# 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(継続)

#### 西 澤 振一郎 シュツットガルト大学・高周波工学研究科

# 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。申請者は、一昨年よりCENELEC (TC-106x: EN50366)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(現在の所属先)と共同研究を(昨年までの所属先:日本-青山学院大学理工 学部)進めてきており、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。このようなソースモデルは、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関 係から、このソースモデルに関する研究は、現在、国際的に注目されている。

#### 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<sup>[1][2]</sup>。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。そこで欧州標準化委員会(CENELEC)や国際標準委員会(IEC)では、電気機器周囲の磁界レベルの標準測定手法および、人体モデルを用いた誘導電流の定量評価手法の確立に躍起になっている。2004年4月に公刊された欧州規格EN50366<sup>[3]</sup>では、各種家電製品の磁界レベルの標準測定手法および、参考レベルを超えた場合における誘導電流の簡易算出方法が規定されており、国際電気標準委員会では、この欧州規格を参考に標準評価手法の確立が議論されている。

この EN50366 における曝露評価手法では,被測定器の磁界発生源(モータ等)を数値ソースモデルである ループコイルに近似している。ここでループコイルの大きさ(半径)は実際の測定値を元に,被測定器の発生磁 界分布と磁界強度が同等となる大きさに設定するよう規定されている。しかし,この手法を用いた磁界特性や人 体曝露量に対する精度を検討した報告例は,これまで知られていない。そこで本報告では,昨年まで研究開発し てきた,小型・大型の被測定器(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<sup>[4][5]</sup>を用いて,EN50366 に規定されているループコイルによる低周波磁界の精度を検 討した。さらに低周波磁界曝露から人体を効果的に防護する人体防護技術の研究も行い,この研究においては等 価磁界ソースモデルを用いて,シールド効果を数値解析的に求める新たな手法を提案し,また本手法の有効性を 確認した。以下,その詳細について報告する。

## 3 EN50366 規定のループコイルと電気機器の磁界分布

本章では、ループコイルおよび等価磁界ソースモデルを用いて被測定器周囲の磁界分布を解析的に検討した結果を記している。さらに、被測定器周囲における漏洩磁界分布および特性(強度,偏波)と同等な磁界分布および特性を高精度(3次元)に再現する等価磁界ソースモデル<sup>[4][5]</sup>を用いて、近似ソースモデルであるループコイル(EN50366において規定)による低周波磁界の精度についても検討を行った。

#### 3.1 解析モデル

図1は磁界分布の解析で用いた,ループコイルと被測定器(試験機:ハンドミキサー)のパラメータおよび配置を示した図である。磁界分布の観測方向・高さは,被測定器表面における磁界最大値(ホットスポット:H<sub>max</sub>)が生じた方向および高さを選択しており,また双方のソースモデルによる結果を比較検討するため,出発点は等価磁界ソースモデルの表面としている。ここで被測定器の磁界分布には等価磁界ソースモデルを用いて解析しており,半径 0.11m,高さ 0.5m の円柱表面に磁気ダイポールモーメント1007個を配置している。また図1に示すパラメータにおいて,d<sub>cyl</sub> は被測定器表面(ホットスポット位置)と等価磁界ソースモデル表面までの距離,G はループコイルの半径 r<sub>coll</sub> を決めるためのパラメータ(実際の測定値を元に,被測定器の発生磁界分布と磁界強度が同等となる大きさに設定)であり,これらは EN50366 で規定されているパラメータである<sup>[3]</sup>。

被測定器には市販品であるハンドミキサーを用いており,測定周波数にはピークスペクトルである 50Hz を選択した。この被測定器のパラメータ(G, r<sub>coil</sub>, d<sub>coil</sub>, H<sub>max</sub>)は,測定結果の結果 G=0.0426m, r<sub>coil</sub>=2cm, d<sub>coi</sub>=5cm, H<sub>max</sub>=2402.1A/m であり,またループコイルの電流値はホットスポットの磁界強度(H<sub>max</sub>)となるように 調整した。なお磁界分布解析には,市販の電磁界シミュレータ FEKO<sup>[9]</sup>を用いている。



