

# MHz 帯 ワイヤレス電力伝送システム近傍の 簡易人体モデルに対するばく露評価

岩本 卓也<sup>†,‡</sup> チャカロタイ ジェドヴィスノプ<sup>‡</sup> 和氣 加奈子<sup>‡</sup>

藤井 勝巳<sup>‡</sup> 有馬 卓司<sup>†</sup> 渡辺 聡一<sup>‡</sup> 宇野 亨<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京農工大学大学院 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

<sup>‡</sup> 独立行政法人 情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail: 50013645202@st.tuat.ac.jp

**あらまし** これまで、ワイヤレス電力伝送システムにおけるばく露評価は、主に数値解析によって行われており、実験に基づく評価例は極めて少なく、明確なばく露評価方法は未だ確立されていない。そこで、本研究では、MHz帯ワイヤレス電力伝送システムを実際に構築し、システム近傍の電磁界分布を測定した。電磁界分布の測定結果とモーメント法での解析結果が良好に一致することを確認した上で、WPTシステム近傍に置かれた簡易人体モデル内の誘導量を数値解析により算出した。これらの結果より、ワイヤレス電力伝送システム近傍の簡易人体モデルに対して、様々なモデル配置によるばく露評価を行った。その結果、本研究で想定したいずれのモデル配置においても、最大局所 10 g 平均 SAR よりも全身平均 SAR から算出したシステムへの最大許容入力電力の方が小さくなることが分かった。

**キーワード** ワイヤレス電力伝送システム, ばく露評価, 電磁界測定, SAR

## Exposure Assessment for Simplified Human Model in the vicinity of Wireless Power Transfer System at MHz-band

Takuya IWAMOTO<sup>†,‡</sup> Jerdvisanop CHAKAROTHAI<sup>‡</sup> Kanako WAKE<sup>‡</sup>

Katsumi FUJII<sup>‡</sup> Takuji ARIMA<sup>†</sup> Soichi WATANABE<sup>‡</sup> Toru UNO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

2-24-16, Nakacho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

<sup>‡</sup> National Institute of Information and Communications Technology

4-2-1, Nukuikitamachi, Koganei-shi, Tokyo, 184-8795 Japan

E-mail: 50013645202@st.tuat.ac.jp

**Abstract** There have been so far many examples of exposure assessments of wireless power transfer (WPT) systems by using numerical methods. However, there is a lack of exposure assessment by a real experiment, and also an appropriate assessment method for the WPT system has not been established yet. In this study, we constructed a WPT system at MHz-band and measured the electric and magnetic fields nearby the system. We confirmed that the measured electric and magnetic fields agree well with those obtained by numerical simulations using the method of moments. Then, we calculated the induced physical quantities inside the simplified human model which is placed close to the WPT system. Finally, we performed exposure assessment for various situations of the simplified human model in the vicinity of the WPT system. As a result, we confirmed that the maximum allowable input power of the WPT system calculated by whole-body SAR is smaller than those calculated by maximum 10g-averaged SAR in all exposure situations in this study.

**Keyword** Wireless power transfer system, exposure assessment, electromagnetic near-field measurement, SAR

### 1. はじめに

近年、MIT (Massachusetts Institute of Technology) の研究グループによって提案されたワイヤレス電力伝送

(Wireless Power Transfer, 以下 WPT) システム[1]の実用化に向けた研究開発が盛んに行われている。WPT システムは、無線で電力を給電することが可能であり、

家電製品や電気自動車などの様々な電気・電子機器への応用が期待されている[2]. しかし、システムを構成する送信・受信コイル近傍に比較的強い電磁界が発生するため、電波を安全に取り扱う観点から、実用化にあたりシステム近傍における人体のばく露評価を定量的に行うことが重要である.

電磁界が人体に与える健康影響には、低周波領域で支配的な刺激作用と、高周波領域で支配的な熱作用がある. これらの健康影響に対するガイドラインとして、国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) ガイドラインがある[3,4]. ICNIRP ガイドラインには、入射電磁界強度などで表される参考レベルと、人体内部に誘導される、電界強度、比吸収率 (Specific Absorption Rate, 以下 SAR) などで表される基本制限があり、周波数によって用いる物理量や値が異なる. 特に 10 MHz 帯 WPT システムでは、刺激・熱作用の両方を考慮する必要がある. 10 MHz における ICNIRP ガイドライン公衆ばく露の制限値を表 1 に示す.

