国際的な文書 (文献①②) に掲載される形などで確立されていない。

2. 研究の目的

(1) kHz 帯と MHz 帯における電磁界のふるまい、特に人体内におけるふるまいは大きく異なっており、防護指針においても評価すべきパラメータは違っている。とりわけ、MHz 帯では、GHz 帯の拡張として SAR に着目した評価が有力候補である。本課題では、MHz 帯における SAR 評価に必要となるプローブ校正に絞って検討を行う。研究代表者は、GHz 帯における SAR 測定用プローブの校正を実施するため、液剤中で動作する基準アンテナの利得校正について検討を行った。ここで、プローブ校正とは、プローブ先端における受信電界強度とプローブの出力直流電圧を対応づけることであり、利得校正とは、アンテナの利得を前もって精度よく測定することを意味する。SAR 評価が行われる液剤中では、電磁界の減衰が大きく、基準アンテナの遠方界領域において信号を受信できないという問題が生じる。このため、研究代表者は、近傍界利得を導入し、フリスの伝達公式を拡張し、GHz 帯において近傍界領域での基準アンテナの利得校正を可能とした。本課題では、この手法の MHz 帯への拡張を検討する。

(2) MHz 帯では、基準アンテナに極めて近接した領域で近傍界利得の推定を行う必要があるため、GHz 帯におけるノウハウにしたがって曲線当てはめを行うだけでは対応が難しい。その理由の一つは、GHz 帯では、測定可能領域において遠方界の寄与が大きく、利得を推定することが可能であったが、MHz 帯では、測定可能領域において遠方界の寄与が相対的に小さくなり、利得の推定が不安定となるこ

とが挙げられる。現実には、遠方において利得が正しく推定できなくとも、測定可能領域において近傍界利得を推定できればよく、本課題ではこの可能性について検討を行う。

(3) もう一つの問題は基準アンテナの寸法にある。校正は水槽内で行われる。例えば、基準アンテナとしてループアンテナを採用する際、その周囲長を1波長とすることは現実的ではない。このため、水槽内に収まるような寸法の基準アンテナは微小ループアンテナとしてふるまい、反射が大きくなるという問題が生じる。このように、MHz 帯における基準アンテナとしてループアンテナが適しているかという観点からも検討を行う必要がある。

(4) 本課題では、MHz 帯において液剤中で動作するプローブ校正を実現するために

① 基準アンテナとして液剤中で動作するシールドループアンテナ (SLA) の試作

② 基準アンテナの近傍界利得測定系の構築および近傍界利得の測定

③ GHz 帯の拡張としての基準アンテナの電界強度の距離特性の関数化およびその条件について検討を行う。

上記の検討を通じて、近傍界利得に着目した、MHz 帯における SAR 標準測定の実現性について判断する。なお、上記 (2)、(3) にて要請した検討は③の条件検討が対応する。

3. 研究の方法

MHz 帯における SAR 評価液剤中でのプローブ校正法、すなわち、2 アンテナ法により基準アンテナの近傍界利得を測定し、その近似曲線を得て、基準アンテナが液剤中に発する電界強度の距離特性を推定する方法に関して、以下の観点について検討を行う。

(1) 13.56MHz/30MHz において SAR 評価液剤中で動作する SLA を設計・試作する。SAR 評価液剤を充たした水槽の中で、試作 SLA を対向させ、ステッピングモーターにて制御されたスライダーにより距離を変化させ、ベクトルネットワークアナライザにより反射特性 S_{11} 、 S_{22} および伝送特性 S_{21} を測定する。これより、SLA 間の距離 r の関数として近傍界利得 $G_n(r)$ を推定する。

(2) 数値シミュレーション (線状アンテナ解析用のモーメント法) により、SLA のループ長の変化に対する電界強度の距離特性の変化について検討する。

(3) (1) で推定された SLA の近傍界利得 $G_n(r)$ を近傍界利得の距離特性に関する近似式にあてはめる。さらに、この近似式における定数項が遠方における利得に一致する条件を検討し、近似式の妥当性を検証する。

(4) 6.78MHz の生体模擬食塩水中で動作する

SLA を設計・試作する。この食塩水中において試作 SLA の近傍界利得の推定を行う。また、数値シミュレーションにより SLA が発する電界強度の距離特性を求め、近傍界利得を介して推定された結果と比較する。

