

人体の散乱電界の空間インパルス応答による実時間 SAR 推定

高橋 幸[†](学生員) 王 建青^{†a)}(正員)

On-Site SAR Estimation Based on Spatial Impulse Response of Scattered Electric Field

Tsukasa TAKAHASHI[†], Student Member and Jianqing WANG^{†a)}, Member

[†]名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻, 名古屋市

Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

a) E-mail: wang@nitech.ac.jp

あらまし 携帯電話, 無線 LAN, デジタル放送などの基地局の放射電磁界に対する人体防護の基礎指針は, 単位質量当りに吸収される電力, すなわち SAR (Specific Absorption Rate) の全身平均値で規定されるが, 測定現場では SAR 測定の困難さから管理指針として入射電界あるいは電力密度が用いられる. 本研究では, 人体の散乱界空間インパルス応答を用いて, 測定現場において実時間で SAR を推定する手法を提案し, その妥当性を検証する.

キーワード 基地局, SAR, 電界測定, 空間インパルス応答

1. ま え が き

近年, 市街地における携帯電話, 無線 LAN (Local Area Network) 及びデジタル放送などの基地局の設置が急増している. それに伴い基地局を整備する無線従事者に対する人体安全性の評価が要求される. 基地局の放射電磁界による人体の安全性は, 適合性評価の立場から電波の人体への曝露量を表す基礎指針, すなわち SAR (Specific Absorption Rate, 単位質量当り吸収される電力) の代わりに, 人体への入射電界あるいは電力密度が用いられる [1]. この入射電界あるいは電力密度は管理指針と呼ばれ, それを超えなければ基礎指針の SAR 値を超えることはないといわれる. しかし, 管理指針は元来様な平面波照射の条件化で導かれたものであり, 不均一照射における平均入射電界と SAR との定量関係は必ずしも明確ではない.

人体全身 SAR 評価は, 一般に解剖学的人体数値モデルに対して, FDTD (Finite Difference Time Domain) 法などの電磁界解析技術を用いて計算されるが, 計算量が膨大であるため, 現場での実時間評価には向かない. Lazzi and Gandhi は, 人体前面において入射電界に対する空間インパルス応答を事前に導出

し, それを用いて実時間 SAR 推定を提案した [2] が, 入射電界の測定面の寸法, 測定点数などに応じて SAR 値へのスケーリングが必要であり, スケーリングファクタの導出も困難である. これを対処するために, F. Saidi らは, 人体を囲む 6 面すべてにおいて電界成分を測定し, それを用いて SAR を推定する手法を提案している [3]. この場合は, スケーリングが必要なく, 推定精度も向上されるが, 現実問題として人体を囲む全 6 面での測定は必ずしも容易でない. 本研究では, 管理指針の評価において人体を占める空間での電界強度測定が要求されることに着眼し, その空間に人体が存在するときの散乱電界の空間インパルス応答を事前に導出して, それを用いて入射電界から SAR を実時間で推定することを提案する. ただし, 管理指針においては, もともと人体所在空間の入射電界の強度測定を要求しているが, 本手法を適用するためには入射電界の位相測定も必要である. これが可能となれば, 人体所在空間の入射電界さえ測定されれば, 実時間 SAR 推定が可能となる.

2. 原 理

人体に電波を照射すると散乱波が生ずる. 人体への入射電磁界を E^i, H^i , 人体の存在により生じた散乱電磁界を E^s, H^s とすれば, 人体が存在するときの全空間での合成電界 E と合成磁界 H は

$$E = E^i + E^s \quad (1)$$

$$H = H^i + H^s \quad (2)$$

となる. 上述関係をマクスウェルの方程式に代入すれば,

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial E^s}{\partial t} = & -\sigma E^s + \nabla \times H^s \\ & -\sigma E^i - (\varepsilon - \varepsilon_0) \frac{\partial E^i}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial H^s}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times E^s \quad (4)$$

が得られる. ここで ε, μ, σ はそれぞれ解析空間内媒質の誘電率, 透磁率及び導電率である. 式 (3) 右辺の入射電界に関する項 (第 3 項と第 4 項) は, 空気中では存在しないが, 生体中ではあたかも電流源となっていることが分かる. それを電流源 $J_i(r')$ とみなせば, 人体内点 r に作る電界 $E(r)$ は

$$\begin{aligned} E(r) = & E^i(r) + E^s(r) \\ = & E^i(r) + \int_V G_s(r, r') \cdot J_i(r') dv \end{aligned} \quad (5)$$

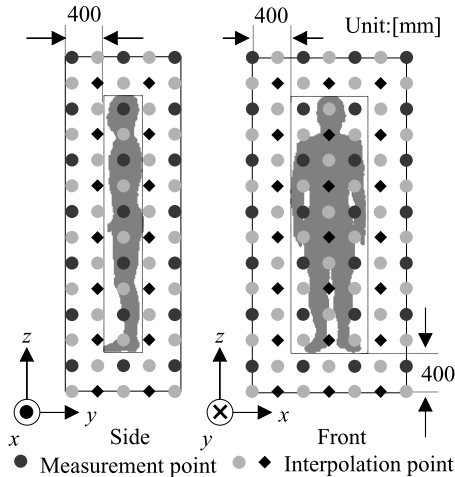


図1 検証モデル
Fig. 1 Model for verification.