これまで、WPT システムから生じる電磁界の人体へのばく露について、様々な数値解析手法を用いた評価が行われている[5-7]. しかし、実験による評価例は極めて少なく、ガイドラインとの適合性を考慮した評価方法は未だ確立されていない.

そこで、本研究では、MIT にて提案されたモデルを参考に、MHz 帯 WPT システムを構築し、システム近傍の空間電磁界分布を測定した. また、簡易的な人体モデルを用いて、様々なばく露状況を想定した数値解析を行い、モデル内の誘導量を算出した. これらの結果より、WPT システム近傍の簡易人体モデルに対するばく露評価を行った.

表 1 ICNIRP ガイドライン値  
(公衆ばく露,  $f=10$  MHz)

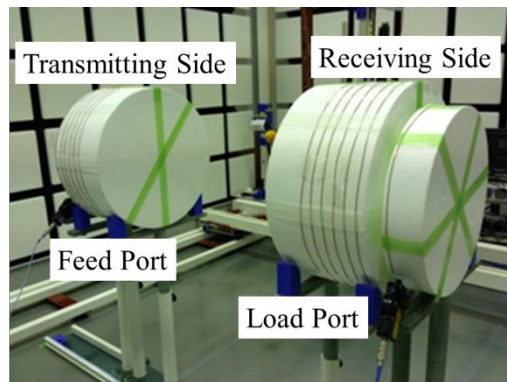
		刺激作用 (瞬間)	熱作用 (6 分間平均)
参考 レベル	E	83	29
	H	21	0.0795
基本制限	$E_{in}$	1350	-
	$SAR_{10g}$	-	2
	$SAR_{wb}$	-	0.08

E [V/m], H [A/m]: 人体外部の電界, 磁界.

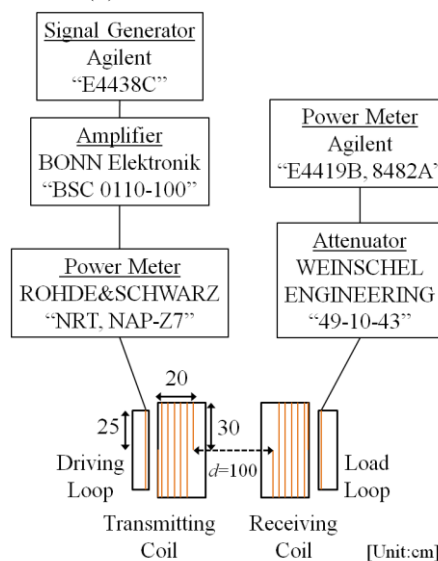
$E_{in}$  [V/m]: 人体内部の誘導電界.

$SAR_{10g}$  [W/kg]: 最大局所 10g 平均 SAR.

$SAR_{wb}$  [W/kg]: 全身平均 SAR.

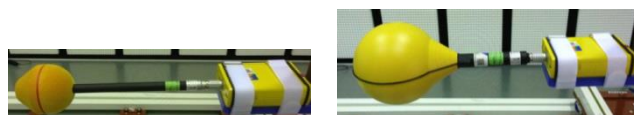


(a) 実際の WPT システム



(b) 構成図

図 1 構築した WPT システム



(a) 電界プローブ

(b) 磁界プローブ

図 2 NARDA 社製電磁界プローブ

表 2 電磁界プローブの仕様

	電界プローブ (Type18)	磁界プローブ (Type12)
測定レンジ	0.2~320 V/m	0.017~17 A/m
周波数レンジ	100 kHz~ 3 GHz	300 kHz~ 30 MHz
周波数応答	±1.0 dB	+0.2 dB/-0.5 dB
等方性偏差	±1.0 dB	

## 2. 測定・数値解析方法

### 2.1 WPT システムと電磁界測定方法

本研究で構築した WPT システムを図 1 に示す. 本システムは、1 ターンの駆動・負荷ループ (半径 25 cm), 6.1 回巻の送信・受信コイル (半径 30 cm) から構成さ

