

5-2 生体関連の EMC に関する研究動向

5-2 Review of Bio-EMC Studies

渡辺聡一 和氣加奈子 福永 香 山中幸雄

Soichi WATANABE, Kanako WAKE, Kaori FUKUNAGA, and Yukio YAMANAKA

要旨

電磁環境グループでは、生体関連の EMC に関して、規格・測定法に関連するテーマと生物実験に関連するテーマについて研究が進められている。規格・測定法関連研究として、携帯電話からのマイクロ波や VHF 帯電波への電磁波曝露に対する電波防護規格適合性評価手法の標準化に関する研究が行われている。生物実験関連研究として、生物実験用曝露装置の開発と曝露評価が行われている。いずれの研究においても高精度な曝露評価技術を用いた詳細な検討が必要であり、そのための高性能ファントムの開発も進めている。これらの研究成果が防護指針の適切な評価体制の構築及び防護指針の根拠の信頼性の向上に貢献し、適正かつ安全な電波利用環境が実現できるものと期待される。

Biological aspects of electromagnetic compatibility (Bio-EMC) have been studied by EMC Research Group of CRL. There are two main subjects in the field. One is related to rules and regulations of electromagnetic-wave hazards, especially development of standard estimation methods of electromagnetic power deposited in human bodies exposed to microwaves from cellular telephones or VHF-band electromagnetic waves. Another is development of exposure setups for laboratory animals used in biological studies on health effects of electromagnetic waves and their dosimetry. Novel phantoms are also being developed in order to perform highly accurate dosimetry in above studies. It is expected that these studies contribute development of compliance tests for radiofrequency protection guidelines and improvement of rationale of those guidelines, which consequently provides safety environment including appropriate electromagnetic wave applications.

[キーワード]

電波防護指針, 比吸収率, ファントム, 曝露評価, 生物実験用曝露装置

Radiofrequency safety guideline, Specific absorption rate (SAR), Exposure, Dosimetry, Exposure setup for biological studies

1 はじめに

近年の携帯電話の爆発的な普及に代表されるように電波を用いた無線通信端末が一般の人々のごく身近で利用されてきている。一方で、電波利用の普及に伴い電波が人体の健康に与える影響についての関心も高まってきている。

電波の人体への健康影響に関しては、これまでの長年にわたる膨大な研究成果が蓄積されており、これらの知見に基づいて電波の防護指針が各国で策定されている。我が国では1990年に

郵政省電気通信技術審議会(現総務省情報通信審議会)から電波防護指針¹⁾が答申され、1997年の一部改訂²⁾を経て、1998年より一部を除いて強制規格(電波法施行規則)として運用されている。

防護指針が従来の自主規格から強制規格としてより厳密に適用されることにより、一般の人々が安心して電波を利用できる環境が整備されるものと期待されている。しかし、防護指針を強制規格として運用するためには、正確で再現性に優れ、できれば簡便な標準評価手法を確立する必要がある。さらに、近年の無線通信シ

システムのグローバル化に対応するために、各国独自の手法ではなく、国際的に整合された標準評価手法を確立することが急務となっている。このため、国際電気標準会議(IEC)では、2000年に電波の防護規格の適合性評価手法に関する専門委員会(TC 106)を発足させ、様々な周波数帯や電波利用機器のための防護規格適合性評価手法の標準化作業を進めている。

また、携帯電話のように近年急速に普及してきた無線通信機器からの電磁波への曝露による人体への健康影響に関しては、現状の防護規格値を適用することで適切な電波防護が行えると考えられているが、大多数の人々が長期間使用することを考慮して、より精度の高い生物実験の実施が必要とされている。そのため、世界保健機関(WHO)は1996年よりInternational EMF Projectを開始し、国際的な協調の下での効果的な研究活動を支援している。日本では1997年に、郵政省(現総務省)生体電磁環境研究推進委員会(委員長:上野照剛東京大学教授)が発足し、国内の医学・生物学と工学の専門家による共同研究プロジェクトを推進している。

著者らが所属する通信総合研究所電磁環境グループでは、これらの国内外の様々な動向に対応するために、1997年から電磁波の生体影響評価に関する研究を本格的に開始し、電波防護規格適合性評価手法に関する研究や電波の生体影響解明のための生物実験用電磁波曝露装置の開発を精力的に進めている。本稿ではこれらの研究の概要を述べる。

2 電波防護基準適合性評価に関する研究

電波(特に周波数が数100 kHz以上の高周波電磁波)の人体への影響は主に人体に吸収された電磁波エネルギーによる発熱の影響(熱作用)が支配的であることが知られている。電磁波の熱作用を測る指標としては、単位重量当たり吸収される電力を表わす比吸収率が用いられる。比吸収率は通常SAR(Specific Absorption Rate)と略称される。SARの単位は(W/kg)である。

電波の安全性(熱作用)を評価するためには人体内のSARを正確に評価することがまず基本と

なり、電波防護指針値は人体SAR特性に基づいて設定されている。そこで我々の研究グループでは人体内SARの正確な評価を可能とする曝露評価技術について研究を進めている。

