

電磁波曝露による解剖学的リアル人体モデルを用いた人体防護の研究

代表研究者 西 澤 振一郎 青山学院大学 理工学部電気電子工学科
 共同研究者 橋 本 修 青山学院大学 理工学部電気電子工学科
 〃 荒 木 純 道 東京工業大学 工学部情報工学科

1 はじめに

近年の情報通信技術は、高周波電磁波を利用した携帯通信機器のみならず、電灯線搬送通信等で利用される低周波を利用した通信技術も普及している。このような通信技術の普及に伴い、公衆の間で電磁波による人体影響の関心が広まり、電磁波と生体影響の関係は世界的に大きな社会問題となっている。このため、電磁波曝露による人体影響の解明や、その防護策は、現社会において強く要求されていると共に、必要不可欠であることは言うまでもない。

一方、欧州標準委員会（CENELEC）は、これまで標準化されていなかった電気機器の低周波曝露に対する標準測定法を定める委員会を7年程前から発足しており、この委員会を柱に、欧州では様々な低周波ドシメトリに関する研究が行われてきた。また、日本も加盟している国際電気標準委員会（IEC）も、CENELEC をきっかけに動きが活発になっており、IEC-TC106 の国内委員会でも、それらに対する対応で躍起になっている。また、電気学会でも「電磁界による体内誘導電界・電流調査専門委員会」が立ち上がり、国内外の研究調査をまとめて、この分野の研究の効率化を図ろうとしている。本研究は、CENELEC（TC-106x: EN-50366）における標準化に関する技術の開発元となっている STUTTGART 大学（ドイツ）と共同研究により、各種電気機器の漏洩磁界曝露と同一条件となる、高精度な磁界曝露を可能とする等価磁界ソースモデルの研究開発を行ってきた。このソースモデルは、これまで世界的に例が無い上、この等価磁界ソースモデルを用いた曝露評価手法が CENELEC において、標準曝露評価手法の一つとして採用された経緯を有する。

2 研究目的

日常生活において我々が使用している電気機器には、ICNIRP（国際非電離放射線防護委員会）のガイドライン^[1]で設定されている ELF（Extremely Low Frequency）電磁界の曝露基準値を超える大きな磁束密度を発生するものが存在する。このような電気機器に対しては、ICNIRPでは詳細な誘導電流に対する検討の必要性が示唆されているため、人体モデルを用いた誘導電流の定量評価に関する研究が種々行われている。

電気機器に対する従来の生体曝露量評価には、電気機器を数値モデル化して曝露条件を直接再現することが困難であるため、電気機器からの磁界を表現する様々な磁界ソースモデルが用いられている。広く用いられている磁界ソースモデルには、ループアンテナ等の近似ソースモデルがある^{[2][3]}。しかしこれらのモデルでは、入力レベルを距離毎に調整しなければならない事や、正確な曝露状態の再現が困難等の問題を有している。また、電気機器表面の測定磁界強度から機器内部の磁流源を解析的に求め、曝露評価に応用する高度なソースモデルも存在する^[4]。しかしこのモデルにおいても、モータの回転によって生じる場合がある磁界偏波が考慮されない等の問題があり、今後、より正確な曝露評価を可能とする磁界ソースモデルの開発が重要となっている。

我々はこれまで、電気機器周辺の測定磁界と等価な磁界分布となる磁気モーメントを数値解析的に求め、これを等価磁界ソースモデルとして用いる手法を提案した^[5]。本手法では、磁界は時間領域で測定することから磁界偏波も考慮される特徴を有しており、文献^[5]では本手法の有効性を理論的に確認した内容を示した。本研究ではこれをさらに進め、実際の電気機器を用いた場合の本手法の有効性を確認した。以下、その詳細について報告する。

3 測定システム

電気機器周囲磁界の振幅および位相は、3次元測定システム“3D-Scan”^[6]を用いて計測した。図1にその様子を示す。この測定システムは、ロボットアーム、ターンテーブル、およびこれらの制御用パーソナルコンピュータから構成されている。ここで測定では、電気機器（DUT: Device Under Test）を囲む空間中に任意の仮想形状（円柱等）を設定し、その表面上の磁界を測定している。

