

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月16日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560390

研究課題名（和文） 高損失液剤中におけるアンテナ利得校正

研究課題名（英文） Gain Calibration of Antenna Operated in High-Loss Liquid

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

研究成果の概要（和文）：携帯無線端末の比吸収率（生体への電波の熱吸収の程度を表す指標）を測定する際に用いられる電界プローブを校正する際に必要となる高損失液剤中における基準アンテナ利得測定に関して、1) マイクロ波増幅器の利用による測定系のダイナミックレンジ拡大、2) サンドウィッチダイポールアンテナの利用、3) 液剤の温度依存性による利得推定への影響、4) 利得推定法の改良、5) 利得曲線への当てはめ条件、6) 導波管開口アンテナを検討した。

研究成果の概要（英文）：To measure the far-field gain of the reference antenna in the high-loss liquid, which is required to calibrate the electric-field probe used in evaluating the specific absorption rate, which is well known as a measure of the thermal absorption of the radio wave in the biological body, for the mobile communication devices, the following items are examined: 1) the enhancement of the dynamic range by using a microwave amplifier, 2) sandwiched dipole antenna, 3) the effect of the temperature dependence of the liquid on the evaluated far-field gain, 4) modification of the procedure to estimate the far-field gain, 5) some conditions in curve-fitting process, 6) waveguide aperture antenna.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，通信・ネットワーク工学

キーワード：アンテナ

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 携帯無線端末の比吸収率（以下、SAR）は頭部形状を模したセルの中に頭部等価液剤を充填し、セルの外側に試験端末を設置し、液剤中における電界分布をSARプローブで測定することで決定される。このプローブの受信する電界強度と出力電圧を関連付ける校正は、導波管を利用する方法が一般的であり、

国際電気標準会議（IEC）において300MHz～3GHzの範囲で標準化されている。

(2) IECにおいてSAR測定法の改定作業が行われており、対象周波数は30MHz～6GHzに拡張されることになっている。3GHz以上において、現行の導波管を利用したSARプローブの校正を行うと、導波管開口サイズに対してブ

ローブ径が無視できず、不確かさが大きくなる懸念があった。

(3) 導波管を利用しない SAR プローブ校正法の開発が必要であり、その有望な候補として、拡張されたフリスの伝達公式に基づく方法に着目していた。すなわち、液剤中で動作する基準アンテナの利得を決定し、基準アンテナからの放射電界強度とプローブ出力電圧を関連付けることで、プローブの感度係数を決定する。3GHz 以上では液剤中における減衰が大きく、この時点までに研究代表者らが導出および構築してきた拡張されたフリスの伝達公式および測定系の改良を要する状況にあった。

## 2. 研究の目的

5.2GHz 帯の頭部等価液剤中において動作する基準アンテナの利得測定を標準不確かさ 5%以下で実施するため、近傍界領域での測定を可能とする液剤中における利得測定法の確立が必要とされている。これを実現するために、研究開始当初までに研究代表者らが導出および構築してきた拡張されたフリスの伝達公式および測定系に対して、以下の検討を行う。

- (1) 液剤の高減衰特性に対応するため、測定系にマイクロ波増幅器を組み込む、あるいは、基準アンテナの利得を改善することにより、測定系のダイナミックレンジの確保を行う。
- (2) 液剤の誘電率測定の精度改善により、アンテナ近傍界利得の距離収束性を確保する。
- (3) アンテナ近傍界利得の距離特性表示式の改良により、曲線当てはめの際に生じる不安定性を除去する。
- (4) 当てはめ範囲、距離オフセット、測定ポイント数（測定間隔）などの最適化により、当てはめに関する不確かさを低減する。

## 3. 研究の方法

マイクロ波発振器とスペクトラムアナライザ、あるいは、ベクトルネットワークアナライザを用いて構成される液剤中アンテナの利得測定系について、近傍界領域における測定による不具合を解消するため、次の項目について検討を行う。

- (1) 測定系にマイクロ波増幅器を組み込む、あるいは、液剤中アンテナとしてサンドウィッチダイポールアンテナを採用することで、測定系のダイナミックレンジの拡大を実現する。
- (2) 測定時の温度管理を行い、液剤の誘電率測定の改善を行う。
- (3) 近傍界利得の距離の逆べき展開を任意の次数までできるように拡張するとともに、距離依存項の係数を数値的に安定して決定する。

