

光技術を用いた電磁界ばく露評価

大西 輝夫[†]

[†] 株式会社 NTT ドコモ 先進技術研究所 〒239-8536 神奈川県横須賀市光の丘 3-6

E-mail: [†] teruo.onishi@m.ieice.org

あらまし 本稿では、光技術を用いた電磁界ばく露評価についてまとめている。まず、電波に対する人体防護指針およびその評価指標について説明し、次に光を用いて電界および温度を測定する方法について述べる。電界や温度測定に光を用いることで、電磁波源近傍に金属導体が存在しないため低侵襲性が期待できる。また、電界測定に関しては従来プローブと異なり kHz~THz オーダーに渡り広帯域な測定が可能である。一方で、これらの測定は研究開発レベルにとどまり、商用化は少なく無線機器の認証に用いられた例はない。本稿では、現状の課題と今後について考察を行なう。

キーワード 光技術, 電磁界ばく露評価, 防護指針, SAR, 電気光学効果, 温度, サーモグラフィ法

Evaluation of the Human Exposure to Electromagnetic Fields Using Photonic Technologies

Teruo ONISHI[†]

[†] Research Laboratories, NTT DOCOMO INC., 3-6 Hikarino-oka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8536 Japan

E-mail: [†] teruo.onishi@m.ieice.org

Abstract In this paper, evaluation of the human exposure to electromagnetic fields using photonic technologies is described. At first, radio protection guidelines and dosimetric parameters are briefly explained. Then the electric field and temperature measurement methods using the photonic technologies are introduced in terms of human exposure. Sensor employing photonic technologies can measure the field distribution at a low level of invasiveness because there exists no metal proximity the electromagnetic sources. In addition, electric field can be measured over broad band frequency range, i.e., from kHz to THz compared to the conventional probe. On the other hand, these technologies have been limited in research and development and there is no case employed by any compliance test. Finally current and future issues to be overcome are discussed.

Keyword Photonic technologies, Evaluation of human exposure, Radio protection guidelines, SAR, Electro-optical effect, Temperature, Thermographic method

1. はじめに

近年、一般公衆における無線通信サービスの発展は国内外で目覚ましいものがあり、その利用形態も多種多様化してきている。また、無線通信以外の例えば無線電力伝送などの研究開発も活発に行われている[1]。このような背景において、広帯域にわたり人体防護を目的としたばく露評価法の必要性がこれまで以上に増してきている。実際、1) 無線通信機器が防護指針を満足しているか、2) 電波が生体に与える影響調査などでばく露量を把握する際に正確なばく露評価が必要となる。

一方、過去より光技術を用いた電界測定や温度測定

法の研究開発が行われており、最近では数 kHz~THz オーダーの電界測定の報告がされている[2]。

本稿では、まず電磁界からのばく露評価について関連する防護指針の概要を簡単に説明する。次に、光技術を用いた電磁界計測について、ばく露評価の観点からまとめ、課題と今後の動向について考察を行う。

2. 電波に対する人体防護指針と評価法

電波¹に対する防護指針は、国際非電離放射線防護委員会 (International Commission on Non-Ionizing

¹ 電波防護指針[3]定義の電磁波

Radiation Protection; ICNIRP), 日本では電波防護指針にて指針値が定められている[3][4]. 日本の電波防護指針について見ると, 図1のように基礎指針と管理指針に分かれており, 基礎指針は人体が電磁界にさらされたときに人体に生じる各種の生体作用に基づいて, 人体の安全性を評価するための指針となっている. ここで生体作用とは, 深部体温上昇, 電流刺激, 高周波熱傷等である. 一方, 管理指針は基礎指針を満たすための実測できる物理量で示した指針で, 電界強度, 磁界強度, 電力密度, 電流, 比吸収率(Specific Absorption Rate; SAR)である[4]. SARは式(1)を用いて算出される.

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} = c \frac{dT}{dt} \Big|_{t=0} \text{ [W/kg]} \quad (1)$$

ここで, σ は媒質の導電率[S/m], ρ は媒質の密度[kg/m³], E は電界強度(実効値)[V/m]で表わされる. また, T は温度[°C], t は時間[sec], c は媒質の比熱[J/kg·°C]である.