(5) 実験室内に設置可能な水槽内で近傍界利得を測定可能とする SLA の構造 (例えば多重巻ループ) について検討する。

(6) SLA に関する被覆モデルの数値シミュレーションと実験により、防水加工チューブおよび防水加工剤が SLA の近傍界利得に及ぼす影響について検討する。

4. 研究成果

(1) ① IEC 標準化文書 (文献②) に記載の 30MHz SAR 評価液剤, あるいは, 同文書に記載の比誘電率, 導電率の外挿値から誘電パラメータを推定して調合した 13.56MHz SAR 評価液剤を 600mm×300mm×350mm の水槽内に注入し, 図 1 に示すように, その中に試作した SLA を対向させて配置し, SLA の近傍界利得を測定する。図 2 に SLA の概要を示す。評価液剤を介した二つの SLA の間を 2 ポート回路網とみなし, SLA の間の距離 r を変化させながら, 本学現有のベクトルネットワークアナライザ (HP 8753A) にて S パラメータ (S_{11}, S_{21}) を測定する。本来ならば, S_{22} を測定すべきところであるが, 現有アナライザは片側測定 (ポート 1 入力) にしか対応しておらず, SLA の工作精度を考慮し, S_{22} は S_{11} に等しい仮定し, 測定した。

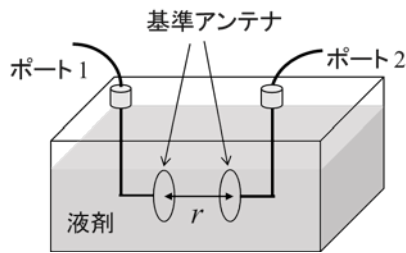


図 1 近傍界利得測定系

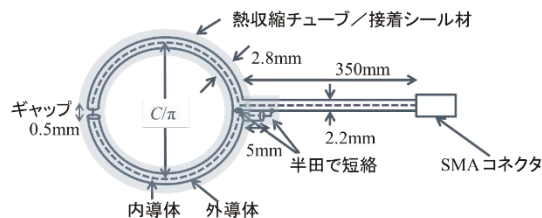


図 2 シールドドロープアンテナの概要

② 2 アンテナ法を利用した一様な損失媒質中におけるアンテナの近傍界利得は

$$G_n(r) = \frac{|S_{21}(r)| e^{\alpha r} \cdot 2\beta r}{\sqrt{(1 - |S_{11}(r)|^2)(1 - |S_{22}(r)|^2)}}$$

で定義される。ここで, α および β は液剤の減衰定数および位相定数であり, 接触プローブ法にて実測する。

③ 図 3 は 30MHz SAR 評価液剤 ($\epsilon_r = 55.0, \sigma = 0.75 \text{ S/m}$) に SLA を対向させて, 上記手順に従い, 近傍界利得を測定した例である。SLA の, ループ長 C は 200mm から 600mm までの 5 通りで測定を行っている。ループ間距離 r が 10mm 以下では, 近傍界利得の距離特性 (立ち上がり特性) は同一である。しかしながら, 10mm 以上では, ループ長 C が大きくなるにつれて, 近傍界利得の傾きが負から正に転じることがわかる。図から, $C = 400\text{mm}$ のとき最も平坦な距離特性が得られる。数値シミュレーションによっても同様の傾向が得られた。同様の結果が 13.56MHz SAR 評価液剤中における近傍界利得測定においても得られた。13.56MHz の場合, 近傍界利得が最も平坦な距離特性を示すループ長は $C = 600\text{mm}$ であった。

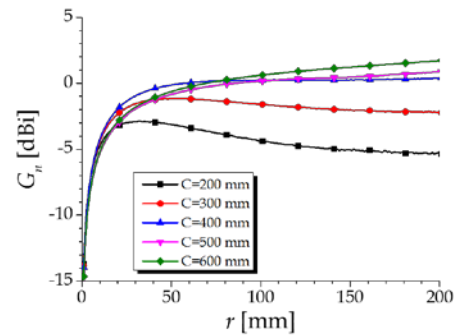


図 3 ループ長を変化させたときの 30MHz における SLA の近傍界利得の距離特性

(2) ① 図 4 に, 数値シミュレーションで近傍界利得の距離特性が最も平坦となったループ長 $C = 600\text{mm}$ の場合の SLA による電界強度の距離特性を示す。図中の $|E_{MOM}|$ がシミュレーション値に対応する。また, $|E_n|$ は近傍界利得の距離特性を考慮したときの基準アンテナが発する電界強度の推定値であり, $|E_f|$ は近傍界利得の代わりに遠方界における利得を適用したときの基準アンテナが発する電界強度の推定値である。

