

特集

 電磁環境 —機器と生体への影響—

電波の人体影響 —携帯電話の安全性と「電波グッズ」—

Biological effects of electromagnetic waves
— safety of portable telephones and “radio wave goods” —

王 建青 (名古屋工業大学) 藤原 修 (名古屋工業大学)

Jianqing WANG
Osamu FUJIWARA

Key Words: Electromagnetic waves, biological effects, portable telephone, specific absorption rate, shield.

1 まえがき

携帯電話の爆発的な普及に伴い、その発する電波の人体影響に対しては公衆の間で漠然とした懸念が存在している。一般に高周波の電磁界が及ぼす人体影響は、内部組織の温度上昇に起因するものとされ、世界各国の人体防護指針もこれを共通のベースとしている。そのとき、発熱源となる単位体重当りの吸収電力 (Specific Absorption Rate: SAR と呼ばれる。次章で詳述) が人体影響の評価尺度に用いられ、影響発現の閾値としては SAR の全身平均値が $4 \sim 8 \text{ W/kg}$ と見積もられ、同閾値の 10 倍の安全率を見越した「 0.4 W/kg 」が世界各国の防護指針や安全基準の共通した基本指針値として既に確立されている [1]-[3]。しかしながら、携帯電話機使用時にはアンテナが頭部に近づくために放射電波がたとえ微弱であっても頭部表面での局所 SAR が増加する。それ故に、携帯電話機等を対象とした局所吸収指針 [3]-[5] が米国、欧州、日本において相次いで制定され、その安全性評価を強制規格として製造メーカー側に義務づけるようになった [6][7]。こうした背景から、携帯電話機に対する低局所 SAR の実現が望まれている。

本稿では、携帯電話に焦点を絞り、その発する電波の安全性及び局所 SAR の低減策をつぎの順序で述べたい。まず、電波の発熱作用とそれに基づく人体安全基準の考え方を示す。つぎに、携帯電話の頭部内 SAR の低減機構を説明した後、低局所 SAR を指向した市販商品のいわゆる「電波グッズ」に対する問題点を指

摘し、最後に科学的根拠に基づく低局所 SAR の実現例を示す。

2 電波の発熱作用と安全基準

電磁波を周波数ごとの成分に分解したものをスペクトルという。周波数が 300 GHz 以下 (波長では 1 mm 以上) の電磁波は電波といい、無線周波または RF (radio frequency) 波とも呼ばれる。電波の発熱作用は体温を上昇させることで熱ストレスによるバイオエフェクトを起こすとされるが、これと電波のパラメータとの関係は単純でない。人体は電氣的には複雑な複合損失誘電体であるため、電波の強さ、周波数や偏波などで体内の発熱分布が大きく変わってしまうからである。バイオエフェクトを引き起こす発熱量の閾値がわかれば、これを越えない電波のパラメータは逆に決定できる。ラットなどの小動物を用いた電波の照射実験によると、全吸収エネルギーの時間率 (全吸収電力) を全身にわたって平均した値が体重 1 kg あたり「 $4 \sim 8 \text{ W}$ 」という狭い範囲で可逆的な行動分裂が生じたという。しかも、この値は、電波の周波数や偏波、実験小動物の種に依存しないことが確認されている。現在の世界各国の安全基準は発熱量の上述した閾値がヒトに対しても適用できるものとして構築されている。これの根拠を科学的に立証することは困難であるが、ほ乳動物の代謝量を発熱量の観点から種別に比較すれば、電波安全基準の考え方が妥当なものであることが理解できる。いろいろな動物の体重あたりの基礎代謝率