さらに管理指針は, 電磁界強度指針, 補助指針, 局所吸収指針に分かれており, 主に電磁波源が人体に近接している場合には局所吸収指針, 遠方のばく露には電磁界強度指針が適用されている. また日本の防護指針は, ICNIRPが定める指針値とほぼ同等となっている. なお, 局所吸収指針については, 適用周波数範囲が100 kHz~3 GHzから100 kHz~6 GHzに拡張されている[5].

ばく露評価にあたり, 管理指針として電界, 磁界, SARなどの測定が必要であるが, 管理指針の測定法については例えば文献[6]に記載されている. 文献[6]によると, 測定用アンテナを電磁波源などに近づけると, 両者間の容量結合やアンテナのインピーダンス変化が生じるほか, アンテナが大きい場合には電磁界の乱れや勾配の平均化などが付加され, 測定誤差が大きくなるとされており, 測定距離やアンテナの大きさなどに注意が必要である. 特にSAR測定では波源の極近傍での電界を測定するため, 微小ダイポールにダイオードを挿荷したセンサが一般的に用いられている[7].

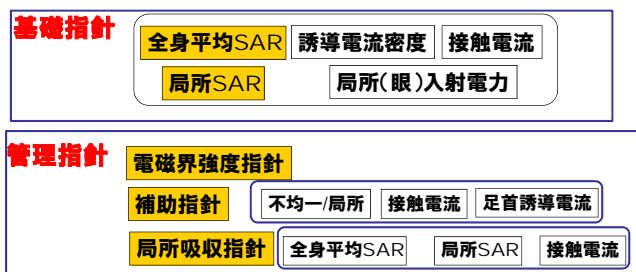


図1 電波防護指針の構成[3].

3. 光技術を用いたばく露評価

過去より光技術を用いた電界測定や温度測定法の研究開発が行われており, 最近では数kHz~THzオーダーの電界測定の報告がされている[2]. 上述したように, アンテナなどの金属導体により構成されたセンサは, 測定対象の場に擾乱を与える可能性があるため, ばく露評価ではできるだけ擾乱を少なくできる光を用いた計測の検討が行われている.

3.1. 電界の測定

電気光学(Electro-Optical; EO)効果を用いた測定が, アンテナやEMCの分野で従来検討されている[8]-[13]. また, 電磁界ばく露評価として携帯電話端末のSAR測定や基地局用アンテナからの電界測定にも応用されている[14]-[18]. 図2にSAR測定用に試作されたEOプローブの例[19]を示す. 電界の検出部は, それぞれ1mm角の非金属で構成されており, 最小検出感度として10 mW/kg, 交差偏波比30 dB以上を達成している. 携帯電話の適合性確認に用いられるSAR測定法[7]では, 最小検出感度は20 mW/kgと規定されている.

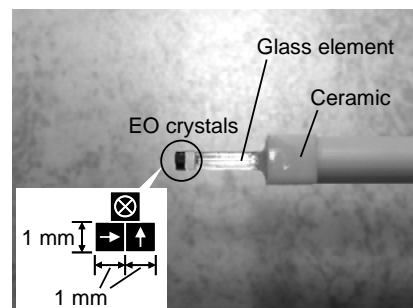


図2 3軸EOプローブの例[19].

電界もしくはSARのばく露評価に用いられている主な理由として, 1) 低侵襲性 2) 広帯域性 3) 電界の振幅と位相が測定可能 4) 周波数識別などが挙げられる. 従来のダイオード挿荷センサは, 場の擾乱, 位相の測定が困難であると同時に異なる周波数の電界を識別できない. 図3に1950 MHzと2450 MHz用ダイポールから同時に照射した際のダイオード挿荷とEOプローブによるSAR測定結果を示す. EOプローブでは, 二つのアンテナ端においてそれぞれの周波数における分布が分離されていることがわかる.