- (4) 二乗誤差の総和を判断基準として、当てはめ範囲、距離オフセット、測定ポイント数（測定間隔）などの最適化を行う。
- (5) 3GHz 以上で動作する、サンドウィッチダイポールアンテナ以外の液剤中基準アンテナの可能性を探る。

## 4. 研究成果

(1) ① 申請前に利用していたマイクロ波増幅器(Agilent 83017A, 利得 25dB)に対して、本補助金で購入したマイクロ波増幅器(Agilent 83020A, 利得 30dB)を利用することにより、2.45GHz において、測定可能最大距離が 175mm から 200mm とすることができた。このように、当てはめ範囲を拡張することにより不確かさは軽減できるものの、適切な当てはめ範囲を選択することで推定される利得の値に変化はなかった。測定距離が長くなると、液剤を溜める容器が大きくなり、液剤の量も増えるなどのデメリットも生じることから、マイクロ波増幅器を挿入せずに、アンテナの近くで曲線当てはめできるように近傍界利得の距離依存項の係数を決定すればよいという結論に達した。

② 5.2GHz において組織等価液剤中で動作する基準アンテナとして、図 1 に示すサンドウィッチダイポールアンテナ (SWDA) について検討を行った。申請以前に検討していた 2.45GHz で動作する SWDA に比べ、比誘電率が 10.2 のアルミナ基板を用いて製作したこともあり、5.2GHz で動作させるためにはダイポール長を 13mm とする必要がある。製作の観点からこの物理寸法は短く、さらに給電同軸ケーブルを取り付けることは困難な作業である。製作された SWDA の利得については、図 2 に示すように、5mm~65mm の範囲で利得曲線に当てはめることが可能であり、遠方界利得 5.1dB と推定された。

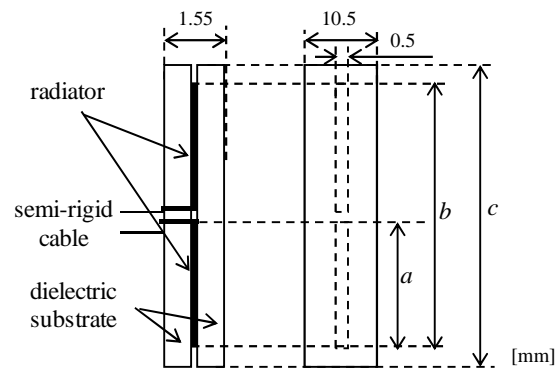


図 1 サンドウィッチダイポールアンテナ

さらに、同軸取り付け部分で不平衡電流を避けるために、バラン付きの SWDA を検討したが、バランを液剤中で構成すると、物理的に

製作が難しいだけでなく、損失で短絡から  $\lambda/4$  の位置で完全な開放が得られないなどの問題が生じることが明らかとなった。このため、2009 年度終了時点においてはバラ付きの SWDA は実現困難と判断した。

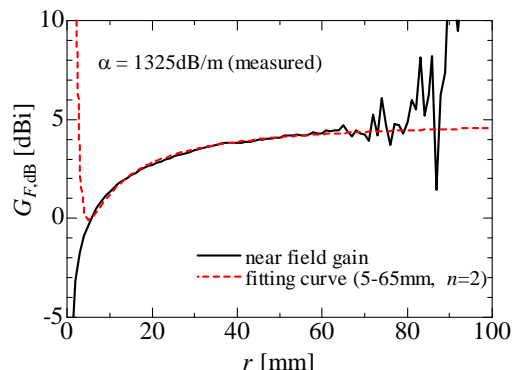


図2 サンドウィッチダイポールアンテナの近傍界利得当てはめ (5.2GHz)

このことは、SWDAに限ったことではなく、拡張されたフリスの伝達公式に基づいて液剤中におけるアンテナの利得校正を行う際は、アンテナ寸法が実現可能な大きさであることが要求されることを意味している。すなわち、周波数が高くなり、液剤中における波長が短くなり、その中で動作するアンテナ長が製作できないほどに短くなるを得ない場合は、拡張されたフリスの伝達公式により SAR プローブ校正すべきではないという結論に達する。一方、周波数を低くすると、アンテナ長は長くなるものの、構成が実現可能な範囲で長くなる分には構わない。その意味で、これまで導波管による 800MHz 以下におけるプローブ校正はその導波管サイズ等が問題となって実現できず、温度比較校正に依っていたが、周波数が低い領域において拡張されたフリスの伝達公式に基づく方法が有効であるということの意味している。実際、144MHz および 450MHz において、被覆ダイポールアンテナによる SAR プローブ校正結果は温度比較法とほぼ同じ結果を与えることが確認されている。