図1 等価磁界ソースモデル(被測定器)とループコイルのパラメータおよび配置図

## 3.2 解析結果

図2は(a)ループコイルと(b)等価磁界ソースモデルの前面における,0.4×0.4m(@Z=0.0m)領域の磁界強度分 布 |H [ dBA/m] を示している。図2の(a)分布から,ループコイルの磁束密度(指向性)の方向はY軸方向に向い ており,分布はY軸に対して対象であることを確認した。一方(b)分布では,ループコイルの分布と大きく異なっ ており,被測定器の磁束密度の方向(指向性)は斜め80度方向(X軸方向に対して)に向いていることが観察さ れた。これは,ハンドミキサー内の駆動モータの回転による影響であると考えられる。これらの結果からわかる ように,磁束密度の方向が単一軸方向(Y軸)のみに定義されている EN50366 のループコイルでは,このよう な複雑な磁界強度分布を正確に再現することは困難であることがわかった。

図3はY軸上(図2)における磁界ベクトル(Hx, Hy, Hz)強度を示している。この結果,ループコイルと

等価磁界ソースモデル双方において、支配的な磁界ベクトル(成分)は Hy であり、5.4dB 程度の差で良好に一 致することを確認した。さらに、劣勢な磁界ベクトルであるHx、Hz 成分のレベルが小さいことにより、支配的 な磁界ベクトル Hy と磁界強度|H|は良好に一致することも確認した。一方、ループコイルと等価磁界ソースモ デルの劣勢磁界ベクトルである Hx 成分は、最大 20dB も異なることが観察された。これは上記したように、磁 東密度の方向が異なることにより生じていると考えられる。以上の結果より、ループコイルは支配的な磁界ベク トルを良好に近似するが、劣勢な磁界ベクトルには大きな誤差が含まれることがわかった。この誤差は、人体モ デル内の誘導電流解析に影響すると考えられる。



図2 磁界強度分布(a:ループコイル, b:等価磁界ソースモデル)



図3 Y軸上(X=Z=0.0m)における磁界ベクトル

## 4 IH クッキングヒータの漏洩磁界低減に関する検討

本章では,数値ソースモデルを用いた IH クッキングヒータの漏洩磁界低減を目的とした新たな解析手法を提 案し,その有効性を実験的に検討した結果を記している。本手法に用いた数値ソースモデルは,従来の研究で広 く用いられている簡易ソースモデル(磁気ダイポールモーメントや線上電流)ではなく<sup>[6][7]</sup>,被測定器周囲にお ける漏洩磁界分布および特性(強度,偏波)と同等な磁界分布および特性を高精度(3次元)に再現する,3章 でも説明した等価磁界ソースモデルを用いた。

#### 4.1 解析および実験における評価手法

図4は、円筒形状の等価磁界ソースモデルと、その前面 0.5cm の位置に配置した金属シールド材の数値解析

モデルを示している。この等価磁界ソースモデルは,被測定器周囲の磁界分布の測定値を元に,数値解析的に得 られた4144個の磁気ダイポールモーメントを円筒表面(高さ:87cm,直径:54cm)に配置した構成となってい る<sup>[8]</sup>。また一般に,金属シールド材の磁界に対するシールド効果は小さいことが知られているが,周波数や漏洩 磁界レベル等による特性変化が小さい,アルミ材を金属シール材として仮定した。これより,シールド材の解析 パラメータである導電率は 4.0×107 S/m とした。さらにシールド材の大きさは,後述する IH 本体の大きさを 考慮して一辺が 40cm の正方形板,厚み 500µm とし,また双方の配置位置は,シールド材の中心位置と等価磁 界ソースモデルの中心(高さ)が同一となるように配置した。なお,等価磁界ソースモデルを用いた磁界分布の 数値解析には,市販シミュレータ FEKO<sup>[9]</sup>を用いた。

一方,測定においては,図5に示す IH クッキングヒータを被測定器として用いた<sup>[8]</sup>。ここで,IH 本体の上 部に配置した鍋には,IH 本体内部にある渦コイルと同程度な大きさである直径 17cm の鍋を用いた。また,図 6 は測定系の概観図を示しており,解析モデルと同様な配置となるように,金属シールド材(アルミ材,厚み 500µm)は 3D-Scan 測定システムの磁界センサー<sup>[4]</sup>と IH 本体(漏洩磁界レベルの最大値が発生した本体側部) の間に配置した。シールド材の大きさは,IH 本体の横幅を考慮し,一辺が 40cm の正方形状とした。なお,磁 界強度レベルの観測位置は,数値解析の場合と同様に,シールド材後方(シールド材の中心位置)の直線上とし た。また磁界強度レベルの低減効果の検討(SE [dB])は、シールド材の有無における磁界強度レベルを比較検 討することにより行い,測定周波数にはピークスペクトルである 21kHz を選択した。