図2は、ロボットアーム先端に接続されている磁界プローブを示しており、本プローブは直径2 cm からなる3軸等方のループプローブから構成されている。ここで磁界の直交三成分は時間領域で測定しており、それぞれDFTにより周波数領域に変換している。なお測定周波数範囲は5Hz～33KHzであり、一般の家電製品等に用いられているモータの回転周波数を覆っている。このように本測定は時間領域で行っているため、磁界偏波の情報は位相の計測結果に反映される。

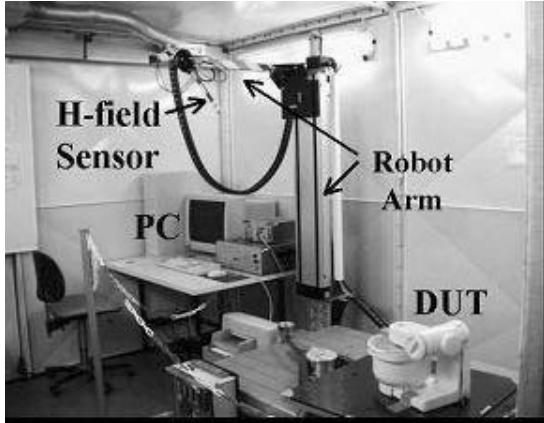


図1：3D-Scan 測定システム

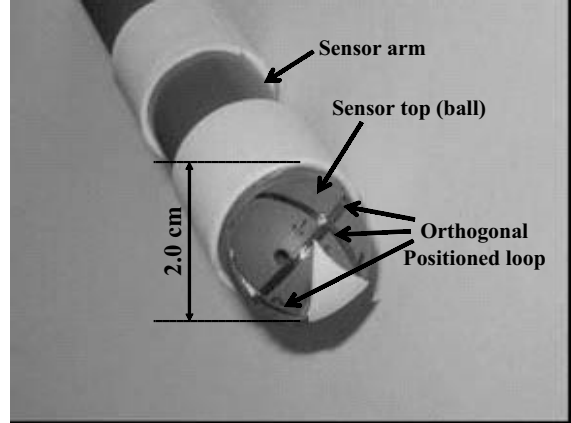


図2：磁界ループセンサー

4 等価磁界ソースモデル

本研究で提案した、磁気ダイポールモーメントから構成される等価磁界ソースモデルは、図3に示される3段階により作成される。第1ステップでは、上述した測定システムによりDUTを囲む空間中に設定した仮想形状表面の磁界（一般に50Hz）を測定する。本研究では、演算プログラムの関係から測定する仮想形状には円柱を選択した。第2ステップでは、測定された仮想円柱表面上の磁界から数値解析的に磁気ダイポールモーメントを算出する。一般に、位置 $(\vec{r}-\vec{r}_0)$ に配置された磁気ダイポールモーメント $\vec{m}(\vec{r}-\vec{r}_0)$ による位置 $(\vec{r})$ における磁界 $\vec{H}_d(\vec{r})$ は(1)式で表される。一方、複数 (N) 個の磁気ダイポールモーメント $\vec{m}_i(\vec{r}-\vec{r}_{0,i})$ による磁界 $\vec{H}_{all}(\vec{r})$ は(2)式で表される。ここで本研究では、 $\vec{H}_{all}(\vec{r})$ が測定された仮想円柱表面上の磁界であり、 $\vec{m}_i(\vec{r}-\vec{r}_{0,i})$ が数値解析的に求める磁気ダイポールモーメントである。また(3)および(4)式に示したように、 $\vec{H}_{all}(\vec{r})$ および $\vec{m}_i(\vec{r}-\vec{r}_{0,i})$ は位相項を有していることから、DUTの偏波特性は測定磁界の位相として考慮される。なお、演算には共役勾配法^{[7][8]}を用いている。