2.1 携帯電話使用時の頭部SAR評価技術³⁾

携帯電話を使用している場合、電波を放射しているアンテナと頭部との距離が非常に近接しているため、頭部内のSAR分布は様々な条件に依存して大きく変動する。特に携帯電話のアンテナは人体頭部と強く結合しているため、実際の使用状態と同様のアンテナ動作条件下で頭部SARの測定が必要である。このような測定を可能とする測定システムの開発が行われており、最近標準化された頭部内SAR測定法⁴⁾では、頭部組織と等価な電気的特性を有する液体で頭部形状を模擬した無損失誘電体容器に満たし、この頭部ファントム¹⁾内を等方性電界プローブで走査する方法が採用されている。

標準測定法では頭部ファントム形状と、頭部に対する携帯電話端末位置を厳密に定義することで、再現性の高い測定結果が得られるように配慮されている。しかし、標準測定法で採用されている頭部ファントム形状は欧米人の頭部寸法の統計データに基づいて決定されており、平均的な日本人に比べてかなり大きな寸法を有している。このような大型の頭部モデルを日本人に適用することの妥当性について、これまでに厳密な検討は行われてきていない。そこで、頭部形状と頭部内SARとの関係について検討を進めている。

3種類の頭部ファントムにおけるファントム内部SAR分布の測定結果を図1に示す。欧米人頭部ファントムと日本人頭部ファントム(A)はともに耳翼の部分が無損失の媒質でかつ同様の形状(携帯電話で押さえつけられている状態)をしている。一方、日本人頭部ファントム(B)は耳翼の部分が頭部と同じ液体で満たされており、形状も通常の状態(押さえつけられていない)をしている。

図1より、耳翼の材質・形状が同様であれば、

(1) ファントムとは代替物のことであり、ここでは人体頭部の電気的特性を模擬したモデルを指す。

欧米人頭部ファントムと日本人頭部ファントムのSAR分布は同様であることが示されている。一方、同じ日本人頭部形状でも、耳翼の形状が異なるとSAR分布は大きく変化することが示されている。以上から、携帯電話使用時の頭部内SAR分布は頭部全体の形状(寸法)にはあまり影響を受けず、むしろ携帯電話に最も近接する耳翼の形状に大きく依存するものと考えられる。

また、様々な形状の携帯電話モデルを用いた検討により、日本人よりも大型の欧米人頭部ファントムは日本人頭部ファントムに対して同程度若しくはそれ以上の最大局所SAR値を与えることも示されている。したがって、日本人よりも大型の標準頭部ファントムを使用することについては日本人に対して、実際よりも高めのSAR値を与えるので、安全側の規格適合性評価を行うことができるものと考えられる。

本研究に関連して耳翼形状の影響⁵⁾や支持手の影響⁶⁾、さらにアマチュア携帯無線機に対するSAR測定法に関する研究⁷⁾⁸⁾等も進めている。

2.2 VHF帯足首SAR評価⁹⁾

電波の波長が人体身長と同程度となるVHF帯では、電界成分が身長方向の電波が人体に入射した時に、全身共振を生じ、人体に吸収される電力やSARが非常に増大することが知られている。特に大地上で直立している人体の場合、人体が共振モノポールアンテナのように振る舞うため、大地付近の足首付近に大きな誘導電流が流れる。この電流は、導電率が低い骨を避けて、導電率が高い筋肉や皮膚に集中するため、これらの部位におけるSARが非常に大きくなること

が知られている¹⁰⁾。

足首SARを直接測定することは困難であるが、足首付近のSARは足首を通過する電流から推定することが可能である。そこで電波防護指針では足首誘導電流指針値を設け、過度の足首SARが生じる可能性がある場合には、足首誘導電流の測定値が足首誘導電流指針値以下であることを確認することを勧告している。

しかし、足首誘導電流測定法については手法が十分に確立しているとはいえないため、現時点では強制規格には含まれていない。そこで、足首誘導電流測定法を確立するための基礎検討として、様々な接地条件下での足首SARを数値シミュレーションにより求めた。

図2に数値シミュレーション(有限差分時間領域法¹¹⁾)に用いた全身数値モデルを示す。このモデルは米国Visible Human Projectのデータベースより開発されたものである。

全身数値モデルを完全導体大地面上に直立した場合、つま先立ちの場合、大地から浮かせた場合、自由空間中の場合における人体垂直断面SAR分布を図3に示す。大地との接地面積の違い(直立とつま先立ち)は足首SARにほとんど影響を与えないことが示されている。一方で、大地からいったん離れると大地からの距離により足首SARは大きく変化すること、大地と人体との距離 d が50cm以上ではほぼ自由空間中でのSAR分布に一致することが示されている。