また位相を測定することにより, 2次元の測定結果より等価定理やNF-FF(Near Field-Far Field)変換などの理論的に3次元分布を求めることが可能となり, ばく露評価時間を精度を保ちつつ大幅に減少できることが示されている[17][18]. 例えば, 携帯電話基地局アンテナ周辺の電界測定(図4)において測定時間が9時間から30分と1/18になると報告されている[18].

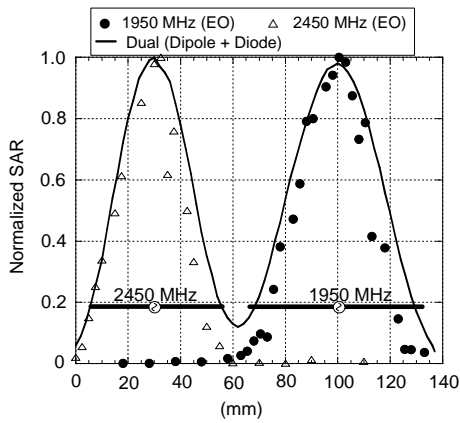
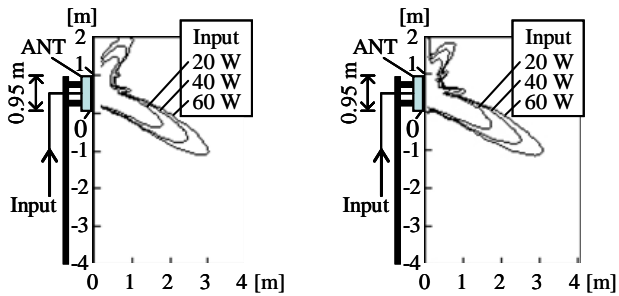


図3 2周波数測定例.



(a) 通常の測定結果 (b) NF-FF変換結果
図4 基地局アンテナ近傍電界分布[18].

3.2. 温度の測定

式(1)より明らかのように、SARは温度の時間変化を計測することでも評価可能である。温度測定には、光ファイバ温度計[20]や赤外線カメラ[21]-[25]が用いられている。図5に赤外線カメラを用いた測定(サーモグラフィ法)の概念図を示した。アンテナから照射された電力はファントムに吸収され、ファントムの温度が上昇する。その温度上昇を赤外線カメラで測定することで、2次元SAR分布の測定が可能である。ここでファントムとは、電氣的に生体と等価な物質で構成された疑似生体モデルである。様々な形状にも比較的容易に対応できるため、人体だけでなく、動物実験用のばく露評価にも利用されている[25].

但し、温度上昇を測定するためには一般的に数十Wの出力が必要であるのと、熱伝導による冷めの影響を考慮する必要がある[23]. 冷めについては、例えば下記の式(2)を用いて補正する方法が提案されている[26].

$$f(t) = a(1 - e^{-bt}) \quad (2)$$

ここで a および b は、測定した時間温度変化から求まる定数である。これを1階微分して $t \rightarrow 0$ にすると熱伝

導を含まない温度上昇の傾きを求めることができる。

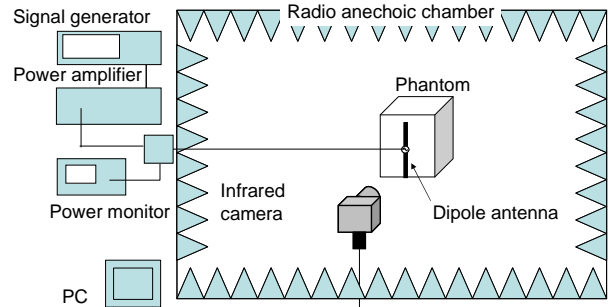


図5 サーモグラフィ法測定系.