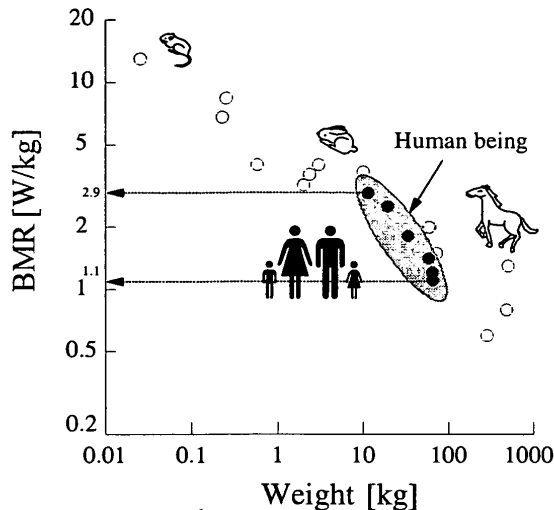


Fig. 1 Relationship between the weight and BMR of various animals.

(BMR: basal metabolic rate)[8]を「W/kg」という単位で表し、これと体重との関係[9]を示すとFig.1のようになる。但し、ヒト以外の動物のBMRは安静時の代謝率に代えている。BMRとは生命の維持だけに必要な最低のエネルギー代謝をいうが、体重あたりのBMRと体重との関係は両対数グラフでは種によらずほぼ直線上に並び、体重が重い動物ほどBMRは低くなる。例えば、0.5 kg以下の小動物のBMRは4 W/kg以上であるのに、乳・幼児から成人を含む10～70 kgのヒトでは1～3 W/kgの範囲にある。ヒトの電波による発熱量がBMRの何倍まで許せるかは熱調節機能に強く依存する。しかしながら、少なくともBMRと同じ程度の発熱量が体内で生ずれば自然の状態になく、バイオエフェクトの発現確率は高まる。

一般に電波による発熱量は、生体内への侵入電界で誘起された電流のジュール損で表され、上昇温度を引き起こす発熱源に相当する。生体内の侵入電界を E 、誘起電流密度を J 、生体組織の導電率を σ とすれば、単位体積あたりのジュール損は $J^2/2\sigma (= \sigma E^2/2)[W/m^3]$ で与えられ、これを単位体重あたりに換算した物理量がSARと呼ばれる。単位は「W/kg」である。したがって、生体組織の密度を ρ とすれば、SARは

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} E^2 \quad (1)$$

と表される。このSARは生体内のポイントでの発熱源になるが、SARと上昇温度との空間分布は必ずしも対応せず、後者のほうが一般には緩やかであることが知られている。しかしながら、遠方界曝露に伴う生体内SARの全身に渡る平均値は深部上昇温度に並行す

るため、全身平均SARが電波の発熱作用によるバイオエフェクトの評価尺度として用いられるようになった。一方、ポイントでのSARは熱作用に基づく安全性評価にはそのまま適用できず、現状ではSARの局所的な組織平均値を指針値として使用されているものの、組織平均化の生理学的根拠は明確ではない。

さて、体重 M [kg]のヒトの全身平均SARについては、これを $\langle SAR \rangle$ と記せば、体重 dm [kg]あたりの電波の吸収電力が $SAR \times dm$ [W]となるので、

$$\langle SAR \rangle = \frac{1}{M} \int_{Whole-body} SAR \times dm \quad (2)$$

で与えられる。組織 Δm グラムあたりの局所SARは、これを $SAR_{\Delta m}$ とすれば、

$$SAR_{\Delta m} = \frac{1}{\Delta m} \int_{\Delta m} SAR \times dm \quad (3)$$

となる。米国の安全指針値は $\Delta m = 1$ g、欧州日本では $\Delta m = 10$ gをそれぞれ採用している。

電波のバイオエフェクトは全身平均SARの一定レベルを越えると現れ、その程度がSARの全身平均値に並行するとの考えは、電離放射線に対する急性効果(非確率的影響)のそれに類似し、微弱電波の人体に及ぼす晩発効果(確率的影響)はないという仮説に基づく。この仮説は非電離放射線の電波に対しては合理的と認識されており、人体に対するバイオエフェクトの閾値としては全身平均SARが米国規格協会(ANSI)では4～8 W/kg、米国環境保護庁(EPA: United State Environmental Protection Agency)では1～2 W/kgと見積もられ、同閾値の10倍または2.5倍の安全率を見越した「0.4 W/kg」が世界各国における電波安全基準の指針値として確立されたものとなっている。この値を越えない電波の強さが安全基準となる。

