

眼球内におけるホットスポットの生成

牛尾 剛†(学生員) 平田 晃正†(学生員)

塩沢 俊之†(正員)

Formation of Hot Spots in the Human Eye

Gou USHIO†, Akimasa HIRATA†, Student Members,
and Toshiyuki SHIOZAWA†, Member

† 大阪大学大学院工学研究科, 吹田市

Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita-shi,
565-0871 Japan

あらまし 眼球に正面から平面波を入射した場合の眼球内 SAR (Specific Absorption Rate) 分布を調べる。特に、特定の周波数領域で発生するホットスポット現象について詳細に調べ、その発生メカニズムについて議論する。解析の結果、ホットスポット現象は、主に電磁波の共振現象に起因し、周波数によりその場所、個数が変化することがわかった。

キーワード FDTD 法, 眼球, ホットスポット, 共振現象

1. まえがき

近年、電磁波が人体に与える影響に大きな関心が寄せられている(解説論文[1]参照)。とりわけ、眼球は熱を運ぶ血流が存在せず、更に皮膚により保護されていないため、電磁波による熱効果が特に懸念されている[2]~[4]。また、眼球は球状のため、特定の周波数領域でホットスポットが発生することが知られている[5]。ここでホットスポットとは、人体表面よりも内部に電力吸収の強い場所がスポット状に現れる現象のことである。しかしながら、眼球中におけるホットスポット現象について詳細に調べた報告はなされていない。そこで本論文では、FDTD 法を用いて、眼球内における平均 SAR の周波数特性及びホットスポット現象について調べる。特に、ホットスポット現象の発生メカニズムについて詳しく検討する。

2. 解析モデルと手法

2.1 解析のモデル

本論文で解析の対象となる周波数領域は、眼球内でホットスポット現象が発生するとされている 1~3 GHz を含む、700 MHz~6.0 GHz とする。解析のモデルとしては、眼球及びその周辺部のみからなる局所的なものを考える。このモデルの単純化は、人体頭部が共振現象[6]を起こさない約 400 MHz 以上の周波数領域で妥当である。眼球モデルは、インターネットサイト“Visible Human Project”から得た MRI (Magnetic

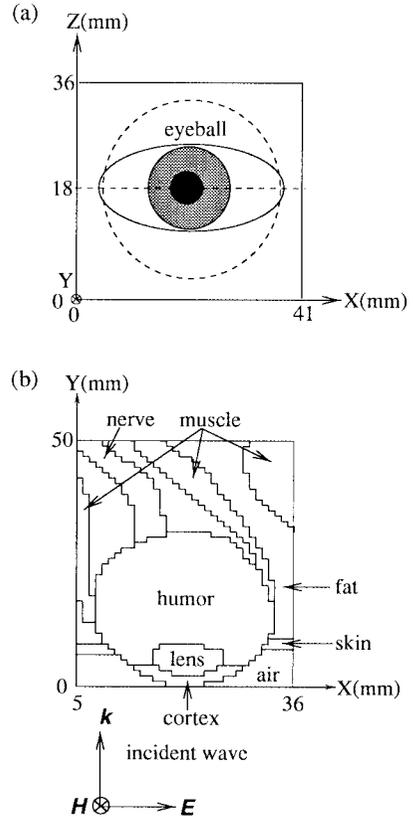


図1 解析のモデル: (a) 眼球モデルと座標系, (b) 眼球付近の水平方向断面図 ($z = 18.0\text{ mm}$)

Fig. 1 Geometry of the problem: (a) front view of the human eye with the coordinate system, (b) top view around the eyeball (at $z = 18\text{ mm}$).

Resonance Imaging) 画像をもとに作成する。ここで、これらの画像を FDTD 法で用いるためには、画像をセルに分割する必要がある。FDTD 法において正確な解を得るには、セル長を系内の最低波長の 10 分の 1 程度になるように定めればよいことが知られている。この条件を厳密に満たすためには、6.0 GHz において、1 辺が約 0.75 mm の長さのセルを用いる必要がある。しかしながら、セル長を 1.0 mm として解析した場合でも、Mie の厳密解 [7] とよい一致が得られている [8]。そこで本論文では、1 辺が 1.0 mm の立方体状のセルを用いる。

以上により得られた眼球モデルを図 1 に示す。図 1 は、(a) 眼球モデルと座標系, (b) $z = 18\text{ mm}$ における水平方向断面図を示したものである。また、得られ