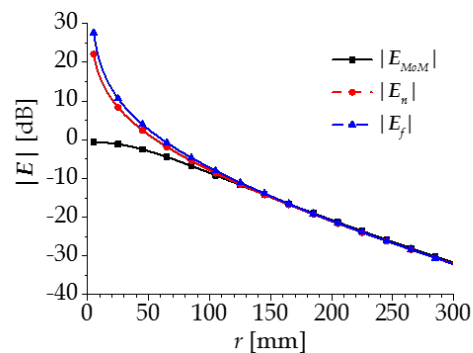


図 4 SLA による電界の距離特性 (計算値, ループ長 $C = 600\text{mm}$)

図1の測定系では、遠方における利得を測定により求めることはできないため、 $|\mathbf{E}_f|$ はリファレンスとしての表示となる。距離 r が100mmを越えると、 $|\mathbf{E}_{MoM}|$ 、 $|\mathbf{E}_n|$ 、 $|\mathbf{E}_f|$ は一致する。この理由としては、近傍界利得が一定になるとき、アンテナ近傍において電界強度と磁界強度の比が距離にかかわらず一定となるためと考えられる。最適化ループ長以外では、数値シミュレーション値と推定値との間に乖離が生じる。このように、近傍界利得を利用したプローブ校正の必須条件として、近傍界利得の距離特性がアンテナ近傍で平坦となるようなループ長を選ぶ必要がある。

② モーメント法は対称行列を利用した数値解析手法であり、このことに着目し、モーメント法の一般化固有値問題に対応する特性モード解析を実施した。解析対象のアンテナ上の電流をモード分解し、モード固有値、各モードの電流分布、励振振幅、モード放射パターンについて検討を行った。その結果、近傍界利得の距離特性が平坦となるのはループ長が液剤中の波長のおよそ半分となることであることがわかった。このとき、給電点とそのループ円周上の対称点を結ぶ方向に直交する方向に電界が構成されること、実際の放射パターンは高次モードの寄与が現れ、給電点とそのループ円周上の対称点を結ぶ方向に対して非対称となることなど、SLAの動作に関する知見が得られた。

(3) ① (1)において推定された近傍界利得 $G_n(r)$ の距離特性に対して、研究代表者がGHz帯において見出した近似式

$$G_{n,dB}(r) = G_{f,dB} + \frac{C_1}{r} + \frac{C_2}{r^2}$$

をあてはめた。ここで、 $G_{n,dB}(r)$ は $G_n(r)$ のdB表示であり、 C_1, C_2 は定数である。上式は $r \rightarrow \infty$ において、近傍界利得 $G_{n,dB}(r)$ は利得 $G_{f,dB}$ に収束する。しかしながら、図3からわかるように、水槽内で測定可能な距離範囲において、近傍界利得は利得に収束せず、上記の近似式を用いるあてはめに問題が生じた。特に傾きが負となる場合、測定された近傍界利得は近似式にあてはまらない。この理由としては、測定範囲が液剤中の波長(30MHzで627mm)の1/3も満たないこと、SLAの近傍界特性がGHz帯の基準アンテナであるダイポールアンテナと大きく異なることが挙げられる。

② 上記①より、近傍界利得の距離特性における傾きが負となる場合に対しても適用可能な近似式を用意する必要が生じた。近傍界利得は損失媒質中での減衰因子 e^{-ar} が考慮されている。このため、近傍界利得の距離特性は自由空間のそれと同じ性質を示す。ここ数年の間、自由空間でのアンテナ利得測定に関して、アンテナ振幅中心に着目する曲線あてはめを利用することで、短距離で精度のよい利得推定が可能となること国内の複数研究機関より発表されている(文献③④)。本課題で

は、SLAの近傍界利得のあてはめにこの近似式を利用することを検証した。この近傍界利得の距離特性に関する近似式は

$$G_n(r) = G_f \frac{r}{r+2d} \left\{ 1 + \frac{A}{(r+2d)^2} \right\}$$

で与えられる。ここで、 G_f は遠方における利得、 d はアンテナの振幅中心に関する量、 A はパターンの鋭さに関する量である。この近似式によると、 $D = A(A - 12d^2)$ の符号により距離特性が分類できる。 $D > 0$ の場合は、極大、極小を経てから遠方において利得 G_f に収束する、 $D = 0$ の場合は、 $r = 4d$ において変曲点を示し、そのときの値は $(8/9)G_f$ となり、遠方において利得 G_f に収束する、 $D < 0$ の場合は、単調増加し、遠方において利得 G_f に収束するという距離特性を示す。これから、アンテナ近傍において、近傍界利得が平坦になるのは $D = 0$ となる場合であることがわかる。実際に、ループ長 C が大きくなるにつれて、 D は徐々に小さくなり、正から負に変化することから、最適ループ長が存在することがわかる。図示は省略するが、近傍界利得が負の場合においても、この近似式は実測された近傍界利得に非常によくあてはまる。