なお、携帯電話などの低電力電波放射機器に関しては、アンテナ近傍の電磁界レベルが指針値を超えても全身平均SARは上述の「0.4 W/kg」を大幅に下回ることが知られているので、以前にはその適用を特別措置として除外している場合が多かった。しかしながら、移動体通信技術の飛躍的な発達と携帯電話の爆発的な普及でアンテナ近傍界の人体影響が懸念され、今日では無線周波の電波を利用する小型端末機に対しては局所的な組織でのSAR指針値が決められている。例えば一般公衆に対しては、米国[3]は頭部の任意組織1グラムあたりの局所SARを1.6 W/kg、欧州勧告[4]のICNIRP(International Commission on

Non-Ionizing Radiation Protection) 及び日本の局所吸収指針 [5] では 10 グラム当たり 2 W/kg と定めている。また、米国においては政府レベルの強制規格として連邦通信委員会 (FCC) が局所吸収値の明記をメーカーに義務付けており [6]、日本でも 2002 年 6 月から強制規格として導入することになった [7]。

3 局所 SAR の低減機構と電波グッズ

こうした背景から、携帯電話は設計段階から人体頭部における低局所 SAR の実現が要求される。低局所 SAR 携帯電話機の実現例としては、アンテナを頭部から遠ざけるために平板アンテナを電話機後面筐体に設置する手法 [10] や、頭部外への放射の強い指向性アンテナの使用 [11][12] などが挙げられる。しかしながら、前者は、高放射効率や通信に必要とした周波数帯域幅の達成は容易でなく、後者は、人体頭部方向への通信を犠牲にしなければ利用できない。そのために、現用の携帯電話機には、水平面にはほぼ無指向性で、放射効率の高いモノポール型とヘリカル型のアンテナが使われている。この種のアンテナで頭部に生ずる局所 SAR 値は、平板アンテナの場合よりも高くなることが知られている [13]。

一方、携帯電話が及ぼす人体影響の不安を背景として、頭部内電磁吸収の低減を謳い文句とした、市販商品のいわゆる「電波グッズ」が市場に登場し、その効用に関しマスコミにも取り上げられるようになった。しかしながら、これらの「電波グッズ」は、その低減機構が不明のものが多く、また科学的根拠に基づくものとしても、例えば遠方界で評価した電波のしゃへい効果がアンテナ近傍でも同じように生じるとの誤解を与えるようなものが多い。実際、米国で販売中の 7 種類の「電波グッズ」に対する局所 SAR の調査結果 [14] によれば、そのすべてに対して局所 SAR の低減効果が見出せなかったという。なお、そこでは、例えば局所 SAR が小さくなったとしても、アンテナの放射電力も同時に劣化したものは、その SAR の低減が単にアンテナ出力電力を抑えたためとして、SAR 低減効果はないものと判断された。こうした「電波グッズ」の問題は、局所 SAR の発生・低減機構を科学的に把握していないことに起因するものと筆者らは考える。

携帯電話機は、外部アンテナと内部回路との電磁干渉を防がねばならず、そのために金属筐体または金属粉を内側に噴塗したプラスチック筐体を使用すること

で内部回路を電磁的にシールドしている。一方、 $1/4$ 波長のモノポールアンテナやヘリカルアンテナは、設置筐体をアンテナの一部として利用するので、筐体表面にも電流を流し、それ故に頭部表面の局所 SAR を増加させる結果となる。携帯電話機の局所 SAR は主にアンテナ及びこの筐体電流に依存して決まる [15] ので、これらの電流の低減こそが局所 SAR 低減のキーポイントになる。