なお、SWDA にバラ付き機能を付加する観点から、アンテナ素子部を折り返しループ化する方法が考えられるが、今後の検討課題としたい。

(2) 液剤の導電率 (複素比誘電率の虚部) あるいは減衰定数が温度に敏感に変化することから、実験室の室温の変化に留意をして測定を行わなければならない。逆に、室温が管理された実験室で同じ実験を行ったところ、液剤の導電率に対して大きな問題は生じなかった。さらに、室温の変化によるアンテナ利得の推定結果の差異についても検討

した。図 2 に示す近傍界利得の距離特性は、液剤の減衰定数を適切に与えないと、一定値に収束することはない。減衰定数が正しく与えられないと、距離に関する一次関数 (傾きを持った直線) に漸近するようになり、正しい遠方界利得推定が困難となることを理論的に明らかにした。

(3) 図 3 に示すように、基準アンテナを液剤中において相対して配置し、その間の距離  $r$  を変化させて伝送係数の大きさ  $|S_{21}(r)|$  を測定すると、近傍界利得の dB 表示  $G_{n,dB}$  は

$$G_{n,dB}(r) = 10 \log_{10} \frac{|S_{21}(r)| e^{\alpha r} \cdot 2\beta r}{\sqrt{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)}}$$

と与えられる。ここで、 $\alpha$  および  $\beta$  は液剤の減衰定数および位相定数であり、 $S_{11}$  および  $S_{22}$  はポート 1 および 2 に接続された基準アンテナの反射係数である。

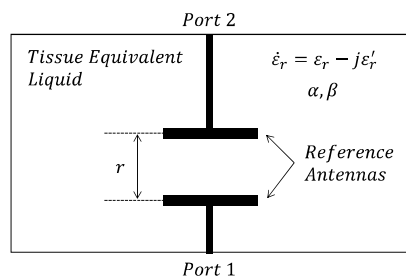


図3 基準アンテナの利得校正測定系模式図

このようにして得られた  $G_{n,dB}(r)$  は、拡張されたフリスの伝達公式によれば

$$G_{n,dB}(r) = G_{f,dB} + \sum_{k=1}^n \frac{C_k}{r^k}$$

とも表現することができる。以上の関係から遠方界利得の dB 表示  $G_{f,dB}$  を求めるためには、次の手順による。

- ①  $r = r_i$  における  $S_{21}(r_i)$  の測定値より近傍界利得  $G_{n,dB}(r_i)$  を計算する。
- ②  $r$  の逆べきで展開された  $G_{n,dB}(r)$  に対して曲線あてはめを行い、 $G_{f,dB}$  を推定する。

これより、正規方程式  $Ax = b$  が得られる。一般に、正規方程式は次数が大きくなると、通常の変立方程式の解法を利用すると、係数が安定して得られないという性質を示すため、特異値分解を用いて正規方程式を解くことにより係数  $G_{f,dB}$  および  $C_k$  を求める。

整合回路付きの防水加工されたダイポールアンテナ (450MHz, 2.45GHz) の近傍界利得の測定結果を図 4 に示す。当てはめ範囲は図中に示したとおりで、逆べきの次数は  $n = 2$  としている。同図から、必ずしも近傍界利得が距離に対してほぼ一定の変化をする範囲で当てはめる必要がないとわかる。すなわち、