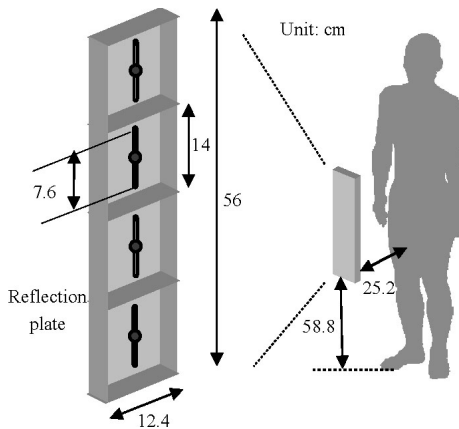


図2 送信アンテナと人体との位置関係
Fig. 2 Transmitting antenna and human body model.

と表される．ここで $G_s(r, r')$ はダイアディックグリーン関数である． $G_s(r, r')$ は解析的には求まらないが，数値的に求めることができる．

今，人体を占める空間内入射電界の測定点を $r'_n (n = 1, 2, \dots, N)$ とすると，式 (5) は

$$E(r) \cong E^i(r) + \sum_{n=1}^N G_s(r, r'_n) J_i(r'_n) \Delta V_n \quad (6)$$

と近似できる．更に式 (6) 右辺の散乱界に関する部分は

$$\sum_{n=1}^N G_s(r, r'_n) J_i(r'_n) \Delta V_n$$

$$= \sum_{n=1}^N G_s(r, r'_n) [\sigma + j\omega(\varepsilon - \varepsilon_0)] E^i(r'_n) \Delta V_n \quad (7)$$

と書ける．したがって，式 (3), (4) に基づく散乱界 FDTD 法において， $E^i(r'_n) (n = 1, \dots, N)$ をそれぞれ 1 として散乱電界を求めれば，

$$E^s(r, r'_n) \cong [\sigma + j\omega(\varepsilon - \varepsilon_0)] G_s(r, r'_n) \Delta V_n \quad (8)$$

となり，それゆえに，

$$G_s(r, r'_n) \cong E^s(r, r'_n) / [\sigma + j\omega(\varepsilon - \varepsilon_0)] \Delta V_n \quad (9)$$

が得られる．上式の $G_s(r, r'_n)$ は，測定点 r'_n での入射電界 $E^i(r'_n)$ に対する人体内点 r での散乱界空間インパルス応答とみなせる．これにより，人体内電界は，すべての測定点 r'_n での入射電界 $E^i(r'_n)$ と空間インパルス応答 $G_s(r, r'_n)$ を用いて次式

$$E(r) \cong E^i(r) + \sum_{n=1}^N E^s(r, r'_n) E^i(r'_n) \quad (10)$$

より求められる．つまり，散乱界 FDTD 法と標準人体数値モデルを用いて，散乱電界の空間インパルス応答を事前に求めておけば，測定現場においては，人体を占める空間内各測定点での入射電界 $E^i(r'_n)$ さえ測れば，式 (10) のような簡単な加算と乗算により人体内電界が算出でき，SAR を実時間で推定することができる．

3. 検証

3.1 モデル

図1と図2に本手法の検証モデル及び基地局アンテナとの位置関係をそれぞれ示す．人体標準数値モデルとしては，情報通信研究機構が中心に開発した日本人成人男性モデル [4] を用いた．モデルは，51 種類の生体組織，2 mm の空間分解能を有する．この人体数値モデルに周波数 2 GHz 帯の基地局アンテナから照射されることを想定した．なお，基地局アンテナは，周波数 2 GHz 帯の UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) に用いられる基地局アンテナの代表例として，図2に示すものを用いた．散乱電界の空間インパルス応答を得るために，まず人体を占める空間内で，ある一定の空間間隔において単位入射電界でそれぞれ励振したときの人体による散乱電界の空間インパルス応答を FDTD 法で求めた．この

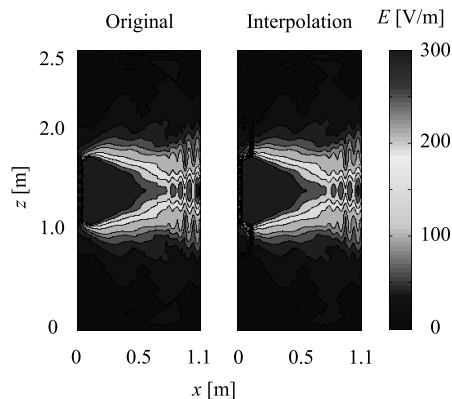


図3 垂直面での電界強度分布

Fig. 3 Electric field intensity distribution in a vertical plane.