4 低局所 SAR の実現例

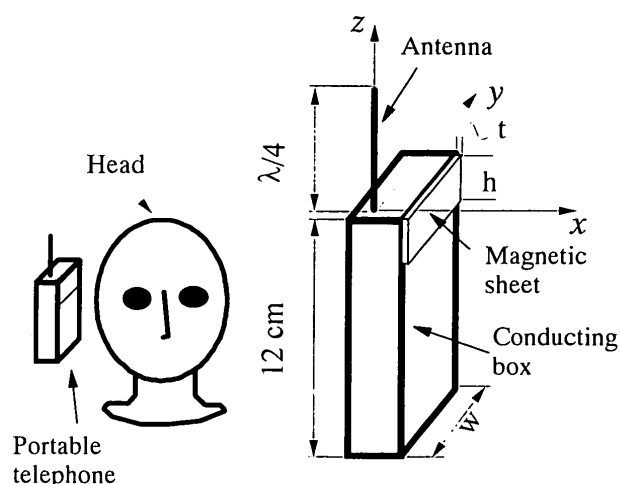


Fig. 2 Models of a head and portable telephone with an attached magnetic sheet.

この低減機構をベースに、磁性体 (フェライト) シートの磁気損失特性に注目した SAR 低減法を筆者らは考案した [16]-[18]。Fig.2 は携帯電話機のモデルを示す。このモデルは矩形の金属筐体とその上方に設置している $1/4$ 波長モノポールアンテナから構成されている。また、同図に示しているように、金属筐体の前面 (頭部側) に幅 $w=4$ cm、高さ $h=3$ cm、厚さ $t=0.25$ cm の磁性シートを装着している。このような磁性シートの特別な配置は、局所 SAR に直接影響を与える頭部側筐体上の電流だけを抑制し、筐体の他の部分を流れる電流にはできるだけ影響を与えないようにするためである。なお、磁性シートは入手可能な市販材料を想定し、計算に際しての複素比透磁率 $\mu_r (= \mu'_r - j\mu''_r)$ と複素比誘電率 $\epsilon_r (= \epsilon'_r - j\epsilon''_r)$ は 900 MHz においてそれぞれ $2.8-j3.3$ と $7.0-j0.6$ とした。一方、人体頭部モデルは、日本人成人男性の頭部解剖図を下に筆者らのグループで開発したもの [19] を使用した。このモデルは一辺 2.5 mm の微小立方体 27 万個余りから構成され、皮膚、脂肪、筋肉、骨、脳、眼球及びレンズの 7

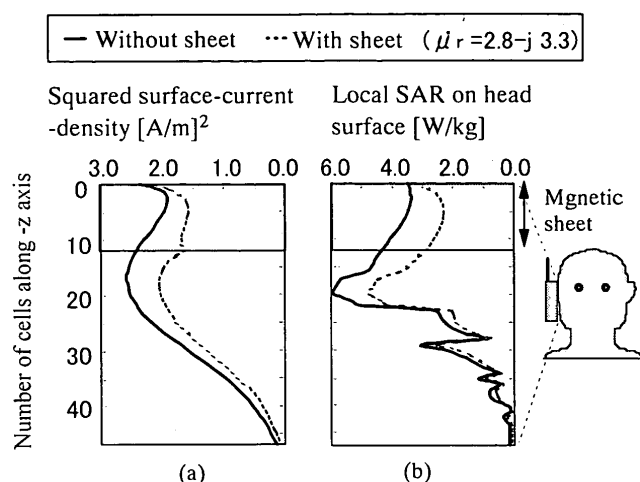


Fig. 3 (a) Squared surface-current density on the conducting box and (b) local SAR on the head surface. Both of them were extracted from the x-z cross-section through the center of the conducting box. The antenna output power was 1 W.