アンテナの遠方界領域で測定できなくても、当てはめが有効に作用する範囲において  $S_{21}$  を測定すればよいと結論できる。

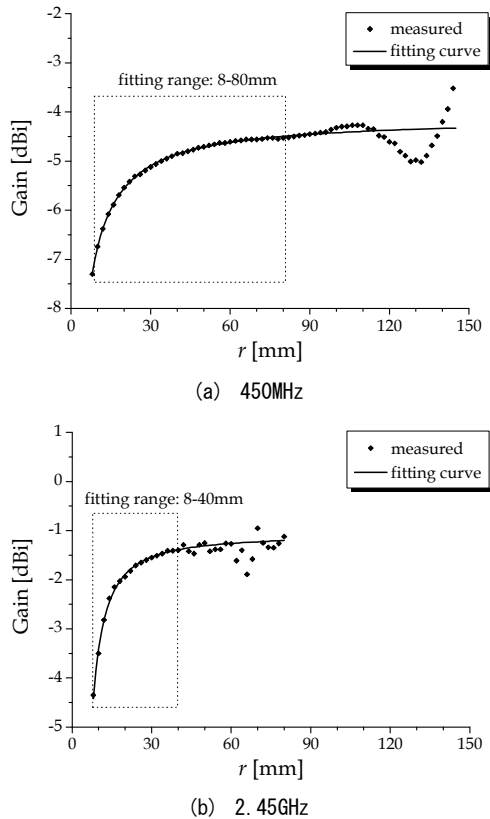


図4 整合回路付きダイポールアンテナの近傍界利得の距離特性と当てはめ曲線

(4) ① 近傍界利得の当てはめ範囲の選び方について、数値シミュレーション等により得られた  $S_{21}$  のデータを当てはめる場合、ある程度統一の取れたガイドラインを導くことはできるが、測定された  $S_{21}$  を利用する場合、測定の際に混入する誤差要因のため、必ずしも統一の取れたガイドラインが導くことは難しく、現実には、測定された  $S_{21}$  の距離特性のグラフをみて判断せざるを得ないのが現状である。実際に SAR プローブ校正を行う観点からは、グラフをみての判断であっても何ら問題はないため、当てはめ範囲に関するガイドラインを定量的に検討しなかった。図4から類推できるように、当てはめ範囲になるべく遠方界成分が優勢となる領域を含めることが望ましい。

② 基準アンテナ間の距離オフセットは、利得の値を上下させる要因となり、利得測定のための観点で考えると、無視してはいけない。しかしながら、このオフセット量を含めて、基準アンテナおよびプローブの校正を行うことにより相殺されるため、なるべくオフセットによる違いが生じないように測定時に

アンテナ間の距離を精度良く計測すればよいことがわかった。

③ 当てはめ曲線の逆べきの次数  $n$  の最適値について検討するため、図5に示す整合回路付きダイポールアンテナ (2.45GHz) に対して、推定される遠方界利得と平均偏差を検討した。 $n = 4$  以上で、遠方界利得と平均偏差はほとんど変化しないのは、数値計算の桁の問題である。このため、次数については  $n \leq 3$  とすべきである。

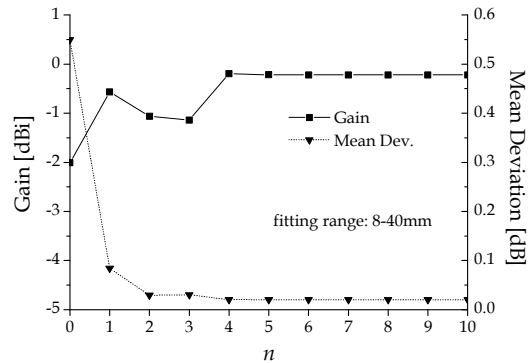


図5 整合回路付きダイポールアンテナ (2.45GHz) における当てはめ次数に対する遠方界利得と平均偏差

(5) ① 5.2GHz 帯におけるファントム高損失液剤中での標準アンテナとして、図6に示す導波管開口アンテナについて、開口面の中心軸近傍における電界を、近軸近似を用いて、解析的に求め、開口面の電界分布が指数関数的に減衰することを明らかにした。

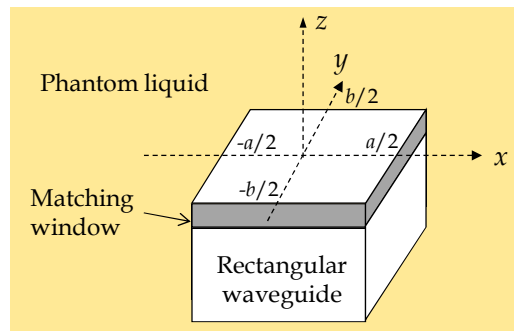


図6 導波管開口アンテナ

解析モデルと同一構造となるような試作モデルによりその動作を確認した。すなわち、マッチングウィンドウである誘電体板の表面が導波管開口面と同一になるようにし、導波管開口分布 ( $TE_{10}$  モード) を理論どおりに与えるようにした。開口から少し離れたと、近似式とは異なり、開口短辺方向の分布は一樣とならないものの、開口中心の領域において近似式とほぼ同じ振る舞うことを実験的

