

電波を用いた不正薬物探知装置の人体への影響に関する研究

長谷部 貴之*, 鈴木 洋介*, 山崎 良*, 篠原 淳一郎***, 柴田 正志*, 分木 淳史*,
チャカロタイ ジェドヴィスノブ***, 和氣 加奈子***, 渡辺 聡一***, 根本 親見*

Studies on the effect of illicit drug detection equipment using radio waves on human health

Takayuki HASEBE*, Yosuke SUZUKI*, Ryo YAMAZAKI*, Junichiro SHINOHARA*, **, Masashi SHIBATA*,
Kiyofumi BUNKI*, Chakarothai JERDVISANOP***, Kanako WAKE***, Soichi WATANABE*** and Chikami NEMOTO*

*Central Customs Laboratory, Ministry of Finance 6-3-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-0882 Japan

**Present address: Moji Customs Hakata Branch Customs 2-4-1, Kashihamafuto, Fukuoka Higashi-ku, Fukuoka 813-0018 Japan

***National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1, Nukuitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795 Japan.

Illicit drug detection equipment using radio waves is currently under development in the Central Customs Laboratory, Ministry of Finance. In this work, to evaluate the impact of radio waves irradiated from the equipment to the human body, we calculated the maximum input power to the antenna to comply with Radio Radiation Protection Guidelines in Japan, by computing the local specific absorption rate (SAR) over 10 g of arbitrary tissue and the internal electric field strength under an electromagnetic simulation. The results showed the safety of the inspection equipment for the human body according to the Radio Radiation Protection Guidelines, when operated with the antenna power of less than 423 W in the general environment and the antenna power of less than 1,691 W in the controlled environment.

1. 緒 言

財務省関税中央分析所では、電波を用いた不正薬物探知装置（以下「本装置」という。）を開発中である。本装置は、電波法における高周波利用設備の設置許可が必要であるものの、使用に当たり資格を要しないことから、その実用化が期待されている。実用化のためには、電波ばく露による人体への安全性の確認が重要となる。

非常に強い電波に人体がばく露されると、X線のように細胞の遺伝子を直接的に傷つける作用（電離作用）はないが、熱作用や刺激作用が起こることが分かっている^{1), 2)}。熱作用とは、人体に電波のエネルギーが吸収されることにより、体温が上昇する作用のことであり、約100 kHz以上の周波数において起こる。熱作用の評価量としては、単位質量の組織に単位時間に吸収されるエネルギー量である比吸収率（Specific Absorption Rate, SAR）が用いられる。刺激作用とは、人体に電流が生じることにより、神経や筋の活動に影響を与える作用のことであり、約10 MHz以下の周波数において起こる。刺激作用の評価量としては、人体組織に誘導される体内電界強度が用いられる。本装置の電波の周波数は1 MHz帯であるため、熱作用と刺激作用の両方を考慮する必要があ

る。熱作用及び刺激作用については多くの研究の蓄積があり、健康に悪影響を及ぼさない電波の強さの基準値が電波防護指針に示されている³⁾。電波防護指針は総務省情報通信審議会から答申されており、その一部は電波法に反映され電波防護規制が行われているもので、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）等が策定している基準値と同等のものであり、この基準値を満たしていれば、人間の健康への安全性が確保されているというのが、国際機関（世界保健機関（WHO）やICNIRP等）の認識である。このことから、本装置の電波が電波防護指針値を下回ることによって、人体への安全性の確認が行われる。

本装置は検査官が送受信アンテナを検査対象に当てて検査を行うものであり、人体と電磁放射源の距離が20 cm以内であるため、電波防護指針の局所吸収指針による評価を行うことができる。本研究で用いる電磁波の周波数1.214 MHzにおける、局所吸収指針の電波防護指針値をTable 1に示す。電波が照射されていると認識していない場合である一般環境では、任意の組織10 g当りの局所SAR（6分間平均値）が2 W/kg、体内電界強度164 V/mである。管理環境では、任意の組織10 g当りの局所SAR（6分間平均値）が10 W/kg、体内電界強度328 V/mである。ここで、電波防護指針値は十分な安全率が考慮されており、電波防護指針値を超えた