れている。ループ、コイルに用いた銅線の直径は 1.6 mm である。WPT システムの電力伝送効率の周波数特性は、送受信コイル間距離が近い場合にはピークが 2 つ現れる双峰特性となり、遠い場合にはピークが 1 つ現れる単峰特性となる。本システムでは、コイル間距離  $d=70$  cm を境に、双峰特性から単峰特性となる。 $d=20$  cm の場合、低周波モードの共振周波数と電力伝送効率は、それぞれ 8.64 MHz, 85% であり、高周波モードでは、それぞれ 9.87 MHz, 79% である。 $d=100$  cm の場合、共振周波数と電力伝送効率は、それぞれ 9.18 MHz, 65% である。

近傍電磁界の測定には、図 2 に示すような NARDA 社製の電界及び磁界プローブを用いた。表 2 に両プローブの仕様を示す。電磁界の測定範囲は、成人男性を測定した空間 ( $70 \times 40 \times 180$  cm<sup>3</sup>) であり、測定間隔は 10 cm とした。全ての測定において、WPT システムの入力電力は 1 W とした。

## 2.2 数値解析手法と簡易人体モデル

本研究では、モーメント法に基づく商用電磁界シミュレータ FEKO を用いて数値解析を行った。簡易人体モデル[8]は均一な誘電体とし、電気定数は筋肉の 2/3 とした。数値解析モデルを図 3 に示す。同図のように、WPT システムの中心軸と簡易人体モデルの中心軸が平行となる配置を CASE 1 とする。また、WPT のシステムと簡易人体モデルの中心軸までの距離を  $L$  とする。

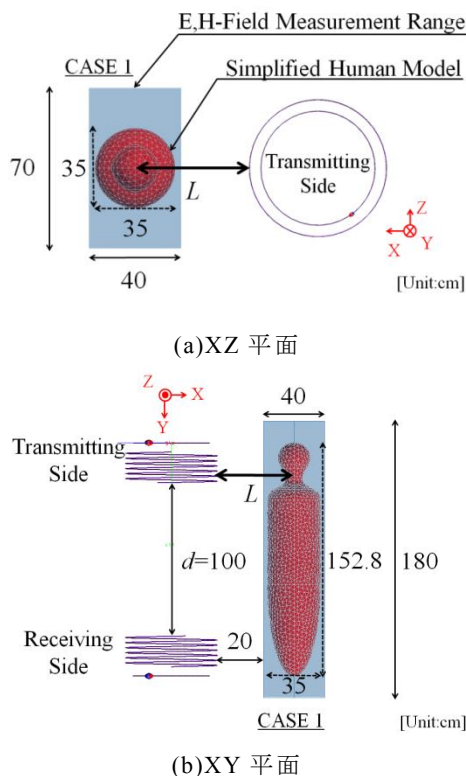


図 3 WPT システムと簡易人体モデル[8]  
(図中の直方体は電磁界の測定範囲を示している.)

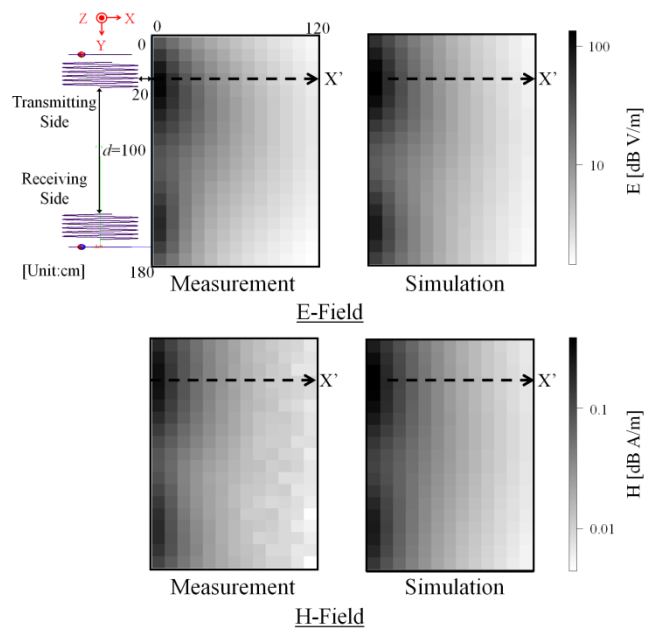
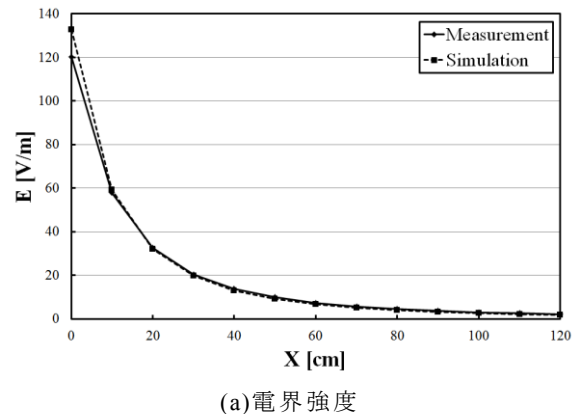
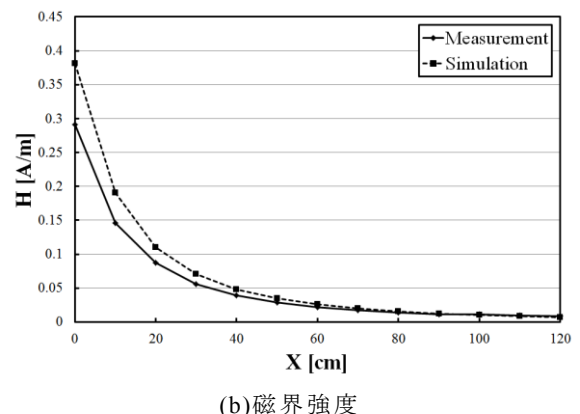