$$\vec{H}_d(\vec{r}) = -\text{grad} \left(\frac{\vec{m}(\vec{r}-\vec{r}_0)}{4\pi\mu_0|\vec{r}-\vec{r}_0|^3} \right) \quad (1)$$

$$\vec{H}_{all}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N \left\{ -\text{grad} \left(\frac{\vec{m}_i(\vec{r}-\vec{r}_{0,i})}{4\pi\mu_0|\vec{r}-\vec{r}_{0,i}|^3} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\vec{H}_{all}(\vec{r}) = \vec{H}_{all}(\vec{r}-\vec{r}_{0,i}) \cdot \exp(j\varphi_{m_i}) \quad (3)$$

$$\vec{m}_i(\vec{r}-\vec{r}_{0,i}) = \vec{m}_i(\vec{r}-\vec{r}_{0,i}) \cdot \exp(j\varphi_{m_i}) \quad (4)$$

但し、 $\vec{r}$: 観測点, $\vec{r}_0, \vec{r}_{0,i}$: 磁気ダイポール位置, N : 磁気ダイポール総数,

$\varphi_{H_{all}}, \varphi_{m_i}$: 磁界および磁気ダイポールの位相

このようにして得られる磁気ダイポールモーメントは、上式の関係から測定磁界と同じ位置に配置が可能では

ない。このため測定に用いた円柱に比べ、直径が小さい円柱表面に配置した。最終段階では、ドジメトリ解析を行う数値解析シミュレータにおいて、数値人体モデル前面に等価磁界ソースモデルを配置することにより、DUT による近傍曝露評価を行う。

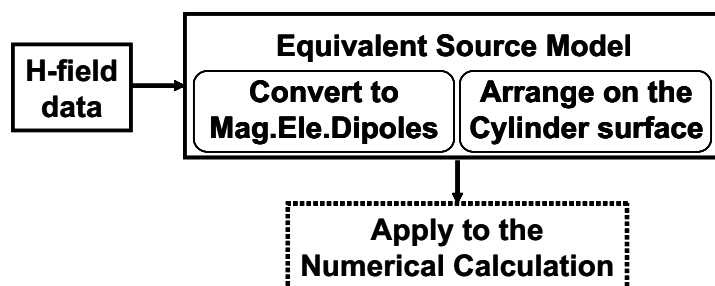


図 3：等価磁界ソースモデルの生成モデル

5 試験モデルおよび結果

本手法の有効性の検討は、図 4 に示す等価ソースモデル（円柱形状：高さ H 、直径 D ）の表面から垂直方向に観測線を設け、測定磁界および等価ソースモデルによる解析磁界を比較することにより行った。電機機器には、一般家庭で広く使用されているヘアードライヤー（ $H=45\text{cm}$ 、 $D=10\text{cm}$ ）およびハンドミキサー（ $H=35\text{cm}$ 、 $D=15\text{cm}$ ）を例として用いた。

なお、電気機器近傍の磁界は不均一性が大きいことから、直径 2cm の磁界ループセンサー内においても磁界分布は一定とならない。このため解析磁界値は、測定に用いたループセンサーと同等の条件となるよう、直交した 3 つのループ面積内の磁界を平均することにより求めた。

図 5(a)と 6(a)はそれぞれ、等価磁界ソースモデルの製作に用いたドライヤーおよびハンドミキサーによる計測円柱面上の測定磁束密度分布 $B(B=\mu_0 H)$ を示している。同様に図 5(b)と 6(b)は、測定および解析による観測線上の磁束密度分布を示している。ここで x 軸はダイポールモーメントを配置した計測円柱表面からの距離（観測線）および、 y 軸は観測線上の磁束密度 $B[T]$ を示している。この結果、測定磁束密度（Measurement）および等価磁界ソースモデルによる解析磁束密度（Calculation）は良好な一致を示し、これより実際の電気機器の測定磁界より構成した等価磁界ソースモデルの有効性が確認できた。しかし等価磁界ソースモデル近傍（ $d=1\text{cm}$ 付近）では、双方の結果に最大 10% 程度の差が観測された。この原因には、計算機のメモリ容量および計算時間によって制限される、円柱表面の磁気ダイポールモーメントの数の少なさ（配置密度の低さ）による誤差が考えられる。また、従来の研究で用いられている近似ソースモデルと比較するため、一例にループアンテナによる磁束密度（Approximated source）を同様に解析した。ここでループアンテナの直径は、測定磁束密度分布において最大値から 40% 程度の範囲の大きさと同程度の 2cm を選択した。またループアンテナの電流は、 $d=1\text{cm}$ における測定磁束密度（Measurement）値と同じになるよう規格し、DUT の中心（仮想円柱の中心）位置に配置した。