* 財務省関税中央分析所 〒277-0882 千葉県柏市柏の葉6-3-5

** 現在所属 門司税関博多税関支署 〒813-0018 福岡県福岡市東区香椎浜ふ頭2-4-1

*** 国立研究開発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

からといって、すぐさま危険な状況にはならない^{1), 2)}ことに注意が必要である。また、電波が照射されていると認識して、そのレベルの把握や管理を実施できる場合、管理環境の電波防護指針値を適用できる可能性がある。

Table 1 Partial Body Absorption Guidelines of Radio Radiation Protection Guidelines about local SAR over 10 g of arbitrary tissue and internal electric field strength at 1.214 MHz.

	Local SAR over 10 g of arbitrary tissue	Internal electric field strength ($f = 1.214 \times 10^6$ Hz)	
Controlled environment	10 (W/kg)	$2.7 \times 10^{-4} \times f$	328 (V/m)
General environment	2 (W/kg)	$1.35 \times 10^{-4} \times f$	164 (V/m)

局所 SAR や体内電界を求める方法としては、人体を模擬した人形（ファントム）に電波を照射して実測する方法^{4)~6)}や、数値人体モデルを用いて電磁界シミュレーションを行う方法^{4), 7)~10)}がある。数値人体モデルとは、人体（組織・臓器）の形状を微小な要素の集合体として表現したものであり、その組織・臓器に対応する電気定数を与えることで、電波が人体に吸収される様子を解析することができる。実測による評価は、携帯電話（周波数 300 MHz-3 GHz）において多く実施されているところであるが、本装置の周波数は約 1 MHz 帯であり、この周波数帯での実測はほとんど実施されておらず、実用的な計測機器が開発・普及されていない状況である。

そのため、本研究では、本装置から照射される電波が人体に及ぼす影響について評価するために、電磁界シミュレーションにより、任意の組織 10 g 当りの局所 SAR 及び体内電界強度を求め、電波防護指針値以下に収まるアンテナへの入力電力の最大許容値を導き出した。なお、国立研究開発法人情報通信研究機構（以下「NICT」という。）は電波防護指針の適合性評価手法の研究・開発に関わっており、電波ばく露の研究に関する多くの知見を有していることから、本研究は NICT との共同研究で行った。

2. 実験及び電磁界シミュレーション

2.1 実験装置

2.1.1 不正薬物探知装置

アンテナ：スパイラルコイル

共振周波数：約 1.214 MHz

波形：パルス波

1 周期における照射時間の割合（Duty 比）：5.6 %

2.1.2 電磁界計測装置

名称：H-field Probe, Type 12 （Narda 社製）

測定範囲：0.017-17 A/m

周波数範囲：300 kHz-30 MHz

2.2 電磁界シミュレーション解析条件

2.2.1 電磁界シミュレータ

名称：CST STUDIO SUITE （株式会社エーイーティー製）

アンテナ：スパイラルコイル

周波数：約 1.214 MHz

波形：連続波

メッシュサイズ：最小 1 mm

解析手法：有限積分法（FIT）

2.2.2 数値人体モデル

名称：数値人体モデル TARO^{10), 11)} （NICT 製）

空間分解能：2 mm

2.3 実験方法及び電磁界シミュレーション

2.3.1 波源モデルの妥当性確認

本装置のアンテナは、Fig. 1 に示すとおり、スパイラルコイルであり、磁界を効率的に発生させる構造である。本装置について人間の健康への安全性が確保されているということを、電磁界シミュレーションの結果をもって証明することについて、その波源のモデル化の妥当性を確認するため、アンテナに周波数 1.214 MHz、入力電力 344 mW を印加した際にアンテナが発生する磁界強度の、x 方向、y 方向、及び z 方向の位置依存性について、電磁界計測装置(H-field Probe, Type 12)による実測及び電磁界シミュレーション(CST STUDIO SUITE)により比較を行った。媒質については、実測では空気とし、電磁界シミュレーションでは真空とした。x 方向、及び y 方向の位置依存性については、アンテナから z 方向に 90 mm 離れた位置(z = 90 mm)で比較を行い、z 方向の位置依存性については、アンテナの中心の位置(x = 0 mm, y = 0 mm)で比較を行った。