種類の組織からなる。各組織の電気定数はFCCが推薦している <http://www.fcc.gov/fcc-bin/dielec.sh> から引用した。

上述のようなモデルを用いて、筐体表面電流と頭部内 SAR との関係を FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法 [20] で解析した。FDTD 法とはマクスウェルの方程式を時間領域と空間領域とで差分化し、その差分式を時間領域で逐次計算することにより計算領域内の電磁界を数値的に求める計算手法である。このとき、計算対象を微小な立方体か長方体 (セル) に分割し、各セルに電気定数を割り付けるので、人体頭部のような複雑形状の不均質媒体での電磁界計算には特に適している。

Fig.3 は、携帯電話機中心を通る x-z 平面における頭部表面 SAR と頭部側筐体表面電流密度の 2 乗値を示す。なお、本稿の結果は、特に断らない限り、アンテナ出力電力は 1W として計算したものである。図から、筐体表面電流密度の 2 乗値の変化が SAR と同じ傾向を示し、磁性シートの装着で筐体表面電流が抑制され、それに対応して頭部表面 SAR も低減されていることがわかる。Fig.4 は、筐体表面電流密度 2 乗値の抑制量とそれに対応する頭部表面 SAR との相関関係を示す。図から、両者の相関係数が 0.73 と求められ、強い相関のあることがわかる。

携帯電話機の筐体電流を効果的に抑制するには、装着磁性シートは大きな磁気損失をもたねばならない。

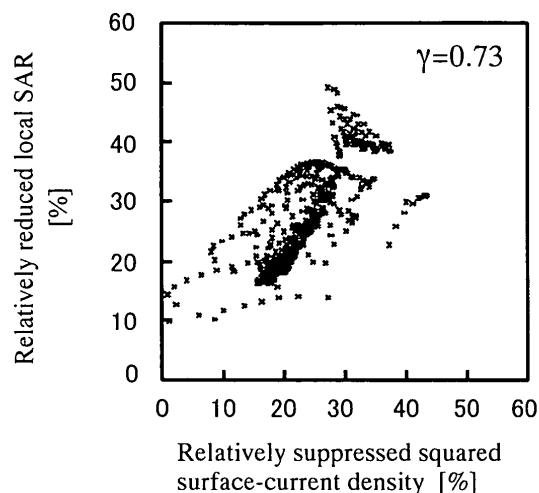


Fig. 4 Correlation between the relative values of the suppressed squared surface-current density and the reduced local SAR.

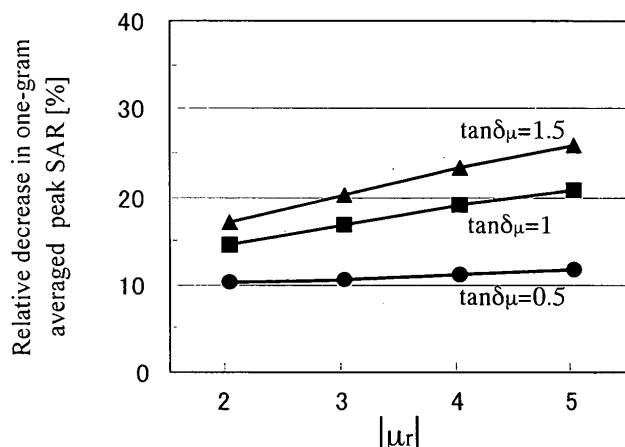


Fig. 5 Relationship between the complex relative permeability μ_r'' of the magnetic sheet and the relative decrease in the one-gram averaged spatial peak SAR.