ループアンテナと測定値の磁束密度分布を比較すると、ホットスポット領域（最大値から 10% 程度）が小さいハンドミキサーでは比較的に良好な一致が観察されたが、逆にホットスポット領域の大きいヘアードライヤーでは大きな差が観察された。この結果より、等価磁界ソースモデルの磁束密度分布は DUT のホットスポット領域の大きさに依存しないが、ループアンテナではホットスポット領域の大きさに依存する傾向があることから、DUT によっては磁束密度分布に大きな誤差が含まれる可能性があることがわかった。

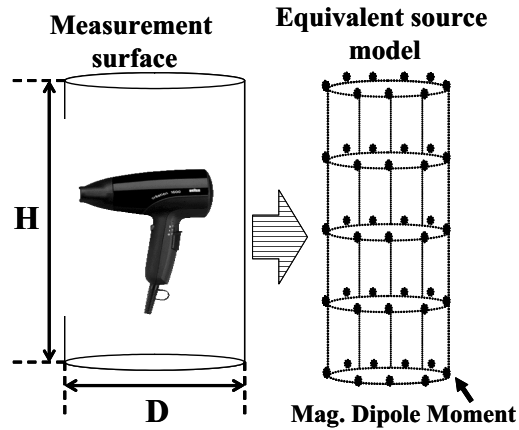


図 4：電気機器および等価磁界ソースモデル

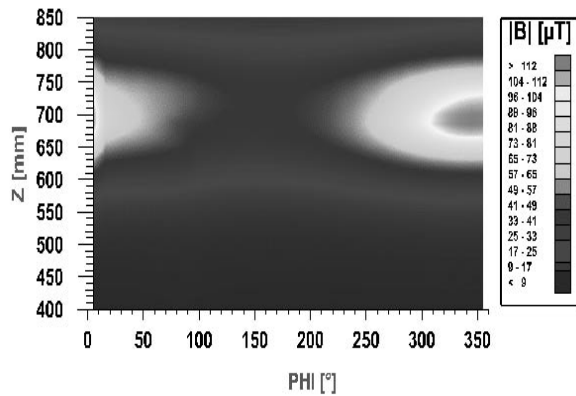


図 5(a)：計測円柱表面上の測定磁束密度分布
(ヘアードライヤー)

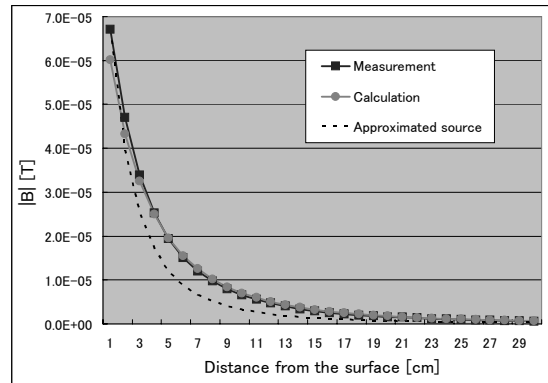


図 5(b)：測定結果および解析結果
(ヘアードライヤー)

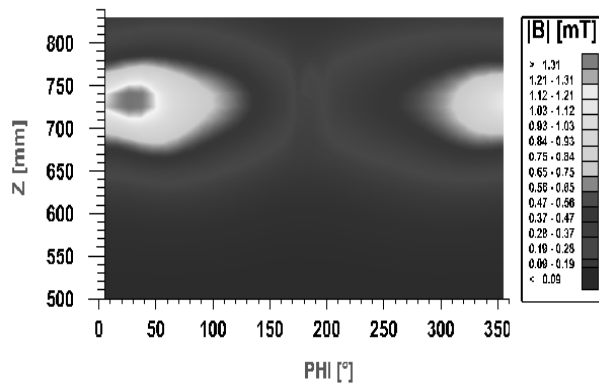


図 6(a)：計測円柱表面上の測定磁束密度分布
(ハンドミキサー)