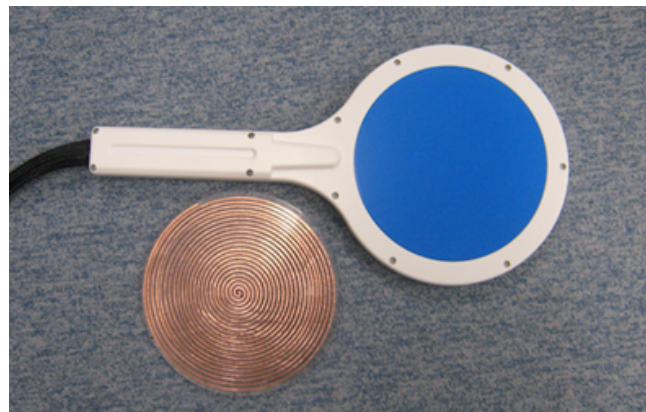


Fig. 1 Spiral type surface coil and antenna coil section of prototype

2.3.2 任意の組織 10 g 当りの局所 SAR

任意の組織 10 g 当りの局所 SAR について、Fig. 2 に示す計算モデルのとおり、数値人体モデル TARO の腹部から 1 cm の距離に本装置のアンテナを置き、電磁界シミュレーションで計算を行った。また、アンテナの入力電力を 0-5,000 W と変化させたときの任意の組織 10 g 当りの局所 SAR の最大値の計算を行った。なお、本装置の電波はパルス波であり、1 周期における照射時間の割合（Duty 比）は 5.6 % である。電磁界シミュレーションでは連続波の 1 周期の実効値として局所 SAR を計算するため、計算された局所 SAR の 5.6 % の割合の値で、局所 SAR の評価を行った。

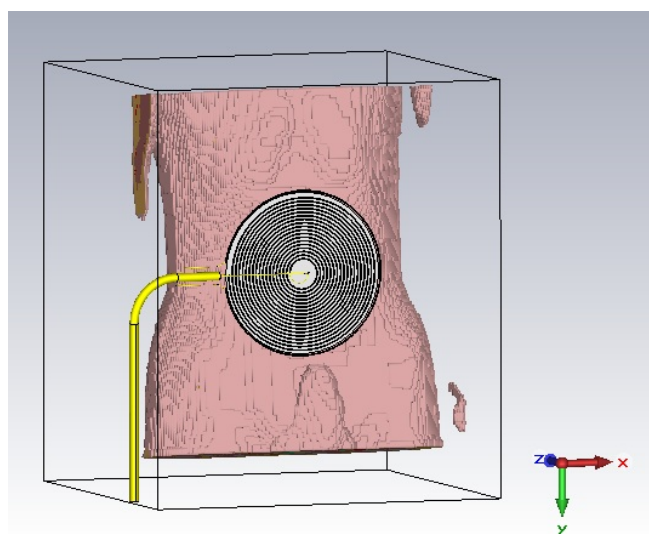


Fig. 2 Calculation model in the electromagnetic simulation

2.3.3 体内電界強度

体内電界強度について、Fig. 2 に示す計算モデルのとおり、数値人体モデル TARO の腹部から 1 cm の距離に本装置のアンテナを置き、電磁界シミュレーションで計算を行った。また、アンテナの入力電力を 0–2,000 W と変化させたときの体内電界強度（実効値）の計算を行った。なお、ICNIRP ガイドラインにおいて、体内電界強度は $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の単位体積の平均値と

して計算して、全単位体積の 99 パーセンタイル値（全単位体積の体内電界強度を低い順番で並べたうちの 99 目目の値）の体内電界強度で評価を行うことを推奨している¹²⁾。そこで、本研究では、電磁界シミュレーションにおいてメッシュサイズを最小 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ で体内電界強度を計算した後、全メッシュについて、 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の単位体積に体内電界強度を平均化して、 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の全単位体積の 99 パーセンタイル値で評価を行った。