図 4  $d=100$  cm における平面電磁界分布  
(入力電力 1 W)



(a)電界強度



(b)磁界強度

図 5  $X'$  線上の電磁界強度 (図 4 を参照.)

## 3. 測定及び解析結果

### 3.1 近傍電磁界分布

WPT システムから 20 cm 離れた位置を  $X=0$  cm とし、 $X=0 \sim 120$  cm の範囲の空間電磁界分布を測定した。測

定結果の一例として、コイル間距離  $d=100$  cm での WPT システム近傍の平面電磁界分布（実効値）を図 4 に示す。図 4 より、測定によって得られた電磁界分布は解析した結果と同じ傾向を示していることが分かる。

また、図 4 に示す X' の破線上における電磁界強度を図 5 に示す。図 5 より、電磁界強度の測定結果と解析結果は概ね良好に一致していることがわかる。測定結果と解析結果との差異は、最大で電界強度が 9.36 %、磁界強度が 23.6 %であった。コイル間距離  $d=20$  cm の低周波モード及び高周波モードでも、同程度の一致を確認した。

### 3.2 簡易人体モデル内の誘導量解析

電磁界の測定範囲と同様に、簡易人体モデルの位置を  $L=40\sim 120$  cm まで変化させ、簡易人体モデル内の最大誘導電界、最大局所 10g 平均 SAR、全身平均 SAR を数値解析によって求めた。このとき、最大誘導電界は、簡易人体モデル内の観測点を 1 cm 間隔で解析した結果を用いている。解析結果の一例として、 $L=40$  cm の場合のモデル内の誘導量を表 3 に示す。最大局所 10 g 平均 SAR を除き、コイル間距離  $d$  が大きくなると、モデル内の誘導量が大きくなる事が分かる。

表 3 簡易人体モデル内の誘導量  
(入力電力 1 W,  $L=40$  cm)

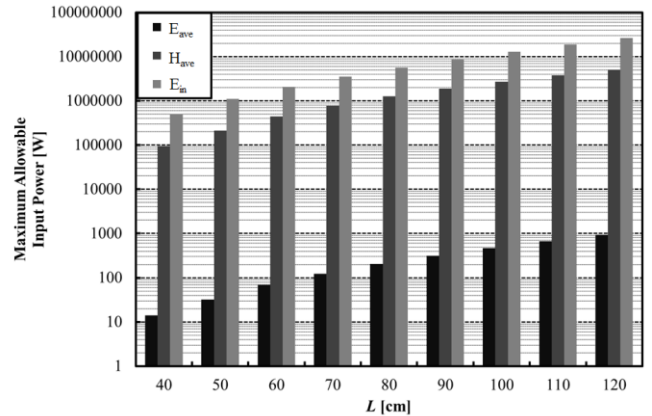
	$d=20$ cm		$d=100$ cm ( $f=9.18$ MHz)
	低周波 モード ( $f=8.64$ MHz)	高周波 モード ( $f=9.87$ MHz)	
$E_{in}$ [V/m]	1.10	1.40	1.73
$SAR_{10g}$ [W/kg]	$3.15 \times 10^{-4}$	$6.73 \times 10^{-4}$	$5.44 \times 10^{-4}$
$SAR_{wb}$ [W/kg]	$6.28 \times 10^{-5}$	$7.99 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-4}$

