

## 85 kHz 帯における人体等価液剤ファントム内電界測定用光変調プローブの実験的検討

南雲 裕一, 今野 佳祐, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科)  
ジェドヴィスノブ チャカロタイ, 和氣 加奈子, 渡辺 聡一 (情報通信研究機構)

**概要:** 85 kHz の人体等価液剤ファントム内電界を測定するための光変調プローブシステムを設計し製作した。作製システムは光変調器とインピーダンス整合回路で構成されている。インピーダンス整合回路はシステムの感度を向上させ、光変調器は導体ケーブルの干渉を低減する。インピーダンス整合回路を装着することで光変調プローブの感度が向上することを実験的に示す。

**キーワード:** 光変調器, 人体等価液剤ファントム, kHz 帯

### 1. まえがき

近年、無線電力伝送 (Wireless Power Transfer; WPT) システムを用いた電気自動車 (Electric Vehicle; EV) の無線充電システムが注目を浴びている。この EV 用無線充電システムの普及に向け、各国で研究活動や標準化運動が進み、国内では利用周波数帯を 85 kHz 帯、最大送電電力を 7.7 kW とするよう制度化されている [1]。その一方、EV 用無線充電システムは kW オーダーの大きな電力を扱うため、電磁界の人体へのばく露をあらかじめ評価する必要がある。85 kHz 帯の電磁界ばく露においては、ICNIRP および総務省は体内の電界強度を人体における安全性の評価基準と定めている [2][3]。現在、85 kHz 帯の体内電界に関して、シミュレーションによる数値的評価は行われているが [4]、現実の人体等価液剤ファントム等を用いた実験的評価は行われていない。したがって、実験的評価を行うために、高誘電率、高損失という電気的特性を持つ人体等価液剤ファントム内で電磁界の測定を行うためのプローブが必要である。

一般的に電磁界強度の計測で用いられる同軸ケーブルは導体であるため、周囲電磁界への擾乱が起り、測定の精度が低下し得る。同軸ケーブルによる電磁波の擾乱を抑えるために、光変調器を用いた光変調プローブが用いられている [5]。同軸ケーブルの代わりに光ファイバで測定信号を測定器に伝送するため、周囲電磁界への擾乱を抑えることができる。ただし、光変調プローブを用いた測定法は、光変調器とプローブとの間のインピーダンス不整合から、感度が低いという問題がある。この問題に対する研究が様々行われているが、いずれも空気中において、MHz/GHz 帯で行われている [6][7]。

本報告では、85 kHz の人体等価液剤ファントム内電界を測定するための光変調プローブシステムを設計し製作する。プローブシステムは、光変調器、トロイダルコイルを用いたインピーダンス整合回路、微小ダイポールアンテナで構成される。0.4 % NaCl 溶液中に配置した作製プローブの受信電力を測定し、プローブの感度が向上することを示す。

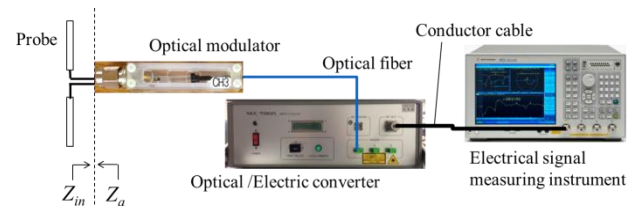


図1: 光変調プローブ測定システム

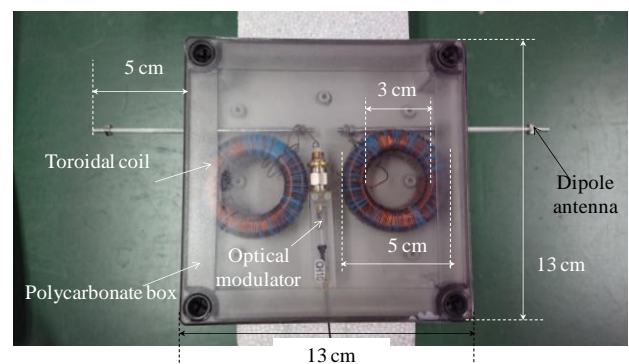


図2: 作製した光変調プローブ

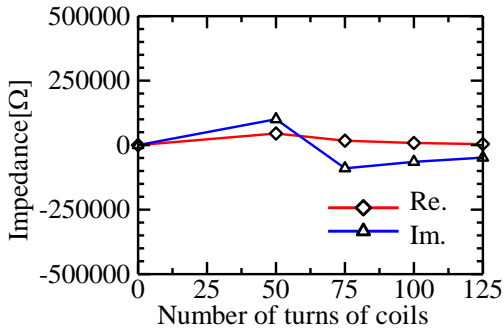
### 2. 85 kHz帯における人体等価液剤ファントム内電界測定用光変調プローブの設計, 作製。