現在、様々な身長の人体や実際の大地インピーダンスを考慮した場合の足首SAR特性についての検討や足首誘導電流計の較正法や人体等価アンテナの開発を進めている。

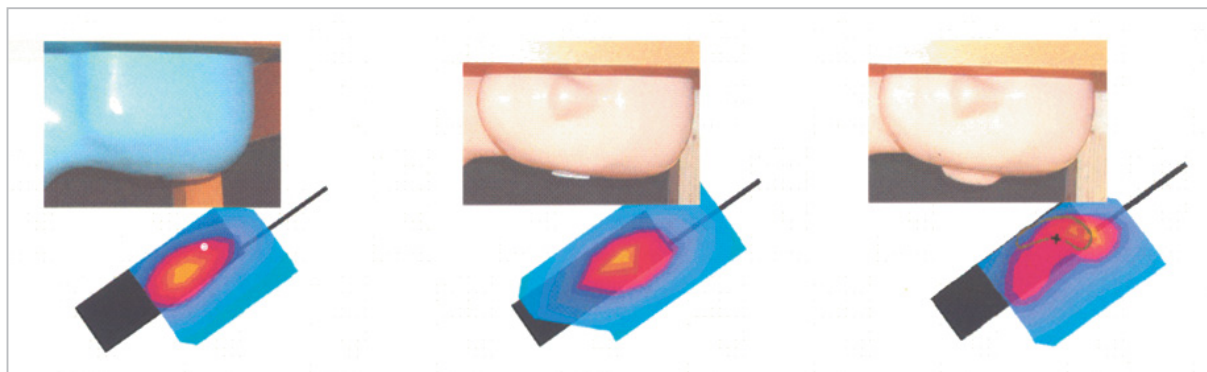


図1 ファントムSAR分布 欧米人モデル(左)、日本人モデル(無損失耳翼、中央)、日本人モデル(損失性耳翼、右) 周波数900 MHz アンテナ放射電力を1 Wに規格化

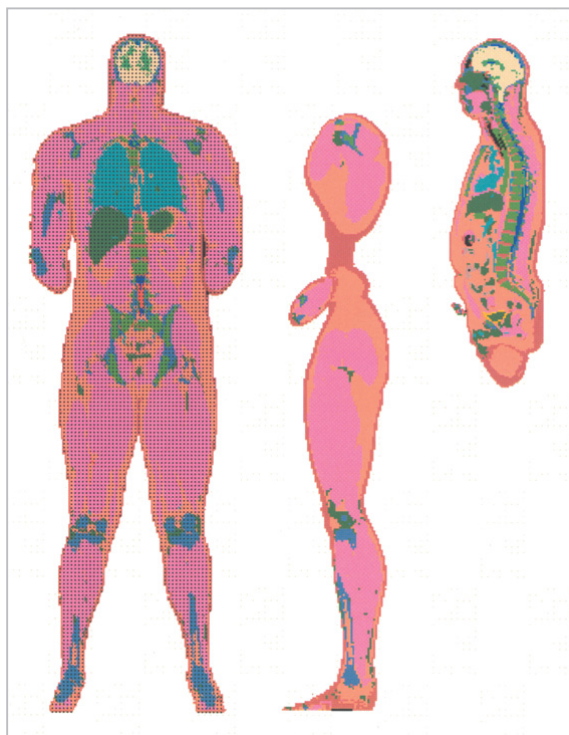


図2 全身数値モデル

VHF 帯より低い周波数では人体に誘導される電流により神経が直接刺激される影響を考慮する必要がある。特に、高周波電流が誘導された金属体に人体が接触した場合の刺激作用を防止するための接触電流測定が必要となっている。そこで、接触電流計開発のための基礎検討とし

て、人体接触インピーダンスの測定と人体等価インピーダンス回路の開発も進めている^[12]。

3 生物実験関連^{[13][14]}

携帯電話を使用している場合、人体吸収電力又はSARはアンテナ近傍の頭部局所に集中する。しかし、頭部若しくは全身で吸収される電力は非常に小さいため、深部体温の上昇は生じない。さらに、血流の効果等により高SARが生じる頭部局所から熱エネルギーが速やかに拡散するため、アンテナ近傍の局所においても温度上昇は無視できるレベルである^[15]。したがって、生物実験において携帯電話端末使用時の電波曝露の生体影響を評価するためには、このような局所・非熱的曝露条件を満たす曝露装置を開発する必要がある。

