

もう一度学ぶ電磁気学の世界



第18回 人体と電磁波(その2)

小暮裕明



前回(本誌2006年2月号, pp.91-97の第17回)は電磁波を伝える誘電体線路について学びました。人体は誘電体としてモデリングできますが, さまざまな部位に集中するエネルギー量を評価するSAR(比吸収率)についても, 電磁界シミュレータを活用して詳しく調べました。急速に進展するユビキタス・システムですが, 主役である人間がモバイル装置を身につけることで実現されます。このことから, 人体の電気的特性をより詳しくモデリングすることが求められます。生体組織は周波数依存性がある誘電体として定義されます。異なる周波数を使うシステムが複数混在する場合は, 分散性を考慮したシミュレーションによって人体の影響を正しく評価する必要があります。(筆者)

1. 人体のモデル

前回(連載第17回)は, TLM(transmission line matrix)

法による3次元電磁界シミュレータ⁽¹⁾⁽²⁾Micro-Stripes^{注1}を使って人体頭部のSARを求めました。生体組織は, 電気的には損失のある誘電体として表されますが, 等価回路では並列に接続された C (コンデンサ)と R (抵抗)で表現できました(図1)。

この連載を初めから読まれている読者の方なら, 筆者がかつて超高圧変電所の下で「電界」を体感したエピソードを覚えていることでしょう(図2, 本誌2004年3月号, pp.115-122の連載第2回を参照)。学生時代に電磁気学の授業で「高压線の下にいる人間は等価的にコンデンサである」と教わった意味が, SARの考えかたからもうかがえますが, 人体細胞をコンデンサで表すというのは何とも大胆なマクロ的モデルです。

しかし人体の各部を表現する誘電体のパラメータは, 携帯電話のようなGHzオーダの高周波と, 静電界や送電線のように低い周波数では, その値が大きく異なります。シミ

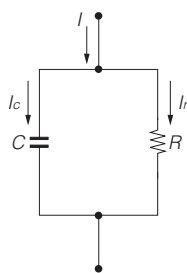


図1
生体組織の等価回路
並列に接続された C (コンデンサ)と R (抵抗)で表現できる。

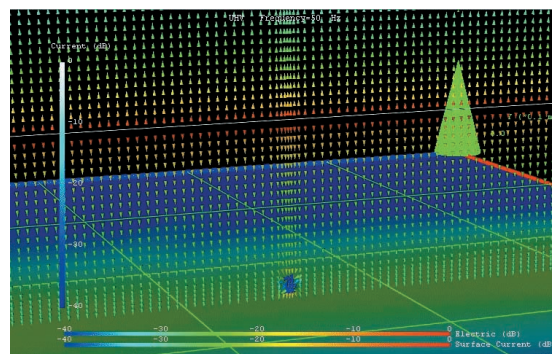


図2 超高圧線の下に立つ人間を含む空間の電界
人体を模した誘電体付近の電界ベクトルに影響を与えている。

注1: Micro-Stripes(マイクロストライプス)のWebサイトのURLは,
「<http://www.flomerics.com/microstripes/>」。



Micro-Stripes, 周波数分散性, 誘電率, 導電率, Debyeのモデル, 比誘電率, 電子レンジ, ファントム, SAR評価液剤, ダイポール・アンテナ, ループ・アンテナ, バッチ・アンテナ, Sonnet

ュレーションの精度を高めるためには、さらに複雑な表現方法が必要になります。

モーメント法や有限要素法による周波数領域の電磁界シミュレータ¹⁾⁽²⁾では、誘電体や磁性体の特性値は、求めたい周波数範囲における代表値(例えば中心の周波数における値)を設定します。このため、広帯域に渡るシミュレーションで計算精度を高めるためには、特性値が変化する周波数範囲に分けて、設定を変えた結果を集めて評価します。