ここでは、より高感度なプローブシステムをインピーダンス共役整合手法によって設計する。図1に光変調プローブの測定システムを示す。電気信号測定器において、受信電力が最大になる条件 [7] を式1に示す。

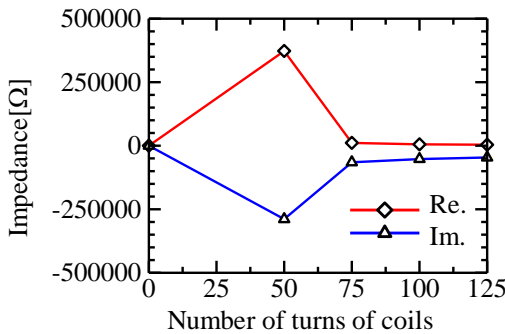
$$Z_a = Z_{in}^* \quad (1)$$

ここで、 $Z_a$  はアンテナの入力インピーダンス、 $Z_{in}$  はアンテナ端から光変調器をみたときの入力インピーダンスである。

85 kHz において、光変調器の入力インピーダンス  $Z_{in}$ 、および人体等価液剤 (NaCl 溶液: 0.074 mol/L  $\approx$  0.4 %) 内での 23cm 長微小ダイポールアンテナの入力インピーダンス  $Z_a$  の測定値はそれぞれ  $Z_{in} = 2.1 \times 10^5 - j2.3 \times 10^5 \Omega$ 、 $Z_a = 40 - j3 \Omega$  である。したがって、上記の 23cm 長微小ダイポールアンテナを光変調プローブのアンテナとして用いる場合、式(1)の条件に近づけるためにはアンテナの入力インピーダンスを誘導性にする必要がある。85 kHz において式(1)を満たすためには  $j2.3 \times 10^5 \Omega$  の整合回路という大きなインダクタンス (0.4 H) を持つコイルが必要となる。



(a) フェライトコア:  $\mu_r = 6000$



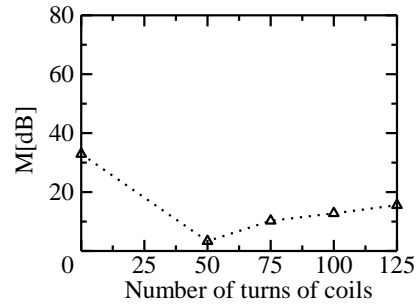
(b) フェライトコア:  $\mu_r = 8500$

図3: 作製プローブ入力インピーダンス測定値

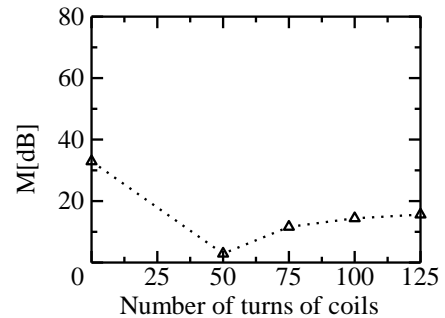
作製したプローブを図2に示す。プローブは光変調器、トロイダルコイル、微小ダイポールアンテナで構成される。トロイダルコイルはインピーダンス整合回路として働き、コイルの巻き数やフェライトコアの透磁率を変化させるとコイルのインダクタンスが変化する。また、光変調器、コイルが液体に触れないようにボックスで被覆した。

### 3. 85 kHz帯における人体等価液剤ファントム内電界測定用光変調プローブの実験的評価

作製したプローブの受信感度の実験的評価を行った。初めに、作製プローブのアンテナ-光変調器間の不整合損  $M$  を得るために作製プローブのコイルを装荷したアンテナの入力インピーダンス  $Z_a$  を測定した。アンテナは人体等価液剤内に配置し、測定器具は keysight LCRmeter E4980AL を使用した。 $Z_a$  の測定値、および  $Z_a$  の測定値から計算した不整合損  $M$  を図3、図4にそれぞれ示す。ただし、不整合損  $M$  は以下の式で求めた。コイルの巻き数、透磁率を変化させることでアンテナの入力インピーダンスおよび不整合損が変化し、アンテナ-光変調器間の整合状態が改善していることが分かる。