3. 結果及び考察

3.1 波源モデルの妥当性確認

アンテナに周波数 1.214 MHz、入力電力 344 mW を印加した際にアンテナが発生する磁界強度の、x 方向、y 方向、及び z 方向の位置依存性についての実測結果と電磁界シミュレーション結果との比較を Fig. 3(a), 3(b), 3(c) に示す。磁界強度について、x 方向、y 方向、z 方向ともに実測値と電磁界シミュレーション結果が極めて近い値を示していることがわかった。このことから、波源のモデル化の妥当性が確認できた。また、本装置のアンテナは、スパイラルコイルであり、磁界を効率的に発生させる構造であるため、本研究においては、磁界の正確な計算を行う電磁界シミュレーションを用いることで、人体への影響を十分に検討することができるものと判断する。

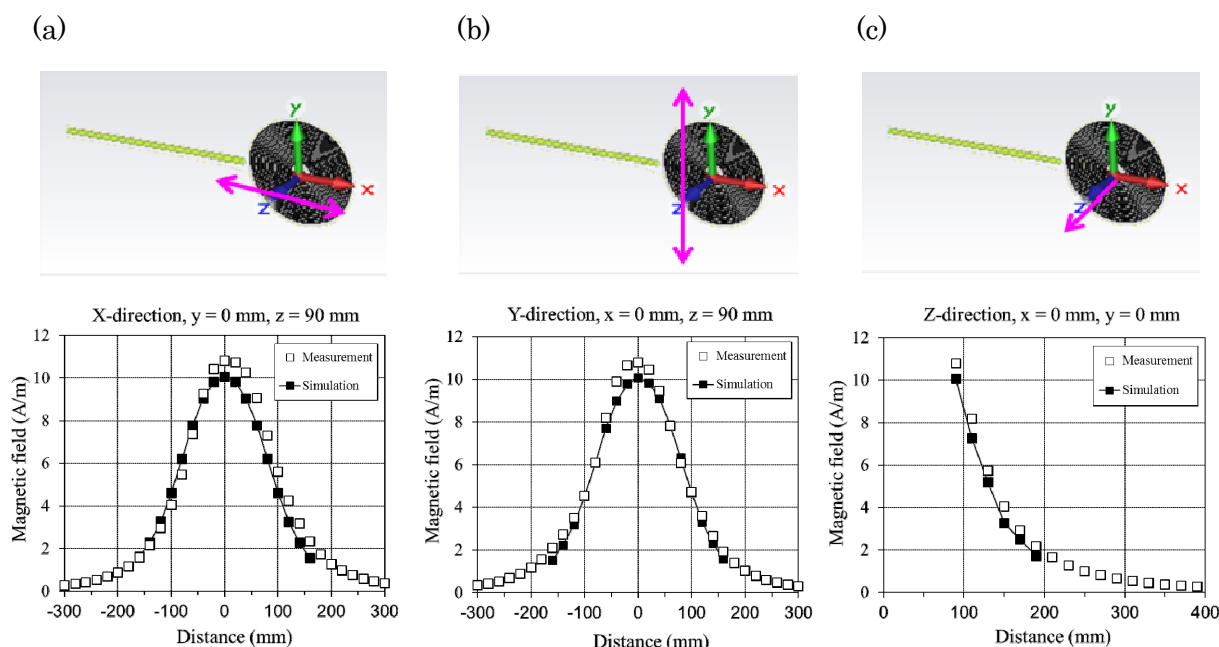


Fig. 3 Comparison between the measured result and the simulated result about the magnetic field of (a) the x-direction, (b) the y-direction, and (c) the z-direction