3.1 曝露装置

動物実験では主にラットやマウスなどの小動物が使用される。しかし、これらの小動物は人体頭部に比べて寸法が非常に小さいため、局所的な曝露条件を実現することが難しい。

これまで我々は実験用小動物の標的組織に集中した曝露を行うために、共振モノポールアンテナの近傍界中にプラスチック製の筒に固定さ

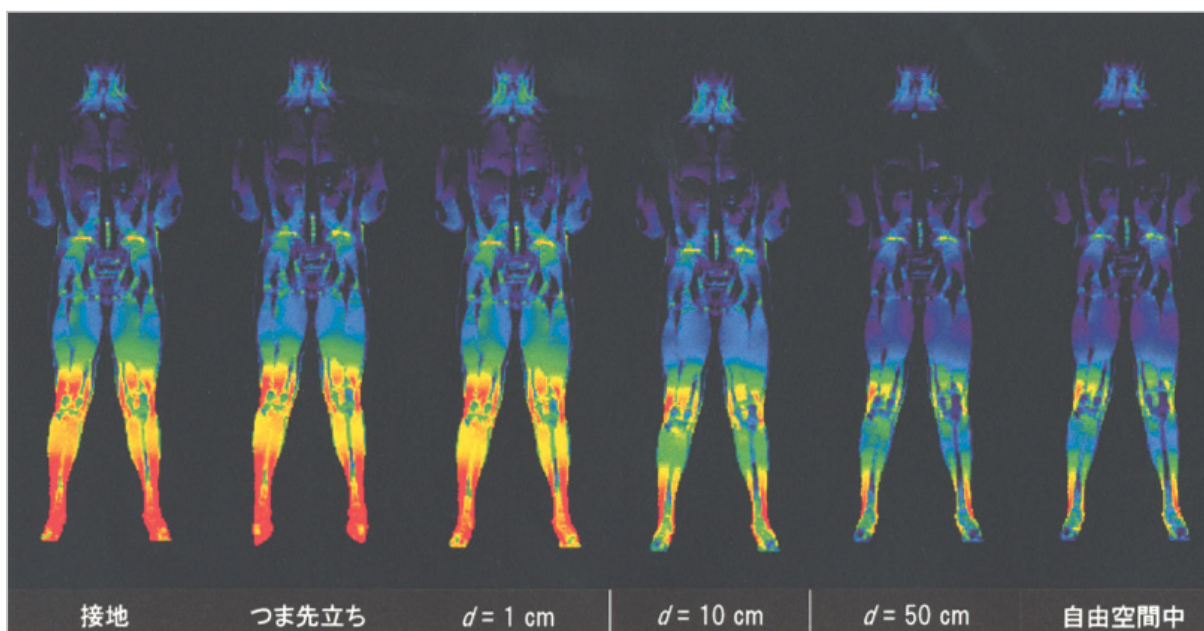


図3 様々な接地条件下での人体垂直断面 SAR 分布 E 偏波平面波入射 周波数 40 MHz(大地上人体の共振周波数付近)

れたラットを配置させる曝露装置を開発してきた(図4～6)。この曝露装置はラットとアンテナとの配置を最適化することで、様々な組織に対して局所曝露を行うことが可能であること、1本のアンテナで複数のラットを同時に曝露することが可能であること、ラットに温度制御された外気をあてることでラットの固定ストレスを軽減できること等の利点がある。

図4はラットの肝臓への局所曝露を行うための装置であり、肝臓がんの促進影響についての研究に用いられている^{[16][17]}。図5はラットの脳への局所曝露を行うための装置であり、血液脳関門や学習／記憶機能への影響についての研究に用いられている^{[18][19]}。図6はラットの一生にわたり脳への局所曝露を行うための装置であり、ラットの成長に応じてアンテナ放射電力を調整することで、常に一定の脳局所SARで曝露が行えるものである。この装置は小動物の一生にわ

たる曝露が必要な脳腫瘍への影響評価試験への利用を想定して開発されている。

携帯電話の周波数帯の共振モノポールアンテナは小動物の寸法とほぼ同程度であるため、たとえ近傍界中に小動物を配置させても局所曝露には限界がある。すなわち、局所SARをある程度高い数値に設定しようとしても全身吸収電力も増大するため、深部体温の上昇が引き起こされ、結果的に非熱的な曝露条件を実現することが困難である。そこで、微小アンテナを用いることでより局所的な曝露を可能とする曝露装置の開発を進めている(図7)。