(4) ① 6.78MHzにおける評価液剤として、6.78MHzにおいてIEC標準化文書(文献②)に記載されている導電率を外挿した値となるような食塩水(0.04mol/l, 0.254%)を使用する(文献⑤)。この液剤中の6.78MHzにおける波長は1860mmである。図5はこの液剤中において、3つのループ長 C のSLAに対する近傍界利得の距離特性の計算値である。距離特性が最も平坦となるのはループ長 $C = 1760$ mmの場合である。直径に換算すると、560mmであり、この場合、測定系で使用する水槽に収まらない。つまり、実験室に容易に設置可能な水槽を用いる場合、6.78MHzにおいて近傍界利得を利用したSARプローブ校正は実現できない。

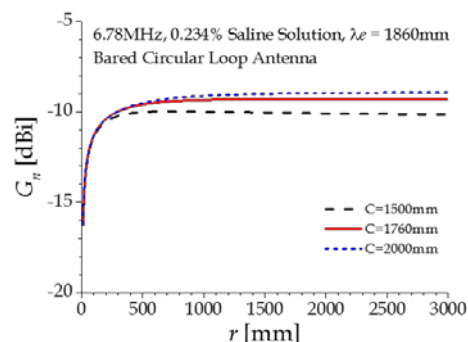


図5 6.78MHzにおける0.04mol/l食塩水内のシールドループアンテナの近傍界利得の距離特性(計算値)

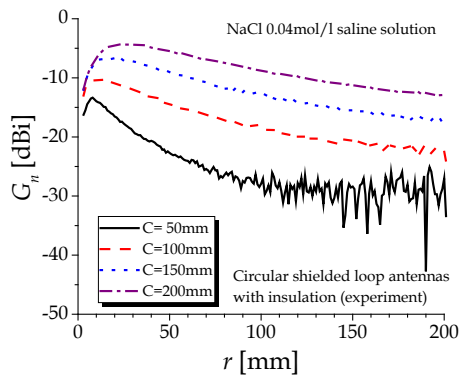


図6 6.78MHzにおける0.04mol/l食塩水内のシールドループアンテナの近傍界利得の距離特性(実験値)

② 図6は6.78MHzにおける0.04mol/l食塩水内のSLAの近傍界利得の距離特性の実験値である。ループ長が短くなると、ループ面積が小さくなり、受信レベルが下がり、測定ノイズフロア以下となるため、100mm以上の距離では測定値がふらつく場合がある。ループ長が長くなるにつれて、利得レベルが高くなり、図示の200mmの距離の範囲で近傍界利得の距離特性が平坦になったように見えるが、実際にはそうではない。これは、30MHz/13.56MHzの場合に比べて波長が長くなるのに対して、測定系におけるアンテナ間の距離は200mmまでしか変化できず、アンテナの極めて近傍において測定せざるを得ないためである。このように、6.78MHzにおいては、近傍界利得を利用したプローブ校正の実現は難しい。

(5) (4)②で述べたように、単一ループで構成されるSLAを基準アンテナとして利用した、近傍界利得経路のプローブ校正は、SLAの寸法が水槽よりも大きくなるのが問題となる。その解決策として、ループを多数巻にした場合について、数値シミュレーションにより検討した。多数巻にすることでループの直径を短くできるためである。しかしながら、自由空間とは異なり、液剤にループ金属が直接あるいは間接的に接触することから、ギャップで給電された電流はループに沿って指数関数的に減衰する傾向を示した。このため、ギャップ付近で近傍界利得が平坦となるような分布になるループ長が存在し、ループ直径を短くする方向に寄与したものの、実験系で利用する水槽によりやく収まる程度の短縮効果しか得られなかった。それと引替に、ループの奥行き寸法が増えるため、実際には水槽の中に収まらない、収まったとしても水槽壁面からの反射の影響を避けられない状況になることが判明した。さらに、電界強度が推定式と一致するようになる距離も水槽内で実現するのが難しいことがわかった。以上のように、6.78MHzにおいては、近傍界利得を利用せず、他の原理に基づく方法でプローブを校正すべきという結論に達した。