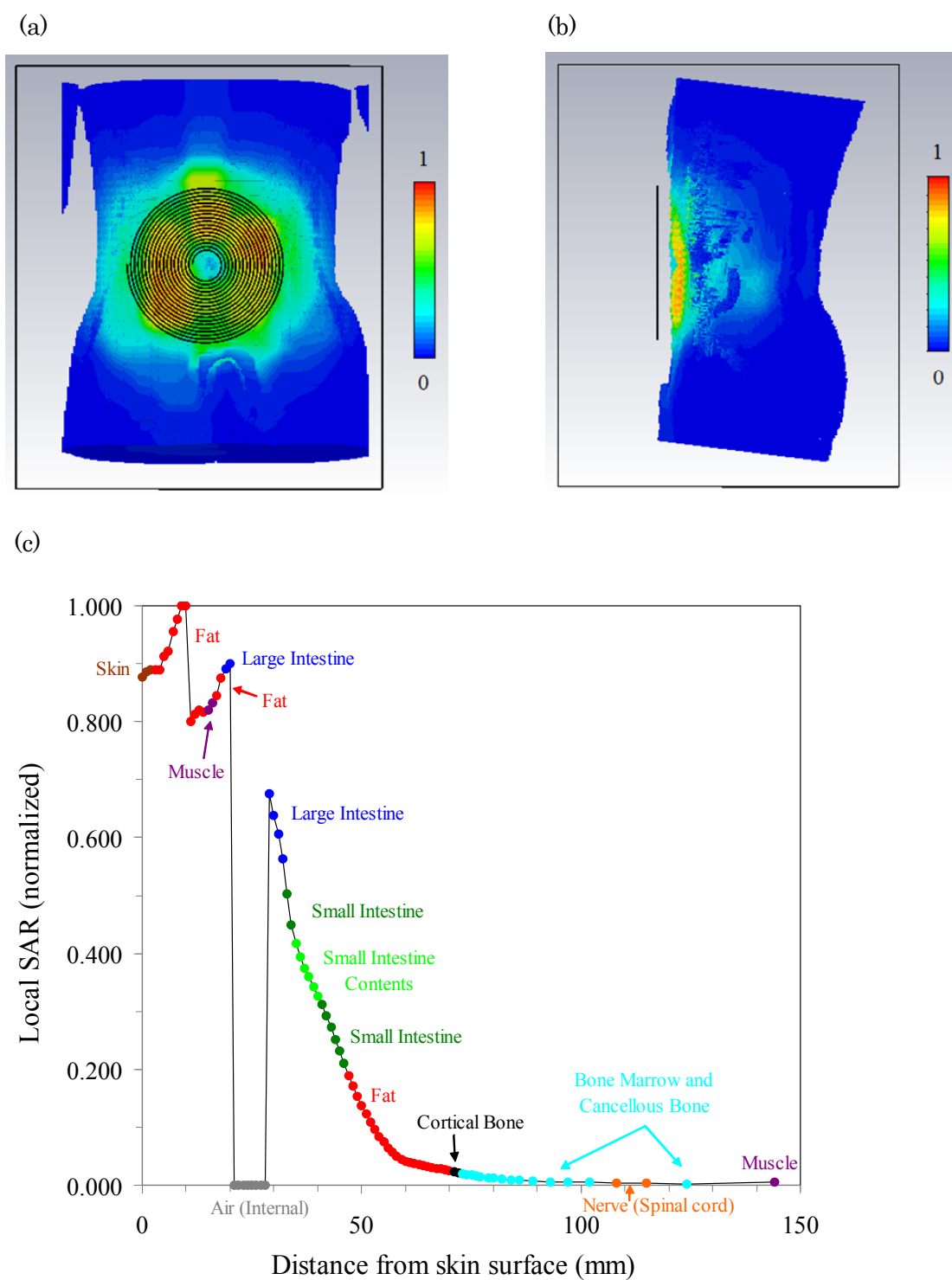


Fig. 4 The distribution of the local SAR over 10g of arbitrary tissue in the electromagnetic simulation on (a) the surface of the body, (b) the cross-section of the body, and (c) the depth profile in tissues