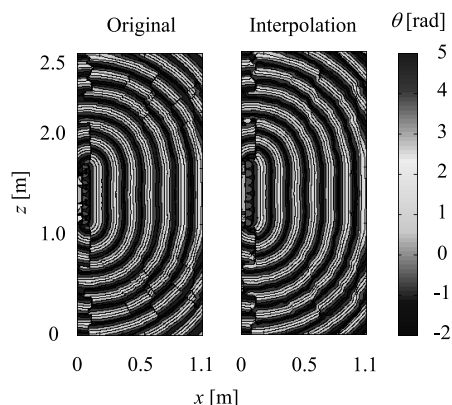


図4 垂直面での電界位相分布

Fig. 4 Electric field phase distribution in a vertical plane.

とき、入射電界の測定点数を減らすために測定間隔をできるだけ大きくし、その間の空間位置での入射電界データは周りのデータをスプライン補間することで求めた。次に、その補間された入射電界データを用いて式(10)により人体 SAR を推定し、その SAR 推定結果を通常の FDTD 計算による人体 SAR の計算結果と比較した。

3.2 入射電界の補間

図3と図4に、4 mm の空間間隔で計算された入射電界とスプライン補間によって得られた入射電界の強度分布と位相分布をそれぞれ示す。ここでの補間は、36 mm ($\lambda/4$) の入射電界の測定間隔を想定したデータに対して行ったものである。図から、電界の強度分布、位相分布ともにスプライン補間によってデータを

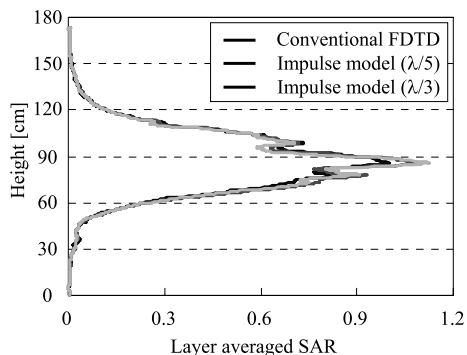


図5 層平均 SAR

Fig. 5 Layer averaged SAR.

表1 全身平均及び 10 g 平均局所 SAR の推定誤差
Table 1 SAR estimation error.

Measurement Spacing [mm]	28 ($\lambda/5$)	36 $\lambda/4$	48 $\lambda/3$
Whole-body SAR [%]	1.6	4.1	4.2
10 g SAR [%]	4.1	4.5	7.8

再現できていることが分かる。

3.3 層平均 SAR

図5に図2の UMTS アンテナによる照射によって得られた人体身長方向の層平均 SAR を示す。ここで比較を行いやすいように通常の FDTD 法による計算結果の最大値を1として規格化を行っている。図より高さ 90 cm 付近で両者の間に多少の違いが見受けられるものの、入射電界の測定間隔を $\lambda/3$ としても精度の良い推定が行えていることが分かる。

3.4 全身平均及び局所 SAR

表1に図2の UMTS 送信アンテナによる全身平均 SAR 及び 10 グラム平均局所ピーク SAR の推定誤差を示す。これらの推定誤差は散乱界インパルス応答による推定結果と通常 FDTD 計算結果との相対誤差から求めた。表より入射電界の測定間隔が $\lambda/3$ 程度でも全身平均 SAR は 5% 以下、10 グラム平均局所ピーク SAR は 8% 以下の推定誤差となり、推定を行うには十分な精度であることが分かる。

4. むすび

本手法は、人体に対する散乱電界の空間インパルス応答を事前に用意し、それをもとに測定された人体を占める空間内入射電界から実時間で SAR を推定するものである。UMTS アンテナの代表例に対する計算機シミュレーション結果により、入射界の測定間隔がたとえ $1/3$ 波長でも 8% 以下の高精度の SAR 推定が

可能であることを確認できた。また、測定された入射電界の補間により測定点数を大幅に減らすことができるため、測定に要する時間は格段に減らすことも可能である。ただし、入射電界の測定には位相情報が必要であり、補間は複素数領域で行う必要がある。

今後の課題は基地局近傍での実測電界データを用いたの検討である。

文 献

- [1] 電気通信技術審議会答申，諮問第 38 号，“電波利用における人体の防護指針”，1990.
- [2] G. Lazzi and Om P. Gandhi, “A mixed FDTD-integral equation approach for on-site safety assessment in complex electromagnetic environments,”
IEEE Trans. Antennas Propag., vol.48, no.12, pp.1830–1836, Dec. 2000.
- [3] F. Saidi, D. Lautru, A. Gati, M.-F. Wong, E. Nicolas, F. Jacquin, J. Wiart, and V.F. Hanna, “Analysis of on site SAR evaluation by measurement of incident field,” BEMS 2006 Annual Meeting Abst., PA-37, June 2006.
- [4] T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda, S. Watanabe, M. Taki, and Y. Yamanaka, “Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry,” Phys. Med. Biol., vol.49, pp.1–15, 2004.

(平成 20 年 3 月 14 日受付，4 月 9 日再受付)