たモデルは、体積 10.9 cm^3 であり、質量 11.0 g に相当する。

また、FDTD 法で開放領域の問題を取り扱う場合には、解析領域を吸収境界と呼ばれる仮想的な境界で閉じておく必要がある。現在までに様々な吸収境界（文献 [9] 第 7 章参照）が提案されているが、本論文では、精度が良く、実装が比較的容易な Berenger の PML (Perfectly Matched Layer) 吸収境界を用いる。

2.2 組織の電気的特性

前節で、角膜、レンズ、体液（ガラス体）、皮膚、骨、筋肉、脳、脂肪、神経の 9 種類の組織からなる眼球モデルを作成した。これらの組織を FDTD 法に組み込む際、それらの物質定数を知る必要がある。ここで、人体組織の物質定数は、周波数に強く依存する。本論文では、各周波数に対する物質定数を 4-Cole-Cole 推定法を用いて決定した [10]。

2.3 入射波源

本論文では、入射波源として水平偏波の平面波を用いる。平面波の電力密度は、職業人に対して適用される MPE (Maximum Permissible Exposure) [11], [12] である 5.0 mW/cm^2 とする。そして、この平面波を眼球正面から入射する（図 1 参照）。

3. 解析結果

図 2 に、眼球全体及び体液の平均 SAR 値の周波数特性を示す。図 2 から、平均 SAR は双方とも 1.9 GHz 付近で最大となることがわかる。これは、この周波数

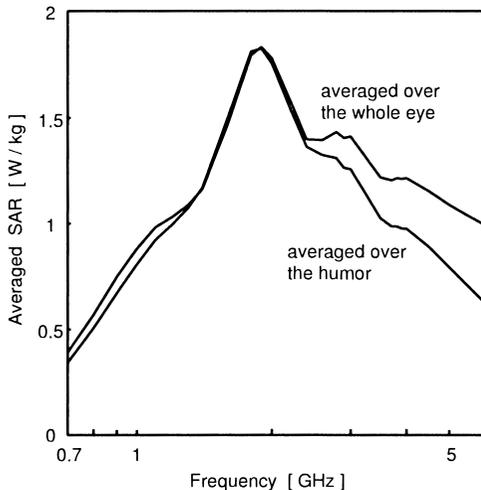


図 2 平均 SAR の周波数依存性

Fig. 2 Dependence of the averaged SARs on the frequencies of the incident wave.

において眼球が共振構造になっていることを示す。同様に、2.8, 3.8 GHz でも小さなピークをもつ。これらの周波数は、眼球の高次共振周波数に対応している。また、4 GHz よりも高い周波数領域では、周波数が高くなるにつれ、眼球全体の平均 SAR と体液の平均 SAR の差が大きくなっている。これは、周波数が高くなるにつれ、人体組織の導電率が高くなり [10]、電磁界が眼球内部まで浸透しないためである。このため、3.8 GHz よりも高い周波数領域で共振現象は見られなかった。

次に、得られた平均 SAR を指針値 [11], [12] と比較する。平均 SAR が最大となるのは、上記のように 1.9 GHz の場合である。この場合、10 g 当りの平均 SAR は約 1.8 W/kg であり、指針値 10 W/kg よりも十分小さい。ここで、10 g 当りの平均 SAR として、眼球全体の平均 SAR (11.0 g) を用いた。このことから、職業人に適用される MPE の電力密度レベルでは、眼球内にホットスポット現象が生じた場合でも、眼球内の SAR 値が指針値より大きくなることはないことがわかった。

更に、図 3 に共振周波数 1.9 GHz 及び 2.8 GHz における水平方向断面 ($z = 18 \text{ mm}$) の SAR 分布を示

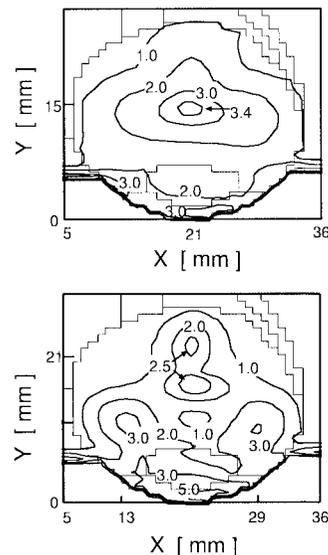


図 3 水平断面 ($z = 18 \text{ mm}$) における SAR 分布: (a) 1.9 GHz, (b) 2.8 GHz (SAR の単位は W/kg)

Fig. 3 SAR distributions on the horizontal cross section ($z = 18 \text{ mm}$) at (a) 1.9 GHz and (b) 2.8 GHz (SARs have the unit of W/kg).