3.2 任意の組織 10 g 当りの局所 SAR

任意の組織 10 g 当りの局所 SAR の計算結果の表面分布図、断面分布図、及び皮膚表面から深さ方向の組織ごとの分布図を Fig. 4(a), 4(b), 4(c)に示す。Fig. 4(a), 4(b)の局所 SAR 値は、全データにおける最大値を 1 として規格化を行い、Fig. 4(c)の局所 SAR 値は、この図のデータにおける最大値を 1 として規格化を行った。Fig. 4(a)を見ると、腹部表面のアンテナ近傍部分で局所 SAR 値が大きくなっていることがわかる。Fig. 4(b)を見ると、アンテナ近傍部分の局所 SAR 値が大きくなっていることがわかる。また、周りの部分より局所 SAR 値が小さくなっている部分があることがわかる。Fig. 4(c)を見ると、アンテナ近傍の脂肪部分で局所 SAR 値が最大となっていることがわかる。また、大腸内側の体内空気の部分には、局所 SAR 値がゼロとなっていることがわかる。SAR 値は、 $SAR = \sigma |E|^2 / \rho$ で定義される²⁾。σ は導電率 (S/m)、E は体内電界強度の実効値 (V/m)、ρ は密度 (g/m³) である。空気の導電率はゼロであるため、大腸内側の体内空気の SAR はゼロとなる。

Fig. 4(c)を見ると、大腸内側は皮膚表面から 2–3 cm、小腸内側は皮膚表面から 3–4 cm に位置しており、大腸内側は局所 SAR が 0.7–0.9、小腸内側は局所 SAR が 0.3–0.4 となっており、大腸内側及び小腸内側まで電波が入射することがわかる。

入力電力を 0–5,000 W と変化させたときの任意の組織 10 g 当りの局所 SAR の最大値を Fig. 5 に示す。一般環境の電波防護指針値の 2.0 W/kg を限界値とすると、入力電力 935 W まで上げることができ、管理環境の電波防護指針値の 10 W/kg を限界値とすると、入力電力 4,677 W まで上げることができると考えられる。

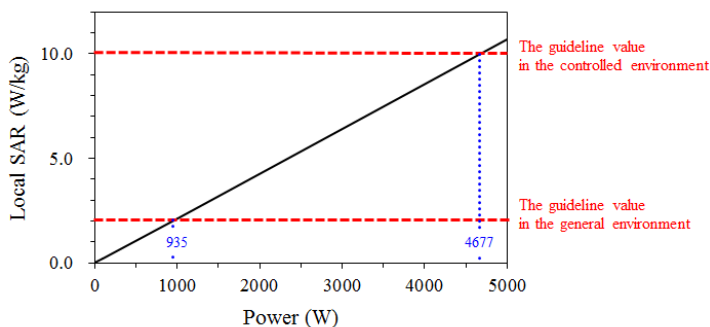


Fig. 5 Comparison between the local SAR over 10 g of arbitrary tissue by 0–5,000 W in the electromagnetic simulation and the guideline value of Radio Radiation Protection Guidelines

3.3 体内電界強度

体内電界強度の計算結果の表面分布図、断面分布図、及び皮膚表面から深さ方向の組織ごとの分布図を Fig. 6(a), 6(b), 6(c)に示す。Fig. 6(a), 6(b)の体内電界強度は、全データにおける最大値を 1 として規格化を行い、Fig. 6(c)の体内電界強度は、この図のデータにおける最大値を 1 として規格化を行った。Fig. 6(a)を見ると、腹部表面のアンテナ近傍部分で体内電界強度が大きくなっていることがわかる。Fig. 6(b)を見ると、アンテナ近傍部分の体内電界強度が大きくなっていることがわかる。また、周りの部分より体内電界強度が小さくなっている部分があることがわかる。Fig. 6(c)を見ると、アンテナ近傍の脂肪部分で体内電界強度が最大となっていることがわかる。また、大腸及び小腸の奥にある脂肪部分が、手前の大腸及び小腸部分より体内電界強度が大きくなっていることがわかる。脂肪は他の組織に比べて、体内電界強度が大きくなりやすいと考えられる。

