

# 人体に対する電磁界・熱混成解析技術の研究開発（082106001）

## Study on Electromagnetic and Thermal Computational Techniques for Humans

### 研究代表者

平田 晃正 名古屋工業大学  
Akimasa Hirata Nagoya Institute of Technology

研究期間 平成 20 年度～平成 22 年度

### 概要

現在の電波防護ガイドラインでは、電力吸収量が安全性の指標として用いられているが、電波の生体への支配的影響は電力吸収に伴う体内温度上昇である。電波防護ガイドラインの科学的根拠の更なる明確化が求められている今日、また、今後の電波利用の多様化、高周波化に対応するためにも、人体の熱生理を考慮でき、かつ高分解能に電力吸収に伴う温度上昇を評価する解析手法の開発が急務であった。本研究開発では、高分解能人体モデルに対しても有用な電磁界・熱混成解析モデルを開発し、その解析技術を用いて得られた知見により、GHz 帯における電波防護ガイドラインへの貢献を行った。

### Abstract

Much attention has been paid to further clarification of scientific rationale of international guidelines. The dominant factor inducing biological effect due to radio-waves is the temperature elevation while power absorption is used as a metric in the international guidelines. In this study, an electromagnetic-thermal computational technique was developed for high-resolution anatomically-based human models. The feature of this technique is that it can take into account the thermoregulatory response of the human. Dosimetry has been conducted for different exposure scenarios to correlate power absorption and temperature elevation.

### 1. まえがき

無線通信の急速な普及に伴い電波が幅広く用いられるようになった一方、その生体への影響に関心が注がれている。そのため、無線通信機器の設計および運用に際しては、電波電力の吸収量を定量評価し、安全性の根拠を明確にすることが望まれる。ここで、国際電波防護ガイドライン／規格では、安全性の指標として単位質量あたりの吸収電力である SAR（比吸収率）が用いられているが、電力吸収に伴う支配的な影響は体内温度上昇（熱作用）に伴うものであるとされている。

電波防護指針の科学的根拠の更なる明確が求められている今日、人体の熱生理を考慮でき、かつ高分解能に電波吸収に伴う温度上昇を評価可能なモデルを構築することが急務となる。本研究開発では、人体に対する電磁界・熱混成解析手法を構築し、それを諸問題に適用することにより、電波防護ガイドライン策定に有用な知見を与えることを目的とした。

### 2. 研究内容及び成果

#### 2. 1. 数値解析の高精度化、高速化

電磁界解析手法として、Finite-Difference Time-Domain(FDTD)法を用いる。まず、FDTD 法により得られた吸収電力分布を求める。得られた吸収電力を発熱源とし、生体に対する熱輸送方程式を解くことにより、体内温度の時間変化を解析した。なお、生体における熱輸送では血液循環が重要な役割を果たす。誌上発表[1]において、生体における熱保存則が満たされるように血液温度を求める方法を提案し、その有効性を確認している。また、誌上発表[2]において、簡易的かつ高速に実装する方法を提案している。以下の解析例では、本研究で開発した方法を用いて得られた結果である。

#### 2. 2. 皮膚における血流の測定

OMEGAWAVE 社のレーザー血流計(FLO-C1 TWIN

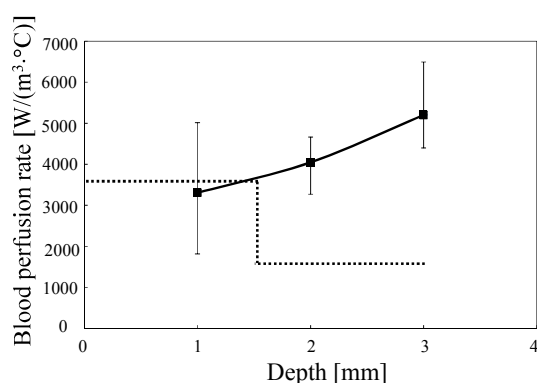


図 1. 人体頭部における血流量の深度変化

C1A303-C1A304)を用い、人体頭部の血流量を測定した。ここで、測定部位はこめかみ部分とした。これは解析において携帯電話等による頭部の局所ばく露を模擬すること、また、頭髮が存在せず血流計のセンサを直接肌に接触させることが可能であるためである。測定対象は、成人男性のボランティア（22～24 歳）12 人とした。また、測定の深度は、皮膚表面から深度 1mm、2mm、3mm の 3 つの深度で測定を行った。測定時間は各深度につき 5 分間とし、測定結果が最も安定した 1 分間の値を時間平均したもの、被験者の血流量とした。

図 1 は測定の深度ごとに血流定数の平均値を四角で示し、エラーバーで最大値、最小値を、先の報告 (McIntosh and Anderson, 2010) に示された血流定数の値を点線で表している。ここで、文献による血流定数の値は皮膚（厚さ 1.5mm）で 3687[W/m³·°C]、脂肪（厚さ 1.5mm）で 1626[W/m³·°C]である。文献値と測定による平均値を比較すると、皮膚における血流定数はほぼ同程度の値となったのに対し、脂肪では 2 倍以上の差が生じた。また、測定深度 1mm においては、測定平均値より±50%の差がみられるなど、個人差によりばらつきがあることがわかった。