すなわち、 $\tan \delta_\mu (= \mu_r'' / \mu_r')$ の大きい材料を使用すべきである。Fig.5 は、磁性シートの磁気損失 $\tan \delta_\mu$ 及び $|\mu_r|$ と 1 グラム平均局所ピーク SAR との関係を示す。図から、SAR の低減効果は $\tan \delta_\mu$ の増加と共に大きくなっていること、大きい $|\mu_r|$ 値も SAR の低減効果に寄与していること、などがわかる。これらの結果から、SAR の低減化には磁性シートの磁気損失 $\tan \delta_\mu$ は 1 以上であることが望まれる。

なお、ここで述べた手法は、筐体がアンテナの一部として動作し、そこに電流の流れる 1/4 波長モノポールアンテナやヘリカルアンテナ型携帯電話機には有効であるが、筐体には電流がほとんど流れない 1/2 波長モノポール型携帯電話機には効果はない。更に、金属

Table 1 Radiated and absorbed powers

	Without magnetic sheet attachment	With magnetic sheet attachment
P_{rad}	44.7%	48.0%
P_{abs}	55.3%	49.2%
P_{magn}	0.0%	2.8%

筐体がアンテナの一部になっている場合には、磁性シート装着で生ずる筐体表面電流の抑制は、アンテナ性能にも影響を及ぼし、通信特性の劣化が心配される。いま、アンテナ出力電力を P_{out} とすると、それは

$$P_{out} = P_{rad} + P_{abs} + P_{magn} \quad (4)$$

と表される。但し、 P_{rad} は空間への放射電力（通信に用いられる電力）、 P_{abs} は人体頭部に吸収される電力、 P_{magn} は磁性シート自身で消費した電力である。Table 1 は磁性シートを装着しない場合と装着した場合 ($\mu_r = 2.8 - j3.3$) の諸電力の計算値を示す。表から、磁性シートの装着で、頭部の吸収電力が低減され、アンテナ放射電力が増加していることがわかる。この理由は、磁性シート装着で生ずる頭部吸収電力の低減量が磁性シート自身の損失電力量よりも大きいからである。なお、このような SAR 低減機構を利用して、最近、フェライトビーズをヘリカルアンテナに直接組み込んだり [21]、磁性シートの材料特性を制御する [22][23] ことで頭部内 SAR の低減とアンテナ放射効率の向上とを同時に実現する試みも報告されている。

5 むすび

電波の人体影響に関しては、誘導電流の発熱作用に基づく急性効果が主流であり、影響度は閾値を超えた曝露界のレベルに並行するとの考えが世界の共通認識である。急性効果の評価尺度には全身平均 SAR が用いられており、この閾値を超えない遠方界の電波レベルで電波安全基準が制定されている。一方、携帯電話のような近傍界については、1 グラム或いは 10 グラム任意組織での局所 SAR の限度値が基準運用の観点から設けられているが、この限度値以下のレベルで何らかの生体影響が存在する根拠は見つかっていない。このために、携帯電話に対する局所 SAR の限度値は、世界規模で認知されて強制規格となり、その評価及び

提示が携帯電話機メーカーに対して義務付けられるようになった。

携帯電話の局所 SAR は、主にアンテナ及び頭部側筐体電流に依存して決まるので、低局所 SAR 実現の科学的キーポイントは、携帯電話機の頭部側筐体に電流をできるだけ流さないようにすることである。この観点から、磁性材の磁気損失特性を利用した筐体面電流抑制による局所 SAR の低減法を例として示した。また、筐体面電流の適切な制御によって低局所 SAR と高放射効率とを両立させる携帯電話機の実現の可能性も述べた。

21 世紀の電波需要は急増の一途を辿ることは言うまでもなく、それに呼応する携帯電話機は利便性を損なうことなく頭部吸収量も同時に低減化すると云った方向を目指すべきであろう。それには頭部吸収量を低減させながらも放射効率を高めるといった、いわゆる EMC アンテナを実現する必要がある、このことが今後に残された課題となる。