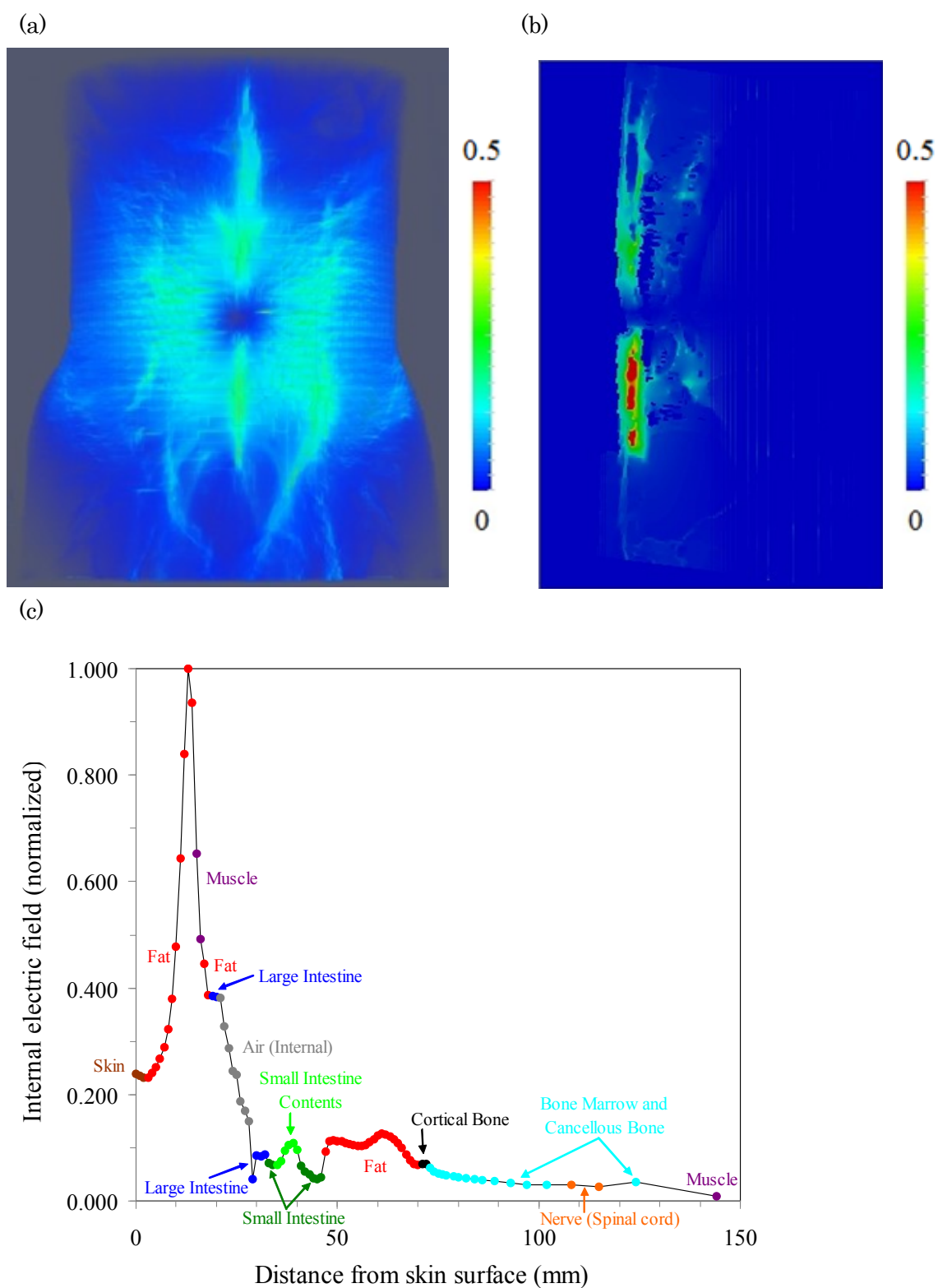


Fig. 6 The distribution of the internal electric field strength in the electromagnetic simulation on (a) the surface of the body, (b) the cross-section of the body, and (c) the depth profile in tissues

入力電力を0-2,000 W と変化させたときの体内電界強度(実効値)の99パーセンタイル値を Fig.7 に示す。一般環境の電波防護指針値の164 V/m を限界値とすると、入力電力423 W まで上げることができ、管理環境の電波防護指針値の328 V/m を限界値とすると、入力電力1,691 W まで上げることができると考えられる。