携帯電話以外の電波の生体影響評価に関する研究テーマとしてパルス波・ミリ波の生体影響評価のための動物実験用曝露装置の開発を進めている(図8)。

また、電波の生体影響メカニズムの詳細な解析を行うための細胞実験用曝露装置の開発も進

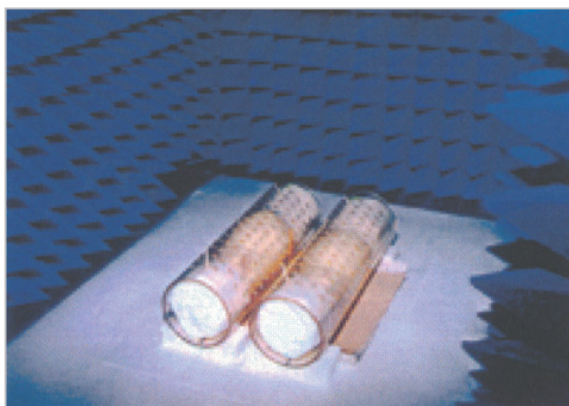


図4 ラット肝臓局所曝露装置 共振長モノポールアンテナ 周波数900 MHz 1500 MHz



図5 ラット脳局所曝露装置 共振長モノポールアンテナ 周波数1500 MHz

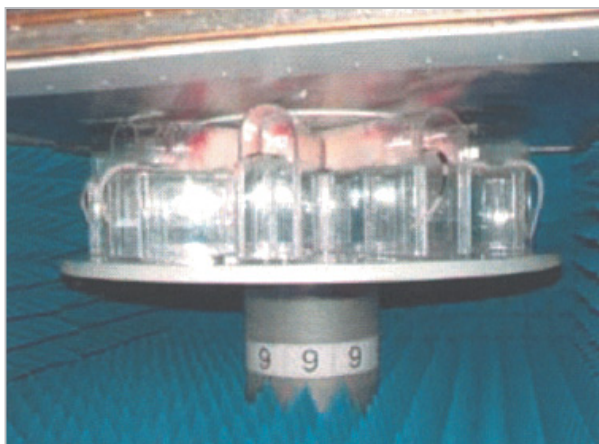


図6 長期実験用ラット脳局所曝露装置 共振長モノポールアンテナ 周波数1500 MHz



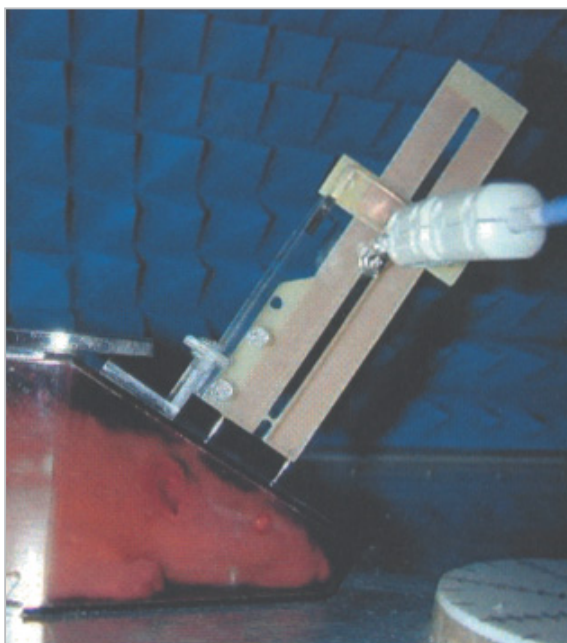


図7 ラット脳曝露装置 微小ループ 周波数 1500 MHz

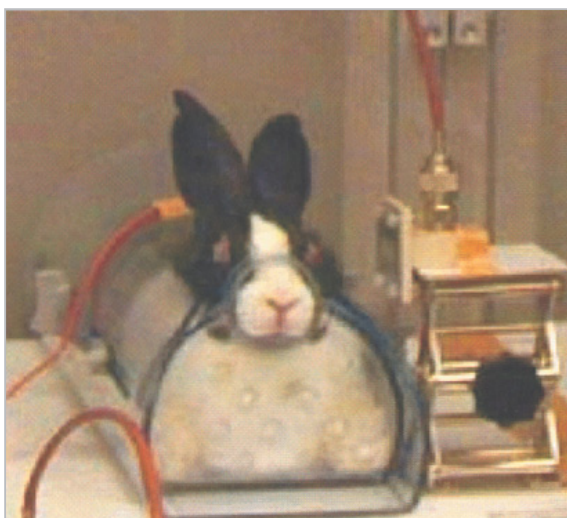


図8 パルス波曝露装置 開口導波管 周波数 2450 MHz

めている^[20]。

3.2 曝露評価

前節に示した近傍界を利用した曝露装置で小動物への局所曝露を行う際には、アンテナ入力を精密に調整することで標的組織の局所 SAR 値を正確に制御する必要がある。このため、アンテナ入力と小動物内 SAR 分布との関係を正確に求める必要がある。

実際の小動物内の SAR 分布を高空間分解で正確に測定することは非常に困難である。小動物

の死体をパラフィン等で固定することで SAR 分布を測定する方法(例えば^[21])もあるが、腐敗による電気定数の変動やプローブ挿入による組織の損傷等の影響で必ずしも再現性に優れた測定を行うことができない。そこで、我々は小動物の解剖図や MRI 断面画像データよりリアルな内部組織構造を有する数値モデルを作成し、数値シミュレーション(有限差分時間領域法)により小動物内 SAR 分布を高精度に推定している(図 9)。

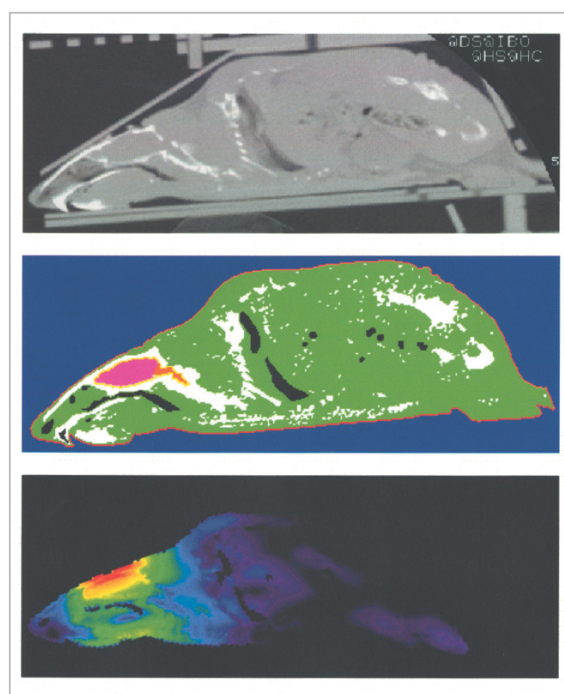


図9 ラット MRI 画像(上)、数値モデル(中)、SAR 分布計算結果(下) 微小ループアンテナ 周波数 1500 MHz

数値シミュレーションではアンテナ部分のモデル化が必ずしも十分とはいえず、アンテナの近傍に配置された小動物モデルとの相互結合の影響等を正確に計算できているかを実験的に確認する必要がある。そこで、数値モデルと同じ形状を有する固体ファントム(均一媒質)を作成し、固体ファントムを実際の曝露装置内に配置させた場合のアンテナ入力特性やファントム内 SAR 分布を測定し、計算結果と比較することで、数値シミュレーションの妥当性を確認している(図 10)。