### 3.3 最大許容入力電力の距離特性

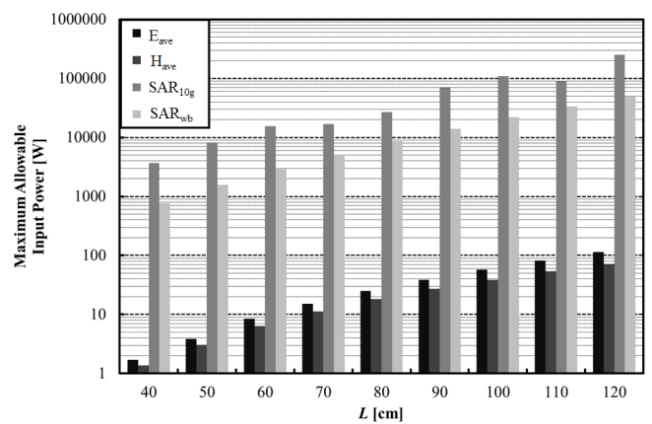
次に、コイル間距離  $d=100$  cm の場合について、測定した電磁界の空間平均値と、数値解析によって得られた簡易人体モデル内の誘導量を元に、ICNIR ガイドラインの参考レベル及び基本制限を満たすような WPT システムの最大許容入力電力を算出した。その結果を図 6 に示す。同図より、以下のことが確認できる。

#### 1) 刺激作用と熱作用の制限値について

参考レベルと比較して算出した最大許容入力電力は、刺激作用よりも熱作用の方が厳しい制限となっている。それぞれ、最も厳しい値となる刺激作用での電界の空間平均値  $E_{ave}$  と、熱作用での磁界の空間平均値  $H_{ave}$  から算出した最大許容入力電力を比較すると、そ



(a) 刺激作用



(b) 熱作用

図 6  $d=100$  cm における最大許容入力電力

の比は約 13 倍である。また、刺激作用に対する結果では、磁界に比べて電界から求めた最大許容入力電力が厳しく、その比は約 5400~6800 倍である。

また、基本制限と比較して算出した最大許容入力電力も同様に、刺激作用よりも熱作用の方が厳しい制限となっている。それぞれ、最も厳しい値となる刺激作用での誘導電界  $E_{in}$  と全身平均 SAR を比較すると、その比は約 540~700 倍である。

ここで、ICNIR ガイドラインでは 6 分間の平均値を用いて熱作用に対する制限値を定めていることに注意が必要である。

#### 2) 参考レベルと基本制限の制限値について

両作用ともに参考レベルと比較して算出した最大許容入力電力と、基本制限と比較して算出した最大許容入力電力との間に大きな差がある。刺激作用において、それぞれ最も厳しい値となる電界の空間平均値  $E_{ave}$  と誘導電界  $E_{in}$  から算出した最大許容入力電力の比は約 28000~36000 倍であり、熱作用において、それぞれ最も厳しい値となる磁界の空間平均値  $H_{ave}$  と全身平均 SAR から算出した最大許容入力電力の比は約 460

～680倍である．図4に示すように，WPTシステム近傍では電磁界分布が局所的である．このような局所的なばく露において参考レベルでの評価を行う場合，人体が占める空間の電磁界の空間平均値を用いる評価方法がある．しかし，そのような評価方法を用いても過大評価となることが分かった．

3) 最大局所 10g 平均 SAR と全身平均 SAR について  
 最大局所 10g 平均 SAR よりも，全身平均 SAR から算出した最大許容入力電力の方が厳しい．局所的な電磁界分布となる WPTシステム近傍であっても，CASE 1 のように簡易人体モデルを配置したばく露状況では，送受信コイルから生じる電磁界の影響を受ける．そのため，最大局所 10g 平均 SAR よりも，全身平均 SAR の方が厳しい結果となる．その比は 2.7～5.3 倍である．