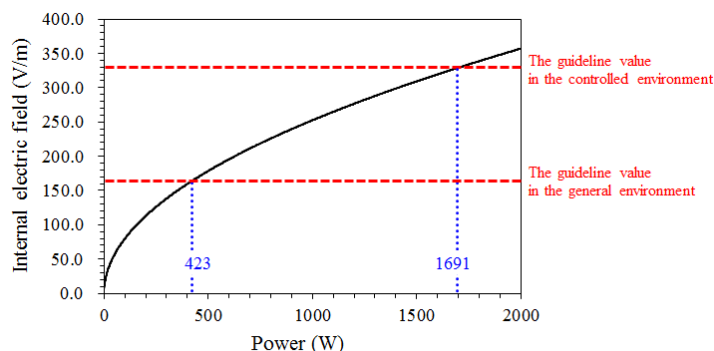


Fig. 7 Comparison between the internal electric field strength by 0-2,000 W in the electromagnetic simulation and the guideline value of Radio Radiation Protection Guidelines

3.4 電波防護指針の適合性

本装置のアンテナへの入力電力が423 W 未満であれば、局所 SAR 及び体内電界強度ともに一般環境の電波防護指針値を満たすことができ、また、入力電力が1,691 W 未満であれば、局所 SAR 及び体内電界強度ともに管理環境の電波防護指針値を満たすことができ、人体への安全性を確保することができると考えられる。

4. 要 約

本装置のアンテナは、スパイラルコイルであり、磁界を効率的に発生させる構造であるため、アンテナが発生する磁界強度の、x 方向、y 方向、及び z 方向の位置依存性について、実測及び電磁界シミュレーションにより比較を行った結果、x 方向、y 方向、z 方向ともに実測値と電磁界シミュレーション結果が極めて近い値を示しており、波源のモデル化の妥当性を確認できた。

本装置から照射される電波が人体に及ぼす影響について評価するために、電磁界シミュレーションにより、任意の組織10g 当りの局所 SAR 及び体内電界強度の計算を行った結果、本装置のアンテナへの入力電力が423 W 未満であれば、局所 SAR 及び体内電界強度ともに一般環境の電波防護指針値を満たすことができ、また、入力電力が1,691 W 未満であれば、局所 SAR 及び体内電界強度ともに管理環境の電波防護指針値を満たすことができ、人体への安全性を確保することができるとわかった。

文 献

- 1) 総務省パンフレット：電波と安心な暮らし
- 2) 和氣加奈子，渡辺聡一：保健医療科学，**64**(6)，578 (2015)。
- 3) 情報通信審議会答申(平成27年3月12日)：平成25年12月13日付け諮問第2035号「電波防護指針の在り方」のうち「低周波領域(10kHz 以上10MHz 以下)における電波防護指針の在り方」
- 4) 電気通信技術審議会答申(平成9年4月24日)：諮問第89号「電波利用における人体防護の在り方」
- 5) A. W. Guy : *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, **19**(2), 205 (1968).
- 6) Y. Okano, et al. : *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, **48**(11), 2094 (2000).
- 7) 渡辺聡一，花澤理宏，長岡智明，ポンパイブーンポーアノン，和氣加奈子：情報通信研究機構季報，**52**(1)，101 (2006)。
- 8) T. Weiland : *Electronics and Communication (AEU)*, **31**(3), 116 (1977).
- 9) E. Gjonaj, et al. : *IEEE Transactions on Magnetics*, **38**(2), 357 (2002).
- 10) T. Nagaoka, et al. : *Physics in Medicine and Biology*, **49**(1), 1 (2004).
- 11) 長岡智明，櫻井清子，国枝悦男，渡辺聡一，本間寛之，鈴木保，河合光正，酒本勝之，小川孝次：生体医工学，**40**(4)，45 (2002)。
- 12) 国際非電離放射線防護委員会(2010年)：時間変化する電界および磁界へのばく露制限に関するガイドライン(1Hz から100kHz まで)