最近では、感温液晶マイクロカプセルを用いて温度を測定する手法も提案されている[27]. これは直径約 $20\text{-}30\ \mu\text{m}$ のカプセルに感温液晶を封入したもので、温度により散乱光の波長が変化することに着目したもので、ミリ波ばく露による家兎眼内温度上昇の様子を動的に観察するために用いられている。

4. 考察

光技術を用いたばく露評価(ここでは、電界測定に限定)は、前述したように低侵襲性、広帯域、位相測定などの特徴があり注目されている。一方で、適合性確認用途などを考えると、1)感度 2)安定性 3)利便性 4)コスト 5)不確かさの評価などが課題と考えられる。プローブ先端に金属を有しないEOプローブの感度は、一般に $0.1\sim 1\ \text{V/m}$ 程度と言われている。低侵襲性と広帯域性を犠牲にして、微小アンテナを付加したプローブでは3ケタ感度が高い。一方で、無線通信の高速化で周波数帯域は確実に増加しており、広帯域な信号に対する感度向上が課題と考えられる。また、光ファイバの揺れや温度変化に影響を受けやすく、不確かさの増大につながっている。さらに、測定の高速化を図るうえでプローブのアレー化が考えられているが[17], 既存の電気部品に比べて光学部品は一般的に高価である。

一方で、無線電力伝送では従来検討されている周波数より低い(数十kHz~数十MHz)周波数帯で、波源近傍の電界・磁界を測定する必要がある。周波数が低いため波源近傍に通常のプローブが存在すると波源と結合し不確かさが増えるが、EOや磁気光学(Magnetic-Optical)素子を用いたプローブを使用することができれば、波源近傍の電界・磁界を正確に測定できると期待できる。

5. まとめ

光技術を用いた人体防護のためのばく露評価法について述べた。光を用いることで従来のプローブになり測定が可能となっているが、感度や安定性などの向上や不確かさの評価を含めた検討が課題である。また、無線電力伝送などの新技術に対応するために、従来検討されている周波数より低い(数十 kHz~数十 MHz)周波数帯において電界だけでなく、磁界センサも重要となることが予想される。