本節で紹介した曝露装置の多くは、総務省生体電磁環境研究推進委員会で推進されている動

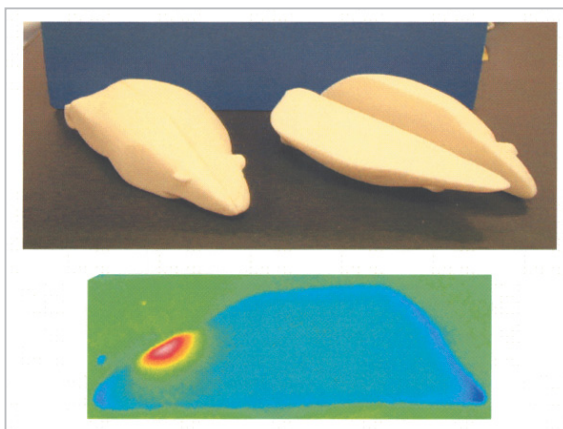


図10 固体ラットファントム(上) SAR分布測定結果(下) 微小ループアンテナ 周波数1500 MHz

物実験で使用されている。これらの動物実験の内容については同委員会中間報告²⁾にまとめられている。

4 ファントム開発

規格適合評価のための曝露評価や生物実験のための曝露評価では、いずれも生体と等価な電気的特性を有するファントムを使用している。数値シミュレーションでは詳細な内部構造まで模擬された数値ファントムが、実験では均一媒質で構成された物理ファントムがそれぞれ使用される。高精度な曝露評価のためには高性能なファントムの利用が必要不可欠であり、本節では我々がこれまでに開発してきた人体ファントムについて概要を示す。実験動物の曝露評価については3.2で述べている。

4.1 数値ファントム

携帯電話使用時の頭部SAR計算を目的とした頭部モデルは多数開発されている。特に、最近ではMRI画像データに基づいた内部組織構造を詳細に模擬したモデルの開発が行われている(例えば²²⁾²³⁾)。一方で、将来に普及が予想されているウェアラブルな無線通信情報端末のように、頭部近傍以外でも無線端末からの電波が人体に照射される状況を評価するため、人体全身を模擬したモデルを用いた数値シミュレーションが必要になるものと考えられる。しかし、人体全身のモデルについては組織同定領域が膨大であ

るため、これまでに少数のモデルしか開発されておらず²⁴⁾、特に日本人のMRI画像データに基づく全身モデルはこれまでに開発されていなかった。そこで、最近我々は日本人の平均的体型を有する数値全身モデルを開発している(図11)。

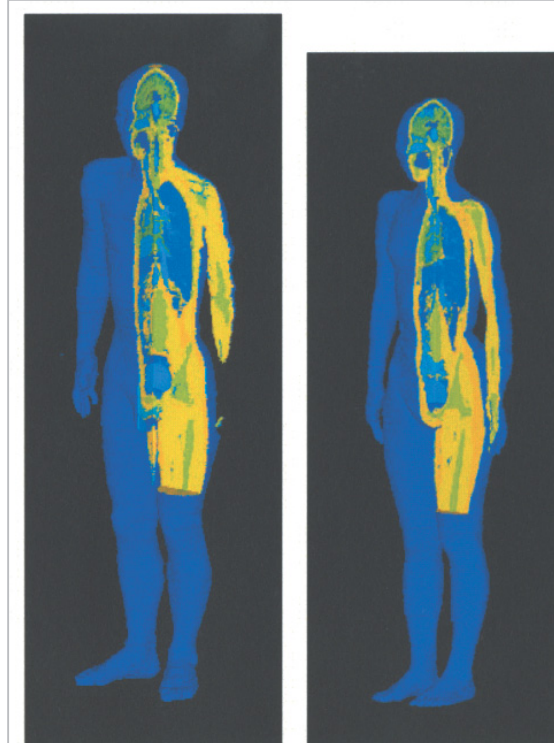


図11 日本人の全身数値モデル 成人男性モデル(左) 成人女性モデル(右)

本モデルは2mmの空間分解能を有しており、約50種類の組織で構成されている。本モデルを用いた数値シミュレーション例を図12に示す。本モデルを用いることで様々な条件下で詳細な曝露評価が可能になると期待される。

4.2 物理ファントム

固体材料のファントムに高電磁界を照射することで短時間に温度上昇が生じる。もし、熱伝導等による温度変動が無視できるならば、この温度上昇からSAR値を算出することができる。この手法は電界プローブでは十分な空間分解能でのSAR測定ができない小動物ファントムの曝露評価のために利用されている。我々は、これ