図4 解析モデル



図5 被測定器(IH クッキングヒータ)



図6 測定系の概観図

## 4.2 解析結果および測定結果

図7は、観測線上におけるシールド効果の解析結果と測定結果を示している。この結果、40cm 四方のシールド材(アルミ材)では最大 13B 程度のシールド効果があり、シールド材から離れるにつれて回折する磁界によりシールド効果が低下することがわかった。また双方の結果は最大 1dB 程度の差で良好に一致したことにより、 IH クッキングヒータの漏洩磁界低減を等価磁界ソースモデルを用いて解析的に検討する、本手法の有効性を確認した。さらに 20cm 四方のシールド材を用いて、小さい面積のシールド材を用いた場合の検討を同様な方法で行った結果、シールド効果は最大 8dB と大きく低下することもわかった。



図7 解析結果および測定結果

# 5 むすび

本報告では、小型・大型の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を用いて、EN50366 に規定されているループコイルによる低周波磁界の精度を検討した。 この結果、磁東密度の方向が単一軸方向(Y軸)のみに定義されているループコイルでは、被測定器の複雑な磁 界強度分布を3次元的に正確に再現することは困難であることを確認した。しかし、単一軸方向の磁界強度(支 配的な磁界ベクトル)に関しては良好に近似することが可能であることを確認した。さらにシールド材を用いた、 低周波磁界曝露から人体を効果的に防護する人体防護技術の研究においては、等価磁界ソースモデルを用いて シールド効果を数値解析的に求める新たな手法を提案し、また本手法の有効性を確認した。また本研究で用いた 40cm 四方のアルミ材では、最大 13dB 程度のシールド効果が得られることもわかった。今後は、磁界に対する シールド効果が大きい,軟磁性材料やパーマロイ等の磁性シールド材を用いた漏洩磁界の低減効果の検討,さら に実用に適した形状を有するシールド材による検討が課題である。

# 参考文献

- J. R. Gauger, "Household appliance magnetic field survey", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.9, pp. 2436-2444, 1985.
- [2] 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.
- [3] European standard EN50366, "Household and similar electrical appliances Electromagnetic fields Methods for evaluation and measurement", CENELEC, 2003.
- [4] S. Nishizawa, F. Landstorfer and O. Hashimoto, "Experimental study on equivalent magnetic source in ELF range", IEICE, B, Vol.J86-B, No.7, pp.1251-1254, 2003.
- [5] S. Nishizawa, H.-O. Ruoss, F. Landstorfer and O. Hashimoto, "Numerical study on an equivalent source model for inhomogeneous magnetic field dosimetry in the low frequency range", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.51, No.4, 2004.
- [6] A. Nishikata and A. Sugiura, "Analysis for Electromagnetic Leakage through a Plane Shield with an arbitrarily-Oriented Dipole Source", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 34, No. 1, 1992.
- [7] Marko Istenic and Robert G. Olsen, "A Simple Hybrid Method for ELF Shielding by Imperfect Finite Planar Shields", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 2, 2004.
- [8] S. Nishizwa, F. Landstorfer and O. Hashimoto, "Dosimetric study of induction heater using the coil source model prescribed by the EN50366" Proceeding of 3rd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Volume 2, pp.894-903, 2004.
- [9] Software tool FEKO: http://www.feko.info.

題	名	掲 載 誌 · 学 会 名 等	発表年月
Numerical study on an equivalent source model for inhomogeneous magnetic field dosimetry in the low frequency range		IEEE Transactions on Biomedical Engineering	2004年4月
Study of the magnetic field properties around household appliances using coil source model as prescribed by the European standard EN50366		電子情報通信学会英文論文誌	2004年9月
Dosimetric study of induction heater us- ing the coil source model prescribed by the EN50366		3rd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields	2004年10月
等価磁界ソースモデルを用いた IH クッキ ングヒータの漏洩磁界低減に関する基礎的 検討		電子情報通信学会総合大会	2005年3月

〈発表資料〉