参考文献

- [1] 雨宮好文, 高周波電磁界の生体影響と防護基準, 電子情報通信学会誌, Vol.78, No.5 (1995), pp.466-475.
- [2] 郵政省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).
- [3] American National Standards Institute, Safety levels with respect to exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, *ANSI/IEEE C95.1-1992*, (1992).
- [4] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP statement - Health issues related to the use of hand-held radio-telephones and base transmitters, *Health Physics*, Vol.70, No.4 (1996), pp.587-593.
- [5] 郵政省電気通信技術審議会答申・諮問第 89 号, 電波利用における人体防護の在り方, (1997).
- [6] Federal Communications Commission, Report and Order: Guidelines for evaluating the environmental effects of radiofrequency radiation, FCC 96-326, Washington DC (1996).
- [7] 郵政省報道発表資料, 携帯電話端末等に対する比吸収率の測定方法の策定, (22 May 2000).
- [8] 中山昭雄, 入来正躬 (編集), エネルギー代謝・体温調節の生理学, 医学書院 (1987), pp.47-54.
- [9] 藤原修, 電磁波のバイオエフェクト, 電子情報通信学会誌, Vol.75, No.5 (1992), pp.519-522.
- [10] G.F. Pedersen and J.B. Andersen, Integrated antennas for hand-held telephones with low absorption, *Proc. 44th IEEE Veh. Technol. Conf.*, (1994), pp.1537-1541.
- [11] R.Y.S. Tay, Q. Balzano and N. Kuster, Dipole

- configuration with strongly improved radiation efficiency for hand-held transceivers, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.46, No.6 (1998), pp.798-806.
- [12] R.G. Vaughan and N.L. Scott, Evaluation of antenna configurations for reduced power absorption in the head, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol.48, No.5 (1999), pp.1371-1380.
- [13] 王建青, 藤原修, 携帯電話に対する頭部のドシメトリ評価, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-B, No.1 (2001), pp.1-10.
- [14] P. Oliver, M. Kanda, C.K. Chou and Q. Balzano, Testing the effectiveness of seven radiation shields for cellular phones, *Presented at 23th Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society*, (2001), pp.52-53.
- [15] Q. Balzano, O. Garay and T.J. Manning, Electromagnetic energy exposure of simulated users of portable cellular telephones, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol.44 (1995), pp.390-403.
- [16] J. Wang and O. Fujiwara, Reduction of electromagnetic absorption in the human head for portable telephones by a ferrite sheet attachment, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E80-B, No.12 (1997), pp.1810-1815.
- [17] J. Wang and O. Fujiwara, Reduction of SAR in human head by suppression of surface currents due to a portable telephone, *Proc. 13th Int. Zurich Symp. on Electromagn. Compat.*, (1999), pp.59-62.
- [18] 王建青, 藤原修, 携帯電話の筐体面電流の制御による局所 SAR の低減化と通信特性の確保, 日本応用磁気学会誌, Vol.23, No.10 (1999), pp.2005-2008.
- [19] O. Fujiwara and A. Kato, Computation of SAR inside eyeball for 1.5-GHz microwave exposure using finite-difference time-domain technique, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E77-B, No.6 (1994), pp.732-737.
- [20] A. Taflov, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Norwood, MA, Artech House (1995).
- [21] Y.-M. Gimm, K.H. Kim, E.S. Chang, E.T. Kim and C.H. Ra, SAR reduction of cellular phone terminals by the application of magnetic materials, *Asia-Pacific Radio Science Conf.*, (2001), p.275.
- [22] 半杭英二, 中村龍哉, 橋本修, 低損失磁性板を配置した携帯電話機の放射効率に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, EMCJ2001-31, (2001).
- [23] 橋本康雄, 長勤, 飯島康, 賀屋雅詔, 若山勝彦, 唐津真弘, 橋本修, 軟磁性金属薄膜を配置した携帯電話の放射効率に関する実験的検討, 電子情報通信学会技術研究報告, EMCJ2001-48, (2001).