文献

- [1] 篠原真毅, “無線電力伝送の概要と動向,” 信学会誌, vol. 95, no. 1, pp. 34 - 37, Jan. 2012.
- [2] H. Togo, D. Moreno-Dominguez, and N. Kukutsu, “Frequency response of optical electric-field sensor at frequencies from 20 kHz to 180 GHz,” APMP2012, FB-5, Kyoto, Apr. 2012.
- [3] 郵政省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, Feb. 1997.
- [4] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz),” Health Physics., vol. 74, no. 4, pp. 494 - 522, Apr. 1998.
- [5] 総務省情報通信審議会答申, 局所吸収指針の在り方, 諮問第 2030 号, May 2011.
- [6] 郵政省電気通信技術審議会答申, 電波利用における人体の防護指針, 諮問第 38 号, June 1990.
- [7] “Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures - Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz),” International Standard, IEC 62209-1, Ed. 1.0, Feb. 2005.
- [8] H. I. Bassen and G. S. Smith, “Electric field probes - A review,” IEEE Trans. Antennas and Propag. vol. 31, no. 5, pp. 710-718, Sept. 1983.
- [9] N. Kuwabara, K. Tajima, R. Kobayashi, and F. Amemiya, “Development and analysis of electric field sensor using LiNbO₃ optical modulator,” IEEE Trans. EMC-34, no. 4, pp. 391-396, Nov. 1992.
- [10] T. Nagatsuma, “Measurement of high-speed devices and integrated circuits using electro-optic sampling technique,” IEICE Trans., vol. E76-C, no. 1, pp. 55 - 63, Jan. 1993.
- [11] Y. Imaizumi, M. Shinagawa, and H. Ogawa, “Electric field distribution measurement of microstrip antennas and arrays using electro-optic sampling,” IEEE Trans., Microwave and Tech., vol. 43, no. 9, pp. 2402-2407, Sept. 1995.
- [12] M. Hirose, T. Ishizone, and K. Komiyama, “Antenna pattern measurements using photonic sensor for planar near-field measurement at X band,” IEICE Trans. vol. E87-B, no. 3, pp. 727 - 734, March 2004.
- [13] E. Suzuki, S. Arakawa, H. Ota, K. Arai, R. Sato, and K. Nakamura, “EO probe for simultaneous electric and magnetic near-field measurements using LiNbO₃ with inverted domain,” IEEE Trans., Microwave Theory and Tech., vol. 53, no. 2, pp. 696 - 701, Feb. 2005.
- [14] B. G. Loader, M. J. Alexander, W. Liang, and S. Torihata, “An optical electric field probe for specific absorption rate measurements,” 15th International Zurich Symposium, pp. 57 - 60, 2003.
- [15] T. Onishi, H. Togo, N. Shimizu, K. Kiminami, S. Uebayashi, and T. Nagatsuma, “SAR measurement employing electro-optic (EO) probe without using metal,” Proc. 27th Ann. Mtg. Bioelectromagnetics Soci., P-C-21, Dublin, Ireland, June 2005.
- [16] H. Togo, N. Shimizu, and N. Nagatsuma, “Near-field mapping system using fiber-based Electro-Optic probe for Specific Absorption Rate measurement,” IEICE Trans., vol. E90-C, no. 2, pp. 436 - 442, Feb. 2007.
- [17] K. Kiminami, T. Iyama, T. Onishi, and S. Uebayashi, “Novel specific absorption rate (SAR) estimation method based on 2-D scanned electric fields,” IEEE Trans. EMC. vol., 50, no. 4, pp. 828 - 836, Nov. 2008.
- [18] J. Higashiyama and Y. Tarusawa, “Method for measuring radiated electric field excited by linear array antenna using near field to far field transformation,” Prof. 18th Int. Zurich Symposium on EMC, pp. 417 - 420, Munich, Sept. 2007.
- [19] T. Iyama, K. Kiminami, and T. Onishi, “Applicability of three-axis Electro-Optic (EO) probe for specific absorption rate (SAR) measurement,” IEICE Trans. Commun., vol. E92-B, no. 4, pp. 1414 - 1417, April 2009.
- [20] Y. Okano, Y. Sugama, and M. Abe, “The SAR evaluation method with optical fiber thermometer,” The 17th International Zurich Symposium on EMC, pp. 161 - 166, Zurich, Switzerland, Feb. 2005.
- [21] A. W. Guy, “Analysis of electromagnetic fields induced in biological tissues by the thermographic studies on equivalent phantom models,” IEEE Trans. MTT. vol. 19, no. 2, pp. 205 - 214, Feb. 1971.
- [22] Q. Balzano, O. Garay, and F. R. Steel, “Energy deposition in simulated human operators of 800-MHz portable transmitters,” IEEE Trans. VT. vol. 27, no. 4, pp. 174 - 181, Nov. 1978.
- [23] 岡野, 長谷, 伊藤, “脳等価個体ファントムを用いたサーモグラフィ法による SAR 測定法に関する基礎検討,” 信学会論文誌, vol. J82-B, no. 1, pp. 167 - 176, Jan. 1999.
- [24] T. Onishi, R. Ishido, T. Takimoto, K. Saito, S. Uebayashi, M. Takahashi, and K. Ito, “Biological tissue-equivalent agar-based solid phantoms and SAR estimation using the thermographic method in the range of 3-6 GHz,” IEICE Trans. vol. E88-B, no. 9, pp. 3733 - 3741, Sept. 2005.
- [25] K. Wake, A. Mukoyama, S. Watanabe, Y. Yamanaka, T. Uno, M. Taki, “An exposure system for long-term and large-scale animal bioassay of 1.5-GHz digital cellular phones,” IEEE Trans. MTT-55, no. 2, pp. 343 - 350, Feb. 2007.
- [26] 滝本, 大西, 齊藤, 高橋, 上林, 伊藤, “サーモグラフィ法による SAR 測定における熱移動の補正,” 信学技法, EMCJ2004-105, Dec. 2004.
- [27] Y. Suzuki, M. Baba, M. Taki, K. Fukunaga, and S. Watanabe, “Imaging the 3D temperature distributions caused by exposure of dielectric phantoms to high-frequency electromagnetic fields,” IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 4, pp. 744 - 750, August 2006.