す。ここで、3.8 GHz においては、上述のように組織の導電率が高いため、明確なホットスポットは観測されなかった。そのため、その SAR 分布は示さない。(a) から明らかなように、1.9 GHz では、体液中央部付近 ($x = 20 \text{ mm}$, $y = 15 \text{ mm}$) でホットスポットが存在することがわかる。一方、(b) から、2.8 GHz においては、三つのホットスポット ($(x, y) = (13, 12)$, $(29, 12)$, $(21, 21)$; 単位は [mm]) が存在することがわかる。ここで、仮にホットスポットが文献 [4] で述べられているように電磁波の集束効果によるものとするれば、 $x = 13 \text{ mm}$, $y = 12 \text{ mm}$ 及び $x = 29 \text{ mm}$, $y = 12 \text{ mm}$ の 2 点の位置でホットスポットは発生しないはずである。これらの 2 点は定在波により生じたものであり、これらの位置はその腹の部分に相当する。このことから、ホットスポット現象は共振現象と密接に関係があるといえる。また、 $x = y = 21 \text{ mm}$ 付近におけるホットスポットは、その中に二つのピークが存在している。これは共振現象とともに、集束効果も影響している。

最後に、ホットスポット現象が観測される周波数領域について議論する。本論文で解析したモデルでは、明確なホットスポットが 1.4~3.5 GHz の周波数領域で観測された。この周波数領域は、電磁波の波長と眼球の大きさが同程度であり、かつ組織の導電率がそれほど大きくない範囲を意味する。つまり、眼球が準共振構造になりうる範囲である。ただし、この範囲は、眼球の構造により若干変化すること、つまり個体差があることに注意しなくてはならない。

4. む す び

本論文では、眼球に正面から平面波を入射した場合の、平均 SAR の周波数特性及び眼球内 SAR 分布を調べた。特に、眼球内ホットスポット現象について詳細に議論した。その結果、まず、眼球はある周波数で共振構造となることがわかった。また、眼球内におけるホットスポット現象とは、電磁波の共振現象と密接な関係があることがわかった。更に、ホットスポットは周波数により位置、個数が変化することが明らかとなった。

謝辞 本研究に関し有益な御討論を頂いた堅山貴弘氏、中川 健氏 (大阪大学大学院工学研究科) に深謝

する。

文 献

- [1] M.A. Stuchly, "Biomedical concerns in wireless communications," Crit. Rev. Biomed. Eng., vol.26, pp.117-151, 1998.
- [2] A. Taflove and M.E. Brodwin, "Computation of the electromagnetic fields and induced temperatures within a model of the microwave-irradiated human eye," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.23, no.11, pp.888-896, Nov. 1975.
- [3] O. Fujiwara and A. Kato, "Computation of SAR inside eyeball for 1.5-GHz microwave exposure using finite-difference time-domain technique," IEICE Trans., vol.E77-B, no.6, pp.732-737, June 1994.
- [4] P. Bernardi, M. Cavagnaro, and S. Pisa, "Assessment of the potential risk for humans exposed to millimeter-wave wireless LANs: The power absorbed in the eye," Wire. Net., vol.3, pp.511-517, 1997.
- [5] H.P. Schwan, "Microwave and RF hazard standard considerations," J. Microwave Power, vol.17, pp.1-9, 1982.
- [6] A.D. Tinniswood, C.M. Furse, and O.P. Gandhi, "Power deposition in the head and neck of an anatomically based human body model for plane wave exposures," Phys. Med. Biol., vol.43, pp.2361-2378, 1998.
- [7] J.R. Mautz, "Mie series solution for a sphere," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.26, p.375, 1978.
- [8] O.P. Gandhi, Y.G. Gu, J.Y. Chen, and H.I. Bassen, "SAR and induced current distributions in a high-resolution in anatomically based model of a human for plane-wave exposures 100-915 MHz," Health Phys., vol.63, pp.281-290, 1992.
- [9] A. Taflove, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, Dedham, MA, 1995.
- [10] C. Gabriel, "Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies," Final Technical Report Occupational and Environmental Health Directorate, AL/OE-TR-1996-0037, Brooks Air Force Base, TX: RFR Division.
- [11] 郵政省電気通信技術審議会答申, 諮問第 89 号, 電波利用における人体の防護指針, 1990.
- [12] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) Prestandard ENV 50166, Human exposure to electromagnetic fields. High frequency (10 kHz to 300 GHz), Jan. 1995.

(平成 11 年 2 月 23 日受付)