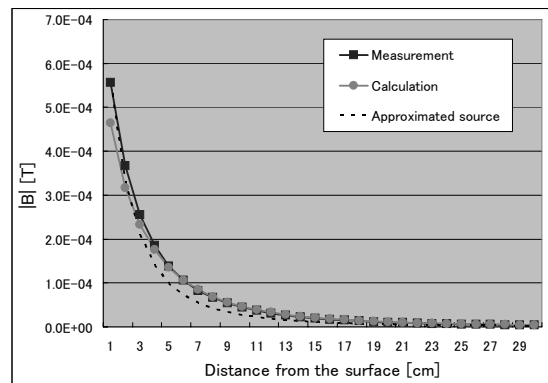


図 6(b)：測定結果および解析結果
(ハンドミキサー)

6 むすび

本報告では、実際の電気機器からの磁界を表す数値ソースモデルとして提案した、等価磁界ソースモデルの有効性を検討した。その結果、実際の電気機器および等価磁界ソースモデルによる電気機器周辺の磁界分布は良好に一致し、等価磁界ソースモデルの有効性を確認できた。この等価磁界ソースモデルを用いて、電気機器による

各種数値人体モデルを用いた近傍曝露解析の検討，防護指針値との比較，各種シールド材を用いた人体防護の検討が，今後の課題である。

参考文献

- [1] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, Health Phys., vol. 41, no. 4, pp. 449-522, 1998
- [2] P. Baraton, B. Hutzler, “Magnetically induced currents in the human Body”, IEC Technology Assessment. pp21-42, 1995
- [3] S. Tofani, P. Ossola, G.d’ Amore and O.P. Gandhi, “Electric Field and Current Density Distributions Induced in an Anatomically-Based Model of the Human Head by Magnetic Fields from a hair Dryer,” Health Physics, vol. 68, no. 1, pp. 71-79, 1995
- [4] 上村佳嗣，小島勝哉，山田芳文： “交流式電気シェーバの磁流源の同定とそれによる頭部内の誘導電流の計”，信学論（B），Vol.J85-B, No.5, pp706-714, 2002.
- [5] S.Nishizawa, H.Ruoss, W.Spreitzer, F.M.Landstorfer and O.Hashimoto, “Induced Current Density in the Human Body using Equivalent Sources for Low-Frequency inhomogeneous Fields,” IEICE Transaction COMMUNICATION, Vol.E84.C, No.10, pp.1612-1614, 2001.
- [6] U. Kampet and W. Hiller, “Measurement of magnetic flux densities in the space around household appliances”, in: Proceedings of NIR 99, Nichtionisierende Strahlung, 31. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Köln, vol. II, pp. 885-891, 1999
- [7] J.R. Shewchuk, “An Introduction to the Conjugate Gradient Method Without the Agonizing Pain”, <http://WWW.cs.cmu.edu/~quake-papers/painless-conjugate-gradient.abstract>, 1994
- [8] T.K. Sarkar, K.R. Siarkiewicz, and R.F. Stratton, “Survey of numerical methods for solution of large systems of linear equations for electromagnetic field problems”, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol.29, no.6, pp.847-856, 1981

〈発表資料〉

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
ELF 帯における等価磁界ソースモデルの実験的検討	電子情報通信学会論文誌 & Techniques	2003年 7 月
Equivalent Source Model for ELF Dosimetry emitted by real household appliances	Proceeding of 25th Bioelectromagnetics-BEMS (国際会議)	2003年 6 月
欧州規格（EN50366）における磁界ソースモデルを用いた家電機器周囲の磁界分布に関する検討	電気学会全国大会	2004年 3 月