(a) フェライトコア:  $\mu_r = 6000$



(b) フェライトコア:  $\mu_r = 8500$

図4: 作製プローブ不整合損計算値

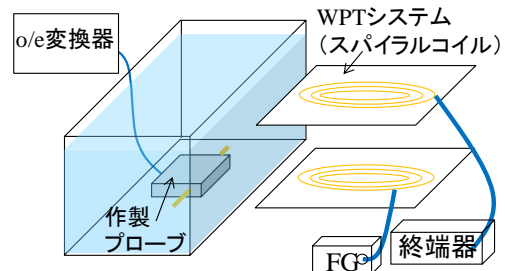


図5: 作製プローブ受信電力測定環境

表1: 測定パラメータ

Table1. Measurement parameters	
Incident power	22 dBm
Frequency	85 kHz
Number of turns of coils	$n = 50, 75, 100, 125$
Relative permeability of ferrite cores	$\mu_r = 6000, 8500$

$$M = \frac{1}{1 - |\Gamma|^2} \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_a^*}{Z_{in} + Z_a} \quad (3)$$

次に作製プローブの受信電力を測定した。測定環境、測定パラメータをそれぞれ図5、表1に示す。作製プローブは人体等価液剤で満たした水槽内に配置した。水槽に隣接してWPTシステムを模擬したスパイラルコイルを配置した。作製プローブの受信電力および上記で求めた不整合損Mの反数を図6に示す。コイルの巻き数、透磁率を変化させることでプローブの受信電力が変化し、受信感度が向上していることが分かる。

ただし、図6から不整合損Mの反数と受信電力の変化の傾向は一致していないことが分かる。したがって、本発表における作製プローブにおいて、受信電力の変化の要因はインピーダンス整合状態の変化によるものだけではないことが考えられる。他の要因のひとつとしては、整合回路のコイルがアンテナとして機能してしまい、コイルの巻き数や透磁率の変化に伴いコイルの受信感度が変化してしまうことが考えられる。

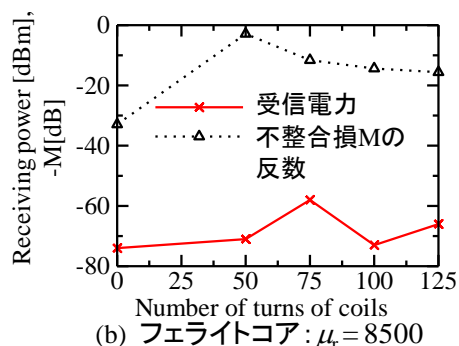
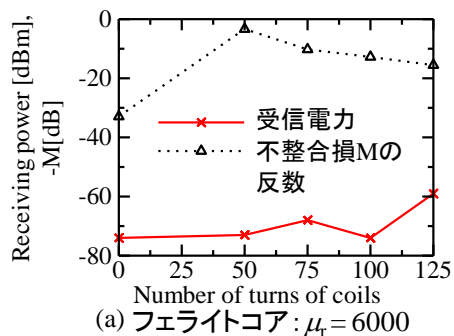


図6：作製プローブ受信電力測定環境

#### 4. むすび

本報告では、85 kHzの人体等価液剤ファントム内電界を測定するための光変調プローブシステムを設計し製作した。プローブシステムは、光変調器、トロイダルコイルを用いたインピーダンス整合回路、微小ダイポールアンテナで構成される。0.4% NaCl溶液中に配置した作製プローブの受信電力を測定し、プローブの感度が向上することを示す。コイルを整合回路として用いた時のプローブの受信電力の変化の要因を今後さらに検討していく。

#### 参考文献

- [1]電波法施行規則の一部を改正する省令（平成28年総務省令第15号）
- [2] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)", *Health Physics*, vol.99(6), pp. 818-836, 2010.
- [3]電気通信技術審議会答申 諮問第38号「電波利用における人体の防護指針」, June, 1990
- [4]S. Park, "Evaluation of electromagnetic exposure during 85 kHz wireless power transfer for electric vehicles", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 1, Jan. 2018.
- [5]E. B. Larsen, J. R. Andrews, and E. E. Baldwin, *Sensitive isotropic antenna with ber-optic link to a conventional receiver*, Nat. Bur.Stand., Washington, DC, 1976.
- [6] K. Tajima, N. Kuwabara, F. Amemiya, and R. Kobayashi, "Sensitivity improvement of electric field sensor with LiNbO<sub>3</sub> electro-optic crystals by loading inductance," *IEICE Trans. Commun.*(Japanese Edition), vol.J76-B-II, no.6, pp. 538-545, June, 1993.
- [7] H. Abe, Q. Chen, "Antenna design for E/O sensors of high sensitivity," *IEICE Trans. Commun.*(Japanese Edition), vol.J97-B, no.3, pp. 1-7, March, 2014.