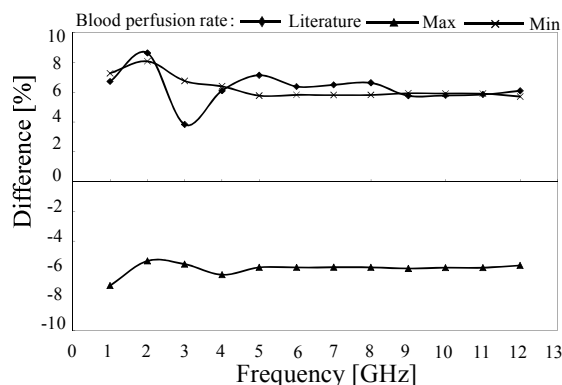


図2 血流定数による最大温度上昇のばらつき

## 2. 3. 血流量のばらつきによる最大温度上昇値の差異

本解析では、基礎検討として、人体頭部を模擬した多層直方体モデルを用いた。これは、モデル形状ではなく、血流量による影響のみを議論するためである。モデルの寸法は、縦 200mm、横 200mm、厚さ 70mm とし、表面より皮膚(1.5mm)、脂肪(1.5mm)、筋肉(2.5mm)、頭蓋骨(4.5mm)、硬膜(1.0mm)、脳脊髄液(1.0mm)、脳(残りの部分)から構成される。アンテナはモデル表面から 25mm 離れた位置に配置し、解析を行う周波数範囲は 1GHz から 12GHz までとした。ここで、アンテナの長さは各周波数においておよそ半波長となるようにした。また、アンテナの出力電力が 1W となるように規格化を行った。血流量のばらつきによる頭部内温度上昇の影響を考察するため、血流定数に測定値の平均値を用いた際の最大温度上昇値を基準(0%)として、その他の血流定数を用いた場合との差異を求めた。結果を図2に示す。図より、差異が最大となるのは、2GHzにおいて血流定数に文献値を用いた際の+9%、1GHzにおいて血流定数に最大値を用いた際の-8%であった。このことから、血流量は頭部内温度上昇に与える支配的要因の一つとして挙げられているものの、平均的な血流定数を基準とした場合、血流定数の個人差によるばらつきは±10%以内であることがわかった。

## 2. 4. 3-10GHzにおける数値ドシメトリ

詳細な人体頭部モデルから 12mm のところに無線通信アンテナを模擬したダイポールアンテナを配置した。このばく露状況に対して、FDTD 法により生体内に吸収される電力量である SAR および温度上昇を解析した。一例として、3GHz で解析した例を図3に示す。図より、両者の関係は線形ではない。これは、吸収された電力は、生体組織内で拡散されるためである。

研究代表者らは、より低周波数帯において SAR を有限質量にわたり平均化した値と温度上昇の間にはよい相関がみられることを報告している。この相関が成立する上限周波数を検討するために、以下の加温係数  $a$  を指標として用いることとする。つまり、SAR が温度上昇を予測する良い指標であるならば、人体頭部モデルの各セルにおいて、式(1)で示す関係が成り立つはずである。

$$\Delta T = a \cdot SAR_{avg} \quad (1)$$

電波の浸透深さは周波数により異なること、また、図3(a)よりわかるように、アンテナから離れた位置では吸収電力は極めて小さいことから SAR の最大値に比べて SAR が 1/100 以内の各セルに対して、最小二乗法により平均加温係数  $\Delta T/SAR_{avg}$  および決定係数を求めた。その結果、6GHz

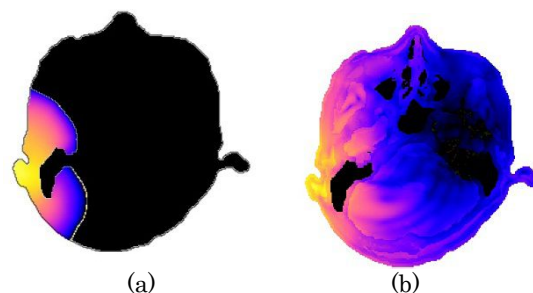


図3 3GHz ダイポールアンテナによる(a)SAR 分布および(b)温度上昇分布

までの周波数においては、平均化質量を 8-30g とすれば、平均加温係数は周波数にほとんど影響しないことがわかった。一方、上記平均化質量に対して、決定係数は 3GHz までの周波数では 0.9 以上と極めて良好な相関が観測されるものの、3GHz 以上では徐々に小さくなり、6GHz では 0.7 となった。これは、平均化質量 (10g、一辺 2.2cm の立方体に相当) に比べ、電波の浸透深さが小さくなるため、相関が低下するものと考えられる。

## 3. むすび

本研究では、高分解能な人体モデルに対して有用な電磁界・熱混成解析手法を提案し、その有効性を確認した。また、開発した解析手法を用いて、ドシメトリを実施し、特に 1-6GHz において既存の安全性評価指標の有用性と限界について明らかにした。得られた結果は、世界保健機構(WHO)による文書に引用されるなど、我が国における電波防護指針の策定に寄与することが期待される。

### 【参加国際標準会議リスト】

- [1] IEEE ・ International Commission on Electromagnetic Safety, Silver Spring (USA)、2010 年 1 月 15-16 日
- [2] IEEE ・ International Commission on Electromagnetic Safety, Seoul (Korea)、2010 年 6 月 11-12 日

### 【誌上発表リスト】

- [1] A. Hirata and O. Fujiwara, "Modeling core temperature variation in the bioheat equation and its application to temperature analysis due to RF exposure," *Physics in Medicine and Biology*, pp.186-196 (2009 年 5 月)
- [2] A. Hirata, H. Sugiyama, and O. Fujiwara, "Estimation of core temperature elevation in humans and animals for whole-body averaged SAR," *Progress in Electromagnetic Research*, vol.99, pp.221-237, (2009 年 12 月)
- [3] A. Hirata and O. Fujiwara, "Correlation between mass-averaged SAR and temperature elevation in human head model exposed to RF near-fields from 1 to 6 GHz," *Physics in Medicine and Biology*, vol.54, pp.7227-7238 (2009 年 12 月)

### 【受賞リスト】

- [1] 藤原修、平田晃正、文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)、“電波に対する数値ドシメトリ技術と人体安全性評価の研究”、2011 年 4 月 11 日