また，コイル間距離  $d=20$  cm の低周波モード，高周波モードでも，1)～3)と同様の傾向を確認した．

#### 4. 考察

CASE 1 のような簡易人体モデルの配置では，最大局所 10g 平均 SAR よりも，全身平均 SAR から算出した最大許容入力電力の方が厳しい結果となることが分かった．そこで，CASE 1 以外の配置について調べるために，図7のように CASE A～D までの様々なばく露状況を想定した簡易人体モデルの配置で，それぞれ簡易人体モデル内の最大局所 10g 平均 SAR，全身平均 SAR を解析した．簡易人体モデルの配置は，CASE A では送信コイルの給電部の反対側，CASE B では送信コイルの給電部側，CASE C では駆動ループの後方，CASE D では送信・受信コイル間の中心である．ここで，CASE D は，コイル間に十分な空間のあるコイル間距離  $d=100$  cm でのみ解析した．各ケースの SAR 分布を図8に示し，最大局所 10g 平均 SAR と全身平均 SAR より求めた最大許容入力電力の結果を図9に示す．

図8より，いずれの配置でも SAR は比較的広い範囲で，強く分布していることが分かる．また，図9より，いずれの配置でも最大局所 10g 平均 SAR よりも全身平均 SAR から算出した最大許容入力電力の方が厳しく，CASE 1 と同様の結果であることが分かる．最大局所 10g 平均 SAR と全身平均 SAR から算出した最大許容入力電力の比を表4に示す．

さらに，全身平均 SAR において，最も制限が厳しくなる CASE D と最も緩くなる CASE 1 との間では，約 10.8 倍の差があり，簡易人体モデルの配置によっては最大許容入力電力に大きなばらつきがあることが分かった．また，コイル間距離  $d=20$  cm における低周波モード，高周波モードでも，同様に全身平均 SAR から算出した最大許容入力電力の方が厳しい傾向が得られ，本研究で想定したばく露状況の中で最も制限が厳しくなるのは，どちらも CASE C であった．