に確認している。このため、開口面における電界分布(導波管  $TE_{10}$  モードライクな分布)、開口中心軸における電界分布(液剤中で指数関数的な減衰)の実測を行った。このことは、校正を行う領域を限定することで、800MHz-3GHz におけるプローブ校正に導波管を用いる従来の手法で利用されている校正アルゴリズムを転用できることを意味している。さらに、不確かさ評価に関しては、プローブ校正を行う領域を限定することで、従来の校正方法の不確かさ評価を踏襲できることを確認した。

② ダイポール系の基準アンテナを用いた SAR 測定用プローブ校正は、従来の導波管校正が実現困難である 450MHz よりも低い周波数において有効であることを確認した。ここ数年、磁界共鳴型の電力伝送システムの検討が行われるようになり、MHz 帯における SAR プローブ校正法の実現が急務となっているが、ダイポール系の校正系が低い周波数で有効であることに着目し、基準アンテナとしてシールドループアンテナが利用可能であることを 30MHz において確認した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① N. Ishii, Y. Miyota, K. Sato, L. Hamada, S. Watanabe, SAR-Probe calibration system using reference dipole antenna in tissue-equivalent liquid, IEICE Trans. Commun., Vol. E95-B, No.1, 2012, pp. 60-68. (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

- ① N. Ishii 他, Effect of higher modes on waveguide aperture covered by a dielectric slab in the liquid, Proc. ISAP 2011, FrF1-2, 2011 年 10 月 28 日, Jeju, South Korea.
- ② 鈴木 優太他, 液剤中における誘電体板付き導波管開口による電界の定式化, 平成 23 年度電子情報通信学会信越支部大会講演論文集, 4C-1, p. 68, 2011 年 10 月 8 日, 柏崎.
- ③ 豊島 秀紀他, 30MHz で動作する液剤中シールドループアンテナの絶対利得測定, 平成 23 年度電子情報通信学会信越支部大会講演論文集, 4C-2, p. 69, 2011 年 10 月 8 日, 柏崎.
- ④ N. Ishii 他, Field distribution by open waveguide in the tissue-equivalent liquid, Proc. 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, KAE-4, 2011 年 9 月 25 日, Toyama, Japan.

- ⑤ 石井 望他, 一様な損失媒質内に設置された導波管開口による電界分布, 信学技報, AP2010-67, pp.1-6, 2010 年 9 月 9 日, 東京.
- ⑥ L. Hamada 他, A SAR-probe calibration system using a reference waveguide antenna in tissue-equivalent liquid, Abst. 32nd BEMS Annual Meeting, P-A-33, pp.242-243, 2010 年 6 月 15 日, Seoul, Korea.
- ⑦ L. Hamada 他, Low-frequency expansion of the SAR-probe calibration system using a reference dipole antenna in head-simulating liquid, Abst. 32nd BEMS Annual Meeting, P-A-37, pp.248-249, 2010 年 6 月 15 日, Seoul, Korea.
- ⑧ 浜田 リラ他, 導波管型標準アンテナを用いた人体等価液剤中での比吸収率測定プローブ校正システム, 2009 年電子情報通信学会総合大会(通信), B-4-35, p. 385, 2010 年 3 月 17 日, 仙台.
- ⑨ T. Watanabe 他, Far-field gain estimation of sandwiched dipole antenna in tissue equivalent liquid at 5.2GHz, Proc. EMC'09/Kyoto, 22S1-4, pp.313-316, 2009 年 7 月 22 日, Kyoto, Japan.
- ⑩ N. Ishii 他, Approximate expression of near field gain in tissue equivalent liquid for SAR evaluation, Proc. 4rd Int. Conf. on Electromagnetic Near-Field Characterization and Imaging (ICONIC2009), pp. 37-42, 2009 年 6 月 24 日, Taipei, Taiwan.

## 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

### (2) 研究分担者

宮川 道夫 (MIYAKAWA MICHIO)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号：50239357