(2) http://www.sonmu.go.jp/joho_tsusin/pressrelease/japanese/sogo_tsusin/010130_2.html

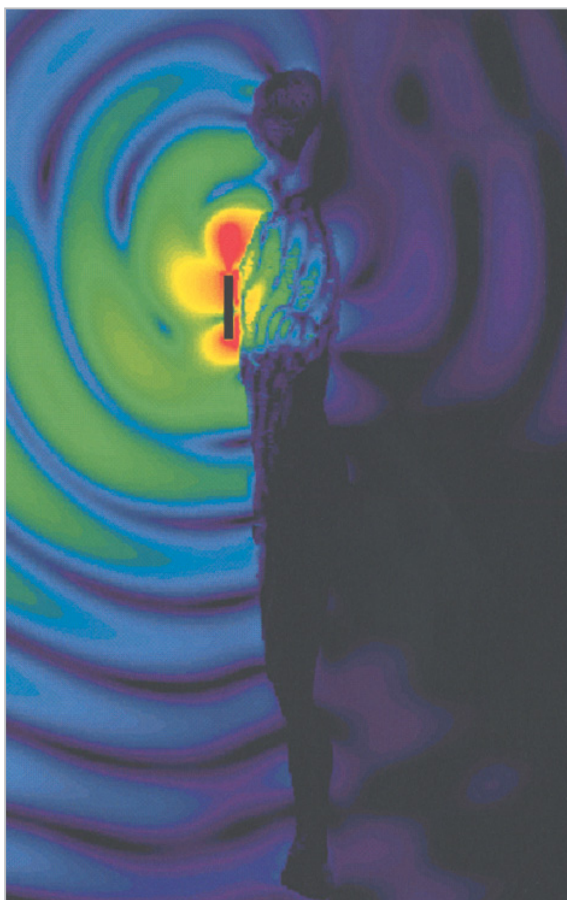


図 12 全身数値モデル(男性)の胸前面の携帯電話による電界強度分布 周波数 900-MHz

までに赤外線カメラを用いた温度測定に基づく SAR 評価の高精度化に関する検討を進めている [25]。

人体頭部の局所 SAR 測定に使用する液体ファントムは、これまで水を主剤としたものが利用

されている[4]。しかし、水が蒸発することにより電気的特性が変化するため、より長期安定性に優れた液剤の開発が必要とされている。現在、我々は簡易に製作が可能であり、かつ安定性に優れたファントム液剤の開発及び液体の電気定数測定法を開発を進めている。

5 まとめ

近年の電波の人体健康影響に対する一般公衆の関心の高まりに対し、電磁環境グループでは 1997 年から生体電磁環境に関する研究を本格的に開始している。生体電磁環境に関する研究は、規格・測定法に関連するテーマと生物実験に関連するテーマに大別され、本稿ではこれらの研究の概略を述べた。

規格・測定法関連では、携帯電話使用時の頭部 SAR 測定における頭部ファントムサイズの効果、VHF 帯における足首 SAR 評価の基礎検討として様々な接地条件下での足首 SAR 特性の評価等が行われている。生物実験関連では、様々な生物実験に最適化された曝露装置の開発と実験動物の詳細な曝露評価等が行われている。いずれの研究も高精度な曝露評価が必要であり、そのための高精度ファントムの開発等も進められている。

これらの研究成果が防護指針の適切な運用体制の構築及び防護指針の根拠の信頼性の向上に貢献し、適正かつ安全な電波利用環境が実現できるものと期待される。

参考文献

- 1 電気通信技術審議会答申“電波防護指針(諮問第 38 号)”, 1990.
- 2 電気通信技術審議会答申“電波利用における人体防護の在り方(諮問第 89 号)”, 1997.
- 3 S. Watanabe, S. Mochizuki, H. Shirai, M. Taki, and Y. Yamanaka, "Specific absorption rates in head phantoms of different shape and size for cellular telephone use", Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'01), K7-03, p. 272, 2001.
- 4 電気通信技術審議会一部答申“携帯電話端末等に対する比吸収率の測定法 - 人体側 頭部の側で使用する携帯電話端末等に対する比吸収率の測定方法の策定 -(諮問第 118 号)”, 2000.
- 5 S. Watanabe, H. Wakayanagi, T. Hamada, M. Taki, and Y. Yamanaka, "The peak specific absorption rate in a human head that has an earlobe exposed to microwave from a cellular telephone", XXVIth General Assembly of the international union of radio science, KA.6, p. 847, 1999.
- 6 S. Mochizuki, S. Watanabe, M. Taki, Y. Yamanaka, and H. Shirai, "Effect of hand holding a cellular phone