(6) ① 数値シミュレーションと実験で得られた近傍界利得の距離特性を比較すると、条件を同一にしても一致しなかった。この理由として、実験で使用するSLAは熱収縮チューブで被覆しているものの、液剤中においてチューブへの液剤の浸入があり、実質的に被覆なしの状態あるいはそれに近い状態になっているのではないかと疑問が生じ、数値シミュレーションにおいて、Lichteneckerの対数混合則によりチューブに液剤が浸入した場合の等価的な複素誘電率を考え、近傍界利得距離特性の実験値(主に曲線の形)との照合を行った。その結果、実測においては実質的に被覆がない状態になっていることを確認した。すなわち、被覆によるアンテナ上に流れる電流が正弦波状となる(指数関数的な減衰がない)効果が得られていないことを確認した。これにより、試作SLAの動作原理を解明する手がかりが得られた。

② 上記の考察により数値シミュレーションにおいてSLAは被覆なしと設定すればよいことがわかったが、なお実験値と比較すると利得のレベルが合わなかった。検討の結果、SLAの入力特性に問題があり、その影響が利得レベルの大きな差の原因となっていることがわかった。すなわち、SLAの入力ポートにおける反射係数の大きさはほぼ1であり(完全反射に近い状態)、その測定誤差が近傍界利得のレベルを大きく左右していた。このことは、近傍界利得の定義において $|S_{11}| = |S_{22}| = 0$ とおいた量を比較すると、シミュレーション値と実験値はほぼ一致することから確認される。今後、SLAに整合機構を追加し、完全反射に近い状態を回避する必要がある。

(7) 研究全体を通して、MHz帯において、基準アンテナであるSLAの近傍界利得が一定となるようにSLAの大きさを適切に選択することにより、SAR評価液剤内でプローブ校正を実現することができることを数値シミュレーションおよび実験により確認した。

<引用文献>

- ① IEC International Standard 62209-1, Feb. 2005.
- ② IEC International Standard 62209-2, Mar. 2010.
- ③ 廣瀬 雅信 他, 位相中心を用いた近傍界利得と遠方界利得の関係の理論的検討, 無線端末・アンテナシステム測定技術研究会資料, AMT2012-2, pp.7-14, 2012.
- ④ K. Harima, Numerical simulation of far-field gain determination at reduced distances using phase center, IEICE Trans. Communications, vol. E97-B, no. 10, pp.2001-2010, Oct. 2014.
- ⑤ チャカロタイ ジェドヴィスノブ 他, 中間周波数帯における人体等価ファントム液剤の開発の一検討, 2015 信学ソ大, 通信, B-4-2, Sep. 2015.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 7 件)

- ① N. Ishii他, Simulated near-field gain of dielectric-coated circular loop antennas operated in liquid and in HF band (invited), Proc. IEEE MTT-S IMWS-Bio 2015, pp.179-180, 2015年9月23日, Taipei(Taiwan).
- ② 石井 望 他, 液体中ループアンテナにおける被覆材料の液体吸収性による影響, 電子情報通信学会技術研究報告, A・P2015-87, pp.43-48, 2015年9月18日, 小山工業高専(栃木県・小山市).
- ③ 石井 望 他, 位相中心を考慮した液剤中アンテナの遠方界利得推定に関する一考察, 電子情報通信学会アンテナ・伝搬専門研究会 無線端末・アンテナシステム測定技術研究会資料, AMT2014-14, pp.13-18, 2014年12月19日, 種子島宇宙センター(鹿児島県・南種子町).
- ④ N. Ishii 他, Modal analysis on insulated loop antenna immersed in liquid, Proc. 2014 Asia Pacific Microwave Conf., WE1F-3, pp.79-81, 2014年11月5日, 仙台国際センター(宮城県・仙台市).
- ⑤ 石井 望 他, 液剤中動作ループアンテナの特性モード分析, 2014電子情報通信学会ソサエティ大会(通信), B-1-83, p.83, 2014年9月25日, 徳島大学(徳島県・徳島市).
- ⑥ 竹澤 諒亮, 石井 望 他, 液剤中でシールドループアンテナの近傍界利得が一定となるループ長の存在について, 平成25年度電子情報通信学会信越支部大会講演論文集, 4B-3, p.57, 2013年10月5日, 長岡科学技術大学(新潟県・長岡市).
- ⑦ N. Ishii 他, Optimal size of water-proofed shielded loop antenna in a tissue-equivalent liquid to calibrate SAR probe in HF band, Abst. PIERS 2013 Stockholm, 2P6-3, p.750, 2013年8月13日, Stockholm(Sweden).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 望 (ISHII Nozomu)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 50232236