一方、TLM法やFDTD(finite difference time domain)法による時間領域の電磁界シミュレータ¹⁾⁽²⁾では、離散化されたセル^{注2}が細かいほど解析周波数の上限が高くなります。誘電体や磁性体の特性値は、広帯域の変化を表現して設定する必要があります。

● 誘電体の分散性とは

回路基板などの誘電体材料の特性値は、電磁界の大き

さや方向に依存しない一定値でシミュレーションします。しかし、一般には誘電体や磁性体の材料は異方性を示す媒質^{注3}です。また、これらの材料は、周波数が異なると特性値も異なります。この性質を周波数分散性、あるいは単に分散性(dispersive)と呼んでいます。透磁率についても誘電率と同じことがいえるのですが、ここでは誘電率に絞って説明します。

誘電率は複素数で次式のように表されます(連載第17回を参照)。

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、シリコンなどの導電性材料では導電率 σ を設定します。この場合の誘電率は、

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' - (j\sigma / \omega) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となります。第3項には角周波数を表す $\omega = 2\pi f$ がありますから、これは分散性を示しています。

● 生体組織の分散性モデル

生体組織の周波数依存性は、式(2)よりも複雑な関数で表現されます。このような、より複雑な分散性媒質を表現する方法の一つに「Debyeのモデル」があります。Micro-Stripesのリファレンス・マニュアルによれば、Debye

表1 比誘電率の10点のデータ

実測値ではなく筆者が作成した値である。

周波数(GHz)	比誘電率(実部)	比誘電率(虚部)
1	7	1.6
2	6	2
3	5	1.8
4	4.5	1.5
5	4.3	1.1
6	4.2	1
7	4.1	0.8
8	4.1	0.7
9	4	0.7
10	4	0.6

注2：電磁界シミュレータは、デジタル・コンピュータで解くために解析空間を細かく離散化して計算している。このときモデルを細分化した最小単位をセルと呼んでいる。

注3：異方性媒質とは、物理的な性質が方向によって異なる誘電体や磁性体。

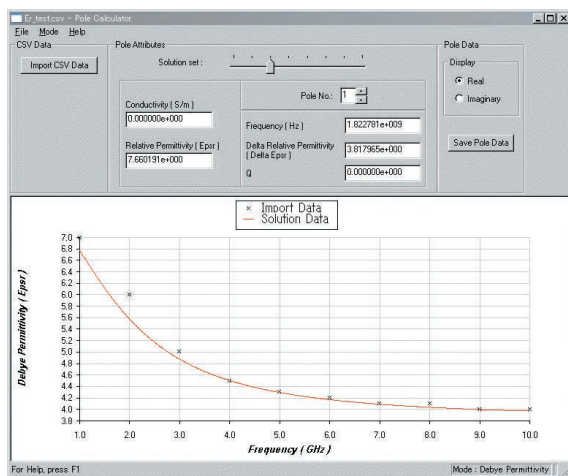


図3 分散性媒質の比誘電率の実部

Debye Calculator を使って表示した。

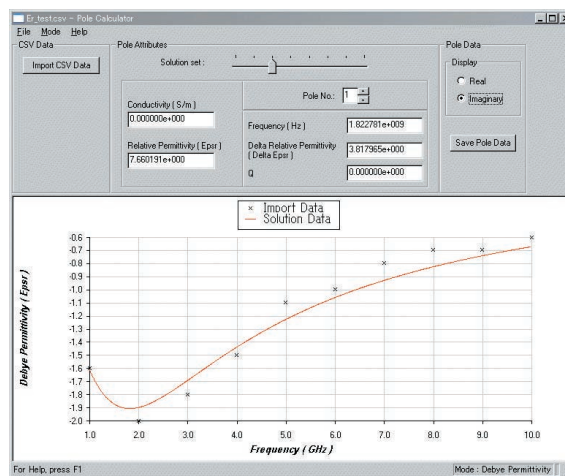


図4 分散性媒質の比誘電率の虚部

図3と同じく、Debye Calculator の画面を示す。