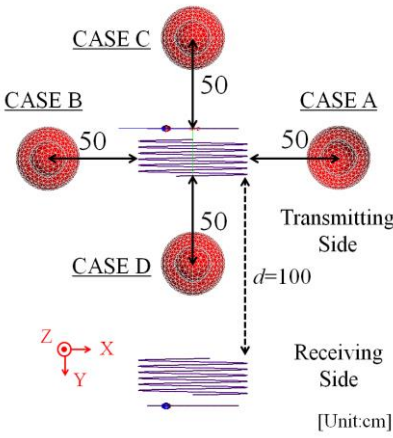


図7 簡易人体モデルの配置

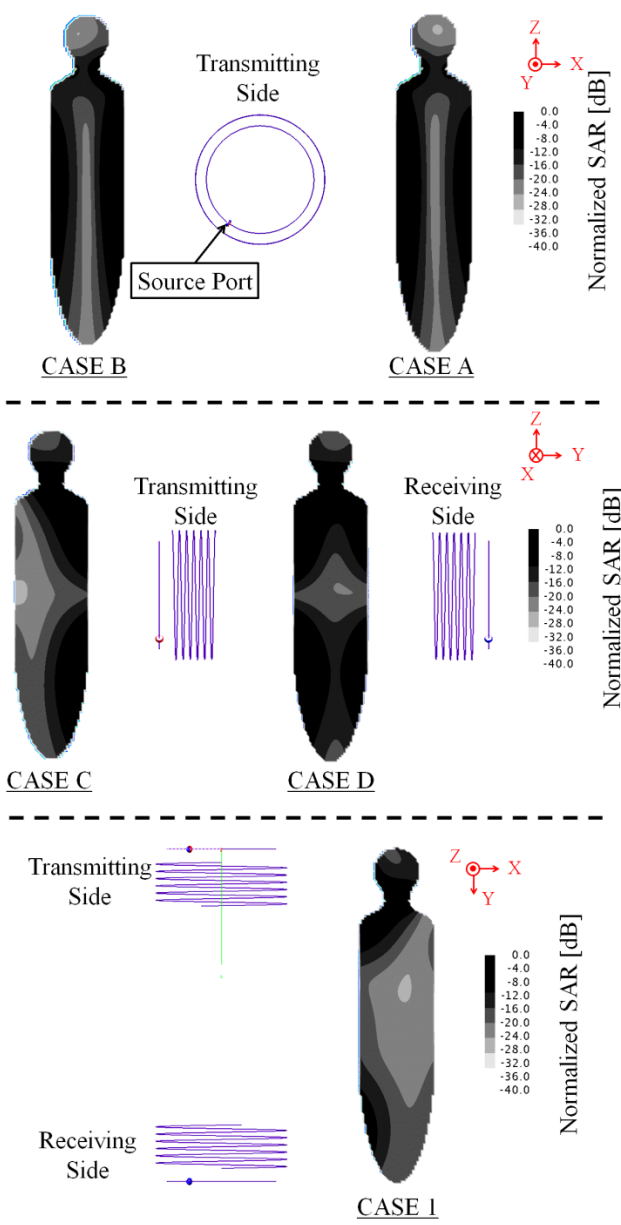


図8 各ケースの SAR 分布

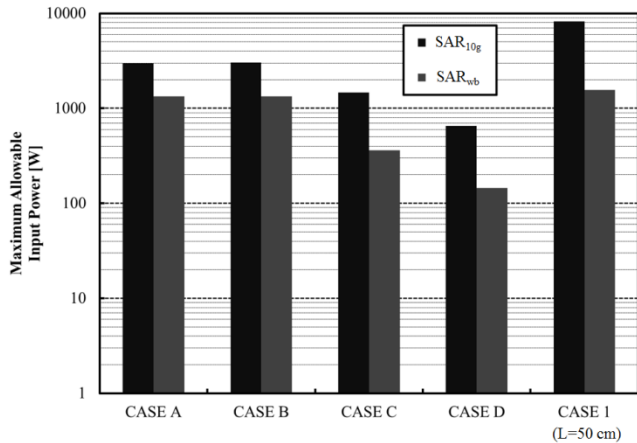


図 9 d=100 cm における各 CASE の最大許容入力電力

表 4 最大局所 10g 平均 SAR と全身平均 SAR から算出した最大許容入力電力の比

CASE	d=20 cm		d=100 cm
	低周波モード	高周波モード	
1 (L=50cm)	7.3	3.2	5.3
A	3.0	2.5	2.2
B	3.1	2.5	2.3
C	4.1	3.6	4.1
D	-	-	4.5

## 5. まとめ

本研究では、MITにて提案された MHz 帯 WPT システムを構築し、システム近傍の電磁界分布を測定した。電磁界分布の測定結果と数値解析結果が良好に一致することを確認した上で、WPT システム近傍に置かれた簡易人体モデル内の誘導量を数値解析により算出した。これらの結果より、WPT システム近傍の簡易人体モデルに対するばく露評価を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 基本制限と比較して求めた最大許容入力電力は、刺激作用よりも熱作用の方が厳しい。
- 2) 参考レベルと基本制限でそれぞれ求めた最大許容入力電力を比較した結果、電磁界の空間平均値を用いた場合、過大評価となる。
- 3) 様々な配置にて簡易人体モデル内の最大局所 10g 平均 SAR と全身平均 SAR から最大許容入力電力を求めた結果、全身平均 SAR の方が厳しくなる。

## 謝辞

本研究の一部は総務省電波利用料委託研究により実施された。

## 文 献

- [1] A. Kurs, et al., "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, vol.317, no. 5834, pp. 83-86, 2007.
- [2] Shinohara, "Power Without Wires," *IEEE Microw. Mag.*, vol.6, S64-73, 2011.
- [3] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Phys.*, vol. 74, pp. 494-522, 1998.
- [4] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (1 Hz to 100 kHz)," *Health Phys.*, vol. 99, pp. 818-836, 2010.
- [5] I. Laakso, et al., "Evaluation of SAR in a human body model due to wireless Power Transmission in the 10 MHz band," *Phys. Med. Biol.*, vol.57, pp.4991-5002,2011.
- [6] A. Christ, et al., "Evaluation of wireless power transfer systems with human electromagnetic exposure limits," *IEEE trans.*, vol. 55, no. 2, pp. 265-274, 2013.
- [7] S. W. Park, et al., "Incident Electric Field Effect and Numerical Dosimetry for a Wireless Power Transfer System Using Magnetically Coupled Resonances," *IEEE trans.*, vol.61, no. 9, 2013.
- [8] International Electrotechnical Commission, "INTERNATIONAL STANDARD NORME INTERNATIONAL -Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure-," *IEC62233*, 2005.