- on the SAR distribution in the head", Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'01), PK7-06, p. 415, 2001.
- 7 S. Watanabe, Y. Akiyama, R. Ishikawa, H. Asou, and Y. Yamanaka, "Measurement of specific absorption rates caused by hand-held amateur radio communication devices", Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'01), PK7-05, p. 415, 2001.
 - 8 S. Watanabe, Y. Akiyama, R. Ishikawa, and Y. Yamanaka, "Tissue-equivalent liquid for experimental estimation of local SAR caused by hand-held amateur radio communication devices", Proceedings of the 2000 International Symposium on Antennas and Propagation, Vol.1, pp. 241-244, 2000.
 - 9 S. Watanabe, Y. Nakamoto, M. Takahashi, M. Taki, and Y. Yamanaka, "Measurement method of the foot current of a human body exposed to VHF electromagnetic waves", 5th International Congress of the European BioElectromagnetic Association (EBEA 2001), pp.328-329, 2001.
 - 10 O. P. Gandhi, I. Chatterjee, D. Wu, and Y. G. Gu, "Likelihood of high rates of energy deposition in the human legs at the ANSI-recommended 3-30 MHz RF safety levels", Proc. IEEE, Vol. 73, pp. 1145-1147, 1985.
 - 11 宇野, "FDTD法による電磁界及びアンテナ解析", コロナ社, 1998.
 - 12 Y. Kamimura, T. Shimizu, Y. Yamada, S. Watanabe, and Y. Yamanaka, "Human body impedance for contact hazard analysis in the LF and HF band", 5th International Congress of the European BioElectromagnetic Association (EBEA 2001), pp. 326-327, 2001.
 - 13 渡辺, 多氣: "携帯電話の *in vivo* ばく露装置と動物実験", 信学論(B), Vol. J84-B, No. 1 pp. 19-28, 2001. 解説論文: 「携帯電話のEMC」解説論文小特集.
 - 14 K. Wake, S. Watanabe, Y. Yamanaka, J. Wang, O. Fujiwara, and M. Taki, "Development of exposure systems for animal experiments in Japan", WHO Meeting of EMF Biological Effects and Standard Harmonization in Asia and Oceania WHO, p. 114, 2001.
 - 15 J. Wang and O. Fujiwara, "FDTD computation of temperature-rise in the human head for portable telephones", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. 47, No. 8, pp. 1528-1534, 1999.
 - 16 K. Imaida, M. Taki, T. Yamaguchi, T. Ito, S. Watanabe, K. Wake, A. Aimoto, Y. Kamimura, N. Ito, and T. Shirai, "Lack of promoting effects of the electromagnetic near-field used for cellular phones (929.2 MHz) on rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay", Carcinogenesis, Vol. 19, No. 2, pp. 311-314, 1998.
 - 17 K. Imaida, M. Taki, S. Watanabe, Y. Kamimura, T. Ito, T. Yamaguchi, N. Ito, and T. Shirai, "The 1.5 GHz electromagnetic near-field used for cellular phones does not promote rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay", Jpn. J. Cancer Res., Vol. 89, pp. 995-1002, 1998.
 - 18 G. Tsurita, H. Nagawa, S. Ueno, S. Watanabe, and M. Taki, "Biological and morphological effects on the brain after exposure of rats to a 1439 MHz TDMA field", Bioelectromagn., Vol. 21, No. 5, pp. 364-371, 2000.
 - 19 H. Yamaguchi, G. Tsurita, S. Ueno, S. Watanabe, M. Taki, and H. Nagawa, "Effects of exposure to high-frequency electro-magnetic waves on rat reference memory in a T-maze task", Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'01), K4-04, p. 264, 2001.
 - 20 丸山, 和氣, 渡辺, 多氣, "細胞用マイクロ波ばく露装置の開発に関する検討", 2001 信学ソ大 通信〇社 電子情報通信学会, B-4-10, p. 243, 2001.
 - 21 M. Burkhardt, Y. Spinelli, and N. Kuster, "Exposure setup to test effects of wireless communications systems on the CNS", Health Phys., Vol. 73, No. 5, pp. 770-778, 1997.
 - 22 王, 藤原: "携帯電話に対する頭部のドシメトリ評価", 信学論(B) Vol. J84-B, No. 1, pp. 1-10, 2001. 解説論文: 「携帯電話のEMC」解説論文小特集.

- 23 F. Schoenborn, M. Burkhardt, and N. Kuster, "Differences in energy absorption between heads of adults and children in the near field of sources", Health Phys., Vol. 74, No. 2, pp. 160-168, 1998.
- 24 P.J. Dimbylow Ed., "Voxel Phantom Development" National Radiological Protection Board (NRPB), 1995.
- 25 加賀谷, 渡辺, 和氣, 河井, 宇野, 高橋, 山中, 伊藤, "温度上昇に基づく SAR 推定誤差のファントム形状・媒質 への依存性" 信学技報, EMCJ2000-111, pp.61-66, 2000.



わた なべ そう いち
渡辺 聡一

無線通信部門 横須賀無線通信研究センター主任研究員 博士(工学)
生体電磁環境
wata@crl.go.jp



わ け か な こ
和氣 加奈子

無線通信部門 横須賀無線通信研究センター研究員 博士(工学)
生体電磁環境
kana@crl.go.jp



ふ く な が かお り
福永 香

無線通信部門 横須賀無線通信研究センター主任研究員 博士(工学)
生体電磁環境、EMC 材料
kaori@crl.go.jp



や ま な か ゆ き お
山中 幸雄

無線通信部門 横須賀無線通信研究センター電磁環境グループリーダー
電磁環境
yama@crl.go.jp